POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka

SPECJALNOŚĆ: Systemy Produkcyjne

PRACA DYPLOMOWA

MAGISTERSKA

TEMAT\_PO\_POLSKU

TEMAT\_PO\_ANG

AUTOR:

Kamil Kozdrowiecki

PROMOTOR:

Dr inż. Krzysztof Chrapek

W10/I24

OCENA PRACY:

WROCŁAW 2016

Spis treści

[1. Cel i zakres pracy 4](#_Toc448825332)

[2. Założenia projektowe 4](#_Toc448825333)

[2.1. Środowisko 4](#_Toc448825334)

[2.2. Funkcjonalność 4](#_Toc448825335)

[3. Teoria stereowizji 4](#_Toc448825336)

[4. Dobór osprzętu 4](#_Toc448825337)

[4.1. Jednostka obliczeniowa 4](#_Toc448825338)

[4.2. Kamery 4](#_Toc448825339)

[5. Protokół komunikacyjny 4](#_Toc448825340)

[5.1. Stawiane wymagania 4](#_Toc448825341)

[5.2. TCP 4](#_Toc448825342)

[6. Oprogramowanie jednostki obliczeniowej 4](#_Toc448825343)

[6.1. Struktura 4](#_Toc448825344)

[6.2. Klasa CStereoCalib 4](#_Toc448825345)

[6.3. Klasa CStereoVision 4](#_Toc448825346)

[6.4. Klasa CTCPConnection 4](#_Toc448825347)

[7. Oprogramowanie robota 4](#_Toc448825348)

[7.1. Struktura 4](#_Toc448825349)

[8. Testowanie oprogramowania 4](#_Toc448825350)

[8.1. Kalibracja 4](#_Toc448825351)

[8.2. Filtrowanie 4](#_Toc448825352)

[8.3. Analiza dokładności 4](#_Toc448825353)

[9. Podsumowanie 4](#_Toc448825354)

[10. Bibliografia 4](#_Toc448825355)

[11. Spis ilustracji 4](#_Toc448825356)

[12. Spis tabel 4](#_Toc448825357)

[13. Spis załączników 4](#_Toc448825358)

# Cel i zakres pracy

Coraz większego znaczenia w przemyśle nabierają układy, które w łatwy sposób można zaadaptować do zmian parametrów procesowych wymuszonych przez modyfikacje wytwarzanego przedmiotu, czy też usprawnień w technologii procesu, montażu. Większość takich elastycznych maszyn wymaga od operatora wiedzy i doświadczenia, nabytych przez kosztowne kursy i szkolenia, aby dostosować nastawy lub programy urządzeń nawet do pomniejszych zmian w procesie. Biorąc pod uwagę powyższe tendencje rozwoju technologii, za cel niniejszej pracy magisterskiej postawiono opracowanie intuicyjnego systemu programowania punktów i prostych funkcji dla robotów przemysłowych. Wprowadzenie takiego rozwiązania przyspieszy procedurę przystosowania elastycznego systemu wytwórczego do nowych produktów, szczególnie w przypadku małoseryjnych produkcji.

# Założenia projektowe

Do rozpoznania i analizy położenia zadanego punktu w przestrzeni wykorzystano dwie jednakowe kamery umieszczone na jednej linii. Wykorzystując technikę stereowizji opisaną w pkt. 3 możliwe jest wyznaczenie głębi z dwóch obrazów, a co za tym idzie, określenie przestrzennej pozycji danego piksela. Korzyści wynikające z zastosowania tej metody to m. in.:

* Względnie ekonomiczne rozwiązanie w porównaniu do innych technik, np. skaner laserowy.
* Niewielki rozmiar urządzenia
* Możliwość dostosowania wykrywanych punktów do urządzenia wskazującego przez duży zakres metod filtrowania
* Możliwość wykorzystania pobranych obrazów do innych operacji np. identyfikacja obiektu, wyznaczenie rozmiaru obiektu

Przyjęto, że urządzeniem wskazującym zadane położenia będzie wskaźnik laserowy o czerwonym świetle. Decyzja ta została podjęta na podstawie kilku czynników:

