

# 遠隔作業支援マニピュレータに関する研究 - 複数インタフェースにおける操作性の比較 -

石川 大輔<sup>1</sup> 武藤 伸洋<sup>2</sup>

**概要:** 本論文では, 本研究室で提案する遠隔作業支援システムにおいて, 指示者がロボット操作に未習熟であることを想定し, 容易かつ正確な操作方式の検討を目的とする. その方法として, それぞれの操作方式について操作性比較実験を行い, その結果から操作特性について評価した. 提案する遠隔作業支援システムは, 将来的な日本の作業者の不足を背景に, 指示者が遠隔操作するロボットによって現地作業者の支援・補助を行うことで保守点検作業の効率化・省力化を目的としている. 比較する操作方式は, マウスとキーボードによる操作を Mouse 方式, 腕の動作計測による操作を MotionCapture 方式, ポインティングデバイスによる操作を 3DPointingDevice 方式とする. 実験として, 簡単な Pick&Place 作業を実施し, 作業達成までに要した操作時間を測定した. また, 測定した各方式の操作時間を t 検定により比較し, 操作時間の差異の有意性を確認した. 実験結果として, 3DPointingDevice 方式は平均操作時間が最も短く, 今回対象とした操作方式において作業効率が最良だと評価した.

## Study on remote operation support manipulator - Comparison of operability by plurality of interfaces -

DAISUKE ISHIKAWA<sup>1</sup> SHIN-YO MUTO<sup>2</sup>

### 1. はじめに

設備の老朽化による維持管理需要の増加と, 少子高齢化による労働人口の減少により, 将来的に日本の作業者は不足すると考えられる. また, 点在する作業地へと逐一作業者を派遣するのは, 作業地間の距離や前述した作業者の不足を考えると効率的ではない. こうした課題に対して, 日本では「ロボット新戦略」[1]を策定するなど, ロボット技術を活用した解決を図っている. しかしながら, 遠隔作業の実用例の少なさ, 設備が高額であることによる導入の難しさ, 操作の難しさという課題を抱えている.

本研究室では, ネットワークを介して遠隔地の熟練作業者が操作するロボットによって, 現地作業者を支援・補助する遠隔作業支援システムについて提案している. ここで指示者として想定する熟練作業者は, マニピュレータ操作

の熟練者ではない. そこで本研究では, 提案するシステムの指示者がロボットの操作に未習熟であることを想定し, 容易かつ正確なロボットの操作方式の検討を行う. 本稿では, 遠隔作業支援マニピュレータシステムで利用する操作方式について述べ, 各操作方式について操作性比較実験を行い, 操作特性について評価して報告する.

### 2. 複数インタフェースが利用可能な操作環境

本稿において操作対象はマニピュレータとし, 操作方法はマウスとキーボードによる操作 [2], 腕の動作計測による操作 [2], ポインティングデバイスによる操作の3つとする. 図.1 に操作比較実験に用いた操作環境について, 図.2 に3つの操作方式による操作の流れをそれぞれ示す. また, 指示者側 PC に接続された操作インタフェースによりマニピュレータ手先位置を入力すると作業側 PC に接続されたマニピュレータが動作する. 各操作インタフェース用の操作 UI クライアントと制御クライアントはソケット通信ライブラリ [3] によって接続サーバを介した操作コマ

<sup>1</sup> 日本大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Nihon University

<sup>2</sup> 日本大学工学部機械工学科  
College of Engineering, Nihon University

ンドのやり取りを行う。状況に応じて複数の操作 UI クライアントがサーバへと接続することにより、複数の操作インタフェースを利用したロボットの操作環境を実現する。

## 2.1 制御クライアントプログラム

制御クライアントは、作業側 PC において実行され、操作 UI クライアントから送られてくる操作コマンドによりロボットを動作させる。ここで操作コマンドとは、通信対象を指定するための ID とロボットを操作するための情報を記述したものである。本稿では水平多関節型 5 自由度

