

卒業研究

ダイレクトドライブモータのトルク制御 によるワイヤの張力制御

東京都市大学

工学部

機械システム工学科

ロボティックライフサポート研究室

1112007 石山 裕隆

指導教官 金宮 好和 印

佐藤 大佑 印

2015年2月27日

目次

第1章 序論	5
1.1 研究背景.....	5
1.2 先行研究.....	6
1.3 本研究室における研究	7
1.4 研究目的.....	7
1.5 本論文の構成.....	8
第2章 ロボットの歴史と将来	9
2.1 1950年代以前のロボットの歴史	9
2.2 1950年代から現在のロボットの歴史	9
2.2.1 ロボットの研究	9
2.2.2 産業用ロボット	10
2.2.3 極限作業用ロボット	10
2.2.4 エンターテインメントロボット	11
2.2.5 サービスロボット	11
2.3 ロボットの将来の予測と計画	12
第3章 現在の実験環境	22
3.1 DD モータ	23
3.2 メガトルクモータシステム	24
3.3 DD モータの運転方法.....	26
3.4 DD モータが被験者に加える外力.....	27
第4章 ディザの適用による静止摩擦力の影響の検証	29
4.1 ディザ.....	29
4.2 本研究室におけるディザの与え方	29
4.3 モータの PD 制御	30
4.4 実験.....	31
4.4.1 実験条件.....	31
4.4.2 実験結果.....	32

4.5	まとめ.....	33
第5章	ワイヤの張力制御	35
5.1	PI 制御・PID 制御.....	35
5.2	PI 制御・PID 制御確認実験	36
5.2.1	実験条件.....	36
5.2.2	実験結果.....	36
5.3	被験者の前方移動への対応	37
5.4	PI 制御・PID 制御の目標角度の設定	37
5.5	ワイヤの張力制御確認実験	38
5.5.1	実験条件.....	38
5.5.2	実験結果.....	39
5.6	まとめ.....	41
第6章	結論	43
6.1	本研究の成果.....	43
6.2	今後の課題.....	43
	謝辞	45
	参考文献	47

目 次

1.1	Pepper (© Softbank)	7
1.2	ASIMO (© HONDA)	7
2.1	The History of Robot till 1950s	14
2.2	The Reserch of Robot	15
2.3	Industrial Robot	16
2.4	Hazardous Environments Robot No.1 -Nuclar Robot • Sea Robot-	17
2.5	Hazardous Environments Robot No.2 -Space Robot • Rescue Robot-	18
2.6	Entertainment Robot	19
2.7	Service Robot	20
2.8	Future market expectation	21
2.9	The work schedule of a Japanese revival strategy	21
3.1	Architectural scheme	24
3.2	System configuration of the mega torque motor system	25
3.3	Feature of the motor M-SSB014: (a) speed control mode and (b) torque control mode	26
3.4	The direct drive motor used the experiment	27
3.5	The experimental overview	27
3.6	State viewed from above the direct drive motor	28
4.1	The experimental overview	31
4.2	Experimental result: (a) angle, (b) angular velocity	32
4.3	Experimental result: (a) motor torque, (b) wire tension	12
5.1	Experimental result: (a) PI control and (b) PID control	36
5.2	The experimental overview	38
5.3	Experimental result of forward - back: (a) PI control and (b) PID control ..	39
5.4	Experimental result of back - forward: (a) PI control and (b) PID control ..	39
5.5	Experimental result of position of the center of gravity	40

表 目 次

2.1	Future market expectation of a robot in each field	21
3.1	Spec of the direct drive motor	24
3.2	Spec of PC	24
3.3	Spec of the D/A board	25
3.4	Spec of the pulse counter board	26
4.1	Approximate equation of torque	33

第 1 章 序論

1.1 研究背景

日本は世界中で稼働している産業用ロボットのうち 25%が稼働している国であり、「ロボット大国」とも呼ばれている。ロボットは、人間に出来ない作業を人間に代わって遂行できるというメリットがあり、世界的にも注目されている分野であると言える。1950 年代以降、ロボットの実用化が急速に進行し、産業用ロボットをはじめ、様々な用途を持つロボットが誕生した。近年では、エンターテインメントの場で活躍するロボットや清掃などのサービスを目的に活躍するロボットなど、人間の住環境に近い環境で活躍するロボットが増加している。このため、一般の人々でもロボットに触れる機会が増加することが見込まれることから、ロボットの将来について情報を得ることは有意性がある。また、ロボットの将来についてより詳細に知るためにはロボットの発展の過程を知ること重要であると考えられる。

現在、企業や研究所、大学などで研究が行われているロボットのなかでもヒューマノイドロボットは映画やドラマにも登場し、また我々人間と同様の形状をしていることから、人間が抱く親近感を高めることができる。さらに人間の住環境にある物を利用することが可能であり、人間の作業支援や代行、医療・福祉関係での利用などが期待されている。現在、人間の住環境での実用例は少なく、ソフトバンクモバイルの Pepper ([Fig. 1.1](#)) のようなエンターテインメント分野での活躍が目立つが、性能の向上がさらに続けば人間の代わりとして活躍することが期待できる。このため、本田技研工業の ASIMO ([Fig. 1.2](#)) などに代表されるヒューマノイドロボットの研究が企業や研究所、大学などで実施されている。ヒューマノイドロボットが人間の住環境に進出するために考慮すべき点は安全性である。安全性を高める方法として、転倒の防止が挙げられる。ロボットが転倒すると、人間への危害や実機の破損などの問題が発生するため、これを防ぐことでこれらの問題を解決できる。そのため、人間社会で利用するためには可能な限り転倒しないヒューマノイドロボットが求められる。ヒューマノイドロボットの我々人間と同様の形状をしていることから、人間のバランス制御の方法をヒューマノイドロボットに取り入れることで可能な限り転倒しないヒューマノイドロボットが実現できると考えられる。

1.2 先行研究



Fig. 1.1: Pepper (© Softbank).



Fig. 1.2: ASIMO (© HONDA).

1.2 先行研究

本研究室同様，立位姿勢の人間に対して外乱を加えた際のモーションパターン解析を行う研究は，国内のみならず，世界中の研究機関においても行われている．外乱の発生方法は各研究機関において異なる手法を用いている．

デンマークのオールボー大学の **Center for Sensory-Motor Interaction** では，立位姿勢の人間に対し，多数の方向から与えられた外乱を与えた際の足首や腰の関節力を解析することで人間の姿勢解析を行った．下部に2台のサーボモータが取り付けられたリンクと取り付けられていないリンクがそれぞれ床面に垂直に立てられ，上部には姿勢制御システムが取り付けられた実験装置を用いている．外乱は油圧サーボモータを用いて，多数の方向に与えることができるようになっている[1]．

イギリスのケンブリッジ大学の研究グループでは，立位姿勢の被験者に対し，腰部に外乱を与えた際の人間のバランスモーションパターンの解析を行った．外乱は2台の電動式サーボモータによって被験者の腰部に不安定な力を与えている[2]．

金城学院大学の鈴木らは立位姿勢中に体軸を中心に外乱を与えた際に，人間が立位姿勢を維持するための応答特性の研究を行った．外乱は天井にモータを設置し，回転する床に乗せられた被験者にその回転力を伝達させるといった手法で与えている[3]．

これらのようにモータを使用して外乱を与えている例が多く存在し、用途によって異なるモータを用いている。

1.3 本研究室における研究

本研究室では、モーションキャプチャシステムを用いて人間に外力を加えた際の人間の姿勢維持動作の解析を行っている。ヒューマノイドロボットの姿勢維持動作を生成する際に必要な人間の動作は、突発的な外力に対する人間の姿勢維持動作である。突発的な外力の発生方法として、ダイレクトドライブモータ（DD モータ）にワイヤを取り付けた実験装置を用いることで一定の外力を与えることが可能となる。しかしながら、現在の実験環境では以下のような問題が発生している。

- 出力トルクの再現性

本研究室の DD モータは電圧に比例したトルクが出力可能なトルク制御モード運転が可能となっている。しかし、一定の電圧を複数回入力した際に同じ大きさのトルクが出力されない、動作する電圧を入力しても動作しない、理論上出力されるトルクより小さなトルクが出力されるなどの問題がある。

- ワイヤの緩みによる張力変化

突発的な外力を与える際、外力は常に一定である必要があることから、ワイヤは常に張った状態であることが望ましい。しかし、人間は常に動揺しているため、被験者の細かな動きでワイヤが緩み、与えられる外力の大きさが実験ごとに異なる。これに対し、現在では突発的な外力を与える前にモータに対してワイヤを張った状態に保つような制御環境は構築されていない。

前者の問題に対し、我々の研究室では DD モータの静止摩擦力が大きいことが原因であると考えており、これを低減する必要がある。後者の問題に対し、突発的な外力を与える前にワイヤを緩まない状態に保つことができるような新しい制御環境を構築する必要がある。

1.4 研究目的

本研究は、一般の人々でもロボットの歴史や将来についての情報を容易に得ること目的に、ロボットの歴史や将来についての資料を作成した。また、DD モータを用いた実験環境の改善を目的に、[1.3 項](#)で述べた問題点を解決するための DD モータに対する新しい制御システムを構築した。

1.5 本論文の構成

本論文は以下の章から構成される。

第1章「序論」では、本研究の背景、目的などについて述べた。

第2章「ロボットの歴史と将来」では、一般の人々でもロボットの歴史や将来についての情報を容易得ることを目的に、ロボットの歴史や将来についての資料を作成し、ロボットの種類や用途に分けてまとめた。

第3章「現在の実験環境」では、DD モータの仕様と DD モータを使用した現在の実験環境についてまとめた。

第4章「ディザの適用による静止摩擦力の検証」では、出力トルクの再現性という問題を解決するため、静止摩擦力を低減する手法であるディザの適用について提案し、現在の DD モータにおける静止摩擦力の検証を行った。

第5章「ワイヤの張力制御」では、ワイヤの緩みによる張力変化という問題を解決するため、モータに対する新しい制御の提案を行い、実装した結果を示す。

第6章「結論」では、以上の議論を要約する。

第 2 章 ロボットの歴史と将来

本項では、ロボットの歴史と将来についての調査結果について述べる。ロボットは 1950 年代を境に急速に実用化が進み、今や主に世界の産業を支えるためになくてはならないものになっている。よって、本項では、1950 年代以前のロボットの歴史、1950 年代から現在のロボットの歴史、ロボットの将来の予測と計画についての 3 項にわけてその調査結果をまとめる。また、1950 年代から現在のロボットの歴史の項については、ロボットの研究、産業用ロボット、極限作業用ロボット、エンタテインメントロボット、サービスロボットの 5 項にわけてその調査結果をまとめる。

2.1 1950 年代以前のロボットの歴史

ロボットの概念は紀元前 8 世紀頃に誕生し、紀元前 2 世紀頃になると火や水を用いた技術を応用した自動的に動く機械なども誕生する。「指南車」のように中国で開発されたものも存在するが、それらの大半はヨーロッパを中心とした国々が多かった。10 世紀頃になるとヨーロッパでは機械技術の進歩によって機械式時計が誕生し、時計に組み込まれた人形が行進したり、鐘を打ったりするからくり仕掛けも 14 世紀頃に普及した。さらにルネッサンス時代になるとぜんまいばねの使用によって、機械構造の小型化が可能となり、数々の自動人形（オートマタ）が作られた。江戸時代の日本ではからくり人形が製作され、一般の人々を対象にしたからくり芝居が好評を博した。やがて、18 世紀頃には産業革命が始まり機械の発展が目覚ましく進んだ一方、19 世紀頃にはコンピュータ技術やプログラム技術の原点が誕生した。そして、20 世紀にはロボット産業が急速な発展を遂げるとともに新たなイマジネーションも誕生した。本項における調査結果をまとめたポスターを [Fig. 2.1](#) に示す。

2.2 1950 年代から現在のロボットの歴史

2.2.1 ロボットの研究

ロボットの研究は 1950 年代頃から研究所や大学で本格的に行われるよ

うになった。アメリカでは知能ロボット、宇宙空間で使用されるロボットなどの研究が行われた。日本では企業が産業用ロボットの開発・販売を行っていた時代、世界初のヒューマノイドロボット開発に成功している。企業でもヒューマノイドロボットの研究が行われており、歩行などの単純な作業に加え、楽器の演奏、ダンス等の娯楽的な動作も可能にしている。近年では、木登りや兵隊の運搬など様々な作業を行えるロボットの研究開発が世界各国で行われている。本項における調査結果をまとめたポスターを [Fig. 2.2](#) に示す。

