ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1989

Seria: AUTOMATYKA z.97 Nr kol. 975

Andrzej POLAŃSKI

ALGORYTM WYZNACZANIA PARAMETRÓW RUCHU NA PODSTAWIE POLA PRZEMIESZCZEŃ[x)]

Streszczenie. W pracy prezentuje się algorytm wyznaczania parametrów ruchu na podstawie sekwencji obrazów otrzymywanych z kamery umieszczonej na poruszającym się obiekcie. Parametry ruchu wyznaczane są na podstawie numerycznej procedury minimalizacji funkcji trzech zmiennych. Wyznaczone są pochodne funkcji względem argumentów, dzięki czemu możliwe jest stosowanie gradientowej metody minimalizacji.

1. Wstęp

Rozwój elektronicznej techniki obliczeniowej umożliwił przyjmowanie i analizowanie przez maszynę cyfrową serii obrazów otrzymywanych z kamery TV. Jedną z koncepcji wykorzystania takiego połączenia są układy, w których prztwarzana przez maszynę cyfrową sekwencja obrazów rejestruje ruch przedmiotów. Znajdują one zastosowanie między innymi w automatycznym sterowaniu mechanizmów, pojazdów, robotyce, lotnictwie.

Zagadnieniu przetwarzania obrazów rejestrujących ruch poświęcono szereg prac teoretycznych, między innymi artykuły [1] - [4]. W pracach, które zostały tu zacytowane, rozpatrywany jest ogólny przypadek, gdy ruch odbywa się w przestrzeni trójwymiarowej. Konstruowane są tam procedury mające na celu określenie przemieszczeń obiektów między chwilami, w których otrzymywane są kolejne obrazy. Dla ruchu w przestrzeni trójwymiarowej przemieszczenie będące założeniem obrotu i translacji jest określone przez 6 parametrów. Informacją wykorzystywaną w algorytmach odtwarzania tych parametrów są pola przemieszczeń, określone przez położenie na kolejnych obrazach pewnej liczby odpowiadających sobie punktów. Informacja ta musi być uzyskana na wcześniejszym etapie, przez zastosowanie odpowiednich metod obróbki obrazu [6], [7].

Złożoność algorytmów w istotny sposób zależy od położenia obserwowanych punktów. Gdy leżą one na jednej płaszczyźnie, możliwe jest analityczne wyznaczenie parametrów przemieszczeń [1], [2]. Przypadek ogólniejszy, gdy obserwowane punkty nie są współpłaszczyznowe, rozpatrywany jest

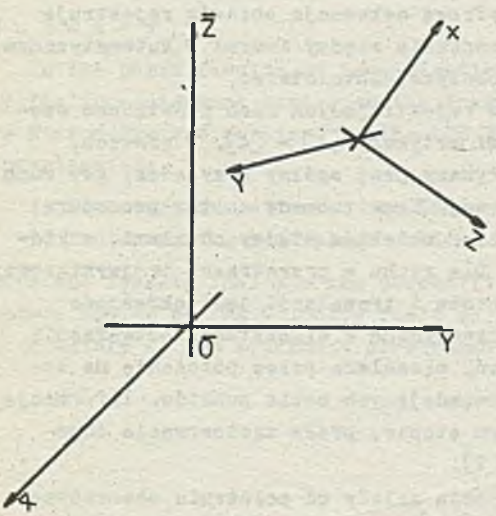
x) Praca finansowana z Centralnego Programu Badań Podstawowych CPBP 02.13 "Układy ze sztuczną inteligencją do maszyn roboczych i pojazdów".

w pracach [3], [4]. Przyjmuje się tam dodatkowe założenie, że kąty obrotu pomiędzy chwilami, w których otrzymuje się kolejne obrazy, są niewielkie. Metoda przedstawiona w pracy [3] umożliwia wyznaczenie parametrów przemieszczeń na podstawie numerycznej procedury poszukiwania miejsca zerowego lub ekstremum funkcji pięciu zmiennych. Znane są przy tym pochodne funkcji względem argumentów, dzięki czemu możliwe jest zastosowanie metod gradientowych. W pracy [4] parametry przemieszczeń otrzymuje się jako wynik minimalizacji pewnej funkcji trzech zmiennych. Konieczne jest jednak stosowanie metod bezgradientowych.

