

# 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設計と製作-

title

2024 年 12 月 31 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設計と製作-

本論文は、オープンプラットフォームオフィスロボットの開発を目的として、ロボットアームの設計と製作について述べる。オフィスロボットは、PAL Robotics 社の TIAGo やトヨタの HSR のように多くの事例が存在するが、ハードウェアのオープンプラットフォーム化が進んでいないことが課題である。オープンプラットフォーム化により、設計データの公開を通じて研究開発の活性化が期待される。本研究では、オフィス環境におけるロボットアームの作業として「机の片付け」を設定し、その要求仕様を策定した。分析の結果、ロボットアームには高い汎用性と安全性が求められることが明らかとなった。これに基づき、すべての関節に QDD モータを採用したロボットアームを設計した。QDD モータは高いバックドライブability を有し、衝突時の柔軟な応答を可能にすることで安全性を向上させる特性を持つ。さらに、部品点数を減らし、組み立てを容易にする設計を行ったことで、オープンプラットフォームとしての再現性と拡張性を高めた。製作したロボットアームは、要求仕様を満たすとともに、設計データを公開することで他の研究者や開発者による再利用や改良を可能にする。本研究は、オープンプラットフォームオフィスロボットの基盤となることを目指しており、QDD モータの新たな応用例としても意義がある。

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

title

keywords:

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	1
1.1	背景 . . . . .	1
1.2	QDD モータの可能性 . . . . .	3
1.3	関連研究 . . . . .	3
1.3.1	Gealy らの研究: Blue ロボットアーム . . . . .	3
1.4	目的 . . . . .	6
1.5	本論文の構成 . . . . .	6
<b>第 2 章</b>	<b>作業の設定と要求仕様</b>	7
2.1	作業の設定 . . . . .	7
2.2	要求仕様 . . . . .	9
2.2.1	サイズと作業範囲 . . . . .	9
2.2.2	自由度 . . . . .	9
2.2.3	可搬重量 . . . . .	9
2.2.4	エンドエフェクタ . . . . .	10
2.2.5	安全性 . . . . .	10
2.2.6	オープンプラットフォーム . . . . .	10
2.3	要求仕様のまとめ . . . . .	11
<b>第 3 章</b>	<b>設計</b>	13
3.1	QDD モータの選定と特徴 . . . . .	14
3.1.1	QDD モータと一般的なモータの比較表 . . . . .	14

3.1.2 減速比	14
3.1.3 高トルクと重量	15
3.1.4 無負荷回転数	15
3.1.5 許容荷重	15
3.1.6 QDD モータの欠点	15
3.2 基本的な性能	16
3.2.1 アームサイズ	16
3.2.2 可動範囲	17
3.2.3 アームの手先の移動	18
3.2.4 可搬重量	21
3.3 構造解析	23
3.4 平行グリッパの設計	24
<b>第 4 章 製作</b>	25
<b>第 5 章 結論</b>	26
5.1 まとめ	26
5.2 今後の展望	26
<b>参考文献</b>	27
<b>付録</b>	28
<b>謝辞</b>	29

# 図目次

1.1	TIAGo from PAL-Robotics (source: [1]) . . . . .	2
1.2	HSR from TOYOTA (source: [2]) . . . . .	2
1.3	The Blue robot arm. (source: [3]) . . . . .	4
1.4	The proposed 5-DOF articulated quasi-direct drive (QDD) robot arm, together with a commercial 1-DOF soft gripper. (source: [4]) . . . . .	5
2.1	Range to place objects and boxes . . . . .	8
2.2	Survey results of objects handled by existing office robots . . . . .	8
2.3	Existing office robot arm DoF . . . . .	10
2.4	Mobile ALOHO Arm . . . . .	11
3.1	Robot arm configuration . . . . .	13
3.2	Arm reach and link length . . . . .	16
3.3	Arm size . . . . .	16
3.4	Minimum range of motion . . . . .	17
3.5	Minimum range of motion . . . . .	18
3.6	Stretched out to the right . . . . .	18
3.7	Stretched out to the right . . . . .	19
3.8	Stretched out to the left . . . . .	19
3.9	Stretched out to the left . . . . .	20
3.10	Center of gravity . . . . .	21
3.11	肩部の構成 . . . . .	23

3.12 Exploded view of parallel gripper . . . . .	24
--	----

# 表目次

1.1	Comparison of actuators used in existing office robot arms and QDD motors	2
2.1	Required specifications for robot arm . . . . .	12
3.1	QDD モータと一般的なロボットアーム用モータの比較 . . . . .	14

# 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、オフィスロボットの開発が活発化している。PAL Robotics 社の TIAGo（図 1.1）やトヨタ自動車の HSR（図 1.2）など、様々なオフィスロボットが開発されているが、設計データを公開しているロボットが少なく、ユーザによる改良や研究開発への新規参入が困難となっている。また、市販のオフィスロボットは、高度なセンサ構成などのため、高価格である場合が多く、コスト面で大きな負担となる。そのため、研究開発用途に適した、容易に利用・改変可能なオープンプラットフォームなオフィスロボットは依然として不足しているのが現状である。

このような状況に対し、オープンプラットフォームハードウェアの成功事例として、i-Cart シリーズが挙げられる。自律移動ロボットである i-Cart mini と i-Cart middle は、設計データ、部品リスト、組み立て図を公開しており、誰もが容易に複製・改良できる。i-Cart をベースとした様々なロボットが開発され、自律移動ロボット開発の活性化に大きく貢献している。これは、i-Cart シリーズの登場により、自律移動ロボット開発への参入障壁が大幅に低下したことを示唆している。そのため、オープンプラットフォームオフィスロボットを開発し、研究開発への参入障壁を下げるることを目指す。



