

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360092

研究課題名(和文) 三次元環境計測に基づく不整地移動マニピュレータの力覚応答型遠隔操作手法の構築

研究課題名(英文) Force-response-type remote operation device for mobile manipulators on rough terrain based on 3D environment observation

研究代表者

永谷 圭司(Nagatani, Keiji)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80314649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,200,000円

研究成果の概要(和文)：不整地移動ロボットに多自由度アームを搭載した不整地移動マニピュレータは、災害現場において有用であるが、遠隔操作には、高い技量が求められることが知られている。そこで、本研究では、不整地移動マニピュレータを容易に遠隔操作する手法の実現を目指し、オペレータに対する(1) 三次元環境情報の提示、(2) 力覚応答による接触予測の提示、(3) 操作安定性情報の提示、について研究開発を行った。さらに、これらの手法を統合し、ロボットの状況をオペレータに提示するシステムを完成させ、対象物を別の場所に動かす「ピックアンドブレース試験」を実施した。この試験により、提案手法の有用性を確認することができた。

研究成果の概要(英文)：Tracked vehicles that mount multi-degrees of freedom manipulator are of service to find and support victims in disaster environments. However, it requires high-skill for tele-operation of such complicated system. Therefore, in this research, we aimed at researching and developing easy handling tele-operation system, particularly, (1) representation of 3D map on display, (2) contact estimation and presentation with master arm, (3) stability analysis and display to operators. Finally, we integrated the above system and evaluated by some experiments in indoor and outdoor fields. According to the experiment, we confirmed the advantages of the proposed system.

研究分野：工学

キーワード：ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

1995年の阪神・淡路大震災、地下鉄サリン事件、2001年のアメリカ同時多発テロ事件の後、レスキュー探査ロボットの必要性が世界的に認識され、国内外で、複数のレスキュー探査ロボットに関する研究プロジェクトが立ち上がった。筆者も、その中の一つである NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトの一員として、これまで、レスキュー探査ロボットに関する研究開発を進めてきた。このプロジェクト最終年度に、東日本大震災が起こり、福島第一原子力発電所の爆発・放射能漏れ事故が発生した。この事故現場は、建屋内の放射線量すら不明であったため、移動ロボットによる原子炉建屋内の調査が急務とされた。そのため、レスキュー探査ロボットの研究者にとって、これが、ロボットを活用する最初の実質的な現場となった。上記の NEDO プロジェクトで開発したクローラ型レスキュー探査ロボット Quince も、現場対応のための改造を行った後、6月に現場に投入された。

レスキュー探査ロボットの活躍が期待される現場では、前述の例以外にも、要救助者への連絡ツールの運搬や、探査のための小物体の移動など、多自由度アームの用途は多岐に渡る。しかし、多自由度アームを搭載した不整地移動ロボット（以後、不整地移動マニピュレータと呼ぶ）の遠隔操作には、(1) ロボットならびに環境の状態把握が困難、(2) 不整地での作業を強いられるためロボットが不安定、(3) 自由度が多いため操作が困難といった問題があり、「短時間の訓練で容易に操作できる」には程遠い。

前述の背景の下、筆者は、不整地移動マニピュレータを容易に遠隔操作する手法の実現を研究目的に設定し、研究開発を進めてきた。研究開始当初は、上述の問題(3)に対し、不整地移動ロボット Quince に多自由度アームを搭載したマスタスレーブ型遠隔操作システムを実装した。図1は、このシステムを用いたマニピュレータの操作シーンである。これにより、マニピュレータの直感的な操作が可能となったが、問題(1)、(2)については、解決が図られていなかった。

2. 研究の目的

前述の通り、不整地移動マニピュレータの遠隔操作には、(1) ロボットならびに環境の状態把握が困難、(2) 不整地での作業を強いられるためロボットが不安定、(3) 自由度が多いため操作が困難、といった問題がある。(3)については、ある程度解決が図られていたため、本研究では、

