

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 3月31日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360110

研究課題名（和文） 不整地環境におけるクローラ型移動ロボットの
スリップに頑強な自己位置推定研究課題名（英文） Robust positioning system for tracked vehicles on rough terrain
研究代表者

永谷 圭司（NAGATANI KEIJI）

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80314649

研究成果の概要（和文）：

クローラ型移動ロボットは、不整地において、クローラと地面の間にスリップを生じるため、モータの回転数を計数して自己位置を求める一般的なオドメトリは、適用不可能と言われてきた。そこで、本研究では、スリップ推定によるオドメトリ、三次元オドメトリ、ビジュアルオドメトリ路面検出によるオドメトリを提案し、不整地におけるオドメトリを実現した。さらに、これらの手法を実ロボットに実装し、有用性の比較評価を行った。

研究成果の概要（英文）：

Typically, it is said that conventional odometry system is inaccurate for tracked vehicles, because of slippage between tracks and the ground. In this research, we proposed slip compensated odometry, 3D odometry, and visual odometry to enable positioning for tracked vehicle on rough terrains. Furthermore, we implemented these technologies on actual tracked vehicles to evaluate its effectiveness and disadvantages.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2010年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2011年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

キャタピラとも呼ばれるクローラ機構は、地表に面で接触するため、不整地走破能力が高い。そのため、多数の瓦礫が散在する地震被災地において活躍が期待されるレスキューロボットの研究では、クローラ機構が広く利用されている。研究代表者も、2005年以

来、クローラ機構を有するロボットを用いて、レスキューロボットの遠隔操作に関する研究を進めてきた。この研究では、被災状況の確認や被災者の位置同定を行うため、ロボットの位置推定機能が必須である。ところが、クローラ機構は、接地面と地表との間にスリップを生じるため、従来型のオドメトリ（左右の車輪回転の計数によりロボットの自己

位置を推定する手法)は、適用が難しい。このような背景をふまえ、これまで、いくつかの研究機関において、視覚センサや距離センサなどの外界センサを用いてロボット周囲の環境情報を獲得し、既に獲得した環境情報とマッチングを行うことで自己位置を獲得する「SLAM (Simultaneous Localization And Mapping)」の研究が盛んに行われてきた。しかしながら、不整地における自己位置推定では、位置精度が環境や初期位置に大きく依存し、また処理にも時間がかかるといった問題が指摘されてきた。

以上の背景において、研究代表者は、2008年までに、スリップ率推定によるクローラ型ロボット専用のオドメトリ手法を提案してきた。この手法では、クローラの回転数の計数と同時に、ロボットに搭載したジャイロセンサを用いてロボットの挙動計測を行い、これを基にスリップ推定を行う。これにより、地表面が一様で平らな環境では、クローラ型ロボットのオドメトリの精度を大きく向上することができた。しかしながら、この手法では、クローラと不整地との間の予測不能なスリップには、対処ができない。

このように、不整地を移動するクローラ型ロボットの位置推定は、非常に重要であるにもかかわらず、それを実現する有効な手段が、未だに不足しているのが、2009年当初の現状であった。

2. 研究の目的

不整地環境におけるクローラ型ロボットの安定したオドメトリ機能実現のためには、クローラ機構のスリップにどう対処するかが鍵となる。しかしながら、ロボットが動作する対象環境に応じて、スリップ検知のための有効な手段が大きく異なるということが、これまでの研究で分かってきた。そこで、本研究では、三種類のオドメトリ(スリップ率推定によるオドメトリ、ビジュアルオドメトリ、レーザ距離センサによるオドメトリ)について、研究開発を行い、これらを自律的に使い分ける機能を実現することで、不整地における、より高精度なオドメトリの実現を目標とする。

3. 研究の方法

平成21年度には、研究の目的で示した、以下に示すオドメトリ手法の実装と評価を平行して進め、平成22年度以降、各手法の利点を統合したオドメトリの実現を目指すこととした。また、平成22年度後半より、各装置の小型化ならびに、ロボットへの組み込み手法についても検討を行うこととした。

(1) スリップ率推定によるオドメトリ

これは、これまで研究代表者らが提案した手法であり、クローラの回転数の計数と同時に、ロボットに搭載したジャイロセンサを用いてロボットの挙動計測を行い、そのデータを基にスリップ推定を行うことで、オドメトリの精度を大きく向上させるものである。そこで、本研究では、路面形状や材質、クローラの材質、路面の傾きなどが変化した場合の、この手法の適用範囲の確認と、精度の評価を行うこととした。

(2) 視覚センサによるビジュアルオドメトリ

従来のビジュアルオドメトリでは、瓦礫等の不整地環境において、視覚センサと地表面との距離変動が生ずるため、カメラ座標と実座標のスケール比が変動し、正確な速度が求まらないという問題があった。そこでこれを解決するため、本研究では、この変動が理論的に生じない「テレセントリック性」を有する光学系を視覚センサに採用することで、不整地における精度の良いビジュアルオドメトリの実装を目指すこととした。

