

# **Optymalizacja trajektorii wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego**

mgr inż. Jan Stanisław Biniewicz

## **Abstract**

This work is dedicated to the quasi-steady-state minimum lap time simulation of race motorcycles. It presents a developed quasi-steady-state motorcycle model that incorporates experimental data. The dissertation also includes the presentation of a semi-empirical envelope of the vehicle's performance diagram (g-g diagram) and discusses the process of three-dimensional track reconstruction. Considered optimization problems are formulated as optimal control problems, which are subsequently solved using external MATLAB optimal control software GPOPS-II. In the presented numerical examples, optimal trajectories of various racing motorcycles are determined on diverse two and three-dimensional racetracks. Additionally, three degrees of freedom motorcycle model is proposed for suspensions deflections estimation based on longitudinal and lateral accelerations of the vehicle. Numerical results are later compared with experimentally recorded data, showing very good agreement.

First, a detailed survey about minimum lap time simulation and related trajectory optimization is presented. The analytical background of the optimal control problem is given, and necessary optimality conditions are formulated. A review of numerical methods used to solve optimal control problems is also provided.

The main section is devoted to the time-optimal control problem of race motorcycle on a two-dimensional (flat) road. A new approach is presented in which the allowable values of control variables are limited by hyperbolic functions of vehicle speed which are derived based on experimental data. Then, the impact of the introduced modifications on the obtained results is discussed. One of the numerical examples is devoted to describing the use of the OCP in the process of improving lap time under real driving conditions.

Next, the reconstruction of the three-dimensional road is discussed. The problem analysis is focused on determining an appropriate method for obtaining input data for optimization problem. Digital elevation models in different resolutions are discussed, as well as orthometric height measurement using GNSS receivers which are typically used in onboard data acquisition systems. Then, the OCP is generalized to the three-dimensional problem and the impact of the three-dimensional road model on OCP results is discussed.

A detailed computational example is presented in which the OCP is compared with experimental data.

The penultimate chapter is devoted to the derivation of the three degrees of freedom motorcycle model, which is later used for suspensions deflections estimation. The loads acting on the vehicle are determined based on vehicle's longitudinal and lateral acceleration. The numerically determined suspensions deflections are compared with experimental data.

In the appendices, the analytical description of the road modeled as a ribbon is presented, as well as a self-developed software created to support the process of analyzing motorcycles chassis geometry. The application is used for analyzing nonlinear fork and shock properties, as well as rear suspension linkages.

The thesis concludes with a summary of the conducted work and the obtained results. Possible directions for further research are also formulated.

# **Optymalizacja trajektorii wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego**

mgr inż. Jan Stanisław Biniewicz

## **Streszczenie**

Niniejsza rozprawa doktorska została poświęcona tematyce optymalizacji trajektorii ruchu wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego. Przedstawia ona opracowany model ruchu motocykla uwzględniający dane eksperymentalne, zawiera propozycję półempirycznej obwiedni diagramu osiąarów pojazdu oraz analizę procedury numerycznego odwzorowania przestrzennej geometrii jezdni. Rozważane w pracy problemy optymalizacji sformułowane zostały jako zadania sterowania optymalnego (ZSO), które następnie rozwiązywano za pomocą zewnętrznych procedur optymalizacyjnych (program GPOPS-II) rozszerzających funkcjonalność środowiska MATLAB. W przedstawionych przykładach numerycznych wyznaczono optymalne trajektorie ruchu pojazdów jednośladowych różnych klas wyścigowych poruszających się po zróżnicowanych płaskich oraz przestrzennych torach wyścigowych. Zaproponowano ponadto model drgań, za pomocą którego, na podstawie informacji o przyspieszeniach motocykla (wzdłużnym oraz poprzecznym) oszacowano ugięcia elementów sprężystych w zawieszeniu. Wiele z wyników symulacji numerycznych porównano z danymi zarejestrowanymi eksperymentalnie uzyskując bardzo dobrą zgodność.

W pierwszych rozdziałach rozprawy omówiono aktualny stan wiedzy z zakresu tematyki minimalizacji czasu manewru oraz nierozzerwalnie związanego i równoważnego tematu optymalizacji trajektorii ruchu pojazdów. Przedstawiono analityczne podłoże problemu sterowania optymalnego, sformułowano warunki konieczne optymalności, a następnie dokonano przeglądu metod numerycznych dedykowanych rozwiązywaniu zagadnień sterowania optymalnego.

Kolejne rozdziały poświęcono sformułowaniu zadania sterowania czasowo-optymalnego dla ruchu pojazdu jednośladowego po jezdni płaskiej. Zaproponowano nową parametryzację zadania prowadzącą do lepszej zbieżności procedur optymalizacyjnych. Zaprezentowano także nowe podejście, w którym dopuszczalne wartości sterowania ograniczono wyznaczonymi na podstawie danych eksperymentalnych hiperbolicznymi funkcjami zależnymi od prędkości pojazdu. Następnie omówiono wpływ wprowadzonych modyfikacji na otrzymywane numerycznie

rezultaty. Jeden z przykładów obliczeniowych poświęcono aspektom praktycznego zastosowania wyników obliczeń w procesie poprawy czasu okrążenia w warunkach ruchu rzeczywistego pojazdu.

W dalszej kolejności poddano analizie proces numerycznego odwzorowania geometrii jezdni poszukując odpowiedniej metody pozyskiwania danych wejściowych do sformułowanego zadania optymalizacji. Zaprezentowano porównanie numerycznych modeli terenu o różnej rozdzielczości. Poruszono także temat pomiarów wysokościowych za pomocą odbiorników sygnału satelitarnego wykorzystywanych w dedykowanych pojazdom jednośladowym pokładowych układach pomiarowych (systemach akwizycji danych). Następnie zaprezentowano proces uogólnienia zadania minimalizacji czasu manewru na przykład przestrzennego ruchu pojazdu oraz omówiono wpływ trójwymiarowego opisu jezdni na rezultaty obliczeń. Przedstawiono również rozbudowany przykład obliczeniowy, w którym wyniki otrzymane na podstawie modelu numerycznego zestawiono z pomiarami zarejestrowanymi w trakcie ruchu rzeczywistego pojazdu.

Przedostatni rozdział rozprawy poświęcono propozycji modelu drgań o trzech stopniach swobody, za pomocą którego przeprowadzono proces szacowania ugięcia elementów sprężystych w zawieszeniu pojazdu jednośladowego. Działające na modelowany pojazd obciążenia wyznaczono na podstawie przebiegu przyspieszenia pojazdu w kierunku wzdłużnym oraz poprzecznym do trajektorii ruchu. Określone numerycznie ugięcia elementów resorujących porównano następnie z danymi eksperymentalnymi.

W załącznikach do pracy przedstawiono matematyczny opis jezdni jako powierzchni zorientowanej oraz zaprezentowano aplikację stworzoną w celu wsparcia procesu analizy zależności geometrycznych charakteryzujących geometrię pojazdu jednośladowego. Za jej pomocą określono, a następnie omówiono nieliniowe charakterystyki elementów resorująco-tłumiących montowanych w pojazdach jednośladowych.

Rozprawę kończy podsumowanie przeprowadzonych prac oraz otrzymanych rezultatów. Wskazano również możliwe kierunki dalszych prac badawczych.