

1F廃炉に貢献するロボット技術開発

廃炉ロボットの遠隔操作支援システムの開発

2023年9月

三菱重工業株式会社

原子力セグメント 機器設計部 装置設計課

橋本達矢

本件は、国際廃炉研究開発機構（IRID）の一員である三菱重工が経済産業省廃炉・汚染水対策補助金事業にて開発した成果を取りまとめたものです。

1. はじめに
2. マニピュレータの操作方法（従来技術と開発技術）
3. 比較試験の概要
4. 比較試験の結果
5. まとめと今後の課題

1. はじめに

● 開発の背景

デブリ取出しでは、格納容器(PCV)のような狭隘な環境において、障害物を避けながら干渉物撤去やデブリ取出し作業を行う(図1)
⇒ 冗長自由度マニピュレータが有効: 7つ以上の関節を持ち、手先位置・姿勢を保持したまま肘の回避運動ができるため(図2)

● 解決すべき課題

視野が制限される条件下で、障害物を回避しながら、冗長自由度マニピュレータを遠隔操作することはオペレータの負荷が非常に高く、マニピュレータの一部を障害物に衝突させるリスクがある。

【従来技術】

- ・ 手動操作・・・オペレータが、マニピュレータの手先位置・姿勢を逐一操作する
→ 操作が複雑でオペレータの負荷が高い、誤操作が発生しやすい
- ・ ティーチング・・・事前にマニピュレータ軌道を作成し、現場でオペレータが再生する
→ 事前準備に時間がかかる、現場で臨機応変に対応できない

● 解決策

「**軌道計画**」によってマニピュレータの干渉回避軌道を自動生成し、安全かつ効率的に作業を進められる手法を開発する。
→ 従来技術(手動操作・ティーチング)と**軌道計画**との比較試験を実施

● 得られる成果

マニピュレータの障害物回避を自動化し、作業の安全性・効率の向上(将来的には、様々な作業・ロボットへの適用を目指す)

