

人×機械の遠隔融合システムの開発

－ 視覚的力触覚を利用した操作提案と基礎検証 －

春名正樹^{†1}^{†5}, 川口昇^{†1}, 猿田祐輔^{†1}, 星野隼人^{†1}, 岡本俊樹^{†1},
道田壘^{†2}, 上田賢^{†2}, 神田吉孝^{†3}, 佐藤亨^{†3}, 小池俊昭^{†4}, 荻野正樹^{†5}

概要：世界人口は増加傾向である一方、先進国では人口減による労働力不足が問題となっている。本論文では、その問題の解決策として、遠隔制御技術による人口の少ない地域から多い地域への作業委託というソリューションを提案する。その実現のためには、オペレータの操作インターフェースが単純で、かつ、一体感のある遠隔操作システムとなる。本論文では、その技術基盤として、セルフロック機構を採用した多指ハンド、直動リンク機構を採用した人型遠隔機械、及び、視覚的力触覚を採用した操作インターフェースから構成されるシステムを提案する。本提案システムの基礎的な作業実現性を技術検証機にて確認した。また、脳波計測を利用した視覚的力触覚による操作性評価の取組みについても記載する。

1. はじめに

20 世紀初頭に約 15 億人であった世界人口は、2000 年には 61 億人に到達し、2011 年には 70 億人を超える。その一方で、日本では人口減少と少子高齢化による労働力不足が懸念されている[1]。その解決策として自律ロボットの開発がある。AI 技術のロボットへの適用が期待されており、近年その進展は目覚ましい。特に、移動技術については Google の自動運転技術、及び、脚移動技術の発展は著しい[2][3]。一方で、人の手を代替できる精巧な自律手指制御の実現は数十年先であるとも言われている[4]。災害現場など高度な判断が必要となる現場での自律的な作業の実現は遠い。海外人材の積極的な活用も労働力不足のもう一つの有力な解決策と考えられている。実際、海外からの出稼ぎ労働者の数は増加傾向にあり、米独英では人口に占める移民比率は 2015 年に 10%を超えており先進国での労働力不足に貢献している[5]。しかし、出稼ぎ労働者の増加は地域生活での文化摩擦の問題等、解決すべき課題を内包している。

本論文では、上記のアプローチに代わる新たなソリューションとして、自律化で代替できない人作業について、海外等の遠隔地からでも労働力不足の補完を可能とする遠隔機械システムを提案する。出稼ぎ労働にかわる提案を行う理由は、労働者の生活環境を重要視しているからである。我々の所属グループでは、技術によって世界の人々の生活を向上させることを目的とし、Small World Project[6]としてインドネシアの無電化地域・電力不安定地域に暮らす人々との交流活動を行っている（図 1）。その活動を通して、慣れ親しんだ家族や友人、地域での生活が人間の幸福にとつ

て不可欠であると考え、生活と労働の両立の問題を考えてきた。提案する遠隔制御システムは、地域の生活環境を壊さずに収穫を可能にする可能性を秘めており、労働者の生活環境における幸福度を下げずに、労働力不足の問題・アクセス困難な地域や災害現場での作業の問題を解決し得る。また、図 2 に示すように遠隔機械システムは労働力不足だけでなく、遠隔地の観測施設の保守点検、頻発する自然災害対応やテレワークなど幅広い用途が考えられる。



図 1 Small World Project [6]



図 2 遠隔機械システムのアプリケーションイメージ

^{†1} 三菱電機(株)

^{†2} 三菱電機エンジニアリング(株)

^{†3} 三菱電機マイコン機器ソフトウェア(株)

