

移動マニピュレータの大域動作と手先の微小動作を実現する ハイブリット遠隔操作システムの開発

○西村 和真 (東北大学), 桐林 星河 (東北大学), 永谷 圭司 (東北大学)

Development of a master-slave/joystick hybrid system

that enables global motion and detailed work for mobile manipulators

○Kazuma Nishimura , and Seiga Kiribayashi , and Keiji Nagatani (Tohoku University)

Abstract: In general, a mater-slave manipulator system is difficult to enable detailed work of the slave manipulator, because of a limitation of fine operability of the master manipulator. Therefore, we propose a master-slave system that enables global motion and detailed work with the master-arm mounted joysticks. In this paper, we introduce our design and development of the novel master-slave system and present our experimental results.

1. 緒言

近年, 放射線にさらされた原子力発電所内部や自然災害現場などで人が立ち入ることができない環境下において, 情報収集活動や復旧作業などを可能とする遠隔操縦型ロボットの需要が高まっている. これまでにも, 移動ロボットに搭載したマニピュレータを人が安全な場所から遠隔操作することによって作業を可能とする, 移動マニピュレータに関する研究が数多く行われてきた[1][2]. 実際に, 東日本大震災後, 福島第一原子力発電所内での探査活動を目的に, iRobot 社の不整地移動マニピュレータである Packbot[3]を利用して遠隔操作によるドアの開閉作業が行われた. また, 現在, 福島原発では監視や探査活動だけでなく, 廃炉に向け除染作業や補修作業等にも遠隔操縦可能な移動マニピュレータが用いられている[4].

従来のマニピュレータの遠隔操縦システムは, ジョイスティックやボタンから構成されたものが広く用いられてきた[5][6]. 災害発生後の屋内環境などの狭小空間では, ロボットの周囲に瓦礫などの障害物が多く存在する可能性があり, マニピュレータと障害物が接触する危険がある. しかし, これらの操作システムでは, 狭小空間において, マニピュレータと周囲の障害物が接触しないように遠隔操作することは困難である. このため, 自身の姿勢を容易に把握可能な遠隔操作システムが求められている.

我々の研究グループでもこれまで, 被災地における軽作業を目的とした不整地移動マニピュレータシステムの研究開発を行ってきた[7][8]. 図 1(a)は当研究グループで研究開発を進めている不整地移動マニピュレー

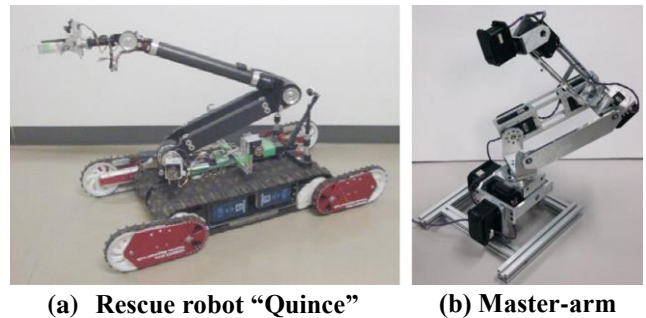


Fig. 1 Master-slave control system for Quince[7]

タ”Quince”である. また, この多自由度マニピュレータの遠隔操作を行うため, ロボットに搭載したマニピュレータ (スレーブアーム) と同形状のマスタアームを開発した (図 1(b)参照). この研究により, 災害現場における狭小空間での作業において, 直感的な操作を可能とするマスタスレーブ方式の遠隔操作システムが高い操作性を有することを示した.

しかし, 同形状型マスタスレーブ方式を用いた遠隔操作は, 手先の微小な操作が難しく, 狭小空間内で小物体の把持やドアノブを掴むことが困難という問題が生じた. 特に, 物体などの把持を正確に行う際, 手先の微小並進・回転操作が要求されるという知見を先行研究より得た.