(3) レーザ距離センサを用いたオドメトリ

三次元のレーザ距離センサを用いた環境情報取得による自己位置推定手法は、不整地環境において、情報取得や演算処理に時間がかかるという問題がある。そこで、本研究では、センシング面がクローラの接地位置の近傍で平行となるようにレーザ距離センサを設置し、路面のパターンの推移を検知することで、ロボットの移動速度を読み取る手法を新たに提案することとした。本研究では、これを実現するシステムを構築し、その評価を行うこととした。

4. 研究成果

(1) スリップ率推定によるオドメトリ

本研究により、路面形状や材質、クローラの材質が変化した場合でも、スリップ率推定には、ほとんど影響がないことを確認することができた。さらに、このシステムを三次元自己位置推定系に拡張することで、三次元オドメトリを実現した。次ページの図1は、階段における不整地移動ロボットの位置推定を示しているが、ロボットは、階段走行時の自己位置を精度良く推定できていることが分かる。本研究で開発したスリップ率推定を考慮した三次元オドメトリは、レスキューロボット Kenaf, Quince にも実装され、標準的なツールとして、現在も運用されている。

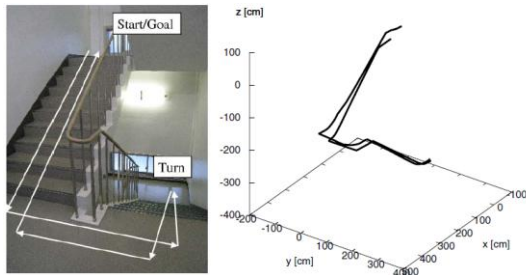


図 1: スリップ率推定による三次元オドメトリ

(2) 視覚センサによるビジュアルオドメトリ

本研究では、カメラ座標と実座標のスケール比の変動が理論的に生じない「テレセントリック性」を有する光学系を視覚センサに採用したセンサを開発し、不整地移動ロボット上に搭載して、位置推定試験を行った。その結果、計測速度に限界があること（5cm/sec以下）、テレセントリック性を実現するデバイス設置高さが、それほど大きく取れないこと、ロボット本体の姿勢が変動する際、誤差が大きくなること、といった問題点が見つかり、提案手法での不整地における位置推定は、困難であることが分かってきた。そこで、本研究では、レーザ光源の照射と高速イメージングセンサを利用した、新たなビジュアルオドメトリ系を開発した。図 2 に開発したデバイスを示す。



図 2: 移動ロボット用位置推定システム

この開発したデバイスにより、230 cm/sec までの計測速度が稼げるようになった。また、デバイス設置高さの余裕も大きく取れることが分かった。ただし、ロボット本体の姿勢が変動する際、誤差が大きくなるという問題に対しては、テレセントリックカメラを用いたデバイスと同様の問題があることが分かった。

(3) レーザ距離センサを用いたオドメトリ

本研究では、路面のパターンの推移を検知するため、図 3 右に示すように、センシング面がクローラの接地位置の近傍で平行とな

るようにレーザ距離センサを設置した。これにより、路面の凹凸の情報を逐次得ることができるようになったため、ロボットに搭載したサブクローラの自動制御が可能となり、不整地における安定した走行を実現することができるようになった。

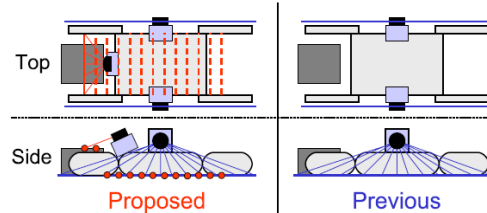


図 3: 路面情報獲得手法

さらに、図 3 左に示すように、3 台目の距離センサを前方に設置することで、ロボット下部の路面情報を逐次獲得することができるようになり、更なる不整地における安定走行が可能となった。走行の様子を、図 4 に示す。この手法については、レスキューロボットの利用者となり得る現場のレスキュー隊員からも、高い評価を得た。不整地移動ロボットの位置推定に関する直接的な成果とは言えないが、本研究から得られた大きな成果と言える。

