

PRZEGLĄD WYBRANYCH UKŁADÓW Nawigacji OBSERWACYJNO - PORÓWNAWCZEJ

Praca stanowi przegląd wybranych układów nawigacji obserwacyjno – porównawczej. W artykule sklasyfikowano układy według kryterium wykorzystywanej metody oraz zastosowania. W przeglądzie przedstawiono przykładowe zastosowanie metod w mechanice płynów, robotyce, lotnictwie oraz nawigacji morskiej.

REVIEW OF SELECTED COMPARATIVE NAVIGATION SYSTEMS

The paper is a review of selected existing comparative navigation systems. Systems are classified into several groups both by method used and application. Some representative applications are presented. Fluid mechanical, robotical, aerial and naval applications are discussed.

1. WPROWADZENIE

1.1. Klasyfikacja metod

Układami nawigacji obserwacyjno – porównawczej nazywane są systemy, w których w celu określenia parametrów nawigacyjnych automatycznie porównywane są wyniki pomiarów ze wzorcem. Układy takie cechują się autonomicznym działaniem i dużą dokładnością względną.

Do wyznaczenia pozycji układy nawigacji porównawczej wykorzystują: rzeźbę terenu (*Terrain Contour Matching*), cechy charakterystyczne powierzchni terenu (*Terrain Characteristic Matching*), obraz terenu (*Scene Matching Area Correlation*).

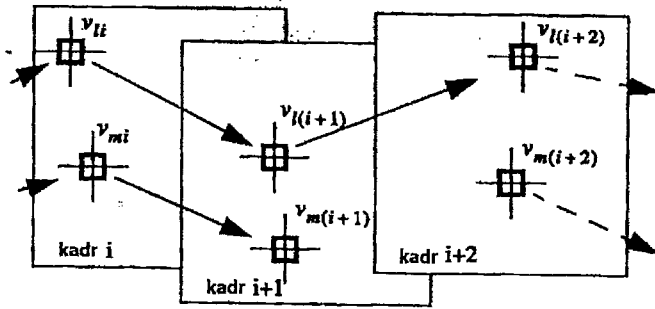
Ostatnio układy takie rozwijają się bardzo szybko i znajdują coraz szersze zastosowanie na pokładach statków powietrznych, przede wszystkim wojskowych.

Informacją nawigacyjną jest obraz z pojedynczej kamery, na ruch której nie nałożono więzów. Obrazy z kamery są odzwierciedleniem trójwymiarowej sceny na dwuwymiarowej płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej kamery. Deformacja elementów charakterystycznych w kadrze jest zależna od konfiguracji tych elementów oraz od położenia i ruchu kamery.

Metody wykorzystujące obraz terenu klasyfikowane są według technik dopasowywania. Zalicza się tu wykorzystanie cech geometrycznych lub sieci neuronowych. Stosowanie cech geometrycznych elementów obrazu opiera się na solidnych podstawach matematycznych i jest dosyć trudne do realizacji. Wpływ na tą trudność mają wszelkie rodzaje zaburzenia, szумы wynikające z parametrów technicznych użytego sprzętu oraz z warunków oświetleniowych. Problemy te eliminuje się stosując sieci neuronowe. Sieć uczy się w czasie rzeczywistym określania macierzy porównań (macierz określająca interakcje między wzorcem a kadrem), ponadto zmniejsza to koszt numeryczny procesu.

Ważną kwestią jest też wybór cech obrazu, które mają być analizowane. Współczesne trendy w tej dziedzinie dążą do definiowania globalnych cech obrazu, a nie lokalnych, wybranych elementów obrazu.

Zaletą cech lokalnych (punkty, linie, obszary) jest to, że raz zaobserwowane i zlokalizowane dostarczają precyzyjnej informacji nawigacyjnej. Schemat śledzenia cech lokalnych przedstawia rysunek 1.



