



UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU
SZKOŁA DOKTORSKA NAUK PRZYRODNICZYCH
WYDZIAŁ NAUK GEOGRAFICZNYCH I GEOLOGICZNYCH

Krzysztof Zagata

***Efektywność nawigacyjna mini-mapy w wirtualnej
przestrzeni topograficznej***

Navigational Efficiency of a Mini-Map in a Virtual
Topographical Space

ROZPRAWA DOKTORSKA

napisana w Zakładzie Kartografii i Geomatyki
pod kierunkiem prof. dr hab. Beaty Medyńskiej-Gulij

POZNAŃ 2026

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania **Pani Prof. dr hab. Beacie Medyńskiej-Gulij** za wieloletnią opiekę naukową, cierpliwość, konsekwencję oraz nieocenioną pomoc okazywaną na wszystkich etapach realizacji doktoratu. Dziękuję za merytoryczne wsparcie, trafne uwagi i konstruktywne wskazówki, które doprowadziły niniejszą rozprawę do ostatecznego kształtu. Bez Pani zaangażowania i wytrwałości ukończenie tej pracy nie byłoby możliwe.

Wyrazy wdzięczności kieruję również do Kolegów z Zakładu Kartografii i Geomatyki za życzliwą atmosferę, codzienną pomoc, inspirujące rozmowy oraz wsparcie merytoryczne.

Niniejszą pracę dedykuję Rodzicom **Marzenie i Andrzejowi** oraz Bratu **Adamowi** za bycie oparciem, nieustające wsparcie i motywowanie mnie przez wszystkie lata.

Na zakończenie szczególne podziękowania i dedykację kieruję do mojej Narzeczonej, **Marty**, za ogromną cierpliwość, nieocenioną pomoc i wyrozumiałość. Dziękuję Ci za codzienne wsparcie, spokój i motywację, które pozwalały mi konsekwentnie kontynuować pracę nawet w trudniejszych momentach. Bez Ciebie doprowadzenie tego doktoratu do końca byłoby niemożliwe.

SPIS TREŚCI

1. Wstęp – problematyka, tezy, cele, metody badań i zawartość pracy	4
2. Mini-mapa jako element nawigacyjny w wirtualnej przestrzeni topograficznej	11
2.1. Kartograficzne formy lokalizacyjne i nawigacyjne	12
2.2. Efektywność nawigacyjna w kartografii	18
3. Projektowanie wirtualnej przestrzeni topograficznej na podstawie Bazy Danych Obiektów Topograficznych	22
4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej	29
4.1. Etap koncepcyjny	30
4.1.1. Schemat etapów projektowania aplikacji oraz schemat równoległego projektowania mini-mapy 2D do wirtualnej przestrzeni 3D	30
4.1.2. Założenia wariantów i cech mini-mapy w interfejsie użytkownika	32
4.1.3. Metody kartograficznej prezentacji wirtualnej przestrzeni topograficznej	36
4.1.4. Metody pozyskiwania danych o efektywności nawigacyjnej	37
4.1.5. Środowisko technologiczne	39
4.1.6. Uczestnicy badania	40
4.1.7. Metody analizy i wizualizacji wyników	41
4.2. Etap opracowania aplikacji do nawigacji w wirtualnej przestrzeni topograficznej	43
4.2.1. Wybór reprezentatywnej przestrzeni topograficznej	43
4.2.2. Adaptacja reprezentacji topograficznej 2D i 3D	44
4.2.3. Projektowanie aplikacji desktopowej	48
4.3. Etap badań z użytkownikami	60
4.3.1. Przeprowadzenie kwestionariusza badawczego	60
4.3.2. Przygotowanie danych do analizy statystycznej, kartograficznej i eye-trackingowej	61
4.4. Etap analizy i wizualizacji wyników	63
4.4.1. Analiza statystyczna cech wymiernych: czas i odległość	64
4.4.2. Analiza cech przestrzennych: mapowanie i wizualizacja	93
4.4.3. Analiza eye-trackingowa	109
4.4.4. Synteza wyników	111
5. Podsumowanie (wnioski i rekomendacje)	117
Literatura	123
Spis rycin	131

1. Wstęp – problematyka, cele, tezy, metody badań i zawartość pracy

Wirtualne środowiska trójwymiarowe w ciągu ostatnich lat stały się jednym z podstawowych narzędzi wizualizacji danych przestrzennych. Rozwój technologii, a także szerokie upowszechnienie silników gier w zastosowaniach naukowych i inżynierskich, doprowadziły do sytuacji, w której eksploracja modeli terenu w formie immersyjnej stała się powszechnie dostępna dla szerokiego grona użytkowników (Bos, 2021). Modele takie wykorzystywane są dziś zarówno w planowaniu przestrzennym i urbanistyce, w symulacjach kryzysowych i szkoleniowych, jak i w wirtualnej turystyce czy rozrywce cyfrowej. Mnogość tych zastosowań generuje jednak nowe wymagania wobec sposobu poruszania się w przestrzeni wirtualnej, w szczególności w zakresie orientacji przestrzennej i podejmowania decyzji nawigacyjnych (Ugwitz i in., 2019). Istotnym czynnikiem wzmacniającym ten trend jest rosnąca dostępność otwartych, wysokiej jakości danych referencyjnych, takich jak Baza Danych Obiektów Topograficznych oraz coraz ściślejsza integracja narzędzi Systemów Informacji Geograficznej z platformami trójwymiarowymi.

Prezentacja lokalizacji użytkownika i otoczenia w wirtualnej przestrzeni interesowała deweloperów systemów interaktywnych od momentu powstania pierwszych symulacji 3D (Bowman i in., 2001). Początki tego procesu wiążą się z prostymi rzutami z góry, które miały pomagać w orientacji w strukturach wczesnych gier wideo i symulatorów lotu. Był to załączek stosowania mini-map, czyli małych, kontekstowych map wkomponowanych w interfejs, które odzwierciedlały położenie użytkownika na tle całego modelu terenu (Nesbitt i in., 2009). Początkowo orientacja opierała się na statycznych mapach i kompasach. Natomiast wraz z rozwojem technologicznym statyczne plany zostały zastąpione przez dynamiczne mini-mapy, które obracają się i aktualizują w czasie rzeczywistym. Współcześnie w aplikacjach typu *desktop* oraz symulatorach, głównym sposobem wspomaganie orientacji jest właśnie mini-mapa, będąca pomniejszonym, kartograficznym odwzorowaniem najbliższego otoczenia użytkownika, nałożonym na interfejs graficzny (Edler i in., 2019).

Obecnie powszechną praktyką jest generowanie środowisk wirtualnych nie tylko jako abstrakcyjnych modeli, ale jako wiernych reprezentacji rzeczywistego terenu, wizualizowanych na podstawie prawdziwych danych topograficznych (Laksono i Aditya, 2019). Wizualizacja w niniejszej rozprawie doktorskiej oznacza proces prezentacji danych wektorowych (BDOT10k – Baza Danych Obiektów Topograficznych) w środowisku silnika graficznego (Unity), tworzącego spójną, trójwymiarową przestrzeń. W związku z postępowaniem w nauce geowizualizacji (MacEachren, 1994; Medyńska-Gulij, 2025), niemal każda nowoczesna

aplikacja przestrzenna wymaga zaprojektowania interfejsu nawigacyjnego (Herman i Řeznik, 2015). Jako elementy składowe takiego interfejsu rozumie się wskaźniki celu, kompasy, a przede wszystkim mini-mapę. Technologie te wykorzystują zaawansowane skrypty programistyczne do translacji współrzędnych świata 3D na płaszczyznę 2D interfejsu użytkownika.

Współczesne osiągnięcia w projektowaniu interfejsu użytkownika *User Interface (UI)* i *User Experience (UX)* dostarczyły wielu wariantów prezentacji map w interfejsach, co jednak prowadzi do braku standaryzacji w komunikacji użytkownika z przedstawioną wizualizacją (Cybulski i Horbiński, 2020). Z tego powodu zmienia się efektywność, z jaką użytkownik przyswaja informacje przestrzenne. Dzięki możliwościom nowoczesnych silników graficznych istnieje dowolność w kształtowaniu parametrów mini-mapy: jej kształtu, umiejscowienia na ekranie czy trybu orientacji. Ta różnorodność sprawia, że potrzeba badań na tym polu jest bardzo wyraźna. Kluczowym powodem jest fakt, że mini-mapy są używane intuicyjnie przez miliony użytkowników, ale często są projektowane w oparciu o konwencje estetyczne, a nie kartograficzne, co może prowadzić do błędów w nawigacji i dezorientacji (Zagata i Medyńska-Gulij, 2023). Problem ten dotyczy w szczególności efektywności nawigacji w oparciu o dane topograficzne.

Problem optymalizacji mini-mapy może dotyczyć różnych jej cech graficznych i geometrycznych (Wang i in., 2024). Obecnie istnieje wiele rozwiązań projektowych mini-map, które inspirowane są różnymi dziedzinami, dla których są wykorzystywane (Mahalil i in., 2019). Większość z nich została zaadaptowana z branży gier wideo, bez głębszej refleksji nad ich wpływem na percepcję mapy topograficznej. W zasadach projektowania kartograficznego oraz w kognitywistyce sugeruje się, że sposób prezentacji danych wpływa na obciążenie poznawcze. Do tej pory nie badano jednak kompleksowo efektywności różnych wariantów mini-map (kształt, orientacja, położenie) w kontekście nawigacji w środowisku wygenerowanym na podstawie urzędowych danych.

Efektywność nawigacyjna w niniejszej rozprawie doktorskiej jest rozumiana jako najszybsze czasowo i najkrótsze odległościowo przejście trasy w wirtualnej przestrzeni topograficznej przy użyciu odpowiednio zaprojektowanej mini-mapy. Szczegółowiej można to wyrazić zależnością pomiędzy parametrami projektowymi mini-mapy: wymiernymi i przestrzennymi. Temat ten jest rzadko podejmowany w literaturze kartograficznej w odniesieniu do wirtualnych środowisk topograficznych, a jest istotny dla rozwoju nowoczesnej geowizualizacji.

1. Wstęp – problematyka, cele, tezy, metody badań i zawartość pracy

Rozpatrywanie efektywności mini-mapy w kontekście graficznego interfejsu użytkownika wymaga zastosowania zintegrowanego podejścia analitycznego. Weryfikacja różnic w efektywności nawigacji pomiędzy różnymi wariantami interfejsu opiera się w głównej mierze na analizie statystycznej rejestrowanych parametrów ruchu (Gonçalves i in., 2015). Pozwala ona na obiektywne potwierdzenie istotności badanych zależności, wykluczając przypadkowość wyników.

Ze względu na przestrzenny charakter zagadnienia, niezbędne jest zastosowanie odpowiednich metod kartograficznej prezentacji danych statystycznych (Mościbroda, 1999), zwłaszcza tych ilościowych technik (Cebrykow, 2017). Wśród wielu możliwych metod mapowania poruszania się w przestrzeni miasta można wybrać te, które ujawniają wymierne charakterystyki takie jak czas (Mościcka i in., 2016) oraz kształt i przebieg trasy (Kraak i Ormeling, 2021). Elementem badań jest również poszukiwanie tematycznych wizualizacji kartograficznych odpowiednich do charakteru danych przestrzennych w oparciu o tradycyjne formy (Żyszkowska i in., 2012) ze wskazaniem właściwości semiotycznych, a szczególnie pragmatycznych (Żyszkowska, 2000). W niniejszej rozprawie badania nakierowano na kartodiagramy wstępowe (Lambert i Zanin, 2022), ze względu na możliwą prezentację zbiorczych trajektorii (np. w formie kartodiagramów), co umożliwi wizualizację jakościową strategii nawigacyjnej w wirtualnym terenie (Wielebski i in., 2020). Uzupełnieniem tego toku badawczego jest technika eye-trackingowa, która pozwala skorelować uzyskane wyniki liczbowe i przestrzenne z procesami percepcji wzrokowej użytkownika (Çöltekin i in., 2009).

Zidentyfikowana luka badawcza, polegająca na braku badań wpływu cech graficznych mini-mapy na nawigację w wirtualnej rzeczywistości, stała się bezpośrednim punktem wyjścia do podjęcia przez autora niniejszej rozprawy rozważań nad efektywnością tego kartograficznego elementu w wirtualnej przestrzeni topograficznej.

Cele i tezy rozprawy

Celem głównym niniejszej rozprawy jest określenie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej opracowanej na podstawie urzędowej bazy topograficznej BDOT10k według jej cech: położenia, kształtu oraz orientacji.

Teza 1: *Typy mini-mapy według położenia, kształtu i orientacji (zaprojektowanej według gier) wykazują zróżnicowanie wymiernych charakterystyk nawigacyjnych: odległość i czas przejścia oraz czas patrzenia na mini-mapę w skalowalnej wirtualnej przestrzeni topograficznej.*

Teza 2: *Ilościowe wizualizacje kartograficzne (kartodiagram wstępowy i mapa ciepła) ujawniają wpływ typu mini-mapy na cechy przestrzenne nawigacji (natężenie i strategia wyboru ulic do przejścia) w wirtualnej przestrzeni topograficznej.*

Uzupełnieniem postawionych tez badawczych są pytania badawcze, których celem jest uszczegółowienie charakteru zależności pomiędzy cechami projektowymi mini-mapy a przebiegiem procesu nawigacji oraz identyfikacja najbardziej efektywnych i stabilnych konfiguracji projektowych. Pytania odnoszą się zarówno do cech wymiernych, cech przestrzennych, jak i do sposobu interakcji użytkowników z informacją kartograficzną:

1. Pytanie badawcze: *W jakim stopniu poszczególne cechy projektowe mini-mapy (kształt, położenie, orientacja) oddziałują na siebie wzajemnie oraz na wymierne charakterystyki nawigacyjne użytkowników?*
2. Pytanie badawcze: *Jakie konfiguracje cech projektowych mini-mapy prowadzą do największych i statystycznie istotnych różnic w efektywności nawigacyjnej, w szczególności w zakresie całkowitego dystansu i struktur wyborów przestrzennych?*
3. Pytanie badawcze: *Które z ośmiu wariantów mini-mapy charakteryzują się najwyższą i najniższą efektywnością czasową i odległościową?*
4. Pytanie badawcze: *Które warianty mini-mapy charakteryzują się najlepszą i najgorszą strategią nawigacyjną?*
5. Pytanie badawcze: *W jaki sposób złożoność struktury przestrzennej poszczególnych tras modyfikuje wpływ cech i wariantów mini-mapy na przebieg nawigacji oraz efektywność wyboru tras?*

Celem metodycznym jest sprawdzenie słuszności komplementarnego zastosowania analizy statystycznej (testy statystyczne: ANOVA Kruskal-Wallisa oraz U Manna-Whitneya) oraz ilościowej wizualizacji kartograficznej (kartodiagram wstępowy oraz mapa ciepła) do wskazania efektywności nawigacyjnej wymiernej (czasu przejścia, odległości przejścia oraz czasu patrzenia na mini-mapę) oraz przestrzennej (natężenie ruchu i strategię wyboru dróg).

Rozprawa doktorska podejmuje także cel pragmatyczny, czyli sformułowanie rekomendacji do projektowania efektywnej mini-mapy do skutecznej nawigacji w przestrzeni wirtualnej konstruowanej z BDOT10k, a zatem dostępnej dla każdego projektującego.

Metody badań

Zakres prac badawczych w niniejszej rozprawie obejmuje realizację celu głównego oraz celów szczegółowych z wykorzystaniem narzędzi i metod charakterystycznych dla kartografii, geografii, informatyki, statystyki oraz badań percepcyjnych:

- opracowanie zestawu wariantów mini-mapy 2D z wykorzystaniem danych topograficznych oraz zasad kartograficznej wizualizacji;
- zaprojektowanie i implementacja wirtualnej przestrzeni topograficznej umożliwiającej stworzenie aplikacji nawigacyjnej oraz rejestrację parametrów przemieszczania się użytkowników;
- zdefiniowanie cech projektowych mini-mapy obejmujących jej położenie na ekranie, kształt geometryczny oraz orientację względem kierunku ruchu;
- przygotowanie procedury eksperymentalnej z udziałem użytkowników, obejmującej pomiary czasowe, przestrzenne oraz okulograficzne;
- dobór procedur analizy danych umożliwiających ilościowe zróżnicowanie wyników pomiędzy wariantami badawczymi;
- opracowanie kartograficznych form prezentacji danych służących analizie natężenia ruchu oraz struktur wyboru tras.

Na szczególną uwagę zasługuje opracowanie autorskiego schematu postępowania badawczego, integrującego procedury eksperymentalne, analizy statystyczne oraz kartograficzne formy wizualizacji danych. Dodatkowy projektowy walor posiada schemat równoległego projektowania mini-mapy 2D do wirtualnej przestrzeni 3D.

Przedmiot badań

Przedmiotem badań niniejszej rozprawy jest dwuwymiarowa mini-mapa wykorzystywana jako element interfejsu wspomagającego nawigację w wirtualnej przestrzeni topograficznej trójwymiarowej, opracowanej na podstawie danych BDOT10k. Mini-mapa stanowi uproszczoną reprezentację otoczenia, umożliwiającą użytkownikowi bieżącą orientację przestrzenną, planowanie kierunku przemieszczania się oraz kontrolę relacji pomiędzy własną pozycją a strukturą środowiska. Wraz z dynamicznym rozwojem środowisk wirtualnych, symulacji przestrzennych oraz aplikacji interaktywnych rośnie znaczenie czytelnego i funkcjonalnego wsparcia kartograficznego, które musi uwzględniać zarówno ograniczenia percepcyjne użytkownika, jak i specyfikę interakcji w przestrzeni cyfrowej (Dong i in., 2021; Kapaj i in., 2023; Kuo i in., 2023).

Efektywność mini-mapy jako narzędzia nawigacyjnego zależy w istotnym stopniu od jej rozwiązań projektowych, w szczególności położenia na ekranie, kształtu oraz orientacji względem kierunku ruchu użytkownika. Cechy te wpływają na sposób interpretowania informacji przestrzennej, tempo podejmowania decyzji oraz zakres zaangażowania uwagi wzrokowej. Pomimo rosnącej liczby badań nad nawigacją w środowiskach wirtualnych oraz nad wizualizacją kartograficzną, zależności pomiędzy konkretnymi cechami projektowymi mini-mapy a wymiernymi i przestrzennymi charakterystykami nawigacji pozostają niedostatecznie rozpoznane, a wyniki dostępnych prac mają często charakter fragmentaryczny (Coutrot i in., 2019; Danyluk i Willett, 2019; Carbonell-Carrera i in., 2021; Di Domenico i in., 2024). W szczególności rzadko łączy się analizy ilościowe z kartograficzną interpretacją wzorców przestrzennych oraz analizą percepcyjną użytkowników (Medyńska-Gulij i in., 2022).

Zidentyfikowana luka badawcza stanowi podstawę podjęcia badań w niniejszej rozprawie doktorskiej. Systematyczna analiza wpływu położenia, kształtu i orientacji mini-mapy na efektywność nawigacyjną w wirtualnej przestrzeni topograficznej pozwala nie tylko na pogłębienie wiedzy o mechanizmach orientacji przestrzennej w środowiskach cyfrowych, lecz także na rozwój podstaw projektowania kartograficznych elementów interfejsów nawigacyjnych.

Zawartość pracy

Niniejsza dysertacja składa się z pięciu rozdziałów, obejmujących część teoretyczną, projektową oraz empiryczną, a także z podsumowania zawierającego wnioski i rekomendacje. Całość uzupełniają spis literatury oraz zestawienia rycin i tabel.

Rozdział pierwszy pełni funkcję wprowadzającą i obejmuje przedstawienie problematyki badawczej, sformułowanie tez i celów rozprawy, omówienie założeń metodycznych oraz prezentację struktury pracy.

W rozdziale drugim zaprezentowano zagadnienia teoretyczne związane z rolą mini-mapy jako elementu wspomagającego nawigację w wirtualnej przestrzeni topograficznej. Przedstawiono kartograficzne formy lokalizacyjne i nawigacyjne, a także omówiono pojęcie efektywności nawigacyjnej w ujęciu kartograficznym.

Rozdział trzeci poświęcono problematyce projektowania wirtualnej przestrzeni topograficznej na podstawie Bazy Danych Obiektów Topograficznych. Omówiono założenia modelowania środowiska przestrzennego oraz zasady przetwarzania danych źródłowych na potrzeby aplikacji nawigacyjnej.

1. Wstęp – problematyka, cele, tezy, metody badań i zawartość pracy

Rozdział czwarty zawiera opis badań nad efektywnością nawigacyjną mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej. Przedstawiono etap koncepcyjny, obejmujący założenia projektowe, metody reprezentacji kartograficznej, sposób pozyskiwania danych, środowisko technologiczne oraz charakterystykę uczestników badania. Następnie omówiono etap opracowania aplikacji nawigacyjnej oraz przebieg badań z użytkownikami. W dalszej części zaprezentowano procedury analizy statystycznej, kartograficznej i okulograficznej, a także syntezę uzyskanych wyników.

Rozdział piąty stanowi podsumowanie rozprawy i zawiera wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz, odniesienie do postawionych tez i pytań badawczych oraz sformułowanie rekomendacji dotyczących projektowania kartograficznych elementów nawigacyjnych.

2. Mini-mapa jako element nawigacyjny w wirtualnej przestrzeni topograficznej

Rozdział ten ma na celu przedstawienie i analizę pojęć kartograficznych, które poprzedzały i wpłynęły na rozwój współczesnej mini-mapy, szczególnie w kontekście interfejsów użytkownika, takich jak te spotykane w grach wideo. Ewolucja tych koncepcji jest kluczowa dla pełnego ujęcia fenomenu mini-mapy, która, choć wydaje się być wynalazkiem ery cyfrowej, ma swoje korzenie w ugruntowanych zasadach kartografii tradycyjnej. Kartografia ma wiele definicji, a ta ustanowiona przez Międzynarodową Asocjację Kartograficzną z 1991 roku oddaje dobrze sens także dziś, „*Cartography is the discipline dealing with the conception, production, dissemination and study of maps*” (ICA, 1995). Ewolucja kartografii była napędzana zarówno potrzebami praktycznymi, takimi jak nawigacja, planowanie militarne czy zarządzanie gruntami, jak i postępem technologicznym i naukowym zwłaszcza zależnym od historii publikowania map (Sirko, 1999). Od prostych rysunków na glinianych tabliczkach, przez mapy drukowane, aż po współczesne systemy informacji geograficznej (GIS) i zobrazowania satelitarne, mapy zawsze pełniły funkcję narzędzia do komunikowania informacji przestrzennej (Koláčny, 1969). W niniejszej pracy, szczególną uwagę poświęcono mapom, które, podobnie jak mini-mapa, służą jako narzędzia orientacji i dostarczania informacji przestrzennej w odniesieniu do większego obszaru.

Mapy stanowią ważny element interfejsów w środowiskach cyfrowych ze szczególnym uwzględnieniem gier wideo. Zgodnie z badaniami Chądryńskiej i Gotliba (2015) determinują one możliwości eksploracji oraz kooperacji i wielowymiarowej interakcji z wirtualnym otoczeniem. Reprezentacje te wykraczają poza funkcję statycznych wizualizacji i pełnią rolę kluczowych mechanik rozgrywki oferujących spektrum aktywności szersze niż standardowa nawigacja. Nierzadko sam proces kartowania, polegający na tworzeniu lub modyfikacji przestrzeni staje się osią rozgrywki, transformującą rolę użytkownika z biernego odbiorcy w aktywnego kreatora interfejsu (Schell, 2019). Obserwowana współcześnie złożoność wirtualnych światów jest rezultatem synergii wizji zespołów programistycznych i projektowych.

Współczesna mini-mapa, wykorzystywana powszechnie w środowiskach interaktywnych, nie jest rozwiązaniem oderwanym od wcześniejszych tradycji kartograficznych. Przeciwnie, stanowi ona rezultat stopniowej ewolucji rozwiązań, które w kartografii służyły poprawie orientacji przestrzennej oraz zwiększeniu czytelności treści kartograficznej (Medyńska-Gulij,

2024). Przykładami takich narzędzi są mapa lokalizacyjna (*location map*), mapa przeglądowa (*overview map*) oraz karton (*inset map*) (Robinson i in., 1995). Każde z tych rozwiązań pełniło określoną funkcję wspomagającą użytkownika mapy: od osadzania szczegółowego przedstawienia w szerszym kontekście geograficznym, poprzez prezentację dodatkowych informacji poza zasięgiem głównego widoku, aż po dynamiczne odwzorowanie zmian zachodzących w czasie rzeczywistym. Mini-mapa współcześnie łączy te funkcje w jedną, kompaktową strukturę graficzną, dostosowaną do wymagań środowisk cyfrowych. Jej analiza wymaga zatem odwołania się do historycznych i funkcjonalnych pierwowzorów, które stanowią fundament dla zrozumienia jej genezy i znaczenia we współczesnych systemach reprezentacji przestrzennej.

2.1. Kartograficzne formy lokalizacyjne i nawigacyjne

W kartografii wyróżniamy następujące typy mniejszych elementów kompozycji mapy, które zawierają znacznie mniejszą mapę odgrywającą rolę pomocniczą dla głównej treści kartograficznej: mapa lokalizacyjna (*location map*), karton (*inset map*) oraz mapa przeglądowa (*overview map*) (Dent, 1999).

Mapa lokalizacyjna (*location map*) może stanowić element bardziej w pełni rozwiniętej kompozycji kartograficznej i jest mapą sporządzoną w mniejszej skali, przedstawiającą położenie geograficzne obszaru objętego tematyką mapy w odniesieniu do większej jednostki administracyjnej lub fizycznogeograficznej (Slocum i in., 2009; Kraak i Ormeling, 2010). W publikacjach naukowych i raportach, mapa lokalizacyjna ukazuje lokalizację badań lub projektów w szerszym kontekście geograficznym, co ułatwia zrozumienie prezentowanych danych. Jest używana także w materiałach edukacyjnych i podróźniczych, gdzie szybkie odnalezienie miejsca na mapie globalnej zwiększa efektywność komunikacji. Mapa lokalizacyjna pomaga czytelnikom zobaczyć, gdzie znajduje się interesujący ich obszar w odniesieniu ogólnogeograficznym, często wyróżniając istotne punkty orientacyjne, takie jak granice państwowe czy miasta (Schiewe, 2025).

Mapa lokalizacyjna jest uproszczonym typem mapy, którego główną funkcją jest przedstawienie położenia określonego obszaru geograficznego w szerszej perspektywie, czyli w mniejszej skali (Johnson-Dahl, 2024). Jej podstawowym celem jest dostarczenie odpowiedniego szerszego odniesienia geograficznego, umożliwiającego użytkownikowi zrozumienie lokalizacji obszaru szczegółowego, nawet w przypadku braku wcześniejszej

2. Mini-mapa jako element nawigacyjny w wirtualnej przestrzeni topograficznej

wiedzy o jego usytuowaniu lub relacjach przestrzennych względem większych struktur geograficznych. Mapy lokalizacyjne funkcjonują jako elementy kompozycji mapowych umieszczanych w sąsiedztwie mapy głównej (Medyńska-Gulij, 2024). Ich znaczenie rośnie zwłaszcza wtedy, gdy zakłada się, że odbiorcy mapy nie posiadają dostatecznej orientacji w przestrzeni przedstawianej na głównej treści kartograficznej. Zasady projektowania map lokalizacyjnych wiążą się z uzyskaniem wysokiej czytelności przez ograniczenia do niezbędnych elementów graficznych (Ormeling, 2002). Tego rodzaju mapy zawierają jedynie kluczowe informacje pozwalające jednoznacznie zidentyfikować położenie wyróżnionego obszaru. Ich projektowanie opiera się na podejściu zorientowanym na użytkownika (Kramers, 2023), uwzględniającym ograniczenia poznawcze oraz potencjalne braki wiedzy geograficznej. Wprowadzenie mapy lokalizacyjnej do kompozycji mapy pozwala na szybkie i intuicyjne odnalezienie się użytkownika na samoistnej mapie, ale też w atlasach, które są traktowane jako multimedialny system informacji (Hurni, 2017). Takie podejście, obecne zarówno w klasycznej kartografii, jak i we współczesnych środowiskach cyfrowych, podkreśla ciągłość jednej z podstawowych intencji projektowych przyjaznych użytkownikowi.

W kartografii tradycyjnej karton (*inset map*) jest powiększonym fragmentem mapy, sporządzonym w większej skali niż treść główna, który służy dokładniejszemu przedstawieniu określonych zjawisk. Może również zaistnieć potrzeba zastosowania dodatkowych elementów graficznych lub ilustracji wspierających temat opracowania (Dent i in., 2009). Taka mniejsza mapa umieszczona jest w obrębie większej kompozycji kartograficznej w miejscu, gdzie najmniej zasłania treść głównej mapy, która przedstawia szczegółowy widok wybranych obszarów (Tyner, 2010). Tego rodzaju mapy są przydatne w przypadku wizualizacji, które obejmują rozległą topografię terenu, gdzie lokalne szczegóły są istotne dla pełnego zrozumienia prezentowanych informacji. Karton umożliwia dodanie detali takich jak ulice, budynki czy tereny zielone, które są niewidoczne na mapie głównej, co jest szczególnie cenne w analizach geograficznych i planowaniu urbanistycznym. Dzięki kartonowi można precyzyjnie przedstawić specyficzne obszary o szczególnym znaczeniu, co wzbogaca informacje dostępne na mapie. W tradycyjnej kartografii drukowanej kartony były powszechnie stosowane np. dla planów miast (karton z powiększonym centrum miasta), na mapach tematycznych Polski (karton z zagłębieniem Górnośląskim przy mapie ogólnokrajowej) czy w atlasach geograficznych (Górski, 2009; Spallek, 2017). Główne funkcje kartonu obejmują kontekstualizację przestrzenną, zwiększanie szczegółowości dla obszarów o dużym zagęszczeniu informacji,

2. Mini-mapa jako element nawigacyjny w wirtualnej przestrzeni topograficznej

prezentację powiązanych danych tematycznych w mniejszych skalach oraz wyrównywanie kompozycji mapy.

Projektowanie kartonów skupia się na zapewnieniu ich czytelności i funkcjonalności jako elementów pomocniczych w kompozycji całej mapy. Należy wyraźnie odróżnić karton od mapy głównej, np. za pomocą obramowania lub cienia (Slocum i in., 2022). Poziom generalizacji kartograficznej w kartonie powinien być odpowiedni do jego skali, a estetyka spójna z mapą główną. Z perspektywy układu kompozycji mapowej, kartony mogą być strategicznie rozmieszczone w celu osiągnięcia równowagi wizualnej, często służąc jako elementy kotwiczące ze względu na ich zazwyczaj proste krawędzie. Treść kartonu powinna zawsze być związana z nadrzędnym tematem lub narracją całej kompozycji mapowej, a nie tylko z mapą główną. Powinny one pomagać w opowiedzeniu pełniejszej historii lub dostarczać dodatkowych punktów widzenia (Hurni, 2017). Krytycznym aspektem projektowania jest to, że kartony powinny być włączane tylko wtedy, gdy rzeczywiście poprawiają zrozumienie czytelnika lub dostarczają pomocnych dodatkowych informacji, a nie tylko w celu wypełnienia pustej przestrzeni, co może odwracać uwagę od głównego przekazu mapy.

Mapa przeglądowa (*overview map*) to uogólniona mapa o mniejszej skali, której głównym zadaniem jest przedstawienie zasięgu innej, bardziej szczegółowej mapy wraz z jej otoczeniem (Hornbæk i in., 2002). Umożliwia użytkownikom zrozumienie szerszego kontekstu przed przejściem do dokładniejszych danych. Jest to kluczowe w planowaniu strategicznym i analizie przestrzennej, gdzie pełny obraz regionu jest niezbędny do podejmowania decyzji (Battersby, 2008). Jej podstawowym celem jest zapewnienie szerszego kontekstu przestrzennego, umożliwiając użytkownikom zrozumienie położenia obszaru szczegółowego w większym regionie. Podstawową funkcją mapy przeglądowej jest orientacja użytkownika i dostarczenie mu kontekstu przestrzennego (Kettunen i in., 2011). W środowisku cyfrowym, mapy przeglądowe są często wykorzystywane w interfejsach użytkownika, aby pomóc w nawigacji po głównej mapie lub obrazie (Chen i Chen, 2020).

Interaktywne aplikacje mapowe często zawierają mapy przeglądowe jako dodatkowy widok mapy (np. Geoportal Polski). Ten dodatkowy widok ma na celu zapewnienie szerszego kontekstu przestrzennego dla głównego, bardziej szczegółowego widoku mapy. Te cyfrowe mapy przeglądowe są często dynamiczne, co oznacza, że automatycznie aktualizują swój punkt widzenia i skalę w czasie rzeczywistym, gdy użytkownik przesuwa lub powiększa mapę główną (Plaisant i in., 1995). To dynamiczne powiązanie poprawia doświadczenie użytkownika, zapewniając ciągłą informację zwrotną o kontekście (Shneiderman, 1998). Ponadto, niektóre

2. Mini-mapa jako element nawigacyjny w wirtualnej przestrzeni topograficznej

interaktywne mapy przeglądowe oferują bezpośrednie możliwości nawigacji, pozwalając użytkownikom na przesuwanie i powiększanie bezpośrednio w mapie przeglądowej w celu kontrolowania zasięgu mapy głównej. Ich włączenie do systemów interaktywnych znacząco poprawia doświadczenie użytkownika poprzez zmniejszenie obciążenia poznawczego podczas eksploracji złożonych, wielkoskalowych zbiorów danych, umożliwiając użytkownikom płynne przechodzenie między szczegółowymi widokami a szerszym zrozumieniem kontekstu (Wu i in., 2009).

Współczesna mini-mapa stała się wszechobecnym i niezastąpionym elementem cyfrowych interfejsów, zwłaszcza w grach wideo, gdzie pełni kluczową rolę w interfejsie użytkownika (*User Interface*, UI), ułatwiając orientację topograficzną i nawigację w czasie rzeczywistym (Toups i in., 2020; Zagata i Medyńska, 2023). Te kompaktowe wyświetlacze dostarczają użytkownikom niezbędnych informacji przestrzennych, w tym aktualnej pozycji, orientacji w wirtualnym środowisku, lokalizacji pobliskich obiektów i kluczowych cech terenu (Adams, 2014). Często przedstawiają one zasięg przestrzenny większy niż obszar widoczny bezpośrednio przez główną kamerę lub punkt widzenia użytkownika (Mahalil i in., 2019). Duże znaczenie obecnie mają okna z mapą lokalizacyjną w interfejsach kontrolerów nalołów bezzałogowych statków powietrznych (Hubsy, 2024), co zdecydowanie podnosi możliwości aplikacyjne dronów w naukach o Ziemi (Niedzielski, 2018).

Pojęcie mini-mapy, choć obecnie kojarzone głównie z grami wideo i aplikacjami na urządzenia stacjonarne, ma swoje korzenie w tradycyjnych opracowaniach kartograficznych i nawigacyjnych. Inspiracje dla koncepcji mini-mapy można odnaleźć w historycznych mapach lokalizacyjnych, znanych również *inset maps*, które były stosowane w kartografii do przedstawiania szczegółowych obszarów w większej skali w ramach większego obszaru mapy (Thompson, 2009). Mapy lokalizacyjne pozwalały na wyodrębnienie i szczegółowe przedstawienie istotnych lokalizacji, takich jak miasta czy regiony, w kontekście szerszego obszaru geograficznego (Tyner, 2010). Takie podejście dostarczało użytkownikom dodatkowego kontekstu kartograficznego, który był kluczowy dla zrozumienia lokalnych detali przestrzennych w ramach przestrzeni geograficznej (Krygier i Wood, 2005).

Wraz z rozwojem technologii cyfrowych, koncept mini-mapy uległ znaczącej transformacji. W latach 80. i 90. XX wieku, z rosnącą popularnością gier wideo i rozwoju interaktywnych systemów nawigacyjnych, mini-mapy zaczęły pojawiać się jako integralny element interfejsu użytkownika (Edler i Dickmann, 2017). W kontekście gier wideo, potrzeba dostarczenia graczom bieżących informacji o otoczeniu, w kontekście dynamicznie zmieniającego się świata

2. Mini-mapa jako element nawigacyjny w wirtualnej przestrzeni topograficznej

gry, doprowadziła do zaadoptowania koncepcji mini-mapy jako narzędzia wspierającego orientację i strategię. Mini-mapy w grach wideo stały się nie tylko wizualnym dodatkiem, ale kluczowym komponentem, który umożliwiał graczom efektywne zarządzanie przestrzenią i podejmowanie decyzji w czasie rzeczywistym.

Mimo, że w literaturze naukowej definicja mini-mapy ma wydźwięk uniwersalny, różni się w zależności od dyscypliny naukowej. W kontekście gier wideo to dynamiczna, interaktywna graficzna reprezentacja obszaru gry, która umożliwia graczom bieżące monitorowanie ich lokalizacji oraz otoczenia w rozgrywce (Dormann i in., 2023). Stanowi integralną część interfejsu użytkownika (UI) oraz pełni funkcję krytyczną w *heads-up display* (HUD), umożliwiając graczowi dostęp do istotnych danych w czasie rzeczywistym bez konieczności przerywania gry, co znacząco wpływa na efektywność nawigacji i podejmowania decyzji w dynamicznym środowisku gry (Marre i in., 2021). Natomiast w kartografii definicja mini-mapy to zredukowana, kompaktowa reprezentacja przestrzenna, która służy do orientacji topograficznej oraz lokalizacji szczegółów orientacyjnych w ramach szerszego kontekstu mapy (Medyńska-Gulij, 2024). Funkcjonuje jako narzędzie wspierające, często w postaci dodatkowej warstwy na głównej mapie, zwiększając efektywność zarządzania danymi przestrzennymi w sposób zintegrowany z głównym interfejsem mapy.

Projektowanie mini-mapy stanowi oddzielne pole badawcze, które czerpie z zasad dwóch odrębnych, lecz wzajemnie przenikających się nurtów: tradycyjnej kartografii oraz projektowania interfejsów użytkownika w grach wideo. Zasady kartograficzne mają bezpośredni wpływ na kształtowanie takich cech mini-mapy jak jej kształt, położenie, orientacja, proporcje oraz odwzorowanie. Z kolei projektowanie UI w grach wideo, bazujące na rozwiązaniach z zakresu interakcji człowiek-komputer, determinuje aspekty takie jak centrowanie, warstwy bazowe oraz dodatkowe elementy nawigacyjne (Zagata i Medyńska, 2023). To interdyscyplinarne podejście, w którym wiele cech wzajemnie się przenika, umożliwia kompleksową i obiektywną analizę projektu mini-mapy. Potwierdza to również możliwość projektowania mini-map zgodnie z tradycyjnymi zasadami kartograficznymi, pomimo konieczności pewnych adaptacji do specyfiki nowych geomeidiów.

Można wyróżnić wiele cech ważnych dla kompleksowego projektu mini-mapy, natomiast niniejsza rozprawa skupia się na kształcie, położeniu i orientacji, uznając je za istotne (Johnson i Wiles, 2003; Edler i in., 2020; Medyńska-Gulij i in., 2022). Te trzy cechy stanowią trzon, na którym buduje się efektywną i użyteczną mini-mapę, a ich optymalne zaprojektowanie jest kluczowe dla sukcesu nawigacji w wirtualnych przestrzeniach. W przeciwieństwie do cech

2. *Mini-mapa jako element nawigacyjny w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

takich jak projekcja czy centrowanie, które są w dużej mierze ustalone w dominujących implementacjach, kształt, położenie i orientacja wykazują znacznie większą różnorodność w zastosowaniach i silniejsze powiązania z psychologią percepcji i użytecznością (Zagata i Medyńska-Gulij, 2023). Ta zmienność wskazuje, że te trzy cechy oferują projektantom największe pole do optymalizacji i personalizacji w zależności od kontekstu gry i preferencji użytkownika, jednocześnie niosąc ze sobą największe ryzyko błędów projektowych, które mogą negatywnie wpłynąć na doświadczenie użytkownika, na przykład poprzez zwiększenie obciążenia poznawczego.

Kształt mini-mapy stanowi istotny parametr determinujący sposób jej odbioru oraz funkcjonalność w strukturze interfejsu użytkownika (Johnson i Wiles, 2003). Projektanci gier wideo dostosowują go zazwyczaj do ogólnej stylistyki wizualnej danej aplikacji, co odpowiada zasadzie estetycznej spójności interfejsu graficznego. Jednocześnie wybór ten podporządkowany jest konieczności integracji z innymi elementami systemu nawigacyjnego, którego użyteczność stanowi kluczowy aspekt funkcjonalny. Odpowiednie ukształtowanie mini-mapy umożliwia racjonalne zagospodarowanie ograniczonej przestrzeni ekranowej poprzez eliminację obszarów nieużytecznych oraz optymalizację rozmieszczenia informacji. W branży gier wideo dominującym kształtem mini-mapy jest okrąg (Zagata i Medyńska-Gulij, 2023). Rozwiązanie to stanowi odejście od klasycznych zasad kartograficznych, zgodnie z którymi mapy przyjmują zazwyczaj formę prostokątną. Różnica ta wynika z adaptacji konwencji kartograficznych do specyfiki przestrzeni wirtualnej oraz wymagań nowych form geometriów, w których zmienna i dynamiczna perspektywa użytkownika wymusza stosowanie alternatywnych rozwiązań wizualnych (Snyder, 1987).

Pozycja mini-mapy na ekranie stanowi istotny aspekt projektowania interfejsu użytkownika, mający bezpośredni wpływ na szybkość, dokładność i intuicyjność interakcji. Zgodnie z dominującymi trendami w kulturze zachodniej, elementy interfejsu użytkownika są najczęściej lokowane w górnej bądź lewej części ekranu, co wynika z przyzwyczajień percepcyjnych ukształtowanych przez kierunek czytania, od lewej do prawej oraz z góry na dół (Miraz i in., 2016). Odmienne preferencje obserwuje się w kulturach wschodnich, gdzie bardziej intuicyjne okazuje się pozycjonowanie interfejsów w górnej lub prawej części przestrzeni ekranowej (Callahan, 2006). Zasady te znajdują swoje odpowiedniki również w tradycyjnym projektowaniu kartograficznym, gdzie rozmieszczenie elementów, takich jak kartony czy legendy, podporządkowane jest zasadom równowagi kompozycyjnej i hierarchii wizualnej (Slocum i in., 2005). Ich celem jest nie tylko estetyczna organizacja przestrzeni, ale

2. *Mini-mapa jako element nawigacyjny w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

przede wszystkim prowadzenie uwagi użytkownika w sposób czytelny i funkcjonalny, bez zakłócania odbioru treści głównej.

Orientacja mini-mapy jest ważną cechą projektową, która odnosi się do sposobu, w jaki mini-mapa obraca się w interakcji z kamerą gracza w wirtualnej przestrzeni. Pełni ona funkcję zbliżoną do tradycyjnego kompasu, jednoznacznie potwierdzając jej rolę jako elementu nawigacyjnego (Hayatpur i in., 2020). Wybór odpowiedniej orientacji ułatwia użytkownikowi orientację topograficzną w wirtualnej przestrzeni, co bezpośrednio wpływa na komfort rozgrywki (Okada i in., 2019). W praktyce projektowej stosowane są dwa główne typy orientacji desktopowej (Mahalil i in., 2019). Pierwszym z nich jest orientacja widoku kamery, w której mini-mapa obraca się zgodnie z aktualnym kierunkiem widzenia gracza. W tym układzie górna część mapy odpowiada kierunkowi, w którym porusza się postać sterowana przez użytkownika. Ten typ orientacji wspiera nawigację lokalną i ułatwia interpretację otoczenia z perspektywy pierwszoosobowej, co jest szczególnie przydatne przy realizacji zadań wymagających szybkiego reagowania i eksploracji bezpośredniego otoczenia. Drugim typem jest orientacja statyczna, oparta na stałym kierunku odniesienia, najczęściej na północ, w której mini-mapa pozostaje nieruchoma względem przestrzeni ekranowej. Tego rodzaju orientacja sprzyja zadaniom wymagającym szerszej perspektywy przestrzennej, takim jak planowanie tras, eksploracja nowych obszarów lub podejmowanie decyzji strategicznych w skali makro.

2.2. Efektywność nawigacyjna w przestrzeni topograficznej

Pojęcie efektywności od dawna zajmuje istotne miejsce w refleksji kartograficznej i stanowi jedno z podstawowych kryteriów analizy jakości mapy jako narzędzia przekazu informacji przestrzennej (Żyszkowska, 1993; Wielebski i Medyńska-Gulij, 2019). W klasycznych ujęciach kartograficznych efektywność była rozumiana przede wszystkim jako skuteczność komunikacyjna mapy, mierzona poprawnością i szybkością odczytu informacji (Vansteenvoort i De Maeyer, 2005). Współcześnie, w kontekście badań nad technologią informacyjną oraz interakcją człowiek-komputer, definicja efektywności uległa specyfikacji, koncentrując się na perspektywie użytkownika końcowego. Pojęcie efektywności nawigacyjnej w literaturze przedmiotu definiowane jest jako zdolność użytkownika do przemieszczania się w przestrzeni fizycznej lub wirtualnej w sposób celowy, ekonomiczny i pozbawiony zbędnych błędów orientacyjnych (Fuest i in., 2021). W kontekście kartograficznym efektywność ta nie jest jednak wyłącznie pochodną indywidualnych predyspozycji przestrzennych jednostki, lecz w głównej

2. *Mini-mapa jako element nawigacyjny w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

mierze zależy od jakości i funkcjonalności narzędzia wspomagającego, jakim jest mapa (Lobben, 2004). Kartografia nawigacyjna stawia sobie za cel taką organizację przekazu graficznego, aby zminimalizować czas potrzebny na dekodowanie informacji i transformację dwuwymiarowego obrazu mapy na trójwymiarową rzeczywistość (Pugliesi i in., 2009). Wielebski (2015) podzielił efektywność na rzeczywistą (opracowaną na podstawie metod prezentacji kartograficznych złożonych graficznie) oraz postrzeganą (kategoryzowała użyte metody w kontekście subiektywnej oceny). Dzięki takiemu sposobowi, można było określić która z analizowanych metod prezentacji jest najbardziej efektywna obiektywnie i subiektywnie.

W niniejszej rozprawie doktorskiej efektywność nawigacyjna jest rozpatrywana jako najszybsze czasowo i najkrótsze odległościowo przejście trasy z punktu początkowego do końcowego w wirtualnej przestrzeni topograficznej przy użyciu odpowiednio zaprojektowanej mini-mapy. Efektywność nawigacyjna może być zatem ujmowana poprzez dwa podstawowe, wzajemnie uzupełniające się wymiary, jakimi są efektywność czasowa oraz efektywność odległościowa, traktowane jako kluczowe wskaźniki w procesie poruszania się pieszego w przestrzeni. Efektywność czasowa odnosi się do tempa realizacji zadania nawigacyjnego i bywa interpretowana jako charakterystyka szybkości pozyskiwania informacji oraz sprawności podejmowania decyzji przestrzennych, szczególnie w badaniach porównawczych różnych form prezentacji mapowej i rozwiązań interfejsowych (Cybulski i in., 2023). W tym ujęciu krótszy czas realizacji zadania świadczy o większej przejrzystości przekazu kartograficznego oraz łatwiejszym dostępie do informacji istotnych dla orientacji i planowania ruchu.

Równolegle w badaniach nad nawigacją rozwijane jest podejście odległościowe, w którym efektywność analizowana jest na podstawie długości przebytej trasy w relacji do struktury przestrzeni oraz możliwych wariantów przejścia (Porathe, 2008). Analiza dystansu pozwala na identyfikację strategii, ujawniając stopień zgodności wyborów użytkownika z zapisem trasy na mapie topograficznej. W przeciwieństwie do czasu, który może być kształtowany przez tempo ruchu lub indywidualny styl działania, długość trasy odzwierciedla skutki sekwencji decyzji podejmowanych w trakcie nawigacji i dlatego bywa traktowana jako charakterystyka bardziej bezpośrednio związana z jakością orientacji przestrzennej. Efektywność nawigacyjna ujawnia się wówczas jako wynik relacji pomiędzy szybkością działania a przestrzenną konsekwencją podejmowanych decyzji, co znajduje odzwierciedlenie zarówno w czasie realizacji zadania, jak i w geometrii przestrzennej wybranych odcinków dla całej przebytej trasy.

2. Mini-mapa jako element nawigacyjny w wirtualnej przestrzeni topograficznej

W badaniach nad efektywnością nawigacyjną technika eye-trackingowa stanowi istotne narzędzie analityczne umożliwiające rekonstrukcję procesów percepcyjnych towarzyszących orientacji przestrzennej oraz korzystaniu z kartograficznych form wsparcia nawigacji (Cybulski, 2021). Rejestracja ruchów gałek ocznych pozwala na identyfikację sposobu alokacji uwagi wzrokowej w obrębie mapy oraz środowiska nawigacyjnego, a tym samym na pośrednią analizę tego, w jakim stopniu prezentacja kartograficzna wspiera podejmowanie decyzji przestrzennych (Medyńska-Gulij i in., 2022). W kontekście mini-map eye-tracking umożliwia analizę intensywności i charakteru korzystania z informacji kartograficznej, wskazując, czy produkt kartograficzny pełni funkcję narzędzia wspomagającego planowanie dalszego przebiegu trasy, czy też wymaga częstego i długotrwałego angażowania uwagi wzrokowej (Rymarkiewicz i in., 2024). Dane okulograficzne pozwalają również badać relację pomiędzy strukturą i formą mini-mapy, a strategią orientacji przestrzennej użytkownika, ujawniając, które elementy interfejsu odgrywają kluczową rolę w procesie nawigacji (Zagata i in., 2021). Zastosowanie tej techniki pozwala zatem na uzupełnienie analiz opartych na parametrach ruchu i strukturze tras o wymiar percepcyjny, który jest kluczowy dla pełnego zrozumienia funkcji mini-mapy jako elementu wspierającego nawigację w środowiskach wirtualnych. Technika eye-trackingowa dostarcza danych w formie tabel oraz nagrań wideo, służących do wizualnej analizy ruchów gałek ocznych. Istotnym narzędziem badawczym są tu obszary zainteresowania (*Area of Interest, AOI*). W niniejszej pracy posłużyły one do analizy wariantów mini-mapy w interfejsie, pozwalając na zmierzenie takich parametrów jak długość patrzenia oraz gęstość fiksacji. Metodologia ta, choć powszechnie stosowana, pozostawia badaczowi swobodę w definiowaniu geometrii obszarów AOI (Hessels i in., 2016).

