

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560540

研究課題名(和文)車輪型倒立振り子ロボットのモデルベースシステム開発

研究課題名(英文)Model Based System Development on Wheeled Inverted Pendulum Robot

研究代表者

島田 明 (Shimada, Akira)

芝浦工業大学・デザイン工学部・教授

研究者番号：50554218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：車輪で移動可能な倒立振り子型ロボットの開発に関する研究を行った。その特徴は、モデルと総称して呼ぶ運動方程式やロボットの構造・振る舞いを表すブロック図を用いて理論的、体系的にロボットを開発する手法を示すことである。内蔵するモータの特性や独自の機械的な拘束条件まで考慮した数式の導出やシステム同定と呼ばれる実験で性質を捉えたこと、部屋に設置したセンサ情報からロボット及び障害物の位置を推定して制御する方法についても、独自のマルチレート制御法を設計し、実装実験を行い、安定した制御性能を確認できた点が本研究の成果である。また、同ロボットの運動性能を上げる技術として適応外乱オブザーバと称する技術を提案した。

研究成果の概要(英文)：This study deals with the development of wheeled inverted pendulum robot. The feature is that the derivation of exact model which consists of equation of motion and block diagrams expressing the structure and behavior of the robot. It means to present the theoretical and systematic method of development. Derivation of the equation of motion was performed considering the characteristics of rotors of mounted electrical motors and special physical constraints. The system identification experiment was performed in order to acquire real physical parameters. Furthermore, the localization technique using Kinect sensor was introduced. Finally, the multirate sampling control technique was presented. Then, the study was performed totally and successfully. Additionally, adaptive disturbance observer technique was presented in order to improve the control performance.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：車輪倒立振り子 ロボット 摩擦補償 システム同定技術 障害物回避 適応外乱オブザーバ

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 第1の背景: 移動・運搬手段

倒立振子の研究は長い歴史を持つ。倒立振子は子供の遊びから始まり、近年、制御工学の教材と位置づけられてきた。しかし、セグウェイが発表されて以来、その利便性が世に知られ、車輪型倒立振子は次世代移動手段として認知された。一方、事故死が起きるなど、安全性を含めて多くの課題が残されている。また、倒立振子の制御原理は人間型ロボット歩行に利用され、車輪型モデルはパートナーロボットの脚部に利用されている。それは、装置の占める占有面積が小さく、起立した成人の両足裏の占有面積に近いこと、人間型ロボットの二足歩行機構に比してアクチュエータ数が少ないことによる。

### (2) 第2の背景: 制御技術の課題と発展

従来の倒立振子の多くは平衡姿勢での線形近似モデルを用いて制御系設計を行う。直線移動を前提とし、駆動モータと減速機を考慮しない例が多い。その問題を解決するため、モータと減速機を考慮した3次元非線形モデルと、非線形制御系設計技術を要する。

また、同ロボットを自律移動ロボットとして用いる場合、従来の多くの移動ロボットと同様に、障害物を回避して目的地に到達するための移動制御技術が必要である。その移動制御技術は従来の移動技術と共通する部分と独自の部分があると考えられる。

### (3) 第3の背景: システムモデリング

自律ロボット開発のためのシステムモデリング法として、UMLまたはSysMLを用いたモデリング法が知られている。しかし、倒立振子型ロボットのように不安定で、リアルタイム性が重要なシステムの制御系の構築例は稀であり、リアルタイム制御系を考慮したシステムモデリングを追求することも重要な技術分野の一つである。同技術の開発は、倒立振子に限らず、人に優しく安全な高性能ロボット創出に役立つと考えられる。

## 2. 研究の目的

### (1) 厳密なモデルの導出

人を支援するためのロボットが人の行動に対し、タイミングをずらさずに支援すること、すなわち、位相遅れなくサービスを行う機能が未来の移動装置やパートナーロボットに必要である。車輪型倒立振子が同機能を実現するには高加速度制御が必要だろう。実現手段として、前傾・後傾姿勢を積極的に生む制御法がある。動作中、胴体が大きく傾く必要があり、制御系設計に線形近似モデルが使えない。島田らは3次元空間で数学モデルと制御法を提案したが、モータと減速比の影響を十分に考慮していなかった。それは極めて重要なはずが、他の研究例でも無頓着である。そこで、モータと減速機を厳密に考慮したモデルを作成し、高加速度制御を実現する足がかりとすることを目的とする。