Rysunek 1. Śledzenie cech lokalnych w kolejnych kadrach

Przykładami cech lokalnych mogą być: krawędzie elementów [9] stosowane na przykład do inspekcji rur pod wodą przez pojazdy autonomiczne [10] czy też utrzymywania się pojazdów jeden za drugim na drodze [11]. Krawędzie mają też zastosowanie w pracy opisującej koncepcje lokalizowanie ramienia manipulatora kosmicznego [12]. Wyłuskiwanie i elementów okrągłych w robotyce opisane jest w [13], a średnice elementów okrągłych są wykorzystywane przez robota zbierającego pomarańcze [14]. Zasada znikającego punktu (dwóch prawie równoległych linii) do pozycjonowania robota przedstawiona została w [15].

Natomiast zaletą stosowania cech globalnych obrazów jest większe niezależenie wyników od zgnębego wpływu szumów i niekorzystnych warunków środowiskowo – oświetleniowych.

Przegląd parametrów definiowanych jako cechy globalne znajduje się w pracach [16,17]. W wyżej wymienionych pozycjach wymieniane są takie pojęcia, jak momenty geometryczne, rzut obrazu na prostą, wzorce obszarów, transformaty Fouriera.

1.2. Zastosowania

Obszary techniki, w których stosuje się techniki wizualne do określania pozycji bądź parametrów ruchu można podzielić na następujące cztery grupy: wykrywanie i omijanie przeszkód, tworzenie map, śledzenie celu i określanie pozycji kamery (pośrednio – mierząc przemieszczenie, oraz bezpośrednio). W dalszej części artykułu najwięcej uwagi zostanie poświęcone określaniu pozycji kamery.

2. PRZEGLĄD WYBRANYCH ROZWIĄZAŃ

2.1. Mechanika płynów

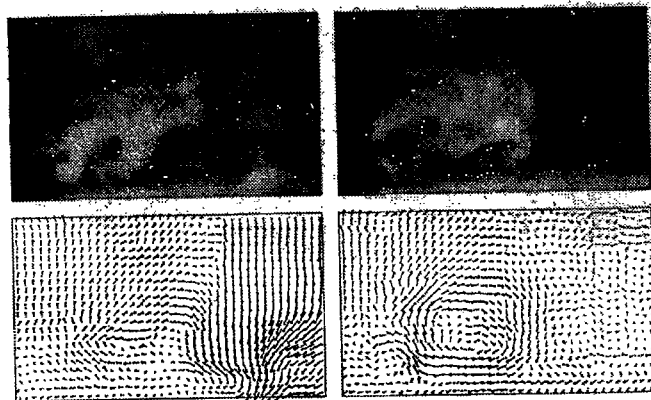
Metody wizualne w mechanice płynów stosuje się do ilościowych, dwuwymiarowych pomiarów parametrów przepływu. Pozwala na określenie pola wektorowego prędkości cząstek w obserwowanym obszarze. Trwają spory, czy opisywane metody zostały w mechanice płynów zaadoptowane z nawigacji, czy odwrotnie.

Najwcześniejszą metodą stosowaną w tej dziedzinie był PIV (Particle Image Velocimetry). Istotą pomiaru było wizualne poszukiwanie wszelkich przemieszczeń cząstek w pomiędzy dwoma, następującymi po sobie kadrami. Robiono to na zwykłym filmie i negatywy były studiowane w laboratoriach, co czyniło tą pracę dosyć długą i mało efektywną. Następnym krokiem była digitalizacja procesu (DPIV – *Digital PIV*) – wykorzystano kamerę CCD i kartę przetwornikową FG (frame grabber). Kadry analizowane były w czasie rzeczywistym przez komputer.

Dwa następujące po sobie obrazy są analizowane przez proste algorytmy cross correlation. Ograniczenie DPIV jest wysypywanie się metody w przypadku regionów gdzie występują duże gradienty przesunięć ze względu na tzw. rozmazanie obrazu.