W ujęciu kartograficznym efektywność nawigacyjna może być analizowana nie tylko poprzez wartości liczbowe opisujące poruszanie się w przestrzeni, lecz także poprzez przestrzenne formy wizualizacji, które umożliwiają identyfikację wzorców zachowań nawigacyjnych w relacji do struktury środowiska (Robinson i in., 2020). Wizualizacja analityczna danych przestrzennych pozwala na syntetyczne przedstawienie przebiegu tras, natężenia ruchu oraz kierunków przemieszczania się użytkowników, co umożliwia analizę stopnia uporządkowania decyzji przestrzennych oraz spójności wyborów nawigacyjnych. W tym kontekście efektywność ujawnia się jako właściwość widoczna w strukturze przepływów, koncentracji ruchu oraz powtarzalności schematów poruszania się, a nie wyłącznie jako relacja pomiędzy czasem i dystansem (Nusrat i in., 2018). Kartograficzne formy prezentacji, takie jak mapy tras, mapy przepływów czy kartodiagramy liniowe i wstęgowe, umożliwiają uchwycenie

2. *Mini-mapa jako element nawigacyjny w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

relacji pomiędzy organizacją przestrzeni a wyborem dróg przez użytkowników, wskazując obszary sprzyjające jednoznacznym decyzjom nawigacyjnym oraz miejsca generujące rozproszenie ruchu i niepewność orientacyjną. Dlatego bardzo ważny jest wybór odpowiedniego typu kartodiagramu popularnie nazywanego mapami przepływu z bardzo wielu wariantów opisywanych w klasycznych dawnych i dzisiejszych podręcznikach (Ratajski, 1989; Lambert i Zanin, 2022). W dzisiejszej kartografii kartodiagramy są bardzo popularne i nadal badane są ich różne formy projektowania (Jenny i in., 2018).

Analiza wizualna prezentacji kartograficznych pozwala ponadto na porównywanie wariantów przebiegu tras w sposób intuicyjny i syntetyczny, ujawniając różnice, które mogą pozostawać niewidoczne w analizach opartych wyłącznie na agregatach statystycznych (Popelka i in., 2019). W tym sensie wizualizacja kartograficzna pełni funkcję narzędzia analitycznego, umożliwiającego interpretację efektywności nawigacyjnej jako zjawiska przestrzennego, wynikającego z relacji pomiędzy sposobem reprezentacji środowiska a podejmowanymi decyzjami ruchowymi, co stanowi istotną podstawę dla analizy jakości rozwiązań kartograficznych wspomagających nawigację (Andrienko i in., 2010).

Wizualizacja kartograficzna zajmuje istotne miejsce w procesie analizy danych przestrzennych, stanowiąc jeden z podstawowych sposobów porządkowania i interpretacji informacji o zjawiskach zachodzących w przestrzeni (Medyńska-Gulij i in., 2022). Jej zastosowanie obejmuje zarówno prezentację rozkładów przestrzennych, jak i analizę relacji pomiędzy elementami środowiska oraz obserwowanymi zachowaniami. W obszarze danych ruchowych i kierunkowych wykorzystywane są metody odwołujące się do form liniowych, wśród których kartodiagramy wstępowe umożliwiają przedstawienie natężenia przemieszczeń w postaci wstęp prostych lub sumarycznych, odnoszonych do jednego kierunku lub do dwóch przeciwnych kierunków ruchu, co pozwala na analizę struktury tras oraz ich zróżnicowania przestrzennego (Medyńska-Gulij, 2024). Odmienny sposób reprezentacji przyjmują mapy ciepła, które operują ciągłym polem intensywności i służą do ukazywania koncentracji zjawisk w przestrzeni, umożliwiając identyfikację obszarów nagromadzenia aktywności oraz stref o mniejszym natężeniu obserwacji (Słomska-Przech i in., 2021). Obie metody wywodzą się z kartograficznej tradycji wizualizacji danych przestrzennych, jednak prowadzą do odmiennych sposobów interpretacji zjawisk, akcentując odpowiednio przebieg i kierunkowość ruchu oraz jego przestrzenne zagęszczenie, co uzasadnia ich wykorzystanie w niniejszej rozprawie jako form analizy i interpretacji danych empirycznych odnoszących się do zachowań nawigacyjnych w środowisku wirtualnym.

3. Projektowanie wirtualnej przestrzeni topograficznej na podstawie Bazy Danych Obiektów Topograficznych

Tradycyjne, dwuwymiarowe reprezentacje przestrzeni geograficznej w formie mapy ustępują miejsca immersywnym, trójwymiarowym modelom, które nie tylko wiernie odwzorowują rzeczywistość, ale także umożliwiają interaktywne badanie, analizę i symulację złożonych zjawisk (Medyńska-Gulij, 2024). W centrum tej ewolucji znajduje się koncepcja wirtualnej przestrzeni topograficznej, która integruje bogactwo danych topograficznych z zaawansowanymi technikami modelowania 3D i wizualizacji, otwierając nowe perspektywy dla nauki, planowania i interakcji z otoczeniem.

Przeźren geograficzna w podstawowym ujęciu odnosi się do powierzchni Ziemi jako układu elementów przyrodniczych i antropogenicznych, stanowiących ramy dla procesów przestrzennych oraz działalności człowieka. Tradycyjnie była ona postrzegana jako zbiór obiektów o określonym położeniu i relacjach przestrzennych, możliwych do opisu za pomocą miar geometrycznych (Włodarczyk, 2009). Wraz z rozwojem badań nad użytkowaniem przestrzeni zwrócono uwagę na znaczenie sposobu jej postrzegania i interpretacji przez użytkowników, co wpłynęło na rozszerzenie ujęć przestrzeni geograficznej o wymiar percepcyjny (Rembowska, 2008). W kontekście rozwoju technologii cyfrowych przestrzeń geograficzna coraz częściej funkcjonuje w formie modeli i reprezentacji wizualnych, które umożliwiają jej analizę, interpretację oraz użytkowanie w środowiskach cyfrowych. Geowizualizacja pełni w tym procesie rolę narzędzia pośredniczącego pomiędzy rzeczywistą przestrzenią geograficzną a jej cyfrowym odwzorowaniem, wspierając percepcję i rozumienie relacji przestrzennych (Medyńska-Gulij, 2024).

Mapa topograficzna jest mapą ogólnogeograficzną o możliwie dokładnym przedstawieniu obiektów na powierzchni Ziemi oraz form rzeźby terenu w skali od 1:10 000 do 1:100 000 (Medyńska-Gulij, 2024), które powstawały na podstawie obserwacji i pomiarów w terenie. Taka terenowa właściwość mapy topograficznej czyli związku z orientacją topograficzną, wprost w terenie skłoniła autora niniejszej rozprawy do zastosowania terminu – przestrzeń topograficzna w znaczeniu wirtualnej przestrzeni topograficznej czyli tej konstruowanej na podstawie wyboru obiektów z klasycznej mapy topograficznej.

Cechą klasycznych map topograficznych jest ich skalowalność, czyli zgodność z rzeczywistością w zakresie proporcji, odwzorowania przestrzennego oraz prezentacji relacji między obiektami geograficznymi (Spiess, 2002). Historycznie, mapy topograficzne wiernie i w skali odwzorowywały cechy Ziemi na dwuwymiarowej powierzchni, służąc jako narzędzie

3. Projektowanie wirtualnej przestrzeni topograficznej na podstawie BDOT

w planowaniu przestrzennym, zarządzaniu zasobami oraz działaniach nawigacyjnych i wojskowych (Kent i Hopfstock, 2018). Kluczowe informacje zawarte na mapach topograficznych obejmują rzeźbę terenu (góry, doliny, stoki, zagłębienia), hydroografię (jeziora, rzeki, bagna), roślinność (obszary zalesione), transport (drogi, koleje), kulturę (budynki, rozwój urbanistyczny), granice i toponimię (nazwy miejsc).

Cyfrowe bazy danych topograficznych, wykorzystywane obecnie przez krajowe instytucje publiczne, oferują bogaty zestaw danych georeferencyjnych, opisujących zarówno geometrię, jak i atrybuty obiektów przestrzennych. Ich struktura umożliwia prowadzenie zaawansowanych analiz przestrzennych, zarządzanie infrastrukturą, a także modelowanie zjawisk fizycznych i społecznych w wirtualnych środowiskach (Medyńska-Gulij, 2013). Przykładem tego typu transformacji jest odejście od koncepcji mapy jako reprezentacji graficznej na rzecz modelu jako struktury danych opisującej rzeczywistość topograficzną (Markoski, 2018). Przestrzeń topograficzna przestaje być jedynie odwzorowaniem geometrycznym, a staje się natomiast środowiskiem wizualizacyjnym, w którym możliwe jest przeprowadzanie immersyjnych geowizualizacji dla procesów związanych z przestrzennością danych (Medyńska-Gulij, 2025).

W środowiskach wirtualnych cechy przestrzenne stanowią podstawowy element modelowania rzeczywistości topograficznej (Slocum i in., 2022). Odnoszą się one do zbiorów danych opisujących lokalizację, kształt, atrybuty i relacje przestrzenne obiektów zlokalizowanych na powierzchni Ziemi lub w jej bezpośrednim sąsiedztwie. Z perspektywy systemów informacji geograficznej, dane przestrzenne łączą aspekty lokalizacyjne, opisowe oraz czasowe, stanowiąc trzon analiz przestrzennych i podstawę do budowy modeli środowiskowych, infrastrukturalnych czy społecznych (Ślusarski i Jurkiewicz, 2020). Dane geoprzestrzenne wektorowe umożliwiają opis obiektów punktowych (np. drzewa, przystanki autobusowe), liniowych (np. rzeki, drogi) i powierzchniowych (np. budynki, tereny zielone), przy czym każdemu obiektowi przypisywane są atrybuty opisowe za pomocą struktur tabelarycznych (Kraak i Ormeling, 2021).

Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT) to zbiór danych przestrzennych, który służy jako punkt odniesienia dla różnych opracowań tematycznych i umożliwia udostępnianie informacji topograficznych (Izdebski, 2020). Jej głównym celem jest zgromadzenie w jednym miejscu danych i informacji dotyczących szczegółowego modelowania obiektów, które stanowią treść map topograficznych i zasadniczych. BDOT zawiera informacje o własnościach geometrycznych i powiązaniach przestrzennych obiektów, a także o ich funkcjach, cechach i właściwościach, odniesionych do powierzchni Ziemi. Kluczowe cechy innowacyjnej bazy

3. Projektowanie wirtualnej przestrzeni topograficznej na podstawie BDOT

danych topograficznych obejmują kompletność klas cech topograficznych i ich atrybutów, zintegrowany system identyfikacji, integralność modeli geometrycznych oraz spójność topologiczną modeli geometrycznych. Istotne jest również wsparcie dla metadanych, zarówno dla klas cech, jak i dla ich konkretnych instancji. BDOT stanowi uporządkowany zbiór obiektów przestrzennych, sklasyfikowanych według określonych kategorii tematycznych, takich jak sieć transportowa, obiekty hydrograficzne, zabudowa, użytkowanie terenu, obiekty przemysłowe, elementy przyrodnicze oraz infrastruktura techniczna. Każdy z obiektów opisany jest za pomocą geometrii (najczęściej w postaci wektorowej) oraz zestawu atrybutów opisowych, umożliwiających jego identyfikację, analizę oraz powiązanie z innymi elementami przestrzeni (Gotlib, 2015).

Znaczenie BDOT wykracza poza ich rolę jako repozytoriów danych. Stanowią one fundament dla budowy wirtualnych reprezentacji rzeczywistości, na których opierają się zarówno klasyczne mapy cyfrowe, jak i zaawansowane aplikacje wykorzystujące rozszerzoną rzeczywistość (*Augmented Reality*, AR), rzeczywistość wirtualną (*Virtual Reality*, VR) oraz symulacje w środowiskach immersyjnych (Halik, 2018). Ponadto, w dobie automatyzacji procesów decyzyjnych i rozwoju sztucznej inteligencji, BDOT pełnią funkcję źródła wiedzy przestrzennej, umożliwiającej uczenie maszynowe, rozpoznawanie wzorców i optymalizację procesów urbanistycznych. W kontekście modelowania wirtualnej przestrzeni topograficznej, BDOT stają się kluczowym ogniwem łączącym świat rzeczywisty ze światem wirtualnym (Halik i Wielebski, 2023). Dzięki nim możliwe jest tworzenie dokładnych, semantycznie opisanych modeli przestrzeni, które znajdują zastosowanie w systemach cyfrowych bliźniaków, inteligentnych miastach, symulatorach szkoleniowych oraz aplikacjach edukacyjnych i rozrywkowych.

W Polsce Baza Danych Obiektów Topograficznych jest tworzona przez Służbę Geodezyjną i Kartograficzną na podstawie Ustawy z dnia 17 maja 1989 r. Prawo geodezyjne i kartograficzne. W polskim systemie informacji przestrzennej funkcjonują trzy główne typy baz danych topograficznych: BDOT500, BDOT10k oraz BDOO. Każda z nich odpowiada innemu poziomowi szczegółowości i przeznaczeniu. BDOT500 jest to baza danych przestrzennych o szczegółowości odpowiadającej mapie zasadniczej w skali 1:500. Jest zakładana dla terenów miast oraz obszarów wiejskich przeznaczonych pod zabudowę. BDOT10k definiuje mapy topograficzne o poziomie szczegółowości 1:10 000. Zawiera dane o lokalizacji przestrzennej i atrybutach opisowych obiektów topograficznych. Dane BDOT10k są dostępne bezpłatnie i do dowolnego wykorzystania, bez konieczności składania wniosków. BDOO (Baza Danych

Obiektów Ogólnogeograficznych) obejmuje dane ogólnogeograficzne w skali 1:250 000, przeznaczone do kartografii przeglądowej oraz zastosowań tematycznych o charakterze krajowym lub międzynarodowym. Baza ta odznacza się mniejszą szczegółowością, lecz dużą skalowalnością i kompatybilnością z innymi zasobami europejskimi. Istnienie różnych poziomów szczegółowości danych topograficznych w Polsce (BDOT500, BDOT10k, BDOO) jest naturalnym fundamentem dla implementacji mechanizmów Level of Detail (LoD) w projektowaniu wirtualnej przestrzeni (Kozioł i in., 2014). Każdy z tych poziomów reprezentuje inną skalę i zakres informacji. BDOT500 oferuje największą szczegółowość dla obszarów zurbanizowanych, BDOT10k dla szerszych obszarów, a BDOO dla ogólnych map ogólnogeograficznych. Wirtualne środowiska, zwłaszcza te immersyjne, muszą radzić sobie z różnymi poziomami szczegółowości w zależności od odległości obserwatora. Ta hierarchia danych topograficznych umożliwia efektywne zarządzanie zasobami obliczeniowymi i renderowaniem, zapewniając wysoką jakość wizualizacji w bliskim planie i uproszczone modele w oddali, co jest kluczowe dla płynności i immersji w dużych, złożonych środowiskach wirtualnych. To również sugeruje potrzebę inteligentnych algorytmów do automatycznego przełączania między tymi poziomami danych.

Pojęcie poziomów szczegółowości (LoD – *Level of Detail*) odnosi się do koncepcji hierarchicznego odwzorowania obiektów przestrzennych w modelach trójwymiarowych, w zależności od potrzeb aplikacyjnych, zasobów obliczeniowych i dostępnych danych źródłowych. LoD stanowią istotny komponent modelowania wirtualnej przestrzeni topograficznej, wpływając bezpośrednio na precyzję, wydajność oraz użyteczność modeli 3D w różnych kontekstach (Cisło-Lesicka, 2010). Stopniowanie szczegółowości pozwala na elastyczne dostosowanie złożoności modelu do konkretnego przypadku użycia, co ma szczególne znaczenie w kontekście obciążeń obliczeniowych, optymalizacji renderingu oraz dostępności danych. W praktyce, różne poziomy LoD mogą współistnieć w jednej aplikacji, umożliwiając płynne przejście między widokiem ogólnym a szczegółową eksploracją obiektu. W standardach wyróżnia się pięć głównych poziomów szczegółowości (Biljecki i in., 2016):

- LoD0 – model płaski (2.5D), bazujący na danych rastrowych lub numerycznych modelach terenu, wykorzystywany głównie do przeglądowych analiz przestrzennych.
- LoD1 – uproszczone modele blokowe budynków, odwzorowujące jedynie ich bryłę i orientację bez detali dachowych i elewacyjnych.

3. Projektowanie wirtualnej przestrzeni topograficznej na podstawie BDOT

- LoD2 – modele z uproszczonymi dachami i geometrią fasad, przeznaczone do analiz widoczności, zacienienia i symulacji urbanistycznych.
- LoD3 – szczegółowe modele architektoniczne z dokładną geometrią elewacji, okien, drzwi i detali konstrukcyjnych, wykorzystywane m.in. w VR, symulacjach ewakuacyjnych oraz analizach akustycznych.
- LoD4 – modele zawierające także strukturę wewnątrz budynków, wykorzystywane w aplikacjach typu BIM oraz rozszerzonej rzeczywistości (AR).

Pojęcie wirtualnej przestrzeni topograficznej odnosi się do cyfrowo odwzorowanego środowiska geograficznego, w którym dane topograficzne, semantyczne i funkcjonalne są zintegrowane w spójną strukturę przestrzenną, umożliwiającą interaktywną eksplorację, analizę oraz symulację rzeczywistości. W odróżnieniu od klasycznych reprezentacji kartograficznych, wirtualna przestrzeń topograficzna charakteryzuje się trójwymiarowością, dynamicznością, a także możliwością immersji i interakcji z użytkownikiem (Halik i Kent, 2021). Teoretyczne podstawy koncepcji wirtualnej przestrzeni topograficznej czerpią z kilku dziedzin naukowych: geografii, kartografii, informatyki oraz geoinformacji. Fundamentem tej koncepcji jest założenie, że przestrzeń topograficzna może być nie tylko odwzorowana geometrycznie, lecz także semantycznie interpretowana oraz funkcjonalnie odwzorowana w środowisku cyfrowym (Lv i in., 2017). Taka przestrzeń nie jest zatem prostym obrazem rzeczywistości, lecz złożonym, dynamicznym modelem poznawczym. W ujęciu praktycznym, wirtualna przestrzeń topograficzna realizowana jest przy pomocy silników graficznych (np. Unity, Unreal Engine), systemów GIS 3D, standardów wymiany danych (CityGML, glTF, 3D Tiles), a także technologii VR/AR. Jej efektywność poznawcza i funkcjonalna zależy od jakości danych źródłowych, stopnia semantyzacji oraz intuicyjności interfejsu interakcji.

Gry wideo, jako jedno z najdynamiczniej rozwijających się mediów cyfrowych, odgrywają kluczową rolę w rozwoju technologii trójwymiarowego modelowania przestrzeni. W kontekście wirtualnych środowisk topograficznych, doświadczenia wyniesione z projektowania gier komputerowych stanowią istotne źródło inspiracji oraz praktycznych rozwiązań w zakresie odwzorowywania przestrzeni, interakcji użytkownika i budowania immersji (Edler i in., 2018). Modelowanie przestrzeni w grach wideo obejmuje zarówno aspekty geometryczne, jak i estetyczne, semantyczne oraz funkcjonalne. Współczesne silniki gier, takie jak Unreal Engine czy Unity, oferują zaawansowane narzędzia do tworzenia realistycznych środowisk 3D, obsługujących złożone tekstury, dynamiczne oświetlenie, fizykę

otoczenia, a także interakcje w czasie rzeczywistym. Dzięki nim możliwe jest nie tylko odtworzenie wyglądu przestrzeni, lecz również symulacja jej właściwości i zachowań. W grach, przestrzeń często pełni funkcję narracyjną, gdzie prowadzi gracza, buduje napięcie, ukrywa informacje lub nagradza eksplorację. Takie podejście sprzyja projektowaniu przestrzeni, intuicyjnych w nawigacji, a jednocześnie bogatych w szczegóły (Medyńska-Gulij i Zagata, 2020). Należy także podkreślić, że wirtualne światy w grach nierzadko opierają się na rzeczywistych danych geograficznych lub ich interpretacjach. Przykłady takie jak seria „Microsoft Flight Simulator”, gry typu *open world* (np. „GTA”, „The Witcher 3”, „Red Dead Redemption 2”), a także tytuły edukacyjne (np. „GeoGuessr”, „Minecraft Education”) pokazują, że granica między fikcyjną a rzeczywistą przestrzenią cyfrową zaciera się.

Doświadczenie użytkownika (UX) w wirtualnych środowiskach topograficznych stanowi kluczowy komponent skuteczności poznawczej i funkcjonalnej tych przestrzeni. W odróżnieniu od klasycznych interfejsów GIS czy statycznych map, środowiska immersyjne wymagają uwzględnienia nie tylko aspektów ergonomii i użyteczności, lecz także percepcji przestrzennej, emocji oraz narracyjnego prowadzenia użytkownika w przestrzeni cyfrowej (Rebelo i in., 2012). Użytkownik nie jest tu jedynie odbiorcą danych, lecz aktywnym uczestnikiem interakcji przestrzennej. Kluczowe jest dostosowanie poziomu szczegółowości, trybów wizualizacji oraz metod interakcji do kompetencji poznawczych i oczekiwań użytkownika. Badania pokazują, że VR pomaga wizualizować relacje przestrzenne między elementami krajobrazu, pozwalając użytkownikowi bardziej poznać zaprojektowane środowisko i interaktywnie przez nie nawigować (Riecke i in., 2018). Płynniejsza nawigacja w VR generuje pozytywne efekty na skali płynności. Ważnym aspektem jest także obecność elementów punktów odniesienia (*landmarks*) w strukturze przestrzeni. Odpowiednio zaprojektowane ścieżki poznawcze, struktury osi widokowych oraz warstwy informacyjne wspierają orientację i zapamiętywanie, a także wzmacniają odbiór przestrzeni.

Silniki do gier komputerowych, takie jak Unity i Unreal Engine, są coraz częściej wykorzystywane do wizualizacji danych geoprzestrzennych i tworzenia wirtualnych środowisk (Medyńska-Gulij, 2024). Ich rosnąca popularność wynika z możliwości renderowania złożonych modeli 3D w czasie rzeczywistym, wsparcia dla danych przestrzennych oraz otwartości na integrację z zewnętrznymi źródłami informacji geograficznej. Jednakże, dzięki wtyczkom i integracji z GIS, możliwe jest importowanie i wizualizowanie dużych zbiorów danych topograficznych, w tym modeli terenu i modeli miast 3D (Laksono i Aditya, 2019). Silniki gier zapewniają bogaty zestaw bibliotek i zasobów do interakcji użytkownika, w tym

3. Projektowanie wirtualnej przestrzeni topograficznej na podstawie BDOT

widok z pierwszej osoby (FPV), widok z lotu ptaka, widok z drona, co umożliwia eksplorację sceny. Kluczową zaletą silników gier jest możliwość dynamicznej interakcji z modelem przestrzennym: użytkownik może w czasie rzeczywistym zmieniać perspektywę, manipulować obiektami, uruchamiać symulacje czy wchodzić w interakcję z interfejsem informacyjnym (Carbonell-Carrera i in., 2020). Taka interaktywność znacząco zwiększa efektywność poznawczą i aplikacyjną wizualizacji geograficznych.

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

4.1. Etap koncepcyjny

4.1.1. Schemat etapów projektowania aplikacji oraz schemat równoległego projektowania mini-mapy 2D do wirtualnej przestrzeni 3D

W tym podrozdziale następuje ogólny opis procesu badawczego zmierzającego do analizy efektywności nawigacyjnej mini-mapy funkcjonującej jako element interfejsu użytkownika w wirtualnej przestrzeni topograficznej. Zaproponowany schemat badania integruje zagadnienia z zakresu kartografii cyfrowej, projektowania interfejsów nawigacyjnych oraz metod empirycznych badań użyteczności, tworząc spójne ramy metodologiczne dla realizacji celów rozprawy doktorskiej. Schemat postępowania badawczego obejmuje cztery powiązane ze sobą etapy, które prowadzą od sformułowania założeń teoretycznych, poprzez działania projektowe i badania z użytkownikami, aż do analizy wyników i interpretacji efektów zastosowanych rozwiązań projektowych (Ryc. 1).

Pierwszy etap ma charakter koncepcyjny i został podporządkowany określeniu pojęcia efektywności nawigacyjnej na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej (podrozdział 2.2). Koncentruje się on na zdefiniowaniu mini-mapy jako narzędzia wspomagającego orientację i podejmowanie decyzji nawigacyjnych w wirtualnej przestrzeni topograficznej. Na tym etapie określono jej warianty funkcjonalne i wizualne, sposób powiązania z modelem przestrzeni oraz zakres informacji kartograficznej prezentowanej użytkownikowi. Uwzględniono metody pozyskiwania danych nawigacyjnych oraz dobrano środowisko technologiczne umożliwiające realizację aplikacji desktopowej. Jednocześnie zaplanowano dobór uczestników badania oraz metody analizy danych, pozwalające na ilościową i jakościową analizę efektywności nawigacyjnej.

Drugi etap obejmuje opracowanie aplikacji desktopowej stanowiącej środowisko eksperymentalne. W jego ramach przygotowano rozwiązania w środowisku 2D i 3D, umożliwiające testowanie różnych wariantów mini-mapy. Część dwuwymiarowa uwzględniała zasady projektowania kartograficznego oraz zasady projektowania znane z aplikacji użytkowych i środowisk gier wideo. Część trójwymiarowa została oparta na danych topograficznych BDOT10k, które poddano operacjom geometrycznym i atrybutowym, a następnie zaimplementowano w silniku gier komputerowych. Szczególną uwagę poświęcono reprezentatywności i adaptacji przestrzeni wirtualnej tak, aby umożliwić wiarygodną analizę

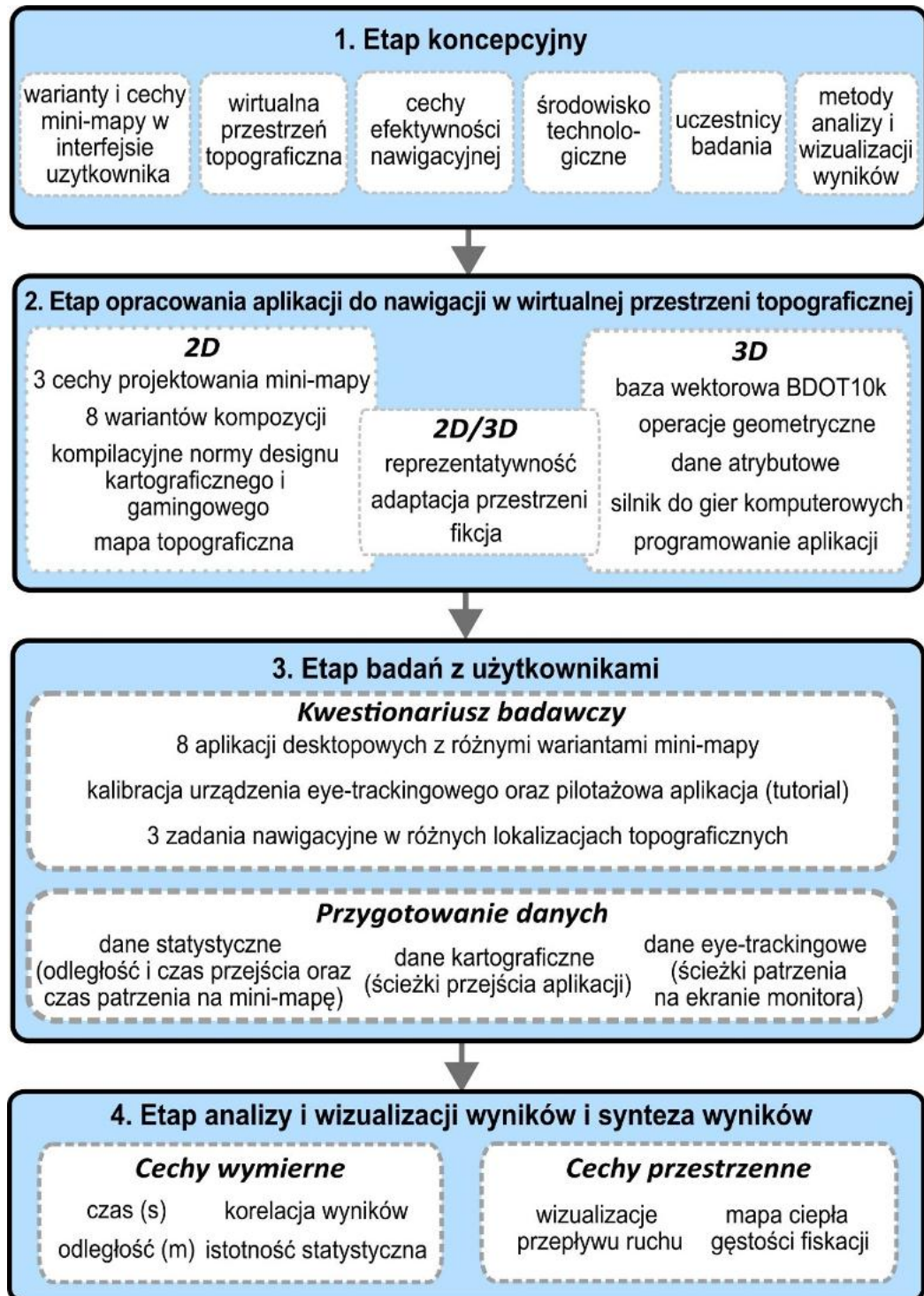
4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

zachowań nawigacyjnych użytkowników. Efektem tego etapu było przygotowanie ośmiu wariantów aplikacji różniących się konstrukcją i funkcją mini-mapy.

Trzeci etap stanowi badania empiryczne z udziałem użytkowników, ukierunkowane bezpośrednio na analizę efektywności nawigacyjnej. Po przeprowadzeniu etapu wprowadzającego i kalibracji urządzenia eye-trackingowego uczestnicy realizowali zestaw zadań nawigacyjnych w różnych lokalizacjach wirtualnej przestrzeni topograficznej. Badania umożliwiły rejestrację danych czasowych i przestrzennych, ścieżek poruszania się w aplikacji oraz danych okulograficznych, obrazujących sposób wykorzystania mini-mapy w procesie orientacji i podejmowania decyzji nawigacyjnych. Zebrane dane poddano wstępnemu przetworzeniu i przygotowano do dalszych analiz.

Czwarty etap obejmuje analizę i wizualizację wyników oraz formułowanie wniosków. Przeprowadzono analizę cech wymiernych, takich jak czas realizacji zadań czy długość przebytej trasy, a także testy statystyczne pozwalające na identyfikację zależności pomiędzy wariantami mini-mapy a efektywnością nawigacyjną. Uzupełnieniem analiz ilościowych były wizualizacje przestrzenne, w tym mapy przepływu ruchu oraz mapy ciepła gęstości fiksacji wzroku. Uzyskane rezultaty posłużyły do sformułowania wniosków dotyczących roli mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej oraz do opracowania rekomendacji projektowych, stanowiących istotny wkład w rozwój badań nad kartograficznymi interfejsami nawigacyjnymi.

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 1 Schemat badania efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej wymaga spójnego i kontrolowanego procesu projektowania środowiska badawczego. Mini-mapa, jako element graficznego interfejsu użytkownika, funkcjonuje w ścisłym powiązaniu z reprezentacją przestrzeni trójwymiarowej, jej strukturą topograficzną oraz mechaniką

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

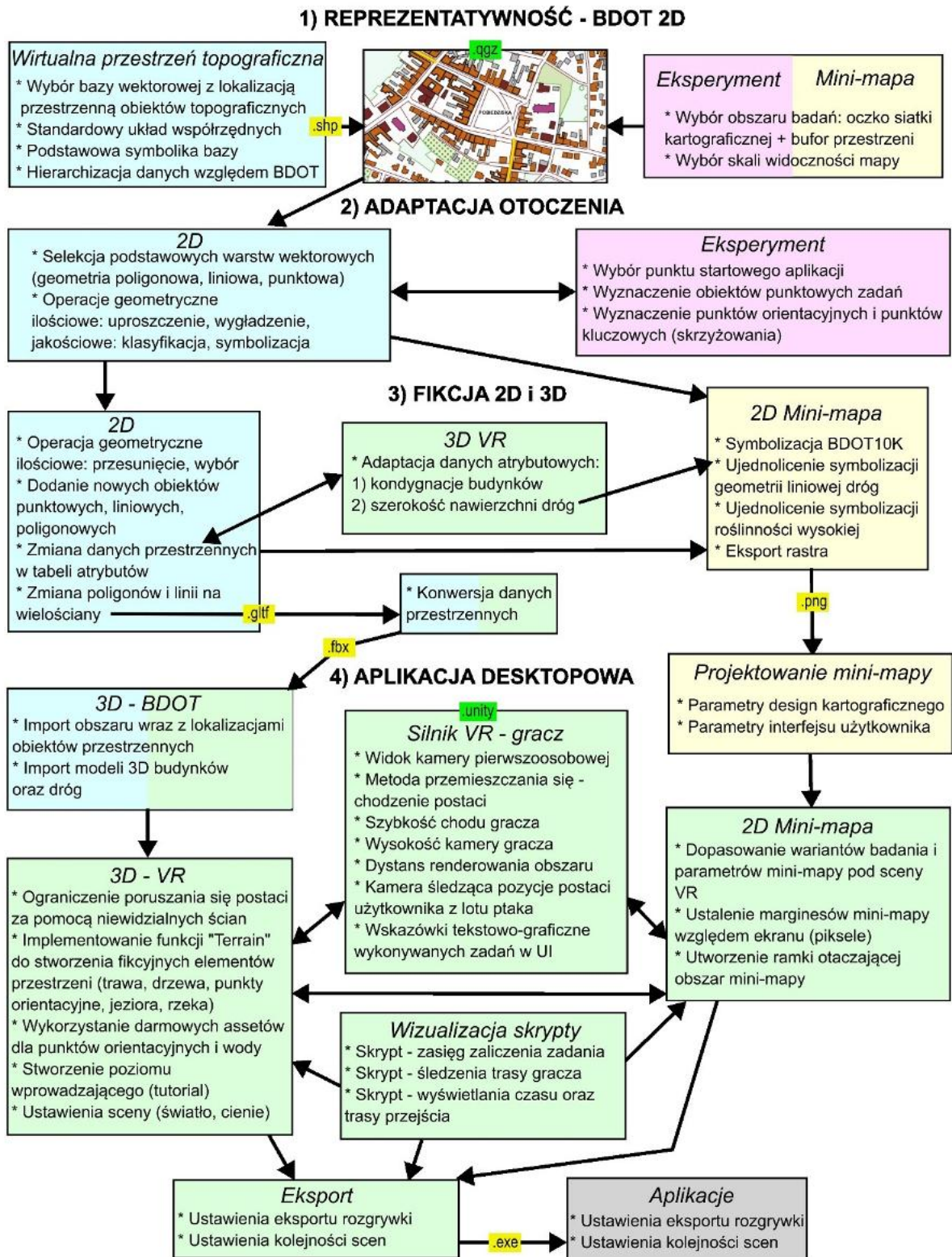
nawigacji użytkownika. Sposób przygotowania danych źródłowych, ich przekształceń kartograficznych oraz decyzje projektowe podejmowane na etapie implementacji mają bezpośredni wpływ na przebieg i wyniki badań empirycznych, co uzasadnia konieczność uporządkowania tego procesu w formie syntetycznego ujęcia. W tym celu opracowano schemat, który porządkuje kluczowe działania prowadzące od danych topograficznych do aplikacji desktopowej wykorzystywanej w eksperymencie (Ryc. 2). Schemat ten obejmuje cztery zasadnicze obszary działań realizowanych równoległe w środowiskach dwuwymiarowym i trójwymiarowym. Pierwszym z nich jest zapewnienie reprezentatywności danych topograficznych poprzez przygotowanie i przetwarzanie danych BDOT10k w postaci mapy 2D. Kolejnym obszarem jest adaptacja otoczenia, polegająca na selekcji i modyfikacji elementów przestrzeni istotnych z punktu widzenia realizowanych zadań nawigacyjnych. Następnie uwzględniono zastosowanie kontrolowanych elementów fikcji w środowiskach 2D i 3D, wynikających z założeń eksperymentalnych i konieczności zachowania porównywalności wariantów badawczych. Ostatnim etapem jest opracowanie aplikacji desktopowej, integrującej wirtualną przestrzeń topograficzną 3D z mini-mapą 2D.

4.1.2. Założenia wariantów i cech mini-mapy w interfejsie użytkownika

Podczas definiowania parametrów i atrybutów mini-mapy odwołano się zarówno do klasycznych zasad projektowania map kartograficznych i ich podstawowych elementów, jak i do rozwiązań stosowanych w projektowaniu interfejsów w grach wideo (Medyńska, 2018; Gazzard, 2018). Znaczna część tych atrybutów występuje równoległe w obu obszarach projektowych, a wykorzystanie podejścia interdyscyplinarnego pozwala na bardziej obiektywny projekt mini-mapy. Na tej podstawie wybrano trzy podstawowe cechy mini-mapy, takie jak kształt, położenie oraz orientacja, dla których stworzono 8 wariantów mini-mapy w interfejsie (Ryc. 3).

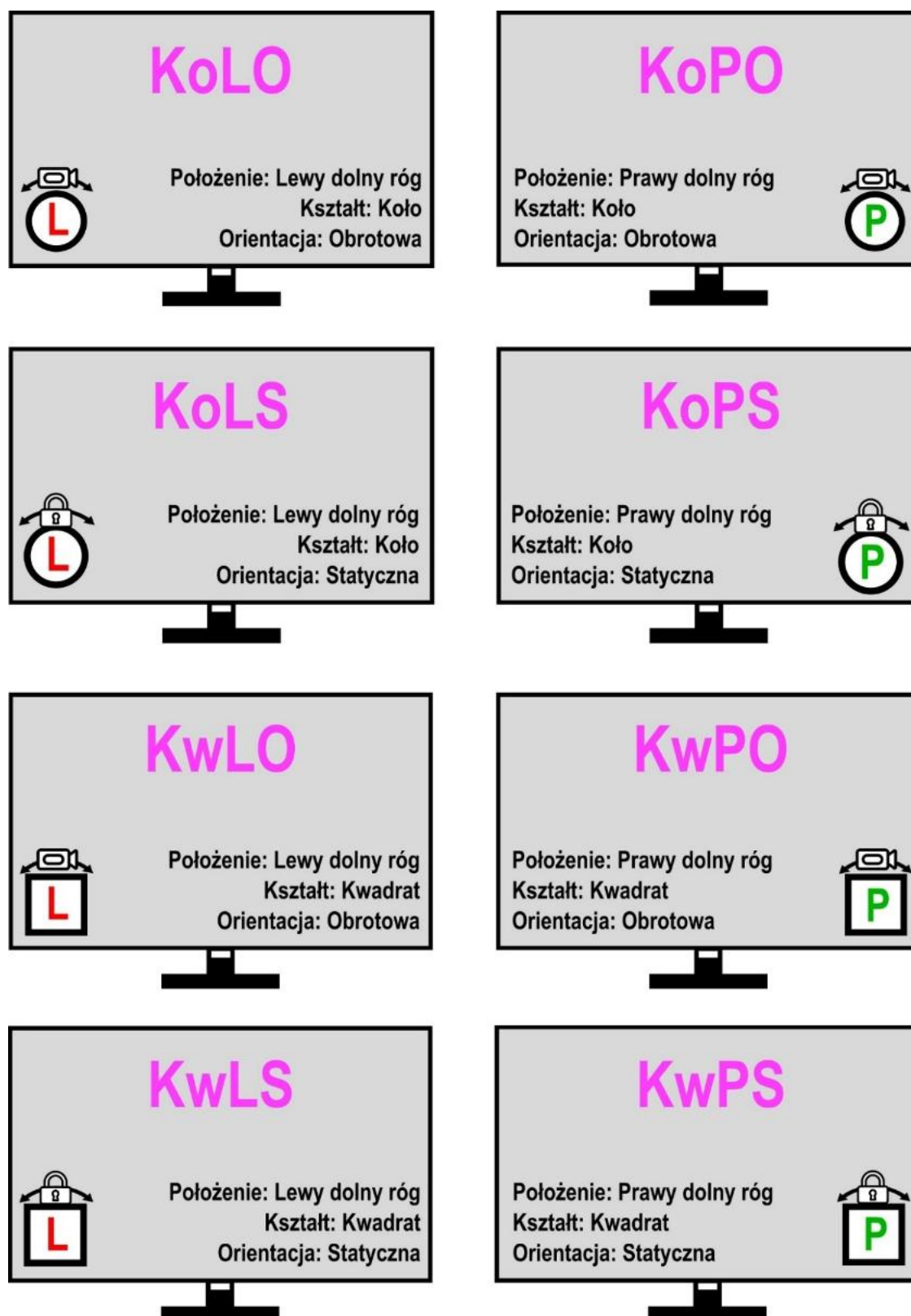
4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

SCHEMAT PROJEKTOWANIA MINI-MAPY 2D I WIRTUALNEJ PRZESTRZENI TOPOGRAFICZNEJ 3D DLA FRAGMENTU PRZESTRZENI MIEJSKIEJ NA PODSTAWIE BDOT10K



Ryc. 2 Schemat równoległego projektowania mini-mapy 2D do wirtualnej przestrzeni 3D

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 3 Zestawienie 8 wariantów mini-map z uwzględnieniem wszystkich cech rozpatrywanych w rozprawie doktorskiej (KoLO – koło lewe obrotowe, KoLS – koło lewe statyczne, KoPO – koło prawe obrotowe, KoPS – koło prawe statyczne, KwLO – kwadrat lewy obrotowy, KwLS – kwadrat lewy statyczny, KwPO – kwadrat prawy obrotowy, KwPS – kwadrat prawy statyczny)

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

Pierwszym aspektem jest kształt mini-mapy. Podczas tworzenia komponentów interfejsu, projektanci aplikacji topograficznych oraz gier komputerowych, dostosowują ich formę do ogólnej stylistyki, zwłaszcza do szaty graficznej (Johnson i Wiles, 2003). W założeniach rozprawy doktorskiej przyjęto dwa warianty kształtu: koło i kwadrat. W badaniach nad popularnością mini-mapy w grach wideo widać wyraźną dominację kształtu w formie koła nad wszystkimi innymi wariantami (Zagata i Medyńska, 2023). Natomiast w kartografii ze względu na zasady kartograficzne tworzenia map i stosowane odwzorowania geograficzne najczęściej stosowany jest kształt kwadratu (Snyder, 1987).

Kolejnym istotnym atrybutem jest położenie mini-mapy jako elementu interfejsu na ekranie. Pozycjonowanie kluczowych elementów nawigacyjnych skraca czas reakcji użytkownika i ogranicza liczbę niepotrzebnych błędów. W rozprawie doktorskiej przyjęto dwa warianty położenia: lewy dolny róg ekranu oraz prawy dolny róg ekranu. W interdyscyplinarnym podejściu projektowania kartograficznego, tradycyjne zasady wskazują na lokowanie map lokalizacyjnych poniżej głównej treści kartograficznej (Peterson, 2020). Również deweloperzy tworzący gry wideo projektują interfejs z tendencją umieszczania mini-mapy w dolnej części ekranu (Zagata i Medyńska, 2023). W kulturze zachodniej dominuje umieszczanie komponentów w lewej części ekranu, co wynika z przyzwyczajenia związanego z kierunkiem czytania (Miraz i in., 2016). Natomiast w kulturach wschodnich częściej stosuje się położenie w prawym obszarze ekranu (Callahan, 2006).

Ostatnią projektowaną cechą jest orientacja mini-mapy, czyli sposób, w jaki mapa zmienia swoje położenie w zależności od ruchu kamery użytkownika obserwującego wirtualną przestrzeń topograficzną. Jest to funkcja analogiczna do klasycznego kompasu, co dodatkowo akcentuje jej nawigacyjny charakter (Hayatpur i in., 2020). W rozprawie doktorskiej przyjęto dwa założenia orientacji: widok z kamery (mini-mapa obraca się zgodnie z kierunkiem kamery użytkownika) oraz widok statyczny (mapa skierowana na północ pozostaje nieruchoma i nie ulega żadnym rotacjom). Obydwa rodzaje wykorzystywane są w wielu mobilnych aplikacjach bądź w grach wideo, czy to dla celów przeglądowych, bądź nawigacyjnych (Gartner i in., 2007). Właściwie dobrany sposób orientowania mini-mapy ułatwia użytkownikowi zachowanie poprawnej percepcji topograficznej w środowisku cyfrowym, a tym samym wpływa na wygodę interakcji oraz płynność (Okada i in., 2019).

4.1.3. Metody kartograficznej prezentacji wirtualnej przestrzeni topograficznej

Na etapie koncepcyjnym badań nad efektywnością nawigacyjną mini-mapy kluczowe znaczenie miało określenie metod kartograficznej reprezentacji, które umożliwią stworzenie wirtualnej przestrzeni topograficznej spełniającej jednocześnie wymagania poprawności kartograficznej, funkcjonalności nawigacyjnej oraz kontrolowalności metodologicznej. Wirtualna przestrzeń topograficzna została od początku potraktowana jako forma kartograficznego modelu przestrzeni geograficznej, podlegającego zasadom selekcji treści, generalizacji, hierarchizacji oraz symbolizacji, znanym z klasycznych opracowań kartograficznych.

Podstawowym elementem przyjętej koncepcji reprezentacyjnej była selekcja treści topograficznej, rozumiana jako wybór obiektów i klas obiektów istotnych z punktu widzenia orientacji przestrzennej i realizacji zadań nawigacyjnych. W kartografii selekcja stanowi jeden z mechanizmów przekształcania rzeczywistości w jej mapowy obraz, a w kontekście środowisk wirtualnych jej znaczenie ulega dalszemu wzmocnieniu ze względu na ograniczenia percepcyjne użytkownika oraz konieczność utrzymania czytelnej struktury przestrzeni (Gökgöz i in., 2025). Na etapie koncepcyjnym założono, że wirtualna przestrzeń topograficzna powinna zawierać przede wszystkim elementy o wysokim potencjale orientacyjnym, takie jak sieć komunikacyjna, zabudowa oraz wybrane obiekty charakterystyczne, natomiast obiekty o marginalnym znaczeniu nawigacyjnym mogą zostać pominięte lub ograniczone. Selekcja ta miała na celu zachowanie logicznej struktury przestrzeni przy jednoczesnym ograniczeniu nadmiaru informacji, który mógłby utrudniać procesy orientacji i podejmowania decyzji nawigacyjnych.

Szczególne znaczenie na etapie koncepcyjnym miała również symbolizacja kartograficzna, która nie była projektowana jako odrębny system znaków, lecz została oparta na istniejących konwencjach map topograficznych oraz wizualizacjach kartograficznych tworzonych na podstawie bazy danych BDOT10k. Przyjęto założenie, że wykorzystanie ugruntowanych rozwiązań symbolizacyjnych pozwala zachować spójność semantyczną reprezentacji przestrzeni oraz ułatwia użytkownikom interpretację treści kartograficznej, odwołując się do znanych i utrwalonych schematów poznawczych. W konsekwencji symbole kartograficzne, kolorystyka oraz formy geometryczne obiektów zostały zaczerpnięte z klasycznych opracowań topograficznych i ich cyfrowych odpowiedników, a następnie konsekwentnie zastosowane zarówno w mini-mapie 2D, jak i w wizualizacji trójwymiarowej. Takie podejście umożliwiło

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

zachowanie jednoznaczności przekazu kartograficznego oraz ciągłości informacyjnej pomiędzy obiema formami reprezentacji przestrzeni.

Istotnym elementem etapu koncepcyjnego było rozróżnienie oraz jednoczesne powiązanie dwóch komplementarnych form kartograficznej reprezentacji przestrzeni: klasycznej reprezentacji dwuwymiarowej oraz reprezentacji trójwymiarowej funkcjonującej w środowisku wirtualnym. Kartografia 2D została potraktowana jako punkt odniesienia dla organizacji treści topograficznej, symbolizacji oraz relacji przestrzennych, wynikających z ugruntowanych zasad projektowania map topograficznych. Mini-mapa stanowiła w tym ujęciu klasyczny produkt kartograficzny, w którym obowiązują reguły skali, generalizacji i hierarchizacji treści, natomiast reprezentacja trójwymiarowa została zaprojektowana jako rozwinięcie tych samych założeń w przestrzeni wirtualnej. Przyjęto, że reprezentacja 3D nie może funkcjonować w oderwaniu od kartograficznego modelu 2D, lecz musi pozostawać z nim semantycznie i strukturalnie spójna, tak aby użytkownik mógł interpretować oba widoki jako różne formy prezentacji tej samej przestrzeni topograficznej. Duże znaczenie miała adaptacja danych mapowych i atrybutowych do środowiska trójwymiarowego.

Na etapie koncepcyjnym założono, że dane wektorowe pozyskane z bazy BDOT10k, opisujące geometrię oraz cechy obiektów topograficznych, muszą zostać przetworzone w taki sposób, aby zachować ich kartograficzny sens po przeniesieniu do przestrzeni 3D. Adaptacja ta obejmowała nie tylko transformację geometrii obiektów płaskich w formy przestrzenne, lecz również świadome wykorzystanie danych atrybutowych do budowy cech trójwymiarowych, takich jak wysokość, skala czy wizualna dominanta obiektów w przestrzeni. Przyjęto, że atrybuty obiektów topograficznych nie pełnią wyłącznie funkcji opisowej, lecz stanowią integralny element kartograficznej reprezentacji, umożliwiający hierarchizację i różnicowanie obiektów w środowisku wirtualnym. W efekcie proces przekształcania danych mapowych w przestrzeń trójwymiarową został potraktowany jako kontynuacja kartograficznego modelowania przestrzeni, a nie jako odrębny proces technologiczny.

4.1.4. Metody pozyskiwania danych o efektywności nawigacyjnej

Analiza efektywności nawigacyjnej w wirtualnej przestrzeni topograficznej wymaga zastosowania metod badawczych umożliwiających uchwycenie zarówno mierzalnych rezultatów poruszania się użytkownika w przestrzeni, jak i sposobu wykorzystania informacji kartograficznej w procesie orientacji. Efektywność nawigacyjna nie jest cechą

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

jednowymiarową, lecz wynika z relacji pomiędzy strukturą przestrzeni, formą jej reprezentacji oraz poruszaniem się użytkownika w trakcie realizacji zadań nawigacyjnych. Z tego względu przyjęto zestaw metod badawczych pozwalających na wieloaspektowe ujęcie badanego zjawiska, przy jednoczesnym zachowaniu kontroli nad warunkami eksperymentu.

Jedną z zastosowanych metod była metoda ankietowa, wykorzystana do zebrania podstawowych informacji charakteryzujących uczestników badania. Ankieta miała postać krótkiej metryczki i obejmowała dane dotyczące wieku oraz płci badanych (Wielebski, 2015). Zastosowanie tej metody umożliwiło ogólny opis próby badawczej oraz zapewniło spójność dokumentacji procesu badawczego, bez ingerencji w przebieg właściwych zadań nawigacyjnych ani w zachowania użytkowników w trakcie eksploracji wirtualnej przestrzeni topograficznej (Wielebski i Medyńska-Gulij, 2019).

