

## SYSTEM WIZYJNY DO OBRAZOWANIA POŁOŻENIA PRZESTRZENNEGO OBIEKTU TYPU OSTROŚŁUP

Piotr HIRSCH<sup>1</sup>, Leszek RAFIŃSKI<sup>2</sup>, Anna GOLIJANEK-JĘDRZEJCZYK<sup>3</sup>

Miejsce pracy

<sup>2,3</sup> Katedra Metrologii i Systemów Informatycznych, Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej,  
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

E-mail: <sup>1</sup> pihirsch@gmail.com <sup>2</sup> lrafin@ely.pg.gda.pl <sup>3</sup> agol@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono system wizyjny, umożliwiający pomiar i wizualizację położenia ostrosłupa na scenie. System wykorzystuje stanowisko laboratoryjne Katedry Metrologii i Systemów Informatycznych na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Stanowisko pomiarowe składa się z następujących elementów: kamery cyfrowej wraz z obiektywem, wyposażonej w interfejs FireWire, zestawu oświetlaczy i komputera osobistego z zainstalowanym środowiskiem LabVIEW i pakietem Vision. Przedstawiono opis wyprowadzenia i realizacji algorytmu pozycjonowania, oraz wyniki testów systemu.

**Słowa kluczowe:** system wizyjny, pozycjonowanie 3d

### 1. WPROWADZENIE

W zaprojektowanym systemie wizyjnym założono, że wizualizowana bryła - ostrosłup - może dowolnie przemieszczać się w trzech wymiarach i przyjmować każdą pozycję, ograniczoną jedynie polem widzenia kamery. Położenie ostrosłupa w postaci zestawu wektorów i kątów obrotu bryły względem osi trójwymiarowego, kartezjańskiego układu współrzędnych bazowych otrzymywane jest na podstawie jednego zdjęcia. Możliwe jest to dzięki zastosowaniu metody polegającej na znajdowaniu punktów i cech charakterystycznych przy wykorzystaniu znaczników.

Podstawowy algorytm działania systemu sprowadza się do wczytania zdjęcia (z wcześniej zapisanego obrazu) ostrosłupa lub pobrania obrazu bezpośrednio z kamery, pod którą znajduje się obiekt badany - ostrosłup. Następnie przeprowadzana jest lokalizacja i identyfikacja widocznych znaczników na ostrosłupie, oraz obliczenie na ich podstawie położenia punktów charakterystycznych. W razie potrzeby, gdy wymagane punkty są zasłonięte i nie można określić ich pozycji na podstawie zdjęcia, stosowane są algorytmy estymujące ich położenie.

Ostatnim etapem jest obliczenie translacji i rotacji bryły, poprzez rozwiązanie równania macierzowego zbudowanego z wyznaczonych punktów charakterystycznych w układzie bazowym i ich

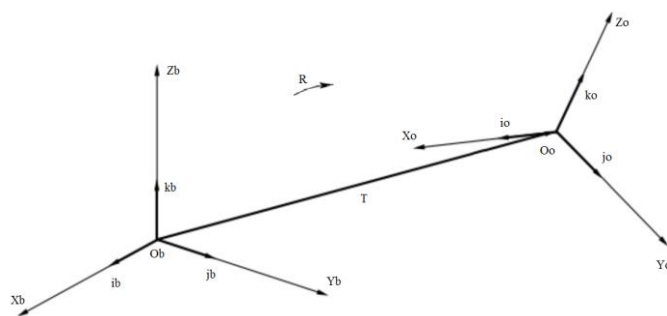
odpowiedników w układzie ostrosłupa. Na podstawie otrzymanych wyników tworzona jest wizualizacja, umożliwiająca szybką ocenę poprawności pozycjonowania.

Zakładana dokładność obliczonej pozycji nie powinna być mniejsza niż 5 mm dla translacji i  $10^\circ$  dla rotacji.

### 2. MODEL MATEMATYCZNY

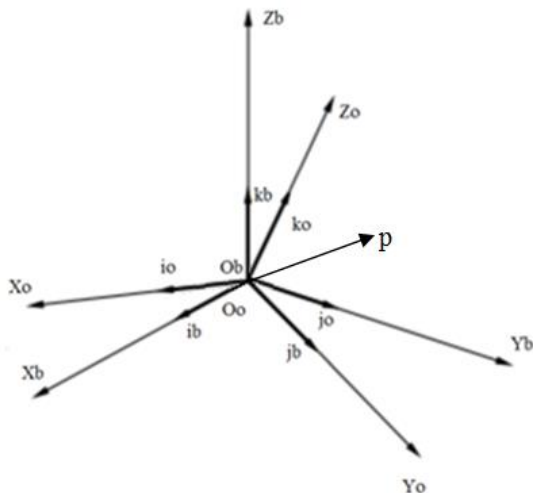
#### 2.1. Analiza kinematyczna

Oznaczając przez  $X_b Y_b Z_b$  kartezjański układ współrzędnych bazowych o środku w punkcie  $O_b$  i ortogonalnych wektorach jednostkowych  $i_b, j_b, k_b$ , oraz nieruchomy względem ostrosłupa układ  $X_o Y_o Z_o$  o środku  $O_o$  i wektorach jednostkowych  $i_o, j_o, k_o$ , których wzajemne położenie opisywane jest przez wektor translacji  $T$  i rotacje  $R$  otrzymujemy sytuację przedstawioną na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat ilustrujący przyjęte oznaczenia, oraz położenie i orientację ostrosłupa

