

mgr inż. Andrzej Bratek, dr inż. Andrzej Syrczyński
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP
Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

UPROSZCZONA METODA REKONSTRUKCJI POŁOŻENIA OBIEKTU W PRZESTRZENI TRÓJWYMIAROWEJ ZA POMOCĄ DWUKAMEROWEGO SYSTEMU WIZYJNEGO

W artykule opisano prostą w implementacji programowej metodę wyznaczania położenia obiektu w przestrzeni trójwymiarowej, na podstawie danych uzyskanych z dwukamerowego systemu wizyjnego, w którym obiekt ten jest obserwowany. Metoda ta została opracowana przy okazji działań zmierzających do syntezy trajektorii robota, wzorowanej na ruchu narzędzia prowadzonego przez człowieka podczas ręcznie wykonywanej pracy.

Na wstępie artykułu przedstawiono ustalone założenia i ograniczenia w stosowaniu metody. Następnie zaprezentowano przyjęty model matematyczny układu wizyjnego, algorytm przeprowadzenia kalibracji parametrów modelu i algorytm rekonstrukcji położenia 3D obserwowanego obiektu. W dalszej części przytoczono wyniki przeprowadzonej, przykładowej rekonstrukcji położenia. Na koniec przedstawiono wnioski ukierunkowane na podniesienie dokładności uzyskiwanych wyników.

THE SIMPLIFIED METHOD OF RECONSTRUCTION OF THREE DIMENSIONAL OBJECT POSITION WITH THE TWO-CAMERA VISION SYSTEM

In this paper we present the method, simple to implement in software, which determines position coordinates of an object in the 3D scene on the basis of data gathered by the two-camera vision system watching the scene. The method was developed during research works on synthesis of robot trajectory, which reflects motion of a tool driven by a man manually.

The paper describes undertaken assumptions and bounds of the above method. Then, the mathematical model of image formation process in cameras, the calibration algorithm of model's parameters as well as the procedure of reconstructing the scene are presented. There are also shown test results based on real data obtained from the sample object 3D reconstruction. The conclusion points out how to increase the accuracy of results achieved.

WSTĘP

W toku prac zmierzających do opracowania sposobu generowania programu sterującego dla robota, który by powielał trajektorie ruchu narzędzia obserwowane podczas prac wykonywanych ręcznie, zetknięto się z problemem dynamicznego wyznaczania położenia narzędzia w przestrzeni roboczej i odwzorowania go w pamięci robota. I jest to jeden z przykładów, w których pomocne może okazać się zastosowanie systemu wizyjnego.

Dla rozwiązania napotkanego zadania wybrano układ dwóch kamer ustawionych prostopadle względem siebie na jednej płaszczyźnie. Taka konfiguracja pozwala uprościć analizę zjawisk optycznych zachodzących w systemie wizyjnym, koncentrując się na układzie współrzędnych w którym opisywana jest przestrzeń robocza narzędzia, gdyż trywializują się powiązania pomiędzy nim, a układami współrzędnych związanymi z kamerami.

Przebieg rekonstrukcji śladu poruszającego się narzędzia wyobrażany jest następująco. Do narzędzia mocowany jest znacznik położenia zabudowany diodami emitującymi światło. Jego przemieszczanie się podczas pracy narzędzia obserwowane jest przez kamery i rejestrowane w systemie wizyjnym z wysoką częstotliwością skanowania. Aplikacja wizyjna przetwarza napływające sukcesywnie obrazy, tworząc ich opis cyfrowy w postaci pliku zawierającego

sekwencje zestawów wartości pikseli dwuwymiarowego położenia znacznika w widoku obu kamer dla kolejnych obrazów. Tak uzyskane dane mogą stanowić podstawę do odtworzenia w przestrzeni trójwymiarowej trajektorii zakreślonej przez narzędzie. Dane te zasilają przygotowaną aplikację rekonstrukcji, która dla kolejnych obrazów obserwowanego znacznika ostatecznie wyznacza współrzędne jego położenia.

