

prof. dr hab. inż. arch. Jacek Kościuk
emerytowany profesor
Laboratorium Skanowania i Modelowania 3D
Wydział Architektury
Politechnika Wroclawska
jacek.kosciuk@pwr.edu.pl

Wrocław, 18.09.2023

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Piotra Forysia

***Metoda automatycznej rekonstrukcji trójwymiarowej geometrii
obiektu dziedzictwa kulturowego na podstawie wielu pomiarów kierunkowych
przygotowanej pod kierunkiem
Prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika
i promotora pomocniczego
dr inż. Jakuba Markiewicza***

Praca została dostarczona recenzentowi w formie pliku PDF sygnowanego przez Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej (2023). Recenzja została zlecona pismem Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej Pana Profesora dr hab. inż. Gerarda Cybulskiego z dnia 29.08.2023 roku, na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 2.08.2023 roku.

1. Tematyka i istotność zagadnień naukowych poruszanych w recenzowanej rozprawie

Przystępując do oceny tak specjalistycznej pracy recenzent zmuszony jest określić granice własnych kompetencji. W latach 2006-2022 Autor recenzji kierował Laboratorium Skanowania i Modelowania 3D przy Katedrze (dawniej Instytucie) Historii Architektury, Sztuki i Techniki na Wydziale Architektury Politechniki Wroclawskiej. W pracach Laboratorium dominowały zagadnienia praktycznego wykorzystania pojawiających się sukcesywnie rozwiązań softwarowych i hardwarowych dotyczących laserowego skanowania 3D i fotogrametrii cyfrowej bliskiego zasięgu w dokumentacji zabytków architektury oraz stanowisk archeologicznych. Recenzent nie jest więc teoretykiem, a raczej praktykiem i właśnie z takiej pozycji będzie oceniał tę pracę doktorską.

Recenzowana praca dotyczy niezwykle istotnego etapu procesu skanowania 3D, a mianowicie rejestracji chmur punktów pozyskanych na poszczególnych stacjach skanowania (pozycjach skanera) do wspólnego układu współrzędnych przestrzennych. Doktorant zawęży wprawdzie tematykę do skanowania obiektów dziedzictwa kulturowego, ale rozpatrywany problem wydaje się być uniwersalnym. Wpływa bowiem na dwa ważne parametry całego procesu skanowania 3D – praktycznie niezależne od przedmiotu digitalizacji. Jednym z nich jest czas

potrzebny do złożenia dwóch chmur, a drugim jakoś wynikowego złożenia. W tym aspekcie, wybór obiektów dziedzictwa kulturowego jest jak najbardziej uzasadniony. Szczególnie dla tego, ciągle niedoinwestowanego, obszaru zastosowania technologii skanowania 3D obniżenie pracochłonności (kosztów) opracowania, a jednocześnie wysoka jego jakość (wierność odwzorowania cyfrowego), ma kapitalne znaczenie dla upowszechnienia tej technologii.

2. Charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa podzielona jest na dziewięć rozdziałów poprzedzonych bardzo przydatnym zestawieniem użytych skrótów oraz pojęć. Całość opatrzone obszerną (202 pozycje) bibliografią obejmującą w znakomitej większości angielskojęzyczne opracowania wydane w ciągu ostatnich kilku lat. Tekstowi towarzyszy 48 rysunków oraz 15 tabel. Praca nie epatuje często spotykanym w przypadku tematyki skanowania zabytków nadmiarem ilustracji. Dobrano je wręcz oszczędnie, jako niezbędne uzupełnienie wywodu tekstowego. W niektórych przypadkach, bez szkody dla objętości pracy, można by się jednak pokusić o powiększenie rozmiaru ilustracji, np. Rys.3; 29; 38; 42; 42.

Autor nie stosuje przypisów, a jedynie odwołania do numerów pozycji bibliograficznych. Konstrukcja pracy i jej język są poprawne, choć liczne błędy w końcówkach fleksyjnych nieco obniżają to dobre wrażenie. Do pracy zostały dołączone streszczenia w języku polskim i angielskim.

Uwagi

1. Brak jest zestawienia tabel i ilustracji, a w podpisach pod tymi ostatnimi najczęściej nie podano ich źródeł, czy też ewentualnie autorstwa. Z kontekstu pracy można wprowadzić wnioskować, że znakomita większość ilustracji jest przygotowana przez Doktoranta, ale mimo tego, stosowna informacja powinna znaleźć się w podpisach.