Najnowsze osiągnięcia w dziedzinie to zastosowanie metod do pomiaru prędkości ośrodków o dużej gęstości pola wektorowego prędkości. Metody te znane są w literaturze pod pojęciem *optical flow*. Zakłada się, że intensywność kolorów nie zmienia się w trakcie przemieszczenia. Metody *optical flow* są stosowane do obróbki par kolejnych obrazów. Z reguły zakładają niewielkie przemieszczenia wzorców przedstawionych za pomocą skali szarości. Ogólnie metody klasyfikuje się, jako. różnicowe, korelacyjne, energetyczne, fazowe.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe zastosowanie metod *optical flow* do pomiaru prędkości optywu.



Rysunek 2 Przykład zastosowania metod *optical flow* do pomiaru prędkości gazu

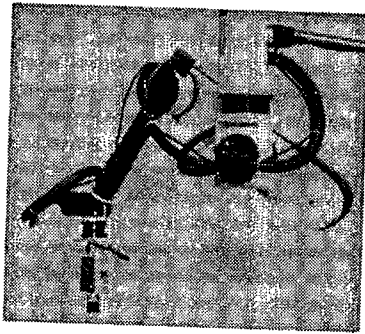
Reprezentatywne dla tej dziedziny wydają się być pozycje literatury: [4,22], gdzie znajduje się ogólny opis i przegląd technik oraz pozycja [5], w której autorzy opisują procedury obróbki obrazu niezbędne w OF. Przykładowe zastosowania jest wiele. Jednym z nich są pomiary przesuwania się kry lodowej [6].

2.2. Robotyka

Metody pozycyjne stosowane są głównie w robotyce. Celem jest uzyskanie pożądanej pozycji i orientacji. W przypadku robotów nieruchomych chodzi o pozycję końcówki ramienia (manipulatora), a w przypadku robotów mobilnych – całego urządzenia. Źródłem informacji nawigacyjnej jest obraz otoczenia robota. Jego źródłem może być jedna lub kilka kamer zamontowanych na robocie (jeden centralny punkt, lub końcówka manipulatora(ów)) lub kamera(y) zainstalowane na poza robotem, w obszarze jego działania.

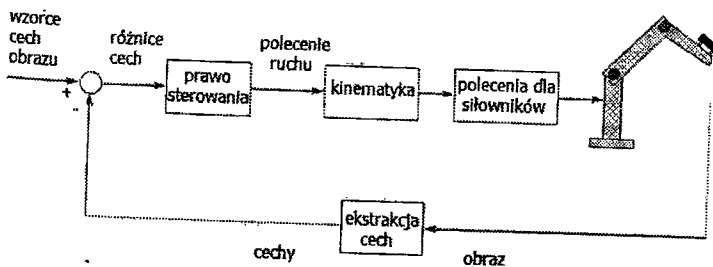
Praca [7] opisuje prototyp systemu pozycjonowania wizualnego wykorzystujący samouczące się sieci neuronowe. Według autorów rozwiązanie takie pozwala na pominięcie skomplikowanych procesów dopasowywania cech obrazu, a także czynności wstępnych, jak modelowania otoczenia (sceny) czy kalibracja kamery.

Praca [8] omawia zagadnienie określenia położenia ramienia robota z użyciem kamery zamontowanej na jego końcówce (rysunek 3).



Rysunek 3. Manipulator z zainstalowaną kamerą

Przedstawione w dwóch powyższych pracach systemy nie ograniczają się jedynie do określania pozycji, ale także wykorzystują informacje do wypracowania sygnałów sterujących i ustawienia manipulatora w požądanej pozycji. Poniższy schemat przedstawia układ z pętlą sprzężenia zwrotnego, sterowania przykładowym manipulatorem.



Rysunek 4. Schemat sterowania manipulatorem

Prace [18,19] przedstawiają zastosowanie porównywania cech lokalnych do kierowania robotem. W opisywanych przez autorów doświadczeniach robot porusza się za człowiekiem kierując się obrazem elementów jego ciała (rysunek 5).



Rysunek 5. Wykorzystanie cech lokalnych do śledzenia celu (człowieka).