そこで, 我々の研究グループは, ゲーム機用に代表されるゲームパッドを併用し, ジョイスティックを傾けることによりスレーブアームの手先の微小並進・回転操作を容易とする遠隔操作システムを開発した[9]. この手法は, 大域動作を行う際にはマスタアームを用いた操作を行い, 微細動作を行う際にはゲームパッドを用いた操作に切り替えるものである. しかし, シス

テムを実装したロボットを用いた遠隔操作実験より、この手法は、作業段階に応じて操作するインターフェースを持ち替えるため、操作者に対して操作を煩雑にさせるという知見を得た。

以上を踏まえ、本研究では、多自由度マニピュレータの遠隔操作性向上を目的とし、スレーブアームの大域動作と手先の微小動作を実現するマスタスレーブ-ジョイスティックハイブリットシステムを提案する。本稿では、開発した遠隔操作システムの紹介及び、操作性の評価実験の結果について報告する。

2. ハイブリット遠隔操作システムの開発

2.1 ハイブリット遠隔操作システムの提案

対象とする屋内環境の狭小空間では、瓦礫などの障害物が多く存在することが想定されるため、マニピュレータと障害物が接触する恐れがある。この問題の解決のため、本研究では、同形状型マスタスレーブ方式を用いることとした。この手法を用いることで、常に自身の姿勢を把握可能となり、また、スレーブの手先位置・姿勢の操作のみならず、個別の関節角の操作を直感的に行うことができる。これにより、障害物と接触しないようにマニピュレータを操作することが容易となる。

一方、探査を妨げる小物体を移動するために把持を行う際や、ドアの開閉のためにドアノブを掴むなどといった際には、スレーブアームの手先の微小量の位置・姿勢の操作が要求される。しかし、当研究で開発した Quince の同形状型マスタアームでは、スレーブアームの手先の姿勢を維持したまま微小な並進操作を行う、手先位置を維持したまま手先の回転操作を行うなどといった手先の微小な操作を行うことが困難である。

そこで、同形状型マスタアームの手先にジョイスティックを搭載することで、スレーブアームの手先の微小並進・回転動作を実現するマスタスレーブ-ジョイスティックハイブリットシステムを提案する。本システムの特徴は、大域的な動作を行う際はマスタアームを用いた操作、微細な動作を行う際はマスタアームの手先に搭載したジョイスティックを用いた操作の切替えを可能とすることである。なお、手先の微小操作には手先速度指指令方式を用いるが、微小量の手先並進・

回転動作を行うためマニピュレータの各関節角度の変化量も小さい。このため、狭小空間の作業においてマニピュレータと障害物が接触する危険を小さくすることができる。ここで、現在、マニピュレータの遠隔操作によく用いられる 2 種類と提案するハイブリット遠隔操作の特徴を表 1 に示す。表に示すように、ハイブリット遠隔操作システムにより、大域的な動作だけでなく微細な動作も容易となり、操作性が向上すると期待される。

2.2 ジョイスティック搭載型マスタアームの設計

提案したハイブリット遠隔操作システムに用いるジョイスティック搭載型マスタアームの要求仕様を以下に示す。

- i. ジョイスティックモード時、直感的に手先の操作が可能である
- ii. マスタスレーブモード、ジョイスティックモードの切り替えが容易である
- iii. 手先の微小並進速度指令及び回転速度指令入力が可能である

これらの要求仕様に対して、各々の設計指針を述べていく。まず、要求仕様 i に対しては、2 自由度ジョイスティックを 2 つ用い、各々のジョイスティックの座標軸がマスタアームの手先座標系に対応するように設計した。これにより、ジョイスティックを傾けた方向とマスタアームの手先座標系における移動方向が対応し、操作者は直感的に手先の微小操作が可能となると期待される。

次に、要求仕様 ii に対しては、マスタアームの先端にボタンを搭載し、ボタンを押している間はマスタスレーブモード、ボタンを離している間はジョイスティックモードに切り替え可能な構成とした。これにより、従来のモード切替えを行う際に生じた操作の煩雑さがなくなると考えられる。

要求仕様 iii に対してはマスタアームの先端にボタンを搭載し、手先並進速度・回転速度指令入力の切替えを行うことで対応する。マニピュレータの手先の動作自由度数は、位置決めに 3 自由度、姿勢に 3 自由度の計 6 自由度ある。2 つの 2 自由度ジョイスティックにより並進・回転方向の速度指令入力を可能とするため、ボタンを押している間は手先の回転速度指令入力、ボタンを離している間は手先の並進速度指令入りに切り替え可能な構成とした。

これらの設計指針に基づき、製作したジョイスティック搭載型マスタアームを図 2, 3 に示す。マスタアームの手先に 2 自由度ジョイスティックを手先座標 Σ_{Hand} における x 軸正方向の面と y 軸正方向の面に配置し、手