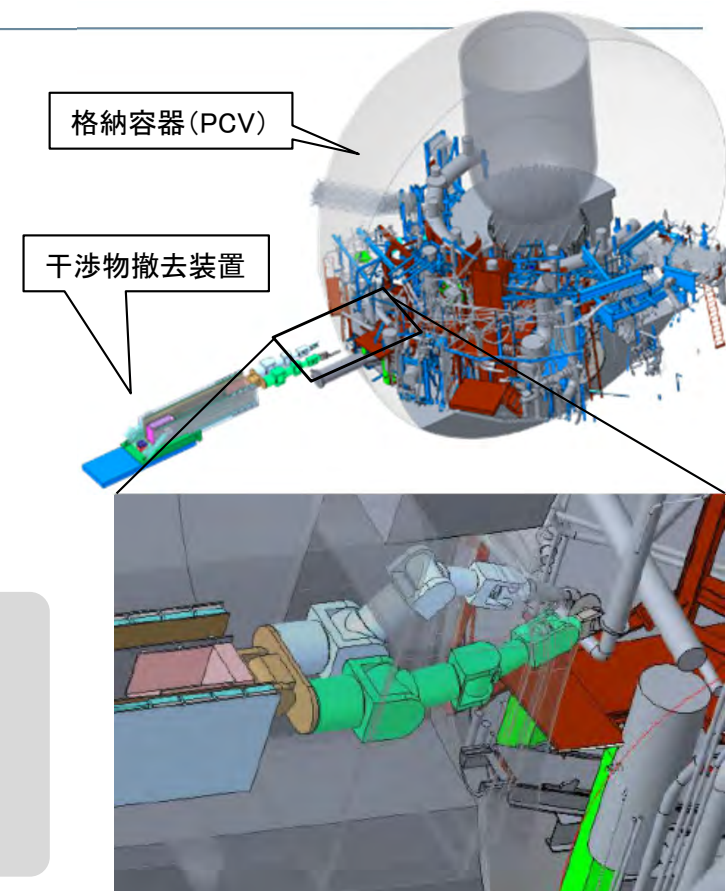


図1 3号機における干渉物撤去作業イメージ

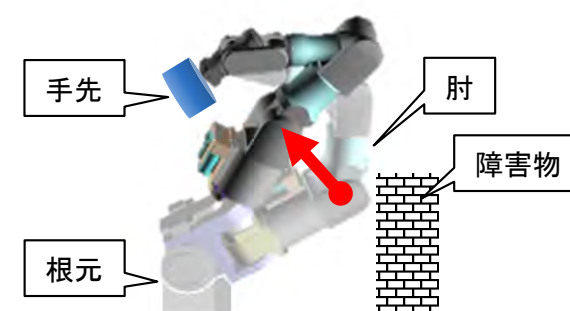
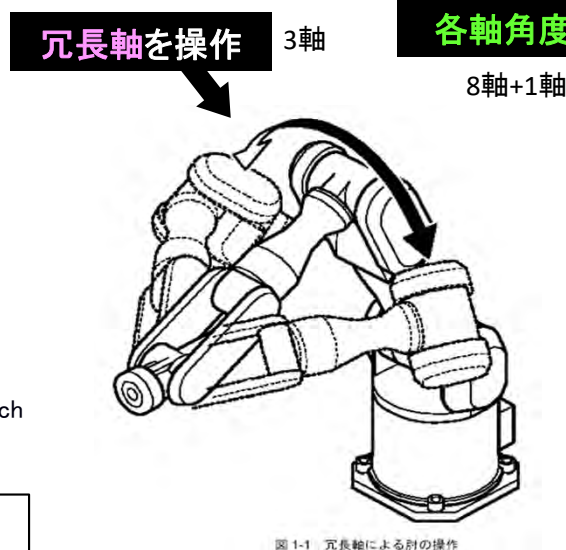
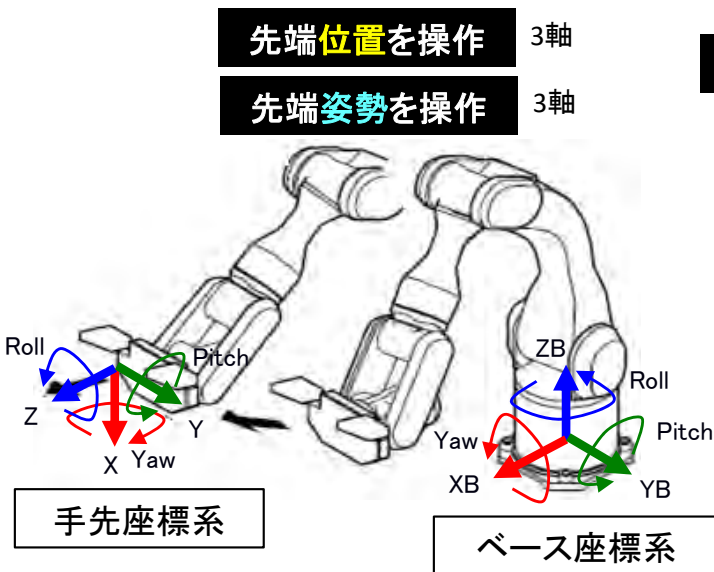
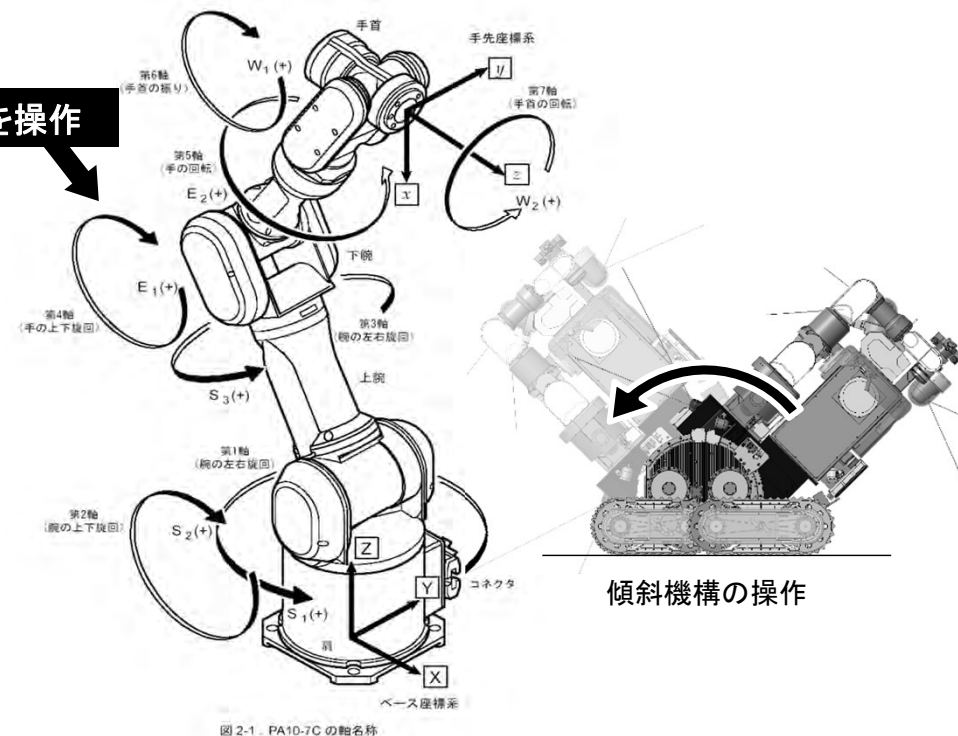


