

Konrad WOJCIECHOWSKI, Marian BŁACHUTA

Andrzej POLAŃSKI, Joanna POLAŃSKA

Krzysztof SIMEK

STEROWANIE OBIEKTAMI DYNAMICZNYMI NA PODSTAWIE INFORMACJI WIZYJNEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono ogólną koncepcję sterowania ruchem bryły sztywnej w przestrzeni trójwymiarowej przy wykorzystaniu informacji wizyjnej. Koncepcja ta ilustrowana jest na przykładzie sterowania przestrzennym ruchem samolotu.

DYNAMIC SYSTEMS CONTROL USING VISUAL INFORMATION

Summary. In the paper the general idea of the 3D object motion control using visual information is described. The example of the plane motion control demonstrates the idea.

УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Резюме. В работе представлена общая концепция управления движением твердого тела в трехмерном пространстве при использовании зрительной информации. Концепция поясняется примером управления пространственным движением самолета.

1. WPROWADZENIE

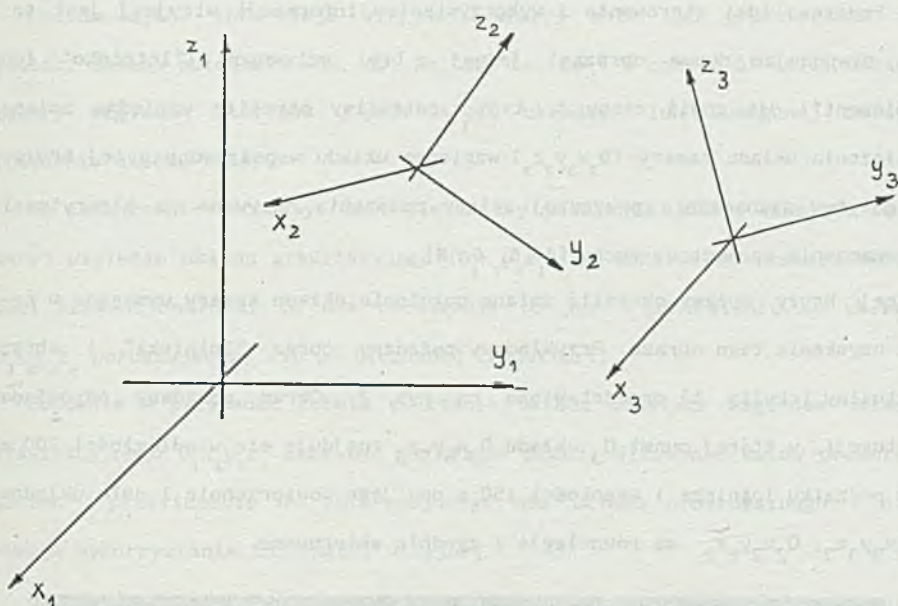
W praktycznych zastosowaniach teorii sterowania idea sprzężenia zwrotnego jest podstawowa. Jej realizacja uwarunkowana jest jednak możliwością bezpośredniego lub pośredniego pomiaru "odchyłki" pomiędzy wartością pożądaną wielkości sterowanej a wartością zrealizowaną na wyjściu obiektu. Fizyczny charakter wielkości wyjściowej oraz zadanej może być przy tym bardzo różny. Stąd istnieje grupa zadań sterowania takich, że pomiar wymagany dla zrealizowania sprzężenia zwrotnego nie jest wykonalny przy użyciu klasycznej techniki pomiarowej. Typowym przykładem takiego zadania jest sterowanie ruchem bryły sztywnej.

Zadanie sterowania ruchem bryły sztywnej w przestrzeni trójwymiarowej na podstawie informacji wizyjnej (obrazy 2D) jest podstawowe dla automatycznego sterowania pojazdów i robotyki. Jest ono jednocześnie trudniejsze o trzy dodatkowe stopnie swobody od analogicznego zadania sterowania ruchem punktu materialnego.

2. STEROWANIE NA PODSTAWIE INFORMACJI WIZYJNEJ

Przypomnijmy podstawowe założenia i interpretacje rozpatrywanego zadania sterowania ruchem przestrzennym bryły sztywnej z wykorzystaniem informacji wizyjnej.

