

Andrzej ŚWIERNIAK

WYZNACZANIE PARAMETRÓW RUCHU OBIEKTU
NA PODSTAWIE DŁUGIEGO CIĄGU OBRAZÓW^{x)}

Streszczenie. W pracy zaproponowano zastosowanie rozszerzonego filtra Kalmana do estymacji parametrów ruchu obiektu względem obserwowanego przedmiotu. Zaproponowana metoda wymaga wykorzystania długiej sekwencji obrazów, przy czym liczba cech obrazu brana pod uwagę może być znikoma.

1. Wprowadzenie

Problem wykorzystania informacji wizyjnej do wyznaczenia parametrów ruchu obiektu a w dalszej konsekwencji do sterowania tym ruchem wydaje się być zagadnieniem o dużym znaczeniu, biorąc pod uwagę możliwości techniczne i wymagania zarówno w dziedzinie sterowania różnego typu pojazdami, jak i robotyzacji. Szczególnie istotnym problemem wydaje się być wyznaczenie parametrów ruchu obiektu wyposażonego w kamerę względem przedmiotu (sceny) przuszającego się. Parametry te, potrzebne przy podejmowaniu decyzji dotyczących wzajemnego stosunku obiektu i przedmiotu, mogą być niedostępne za pomocą klasycznych metod pomiarowych, zwłaszcza w przypadku ruchów stosunkowo złożonych.

Zagadnienie estymacji parametrów ruchu obiektu na podstawie ciągu obrazów nie jest nowe. Większość prac (np.: [1] - [6]) dotyczy jednak problemu wyznaczenia parametrów na podstawie krótkiej sekwencji obrazów przy wykorzystaniu kilku istotnych punktów obiektu. Ponieważ z reguły, w przypadku zainstalowania kamery na obiekcie, ciąg obrazów możliwy do otrzymania jest długi, nie stoi na przeszkodzie w wykorzystaniu całej dostępnej z niego informacji do oceny parametrów ruchu. Z kolei, zwłaszcza przy dysponowaniu jedynie dwoma poziomami szarości, liczba dostępnych "pomiarowo" punktów obrazu jest mała (punkty graniczne krawędzi), a uzyskana informacja jest obarozona szumem.

Prowadzi to w naturalny sposób do zastosowania techniki rekurencyjnej estymacji stanu, opartej na algorytmie filtra Kalmana (np. [7]). Niestety, nawet w przypadku ruchu płaskiego obiektu, dla którego równania stanu

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

mogą być podane w postaci równań liniowych, nieliniowość transformaty wizyjnej [8] pociąga za sobą nieliniowość równania wyjścia i tym samym niemożliwość korzystania z klasycznego liniowego równania filtru Kalmana. W przypadku ruchu trójwymiarowego spotykamy się już z nieliniowymi równaniami stanu. Pozostaje możliwość korzystania z rozszerzonego filtru Kalmana [9], którego idee przypomnimy w rozdziale 2. Rozdział 3 zawiera proste przykłady zadań estymacji parametrów ruchu na podstawie ciągu obrazów i ich modele. Rozdział 4 przedstawia zastosowanie rozszerzonego filtru Kalmana do rozwiązywania zadań w rozdziale 3. Rozdział 5 jest poświęcony podsumowaniu otrzymanych rezultatów i uwagom o możliwości stosowania proponowanej metody.

2. Rozszerzony filtr Kalmana

Idea rozszerzonego filtru Kalmana polega na zlinearyzowaniu nieliniowych równań stanu i wyjścia wokół aktualnie otrzymanych ocen stanu i zastosowaniu klasycznego rekurencyjnego filtru estymującego stan procesu. Nie wdając się zatem w szczególności przypomnimy ideę filtru Kalmana. Przypuśćmy, że obiekt opisany jest równaniem stanu:

$$x_{k+1} = A_k x_k + w_k \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

gdzie x_k jest n -wymiarowym wektorem stanu, A_k jest znaną macierzą kwadratową rzędu n , w_k jest n -wymiarowym wektorem losowym gaussowskim o wartości oczekiwanej równej zero i macierzy kowariancji spełniającej warunek:

$$E (w_k \cdot w_j^T) = Q_k \delta_{kj} \quad (2)$$

δ_{kj} oznacza deltę Kroneckera.

Stan początkowy x_0 jest wektorem losowym o rozkładzie normalnym, początkowej wartości oceny \hat{x}_0 oraz macierzy kowariancji

$$E \left\{ (x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T \right\} = P_0 \quad (3)$$

Wyniki pomiarów procesu mają postać:

$$z_k = C_k x_k + v_k \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

gdzie: C_k jest macierzą $m \times n$, a v_k jest m wymiarowym wektorem szumów pomiarowych gaussowskich o zerowej wartości oczekiwanej i macierzy kowariancji spełniającej warunek:

$$E (v_k v_j^T) = R_k \delta_{kj}, \quad (5)$$

gdzie R_k jest macierzą dodatnio określoną. Wektory x_0, w_j, v_k są nieskorelowane dla $j \geq 0, k \geq 0$.