- (A) ロボットならびに環境の状態把握
- (B) ロボットの安定性の把握

の二つの問題の解決を目指すこととした。



図1: 不整地移動マニピュレータのマスタスレーブ型遠隔操作システム

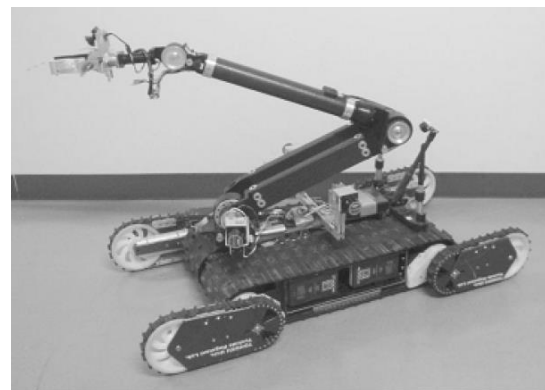


図2: Quince 搭載型 6 自由度マニピュレータ

3. 研究の方法

(1) 多自由度マニピュレータの操作方式

本研究で対象とする Quince 搭載型マニピュレータ（図2）は、6自由度を有し、手先の位置・姿勢を任意に取ることができる。実際に作業を行う場合には、この6個の関節を適切な角度に調整しなくてはならないが、各関節を単独で操作することは直感的ではなく、非常に困難である。最も直感的にマニピュレータを操作できる手法としてマスタスレーブ方式が知られている。この手法は、人が動かすマニピュレータ（マスタ）と、実際に動くマニピュレータ（スレーブ）により構成され、マスタの動作軌跡に従ってスレーブが動く。そのため、オペレータは行いたい作業を手元のマスタで再現するだけでよい。この手法は、マニピュレータの動作がつかみやすいため、操作性が大きく向上する。そこで本研究では、マスタスレーブ方式の中でも、マスタとスレーブの関節配置が同一の「同構造」方式を採用することとした。

(2) 不整地移動への対応

一般的に地球上でマスタスレーブ方式に

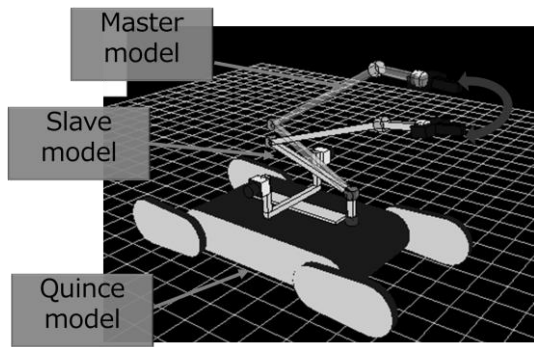


図 3：通信遅延への対応

より遠隔操作を行う場合、オペレータは慣性座標系に固定された空間でマニピュレータを操作することとなる。しかしながら、本研究で対象とするマニピュレータは、不整地走行するため、スレーブのベースが慣性座標系に対して大きく変動し得る。その結果、マスタとスレーブの間でベース姿勢が乖離してしまい、慣性座標系に対して望んだ操作が行えなくなる可能性がある。

そこで、本研究では、マスタのベースに 2 自由度のアクチュエータを搭載し、マスタのベース姿勢をスレーブのベース姿勢と一致させることで、この問題の解決を図った。この方式をベース姿勢同期式マスタスレーブと呼び、本システムに搭載する。

この方式について、いくつかの評価試験を行った結果、ベース姿勢同期を行った場合は、マスタ側とスレーブ側の動作が一致するため、直感的な操作が可能となり、所要時間の大幅な短縮につながる事が分かった。