Zasadniczą metodą badawczą zastosowaną w niniejszej pracy była ilościowa analiza zachowań nawigacyjnych w ujęciu wydajnościowym, oparta na realizacji zadań nawigacyjnych w kontrolowanym środowisku wirtualnym. Metoda ta umożliwia obiektywne badanie efektywności nawigacyjnej poprzez obserwację przebiegu eksploracji przestrzeni oraz sposobu osiągania wyznaczonych celów (Garlandini i Fabrikant, 2009). Przyjęto, że efektywność nawigacyjna może być opisana za pomocą mierzalnych charakterystyk procesu nawigacji, w szczególności czasu realizacji zadań oraz długości przebytej trasy, które stanowią podstawowe i powszechnie stosowane wskaźniki sprawności poruszania się w przestrzeni (Medyńska-Gulij i in., 2022). Charakterystyki te pozwalają na jednoznaczną, ilościową analizę skuteczności i wydajności nawigacji, niezależną od subiektywnych opinii użytkowników, a jednocześnie umożliwiają porównywanie zachowań nawigacyjnych pomiędzy różnymi wariantami mini-mapy (Korycka-Skorupa i Gołębiowska, 2021). Zastosowana metoda badawcza stanowiła tym samym podstawę analiz statystycznych oraz porównań efektywności nawigacyjnej w zaprojektowanej wirtualnej przestrzeni topograficznej.

Uzupełnieniem była metoda eye-trackingowa, umożliwiająca rejestrację i analizę zachowań percepcyjnych użytkowników w trakcie eksploracji wirtualnej przestrzeni topograficznej. Metoda ta pozwala na pozyskanie danych dotyczących rozkładu uwagi wzrokowej oraz o miejscach i czasie zatrzymania wzroku. Zastosowanie metody eye-trackingowej umożliwia pogłębioną interpretację wyników uzyskanych metodami wydajnościowymi, pozwalając na analizę relacji pomiędzy percepcją informacji kartograficznej a podejmowanymi decyzjami nawigacyjnymi (Cybulski, 2022; Qu i in., 2017).

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

Integralnym elementem przyjętej metodologii było zastosowanie metod statystycznych jako narzędzi formalnej analizy danych pozyskanych w toku eksperymentu. Metody statystyczne umożliwiają obiektywną analizę istotności zaobserwowanych różnic pomiędzy wariantami mini-mapy oraz identyfikację zależności pomiędzy badanymi zmiennymi (Zagata i in., 2024). Ich zastosowanie stanowiło warunek rzetelnej interpretacji danych ilościowych oraz zapewniało porównywalność wyników uzyskanych w ramach poszczególnych wariantów badawczych.

Na etapie koncepcyjnym badań nad efektywnością nawigacyjną w wirtualnej przestrzeni topograficznej przyjęto założenie, że same miary liczbowe nie będą wystarczające do pełnej interpretacji strategii użytkowników. Z tego względu założono wykorzystanie kartograficznych metod prezentacji wyników, które umożliwią odniesienie pozyskanych danych do struktury przestrzeni topograficznej. Przyjęto, że dane rejestrowane w trakcie realizacji zadań nawigacyjnych będą miały charakter przestrzenny i będą wymagały opracowania z wykorzystaniem metod kartograficznych. W tym kontekście zastosowano kartodiagram wstępowy jako jedną z podstawowych form prezentacji danych dotyczących wyboru tras przez użytkowników (Dębowska i Korycka-Skorupa, 2010). Metoda ta została wybrana ze względu na możliwość jednoczesnego przedstawienia układu sieci drogowej oraz intensywności jej wykorzystania w trakcie eksploracji przestrzeni. Równolegle przewidziano możliwość zastosowania kartograficznej prezentacji sekwencyjnej, polegającej na odwzorowaniu najczęściej występujących schematów przejść pomiędzy kolejnymi odcinkami przestrzeni.

4.1.5. Środowisko technologiczne

W tym podrozdziale przedstawione zostaną programy komputerowe, język programowania oraz sprzęt badawczy służący przygotowaniu, obróbce i przetworzeniu danych na każdym etapie rozprawy doktorskiej.

Początkiem przygotowania aplikacji do badań było opracowanie Bazy Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k) w programie geoinformacyjnym QGIS, w celu stworzenia wirtualnej przestrzeni topograficznej oraz podkładu tła mini-mapy. Zbiory danych były pobierane z Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego. Przy tworzeniu sygnatur oraz symboli znajdujących się w wizualizacjach mapy, wspomagano się programem Inkscape do tworzenia grafiki wektorowej. Następnie eksportowano wszystkie elementy wirtualnej przestrzeni topograficznej do formatu danych umożliwiającego przetwarzanie ich w silniku do

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

tworzenia trójwymiarowych wizualizacji Unity. W celu bezstratnego eksportu informacji o danych przestrzennych wspomagano się przekonwertowaniem danych trójwymiarowych w oprogramowaniu Blender do formatów danych, które obsługiwał silnik do wizualizacji. W trakcie opracowywania aplikacji tworzone skrypty programistyczne w języku programowania C# (C Sharp) w programie Microsoft Visual Studio pozwalające na działanie aplikacji oraz eksport danych z badania.

Opracowanie danych okulograficznych zostało przeprowadzone w oprogramowaniu Gazepoint Analysis oraz Gazepoint Control. Pozwalało na śledzenie punktu skupienia wzroku oraz ruchu gałki ocznej przy użyciu urządzenia zwanego eyetrackerem. Badanie wykonano na monitorze NEC 27" EA271F, a do rejestracji ruchu gałki ocznej posłużono się eyetrackerem Gazepoint GP3 HD.

Przygotowanie danych ankietowych, kartograficznych oraz statystycznych odbywało się w arkuszu kalkulacyjnym Microsoft Excel. Dane ankietowe automatycznie po skończonym badaniu każdego uczestnika zapisywały się w zbiorczym pliku Excela natomiast obróbka danych wymiernych była ręcznie przygotowywana z danych zbieranych na końcu każdej rozgrywki. Następnie przystąpiono do analizy danych w statystycznym narzędziu obliczeniowym PQStat (v.1.8.6) w celu znalezienia różnic przy użyciu testów statystycznych. Wizualizacje kartograficzne były tworzone w środowisku graficznym Inkscape, w celu wizualizacji przepływu ruchu w przestrzeni topograficznej.

4.1.6. Uczestnicy badania

Do udziału w badaniu zaproszono jednorodną grupę respondentów o zbliżonym poziomie doświadczenia w korzystaniu z narzędzi mapowych oraz należących do podobnej kategorii wiekowej. Założono, że każdy z ośmiu wariantów mini-mapy będzie testowany przez 28 użytkowników, co odpowiada rekomendacjom często spotykanym w literaturze kartograficznej. Większość eksperymentów percepcyjnych przeprowadzana jest z udziałem do 20 uczestników, o ile możliwe jest zapewnienie jednorodności grupy badawczej (Ware, 2004). Natomiast w przypadku badań, w których istnieje ryzyko wystąpienia efektu uczenia się, sugerowane jest zwiększenie liczebności próby, co potwierdzają także inne prace z zakresu badań nad efektywnością produktów kartograficznych (Garlandini i Fabrikant, 2009; Cybulski i Wielebski, 2019; Wielebski i Medyńska-Gulij, 2019).

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

Najbardziej adekwatną grupą odbiorców badań dotyczących narzędzi nawigacyjnych w środowisku topograficznym są użytkownicy posługujący się mapami w codziennym życiu (McCullough i Collins, 2019). Ze względu na fakt, że mini-mapy wykorzystywane są przede wszystkim w aplikacjach nawigacyjnych i serwisach mapowych dostępnych w przestrzeni internetowej, ich naturalnym odbiorcą jest aktywny użytkownik cyfrowy. Tego typu użytkownik nie tylko sprawnie porusza się w środowisku online, lecz także posiada podstawowe kompetencje kartograficzne wyniesione z edukacji szkolnej. Badania społeczne wskazują, że najbardziej aktywnymi użytkownikami technologii mobilnych i Internetu są osoby młode, najczęściej studenci, którzy spędzają znaczną część dnia, korzystając z usług cyfrowych (Brychtová i Çöltekin, 2014). Z tego powodu przyjęto, że najbardziej adekwatną grupę do testowania narzędzi nawigacyjnych stanowią studenci Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, reprezentujący różne kierunki i roczniki, a jednocześnie posiadający jednorodne kompetencje w zakresie korzystania z map interaktywnych. Łącznie w eksperymencie wzięło udział 224 respondentów, przypisanych do ośmiu równolicznych grup. Taki podział umożliwił przeprowadzenie porównania wszystkich wariantów mini-mapy w porównywalnych warunkach, przy jednoczesnym zachowaniu jednorodności populacji badawczej.

4.1.7. Metody analizy i wizualizacji wyników

Na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej dla analizy statystycznej zdecydowano się wykorzystać test dla danych nieparametrycznych ANOVA Kruskal-Wallisa gdy występowało więcej niż dwie grupy zmienne oraz test dla danych nieparametrycznych U Manna-Whitneya, gdy występowały tylko dwie grupy zmiennych. Testy te miały na celu zweryfikować korelację między grupami aby wykazać istotność statystyczną. Dla ANOVA wykonano również analizę post-hoc za pomocą korekty Benjamina-Hochberga, aby wykazać szczegółowe różnice w zadanych zmiennych. Dla U Manna-Whitneya brano pod uwagę również współczynnik d Cohena mówiący o wielkości efektu na różnych poziomach. Parametry czasowe oraz odległościowe uzyskane na podstawie zebranych danych z aplikacji wraz z techniką eye-trackingową zapewniają obiektywną miarę analizy efektywności nawigacyjnej poruszania się po wirtualnej przestrzeni topograficznej.

Opracowanie związane z danymi kartograficznymi miało na celu pokazanie relacji przestrzennych między ważnymi obiektami zadaniowymi z wykorzystaniem kartodiagramu wstęgowego (Żyszkowska i Spallek, 2012). Wykorzystanie takiej metody umożliwia pokazanie

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

cech ilościowych i jakościowych (również zjawiska strukturalne), operując różnymi zmiennymi wizualnymi takimi jak grubość, kolor czy przypisana klasa (Zych, 2014). Kartodiagram miał na celu ukazanie przepływu ruchu wszystkich użytkowników 8 równolicznych grup na wszystkich trasach wyszczególnionych w przestrzeni topograficznej.

Analiza eye-trackingowa natomiast została przedstawiona w formie map ciepła, czyli przedstawienia danych geoprzestrzennych na obrazie z użyciem różnych kolorów reprezentujących obszary o różnym zagęszczeniu punktów, w tym przypadku gęstości fiksacji. Mapa ciepła z wykorzystaniem fiksacji to grafika przedstawiająca ogólny obraz lokalizacji wzroku na ekranie i czasu trwania fiksacji wszystkich uczestników badania z obrazem. Mapy ciepła czerpią inspiracje z tradycji kartograficznych takich jak izoliny i mapy powierzchniowe (MacEachren i DiBiase, 1991). Przy pomocy kodowania językiem Python ustalono kolorystykę obszarów obrazu. Kolor czerwony oznaczał obszary, w których uczestnicy skupiali wzrok przez dłuższy czas oraz koloru niebieskiego, na których ankietowani skupiali wzrok przez krótszy czas. Obszary, które nie otrzymały żadnych fiksacji nie były symbolizowane.

4.2. Etap opracowania aplikacji do nawigacji w wirtualnej przestrzeni topograficznej

4.2.1 Wybór reprezentatywnej przestrzeni topograficznej

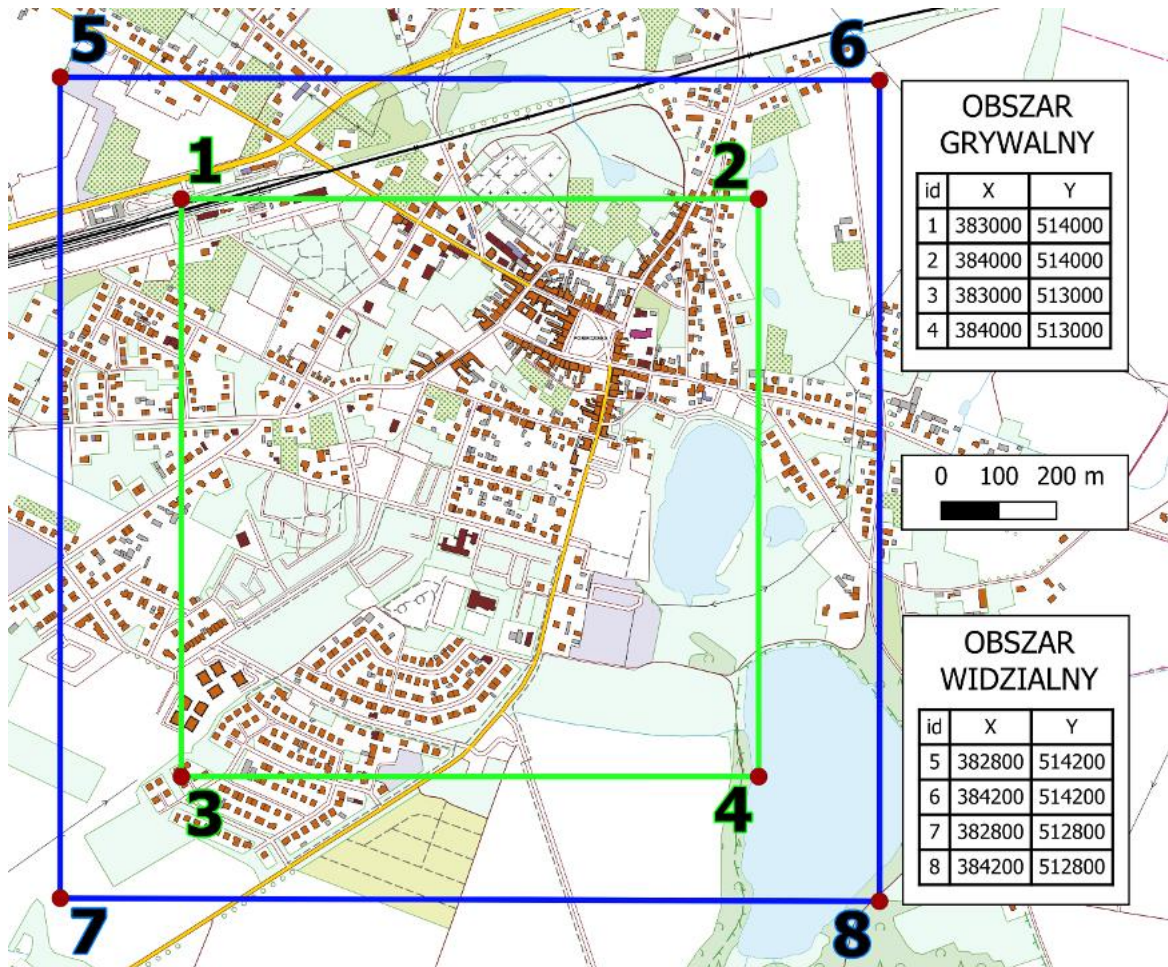
Proces opracowania aplikacji do nawigacji w wirtualnej przestrzeni przebiegał zgodnie ze schematem równoległego projektowania mini-mapy 2D do wirtualnej przestrzeni 3D zamieszczonym na rycinie 2.

Pierwszym krokiem opracowania aplikacji do nawigacji w wirtualnej przestrzeni topograficznej był wybór bazy wektorowej z lokalizacją przestrzenną różnych obiektów topograficznych. BDOT10k jako państwowa baza danych topograficznych opracowana w skali 1:10 000, oferuje pełen zakres obiektów istotnych dla odwzorowania środowiska zurbanizowanego, począwszy od elementów infrastruktury technicznej, poprzez budynki i sieci komunikacyjne, aż po szczegółowe klasy pokrycia terenu. To kompleksowe spektrum treści gwarantuje, że modelowana przestrzeń zachowa zarówno wierność rzeczywistości, jak i strukturalną logikę charakterystyczną dla układów miejskich. Zbiory danych były pobierane z Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego. Wybrano obszar o godle arkusza N-33-131-D-a-1 na którym przedstawiona jest wizualizacja kartograficzna BDOT10k w skali 1:10 000 miasta Pobiedziska. Wybór obszaru badań kierunkowano na przestrzeń miejską małego miasta ze zróżnicowaną przestrzenią topograficzną (występuje przestrzeń wodna, mało schematyczny układ dróg, zabudowa oraz liczne pokrycie lasami i terenami zielonymi) w województwie wielkopolskim. Następnie w programie geoinformacyjnym QGIS wykorzystano dwie wtyczki dedykowane do pobierania i wizualizacji BDOT10k. Za pomocą wtyczki BDOT10k pobrano dane dla powiatu poznańskiego, a następnie przy pomocy wtyczki BDOT10k_GML_SHP zaimportowano dane do programu QGIS, w którym warstwy otrzymują hierarchizację oraz symbolizację podobną do mapy topograficznej w skali 1:10 000.

Kolejnym krokiem był wybór skali widoczności mapy oraz szczegółowy wybór obszaru badań dla stworzenia wirtualnej przestrzeni topograficznej. Jako że w rozprawie doktorskiej wykorzystywana jest baza danych obiektów topograficznych wykorzystywana do tworzenia wizualizacji kartograficznych w skali 1:10 000, taka skala również została wykorzystana przy tworzeniu symbolizacji dla mini-mapy. Szczegółowy zakres przestrzenny aplikacji został wydzielony na dwa obszary: grywalny i widzialny. Obszar grywalny (przebieg, po której użytkownik może się poruszać w aplikacji) został wydzielony z jednego oczka siatki topograficznej (kilometrowej) o długości 1 kilometra na 1 kilometr. Ze względu na specyfikę

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

środowisk wirtualnych, konieczne było również wyznaczenie bufora przestrzeni (obszaru widzialnego). Jest to strefa otaczająca właściwy teren badania, mająca na celu wyeliminowanie efektu pustki na krawędziach renderowanej sceny, co mogłoby negatywnie wpłynąć na immersję użytkownika i zaburzyć procesy kognitywne podczas nawigacji. Ten obszar widzialny został dostosowany do skalowalnej widoczności mini-mapy w aplikacji, tworząc przestrzeń w kwadracie 1,4 kilometra na 1,4 kilometra (Ryc. 4).



Ryc. 4 Współrzędne punktów granicznych obszaru grywalnego oraz obszaru widzialnego na wizualizacji BDOT10k miasta Pobiedziska

4.2.2 Adaptacja reprezentacji topograficznej 2D i 3D

Po zakończeniu procesu selekcji danych źródłowych następuje ich adaptacja, której celem jest dostosowanie danych wektorowych do wymogów dwóch równoległych reprezentacji topograficznych: kartograficznego (mini-mapą 2D) oraz wirtualnego (przestrzeń topograficzna 3D). W pierwszej kolejności przeprowadza się proces selekcji warstw, który polega nie tylko

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

na ich wyborze, ale również na określeniu ich roli w hipotetycznym środowisku użytkowym. Oznacza to, że wiele obiektów obecnych w BDOT10k musi zostać odrzuconych, ponieważ nie pełnią funkcji ani informacyjnej, ani nawigacyjnej, ani narracyjnej. Pozostawienie ich mogłoby doprowadzić do przeładowania mapy treścią lub nadmiernego obciążenia graficznego sceny. Dzięki tej selekcji pozostawiono jedynie warstwy, które zawierały istotne informacje przestrzenne dostosowane do przestrzennych zadań topograficznych.

Następnie przeprowadzono operacje geometryczne, które zredukowały złożoność danych do postaci zgodnej z zasadami topologii GIS (Ryc. 5). Na BDOT10k zrealizowano procesy takie jak: uproszczenie danych, wygładzanie linii i powierzchni, agregacja poligonów, scalanie warstw, przesunięcie obiektów, wybór geometrii, przewiększenie powierzchni, redukcja, dodanie nowych elementów czy zmiana klasyfikacji i symbolizacji. Dzięki tym procesom pozostawiono w przestrzeni kilka grup warstw wektorowych z nazewnictwem warstw z BDOT10k które odzwierciedlały budynkom (BUBD_A, BUIB_A), drogom (SKJZ_L, SKRP_L, SKTR_L), innymi terenami topograficznymi (KUSC_A, OISZ_A), wodom i ciekom (PTWP_A, SWRS_L, OIMK_A) oraz terenom roślinnym (PTUT_A, PTRK_A, PTLZ_A, PTTR_A, PTZB_A).

Kluczową fazą dla procesu tworzenia wirtualnej przestrzeni topograficznej były fikcyjne zmiany obiektów przestrzennych, które odnosiły się do celowego uproszczenia, przekształcenia i reinterpretacji danych w taki sposób, aby stały się one użyteczne w kontekście wirtualnej eksploracji oraz czytelnej prezentacji kartograficznej (Ryc. 5). Świadome zmiany i adaptacje terenu były wymagane, mając na celu przekształcenie pierwotnej przestrzeni topograficznej w czytelną, uproszczoną przestrzeń użytkową w wirtualnej rozgrywce. Zastosowano jakościową i ilościową generalizację kartograficzną (Chrobak, 2007). Operacje geometryczne opierające się na fikcyjnych zmianach przedstawiały modyfikacje np.: scalenia linii kolejowych, przedłużenia cieku wodnego między zbiorniki i w mieście, usunięcia małych cieków wodnych, zmiany szerokości cieku, usunięcia dróg prowadzących do ślepych zaułków, dodanie nowych dróg do urozmaicenia siatki drogowej, ujednolicenie szerokości i kolorystyki dróg, uzupełnienie liczby kondygnacji budynków, uproszczenie geometrii budynków, usunięcie obrysów dla sygnatur powierzchniowych, stworzenie nowego terenu roślinnego (parku), dodanie nowych sygnatur punktowych (przystanki autobusowe, kominy, młyny wiatrowe, pomniki przyrody, transformatory, stacje paliw). Adaptacja ta obejmowała również symbolizację obiektów w odniesieniu do mini-mapy. Wszystkie elementy mapy muszą być

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

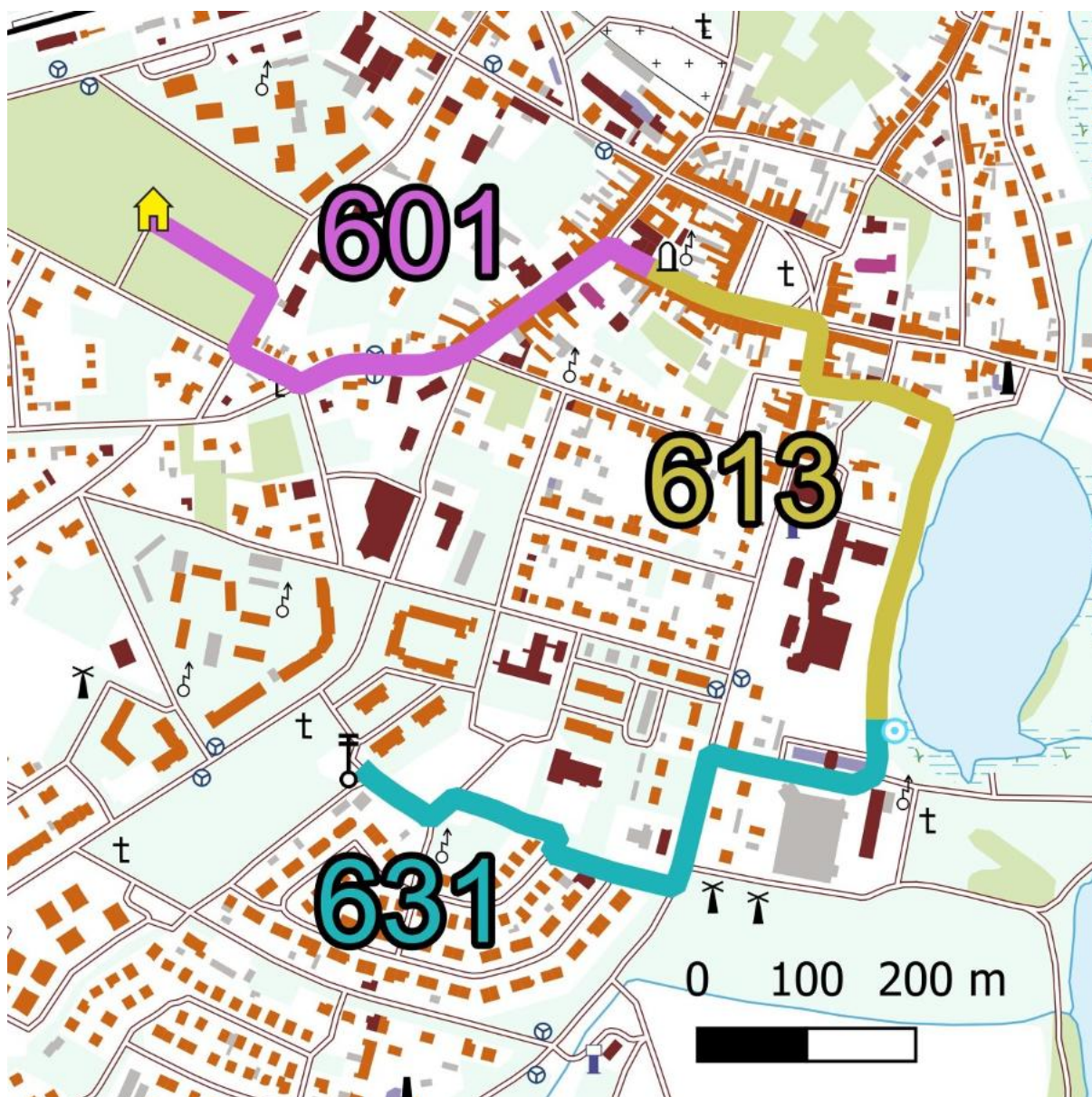
zgodne z konwencjami kartograficznymi, a jednocześnie muszą zachować ogólną estetykę kompozycji pod nawigację w wirtualnej przestrzeni.

Dalej nastąpiło określenie punktu startowego, lokalizacji kluczowych tras i skrzyżowań oraz wyboru obiektów topograficznych pełniących funkcję znaczników orientacyjnych. Miejsce rozpoczęcia aplikacji usytuowano na nowo stworzonym parku (północno-zachodnia część miasta) i oznaczono go żółtym znacznikiem domu. Na podstawie wcześniejszej zmiany z punktem startowym stworzono w programie graficznym Inkscape trzy obiekty topograficzne będące wyznacznikami trzech różnych zadań nawigacyjnych zgodnie ze standardami technicznymi tworzenia map topograficznych (pomnik OT_OIOR_P 0010_331, studnia głębinowa OT_OIOR_P 0010_613 oraz wieża telekomunikacyjna OT_BUWT_P 0010_426). Te obiekty topograficzne zostały umieszczone w przestrzeni w trzech lokalizacjach, które zostały wybrane na podstawie dwóch zmiennych: długości trasy pomiędzy poszczególnymi obiektami topograficznymi oraz kierunku przemieszczania się (Ryc. 6). Obiekt pomnika umieszczono w kierunku wschodnim od punktu startowego w centrum miasta Pobiedziska w odległości 601 metrów od siebie. Studnię zlokalizowano w kierunku południowo wschodnim od pomnika, niedaleko zbiornika wodnego w odstępnie 613 metrów względem siebie. Ostatni obiekt wieży usytuowano w kierunku zachodnim od studni, w otwartej przestrzeni parkowej w odległości 631 metrów między sobą.

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 5 Widok na mapę przestrzeni topograficznej przed zmianami (A) oraz po operacjach geometrycznych i fikcyjnych zmianach obiektów i przestrzeni topograficznej (B)



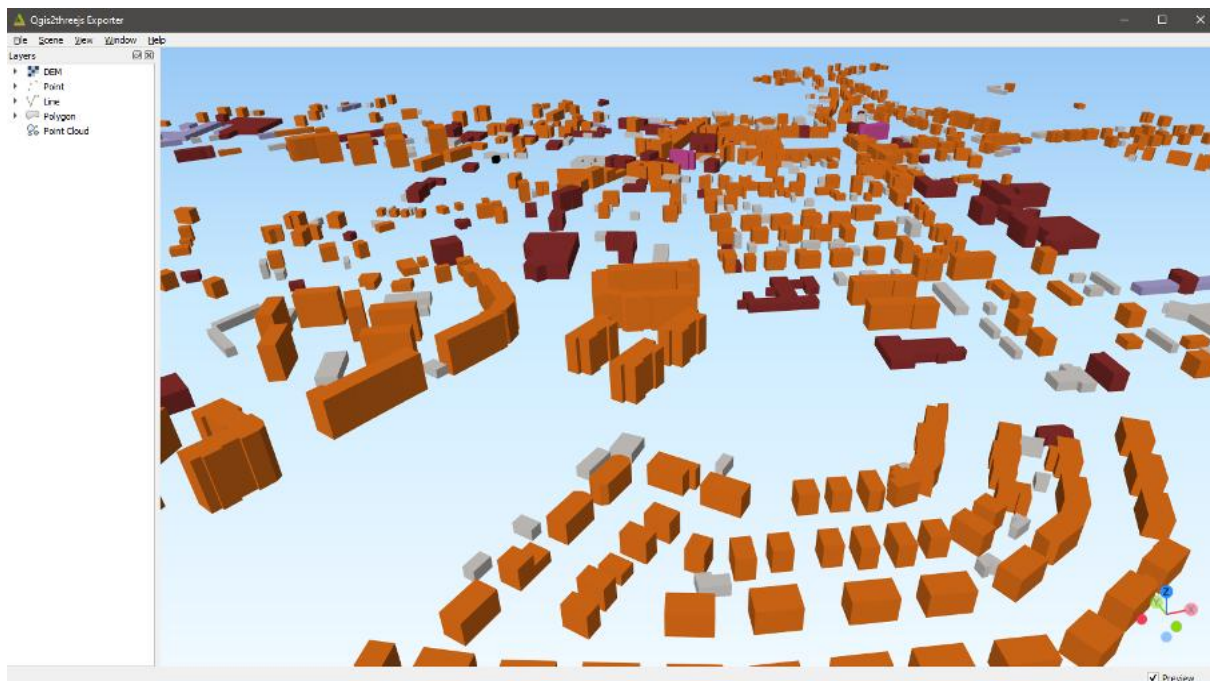
Ryc. 6 Widok na mapę grywalnej przestrzeni topograficznej z widocznymi zadaniowymi obiektami topograficznymi (pomnik, studnia, wieża) oraz najkrótszymi możliwymi długościami tras podawanych w metrach do przejścia między tymi obiektami

4.2.3. Projektowanie aplikacji desktopowej

Po zakończeniu ciągów operacyjnych związanych z przekształcaniem przestrzeni topograficznej oraz kartograficzną adaptacją zmiennych wizualnych obiektów przystąpiono do etapu eksportu i konwersji danych do formatów umożliwiających budowę aplikacji w środowisku silnika Unity. Podkład mini-mapy wykorzystywanej do nawigacji przygotowano z użyciem menedżera druku w programie QGIS, a następnie wyeksportowano w wysokiej rozdzielczości do formatu rastrowego PNG. Równoległe dane wektorowe poddano

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

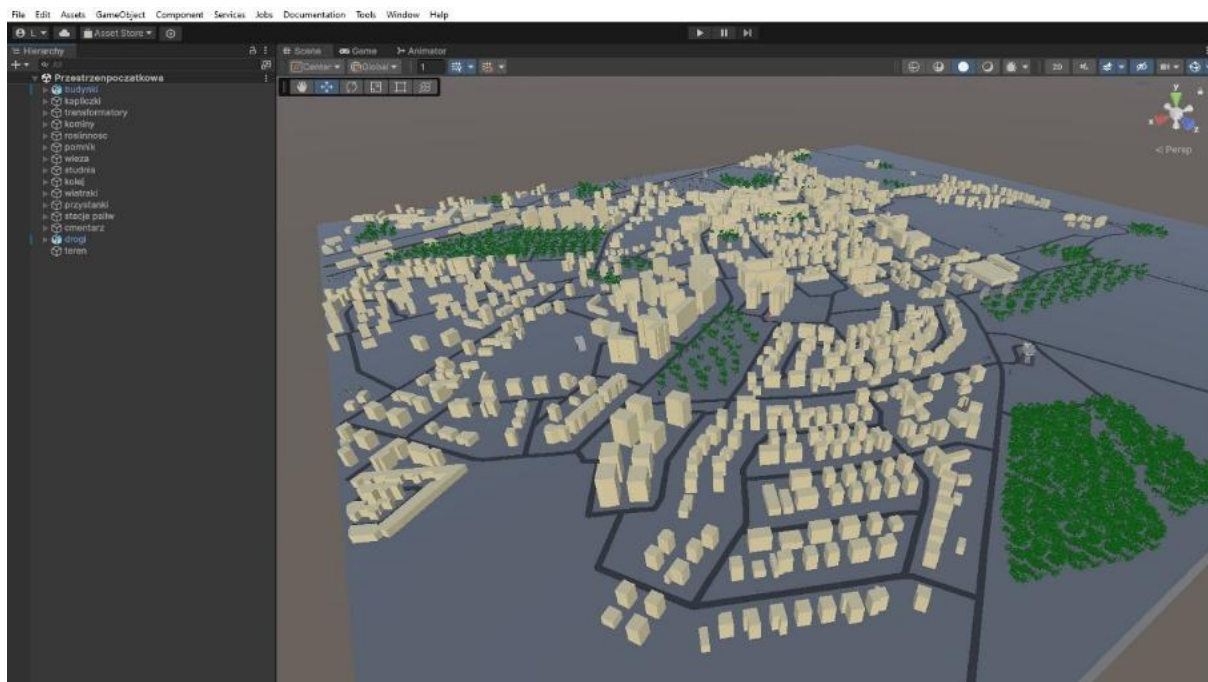
zaawansowanym operacjom geometrycznym, których celem było ich przekształcenie w obiekty przestrzenne możliwe do wykorzystania w środowisku trójwymiarowym. Kluczowe znaczenie na tym etapie miała wcześniejsza adaptacja danych atrybutowych, w szczególności informacji dotyczących liczby kondygnacji budynków oraz szerokości nawierzchni dróg. Z wykorzystaniem wtyczki Qgis2threejs, bazującej na bibliotece JavaScript, przeprowadzono wizualizację zabudowy i infrastruktury drogowej w postaci obiektów trójwymiarowych. Wszystkie drogi zostały przekształcone w poligony o jednolitej szerokości 6 metrów, co pozwoliło na zachowanie ich przestrzennego charakteru zgodnie z warunkami technicznymi budowy dróg gminnych. Budynki natomiast poddano operacji wyciągnięcia (*extrude*) w oparciu o liczbę kondygnacji zapisaną w tabeli atrybutowej, stosując sześciokrotne przewyższenie wysokości w celu wzmocnienia ich czytelności jako elementów wspierających orientację i nawigację w przestrzeni miejskiej (Ryc. 7). Tak przygotowane grupy obiektów zostały następnie przekształcone w wielościany i wyeksportowane do formatu glTF, z zachowaniem spójnego rozmieszczenia przestrzennego oraz atrybutów modelu trójwymiarowego. W celu zapewnienia pełnej kompatybilności z silnikiem Unity oraz poprawnego odwzorowania geometrii i relacji przestrzennych konieczna była dalsza konwersja danych do formatu FBX. Operację tę przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania Blender, które umożliwiło bezstratne przekształcenie modeli przy jednoczesnym zachowaniu ich struktury i parametrów przestrzennych.



Ryc. 7 Widok na okienko rozszerzenia Qgis2threejs na budynki z bazy danych obiektów topograficznych z 6-krotnym przewyższeniem

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

Finalny etap prac polegał na implementacji przygotowanych danych w środowisku silnika Unity, opracowaniu skryptów programistycznych w języku C# odpowiedzialnych za mechanikę interakcji oraz kontrolę przebiegu aplikacji, a także na przygotowaniu końcowych wersji aplikacji dla każdego z wariantów mini-mapy. Proces ten rozpoczęto od utworzenia nowego projektu oraz sceny trójwymiarowej, stanowiącej podstawowe środowisko integrujące wszystkie komponenty aplikacji (Ryc. 8). W ramach tej fazy skonfigurowano strukturę projektu, obejmującą widoki robocze, hierarchię obiektów sceny oraz system zarządzania zasobami i właściwościami obiektów, co umożliwiło dalszą implementację elementów przestrzennych, interfejsu użytkownika oraz mechanizmów badawczych.



Ryc. 8 Widok na początkową fazę projektu w silniku Unity z widocznymi elementami przestrzeni topograficznej

Następnym etapem prac było utworzenie spójnej przestrzeni wirtualnej oraz lokalizacyjne osadzenie obiektów topograficznych zgodnie z ich pierwotnymi współrzędnymi geograficznymi. Na tym etapie dokonano rekonstrukcji krajobrazu miasta Pobiedziska z wykorzystaniem funkcji *Terrain*, stanowiącej zestaw narzędzi umożliwiających generowanie i modyfikację realistycznych środowisk trójwymiarowych. Odwzorowano podstawową strukturę przestrzeni krajobrazowej, w tym rzeźbę terenu w rejonach zbiorników wodnych, a także przygotowano tekstury symulujące powierzchnię wody o charakterze falującym. Uzupełnieniem tego etapu było naniesienie roślinności trawiastej i drzewiastej oraz przypisanie odpowiednich tekstur dla powierzchni gleby i obszaru cementarnego, co pozwoliło na uzyskanie

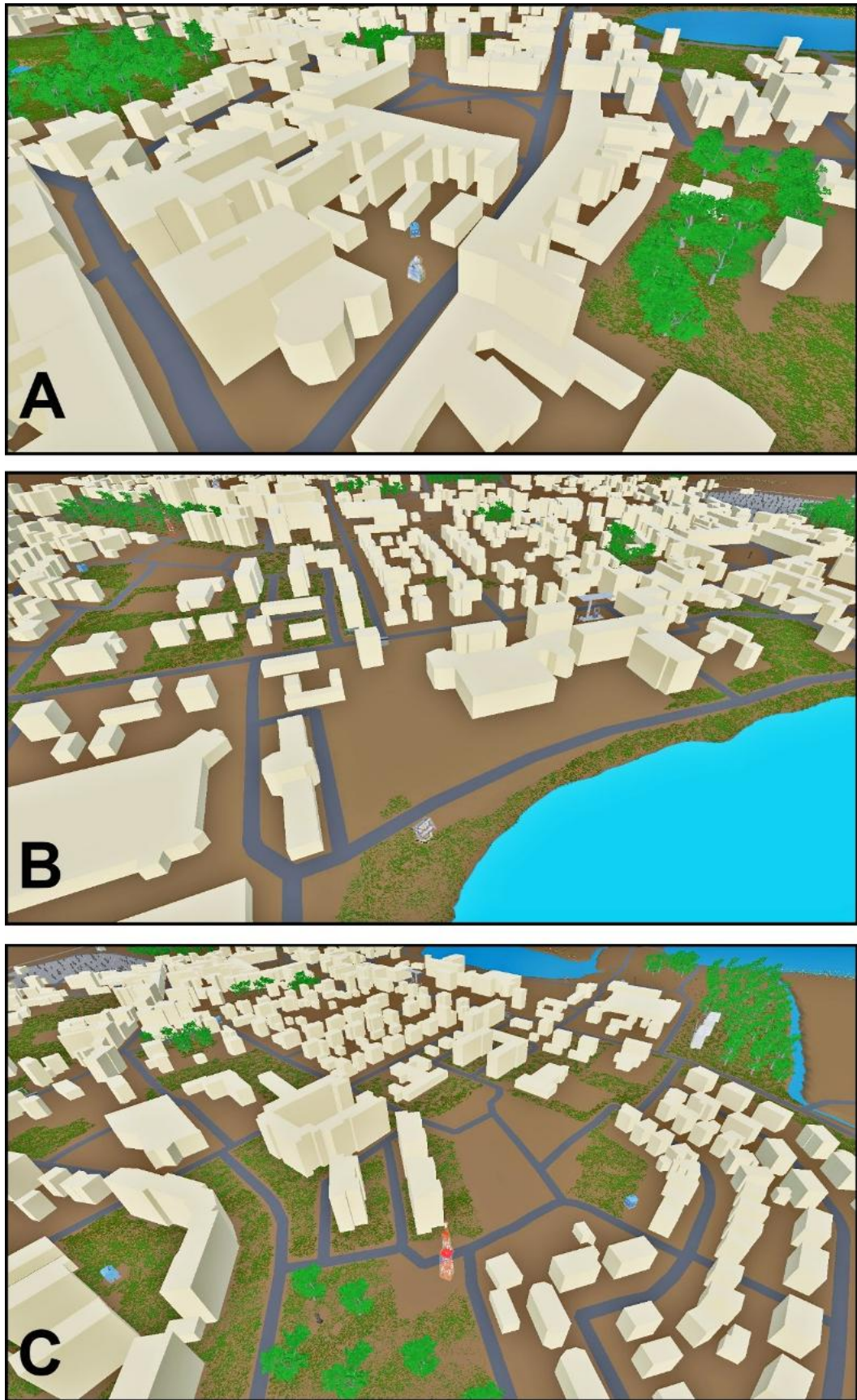
4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

wizualnej ciągłości krajobrazu. Po zakończeniu modelowania środowiska krajobrazowego przeprowadzono import wcześniej przygotowanych modeli trójwymiarowych infrastruktury miejskiej, obejmujących 276 modeli dróg oraz 1331 modeli budynków. Każdy z obiektów został osadzony w wirtualnej przestrzeni na podstawie odpowiadających mu współrzędnych przestrzennych, co zapewniło zgodność topologiczną pomiędzy modelem wirtualnym a mapą topograficzną. Dla obiektów sieci drogowej zastosowano jednolitą teksturę w odcieniach szarości, natomiast dla budynków przypisano jednolitą teksturę w jasnych odcieniach beżu. Wszystkim obiektom nadano komponent *Mesh Renderer*, umożliwiający poprawne wyświetlanie geometrii oraz przypisanych materiałów w środowisku aplikacji.

Kolejnym krokiem był import modeli trójwymiarowych reprezentujących obiekty topograficzne pełniące funkcję celów nawigacyjnych oraz punktów orientacyjnych. Wśród obiektów zadaniowych znalazły się pomnik, studnia głębinowa oraz wieża telekomunikacyjna. Dodano także obiekty orientacyjne, takie jak stacje paliw, transformatory, kapliczki, przystanki autobusowe, młyny wiatrowe, kominy oraz nagrobki. Wszystkie obiekty zostały osadzone w wirtualnej przestrzeni zgodnie z ich rzeczywistym położeniem, odwzorowanym na mapie topograficznej, co miało kluczowe znaczenie dla zachowania spójności przestrzennej i wiarygodności środowiska nawigacyjnego. Przykładowe widoki perspektywiczne gotowej wirtualnej przestrzeni topograficznej zaprezentowano na rycinie 9. Według zakresu treści mapy dla grywalnej przestrzeni topograficznej wśród obiektów zostały umieszczone również zadaniowe obiekty topograficzne: pomnik lwa (ryc. 9 A – na środku widoku wśród budynków), studnia głębinowa (ryc. 9 B – na dole przy jeziorze) oraz wieża telekomunikacyjna (ryc. 9 C – na środku). Wszystkie obiekty topograficzne oznaczane znakami punktowymi na mapie topograficznej na rycinie 6 otrzymały trójwymiarową realistyczną formę w przestrzeni.

W dalszej kolejności wprowadzono mechanizmy ograniczające zakres przemieszczania się użytkownika w wirtualnej przestrzeni. W tym celu zaprojektowano niewidzialne bariery przestrzenne wzdłuż ciągów komunikacyjnych oraz na obrzeżach obszaru grywalnego, które uniemożliwiały opuszczenie wcześniej zdefiniowanych granic eksploracji. Ściany wzdłuż dróg zostały wygenerowane na podstawie prostopadłościanów odpowiadających geometrii dróg zapisanych w bazie BDOT, a następnie przetworzone w środowisku QGIS i oprogramowaniu do modelowania trójwymiarowego SketchUp. Dodatkowo dla barier ograniczających obszar grywalny zastosowano skrypt programistyczny informujący użytkownika o zbliżeniu się do granicy dostępnej przestrzeni, co pozwalało zachować ciągłość narracji i zapobiegało dezorientacji przestrzennej.

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 9 Przykładowe widoki perspektywiczne na gotową wirtualną przestrzeń topograficzną z docelowymi obiektami topograficznymi (A – z pomnikiem lwa, B – ze studnią głębinową, C – z wieżą telekomunikacyjną)

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

Po zakończeniu etapu budowy przestrzeni wirtualnej przystąpiono do projektowania interfejsu użytkownika. W pierwszej kolejności utworzono element *Canvas*, stanowiący obszar nadrzędny dla wszystkich komponentów interfejsu. Następnie zaprojektowano mini-mapę, której parametry dostosowano indywidualnie do poszczególnych wariantów badawczych, określając jej położenie względem ekranu, kształt, marginesy oraz ramkę otaczającą obszar mapy. Równolegle opracowano zestaw instrukcji wyświetlanych użytkownikowi, zawierających opis zadania nawigacyjnego, charakterystykę poszukiwanego obiektu, objaśnienie symbolu użytego na mapie topograficznej oraz wizualną prezentację obiektu w przestrzeni wirtualnej. Ostatnim etapem prac interfejsowych było zaprogramowanie dwóch wariantów mini-mapy: statycznej oraz obrotowej. Dodatkowym elementem było zaimplementowanie wskaźnika północy, którego orientacja przy mini-mapie obrotowej zmieniała się przeciwnie do kierunku obrotu kamery użytkownika, co miało na celu zachowanie spójności orientacji kartograficznej niezależnie od kierunku patrzenia w przestrzeni trójwymiarowej (Ryc. 10).

Następnym etapem prac było opracowanie mechanik interakcji użytkownika z wirtualną przestrzenią, obejmujących konfigurację kamer, integrację mini-mapy, parametry przemieszczania się użytkownika oraz skrypty odpowiedzialne za wizualizację wyników interakcji. Jako podstawowy widok użytkownika przyjęto kamerę z perspektywą pierwszej osoby, która umożliwia obserwację wirtualnej przestrzeni z punktu widzenia głównej postaci. W niniejszej pracy przyjęto metodę przemieszczania się użytkownika w wirtualnej przestrzeni topograficznej polegającą na chodzeniu postaci sterowanej przez użytkownika. Rozwiązanie to zostało wybrane jako najbardziej zbliżone do naturalnego sposobu eksploracji przestrzeni w środowisku rzeczywistym, co umożliwia zachowanie ciągłości percepcji oraz porównywalności procesów orientacji przestrzennej pomiędzy światem realnym a środowiskiem wirtualnym. Standaryzacja warunków eksploracji obejmowała również ustalenie stałej prędkości poruszania się użytkownika na poziomie 12 m/s, co eliminowało wpływ indywidualnych różnic w tempie ruchu na analizowane miary efektywności nawigacyjnej, a jednocześnie zachowana została kontrola nad tempem podejmowania decyzji nawigacyjnych.

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

```
1 using System.Collections;
2 using System.Collections.Generic;
3 using UnityEngine;
4
5 public class minimap_script : MonoBehaviour
6 {
7
8     public Transform MainCamera;
9
10 void LateUpdate()
11 {
12     Vector3 newPosition = MainCamera.position;
13     newPosition.y = transform.position.y;
14     transform.position = newPosition;
15
16     transform.rotation = Quaternion.Euler(90f, MainCamera.eulerAngles.y, 0f);
17 }
18 }
```

A

```
1 using UnityEngine;
2
3 public class NorthArrow : MonoBehaviour
4 {
5     public Transform playerTransform;
6
7 void Update()
8 {
9     if (playerTransform != null)
10    {
11        Vector3 northDirection = new Vector3(0, 0, 1);
12        Vector3 forward = playerTransform.forward;
13        forward.y = 0;
14        float angle = Vector3.SignedAngle(forward, northDirection, Vector3.up);
15        transform.localRotation = Quaternion.Euler(0, 0, -angle);
16    }
17 }
```

B

```
1 using UnityEngine;
2
3 public class NorthKwadratScript : MonoBehaviour
4 {
5     public Transform playerTransform;
6     public RectTransform mapRect;
7     public RectTransform arrowRect;
8
9 void Update()
10 {
11     if (playerTransform != null)
12     {
13         UpdateArrowRotation();
14         UpdateArrowPosition();
15     }
16 }
17
18 private void UpdateArrowRotation()
19 {
20     // Obrót strzałki względem północy, odwracamy kierunek obrotu
21     float angle = playerTransform.eulerAngles.y;
22     arrowRect.localRotation = Quaternion.Euler(0, 0, angle);
23 }
24
25 private void UpdateArrowPosition()
26 {
27     float halfwidth = mapRect.rect.width / 2f;
28     float halfheight = mapRect.rect.height / 2f;
29     float angleRad = Mathf.Deg2Rad * (360 - playerTransform.eulerAngles.y);
30     float x = Mathf.Sin(angleRad) * halfwidth;
31     float y = Mathf.Cos(angleRad) * halfheight;
32     if (Mathf.Abs(x) > Mathf.Abs(y))
33     {
34         x = Mathf.Sign(x) * halfwidth;
35         y = y * (halfwidth / Mathf.Abs(x));
36     }
37     else
38     {
39         y = Mathf.Sign(y) * halfheight;
40         x = x * (halfheight / Mathf.Abs(y));
41     }
42     arrowRect.anchoredPosition = new Vector2(x, y);
43 }
```

C

Ryc. 10 Skrypty w języku C# pozwalające mini-mapie obracać się względem kamery użytkownika (A) oraz skrypt pozwalający śledzić ruch kamery użytkownika i wyznaczać kierunek północny na mini-mapie o kształcie koła (B) oraz mini-mapie w kształcie kwadratu (C)

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

W celu umożliwienia pogłębionej analizy zachowań nawigacyjnych użytkowników w wirtualnej przestrzeni topograficznej opracowano zestaw mechanizmów służących rejestracji przebiegu eksploracji oraz kontroli realizacji zadań nawigacyjnych. Jednym z kluczowych elementów systemu badawczego był mechanizm ciągłej rejestracji pokonanego dystansu, który pozwalał na ilościowy opis efektywności poruszania się użytkownika w przestrzeni. System ten umożliwiał pomiar zarówno całkowitej długości przebytej trasy, jak i dystansów cząstkowych pomiędzy kolejnymi punktami zadaniowymi. Dystans był obliczany na podstawie zmian położenia użytkownika w czasie rzeczywistym i sumowany wyłącznie w trakcie aktywnej eksploracji. W momencie osiągnięcia kolejnego obiektu topograficznego zapisywana była długość trasy pokonanej od poprzedniego etapu zadania, co umożliwiało porównywanie strategii nawigacyjnych użytkowników nie tylko pod względem czasu realizacji zadania, lecz również pod kątem wybieranych tras. Integralną częścią zaprojektowanego środowiska był system obiektów topograficznych do etapów zadania nawigacyjnego (Ryc. 10).

Każdemu z obiektów przypisano jednoznaczny identyfikator, który determinował kolejność jego osiągnięcia przez użytkownika. Mechanizm ten zapewniał sekwencyjną kontrolę przebiegu zadania, eliminując możliwość zaliczenia etapów w przypadkowej kolejności. Osiągnięcie obiektu topograficznego było rejestrowane wyłącznie w sytuacji, gdy użytkownik znajdował się w odpowiedniej fazie zadania, co pozwalało zachować spójność scenariusza badawczego oraz jednoznaczność interpretacji danych. Dzięki temu eksploracja przestrzeni miała charakter kontrolowany, a każdy etap zadania mógł być analizowany jako odrębny fragment procesu nawigacyjnego.