W tym przypadku optymalny estymator stanu przy predykcji $x_{k+1|k}$ dany jest w postaci:

$$\hat{x}_{k+1|k} = A_k \hat{x}_{k|k} \quad (6)$$

gdzie $\hat{x}_{k|k}$ jest optymalną oceną przy filtracji, określoną w postaci:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - C_k \hat{x}_{k|k-1}), \quad (7)$$

gdzie K_k jest macierzą filtru daną przez równanie:

$$K_k = P_{k|k-1} C_k^T (C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_k)^{-1} \quad (8)$$

Natomiast macierz warunkowej kowariancji dla predykcji $P_{k+1|k}$ dana jest równaniem:

$$P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + Q_k, \quad (9)$$

gdzie $P_{k|k}$ jest macierzą warunkowej kowariancji dla filtracji określoną przez równanie:

$$P_{k|k} = (I - K_k C_k) P_{k|k-1} \quad (10)$$

I jest macierzą jednostkową.

Warunkami początkowymi dla równań rekurencyjnych są $\hat{x}_0|_{-1} = \hat{x}_0$ oraz odpowiadająca mu P_0 .

Przypuśćmy obecnie, że równania stanu i pomiaru są nieliniowe:

$$x_{k+1} = f_k(x_k) + w_k \quad (11)$$

$$z_k = g_k(x_k) + v_k \quad (12)$$

Dokonajmy ich linearyzacji wokół aktualnej oceny $\hat{x}_{k|k-1}$. Otrzymamy:

$$\tilde{x}_{k+1} = \frac{\partial f_k(\hat{x}_{k|k-1})}{\partial x_k} \tilde{x}_k + w_k \quad (13)$$

$$\hat{z}_k = \frac{\partial g_k(\hat{x}_{k|k-1})}{\partial x_k} \hat{x}_k + v + v_k \quad (14)$$

Podstawiając w równaniach filtru (8) - (10)

$$A_k = \frac{\partial f_k(\hat{x}_{k|k-1})}{\partial x_k} \quad C_k = \frac{\partial g_k(\hat{x}_{k|k-1})}{\partial x_k},$$

przy czym:

$$\hat{x}_{k+1|k} = f_k(\hat{x}_{k|k}) \quad (6')$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - g_k(\hat{x}_{k|k-1})), \quad (7')$$

otrzymany równania rozszerzonego filtru Kalmana.

3. Przykłady zadań estymacji parametrów ruchu

W rozważanych przykładach będziemy abstrahować od rzeczywistych równań dynamiki obiektu i sceny. Zakładając znajomość charakteru ich ruchu będziemy w stanie sprowadzić problem dynamiki do modelu trajektorii obiektu. Przykłady mają głównie charakter objaśniający metodę, stąd zostały przedstawione w możliwie najprostszej formie. W osterech z nich zarówno obiekt, jak i scena podlegają ruchowi płaskiemu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny obrazu. Stąd, aczkolwiek przedmiot jest bryłą trójwymiarową, istotna w nim jest dwuwymiarowa krawędź obserwowana w postaci jednowymiarowego obrazu. W przykładzie 5 problem komplikuje się ze względu na trójwymiarowy charakter ruchu kamery. W przykładach przyjęto, że punkty graniczne krawędzi obserwowanego przedmiotu są stale obejmowane przez kamerę, a kąty obrotu na tyle małe, iż nie następuje zmiana struktury obserwowanego obrazu.

Przykład 1. Kamera umieszczona jest na obiekcie poruszającym się ruchem jednostajnym. Obiektów ustawiony jest w kierunku osi y . Płaszczyzna obrazu jest równoległa do osi x w odległości ogniskowej F . Obserwowany przedmiot może być traktowany jako punkt poruszający się ruchem jednostajnym (rys. 1). Względny ruch przedmiotu względem obiektu określony jest przez współrzędne: $x = x' - x''$, $y = y' - y''$ i odpowiednio ich prędkości: $\dot{x} = \dot{x}' - \dot{x}''$, $\dot{y} = \dot{y}' - \dot{y}''$. Obraz punktu ma względne współrzędne:

$$F \frac{\dot{x}}{y}, \quad F.$$

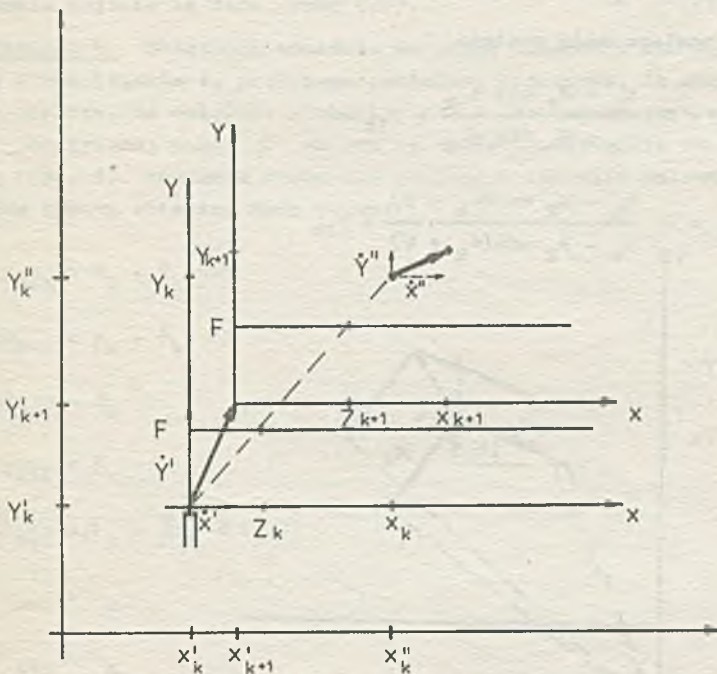
Ze względu na stałe prędkości równania ruchu mogą być zapisane w postaci:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= x_k + \Delta T \dot{x}_k \\y_{k+1} &= y_k + \Delta T \dot{y}_k \\ \dot{x}_{k+1} &= \dot{x}_k \\ \dot{y}_{k+1} &= \dot{y}_k,\end{aligned}\quad (15)$$

a równanie pomiaru ma postać:

$$z_k = F \frac{x_k}{y_k} + v_k \quad (16)$$

gdzie v_k reprezentuje szumy wynikające z drgań kamery, dystorsji itp.



Rys. 1. Obserwowany obiekt i zmiana układu współrzędnych z przykładu 1

Fig. 1. Observed object treated as a moving point

Przykład 2. Kamera umieszczona jest na obiekcie spełniającym założenia przykładu 1. Obserwowany przedmiot reprezentowany jest przez krawędź przy czym znane są odległości granicznych punktów krawędzi od środka ciężkości przedmiotu poruszającego się ruchem jednostajnym (rys. 2). Znany jest ponadto kąt tworzony przez te promienie wodzące skrajnych punktów. Równania ruchu względnego środka ciężkości sceny dane w postaci

$$x_{k+1} = x_k + \dot{x}_k \Delta T$$

$$y_{k+1} = y_k + \dot{y}_k \Delta T$$

$$\dot{x}_{k+1} = \dot{x}_k$$

$$\dot{y}_{k+1} = \dot{y}_k$$

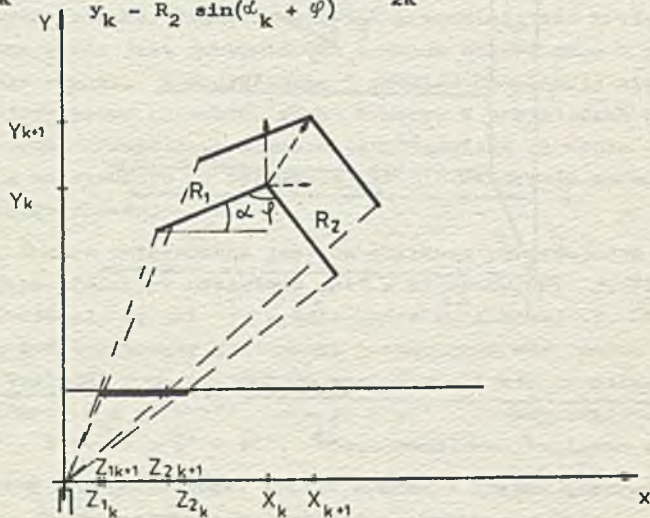
Dodatkowo dopiszemy równanie na stały, lecz nieznaną kąt

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k$$

Równania pomiaru mają postać:

$$z_{1k} = F \frac{x_k - R_1 \cos \alpha_k}{y_k - R_1 \sin \alpha_k} + v_{1k}$$

$$z_{2k} = F \frac{x_k - R_2 \cos(\alpha_k + \varphi)}{y_k - R_2 \sin(\alpha_k + \varphi)} + v_{2k}$$



Rys. 2. Obserwowany obiekt i zmiana układu współrzędnych z przykładu 2
Fig. 2. Observed object represented by a broken line in the uniform motion

Przykład 3. Założenia odnośnie do ruchu obiektu z kamerą i przedmiotem jak w przykładzie 2, przy czym dodatkowo występuje obrót ze stałą prędkością względem osi prostopadłej do płaszczyzny rysunku przechodzącej przez środek ciężkości.

