不整地狭小空間における不整地移動マニピュレータの 遠隔操作支援システムの構築

幸 村 貴 臣*・桐 林 星 河**・永 谷 圭 司**

Teleoperation Assist System for All-terrain Mobile Manipulator in Narrow and Rough Environment

Takaomi KOMURA*, Seiga KIRIBAYASHI** and Keiji NAGATANI**

In order to perform surveillance missions in case of natural/human-caused disasters, all-terrain mobile manipulators are useful tools for rescue crews' safety. It has a capability to traverse on rough terrain, and to handle objects with the mounted manipulator. For example, the mobile manipulator "Packbot" opened a door in Fukushima Daiichi Nuclear accident in 2011. However, it is well-known that it requires a lot of skill for its teleoperation, particularly in case of missions in narrow and rough terrain. Based on our ex-researches, we found the following issues: (1) According to the rough terrain, the pose of the manipulator is not fitted with the inertial frame of reference, and it prevents an intuitive teleoperation. (2) In narrow areas, the manipulator contacts with the environment because of the lack of environmental information. (3) Communication delay makes more difficult for teleoperation. To solve the above issues, in this research, we implemented a base-altitude synchronous type master-slave controller for the issue (1), teleoperation system with vision and 3D information for the issue (2), and anti-communication-delay-system with 3D point cloud information for the issue (3). To evaluate the above system, we conducted some experiments with non-skilled operators. In this paper, we describe the above system implementation, and report the experimental results to evaluate the above system.

Key Words: mobile manipulator, teleoperation, rough terrain

1. はじめに

現在、世界各地において、地震や噴火などの自然災害や、テロ行為などの人的災害など、さまざまな災害が発生している。このような災害が発生した際に、迅速な救助活動および、被災状況の把握が、人命の救助および今後の救援活動のために非常に重要である。しかし、被災地に直接レスキュー隊員が立ち入り作業を行なうことは、二次災害の発生による人的被害が懸念されるなどの理由から、できるだけ避けたい。そこで、レスキュー隊員の代わりに被災地において探索・救援活動を行なうレスキューロボットの活躍が期待されており、これまでに、多くの研究開発が行われてきた^{1),2)}。その中でも、高い不整地走行性能を有する不整地移動ロボットにマニピュレータを搭載した、不整地移動マニピュレータ (Fig. 1) は、レスキューロボットとしての幅広い活躍が期待されている。

この移動マニピュレータは、不整地を走行可能な移動ロボットにマニピュレータを搭載することで、瓦礫の撤去やドアの開閉などの作業を行なうことが可能となり、探索範囲を拡大することが可能となる上、物資の運搬などの作業も可能となる。一例として、2011年の東日本大震災にて被災した福島第一原子力発電所の内部に、iRobot社のpackbot³⁾が投入され、内

Fig. 1 All-terrain mobile manipulator "Quince"

* 東北大学大学院工学研究科 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

** 東北大学未来科学技術共同研究センター
仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-10

* Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-01 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai

** New Industry Creation Hatchery Center, Tohoku University, 6-6-10 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai

(Received April 13, 2016)

(Revised June 7, 2016)

部の調査やドア開けの作業を行なったことが挙げられる。

不整地移動マニピュレータの活躍が期待される環境には、瓦礫の上といった不整地や、屋内環境のような狭小空間が挙げられる。しかしながら、このような不整地狭小空間における不整地移動マニピュレータの遠隔操作には、以下に示すさまざまな課題が存在することが知られている。

まず、自由度の多さや通信遅延などの影響により、多自由度マニピュレータの遠隔操作は、直接目視下で操作を行なう場合と比較すると、操作が非常に困難となる。加えて、不整地の影響により、マニピュレータを搭載する移動体の姿勢が変動する場合、マニピュレータの土台が水平面と平行にならなくなるため、遠隔操作はさらに困難となる。また、屋内環境などの狭小空間においては、周囲に壁や瓦礫などの障害物が多く存在する可能性があり、そのような環境で作業を行なう際、マニピュレータと環境が衝突を起こす可能性が小さくない。加えて、一般に、遠隔操作のための通信には遅延が発生するが、この通信遅延により、リアルタイムな環境情報の取得が困難となり、遠隔操作による操作性が大きく低下する。以上に示した問題に対し、不整地移動マニピュレータの作業が期待される不整地狭小環境において、衝突防止を考慮しつつ、移動体の姿勢変動にも対応し、十分な操作性を有する遠隔操作システムの構築は、これまでに見られない。

そこで、本研究では、地表が不整地かつ、周辺に障害物が存在する狭小空間であり、加えて、通信遅延が起こり得る遠隔操作において、不整地移動ロボットが停止した状態で、搭載した多自由度マニピュレータを円滑に遠隔操作する技術の実現を目指し研究を行なう^{4), 5)}。なお、移動マニピュレータの研究については、ベースロボットが移動しながらマニピュレータの作業を行なう提案も存在するが⁶⁾、対象環境が未知の不整地環境である場合、そのような動作は非常に危険であるため、本研究では対象としないこととした。

本研究において、われわれが提案する、狭小空間における不整地移動マニピュレータの遠隔操作支援システムの特徴は、以下の三点である。

(1) ベース姿勢同期式同構造マスタスレーブによる操作性の向上

マスタスレーブによる遠隔操作において、マニピュレータを搭載する移動体の姿勢変動を、マスタアームの姿勢にフィードバックすることで、マスタアームとスレーブアームのベース姿勢の乖離を防ぐ。これを、ベース姿勢同期マスタスレーブと呼ぶ。これを利用することで、不整地においても直感的な遠隔操作が可能となる。

