

## 修士論文

# オープンプラットフォームオフィスロボットの開発 -QDD モータを使用した ロボットアームのメカニズムの設計と製作-

Development of Open Platform Office Robot  
-Design and Construction of a Robot Arm Mechanism  
using QDD Motor-

2025年1月16日 提出

指導教員 林原 靖男 教授

千葉工業大学 先進工学研究科 未来ロボティクス専攻  
23S1008 川鍋清志郎



# 概要

## オープンプラットフォームオフィスロボットの開発 -QDD モータを使用したロボットアームのメカニズムの設計と製作-

本研究では、オープンプラットフォームオフィスロボット開発の第一段階として、QDD モータを使用したロボットアームの設計と製作を行った。近年、人手不足を背景に、オフィスロボットの実用化が期待されている。様々な企業や研究室で開発が行われているが、それらのロボットは設計データを公開しておらず、オープンプラットフォームが不足している。本研究では、この課題を解決する第一歩として、QDD モータを使用したオフィスロボットのロボットアームのメカニズムを設計・製作し、その設計データを公開することを目的とする。QDD モータは、低減速比による高い応答性を備えており、適切に制御することで衝突時の衝撃を軽減できることが先行研究により確認されている。オフィスロボットは人に被害を加えないことが極めて重要であるため、本研究ではロボットアームに QDD モータを採用した。従来のロボットアーム調査を基に、最低限の機能を持つ QDD モータを使用した 6 自由度のロボットアームを開発した。構造解析により強度を確認し、部品外注サービスを活用し、短期間での部品調達と製作を可能にした。検証では、机の片づけ作業を想定し、開発したロボットアームが要求された作業領域での動作ができるかを確認した。また、安全対策として、通電時の可動範囲内への進入防止および遠隔停止の必要性を検討した。開発したロボットアームの設計データおよび部品リストは GitHub 上で公開され、他の開発者による利用および改良が可能である。これにより、オフィスロボット開発のコスト削減やスピード向上を促進し、分野の活性化に貢献する。

キーワード: オフィスロボット、ロボットアーム、QDD モータ、オープンプラットフォーム

# abstract

This study focuses on the design and fabrication of a robotic arm using QDD motors as the first step toward developing an open-platform office robot. In recent years, the practical application of office robots has been increasingly anticipated due to labor shortages. Although various companies and research institutions have been developing office robots, most do not disclose their design data, resulting in a lack of open platforms. To address this issue, this study aims to design and fabricate the mechanism of a robotic arm for office robots using QDD motors and make the design data publicly available. QDD motors feature high responsiveness due to their low reduction ratio and have been shown in previous studies to reduce impact forces during collisions with appropriate control. Since it is critical for office robots to avoid causing harm to humans, QDD motors were selected for the robotic arm in this study. Based on an analysis of existing robotic arms, a six-degree-of-freedom robotic arm with essential functionalities was developed using QDD motors. Structural analysis was conducted to ensure sufficient strength, and outsourced manufacturing services were utilized to enable rapid procurement and fabrication of components. In the validation phase, the robotic arm was tested for a desk-cleaning task, confirming that it could operate within the required workspace. Additionally, safety measures, such as preventing entry into the arm's operational range during power-on and enabling remote emergency stops, were considered. The design data and parts list of the developed robotic arm have been published on GitHub, allowing other developers to utilize and improve the design. This contributes to reducing development costs, accelerating progress, and revitalizing the field of office robot development.

keywords: Office robot, robotic arm, QDD motor, open platform

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	1
1.1	背景 . . . . .	1
1.2	QDD モータの採用 . . . . .	3
1.3	目的 . . . . .	6
1.4	本論文の構成 . . . . .	6
<b>第 2 章</b>	<b>設計指針</b>	7
2.1	ロボットアーム調査 . . . . .	7
2.1.1	アームリーチ . . . . .	7
2.1.2	可搬重量 . . . . .	8
2.1.3	自由度 . . . . .	10
2.1.4	エンドエフェクタの形状 . . . . .	11
2.1.5	オフィスロボットのロボットアームとして要求される項目 . . . . .	12
2.2	作業調査 . . . . .	13
<b>第 3 章</b>	<b>設計</b>	14
3.1	部品の選定 . . . . .	14
3.1.1	QDD モータ . . . . .	14
3.1.2	板金部品 . . . . .	16
3.1.3	アルミフレーム . . . . .	16
3.1.4	エンドエフェクタ . . . . .	16
3.2	ロボットアームの構造設計 . . . . .	17

3.2.1	軸配置	18
3.2.2	軸間距離	18
3.2.3	可搬重量	19
3.2.4	可動範囲	20
3.3	平行グリッパの設計	25
3.4	強度確認	26
3.4.1	部品1の構造解析	26
3.4.2	設計の変更	28
3.4.3	部品2の構造解析	29
<b>第4章 製作</b>		32
4.1	部品の製作	32
4.2	組み立て	35
<b>第5章 検証</b>		36
5.1	検証方法	36
5.2	検証結果	38
5.3	安全対策の検討	39
<b>第6章 結論</b>		41
6.1	まとめ	41
6.2	今後の展望	41
<b>参考文献</b>		42
<b>付録</b>		44
<b>謝辞</b>		45

# 図目次

1.1	TIAGo from PAL-Robotics . . . . .	2
1.2	HSR from TOYOTA . . . . .	2
1.3	3-DoF robot arm using QDD motor . . . . .	4
1.4	The Blue robot using QDD motor . . . . .	4
1.5	The proposed 5-DOF articulated quasi-direct drive (QDD) robot arm, together with a commercial 1-DOF soft gripper . . . . .	5
2.1	Office robot arm reach survey results . . . . .	8
2.2	Office robot payload survey results . . . . .	9
2.3	Office robot arm DoF survey results . . . . .	10
2.4	End effectior of TIAGo . . . . .	11
3.1	The mechanical design of the robot arm . . . . .	17
3.2	Axis configuration of the robot arm. . . . .	18
3.3	Arm reach and link length . . . . .	18
3.4	Center of gravity . . . . .	19
3.5	Minimum range of motion . . . . .	21
3.6	Maximum range of motion . . . . .	21
3.7	Positional relationship between desk, can and robot arm. . . . .	22
3.8	Initioal position of robot arm . . . . .	23
3.9	Checking the working area of the robot arm . . . . .	23

3.10	Results of measuring the hand position of the robot arm shown in the figure3.9 . . . . .	24
3.11	Exploded view of parallel gripper . . . . .	25
3.12	Configuration of the shoulder components . . . . .	26
3.13	Structural analysis results of Part 1 . . . . .	27
3.14	Structural analysis results of Part 1 (thickness changed to 5mm) . . . . .	28
3.15	Structural analysis results of Part 1 (shape optimized) . . . . .	29
3.16	Fixing the aluminum frame and part 2 . . . . .	30
3.17	Structural analysis results of Part 2 at maximum output of 22Nm . . . . .	30
3.18	Structural analysis results of Part 2 at rated output 7.5Nm . . . . .	31
4.1	3D printed parts . . . . .	33
4.2	Parts ordered from Meviy . . . . .	33
4.3	Parts list . . . . .	34
4.4	Assembled robot arm . . . . .	35
5.1	Test environment: Randomly place paper cups in a 50 x 100 area . . . . .	37
5.2	How a robot arm is supported and moved by a person . . . . .	37
5.3	Approaching a paper cup near the robot arm . . . . .	39

# 表目次

3.1	QDD motor performance comparison . . . . .	15
3.2	Specifications of Part 1 . . . . .	27
3.3	Specifications of Part 1 (thickness changed to 5mm) . . . . .	28
3.4	Specifications of Part 1 (shape optimized) . . . . .	29
3.5	Specifications of Part 2 . . . . .	30
4.1	Specifications of the robot arm . . . . .	35

# 第1章

## 序論

### 1.1 背景

近年，人手不足を背景にサービスロボットの需要が高まり，日常生活の中で目にする機会が増えている。現在，実用化に至っているサービスロボットは，館内の案内 [1]，警備 [2]，掃除 [3]，配膳 [4]，など，1つの作業に特化したロボットが主流である。一方で，複数の作業が行えるサービスロボットであるモバイルマニピュレータロボットの開発が進められている。モバイルマニピュレータロボットは，自律移動ロボットにマニピュレータを搭載したロボットであり，PAL Robotics 社の TIAGo(図 1.1 参照) やトヨタ自動車の HSR(図 1.2 参照) などが代表例として挙げられる。これらのロボットは，人に代わって様々な作業ができる汎用的なサービスロボットとして実用化が期待されている [5]。本研究では，オフィス環境で活動するモバイルマニピュレータロボットを「オフィスロボット」と定義して研究を進める。

オフィスロボットは様々な企業や研究室で開発が進められているものの，設計データを公開している例が少なく，オープンプラットフォームが不足している。オープンプラットフォームとして設計データを公開することは，利用者によるハードウェアの改良を容易にし，開発者間の技術交流を促進する点で大きな利点がある。例えば，自律移動ロボットのオープンソースハードウェアである i-Cart シリーズは，本研究室で開発されている orne-box をはじめとする様々なロボットのベースとして活用してきた。このようにハードウェアプラットフォームが整備されている場合には，開発者はハードウェア製作の工数を削減し，ソフトウェア開発やタスク実装に注力できる。さらに，開発者間の知識や成果を共有することで，技術発展が加速

すると考えられる。

そこで本研究では、オープンプラットフォームオフィスロボットの開発を行う。特に本項では、オフィスロボットの要となるアームに着目し、そのメカニズムの設計と製作について述べる。



Fig. 1.1: TIAGo from PAL-Robotics (source: [6])



Fig. 1.2: HSR from TOYOTA (source: [7])

## 1.2 QDD モータの採用

オフィス環境においてロボットアームが人や物に被害を与えないことは極めて重要である。本研究ではロボットアームが人や物と衝突した時の衝撃を軽減することを目的として、QDD (Quasi Direct Drive) モータを採用する。QDD モータは、低減速比で高いバックドライブabilitiy を有し、優れた応答性を示す点が特徴である。いくつかの研究では、QDD モータを適切に制御することで、衝突時の衝撃を軽減することが示されている。