2.1. Rozdział pierwszy

W tym wstępnym rozdziale Autor przedstawia motywacje które skłoniły go do podjęcia takiego właśnie tematu koncentrującego się na wybranych zagadnieniach cyfrowej dokumentacji zabytków dziedzictwa kulturowego. W formie skrótowej omawia korzyści wynikające z zastosowania takiej metody i możliwości wykorzystania zebranych danych. Sygnalizuje także węzłowy problem swojej pracy – „... łączenie wielu chmur punktów w celu uzyskania spójnego i pełnego modelu 3D.” (s. 12), a następnie skrótowo omawia związane z tym procedury oraz stosowane strategie i metody.

W ten sposób dochodzi do sformułowania celów pracy rozróżniając wśród nich cele naukowe oraz aplikacyjne. Wśród tych pierwszych wymienia:

„1. Opracowanie skutecznej metody łączenia pary chmur punktów bazującej na cechach geometrycznych oraz intensywności wyznaczonej z koloru o parametrach uzależnionych od średniej odległości między punktami” (s. 16)

oraz

„2. Opracowany algorytm musi być zdolny do poprawnego działania z różnymi typami danych wejściowych, takimi jak chmury punktów reprezentujące płaskie ściany z bogatymi zdobieniami i malowidłami, płaskorzeźby oraz obiekty o złożonym kształcie, przy uwzględnieniu obecności licznych złożonych i błyszczących dekoracji” (s. 16).

Uwagi

2. W przekonaniu recenzenta drugi z celów naukowych jest raczej kryterium które powinna spełniać metoda wymieniona jako cel pierwszy i w konsekwencji powinna być raczej wyróżniona znakiem "•", tak jak pozostałe trzy kryteria, czy też założenia dla tego celu.

3. Wśród trzech kryteriów dla celu pierwszego wymienione są m. in. dystans Chamfera które to pojęcie wprowadza Doktorant dopiero w rozdziale 6 (s. 81-82) oceniającym skuteczność metody służącej realizacji celu pierwszego, oraz współczynnik podobieństwa S definiowany wzorem (8) dopiero w rozdziale 5 jako miara podobieństwa pomiędzy dwoma zbiorami punktów (s. 73). Doktorant, już na etapie wyznaczania celu pracy, antycypuje więc szczegóły metody którą ma dopiero stworzyć (współczynnik S) oraz mierniki jej oceny (dystans Chamfera). Wprowadza to u czytelnika (a przynajmniej u recenzenta) pewien dysonans poznawczy. Jest to zapewne mimowolny efekt powszechnie stosowanej (i dobrej!) zasady, że „wstęp pisze się na końcu”.

Jako cel aplikacyjny stawia sobie Autor zastosowanie zaproponowanej przez siebie metody do „efektywnego i szybkiego procesu do łączenia dużej ilości wysoko-rozdzielczych chmur punktów” (s. 16) pozyskanych w czasie skanowania 3D dwóch pomieszczeń w Muzeum Pałacu Króla Jana III w Wilanowie. Jako główne kryteria realizacji celu aplikacyjnego zakłada Doktorant skrócenie o 50% czasu potrzebnego na stworzenie pełnego modelu składającego się z 50 chmur punktów, oraz automatyzację i parametryzację proponowanych algorytmów stosownie do charakterystyki wejściowych chmur punktów. W końcowej części wstępu przedstawiono krótki opis układu pracy.

Rozdział wstępny skonstruowany jest poprawnie, a główny cel pracy oraz stojące za nim motywacje są jasno i jednoznacznie wyartykułowane na 6 stronach. Krytyczne uwagi recenzenta mają jedynie charakter porządkowy i Doktorant nie musi się do nich ustosunkowywać.

2.2. Rozdział drugi

Na 25 stronach tego rozdziału szeroko omówiono stosowane w praktyce metody automatycznej rejestracji chmur punktów do wspólnego układu współrzędnych przestrzennych. Doktorant rozróżnił tu:

- metody oparte o wyszukiwanie punktów charakterystycznych i obliczaniu ich deskryptorów, dzieląc je na bazujące na kształcie (geometrii) obiektu, jego kolorze i/lub teksturze, oraz metody mieszane stosujące oba te deskryptory,
- metody iteracyjne, reprezentowane w tym zestawieniu przez metodę ICP (Iterative Closest Point), oraz SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) i SLAM 6D.
- metody oparte na sieciach neuronowych i głębokim uczeniu bazujące na cechach, na zasadach odrzucania błędnych korespondencji, oraz metody kompleksowe polegające nie tylko na trenowaniu rozpoznawania cech charakterystycznych, ale i na uczeniu dopasowania cech i znajdowania odpowiednich korespondencji.

