

Konrad WOJCIECHOWSKI

WPROWADZENIE

Automatyczne sterowanie ruchem obiektów dynamicznych, takich jak: pojazd samochodowy, mobilny robot, statek, samolot w trójwymiarowej przestrzeni fizycznej wymaga wykorzystania informacji wizyjnej.

Sterowanie ze sprzężeniem od informacji wizyjnej oznacza zależność decyzji sterującej, podejmowanej w danej chwili dyskretnej, od informacji zawartej w ciągu obrazów otrzymanych dla chwil wcześniejszych. Zależność taka, wyznaczona dla wszystkich chwil rozpatrywanego horyzontu sterowania, nosi nazwę prawa sterowania ze sprzężeniem od informacji wizyjnej.

Wykorzystanie sprzężenia od informacji wizyjnej pozwala na formułowanie i rozwiązywanie zadań sterowania w ruchomych lub zmieniających okresowo swe położenie układach odniesienia.

Fizycznie system wizji stanowi kamera TV sztywnie związana z poruszającym się obiektem. Sygnał z kamery przekazywany jest na szybki przetwornik A/C, a następnie gromadzony w systemie pamięci obrazu. W niektórych rozwiązaniach stosuje się dwie kamery jak również dopuszcza ruch kamery względem pojazdu.

Założona długość ciągu obrazów jak również liczba składowych wektora stanu zależą od szczegółowych warunków zadania sterowania. Przykładowo wzrost długości ciągu może zwiększać dokładność wyznaczenia parametrów ruchu, jednak w przypadku występowania niestacjonarności w modelu sterowanego obiektu dynamicznego stosowanie zbyt długich ciągów może prowadzić do błędów systematycznych. Podobnie liczba składowych wektora stanu zależy od rodzaju ruchu oraz od rzędu równania różnicowego stanowiącego model sterowanego obiektu.

W przedstawionych pracach stosuje się najprostsze dwuelementowe ciągi obrazów, jedynie w pracy [10] rozpatrywano przypadek ogólniejszy.

Przetwarzanie całej informacji zawartej w ciągu obrazów w wartość sterowania nie jest potrzebne, jeśli wziąć pod uwagę, że jej znaczna część stanowi informację nadmiarową.

Z powyższych względów założono wstępną agregację informacji zawartej w ciągu obrazów do postaci wektora stanu lub parametrów ruchu.

Agregacja ciągu obrazów do postaci parametrów ruchu jest przeprowadzana w dwu etapach.

W etapie pierwszym określa się pola prędkości i przemieszczeń lub odpowiedniość punktów na kolejnych obrazach wchodzących w skład agregowanego ciągu.

Na etapie drugim w pewnych przypadkach szczególnych pole prędkości może być podstawą do bezpośredniego określenia parametrów ruchu, [4]. W przypadku ogólnym do określenia tych parametrów wykorzystuje się pole przemieszczeń lub wielkości przemieszczeń dla wybranych par punktów.

1. Pola przemieszczeń i prędkości

Polem przemieszczeń obrazu określonym na podstawie ciągu dwu obrazów z chwil t , $t + \Delta t$ nazywamy dwuwymiarowe pole wektorowe, którego wektory reprezentują przemieszczenia odpowiadających sobie punktów obrazów. Pole to jest rzutem na płaszczyznę obrazu fizycznych, trójwymiarowych przemieszczeń punktów sceny.

Polem prędkości obrazu, określonym na podstawie ciągu dwu obrazów z chwil t , $t + \Delta t$, nazywamy dwuwymiarowe pole wektorowe, którego wektory reprezentują chwilowe prędkości odpowiadających sobie punktów obrazu.

Pole to jest rzutem na płaszczyznę obrazu wektorów prędkości chwilowych dla punktów sceny.

Wyznaczanie pola przemieszczeń lub prędkości jest traktowane jako etap pośredni w agregacji ciągu obrazów do parametrów ruchu. Może też stanowić zadanie samodzielne, jeśli pole prędkości jest podstawą do segmentacji obrazu w sytuacji, gdy w scenie występuje wiele poruszających się względem siebie obiektów.

W praktyce nie jest możliwe określenie pól przemieszczeń i prędkości dla wszystkich punktów obrazu. Aby przemieszczenie punktu na kolejnych obrazach było widoczne, musi on być "identyfikowalny", tj. musi odróżniać się od punktów sąsiednich, będąc od nich jaśniejszy lub ciemniejszy. Własność taka występuje np. dla punktów leżących na konturze obserwowanego obiektu lub w miejscach zmiany faktury powierzchni.

W praktyce pole przemieszczeń lub prędkości jest określane właśnie dla tych punktów.

W dalszym ciągu pole przemieszczeń i pole prędkości traktuje się zamiennie przy założeniu, że przedział czasu Δt jest odpowiednio mały.

1.1. Metody wyznaczania pola prędkości na podstawie ciągu obrazów

Metody wyznaczania pola prędkości można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej należą metody, w których zakłada się znajomość prędkości w pewnych punktach obrazu i na tej podstawie łącznie z dodatkowymi założeniami o charakterze ruchu oraz sztywności obiektu, którego obraz oglądamy, wyznacza się całe pole prędkości. Metody należące do tej grupy przedstawiono w pracy [4]. Nie mają one charakteru ogólnego.

Do drugiej grupy należą metody nie wymagające znajomości prędkości w żadnym punkcie obrazu. Wyznaczanie pola prędkości odbywa się dwuetapowo.

W etapie pierwszym wyznacza się jedynie składowe prędkości normalne do konturu w jego kolejnych punktach. W etapie drugim, stosując heurystyczny warunek "gładkości" pola, określa się poszukiwane pole prędkości.