Znane są ogólne rozwiązania problemu rekonstrukcji położenia na trójwymiarowej scenie, korzystają one z metod geometrii epipolarnej i algebry liniowej i prowadzą do złożonych algorytmów [1], [3]. W dalszej części artykułu przedstawiono przyjęty model układu wizyjnego oraz opracowany dla tego modelu algorytm kalibracji jego parametrów, jak również algorytm wyznaczania położenia obserwowanego obiektu. Opracowane algorytmy są nieskomplikowane w realizacji i nie wymagają nadmiernych obliczeń. Przytoczono także wyniki przykładowej rekonstrukcji położenia obiektu uzyskane z aplikacji, w której zaimplementowano prezentowane rozwiązanie.

1. KONFIGURACJA SYSTEMU WIZYJNEGO I ZDEFINIOWANIE ZADANIA REKONSTRUKCJI POŁOŻENIA

Do obserwacji ruchu narzędzia w przestrzeni roboczej przewidziano system wizyjny złożony z dwóch kamer, o osiach optycznych wzajemnie prostopadłych i leżących na jednej płaszczyźnie, przedstawiony schematycznie na rys. 1. Kamery dla odróżnienia oznaczono symbolami H i V . Układ współrzędnych $OXYX$, związany ze sceną, obrano tak, by jego punkt zerowy znajdował się na przecięciu osi optycznych kamer, zaś osie X , Y , Z były współliniowe z osiami układów odniesienia kamer $OXYZ^H$ i $OXYZ^V$.

Układ współrzędnych związany z kamerą zaczepiony jest w jej ognisku optycznym, przy czym oś Z narzucona jest przez oś optyczną kamery, zaś kierunki osi X i Y określone są przez kierunki współrzędnych pikselowych X i Y obrazu utworzonego w kamerze. Obraz ten wyobrażany jest w płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej (Z^H lub Z^V odpowiednio dla kamer H , V) przed punktem ogniskowym układu optycznego kamery skupiającym wiązkę światła wpadającą do kamery, w odległości równej parametrowi ogniskowej.

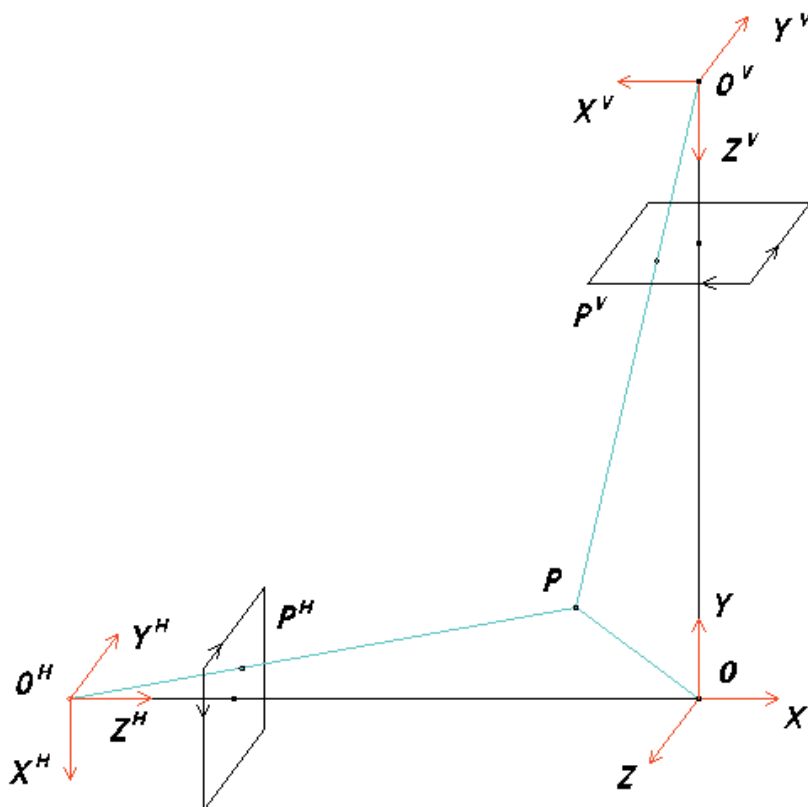
Piksele opisujące położenie punktu na otrzymanym obrazie, uzyskiwane z rzeczywistego systemu wizyjnego, przedstawiane są w układzie odnoszącym się do lewego, górnego wierzchołka obrazu. Przejście do wybranego wyżej układu odniesienia wiąże się więc jedynie z wstępnym przesunięciem pikseli o wektor wyznaczony przez centralny punkt obrazu.

