

**Dariusz RZESZOTARSKI**

INSTYTUT ELEKTRONIKI,  
ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź

**Procedury rekonstrukcji scen trójwymiarowych ze stereoskopii**

Mgr inż. Dariusz RZESZOTARSKI

W roku 2002 ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektroniki i Elektrotechniki, na kierunku Elektronika i Telekomunikacja. W roku 2004 podjął pracę w Instytucie Elektroniki na stanowisku naukowo-technicznym. Jego obecne zainteresowania naukowe koncentrują się na opracowywaniu programów komputerowych do rekonstrukcji scen trójwymiarowych na podstawie obrazów stereowizyjnych.



e-mail: [dariusz.rzeszotarski@p.lodz.pl](mailto:dariusz.rzeszotarski@p.lodz.pl)

**Streszczenie**

W niniejszym artykule przedstawiono nową procedurę rekonstrukcji scen trójwymiarowych na podstawie pary współrzędnych obrazowych obserwowanych punktów. Zaproponowaną procedurę odniesiono do istniejących rozwiązań. Przeprowadzono również analizę wpływu parametrów orientacji wzajemnej między kolejnymi położeniami kamery na dokładność rekonstrukcji. Zaprezentowano wyniki rekonstrukcji syntetycznych punktów uzyskanych przy pomocy opracowanej aplikacji modelującej ruch kamery.

**Słowa kluczowe:** rekonstrukcja scen trójwymiarowych, stereowizja, kalibracja kamer, obrazy termowizyjne.

**Reconstruction methods for 3D scenes from stereoscopy****Abstract**

In this paper a new procedure for reconstruction of 3D scenes is presented. It is an extension of the method presented in [6], in which 3D reconstruction is performed by means of a  $4 \times 4$  re-projection matrix on a pair of rectified stereo images. Here the  $4 \times 4$  re-projection matrix is extended to general motion between two cameras or one moving camera constituting a stereoscopic set. First, the proposed reconstruction algorithm from the stereoscopic set of images is explained in detail. Two different approaches are compared: two cameras approach against a single moving camera case (Fig. 1). Next  $4 \times 4$  re-projection matrix is derived for the general motion case. In Section 3 there is presented a method for evaluating the influence of camera motion parameters on the value of a 3D coordinate depth component of the reconstructed points by means of an extended re-projection matrix. Section 4 contains the results obtained by means of a special application designed for modeling motion of the camera and projection of test points used for evaluating the presented method (Fig. 2). In Fig. 3 there are defined the motion parameters used for evaluating the relation between the camera motion and the depth component estimation. Plots in Figs. 4, 5 show a dependence of the depth component value and its derivative, respectively, on the angle between  $x$  and  $z$  components of the translation vector for different camera frame rotation angles. Plots in Figs. 6, 7 present a dependence of the depth component value and its derivative, respectively, on the horizontal disparity for different camera frame rotation angle. The obtained results show that introducing rotation between cameras in a stereoscopic set can enhance the depth evaluation. The extended re-projection matrix includes, in a closed form, all necessary parameters for 3D scenes reconstruction.

**Keywords:** 3D scene reconstruction, stereovision, cameras calibration, thermal images.

**1. Rekonstrukcja scen trójwymiarowych ze stereoskopii**

Procedury wyznaczania położenia punktów kluczowych występujących w obserwowanej scenie trójwymiarowej są podstawą działania każdego wizyjnego i termowizyjnego systemu wykorzystywanego do trójwymiarowego odwzorowania oraz do nawigacji [1, 2, 3].

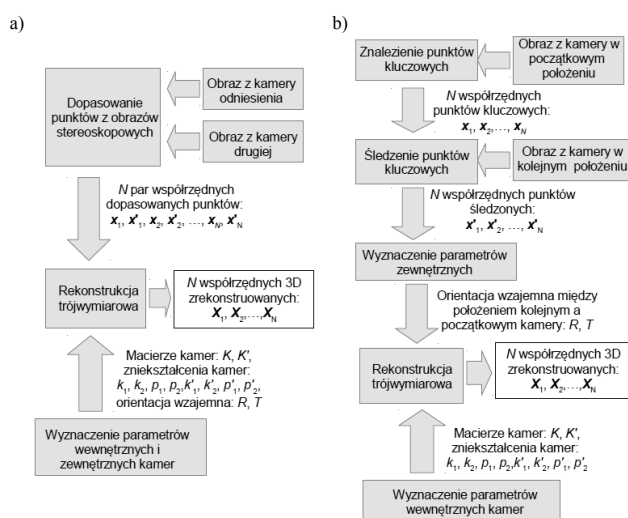
Pojęcie rekonstrukcji sceny trójwymiarowej odnosi się do obliczenia współrzędnych przestrzennych punktów należących do