(2) 三次元環境情報を利用した環境とマニピュレータの衝突防止

不整地移動ロボットに三次元測域センサを搭載することで、マニピュレータに搭載したカメラから得られる視覚情報と共に、スレーブアーム周辺の三次元環境情報を獲得することが可能となる。これにより、操作者は、ロボットの周囲の環境を三次元的に理解することが可能となる。さら

に、この三次元環境情報により、事前に衝突検知が可能となり、環境とマニピュレータの衝突防止が実現される。

(3) 三次元環境情報とロボットの三次元提示を利用した通信遅延による操作性の低下の防止

前項の三次元環境情報により、操作者側の PC 内に、ロボットを含む仮想空間を構築することができる。この仮想空間内でロボットを動作させ、問題とならない動作コマンドのみをスレーブ側のロボットに送信することで、通信遅れにかかわらず、ロボットの動作を実施することが可能となる。

本稿では、上記の特徴を有する、不整地狭小空間における不整地移動マニピュレータの遠隔操作支援システムに関して、システムの提案および実機体への実装と評価に関して述べる。

2. 不整地移動マニピュレータの遠隔操作における課題および対策の提案

瓦礫が存在する不整地狭小空間における、不整地移動マニピュレータの遠隔操作には、さまざまな課題が存在する。本章では、不整地狭小空間における不整地移動マニピュレータの遠隔操作における課題と先行研究、さらに、それらの対策として、著者らが提案する遠隔操作支援システムについて述べる。

2.1 多自由度マニピュレータの直感的な操作

不整地移動マニピュレータには、ドアの開閉や瓦礫の除去など、さまざまな作業が要求される。このように、多様な作業を行なうためには、マニピュレータの先端に搭載されたエンドエフェクタが、任意の位置・姿勢を実現できることが必要不可欠である。そのためには、搭載するマニピュレータは、最低でも六自由度を有する必要がある。このような多自由度マニピュレータを操作する際、すべての関節角を個別に操作することは、直感的でないため、非常に困難である。

この問題を解決する先行研究として、マスタスレーブ方式⁷⁾がある。この方式は、操作者が操作するマスタアーム (マスタ) と、実際に動作するスレーブアーム (スレーブ) により構成され、操作者が操作したマスタの形状に従って、スレーブが動作する。そのため、操作者が目的の動作をマスタ側で再現するだけで、スレーブにその動作を実現させることが可能となり、直感的な操作が可能となる。特に、狭小空間におけるマニピュレータの遠隔操作を行なう際、手先の位置・姿勢のみならず、マニピュレータを構成する各リンクの位置・姿勢を把握することで、操作性の向上につながると考えられる。そこで、本研究では、マスタスレーブ方式の中においても、マスタとスレーブの関節配置が同一となる、「同構造マスタスレーブ方式」(Fig. 2)を採用することとした。この方式を利用することで、マスタのリンク姿勢からスレーブのリンク姿勢を把握することが可能となるため、エンドエフェクタの位置・姿勢のみならず、マニピュレータ全体の姿勢を把握することが可能となり、狭小空間における操作性の向上が期待できる。

Fig. 2 The same constructure master-slave teleoperation system: the slave arm (left) and the master arm (right)

2.2 マスタとスレーブのベース姿勢の相違に伴う問題

一般に、マスタスレーブ方式を用いた固定マニピュレータの遠隔操作を行なう場合、マスタとスレーブは、共に慣性座標系に固定される。しかしながら、本研究の対象である不整地移動マニピュレータでは、スレーブを搭載した移動体の姿勢は、不整地上で、慣性座標系に対して変動する可能性がある。その結果、マスタとスレーブの座標系の間には乖離が生じ、これが、操縦者の操作を困難とする要因の一つであることがわかってきた。

移動体の姿勢変動を伴うマニピュレータの遠隔操作に関する先行研究としては、宇宙マニピュレータ⁸⁾の遠隔操作が挙げられる。そもそも、宇宙空間では地面が存在しないため、この研究では、作業対象とマニピュレータの相対座標が重視され、スレーブは、慣性座標系のような基準をもたない。一方、本研究では、操作者が有するマスタの慣性座標系とスレーブ側の慣性座標系に乖離が生じ、これを操作者が認識できていないことに問題があるため、宇宙マニピュレータで利用されるアプローチでは、対応することができない。

本問題への対策として、著者らの研究グループでは、マスタの土台部分に、二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、スレーブが搭載されたベース姿勢、つまり不整地移動ロボットの姿勢と同期する方式を提案した⁹⁾。以後、この方式を「ベース姿勢同期式マスタスレーブ」と呼ぶ。ベース姿勢同期式の動作例を Fig. 3 に示す。左図では、ロボットが水平面にあり、スレーブのベース姿勢が水平であるため、マスタのベース姿勢も水平となる。一方、ロボットが傾斜地にある場合、スレーブのベース姿勢が傾く。この場合、操作者の操るマスタのベース姿勢が、スレーブのベース姿勢に同期するため、Fig. 3 の右図に示すとおり、マスタのベースが傾く。これにより、慣性座標系に乖離が生じないため、操作者がマスタの手先を前方に動かせば、スレーブの手先も同様に前方に動くことが可能となる。

