



# 視覚・力覚フィードバックで拡大した手指運動によって 運動イメージの増強を図るリハビリ支援システム

池田開<sup>1)</sup>, 木村浩彰<sup>1)</sup>, 平田和彦<sup>1)</sup>, 来間千晶<sup>1)</sup>, 栗田雄一<sup>1)</sup>

Kai IKEDA, Hiroaki KIMURA, Kazuhiko HIRATA, Chiaki RAIMA, and Yuichi KURITA

1) 広島大学

**概要:** 近年, 脳の可塑性を応用したニューロリハビリ技術が期待されている. 本研究では, ヘッドマウントディスプレイのハンドトラッキング技術で取得できる手指の各関節値を用いてバーチャルハンドのリアルタイム動作を表示するシステム, ならびに空気圧人工筋によって手指運動をアシストするシステムを開発した. 本稿では, 腕の筋電信号を基に, バーチャルハンドの手指を実際の手指の動きよりも大きく動作させたときに, 両動作の一致感へ与える影響を考察し, 視覚・力覚フィードバックによる拡大が運動機能向上に有用である可能性を示した.

**キーワード:** 提示, 空気圧人工筋, 仮想現実, リハビリ

## 1. はじめに

運動ニューロン疾患は運動神経細胞が変性する病気の総称であり, 筋力低下を主な症状とする. 治療薬での完全な治癒は困難で, リハビリとの併用が必要不可欠である. 現在は運動の繰り返しを行う促通反復療法 [1] が主なリハビリとして行われているが, 他動的な運動であり, 神経の再構築が困難であると報告されている. そこで, 自発的な運動を行うことで脳機能を効率的に変化させるニューロリハビリの効果が期待される [2]. ニューロリハビリの例として, 従来, 意思に沿った動作をアシストするロボットスーツ HAL による力覚を用いた研究 [3] や, 脳の錯覚を利用したミラー療法による視覚を用いた研究 [4] が行われており, 自分の動作と目に映る動作の一致感, および自分が運動を引き起こす感覚を指す運動主体感の誘起によって, 運動機能の向上が報告された [5]. また, 小型・柔軟といった特長を持つ空気圧人工筋 (Pneumatic gel muscle. 以下, PGM) は従来, 持ち上げ動作の負担軽減を目指した腰補助用スーツ [6] 等に応用されてきた. さらに, 牧野らは, 運動イメージを用いながら運動を行うと, 視覚と筋感覚との連合を形成しやすくなると報告している [7]. よって, 動作映像による視覚提示と, PGM を用いた装具による力覚提示を同時に行うニューロリハビリ支援システムが運動機能向上に期待できる. また, 後藤らは適切な映像の強調による運動感覚の増強を報告しており [8], 映像の拡大と運動アシストを同時に行うことで, イメージした運動と視覚・筋感覚からのフィードバックとの一致が期待できる.

本研究では, HMD のハンドトラッキングで取得した手指の関節値を基に, リアルタイムでの動作映像を提示する VR システム, ならびに PGM を動力源とするアシストグローブに取り付けた 6 軸加速度センサの値をトリガーとし, 手指の動作支援を行うシステムを構築する. そして, 手指よりバーチャルハンドの指関節角度が大きい時 (図 1) に指関節運動のアシストがあると, 動作の一致感に影響するかという点に着目し, 視覚・力覚フィードバックによる手指運動の拡大が運動機能向上に有用であるかを検証する (図 2).

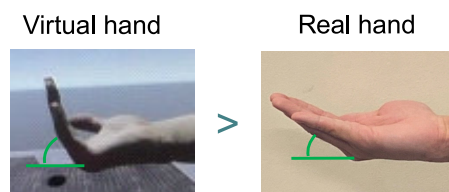


図 1 バーチャルハンドの指関節角度の拡大



図 2 本研究のコンセプト

## 2. ニューロリハビリ支援システム

### 2.1 システム構成

今回構築した視覚と力覚の同時フィードバックを行うニューロリハビリ支援システムの概要を説明する. 本システ

ムでは、HMD (Facebook Technologies 製 Oculus Quest.) のハンドトラッキングで取得した手指各関節の回転座標を基に、バーチャルハンドがリアルタイム動作を行う視覚提示システム、ならびに右手の屈曲動作に応じて PGM を動力源とするアシストグローブ (ダイヤ工業製 DARWING Power Assist Glove) が屈曲動作を起こす力覚提示システムを構築した。視覚フィードバック部の構成図を図 3 に、力覚フィードバック部の構成図を図 4 に示す。また、視覚と力覚の同時フィードバックを行うシステム全体の様子を図 5 に示す。