Fig. 1.1 TIAGO from PAL-Robotics (source: [1])



Fig. 1.2 HSR from TOYOTA (source: [2])

Table 1.1 Comparison of actuators used in existing office robot arms and QDD motors

	Dynamixel MX-106T	KONDO B3M-CS-1170-A	Steadywin GIM8108-8
ストールトルク [Nm]	8.0	7.6	22
無負荷回転数 [rpm]	41	46	110
減速比	225 : 1	362.88 : 1	8 : 1
重量 [g]	153	105	396
許容ラジアル荷重 [N]	40	-	900
許容アキシャル荷重 [N]	20	-	800

## 1.2 QDD モータの可能性

既存のオフィスロボットのロボットアームでは、高減速比のサーボモータが一般的に使用されているが、これにはバックドライバビリティが低いという欠点がある。バックドライバビリティとは、「アクチュエータや動力伝達機構において、出力節に適当な力を加えたときに、その節が可動し、かつそれが入力節側に伝わる性質」である [5]。そのため、衝突時の柔軟な応答が困難となり、人や物体へ危害を加えるリスクがある。一方で、QDD(Quasi-Direct Drive)モータは、高いバックドライバビリティと高トルクを両立できる特性を持ち、衝突時の安全性を向上させる可能性がある。特にオフィス環境では、人だけでなく、PC やディスプレイなど衝撃に弱い機器が多いため、QDD モータの採用は非常に有用である。しかし、QDD モータをロボットアームに活用した事例は少なく、そ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。

## 1.3 関連研究

QDD モータの特徴に着目した研究事例として、Gealy らの「Blue」と Zhao らの QDD ロボットアームが挙げられる。[3][4]

### 1.3.1 Gealy らの研究: Blue ロボットアーム

Gealy らの研究では、7 自由度のロボットアーム「Blue」を開発し、家庭や研究環境での利用を目的とした設計がなされている。(図 1.3 参照) このアームは QDD モータを採用し、高いバックドライバビリティを実現することで、物体や人との衝突時のダメージを軽減する構造となっている。さらに、タイミングベルト駆動を採用することで構造を簡素化し、製造コストを約 5000 ドル以下に抑えている。これにより、柔軟な力制御を実現する低成本なロボットアームとしての可能性が示された。

また、Zhao らの研究では、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が提案されている。(図 1.4 参照) このアームは 5 自由度構成であり、QDD モータの高いバックドライバビリティを活用しながら、トポロジー最適化やアルミニウム合金、樹脂

3D プリント部品を組み合わせて軽量化を図っている。さらに、ピックアンドプレースタスクを想定した実験により、高い柔軟性と安全性を実証している。

これらの研究はいずれも、QDD モータの特徴である高いバックドライバビリティを活かした安全性や柔軟性の向上を目指している点で重要である。しかし、オフィス環境を考慮した設計や、研究者や開発者が容易に利用可能なオープンプラットフォームの実現には至っていない。本研究では、オフィス環境に適応可能な QDD モータ搭載のロボットアームを設計することを目指す。さらに、設計データを公開することで、QDD モータの普及および技術発展に貢献することを期待する。

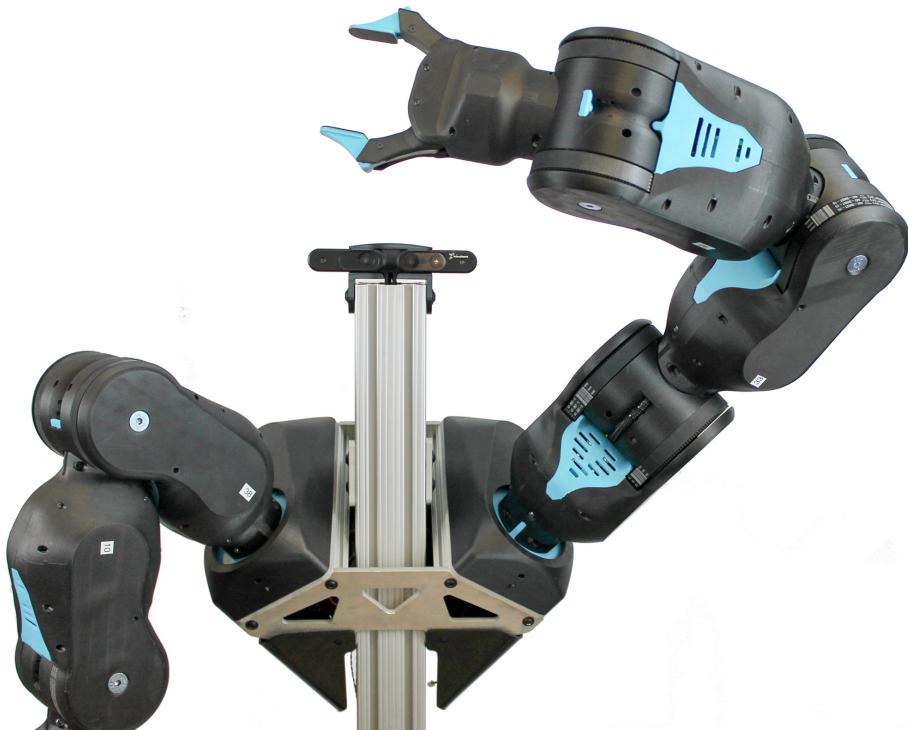


Fig. 1.3 The Blue robot arm. (source: [3])