^{†4} Mitsubishi Electric Research Laboratories

^{†5} 関西大学

本論文では、遠隔操作による人代替作業を可能とするために、安定した把持を目指したセルフロック機能を搭載した多指ハンドと、ハイパワー出力を可能とする直動リンク機構を有する人型遠隔機械を提案するとともに、操作インターフェースとしてオペレータが取付ける機器を最小限にするために物理的な力触覚のフィードバックを利用しない、視覚的な力触覚技術を適用した操作インターフェースを提案する。2章ではこれら2つの提案の基礎的な効果を検証するために構築したシステムについて記載する。3章では構築したシステムの有効性を実作業で検証した結果を述べる。4章ではオペレータの操作性を評価するために取り組みを始めた脳波計測方法とその結果の一例を紹介する。

2. 人×機械の遠隔融合システム

2.1 人型遠隔機械

11自由度を有する機械ハンド(片手)の各関節には、高減速ウォームギヤによるセルフロック機能が実装され、対象物形状に沿って安定した把持が可能である。17自由度を有する機械上半身(両手ハンド除く)の各関節には直動リンク機構が実装され、限られた体積と質量で高い推力を実現している。機械構造、及び、駆動範囲と推力設計値を図3に示す。これら技術は三菱電機(株)の大型望遠鏡事業で重量物の高精度な駆動を実現するために、セルフロック機構や直動リンク機構を採用した実績を活用している。例えば、TMT 分割鏡交換ロボット[7]にはこれらの機構に加えて、力覚制御技術[8]が適用されている。

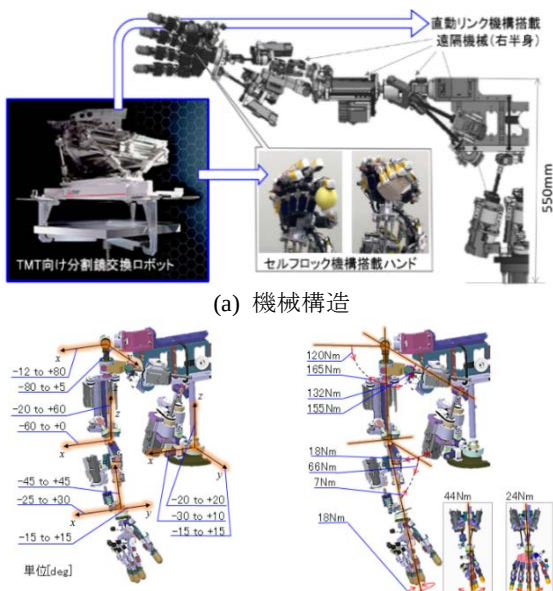


図3 人型遠隔機械 (技術検証機)

2.2 視覚ベースの人操作インターフェース

「一体感」のある遠隔操作技術として、力触覚を物理的にフィードバックする技術の開発が盛んに行われている。

一方、外科手術支援ロボットにおける力触覚提示の有効性が示されている[9][10]にも関わらず、da Vinci を操作する外科医からは、視覚によって力触覚提示が補われており力触覚提示は重要でないという意見がある[11]。

本開発では、遠隔機械カメラの映像に力触覚情報を AR 技術で視覚的に重畳することで、オペレータに物理的な力触覚提示を必要としない操作インターフェースを提供しながらも、「一体感」のある遠隔操作システムの実現を目指している。図4に操作インターフェースを示す。人への感覚伝達インターフェースは視覚提示デバイスのみのためシンプルな構成が可能である。機械への運動伝達は環境安定性の高い機械式の角度検出センサを利用している。



図4 視覚ベース操作インターフェース (技術検証機)

3. 技術検証機による作業実験

遠隔機械側のステレオカメラ映像をヘッドマウントディスプレイ (以後、HMD) に投影して、遠隔機械による作業実験を実施した。本検証では図5に示すように1[m]程度離れた場所に遠隔機械とオペレータを配置した。オペレータ側と遠隔機械側のコントローラは有線 LAN で接続した。使用した HMD は Oculus DK2 や HTC VICE であり、人視力換算で 0.1 程度と低い。直感的にはオペレータが直接見て操作した方がワークとハンドの状態が良く理解できると考えたが、結果的には解像度の低い HMD の操作性が高かったことは、人が視覚を中心とした身体マッピングを脳内でしていることを伺わせる経験であった。以下、図6から図11に示す作業実験は全て遠隔機械側のステレオカメラとオペレータ側の HMD を利用した。

