

博士論文

実用性を考慮した 軽量装着型ロボットアームの提案と考察 (Proposal and consideration of a lightweight wearable robotic arm)

2022年9月

立命館大学大学院情報理工学研究科
情報理工学専攻博士課程後期課程

小島 景行

立命館大学審査博士論文

実用性を考慮した 軽量装着型ロボットアームの提案と考察 (Proposal and consideration of a lightweight wearable robotic arm)

2022 年 9 月
September 2022

立命館大学大学院情報理工学研究科
情報理工学専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in
Advanced Information Science and Engineering
Graduate School of Information Science and Engineering
Ritsumeikan University

小島 景行
KOJIMA Akimichi

研究指導教員: 李 周浩 教授
Supervisor: Professor LEE Joo-Ho

概要

本論文は, 実用性を考慮した Supernumerary Robotic Limbs(SRLs) を提案し考察する. 近年, アクチュエータの小型化と共にユーザの体にロボットやデバイスを装着する人体拡張をテーマにした研究が盛んである. その中でも, 本研究はロボットアームをユーザに装着し, 作業の支援を行う SRLs について研究した. SRLs は, 目標タスクや用途によって自由度や大きさなど様々である. しかし, ユーザに装着するためには, 十分軽量である必要がある. また, ロボットアームをユーザに装着するため安全性も重要である. しかし, 軽量化に重きをおいて, 自由度を減少させるとロボットアームの可動域が狭くなり有用性が無くなる. ロボットアームの自由度を増やし, 可動範囲を広げるとロボットアームの重量が増しユーザへの負担につながる. また, ロボットアーム自体を小型化した場合, 関節に用いたアクチュエータの保持トルクが小さいため, 把持容量が少なく本来のロボットアームとして物を掴み, 保持する事が困難になる.

そこで, 最も保持トルクが必要となる根本関節を, アクチュエータにて保持するのではなくロック機構を用いて物理的に固定する. これにより, 高重量なアクチュエータの代わりに軽量に実装したロック機構を用いてロボットアーム全体の重量を軽減した. また, ロボットアームとしての有意性を無くさないために, アクチュエータで角度制御を行う関節と組み合わせることで, 自由度を減少させることなく軽量のロボットアームが実現できる. また, ロック機構を用いた関節は, ユーザが直接ロボットアームを把持し駆動させるため, 誤操作による事故の危険性が軽減できた.

2 種類の関節を組み合わせるデザインは, 人の腕の動きを基に検討した. 人は作業前に根本関節にあたる肩・肘関節を用いて作業範囲まで手先を動かす. その後, 手先関節を用いて作業を行う. これに基づき, 作業前に駆動する関節と作業中に駆動する関節の 2 種類に分けられる. 本論文では, 本研究で提案したパッシブ関節とアクティブ関節を組み合わせた Hybrid Actuation System(HAS) を用いて SRLs の実用性について検討した.

SRLs は, ユーザの両手が塞がった状態の作業を支援することが目的の 1 つである. 両手は作業に集中するため, 手を用いたユーザインタフェースは使用できない. この問題を改善するために, 筋電位や脳波を用いて SRLs を操作するユーザインタフェースが多く研究

されている。しかし、ロボットアームの自由度が多いと姿勢制御が複雑になるため直観的な操作が困難である。そこで、動的に駆動するアクティブ関節と、受動的なパッシブ関節に分けることで、可動範囲を維持したまま動的に操作する関節の自由度が減り、操作・制御が容易になる。この2種類の関節を組み合わせたロボットアーム Assist Oriented Arm (AOA) を提案し、検討した。

パッシブ関節とアクティブ関節を組み合わせることで、重量がどの程度軽減されるのかをトルク計算を基に求めた。全ての関節にアクチュエータを用いた場合と比較し、約 40 % の軽減が確認できた。しかし、パッシブ関節を用いたことにより、操作性に大きく影響が生じる可能性がある。そこで、シミュレーションと実機操作を通して、AOA の操作性を評価した。

ユーザの作業を AOA を用いて十分に支援するには、最適な自由度やリンクの長さを検討し、ユーザと AOA が協調して作業を行える範囲を広く設ける必要がある。関節の数やリンクの長さによっては、ユーザと AOA が協調した作業を行えない場合もある。また、関節数が多くても無駄が生じ、ロボットアームの重量が重くなる。そこで、ユーザの作業範囲を、自由に手が動かせるメイン作業範囲とユーザが手を動かせる限界の範囲を拡張作業範囲として、ユーザと AOA が十分に協調作業を行える最小限の関節構成・リンク長を検討した。

また、装着位置によって、ユーザと AOA の協調作業範囲が異なるため、ユーザに装着可能な部位について、協調範囲と、ロボットアームがユーザの作業の邪魔になる範囲である侵襲範囲を用いて評価し、5 ヶ所の装着候補位置を選定した。選定した装着位置において、ユーザへの負担を最小に抑える装着方法を、応力解析を用いて評価した。解析結果と被験者実験を通して、最もユーザへの負担が少なく、協調範囲、侵襲範囲を考慮した装着位置・装着方法を検討した。

その後、検討結果を基に、改善した AOA を用いてタスク実験を行い、AOA の有用性と作業効率を評価し、実用的な AOA の応用例を示した。

目次

第 1 章	緒言	1
1.1	Supernumerary Robotic Limbs(SRLs)	1
1.2	作業支援への応用	2
1.3	有用性と問題点	4
1.4	本論文の構成	5
第 2 章	軽量化と実用性を考慮した SRLs の提案	6
2.1	関連研究	6
2.2	軽量なロボットアーム設計におけるアイデア	8
2.3	AOA のデザイン	9
2.4	重量比較	13
2.5	AOA の評価実験	15
2.5.1	実験目的	15
2.5.2	実験内容	16
2.6	実験結果・考察	17
2.7	考察	19
2.8	まとめ	20
第 3 章	SRLs の関節構成とリンク長	21
3.1	関連研究	21
3.2	人の作業範囲と寸法	22
3.3	関節構成・リンク長の検討	24
3.3.1	パッシブ関節	25
3.3.2	アクティブ関節	27
3.4	まとめ	31
第 4 章	装着方法・位置の検討	32

4.1	関連研究	32
4.2	装着方法の検討	32
4.3	装着位置の評価	36
4.4	ユーザの体への応力解析	38
4.5	ユーザへの重量負担実験	38
4.6	まとめ	40
第 5 章	AOA の改良とタスク評価	41
5.1	パッシブ関節におけるロック機構の改善	41
5.1.1	ロック機構における角度分解能の向上	41
5.1.2	トーションばねを用いたロック機構	43
5.2	評価実験	46
5.2.1	実験内容・目的	46
5.2.2	実験結果・考察	47
5.3	まとめ	50
第 6 章	結言	51
6.1	本論文のまとめ	51
6.2	AOA の応用	52
6.3	今後の課題	53
参考文献		55

目次

1.1	Different supernumerary robotic limbs.	3
2.1	Mechanism of Assist Oriented Arm (AOA).	10
2.2	Example of robot arm's joint configuration.	10
2.3	Locking mechanism of passive joints.	11
2.4	Rectangular and spherical coordinates in active joints	12
2.5	Definition of torque calculation in active joints	13
2.6	Definition of torque calculation in passive joints	13
2.7	Experimental environment of simulation and state of movement	17
2.8	Experimental environment of AOA	18
2.9	Average working time.* : $p < 0.0167$	18
2.10	Result of questionnaire.	19
3.1	Definitions of the each workspace according to [37]. (a) extensive workspace, (b) cooperative workspace, (c) invasive workspace.	22
3.2	Definitions of the user's workspace and body dimensions.	23
3.3	Definition of the joint configurations.	24
3.4	Denavit-Hartenberg representation.	24
3.5	Effect of passive-joint link length on the range of motion when the link length is (a) greater than the main workspace, (b) much smaller than the main workspace, and (c) similar to the maximum main workspace.	26
3.6	Maximum range of motion for each passive joint configuration.	26
3.7	Differences in the range of motion of passive joint configurations and link lengths at the high, middle, and low positions.	28
3.8	Joint configuration of the robot arm.	29
3.9	Range of motion due to the difference in the link lengths of the active joints.	31
3.10	Configuration of the AOA.	31

4.1	Selected mounting positions.	33
4.2	Mounting method to waist position.	34
4.3	Mounting method to back position.	34
4.4	The stress when mounted on the waist.	35
4.5	The stress when mounted on the back of body.	35
4.6	Moment at each mounting position.	36
4.7	Percentage of cooperative workspace in the main workspace and invasive workspace in middle range.	37
4.8	Candidates of mounting positions.	38
4.9	Stress verification at each mounting position.	39
4.10	Wearing AOA on the shoulder and waist. The AOA was implemented based on the dimensions specified in this study.	40
4.11	Results of the user burden experiment.	40
5.1	Mechanism of locking system by actuator.	42
5.2	Force decomposition diagram.	42
5.3	Mechanism of locking system by spring.	44
5.4	Mechanism of ON/OFF the lock by wire.	45
5.5	Specifications of the improved AOA.	45
5.6	Task experimentation using AOA	47
5.7	Details of the work process	48
5.8	Questionnaire experiment results (* : $p < 0.05$).	48
5.9	Difference in average work time (* : $p < 0.05$).	49
5.10	Usability of AOA (* : $p < 0.05$).	49
6.1	Applications of the wearable robot arm.	52

表目次

1.1	Features of existing wearable robot arms. MP: mounting position; DoF: degrees of freedom; WS: workspace.	4
3.1	Passive joint specification.	27
3.2	DH parameter for the passive joints.	27
3.3	DH parameter for overall robot arm.	30
3.4	Specifications of the active joints in the wearable robot arm.	30

第 1 章

緒言

ユーザの作業を支援するためのデバイスは世界的にも多く研究されている。その中でも、ウェアラブルロボットは、身体拡張をテーマとしたデバイスが多く、高重量を持ち上げるサポートを行うなど、ユーザへの身体的負担を軽減するものが多く存在する。

本章では、主に、ウェアラブルロボットの中でも Supernumerary Robotic Limbs (SRLs) についてウェアラブルロボットの発展にともなう現状の問題を関連研究を参考に述べる。

1.1 Supernumerary Robotic Limbs(SRLs)

厚生労働省によると、2021 年 8 月時点でコロナウイルスの影響による解雇等見込み労働者数は 11 万 3272 人となり、労働者不足問題はより加速している。これにより、一人当たりの作業量が増加するため、労働時間の延長や過労による健康面への影響等の問題が生じる。この問題を改善する方法の一つとして、ロボティクス技術を用いて、労働者一人当たりの生産性を向上させ、労働者不足問題の軽減を図る試みがある [1]。過去数十年間に渡り、様々なウェアラブルロボットが開発され、その応用範囲は多岐にわたる [2]-[9]。外骨格を用いてユーザへの負担軽減や力の増加を目的とする研究 [4], [6], [8] や、Supernumerary Robotic Limbs (SRLs) の多機能性を発揮し、人体を支える余分な腕や足となり、作業を補助する研究 [3], [5], [7] などがある。外骨格を用いた研究は、主に介護現場や荷物の搬送などの、人体に重量負荷が加わる場面にて応用されている。実際にパワーアシストスーツは空港の荷物搬送等で用いられており、作業負担の軽減に成功している。SRLs はユーザに物理的なサポートを提供し、ユーザの作業スペースの拡大や協調作業など支援方法は様々である。SRLs の中でも、高重量を扱うウェアラブルロボットと、軽重量を扱うウェアラブルロボットの 2 種類に分類できる。

高重量を扱う SRLs の例として、ユーザの姿勢をウェアラブルロボットが支える研究 [10], [11] がある。ユーザ自身の姿勢を SRLs を用いて保持し、作業時の無理な姿勢等の

負担を軽減する。また, [10] では, SRLs のそれぞれの特徴を組み合わせることで, 多様なユーザ補助や人体拡張が行えるシステムとして構築可能であると述べている。軽量なオブジェクトを扱う SRLs の例としては, Ding らの [12] がある。SRLs を上腕に装着し, テープやペンなどの軽量なオブジェクトを把持し, ユーザに供給する。この SRLs は, 使用しない場合において, ロボットアームを折り畳み収納できる。また, 軽量なオブジェクトを扱う SRLs の一種として Supernumerary Robotic Fingers(SR Finger) がある。指のようなロボットをユーザの手に装着し, ユーザと協調して作業を行う。指や腕を用いて, 物を掴む, 回転させるなどの支援を行う [13], [14]。SRLs は, 様々な分野への応用が期待され, 近年世界中で注目されている研究分野である。

しかし, SRLs には, 独自の課題がある。SRLs は, 従来のマニピュレータとは異なり, 固定位置がユーザ自身である。これは, 常にユーザの作業範囲を追従できるため, メリットでもあるが, ロボットアームの位置・姿勢制御に人の動きが干渉するためロボットアームの位置や姿勢予測が困難となり制御が難しい [15]-[18]。さらに, SRLs をユーザの体の一部として認識させることで, 外部環境との接触の危険性を軽減する必要がある。また, ユーザに装着するためロボットアームの重量を十分に軽量化する必要がある。これらの問題を解決するために, 様々な国の研究者が, 様々な観点から科学的な研究を行い, 既存の問題を解決し, 操作の安全性向上や実用化を目指している [19]-[23]。本研究では, SRLs が現在直面している重量・安全性・操作性の課題を分析・整理し改善に向けた方策を探る。

1.2 作業支援への応用

Fig. 1.1 に SRLs の研究例をいくつか示す。Parietti らの [3], [19] は, **Fig. 1.1 (a)** に示すように, 腰に装着する SRLs を開発した。このデバイスは, 航空機の組立作業など, 重量が重く, 人では行えない困難な作業を支援する。この研究では, 従来の産業用ロボットをユーザに装着し効率的に作業を行えるようにした。**Fig. 1.1 (b)** は, Gonzalez らが研究しているユーザの姿勢保持用の SRLs である [20]。背中に装着した双腕ロボットアームにてユーザの体を支えることで, 低姿勢の作業負担を軽減し作業効率の向上が期待できる。これらの SRLs は, 高重量を扱うため, 高出力なアクチュエータを用いて実装する必要がある。また, Khodambashii, Gopinath らの [21], [22] は, **Fig. 1.1 (c)** に示す様に, 肩に装着した小型のロボットアームを用いて, ユーザと同時にドラムを叩く。モーションキャプチャーにより, ユーザがドラムのどの位置をどの程度のピッチで叩いているかを認識し, ユーザの動きに合わせて SRLs がドラムを叩く。これにより, 2 本の腕では奏でられない音を実現できる。**Fig. 1.1 (d)** は, Bright ら [23] の頭上タスクの作業支援を行う SRLs である。このように, ロボットアームを用いた SRLs は目標タスクや用途により形状, 自由度が大幅に異なる。

従来, 人の作業代行, 精密な作業などで用いられるロボットアームだが, 近年, 小型化や低

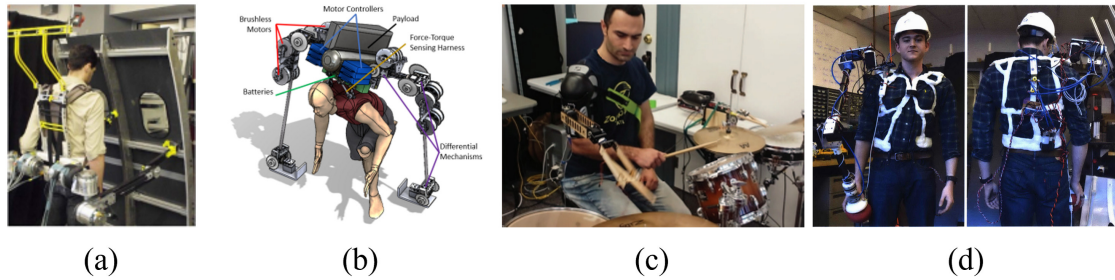


図 1.1: Different supernumerary robotic limbs.

価格化が進み多様な分野で活躍されるようになった。しかし、ロボットアームは設置した場所において一定の作業空間内でのみ駆動するため、異なる場所や広範囲での作業が必要な際は、別のロボットアームを導入するか、ロボットアームを設置し直す必要がある。そこで、研究されているのが、位置変更が可能なロボットにロボットアームを乗せる三菱重工の [24] や、ドローンにロボットアームを取り付けた大西らの [25] などである。これらの研究により、ロボットアームの弱点である作業範囲の限定は改善される。しかし、工場や農業現場などの特殊な作業環境によっては導入が困難な場合がある。また、人が行う作業環境への適応性が高いヒューマノイドなども作業代行の例として挙げられるが、ヒューマノイドを導入するためのコストは高く、2足歩行の安定性不足も課題である。このような場合にも SRLs は有用である。Table. 1.1 に、既存の SRLs の仕様を示す。Parietti らの [1] や、浅田ら [10] などの SRLs は、高重量なオブジェクトを支える必要があるため十分な強度で実装する必要がある。また、Zeyu らの [12] の様に、軽量なオブジェクトの把持支援を行う小型で軽量な SRLs も研究されている。SRLs は目的に応じて、多種多様な形状があり、人に装着し作業の支援を行うため、ヒューマノイドの様に自律移動を行う必要がなく、コストも低いため実用化が試みられている。

Inseong らの [26] や、Kern らの [27] のように、ロボットを人に装着し、作業アシストや協調作業を行うことで、人の負担軽減や作業効率の向上などのメリットがあり、介護施設や作業現場などにおいて注目されている。この技術を用いて、作業負担を軽減するパワードスーツ (Powered Exoskeleton) などの実用化が進んでいる [28]。パワードスーツは労働者や高齢者などに適用でき、作業負担の軽減や、リハビリテーションなどの補助として期待される。また、Khodambashii らの [21] のようなロボットアームを人に装着し、人と協調作業を行うウェアラブルロボットは、人に装着し利用するため、人間の生活環境への適応性が高く、人と協調しやすい距離が維持できる。これらの特徴から、SRLs は作業現場や日常生活への応用が期待されている。

表 1.1: Features of existing wearable robot arms. MP: mounting position; DoF: degrees of freedom; WS: workspace.

Referance	MP	Dof	WEIGHT	WS
F. Parietti et al. 2016 [1]	Waist	3	13 kg	Middle
D. A. Kurek et al. 2017[10]	Waist	2	12.7 kg	Middle
Zeyu Ding et al. 2021[12]	Upper arm	3	678 g	Middle
Parietti et al. 2013 [32]	Waist	6	18kg	Middle
Parietti et al.2015 [34]	Waist	3	9kg	Middle
Baldin et al. 2014 [35]	Shoulder	5	4.5kg	Low
Vatsal et al. 2018 [36]	Elbow	3	2kg	High
Nakabayashi et al. 2017 [37]	Shoulder	5	unknown	Middle
Saraiji et al. 2018 [38]	Waist	6	9.6kg	Middle
Sasaki et al. 2017 [39]	Waist	7	unknown	Middle

1.3 有用性と問題点

SRLs は 3 本目の腕としてユーザと協調作業を行う。ユーザにロボットアームを直接装着するため、ロボットアームの重量や、ロボットアームが把持したオブジェクトの重量がユーザの負担となる。また、両手を作業に用いた状態でどのようにロボットアームを操作するかも問題である。この社会的問題を解決するにあたり、SRLs が抱える問題に、ユーザへの重量負担問題と操作性問題がある。重量負担問題は、ロボットアームの重量が増すことでユーザへの負担も増し、作業効率や安全性の低下が懸念される。ロボットアームに器用さが必要な作業を実行させる場合、高性能のアクチュエータが必要となるため、ロボットアームの重量は重くなる。つまり、高性能のアクチュエータによって動的に関節角度を制御するには、アクチュエータが必然的に高出力、高重量のものになってしまう。アクチュ

エータの出力トルクは、ロボットアームの根元関節に行くにつれて大きくなるため、根元関節は必然的に高重量なアクチュエータとなる。これにより、ロボットアームの総重量は重くなりユーザへの負担につながる。また、工場や作業現場で用いられる産業用ロボットアームは、ユーザとの接触による事故を防ぐため、ロボットアームの可動エリアへの侵入禁止や非常停止装置などの規定が厳しい。理由は、ロボットアームの重量が重く、接触の際に人への衝撃が大きいからである。装着型ロボットアームも例外ではないため、重量を軽量化することで安全性への配慮及び実用化につながる。その際に SRLs を、どのように操作するかが操作性問題である。

この課題を解決するために、森園らの筋電位を用いてロボットアームを操作する方法 [29] や、岩崎らの人の顔方向ベクトルから三次元目標位置を示す “face vector” [30] などの操作方法が研究されている。しかし、この操作性問題は、Nimawat らの [31] でも述べられてるように、ロボットアームの想定外の動きにより、ユーザに危険が及ぶ可能性もある。これは、ロボットアームの全関節が動的に駆動するため UI (User Interface) による操作が難しく、ユーザの操作ミスや UI の誤認識によりロボットアームが人に接触する危険性が高いことを意味する。さらに、SRLs でも、ロボットアームの重量が重くなるにつれて、人と接触した際の危険性はより増加していくため、全関節を動的に駆動するロボットアームの機構を用いた場合、重量負担問題、操作性問題の軽減は共に限界がある。本論文では、既存の SRLs の構成を用いた改善が困難な、重量負担問題と操作性問題の改善を目標に、ロボットアームのデザインを提案し、問題点や改善点について検討し考察する。