Niech będą dane trzy, prostokątne, prawoskrętne układy odniesienia, przykładowo: $O_1x_1y_1z_1$, $O_2x_2y_2z_2$, $O_3x_3y_3z_3$ przedstawione na rys.1. Każdy z układów związany jest z jedną z trzech wyróżnionych brył sztywnych. Interpretacje fizyczne nadawane poszczególnym bryłom sztywnym mogą być bardzo różne.



Rys. 1. Wyróżnione układy współrzędnych

Fig. 1. Coordinate systems

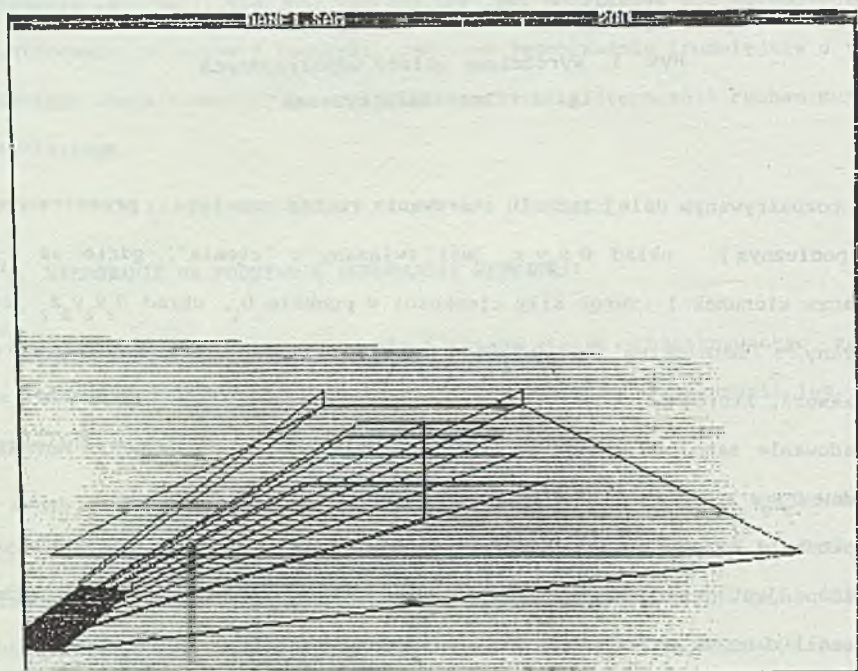
W rozpatrywanym dalej zadaniu sterowania ruchem samolotu (przestrzennym lub podłużnym) układ $O_1x_1y_1z_1$ jest związany z "ziemią", gdzie os O_1z_1 wyznacza kierunek i zwrot siły ciężkości w punkcie O_1 , układ $O_2x_2y_2z_2$ jest związany z "lotniskiem" zaś układ $O_3x_3y_3z_3$ z "samolotem" i zamocowana na nim kamera, której os obiektywu pokrywa się z osią O_3x_3 .

Ładowanie samolotu wymaga zapewnienia odpowiedniej wzajemnej orientacji układów $O_2x_2y_2z_2$, $O_3x_3y_3z_3$.

Położenie każdego z wyróżnionych układów względem jednego z pozostałych określone jest przez trzy kąty Eulera oraz wektor translacji [4]. Zauważmy, że jeżeli dane są położenia jednego z układów względem dwu pozostałych, to wzajemne położenie układów pozostałych jest również znane.

Podstawą ideal sterowania z wykorzystaniem informacji wizyjnej jest to, że dysponując dwoma obrazami jednej z brył sztywnych ("lotnisko" lub "element") dla chwil czasu t , $t+\Delta t$, potrafimy określić względną zmianę położenia układu kamery ($O_3x_3y_3z_3$) względem układu współrzędnych tej bryły. Algorytmy wyznaczania powyższej zmiany położenia nazywane są algorytmami wyznaczania parametrów ruchu [4, 5, 6, 8].

danej bryły, możemy określić zmianę położenia układu kamery wymaganą w celu uzyskania tego obrazu. Przykładowy pożądaný obraz "lotniska" i obraz aktualny (chwila t) przedstawiono na rys. 2. Obraz pożądaný odpowiada sytuacji, w której punkt O_3 układu $O_3x_3y_3z_3$ znajduje się w odległości 200 m od początku lotniska i wysokości 150 m nad jego powierzchnią i osie układów $O_3x_3y_3z_3$, $O_2x_2y_2z_2$ są równoległe i zgodnie skierowane.