2.2.2 産業用ロボット

産業用ロボットは大量生産や危険や悪い環境での作業からの解放などを目的に導入された自動制御ロボットである。1930年代から実用化に向けて設計・開発等が行われ、1960年代に世界初の産業用ロボットが実用化された。当初の産業用ロボットは油圧駆動式を用いており、保守でのデメリットが大きかったことから、電動駆動式多関節型の産業用ロボットが開発され、溶接や組立作業に使用されるロボットとして現在でも普及している。近年では、人と共存できる環境で作業を行うロボットや中小企業向けに導入コストを抑えたロボット等、新しい産業用ロボットの導入も進んでいる。本項における調査結果をまとめたポスターを [Fig. 2.3](#) に示す。

2.2.3 極限作業用ロボット

極限作業用ロボットは人間が存在できない極限環境下で稼働する遠隔または自律性を持つロボットであり、原子力ロボット、海洋ロボット、宇宙ロボット、レスキューロボットが該当する。

原子力ロボットは原子力施設内で作業を行うロボットであり、耐放射線性、耐高温性、耐腐食ガス性等が求められる。その開発は産業用ロボットが実用化される前の1940年代から行われており、遠隔操作ロボットやバーチャルリアリティーの原点に位置づけられている。1970年代の原発や核燃料サイクル施設の運転開始により、様々な原子力ロボットが開発された。また、原発の重大事故においてもロボットが活躍している。

海洋ロボットは海洋環境等で活躍するロボットであり、軍事産業、石油資源開発産業などへの適用や重大事故などでの海洋調査にも用いられ、近年では地球科学、海底ケーブル、環境保全などへの適用がなされている。海面の支援船とケーブルで繋がっている有索型が主流であり、繋がっていない無索型は21世紀の海洋ロボットとして注目されている。

宇宙ロボットは宇宙空間や国際宇宙ステーション（ISS）の内外，月や惑星の表面等において，宇宙飛行士に代わって様々な作業をするロボットである．用途によってさらに分類され，大型衛星の操作や ISS の組立・保守を行う軌道上ロボット，月・惑星・小惑星等の探査を行う月惑星探査ロボット，ISS での実験や点検保守等を行う宇宙飛行士支援・代替ロボットに分類される．

レスキューロボットは災害予防や災害復旧時に働くロボットであり，災害発生時に救助・捜索・探索などの活動をする救助・捜索・探索用ロボット，火災発生時に活動する火災用ロボットに分類される．

原子力ロボットおよび海洋ロボットにおける調査結果をまとめたポスターを [Fig. 2.4](#)，宇宙ロボットおよびレスキューロボットにおける調査結果をまとめたポスターを [Fig. 2.5](#) に示す．

2.2.4 エンターテインメントロボット

エンターテインメントロボットは娯楽を目的としたロボットである．[2.1 項](#)で述べた通り，ルネッサンス時代には多くの自動人形（オートマタ），20 世紀前半には個人で趣味的なロボットも作られていた．これらのロボットが大量生産で一般の人々向けに販売されたのは 1970 年代である．1990 年代になると少子高齢化のニーズにより，人間と共存するロボットが注目され，一人暮らしの高齢者のために個人用のエンターテインメント機器としてロボット技術の適用が検討され，続々とエンターテインメントロボットの一般発売が行われた．近年では，人の感情を察知する感情認識機能を備えたロボット等も発売されている．本項における調査結果をまとめたポスターを [Fig. 2.6](#) に示す．

2.2.5 サービスロボット

サービスロボットは生活環境下で人間に密着し，サービス業で使われるロボットであり，清掃ロボット，医療用ロボット，案内接客ロボット，警備ロボットが該当する．これらのロボットは近年実用化が進行しているロボットである．

清掃ロボットは掃除，清掃作業を実施するロボットであり，省力化・省人化や 3K（きつい・汚い・危険）作業からの解放などの利点が存在する．日本国内ではビルの床面清掃や窓拭き等の用途で用いられるロボットの開発が実施された一方，海外では家庭用清掃ロボットの他，プールサイド清掃ロボットや芝刈りロボットなど，多種多様な用途で用いられる清掃

ロボットも開発されている。

医療用ロボットは医療関係で使用されるロボットであり、現在では手術ロボット、介護ロボットなどが実用化されている。手術ロボットは手術を支援・補助するロボットで医師が遠隔操作を行うマスターコンソールとマスターコンソールから送られる操作指令に従って実際に患部で手技を行うスレーブロボットから構成されるマスタースレーブ方式を採用した手術ロボットが主流となっている。介護ロボットは介護作業を補助するロボットで介助者の負担軽減を目的に段差の解消や入浴作業、汚物処理などの用途で使用されるロボットが開発されている。

案内接客ロボットはオフィスや公共施設などの様々な場所で接客案内を行うことを目的に開発されたロボットであり、訪問者に対する挨拶や会話を行う能力、多言語会話能力、会話仲介能力を持ち合わせたロボットである。現在は博物館の案内業務などに導入されている。

警備ロボットは一般市民の安全を確保するために屋外での高い移動能力や火災などの検知能力、遠隔地監視能力等を有するロボットである。現在は常駐警備員と連携して働くロボットが実用化されている。

本項における調査結果をまとめたポスターを [Fig. 2.7](#) に示す。

2.3 ロボットの将来の予測と計画

本項では、ロボットの将来市場予測と日本におけるロボットの将来計画についてまとめる。

ロボットの将来市場予測

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が2010年に「ロボットの将来市場予測」を公表した。[Table 2.1](#)に各分野におけるロボットの将来市場予測、[Fig. 2.8](#)にそのグラフを示す。製造分野は製造業を中心とした分野、ロボテク分野は『センサ』『知能・制御系』『駆動系』の三つの要素技術がある分野、農林水産分野は農林水産業を中心とした分野、サービス分野はサービスロボット分野である。

[Table 2.1](#) 及び [Fig. 2.8](#) より、全ての分野において、市場が拡大していることがわかる。この理由として、製造分野のように現在市場が形成されている分野の成長に加え、サービス分野のような新たな分野のロボットの普及が考えられる。また、サービス分野の予測数値に関しては現在市場形成されている製造分野の予測数値のおよそ2倍となっており、今後多くのサービスロボットが実用化されると見込みと考えることができる。サービスロボット的一种である介護ロボットは2015年から政府が介護ロボットの利用料の9割を補助することや介護ロボット開発事業に対して補助金を交

2.3. ロボットの将来の予測と計画

付することが決定している。このことから、今後様々な介護ロボットの開発が進むことや介護ロボットの利用率が上昇することが予測されている。

「日本再興戦略」の改訂

日本は2014年6月16日に「第17回 産業競争力会議」を開催し、「日本再興戦略」の改訂について（素案）を発表し、日本からロボットによる新たな産業革命を起こすと宣言した。日本企業にはグローバルなコスト競争に晒されている製造業やサービス分野の競争力強化、労働者の高齢化が進む中小製造事業者や医療・介護サービス現場、農業・建設分野等の人材不足分野における働き手の確保、物流の効率化などの問題があり、ロボット技術の活用により生産性や企業の収益力の向上、賃金の上昇を図るとしている。政府が掲げる重点分野としては「介護」「インフラ整備」「農業」「モノづくり」「サービス」となっている。以下に成長戦略改訂版における目標とアクションプランを示す。また、[Fig. 2.9](#)に「日本再興戦略」の改訂素案における中短期工程表を示す。

① 目標

・ロボット国内生産市場開拓

2020年の市場規模を製造分野で2倍（6000億円→1.2兆円）

サービスなどの非製造分野で20倍（600億円→1.2兆円）

・製造業労働生産性向上

・製造業の労働生産性（製造業総生産額÷総労働時間）の年間成長率を足下の1%から2020年に2%以上へ向上

② アクションプラン

・ロボット革命実現会議（～2014年12月）

ユーザー、関連技術者の叡智を結集

本格普及に向けた「5ヵ年計画」を策定

・5ヵ年計画の実施（2015～2019年）

要素技術開発，日本主導の国際安全規格改訂，規制緩和，
新分野への本格普及，専門家育成

・ロボットオリンピック＜仮称＞（2020年）

様々な分野のロボットやユニバーサルデザインなどの
日本の最先端技術を世界発信

これらの計画に加え、安全・便利で経済的な次世代インフラの構築の項目において、次世代社会インフラ用ロボットの研究開発・導入を新たに講ずべき具体的施策として挙げている。次世代社会インフラロボットについては今年度より公募を行った上で直轄事業の現場における検証・評価の実施や開発・改良を促進し、2016年度以降に本格導入を図るとしている。

1950年までのロボットの歴史

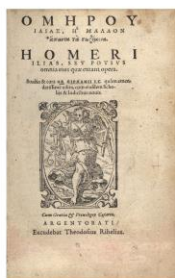
The History of Robot till 1950s

石山 裕隆

Hirotaka Ishiyama



ロボットの概念の誕生 紀元前8世紀頃



■ イーリアス (Ilud)

ギリシャの詩人 ホメロス (Homer) の叙事詩

鍛冶・技術の神ヘパイストス (Hephaistos) が作った人間の仕事を手伝う自動人形が登場

つらい仕事を人間に代わって行う
道具や機械を作り出したいという
人間の期待が込められている

人間の仕事の代行というロボットの概念誕生



■ タロス

鍛冶・技術の神ヘパイストス (Hephaistos) が作った青銅製の自動人間

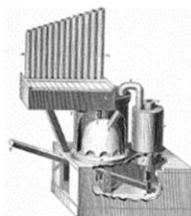
他国からの攻撃から島を守っていた

『アルゴ探検隊の大冒険』1963年映画化)

←ギリシャ・クレタ島の銀貨に彫られたタロス

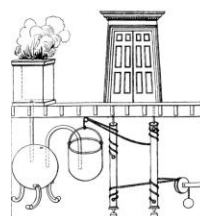
この時代はイマジネーションとしてのロボットが多く誕生

自動で動く機械の発明 紀元前2世紀～紀元後2世紀頃



■ 水式オルガン (Hydraulis)

水力で空気を送り込み、手で弁を開閉させることによって音出す。



■ 神殿の扉 (オートドア)

サイホンの原理を利用して神殿の扉を自動化。



■ アンティキティラ島の機械

ギリシャで作られた天文計算機の一部。



■ 指南車

差動機構を用い人形が常に南を指すように設計。

オートマタの登場 16～18世紀頃

オートマタ・・・時計などに組み込まれていたからくり仕掛けが独立してできた自動で動く人形。ロボットの原点。



■ ヴォーカンソンのアヒル

えさをついばみ、排泄をし、水遊びができるように見えるメカニズムが組み込まれていた。

■ ジャケドロー親子の自動人形

左:絵描き 中央:オルガン弾き 右:文字書き 多数のカムが組み込まれたオートマタ史上最大の傑作。

コンピュータ・プログラム技術の原点 19世紀



←ジャカード織機

パンチカードが用いられ、カードを変えると異なる模様を編むことが可能。



↑タビュレーティングマシン

ジャカード織機を応用して作成され、アメリカの国勢調査にも活用。

←解析機関

演算がプログラマブルとなった原始的なコンピュータ。

新たなイマジネーション 20世紀



■ R・U・R (ロッサム・ユニバーサル・ロボット)

1920年、チェコの作家カレル・チャペック (Karel Čapek) が発表した戯曲で人間に代わり労働するロボットが登場。

言葉としてのロボットの誕生

語源はチェコ語で「労働」を表す「robota」に由来し、

「人間の労働の代替」を表している。



■ I, Robot

1950年、アメリカの作家アイザック・アシモフ (Isaac Asimov) が刊行したSF小説集。

ロボット工学三原則の提唱

Fig. 2.1: The History of Robot till 1950s

[4][5][6][7][8][9][10][11][12][13][14][15].

