

CK-005

## 画像計測を用いた手指リハビリデバイスの制御 Hand rehabilitation device controlled by image measurement

北里 元<sup>1)</sup> 愛川 雄大<sup>1)</sup> 熊谷 大和<sup>1)</sup> 三枝 亮<sup>1)</sup>  
Gen Kitazato Yudai Aikawa Yamato Kumagai Ryo Saegusa

### 1 はじめに

脳血管疾患の後遺症として四肢の麻痺などの症状が挙げられる。これら症状の進行抑制や、四肢機能の回復を目的としたリハビリテーションが病院やリハビリテーションセンターで行われている。その中で手指の麻痺症状である痙縮、萎縮に対するリハビリテーション療法として関節運動が挙げられる。関節運動には外骨格を使った受動的開閉動作が多く用いられており、手指の関節動作を模倣した外骨格や動力伝達が容易で軽量の空気圧ソフトウェアアクチュエータが用いられている。また、手指温度を上昇することで血流を改善し、筋肉の緊張を緩和したり、痛みを軽減したりする温熱療法も存在する。しかし、機械式の外骨格は熱に弱いものが多い。さらに、空気圧ソフトウェアアクチュエータは構造上指全体を覆うグローブ状のものである為、熱が手指に伝わりにくく、手指の温度を上昇させながらリハビリテーションを行うことは難しい。加えて、温熱療法は効果持続時間はあまり長くなく、温熱療法後リハビリテーションを行っている際に効果が失われてしまう。また、加熱のし過ぎによる皮膚の損傷等のリスクも存在する。前研究 [1] では、手指アシスト方法として、指の付け根を軸とした同心円状のチェーンとウォームギアを用いることで後方の小型モータひとつで手指一本の開閉動作が可能なデバイスを開発した。本研究ではお湯に手を入れて温熱効果を得つつ関節療法を行うためのリハビリテーションシステム及び手指状態計測システムの開発し、通常関節運動よりも効果の高いリハビリテーションの提案を行う。

### 2 使用リハビリデバイス

本研究で使用しているリハビリデバイスは動力部と指装着部の二点に特徴がある。動力部はウォームギアを用いることで動力方向変換及びトルク増強を行っている。また、指装着部は、指の回転軌道と同心円状の軌道を描くチェーン関節を用いている。これら機構により手指を動作させる際に必要な動力を軽減している。

#### 2.1 ウォームギア

リハビリデバイス動力部の構造を説明する(図1)。土台は全長50(mm)高さ5.5(mm)、ギアは半径7.9(mm)溝の幅が3.175(mm)である。このギアが動力部のモータ先端軸に固定される。土台の先端には板バネを使った動力伝達ケーブルが接続されている(図2)。この機構からモータの回転運動を用いてギアが土台を前方及び後方に移動させ、土台に固定されたケーブルが同様に移動することで手指の開閉動作をする動力を発生させている。また拘縮状態にある指を開かせようと逆方向に動力が作用した場合も、その力はギアに垂直に働くためギアへの負担は軽減される。

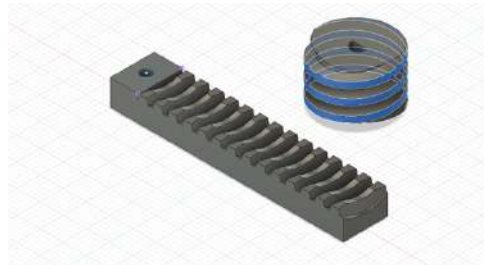


図1 ウォームギア及び土台設計図

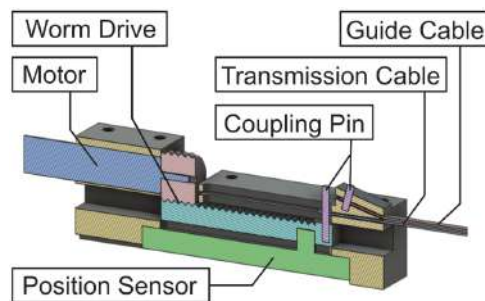


図2 動力部内部構造

#### 2.2 同心円状チェーン関節

一方のリハビリデバイスの指装着部は(図3)のような構造である。この機構は手指の第三関節が閉状態である際に手の甲と直角になることを利用し、第三関節の中心部に固定部を設けその地点から手の甲までを4関節とケーブル接続部に分割した。関節は(図4)であり、間接長は7.92(mm)各関節の最大角は18(度)である。