2.3 環境とマニピュレータの予期せぬ接触

不整地移動マニピュレータへの要求の一つとして、狭小空間での作業があるが、狭小空間では、マニピュレータと環境との予期せぬ接触が起こり得る。このような接触は、ロボットの破損や環境に対する損害を引き起こすため、意図せぬ接触を防ぐことは、非常に重要な課題である。

マニピュレータと環境の衝突によるロボットや環境への損

Fig. 3 Base-synchronous-type master-slave system

Fig. 4 The flow of collision avoidance system based master-slave system

害の防止には、「接触の事前防止」および、「接触の事後検知および衝撃の吸収」といった二通りのアプローチが考えられる。前者の先行研究としては、Lumelsky らの手法¹⁰⁾が挙げられる。この手法は、スレーブをセンサで覆い、接触する前にスレーブの動作を止めるものであるが、ハードウェアの制約が非常に大きいという問題がある。一方、後者の先行研究としては、高所作業ロボットに採用された手法¹¹⁾がある。これは、動作中に接触が起こった場合、これを検知すると共に、柔らかい制御で衝撃を吸収するものである。ただし、この手法では、接触を事前に防止することは不可能となる。

上記の二通りのアプローチは、本来、両方とも実装されることが望ましいが、今回は、不整地移動ロボットに搭載した三次元測域センサを利用し、前者のアプローチである「接触の事前防止」を考えることとした。本研究で提案する接触防止システムの動作の概要を、Fig. 4 に示す。このシステムでは、以下の手順により、接触の防止を試みる。

- (1) 三次元測域センサにより、スレーブ周辺の三次元環境情報を取得する。
 - (2) 取得した環境情報から、仮想空間に仮想障害物を構築する。
 - (3) マスタの関節角度から仮想空間内のマニピュレータの姿勢を計算し、仮想障害物との接触判定を行なう。
 - (4) 接触判定の結果、接触が発生しない動作のみをスレーブに指令することで、環境と接触しない動作が実現される。
- このように、マスタスレーブシステムを用いた遠隔マニピュレーションにおいて、マスタの関節角度と、スレーブ周辺の三次元環境情報を利用することで、スレーブは、安全が保障された動作のみを実行することが可能となり、環境とスレーブの予期せぬ衝突を防ぐことが可能となる。

Fig. 5 Operator's screen that includes master-arm, slave-arm, and 3D environmental data

2.4 通信遅延による操作性の低下に関する課題

一般に、ロボットの遠隔操作では、ロボットと操作者の間の通信において遅延が発生する。この影響により、操作者へのリアルタイムな環境情報の提示が困難となり、遠隔操作が非常に難しくなることが知られている。たとえば、マニピュレータに搭載されたカメラ画像のみを利用した操作において、操作者は、環境とマニピュレータとの相対的な位置関係を、画像情報より取得する必要がある。そのため、通信遅延が存在する場合、画像の更新の遅れにより、環境とマニピュレータの位置関係の把握に要する時間が増加し、操作性は大きく低下することが知られている。

通信遅延が存在する状況におけるマニピュレータの遠隔操作の先行研究としては、通信遅延の影響が顕著な、宇宙ロボットの遠隔操作に関するものが、数多く行なわれてきた。たとえば、Thomas らの宇宙マニピュレータの遠隔操作に関する研究¹²⁾では、操作者にマニピュレータの指令姿勢とスレーブの姿勢を重ねて提示することで、通信遅延時の操作性の低下を防止するシステムの提案を行なった。

上述の課題に対し、本研究では二つの手法を提案する。一つ目は、取得した三次元環境情報から構築した仮想障害物およびマスタを描画する手法である。環境が静的である場合、障害物の情報は、マニピュレータの動作によって変化しない。そのため、作業の前段階で取得したスキャンデータは、逐次更新を行なう必要はなく、通信遅延の影響を受けずに、作業中も利用することが可能となると共に、マスタと障害物の相対的な位置関係を把握することが可能となる。以上の手法により、遠隔操作における通信遅延の影響を低減することが可能である。

二つ目は、Thomas らの提案した、マスタのアーム姿勢（指令値）とスレーブのアームの姿勢（現在値）を同一の画面に描画する手法¹²⁾である。この手法では、操作コンソールにマスタとスレーブの姿勢を重ねて描画する (Fig. 5)。これにより、自身の入力量と現在および近未来のマニピュレータの位置を把握することが可能となるため、通信遅延の影響を低減することが可能となる。

3. 提案手法の不整地移動マニピュレータへの実装

不整地移動ロボット Quince¹³⁾と六自由度のシリアルリンクマニピュレータからなる不整地移動マニピュレータ（以下、

Fig. 6 All-terrain mobile manipulator Quince (left), and the configuration of the mounted 6 D.O.F. manipulator

Quince と呼ぶ) (Fig. 6) に、前章で示した手法を実装した。なお、Quince に搭載したマニピュレータは、小型かつ高トルクを実現するため、各軸の減速比が非常に大きいという特徴がある。また、マニピュレータの手先とベースには、それぞれカメラを搭載しており、カメラ画像を利用したマニピュレータの遠隔操作を可能とする。ロボットと操作 PC は、イーサネットにより通信を行っており、無線操縦時には、市販の無線 LAN を利用している。

本章では、前章で示したベース姿勢同期式マスタスレーブシステム、三次元環境情報の取得手法、環境とマニピュレータの接触防止システムの実装、ならびに通信遅延対策としての操作インターフェースに関する実機への実装に関して述べる。