obserwowanego obiektu na podstawie par znanych współrzędnych pikseli z obrazów kamer w układzie stereoskopowym.

W opisanym algorytmie rekonstrukcji przyjęto, że układ stereoskopowy kamer jest skalibrowany, tzn. znane są parametry wewnętrzne kamer oraz ich wzajemna orientacja [3]. Znane są również dla obydwu kamer współrzędne obrazowe odwzorowywanych punktów sceny. Niewiadomymi są natomiast współrzędne przestrzenne tych punktów. Rekonstrukcja sceny trójwymiarowej, czyli obliczenie współrzędnych przestrzennych obserwowanych punktów jest poprzedzana dwoma innymi ważnymi procedurami [3]: (1) wyznaczeniem parametrów wewnętrznych kamer oraz parametrów zewnętrznych, (2) znalezieniem w obrazach stereoskopowych par punktów reprezentujących te same punkty w rekonstruowanej przestrzeni.

W przypadku tradycyjnych układów stereoskopowych (rysunek 1a) użyte kamery znajdują się na sztywnym statywie, ich obiektywy mają stałe ogniskowe i procedura kalibracji może być wykonana jednokrotnie, ponieważ podczas obserwacji rekonstruowanej sceny parametry wewnętrzne i zewnętrzne stereoskopowego układu nie zmieniają się. Do etapu drugiego wykorzystane są wówczas tzw. algorytmy dopasowujące, których zadaniem jest znalezienie dla wszystkich punktów lub jedynie dla grupy kluczowych punktów z obrazu kamery odniesienia, współrzędnych odpowiadających im punktów z obrazu drugiej kamery, reprezentujących te same punkty w przestrzeni.

W przypadku, gdy do rekonstrukcji wykorzystana jest para obrazów z pojedynczej kamery (rysunek 1b) znajdującej się w dwóch różnych nie znanych a priori położeniach względem rekonstruowanego obiektu, przemieszczenie kamery jest niewiadomą, której nie da się jednorazowo oszacować.



Rys. 1. Procedury poprzedzające rekonstrukcję sceny trójwymiarowej w przypadku: a) stereoskopowego układu składającego się z dwóch różnych skalibrowanych kamer o niezmienną orientacją wzajemną, b) pojedynczej skalibrowanej kamery wykonującej nieznaną ruch względem rekonstruowanego obiektu

Fig. 1. Methods preceding 3D scene reconstruction in case of: a) stereoscopic set consisting of two different calibrated cameras of which relative position remains unchanged, b) single calibrated camera moving in the scene being reconstructed

Przy założeniu, że kamera posiada obiektyw o stałej ogniskowej, można jednorazowo wyznaczyć jedynie jej parametry wewnętrzne. W takim przypadku współrzędne par punktów obrazowych reprezentujących te same punkty w przestrzeni muszą być wyznaczone w pierwszej kolejności i na ich podstawie dokonuje się oszacowania parametrów określających przemieszczenie kamery. Ostatnim etapem jest obliczenie współrzędnych przestrzennych.

