**politechnika częstochowska**

**WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI I TECHNOLOGII MATeRIAŁÓW**

**INSTYTUT FIZYKI**

**A description...**

Adam Świącik

nr albumu: 118375

PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA

Studia stacjonarne

**Temat:**

**Wykorzystanie fotogrametrii do wyznaczania geometrii obiektów**

Promotor:

**dr inż. Rafał Dobrakowski**

Spis treści

[1. Wstęp 4](#_Toc440553395)

[1.1. Cel i zakres pracy 4](#_Toc440553396)

[1.2. Struktura pracy 5](#_Toc440553397)

[1.3. Fotogrametria 5](#_Toc440553398)

[1.3.1. Techniki fotogrametryczne 5](#_Toc440553399)

[1.3.2. Structure from Motion 5](#_Toc440553400)

[2. Model matematyczny 5](#_Toc440553401)

[3. Proces skanowania 5](#_Toc440553402)

[3.1. Kalibracja kamery 5](#_Toc440553403)

[3.2. Wykonanie serii zdjęć 5](#_Toc440553404)

[3.3. Detekcja punktów charakterystycznych 5](#_Toc440553405)

[3.4. Obliczenie deskryptorów 5](#_Toc440553406)

[3.5. Dopasowanie 5](#_Toc440553407)

[3.6. Wyznaczenie zmiany położenia kamery 5](#_Toc440553408)

[3.7. Triangulacja punktów 5](#_Toc440553409)

[4. Rekonstrukcja obiektu 5](#_Toc440553410)

[4.1. Usunięcie punktów niezwiązanych z modelem 5](#_Toc440553411)

[4.2. Optymalizacja 5](#_Toc440553412)

[4.3. Wygładzenie 5](#_Toc440553413)

[4.4. Wyznaczenie wektorów normalnych 5](#_Toc440553414)

[4.5. Rekonstrukcja powierzchni 5](#_Toc440553415)

[5. Wizualizacja 5](#_Toc440553416)

[6. Realizacja 5](#_Toc440553417)

[6.1. Schemat działania 5](#_Toc440553418)

[6.2. Narzędzia 5](#_Toc440553419)

[6.3. Problemy 5](#_Toc440553420)

[6.4. Wyniki badań 5](#_Toc440553421)

[7. Porównanie ze skanerem laserowym 5](#_Toc440553422)

[8. Podsumowanie 5](#_Toc440553423)

[9. Literatura 5](#_Toc440553424)

[10. Spis rysunków 5](#_Toc440553425)

[Wprowadzenie 6](#_Toc440553426)

[Cel i zakres pracy 6](#_Toc440553427)

[Metody rekonstrukcji 6](#_Toc440553428)

[Czym jest fotogrametria 6](#_Toc440553429)

[Techniki fotogrametryczne 7](#_Toc440553430)

[Structure from Motion 7](#_Toc440553431)

[Punkty charakterystyczne (features) 8](#_Toc440553432)

[Detekcja (ang. feature detection) 9](#_Toc440553433)

[Deskryptory (ang. feature descriptors) 9](#_Toc440553434)

[Dopasowanie (ang. matching) 9](#_Toc440553435)

[Model matematyczny 10](#_Toc440553436)

[Bibliografia 11](#_Toc440553437)

# Wstęp

Wydaje się, że świat rozwija się coraz szybciej i nie zamierza zwalniać. Wiele dokonanych przez nas w ostatnim czasie osiągnięć zawdzięczamy komputerom. Co więcej, w erze komputerów w której obecnie żyjemy, wydaje się, że nasz dalszy postęp jest od nich mocno uzależniony.

Do niedawna komputery służyły inżynierom głównie do projektowania i obliczeń konstrukcyjnych. Trudno wyobrazić sobie dzisiaj skonstruowanie mostu czy samochodu bez pomocy właśnie komputera. W ostatnim czasie jednak ten trend zaczyna się zmieniać i coraz częściej można spotkać się z takimi termiami jak rekonstrukcja czy inżynieria odwrotna. Przykładów zastosowań tych technik jest bardzo wiele. Począwszy od robotyki i automatyki w których rekonstrukcja otoczenia pozwala autonomicznym robotom orientować się przestrzeni. Kończąc na fizyce która chcąc lepiej zrozumieć mechanizmy natury ciągle próbuje symulować i odtwarzać zachodzące wokół nas zjawiska, chociażby moment wielkiego wybuchu.