図6から図9に示す作業実験は視覚的な力触覚フィードバックを利用せずに実施した。セルフロック機構を搭載した多指ハンド、及び、直動リンク機構を搭載した上半身機構により、軽く柔らかいボールから、重く硬いアルミ部材まで直感的な操作で遠隔操作が可能であった。

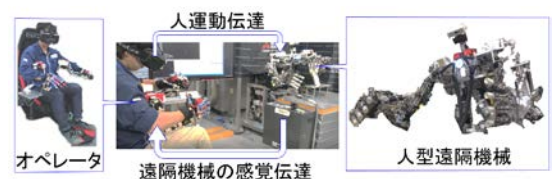
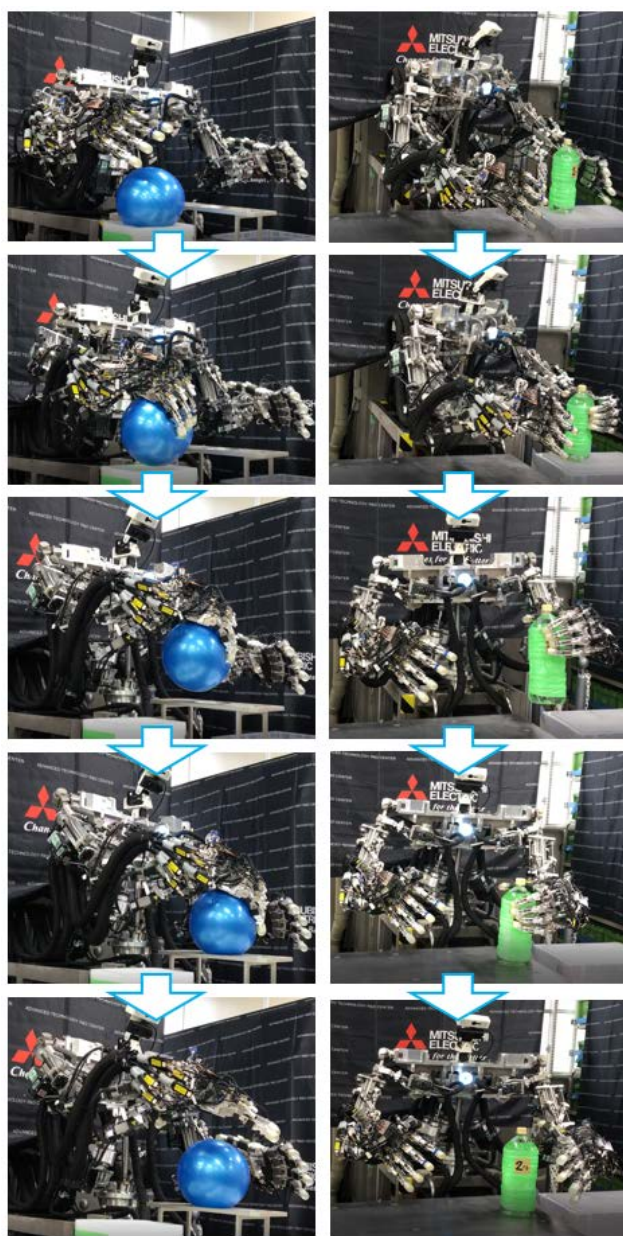