図2 冗長自由度マニピュレータの回避運動

2. マニピュレータの操作方法① 手動操作(従来技術)



各軸角度を操作
8軸+1軸



【手動操作の内容】

- 操作モードを選択する
- 操作モードに応じて、キー割り当てが変化する
- ゲームパッドの左右のキーが左右のマニピュレータに対応する
- 先端位置/姿勢を操作する際は、手先/ベース座標系を選択する

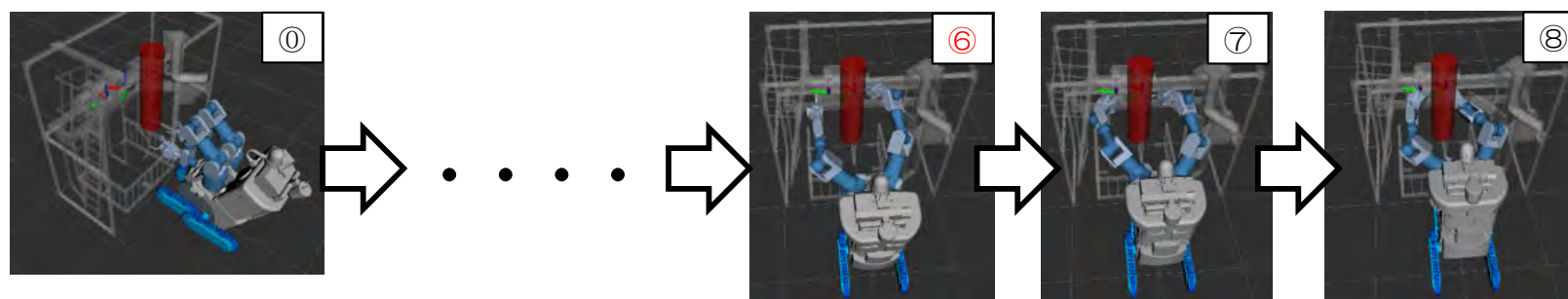
※複雑な動きができるマニピュレータは、選択肢が多い(35種)ため、状況認識と選択を常に行う必要がある

2. マニピュレータの操作方法② ティーチング(従来技術)

- 事前にシミュレータ上でティーチングデータを作成する
(今回は、オペレータとは別の人間が作成した)
- 現場では、オペレータがゲームパッドのスティックを倒すと
ティーチングデータが再生される(速度調整/停止可能)

