

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9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、QDD モータを用いたオフィスロボットのロボットアームのメカニズム設計および製作について述べる。近年、人手不足を背景に、オフィス業務の効率化を目的としたロボット技術の導入が注目されている。多くの企業や研究室においてオフィスロボットの開発が進められているが、既存のロボットは設計データが公開されていないものが多く、標準的なプラットフォームが不足している。こうした状況に対し、本研究では、オープンプラットフォーム開発の、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設計し、その設計データを公開することを目的とする。

オフィス環境において、ロボットは人や物などに対する安全性が求められる。QDD モータは低減速比による高応答性を持ち、適切な制御を施すことで外力に対して柔軟に動作可能な関節を実現できる。本研究では、オフィスロボットの代表的なタスクとして「机の片づけ作業」を対象とし、ロボットアームの要求仕様を設定した。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。また、部品は外注製作に対応しており、加工を必要とせず、組み立てのみで再現可能である。

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。

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	QDD モータの採用	3
1.3	目的	6
1.4	本論文の構成	6
第 2 章	設計指針	7
2.1	作業調査	7
2.2	机の片づけ作業	8
2.2.1	机の上に置く物体	8
2.2.2	物体の重量	9
2.2.3	物体の設置位置	9
2.3	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	10
2.3.1	アームリーチ	10
2.3.2	可搬重量	10
2.3.3	自由度	12
2.3.4	エンドエフェクタの形状	13
第 3 章	設計	14
3.1	オープンプラットフォームを意識した設計	14
3.2	QDD モータの選定と特徴	15
3.2.1	QDD モータと一般的なモータの比較表	15

3.2.2	減速比	15
3.2.3	高トルクと重量	16
3.2.4	無負荷回転数	16
3.2.5	許容荷重	16
3.2.6	QDD モータの欠点	16
3.3	基本的な性能	17
3.3.1	アームサイズ	17
3.3.2	可動範囲	18
3.3.3	アームの手先の移動	19
3.3.4	可搬重量	22
3.4	構造解析	24
3.4.1	部品 1 の構造解析	25
3.4.2	部品 2 の構造解析	28
3.5	平行グリッパの設計	29
第 4 章	製作	30
4.1	部品の製作	30
4.2	組み立て	30
4.3	安全対策	30
第 5 章	結論	31
5.1	まとめ	31
5.2	今後の展望	31
参考文献		32
付録		34
謝辞		35

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 using QDD motor. (source: [3])	4
1.4	The Blue robot using QDD motor. (source: [4])	4
1.5	The proposed 5-DOF articulated quasi-direct drive (QDD) robot arm, together with a commercial 1-DOF soft gripper. (source: [5])	5
2.1	Survey results of objects grasped by office robots	8
2.2	Office robot arm reach survey results	11
2.3	Office robot payload survey results	11
2.4	Office robot arm DoF survey results	12
2.5	End effectior of TIAGO	13
3.1	Arm reach and link length	17
3.2	Arm size	17
3.3	Minimum range of motion	18
3.4	Minimum range of motion	19
3.5	Stretched out to the right	19
3.6	Stretched out to the right	20
3.7	Stretched out to the left	20
3.8	Stretched out to the left	21
3.9	Center of gravity	22

3.10	Configuration of robot arm shoulder	24
3.11	Structural analysis results using Inventor of Part 1	25
3.12	Structural analysis results using Inventor of part 1 after changing the thickness	26
3.13	Structural analysis results using Inventor of part 1 after changing shape	27
3.14	Exploded view of parallel gripper	29

表目次

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	15
3.2	Specifications of Part 1	25
3.3	Specs of part 1 after changing the thickness	26
3.4	Specs of part 1 after changing shape	27

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 [6]，警備 [7]，掃除 [8]，配膳 [9]，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 [10]。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，標準的な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: [1])



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

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。本研究では安全性の向上を目的として、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バビリティを有し、優れた応答性を示す点が特徴である。この特徴により、動作中の予期せぬ接触が発生しても関節が柔軟に動作しやすく、安全性の向上が期待される。

QDD モータに関する研究として、飯塚ら [3] 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 [11] 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、高いバックドライバビリティ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 [4]。

さらに、Zhao ら [5] 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。同アームは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し、安全性を向上させることが確認されている。一方で、使用されている QDD モータは、DD モータと低減速比ギアを組み合わせたケースが大半であり、市販の QDD モータをロボットアームに活用した事例は少ない。そのため、市販の 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 The Blue robot using QDD motor. (source: [3])

