

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

高バックドライバビリティを有する
ロボット用アクチュエータに関する研究

Study on a robot actuator
with high backdrivability

申 請 者

氏 名

石田 健蔵

Tatsuzo Ishida

専攻・研究指導
(課程内のみ)

2006 年 4 月

ロボット用アクチュエータは、従来、まず産業用ロボットに適応するため、その大きなニーズである、高精度、高速、高出力を目指して発展してきた。この必要性は現在も重要であり研究開発は継続している。しかしながら近年、ロボットの適応範囲の拡大に伴い、新たなニーズが起こってきている。すなわち、たとえば、人間と共存を目指すヒューマノイドロボットに代表されるパートナーロボットの登場がある。このパートナーロボットの場合、そのアクチュエータに必要とされるのは、高精度、高速というより、共存する人間に危害を与えない安全なアクチュエータであることが望まれる。すなわち、外部からの力に対し柔らかく反応し、また、転倒の際にも衝撃を柔らかく吸収し自身の本体を守るアクチュエータであることが望まれる。また、一方、近年の産業用ロボットの分野においても高速、高精度の追求だけでなく、部品の位置決めを正確にしておかなくてもハンドリングや組立を実行することができる機能のニーズが高まっており、そのための方法として力センサなどを利用したコンプライアンス制御の必要性が急速に拡大している。このときに望まれるアクチュエータも外部から力が加えられた際に柔軟に反応する性能を持つアクチュエータである。すなわち、これからのロボット用アクチュエータとしては、高精度、高速、高出力のみならず、外部からの力に柔らかく反応するアクチュエータが望まれるようになってきている。この実現のために制御的な方法、機構的な方法など様々なアプローチが考えられ、研究がなされてきている。

本研究では、そのなかで機構的な解決策としてアクチュエータに高いバックドライバビリティを持たせ、基本的にハードウェアとして柔らかさを持たせる設計手法について研究し、提案していくことを目的とした。ハードウェアとして柔らかさを持つことができれば、制御的なコンプライアンスコントロールなども大変効果的に実現できるようになる。

本論文は全 8 章から構成され、各章の概要は次の通りである。

第 1 章では、本研究の経緯、従来研究、目的について述べた。具体的には、ロボット用アクチュエータの歴史的観点から、サーボモータや減速機の技術的な流れについて触れた。従来研究としては、DC サーボモータ、AC サーボモータ、DD モータおよび数種の減速機の開発の経緯、また柔軟性を有するアクチュエータの最近の研究内容について述べ、それらを踏まえて、本研究の目的、意義について示した。

第 2 章では、本研究の目的である高バックドライバビリティを有するロボット用アクチュエータを実現するため、まず、バックドライバビリティとは何かという概念の検討を示した。バックドライバビリティについては従来より定性的な説明は存在していたが、定量的な定義は存在していなかった。そこで、モータと減速機を含めた機構系のモデルについて検討し、「バックドライバビリティ」という概念の定量的定義を、慣性、粘性、クーロン摩擦の各抵抗、およびアクチュエ

ータの回転速度・加速度を含んだ「バックドライブ抵抗」として新たに提案を行った．この定義に基づいて，高バックドライブバビリティの実現の指針を示した．さらに，その中で，バックドライブ抵抗の実際の計測および評価に結びつける手法として静的バックドライブバビリティおよび動的バックドライブバビリティの概念についても新たに提案を行った．

第3章では，本研究に適応したロボット用高出力モータを開発し，特にその機構設計について述べた．まず，モータの要求仕様として，高い出力重量比，高い制御性能とスムーズな回転性能などを上げ，これに適応した，モータユニット，制御回路ユニット，減速機ユニットの3機能が一体化されたアクチュエータを開発した．その高出力化の開発ポイントとして，ロータマグネット，および固定子コア形状の高トルク化設計手法として，従来モータ設計には応用されることの少なかった I E M (Integral Element Method) と呼ばれる数値解析法を使用した3次元電磁場解析シミュレーションによる最適化設計手法を提案した．これは解析速度と精度の面でモータ設計に有効であることを示した．この手法により，実際に試作したモータにおいて，最適化前に比較し最適化後は，コギングトルクでは約 $1/4 \sim 1/6$ にまで減少させスムーズな回転性能を実現し，出力重量比では，従来の容積，重量で同等レベルのモータとの比較において $1.6 \sim 2.8$ 倍の高出力性能を実現した．

第4章では，高バックドライブバビリティを有する高精度減速機の構造設計手法について述べた．今回開発した減速機は，遊星歯車型減速機に属するが，第2章で提案しているバックドライブバビリティの定量的定義に基づき，その向上のための慣性抵抗，粘性抵抗，クーロン摩擦抵抗の低減に関して具体的な提案を示し，その手法により実際の減速機を試作した．さらに，従来には定量的に計測されたことのなかった実際の静的バックドライブバビリティ値の計測実験を行った．対象は，試作した2種の減速機，ロボットの減速機として広く利用されているハーモニックドライブ減速機2種，および，試作ロボットなどに利用されることの多いマクソンモータ社の遊星型減速機1種である．計測結果は，試作減速機に関しては目標値を満足する結果であり，ハーモニックドライブ減速機では，試作減速機と大きさ，減速比などの仕様で同レベルのものとの比較で約 $4 \sim 12$ 倍のバックドライブバビリティ値という大きな値が計測された．次に、方式が遊星歯車型減速機であるマクソン減速機については試作減速機に比較して約 1.5 倍のバックドライブバビリティ値を計測し，これらの比較実験から試作減速機の性能の良好であることを確認した．