飯塚ら [8] は、DD モータに 10:1 の減速機構を組み合わせた QDD モータを用いた柔軟な 3 自由度ロボットアーム (図 1.3 参照) を開発し、その評価実験を行っている。同研究では、制御周波数を高めることで制御ゲインを向上させることを確認しており、柔軟性と剛性の切り替えが自在に行えることを示している。

また、Gealy ら [9] が開発した Blue(図 1.4 参照) では、アームの関節に QDD モータを採用することで、高いバックドライブabilitiy と応答性を活かした作業を可能にしている。特に、動作中に人間が接触した場合でも、関節が柔軟に動作する特性や、人間が遠隔操作を行い、コーヒーメーカーを操作や、机拭き作業などを行えることを示している [10]。

さらに、Zhao ら [11] は、モバイルプラットフォームへの搭載を視野に入れた軽量ロボットアームを開発している (図 1.5 参照)。同アームは 6 自由度や 7 自由度のロボットアームが多い中、5 自由度で構成されており、部品の形状、素材によって軽量化を図っている。シミュレーション実験と実ロボットを使用した実験により、優れたコンプライアンスを備えていることを示している。

これらの研究から、QDD モータを適切に制御することで、衝突時の衝撃を軽減することが確認されている。一方で、QDD モータを使用したオープンソースのロボットアームは、調査した中では確認されていない。また、QDD モータをロボットアームに活用した事例は少なく、QDD モータの技術的なノウハウや応用可能性については、まだ十分に探求されていないのが現状である。



Fig. 1.3: 3-DoF robot arm using QDD motor (source: [8])

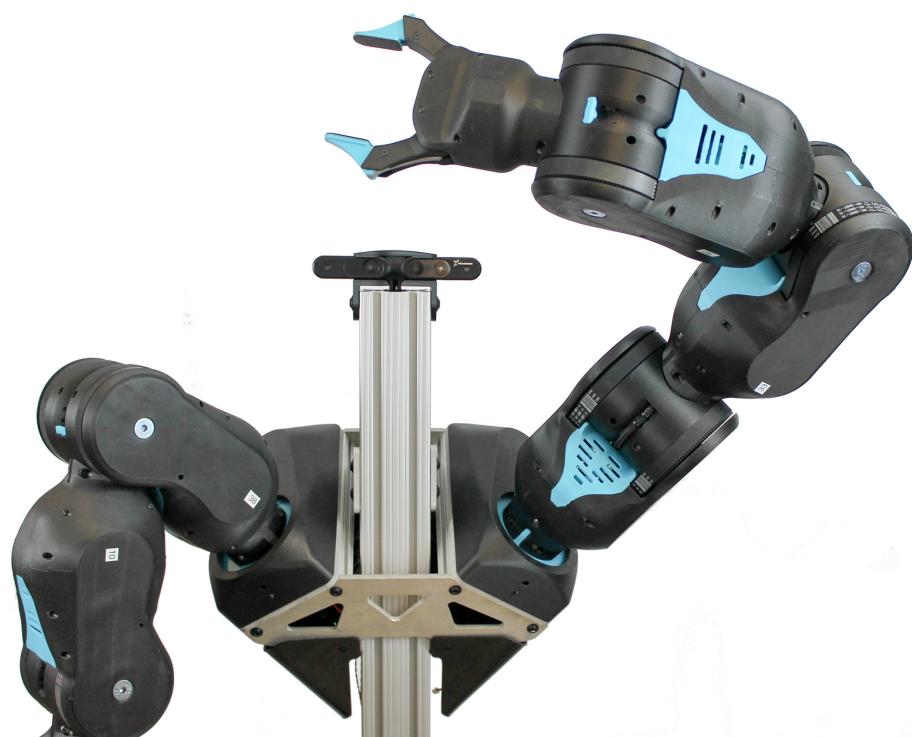


Fig. 1.4: The Blue robot using QDD motor (source: [10])

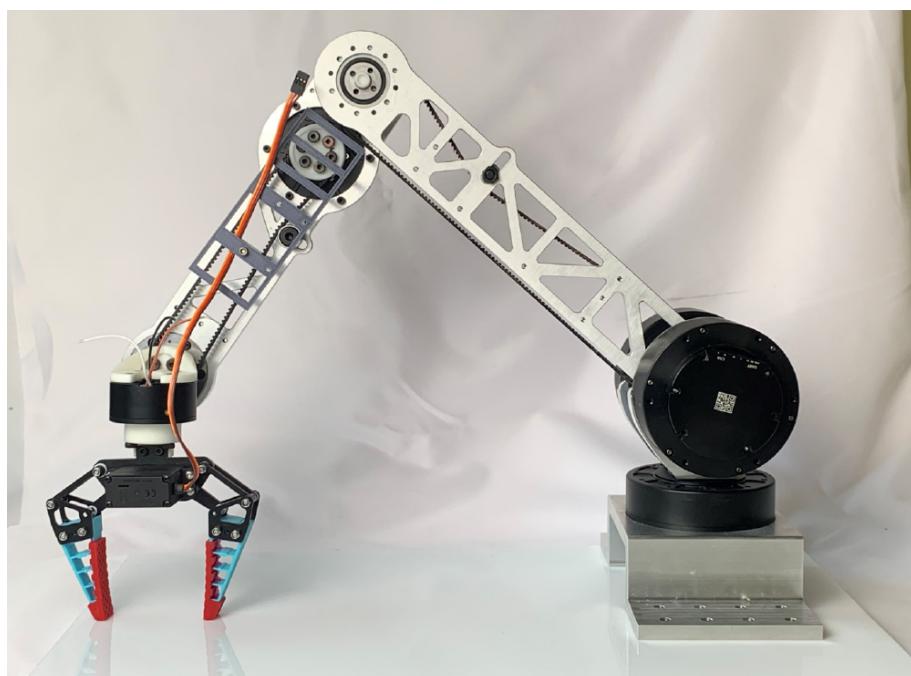


Fig. 1.5: The proposed 5-DOF articulated quasi-direct drive (QDD) robot arm, together with a commercial 1-DOF soft gripper (source: [11])

### 1.3 目的

本研究は、オープンプラットフォームオフィスロボット開発の第一段階として、QDD モータを用いたロボットアームのメカニズムを開発し、その設計データを公開することを目的とする。設計データを公開することで、ロボットアームに置ける QDD モータのかつ追う可能性を探求する研究基盤を提供する。また、オフィスロボット開発者に向けて、オープンプラットフォームを提供し、技術交流の活性化促進に貢献する。

### 1.4 本論文の構成

第1章は、研究背景や目的について述べ、本研究と関連する先行研究や文献について調査して、研究の位置づけを明らかにした。第2章では、オフィスロボットが対象とする作業とロボットアームの仕様について述べる。第3章では、QDD モータを用いたロボットアームの設計について述べる。第4章では製作について述べる。最後に、第5章で結論と今後の展望を述べる。

## 第2章

# 設計指針

本研究で開発するロボットアームは、オープンプラットフォームとしての利用のしやすさを考慮し、オフィスロボットとして最低限の機能を要求する。本章では、従来のオフィスロボットのロボットアーム調査を行い、本研究で開発するロボットアームの要求仕様をまとめた。加えて、開発したロボットアームを検証する際に行う作業について、従来のオフィスロボットが対象としている作業を調査し検討する。

### 2.1 ロボットアーム調査

本節では、従来のオフィスロボットのロボットアーム 20 台を対象に、ロボットアームのメカニズムについて調査し、オフィスロボットのアームに最低限求められる機能をまとめる。

#### 2.1.1 アームリーチ

従来のオフィスロボットのアームリーチ調査の結果（図 2.1 参照）、最小値は 0.51m、最大値は 0.90m、平均値および中央値はいずれも 0.71m であった。この結果から、オフィス環境での作業には最低でも 0.51m 以上のアームリーチが必要であることが示唆される。さらに、調査対象 10 台中 8 台のロボットのアームリーチが 0.75m 以下であることから、0.75m を超えるアームリーチは現在のオフィスロボットが想定する作業には過剰である可能性が高い。

これらの結果に基づき、本研究ではアームリーチの要件を 0.51m から 0.75m の範囲に設定する。この範囲内のアームリーチであれば、基本的なオフィス作業に十分対応可能であると推

測される。

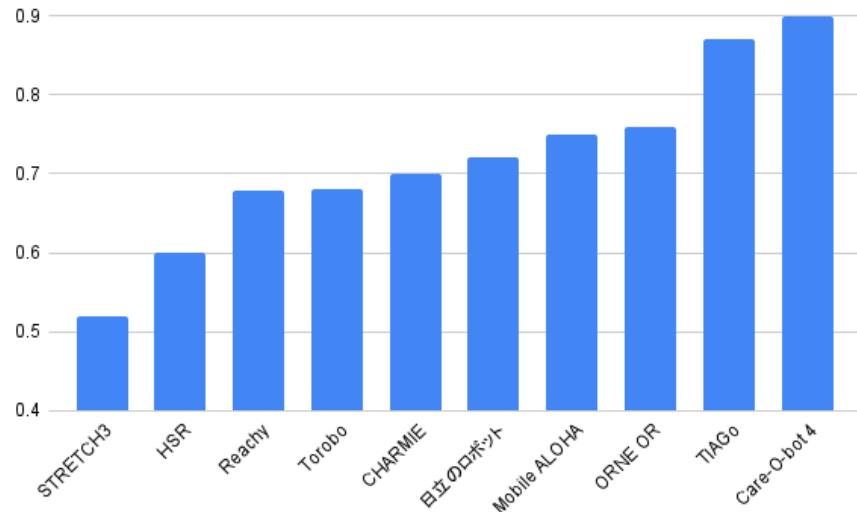


Fig. 2.1: Office robot arm reach survey results

### 2.1.2 可搬重量

従来のオフィスロボットの可搬重量の最小は 0.35kg であった（図 2.2 参照）。よって、現時点のオフィス作業においては 0.5kg 以上の可搬重量を確保できれば十分であると考えられるため、本研究では 0.5kg 以上を可搬重量の要件とした。