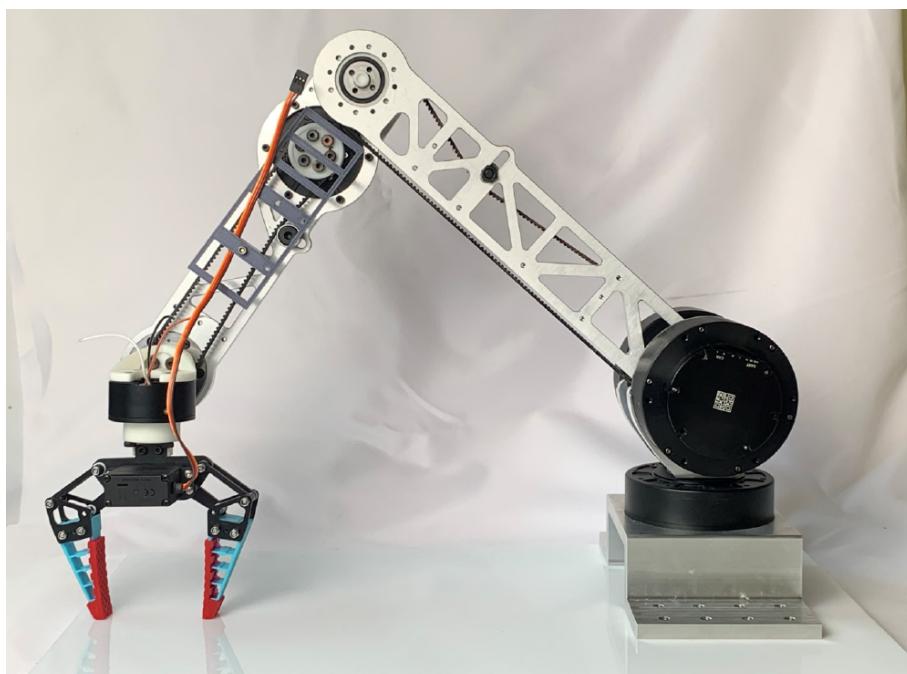


Fig. 1.4 The proposed 5-DOF articulated quasi-direct drive (QDD) robot arm, together with a commercial 1-DOF soft gripper. (source: [4])

## 1.4 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 モータを使用したロボットアームを開発し、設計データを公開することを目的とする。QDD モータの新たな応用事例を提示し、設計データを公開することで、研究開発の技術発展を促進することを期待する。

## 1.5 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、オフィスロボットの作業要件とロボットアームの仕様を明確化する。第3章では、QDD モータを使用したロボットアームの設計について詳述する。第4章では製作および実験結果を示し、第5章で結論と今後の展望を述べる。

## 第2章

# 作業の設定と要求仕様

本章では、オープンプラットフォームのロボットアームの要求仕様を決定していく。行わせる作業を設定し、設定した作業と既存のオフィスロボットの調査を基に要求仕様をまとめていく。

### 2.1 作業の設定

本研究では、オフィス環境におけるロボットアームの作業として「机の片づけ」を設定した。オフィス環境で想定される作業は多岐にわたるが、基本的には台車移動とピック&プレイス作業を組み合わせたものが大半を占める。これは既存のオフィスロボットがどのような作業を対象にしているかを調査した結果である。文献や動画から 78 の作業内容を抽出し、そのうち 66 件（約 85 %）が台車移動とピック&プレイス作業を組み合わせたものであった。本研究で開発するロボットアームは、将来的にオフィスロボットの標準プラットフォームとなることを期待しているため、最初のステップとして「机の片づけ作業」を設定した。図 2.1 は、机上における対象物と箱の設置位置を示している。対象物と箱は机の縁から 50cm 以内の範囲に設置する。また、対象物については既存のオフィスロボットが扱っている物体を調査した結果に基づいて選定した。調査結果を図 2.2 に示す。最も多く確認されたのは衣類などの柔軟な物体であり、次いでボトルなどの円柱型物体が多くかった。今回はこれらの中からボトルとタオルを対象物として設定した。調査では、重量の大きい物体を把持する作業は確認されず、多くの作業が軽量な物体を対象としていた。これを踏まえ、本研究における対象物の重量を 500g 以下と設

