

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

○幸村貴臣(東北大学), 桐林星河(東北大学), 永谷圭司(東北大学)

3D-map-based teleoperation-assistant-system for mobile manipulator in narrow environment

the second report: development and evaluation of collision avoidance system

○Takaomi Koumura(Tohoku Univ.), Seiga Kiribayashi(Tohoku Univ.), Keiji NAGATANI(Tohoku Univ.)

Abstract :

Abstract: All-terrain mobile manipulators are expected to work in the disaster area from the point of view of rescue worker's safety. In order to enable teleoperation of mobile manipulators in such area, easy operation and collision avoidance should be considered, particularly in narrow and rough environment. In this research, we installed a collision-avoidance-system with a 3D-map created by LIDARs on our all-terrain mobile manipulators, called Quince, and performed evaluation trials of the system.

1 序論

現在、世界のあらゆる地域で、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、様々な災害が発生している。これらの災害が発生した場合に、迅速な救助活動及び、現状把握が重要である。しかし、被災地に直接人間が立ち入ることは、二次災害の発生が懸念されるなどの理由から、望ましくない。そこで、人間の代わりに被災地において探索・救援活動を行う、不整地移動ロボットに注目が集まっており、これまでも様々な研究開発が行われてきた [1]。実際に、2011年に発生した福島第一原子力発電所の事故の際には、iRobot社の不整地移動マニピュレータである、pacbot [2]が、ドア開け動作を含む、原子力発電所の建屋内部の調査活動を行った(図1)。このようなロボットには、屋内環境のような、大型機械の侵入が困難である狭小空間での作業が期待されている。

我々の研究グループにおいても、Kenaf [3]や、Quince [4]と呼ばれる、不整地移動ロボットの研究開発を行ってきた。これらの知見から、不整地移動ロボットにマニピュレータを搭載することで、探索範囲の拡大、被災者への救援物資の搬送など、ロボットによる探索・救援活動の可能性が広がることが分かった。しかしながら、移動マニピュレータの遠隔操作には、様々な課題が存在する。まず、多自由度マニピュレータの遠隔操作は容易でなく、直接操作を行う場合と比較すると、非常に操作が困難である。また、屋内環境などの狭小空間では、周囲に瓦礫などの障害物が多く存在する可能性があり、そのような環境でマニピュレーションを行う際に、マニピュレータと環境とが接触を起こす恐れがある。加えて、遠隔操作を行うための通信においては、遅延が発生する。この通信遅延により、リアルタイムな情報取得が困難となり、遠隔操作による操作性は低下する。

我々は、このような課題とする環境、つまり、周辺に障害物が存在する狭小空間であり、かつ、通信遅延が起こりうる環境において、円滑に多自由度マニピュレータを遠隔操作する技術の実現を目標として研究を行ってきた [5]。本稿ではその中から、測域センサにて取得した三



Fig. 1: 福島第一原子力発電所内部でのpacbotによるドア開け作業の様子(©東京電力)

次元環境情報に基づいた、周辺環境とマニピュレータの接触防止手法および通信遅延による操作性の低下への対策の二点に関して述べ、本技術の実機への実装と評価に関して報告する。

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

2.1 多自由度マニピュレータの操作

2.1.1 課題：直感的な操作が困難

不整地移動マニピュレータには、ドアの開閉や瓦礫の撤去など、様々な作業が要求される。多様な作業を行うためには、手先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。エンドエフェクタが任意の位置・姿勢を実現するためには、マニピュレータは最低でも6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に、これら全ての関節角を独立に操作することは、直感的でなく、非常に困難である。

2.1.2 対策：同構造マスタスレーブ

ここで、直感的に多自由度マニピュレータを操作する方法の一つとして、マスタスレーブ方式が知られている。この方法は、オペレータが操作するマニピュレータ(マスタ)と、実際に動作するマニピュレータ(スレーブ)により構成され、マスタの手先移動軌跡に従ってスレーブが動作する。従って、オペレータ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。

また、狭小空間におけるマニピュレータの遠隔操作を行う際に、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」を採用する。同構造マスタスレーブ方式の場合、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。