Należy zaznaczyć, że przytoczone układy współrzędnych przedstawiają położenie w różnych skalach. W układzie $OXYZ$ odległość przyjmowana jest w mm , układy kamer zorientowane zaś są na pikselowy opis obiektu.

Miejsce usytuowania kamer nie było znane precyzyjnie, zrezygnowano też z dokonania stosownych pomiarów. Podobnie, za nieznanne przyjęto parametry układu optycznego, jak i wymiary pojedynczego pikselu na matrycy CCD, a więc zestaw parametrów wewnętrznych kamer.

Przy tak określonych ograniczeniach podjęto próbę rozwiązania problemu rekonstrukcji położenia obiektu w przestrzeni trójwymiarowej. W tym celu należało na wstępie przyjąć model kamery, następnie opracowano metodę kalibracji parametrów modelu opartą o dostępną próbkę punktów przestrzeni 3D i ich obrazów w kamerach H i V (tj. bazującą na współrzędnych punktów w układzie $OXYZ$ i pikselach położenia ich obrazów). Na końcu przygotowano

sposób wyznaczania współrzędnych punktu w przestrzeni na podstawie pikseli położenia jego obrazów H i V .



Rys. 1. Schemat ilustrujący formowanie obrazów P^H , P^V punktu P w dwukamerowym systemie wizyjnym. Zaznaczono układ współrzędnych przestrzeni $OXYZ$ oraz układy współrzędnych $OXYZ^H$, $OXYZ^V$ związane z kamerami H i V (usytuowane w punktach stanowiących ogniska układów optycznych O^H , O^V kamer). Na prostokątach wyobrażających miejsce tworzenia się obrazu (położonych w odległościach ogniskowych kamer od punktów O^H , O^V) oznaczono kierunki dwuwymiarowego układu, w którym przedstawiane są piksele obrazu.

2. MODEL KAMERY

2.1. Projektacja obrazu

Przy ustalaniu modelu kamery przyjęto następujące założenia dotyczące optyki kamery i przetwarzania obrazu:

- projekcja obrazu w oparciu o obiektyw punktowy
- kwadratowy kształt pikseli obrazu
- liniowość układu optycznego kamer
- oś optyczna kamery H leży na osi X układu współrzędnych
- oś optyczna kamery V leży na osi Y układu współrzędnych

Sposób formowania obrazu w kamerach przedstawiono na rys. 1, przy czym indeksem i oznaczono rozpatrywane punkty sceny P [2]. Punkt $P_i(x_i, y_i, z_i)$ przestrzeni opisanej w układzie ortokartezjańskim $OXYZ$ przekształcony jest względem punktu centralnego transformacji $O^H(K^H, 0, 0)$, w punkt $P_i^H(x_i^H, y_i^H, z_i^H)$. Punkt P_i^H , będący obrazem punktu P_i , położony jest

na płaszczyźnie prostopadłej do osi X odległej o F^H od środka przekształcenia, które znajduje się w ognisku układu optycznego kamery.

Wychodząc z parametrycznego równania prostej (promienia światła tworzącego obraz punktu) wyznaczonej przez punkty O^H, P_i

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i - K^H \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} t + \begin{bmatrix} K^H \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

i uwzględniając związek łączący skalę współrzędnych obrazu punktu, przedstawionego w układzie $OXYZ$, ze skalą położenia obrazu w układzie współrzędnych kamery $OXYZ^H$ wyrażonego w pikselach

$$-\lambda \cdot x_{P_i}^H = y_i^H, \quad -\lambda \cdot y_{P_i}^H = z_i^H, \quad \lambda \cdot F_p^H = F^H; \quad (2)$$

uzyskujemy równanie wiążące piksele obrazu punktu ze współzrędnymi jego położenia 3D w układzie sceny

$$-\lambda \cdot \begin{bmatrix} -F_p^H \\ x_{P_i}^H \\ y_{P_i}^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i - K^H \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \cdot t \quad (3)$$