第5章では，減速機を外部からある回転数で回転させている場合の抵抗，すなわち，動的バックドライブバビリティ値について計測し評価検討を進めた．この値の必要性は，ロボットの関節が転倒などの衝撃力を緩和するためには減速機が外力により急速に回転数を上げていく必要があり，その動的な状態を知ることが大

変重要となるためである。第4章と同じく5種の減速機で実験を行った。実験結果については5種の減速機のより公平な比較を行う目的で、それぞれ異なっているサイズ、減速比、バックラッシュの影響を取り除くため、無次元化の比較法を提案した。この無次元化を行った後の実験結果では、ハーモニックドライブ減速機では、試作減速機に比較してクーロン摩擦抵抗で5～6倍、粘性摩擦抵抗で8～18倍、遊星型減速機のマクソン減速機では、粘性抵抗はほぼ同等であるがクーロン摩擦抵抗では約6倍という結果を得た。この評価方法において、公正な形で試作減速機が有利であることを示した。この無次元化比較法は、小型減速機だけでなく、様々な大きさや仕様の異なる減速機を比較する場合に有効な方法であることを示した。

第6章では、前章まで検証してきた高バックドライバビリティを有するロボット用アクチュエータを実際のロボットシステムに適用することを試みた。ロボットシステムとしては、ヒューマノイドロボットを取り上げ、適用するロボットのサイズ、重量などの仕様について検討し、その仕様から導かれるアクチュエータの仕様、具体的にはモータのサイズ、重量、出力、また減速機については必要なバックドライバビリティ値について検討した。次に、ロボットシステムのアクチュエータとして望まれる具体的な性能について述べた。

第7章では、実現されたロボット用アクチュエータが、ロボットシステムにおいて目的とした性能を達成しているかどうかを各種の動作実験を通して評価し確認した。具体的な確認動作実験として、広角度旋回動作実験、前方および後方転倒動作について実験を行った。実験結果では、広角度旋回動作実験においてアクチュエータが十分な出力を持ちまたスムーズな回転を実現していることを確認し、また前方および後方の転倒動作においてはアクチュエータが必要なバックドライバビリティの性能を発揮し転倒の衝撃を柔軟に吸収していることが確認された。これらの実験よりアクチュエータのロボットシステムに対する当初の目標が達成されていることを確認した。

第8章では、結論として第2章から第7章までで得られた主要な研究成果についてまとめを行い、本研究の目的が達成されたことを示すとともに今後の展望を述べた。

以上、本研究では、ロボット用アクチュエータの今後の方向として、共存する人間に危害を与えない安全なアクチュエータであるために外部からの力に対し柔軟かく反応できること、また、コンプライアンス制御の必要性が急速に拡大している産業用ロボットにも対応できることなどを目的とし、その実現のために特に高いバックドライバビリティを有するロボット用アクチュエータの機構設計に焦点をあて、その具体的設計手法について明らかにし、ロボットの能力をより高める方式の確立に貢献した。

研 究 業 績

種類別	題名	発表学会・発行掲載誌名	発表・発行年月	連名者
○論文	A Robot Actuator Development with high backdrivability	2006 IEEE International Conferences on Cybernetics & Intelligent Systems (CIS) and Robotics, Automation & Mechatronics (RAM)	Jun. 2006	T.Ishida A.Takanishi
○論文	Analysis of Motions of a Small Biped Entertainment Robot	IROS2004(IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems)	Sep. 2004	T.Ishida Y.Kuroki
○論文	Motion and Real-World Sensing System for a Small Biped Entertainment Robot	WCICA2004 (World Congress on Intelligent Control and Automation)	Jun. 2004	T.Ishida Y.Kuroki
○論文	Development of Sensor System for a Small Biped Entertainment Robot	ICRA2004(International Conference on Robotics & Automation)	Apr. 2004	T.Ishida Y.Kuroki
○論文	Development of Mechanical System for a Small Biped Entertainment Robot	RO-MAN2003(The 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication)	Nov. 2003	T.Ishida Y.Kuroki J.Yamaguchi
○論文	Mechanical System for a Small Biped Entertainment Robot	IROS2003 (IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems)	Oct. 2003	T.Ishida Y.Kuroki J.Yamaguchi
○論文	A Small Biped Entertainment Robot and its Attractive Applications	Proc. of The Third IARP International Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics	Dec. 2002	T.Ishida Y.Kuroki K.Nagasaka J.Yamaguchi
○論文	Motion Entertainment by a Small Humanoid Robot Based on OPEN-R	IROS 2001(IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems)	Sep. 2001	T.Ishida Y.Kuroki J.Yamaguchi M.Fujita T.Doi
○論文	Sensor System of a Small Biped Entertainment Robot	Advanced Robotics, The International Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.18,No.10	Oct.2004	T.Ishida Y.Kuroki
論文	Development of a New Actuator for a Small Biped Walking Entertainment Robot	ISR2004(35th International Symposium on Robotics)	Mar. 2004	T.Fukushima Y.Kuroki T.Ishida
論文	Development of a New Actuator for a Small Biped Walking Entertainment Robot	PEMD2004(The Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives)	Mar. 2004	T.Fukushima Y.Kuroki T.Ishida
論文	Autonomous behavior control architecture of entertainment humanoid robot SDR-4X	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	Oct. 2003	M. Fujita Y. Kuroki T. Ishida T.Doi
論文	A small humanoid robot SDR-4X for entertainment applications	International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics	Sep. 2003	M. Fujita Y. Kuroki T. Ishida T.Doi
論文	A Small Biped Entertainment Robot Exploring Attractive Applications	ICRA2003(International Conference on Robotics & Automation)	Sep. 2003	Y.Kuroki M.Fujita T.Ishida K.Nagasaka J.Yamaguchi