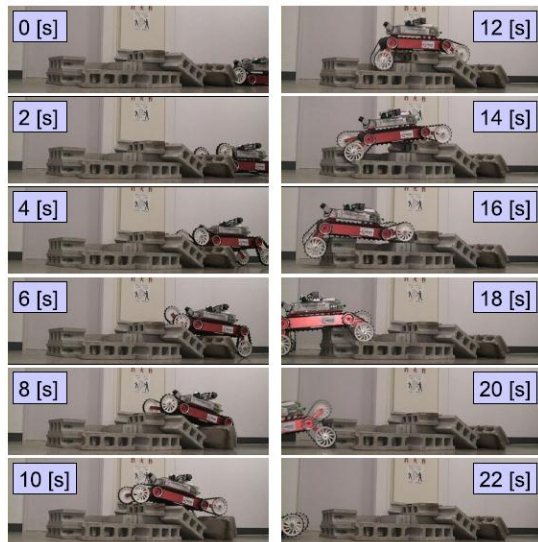


図 4: 路面計測による不整地走行

一方、路面情報を用いてロボットの移動速度を読み取る手法については、旋回動作の際に問題が生ずるという点ならびに、処理時間がかかるという点から、提案手法については、直接的に効果を上げることができなかった。

以上より、本研究で目指した 3 つの手法のうち、提案手法(1)については、実用機に搭載可能なレベルまで到達し、現在、不整地移動ロボットで利用されている。また、提案手法(2)については、現在は、提案手法(2)で構築し

たデバイスと姿勢計測センサを組み合わせ、不整地における高性能な位置推定手法を開発中である。提案手法(3)については、当初目標を達成できなかったが、その研究の派生研究として、不整地安定走行機能の実現ができた。これは、不整地移動ロボットの位置推定にも大きく寄与するものであり、大きな成果と言える。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

1. Masataku Sutoh, Junya Yusa, Tsuyoshi Ito, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, "Traveling Performance Evaluation of Planetary Rovers on Loose Soil", Journal of Field Robotics, accepted and to be appeared (2012-01) 査読有
2. Yoshito Okada, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, Satoshi Tadokoro, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, "Shared Autonomy System for Traversing and Turning Tracked Vehicles on Rough Terrain Based on Continuous Three-Dimensional Terrain Scanning", Journal of Field Robotics, Volume 28, Issue 6, pp.875-893 (2011-11) 査読有
3. Keiji Nagatani, Hiroaki Kinoshita, Kazuya Yoshida, Kenjiro Tadakuma, Eiji Koyanagi, "Development of leg-track hybrid locomotion to traverse loose slopes and irregular terrain", Journal of Field Robotics, Volume 28, Issue 6, pp.950-960 (2011-11) 査読有
4. Keiji Nagatani, Yoshito Okada, Naoki Tokunaga, Seiga Kiribayashi, and Kazuya Yoshida, Kazunori Ohno, Eijiro Takeuchi, and Satoshi Tadokoro, Hidehisa Akiyama and Itsuki Noda, Tomoaki Yoshida and Eiji Koyanagi, "Multirobot Exploration for Search and Rescue Missions: A Report on Map Building in RoboCupRescue 2009", Journal of Field Robotics, Volume 28, Issue 3, pp. 373-387 (2011-03) 査読有
5. Keiji Nagatani, Ayako Ikeda, Genya Ishigami, Kazuya Yoshida, Isaku Nagai, "Development of a Visual Odometry System for a Wheeled Robot on Loose Soil Using a Telecentric Camera", Advanced Robotics, Volume 24, pp.1149-1167 (2010-05) 査読有
6. Giulio Reina, Genya Ishigami, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida,

"Odometry Correction Using Visual Slip-Angle Estimation for Planetary Exploration Rovers", Advanced Robotics, Volume 24, pp.359-385 (2010-03) 査読有

[学会発表] (計 64 件)

1. Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, Yoshito Okada, Kazuki Otake, Kazuya Yoshida, Satoshi Tadokoro, Takeshi Nishimura, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, Mineo Fukushima, Shinji Kawatsuma, "Gamma-ray irradiation test of Electric components of rescue mobile robot Quince --Toward emergency response to nuclear accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on March 2011--", Proceedings of the 2011 IEEE Int'l Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, pp.56-60 (2011/11/02) 京都, 査読有
2. Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, Yoshito Okada, Satoshi Tadokoro, Takeshi Nishimura, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, Yasushi Hada, "Redesign of rescue mobile robot Quince Toward emergency response to the nuclear accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on Mar. 2011", Proceedings of the 2011 IEEE Int'l Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, pp.13-18 (2011/11/02) 京都, 査読有
3. Masataku Sutoh, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, "Evaluation of influence of surface shape of wheel on traveling performance of planetary rovers over slope", The 17th International Society of Terrain Vehicle Systems International Conference (2011/09/20) Virginia, U.S.A. 査読有
4. Masataku Sutoh, Tsuyoshi Ito, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida, "Influence Evaluation of Wheel Surface Profile on Traversability of Planetary Rovers", SI International 2010, pp.67-72 (2010/12/22), 仙台, 査読有
5. Takeshi OHKI, Keiji NAGATANI, Kazuya YOSHIDA, "Safety Path Planning for Mobile Robot on Rough Terrain Considering Instability of Attitude Maneuver", SI International 2010, pp.55-60, (2010/12/22), 仙台, 査読有
6. Takeshi OHKI, Keiji NAGATANI, Kazuya YOSHIDA, "Collision Avoidance