Niewiadomą dla procedury rekonstrukcji punktu  $P$  jest zatem jego współrzędna przestrzenna  $\mathbf{X} = [X, Y, Z]^T$ . Wiadomymi są: współrzędne  $\mathbf{x} = [x, y, 1]^T$ ,  $\mathbf{x}' = [x', y', 1]^T$  obrazów rekonstruowanego punktu w kamerach stanowiących układ stereoskopowy, parametry wewnętrzne w postaci macierzy kamer  $K$ ,  $K'$  (lub pojedynczej kamery  $K$ ), parametry zewnętrzne w postaci macierzy obrotu  $R$  oraz wektora przesunięcia  $T$  określające wzajemne położenie pary kamer (lub przemieszczenie pojedynczej kamery). Problem wyznaczenia położenia punktu w scenie trójwymiarowej można zapisać w przypadku braku zniekształceń za pomocą następujących równań:

$$Z\mathbf{x} = K\mathbf{X}, \quad (1)$$

$$Z'\mathbf{x}' = K'\mathbf{X}', \quad (2)$$

$$\mathbf{X}' = R\mathbf{X} + T, \quad (3)$$

gdzie macierz kamery jest zdefiniowana jako:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

gdzie  $f_x = f/h_x$ ,  $f_y = f/h_y$ ;  $h_x$ ,  $h_y$  są rozmiarami pojedynczego piksela odpowiednio w kierunku osi  $x$  i  $y$  dwuwymiarowego układu odniesienia związanego z płaszczyzną przetwornika obrazowego kamery,  $f$  jest ogniskową obiektywu kamery,  $c_x$ ,  $c_y$  są współrzędnymi przecięcia osi  $Z$  układu kamery z płaszczyzną przetwornika. Oznaczenie  $K'$  wykorzystywane jest, gdy macierz drugiej kamery lub kamery znajdującej się w kolejnym położeniu różni się od macierzy kamery pierwszej lub znajdującej się w początkowym położeniu.

W idealnym przypadku układ równań (1)-(3) powinien mieć jedno rozwiązanie w postaci współrzędnych przestrzennych punktu wyrażonych w układzie związanym z kamerą odniesienia ( $\mathbf{X}$ ) lub z kamerą drugą ( $\mathbf{X}'$ ), co wynika z tego, że proste wychodzące z ognisk  $c$ ,  $c'$  kamer w układzie stereoskopowym oraz przechodzące przez obrazy odpowiednio  $p$ ,  $p'$  powinny przecinać się w przestrzeni w punkcie  $P$  ( $P'$ ) o współrzędnych  $\mathbf{X}$  ( $\mathbf{X}'$ ). W rzeczywistości współrzędne  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{x}'$  punktów kluczowych  $p$ ,  $p'$  będących obrazami rekonstruowanego w przestrzeni punktu  $P$  są obciążone błędem wynikającym między innymi z zakłóceń występujących w przetwornikach kamer. Błąd ten powoduje, że proste przechodzące przez obrazy  $p$  i  $p'$  oraz przez ogniska odpowiadających im kamer nie będą się przecinać. Możliwe jest zatem jedynie oszacowanie współrzędnych rekonstruowanego punktu, np. metodą najmniejszych kwadratów.

Istnieją różne sposoby oszacowania współrzędnych  $\mathbf{X} = [X, Y, Z]^T$ : (1) oszacowanie metodą najmniejszych kwadratów współrzędnych przestrzennych jednorodnych [1, 4]; (2) oszacowanie metodą najmniejszych kwadratów jedynie głębi rekonstruowanego punktu (składowej  $Z$ ) [5]; (3) oszacowanie współrzędnych przestrzennych za pomocą macierzy reprojekcji (nazwaną tu macierzą rekonstrukcji stereoskopowej) w przypadku obrazów poddanych rektyfikacji, czyli dla kanonicznego stereoskopowego układu kamer [6]. Zaproponowana metoda łączy w sobie następujące zalety: może być wykorzystana dla układu kamer o dowolnej orientacji, ponadto tak jak w przypadku metody (3) do obliczenia współrzędnych przestrzennych wykorzystuje trzelementowy wektor uwzględniający dysparycję oraz współrzędne pikseli.

## 2. Oszacowanie współrzędnych przestrzennych za pomocą macierzy reprojekcji dla stereoskopowego układu kamer o dowolnej orientacji

Pojęcie macierzy reprojekcji użyte jest [6] w odniesieniu do rekonstrukcji sceny trójwymiarowej za pomocą kanonicznego układu stereoskopowego. Układ kanoniczny jest szczególnym przypadkiem układu stereoskopowego o dowolnej orientacji wzajemnej kamer, w którym macierz obrotu jest jednostkowa a przesunięcie występuje jedynie w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny

obrazów kamer, czyli np. gdy  $T = [T_x, 0, 0]^T$ . Na potrzeby dalszej analizy wprowadzono nowe pojęcie macierzy rekonstrukcji stereoskopowej (zwanej dalej macierzą rekonstrukcji) będące rozwinięciem pojęcia macierzy reprojekcji do przypadku ogólnego o dowolnej orientacji wzajemnej kamer.