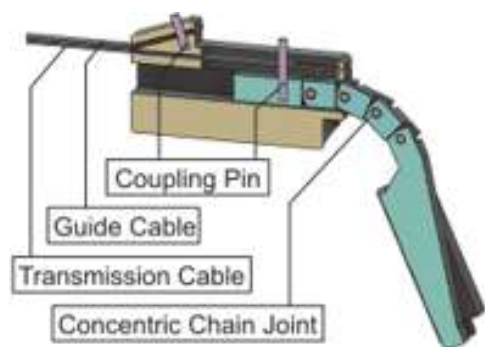


図3 指装着部概要

#### 2.3 動作式

上記2機構からモータの回転動作より指の動作角を推定できる。(図5)まず、ウォームギアによる動力変化は一回転あたり土台の溝が一段階後方に引かれることから、モータが回転した際の土台の移動量は(1)である。

1) Dept. of Information Systems, Kanagawa Institute of Technology

$$\delta x = \alpha \delta \phi \quad (1)$$

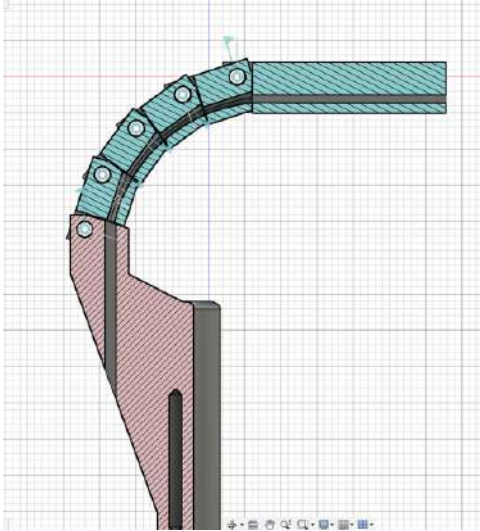


図4 同心円状チェーン間接

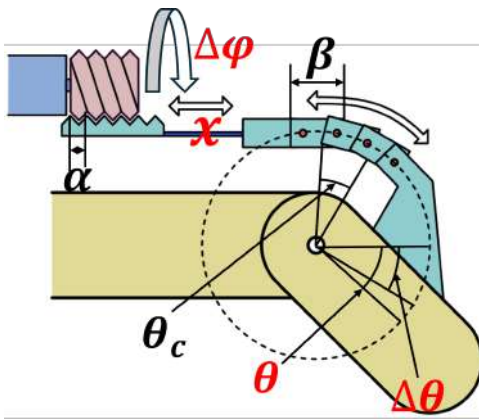


図5 動作式関係図

ここで、ピニオンの位置を  $x$ 、モータの回転角を  $\phi$ 、ギアの溝幅を  $\alpha$  とする。

土台が一段階引かれたことにより、プッシュプルケーブルが土台の移動量分後方に引かれるため、その分チェーン間接が移動することで指の屈折角は(式2)と表せる。

$$\delta\theta_c = \frac{\delta x}{\beta} \theta \quad (2)$$

ここで、1チェーン当たりの動作角を  $\theta_c$ 、チェーン間接当たりの長さを  $\beta$ 、指の屈折角を  $\theta$  とする。

(1),(2)よりモータの回転当たりの指の屈折角を導出できる(式4)

$$\delta\theta_c = \frac{\alpha\delta\phi}{\beta} \theta \quad (3)$$

## 2.4 プルケーブル

指装着部と動力部の動力伝達は(図6)のプッシュプルケーブルが行っている。プッシュプルケーブルは板バネ二つを低摩擦シートをかませた状態でひとつにまとめている構造をしている。これによりケーブル同士の摩擦を最小限にすることで動力伝達のロスを軽減する。(図7)上部のケーブルは各部品に固定することでガイドケーブルの役割を果たしている。この構造によりモータを後方

