**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 3](#_Toc440819929)

[1.1 Cel i zakres pracy 3](#_Toc440819930)

[1.2 Struktura pracy 4](#_Toc440819931)

[1.3 Czym jest fotogrametria 4](#_Toc440819932)

[1.3.1 Techniki fotogrametryczne 5](#_Toc440819933)

[1.3.2 Structure from Motion 5](#_Toc440819934)

[2 Model matematyczny 6](#_Toc440819935)

[2.1 Model kamery otworkowej 6](#_Toc440819936)

[2.1.1 Model aparatu cyfrowego 6](#_Toc440819937)

[2.1.2 Pozycja i orientacja kamery 6](#_Toc440819938)

[2.2 Geometria epipolarna 6](#_Toc440819939)

[3 Skanowanie 6](#_Toc440819940)

[3.1 Kalibracja kamery 6](#_Toc440819941)

[3.2 Akwizycja obrazu 6](#_Toc440819942)

[3.3 Detekcja punktów charakterystycznych 6](#_Toc440819943)

[3.4 Obliczenie deskryptorów 6](#_Toc440819944)

[3.5 Dopasowanie 6](#_Toc440819945)

[3.6 Wyznaczenie macierzy projekcji 6](#_Toc440819946)

[3.7 Triangulacja 6](#_Toc440819947)

[4 Rekonstrukcja powierzchni 6](#_Toc440819948)

[4.1 Usunięcie punktów nie związanych z modelem 6](#_Toc440819949)

[4.2 Uproszczenie 6](#_Toc440819950)

[4.3 Wygładzanie 6](#_Toc440819951)

[4.4 Wyznaczenie wektorów normalnych 6](#_Toc440819952)

[4.5 Rekonstrukcja powierzchni 6](#_Toc440819953)

[5 Wizualizacja 6](#_Toc440819954)

[6 Realizacja projektu 6](#_Toc440819955)

[6.1 Schamat działania 6](#_Toc440819956)

[6.2 Narzędzia 6](#_Toc440819957)

[6.3 Problemy 6](#_Toc440819958)

[6.4 Wyniki badań 6](#_Toc440819959)

[6.5 Porównanie ze skanerem laserowym 6](#_Toc440819960)

[7 Podsumowanie 6](#_Toc440819961)

[8 Bibliografia 7](#_Toc440819962)

# Wstęp

Wydaje się, że świat rozwija się coraz szybciej i nie zamierza zwalniać. Wiele dokonanych przez nas w ostatnim czasie odkryć i 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 rozumieć mechanizmy natury ciągle próbuje symulować i odtwarzać zachodzące wokół nas zjawiska.

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. Z jej możliwości korzysta dzisiaj m.in.: medycyna, wojsko, kryminalistyka, robotyka, architektura.

## Cel i zakres pracy

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

Jest to zrealizowane poprzez stworzenie systemu składającego się z komputera połączonego bezprzewodowo z urządzeniem wyposażonym w aparat i system operacyjny android, takim urządzeniem może być telefon lub tablet. Każde z urządzeń jest wyposażone w dedykowane dla niego oprogramowanie które również stworzono na potrzeby tej pracy.

Do głównych założeń nie należą:

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

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. W obu przypadkach często towarzyszą wymienione wyżej założenia. Jednakże w tej pracy nie zostały zakwalifikowane jako priorytetowe, dlatego zrezygnowano z nich.

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

Celem niniejszej pracy nie jest konkurencja z w/w urządzeniami, a jedynie wprowadzenie do technik fotogrametrycznych i cyfrowej rekonstrukcji, stworzenie systemu stanowiącego bazę do rozwoju i dalszych badań w tym zakresie.

## Struktura pracy

Praca została podzielona na 8 rozdziałów.

**Rozdział 1** opisuje tematykę pracy, przedstawia poruszane zagadnienia. Zawiera także podstawowe informacje na temat technik fotogrametrycznych.

