

Application of selected control algorithms for nonlinear systems in unmanned bicycle robot stabilized by an inertial drive

Zastosowanie wybranych algorytmów sterowania systemów nieliniowych w bezzałogowym pojeździe jednośladowym stabilizowanym napędem inercyjnym



by
Adam Owczarkowski

DOCTORAL DISSERTATION

Institute of Control and Information Engineering Faculty
of Electrical Engineering Poznań University of
Technology

Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej Wydział Elektryczny Politechnika
Poznańska

Advisor: Dariusz Horla, Ph.D.,D.Sc.

Poznań, Poland, April 4, 2017

Abstract

This thesis consists of two main parts: the first describing the reaction wheel principles and the other describing the bicycle with the reaction wheel. These two parts are complementing each other and form a complete dissertation.

The first main part describes the main principles of operation of the reaction wheel. It explains in detail how and where action and reaction forces are created in the mechanical device. Their relationship between acting body and reacting body is well-explained therein. The full set of differential equations is formulated with many partial results obtained from examples of linear and rotary motions where the reaction forces are created. This namely allows to model a completely new object very important for this research: the reaction wheel pendulum. It is deeply analysed using control theory techniques. Controlling this object is difficult because it is underactuated (less control signals than actuators) and control signals are very limited. The reaction torque is used, which occurs only when the reaction wheel is accelerated or decelerated and there is a need to put a huge care to angular velocity never to exceed the limit value. The system is nonlinear and therefore control techniques are proposed to stabilize it. Finally, the linear quadratic controller is designed which is based on the algebraic Riccati equations. A fully-detailed description of all necessary mathematical equations is used to create the control law. The classical LQR control law and its modified version (LQI) based on the additional loop which integrates state signals is used. The linear quadratic algorithm allows to control the whole state of the object which is a great advantage of this algorithm. In addition, it is a tracking control technique which allows to move the system from one state to another during the operation. Object described mathematically with proposed control algorithms give the full description of this automatic control system. Eigenvalue and step response analysis confirms the stability in the considered point of operation. Furthermore, this stability is checked when several parameters change such as: the mass and radius of the reaction wheel, the height of the reaction wheel mounting and the coefficients of friction. A through analysis of the energy flow in the considered inverted pendulum is constructed. This analysis confirms the high energy efficiency of this type of actuator. The proposed control law is tested by numerous computer simulations, which perfectly illustrate the real behaviour of the machine. The real object is created and described and physical parameters are identified. Experimental tests confirm the suitability of control algorithms used. An important aspect is the description of hardware solutions related with

measuring system. There is a novel method of determining the angle from the vertical position using only gyroscope with its imperfections – the drift. Additionally, the explanation how to use it is given with the linear quadratic regulation to estimate the position.

The second part of this work is focused on the bicycle with and without the reaction wheel module. It starts from a deep analysis of the mathematical models available in the literature. The aim is to find as good differential equations as possible to describe the most important states of the real single-track vehicles. Finally, one model is selected which is at this moment the reference for the bicycle models. This system of mathematical equations is transformed into state-space form. Next, these equations are gathered together with the whole description of the reaction wheel pendulum. This gives the complete description of the new object that is difficult to find in the currently available literature. This is the vital base of this scientific work. It allows one to develop a complete control law for optimal stabilization based on the handlebar control and reaction wheel control. The LQR control algorithm is used to ensure minimization of quadratic performance indices and stabilization of all state variables using several control signals simultaneously. There is a series of stability analysis and computer simulations of the bicycle with and without additional reaction unit. The detailed comparison of these two objects is performed. It is proven that in a certain range of velocity the bicycle is self stable, thus it does not need any control to keep balance. There are many conclusions drawn when the handlebar control or the reaction wheel control gives better results. Thus, it proves that the reaction wheel in some conditions improves the stability of the bicycle and sometimes allows keeping stability (balance) of the bicycle.

Niniejsza rozprawa składa się z dwóch głównych części: pierwszej opisującej zasady działania koła reakcyjnego oraz drugiej opisującej rower z kołem reakcyjnym. Obie te części się wzajemnie uzupełniają i tworzą jedną całość.