【ティーチングデータの作り方】

- シミュレータ上でロボットモデルを手動操作し、1場面ごとに
ロボットの姿勢を作り、全ての関節角度を記録する
- ゴールに到達するまで、複数の場面を作成する

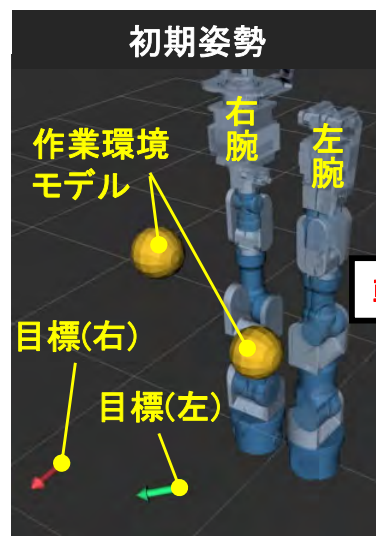


ティーチングデータの例

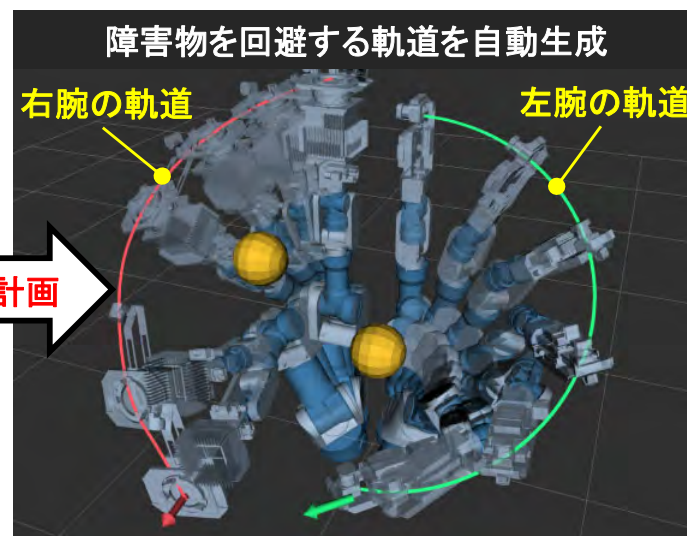
場面	傾斜軸	左腕の関節								右腕の関節							
		S0軸	S1軸	S2軸	S3軸	E1軸	E2軸	W1軸	W2軸	S0軸	S1軸	S2軸	S3軸	E1軸	E2軸	W1軸	W2軸
①	-30	30	0	50	0	130	0	-90	0	30	0	50	0	130	0	-90	0
②	-30	32.44	19.31	54.56	18.32	119.03	28.36	-92.9	90	30.62	-10.28	50.4	-11.26	127.11	-17.21	-90.31	9.16
③	-30	10.14	10.87	18.28	33.04	106.03	76.8	-46.53	20.73	19.17	-11.27	10.49	-4.08	97.33	-66.47	-16.56	63.38
④	-25	16.03	64.27	29.79	-36.95	90.98	87.84	-24.02	28.95	6.23	-27.89	42.79	33.4	69.34	-49.85	9.03	28.49
⑤	-20	16.03	64.27	29.79	-36.95	90.98	87.84	-24.02	28.95	8.97	-35.72	53.57	73.76	44.86	-15.96	44.42	-35.79
⑥	-10	3.57	63.58	52.82	-63.94	74.9	132.35	-1.13	5.46	16.78	-30.8	39.14	74.34	35.15	-15.89	51.94	-27.87
⑦	-5	13.51	69.46	39.52	-63.61	60.68	135.26	-46.41	-102.28	2.43	-48.92	38.12	78.53	57.17	-9.54	51.22	-24.93
⑧	0	6.55	68.08	48.44	-69.03	65.9	129.56	-37.29	-90.2	2.59	-57.97	47.06	95.95	83.53	-67.45	3.26	16.58
⑨	3.945	3.66	80.24	46.79	-88.54	82.16	121.97	-12.59	-74.24	1.5	-46.72	29.53	71.03	88.1	-47.95	-13.05	17.06

2. マニピュレータの操作方法③ 軌道計画(開発した新手法)

- 事前に軌道計画プログラムを使って干渉回避軌道を自動生成する
- 現場では、オペレータがゲームパッドのスティックを倒すと軌道データが再生される(速度調整/停止可能)