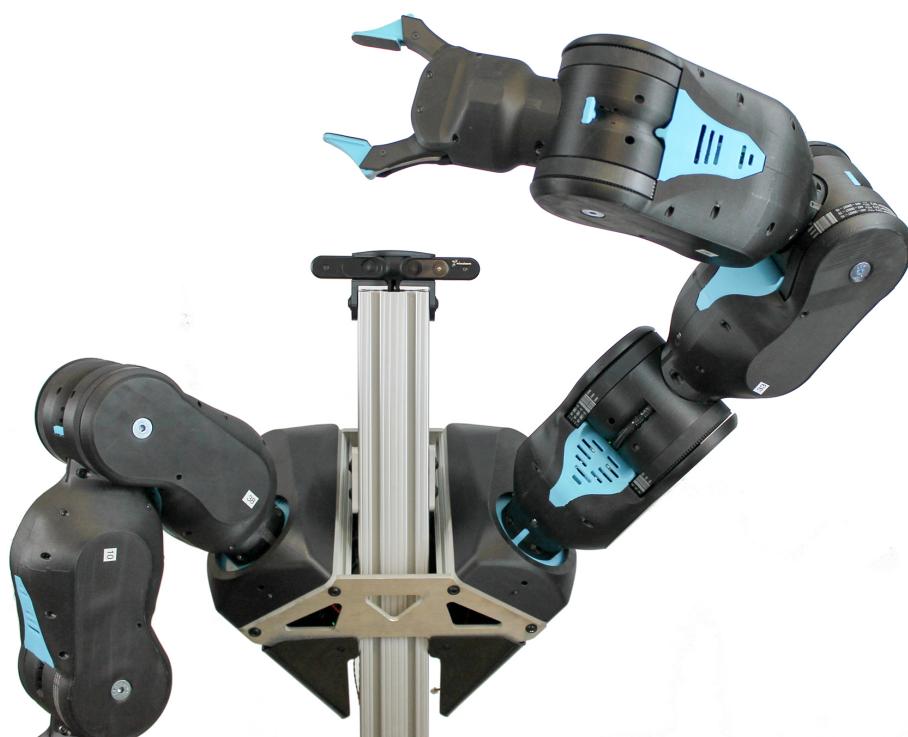


Fig. 1.4 The Blue robot using QDD motor. (source: [4])

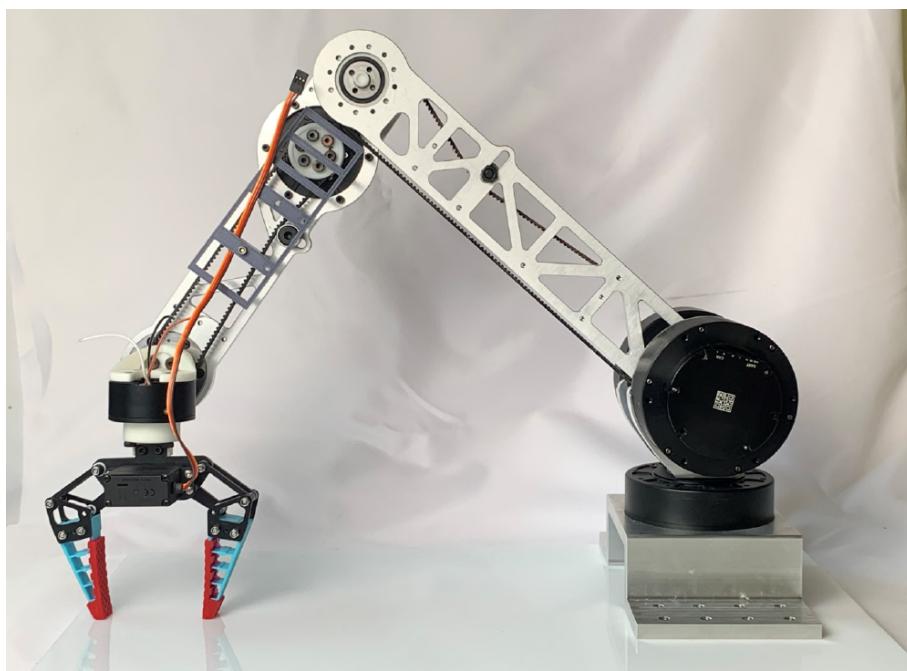


Fig. 1.5 The proposed 5-DOF articulated quasi-direct drive (QDD) robot arm, together with a commercial 1-DOF soft gripper. (source: [5])

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、応用事例の少ない市販の 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。

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、オフィスロボットの作業要件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

前提として、開発するロボットアームは、オフィスロボットとして適している必要がある。オフィスロボットとして適した仕様を決定するにあたり、本研究では以下の手順を踏んだ。

1. 既存オフィスロボットが対象としている作業の調査
2. 行う作業の決定
3. 既存オフィスロボットのロボットアームのメカニズム調査
4. 仕様の決定

まず、「調査した全てのオフィスロボットが行える作業」を基準に作業を決定し、その作業から求められる項目を、ロボットアーム調査の結果を踏まえて整理した。本章では、本研究で対象とする作業の決定過程と、要求仕様の決定について述べる。

2.1 作業調査

開発するロボットアームが対象とする作業を決定するため、既存のオフィスロボットが対象としている作業を調査した。動画や文献をから合計 77 件の作業事例を抽出したところ、約 61% が台車移動とピック＆プレイスを組み合わせた作業であった。これは、部屋の片づけや荷物の運搬などが代表例である。それ他の作業としては、ドアの開閉、ボタンの押下、フロアの巡回、などが挙げられた。以上の結果から、現在オフィスロボットが対象としている作業の多くは、物体を把持して移動させる作業であると考えられる。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して活用されることを目指している。その第一歩として、本研究では「机の片づけ作業」を対象とした。

