

フレキシブル双腕ロボットの協調制御に関する研究

(課題番号：07455416)

平成7～9年度科学研究費補助金 基盤研究B(2)

研究成果報告書

平成10年3月

研究代表者 内山 勝

(東北大学 大学院工学研究科教授)

フレキシブル双腕ロボットの協調制御に関する研究

(課題番号：07455416)

平成7～9年度科学研究費補助金 基盤研究B(2)

研究成果報告書

平成10年3月

研究代表者 内山 勝

(東北大学 大学院工学研究科教授)

東北大学図書



00010138572

附属図書館

はしがき

本報告書は、平成7年4月より平成10年3月までの期間に、文部省科学研究費補助金（基盤研究 B(2)）「フレキシブル双腕ロボットの協調制御に関する研究」により、東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻宇宙機システム学講座で実施した研究の成果をまとめたものである。

本研究では、フレキシブル双腕ロボットの実作業への適用を目指し、その力制御と協調制御について、研究を実施した。具体的には、フレキシブル双腕ロボットによる物体の把持、運搬、組み付け等の実作業過程の力学モデリング、ならびにこれに基づく力制御と協調制御について研究を行った。その結果、フレキシブルアームのモデリング、力制御、双腕協調制御、および逆運動学・動力学について、成果を挙げ、これに基づき双腕協調制御系を設計することができた。そして、この制御系を3次元フレキシブル双腕ロボットに適用し、物体の把持、運搬作業を実現した。このような作業の実現は、世界でも例がない。

なお、本研究には、元大学院博士課程学生湯川俊浩君（現在、富士通）、修士課程学生薄井和明君（現在、日立製作所）、鈴木邦章君（現在、東北電力）、大学院研究生戴永強君（現在、日野自動車）、学部研究生 Andrey A. Loukianov 君（現在、ロシア科学アカデミー）、および現大学院博士課程3年金鎮秀君、同1年山野光裕君、修士課程1年桂島航君、学部4年川口順央君が参加し、大きな貢献をした。ここに記して感謝の意を表す。

平成10年3月 内山勝

研究発表

I. 学会誌等

研究組織

研究代表者： 内山 勝（東北大学 大学院工学研究科教授）

研究分担者： ドウラゴミール・ネンチェフ（新潟大学 工学部教授）

阿部幸勇（東北大学 工学部教務職員）

研究経費

平成7年度 3,900千円

平成8年度 1,500千円

平成9年度 1,100千円

計 6,500千円

- [5] 近野義、内山勝：三次元フレキシブルマニピュレータの可変ゲイン振動抑制制御実験。日本機械学会論文集（C編）、61-591（1995/11/26）、4345-4350。
- [6] 近野義、内山勝、貴谷豊、村上真人：フレキシブルアームマニピュレータの姿勢依存振動抑制制御。計測自動制御学会論文集、32-1（1996/1）、78-86。
- [7] Masaru Uchiyama and Atsushi Konno: Modeling, Controllability and Vibration Suppression of 3D Flexible Robots, Robotics Research, The Seventh International Symposium, Georges Gauthier and Gerhard Hirzinger (Eds), Springer, (1996), 90-99.
- [8] 内山勝：FLEBOT (FLExible roBOT) II, 日本ロボット学会誌、14-3（1996/4）、333-340。
- [9] 内山勝：ADAM (Aerospace Dual Arm Manipulator) 日本ロボット学会誌、14-3（1996/4）、341-341。
- [10] Jin-Seo Kim, Kazuaki Suzuki, Atsushi Konno and Masaru Uchiyama: Force Control of Constrained Flexible Manipulators, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, USA, (1996/4), 635-640.