**Rozdział 2** zawiera użyty w obliczeniach model matematyczny.

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

**Rozdział 4** przedstawia przetwarzanie chmury punktów otrzymanej podczas skanowania.

**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 wyników pracy

**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 [1].

Początkowo znalazła głównie zastosowanie w geodezji i kartografii, gdzie za jej pomocą sporządzano mapy topograficzne terenu, a było to związane w tamtym okresie czasu 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 [2].

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 te dwuwymiarowe zdjęcia w trójwymiarowy model. Nazywa się stereowidzeniem.

Nawet jeżeli zasłonimy jedno oko nadal jesteśmy w stanie określić odległość między obserwowanymi przedmiotami. W takiej sytuacji mózg analizuje sekwencję zarejestrowanych obrazów z jednego oka, 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 [3].
* 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 [1].
* 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 i zbadany, na przestrzeni czasu powstało wiele algorytmów i metod pozwalających na taką rekonstrukcję. Z drugiej strony jest to zadanie złożone i trudne do realizacji w praktyce.

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

Cały ten proces można podzielić na kilka etapów:

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

# Model matematyczny

Aby w matematyczny sposób przedstawić sposób działania kamery geometrycznych zależności jakie zachodzą podczas rzutowania trójwymiarowego obiektu na płaszczyźnie obrazu często wprowadza się na początku jeden z najprostszych modeli kamery jakim jest model kamery otworkowej (ang. pinhole camera model).

## Model kamery otworkowej

Rysunek 2.1.1Model kamery otworkowej. Punkt przecięcia płaszczyzny obrazu z osią optyczną/główną nazywany jest punktem głównym. Płaszczyzna obrazu jest ustawiona prostopadle do osi głównej w odległości f będącej ogniskową układu.

Oś optyczna

Płaszczyzna obrazu

Zasłona z małym otworem



Źródło: [4]. Umieszczono własne oznaczenia oraz przetłumaczono istniejące

Model ten zakłada, że jedynie te promienie które przechodzą przez aperturę tworzą obraz, a powstaje on na przeciwległej do zasłony ścianie. W celu uproszczenia obliczeń powyższy schemat można delikatnie zmodyfikować. W taki sposób aby tworzony obraz nie był odwrócony.

Rysunek 2.1.2 Obraz rzutu q(x,y) powstaje w miejscu przcięcia prostej łączącej punkt Q(x,y,z) i środek projekcji (nazywany także środkiem kamery)

Środek projekcji

Oś optyczna

Płaszczyzna obrazu



Źródło: [4] str. 372. Przetłumaczono angielskie oznaczenia

Korzystając z podobieństwa trójkątów można zauważyć, że mapowanie punktu przestrzennego *Q* na płaszczyznę obrazu przebiega w sposób

(2.1.1)

Korzystając następnie ze współrzędnych jednorodnych powyższe wyrażenie można zapisać jako

(2.1.2)

Na podstawie powyższego równania, związek pomiędzy punktem *q* będący punktem na obrazie a punktem w przestrzeni *Q* można przedstawić jako

(2.1.3)

gdzie *P* jest macierzą projekcji.

### Model aparatu cyfrowego

Przedstawiony w poprzedniej części model nie uwzględnia wielu czynników które odgrywają znaczącą rolę podczas projekcji. Poprzednio zakładano np. że punkt główny znajduje się dokładnie w środku płaszczyzny obrazu. W rzeczywistości, w aparatach płaszczyznę obrazu tworzy najczęściej matryca CCD lub CMOS, składająca się z wielu elementów światłoczułych tworzących macierz. Matryca ta jest umieszczana w aparacie jedynie z pewną dokładnością i najczęściej jej środek nie pokrywa się z osią optyczną. Co więcej często nie są one ustawione prostopadle do osi optycznej co objawia się pojawieniem dystorsji tangencjalnej i innych zniekształceń na obrazie. Dalsze rozważania na ten temat zostały przeniesione do części poświęconej skanowaniu i kalibracji kamery.