に設置し指装着部に機械等を用いないことで手指を入水可能にしている。

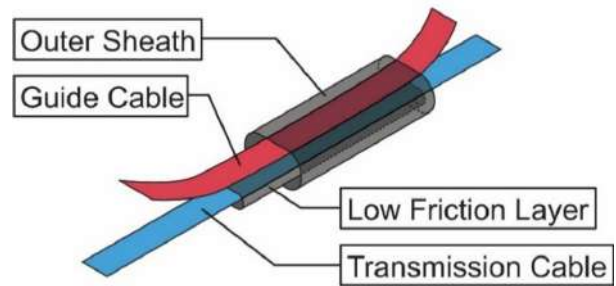


図6 プッシュプルケーブルイメージ図

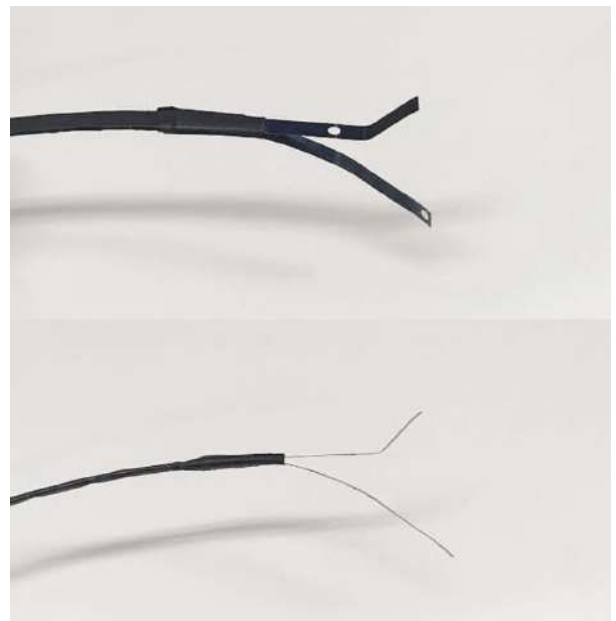


図7 プッシュプルケーブル画像

## 2.5 全体図

全体図は(図8)である。リハビリデバイスは epso2 のマイコンと固定電源につながれており、マイコンは PC に接続されモータのエンコーダデータを取得している。動力部下部には可変抵抗を用いたポテンショメータを設置しておりウォームギアに接続している台座の移動距離から指の動作量の計測及びモータの回転量との差異から以上を検出した際に停止するシステムを導入している。指装着部は二つのマジックテープが設置されており、指関節および手のひらに通して固定をすることで様々な手指のサイズに対応でき、着脱が容易になっている。指装着部及び動力部は二つの板バネを組み合わせたプッシュプルケーブルを用いて動作を連動させている。PCには、モータ動作マイコン、サーモカメラ、arduino Mega を接続しており、リハビリ動作前後の手指温度の計測及び土台の移動距離を計測している。

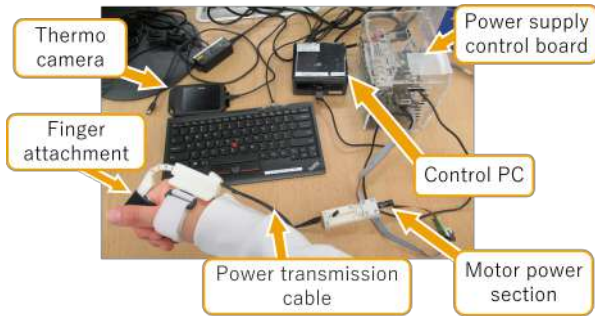


図 8 全体図

### 3 リハビリテーションシステム

リハビリテーションシステムは(図 9)である。UI 上で動作決定を行いマイコンを通してモータに伝達, モータのエンコードデータとポジションセンサによるデータを PC に返すことで動作終了時の状態を再度ディスプレイに表示する。また, サーモカメラの映像をディスプレイに出力し, マウスでクリックした箇所の温度数値を出力するシステムを用いて手指の各関節の温度が正常であるか, 温浴による温度上昇が見受けられるかを確認する。これらのシステムはデータの共有が行えるようになっており yarpserver を用いてデータの送受信を行っている。