2.2 環境とマニピュレータの接触

2.2.1 課題：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。例えば、大型の機械の進入が困難となる狭小な作業環境において、瓦礫の撤去や、ドアの開閉等の動作を行うことがあげられる。このような狭小空間においては、マニピュレータと環境との予期せぬ接触が起り得る。環境とマニピュレータの接触は、ロボットの破損や、環境への損害を引き起こすため、これを防ぐことは非常に重要であると言える。

2.2.2 対策：接触防止システムの構築

本研究では、三次元環境情報を利用した、環境とマニピュレータとの接触防止システムを提案する。本研究で提案する接触防止システムの概要を図2に示し、このシステムの流れを以下に示す。

1. スレーブマニピュレータ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障害物を構築し、マスタの関節角度を用いて接触判定を行う
3. 接触判定の結果から安全な動作のみをスレーブに指令することで、安全な動作が実現される

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現することが可能となり、環境とマニピュレータの予期せぬ衝突を防ぐことが可能となる。

2.3 通信遅延

2.3.1 課題：通信遅延による操作性の低下

一般に、遠隔操作では、ロボットとオペレータの間の通信において遅延が発生する。この影響により、オペレータへのリアルタイムな環境情報の提示が不可能となり、遠隔操作が非常に困難なものとなることが知られている。例えば、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では、マニピュレータを動かすごとに、環境とマニピュレータとの相対的な位置関係を、操作者が現

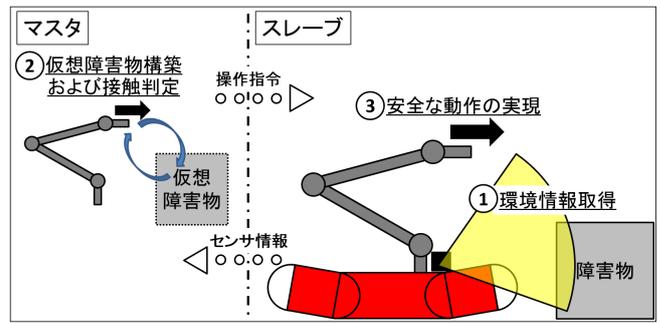


Fig. 2: マスタスレーブシステムを利用した環境とマニピュレータの衝突防止システムの概要

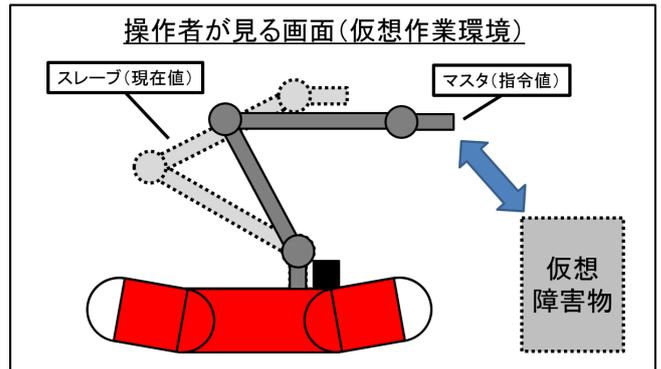


Fig. 3: 操作者へのマスタ/スレーブ/三次元環境情報の提示

在のカメラ画像から逐次フィードバックする必要がある。そのため、通信遅延が存在する場合には、画像の更新が遅れ、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、操作性が低下する。

2.3.2 対策：三次元環境情報の提示およびマスタとスレーブの重畳描画

このような課題に対し、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アームの描画である。仮想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ため、この情報を利用することで、通信遅延の影響を受けずにマスタと障害物の総体的な位置関係を把握することが可能である。

二つ目は、司令値と現在値を同一の画面に描画する手法 [6] を応用した、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手法である(図3)。この方式を用いることで、通信遅延が存在する場合においても、スレーブの動作予測が容易となる。

3 実機体への実装

前章で提案した手法を、不整地移動ロボットQuinceと六自由度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、Quinceと呼ぶ)(図4)に実装した。なお、Quinceに搭載されているマニピュレータは、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移動体の後方にカメラを搭載しており、カメラ画像を利用した遠隔操作が可能となっている。本章では、三次元環境情報の取得、環境とマニピュレータの接触防止システム、および通信遅延への対応に関する実機体への実装に関して述べる。