1.4 本論文の構成

SRLs の実用性を考慮するために、2 章にて SRLs の軽量化方法と操作性について述べる。2 章では、本研究にて提案した Assist Oriented Arm (AOA) のデザインや重量について検討する。また、検討した AOA の操作性について評価する。3 章では、SRLs における最適な関節構成とリンク長を検討する。ユーザの作業範囲とロボットアームの作業範囲が重なる領域 (協調範囲) が最も広くなるような最小限の関節構成とリンク長を評価する。4 章では、応力解析によりユーザへの重量負担が軽減される形状の装着方法を検討する。また、ロボットアームのボディがユーザの作業範囲内を侵襲する領域 (侵襲範囲) が狭く、協調範囲が広くなるような装着位置を検討し、各装着位置における応力負担も考慮する。5 章にて AOA のロック機構の改良を行い、改良した AOA を用いてタスク実験を行い評価する。最後に、6 章にて本論文をまとめる。

第 2 章

軽量化と実用性を考慮した SRLs の提案

SRLs の軽量化と実用性を考慮するために、人の作業方法について調査する。作業時における人の腕の使い方を SRLs に適用することで、ロボットアームの軽量化を図る。ロボットアームの軽量化により、装着者への負担が軽減され、長時間の使用が期待できる。

本章では、SRLs を軽量化するためのアイデアとデザインについて述べる。また、従来の SRLs と比較しどの程度の軽量化が期待できるかを評価する。軽量化デザインによる操作性や作業効率への影響についてシミュレーションを用いた評価実験を行う。

2.1 関連研究

SRLs は、第三の腕として人の作業支援などを行うため、多種多様な研究が行われている。SRLs の主な支援内容としてオブジェクトの保持やユーザの補助が挙げられる。Baldin らの [32], [33] は、バックパック型の装着装置によりロボットアームを人に装着する。[32], [33] は、オブジェクトや、柱などを自動で把持しユーザのバランスを維持する事が可能である。また、Federico らの [34] は、作業時にユーザの姿勢を支えるために [33] を改良したロボットアームについて述べている。自由度が 3 自由度のため、[33] と比較すると軽量化が図られている。その他にも、Baldin らは肩に装着し天井パネルの取り付け作業を支援する装着型ロボットアームを提案している [35]。5 自由度のロボットアームがユーザの手に装着した IMU センサの入力を基に天井パネルを支える。これにより、ユーザの両手は自由になり、取り付け作業に集中できる。また、Vatsal らの [36] は、肘に装着し両手が塞がったユーザの代わりに作業を行うロボットアームを研究している。

これらは、ユーザのメインタスクのサポートを行うことで、ユーザの作業効率の向上が期待できる SRLs である。しかし、保持可能な重量が重くなるほどロボットアームの重量

も増加し、ユーザへの重量負担が大きくなるため、負担の少ない部位に装着するなどの検討が必要である。また、装着位置を作業空間や協調性を評価し検討を行った研究として中林らの [37] がある。上記の SRLs とは別に、人とのインタラクションを行う SRLs として、Saraiji らの [38] や、佐々木らの [39] が研究されている。[38] は、ロボットアームとカメラを統合したウェアラブルデバイスで、遠隔地の相手が HMD とコントローラを用いてユーザに装着したロボットアームを操作する。遠隔地の相手とユーザはカメラとロボットアームを通して同じ作業空間でインタラクションが行える。[39] は、7 自由度のロボットアームをモーションキャプチャを用いて人の足と同期させ操作する SRLs である。ユーザ自身の足と同期し操作するため、3 本目の腕のように直感的なインタラクションが行える。

これらの共通点は、ユーザと同等の器用さが必要な作業を SRLs が実行する事である。また、ユーザとのインタラクションを行うには、ロボットアームが十分な稼動領域を確保する必要があるため、6 自由度などの多自由度ロボットアームが必要となる。しかし、これにより、ロボットアームの重量が増し重量負担が懸念される。また、UI の操作方法やロボットアームとユーザの接触の危険性も課題である。

SRLs は、ウェアラブルロボットとしてユーザに取り付けるため、以下に示す項目が重要となる [40]。

- 安全性: ウェアラブルロボットにおいて、安全な運用保証は、最も重要な点である。ユーザが意図しない動きは、避けなければならない。例えばユーザの体にデバイスが衝突する、デバイスに挟まれるなどの危険性は排除する必要がある。
- 人間工学と快適性: ウェアラブルロボットの設計において、課題のひとつに「適応性」がある。ユーザのニーズや人間工学的な観点から、自然で負担の少ない形状や装着方法を用いる必要がある。また、装着方法・位置に問題が生じた場合、ユーザ負担による怪我が生じる可能性がある [41]。
- 人体への荷重: ウェアラブルロボットは、ユーザの筋骨格系に荷重が加わる。そのため、人体のどの部分にどの程度の強さの荷重をかけるか、どのような方法でかけるかが問題となる [42]。
- 制御方法: ウェアラブルロボットは、ユーザとの協調制御が必要である。ユーザの動きによりロボットが影響されるため、ロボットの制御だけではなくユーザの動きを考慮した制御方法が必要となる。
- 使いやすさ: 装着位置、制御方法、重量感などによるウェアラブルロボットとしての使いやすさも考慮すべき点である。

本研究では、SRLs を実装する上でこれらの項目を考慮し設計、開発を行った。

2.2 軽量なロボットアーム設計におけるアイデア

本研究では、SRLs の重量負担問題と操作性問題を改善するために人の作業方法に着目した。安部らの [43] では、人の作業時には肘、手首などの腕群と頭、肩などの胴体群に分かれて独立した動きを行う特徴があると述べられている。本研究では、様々な作業における人の手の動きを観察した結果、特定の作業では 2 種類の関節群にて異なる役割を持っていると結論付けた。この 2 種類の関節群を SRLs にも適用し、SRLs のメカニズムを検討する。人がハンダやドリルを用いた作業などを行う際、作業前に肩や肘関節を用いて腕全体を動かし作業領域まで手先を運ぶ。その後、手先の関節を用いて作業を実行するため、作業中は作業領域が変更されない限り根元の関節は大きく動作しない。作業実行中においては、必ずしもロボットアームの全関節が動的に駆動する必要は無いとすると、作業前に動かす根元関節と作業中に動かす手先関節の独立した動きを行う 2 群にロボットアームの関節を分けることが可能である。しかし、7 自由度ロボットアームなどの冗長性があるロボットアームの場合、手先の位置指定だけではロボットアームの姿勢は一意に決定されない。また、作業領域により最適な装着位置が異なる SRLs は、装着位置毎にユーザと干渉しないロボットアームの姿勢を考慮する必要があるため姿勢制御が困難である。冗長性の制御はロボットアームの大きな課題として Li らの [44] で研究されている。人の腕は 7 自由度あるが、作業に無理のない自然な関節角度を人が判断し制御しているため冗長性を考慮している。また、Mohammed らの [45] は、人の腕を基に手首位置と肩関節の運動学を用いた関係式を示している。この関係式と作業に無理のない自然な関節角度を考慮し制御すると、手首位置に対して肩関節の角度は一意に決定すると言える。

よって、多自由度の SRLs でも根元関節を用いて手先位置を人が決定することで、ロボットアームの姿勢を一意に決定することが可能と考える。これにより、ロボットアームの関節を作業前に動かす根元関節と、作業中に動かす手先関節に分けて独立的な操作を行い、重量負担問題と操作性問題の軽減を検討する。この独立した 2 種類の関節操作方法を用いて、以下の 1～3 の手順で SRLs を用いた作業支援を考える。

1. ユーザの作業前に SRLs の根元関節を用いてロボットアームの手先位置を作業領域に合わせる
2. 作業中、SRLs の根元関節は、関節角度を固定し作業領域を大きく動かさない
3. SRLs の手先関節は、アクチュエータを用いて動的に角度制御を行いユーザの作業支援を行う

この操作方法により、SRLs の根元関節は、従来の重いアクチュエータから静的に関節角度を固定する簡易で軽量なロック機構で代用でき SRLs 全体の軽量化が期待できる。ま

た、根元関節の操作方法に UI などのデバイスを介さず、人が直接ロボットアームのボディを把持し根元関節を操作することで、操作性問題の課題である直感的な操作が可能となり、誤操作によるロボットアームとユーザが接触する危険性も軽減される。上記のアイデアを基にプロトタイプとして軽量化と実用性を考慮した”Assist Oriented Arm (AOA)”を提案する。

2.3 AOA のデザイン

作業実行中にはロボットアームの全関節が必ずしも動的に駆動する必要は無いと仮定すると、作業実行前に動かす根元関節は、作業実行中には関節が固定され動かなくとも、手先に動的な関節があれば作業が可能となる。これにより、根元関節は、関節角度を固定する静的な関節を用いることが可能となり小型のアクチュエータで代用でき軽量化できる。まとめると、作業実行前に根元の静的な関節で手先の作業領域を決定し、手先のアクチュエータを用いた動的な関節で作業を実行する SRLs を検討する。

しかし、前節でも述べたように、7 自由度ロボットアームなどの冗長性があるロボットアームの場合、作業領域の決定のみでは腕の姿勢は一意に決定されない。また、人の腕も同様に、決定した作業領域に対して複数の姿勢をとりうる。人は不自然な姿勢と自然な姿勢を判断し冗長制御を行っているため適切な姿勢の選択が可能である。そこで、ユーザがロボットアームの根元関節を冗長性を考慮し操作することで、多自由度のロボットアームでも姿勢が一意に決まる。

これらを踏まえて、プロトタイプ AOA の最も重要な特徴である根元の静的な関節をパッシブ関節、手先の動的な関節をアクティブ関節と呼称し、それらを組み合わせた機構”Hybrid Actuation System (HAS)”を提案し実装した。HAS を実装する上で、パッシブ関節、アクティブ関節の自由度の選定が最も重要となる。パッシブ関節の自由度を増加させるとロボットアームはより軽量、安全になるが、作業のアシスト力が低下する。また、アクティブ関節の自由度を増加させると作業のアシスト力は増すが、軽量化や安全性が低下する。

このトレードオフの関係性において重要なパッシブ関節の自由度とアクティブ関節の自由度を作業タスクに基づいて選定する必要がある。まずは、プロトタイプとして簡易的に作業領域を移動可能な SRLs の実装を目指し、HAS のパッシブ関節、アクティブ関節を用いてロボットハンドが 3 次元上に可動する最小限の自由度構成の選定を行った。Fig. 2.1 にてその構成を示す。

提案した機構ではパッシブ関節、アクティブ関節共に独立した駆動を行う。よって、それぞれの関節に 3 次元を可動する自由度が必要となる。ユーザの作業スペースへアクセス可能な自由度の構成として球座標系ロボットと直交座標系ロボットが考えられる。それぞ

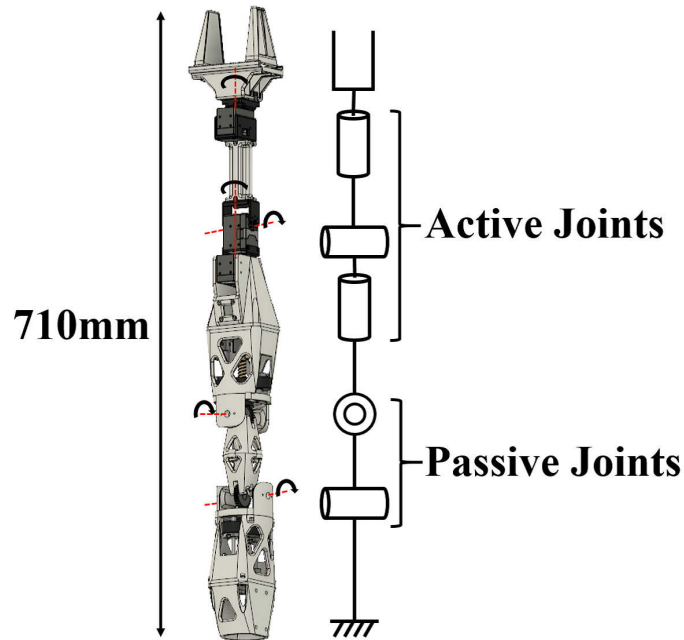
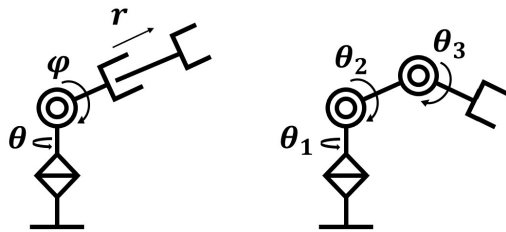


図 2.1: Mechanism of Assist Oriented Arm (AOA).



(a) Spherical robot (b) Articulated robot

図 2.2: Example of robot arm's joint configuration.

れの例を **Fig. 2.2** に示す. **Fig. 2.2 (a)** の球座標系ロボットは, ロボットハンドの座標位置を θ, ϕ, r を用いて表現できる. また, **Fig. 2.2 (b)** の直交座標系ロボットは, 同じ回転軸をもつ関節を複数個組み合わせることで, 3次元直交座標系における平面上を可動範囲とする. 球座標系ロボットは, 直交座標系ロボットと比べて低自由度で3次元上をロボットハンドが可動するため最小限の自由度でユーザの作業スペースと協調できる. プロトタイプとして最小限の関節構成で実装することを目指すため, HAS の構成は, パッシブ関節 (Pitch-Yaw), アクティブ関節 (Roll-Pitch-Roll) の5自由度とグリップで実装する.

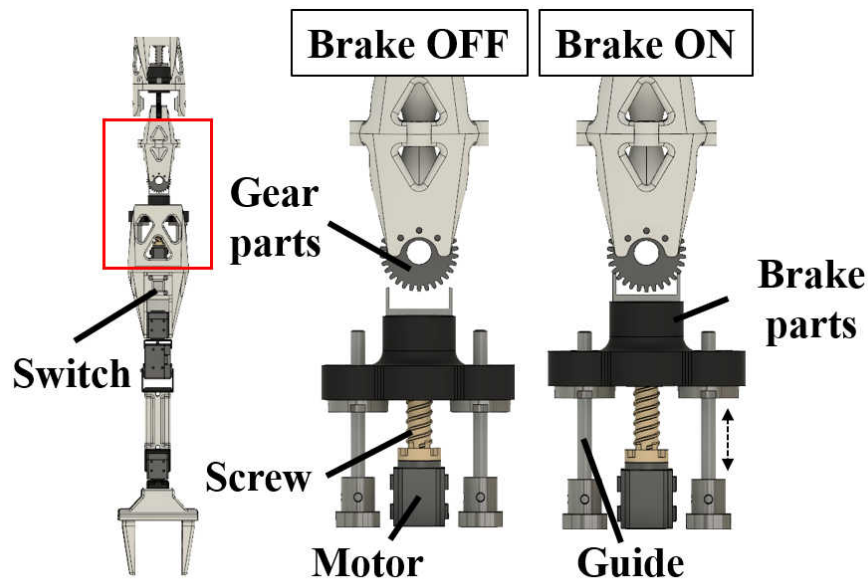


図 2.3: Locking mechanism of passive joints.

パッシブ関節

ロボットにおける関節は、アクチュエータを用いることで動的に駆動する。このアクチュエータを制御することで、ユーザが意図した動きをロボットに実行させる。しかし、従来のパッシブ関節は、Collins らの [46] の様に、関節はベアリング等のパーツで設計されており重力やユーザからの力を用いて駆動する。本研究で提案するパッシブ関節は、ロボットアームに用いるため、アクチュエータを用いた角度制御の代わりに、物理的に関節角度を固定するための機構が必要である。例えば、PC モニタを支えるアームの様にネジで関節を固定した場合、関節を動かす際にネジを回しロックを開閉する必要があるためユーザへの操作負担が大きい。そのため、ユーザが簡易にロックの開閉を行える機構が必要である。そこで、本研究では **Fig. 2.3** に示すギア形状を用いたロック機構を実装した。ここでのギアパーツは関節を固定するために用いており、ギアパーツとロボットアームのリンクパーツは一体化されている。ギアパーツの中心軸を基準に、リンクパーツが回転するため、ギアパーツを固定することで、関節の回転角度も固定される。このギアパーツと対になるブレーキパーツが、アクチュエータにてリニア駆動することで、ギアパーツと噛み合い固定され関節角が保持される。また、人がロボットアームのリンクを直接把持し操作するため、ロボットアームのリンク上にスイッチを取り付け、ロックの ON/OFF を片手で容易に行えるように設計した。

関節角を固定する力は、ガイドパーツの固定強度に依存するため、パッシブ関節のアクチュエータに必要なトルクは、スクリュを回転させる力のみである。よってアクチュエー

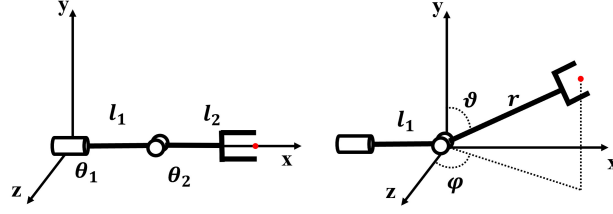


図 2.4: Rectangular and spherical coordinates in active joints

タは関節角を固定するトルクを考慮する必要がないため軽量で低出力なアクチュエータを用いて実装可能となる。

アクティブ関節

アクティブ関節は、3 自由度の回転関節とグリッパがある。3 自由度のうち 1 つはグリッパの姿勢回転に用いるため、先端座標の位置制御に関する回転関節は Roll-Pitch の 2 自由度である。また、アクティブ関節は、動的にアクチュエータを用いて駆動するため運動学、逆運動学を用いて先端座標を操作する。以下にアクティブ関節の運動学、逆運動学を示す。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 + l_2 \cos \theta_2 \\ l_2 \sin \theta_2 \cos \theta_1 \\ l_2 \sin \theta_2 \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \frac{z}{y} \\ \tan^{-1} \frac{y}{x - l_1} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

球座標ロボットの先端座標を上下左右に操作するために、アクティブ関節を **Fig. 2.4** の右に示す極座標から r, θ, ϕ を用いてロボットアームの先端座標を表現する。この θ, ϕ を増減し求めた先端座標を、**Fig. 2.4** の左に示す直交座標に変換し逆運動学にて関節角度として求める。極座標から直交座標への変換式を以下に示す。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \sin \theta \cos \phi \\ r \sin \theta \sin \phi \\ (r + l_1) \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

これにより、球座標上におけるアクティブ関節の先端座標を θ, ϕ を用いて 3 次元的に制御する。

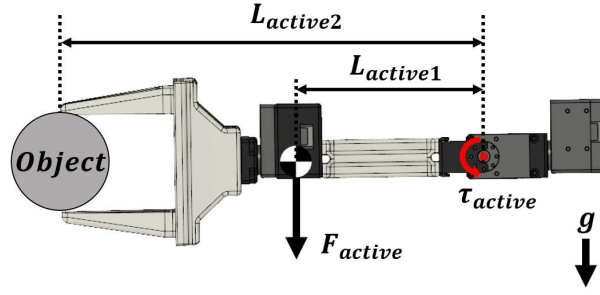


図 2.5: Definition of torque calculation in active joints

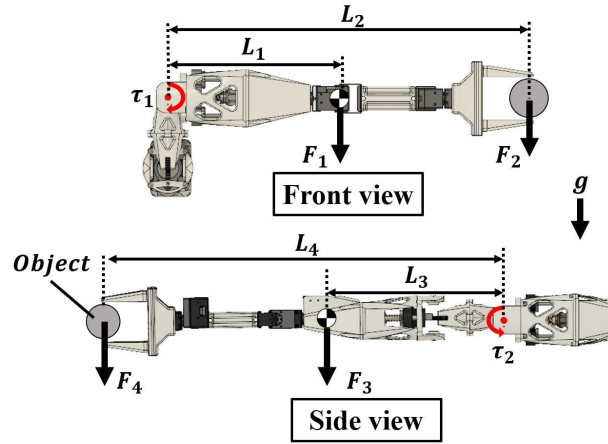


図 2.6: Definition of torque calculation in passive joints

2.4 重量比較

本研究で提案した SRLs の特徴である HAS を用いることで、重量がどの程度軽量化されるかの検証を行う。しかし、既存の SRLs との重量比較を行うには、目的タスク、自由度、長さなど様々な点で条件が異なるため一概に比較は行えない。そこで、すべての関節にアクチュエータを用いて実装したロボットアームを比較対象として用いる。以後このロボットアームを Act とする。

Act の根元関節に用いるアクチュエータの選定方法を検討する。Act の手先部分は AOA のアクティブ関節を用いるため、このアクティブ関節の限界保持重量を求め、その重量を基に Act の根元の関節に必要なトルク値を求め、アクチュエータを選定する。

AOA のアクティブ関節は、ROBOTIS 社の XM540-W270-R を用いて実装した。このアクチュエータの出力トルクは $10.6Nm$ である。Fig.2.5 に示す τ_{active} がアクティブ関節の保持トルクである。この τ_{active} に、アクチュエータの最大出力トルクである $10.6Nm$ を

用いてアクティブ関節の限界保持重量を求める． τ_{active} の回転軸から手先までの質量と距離をそれぞれ， $M_{active} = 0.45kg$ ， $L_{active2} = 0.27m$ とし， τ_{active} の回転軸から重心位置までの距離を $L_{active1} = 0.135m$ とすると，限界保持重量 M_{limit} は $F_{active} = M_{active} * g$ を用いて以下の式で得る．ただし g は重力加速度 ($9.8ms^{-2}$) である．

$$\begin{aligned}\tau_{active} &= M_{limit}gL_{active2} + M_{active}gL_{active1} \\ M_{limit} &= \frac{\tau_{active} - F_{active}L_{active1}}{gL_{active2}} \\ &= 3.8kg\end{aligned}\tag{2.4}$$

