

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 28 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-

本論文では、オープンプラットフォームなオフィスロボット開発の第一段階として、ロボットアームの設計・製作について述べる。オフィスロボットの明確な定義は現状存在しないため、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」と定義する。近年、PAL ロボティクス社の TIAGo、トヨタの HSR、Pollen ロボティクス社の Reachy など、様々なオフィスロボットが開発されているものの、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点が課題として挙げられる。ハードウェアのオープンプラットフォームが普及することで、分野の活性化に寄与すると感がられる。そこで本研究では、オープンプラットフォームなオフィスロボットの開発を目指し、その第一段階として、ロボットアームの開発に取り組んだ。

オフィスロボット用ロボットアームの開発にあたっては、まずオフィス環境で求められる作業分析し、具体的な作業内容を明確化する必要があった。既存のオフィスロボット (前出のロボットを含む 20 台) を対象に動画及び文献調査を行い、80 種類の作業を抽出し分析した。その結果、片付け作業が多く行われていることが判明し、本研究では「デスクの片付け」を作業タスクとして設定した。この作業は、多様な形状・大きさの物体を扱う必要があるため、ロボットアームには高い汎用性が求められる。また、人とロボットが協働するオフィス環境においては、安全性も重要な要素となる。これらの点を踏まえ、ロボットアームの要求仕様を策定し設計を行った。

開発したロボットアームは、全ての関節に QDD モータを採用している点が最大の特徴である。QDD モータの高いバックドライバビリティにより、外力が加わった際に関節が柔軟に動

作し，衝撃を吸収することが可能となる．これにより，従来の減速機付きモータを採用したアームと比較して，人や物体との衝突時の安全性が向上する．さらに，QDD モータの堅牢性を活かした設計により，アームはシンプルな構造で実現されている．具体的には，部品点数を少なく抑え，組み立てを容易にすることで，オープンプラットフォームとして重要な再現性と拡張性を高めている．これにより，設計データを公開することで，他の開発者による容易な複製と，必要に応じたカスタマイズが可能となる．本研究の成果は，将来的なオープンプラットフォームオフィスロボットの開発基盤となることが期待される．

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

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	ロボットアーム調査と QDD モータ採用の動機	2
1.3	関連研究	3
1.3.1	QDD モータを用いたロボットアーム	3
1.4	目的	4
1.5	本論文の構成	5
第 2 章	作業の設定と要求仕様	6
2.1	作業の設定	6
2.2	要求仕様	8
2.2.1	アームのサイズ	8
2.2.2	アーム重量	8
2.2.3	アームの自由度	9
2.2.4	可搬重量	9
2.2.5	エンドエフェクタ	9
2.2.6	安全性	10
第 3 章	設計	11
3.1	基本的な性能	11
3.1.1	アームサイズ	12
3.1.2	可動範囲	13

目次	vii
3.1.3 アームの手先の移動	14
3.1.4 可搬重量	17
3.2 板金部品	19
3.2.1 肩部	19
参考文献	20
付録	21
謝辞	22

図目次

1.1	TIAGo from PAL-Robotics	2
1.2	HSR from TOYOTA	2
1.3	The proposed 5-DOF articulated quasi-direct drive (QDD) robot arm, together with a commercial 1-DOF soft gripper.	4
2.1	対象物と箱の設置範囲	7
2.2	既存のオフィスロボットが扱っている対象物	7
2.3	既存のオフィスロボットの自由度	9
2.4	Mobile ALOHO Arm	10
3.1	アームの構成	11
3.2	アームリーチとリンク長	12
3.3	アームサイズ	12
3.4	最小可動範囲	13
3.5	最大可動範囲	14
3.6	右近くへ伸ばした様子	14
3.7	右遠くへ伸ばした様子	15
3.8	左近くへ伸ばした様子	15
3.9	左遠くへ伸ばした様子	16
3.10	アームの重心	17

表目次

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も様々な企業や研究室で活発に行われている。代表的なロボットとして、PAL ロボティクス社が開発している TIAGo とトヨタ自動車が開発している HSR を示す。しかし、多くのオフィスロボットは設計データが公開されていないため、利用者による改良や新規開発が困難であり、研究開発への参入障壁となっている。一方、設計データを公開しているロボットは存在するものの、それらは主に情報共有を目的としており、必ずしもユーザーが容易に自作できる設計思想に基づいて開発されているわけではない。このため、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。

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、組み立て図が公開されており、誰もが容易に複製・改良できる。実際に、i-Cart をベースとした様々なロボットが開発されており、自律移動ロボット開発の活性化に大きく貢献している。

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、本研究ではロボットアームの開発に取り組む。オフィス環境で活動するロボットは、人間と共同の空間での作業となるため人間に危害が及ぶ可能性を持っている。文献 [1] では、ソフトウェア的にその問題解決に取り組んでいるが、本研究ではアクチュエータに QDD モータを使用し、ハードウェア的

解決を目指す.