1.2. Algorytmy wyznaczania pola składowych normalnych prędkości

W przypadku braku danej a priori odpowiedniości pomiędzy punktami obrazów z chwil t , $t + \Delta t$ możliwe jest wyznaczanie tylko tej składowej prędkości w danym punkcie konturu, która nie jest do niego styczna w tym punkcie. Służą temu algorytmy przedstawione w [2], [5].

W pierwszym z algorytmów wykonuje się konturowanie każdego z obrazów należących do agregowanego ciągu. Następnie w wybranych punktach konturu obrazu wcześniejszego wyznacza się kierunki prostopadłe i na nich oblicza wielkości przemieszczeń do przecięcia z konturem obrazu późniejszego. Wydzielenie wyznaczonych przemieszczeń przez Δt daje poszukiwane składowe normalne prędkości.

Drugi algorytm wykorzystuje dla wyznaczenia składowych normalnych prędkości zmianę w czasie poziomu szarości przetworzonego odpowiednio obrazu późniejszego, liczoną na konturze obrazu wcześniejszego. Przetwarzanie obrazu późniejszego polega na jego splocie z funkcją typu $\nabla^2 G$, gdzie ∇^2 jest dwuwymiarowym laplasjanem, zaś G również dwuwymiarową funkcją Gaussa. Parametry tej funkcji, a w szczególności parametr odpowiadający macierzy kowariancji, decyduje o maksymalnej wielkości Δt , dla której metoda daje wynik poprawny.

W pracy [5] przedstawiono rezultaty uzyskane przy zastosowaniu wspomnianego algorytmu. Badano wpływ wielkości maski na efekt wyznaczania pola prędkości. Przebadano również możliwości stosowania operatorów różnych od $\nabla^2 G$, oraz wpływ błędów kwantowania na poprawność wyznaczania pola prędkości.

2. Wyznaczanie parametrów ruchu

Ostateczna agregacja ciągu obrazów wstępnie przetworzonych do postaci pola przemieszczeń dla całego obrazu lub jego 9 punktów polega na wyznaczeniu parametrów ruchu.

Parametrami ruchu są trzy przyrosty kątów obrotu oraz trzy składowe przesunięcia. Znajomość ich przy założeniu $\Delta t \rightarrow 0$ pozwala następnie na określenie odpowiednich pochodnych kątów obrotu i przesunięć względem czasu.

Parametry ruchu wyznacza się z ogólnej zależności pomiędzy współrzędnymi punktu w przestrzeni trójwymiarowej przed i po translacji połączonej z obrotem w powiązaniu z transformacją prespektywiczną punktu z przestrzeni trójwymiarowej na płaszczyznę obrazu.

Ze względu na funkcje trygonometryczne kątów obrotu występujące w macierzy rotacji oraz postać transformacji perspektywicznej wspomniana zależność jest nieliniowa i poza szczególnymi przypadkami ruchu nie jest możliwe jej analityczne rozwiązanie względem parametrów ruchu.

W pracy [6] podano iteracyjny algorytm rozwiązania tego problemu. Polega on na dekompozycji pola przemieszczeń na pole rotacji i pole translacji oraz wykorzystaniu warunku pozwalającego na sprawdzenie czy dane pole jest rzeczywiście polem rotacji. W przypadku gdy wyznaczone w danym kroku iteracji pole przemieszczeń różni się zbytnio od pola translacji, następuje modyfikacja założonych wcześniej kątów obrotu i ponowna dekompozycja całego pola przemieszczeń.

W pracy [7] przedstawiono wyniki badań numerycznych algorytmu wyznaczania parametrów ruchu na podstawie symulowanego pola przemieszczeń w wariantach z zakłóceniami i bez nich. Badania numeryczne prowadzono przy różnej liczbie wyznaczonych parametrów. Stwierdzono jego poprawność szczególnie przy zastosowaniu bezgradientowej metody minimalizacji.

2.1. Wyznaczanie parametrów ruchu na podstawie obrazów i dwu kamer

W pracach [2], [4], [5], [6] zakładano, że na obiekcie dynamicznym podlegającym sterowaniu znajduje się tylko jedna kamera przekazująca ciąg obrazów będących podstawą syntezy sterowania.

Możliwe jest oczywiście założenie większej liczby kamer, których położenia względem siebie są znane.

W pracy [9] rozpatrzono przypadek dwu kamer. Oznacza to, że parametry ruchu wyznaczone są na podstawie dwu pól przemieszczeń, co powoduje uproszczenie algorytmu. Należy też oczekiwać, że w obliczeniach będzie osiągać się lepszą dokładność. Wzory określające parametry ruchu mają w tym przypadku analityczną postać i jest możliwe określenie wszystkich współrzędnych wektora translacji.

2.2. Wyznaczanie parametrów ruchu na podstawie długiego ciągu obrazów

Wyznaczanie parametrów ruchu na podstawie długiego ciągu obrazów wymaga jawnej znajomości modelu sterowanego obiektu dynamicznego. Równanie to stanowi bowiem ograniczenie wiążące ze sobą parametry ruchu wyznaczone na podstawie kolejnych pól przemieszczeń.

Powstały w ten sposób problem stanowi nieliniowe zadanie filtracji dynamicznej i jego ogólne analityczne rozwiązanie rekurencyjne nie istnieje.

W problemie tym nieliniowa niejawna zależność parametrów ruchu od wielkości przemieszczeń stanowi równanie wyjścia, podczas gdy równania modelu odpowiadają równaniom stanu.

W pracy [10] przedstawiono rozwiązanie różnych przypadków szczególnych problemu dynamicznej estymacji parametrów ruchu. Dzięki ogólnemu założeniu o liniowości równań modelu możliwe było zastosowanie rozszerzonego filtra Kalmana, którego zbieżność jest w tym przypadku zapewniona.