Poprawione równanie (2.1.1) powinno zatem wyglądać następująco

(2.1.1.1)

gdzie i stanowią przesunięcie punktu głównego na rzutni wyrażone w pixelach.

Po przejściu do układu współrzędnych homogenicznych (2.1.1.1) przyjmie postać

(2.1.1.2)

,a po wprowadzeniu *K* jako macierzy kalibracji

(2.1.1.3)

(2.1.1.2) można zapisać jako

(2.1.1.4)

gdzie *I* jest macierzą jednostkową o wymiarach 3x3, a *0* jest zerowym wektorem kolumnowym.

Na koniec tej części należy wprowadzić jeszcze jedną poprawkę. Otóż zapisana w (2.1.1.3) macierz kalibracji zawiera w sobie odległość ogniskową, (odległość od środka projekcji do rzutni rolę której spełnia matryca CCD lub CMOS) wyrażoną w jednostkach długości oraz współczynniki i wyrażone w pixelach. W celu unifikacji jednostek można wprowadzić dodatkowe współczynniki i wyrażające ilość pixeli w jednostce długości w kierunku x i y. Uwzględnia to sytuację w której elementy światłoczułe matrycy nie są kwadratowe. Tak więc

(2.1.1.5)

gdzie , , .

### Pozycja i orientacja kamery

Związek pomiędzy układem współrzędnych obserwowanego obiektu a układem współrzędnych kamery można wyrazić za pomocą rotacji i translacji w następujący sposób.

(2.1.2.1)

gdzie *R* jest macierzą kwadratową o wymiarach 3x3 opisującą orientację układu współrzędnych związanego z obiektem w stosunku do układu współrzędnych kamery, natomiast *t* jest trójwymiarowym wektorem opisującym położenie obiektu w układzie kamery.

Łącząc równania (2.3.1) oraz (2.2.5) można zapisać ostatecznie równanie opisujące odwzorowanie punktów przestrzennych na powierzchni obrazu

(2.1.2.2)

Z powyższego równania widać jednocześnie, że macierz projekcji przedstawia się teraz jako

(2.1.2.3)

## Geometria epipolarna

Często przy omawianiu geometrii epipolarnej korzysta z przykładu pokazanego na Rys. 2.2.1. Warto wypunktować widoczne zależności.

* Obserwowany punkt *Q* jest widoczny przez obie kamery.
* Środek pierwszej z nich oznaczony jest jako *C*, natomiast środek drugiej jako *C’*
* Obraz punktu *Q* powstały na płaszczyznach każdej z nich znajduje się kolejno w punkcie *q* i *q’*
* Linia łącząca środki obu kamer nazywa się linią bazową (ang. baseline)
* Punkty *Q*, *C* i *C’* leżą na jednej płaszczyźnie, płaszczyźnie epipolarnej
* Punkt przecięcia linii bazowej z płaszczyzną obrazu kamery jest punktem epipolarnym kolejno *e* i *e’*
* Linia stworzona przez przecięcie płaszczyzny epipolarnej z płaszczyzną obrazu nazywa się linią epipolarną odpowiednio *l* i *l’*

Wszystkie wymienione wyżej zależności pozwalają stwierdzić, że punkt *q* leżący na linii *l*, a będący obrazem punktu *Q* na płaszczyźnie obrazowej pierwszej kamery ma swój odpowiednik *q’* który musi znajdować się na linii epipolarnej *l’*.