Kinematykę zaprezentowanego schematu rozpatrywać można jako szczególny przypadek manipulatora z końcówką sferyczną o 6 stopniach swobody [1]. Zmiana orientacji ostrosłupa nie powoduje przesunięcia punktu  $O_o$ , co pozwala na uproszczenie modelu poprzez zastosowanie odsprężenia kinematycznego [2]. Znając położenie punktu  $O_o$  w układzie bazowym odpowiadające wektorowi translacji  $T$ , dokonać można przemieszczenia układu ostrosłupa do środka układu bazowego. Wynik tej operacji przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Efekt przesunięcia układu ostrosłupa do środka układu bazowego

Zaznaczony na rysunku 2 wektor położenia  $p$  zdefiniowany jest w obu układach współrzędnych jako:

$$\begin{aligned} p_b &= p_{bx}i_b + p_{by}j_b + p_{bz}k_b, \\ p_o &= p_{ox}i_o + p_{oy}j_o + p_{oz}k_o. \end{aligned} \quad (1)$$

Ponieważ  $p_b$  i  $p_o$  są reprezentacjami tego samego wektora  $p$ , zapisać można:

$$\begin{aligned} p_{bx} &= p_b i_b = p_o i_b = p_{ox} i_o i_b + p_{oy} j_o i_b + p_{oz} k_o i_b, \\ p_{by} &= p_b j_b = p_o j_b = p_{ox} i_o j_b + p_{oy} j_o j_b + p_{oz} k_o j_b, \\ p_{bz} &= p_b k_b = p_o k_b = p_{ox} i_o k_b + p_{oy} j_o k_b + p_{oz} k_o k_b, \end{aligned} \quad (2)$$

a w formie równania wektorowego:

$$p_b = R_b^o p_o. \quad (3)$$

Macierz  $R_b^o$  o wymiarach (3x3) reprezentuje transformację współrzędnych punktu z układu ostrosłupa do układu bazowego. Jeśli znane jest położenie trzech punktów  $p_1, p_2, p_3$  o reprezentacjach w układzie ostrosłupa i w układzie bazowym, można zbudować z nich odpowiednio macierze  $A$  i  $B$ :

$$\begin{aligned} A &= [p_1 \quad p_2 \quad p_3] = \begin{bmatrix} p_{1bx} & p_{2bx} & p_{3bx} \\ p_{1by} & p_{2by} & p_{3by} \\ p_{1bz} & p_{2bz} & p_{3bz} \end{bmatrix}, \\ B &= [p_1 \quad p_2 \quad p_3] = \begin{bmatrix} p_{1ox} & p_{2ox} & p_{3ox} \\ p_{1oy} & p_{2oy} & p_{3oy} \\ p_{1oz} & p_{2oz} & p_{3oz} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

Macierz  $A$  grupując punkty zdefiniowane w układzie bazowym i  $B$  w układzie ostrosłupa podstawić można do równania (3), otrzymując:

$$A = R_b^o B. \quad (5)$$

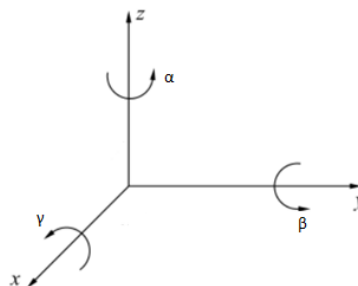
Prawostronne mnożenie równania (5) przez  $B^{-1}$  prowadzi do wyznaczenia macierzy rotacji  $R_b^o$ :

$$R_b^o = AB^{-1} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Warunkiem uzyskania zależności (6) jest odwracalność macierzy  $B$ . Z uwagi na to, że macierz  $B$  zbudowana jest z punktów w układzie ostrosłupa, a więc z punktów o znanych i stałych współrzędnych, jest to warunek możliwy do spełnienia.

