

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760380

研究課題名(和文) 方向依存性に起因する非線形摩擦と重心のずれを考慮した全方向移動ロボットの軌道制御

研究課題名(英文) Trajectory control of omni-directional mobile robot with considering shift of center of gravity and nonlinear friction which is affected by direction of movement

研究代表者

江丸 貴紀 (EMARU, Takanori)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30440952

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はオムニホイール(全方向に移動可能な特殊構造を有する車輪)を用いた全方向移動ロボットをより安全に、より使いやすくすることを目的としたものである。主な研究成果は以下の通りである：1)オムニホイールの方向依存性に起因する非線形摩擦を精度良くモデル化できた。これにより位置や速度をより精密に制御することが可能となった。2)移動ロボットの重心のずれをモデル化し、それに対する制御法を提案した。このモデルは強い非線形性を持つため、非線形要素を効果的に補償する新しい制御器を提案し、その有効性をシミュレーションおよび実験により確認した。

研究成果の概要(英文)：Mechanism analysis and performance improvement of an omni-directional wheel mobile robot is purpose of this research. Here, an omni-directional wheel has special mechanism in order to achieve omni-directional movement. The results of this project are as follows: 1)Appropriate model of nonlinear friction of omni-directional wheel that is affected by direction of movement has been proposed. This result makes it possible to control position or velocity of an omni-directional wheel mobile robot accurately. 2)Appropriate model of dynamic shift of center of gravity has been proposed. Such model has strong nonlinearity. In order to compensate such nonlinearity, a novel control strategy has been proposed. The validity of the new control strategy has been investigated by simulations and experiments using an omni-directional wheel mobile robot and manipulator system.

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：制御システム 全方向移動ロボット 軌道制御 非線形補償器

1. 研究開始当初の背景

(1) オムニホイールを用いた全方向移動ロボットは静止状態から任意の方向に移動することができるため、従来の車輪型移動ロボット、クローラ型移動ロボットと比較し、狭所空間を自由自在に動き、切り返し操舵無しに目的地までスムーズに移動することが可能である。これらの特徴は狭い場所や混みあった場所で使用されるロボットを実現するためには必要不可欠な要素であり、また操作者がロボットを直感的に操作できるというメリットもある。これらのメリットを生かし、産業分野（搬送台車・フォークリフト）、医療福祉分野（電動車椅子・食事配膳台車・歩行支援器）などへの応用が想定されている。

(2) オムニホイールは円周上に取り付けられた樽型のローラが軸方向への摩擦を軽減することによって全方向への移動を可能にする。そのため、移動方向によってオムニホイールが受ける摩擦は非線形かつ時変となる。障害物回避行動や目的地到達行動を目的とし、オムニホイールの特長を生かした軌道生成手法が数多く提案されているが、非線形性を有する摩擦のモデリングおよび制御に関する研究は国内外において見当たらない。

(3) 搬送台車や移動マニピュレータなどのアプリケーションを想定した場合、搬送物や作業によっては重心が大きく移動するため、これが軌道制御に対し悪影響を及ぼす。また、この重心のずれが大きくなると、ロボットの安定性にも影響し、最悪の場合には転倒の可能性もある。この重心のずれも非線形かつ時変特性となり、一般的に制御は困難である。

(4) 研究代表者らは、これまえ「重心のずれを考慮した全方向移動ロボットの経路追従制御」として2次元的なモデルを構築し、線形化した上で制御系を構築することにより重心のずれに対してロバストな制御系構築の可能性を示した。また、非線形な制御対象に対する制御手法としてデジタル加速度制御を提案している。この手法をマニピュレータの制御に適用することにより、重力項に代表される非線形項に対するロバスト性を示した。これらの手法をベースとして本研究課題に応用することにより効率的に研究を推進する。

2. 研究の目的

本研究ではオムニホイールを用いた全方向移動ロボットの軌道制御を行う際に問題となる諸問題を整理し、より精密・ロバストな軌道制御手法の確立を目指す。主な課題と目標は以下の通りである。