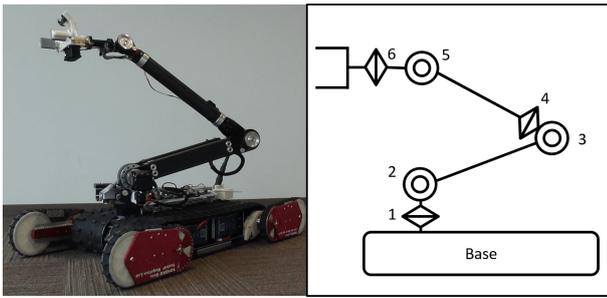


Fig. 4: 不整地移動ロボット”Quince”および6自由度マニピュレータ（左）とマニピュレータの軸配置（右）

3.1 三次元環境情報取得

三次元環境情報の取得目的として、接触判定への利用を考えている。そのため、センサから得られる情報が直接計算に利用できるものが望ましい。そこで、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、ある軸周りに二走査を行うLRFを、別の軸周りに回転させる手法が一般的であり [7]、本研究においても、この手法を採用することとした。

実機体に搭載するLRFとしてUTM-30LN(北陽電機)を使用した。このLRFは270度の走査範囲を持つ、二次元測域センサである。このLRFを、スマートモータを用いて走査軸と垂直となる軸周りに回転することで、三次元の走査を行うことを可能とした、三次元測域センサを構築した。

LRFを用いた三次元環境取得を行う際に注意すべき点がある、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ことである。本研究において使用した筐体であるQuinceのマニピュレータの軸配置は、図4に示す通り、第一軸はベースに対してyaw方向に回転する。そのため、エンドエフェクタのベースに対するyaw方向は、この第一軸が支配的になる。そこで、本研究では、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した。

二つ目は、マニピュレータ自身を環境情報から取り除くことである。三次元環境取得の目的の一つとして、環境とマニピュレータの接触を防止することがある。しかしながら、マニピュレータ自身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す。そこで、本研究では、マニピュレータ自身を環境からのぞくためのマスク処理を行った。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。

3.2 環境との接触の防止

前述のように、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。具体的な手法としては、マスタに対してC-spaseを設定し、三次元環境情報として取得したポイントクラウドとの接触判定を行う。

C-spaseの寸法を設計するに当たって、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。今回の実装においては、マニピュレータの位置精度を $\pm 5[mm]$ 、LRFの測定誤差を $\pm 10[mm]$ 、接触までの距離余裕を $5[mm]$ と設計し、接触判定の領域をマニピュレータ表面から $20[mm]$ と設計した。

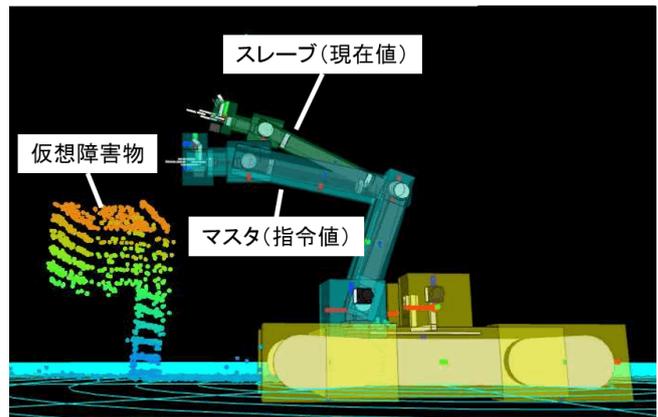
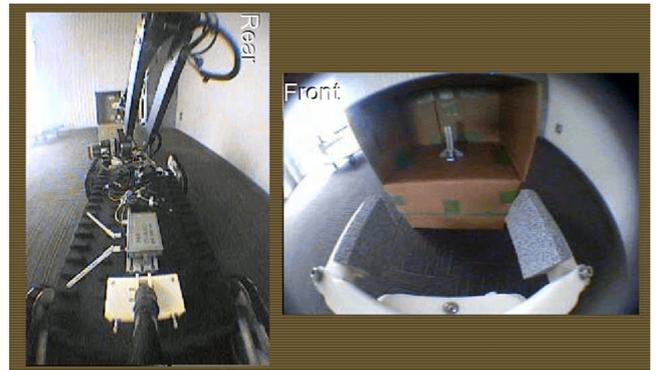