Z równań (1)-(3) można wyznaczyć składową  $Z$  współrzędnych przestrzennych rekonstruowanego punktu  $P$  dla układu związaneego z kamerą odniesienia w następujący sposób. Ze wzoru (1):  $\mathbf{X} = ZK^{-1}\mathbf{x}$ . Podstawiając uzyskaną zależność do wzoru (3) a następnie podstawiając (3) do (2) i dalszych przekształceń można otrzymać układ równań w następującej postaci:

$$B\mathbf{x}Z + \mathbf{x}'Z = K'T, \quad (5)$$

gdzie:

$$B = -K'RK^{-1}. \quad (6)$$

Układ równań (5) przedstawia zależność między współrzędnymi obrazowymi  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{x}'$  a składową  $Z$  ( $Z'$ ) odpowiadającego punktu  $P$  ( $P'$ ) w układzie współrzędnych związanym z kamerą odniesienia (drugą kamerą). Układ równań (5) można rozpaść w następujący sposób:

$$\begin{aligned} b_1\mathbf{x}Z + \mathbf{x}'Z &= f'_xT_x + c'_xT_z \\ b_2\mathbf{x}Z + \mathbf{y}'Z &= f'_yT_y + c'_yT_z \\ b_3\mathbf{x}Z + Z &= T_z, \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  są wektorami wierszowymi macierzy  $B$ .

W celu wyznaczenia składowych  $Z$ ,  $Z'$  na podstawie współrzędnych obrazowych punktu  $p$  w obrazie odniesienia oraz składowej  $\mathbf{x}'$  ze współrzędnych punktu  $p'$  z obrazu drugiego, należy rozwiązać układ równań składający się z pierwszego i trzeciego równania układu równań (7). Zdefiniujemy dysparycję horyzontalną jako:

$$d_x = x - x'. \quad (8)$$

Składowa  $Z$  współrzędnych przestrzennych wyznaczona na podstawie pierwszego i trzeciego równania układu (7), ma postać przy uwzględnieniu, że  $x' = x - d_x$ :

$$Z = \frac{f'_xT_x + c'_xT_z - (x - d_x)T_z}{b_1x - (x - d_x)b_3}. \quad (9)$$

Zdefiniujemy macierz rekonstrukcji stereoskopowej  $Q$ , jako macierz  $4 \times 4$  określającą zależność między współrzędnymi przestrzennymi  $\mathbf{X} = [X, Y, Z]^T$  a współrzędnymi obrazu  $\mathbf{x} = [x, y]^T$  w kamerze odniesienia oraz dysparycją  $d$ , w następujący sposób:

$$W \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} x \\ y \\ d_x \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

gdzie:  $W = 1/Z$ . Natomiast macierz rekonstrukcji  $Q$  można określić w następujący sposób:

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{f_x} & 0 & 0 & -\frac{c_x}{f_x} \\ 0 & \frac{1}{f_y} & 0 & -\frac{c_y}{f_y} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

gdzie elementy  $q_{41} \dots q_{44}$ , dla macierzy rekonstrukcji dla dysparycji horyzontalnej  $d_x$  mają postać:

$$\begin{aligned}
 q_{41} &= \frac{b_{11} - (x - d_x)b_{31} - b_{33}}{f'_x T_x + c'_x T_z - (x - d_x)T_z} \\
 q_{42} &= \frac{b_{12} - (x - d_x)b_{32}}{f'_x T_x + c'_x T_z - (x - d_x)T_z} \\
 q_{43} &= \frac{b_{33}}{f'_x T_x + c'_x T_z - (x - d_x)T_z} \\
 q_{44} &= \frac{b_{13}}{f'_x T_x + c'_x T_z - (x - d_x)T_z}
 \end{aligned} \quad (12)$$