Powyższe rozważania prowadzą do jednoznacznego wyznaczenia liczbowych wartości macierzy rotacji  $R_b^o$ . Przyjmując, że orientacja ostrosłupa w przestrzeni opisana jest przy pomocy kątów Eulera RPY, których definicja przedstawiona została na rysunku 3, prawa składania obrotów wokół układu ustalonego i zestawu elementarnych macierzy rotacji [3], otrzymano następującą macierz  $R_b^o$ :

$$R_b^o = R_z(\alpha)R_y(\beta)R_x(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma \\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\gamma & \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix}. \quad (7)$$



Rys. 3. Kąty Eulera RPY

Gdzie  $R_b^o$  opisuje orientację układu współrzędnych bazowych względem układu współrzędnych ostrosłupa i pozostaje w związku z (6) poprzez równość:

$$R_b^o = R_b^{oT}. \quad (8)$$

Przy założeniu, że  $r_{11}$  i  $r_{21}$  nie są równocześnie równe zeru, czyli  $\cos\beta \neq 0$ , zachodzi:  $\sin\beta = -r_{31}$ ,  $\cos\beta = \pm\sqrt{1 - r_{31}^2}$ , a  $1 - r_{31}^2 = r_{32}^2 + r_{33}^2$ . Zatem dla  $\cos\beta > 0$  otrzymano:

$$\begin{aligned} \beta &= \text{atan2}(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}), \\ \alpha &= \text{atan2}(r_{21}, r_{11}), \\ \gamma &= \text{atan2}(r_{32}, r_{33}) \end{aligned} \quad (9)$$

a dla  $\cos\beta < 0$ :

$$\begin{aligned} \beta &= \text{atan2}(r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}), \\ \alpha &= \text{atan2}(-r_{21}, -r_{11}), \\ \gamma &= \text{atan2}(-r_{32}, -r_{33}). \end{aligned} \quad (10)$$

Jeżeli  $r_{11} = r_{21} = 0$ , to z faktu, że macierz rotacji jest ortogonalna zachodzi:  $r_{11} = r_{21} = 0$  i  $r_{31} = \pm 1$ . Gdy  $r_{31} = 1$ , to  $\sin\beta = -1$  i  $\cos\beta = 0$ , więc  $\beta = -\frac{\pi}{2}$ . W takim wypadku równanie (8) przyjmuje postać:

$$\begin{bmatrix} 0 & -c\alpha\gamma - s\alpha\gamma & -c\alpha\gamma + s\alpha\gamma \\ 0 & -s\alpha\gamma + c\alpha\gamma & -s\alpha\gamma - c\alpha\gamma \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r_{12} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{32} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Z równania (11) wyznaczyć można tylko sumę  $\alpha + \gamma$ , a zatem istnieje nieskończenie wiele zestawów kątów, które opisują to samo ułożenie figury. Z uwagi na intuicyjność interpretacji zakłada się  $\gamma = 0$ , wtedy:

$$\alpha = \text{atan2}(-r_{12}, r_{22}). \quad (12)$$

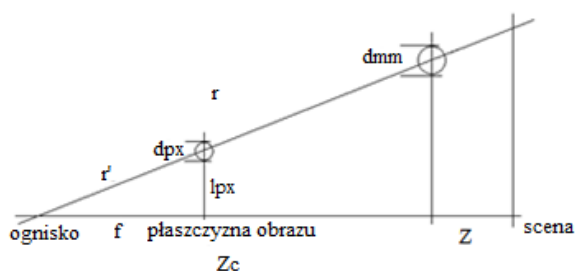
Gdy  $r_{31} = -1$ , to  $\sin\beta=1$  i  $\cos\beta=0$ , więc  $\beta=\frac{\pi}{2}$ .  
Równanie (8) przyjmuje postać:

$$\begin{bmatrix} 0 & casy - sacy & cacy + sasy \\ 0 & sasy + cacy & sasy - cacy \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r_{12} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{32} \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Z równania (13) podobnie jak poprzednio wyznaczyć można tylko różnicę  $\alpha-\gamma$ . Na potrzeby projektu przyjmuje się  $\gamma=0$ , wtedy  $\alpha$  oblicza się jak w (12).

## 2.2. Model kamery

Przyjęty na potrzeby projektu model kamery otworkowej [4] jest jednym z najczęściej używanych w systemach wizyjnych, zarówno do kalibracji jak i do odtwarzania współrzędnych 3D. Popularność zawdzięcza wysokiemu stopniowi uproszczenia, przy zachowaniu rozsądnej jakości odwzorowywania. Używany model wraz z oznaczeniami przedstawiony został na rysunku 4.



Rys. 4. Ilustracja przyjętych oznaczeń

Odległość znacznika od ogniska w osi z kamery  $Z_c$  wyznaczona została z proporcji:

$$Z_c = \frac{r \cdot f}{r'}, \quad (14)$$

gdzie:  $r$  – odległość znacznika od ogniska [mm], wyznaczona jako [5]:

$$r = \frac{f \cdot dmm}{dpx}, \quad (15)$$

gdzie:  $dpx$  to zmierzona średnica obrazu znacznika [px] natomiast  $dmm$  to rzeczywista średnica znacznika [mm].

