

# 不整地移動マニピュレータの直感的遠隔操作が可能な ベース姿勢同期機能を有するマスタスレーブシステム

桐林星河 岡田佳都 永谷圭司 吉田和哉 (東北大学) 小柳栄次 (千葉工業大学)

Master-slave-type mobile manipulators to enable an intuitive teleoperation  
-Development of a synchronous function of base-attitude for master manipulator-

\*Seiga KIRIBAYASHI, Yoshito OKADA, Keiji NAGATANI,  
Kazuya YOSHIDA(TOHOKU Univ.), Eiji KOYANAGI(Chiba Institute of Technology)

**Abstract**— In a use of a conventional teleoperation system of master-slave manipulators for a mobile manipulator, the base pose of the master manipulator is different from the base pose of the slave manipulator on rough terrain. Such an incompatibility usually cause an operator's confusion. To reduce the incompatibility, in this research, we developed a synchronous function of manipulator's base-attitude for master-slave manipulators' system to enable an intuitive teleoperation. In this system, the master manipulator has two extra actuators at the root of it to indicate the attitude of the base robot measured by a simple IMU on the robot. Some experimental results validated a usefulness of the developed system.

**Key Words:** Manipulator, Tere-operation, Rescue robot, Master-Slave, Rough terrain

## 1. はじめに

人が直接作業を行うことが困難な対象や環境において、多自由度マニピュレータを遠隔地から操作して作業を行わせるという需要は大きい。例えば、強い放射線にさらされた原子炉内部の環境や、人が到達することが困難な山林地帯、さらには火星上においても、遠隔地から操作するロボットマニピュレータによる作業が実現されてきた [1][2]。また、筆者らが現在研究開発を進めている被災地探査ロボット（レスキューロボット）にも、探査を目的とした小物体の移動や、被災者に対する救援物資や通信装置の配達を目的としたマニピュレータの搭載が強く望まれている [3]。そこで、筆者らの研究グループでは「NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」で開発を進めている不整地移動ロボット Quince (Fig.1) に搭載可能な、小型マニピュレータの遠隔操作システムに関する研究開発を行うこととした。

一般に、多自由度マニピュレータの遠隔操作において、各関節の動きが手先の運動に与える影響を想像することが難しいため、各軸を個別に操作する手法は、非常に高い熟練を要する。そこで、人間にとって直感的に操作が可能であると言われているマスタスレーブ方式が、多くの遠隔操作システムで採用されてきた [4]。この方式は、操作者側に小さなマニピュレータ（マスタアーム）を準備し、操作者がマスタアームを操作して形状を表現することで、実際に作業を行う遠隔地のマニピュレータ（スレーブアーム）の動作を実現するものである。

本研究グループにおいても、長さ 1.3m の 6 自由度マニピュレータを不整地移動ロボット Quince に搭載し、一般的なマスタスレーブ方式を用いた遠隔操作システムを実装した。しかしながら、この一般的なマスタスレーブ方式では、不整地移動ロボットに搭載した



Fig.1 Rescue robot Quince with 6-DOF manipulator

際、状況によって、操作性が大きく低下することが判明した。これは、ロボットが不整地で操作を行う際、スレーブ側の土台となるロボット本体が傾いている場合にも、マスタ側の土台は水平であるため、マスタ側の動作がスレーブ側の動作に一致しないということが理由である。

この問題を回避するため、筆者らは、マスタアームのベースに 2 自由度のアクチュエータを追加し、不整地移動ロボットの姿勢と同じ姿勢を実現するマスタアームを提案し、このシステムを構築した。これにより、マスタアームの動作とスレーブアームの動作が一致したため、傾いたロボット上に搭載したマニピュレータの操作性が向上した。本稿では、このマスタスレーブシステムについて紹介し、このシステムの評価実験について報告する。

## 2. 不整地における移動マニピュレーション

### 2.1 不整地移動ロボット Quince

筆者らの研究グループでは、これまで高い不整地走破性能を有するレスキューロボットの開発を行ってきた。このようなレスキューロボットは、地震やテロなどの直後に被災地に投入され、瓦礫などからなる不整地上を遠隔操作により走行し被災状況の情報を収集することを目的としている。また、この種のロボットを利用して、要救助者への救援物資や救助隊員と通話ができる通信装置の配達、非常ドアを含む扉の開閉、危険物や障害物の除去などの作業を行うための多自由度マニピュレータの搭載に対する需要も近年高まっている。