Równania ruchu środka ciężkości przedmiotu mają postać:

$$\begin{aligned}
 x_{k+1} &= x_k + \dot{x}_k \Delta T \\
 y_{k+1} &= y_k + \dot{y}_k \Delta T \\
 \dot{x}_{k+1} &= \dot{x}_k \\
 \dot{y}_{k+1} &= \dot{y}_k \\
 \alpha_{k+1} &= \alpha_k + \dot{\alpha}_k \Delta T \\
 \dot{\alpha}_{k+1} &= \dot{\alpha}_k
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

a równania wyjścia są dane przez (19).

Przykład 4. Założenia odnośnie do ruchu obiektu z kamerą i przedmiotem jak w przykładzie 2, przy czym zakładamy dodatkowo, iż obiekt z kamerą obraca się tak, że obiektyw w chwili $k \Delta T$ ustawiony jest w kierunku osi \tilde{y} odchylonej o kąt β od osi y . Obrót odbywa się ze stałą prędkością (rys. 3). Równania ruchu nie ulegają w zasadzie zmianie. Dochodzi równanie obrotu obiektu. Mamy zatem:

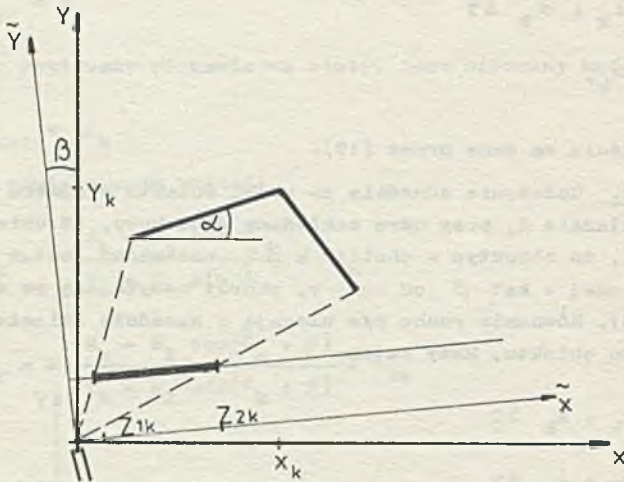
$$\begin{aligned}
 x_{k+1} &= x_k + \dot{x}_k \Delta T \\
 y_{k+1} &= y_k + \dot{y}_k \Delta T \\
 \dot{x}_{k+1} &= \dot{x}_k \\
 \dot{y}_{k+1} &= \dot{y}_k \\
 \beta_{k+1} &= \beta_k + \dot{\beta}_k \Delta T \\
 \dot{\beta}_{k+1} &= \dot{\beta}_k \\
 \alpha_{k+1} &= \alpha_k
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Równania pomiaru przyjmują natomiast postać:

$$z_{1k} = F \frac{(x_k - R_1 \cos \alpha_k) \cos \beta_k + (y_k - R_1 \sin \alpha_k) \sin \beta_k}{-(x_k - R_1 \cos \alpha_k) \sin \beta_k + (y_k - R_1 \sin \alpha_k) \cos \beta_k} + v_{1k} \quad (22)$$

$$z_{2k} = F \frac{(x_k - R_2 \cos(\alpha_k + \varphi)) \cos \beta_k + (y_k - R_2 \sin(\alpha_k + \varphi)) \sin \beta_k}{-(x_k - R_2 \cos(\alpha_k + \varphi)) \sin \beta_k + (y_k - R_2 \sin(\alpha_k + \varphi)) \cos \beta_k} + v_{2k}$$

W przypadku bardziej złożonych ruchów odpowiednie równania stanu i wyjścia komplikują się.



Rys. 3. Obserwowany obiekt i zmiana układu współrzędnych z przykładu 4

Fig. 3. Object observed by rotating camera

Przykład 5. W przykładzie tym założymy, że kamera może być pod działaniem ruchu trójwymiarowego, a w szczególności może ulegać obrotowi wokół wszystkich trzech osi, natomiast przedmiot znajduje się w ruchu jednostajnym i jest określony przez pojedynczy punkt (rys. 4). Jeśli prędkości obrotowe we wszystkich kierunkach są stałe, można równanie ruchu względnego zapisać w postaci:

$$\dot{x}_{k+1} = \dot{x}_k + \dot{x}_k \Delta T$$

$$\dot{y}_{k+1} = \dot{y}_k + \dot{y}_k \Delta T$$

$$t_{k+1} = t_k + \dot{t}_k \Delta T$$

$$\dot{x}_{k+1} = \dot{x}_k$$

$$\dot{y}_{k+1} = \dot{y}_k$$

$$\dot{t}_{k+1} = \dot{t}_k$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \dot{\theta}_k \Delta T$$