Niniejsza praca staje przed problemem właśnie rekonstrukcji. Odtworzenia i sporządzenia cyfrowej reprezentacji rejestrowanego obiektu. Jest to problem z którym zmagamy się coraz częściej, a to za sprawą chociażby szybko rozwijających się ostatnio technik druku 3D oraz ich popularnością.

Ilość zastosowań jakie towarzyszą cyfrowej rekonstrukcji obiektów jest ogromna. Należą do nich medycyna, wojsko, kryminalistyka, inżynieria odwrotna, robotyka, architektura.

## Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest stworzenie systemu który pozwoli zrekonstruować geometrię obiektów na podstawie serii zdjęć fotograficznych.

Do głównych założeń nie należą:

* praca w czasie rzeczywistym
* gromadzenie informacji o teksturze
* wysoka dokładność

Wymienione powyżej kryteria stanowią duże ograniczenia i wymuszają dodatkowy nakład pracy dlatego zrezygnowano z nich.

Zakres pracy obejmuje opis kompletnego procesu skanowania, rekonstrukcji powierzchni i wizualizacji.

Dotychczas powstało wiele przyrządów pomiarowych wykorzystujących techniki fotogrametryczne. Najczęściej są to drogie komercyjne urządzenia o dużej dokładności przeznaczone do konkretnych zastosowań lub samodzielne konstrukcje wykorzystywane w robotyce.

Celem niniejszej pracy nie jest konkurencja z w/w urządzeniami a jedynie w prowadzenie do technik fotogrametrycznych i cyfrowej rekonstrukcji.

## Struktura pracy

Praca została podzielona na 7 rozdziałów.

Rozdział 1 opisuje tematykę pracy, przedstawia poruszane zagadnienia oraz zawiera podstawowe informacje na temat technik fotogrametrycznych i metod rekonstrukcji.

Rozdział 2 zawiera model matematyczny użyty w programie.

Rozdział 3 składa się z kilku podrozdziałów które przedstawiają kolejne etapy w procesie skanowania

Rozdział 4 przedstawia przetwarzanie chmury punktów otrzymanej podczas skanowania oraz metodę rekonstrukcji powierzchni.

Rozdział 5 zawiera krótkie omówienie części programu odpowiedzialnej za wizualizację gotowego modelu 3D

Rozdział 6 jest poświęcony realizacji projektu. Zamieszczono w nim informacje o użytych narzędziach programistycznych. Zaprezentowano wyniki badań oraz porównano je z wynikami otrzymanymi ze skanera laserowego.

Rozdział 7 jest podsumowaniem

Rozdział 8 to wykaz literatury

## Czym jest fotogrametria

Nazwa „*fotogrametria”* pochodzi od greckich słów „*photos”* oznaczające światło, „*gramma”* – zapis, oraz *„metreo”* – mierzę.

Fotogrametria jest ona nauką i technologią pozwalającą otrzymać informacje o obserwowanych obiektach i ich otoczeniu, poprzez rejestrację, analizę i interpretację wykonanych zdjęć fotograficznych [2].

Początkowo znalazła ona głównie zastosowanie w geodezji i kartografii, gdzie za jej pomocą sporządzano mapy topograficzne terenu, a było to związane w tamtym czasie z równoległym rozwojem jej i lotnictwa. Obecnie trudno wymienić gałąź nauki i techniki w której fotogrametria nie znajduje zastosowania. Można tu wymienić chociażby architekturę, medycynę, kryminalistykę czy systemy zabezpieczeń. Jako dyscyplina inżynierska odgrywa znaczącą rolę na takich polach jak robotyka czy komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów [3].

Zdolność percepcji głębi jaką posiadamy ma swoje źródło w układzie wzrokowym człowieka. Obserwowany przez nas świat wygląda delikatnie inaczej z perspektywy lewego i prawego oka. Zarejestrowane dwa nieznacznie różniące się obrazy, są analizowane przez mózg, który zamienia dwa dwuwymiarowe zdjęcia w trójwymiarowy model. Mówimy wtedy o stereowidzeniu.