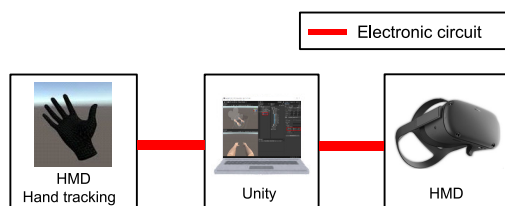


図 3 視覚提示システム

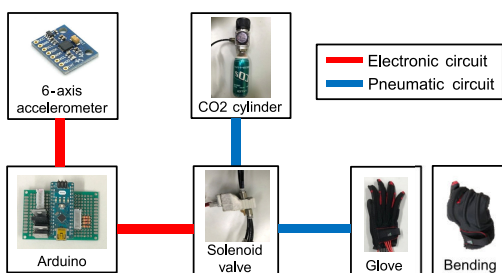


図 4 力覚提示システム



図 5 構築したシステム

## 2.2 運動意図推定部

装着者の運動意図を推定するために手の屈曲角度を用いる。アシストグローブの甲側中指第 2-第 3 関節に取り付けた 6 軸角速度センサ (MPU-6050) から手の屈曲角度を取得し、マイコン Arduino UNO でデジタル信号へと変換する。変換には、測定される屈曲角度が設定する任意の閾値を超えたとき

ON-OFF を示す制御信号を出力するプログラムを実装する。患者が使用する状況を見据え、手の平を上に向けた水平状態から 8 度以上の屈曲動作で ON の信号を出力するプログラムとした。なお、水平状態はその都度、キャリブレーションを行うことで決定している。この変換された信号を基に、力覚フィードバック部でグローブのアシスト動作を行う。

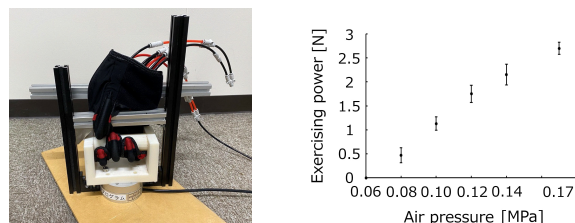
## 2.3 視覚フィードバック部

提示映像には Unity で作成したバーチャルハンドを用いる。HMD のハンドトラッキングで取得した手指各関節の回転座標をバーチャルハンドの各関節に適用することで、バーチャルハンドをリアルタイムに動作させる。なお、全ての軸方向の回転座標を適用すると、バーチャルハンドの動作が大きくぶれるため、回転軸方向の回転座標のみ (親指は y 軸、親指以外は z 軸の回転座標) を適用した。映像は HMD により仮想空間を示し、装着者に没入感と臨場感を与える。

## 2.4 力覚フィードバック部

アシストグローブの構造は手から近い順に伸展用のエアバッグ、グローブ繊維、PGM、ゴム繊維となっている。PGM は空気供給によって収縮する性質を持ち、供給時にはグローブ繊維よりも柔らかいゴム繊維が PGM と同方向へ曲がることでグローブは屈曲動作を行う。

グローブの発揮力測定に用いた装置を図 6(a) に示す。z 方向にかかる力を測定できる力センサを用い、空気圧を 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.17 [MPa] と変えながら、親指を支点としたそれ以外の 4 本の指で加わる力を各 10 回測定した。各空気圧における平均発揮力の結果を図 6(b) に示す。図 6(b) より、発揮力は空気圧に比例し、最大発揮力はおよそ 2.8 [N] であることが確認できた。



(a) 測定装置

(b) 測定結果

図 6 グローブから出力されるアシスト力

## 3. 評価実験

### 3.1 実験方法

21-25 歳の健常者 10 名 (男性 9 名, 女性 1 名) の被験者に対し、視覚提示として HMD を、力覚提示として右手にグローブを装着し、手指を目標角度 ( $\theta_{real} = 30$  度, 60 度) に到

達するよう屈曲動作を求めた。被験者が手指の屈曲角度を確認できるよう、グローブに取り付けた 6 軸加速度センサから得られた屈曲角度を示すゲージを HMD 上に提示した。実験条件として力覚提示にはアシスト有無の変更を、視覚提示には事前に作成された映像による手指の最終到達角度  $\theta_{vr}$  (各指第 2-第 3 関節角度を  $\theta_{vr}$  として作成) の変更をそれぞれ以下の 3 条件として設定し (制御信号が ON で一定の場合、各  $\theta_{vr}$  到達までは約 0.5 [s] として作成)、組み合わせた 9 試行をランダムに提示した。そして手指の各目標角度  $\theta_{real}$  に対して提示条件を 2 回分 (18 試行) 行った。視覚条件に設定する  $\theta_{vr}$  の違いを、目標角度  $\theta_{real} = 30$  度の場合を例にとって図 7 に示す。また、実験の評価方法として、7 段階評価を用いて「バーチャルハンドの動きは自分が行った動きと一致しましたか」という主観評価アンケートに各試行終了後に回答を求めた [9]。主観評価アンケートに用いた表を図 8 に示す。なお、回答選択肢の「7」が最も高い一致感を表しており、被験者には事前に数字の指す意味を説明している。