Ogniskową kamery  $f$  w [px], zdefiniowano jako:

$$f = 3750 \text{ px}. \quad (16)$$

Natomiast odległość środka obrazu znacznika od ogniska  $r'$  [px] wyznaczono z następującego wzoru:

$$r' = \sqrt{f^2 + lpx^2}, \quad (17)$$

gdzie:  $lpx$  – to odległość środka znacznika, o współrzędnych  $x$  i  $y$ , od środka obrazu w [px] wyznaczona z zależności:

$$lpx = \sqrt{(814 - x)^2 + (618 - y)^2}. \quad (18)$$

Podstawiając wzory (15-17) do zależności (14) otrzymano następującą zależność:

$$Z_c = \frac{f^2 \cdot dmm}{dpx \cdot \sqrt{f^2 + lpx^2}}. \quad (19)$$

Znając  $Z_c$  danego punktu, oraz jego położenie  $x$  i  $y$  na płaszczyźnie obrazu, współrzędne rzeczywiste w układzie kamery wyznacza się z następującego układu równań:

$$X_c = Z_c \cdot \frac{x}{f}, \quad (20)$$

$$Y_c = Z_c \cdot \frac{y}{f}. \quad (21)$$

Ostatnim krokiem wyznaczania położenia znaczników jest przeliczenie współrzędnych  $X_c$ ,  $Y_c$  i  $Z_c$  punktu z układu kamery na układ bazowy. Przy znajomości wysokości na jakiej znajduje się kamera nad sceną (scena pokrywa się z płaszczyzną  $O_b x_b y_b$ ), oznaczonej jako  $H^0$ , współrzędne przeliczane są zgodnie z poniższymi wzorami:

$$\begin{aligned} X_b &= Y_c, \\ Y_b &= X_c, \\ Z_b &= H^0 - Z_c. \end{aligned} \quad (22)$$

## 2.3. Estymacja położenia niewidocznych punktów

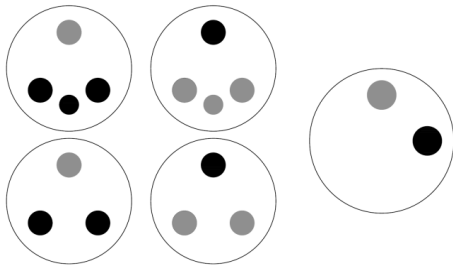
Do obliczenia położenia i orientacji ostrosłupa w układzie bazowym potrzebna jest znajomość czterech punktów, co wynika z przeprowadzonej analizy kinematycznej. Niezbędne są współrzędne środka układu ostrosłupa – punktu  $O_o$ , które wskazywane są przez środek znacznika znajdującego się na podstawie, oraz trzech punktów spełniających wymóg o odwracalności zbudowanej z ich współrzędnych  $X_o Y_o Z_o$  macierzy.

Gdy na badanym zdjęciu widoczna jest tylko podstawa, do zbudowania odwracalnej macierzy  $B$  (4-6) potrzebna jest znajomość położenia górnego wierzchołka bryły. Obliczana jest ona przy wykorzystaniu iloczynu wektorowego i znajomości modelu badanego ostrosłupa.

Kolejny przypadek, gdy widać wszystkie ściany oprócz podstawy, wymaga estymacji położenia punktu  $O_o$ . Po serii przekształceń morfologicznych [6] usuwających zakłócenia i wypełniających ubytki w sylwetce, obliczony środek ciężkości obrazu stanowi współrzędne punktu  $O_o$  w układzie obrazu. Przy znajomości rzeczywistej odległości tego punktu od dowolnego innego punktu zlokalizowanego na zdjęciu, możliwe jest obliczenie położenia  $O_o$  w układzie bazowym.

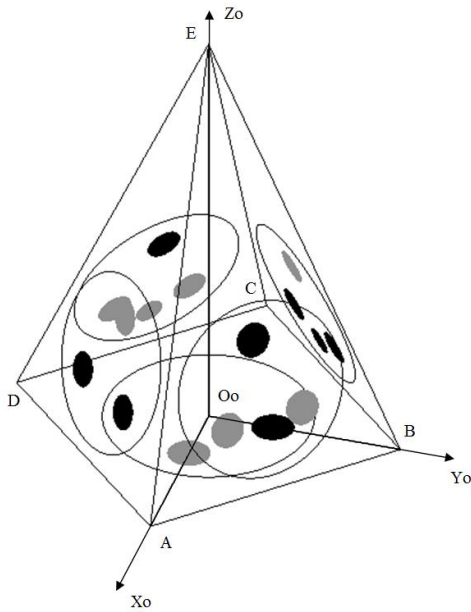
## 3. REALIZACJA

Analiza kinematyczna dostarcza informacji o liczbie i położeniu punktów, które należy wyznaczyć na podstawie zdjęcia, aby możliwe było określenie pozycji bryły. Na tej podstawie możliwe jest zaprojektowanie znaczników. Powinny one umożliwiać dokładne określenie pozycji wybranych wcześniej punktów w trzech wymiarach. Jedynym wskaźnikiem, z którego można wnioskować o odległości znacznika od obiektu jest jego wielkość – im dalej tym jest on mniejszy. Z racji tego, że bryła może się dowolnie obracać, jej ściany mogą być widoczne pod kątem. Sprawia to, że znacznik musi przyjąć kształt koła, ponieważ nawet gdy jego obraz ulegnie zniekształceniu, to dłuższy promień powstałej elipsy równy będzie promieniowi pierwowzoru. Dodatkowo znaczniki muszą umożliwiać identyfikację widocznych ścian. Oparty na tych informacjach projekt znaczników przedstawiony został na rysunku 5.