ロボットの研究

The Reserch of Robot

石山 裕隆

Hiroataka Ishiyama



ロボットの研究の始まり 1960年代

1960年代、産業用ロボットの実用化と並行して研究機関などでロボットの研究が実施された。



■ Stanford Cart

1960年代からアメリカのジェームズ・L・アダマス (James L. Adams) が月面の探査車を制御するための実験車として作成したアンテナセンサ付き四輪ロボット。白線に沿った走行が可能。



■ Shakey

1966年からアメリカのスタンフォード研究所 (SRI) の人工知能研究所において研究開発が開始。搭載されたカメラで周囲の環境認識、単語をパターン認識で処理する音声認識が可能。

コンピュータ制御で動作、知能も備えた最初のロボット

日本でのロボット研究の始まり 1960年代～1980年代



■ WAM-4・WL-5

1971年、早稲田大学で開発。WAM4は人工の手、WL-5は人工の足のロボットである。ヒューマノイドロボット開発の原点。



■ WABOT-1

1973年、早稲田大学で開発された世界初のヒューマノイドロボット。多数のセンサとミニコンピュータの搭載により、人間と同じような感覚器と脳機能が融合した最初のロボットであった。

■ つくば科学万博(1985)に出展されたロボット



■ TITAN-IV

東京工業大学で開発された四脚の移動ロボット。接地センサで床の高さを検出することで安定した階段の昇降が可能。



■ WASUBOT

早稲田大学と住友電工が共同開発した鍵盤楽器演奏ロボット。楽譜をカメラで認識し、足と指の動きを指定することでオルガンの演奏が可能。

近年のロボットの研究 1990年代～

■ Honda

1980年代からヒューマノイドロボットの研究を開始し、1996年にP2が初めて公表された。2000年に誕生したASIMOは認識技術によるコミュニケーション能力を持ち、オフィス環境等での実用化に向け、研究が行われている。



■ 産業技術総合研究所

1998年以降に国家プロジェクト「人間協調・共存型ロボットシステム (HRP)」で民間企業とも連携して開発された2足歩行ヒューマノイドロボット。



■ 愛・地球博(2005)に出展されたロボット

「次世代ロボット実用化プロジェクト」で開発されたロボット群が多数展示。左: パートナーロボット (楽器演奏) 中央: Woody-1 (木登り) 右: PBDR (社交ダンス)



■ 海外の研究ロボット



左: BigDog 中央: Cheetah 右: Justin

BigDogとCheetahはBoston Dynamicsで開発された歩行ロボット。BigDogは米軍での実用化が期待、Cheetahは襲歩での走行が可能。Justinはドイツ宇宙センターで開発された四輪移動型ロボット。周囲の環境を判断し、人間の介入なしに行動することが可能。

Fig. 2.2: The Reserch of Robot[4][16][17][18][19][20][21][22][23][24][25][26].

産業用ロボット

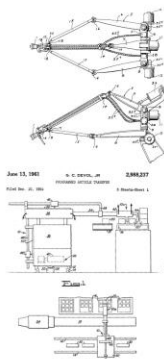
Industrial Robot

石山 裕隆

Hirotaka Ishiyama



産業用ロボットの原点 1930年代～1950年代



■ Position-controlling apparatus

Willard L.V. Pollard が1938年に設計し、1942年に特許を取得した塗装用マニピュレータ。世界で初めて設計された産業用ロボットと言われている。

■ Programmed article transfer

George Charles Devol, Jr. が1954年に特許申請した物体移動用機械。プログラム可能でティーチングプレイバック方式を採用するなど、現代のロボットにも通じるロボット制御法を構築した。

産業用ロボットの実用化 1960年代



■ UNIMATE

世界初の産業用ロボットとして1961年に誕生したロボット。UNIMATEはUNIMATION社から発売された極座標型。VersatranはAMF社から発売された円筒座標型に分類される。共に自動車メーカーを中心に導入が進んだ。



■ Versatran



■ オートハンド

日本初の産業用ロボットとして1968年にアイダエンジニアリングから発売されたロボット。危険かつ単純な作業を自動化・機械化した。

産業用ロボットの標準化 1970年代～1990年代

油圧式極座標型の産業用ロボットでは、機能の不十分さ、保守の面倒さ、信頼性不足が問題に

電動式多関節型の産業用ロボットが誕生



■ IRB-6

世界初の電動式多関節型産業用ロボットとして1973年にスウェーデンのASEA社が開発。



■ MOTOMAN-L10

1977年に安川電機が「IRB-6」をベースに開発した日本初のアーク溶接用電動式多関節型ロボット。



■ SCARA

1978年から研究が進められ、1981年に市販された部品組立用ロボット。



↑1980年代頃から使用されている電動式多関節型ロボット群。現在でも溶接作業や組立作業などに適用されている。

新たな産業用ロボット 2000年代



■ Nextage

2011年に川田工業から発売された産業用ロボット。人間を単純な繰り返し作業の解放することを目的に開発。



■ Baxter

2012年にRethink Roboticsから発売された産業用ロボット。動作を教示可能なほか、動作状態を正面パネルで確認可能。

産業用ロボット稼働台数 2012年代

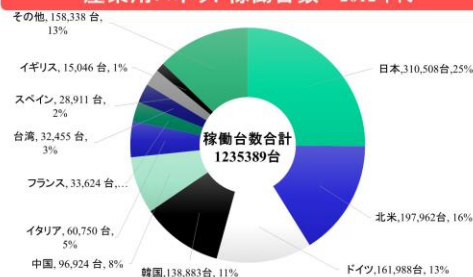


Fig. 2.3: Industrial Robot[4][27][28][29][30][31][32][33][34][35][36].

極限作業用ロボット①-原子力ロボット・海洋ロボット-

Hazardous Environments Robot No.1 -Nuclar Robot・Sea Robot-

石山 裕隆

Hiroataka Ishiyama



原子力ロボット

原子力ロボット・・・原子力施設内で作業を行うロボット。
耐放射線性、耐高温性、耐腐食ガス性等が求められる。



■ マスタースレーブマニピュレータ

1948年にアメリカアルゴンヌ国立研究所で
開発されたマニピュレータ。

マスターアームとスレーブアームから構成され、
それぞれが同じように動くようになっている

■ 制御棒駆動機構交換ロボット

■ 蒸気発生器点検ロボットMR-3

原発や核燃料サイクル施設で
使用される原子力ロボット群。

作業員の被曝低減、作業時間短縮、
ヒューマンエラーの排除などを実現



■ RRV

■ Pioneer

スリーマイル島原発事故や
チェルノブイリ原発事故の現場において
導入されたロボット群。

清掃作業や瓦礫撤去作業等を使用。



■ 日本で開発された原子力ロボット



日本国内では1990年代、
日立や東芝などの大手メーカーが
原子力ロボット開発を実施。
実証実験において、
実用化の段階に至っていないと
判断され、国内メーカーによる
原子力ロボットは実現せず。

■ 福島第一原発事故で現場導入されたロボット



上左:Packbot
上右:Talon
下:Quince

2011年に発生した

福島原発事故では国内メーカー
による原子力ロボットが実現
していないため、海外製を多く導入。
千葉工大で研究開発されたロボットも
現場導入された。



海洋ロボット

海洋ロボット・・・海洋環境で活躍するロボット。
海洋関連産業や海洋調査、近年では環境保全等にも使用。
現在は海上支援船とケーブルで接続される有索型が主流。
ケーブル接続のない無索型の研究が進行。



■ CURV

1965年に初の有索型無人海洋ロボットの
実用機として開発。海中の落下物回収や
有人潜水艇救助等で有用性が実証。



■ ARGO

海洋調査船に曳かれる曳航ロボットとして
1984年に登場。海洋調査・操作システムが
形成され、沈没船や墜落した航空機等の
確実な捜索が可能に。

■ 日本の海洋探査ロボット



1995年に登場した「かいこう」は潜航深度
10000m級の日本の海洋探査ロボット。
世界最深度であるマリアナ海溝チャレン
ジャー海淵の潜航やバクテリアを採取する
などの成果をあげた。



「ABISMO」は「かいこう」の後継機として
2007年に登場した海底探査ロボット。
マリアナ海溝チャレンジャー海淵での調査で
深海底の堆積物採取や垂直多点採水を
実施するなどの成果を挙げた。



■ Nereus

2009年に登場したアメリカの海洋探査
ロボット。現在、世界最長の海洋探査が
可能なロボットである。



■ LCROV

1984年に民生用小型カメラ等を搭載して
登場した海洋ロボット。
現在でもテレビ番組、漁業分野、災害分野
などへの応用がなされている。



■ うらしま

1984年に民生用小型カメラ等を搭載して
登場した海洋ロボット。
現在でもテレビ番組、漁業分野、災害分野
などへの応用がなされている。

Fig. 2.4: Hazardous Environments Robot No.1 -Nuclar Robot・Sea Robot-
[4][37][38][39][40][41][42][43][44][45][46][47][48][49].

極限作業用ロボット②-宇宙ロボット・レスキューロボット-

Hazardous Environments Robot No.2 -Space Robot・Rescue Robot-

石山 裕隆

Hiroataka Ishiyama



宇宙ロボット

宇宙ロボット・・・宇宙空間で作業を行うロボット。ISSなどの組立保守に用いられる軌道上ロボット、月・惑星・小惑星等の探査を行う月惑星探査ロボット、ISSで実験などに用いられる宇宙飛行士支援・代替ロボットに分類される。



■ SRMS

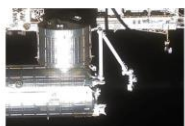
スペースシャトルに搭載されるロボットアーム。

スペースシャトル全機に搭載され、シャトルの熱防護システム検査のためにアームの先端にセンサ付き検査用ブームが取り付けられた。



■ カナダアーム

ISSに搭載されているロボットアーム。宇宙飛行士の船外活動支援やISSの組立・整備を行っている。



■ JEM-RMS

ISS内の日本宇宙実験棟「きぼう」に取り付けられたロボットアーム。実験装置や搭載機器の交換作業、各種実験や保守・保全作業の支援を実施。

■ 月面探査ロボット



上左:ルノホード(ソ連)
上右:LRV(アメリカ)
下:玉兔号(中国)

2011年に発生した



世界各国の月面探査ロボット。現在でも月面にて使用されているものやその設計が原子力ロボットに応用されたものも存在する。

■ 火星探査ロボット



左:Sojourner(アメリカ) 右:Mars Exploration Rover(アメリカ)
月面に続いて開発された火星表面探査ロボット。火星の岩石の化学組成分析や気象観測などで活躍。当初の予定を大幅に超えて稼働中のものも存在する。

レスキューロボット

レスキューロボット・・・災害予防や災害復旧時に働くロボット。救助・捜索・探索などの活動をする救助・捜索・探索用ロボット、火災発生時に活動する火災用ロボットに分類される。

■ 日本のレスキューロボット



◆ 援竜

テムザックが開発したレスキューロボット。瓦礫の撤去作業などに用いられ、機動性向上を図るため改良が行われている。

◆ 東京消防庁が導入しているレスキューロボット



上左:ロボQ 上右:レインボーファイブ
下左:ファイヤーサーチ 上右:デュアルファイタードラゴン
東京消防庁が導入しているレスキューロボット群。要救助者の救助や大規模火災の消火活動、危険区域での探査などの用途で用いられる。近年は機能を分割させるなどの改良が実施されている。

■ 海外のレスキューロボット



左:Packbot 右:RQ-16 T-Hawk
共にアメリカで開発されたレスキューロボット。自律した走行や飛行を可能にしており、戦場での偵察や爆弾処理を行うことが可能。

Fig. 2.5: Hazardous Environments Robot No.2 -Space Robot・Rescue Robot-[4][37][38][39][50][51][52][53][54][55][56][57].

エンターテインメントロボット

Entertainment Robot

石山 裕隆

Hirotaka Ishiyama



初期のエンターテインメントロボット 1900年代前半

1900年代前半, 個人製作による趣味的なロボットが誕生。
現代のエンターテインメントロボットブームの原点。



■ Philidog

20世紀初頭にフランスのM. Piraux ingeniero de Philips
が製作した趣味的なロボット。光の強度によって電流
の大きさを変化させることができる光導電セルが
取り付けられ光の方角への前進などが可能。



■ Elsie

イギリスのWilliam Grey Walterが作成した趣味的なロ
ボットの一種。光を追従することが可能である他,
障害物を回避する機能がある。



■ Squee

ショベルでボールを持ち上げることができ,
初めての自動制御されたロボット。

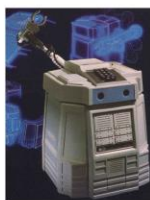
エンターテインメントロボットの普及 1900年代後半

1900年代後半, エンターテインメントロボットが一般市民へもする。



■ BigTrak

1979年に初のプログラム可能な
玩具として発売。最大16個のコマンド
を覚え、それらを順番に実行すること
ができ、子供から大人まで
人気を博す商品となった。



■ Hero

1982年に登場。
人間の手足に相当する機器を持って
いる他、充電式電池による駆動も可
能。



■ Hero

1984年に登場。
丸みをおび、馴染みやすい形状となっ
た。
音声認識機能や触覚センサなども搭
載。



■ ファービー

1998年にTiger Electronics社から発売
された世界初のペットロボット。
現在ではスマートフォンなどの通信
が可能となっている。



■ AIBO

2000年にソニーから発売された犬型
コミュニケーションロボット。
自立行動するロボットとして人とコミュ
ニケーションを取りながら、学習・成長
していくロボットである。



■ NeCoRo

2002年にオムロンが発売した猫型
コミュニケーションロボット。
人の身近なところにおいてコミュニケーシ
ョンを取ることをコンセプトに開発され、本
物の猫のようなリアル指向を徹底。



■ ifbot

2004年にビジネスデザイン研究所から発
売されたコミュニケーションロボット。
数万パターンの会話が登録されている
ノーマルタイプの他、高齢者用なども
登場している。

新しいエンターテインメントロボット 2000年代



■ Pepper

2014年に携帯電話会社大手のソフトバンクが
発表した感情認識パーソナルロボット。
各種情報の提供や学習機能によりできること
が増えていくほか、スマホ同様にアプリも
提供されている。

2015年2月から一般発売される予定

Fig. 2.6: Entertainment Robot[4][58][59][60][61][62][63].