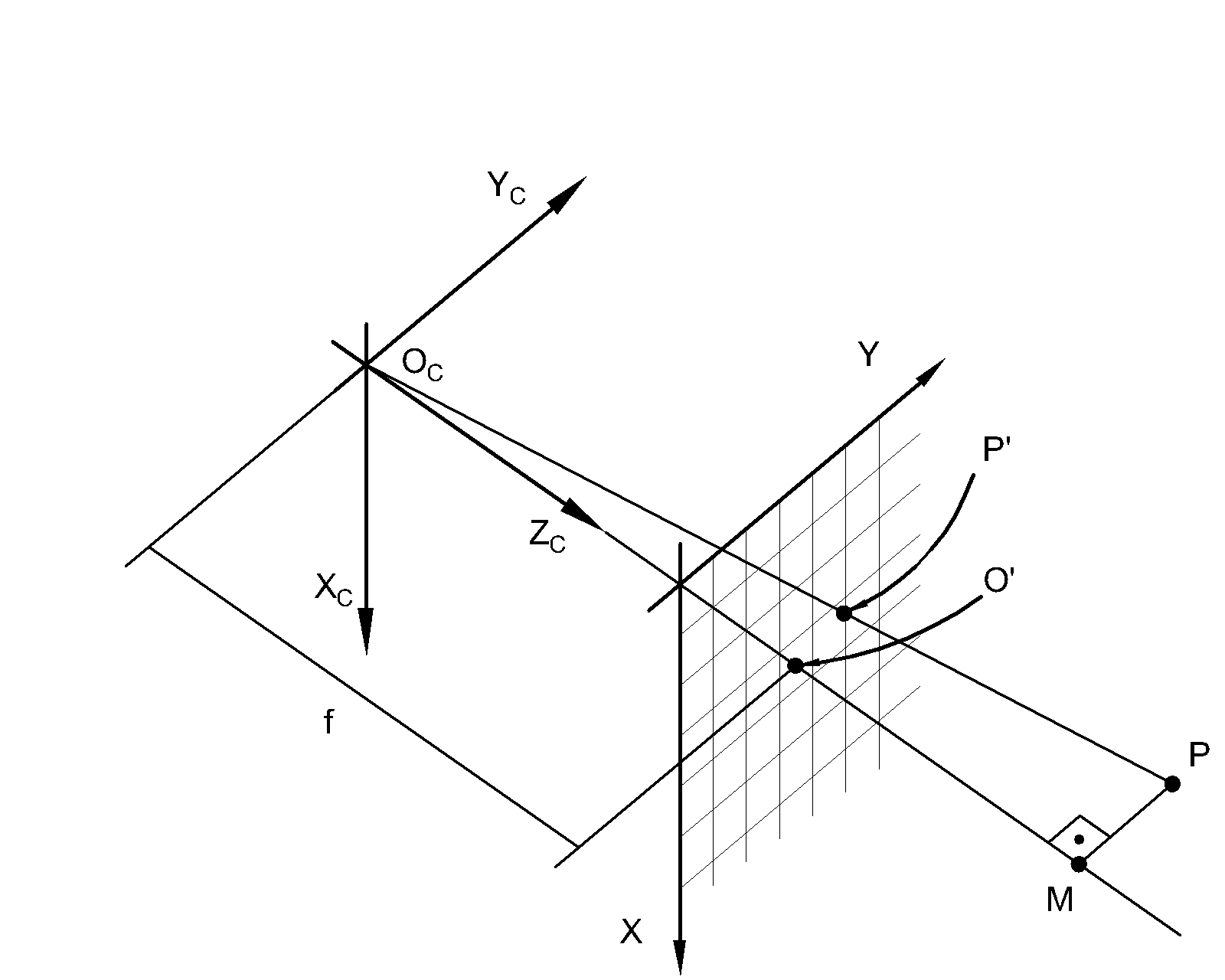
* Ułatwienie procedury filtrowania i wyłuskania odpowiednich pikseli, ze względu na dużą jasność punktu, charakterystyczny względem tła kolor
* Możliwość wskazania punktu z daleka, nie będą bezpośrednio w strefie roboczej robota
* Łatwo dostępne, tanie, kieszonkowe urządzenie wskazujące, nie wymagające dużej mocy zasilania

# Teoria stereowizji

Już jako niemowlę człowiek przyswaja sobie praktyczną umiejętność wykorzystania stereowizji do funkcjonowania w naturalnym środowisku. W biologicznym aspekcie znana jest jako „ widzenie binokularne”. Technika, czerpiąc pomysły garściami z przyrody, wykorzystała również i tę metodę określania głębi obrazu.