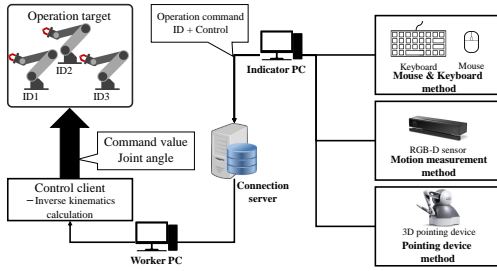
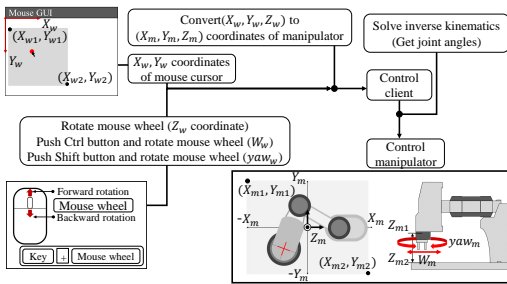
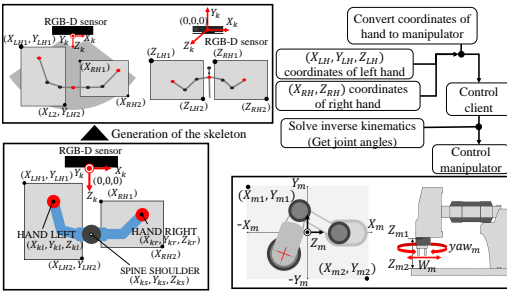


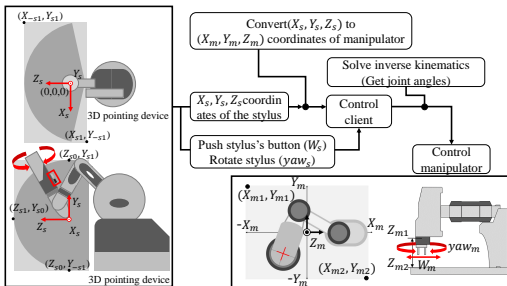
図 1: Concept of operating environment



(a) Method using mouse



(b) Method using RGB-D sensor



(c) Method using 3DPointingDevice

図 2: Operation method by each interface

マニピュレータ (VS-ASR, VStone 社) 専用の制御クライアントを作成した。このマニピュレータはアーム軸 2 つとアーム上下軸、ハンド回転軸、ハンド開閉軸それぞれ 1 つずつの 5 軸構成となっている。操作インタフェースにより入力された手先位置・姿勢の値から逆運動学計算によって関節角度の指令値を算出し、マニピュレータを制御する。

## 2.2 操作 UI クライアントプログラム

### 2.2.1 マウスとキーボードによる操作 UI

指示者側 PC のマウスポインタ座標とマウスホイールの回転により値を取得し、その値をマニピュレータ手先位置座標系の指令値に変換してから制御クライアントに送信する。垂直方向動作や手先の回転・開閉の操作はキーボード入力とマウスホイール操作の組み合わせにより区別される。Ctrl キーを押している場合は手先回転動作を、Shift キーを押している場合は手先開閉動作を行い、何も押されていない場合はマニピュレータの垂直方向動作を行う。

図 2(a) にマウスポインタの座標からマニピュレータ手先位置への変換の流れを示す。マニピュレータ手先位置  $(X_m, Y_m, Z_m)$  の指令値は、マウスポインタ座標  $(X_w, Y_w)$  およびマウスホイールの回転により増減するカウンタの値  $(Z_w)$  を変換して求める。Mouse 方式による変換式は

$$X_m = a_1 X_w + c_1 \quad (1)$$

$$Y_m = a_2 Y_w + c_2 \quad (2)$$

$$Z_m = Z_w \quad (3)$$

となる。比例定数  $a_1, a_2$  は

$$a_1 = \frac{X_{m1} - X_{m2}}{X_{w1} - X_{w2}} \quad (4)$$

$$a_2 = -\frac{Y_{m1} - Y_{m2}}{Y_{w1} - Y_{w2}} \quad (5)$$

とした。  $c_1, c_2$  は定数であり、マウスポインタの操作範囲内にマニピュレータ動作範囲の上限と下限が収まるように設定した。  $X_{m1}, X_{m2}, Y_{m1}, Y_{m2}$  は XY 方向に対するマニピュレータ動作範囲の上限と下限を示し、  $X_{w1}, X_{w2}, Y_{w1}, Y_{w2}$  は XY 方向に対するマウスポインタの操作範囲を示す。キーボードの Ctrl キーを押している間のマウスホイール回転により増減するカウンタの値を  $W_w$  とする。同様にキーボードの Shift キーが押されている間に増減するカウンタの値を  $yaw_w$  とする。その値からマニピュレータ手先回転・開閉動作の指令値  $(yaw_m, W_m)$  への変換式は