定する。片付け用の箱のサイズは、高さ 20cm とする。



Fig. 2.1 Range to place objects and boxes

### 把持対象物

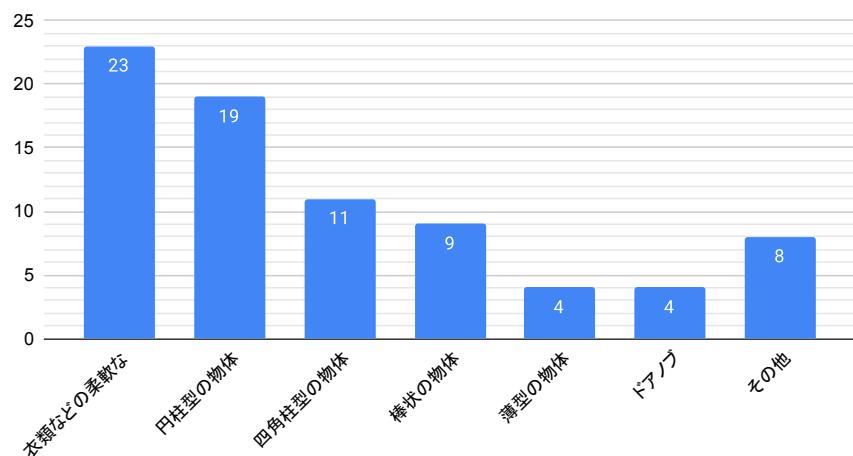


Fig. 2.2 Survey results of objects handled by existing office robots

## 2.2 要求仕様

本研究では、QDD (Quasi-Direct Drive) モータを搭載したロボットアームを開発し、オフィス環境での作業遂行を目指す。そのため、以下の要求仕様を策定する。これらの仕様は、設定した作業内容や既存のオフィスロボットの調査結果を基に決定したものである。特に、QDD モータを採用することで、柔軟性と安全性を高める点に注力している。

### 2.2.1 サイズと作業範囲

ロボットアームのサイズは、机上の片付け作業を想定し、50cm 以内の範囲にある対象物を扱えるよう設計する。これを実現するため、アームのリーチは 70cm 程度とする。この範囲は既存のロボットアームの調査結果を基準として設定したものであり、オフィス環境における机上作業の多くをカバーできる。

### 2.2.2 自由度

自由度の決定は既存のオフィスロボットを参考に行う。既存のオフィスロボットの自由度を調査した結果を示す。7 自由度と 6 自由度のロボットがほとんどである。6 自由度に比べ 7 自由度は柔軟な操作が可能であるが、アーム重量が増加し、コストも高くなるため、6 自由度を採用する。軸配置についても既存のロボットアームを参考に、肩 2 軸（ヨー、ピッチ）、肘 1 軸（ロール）、手首 3 軸（ヨー、ピッチ、ロール）とする。

### 2.2.3 可搬重量

オフィス環境での作業では軽量な物体を扱うことが多く、設定した作業では 500g 以下の物体を対象とした。そのため、アームの可搬重量は 500g 以上の可搬重量を確保する。これにより、オフィス作業で想定される軽量物の取り扱いを十分にカバーできる。

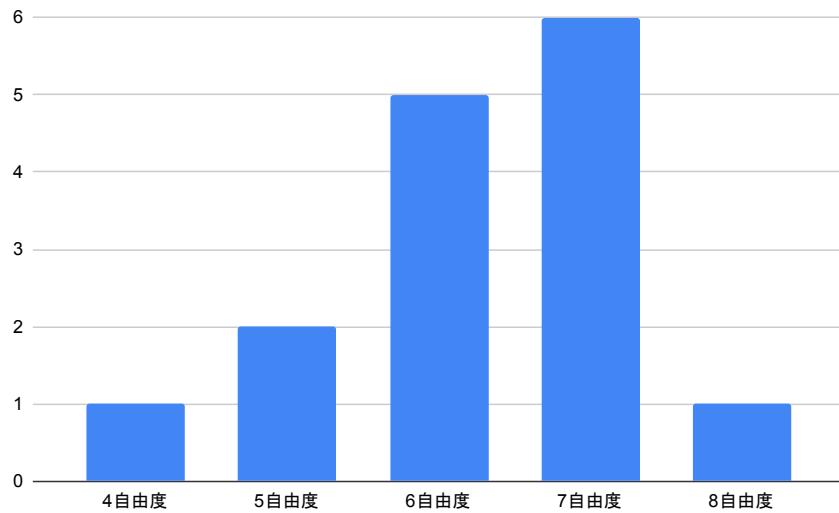


Fig. 2.3 Existing office robot arm DoF

#### 2.2.4 エンドエフェクタ

既存のオフィスロボットのエンドエフェクタは、Mobile ALOHA に搭載されているロボットアーム(2.4に示す)のような平行グリッパが多く、様々な形状の物体を把持していることが確認できた。そのため、本研究で開発するアームにも平行グリッパを搭載する。

#### 2.2.5 安全性

人や精密機器があるオフィス環境では、ロボットがそれらの危害を加えないことが最も重要である。接触してしまっても、ロボットアームの関節が柔軟に駆動すれば被害は最小限に抑えきくことができるため、QDD モータを使用する。QDD モータは低減速比でバックドライバビリティが高いため、人や機器との衝撃を最小限に抑え、オフィス環境での安全性に寄与する。

#### 2.2.6 オープンプラットフォーム

開発するロボットアームはオープンプラットフォームオフィスロボットの一部機能であるため、オープンプラットフォームであることが望ましい。オープンプラットフォームとして、以



Fig. 2.4 Mobile ALOHO Arm

下の項目を満たすことが望ましい。

- ハードウェアの設計図の公開
- 部品リストの公開
- 製作動画の公開

### 2.3 要求仕様のまとめ

以上の項目をまとめた要求仕様を表 2.1 に示す。これらの項目を満たしたロボットアームを設計する。

項目	仕様
アームリーチ	約 70cm
自由度	6 自由度
可搬重量	500g 以上
エンドエフェクタ	平行グリッパ
安全性	QDD モータを使用した柔軟な関節
オープンプラットフォーム性	設計データおよび製作ノウハウの公開