## Obrazowanie punktu w przestrzeni trójwymiarowej na matrycy światłoczułej

Układ współrzędnych kamery wyznaczają osie , , oraz punkt centralny . O odległość ogniskową od płaszczyzny przesunięta jest płaszczyzna obrazowa z lokalnym układem współrzędnych i siatką pikselową, której rozmiar elementu podstawowego wynosi . Punkt na płaszczyźnie obrazowej jest rzutem punktu wzdłuż osi . Prosta wyznaczona przez punkt i jest osią optyczną. Zobrazowanie punktu położonego w przestrzeni trójwymiarowej polega na perspektywicznym zrzutowaniu tego punktu wzdłuż prostej przechodzącej przez punkt centralny układu kamery i punkt na płaszczyznę obrazową, wyznaczając w ten sposób punkt . Wykorzystując podobieństwo trójkątów i można utworzyć następujące zależności [1]:



Biorąc pod uwagę fakt, że rzeczywista kamera posiada niedokładności w postaci błędów wykonania elementów oraz ich montażu, do równania NUMER\_RÓWN wprowadza się parametry korekcyjne.

Wartości określają przesunięcie środka płaszczyzny obrazowania względem osi optycznej, wynikające z nieidealnego montażu matrycy światłoczułej. Kształt matrycy wymusza wprowadzenie osobnych ogniskowych dla odpowiednich kierunków. Inną nieprawidłowością powodującą radialne zniekształcenie obrazu nasilające się wraz z odległością od osi optycznej jest dystorsja sferyczna [OBRAZEK?] . Aby zredukować jej wpływ wprowadza się kolejną korektę w postaci [2]:

,gdzie:

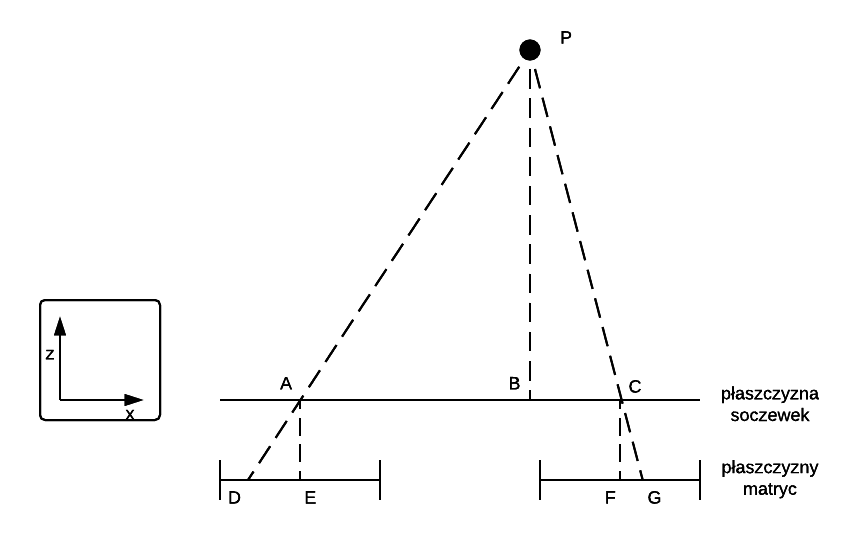
Dystorsja tangencjalna jest kolejnym efektem deformującym obraz, choć w mniejszym stopniu niż dystorsja sferyczna. Wprowadzenie poniższego równania   
minimalizuje skutki zniekształcenia [2]:

## Triangulacja w stereowizji

Analiza głębi w stereowizji opiera się na wyznaczeniu różnicy w horyzontalnym położeniu punktu zainteresowania na obrazach z obu kamer. Wyznaczona głębia danego punktu jest odwrotnie proporcjonalna do uzyskanej różnicy w położeniu horyzontalnym zrzutowanego punktu na obrazach. Zależność ta wynika z następującego rozumowania:

Na rys. 3.1 przedstawiono schematycznie zapis jednowymiarowego położenia piksela na matrycach kamer przy założeniach:

* Płaszczyzny obrazowania kamer są do siebie równoległe
* Osie optyczne kamer są do siebie równoległe
* Odległości ogniskowych kamer są sobie równe



Różnica w położeniu zrzutowanego punktu P na matrycach kamer wynosi [3]:

Odległości |AE| i |CF| są sobie równę, więc:

Ze względu na kątowe cechy podobieństwa pary trójkątów PBA i AED oraz PBC i CFG są podobne, stąd:

– różnica w horyzontalnym położeniu od środka matryc zobrazowanego punktu P

– odległość ogniskowa kamer

– odległość między kamerami

– odległość punktu od płaszczyzny kamer

Ostatecznie otrzymuje się:

# Dobór osprzętu

## Jednostka obliczeniowa

Wstępny projekt uwzględniał wykorzystanie popularnych w ostatnich latach komputerów jednopłytkowych takich jak: Raspberry Pi, Banana Pi, czy BeagleBone. Przegląd podobnych rozwiązań [wskaż które], w których również wykorzystano podobne jednostki wykazał, że cechują się one za niską mocą obliczeniową, co zmniejszyło liczbę przetwarzanych klatek na sekundę. Z tego powodu porzucono te założenia na korzyść komputera PC. Ostatecznie wszystkie testy zostały przeprowadzane na laptopie HP Pavilion dv6, którego główną specyfikacje przedstawiono w tab. 4.1.

|  |  |
| --- | --- |
| System operacyjny | Windows 7 Home x64 |
| Procesor | 8 x Intel Core i7 2.20 GHz |
| Pamięć | 8 GB |
| Karta graficzna | AMD Radeon HD 6700M |

## Kamery

Dobór kamer był kluczowym elementem przy wstępnych założeniach. Głównymi parametrami, które miały wpływ na wybór urządzenia były:

* Ilość pikseli
* Maksymalna rozdzielczość
* Liczba klatek na sekundę
* Możliwość konfiguracji parametrów ( ekspozycja, wzmocnienie)
* Typ przewodu

Rozdzielczość obrazu wpływa na dokładność wyznaczanej głębokości punktu ale jednocześnie zwiększa wymaganą moc obliczeniową do przetworzenia większej ilości danych. Istotną i często pomijaną cechą jest możliwość kontrolowania ustawień kamery. Zazwyczaj producenci kamer internetowych wprowadzają automatyczne dopasowanie wzmocnienia lub ekspozycji, których użytkownik nie może kontrolować i często powoduje to pojawianie się szumów. Możliwość sterowania tymi parametrami daje kolejne stopnie swobody np. przy filtrowaniu obrazu. Liczba klatek na sekundę nie jest już tak istotną cechą, ze względu na długi okres przetwarzania pojedynczej klatki, przez co trudno jest wykorzystać całkowity potencjał szybkości pobierania obrazu przez kamerę.

Podczas projektowania i testowania systemu korzystano z kamery Logitech C905. Charakteryzuje się ona zawyżoną maks. rozdzielczością od zakładanej, jednak pozwoliło to na zbadanie zależności czasu przetwarzania obrazu od jego rozdzielczości. Dodatkowo producent udostępnia oprogramowanie umożliwiające przełączenie doboru nastaw z automatycznego na ręczne.

|  |  |
| --- | --- |
| Ilość pikseli | 2 Mpix |
| Maks. rozdzielczość | 1600 x 1200 |
| Liczba klatek na sekundę | 30 |
| Typ przewodu | USB 2.0 |

# Komunikacja jednostka obliczeniowa - robot

## Stawiane wymagania

Wymogi odnoszące się do komunikacji jednostki obliczeniowej z robotem uwzględniają następujące cechy:

* Dostępność portów, złączy – takie same porty lub złącza w sterowniku robota i jednostce obliczeniowej eliminują potrzebę stosowania konwerterów
* Rodzaje obsługiwanych protokołów – sterownik robota nie jest tak elastyczny jak jednostka obliczeniowa i ogranicza zbiór możliwych protokołów komunikacyjnych
* Funkcje programowe – łatwość i przejrzystość funkcji inicjujących komunikację, odbierania i wysyłania danych
* Obsługa błędów – protokół z zaimplementowaną kontrolą danych i ew. retransmisją pozwala uniknąć dodatkowej obsługi błędów na poziomie aplikacji
* Szybkość transmisji danych – mniej istotna cecha, ze względu na okresową, niewielką ilość przesyłanych informacji

## TCP

Uwzględniając stawiane wymagania co do sposobu komunikacji jednostki obliczeniowej z robotem zdecydowano się na wybór protokołu transportowego TCP.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| bit | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 |
| 0 | Port źródłowy | | | | | | | | | | | | | | | | Port docelowy | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | Numer sekwencyjny | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 64 | Numer potwierdzenia | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 96 | Długość nagłówka TCP | | | |  | | | N S | C W R | E C E | U R G | A C K | P S H | R S T | S Y N | F I N | Rozmiar okna | | | | | | | | | | | | | | | |
| 128 | Suma kontrolna | | | | | | | | | | | | | | | | Wskaźnik pilności | | | | | | | | | | | | | | | |
| 160 | Opcje | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

# Oprogramowanie jednostki obliczeniowej

## Struktura

W jednostce obliczeniowej zaimplementowano dwa programy:

* Kalibrujący - mający na calu wyznaczenie i zapisanie do zewnętrznego pliku współczynników i macierzy niezbędnych do przeprowadzenia poprawnej analizy obrazów.
* Wykonawczy – główny program realizujący sekwencję: nawiązania połączenia, pobrania obrazów, analizy obrazów oraz przesłania informacji do robota