W kolejnych podrozdziałach, na 25 stronach, przedstawiono opisy wszystkich tych metod. Szczególnie wiele miejsca poświęcono rozwijającym się w tej chwili intensywnie metodom opartym na głębokim uczeniu, gdzie Doktorant proponuje także kilka alternatywnych sposobów klasyfikacji tych metod.

W podsumowaniu tego rozdziału, w tabeli 2, Autor przedstawia syntetyczne zestawienie algorytmów należących do, jak to nazywa, „klasycznych” metod łączenia chmur punktów 3D. Dalsza część podsumowania poświęcona jest metodom opartym na sieciach neuronowych i głębokim uczeniu. Podkreślając trudności w ocenie skuteczności tych metod (operowanie na nieporównywalnych, specyficznych danych; brak w literaturze kompleksowych, krzyżowych porównań) Doktorant porównuje metody głębokiego uczenia w oparciu o różne miary:

- Feature Matching Recall (FMR) określający stosunek pozytywnych dopasowań znalezionych przez algorytm do całkowitej liczby możliwych poprawnych dopasowań (tabela 3),
- Registration Recall (RR) wyrażający stosunek poprawnie dopasowanych par chmur punktów do całego zbioru danych, dzieląc je na metody odrzucające błędne rozwiązania (tabela 4), metody opisujące cechy (tabela 5) i metody kompleksowe (tabela 6).

W ten sposób, rozdział 2 stanowi analizę aktualnego stanu badań nad interesującym Doktoranta zagadnieniem. Warto w tym miejscu podkreślić, że analiza gwałtownie rozwijających się metod głębokiego uczenia oparta została o ponad 40 publikacji z okresu 2004-2022, w tym ponad 2/3 z ostatnich 3 lat. Jest to najbardziej kompleksowa i aktualna synteza znana recenzentowi i już sama w sobie stanowi istotną wartość ocenianej pracy.

2.3. Rozdział trzeci

Rozdział trzeci opisuje na 12 stronach dane wejściowe które posłużą do testowania tworzonej w pracy metody, a jednocześnie będą stanowiły materiał służący realizacji celu aplikacyjnego. Dane pochodzą z czterech pomieszczeń Muzeum Pałacu Króla Jana III w Wilanowie i zostały zebrane w ramach dwóch projektów finansowanych współfinansowanych przez Unię Europejską.

Urządzeniem skanującym był dedykowany system składający się ze skanera światła strukturalnego, kamery służącej do akwizycji barw i 6 oświetlaczy. Całość zamontowano na zrobotyzowanym podnośniku kołowym o maksymalnej wysokości roboczej 5,5 metra. W rozdziale 3 podano zwięzłą charakterystykę techniczną zastosowanego systemu określając błąd geometryczny położenia punktów jako mniejszy niż 0,05 mm, a rozdzielczość chmur punktów w granicach 0,1 mm.

Dla każdego z czterech dokumentowanych pomieszczeń zebrano około 5 tysięcy chmur punktów 3D liczących około 7,5 miliona punktów pomiarowych każda. Wielkość zebranego materiału uzasadniała więc poszukiwanie optymalnej metody łączenia tych wszystkich niemal 20 tysięcy chmur punktów – co właśnie stanowi główny temat recenzowanej pracy.

Z tego bogatego zestawu danych wybrano 5 podzbiorów – każdy składający się z 25 par chmur punktów o wzajemnym pokryciu między 20 a 90 procent. Kryterium podziału stanowił charakter skanowanych obiektów, a w konsekwencji i charakter wynikowych chmur punktów które różniły się poziomem szumu, geometrią, kolorem i teksturą.

Podzbiór I - obiekty o skomplikowanej geometrii, głównie dekoracja sztukatorska o ograniczonej (jak można domniemywać z rys. 16) palecie barwnej.

Podzbiór II - płaskie powierzchnie o bogatej palecie barwnej, różnorodnym podłożu i różnych technikach malarskich.

Podzbiór III – charakteryzujące się bogatą gamą kolorystyczną i przejściami półtonowymi malarstwo ścienne na sklepieniach i innych nie-płaskich powierzchniach. Dodatkowym wyróżnikiem jest tu chropowata powierzchnia tynku i liczne rysy oraz pęknięcia.

Podzbiór IV - połączona dekoracja sztukatorska na monochromatycznym tle. Silnie refleksyjne powierzchnie skutkowały to wysokim poziomem szumów pomiarowych.