Odpowiednie równanie dla kamery V przyjmuje postać

$$-\lambda \cdot \begin{bmatrix} x_{P_i}^V \\ F_p^V \\ y_{P_i}^V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i - K^V \end{bmatrix} \cdot t \quad (4)$$

2.2. Kalibracja kamer

Dysponując parą punktów P_1, P_2 oraz ich obrazami P_1^H, P_2^H uzyskanymi przy pomocy kamery H , można wyznaczyć wartości parametrów K^H i F_p^H . Po podstawieniu znanych współrzędnych punktów sceny i wartości pikseli ich obrazów do równania (3), uzyskuje się układ równań jednoznacznie określający te parametry. Jego rozwiązanie prowadzi do następujących zależności dla parametrów modelu kamery:

$$K^H = \frac{x_2 \cdot d_2 - x_1 \cdot d_1}{d_2 - d_1} \quad \text{oraz} \quad F_p^H = x_1 \cdot d_1 - K^H \cdot d_1 \quad (5)$$

gdzie

$$d_i = \frac{-x_{P_i}^H}{y_i} \quad (6)$$

Podobnie, na podstawie równania (4), można określić parametry modelu kamery V .

$$K^V = \frac{z_2 \cdot d_2 - z_1 \cdot d_1}{d_2 - d_1} \quad \text{oraz} \quad F_p^V = z_1 \cdot d_1 - K^V \cdot d_1 \quad (7)$$

gdzie

$$d_i = \frac{-x_{Pi}^V}{x_i} \quad (8)$$

W obu przypadkach wymagane jest jedynie, by wybrane punkty nie leżały na płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej rozpatrywanej kamery, oraz by miały niezerowe współrzędne. Nieznajomość współczynnika skali λ nie ma tutaj znaczenia, gdyż parametr ten zredukowany jest przez zmianę zmiennej niezależnej równania.

2.3. Algorytm kalibracji

Parametry modelu kamery H można wyznaczyć postępując zgodnie z następującą procedurą:

- wyznaczyć współrzędne (x, y, z) dla N par punktów P_1, P_2 oraz współrzędne pikselowe (x_p^H, y_p^H) ich obrazów w kamerze H
- dla każdej pary punktów P_1, P_2
 - wyznaczyć d_1, d_2 wg zależności (6)
 - wyznaczyć K^H, F_p^H wg zależności (5)
- za ostateczne parametry K^H, F_p^H kamery H przyjąć wartość średnią z obliczeń dla poszczególnych par punktów.

Odpowiednie parametry modelu K^V, F_p^V dla kamery V wyznaczamy w podobny sposób z zależności (8) i (7), korzystając z pikselowych współrzędnych (x_p^V, y_p^V) obrazów punktów otrzymanych kamerą V .

3. REKONSTRUKCJA POŁOŻENIA PUNKTU W PRZESTRZENI 3D

3.1. Metoda minimalnej odległości prostych projekcji obrazu

Zadaniem jest wyznaczenie współrzędnych (x, y, z) punktu P na podstawie znanych współrzędnych pikselowych (x_p^H, y_p^H) i (x_p^V, y_p^V) jego obrazów uzyskanych odpowiednio kamerą H i V .

Wektor wodzący $[x_p^H; y_p^H; F_p^H]^T$ obrazu punktu P w kamerze H , przedstawiony w układzie współrzędnych kamery H , jest równoległy do wektora kierunkowego prostej l^H promienia tworzącego obraz. Równanie parametryczne tej prostej w układzie $OXYZ$ można więc zapisać w postaci

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} \cdot r + \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

gdzie

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_p^H \\ x_p^H \\ y_p^H \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K^H \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Dla promienia l^H tworzącego obraz kamery V odpowiednie równanie parametryczne prostej ma postać

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \cdot t + \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

gdzie

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p^V \\ F_p^V \\ y_p^V \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K^V \end{bmatrix} \quad (12)$$