Table 1 Comparison of remote control system

	同形状型マスタスレーブ方式	手先速度指指令方式	ハイブリット遠隔操作方式
直感性	○	×	○
微細動作	×	○	○
大域動作	○	×	○

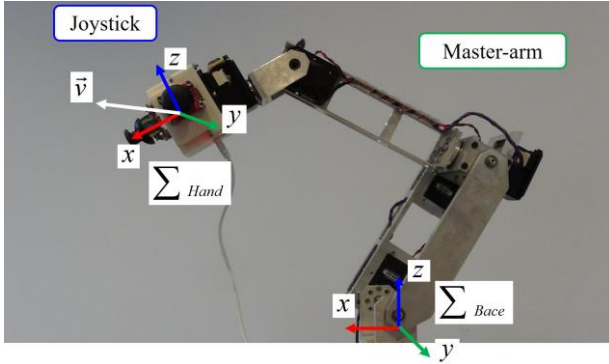


Fig.2 Master-arm equipped with joystick

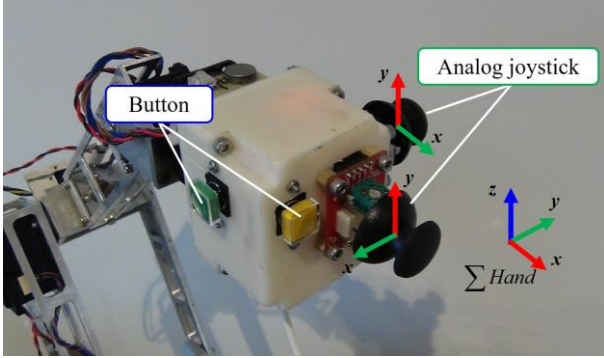


Fig.3 3DOF translation/rotation controller

先の微小並進・回転入力可能なインターフェースを実現した。搭載したジョイスティックの角度及びボタンの状態は、同様に手先に搭載したマイコンにより取得し、マスタアームの制御用 PC へ送信する。

マスタアームの手先座標系 Σ_{Hand} とジョイスティックの座標軸を対応させるため、手先座標における x 軸正方向の面のジョイスティックは x, y 軸が手先座標系の y, z 軸に、 y 軸正方向の面のジョイスティックは x 軸が手先座標系の x 軸となるように配置した。手先の微小並進速度指令及び回転速度指令入力の切り替えは手先座標における x 軸正方向の面に配置したボタン、マスタスレーブモード、ジョイスティックモードの切り替えは y 軸負方向の面に配置したボタンを操作することにより可能となっている。なお、使用しているマスタアームの各関節にはスマートモータを用い、マスタスレーブモード時にはサーボが OFF、ジョイスティックモード時にはサーボを ON とすることで、姿勢保持の有無を切り替えられる。また、マスタアームの各関節角度はスマートモータにより取得する。

2.3 手先の微小速度指令の生成

手先の微小速度指令はジョイスティックの各軸の傾きに応じて、手先座標系における手先速度の方向や大きさを決定する。ロボットのベース座標系におけるマニピュレータの手先速度を \dot{x} 、手先座標系における手

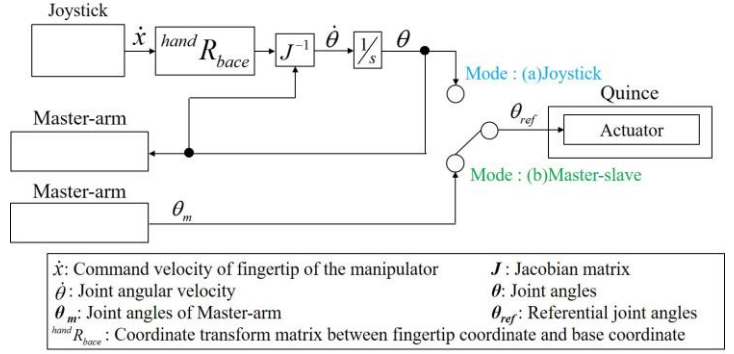


Fig. 4 Block diagram of the switch control system: (a) joystick mode, and (b) master-slave mode

先速度を \dot{x}_{Hand} と定義すると、回転行列 ${}^{Base}R_{Hand}$ を用いて次式で表される[10].