サービスロボット

Service Robot

石山 裕隆

Hirotaka Ishiyama



清掃ロボット

清掃ロボット・・・清掃作業を実施するロボット。省力化・省人化や3K(きつい・汚い・危険)作業からの解放などの利点。



■ ロボハイター

2001年に富士重工業が開発した清掃ロボット。無線LANを利用して周囲の情報の送信やロボットの遠隔操縦などが可能。



■ Roomba

2000年代前半頃から販売が行われた家庭内自走式清掃ロボット。現在の家庭内清掃ロボットの基本形となっており、全世界で人気。



■ ドルフィンリーダCL

イスラエルのドルフィン社で開発された水中やプールサイドの清掃を行うロボット。ケーブルレス型でブラシでも取れない汚れをとることが可能。



■ Robomow

芝生を刈ることを目的に開発されたロボット。自走式清掃ロボットのように決められた領域内で芝生を刈るようにしている。

医療用ロボット

医療用ロボット・・・医療関係で使用されるロボットであり、現在では手術ロボット、介護ロボットなどが実用化



■ ZEUS

Computer motion社から1998年に発売された手術ロボット。マスタースレーブ方式の2つのアームと音声認識アームの3本から構成。



■ da Vinci

Intuitive Surgical 社から1999年に発売された手術ロボット。腹腔外科領域を中心に臨床例を重ね、世界で2000台以上が発売。



■ 百合菜

日本ロジックマシンが開発した介護ロボット。抱き上げハンドがベッドで寝ている介護者を抱き上げることで介護者の移乗作業が可能。



■ HOSPI

パナソニックが2013年から発売した病院内自律搬送ロボット。医療・看護業務を阻害する薬剤や検体の搬送が可能。

案内・接客ロボット

案内・接客ロボット・・・公共施設などの様々な場所で接客案内を行うロボット。現在は博物館の案内業務などに導入。



■ wakamaru

人間とのコミュニケーションが可能なロボット。特定の言葉で話しかけると返事をしてくれるほか、インターネットに接続して天気予報やニュースなどの各種情報を提供することが可能



■ T2-3

テムザックが開発し、実用化されている接客ロボット。写真は病院での案内接客を行うロボットであるが、ショッピングモール等でも同様のロボットが導入されている。



■ An9-PR

2009年に総合警備保障(ALSOK)から発売された接客ロボット。正面のパネルや音声による案内が可能であり、東京タワーや博物館などで導入されている。

警備ロボット

警備ロボット・・・一般市民の安全を確保するために開発されたロボット。現在は警備員と連携して働くロボットが実用化。



■ Reborg-Q

2006年に総合警備保障(ALSOK)から発売された警備ロボット。警備員と連携して業務を遂行するロボットであり、案内機能の充実化、保守メンテナンスの充実化が図られている。



■ T-34

2009年にテムザックとアラコムが共同開発した警備ロボット。カメラ、人感センサを備え、侵入者を捕まえるネットランチャーを搭載している。



■ セコムロボットX

2005年にセコムが開発した警備ロボット。施設内を自動巡回し、侵入者を発見すると人間の早足程度の走行や光と音を使った威嚇などを可能にしている。

Fig. 2.7: Service Robot[4][64][65][66][67][68][69][70][71][72][73][74][75].

2.3. ロボットの将来の予測と計画

21

Table 2.1: Future market expectation of a robot in each field[76].

(単位:億円)	2015 年	2020 年	2025 年	2035 年
製造分野	10,018	12,564	15,807	27,294
ロボテク分野	1,771	4,516	8,057	15,555
農林水産分野	467	1,212	2,255	4,663
サービス分野	3,733	10,241	26,462	49,568
合計	15,989	28,533	52,581	97,080

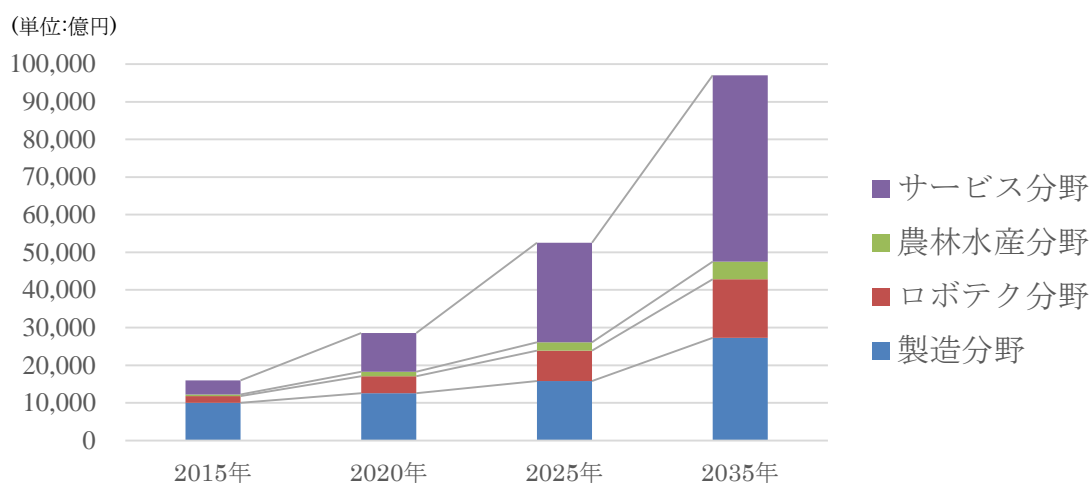


Fig. 2.8: Future market expectation of a robot in each field[76].

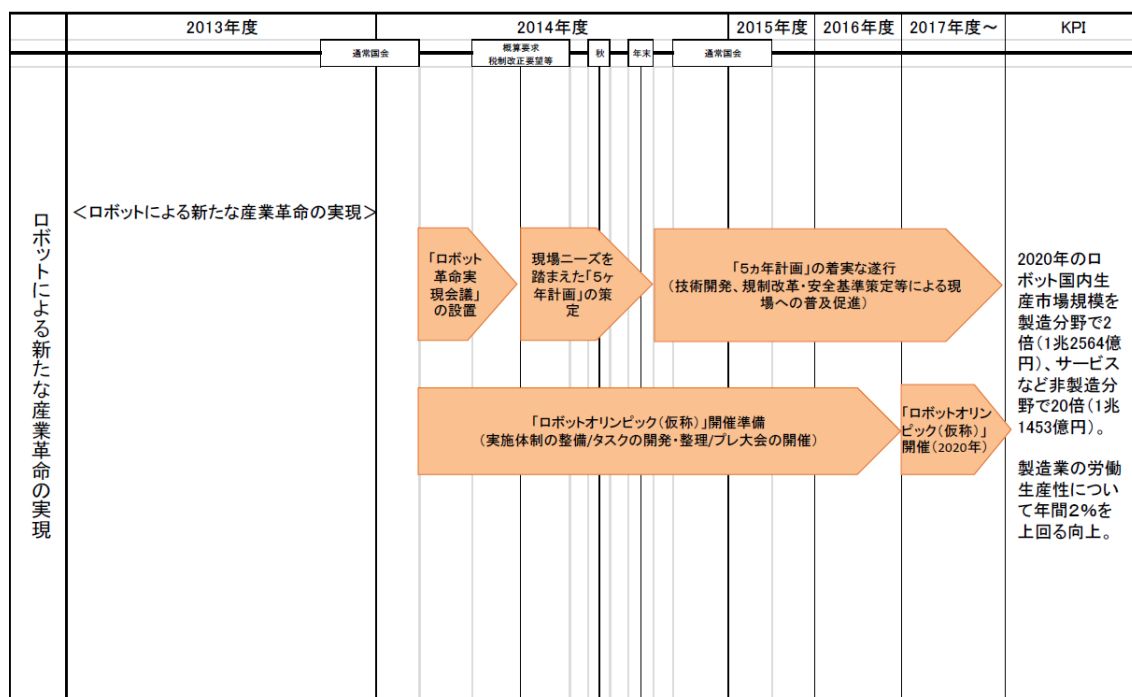


Fig. 2.9: The work schedule of a Japanese revival strategy[77].

第 3 章 現在の実験環境

我々の研究室はモーションキャプチャを用いて人間の姿勢制御を解析している．モーションキャプチャで動作データを取得する際，被験者により，その動作に大小様々な違いがあった．その原因が個人差なのか，加えた外力の大きさなのか，与えた外力の方向の違いなのか明確に判断する事ができなかった．その解決策として人間の手ではなく機械を用いる．機械を用いることにより以下の利点があげられる．

- 一定の外力を出せる．
- 外力の値を正確に把握できる．
- 一方向の外力を与える．

3.1 DD モータ

DD モータの特徴はモータの回転力をギアやチェーンなどの減速機構を用いず直接，駆動対象に伝達する方式を用いたモータである．以下に DD モータの利点を示す．

- 減速機構を用いないため，摩擦によるエネルギー損失が少ない
- 高速・高精度な位置決めが可能
- 耐久性高くメンテナンスの頻度が少ない

今回用いる DD モータは日本精工株式会社（NSK）の M-SSB014 であり，永久磁石を使用せず，位置検出にレゾルバを使用する DD モータである．[Table 3.1](#) に本研究室の DD モータの仕様，[Fig. 3.1](#) に外観を示す．

Table 3.1: Spec of the direct drive motor.

Type	M-SSB014
Mass[kg]	6
Max speed [rps]	3.75
Max torque [Nm]	14
Resolution [count/rev]	122880
Allowable max torque [Nm]	39
Diameter [m]	0.164



Fig. 3.1: Architectural scheme.

3.2 メガトルクモータシステム

システム構成

DD モータを制御するメガトルクモータシステムのシステム構成図を [Fig. 3.2](#) に示す.

制御環境

DD モータの制御に使用するパソコンのスペックと, DD モータの制御に利用する二つのボードを [Table 3.2](#) に示す.

Table 3.2: Spec of PC

Distribution	Fedora13
Kernel	2.6.33.9 -rt31
CPU	Pentium2
Interface board	PCI-3343A
CONTEC board	CNT-24-4D

の回転角は、前述したとおりレゾルバで測定しパルス信号として出力される．そのため、[Table 3.1](#)に示すレゾルバの分解能より 1 カウント当たりの回転角を予め計算しておくことで DD モータの回転角がわかる．

Table 3.4: Spec of the pulse counter board.

Model	CNT24-4D
Channel	4
Max count	24 bit
Count system	up/down
Output range	Differential

3.3 DD モータの運転方法

使用しているメガトルクモータシステムには、DD モータの運転方法として、速度制御モードとトルク制御モードがある．なお、速度制御モードとトルク制御モードの出力特性は [Fig. 3.3](#) に示す．(a) は速度制御モードの出力特性、(b) はトルク制御モードの出力特性である．[Fig. 3.3](#) を見ると速度制御モード、トルク制御モードともに D/A ボードより出力される電圧に比例して速度、トルクが出力されることがわかる．この特性により、D/A ボードより任意に出力できる電圧を一定に保つことで、複数の被験者で外力の方向、大きさを一定に保つことができる．本研究では、[1.3 項](#)で示した問題点を解決するためにトルクを制御する必要があることから、トルク制御モード運転を用いている．

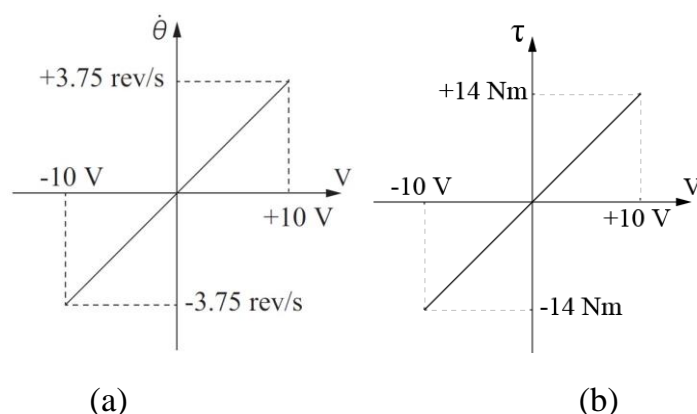


Fig. 3.3: Feature of the motor M-SSB014: (a) speed control mode and (b) torque control mode.