$$\dot{\theta}_{k+1} = \dot{\theta}_k$$

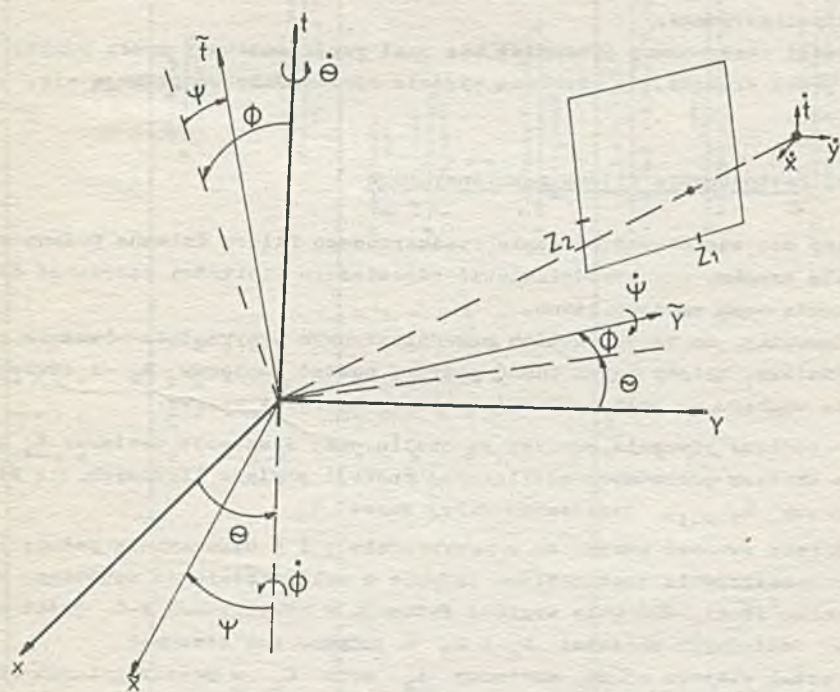
$$\phi_{k+1} = \phi_k + \dot{\phi}_k \Delta T$$

$$\dot{\phi}_{k+1} = \dot{\phi}_k$$

$$\psi_{k+1} = \psi_k + \dot{\psi}_k \Delta T$$

$$\dot{\psi}_{k+1} = \dot{\psi}_k$$

(23)



Rys. 4. Obserwowany obiekt i zmiany układu współrzędnych z przykładu 5

Fig. 4. Object treated as a point observed by a camera in 3-D motion

Natomiast równania obserwacji w postaci:

$$z_{1k} = F \left\{ \frac{(x_k \cos \theta_k + y_k \sin \theta_k) \cos \varphi_k}{(-x_k \cos \phi_k \sin \theta_k + y_k \cos \phi_k \cos \theta_k + t_k \sin \phi_k)} + \frac{(x_k \sin \phi_k \sin \theta_k - y_k \sin \phi_k \cos \theta_k + t_k \cos \phi_k) \sin \varphi_k}{(-x_k \cos \phi_k \sin \theta_k + y_k \cos \phi_k \cos \theta_k + t_k \sin \phi_k)} \right\} + v_{1k} \quad (24)$$

$$z_{2k} = -F \left\{ \frac{(x_k \cos \theta_k + y_k \sin \theta_k) \sin \varphi_k}{-x_k \cos \phi_k \sin \theta_k + y_k \cos \phi_k \cos \theta_k + t_k \sin \phi_k} + \frac{(x_k \sin \phi_k \sin \theta_k - y_k \sin \phi_k \cos \theta_k + t_k \cos \phi_k) \cos \varphi_k}{-x_k \cos \phi_k \sin \theta_k + y_k \cos \phi_k \cos \theta_k + t_k \sin \phi_k} \right\} + v_{2k}$$

Zauważmy, że podobnie jak w przykładzie 1 położenie względne punktu nie może być określone jednoznacznie, lecz z dokładnością do stałego mnożnika multiplikatywnego.

Jeśli obserwowany przedmiot nie jest reprezentowany przez punkt, lecz np. przez krawędź, to równania wyjścia odpowiednio komplikują się.

4. Zastosowanie filtru rekurencyjnego

Aby móc zastosować równania rozszerzonego filtru Kalmana podane w rozdziale drugim, należy zdefiniować odpowiednie wielkości potrzebne do wyznaczania ocen wektora stanu.

Zauważmy, że we wszystkich przedstawionych przykładach równania stanu są liniowe. Należy zatem podać jedynie postać macierzy A_k i stwierdzić, że ze względu na brak zakłóceń macierz Q_k jest zerowa.