W pracy niniejszej prezentuje się algorytm wyznaczania parametrów ruchu, który jest modyfikacją metody przedstawionej w [4]. W algorytmie tym nie występuje ograniczenie dotyczące małych kątów obrotu. Parametry ruchu wyznaczane są poprzez minimalizację pewnej funkcji trzech zmiennych. Dzięki zastosowaniu odpowiedniej funkcji celu otrzymano także wyrażenia na pochodne funkcji względem argumentów.

2. Parametry ruchu

Analizowana jest seria obrazów otrzymywanych z kamery umieszczonej na poruszającym się obiekcie. Obserwowana scena jest nieruchoma, zmiana położenia punktów na kolejnych obrazach wynika tylko z ruchu samej kamery. Niech $\bar{O}\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ będzie układem współrzędnych sceny, a $Oxyz$ układem związanym z poruszającym się obiektem. Będziemy zakładać, że środek układu $Oxyz$ znajduje się w ognisku soczewki kamery, a oś Oz jest osią soczewki kamery. Sytuację tę ilustruje rys. 1.



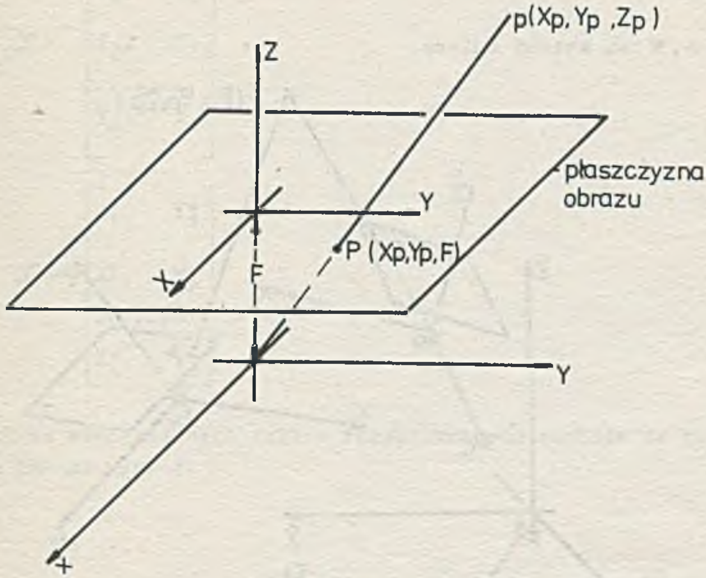
Rys. 1. Środek układu $Oxyz$ znajduje się w ognisku soczewki kamery, oś Oz jest osią soczewki kamery

Fig. 1. The origin of the system $Oxyz$ is in the focal distance of the camera lens axis Oz is an axis of the camera lens

Oznaczmy ogniskową soczewki przez F. Punkty obrazu przekazywanego przez kamerę powstają przez transformację perspektywiczną jest rzutem na płaszczyznę obrazu znajdującą się w odległości F od początku układu $Oxyz$, jak na rys. 2.

Obrazem punktu p o współrzędnych (x_p, y_p, z_p) jest punkt P na płaszczyźnie obrazu o współrzędnych (X_p, Y_p, F), określonych przez zależność:

$$X_p = \frac{x_p}{z_p}, \qquad Y_p = F\,\frac{y_p}{z_p} \tag{1}$$



Rys. 2. Transformacja perspektywiczna
Fig. 2. Perspective transformation

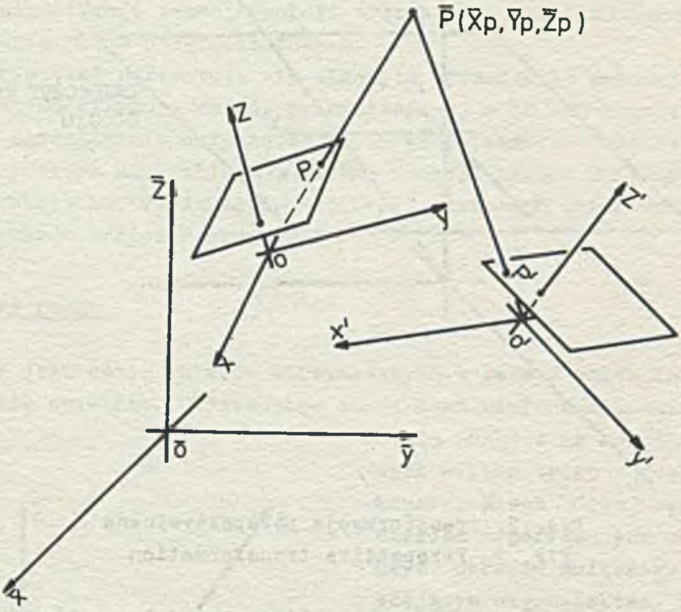
Rozpatrzmy pewien nieruchomy punkt $\bar{p}(\bar{x}_p, \bar{y}_p, \bar{z}_p)$ w układzie $\bar{O}\bar{x}\bar{y}\bar{z}$. Niech współrzędne tego punktu w układzie związanym z poruszającą się kamerą dla dwóch momentów przekazywania obrazu wynoszą odpowiednio $p(x_p, y_p, z_p)$, $p'(x_p', y_p', z_p')$, zgodnie z rys. 3. Przez rozkład przemieszczenia na obrót i translację otrzymuje się następujący wzór określający współrzędne punktu p'

$$\begin{bmatrix} x_p' \\ y_p' \\ z_p' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \tag{2}$$

Wektor $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$ opisuje translację. Dla macierzy obrotu R stosować się będzie następującą parametryzację:

$$
R = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\vartheta\cos\psi - \sin\varphi\sin\psi; & \sin\varphi\cos\vartheta\cos\psi - \cos\varphi\sin\psi; & -\sin\vartheta\cos \\ -\cos\varphi\cos\vartheta\sin\psi - \sin\varphi\cos\psi; & -\sin\varphi\cos\vartheta\sin\psi + \cos\varphi\cos\psi; & \sin\vartheta\cos \\ \cos\varphi\sin\vartheta & \sin\varphi\sin\vartheta & \cos\vartheta \end{bmatrix} \quad (
$$

gdzie φ, ϑ, ψ są kątami Eulera.



Rys. 3. Współrzędne punktu $\bar{p}(\bar{x}_p, \bar{y}_p, \bar{z}_p)$ w układzie Oxyz wynoszą $p(x_p, y_p, z_p)$ a w układzie O'x'y'z' - $p'(x_p', y_p', z_p')$

Fig. 3. Coordinates of the point $\bar{p}$ in the system Oxyz are $p(x_p, y_p,$ and the system O'x'y'z' are $p'(x_p', y_p', z_p')$

3. Rozkład pola przemieszczeń

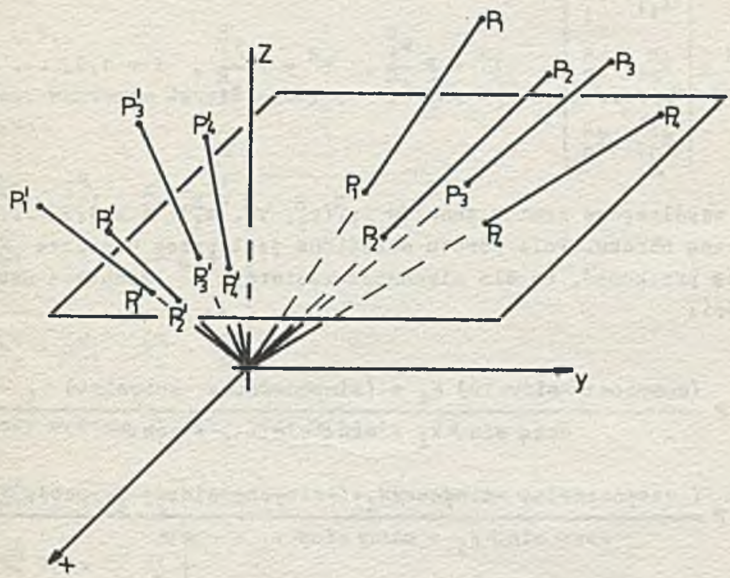
W paragrafie tym będzie opisany algorytm wyznaczania parametrów przemieszczenia Δx, Δy, Δz, φ, ϑ, ψ. Zakłada się, że na dwóch obrazach przekazanych przez poruszającą się kamerę widoczne jest położenie pewnego nieruchomego zbioru punktów. Niech $p_1(x_1, y_1, z_1)$, $p_2(x_2, y_2, z_2)$ ... ... $p_n(x_n, y_n, z_n)$ oznaczają współrzędne tych punktów w układzie Oxyz przed przemieszczeniem, a $p_1'(x_1', y_1', z_1')$, $p_2'(x_2', y_2', z_2')$ ... $p_n'(x_n', y_n, z_n)$ - po przemieszczeniu.