$$yaw_m = yaw_w \quad (6)$$

$$W_m = W_w \quad (7)$$

とした。

### 2.2.2 腕の動作計測による操作 UI

この操作方式では、RGB-D センサにより指示者の関節位置を取得することで姿勢や腕の操作を計測してマニピュ

レータを操作する。指示者の両肩の間にある頸椎の位置を原点とした左右の手先位置座標を計算する。ここで、左手位置座標、右手位置の水平方向座標、および右手位置の垂直方向座標は、マニピュレータ手先位置座標系の指令値、マニピュレータ手先回転動作の指令値、およびマニピュレータ手先開閉動作の指令値にそれぞれ変換して制御クライアントに送信する。

図2(b)にRGB-Dセンサによって取得した指示者の腕の動作における座標からマニピュレータ手先位置への変換の流れを示す。マニピュレータ手先位置操作には動作計測により取得した左手の位置 (HAND LEFT), 右手の位置 (HAND RIGHT), 両肩の間にある頸椎の位置 (SPINE SHOULDER) を用いる。図2(b)よりRGB-Dセンサの座標を  $(X_k, Y_k, Z_k)$  とする。また、RGB-Dセンサにより取得した左手の位置を  $(X_{kl}, Y_{kl}, Z_{kl})$  とし、右手の位置を  $(X_{kr}, Y_{kr}, Z_{kr})$  とし、頸椎の位置を  $(X_{ks}, Y_{ks}, Z_{ks})$  とする。頸椎の位置を原点とすると、原点から見た左手の位置  $(X_{LH}, Y_{LH}, Z_{LH})$  は

$$X_{LH} = X_{kl} - X_{ks} \quad (8)$$

$$Y_{LH} = Z_{ks} - Z_{kl} \quad (9)$$

$$Z_{LH} = Y_{kl} - Y_{ks} \quad (10)$$

とした。また、原点から見た右手の位置  $(X_{RH}, Z_{RH})$  は、次のように表す。

$$X_{RH} = X_{kr} - X_{ks} \quad (11)$$

$$Z_{RH} = Y_{kr} - Y_{ks} \quad (12)$$

式(8),(9),(10)の値からマニピュレータ手先位置の指令値  $(X_m, Y_m, Z_m)$  へ変換することで、指示者は左手によりマニピュレータ手先位置を操作する。その変換式は

$$X_m = p_1 X_{LH} + q_1 \quad (13)$$

$$Y_m = p_2 Y_{LH} + q_2 \quad (14)$$

$$Z_m = p_3 Z_{LH} + q_3 \quad (15)$$

とした。比例定数  $p_1, p_2, p_3$  は

$$p_1 = \frac{X_{m1} - X_{m2}}{X_{LHand1} - X_{LHand2}} \quad (16)$$

$$p_2 = -\frac{Y_{m1} - Y_{m2}}{Y_{LHand1} - Y_{LHand2}} \quad (17)$$

$$p_3 = \frac{Z_{m1} - Z_{m2}}{Z_{LHand1} - Z_{LHand2}} \quad (18)$$

である。 $q_1, q_2, q_3$  は定数であり、指示者の動作範囲内にマニピュレータ動作範囲の上限と下限が収まるように設定した。 $X_{m1}, X_{m2}, Y_{m1}, Y_{m2}, Z_{m1}, Z_{m2}$  はXYZ方向に対するマニピュレータ動作範囲の上限と下限を示し、 $X_{LH1}, X_{LH2}, Y_{LH1}, Y_{LH2}, Z_{LH1}, Z_{LH2}$  はXYZ方向に対する動作計測時の左手操作範囲を示す。次に、原点から見た