Nawet jeżeli zasłonimy jedno oko nadal jesteśmy w stanie określić odległość między obserwowanymi przedmiotami. W takiej sytuacji mózg analizuje sekwencję zarejestrowanych obrazów, wykonanych z różnej perspektywy dzięki mimowolnym ruchom gałki ocznej czy ruchom głowy.

Fotogrametria jest próbą naśladowania tych mechanizmów.

## Techniki fotogrametryczne

W ciągu kilkudziesięciu lat od początków fotogrametrii, powstało wiele technik fotogrametrycznych. Należą do nich m.in:

* fotogrametria jednoobrazowa – pozwala wyznaczyć położenie punktów na płaszczyźnie, stąd jej stosowanie jest ograniczone. W przypadku wykorzystania jej w tworzeniu map, rejestrowany teren powinien być płaski. W przypadku dokumentacji obiektów zabytkowych, rejestrowanymi przedmiotami mogą być np. malowidła lub płaskie elewacji budynków [4].
* fotogrametria dwuoobrazowa (stereofotogrametria) – przeznaczona do wyznaczania współrzędnych punktów w przestrzeni.
* fotogrametria lotnicza – korzysta się w niej ze zdjęć fotograficznych wykonanych z powietrza. Duży postęp w tej technice dokonał się początkowo w okresie dwóch wojen światowych i był on mocno związany z rozwojem lotnictwa [2].
* fotogrametria naziemna – zdjęcia wykonywane są ze specjalnie przygotowanych stanowisk naziemnych

Jedną z najmłodszych i w ostatnim czasie mocno rozwijaną jest technika *„Structure from Motion”*. SfM polega na wykonaniu serii pojedynczych zdjęć rekonstruowanego obiektu z różnej perspektywy, a następnie otrzymaniu struktury, tj. współrzędnych 3D, dzięki triangulacji.

## Structure from Motion

Zadaniem SfM jest rekonstrukcja sceny/obiektu na podstawie sekwencji zarejestrowanych obrazów. Jest to problem z jednej strony dobrze zrozumiany, powstało wiele algorytmów i technik pozwalających na taką rekonstrukcję. Z drugiej strony jest to zagadnienie trudne do realizacji w praktyce.

SfM zakłada, że zmiana położenia kamery podczas wykonywania zdjęć jest początkowo nie znana i należy ją obliczyć. Kiedy zmiana położenia kamery jest już znana, możliwe jest użycie triangulacji w celu wyznaczenia współrzędnych 3D punktów.

Proces wyznaczenia współrzędnych 3D na podstawie pary zdjęć można podzielić na kilka etapów:

- detekcję punktów charakterystycznych (ang. keypoints) na obu zdjęciach.  
- obliczenie dla każdego znalezionego wcześniej punktu specjalnego deskryptora  
- znalezienie odpowiadających sobie punktów poprzez porównanie obliczonych deskryptorów  
- obliczenie macierzy projekcji dla obu kamer  
- obliczenie współrzędnych 3D na podstawie odpowiadających sobie punktów charakterystycznych i macierzy projekcji.

## Inne metody rekonstrukcji

Istnieje wiele technik pomiarowych pozwalających na sporządzenie cyfrowej reprezentacji obiektów fizycznych. Zasadniczo pomiary bezkontaktowe dzieli się na pasywne i aktywne.

Techniki aktywne w przeciwieństwie do technik pasywnych (w tym fotogrametrii) wykorzystują do pomiaru dodatkowe źródło światła, które jest emitowane w kierunku badanego przedmiotu. Przykładem może być triangulacja laserowa oraz wykorzystanie światła strukturalnego [1].