W pierwszej głównej części opisano zasadę działania koła reakcyjnego. Szczegółowo wyjaśniono jak i gdzie powstają siły akcji i reakcji w urządzeniu mechanicznym. Opisano matematycznie niezbędną relację między układem wykonawczym a układem reagującym. Dzięki zastosowaniu modelowych przykładów odnoszących się do ruchu liniowego a następnie ruchu obrotowego wyprowadzono kompletny zestaw równań różniczkowych opisujących ten proces. To z kolei umożliwiło zamodelować obiekt wysoce istotny w tej sprawie: wahadło odwrócone z kołem reakcyjnym. Wahadło poddano szczegółowej analizie wykorzystując techniki z teorii sterowania. Sterowanie wahadłem odwróconym z kołem reakcyjnym jest trudne, ponieważ jest to układ niedosterowany (o mniejszej liczbie sterowań niż stopni swobody) i o bardzo ograniczonym sterowaniu. Wykorzystywany jest reakcyjny moment siły, który powstaje tylko, gdy wirująca masa jest rozpędzana bądź hamowana i należy bardzo dbać o to, aby prędkość obrotowa nigdy nie przekroczyła dopuszczalnej wartości. Układ jest nieliniowy i zaproponowano takie techniki sterowania, które są w stanie go ustabilizować. Wybrano optymalne sterowanie liniowo kwadratowe oparte na algebraicznym równaniu Riccatiego. Szczegółowo opisano wszystkie niezbędne równania matematyczne tej techniki sterowania. Wykorzystano klasyczne prawo sterowania LQR oraz wersję zmodyfikowaną w oparciu o dodatkową pętlę całkującą stan obiektu LQI. Regulacja liniowo kwadratowa pozwala na sterowanie całego wektora stanu obiektu co stanowi wielką zaletę tego algorytmu. Zaproponowano również różne sposoby regulacji nadążnej pozwalającej przechodzenie maszyny z jednego stanu do drugiego w trakcie działania systemu. Mając zaprojektowane prawo sterowania otrzymano kompletny układ regulacji automatycznej. Sprawdzono jego stabilność wykreślając linie pierwiastkowe dla układu bez ograniczeń oraz odpowiedzi skokowe. Wyznaczono wpływ najważniejszych parametrów układu na stabilność takich jak: masa i promień koła zamachowego, wysokość zamocowania koła zamachowego oraz współczynniki tarcia. Gruntownie przeanalizowano przemiany energii w rozważanym wahadle odwróconym. Analiza ta potwierdza wysoką efektywność energetyczną działania wymuszenia reakcyjnego. Zaproponowane prawo sterowania przetestowano na licznych symulacjach komputerowych, które doskonale dają obraz działania realnej maszyny. Opra-

cowano realny obiekt oraz zidentyfikowano jego parametry fizyczne. Test eksperymentalne potwierdzają poprawność opracowanych algorytmów sterowania. Ważnym aspektem jest opis wykorzystanych rozwiązań sprzętowych związanych z sensoryką. Zaproponowano nowatorski sposób wyznaczania kąta odchylenia od pionu przy pomocy niedoskonałego żyroskopu obciążonego błędem pomiaru w postaci dryfu. Wykorzystując właściwości regulacji liniowo kwadratowej przedstawiono sposób estymacji położenia chwiejnego punktu równowagi.

W drugiej części rozprawy skupiono się na pojeździe rowerowym oraz jego modyfikacji o dodatkowy moduł stabilizacji opartej o koło reakcyjne. Na początek głęboko przeanalizowano model matematyczny roweru oraz przeszukano dostępną na ten temat literaturę. Celem jest odnalezienie takiego modelu roweru, aby odzwierciedlał najważniejsze stany dynamiki realnych pojazdów jednośladowych. Wybrano jeden z nich, który w obecnej chwili stanowi referencję spośród dostępnych modeli rowerów. Zaproponowany układ równań dynamiki ruchu przetworzono w formę równań zmiennych stanu. Następnie dokonano połączenia tak opisanego systemu z równaniami wahadła odwróconego z kołem reakcyjnym. W ten sposób otrzymano kompletny opis obiektu sterowania, który trudno odnaleźć w dostępnej obecnie literaturze oraz który stanowi najważniejszy fundament tej pracy naukowej. Następnie zostało opracowane rozbudowane prawo sterowania zapewniające optymalną stabilizację w oparciu o sterowanie kierownicą i kołem reakcyjnym. Wybrano algorytm sterowania LQR zapewniający minimalizację kwadratowego wskaźnika jakości stabilizując wszystkie zmienne stanu układu kontrolując wiele sygnałów sterujących równocześnie. Wykonano serię analiz stabilności oraz symulacji komputerowych roweru bez dodatkowego systemu oraz z systemem stabilizacji reakcyjnej. Dokonano szczegółowego porównania tych dwóch obiektów. Przy okazji udowodniono, że dla pewnego zakresu prędkości liniowych roweru wykazuje on właściwości samo stabilizacji, a zatem nie wymaga żadnego sterowania, aby utrzymać równowagę. Postawiono liczne wnioski kiedy sterowanie samą kierownicą jest lepsze od sterowania kołem reakcyjnym i na odwrót. Tym samym udowodniono, że koło reakcyjne dla pewnych zakresów prędkości roweru doskonale poprawia a czasem nawet umożliwia zachowanie stabilności (równowagi) roweru w rozumieniu utrzymaniu pozycji pionowej.