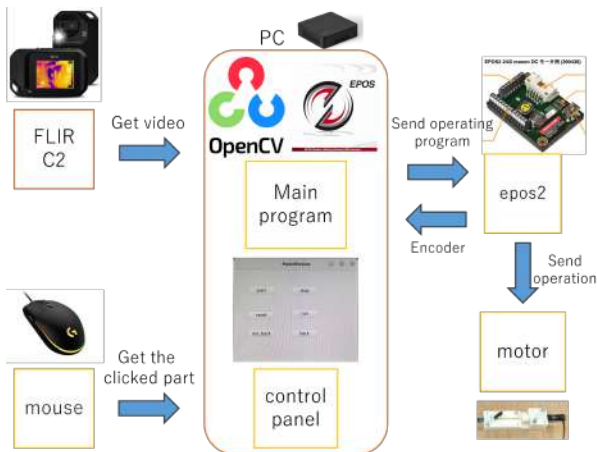


図 9 システム全体図

#### 3.1 モータ動作システム

モータ動作は(図 11)である。UI 上にはモータに指令を送るシステムとの接続, 動作の継続, 動作の終了, 規定開動作を行う, 規定閉動作を行う, 規定開閉動作を行う, 及び速度と回転数を指定して行う為のボタンが設置されている。開動作及び閉動作は 40000(回転)を 8000(rpm)で行う(図 10)。開閉動作は上記動作をボタン一つで行う。モータの速度と回転数を指定する場合は, ボタンで速度や位置の数値を増加及び減少させることができ, 開動作及び閉動作の回転速度と位置をそれぞれ最大 2 つまで設定し動作させることが可能である。また, 設定した速度は動作接続ボタンの上に二段階に表示される。プログラム内には現在の動作時間及び土台の位置を記録しており, 動作時には動作速度や動作距離, 動作時間と動作終了予測地点を文字で出力する。モータシステムは UI と連

動しており UI の終了を end で宣言した際に同時に終了するように組んでいる。

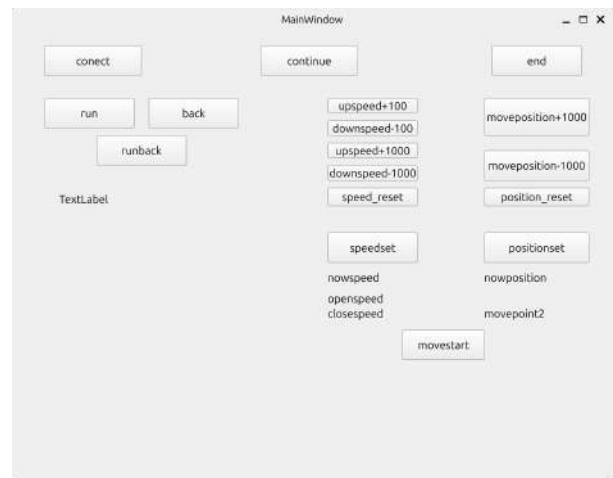


図 10 システム UI

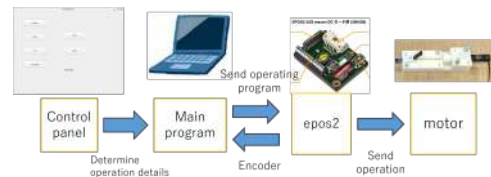


図 11 モータシステム図

#### 3.2 ポジションセンサ

ポジションセンサはスライドボリューム(図 12)を使用しており, ここから取得したデータを arduino mega を経由し PC でデータを取得する(図 13)。スライドボリュームからは 0~1023 の値が出力される。その際に可変抵抗の端から端までを 100(%)とした際の到達率と計測時間を出力することで実際の指の角度遷移とモータの回転数当たりの移動量を計測している。計測データはテキスト上で保存しており計測時間及び出力されたスライドボリュームのデータが出力されている。