研究発表

I. 学会誌等

- [1] T. Yukawa, M. Uchiyama, H. Inooka: Handling of a Constrained Flexible Object by a Robot, PROCEEDINGS 1995 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, Nagoya, Japan, (1995/5), 324-329.
- [2] T. Yukawa, M. Uchiyama, H. Inooka: Cooperative Control of a Vibrating Flexible Object by a Rigid Dual-Arm Robot, PROCEEDINGS 1995 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, Nagoya, Japan, (1995/5), 1820-1826.
- [3] A. Konno and M. Uchiyama: VIBRATION SUPPRESSION CONTROL OF SPATIAL FLEXIBLE MANIPULATORS, CONTROL ENGINEERING PRACTICE, A Journal of IFAC the International Federation of Automatic Control, 3-9 (1995/9), 1315-1321.
- [4] Jin-Soo Kim, Kuniaki Suzuki, Atsushi Konno, Masaru Uchiyama: Hybrid Position/Force Control of Flexible Manipulators, Proceedings of the 10th KOREA AUTOMATIC CONTROL CONFERENCE, International Program, October 23-25, 1995, Seoul, Korea, (1995/10), 408-411.
- [5] 近野敦、内山勝：三次元フレキシブルマニピュレータの可変ゲイン振動抑制制御実験、日本機械学会論文集（C編）、61-591 (1995/11/25), 4345-4350.
- [6] 近野敦、内山勝、貴答豊、村上真人：フレキシブルアームマニピュレータの姿勢依存振動可制御性、計測自動制御学会論文集、32-1 (1996/1), 78-86.
- [7] Masaru Uchiyama and Atsushi Konno: Modeling, Controllability and Vibration Suppression of 3D Flexible Robots, Robotics Research, The Seventh International Symposium, Georges Giralt and Gerhard Hirzinger (Eds), Springer, (1996), 90-99.
- [8] 内山勝：FLEBOT (FLExible roBOT) II, 日本ロボット学会誌、14-3 (1996/4), 340-340.
- [9] 内山勝：ADAM (Aerospace Dual Arm Manipulator) 日本ロボット学会誌、14-3 (1996/4), 341-341.
- [10] Jin-Soo Kim, Kuniaki Suzuki, Atsushi Konno and Masaru Uchiyama: Force Control of Constrained Flexible Manipulators, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, USA, (1996/4), 635-640.

- [11] T. Yukawa, M. Uchiyama, D. N. Nenchev, H. Inooka: Stability of Control System in Handling of a Flexible Object by Rigid Arm Robots, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, USA, (1996/4), 2332-2339.
- [12] Jin-Soo Kim, Kuniaki Suzuki, Mitsuhiro Yamano and Masaru Uchiyama: HYBRID POSITION/FORCE CONTROL OF SPATIAL FLEXIBLE MANIPULATORS, PROCEEDINGS THE THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOTION AND VIBRATION CONTROL, Chiba, JAPAN, Edited by K. Nonami and T. Mizuno, Volume 1 (1996/9/1-6), 222-227.
- [13] 金鎮秀、近野敦、内山勝：フレキシブルマニピュレータ動力学の高精度集中定数モデリング、日本機械学会論文集（C編）、62-602 (1996/10), 4005-4011.
- [14] Atsushi Konno, Masaru Uchiyama: Modeling of a Flexible Manipulator Dynamics Based upon Holzer's Model, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Osaka, Japan, (1996/11), 223-229.
- [15] Jin-Soo Kim, Kuniaki Suzuki and Masaru Uchiyama: Force Control of a Flexible Manipulator Based on the Measurement of Link Deflections, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Osaka, Japan, (1996/11), 238-245.
- [16] Y. Q. Dai, K. Usui and M. Uchiyama: A New Iterative Approach to Solving Inverse Flexible-Link Manipulator Kinematics, Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control, Kobe, Japan, (1996/12/11, 12, 13), 2493-2494.
- [17] Jin-Soo Kim, Kuniaki Suzuki, Mitsuhiro Yamano and Masaru Uchiyama: Vibration Suppression Control of Constrained Spatial Flexible Manipulators, Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, USA, (1997/4), 2831-2837.
- [18] Y. Q. Dai, A. A. Loukianov, M. Uchiyama: A Hybrid Numerical Method for Solving the Inverse Kinematics of a Class of Spatial Flexible Manipulators, Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, USA, (1997/4), 3449-3454.
- [19] S. López-Linares, A. Konno, and M. Uchiyama: Vibration Controllability of 3D Flexible Manipulators, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 119-2 (1997/6), 326-330.
- [20] A. A. Loukianov, Y. Q. Dai, M. Uchiyama: Trajectory Tracking of Spatial Flexible Link Manipulators Using Inverse Kinematics Solution and Vibration Suppression,