Natomiast równania pomiaru są nieliniowe, stąd rolę macierzy C_k przejmuje macierz pochodnych nieliniowej funkcji pomiaru liczonych dla wartości oceny $\hat{x}_{k|k-1}$, oznaczanej dalej przez \hat{x} .

Należy zwrócić uwagę, że w przykładzie 1 i 5 wyznaczenie położenia i przemieszczenia jest możliwe jedynie z dokładnością do wspólnego współczynnika skali. Podobnie wygląda sytuacja w przykładach 2-4, jeśli nie znamy dokładnych wartości R_1 i R_2 a jedynie ich stosunek.

Postać wektora stanu, macierzy A_k oraz C_k w poszczególnych przykładach jest następująca:

Przykład	Stan	\mathbf{A}	\mathbf{C}^T
1	x	1 0 ΔT 0	$\frac{1}{\dot{y}}$
	y	0 1 0 ΔT	$-\frac{\dot{x}}{\dot{y}^2}$
	\dot{x}	0 0 1 0	0
	\dot{y}	0 0 0 1	0
2	x	1 0 ΔT 0 0	$\frac{-\dot{x} + R_1 \cos \alpha}{(\dot{y} - R_1 \sin \alpha)^2}$
	y	0 1 0 ΔT 0	$\frac{-\dot{x} + R_2 \cos(\alpha + \varphi)}{(\dot{y} - R_2 \sin(\alpha + \varphi))^2}$
	\dot{x}	0 0 1 0 0	$\frac{1}{\dot{y} - R_1 \sin \alpha}$
	\dot{y}	0 0 0 1 0	$\frac{1}{\dot{y} - R_2 \sin(\alpha + \varphi)}$
	α	0 0 0 0 1	$\frac{R_1(\dot{y} \sin \alpha + \dot{x} \cos \alpha - R_1)}{(\dot{y} - R_1 \sin \alpha)^2}$
3	x	1 0 ΔT 0 0 0	$\frac{1}{\dot{y} - R_1 \sin \alpha}$
	y	0 1 0 ΔT 0 0	$\frac{1}{\dot{y} - R_2 \sin(\alpha + \varphi)}$
	\dot{x}	0 0 1 0 0 0	$\frac{-\dot{x} + R_1 \cos \alpha}{(\dot{y} - R_1 \sin \alpha)^2}$
	\dot{y}	0 0 0 1 0 0	$\frac{-\dot{x} + R_2 \cos(\alpha + \varphi)}{(\dot{y} - R_2 \sin(\alpha + \varphi))^2}$
	α	0 0 0 0 1 ΔT	0
4	x	1 0 ΔT 0 0 0 0	$\frac{R_1(\dot{y} \sin \alpha + \dot{x} \cos \alpha - R_1)}{(\dot{y} - R_1 \sin \alpha)^2}$
	y	0 1 0 ΔT 0 0 0	$\frac{R_2(\dot{y} \sin(\alpha + \varphi) + \dot{x} \cos(\alpha + \varphi) - R_2)}{(\dot{y} - R_2 \sin(\alpha + \varphi))^2}$
	\dot{x}	0 0 1 0 0 0 0	0
	\dot{y}	0 0 0 1 0 0 0	0
	α	0 0 0 0 0 1 ΔT	0
5	x	1 0 ΔT 0 0 0 0	$\frac{\dot{y} - R_1 \sin \alpha}{(-\dot{x} \sin \beta + \dot{y} \cos \beta - R_1 \sin(\alpha - \beta))^2}$
	y	0 1 0 ΔT 0 0 0	$\frac{\dot{y} - R_2 \sin(\alpha + \varphi)}{(-\dot{x} \sin \beta + \dot{y} \cos \beta - R_2 \sin(\alpha + \varphi - \beta))^2}$
	\dot{x}	0 0 1 0 0 0 0	$\frac{-\dot{x} + R_1 \cos \alpha}{(-\dot{x} \sin \beta + \dot{y} \cos \beta - R_1 \sin(\alpha - \beta))^2}$
	\dot{y}	0 0 0 1 0 0 0	$\frac{-\dot{x} + R_2 \cos(\alpha + \varphi)}{(-\dot{x} \sin \beta + \dot{y} \cos \beta - R_2 \sin(\alpha + \varphi - \beta))^2}$
	β	0 0 0 0 1 ΔT 0	0
6	x	1 0 ΔT 0 0 0 0	$\frac{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + R_1^2 - 2R_1(\dot{x} \cos \alpha + \dot{y} \sin \alpha)}{(-\dot{x} \sin \beta + \dot{y} \cos \beta - R_1 \sin(\alpha - \beta))^2}$
	y	0 1 0 ΔT 0 0 0	$\frac{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + R_2^2 - 2R_2(\dot{x} \cos(\alpha + \varphi) + \dot{y} \sin(\alpha + \varphi))}{(-\dot{x} \sin \beta + \dot{y} \cos \beta - R_2 \sin(\alpha + \varphi - \beta))^2}$
	\dot{x}	0 0 1 0 0 0 0	0
	\dot{y}	0 0 0 1 0 0 0	0
	α	0 0 0 0 0 1 ΔT	$\frac{R_1(\dot{x} \cos \alpha + \dot{y} \sin \alpha - R_1)}{(-\dot{x} \sin \beta + \dot{y} \cos \beta - R_1 \sin(\alpha - \beta))^2}$