Rys. 5. Zaprojektowane znaczniki

Każdy z pięciu znaczników zbudowany jest z białego okręgu (głównego znacznika) i kilku podznaczników. Umieszczenie znaczników na pozycjonowanej figurze, oraz orientację układu ostrosłupa przedstawia rysunek 6.

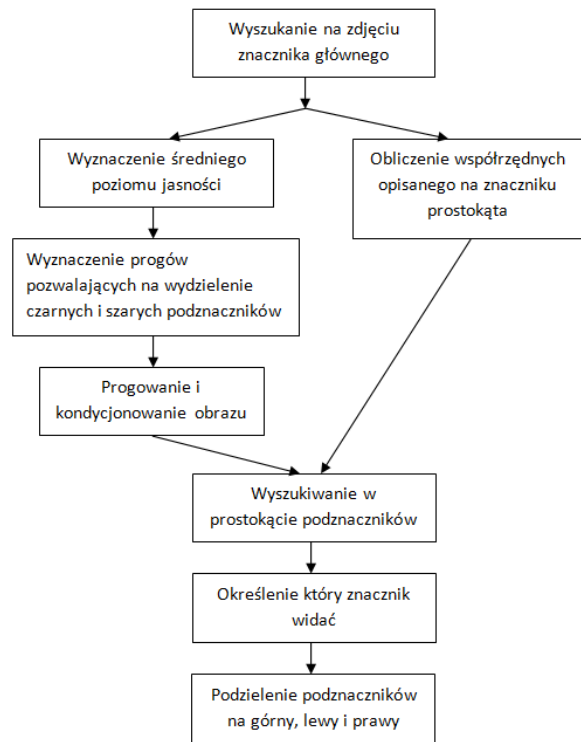


Rys. 6. Orientacja układu ostrosłupa względem bryły, położenie znaczników

Pierwszym zadaniem po wczytaniu obrazu jest znalezienie i zidentyfikowanie znaczników. Następnie obliczone lub wyestymowane zostaje położenie punktów charakterystycznych. Po zbudowaniu z nich macierzy  $A$  (4) i dobraniu odpowiedniej macierzy  $B$ , wyliczona zostaje translacja i rotacja bryły.

Przedstawiony na rysunku 7 algorytm realizowany jest dla każdego znacznika głównego widocznego na zdjęciu. W trakcie wykonywania testów okazało się, że w warunkach zmiennego oświetlenia nie jest możliwy dobór stałej wartości progów, pozwalającej na wykrycie czarnych i szarych podznaczników. Reprezentacja obrazu w 8-bitowej skali szarości daje 256 przedziałów, gdzie 0 oznacza kolor czarny, a 255 biały. Na ciemniejszych zdjęciach lub po gorzej oświetlonej stronie ostrosłupa, podznacznik szary osiągał jasność nawet 50-60 punktów. Tymczasem po lepiej oświetlonej stronie podznacznik czarny posiadał 70 punktów. W celu zwiększenia odporności układu na nierównomierność oświetlenia, wprowadzone zostało progowanie adaptacyjne – dla każdego znacznika głównego mierzona jest średnia jasność koloru białego na polu o wielkości 25 pikseli. Następnie opierając się na tej wielkości dostosowywane są wartości progów odcinające czarne i szare podznaczniki. Skuteczność tego rozwiązania potwierdzona została na

próbce 15 zdjęć. Przy stałych progach wszystkie znaczniki zostały poprawnie zidentyfikowane na 5 zdjęciach, a przy adaptacyjnych na 14-stu.



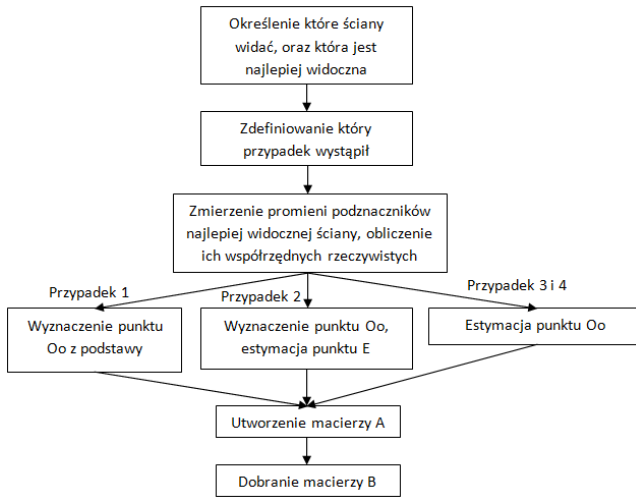
Rys. 7. Algorytm lokalizacji i identyfikacji znaczników