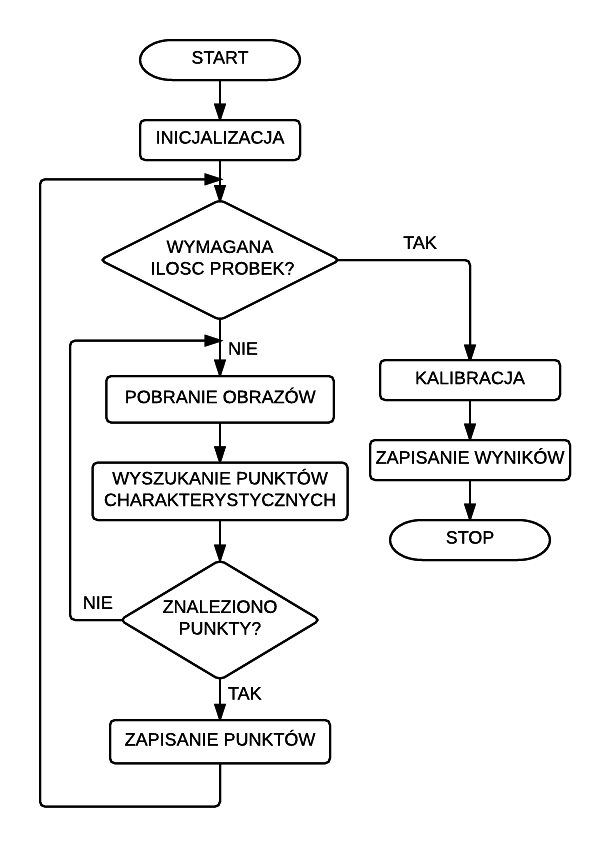
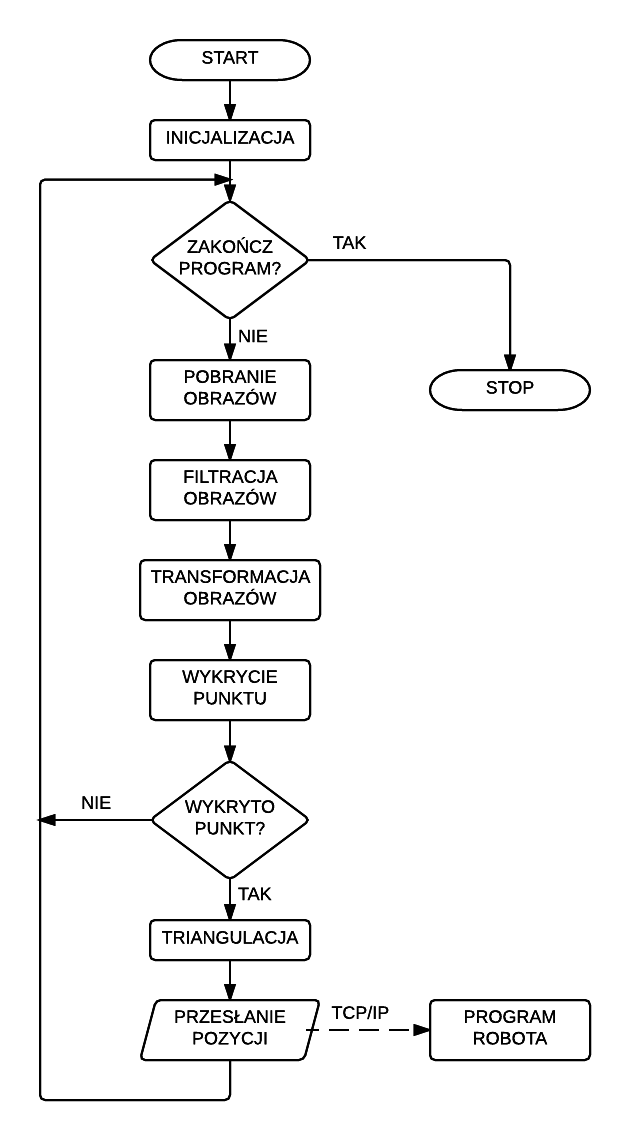
Ogólna procedura kalibracji systemu przedstawiona została na rys. NUMER. Po uruchomieniu programu kalibrującego wykonywany jest krok inicjalizacji, w którym sprawdzane jest połączenie z kamerami oraz parsowane są ewentualne parametry dotyczące kalibracji. Kolejny etap to pętla porównująca aktualną ilość próbek do ich wymaganej liczby (określanej przy inicjalizacji ). W przypadku negatywnego wyniku porównania pobierana jest para obrazów, a następnie odnajduje się punktu charakterystyczne. Jeżeli istnieją takie punkty na obu obrazach, są one wprowadzane do bufora próbek. W przeciwnym wypadku ponownie pobiera się parę obrazów. Jeśli spełniony jest warunek pętli wymaganej ilości próbek, program przechodzi do kroku faktycznej kalibracji, a następnie zapisuje jej wyniki do pliku i kończy swoje działanie. Potrzebnymi argumentami przy uruchamianiu programu są:

* Numery identyfikacyjne kamer – zazwyczaj są to liczby 0 i 1. W przypadku występowania wbudowanej kamery lub wcześniej podłączonego urządzenia wizyjnego, numery te są inkrementowane o liczbę aktualnie podłączonych urządzeń.
* Liczba wymaganych próbek – określa minimalną ilość próbek ( zbioru znalezionych punktów charakterystycznych na obrazach), która jest wymagana przy procedurze kalibracji. Większa liczba próbek podwyższa dokładność kalibracji, jednak znacząco wydłuża czas jej wykonywania. Domyślna wartość to 20.
* Czas między pobraniem próbek – liczba ustalająca przerwę czasową w sekundach po zaakceptowaniu aktualnej pary obrazów. Zapobiega przed pobranej podobnej pary obrazów i uzyskaniem zbliżonych wartości próbek.

