

補助事業番号 2024M-404

補助事業名 2024年度 筋骨格六角形出力分布による動作解析とアシストロボットの多機能化制御 補助事業

補助事業者名 慶應義塾大学・理工学部 村上俊之

1 研究の概要

高齢者や障害者の日常動作をアシストする上肢外骨格ロボットに関して、本事業では人体の運動制御で重要な役割を持つ二関節筋の働きを考慮した筋骨格六角形出力分布と呼ばれる、二関節筋を含めた上肢筋骨格モデルを導入する。このモデルは上肢を上腕と前腕の2リンク機構と考え、さらに上腕の筋肉を2対の拮抗単関節筋と1対の拮抗二関節筋でモデル化する。このモデルを解析することにより、人の手先の最大出力を表す分布である筋骨格六角形出力分布を導出する。そして導出した筋骨格六角形出力分布に基づき、人の筋力向上のための最適な訓練動作を定めつつ、外骨格ロボットのアシストトルク制御による人の動作機能向上システムを開発する。

2 研究の目的と背景

本事業では、人の運動機能向上の手段の一つとして外骨格ロボットによる日常動作支援を目指している。外骨格ロボットとは身体に直接装着するアシストロボットであり、外骨格ロボットを上肢に装着することで、荷物の持ち上げといった動作がアシストされる。これにより、日常的な運動機会の確保と筋力低下の防止に繋がり、高齢者や障害者が自立した生活を送れるようになる。さらに、健康寿命の向上を目指し、社会のレジリエンスにも役立つ安全・安心ロボットシステムの提案を目標としている。

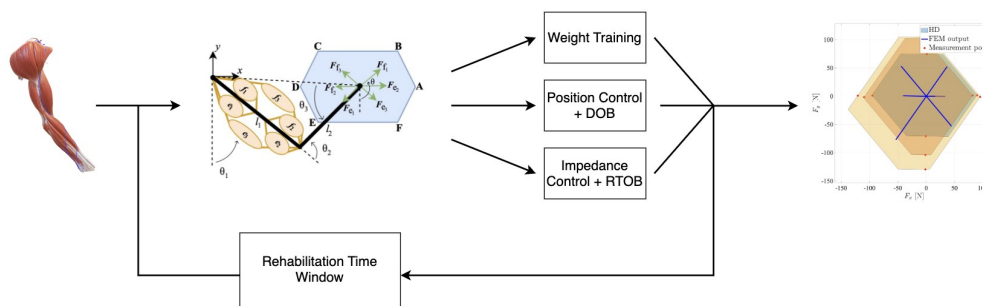


図1：筋骨格六角形出力分布に基づいた筋肉の機能向上手法の概念図

3 研究内容

(1) 筋骨格六角形出力分布による動作解析に関する研究

https://www.murakami.sd.keio.ac.jp/JKA2024/2024jka_report-chukan.pdf

本事業では、高齢者や障害者の日常動作をアシストする上肢外骨格ロボットに関して、姿勢に因って決まる、人の最大出力の変化を考慮可能なアシスト制御の提案を目的とする。ただし、人体の運動制御で重要な役割を持つ二関節筋の働きを考慮してアシストする。また、日常生活で外

骨格ロボットを利用するための利便性に配慮し、筋電位などの生体信号は使用せずに力学的情報のみを用いて制御する。この目的を達成するため、筋骨格六角形出力分布と呼ばれる、二関節筋を含めた上肢筋骨格モデルを導入している。

Muscle	Week 1 [N]	Week 2 [N]	Week 3 [N]	$\Delta\%$
f_1	33.63	38.74	40.25	19.68%
f_2	33.60	36.68	37.19	10.68%
f_3	33.90	39.66	41.02	21.00%
e_1	65.09	69.27	75.38	15.81%
e_2	17.06	19.32	19.62	15.01%
e_3	33.90	39.66	41.02	21.00%

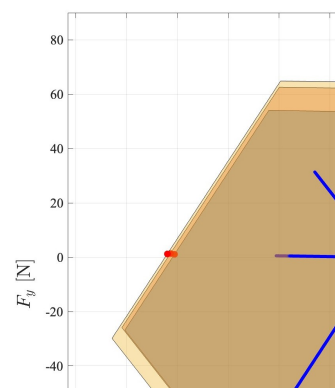


図2：トレーニングの結果（左表：各筋肉の改善率：左図：HDの改善）

図1に基づいたに関節筋モデルに基づいて筋骨格六角形出力分布(HD)を求め、所望とする分布に対してトレーニングを行った結果を図2に示す。この結果から、筋骨格六角形出力分布(橙色領域)を改善(拡張)するために提案手法により効果的なトレーニング(運動)を見いだせることが分かる。