Druga gałąź algorytmu tworzy w tym czasie ROI (*ang. Region Of Interest*), czyli obszar zainteresowania. Określa on część obrazu, na której wykonywane są niektóre z funkcji w LabVIEW. Ustawienie ROI na pole wewnątrz znacznika głównego, zawęża obszar poszukiwań podznaczników, a co za tym idzie pozwala je skutecznie zaklasyfikować. ROI o kształcie elipsy najłatwiej uzyskać opisując na znalezionym znaczniku prostokąt, a następnie odrzucając wszystko, co znajduje się na granicy obrysowanego obszaru.

Znacznik identyfikowany jest na podstawie liczby znalezionych w nim czarnych i szarych podznaczników. Dodatkowo, znaczniki zostały tak zaprojektowane, że zawsze jeden z podznaczników posiada inny kolor niż pozostałe, w ten sposób oznaczony jest górny podznacznik. Rotacja ostrosłupa zostaje obliczona poprawnie, gdy macierze  $A$  i  $B$  zbudowane są z tych samych punktów, ale wyrażonych w różnych układach współrzędnych. Do macierzy  $B$ , przygotowanej dla danej ściany, wpisane zostały współrzędne kolejno: górnego, lewego i prawego podznacznika.

Gdy wiadomo już jakie ściany są widoczne na zdjęciu, można określić, który z przypadków estymacji opisanych w rozdziale 2.3 należy wykonać. Schemat algorytmu określania i rozwiązywania odpowiedniego przypadku przedstawiony został na rysunku 8. Jeśli na pobranym obrazie widoczna jest więcej niż jedna ściana, za ścianę główną uznana zostaje ta najmniej zniekształcona. Kryterium stanowi obliczany przez środowisko LabVIEW wskaźnik dopasowania widzianego znacznika do wzorca. Za najlepiej widoczny zostanie uznany znacznik, którego rzut na płaszczyznę obrazu został najmniej zniekształcony, a więc ten o najbardziej kolistym kształcie.



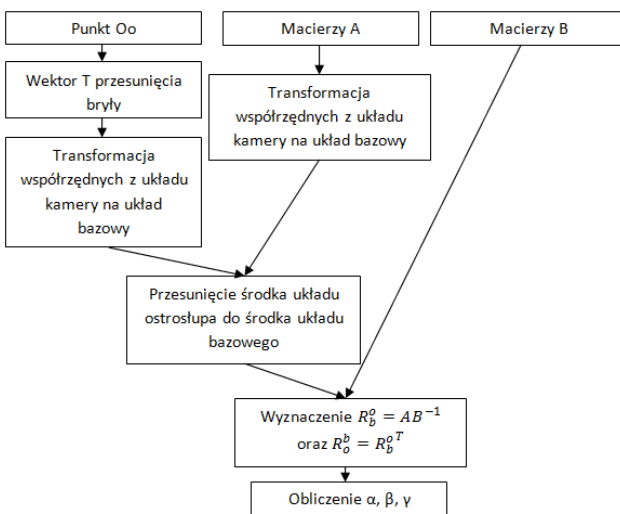


Rys. 8. Algorytm estymacji położenia niewidocznych punktów

Po wybraniu ściany głównej ponownie wyszukiwane są jej podznaczniki. Tym razem metoda poszukiwań nie ma na celu segregacji, a dokładny pomiar promienia. Średnica podznacznika jest niezbędna do obliczenia jego współrzędnych rzeczywistych ze wzoru (14). W celu zwiększenia dokładności pomiaru obraz jest poddawany działaniu filtra uwydatniającego detale [6], powodującego wyraźniejsze zarysowanie krawędzi elips.

Po obliczeniu rzeczywistych współrzędnych podznaczników następuje wyznaczenie punktu  $O_0$ , niezbędnego do określenia translacji bryły. W zależności od widocznych ścian,  $O_0$  wyznaczone jest jako środek podstawy – przypadek 1 i 2 – lub estymowane - przypadek 3 i 4. Obliczanie  $O_0$  na podstawie znacznika przebiega analogicznie do opisywanego wcześniej wyznaczania współrzędnych podznaczników. Jeśli na zdjęciu widać tylko podstawę, to przed przejściem do dalszego kroku, następuje estymacja położenia wierzchołka  $E$  ostrosłupa.

