

Tytuł pracy doktorskiej: Kaskadowe układy sterowania odpornego ze sprzężeniem od wyjścia dla robotów mobilnych w zadaniach ruchu przestrzennego: podejście VFO-ADR

Autor: Krzysztof Łakomy

Streszczenie

W niniejszej rozprawie zaprezentowano wyprowadzenie oraz kompleksową analizę teoretyczną, symulacyjną i eksperymentalną kaskadowej struktury sterowania VFO-ADR (ang. *Vector Field Orientation - Active Disturbance Rejection*) przeznaczonej do realizacji precyzyjnych zadań ruchu przez autonomiczne, zrobotyzowane pojazdy poruszające się w przestrzeni trójwymiarowej. Kaskadowa struktura sterowania pozwala na rozdzielenie problemu projektowania sterownika na osobne podsystemy na poziomie kinematyki i dynamiki robota, przypominając tym samym sposób projektowania systemów sterowania przeznaczonych dla obiektów nieholonomicznych. Wykorzystanie metody aktywnej redukcji zakłóceń (ADR) w ramach sterownika implementowanego na poziomie dynamiki pozwala na uodpornienie proponowanej metody na znaczne niepewności modelu obiektu, zarówno parametryczne jak i strukturalne, oraz na wpływ zaburzeń zewnętrznych. W wyniku wykorzystania obserwatora stanu rozszerzonego, stanowiącego element sterownika ADR, struktura sterowania korzysta wyłącznie ze sprzężenia od wyjścia pomiarowego zawierającego wyłącznie informacje o aktualnej pozycji i orientacji robota. Zaprezentowana w pracy struktura VFO-ADR pozwala na realizację zadań śledzenia trajektorii oraz odtwarzania ścieżki nieparametrycznej przez obiekty w pełni dosterowane oraz przez obiekty niedosterowane o charakterystycznym, torpedopodobnym układzie elementów wykonawczych. W przypadku ruchu robota niedosterowanego, ze względu na niemożność wygenerowania sił (lub momentów sił) w ściśle określonych kierunkach, można zaobserwować pojawienie się zjawiska dryfu poprzecznego, którego wpływ kompensowany jest poprzez odpowiednie odkształcenie wektorowego pola zbieżności stanowiącego nieodłączny element sterownika opartego na metodzie VFO. Opracowanie kinematycznego sterownika VFO przystosowanego do realizacji ruchu w przestrzeni trójwymiarowej stanowi rozszerzenie zakresu zastosowań metody VFO, która do tej pory wykorzystywana była głównie w sterowaniu robotów kołowych poruszających się na płaszczyźnie.

Przeprowadzona analiza stabilności typu wejście-stan (ang. *Input-to-State Stability*, ISS) wykazała ograniczony charakter odpowiednio zdefiniowanych błędów sterowania, potwierdzając tym samym stabilność proponowanego rozwiązania w sensie ISS, jak i odporność wyprowadzonej metody na założone niepewności i zaburzenia. Sformułowane w rozważaniach teoretycznych własności prezentowanej w pracy struktury sterowania zostały potwierdzone w przeprowadzonych badaniach symulacyjnych realizowanych w środowisku Matlab/Simulink oraz w trakcie walidacji eksperymentalnej przeprowadzonej na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w autonomiczny sterowiec. Rezultaty symulacji i eksperymentów wykazały wrażliwość algorytmu VFO-ADR na szumy pomiarowe, implikując konieczność wykorzystania precyzyjnego systemu lokalizacji w potencjalnych aplikacjach praktycznych.

W efekcie przeprowadzonych prac, wykazano iż stosowne połączenie metod VFO i ADR gwarantuje odporną realizację postawionych w pracy zadań sterowania przez torpedopodobne obiekty poruszające się w przestrzeni trójwymiarowej, natomiast uogólnienie metody VFO na przypadek ruchu trójwymiarowego znacznie rozszerzyło klasę potencjalnych obiektów sterowania, dla których metoda może znaleźć zastosowanie.

Krzysztof Łakomy

Thesis title: Output-feedback cascaded robust control systems for mobile robots in the spatial motion tasks: the VFO-ADR approach

Author: Krzysztof Łakomy

Abstract

This dissertation presents the derivation and a comprehensive theoretical, simulation, and experimental analysis of the VFO-ADR (*Vector Field Orientation - Active Disturbance rejection*) cascade control structure, designed for the realization of precise motion tasks by the autonomous robotic vehicles moving in a three-dimensional space. The cascade structure of the controller allows to divide the problem of controller design into separate subsystems on the kinematic and dynamic levels, and thus, resembles the control design methods utilized in the case of nonholonomic systems. The use of an active disturbance rejection (ADR) method within the dynamic-level controller increases the robustness of the proposed method for the substantial uncertainties of the vehicle model, both parametric and structural, and for the influence of external disturbances. As a result of using the extended state observer, which is a part of the ADR controller, the control structure only uses the feedback from the measured output containing explicitly the information about the vehicle position and orientation. The VFO-ADR structure presented in this thesis solves the trajectory tracking and the non-parametric path following motion tasks for fully actuated vehicles, and for the underactuated ones that have a characteristic, torpedo-like setup of implemented actuators. In the case of underactuated robots, due to the inability to generate forces (or torques) in the strictly defined directions, the appearance of transversal-drift phenomenon can be observed, the impact of which is compensated by the appropriately reshaped convergence vector field, which is an inherent element of the controllers designed according to the VFO method. The development of the VFO-based kinematic controller adapted for the motion in three-dimensional space is an extension of the VFO method application range, which for now was mainly limited for the control of wheeled robots moving on the planar surface.

The conducted *Input-to-State Stability* (ISS) analysis guarantees the boundedness of the appropriately defined control errors, and thus, implies the ISS stability of the proposed solution, together with its robustness against considered uncertainties and disturbances. The simulation results carried out in Matlab/Simulink environment and the experimental validation executed on the laboratory station equipped with an autonomous airship confirmed the control structure properties formulated along with the theoretical analysis. The results of simulations and experiments showed the sensitivity of the VFO-ADR algorithm to measurement noise, implying the need to use a precise localization system in the potential practical applications.

As a result of the carried out work, it was shown that the appropriate combination of VFO and ADR methods guarantees a robust realization of selected motion tasks by torpedo-like vehicles moving in a three-dimensional space, while the generalization of the VFO method for the case of three-dimensional motion is a significant extension of the class of potential control objects, which control systems could be possibly designed with the vector field orientation method.

Krzysztof Łakomy