図5 システムの作業実験風景

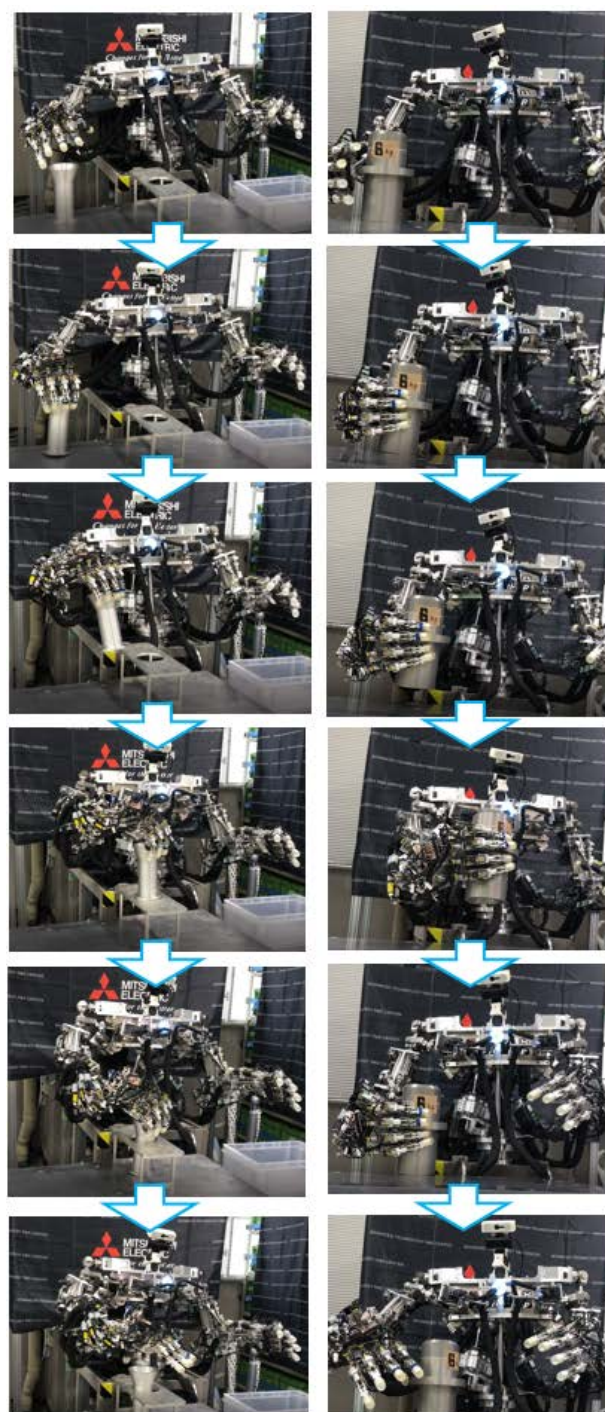


ボールの把持・運搬

2kg ペットボトルの
把持・運搬

図 6 作業実験(a)

(a) 「ボールの把持・運搬」，及び，「2kg ペットボトルの把持・運搬」の2つの作業は1回目の操作で作業に成功し，その後も概ね失敗することはなかった．変形しやすいワークを対象とする場合には，事前の人の経験値による予測とワーク変形量から，把持力を脳内で容易に想像可能であることを確認した．ハンドに搭載したセルフロック機構によりワークを安定して把持することが可能であった．また，ステレオカメラとHMDによる立体視をすることで，2kgのペットボトルを把持・運搬した後にワークを直立に置く作業も直感的に実施できた．