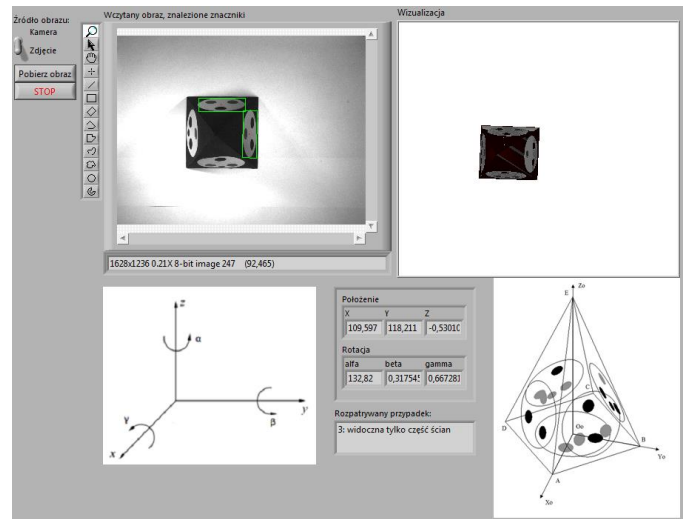
Po skompletowaniu macierzy  $A$  następuje utworzenie odpowiedniej do wybranej ściany głównej macierzy  $B$ . Polega to na wybraniu właściwej z 5 dostępnych macierzy, zbudowanych na podstawie pomiarów trójwymiarowego modelu. Gdy znane są już  $A$ ,  $B$  oraz  $O_0$ , przystąpić można do realizacji ostatniego zadania, które w formie schematu blokowego przedstawione zostało na rysunku 9.



Rys. 9. Schemat blokowy algorytmu wyznaczania kątów

Wszystkie funkcje w LabVIEW operują w układzie współrzędnych obrazowych. Uzyskane współrzędne

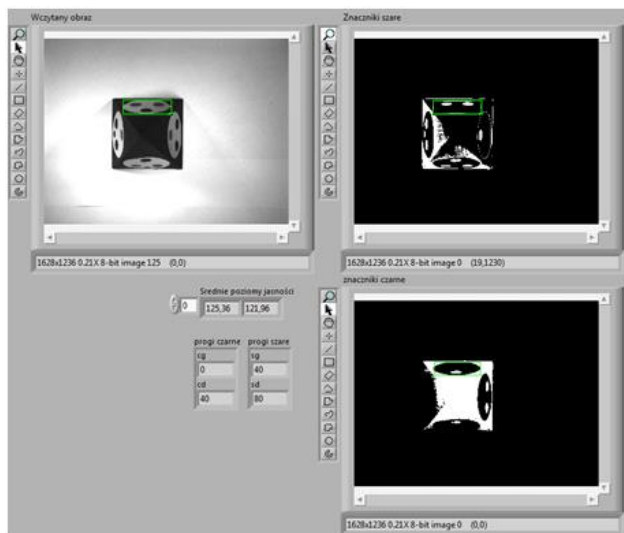
przeliczone były na rzeczywiste w układzie kamery. Końcowa transformacja, przeprowadzona zgodnie ze wzorem (22) zostaje tylko dla tych punktów, dla których jest wymagana. Przy znanym wektorze  $T$  i macierzy  $A$  wyrażonych w układzie bazowym, realizowane jest przesunięcie środka układu ostrosłupa, co pozwala na wyznaczenie wszystkich danych niezbędnych do utworzenia macierzy  $R_b^g$  (6), (8). Ostatnim krokiem jest rozwiązanie powstałego równania macierzowego. Kąty obliczane są z (8) i (9). W ten sposób uzyskuje się dwa równoważne opisy ułożenia figury, z których jeden jest każdorazowo łatwiejszy w interpretacji. Mniej skomplikowany zestaw kątów jest wybierany z wykorzystaniem średniej ważonej i przedstawiany użytkownikowi jako wynik końcowy. Gdy znana jest już pozycja ostrosłupa generowana zostaje wizualizacja. Trójwymiarowy model figury jest przesuwany i obracany zgodnie z otrzymanymi wynikami umożliwiając szybkie sprawdzenie poprawności pozycjonowania przez porównanie ze zdjęciem. Zaprojektowany i zrealizowany interfejs użytkownika i wizualizacja tego systemu pomiarowego widoczne są na rysunku 10.



Rys. 10. Interfejs użytkownika

Interfejs ten pozwala użytkownikowi na wybór zdjęć do analizy z dysku lub pobranie ich bezpośrednio z kamery. W lewym i prawym dolnym rogu znajdują się schematy pomagające zinterpretować uzyskane przesunięcie i kąty. Dodatkowo wyświetlana jest informacja o tym, jak obraz został zaklasyfikowany (do którego przypadku ułożenia bryły). W lewym górnym rogu wyświetlane jest pobrane zdjęcie, na które następnie nanoszone są prostokąty opisane na znalezionych znacznikach. Dodatkowo czerwonymi kropkami i kółkami zaznaczane są środki podznaczników. W prawym górnym rogu znajduje się okno wizualizacji.

Odporność systemu na niekorzystne warunki oświetleniowe, w szczególności na nierównomierne oświetlenie bryły, została zwiększona dzięki użyciu adaptacyjnego progowania, którego działanie zostało pokazane na rysunku 11. Dla każdego znacznika głównego mierzony jest średni poziom jego jasności. Na tej podstawie wyznaczone są górne i dolne wartości progów wydzielające czarny i szary kolor. Czarny podznacznik po jednej stronie figury może być jaśniejszy niż szary po drugiej, a mimo to ściany zostaną poprawnie zidentyfikowane.