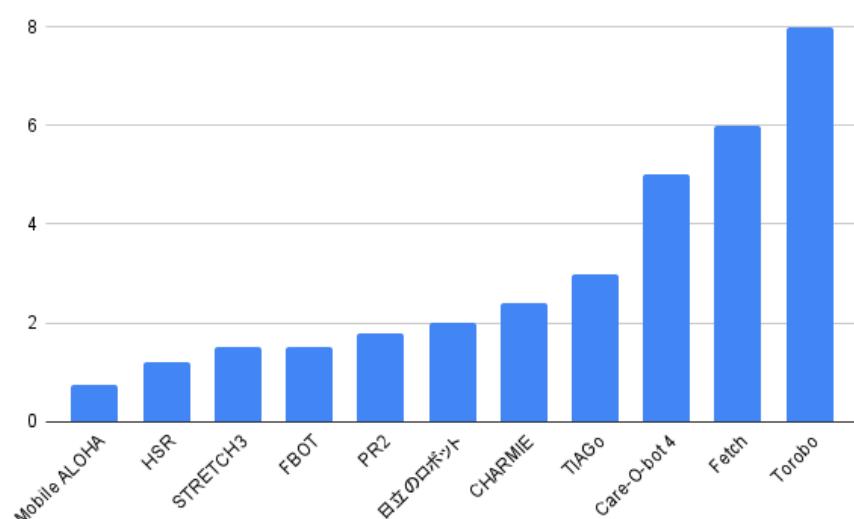


Fig. 2.2: Office robot payload survey results

### 2.1.3 自由度

従来のオフィスロボットのアームの自由度を調査した結果、6自由度および7自由度のロボットが主流であることが確認された（図2.3参照）。6自由度アームの典型的な軸配置は、肩2軸（ピッチ、ロール）、肘1軸（ロール）、手首3軸（ロール、ピッチ、ヨー）であり、7自由度アームでは肩に追加のロール軸が設けられている。7自由度アームは6自由度アームに比べて姿勢の自由度が増加する利点がある一方で、アーム重量やコストが増大する傾向がある。これらの要因を比較検討した結果、本研究ではコスト削減と軽量化を優先するため、6自由度アームを採用する。

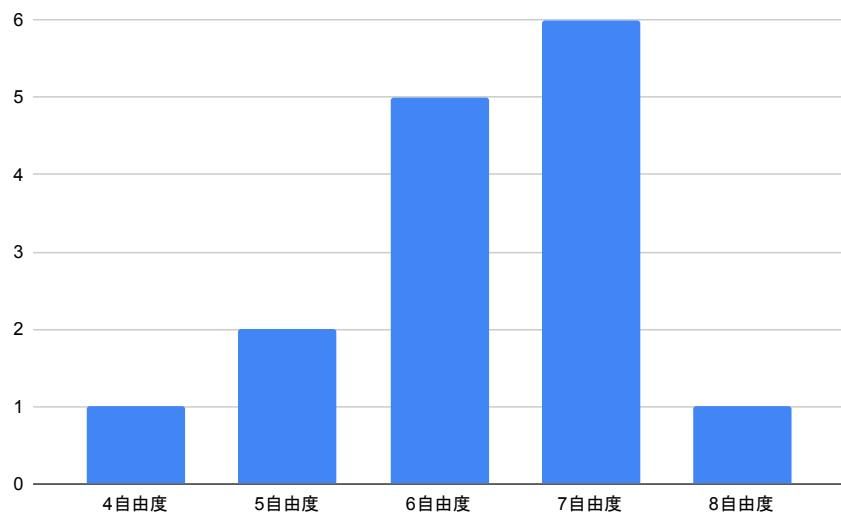


Fig. 2.3: Office robot arm DoF survey results

### 2.1.4 エンドエフェクタの形状

従来のオフィスロボットで広く採用されているエンドエフェクタには、TIAGo に搭載されているような平行グリッパが挙げられる（図 2.4 参照）。PAL Robotics 社が公開した動画 [12] では、平行グリッパによって布、ジュース缶、スプレー缶、ジュースパック、板状物など、さまざまな形状の物体を把持する動作が示されている。オフィス作業において多様な形状の物体を確実に把持することが求められるため、本研究では、エンドエフェクタとして平行グリッパを採用する。



Fig. 2.4: End effectior of TIAGo (source: [6])

### 2.1.5 オフィスロボットのロボットアームとして要求される項目

以上を踏まえ、本研究で開発するロボットアームに、以下の項目を要求する。これを仕様として、ロボットアームのメカニズムを設計する。

- 0.51 m - 0.75m のアームリーチ
- 500g 以上の可搬重量
- 6 自由度アーム
- 平行グリッパのエンドエフェクタ

## 2.2 作業調査

本節では、従来のオフィスロボットが対象とする作業を調査し、ロボットアームの検証に適した作業対象を検討する。本研究で開発するロボットアームは、オフィスロボットとして最低限の機能を満たすことが要求される。このため、アームの性能を効果的に検証するには、従来のオフィスロボットが頻繁に対象とし、オフィス環境で基本的な作業と位置づけられるタスクを選定することが重要である。

従来のオフィスロボットによる作業事例を動画および文献から収集した結果、77例が抽出された。そのうち、約61%の作業が台車移動とピック&プレースを組み合わせた作業であり、代表例として部屋の片付けや荷物の運搬が挙げられる。その他の作業事例として、ドアの開閉、ボタンの押下、フロアの巡回などが観察された。これらの結果から、従来のオフィスロボットが主に対象とする作業は、物体を持ちして移動させるタスクであると推察される。

検証作業を選定するにあたり、基本的な作業であること、多様な物体操作への対応力、ならびに他の作業への応用性を考慮した。その結果、「机の片付け作業」が検証対象として適切であると結論付けた。この作業は、多様な物体の把持能力が求められると同時に、研究者が操作条件を柔軟に設定可能である。また、床の片付けや棚の物体操作など、他のタスクへの応用も可能であり、ロボットアームの性能評価において高い有用性を示す。

# 第3章

## 設計

本章ではロボットアームのメカニズムの設計について述べる。基本方針として、オープンプラットフォームとしての利用しやすさを重視し、利用者が簡易的に組み立てて利用できるロボットアームを目指して設計を行った。本章では、部品の選定、構造設計、平行グリッパの設計、そして強度確認について述べる。

### 3.1 部品の選定

設計したロボットアームは、QDDモータ、アルミフレーム、板金部品、エンドエフェクタから構成される。本節では、それらの選定理由について述べる。

#### 3.1.1 QDDモータ

飯塚ら [8] の研究では、減速比 10:1 の QDD モータが使用されている。また、Zhao ら [11] の研究においては、減速比 9:1 の QDD モータが採用されていた。これらの先行研究は、ロボットアームと人の衝突時の衝撃力軽減を実現するためには、この程度の減速比を持つモータを採用することが有効であることを示唆している。

また、本研究ではオープンプラットフォームの観点を重視し、他のロボットアームに使用されているモータと同程度の価格であることも考慮した。

以上を踏まえ、本研究では、持つ Steadywin の GIM8108-8 と GIM3505-8 を採用した。減速比は 8:1 であり、先行研究で使用されていたモータと同程度の減速比を持つ。

Table 3.1: QDD motor performance comparison

	SteadyWin GIM8108-8	SteadyWin GIM3505-8	Dynamixel MX-106T
減速比	8 : 1	8 : 1	225 : 1
定格トルク (Nm)	7.5	0.65	-
最大トルク (Nm)	22	1.27	10
重量 (g)	396	97	153
無負荷回転数 (rpm)	320	384	55
許容ラジアル荷重 (N)	900	300	40
許容アキシャル荷重 (N)	225	75	20

### 選定したモータの性能

選定した Steadywin の GIM8108-8 と GIM3505-8 は、減速比が 8:1 であり、飯塚ら [8] の研究で使用していた減速器 (10:1) や、Zhao ら [11] の使用していた QDD モータの減速比 (9:1) と近いものを選んだ。表 3.1 に、選定した QDD モータと Reachy[13] のアームに使用されているモータである、Dynamixel MX-106T との比較を示す。表 3.1 より、選定した QDD モータの減速比は、Dynamixel に比べ非常に小さく、応答性やバックドライブバビリティが高い。そのため、適切に制御することで衝突時の衝撃を軽減することが可能である。さらに、許容ラジアル荷重とアキシャル荷重が Dynamixel よりも大きく (3.1 参照)，追加の補強部品を必要とせずにロボットアームの構造を簡略化することが可能となる。

### QDD モータの欠点

QDD モータは高トルク・高スピードでの動作が可能であるという利点を持つ一方で、この特性は制御が不十分な場合にリスクとなる。特に、通電時に動作が暴走した場合、一般的なモータと比較して周囲の人や機器への被害が大きい。そのため、QDD モータを安全に運用するためには、適切な制御と安全対策が必要である。本開発では制御を実装しないため、現時点できえられる安全対策について 5 章で検討する。

### 3.1.2 板金部品

ロボットアームを構成する部品は、構造を簡素化と強度の確保を目的として、板金部品を使用した。板金部品の素材には、板金加工に適しているアルミニウム合金の A5052 を採用した。製作には、機械加工・板金加工サービス「meviy」[14] を使用し、自動見積もりが通る部品を前提として部品を設計した。

### 3.1.3 アルミフレーム

ロボットアームのリンクにはアルミフレームを採用し、リンク長の変更を容易にした。これにより、他の開発者が用途に応じてリンク長を柔軟に調整することが可能となり、プラットフォームとしての汎用性および適応性が向上した。

### 3.1.4 エンドエフェクタ

エンドエフェクタは、3D プリント部品とリニアガイドで構成されている。平行グリッパの機構を実現するために、滑らかな直線運動を可能とするリニアガイドを採用した。また、エンドエフェクタに高い強度が要求されることや、形状の変更が容易であることを考慮し、主要な部品に 3D プリントを採用した。