この限界保持重量を用いて **Fig. 2.6** に示す τ_1 ， τ_2 を求める．まず， τ_1 を求める． τ_1 の回転軸から手先までの質量を M_1 とし，その重心位置までの距離を L_1 とする．また，手先に先ほど求めた M_{limit} を把持し， τ_1 の回転軸からオブジェクトまでの距離を L_2 とすると F_1 ， F_2 を用いて以下の式で表せる．

$$\begin{aligned}\tau_1 &= F_1L_1 + F_2L_2 \\ &= M_1gL_1 + M_{limit}gL_2\end{aligned}\tag{2.5}$$

$g = 9.8ms^{-2}$ ， $M_1 = 0.5kg$ ， $L_1 = 0.27m$ ， $L_2 = 0.52m$ とすると τ_1 は，

$$\tau_1 = 20.6Nm\tag{2.6}$$

となる．この τ_1 のトルク値を出力可能なモータとして ROBOTIS 社の H54-100-S500-R(A) を選定する．出力トルクは $25.3Nm$ で $0.732kg$ である．このアクチュエータの重量を考慮し， τ_2 を求める． τ_2 は， τ_2 の回転軸から手先までの質量を M_2 ，重心位置までの距離を L_3 ， τ_2 の回転軸からオブジェクトまでの距離を L_4 とすると F_3 ， F_4 を用いて以下の式で表せる．

$$\begin{aligned}\tau_2 &= F_3L_3 + F_4L_4 \\ &= M_2gL_3 + M_{limit}gL_4\end{aligned}\tag{2.7}$$

$g = 9.8ms^{-2}$ ， $M_2 = 0.55kg + 0.732kg$ ， $L_3 = 0.25m$ ， $L_4 = 0.643m$ とすると， τ_2 のトルクは

$$\tau_2 = 27.2Nm\tag{2.8}$$

となる．この τ_2 のトルク値を出力可能なモータとして ROBOTIS 社の H54P-200-S500-R を選定する．出力トルクは $44.7Nm$ で $855g$ である．モータは，十分に軽量で高トルクが

出力可能なギアボックスを用いたモータであり，ROBOTIS 社に統一することで比較基準を設けた．

これらの結果から，4 自由度全ての関節にアクチュエータを用いて角度制御を行った場合のロボットアーム (Act) の重量はアクティブ関節が 0.45kg， τ_1 のアクチュエータが 0.732kg， τ_2 のアクチュエータが 0.855kg，よって Act の合計は約 2.0 kg となり，AOA の重量約 1.2 kg と比較すると，約 40% の軽量化が確認できた．また，アクチュエータを用いて角度制御を行う関節の場合，手先関節部分の自由度やリンク長が増えるに従い，求めた τ_1 ， τ_2 の必要トルクは増加しアクチュエータが重くなるため，HAS を用いた軽量化の有効性はさらに向上する．よって，HAS を用いた AOA は，HAS を用いずに実装した場合と比較し約 40% 以上の軽量化の可能性があると言える．

2.5 AOA の評価実験

SRLs の関節にパッシブ関節とアクティブ関節を用いた AOA を提案し，SRLs の軽量化が図れた．しかし，2 種類の関節を組み合わせることで操作性が低下した場合，ロボットアームとしての有意性が薄れる．よって，HAS を用いた場合と，用いない場合で操作性の差を評価する必要がある．しかし，UI によって操作性は大きく異なるため，操作方法を統一し，パッシブ関節とアクティブ関節の操作性における差を評価する．

2.5.1 実験目的

従来のロボットアームは，全ての関節にアクチュエータを用いて角度制御を行うため，ロボットアームの手先目標座標を入力するとロボットアームの関節が動的に駆動し，入力した目標座標まで手先が移動する．しかし，本研究で提案した AOA は，パッシブ関節を用いておおよその作業領域に手先を移動させ，アクティブ関節にて動的に作業を実行する HAS を用いる．これにより，ロボットアームの操作性や操作難易度，または作業効率などに影響が生じる可能性がある．よって，全ての関節を動的に駆動した場合と，HAS を用いた場合で作業効率，操作性に影響が生じるか評価を行う．

HAS の評価を行う際に，比較対象として全ての関節にアクチュエータを用いて動的に角度制御を行うロボットアームを実機にて実装するのは困難なため Unity を用いてシミュレーション上で実装し評価を行う．HAS を用いた AOA の比較対象として，全ての関節を動的に駆動するロボットアームをシミュレータ上にて実装した．以下にそれぞれの特徴を示す．

- PasAct (Passive-Active)：実機の AOA をシミュレーション上にて実装した．根元の 2 関節をパッシブ関節，手先の 2 関節をアクティブ関節として操作する．アクティ

ブ関節は上記で示した，極座標変換，逆運動学を用いて操作する．

- Act (Active)：ロボットアームの構成は PasAct と同様であるが，全ての関節をアクティブ関節とし操作する．既存のロボットアームと同様に，4 自由度すべてがアクチュエータを用いて角度制御を行う関節として制御し操作する．

これらのシミュレーションは全てキーボード入力により操作を行う．実機 (AOA) の操作方法は，アクティブ関節とパッシブ関節で操作方法が異なる．アクティブ関節の操作方法は，4つのスイッチが上下左右に対応しており，ロボットアームの先端座標を操作する．これは，シミュレーションにおけるキーボード入力と同様の操作方法である．パッシブ関節は，人が直接把持を行い操作するためパッシブ部分の操作のみシミュレーションと異なる．また，全てのロボットアームの関節回転速度を実機の AOA と同様に $270 \text{ deg} / \text{sec}$ で実装した．

この評価実験では，PasAct と Act の作業効率，操作性における比較を行う．これらの間に有意差が確認できない場合は，HAS を用いた場合でも，作業効率，操作性に影響はあまり無いと言える．

2.5.2 実験内容

シミュレーション上で実装したロボットアーム 2 種類と実機の計 3 種類で作業効率，操作性に有意差があるかを評価する．PasAct, Act それぞれのロボットアームの手先位置を **Fig. 2.7** に示すような手順でキューブの位置まで操作する．左のキューブ位置までロボットアームを動かすタスクを TaskA, 右のキューブ位置までロボットアームを動かすタスクを TaskB とし，TaskA と TaskB それぞれの作業時間を計測し，平均作業時間を求める．被験者は 20 代男性の 6 人とし，3 種類の操作方法からランダムに実行し，それぞれの操作方法にて 3 分間の習熟時間を設けた．また，実機の AOA では，**Fig. 2.8** に示すように，シミュレータと同じ距離に目標位置を設け同様のタスクを実施した．その際，被験者には立ち位置を指定し，状態を大きく動かせないよう指示している．これにより人の動きによるロボットアームの大幅なブレを軽減させ，シミュレーションと比較を行っている．なお，TaskA, TaskB に差は無いものとし 1 被験者あたり TaskA, TaskB の作業時間を用いて平均作業時間を求める．ロボットアームの操作後，それぞれアンケートを行い，作業効率，操作性を 5 段階で評価した．アンケートの質問内容を以下に示す．

- Question1：手先位置は思い通りに動かせたか
- Question2：操作の難易度

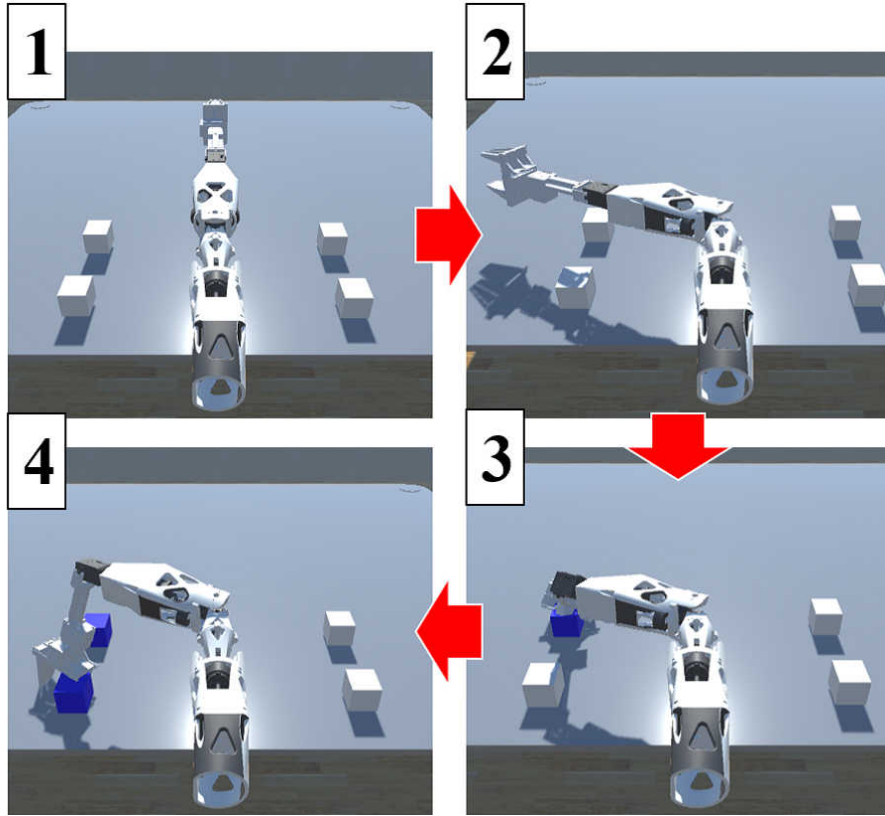


図 2.7: Experimental environment of simulation and state of movement

2.6 実験結果・考察

各ロボットアームにおける TaskA と TaskB の平均作業時間を，多重分散分析を用いて評価した結果と標準偏差を **Fig. 2.9** に示す．それぞれのタスクにおいて，3 種類のロボットアームにおける平均作業時間を比較し，計 3 種類の組に有意差があるかを t 検定にて評価した．まず，**Fig.2.9** の結果から，平均作業時間において有意水準 0.0167% で，PasAct と Act ($p = 0.96$)，PasAct と AOA ($p = 0.71$)，Act と AOA ($p = 0.49$) の 3 組ともに， $p > 0.0167$ となり，有意差は，確認できなかった．**Fig.2.10** にアンケートの質問に対する対応のある t 検定の結果を示す．**Fig.2.10(a)** に示す Question1 の手先は思い通りに動かせたかの質問結果として，PasAct と Act($p = 0.15$)，PasAct と AOA($p = 0.35$)，Act と AOA($p = 0.026$) は， $p > 0.0167$ となり，有意差は確認できなかった．**Fig.2.10(b)** に示す Question2 の操作難易度については，PasAct と Act($p = 1.00$)，PasAct と AOA($p = 0.04$)，Act と AOA($p = 0.04$) は， $p > 0.0167$ となり，有意差が確認できなかった．

これらの結果から，HAS を用いた SRLs は，アクチュエータで角度制御を行う同じ自由度構成のロボットアームと比較しても，作業効率において有意な差は無く，重量の軽量化

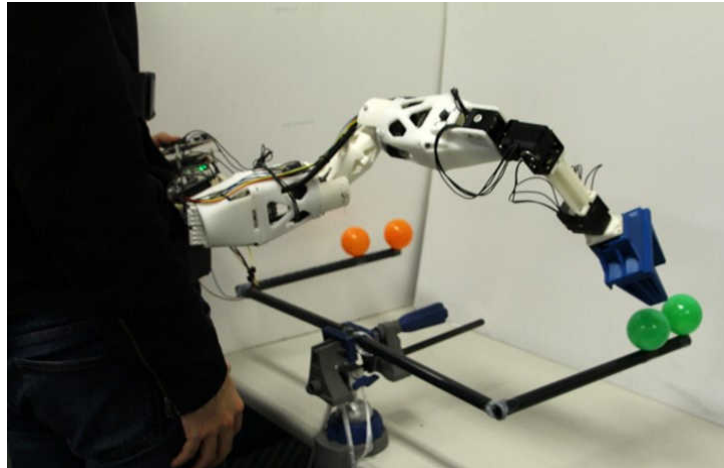


図 2.8: Experimental environment of AOA

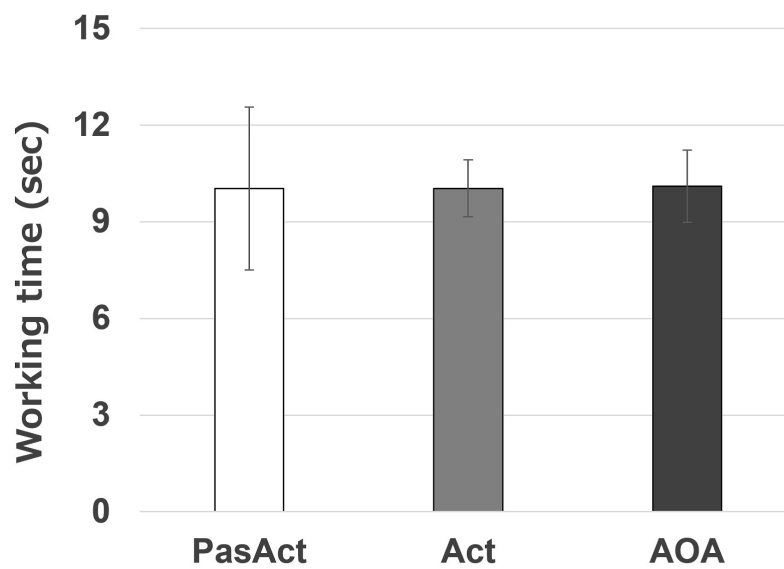
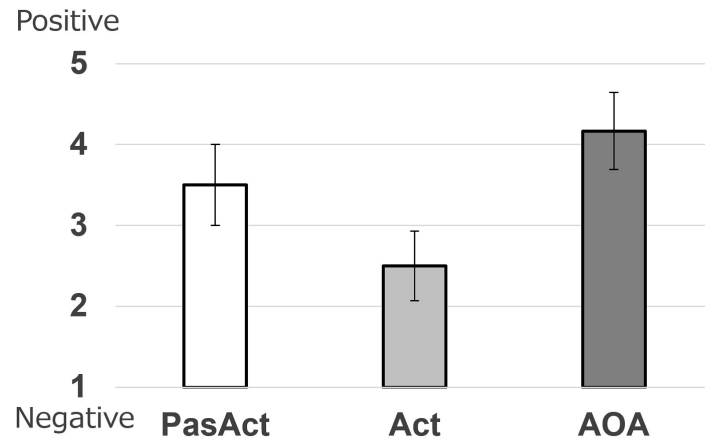
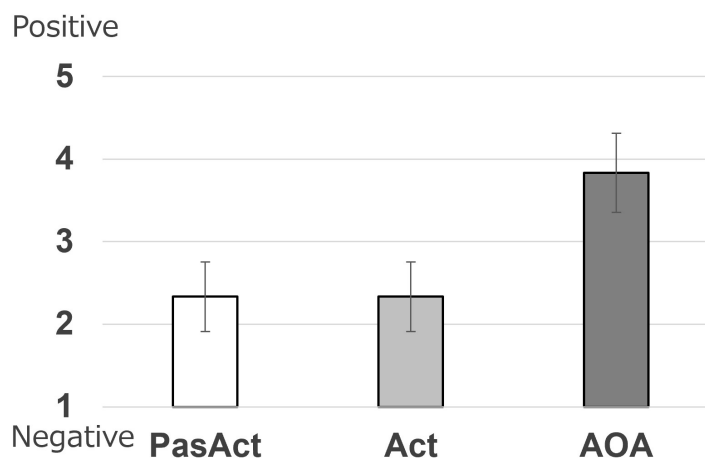


図 2.9: Average working time.* : $p < 0.0167$

が図れることを示した。また、シミュレーション上において、HAS を用いた SRLs は、操作性に関しても全ての関節を動的に駆動し操作した場合との有意差は無く操作性に大きな影響は無いことを示した。よって、HAS を用いることでロボットアームの作業効率、操作性に影響は生じず、軽量で直感的操作が行える SRLs として重量負担問題、操作性問題を軽減できることを確認した。



(a) Q1 : Were you able to move your hand as intended? * : $p < 0.0167$



(b) Q2 : State the difficulty of control. * : $p < 0.0167$

図 2.10: Result of questionnaire.

2.7 考察

重量面ではパッシブ関節とアクティブ関節を組み合わせることで、全ての関節をアクティブ関節にて実装した場合より約 40 % 以上の軽量化が期待できる。ロボットアームを軽量化したことにより、ユーザへの重量負担が軽減され作業継続時間の向上も期待できる。また、ユーザに装着した際の重量負担が軽減されるため、前腕や肩などのユーザ負担が大きな装着位置にもロボットアームの装着が期待できる。よって、様々な作業の支援が期待できるため支援可能なタスクの幅が広がる。さらに、軽量化によりロボットアームとの接触による衝撃が軽減されるため安全性が向上したと言える。

操作面においてパッシブ関節とアクティブ関節を分けることで懸念される影響は、全て

の関節をアクティブ関節で実装した場合と比較しても有意差はなく大きな影響は確認されなかった．よって HAS の採用は操作性に影響をあまり与えず軽量化が可能であると言える．しかし，作業支援内容によっては装着位置が変わるため，今後は作業内容とその際の装着位置についても検討していく必要がある．

また，関節の組み合わせにおいて，パッシブ関節が増えれば，ロボットアームはより直感的になり操作性が向上する．しかし，動的な作業支援ができず作業アシスト力が減少する．逆にアクティブ関節が増えた場合，ロボットアームを操作する UI を検討する必要がある．ユーザの両手は作業に用いられるため，手以外の部位にて操作を行う UI が必要となる．しかし，手以外の足や頭を用いて操作を行う場合，操作時に無理な姿勢をとる必要があるためユーザ負担が大きい．本研究では，アクティブ関節とパッシブ関節のバランスを作業時における人の腕の動きを基に検討した結果，根元関節に相当する肘，肩関節の 2 関節をパッシブ関節とすることで操作性，作業効率において大きな影響はなく軽量化が実現できた．

2.8 まとめ

本章では，作業時における人の腕の動きに着目し，根元と手先関節で独立した動きを行う特徴を参考に装着型ロボットアームの軽量化と実用性を考慮したデザインを検討した．また，そのデザインを基に装着型ロボットアーム AOA を実装した．重量は全ての関節をアクティブ関節として実装した場合のロボットアームと比較すると約 40 % 以上の軽量化が実現できた．また，操作性は，パッシブ関節とアクティブ関節に分けることによる影響は少なく，評価実験にて提案システムが軽量で直観的な操作性を有することが確認できた．

今後は本研究で開発したウェアラブルロボットアーム AOA に対し，既存の SRLs やウェアラブルデバイスを参考に，ユーザが負担を感じにくい装着方法と，装着位置について検討する．また，ロボットアームとユーザが協調して作業を行うために，AOA の関節構成やリンク長の検討を行う．その後，AOA の有用性について検証する．

第 3 章

SRLs の関節構成とリンク長

3.1 関連研究

Tanaka らの [47] では, ICF(International Classification of Functioning, Disability, and Health)[48], [49] に基づいた支援ロボットの評価と設計のフレームワークを提案している. 被験者の頭部にカメラを取り付け日常生活を記録した動画から, ユーザの手の使用状況を動作頻度等で分析している. [47] によると, 人の日常生活の 9 割に「持ち上げる」作業があると分析している. つまり, 持ち上げる作業を支援可能にすることで, 日常生活の 9 割の作業が支援可能となる. また, 持ち上げるタスクの対象物の 9 割は 300g 以下であると述べている. よって, 本論文では, AOA の作業目標を, 300g 以下の対象物を持ち上げるタスクとする. この目的作業を基に必要となる関節構成と装着位置を検討する.

中林らの [37] では, 4 自由度の SRLs の装着位置について検討している. ロボットアームのリンク長や関節構成を変化させ可動域を調査した. その際, ロボットアームの取り付け位置は, 腰, 胸, 肩の 3 カ所を選定し, 最適な取り付け位置とロボットアームの仕様を評価する. 評価指標として, ロボットアームとユーザの協調性と拡張性を用いた. また, ロボットアームのリンクがユーザの作業範囲内を多く占める場合, 作業実行に影響が生じるため, ロボットアームの侵襲性も考慮している. これに対して, 本研究では, HAS を用いた SRLs の関節構成とリンク長を検討し, 最適な装着位置を検討する必要がある. よって, [37] の協調性, 拡張性, 侵襲性の各指標を用いてロボットアームを評価した. **Fig.3.1** は, 拡張範囲, 協調範囲, 侵襲範囲の詳細を示したものである. メインワークスペースは, ユーザの手の届く範囲である. **Fig.3.1 (a)** の拡張作業範囲は, メインワークスペースの外側にあるロボットハンドの可動領域である. **Fig.3.1 (b)** の協調作業範囲は, メインワークスペース内のロボットハンドの可動領域である. **Fig.3.1 (c)** の侵襲作業範囲は, メインワークスペースにおいて, ロボットハンドの移動時にロボットアームのリンクがユーザの腕と干渉する範囲で

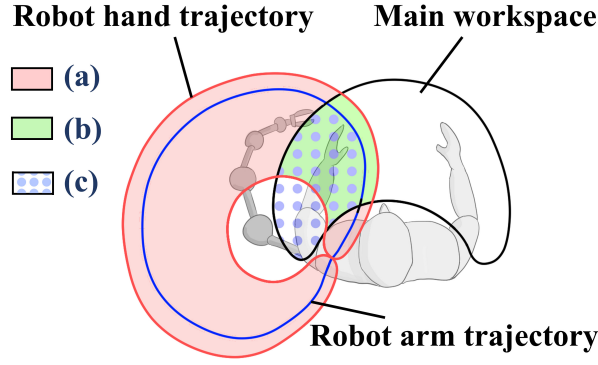


図 3.1: Definitions of the each workspace according to [37]. (a) extensive workspace, (b) cooperative workspace, (c) invasive workspace.