3.1 ベース姿勢同期式同構造マスタスレーブ

2.2 節にて紹介したベース姿勢同期方式を用い、Quince 搭載型マニピュレータ (Fig. 6) を遠隔操縦するための、マスタアーム (Fig. 2: 右) を製作した。このマスタアームは、スレーブ操作用の六自由度と、ベース姿勢同期用の二自由度の、計八自由度からなる。マスタアームのリンク長とスレーブアームのリンク長の比は、1:3 である。各自由度には、スマートモータ（ベース姿勢同期用：Dynamixel RX-64, マスタアーム用：Dynamixel RX-28）を配置している。マスタアームの操作を行なう際には、マスタアーム用の各スマートモータをフリーにすることで、マスタアームを自由に動かしつつ各関節ごとに角度取得が行なえる。これに対し、マスタアームの操作を行わない場合には、マスタアーム用の各スマートモータを角度制御して固めることで、マスタアームの姿勢を維持する。一方、ベース姿勢同期用の二つのスマートモータは、スレーブ側の姿勢情報に応じた角度制御を行なうことが可能である。

3.2 三次元環境情報取得

不整地移動マニピュレータに搭載する三次元環境情報取得センサにとって、重要となる要求要素は、以下のとおりである。

- マニピュレータの動作範囲が、広く測定可能領域に含まれる
- 接触の判定に利用できるだけの十分な精度を有する
- 移動ロボットに搭載可能となるサイズ・重量を満たす
- 可能な限り消費電力が小さいこと

Fig. 7 3D scanner based on UTM-30LN (Hokuyo co., ltd.)

- 可能な限り計算コストが小さいこと

以上の条件を踏まえ、本研究では、LRF (Laser Range Finder) を用いた三次元環境情報取得装置を開発し、機体に搭載した。LRF を用いた三次元環境の取得では、ある軸周りに二次元走査を行なう LRF を、別の軸周りに回転させる手法が一般的であり¹⁴⁾、本研究においても、この手法を採用することとした。

搭載する LRF には、北陽電機社製の UTM-30LN を採用することとした。この LRF は、270 度の走査範囲をもつ、二次元測域センサである。スマートモータを利用し、この LRF を、走査軸に垂直となる軸周りに回転させることで、三次元の距離情報の取得を可能とした。Fig. 7 に、構築した三次元測域センサを示す。

ロボットに搭載した LRF を用いた三次元環境取得を行なう際に注意すべき点が、主に二点ある。一つ目は、エンドエフェクタ付近を常に走査範囲に含む必要がある点である。本研究において使用した Quince のマニピュレータの軸配置は、Fig. 6 に示すとおり、第一軸は、ベースに対してヨー回転を行なう。そのため、エンドエフェクタのベースに対するヨー方向は、この第一軸が支配的になる。そこで、本研究では、マニピュレータの第一軸と第二軸の間に三次元測域センサを搭載し、エンドエフェクタへの見通しを確保することとした。

二つ目は、三次元点群から、マニピュレータ自身を取り除くという点である。仮に、マニピュレータ自体を環境として認識してしまうと、環境とマニピュレータとの接触の判定に支障をきたしてしまう。そこで、本研究では、マニピュレータ自身を環境から取り除くためのマスク処理を行なうこととした。マスクの寸法は、本研究で使用した LRF の誤差を考慮し、マニピュレータ表面から 10 mm とした。同様に、移動ベースについてもマスク処理を行ない、寸法は、移動体表面から 10 mm とした。

3.3 環境との接触の防止

2.3 節で述べたとおり、取得したスレーブ周辺の三次元環境情報を用いて、マニピュレータと環境との接触を判定する。具体的には、仮想空間内のマスタの接触判定用領域 (Fig. 8) を設定し、三次元測域センサより取得したポイントクラウド

Fig. 8 Bounding-box for master arm to prevent unexpected collision

Fig. 9 Visual information obtained by the hand camera and bird's eye view camera

との接触判定を行なう。

接触判定に用いる接触判定領域の寸法を設計するに当たり、マニピュレータの位置精度、LRF の測定誤差、環境との接触までの距離余裕を考慮する必要がある。本実装においては、マニピュレータの位置精度を ± 5 mm, LRF の測定誤差をカタログスペックより ± 10 mm, 接触までの距離余裕を 5 mm と設定し、これらの値から、接触判定領域をマニピュレータ表面から 20 mm と設定した。なお、把持対象物との接触については、許容する必要があるため、指先には、接触判定領域を設定しない。

3.4 通信遅延対策

2.4 節に示したとおり、遠隔操作のための情報としてカメラ画像のみを利用する場合、通信遅延が発生した際、操作性を大きく損なう恐れがある。そこで、本研究では、三次元環境情報を利用した仮想作業環境を利用することとした。具体的な実装概要を以下に示す。

Quince に搭載されたカメラによる画像を Fig. 9 に、三次元環境情報を利用した操作画面を Fig. 10 に示す。後者の図からわかるとおり、三次元環境情報とマニピュレータを同一の画面に描画することで、ロボットの周囲の環境とマニピュレータとの位置関係を容易に把握することが可能となる。この画面を利用することで、大域的なマニピュレータの操作が可能となるが、エンドエフェクタと作業対象の詳細な位置関係を把握することは、この図からは少し難しい。そこで、手