2.2 机の片づけ作業

ここでは、「机の片づけ作業」の詳細を述べる。机の片づけ作業は、机の上に散らばっている物体を事前に設置した箱の中へ移動させる作業である。以下に、具体的に使用する物体の種類や重量、設置位置について以下に述べる。

2.2.1 机の上に置く物体

机の上に置く物体、すなわちロボットが把持対象とする物体は、既存のオフィスロボットが頻繁に把持していた対象を調査したうえで設定した。図2.1に示すように、最も多かったのは服やタオルなどの衣類で、次にペットボトルや缶ジュースなどの筒状物、お菓子の箱や200ml程度のパックジュースなどの箱状物、さらにペンなどの棒状物や雑誌などの薄型物が続いた。以上の結果に基づき、本研究では作業対象としてタオル、缶ジュース、パックジュースの3種類を採用する。

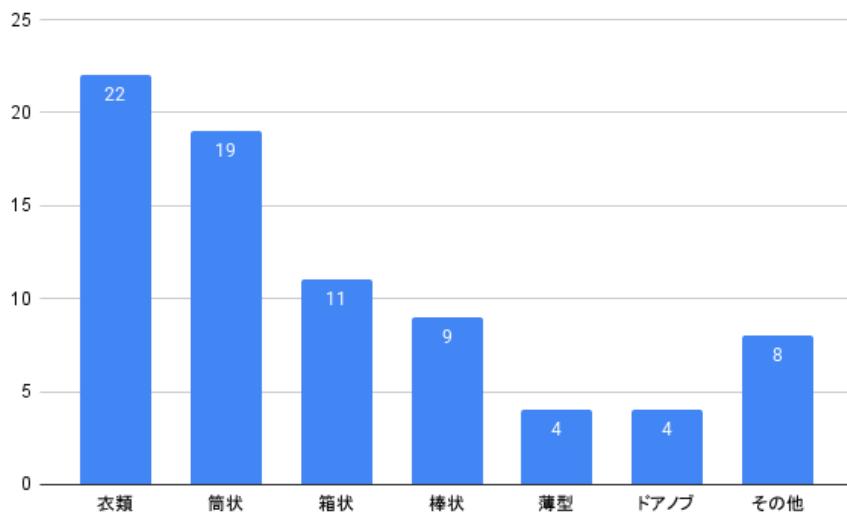


Fig. 2.1 Survey results of objects grasped by office robots

2.2.2 物体の重量

調査の中では、人が片手で持てないサイズや重量の大きい物体を扱う事例は見られなかつた。そこで、把持対象物の重量は 500g 以下と設定した。

2.2.3 物体の設置位置

次節で詳述するように、既存のオフィスロボットのアームリーチで最小の値は、Hello Robot 社が開発している Stretch 3 の約 0.51m であった。したがって、把持対象物と箱の設置位置は、机の縁から 0.5m 以内の範囲に設置することとする。

2.3 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

前節で設定した作業（机の片づけ）から導かれる要求事項と、既存オフィスロボットのロボットアーム調査の結果を踏まえて、以下の項目を要求仕様として設定した。なお、QDDモータの使用とオープンプラットフォーム性は、本研究の前提であるため、ここではその他の項目を示す。以下の項目を仕様として、ロボットアームのメカニズム設計を行う。

- 0.65m - 0.70m 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

以下では、これらの項目の詳細について述べる。

2.3.1 アームリーチ

前節で設定した作業より、ロボットアームから 0.5m 以内の範囲にある対象物を扱えることが要求される。また、既存のオフィスロボット 10 台のアームリーチを調査した結果（図 2.2 参照）、最小は 0.51m、最大は 0.90m で、平均値および中央値はいずれも 0.71m であった。そこで、本研究ではアームリーチを 0.65m から 0.70m の範囲に設定した。

2.3.2 可搬重量

机の片づけ作業では、最大 500g の物体の把持が求められる。また、既存ロボットアーム調査では、可搬重量の最小は 0.35kg であった（図 2.3 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。