Rys. 2. Pożądaný i aktualny widok lotniska

Fig. 2. The desired and actual aircraft carrier view

Podsumowując, informacja wizyjna (obrazy) może być przetworzona do postaci zmiany położenia (Δx , Δy , Δz , $\Delta \varphi$, $\Delta \nu$, $\Delta \psi$) w czasie Δt [4,7] układu kamery względem któregoś z pozostałych układów lub wymaganej zmiany położenia układu kamery.

Na zakończenie zauważmy, że o ile zmiany położenia układu samolotu (kamery) względem układu grawitacyjnego ($0_1 x_1 y_1 z_1$) są możliwe do pomiaru metodami konwencjonalnymi to nie obowiązuje to już w odniesieniu do układu $0_2 x_2 y_2 z_2$ poruszającego się po nieznannej trajektorii.

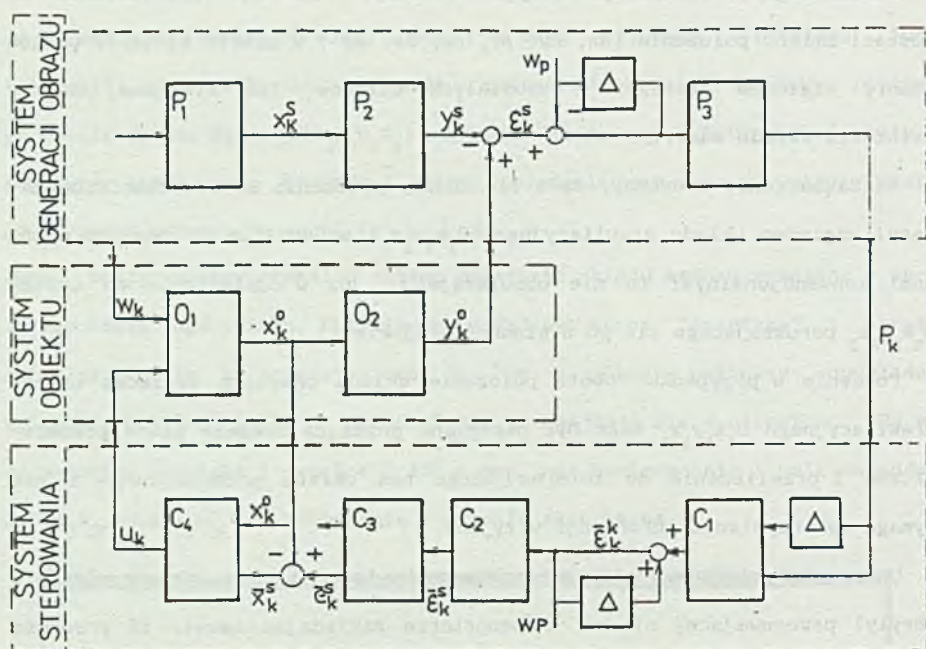
Podobnie w przypadku robota położenie układu chwytaka względem układu grawitacyjnego $0_1 x_1 y_1 z_1$ może być określane przez całkowanie kątów przemieszczeń i przeliczenie do interesującego nas układu prostokątnego i nie wymaga wykorzystania informacji wizyjnej.

Uzyskanie pożądanego położenia układu chwytaka względem układu elementu (bryły) przesuwanego na transporterze zakładając nawet, że prędkość transportera jest stała i znana, jednak orientacja elementów w układzie grawitacyjnym jest przypadkowa, wymaga korzystania z informacji wizyjnej.