Fig. 5: Quince搭載カメラによる操作画面（上）/三次元環境情報による操作画面（下）

3.3 通信遅延

前述の通り、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と、通信遅延が発生した際に操作性を大きく損なう恐れがある。そこで、遠隔操作のためにオペレータに提示する情報として、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。Quinceに搭載されたカメラによる画像および、三次元環境情報を利用した操作画面を図5に示す。この図からわかる通り、操作コンソール上に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、環境とマニピュレータの位置関係を把握することが可能となる。また、手先と把持対象の詳細な位置関係等は、カメラ画像を利用することで把握することが可能である。

4 遠隔マニピュレーション試験

4.1 概要と目的

提案手法の有用性を確認するため、実機体を用いた検証試験を行った。検証試験として、狭小空間を模擬した環境において、遠隔操作にてピックアンドプレースの動作を行い、環境とマニピュレータの接触回数および、作業の所要時間を計測した。提案手法としては、操作者へのカメラ画像と3次元環境情報の提示および、接触の防止機能を含めた手法を用いた。また、比較対象として、操作者にカメラ画像のみを提示した手法を用いた。この二つの手法において、環境との接触回数および、作業の所要時間を比較することで、提案手法の有用性を検証した。

Table 1: 実施条件

実施順	グループA	グループB	共通
1	提案手法	カメラのみ	通信遅延なし
2	カメラのみ	提案手法	通信遅延なし
3	提案手法	カメラのみ	通信遅延あり
4	カメラのみ	提案手法	通信遅延あり

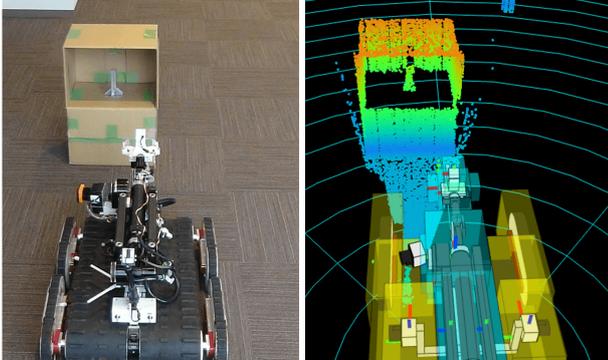


Fig. 6: 検証試験の対象環境(左)および三次元環境情報を用いて構築した仮想環境(右)

4.2 環境

図6に示すように、実験の対象環境として、狭小作業空間を模擬した環境を構築した。高さ29[cm]幅38[cm]奥行き28[cm]の箱を作業空間として設置し、その内部に、長さ約10[cm]の把持対象物を配置した。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ンドプレース動作が、本試験の目標動作となる。

4.3 内容

三次元環境情報を利用したマニピュレータと接触の防止および、通信遅延のある状態での操作性の二点に注目し、検証試験を行った。狭小空間を模擬した環境にて、カメラ画像のみを利用した遠隔操作と、提案手法であるカメラ画像に加えて三次元環境情報を利用した手法にて、遠隔操作を行った。それぞれの手法において、通信遅延がある状況と、通信遅延がない状況の2通りにて試験を実施した。それぞれの遠隔操作にて、対象物を把持するまで(ピック動作)の時間、対象物を把持してから設定された地点へ置くまで(プレース動作)の時間、環境とマニピュレータとの接触回数を計測した。また、試験後にはオペレータにアンケートを行い、提案手法での遠隔操作時に、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おいて、カメラ画像と3次元環境のどちらの画面を利用していたかを調査した。