Fig. 10 Display of 3D point cloud information and robot model

先と把持対象の詳細な位置関係については、この仮想作業環境に加え、Fig. 9 に示すカメラ画像を利用することで、環境情報を把握することが重要となる。

4. 試験 1：ベース姿勢同期機能の有用性確認

本研究において提案したシステムの特徴は、主に下記の二点である。

- ベース姿勢同期式同構造マスタスレーブによる操作性の向上
- 三次元環境情報を利用した「環境と不整地移動マニピュレータの衝突防止」および「通信遅延による操作性の低下の防止」

本章では、まず、ベース姿勢同期機能を有するマスタスレーブの有用性の検証試験について述べる。

4.1 試験概要

本試験では、10 人の被験者に対し、複数の条件下で同一のタスクを与え、各被験者が実行した動作を解析することで、提案するベース姿勢同期機能の有用性の検証を行なう。ロボットは、Fig. 11 に示すように、サブクローラを用いて後方がもち上げられ、20 deg 傾いた状態で静置される。ロボットの前左方には、直径約 4 cm の小石を設置する。操作者に与えられたミッションは、この小石をマニピュレータを用いて把持し、ロボット前方右に置かれたブロック上に移動させることである。

操縦手法による操作性の有用性を検証するため、各操作者には、つぎの三つの条件下で操作を行なってもらい、操作に要する時間の比較を行なう。

- マスタスレーブ 姿勢同期 あり
- マスタスレーブ 姿勢同期 なし
- ジョイスティック

(a) は、本研究で提案、構築した姿勢同期マスタスレーブによる操縦であり、実際に製作したマスタコントローラにより操縦を行なう。(b) は、(a) のシステムから、姿勢同期機能を無効化した手法であり、一般的なマスタスレーブによる操縦となる。最後の (c) については、マスタスレーブシステムを用いない操縦である。具体的には、多自由度マニピュレータの操作として、スペースシャトルや国際宇宙ステーションのマニピュレータ操縦に用いられている手法¹⁵⁾を、市販のジョイ

Fig. 11 An overview of the teleoperation experiment

Fig. 12 Appearance of the operation environment

スティックを利用して実現した。なお、マニピュレータ操縦の初心者については、慣れによる試行時間の短縮が考えられるため、試行の順は (a) → (c) → (b) とした。

なお、上述のミッションは、

- (1) 把持姿勢までのアプローチ動作
- (2) 小石の把持動作
- (3) 小石の移動動作
- (4) 小石の開放動作

の四つの動作要素に分解されるが、(2) ならびに (4) に示す把持機構の操作については、どの手法でも操縦手段が共通であるため、本試験では、操作に要する時間の比較対象を、(1) アプローチ動作および (3) 小石の移動動作とした。

4.2 操縦環境

操縦者は、遠隔操作時、ロボット自身を直接見ずに、マスタアームとタッチパネルを併用し、マニピュレータを操縦する。試験時に使用した操縦環境を Fig. 12 に示す。左側より、(1) Quince の前方ならびに俯瞰画像用モニター、(2) マニピュレータの手先カメラのモニター、(3) マニピュレータの操作 PC とジョイスティック、(4) マスタアームである。(3) のマニピュレータ操作 PC には、タッチパネルを有するノートパソコンを利用する。なお、ジョイスティック操作においても、ジョイスティックと (3) のタッチパネルを併用しての操作となる。基本的に操作者は、(3) マニピュレータ操作画面上の 3D モデル表示ならびに、(1) の俯瞰カメラ映像を用いて、マニピュレータの姿勢把握を行なう。また、把持の際は、(2) の手先カメラ画像を参照しつつ、把持対象である小石に接近

し、把持を行なうこととなる。

4.3 操縦対象者について

操縦対象者には、試験対象のシステムをほとんど使用したことのない初心者9人とした。なお、操縦者には、あらかじめ試験環境を目視してもらい、Quinceと小石との、おおよその位置関係を事前に把握してもらうこととした。また、それぞれ試験前には、操縦方法の説明を行ない、本番と同じ条件で一度練習をしたのち、実際の遠隔操作を行なうこととした。

4.4 試験結果と考察

動作試験中は、すべての操作者に対し、それぞれの条件において、各作業にかかった時間を測定した。また、各操作者における操作能力のばらつきを考慮するため、**Fig. 13**に示す全操縦者の作業時間の平均値の算出には、試行(b)の作業時間を基準として正規化を行なった無次元時間を利用することとした。なお、この図中のエラーバーは、最大最小値を示している。

Fig. 13より、マスタスレーブ方式である(a)(b)と、ジョイスティック方式である(c)を比較すると、マスタスレーブ方式のほうが、大幅に操作時間が短いことがわかる。また、一部の操作者は、マスタスレーブ方式において、(b)の姿勢同期機能なしの場合に、試行時間が短くなるものも見られたが、平均で見ると、本研究で提案する(a)姿勢同期機能ありの場

合、アプローチ時に9%、移動時に12%程、試行時間が短縮された。なお、本試験では、試行順序を(a)→(c)→(b)としていることから、この差は、(a)姿勢同期ありの時間短縮は、慣れによる影響ではないと考えられる。ただし、本結果は、個人によるばらつきが大きく、また操縦対象者の人数も少ないため、この結果より、提案手法の優位性を示すことは難しい。

一方、操作者に対して操作後に実施したアンケートにおいて、3人から、実際の試行時間が長かったにもかかわらず「ジョイスティック方式のほうが操縦しやすかった」という感想が得られた。なお、この3人のうち2人が、(a)姿勢同期ありよりも(b)姿勢同期なしの作業時間が短い、つまり提案手法による優位性が見られなかった。