ある. 各指標の定義は以下に示す.

$$V_e = V_h - V_m \cap V_h \quad (3.1)$$

$$V_c = V_m \cap V_h \quad (3.2)$$

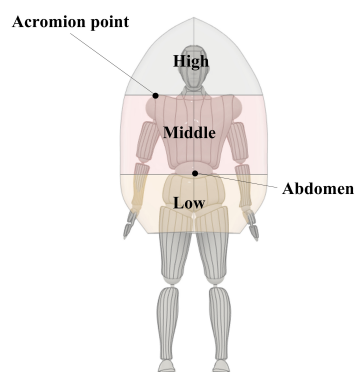
$$V_i = V_m \cap V_a \quad (3.3)$$

ここで, V_m はユーザ作業範囲, V_e は拡張作業範囲, V_c は協調作業範囲, V_i は侵襲範囲, V_h はロボットハンドの軌跡, V_a はロボットアームの軌跡を表している. この評価指標を基に, ロボットアームの関節構成・リンク長の検討を行う.

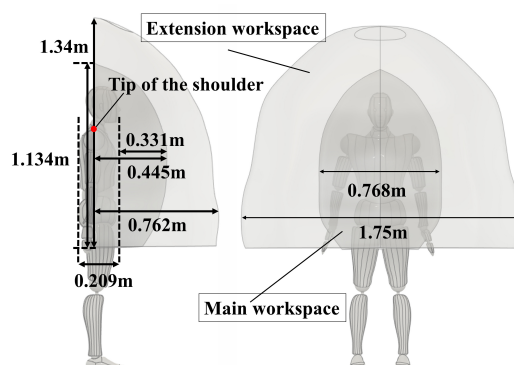
3.2 人の作業範囲と寸法

SRLs の装着位置は, 作業タスクによって異なる. **Fig.3.2(a)** に示すように, ユーザの作業内容を肩峰点と腹部位置を基準に High, Middle, Low の 3 種類に分類し, それぞれの装着位置や自由度等の仕様を **Table.1.1** にまとめた. 作業範囲の基準として生活工学研究センターの動作特性における作業しやすい幅と奥行きを測定したデータ [50] を用いる. 被験者は 20 代の男性 50 名で, 両足の足裏が地面に付いた状態を拘束条件とし, 人の右腕が動く範囲を計測し平均化したデータである. データは右手の肩峰点を基準としたデータのため, 左手の作業範囲はデータを左右反転させたものを用いて作業範囲を定義する. ユーザが楽に手を動かせる範囲 (メイン作業範囲) とユーザが無理をして届く範囲 (拡張作業範囲) を **Fig.3.2(b)** に示す.

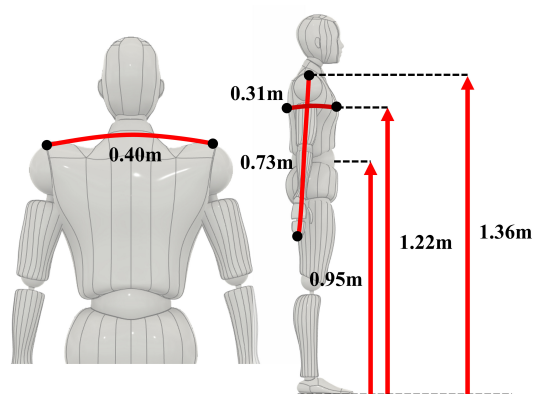
人体の寸法として National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) の AIST/HQL 人体寸法・形状データベース [51] を用いる. **Fig.3.2(c)** に本論文で用いる平均人体寸法を示す. 寸法はそれぞれ, 肩幅を 0.40 m, 肩峰点から指先までの長さを



(a) Division of the user's main workspace.



(b) Average workspace range of a person according to [50].



(c) Human dimensions according to [51].

☒ 3.2: Definitions of the user's workspace and body dimensions.

0.73 m, 胸部横径を 0.31 m, 腹部までの高さを 0.95 m, 胸部までの高さを 1.22 m, 肩峰点までの高さを 1.36 m とする. これらの基準データおよび寸法を用いて SRLs の関節構成やリンク長, 装着位置等を検討する.

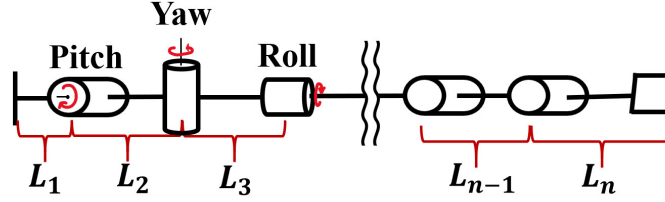


図 3.3: Definition of the joint configurations.

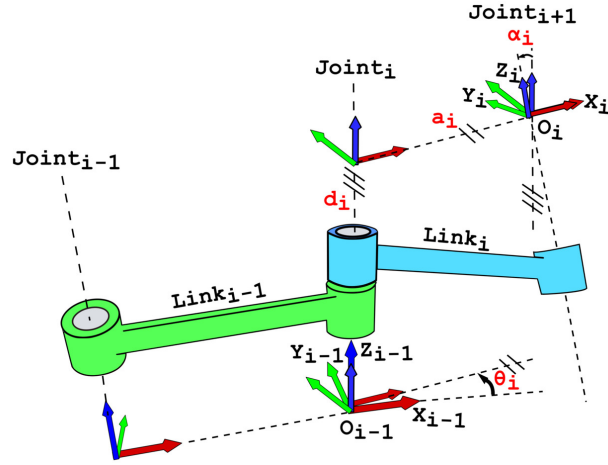


図 3.4: Denavit-Hartenberg representation.

3.3 関節構成・リンク長の検討

前節で述べた「持ち上げ」タスクを目的タスクとし、AOA のパッシブ関節とアクティブ関節の関節構成、リンク長を検討する。また、ロボットアームのリンク長は **Fig.3.3** に示すように、根本位置から一つ目の関節までを L_1 、以降の関節間のリンクを $L_2, L_3, \dots, L_{n-1}, L_n$ と呼称し、関節の回転軸は Pitch, Yaw, Roll を用いて表現する。ロボットアームのリンク長や関節配置は運動学を用いて検討する。**Fig. 3.4** の Denavit-Hartenberg 表現を用いると、基準枠 $i-1$ と基準枠 i 間の変換は以下の式により容易に計算できる。

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.3.1 パッシブ関節

パッシブ関節では、ロボットアームの胴体に取り付けられたスイッチで関節角度のロックを ON/OFF し、ユーザはロボットアームを持ったまま目的の作業スペースにロボットハンドを移動させる。スイッチは、ロボットアームの関節角度や姿勢に影響されないようユーザが手を伸ばし容易に押せる位置に設置する必要がある。アクティブ関節のリンクにスイッチを取り付けた場合、アクティブ関節操作の前後でロボットアームの姿勢が大きく変化するため、ユーザがスイッチを押すことが困難である。パッシブ関節は、作業中に関節の角度が変化しないため、パッシブ関節のリンク上にスイッチを実装することが適切である。

パッシブ関節リンクの最大範囲は、ユーザが容易に手を伸ばすことができる範囲にとどめる必要がある。しかし、ロボットアームの可動域は、リンク長によって変化する。パッシブ関節の長さを変化させたときのロボットハンドの可動域の変化を **Fig.3.5** に示す。可動域を求める際、アクティブ関節のリンク長は一定とし、関節の角度を 90° から -90° まで変化させた。 **Fig.3.5(a)** に示す様に、パッシブ関節のリンク長がメイン作業範囲以上に長い場合、メイン作業範囲内におけるアクティブ関節の可動範囲を広くとろうとすると、アクティブ関節の自由度が必要以上に増え、リンク長も十分な長さが必要となる。逆に **Fig.3.5(b)** の様にパッシブ関節のリンク長が短い場合、ロボットアーム全体の可動範囲が狭くなる。パッシブ関節の先端位置をメイン作業範囲の奥行き方向における最大長と同様の位置に設定した **Fig.3.5(c)** の場合、ロボットアーム全体の可動範囲は広くなりアクティブ関節の自由度やリンク長は最小限に抑えられる。AOA のプロトタイプ実装時に装着ベストやロボットアームの固定パーツ等で約 0.05 m 必要となったため、パッシブ関節の実装可能な最大長は 0.28 m となる。したがって、ロボットアームをユーザの前方に装着する場合、パッシブ関節リンクの全長は、 **Fig. 3.2(b)** の寸法により、ユーザの前方から最大メイン作業範囲までの 0.33 m が必要である。AOA のプロトタイプを実装した際に、ベストとロボットアームの固定部には 0.05 m 程度のパーツを用いた。したがって、L1 には 0.05 m, L2 と L3 のパッシブ関節リンクの全長は 0.28 m が必要となる。

次に、パッシブ関節の構成について検討する。パッシブ関節は、ロボットアームの手先を作業領域まで大まかに移動させることを目的としている。また、人に装着するため重量や安全性を考慮し最小限の関節構成にする必要がある。ロボットアームの先端を三次元に動かす最低限の自由度として 2 自由度が必要となる。Roll, Pitch, Yaw の 3 種類の回転軸の内、Roll 回転を根本位置に設けた場合、Roll-Pitch, Roll-Yaw の組み合わせがあるが、どちらも同じ可動範囲のため同様のものとする。また、先端に Roll 回転を設けた場合は、2 次元上の可動となるため除外する。ユーザのメイン作業範囲内を広く占める関節構成、リンク長

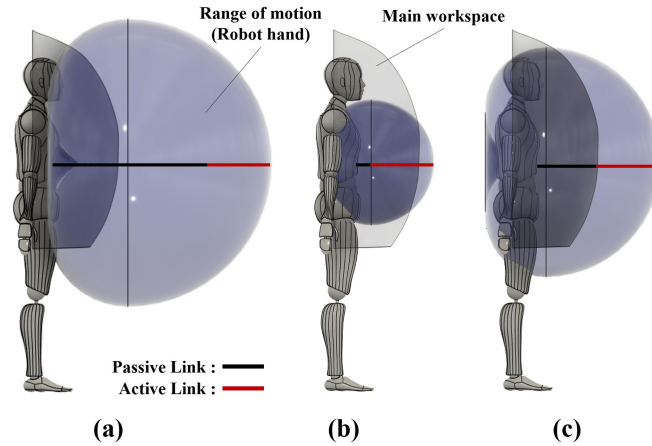


図 3.5: Effect of passive-joint link length on the range of motion when the link length is (a) greater than the main workspace, (b) much smaller than the main workspace, and (c) similar to the maximum main workspace.

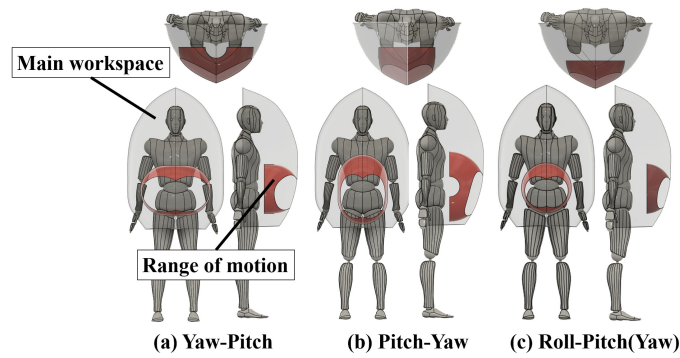


図 3.6: Maximum range of motion for each passive joint configuration.

を検討するため、ロボットアームを装着した際にユーザとの協調作業範囲が最大になる位置として体の中央位置を用いる。Fig.3.2 で分割したそれぞれの範囲における高さの中央位置を装着位置として選定する。なお、High における高さの中央位置は頭部になるため、上半身の最も高い装着可能な位置を用いる。これらの装着位置をそれぞれ、High, Middle, Low の範囲に対応する装着位置としてパッシブ関節の可動面積を比較する。パッシブ関節の最大リンク長を 0.28 m とし、 L_1 , L_2 のそれぞれの長さを 0.01 m 単位で変更し Roll-Pitch, Pitch-Yaw, Yaw-Pitch のどの構成がユーザの作業範囲をより多く占めるかを検討する。

また、運動学を用いて求めた各関節構成の最大協調範囲を Fig. 3.6 に示す。図中の赤い部分は、ユーザのメイン作業範囲内におけるパッシブ関節の可動域を示す。Roll-Pitch 構成は Pitch 回転軸を中心に半球状に動くため、Pitch-Yaw 構成や Yaw-Pitch 構成に比べて可

表 3.1: Passive joint specification.

Joints configuration	Range of motion	L_1	L_2	L_3
Pitch-Yaw	Pitch : $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ Yaw : $-90^\circ < \theta < 90^\circ$	0.05m	0.03m	0.25m

表 3.2: DH parameter for the passive joints.

i	θ	d	a	α
1	0	l1	0	0°
2	θ_1	l2	0	90°
3	θ_2	l3	0	0°

動域が狭くなる．また, Pitch-Yaw 型と Yaw-Pitch 型は作業範囲は似ているが, 協調範囲が異なる．**Fig. 3.7** は, パッシブ関節を High, Middle, Low に取り付けたときの作業範囲を各関節構成で比較したものである．3 箇所とも, Pitch-Yaw 型はユーザのメイン作業範囲内で広い可動域を示した．リンク長と作業範囲の関係では, L_2 が 0.03 m, L_3 が 0.25 m のときに作業範囲が最も広くなるため, このリンク長を用いた．パッシブジョイントの仕様を **Table. 3.1** に示す．また, パッシブ関節の根元から先端までの DH パラメータを **Table. 3.2** に示す．これらのパラメータを基に, パッシブ関節の運動学を以下に示す．

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \theta_2 & -\cos \theta_1 \sin \theta_2 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 l_2 & l_3 \cos \theta_2 \\ \cos \theta_2 \sin \theta_1 & -\sin \theta_1 \sin \theta_2 & -\cos \theta_1 & \sin \theta_1 l_2 & l_3 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & l_1 & l_3 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3.3.2 アクティブ関節

パッシブ関節だけでは実現できないダイナミックな動きには, アクティブ関節を用いる．ここでは, 動的なピックアップタスクに必要なアクティブ関節構成とリンク長を考える．アクティブ関節の構成は対象となるタスクに依存する．例えば, 物体の姿勢を 3 次元的に制御する必要がある場合, 関節に求められる DoF の数は増加する．しかし, SRLs はユーザに装着されているため, ユーザの動きによってロボットアームの位置が変化する可能性がある．SRLs は, 細かい器用な作業よりも, 物を持ち上げて移動するなど単純な作業に向い

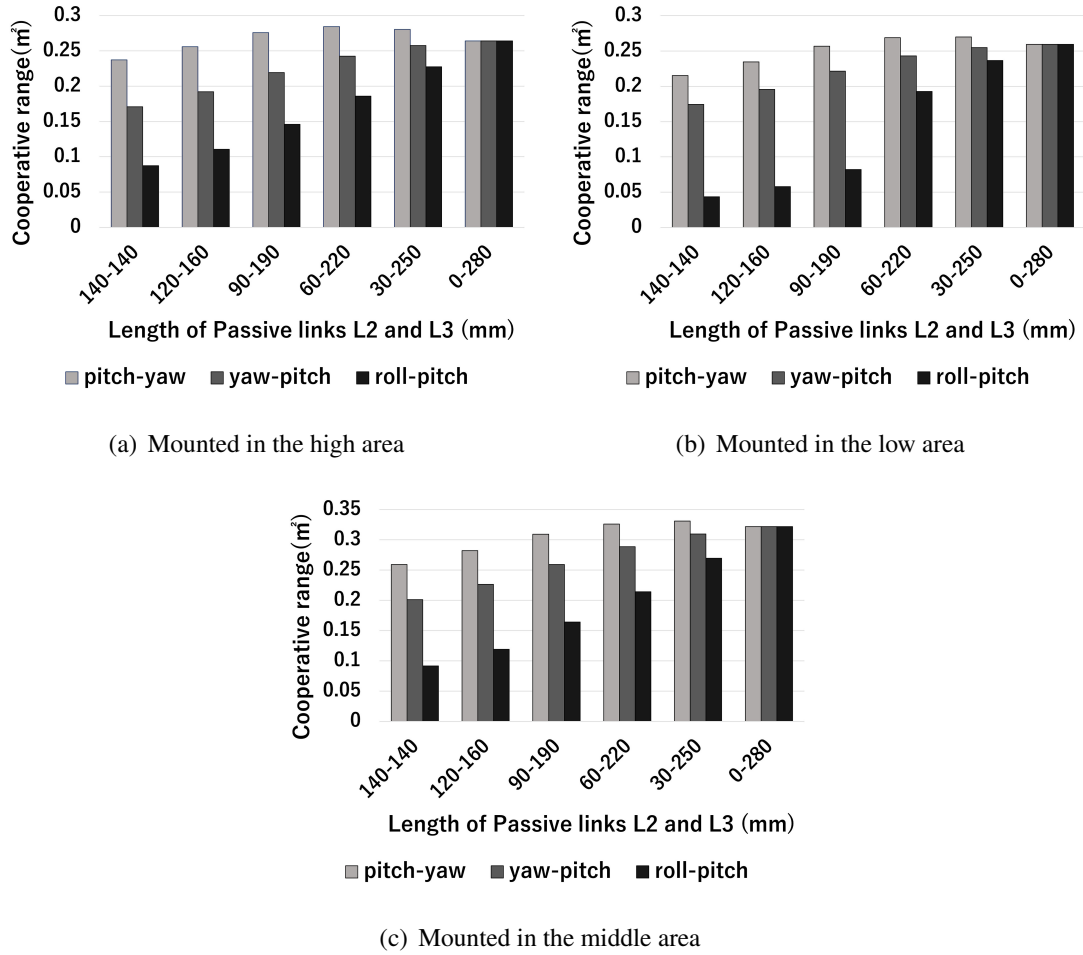


図 3.7: Differences in the range of motion of passive joint configurations and link lengths at the high, middle, and low positions.

ている。DoF 数が増えるとロボットアームの重量が増加するため、関節構成やリンク長を最小限にする必要がある。アクティブ関節の作業範囲には、協調作業範囲と拡張範囲がある。協調作業範囲とは、ロボットハンドとユーザの腕の可動域の重なり部分である。拡張作業範囲は、ロボットハンドの可動域における協調作業範囲以外の領域である。例えば、ユーザが照明を用いて作業範囲をダイナミックに照らすようなタスクでは、拡張範囲が不可欠となる場合がある。このようなタスクでは、ライトを持つアクティブ関節が協調作業範囲内にある場合、ユーザの手と干渉し、作業に影響を与える。協調範囲が必要なタスクの例としては、ハンダ付けや、ロボットアームが協調作業範囲内にある物体を保持する場合などがある。両作業範囲をバランスよく保つためには、DoF とリンク長を考慮する必要がある。

アクティブ関節に求められるのは、広い可動域と、物体を把持する際の最小限の姿勢制御である。一般的なロボットアームの関節配置を **Fig. 3.8** に示す。**Fig. 3.8 (a)-(c)** の場合、

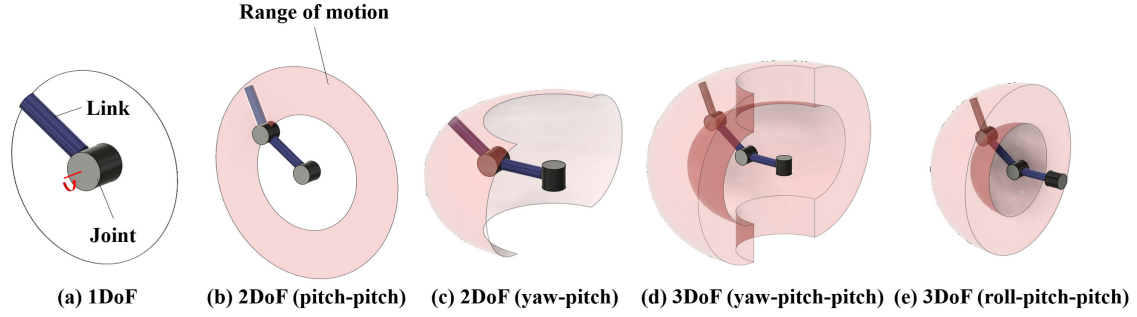


図 3.8: Joint configuration of the robot arm.

可動域は線または面であるため、できる作業が大きく制限される。Fig. 3.8 (d), (e) の場合は、3 次元で可動するため、Fig. 3.8 (a), (c) に比べてより多くの動作が可能である。しかし、ピックアップやマニピュレーションなどのタスクでは、エンドエフェクタの姿勢制御が必要なため、4DoF 以上が必要になる。また、本研究の目的である物体持ち上げタスクは、Fig. 3.8(a)-(e) で実行可能である。しかし、コップやケーブルなど日常生活でよく使われる物体の持ち上げには、エンドエフェクタの 3 次元的な可動域と姿勢制御が必要である。そこで、本研究では、Fig. 3.8(d), (e) に示すような関節配置を採用する。

アクティブ関節の場合、リンク長が長いほど可動域が広がる。しかし、リンク長が長くなればなるほど、ユーザへの重量負担は大きくなる。また、アクティブ関節のリンク長が短すぎると、可動域が狭くなり、協調性・拡張性が低下する。そこで、アクティブ関節の長さをユーザの拡張範囲である 0.317 m に設定し、ユーザとロボットアームの協調・拡張作業範囲を最大限確保する。また、Fig. 3.8 (d) の場合、ロボットアームは 3 次元的に可動するが、アクティブ関節のリンク上に 3 つの関節を配置する必要がある。アクティブ関節の最大リンク長には制限があるため、関節数が多いと逆に可動域が狭くなる。しかし、Fig. 3.8 (e) の場合、パッシブ関節のリンクにアクティブ関節の Roll 回転を配置することで、アクティブ関節の可動域を圧迫することなく、広い可動域を確保することができる。そこで、Roll-Pitch-Pitch の関節構成を採用する。Roll-Yaw-Yaw の関節構成は、Roll 関節を 90°回転 させることで、Roll-Pitch-Pitch と同様の可動域になるため同じものとする。また、ロボットハンドの最小姿勢制御のためにアクティブ関節の先端に Roll 関節を設け、Roll-Pitch-Pitch-Roll の 4 自由度を用いる。これにより、物体の把持・持ち上げに必要な最小限の姿勢制御を実現する。

同様の回転軸を持つ関節が複数ある場合、関節間のリンク長によって可動域が変化する。そこで、Table 3.3 のパラメータを用いて運動学を解き、以下の式で可動域を算出する。

$${}^0T_7 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 \quad (3.6)$$

表 3.3: DH parameter for overall robot arm.

i	θ	d	a	α
1	0	11	0	0°
2	θ_1	12	0	90°
3	θ_2	0	0	90°
4	θ_3	0	13	90°
5	θ_4	14	0	0°
6	θ_5	0	0	90°
7	θ_6	0	15	0°

表 3.4: Specifications of the active joints in the wearable robot arm.