軌道計画



シミュレータ上
・ロボットモデル
・作業環境モデル

オペレータ
手先目標を指定

軌道計画プログラム

- 目標までの経路を計算
- ロボットモデルと環境モデルの接触判定
→ 環境と接触しないロボット姿勢を計算

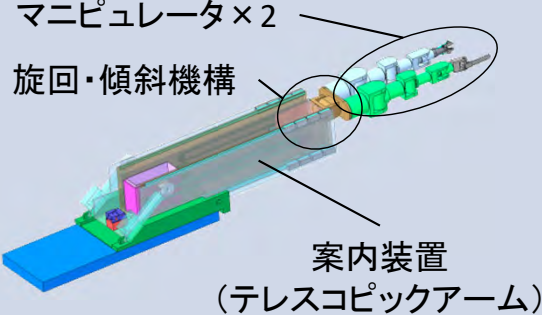
神戸大学との共同開発

ティーチングと軌道計画の比較表

	ティーチング	軌道計画
事前準備における作業環境	シミュレータ上	シミュレータ上
軌道の作成方法	作業者による手動操作	プログラムによる自動生成
軌道作成時間	1時間～3時間	設定、計算、軌道データ確認まで数分～数十分 (1回の計算時間:数秒～数分)
出来上がる軌道の特徴	右腕、左腕、傾斜機構を順に動す	全ての関節(17軸)が連動する
現場のズレへの対応性	部分的修正なら数十分、 大規模修正は数十分～数時間	現場で条件(初期姿勢や作業環境モデル)を変更し、 再計算を行う:数分～30分程度

3. 比較試験の概要

軌道計画の有効性を検証するため、PCV内の構造物を模擬したモックアップと試験用双腕ロボットを用いて、従来の操作方法と比較試験を行った。

外観		干渉物撤去装置【検討中】	試験機（双腕ロボット）
			
主な用途		PCV内の干渉物撤去	
主な仕様	マニピュレータ可搬質量	【検討中】 150kg × 2	25kg × 2
	自由度※	【検討中】 マニピュレータ: 8軸 × 2式 旋回・傾斜機構: 2 案内装置: 2 (伸縮・傾斜)	マニピュレータ: 8軸 × 2式 傾斜機構: 1 合計: 17軸

大きさ、可搬質量は異なるが、軸構成や制御システムは近しいため、比較試験の検証に使用可能と判断した

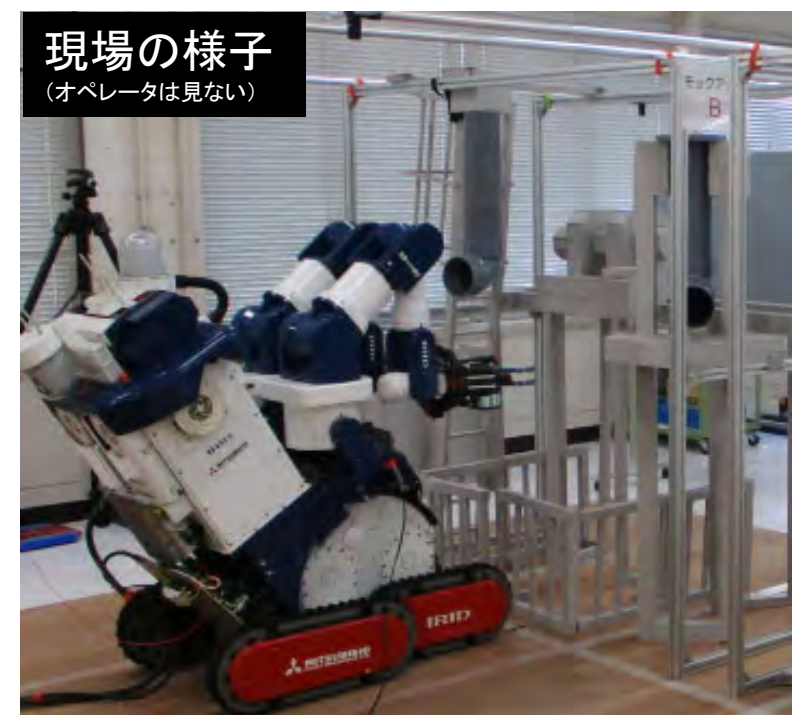
3. 比較試験の概要

比較試験の検証方法

- オペレータは、モニタを見ながらゲームパッドを操作して、モックアップに衝突させないようにマニピュレータ手先を指定されたゴール位置まで移動させる
- 1つの課題に対して、「軌道計画」「ティーチング」「手動操作」の3種類の操作方法で計測を行う
 - 開発技術 従来技術
- 3種類の操作方法について、それぞれ評価を行う
 - ・ 作業時間(ゴールに到達するまでの時間) ……作業効率の評価
 - ・ モックアップとの接近距離(後からログデータを解析) ……安全性の評価
 - ・ オペレータの負荷計測(アンケート、心拍計測、発汗計測、視線移動) ……オペレータ負荷の評価