# Model matematyczny

## Camera Model

## Basic Pinhole Camera

## Digital Cameras

## Camera Position and Orientation

## Epipolar Geometry

# Proces skanowania

## Kalibracja kamery

## Wykonanie serii zdjęć

## Detekcja punktów charakterystycznych

## Obliczenie deskryptorów

## Dopasowanie

## Wyznaczenie zmiany położenia kamery

## Triangulacja punktów

# Rekonstrukcja obiektu

## Usunięcie punktów niezwiązanych z modelem

## Optymalizacja

## Wygładzenie

## Wyznaczenie wektorów normalnych

## Rekonstrukcja powierzchni

# Wizualizacja

# Realizacja

## Schemat działania

## Narzędzia

## Problemy

## Wyniki badań

## Porównanie ze skanerem laserowym

# Podsumowanie

# Literatura

# Spis rysunków

# Wprowadzenie

## Cel i zakres pracy

Niniejsza praca staje przed problemem rekonstrukcji otaczających nas przedmiotów przy pomocy fotogrametrii. Z problemem rekonstrukcji zmagamy się coraz częściej, a to za sprawą, m.in. ciągłej potrzeby gromadzenia coraz większej ilości informacji, rozwojem i popularyzacją druku 3D czy też inżynierii odwrotnej. Próba rekonstrukcji środowiska jest również jednym z głównych problemów przed jakim stoi współczesna robotyka.

Praca zawiera opis implementacji systemu, przygotowanego w celu rekonstrukcji geometrii obiektów fizycznych. Wykorzystano w tym celu techniki fotogrametryczne.

## Metody rekonstrukcji

Istnieje wiele technik pomiarowych pozwalających na sporządzenie cyfrowej reprezentacji obiektów fizycznych. Zasadniczo pomiary bezkontaktowe dzieli się na pasywne i aktywne.

Techniki aktywne w przeciwieństwie do technik pasywnych (w tym fotogrametrii) wykorzystują do pomiaru dodatkowe źródło światła, które jest emitowane w kierunku badanego przedmiotu. Przykładem może być triangulacja laserowa oraz wykorzystanie światła strukturalnego [1].

## Czym jest fotogrametria

Nazwa „*fotogrametria”* pochodzi od greckich słów „*photos”* oznaczające światło, „*gramma”* – zapis, oraz *„metreo”* – mierzę.

Fotogrametria jest ona nauką i technologią pozwalającą otrzymać informacje o obserwowanych obiektach i ich otoczeniu, poprzez rejestrację, analizę i interpretację wykonanych zdjęć fotograficznych [2].

Początkowo znalazła ona głównie zastosowanie w geodezji i kartografii, gdzie za jej pomocą sporządzano mapy topograficzne terenu. Obecnie trudno wymienić gałąź nauki i techniki w której fotogrametria nie znajduje zastosowania. Można tu wymienić choćby architekturę, medycynę, kryminalistykę Jako dyscyplina inżynierska odgrywa znaczącą rolę na takich polach jak robotyka czy komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów [3].

Zdolność percepcji głębi jaką posiadamy ma swoje źródło w układzie wzrokowym człowieka. Obserwowany przez nas świat wygląda delikatnie inaczej z perspektywy lewego i prawego oka. Zarejestrowane dwa nieznacznie różniące się obrazy, są analizowane przez mózg, który odtwarza dwa dwuwymiarowe zdjęcia w trójwymiarowy model. Mówimy wtedy o stereowidzeniu.

Nawet jeżeli zasłonimy jedno oko nadal jesteśmy w stanie określić odległość między obserwowanymi przedmiotami. W takiej sytuacji mózg analizuje sekwencję zarejestrowanych obrazów, wykonanych z różnej perspektywy dzięki mimowolnym ruchom gałki ocznej czy ruchom głowy.

Fotogrametria jest próbą skopiowania tych mechanizmów.

## Techniki fotogrametryczne

W ciągu kilkudziesięciu lat od początków fotogrametrii, powstało wiele technik fotogrametrycznych. Należą do nich m.in:

* fotogrametria jednoobrazowa – pozwala wyznaczyć położenie punktów na płaszczyźnie, stąd jej stosowanie jest ograniczone. W przypadku wykorzystania jej w tworzeniu map, rejestrowany teren powinien być płaski. W przypadku dokumentacji obiektów zabytkowych, rejestrowanymi przedmiotami mogą być np. malowidła lub płaskie elewacji budynków [4].
* fotogrametria dwuoobrazowa (stereofotogrametria) – przeznaczona do wyznaczania współrzędnych punktów w przestrzeni.
* fotogrametria lotnicza – korzysta ze zdjęć fotograficznych wykonanych z powietrza. Duży postęp w tej technice dokonał się początkowo w okresie dwóch wojen światowych i był on mocno związany z rozwojem lotnictwa [2].
* fotogrametria naziemna – zdjęcia wykonywane są ze specjalnie przygotowanych stanowisk naziemnych