Joint Configuration	Range of Motion	L_4	L_5
Roll-Pitch-Pitch	Pitch: $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ Roll: $0^\circ < \theta < 360^\circ$	0.073 m	0.244 m

Fig. 3.9 の赤線は、協調作業範囲、黒線は、ロボットハンドの可動域を示す。また、関節間隔は 0.13 m が最も広い可動域を実現している。しかし、協調作業範囲の割合が小さい。協調作業範囲を優先するのか、ロボットアームの可動範囲を優先するのかで、リンク長は異なる。しかし、リンク長が 0.13 m より長くなると、拡張作業範囲、可動範囲共に減少するため相応しいリンク長ではない。よって、妥当性のあるリンク長として 0.073 m を用いて、広い協調作業範囲、可動域を確保する。本研究で検討した AOA の全体の構造を **Fig. 3.10** に示す。また、アクティブ関節の仕様を **Table. 3.4** に示す。次に、アクティブ関節の関節構成とリンク長 (**Table. 3.4**)、パッシブ関節の関節構成とリンク長 (**Table 3.1**) を用いて、最適な装着位置を検討する必要がある。

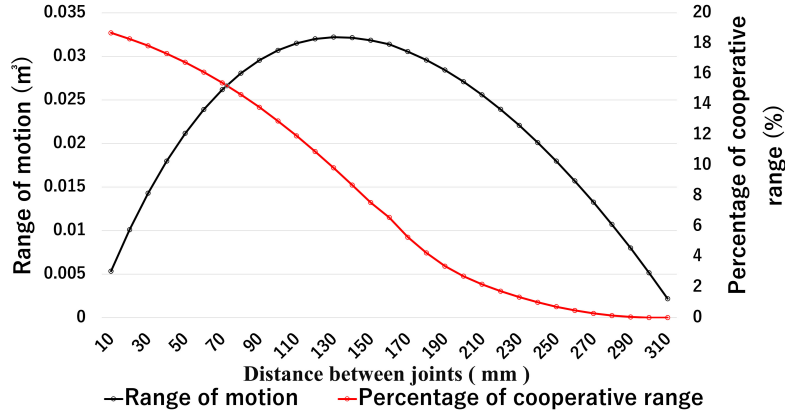


図 3.9: Range of motion due to the difference in the link lengths of the active joints.

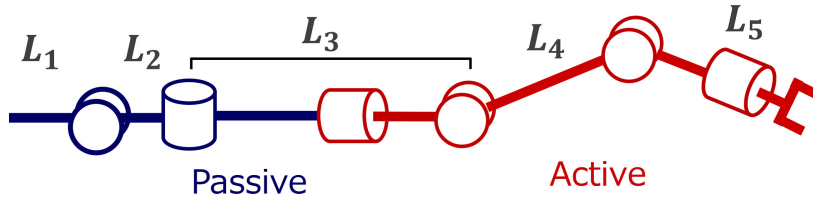


図 3.10: Configuration of the AOA.

3.4 まとめ

SRLs における最適な, ロボットアームの関節構成とリンク長について検討した. 人の日常生活の 9 割を占める「持ち上げる」タスクを目標タスクとし, 最低限の位置・姿勢制御が行える自由度を運動学を用いて検討した. その際に, 評価指標として, ユーザとロボットアームの協調範囲, 拡張範囲, 侵襲範囲の 3 項目を用いた. 協調性は, ユーザとロボットアームが協調して作業を行える範囲の割合である. 拡張性は, ユーザの作業範囲外のロボットアームが可動する範囲の割合である. 侵襲性は, ロボットアームのリンクがユーザの作業範囲を侵襲する割合を示す. これらの評価指標を用いて評価した結果を基に, **Table. 3.4, 3.1** に示すような関節構成とリンク長を用いて実装した. これにより, ロボットアームとユーザの協調範囲と拡張範囲が広く, 侵襲範囲が狭い SRLs が期待できる.

第 4 章

装着方法・位置の検討

4.1 関連研究

SRLs の装着位置を検討した論文として中林らの [37] が挙げられる。この論文では、装着位置として腰、胸、肩の 3 ヾ所でロボットアームのリンク長や関節構成を変更し可動範囲を調査した。その結果を基に、ユーザの作業空間との協調性や拡張性を比較し最適な装着位置とロボットアームの仕様を求めた。また、ロボットアームのリンクがユーザの作業空間を侵襲する範囲の検討も行った。前章では、[37] の協調性、拡張性、侵襲性の指標を基にユーザとの協調範囲が広く侵襲性を抑えた SRLs の関節構成やリンク長を検討した。本章では、検討した SRLs を用いて、最適な装着位置を選定する。

装着位置を選定する上で、考慮する点はロボットアームの重量である。プロトタイプとして実装した AOA の総重量は 1.2 kg である。そのため、上腕や、肘などに装着した場合、Mandinei らの [52] で述べているように、体幹への負担が大きい。また、Lloyd らの [53] で研究されているように、頭部に荷物を載せ運ぶ方法があるが、荷重の重心位置によって身体への影響が異なるため、ロボットアームの様な動的に重心位置が異なるものを装着するのには適切ではない。これらを踏まえた上で、装着可能な候補位置は、腕と首、頭部を除外した肩周辺から腹部までを選定する。下半身では、腹部から股下位置までを選定する。選定した装着位置の候補を **Fig.4.1** に示す。

4.2 装着方法の検討

重量が 1 kg を超えるロボットアームは、ユーザが装着する際に十分な安定性が確保できる装着位置が必要である。また、ユーザの腕や肘に装着する場合は、ロボットアームの重量を十分に軽減する必要がある。しかし、重量を軽量化するために関節を減らしすぎると、ロボットアームとしての有用性が減少するため軽量化と自由度のバランスが重要である。今

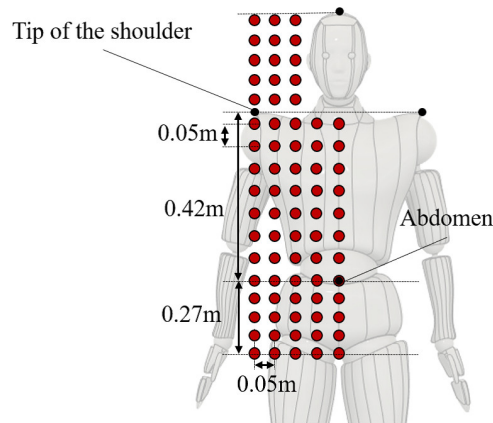


図 4.1: Selected mounting positions.

回使用するロボットアームの重量は約 1.2 kg であるため、腰や肩などの安定した取り付け位置を用いる必要がある。

ロボットアームをバックパックなどを用いて背中に背負う装着方法は、多くの研究により示されている。しかし、装着ベストをより頑丈にすると重量が増え、ユーザへの負担が大きくなる。そこで、必要最小限の強度で装着する方法を検討する。ロボットアームの取り付け位置の候補として、腰、背中、前面を検討する。しかし、ロボットアームの可動範囲を検出した結果、体の前面に取り付けた場合、ユーザの腕との干渉範囲が最も広がった。そのため、ロボットアームを体の前面に取り付ける方法を装着位置候補から除外する。

ロボットアームをベルトで装着する場合、そのデザインによって使用者の負担は大きく異なる。**Fig. 4.2** にいくつかの装着方法の形状を示す。これらのデザインは、腰の右側にロボットアームを装着する場合に用いる。SRLs を用いる際に、身体に負担のかかる装着方法では、長時間使用することが困難である。そこで、SRLs を装着する際の体に生じる応力をより分散させる装着方法を検討する必要がある。**Fig. 4.2 (a)** はベルト 1 本でロボットアームを装着する方法である。また、**Fig. 4.2 (b)** は 1 本のベルトで腰を用いて支え、もう 1 本のベルトで左右の肩を用いて支えることでロボットアームを装着する方法である。**Fig. 4.2 (c)** は、3 本のベルトでロボットアームを腰と肩で支える方法である。

Fig. 4.3 にバックパックタイプの装着方法を示す。**Fig. 4.3 (a)** は背中上部に、**Fig. 4.3 (b)** は、背中下部に、**Fig. 4.3 (c)** は、背中中部に固定する方法である。Anderson らの [54] では、ユーザの立位と歩行時において、身体の前で重量を支えた場合の負担を評価している。結果として、肩位置で支えた場合は、腰位置で支えた場合と比べて、筋活動が活性化したため腰位置の方がユーザへの身体的負担は少ない。阿部らの [55] では、背中側に重量を載せた場合の体への負担をエネルギーコストで評価している。背中上部に荷重を

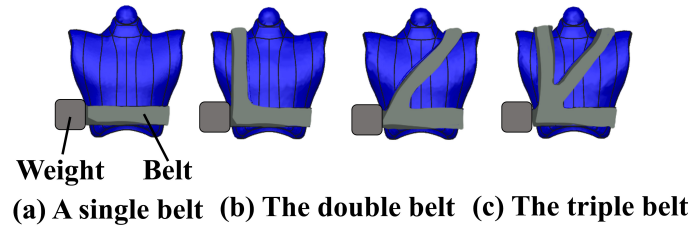


図 4.2: Mounting method to waist position.

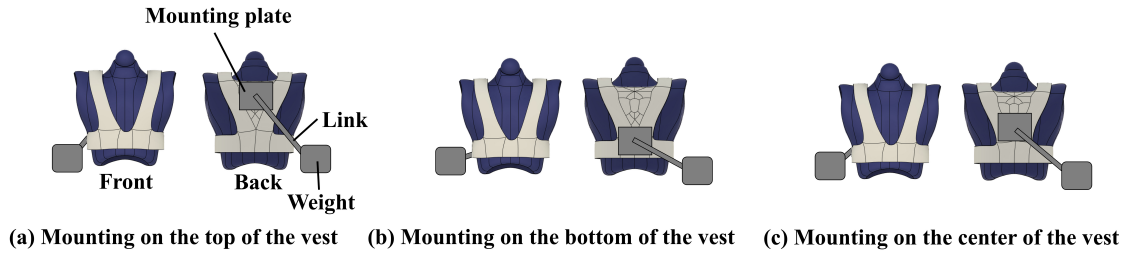


図 4.3: Mounting method to back position.

載せた場合と背中の腰側に荷重を載せた場合で比べると、背中の上側に荷重を載せた場合の方が有意に低いエネルギーコストが確認されている。しかし、本研究では単腕のロボットアームを装着するため、上記の研究とは異なるモーメントが生じる。よって、背中の上部、下部に加え、背中の中部に固定した際の応力の差を比較し装着方法の候補として検討する。

Fig. 4.3 に示すリンクの先端がロボットアームの重心位置とする。この重心位置にモーメント荷重を加えたときのユーザとベルトに生じる応力を **Fig. 4.4** に示す。 **Fig. 4.4 (a)** は、ロボットアームを 1 本のベルトでユーザに固定した場合の応力である。右腰部に大きな応力が発生していることがわかる。 **Fig. 4.4 (b)** は、ロボットアームを 2 本のベルトでユーザに取り付けた場合の応力である。 **Fig. 4.4 (b)** の左側の図は、1 本のベルトで腰に装着し、もう 1 本のベルトを右肩に装着しロボットアームを固定した状態を示す。 **Fig. 4.4 (a)** の場合と比較すると、右腰への負担が分散され軽減されていることが確認できる。 **Fig. 4.4 (b)** の右側の図は腰と左肩にベルトで固定した状態を示す。左肩と腰に応力が分散し、右腰部への応力は **Fig. 4.4 (b)** の左側の図と比較すると、より軽減されていることがわかる。 **Fig. 4.4 (c)** は **Fig. 4.4 (b)** の二種類の装着方法を組み合わせ、両肩と腰の 3 本のベルトで固定した。 **Fig. 4.4 (c)** は、応力が体全体に分散され、使用者の身体への部分的応力が軽減されている。 **Fig. 4.5 (a), (b), (c)** は、ベストの上部、下部、中部にロボットアームを固定した場合の応力分布を示す。ベストの上部に取り付けた場合は、ユーザの肩周辺に応力が集中し、ベストの下部に取り付けた場合は、ユーザの腹部周辺に応力が集中する。ベストの中部に装着した場合が最も応力が分散し、ユーザへの負担が軽減された。

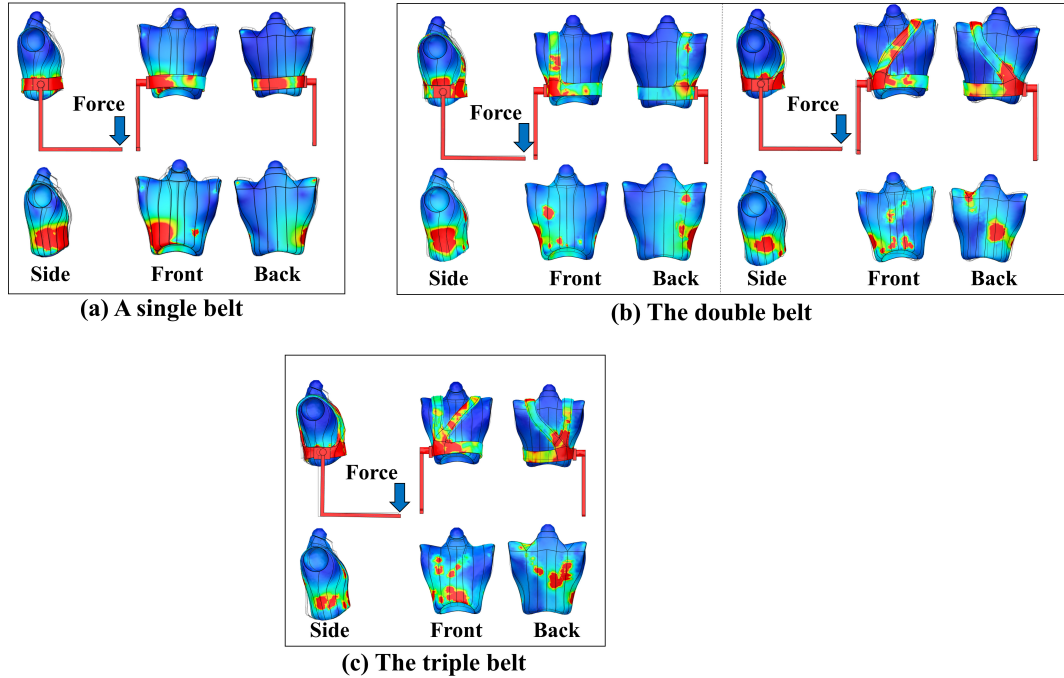


図 4.4: The stress when mounted on the waist.

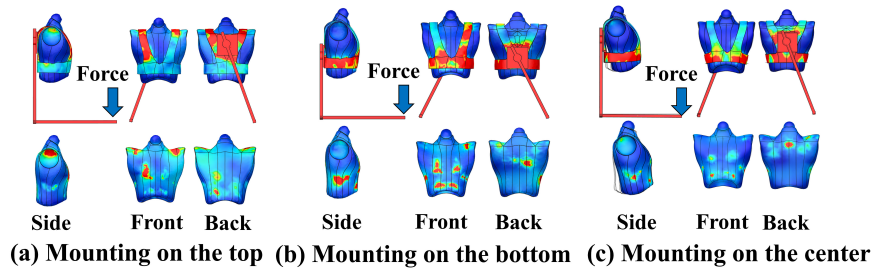


図 4.5: The stress when mounted on the back of body.

この結果より, **Fig. 4.4 (c)** のような形状を用いてロボットアームを装着することで, 応力が分散し, 部分的応力が軽減される. ベルトの本数を増やすことで, 応力を分散させ負担を減らすことは可能だが, ロボットアームによる重力方向のモーメントによって取り付け部のベルトが歪み, ロボットアームの手先が大きくずれてしまう. ロボットアームの荷重とモーメントを支えるためには, ベルトに歪みにくい素材や形状を用いる必要がある. **Fig. 4.4 (c)** では両肩のベルトで重力方向の力を支えているが, **Fig. 4.6 (a)** のようなモーメントは支えるのが困難である. ロボットアームを固定するためには, モーメントが発生する部分を十分に支える形状や素材を用いる必要がある. **Fig. 4.6 (b)** のバックパック型では, ロボットアームを固定した部分にモーメントが生じる. **Fig. 4.6 (b)** は, 複数のベルトでロボットアームのモーメントを支えるため, ベルトの歪みが少なく, ロボットハンドの変位も

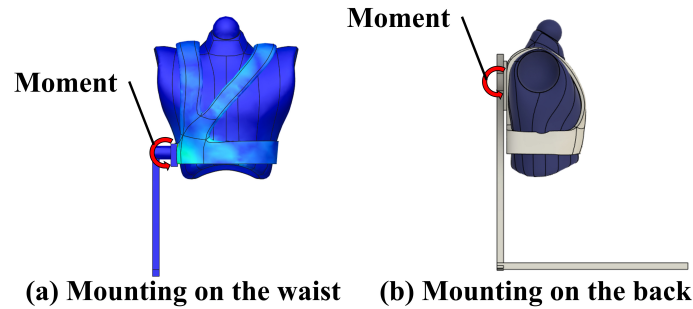


図 4.6: Moment at each mounting position.

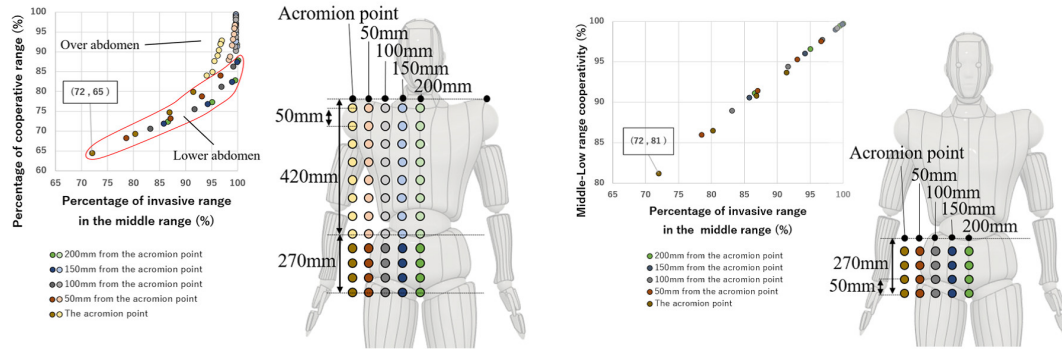
軽減される。ロボットアームの固定位置である背中上部、中部、下部では、応力が発生する場所が異なる。よって、応力の分散が大きい背中中部に装着した方がよりユーザ負担の軽減が期待できる。

4.3 装着位置の評価

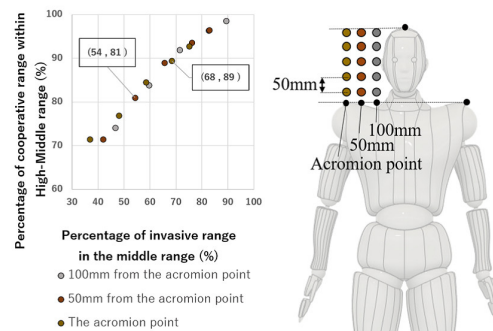
[51] より、ユーザの上半身の横幅を右の肩峰点から左の肩峰点までの平均距離 0.4 m, 縦幅を肩峰点から股下までの平均距離 0.61 m とし, 0.05 m 間隔で横幅と縦幅の位置を変更しそれぞれの装着位置にてロボットアームの可動範囲とユーザの作業範囲との協調範囲を求める。

ロボットアームの取り付け位置によっては、ユーザが作業を行う際に、装着型ロボットアームのリンクがユーザの腕に干渉する。よって、ロボットアームとユーザの協調範囲の大きさのみで装着位置を決定するのは不十分である。そこで、ユーザのメイン作業範囲内で、侵襲範囲が大きくなる場所を避けた装着位置を検討する必要がある。Fig. 3.2 に示すように、ユーザの作業範囲を High, Middle, Low の 3 つの領域に分け、協調範囲と侵襲範囲を分析する。High, Middle, Low はそれぞれ 0.038 m^3 , 0.093 m^3 , 0.053 m^3 の体積である。

ロボットアームを体の中央に装着した場合、どの高さにおいても広い協調作業範囲を確保することが可能である。Fig. 4.7 (a) は、ユーザのメイン作業範囲全体における、協調作業範囲と侵襲作業範囲の比率を表した。ロボットアームを Middle 領域に設置した場合、協調作業範囲は広がるが、侵襲作業範囲も広がるため、ユーザの腕を動かす際にロボットアームと干渉する可能性がある。Low 領域にロボットアームを装着した場合、装着位置によっては侵襲範囲が広がるが、装着位置が肩峰点に近づくにつれ侵襲範囲の割合が減少する。しかし、最も侵襲範囲が狭い装着位置であっても、侵襲範囲が 72 %, 協調範囲が 65 % と侵襲範囲の方が広い結果が確認できた。侵襲範囲が協調範囲より広い場合、ロボットアームがユーザの腕と干渉し協調作業に影響が生じる。よって、侵襲範囲より協調範囲が



(a) Percentage of cooperative workspace in the total (b) Lower body mounting position: Percentage of co-main workspace and percentage of invasive range in operative workspace in the middle and low ranges and the middle range.