### (2) 知能化空間での軌道制御技術の確立

倒立振子型ロボットを移動ロボットとして用いるには、障害物を回避しつつ、目標位置に到達するための移動制御技術が必要である。既に多くの移動ロボットに関して、移動技術が提案されているが、本研究では倒立振子型ロボットに対しても既存移動技術のままが良いのか否かの検討を含めて移動制御技術の確立を行うことを目的のひとつとする。

### (3) システムモデルの作成

オブジェクト指向の考え方を実現するために様々な図が用いられるが、ソフトウェアの専門家たちは、ロボット工学の専門を兼ねている場合でも、不安定性やリアルタイム制御の概念が反映されたシステムは想定されていないことがある。本研究では、同システムモデルの構築を行う。

## 3. 研究の方法

本研究を遂行し成功させるために必要な

項目として2項目が考えられる。

第1には、島田らによる文献で導出されたモデルをモータと減速機の影響が陽に表わされるモデルに書き換えることである。このモデリングは特に重要である。さらに難しいのはその後の移動制御系の設計方法の確立である。移動車輪の滑り等を考慮に入れた新しい制御法と実機実験と行き来しながら探索する。

第2は移動制御を実現するための環境の構築である。本ロボットの利用を屋内と仮定するとGPSは使えない。広い屋内空間を智能化する研究も進んでいるが、本研究では第一段階の基礎研究として、KINECTセンサを用いたごく狭い空間での移動制御からはじめるものとする。

以上の2項目を鑑みると、限られた狭い空間での環境を整え、その世界での移動制御に限ったとしても、本研究で開発しようとしている制御技術の根本的な部分を扱うことができる。すなわち、KINECTセンサによるロボット及び障害物の位置の観測から推定に至る時間による遅れは、制御系にとっては、むだ時間遅れ、或いは長い制御周期の原因となる。一方、ロボットの車輪の回転角度は内蔵するモータに組み込まれるロータリーエンコーダから短い周期で観測できるため、倒立振子の性質と重なって、本システムは不安定な非線形かつマルチレートサンプリングシステムとなる。

#### 4. 研究成果

車輪で移動可能な倒立振子型ロボットの開発に関する研究を行った。本研究で開発した実験装置の外形を図1に、コントロールに関するハードウェア工製図を図2に示す。図2の左側にジャイロ及び加速度センサから構成されるIMUセンサと車輪駆動用モータに搭載されたロータリーエンコーダの情報が、図2中央部のコントローラにもたらされ、