右手までの距離  $(X_{RH})$  からマニピュレータ手先回転・開閉動作の指令値  $(yaw_m, W_m)$  への変換式を次に示す。

$$yaw_m = p_4 X_{RH} + q_4 \quad (19)$$

$$W_m = Z_{RH} + q_5 \quad (20)$$

比例定数  $p_4$  は比例定数であり、

$$p_4 = \frac{yaw_{m1} - yaw_{m2}}{X_{RH2} - X_{RH1}} \quad (21)$$

とした。 $q_4, q_5$  は定数であり、指示者の動作範囲内にマニピュレータ動作範囲の上限と下限が収まるように設定した。 $yaw_{m1}, yaw_{m2}$  はマニピュレータ手先回転範囲の上限と下限を示し、 $X_{RH1}, X_{RH2}, Z_{RH1}, Z_{RH2}$  はXZ方向に対する動作計測時の右手操作範囲を示す。

### 2.2.3 ポインティングデバイスによる操作 UI

この操作方式では、3次元の位置・姿勢入力装置によりマニピュレータを操作する。指示者によって入力される3次元の位置・姿勢の値を取得し、位置の値はマニピュレータ手先位置座標系の指令値に、姿勢の値はマニピュレータ手先回転動作の指令値にそれぞれ変換して制御クライアントに送信する。手先の開閉動作は入力装置のボタン入力により指令値を制御クライアントに送信する。

図2(c)に3Dポインティングデバイス入力装置(以下入力装置)座標からマニピュレータ手先位置への変換の流れを示す。マニピュレータ手先位置  $(X_m, Y_m, Z_m)$  の操作には入力装置座標  $(X_s, Y_s, Z_s)$  を用いる。その変換式は

$$X_m = X_s \quad (22)$$

$$Y_m = f Z_s + g \quad (23)$$

$$Z_m = \frac{1}{2} Y_s \quad (24)$$

とした。比例定数  $f$  は

$$f = \frac{Y_{m1} - Y_{m2}}{Y_{s1} - Y_{s2}} \quad (25)$$

とした。 $g$  は定数であり、入力装置の操作範囲内にマニピュレータ動作範囲の上限と下限が収まるように設定した。 $X_{m1}, X_{m2}, Y_{m1}, Y_{m2}, Z_{m1}, Z_{m2}$  はXYZ方向に対するマニピュレータ動作範囲の上限と下限を示し、 $X_{s1}, X_{s2}, Y_{s1}, Y_{s2}, Z_{s1}, Z_{s2}$  はXYZ方向に対する入力装置の操作範囲を示す。また、入力装置のボタンを押すと増減するカウンタの値を  $W_s$  とし、入力装置のY軸周り回転の値を  $yaw_s$  とする。マニピュレータ手先回転・開閉の指令値  $(yaw_m, W_m)$  への変換式は

$$yaw_m = -yaw_s \quad (26)$$

$$W_m = W_s \quad (27)$$

とした。

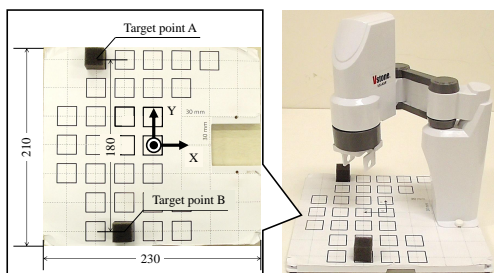


図 3: Experiment placement

### 3. 操作性比較実験

図 3 に実験配置図を示す。本実験において、操作するマニピュレータとして VS-ASR(VStone 社), RGB-D センサとして Kinect V2(Microsoft 社), 3次元の位置・姿勢入力装置として Geomagic Touch(3DSystem 社) を使用した。また、マウスとキーボードによる操作を Mouse 方式, 腕の動作計測による操作を MotionCapture 方式, ポインティングデバイスによる操作を 3DPointingDevice 方式とする。本実験では前述した 3つの操作方式について比較・評価することを目的としており, 初期指令値  $(X_m, Y_m, Z_m, yaw_m, W_m)$  を  $(0, 0, 0, 0, 20)$  とし, 目標地点 A の物体を目標地点 B の物体の上に積み上げるといった簡単な Pick&Place 作業を, 各操作方式により 10 回ずつ実施し, 操作終了までの時間を測定した。測定した操作時間 (以下合計操作時間) は, マニピュレータが物体を把持する (以下把持作業) までの操作時間, 把持した物体を地点 B に運搬するまで (以下運搬作業) の操作時間, および把持した物体を積み上げてマニピュレータ垂直方向の手先位置が最大になるまでの操作時間 (以下積み上げ作業) の 3 段階に分割して記録した。その後, 各操作方式の操作時間の平均を求め, t 検定により合計操作時間の平均に有意差があるかどうかを検証した。

