



顔面運動を用いた複数の拡張肢の独立操作手法の検討

Exploring Independent Control of Multiple Supernumerary Limbs using Facial Movements

中村文彦¹⁾, 大谷翔生¹⁾, 木村朝子¹⁾, 柴田史久¹⁾

Fumihiko Nakamura, Shosei Otani, Asako Kimura, and Fumihisa Shibata

1) 立命館大学 情報理工学部 (〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150, f-naka@fc.ritsumeai.ac.jp)

概要: 人間の能力の向上を図るために, 第 3・4 の腕等の拡張肢を付与する試みや, その拡張肢の操作手法が研究されている. 本研究では, 顔面運動を第 3・4 の腕の 8 操作 (上下・左右・前後の 6 方向への移動, 手の開閉の 2 動作) にマッピングする手法について検討する. 我々は, バーチャル空間で第 3・4 の腕の 8 操作にマッピングしやすい顔面運動をユーザ実験から分析した. その結果を基に拡張肢の操作に顔面運動をマッピングした際のユーザビリティとタスク完了時間を評価した.

キーワード: 顔面運動, 拡張身体, Action Unit, 多自由度

1. はじめに

人間の能力を拡張する手法として, 身体に第 3・4 の腕といった拡張肢を付与する研究が進められている [1]. 拡張肢を用いることで, 複数のタスクの同時実行 [2] や作業支援 [3] などが可能になり, 生得的な身体限界を超えた行動が実現できる. こうした拡張肢の操作手法として, 様々な身体部位の動作を用いたインタフェースが提案されている. Sasaki らは足の動作を拡張肢の動作にマッピングする手法を開発した [4]. しかし, 足のように物理的なインタラクションに多用される部位を拡張肢の操作に用いると, それ以外の身体活動との干渉が生じてしまう.

そこで, 身体活動との干渉が少ない部位として, 顔面を用いた拡張肢の操作手法が提案されている [5, 6]. この手法では, 手の開閉や拡張肢の伸縮の 4 動作に対して顔面運動が割り当てられているが, 上下・左右方向への移動には頭部の姿勢に対応付けられており, ユーザは捜査対象となる拡張肢の方向に顔を向ける必要がある. したがって, ユーザの視界の外で自由に拡張肢を操作することは困難である.

本研究では, 第 3・4 の腕を独立して同時に操作できるように, 上下・左右・前後の 6 方向への移動と手の開閉の 2 動作への顔面運動をマッピングする手法について検討する. 我々は, 人間の表情を構成する最小単位である AU (Action Unit) を用い, 顔面運動への拡張肢へのマッピングの手法を探索した. AU の計測には Meta Quest Pro の表情認識機能を使用した. 我々は, まず, つもり制御を用いた実験によって拡張肢の各動作にマッピングしやすい顔面運動を探索した. 次の実験では, 実験 1 の結果を基に拡張肢の 8 動作に顔面運動に割り当て, 拡張肢を用いたピック・アンド・プレイスタスクを実施した際のユーザビリティを検証した.

2. 実験 1: 拡張肢操作にマッピングしやすい顔面運動の探索

本実験では, 顔面運動によって第 3・4 の腕を独立に操作する際に, ユーザが各操作にマッピングしやすい顔面運動をつもり制御を通して検証した (図 1). 我々は, 第 3・4 の腕を備えたアバターの右側の腕が動作している映像を提示し, 実験参加者がその操作をしているつもりになって顔面運動を行うように指示した. その際の AU のデータを収集・分析した. つもり制御の対象とした第 3・4 の腕の動作は, 物体の把持と解放に対応する手の開閉の 2 動作と, 空間内の上下・左右・前後の 6 方向への移動操作の計 8 動作だった. なお, 本実験において, 右側の拡張肢のみに限定してデータを収集したのは, 実験参加者の疲労を考慮したためである. また, 顔面運動の使用範囲として, 顔面全体を使用する条件と右側のみを用いる条件の 2 条件を設定した. これは, 将来的に複数の拡張肢の同時操作への応用において, 顔面の片側だけでも十分な操作が可能かを検証す