Method for Mobile Robot Considering Motion and Personal Spaces of Evacuees",2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1819-1824, (2010/10/20), TAIPEI,TAIWAN, 査読有

7. Isaku Nagai, Keigo Watanabe, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, ``Noncontact Position Estimation Device with Optical Sensor and Laser Sources for Mobile Robots Traversing Slippery Terrains",2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3422-3427,(2010/10/20),TAIPEI,TAIWAN,査読有

8. Yoshito Okada, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi,``Shared Autonomy System for Tracked Vehicles to Traverse Rough Terrain Based on Continuous Three-Dimensional Terrain Scanning", 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.357-362 (2010/10/19), TAIPEI,TAIWAN, 査読有

9. Eric Rohmer, Tomoaki Yoshida, Kazunori Ohno, Keiji Nagatani, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi, ``Quince: A Collaborative Mobile Robotic Platform for Rescue Robots Research and Development", International Conference on Advanced Mechatronics, pp.225-230 (2010/10/19), TAIPEI,TAIWAN, 査読有

10. K.Nagatani, H.Kinoshita, K.Yoshida, K.Tadakuma, E.Koyanagi, ``Development of leg-track hybrid locomotion to traverse loose slopes and irregular terrain", Proceedings of the 2010 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (2010/07/29), Bremen, Germany, 査読有

11. Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro, Keiji Nagatani,Eiji Koyanagi, Tomoaki Yoshida, ``Trials of 3-D Map Construction Using the Tele-Operated Crawler Robot Kenaf at Disaster City",2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2864-2870 (2010/05/05), Alaska, U.S.A. 査読有

12. Liang Ding, Keiji Nagatani, Keisuke Sato, Andres Mora, Kazuya Yoshida, Haibo Gao, Zongquan Deng, ``Terramechanics-based High-Fidelity

Dynamics Simulation for Wheeled Mobile Robot on Deformable Rough Terrain",2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.4922-4927 (2010/05/05), Alaska, U.S.A., 査読有

13. Keiji Nagatani, Naoki Tokunaga, Yoshito Okada, Kazuya Yoshida, Yasushi Hada, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, ``Teleoperation of all-terrain robot using continuous acquisition of three-dimensional environment under time-delayed narrow bandwidth communication", Proceedings of the 2009 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (2009/11/04), Denver, U.S.A., 査読有

14. Keiji Nagatani, Yoshito Okada, Naoki Tokunaga, Kazuya Yoshida,Seiga Kiribayashi, Kazunori Ohno,Eijiro Takeuchi, Satoshi Tadokoro,Hidehisa Akiyama, Itsuki Noda, Tomoaki Yoshida,Eiji Koyanagi, ``Multi-Robot Exploration for Search and Rescue Missions -- A Report of Map Building in RoboCupRescue 2009 -- ", Proceedings of the 2009 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (2009/11/04), Denver, U.S.A., 査読有

15. Keiji Nagatani, Ayako Ikeda, Keisuke Sato, Kazuya Yoshida, ``Accurate Estimation of Drawbar Pull of Wheeled Mobile Robots Traversing Sandy Terrain Using Built-in Force Sensor Array Wheel", 2009 IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2373-2378, (2009/10/13), St.Luis, U.S.A., 査読有

16. Yoshito Okada, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida,``Semi-autonomous Operation of Tracked Vehicles on Rough Terrain using Autonomous Control of Active Flippers", 2009 IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2815-2820, (2009/10/13), St.Luis, U.S.A.,査読有

17. K.NAGATANI, Takayuki Matsuzawa, and Kazuya Yoshida,``Scan-point Planning and 3-D Map Building for a 3-D Laser Range Scanner in an Outdoor Env.", Proceedings of the 7th International Conf. on Field and Service Robotics, pp.207-217 (2009/07/14), Boston, U.S.A., 査読有

18. Tomoaki Yoshida, Keiji Nagatani, Eiji Koyanagi, Yasushi Hada, Kazunori Ohno, Shoichi Maeyama, Hidehisa Akiyama,

Kazuuya Yoshida, and Satoshi Tadokoro, ``Field Experiment on Multiple Mobile Robots conducted in an Underground Mall'', Proceedings of the 7th International Conference on Field and Service Robotics, pp.365-375 (2009/07/14), Boston, U.S.A., 査読有

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

Webpage :

<http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/~keiji/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永谷 圭司 (NAGATANI KEIJI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：80314649

(2) 研究分担者

永井 伊作 (NAGAI ISAKU)
岡山大学・大学院 自然科学研究科・助教
研究者番号：80294437

吉田 和哉：(YOSHIDA KAZUYA)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00191578

(3) 連携研究者

特になし