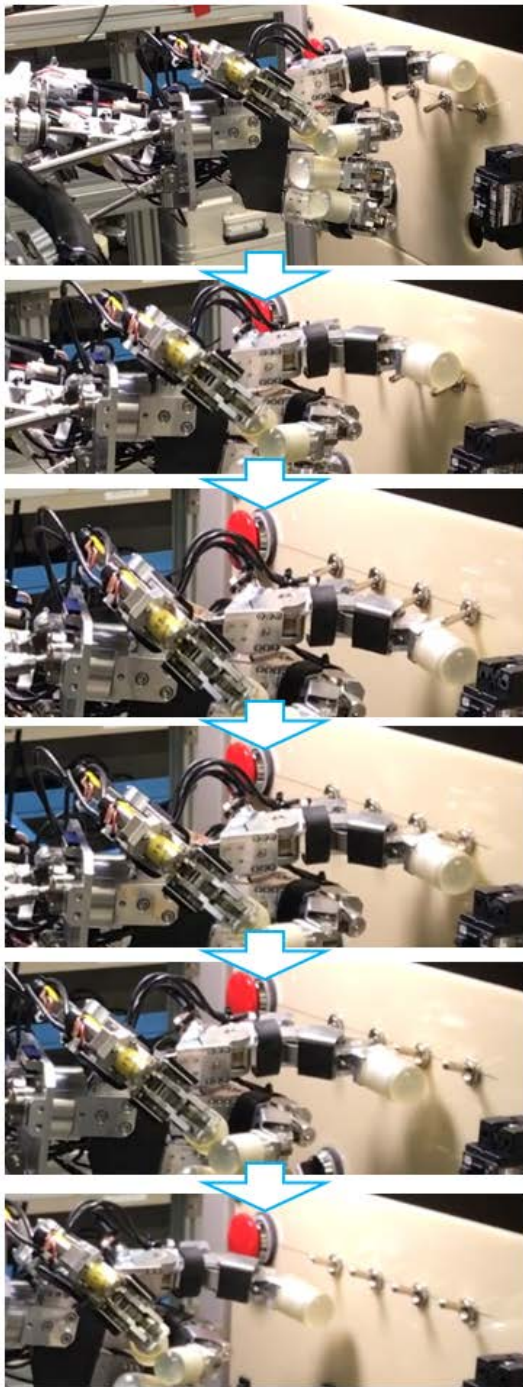


円筒の挿入作業

6kg アルミ部材の
把持・運搬

図 7 作業実験(b)

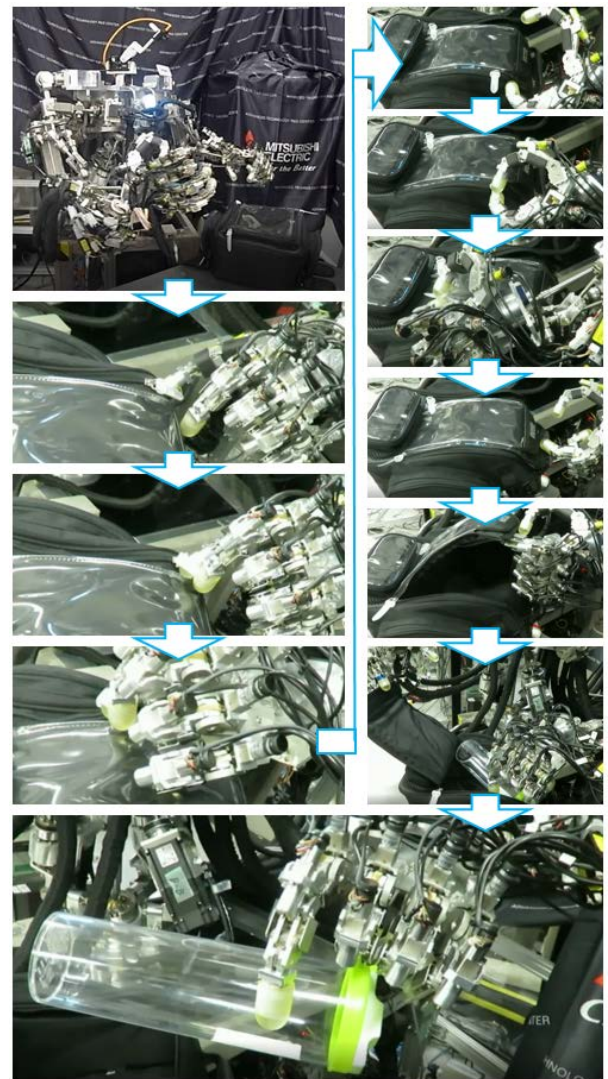
(b) 「円筒の挿入作業」，及び，「6kg アルミ部材の把持・運搬」はいずれも複雑な形状をしたアルミ部材を把持するために5回程度の操作練習が必要であった．「円筒の挿入作業」では円筒ワークの隙間は1[mm]程度であるが挿入作業が可能であった．6kgのワークも片手で把持，運搬が可能であることを確認し，直動リンク機構の有効性を確認できた．