Równolegle do pomiaru dystansu zastosowano mechanizm zapisu trajektorii ruchu użytkownika w wirtualnej przestrzeni. System ten umożliwiał gromadzenie punktów położenia użytkownika w trakcie eksploracji oraz ich wizualizację w postaci linii reprezentujących przebytą trasę. Trajektorie były zapisywane oddzielnie dla kolejnych etapów zadania, a następnie łączone w celu uzyskania pełnego obrazu przebiegu eksploracji. Tak przygotowane dane umożliwiały rekonstrukcję rzeczywistego przebiegu ruchu użytkownika oraz jego odniesienie do struktury przestrzeni topograficznej. Po zakończeniu eksploracji wirtualnej przestrzeni zastosowano mechanizm prezentacji wyników, które opierały się na wygenerowanych obrazach mini-map z naniesionymi trajektoriami ruchu oraz wymiernymi danymi statystycznymi przebytego dystansu i czasu.

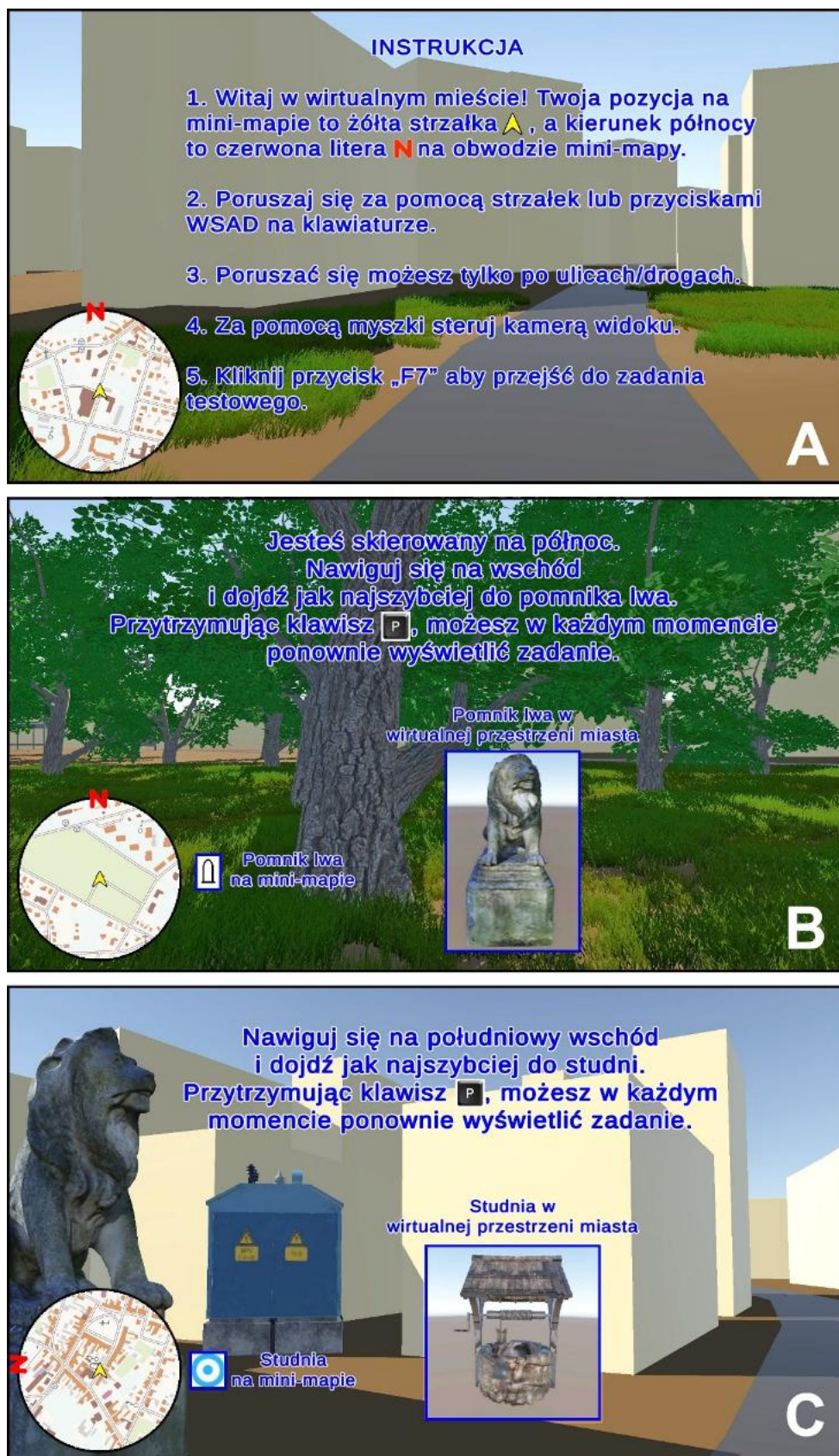
4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

Uzupełnieniem właściwego środowiska badawczego była ankieta, której celem było zebranie metryczki dotyczącej uczestników badania. Ankieta została zaimplementowana jako osobna scena aplikacji, dostępna z poziomu menu głównego, i była wypełniana przez użytkownika przed rozpoczęciem eksploracji wirtualnej przestrzeni topograficznej. Proces wypełniania ankiety został zaprojektowany w sposób zapewniający konkretność odpowiedzi oraz ich automatyczną rejestrację. Po zatwierdzeniu formularza dane ankietowe były zapisywane w postaci ustrukturyzowanego zbioru, co umożliwiało ich dalsze przetwarzanie i analizę statystyczną niezależnie od danych pochodzących z właściwej fazy eksploracyjnej.

Następnie użytkownik przechodził do części instruktażowej, pełniącej funkcję tutorialu przygotowującego do właściwego badania (Ryc. 11 A). Tutorial został zaprojektowany jako uproszczona, lecz strukturalnie analogiczna wersja środowiska badawczego, co pozwalało użytkownikowi zapoznać się z mechaniką aplikacji bez jednoczesnego wpływu na wyniki eksperymentu głównego. W tej fazie zadanie nawigacyjne ograniczono do dotarcia do jednego obiektu orientacyjnego – młyna wiatrowego zlokalizowanego w południowo-zachodniej części wirtualnej przestrzeni.

W trakcie tutorialu użytkownik otrzymywał zestaw instrukcji tekstowych wyświetlanych w interfejsie aplikacji, których celem było objaśnienie podstawowych zasad eksploracji przestrzeni. Instrukcje te obejmowały informacje dotyczące interpretacji mini-mapy, znaczenia kierunku północnego, sposobu poruszania się za pomocą klawiatury oraz sterowania widokiem kamery przy użyciu myszy. Wyraźnie podkreślono również ograniczenie ruchu użytkownika do sieci dróg, co miało istotne znaczenie zarówno dla eksploracji, jak i dla zachowania spójności z założeniami badania głównego. Treść zadania była celowo zbliżona do zadań realizowanych w dalszej części badania, co umożliwiało użytkownikowi nabycie kompetencji operacyjnych bez ujawniania właściwych celów eksperymentalnych. Zastosowanie oddzielnego etapu ankiety wstępnej oraz tutorialu pozwoliło na standaryzację warunków wejściowych badania oraz ograniczenie wpływu czynników losowych i technicznych na zachowania nawigacyjne użytkowników. Dzięki temu uczestnicy rozpoczynali właściwą fazę eksploracji z porównywalnym poziomem wiedzy na temat interfejsu, mechaniki poruszania się oraz sposobu interpretacji informacji kartograficznych, co miało kluczowe znaczenie dla rzetelności dalszych analiz efektywności nawigacyjnej w wirtualnej przestrzeni topograficznej (Ryc. 11 B oraz C).

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



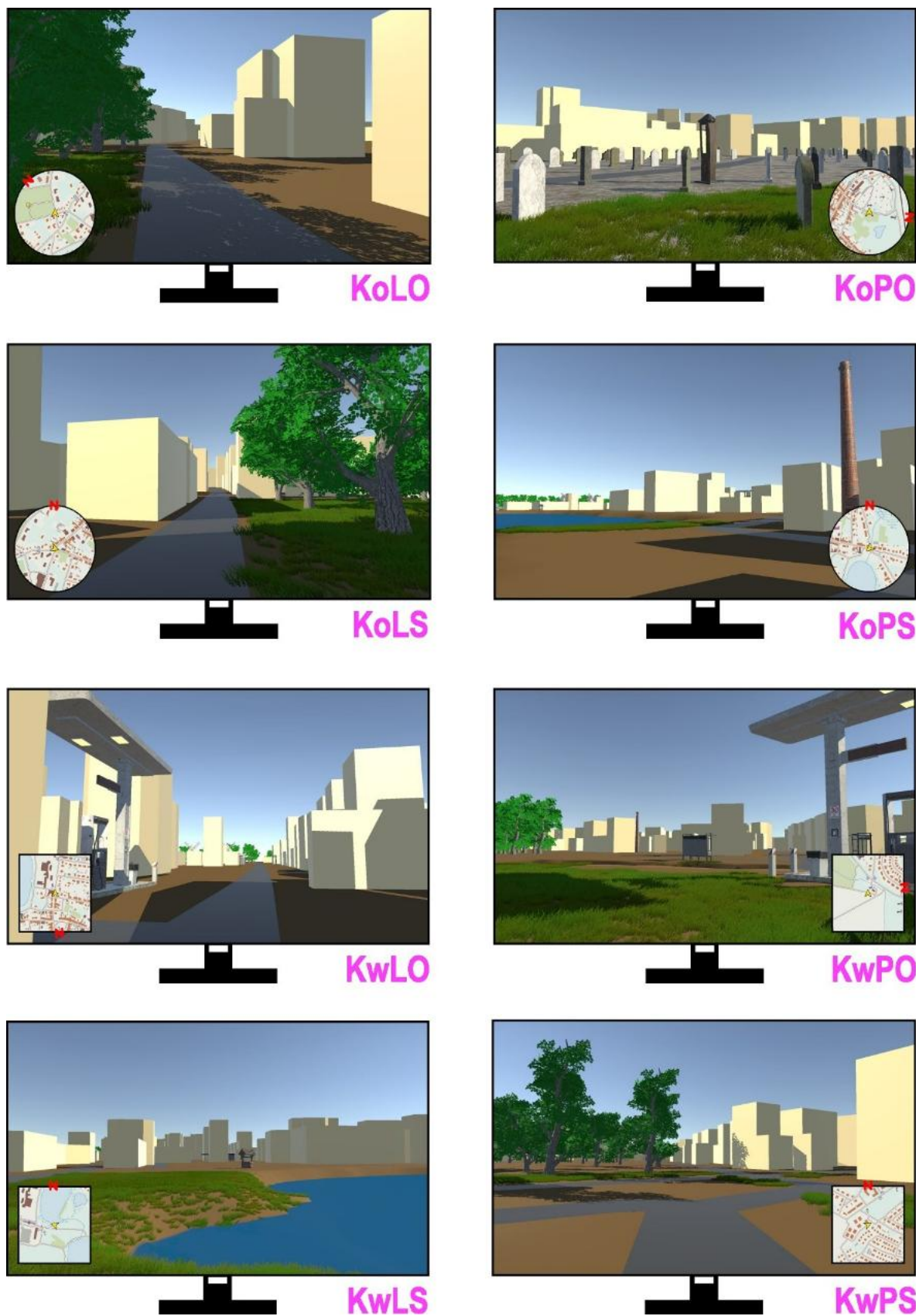
Ryc. 11 A: Widok na monitorze podczas rozpoczęcia samouczka; B: Widok z instrukcją na starcie do pierwszego obiektu – pomnika lwa; C: Widok po zdobyciu pierwszego punktu z instrukcją nawigacji do drugiego obiektu – studni.

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

Zwieńczeniem tej części rozprawy doktorskiej było przygotowanie ośmiu odrębnych wariantów aplikacji, odpowiadających poszczególnym wariantom mini-mapy zastosowanym w badaniu (Ryc. 12). Każdy z wariantów stanowił kompletną i funkcjonalnie spójną wersję środowiska wirtualnego, w której zachowano identyczną strukturę przestrzeni topograficznej, scenariusz zadań nawigacyjnych oraz parametry lokomocji użytkownika. W wariacie KoLO zaprezentowano fragment przestrzeni w pobliżu punktu startowego, obejmujący jedno z pierwszych głównych skrzyżowań z widoczną zabudową i terenami zieleni. Scena z wariantu KoPO ukazuje fragment północnej części przestrzeni, w której rozpoznawalnym punktem orientacyjnym jest przydrożna kapliczka sąsiadująca z cmentarzem, a dalszy plan dopełnia sylweta miejskiej zabudowy. Wariant KoLS prezentuje widok na kluczowy odcinek prowadzący w kierunku centrum miasta, obejmujący jedno z głównych skrzyżowań wykorzystywanych w pierwszej trasie zadaniowej. Wschodni kraniec przestrzeni topograficznej został uchwycony w wariacie KoPS, z widocznym w oddali miejskim zabudowaniem, charakterystycznym kominem i sąsiadującym zbiornikiem wodnym. Wariant KwLO przedstawia fragment śródmiejskiej przestrzeni z prostą drogą przebiegającą przez miasto, widoczną stacją paliw po lewej stronie, a także przystankami autobusowymi, zadrzewieniem i sylwetkami wiatraków w dalszym planie. W scenie odpowiadającej mini-mapie KwLS widoczny jest fragment trasy przebiegającej wzdłuż zbiornika wodnego w wschodniej części przestrzeni, ze studnią głębinową na pierwszym planie oraz panoramą miejskiej zabudowy w tle. W południowo-wschodnim fragmencie przestrzeni topograficznej, wariant KwPO prezentuje okolice z kolejną stacją paliw oraz rozproszoną zabudową o mniejszym zagęszczeniu. KwPS prezentuje fragment przestrzeni zlokalizowany w południowo-zachodniej części obszaru, w sąsiedztwie zwartej zabudowy mieszkalnej i rozległego parku zadrzewionego.

Różnice pomiędzy wariantami dotyczyły wyłącznie sposobu prezentacji informacji kartograficznej w postaci mini-mapy, co umożliwiło izolację wpływu tego czynnika na efektywność nawigacyjną. Przygotowanie wielu wariantów wymagało każdorazowego dostosowania mechanizmów interakcji, systemu instrukcji, rejestracji danych, wizualizacji tras oraz logiki przejścia pomiędzy kolejnymi etapami badania, tak aby zapewnić pełną porównywalność wyników. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie badania w kontrolowanych warunkach, w których jedyną zmienną różnicującą przebieg eksploracji była forma i sposób działania mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej.

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 12 Zestawienie ośmiu aplikacji ze wszystkimi wariantami mini-map z widokami użytkownika w pierwszej osobie (KoLO – koło lewe obrotowe, KoLS – koło lewe statyczne, KoPO – koło prawe obrotowe, KoPS – koło prawe statyczne, KwLO – kwadrat lewy obrotowy, KwLS – kwadrat lewy statyczny, KwPO – kwadrat prawy obrotowy, KwPS – kwadrat prawy statyczny) (por. z ryciną 3)

4.3. Etap badań z użytkownikami

Etap badań z udziałem użytkowników obejmował kilka faz, w tym realizację kwestionariusza badawczego, w którym opisano charakterystykę uczestników, organizację stanowiska testowego, przebieg kalibracji, wypełnianie ankiety oraz wykonywanie zadań. Kolejny podrozdział odnosi się do opracowania uzyskanych danych pierwotnych w celu przygotowania ich do analizy statystycznej i kartograficznej. Obejmowało to tworzenie scen i segmentów z nagrań śledzenia ruchu gałki ocznej, analizę arkusza obliczeniowego oraz tworzenie analiz kartograficznych przepływu ruchu.

4.3.1. Przeprowadzenie kwestionariusza badawczego

Do udziału w badaniach zaproszono studentów studiów na kierunkach realizowanych na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Łączna liczba respondentów wyniosła 224 osoby w tym 125 mężczyzn (55,8%) oraz 99 kobiet (44,2%). Ponad 93,3% badanych w trakcie badania zadeklarowało swój wiek w przedziale 18-25 lat, natomiast pozostali użytkownicy byli powyżej 26 roku życia (6,7%). Każdemu z uczestników przedstawiono cel eksperymentu, jego charakter oraz dokonano wprowadzenia do działania sprzętu eye-trackingowego. Badania na początku rozpoczęto od kalibracji wzroku, czyli oszacowania pozycji wzroku na ekranie monitora w programie Gazepoint. Uczestnik miał za zadanie na ekranie monitora śledzić tylko za pomocą ruchu gałki ocznej poruszanie się czerwonego migającego punktu w 5 punktach pomiarowych, jednocześnie zachowując jak najmniejszy ruch głowy i ciała. Po pozytywnym wyniku i sprawdzeniu śledzenia wzroku na testowym ekranie, uczestnicy wypełniali ankietę, następnie wykonywali przygotowany samouczek działania aplikacji, a na końcu przechodzili do wykonywania zadań w głównym badaniu. Uczestników poproszono także o dokładne wykonanie powierzonych zadań i udzielenie odpowiedzi na pytania w ankiecie. Całość badania miała charakter całkowicie anonimowy i dobrowolny. W badaniu wykorzystano następujący sprzęt i oprogramowanie:

- Stację roboczą wraz z monitorem NEC 27" EA271F,
- Eye-tracker Gazepoint GP3 HD,
- Oprogramowanie Gazepoint Analysis UX Edition (v7.0.0) oraz Gazepoint Control x64
- Aplikacja specjalnie zaprogramowana na badanie w silniku Unity

4.3.2. Przygotowanie danych do analizy statystycznej, kartograficznej i eye-trackingowej

Prace nad przygotowaniem danych rozpoczęto od zgromadzenia danych ankietowych oraz statystycznych w programie Excel zbieranych automatycznie po każdym badaniu użytkownika. Kolejnym etapem była analiza filmowa i eye-trackingowa zebrana w programie Gazepoint. Nagrania zarejestrowane podczas badania były znacznie dłuższe niż fragmenty potrzebne do opracowania wyników, dlatego było konieczne ręczne wydzielenie z 224 filmów segmentów, które odzwierciedlały właściwe wykonanie badań. Pozwoliło to na uzyskanie dokładnych pomiarów czasowych związanych z analizą wzroku związaną z realizacją poszczególnych zadań w badaniu. Po przygotowaniu scen i segmentów przystąpiono do zdefiniowania obszaru zainteresowania (AOI), którym w tym badaniu była mini-mapa. Wielkość AOI ustalono na podstawie rozmiaru mini-mapy, powiększając je dodatkowo o około 60 pikseli w długości boku w celu redukcji błędów kalibracyjnych (Brand i in., 2021).

W badaniach eye-trackingowych wokół AOI należy dodawać marginesy w celu kompensacji niedokładności (Holmqvist i in., 2023). W trakcie tworzenia segmentów filmów zauważono dla mniej niż 5% użytkowników potrzebę poprawy zdefiniowania lokalizacji obszaru zainteresowania (AOI) na ekranie analizy danych. Przejawiało się to przesuniętym śladem wzroku użytkowników w trakcie analizy w różne strony zarejestrowanego obrazu. Wynikało to prawdopodobnie z niedokładnej kalibracji przeprowadzanej przed badaniem, która mogła być spowodowana różną grubością szkiełek w okularach bądź zbyt duży ruch ciałem i głową podczas badania. W takich przypadkach przeanalizowano całe nagranie i dostosowano obszar zainteresowania do prawidłowego przesunięcia śladu wzroku. Tylko u 1 użytkownika nie udało się wyeksportować żadnych danych eye-trackingowych ze względu na nieprawidłową kalibrację i brak fiksacji w trakcie analizowania filmów.

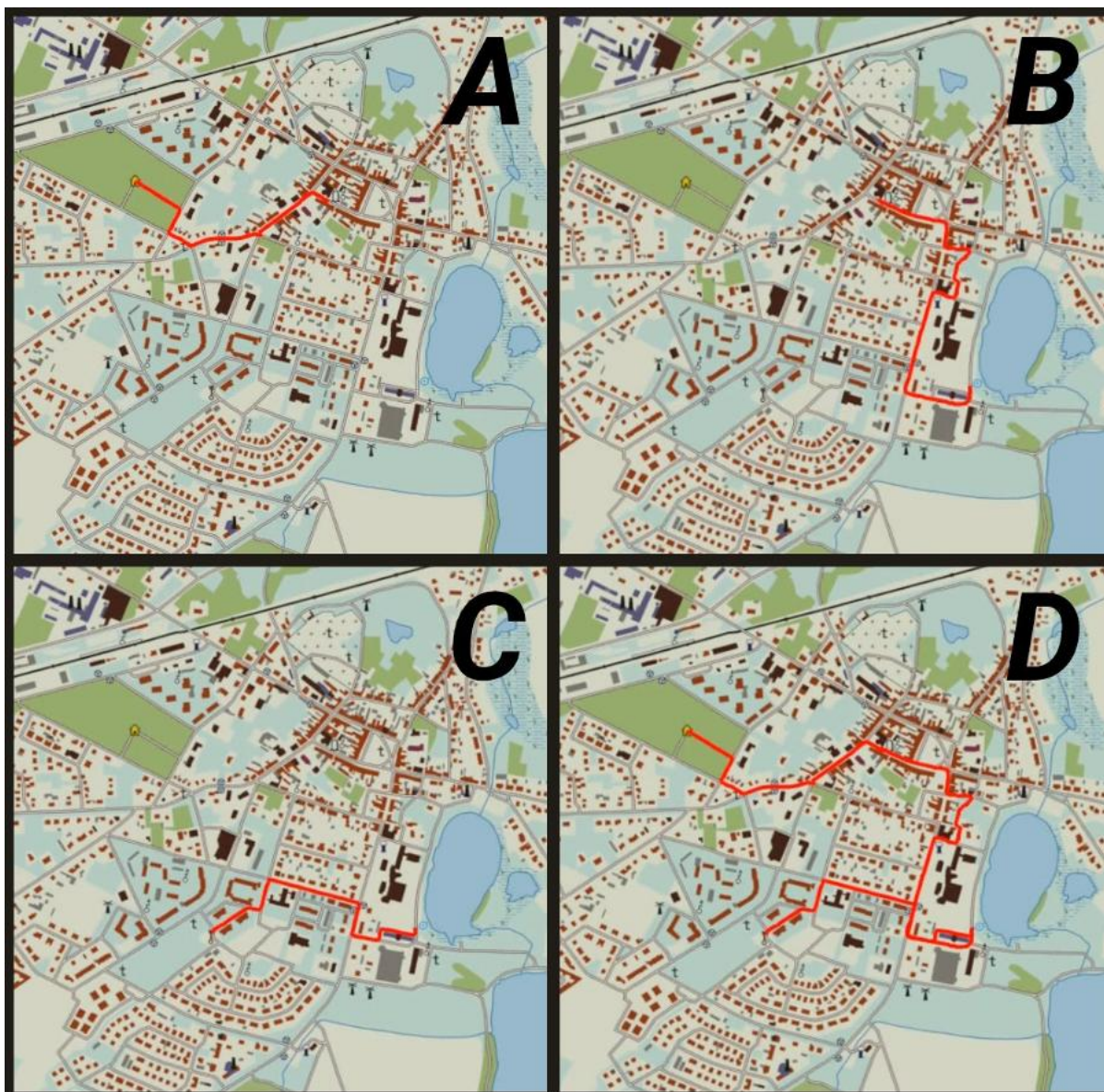
Końcowym etapem było wyeksportowanie danych eye-trackingowych do pliku Excela i scalenie ich z danymi ankietowymi, czasowymi i odległościowymi (Ryc. 13). Tak przygotowany zestaw danych dotyczących nawigacji po wirtualnej przestrzeni przy użyciu mini-mapy posłużył w dalszych etapach analizy statystycznej i eye-trackingowej.

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

L.P.	przejs	swity	dystaj	ponmas	ponmas	stans	stans	stns	wieżas	wie	stans	wi	AOI	EYE (s)	AOI	EYE (s)	%	asa 1 A	asa 1 AOI	asa 2 A	asa 2 AOI	asa 3 A	asa 3 AOI	Typ	Płeć	Wiek
User 0	212	2327,39	61	01:01	645	86	02:27	960	65	03:32	722,11	85,09	40,1%	26,91	44,3%	36,46	41,9%	21,72	33,8%	KoLO	Mężczyzna	26 - 31				
User 102	255	2497,39	93	01:33	832,59	81	02:54	846	81	04:15	818,88	91,01	35,7%	33,62	36,6%	25,22	30,9%	32,17	39,5%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 111	261	2545,22	83	01:23	677,97	86	02:49	853	92	04:21	1014,6	159,39	60,9%	47,60	56,6%	56,94	66,3%	54,86	59,8%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 119	235	2390,44	77	01:17	766,51	95	02:52	939	63	03:55	685,03	102,67	43,8%	27,33	35,1%	50,52	53,7%	24,82	39,7%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 127	203	2219,48	80	01:20	857,7	57	02:17	629	66	03:23	733,25	101,29	49,8%	37,70	46,3%	28,76	50,9%	34,83	53,0%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 132	212	2087,41	81	01:21	759,11	68	02:29	640	63	03:32	688,21	87,31	41,0%	36,50	44,4%	27,90	41,2%	22,91	36,5%	KoLO	Mężczyzna	26 - 31				
User 140	260	2343,20	90	01:30	765,12	72	02:42	676	98	04:20	902,06	121,72	46,9%	41,33	45,6%	33,48	47,2%	46,90	48,0%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 148	217	2196,31	90	01:30	874,29	64	02:34	646	63	03:37	676,41	90,12	41,5%	40,08	44,4%	25,35	39,1%	24,70	39,7%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 156	465	3690,59	134	02:14	969,24	121	04:15	968	210	07:45	1753	168,32	36,1%	45,78	34,3%	46,85	38,8%	75,70	35,7%	KoLO	Kobieta	18 - 25				
User 163	315	2553,48	118	01:58	897,26	108	03:46	878	89	05:15	778,19	134,62	42,9%	55,43	47,5%	37,00	34,3%	42,20	47,2%	KoLO	Kobieta	18 - 25				
User 171	224	1960,42	72	01:12	607,29	74	02:26	635	78	03:44	718,29	112,33	50,0%	38,31	52,8%	34,29	45,9%	39,73	51,3%	KoLO	Kobieta	18 - 25				
User 179	263	2623,31	76	01:16	744,16	99	02:55	1074	88	04:23	805,04	117,72	44,9%	39,85	52,6%	49,93	50,5%	27,94	31,8%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 18	224	2396,63	91	01:31	922,67	65	02:36	698	68	03:44	775,94	105,36	46,9%	42,22	46,2%	27,95	43,1%	35,19	51,5%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 187	381	3314,40	226	03:46	1874,4	78	05:04	693	77	06:21	747,57	148,64	39,1%	86,48	38,5%	31,16	39,7%	31,00	40,3%	KoLO	Kobieta	18 - 25				
User 197	256	2557,34	73	01:13	703,19	106	02:59	1030	77	04:16	824,49	112,77	44,1%	36,82	50,7%	45,85	43,4%	30,10	39,0%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 205	219	2297,18	80	01:20	851,79	68	02:28	648	71	03:39	797,38	95,06	43,4%	39,68	50,0%	26,03	38,2%	29,34	40,8%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 213	252	2138,68	96	01:36	727,83	73	02:49	621	83	04:12	790,2	110,84	44,0%	43,07	44,8%	30,76	42,5%	37,02	44,6%	KoLO	Kobieta	18 - 25				
User 221	239	2256,16	74	01:14	672,97	94	02:48	869	71	03:59	713,96	137,62	57,7%	41,04	55,4%	54,43	58,5%	42,16	59,2%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 26	200	2267,00	67	01:07	764,27	66	02:13	720	67	03:20	782,6	114,21	57,0%	40,90	61,2%	34,07	51,5%	39,23	58,2%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 34	302	2594,03	77	01:17	614,56	117	03:14	1204	108	05:02	775,15	158,16	52,3%	34,55	45,5%	89,71	76,1%	33,90	31,5%	KoLO	Kobieta	18 - 25				
User 42	265	2228,32	85	01:25	689,95	102	03:07	888	78	04:25	650,14	102,97	38,9%	33,56	40,0%	40,14	39,2%	29,27	37,2%	KoLO	Kobieta	18 - 25				
User 51	426	3899,86	123	02:03	987,32	235	05:58	2271	68	07:06	641,53	136,76	32,2%	38,27	30,9%	78,91	33,6%	19,58	29,4%	KoLO	Kobieta	18 - 25				
User 61	196	2035,05	68	01:08	672,15	65	02:13	652	63	03:16	710,44	55,08	28,1%	22,17	32,4%	17,49	27,7%	15,42	23,8%	KoLO	Kobieta	18 - 25				
User 69	251	2543,04	97	01:37	966,67	92	03:09	908	62	04:11	668,74	99,93	39,8%	50,58	51,5%	28,64	31,5%	20,71	33,9%	KoLO	Kobieta	18 - 25				
User 77	231	2377,94	67	01:07	650,53	104	02:51	1051	60	03:51	676,19	75,36	32,5%	20,22	29,9%	46,07	44,2%	9,06	15,0%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 8	200	2090,25	76	01:16	764,18	61	02:17	634	63	03:20	691,97	83,90	42,0%	35,53	46,1%	25,76	42,6%	22,61	36,5%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				
User 86	221	2161,74	83	01:23	762,33	67	02:30	667	71	03:41	732,41	134,62	61,1%	54,77	66,3%	39,95	59,7%	39,90	56,3%	KoLO	Mężczyzna	18 - 25				

Ryc. 13 Fragment wyników parametrów ankietowych, czasowych, odległościowych i eye-trackingowych w programie Excel na przykładzie kilkunastu użytkowników

Przygotowanie danych kartograficznych dotyczyło wcześniejszego zbierania w czasie rzeczywistym lokalizacji użytkownika w aplikacji. Charakterystyka tych danych bazowała na unikatowych odwiedzinach poszczególnych ulic w przestrzeni w całej aplikacji. Użytkownik mógł wielokrotnie wejść na daną ulicę, natomiast aplikacja odnotowała jedynie pierwsze wejście na dany odcinek drogi. Po skończonym badaniu aplikacja zapisywała ścieżki przejścia do pierwszego zadania (Ryc. 14 A), drugiego zadania (Ryc. 14 B), trzeciego zadania (Ryc. 14 C) oraz zbiorczą mapę przepływu ruchu po aplikacji w formie map z czerwoną zaznaczoną ścieżką (Ryc. 14 D). Następnie eksportowano do pliku .csv listę wszystkich odcinków wraz z zaznaczeniami odwiedzin każdego odcinka do poszczególnego zadania. Ostatnim krokiem było przygotowanie danych w Excelu do obliczeń przepływu ruchu sekwencyjnego oraz ilościowego dla poszczególnych grup użytkowników.



Ryc. 14 Dane dotyczące ścieżki przepływu ruchu użytkownika (User 0) z zadania pierwszego (A), zadania drugiego (B), zadania trzeciego (C) oraz zbiorcza mapa przepływu (D) na tle mapy wirtualnej przestrzeni topograficznej

4.4. Etap analizy i wizualizacji wyników oraz formułowania wniosków

Etap analizy wyników składał się z kilku kroków, których celem było sformułowanie wniosków na temat efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej. Równie istotne było opracowanie rekomendacji dotyczących projektowania elementu kartograficznego interfejsu użytkownika, jakim jest mini-mapa na urządzeniu stacjonarnym. Pierwszym krokiem do tego celu było wyliczenie podstawowych statystyk cech wymiernych odległości (całkowitego dystansu przebytego podczas aplikacji podawanego w metrach) oraz czasu (całkowitego czasu przejścia całej aplikacji przez użytkownika i całkowitego czasu

















4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

patrzenia na mini-mapę w trakcie aplikacji podawanego w sekundach) dla wszystkich użytkowników w 8 grupach, a także przedstawienie różnic statystycznych poszczególnych wariantów projektowania mini-mapy. Kolejnym krokiem jest przedstawienie tych samych cech wymiernych na poszczególnych trasach aplikacji (3 zadania) jak i również przedstawienie szczegółowych różnic dla wariantów projektowania mini-mapy. Trzecim krokiem było wykonanie analizy kartograficznej i wizualizacja map przepływu ruchu użytkowników podczas użytkowania aplikacji oraz przedstawienie dominujących schematów przepływu ruchu ulic dla każdego z zadań w 8 grupach mini-mapy. Czwartym krokiem była analiza ścieżek patrzenia na monitorze i przygotowanie map ciepła za pomocą danych eye-trackingowych. Ostatnie kroki zakładały zestawienie wyników w kontekście efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej za pomocą metod wymiernych, przestrzennych i statystycznych, zaproponowanie rekomendacji do projektowania mini-mapy w kontekście elementu kartograficznego interfejsu użytkownika oraz przedstawienie dyskusji z dotychczasowymi badaniami naukowymi.

4.4.1. Analiza statystyczna cech wymiernych: czas i odległość

Wszystkie zadania zostały wykonane poprawnie, a uzyskane parametry odległości i czasu dla tras 1-3 posłużyły przy wyliczeniu sum, median, procentowych zależności oraz statystycznych korelacji między zmiennymi grupami użytkowników. Czas przejścia oznacza przejście danego użytkownika pomiędzy dwoma kluczowymi punktami wyznaczającymi poszczególne trasy zadań w aplikacji wyrażony w sekundach (s). Całkowity dystans oznacza odległość pokonaną przez danego użytkownika pomiędzy kluczowymi punktami wyznaczającymi poszczególne trasy zadań w aplikacji wyrażony w metrach (m). Czas patrzenia na mini-mapę określa, ile czasu użytkownik poświęcił spoglądając na mini-mapę na monitorze względem innych części ekranu pomiędzy dwoma kluczowymi punktami wyznaczającymi poszczególne trasy zadań w aplikacji wyrażony w sekundach (s).

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

	Kod	Wszystkie trasy	Trasa 1	Trasa 2	Trasa 3	
Czas przejścia (s)		7568	2778	2549	2241	
		7234	2524	2505	2205	
	Suma czasu przejścia dla poszczególnych wariantów mini-map (28 osób)		7587	2635	2465	2487
			8145	2725	2697	2723
		7378	2607	2298	2473	
		7149	2413	2288	2448	
		7700	2948	2284	2468	
		8195	2779	2621	2795	
	Wszyscy (224 osoby)		60956	21409	19707	19840
	Mediana czasu przejścia dla poszczególnych wariantów mini-map (28 osób)		245	82	84	71
			241	79	73	75
			258	87	82	82
			279	82	88	78
			239	86	74	72
		229	81	70	75	
		258	85	74	71	
		262	83	82	73	
Wszyscy (224 osoby)		250	83	77	75	

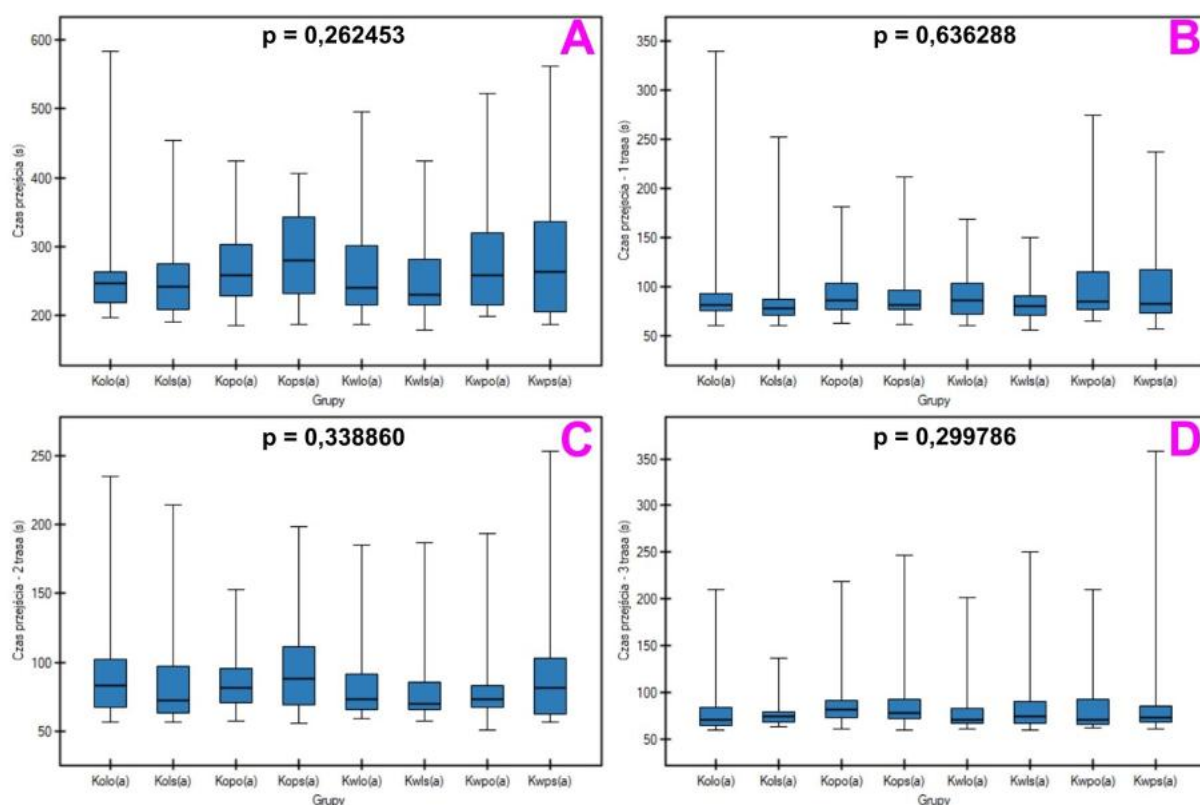
Ryc. 15 Zestawienie tabelaryczne sumy i mediany czasu przejścia dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras

Rycina 15 prezentuje wyniki dotyczące czasu przejścia (s) zarówno dla całej aplikacji (3 trasy) jak i dla poszczególnych tras. Największą wartość sumarycznego czasu przejścia całej aplikacji odnotowano w grupie KwPS (8195 s), a najniższą w grupie KwLS (7149 s), uzyskując różnicę czasu przejścia między nimi na poziomie 1046 sekund (około 37,5 sekundy na 1 użytkownika). W przypadku 1 trasy zakres czasu przejścia mieścił się w przedziale od 2413 sekund (KwLO) do 2948 sekund (KwPO), uzyskując różnicę czasu przejścia między nimi na poziomie 535 sekund (około 19 sekund na 1 użytkownika). Dla 2 trasy największą wartość wykazała grupa użytkowników KoPS (2697 s), natomiast najniższą wartość wykazała grupa użytkowników KwPO (2284 s), uzyskując różnicę czasu przejścia między nimi na poziomie 413 sekund (około 14,5 sekundy na 1 użytkownika). W przypadku 3 trasy zakres czasu przejścia mieścił się w przedziale od 2205 sekund (KoLS) do 2795 sekund (KwPS), uzyskując różnicę czasu przejścia między nimi na poziomie 590 sekund (około 21 sekund na 1 użytkownika).

W przypadku mediany czasu przejścia całej aplikacji wykazano, że cztery grupy charakteryzują się niższym wynikiem (KwLS - 229 s, KwLO - 239 s, KoLS - 241 s, KoLO -

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

245 s) niż mediana czasu przejścia wszystkich użytkowników badania (250 s). Najwyższą wartość mediany odnotowała grupa KoPS (279 s). Dla 1 trasy mediana czasu przejścia wszystkich użytkowników badania wyniosła 83 sekundy, poniżej tej wartości znalazły się 4 grupy (KoLS – 79 s, KwLO – 81 s, KoLO – 82 s, KoPS – 82 s). Najwyższą wartość mediany dla 1 trasy odnotowała grupa KoPO (87 s). W przypadku mediany czasu przejścia 2 trasy wartości poniżej wyniku charakteryzującego wszystkich badanych użytkowników (77 s), zaobserwowano wśród grup KwLO (70 s), KoLS (73 s), KwLO (74 s) oraz KwPO (74 s). Najwyższą wartość mediany dla 2 trasy wykazano w grupie KoPS (88 s). Dla 3 trasy mediana czasu przejścia wszystkich użytkowników wyniosła 75 sekund, poniżej tej wartości znalazły się 4 grupy (KoLO – 71 s, KwPO – 71 s, KwLO – 72 s, KwPS – 73 s). Najwyższą wartość mediany dla 3 trasy odnotowała grupa KoPO (82 s).



Ryc. 16 Zestawienie wykresowe testu ANOVA Kruskal-Wallis dla czasu przejścia 8 grup użytkowników wraz z wynikiem istotności statystycznej (A – czas przejścia wszystkich tras, B – 1 trasy, C – 2 trasy, D – 3 trasy)

Aby zweryfikować, czy istnieją statystyczne różnice i korelacje czasu przejścia, przeprowadzono analizę statystyczną. Na podstawie tego założenia przeprowadzono testy normalności jednowymiarowej (test Shapiro-Wilka, test Kołmogorova-Smirnova oraz test skośności i kurtozy D'Agostino-Pearsona), aby sprawdzić, czy pierwotne dane czasu przejścia

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

mają rozkład normalny (Ryc. 16). Wszystkie wyniki testów badających normalność rozkładu stwierdziły, że rozkład nie jest rozkładem normalnym ($p < 0,05$). W dalszych krokach wykorzystano test dla danych nieparametrycznych ANOVA Kruskala-Wallis, ponieważ występuje więcej niż dwie grupy zmiennych, w celu zweryfikowania korelacji między grupami. Wykonano również analizę post-hoc za pomocą korekty Benjamina-Hochberga, aby wykazać szczegółowe różnice w zadanych zmiennych. Testy w żadnym z przypadków nie wykazały istotności statystycznej.

		Kod	Wszystkie trasy	Trasa 1	Trasa 2	Trasa 3	
Suma czasu przejścia dla mini-map na podstawie dwóch parametrów (224 osoby)	kształt-położenie (56 osób)		14802	5302	5054	4446	
			14527	5020	4586	4921	
			15732	5360	5162	5210	
			15895	5727	4905	5263	
	kształt-orientacja (56 osób)		15155	5143	5014	4728	
			15379	5249	5202	4928	
			15078	5555	4582	4941	
			15344	5192	4909	5243	
	położenie-orientacja (56 osób)		14946	5385	4847	4714	
			14383	4937	4793	4653	
			15287	5583	4749	4955	
			16340	5504	5318	5518	
	Czas przejścia (s)	kształt-położenie (56 osób)		241	81	77	73
				233	84	72	72
				271	84	84	80
				261	85	75	73
kształt-orientacja (56 osób)			254	85	82	78	
			251	82	80	76	
			247	85	74	72	
			246	81	74	73	
położenie-orientacja (56 osób)			241	84	78	71	
			238	80	72	75	
			258	86	77	79	
			271	82	84	76	

Ryc. 17 Zestawienie tabelaryczne sumy i mediany czasu przejścia dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras na podstawie dwóch parametrów projektowania mini-mapy

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

Rycina 17 prezentuje wyniki dotyczące czasu przejścia (s) dla całej aplikacji i poszczególnych tras, grupując użytkowników pod względem dwóch zmiennych projektowania mini-mapy (kształt-położenie, kształt-orientacja, położenie-orientacja). Największą wartość sumarycznego czasu przejścia całej aplikacji dla parametrów kształt-położenie odnotowano w grupie użytkowników z mini-mapą kwadratową i po prawej stronie ekranu (15895 s), a najniższą w grupie użytkowników z mini-mapą kwadratową po lewej stronie ekranu (14527 s).

Dla parametrów kształt-orientacja najwyższa wartość sumaryczna czasu przejścia wykazano dla grupy z mini-mapą kołową i statyczną (15379 s), a najniższą wartość dla grupy z mini-mapą kwadratową i obrotową (15078 s). W ostatnim przypadku parametrów położenie-orientacja najwyższy sumaryczny czas przejścia aplikacji uzyskała grupa użytkowników z mini-mapą po prawej stronie ekranu i statyczną (16340 s), natomiast najniższą wartość wykazano w grupie mini-mapy po lewej stronie ekranu i również statyczną (14383 s). W przypadku 1 trasy dla parametru kształt-położenie zakres czasu przejścia mieścił się w przedziale od 5020 sekund (kwadrat po lewej stronie ekranu) do 5727 sekund (kwadrat po prawej stronie ekranu). Dla parametrów kształt-orientacja zakres czasu został odnotowany od 5143 sekund (koło obrotowe) do 5555 sekund (kwadrat obrotowy). Najwyższą wartość dla parametrów położenie-orientacja wykazano przy mini-mapach prawych i obrotowych (5583 s), natomiast najniższą wartość wykazano przy mini-mapach lewych statycznych (4937 s). Dla 2 trasy największą wartość w grupie parametrów kształt-położenie wykazali użytkownicy korzystający z mini-mapy kołowej po prawej stronie ekranu (5162 s), natomiast najniższą wartość wykazała grupa z mini-mapą kwadratową po lewej stronie ekranu (4586 s).

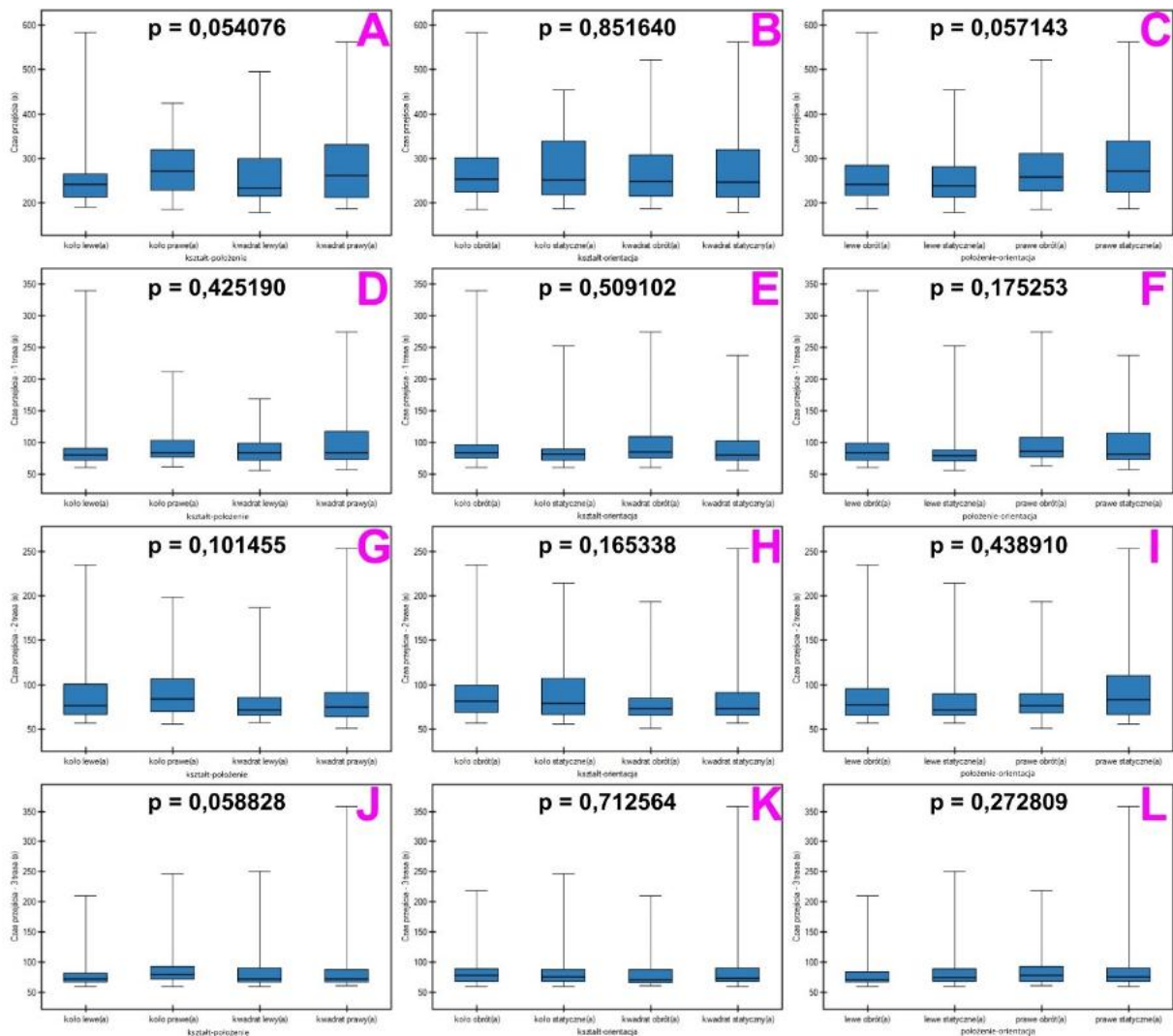
Parametry kształt-orientacja odnotowały największą wartość dla grupy z mini-mapą kołową i statyczną (5202 s), natomiast najniższą wartość dla grupy z mini-mapą kwadratową i obrotową (4582 s). W ostatnich parametrach położenia-orientacji zakres czasu przejścia mieścił się w przedziale od 4749 sekund (obrotowa mini-mapą po prawej stronie ekranu) do 5318 sekund (statyczna mini-mapą po prawej-stronie ekranu). W przypadku 3 trasy zakres czasu przejścia parametrów kształtu-położenia mieścił się w przedziale od 4446 sekund (kształt koła po lewej stronie ekranu) do 5263 sekund (kwadrat po prawej stronie ekranu). Parametry kształt-orientacja odnotowały największą wartość dla grupy z mini-mapą kwadratową i statyczną (5243 s), natomiast najniższą wartość dla grupy z mini-mapą kołową i obrotową (4728 s). Najwyższą wartość dla parametrów położenie-orientacja wykazano przy mini-mapach prawych statycznych (5518 s), natomiast najniższą wartość wykazano przy mini-mapach lewych statycznych (4653 s).

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

W przypadku mediany czasu przejścia całej aplikacji dla parametrów kształt-położenie wykazano, że kształty, znajdujące się po lewej stronie ekranu (lewy kwadrat 233 s, lewe koło 241 s), charakteryzują się niższym wynikiem niż mediana czasu przejścia dla kształtów po prawej stronie (kwadrat prawy 261 s, koło prawe 271 s). Dla parametrów związanych z kształtem-orientacją, zakres czasu przejścia jest bardziej zbliżony do siebie oscylujący w przedziale od 246 sekund (kwadrat statyczny) do 254 sekund (koło obrotowe). Natomiast parametry położenia-orientacji wykazują podobne różnice jak przy parametrze kształtu, niższe wartości przy mini-mapach zlokalizowanych po lewej stronie ekranu (lewe statyczne 238 s, lewe obrotowe 241 s) niż mini-mapy zlokalizowane po prawej stronie ekranu (prawe obrotowe 258 s, prawe statyczne 278 s). Dla 1 trasy mediany wyników czasu przejścia dla parametrów kształt-położenie są zbliżone do siebie w zakresie czasu od 81 sekund (kwadrat lewy) do 85 sekund (kwadrat prawy). Podobny przedział wartości czasu widać dla parametrów kształt-orientacja, gdzie kwadrat statyczny osiągnął wynik 81 sekund, natomiast koło obrotowe osiągnęło wynik 85 sekund. W ostatnim przypadku parametrów położenie-orientacja wyniki również są do siebie zbliżone, osiągając wyniki od 80 sekund (mini-mapy lewe statyczne) do 86 sekund (mini-mapy prawe obrotowe). Dla 2 trasy największą wartość dla parametrów kształt-położenie, uzyskała grupa użytkowników z mini-mapą kołową umieszczoną po prawej stronie ekranu (84 s), natomiast najniższą wartość uzyskała grupa z mini-mapą kwadratową umieszczoną po lewej stronie ekranu (72 s).