$$\dot{x} = {}^{Base}R_{Hand} \dot{x}_{Hand} \quad (1)$$

$${}^{Base}T_{Hand} = \begin{bmatrix} {}^{Base}R_{Hand} & {}^{Base}d_{Hand} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 ${}^{Base}R_{Hand}$ は、(2)に表されるベース座標系から手先座標系への同次変換行列 ${}^{Base}T_{Hand}$ において、マニピュレータの手先姿勢を意味する回転行列である。また、マニピュレータの関節角速度 $\dot{\theta}$ をとすると、手先速度 \dot{x} 、ヤコビ行列 J を用いて次式のように表される[11].

$$\dot{\theta} = J^{-1} \dot{x} \quad (3)$$

(3)式を用い、手先座標系における手先の微小速度に応じた関節角を指令値として、マスタアーム及びスレーブアームの各関節部のモータに与えることにより、手先の微小並進・回転動作を行う。

2.4 遠隔操作システムの制御手法

構築したハイブリット遠隔操作システムの概略を図4に示す。マスタアームの各関節角を θ_m 、手先の微小並進・回転操作に対応した各関節角を θ とすると、スレーブアームの目標関節角 θ_{ref} は次式に基づき算出される。

$$\theta_{ref} = S\theta_m + (E - S)\theta \quad (4)$$

ここで、単位行列を $E \in R^6$ 、対角スイッチ行列を $S \in R^6$ と定義する。スイッチ行列 S を単位行列とすればマスタスレーブモード、零行列とすればジョイスティックモードと切り替えが可能となる。なお、対角スイッチ行列の値は、マスタアームの先端に搭載するジョイスティックに装着するボタンの入力状態によって切り替えるものとする。

ジョイスティックモードでは、手先の微小並進・回

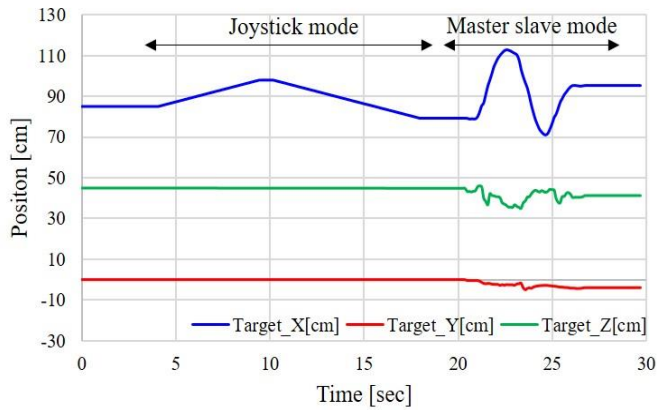


Fig.5 Transition of position of the hand in case of Master-arm equipped with joystick

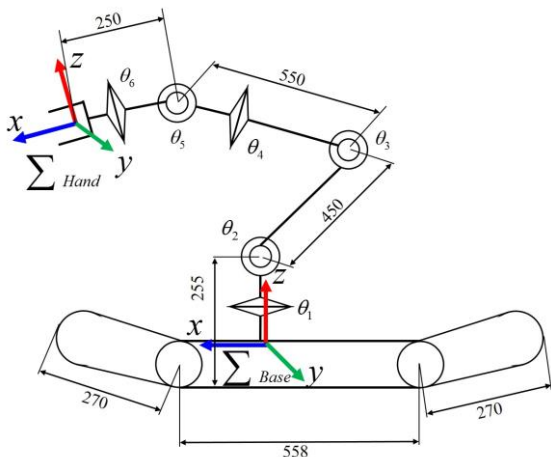


Fig.6 Configuration of rescue robot "Quince"

転速度が、ジョイスティックを用いて指定される。この指令速度から、ヤコビ行列の逆行列を用いて目標関節角速度を算出して積分し、これをスレーブアームの目標関節角とすることで、手先の微小並進・回転動作を実現する。また、スレーブアームの各関節角度は、マスタアームの各関節部のスマートモータに指令値としてフィードバックされる。

マスタスレーブモードでは、マスタアームの各関節部の角度制御は行わず、各関節部のスマートモータにより取得した関節角をスレーブアームに与えることにより、遠隔操作を行う。

なお、スレーブアームの関節角とマスタアームの関節角が一致するまでには、時間遅れが生ずるため、マスタスレーブモードからジョイスティックモードへの切り替えの際には、注意が必要である。