Podzbiór V - płaskie powierzchnie o jasnej palecie barwnej z licznymi przejściami półtonowymi i powtarzającymi się wzorami geometrycznymi. Dodatkowo, tekstura powierzchni różniła się od pozostałych pomieszczeń – szkoda, że Doktorant nie sprecyzował na czym polegały te różnice.

Znając nieco Muzeum w Wilanowie, taki dobór danych wejściowych oceniam jako prawidłowy. Pomijając mobilia, dobrze charakteryzuje on typowe sytuacje z którymi można się zetknąć w czasie skanowania tych wnętrz.

2.4. Rozdział czwarty

Czwarty rozdział opisuje koncepcję zaproponowanej metody bazującej na wcześniejszych próbach z wykorzystaniem algorytmu Iterative Closest Point (ICP) i manualnego, wstępnego dopasowania chmur wobec częstych braków poprawnej i wystarczająco precyzyjnej orientacji wyjściowej.

W rozprawie zaproponowano nowy, autorski proces orientacji par chmur punktów o nazwie FAMFR (Fast Adaptive Multimodal Feature Registration) który ma wyeliminować żmudny

proces manualnego, wstępnego dopasowania chmur. Proces bazuje na dwóch cechach wyznaczonych dla każdego z punktów w dopasowywanych chmurach – geometrii i gradientach intensywności.

Na podstawie analizy histogramów cech (geometrii i gradientu) każdego z punktów i na tej podstawie wybierane są „trójki” par najlepiej odpowiadających sobie punktów. Po odrzuceniu trójek o błędnej zgodności przestrzennej, przeprowadzana jest analiza błędu dopasowania i wybierane są te które dają najlepsze wyniki. Finalne dopasowanie oparte jest o klasyczny algorytm ICP uwzględniający średnie odległości pomiędzy punktami przetwarzanych chmur. Schemat zaproponowanej koncepcji został czytelnie przedstawiony na rysunku 22 (s. 62), a towarzyszący mu zwięzły, 3-stonnicowy opis zredagowano językiem prostym i przystępnym nawet dla osób niebędących specjalistami.

2.5. Rozdział piąty

Na 16 stronach rozdziału piątego przedstawiono implementację proponowanej metody. Do pracy użyto komputer o charakterystyce odpowiadającej wydajnej stacji graficznej, a fazę implementacji i testów prowadzono w środowisku FRAMES (Framework and Robust Algorithms for Models of Extreme Size) opracowanym na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. FRAMES jest narzędziem do przetwarzania i wizualizacji dużych zbiorów danych 3D zdolnym do zarządzania, przetwarzania i wizualizacji dużych zbiorów danych 3D. Obok szeregu wbudowanych algorytmów (m.in. do filtracji szumów, segmentacji, wyznaczenia punktów charakterystycznych oraz ich opisu za pomocą deskryptorów, dopasowywania chmur punktów) posiada także system wtyczek ułatwiający rozwój, testowanie i implementację własnych niestandardowych procedur.

Uwagi

4. Sformułowanie (s. 67) że FRAMES „... doskonale nadaje się do zastosowań związanych z dziedzictwem kulturowym, takich jak łączenie chmur punktów” jest trochę niezręczne. Spłyca zagadnienie użycia skanowania 3D w dokumentacji dziedzictwa kultury i może sugerować, że problem łączenia chmur punktów występuje jedynie w tym obszarze zastosowań. Nie ulega jednak wątpliwości, że wybór FRAMES jako środowiska implementacji był dobrym pomysłem i znacznie ułatwił, o czym pisze zresztą sam Doktorant, prace nad rozwojem proponowanej metody łączenia chmur.

W kolejnych podrozdziałach opisano poszczególne kroki budujące całą metodę:

- przetwarzanie wstępne składające się z kilku etapów: uproszczenie (redukcja liczby punktów w chmurach), wyznaczenie średniej odległości pomiędzy punktami, wyznaczenie wektorów 2 cech (opisu kształtu i gradientu intensywności) dla chmury referencyjnej i dopasowywanej.