3. STRUKTURA UKŁADU STEROWANIA Z WYKORZYSTANIEM INFORMACJI WIZYJNEJ

Szczegółową strukturę układu sterowania ruchem bryły sztywnej z wykorzystaniem informacji wizyjnej przedstawiono na rys. 3. Na rysunku tym dodatkowo uwzględniono układy symulacji "świata zewnętrznego" i obiektu podlegającego sterowaniu.

Układ sterowania zawiera dwa podsystemy. W pierwszym podsystemie (według kierunku przepływu informacji) składającym się z bloków C1, C2, C3 ciąg obrazów przekształcany jest do postaci parametrów ruchu. W drugim podsystemie (blok C4) odtwarzany jest wektor x_k^s stanu obiektu, za którym odbywa się nadążanie i na tej podstawie przy znajomości własnego wektora stanu obiektu x_k^o wyznaczana jest wartość sterowania.



Rys. 3. Struktura układu sterowania z wykorzystaniem informacji wizyjnej

Fig. 3. The structure of control system using visual information

Obraz cyfrowy P_k przekazywany w torze wizji w chwili dyskretnej k jest zapamiętywany i z obrazem P_{k-1} zapamiętanym w chwili poprzedniej stanowi informację wejściową bloku C_1 , gdzie wykonywane jest wyznaczanie pola przemieszczeń oraz określane są przyrosty położenia i kątów Eulera układu kamery względem układu związanego z widzianym przez nią obiektem (otoczeniem).

Na podstawie powyższych przyrostów i zadanego warunku początkowego odtwarzane są trzy składowe położenia i kąty Eulera układu kamery w chwili dyskretnej k względem układu obiektu (otoczenia). Parametry te są zawarte w wektorze \bar{e}_k^k .

Biorąc pod uwagę, że os widzenia kamery nie musi pokrywać się z osią podłużną obiektu lub kamera może poruszać się względem osi obiektu, wektor \bar{e}_k przeliczany jest w bloku C2 na wektor \bar{e}_k^s

Składowe położenia oraz kąty Eulera zawarte w wektorze $\bar{e}_k^s = [\Delta \bar{x}_k \Delta \bar{y}_k \Delta \bar{z}_k \Delta \bar{\varphi}_k \Delta \bar{\nu}_k \Delta \bar{\psi}_k]$ nie stanowią w przypadku ruchu bryły sztywnej pełnego wektora stanu. Brakujące trzy składowe prędkości postępowej i odpowiednie trzy składowe prędkości obrotowej w najprostszym przypadku mogą zostać odtwarzane w bloku C3 przez wykorzystanie związków kinematycznych [13], [14] i aproksymację pochodnych względem czasu odpowiednimi ilorazami różnicowmi. Mamy:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_{x,k} \\ \Delta \bar{v}_{y,k} \\ \Delta \bar{v}_{z,k} \end{bmatrix} = D_{SC}(\Delta \bar{\varphi}_k, \Delta \bar{\nu}_k, \Delta \bar{\psi}_k) \cdot \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} \Delta \bar{x}_k - \Delta \bar{x}_{k-1} \\ \Delta \bar{y}_k - \Delta \bar{y}_{k-1} \\ \Delta \bar{z}_k - \Delta \bar{z}_{k-1} \end{bmatrix}$$

oraz

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{\omega}_{x,k} \\ \Delta \bar{\omega}_{y,k} \\ \Delta \bar{\omega}_{z,k} \end{bmatrix} = \Omega(\Delta \bar{\varphi}_k, \Delta \bar{\nu}_k) \cdot \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} \Delta \bar{\varphi}_k - \Delta \bar{\varphi}_{k-1} \\ \Delta \bar{\nu}_k - \Delta \bar{\nu}_{k-1} \\ \Delta \bar{\psi}_k - \Delta \bar{\psi}_{k-1} \end{bmatrix}$$

Ostatecznie na wyjściu pierwszego z podsystemów systemu sterowania dysponujemy wszystkimi składowymi wektora odchyłki \bar{e}_k pomiędzy znanym stanem x_k^0 sterowanego obiektu a nieznanym stanem x_k^s obiektu, za którym odbywa się nadażanie. Możliwe jest zatem odtworzenie nieznanego stanu jako $\bar{x}_k^s = x_k^0 + \bar{e}_k$.