3. 操作性の評価実験

3.1 提案システムの動作確認実験

開発したバイブリット遠隔操作システムを用いて手先座標 x 軸方向の操作実験を行い、提案手法のモード切り替え及び、ジョイスティックによる動作が実現して

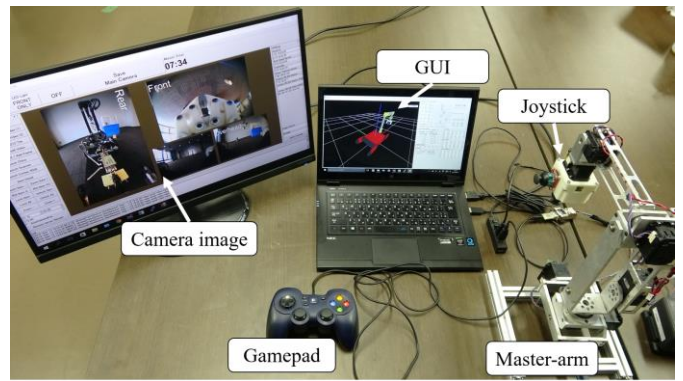


Fig.7 Experiment environment of operator

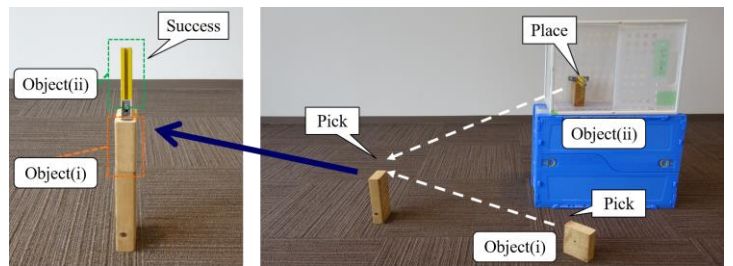


Fig.8 Pick and place test for performance evaluation of the system

いることをスレーブアームの手先位置の軌跡により確認する。実験はまず、ジョイスティックモードによる操作を行い、次にマスタスレーブモードにより操作した。その際のスレーブアームの手先位置の軌跡を図5に示す。図に示されるように、ジョイスティックモード時、手先が x 軸方向のみに動作していることから、ジョイスティックによる手先の動作が実現されていることを確認した。また、マスタアームによる操作も可能となっており、構築した遠隔操作システムが所望の動作を実現できることを確認した。

3.2 提案手法を実装したロボットによる操作実験

3.2.1 実験概要

提案手法を実装したロボットを用い、提案システムの操作性の評価実験を行った。実験は、操作対象を"Quince"(図6参照)とし、被験者は成人男性5人とした。図7に示すような実験環境下で被験者は、ロボットに搭載されているカメラにより取得した俯瞰画像及び手先奥行き方向の画像をもとに作業を行い、作業時間、作業タスクの成功率、接触回数を計測し評価する。

作業内容の概略を図8に示し、以下に作業の流れを示す。

作業1：地面に置かれている物体(i)を掴む。

作業2：掴んだ物体(i)を目標位置(木片の上)に置く。

作業3：白い箱の中にある物体(ii)を掴む。また、物体(ii)は木片の上に置かれている。

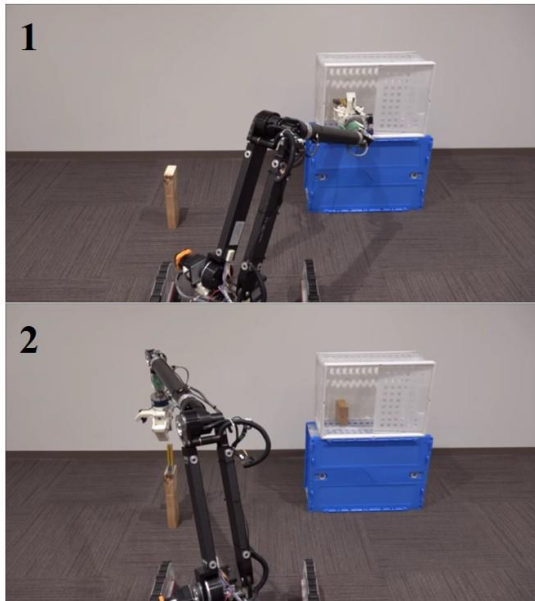


Fig.9 Experimental scenes

作業 4 : 掴んだ物体(ii)を物体(i)の上に置く.
 実験で使用した各物体の詳細を表 2 に示す.

以上の作業を被験者は(a)マスタアームのみ, (b)先行研究で開発したマスタアームとゲームパッドを併用, (c)提案手法の 3 種類により実行し比較を行う. 作業が失敗した場合は次の作業段階に移行せず実験は終了するものとした.