図 12 SL4515N-B103L15CM

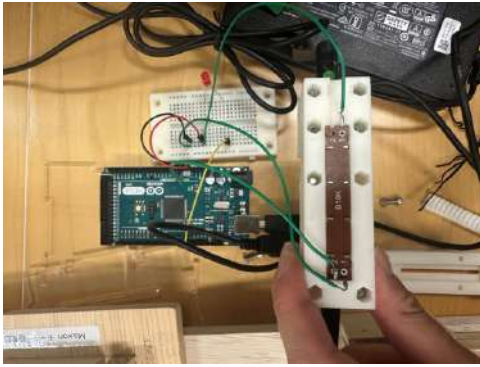


図 13 ポテンシオメータ装着画像

### 3.3 手指温度計測

サーモカメラは(図 14)を使用している。このカメラは測定温度範囲が $-10(^{\circ})\sim+150(^{\circ})$ 、サイズ:125\*80\*24(mm)と軽量ながら計測温度幅が大きく環境温度と手指の手指の温度差を検出できる。また、通常のカメラも内蔵されている為手指の輪郭なども鮮明に判別することも可能である。しかし色による温度表示は出来ていても中心点のみの温度数値となっている。そのため PC 上で映像の色データから温度の逆算を行うシステムを開発した。こちらはディスプレイ上にサーモカメラの映像を別途出力し、ディスプレイの映像上でマウスを用いてクリック操作を行うと温度データを出力するものである(図 15)。



図 14 FLIR2

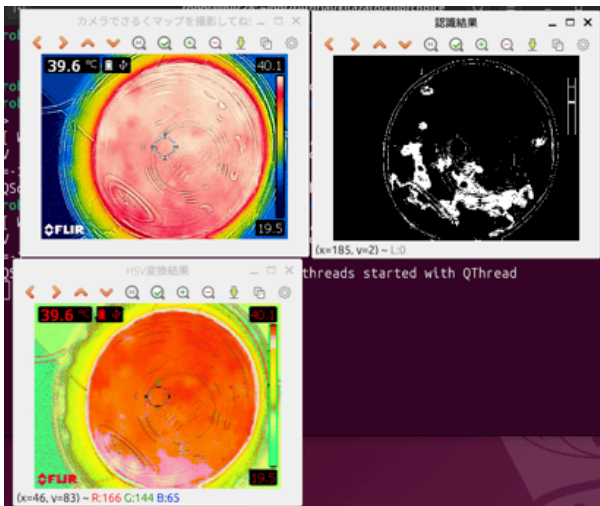


図 15 温度出力システム

## 4 実験

### 4.1 人工指の動作検証

本実験では、温水中のリハビリデバイスの動作を検証する。実験では 3D プリンタで造形した ABS 樹脂素材の人差し指の模型(以降は人工指と記す)にリハビリデバイスを装着した。まず、空のボウルの中に固定台を用いて人工指を固定して開動作と閉動作をそれぞれ 10 回行い、動作終了までの時間を計測した。次に、ボウル内に $40(^{\circ})$ の湯を入れ同様に開動作と閉動作をそれぞれ 10 回行い、動作終了までの時間を計測し温水中の動作変化を計測した(図 16 上段)。動作変化の検出する際に人口指の関節に特徴点を設けることで、特定地点から離れた状態の際に動作中と過程することで動作時間を計測した。動作映像は市販のデジタルカメラを使用した。計測結果は(図 17)である。結果として温水中の動作は空気中と比べ最大 0.1 秒ほど遅延した。しかしながら、温水中の動作の回数を増やしても動作が遅延することはない、動作は安定していた。以上の結果から本装置は温水中においても正常に動作することが確認された。