Opisana powyżej sytuacja jest najbardziej ogólną. W przypadku uproszczonego obiektu może być sterowany względem fragmentu otoczenia, który jest nieruchomy względem przyjętego inercyjnego układu odniesienia, a początki układów pokrywają się ze sobą. W takim przypadku $x_k^s = 0$ i informacja wizyjna służy jedynie do poprawy dokładności wyznaczania własnego wektora stanu x_k^0 .

W innych przypadkach szczególnych jedynie niektóre ze składowych wektora x_k^s mogą być z założenia równe zero (np. wykluczenie ruchu obrotowego).

Blok C4 jest "konwencjonalnym" układem sterowania, dla którego informację wejściową stanowią aktualny stan x_k^0 sterowanego obiektu oraz odtworzony stan \bar{x}_k^s obiektu, za którym odbywa się nadążanie.

Podsumowując realizacja sterowania z wykorzystaniem informacji wizyjnej zakłada jej dwuetapową agregację.

W etapie pierwszym dla pary obrazów (z chwil $t, t+\Delta t$) wyznaczany jest tzw. przepływ optyczny (optical flow) na podstawie analizy różniczkowej lub odpowiedniości wyróżnionych punktów lub obszarów analizowanych obrazów.

W etapie drugim, na podstawie przepływu optycznego wyznaczane są parametry ruchu określające kierunek wektora translacji i przyrosty trzech kątów Eulera układu współrzędnych związanego z kamerą względem układu współrzędnych wyróżnionej bryły sztywnej. Parametry ruchu wyznaczane są przez iteracyjną dekompozycję przepływu optycznego na składowe rotacje i translacje [8] lub przez zastosowanie algorytmu Wenga.

Parametry ruchu stanowią informację wejściową dla wielowymiarowego regulatora realizującego wybrane zadanie sterowania.

W syntezie regulatora stosuje się metody liniowo-kwadratowe, metodę H^∞ oraz oryginalną metodę tzw. lokalizacji.

Fizyczna realizacja sterowania z wykorzystaniem informacji wizyjnej poprzedzona jest badaniami symulacyjnymi. Badania takie mogą mieć strukturę etapową.

W etapie pierwszym symulowany jest nie tylko obiekt dynamiczny podlegający sterowaniu, ale również jego otoczenie będące źródłem informacji wizyjnej wykorzystywanej w torze sprzężenia zwrotnego (patrz rys. 3).

Zaletą takiego podejścia jest możliwość uzyskania na tej drodze idealnego toru wizji pozbawionego zakłóceń związanych z pozyskiwaniem

i przetwarzaniem ciągu obrazów przy równoczesnej możliwości wprowadzania sztucznych zakłóceń o założonym charakterze i kontrolowanej wielkości.

Kolejną zaletą wspomnianego podejścia jest możliwość wyróżnienia w otoczeniu sterowanego obiektu również innych obiektów poruszających się według zadanej lub losowej trajektorii i formułowanie zadania sterowania względem tych obiektów.

Podejście to jest równocześnie bardzo elastyczne, umożliwia proste formowanie i równie prostą zmianę parametrów toru wizji takich, jak: kąt widzenia kamery względem osi sterowanego obiektu, prędkość ruchu kamery względem tego obiektu, ogniskowa kamery, zasięg widzenia i inne oraz formowania i zmianę otoczenia (świat zewnętrzny), w którym odbywa się ruch.

Mając na uwadze powyższe zalety w pracy zdecydowano się na taką właśnie koncepcję, która uzupełniona o modułową realizację poszczególnych funkcji daje uniwersalny system dla symulacyjnego badania algorytmów sterowania z wykorzystaniem informacji wizyjnej.

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono ogólną koncepcję sterowania ruchem bryły sztywnej w przestrzeni trójwymiarowej przy wykorzystaniu informacji wizyjnej. Koncepcja ta w tekście pracy ilustrowana jest na przykładzie sterowania przes-
trzennym ruchem samolotu, jednak ogólnie może być odnoszona do sterowania ruchem dowolnej bryły sztywnej na podstawie informacji wizyjnej.