Algorytm wykorzystuje jako informację wejściową pole przemieszczeń. Jest ono określone przez dwie macierze:

$$X = \begin{bmatrix} X_1, & Y_1 \\ X_2, & Y_2 \\ \cdots & \cdots \\ X_n, & Y_n \end{bmatrix}, \tag{4}$$

$$X' = \begin{bmatrix} X'_1, & Y'_1 \\ X'_2, & Y'_2 \\ \cdots & \cdots \\ X'_n, & Y'_n \end{bmatrix} \tag{5}$$

złożone ze współrzędnych rzutów rozpatrywanych punktów na płaszczyznę obrazu jak na rys. 4.



Rys. 4. Położenie zbioru nieruchomych punktów w ruchomym układzie Oxyz, na rysunku przyjęto n = 4

Fig. 4. A set of fixed points in the moving system Oxyz (n = 4)

Zgodnie z (1) mamy:

$$X_i = F\,\frac{x_i}{z_i}, \qquad Y_i = F\,\frac{y_i}{z_i}, \qquad i = 1,2,\ \dots\ n, \tag{6}$$

$$X_i' = F\,\frac{x_i'}{z_i'}, \qquad Y_i' = F\,\frac{y_i'}{z_i'}, \qquad i = 1,2,\ ..\ n \tag{7}$$

Kosstrukcja algorytmu oparta jest na rozkładzie pola przemieszczeń na pole obrotu i pole translacji [4]. Oznaczmy

$$\begin{bmatrix} x_i^{\,R} \\ y_i^{\,R} \\ z_i^{\,R} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}, \qquad i = 1,2,\ \dots\ n \tag{8}$$

oraz niech macierz

$$X^R = \begin{bmatrix} X_1^R, & Y_1^R \\ X_2^R, & Y_2^R \\ \dots\dots & \\ X_n^R, & Y_n^R \end{bmatrix}, \qquad X^R = F\,\frac{x_i^R}{z_i^R}, \quad Y^R = F\,\frac{y_i^R}{z_i^R}, \quad i = 1,2,\ \dots\ n \tag{9}$$

zawiera współrzędne rzutów punktów $p_i^R(x_i^R, y_i^R, z_i^R)$ $i = 1,2, \dots n$ na płaszczyznę obrazu. Pole obrotu określone jest przez macierze X i X^R. Łatwo się przekonać, że dla elementów macierzy X^R zachodzą następujące zależności:

$$X_i^R = F\,\frac{(\cos\varphi\cos\vartheta - \sin\psi\sin\psi)\,X_i + (\sin\varphi\cos\vartheta\cos\psi - \cos\varphi\sin\psi)\,Y_i - \sin\vartheta\cos\varphi}{\cos\varphi\sin\vartheta\,X_i + \sin\varphi\sin\vartheta\,Y_i + \cos\vartheta} \tag{10}$$

$$Y_i^R = F\,\frac{(-\cos\varphi\cos\vartheta\sin\psi - \sin\varphi\cos\psi)X_i + (-\sin\varphi\cos\vartheta\sin\psi + \cos\varphi\cos\psi)Y_i + \sin\vartheta\sin\psi}{\cos\varphi\sin\vartheta\,X_i + \sin\varphi\sin\vartheta\,Y_i + \cos\vartheta} \tag{11}$$

$$i = 1,2,\ \dots\ n.$$

Oznacza to, że jeżeli znane są kąty Eulera φ, ϑ, ψ, to do obliczenia elementów macierzy X^R wystarczy znajomość tylko elementów macierzy X

Pole translacji jest określone przez macierze X^R oraz X'. Ze znanych własności transformacji perspektywicznych [5] wynika, że proste wyznaczone przez wektory pola translacji przecinają się w jednym punkcie. Położenie tego punktu, wraz z początkiem układu Oxyz, określa kierunek translacji.