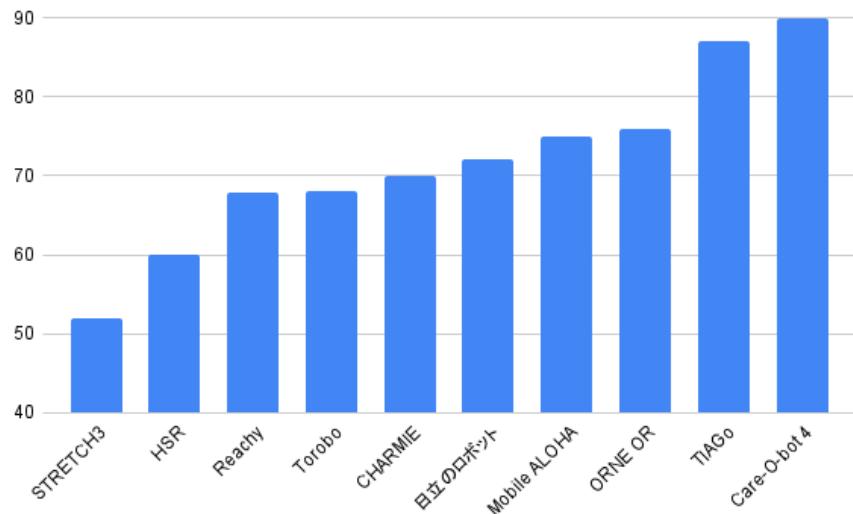


Fig. 2.2 Office robot arm reach survey results

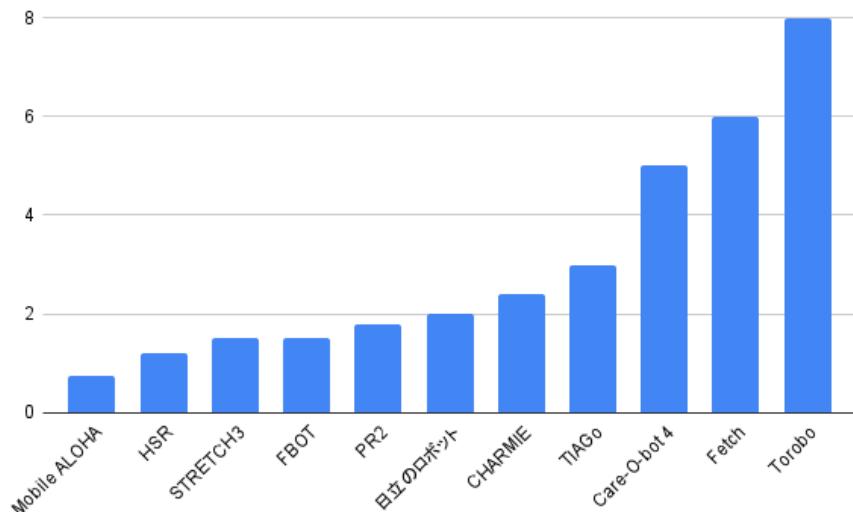


Fig. 2.3 Office robot payload survey results

2.3.3 自由度

既存のオフィスロボットのアームの自由度を調査したところ、6自由度と7自由度のロボットが大半であった(2.4参照)。6自由度の軸配置は、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、7自由度ロボットは肩にロール軸が追加されている。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す一方で、アーム重量やコストが増加する。本研究ではコスト削減と軽量化を優先し、6自由度を採用した。

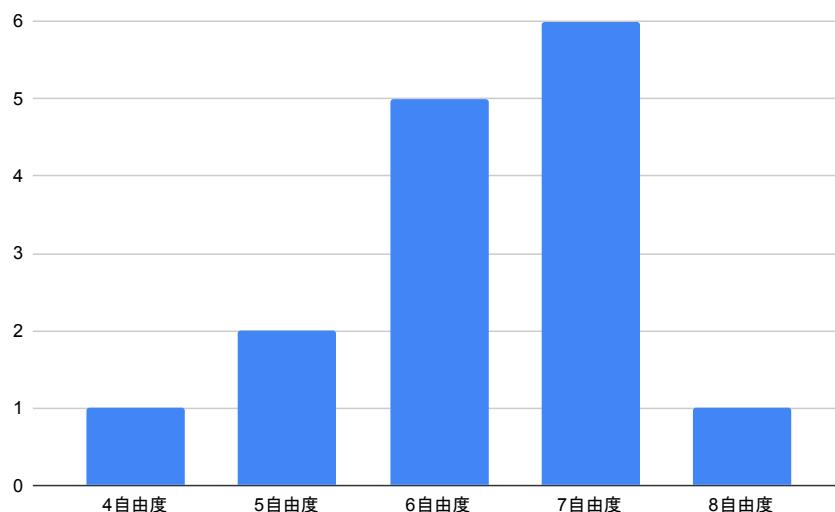


Fig. 2.4 Office robot arm DoF survey results

2.3.4 エンドエフェクタの形状

既存のオフィスロボットで多く採用されているエンドエフェクタは、TIAGo のような平行グリッパ（図 2.5 参照）である。TIAGo を開発している PAL Robotics 社が公開している動画 [12] では、布、ジュース缶、スプレー缶、ジュースパック、板状物など多様な形状の物体を把持している様子が確認できる。本研究においても多様な形状の物体把持が求められるため、平行グリッパを採用した。



Fig. 2.5 End effectior of TIAGO

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。まず、選定した QDD モータについて説明し、ロボットアームの設計について述べる。

3.1 オープンプラットフォームを意識した設計

3.2 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。

3.2.1 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

3.2.2 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。

3.2.3 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。

3.2.4 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。

3.2.5 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。

3.2.6 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。

3.3 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。

3.3.1 アームサイズ

図3.1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[13]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3.2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。