そこで筆者らの研究プロジェクトでは、マニピュレータを搭載した状態で瓦礫や階段などを走破できるクローラ型レスキューロボット Quince の開発を行ってきた。Quince は、RoboCup Rescue Real Robot League[5]で複数回にわたり Best Mobility Award を獲得した Kenaf の後継として開発を進めている不整地移動ロボットである。Kenaf と同様に、メインクローラで覆われた本体の四隅に、アクチュエータで取り付け角度を変更できるサブクローラを搭載しており、これにより高い不整地走破性能を発揮できる。さらに、本体内部にコントローラやモータドライバ、内界センサなどがすべて格納されているため、ロボット上面にマニピュレータをはじめとするさまざまな機器を搭載できる。

このようなレスキューロボットに搭載したマニピュレータを遠隔操作により運用する際には、マニピュレータのベースとなるロボットの姿勢が水平でないことが大いに想定される。また、狭小空間での作業やマニピュレータの可動範囲に障害物が存在する状況に適した遠隔操作法を導入する必要がある。

### 2.2 Quince 搭載マニピュレータ

レスキューロボットによる要救助者への物資や通信機器の提供や扉の開閉、障害物の除去といった不整地移動マニピュレーションを円滑に行うためには、ドアノブなどにアプローチできる高い自由度と十分な可動範囲を有するマニピュレータが求められる。また、ロボットが不整地上で転倒ににくい低重心を維持するため、ロボット本体と比べて軽量であることも必須条件である。

これらの条件を踏まえ、Quince に搭載可能なマニピュレータの設計および開発を行った。開発したマニピュレータは 6 自由度であり、手先の位置および姿勢を独立に操作できる。6 つの関節は回転自由度のみを有しており、Fig.2 に示すようにベース（ロボット本体）側からロール、ピッチ、ピッチ、ロール、ピッチ、ロールの回転が可能である。

また、ドアノブは地上高 1000[mm] 程度に取り付けられていることが多いため、手首を地上高 1250[mm] まで持ち上げ可能とした。リンク部の構造材には CFRP を採用しており、Quince 本体の重量 29[kg] と比較して、重量は 7[kg] と軽量である。マニピュレータ搭載時の走破性能に関しても、RoboCup2010 において最大難度である Red ランクの Stepfield(NIST/AIST により標準化が行われているレスキューロボットの走行性能評価の

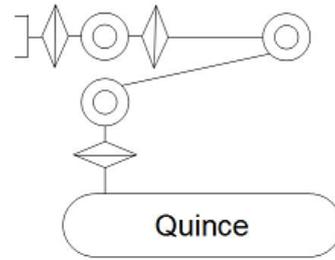


Fig.2 Axis arrangement of manipulator

ためのフィールド)[6] を転倒することなく走破するなど、十分な走破性能を維持できる。

このような多軸マニピュレータを遠隔操作するにあたり、本研究プロジェクトでは、一般に人間が直感的に操作できるとされている、マスタスレーブ方式を採用した。

## 3. ベース姿勢同期マスタアーム

### 3.1 マスタアームの設計と操作性

マスタスレーブシステムの設計方針は、マスタアームのリンクや関節の構成をスレーブアームと一致させるかどうかにより、二種類に大別できる。

マスタの構成を縮尺を除いてスレーブと一致させる同形状タイプでは、マスタとスレーブの間で各関節の角度値をそのまま対応させることによりシステムを構築できる。このタイプでは、マスタの形状がスレーブの形状をそのまま表現するため、手元のマスタを見ることで操作者は容易にスレーブ全体の形状を逐次把握できる。また、スレーブの手先位置の操作のみならず、個別の関節角の操作を直感的に行うことができる。ただし多くの場合、操作者から見てマスタ手先の手前にアームの大部分が配置されることになるため、マスタと操作者の腕が干渉し操作の支障となることがある。