Natomiast dla parametrów kształt-orientacja, najwyższa wartość jest zauważalna przy grupie użytkowników z mini-mapą kołową i obrotową (82 s), a najniższa wartość odnotowana jest w grupach z mini-mapą kwadratową obrotową oraz statyczną (74 s). W ostatniej grupie parametrów położenia-orientacji, największa wartość przypada grupie z mini-mapą statyczną po prawej stronie ekranu (84 s), natomiast najniższą wartość uzyskała grupa z mini-mapą statyczną po lewej stronie ekranu (72 s). W przypadku 3 trasy zakres mediany czasu przejścia dla parametrów kształt-położenie mieścił się w przedziale od 72 sekund (lewy kwadrat) do 80 sekund (prawe koło). Dla parametrów kształt-orientacja, najniższą wartość odnotowano dla kwadratu obrotowego (72 s), a najwyższą wartość dla koła obrotowego (78 s). Najwyższą wartość dla parametrów położenie-orientacja wykazano przy mini-mapach prawych obrotowych (79 s), a najniższą wartość przy mini-mapach lewych obrotowych (71 s).













4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 18 Zestawienie wykresowe testu ANOVA Kruskal-Wallis dla czasu przejścia pod względem dwóch zmiennych projektowania mini-mapy wraz z wynikiem istotności statystycznej (czas przejścia wszystkich tras [A – kształt-położenie, B – kształt-orientacja, C – położenie-orientacja], 1 trasy [D – kształt-położenie, E – kształt-orientacja, F – położenie-orientacja], 2 trasy [G – kształt-położenie, H – kształt-orientacja, I – położenie-orientacja], 3 trasy [J – kształt-położenie, K – kształt-orientacja, L – położenie-orientacja])

W następnym kroku wykorzystano test dla danych nieparametrycznych ANOVA Kruskala-Wallisa w celu zweryfikowania korelacji między grupami (Ryc. 18). Testy w żadnym z przypadków nie wykazały istotności statystycznej. W przypadku wykresów A ($p = 0,054076$), C ($p = 0,057143$) oraz J ($p = 0,058828$) wartość p jest zbliżona do istotności statystycznej, ale ostatecznie nie widać korelacji między grupami.

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

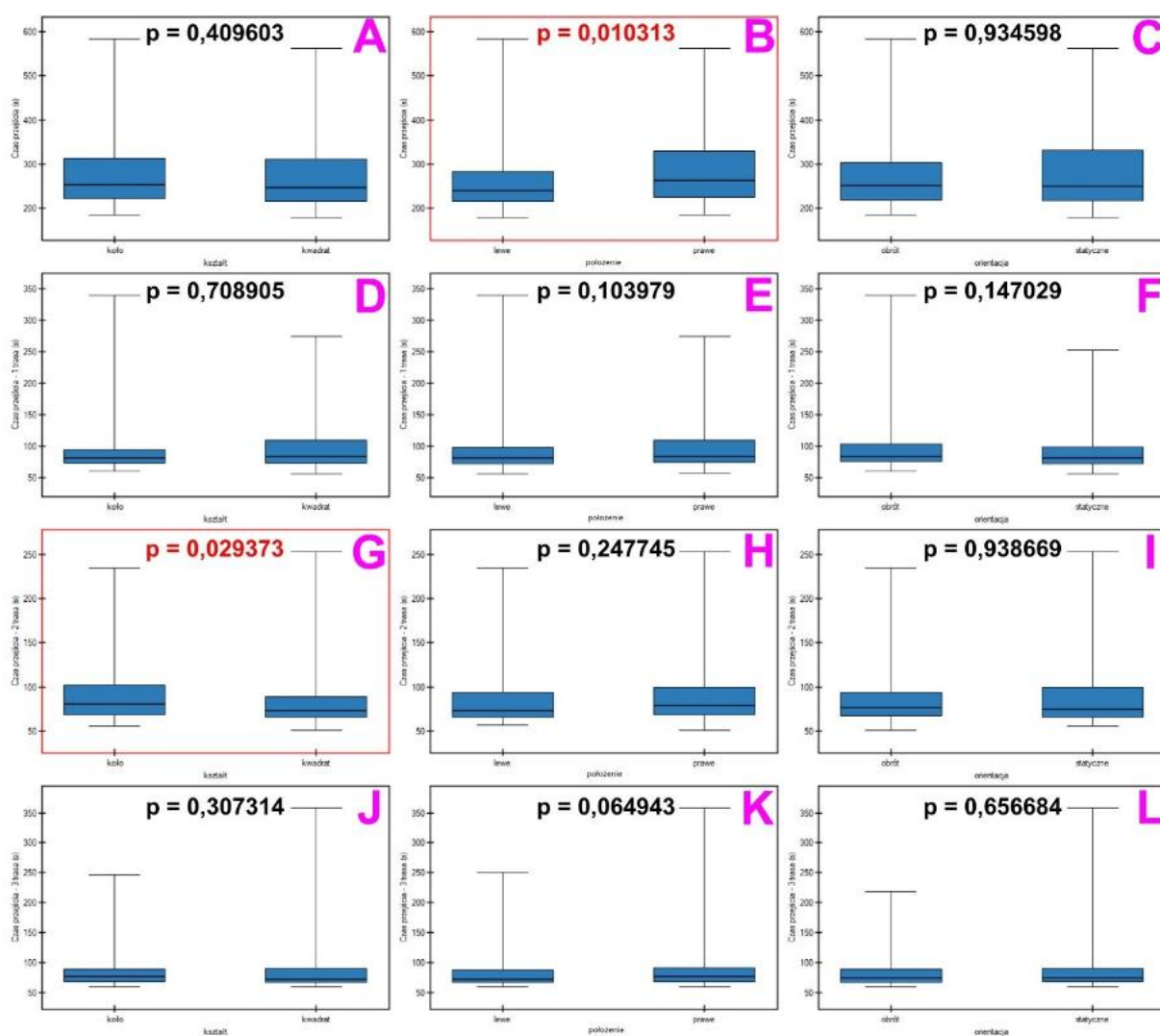
		Kod	Wszystkie trasy	Trasa 1	Trasa 2	Trasa 3
Suma czasu przejścia dla mini-map na podstawie jednego parametru (224 osoby)	kształt (112 osób)		30577	10662	10216	9656
			30464	10747	9491	10184
Czas przejścia (s)	położenie (112 osób)		29372	10322	9640	9367
			31670	11087	10067	10473
Mediana czasu przejścia dla mini-map na podstawie jednego parametru (224 osoby)	orientacja (112 osób)		30274	10968	9596	9669
			30767	10441	10111	10171
Czas przejścia (s)	kształt (112 osób)		253	82	81	77
			246	84	74	72
Mediana czasu przejścia dla mini-map na podstawie jednego parametru (224 osoby)	położenie (112 osób)		239	82	74	72
			263	84	79	77
Czas przejścia (s)	orientacja (112 osób)		252	85	77	75
			249	82	75	75

Ryc. 19 Zestawienie tabelaryczne sumy i mediany czasu przejścia dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras na podstawie jednego parametru projektowania mini-mapy

Rycina 19 prezentuje wyniki dotyczące czasu przejścia (s) dla całej aplikacji i poszczególnych tras, grupując użytkowników pod względem jednej zmiennej projektowania mini-mapy (kształt, położenie, orientacja). Największą różnicę w sumarycznym czasie przejścia całej aplikacji względem jednego parametru odnotowano dla położenia mini-mapy na ekranie (położenie lewe – 29372 s, położenie prawe – 31670 s), uzyskując różnicę czasu przejścia między nimi na poziomie 2298 sekund (około 21 sekund na 1 użytkownika). Dla 1 trasy ponownie największa różnica zauważalna jest dla parametru położenia, z większą wartością dla mini-map prawych (11087 s), niż mini-mapy lewe (10322 s). W przypadku 2 trasy wykazano większe zróżnicowanie pomiędzy parametrami związane z sumarycznym czasem przejścia. Dla parametru kształtu, zdecydowanie szybciej przechodzili użytkownicy z mini-mapą kwadratową (9491 s) niż mini-mapą kołową (10216 s). Użytkownicy związani z mini-mapami lewymi (9640 s) ponownie szybciej przechodzili trasy niż mini-mapy prawe (10067 s). Natomiast dla parametru orientacji można odnotować znaczną różnicę dla mini-map obrotowych (9596 s), względem mini-map statycznych (10111 s). Dla 3 trasy ponownie dla parametru położenia, lewe mini-mapy oraz dla parametru orientacji, obrotowe mini-mapy przechodziły zdecydowanie szybciej trasy. Jednakże dla parametru kształtu można zauważyć sporą zmianę, gdzie dla 3 trasy kształt kołowy (9656 s) mini-mapy odnotował mniejszy sumaryczny czas przejścia niż kształt kwadratowy (10184 s).

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

















W przypadku mediany czasu przejścia całej aplikacji, podobnie jak przy sumarycznym czasie przejścia, największe różnice odnotowano przy parametrze położenia lewych mini-map (239 s) względem mini-map prawych (263 s). Dla 1 trasy nie odnotowano dużych różnicowań mediany czasu przejścia pomiędzy parametrami, wykazując największą wartość dla orientacji obrotowej (85 s), natomiast najniższa wartość przypadła trzem parametrom mini-map kołowych, po lewej stronie ekranu oraz statycznych (82 s). W przypadku 2 trasy większe różnice uzyskano w parametrze kształtu na korzyść kwadratu (74 s) w odniesieniu do koła (81 s) oraz w parametrze położenia na korzyść lewych mini-map (74 s) w odniesieniu do prawych mini-map (79 s). Dla 3 trasy zauważano podobną zależność ponownie na korzyść kształtu kwadratu oraz lewych mini-map.



Ryc. 20 Zestawienie wykresowe testu U Manna-Whitneya dla czasu przejścia na podstawie jednego parametru projektowania mini-mapy wraz z wynikiem istotności statystycznej (czas przejścia wszystkich tras [A – kształt, B – położenie, C – orientacja], 1 trasy [D – kształt, E – położenie, F – orientacja], 2 trasy [G – kształt, H – położenie, I – orientacja], 3 trasy [J – kształt, K – położenie, L – orientacja])

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

W następnym kroku wykorzystano test dla danych nieparametrycznych U Manna-Whitneya, ponieważ występują tylko dwie grupy zmiennych, w celu zweryfikowania korelacji między grupami (Ryc. 20). Testy we dwóch przypadkach wykazały istotność statystyczną (wykres B oraz G). Dla wykresu B przedstawiano wykres czasu przejścia wszystkich tras względem parametru położenia. Z istotności statystycznej ($p = 0,010313$) oraz mediany czasu przejścia można wywnioskować, że użytkownicy, którzy poruszali się po aplikacji z mini-mapą zaprojektowaną po lewej stronie ekranu szybciej przechodzili całą aplikację niż użytkownicy z mini-mapą położoną po prawej stronie ekranu. Współczynnik d Cohena o wielkości 0,347075 informuje, że wielkość efektu jest na poziomie od małego do średniego, co oznacza, że różnica jest umiarkowana względem grup. Dla wykresu G przedstawiono wykres czasu przejścia 2 trasy względem parametru kształtu mini-mapy. Z istotności statystycznej ($p = 0,029373$) oraz mediany czasu przejścia, można wywnioskować, że użytkownicy, którzy poruszali się po aplikacji w trakcie 2 trasy z mini-mapą kwadratową szybciej przechodzili całą aplikację niż użytkownicy z mini-mapą o kształcie koła. Współczynnik d Cohena o wielkości 0,293899 informuje, że wielkość efektu jest na poziomie od małego do średniego.

	Kod	Wszystkie trasy	Trasa 1	Trasa 2	Trasa 3	
Suma całkowitego dystansu dla poszczególnych wariantów mini-map (28 osób)		71149	24846	24213	22090	
		71906	23534	25314	23058	
		69489	22480	22870	24139	
		76993	23668	25659	27666	
		67156	22202	20700	24254	
		66702	21292	21145	24265	
		70691	26178	20652	23861	
		75810	24336	23674	27800	
	Wszyscy (224 osoby)	569896	188536	184227	197133	
	Mediana całkowitego dystansu dla poszczególnych wariantów mini-map (28 osób)		2361	764	850	741
			2334	716	697	773
			2325	747	666	791
			2565	727	838	774
			2177	714	661	705
		2200	742	653	729	
		2266	764	645	716	
		2344	747	690	742	
Wszyscy (224 osoby)	2290	744	665	742		

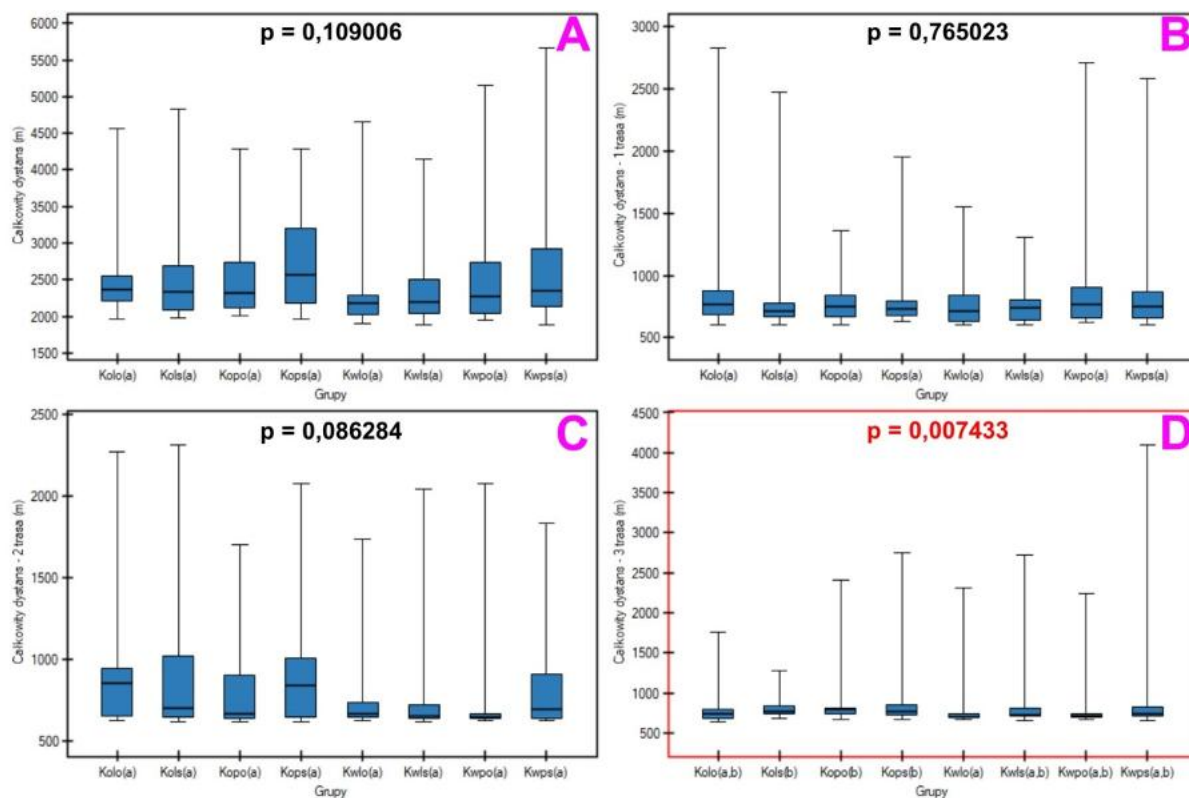
Ryc. 21 Zestawienie tabelaryczne sumy i mediany całkowitego dystansu dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

Rycina 21 prezentuje wyniki dotyczące całkowitego dystansu (m) zarówno dla całej aplikacji (3 trasy) jak i dla poszczególnych tras. Największą wartość sumarycznego całkowitego dystansu całej aplikacji odnotowano w grupie KoPS (76993 m), a najniższą w grupie KwLS (66702 m), uzyskując różnicę całkowitego dystansu między nimi na poziomie 10291 metrów (około 368 metrów na 1 użytkownika). W przypadku 1 trasy zakres całkowitego dystansu mieścił się w przedziale od 21292 metrów (KwLS) do 26178 metrów (KwPO), uzyskując różnicę czasu przejścia między nimi na poziomie 4886 metrów (około 175 metrów na 1 użytkownika). Dla 2 trasy największą wartość wykazała grupa użytkowników KoPS (25659 m), natomiast najniższą wartość wykazała grupa użytkowników KwPO (20652 m), uzyskując różnicę całkowitego dystansu między nimi na poziomie 5007 metrów (około 179 metrów na 1 użytkownika). W przypadku 3 trasy zakres całkowitego dystansu mieścił się w przedziale od 22090 metrów (KoLO) do 27800 metrów (KwPS), uzyskując różnicę całkowitego dystansu między nimi na poziomie 5710 metrów (około 204 metry na 1 użytkownika).

W przypadku całkowitego dystansu przejścia całej aplikacji wykazano, że trzy grupy charakteryzują się niższym wynikiem (KwLO – 2177 m, KwLS – 2200 m, KwPO – 2266 m) niż mediana całkowitego dystansu wszystkich użytkowników badania (2290 m). Najwyższą wartość mediany odnotowała grupa KoPS (2565 m). Dla 1 trasy mediana całkowitego dystansu wszystkich użytkowników badania wyniosła 744 metry, poniżej tej wartości znalazły się 4 grupy (KwLO - 714 m, KoLS – 716 m, KoPS – 727 m, KwLS – 742 m). Najwyższą wartość mediany dla 1 trasy odnotowały grupy KoLO i KwPO (764 m). W przypadku mediany całkowitego dystansu 2 trasy wartości poniżej wyniku charakteryzującego wszystkich badanych użytkowników (665 m), zaobserwowano wśród trzech grup KwPO (645 m), KwLS (653 m) oraz KwLO (661 m). Najwyższą wartość mediany dla 2 trasy wykazano w grupie KoLO (850 m). Dla 3 trasy mediana całkowitego dystansu wszystkich użytkowników wyniosła 742 metry, poniżej tej wartości znalazły się 4 grupy (KwLO – 705 m, KwPO – 716 m, KwLS – 729 m oraz KoLO – 741 m). Najwyższą wartość mediany dla 3 trasy odnotowała grupa KoPO (791 m).

























4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 22 Zestawienie wykresowe testu ANOVA Kruskal-Wallis dla całkowitego dystansu 8 grup użytkowników wraz z wynikiem istotności statystycznej (A – całkowity dystans wszystkich tras, B – 1 trasy, C – 2 trasy, D – 3 trasy)

Aby zweryfikować, czy istnieją statystyczne różnice i korelacje całkowitego dystansu, przeprowadzono analizę statystyczną (Ryc. 22). Na podstawie tego założenia przeprowadzono testy normalności jednowymiarowej (test Shapiro-Wilka, test Kołmogorowa-Smirnova oraz test skośności i kurtozy D'Agostino-Pearsona), aby sprawdzić, czy pierwotne dane całkowitego dystansu mają rozkład normalny. Wszystkie wyniki testów badających normalność rozkładu stwierdziły, że rozkład nie jest rozkładem normalnym ($p < 0,05$). W dalszych krokach wykorzystano test dla danych nieparametrycznych ANOVA Kruskala-Wallis, ponieważ występuje więcej niż dwie grupy zmiennych, w celu zweryfikowania korelacji między grupami. Wykonano również analizę post-hoc za pomocą korekty Benjamina-Hochberga, aby wykazać szczegółowe różnice w zadanych zmiennych. Jedynie dla wykresu D (całkowity dystans dla 3 trasy) testy wykazały istotność statystyczną ($p = 0,007433$), w którym również zaobserwowano istotność przy procedurze Benjamina-Hochberga. Na podstawie odnotowanych istotności ($p = 0,027854$) oraz mediany całkowitego dystansu można wywnioskować, że użytkownicy, którzy poruszali się z mini-mapą KwLO (705 m) pokonywali mniejsze odległości podczas trasy 3 między kluczowymi punktami niż użytkownicy z mini-mapami KoLS (773 m), KoPO (791 m) oraz KoPS (774 m).

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

	Kod	Wszystkie trasy	Trasa 1	Trasa 2	Trasa 3	
Suma całkowitego dystansu dla mini-map na podstawie dwóch parametrów (224 osoby)		143055	48380	49527	45148	
	kształt-położenie (56 osób)		133858	43494	41845	48519
			146482	46148	48529	51805
			146501	50514	44326	51661
	kształt-orientacja (56 osób)		140638	47326	47083	46229
			148899	47202	50973	50724
			137847	48380	41352	48115
			142512	45628	44819	52065
	położenie-orientacja (56 osób)		138305	47048	44913	46344
			140180	48658	43522	48000
			138608	44826	46459	47323
			152803	48004	49333	55466
Całkowity dystans (m)		2342	747	718	760	
	kształt-położenie (56 osób)		2177	741	655	722
			2469	741	689	777
			2293	752	651	732
	kształt-orientacja (56 osób)		2341	763	695	776
			2440	720	714	774
			2180	747	650	709
			2267	744	655	738
	położenie-orientacja (56 osób)		2240	761	685	719
			2250	727	656	747
			2309	757	651	742
			2437	736	726	754

Ryc. 23 Zestawienie tabelaryczne sumy i mediany całkowitego dystansu dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras na podstawie dwóch parametrów projektowania mini-mapy

Rycina 23 prezentuje wyniki dotyczące całkowitego dystansu (m) dla całej aplikacji i poszczególnych tras, grupując użytkowników pod względem dwóch zmiennych projektowania mini-mapy (kształt-położenie, kształt-orientacja, położenie-orientacja). Największą wartość sumarycznego całkowitego dystansu całej aplikacji dla parametrów kształt-położenie odnotowano w grupie użytkowników z mini-mapą kwadratową i po prawej stronie ekranu (146501 m), a najniższą w grupie użytkowników z mini-mapą kwadratową i po lewej stronie ekranu (133858 m). Dla parametrów kształt-orientacja najwyższa wartość sumaryczna całkowitego dystansu wykazano dla grupy z mini-mapą kołową i statyczną (148899 m), a

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

najniższą wartość dla grupy z mini-mapą kwadratową i obrotową (137847 m). W ostatnim przypadku parametrów położenie-orientacja najwyższy sumaryczny całkowity dystans aplikacji uzyskała grupa użytkowników z mini-mapą po prawej stronie ekranu i statyczną (152803 m), natomiast najniższą wartość wykazano w grupie mini-mapy po lewej stronie ekranu i obrotowej (138305 m). W przypadku 1 trasy dla parametru kształt-położenie zakres całkowitego dystansu mieścił się w przedziale od 43494 metrów (kwadrat po lewej stronie ekranu) do 50514 metrów (kwadrat po prawej stronie ekranu). Dla parametrów kształt-orientacja zakres dystansu został odnotowany od 48380 metrów (kwadrat obrotowy) do 45628 metrów (kwadrat statyczny). Najwyższą wartość dla parametrów położenie-orientacja wykazano przy mini-mapach lewych i statycznych (48658 m), natomiast najniższą wartość wykazano przy mini-mapach prawych obrotowych (44826 m). Dla 2 trasy największą wartość w grupie parametrów kształt-położenie wykazali użytkownicy korzystający z mini-mapy kołowej po lewej stronie ekranu (49527 m), natomiast najniższą wartość wykazała grupa użytkowników z mini-mapą kwadratową po lewej stronie ekranu (41845 m). Parametry kształt-orientacja odnotowały największą wartość dla grupy z mini-mapą kołową i statyczną (50973 m), natomiast najniższą wartość dla grupy z mini-mapą kwadratową i obrotową (41352 m). W ostatnich parametrach położenia-orientacji zakres całkowitego dystansu mieścił się w przedziale od 43522 metrów (statyczna mini-mapą po lewej stronie ekranu) do 49333 metrów (statyczna mini-mapą po prawej stronie ekranu). W przypadku 3 trasy zakres całkowitego dystansu parametrów kształtu-położenia mieścił się w przedziale od 45148 metrów (kształt koła po lewej stronie ekranu) do 51805 metrów (koło po prawej stronie ekranu). Parametry kształt-orientacja odnotowały największą wartość dla grupy z mini-mapą kwadratową i statyczną (52065 m), natomiast najniższą wartość dla grupy z mini-mapą kołową i obrotową (46229 m). Najwyższą wartość dla parametrów położenie-orientacja wykazano przy mini-mapach prawych statycznych (55466 m), natomiast najniższą wartość wykazano przy mini-mapach lewych obrotowych (46344 m).

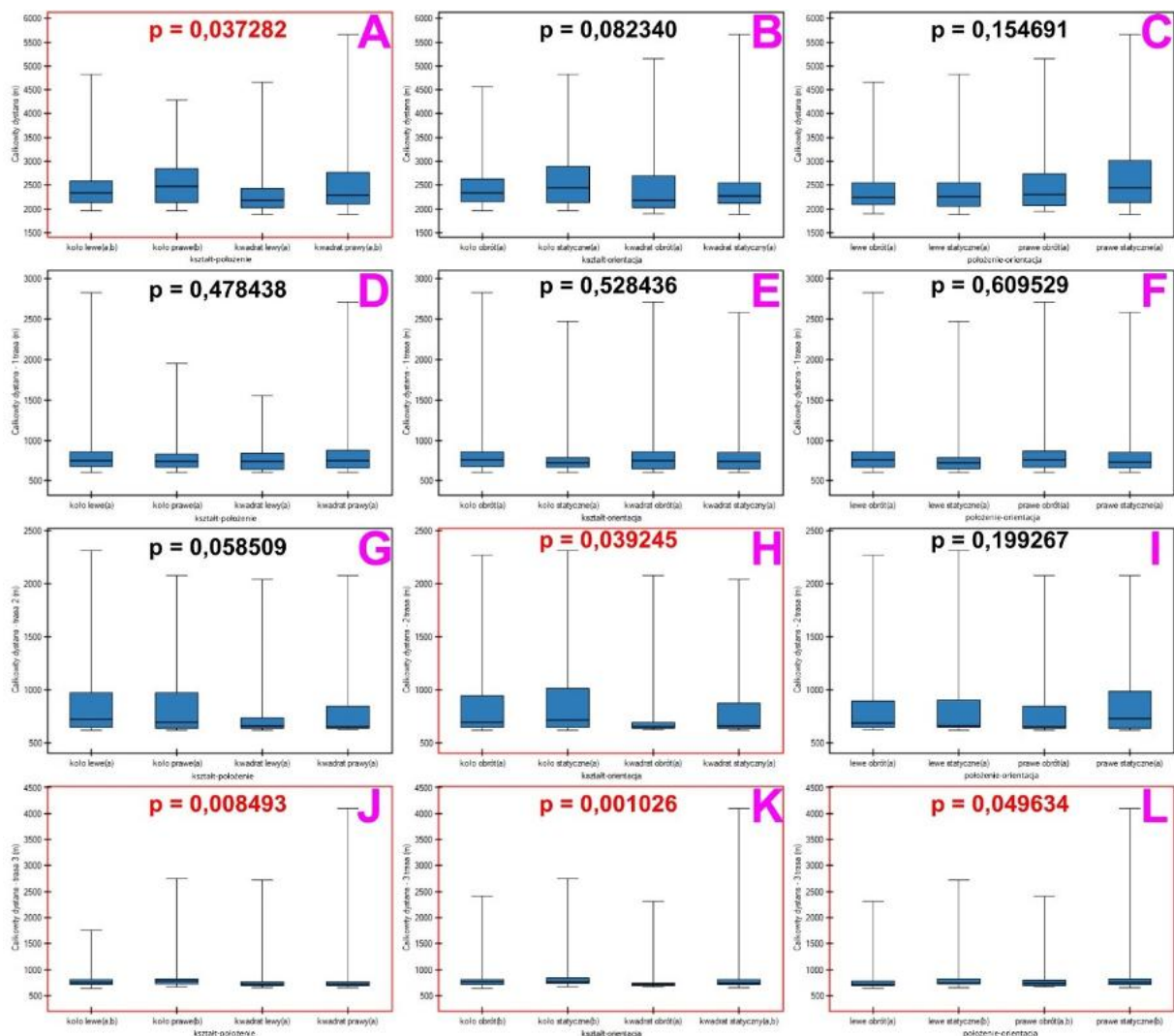
W przypadku mediany całkowitego dystansu całej aplikacji dla parametrów kształt-położenie wykazano, że mini-mapy po lewej i po prawej stronie ekranu o kształcie kwadratu (lewy kwadrat 2177 m, prawy kwadrat 2293 m), charakteryzowały się niższym wynikiem niż mediana całkowitego dystansu dla mini-map kołowych (koło lewe 2342 m, koło prawe 2469 m). Dla parametrów związanych z kształtem-orientacją, użytkownicy korzystający z mini-map kwadratowych wybierali krótsze trasy (obrot 2180 m, statyczny 2267 m) od kształtów kołowych (obrot 2341 m, statyczny 2440 m). Natomiast parametry położenia-

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

orientacji wykazują różnice, przy niższych wartościach mini-map zlokalizowanych po lewej stronie ekranu (lewe obrotowe 2240 m, lewe statyczne 2250 m) niż mini-mapy zlokalizowane po prawej stronie ekranu (prawe obrotowe 2309 m, prawe statyczne 2437 m). Dla 1 trasy mediany wyników całkowitego dystansu dla parametrów kształt-położenie są zbliżone do siebie w zakresie dystansu od 741 metrów (kwadrat lewy i koło prawe) do 752 metrów (kwadrat prawy). Inny przedział wartości dystansu widać dla parametrów kształt-orientacja, gdzie koło statyczne osiągnęło wynik 720 metrów, natomiast koło obrotowe osiągnęło wynik 763 metrów. W ostatnim przypadku parametrów położenie-orientacja wyniki również nie były do siebie zbliżone, osiągając wyniki od 727 metrów (mini-mapy lewe statyczne) do 761 metrów (mini-mapy lewe obrotowe). Dla 2 trasy największą wartość dla parametrów kształt-położenie, uzyskała grupa użytkowników z mini-mapą kołową umieszczoną po lewej stronie ekranu (718 m), natomiast najniższą wartość uzyskała grupa z mini-mapą kwadratową umieszczoną po prawej stronie ekranu (651 m).

Natomiast dla parametrów kształt-orientacja, najwyższa wartość jest zauważalna przy grupie użytkowników z mini-mapą kołową statyczną (714 m), a najniższa wartość odnotowana jest w grupach z mini-mapą kwadratową obrotową (650 m). W ostatniej grupie parametrów położenia-orientacji, największa wartość przypada grupie z mini-mapą statyczną po prawej stronie ekranu (726 m), natomiast najniższą wartość uzyskała grupa z mini-mapą obrotową po prawej stronie ekranu (651 m). W przypadku 3 trasy zakres mediany całkowitego dystansu dla parametrów kształt-położenie mieścił się w przedziale od 722 metrów (lewy kwadrat) do 777 metrów (prawe koło). Dla parametrów kształt-orientacja, najniższą wartość odnotowano dla kwadratu obrotowego (709 m), a najwyższą wartość dla koła obrotowego (776 m). Najniższą wartość dla parametrów położenie-orientacja wykazano przy mini-mapach lewych obrotowych (719 m), a najwyższą wartość przy mini-mapach prawych statycznych (754 m).

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej















Ryc. 24 Zestawienie wykresowe testu ANOVA Kruskal-Wallis dla całkowitego dystansu pod względem dwóch zmiennych projektowania mini-mapy wraz z wynikiem istotności statystycznej (całkowity dystans wszystkich tras [A – kształt-położenie, B – kształt-orientacja, C – położenie-orientacja], 1 trasy [D – kształt-położenie, E – kształt-orientacja, F – położenie-orientacja], 2 trasy [G – kształt-położenie, H – kształt-orientacja, I – położenie-orientacja], 3 trasy [J – kształt-położenie, K – kształt-orientacja, L – położenie-orientacja])

W następnym kroku wykorzystano test dla danych nieparametrycznych ANOVA Kruskala-Wallisa w celu zweryfikowania korelacji między grupami (Ryc. 24). Wykonano również analizę post-hoc za pomocą korekty Benjamina-Hochberga, aby wykazać szczegółowe różnice w zadanych zmiennych. Testy w pięciu przypadkach wykazały istotność statystyczną (wykresy A, H, J, K oraz L). Dla wykresu A odnotowano istotność statystyczną przy procedurze Benjamina-Hochberga ($p = 0,034212$) dla mini-map kwadratowych po lewej stronie ekranu oraz mini-map kołowych po prawej stronie ekranu. Na podstawie mediany całkowitego dystansu można wywnioskować, że użytkownicy, którzy poruszali się z mini-mapą kwadratową po lewej stronie (2177 m) pokonywali mniejsze odległości podczas wszystkich tras niż

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

użytkownicy z mini-mapami kołowymi po prawej stronie (2469 m). Dla wykresu H odnotowano istotność statystyczną względem całkowitego dystansu dla 2 trasy pomiędzy dwoma parametrami mini-mapy, niestety poprawka Benjamina-Hochberga nie wykazała żadnych istotnych różnic. W przypadku 3 trasy dla wszystkich grup związanych z dwoma parametrami wykazano istotności statystyczne (wykresy J, K oraz L). Dla wykresu J z parametrami kształt-położenie, procedura Benjamina-Hochberga odnotowała dwie istotne korelacje między grupami. Na podstawie istotności ($p = 0,014785$ oraz $p = 0,025097$) oraz medianach całkowitego dystansu zauważono różnicę, że użytkownicy z mini-mapami lewymi kwadratowymi (722 m) oraz prawymi kwadratowymi (732 m) wybierali krótsze odcinki między kluczowymi punktami 3 trasy niż użytkownicy z mini-mapami prawymi kołowymi (776 m). Podobnie jak w poprzednim diagramie, dla wykresu K z parametrami kształt-orientacja, procedura Benjamina-Hochberga odnotowała dwie istotne korelacje między grupami. Na podstawie istotności ($p = 0,020194$ oraz $p = 0,000506$) oraz medianach całkowitego dystansu wykazano różnicę, że użytkownicy z mini-mapami kołowymi obrotowymi (776 m) oraz kołowymi statycznymi (774 m) wybierali dłuższe trasy niż użytkownicy, którzy mieli do dyspozycji mini-mapę obrotową w kwadracie (709 m). Wykres L prezentuje różnice dla parametrów położenia-orientacji dla 3 trasy całkowitego dystansu, gdzie również jak w pozostałych wykresach test Benjamina-Hochberga wykazał dwie istotne korelacje. Na podstawie istotności ($p = 0,047734$ oraz $p = 0,047734$) oraz medianach całkowitego dystansu wykazano różnicę, że użytkownicy, którzy poruszali się po aplikacji z mini-mapami lewymi (747 m) i prawymi (754 m) statycznymi, wybierali dłuższe trasy niż użytkownicy z mini-mapą obrotową po lewej stronie ekranu (719 m).

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

		Kod	Wszystkie trasy	Trasa 1	Trasa 2	Trasa 3
Suma całkowitego dystansu dla mini-map na podstawie jednego parametru (224 osoby)	kształt (112 osób)		289537	94528	98056	96953
			280359	94008	86171	100180
Całkowity dystans (m)	położenie (112 osób)		276913	91874	91372	93667
			292983	96662	92855	103466
Mediana całkowitego dystansu dla mini-map na podstawie jednego parametru (224 osoby)	orientacja (112 osób)		278485	95706	88435	94344
			291411	92830	95792	102789
	kształt (112 osób)		2364	743	705	775
			2220	747	653	728
	położenie (112 osób)		2240	742	670	737
			2354	746	659	748
	orientacja (112 osób)		2257	761	664	732
			2331	734	673	751

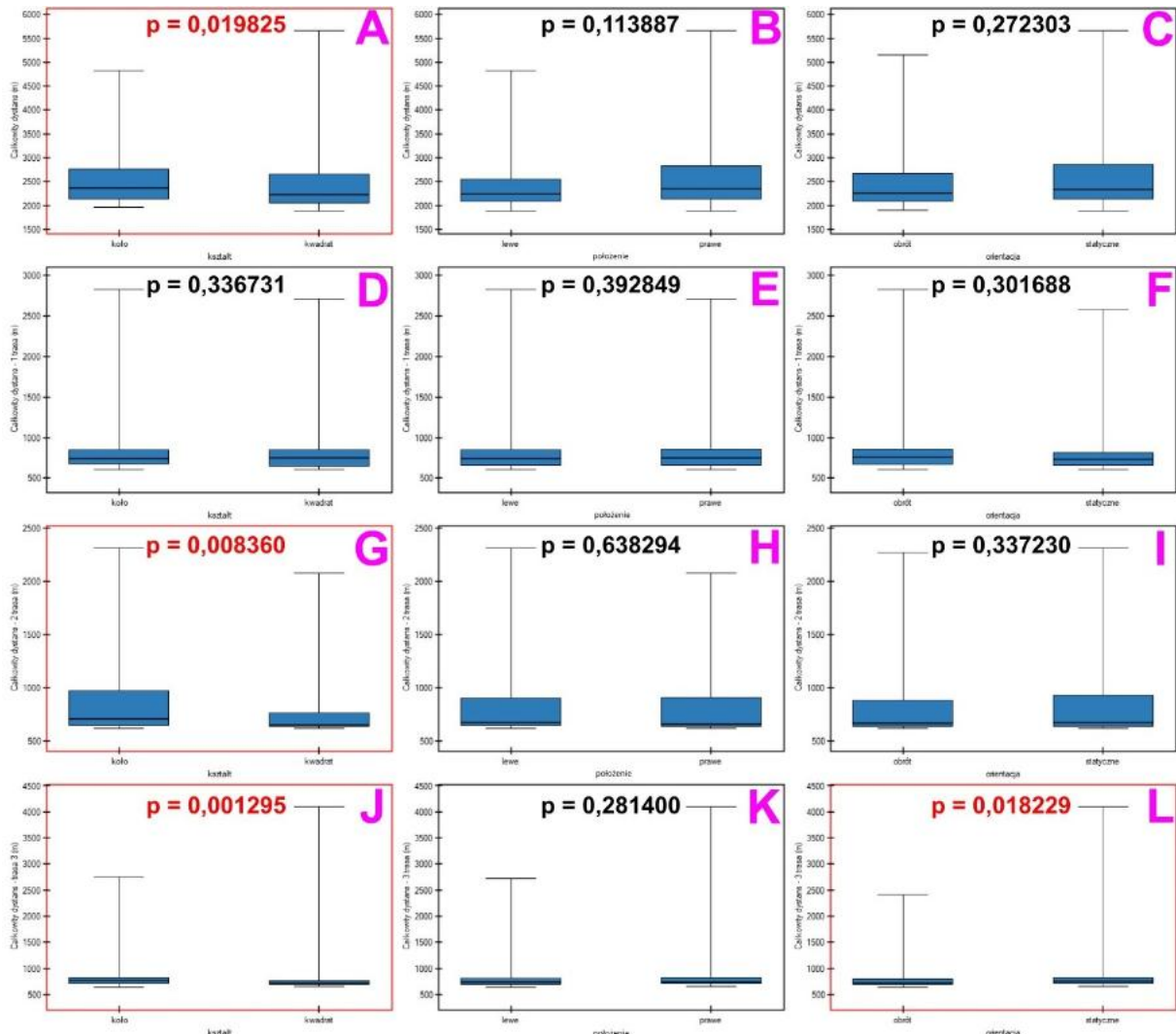
Ryc. 25 Zestawienie tabelaryczne sumy i mediany całkowitego dystansu dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras na podstawie jednego parametru projektowania mini-mapy

Rycina 25 prezentuje wyniki dotyczące całkowitego dystansu (m) dla całej aplikacji i poszczególnych tras, grupując użytkowników pod względem jednej zmiennej projektowania mini-mapy (kształt, położenie, orientacja). Największą różnicę w sumarycznym całkowitym dystansie całej aplikacji względem jednego parametru odnotowano dla położenia mini-mapy na ekranie (położenie lewe – 276913 m, położenie prawe – 292983 m), uzyskując różnicę całkowitego dystansu na poziomie 16070 m (około 72 m na 1 użytkownika). Dla 1 trasy ponownie największa różnica zauważalna jest dla parametru położenia, z większą wartością dla mini-map prawych (96662 m), niż mini-mapy lewe (91874 m). W przypadku 2 trasy dla parametru kształtu, zdecydowanie krótsze trasy wybierali użytkownicy z mini-mapą kwadratową (86171 m) niż mini-mapą kołową (98056 m). Natomiast dla parametru orientacji można odnotować znaczną różnicę dla mini-map obrotowych (88435 m), względem mini-map statycznych (95792 m). Dla 3 trasy można zauważyć duże różnice pomiędzy poszczególnymi parametrami, z których największą można wyróżnić dla parametru położenia, w którym mini-mapy lewe (93667 m) zdecydowanie wybierały krótsze trasy niż mini-mapy prawe (103466 m).

W przypadku mediany całkowitego dystansu całej aplikacji, inaczej niż przy sumarycznym całkowitym dystansie, największe różnice odnotowano przy parametrze kształtu kwadratowych mini-map (2220 m) względem mini-map kołowych (2364 m). Dla 1 trasy odnotowano dużą różnicę mediany całkowitego dystansu dla parametru orientacji, wykazując największą wartość dla orientacji obrotowej (761 m), natomiast najniższą wartość dla orientacji statycznej (734 m). W przypadku 2 trasy większe różnice uzyskano w parametrze kształtu na korzyść kwadratu

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

(653 m) w odniesieniu do koła (705 m). Dla 3 trasy zauważano podobną zależność ponownie na korzyść kształtu kwadratu (728 m), w odniesieniu do koła (775 m).



















Ryc. 26 Zestawienie wykresowe testu U Manna-Whitneya dla całkowitego dystansu na podstawie jednego parametru wraz z wynikiem istotności statystycznej (całkowity dystans wszystkich tras [A – kształt, B – położenie, C – orientacja], 1 trasy [D – kształt, E – położenie, F – orientacja], 2 trasy [G – kształt, H – położenie, I – orientacja], 3 trasy [J – kształt, K – położenie, L – orientacja])

W następnym kroku wykorzystano test dla danych nieparametrycznych U Manna-Whitneya, ponieważ występują tylko dwie grupy zmiennych, w celu zweryfikowania korelacji między grupami (Ryc. 26). Testy we czterech przypadkach wykazały istotność statystyczną (wykres A, G, J oraz L). Dla wykresu A przedstawiano wykres całkowitego dystansu wszystkich tras względem parametru kształtu. Z istotności statystycznej ($p = 0,019825$) oraz mediany całkowitego dystansu można wywnioskować, że użytkownicy, którzy poruszali się po aplikacji z mini-mapą zaprojektowaną w kształcie kwadratu wybierali krótsze przejścia aplikacji niż użytkownicy z mini-mapą w kształcie koła. Współczynnik d Cohena o wielkości 0,314636 informuje, że wielkość efektu jest na poziomie od małego do średniego. Dla wykresu G

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

przedstawiono wykres całkowitego dystansu 2 trasy względem parametru kształtu mini-mapy. Z istotności statystycznej ($p = 0,008360$) oraz mediany całkowitego dystansu, można wywnioskować, że użytkownicy wybierali krótsze odcinki przejścia w trakcie 2 trasy z mini-mapą kwadratową niż użytkownicy z mini-mapą o kształcie koła. Współczynnik d Cohena o wielkości $0,357032$ informuje, że wielkość efektu jest na poziomie od małego do średniego. W przypadku wykresu J na podstawie istotności statystycznej ($p = 0,001295$) oraz mediany całkowitego dystansu, wykazuje się różnicę, że użytkownicy z mini-mapą kwadratową wybierali krótsze odcinki w trakcie 3 trasy, niż użytkownicy z mini-mapą kołową. Współczynnik d Cohena o wielkości $0,43793$ informuje, że wielkość efektu jest na poziomie od małego do średniego, ze wskazaniem na większy efekt różnicy między mini-mapami. Dla ostatniego wykresu L, istotność statystyczna ($p = 0,018229$) oraz mediany całkowitego dystansu informują nas, że użytkownicy z mini-mapą obrotową wybierali krótsze trasy niż użytkownicy z mini-mapami statycznymi. Współczynnik d Cohena o wielkości $0,318936$ informuje, że wielkość efektu jest na poziomie od małego do średniego.

	Kod	Wszystkie trasy	Trasa 1	Trasa 2	Trasa 3	
Całkowity czas patrzenia na mini-mapę (s)		112	40	35	32	
		108	37	36	34	
		118	40	37	37	
		123	35	36	41	
		100	36	30	29	
		106	36	28	35	
		119	40	29	33	
		109	38	32	35	
	Wszyscy (224 osoby)	112	37	33	35	
	Mediana procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę dla poszczególnych wariantów mini-map (28 osób)		43,6%	45,8%	42,8%	39,7%
			46,7%	44,5%	46,7%	43,9%
			45,6%	46,3%	44,6%	43,3%
			47,4%	42,7%	43,1%	49,7%
			39,2%	40,8%	39,3%	37,9%
		43,9%	45,1%	39,8%	44,8%	
		42,5%	42,3%	40,5%	47,0%	
		46,4%	47,0%	44,5%	46,7%	
Wszyscy (224 osoby)	44,0%	44,7%	42,6%	44,5%		

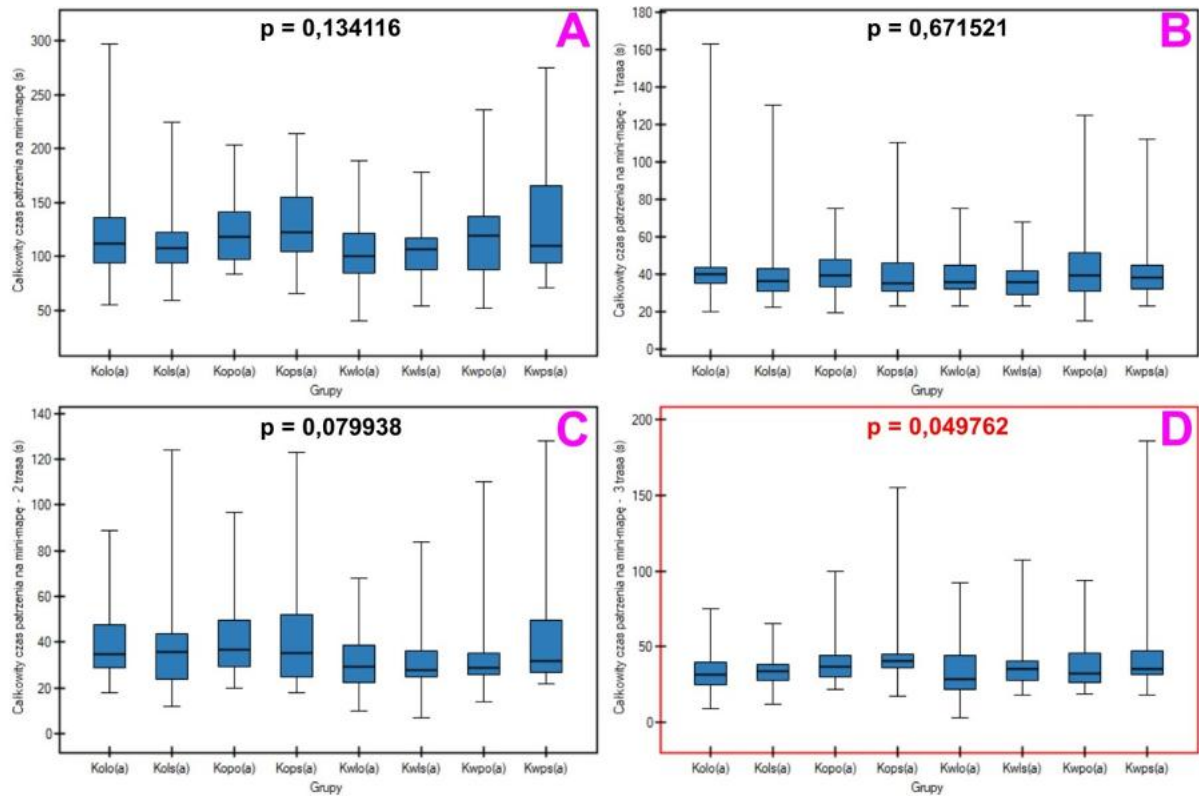
Ryc. 27 Zestawienie tabelaryczne mediany całkowitego czasu patrzenia na mini-mapę oraz mediany procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

Rycina 27 prezentuje wyniki dotyczące czasu patrzenia na mini-mapę (s) zarówno dla całej aplikacji (3 trasy) jak i dla poszczególnych tras. Największą wartość mediany czasu patrzenia na mini-mapę całej aplikacji odnotowano w grupie KwPS (123 s), a najniższą w grupie KwLO (100 s). W przypadku 1 trasy zakres mediany czasu patrzenia na mini-mapę mieścił się w przedziale od 35 sekund (KoPS) do 40 sekund (KoLO, KoPO oraz KwPO). Dla 2 trasy największą wartość wykazała grupa użytkowników KoPO (37 s), natomiast najniższą wartość wykazała grupa użytkowników KwLS (28 s). W przypadku 3 trasy zakres czasu patrzenia na mini-mapę mieścił się w przedziale od 29 sekund (KwLO) do 41 sekund (KoPS).

W przypadku mediany procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę całej aplikacji wykazano, że cztery grupy charakteryzują się niższym wynikiem (KwLO – 39,2%, KwPO – 42,5%, KoLO – 43,6%, KwLS – 43,9%) niż mediana procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę wszystkich użytkowników badania (44,0%). Najwyższą wartość mediany odnotowała grupa KoPS (47,4%). Dla 1 trasy mediana procentowego czasu patrzenia na mini-mapę wszystkich użytkowników badania wyniosła 44,7 %, poniżej tej wartości znalazły się 4 grupy (KwLO – 40,8%, KwPO – 42,3%, KoPS – 42,7%, KoLS – 44,5%). Najwyższą wartość mediany dla 1 trasy odnotowała grupa KwPS (47,0%). W przypadku mediany procentowego czasu patrzenia na mini-mapę 2 trasy wartości poniżej wyniku charakteryzującego wszystkich badanych użytkowników (42,6%), zaobserwowano wśród grup KwLO (39,3%), KwLS (39,8%) oraz KwPO (40,5%). Najwyższą wartość mediany dla 2 trasy wykazano w grupie KoLS (46,7%). Dla 3 trasy mediana procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę wszystkich użytkowników wyniosła 44,5%, poniżej tej wartości znalazły się 4 grupy (KwLO – 37,9%, KoLO – 39,7%, KoPO – 43,3%, KoLO – 43,9%). Najwyższą wartość mediany dla 3 trasy odnotowała grupa KwPO (47,0%).

