Poszukiwany punkt P powinien znajdować się na przecięciu prostych l^H i l^V . Uwzględniając w równaniach prostych rzeczywiste dane obrazów, jakie pobierane są z systemu wizyjnego, proste te nie muszą się jednak przecinać. Aproxymacji punktu przecięcia można dokonać posługując się odcinkiem wyznaczającym odległość pomiędzy prostymi. Na wstępie na prostych należy znaleźć punkty, pomiędzy którymi odległość przyjmuje minimalną wartość. Minimum osiągane jest dla parametrów r^H , t^V wyznaczonych zależnością

$$\begin{bmatrix} r^H \\ t^V \end{bmatrix} = A^{-1} \times B \quad (13)$$

gdzie macierze A , B określone są następująco

$$A_{11} = \sum_{i=1}^3 h_i^2, \quad A_{12} = A_{21} = \sum_{i=1}^3 -h_i v_i, \quad A_{22} = \sum_{i=1}^3 v_i^2, \quad (14)$$

$$B_{11} = \sum_{i=1}^3 -h_i (p_i - q_i), \quad B_{21} = \sum_{i=1}^3 v_i (p_i - q_i)$$

Za poszukiwany punkt przestrzeni $P(x, y, z)$ możemy przyjąć środek odcinka łączącego proste l^H i l^V , którego końce w równaniach prostych wyznaczają parametry r^H i t^V :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{l^H(r^H) + l^V(t^V)}{2} \quad (15)$$

3.2. Algorytm rekonstrukcji położenia

Rekonstrukcję położenia obiektu w przestrzeni można przeprowadzić (po uprzednim wyznaczeniu parametrów modelu dla obu kamer) na podstawie jego dwuwymiarowych obrazów zgodnie z następującą procedurą:

- zdjąć obraz punktu $P(x,y,z)$ przy pomocy kamery H i kamery V , a następnie pobrać pikselowe współrzędne obrazu punktu (x_p^H, y_p^H) dla kamery H oraz (x_p^V, y_p^V) dla kamery V

- wyznaczyć współrzędne wektorów \mathbf{h} , \mathbf{p} wg zależności (10) oraz wektorów \mathbf{v} , \mathbf{q} wg zależności (12)
- wyznaczyć macierze \mathbf{A} , \mathbf{B} wg zależności (14)
- wyznaczyć wartości parametrów r^H , t^V wg zależności (13)
- wyznaczyć współrzędne (x, y, z) poszukiwanego punktu P wg zależności (9), (11), (15)

4. PRZYKŁADOWA REKONSTRUKCJA POŁOŻENIA OBIEKTU

Stanowisko do przeprowadzenia testów opracowanej metody zbudowano w oparciu o doświadczalne gniazdo pracy robota KUKA KR16 i układ dwóch kamer monochromatycznych NeuroCheck FWX05-II. Były to kamery o rozdzielczości 782x582 pikseli, wyposażone w matryce CCD o kwadratowym kształcie pikseli, sprzężone łączem FireWire z komputerem PC odczytującym obrazy obserwowanych obiektów.

Jedną z kamer (oznaczoną symbolem H) umieszczono na ujemnej półosi X układu odniesienia przestrzeni roboczej robota, w odległości około 3 m od jej punktu zerowego. Drugą kamerę (oznaczoną V) umieszczono w podobnej odległości na dodatniej półosi Y . Dołożono przy tym wszelkich starań, by osie układu współrzędnych kamer (powiązane z ich układami optycznymi) pokrywały się z osiami układu współrzędnych robota. W chwytaku robota umieszczono znacznik położenia narzędzia w postaci diody emitującej światło w zakresie widzialnym. Zadaniem kamer była obserwacja przestrzeni roboczej robota i rejestracja położenia znacznika.

Na wstępie określono zestaw punktów testowych w przestrzeni roboczej i zaprogramowano przemieszczenie robota do tych punktów. Dla każdej osiągniętej pozycji rejestrowano położenie znacznika w układzie współrzędnych robota oraz współrzędne pikselowe uzyskanych obrazów znacznika.