Fig. 1.1 TIAGo from PAL-Robotics



Fig. 1.2 HSR from TOYOTA

1.2 ロボットアーム調査と QDD モータ採用の動機

既存のオフィスロボットのアームを調査した結果、4 台のロボットアームに使用されているアクチュエータが判明した。Reachy, sobit pro, Mobile ALOHA, らのロボットアームは ROBOTIS 社の Dynamixel(XM-430, XM-540, MX-106T など)を採用している。また、本研究室 OB が過去に開発したオフィスロボットのアームには近藤科学の B3M サーボモータ (B3M-SC-1040-A, B3M-SC-1170-A)を採用している。これらのサーボモータは多くのロボットに搭載されているもので、小型かつ高トルクなモータである。しかし、高減速比のためロボットアームの関節はバックドライバビリティが低くなってしまう。バックドライバビリ

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

ティとは、機械工学事典にて、「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。ダイレクトドライブモータや低減速比の平歯車を用いた駆動系などにこのような性質がみられる。」(引用：機械工学事典)と説明されている。つまり、通電時、関節が外力に対してどの程度柔軟に駆動するかというもののだが、調査したロボットアームに搭載されているアクチュエータは高減速比のために外力に対して関節がほとんど動くことはない。衝突時に人間だけでなくロボットも守ることができる関節を実現するため、QDD モータを採用した。使用する QDD モータ (Steadywin GIM8108-8) と調査したサーボモータの比較を表に示す。Dynamixel と B3M の減速比に比べ、QDD モータの減速比が非常に小さいことがわかる。さらに、QDD モータは許容ラジアル荷重、許容アキシアル荷重が高いため、モータとリンクを部品でつなぐシンプルな構成のロボットアームの実現が可能であり、オープンプラットフォームとして好ましい。

1.3 関連研究

1.3.1 QDD モータを用いたロボットアーム

近年、QDD (Quasi-Direct Drive) アクチュエータを用いたロボットアームの研究が注目を集めている。QDD アクチュエータは、高減速比ギアを用いることなくモータを直接、あるいは低減速比のギアを介して関節に接続する方式であり、バックドライバビリティと高帯域幅制御といった利点を持つ。Zhao ら [26] は、5 自由度の軽量 QDD ロボットアームを提案している。この研究では、モバイルロボットへの搭載を想定し、軽量化、安全性、制御性能の向上