4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 28 Zestawienie wykresowe testu ANOVA Kruskal-Wallis dla całkowitego czasu patrzenia na mini-mapę 8 grup użytkowników wraz z wynikiem istotności statystycznej (A – czas patrzenia na mini-mapę wszystkich tras, B – 1 trasy, C – 2 trasy, D – 3 trasy)

Aby zweryfikować, czy istnieją statystyczne różnice i korelacje czasu patrzenia na mini-mapę, przeprowadzono analizę statystyczną (Ryc. 28). Na podstawie tego założenia przeprowadzono testy normalności jednowymiarowej (test Shapiro-Wilka, test Kołmogorova-Smirnova oraz test skośności i kurtozy D'Agostino-Pearsona), aby sprawdzić, czy pierwotne dane czasu patrzenia na mini-mapę mają rozkład normalny. Wszystkie wyniki testów badających normalność rozkładu stwierdziły, że rozkład nie jest rozkładem normalnym ($p < 0,05$). W dalszych krokach wykorzystano test dla danych nieparametrycznych ANOVA Kruskala-Wallis, ponieważ występuje więcej niż dwie grupy zmiennych, w celu zweryfikowania korelacji między grupami. Wykonano również analizę post-hoc za pomocą korekty Benjamina-Hochberga, aby wykazać szczegółowe różnice w zadanych zmiennych. Jedynie dla wykresu D (czas patrzenia na mini-mapę dla 3 trasy) testy wykazały istotność statystyczną ($p = 0,049762$), niestety poprawka Benjamina-Hochberga nie wykazała żadnych istotnych różnic pomiędzy grupami.

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

	Kod	Wszystkie trasy	Trasa 1	Trasa 2	Trasa 3	
Mediana czasu patrzenia na mini-mapę dla mini-map na podstawie dwóch parametrów (224 osoby)	kształt-położenie (56 osób)		110	38	36	33
			101	36	29	34
			120	36	37	38
			117	39	31	34
	kształt-orientacja (56 osób)		115	40	37	35
			114	35	36	36
			106	38	29	32
			108	37	31	35
	położenie-orientacja (56 osób)		103	38	32	31
			107	36	33	34
			119	40	33	34
			118	36	35	37
Czas patrzenia na mini-mapę (s)	kształt-położenie (56 osób)		44,1%	45,5%	43,8%	41,8%
			42,4%	42,5%	39,5%	43,0%
			46,1%	43,9%	44,2%	45,7%
			44,3%	45,2%	42,2%	46,8%
	kształt-orientacja (56 osób)		43,9%	46,0%	44,1%	41,9%
			47,1%	42,9%	44,5%	47,6%
			41,4%	41,2%	40,1%	41,1%
			44,9%	46,1%	42,5%	46,0%
	położenie-orientacja (56 osób)		41,7%	44,4%	41,5%	39,2%
			44,4%	44,9%	42,1%	43,9%
			43,4%	45,2%	42,6%	44,5%
			47,0%	44,2%	43,9%	47,9%

Ryc. 29 Zestawienie tabelaryczne mediany czasu patrzenia na mini-mapę oraz mediany procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę i poszczególnych tras na podstawie dwóch parametrów projektowania mini-mapy

Rycina 29 prezentuje wyniki dotyczące mediany czasu patrzenia na mini-mapę (s) oraz medianę procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę dla całej aplikacji i poszczególnych tras, grupując użytkowników pod względem dwóch zmiennych projektowania mini-mapy (kształt-położenie, kształt-orientacja, położenie-orientacja). Największą wartość mediany czasu patrzenia na mini-mapę całej aplikacji dla parametrów kształt-położenie odnotowano w grupie użytkowników z mini-mapą kołową i po prawej stronie ekranu (120 s), a najniższą w grupie użytkowników z mini-mapą kwadratową i po lewej stronie ekranu (101 s). Dla parametrów kształt-orientacja najwyższa wartość mediany czasu patrzenia na mini-mapę wykazano dla grupy z mini-mapą kołową i obracającą się (115 s), a najniższą wartość dla

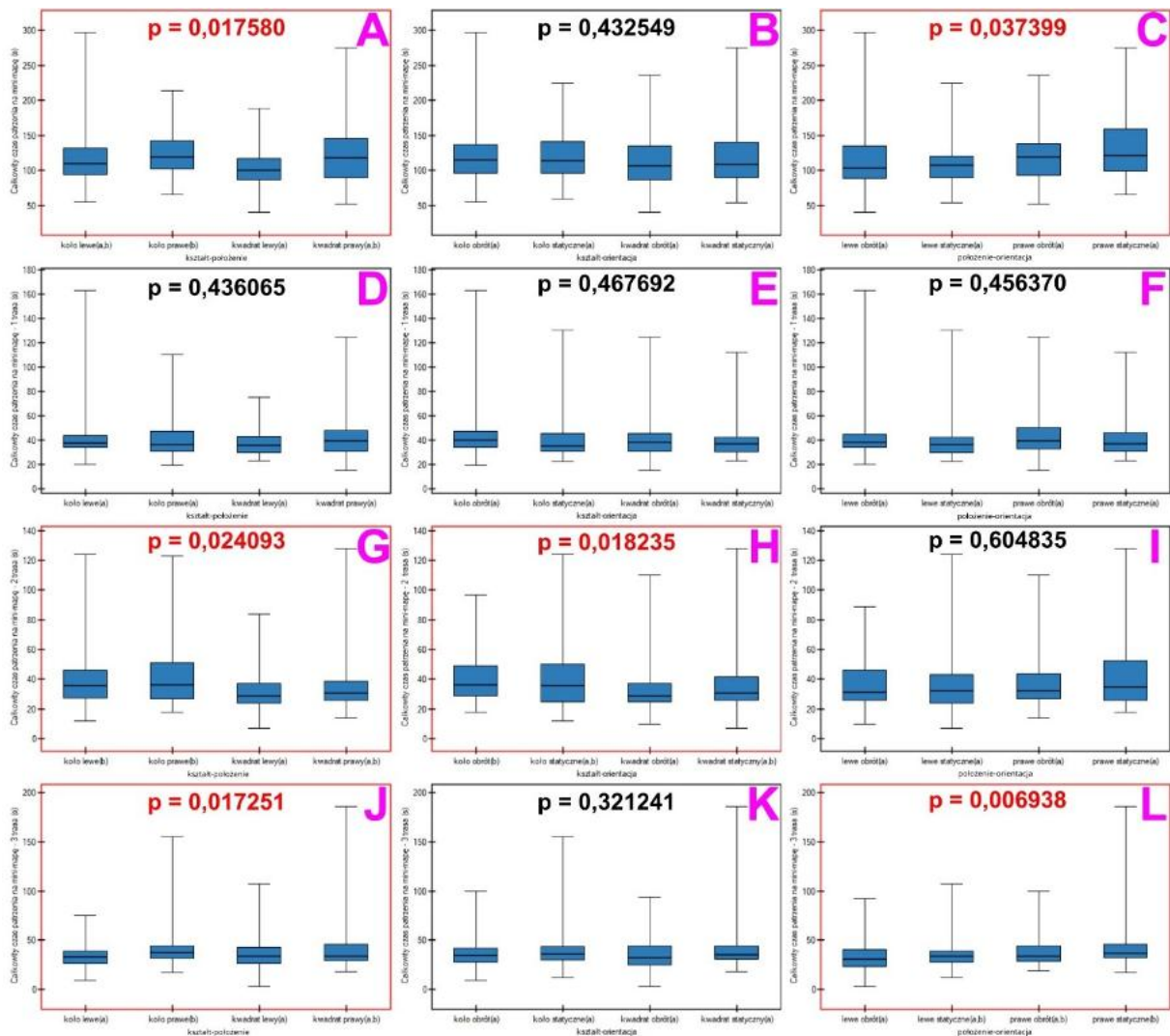
4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

grupy z mini-mapą kwadratową i obrotową (106 s). W ostatnim przypadku parametrów położenie-orientacja najwyższą medianę uzyskała grupa użytkowników z mini-mapą po prawej stronie ekranu i obrotową (119 s), natomiast najniższą wartość wykazano w grupie mini-mapy po lewej stronie ekranu i obrotowej (103 s). W przypadku 1 trasy dla wszystkich zmiennych parametrów (kształt-położenie, kształt-orientacja oraz położenie-orientacja) zakres mediany czasu patrzenia na mini-mapę mieścił się w bardzo zbliżonym przedziale od 35 s (koło statyczne) do 40 s (koło obrotowe oraz mini-mapą obrotowe po prawej stronie ekranu). Dla 2 trasy zauważano większą dysproporcję wartości median w którym użytkownicy korzystający z mini-mapy kwadratowej obrotowej zanotowali najniższą medianę (29 s), natomiast najwyższą medianę wykazały grupy użytkowników z mini-mapami kołowymi obrotowymi oraz mini-mapami kołowymi po prawej stronie ekranu (37 s). W przypadku 3 trasy zakres mediany czasu patrzenia na mini-mapę mieścił się w przedziale od 31 sekund (mini-mapy lewe obrotowe) do 38 sekund (mini-mapy kołowe po prawej stronie).

W przypadku mediany procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę całej aplikacji dla parametrów kształt-położenie wykazano, że mini-mapy kwadratowe po lewej stronie ekranu charakteryzują się najniższym wynikiem (42,4%), w porównaniu najwyższy wynik mediany dla mini-map kołowych po prawej stronie ekranu (46,1%). Dla parametrów związanych z kształtem-orientacją, grupy z mini-mapami obrotowymi procentowo mniej patrzyły na mini-mapę (kwadrat 41,4%, koło 43,9%) od mini-map statycznych (kwadrat 44,9%, koło 47,1%). Natomiast parametry położenia-orientacji podobnie wykazują różnice, przy niższych wartościach mini-map obrotowych (lewe 41,7%, prawe 43,4%) niż mini-mapy statyczne (lewe 44,4%, prawe 47,0%).

W przypadku 1 trasy dla wszystkich zmiennych parametrów (kształt-położenie, kształt-orientacja oraz położenie-orientacja) zakres mediany procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę mieścił się w przedziale od 41,2 % (kwadrat obrotowy) do 46,1% (kwadrat statyczny). Dla 2 trasy zakres wartości median wykazano dla użytkowników korzystających z mini-mapy kwadratowej po lewej stronie ekranu (39,5%), z grupą użytkowników z mini-mapami kołowymi statycznymi (44,5%). W przypadku 3 trasy zakres mediany procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę mieścił się w przedziale od 39,2% (mini-mapy lewe obrotowe) do 47,9 % (mini-mapy prawe statyczne).

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 30 Zestawienie wykresowe testu ANOVA Kruskal-Wallis dla czasu patrzenia na mini-mapy pod względem dwóch zmiennych projektowania mini-mapy wraz z wynikiem istotności statystycznej (całkowity czas patrzenia na mini-mapy wszystkich tras [A – kształt-położenie, B – kształt-orientacja, C – położenie-orientacja], 1 trasy [D – kształt-położenie, E – kształt-orientacja, F – położenie-orientacja], 2 trasy [G – kształt-położenie, H – kształt-orientacja, I – położenie-orientacja], 3 trasy [J – kształt-położenie, K – kształt-orientacja, L – położenie-orientacja])













W następnym kroku wykorzystano test dla danych nieparametrycznych ANOVA Kruskala-Wallisa w celu zweryfikowania korelacji między grupami (Ryc. 30). Wykonano również analizę post-hoc za pomocą korekty Benjamina-Hochberga, aby wykazać szczegółowe różnice w zadanych zmiennych. Testy w sześciu przypadkach wykazały istotność statystyczną (wykresy A, C, G, H, J oraz L). Dla wykresu A odnotowano istotność statystyczną przy procedurze Benjamina-Hochberga ($p = 0,015946$) dla mini-map kwadratowych po lewej stronie ekranu oraz mini-map kołowych po prawej stronie ekranu. Za pomocą mediany całkowitego czasu patrzenia na mini-mapy można wywnioskować, że użytkownicy, którzy nawigowali się z mini-mapy kwadratową po lewej stronie (101 s) potrzebowali mniej czasu na spoglądanie na mini-

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

mapę podczas wszystkich tras niż użytkownicy z mini-mapami kołowymi po prawej stronie (120 s). Dla wykresu C odnotowano istotność statystyczną względem czasu patrzenia na mini-mapę dla wszystkich tras przy parametrach położenia-orientacji, niestety poprawka Benjamina-Hochberga nie wykazała żadnych istotnych różnic pomiędzy grupami. W przypadku wykresu G związanego z parametrami kształt-położenie dla 2 trasy istotność statystyczna oraz procedura Benjamina-Hochberga wykazały dwie korelacje między mini-mapami kwadratowymi po lewej stronie ekranu, a mini-mapami kołowymi prawymi ($p = 0,038301$) oraz lewymi ($p = 0,043413$). Za pomocą mediany czasu patrzenia na mini-mapę 2 trasy odnotowano, że użytkownicy korzystający z mini-map kwadratowych zlokalizowanych po lewej stronie ekranu (29 s), patrzyli krócej na mini-mapę podczas nawigowania się niż mini-mapy kołowe po lewej (36 s) i po prawej stronie (37 s).

Dla wykresu H z parametrami kształt-orientacja procedura Benjamina-Hochberga odnotowała jedną istotną korelację między grupami. Na podstawie istotności ($p = 0,015818$) oraz medianie czasu patrzenia na mini-mapę zauważono różnicę, że użytkownicy z mini-mapami kwadratowymi obrotowymi (29 s) potrzebowali mniej czasu na spoglądanie na mini-mapę niż użytkownicy z mini-mapami kołowymi obrotowymi (37 s). W przypadku wykresu J dla parametrów kształt-położenie dla 3 trasy procedura Benjamina-Hochberga wykazała dwie istotne korelacje między grupami. Na podstawie istotności ($p = 0,025229$ oraz $p = 0,048006$) oraz medianach wykazano różnicę, że użytkownicy z mini-mapami po lewej stronie ekranu (koło 33 s, kwadrat 34 s) krócej patrzyli na mini-mapę niż użytkownicy, którzy mieli do dyspozycji mini-mapę kołową po prawej stronie (38 s). Wykres L prezentuje różnice dla parametrów położenia-orientacji dla 3 trasy czasu patrzenia na mini-mapę, gdzie test Benjamina-Hochberga wykazał jedną istotną korelację. Na podstawie istotności ($p = 0,004682$) oraz medianie wykazano różnicę, że użytkownicy, którzy nawigowali się po aplikacji z mini-mapą lewą obrotową (31 s), krócej spoglądali na mini-mapę niż użytkownicy z mini-mapą statyczną po prawej stronie ekranu (37 s).

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

		Kod	Wszystkie trasy	Trasa 1	Trasa 2	Trasa 3
Mediana czasu patrzenia na mini-mapę dla mini-map na podstawie jednego parametru (224 osoby)	kształt (112 osób)		115	37	36	36
			107	38	30	34
	położenie (112 osób)		105	37	32	33
			119	39	33	36
Czas patrzenia na mini-mapę (s)	orientacja (112 osób)		113	39	32	33
			110	36	33	36
Mediana procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę dla mini-map na podstawie jednego parametru (224 osoby)	kształt (112 osób)		45,3%	45,2%	44,1%	44,0%
			43,5%	44,3%	40,8%	45,2%
	położenie (112 osób)		43,1%	44,6%	41,6%	42,9%
			45,2%	44,8%	43,8%	46,7%
orientacja (112 osób)	orientacja (112 osób)		42,8%	44,7%	42,4%	41,9%
			45,8%	44,6%	43,2%	46,3%

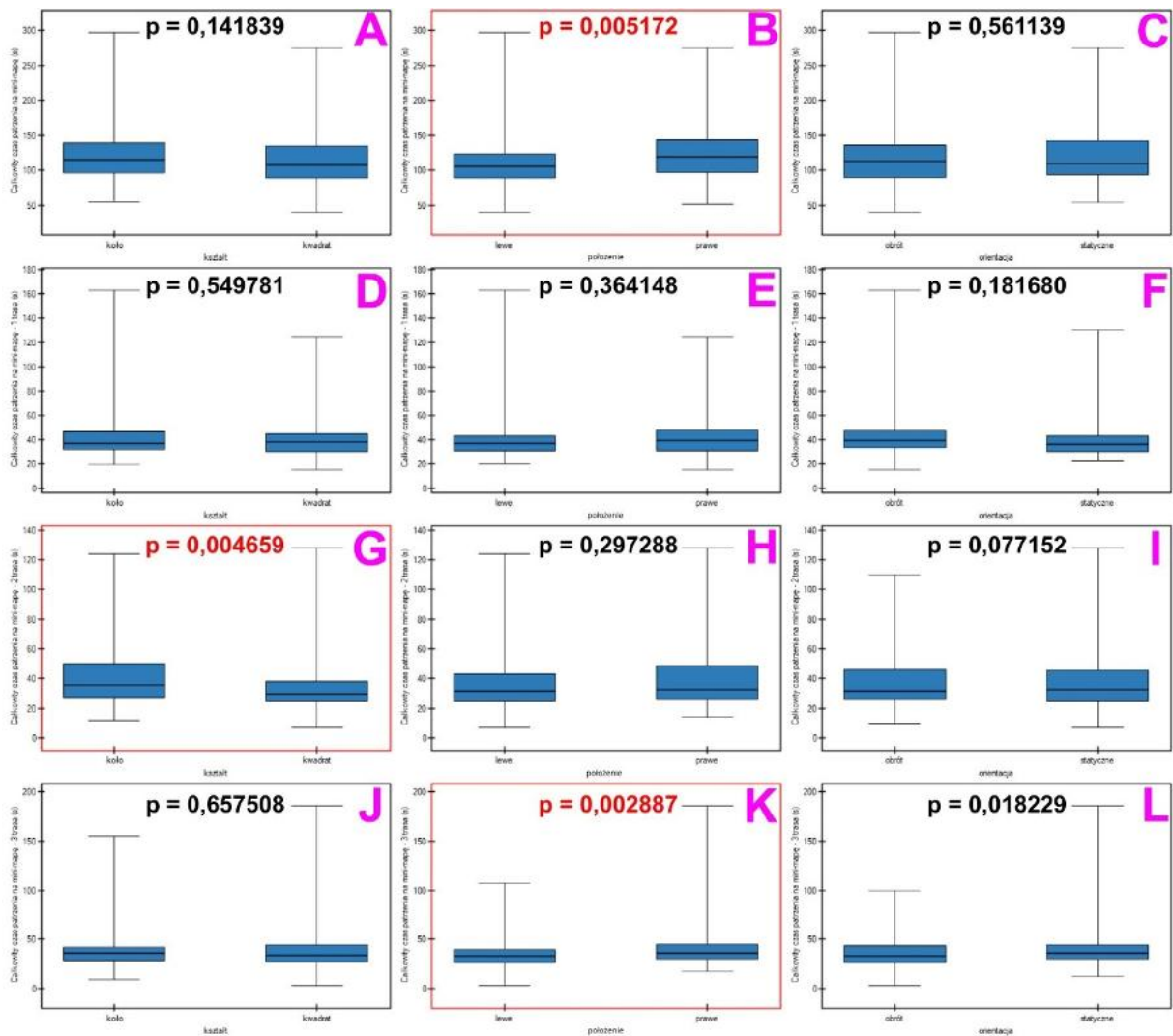
Ryc. 31 Zestawienie tabelaryczne mediany czasu patrzenia na mini-mapę i mediany procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras na podstawie jednego parametru projektowania mini-mapy

Rycina 31 prezentuje wyniki dotyczące czasu patrzenia na mini-mapę (s) dla całej aplikacji i poszczególnych tras, grupując użytkowników pod względem jednej zmiennej projektowania mini-mapy (kształt, położenie, orientacja). Największą różnicę w medianie czasu patrzenia na mini-mapę całej aplikacji względem jednego parametru odnotowano dla położenia mini-mapy na ekranie (położenie lewe – 105 s, położenie prawe – 119 s). Dla 1 trasy wykazano bardzo zbliżone wobec siebie wyniki z większą wartością dla mini-map prawych oraz obrotowych (39 s), niż mini-mapy statyczne (36 s). W przypadku 2 trasy największą rozbieżność odnotowano dla parametru kształtu, w której to użytkownicy z mini-mapą kwadratową (30 s), potrzebowali mniej czasu na spoglądanie na mini-mapę niż użytkownicy z mini-mapą kołową (36 s). Dla 3 trasy podobnie jak dla 1 trasy wyniki są bardzo do siebie zbliżone, wykazując najmniejszą medianę czasu dla mini-map lewych oraz obrotowych (33 s) niż mini-mapy kołowe, prawe oraz statyczne (36 s).

W przypadku mediany procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę całej aplikacji, największe różnice odnotowano przy parametrze orientacji obrotowych mini-map (42,8%) względem mini-map statycznych (45,8%). Dla 1 trasy wykazano zbliżone różnicę mediany czasu patrzenia na mini-mapę dla wszystkich parametrów w zakresie od 44,3% (mini-mapy kwadratowe) do 45,2% (mini-mapy kołowe). W przypadku 2 trasy większe różnice uzyskano w parametrze kształtu na korzyść kwadratu (40,8%) w odniesieniu do koła (44,1%). Dla 3 trasy

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

większą różnicę wykazały parametry położenia i orientacji na korzyść lewych mini-map (42,9%), w odniesieniu do prawych (46,7%) oraz na korzyść mini-map obrotowych (41,9%) niż mini-mapy statyczne (46,3%).



Ryc. 32 Zestawienie wykresów testu U Manna-Whitneya dla czasu patrzenia na mini-mapę na podstawie jednego parametru projektowania mini-mapy wraz z wynikiem istotności statystycznej (czas patrzenia na mini-mapę wszystkich tras [A – kształt, B – położenie, C – orientacja], 1 trasy [D – kształt, E – położenie, F – orientacja], 2 trasy [G – kształt, H – położenie, I – orientacja], 3 trasy [J – kształt, K – położenie, L – orientacja])

W następnym kroku wykorzystano test dla danych nieparametrycznych U Manna-Whitneya, ponieważ występują tylko dwie grupy zmiennych, w celu zweryfikowania korelacji między grupami (Ryc. 32). Testy w trzech przypadkach wykazały istotność statystyczną (wykres B, G oraz K). Dla wykresu B przedstawiano wykres czasu patrzenia na mini-mapę wszystkich tras względem parametru położenia. Z istotności statystycznej ($p = 0,005172$) oraz mediany czasu patrzenia na mini-mapę można wywnioskować, że użytkownicy, którzy nawigowali się po

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

aplikacji z mini-mapą zaprojektowaną po lewej stronie ekranu spoglądali o wiele krócej na mini-mapę w trakcie przejścia aplikacji niż użytkownicy z mini-mapą zaprojektowaną po prawej stronie ekranu. Współczynnik d Cohena o wielkości 0,379948 informuje, że wielkość efektu jest na poziomie od małego do średniego, co oznacza, że różnica jest umiarkowana względem grup. Dla wykresu G przedstawiono wykres czasu patrzenia na mini-mapę 2 trasy względem parametru kształtu mini-mapy. Z istotności statystycznej ($p = 0,004659$) oraz mediany czasu patrzenia na mini-mapę, można wywnioskować, że użytkownicy spoglądali krócej na mini-mapę w trakcie 2 trasy z mini-mapą kwadratową niż użytkownicy z mini-mapą o kształcie koła. Współczynnik d Cohena o wielkości 0,384627 informuje, że wielkość efektu jest na poziomie od małego do średniego, ze wskazaniem na umiarkowany efekt różnicy między mini-mapami. W przypadku wykresu K na podstawie istotności statystycznej ($p = 0,002887$) oraz mediany czasu patrzenia na mini-mapę, wykazuje się różnicę, że użytkownicy z mini-mapą po lewej stronie ekranu spoglądali krócej na mini-mapę w trakcie 3 trasy, niż użytkownicy z mini-mapą po prawej stronie ekranu. Współczynnik d Cohena o wielkości 0,405568 informuje, że wielkość efektu jest na poziomie od małego do średniego, ze wskazaniem na większy efekt różnicy między mini-mapami.

W ramach niniejszej analizy jednym z kluczowych elementów jest zbadanie związku monotonicznego pomiędzy wcześniej wymienionymi zmiennymi opisującymi czas przejścia, całkowity dystans oraz czas patrzenia na mini-mapę. W celu weryfikacji korelacji między zmiennymi zastosowano nieparametryczny test korelacji rang Spearmana. Związek pomiędzy dwoma zmiennymi przedstawia monotoniczny wzrost, jeżeli wzrostowi jednej cechy towarzyszy wzrost drugiej cechy. Aby uzyskać pełny obraz zależności, każdą parę zmiennych analizowano w czterech odrębnych kontekstach danych: dla całej aplikacji, dla trasy 1, dla trasy 2 oraz dla trasy 3. Zastosowanie nieparametrycznego testu korelacji rang Spearmana pozwoliło na przeprowadzenie łącznie 96 niezależnych testów, mapujących sieć powiązań między badanymi wskaźnikami. Wyniki przeprowadzonej analizy w sposób jednoznaczny wskazują na silną współzależność badanych zmiennych. W przeważającej większości przypadków, tj. w 89 z 96 przeprowadzonych testów, stwierdzono istnienie istotnej statystycznie korelacji. Ten dominujący wzorzec sugeruje, że metryki czasu, dystansu i korzystania z mini-mapy tworzą spójny system wzajemnie powiązanych wskaźników. Należy jednak odnotować, że w siedmiu przypadkach nie zaobserwowano istotności statystycznej. Dotyczyło to par zmiennych i wariantów danych: 1) grupa KOLS przy zmiennych czasu przejścia względem czasu patrzenia na mini-mapę dla 3 trasy, 2) grupa KOLS przy zmiennych całkowitego dystansu względem

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

czasu patrzenia na mini-mapę dla 3 trasy, 3) grupa KWLO przy zmiennych całkowitego dystansu względem czasu patrzenia na mini-mapę dla wszystkich tras, 4) grupa KWLO przy zmiennych całkowitego dystansu względem czasu patrzenia na mini-mapę dla 1 trasy, 5) grupa KWLO dla czasu przejścia względem całkowitego dystansu dla 3 trasy, 6) grupa KWPO dla czasu przejścia względem całkowitego dystansu dla 2 trasy oraz 7) grupa KWPO dla całkowitego dystansu względem czasu patrzenia na mini-mapę dla 2 trasy. Istotne jest, że powyższe przypadki braku istotności statystycznej są rozproszone po różnych wariantach danych i parach zmiennych, nie tworząc żadnego logicznego i powtarzalnego wzorca. Taki sporadyczny charakter tych wyników sugeruje, że mogą one reprezentować naturalną wariację statystyczną lub wynikać z unikalnej specyfiki pojedynczej trasy, a nie wskazywać na systematyczny brak zależności. W świetle przytłaczającej liczby dowodów na istnienie korelacji, ogólny wniosek z analizy podtrzymuje tezę o silnym, wzajemnym powiązaniu badanych zmiennych. Dlatego też te pojedyncze, nieistotne statystycznie wyniki nie zostaną uwzględnione w dalszej interpretacji jako mające wpływ na ogólny model zależności.

4.4.2. Analiza cech przestrzennych: mapowanie i wizualizacja

Kartograficzna wizualizacja wyników badań obejmowała trzy ilościowe techniki mapowania: kartodiagram wstępowy przepływu ruchu wszystkich użytkowników, kartodiagram wstępowy sekwencyjny najpopularniejszych schematów przepływu ruchu oraz mapa ciepła widoku eye-trackingowego. Na samym początku, aby uzyskać liczbę przejść danych odcinków, które wykonali uczestnicy w trakcie przejścia aplikacji, ulice miasta zostały oznaczone dwuliterowymi symbolami, np. AA. Każde dwuliterowe oznaczenie umieszczono na środku odległości pomiędzy węzłami. Zastosowano metodę umieszczania opisów sekcji, wzorowaną na sposobie oznaczania wartości kilometrów na mapach drogowych (Ryc. 33). Drogi zostały podzielone na krótkie odcinki zgodnie ze skrzyżowaniami, długością odcinka oraz lokalizacją bezpośrednich punktów kluczowych dla 3 tras. Wszystkie ulice, które wchodziły w skład grywalnej przestrzeni aplikacji, zostały oznaczone, a maksymalna liczba możliwych dróg do przejścia to 181 odcinków. Kolejność przypisywania oznaczeń symboli dwuliterowych jest całkowicie losowa względem wszystkich odcinków.

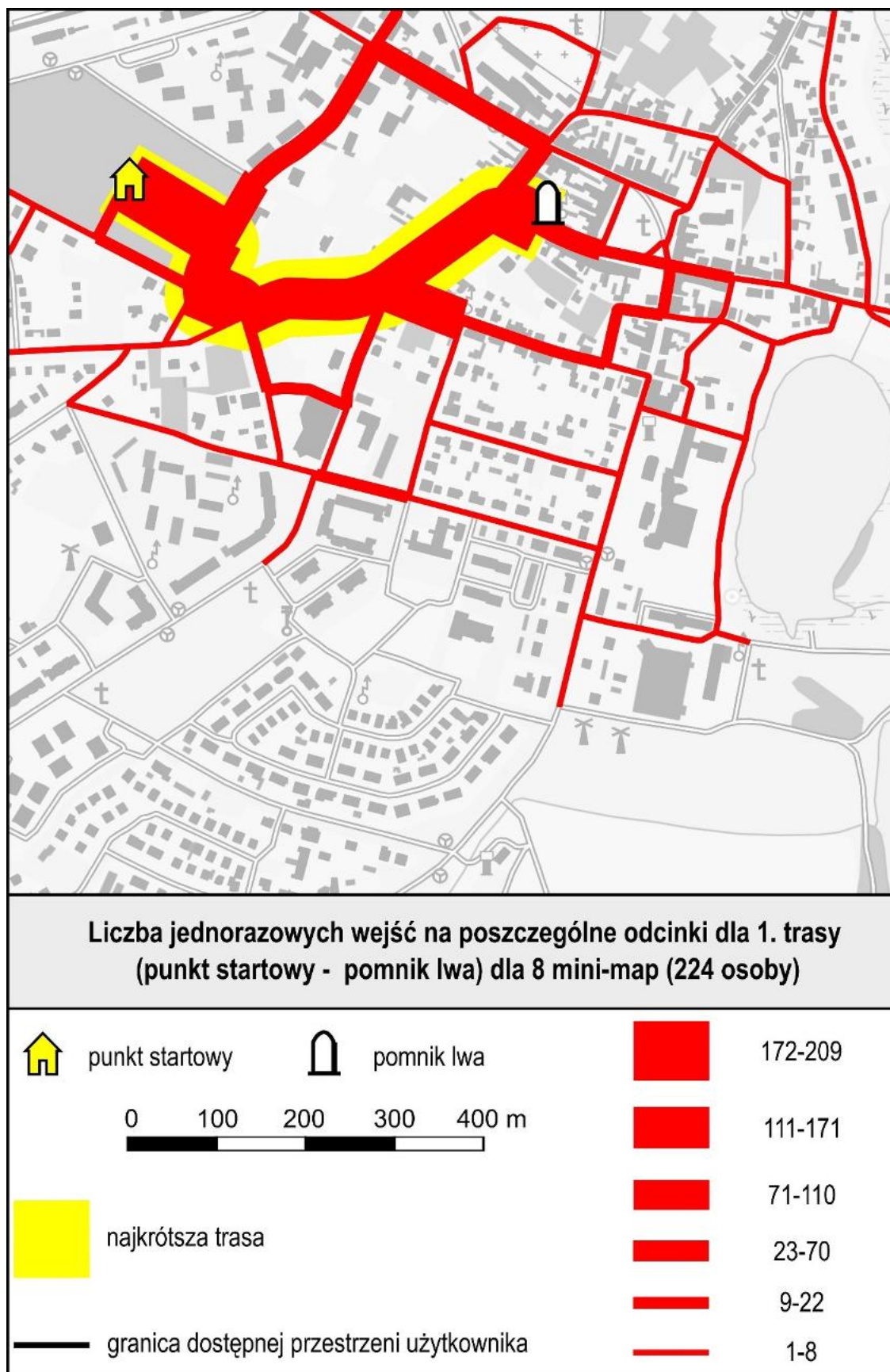
4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 33 Mapa ulic aplikacji z przedstawieniem dwuliterowych oznaczeń poszczególnych odcinków dróg (od AA do GY)

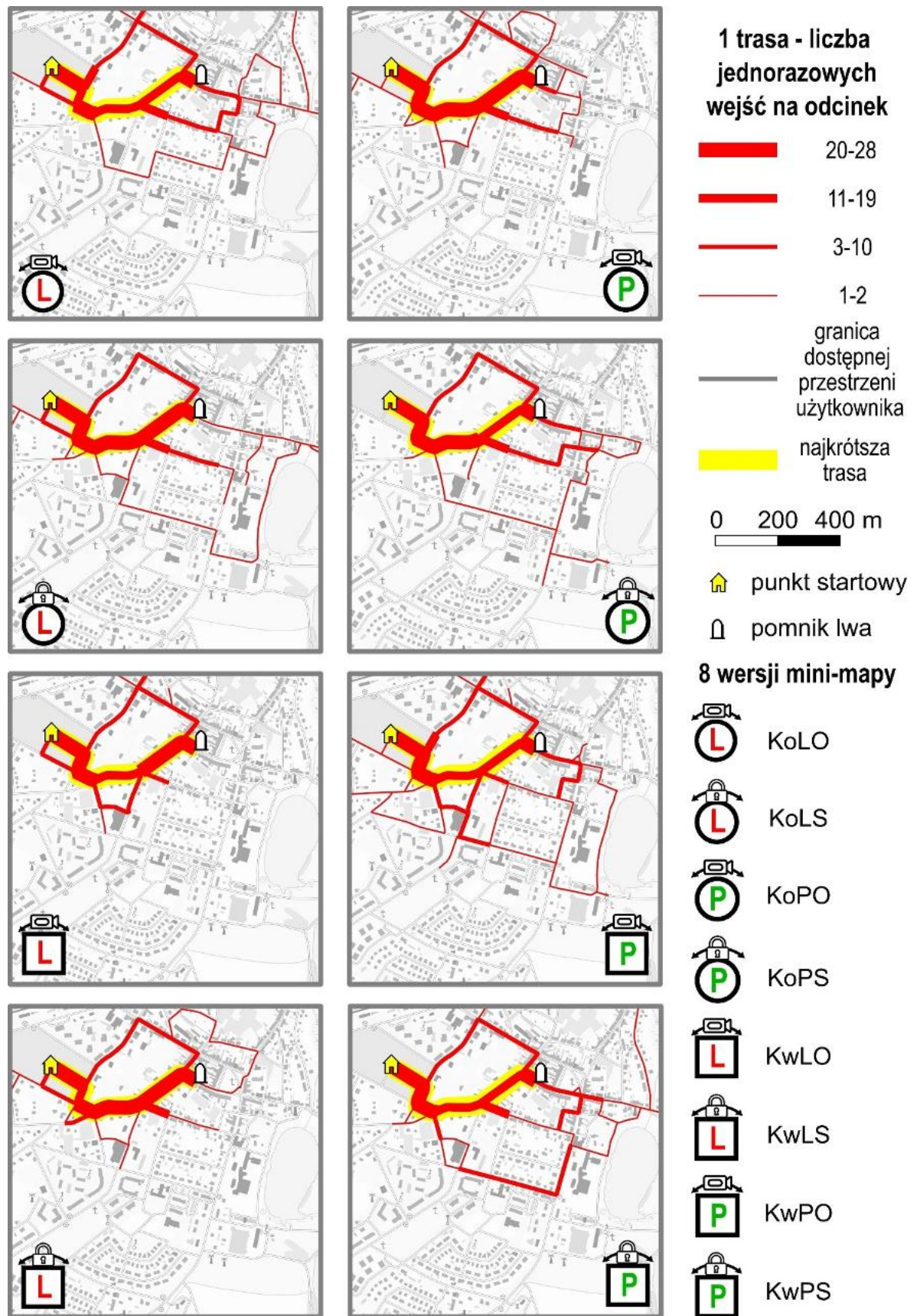
Pierwsza wizualizacja, w formie trzech map wszystkich użytkowników na poszczególnych trasach oraz trzy mapy podzielone na poszczególne grupy użytkowników, opiera się na rozkładzie przepływu ruchu na każdym z odcinków, które użytkownicy w trakcie aplikacji wybrali do nawigacji. Ten obraz kartograficzny przedstawia strategię wyboru tras przy wykonywaniu trzech zadań w różnych kompozycjach mini-mapy. Zaprezentowane wyniki dotyczą całego zadania, tj. przemieszczania się użytkownika od początku aplikacji do końca 3 trasy.

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



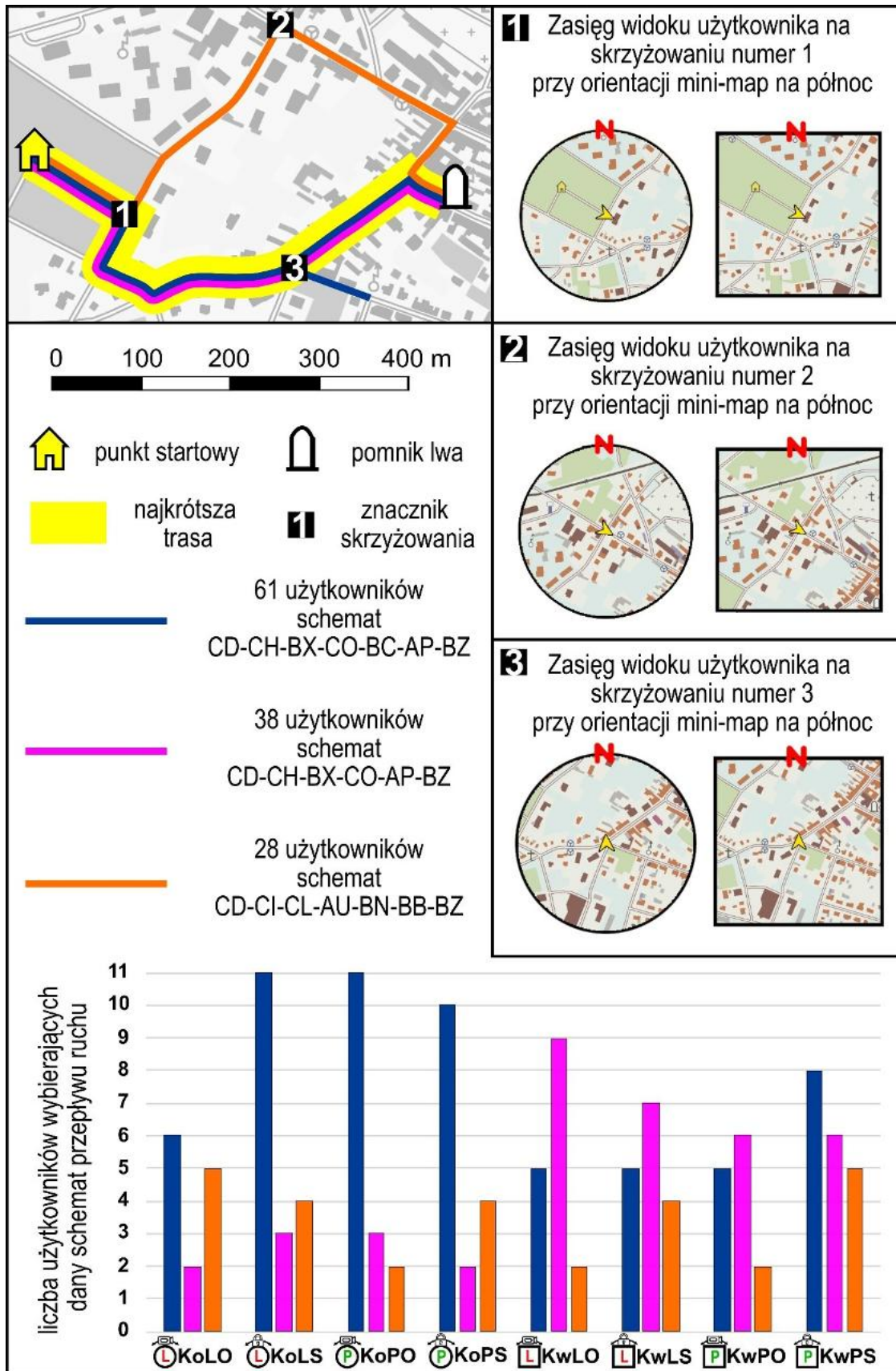
Ryc. 34 Kartodiagram wstępowy przepływu ruchu wszystkich użytkowników na poszczególnych odcinkach ulic 1. trasy dla 8 mini-map

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 35 Kartodiagram wstępowy przepływu ruchu na poszczególnych odcinkach ulic 1. trasy dla 8 mini-map (kody i symbole 8 wersji mini-map)

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 36 Kartodiagram wstępny sekwencyjny z kodowaniem kolorystycznym dominanty trzech najpopularniejszych schematów przepływu ruchu wszystkich użytkowników dla 1. trasy dla 8 mini-map

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

Na podstawie ryciny 34 przedstawiono liczbę jednorazowych wejść na poszczególne odcinki dla 1 trasy pomiędzy dwoma kluczowymi obiektami mapowymi (punkt startowy oraz pomnik lwa) dla wszystkich użytkowników (224 osoby) dla 8 mini-map. Zaznaczono na diagramie najkrótszą trasę, którą użytkownicy mogli przebyć, aby zmaksymalizować efektywność nawigacyjną w trakcie rozgrywki. Dodatkowo utworzono kartodiagram wstęgowy na podstawie algorytmu naturalnego podziału Jenksa, w celu klasyfikacji danych na minimalizację wariacji wewnątrz klas, a maksymalizację wariacji pomiędzy klasami. Zadanie dla użytkownika było wyznaczenie na kierowanie się na wschód od punktu startowego i znalezienie pomnika lwa. Z kartodiagramu wynika, że większość użytkowników wybierała odcinki tras ukierunkowane na jak największą efektywność nawigacyjną. Odnosząc się również do wyników analizy wejścia na poszczególne odcinki można zauważyć, że najmniej uczęszczanym odcinkiem w schemacie najszybszego przejścia był odcinek AP (68,8% użytkowników – 154 razy), a najczęstszym był odcinek blisko punktu startowego CD (89,7% użytkowników - 209 razy). Dominującymi odcinkami poza schematem najkrótszej trasy były ulice BC (49,6 % użytkowników – 111 razy), CI (31,7% użytkowników – 71 razy) oraz CL (24,1% użytkowników – 54 razy). Wszyscy użytkownicy w trakcie przejścia 1 trasy przynajmniej raz weszli na 46,4% wszystkich dostępnych odcinków w aplikacji.

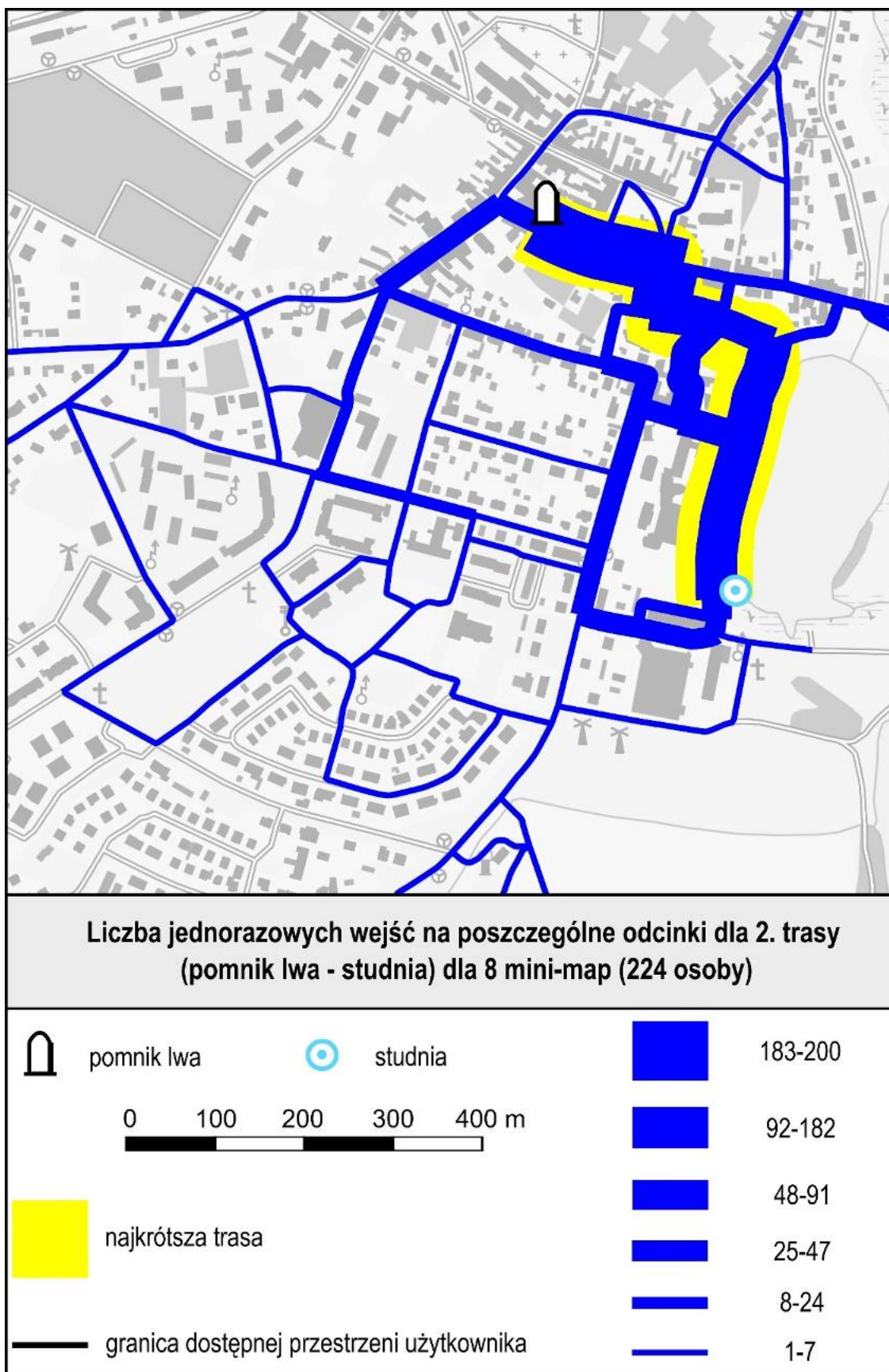
Rycina 35 przedstawia informacje takie jak poprzednia rycina, z różnicą, że wizualizacja podzielona jest na grupy użytkowników z mini-mapą, którą używali w trakcie aplikacji. Z kartodiagramu wynika, że wszystkie grupy nie miały większego problemu z wybraniem przybliżonej najkrótszej trasy do punktu końcowego. Należy zauważyć, że w każdej grupie użytkowników znalazły się osoby, które gubiły się podczas nawigacji w całej dostępnej przestrzeni topograficznej. Zauważyć można również, że alternatywna dłuższa trasa prowadząca graczy na północ od punktu startowego występowała w grupach w popularności od 32,1% (9 wejść – KoLO) do 17,9% (5 wejść – KoLS oraz KoPS). Dla 3 grup odnotowano odcinki, w których wszyscy użytkownicy daną ulicę odwiedzili chociaż jeden raz (CD – KoPS oraz KwPS, BZ – KwLO). Największą różnicą w odwiedzin odcinków można zanotować dla odcinka BC. Grupy, które nawigowały się z mini-mapami w kształcie kwadratu wchodziły na te odcinki znacznie rzadziej, niż grupy z mini-mapami w kształcie koła.

Natomiast rycina 36 przedstawia informacje dotyczące dominanty najpopularniejszych schematów przepływu ruchu użytkowników dla wszystkich grup mini-map. Każdy uczestnik, przechodząc aplikację, tworzył swój unikatowy schemat przepływu wybierając ścieżki, którymi planował dotrzeć do punktu końcowego. Potwierdzając wcześniejsze wyniki, z kartodiagramu

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

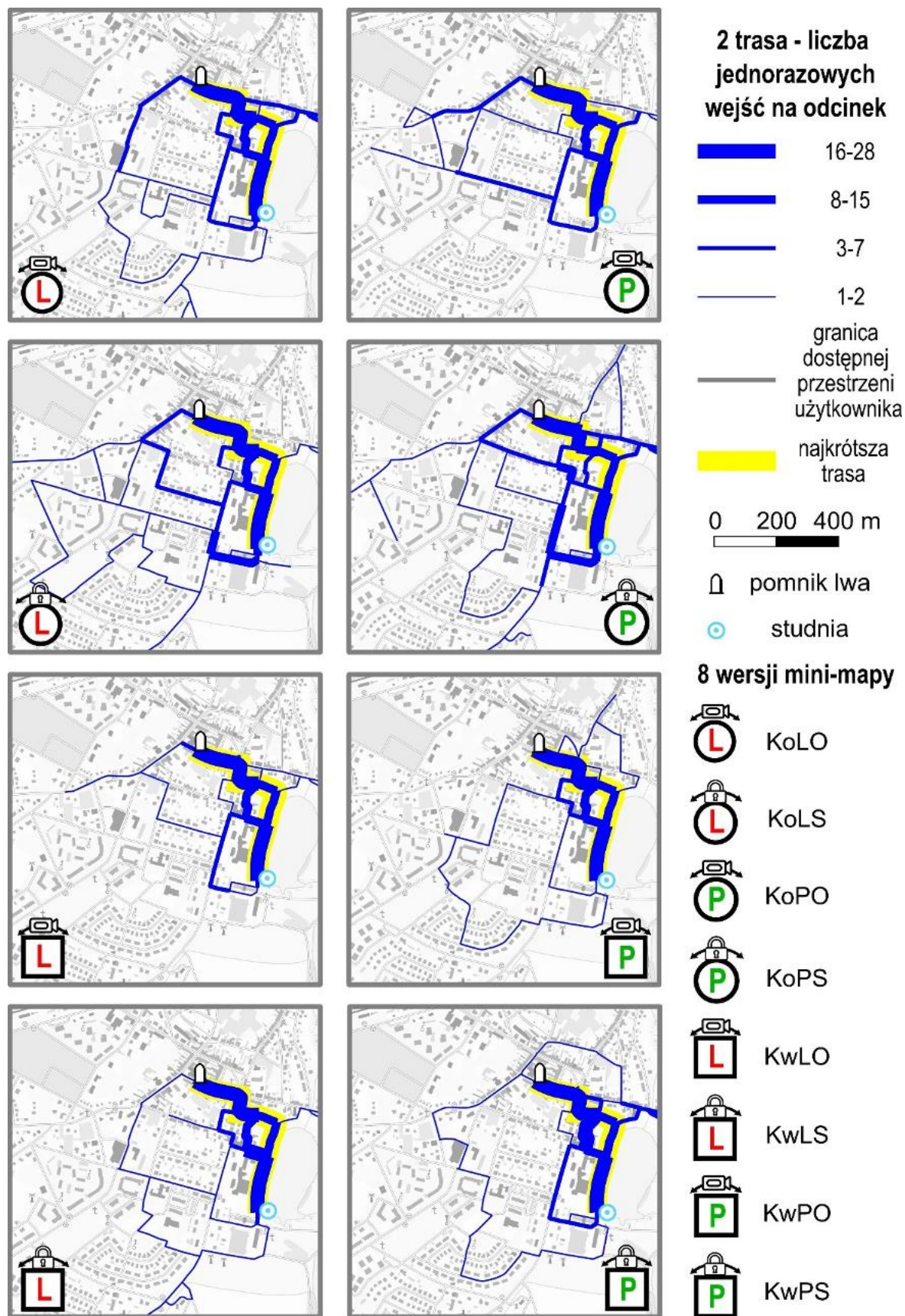
można wyczytać, że najpopularniejszym schematem przepływu ruchu użytkowników (wyborem odcinków, którymi odwiedzili chociaż jeden raz) był schemat CD-CH-BX-CO-BC-AP-BZ z liczbą 61 użytkowników. Drugim najpopularniejszym schematem był schemat CD-CH-BX-CO-AP-BZ, który jest schematem najkrótszej możliwej trasy dla użytkownika i był wybierany 38-krotnie przez użytkowników. Na trzecim miejscu odnotowano układ tras związany z schematem CD-CI-CL-AU-BN-BB-BZ z liczbą 28 użytkowników. Na podstawie wykresu liczby użytkowników wybierających dane schematy przepływu ruchu wnioskować można, że użytkownicy korzystający z mini-map kwadratowych częściej wybierali najkrótszą możliwą trasę do przejścia niż użytkownicy z mini-mapą kołową, którzy wybierali najpopularniejszy wariant schematu przepływu ruchu. Ten wynik ilustruje znacznik skrzyżowania z numerem trzecim, który przedstawia zakres widoku na mini-mapie użytkowników znajdujących się na danym skrzyżowaniu. Użytkownicy, którzy korzystali z mini-mapy kwadratowej będąc na środku trzeciego skrzyżowania, w rogu ekranu mogli zauważyć pomnik lwa (punkt końcowy 1 trasy) szybciej niż użytkownicy, którzy poruszali się z mini-mapą kołową. Podobny efekt można zauważyć dla drugiego skrzyżowania, gdzie użytkownicy z mini-mapą kwadratową widzieli znak również szybciej niż użytkownicy z mini-mapą kołową, natomiast liczba użytkowników wybierających taki schemat jest o wiele mniejsza niż pozostałe.