3.4 DD モーターが被験者に加える外力

モーターとワイヤ，被験者の接続

今回の動作解析実験では，モーターの回転力を利用して被験者に外力を加える．なお，モーターとワイヤの取り付け方は，[Fig. 3.4](#)のように DD モーターにあるネジ穴にボルトを立て，簡易的にそのボルトにワイヤの一端を取り付けた．そして DD モーターが回転することでワイヤが巻き取られ，被験者に外力を発生させることができる．[Fig. 3.5](#)に実験装置と被験者の様子を示す．



Fig. 3.4: The direct drive motor used the experiment.

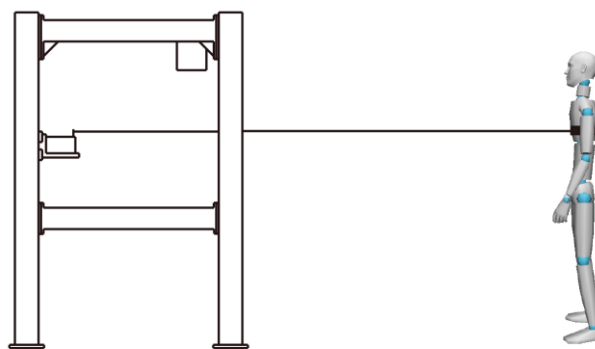


Fig. 3.5: The experimental overview.

DD モータの回転と被験者への外力

使用する DD モータを上から見た際の様子を [Fig. 3.6](#) に示す. [Fig. 3.6](#) の点線は DD モータが回転した際においてワイヤを取り付けたボルトの軌跡であり, 小さな円はボルトである. この時, V はワイヤを引く速度で, d は点線で示す円 (モータ) の直径である. また, F はワイヤの張力であり, 被験者に加わる外力の大きさと等しい.

なお, DD モータにあるネジ穴は計 6 個であり, [Fig. 3.6](#) を見るとわかる通り, 正六角形状に分布されている. そのため, DD モータが一回転すると [Fig. 3.6](#) 上の点線で示す円周分だけ被験者を引くことができる. これを考慮すると隣り合うボルト間の距離が 78 mm であるため, モータが一回転すると 468 mm だけ被験者を引くことができる. DD モータが一回転以上するとワイヤが重なり, 被験者に与える外力に変化が生じる可能性があるため, 被験者に外力を与える際は, 最大で 468 mm だけ引く. ワイヤを引く距離を x [mm], DD モータの回転角を θ [deg] としてこれらをまとめると, DD モータの回転角と, 被験者を引く距離の関係は以下のようになる. これにより, 被験者を引いた距離を知ることができる.

$$x = 1.3 \theta \quad (3.1)$$

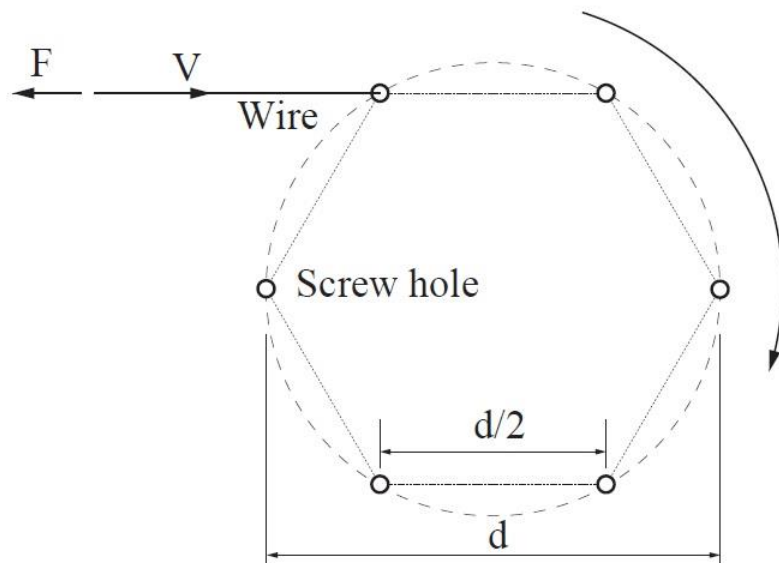


Fig. 3.6: State viewed from above the direct drive motor.

第 4 章 ディザの適用による静止摩擦力の影響の検証

[1.3 項](#)でも述べた通り，出力トルクの再現性という問題点があり，これは DD モータの静止摩擦力が大きいことが原因であると考えている．そのため，DD モータの静止摩擦力を低減することで出力トルクにどのような影響を及ぼすか検証する必要がある．

本稿では，静止摩擦力を低減する手法の一つであるディザを用いて，DD モータの静止摩擦力が出力トルクに及ぼす影響について検証する．

4.1 ディザ

ディザはモータに微振動を加えることで静止摩擦力を低減することができる手法である．モータに微振動が加わることでモータは常に移動している状態になり，モータの摩擦領域は静止摩擦領域から動摩擦領域に移行する．摩擦領域は非線形であるが，一般的に動摩擦力は静止摩擦力より小さいとされている．これより，モータにかかる摩擦力を低減することが可能となる．

モータの出力トルク τ は駆動トルク τ_o と摩擦トルク τ_f の差で求められる．これにディザによる摩擦補償力 $\hat{\tau}_f$ を加えると出力トルク τ は以下のような式で与えられる．

$$\tau = \tau_o - \tau_f + \hat{\tau}_f \quad (4.1)$$

ここで $\hat{\tau}_f$ は以下のような式で与えられる．

$$\hat{\tau}_f = A \sin 2\pi ft \quad (4.2)$$

A はディザの振幅， f はディザの周波数， t は時間である．これより摩擦トルクが補償でき，出力トルクを現状より大きくすることが可能である [78] [79]．

4.2 本研究室におけるディザの与え方

[3.3 項](#) より，本研究室の DD モータは速度制御モード運転とトルク制御モード運転が可能となっており，本研究ではトルク制御モード運転を採用

第4章 ディザの適用による静止摩擦力の影響の検証
 している．トルク制御モード運転では，D/A ボードより出力される電圧に比例したトルクが出力されるため，電圧を入力しなければならないことがわかる．このため，本研究室の DD モータにディザを与える場合は電圧を振動的に与えることでモータに振動が加えることが可能となる．これにより，本研究室におけるディザによる摩擦補償力 \hat{t}_f は(4.2)の式から以下のように求められる．

$$\hat{t}_f = V_m \sin 2\pi ft \quad (4.3)$$

ここで振幅にあたる V_m は入力電圧[V]である．これにより， \hat{t}_f は時間変化するため，DD モータにディザを与えることが可能となる．しかしながら，本研究室の入力電圧は直流電圧であることから，(4.3)式でディザを与えても入力電圧は連続的にならないといった問題点がある．このため，入力電圧が振幅の最大値と最小値を出力できるように周波数 f の値を調整する必要がある．入力電圧が振幅の最大値と最小値を出力できるように周波数は 250 Hz であることから，本研究室の DD モータに与えることの可能なディザの最大周波数は 250 Hz である．

4.3 モータの PD 制御

4.2 項で述べた方法でディザを与えることは可能となった．しかしながら，ワイヤを取り付けてディザを加えた際，モータがワイヤの張力によって回転し，ワイヤが緩んでしまうといった現象が発生した．ワイヤが緩んでしまった状態でモータを回転させると，与えられる張力の大きさが緩んでいない状態と比較して変化することから，ディザを与えても常にワイヤを張った状態に保つことができるようにする必要がある．そこで，ディザを与えた後，目標角度に戻るようにする PD 制御を実装した．(4.4) 式に PD 制御の制御式を示す．

$$V = K_p(\theta_d - \theta) + K_d(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (4.4)$$

V : 電圧
 θ : 現在角度
 θ_d : 目標角度
 $\dot{\theta}$: 現在角速度
 $\dot{\theta}_d$: 目標角速度
 K_p : 比例ゲイン
 K_d : 微分ゲイン

4.4 実験

モータのトルク出力特性の確認とディザ入力による出力トルク特性の変化を検証するため、実験を実施した。

4.4.1 実験条件

[Fig. 4.1](#) に示すような実験装置を構成し、張力を測定するためのばねばかりを固定した。実験開始時はモータにディザを与え、途中で一定の電圧 V を入力し、ワイヤを引っ張るようにして行った。ディザの振幅にあたる入力電圧 V_m は 2 V、ディザの周波数 f は入力電圧が振幅の最大値と最小値を通るようにそれぞれ 25 Hz, 50 Hz, 125 Hz, 250 Hz と変化させた。加えて、ディザを与えなかった場合の張力測定値として、周波数 f を 0 Hz にした場合の測定も実施した。また、ディザを与えたのちに与える一定の電圧 V は 2 V から 6 V まで 1 V 刻みで変化させた。PD 制御のゲインは $K_p = 1$ V/deg, $K_d = 0.1$ Vs/deg, 目標角度は初期角度の 0 deg とした。

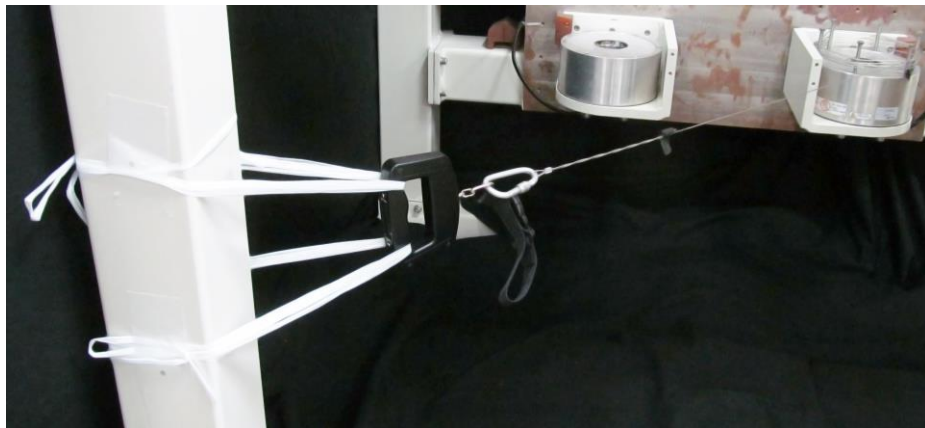


Fig. 4.1: The experimental overview.

4.4.2 実験結果

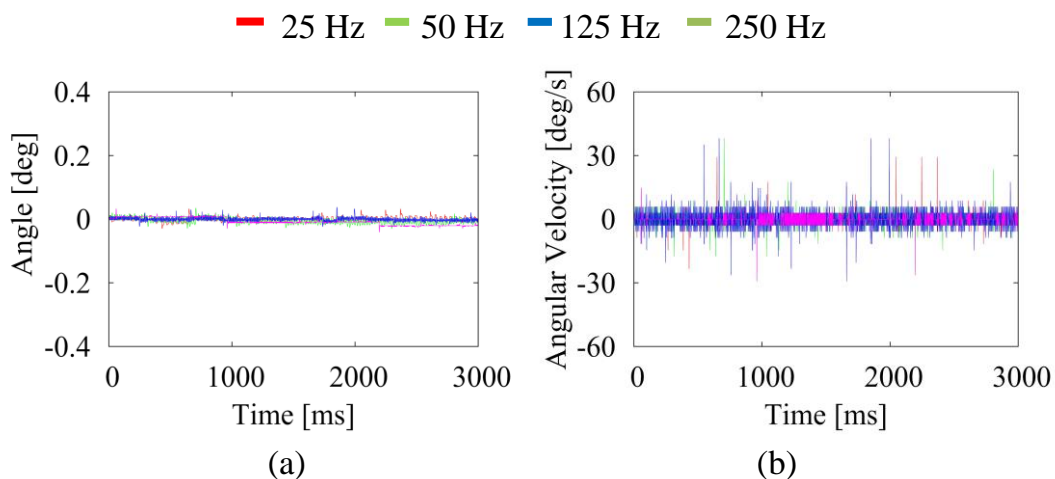


Fig. 4.2: Experimental result: (a) angle, (b) angular velocity.