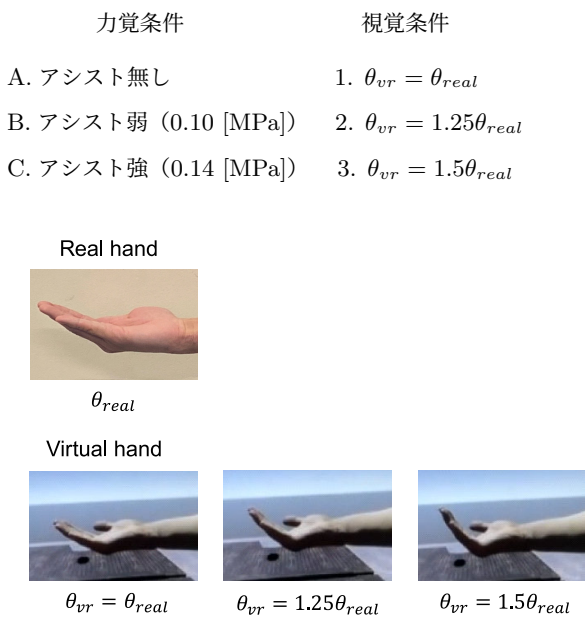


図 7 実際の指の角度とバーチャルハンドの指の角度

Did the movement of the virtual hand match the movement you made?							
	1	2	3	4	5	6	7
Trial 1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trial 2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trial 3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trial 4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trial 5	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trial 6	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trial 7	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trial 8	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trial 9	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

図 8 アンケート項目

### 3.2 実験結果と考察

縦軸を全平均評価値、横軸を提示条件とし、図 9 に  $\theta_{real} = 30$  度の場合の結果を、図 10 に  $\theta_{real} = 60$  度の場合の結果を示す。検定には各条件間全ての組み合わせにおいて多重比較 (Tukey 法) を用い、有意水準を 5% に設定した。図 9 より、同力覚条件における結果を比較すると、本来、実際的手指と同じ角度映像 ( $\theta_{vr} = \theta_{real}$ ) での一致感が最も高いと考えられるが、手指より大きな角度映像 ( $\theta_{vr} = 1.25\theta_{real}$ ,  $1.5\theta_{real}$ ) を提示した時も同等の一致感であることが確認できた。また、一部の同視覚条件 (提示映像の最終到達角度  $\theta_{vr} = \theta_{real}$ ,  $1.25\theta_{real}$  の条件) 時においては、表 1 より、アシストが無い条件と強いアシストがある条件間で有意な差が見られ、アシストが無い方が一致感が高いことが示された。

さらに、図 10 より、同力覚条件における角度映像  $\theta_{vr} = \theta_{real}$  と  $\theta_{vr} = 1.5\theta_{real}$  条件時の平均評価値を比較する。表 2 より、各条件間で統計的な有意差は確認できなかったものの、比較的強いアシストがある方が一致感が上昇するという傾向が確認できた。この理由として、実際的手指とバーチャルハンドの角度映像が一致していないにも関わらず、指関節運動のアシストと指関節角度が拡大された視覚提示によって、手指の動いた感覚が増強し、動作の一致感が高まった可能性がある。このことから、比較的大きな指関節角度の屈曲を行う場合には、視覚・力覚フィードバックにより拡大した手指運動が運動機能の向上に有用である可能性が示された。

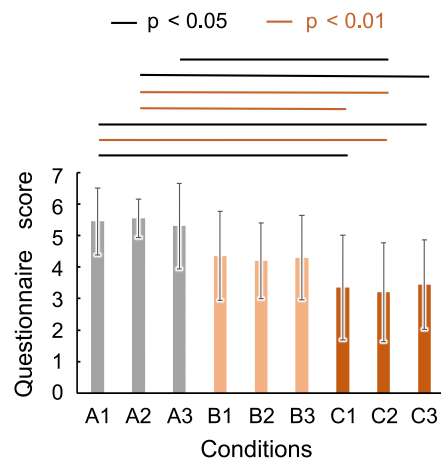


図 9 実験結果  $\theta_{real} = 30deg$

表 1 統計解析の結果  $\theta_{real} = 30deg$  (同視覚条件下)