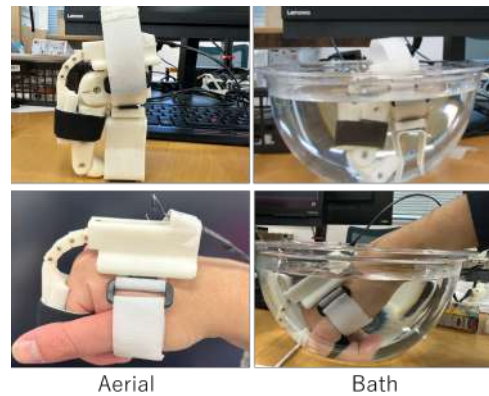


図 16 動作検証と温度計測(上:人工指,下:生体指)

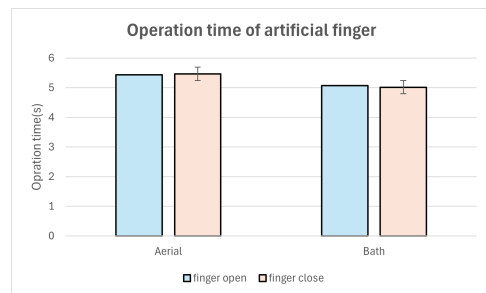


図 17 動作実験結果

### 4.2 生体指の温度計測

本実験では、空気中と温水中の動作前と動作後の手指の温度を計測し、温水中の動作が手指の温度向上に有効であるかを検証する。被験者は成人大学生二名で、運動機能はともに以上のない一般成人男性である。実験は室内温度 $30(^{\circ})$ であり時期は12月の冬頃である。まず、Manoを指に装着した状態で熱画像カメラを用いて MP 関節周辺の温度を計測した。次に、空気中で 10 回開閉動作を行い、同じ部位を熱画像カメラで計測した。その後、 $40(^{\circ})$ の温水中にリハビリデバイスを装着した状態で手を入れ 10 回開閉動作を行った(図 16 下段)。これらの計測結果

を比較し、空气中及び温浴中でのリハビリテーション動作が手指に与える温度変化の影響を比較した。結果として、空气中の動作後は温度が 0.7(°) 上昇したが、温水中では 7(°) の温度上昇が確認された (図 18)。この結果より空气中のリハビリテーション動作では手指の温度上昇は見受けられなかった。それに対して温浴下での動作は手指の温度上昇では手指の温度上昇が見受けられたため通常のリハビリ動作では得られない温度上昇による運動補助が見込める。また、機器を外した際も装着時と同様の温度が検出された。以上から温水中のリハビリ動作は手指の温度を向上させるために有効であるといえる。

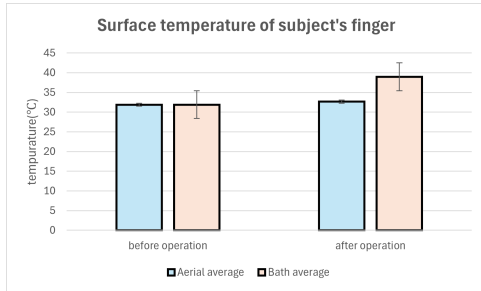


図 18 動作実験結果

### 4.3 ポジションセンサによる動作変換効率導出

本実験では空气中でのリハビリデバイスの動作映像とポジションセンサのデータからモータの回転によるケーブルの移動量および装着した指の動作角度の変化の関連性を調べるとともにモータの回転量当たりの動作角の変化を導出する。まず、リハビリデバイスを人工指につけた状態で第三および第二関節に目印となるシールを貼る (図 19)。動作時の映像からマーカの色を抽出しマスクを作成。平滑化処理とモルフォジー処理を行いノイズを除去。ラベルの重心座標を取得しラベルに番号を付けを行う。取得データが前のラベルデータと変化があった場合新規ラベルとしてデータを保存。これにより現実で計測したマーカ間の距離と処理場のピクセル単位のラベル間距離から座標情報を mm 基準で出力する。この解析データより各時間ごとの座標データを取得しベクトル角度を計算する。

$$\delta\theta_c = \arctan 2\left(\frac{y}{x}\right) \quad (4)$$

動作終了地点を最大動作角とすることで、手指ど動作角を計算できる。

結果として、時間当たりの屈曲角の変化は (図 20) である。また、中心軸からの距離の分散は (図 21) である。(図 20) から、動作時間に対して概ね線形的に角度が推移していることが分かった。また、(図 21) から全体が弧を描くように手指関節が動作していることがわかる。以上の結果から指装着部においてチェーン関節を用いた動力伝達によって手指が弧を描くように定量的に動作している事が確認できた。また、(図 22) より各動作の動作時間と変化なくポテンショメータが動作している為モータの動作は指の角度変化に密接に関連しており、線形に角度が推移していることが分かった。このことから、土台の動作と指装着部の角度推移は連動しており、安定して動力伝達を行っていると考えられる。以上から同心円状チェーン