各操作手法の順番は, 順番による操作の慣れの影響を考慮し, それぞれの被験者が異なる順番となるように設定した. なお, 被験者にはできる限りスレーブアームが障害物に接触しないよう作業を行うように指示した.

作業時間は全ての作業を完了するのにかかった合計時間, 接触回数はマニピュレータと障害物が接触した回数とした. 作業タスクの成功率は, 作業 1 のみが成功した場合に 25[%], 作業 1 と作業 2 で 50[%], 作業 1 から作業 3 で 75[%], 作業 1 から作業 4 の全てで 100[%] と定義した.

3.2.2 実験結果及び考察

実験の様子を図 9 に示す. 上の図から順に, 物体(ii)を掴む作業段階 3 の様子, 物体(ii)を物体(i)の上に置く作業段階 4 の様子である.

図 10 に各操作手法を用いた場合の被験者 5 人の作業タスクの成功率の結果を示す. この結果, 全作業を成

Table 2 Experimental parameter

		Width×depth×height
Object(i)	Wooden block	40×90×90 [mm]
Object(ii)	Aluminium X frame	20×20×120 [mm]
Target place	Wooden block	40×90×170 [mm]

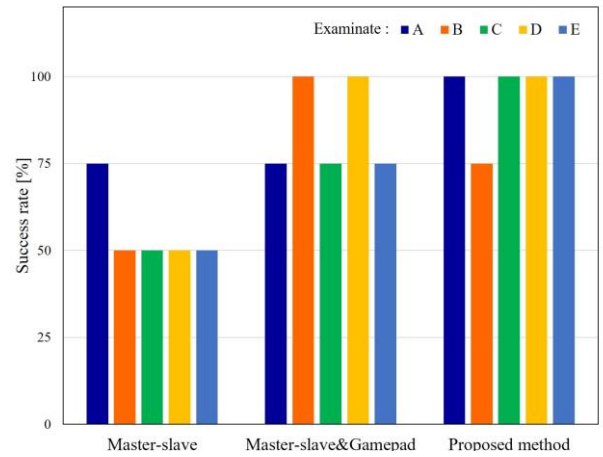


Fig.10 Experimental result of successful ratios

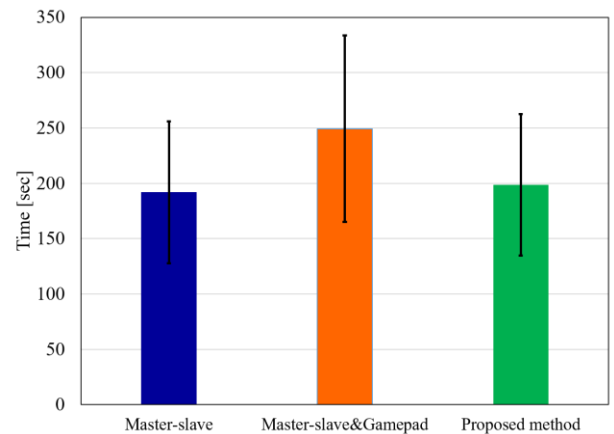


Fig.11 Experimental result of operation time

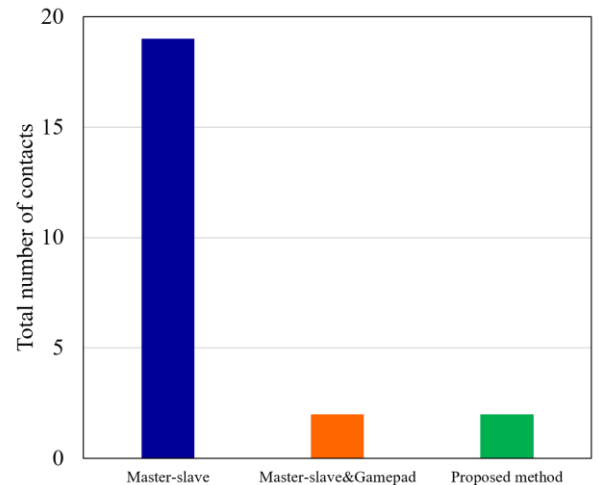


Fig.12 Experimental result of number of contacts

功した者はそれぞれ, マスタアームを用いた操作のみでは 5 人中 0 人, マスタアームとゲームパッドを併用した操作では 5 人中 2 人, 提案手法を用いた操作では 5 人中 4 人となった. 提案手法を用いた操作では, マスタアームのみを用いた操作に対し平均 40[%]程度, マスタアームとゲームパッドを併用した操作に対しては平均 10[%]程度成功率が向上した. 提案手法を用いた操作によって成功率が向上した要因は, マニピュレータの