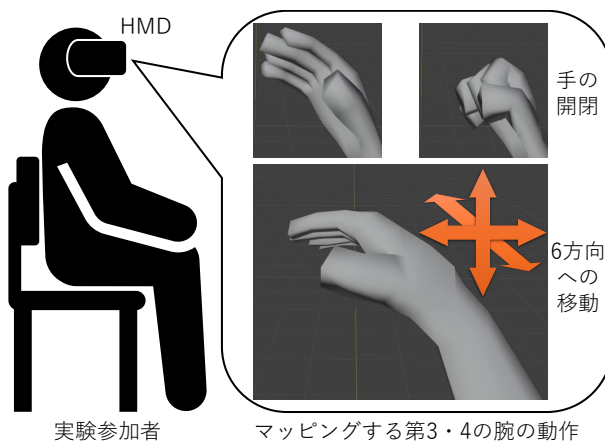


図 1: 実験 1 における実験セットアップとつもり制御の対象

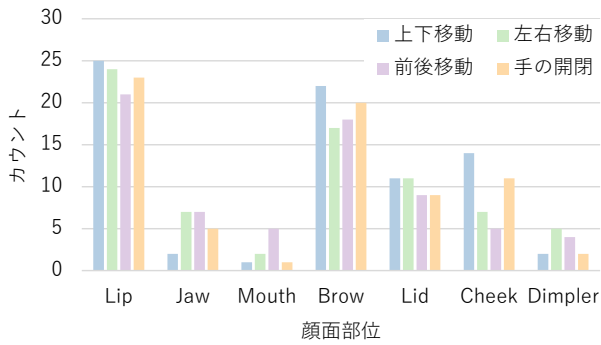
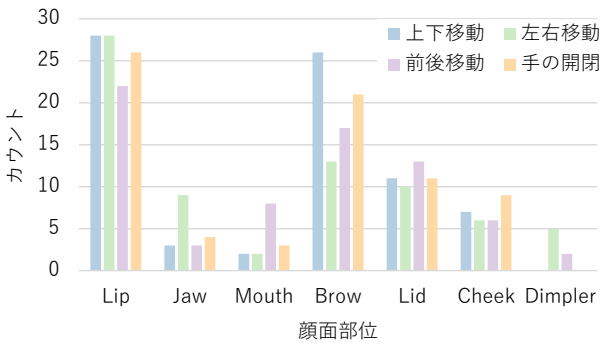


図 2: 実験 1 の結果. (左) 片側の顔面運動のみの条件. (右) 全体の顔面運動のみの条件.



るためである。

実験手順としては、まず、実験者が実験参加者に実験の内容について説明した。その後、実験参加者は HMD を装着し、位置調整を行った。そして、実験参加者は、HMD 上に提示された第 3・4 の腕の動作映像（手の開閉、及び、左右・上下・前後への移動）を視聴しながら、その動作をしたつもりになって顔を動かした。各動作の終了後には 30 秒間の休憩を設けた。条件の順番はカウンターバランスをとるように、実験参加者ごとにランダムに設定した。実験参加者は 20 代の男性の学生 8 人だった。

顔面運動の分析には、Meta Quest Pro によって計測した AU のデータを用いた。本研究では、拡張を肢視線と独立に操作可能にする手法を探索していることから、視線と直接的に関連する目の動作にかかわる AU は分析対象から除外した。分析手順としては、まず、各動作における各 AU のデータ内で最小値と最大値の差分を計算し、変動幅が大きい上位 10 個の AU を抽出した。さらに、抽出した AU の中で、Lip・Jaw・Mouth・Brow・Lid・Cheek・Dimpler の 7 つの顔面部位の単語を含む AU 数を集計した。この集計結果から、各拡張肢動作に対して、どの顔面部位に関連する動作が多く関与していたかを調査した。

2.1 結果・考察

各条件における分析結果を図 2 に示す。分析結果から、顔面全体を使用した条件と顔面右側だけで使用した条件の間での傾向に大きな差は見られなかった。しかし、手の開閉動作については、Jaw, Lid, Cheek を含む AU のカウント数の傾向に違いが見られた。各動作において、各顔面部位が含まれていた AU のカウント数を見ると、上下移動では Lip, Brow, Cheek を含む AU、左右移動では Jaw, Lid, Dimpler を含む AU、前後移動では Jaw, Mouth を含む AU、手の開閉では Lip, Brow, Cheek を含む AU が多い傾向が見られた。各動作において、カウント数が多かった顔面部位を見ると、上下移動では Lip, Brow, Cheek を含む AU、左右移動では Jaw, Lid, Dimpler を含む AU、前後移動では Jaw, Mouth を含む AU、手の開閉では Lip, Brow, Cheek を含む AU が多い傾向が見られた。