Table 2.1 Required specifications for robot arm

## 第3章

# 設計

本章では、使用する QDD モータの説明とロボットアームの基本的な性能や、要求仕様を満たすための設計について述べる。設計には、Autodesk Inventor 2023 を使用した。ロボットアームは、6 自由度のアームと 1 軸駆動の平行グリッパで構成されており、前章で述べた要求仕様を満たすように設計されている。アームの主要構成部品は、QDD モータ 6 基、アルミ板金部品 7 点、アルミフレーム 2 本、平行グリッパである。

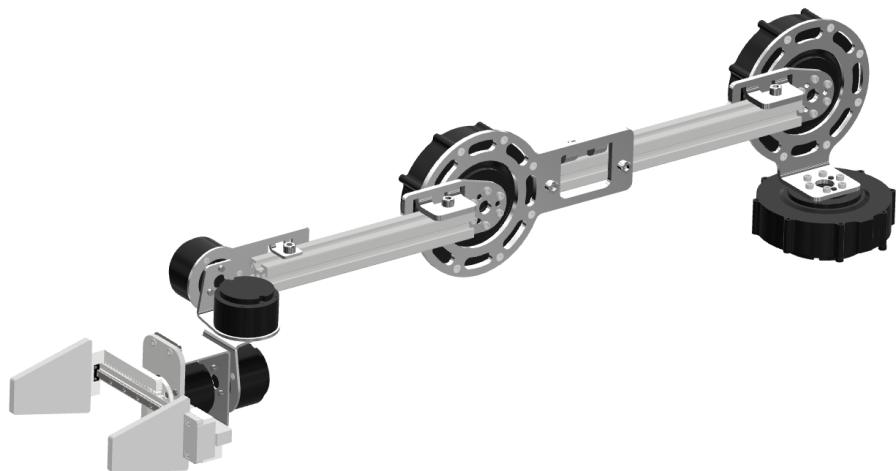


Fig. 3.1 Robot arm configuration

### 3.1 QDD モータの選定と特徴

採用した QDD モータは 2 種類あり、肩関節と肘関節にトルクの大きい QDD モータ (Steadywin GIM8108-8) を使用し、手首およびエンドエフェクタにはトルクの小さいモータ (Steadywin GIM3505-8) を使用する。QDD モータを採用することで、柔軟な関節動作を実現し、衝突時の安全性を向上させることが可能となる。以下では、肩関節と肘関節に使用するトルクの大きいモータを例に、一般的なロボットアーム用モータと比較してその特性を論じる。

#### 3.1.1 QDD モータと一般的なモータの比較表

表 3.1 に、本研究で使用する QDD モータと一般的なロボットアーム用モータ (Dynamixel MX-106T) の比較を示す。

	SteadyWin GIM8108-8	Dynamixel MX-106T
減速比	8:1	225:1
最大トルク (Nm)	22	10
モータ重量 (g)	396	153
無負荷回転数 (rpm)	320	55
許容ラジアル荷重 (N)	900	40
許容アキシャル荷重 (N)	225	20

Table 3.1 QDD モータと一般的なロボットアーム用モータの比較

#### 3.1.2 減速比

採用した QDD モータの減速比は約 8:1 であり、これは一般的なロボットアームに使用されるモータの減速比 (225:1) に比べて著しく低い。低減速比により、バックドライブリティが高まり、柔軟な関節動作を実現することが可能となる。これにより、外力に対して柔軟に対応できるため、衝突時の衝撃を最小限に抑えられる。また、柔軟性の向上により、安全性が求

められるオフィス環境での運用に適している。

### 3.1.3 高トルクと重量

採用した QDD モータは、最大トルクが 22Nm であり、一般的なロボットアーム用モータの約 2.2 倍のトルクを提供できる。これにより、肩関節や肘関節において高い負荷がかかる作業を可能にする。しかし、QDD モータは重量が 396g と、一般的なモータ（153g）の約 2.6 倍であり、設計では軽量化が求められる。

### 3.1.4 無負荷回転数

QDD モータの無負荷回転数は 320rpm であり、これは一般的なロボットアーム用モータの 55rpm に比べて約 6 倍高速である。高速な回転数は、動作の迅速化や応答性の向上に寄与する。特に、短い時間での作業遂行が求められる環境での利便性を高める。

### 3.1.5 許容荷重

QDD モータは、ラジアル荷重とアキシャル荷重の許容値が非常に高い。ラジアル荷重の許容値は 900N、アキシャル荷重は 225N であり、これは一般的なモータ（ラジアル荷重 40N、アキシャル荷重 20N）に比べて大幅に優れている。これにより、モータの出力軸に直接部品を接続する片持ち梁設計が可能となる。片持ち梁設計は、追加の支持構造が不要となるため、設計の簡素化や部品点数の削減が期待できる。

### 3.1.6 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影響が大きい。そのため、QDD モータを安全に運用するためには、動作制御における適切な安全対策が不可欠である。また、QDD モータは重量が大きいため、設計時には軽量化を考慮する必要がある。軽量化を図ることで、暴走時のリスク軽減にも繋がる。

## 3.2 基本的な性能

設計したロボットアームの基本的な性能を述べる。

### 3.2.1 アームサイズ

図3.2にロボットアームのアームリーチとリンク長を示す。人間の腕の長さの比[6]を参考に、肩から肘までは290mm、肘から手首までは220mmとした。アームリーチは660mmであり、要求仕様の700mm程度を満たしている。図3.3にアームサイズを示す。比較のため、机とボトルを模したものを配置している。