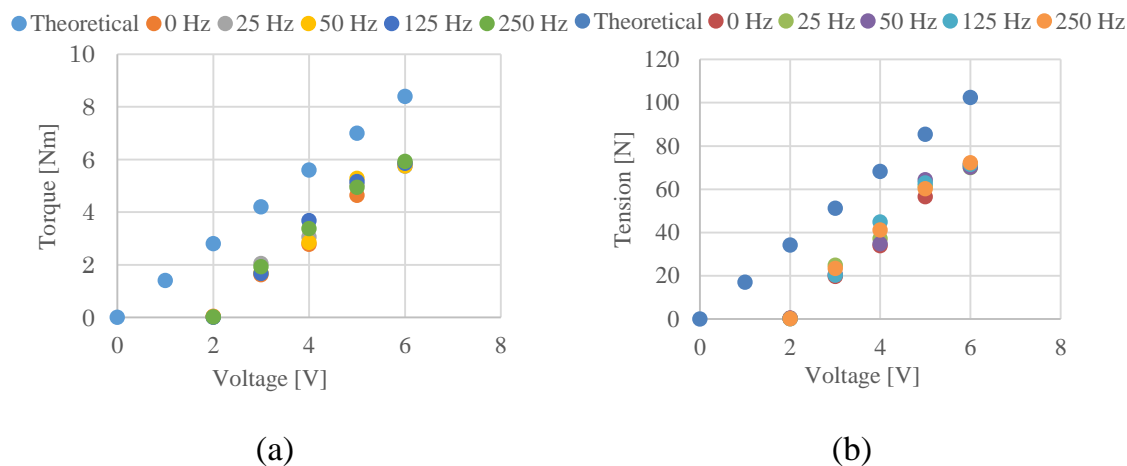


Fig. 4.3: Experimental result: (a) motor torque, (b) wire tension.

Table 4.1: Approximate equation of torque.

Frequency [Hz]	Equation
Theoretical value	$\tau = 1.4V$
0	$\tau = 1.5V - 2.9$
25	$\tau = 1.4V - 2.6$
50	$\tau = 1.5V - 2.9$
125	$\tau = 1.5V - 2.8$
250	$\tau = 1.5V - 2.7$

[Fig. 4.2](#) にディザを与えた際の角度変位，角加速度変位，[Fig. 4.3](#) に実験により求めたトルク出力特性，張力出力特性，[Table 4.1](#) にトルク出力特性における近似直線の式を示す．理論値は [Fig. 3.3](#) に示したトルク，張力の出力特性であり，それぞれのグラフにおいて，プロット点は実測値の平均値である．

[Fig. 4.2](#) の結果において，角度変位はディザの周波数を変化させても初期角度 0 deg となっていることから，PD 制御が実装できていることが確認できた．

[Fig. 4.3](#) および [Table 4.1](#) の結果において，理論値と実測値を比較すると，傾きの値は実測値と一致しているが，全ての周波数において一定の値で出力トルク値が小さくなっていることがわかる．加えて，周波数を変化させた場合でもグラフの式が一致していることから，ディザを与えた場合でも出力トルクが改善されることはなかったと考えることができる．このことから，任意のトルクを出力できないという問題点は静止摩擦力に起因するものではなく，DD モータにディザを与える必要はないと考えられる．また，入力電圧と出力トルクには線形の関係が見られることがわかる．これより，今後は本研究室の DD モータのトルク出力特性は本実験において求めたディザの周波数が 0 Hz のときの近似直線の式で与えられるものとし，実験を行うこととする．

4.5 まとめ

DD モータの静止摩擦力が出力トルクに及ぼす影響について検証した．その結果，ディザを用いた場合でもモータの出力トルクの改善が見られなかった．このことから，出力トルクの再現性という問題点は静止摩擦力に起因せず，今後ディザを与える必要はないと考えられる．また，入力電圧と出力トルクには線形の関係が見られることから，今後は実験により求めたトルク出力特性を用いて実験を行うこととする．

第 5 章 ワイヤの張力制御

[1.3 項](#)でも述べた通り，被験者の細かな動きで実験中にワイヤが緩むという問題点がある．これを解決するため，突発的な外力を与える前にワイヤを緩まない状態に保つことができるような新しい制御環境を構築する必要がある．

本稿では，DD モータに対して実装した新しい制御環境を構築について述べる．

5.1 PI 制御・PID 制御

PI 制御を用いて DD モータの制御することにより，ワイヤが緩まない状態を保つようにする制御環境を構築した．PI 制御を用いることで最終的に目標値に一致させることが可能となるため，ワイヤを緩まない状態に保つことが可能となる

$$V = K_p(\theta_d - \theta) + \int_0^t K_i(\theta_d - \theta)d\tau \quad (5.1)$$

また，PI 制御に微分動作を加えた PID 制御を実装した．PID 制御を用いることで PI 制御に比較して，目標値を行きすぎるオーバーシュートなどを抑える効果がある．

$$V = K_p(\theta_d - \theta) + \int_0^t K_i(\theta_d - \theta)d\tau + K_d(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (5.2)$$

V : 電圧
 θ : 現在角度
 θ_d : 目標角度
 $\dot{\theta}$: 現在角速度
 $\dot{\theta}_d$: 目標角速度
 K_p : 比例ゲイン
 K_i : 積分ゲイン
 K_d : 微分ゲイン

5.2 PI 制御・PID 制御確認実験

PI 制御および PID 制御の実装の確認と比較を行うため，実験を実施した．

5.2.1 実験条件

[Fig. 4.1](#) に示すような実験装置を構成し，張力を測定するためのばねばかりを固定した．実験開始から任意の時間が経過した後，ワイヤを 10 N の力で 1 s 間引っ張り，その後のモータの挙動を確認する．引っ張るのは人間とし，引っ張る力の計測には電子ばかりを使用する．目標角度 θ_d は初期位置である 0 deg，PI 制御のゲインは $K_p = 0.1 \text{ V/deg}$ ， $K_i = 0.4 \text{ V} \cdot \text{deg}$ ，積分動作に使用する時間は 1 ms，PID 制御のゲインは $K_p = 0.1 \text{ V/deg}$ ， $K_i = 0.4 \text{ V} \cdot \text{deg}$ ， $K_d = 0.01 \text{ V} \cdot \text{s/deg}$ とし，積分動作および微分動作に使用する時間は 1 ms とした．

5.2.2 実験結果

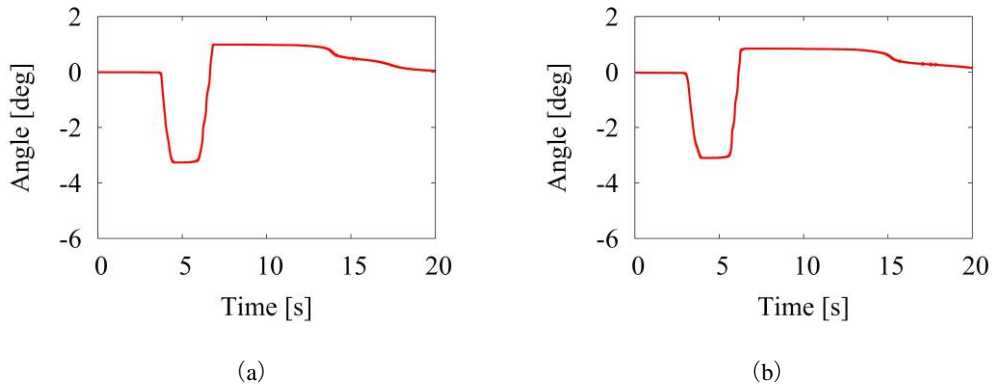


Fig. 5.1: Experimental result: (a) PI control and (b) PID control.

[Fig. 5.1](#) に PI 制御実装時と PID 制御実装時の目標角度と現在角度の偏差を示す．

[Fig. 5.1](#) より，共に目標角度である 0 deg に収束していることから，PI 制御および PID 制御が実装できたことが確認できた．ここで，PI 制御と PID 制御の結果を比較すると，目標角度と現在角度の偏差はほぼ一致して

いることがわかる．これは PID 制御の実装の目的として，オーバーシュートの低減があるが，目標角度を常に 0 deg としていること，ワイヤを電子ばかりに取り付けていることなどから，PI 制御時においてもオーバーシュートは発生しなかったため，このような結果が得られたと考えられる．

5.3 被験者の前方移動への対応

被験者が後方へ移動した場合は PI 制御もしくは PID 制御を用いることでワイヤを緩まない状態に保つことができる．一方で被験者が前方へ移動した場合，モータに角度変位は生じないため，後方移動と同様に PID 制御を用いて，ワイヤを緩まない状態に保つことはできない．また，人間の細かな動きは一定のものではないため，目標角度を一意に設定することは困難である．このことから，被験者の前方移動に対し，ワイヤを緩まない状態に保つためにはモータで常にワイヤを引っ張っておく必要がある．[第4章](#)でも述べた通り，本研究室の DD モータのトルク出力特性は理論上出力される値が出力されず，[Table 4.1](#)における周波数 0 Hz のときの式で表わされる．よって，モータで常にワイヤを引っ張るためには動き出す寸前の電圧を与え続けることで条件を満たすことができる．

5.4 PI 制御・PID 制御の目標角度の設定

[5.3 項](#)で述べた手法を用いることで被験者の前方移動に対応することが可能となるため，これと [5.1 項](#)で述べた PI 制御または PID 制御を用いることで被験者の前後移動に対してワイヤを緩まない状態に保つことが可能となる．しかしながら，現状では PI 制御および PID 制御における目標角度を初期位置の 0 deg のままとなっているため，目標角度の設定を変更する必要がある．

従来の実験環境では，ワイヤの緩みによる張力変化が問題となっており，被験者とモータ間の長さは一定にする必要はない．被験者が後方へ移動した場合，モータに巻き取られているワイヤが引っ張られ，モータに角度変位が生じる．このことから，被験者の後方移動に対しては，目標角度を被験者が動く前の角度に設定することでワイヤを緩まない状態に保つことが可能である．一方，被験者が前方へ移動した場合，[5.3 項](#)で述べたように寸前の電圧を与えることでモータを回転させることになるため，PI 制御および PID 制御における目標角度を変化させる必要がある．被験者が前方へ移動しモータが回転した後，ワイヤが張った状態になるとモータの回転が停止する．このモータの回転が停止したときの角度を PI 制御および PID 制御における目標角度に変更することで，前方移動後に後方移動し

でもワイヤを張った状態に保つことが可能となる。

5.5 ワイヤの張力制御確認実験

実装されたワイヤの張力制御手法の確認をするため、被験者にワイヤを取り付けて実験を実施した。

5.5.1 実験条件

[Fig. 5.2](#) に示すようにワイヤの一端を DD モータと被験者に取り付けた実験環境を構成した。この実験環境は本研究室における DD モータを用いて被験者に外乱を与える際に用いる実験環境と同様である。

実験開始前は被験者に対して直立姿勢を維持、実験開始後は 5 秒後に前方移動または後方移動、10 秒後に実験開始 5 秒後に行った移動と逆方向の移動をするように指示した。その際に生じた角度変化とワイヤの状態変化の観察、モーションキャプチャを用いた被験者の重心位置の検出を行った。被験者の前方移動に対応するために入力する動き出す寸前の電圧は [Table 4.1](#) の近似直線の式より、1.9 V と設定した。PI 制御のゲインは $K_p = 1 \text{ V/deg}$, $K_i = 1 \text{ V} \cdot \text{deg}$, 積分動作に使用する時間は 1 ms, PID 制御のゲインは $K_p = 1 \text{ V/deg}$, $K_i = 1 \text{ V} \cdot \text{deg}$, $K_d = 0.005 \text{ V} \cdot \text{s/deg}$ とし、積分動作および微分動作に使用する時間は 1 ms とした。

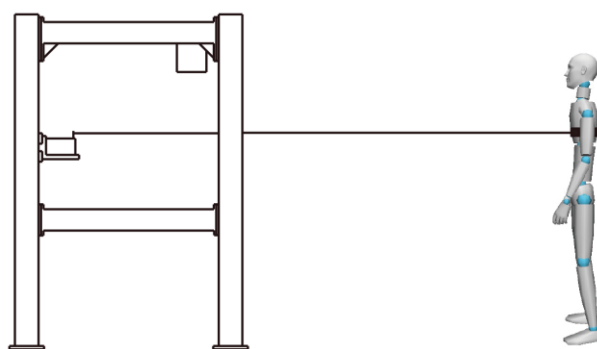


Fig. 5.2: The experimental overview.