Rysunek 2.2.1 Geometria epipolarna

l’

l

e

e’

C

C’

Q(x,y,z)

q(x,y)

q’(x’,y’)

Linia bazowa

Płaszczyzna epipolarna

Źródło: [5]. Str. 240. Zmodyfikowano oryginalne oznaczenia

Każdy punkt q ma odpowiadającą mu linię epipolarną *l’* tworzoną na drugim zdjęciu. Algebraiczną reprezentacją tej zależności jest

(2.1.2.4)

gdzie *F* to macierz fundamentalna o wymiarach 3x3 zawierająca informacje o orientacji i przesunięciu jednej kamery względem drugiej oraz informacje o wewnętrznych parametrach obu kamer. Tym samym zawiera zależności między kamerami wyrażone w pixelach.

Relacja pomiędzy punktem *q* oraz *q’* można wyrazić przy pomocy macierzy fundamentalnej jako

(2.1.2.5)



Rysunek . Białe linie oznaczają linie epipolarne

Źródło: [5]

# Skanowanie

Proces skanowania składa się z kilku etapów podczas których informacje o geometrii obiektu uzyskiwane są dzięki technice SfM. Całość rozpoczyna proces kalibracji kamery a kończy triangulacja i wyznaczenie chmury punktów.

## Kalibracja kamery

Kalibracja kamery służy wyznaczeniu jej wewnętrznych i zewnętrznych parametrów. Mają one wpływ na proces tworzenia obrazu. Pozwalają także znaleźć zależność pomiędzy układem współrzędnych kamery, a układem związanym ze skanowanym obiektem.

Do paramatrów wewnętrzenych kamery zalicza się:

* Współrzędne punktu głównego, który przeważnie nie znajduje się w połowie wysokości i szerokości rzutni.
* Odległość ogniskową *f* która jest odległością od środka soczewki do punktu głównego
* Współczynnik *r* informujący o stosunku szerokości do wysokości matrycy aparatu
* Współczynnik *k*, który zależy od kąta pomiędzy osią x i y
* Współczynniki dystorsji. Najczęściej wyznacza się 5-wymiarowy wektor, który pozwala przeprowadzić operację niwelacji wprowadzanej przez układ dystorsji.

Z kolei na parametry zewnętrzne składają się

* macierz rotacji **R** o wymiarach 3x3
* wektor translacji **t**.

Wiążą one układ współrzędnych kamery z lokalnym układem obiektu.



Każdy układ optyczny aparatu wprowadza pewne zniekształcenia obrazu. W zależności od wykonania zniekształcenia te mogą być zaniedbywalnie małe lub bardzo duże. Proces kalibracji polega na znalezieniu parametrów wewnętrznych układu optycznego w celu późniejszej niwelacji tych zniekształceń. Najczęściej aby tego dokonać należy wykonać 10 – 20 zdjęć wzorca kalibracyjnego   
(np. szachownicy) z różnej perspektywy.

## Akwizycja obrazu

Źródłem informacji o badanych obiektach i ich otoczeniu w technika fotogrametrycznych są właśnie zdjęcia fotograficzne. Stąd też jakość oraz sposób ich wykonania odgrywa znaczącą rolę w procesie całego skanowania.

Wykonane zdjęcia powinny cechować się dużą ostrością i rozdzielczością. Zwiększa to w sposób znaczący ilość i jakość znalezionych na obrazach punktów charakterystycznych i zwiększa szanse na ich poprawne dopasowanie. Ponadto otrzymane zdjęcia nie powinny posiadać zniekształceń. Dlatego też tak ważny jest etap kalibracji kamery i wyznaczenie parametrów informujących o wprowadzanej dystorsji.

Kolejną ważną kwestią jest zmiana perspektywy pomiędzy zdjęciami. Zbyt mała może skutkować błędnymi wynikami, a w rezultacie sprawić, że otrzymana chmura punktów będzie nie czytelna lub całkowicie nie poprawna. Z drugiej strony zbyt duża zmiana perspektywy może nie pozwolić na znalezienie odpowiadających sobie punktów charakterystycznych.

## Detekcja punktów charakterystycznych

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 [6].