Wzór (11) definiuje macierz rekonstrukcji dla układu kamer o dowolnej orientacji i różnych parametrów wewnętrznych. Dla przypadku kanonicznego, tzn. gdy  $R = \mathbf{1}$ ,  $T = [T_x, 0, 0]^T$ , oraz gdy  $f_x = f'_x$ , wzór (11) przyjmuje znaną wcześniej postać wyprowadzoną dla macierzy reprojekcji [6]. Jedynie dla przypadku kanonicznego współczynniki macierzy rekonstrukcji nie zależą od współrzędnych obrazowych a jedynie od parametrów wewnętrznych i zewnętrznych stereoskopowego układu kamer.

Macierz rekonstrukcji zdefiniowana wzorem (11) uwzględnia jedynie wpływ dysparycji horyzontalnej na współrzędne przestrzenne rekonstruowanego punktu i ma zastosowanie, gdy różnica w składowych horyzontalnych pary współrzędnych obrazowych przeważa nad różnicą między składowymi wertykalnymi. W analogiczny sposób można wyprowadzić wzór na macierz rekonstrukcji dla dysparycji wertykalnej  $d_y = y - y'$ , wykorzystując równanie drugie i trzecie z układu równań (7).

### 3. Wpływ parametrów orientacji wzajemnej na błąd składowej głębi współrzędnych przestrzennych

Współrzędne obrazowe śledzonych punktów kluczowych, wykorzystane do oceny parametrów ruchu kamery, obarczone są błędem wynikającym z (1) zakłóceń, które występują w obrazie oraz (2) sposobu definiowania cechy punktów kluczowych.

Błąd, którym obarczone są współrzędne obrazowe punktów kluczowych będzie miał wpływ na oszacowaną na ich podstawie macierz zasadniczą, a w dalszej kolejności na oszacowane parametry ruchu i wreszcie na zrekonstruowane współrzędne przestrzenne [5]. Współrzędne przestrzenne  $X_i = [X_i, Y_i, Z_i]^T$  zrekonstruowanych punktów zależą od ich współrzędnych obrazowych  $x_i = [x_i, y_i]^T$ ,  $x'_i = [x'_i, y'_i]^T$  odpowiednio dla kamery w pierwszym i kolejnym położeniu oraz od parametrów  $R$ ,  $T$  określających przemieszczenie kamery, lub orientację wzajemną między dwoma kamerami.

Warto zatem określić jak zmiana tych parametrów wpływa na zmianę wartości składowej głębi. Również interesujące jest określenie jak zmiana składowej głębi zależy od parametrów  $R$ ,  $T$ . W tym celu można określić pochodną składowej głębi w funkcji zmian współrzędnych obrazowych oraz parametrów ruchu:

$$\dot{Z}_i = J_i \dot{x}_i + J'_i \dot{x}'_i + J_R \dot{r} + J_T \dot{T}, \quad (13)$$

gdzie  $J_i$ ,  $J'_i$  są macierzami Jacobiego o wymiarach  $1 \times 2$  określającymi związek między pochodną  $\dot{Z}_i$  składowej głębi a pochodnymi  $\dot{x}_i = [\dot{x}_i, \dot{y}_i]^T$ ,  $\dot{x}'_i = [\dot{x}'_i, \dot{y}'_i]^T$  współrzędnych obrazowych.

$J_R$ ,  $J_T$  są macierzami Jacobiego o wymiarach odpowiednio  $1 \times 9$ ,  $1 \times 3$  określającymi związek między pochodną  $\dot{Z}_i$  składowej głębi a pochodnymi  $\dot{r} = [\dot{r}_{11}, \dot{r}_{12}, \dot{r}_{13}, \dot{r}_{21}, \dot{r}_{22}, \dot{r}_{23}, \dot{r}_{31}, \dot{r}_{32}, \dot{r}_{33}]^T$ ,  $\dot{T} = [\dot{T}_x, \dot{T}_y, \dot{T}_z]^T$  współrzędnych obrazowych.