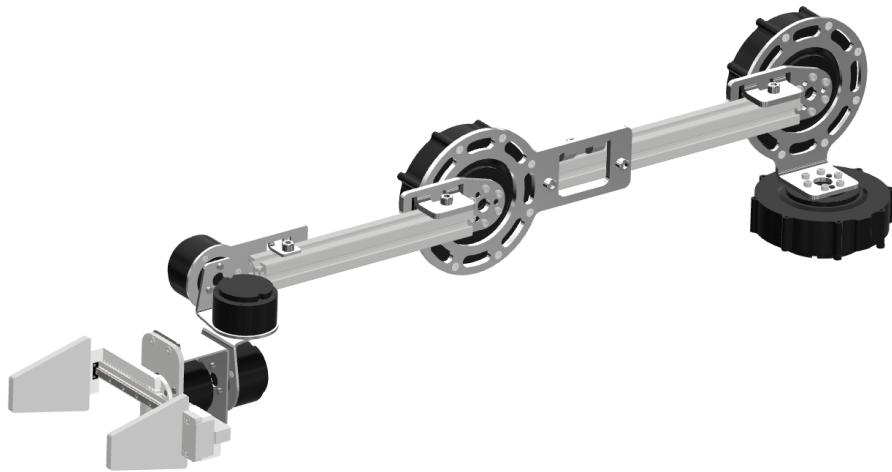


Fig. 3.1: The mechanical design of the robot arm

## 3.2 ロボットアームの構造設計

要求仕様に基づき、6軸のロボットアームを設計した(図3.1参照)。設計にはAutodesk社のInventor 2023[15]を使用した。リンク部には、板金部品とアルミフレームを採用し、シリアルリンク機構を構成している。また、専門的な技術を必要とせず、ネジ締結のみで組立が可能な設計を採用した。設計したロボットアームのデータはGitHub上で公開しており、自由に閲覧・利用が可能である(<https://github.com/open-rdc/OfficeRobot>)。

本節では、ロボットアームの構造設計について述べる。なお、本設計は次節で実施する強度確認を踏まえた最適化が前提であり、現時点で示す内容は仮のものである。設計した板金部品についても、構造解析結果に基づいて形状変更が行われる予定である。

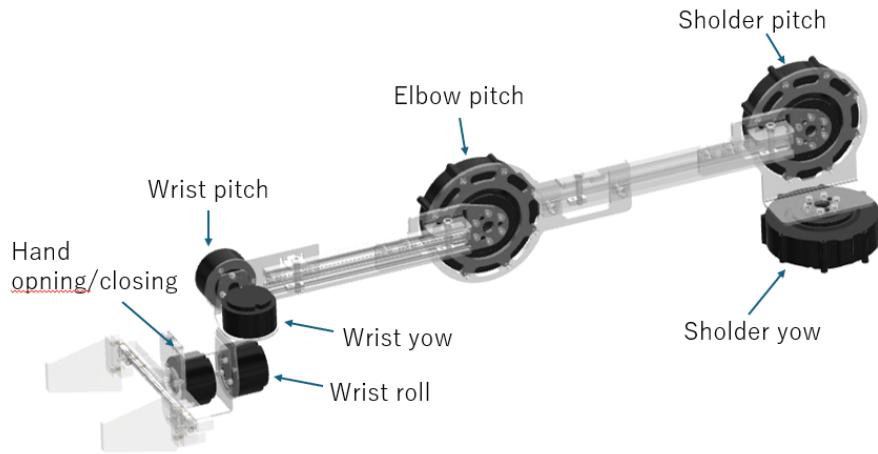


Fig. 3.2: Axis configuration of the robot arm.

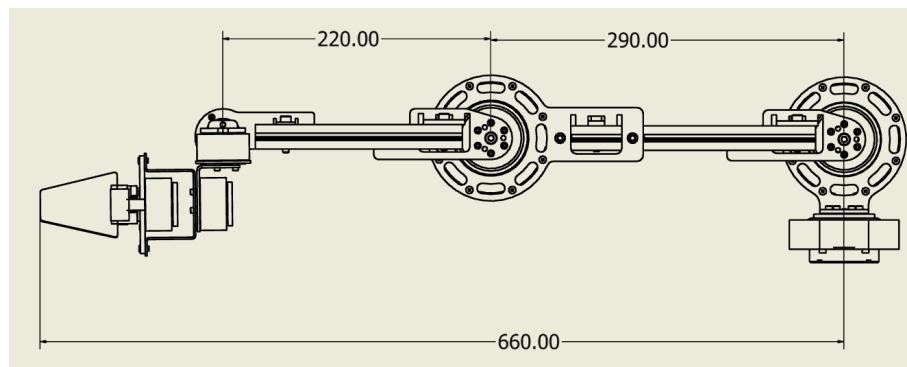


Fig. 3.3: Arm reach and link length

### 3.2.1 軸配置

図 3.2 にロボットアームの軸配置を示す。要求仕様に基づき、肩に 2 軸、肘に 1 軸、手首 3 軸を配置している。また、エンドエフェクタの開閉には 1 軸を用いている。

### 3.2.2 軸間距離

図 3.3 にロボットアームのアームリーチとリンク長を示す。アームリーチの仕様は 510 mm から 750 mm であり、本ロボットアームでは仕様範囲内の 660 mm を採用した。肩から肘、肘から手首のリンク長の比率については、人間の腕を比率を参考に設定した [16]。

### 3.2.3 可搬重量

設定したアームリーチで、仕様である 500g の可搬重量を定格トルクで確保できるかを確認する。また、最大トルク時の可搬重量についても計算を行う。肩ピッチ軸の QDD モータ (SteadyWin GIM8108-8) の定格トルクは 7.5Nm、最大トルクは 22Nm である。アームを伸ばした際に、自重を支えるために必要なトルクを算出し、常時把持することのできる物体の重量と、瞬間に把持することのできる物体の重量を求める。

#### 自重を支える為に必要なトルク

図 3.4 にアームの重心を示す。アームの重心は肩ピッチ軸から 0.334m の位置にあり、アームの重さは 1.31kg である。重力加速度を  $9.8\text{m/s}^2$  とすると、肩ピッチ軸にかかるトルク  $T$  は次のように求められる。

$$T = 1.31 \times 9.8 \times 0.334 = 4.2\text{Nm} \quad (3.1)$$

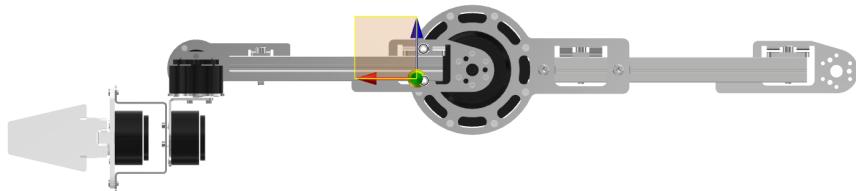


Fig. 3.4: Center of gravity

#### 常時把持することのできる物体の重量

アームの定格トルクから、自重を支える為に必要なトルクを引くと  $3.3\text{Nm}$  であり、肩ピッチ軸から手先までの距離は  $0.66\text{m}$  である。したがって、常時把持することのできる物体の重量  $m$  は次のように求められ、仕様の 500g 以上の可搬重量を満たしていることが確認できる。

$$m = 3.3 / (9.8 \times 0.66) = 0.51\text{kg} \quad (3.2)$$

### 瞬間に把持することのできる物体の重量

同様に、最大トルクから自重を支える為に必要なトルクを引くと  $17.8\text{Nm}$  である。したがって、瞬間に把持することのできる物体の重量  $M$  は次のように求められる。

$$m = 17.8 / (9.8 \times 0.66) = 2.75\text{kg} \quad (3.3)$$

### 3.2.4 可動範囲

図 3.5 および図 3.6 に、エンドエフェクタを水平に保った際のロボットアームの最小可動範囲と最大可動範囲を示す。最小可動範囲は、部品同士が干渉せずに動作可能な最小の範囲を指し、最大可動範囲はアームを最大まで伸ばした際の動作可能範囲を示している。

現行の最小可動範囲では、狭小エリアなど台車の移動に制限が生じる状況への対応が難しいと予想される。そこで、机の片付け作業を想定し、机と缶を模した CAD モデルを使用して作業領域の確認を行った。