	Prwy- klas	Stan	A_k	C_k^T
	x	1 0 0 ΔT 0 0 0 0 0 0 0 0	$\frac{\hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\psi} + \hat{t} \sin \hat{\phi} \cos \hat{\theta} \cos \hat{\psi} + \hat{t} \sin \hat{\theta} \sin \hat{\psi}}{(-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi})^2}$	$\frac{\hat{y} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\psi} + \hat{t} \sin \hat{\phi} \cos \hat{\theta} \sin \hat{\psi} - \hat{t} \sin \hat{\theta} \cos \hat{\psi}}{(-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi})^2}$
	y	0 1 0 0 ΔT 0 0 0 0 0 0 0	$\frac{-\hat{x} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\psi} + \hat{t} \sin \hat{\phi} \cos \hat{\theta} \cos \hat{\psi} - \hat{t} \cos \hat{\theta} \sin \hat{\psi}}{(-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi})^2}$	$\frac{-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\psi} + \hat{t} \sin \hat{\phi} \cos \hat{\theta} \sin \hat{\psi} + \hat{t} \cos \hat{\theta} \cos \hat{\psi}}{(-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi})^2}$
5	z	0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0	$\frac{\sin \hat{\psi} (\hat{y} \cos \hat{\theta} - \hat{x} \sin \hat{\theta}) - \sin \hat{\phi} \cos \hat{\psi} (\hat{x} \cos \hat{\theta} + \hat{y} \sin \hat{\theta})}{(-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi})^2}$	$\frac{\cos \hat{\psi} (\hat{y} \cos \hat{\theta} - \hat{x} \sin \hat{\theta}) + \sin \hat{\phi} \sin \hat{\psi} (\hat{x} \cos \hat{\theta} + \hat{y} \sin \hat{\theta})}{(-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi})^2}$
	t	0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0	$\frac{\sin \hat{\psi} (\hat{y} \cos \hat{\theta} - \hat{x} \sin \hat{\theta}) - \sin \hat{\phi} \cos \hat{\psi} (\hat{x} \cos \hat{\theta} + \hat{y} \sin \hat{\theta})}{(-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi})^2}$	$\frac{\cos \hat{\psi} (\hat{y} \cos \hat{\theta} - \hat{x} \sin \hat{\theta}) + \sin \hat{\phi} \sin \hat{\psi} (\hat{x} \cos \hat{\theta} + \hat{y} \sin \hat{\theta})}{(-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi})^2}$
	θ	0 0 0 0 0 0 1 ΔT 0 0 0 0	0	0
	φ	0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0	0	0
	ψ	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 ΔT 0 0	0	0
	χ	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1	$\frac{(\hat{x}^2 + \hat{y}^2) \cos \hat{\phi} \cos \hat{\psi} - \hat{x} \hat{t} (\sin \hat{\theta} \sin \hat{\theta} \cos \hat{\psi} - \cos \hat{\theta} \sin \hat{\psi}) + \hat{y} \hat{t} (\sin \hat{\phi} \cos \hat{\theta} \cos \hat{\psi} + \sin \hat{\theta} \sin \hat{\psi})}{(-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi})^2}$	
			$\frac{(\hat{x}^2 + \hat{y}^2) \cos \hat{\theta} \sin \hat{\psi} + \hat{x} \hat{t} (\sin \hat{\phi} \sin \hat{\theta} \cos \hat{\psi} - \cos \hat{\theta} \sin \hat{\psi}) - \hat{y} \hat{t} (\sin \hat{\phi} \cos \hat{\theta} \sin \hat{\psi} - \sin \hat{\theta} \cos \hat{\psi})}{(-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi})^2}$	
			$\frac{\sin \hat{\psi} [(\hat{x} \sin \hat{\theta} - \hat{y} \cos \hat{\theta})^2 - \hat{t}^2] - \hat{t} \cos \hat{\psi} \cos \hat{\phi} (\hat{x} \cos \hat{\theta} + \hat{y} \sin \hat{\theta})}{(-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi})^2}$	
			$\frac{\cos \hat{\psi} [(\hat{x} \sin \hat{\theta} - \hat{y} \cos \hat{\theta})^2 + \hat{t}^2] + \hat{t} \sin \hat{\psi} \cos \hat{\psi} (\hat{x} \cos \hat{\theta} + \hat{y} \sin \hat{\theta})}{(-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi})^2}$	
			$\frac{-\sin \hat{\psi} (\hat{x} \cos \hat{\theta} - \hat{y} \sin \hat{\theta}) + \cos \hat{\psi} (\hat{x} \sin \hat{\theta} \sin \hat{\theta} - \hat{y} \sin \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \cos \hat{\phi})}{-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi}}$	
			$\frac{-\cos \hat{\psi} (\hat{x} \cos \hat{\theta} + \hat{y} \sin \hat{\theta}) - \sin \hat{\psi} (\hat{x} \sin \hat{\theta} \sin \hat{\theta} - \hat{y} \sin \hat{\theta} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \cos \hat{\phi})}{-\hat{x} \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} + \hat{y} \cos \hat{\phi} \cos \hat{\theta} + \hat{t} \sin \hat{\phi}}$	