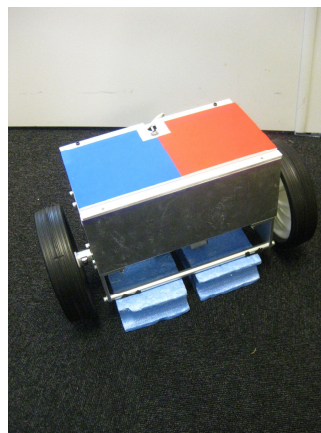


図1 倒立振子型ロボットの外観

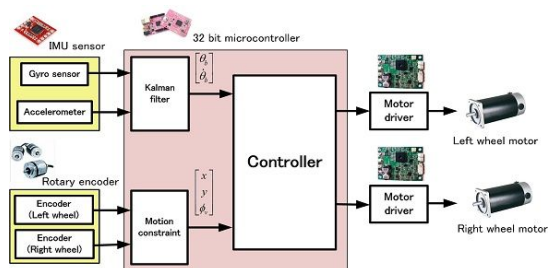


図2 ハードウェア構成図

図2右に記されたモータ駆動部に反映される関係が表現されている。

この実機に対し、図3に示した傾き角度と車輪回転角度の関係や図4に示した姿勢の関係を考慮して、厳密な運動方程式が導出されたことが成果の一つである。

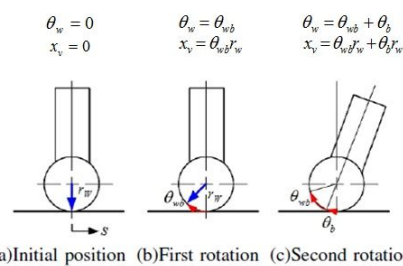


図3 傾き角度と車輪回転角度の関係

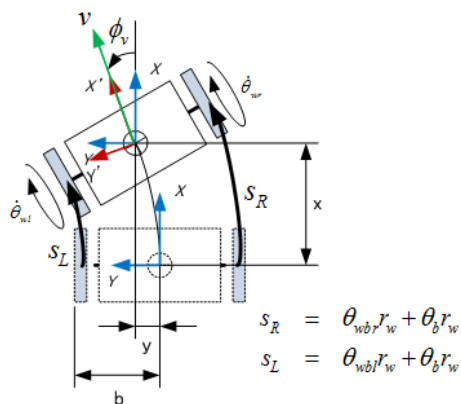


図4 車輪回転角度と姿勢の関係

また、得られた運動方程式を基につつ、システム同定実験を行い、摩擦モデルを導出し、摩擦補償制御実験に成功した。図5にそのブロック図を示す。

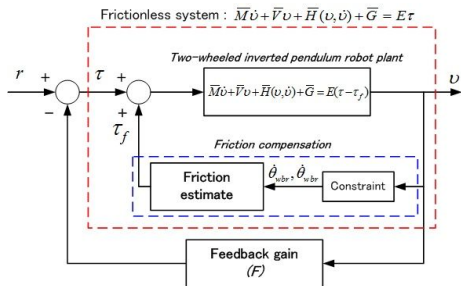


図5 摩擦補償時のブロック図

次に、移動制御実験のために構築した環境を図6に示す。KINECTを実験室上部に固定し、床を操作空間としている。

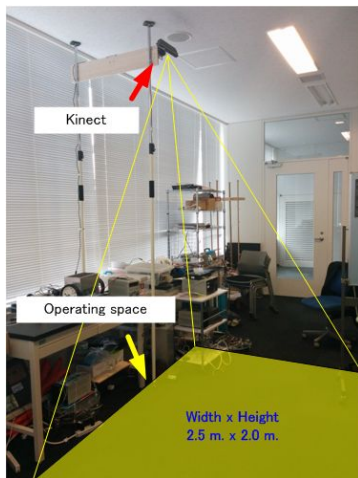


図6 KINECT センサと操作空間

KINECT から観測されるロボット及び障害物の実験風景の例を図7に示す。右下がマーカを貼り付けた倒立振り子型ロボットである。

これに対して、ロボットと障害物の位置及び姿勢を認識した図を図8に示す。

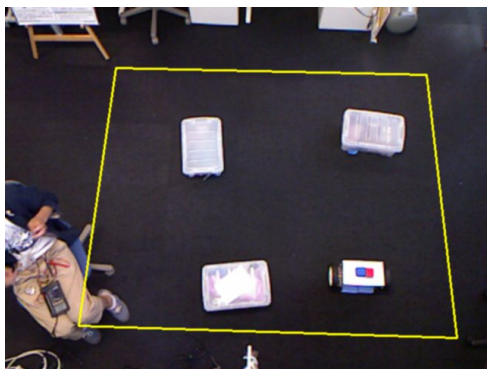


図7 実験風景の例

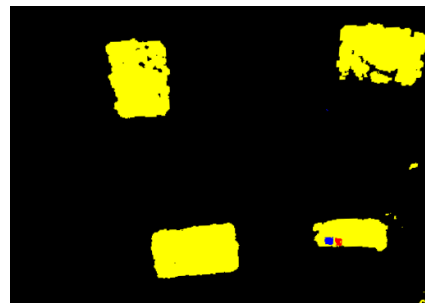


図8 ロボットと障害物の認識

KINECT センサからの情報からロボットの位置・姿勢と障害物の位置・姿勢を認識し、軌道計画に反映する情報の流れを図9に示す。

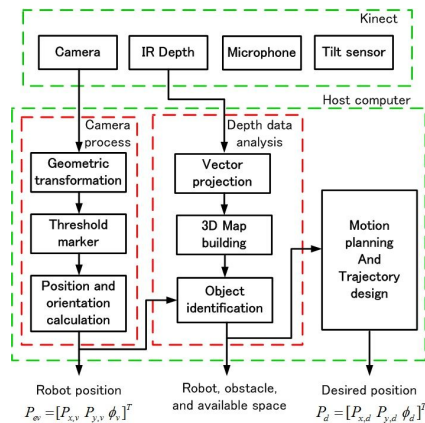


図9 位置・姿勢観測と軌道計画

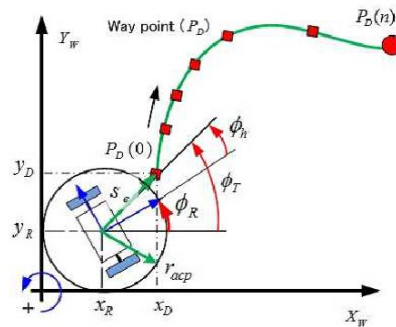


図10 ロボットの目標軌道

ロボットの軌道計画に応じて、Waypointと名づけた目標点を次々と生成して行く仕組みを図10に示した。コントローラはKINECTセンサから長い制御周期でi番目の情報を得ると共に、ロータリーエンコーダから短い制御周期でk番目の情報を得る。従って、同システムは複数のサンプリング周期、或いは、制御周期を持つマルチサンプリング制御系として設計さ、その制御系に基づき、目標軌道に沿った移動制御を行う。制御ブロック図