研 究 業 績

種類別	題名	発表学会・発行掲載誌名	発表・発行年月	連名者
論文	A Small Biped Entertainment Robot	Journal of Robotics and Mechatronics Vol.14 No.1	Sep. 2002	Y.Kuroki T.Ishida J.Yamaguchi M.Fujita T.Doi
論文	A Small Biped Entertainment Robot	Proc.of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots	Oct. 2001	Y.Kuroki T.Ishida J.Yamaguchi M.Fujita T.Doi
論文	Dynamic Simulation of Humans and Humanoids	Proc.of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots	Oct. 2001	M.Raibert Y.Kuroki R.Playter T.Ishida T.Doi
総説	エンターテインメントロボットへの応用	日本ロボット学会誌 Vol.20, No.3, pp.270~272	Nov. 2003	石田健蔵
総説	小型二足歩行エンターテイン メントロボット	画像電子学会誌 第30巻 第4号	July, 2001	石田健蔵 黒木義博
総説	エンターテインメントロボットビジネス	日本ロボット学会誌、Vol.20, No.7 pp.668-671	Oct. 2002	景山浩二 石田健蔵
○講演	A Small Biped Entertainment Robot	Robotics,Intelligent Systems and Signal Processing 2003 (IEEE International Conference), Special Invited Talk	Oct. 2003.	T.Ishida
○講演	小型二足歩行エンターテインメント ロボットSDR-4X II に関する 機構部の開発	日本ロボット学会第21回 学術講演会, 1E25	Sep, 2003	石田健蔵 黒木義博 山口仁一
○講演	A Small Biped Entertainment Robot SDR-4XII	Computational Intelligence in Robotics and Automation 2003, Plenary Talk	July, 2003	T.Ishida
○講演	小型二足歩行エンタテインメント ロボットの開発	日本医工学治療学会 第 1 9 回学術大会	May, 2003	石田健蔵
○講演	感性ロボットの応用	第 3 9 回日本リハビリテーション 医学会学術集会	May, 2002	石田健蔵
講演	高度統合運動制御機能を有する 小型二足歩行エンターテインメント ロボットSDR-4X	日本ロボット学会第20回 学術講演会 ,1C17	Oct. 2002	黒木義博 石田健蔵
講演	小型二足歩行エンターテインメント ロボット	日本ロボット学会第19回学術講演会 3J26	Sep. 2001	黒木義博 石田健蔵 山口仁一
その他 論文	SRX, A New High-Speed Assembly Robot	Proc. of 15th International Symposium on Industrial Robots	Nov. 1985	T.Ishida Y.Kuroki
その他 論文	Force Control in Coordination of Two Arms	The International Joint Conference of Artificial Intelligence, pp.717-722	Aug. 1977	T.Ishida
その他 論文	Cooperative Control of Two Manipulators	Stanford Artificial Intelligence Laboratory Memo AIM-285.4	June, 1977	T.Ishida
その他 論文	Cooperational Control of the Anthropomorphous Manipulator “MELARM”	Proc. of 4th International Symposium on Industrial Robots, pp.251-260	Nov. 1974	E.Nakano S.Ozaki T.Ishida I.Kato

研 究 業 績

種 類 別	題 名	発 表 学 会 ・ 発 行 掲 載 誌 名	発 表 ・ 発 行 年 月	連 名 者
その他 論文	Arms of the WABOT(Waseda Automatic Manipulator-4)	Bulletin of Science and Engineering Laboratory Waseda University, No.62, pp.19-30	June,1973	I.Kato I.Masaki T.Ishida S.Osako M.Mizukawa
その他 総説	高速組立ロボット	日刊工業新聞社「オートメーション」 第30巻、第10号	Oct. 1986	石田健蔵 横内猛