課題1：オムニホイールの非線形摩擦のモデル化。オムニホイールはその構造から強い方向依存性を持つ。そのため、この摩擦をモデル化すると強い非線形性を持つことが予想されるがいまだ実用的なモデルが提案されていない。

課題2：重心のずれのモデル化。これまでの研究では2次元的なモデルの構築を行い、その中で重心が移動した際の制御法について考察を行ってきた。本研究ではオムニホイールを用いた台車、そしてロボット本体を3次元モデルで表現し、ロボットのダイナミクスを考慮した非線形モデルを構築することを目的とする。重心のずれを考慮した3次元移動ロボットモデルについては、いまだ十分に議論されていない。

課題3：重心のずれ・オムニホイールの非線形摩擦に対してロバストな軌道制御系の提案。これらのいずれとも強い非線形時変特性を持つため、既存の制御法では十分に精度良く制御することができない。そこで、非線形制御法を独自に開発し、軌道追従誤差を十分に小さくするロバストな制御系を開発する。強い非線形性を持つ制御系に対して有効な制御系はいまだ提案されておらず、汎用的な制御系の開発を目的とする。

課題4：汎用的な微分値推定フィルタの開発。上記の課題3は我々が提案しているデジタル加速度制御系に基づいて解決を試みる。ただしデジタル加速度制御系を構成するためには制御対象の位置・速度・加速度の情報が必要である。これらの情報をセンサレスで獲得するため、汎用的な微分値推定フィルタを開発する。

3. 研究の方法

各年度の研究内容として以下の具体的な研究課題を抽出し、3カ年に分けて順次進めた。平成23年度はオムニホイールの非線形性のモデル化（課題1）、平成24年度は重心のずれをモデル化すること（課題2）を目標とした。さらに、これらの強い非線形を持つモデルの構築と平行し、非線形な制御対象に対してロバストな制御系の設計（課題3）を平成23～24年度にかけて実施した。最終年度である平成25年度は、実環境における実験を繰り返し行い、問題点の把握およびその解決を図り、提案手法のブラッシュアップに努めるとともに研究を総括した。

4. 研究成果

本研究は、オムニホイールを用いた全方向移動ロボットマニピュレータにおける、1)オムニホイールの方向依存性に起因する非線形摩擦、2)移動ロボットにマニピュレータを搭載した際の重心のずれ、という2つの大きな問題解決を目的としたものである。平成23年度～平成25年度に渡り、研究計画に従い4つの課題について研究を行った。その成果を以下の通り記述する。

課題1 [オムニホイールの非線形摩擦のモデル化]：本課題については、車輪と床面の摩擦について一般的なモデルを構築し、シミュ

レーションおよび実機実験を行うことにより有効性を確認した。平成 23 年度においては、特定の床面を仮定した場合における妥当なモデルを構築することができた。平成 24 年度においては非線形摩擦の影響がより大きくなり低速度領域に着目し、オムニホイール移動ロボットが低速で移動する際の摩擦について機構面から解析を行いモデル化した。オムニホイールは、その機構によって特に低速度領域で大きな、そして強い非線形特性を持つことが知られている。そこで、低速度領域にターゲットを絞りモデル化を行うことで、実際のオムニホイール移動ロボットの挙動を精度よくモデル化することに成功した。しかしながら、オムニホイールに固有の問題である方向依存性に起因する非線形摩擦について、実機の挙動と一致するような精度の良いモデリングができたとは言い難い。そこで、最終年度である平成 25 年度においてはオムニホイールの幾何学的な特徴をモデルに反映すべく、ホイールの接地面によってオムニホイール移動ロボットの回転半径が変わることに着目し、そのモデル化を行った。提案モデルの有効性についてシミュレーションおよび実機実験を行い、その有効性を確認することができた。本モデルはオムニホイール移動ロボットをより精密・ロバストに軌道制御するための基本技術となるため、本研究課題の大きな成果であるといえる。