(c) Shoulder body mounting position: Percentage of cooperative workspace in the middle and high ranges and percentage of invasive range in the middle range.

図 4.7: Percentage of cooperative workspace in the main workspace and invasive workspace in middle range.

広い装着位置が理想である。

Fig. 4.7 (b) は, Low, Middle 領域の協調範囲割合と侵襲範囲の割合を示す。横軸は Middle 領域の侵襲範囲の割合, 縦軸は Middle と Low 範囲における協調範囲の割合を示している。Middle 領域における, 侵襲範囲が最も小さい装着位置は, 侵襲範囲が 72 %, 協調範囲が 81 % となっている。侵襲範囲が協調範囲より狭く, 十分な協調範囲が得られる装着位置を 2 ヶ所選定する。

次に, 肩周辺における装着位置について検討する。**Fig. 4.7 (c)** は, High と Middle 領域の協調範囲の割合と侵襲範囲の割合を分布で示したものである。これらの装着位置の中で侵襲範囲が協調範囲より狭く, 十分に協調範囲が広い装着位置を 3 ヶ所選定する。検討の結果, 得られた装着位置の候補を **Fig. 4.8** に示す。これらの検討した装着位置において, ユー

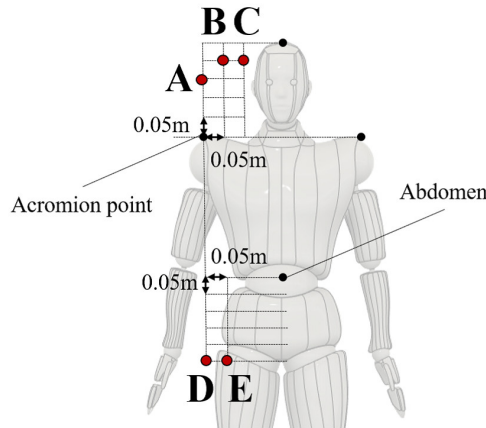


図 4.8: Candidates of mounting positions.

ザへの重量負担について検討する。

4.4 ユーザの体への応力解析

Fig. 4.8 の位置にロボットアームを取り付けたときの身体への応力を比較する。**Fig. 4.9** はロボットアームを取り付けた際の応力を示す。応力シミュレーションには、応力解析シミュレーションツールとして Fusion 360 を使用する。ロボットアームを背中に固定するアルミリンクとプレート、ベスト、ユーザの体の 3D モデルを製作し、モデル間の接触の影響を考慮したシミュレーションを行う。ベストは両肩と腹部のベルトで装着するため、ロボットアーム装着時の荷重は、ベストを介してユーザの身体に伝わる。**Fig. 4.9** のアルミリンクの先端は、ロボットアームの重心位置を示している。この重心位置にロボットアームの重量が加わったとき、ユーザの身体にかかる応力を評価する。**Fig. 4.9(a)-(c)** はロボットアームを肩周辺の A, B, C 位置に装着した場合の応力を示す。アルミリンクの先端に力が加わるため、ベストに生じるモーメントにより、ユーザの腹部や背中上部に大きな応力が生じる。腰の位置 D, E にロボットアームを取り付けた場合の応力を **Fig. 4.9(d), (e)** に示す。肩周辺位置に取り付けた場合と比較すると、腹部の応力が小さく、背面の広範囲に応力が生じることが確認できる。この応力評価結果をもとに、被験者実験を通して、重量負担を評価する。

4.5 ユーザへの重量負担実験

ユーザへの重量負担を検討するため、**Fig. 4.8** の取り付け位置を用いて評価する。実装した SRLs を装着した様子を **Fig. 4.10 (a)** に示す。ロボットアームはベストを用いて背中

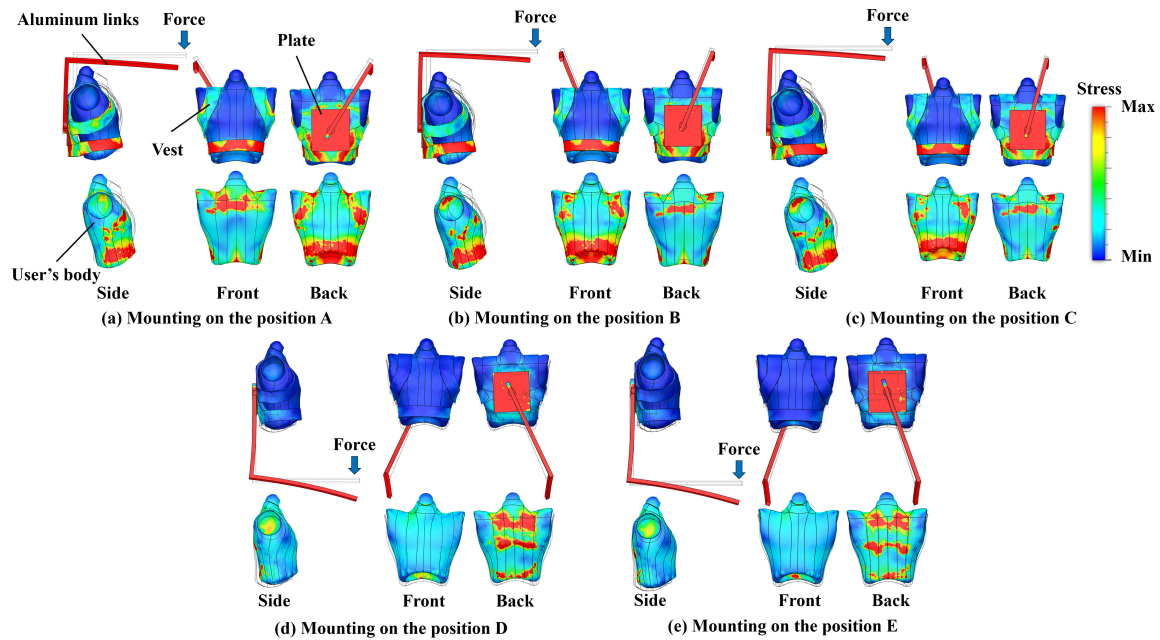


図 4.9: Stress verification at each mounting position.

に固定する。装着位置はユーザの身長に合わせて高さや角度の調節が可能である。腰の位置も同様に固定した。Fig. 4.10 (b) に実装したロボットアームを示す。パッシブ関節にはロック機構を用いて実装する。現状のロック機構が大きいため、第 3 章にて求めたパッシブ関節間リンク長 0.03 m を確保するために回転軸の位置を平行移動させる。

被験者実験では、実装した SRLs を被験者に 1 分間装着し、20 分間の休憩を挟んで、各装着位置におけるユーザ負担を評価する。また、装着位置はランダムとし、装着後に各装着位置について 5 段階評価アンケートを実施する。被験者は 20 代の男性 8 名である。装着位置 A-E における負担の程度を 1～5 で評価し、1 が最も負担が少なく、5 が最も負担が大きいことを示す。

評価実験の結果を、Fig. 4.11 に示す。グラフの横軸は装着位置、縦軸はユーザの負担の評価値で、1 が負担が軽く、5 が負担が重いことを表している。肩周辺位置である A, B, C は腰の位置である D, E よりも負担が大きい。装着位置 A, B, C のユーザ負担平均と装着位置 D, E のユーザ負担平均を有意水準 5 % で両側 t 検定を行ったところ、 $p = 0.012$ となり有意差が確認できた。腰位置と肩位置の比較では、肩よりも腰の方が負担が少ないといえる。肩に装着した場合、ユーザの視界にロボットアームが入るため、圧迫感を感じるという意見が多く見られた。肩と腰では、協調作業領域と侵襲作業領域の比率にほとんど差はないが、ユーザの負担を考えると腰に装着するのが適切である。

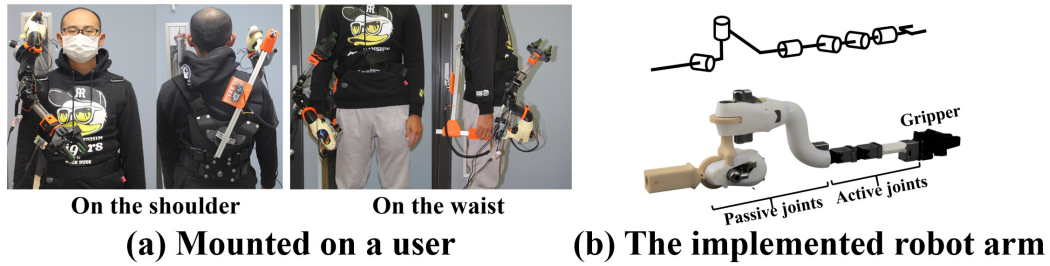


図 4.10: Wearing AOA on the shoulder and waist. The AOA was implemented based on the dimensions specified in this study.

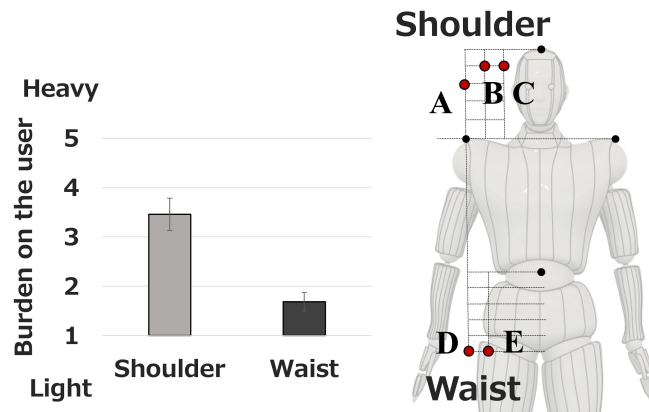


図 4.11: Results of the user burden experiment.

4.6 まとめ

関節構成やリンク長を検討し、改善した AOA を用いて、ユーザ負担が少なく協調して作業を行える装着方法・装着位置について検討した。装着位置は、ユーザに装着可能な位置を平均人体寸法と腕の平均的な可動範囲を基に選定し、網羅的に検討を行った。また、ロボットアームのリンクがユーザの腕の可動域に影響を与える範囲の割合と、ユーザとロボットアームの協調範囲の割合を基に最適な装着位置候補を評価し検討した。装着方法として、ベルトタイプとバックパックタイプを用いて、ロボットアームを装着した際に生じる応力を解析した。その結果、バックパックタイプを用いて背中の中部にロボットアームを固定した装着方法が最も応力が分散しユーザへの負担が軽減された。また、この装着方法を用いて、検討した装着位置に実機を装着した場合の被験者実験を行った。結果は、ユーザの腰位置に固定した場合が最もユーザ負担が少ないことが確認できた。

第 5 章

AOA の改良とタスク評価

関節構成やリンク長, 装着位置・装着方法を検討した AOA のパッシブ関節を改良する. プロトタイプで用いたパッシブ関節のロック機構では, 関節の角度分解能が 12° と低く, 検討した作業範囲の実現が困難である. よって, 本章では, パッシブ関節のロック機構メカニズムを改良し, 改良した AOA を用いて評価実験を行う. 評価実験は, 被験者に AOA を装着し, タスク実験を行い, アンケート結果や被験者からの意見を踏まえて SRLs の有用性を示す.

5.1 パッシブ関節におけるロック機構の改善

ロック機構は, パッシブ関節の関節角度を保持する際に必要な機構である. プロトタイプにて実装したロック機構メカニズムの問題点を改善するため, より軽量で保持トルクが高いロック機構を提案し実装する.

5.1.1 ロック機構における角度分解能の向上

プロトタイプのロック機構は, 関節の角度分解能がギアパーツの歯に依存するため, 角度に制限が生じる. プロトタイプのロック機構におけるギアパーツの歯は, 30 個であるため角度分解能は 12° と低い. 角度分解能が低いと, 検討した協調範囲や作業範囲が再現できないため問題である. そこで, 角度分解能をより向上させるために, 摩擦力を用いたロック方法にて改善する. **Fig. 5.1** にロック機構のメカニズムを示す. ブレーキホイールにブレーキパッドを押し付け, 摩擦力を用いて関節角度を固定する. ブレーキパッドとホイールには, 摩擦係数の高いウレタンゴムを用いることで, 摩擦力が高く角度分解能の制限がないパッシブ関節が実装できる.

摩擦力で関節角度を保持するにあたり, ロック機構の保持トルクを求める. 保持トルク

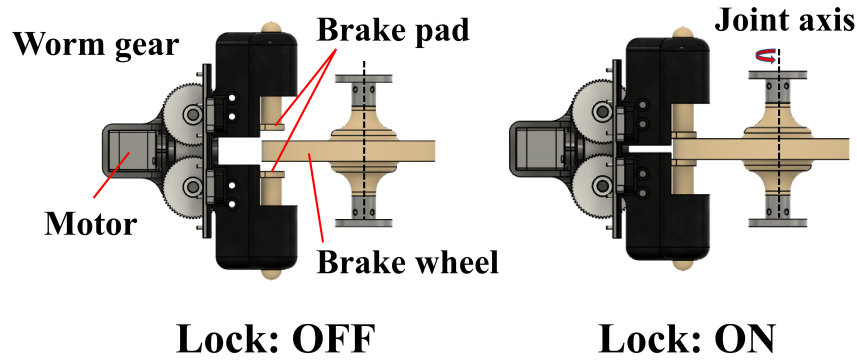


図 5.1: Mechanism of locking system by actuator.

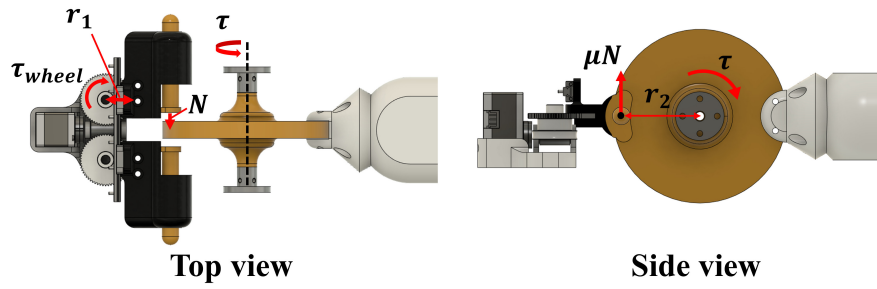


図 5.2: Force decomposition diagram.

を求めるのに必要な力の関係を **Fig.5.2** に示す. 摩擦力で関節角度を保持するために, ブレーキパッドを押し付け角度保持を行う. ねじなどを用いてブレーキパッドを押し付けた場合, このブレーキパッドを押し付ける力 N の反力により, ねじが逆回転し十分な力の出力が困難である. よって, N の反力に影響を受けない機構が必要である. そこで, 本研究では, ウォームギアの特徴であるセルフロックを用いる. このセルフロックは, ウォームギアのピッチが十分に短ければ逆戻りを防止する. また, ロック機構のモータの出力トルクを τ_{Motor} とし, ブレーキパッドを押し付ける力 N を以下の式で求める.

$$N = \frac{\tau_{wheel}}{r_1} \quad (5.1)$$

Fig.5.2 の Top view はロック機構を上から見た図である. モータの回転をウォームギアとウォームホイールを通じてブレーキパッドに伝える. モータには, 軽量で小型な ROBOTIS の XL-320 を用いる. 静的トルクは $0.39Nm$ である. このトルクを基に, ウォームホイールのトルクを以下の式で求める.

$$\tau_{wheel} = \tau_{Motor} \frac{\text{ホイールの歯数}}{\text{ウォームの条数}} \quad (5.2)$$

可能な限り、コンパクトで軽量に設計するため、ウォームギアとホイールのモジュールを 0.5 として検討した結果、ウォームの条数を 1、ホイールの歯数が最大で 50 となった。よって、 τ_{wheel} は、19.5 Nm となる。ウォームホイールの半径 r_1 は 0.015 m であるため、これらの値を基に N を求めると

$$\begin{aligned} N &= \frac{19.5Nm}{0.015m} \\ &= 1300N \end{aligned} \quad (5.3)$$

となる。ブレーキホイールの回転中心からブレーキパッドの中心までの距離 r_2 と硬度が ショア A70 のウレタンゴムの摩擦係数 μ は、それぞれ、0.02m, 0.6 に設計した。よって、摩擦力を用いたロック機構の保持トルクは、

$$\begin{aligned} \tau &= 2\mu Nr_2 \\ &= 31.2Nm \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$(5.5)$$

となる。2 章にて求めた、パッシブ関節に必要な最大保持トルクである 27.2 Nm を満たす摩擦力を用いたロック機構が実装できる。

5.1.2 トーションばねを用いたロック機構

アクチュエータを用いて摩擦力によるロック機構を検討し実装したが、関節構成やリンク長を検討した際に、パッシブ関節間のリンクが 0.03 m に限定された。これにより、検討したロック機構では、回転軸を並行移動させることで実現したが、余分なパーツやリンクが必要となるため問題である。そこで、摩擦力を用いた関節保持のメカニズムは同様に、アクチュエータの代わりにトーションばねを用いることでロック機構の小型化を図り、パッシブ関節の回転軸を平行移動させることなく実装可能なメカニズムを検討する。

アクチュエータを用いる代わりに、トーションばねを用いたロック機構の詳細を **Fig.5.3** に示す。ブレーキパッドとブレーキホイールは同様に用いて摩擦力により関節角度を保持する。ブレーキパッドを押し付ける力にアクチュエータとウォームギア、ウォームホイールを用いていたが、トーションばねを用いることで、スペースの小型化、ロック機構の軽量化を図る。また、トーションばねを用いることで、バネ定数によっては、アクチュエータを用いるよりも保持トルクの高いパッシブ関節が実装可能である。本論文では、目標タスクを 300 g 以下のオブジェクトの把持としているため、パッシブ関節の保持トルクは最大でも 27.2Nm である。しかし、パッシブ関節の保持トルクが向上することで、日常生活における作業支援のみならず、工場や作業現場などの高重量を扱うタスクの支援が期待でき

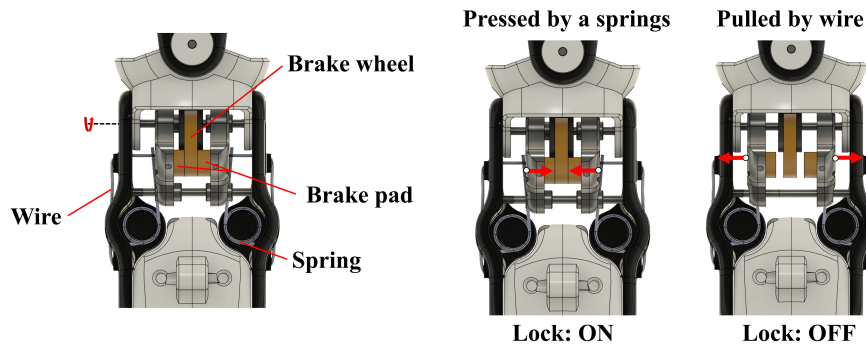


図 5.3: Mechanism of locking system by spring.

る。また、ロボットアームが動的に駆動した際の慣性力やユーザの動きによる外力を考慮すると、パッシブ関節には、十分に高い保持トルクが必要となる。よって、保持トルクの向上と、ロック機構の小型化を目的に、トーションばねを用いた関節保持メカニズムを検討する。トーションばねを用いた保持トルクの計算式を以下に示す。

$$N_{spring} = \frac{\text{バネ定数} * \text{タワミ角度}}{\text{コイル中心から作用点までの距離}} = \frac{17.2 * 5^\circ}{0.02m} = 4300N \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} \tau_{spring} &= N_{spring} * \text{摩擦係数} * \text{関節回転中心からブレーキパッドまでの距離} \\ &= 4300N * 0.6 * 0.01m \\ &= 25.8Nm \end{aligned} \quad (5.7)$$

よって、両側のブレーキパッドによる関節保持トルクは2倍の 51.6 Nm となる。プロトタイプでは、パッシブ関節の必要保持トルクが 31.2 Nm であったが、トーションばねを用いることで約 1.7 倍の 51.6 Nm の保持トルクが期待できる。

アクチュエータを除去したことでスイッチ等による電氣的なロック機構の制御は出来ない。そこで、このトーションばねによるブレーキパッドを押し付ける力をワイヤを用いてユーザが引っ張ることでロックの ON/OFF を制御する。Fig.5.4 にワイヤの機構詳細を示す。ワイヤには二種類あり、ブレーキパッドワイヤと、レバーワイヤがある。ブレーキパッドワイヤは、動滑車とブレーキパッドをつないでいる。また、レバーワイヤは2個の動滑車と2個の定滑車を結び、パッシブ関節の先端リンク上にあるレバーに固定されている。よってこのレバーをユーザが引くことで、動滑車が動き、それに伴いブレーキパッドも引っ張られるため、パッシブ関節のロック開閉が行える。2個の動滑車と2個の定滑車を用いることで、ユーザはブレーキパッドを押さえつけている力の 1/4 の力でロックの開閉が可能である。実装した AOA を Fig. 5.5 に示す。関節構成・リンク長を検討した際に、パッシブ関節の第1関節から第2関節までのリンク長が 0.03 mm と限定されたため、アクチュエータを用いたロック機構の場合、関節位置を回転軸に平行移動する必要があった。しか

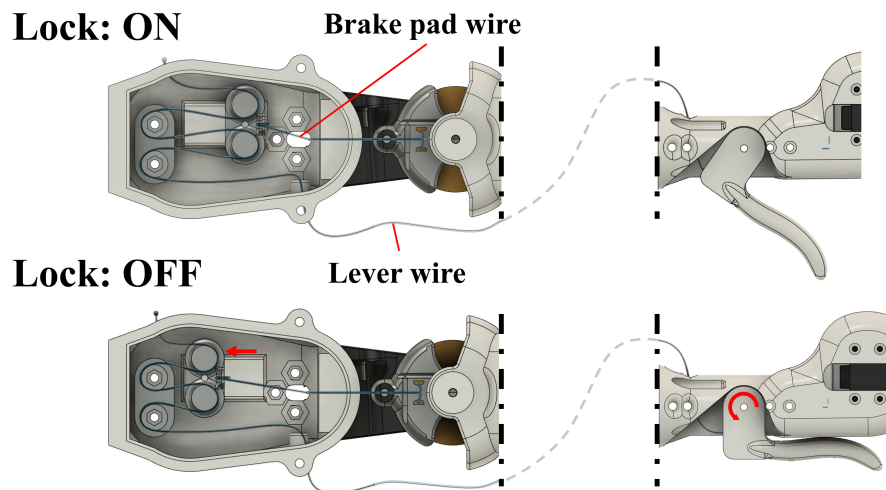


図 5.4: Mechanism of ON/OFF the lock by wire.