Wzór (9) na składową głębi można przedstawić w funkcji współrzędnych obrazowych znormalizowanych. Dla współrzędnych znormalizowanych parametry wewnętrzne obydwu kamer mają wartości:  $f_x = f'_x = f_y = f'_y = 1$ ,  $c_x = c'_x = c_y = c'_y = 0$ , co oznacza że macierze kamer są macierzami jednostkowymi oraz macierz  $B$  ze wzoru (5) jest równa  $B = -R$ . Wówczas wzór na składową głębi

w funkcji współrzędnych obrazowych znormalizowanych można przedstawić jako:

$$Z_i = \frac{T_x - x'_i T_z}{x'_i r_3 - r_1 x_i} = \frac{a}{b}, \quad (14)$$

gdzie  $r_1, r_3$ , są wektorami wierszowymi macierzy obrotu  $R$ ,  $T_x, T_z$  są elementami wektora przesunięcia  $T$ ,  $x_i = [x_i, y_i, 1]^T$  są jednorodnymi znormalizowanymi współrzędnymi obrazowymi  $i$ -tego punktu kluczowego dla kamery w pierwszym położeniu,  $x'_i$  składową horyzontalną współrzędną obrazową  $i$ -tego punktu kluczowego dla kamery w kolejnym położeniu.

Pochodną składowej głębi można określić na podstawie wzoru (14) jako:

$$\dot{Z}_i = c \dot{T}_x - c x'_i \dot{T}_z + d x'_i \tilde{x}_i^T \dot{r}_3 - d \tilde{x}_i^T \dot{r}_1 + d(x'_i r_3 - r_1 x_i)^T \tilde{x}_i + (d r_3 \tilde{x}_i - c T_z) \dot{x}'_i, \quad (15)$$

gdzie:  $c = 1/b$ ,  $d = a/b^2$ , natomiast  $a, b$  są zdefiniowane zgodnie ze wzorem (14).

Macierze Jacobiego ze wzoru (13) można wówczas zapisać w postaci:

$$J_i = [d(x'_i r_{31} - r_{11}) \quad d(x'_i r_{32} - r_{12})] \quad (16)$$

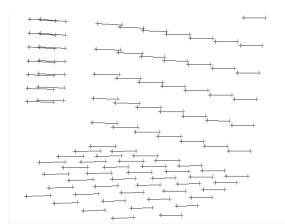
$$J'_i = [(d r_3 \tilde{x}_i - c T_z) \quad 0] \quad (17)$$

$$J_R = [-dx_i, -dy_i, -d, 0, 0, 0, dx'_i x_i, dx'_i y_i, dx'_i] \quad (18)$$

$$J_T = [c \quad -c x'_i] \quad (19)$$

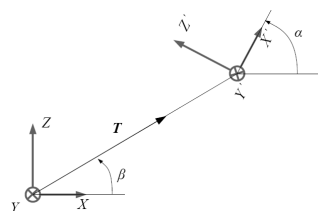
### 4. Weryfikacja procedury

Wyprowadzone zależności służące do wyznaczenia współrzędnych przestrzennych zostały zaimplementowane w języku C++ w specjalnej aplikacji przeznaczonej do kalibracji parametrów toru optycznego kamer wizyjnych i termowizyjnych oraz do rekonstrukcji sceny trójwymiarowej na podstawie obrazów wizyjnych i termowizyjnych [3, 7]. W celu weryfikacji wyprowadzonych zależności opracowany został model kamery poruszającej się w scenie, w której występują punkty testowe o znanych współrzędnych przestrzennych. Przykład obrazów zadanych punktów testowych pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Widok okna aplikacji z punktami testowymi śledzonymi przez model poruszającej się kamery. Na rysunku widoczne są punkty w obrazie kamery w położeniu początkowym (znaczniki po lewej stronie) połączone liniami prostymi z punktami widocznymi w obrazie kamery w kolejnym położeniu (znaczniki po prawej stronie)

Fig. 2. A view of an application window with projected test points tracked by the model of a moving camera. Points projected in the initial camera position (left markers) are connected by line segments with points tracked in the image given by the camera in the next position (right markers)



Rys. 3. Parametry modelowanego ruchu  
Fig. 3. Parameters of the camera motion being modeled

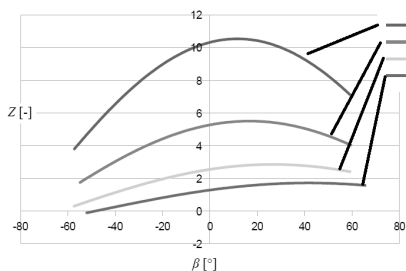
Na podstawie wprowadzonych parametrów wewnętrznych kamery oraz zadanych parametrów ruchu można wyznaczyć współrzędne obrazowe modelowanej sceny dla kamery znajdującej się w położeniu początkowym oraz w kolejnej analizowanej chwili.