関節がウォームギアの変換した回転運動を正確に伝えていることが証明された。また、ウォームギアが回転運動をスムーズに前後の動作に変換していることが証明された。

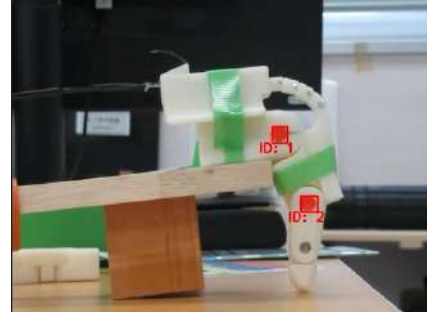


図 19 計測画像

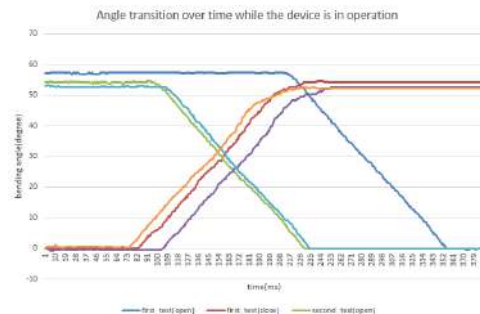


図 20 動作時の屈曲角推移

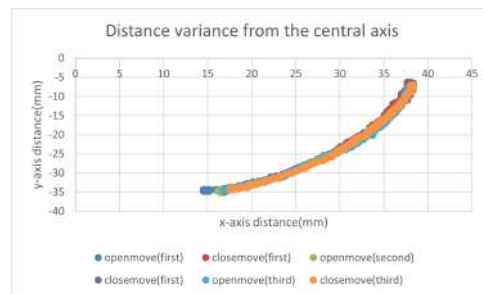


図 21 指関節の推移

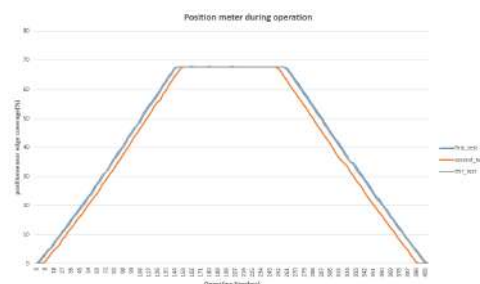


図 22 各動作時のポテンショメータの移動率

## 5 結論

本研究ではリハビリテーションデバイスの改良, リハビリテーションシステムの開発及びデバイスの動作検出システムの構築を行った。また動作実験として, 温浴可能な手指リハビリデバイスを用いて温浴下での動作実験, リハビリテーション動作による手指の温度変化, 及びポテンショメータによるモータ動作と指の関節角推移の関連性に関して実験を行った。これらの実験結果から, 本研究で使用するリハビリデバイスが角度制御のフィードバックをリアルタイムで行いつつ, 温浴下で動作が出来る機器であることが検証できた。しかし, 現在の状態では手指拘縮患者に実施実験を行えてない為, リハビリテーションシステム自体の効果検証および動作検証を行えていない。今後は, 手指拘縮患者に装着した状態でリハビリ動作を観察し, 温浴下と空気中で行うリハビリテーションプログラムの手指拘縮に対する効果の違いを検証する。また, 計測データを出力するインターフェースを追加することでリハビリテーションシステムとしてより使用しやすいものにする。加えて, リハビリテーション効果向上のための温度条件や, 生活環境環境などの周辺の影響の研究を進めていく。