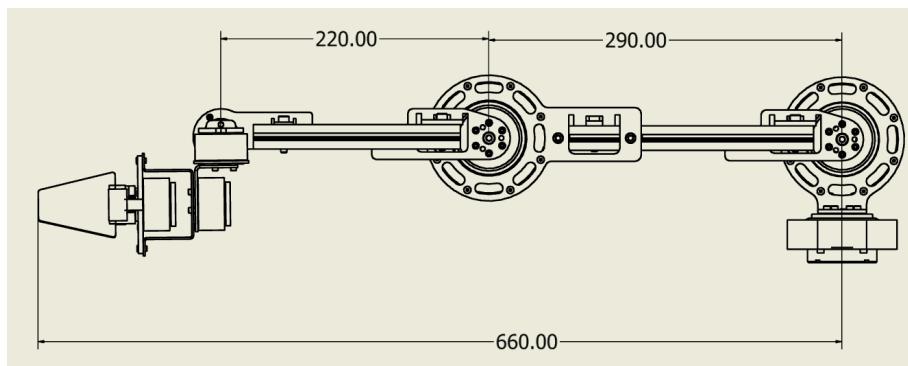


Fig. 3.1 Arm reach and link length

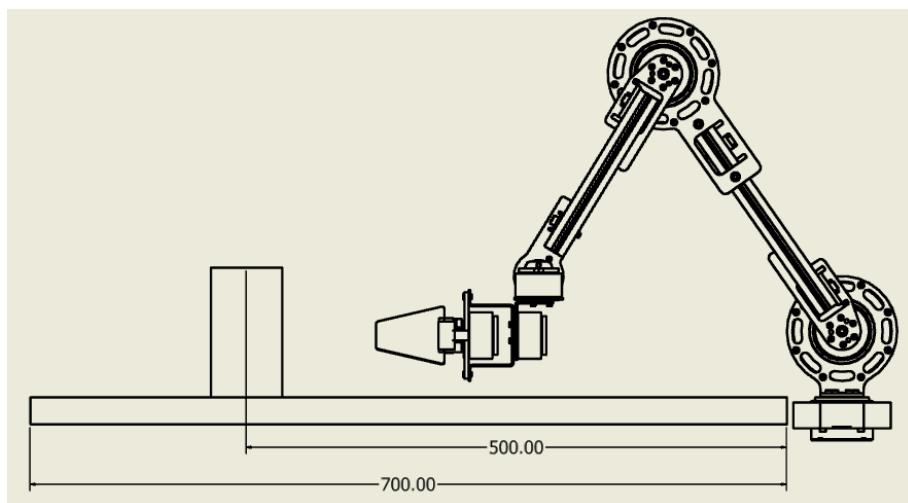


Fig. 3.2 Arm size

3.3.2 可動範囲

図3.3、図3.4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。

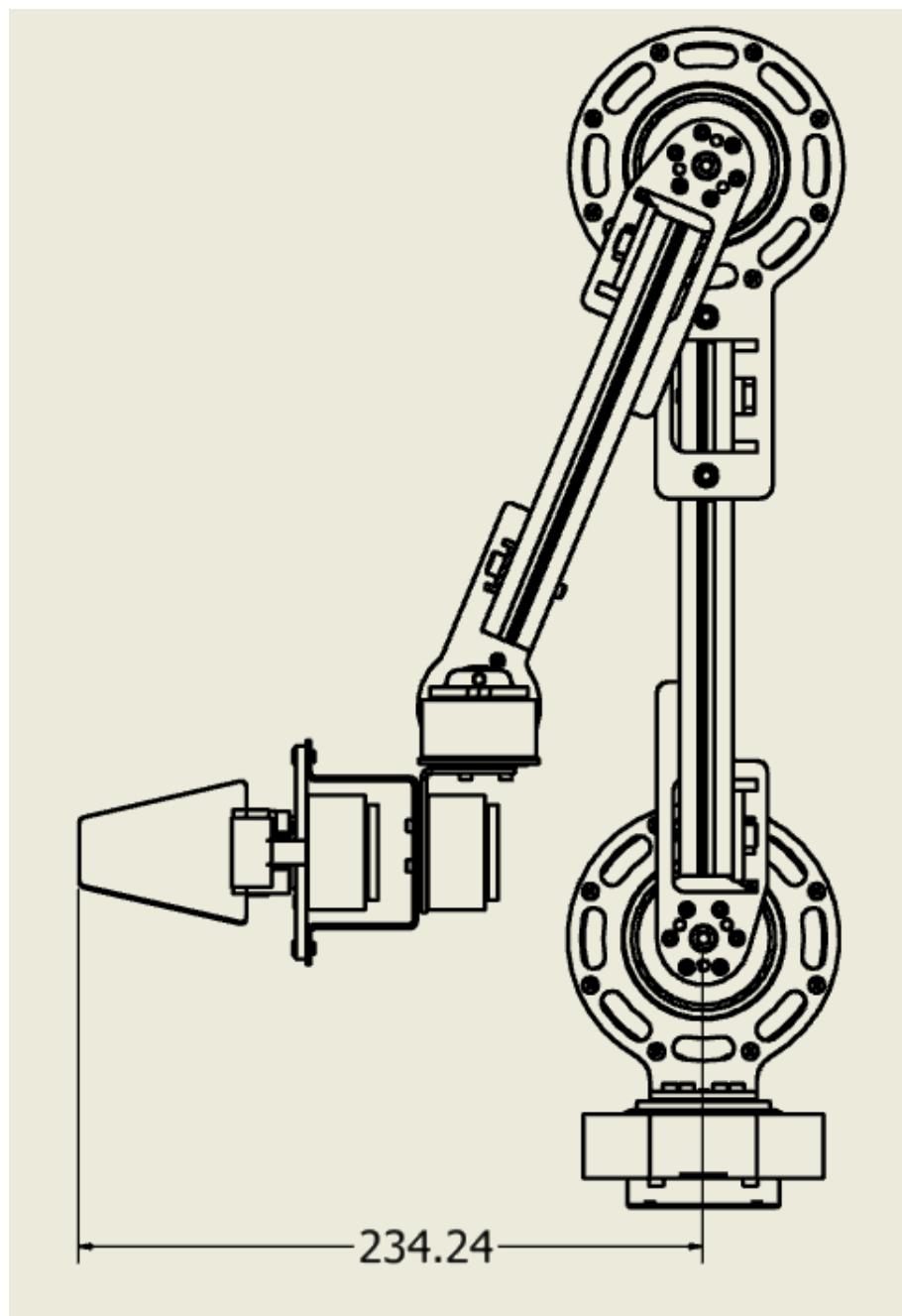


Fig. 3.3 Minimum range of motion

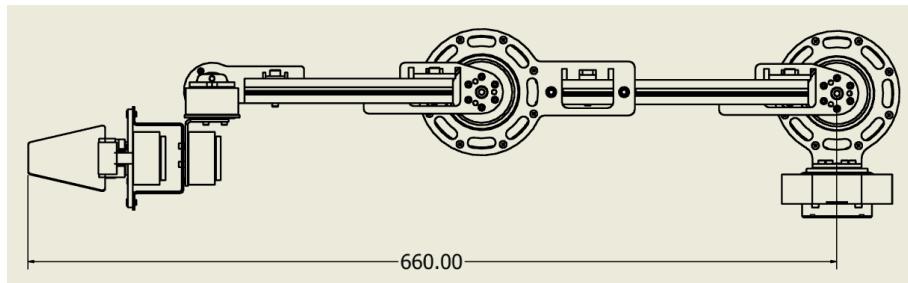


Fig. 3.4 Minimum range of motion

3.3.3 アームの手先の移動