Algorytm wyznaczania parametrów przemieszczenia, oparty na powyższych spostrzeżeniach jest następujący:

a) zakłada się wartości kątów Eulera φ, ϑ, ψ,

b) na podstawie kątów Eulera φ, ϑ, ψ, oraz macierzy X wyznacza się macierz X^R,

c) sprawdza się, czy pole określone przez macierze X^R i X' jest polem translacji, jeżeli nie, to modyfikuje się wartości kątów φ, ϑ, ψ i wraca się do punktu b).

Zrealizowanie tego algorytmu wymaga skonstruowania funkcji celu, na podstawie której będzie można sprawdzać, czy pole przemieszczeń X^R, X' jest polem translacji.

Twierdzenie: Warunkiem koniecznym na to, żeby pole X^R, X było polem translacji, jest istnienie rozwiązania, ze względu na wektor W, układu równań

$$\Delta = M \cdot W, \tag{12}$$

gdzie W jest wektorem dwuwymiarowym, $W = [X, Y]^T$, macierz M określona jest jako

$$M = \begin{bmatrix} Y_1' - Y_1^R, & X_1^R - X_1' \\ Y_2' - Y_2^R, & X_2^R - X_2' \\ \cdots & \cdots \\ Y_n' - Y_n^R, & X_n^R - X_n' \end{bmatrix} \tag{13}$$

a n-wymiarowy wektor Δ dany jest przez:

$$\Delta = \begin{bmatrix} X_1^R Y_1' - Y_1^R X_1' \\ X_2^R Y_2' - Y_2^R X_2' \\ \cdots \\ X_n^R Y_n' - Y_n^R X_n' \end{bmatrix} \tag{14}$$

Dowód twierdzenia wynika z bezpośrednich obliczeń. Prosta wyznaczona przez punkty (X_i^R, Y_i^R) oraz (X_i', Y_i') dana jest wzorem:

$$X(Y_i' - Y_i^R) + Y(X_i^R - X_i') = X_i^R Y_i' - Y_i^R X_i' , \tag{15}$$

$i = 1,2, \ldots n.$

Jeżeli pole X^R, X' jest polem translacji, to proste określone równaniem (15) dla $i = 1,2, \ldots n$ muszą mieć jeden wspólny punkt. Wynika z tego układ równań (12).

W przypadku gdy układ równań (12) jest sprzeczny, pole X^R, X' nie jest polem translacji. Dla równania (12) można wtedy zminimalizować wartość kwadratu normy

$$I = \| \Delta - MW \|^2 , \tag{16}$$

dobierając

$$W^o = (M^T M)^{-1} M^T \Delta \tag{17}$$

Dla wektora W^o zadanego wzorem (17) wartość wskaźnika (16) wynosi:

$$I^o(\varphi, \vartheta, \psi) = \Delta^T \left[I - M(M^T M)^{-1} M^T \right] \Delta \tag{18}$$

Jeżeli kąty φ, ϑ, ψ są tak dobrane, że pole X^R, X' jest polem translacji, to funkcja (18) osiąga wartość minimalną równą zero. Funkcja $I^o(\varphi, \vartheta, \psi)$ jest proponowaną funkcją celu dla algorytmu określenia parametrów ruchu. Kąty Eulera φ, ϑ, ψ wyznaczane są na podstawie minimalizacji funkcji $I^o(\varphi, \vartheta, \psi)$, kierunek translacji jest określony przez wektor W^o ze wzoru (17). Jeżeli oznaczymy $W^o = [X^o, Y^o]^T$, to wektor translacji jest określony, z dokładnością do współczynnika skali, przez wzory:

$$\frac{\Delta x}{\Delta z} = \frac{X^o}{F} , \tag{19}$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta z} = \frac{Y^o}{F} \tag{20}$$