一方、マスタの構成をスレーブと異なるものにする異形状タイプでは、操作者から見てマスタ手先の奥にアームを配置できるため、このような問題は生じず操作者はより作業に集中できる。その反面、マスタとスレーブの手先位置のみを対応させることになるため、同形状タイプのようなスレーブ形状の直感的な把握や個別の関節角の操作が不可能になる。

本研究が対象とする被災地などの不整地環境では、ロボットを狭小空間に進入させての作業やスレーブの可動範囲に障害物が存在する状況が想定される。そのため、操作者はスレーブアームの形状を常に把握し、必要に応じて個別の関節角操作により障害物との干渉を回避しなくてはならない。

このような特徴を踏まえ、本研究では同形状タイプのマスタアームを採用した。

### 3.2 不整地移動マニピュレーションの問題点

前節で述べたように、スレーブと同形状のマスタアームを採用することで操作者はスレーブの形状を逐次把握でき、それを生かした直感的操作が実現されるものと期待できる。

しかしながら、不整地移動ロボットにマニピュレータを搭載し、遠隔マニピュレーションを行う場合は、一般的な同形状マスタスレーブシステムを用いても、直感

的な操作が実現されず操作性が大きく低下することが開発を通じてわかってきた。例えば、Fig.3 に示すような不整地上で傾いたロボットに搭載したスレーブアームを操作するために、操作者がマスタの手先を操作卓と水平に移動させた場合を考える。この操作は、スレーブアームの手先を水平方向に動作させることを意図したものであるが、スレーブアームのベースであるロボットの姿勢が水平でないため、実際の手先はロボットの傾きと平行に移動してしまい、望んだ動作とはならない。このような状況ではマスタスレーブシステムの利点である直感的な操作性が大きく損なわれてしまう。

このように、不整地移動マニピュレーションでは、マスタアームとスレーブアームのベース姿勢の乖離が原因となり、マスタ側の動作がスレーブ側の動作に一致しないという問題が生じてしまう。

### 3.3 ベース姿勢同期機能の提案

マスタとスレーブのベース姿勢の乖離に起因するマニピュレータの操作性の低下を回避するため、本研究ではベース姿勢同期機能を追加したマスタアームを開発し、それを用いたマスタスレーブシステムを構築した。Fig.4(a) にマスタアームの概念図を示す。提案するマスタアームは、一般的な同形状タイプのマスタアームのベースを、アクチュエータで駆動する2自由度のジンバル機構としたものである。概念図における最も外側の正方形の枠を操作卓に固定し、この枠の内側に配置した2自由度のアクチュエータにより、マスタアーム自身の傾きをロボットの傾きと一致させる。本研究のテストベッドとした Quince では、3軸ジャイロセンサと加速度センサを用いてロボット本体姿勢を逐次推定している [7]。本システムでは、この推定により得られたベース姿勢を利用してマスタアームのベース姿勢を同期させることとした。このベース姿勢同期機能を導入することにより、Fig.5 に示すように、スレーブの土台であるロボットの姿勢が大きく傾いた状態でもマスタとスレーブの動作が一致するため、前節で指摘したベース姿勢の乖離による操作性の低下問題を回避できる。またこの拡張により、マスタアームの形状からロボットの傾きを含めたスレーブアームの全容を直感的に把握でき、それを生かした操作を行うことができる。

### 3.4 マスタアームの構成

実際に開発したベース姿勢同期マスタアームを Fig.4(b) に示す。操作性を考慮し、マスタアームをスレーブアームのリンク長を約 1/3 に縮小した同形状タイプとした。また、回転角検出とベース姿勢同期機構の駆動を目的として、各回転軸に Robotis 社の Dynamixel サーボを配置した。スレーブの関節に対応する軸につ