5.5.2 実験結果

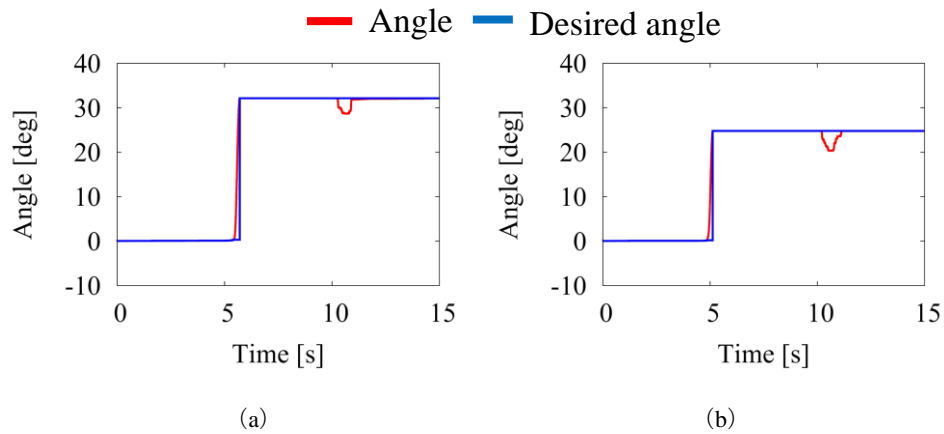


Fig. 5.3: Experimental result of forward - back: (a) PI control and (b) PID control.

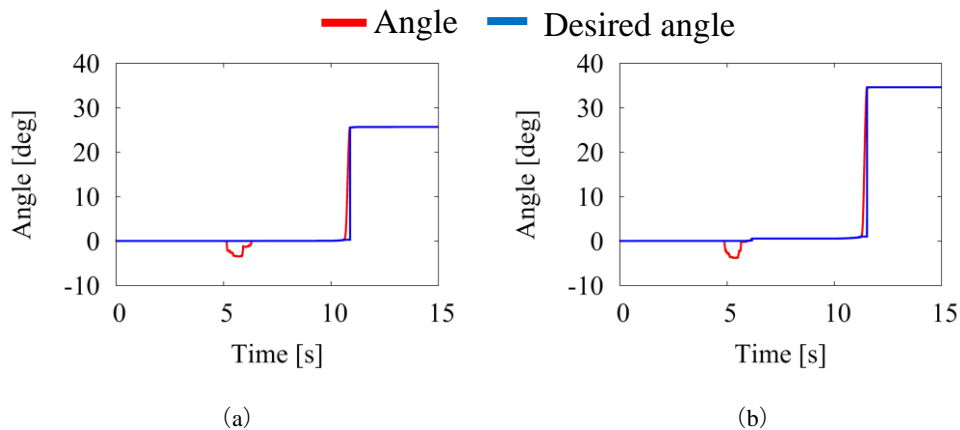


Fig. 5.4: Experimental result of back - forward: (a) PI control and (b) PID control.

[Fig. 5.3](#)にPI制御時およびPID制御時に前方移動、後方移動の順に行った際の目標角度と検出角度、[Fig. 5.4](#)にPI制御時およびPID制御時に後方移動、前方移動の順に行った際の目標角度と検出角度を示す。[Fig. 5.3](#)および[Fig. 5.4](#)において、検出角度が正方向に変化した場合は前方移動したとき、負方向に変化した場合は後方移動をしたときである。

[Fig. 5.3](#)および[Fig. 5.4](#)の結果より、前方移動すると角度変位が生じ目標角度が変化、後方移動した際は目標角度に戻るようになっており、PI制

御および PID 制御が正しく実装されていることが確認できた．前方移動と後方移動の順序が逆転してもモータやワイヤの状態は同一であった．PI 制御と PID 制御を比較するとオーバーシュートの発生はせず，後方移動から目標値までの収束速度も同程度であることがわかる．被験者が行った前後移動は人間が直立姿勢を維持し続けていれば，外乱が加わらない限り起こらない程度の移動である．これより，被験者が直立姿勢を維持し続けている場合，ワイヤを常に張った状態に保つためには PI 制御でも十分であることが考えられる．

また，ワイヤの状態変化は，後方移動時についてはワイヤが緩むことなく目標値に戻っていたが，前方移動時については被験者が前方移動してからワイヤが引っ張られるまで時間差が生じていた．これはモータが動き出すまで時間がかかる特性を持っていること，後方移動時とは違い目標角度の設定による制御は実施せずにモータに定電圧を与えて回転させているだけにすぎないことから，時間差が生じていると考えられる．

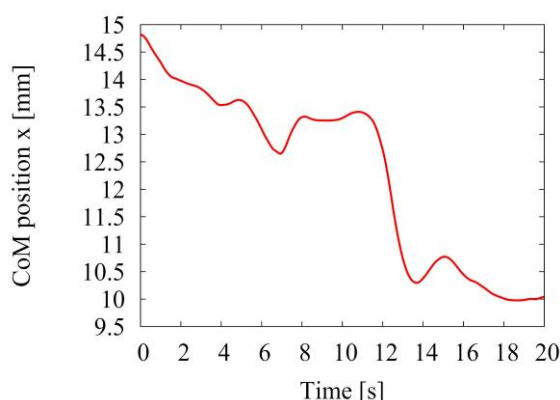


Fig. 5.5: Experimental result of position of the center of gravity.

Fig. 5.5 に被験者が後方移動，前方移動の順に行った際のモーションキャプチャを用いて検出した被験者の重心位置の変化を示す．実験開始後，最初は後方移動を行っているが，重心位置変位に特徴的な変化は見られなかった．このことから，後方移動に対しては重心位置に大きな変位がない場合でもワイヤを張った状態を保つことが可能であることがわかる．一方，前方移動については 10 s 程度の点で大きく重心位置が変化していることから，このときに前方移動をしたことがわかる．このときの重心位置変位は 3 mm 程度であり，この変位はモータが回転し，被験者が引っ張られた長さも含まれているため，前方移動時は重心位置変位が 3 mm 以内でモータが被験者の前方移動を検出し，ワイヤを張った状態を保つことが可能であることがわかる．

5.6 まとめ

突発的な外力を与える前にワイヤを緩まない状態に保つことができるような新しい制御環境として **PI** 制御および **PID** 制御を実装した．その結果，目標角度を被験者が動く前の角度に設定することで被験者の後方移動に対してワイヤを緩まない状態に保つことが可能となった．これより，ワイヤを緩まない状態に保つことが可能となった．また，被験者の前方移動に対しては **DD** モータにモータが動き出す寸前の電圧を与えることでワイヤを緩まない状態に保つようにした．実装した **PI** 制御および **PID** 制御のそれぞれにおける結果に大きな変化はなかった．このことから，ワイヤを常に張った状態に保つためには **PI** 制御でも十分であることが考えられる．

第 6 章 結論

6.1 本研究の成果

本研究では、ロボットの歴史や将来についての資料を作成した。また、1.2 項で述べた問題点を解決するための DD モータに対する新しい制御システムを構築した。

第 2 章 ロボットの歴史と将来

ロボットの歴史や将来についての資料を作成し、ロボットの種類や用途に分けてまとめた。

第 4 章「ディザの適用による静止摩擦力の検証」

静止摩擦力を低減する手法であるディザを用いて DD モータの静止摩擦力の影響を検証した。出力トルクが不安定という問題点は静止摩擦力に起因しないこと、入力電圧と出力トルクには線形の関係が見られることがわかった。

第 5 章「ワイヤの張力制御」

被験者の後方移動に対しては PI 制御、前方移動に対しては動き出す寸前の電圧を与えることにより、ワイヤを緩まない状態に保つことが可能となった。

6.2 今後の課題

本稿の結果より、今後、本研究室の人間の動作解析実験を行っていくうえで以下のように課題が与えられる。

- ・ 正確なトルク出力特性の算出
- ・ 実装した新しい制御環境を用いた人間の動作解析実験の実施

謝辞

本研究は平成 26 年 4 月から平成 27 年 3 月までの間、東京都市大学工学部機械システム工学科ロボティックライフサポート研究室で行われました。

本研究を行うにあたり、指導教員の金宮教授、佐藤准教授には深く感謝しております。金宮教授には広い視野からのアドバイスと親切、丁寧なご指導をいただき、非常に勉強に成りました。佐藤准教授には論文作成や発表の仕方をはじめ、本研究室の DD モータに関連する知識等、非常に多くのことを学ばせていただきました。

研究室内の先輩方には大変お世話になりました。前期の研究内容について、宮田先輩、曽根先輩には研究内容が異なるにも関わらず、同じ部屋という縁から指導をいただき、大変感謝しております。後期の研究内容について、ヒューマノイドロボットグループバランス班の小沼先輩、宮本先輩、小笠原先輩には研究内容に関する指導をいただき、特に小沼先輩には大変細かな部分までご指導いただきましたこと、大変感謝しております。

同期の皆さん、皆さんのおかげで一年間の研究生活が非常に楽しいものになりました。研究や論文作成に詰まった際、意見やアドバイスをいただき、非常に助かりました。修士に進学する三村君、満平君、吉野君、松本さん。進学する研究室は異なりますが、同じ東京都市大学大学院工学研究科機械システム工学専攻に進学する同志として、ともに良い結果を残せるように頑張りましょう。また、社会人になる黒山君、高見君、陳君、根本君、平岡君、長谷川君、畠山君、茂木君。社会ではこれまでの学生生活とはまた違った喜びや苦難が待っていると思います。お互いに頑張ってください。

最後になりましたが、研究生活を暖かく見守って、支えてくれた両親にこの場を借りて心から感謝いたします。

2015 年 2 月 27 日
石山 裕隆

参考文献

- [1] Z. Matjacic, M. Voigt, D. Popovic, T. Sinkær, “Functional postural responses after perturbations in multiple directions in a standing man: a principle of decoupled control,” J.Biomech., vol. 34, pp.187-196, 2001.
- [2] A.M.Wing, S.Clapp, R.Burgess-Limerick, “Standing stability in the frontal plane determined by lateral forces applied to the hip,” Gait & Posture 3, pp. 38-42, 1995.
- [3] Y.Yamazaki, T.Wang, M.Suzuki, T.Ohkuwa, H.Itoh, “Adjustments of upright standing posture to rotational perturbation of the trunk,” J. Biomech., vol. 40, pp.701, 2007.
- [4] 菅野重樹, “人が見た夢ロボットの来た道 : ギリシャ神話からアトム、そして…” , JIPM ソリューション, 2011.
- [5] (2014, Jul. 28) 青銅の巨人タロスは伸縮自在? アルゴ探検隊の大冒険 [Online]. Available: {<http://blogs.yahoo.co.jp/kpgcm339/51532996.html>}
- [6] (2014, Apr. 21) 古代アレクサンドリアをめぐる人物 クテシビオス [Online]. Available: {<http://www.bibalex.jp/Ancient/03/03043.html>}
- [7] (2014, Apr. 21) 古代アレクサンドリアと図書館の謎 自動販売機 (自動ドア) の発明 [Online]. Available: {<http://www.bibalex.jp/Ancient/02/02041.html>}
- [8] (2014, May 13) 世界最古, 2100 年前のコンピューター 『アンティキティラ島の機械』 [Online]. Available: {<http://karapaia.livedoor.biz/archives/52033213.html>}
- [9] (2014, Jun. 24) 指南車 – Wikipedia [Online]. Available: {<http://ja.wikipedia.org/wiki/指南車>}

- [10] (2014, Jun. 17) ジャック・ド・ヴォーカンソン – Wikipedia [Online]. Available: {<http://ja.wikipedia.org/wiki/ジャック・ド・ヴォーカンソン>}
- [11] (2014, Jun. 17) オートマタ – Wikipedia [Online]. Available: {<http://ja.wikipedia.org/wiki/オートマタ>}
- [12] (2014, Jun. 17) タビュレーティングマシン – Wikipedia [Online]. Available: {<http://ja.wikipedia.org/wiki/タビュレーティングマシン>}
- [13] (2014, May 6) 解析機関 – Wikipedia [Online]. Available: {<http://ja.wikipedia.org/wiki/解析機関>}
- [14] (2014, Sep. 11) Robotics: Universal Robots: The History and Working of Robots [Online]. Available: {http://www.thetech.org/exhibits/online/robotics/universal/breakout_p01_rur.html}
- [15] (2014, Apr. 21) I,Robots [Online]. Available: {http://en.wikipedia.org/wiki/I,_Robot}
- [16] (2014, May 23) Stanford Cart 102670863 Computer History Museum [Online]. Available: {<http://www.computerhistory.org/collections/catalog/102670863>}
- [17] (2014, May 23) History Making Mobile Robots [Online]. Available: {<http://davidbuckley.net/DB/HistoryMakers.htm>}
- [18] (2014, Apr. 18) Development of Waseda Robot [Online]. Available: {<http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/katobook-j.html>}
- [19] 広瀬茂男他, “4 足歩行ロボット TITAN XII の開発とその大型障害物踏破制御に関する基礎的研究”, 日本機械学会論文集, Vol. 80 (2014) No. 813, p. DR0128, 2014.
- [20] (2014, Jun. 14) ロボットの見られる博物館などの紹介 ロボエネット [Online]. Available: {<http://www.robotics-handbook.net/museum/>}
- [21] (2014, Jun. 18) 産総研：人間に近い外観と動作性能を備えたロボットの開発に成功 [Online]. Available: {http://www.aist.go.jp/aist_j/press_relea}

se/pr2009/pr20090316/pr20090316.html}

[22] (2014, Jun. 19) 巧みな木登りで枝打ちを行う『WOODY-1』【早稲田大学 WABOTO-HOUSE 研究所】 | ロボ・ステーション | J-Net21[中小企業ビジネス支援サイト] [Online]. Available: {<http://j-net21.smrj.go.jp/develop/robot/entry/20081127-10.html>}