課題 2 [オムニホイールの非線形摩擦に対してロバストな軌道制御系の提案]：我々が目的とする摩擦は非線形かつ時変特性を持つため、一般的な制御器で精度よく制御することは大変困難である。平成 23 年度は、既存の PID 制御系や最適制御系に対し容易に追加できる非線形補償器の開発を目的とし、これまで提案してきたデジタル加速度制御系 (DAC) を改良し、非線形補償器としての性能を向上させる研究を行った。具体的には、慣性項に対してオンラインシステム同定を適用する手法を提案し、ロバストな非線形補償器が構成できることをシミュレーションおよび実験により確認した。提案手法をロボットマニピュレータに適用することにより有用性の検討を行うことにより、本制御手法がマニピュレータのみならず非線形な要素を持つメカニカルシステムに対し汎用的に適用できる可能性を持つことを確認した。これは大きな研究成果であるといえる。さらに平成 24, 25 年度においては提案した非線形補償器をセンサレスで実装するために運動の加加速度に着目した補償器を提案し、シミュレーションおよび実験によってその有効性を確認した。本手法は幅広い分野のメカニカルシステムに応用可能な非線形補償器をセンサレスで実装することを可能としており、様々な分野に応用可能な研究成果であるといえる。

課題 3 および 4 [重心のずれのモデル化およびそのずれに対してロバストな軌道制御系の提案]：重心のずれをモデル化するために、質点がロボット上のある範囲内を移動することを想定することにより運動方程式を導出しモデル化を行った。この強い非線形時変特性を持つ重心のずれに対して、(1)一般的なメカニカルシステムの制御に用いられる PID 制御系、(2)課題 2 で提案した非線形補償器を適用し、それを基に研究を進展させることにより効率的な研究の推進を図った。その結果、我々の提案する非線形補償器が重心のずれに対して有効な制御性能を持つことを実験的に確認することができた。

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 15 件)

1. Jixin LV, Yukinori KOBAYASHI, Ankit A. RAVANKAR and Takanori EMARU, Straight Line Segments Extraction and EKF-SLAM in Indoor Environment, Journal of Automation and Control Engineering, 査読有, Vol. 2, No. 3, 2014, pp. 270-276, DOI:10.12720/joace.2.3.270-276
2. Takumi MAEDA, Yohei HOSHINO, Daisuke YOSHIDA, Yukinori KOBAYASHI and Takanori EMARU, Force Redistribution Method for Compensating Actuator Breakdown of Vibration-Isolation Tables Supported with a Redundant Number of Pneumatic Actuators, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 7, No. 4, 2013, pp. 355-366, DOI:10.1299/jsdd.7.355.
3. 前田拓巳, 星野洋平, 吉田大輔, 小林幸徳, 江丸豊紀, アクチュエータ故障に対する冗長支持空気圧除振台の出力再分配法, 日本機械学会論文集 (C 編), 査読有, 79 巻, 801 号, 2013, pp. 1317-1326, DOI:10.1299/kikaic.79.1317.
4. Yizhi GAI, Yukinori KOBAYASHI, Yohei HOSHINO and Takanori EMARU, Motion Control of a Ball Throwing Robot with a Flexible Robotic Arm, International Journal of Computer, Information Sciences and Engineering, 査読有, Vol. 7, No. 7, 2013, pp. 79-87, <http://waset.org/publications/16363/>
5. Guoliang ZHONG, Yukinori KOBAYASHI, Takanori EMARU and Yohei HOSHINO, Optimal control of the dynamic stability for robotic vehicles in rough terrain, Nonlinear Dynamics, 査読有, published online 13 March 2013, DOI:10.1007/s11071-013-0847-2.