トグルスイッチの操作

図 8 作業実験(c)

- (c) 「トグルスイッチの操作」は1回目の操作で作業に成功し、その後もほぼ失敗することはない。指先をスイッチ位置に的確に合わせることで、力を加えるベクトルを的確に合わせることで、スイッチ操作完了後は的確なタイミングで動作を停止する一連の作業が可能であることを確認した。使用したHMDは人視力換算で0.1程度と低いにも関わらず、人と同じ身体構造と視点からの操作により、いずれの作業もスムーズに実施することが可能であった。

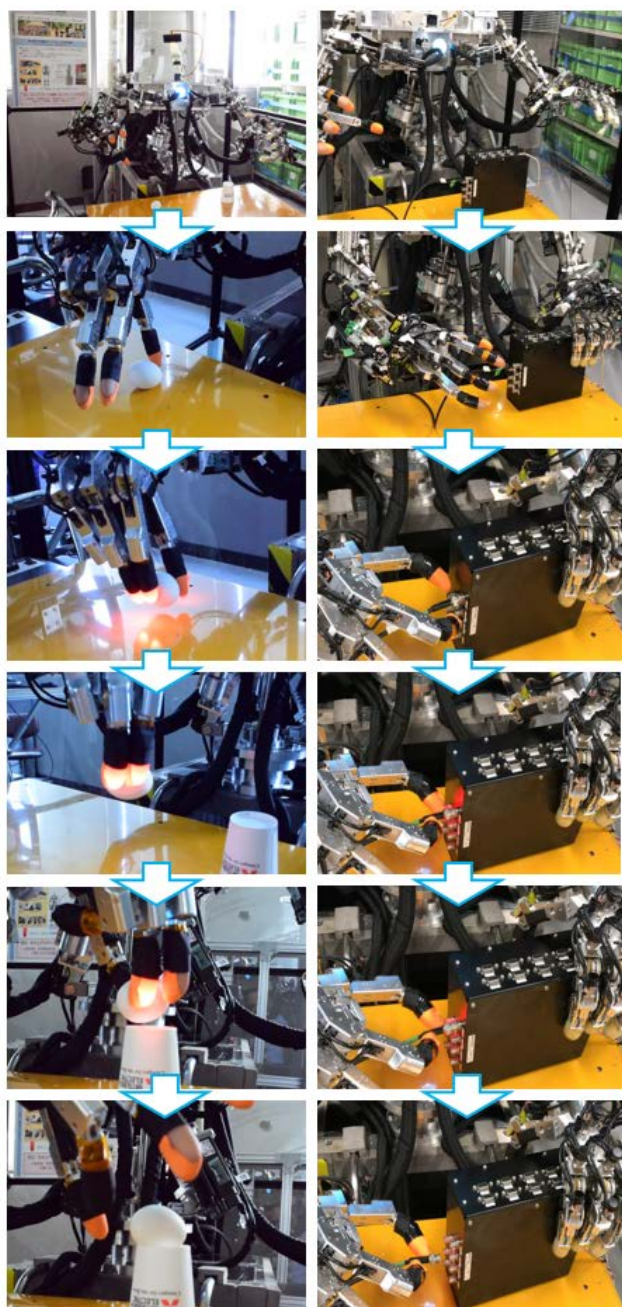


ファスナー操作と内容物の取出し

図 9 作業実験(d)

- (d) 「ファスナー操作と内容物の取出し」は両サイドにあるファスナーを開いた後に、ベルクロで固定された蓋を開けて、内容物のプラスチック円筒を取出す作業である。対向する2指でファスナーを的確に把持する必要がある。ファスナー把持のために10回程度の操作練習が必要であり困難であった。機械側の指先形状や、指先部材変更などのハードウェア対策が操作性向上に寄与すると考えられる。ファスナーを把持した後は、適切な方向にアーム操作する必要があるが、アームの操作は比較的容易であった。