Realizacja przedstawionej koncepcji wymaga rozwiązania wielu problemów składowych. Należą do nich opracowanie modelu sterowanego obiektu, zasady wyznaczania ustalonego punktu pracy i linearyzacja obiektu w jego otoczeniu, zagadnienia związane z wyznaczaniem pola przemieszczeń (optical flow), a następnie jego przetwarzania do postaci parametrów ruchu. Isto-

tny jest problem syntezy prawa sterowania wraz z planowaniem trajektorii odniesienia przy ewentualnych ograniczeniach na zbiór trajektorii dopuszczalnych. Ostatnim z problemów częściowych jest opracowanie danych liczbowych, wizualnych i ocena rezultatów sterowania.

LITERATURA

- [1] Ordys A., Wojciechowski K.: Wybrane algorytmy przetwarzania wstępnego obrazu z zagadnieniami wyznaczania pola prędkości. ZN Pol. Śl., ser. Automatyka, nr 97, Gliwice
- [2] Ordys A., Wojciechowski K.: Metody wyznaczania pola prędkości na podstawie sekwencji obrazów. ZN Pol. Śl., ser. Automatyka, nr 97, Gliwice
- [3] Ordys A.: Numeryczne wyznaczania pola prędkości na podstawie analizy przesuniętych w czasie obrazów. ZN Pol. Śl., ser. Automatyka, nr 97, Gliwice
- [4] Polański A.: Algorytm wyznaczania parametrów ruchu na podstawie pola przemieszczeń. ZN Pol. Śl., ser. Automatyka, nr 97, Gliwice
- [5] Polański A., Wojciechowski K.: Wyniki numerycznych badań algorytmu wyznaczania parametrów ruchu. Prace Nauk. Inst. Cybernetyki Techn. Pol. Wrocławskiej. Wrocław 1988.
- [6] Polański A.: Określenie parametrów ruchu w przestrzeni trójwymiarowej na podstawie obrazów z dwóch kamer. ZN Pol. Śl., ser. Automatyka, nr 97, Gliwice
- [7] Polański A., Wojciechowski K.: Analiza pola przemieszczeń, ZN Pol. Śl., ser. Automatyka, nr 97, Gliwice
- [8] Polański A., Wojciechowski K.: Dobór funkcji celu w algorytmach wyznaczania parametrów ruchu. ZN Pol. Śl. (przyjęte do druku).
- [9] Simek K., Wojciechowski K.: Synteza prawa sterowania w strukturze otwartej ze sprzężeniem. ZN Pol. Śl. (przyjęte do druku).
- [10] Simek K., Wojciechowski K.: Dyskretne przekształcenia sumacyjne dla funkcji Walsh'a. ZN Pol. Śl., ser. Automatyka, nr 97, Gliwice
- [11] Świerniak A.: Wyznaczanie parametrów ruchu obiektu na podstawie długiego ciągu obrazów. ZN Pol. Śl., ser. Automatyka, nr 97, Gliwice
- [12] Świerniak A., Polański J.: Dobór regulatora metodami H^∞ dla modelu samolotu linearyzowanego. ZN Pol. Śl. (przyjęte do druku).

- [13] Wojciechowski K., Ordys A., Polański A.: Algorytm sterowania wybranym obiektem dynamicznym na podstawie informacji wizyjnej. Prace Nauk. Inst. Cyb. Techn. Pol. Wrocławskiej, nr 75, Wrocław 1988.
- [14] Wojciechowski K., Ordys A., Polańska J.: Model przestrzennego ruchu samolotu dla celów symulacji i sterowania. ZN Pol. Śl. (przyjęte do druku).

Recenzent: Doc. dr inż. Bohdan WOŁCZAK

Wpłynęło do Redakcji 20.05.1991 r.

A b s t r a c t

The construction of the feedback channel requires the measurement of the difference between the desired values of controlled signals and the real values of these signals. However there is a group of control problems for which the measurement of this difference cannot be realized using the classical techniques. In such a situation the application of a vision channel as the first step of information processing is justifiable.

In the paper the general idea of a rigid body motion control using visual information is presented. This idea is illustrated by an example of an airplane flight control.