オペレータの操作卓

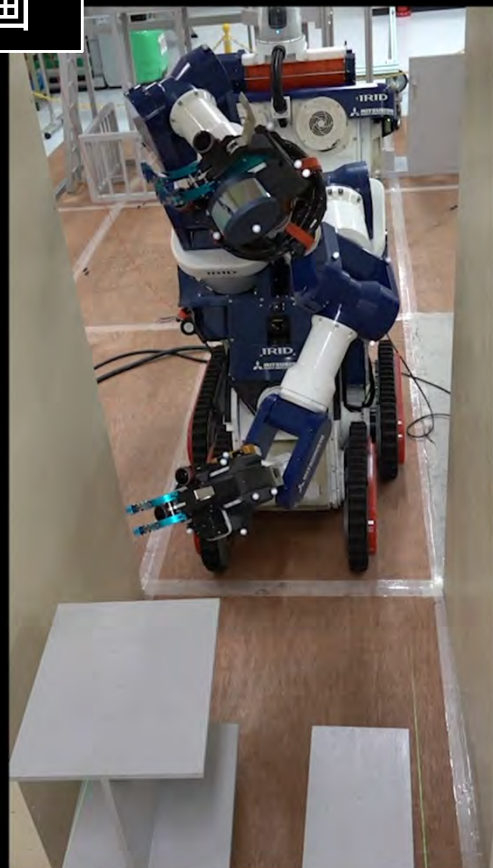


試験機(ロボット)と格納容器内を模擬したモックアップ

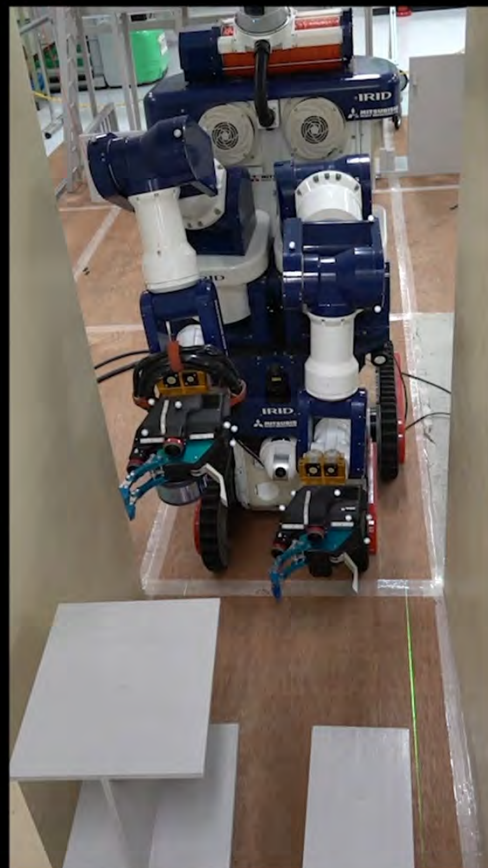
4. 比較試験の結果

軌道計画、ティーチング、手動操作の作業時間を比較検証した