図 10、及び、図 11 に示す作業実験は右手機械ハンド指先に圧力が付加された場合に点灯するLEDを取付け、視覚的力触覚フィードバックの操作性への影響を実作業において検証した。将来的には指先の圧力に応じて輝度や色合いが変化するCG映像を提示する計画である。



卵の把持・運搬

BNC ケーブルの引抜

図 10 作業実験 (e)

- (e) 「卵の把持・運搬」、及び、「BNC ケーブルの引抜」は、指先の LED 点灯によりワークに圧力がかかっていることが視覚的に理解でき、操作性が向上した。カメラ位置から死角になる指の把持状態を視覚的に確認することが難しい場合があるが、提案手法であれば視覚的力触覚情報を CG で死角位置となる指の把持状態を表示することが可能となる。本基礎実験では、卵を置いた台や BNC ケーブル接続ボックスが金属光沢を有していることから反射した LED の状況を理解することで確実な作業を実施することができた。この結果は提案する視覚的力触覚による遠隔機械操作が有効であることを示唆する。



半田付け

図 11 作業実験 (f)

- (f) 「半田付け」は、半田ゴテを親指、人差し指、中指を使って把持することができた。指先の LED 点灯によりコテに圧力がかかっていることがわかり把持操作を直感的にすることができた。ただし、使用した圧力センサが 1 つの指に 1 つしかなく、圧力がかかっているが LED 点灯しないこともあり改善の余地がある。

4. 生体信号による操作性評価

視覚的力触覚の操作性向上への有効性を検証するために、VR 空間内のランダムな位置に、ランダムなサイズで出現する立方体を把持して、所定の場所に運搬する実験環境を構築した。評価実験では、出現する立方体と指先が接触した場合に、視覚的効果が現れるケースと、視覚的効果が現れないケースで、被験者に 1 分間の作業を各々 3 回ずつ実施してもらった。被験者は HMD を被り、HMD 前に取付けられたハンド認識装置(LEAP MOTION)で VR 空間内のハンドを操作する。操作中、被験者は 14ch の脳波計測計(EEG)を頭部に被り脳波信号を同時に計測した。評価実験の風景を図 12 に示す。

計測した脳波計測結果は SCoT(Smooth Coherence Transform)により、脳内情報流として可視化処理をする。処理結果を図 13 に示す。14ch の電極を前頭葉・前部、前頭

葉、後頭葉、運動野、頭頂部/側頭葉の5つの部位にマッピングして処理をしている。図13の中の赤い矢印は脳内情報流の流れる方向（励起される時間順序）を表している。また、矢印の線の太さは情報流の量を現わしている。図13の上図のように、視覚的效果がない場合には複数個所の情報が感覚情報の統合・認知を司る頭頂部/側頭葉に出現していることから、VR空間内で欠如する力触覚情報を他情報から補完しようとしているのかもしれない。一方、図13の下図のように、視覚的效果がある場合には脳内情報流れが α 波、 β 波ともに、視覚效果がない場合と比較すると70%以上低減される結果となった。視覚的效果を重量することにより脳内情報流が低減し、操縦者の負担が軽減できる可能性が示唆された。

今後、被験者数を増やして視覚的力触覚の適用が遠隔操作に効果的であるかを追加検証するとともに、視覚效果の表現方法として効果的な表現を検討する予定である。

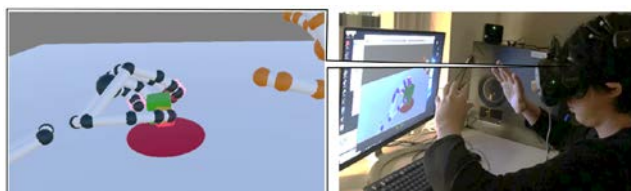
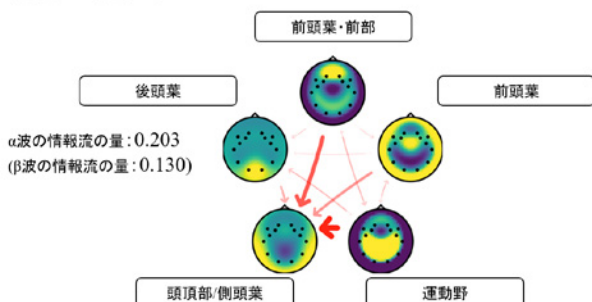