6. Guoliang ZHONG, Yukinori KOBAYASHI, Yohei HOSHINO and Takanori EMARU, System modeling and tracking control of mobile manipulator subjected to dynamic interaction and uncertainty, Nonlinear Dynamics, 査読有, published online 25 Jan. 2013, DOI:10.1007/s11071-013-0776-0.
 7. Yohei HOSHINO, Kyohei KATAYAMA, Yukinori KOBAYASHI, Takanori EMARU and Yohsuke NAKANISHI, Sky-Hook with Adaptive Disturbance Cancellation Control for Flexible Structures with an Active Vibration Control Unit (Translated Paper), Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 6, No. 5, 2012, pp. 626-640, DOI:10.1299/jsdd.6.626.
 8. Guoliang ZHONG, Yukinori KOBAYASHI, Takanori EMARU and Yohei HOSHINO, Approaches Based on Particle Swarm Optimization for Problems of Vibration Reduction of Suspended Mobile Robot with a Manipulator, Journal of Vibration and Control, 査読有, published online 5 Oct. 2012, DOI: 10.1177/1077546312458534.
 9. Yohei HOSHINO, Kyohei KATAYAMA, Yukinori KOBAYASHI, Yohsuke NAKANISHI and Takanori EMARU, Active Vibration Suppression of Flexible Sprayer-Boom by Sky-Hook with Adaptive Disturbance Cancellation Control Unit, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 6, No. 3, 2012, pp. 251-262, DOI:10.1299/jsdd.6.251.
 10. 星野洋平, 片山恭平, 小林幸徳, 江丸貴紀, 中西洋介, アクティブ制振ユニットによる柔軟構造物の適応スカイフック - 外乱相殺併合制御, 日本機械学会論文集 (C編), 査読有, 78巻, 789号, 2012, pp. 1485-1496, DOI:10.1299/kikaic.78.1485
 11. Ankit A. RAVANKAR, Yohei HOSHINO, Takanori EMARU and Yukinori KOBAYASHI, Robot Mapping Using k-means Clustering Of Laser Range Sensor Data, Bulletin of Networking, Computing, Systems, and Software (Non-peer reviewed journal), 査読無, Vol. 1, No. 1, 2012, pp. 9-12.
 12. Haibin YIN, Yukinori KOBAYASHI, Yohei HOSHINO and Takanori EMARU, Modeling and Vibration Analysis of Flexible Robotic Arm under Fast Motion in Consideration of Nonlinearity, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 5, No. 5, 2011, pp. 909-924, DOI:10.1299/jsdd.5.909.
 13. Haibin YIN, Yukinori KOBAYASHI, Yohei HOSHINO and Takanori EMARU, Decomposed Dynamic Control for Flexible Manipulator in Consideration of Nonlinearity -Flexible Dynamic Control-, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 5, No. 2, 2011, pp. 219-230, DOI:10.1299/jsdd.5.219.
- 〔学会発表〕(計46件)
1. 相澤優作, 江丸貴紀, 小林幸徳, 筋電パターン認識におけるリカレントニューラルネットワークの有用性の検討, 第46回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 2014年3月9日(北海道大学, 札幌市).
 2. Chenyu WANG, Yukinori KOBAYASHI and Takanori EMARU, Tracking of Mobile Robot and 3-D Grid Structure Recognition with Stereo Camera and RGB-D Camera, 第46回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 2014年3月9日(北海道大学, 札幌市).
 3. 李鍾赫, 江丸貴紀, 小林幸徳, カルマンフィルタを用いた全方位移動ロボットの速度推定と制御性能改善, 第31回日本ロボット学会学術講演会, 2013年9月4~6日(首都大学東京, 東京).
 4. Masashi OKUMA, Takanori EMARU, Yohei HOSHINO, Yukinori KOBAYASHI, A Novel Nonlinear Compensator Based on Digital Acceleration Control, 9th annual IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, August 17-21, 2013 (Madison Concourse Hotel, Madison, WI, USA).
 5. Ankit RAVANKAR, Yukinori KOBAYASHI, Takanori EMARU, Clustering Based Loop Closure Technique for 2D Robot Mapping Based on EKF-SLAM, 7th Asia international conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation, 23 July 2013 (Harbour Plaza 8 Degrees, Hong Kong).
 6. Yizhi GAI, Yukinori KOBAYASHI, Yohei HOSHINO, Takanori EMARU, Motion Control of a Ball Throwing Robot with a Flexible Robotic Arm, International Conference on Mechatronics and Robotics, July 8-9, 2013 (Holiday Inn London - Wembley, UK).
 7. Koichi IMAOKA, Takanori EMARU, Yukinori KOBAYASHI, Yohei HOSHINO, Mass Identification by Digital Acceleration Control for Dynamic Systems, 15th Asia Pacific Vibration Conference, June 2-6, 2013 (International Convention Center, Jeju, Korea).
 8. Ankit RAVANKAR, Yohei HOSHINO, Takanori EMARU, Yukinori KOBAYASHI, A New Algorithm To Detect Lines in Noisy Environment for Indoor Robot Mapping, 2013 JSME Conference on Robotics and