- wyznaczanie punktów charakterystycznych na podstawie cech geometrycznych i gradientów intensywności oraz ich filtracja. Uzupełniający część opisową rysunek 30 (s. 71) dobrze ilustruje cały proces.
- wyznaczanie histogramów cech (kształtu i gradientu intensywności) dla każdego z charakterystycznych punktów chmury referencyjnej i chmury dopasowywanej.
- wyznaczanie i wybór najlepszych korespondencji służących do łączenia chmur na podstawie zgodności przestrzennej (podobieństwa trójkątów) potencjalnych trójek punktów o najlepszym dopasowaniu wyznaczonym na podstawie histogramów cech. Według koncepcji Autora (s. 74) , „... jakość dopasowania dwóch chmur punktów jest oparta na dwóch miarach: liczbie poprawnych dopasowań punktów kontrolnych oraz podobieństwie cech w zadanych punktach”. W ten sposób eliminowane są rozwiązania które wprawdzie posiadają duże podobieństwo cech, ale bardzo mało korespondujących punktów na wspólnej części obu chmur. W odróżnieniu od poprzednich podrozdziałów, ta część opisu zredagowana jest mniej przejrzysto i śledzenie toku rozumowania Autora nastrocza pewne trudności.

Ostatnim etapem jest obliczenie finalnej transformacji 3D opartej o korespondencje wytypowane w poprzednich krokach. W tym przypadku wykorzystano klasyczny algorytm ICP (Iterative Closest Point).

W końcowym podrozdziale omówiono parametry sterujące poszczególnymi etapami przetwarzania. Tych osiem parametrów zestawiono w tabeli 7 (s. 75) i na kolejnych 6 stronach wystarczająco szczegółowo omówiono ich wpływ na uzyskiwane wyniki. Dodatkowo, w tabeli 8 (s. 80) podano wartości parametrów zastosowane w tej pracy doktorskiej.

Uwagi

5. Nie jest dla recenzenta jasne jaką metodę przyjęto dla redukcji liczby punktów w chmurach (uproszczenie). Doktorant pisze (s. 68), że wartość parametru uproszczenia (N_{sim}) „... została dobrana w taki sposób, aby nie wyływała negatywnie na precyzję wymaganą przy łączeniu dwóch chmur punktów”. Jednocześnie w tabeli 8 (s. 80) podano wartość tego parametru wyrażającego stosunek liczby punktów wejściowej chmury do liczby punktów po uproszczeniu jako „25”. Oznacza to, że z chmury wejściowej pozostało jedynie 4% punktów. Recenzent prosi o przybliżenie zasady według której dokonano uproszczenia, gdyż wydaje się to mieć krytyczny wpływ na wszystkie następne etapy bazujące właśnie na tak uproszczonych chmurach.

6. Proszę o doprecyzowanie czy w cytowanym powyżej zdaniu (podkreślenie) chodzi faktycznie o precyzję, czy o dokładność. Termin „precyzja” pojawia się w doktoracie kilkakrotnie w kontekstach które uzasadniałyby raczej użycie terminu dokładność. Recenzent posługuje się tu poniższymi definicjami:

Precyzja - zbieżność zachodząca pomiędzy wartościami otrzymanymi przy powtarzaniu pomiarów.

Dokładność - zbieżność zachodząca pomiędzy zmierzoną wartością, a wartością prawdziwą.

7. Recenzent zauważa, że opisy na rysunkach towarzyszących podrozdziałowi 5.6 (Rys. 34÷37) podane są w wersji angielskojęzycznej. W wielu miejscach tekstu zastosowano także angielską notację np. $T_h = 0.2$, zamiast polskiej, $T_h = 0,2$.

8. Wykres przedstawiony na Rys. 34(s. 77) wydaje się nie być zgodny z opisem tekstowym. Doktorant pisze (s. 76-77,) że „... znalezienie wstępnych dopasowa(ć)ń zajmuje około 266 sekund dla wartości $K_d = 2$, ... a ilość poprawnych korespondencji ... wynosi nawet 455”. Recenzent ma trudności z odnalezieniem tych zależności na wykresie (rys. 34) gdyż oś pozioma wyskalowana jest w $K_d \cdot D_{avg}$, a nie K_d . Opisana w tekście relacja zachodzi dla $K_d \cdot D_{avg} \approx 1,3$ [mm], co odpowiada $K_d = 2$ i $D_{avg} \approx 0,65$ mm.

Natomiast opisy na rysunku 35 ($K_d = 20$; 10 i 5) ze strony 78 oraz odpowiadające im czasy i liczba korespondencji będą się zgodne z wykresem na Rys. 34 pod warunkiem, że tym razem skalowanie osi poziomej należy przyjąć jako K_d , a nie $K_d \cdot D_{avg}$ (jak na wykresie).

2.6. Rozdział szósty

Na 7 stronach rozdziału szóstego przedstawiono kryteria i proces oceny skuteczności zaproponowanej metody FAMFR wraz z opisem eksperymentu oraz wynikami walidującymi metodę.