Rys. 11. Adaptacyjne progowanie

W grupie 30 zdjęć testowych wykonanych w zróżnicowanych warunkach oświetleniowych, zastosowanie adaptacyjnego progowania umożliwiło poprawne zidentyfikowanie wszystkich znaczników na 26 zdjęciach. Bez użycia tego systemu poprawne wyniki uzyskano w 5 przypadkach.

Dokładność pozycjonowania różni się w zależności od przypadku wykonywanej estymacji. Najdokładniejsze wyniki uzyskane zostały dla zdjęć, na których widoczne są wszystkie 4 ściany i estymowane jest położenie środka podstawy. Na 15 zdjęć poprawnie zidentyfikowane zostały znaczniki w 13 przypadkach. Błąd estymacji rotacji nie przekroczył  $5^\circ$  w żadnej osi, a pozycjonowania w osiach X i Y 2 mm. W osi Z w pięciu przypadkach błąd wyniósł 11-12 mm, a w pozostałych nie więcej niż 3 mm.

Dla innych ułożeń figury (widoczna sama podstawa, podstawa i któraś ze ścian, tylko część ścian) w większości przypadków błędy pozycjonowania nie przekraczają założonych 5 mm i  $10^\circ$ , jednakże dla niektórych przypadków błąd estymacji rotacji wynosi nawet  $15-20^\circ$ .

Powyżej opisane testy zostały wykonane w różnorodnych warunkach oświetleniowych, tymczasem system może zostać skalibrowany pod konkretne i stałe oświetlenie. Praca przy optymalnym, stałym oświetleniu prowadzi do ograniczenia błędów do wartości rzędu 3 mm i  $5^\circ$ .

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Zaprezentowany system wizyjny do pozycjonowania ostrosłupa w przestrzeni spełnia postawione przed nim zadania. W zrealizowanym systemie analizowana bryła może być ułożona w dowolny sposób - jedynym wymaganiem jest, by znajdowała się w polu widzenia kamery. Otrzymane wyniki są przedstawiane liczbowo oraz graficznie, w formie wizualizacji. Ponadto do algorytmu identyfikacji znaczników dodano adaptacyjne rozwiązania, które znacząco wpłynęły na poprawę odporności układu na błędy wynikające z nierównomiernego oświetlenia. Znaczniki są poprawnie lokalizowane zarówno przy silnym jak i słabym natężeniu światła. W warunkach stałego, optymalnego oświetlenia udało się uzyskać wysoką dokładność pozycjonowania, wynoszącą mniej niż 3 mm dla translacji i  $5^\circ$  dla określania rotacji. Wydajność systemu pozycjonowania, na komputerze wyposażonym w wielordzeniowy procesor 2 GHz, zbliża się do 2 pomiarów na sekundę.

Dalszy rozwój pracy powinien koncentrować się na zwiększeniu dokładności pozycjonowania. Obejmować może przeprojektowanie znaczników i zależnych od nich części systemu tak, by wyeliminować użycie koloru szarego.

Tak zaprojektowany system stanowi uogólnione rozwiązanie zadania pozycjonowania i może zostać uproszczony do pozycjonowania 2D.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Kozłowski K., Dutkiewicz P., Wróblewski W.: Modelowanie i sterowanie robotów. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2003, ISBN 83-01-14081-X.
2. Dąbkowski M.: Podstawy robotyki i mechatroniki. Materiały do wykładów, Politechnika Gdańska, 2009.
3. Morecki A., Knapczyk J.: Podstawy robotyki. Teoria i elementy manipulatorów robotów. Wydanie trzecie, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999, ISBN 83-204-2331-7.
4. Hartley R., Zisserman A.: Multiple View Geometry In Computer Vision. Wydanie drugie, Cambridge University Press, 2003, ISBN 0-521-54051-8.
5. Dąbkowski M.: Podstawowe metody cyfrowej obróbki obrazu. Materiały do laboratorium, Politechnika Gdańska 2009.
6. Malina W., Smiatcz M.: Cyfrowe przetwarzanie obrazów. Wydanie drugie, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2008, ISBN 978-83-60434-54-3.

### MACHINE VISION SYSTEM FOR 3D POSITIONING OF PYRAMID

**Key-words:** machine vision, 3d positioning

This paper presents a vision system used to measure and visualize the position of a pyramid on the stage. The system uses a laboratory stand at the Department of Metrology and Information Systems at the Faculty of Electrical and Control Engineering of the Technical University of Gdansk. The measurement system consists of the following components: a digital camera with equipped with a FireWire interface, a set of light sources and a PC running the LabVIEW environment and Vision package. Derivation and implementation of positioning algorithm has been presented. Test results are also included.