Zasadę działania głównego programu analizującego położenie punktu wskaźnika opisuje schemat blokowy na rys. NUMER. Podobnie jak w przypadku kalibracji, pierwszym krokiem jest inicjalizacja, podczas której sprawdzany jest dostęp do pliku wynikowego programu kalibrującego, odczytywane są dane i weryfikuje się połączenie z kamerami. Następnie pobierana jest para obrazów, która poddawana jest szeregowi operacji:

* Filtracji - wyodrębnienie punktu świetlnego wskaźnika od tła
* Transformacji – kompensacja dystorsji obrazów
* Wykrycia punktu – uzyskanie położenia punktu wskaźnika z przekształconych wcześniej obrazów

Jeśli wykryto punkty na obu obrazach to na podstawie ich położeń rekonstruuje się przestrzenne położenie punktu wskaźnika. Uzyskana pozycja przesyłana jest do robota, który podejmuje odpowiednio zaprogramowaną akcję.



## Klasa CStereoCalib

## Klasa CStereoVision

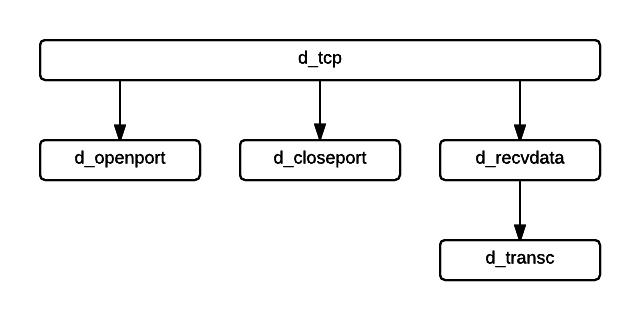
## Klasa CTCPConnection

# Oprogramowanie robota

## Struktura

Oprogramowanie robota składa się z głównego programu *d\_tcp* i 4 podprogramów odpowiedzialnych za:

* d\_openport – poprawne otworzenie portu TCP i nasłuchiwania na prośbę połączenia
* d\_closeport – zatrzymanie nasłuchiwania i zamknięcie portu
* d\_recvdata – odbieranie otrzymywanych pakietów danych
* d\_transc – interpretacje otrzymanych danych i wykonanie odpowiedniej akcji



# Testowanie oprogramowania

## Kalibracja

## Filtrowanie

Wyznaczenie efektywnej metody filtrowania i jej parametrów jest jednym z najtrudniejszych procesów przetwarzania obrazów. Wydobycie z obrazu obiektów zainteresowania utrudnia wiele czynników, m.in.:

* Niejednorodność tła
* Zmienne oświetlenie
* Zmienne parametry kamery
* Szumy

Niektóre z powyższych problemów można rozwiązać stosując dodatkowe źródło stałego oświetlenia, zapewniające jednakową jasność monitorowanego obszaru lub wykorzystać jednokolorowe maty, podłoża ułatwiające wykrycie i odrzucenie tła. Dopracowany algorytm filtrowania pozwala często uniknąć stosowania dodatkowych procedur pochłaniających wiele zasobów i czasu, mających na celu sprecyzowanie położenia szukanego obiektu. Z tego powodu istotne jest przeprowadzenie poprawnej i dokładnej filtracji na obrazie wejściowym.

Testowany filtracja przebiega na dwóch poziomach. Pierwszym poziomem są wewnętrzne parametry kamery Logitech C905, które można zmieniać dzięki oprogramowaniu producenta. Niestety nie można wprowadzać, ani odczytywać wartości liczbowych konkretnych parametrów, a jedynie ustalać ukryte wartości przez pasek przesuwny. Wyróżniono dwie grupy parametrów: ustalone automatycznie przez oprogramowanie kamery oraz ręcznie.

|  |  |
| --- | --- |
| Nastawy automatyczne:  Ekspozycja, wzmocnienie i równowaga bieli dobierane są na podstawie analizy pobranego, aktualnego obrazu. |  |
| Nastawy ręczne:  Wszystkie parametry są dobierane ręcznie i pozostają stałe. |  |