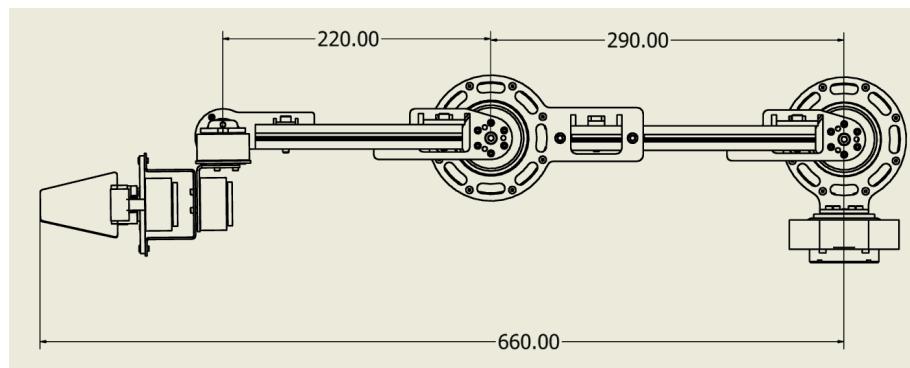


Fig. 3.2 Arm reach and link length

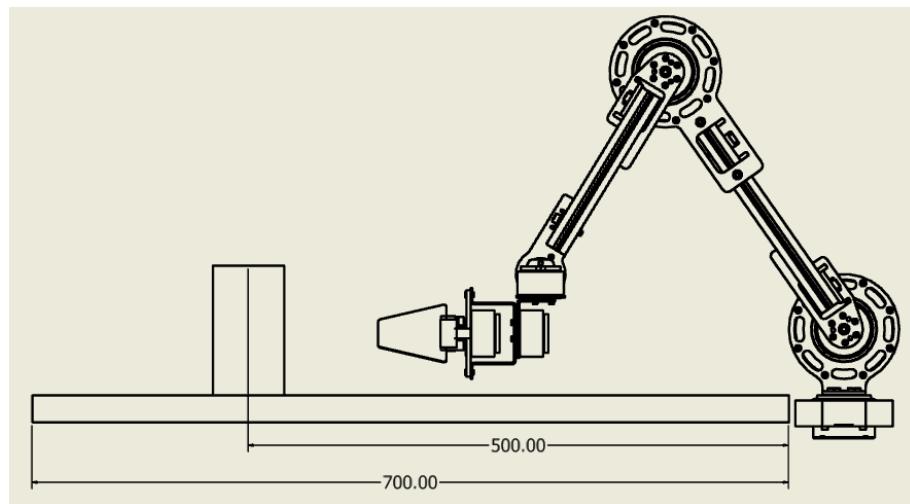


Fig. 3.3 Arm size

### 3.2.2 可動範囲

図3.4、図3.5に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、アームの部品が干渉することなく動作できる最小の範囲を示しており、最大可動範囲はアームを最大まで伸ばしたときの範囲を示している。