5. Gradient funkcji celu

Niech q oznacza jeden z parametrów φ, ϑ, ψ. Ze wzoru (18), przy wykorzystaniu formuły

$$\frac{\partial}{\partial q}(M^TM)^{-1} = -(M^TM)^{-1}\left[\frac{\partial}{\partial q}(M^TM)\right](M^TM)^{-1}, \tag{21}$$

można wyznaczyć następującą zależność określającą pochodną funkcji celu względem parametru:

$$\frac{\partial I^o}{\partial q} = 2\left[W^{oT}\left(\frac{\partial M}{\partial q}\right)^T MW^c - W^{oT}\left(\frac{\partial M}{\partial q}\right)^T\Delta\right] \tag{22}$$

Elementami macierzy występujących w równaniu (22) są pochodne:

$$\frac{\partial X_i^R}{\partial q}, \qquad \frac{\partial Y_i^R}{\partial q} \tag{23}$$

Można je obliczyć następująco:

$$\frac{\partial X_i^R}{\partial q} = \frac{\partial}{\partial q}\left(F\frac{x_i^R}{z_i^R}\right) = F\cdot\frac{\frac{\partial x_i^R}{\partial q}}{z_i^R} - \frac{\frac{\partial z_i^R}{\partial q}}{z_i^R}X_i^R, \tag{24}$$

$$\frac{\partial Y_i^R}{\partial q} = \frac{\partial}{\partial q}\left(F\frac{y_i^R}{z_i^R}\right) = F\frac{\frac{\partial y_i^R}{\partial q}}{z_i^R} - \frac{\frac{\partial z_i^R}{\partial q}}{z_i^R}Y_i^R \tag{25}$$

Korzystając ze wzorów (8) i (3) otrzymuje się:

$$\frac{\partial X_i^R}{\partial \varphi} = F\frac{(-\sin\varphi\cos\vartheta\cos\psi - \cos\varphi\sin\psi)X_i + (\cos\varphi\cos\vartheta\cos\psi - \sin\varphi\sin\psi)Y_i}{\cos\varphi\sin\vartheta X_i + \sin\varphi\sin\vartheta Y_i + \cos\vartheta} - A_iX_i^R \tag{26}$$

$$\frac{\partial Y_i^R}{\partial \psi} = F\frac{(\sin\varphi\cos\vartheta\sin\psi - \cos\varphi\cos\psi)X_i + (-\cos\varphi\cos\vartheta\sin\psi - \sin\varphi\cos\psi)Y_i}{\cos\varphi\sin\vartheta X_i + \sin\varphi\sin\vartheta Y_i + \cos\vartheta} - A_iY_i^R \tag{27}$$

$$\frac{\partial X_i^R}{\partial \vartheta} = F\frac{-\cos\varphi\sin\vartheta\cos\psi X_i - \sin\varphi\sin\vartheta\cos\psi Y_i - \cos\vartheta\cos\psi}{\cos\varphi\sin\vartheta X_i + \sin\varphi\sin\vartheta Y_i + \cos\vartheta} - B_iX_i^R, \tag{28}$$

$$\frac{\partial Y_i^R}{\partial \vartheta} = F\,\frac{\cos\varphi\sin\vartheta\sin\psi\, X_i + \sin\varphi\sin\vartheta\sin\psi\, Y_i + \cos\vartheta\sin\psi}{\cos\varphi\sin\vartheta\, X_i + \sin\varphi\sin\vartheta\, Y_i + \cos\vartheta} - B_i Y_i^R \tag{29}$$

$$\frac{\partial X_i^R}{\partial \psi} = F\,\frac{(-\cos\varphi\cos\vartheta\sin\psi - \sin\varphi\cos\psi)X_i + (-\sin\varphi\cos\vartheta\sin\psi - \cos\varphi\cos\psi)Y_i + \sin\vartheta\sin\psi}{\cos\varphi\sin\vartheta\, X_i + \sin\varphi\sin\vartheta\, Y_i + \cos\vartheta} \tag{30}$$

$$\frac{\partial Y_i^R}{\partial \psi} = F\,\frac{-\cos\varphi\cos\vartheta\cos\psi + \sin\varphi\sin\psi)Y_i + (-\sin\varphi\cos\vartheta\cos\psi - \cos\varphi\sin\psi)Y_i + \sin\vartheta\cos\psi}{\cos\varphi\sin\vartheta X_i + \sin\varphi\sin\vartheta\, Y_i + \cos\vartheta} \tag{31}$$