Jedną z najmłodszych i w ostatnim czasie mocno rozwijaną jest technika *„Structure from Motion”*. SfM polega na wykonaniu serii pojedynczych zdjęć rekonstruowanego obiektu z różnej perspektywy, a następnie otrzymaniu struktury, tj. współrzędnych 3D, na podstawie przesunięcia kamery pomiędzy poprzednim i następnym zdjęciem. Cały proces składa się z kilku etapów które zostaną omówione w kolejnych częściach pracy.

# Structure from Motion

Zadaniem SfM jest rekonstrukcja sceny/obiektu na podstawie sekwencji zarejestrowanych obrazów. Jest to problem z jednej strony dobrze zrozumiany, powstało wiele algorytmów i technik pozwalających na taką rekonstrukcję. Z drugiej strony jest to zagadnienie trudne do realizacji w praktyce.

SfM zakłada, że (motion) zmiana perspektywy, tj. położenia kamery podczas wykonywania zdjęć jest początkowo nie znana i należy ją obliczyć. Kiedy zmiana położenia kamery jest już znana, możliwe jest wyznaczenie współrzędnych 3D punktów przy pomocy triangulacji.

Proces wyznaczenia współrzędnych 3D na podstawie pary zdjęć można podzielić na kilka etapów:

- znalezienie punktów charakterystycznych (ang. keypoints) na obu zdjęciach.  
- obliczenie dla każdego znalezionego wcześniej punktu specjalnego deskryptora  
- znalezienie odpowiadających sobie punktów poprzez porównanie obliczony deskryptorów  
- obliczenie macierzy projekcji dla obu kamer  
- obliczenie współrzędnych 3D na podstawie odpowiadających sobie punktów charakterystycznych i macierzy projekcji.

## Punkty charakterystyczne (features)

Termin (ang. features) jest często zamiennie używany z takimi terminami jak:

* cechy, cechy lokalne/punktowe
* punkty kluczowe/charakterystyczne,
* ang. interest point,
* ang. keypoints fetures,
* ang. local features,
* ang. keypoints.

Może to powodować wieloznaczności i nie porozumienia dlatego w pracy staram się używać jedynie określenia punkty charakterystyczne.

Idealny punkt charakterystyczny powinien być punktem o dokładnym położeniu. W rzeczywistości często analizuje się często również jego otoczenie/sąsiedztwo, w celu znalezienia dużego gradientu jasności lub innych cech (np. koloru, tekstury) które sprawiają, że łatwo zlokalizować taki punkt. W praktyce więc często punktami charakterystycznymi są również krawędzie czy narożniki.

W celu lepszego zrozumienia czym są punkty charakterystyczne warto przyjrzeć się poniższemu przykładowi. Zawiera on zdjęcie budynku oraz sześć jego fragmentów.

Rysunek 1 Przykłady punktów charakterystycznych

Na fragmencie *A* nie występuje lokalnie duża różnica jasności, przez co trudno znaleźć jego dokładne położenie na zdjęciu. Fragment B który przedstawia fragment elewacji również jest trudny do dokładnego zlokalizowania ponieważ duża część zdjęcia zawiera identyczny regularny wzorzec.

Fragmenty C i D wydają się lepszymi kandydatami do wyznaczenia punktów charakterystycznych niż poprzednie A i B, jednak i w tym przypadku znajdujące się na nich krawędzie są trudne do dokładnego zlokalizowania.

Ostatnie dwa E oraz F które prezentują narożniki są najlepszymi z przedstawionego tutaj zestawu.