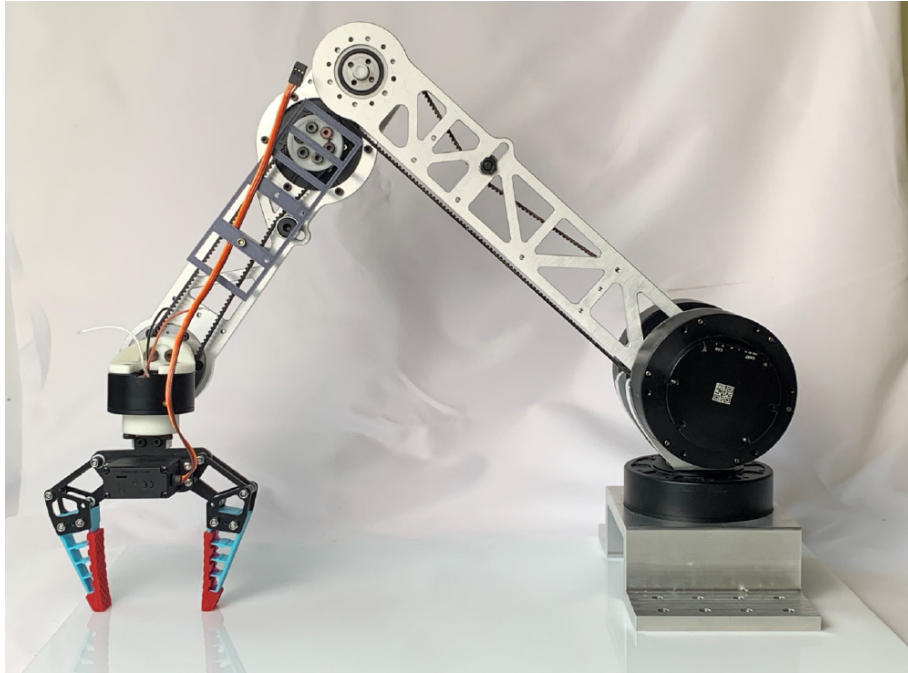


Fig. 1.3 The proposed 5-DOF articulated quasi-direct drive (QDD) robot arm, together with a commercial 1-DOF soft gripper.

を設計目標としている。彼らは、アームの軽量化のために、自由度を5に削減し、一部の関節にリモートアクチュエーション機構を採用している。また、リンク形状のトポロジー最適化や、高強度アルミニウム合金、樹脂3Dプリント部品の利用により、軽量化と構造的強度を両立させている。提示された論文では、ピックアンドプレースタスクを想定したシミュレーションと、実機によるコンプライアンス制御実験を行い、QDDアームの実現可能性を示している。

しかし、この研究ではオープンプラットフォーム化については考慮されておらず、具体的な作業タスクも設定されていない。

1.4 目的

QDDモータを使用したロボットはいくつかあるが、ロボットアームに関しては不足している。また、オープンプラットフォームとなっているものもない。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の設計と製作をすることを目的とする。

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、対象とする作業の決定と要求仕様について述べる。第3章ではロボットアームの設計について述べる。第4章ではロボットアームの製作について述べる。第5章は結論として、まとめと今後の展望について述べる。

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デスク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．本研究で開発するアームは，将来的にオフィスロボットの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この作業を設定した．作業環境のイメージ図を図 2.1 に示す．図のように，部屋の中にある机の上に対象物と箱を配置し，全ての対象物を箱の中に入れるというシンプルな作業である．対象物と箱は机の縁から 50cm 以内の範囲に設置する．また，対象物に関しても既存のオフィスロボットが扱っているものを調査し決定した．調査結果を表に示す．最も多かっ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の物体が多かった．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．調査した作業内で重量の大きい対象物を把持している作業は確認できず，多くは軽量の物体を把持していた．その