Druga warstwa odnosi się do sposobu zapisu przestrzeni kolorów do postaci cyfrowej. Jednym z modeli często wykorzystywanym w informatyce jest trójwymiarowy układ RGB, gdzie punkt reprezentowany jest przez trzy współrzędne barw przyjmujące wartości od 0 do 255: R – czerwonej, G – zielonej oraz B – niebieskiej. Kombinacja współrzędnych w odpowiednich proporcjach daje dowolny kolor. [ OBRAZ UKŁADU RGB?] Innym modelem jest układ HSV, który dzieli się na współrzędne: H – barwa, S – nasycenie oraz V – jasność i jego reprezentacja geometryczna jest w postaci walca. Oba wyżej wymienione sposoby reprezentacji koloru zostały wykorzystane do progowanie obrazu. Jeśli współrzędne punktu w danej przestrzeni barw znajdowały się w przedziale określonych wartości to punkt ten przyjmował wartość 255 w jednowymiarowym obrazie:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Celem testu filtrowania było stworzenie obrazu z wyodrębnionym obszarem plamki światła lasera o długości 690 nm i mocy 35 mW oraz odrzucenie pozostałych, nieistotnych informacji tła. Przetworzony dwuwymiarowy obraz zawiera piksele, które mogą przyjąć jeden z dwóch stanów: 0 – informacja nieistotna lub 255 – szukana informacja. Po ustawieniu wewnętrznych parametrów kamery, uruchomiono program, który w czasie rzeczywistym pobierał i progował obraz z kamer w wybranej przestrzeni barw. Doświadczalnie dobierano parametry progowania, śledząc na bieżąco wyświetlany obraz wynikowy, tak aby uzyskać wyłącznie obszar wskazany przez światło lasera. Wyniki testowania przy parametrach opisanych w TAB\_X przedstawiono w TAB\_Y, gdzie czerwonym okręgiem zaznaczono szukany, czerwony punkt.

Dla automatycznych nastaw, pomimo różnych kombinacji zakresu progowania, na żadnym obrazie z obu przestrzeni barw nie udało się całkowicie odrzucić tła. W przypadku obrazu RGB niektóre z białych, jaśniejszych pikseli pozostało na wynikowym obrazie. Progowanie przestrzeni HSV wyeliminowało zdecydowaną większość tła, pozostawiając jedynie kilka pikseli, kosztem utraty dużej części obszaru światła lasera, przez co trudno odróżnić szukany punkt od kilku nieodfiltrowanych pikseli tła.

Druga seria obrazów wejściowych, została pobrana przez kamerę o ręcznie ustawionych parametrach. Zdecydowanie zmniejszono ekspozycję i wzmocnienie, aby zmniejszyć ilość nadmiernie jasnych pikseli. Jednocześnie zwiększono intensywność kolorów, by zintensyfikować widoczność czerwonej plamki światła. Progowanie obrazu wejściowego skutecznie wyeliminowało tło, pozostawiając jedynie piksele odpowiadające laserowi. W przestrzeni HSV utracono nieco więcej informacji, niż w układzie RGB.

Najlepszy rezultat filtrowania został uzyskany stosując ręczne nastawy kamery dla danych warunków otoczenia oraz progując wartości pikseli w przestrzeni RGB, gdzie udało się odfiltrować tło, bez odrzucania pikseli przypadających na światło lasera.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Automatyczne nastawy kamery | Ręczne nastawy kamery |
| Obraz wejściowy |  |  |
| Progowanie w przestrzeni RGB |  |  |
| Progowanie w przestrzeni HSV |  |  |

Parametry progowania :

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | B | G | R |  | H | S | V |
| Automatyczne  nastawy kamery | MIN | 0 | 0 | 255 | 7 | 0 | 255 |
| MAX | 210 | 224 | 255 | 26 | 133 | 255 |
| Ręczne  nastawy kamery | MIN | 0 | 0 | 96 | 100 | 0 | 114 |
| MAX | 161 | 162 | 255 | 200 | 255 | 255 |

## Analiza dokładności

# Podsumowanie

# Bibliografia

1. Cyganek Bogusław, „ Komputerowe przetwarzanie obrazów”
2. <http://docs.opencv.org/3.0-beta/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html>
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Computer\_stereo\_vision

# Spis ilustracji

# Spis tabel

# Spis załączników