アームの手先の移動の様子を図 3.5, 図 3.6, 図 3.7, 図 3.8 に示す.



Fig. 3.5 Stretched out to the right

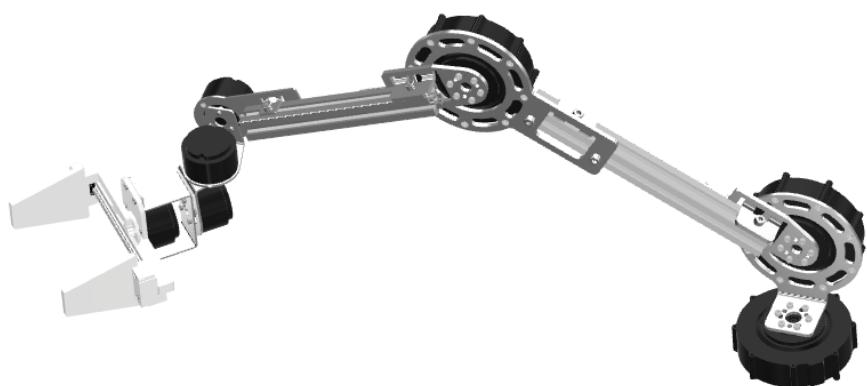


Fig. 3.6 Stretched out to the right

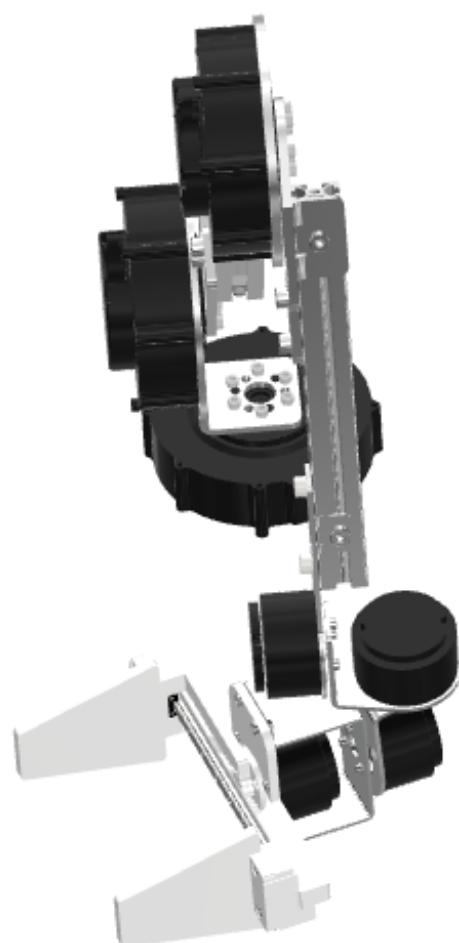


Fig. 3.7 Stretched out to the left



Fig. 3.8 Stretched out to the left

3.3.4 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 3.9 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。