(3) 通信遅延への対応

遠距離の遠隔操作では、通信により操作指令・ロボット情報の伝達に遅延が発生する。このことにより、操作性は大きく損なわれる。そこで本研究では、Thomas らの提案する手法を応用し、操作画面にマスタの姿勢とスレーブの姿勢を重ねて表示する手法を採用した。この方式により、スレーブに動作遅延があっても、マニピュレータの動作予測が容易になる。図 3 に、遅延が生じた場合の操作画面の表示例を示す。目標姿勢のマニピュレータを透過色で、現在のマニピュレータの姿勢を原色で示すことで、遅延に対応した操作が容易になる。この手法を実装し、操作者へのアンケートを行ったところ、遅延が大きいほどマスタ姿勢の表示を重視して見ることで、操作が容易だと感じていることが分かった。以上より、本手法は通信遅延が大きくなる環境下において、遠隔操縦者に対する支援機構として有効に働くことがわかった。

(4) 環境情報取得

実作業を行う空間には、様々な障害物があり、マニピュレータは常に接触の危険性がある。このような環境でマニピュレータを用い

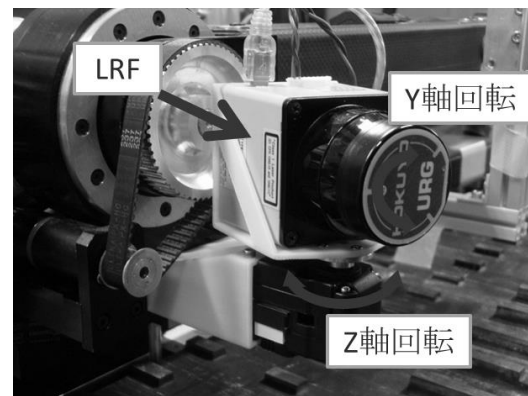


図 4：三次元環境情報取得センサ

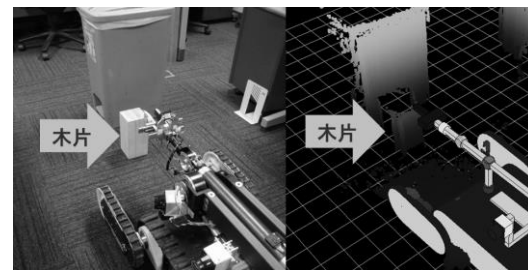


図 5：三次元環境情報取得センサが取得した環境をオペレータに提示する様子

た作業を行うためには、オペレータは的確にスレーブ周辺の環境情報を把握する必要がある。一般的にはカメラ画像により、オペレータが判断することが多いが、死角も多く、光量が足り無い場合もあり、環境を完全に把握することは困難である。そこで、本研究では、レーザ距離センサを用いた、三次元の距離情報を取得することで、周辺環境の把握を行うこととした。

図 4 にロボットに搭載したセンサ、図 5 に取得した情報を画面上に提示した例を示す。このセンサは、Y 軸周りに 240[deg] の範囲の距離情報を角度分解能約 0.3[deg] で 100[msec] ごとに取得しており、同時に Z 軸周りに回転させることで三次元の距離情報を取得する。この時、Z 軸の回転範囲や回転速度を可変することにより、マニピュレータの接触判定に必要な、適切な範囲を適切な周期で取得できる。なお、このセンサは、エンドエフェクタの可動範囲を常に監視出来るような位置に設置する必要がある。図 2 に示すロボットは、第一軸は、ベースに対して Yaw 軸回転する軸となるため、エンドエフェクタのロボットに対する Yaw 方向は、この第一軸が支配的になる。そこで、本研究では、第一軸と第二軸の間のリンクにセンサを設置することで、エンドエフェクタへの見通しを確保することとした。

この手法について、ロボットを操作してもらい、操作者へのアンケートを行ったところ、ロボット上に搭載したカメラでは確認できない視点で物体とロボットの関係性を把握できるため、接触の回避や作業を行うに当たって非常に有効であるとの意見が多かった。