W podrozdziale omawiającym kryteria walidacji wyniku połączenia chmur punktów, Doktorant słusznie zwraca uwagę na występujące szczególnie w przypadkach powierzchni płaskich, niebezpieczeństwa związane z oceną jedynie na podstawie dystansu Chamfera. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że w skrajnie „złośliwych” sytuacjach takie błędy mogą się także pojawić przy składaniu chmur punktów 3D reprezentujących także przestrzenne, niepłaskie obiekty (Ryc. 1)



Ryc. 1.

Przykład błędnego dopasowania tekstury (zaznaczone czerwonym kolorem) na przestrzennym obiekcie pomimo „poprawnego” pod względem dystansu Chamfera złożenia chmur punktów (źródło: materiały własne recenzenta)

Postulowane przez Doktoranta wprowadzenie dodatkowych kryteriów w postaci współczynnika wyrażającego procent poprawnych korespondencji znalezionych pomiędzy

punktami kontrolnymi z pary chmur punktów ($Recall_c$), oraz współczynników określających podobieństwa gradientów intensywności (S_{Vg}) i kształtu (S_{Vs}) jest więc jak najbardziej uzasadnione.

Opisywany w kolejnym podrozdziale eksperyment miał na celu ocenę skuteczności proponowanej metody FAMFR. Jako dane wejściowe wykorzystano 5 podzbiorów danych zebranych w Muzeum Pałacu Króla Jana III w Wilanowie (opisane w rozdziale 3), po 25 par chmur dla każdego podzbioru. Rozwiązania uzyskane metodą FAMFR porównano z wynikami kilku powszechnie stosowanych algorytmów bazujących na cechach (3 algorytmy) oraz metodami opartymi na głębokim uczeniu (5 metod). Praktycznie, dla wszystkich 5 podzbiorów danych (Tabele 9÷13) proponowana metoda FAMFR wykazała swoją przewagę w każdym z ocenianych kryteriów ($Recall_c$, S_{Vg} , S_{Vs} , RMSD). Wyjątek stanowi tu II. Podzbiór Danych (płaskie powierzchnie o bogatej palecie barwnej, różnorodnym podłożu i różnych technikach malarskich), gdzie najlepszy wynik dla kryterium S_{Vs} uzyskano stosując jedną z metod głębokiego uczenia (Predator). Wynik uzyskany przez proponowaną metodę FAMFR jest jednak zaledwie 1,5% gorszy ($S_{Vs} = 0,727$ w porównaniu z $0,714$ uzyskanym przez metodę Predator). Dodatkowo, w Tabeli 14 przedstawiono uśrednioną skuteczność dla wszystkich testowanych metod i wszystkich podzbiorów chmur punktów wprowadzając dodatkowe kryterium oceny w postaci uśrednionego czasu przetwarzania. I tutaj metoda FAMFR osiągnęła najlepsze wyniki.

Warto w tym miejscu odnotować, że przeprowadzone w ramach tej pracy tak szeroko zakrojone testy porównawcze są rzadko spotykane w literaturze przedmiotu i obok walidacji proponowanej metody dostarczają i innych interesujących obserwacji, co stanowi dodatkowy walor tej pracy. Recenzent chciałby w tym miejscu zwrócić uwagę na wyniki które uzyskały metody bazujące na głębokim uczeniu. Tylko w 2 przypadkach (II. I III. Podzbiór danych testowych) osiągnęły one rezultaty lepsze niż metody klasyczne. Może to stanowić z jednej strony wyzwanie do doskonalenia tych metod, a z drugiej strony powinno być ostrzegawczym sygnałem dla potencjalnych użytkowników którzy mogą być bezkrytycznie zafascynowani tymi nowymi i modnymi ostatnio narzędziami.

2.7. Rozdział siódmy

W rozdziale siódmym przeprowadzono dyskusję dotyczącą analizy wyników oraz wyzwań i ograniczeń zaproponowanej metody. Rozdział został podzielony na dwie części – pierwszą traktującą o wyzwaniach i problemach na jakie napotkano w czasie łączenia chmur punktów metodą FAMFR i drugą porównującą wyniki jej zastosowania do innych metod.

Wśród problemów dotyczących praktycznego zastosowania opracowanej metody FAMFR Doktorant wymienia

- zbyt małe powierzchnie części wspólnej obu chmur,
- bogata tekstura z wieloma szczegółami i częściowo odblaskową powierzchnią,

- powtarzalne wzory tekstury,
- szum pomiarowy generowany przez refleksyjne złączenia.