このことを踏まえると、マスタの姿勢・形状を特に意識せず、ロボットからのカメラ画像のみを頼りとした操作を行なっている場合には、このような結果となるのではないかと推測される。そこで、これらの操作者に対して「操縦するときにマスタの形状を意識したか」との追加質問を行なったところ、否定的な回答が得られた。以上より、これら2人については、姿勢同期の有無による操作性の変動については関知せず、単純に慣れによる試行時間の短縮が発生し、今回の試験結果になったのではないかと考えられる。

5. 試験2：三次元環境情報提示を利用した遠隔操作システムの有用性の確認

本章では、本研究において提案したシステムの二つ目の特徴である、「環境と不整地移動マニピュレータの衝突防止」ならびに「通信遅延による操作性の低下の防止」を目指した、三次元環境情報提示を利用した遠隔操作システムの有用性の確認試験について述べる。

5.1 試験概要

本試験では、20人の操作者に対し、複数の条件下で同一のミッションを与え、各動作時の環境とマニピュレータの接触回数および、作業時間を計測することで、提案するシステムの有用性の検証を行なう。与えるミッションは、狭小空間を模擬した環境における、遠隔操作でのピックアップ・プレース動作(**Fig. 14**)である。なお、この遠隔操作については、前章で示したマスタアームを利用することとする。

対象とする環境ならびに動作を**Fig. 15**に示す。この図に示されるように、高さ29cm、幅38cm、奥行き28cmの箱を作業空間として設置し、その内部に、長さ約10cmの把持対象物を配置する。この把持対象物を把持し、直方体の上面に置くというピックアップ・プレース動作が、本試験の目標動作となる。なお、遠隔操作時の条件としては、三次元環境情報の提示を行わず、カメラ画像のみで操作する場合と、カメラ画像と共に、三次元環境情報の提示ならびに接触防止機能を有効にする場合(提案手法と記す)の2パターンとする。それぞれの条件に対して、与えられたミッションを操作者に実施してもらい、環境とマニピュレータの接触回数ならびに、

Fig. 13 Average of the operation time

Fig. 14 Target mission: pick and place motion

Fig. 15 The target environment of the experiment (left), and the virtual environment based on the three-dimensional environmental information (right)

Table 1 Experimental conditions

Order	Group A	Group B	Communication
1	Proposed method	Camera only	Normal communication delay
2	Camera only	Proposed method	Normal communication delay
3	Proposed method	Camera only	Additional artificial communication delay
4	Camera only	Proposed method	Additional artificial communication delay

通信遅延の付与の有無による作業所要時間の差を計測することで、提案手法を評価することとした。

また、試験後には、操作者にアンケートを行ない、提案手法での遠隔操作時、把持の手前までの操作、把持の前後における操作、プレース動作における操作のそれぞれについて、カメラ画像と三次元環境のどちらの画面を利用していたのか、さらに、どちらの手法が操作しやすかったかを調査した。

5.2 実施条件

試験の実施条件を Table 1 に示す。本試験では、20 人の操作者に対し、無作為にグループ A、グループ B の 10 人ずつに分けて試験を実施した。これは、試験の実施順による慣れの影響を考慮するためである。グループ A は、提案手法による遠隔操作を先に行ない、つぎにカメラ画像のみによる遠

Fig. 16 Experimental result (operational time): the vertical axis is a normalized time when the operation time of “only camera view condition” is as a standard

隔操作を行なうこととした。一方、グループ B は、カメラ画像のみによる遠隔操作を先に行ない、つぎに提案手法による遠隔操作を行なうこととした。なお、両方のグループに共通して、まず、追加通信遅延なしの状態で行ない、つぎに往復で 250 ms の追加通信遅延を設定した状態での試験を行なった。この遅延は、ネットワーク上を流れるパケットすべてに発生させている。なお、追加通信遅延なしの状態においても、無線通信の性質上、数十ミリ秒程度の通信遅延が生ずる。

5.3 試験結果と考察

検証試験の結果を、Fig. 16, Fig. 17 に、アンケート結果を Fig. 18 に示す。追加通信遅延がない状態でカメラ画像のみを利用した操作における平均作業時間は、ピック動作が 39.5s、プレース動作が 27.2s であり、合計が 66.7s であった。なお、Fig. 16 に示した各作業時間の結果については、各操作者における操作能力のばらつきを考慮し、追加通信遅延がない状態でカメラ画像のみを利用した操作における作業時間を基準として正規化し、無次元時間とした。

まず、Fig. 16 において、通信遅延がない状態での各作業時間に注目すると、実施順に伴って所要時間が小さくなる傾向

Fig. 17 Experimental result: the vertical axis is a number of collision with objects

Fig. 18 Experimental result (enquete from operators)

が見られるため、両方のグループにおいて、慣れの影響が出ていることがわかった。これは、ピック動作とプレース動作の両者において、同様の傾向が見られた。この結果から、通信遅延がない状態での操作性に関しては、提案手法とカメラ画像のみの場合では大きく差が出ず、実施順による慣れの影響のほうが大きいことが確認された。