Na punkty testowe wybrano punkty osi X , Y , Z 1 w zakresie od -500 mm do 500 mm, co wyczerpywało kąt widzenia kamer, oraz wierzchołki sześcianu o krawędzi 400 mm, umieszczonego centralnie w środku układu współrzędnych.

Wierzchołki sześcianu posłużyły jako punkty kalibracji do wyznaczenia parametrów modelu kamer, tj. położenia ogniska układu optycznego kamery na wyróżnionej osi przestrzeni roboczej oraz wielkość ogniskowej. W dalszej kolejności przeprowadzono kalibrację przy pomocy przygotowanej w środowisku Matlab aplikacji z zaprogramowanym, samodzielnym doбором dostępnych punktów obliczeniowych. W wyniku wykonanych obliczeń uzyskano następujące wartości parametrów systemu wizyjnego:

$$K^H = -2693,2 \quad F_p^H = 1973,8$$

$$K^V = 2612,8 \quad F_p^V = 1965,9$$

Powyższymi parametrami zestrojono aplikację rekonstrukcji położenia 3D obiektów (również opracowaną w środowisku Matlab). Następnie, przy pomocy tej aplikacji, odtworzono położenie punktów testowych na podstawie danych, które program NeuroCheck zarejestrował w oparciu o obrazy uzyskane z kamer. Aplikacja jest kompatybilna z oprogramowaniem NeuroCheck pod względem standardu danych pobieranych z kamer i prowadzi ich interpretację bez operatorskiego wspomaganie. W tab. 1 zgromadzono uzyskane wyniki.

a)

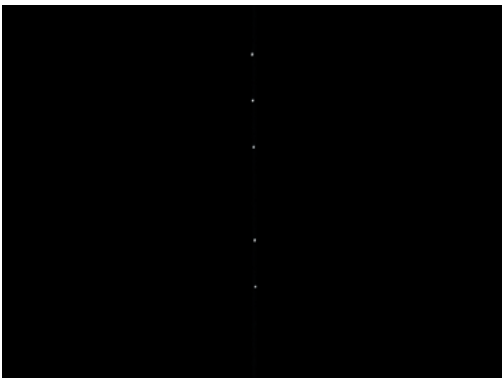


b)

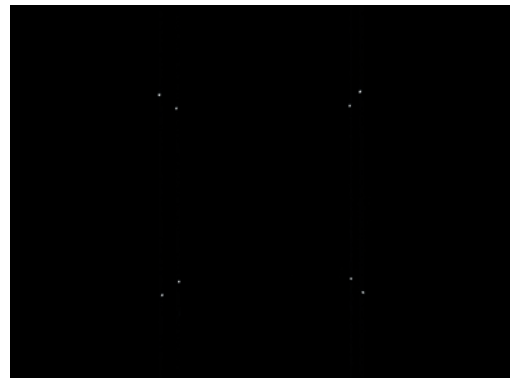


Rys. 2. Przykładowe obrazy punktów testowych uzyskane kamerą H - a) obraz wybranych punktów osi Y ; b) obraz wierzchołków sześcianu o boku 400 mm.

a)



b)



Rys. 3. Przykładowe obrazy punktów testowych uzyskane kamerą V - a) obraz wybranych punktów osi Z ; b) obraz wierzchołków sześcianu o boku 400 mm.

Tab. 1. Wyniki rekonstrukcji współrzędnych punktów testowych w przestrzeni roboczej na podstawie ich obrazów (położenie punktów w układzie współrzędnych $OXYZ$ przedstawiono w mm)

punkty testowe			punkty odtworzone			odległość
x	y	z	x	y	z	d
0	0	0	-0,35	-0,08	0,14	0,4
100	0	0	100,4	0,06	-0,34	0,5
200	0	0	201	0,06	-0,48	1,1
300	0	0	300,56	-0,09	-0,69	0,9
500	0	0	498,07	-0,1	-1,04	2,2
-100	0	0	-100,15	0,18	0,33	0,4
-200	0	0	-199,95	0,3	0,46	0,6
-300	0	0	-299,13	-0,07	0,52	1
-500	0	0	-493,88	-0,29	1,27	6,3
0	100	0	-1,74	100,82	0,14	1,9
0	200	0	-3,51	200,51	0,53	3,6
0	300	0	-5,25	300,2	0,66	5,3
0	500	0	-9,43	495,93	1,4	10,4