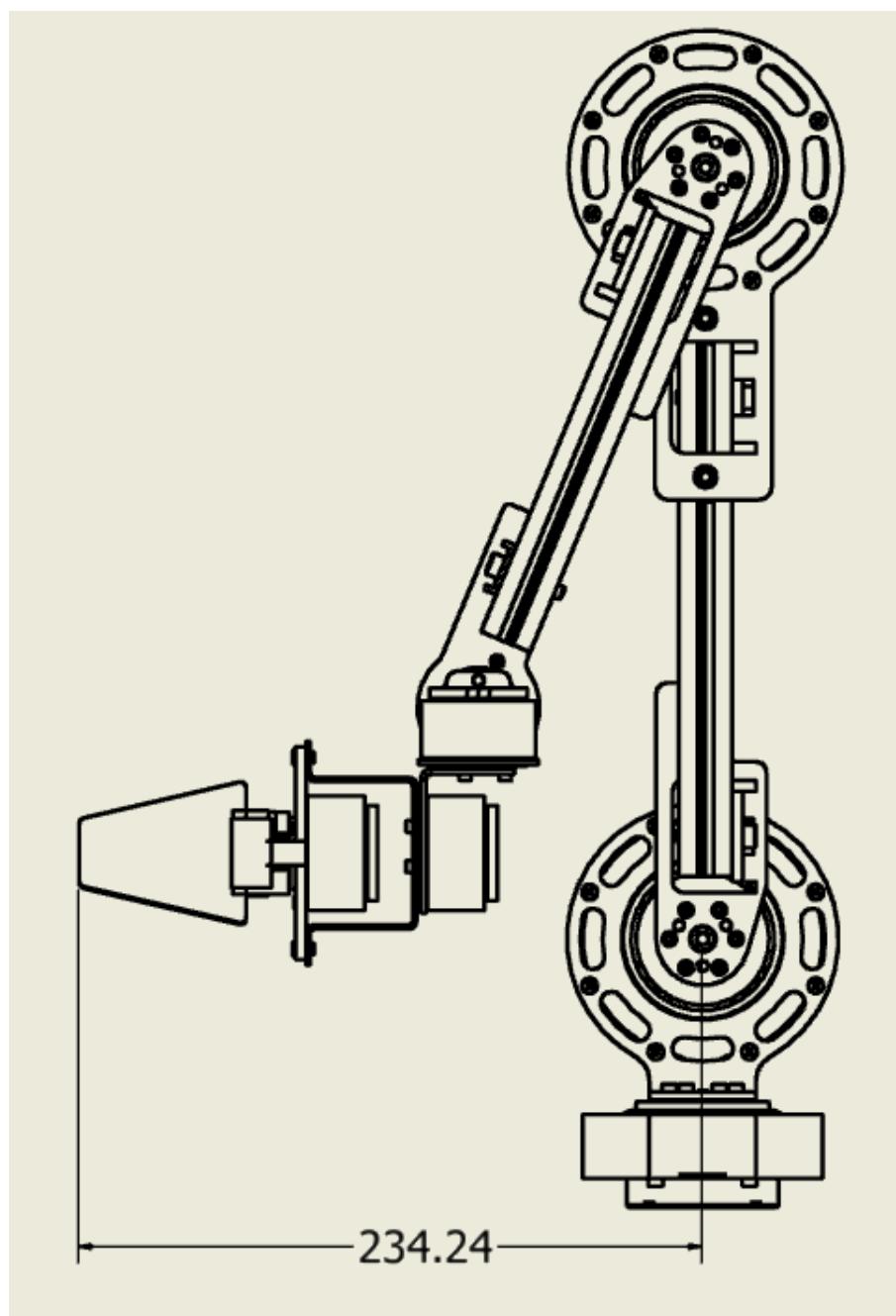


Fig. 3.4 Minimum range of motion

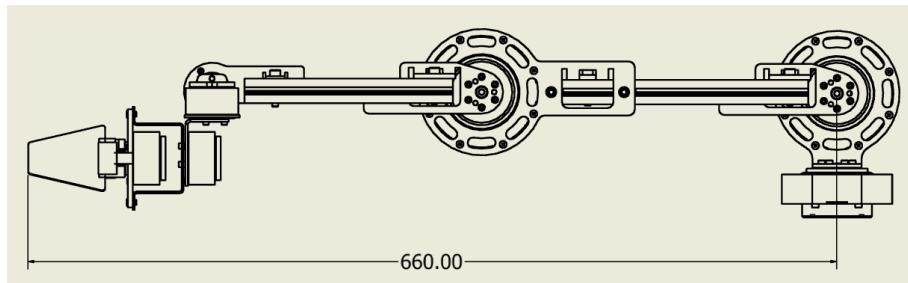


Fig. 3.5 Minimum range of motion

### 3.2.3 アームの手先の移動

アームの手先の移動の様子を図 3.6, 図 3.7, 図 3.8, 図 3.9 に示す.



Fig. 3.6 Stretched out to the right

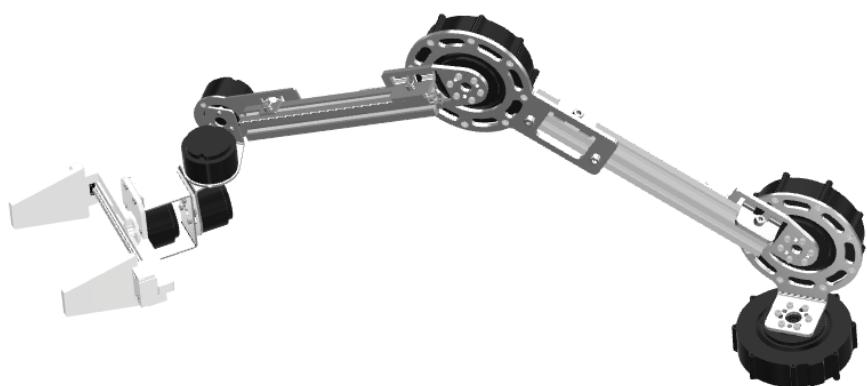


Fig. 3.7 Stretched out to the right

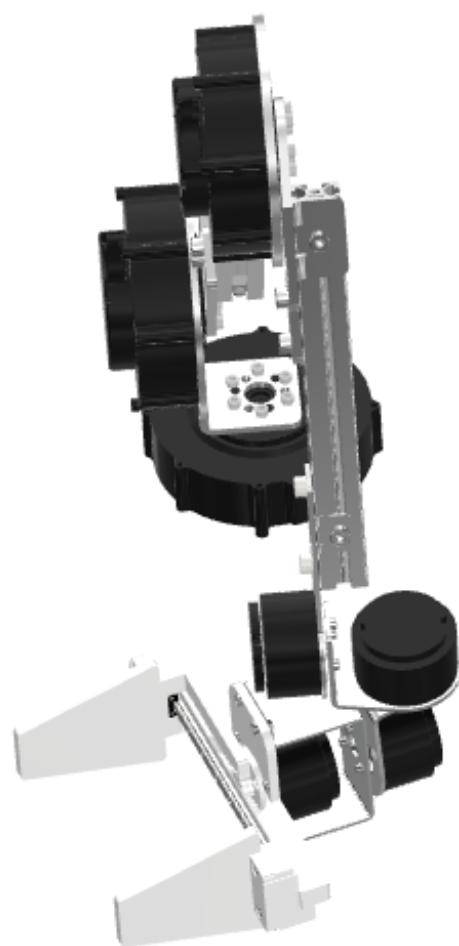


Fig. 3.8 Stretched out to the left



Fig. 3.9 Stretched out to the left

### 3.2.4 可搬重量

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。アームを伸ばしたときに自重を支えるために必要なトルクを求め、常時把持することのできる物体の重量と、瞬間的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 3.10 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。