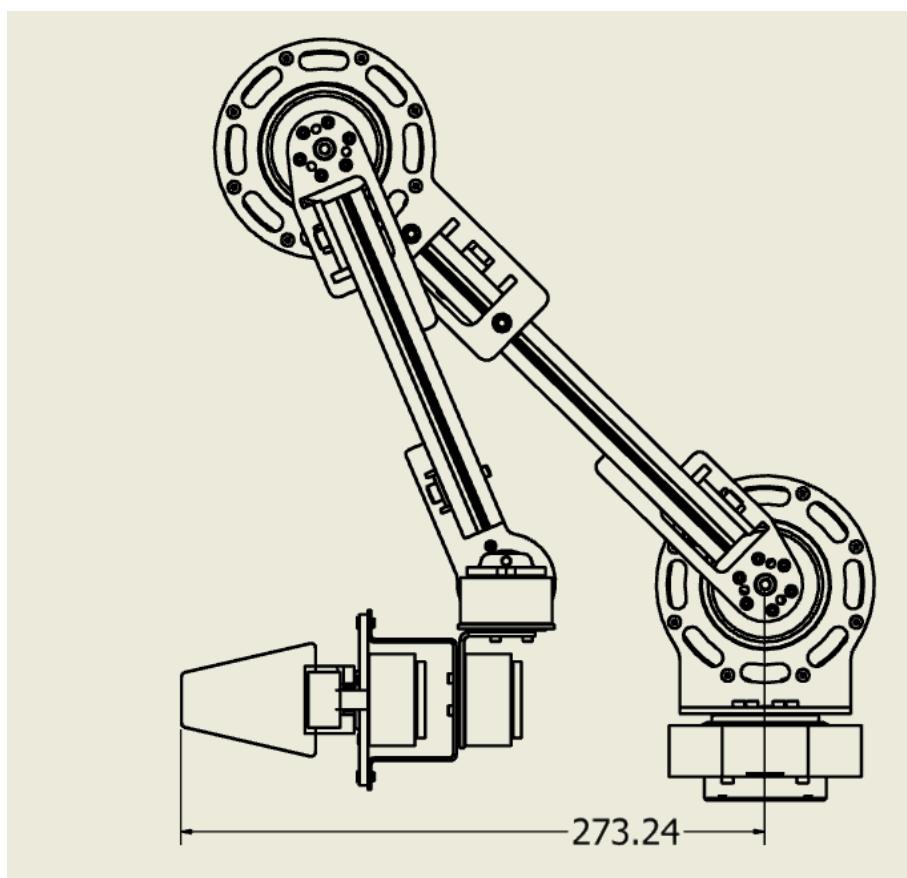


Fig. 3.5: Minimum range of motion

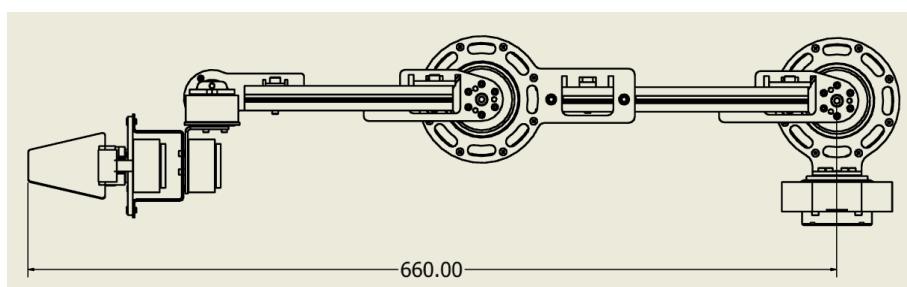


Fig. 3.6: Maximum range of motion

図3.7にロボットアーム、机、缶の位置関係を示し、図3.8にロボットの初期姿勢を示す。図3.8における黄色の点を原点  $(x, y)=(0, 0)$  とし、図3.9の(a)から(h)の順にアームを動かして手先位置を計測した。なお、エンドエフェクタの角度は図3.8状態から変更せず、缶を正面から把持することを想定した。缶の設置位置を、机の縁から500mm以内と仮定し、図3.9の(d)は、 $x = -500$ 、(f)は、 $x = 500$  のときの最大可動範囲を示している。

計測したアームの手先位置を図3.10に示す。図3.10の(b)は、図3.10の(a)の視点から観測した手先位置(星印)をプロットしたものであり、およそその作業領域を表している。図3.10の(b)より、ロボットアームに近い位置でアクセスできない領域が存在することが確認された。

会議室など、オフィスロボットが十分なスペースを確保できる環境では、現在のロボットアームでも対応可能である。しかし、移動が制限される狭小エリアでは作業が困難になる可能性がある。したがって、今後の課題として、作業領域の拡大が必要である。

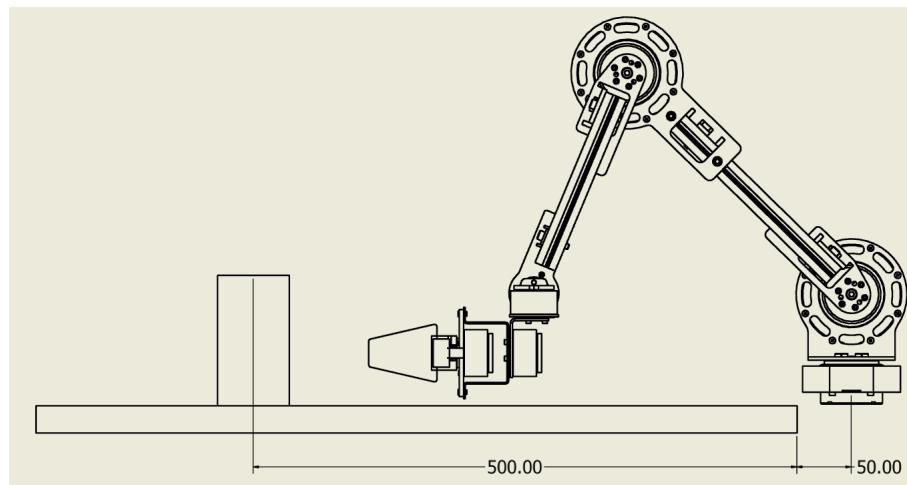


Fig. 3.7: Positional relationship between desk, can and robot arm.

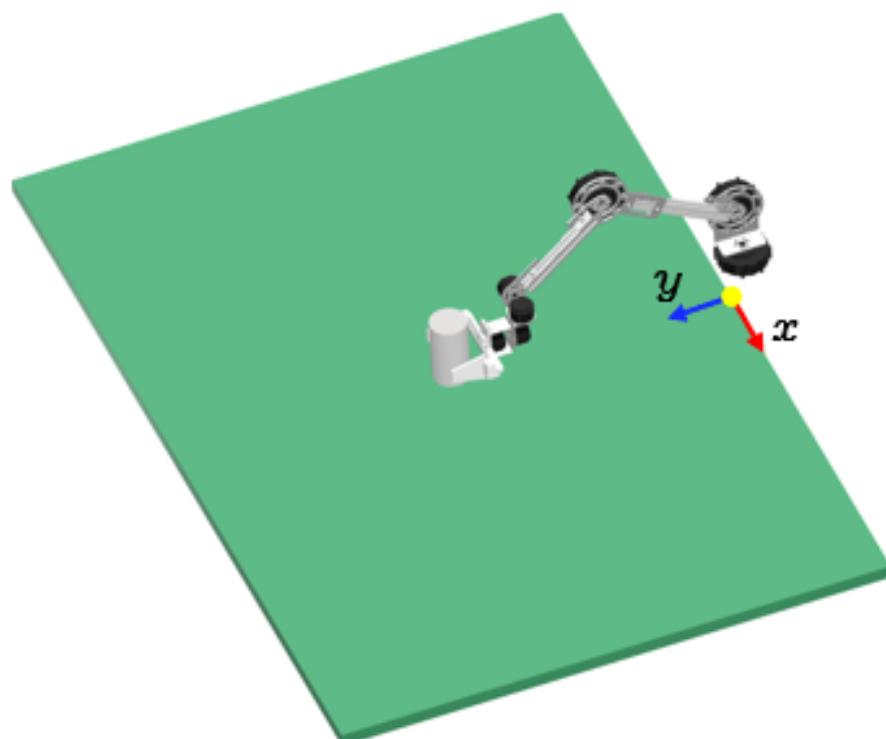


Fig. 3.8: Initioal position of robot arm

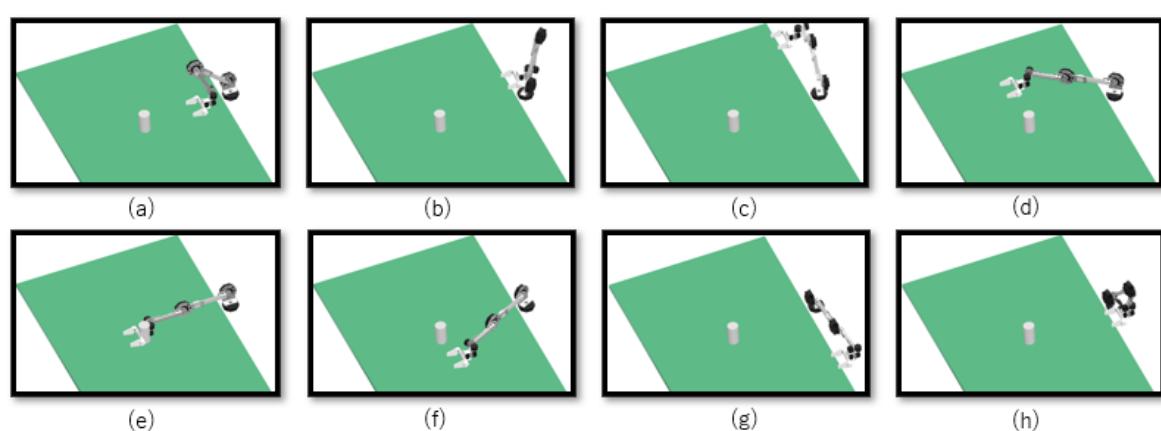


Fig. 3.9: Checking the working area of the robot arm

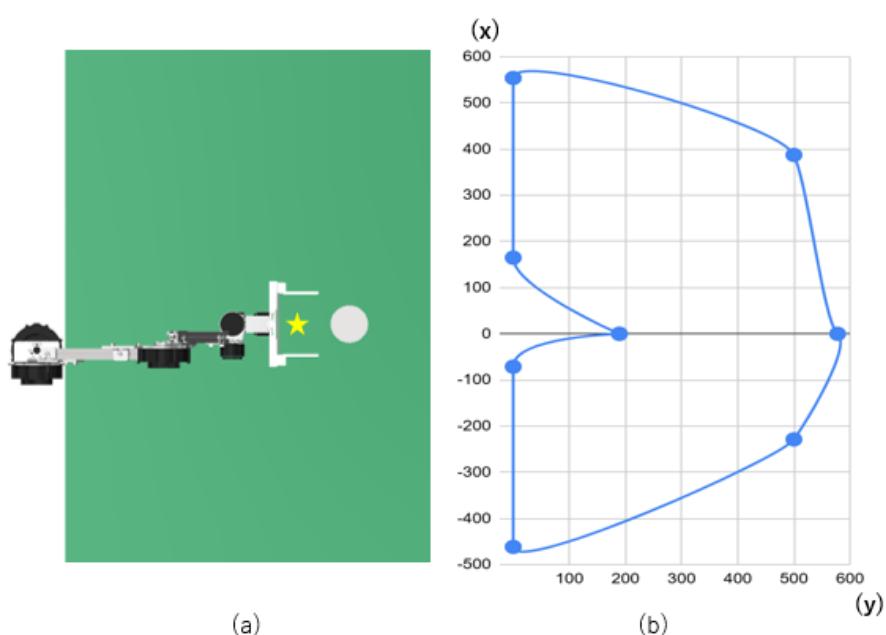


Fig. 3.10: Results of measuring the hand position of the robot arm shown in the figure3.9.