分析結果から、第 3・4 の腕の 8 動作に AU を対応付ける際には、マッピングする傾向のある顔面部位に重複が見られた。しかし、同一の顔面部位を複数の動作に対応付けるこ

表 1: 拡張肢の操作に対応させた AU

拡張肢の動作	左の拡張肢	右の拡張肢
開く	左頬を萎ませる	右頬を萎ませる
閉じる	左頬を膨らます	右頬を膨らます
左移動	顎を左に動かす	左にくぼを作る
右移動	右にくぼを作る	顎を右に動かす
上移動	左眉を挙げる	右眉を挙げる
下移動	左眉を下げる	右眉を下げる
前移動	唇を前方+ 口を左に	唇を前方+ 口を右に
後移動	左下唇を吸い込む	右下唇を吸い込む

とは、第 3・4 の腕の操作時にユーザを混乱させたり、誤作動を引き起こす可能性がある。したがって、異なる動作には異なる顔面部位をマッピングすることが望ましいと考えた。そこで、我々は各動作を割り当てる AU について、第 3・4 の腕の上下移動には Brow を含む AU、左右移動には Jaw を含む AU、前後移動には Lip と Mouth を含む AU、手の開閉には Cheek を含む AU が適当と考えた。実験 2 では、このマッピングの方針に基づき、各動作に割り当てる顔面部位の中で、特に最小値と最大値の差が大きかった AU を第 3・4 の腕の操作に対応付けた（表 1）。

3. 実験 2: 顔面運動を用いた拡張肢操作におけるユーザビリティ評価

本実験では、顔面運動を用いて第 3・4 の腕を独立に制御した際のユーザビリティを検証した。実験参加者は第 3・4 の腕を用いたピック・アンド・プレイスタスクを実施した。ユーザビリティの評価には SUS (System Usability Scale) を用いた。

第 3・4 の腕の制御に用いる顔面運動は、実験 1 の結果に基づいて決定した。第 3・4 の腕の各動作と対応付けた AU を表 1 に示す。第 3・4 の腕の動作は、Meta Quest Pro によって認識した AU の値が閾値を超えた時に対応する動作が発生するように制御した。第 3・4 の腕の手の位置の制御



図 3: 実験 2 で使用したアバターとゴールの配置

には, Final IK¹を用いた。

本実験では, まず, 実験者が実験参加者に実験の内容と AU と第 3・4 の腕のマッピングについて説明した。そして, 実験参加者は椅子に座り, HMD を装着した。本番のタスクに先立ち, 実験参加者が十分に顔面運動による第 3・4 の腕の操作に慣れるよう, ピック・アンド・プレイタスクの練習を行った。その後, 本番タスクのフェーズに移行した。実験参加者は, 前方に出現するボールを第 3・4 の腕を用いて把持し, 実験参加者の真正面に配置されたゴール地点までボールを移動させて解放するタスクを 10 回繰り返した。タスク完了後, 実験参加者は HMD を外し, SUS の質問票に回答した。実験参加者は 20 代の男性 3 名だった。

3.1 結果・考察

各実験参加者の SUS のスコアの結果を図 4 に示す。全体の SUS スコアの平均は 33.3 であった。実験参加者からのコメントとしては, 上下方向の動作は比較的容易であり, 開閉の動作は他の動作よりも簡単だったという評価が得られた一方で, 第 3・4 の腕を内側方向への移動が難しかったことや, 動作中に意図しない動作が発生しやすいという課題が指摘された。また, 長時間の操作に伴う口周辺の筋肉の疲労によるストレスを感じた意見も得られた。

本実験での SUS スコアは低くなった要因として, 意図しない動作が発生しやすいことが挙げられる。意図しない動作が発生した要因としては, 実験参加者が顔を片側だけ動かすことが難しかった点と, 本実験で使用した Meta Quest Pro の表情認識機能の特性によって片側だけの AU の認識が難しかった点が考えられる。