- 1997 8th International Conference on Advanced Robotics Proceedings, Monterey, California, U.S.A., (1997/7/7-9), 221-226.
- [21] Atsushi Konno, Masaru Uchiyama, Yutaka Kito and Mahito Murakami: Configuration-Dependent Vibration Controllability of Flexible-Link Manipulators, The International Journal of Robotics Research, 16-4 (1997/8), 567-576.
- [22] 内山勝、薄井和明、戴永強：学習アルゴリズムを用いたフレキシブルマニピュレータの逆運動学解法、計測自動制御学会論文集、33-8 (1997/8/31), 858-860.
- [23] Y. Q. Dai, A. A. Loukianov, M. Uchiyama: SPATIAL FLEXIBLE MANIPULATOR TRAJECTORY CONTROL THROUGH SOLVING THE INVERSE KINEMATICS, Preprints of the Fifth IFAC Symposium on Robot Control, Nantes, France, (1997/9/3-5), 273-279.
- [24] Jin-Soo Kim, Mitsuhiro Yamano and Masaru Uchiyama: Lumped-Parameter Modeling for Cooperative Control of Two Flexible Manipulators, Asia-Pacific Vibration Conference '97, Proceedings, Kyongju, Korea, (1997/11/9-13), 120-125.
- [25] Mitsuhiro Yamano, Jin-Soo Kim and Masaru Uchiyama: Experiments on Cooperative Control of Two Flexible Manipulators Working in 3D Space, Asia-Pacific Vibration Conference '97, Proceedings, Kyongju, Korea, (1997/11/9-13), 274-279.
- [26] S. López-Linares, A. Konno, M. Uchiyama: Vibration Suppression Control of 3D Flexible Robots Using Velocity Inputs, Journal of Robotic Systems, 14-12 (1997/12), 823-837.
- [27] Mitsuhiro Yamano, Jin-Soo Kim and Masaru Uchiyama: Hybrid Position/Force Control of Two Cooperative Flexible Manipulators Working in 3D Space, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, (1998/5/16-20), (to be presented).

II. 口頭発表

- [1] 金鎮秀、近野敦、内山勝：フレキシブルマニピュレータの力制御に関する研究、日本機械学会 [No. 95-17] ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 講演論文集、(1995/6), 157-160.
- [2] 湯川俊浩、内山勝、猪岡光：剛体ロボットにより柔軟対象物を把持する際の制御系の安定性、日本機械学会 [No. 95-17] ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 講演論文集、(1995/6), 169-172.
- [3] 薄井和明、内山勝：フレキシブルマニピュレータ逆運動学の一解法、第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集、(1995/11), 51-52.

- [4] 鈴木邦章、金鎮秀、内山勝：3次元フレキシブルマニピュレータの力制御実験、第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集、(1995/11), 77-78.
- [5] 湯川俊浩、内山勝、猪岡光：双腕剛体ロボットによる柔軟対象物の変形制御、第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集、(1995/11), 779-780.
- [6] 薄井和明、内山勝：学習アルゴリズムによるフレキシブルロボットの逆運動学解法、計測自動制御学会東北支部第157回研究集会資料、(1995/11/24), 資料番号157-7.
- [7] 金鎮秀、鈴木邦章、内山勝：フレキシブルマニピュレータのモデリングと力制御、'95 ADAMS ユーザ・コンファレンス、株式会社電通国際情報サービス、(1995/12/1), 22-28.
- [8] 金鎮秀、鈴木邦章、内山勝：リンクの歪みを用いるフレキシブルマニピュレータの力制御、日本機械学会 [No. 96-2] ロボティクス・メカトロニクス講演会'96 講演論文集、(1996/6/20, 21), 173-176.
- [9] 山野光裕、金鎮秀、鈴木邦章、内山勝：拘束環境下における3次元フレキシブルマニピュレータの集中定数系によるモデリング、東北支部八戸地方講演会講演論文集、No. 961-2, 日本機械学会東北支部、(1996/9/7), 338-340.
- [10] Andrey Loukianov, Yongqiang Dai, Masaru Uchiyama: A Method for Flexible Manipulator Inverse Kinematics Using the Solution of a Differential-Algebraic System, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集、(1996/11/1, 2, 3), 759-760.
- [11] 山野光裕、金鎮秀、内山勝：双腕フレキシブルマニピュレータの協調制御実験、第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集、(1996/11/1, 2, 3), 1005-1006.
- [12] Mitsuhiro Yamano, Jin-Soo Kim, Kuniaki Suzuki and Masaru Uchiyama: Modeling of Constrained Spatial Flexible Manipulators, Proceedings of U.S.-Japan Graduate Student Forum in Robotics, Osaka, Japan, (1996/11), 93-96.
- [13] Masaru Uchiyama: MULTI-ARM ROBOT SYSTEMS: A SURVEY, Tutorial Su A4, Modeling and Control of Multi-Arm Robot Systems, Organizers: Pasquale Chiacchio and Stefano Chiaverini, 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, USA, (1997/4/20), A-1-A-25.
- [14] 山野光裕、金鎮秀、内山勝：双腕フレキシブルマニピュレータの協調制御における振動抑制制御、日本機械学会 [No. 97-22] ロボティクス・メカトロニクス講演会'97 講演論文集、(1997/6/7, 8), 199-202.
- [15] 桂島航、山野光裕、金鎮秀、内山勝：フレキシブル冗長マニピュレータの擬似逆行列を用いた位置制御及びその振動抑制効果、第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集、(1997/9/12, 13, 14), 9-10.