W omawianym przypadku elementami charakterystycznymi są okna o wymiarze 7×7 pikseli. Kryterium wyboru jest lokalne maksimum gradientu jasności, a kryterium dopasowania minimalizacja błędu średnio kwadratowego stopni szarości okna. Dla oceny przemieszczenia brana pod uwagę jest konfiguracja zespołu wyżej wymienionych okien.

2.3. Pozycjonowanie statku powietrznego

Wyznaczenie prędkości ruchu statku powietrznego jest przedmiotem prac [2,3]. Stosowane w tym przypadku są zachowane wcześniej w pamięci dane cyfrowe terenu działania. Od dokładności takich danych zależy dokładność działania systemu nawigacji. Koszt numeryczny takich działań jest określany jako duży.

W odróżnieniu od wyżej wymienionego rozwiązania, autorzy [1] proponują system działający na podobnej zasadzie, z tą jednak różnicą, że kamera nie jest stabilizowana, baza danych nie zawiera mapy cyfrowej terenu. Dlatego też możliwe było zastosowanie modelu dynamicznego statku o sześciu stopniach swobody. Jako model terenu wykorzystywany jest dyskretny opis cech charakterystycznych terenu, rzutowany na płaszczyznę kadru widzianego przez kamerę. Jest to zatem płaszczyzna prostopadła do osi optycznej obiektywu. Zakłada się ponadto, że punkty są względem siebie nieruchome. Ich ruch względem kamery jest określony przez proste zależności kinematyczne nazywane więzami podprzestrzennymi (*subspace constraints*).

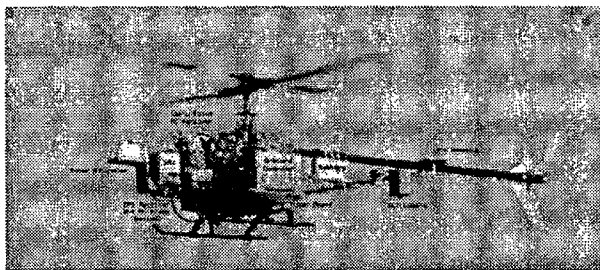
W celu otrzymania niezaburzonych, wiarygodnych wyników zastosowano rozszerzony filtr Kalmana. Wyniki tego typu symulacji pokazują, że możliwe jest uzyskanie kątów orientacji z wykorzystaniem obrazów dwuwymiarowych, co stanowi znaczącą alternatywę dla triad giroskopów i przyspieszeniomierzy.

Przebieg wykonanej przez autorów symulacji nawigacji można sprowadzić do dwóch etapów:

1. Rozwiązanie układu równań ruchu pojazdu (brak sterowania przepustnicą, proste manewry, wykorzystujące obroty wokół wszystkich 3 osi układu współrzędnych) we współrzędnych kamery.

2. Wyznaczenie punktów, które powinny być widoczne w kadrze. Ilość punktów nie ma większego wpływu na dokładność, wręcz im jest ich mniej tym mniejsze koszty numeryczne. Ważne, żeby punkty nie były zbyt blisko siebie.

Prace [20,21] prezentują badania autonomicznego śmigłowca wykorzystującego wizualne metody nawigacji (rysunek 6). W pracy [21] zastosowana jest metoda niemal identyczna, jak w poprzednim omówionym przykładzie.



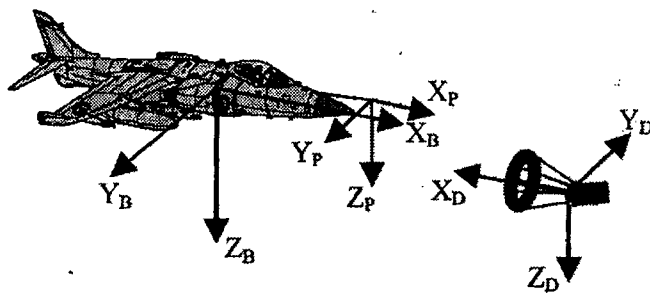
Rysunek 6. Autonomiczny śmigłowiec wykorzystujący wizualne metody nawigacji.