Mimo że poszczególne elementy macierzy C_k określone są dość złożonymi formułami, to wyznaczenie tych elementów nie stanowi istotnych trudności. Również postać macierzy A_k stwarza pewne szczególne możliwości obliczeniowe wyznaczenia macierzy $P_{k|k}$. Nie wniej jednak silnie nieliniowa postać równań pomiarów może być przyczyną słabej zbieżności równań rozszerzonego filtra Kalmana. W tym przypadku można zastosować schemat Newtona-Raphsona do iterowania równań estymatora. Jakość ocen proponowanego estymatora musi być przedmiotem badań numerycznych.

5. Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono koncepcję zastosowania rozszerzonego filtra Kalmana jako estymatora parametrów ruchu obiektu z kamerą względem ruchomego przedmiotu (sceny) na podstawie długiej sekwencji obrazów. Przedstawiono postać modelu ruchu i estymatora dla prostych przykładów wzajemnych sytuacji układu obiekt-scena. Ograniczono się do zagadnień prostych, dla których równania stanu są liniowe, a nieliniowość równań pomiaru wynika z transformacji wizyjnych. Zwiększenie złożoności ruchu obiektu lub przedmiotu prowadzi do nieliniowych równań stanu. Stosowanie proponowanego filtra jest również możliwe, lecz zbieżność uzyskiwanych ocen jest wówczas wątpliwa. Natomiast skomplikowanie kształtu sceny nie powinno w istotny sposób zwiększać trudności obliczeniowych.

LITERATURA

- [1] Tsai R.Y., Huang T.S.: Estimating three-dimensional motion parameters of a rigid planar patch, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, v. ASSP-29, pp. 1147-1152, Dec. 1981.
- [2] Tsai R.Y., Huang T. Sand Zhu W.L.: Estimating three-dimensional motion parameters of a rigid planar patch, II : singular value decomposition, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, v. ASSP-30, pp. 525-534, Aug. 1982.
- [3] Tsai R.Y., Huang T.S.: 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, v. ASSP-32, pp. 213-219, April, 1984.
- [4] Prazdny K.: Determining the instantaneous direction of motion from optical flow generated by a curvilinearly moving observer, Computer Graphics and Image Processing, 17, pp. 238-248, 1981.
- [5] Feunema C.L., Thompson W.B.: Velocity determination in scenes containing several moving objects, Computer Graphics and Image Processing, 9, pp. 301-315, 1979.
- [6] Polański A.: Algorytm wyznaczenia parametrów ruchu na podstawie pola przemieszczeń (złożone do druku w Redakcji Zeszytów Naukowych, s. Automatyka, 1986).
- [7] Anderson B.D.O., Moore J.B.: Filtracja optymalna, WNT, Warszawa 1984.

- [8] Haralick R.M.: Using perspective transformations in scene analysis, Computer Graphics and Image Processing, 13, pp. 191-221, 1980.
- [9] Jazwiński A.H.: Stochastic Processes and Filtering Theory, New York, Academic Press, 1970.

Recenzent: Doc. dr inż. Bogdan Wołozak

Wpłynęło do Redakcji 2.01.87 r.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА
НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОБРАЗОВ

Р е з ю м е

В работе предлагается применение расширенного фильтра Калмана для оценки параметров движения объекта относительно наблюдаемого предмета. Предлагаемый метод требует довольно длинной последовательности образов, при чем число признаков образа может быть минимальным.

ESTIMATION OF MOTION PARAMETERS FOR THE PLANT BASING
ON THE LARGE SEQUENCE OF IMAGES

S u m m a r y

An extended Kalman filter is proposed to estimation of the plant motion parameters in the relation to the observed object. The method needs a large sequence of images to be used while a number of the images features may be small.