条件	平均値の差	下限	上限	p 値
C1-A1	-2.10	-4.09	-0.105	0.0313
C2-A2	-2.35	-4.34	-0.355	0.00938
C3-A3	-1.85	-3.84	0.145	0.0908

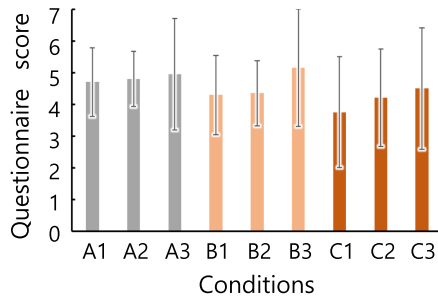


図 10 実験結果  $\theta_{real} = 60deg$

表 2 統計解析の結果  $\theta_{real} = 60deg$  (同力覚条件下)

条件	平均値の差	下限	上限	p 値
A3-A1	0.250	-1.99	2.49	1.00
B3-B1	0.850	-2.19	2.29	1.00
C3-C1	0.750	-1.49	2.99	0.978

#### 4. 今後の課題と展望

本論文では、HMD のハンドトラッキングによる手指のリアルタイム動作を行う視覚提示システム、ならびに手の屈曲角度をトリガーとしたアシストグローブの動作によって、手の屈曲運動を支援する力覚提示システムの構築を行った。そして、視覚・力覚フィードバックにより拡大した手指運動が動作の一致感へ及ぼす影響を調べ、本システムが運動機能向上に有用である可能性が示された。一方で、現状のシステムでは、運動を推定する際に屈曲角度を用いており、患者のわずかな運動を検出するには精度が低く、正確な運動推定が行えないという問題点が挙げられる。また、本実験における提示映像は、事前に作成した角度映像を用いており、正しい最終到達角度や適切な屈曲速度が提示できていないという問題点が挙げられる。今後は、患者の運動を推定するため、微小な筋電を用いて運動推定を行うことやリアルタイム動作映像を用いた実験を行うこと、さらには実際の患者での実験を検討していく。なおこの成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務により実施されている「健康長寿を楽しむスマートソサエティ・主体性のあるスキルアップを促進する AI スマートコーチング技術の開発」の結果、得られたものである。

#### 参考文献

- [1] 木佐俊郎, 酒井康生, 三谷俊史, 小野恵司. 回復期脳卒中片麻痺患者のリハビリテーションに促通反復療法を取り入れた場合の片麻痺と日常生活活動への効果. *The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine*, Vol. 48, No. 11, pp. 709–716, 2011.
- [2] 大内田裕, 須藤珠水, 出江紳一. リハビリテーションにおける脳内身体表現と評価指標. 計測と制御, Vol. 56, No. 3, pp. 181–186, 2017.
- [3] 長谷川真人, 山海嘉之. ロボットスーツ hal® 福祉用を用いた歩行練習の効果: 慢性不全脊髄損傷者に対する症例研究. *理学療法科学*, Vol. 29, No. 1, pp. 151–156, 2014.
- [4] 堀場充哉, 清水陽子, 佐橋健斗, 野島一平, 川嶋将司, 植木美乃, 和田郁雄. 運動技能学習に対するミラーセラピーと経頭蓋直流電気刺激法の併用療法の有効性. *理学療法科学*, Vol. 43, No. 2, pp. 168–169, 2016.
- [5] Kazumichi Matsumiya. Awareness of voluntary action, rather than body ownership, improves motor control. *Scientific reports*, Vol. 11, No. 1, pp. 1–14, 2021.
- [6] 佐藤裕, 何佳欧, 小林寛征, 村松慶紀, 橋本卓弥, 小林宏. 腰補助用マッスルスーツの開発と定量的評価. *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 78, No. 792, pp. 2987–2999, 2012.
- [7] 牧野均, 生駒一憲ほか. [査読論文] 人称イメージと三人称イメージでの運動イメージ課題を用いた場合の脳活動の比較研究: 運動イメージ課題をリハビリテーションに用いる場合の効果的方法についての検討. *北海道文教大学研究紀要 = Bulletin of Hokkaido Bunkyo University*, No. 40, pp. 55–68, 2016.
- [8] 後藤玲子, 工藤博章, 佐藤耕平, 堀田典生, 石田浩司, 大西昇. 自己運動感覚を誘導する視覚刺激に対する生体反応の分析. *映像情報メディア学会誌*, Vol. 60, No. 4, pp. 589–596, 2006.
- [9] Amit Regev Krugwasser, Eiran V Harel, and Roy Salomon. The boundaries of the self: The sense of agency across different sensorimotor aspects. *Journal of Vision*, Vol. 19, No. 4, pp. 14–14, 2019.