[23] (2014, Jun. 19) Partner Ballroom Dance Robot -PBDR- <東北大学工学研究科バイオロボティクス専攻 小菅・菅原研究室 平田研究室> [Online]. Available: {http://www.irs.mech.tohoku.ac.jp/partner_ballroom_dance_robot_pbdr.html}

[24] (2014, Jun. 23) Boston Dynamics Hakkinda hakan melikoglu [Online]. Available: {<http://hakanmelikoglu.com/boston-dynamics-hakkinda.html>}

[25] (2014, Jun. 23) Science in Seconds Blog [Online]. Available: {<http://www.scienceinseconds.com/blog/Cheetah-Robot-is-Faster-Than-You>}

[26] (2014, Jun. 23) DLR - Institute of Robotics and Mechatronics - Roll in' Justin [Online]. Available: {<http://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-5471>}

[27] (2014, May 8) Patent US2286571 - Position-controlling apparatus - Google Patents [Online]. Available: {<https://www.google.co.jp/patents/US2286571?dq=Willard+L.V.+Pollard&hl=en&sa=X&ei=CMWiU8q-L9C-uASg4YDgCw&ved=0CB0Q6AEwAA>}

[28] (2014, Jun. 20) Patent US2988237 - Programmed article transfer - Google Patents [Online]. Available: {<https://www.google.co.jp/patents/US2988237?dq=George+Devol&hl=en&sa=X&ei=y8SiU4-TEMy6uATL4oJI&ved=0CB0Q6AEwAA>}

[29] (2014, Jun. 20) 沿革 ビジネスセンター情報 川崎重工 ロボットビジネスセンター [Online]. Available: {<http://www.khi.co.jp/robot/center/history/index.html>}

[30] (2014, May 25) 沿革 | 企業情報 | アイダエンジニアリング株式会社 [Online]. Available: {<http://www.aida.co.jp/company/history.html>}

- [31] (2014, Jun. 25) Articulated robot 6-axis - 130 - 205 Kg, 1.93 - 3.35 m IRB 6660 series - ABB Robotics – Videos [Online]. Available: {<http://www.directindustry.com/prod/abb-robotics/articulated-robots-6-axis-30265-566278.html>}
- [32] (2014, Jun. 20) 再検証「ロボット大国・日本」(7) : 「ロボット大国だとは全く思っていない」～産業用ロボット世界シェア No.1 の安川電機(前編)(1 2) - MONOist (モノイスト) [Online]. Available: {<http://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1110/06/news002.html>}
- [33] (2014, Apr. 18) Download SCARA robot 1.0 for Linux – Softpedia [Online]. Available: {<http://linux.softpedia.com/get/Science/SCARA-robot-100789.shtm>}
- [34] (2014, Jul. 18) はたらく NEXTAGE を見に行きました - --Online ROBICON Magazine [Online]. Available: {<http://www.ohmsha.co.jp/robocon/archive/2012/10/nextage-1.html>}
- [35] (2014, Jul. 30) Rethink Robotics Opens Up Baxter Robot For Researchers - IEEE Spectrum [Online]. Available: {<http://www.ohmsha.co.jp/robicon/archive/2012/10/nextage-1.html>}
- [36] 日本ロボット工業会, “世界の産業用ロボット稼働台数”, 2012.
- [37] 日本ロボット工業会, “国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第3集”, ジェイスパーク, 2003.
- [38] 日本ロボット学会他, “原子力ロボット記録と提言 概要版”, 日本ロボット学会, 2011.
- [39] 楠田 喜宏, “国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第5集”, ジェイスパーク, 2005.
- [40] (2014, Jul. 2) 遠隔自動装置: 日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社 [Online]. Available: {<http://www.hitachi-hgne.co.jp/activities/maintenance/advance/remotely/index.html>}

- [41] (2014, Jul. 3) Pioneer Project Homepage [Online]. Available: {<http://www.frc.ri.cmu.edu/projects/pioneer/>}
- [42] (2014, Jul. 3) 日本のロボット研究の歩み [Online]. Available: {<http://www.rsj.or.jp/RSJ20DVD/data/paper/029/029.html>}
- [43] (2014, Jul. 3) 「2001 国際ロボット展」 レポート [Online]. Available: {<http://pc.watch.impress.co.jp/docs/article/20011114/robot.htm>}
- [44] (2014, Jul. 3) fuRo : Rosemary : 機能紹介 / 開発コンセプト [Online]. Available: {<http://www.furo.org/ja/robot/rosemary/>}
- [45] (2014, Jul. 7) CURV-III - Wikipedia [Online]. Available: {<http://en.wikipedia.org/wiki/CURV-III>}
- [46] (2014, Jul. 7) 日本財団図書館（電子図書館）OMAE' 99 調査報告書 [Online]. Available: {<https://nippon.zaidan.info/seikabutsu/1999/00780/contents/031.htm>}
- [47] (2014, Jul. 7) 無人探査機かいこう 7000 II 1 [Online]. Available: {http://www.uchinome.jp/event/otherevent/event17_2.html}
- [48] (2014, Jul. 7) JAMSTEC 海洋研究開発機構 ジャムステック [Online]. Available: {<http://www.jamstec.go.jp/j/index.html>}
- [49] (2014, Jul. 7) Nereus – AUVAC [Online]. Available: {<http://auvac.org/configurations/view/47>}
- [50] (2014, Jul. 3) シャトル・リモート・マニピュレータ・システム – Wikipedia [Online]. Available: {<http://en.wikipedia.org/wiki/シャトル・リモート・マニピュレータ・システム>}
- [51] (2014, Jul. 3) カナダアーム 2 – Wikipedia [Online]. Available: {<http://en.wikipedia.org/wiki/カナダアーム2>}
- [52] (2014, Jul. 3) 「きぼう」日本実験棟 ロボットアームが「第4回ロボット大賞」で「優秀賞」を受賞(2010年11月25日) プレスリリース

- NEC [Online]. Available: {<http://www.nec.co.jp/press/ja/1011/2503.html>}
- [53] (2014, Jul. 3) 宇宙航空研究開発機構 Hashigozakura [Online]. Available: {<https://hashigozakura.wordpress.com/tag/宇宙航空研究開発機構>}
- [54] (2014, Jul. 10) テムザック、大型レスキューロボット「T-52 援竜」公開 [Online]. Available: {<http://pc.watch.impress.co.jp/docs/2004/0325/tmsuk.htm>}
- [55] (2014, Jul. 10) 東京消防庁<組織・施設><消防装備><消防ロボット> [Online]. Available: {<http://www.tfd.metro.tokyo.jp/ts/soubi/robo/index.html>}
- [56] (2014, Jul. 3) RQ-16 T-ホーク – Wikipedia [Online]. Available: {http://en.wikipedia.org/wiki/RQ-16_T-ホーク}
- [57] (2014, Jul. 3) iRobot 510 PackBot Unmanned Systems Technology [Online]. Available: {http://www.unmannedsystemstechnology.com/2013/05/irobot-wins-7-2m-contract-to-supply-packbot-robots-to-brazilian-government/irobot_510_packbot_4/}
- [58] (2014, May 21) 1928 - Phil the Radio Dog a.k.a. Philidog - Henri Piraux (French) - cyberneticzoo.com [Online]. Available: {<http://cyberneticzoo.com/precyber/1928-phil-the-radio-dog-a-k-a-philidog-piraux/>}
- [59] (2014, Jun. 30) HERO – Wikipedia [Online]. Available: {[http://en.wikipedia.org/wiki/HERO\(ロボット\)](http://en.wikipedia.org/wiki/HERO(ロボット))}
- [60] (2014, May 29) HighTechScience.org RB5X Robot [Online]. Available: {http://www.hightechscience.org/rb5x_robot.htm}
- [61] (2014, Jun. 30) AIBO Official Site [AIBO Chronicle] [Online]. Available: {<http://www.sony.jp/products/Consumer/aibo/chronicle/index>}
- [62] (2014, Jun. 30) オムロン、リアルさに徹したネコ型ロボット「ネコロ」発表 [Online]. Available: {<http://game.watch.impress.co.jp/docs/20011016/omron>}
- [63] (2014, Jul. 21) Pepper とは ロボット ソフトバンク [Online]. Avail

able: {<http://www.softbank.jp/robot/products/>}

[64] (2014, Jul. 31) SUBARU NEWS [Online]. Available: {https://www.fhi.co.jp/news/99_1_3/03_25.htm}

[65] (2014, Jul. 10) View our gallery of photos for the iRobot Roomba 780 [Online]. Available: {<http://www.trustedreviews.com/irobot-roomba-780-photos>}

[66] (2014, Jul. 10) プールロボット | 施設維持・メンテナンス | 商品カテゴリ一覧 | Pool&Fitness 繁盛ネット [Online]. Available: {http://www.pool-fitness.jp/item.php?cmd=item_detail&parent_category_id=23&category_id=60&item_id=1605}

[67] (2014, Jul. 22) Robotic lawn mowers – Robomow [Online]. Available: {<http://www.robomow.com/en-UK>}

[68] (2014, Jul. 17) 医療解説 – RTPedia [Online]. Available: {<http://www.rt-gcoe.waseda.ac.jp/wiki/index.php/医療解説>}

[69] (2014, Jul. 17) Robot-ニュース-- 【iREX2009】自治体ブースそのほか [Online]. Available: {http://robot.watch.impress.co.jp/docs/news/20091201_332653.html}

[70] (2014, Jul. 22) 「病院内自律搬送ロボット HOSPI®」の販売を開始 プレスリリース ニュース パナソニック企業情報 Panasonic [Online]. Available: {<http://news.panasonic.com/press/news/official.data/data.dir/2013/10/jn131024-1/jn131024-1.html>}

[71] (2014, Jul. 17) 会津中央病院 + tmsuk [Online]. Available: {<http://www.onchikai.jp/robot/main.html>}

[72] (2014, Jul. 21) 電子看板載せてロボットがご案内 デジタルサイネージ付き自動走行型ロボ、ALSOK が発売 - ITmedia ニュース [Online]. Available: {<http://www.itmedia.co.jp/news/articles/0907/29/news070.html>}

[73] (2015, Jan. 07) ALSOK 総合警備保障【ホームセキュリティ・防犯対策のアルソック／法人のお客様／ロボットシステム／巡回警備ロボット Reborg-Q [Online]. Available: {http://www.alsok.co.jp/corporate/robot/reborg_}

q.html}

[74] (2014, Jan. 21) テムザックとアラコム、警備ロボ「T-34」を共同開発～FOMA 携帯電話から操作、ネットランチャーを装備 [Online]. Available: {<http://robot.watch.impress.co.jp/cda/news/2009/01/23/1567.html>}

[75] (2014, Jul. 21) あの屋外巡回監視ロボット「セコムロボット X」レンタル開始 (1 2) - ITmedia LifeStyle.html [Online]. Available: {<http://www.itmedia.co.jp/lifestyle/articles/0510/06/news082.html>}

[76] 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “ロボットの将来の市場予測”, 2010.

[77] 首相官邸, “「日本再興戦略」の改訂について (素案) ”, 2014.

[78] 永井 清, 益原 絆, 山中 和也, “ハーモニックドライブを有するマニピュレータに対する飽和特性とディザを用いた力センサレス・コンプライアンス制御”, 日本ロボット学会誌 vol. 22, no. 3, pp. 353~360, 2004.

[79] Ranjan K. Behera, Shyama P. Das, “High Performance Induction Motor Drive: A Dither Injection Technique”, Energy, Automation, and Signal (ICEAS), 2011 International Conference, pp. 1~6, 2011.