### 4. 実験結果と考察

表 1: Average time by each control method

	Mouse	MotionCapture	3DPointingDevice	
Ave. [s]	Pick up	5.4	6.2	4.7
	Carry	4.3	1.4	2.8
	Pile up	4.1	6.3	2.6
	Total	13.8	13.9	10.0

Ave. : Average time

表 2: The t test for each control method

	Mouse	MotionCapture	3DPointingDevice
Mouse	-	0.95	$p < 0.05$
MotionCapture	0.95	-	$p < 0.05$
3DPointingDevice	$p < 0.05$	$p < 0.05$	-

表 1 には各操作方式におけるマニピュレータ操作による操作時間の平均を作業段階ごとに示す。

Mouse 方式では作業段階ごとの操作時間の変化が少ない。これはどの作業段階でも安定して操作出来たため, 操作時間に差が出なかったと考えられる。

MotionCapture 方式では把持作業と積み上げ作業の操作時間が長い。これは操作時に計測される腕の振れによりマニピュレータの手先位置に誤差が生じ, その修正に時間がかかっているためだと考えられる。一方で, 運搬作業の操作時間の平均は MotionCapture 方式が最短だった。このことから, 手先操作を伴わないマニピュレータの移動に関しては MotionCapture 方式が効率的だと考えられる。そのため, 例えばロボットによるスプレー塗装などの把持動作が必要ない作業に適している可能性がある。

3DPointingDevice 方式では, 運搬作業以外の作業段階における操作時間の平均が最も短く, 合計操作時間の平均が最短であることが分かった。把持作業の操作時間が他の作業段階と比較して長いのは, 把持作業ではマニピュレータ手先位置と目標地点 A とに生じる誤差の修正に時間がかかり, 運搬作業および積み上げ作業では複数自由度を同時に操作し, 経路を短縮したためだと考えられる。

表 2 に各操作方式における合計操作時間を t 検定により比較した際の有意確率 p 値を示す。ここで有意水準値は 0.05 としており, p 値が有意水準値以下であれば  $p < 0.05$  と表記している。結果より, Mouse 方式と MotionCapture 方式の比較では  $p > 0.05$  であり, Mouse 方式と MotionCapture 方式で有意差は見られない。一方, 3DPointingDevice 方式とその他の操作方式を比較では  $p < 0.05$  であったため, 3DPointingDevice 方式とその他の操作方式の比較は有意であることが確認できた。このことから, 3DPointingDevice 方式はその他の操作方式よりも効率的に作業が達成可能であると考えられる。

### 5. おわりに

本研究では, ネットワークを利用して遠隔地の指示者が現場作業者の支援・補助する遠隔作業支援マニピュレータの操作方式について提案した。本稿では, マニピュレータを用いた操作性比較実験により 3つの操作方式の操作特性評価を行った。結果より, 今回実験の対象とした操作において, 3DPointingDevice 方式は比較した操作方式の中では作業効率が最も良いことが分かった。また, 本稿で述べた操作方式は手先の姿勢方向操作を 1 軸に限定して 6DoF マニピュレータに対しても実装した。今後は被験者数を増やし, 6DoF マニピュレータを用いて比較する。

### 参考文献

- [1] 経済産業省, “ロボット新戦略”, 経済産業省, [www.meti.go.jp/](http://www.meti.go.jp/), (参照日 2017 年 12 月 19 日)。
- [2] 三富剛史, 他, “遠隔作業支援マニピュレータ制御システムに関する研究”, 第 60 回日本大学工学部学術研究報告会, pp.23-25, (2017)
- [3] 武藤伸洋, 他, “シンビオティック情報システムにおける多種ロボット・多操作者ネットワーク系, マルチモーダル操作系, 教示・再生系の検討”, 第 7 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.353-359, (2002)