W celu znalezienia punktów charakterystycznych analizuje się zdjęcie w poszukiwaniu miejsc o dużym gradiencie jasności lub innych cech (np. koloru, tekstury) które sprawiają, że łatwo zlokalizować taki punkt. W praktyce więc często punktami charakterystycznymi są krawędzie czy narożniki.

Aby lepiej zrozumieć czym są punkty charakterystyczne warto przyjrzeć się poniższemu przykładowi. Zawiera on zdjęcie budynku oraz sześć jego fragmentów.

Rysunek . 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.

## Obliczenie deskryptorów

Podczas detekcji punktów charakterystycznych wyznaczana jest ich lokalizacja na zdjęciu. Nie jest to wystarczająca ilość informacji aby dokonać ich porównania i znalezienia odpowiadających sobie punktów. Dlatego dla każdego punktu oblicza się specjalny deskryptor który jest wektorem liczb opisującym punkt i jego otoczenie. W zależności od algorytmu z którego korzysta się do obliczenia deskryptora obliczony wektor może mieć różną długość.

## Dopasowanie

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. W przypadku SfM na podstawie korespondujących sobie par punktów wyznacza się macierz fundamentalną a następnie rekonstruuje scenę.

Z szeregu różnych implementacji tego etapu, często wykorzystywanym jest model w którym początkowo dopasowuje się punkty metodą każdy z każdym, a następnie poddaje się znalezione pary testom symetrii i podobieństwa.

Test symetrii polega na znalezieniu dla każdego punktu charakterystycznego na pierwszym zdjęciu jego odpowiednika na drugim, następnie postępując analogicznie, dla każdego punktu na drugim szuka się odpowiednika na pierwszym. Na koniec sprawdza się czy obu przypadkach znalezione dopasowania są te same.

Test podobieństwa polega na odrzuceniu tych par których współczynnik odległości pomiędzy dwoma deskryptorami jest zbyt wysoki. Współczynnik odległości jest miarą podobieństwa dwóch deskryptorów.

## Wyznaczenie macierzy projekcji

Wyznaczenie macierzy projekcji zaczyna się od wyznaczenia macierzy fundamentalnej F. Wykonuje się to w oparciu o zestaw co najmniej 7. Par odpowiadających sobie punktów charakterystycznych.

Kolejnym krokiem jest wyznaczenie tzw. macierzy zasadniczej E korzystając z równości

(3.6.1)

,gdzie K’ to macierz kamery drugiej, a K macierz kamery pierwszej.

Następnie macierz E dekomponuje się otrzymując macierz rotacji R oraz wektor translacji t. To z kolei pozwala otrzymać korzystając z (2.1.2.3) macierz projekcji pierwszej i drugiej kamery.

## Triangulacja

Korzystając z (2.1.2.3) można napisać układ równań

(3.7.1)

W których odpowiednio q i q’ określają położenie punktu charakterystycznego na pierwszym i drugim zdjęciu. P i P’ są macierzami projekcji dla pierwszej i drugiej kamery, natomiast Q jest położeniem punktu przestrzennego.

# Rekonstrukcja powierzchni

Otrzymana w wyniku skanowania chmura punktów może zostać użyta do rekonstrukcji powierzchni a następnie wizualizacji zrekonstruowanego modelu. Aby jednak było to możliwe chmurę należy przedtem poddać analizie i przetworzeniu.

## Usunięcie punktów nie związanych z modelem

W zależności od użytych narzędzi i technik otrzymana podczas skanowania chmura punktów może być bardziej lub mniej spójna. Często zawiera ona punkty nie związane ze skanowanym obiektem które są wynikiem błędnych obliczeń lub skutkiem wpływu czynników zewnętrznych. Należy takie punkty usunąć ponieważ mogą mieć bardzo negatywny wpływ na jakość zrekonstruowanej powierzchni. W tym celu można wykorzystać algorytm który oblicza odległość każdego punktu względem   
k-najbliższych sąsiednich punktów, a następnie usuwa te których wartość odległości jest większa niż zadany próg.