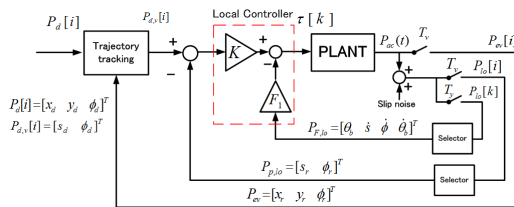


図 11 マルチレートサンプリング制御系  
を 図 11 に示す。また、実験風景を 図 12 に示す。



図 12 移動制御の実験風景

以上、厳密な運動法式的の導出やシステム同定と呼ばれる実験で倒立振り型移動ロボットの性質を深く捉えたこと、部屋に設置したセンサ情報からロボット及び障害物の位置を推定して制御する方法を確立し、同環境条件下で動作するマルチレート制御法を設計し、実装実験を行い、安定した制御性能を確認できた点が本研究の主たる成果である。

また、同ロボットの運動性能を上げる技術として適応外乱オブザーバと称する技術を提案した。図 13 に適応外乱オブザーバのブロック図を示す。

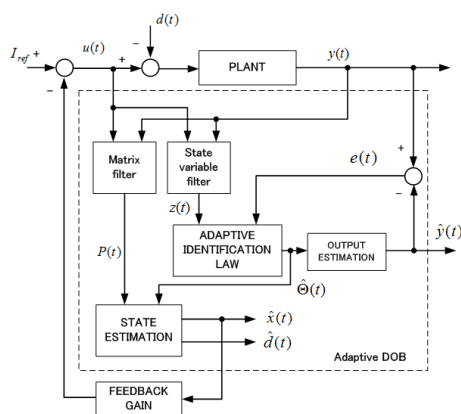


図 13 適応外乱オブザーバのブロック図

## 5 . 主な発表論文等

( 研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[ 雑誌論文 ] ( 計 1 件 )

Danai Phaoharuhansa, Akira Shimada,  
Friction Compensation for Two  
Wheeled Inverted Pendulum Robot  
Using System Identification,  
International Journal of Advances in  
Science and Technology (IJAST),  
Special Issue, 査読あり、2014、pp.1-7

[ 学会発表 ] ( 計 7 件 )

Danai Phaoharuhansa, Akira Shimada,  
Trajectory Tracking for Wheeled  
Inverted Pendulum Robot using Tilt  
Angle Control, IECON2013, 査読あり、  
Austria Center Vienna ( ウィーン )、  
pp.4287-4291、2013-11-12、  
坪井康太郎, 島田 明 : 結合倒立振り子の位  
置制御, 電気学会産業計測制御研究会  
IIC-13-116, MEC-13-116, 査読なし、  
p.23-27, 千葉大、2013-3-8

Danai Phaoharuhansa, Akira Shimada,  
Position Control on Wheeled Inverted  
Pendulum Robot, IEEJ Technical  
Meeting, IIC-13-115 MEC-13-115, 査読  
なし、千葉大、2013-3-8

Akira Shimada, Danai Phaoharuhansa, An  
Adaptive Disturbance Observer Design on  
Motion Control Systems, The International  
Conference on Advanced Mechatronic  
Systems (ICAMEchS2012), Journal of  
Advanced Mechatronic Systems, IEEE, etc.,  
査読あり、東京農工大、p.320-322,  
2012-9-19

Danai Phaoharuhansa, 島田 明 : Control  
on Inverted-Pendulum Robot with  
Unknown Parameters and Disturbance, 第  
30 回日本ロボット学会学術講演会, 日本  
ロボット学会, 査読なし、札幌コンベン

ションセンター、RSJ2012AC2G1-3、  
2012-9-18

Danai Phaoharuhansa, Akira Shimada,  
Obstacle avoidance for multi-link  
inverted pendulum robot using virtual  
impedance, SEATUCM2012, Robotics  
and Mechanical Engineering, 査読あり,  
2012 タイ国 KMUTT, OS05,2012-3-6

Danai Phaoharuhansa, Akira Shimada,  
An Approach to SysML and Simulink  
Based Motion Controller Design for  
Inverted Pendulum Robots, SICE  
Annual Conference 2011 in Tokyo, 査読  
あり、早稲田大, pp.2190-2193, 2011-9-16

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sic.shibaura-it.ac.jp/~ashimada/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

島田 明 (SHIMADA, Akira)

芝浦工業大・デザイン工学部・教授

研究者番号: 50554218