つぎに、通信遅延がある状態での各作業所要時間に注目すると、両グループ共に、提案手法を利用した場合に、作業時間が小さくなることがわかった。なお、ピック動作においては、約 28% (約 11s)、プレース動作においては約 11% (約 3s) の作業時間の短縮が見られた。ピック動作のほうが作業時間を短縮できた理由の考察については、アンケートの結果も踏まえて、後述する。以上より、三次元環境情報の利用により、通信遅延による操作性の低下を低減することができたといえる。

つぎに、Fig. 17 に示す、マニピュレータが環境に接触した回数について注目する。カメラ画像のみを利用して操作する場合、一作業当たり約 0.7 回の接触が発生したが、提案手法を利用することで、環境中への接触は、一作業当たり約 0.1 回となった。このことから、提案手法では、カメラ画像のみを利用した場合と比較し、大幅に接触回数を低減することができたことが確認できる。なお、提案手法において発生した、環境とマニピュレータとの接触の原因に関しては、後述する。

最後に、Fig. 18 に示すアンケート結果に注目する。これは、

作業中、各作業者が最も注目した画面について質問を行なった結果を表わしている。この結果より、把持を行なうまでの操作には三次元環境情報を見る傾向があり、把持付近での操作時にはカメラ画像を見る傾向が、プレース動作の操作時は操作者によって異なる画面を利用していることがわかった。このことから、提案手法は、把持動作のような細かい動作を行なう場合には利用されず、あくまで大域的なマニピュレータの操作に利用されることが確認できた。また、上述の結果より、通信遅延がある状態におけるピック動作の所要時間の短縮は、把持を行なう手前までの所要時間が、三次元環境情報の利用によって短縮されたことが理由であるといえる。また、プレース動作の所要時間の短縮が、ピック動作の所要時間の短縮よりも小さかったことも、プレース動作時に、三次元環境情報を利用する操作者が少なかったことが原因であると考えられる。

一方、操作性に関するアンケートでは、80%の操作者が、提案手法のほうが、カメラ画像のみの場合と比較して、操作がしやすかったと答えた。このことから、提案手法は、カメラ画像のみの場合と比較し、操作がしやすいと感じる傾向にあるといえる。なお、カメラ画像のみの場合のほうが操作がしやすいと答えた 20%の操作者は、提案手法による操作時にも、主にカメラ画像を利用する傾向にあり、三次元環境情報が直感的に空間を把握しにくいと答える場合が多かった。このことから、三次元環境情報を理解するためには、ある程度の経験が必要であり、より多くの人が直感的に三次元環境情報を把握するためには、情報提示にまだ改善の余地があるといえる。

以上の結果から、カメラ画像に加えて、三次元環境情報を利用することで、環境とマニピュレータとの予期せぬ接触を大幅に減少させることができ、なおかつ通信遅延の影響を受けにくい遠隔操作が実現されたといえる。

5.4 環境とマニピュレータの接触に関する考察

本節では、本来ならば起こり得ない環境とマニピュレータの接触の原因に関して考察する。著者らが観察した限り、原因は二点存在した。

一つ目の原因は、三次元測域センサの死角の存在である。対象環境において、把持対象物が配置されている箱の底面は、三次元測域センサの走査領域の死角となる。提案手法における接触の判定は、三次元測域センサから得られた三次元環境情報を利用しているため、三次元環境情報が取得できない死角への接触を防ぐことはできない。これにより、今回の試験環境においては、箱の底面とマニピュレータの接触が複数回発生した。

上記の問題の対策として、三次元測域センサの搭載位置の変更が考えられる。三次元測域センサをエンドエフェクタ付近に搭載し、測定位置の変更を可能とすることができれば、作業時の死角を大幅に減らすことが可能である。ただし、手先重量の増加や、測定誤差の増加など、考慮しなければならない問題も存在するため、要求に合わせて適切な設計を行なう必要がある。

Fig. 19 A collision of an object caused by the difference between the input path and the actual path of the end-effector

二つ目の原因は、本システムにて使用したマスタスレーブシステムにおける、スレーブへの目標角指令の仕様である。本システムでは、マスタアームの各関節角度をスレーブの各関節角度の目標値として指令している。しかしながら、スレーブ側の関節角が目標値に達するまでの間には、一定の時間を要する。スレーブ側の関節角が目標値に達するまでの間に、マスタから新たな目標関節角度が指令されると、スレーブは、最新の目標関節角度となるように動作する。この結果、マスタの移動軌跡とスレーブの移動軌跡が一致しなくなる。提案手法における接触判定は、マスタ側の関節角度を利用しているため、マスタとスレーブの移動軌跡が異なる場合、スレーブが環境に接触する可能性が存在する。このことが原因となり、スレーブが環境に接触してしまう事象が確認された (**Fig. 19**)。

この問題の対策としては、スレーブの動作として、マスタの姿勢を正確に追従させるという手法が考えられる。しかし、これは、スレーブの応答速度が低下すると共に、操作性を大きく損なう恐れがある。よって、作業に応じて軌跡追従と単純角度指令を使い分けるなど、運用に工夫が必要であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、狭小空間における不整地移動マニピュレータの遠隔操作における課題を述べ、その対策としての遠隔操作支援システムを提案した。提案したシステムにおいては、以下の三点の課題に注目した。

