**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**

# 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.

# Model matematyczny

## Model kamery otworkowej

Najprostszym modelem matematycznym wyjaśniającym działania kamery, jest model kamery otworkowej (ang. pinhole camera model). Opisuje on sposób odwzorowania obiektów trójwymiarowych na płaszczyźnie.

Rysunek .Model 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 na przeciwległej do zasłony ścianie obraz. W celu uproszczenia obliczeń powyższy schemat można delikatnie zmodyfikować. W taki sposób aby tworzony obraz nie był odwrócony.

Rysunek . 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 równanie 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.

### Aparat cyfrowy

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 tak nie jest. W realnych aparatach płaszczyznę obrazu tworzy najczęściej matryce CCD lub CMOS składająca się z wielu elementów światłoczułych tworzących macierz. Są one umieszczane jedynie z pewną dokładnością i najczęściej ich środek nie pokrywa się z osią optyczną. Co więcej często nie są one ustawione prostopadle do osi optycznej co objawia się pojawieniem dystorsji 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 które wyrażone w pixelach. W celu unifikacji jednostek można wprowadzić dodatkowe współczynniki i wyrażające ilość pixeli w jednostce odległości 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. 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 . 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

Parametry kamery generalnie dzieli się na zewnętrzne i wewnętrzne. Ich znajomość jest niezbędna do prowadzenia dalszych obliczeń oraz operacji niwelacji wprowadzonych zniekształceń obrazu.

* Parametry wewnętrzne informują o odległości ogniskowej, przesunięciu środka obrazu względem osi optycznej kamery, oraz o wprowadzanej przez układ optyczny dystorsji.
* Parametry zewnętrzne natomiast określają położenie i orientację kamery w odniesieniu do układu związanego z obserwowanym obiektem. Często tym układem jest pozycja kamery która wykonała pierwsze zdjęcie.

Parametry wewnętrzne można wyznaczyć dzięki kalibracji z wykorzystaniem wzorca kalibracyjnego lub przy pomocy metadanych EXIF które są zapisywane razem z wykonanym zdjęciem. Wzorcem kalibracyjnym jest najczęściej szachownica, a cała procedura polega na wykonaniu serii 10-20 zdjęć tego wzorca z różnej perspektywy. Na ich podstawie wyznaczane są parametry wewnętrzne w tym parametry wprowadzanej dystorsji stycznej i radialnej.

## 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.

## Detekcja punktów charakterystycznych

## Obliczenie deskryptorów

## Dopasowanie

## Wyznaczenie macierzy projekcji

## Triangulacja

# Rekonstrukcja powierzchni

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

Kolejne podrozdziały opisują najważniejsze etapy przetwarzania.

## 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 je 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.

## 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 momencie generowania siatki w miejscach gdzie występują dziury. 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.

# Wizualizacja

Nawet najbardziej złożone modele trojwymiarowe, są najczęściej jedynie siatką gesto połączonych wiewielokątów, a w zasadzie trojkatow. Sama siatka nie posiada informacji o powierzchni. Jej sstruktura jest rozbudowana i różna w zaleznosci od korzystanego formatu jednak zawsze w jej sklad wchodza wierzcholki,renderowania.scciany(ang.faces) i wektory normalne. Wierzcholki sa punktami o przestrzenn6m polozeniu, krawedzie lacza pare wierzolkow natomiast faces sa elementam widocznym podczas renderowania. Jest to powierzchnia obliczana na podstawie polozen trojki jego wierzcholkow.Wektory normalne sluza podczas renderowania do obliczenia wlasnosci wizualnych materialu ktory ma zostac zasymulowany podczas renderowania.

# Realizacja projektu

## Schamat działania

## Narzędzia

## Problemy

## 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. |