- Mechatronics, 2013年5月22-25日(つくば市, つくば国際会議場).
9. 高野直人, 江丸貴紀, 星野洋平, 小林幸徳, デジタル加速度制御とフィードフォワード制御の組み合わせによる柔軟ロボットアームの高性能化, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2013年5月22-25日(つくば市, つくば国際会議場).
 10. 李鍾赫, 江丸貴紀, 星野洋平, 小林幸徳, 重心のずれに対する全方位移動ロボットの速度制御, 第45回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 2013年3月6-7日(北海道大学, 札幌市).
 11. 今岡広一, 江丸貴紀, 小林幸徳, 星野洋平, デジタル加速度制御則を用いたロボットアームの質量推定, 第45回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 2013年3月6-7日(北海道大学, 札幌市).
 12. Jixin Lv, Yukinori KOBAYASHI, Yohei Hoshino and Takanori EMARU, Slope Detection based on Orthogonal Assumption, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Dec. 12-18, 2012 (Kyushu Univ. Fukuoka).
 13. Guoliang ZHONG, Yukinori KOBAYASHI, Takanori EMARU and Yohei HOSHINO, Trajectory Tracking of Wheeled Mobile Robot with a Manipulator Considering Dynamic Interaction and Modeling Uncertainty, International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Oct. 3-5 2012 (Concordia University, Montreal, QC, Canada).
 14. 大熊雅史, 江丸貴紀, 星野洋平, 小林幸徳, デジタル加速度制御系に基づく非線形補償器の提案, JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2012年5月27-29日(アクトシティ浜松, 浜松市).
 15. Takanori EMARU, Hiroto SASAKI, Yohei HOSHINO and Yukinori KOBAYASHI, Performance Improvement of PID-DAC-Nonlinear-Compensator by Applying Online System Identification, International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, Oct. 20-26, 2012 (Gran Melia Victoria, Majorca, Spain).
 16. 李鍾赫, 江丸貴紀, 星野洋平, 小林幸徳, 動的な重心のずれに対する全方位移動ロボットの軌道制御, 日本機械学会北海道支部北海道学生会第41回学生員卒業研究発表講演会, 2012年3月3日(北海道大学, 札幌市).
 17. 佐々木広人, 江丸貴紀, 星野洋平, 小林幸徳, オンラインシステム同定によるPID-デジタル加速度制御併合制御系の性能向上, 第29回日本ロボット学会学術講演会, 2011年9月7日(芝浦工業大学, 東京).

〔その他〕

ホームページ等

<http://net-hm.eng.hokudai.ac.jp/~rd/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江丸 貴紀 (EMARU, Takanori)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 30440952

(2) 連携研究者

小林 幸徳 (KOBAYASHI, Yukinori)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 10186778

王 碩玉 (WANG, Shuoyu)

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号: 90250951