### 3.3 平行グリッパの設計

本研究では、リニアガイドとラック＆ピニオン機構を用いた平行グリッパを設計した。図 3.11 は平行グリッパの分解図である。グリッパの開閉には、QDD モータ (Steadywin GIM3505-8) を使用し、モータに取り付けたギアを介してラック＆ピニオン機構で駆動する。グリッパのスライド部分にはリニアガイドを採用している。また、黄色の部品は 3D プリンタでの製作を行う。

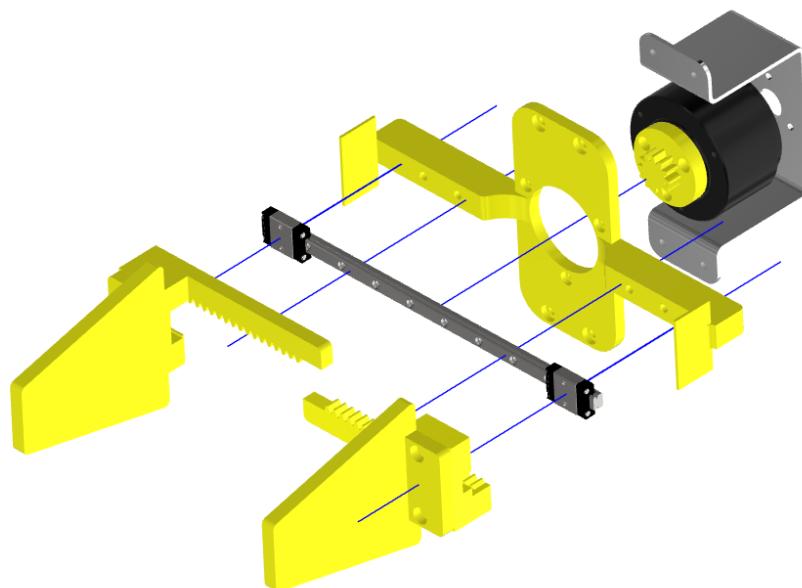


Fig. 3.11: Exploded view of parallel gripper

### 3.4 強度確認

設計したロボットアームの強度確認のため、Autodesk Inventor の機能である構造解析を行った。解析における安全率が 1 以上であれば、強度が十分であると判断した。図 3.12 に肩部の構成を示す。肩部は、ヨー軸モータとピッチ軸モータを繋ぐ図 3.12 の部品 1、およびリンクの一部である、部品 2 から構成されている。部品 1 および部品 2 には、いずれもアルミニウム合金（A5052）を使用している。

本節では、構造解析による部品の強度確認について述べる。

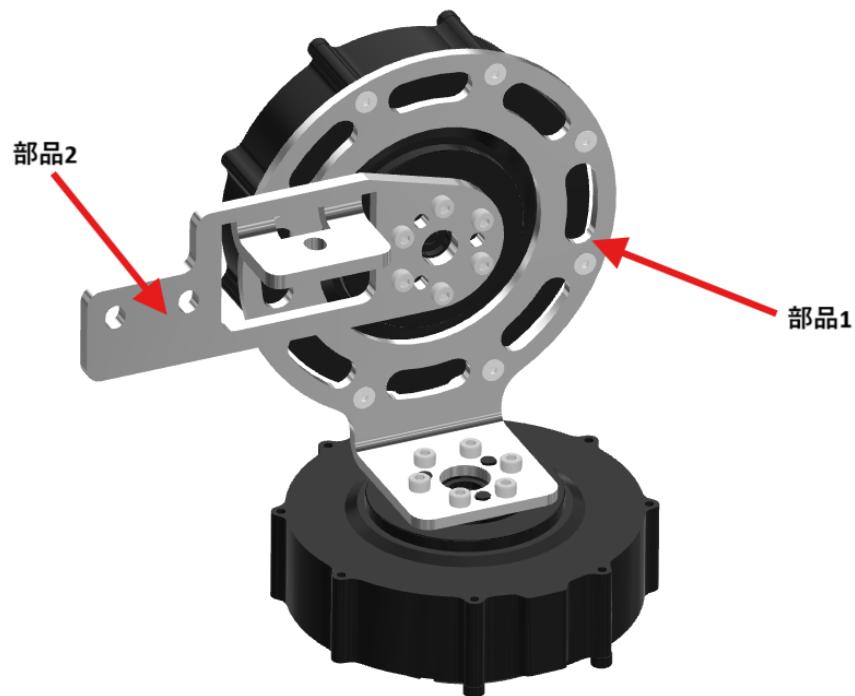


Fig. 3.12: Configuration of the shoulder components

#### 3.4.1 部品 1 の構造解析

図 3.12 の部品 1 は、ヨー軸モータが最大出力 22Nm を発生した際に最大負荷を受ける部品である。図 3.13 に構造解析結果を示し、設計仕様を表 3.2 にまとめた。解析の結果、安全率は 0.39 であり、強度が不足していることが確認された。特に、図 3.13 の結果から、曲げ加工部

分において強度が不足していることが明らかとなった。この課題を解決するため、「板厚を変更した部品」と「形状を変更した部品」の2つの設計案を検討し、それぞれ再解析を実施した。

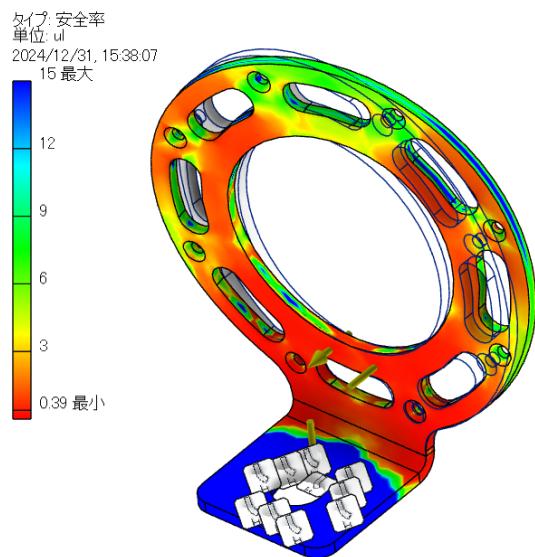


Fig. 3.13: Structural analysis results of Part 1

Table 3.2: Specifications of Part 1

厚み	3 mm
質量	43.6g
安全率	0.39

### 3.4.2 設計の変更

部品の形状はそのままに、板厚を 3mm から 5mm に変更した場合の構造解析結果を図 3.14 に示し、設計仕様を表 3.3 にまとめた。解析の結果、安全率は基準の 1 を超え、強度が十分であることが確認された。ただし、質量が 27.5g 増加するという結果が得られた。

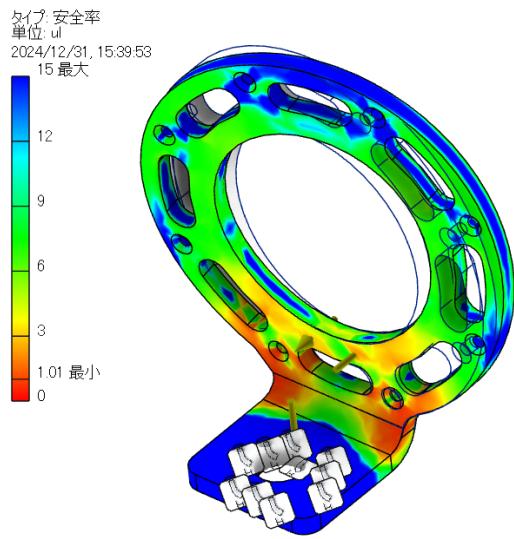


Fig. 3.14: Structural analysis results of Part 1 (thickness changed to 5mm)

Table 3.3: Specifications of Part 1 (thickness changed to 5mm)

厚み	5 mm
質量	71.1g
安全率	1.01

次に、板厚を変更せず、形状の改良を行った場合の解析結果を図 3.15 に示し、設計仕様を表 3.4 にまとめた。具体的には、図 3.13 の解析結果を基に、特に強度が不足していると判明した曲げ加工部分の幅を広げる設計変更を行った。

解析の結果、安全率が基準を満たし、十分な強度を確保できることが確認された。また、重量は 61.8g であり、板厚を変更した場合（表 3.3 参照）と比較して軽量化を実現した。

以上の解析結果を踏まえ、図 3.12 の部品 1 について、曲げ加工部分の幅を広げた設計変更を最終設計として採用した。

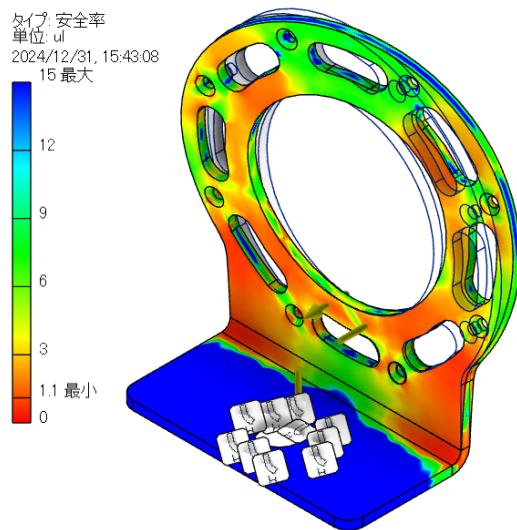


Fig. 3.15: Structural analysis results of Part 1 (shape optimized)

Table 3.4: Specifications of Part 1 (shape optimized)

厚み	3 mm
質量	61.8g
安全率	1.1

### 3.4.3 部品 2 の構造解析

図 3.12 の部品 2 は、アルミフレームを 2 方向から固定する形状を採用している（図 3.16 参照）。最大負荷条件（22Nm）の下で構造解析を実施した結果を図 3.17 に示す。現行の設計では、安全率が 0.47 と低く、特に赤色で示された箇所において強度不足が確認された。