System wizualny jest w tym podejściu integrowany z już istniejącymi układami (inercjalny i DGPS) na pokładzie śmigłowca. Zdaniem autorów system ma być używany także w fazie lądowania, a koszt numeryczny algorytmu pozwala na aktualizacje danych z częstotliwością do 5 Hz.

Zastosowanie systemu do nawigacji śmigłowca w fazie lądowania zaproponowano również w [25].

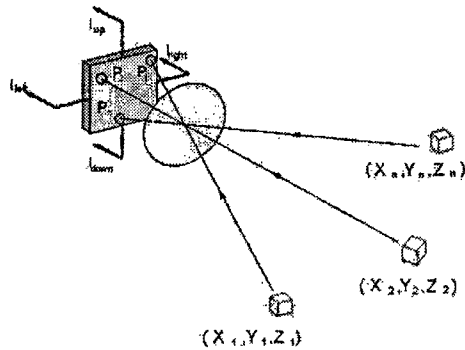
2.4. Tankowanie w powietrzu

Tankowanie w powietrzu jest operacją trudną Z tego też powodu do dzisiaj nie udało się stworzyć autonomicznego statku powietrznego, który byłby w stanie wykonać ten manewr. Prezentowany projekt [26,27] stawia sobie właśnie taki cel. Jego opis w niniejszym artykule ogranicza się jedynie do systemu wyznaczającego relatywną pozycję samolotu (końcówki wlotu paliwa) w stosunku do tankowca, a ściślej jego złącza paliwowego (rysunek 7).



Rysunek 7. Problem określenia pozycji.

Badany system nawigacji przewiduje zastosowanie nadajników światła LED i odbiorników PSD. Pozycja określana jest na podstawie widzianej konfiguracji tychże trzech punktów (rysunek 8). Wyniki badań laboratoryjnych wykazują, że układ jest w stanie osiągnąć dokładność dochodzącą do 0,25 cm przy częstotliwości pracy 100 Hz.



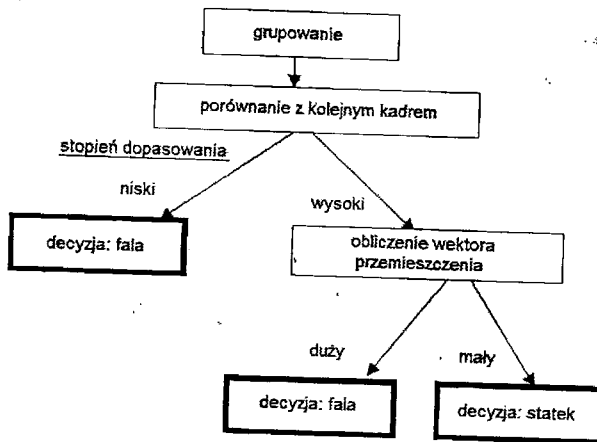
Rysunek 8. Idea układu pozycjonowania.

2.5. Nawigacja morska

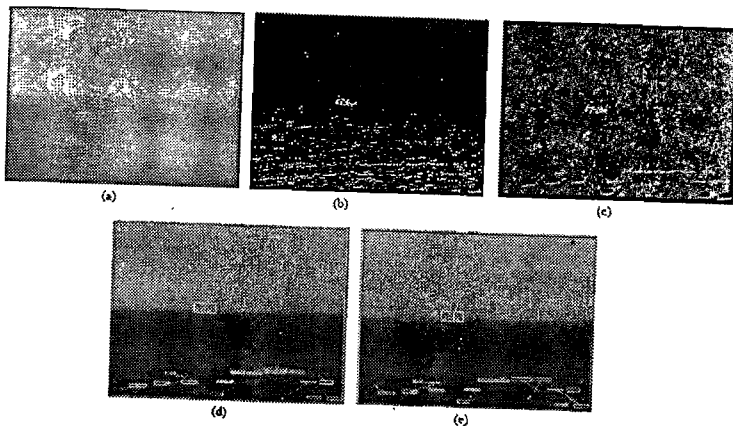
Nawigacja obserwacyjna w której obraz porównywany jest ze wzorcem ma ograniczone zastosowanie. Może być stosowana głównie w przypadkach przy niedużych relatywnych prędkościach obiektów. Sytuacja taka ma miejsce w nawigacji morskiej i tu też metody wyznaczające bezpośrednio pozycję znajdują najszersze zastosowanie. Czujnikami informacji nawigacyjnej przetwarzanej w układach porównawczych morskich jest radar i/lub sonar [23].