ため、対象物の重量は 500g 以下とする。片づける箱のサイズは、高さ 20cm とする。

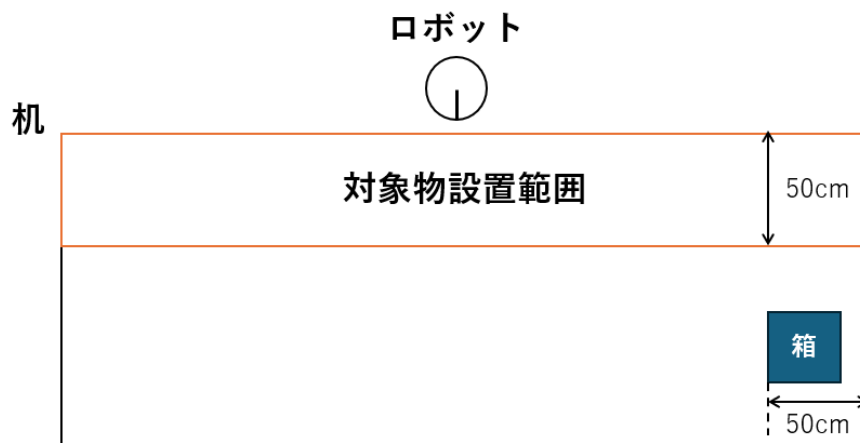


Fig. 2.1 対象物と箱の設置範囲

把持対象物

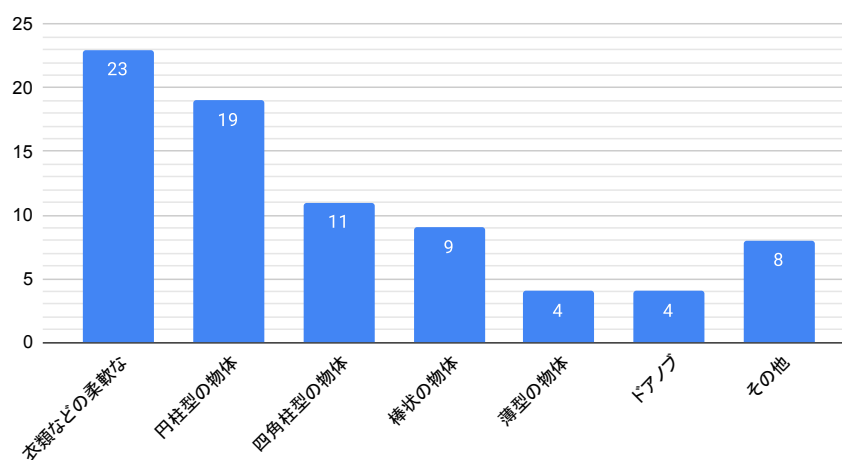


Fig. 2.2 既存のオフィスロボットが扱っている対象物

2.2 要求仕様

前項で設定した作業と既存のオフィスロボットの調査を基に，要求仕様を決定する．以下に決定した要求仕様とその理由を示す．

- アームリーチ 70cm 程度
- 軽量化
- 6 自由度
 - － 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）
- 可搬重量 500g 以上
- 平行グリップ
- QDD モータを使用

2.2.1 アームのサイズ

ロボットアームのサイズは，オフィス環境で活動するのに適したサイズが好ましい．既存のオフィスロボットのアームリーチは，平均約 70cm 程度である．また，前項で設定した作業より，対象物の設置位置と箱の設置位置は 50cm 以内の位置であるため，アームリーチ 70cm 程度あれば作業の遂行も可能である．

2.2.2 アーム重量

既存のオフィスロボットのアームの重量は調査してもわからなかったが，将来的に台車ロボットに搭載することや，双腕ロボットにすることを考えると，軽量であることが望ましい．また，軽量化することで安全性にも寄与すると考えられる．

2.2.3 アームの自由度

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。そのため、6自由度のアームが望ましい。この際、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。

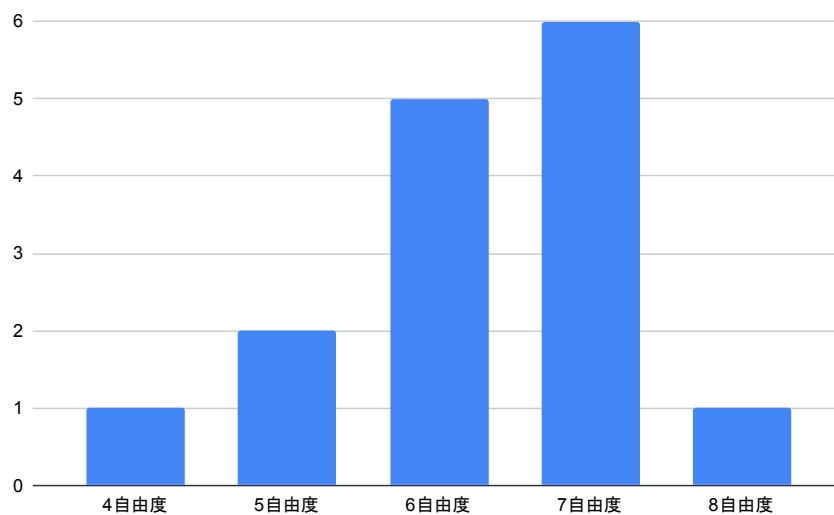


Fig. 2.3 既存のオフィスロボットの自由度

2.2.4 可搬重量

設定した作業では、500g以下の対象物を把持する。そのため、アームの可搬重量は500g以上であることが望ましい。

2.2.5 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プが多く、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プを搭載する。



Fig. 2.4 Mobile ALOHO Arm

2.2.6 安全性

オフィス環境には多くの人がいるため、ロボットアームが人に接触する可能性があり、安全性が重要である。既存のオフィスロボットで使用されているアクチュエータは、高減速比でバックドライバビリティが低いものが多い。そのため、低減速比の QDD モータを使用することで、バックドライバビリティを高め、衝突時に柔軟な関節を実現することができる。そもそも、利用者や近くの人間に危害を加えないことが重要であり、QDD モータを使用する以外にも対策を講じる必要がある。

第 3 章

設計

本章では設計したロボットアームについて述べる．設計には，inventor2023 を使用した．ロボットアームの構成は，6 自由度アームと平行グリップ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．アームの基本的な構成部品は，QDD モータ× 6，アルミ板金部品× 7，アルミフレーム× 2，となっている．基本的な性能を示した後，肩部，肘部，手首部，のそれぞれの詳細設計について述べる．