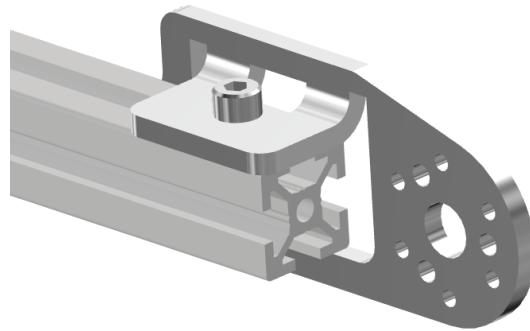


Fig. 3.16: Fixing the aluminum frame and part 2

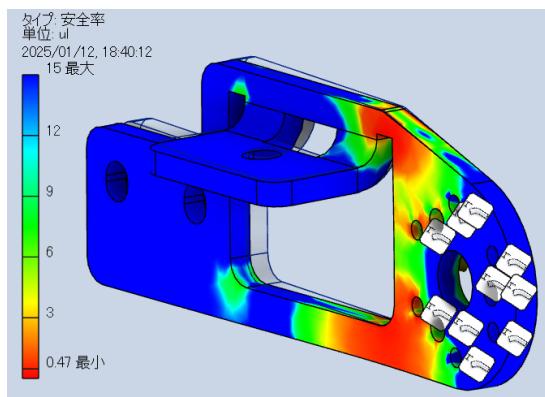


Fig. 3.17: Structural analysis results of Part 2 at maximum output of 22Nm

部品の厚みを 5mm に変更した場合、安全率は 0.58 に改善したものの、依然として基準に満たなかった。このため、定格出力 (7.5Nm) の条件下で再解析を実施した。解析結果を図 3.18 に示し、設計仕様を表 3.5 にまとめた。この結果、定格条件下では安全率が基準を満たし、十分な強度を確保できることが確認された。

以上より、現設計において部品 2 の形状変更は行わないこととし、最大出力時の安全率の確保を今後の課題とする。

Table 3.5: Specifications of Part 2

厚み	5 mm
質量	34.0g
安全率	1.38

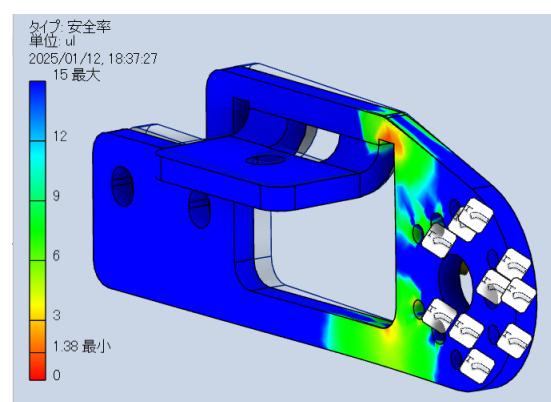


Fig. 3.18: Structural analysis results of Part 2 at rated output 7.5Nm

## 第4章

# 製作

本章では、ロボットアームの製作について述べる。

### 4.1 部品の製作

本研究で製作したロボットアームには、3D プリント部品と板金部品を使用した。3D プリント部品は、FDM 方式の 3D プリンタを用いて製作した（図 4.1 参照）。一方、板金部品については、ミスミ株式会社が提供する板金・機械加工のオンライン外注サービス「meviy」[14] を利用して外注製作を行った（図 4.2 参照）。このサービスの利用により、専門的な加工技術を持たない場合でも、短納期で部品を調達することが可能である。

その他の部品については、既製品を採用した。特に、QDD モータ以外の部品はすべて MISUMI[17] で発注可能な汎用部品を使用した。部品の選定基準は価格、納期、および性能とした。図 4.3 に部品リストを示す。

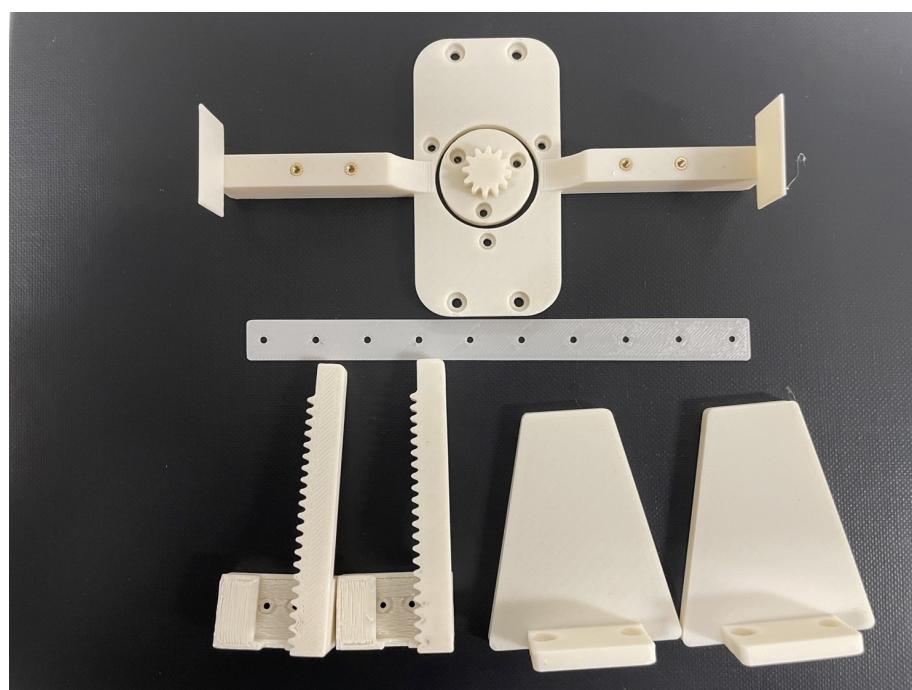


Fig. 4.1: 3D printed parts

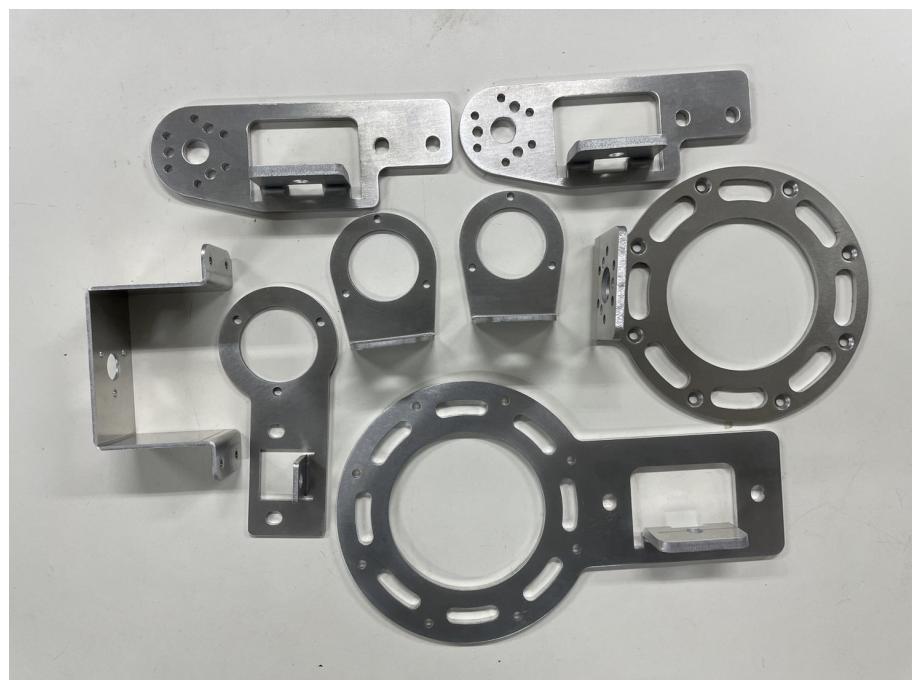


Fig. 4.2: Parts ordered from Meviy

合計金額(2025/01/12時点)

¥221,095

購入先	型番	URL	単価(税抜き)	必要数	購入金額(税込み)
MISUMI	CBE3-8	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥58	18	¥1,148
MISUMI	CBE3-5	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥70	8	¥616
MISUMI	HFBCM3-8	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥72	16	¥1,267
MISUMI	CBSTSR2.5-6	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥260	9	¥2,574
MISUMI	SCB5-25	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥252	4	¥1,109
MISUMI	SCB5-10	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥226	6	¥1,492
MISUMI	SCB5-8	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥237	2	¥521
MISUMI	HNTU5-5	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥52	12	¥686
MISUMI	FWSJJ-D5-V2.6-T2.5	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥260	9	¥2,574
MISUMI	FB-305530	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥29	4	¥128
MISUMI	FB-2001	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥30	6	¥198
MISUMI	NFS5-2020-215-AV15-BV180	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥545	1	¥600
MISUMI	NFS5-2020-170-AV15-BV145	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥545	1	¥600
MISUMI	CSH-316L-M2-6	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥152	4	¥669
MISUMI	CSH-316LM2.5-6	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥129	6	¥851
MISUMI	CSH-316LM2.5-8	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥129	9	¥1,277
MISUMI	SSE2B6-145	<a href="https://jp.misum">https://jp.misum</a>	¥7,610	1	¥8,371
AliExpress	GIM8108-8	<a href="https://ja.aliexp">https://ja.aliexp</a>	¥18,515	3	¥61,100
AliExpress	GIM3505-8	<a href="https://ja.aliexp">https://ja.aliexp</a>	¥19,642	4	¥86,425
Meviy	MVSHM-AN03054-41L-KXY42		¥11,787	1	¥11,787
Meviy	MVSHM-AN04050-41D-2N2EY		¥6,204	2	¥12,408
Meviy	MVSHM-AN04054-41D-5MELN		¥11,153	1	¥11,153
Meviy	MVSHM-AN02050-41C-YNWWC		¥3,647	1	¥3,647
Meviy	MVSHM-AN02050-41C-JKCBT		¥3,113	2	¥6,226
Meviy	MVSHM-AN01552-41R-U1G17		¥3,669	1	¥3,669