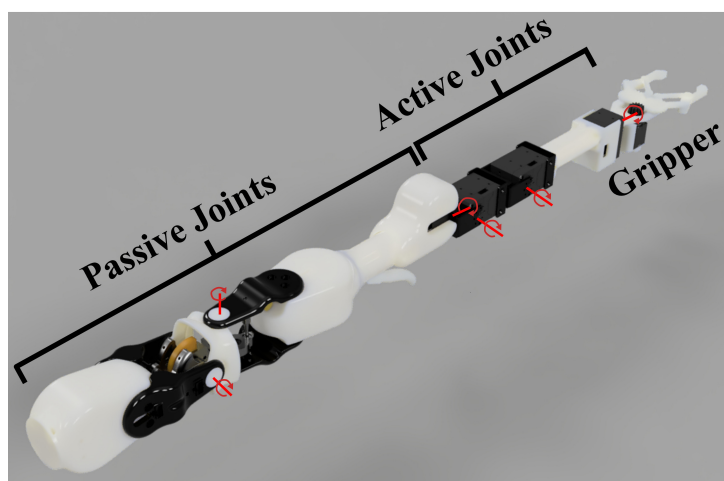


図 5.5: Specifications of the improved AOA.

し、トーションばねを用いたロック機構では、検討したリンク長や関節構成を用いてパッシブ関節の実装が可能となった。

また、プロトタイプで実装した AOA の総重量 1.2 kg なのに対し、改良した AOA の総重量は 0.9 kg とさらなる軽量化が図れた。改良したパッシブ関節の保持トルクは、プロトタイプの 2 倍である 51.6 Nm が実現でき、アクティブ関節の自由度が 1 自由度増加したが、プロトタイプと比較するとさらに軽量で安全な SRLs として実装することができた。

5.2 評価実験

本論文で検討した AOA の有用性をタスク実験を通して評価する。評価タスクとして、ハンダタスクを用いて作業効率と有用性を評価し対応のある 2 標本 t 検定を行い、AOA の有無で作業効率に影響が生じるかを検討する。また、今後の AOA ならびに SRLs の発展に向けて、この評価実験にて SRLs の現状における問題点や改善点を考察する。

5.2.1 実験内容・目的

本論文では、ロボットアームの軽量化の評価、ロボットアームの関節構成、リンク長の検討、装着方法・装着位置の検討、ユーザへの装着時の重量負担の評価・検討・考察を行った。これらの結果や考察を踏まえて、実装した SRLs である AOA を、具体的なタスクを用いて作業効率や有用性を評価することで、実用性の検討を行う。ユーザの作業範囲における協調性、拡張性、侵襲性を評価し実装したことによるタスク実行時の影響や改善点、問題点を示し、AOA の改善につなげる。また、本研究の新規性であるパッシブ関節とアクティブ関節を組み合わせた SRLs を用いるメリットをより具体的に示すためにも、被験者実験を用いた評価は非常に重要である。

しかし、AOA における有用性の評価や、作業効率の評価については、操作 UI によるアクティブ関節の制御方法に大きく依存する。ユーザの作業内容を把握し、ロボットアームが自主的に動作し支援するような制御方法を用いることで SRLs の有用性は大きく向上する。例えば、Wu らの [56], [57] のように、ユーザの腕の動きから支援する動作を動的に制御することで SRLs としての有用性が上がり作業効率も向上する。また、[39] のように、座った状態で用いる前提にモーションキャプチャーを用いて、ユーザの足とロボットアームの動きを一致させることで自由に SRLs を操作する方法等がある。このように SRLs として有用な UI は多く存在し、各 SRLs に特化した制御方法が用いられている。

本章では、具体的なタスク時における AOA の有用性を評価するためアクティブ関節は、第三者によりコントローラにて操作する。操作者の操作技術のばらつきによる影響を無くするため、十分な操作習熟期間を設けた操作者一人によりアクティブ関節を操作する。本タスク実験では、銅線のハンダ作業を用いて AOA を評価する。銅線のハンダ作業では、基板を治具に固定しハンダを行う。ハンダスタンドの様な、基板を支えるツールを用いれば、ユーザの腕のみでも実行は可能であるが、3 本目の腕が基板を支えることで、作業効率やユーザ負担に影響が生じるかを評価する。**Fig.5.7** にタスク内容を示す。まず、基板を手に取り銅線の両側を基板に差し込む (**Fig.5.7 A**)。その後、クリップで銅線を固定し (**Fig.5.7 B**)、基板を裏向けに治具にセットする (**Fig.5.7 C**)。治具の角度をハンダがやり易い角度に調整す

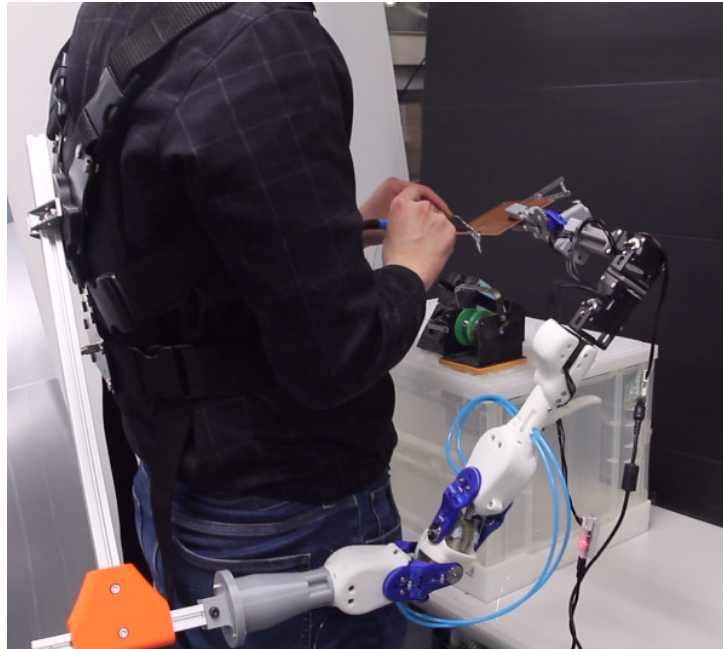


図 5.6: Task experimentation using AOA

る (**Fig.5.7 D**). 基板裏から出ている銅線の両側をハンダとハンダゴテを用いてハンダする (**Fig.5.7 E, F**). AOA を用いた場合は, 治具による基板固定の代わりにロボットアームが基板を把持し支える. ロボットアームの動的な基板の角度調整や位置調整による有意性を評価する.

評価方法として, 本研究で提案した SRLs を被験者に装着した場合と装着しない場合で, ハンダタスクを実行した後にアンケートにて評価を行う. **Fig.5.6** に AOA を装着しハンダタスクを行っている様子を示す. 評価実験における AOA の装着の有無は, ランダムで行う. 被験者は 20 代の男性 7 名である. アンケートの項目を以下に示す.

- AOA を用いた際の作業効率
- ユーザのみの作業効率
- AOA の有用性

上記の項目を 1-5 段階にて評価する. また, 各タスクの実行時間を計測し, それぞれの平均作業時間の差を評価する. 結果を踏まえて, AOA を用いてタスクを行った被験者からの意見を考察し問題点や改善点を示す.

5.2.2 実験結果・考察

Fig.5.8 に評価実験の作業効率と有用性の結果を示す. 作業効率は, AOA を装着した場合

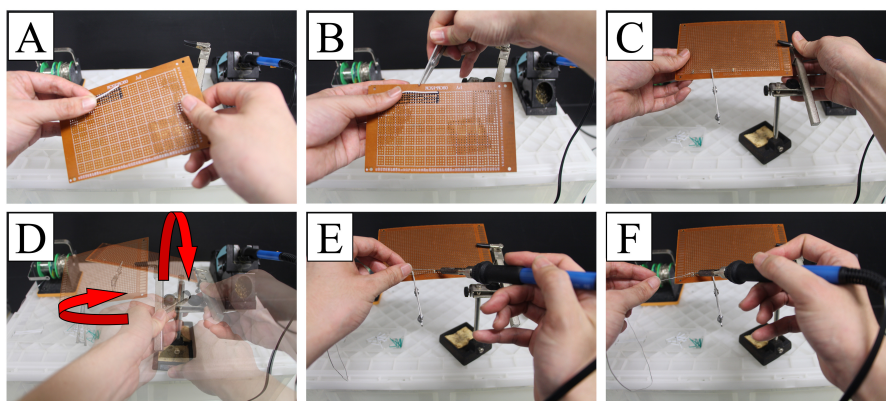


図 5.7: Details of the work process

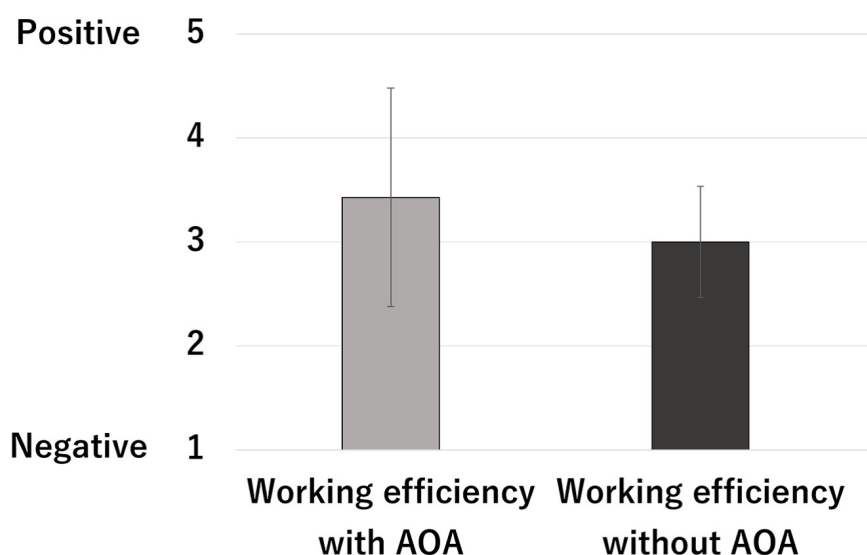


図 5.8: Questionnaire experiment results (* : $p < 0.05$).

と、装着しない場合で有意水準 5 % に対応のある 2 標本の両側 t 検定を行ったところ、p 値は 0.4 となり有意差は確認できなかった。また、平均作業時間の差を **Fig.5.9** に示す。有意水準 5 % に対応のある 2 標本の両側 t 検定を行ったところ、p 値は 0.4 となり有意差は確認できなかった。しかし、**Fig.5.10** に示す AOA の有意性は、4 と中央値の 3 を上回る高い評価となった。

被験者の意見として、「自分以外の手がオブジェクトを把持し、作業を行うこと自体に有用性を感じた」や、「軽量で負担が少ないため、SRLs としての有用性を感じた」などの意見が多くあった。本タスク実験において、作業効率に有用な差は見られなかったがパッシ

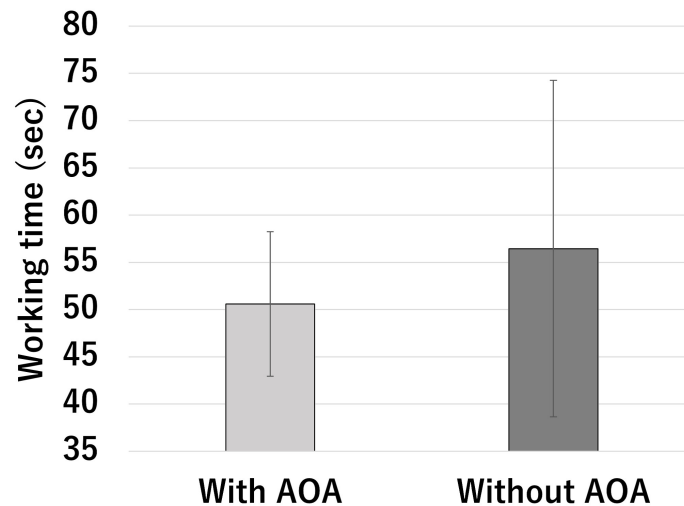


図 5.9: Difference in average work time (* : $p < 0.05$).

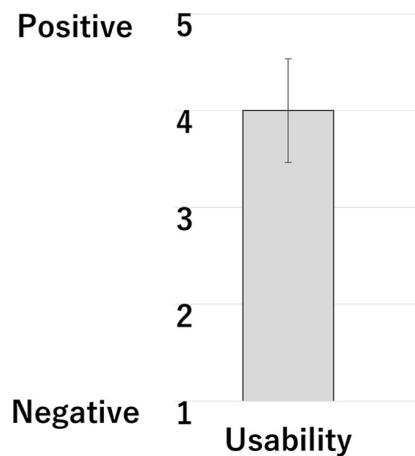


図 5.10: Usability of AOA (* : $p < 0.05$).

ブ関節とアクティブ関節を組み合わせたロボットアームが, SRLs として有用であることを示した. その他の意見として, 作業以外の間は, SRLs が邪魔になるためパッシブ関節を用いて直観的に邪魔にならない位置に移動できる点が良いとの声があった. パッシブ関節を用いることで, ユーザが思った位置に直接動かすことができるため操作性のストレスを軽減したと考えられる. しかし, 作業範囲が変わる度にパッシブを用いて動かすのが煩わしいとの意見もあった. AOA は, 予め大きく作業範囲が異なるタスクを目的に実装したため, 作業範囲が大きく移動する場合はパッシブ関節をユーザの手で動かす必要がある. これは, 全ての関節にアクチュエータを用いて動的に制御した場合にも同じことが言える. 作業範囲が異なる度にユーザが入力し操作する必要がある. この問題を改善するには, UI

へのユーザからの入力をより直観的に改善するか、ロボットアーム自体がユーザのタスクを認識し自動で駆動する必要がある。このような制御を行うには、深層学習等を用いた作業認識や作業工程の把握が必要となる。この問題は SRLs の発展において最も重要で困難な問題である。本論文で用いた Hybrid Actuation System を用いることで、動的な制御関節を減らし計算量を軽減することでロボットアームの制御処理への負担も軽減される。よって、HAS のデザインは従来の SRLs とは異なる視点でのアイデアとして、SRLs の発展への貢献が期待できる。

5.3 まとめ

パッシブ関節の角度分解能を向上するために、摩擦力を用いたロック機構を実装した。プロトタイプ of ロック機構と同様に 27 Nm の関節保持トルクを出力可能なメカニズムとして検討した。しかし、関節構成やリンク長を検討した際にパッシブ関節間のリンク長が 0.03 m と限定され、アクチュエータを用いてロックの開閉を制御する機構では、ロック機構に必要なサイズが大きいため、関節の位置を回転軸に平行移動する必要があった。これにより、無駄なパーツやリンクが必要になるためトーションばねを用いた、より小型で軽量のロック機構を検討し実装した。さらに、関節の保持トルクは 51.6 Nm とプロトタイプの約 1.7 倍の保持トルクを出力可能なパッシブ関節として実装した。重量においても、0.9 kg とプロトタイプよりもさらに軽量化ができた。

SRLs として評価を行うにあたり、改良した AOA を被験者に装着しタスク実験を行った。その結果、ハンダタスクにおける基板の把持支援において作業効率の向上は、確認できなかった。しかし、パッシブ関節とアクティブ関節を組み合わせた SRLs としての有用性を示した。これにより、従来の SRLs より軽量の SRLs としてのユーザ支援が期待できる。今後は、SRLs としての有用性をより向上するために、直観的な操作性を持つ UI の開発にも注力し、明文化する。

第 6 章

結言

6.1 本論文のまとめ

ユーザの作業支援を行う SRLs の検討と実装, 考察を行った. 2 本の腕では, 困難な作業時に SRLs を用いることで, 作業効率の向上が可能となり, ユーザへの作業負担も軽減できる. しかし, ユーザと同等の作業を実行するロボットアームを用いた場合, ロボットアームの重量負担問題や操作性問題が生じる.

一般的なロボットアームは, 全ての関節にアクチュエータを用いて角度制御を行うが, ロボットアームの根本関節に近づくにつれ, 必要な保持トルクが大きくなり, 高出力, 高重量のアクチュエータを用いる必要がある. これにより, ロボットアームの自重が重くなりユーザ負担となる. また, 関節が 6 自由度以上のロボットアームを制御するためには, ロボットアームの姿勢制御を行う必要があるが, 装着位置が異なる装着型ロボットアームでは, その都度姿勢制御パラメータを変更する必要があるため制御が困難である. これにより, より簡易で直観的な操作が必要となる.

そこで, 関節を物理的なロック機構を用いて角度を固定するパッシブ関節と, アクチュエータを用いて角度制御を行うアクティブ関節の 2 種類を組み合わせた Hybrid Actuation System を用いることで, SRLs の問題点である, 重量問題と操作性問題を改善した.

提案した SRLs をより最適化するために, 関節構成やリンク長をユーザの作業範囲を基に, 協調性, 拡張性, 侵襲性の 3 項目の指標を用いて検討した. 検討した SRLs を用いて, 最適な装着位置について評価した. 応力解析ツールを用いて, シミュレーション上でユーザの体に生じる応力を比較し, 部分的に大きな応力が生じない装着方法と装着位置について評価し検討した. 評価の結果, ベストを用いてバックパック型の装着方法を用いてロボットアームを腰位置に装着した場合, 協調性, 拡張性, 侵襲性のバランスが良く, ユーザへの負担も軽減されることが確認できた.

SRLs はユーザに装着するため, ユーザのタスクに合わせた作業範囲が確保でき, 協調作

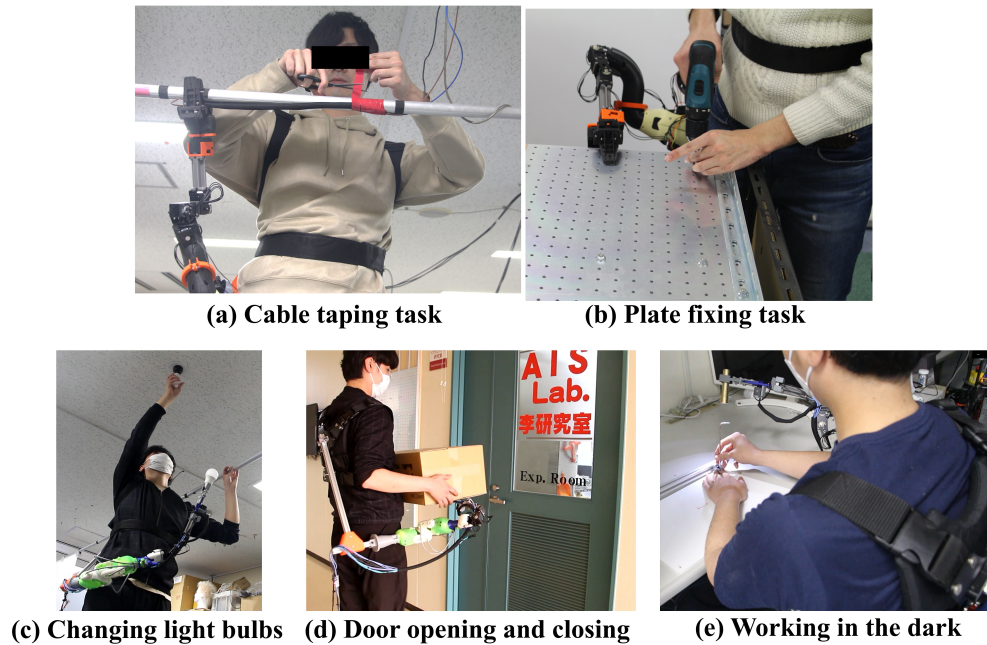


図 6.1: Applications of the wearable robot arm.