4.4 実施条件

本試験の実施条件を表1に示す。

実験は20名のオペレータを対象として行った。20名のオペレータをグループA、グループBに10名ずつ分類した。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は先に提案手法による遠隔操作を行ってから、次にカメラ画像のみの遠隔操作を行った。グループBは先にカメラ画像のみの遠隔操作を行ってから、次に提案手法による遠隔操作を行った。両方のグループに共通して、まず、通信遅延なしの状態で行った実験を行い、次に250[ms]の通信遅延を設定した状態で行った実験を行った。

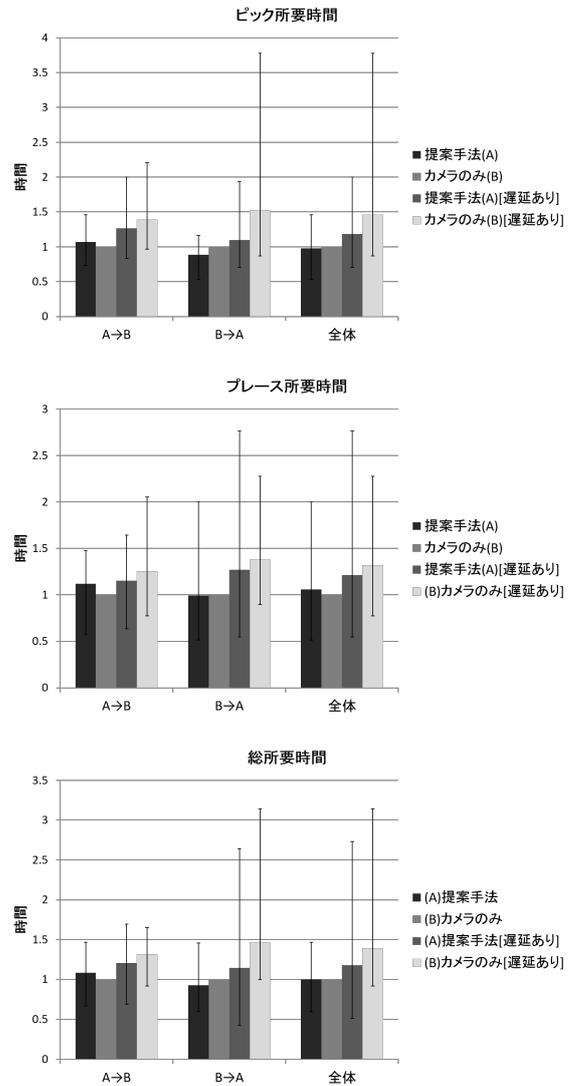


Fig. 7: 検証試験結果 (所要時間)

4.5 結果

試験の結果を、図7, 8に、アンケートの結果を図9に示す。なお、各オペレータの能力のばらつきを考慮し、各所要時間は、通信遅延がない状態での、カメラ画像のみを利用した操作における所要時間を基準として正規化した、無次元時間とした。また、基準として利用した、カメラ画像のみを利用した操作の平均所要時間は、ピック動作が39.5[s]、プレース動作が27.2[s]、総合動作66.7[s]であった。

通信遅延がない状態での各所要時間に注目すると、両方のグループにて慣れの影響が大きく見られ、実施順に伴って所要時間が小さくなる傾向が見られた。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大きく差が出ないことが確認された。

通信遅延がある状態での各所要時間に注目すると、両方のグループともに、提案手法の方が所要時間が小さくなるのが分かった。ピック動作においては約28%(約11[s])、プレース動作においては約11%(約3[s])の所要時間の短縮が見られた。このことから、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緩和することができたと言える。

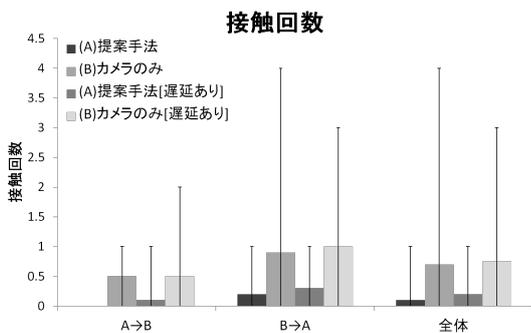


Fig. 8: 検証試験結果 (接触回数)