W omawianym w pozycji [23] przypadku porównywany ze wzorcem (mapą morską) jest radarowy obraz linii brzegowej. Dodatkowo porównywany może być także obraz dna morskiego uzyskany z sonaru z cyfrową mapą dna morskiego. Stosowane algorytmy to iloczyn logiczny lub – w przypadkach bardziej zaawansowanych – sieci neuronowe.

Praca [24] przedstawia metody rozpoznawania innych statków w zasięgu widzialności przez kamerę umieszczoną na mostku. System jest w stanie określić namiar i odległość innych jednostek na zasadzie grupowania pikseli o zbliżonej jasności. Algorytm także wyklucza z grupy pikseli obiekty nie będące statkami, jak na przykład fale. Etapy pracy układu prezentuje schemat (rysunek 9) i seria obrazów (rysunek 10):



Rysunek 9. Rozpoznawanie statków - schemat.



Rysunek 10. Rozpoznawanie statków - sekwencja obrazów.

W pierwszej kolejności wyszukiwane zostają grupy pikseli (rysunek 10 b, c). Następnie te grupy, których położenie pozostaje niezmiennie (lub wolno zmienia) w kilku kolejnych kadrach klasyfikowane są jako statki. Według autorów tego rozwiązania, wyniki testów morskich są satysfakcjonujące.

3. PODSUMOWANIE

Artykuł stanowi przegląd wybranych współczesnych zastosowań nawigacji obserwacyjno – porównawczej. Przedstawiono układy stosowane w robotyce, lotnictwie i nawigacji morskiej.

Do niewątpliwych zalet układów nawigacji obserwacyjno – porównawczej należą autonomiczna praca oraz duża dokładność. Wartość maksymalnego błędu w niektórych zastosowaniach dochodzi do wartości centymetrowych. Systemy te posiadają także swoje wady. Są nimi duże koszty numeryczne, co pociąga za sobą konieczność stosowania komputerów o dużej mocy obliczeniowej. Należy też mieć na uwadze możliwość pojawienia się niejednoznacznych rozwiązań. Wymaga to od projektantów systemów weryfikowania otrzymanych wyników.

Literatura

1. Gurfil, P., Rotstein, H., „Partial Aircraft State Estimation from Visual Motion Using the Subspace Constraints Approach”, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 24, No. 5, wrzesień – październik 2001, strony 1016-1028.
2. Merhav, S.J., Bresler, Y., „On-line Vehicle Motion Estimation From Visual Terrain Information Part 1: Recursive Image Registration”, Vol. 9, AES-22, No. 5, 1986, strony 583-587.
3. Merhav, S.J., Bresler, Y., „On-line Vehicle Motion Estimation From Visual Terrain Information Part 2: Ground Velocity and Position Estimation”, Vol. 9, AES-22, No. 5, 1986, strony 588-604.
4. Quenot, G., Pakleza, J., Kowalewski, T., „Particle image velocimetry using optical flow for image analysis”, 8th International Symposium on Flow Visualisation, strony 47.1 – 47.11, 1998.
5. Reinecke, H., Minggang, M., Grant, I., „Image Processing Problems in Fluid Dynamics: Selected Digital Procedures”, Fluid Loading and Instrumentation Centre, Scotland 1999.
6. Ettema, R., Fujita, I., Muste, M., Kruger, A., „Particle-image Velocimetry for whole-field measurement of ice velocities”, *Cold Regions Science and Technology* 26 (1997) strony 97-112.
7. Wells, G., Venaille, C., and Torras, C., „Vision-Based Robot Positioning Using Neural Networks”, *Image and Vision Comput.* 14 (grudzień 1996), strony 715-732.
8. Wells, G., Torras, C., „Assesing Image Features for Vision-Based Robot Positioning”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 30, 2001, strony 95-118.
9. Wilson, W., Williams, C., and Janabi, F., „Robust image processing and position-based visual servoing”, Notes for Workshop WS2 (Robust Vision for Vision-based Control of Motion), IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, 1998.
10. Rives, P. and Borrelly, J., „Real-time image processing for image-based visual servoing”, Notes for Workshop WS2 (Robust Vision for Vision-based Control of Motion), IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, 1998.
11. Dickmanns, E., Mysliwetz, B., and Christians, T., „An integrated spatio-temporal approach to automatic visual guidance of autonomous vehicles”, *IEEE Trans. Systems Man Cybernet.* 20 (1990), strony 1279-1284.