業範囲を広く設けられる点に大きなメリットがある。近年, SRLs の研究が盛んに行われているが, 様々な装着位置にてそれぞれの SRLs が検討されている。作業内容やロボットアームの自由度によって最適な装着位置は異なるため装着位置の一般化は難しい。しかし, 本論文で検討した SRLs は, ユーザの日常生活で 9 割を占める「持ち上げる」タスクを実行するために必要な関節構成, リンク長, 装着位置を検討したものである。持ち上げるタスクは, 日常生活だけでなく工場や農業などの様々なフィールドで応用可能なタスクであるため, 本論文で検討した内容は SRLs の一般化に貢献している。装着位置がある程度統一化されれば, 現状では困難な SRLs 同士の比較が可能になり, より良い SRLs の検討が可能となる。本研究の今後の展望は, 検討した AOA を用いて「持ち上げる」タスクをベースとした作業支援のための UI を開発・検討を行い, さらなる研究の発展を目指すことである。

6.2 AOA の応用

本研究で提案した AOA を用いた応用例を Fig. 6.1 に示す。Fig. 6.1 (a) はケーブルをテーピングする例である。ロボットアームでケーブルの端を支えながら, 両手でテーピング作業を行う。Fig. 6.1 (b) はプレートを固定する例である。ロボットアームでプレートを支えながら, ドリルを使ってプレートを固定する。Fig. 6.1 (c) は, 電球交換作業の例である。替えの電球を AOA が把持することで, ユーザは手すりや壁を持ち安全に作業を行える。Fig. 6.1 (d) は, 両手が塞がった状態でドアの開閉を行う例である。荷物を AOA が保

持するため、ユーザの肩手が自由になり、ドアの開閉が行える。Fig. 6.1 (e) は、暗所で作業を行う場合の例である。ユーザの手元位置を AOA が把持したライトを照らす事で、暗所での作業を支援する。AOA が目標としている保持重量は 300g と軽量だが、高重量なオブジェクトを扱う際には、パッシブ関節のトーションばねを変えることで、保持トルクを向上可能である。この他にも、立食パーティなどの場面で、皿やコップを保持する等の第 3 者の簡易サポートを行うには十分な有用性が期待できる。

6.3 今後の課題

本研究で提案した AOA はユーザがロボットアームを保持し可動させるパッシブ関節と、動的に作業を支援するアクティブ関節を用いて SRLs として実装し提案した。このアクティブ関節を用いた動的な支援を行うには、2 種類の操作方法がある。1 つ目は、ユーザがコントローラを用いてロボットアームを操作する方法、2 つ目は、ロボットアームが自律的に関節を動かしユーザ作業を支援する方法である。1 つ目の方法は、ユーザの両手は作業に用いるため使用することは困難である。足や頭などを用いてロボットアームを操作することも可能だが、操作性に問題が生じる。この問題を解決する研究として、モーションキャプチャーを用いてユーザの足とマッピングしロボットアームを操作する [39] や、筋電位センサ (EMG) を用いて、筋肉の動きを読み取り操作する [58], [59] などがある。本研究では、以前に足を用いた UI を実装し評価した [60]。しかし、足を用いた操作が困難であり、ユーザへの操作負担が生じたため、十分な操作性が得られなかった。Prattichizzo らの [61] では、SRLs の操作方法として人間の手足の活動を妨げないような制御インターフェースが最も重要であると述べている。ユーザへの動的な支援を行うアクティブ関節には、単純なユーザからの入力にてロボットアームが駆動する UI を検討する必要がある。

また、2 つ目の操作方法では、ユーザの行動認識や作業行程認識などの深層学習を用いることでロボットアームが自発的に作業を支援することが可能である。これらの操作方法を検討し、本研究の目標タスクである「持ち上げる」タスクに最適な操作方法を研究開発していく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、日頃から適切なご指導、および助言を与えてくださった立命館大学情報理工学部の李周浩教授に心より深く感謝いたします。研究者として重要な思考や行動を、日常生活や研究活動を通して教えていただきました。また、私の弱点や足りない部分を指摘していただき、改善する方向へと導いてくださいました。重ねて、お礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、お忙しい中、本論文を査読して頂いた立命館大学情報理工学部の木村朝子教授、同 満田隆教授には深く感謝申し上げます。また、研究や将来性について数々の助言を頂きました、立命館大学情報理工学部の山本寛教授にも深く感謝申し上げます。

また、日頃からアドバイスや相談など多岐にわたって非常に多くの助言をいただきました、兵庫県立大学工学部大学院工学研究科の山添大丈准教授、立命館大学情報理工学部の Dinh Tuan Tran 助教にも心より感謝いたします。

李研究室の先輩である Park JongSeung 氏, RENTERIA ROCHIN Francisco 氏, Lee Miran 氏, 竹内龍氏, 三好智之氏, Lee Dongjun 氏, 菅野晃史氏, 森田浩平氏, 仲田晃嗣氏には、研究面でも日常生活の面でも適切な助言や支えて頂いたことに深く感謝致します。李研究室の後輩である藤井康之氏, 施真琴氏にも、同じ博士課程の学生として切磋琢磨し、研究の士気を高めていただいたことに感謝申し上げます。李研究室の後輩である里岡樹氏には実験や共同研究をサポートしていただき感謝いたします。また、日頃から様々な面でご協力いただきました李研究室の皆様にも感謝いたします。

元研究室の同期である日立製作所の松見匠規氏, 村田製作所の村田航大氏には、日常生活において数多く支えていただきましたことを感謝申し上げます。

共同研究を通して、社会の厳しさや企業のノウハウを教えて頂いた住友電装株式会社の生産技術部の方々にも感謝申し上げます。最後に私をここまで支えてくださった両親である小島英伸, 雅子に感謝の意を表して、本論文の謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] F. Parietti and H. Asada, “Supernumerary robotic limbs for human body support”, IEEE Trans. Robot., vol. 32, no. 2, pp. 301–311, Apr. 2016.
- [2] B. Chen, H. Ma, L. Y. Qin, F. Gao, K. M. Chan, S. W. Law, L. Qin, and W. H. Liao, “Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons,” J. Orthop. Translat., vol. 5, pp. 26–37, Apr. 2016.
- [3] F. Parietti, K. Chan, and H. H. Asada, “Bracing the human body with supernumerary robotic limbs for physical assistance and load reduction,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Hong Kong, China, 2014, pp. 141–148.
- [4] H. Kawamoto and Y. Sankai, “Power assist system HAL-3 for gait disorder person,” in Proc. 8th Int. Conf. Computers Helping People with Special Needs, Linz, Austria, 2002, pp. 196–203.
- [5] M. Hao, J. W. Zhang, K. Chen, and C. L. Fu, “Design and basic control of extra robotic legs for dynamic walking assistance,” in Proc. IEEE Int. Conf. Advanced Robotics and Its Social Impacts, Beijing, China, 2019, pp. 246–250.
- [6] Z. Lovrenovic and M. Doumit, “Review and analysis of recent development of lower extremity exoskeletons for walking assist,” in Proc. IEEE EMBS Int. Student Conf., Ottawa, ON, Canada, 2016, pp. 1–4.
- [7] G. Kenneally, A. De, and D. E. Koditschek, “Design principles for a family of direct-drive legged robots,” IEEE Rob. Autom. Lett., vol. 1, no. 2, pp. 900–907, Jul. 2016.
- [8] H. Kazerooni, R. Steger, and L. H. Huang, “Hybrid control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX),” Int. J. Rob. Res., vol. 25, no. 5-6, pp. 561–573, May 2006.
- [9] H. Kazerooni, J. L. Racine, L. H. Huang, and R. Steger, “On the control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX),” in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Barcelona, Spain, 2005, pp. 4353–4360.
- [10] C. Davenport, F. Parietti, and H. H. Asada, “Design and biomechanical analysis of supernumerary robotic limbs,” in Proc. ASME 5th Annu. Dynamic Systems and Con-

- trol Division Conf., JSME 11th Motion and Vibration Conf., Florida, USA, 2013, pp. 787–793.
- [11] D. A. Kurek and H. H. Asada, “The MantisBot: Design and impedance control of supernumerary robotic limbs for near-ground work,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Singapore, 2017, pp. 5942–5947.
 - [12] Zeyu Ding, Shogo Yoshida, Takuma Torii, Haoran Xie, “xLimb: Wearable Robot Arm with Storable and Extendable Mechanisms”, *AH2021*, May 27–28, 2021, Geneva, Switzerland.
 - [13] I. Hussain, M. Anwar, Z. Iqbal, R. Muthusamy, M. Malvezzi, L. Seneviratne, D. M. Gan, F. Renda, and D. Prattichizzo, “Design and prototype of supernumerary robotic finger (SRF) inspired by fin ray (R) effect for patients suffering from sensorimotor hand impairment,” in *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Soft Robotics*, Seoul, Korea, 2019, pp. 398–403.
 - [14] I. Hussain, G. Spagnoletti, C. Pacchierotti, and D. Prattichizzo, “A wearable haptic ring for the control of extra robotic fingers,” in *Haptic Interaction: Science, Engineering and Design*, Singapore, 2018, pp. 323–325.
 - [15] G. Gourmelen, A. Verhulst, B. Navarro, T. Sasaki, G. Gowrishankar, and M. Inami, “Co-limbs: An intuitive collaborative control for wearable robotic arms,” in *Proc. SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies*, Australia, pp. 9–10.
 - [16] J. Guggenheim, R. Hoffman, H. J. Song, and H. H. Asada, “Leveraging the human operator in the design and control of supernumerary robotic limbs,” *IEEE Rob. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 2, pp. 2177–2184, Apr. 2020.
 - [17] Y. P. Huang, E. Burdet, L. Cao, P. T. Phan, A. M. H. Tiong, and S. J. Phee, “A subject-specific four-degree-of-freedom foot interface to control a surgical robot,” *IEEE-ASME Trans. Mech.*, vol. 25, no. 2, pp. 951–963, Apr. 2020.
 - [18] C. Véronneau, J. Denis, L. P. Lebel, M. Denninger, V. Blanchard, A. Girard, and J. S. Plante, “Multifunctional remotely actuated 3-DOF supernumerary robotic arm based on magnetorheological clutches and hydrostatic transmission lines,” *IEEE Rob. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 2, pp. 2546–2553, Apr. 2020.
 - [19] F. Parietti and H. H. Asada, “Supernumerary robotic limbs for aircraft fuselage assembly: Body stabilization and guidance by bracing,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Hong Kong, China, 2014, pp. 1176–1183.
 - [20] D. J. Gonzalez and H. H. Asada, “Design of extra robotic legs for augmenting human payload capabilities by exploiting singularity and torque redistribution,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, Madrid, Spain, 2018, pp. 4348–4354.

- [21] Roozbeh Khodambashii, Gil Weinberg, William Singhose, Shima Rishmawi, Varun Murali, Euisun Kim, “User Oriented Assessment of Vibration Suppression by Command Shaping in a Supernumerary Wearable Robotic Arm” , IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 2016.
- [22] D. Gopinath and G. Weinberg, “A generative physical model approach for enhancing the stroke palette for robotic drummers,” *Rob. Autonom. Syst.*, vol. 86, pp. 207–215, Dec. 2016.
- [23] Z. Bright and H. H. Asada, “Supernumerary robotic limbs for human augmentation in overhead assembly tasks,” in *2017 Robotics: Science and Systems*, Cambridge MA, USA.
- [24] Development of the Remote Decontamination Robot for an Upper Floor of Reactor Building in Fukushima Daiichi NPP.
- [25] Yoshinori Ohnishi, Takeshi Takaki, Tadayoshi Aoyama and Idaku Ishii, "Development of a 4-Joint 3-DOF robotic arm with anti-reaction force mechanism for a multicopter", 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) September 24–28, 2017, Vancouver, BC, Canada.
- [26] Inseong Jo, Joonbum Bae, “Design and Control of a Wearable Hand Exoskeleton with Force-controllable and Compact Actuator Modules”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.5596–5601, 2015.
- [27] Nicky Kern, Bernt Schiele, Albrecht Schmidt, “Multi-sensor Activity Context Detection for Wearable Computing” , *European Symposium on Ambient Intelligence*, pp.220–232, 2003.
- [28] Hiroaki Kawamoto, Yoshiyuki Sankai, “Power Assist System HAL- 3 for Gait Disorder Person”, *International Conference on Computers for Handicapped Persons*, pp 196–203, 2002.
- [29] Tetsuya Morizono, Kenji Tahara, and Hitoshi Kino, “Choice of Muscular Forces for Motion Control of a Robot Arm with Biarticular Muscles” , *J. Robot. Mechatron*, Vol.31 No.1 pp.143–155, 2019.
- [30] Yukiko Iwasaki, Hiroyasu Iwata, “A face vector - the point instruction-type interface for manipulation of an extended body in dual-task situations” , *International Conference on Cyborg and Bionic Systems*, pp.662–666, 2018.
- [31] Dheeraj Nimawat, Pawan Raj, Singh Jailiya, “Requirement of Wearable Robots in Current Scenario” , *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, pp 19–23, 2015.
- [32] Federico Parietti, H. Harry Asada, “Dynamic Analysis and State Estimation for Wearable

- Robotic Limbs Subject to Human-Induced Disturbances”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp 3880–3887, 2013.
- [33] baldin Llorens-Bonilla, Federico Parietti, Harry Asada, “Demonstration-Based Control of Supernumerary Robotic Limbs”, IEEE International Conference on Intelligent Robotics and Systems, pp 3936–3942, 2012.
- [34] Federico Parietti, Kameron C. Chan, Banks Hunter, H. Harry Asada, “Design and Control of Supernumerary Robotic Limbs for Balance Augmentation”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp 5010–, 5017, 2015.
- [35] Baldin Llorens-Bonilla, H. Harry Asada, “A Robot on the Shoulder: Coordinated Human-Wearable Robot Control using Coloured Petri Nets and Partial Least Squares Predictions”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp 119–125, 2014.
- [36] Vighnesh Vatsal, Guy Hoffman, “At Arm’ s Length: Challenges in Building aWearable Robotic Forearm for Human-Robot Collaboration”,IEEE International Conference on Human Robot Interaction , pp 271–272, 2018.
- [37] Koki Nakabayashi, Yukiko Iwasaki, Hiroyasu Iwata, “Development of Evaluation Indexes for Human-Centered Design of a Wearable Robot Arm”, International Conference on Human Agent Interaction (HAI), 2017.
- [38] MHD Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Reo Matsumura, Kouta Minamizawa, Masahiko Inami, “Fusion Full Body Surrogacy for Collaborative Communication”,SIGGRAPH Emerging Technologies, 2018.
- [39] Tomoya Sasaki, MHD Yamen Saraiji, Charith Lasantha Fernando, Kouta Minamizawa, Masahiko Inami, “MetaLimbs: Multiple Arms Interaction Metamorphism”, SIGGRAPH Emerging Technologies, 2017.
- [40] Dheeraj Nimawat and Pawan Raj Singh Jailiya, "Requirement of Wearable Robots in Current Scenario", European Journal of Advances in Engineering and Technology, 2015, 2(2): 19-23.
- [41] Schiele A Vander and Helm FCT, "Kinematic Design to Improve Ergonomics in Human Machine Interaction", IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2006, 14(4): 456–469.
- [42] Lemay M, Hogan N and Dorsten JW, Issues in Impedance Selection and Input Devices for Multipoint Powered Orthotics, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 1998, 6(1): 102–105.
- [43] Mamiko Abe, Tomoyuki Yamamoto Tsutomu Fujinami, “A dynamical analysis of kneading using a motion capture device”, Proc. of Third International Workshop on Epgenetic

- Robotics, pp.41–48, 2003.
- [44] Li Qin, Fucui Liu, Tiantian Hou, and Lihuan Liang, “Kinematics Analysis of Serial-Parallel Hybrid Humanoid Robot in Reaching Movement” , J. Robot. Mechatron, Vol.26 No.5 pp.592–599, 2014.
- [45] Mohammed Z. Al-Faiz, Ahmed F. Shanta, “Kinect-Based Humanoid Robotic Manipulator for Human Upper Limbs Movements Tracking” , Intelligent Control and Automation, pp.29–37, 2015.
- [46] S Collins, A Ruina, R Tedrake, M Wisse, "Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers", Science 2005, Vol. 307, No. 5712, pp.1082-1085.
- [47] Hideyuki Tanaka, Masahiro Yoshikawa, Eimei Oyama, Yujin Wakita, and Yoshio Matsumoto, "*Development of Assistive Robots Using International Classification of Functioning, Disability, and Health: Concept, Applications, and Issues*", Hindawi Publishing Corporation Journal of Robotics Volume 2013, Article ID 608191, 12 pages.
- [48] International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF), World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2001.
- [49] Bedirhan, Ü.T.; Chatterji, S.; Bickenbach, J.; Kostanjsek, N.; Schneider, M. The International Classification of Functioning, Disability and Health: A New Tool for Understanding Disability and Health. *Disabil. Rehabil.* **2003**, *25*, 565–571.
- [50] HQL Database for Human Life Engineering. <https://www.hql.jp/database/2021-09-15>.
- [51] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), AIST/HQL 3D Anthropometric Database 2003: Definitions of Measurement. <https://www.airc.aist.go.jp/2021-09-15>.
- [52] Saman Madinei, Xiaopeng Ning, "Effects of the weight configuration of hand load on trunk musculature during static weight holding", Ergonomics, 2018 VOL. 61, NO. 6, 831–838.
- [53] R. Lloyd , B. Parr , S. Davies, C. Cooke, "A kinetic comparison of back-loading and headloading in Xhosa women", Ergonomics Vol. 54, No. 4, April 2011, 380–391.
- [54] A. M. ANDERSON, K. A. MEADOR, L. R. MCCLURE, D. MAKROZAHOPOULOS, D. J. BROOKS and G. A. MIRKA, "A biomechanical analysis of anterior load carriage", Journal of Ergonomics Vol. 50, No. 12, December 2007, 2104–2117.
- [55] Daijiro Abe, Satoshi Muraki, Akira Yasukouchi, "Ergonomic effects of load carriage on the upper and lower back on metabolic energy cost of walking", Applied Ergonomics Volume 39, Issue 3, May 2008, Pages 392-398.
- [56] F. Y. Wu and H. H. Asada, ““Hold-and-manipulate” with a single hand being assisted by wearable extra fingers” , in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Seattle,

- WA, USA, 2015, pp. 6205–6212.
- [57] F. Y. Wu and H. Asada, “Supernumerary robotic fingers: An alternative upper-limb prosthesis,” in Proc. ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conf., San Antonio, Texas, USA.
 - [58] S. W. Leigh and P. Maes, “Body integrated programmable joints interface,” in Proc. CHI Conf. Human Factors in Computing Systems, San Jose, California, USA, 2016, pp. 6053–6057.
 - [59] M. Bretan, D. Gopinath, P. Mullins, and G. Weinberg, "A robotic prosthesis for an amputee drummer". 2016. arXiv preprint arXiv: 1612.04391
 - [60] Akimichi Kojima, Hirotake Yamazoe, Joo-ho Lee, "User friendly podalic interface for light weighted wearable robot arm", 2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI) June 28 - July 1, 2017 at Maison Glad Jeju, Jeju, Korea.
 - [61] Domenico Prattichizzo, Maria Pozzi, Tommaso Lisini Baldi, Monica Malvezzi, Irfan Hussain, Simone Rossi and Gionata Salvietti, "Human augmentation by wearable supernumerary robotic limbs: review and perspectives", Prog. Biomed. Eng.3(2021) 042005.

研究業績

学術論文

1. Kojima, A.; Yamazoe, H.; Lee, J.-H. Wearable Robot Arm with Consideration of Weight Reduction and Practicality. J. Robot. Mechatron. 2020,32,pp.173–182.
2. Akimichi Kojima, Dinh Tuan Tran, Joo-Ho Lee, Investigation of the Mounting Position of a Wearable Robot Arm, Robotics 2022, <https://doi.org/10.3390/robotics11010019>.

国際会議

1. Akimichi Kojima, Hirotake Yamazoe, Joo-Ho Lee, “Improvement of Passive Joint in Wearable Robot Arm” , International Conference on Ubiquitous Robots 2020.
2. Akimichi Kojima, Hirotake Yamazoe, Joo-Ho Lee, "Proposal of light wearable robot arm for assistances of user’ s tasks ", The 15th Join Workshop on Machine Perception and Robotics, Shiga, Oct, 2019.
3. Akimichi Kojima, Hirotake Yamazoe, Joo-Ho Lee, "User friendly podalic interface for light weighted wearable robot arm", 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, June 2017.
4. Akimichi Kojima, Hirotake Yamazoe, Joo-Ho Lee, “Contorl of wearable robot arm with hybrid actuation system” , IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp-1022-1027, December 11, 2017.
5. Akimichi Kojima, Hirotake Yamazoe, Joo-Ho Lee, "Proposal of light and safe wearable robot arm with HAS ", The 12th Join Workshop on Machine Perception and Robotics, Osaka, Oct, 2016.
6. Akimichi Kojima, Hirotake Yamazoe, Joo-Ho Lee, " Practical-use oriented design for wearable robot arm", International Conference on Intelligent Robotics and Applications, 125-134, 2016.

国内会議

1. 小島景行, 山添大丈, 李周浩, "軽量化と実用性を考慮した装着型ロボットアームの提案 第6報", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019.
2. 小島景行, 山添大丈, 李周浩, "装着型ロボットアーム操作のためのユーザインタフェースの検討", ヒューマンインタフェースシンポジウム 2017.
3. 小島景行, 山添大丈, 李周浩, "軽量化と実用性を考慮した装着型ロボットアームの提案 第5", 第35回日本ロボット学会学術講演会 2017.
4. 小島景行, 山添大丈, 李周浩, "軽量化と実用性を考慮した装着型ロボットアームの提案 第4報", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017.
5. 小島景行, 山添大丈, 李周浩, "軽量化と実用性を考慮した装着型ロボットアームの提案 第3報", 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2017.
6. 小島景行, 山添大丈, 李周浩, "軽量化と実用性を考慮した装着型ロボットアームの提案 第2報", 第34回日本ロボット学会学術講演会 2016.
7. 小島景行, 山添大丈, 李周浩, "軽量化と実用性を考慮した装着型ロボットアームの提案", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016.

受賞歴

2020年3月2日 住友電装株式会社 「自動化技術開発」 感謝状