### 参考文献

- [1] 飯田高央, 三枝亮, "手指アシストデバイスによる自立リハビリ支援", 神奈川工科大学学部卒業論文, (2024)
- [2] Takahashi, Craig D., et al. "Robot-based hand motor therapy after stroke." *Brain* 131.2 (2008): 425-437.
- [3] Yu, Jinxu, et al. "A novel low-pressure robotic glove based on CT-optimized finger joint kinematic model for long-term rehabilitation of stroke patients." *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* (2023).
- [4] Ahmed, Tanvir, et al. "Flexohand: A hybrid exoskeleton-based novel hand rehabilitation device." *Micromachines* 12.11 (2021): 1274.
- [5] Yang, Yu-Sheng, et al. "Effectiveness of a new 3d-printed dynamic hand-wrist splint on hand motor function and spasticity in chronic stroke patients." *Journal of Clinical Medicine* 10.19 (2021): 4549.
- [6] Duanmu, Dehao, et al. "Design of guided bending bellows actuators for soft hand function rehabilitation gloves." *Actuators*. Vol. 11. No. 12. MDPI, 2022.
- [7] Cann, Connor, and Mohd Shahneel Saharudin. "Design and fabrication of a wrist splint for burn patient rehabilitation using 3D printing technologies." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2643. No. 1. IOP Publishing, 2023.
- [8] Carr, S., et al. "Central Slip Repair using Trans-articular K-wires: A Comparative Study." *JPRAS open* 37 (2023): 163-170.
- [9] Frade, Fátima, et al. "Rehabilitation of a child with neonatal brachial plexus palsy: Case report described by parents." *Children* 9.9 (2022): 1298.
- [10] John, Kevin, et al. "The effect of a 4-week, remotely administered, post-exercise passive leg heating intervention on determinants of endurance performance." *European Journal of Applied Physiology* (2024): 1-17.
- [11] Xie, Anran, et al. "A hybrid sensory feedback system for thermal nociceptive warning and protection in prosthetic hand." *Frontiers in Neuroscience* 18 (2024): 1351348.
- [12] Seinfeld, Sofia, et al. "Effects of music learning and piano practice on cognitive function, mood and quality of life in older adults." *Frontiers in psychology* 4 (2013): 810.
- [13] Bass, Hannah, et al. "HAND MOVEMENT GLOVE FOR CHILD WITH TITINOPATHY." *Frontiers in Biomedical Devices*. Vol. 86731. American Society of Mechanical Engineers, 2023.
- [14] Ikeda, Takeshi, et al. "Development of Flexion Posture Formation Mechanism in Wearable Type of Flexor Tendon Rehabilitation Equipment." *Journal of Robotics and Mechatronics* 35.3 (2023): 577-585.
- [15] Gao, Huina, Ravindra Luhach, and Muhammed Alshehri. "International Journal of e-Collaboration (IJeC): Improved Cognitive Web Service sand Finger Rehabilitation System using Motor Imagination for Sports Injury Restoration." *International Journal of e-Collaboration (IJeC)* 19.2 (2022): 1-24.
- [16] Ranzani, Raffaele, et al. "Design, characterization and preliminary usability testing of a portable robot for unsupervised therapy of hand function." *Frontiers in Mechanical Engineering* 8 (2023): 1075795.
- [17] Ahmed, Tanvir, et al. "Flexohand: A hybrid exoskeleton-based novel hand rehabilitation device." *Micromachines* 12.11 (2021): 1274.
- [18] Huo, Congcong, et al. "fNIRS-based brain functional response to robot-assisted training for upper-limb in stroke patients with hemiplegia." *Frontiers in Aging Neuroscience* 14 (2022): 1060734.
- [19] Tajik, Hamidreza, et al. "The effects of adding splint use to corticosteroid injection for the treatment of trigger finger: A randomized controlled trial." *Musculoskeletal Care* 20.4 (2022): 908-916.
- [20] Huo, Congcong, et al. "fNIRS-based brain functional response to robot-assisted training for upper-limb in stroke patients with hemiplegia." *Frontiers in Aging Neuroscience* 14 (2022): 1060734.