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

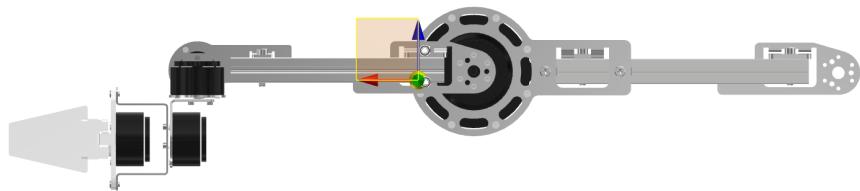


Fig. 3.9 Center of gravity

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 3.3Nm 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。

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

3.4 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3.10)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。

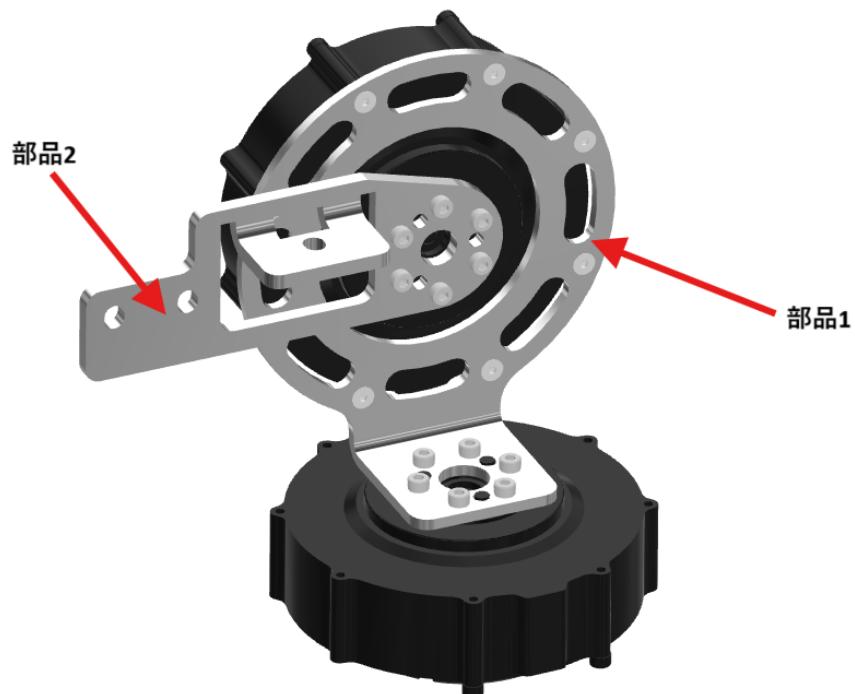


Fig. 3.10 Configuration of robot arm shoulder

3.4.1 部品1の構造解析

部品1は、肩部のヨー軸モータの出力軸と、ピッチ軸モータを繋いでおり、アルミニウム合金(A5052)で加工されている。この部品に最大の負荷がかかるのは、ヨー軸が最大出力の22Nmで動作した時である。部品の重心位置に荷重が加わるとし、その時の部品の構造解析の結果を図3.11に示す。また、この部品の厚み、質量、安全率を表3.2に示す。現状の設計では、安全率が0.39となっており、強度が不足している。

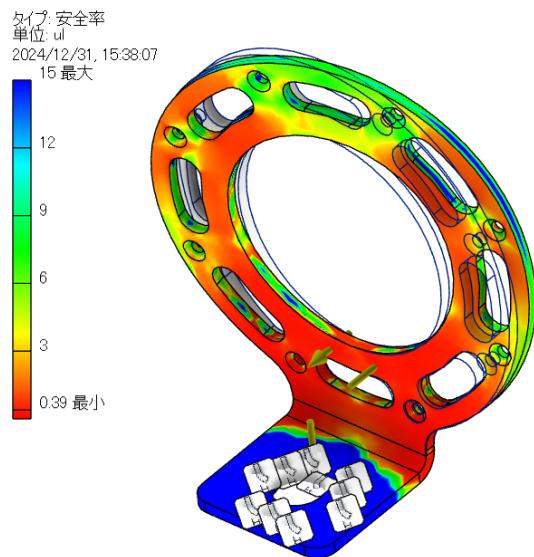


Fig. 3.11 Structural analysis results using Inventor of Part 1

厚み	3 mm
質量	43.6g
安全率	0.39

Table 3.2 Specifications of Part 1

そこで、部品1の強度を向上させるため、形状を変えずに厚みを5mmに変更した場合の構造解析を行った。その結果を3.13に示す。また、同様に表3.4にその時の部品の厚み、質量、安全率を示す。この設計では、安全率が1.01となり、強度が確保されている一方で、質量が71.1gとなり、重量が増加している。