Uwagi

8. W dyskusji proszę o podanie procentu par chmur których metoda FAMFR nie złożyła poprawnie w „pierwszym podejściu”.

9. W dyskusji proszę o syntetyczne omówienie jak rozwiązywano problemy z dopasowaniem chmur w czterech wyżej wymienionych przypadkach, np. zmiana parametrów metody FAMFR (ew. których), czy też zastosowanie innych metod łączenia chmur (ew. których).

Porównując wyniki uzyskane przez FAMFR z rezultatami innych rozwiązań, Doktorant zauważa że klasyczne metody oparte jedynie na cechach kształtu wykazały bardzo słabe wyniki pomimo zastosowania różnych parametrów konfiguracyjnych. Lepiej, co zrozumiałe, wypadły metody oparte o dwie cechy opisujące chmurę – kształt i kolor. Wyjątek stanowiły tu chmury w których występowały silne rozbłyski i lustrzane odbicia. Konkludując, Doktorant stwierdza, że „... wszystkie metody oparte na cechach mają pewne wady. Są matematycznie skomplikowane, ciężkie obliczeniowo i wrażliwe na dostrajanie parametrów. Często wymogiem jest posiadanie specjalistycznej wiedzy do określenia optymalnych wartości parametrów dla zadanego zestawu danych” (s.92). Opinia ta jest zgodna z praktycznymi doświadczeniami recenzenta, acz nigdy nie przeprowadzał on tak wszechstronnych testów porównawczych.

Wśród metod opartych na głębokim uczeniu, DCP, PointNetLK i DeepGMR osiągnęły bardzo niską skuteczność, choć w przypadku tej ostatniej uzyskano nieco lepsze wyniki. Pomimo problemów z wykorzystania pamięci komputera oraz dużych kosztów obliczeniowych, w testach najlepiej wypadły metody GeoTransformer i Predator. Pierwsza z nich wykazała dużą skuteczność w sytuacjach par chmur o niskim procencie części wspólnej. Natomiast Predator osiągnął najlepsze wyniki w porównaniu do innych metod głębokiego uczenia. Jednocześnie, wszystkie metody głębokiego uczenia charakteryzowały się wyraźnie krótszym uśrednionym czasem przetwarzania (Tabela 14, s.87). Wszystkie te obserwacje są niezwykle cenne zarówno z punktu widzenia praktycznych zastosowań tych metod, jak i dla prac nad ich ewentualnym dalszym rozwojem.

Proponowana metoda FAMFR wykazuje znacząco lepsze wyniki zarówno w porównaniu z testowanymi klasycznymi metodami opartymi na cechach, jak i metodami głębokiego uczenia. Od tych ostatnich odstaje jednak od dwa rzędy wielkości pod względem uśrednionego czasu przetwarzania. Doktorant słusznie jednak zauważa (s. 93), że dla pełnego obrazu należałoby także uwzględnić czas niezbędny na wytrenowanie sieci który w zależności od wielu czynników może się wahać od kilku minut do nawet kilku tygodni. Jest więc to parametr trudno porównywalny, tym bardziej, że w przypadku skanowania obiektów dziedzictwa kulturowego mamy często do czynienia z unikalną charakterystyką chmur punktów „... i wyuczony model może nie działać skutecznie w przypadku innego typu obiektu...”(s.94). W konsekwencji „... te

metody nie zawsze są najlepszym rozwiązaniem problemów związanych z dopasowywaniem chmur punktów...” (s.94). Recenzent w pełni podziela te poglądy Doktoranta.

Uwagi

10. W dyskusji proszę jednak o podanie szacunkowego czasu który w przedmiotowej pracy był potrzebny do wytrenowania sieci w przypadku tych konkretnych zestawów 5 typów danych testowych. Jednocześnie, proszę o oszacowanie czasu poświęconego na eksperymentalny dobór (jak opisano na stronach 75, 77 i 78) właściwych parametrów sterujących metodą FAMFR.

2.8. Rozdział ósmy

Rozdział ósmy podsumowuje całą rozprawę oceniając realizację obu postawionych celów oraz wskazując na potencjalne dodatkowe zastosowania zaproponowanej metody i możliwe kierunki jej dalszego rozwoju.