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



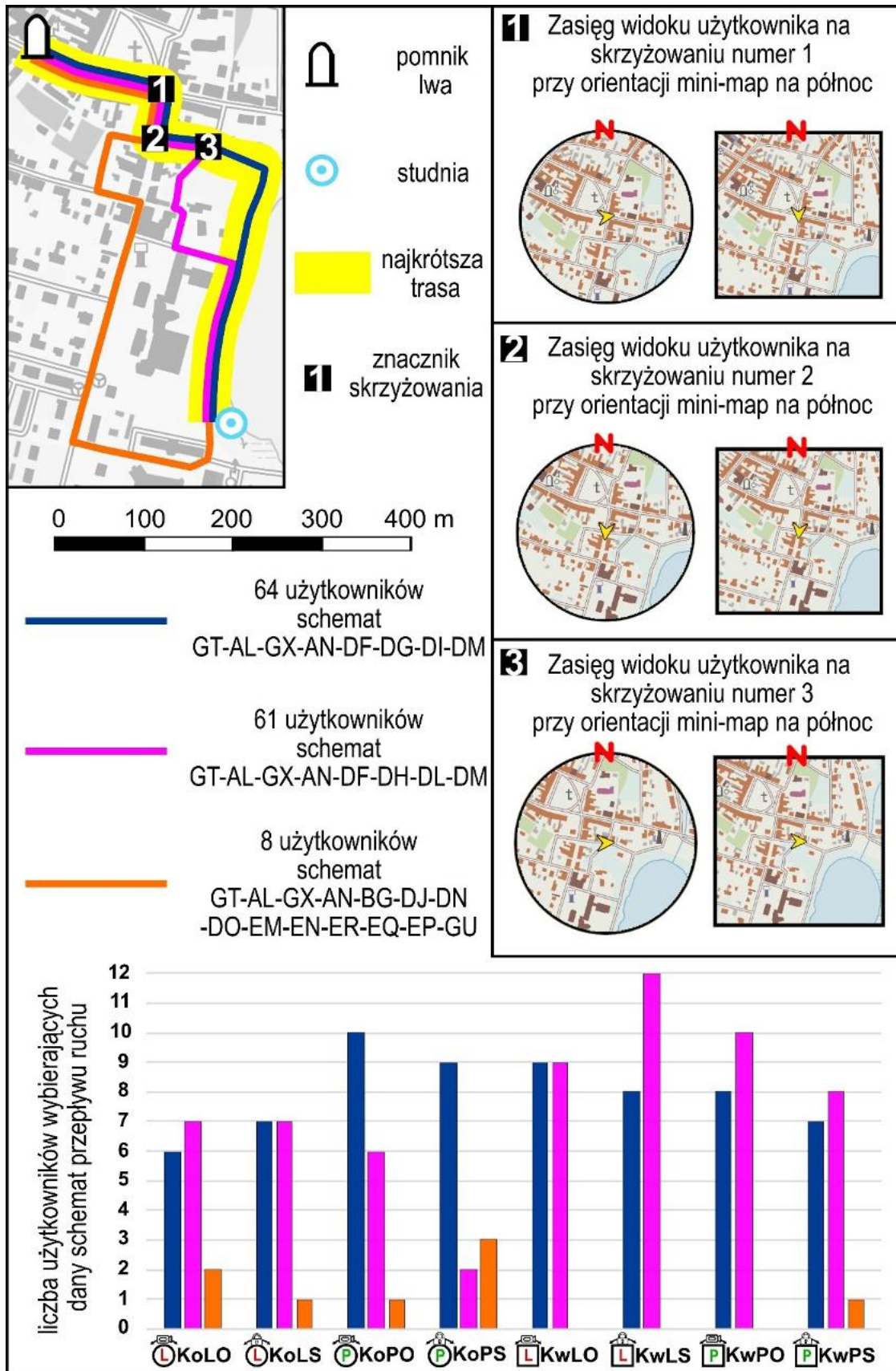
Ryc. 37 Kartodiagram wstępowy przepływu ruchu wszystkich użytkowników na poszczególnych odcinkach ulic 2. trasy dla 8 mini-map

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 38 Kartodiagram wstępowy przepływu ruchu na poszczególnych odcinkach ulic 2. trasy dla 8 mini-map (kody i symbole 8 wersji mini-map)

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 39 Kartodiagram wstępny sekwencyjny z kodowaniem kolorystycznym dominanty trzech najpopularniejszych schematów przepływu ruchu wszystkich użytkowników dla 2. trasy dla 8 mini-map

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

Na podstawie ryciny 37 przedstawiono liczbę jednorazowych wejść na poszczególne odcinki dla 2 trasy pomiędzy dwoma kluczowymi obiektami mapowymi (pomnik lwa oraz studnia) dla wszystkich użytkowników (224 osoby) dla 8 mini-map. Zaznaczono na diagramie najkrótszą trasę, którą użytkownicy mogli przebyć, aby zmaksymalizować efektywność nawigacyjną w trakcie rozgrywki. Dodatkowo utworzono kartodiagram wstęgowy na podstawie algorytmu naturalnego podziału Jenksa, w celu klasyfikacji danych na minimalizację wariacji wewnątrz klas, a maksymalizację wariacji pomiędzy klasami. Zadanie dla użytkownika było wyznaczone na kierowanie się na południowy wschód od pomnika lwa do studni. Z kartodiagramu wynika, że większość użytkowników wybierała odcinki tras ukierunkowane na jak największą efektywność nawigacyjną. Odnosząc się również do wyników analizy wejścia na poszczególne odcinki można zauważyć, że najmniej uczęszczanym odcinkiem w schemacie najszybszego przejścia był odcinek DG (37,5% użytkowników – 84 razy), a najczęstszym był odcinek blisko pomnika lwa GT (89,3% użytkowników – 200 razy). Dominującymi odcinkami poza schematem najkrótszej trasy były ulice DH (40,6 % użytkowników – 91 razy), DL (38,4% użytkowników – 86 razy) oraz GU (21,4% użytkowników – 48 razy). Wszyscy użytkownicy w trakcie przejścia 2 trasy przynajmniej raz weszli na 61,9% wszystkich dostępnych odcinków w aplikacji.

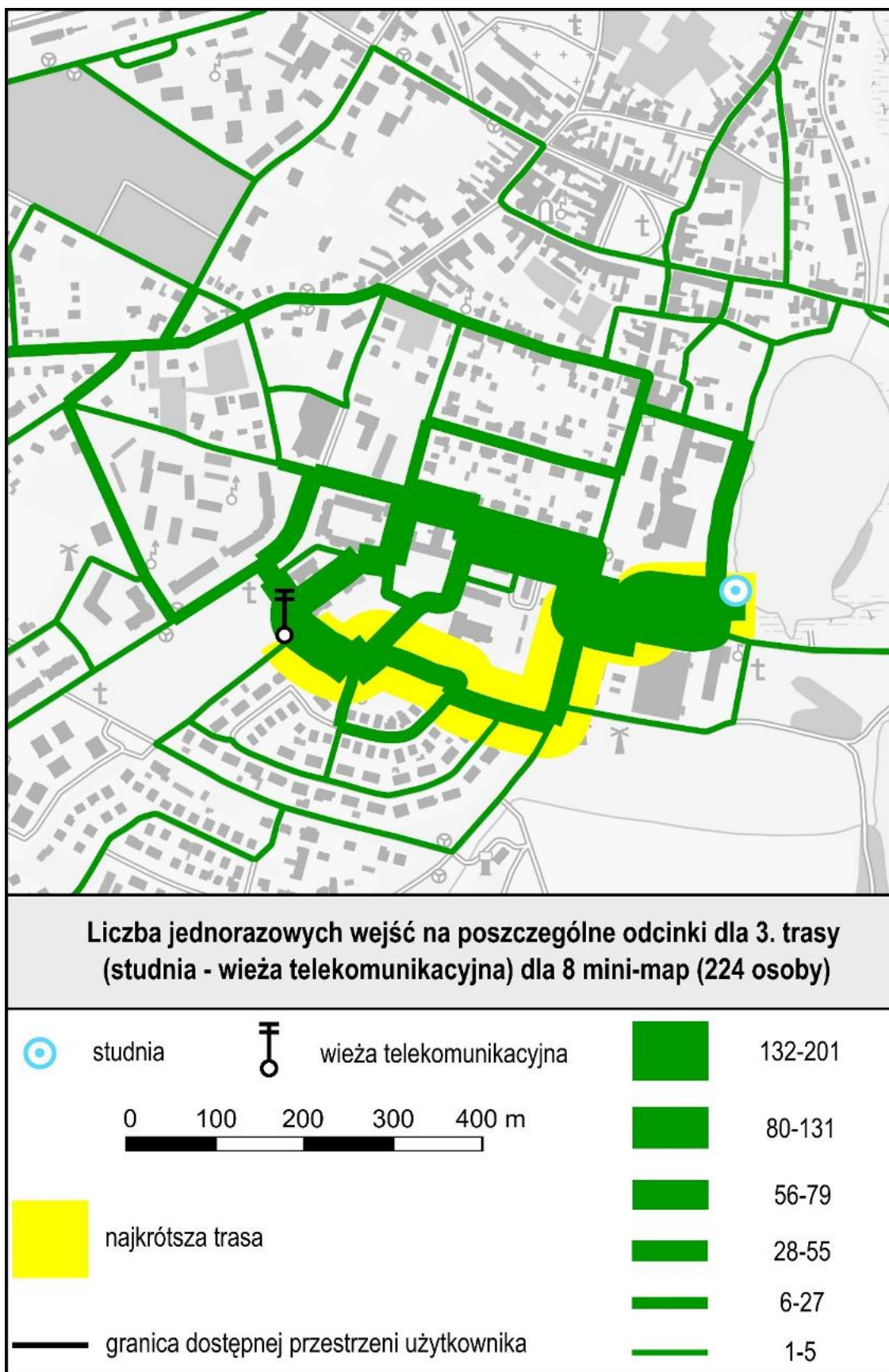
Rycina 38 przedstawia informacje analogicznie do poprzedniej ryciny, z różnicą, że wizualizacja podzielona jest na grupy użytkowników z mini-mapą, którą używali w trakcie aplikacji. Z kartodiagramu wynika, że wszystkie grupy przeważnie wybierały dwie bardzo zbliżone do siebie trasy niedaleko oddalone. Należy zauważyć, że w każdej grupie użytkowników znalazły się osoby, które gubiły się podczas nawigacji w całej dostępnej przestrzeni topograficznej. Zauważyć można również, że alternatywne dłuższe trasy prowadzące graczy do studni od wejścia od strony południowej (odcinek GU) występowały w większości w grupach o mini-mapie kołowej w liczbie 30,4% (34 wejścia na 112 możliwych) w przeciwieństwie do mini-mapy kwadratowej 12,5% (14 wejść na 112 możliwych). Tylko w jednej grupie (KwPO) odnotowano odcinek GT, w której wszyscy użytkownicy daną ulicę odwiedzili chociaż raz. Największą różnicą w odwiedzin odcinków można zanotować dla odcinka BZ. Grupy, które nawigowały się z mini-mapami w kształcie kwadratu o wiele mniej na ten odcinek wchodziły, niż grupy z mini-mapami w kształcie koła.

Natomiast rycina 39 ukazuje informacje dotyczące dominanty najpopularniejszych schematów przepływu ruchu użytkowników dla wszystkich grup mini-map. Każdy uczestnik, przechodząc aplikację, tworzył swój unikatowy schemat przepływu wybierając ścieżki, którymi

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

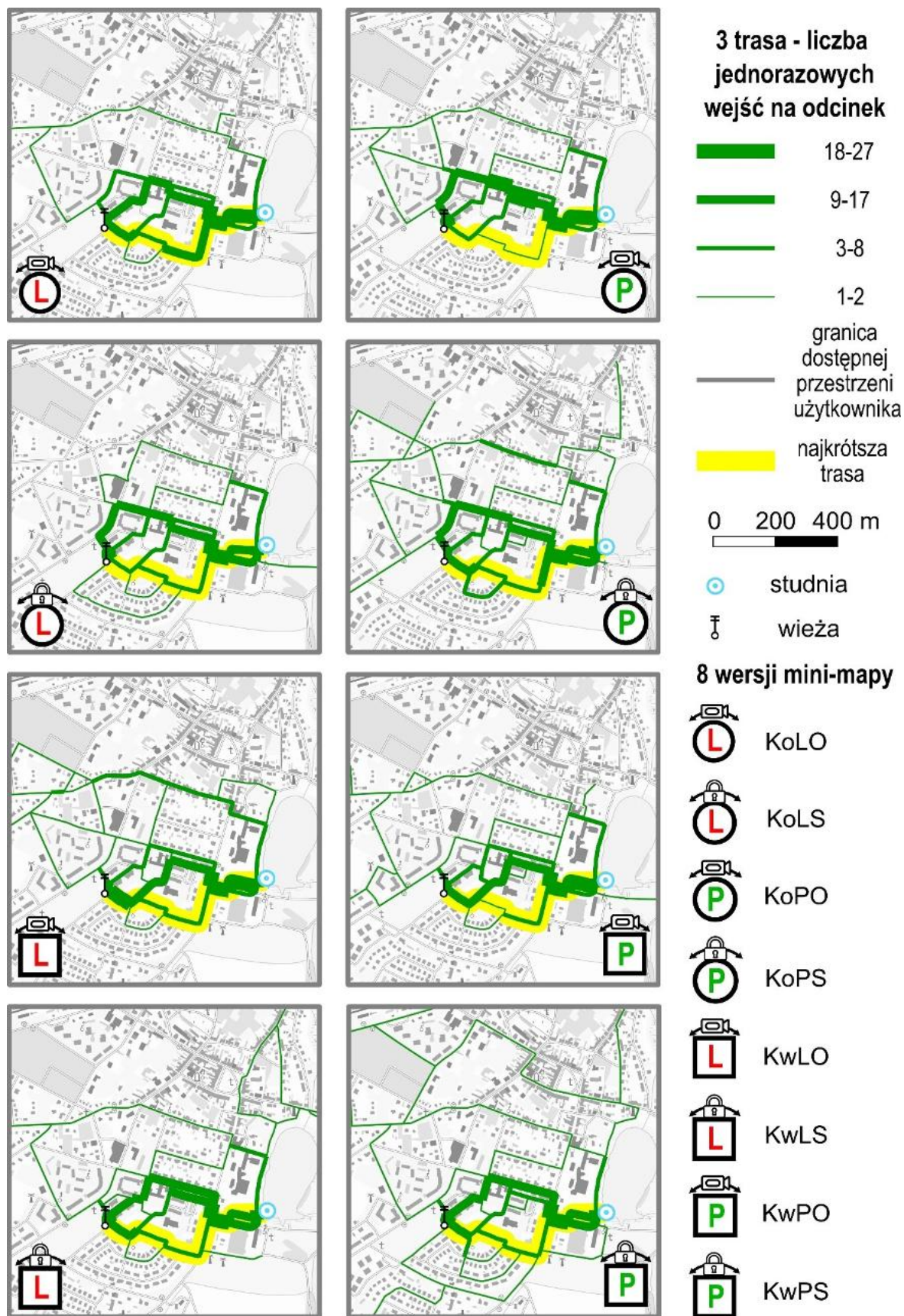
planował dotrzeć do punktu końcowego. Potwierdzając wcześniejsze wyniki, z kartodiagramu można wyczytać, że najpopularniejszym schematem przepływu ruchu użytkowników (wyborem odcinków, którymi odwiedzili chociaż jeden raz) był schemat GT-AL.-GX-AN-DF-DG-DI-DM z liczbą 64 użytkowników, który jednocześnie jest schematem najkrótszej możliwej trasy dla użytkowników. Drugim najpopularniejszym schematem był GT-AL-GX-AN-DF-DH-DL-DM, który różni się dwoma odcinkami pomiędzy najpopularniejszym schematem i był wybierany 61-krotnie przez użytkowników. Na trzecim miejscu odnotowano układ tras związany z schematem GT-AL-GX-AN-BG-DJ-DN-DO-EM-EN-ER-EQ-EP-GU wybrany przez 8 użytkowników. Na podstawie wykresu liczby użytkowników wybierających dane schematy przepływu ruchu wnioskować można, że użytkownicy korzystający z mini-map kwadratowych częściej wybierali dwa najpopularniejsze schematy niż użytkownicy z mini-mapą kołową. Jak zauważyć można na znacznikach skrzyżowań, kształt mini-mapy w tym przypadku nie określa większej widoczności w celu wydedukowania najkrótszej trasy, co za tym idzie nie da się wskazać bezpośredniej przyczyny przestrzennej wyboru takich schematów. Będąc na trzecim skrzyżowaniu większość użytkowników wybierała bądź najkrótszą możliwą trasę bądź trasę złożoną z odcinków pobocznych idących w dobrym kierunku, prawdopodobnie ze względu na widoczność ciągłości trasy na południowy wschód wzdłuż jeziora.

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



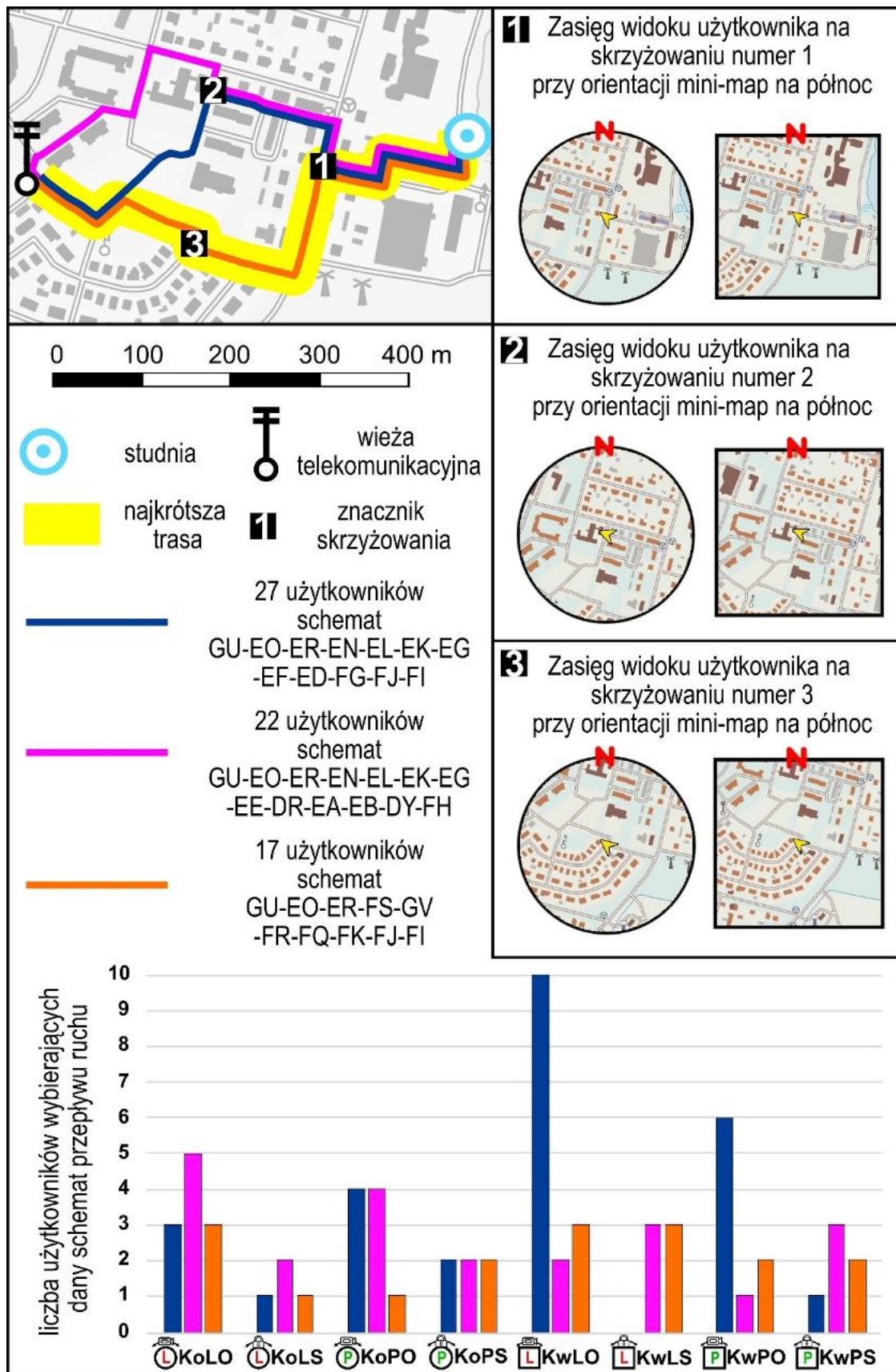
Ryc. 40 Kartodiagram wstępowy przepływu ruchu wszystkich użytkowników na poszczególnych odcinkach ulic 3. trasy dla 8 mini-map

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 41 Kartodiagram wstępowy przepływu ruchu na poszczególnych odcinkach ulic 3. trasy dla 8 mini-map (kody i symbole 8 wersji mini-map)

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej



Ryc. 42 Kartodiagram wstępowy sekwencyjny z kodowaniem kolorystycznym dominanty trzech najpopularniejszych schematów przepływu ruchu wszystkich użytkowników dla 3. trasy dla 8 mini-map

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

Na podstawie ryciny 40 przedstawiono liczbę jednorazowych wejść na poszczególne odcinki dla 3 trasy pomiędzy dwoma kluczowymi obiektami mapowymi (studnia oraz wieża telekomunikacyjna) dla wszystkich użytkowników (224 osoby) dla 8 mini-map. Zaznaczono na diagramie najkrótszą trasę, którą użytkownicy mogli przebyć, aby zmaksymalizować efektywność nawigacyjną w trakcie rozgrywki. Dodatkowo utworzono kartodiagram wstęgowy na podstawie algorytmu naturalnego podziału Jenksa, w celu klasyfikacji danych na minimalizację wariacji wewnątrz klas, a maksymalizację wariacji pomiędzy klasami. Zadanie dla użytkownika było wyznaczone na kierowanie się na zachód od studni do wieży telekomunikacyjnej. Z kartodiagramu wynika, że większość użytkowników nie wybierała odcinków tras ukierunkowanych na jak największą efektywność nawigacyjną. Odnosząc się również do wyników analizy wejścia na poszczególne odcinki można zauważyć, że najmniej uczęszczanym odcinkiem w schemacie najszybszego przejścia był odcinek FK (12,5% użytkowników – 28 razy), a najczęstszym był odcinek blisko studni GU (89,7% użytkowników - 201 razy). Dominującymi odcinkami poza schematem najkrótszej trasy były ulice EN (69,6% użytkowników – 156 razy), FH (57,1% użytkowników – 128 razy) oraz EK (49,6% użytkowników – 111 razy). Wszyscy użytkownicy w trakcie przejścia 3 trasy przynajmniej raz weszli na 70,2% wszystkich dostępnych odcinków w aplikacji.

Rycina 41 przedstawia informacje takie jak poprzednia rycina, z różnicą, że wizualizacja podzielona jest na grupy użytkowników z mini-mapą, którą używali w trakcie aplikacji. Z kartodiagramu wynika, że wybór odcinków dla tej trasy był bardzo rozbieżny wśród wszystkich użytkowników. Należy zauważyć, że w każdej grupie użytkowników znalazły się osoby, które gubiły się podczas nawigacji na przeważnie południowej części dostępnej przestrzeni topograficznej. Zauważyć można również, że dwa końcowe odcinki tras prowadzących graczy do wieży telekomunikacyjnej, z których jeden od strony północnej (odcinek FH), był częściej uczęszczany (128 wejść na 224 możliwych) niż odcinek (odcinek FI) od strony południowo-wschodniej (94 wejścia na 224 możliwych) mimo dwóch najpopularniejszych schematów zawierających odcinek FI jako kończący. Przy odcinku FH występuje w miarę równomierne występowanie we wszystkich grupach, natomiast dla odcinka FI, użytkownicy z mini-mapami kwadratowymi o wiele częściej (54 wejścia) wybierali ten odcinek końcowy niż użytkownicy z mini-mapą kołową (40 wejść). W żadnej grupie nie odnotowano odcinków, w których wszyscy użytkownicy daną ulicę odwiedzili chociaż raz.

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

Największą różnicą w odwiedzin odcinków można zanotować dla odcinka DQ. Grupy, które nawigowały się z mini-mapami w kształcie kwadratu prawie w ogóle nie wchodziły na ten odcinek (5 wejść), w porównaniu z mini-mapami kołowymi (46 wejść).

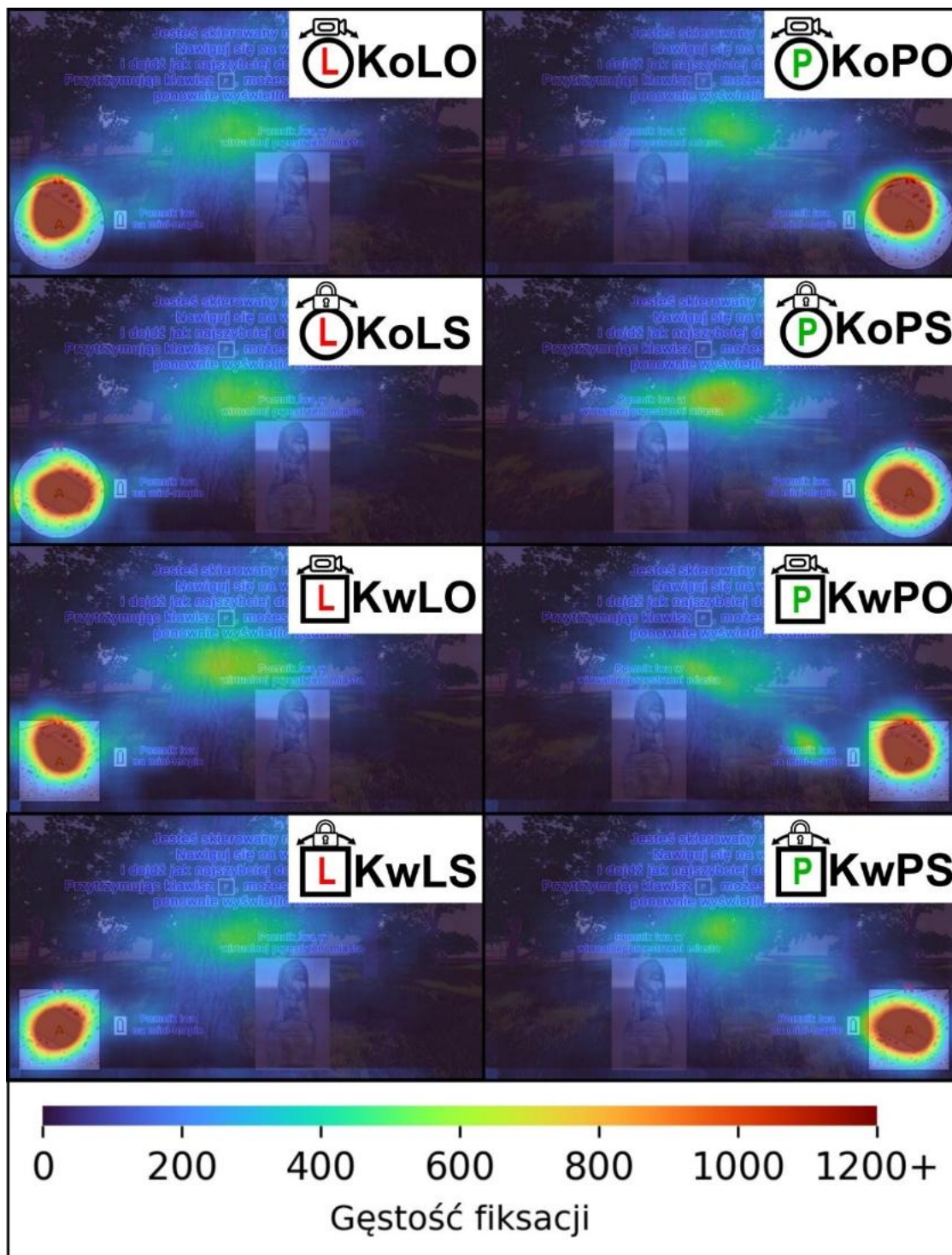
Natomiast Rycina 42 przedstawia informacje dotyczące dominanty najpopularniejszych schematów przepływu ruchu użytkowników dla wszystkich grup mini-map. Każdy uczestnik, przechodząc aplikację, tworzył swój unikatowy schemat przepływu wybierając ścieżki, którymi planował dotrzeć do punktu końcowego. Potwierdzając wcześniejsze wyniki, z kartodiagramu można wyczytać, że najpopularniejszym schematem przepływu ruchu użytkowników (wyborem odcinków, którymi odwiedzili chociaż jeden raz) był schemat GU-EO-ER-EN-EL-EK-EG-EF-ED-FG-FJ-FI z liczbą 27 użytkowników. Drugim najpopularniejszym schematem był schemat GU-EO-ER-EN-EL-EK-EG-EE-DR-EA-EB-DY-FH i był wybierany 22-krotnie przez użytkowników. Na trzecim miejscu odnotowano układ tras związany z schematem GU-EO-ER-FS-GV-FR-FQ-FK-FJ-FI z liczbą 17 użytkowników który jest schematem najkrótszej możliwej trasy dla użytkownika. W porównaniu do poprzednich dwóch tras dominanty schematów dla 3 trasy są bardzo zbliżone do siebie również w porównaniu z mniej popularniejszymi schematami. Może to oznaczać, że układ odcinków dla tej trasy był bardziej skomplikowany i użytkownicy nawigowali się na większej ilości odcinków niż wskazywałaby na to wcześniejsze zadania. Na podstawie wykresu liczby użytkowników wybierających dane schematy przepływu ruchu wnioskować można, że gracze z mini-mapami kwadratowymi obrotowymi najczęściej wybierali najpopularniejszy schemat. Wynik na ogólny trend wybierania tras skierowanych bardziej na północ (bądź do skrętu w prawo na skrzyżowaniu) widoczny jest przy znaczniku skrzyżowania z numerem pierwszym. Jedyne zmienny efekt wizualny widoczny na mini-mapach znajduje się na skrzyżowaniu ze znacznikiem trzecim. Użytkownicy, którzy korzystali z mini-mapy kwadratowej będąc na środku tego skrzyżowania, w rogu ekranu mogli zauważyć wieże telekomunikacyjną (punkt końcowy 3 trasy) szybciej niż użytkownicy, którzy poruszali się z mini-mapą kołową. Natomiast wyniki liczby użytkowników wybierających dany schemat przepływu ruchu na najpopularniejszych schematach nie potwierdzają, żadnych szczególnych różnic między grupami.

4.4.3. Analiza eye-trackingowa

Autor niniejszej rozprawy doktorskiej przeanalizował 224 filmów (średnia długość filmu 8 minut 48 sekund) użytkowników opisanych w rozdziale 4.3.2. Analiza miała na celu określić zachowania użytkowników na interfejsie mini-mapy i zaznaczyć obszary najczęściej odwiedzane przez wzrok użytkowników. Użytkownicy byli podzieleni na 8 grup, z czego

4. Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej

najważniejszy element nawigacyjny, mini-mapa była wyświetlana zgodnie z zaprojektowanymi elementami graficznymi wymienianymi we wcześniejszych podrozdziałach. Na rycinie 43 widzimy różnokolorowe miejsca (zarejestrowane fiksacje) symbolizujące mapy natężenia uwagi poszczególnych grup użytkowników na ekranie interfejsu gry.



Ryc. 43 Zestawienie map ciepła z miejscami fiksacji użytkowników w poszczególnych grupach badawczych (KoLo, KoPo, KoLS, KoPS, KwLO, KwPO, KwLS, KwPS)

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

Najważniejszy element interfejsu, czyli mini-mapa, była ukazana w dolnym lewym i prawym rogu ekranu. Przy pomocy zastosowanej kolorystyki można zauważyć, że mini-mapa była elementem, na którym najczęściej skupiał się wzrok użytkowników podczas badania. Atrybut kształtu (koła czy kwadratu) oraz położenia (lewa strona czy prawa strona) nie wykazują żadnych wzorców skupiania wzroku przez użytkowników w trakcie badania. Jednakże najważniejszym wynikiem tego zestawienia jest widoczność zmian gęstości fiksacji przy mini-mapach o atrybucie orientacji (statyczna i obrotowa). Użytkownicy poruszający się wraz z mini-mapą statyczną, koncentrowali swój wzrok wokół geometrycznego centrum mini-mapy w regularnym i zwartym okrągłym obszarze. Natomiast użytkownicy poruszający się z mini-mapą obrotową, koncentrowali swój wzrok lekko odsunięty w kierunku symbolu północy na mini-mapie, tworząc elipsę wydłużoną ku górze.

4.4.4. Synteza wyników

Wyniki dotyczące czasu przejścia wskazują, że oddziaływanie cech projektowych mini-mapy na tempo realizacji zadań ma charakter selektywny. Miara ta nie różnicuje wariantów badawczych w sposób jednolity, a efekty istotne statystycznie ujawniają się jedynie w określonych konfiguracjach. Wpływ kształtu mini-mapy zaobserwowano wyłącznie w drugiej trasie, co sugeruje, że znaczenie tej cechy jest zależne od konkretnego etapu nawigacji. Oznacza to, że geometria mini-mapy może modyfikować tempo realizacji zadania jedynie w wybranych fragmentach procesu decyzyjnego, nie wykazując jednak wpływu o charakterze całkowitym.

Odminną rolę odgrywa położenie mini-mapy na ekranie. W ujęciu obejmującym łączny czas przejścia dla wszystkich trzech tras, cecha ta okazała się czynnikiem różnicującym wyniki w sposób istotny statystycznie. Mimo braku rozstrzygających efektów w analizach poszczególnych odcinków rozpatrywanych osobno, wpływ położenia ujawnia się w skali całego zadania nawigacyjnego. Spośród analizowanych atrybutów to właśnie położenie wykazuje najbardziej stabilny związek z czasem przejścia, podczas gdy wpływ kształtu pozostaje ograniczony. Uzyskane wyniki potwierdzają, że czas stanowi istotną, lecz pomocniczą miarę analizy efektywności nawigacyjnej i powinien być interpretowany łącznie z innymi wskaźnikami.

Założenie, zgodnie z którym uczestnicy pokonywali trzy kolejne trasy nawigacyjne w tej samej zróżnicowanej przestrzeni topograficznej, stanowiło świadomy kompromis pomiędzy złożonością projektu badawczego a jego spójnością. Choć może budzić wątpliwości co do

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

różnorodności scenariuszy przestrzennych, taka decyzja umożliwiła precyzyjne porównanie wyników dla kolejnych etapów zadania w jednolitym wirtualnym środowisku testowym. Dzięki temu ograniczono wpływ zmiennych zewnętrznych, uzyskując bardziej czytelny obraz wpływu cech projektowych mini-mapy na procesy nawigacyjne.

Zdecydowanie większą klarowność interpretacyjną wykazuje całkowity dystans, który okazał się miarą o wysokiej czułości na cechy projektowe oraz jedną z najczytelniejszych charakterystyk różnicujących efektywność nawigacyjną. Różnice istotne statystycznie odnotowano zarówno w analizie zbiorczej dla wszystkich tras, jak i w odniesieniu do poszczególnych etapów zadania, co potwierdza, że sposób projektowania mini-mapy bezpośrednio wpływa na długość wybieranej ścieżki. W trzeciej trasie zaobserwowano istotne dysproporcje pomiędzy wszystkimi ośmioma wariantami, co wskazuje, że na tym etapie zróżnicowanie rozwiązań projektowych ujawnia się szczególnie wyraźnie. W odniesieniu do pojedynczych cech, wyniki analizy dystansu wskazują na dominującą rolę kształtu. Istotny statystycznie wpływ tego parametru potwierdzono zarówno w ujęciu całościowym, jak i w analizach cząstkowych dla drugiej oraz trzeciej trasy. W przeciwieństwie do czasu przejścia, oddziaływanie kształtu na całkowity dystans jest konsekwentne i stabilne, co pozwala uznać tę cechę za kluczowy czynnik kształtujący ekonomię ruchu w przestrzeni.

Znaczenie dystansu potwierdzają również analizy uwzględniające interakcje cech projektowych. Parametr ten okazał się wrażliwy na kombinacje kształtu z położeniem oraz orientacją mini-mapy. Zależności istotne statystycznie dla zestawienia kształt–położenie wystąpiły w większości analizowanych wariantów, natomiast kombinacje z orientacją ujawniły różnice przede wszystkim w drugiej i trzeciej trasie. Dowodzi to, że efektywność nawigacyjna długości trasy nie wynika wyłącznie z oddziaływania pojedynczych atrybutów, lecz z ich współdziałania, które nabiera znaczenia w bardziej złożonych etapach nawigacji. W tym sensie całkowity dystans może stanowić miarę rzetelnie odzwierciedlającą jakość rozwiązań projektowych.

Na tle pozostałych zmiennych wyraźnie odrębną charakterystykę prezentuje całkowity czas patrzenia na mini-mapę. Wskaźnik ten okazał się szczególnie wrażliwy na cechy projektowe, w istotny sposób różnicując warianty nawigacji, zwłaszcza w trzecim, najbardziej wymagającym etapie zadania, czyli nawigacji ze wschodu w kierunku zachodnim. Ujawnione tam różnice pomiędzy wszystkimi grupami badawczymi uzasadniają traktowanie czasu fiksacji wzroku jako miary precyzyjnie obrazującej obciążenie poznawcze i sposób korzystania z informacji kartograficznej. Analiza wykazała, że najsilniejszy związek z czasem patrzenia ma

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

położenie mini-mapy. Wpływ ten jest stabilny i powtarzalny w różnych ujęciach analitycznych. Jednocześnie znaczenie kształtu ogranicza się do wybranych etapów zadania, a rola orientacji uwidacznia się głównie w interakcji z innymi cechami. Szczególnie interesujących wniosków dostarczają analizy wieloczynnikowe: kombinacja kształtu i położenia, a także położenia z orientacją, generuje istotne różnice statystyczne w większości badanych scenariuszy. Sugeruje to, że ergonomia interfejsu (położenie) w połączeniu z formą prezentacji danych (kształt, orientacja) determinuje długotrwałe wzorce percepcji wzrokowej.

Dodatkowe światło na zróżnicowanie czasu patrzenia rzucają analizy uwzględniające jednoczesne oddziaływanie cech projektowych mini-mapy. Kombinacja kształtu i położenia wykazała istotne różnice zarówno w analizach obejmujących wszystkie trasy, jak i w drugiej oraz trzeciej trasie, co sugeruje, że sposób prezentacji mini-mapy jako całości ma znaczenie większe niż suma oddziaływań pojedynczych parametrów. Również zestawienia położenia z orientacją ujawniły istotne różnice w analizach obejmujących wszystkie trasy oraz trzecią trasę, co uzasadnia uwzględnienie uwarunkowań interfejsu w opisie długotrwałych wzorców korzystania z informacji kartograficznej. W tym kontekście całkowity czas patrzenia na mini-mapę pełni rolę miary dobrze oddającej zróżnicowanie sposobu interakcji użytkowników z prezentowaną informacją kartograficzną.

Wyniki analiz wskazują, że poszczególne cechy projektowe mini-mapy oddziałują na efektywność nawigacyjną w odmienny sposób i z różną siłą. Czas przejścia ujawnia znaczenie położenia mini-mapy w ujęciu całego zadania, całkowity dystans wyraźnie potwierdza kluczową rolę kształtu mini-mapy oraz współdziałania cech projektowych, natomiast całkowity czas patrzenia na mini-mapę okazuje się szczególnie wrażliwym wskaźnikiem wpływu rozwiązań projektowych na sposób korzystania z informacji kartograficznej. Zróżnicowanie wyników pomiędzy analizami obejmującymi wszystkie trasy oraz poszczególne etapy zadania wskazuje, że efektywność nawigacyjna nie jest cechą jednowymiarową, lecz wynikiem interakcji pomiędzy rozwiązaniami projektowymi a strukturą zadania nawigacyjnego.

W rozprawie doktorskiej skoncentrowano się na trzech podstawowych cechach projektowych mini-mapy: położeniu, kształcie i orientacji. Choć taka decyzja umożliwiła przeprowadzenie pogłębionej analizy interakcji pomiędzy tymi kluczowymi parametrami, należy zauważyć, że pominięto inne potencjalnie istotne cechy, takie jak proporcje wymiarów mini-mapy, wyśrodkowanie i odwzorowanie kamery czy poziom generalizacji treści. Ich nieuwzględnienie wynikało z konieczności utrzymania przejrzystości schematu projektowania i kontroli zmiennych. Niemniej można założyć, że także i te cechy mogą wpływać na sposób

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

korzystania z mini-mapy oraz na efektywność nawigacyjną w zadaniach przestrzennych. W związku z tym dalsze prace powinny rozważyć ich włączenie do struktury badawczej, zwłaszcza w kontekście złożonych scenariuszy nawigacyjnych w wirtualnej przestrzeni topograficznej.

Analiza kartograficzna ucześnieczania tras, liczby wejść na poszczególne odcinki oraz dominant schematów przepływu ruchu pozwala stwierdzić, że wpływ mini-mapy 2D na efektywność nawigacyjną ujawnia się w sposób zróżnicowany w zależności od etapu zadania nawigacyjnego. W pierwszej i drugiej trasie użytkownicy w większości przypadków poruszali się w sposób ukierunkowany na maksymalizację efektywności przestrzennej, co przejawiało się częstym wyborem tras najkrótszych lub bardzo do nich zbliżonych. W trzeciej trasie natomiast zaobserwowano wyraźny spadek efektywności nawigacyjnej w ujęciu kartograficznym, przejawiający się znacznym rozproszeniem tras, częstym wyborem odcinków pobocznych oraz ograniczonym wykorzystaniem schematu najkrótszego przejścia.

Przyczyną spadku efektywności nawigacyjnej obserwowanej w trzeciej trasie wydaje się przede wszystkim większa złożoność przestrzenna układu. Co istotne, nie zaobserwowano tutaj efektu uczenia się wśród użytkowników, który mógłby przejawiać się większą sprawnością w realizacji zadania na skutek wcześniejszych doświadczeń z interfejsem. Pomimo wcześniejszego przejścia dwóch tras użytkownicy nie wykazywali wyraźnej poprawy w zakresie efektywności nawigacyjnej. Sugeruje to, że zdobyte wcześniej umiejętności nie były wystarczające w obliczu bardziej złożonego układu urbanistycznego tras miasta. Może to oznaczać, że mini-mapa jako narzędzie wspierające orientację przestrzenną powinna być projektowana z uwzględnieniem różnych przypadków sytuacji nawigacyjnych. Nie tylko tych prostych, lecz także bardziej wymagających poznawczo. Interfejs kartograficzny musi umożliwiać skuteczne wspomaganie użytkownika również w warunkach wzmożonego obciążenia decyzyjnego.

W przypadku pierwszej trasy kartograficzne wizualizacje wykazały, że niezależnie od wariantu mini-mapy większość użytkowników była w stanie zidentyfikować kierunek prowadzący do punktu końcowego. Jednocześnie porównanie grup użytkowników ujawniło, że osoby korzystające z mini-map kwadratowych częściej wybierały schemat najkrótszej możliwej trasy, podczas gdy użytkownicy mini-map kołowych częściej podążali wariantem najpopularniejszym, lecz nie najkrótszym przestrzennie. Różnice te znalazły swoje odzwierciedlenie w ucześnieczaniu konkretnych odcinków oraz w dominujących schematach

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

przepływu ruchu, co wskazuje, że kształt mini-mapy wpływał na zdolność wcześniejszego dostrzeżenia celu i zaplanowania bardziej bezpośredniej trasy.

W drugiej trasie kartograficzna analiza schematów przepływu ruchu wykazała najwyższą efektywność nawigacyjną w skali całego zadania. Najkrótszy schemat przejścia był jednocześnie najczęściej wybieranym, a dwa dominujące schematy różniły się jedynie niewielkimi odchyleniami od trasy najkrótszej. Istotnym wynikiem jest jednak zróżnicowanie pomiędzy wariantami mini-mapy: użytkownicy mini-map kwadratowych częściej ograniczali się do dwóch najbardziej efektywnych schematów, podczas gdy użytkownicy mini-map kołowych częściej wybierali długie, alternatywne przebiegi prowadzące przez południową część obszaru. W tym przypadku kartograficzne wizualizacje nie pozwalają na wskazanie pojedynczej przyczyny przestrzennej tych wyborów, co sugeruje, że efektywność była wynikiem ogólnej czytelności układu, a nie pojedynczego efektu wizualnego.

Największe zróżnicowanie efektywności nawigacyjnej ujawniło się w trzeciej trasie, która charakteryzowała się najbardziej skomplikowanym układem przestrzennym. Kartodiagramy bezspornie wskazują, że większość użytkowników nie wybierała tras najkrótszych, a uczęszczanie odcinków pobocznych osiągało bardzo wysokie wartości. W tym przypadku analiza wariantów mini-mapy ujawniła jednak istotne różnice: użytkownicy mini-map kwadratowych, a w szczególności mini-map kwadratowych obrotowych, częściej wybierali schematy bardziej zbliżone do przebiegu najkrótszego oraz rzadziej wchodzili na odcinki skrajnie nieefektywne przestrzennie. Jednocześnie w żadnym wariacie nie odnotowano pełnej zgodności wyborów tras, co potwierdza, że złożoność układu przestrzennego ograniczała skuteczność samego wsparcia kartograficznego.

Uzupełniająca interpretacja wyników eye-trackingowych wskazuje, że różnice pomiędzy wariantami mini-mapy statycznej i obrotowej mogą odzwierciedlać odmienne sposoby poznawczej interpretacji sytuacji przestrzennej. W wariantach obrotowych koncentracja fiksacji przesunięta w kierunku górnej części mini-mapy, w pobliżu symbolu północy oraz wskaźnika kierunku patrzenia kamery, sugeruje, że użytkownicy częściej koncentrowali uwagę na przestrzeni znajdującej się przed nimi, zgodnie z aktualnym kierunkiem ruchu. Oznacza to, że mini-mapa obrotowa sprzyjała planowaniu nawigacji w perspektywie do przodu, wspierając przewidywanie dalszego przebiegu trasy.

Natomiast w wariantach mini-mapy statycznej koncentracja wzroku wokół geometrycznego centrum mapy wskazuje na częstsze porównywanie bieżącej pozycji z otaczającą ją strukturą

4. *Badanie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej*

przestrzenną. Taki wzorzec fiksacji sugeruje strategię polegającą na częstszym sprawdzaniu relacji lokalnych i orientowaniu się względem najbliższego otoczenia, a nie wyłącznie względem kierunku ruchu. W konsekwencji użytkownicy korzystający z mini-mapy statycznej mogli częściej analizować przestrzeń wokół swojej pozycji, zamiast koncentrować się na tym, co znajduje się bezpośrednio przed nimi.

5. Podsumowanie (wnioski i rekomendacje)

Głównym celem niniejszej rozprawy było określenie efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej opracowanej na podstawie urzędowej bazy topograficznej BDOT10k według jej cech: położenia, kształtu oraz orientacji.

Efektywność nawigacyjną czasową i odległościową rozpatrywano w odniesieniu do ośmiu typów mini-mapy według kombinacji trzech cech projektowych: położenia w interfejsie na ekranie, kształtu geometrycznego oraz orientacji względem kierunku ruchu użytkownika. Zastosowana metodologia badania z użytkownikami, analizy statystyczne oraz wizualizacje kartograficzne umożliwiły wielowymiarową analizę wpływu tych trzech cech na procesy nawigacyjne, ujmowane zarówno poprzez parametry wymierne czasowe, sposobu przemieszczania się, jak i strategię pozyskiwania informacji przestrzennej.