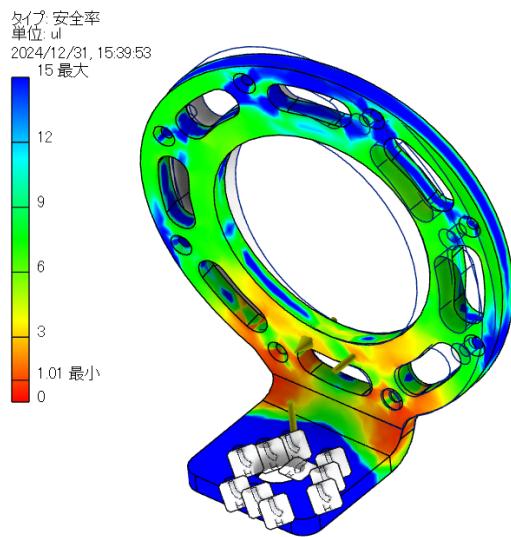


Fig. 3.12 Structural analysis results using Inventor of part 1 after changing the thickness

厚み	5 mm
質量	71.1g
安全率	1.01

Table 3.3 Specs of part 1 after changing the thickness

厚みを3mmのままで強度を向上させるため、部品1の形状を変更した場合の構造解析を行った。その結果を図3.13に示す。また、同様に表3.4にその時の部品の厚み、質量、安全率を示す。この設計では、安全率が1.1となり、強度が確保されている。また、厚みを変更した時よりも質量が軽くなり、61.8gとなっている。

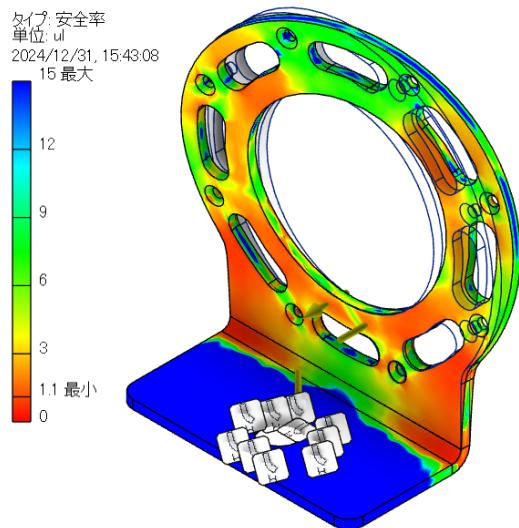


Fig. 3.13 Structural analysis results using Inventor of part 1 after changing shape

厚み	3 mm
質量	61.8g
安全率	1.1

Table 3.4 Specs of part 1 after changing shape

3.4.2 部品2の構造解析

3.5 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 3.14 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。

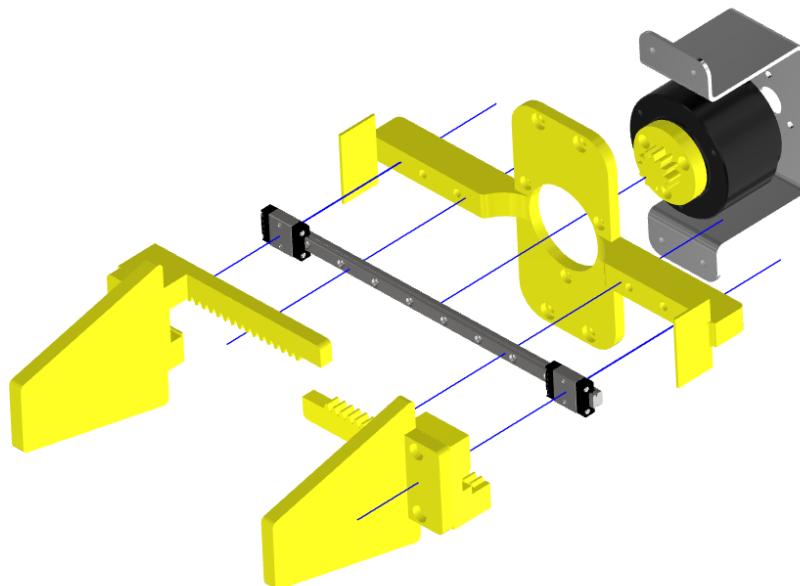


Fig. 3.14 Exploded view of parallel gripper

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。

4.1 部品の製作

4.2 組み立て

4.3 安全対策

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] 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.
- [4] Quasi-direct drive for low-cost compliant robotic manipulation. <https://berkeleyopenarms.github.io/>. (Accessed on 1/15/2025).
- [5] 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.
- [6] 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).
- [7] Seqsense — 自律移動型警備ロボット sq-2. <https://www.seqsense.com/product>. (Accessed on 1/15/2025).
- [8] Keenon — kleenbot c30. https://www.keenon.com/jp/product/C30/index.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAm-67BhB1EiwAEVftNqiRWgt7AQPRk51y_rXQkRHg-02tPQ0uCmrhPOVeNcSkQ04SX8-ocRoC3SEQAvD_BwE. (Accessed on 1/15/2025).
- [9] Elmo — bellabot. <https://www.elmo.co.jp/product/robot/bellabot/>. (Accessed

- on 1/15/2025).
- [10] 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.
 - [11] 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.
 - [12] Tiago — manipulation compilation. <https://www.youtube.com/watch?v=Bmk4EASGTJI>. (Accessed on 1/15/2025).
 - [13] 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).
 - [14] 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).
 - [15] Meviy(misumi). <https://meviy.misumi-ec.com/worldwide/>. (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。