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

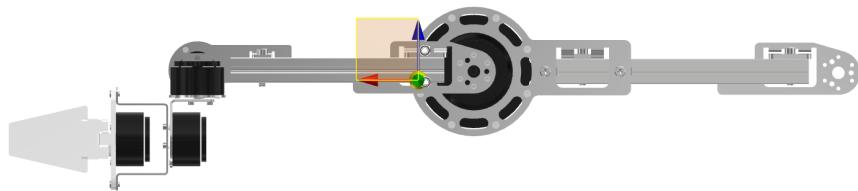


Fig. 3.10 Center of gravity

#### 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る。

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

### 瞬間的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、瞬間的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。

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

### 3.3 構造解析

設計したアームには、7つの板金部品を使用している。それぞれの部品は、軽量化と強度を考慮し設計している。特に、肩部の部品1と部品2(図3.11)は、最も負荷がかかる部位であるため、inventor上で構造解析を行い、強度を確認している。以下に、各部品の構造解析について述べる。

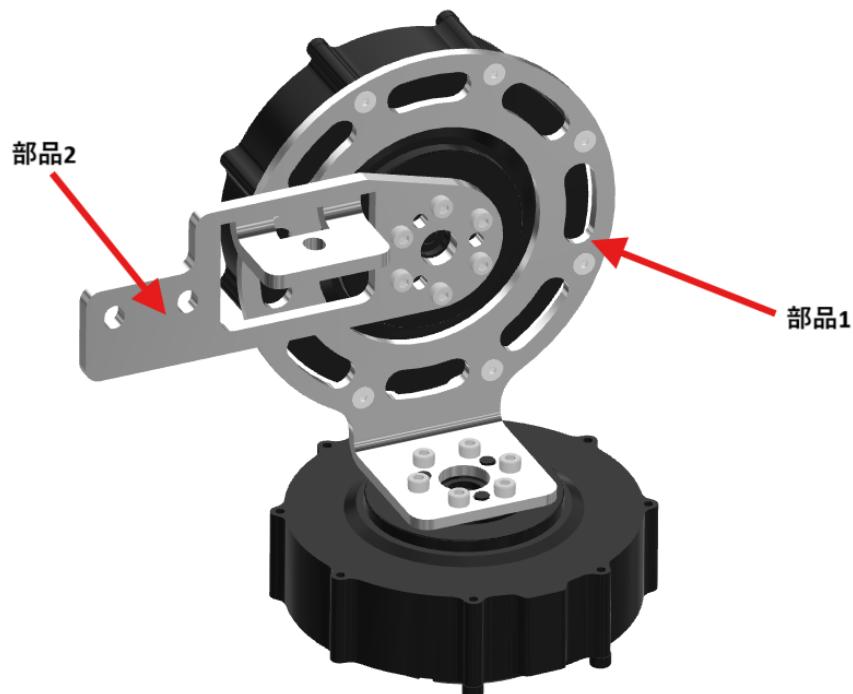


Fig. 3.11 肩部の構成

※※ ここに構造解析の結果を乗せる。構造解析がしっかりできていなかったので、やり直し中。

### 3.4 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 3.12 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、開閉時の動作を安定させている。また、黄色の部品は 3D プリントパーツを使用しており、これにより軽量化を図っている。

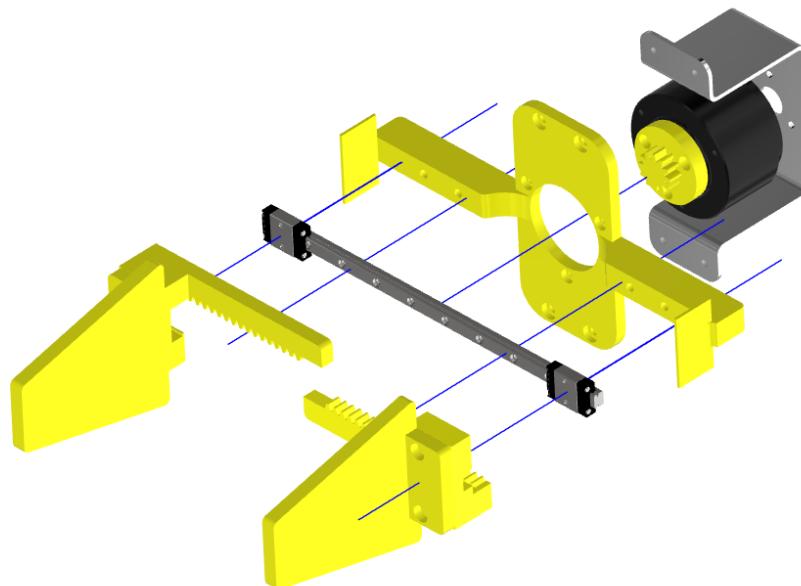


Fig. 3.12 Exploded view of parallel gripper

## 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。製作してから書きます。

## 第5章

### 結論

5.1 まとめ

5.2 今後の展望

# 参考文献

- [1] Pal robotics — mobile manipulator tiago. <https://pal-robotics.com/robot/tiago/>. (Accessed on 1/15/2025).
- [2] 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).
- [3] David V. Gealy, Stephen McKinley, Brent Yi, Philipp Wu, Phillip R. Downey, Greg Balke, Allan Zhao, Menglong Guo, Rachel Thomasson, Anthony Sinclair, Peter Cuelular, Zoe McCarthy, and Pieter Abbeel. Quasi-direct drive for low-cost compliant robotic manipulation, 2019.
- [4] 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.
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] Meviy(misumi). <https://meviy.misumi-ec.com/worldwide/>. (Accessed on 1/15/2025).

# 付録

## 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。