Aplikacja umożliwia dodanie zakłócenia do wygenerowanych wartości współrzędnych obrazowych. Rekonstrukcja dokonywana jest za pomocą wzoru (9) na podstawie wygenerowanych współrzędnych obrazowych oraz zadanych parametrów wewnętrznych i parametrów ruchu kamery. Aplikacja umożliwia również oszacowanie parametrów ruchu na podstawie macierzy zasadniczej obliczonej za pomocą współrzędnych obrazowych śledzonych punktów sceny [1, 5, 7].

Utworzono wykresy przedstawiające wartość składowej głębokości współrzędnych przestrzennych dla arbitralnie przyjętej pary współrzędnych obrazowych w funkcji kąta  $\beta$  między składowymi  $x$  i  $z$  kierunku wektora przesunięcia (modelowany ruch odbywał się w płaszczyźnie  $x$ - $z$ ). Kąt  $\beta$  oraz kąt obrotu wokół osi  $y$  wykonywanego podczas modelowanego ruchu zdefiniowane są zgodnie z oznaczeniami z rysunku 3. Wartości składowej głębokości są podawane względem jednostkowej długości wektora przesunięcia ( $\|T\|=1\text{m}$ ).

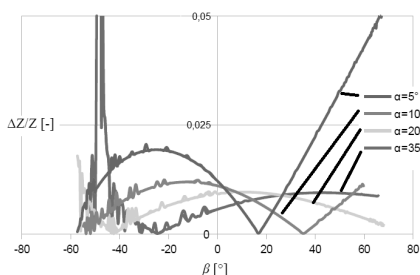
Rysunek 4 przedstawia wygenerowaną zależność wartości składowej głębokości współrzędnej przestrzennej w funkcji kąta między składowymi  $x$  i  $z$  kierunku wektora przesunięcia dla różnych kątów obrotu wokół osi  $y$  (prostopadłej do płaszczyzny ruchu) układu odniesienia poruszającej się kamery. Na wykresie na rysunku 5 pokazano zależność zmiany składowej głębokości obliczonej za pomocą wzoru (13) przy założeniu, że we współrzędnych obrazowych występuje zakłócenie o wartości porównywalnej z rozmiarem piksela, oraz przy założeniu, że w parametrach ruchu występuje zakłócenie o poziomie odpowiadającym zakłóceniu w elementach macierzy zasadniczej rzędu 0,1.

Z porównania wykresów z rysunków 4 i 5 wynika, że wraz ze wzrostem kąta obrotu wykonanego podczas przemieszczenia kamery maleje zmiana w składowej głębokości wywołana zmianą kierunku wektora przemieszczenia.



Rys. 4. Zależność wartości składowej głębokości  $Z$  w funkcji kąta  $\beta$  między składową  $x$  i  $z$  kierunku wektora przesunięcia dla różnych kątów  $\alpha$  obrotu wokół osi  $y$ . Składowa  $Z$  wyrażona jest względem jednostkowego wektora przesunięcia.

Fig. 4. Relations between the depth component  $Z$  and an angle  $\beta$  between  $x$  and  $z$  elements of translation vector for different camera frame rotation angles  $\alpha$ .  $Z$  is related to unit length translation vector

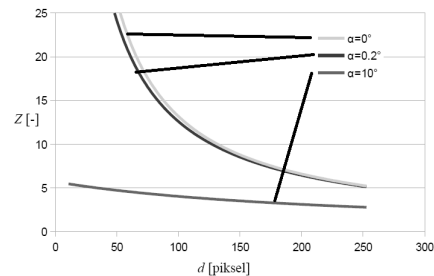


Rys. 5. Zależność zmiany składowej głębokości podzielonej przez wartość składowej głębokości  $\Delta Z/Z$  w funkcji kąta  $\beta$  między składową  $x$  i  $z$  kierunku wektora przesunięcia dla różnych kątów  $\alpha$  obrotu wokół osi  $y$