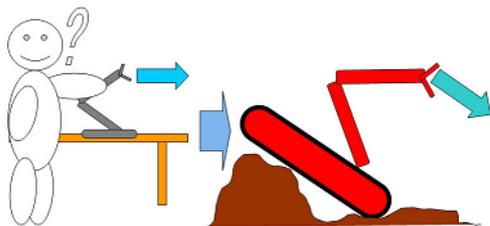


Fig.3 A relationship of Master-Slave when robot has tilted

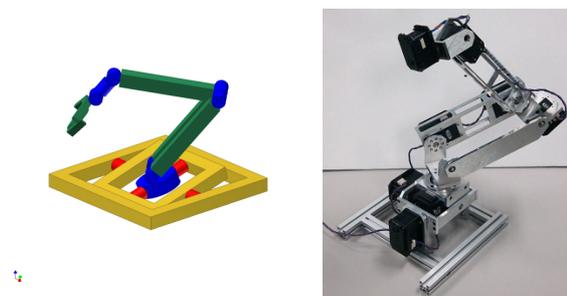


Fig.4 (a)Concept/(b)Actual master arm with attitude synchronization

いては、通常の遠隔操作時にはサーボを無効にし回転角検出のみを行うこととし、特定の関節あるいはアーム全体の姿勢を固定する際にサーボを有効とする。

## 4. 実験

### 4.1 概要

提案するマスタスレーブシステムの有用性を検証するため、スレーブアームとなるマニピュレータを搭載した Quince および開発したベース姿勢同期マスタアームを用いて実験を行った。実験環境を Fig.6 に示す。床面から高さ 700[mm] の壁面に床面と平行に手先の目標軌跡を示す線を引き、その線上に 500[mm] の間隔をあけてスタート地点とゴール地点を設けた。この壁から 100[mm] 離してロボットを壁面と平行に静置し、本体後部を 200[mm] ほど持ち上げ、ピッチ角が約 22 度となる状態で固定した。スレーブアームの手先には小型のカメラが搭載されており、スタート地点がカメラ映像の中心に映るよう、毎回試行前に手先位置の調整を行った。

被験者は目標軌跡を示す壁面の線が常にカメラ映像の中心に映るよう、スタート地点からゴール地点までマスタスレーブシステムを用いてマニピュレータの手先を操作する。この試行をマスタアームのベース姿勢同期機能を有効にした場合とそうでない場合について行い、その際のスレーブの手先軌跡および所要時間を比較した。なお、試行はベース姿勢同期を有効とした場合を先に行った。

被験者は Fig.6 中央左に示すような手先カメラ映像を参考に別室からスレーブアームの遠隔操作を行う。被験者は、本システムの利用経験のない 20 代の男性 2 名と女性 1 名の計 3 名で、実験前に簡単な操作説明を受けたのち、1 分程度の練習を行った。

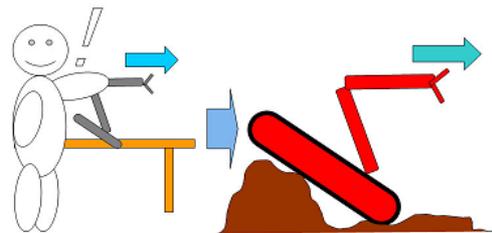


Fig.5 A relationship of Master-Slave with attitude synchronization

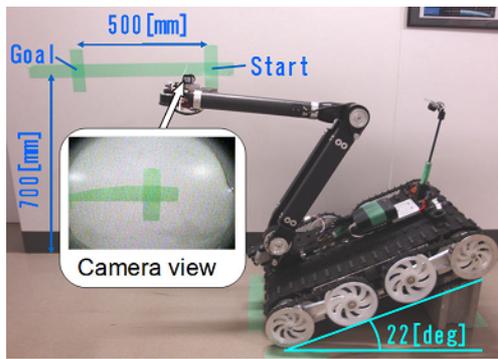


Fig.6 Experimental field

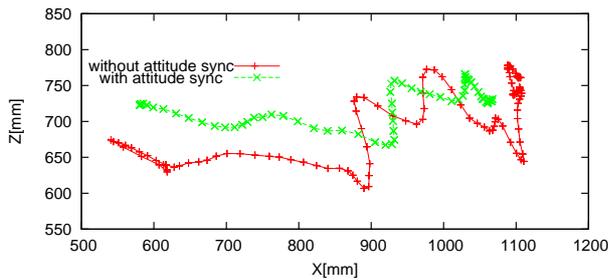


Fig.7 Hand trajectory by subject A

Table 1 Total time required in trial

Subject	with[sec]	without[sec]	decrease[%]
A	11.35	19.70	42.4
B	15.10	26.05	42.0
C	13.40	20.35	34.2