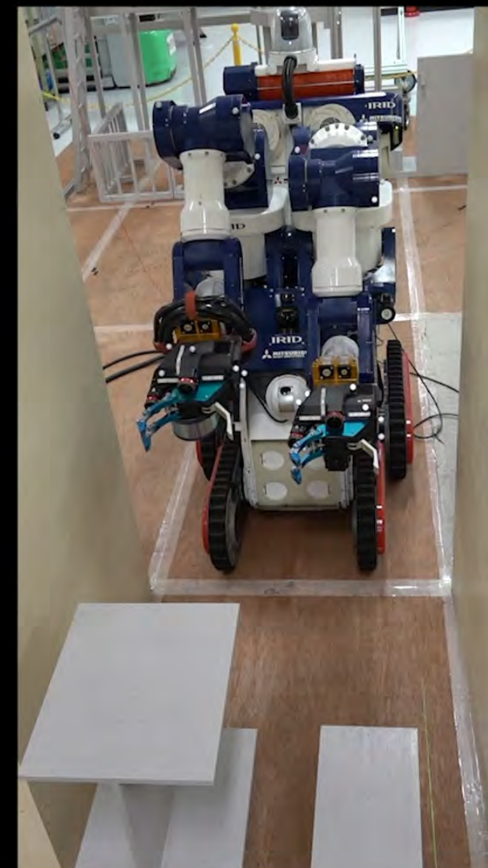
動画



軌道計画



ティーチング



手動操作

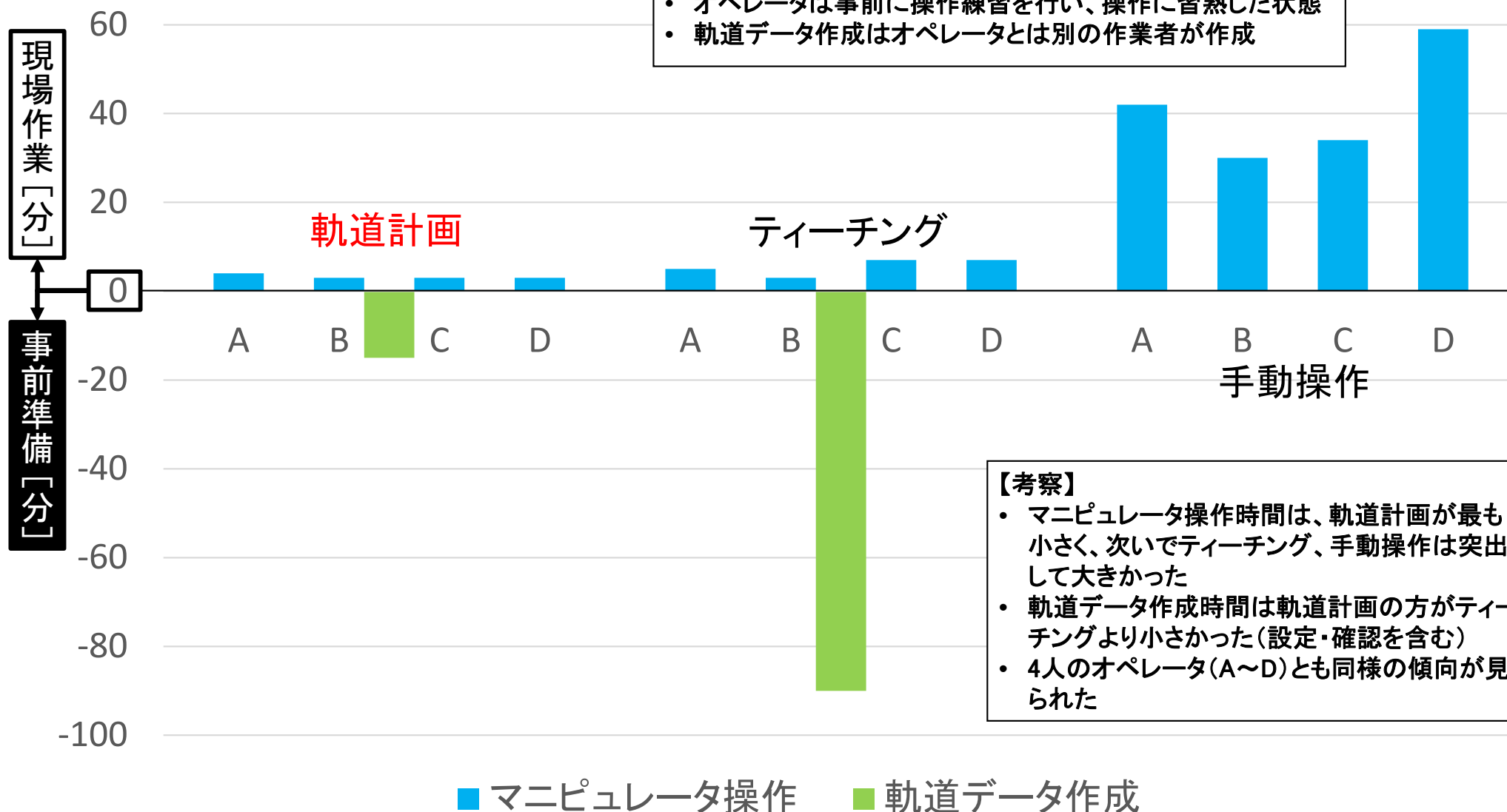
16倍速 01:15

4. 比較試験の結果

操作方法ごとの作業時間を比較した。
(前頁の動画はオペレータDのもの)