## Uproszczenie

Uproszczenie polega na redukcji ilości punktów składających się na chmurę. Jest to uzyskiwane poprzez równomierne rozmieszczenie punktów i usunięcie tych które nie wnoszą znaczącej informacji o strukturze chmury.

## Wygładzanie

Etap wygładzania polega na redukcji szumu, tj. próbie ułożenia punktów na gładkiej płaszczyźnie parametrycznej wykorzystując położenie k-najbliższych sąsiednich punktów. Zmniejsza to stopień chropowatości i innych lokalnych zniekształceń rekonstruowanej powierzchni

## Wyznaczenie wektorów normalnych

Wyznaczenie wektorów normalnych jest kluczowym momentem ponieważ od wyników tej operacji w dużej mierze zależy postać zrekonstruowanej powierzchni. W szczególności w chwili generowania siatki w miejscach gdzie występują dziury lub ubytki punktów.   
W grafice komputerowej wektory normalne służą głównie do wiernej symulacji interakcji powierzchni ze światłem, tj. w celu obliczenia współczynników odbicia i absorpcji światła.

## Rekonstrukcja powierzchni

Ostatnim etapem jest wyznaczenie na podstawie przetworzonej już chmury punktów, siatki wielokątów, najczęściej trójkątów. Wyznaczoną siatkę można następnie zwizualizować w programie graficznym. Jednym z popularniejszych algorytmów pozwalających na taką rekonstrukcję jest tzw. metoda Poissona.

# Wizualizacja

# Realizacja projektu

## Schamat działania

## Narzędzia

## Problemy

O ile w teorii problem rekonstrukcji obiektów za pomocą techniki SfM jest dobrze zdefiniowany i zrozumiany, o tyle w praktyce otrzymanie zadowalających wyników jest stosunkowo trudne.

Wykonane zdjęcia badanego przedmiotu powinny cechować się dużą ostrością i rozdzielczością. Zwiększa to w sposób znaczący ilość i jakość znalezionych na obrazach punktów charakterystycznych i zwiększa szanse na ich poprawne dopasowanie. Zbyt mała zmiana perspektywy pomiędzy parą zdjęć może skutkować błędnymi wynikami, a w rezultacie sprawić, że otrzymana chmura punktów będzie nie czytelna lub całkowicie nie poprawna. Z drugiej strony zbyt duża zmiana perspektywy może nie pozwolić na znalezienie odpowiadających sobie punktów charakterystycznych.

Problemy dotyczące części rekonstrukcji powierzchni dotyczą przede wszystkim ubogiej i nie kompletnej chmury punktów, tzn. chmury która posiada ubytki. Co prawda możliwe jest wypełnienie tych ubytków korzystając z próbkowania, jednakże często otrzymanie poprawnych wyników wymaga manualnej korekcji parametrów rekonstrukcji lub jest niemożliwe do uzyskania.

## Wyniki badań

## Porównanie ze skanerem laserowym

# Podsumowanie

# Bibliografia

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | Z. Sitek, Fotogrametria inżynierska, Kraków, 1979. |
| [2] | T. Schenk, "Introduction to Photogrammetry," 2005. |
| [3] | A. R. A. W. Adam Boroń, „Metody fotogrametrii cyfrowej i skanowania laserowego w inwentaryzacji zabytków,” Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej, 2007. |
| [4] | A. K. Gary Bradski, Learning OpenCV, O'Reilly Media, 2008. |
| [5] | A. Z. Richard Hartley, Multiple View Geometry in Computer Vision, New York: Cambridge University Press, 2004. |
| [6] | K. M. Tinne Tuytelaars, „Local Invariant Feature Detectors: A Survey,” 2008. |
| [7] | R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications, London: Springer, 2011. |
| [8] | A. K. Gary Bradski, Learning OpenCV, Sebastopol: O'Reailly Media, 2008. |