0	-100	0	1,71	-100,43	-0,34	1,8
0	-200	0	3,63	-200,52	-0,63	3,7
0	-300	0	5,54	-300,88	-0,84	5,7
0	-500	0	9,4	-498,76	-0,74	9,5
0	0	100	0,33	0,2	100,18	0,4
0	0	200	0,56	0,03	200,45	0,7
0	0	300	0,99	0,06	300,06	1
0	0	-100	-0,35	-0,09	-100,58	0,7
0	0	-200	-0,87	-0,08	-200,33	0,9
0	0	-300	-0,59	0,07	-300,04	0,6
200	200	200	196,98	200,5	200,1	3,1
-200	200	200	-201,85	200,21	200,8	2
-200	-200	200	-194,84	-200,68	199,78	5,2
200	-200	200	205	-200,5	199,44	5,1
200	200	-200	196,07	200,37	-199,99	3,9
-200	200	-200	-203,82	199,94	-198,93	4
-200	-200	-200	-196,76	-200,34	-200,03	3,3
200	-200	-200	203,35	-199,82	-201,1	3,5

PODSUMOWANIE

Opisana tu metoda pozwala określić położenie obiektu w trójwymiarowej przestrzeni na podstawie danych uzyskiwanych z dwukamerowego systemu wizyjnego (o prostopadłych osiach optycznych leżących w jednej płaszczyźnie), obserwującego ten obiekt. Metoda została zaimplementowana w środowisku Matlab, a opracowana w tym celu aplikacja jest zintegrowana z oprogramowaniem użytkowym systemu wizyjnego. Rekonstrukcji położenia dokonuje się z jej pomocą przy minimalnym nakładzie obliczeń.

W zastosowanej metodzie wykorzystano liniowy, dwuparametrowy model projekcji obrazu kamery, zbudowany przy założeniu braku znajomości zarówno parametrów wewnętrznych kamery, jak i dokładnego usytuowania kamer. Parametry modelu wyznaczono w oparciu o zestaw wzorcowych punktów kalibracji obrany wewnątrz docelowego pola roboczego.

Przedstawiona metoda cechuje się prostotą zastosowanego algorytmu, wymaga jednak precyzyjnego zestawienia układu kamer w jednej płaszczyźnie z osiami optycznymi leżącymi prostopadle do siebie. Wyznaczone przez aplikację położenie obserwowanego obiektu jest obciążone błędem rzędu pojedynczych milimetrów, przy scenie systemu wizyjnego obejmującej obszar około 1 m w każdym kierunku. Wielkość błędu zależna jest od miejsca, w którym znajduje się obserwowany obiekt.

Zasadniczych źródeł błędów rekonstrukcji należy dopatrywać się w występowaniu następujących czynników:

- rozbieżności pomiędzy kierunkami układów odniesienia poszczególnych kamer, a kierunkami układu współrzędnych przestrzeni roboczej
- błędy odwzorowania projekcji obrazu przy pomocy zastosowanego modelu kamery

Stąd wydaje się, że dla uzyskania lepszych efektów rekonstrukcji, tj. zmniejszenia jej błędów, należy:

- rozwinąć model uwzględniając rzeczywiste położenie kamery, w szczególności rzeczywiste kierunki jej układu odniesienia względem układu współrzędnych przestrzeni roboczej
- wprowadzić do modelu nieliniowy opis projekcji obrazu kamery
- uwzględnić rzeczywisty kształt pikseli obrazu.

LITERATURA

- [1] Cyganek Bogusław; Komputerowe przetwarzanie obrazów trójwymiarowych; Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT Warszawa 2002.
- [2] Ma, Soatto, Kosecka and Sastry; An Invitation to 3D Vision: From Images to Geometric Models; Springer Verlag 2003.
- [3] Liviu Toma; Using Stereo Vision to Realize 3D Accurate Measurements: Analysis, Improvements and Contributions; PhD Thesis; 2004.
- [4] Tadeusz Trajdos; Matematyka III; WNT Warszawa 1981.