12. Wunsch, P. and Hirzinger, G., „Real-time visual tracking of 3D objects with dynamic handling of occlusion”, Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, Albuquerque, 1997.
13. Kabuka, M. and Arenas, A., „Position verification of a mobile robot using standard pattern”, IEEE J. Robotics Automat. 3(6) (1987), strony 505–516.
14. Harrell, R., Slaughter, D., and Adsit, P., „A fruit-tracking system for robotic harvesting, Machine Vision Appl. 2 (1989), strony 69–80.
15. Zhang, Z., Weiss, R., and Hanson, A., „Automatic calibration and visual servoing for a robot navigation system”, Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, Atlanta, 1993, strony 14–19.
16. Jang, W. and Bien, Z., „Feature-based visual servoing of an eye-in-hand robot with improved tracking performance”, Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, 1991, strony 2254–2260.
17. Bien, Z., Jang, W., and Park, J., „Characterization and use of feature-Jacobian matrix for visual servoing, in: K. Hashimoto (ed.), Visual Servoing, World Scientific, Singapore, 1993, strony 317–363.
18. Ferruz, J., Ollero, A., „Integrated Real-Time Vision System For Vehicle Control In Non-Structured Environments”, Engineering Applications of Artificial Intelligence. Vol. 13. Num. 3. 2000. strony 215-236
19. Ferruz, J., Ollero, A., "Real-Time Feature Matching In Image Sequences For Non-Structured Environments. Applications To Vehicle Guidance", Journal of Intelligent & Robotic Systems. Vol. 28. Num. 1/2. 2000. strony 85-123
20. Amidi, O., Mesaki, Y., Kanade, T., Uenohara, M., „Research on an Autonomous Vision Guided Helicopter”, Fifth World Conference on Robotics Research, wrzesień, 1994.
21. Bosse, M., Karl, W.C., Castanon, D., DeBitetto, P., „A Vision Augmented Navigation System”, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems Boston, Massachusetts, 1997
22. Horn, B., Schunck, B., „Determining Optical Flow”, Artificial Intelligence 17, 1981, strony 185-203.
23. Stateczny, A., „Comparative Navigation as an Alternative Positioning System”, Proceedings 11th World IAIN Congress "Smart Navigation - Systems and Services", Berlin, 2003.
24. Shimpo, M., Lu, Y., Oshima, M., „A Detection Method of Moving Ship from Navigational Image Sequence”, Proceedings 11th World IAIN Congress "Smart Navigation - Systems and Services", Berlin, 2003.
25. Zasuwa, M., Narkiewicz, J., „Application of Image Matching Navigation System to Support Approach and Landing of VTOL Vehicle”, The International 58th Annual Forum and Technology Display, Montreal, 2002.
26. Valasek, J., Kimmitt, J., Junkins, J. L., Hughes, D., Gunnam, K., „Vision Based Sensor and Navigation System for Autonomous Aerial Refueling”, AIAA 2002-3441.
27. Valasek, J., Kimmitt, J., Junkins, „Autonomous Aerial Refueling Utilizing a Vision Based Navigation System”, AIAA 2002-4469.