#### 4.2 結果と考察

Fig.7に被験者Aの手先軌跡を示す。このグラフにおいてはロボット中心の鉛直下の床面を原点とし、x軸を床面上に壁面と平行な向き、z軸を鉛直上向きとした。また、スタート地点は(550[mm],700[mm])、ゴール地点は(1050[mm],700[mm])である。Fig.7から見てとれるように、ベース姿勢同期の有無に関わらずスレーブ手先は概ね $z=700$ [mm]を上下しながらゴール地点へと到達している。他の被験者についても同様の傾向の手先軌跡が得られた。

一方、試行に要した所要時間については明確な差がみられた。被験者ごとの所要時間をTable 1に示す。Table 1に示されるように、ベース姿勢同期を行うことにより、すべての被験者の実験所要時間が40%前後短縮された。本実験のようにスレーブのベース姿勢が水平でない状況では、ベース姿勢同期を行わない場合にマスタ側とスレーブ側の動作が一致しない。そのため、操作者は操作画面に表示されたロボットの姿勢角情報や手先カメラ映像の推移からロボットの傾きを想像し、マスタ手先を微調整しながら操作を行う必要がある。対して、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である。この操作性の違いが所要時間の大幅な短縮につながったものと考えられる。

また、実験後に行った被験者への聞き取り調査でも、すべての被験者が「ベース姿勢同期有りの試行の方が

操作が容易であった」と回答した。

これらの結果より、不整地におけるマニピュレーションに一般的なマスタスレーブシステムを用いた場合でも、ベース姿勢の乖離による操作性の低下を操作者が補うことで一応の操作が可能であるが、ベース姿勢同期マスタアームを導入することにより、操作性の低下が回避され、操作者の負担軽減につながる事が確かめられた。

#### 5. まとめ

レスキューロボットに代表される不整地移動ロボットに搭載したマニピュレータを一般的なマスタスレーブ方式で遠隔操作する際、マニピュレータの土台であるロボットの姿勢によっては操作性が大きく損なわれる。この原因であるマスタとスレーブのベース姿勢の乖離を解消するため、筆者らはマスタのベースに2自由度のアクチュエータを追加し、スレーブのベースであるロボットの傾きとマスタのベース姿勢を同期させる遠隔操作システムを開発した。

また、構築したマスタスレーブシステムを不整地移動ロボットに搭載し、本システムの有用性を実験により検証した。その結果、提案するマスタスレーブシステムの利用により、不整地移動マニピュレーションを行う際の操作性の低下が回避され、操作者の負担を軽減することが明らかになった。

なお、本研究は、NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト「閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」の一環として行われた。

#### 参考文献

- [1] 宮坂靖彦, 渡辺正秋, 田中貢, 他, "JPDR 解体実地試験の概要と成果." 原子力学会誌 Vol.38 No.7, p.553 - 576, 1996
- [2] E. T. BAUMGARTNER, R. G. BONITZ, J. P. MELKO, L. R. SHIRAIISHI, P. C. LEGER, A. TREBI-OLLENNU, "Mobile Manipulation for the Mars Exploration Rover," IEEE Robotics & Automation Magazine JUNE 2006, pp.27-36, 2006
- [3] M. Guarnieri, P. Debenest, T. Inoh, E. Fukushima and S. Hirose, "Helios VII: a New Vehicle for disaster response-mechanical design and basic experiments," Advanced Robotics Vol.19 No.8, pp.901-927, 2005
- [4] H. Hasunuma, H. Kagaya, M. Takatori, J. Fujimori, F. Mifune, S. Shikoda, M. Kobayashi, T. Itoko, S. Tachi, "Development of Teleoperation Master System with a Kinesthetic Sensation of Presence," VRSJ International Conference on Artificial Reality and Telexistence, pp.53-59, 1999
- [5] A. Jacoff, E. Messina, B.A. Weiss, S. Tadokoro and Y. Nakagawa, "Test Arenas and Performance Metrics for Urban Search and Rescue Robots," The IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3396-3403, 2003
- [6] A. Jacoff, A. Downs, A. Virts and E. Messina, "Stepfield Pallets: Repeatable Terrain for Evaluating Robot Mobility," The 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems, pp.29-34, 2008
- [7] K. Nagatani, N. Tokunaga, Y. Okada and K. Yoshida, "Continuous Acquisition of Three-Dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain," The IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics, pp.25-30, 2008