W odniesieniu do pierwszej tezy, zakładającej, że typy mini-mapy według położenia, kształtu i orientacji wykazują zróżnicowanie wymiernych charakterystyk nawigacyjnych obejmujących odległość i czas przejścia oraz czas patrzenia na mini-mapę w skalowalnej wirtualnej przestrzeni topograficznej, stwierdza się, że została ona potwierdzona, a do najważniejszych wniosków należą:

- Typy mini-mapy wyodrębnione ze względu na położenie, kształt i orientację charakteryzują się odmiennymi wartościami wymiernych charakterystyk nawigacyjnych, przy czym poszczególne cechy projektowe wpływają na analizowane charakterystyki w różnym zakresie. Położenie mini-mapy pozostaje stabilnie powiązane z czasem przejścia oraz z czasem patrzenia na mini-mapę, natomiast kształt w sposób powtarzalny oddziałuje na długość wybieranej trasy. Orientacja mini-mapy nie wykazała porównywalnie silnego wpływu na miary wymierne.
- Odległość przejścia stanowi miarę szczególnie wrażliwą na zmienność rozwiązań projektowych mini-mapy, ujawniając zarówno wpływ pojedynczych cech, jak i ich współwystępowania, zwłaszcza w bardziej złożonych etapach zadania nawigacyjnego.
- Czas patrzenia na mini-mapę wykazuje wyraźną zależność od położenia interfejsu, natomiast wpływ kształtu i orientacji ujawnia się głównie w ich współwystępowaniu.

Przeprowadzone analizy jednoznacznie potwierdzają tezę pierwszą, zgodnie z którą cechy projektowe mini-mapy 2D, takie jak kształt, położenie oraz orientacja, wykazują istotne zróżnicowanie wymiernych charakterystyk nawigacyjnych w wirtualnej przestrzeni topograficznej. Wpływ tych cech został wykazany na podstawie miar ilościowych odnoszących

się do przebiegu nawigacji, co pozwala stwierdzić, że sposób zaprojektowania mini-mapy realnie kształtuje efektywność poruszania się użytkowników w środowisku wirtualnym.

W odniesieniu do drugiej tezy, zgodnie z którą ilościowe wizualizacje kartograficzne, w tym kartodiagram wstępowy i mapa ciepła, ujawniają wpływ typu mini-mapy na cechy przestrzenne nawigacji obejmujące natężenie ruchu oraz strategię wyboru ulic w wirtualnej przestrzeni topograficznej, stwierdza się, że została ona potwierdzona, a do najważniejszych wniosków należą:

- Wizualizacje kartograficzne umożliwiają identyfikację zróżnicowania przebiegu tras, intensywności uczęszczania odcinków oraz dominujących schematów przepływu ruchu w zależności od typu zastosowanej mini-mapy oraz etapu zadania nawigacyjnego. W pierwszej i drugiej trasie obserwowany jest wysoki stopień koncentracji ruchu na przebiegach zbliżonych do efektywnych, natomiast w trzeciej trasie ujawnia się wyraźne rozproszenie wyborów i zwiększone wykorzystanie odcinków pobocznych.
- W analizach pierwszej i drugiej trasy zaznaczają się różnice pomiędzy wariantami mini-mapy w zakresie strategii wyboru przebiegu trasy. Użytkownicy mini-map kwadratowych częściej wybierają schematy najkrótsze lub do nich zbliżone, podczas gdy użytkownicy mini-map kołowych częściej podążają wariantami najczęściej uczęszczanymi, lecz mniej efektywnymi, co znajduje odzwierciedlenie w strukturze natężenia ruchu oraz w układzie dominant przepływu.
- Największe zróżnicowanie strategii przestrzennych ujawnia się w trzeciej trasie, charakteryzującej się wysoką złożonością układu ulic. Kartodiagramy wskazują na częste odejścia od najkrótszych przebiegów oraz silne obciążenie odcinków alternatywnych, przy czym warianty mini-map kwadratowych, w szczególności obrotowe, sprzyjają wyborom bliższym rozwiązaniom skutecznym i ograniczają skrajnie nieefektywne przebiegi.
- Analiza rozmieszczenia fiksacji wzrokowych ujawniła wyraźne różnice w sposobie organizowania uwagi w zależności od orientacji mini-mapy. W wariantach statycznych koncentracja fiksacji skupiała się wokół geometrycznego centrum mini-mapy, tworząc zwarty, regularny obszar, natomiast w wariantach obrotowych była przesunięta w kierunku górnej części mini-mapy, przyjmując wydłużony układ eliptyczny. Wynik ten wskazuje na odmienny sposób interpretowania sytuacji przestrzennej w zależności od orientacji mini-mapy.

Uzupełnieniem weryfikacji tez było sformułowanie pytań badawczych, których celem było pogłębienie interpretacji wyników oraz uchwycenie bardziej szczegółowych zależności pomiędzy cechami projektowymi mini-mapy a przebiegiem nawigacji. Pytania te koncentrowały się na relacjach pomiędzy cechami projektowymi, strategiami użytkowników, wrażliwości poszczególnych charakterystyk oraz zróżnicowaniu przebiegu tras. Uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie następujących odpowiedzi:

1. Pytanie badawcze: *W jakim stopniu poszczególne cechy projektowe mini-mapy (kształt, położenie, orientacja) oddziałują na siebie wzajemnie oraz na wymierne charakterystyki nawigacyjne użytkowników?*

Najsilniej oddziałującą na pozostałe cechy projektowe okazało się położenie mini-mapy na monitorze. Cecha ta wykazywała stabilne związki zarówno z czasem przejścia, jak i z czasem patrzenia na mini-mapę, a także ujawniała istotne interakcje z kształtem i orientacją. Położenie mini-mapy wpływało w sposób powtarzalny na sposób alokacji uwagi wzrokowej oraz na płynność integracji informacji kartograficznej z widokiem sceny.

2. Pytanie badawcze: *Jakie konfiguracje cech projektowych mini-mapy prowadzą do największych i statystycznie istotnych różnic w efektywności nawigacyjnej, w szczególności w zakresie całkowitego dystansu i struktur wyborów przestrzennych?*

Największe różnice pomiędzy konfiguracjami cech projektowych ujawniały się w kombinacjach obejmujących kształt mini-mapy. Zestawienia kształt–położenie oraz kształt–orientacja generowały istotne różnice w całkowitym dystansie i w strukturze wyborów przestrzennych, szczególnie w bardziej złożonych etapach zadania. Oznacza to, że kształt mini-mapy pełni kluczową rolę w kształtowaniu ekonomii ruchu i strategii planowania trasy.

3. Pytanie badawcze: *Które z ośmiu wariantów mini-mapy charakteryzują się najwyższą i najniższą efektywnością czasową i odległościową?*

Wysoką efektywnością czasową wyróżniały się wszystkie cztery mini-mapy umieszczone po lewej stronie ekranu. Najwyższą efektywność czasową osiągnęli użytkownicy korzystający z mini-mapy statycznej kwadratowej zlokalizowanej po lewej stronie ekranu. Najniższą efektywność czasową zaobserwowano u użytkowników posiadających mini-mapę statyczną kołową po prawej stronie ekranu. Wysoką efektywność odległościową wykazywały mini-mapy w formie kwadratu. Najwyższą

5. Podsumowanie (wnioski i rekomendacje)

efektywność odległościową uzyskiwali użytkownicy z mini-mapą obrotową kwadratową po lewej stronie ekranu. Tak samo jak w efektywności czasowej, najniższą efektywność odległościową odnotowano u użytkowników korzystających z mini-mapy statycznej kołowej po prawej stronie ekranu.

4. Pytanie badawcze: *Które warianty mini-mapy charakteryzują się najlepszą i najgorszą strategią nawigacyjną?*

Najlepsze strategie nawigacyjne, czyli wybór najkrótszych tras podczas nawigowania się w wirtualnej przestrzeni topograficznej wystąpiły przy wariantach mini-map kwadratowych, a w szczególności z obrotową orientacją usytuowanej po lewej stronie ekranu. Najgorsze strategie nawigacyjne odnotowano przy mini-mapach kołowych z umiejscowieniem po lewej stronie ekranu.

5. Pytanie badawcze: *W jaki sposób złożoność struktury przestrzennej poszczególnych tras modyfikuje wpływ cech i wariantów mini-mapy na przebieg nawigacji oraz efektywność wyboru tras?*

Efektywność przebiegu tras była silnie uzależniona od stopnia złożoności układu przestrzennego ulic w mieście. W pierwszej i drugiej trasie większość użytkowników, niezależnie od wariantu mini-mapy, poruszała się zgodnie z przebiegiem tras najkrótszych, natomiast w trzeciej trasie zaobserwowano wyraźne rozproszenie wyborów i większą liczbę odchyień od trasy najkrótszej. W tym etapie widoczny był również większy wpływ konkretnych konfiguracji mini-map na stabilność i jakość podejmowanych decyzji przestrzennych.

Cel metodyczny, polegający na sprawdzeniu zasadności komplementarnego zastosowania analizy statystycznej (testy statystyczne: ANOVA Kruskala-Wallisa oraz U Manna-Whitneya) oraz ilościowej wizualizacji kartograficznej (kartodiagram wstęgowy oraz mapa ciepła) do wskazania efektywności nawigacyjnej w ujęciu wymiernym (czas przejścia, odległość przejścia oraz czas patrzenia na mini-mapę) oraz przestrzennym (natężenie ruchu i strategie wyboru dróg), został osiągnięty. Zastosowane podejście umożliwiło równoległą analizę miar liczbowych oraz struktur przestrzennych, pozwalając na powiązanie wyników statystycznych z kartograficzną interpretacją wzorców ruchu i sposobów podejmowania decyzji nawigacyjnych. Analiza statystyczna dostarczyła podstaw do ilościowej analizy istotności i zakresu różnic pomiędzy wariantami mini-mapy, natomiast wizualizacje kartograficzne umożliwiły identyfikację przestrzennego zróżnicowania natężenia ruchu, przebiegu tras oraz dominujących

5. Podsumowanie (wnioski i rekomendacje)

strategii wyboru dróg. Kartodiagramy ujawniły zróżnicowanie natężenia ruchu, dominujące schematy przepływu oraz stopień koncentracji wyborów tras w zależności od typu mini-mapy i złożoności układu przestrzennego, natomiast testy statystyczne ANOVA Kruskala-Wallisa oraz U Manna-Whitneya pozwoliły na ilościowe potwierdzenie istotności różnic w zakresie czasu przejścia, odległości oraz czasu patrzenia. Dodatkowo analizy statystyczne umożliwiły określenie, które cechy projektowe i ich kombinacje odpowiadały za obserwowane różnice oraz w jakim stopniu efekty te były powtarzalne pomiędzy poszczególnymi etapami zadania nawigacyjnego. Uzyskane rezultaty potwierdzają zasadność łączenia obu podejść jako spójnego narzędzia analizy efektywności nawigacyjnej w badaniach nad funkcjonowaniem kartograficznych elementów interfejsu w środowiskach wirtualnych.

Celem pragmatycznym niniejszej rozprawy doktorskiej było sformułowanie rekomendacji do projektowania efektywnej mini-mapy do skutecznej nawigacji w przestrzeni wirtualnej konstruowanej z BDOT10k a zatem dostępnej dla każdego projektującego. Na podstawie uzyskanych wyników możliwe jest sformułowanie rekomendacji dotyczących projektowania dwuwymiarowej mini-mapy jako elementu interfejsu aplikacji nawigacyjnych.

Do najważniejszych rekomendacji można zaliczyć następujące:

- Mini-mapa kwadratowa w lewym dolnym narożniku jest bardziej korzystna w aplikacjach nawigacyjnych, przy osiągnięciu wysokiej efektywności czasowej i odległościowej.
- Nie zaleca się projektowania mini-map statycznych kołowych po prawej stronie ekranu.
- Parametr orientacji nie ma znaczenia dla efektywności nawigacyjnej przy projektowaniu mini-mapy, z wyjątkiem mini-map dynamicznych kołowych po prawej stronie ekranu, które są lepsze niż statyczne.
- Mini-mapy usytuowane po lewej stronie ekranu są bardziej efektywne, niż mini-mapy po prawej stronie ekranu.
- Mini-mapy kwadratowe w większości przypadków są bardziej efektywne do nawigacji od mini-map kołowych.

Ważnym wnioskiem płynącym z rozprawy jest konieczność traktowania mini-mapy jako elementu interfejsu projektowanego całościowo, z uwzględnieniem współdziałania jej cech projektowych. Wyniki badań pokazują, że efektywność nawigacyjna nie jest bezpośrednim rezultatem pojedynczej decyzji projektowej, lecz konsekwencją spójnego zestawienia kształtu, położenia i orientacji mini-mapy w odniesieniu do struktury przestrzeni oraz charakteru

5. Podsumowanie (wnioski i rekomendacje)

zadania. Oznacza to konieczność świadomego doboru wariantu mini-mapy do roli, jaką ma ona pełnić w określonej projektowanej aplikacji nawigacyjnej.

Warta podkreślenia jest rola metodyki opartej na komplementarnym zastosowaniu analiz statystycznych oraz ilościowych wizualizacji kartograficznych. Cechy wymierne, takie jak czas przejścia, długość trasy oraz czas patrzenia na mini-mapę, analizowane za pomocą testów statystycznych, zostały uzupełnione interpretacją przestrzenną opartą na kartodiagramach wstęgowych oraz mapach ciepła. Pozwoliło to na powiązanie wyników liczbowych z przestrzenną strukturą ruchu i strategiami wyboru tras. Wnioskiem metodycznym jest zasadność łączenia analiz statystycznych z kartograficzną wizualizacją danych w badaniach nad nawigacją w środowiskach wirtualnych, ponieważ podejścia te dostarczają zdecydowanie bardziej całościowych informacji w procesie nawigowania się w przestrzeni topograficznej.

Autor niniejszej rozprawy zwraca również uwagę na kwestie wymagające dalszej interpretacji, związane przede wszystkim z analizą zachowań nawigacyjnych użytkowników w najbardziej złożonych fragmentach przestrzeni oraz z ograniczeniami wynikającymi z zakresu modelowania środowiska wirtualnego i liczebności próby badawczej. Wskazuje to na zasadność dalszych badań ukierunkowanych na rozszerzenie zbioru scenariuszy przestrzennych, zwiększenie stopnia złożoności i realizmu środowiska oraz pogłębienie analiz percepcyjnych i poznawczych, w tym badań nad projektowaniem kartograficznych elementów nawigacyjnych, takich jak mini-mapa. Jednocześnie wyniki rozprawy podkreślają potrzebę podejścia interdyscyplinarnego, łączącego perspektywę kartograficzną, badania nad interakcją użytkownika z wirtualną rzeczywistością, analizy poznawcze oraz projektowanie interfejsów, jako warunku pełniejszego rozumienia mechanizmów nawigacji w środowiskach wirtualnych.

Literatura

- Adams, E. (2014). *Fundamentals of Game Design* (3rd ed.). Indianapolis, IN, USA: New Riders Publishing.
- Andrienko, G., Andrienko, N., Demsar, U., Dransch, D., Dykes, J., Fabrikant, S. I., Jern, M., Kraak, M.-J., Schumann, H., & Tominski, C. (2010). Space, Time and Visual Analytics. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(10), 1577–1600.
- Battersby, S. E. (2008, wrzesień). *User-centered design for digital map navigation tools*. Referat zaprezentowany na konferencji AutoCarto 2008, Shepherdstown, Wirginia Zachodnia, USA.
- Biljecki F., Ledoux H., Stoter J. (2016), An improved LOD specification for 3D building models, *Computers, Environment, and Urban Systems*, vol. 59, s. 25–37.
- Bos, D. (2021). Geography and virtual reality. *Geography Compass*, 15.
- Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J., & Poupyrev, I. (2001). An introduction to 3-D user interface design. *Presence*, 10(1), 96–108.
- Brand, J., Diamond, S. G., Thomas, N., et al. (2021). Evaluating the data quality of the Gazepoint GP3 low-cost eye tracker when used independently by study participants. *Behavior Research Methods*, 53, 1502–1514.
- Brychtová, A., & Çöltekin, A. (2014). An Empirical User Study for Measuring the Influence of Colour Distance and Font Size in Map Reading Using Eye Tracking. *The Cartographic Journal*, 53 (3): 202-212.
- Callahan, E. (2006). Interface design and culture. *Annual Review of Information Science and Technology*, 39, 255–310.
- Carbonell-Carrera, C., Gunalp, P., Saorin, J. L., & Hess-Medler, S. (2020). Think Spatially With Game Engine. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9, 159.
- Carbonell-Carrera, C., Saorin, J. L., & Jaeger, A. J. (2021). Navigation tasks in desktop VR environments to improve the spatial orientation skill of building engineers. *Buildings*, 11(10), 492.
- Cebrykow, P. (2017). Elaboration of topographic bases for statistical maps, their contents and importance. *Polish Cartographical Review*, 49(3), 97-106.
- Chądyńska, D., & Gotlib, D. (2015). Maps in video games – range of applications. *Polish Cartographical Review*, 47(3), 137–145.
- Chen, C.-H., & Chen, M.-X. (2020). Wayfinding in virtual environments with landmarks on overview maps. *Interacting with Computers*, 32(3), 316–329.
- Chrobak T. (2007), *Podstawy cyfrowej generalizacji kartograficznej*, Wyd. Nauk.-Dydakt., Kraków.
- Cisło-Lesicka, U. (2010). Pozyskiwanie informacji 3D o budynkach dla potrzeb trójwymiarowej wielorozdzielczej bazy topograficznej. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 21, 63–73.
- Çöltekin, A., Heil, B., Garlandini, S., & Fabrikant, S. I. (2009). Evaluating the effectiveness of interactive map interface designs: A case study integrating usability metrics with eye-movement analysis. *Cartography and Geographic Information Science*, 36(1), 5–17.
- Coutrot, A., Schmidt, S., Coutrot, L., Pittman, J., Hong, L., Wiener, J. M., Hölscher, C., Dalton, R. C., Hornberger, M., & Spiers, H. J. (2019). Virtual navigation tested on a mobile app is predictive of real-world wayfinding navigation performance. *PLOS ONE*, 14(3).

- Cybulski, P., & Wielebski, Ł. (2019). Effectiveness of dynamic point symbols in quantitative mapping. *The Cartographic Journal*, 56(2): 146-160.
- Cybulski, P., & Horbiński, T. (2020). User experience in using graphical user interfaces of web maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 412.
- Cybulski, P. (2021). Effectiveness of Memorizing an Animated Route—Comparing Satellite and Road Map Differences in the Eye-Tracking Study. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10, 159.
- Cybulski, P. (2022). An Empirical Study on the Effects of Temporal Trends in Spatial Patterns on Animated Choropleth Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11, 273.
- Cybulski, P., Medyńska-Gulij, B., & Horbiński, T. (2023). Users' Visual Experience During Temporal Navigation in Forecast Weather Maps on Mobile Devices. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 7, 32.
- Danyluk, K., & Willett, W. (2019). Evaluating the performance of virtual reality navigation techniques for large environments. In M. Gavrilova, J. Chang, N. Thalmann, E. Hitzer, & H. Ishikawa (Eds.), *Advances in computer graphics: CGI 2019* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 11542). Springer.
- Dent, B. D. (1999). *Cartography: Thematic Map Design* (5th ed.). Boston, MA: McGraw-Hill.
- Dent, B. D., Torguson, J. S., & Hodler, T. W. (2009). *Cartography: Thematic Map Design* (6th ed., pp. 209-215). McGraw-Hill.
- Dębowska, A., & Korycka-Skorupa, J. (2010). Kartogram i kartodiagram jako przykład łączenia metod prezentacji kartograficznej. *Polski Przegląd Kartograficzny*, 42(4), 305–320.
- Di Domenico, G., Da Cas Becker, F., Schirmer, B. B., Berwaldt, N. L. P., De Freitas, G. M., Neto, A. C., Pozzer, C. T., Fontoura, L. M., & Nunes, R. C. (2024). Evaluation of navigation in immersive large-scale VR environments using minimap-assisted teleportation. In *Proceedings of the 26th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR '24)* (pp. 270–274). Association for Computing Machinery.
- Dong, W., Wu, Y., Qin, T., Bian, X., Zhao, Y., He, Y., Yawei, X., Yu, C. (2021). What is the difference between augmented reality and 2D navigation electronic maps in pedestrian wayfinding? *Cartography and Geographic Information Science*, 48(3), 225–240.
- Dormann, C., Pötscher, C., & Wallner, G. (2023). A Classification of Video Game Cartographic Maps.
- Edler, D., & Dickmann, F. (2017). The Impact of 1980s and 1990s Video Games on Multimedia Cartography. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 52(2), 168-177.
- Edler, D., Keil, J., & Dickmann, F. (2018). Varianten interaktiver Karten in Video-und Computerspielen—Eine Übersicht. *KN Journal of Cartography and Geographic Information*, 68, 57–65.
- Edler, D., Keil, J., Wiedenlubbert, T., & Dickmann, F. (2019). Immersive VR experience of redeveloped post-industrial sites: The example of “Zeche Holland” in Bochum-Wattenscheid. *KN – Journal of Cartography and Geographic Information*, 69, 267–284.
- Edler, D., Keil, J., Tuller, M. C., Bestgen, A. K., & Dickmann, F. (2020). Searching for the ‘Right’ Legend: The Impact of Legend Position on Legend Decoding in a Cartographic Memory Task. *The Cartographic Journal*, 57(1), 6–17.

- Fuest, S., Grüner, S., Vollrath, M., & Sester, M. (2021). Evaluating the effectiveness of different cartographic design variants for influencing route choice. *Cartography and Geographic Information Science*, 48(2), 169–185.
- Garlandini, S., & Fabrikant, S. I. (2009). Evaluating the Effectiveness and Efficiency of Visual Variables for Geographic Information Visualization. In K. S. Hornsby, C. Claramunt, M. Denis, & G. Ligozat (Eds.), *Spatial Information Theory. COSIT 2009* (Lecture Notes in Computer Science, vol. 5756). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Gartner, G., Bennett, D. A., & Morita, T. (2007). Towards Ubiquitous Cartography. *Cartography and Geographic Information Science*, 34(4), 247–257.
- Gazzard, A. (2018). Gaming maps and virtual words. In A. J. Kent & P. Vujakovic (Eds.), *The Routledge Handbook of Mapping and Cartography*. Milton Park, UK: Routledge.
- Gökgöz, T., Hacı, M., Şengün, Y. S., Simav, Ö., & Çobankaya, O. N. (2025). Uncertainty in Generalization: A Comparative Analysis of Selection/Elimination by Algorithms and Cartographers. *Transactions in GIS*, 29(7), e70143.
- Gonçalves, T., Afonso, A. P., & Martins, B. (2015). Cartographic visualization of human trajectory data: Overview and analysis. *Journal of Location Based Services*, 9(2), 138–166.
- Gotlib, D. (2015). Analiza różnic pomiędzy modelami danych BDOT10K a TBD. *Roczniki Geomatyki*, 13(4/70), 321–334.
- Górski, J. (2009). Ogólnodostępne mapy powiatów jako środek przekazu informacji o infrastrukturze społecznej. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 20, 99–107.
- Halik, Ł. (2018). Challenges in Converting the Polish Topographic Database of Built-Up Areas into 3D Virtual Reality Geovisualization. *The Cartographic Journal*, 55(4), 391–399.
- Halik, Ł., & Kent, A. J. (2021). Measuring user preferences and behaviour in a topographic immersive virtual environment (TopoIVE) of 2D and 3D urban topographic data. *International Journal of Digital Earth*, 14(12), 1835–1867.
- Halik, Ł., & Wielebski, Ł. (2023). Usefulness of Plane-Based Augmented Geovisualization—Case of “The Crown of Polish Mountains 3D”. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12, 38.
- Hayatpur, D., Xia, H., & Wigdor, D. (2020). DataHop: Spatial Data Exploration in Virtual Reality. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2020)* (pp. 818–828). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery.
- Herman, L., & Řezník, T. (2015). 3D web visualization of environmental information: Integration of heterogeneous data sources when providing navigation and interaction. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-3/W3, 479–485.
- Hessels, R. S., Kemner, C., van den Boomen, C., & Hooge, I. T. (2016). The area-of-interest problem in eyetracking research: A noise-robust solution for face and sparse stimuli. *Behavior Research Methods*, 48(4), 1694–1712.
- Holmqvist, K., Örbom, S. L., Hooge, I. T. C., et al. (2023). Eye tracking: empirical foundations for a minimal reporting guideline. *Behavior Research Methods*, 55, 364–416.
- Hornbæk, K., Bederson, B. B., & Plaisant, C. (2002). Navigation patterns and usability of zoomable user interfaces with and without an overview. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 9(4), 362–389.
- Hubsy, O. M. (2024). Analysis of User Interfaces for Ground Control Stations of Unmanned Aerial Vehicles. *Cybernetics and computer engineering*, (3), 5–23.

- Hurni L. (2017), Atlas Information Systems [w:] Encyclopedia of GIS, Shekhar S., Xiong H., Zhou X. (red.), Springer, Cham.
- International Cartographic Association. (1995). *The Definition of Cartography*. A statement adopted by the 10th General Assembly, Barcelona, Spain.
- Izdebski W. (2020), Infrastruktura Danych Przestrzennych w Polsce, Geo-System Sp. z o.o., Warszawa.
- Jenny B., Stephen D.M., Muehlenhaus I., Marston B.E., Sharma R., Zhang E., Jenny H. (2018), Design principles for origin-destination flow maps, *Cartography and Geographic Information Science*, 45, 1, s. 62–75.
- Johnson, D., & Wiles, J. (2003). Effective affective user interface design in games. *Ergonomics*, 46, 1332–1345.
- Johnson-Dahl, V. (2024). The Map on your Map: Ten Things to Consider When Making A Locator Map. *Cartographic Perspectives*, 104, 65–69.
- Kapaj, A., Lanini-Maggi, S., Hilton, C., Cheng, B., & Fabrikant, S. I. (2023). How does the design of landmarks on a mobile map influence wayfinding experts' spatial learning during a real-world navigation task? *Cartography and Geographic Information Science*, 50(2), 197–213.
- Kent, A. J., & Hopfstock, A. (2018). Topographic Mapping: Past, Present and Future. *The Cartographic Journal*, 55(4), 305–308.
- Kettunen, P., Sarjakoski, L. T., Ylirisku, S., & Sarjakoski, T. (2011). Web map design for a multipublishing environment based on open APIs. In *Maps and the Internet*. Springer.
- Koláčny, A. (1969). Cartographic information – a fundamental concept and term in modern cartography. *Cartographic Journal*, 6(1), 47–49.
- Korycka-Skorupa, J., & Gołębiowska, I. (2021). Multivariate mapping for experienced users: Comparing extrinsic and intrinsic maps with univariate map. *Miscellanea Geographica*, 25, 259–271.
- Kozioł, K., Lupa, M., & Krawczyk, A. (2014). The Extended Structure of Multi-Resolution Database. In S. Kozielski et al. (Eds.), *Beyond Databases, Architectures, and Structures. BDAS 2014* (Communications in Computer and Information Science, vol. 424). Cham: Springer.
- Kraak, M.-J., & Ormeling, F. J. (2010). *Cartography: visualization of spatial data* (3rd ed.). Pearson Education.
- Kraak M.-J., Ormeling F. (2021), *Cartography: Visualization of Geospatial Data*, 4th ed., CRC Press.
- Kramers E.R. (2023), Prototyping and evaluation [w:] *The Atlas cookbook*, ICA Commission on Atlases, Zurich.
- Krygier, J., & Wood, D. (2005). *Making Maps: A Visual Guide to Map Design for GIS*. Guilford Press.
- Kuo, T. Y., Chang, Y. J., & Chu, H. K. (2023). Investigating Four Navigation Aids for Supporting Navigator Performance and Independence in Virtual Reality. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 39(12), 2524–2541.
- Laksono, D., & Aditya, T. (2019). Utilizing A Game Engine for Interactive 3D Topographic Data Visualization. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8, 361.
- Lambert, N., Zanin, Ch. (2022). *Practical handbook of thematic cartography*, Taylor and Francis Group.
- Lobben, A. K. (2004). Tasks, Strategies, and Cognitive Processes Associated With Navigational Map Reading: A Review Perspective. *The Professional Geographer*, 56(2), 270–281.

- Ly, Z., Li, X., & Li, W. (2017). Virtual reality geographical interactive scene semantics research for immersive geography learning. *Neurocomputing*, 254, 71–78.
- Mahalil, I., Yusof, A. M., Ibrahim, N., Mahidin, E. M. M., & Rusli, M. E. (2019). Virtual Reality Mini Map Presentation Techniques: Lessons and experience learned. In *Proceedings of the 2019 IEEE Conference on Graphics and Media (GAME)* (pp. 26–31). New York, NY, USA: IEEE.
- MacEachren, A. M., & DiBiase, D. (1991). ‘Animated maps of aggregate data: Conceptual and practical problems’, *Cartography and Geographic Information Science*, 18, pp. 221–229.
- MacEachren A.M. (1994), Visualization in modern cartography: Setting the agenda. [w:] *Visualization in Modern Cartography*, MacEachren A.M., Taylor D.R. (red.), Pergamon, Oxford, s. 1–12.
- Markoski, B. (2018), *Basic principles of topography*, Springer International Publishing.
- Marre, Q., Caroux, L., & Sakdavong, J. C. (2021). Video Game Interfaces and Diegesis: The Impact on Experts and Novices’ Performance and Experience in Virtual Reality. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 37(12), 1089–1103.
- McCullough, D., & Collins, R. (2019). “Are we losing our way?” Navigational aids, socio-sensory way-finding and the spatial awareness of young adults. *Area*, 51: 479–488.
- Medyńska-Gulij, B. (2013). Database of Topographic Objects as a Ground for Creation the Spatial Development Study in Polish Communes. *Geoinformatica Polonica*, 12, 45-52.
- Medyńska-Gulij, B. (2018). Educating tomorrow’s cartographers. In A. J. Kent & P. Vujakovic (Eds.), *The Routledge Handbook of Mapping and Cartography*. Milton Park, UK: Routledge.
- Medyńska-Gulij, B. (2024). *Kartografia geomatycznie i geomedialnie*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Medyńska-Gulij, B., Gulij, J., Cybulski, P., Zagata, K., Zawadzki, J., & Horbiński, T. (2022). Map Design and Usability of a Simplified Topographic 2D Map on the Smartphone in Landscape and Portrait Orientations. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11, 577.
- Medyńska-Gulij, B. (2025). Pragmatics of visual variables in statistical-thematic and immersive geovisualizations. *International Journal of Cartography*, 11(2), 282-287.
- Medyńska-Gulij, B., & Zagata, K. (2020). Experts and Gamers on Immersion into Reconstructed Strongholds. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9, 655.
- Mościbroda, J. (1999). *Mapy statystyczne jako nośnik informacji ilościowej*. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej.
- Mościcka, A., Pokonieczny, K., & Tomala, J. (2016). Selection of an Optimal Density of Measurement Points in Travel Time Mapping. *Archives of Geomatics, Abstracts*, 94.
- Miraz, M. H., Excell, P. S., & Ali, M. (2016). User interface (UI) design issues for multilingual users: A case study. *Universal Access in the Information Society*, 15, 431–444.
- Nesbitt, K., Sutton, K., Wilson, J., & Hookham, G. (2009). Improving player spatial abilities for 3D challenges. In *Proceedings of the Sixth Australasian Conference on Interactive Entertainment (IE ’09)* (pp. 1–3). Association for Computing Machinery.
- Niedzielski, T. (2018). Applications of unmanned aerial vehicles in geosciences: introduction. *Pure and Applied Geophysics*, 175(9), 3141-3144.
- Nusrat, S., Alam, M. J., & Kobourov, S. (2018). Evaluating Cartogram Effectiveness. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(2), 1077-1090.

- Okada, A., Rocha, K., Fuchter, S., Zucchi, S., & Wortley, D. (2019). Formative assessment of inquiry skills for Responsible Research and Innovation using 3D Virtual Reality Glasses and Face Recognition. In *Proceedings of the Technology Enhanced Assessment Conference (TEA 2018)* (pp. 91–101). Berlin, Germany: Springer.
- Ormeling, F. (2002). Island Cartography. In *Proceedings of the 7th National Cartographic Conference, Island Cartography* (pp. 24-30).
- Peterson, G. N. (2020). *GIS Cartography: A Guide to Effective Map Design* (3rd ed.). CRC Press.
- Plaisant, C., Carr, D., & Shneiderman, B. (1995). Image browsers: Taxonomy, guidelines, and informal specifications. *IEEE Software*, 12(2), 21–32.
- Popelka, S., Herman, L., Řezník, T., Pařilová, M., Jedlička, K., Bouchal, J., Kepka, M., & Charvát, K. (2019). User Evaluation of Map-Based Visual Analytic Tools. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8, 363.
- Porathe, T. (2008). Measuring effective map design for route guidance: An experiment comparing electronic map display principles. *Information Design Journal*, 16(3), 190–201.
- Pugliesi, E. A., Decanini, M. M. S., & Tachibana, V. M. (2009). Evaluation of the Cartographic Communication Performance of a Route Guidance and Navigation System. *Cartography and Geographic Information Science*, 36(2).
- Qu, Q. X., Zhang, L., Chao, W. Y., & Duffy, V. (2017). User Experience Design Based on Eye-Tracking Technology: A Case Study on Smartphone APPs. In V. Duffy (Ed.), *Advances in Applied Digital Human Modeling and Simulation*. Cham, Switzerland: Springer.
- Ratajski, L. (1989). *Metodyka kartografii społeczno-gospodarczej*, wyd. 2, PPWK, Warszawa
- Rebelo, F., Noriega, P., Duarte, E., & Soares, M. (2012). Using Virtual Reality to Assess User Experience. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54(6), 964-982.
- Rembowska, K. (2008). Człowiek – czas – przestrzeń. Erozja więzi człowieka z ziemią. W W. Maik, K. Rembowska, A. Suliborski (Red.), *Podstawowe idee i koncepcje w geografii*, t. 4 (s. 57-70). Łódź/Bydgoszcz: ZGSiSR UŁ/WSG.
- Riecke, B. E., LaViola, J. J., & Kruijff, E. (2018). 3D user interfaces for virtual reality and games: 3D selection, manipulation, and spatial navigation. In *ACM SIGGRAPH 2018 Courses* (13). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery.
- Robinson, A. C., Anderson, C. L., & Quinn, S. D. (2020). Evaluating geovisualization for spatial learning analytics. *International Journal of Cartography*, 6(3), 331–349.
- Robinson, A. H., Morrison, J. L., Muehrecke, P. C., Kimerling, A. J., & Guptil, S. C. (1995). *Elements of Cartography* (6th ed.). New York: Wiley.
- Rozporządzenie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii z dnia 23 lipca 2021 r. w sprawie bazy danych obiektów topograficznych oraz mapy zasadniczej (2021). Dz.U. 2021 poz. 1385.
- Rozporządzenie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii z dnia 27 lipca 2021 r. w sprawie bazy danych obiektów topograficznych oraz bazy danych obiektów ogólnogeograficznych, a także standardowych opracowań kartograficznych (2021). Dz.U. 2021 poz. 1412.
- Rymarkiewicz, W., Cybulski, P., & Horbiński, T. (2024). Measuring Efficiency and Accuracy in Locating Symbols on Mobile Maps Using Eye Tracking. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(2), 42.
- Schell J. (2019), *The art of game design: a book of lenses*, CRC Press.

- Shneiderman, B. (1998). *Designing the user interface: Strategies for effective human–computer interaction*. Addison-Wesley.
- Schiewe, J. (2025). *Cartography: Visualization of Geospatial Data*. Springer Nature.
- Sirko, M. (1999). *Zarys historii kartografii*. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej.
- Slocum, T. A., McMaster, R. B., Kessler, F. C., & Howard, H. H. (2005). *Thematic cartography and geographic visualization* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Slocum, T. A., McMaster, R. B., Kessler, F. C., & Howard, H. H. (2009). *Thematic cartography and geovisualization* (3rd ed.). Pearson Education.
- Slocum, T. A., McMaster, R. B., Kessler, F. C., & Howard, H. H. (2022). *Thematic cartography and geovisualization*. CRC Press.
- Słomska-Przech, K., Panecki, T., & Pokojski, W. (2021). Heat Maps: Perfect Maps for Quick Reading? Comparing Usability of Heat Maps with Different Levels of Generalization. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(8), 562.
- Spallek, W. A. (2017). Obraz bieżących wydarzeń politycznych w latach 1934–1939... W B. Konopska, W. Spallek & G. Strauchold (Red.), *Z dziejów kartografii* (Tom XXI, s. 161–181). Wydawnictwa IHN PAN.
- Spieß E. (2002), Map compilation [w:] *Basic Cartography for students and technicians*, Anston R., Ormeling F. (eds.), Reed Education and Professional Publishing.
- Ślusarski, M., & Jurkiewicz, M. (2020). Visualisation of Spatial Data Uncertainty. A Case Study of a Database of Topographic Objects. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9, 16.
- Thompson, W. G. (2009). An Automated Method of Scale Selection and Sheet Configuration for Multiple Sheet Census Maps with Insets. *Cartography and Geographic Information Science*, 36(1), 59-70.
- Toups, Z. O., LaLone, N., Spiel, K., & Hamilton, B. (2020). Paper to Pixels: A Chronicle of Map Interfaces in Games. In *Proceedings of the 2020 ACM Designing Interactive Systems Conference (DIS 20)*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery.
- Tyner, A. (2010). *Principles of Map Design* (1st ed.). Guilford Press.
- Ugwitz, P., Juřík, V., Herman, L., Stachoň, Z., Kubiček, P., & Šašinka, Č. (2019). Spatial analysis of navigation in virtual geographic environments. *Applied Sciences*, 9(9), 1873.
- Ustawa z dnia 17 maja 1989 r. Prawo geodezyjne i kartograficzne* (1989). Dz.U. 1989 nr 30 poz. 163.
- Vansteenvoort, L., & De Maeyer, P. (2005, July). An approach to the quality assessment of the cartographic representation of thematic information. In: *Proceedings of the 22th International Cartographic Conference (ICA)*, La Coruna, Spain
- Wang, X., Li, Y., & Liang, H.-N. (2024). MagicMap: Enhancing indoor navigation experience in VR museums. In *2024 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (pp. 881–891). IEEE.
- Ware, C., (2004). *Information visualization: Perception for design*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann.
- Wielebski, Ł. (2015). *Wizualizacja kartograficzna dostępności przestrzennej w modelu monocentrycznym*. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe.

- Wielebski, Ł., & Medyńska-Gulij, B. (2019). Graphically supported evaluation of mapping techniques used in presenting spatial accessibility. *Cartography and Geographic Information Science*, 46(4), 311-333.
- Wielebski, Ł., Medyńska-Gulij, B., Halik, Ł., & Dickmann, F. (2020). Time, spatial, and descriptive features of pedestrian tracks on set of visualizations. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6), 348.
- Włodarczyk, B. (2009). Krajobrazy przestrzeni turystycznej. *Turyzm*, 19(1-2), 89-97.
- Wu, A., Zhang, W., & Zhang, X. (2009). Evaluation of wayfinding aids in virtual environment. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 25, 1-21.
- Zagata, K., Gulij, J., Halik, Ł., & Medyńska-Gulij, B. (2021). Mini-Map for Gamers Who Walk and Teleport in a Virtual Stronghold. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10, 96.
- Zagata, K., & Medyńska-Gulij, B. (2023). Mini-Map Design Features as a Navigation Aid in the Virtual Geographical Space Based on Video Games. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(2), 58.
- Zagata, K., Medyńska-Gulij, B., & Horbiński, T. (2024). Impact of the mini-map on the interpretation of spatial situations in the virtual geographical space of a video game. *Cartography and Geographic Information Science*, 1-14.
- Zych, M. (2014). Prezentacja danych na mapach. W: *Graficzna prezentacja danych statystycznych. Wykresy, mapy, GIS* (s. 36-104). Warszawa: Główny Urząd Statystyczny.
- Żyszkowska, W. (1993). Złożoność jako właściwość obrazu kartograficznego i jej wpływ na odbiór mapy. *Polski Przegląd Kartograficzny*, 25(3), 116-125.
- Żyszkowska, W. (2000). Semiotyczne aspekty wizualizacji kartograficznej. Wyd. Uniw. Wroc., Wrocław.
- Żyszkowska, W., & Spallek, W. (2012). Wizualizacja różnych aspektów zjawisk przestrzennych. W W. Spallek & W. Żyszkowska (Red.), *Kartografia tematyczna* (s. 97-128). Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

Spis rycin

- Ryc. 1 Schemat badania efektywności nawigacyjnej mini-mapy w wirtualnej przestrzeni topograficznej
- Ryc. 2 Schemat równoległego projektowania mini-mapy 2D do wirtualnej przestrzeni 3D
- Ryc. 3 Zestawienie 8 wariantów mini-map z uwzględnieniem wszystkich cech rozpatrywanych w rozprawie doktorskiej (KoLO – koło lewe obrotowe, KoLS – koło lewe statyczne, KoPO – koło prawe obrotowe, KoPS – koło prawe statyczne, KwLO – kwadrat lewy obrotowy, KwLS – kwadrat lewy statyczny, KwPO – kwadrat prawy obrotowy, KwPS – kwadrat prawy statyczny)
- Ryc. 4 Współrzędne punktów granicznych obszaru grywalnego oraz obszaru widzialnego na wizualizacji BDOT10k miasta Pobiedziska
- Ryc. 5 Widok na mapę przestrzeni topograficznej przed zmianami (A) oraz po operacjach geometrycznych i fikcyjnych zmianach obiektów i przestrzeni topograficznej (B)
- Ryc. 6 Widok na mapę grywalnej przestrzeni topograficznej z widocznymi zadaniowymi obiektami topograficznymi (pomnik, studnia, wieża) oraz najkrótszymi możliwymi długościami tras podawanych w metrach do przejścia między tymi obiektami
- Ryc. 7 Widok na okienko rozszerzenia Qgis2threejs na budynki z bazy danych obiektów topograficznych z 6-krotnym przewyższeniem
- Ryc. 8 Widok na początkową fazę projektu w silniku Unity z widocznymi elementami przestrzeni topograficznej
- Ryc. 9 Przykładowe widoki perspektywiczne na gotową wirtualną przestrzeń topograficzną z docelowymi obiektami topograficznymi (A – z pomnikiem lwa, B – ze studnią głębinową, C – z wieżą telekomunikacyjną)
- Ryc. 10 Skrypty w języku C# pozwalające mini-mapie obracać się względem kamery użytkownika (A) oraz skrypt pozwalający śledzić ruch kamery użytkownika i wyznaczać kierunek północny na mini-mapie o kształcie koła (B) oraz mini-mapie w kształcie kwadratu (C)
- Ryc. 11 A: Widok na monitorze podczas rozpoczęcia samouczka; B: Widok z instrukcją na starcie do pierwszego obiektu – pomnika lwa; C: Widok po zdobyciu pierwszego punktu z instrukcją nawigacji do drugiego obiektu – studni.
- Ryc. 12 Zestawienie ośmiu aplikacji ze wszystkimi wariantami mini-map z widokami użytkownika w pierwszej osobie (KoLO – koło lewe obrotowe, KoLS – koło lewe statyczne, KoPO – koło prawe obrotowe, KoPS – koło prawe statyczne, KwLO – kwadrat lewy obrotowy, KwLS – kwadrat lewy statyczny, KwPO – kwadrat prawy obrotowy, KwPS – kwadrat prawy statyczny) (por. z ryciną 3)
- Ryc. 13 Fragment wyników parametrów ankietowych, czasowych, odległościowych i eye-trackingowych w programie Excel na przykładzie kilkunastu użytkowników
- Ryc. 14 Dane dotyczące ścieżki przepływu ruchu użytkownika (User 0) z zadania pierwszego (A), zadania drugiego (B), zadania trzeciego (C) oraz zbiorcza mapa przepływu (D) na tle mapy wirtualnej przestrzeni topograficznej
- Ryc. 15 Zestawienie tabelaryczne sumy i mediany czasu przejścia dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras
- Ryc. 16 Zestawienie wykresowe testu ANOVA Kruskal-Wallis dla czasu przejścia 8 grup użytkowników wraz z wynikiem istotności statystycznej (A – czas przejścia wszystkich tras, B – 1 trasy, C – 2 trasy, D – 3 trasy)

Ryc. 17 Zestawienie tabelaryczne sumy i mediany czasu przejścia dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras na podstawie dwóch parametrów projektowania mini-mapy

Ryc. 18 Zestawienie wykresowe testu ANOVA Kruskal-Wallis dla czasu przejścia pod względem dwóch zmiennych projektowania mini-mapy wraz z wynikiem istotności statystycznej (czas przejścia wszystkich tras [A – kształt-położenie, B – kształt-orientacja, C – położenie-orientacja], 1 trasy [D – kształt-położenie, E – kształt-orientacja, F – położenie-orientacja], 2 trasy [G – kształt-położenie, H – kształt-orientacja, I – położenie-orientacja], 3 trasy [J – kształt-położenie, K – kształt-orientacja, L – położenie-orientacja])

Ryc. 19 Zestawienie tabelaryczne sumy i mediany czasu przejścia dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras na podstawie jednego parametru projektowania mini-mapy

Ryc. 20 Zestawienie wykresowe testu U Manna-Whitneya dla czasu przejścia na podstawie jednego parametru projektowania mini-mapy wraz z wynikiem istotności statystycznej (czas przejścia wszystkich tras [A – kształt, B – położenie, C – orientacja], 1 trasy [D – kształt, E – położenie, F – orientacja], 2 trasy [G – kształt, H – położenie, I – orientacja], 3 trasy [J – kształt, K – położenie, L – orientacja])

Ryc. 21 Zestawienie tabelaryczne sumy i mediany całkowitego dystansu dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras

Ryc. 22 Zestawienie wykresowe testu ANOVA Kruskal-Wallis dla całkowitego dystansu 8 grup użytkowników wraz z wynikiem istotności statystycznej (A – całkowity dystans wszystkich tras, B – 1 trasy, C – 2 trasy, D – 3 trasy)

Ryc. 23 Zestawienie tabelaryczne sumy i mediany całkowitego dystansu dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras na podstawie dwóch parametrów projektowania mini-mapy

Ryc. 24 Zestawienie wykresowe testu ANOVA Kruskal-Wallis dla całkowitego dystansu pod względem dwóch zmiennych projektowania mini-mapy wraz z wynikiem istotności statystycznej (całkowity dystans wszystkich tras [A – kształt-położenie, B – kształt-orientacja, C – położenie-orientacja], 1 trasy [D – kształt-położenie, E – kształt-orientacja, F – położenie-orientacja], 2 trasy [G – kształt-położenie, H – kształt-orientacja, I – położenie-orientacja], 3 trasy [J – kształt-położenie, K – kształt-orientacja, L – położenie-orientacja])

Ryc. 25 Zestawienie tabelaryczne sumy i mediany całkowitego dystansu dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras na podstawie jednego parametru projektowania mini-mapy

Ryc. 26 Zestawienie wykresowe testu U Manna-Whitneya dla całkowitego dystansu na podstawie jednego parametru wraz z wynikiem istotności statystycznej (całkowity dystans wszystkich tras [A – kształt, B – położenie, C – orientacja], 1 trasy [D – kształt, E – położenie, F – orientacja], 2 trasy [G – kształt, H – położenie, I – orientacja], 3 trasy [J – kształt, K – położenie, L – orientacja])

Ryc. 27 Zestawienie tabelaryczne mediany całkowitego czasu patrzenia na mini-mapę oraz mediany procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras

Ryc. 28 Zestawienie wykresowe testu ANOVA Kruskal-Wallis dla całkowitego czasu patrzenia na mini-mapę 8 grup użytkowników wraz z wynikiem istotności statystycznej (A – czas patrzenia na mini-mapę wszystkich tras, B – 1 trasy, C – 2 trasy, D – 3 trasy)

Ryc. 29 Zestawienie tabelaryczne mediany czasu patrzenia na mini-mapę oraz mediany procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę i poszczególnych tras na podstawie dwóch parametrów projektowania mini-mapy

Ryc. 30 Zestawienie wykresowe testu ANOVA Kruskal-Wallis dla czasu patrzenia na mini-mapę pod względem dwóch zmiennych projektowania mini-mapy wraz z wynikiem istotności

statystycznej (całkowity czas patrzenia na mini-mapę wszystkich tras [A – kształt-położenie, B – kształt-orientacja, C – położenie-orientacja], 1 trasy [D – kształt-położenie, E – kształt-orientacja, F – położenie-orientacja], 2 trasy [G – kształt-położenie, H – kształt-orientacja, I – położenie-orientacja], 3 trasy [J – kształt-położenie, K – kształt-orientacja, L – położenie-orientacja])

Ryc. 31 Zestawienie tabelaryczne mediany czasu patrzenia na mini-mapę i mediany procentowego udziału czasu patrzenia na mini-mapę dla całej trasy przejścia aplikacji i poszczególnych tras na podstawie jednego parametru projektowania mini-mapy

Ryc. 32 Zestawienie wykresowe testu U Manna-Whitneya dla czasu patrzenia na mini-mapę na podstawie jednego parametru projektowania mini-mapy wraz z wynikiem istotności statystycznej (czas patrzenia na mini-mapę wszystkich tras [A – kształt, B – położenie, C – orientacja], 1 trasy [D – kształt, E – położenie, F – orientacja], 2 trasy [G – kształt, H – położenie, I – orientacja], 3 trasy [J – kształt, K – położenie, L – orientacja])

Ryc. 33 Mapa ulic aplikacji z przedstawieniem dwuliterowych oznaczeń poszczególnych odcinków dróg (od AA do GY)

Ryc. 34 Kartodiagram wstęgowy przepływu ruchu wszystkich użytkowników na poszczególnych odcinkach ulic 1. trasy dla 8 mini-map

Ryc. 35 Kartodiagram wstęgowy przepływu ruchu na poszczególnych odcinkach ulic 1. trasy dla 8 mini-map (kody i symbole 8 wersji mini-map)

Ryc. 36 Kartodiagram wstęgowy sekwencyjny z kodowaniem kolorystycznym dominanty trzech najpopularniejszych schematów przepływu ruchu wszystkich użytkowników dla 1. trasy dla 8 mini-map

Ryc. 37 Kartodiagram wstęgowy przepływu ruchu wszystkich użytkowników na poszczególnych odcinkach ulic 2. trasy dla 8 mini-map

Ryc. 38 Kartodiagram wstęgowy przepływu ruchu na poszczególnych odcinkach ulic 2. trasy dla 8 mini-map (kody i symbole 8 wersji mini-map)

Ryc. 39 Kartodiagram wstęgowy sekwencyjny z kodowaniem kolorystycznym dominanty trzech najpopularniejszych schematów przepływu ruchu wszystkich użytkowników dla 2. trasy dla 8 mini-map

Ryc. 40 Kartodiagram wstęgowy przepływu ruchu wszystkich użytkowników na poszczególnych odcinkach ulic 3. trasy dla 8 mini-map

Ryc. 41 Kartodiagram wstęgowy przepływu ruchu na poszczególnych odcinkach ulic 3. trasy dla 8 mini-map (kody i symbole 8 wersji mini-map)

Ryc. 42 Kartodiagram wstęgowy sekwencyjny z kodowaniem kolorystycznym dominanty trzech najpopularniejszych schematów przepływu ruchu wszystkich użytkowników dla 3. trasy dla 8 mini-map

Ryc. 43 Zestawienie map ciepła z miejscami fiksacji użytkowników w poszczególnych grupach badawczych (KoLo, KoPo, KoLS, KoPS, KwLO, KwPO, KwLS, KwPS)