- 移動体の姿勢変動によるマスタアームとスレーブアームのベース姿勢の乖離
- 周辺環境とマニピュレータの衝突
- 通信遅延による操作性の低下

上記三点の問題を解決するため、本研究では、以下の機能を有するシステムの提案を行なった。

- ベース姿勢同期式マスタスレーブ
- 三次元環境情報を用いたマニピュレータの衝突防止機能
- 三次元環境情報から構築した仮想作業空間の提示

また、上記の機能を有する遠隔操作支援システムを実機へ実装し、その有用性の検証のため、二つの遠隔マニピュレーション試験を行なった。

一つ目は、ベース姿勢同期機能の有用性の確認を目的とした試験である。この試験の結果から、スレーブが傾いている

環境において、一般的なマスタスレーブシステムと比較し、提案手法での操縦によって、若干の操作時間の短縮が見られた。このことから、提案手法は、不整地におけるマスタスレーブによる遠隔操作システムにおいて、操作者の負担を低減できる可能性を示すことができたが、現状では、試験条件は 1 種類であり、また、操作者のサンプル数も少ない。今後、条件の異なる複数の試験内容に対し、操作者数を増やすことで、提案手法の有用性の確認を行なう必要がある。

二つ目は、三次元環境情報の利用の有用性の確認を目的とした試験である。この試験の結果から、提案手法により、環境との予期せぬ接触の可能性を大きく低減することが可能であることを示した。さらに、通信遅延による操作性の低下への対策として、三次元環境情報の操作者への提示が有用であることが判明した。

今後の展望として、マニピュレータが環境に衝突してしまう問題について、今回の実装で防ぐことができなかった衝突を防止するための、三次元測域センサの搭載位置の検討や搭載センサの個数の再検討、マスタからスレーブへの指令方法の改良などが挙げられる。また、マスタスレーブ方式で比較的難しい微細な位置合わせや作業についても、改良を進める予定である。さらに、より実践的な環境において本システムの動作を確認することで、本システムの実用性を検証することが重要であると考えている。

参 考 文 献

- 1) A. Birk and F. Matsuno: Editorial: Safety, security, and rescue robotics special issue, *Journal of Field Robotics*, **28**-6, 813/816 (2011)
- 2) J. Casper and R.R. Murphy: Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the world trade center, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, **33**-3, 367/385 (2003)
- 3) B.M. Yamauchi: Packbot: A versatile platform for military robotics, *Defense and Security, International Society for Optics and Photonics*, 228/237 (2004)
- 4) 桐林, 永谷, 岡田, 吉田: 三次元環境情報を基にした狭小空間での遠隔マニピュレーション支援システムの構築, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 1p1-c08 (2012)
- 5) 幸村, 桐林, 永谷: 三次元環境情報を基にした狭小空間での遠隔マニピュレーション支援システムの構築—第二報: 環境とマニピュレータの接触防止機能の実装と評価—, 第 16 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, 2328/2332 (2015)
- 6) 江口, 油田: 移動系の自由度も用いて物体を操作する小型移動マニピュレータ, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '00 講演論文集*, 2A1-45-055 (2000)
- 7) 高野政晴: ロボットの運動学, オーム社 (2004)
- 8) Z. Vafa and S. Dubowsky: On the dynamics of space manipulators using the virtual manipulator, with applications to path planning, *Journal of the Astronautical Sciences*, **38**, 441/472 (1990)
- 9) 桐林, 岡田, 永谷, 吉田, 小柳: 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, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, RSJ2010AC1C3-5 (2010)
- 10) V.J. Lumelsky and E. Cheung: Real-time collision avoid-

- ance in teleoperated whole-sensitive robot arm manipulators, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, **23**-1, 194/203 (1993)
- 11) 杉浦, 福島, 黒田: 東京電力福島第一原子力発電所向けの高所調査用ロボットシステムの開発, Honda R&D technical review, **26**-2, 71/81 (2014)
 - 12) T.B. Sheridan: Space teleoperation through time delay: Review and prognosis, IEEE Transactions on Robotics and Automation, **9**-5, 592/606 (1993)
 - 13) E. Rohmer, T. Yoshida, K. Ohno, K. Nagatani, S. Tadokoro and E. Koyanagi: Quince: A Collaborative Mobile Robotic Platform for Rescue Robots Research and Development, Proceedings of the 5th International Conference on the Advanced Mechatronics (ICAM2010), 225/230 (2010)
 - 14) K. Ohno, T. Kawahara and S. Tadokoro: Development of 3D laser scanner for measuring uniform and dense 3D shapes of static objects in dynamic environment, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2008 (ROBIO 2008), 2161/2167 (2009)
 - 15) K. Wakata, T. Shibata and Y. Ohkami: Evaluation Criteria for Multi-joint Arm Configuration in Space Robotics Operations, i-SAIRAS, **15**-9, 2323/2330 (2003)

=====

[著 者 紹 介]

幸 村 貴 臣

東北大学大学院工学研究科修士課程。移動ロボットの研究に従事。

桐 林 星 河

東北大学大学院工学研究科博士課程修了。現在、東北大学未来科学技術共同研究センター特別研究員。レスキュー探査ロボットや飛行ロボットの開発など、フィールドロボットの研究に従事。博士(工学)。

永 谷 圭 司 (正会員)

1997年筑波大学大学院博士課程修了。カーネギーメロン大学機械工学科(ポスドクトラルフェロー)、岡山大学大学院自然科学研究科講師、東北大学大学院工学研究科准教授を経て、現在、東北大学未来科学技術共同研究センター准教授。レスキュー探査ロボットによる不整地走行制御や環境地図構築や火山探査ロボットの開発など、フィールドロボットの研究に従事。博士(工学)。IEEE, 日本ロボット学会, 日本機械学会の会員。

=====