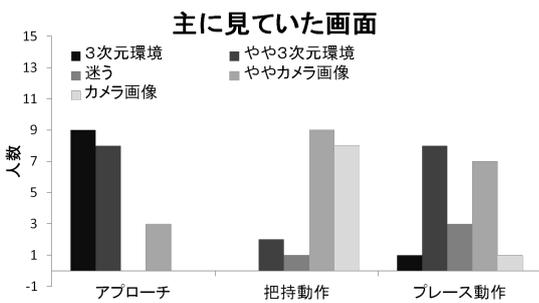


Fig. 9: 検証試験結果 (アンケート)

一方、環境とマニピュレータの接触回数に注目すると、カメラ画像のみを利用して操作する場合と比較して、大幅に接触回数を減らす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てしまった、環境とマニピュレータとの接触の原因に関しては、考察にて後述する。

操作者へのアンケートに注目すると、把持を行う手前までの操作時には三次元環境情報を見る傾向が、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には操作者によって異なる画面を利用していることが分かった。この結果から、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言える。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言える。

以上の結果から、カメラ画像に加えて、LRFにより取得した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し、なおかつ通信遅延の影響を受けにくい遠隔操作が実現できたと言える。

4.6 考察

ここで、提案手法において発生してしまった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面は、今回の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、死角への接触を防ぐことはできない。この対策として、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で、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。

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指令の仕様である。本システムでは、マスタの各関節角度をスレーブに目標値として指令している。このマスタスレーブ方式は、目標値に従ってスレーブが常に動作するが、スレーブが目標値を実現するまでの間に一定の時間を要する。ここで、スレーブが目標値を実現するまでの間に、マスタから新たな目標値が指令されると、スレーブは最新の目標値へ向かって動作する。この結果として、マスタの移動軌跡とスレーブの移動軌跡は一致しない場合がある。提案手法における接触の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には、スレーブ側へのみ環境との接触が発生する可能性がある。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。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を低下し、操作性を大きく損なう恐れがあるため、場面によって軌跡追従と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。

5 結論および今後の展望

本稿では、移動マニピュレータの遠隔操作における課題とその対策に関して述べ、三次元環境情報を利用した、マニピュレータと環境との接触防止システムと、通信遅延による操作性の低下への対策法に関して、提案と実機体への実装に関して論じた。また、提案手法の有用性の検証としての、遠隔マニピュレーション試験を行った。その結果から、提案手法により、環境との予期せぬ接触を大きく減らすことが可能であることを示した。また、通信遅延による操作性の低下への対策として、三次元環境情報の利用が有用であることを示した。

今後の展望としては、今回の実装で防ぐことのできなかったマニピュレータと環境との接触を防ぐため、三次元測域センサの搭載位置・個数の再検討および、マスタからスレーブへの指令方法の改良が挙げられる。

参考文献

- [1] Andreas BIRK and Fumitoshi MATSUNO. "special issue on safety, security, and rescue robotics". In *Journal of Field Robotics*, 2011.
- [2] B.Yamauchi. "packbot: A versatile platform for military robotics". In *In Proceedings of SPIE 5422*, 2004.
- [3] Tomoaki Yoshida and Keiji Nagatani et al. "field experiment on multiple mobile robots conducted in an underground mall". In *Preprint of the 7th International Conference on Field and Service Robotics*, 2009.
- [4] Eric Rohmer and Tomoaki Yoshida et.al. "quince: a collaborative mobile robotic platform for rescue robots research and development". In *International Conference on Advanced Mechatronics*, 2010.
- [5] 桐林星河, 永谷圭司, 岡田佳都, 吉田和哉. "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 1P1-C08 (2012-05), 2012.
- [6] Thomas B.Sheridan. "space teleoperation through time delay". In *IEE Transactions on robotics and automation*, 1993.
- [7] Kazunori Ohno, Toyokazu Kawahara, and Satoshi Tadokoro. "development of 3d laser scanner for measuring uniform and dense 3d shapes of static objects in dynamic environment". In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2009.