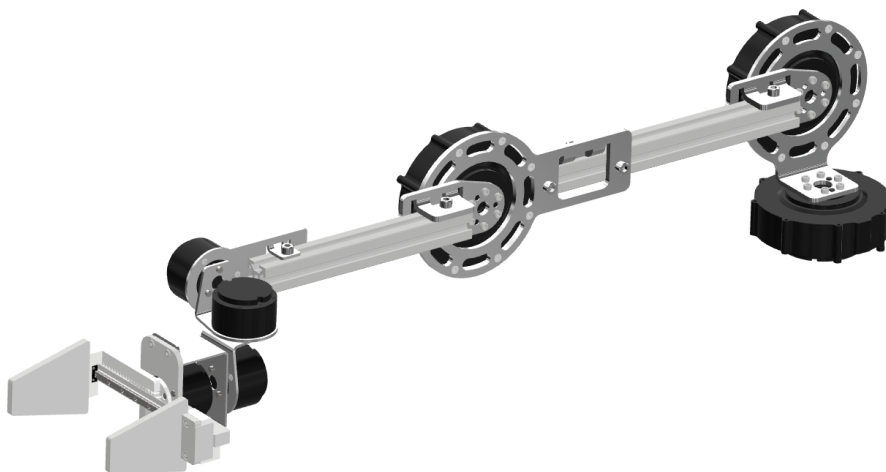


Fig. 3.1 アームの構成

3.1 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．

3.1.1 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 [?] を参考に、肩から肘までは 290 mm、肘から手首までは 220 mmとした。アームリーチは 660 mmであり、要求仕様の 700 mm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。

