

**Streszczenie pracy doktorskiej mgr. inż. Karola Kwiatka  
pt. „Zastosowanie immersyjnych obrazów wideo do fotogrametrycznych pomiarów 3D”.**

Praca doktorska przedstawia koncepcję pomiarów fotogrametrycznych z wideo immersyjnego, czyli wideo zarejestrowanego w ruchu przez kamerę immersyjną. Taka kamera rejestruje serię immersyjnych obrazów wideo o 360° polu widzenia dzięki zastosowaniu kilku kamer składowych, których środki rzutów są oddalone od wspólnego „wirtualnego” środka rzutów.

W celu łatwiejszego korzystania z takich oddzielnych obrazów składowych zwykle tworzone są „ułamne” panoramy sferyczne, które w tej pracy nazywane są panoramami immersyjnymi. Obrazy składowe są rzutowane na powierzchnię sfery i wyświetlane jako panoramy sferyczne o wspólnym środku rzutów. Powoduje to powstawanie błędów na tych panoramach, co wpływa na dokładność opracowań fotogrametrycznych.

W literaturze brak jest opracowań dotyczących wpływu różnych parametrów odpowiedzialnych za tworzenie panoram immersyjnych na pomiary fotogrametryczne, na tworzenie wysokorozdzielczych chmur punktów, a także na generowanie trajektorii poruszającej się kamery immersyjnej. W dotychczasowych badaniach nie ma też analizy dokładności pomiarów fotogrametrycznych z obrazów tworzonych przez wielokamerowe systemy dioptryczne oraz wykorzystania zalet immersyjnego wideo. Niniejsza rozprawa zawiera badania pozwalające na wypełnienie luk w istniejącym stanie wiedzy na temat obrazowania wideo immersyjnego i jego zastosowania do pomiarów fotogrametrycznych. W szczególności położono nacisk na wpływ zastosowania obrazów immersyjnych na dokładność takich pomiarów w dostępnym oprogramowaniu fotogrametrycznym wykorzystującym model sferyczny.

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej było sprawdzenie potencjału kamer immersyjnych w fotogrametrii bliskiego zasięgu i opracowanie metodyki pomiarów z immersyjnych obrazów wideo. Z uwagi na charakter obrazów immersyjnych w odniesieniu do panoram sferycznych, celem poznawczym jest analiza modelu immersyjnego i badanie różnic w stosunku do modelu sferycznego, natomiast praktycznym aspektem badań jest sprawdzenie wpływu tych różnic na pomiary fotogrametryczne na konkretnych, zarejestrowanych immersyjnych obrazach wideo. W badaniach wykorzystano kamerę immersyjną Ladybug® 3 firmy Point Grey Research.

Z uwagi na wykorzystanie oprogramowania bazującego na obrazach sferycznych (Agisoft Photoscan) w analizach uwzględniono model sferyczny z błędami obrazowania immersyjnego. Problemem badawczym jest analiza dokładności pomiarów z panoram immersyjnych w zależności od czynników wpływających na tworzenie immersyjnych obrazów wideo, a także od specyfiki rejestrowanego miejsca.

Ustalono następujące tezy rozprawy doktorskiej: a) immersyjne obrazy wideo pozyskiwane z systemów mobilnych mogą być użyte jako źródło fotogrametrycznych danych do pomiarów 3D o dokładności wynikającej z geometrii modelu obrazowania; b) immersyjne obrazy wideo pozwalają na tworzenie modeli 3D obiektów w postaci chmury punktów o dużej rozdzielczości; c) immersyjne obrazy wideo pozwalają na poprawienie dokładności wyznaczenia trajektorii ruchu kamery poprzez integrację metody SfM z pomiarem GNSS/INS.