(5) 三次元環境情報を用いたマニピュレータの接触対策

災害現場において、周辺環境と接触することは、瓦礫を崩し二次災害を発生させる、環境の設備を破損する、または、ロボット自体を破損する可能性があり、最も避けなければならないことである。また、対象ロボットは不安定で平滑でない不整地を走行するため、マニピュレーション中に姿勢を崩す可能性も大きい。もし、姿勢を崩し、ロボットが転倒してしまうと、復帰は困難であるため、やはり避けなければならない。これらの危険性をオペレータがすべて把握し、管理することは困難であるため、ロボットの有する位置・姿勢・環境情報などを利用し、統合的にロボットの安全を確保し、オペレータに提示することが必須となる。本研究では、これまでに記載した、通信遅延対応と三次元環境情報取得を元に、マスタマニピュレータ操作空間内で接触判定を行う手法を開発した。また、判定の結果として、操作画面で提示する他、マスタマニピュレータに搭載した振動モータにより提示する手法を採用した。

一般的に、接触の危険性を判定する際には、スレーブマニピュレータのある空間において、環境とスレーブマニピュレータの接触危険性を判断する。しかしながら、通信遅延がある環境では、オペレータにその危険性が通達されるまでに時間がかかり、結局は接触してしまう可能性がある。そこで、本研究では、ロボットが現地でスキャンした三次元環境情報を蓄積し、オペレータの操作するマスタマニピュレータと、その蓄積された三次元環境情報の間で接触判定を行う。マスタは遅延がない環境に置かれているため、接触判定はリアルタイムに行うことができ、マスタは常に安全な領域でのみ操作可能となる。その結果、マスタからスレーブに送られる操作指令も安全な領域で動けるもののみが伝達されることとなり、スレーブの危険な動作を事前に防げることとなる。そのため、時間遅延が大きい環境であっても、直前の三次元環境情報取得を行うことで、安全なマニピュレーションが行えるようになる。

(6) 力覚情報の提示手法の提案

マニピュレータの操作を行う上で、手先の意図せぬ接触を認識することや、手先が把持対象物から受ける力を把握することは、マニピュレータの故障を防ぐ意味においても、非常に重要となる。しかしながら、一般に、遠隔操作にてマニピュレータの操作を行う場合には、オペレータは、視覚情報や、3次元点群等の環境情報をもとにして操作を行う場合が多い。これらの情報のみでは、手先に負荷が発生しているかを認識することはできない。そこで、本研究では、マニピュレータの手先に力覚センサを搭載し、オペレータへ、手先の力覚情報を提示することとした。



図6：手先に搭載された力覚センサ

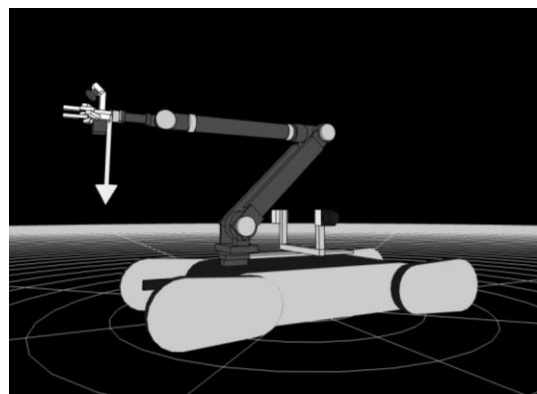


図7：力覚情報の描画

図6に、手先に搭載した力覚センサおよび、オペレータへの力覚情報の描画を示す。また、図7は、力覚センサから取得した情報を、ネットワークを介してオペレータの操作画面へと表示したものである。力覚センサによって取得した3方向の力覚情報を、合成したベクトルとして描画している。これにより、オペレータは、手先に働く負荷を直感的に認識することができる。

この手法を用いてマニピュレータの遠隔操作を行い、操作者へのアンケートを行ったところ、「画像のみではわからない把持対象物の重量感を知ることができた」「死角に存在していた障害物に接触した際に、力覚応答の異常からすぐに対応することができた」等の意見を得ることができた。