【備考】

- 4人のオペレータ(A~D)が3種類の操作方法で試験を実施
- オペレータA,Bは熟練者、Cは中級者、Dは初心者
- オペレータは事前に操作練習を行い、操作に習熟した状態
- 軌道データ作成はオペレータとは別の作業者が作成



【考察】

- マニピュレータ操作時間は、軌道計画が最も小さく、次いでティーチング、手動操作は突出して大きかった
- 軌道データ作成時間は軌道計画の方がティーチングより小さかった(設定・確認を含む)
- 4人のオペレータ(A~D)とも同様の傾向が見られた

5. まとめと今後の課題

● まとめ

- 視界不良かつ狭隘環境において、ロボットを遠隔操作するオペレータの作業負荷を軽減し、操作の効率化を図るため、遠隔操作支援システム(軌道計画)の開発を行った。
- 軌道計画について比較試験で検証を行い、有効であることを確認した。

【有効性の確認結果】

- マニピュレータ操作時間の短さ: 軌道計画 < ティーチング < 手動操作

90%低減

- 事前準備の短さ: (手動操作 <) 軌道計画 < ティーチング

80 %低減

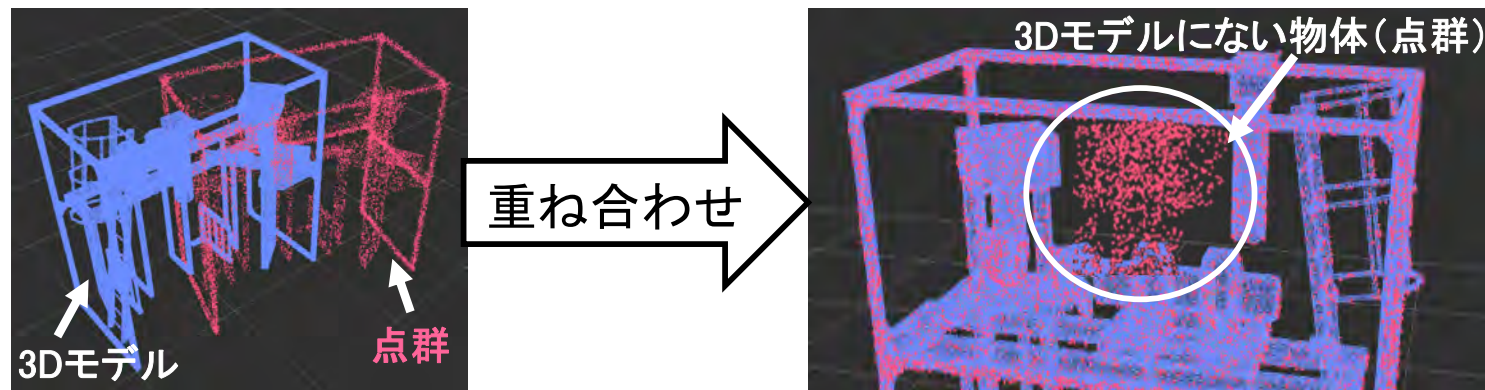
【要因】

- 手動操作では、オペレータが処理する情報量が多い → ヒューマンエラーを生みやすい
一点集中すると他がおろそかになる、手先が反転すると+/ーや左右を間違える 等
- ティーチングの現場作業は楽だが、事前準備が大変
(やっていることは手動操作そのもの)

5. まとめと今後の課題

● 今後の課題

- 作業環境モデル(3Dモデル)と現場の実物との違い、ロボットの設置誤差によるズレへの対応が必要
 - 現場でオペレータが、3Dモデルやロボットの位置を修正できる仕組みの開発
 - 現場で環境モデルの不足部分を計測・補完する仕組みの開発
 - 現場でオペレータが軌道計画を再計算できる仕組みの開発



実機ロボットに搭載したレーザセンサで取得した
点群データを画面上に重畳表示する

- 切断・把持回収など微調整が必要な施工動作は手動操作が主流になるため、手動操作でも干渉回避をアシストし、ヒューマンエラーを防止する仕組みが必要

MOVE THE WORLD FORWARD

mitsubishi
heavy
industries
group