W ramach badań nad tezą (a) zauważono przede wszystkim, że punkty fotografowanego obiektu znajdujące się w odległości ( $D$ ) równej promieniowi sfery ( $R$ ) (od umownego wirtualnego środka rzutów) odwzorowane są na panoramie w położeniach zgodnych z

obrazowaniem sferycznym, pozostałe punkty doznają przesunięć – nazwanych tu paralaksami. Największe błędy paralaksy uzyskuje się dla dużych wartości  $R$  i małych wartości  $D$ . Tendencje wyboru długości bazy dla obrazowania imersyjnego w modelu sferycznym są przeciwne z minimalizacją błędów przypadkowych dla kamer składowych w położeniu normalnym i zgodne dla kamer sąsiednich. Im krótsza baza, tym kąty  $\varepsilon$  (pomiędzy osią kamery składowej a kierunkiem obserwacji) są mniejsze, w związku z tym zmniejsza się błąd paralaksy, natomiast zwiększa się wpływ błędu przypadkowego w kierunku wglębnym. Optymalny dobór bazy przy pomiarze z dwóch panoram występuje wtedy, gdy wykres błędu przypadkowego dla kierunku głębi wcięcia przecina się z wykresem wpływu błędu systematycznego spowodowanego imersją w tym samym kierunku. Przy pomiarze z tych samych kamer składowych można przewidzieć błędy, jakie pojawią się na obrazach imersyjnych, jednakże, gdy pojawia się przeskok na sąsiednią kamerę składową wtedy wpływ imersji jest trudno przewidywalny (analizowana kamera immersyjna nie jest symetryczna i składa się z pięciu kamer składowych rozmieszczonych na jednej płaszczyźnie).

W badaniach nad tezą (b) stwierdzono głównie, że zwiększenie liczby panoram ma decydujące znaczenie dla gęstości chmury punktów, co wpływa na zwiększenie rozdzielczości tworzonego modelu. Dodatkowo, dobór małej bazy znacznie zwiększa liczbę punktów wiążących między panoramami.

W celu udowodnienia tezy (c) zbudowano średnio-budżetowy autorski system mobilnego kartowania składający się z modułów pozycjonowania, inercyjnego i imersyjnego obrazowania. Został on skalibrowany przez wyznaczenie wektora przesunięć między modułami systemu, wyliczono macierze obrotów i macierze kalibracyjne oraz porównano dane pozyskane z pomiarów GNSS i INS z danymi uzyskanymi z aplikacji SfM. Przeprowadzono także integrację georeferencji bezpośredniej z wyrównaniem sieci panoram. W autorskim systemie mobilnym wykorzystanie georeferencji pośredniej dla imersyjnych obrazów wideo zwiększyło nawet 3-krotnie dokładność na punktach kontrolnych w porównaniu do sytuacji, gdy korzysta się z georeferencji bezpośredniej pozyskanej z technologii SPAN opartej na dwóch antenach GNSS oraz danych satelitarnych i inercyjnych poddanych *post-processingowi*.

W tej rozprawie udowodniono, że można zaplanować realizację pomiarów fotogrametrycznych z panoram imersyjnych o określonej dokładności, jednak odbywa się to kosztem ograniczenia pola widzenia i związanego z tym zmniejszenia liczby punktów, co zrekompensować można przez zwiększenie liczby rejestrowanych panoram (fps). Wiąże się to z krótszą bazą, co prowadzi do zmniejszenia błędu paralaksy (błąd systematyczny), ale przy jednoczesnym wzroście błędu przypadkowego. Uzyskane dokładności potwierdzają przydatność skonstruowanego systemu oraz zaproponowaną metodykę kalibracji i integracji obserwacji pod kątem niektórych opracowań fotogrametrycznych. System może być wykorzystany do tworzenia modeli budynków o poziomie szczegółowości LoD4. Przestrzeganie wyżej opisanych zasad przy pomiarach z panoram imersyjnych umożliwia opracowanie modeli 3D ulic lub wnętrz obiektów z dokładnością mieszczącą się w przedziale 0,01-0,04 m.