## Detekcja (ang. feature detection)

Detekcja punktów charakterystycznych jest jednym z elementarnych zadań podczas analizy i przetwarzania obrazu. Narzędzia które służą do ich wyselekcjonowania z obrazu nazywa się detektorami. Obecnie istnieje bardzo wiele rozwiązań i algorytmów przeznaczonych do detekcji punktów charakterystycznych. Każdy z nich ma swoje zalety oraz wady i jest stosowany w zależności od postawionych wymagań.

Znalezione punkty powinny być powtarzalne, tzn. na dwóch zdjęciach przedstawiających ten sam obiekt ale z różnej perspektywy znalezione punkty na pierwszym zdjęciu powinny zostać znalezione również na drugim. Ponadto ich ilość powinna być odpowiednio duża, posiadając jednocześnie jak najwięcej indywidualnych cech które pozwolą na prawidłowe znalezienie punktów im odpowiadających na kolejnym zdjęciu. Duży nacisk kładzie się również na dokładność w wyznaczeniu ich położenia i czas potrzebny na proces ich wyselekcjonowania który w przypadku aplikacji działających w czasie rzeczywistym ma ogromne znaczenie [5].

Do najpopularniejszych należą, detektory:

* Harrisa
* SIFT (ang. Scale Invariant Feature Transform)
* SURF (ang. Speed-Up Robust Features)

## Deskryptory (ang. feature descriptors)

Deskryptor jest wektorem liczb który zawiera zakodowane informacje o konkretnym punkcie charakterystycznym.

Kolejnym krokiem, po wyselekcjonowaniu punktów charakterystycznych jest obliczenie dla nich deskryptorów. Podczas detekcji wyznaczana jest jedynie pozycja punktu. Nie jest to wystarczająca ilość informacji do porównania go z innymi punktami.

## Dopasowanie (ang. matching)

Jeżeli dla obu zdjęć zostały znalezione punkty charakterystyczne oraz zostały dla nich obliczone deskryptory, ostatnim krokiem jest ich porównanie i znalezienie odpowiadających sobie par. Jest to kluczowy etap ponieważ każda para źle dopasowanych punktów ma ogromny wpływ na dalsze obliczenia. Przykładem może być SfM gdzie sparowane punkty służą do wyznaczenia przesunięcia kamery.

## Model matematyczny

# Bibliografia

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | R. S. Eryk Bunsch, „Kryteria doboru techniki 3D do dokumentacji obiektów dziedzictwa kulturowego,” Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów, Warszawa, 2014. |
| [2] | Z. Sitek, Fotogrametria inżynierska, Kraków, 1979. |
| [3] | T. Schenk, "Introduction to Photogrammetry," 2005. |
| [4] | A. R. A. W. Adam Boroń, „Metody fotogrametrii cyfrowej i skanowania laserowego w inwentaryzacji zabytków,” Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej, 2007. |
| [5] | Z. B. M. D. Piotr Pawlik, „Śledzenie obszarów zainteresowania w sekwencjach obrazów brunchoskopowych za pomocą metody SIFT,” 2009. |
| [6] | S. M. Piotr Pawlik, „Porównanie dokładności wybranych metod dopasowania obrazów zdjęć lotniczych,” Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 2007. |
| [7] | J. J. Jolanta Pacan, „Ocena powtarzalności punktów kluczowych obrazów twarzy z zakresu światła widzialnego i podczerwieni,” 2014. |

W celu lepszego rozumienia świata i zachodzącym w nim zjawisk, gromadzimy i analizujemy coraz większą ilość rożnego typu informacji.

Coraz częściej są to informacje o otaczającym nas środowisku.

W erze komputerów w jakiej żyjemy, można zaryzykować stwierdzenie, że nasze dalszy postęp jest uzależniony właśnie od nich i ich mocy obliczeniowej. Symulujemy różne zjawiska fizyczne, rekonstruujemy Gromadzimy i analizujemy coraz większą ilość różnego typu informacji. Symulujemy różne

Mimo to nadal w porównaniu z naturą nasze wynalazki i urządzenia wydają się delikatnie mówiąc, prymitywne. Nadal to natura jest źródłem inspiracji dla naukowców i konstruktorów. Bez wątpienia olbrzymi wkład w nasz dzisiejszy rozwój wnoszą komputery. Można zaryzykować stwierdzenie, że to właśnie ich moc obliczeniowa ogranicza nas