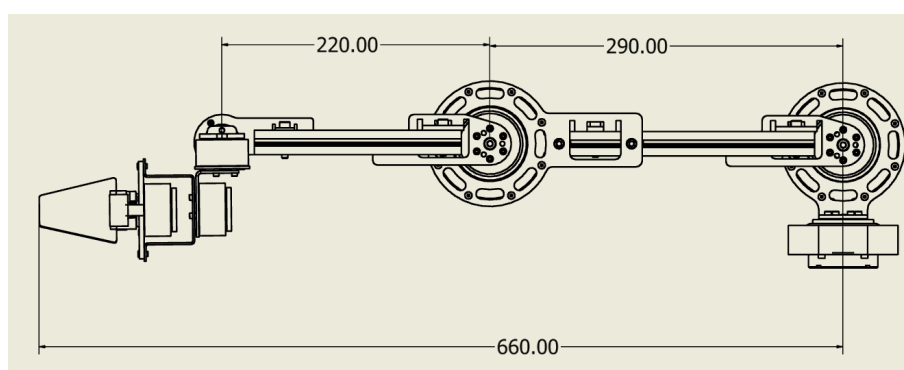


Fig. 3.2 アームリーチとリンク長

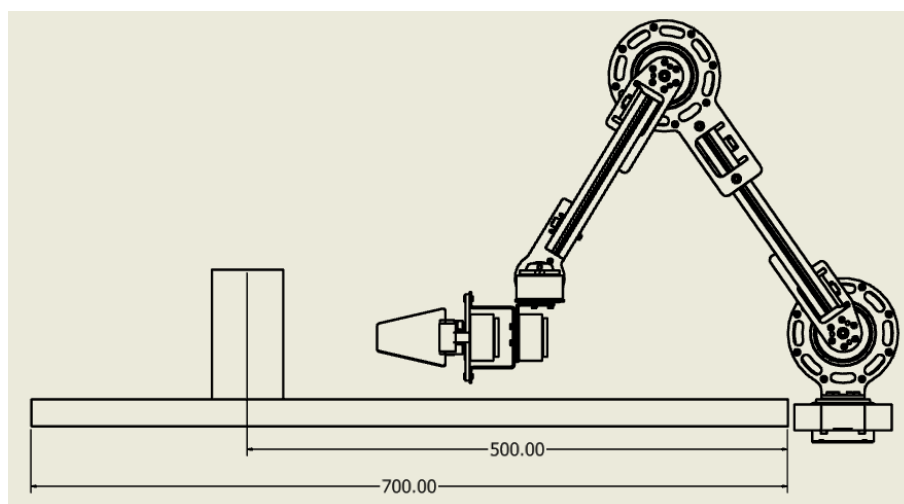


Fig. 3.3 アームサイズ

3.1.2 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。

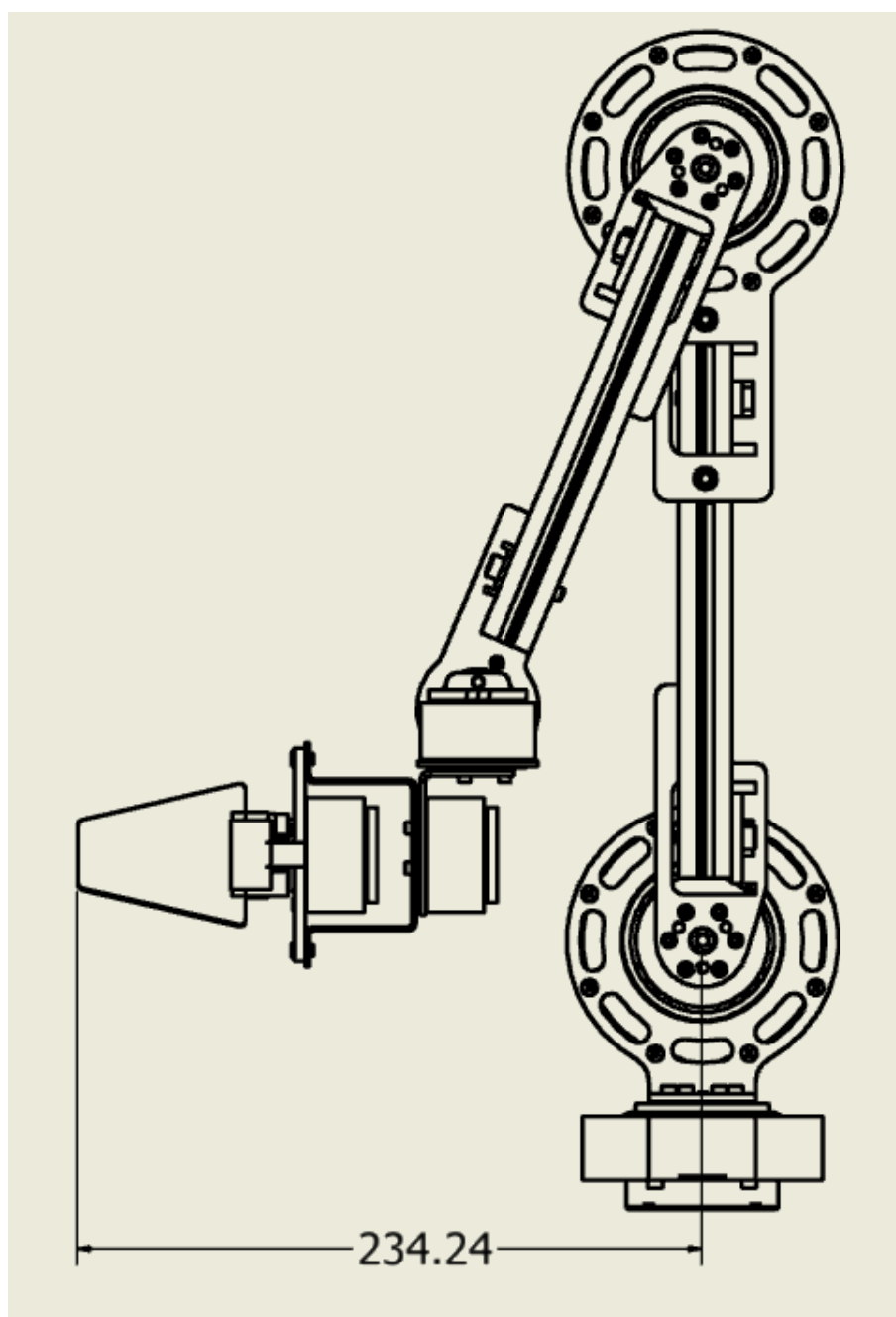


Fig. 3.4 最小可動範囲

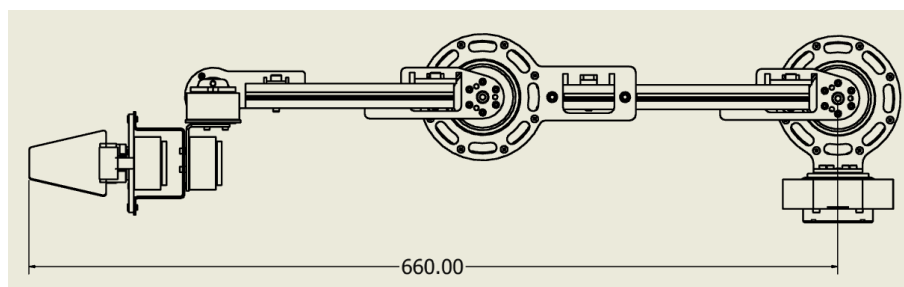


Fig. 3.5 最大可動範囲

3.1.3 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 右近くへ伸ばした様子

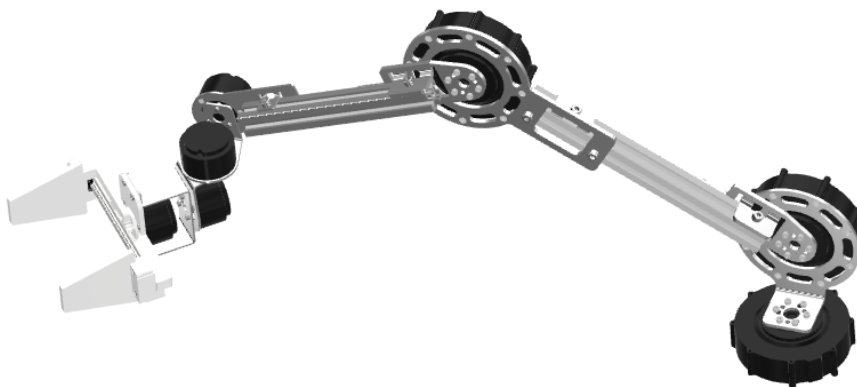


Fig. 3.7 右遠くへ伸ばした様子

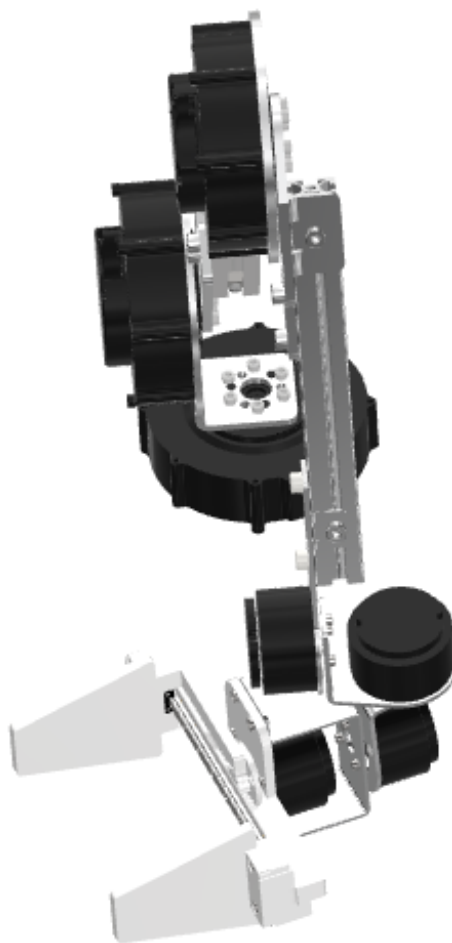


Fig. 3.8 左近くへ伸ばした様子



Fig. 3.9 左遠くへ伸ばした様子

3.1.4 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 9.8m/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.

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

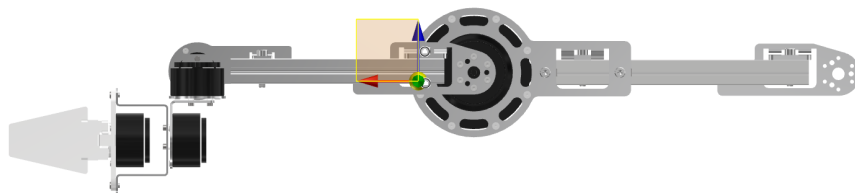


Fig. 3.10 アームの重心

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 3.3Nm であり, 肩ピッチ軸から手先までの距離は 0.66m 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 17.8Nm 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．

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

3.2 板金部品

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。本項では、それぞれの部位 (肩, 肘, 手首) の部品について述べる。

3.2.1 肩部

参考文献

- [1] 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).
- [2] Pal robotics — mobile manipulator tiago. <https://pal-robotics.com/robot/tiago/>. (Accessed on 1/15/2025).
- [3] 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).

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。