前者については, 実験参加者が左側の顔面部位を動かしたときに, 意図せず同時に別の顔面部位も動いてしまうことである。別の顔面部位が動いたことで, その動作を Meta Quest Pro が検出し, 結果として, 拡張肢の想定しない操

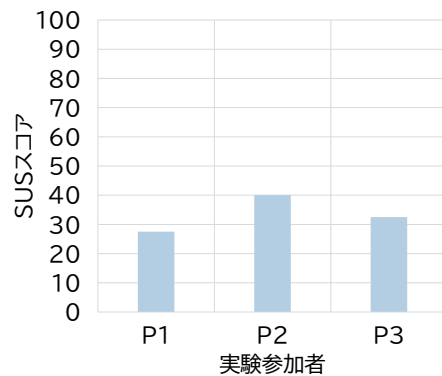


図 4: 実験 2 の結果: 各実験参加者の SUS スコア

作につながったと考えられる。この点については, 顔面運動とマッピングする拡張肢の適切な動作数について検討が必要である。

後者については, Meta Quest Pro が顔面全体を動かした場合と, 片側の顔面を動かした場合で計測した AU の最大値が変わってしまうことである。Meta Quest Pro は顔面全体を動かしたときには, 計測した AU は 0.0 から 1.0 までの間で変動するが, 片側だけしか動かさない場合は, 0.0 から約 0.4 の間で変動することが観察された。これは, Meta Quest Pro の表情計測機能は HMD ユーザの表情をアバターに反映するための機能であり, 拡張肢の操作などへの応用を目的としていないためであると考えられる。今後は, 拡張肢の動作と AU を機械学習によって対応付けることで, 表情認識機能の特性による影響を受けにくい操作手法を検討する。

4. 結論

本研究では, 顔面運動を用いた第 3・4 の腕の独立に操作する手法の検討を行った。我々は, 第 3・4 の腕における上下・左右・前後の 6 方向への移動と, 手の開閉の 2 動作の計 8 動作と対応付けしやすい AU を模索した。実験 1 では, 実験参加者に対して第 3・4 の腕の各動作を提示し, その操作をしているつもりになって顔面運動を行った際の AU のデータを分析した。分析した結果に基づき, 各動作に割り当てる AU を決定した。実験 2 では, 第 3・4 の腕の各動作に AU を対応付けた状態でピック・アンド・プレイタスクを行った際のユーザビリティを評価した。実験結果から, 実験参加者の意図せずに発生する顔面運動やマッピングする動作の選定がユーザビリティの向上には不可欠であることが示唆された。今後は, より安定した操作を実現するために, マッピングする動作の選定や, 拡張肢の操作と AU を機械学習によってマッピングする手法についても検討する。

謝辞 本研究は, JSPS 科学研究費 (24K20823) の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] Domenico Prattichizzo, Maria Pozzi, Tommaso Lisini Baldi, Monica Malvezzi, Irfan Hussain, Simone

¹Final IK, <https://assetstore.unity.com/packages/tools/animation/final-ik-14290>. アクセス日: 2025 年 7 月 14 日

- Rossi, and Gionata Salvietti. Human augmentation by wearable supernumerary robotic limbs: review and perspectives. *Progress in Biomedical Engineering*, Vol. 3, No. 4, p. 042005, sep 2021.
- [2] Christian I. Penalzoza and Shuichi Nishio. Bmi control of a third arm for multitasking. *Science Robotics*, Vol. 3, No. 20, p. eaat1228, 2018.
- [3] Federico Parietti and Harry Asada. Supernumerary robotic limbs for human body support. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 32, No. 2, pp. 301–311, 2016.
- [4] MHD Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Kai Kunze, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. Metaarms: Body remapping using feet-controlled artificial arms. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, p. 65–74, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [5] 福岡正彬, Adrien Verhulst, 中村文彦, 滝澤瞭, 正井克俊, 北崎充晃, 杉本麻樹. Facedrive : 顔表情による装着型ロボットアーム操作手法の提案. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 4, pp. 451–461, 2020.
- [6] Masaaki Fukuoka, Fumihiko Nakamura, Adrien Verhulst, Masahiko Inami, Michiteru Kitazaki, and Maki Sugimoto. Sensory attenuation with a virtual robotic arm controlled using facial movements. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 30, No. 7, pp. 4023–4038, 2024.