以上より、オペレータへの力覚情報の提示による、手先への負荷の認識の有用性を検証した。

4. 研究成果

(1) 試験概要

本研究の三次元環境情報を基にした遠隔操作の有用性を検証する目的で、屋外環境にてマニピュレーション作業を行う実験を行った。実験では、不整地の屋外で移動ロボットに搭載されたマニピュレータを遠隔操作し、不整地斜面に設置した物体の把持が行えるか検証し操縦者への聞き取りを行った。



図 8：試験フィールド

本実験は、独立行政法人 土木研究所（現在は国立研究開発法人 土木研究所）先端チームの協力を得て、遠隔操作建機の試験フィールド（図 8）にて実施した。

(2) 実験条件

遠隔操作を行うにあたり、次の機能を有するシステムを用いた。

- ・ベース姿勢同期
- ・三次元環境情報取得・提示
- ・接触判定・振動提示
- ・ロボット搭載カメラ画像

ロボットの前方 5m にある不整地斜面上に把持対象を設置し、ロボットを走行させたのちにマニピュレータで対象を把持、スタート地点まで戻る試行を行う。操縦者はロボットを目指できない遠隔地に置き、上記 4 つの機能から得られる情報を元に操縦を行った。なお、通信遅延は 50msec～200msec 程度の間で不安定に遷移していた。

(3) 実験結果

実験の様子を図 9 に示す。実験時は晴天の屋外であったため、大変明るく、また、全体に砂塵に覆われていたため、カメラ画像のコントラストが著しく落ち、視認性が悪くなっていた。そのため、操縦者は主に、三次元環境情報のみにより、移動操作を行った。また、マニピュレーション時についてもカメラ画像は同様の問題があり、三次元環境情報の画面提示を中心に操作を行った。マニピュレーション時には、ロボットが斜面に差し掛かっていたが、ベース姿勢同期機能により、具体的なロボットの傾きをひと目で視認することが可能であった。また、通信遅延が一定でなく不安定な環境であったが、三次元環境情報を基にした接触判定があるため、スレーブの動作を意識せずマスタ側の操作を行い、更に振動提示により見逃しがちな細かな障害物（植生）との接触危険性も十分に検証可能であった。実験中のオペレータサイドの様子を図 10 に示す。操作 PC 画面内の三次元環境情報と、マスタの姿勢が、図 10 に示したスレーブとその周辺環境に一致していることがよくわかる。



図 9：実験の様子



図 10：オペレータサイドの様子

(4) 考察

災害現場のような環境においては、本実験と同様に、環境のコントラストが落ち、カメラ画像のみでは操作の指標を立てにくい場合が多々ある。そのような環境の中で、三次元環境情報のみで大部分の遠隔操作を行えたという事実が重要であると考えられる。また、操縦者は、三次元環境情報提示画面を注視しているものの、見逃してしまう地点は必ず存在する。そのような場合に、振動提示という手法により、操縦者への情報提供を行うことで、操縦者の気がついていない危険を提示できることが示すことが出来た。

しかしながら、接触しても安全性に影響が無いと考えられるような細かい植生でも接触判定は反応してしまうため、カメラ画像との併用が必要であった。

(5) 成果のまとめ

本研究では、不整地移動マニピュレータを容易に遠隔操作する手法の実現を目指し、研究期間の前半には、オペレータに対する (1) 三次元環境情報の提示、(2) 力覚応答による接触予測の提示、(3) 操作安定性情報の提示、について研究開発を行った。また、実施した複数の試験により、提案手法を用いて、作業時間の短縮を確認することができた。これにより、提案手法の有用性を確認することができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- 1) Keiji Nagatani, "Review: Recent Trends and Issues of Volcanic Disaster Response with Mobile Robots", *Journal of Robotics and Mechatronics*, 査読有, Vol.26 No.4, 2014, pp.436-441, (2014-08)
- 2) Isaku Nagai, Genki Yamauchi, Keiji Nagatani, Keigo Watanabe, and Kazuuya Yoshida, "Positioning device for outdoor mobile robots using optical sensors and lasers", *Advanced Robotics*, 査読有, Vol.27, No.15, pp.1147-1160, (2013-07)
DOI:10.1080/01691864.2013.819603
- 3) Keiji Nagatani, Kazuuya Yoshida, Tomoaki Yoshida, et. al, "Emergency Response to the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using Mobile Rescue Robots", *Journal of Field Robotics*, 査読有, Volume 30, Issue 1, pp.44-63, (2013-01), DOI: 10.1002/rob.21439