手先移動方向にジョイスティックを傾けた方向が対応しているため、ゲームパッドを併用した方式よりも操作の直感性が向上したと考えられる。

図 10 から示されるように、マスタアームのみの操作で全被験者が成功したのは作業 2 までとなった。各操作手法の比較のため、成功した作業段階までの時間に着目し、図 11 に作業 1 と作業 2 を行った際の全被験者の平均作業時間と標準偏差を示す。この結果、提案手法を用いた操作は、マスタアームのみを用いた操作に対して同程度の作業時間となり、マスタアームとゲームパッドを併用した操作に対しては平均 51[sec]程度作業時間が短くなった。提案手法がゲームパッドよりも作業時間が短縮されたのは、マスタスレーブモードとジョイスティックモードの切替えの際に生じる時間の短縮、及び操作の直感性が向上したと考えられる。

図 12 に各操作を用いた場合の全被験者の合計接触回数を示す。この結果、提案手法を用いた操作は、マスタアームのみを用いた操作に対して 17 回減少し、マスタアームゲームパッドを併用した操作に対しては同程度となった。ジョイスティックを搭載したことにより、手先の微小操作が容易となったため、提案手法はマスタアームのみの操作よりも接触が少なくなったと考えられる。

4. 結言

本研究は、多自由度マニピュレータの遠隔操作性向上を目的とし、移動マニピュレータの大域動作と手先の微小動作を実現するマスタスレーブ-ジョイスティックハイブリットシステムを開発した。また、提案手法の操作性を評価するため、Quince を用いた操作実験を行った。その結果、マスタアームのみを用いた操作、マスタアームとゲームパッドを併用した操作よりも高い操作性を有していることを確認した。今後は、被験者を増やし引き続き Quince を用いた操作実験を行い、提案手法の評価を進める。

5. 参考文献

[1] J. Seron, J. L. Martinez, A. Mandow, A. J. Reina, J. Morales, and A. J. Garcia-Cerezo, "Automation of the arm-aided climbing maneuver for tracked mobile manipulators", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 7, pp. 3638-3647(2014).

[2] M. Guarnieri, I. Takao, E. Fukushima, and S. Hirose, "HELIOS VIII search and rescue robot: Design of an adaptive gripper and system improvements", in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System(IROS2007)*, pp. 1775-1780(2007).

[3] B. Ymauchi, "Packbot: A versatile platform military robotics", in *Proceedings of SPIE 5422*, pp. 228-237(2004).

[4] 東京電力, ロボット技術の活用, <https://www.tepco.co.jp/decommission/principles/technology/robot/index-j.html>(accessed on 16 September, 2016).

[5] E. F. Fukushima, M. Freese, T. Matsuzawa, T. Aibara and S. Hirose, "Humanitarian demining robot GRYPHON -Current status and an objective evaluation-", *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 1, no. 3, pp. 736-753 (2008).

[6] L. F. Penin, K. Matsumoto, and S. Wakabayashi, "Force reflection for time-delayed teleoperation of space robots", in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA'00)*, vol. 4. IEEE, pp. 3120-3125(2000).

[7] 桐林星河, 岡田佳都, 永谷圭司, 吉田和哉, 小柳栄治, "不整地移動マニピュレータの直感的遠隔操作が可能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 28 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. RSJ2010AC1C3-5(2010).

[8] 幸村貴臣, 桐林星河, 永谷圭司, "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--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, pp. 2328-2332(2015).

[9] 西村和真, 幸村貴臣, 桐林星河, 永谷圭司, "ジョイスティックを用いた遠隔操作型移動マニピュレータの微操作の実現", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2016, pp. 2A1-17a1(2016).

[10] 稲葉雅幸, 加賀美聡, 西脇光一, "岩波講座 ロボット学 7 ロボットアトナミー", pp. 158-164, 岩波書店(2005).

[11] 稲葉雅幸, 加賀美聡, 西脇光一, "岩波講座 ロボット学 7 ロボットアトナミー", pp. 168-169, 岩波書店(2005).