Stopień realizacji celu naukowego, to jest „... opracowania skutecznej metody łączenia pary chmur punktów bazującej na cechach geometrycznych oraz intensywności wyznaczonej z koloru o parametrach uzależnionych od średniej odległości między punktami D_{avg} ...” (rozdział 1.2, s.16) oceniono porównując uzyskane rezultaty z założeniami. Miernikiem sukcesu były tu cztery kryteria wynikające ze wstępnych założeń:

- kontrolny błąd dopasowania $RMSD < 1,5 \cdot D_{avg} \approx 1 \text{ mm}$,
- różnica wyliczonego dystansu Chamfera pomiędzy wynikiem, a wartością referencyjną $D_{CHd} < 3 \cdot D_{avg} \approx 2,1 \text{ mm}$,
- różnica opisanego wzorem [8] współczynnika podobieństwa S pomiędzy wynikiem, a wartością referencyjną dla cechy kształtu $S_{Sd} < 0,15$,
- różnica opisanego wzorem [8] współczynnika podobieństwa S pomiędzy wynikiem, a wartością referencyjną dla gradientu intensywności $S_{Gd} < 0,1$.

W każdej z 5 grup danych testowych metoda FAMFR uzyskała wyniki lepsze niż zakładane minima (Tabela 15, s.97) – często o rząd wielkości. Stanowi to dobry dowód że założony cel naukowy został osiągnięty.

Cel aplikacyjny pracy polegał na złożeniu chmur punktów reprezentujących Antygabinet Królowej, Gabinet al Fresco, Gabinet Chiński i Garderobę Króla w Muzeum Pałacu Króla Jana III w Wilanowie. Założonym miernikiem osiągnięcia tego celu było, obok zachowania kryteriów założonych dla celu naukowego, skrócenie czasu potrzebnego na stworzenie pełnego modelu o co najmniej 50% i automatyzacja oraz parametryzacja algorytmów dopasowania poprzez uzależnienie ich parametrów sterujących od charakterystyki wejściowych chmur punktów.

W porównaniu z manualną orientacją chmur, metoda FAMFR pozwoliła na skrócenie czasu złożenia o ponad 90%. Niewielka liczba wejściowych parametrów sterujących metody, wraz z zaimplementowaną automatyzacją i parametryzacją spełnia też drugi z warunków nałożonych na cel aplikacyjny.

W kolejnym podrozdziale (8.2) Autor omawia potencjalne, dodatkowe zastosowania opracowanej przez siebie metody. Wśród nich wymienia multimodalny monitorowanie infrastruktury krytycznej – projekt zrealizowany w ramach grantu NCBiR oraz startupu Mnemosis. Obie implementacje zakładały, że chmury punktów 3D pozyskiwane są z materiału fotograficznego, ewentualnie za pomocą skanerów światła strukturalnego.

Uwagi

11. Recenzent prosi Doktoranta o ustosunkowanie się do wykorzystania metody FAMFR dla chmur punktów pozyskanych za pomocą skanowania laserowego na zewnątrz budynków. W szczególności chodzi o trudności w złożeniu chmur punktów na których zarejestrowana jest zieleń (zwłaszcza drzewa) otaczające budynki, a w terenie nie korzystano ze sztucznych punktów kontrolnych. Poruszające się na wietrze liście generują nieprzystające do siebie ani geometrię, ani teksturę chmury punktów. Komercyjne aplikacje (np. Lecia Cyclone zarówno w trybie cloud-to-cloud jak i visual alignment) mają wyraźne trudności z dokładnym dopasowaniem takich chmur punktów.

Ostatni podrozdział rysuje w kilku zdaniach przyszłe zamiary Doktoranta. Dotyczą one zarówno prac nad dalszą optymalizacją kodu, wykorzystaniem procesów wielowątkowych i optymalizacją użycia zasobów pamięci. Osobny cel stanowi implementacja opisów cech zaproponowanych w FAMFR do metod głębokiego uczenia.

3. Konkluzja

Powyższa, szczegółowa analiza recenzowanej pracy doktorskiej zatytułowanej „Metoda automatycznej rekonstrukcji trójwymiarowej geometrii obiektu dziedzictwa kulturowego na podstawie wielu pomiarów kierunkowych” dowodzi że:

- Autor osiągnął zakładane w pracy cele,
- rozprawa doktorska jest oryginalnym rozwiązaniem zarówno problemu naukowego, jak i aplikacyjnego,
- w swojej dyscyplinie Autor prezentuje bardzo dobrą znajomość wiedzy ogólnej,
- swoją rozprawą Doktorant wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Zgłaszane przez recenzenta uwagi mają charakter marginalny i nie wpływają na końcową ocenę pracy.

Przedstawiona rozprawa spełnia więc zadowalająco wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim i może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.