[学会発表] (計 11 件)

- 1) 遠藤 大輔, 幸村 貴臣, 鈴木 大貴, 山内 元貴, 永谷 圭司, "東北大学永谷研のつくばチャレンジへ取り組み", 第15回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会, pp.397-399, 2014年12月15日, 東京ビックサイト, 東京
- 2) Ryohei Tsuzuki, Keiji Nagatani, Genki Yamauchi, "Teleoperation of mobile robots using hybrid communication system in unreliable radio communication environments", *Proceedings of the 2014 IEEE Int'l Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, 査読有, #20, 2014年10月27日, Toya, Japan
- 3) Keiji Nagatani, Ken Akiyama, Genki Yamauchi, Kazuuya Yoshida, et. al, "Development and Field Test of Teleoperated Mobile Robots for Active Volcano Observation", 2014 IEEE/RSJ Int'l Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 査読有, pp.1932-1937, 2014年9月15日, Chicago, U.S.A.
- 4) 遠藤大輔, 永谷圭司, 吉田和哉, "クローラロボットの階段における走行安定性", 第32回日本ロボット学会学術講演会, AC3D2-03, 2014年9月4日, 九州産業大学, 福岡
- 5) 幸村貴臣, 永谷圭司, 吉田和哉, "サブクローラに小型測距モジュールを搭載したクローラ型移動ロボットの階段走行の自律化", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2014, 1P2-E06, 2014年5月26日, 富山国際会議場, 富山
- 6) 幸村貴臣, 山内元貴, 都築遼平, 永谷圭司, "クローラ型移動ロボットを用いた東北大学永谷研のつくばチャレンジへの取り組み", 第14回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 論文集, pp.79-80, 2013

年12月18日, 神戸国際会議場, 神戸

- 7) Keiji Nagatani, Takahiro Noyori, Kazuuya Yoshida, "Development of Multi-D.O.F. Tracked Vehicle to Traverse Weak Slope and Climb up Rough Slope", 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, pp.2849-2854, 2013年11月4日, Tokyo, Japan
- 8) 野寄敬博, 永谷圭司, 吉田和哉, 小柳栄次, "クローラの接地荷重情報を利用した多自由度クローラ型移動ロボットの走行制御", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2013, 2P1-R10, 2013年6月22日, つくば国際会議場, 筑波
- 9) 吉田和哉, 永谷圭司, 岡田佳都, 桐林星河, 大竹一樹, 大野和則, 竹内栄二郎, 田所諭, Nathan Michael, Shaojie Shen, Kartik Mohta, Vijay Kumar, "地上走行ロボットと飛行ロボットの協調による被災ビルの探査実験", 第30回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2A3-1 (CDROM), 2012年9月18日, 札幌コンベンションセンター, 札幌
- 10) Tomoaki Yoshida, Keiji Nagatani, et. al, "Improvements to the rescue robot Quince Toward future indoor surveillance missions in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant", *The 8th International Conference on Field and Service Robotics*, 査読有, #80, 2012年7月17日, Matsushima, Japan
- 11) Keiji NAGATANI, Kazuki OTAKE, and Kazuuya Yoshida, "Three-dimensional Thermography Mapping for Mobile Rescue Robots", *Preprints of the 8th International Conference on Field and Service Robotics*, 査読有, #42, 2012年7月17日, Matsushima, Japan

[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]

ホームページ:

<http://frl.niche.tohoku.ac.jp>

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

吉田 智章: (YOSHIDA, TOMOAKI)

千葉工業大学・未来ロボット技術研究センター・上席研究員

研究者番号: 20458631

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