Fig. 4.3: Parts list

## 4.2 組み立て

組み立てたロボットアームの全体図を図 4.4 に示す。また、寸法等の仕様を表 4.1 に示す。組み立て時間は、約 1 時間である。



Fig. 4.4: Assembled robot arm

Table 4.1: Specifications of the robot arm

Weight	2.2 kg
Length	760 mm
Materials	A5052, A6063S-T5, ASA

## 第 5 章

# 検証

本章では、開発したロボットアームがオフィス環境で想定される作業に対して、メカニズム的に問題がないかを検証する。また、安全対策の検討を行う。

### 5.1 検証方法

第 2 章で行った作業調査の結果、本研究で開発したロボットアームの検証として、「机の片づけ作業」が適していると判断した。これを踏まえ、本検証では、机の片づけ作業を想定して検証を行った。検証環境を図 5.1 に示す。 $50 \times 100$  の範囲にランダムに紙コップを配置した。図 5.1 の黄色テープの位置にロボットアームの肩ヨー軸を置き、人間がロボットアームを支えて手先を動かす。検証の様子を図 5.2 に示す。この検証を通し、ロボットアームの手先が干渉なく紙コップにアプローチできるかを確認する。

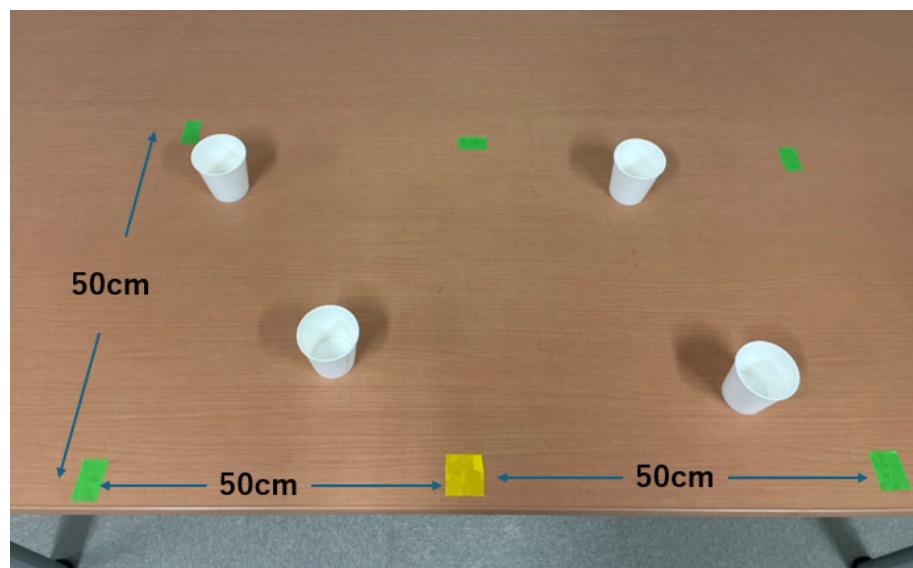


Fig. 5.1: Test environment: Randomly place paper cups in a 50 x 100 area



Fig. 5.2: How a robot arm is supported and moved by a person

## 5.2 検証結果

本検証は 10 回の試行を実施し、すべての試行で問題なく動作することを確認した。構造設計時に確認された作業領域では、ロボットアームの根元付近にある物体へのアプローチが困難であるという問題が発生していた。この原因は、「物体を正面から掴む」という条件を設けていたためであった。一方、本検証では、ハンドの角度を固定することが困難であったため、この条件を撤廃して実施した。その結果、図 5.3 に示すように、ロボットアームに近い位置にある物体にも干渉なくアプローチ可能であることが確認された。

しかし、この結果は、作業領域の拡大という課題が解消されたことを意味するものではない。今回の検証では、紙コップのような筒状の物体を対象としたため、どの方向から掴んでも形状が変わらず、干渉の問題が発生しなかった。しかし、箱型の物体や取っ手のある物体など、掴む方向に制限がある場合には、ロボットアームが干渉し動作が困難になることが予想される。

したがって、作業領域の拡大という課題は依然として残されており、今後の検討が必要である。



Fig. 5.3: Approaching a paper cup near the robot arm

### 5.3 安全対策の検討

本節では、ロボットアームが通電した際に必要な安全対策について検討する。本ロボットアームは QDD モータを採用しており、高トルクおよび高スピードという特性を有するが、これらの特性は暴走時に大きなリスクを伴う。したがって、以下では、通電状態での安全な運用を実現するために必要な対策を検討する。

まず、ロボットアームの可動範囲内への進入を防止することが挙げられる。本ロボットアームの重量は約 2.2kg であり、高スピードで動作中に接触が発生した場合、大事故につながる可能性がある。適切で完全な制御が確立するまでは、可動範囲内に人が入らないようにすること

が必要である。

次に、暴走時に遠隔で動作停止が可能なシステムの構築が重要である。暴走が発生した場合、人がロボットアームに近づくことは困難であるため、離れた位置からロボットアームを停止できる仕組みが求められる。これにより、暴走による被害を最小限に抑えることが可能となる。

以上のように、QDD モータは適切な制御を行うことで安全性を高める可能性を持つ一方で、不適切な運用が人に危害を及ぼすリスクを伴う。そのため、ロボットアームの動作時には、最低限、以下の 2 点を満たす安全対策が必要である

1. 可動範囲内への進入を防止する仕組み
2. 遠隔で動作停止が可能なシステムの導入

これらの対策を講じることが、QDD モータを搭載したロボットアームの安全な運用に不可欠であると考える。

## 第6章

### 結論

#### 6.1 まとめ

本研究では、オープンプラットフォームオフィスロボット開発の第一段階として、QDDモータを用いたロボットアームの設計と製作を行った。従来のオフィスロボットが対象としている作業を調査し、「机の片づけ作業」を対象作業とした、作業を行うロボットアームに求められる要求仕様を策定し、それに基づきロボットアームの設計を行った。設計したロボットアームは6自由度を有し、すべての関節にQDDモータを採用している。設計にはAutodesk社のInventor2023を使用し、部品の構造解析を行った。また、部品外注サービスであるMeviyを活用し、短期間での部品調達と製作を可能にした。設計データや部品リストなどはすべてGitHub上で公開している。

#### 6.2 今後の展望

今後の課題として、動作実験を通じた性能評価の実施、他のタスクにも対応可能な仕様拡張、さらには設計データのさらなる汎用性向上を検討する必要がある。また、オープンプラットフォームとしての設計データの公開を通じて、他の研究者や開発者による再利用や改良を促進し、技術の発展に寄与することを目指す。

# 参考文献

- [1] 株式会社 cij — サービスロボット「ayuda」シリーズ. <https://ayuda.cij.co.jp/service/product/ayuda/index.html#ayuda>. (Accessed on 1/15/2025).
- [2] Seqsense — 自律移動型警備ロボット sq-2. <https://www.seqsense.com/product>. (Accessed on 1/15/2025).
- [3] Panasonic — 業務用ロボット掃除機. <https://panasonic.biz/appliance/VacuumCleaner/>. (Accessed on 1/15/2025).
- [4] Elmo — bellabot. <https://www.elmo.co.jp/product/robot/bellabot/>. (Accessed on 1/15/2025).
- [5] 古賀達也, 井尻善久. IoT の側面から見た, モバイルロボット・モバイルマニピュレータの現状と今後の展望. 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 8, pp. 707–710, 2019.
- [6] Pal robotics — mobile manipulator tiago. <https://pal-robotics.com/robot/tiago/>. (Accessed on 1/15/2025).
- [7] Toyota — トヨタ自動車、生活支援ロボットの実用化に向けて研究機関等と技術開発を推進するコミュニティを発足. <https://global.toyota/jp/detail/8709536>. (Accessed on 1/15/2025).
- [8] 飯塚浩太, 鈴木諒太郎, 武居直行, 徳永晋也, 深澤俊樹, 山本章. 準 dd モータと重力補償機構による柔軟ロボットアームの特性評価. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2021, pp. 2P3-I02, 2021.
- [9] David V. Gealy, Stephen McKinley, Brent Yi, Philipp Wu, Phillip R. Downey, Greg Balke, Allan Zhao, Menglong Guo, Rachel Thomasson, Anthony Sinclair, Peter Cueliar, Zoe McCarthy, and Pieter Abbeel. Quasi-direct drive for low-cost compliant robotic manipulation, 2019.

- [10] Quasi-direct drive for low-cost compliant robotic manipulation. <https://berkeleyopenarms.github.io/>. (Accessed on 1/15/2025).
- [11] Yuntian Zhao, Binxin Huang, Shiyuan Lin, Zheng Zhu, and Zhenzhong Jia. A light-weight quasi-direct drive collaborative robot arm. In *2023 9th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, pp. 24–29, 2023.
- [12] Tiago — manipulation compilation. <https://www.youtube.com/watch?v=Bmk4EASGTJI>. (Accessed on 1/15/2025).
- [13] Reachy 2023 — reachy 2023 documentation. <https://docs.pollen-robotics.com/>. (Accessed on 1/15/2025).
- [14] Meviy(misumi). <https://meviy.misumi-ec.com/worldwide/>. (Accessed on 1/15/2025).
- [15] Autodesk — inventor. <https://www.autodesk.com/jp/products/inventor/>. (Accessed on 1/15/2025).
- [16] 人工知能研究センター — 人体寸法データベース 1991-92-寸法項目一覧. <https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/91-92/data/list.html>. (Accessed on 1/15/2025).
- [17] Misumi. <https://jp.misumi-ec.com/>. (Accessed on 1/15/2025).
- [18] 日本機械学会. 機械工学事典 — バックドライバビリティ. <https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/doku.php?id=14:1010220>. (Accessed on 1/15/2025).

# 付録

組立動画、部品リスト、を記載する

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、1年に渡り、熱心にご指導を頂いた林原靖男教授に深く感謝いたします。