

学位論文 博士（工学）

エネルギー整形による  
システムの動力的特性を利用した  
倒立振り子型移動体の非線形制御

2013年3月

慶應義塾大学大学院理工学研究科

横山和人

# 主 論 文 要 旨

報告番号	① 乙 第	号	氏 名	横山 和人
主 論 文 題 目： エネルギー整形によるシステムの動力的特性を利用した 倒立振り子型移動体の非線形制御				
(内容の要旨) 次世代移動支援技術などに応用されている倒立振り子型移動体 (MIP: Mobile Inverted Pendulum) の安定化・走行制御系設計を行う。特にシステムのエネルギー状態の整形および2つの動力的に特性に着目する。1つは物理システムが本来有する運動に伴うエネルギー減衰特性である受動性, もう1つはMIPの不安定性である。制御理論は Interconnection and Damping Assignment Passivity-Based Control (IDA-PBC) を用い, 安全性を考慮した非線形な制御特性を付与した。提案するいずれの制御系もエネルギー整形の自由度を利用した状態量依存のゲイン特性を有し, MIPの状態を指定範囲内に制限するとともに, 転倒に近づくと積極的に目標状態へ復帰させる。本論文の構成は以下の通りである。 第1章では, 本論文の背景を述べた。 第2章では, MIPと類似するシステムである台車型倒立振子に IDA-PBC を適用し, 制御性能を検証した。エネルギー整形に基づく制御は広範囲な状態に対する安定性保証などの利点がある反面, 過渡応答が遅くなる傾向があるといわれる。本章では従来用いられなかったエネルギー整形の自由度を利用することにより, 過渡応答の速さと引き込み領域の大きさを両立可能であることを示し, MIPに IDA-PBC を応用することの妥当性を確認した。 第3章では, MIPを指定した位置に倒立状態で停止させる安定化制御について述べた。劣駆動システムのMIPに IDA-PBC を適用する場合, 非線形偏微分方程式を解く必要があり, 一般的に困難を伴う。MIPに対してはこれが解けることを示して制御系を導出し, 併せて安定性を保証する制御系パラメータの視覚的選択法を示した。第2章の知見に基づき制御系を調整し, シミュレーションと実機実験により提案制御系の有効性を示した。 第4章では, 運転者からの指令に対して力学的な不安定性を利用しつつMIPを加減速させる走行制御について述べた。MIPが前方または後方に倒れ込み, 定常状態となるように制御されるとき, 動力的釣り合いから間接的に並進方向加速度も一定となる。本章では車輪の状態量を消去したMIPのダイナミクスを解析することで, これが全駆動システムの枠組みで非線形偏微分方程式を解かずに IDA-PBC を適用可能な構造を有することを示した。導出した制御系は車体角度のみに着目するものであるが, 加減速指令に応じて故意にMIPを倒れ込ませることで並進方向加速度を制御した。シミュレーションと実機実験により提案制御系が有効に機能することを示した。 第5章では車体重心移動機構を追加したMIPに対する走行制御について述べた。本システムは民間で実車開発が進む一方, 静力学的な平衡点近傍での安定性を保証する線形制御を用いた従来研究が少数存在するのみである。本章では新しい自由度が追加されたMIPに対しても第4章で提案した制御系導出方法が拡張可能であることを示した。倒れ込みと車体重心移動を併用する不安定化によりMIPを加減速させる走行制御系を提案し, シミュレーションと実機実験により有効性を示した。 最後に第6章では, 本論文の結論を述べた。				

## SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Science for Open and Environmental Systems	Student Identification Number	SURNAME, First name YOKOYAMA, Kazuto
Title  Dynamics-Based Nonlinear Control with Energy Shaping for Mobile Inverted Pendulum		
Abstract <p>In this dissertation, stabilizing and driving nonlinear controllers for a mobile inverted pendulum (MIP) are proposed. The key idea of the controllers is based on energy shaping and two dynamical properties of the MIP. The one is passivity, which is the inherent property of energy dissipation of physical systems in motion, and the other is dynamical instability. Especially, interconnection and damping assignment passivity-based control (IDA-PBC) is applied and the way of energy shaping to enhance the safety of the MIP is shown. All of the proposed controllers have state-dependent gain properties. They stabilize and drive the MIP theoretically restricting the states in a predefined region and actively recover the system back to desired states. The contents of this dissertation are as follows.</p> <p>Chapter 1 describes the introduction and the motivation of this study.</p> <p>In chapter 2, performance of IDA-PBC is verified. It is applied to a cart-inverted pendulum which has similar dynamics to the MIP. Although controllers based on energy shaping can guarantee a large domain of attraction, transient responses tend to be slow in general. Utilizing free parameters which are not focused on in previous studies, IDA-PBC is shown to be able to achieve both of fast transient responses and a large domain of attraction. Validity of applying IDA-PBC for the MIP is decided based on the results.</p> <p>In chapter 3, the stabilizing controller for the MIP is designed. Nonlinear partial differential equations (PDEs) must be solved when IDA-PBC is applied for an underactuated system like the MIP. This is difficult task in general. The PDEs are shown to be solved for the MIP and the controller is derived. A graphical way of selecting controller parameters to guarantee stability is also proposed. With appropriate tuning based on the knowledge obtained in chapter 2, the proposed nonlinear controller shows performance which is superior to a typical linear controller.</p> <p>In chapter 4, the driving controller to track a reference translational acceleration utilizing instability is proposed. When the body angle is controlled to be inclined steadily, the acceleration becomes constant due to the dynamic equilibrium. The dynamics of the MIP focusing on the body angle is shown to have an appropriate structure to derive the IDA-PBC controller without solving the PDEs. Although it focuses only on the body angle, the MIP is driven with destabilization. Effectiveness of the controller is verified in simulations and experiments.</p> <p>In chapter 5, the MIP is extended introducing a slider mechanism for the center of gravity of the body and the driving controller is designed. Previous studies on the extended MIP use linear controllers which guarantee stability in the neighborhood of the static equilibrium. This study extends the controller design procedure in chapter 4 to the new system. Effectiveness of accelerating with intentional inclining and sliding body is shown in simulations and experiments.</p> <p>Chapter 6 describes the conclusion of this dissertation.</p>		