$i = 1,2, \dots n;$

gdzie

$$A_i = \frac{-\sin\varphi\sin\vartheta\; X_i + \cos\varphi\sin\vartheta\, Y_i}{\cos\varphi\sin\vartheta\, X_i + \sin\varphi\sin\vartheta\; Y_i + \cos\vartheta}, \tag{32}$$

$$B_i = \frac{\cos\varphi\cos\vartheta\; X_i + \sin\varphi\cos\vartheta\; Y_i - \sin\vartheta}{\cos\varphi\sin\vartheta\; X_i + \sin\varphi\sin\vartheta\; Y_i + \cos\vartheta}, \tag{33}$$

$i = 1,2, \dots n.$

6. Uwagi końcowe

Przedstawiony algorytm wyznaczania parametrów ruchu wymaga minimalizacji funkcji trzech zmiennych (18). Warunek początkowy φ_{pocz}, ϑ_{pocz}, ψ_{pocz} dla algorytmu minimalizacji może być wyliczany, jeśli opisana procedura jest częścią algorytmu oceny stanu równań ruchu.

W przypadku braku informacji o pozostałych obrazach algorytmu musi startować z zerowego warunku początkowego.

Dla wektora translacji uzyskuje się tylko kierunek i zwrot, natomiast nie jest znana jego długość. Jest to wspólna własność wszystkich algorytmów, w których nie zakłada się znajomości odległości obserwowanych punktów od kamery [1] - [4]. W praktycznym zastosowaniu algorytmów oceny parametrów ruchu, dla uniknięcia trudności ze zbieżnością w przypadku, gdy translacja jest bardzo mała, konieczne jest wprowadzenie danych dotyczących np. średniej odległości przedmiotów od kamery.

Obliczanie funkcji celu (18) jest bardzo proste, wymaga odwracania tylko macierzy o wymiarach 2 x 2. Równania określające pochodne (22) —(33) mają przejrzystą strukturę, dzięki czemu w obliczeniach mogą być wielokrotnie wykorzystywane te same zmienne.

LITERATURA

[1] Tsai R.Y., Huang T.H., Wei-le Zhu; Estimating three-dimensional motion parameters of a rigid planar patch, II: Singular value decomposition, IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing, vol. ASSP-29, 1981, pp. 1147-1152.

[2] Tsai R.Y., Huang T.H.: Estimating three-dimensional motion parameters of a rigid planar patch, III: Finite Point correspondence and the three-view problem, IEEE Trans.Acoust. Speech, Signal Processing, vol. ASSP-32, 1984, pp. 213-220.

[3] Fang J.Q., Huang T.S.: Solving three-dimensional small-rotation motion equations: Uniqueness, Algorithms and numerical results, Comput Vision Graphics and Image Processing, vol. 26, 1984, pp. 183-206.

[4] Prazdny K.: Determining the instantaneous direction of motion from optical flow generated by curvilineary moving observer, Comput. Graphies Image Processing, vol. 17, 1981, pp. 238-258.

[5] Harlick R.M.: Using perspective transformations in scene analysis, Comput. Graphics Image Processing, vol. 13, 1980, pp. 191-221.

[6] Ordys A., Wojciechowski K.: Metody wyznaczania pola prędkości na podstawie sekwencji obrazów. Praca przygotowywana do druku.

[7] Horn B.K.P., Schunck B.G.: Determining opitcal flow, Artificial Intelligence, vol. 17, 1981, pp. 185-203.

Recenzent: Doc. dr inż. Bogdan Wołczak

Wpłynęło do Redakcji 2.01.1987 r.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ПОЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Р е з ю м е

В работе предоставляется алгоритм определения параметров движения на основе последовательности образов полученных камерой находящейся на движущимся о объекте. Параметры движения определяются на основе машинной процедуры минимизации функции трех переменных. Определены производные функции относительно аргументов, благодаря чему возможным является применение градиентного метода минимизации.

AN ALGORITHM OF MOTION PARAMETERS ESTIMATION BASING ON THE DISPLACEMENT FIELD

S u m m a r y

In the paper an algorithm is presented which estimates motion parameters basing on the sequence of images from a camera placed on the moving plant. The parameters of motion are assigned numerically by the use of the minimization procedure for functions of three variables. Derivatives of the function according its arguments are assigned and it enables the use of gradient minimization methods.