図12 UNITYを利用した視覚的力触覚效果の評価風景

視覚的效果なし



視覚的效果あり

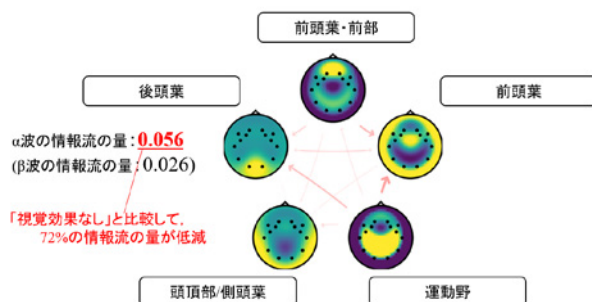


図13 SCoTによる脳波解析結果の一例

5. まとめ

本開発ではオペレータの操作インターフェースが単純で、かつ、一体感のある遠隔操作システムの実現を目指している。本論文では、その技術基盤として、セルフロック機構を採用した多指ハンド、直動リンク機構を採用した人型遠隔機械、及び、視覚的力触覚を採用した操作インターフェースから構成されるシステムを提案した。本提案システムの基礎的な作業実現性を技術検証機にて実験し、その有効性を示した。また、脳波計測を利用した視覚的力触覚による操作性評価の取組みを紹介し、被験者数が一人であるが、視覚的力触覚の遠隔操作への適用が操作性向上に貢献する可能性を確認した。

参考文献

- [1] “データブック国際労働比較2018”，独立行政法人 労働政策研究・研修機構，2018.
- [2] Hae-Won Park, Sangbae Kim, “The MIT Cheetah, an Electrically-Powered Quadrupedal Robot for High-speed Running”，日本ロボット学会誌，2014, vol. 32, no. 4, pp. 323-328.
- [3] Siyusan Feng, et al., “Optimization based full body control for the atlas robot”，IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2014, pp. 120-127.
- [4] “ソフトバンクロボティクスの新たな取組みに関する記者発表会/ロボットの進化”，SoftBank Robotics, 2017.
https://www.softbankrobotics.com/jp/set/data/news/info/20171120_a/20171120_01.pdf
- [5] 萩原 里紗，ほか，“労働市場のグローバル化と労働者意識”，日本労働研究雑誌/特集/グローバル化と労働市場，2018, No.669, pp.18-29.
- [6] “三菱電機グループと SDGs/Small World Project BOP 層の暮らしに向けた研究開発の取組”，三菱電機(株)，2018.
http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/csr/management/sdgs/pdf/small_world_project.pdf
- [7] “注目の研究・技術/次世代超大型望遠鏡 TMT「分割鏡交換ロボット技術」”，三菱電機(株)，2016.
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/spotlight/a28/index.html>
- [8] Masaki Haruna, et al., “Force control technology of segment mirror exchange robot for Thirty Meter Telescope (TMT)”，Proc. SPIE 9906, Ground-based and Airborne Telescopes VI, 2016
- [9] Chin-Hung King, et al., “Tactile Feedback Induces Reduced Grasping Force in Robot-Assisted Surgery”，IEEE Transactions on haptics, vol.2, no.2, 2009
- [10] N. Enayati, et al., “Haptics in Robot-Assisted Surgery: Challenges and Benefits”，IEEE Reviews in biomedical engineering, vol.9, pp.49-65, 2016
- [11] 川嶋 建嗣，“低侵襲な外科手術を支援するロボットにおける力触覚センシング”，日本ロボット学会誌/特集：触覚センサの要素技術・応用技術, vol.37, no.5, pp.25-28, 2019