(2)アシストロボットの多機能化制御・スラスト力推定アルゴリズム

https://www.murakami.sd.keio.ac.jp/JKA2024/2024jka_report-chukan.pdf

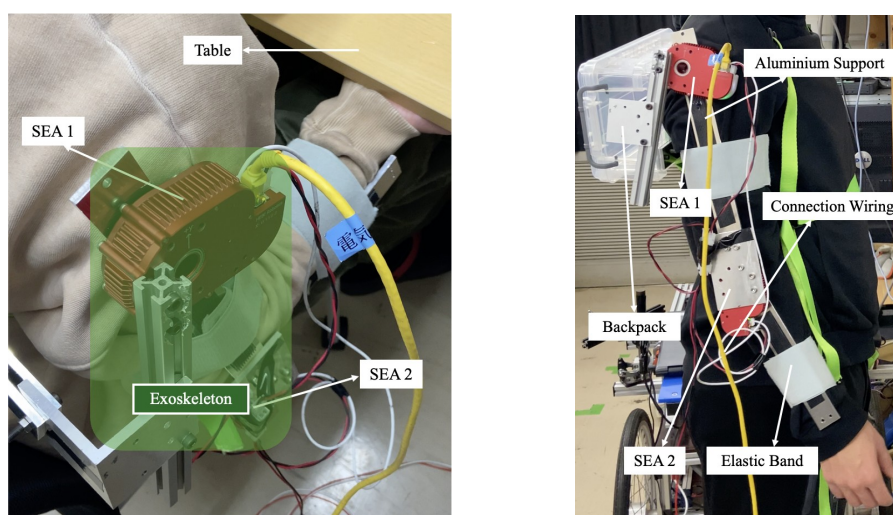


図3：製作した外骨格型アシストロボットの外観（左図：上面図，右図：側面図）

前述したように、HDに基づいたトレーニング手法は有用であることがわかった。そこで、次のステップとして、外骨格型のアシストロボットを構成し、HDに基づいて効率的にトレーニングが行なえるアシスト制御を構築する。そのために製作した外骨格型のアシストロボットの外観を図3に示す。

会における健康寿命の改善にも役立つ安全・安心システムの提案となることを期待している。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本事業では、二関節筋の働きを考慮した筋骨格六角形出力分布(HD)を考慮することでHDを効果的に改善できるアルゴリズムと外骨格ロボットの構築を目的として、HD分布の解析手法ならびにカセンサレスインピーダンス制御に基づいた制御手法を提案している。提案システムでは、人の力検出に反力推定オブザーバを適用し、筋力トレーニングに適するインピーダンスパラメータを設定することでHDの効果的な改善手法を実現している。HD分布に基づいた筋力トレーニングのためのインピーダンスパラメータ設定法については従来にない考え方であり強い新規性を有するものである。インピーダンス制御の基本構成については、過去において本事業に携わった研究グループが開発してきたカセンサレスアルゴリズムの応用として開発したものとなっている。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

(論文発表)

1. Matteo Pavia, Toshiyuki Murakami, “A Robust Constrained Control of Upper-Limb Exoskeleton for Isometric Rehabilitation Exercises”, 2024 IEEE 33rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2024 (<https://doi.org/10.1109/ISIE54533.2024.10595688>). (JKA謝辞あり：筋骨格六角形出力分布に基づいたトレーニング軌道の生成に関する論文)
2. Jin Ito, Toshiyuki Murakami, “Robust Position Control System of MDOF Manipulator with Flexible Joints”, 2024. IEEE 33rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2024. (<https://doi.org/10.1109/ISIE54533.2024.10595743>). (JKA謝辞あり：外骨格型デバイスの構成に用いているHEBIアクチュエータはSEA (Series Elastic Actuator) であり、SEAの高性能制御に関する論文)
3. Jin Ito, Toshiyuki Murakami, “Vibration Suppression and Disturbance Rejection Based on Equivalent Mass and Stiffness Matrices”, 2025 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 2025. (<https://doi-org.kras.lib.keio.ac.jp/10.1109/ICM62621.2025.10934928>). (JKA謝辞あり：外骨格型デバイスの構成に適するダブルエンコーダ型SEA (Series Elastic Actuator) の高性能制御に関する論文)

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

2024年度 筋骨格六角形出力分布による動作解析とアシストロボットの多機能化制御 補助事業(PDF)

(2) (1)以外で当事業において作成したもの

https://www.murakami.sd.keio.ac.jp/JKA2024/2024jka_report-chukan.pdf

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 慶應義塾大学 理工学部 村上俊之研究室
(ケイオウキジユクダイガク リコウガクブ ムラカミシユキケンキユウシツ)

住 所： 〒223-8522
神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1

担 当 者： 教授 村上俊之(キョウジユ ムラカミシユキ)

担 当 部 署： システムデザイン工学科(システムデザインコウガクカ)

E - m a i l: mura@sd.keio.ac.jp

U R L: <https://www.murakami.sd.keio.ac.jp/>