Fig. 5. Relations between the depth component derivative divided by the depth value  $\Delta Z/Z$  and the angle  $\beta$  between  $x$  and  $z$  components of the translation vector for different camera frame rotation angles  $\alpha$

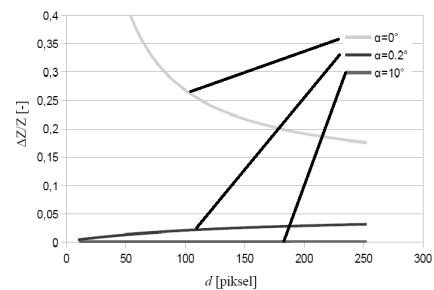
Na rysunku 6 przedstawiono zależność składowej głębokości w funkcji dysparycji horyzontalnej dla różnych kątów obrotu. Natomiast na rysunku 7 pokazano zależność zmiany składowej głębokości obliczonej za pomocą wzoru (13) w funkcji dysparycji horyzontalnej. Porównując obydwa wykresy można wnioskować, że jedynie dla

przypadku kanonicznego czyli zerowego kąta obrotu wraz ze wzrostem dysparycji wyraźnie zmienia się odległość i rośnie dokładność rekonstrukcji. W przypadku, gdy występuje nawet niewielki obrót można już zaobserwować spadek dokładności rekonstrukcji wraz ze wzrostem wartości dysparycji.



Rys. 6. Zależność wartości składowej głębokości  $Z$  w funkcji wartości dysparycji  $d$  dla różnych kątów obrotu  $\alpha$  wokół osi  $y$ . Składowa  $Z$  wyrażona jest względem jednostkowego wektora przesunięcia

Fig. 6. Relations between the depth component  $Z$  and the disparity  $d$  for different camera frame rotation angles  $\alpha$ .  $Z$  is related to unit length translation vector



Rys. 7. Zależność zmiany wartości składowej głębokości  $Z$  w funkcji wartości dysparycji  $d$  dla różnych kątów obrotu  $\alpha$  wokół osi  $y$

Fig. 7. Relations between the depth component  $Z$  derivative and the disparity  $d$  for different camera frame rotation angles  $\alpha$

## 5. Wnioski

W pracy opisano nową metodę rekonstrukcji współrzędnych przestrzennych na podstawie pary obrazów rejestrowanych przez kamery o dowolnej wzajemnej orientacji. Wyprowadzona postać macierzy rekonstrukcji zawiera wszystkie parametry niezbędne do przeprowadzenia odwzorowania trójwymiarowego. Dzięki wymienionym cechom metoda znajduje zastosowanie w systemach składających się z pojedynczej kamery poruszającej się w rekonstruowanej scenie. Pokazano również, że wprowadzanie obrotu między kamerami w układzie stereoskopowym może być korzystne dla dokładności obliczenia składowej głębokości punktu rekonstruowanej sceny trójwymiarowej.

## 6. Literatura

- [1] Ma Y., Soatto S., Kosecka J., Sastry S.: An invitation to 3D vision, from images to models, Springer Verlag, 2003.
- [2] Cyganek B.: Komputerowe przetwarzanie obrazów trójwymiarowych, Warszawa 2002.
- [3] Rzeszotarski D.: Algorytmy kalibracji stereoskopowego układu kamer i rekonstrukcji sceny trójwymiarowej na podstawie obrazów termowizyjnych, Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 57, nr 10, 2011r.
- [4] Hartley, R., Sturm, P.: Triangulation. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 68(2), 146-157.
- [5] Perona P. Soatto S.: Motion and Structure from 2 perspective views of p localized features: noise sensitivity analysis, CNS Tech Report n. 23, 1993.
- [6] Bradski G., Kaehler A.: Learning OpenCV, O'Reilly Media, 2008.
- [7] Rzeszotarski D., Więcek B.: An integrated thermal and visual camera system for 3D reconstruction, QIRT 2012. 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.