- [16] 内山勝：フレキシブルマニピュレータの制御、第12回「大学と科学」公開シンポジウム予稿集、生物に学ぶマシン—柔らかく優しく動く機械—、(1997/10/27, 28), 18-19.

目次

III. 出版物

- [1] Masaru Uchiyama: Multirobots and Cooperative Systems, Control Problems in Robotics and Automation, B. Siciliano and K.P. Valavanis (Eds), Lecture Notes in Control and Information Sciences 230, Editor: M. Thoma, Springer, (1997), 19-34.

第1章 フレキシブルマニピュレータのモデリング

第2章 フレキシブルマニピュレータの制御

第3章 フレキシブルマニピュレータの協調制御

第4章 フレキシブルマニピュレータの駆動系・動力学

付録 フレキシブルマニピュレータのモデリング

目次

本研究では、フレキシブル関節ロボットの実用への適用を目指し、その力制御と協調制御について、フレキシブル関節ロボットによる物体の把持、運搬、組み付け等の動作を実現するためのモデリング、ならびにこれに基づく力制御と協調制御について研究を行った。本研究の概要は以下の通りである。

研究成果の概要	1
第1章 フレキシブルアームのモデリング	2
第2章 フレキシブルアームの力制御	37
第3章 フレキシブルアームの双腕協調制御	59
第4章 フレキシブルアームの逆運動学・動力学	73
付録 フレキシブル対象物のハンドリング	90

1. フレキシブルアームの力制御について、まず固有力学系としてのモデル化ならびに制御系設計を行い、これに基づき実験的検証を行った。また、このモデルに基づき、本研究で扱ったようなフレキシブル対象物のハンドリングに適用し、物体の把持、運搬作業を実現した。このような作業は、従来の剛体モデルでは実現できない。

2. フレキシブルアームの双腕協調制御について、力制御の観点から、固有力学系としてのモデル化を行い、これに基づき協調制御系を設計した。この制御系をフレキシブル対象物のハンドリングに適用し、物体の把持、運搬作業を実現した。このような作業は、従来の剛体モデルでは実現できない。

3. フレキシブルアームの逆運動学・動力学について、この問題を微分代数方程式としてモデル化し、非線形制御に基づく新しい解法を提案した。本解法の収束性について解析し、その有効性を実験およびシミュレーションにより明らかにした。

研究成果の概要

本研究では、フレキシブル双腕ロボットの実作業への適用を目指し、その力制御と協調制御について研究した。具体的には、フレキシブル双腕ロボットによる物体の把持、運搬、組み付け等の実作業過程の力学モデリング、ならびにこれに基づく力制御と協調制御について研究した。その成果の概要は以下の通りである。

1. フレキシブルアームのモデリングに関して、簡便かつ有効な集中定数モデルを提案し、その精度、適用範囲について評価を行った。また、このモデルに基づき、従来研究されていなかった可制御性について、解析を行い、種々の興味深い不可制御姿勢を見いだした。
2. フレキシブルアームの力制御について、まず拘束力学系としての定式化ならびに解析を行い、これに基づき制御系を設計した。そして、実験により有効性を確認した。また、力制御と振動制御の干渉について論じ、その幾何学を明らかにした。
3. フレキシブルアームの双腕協調制御について、力制御の場合と同様、拘束力学系としてのモデリングを行い、これに基づき協調制御系を設計した。この制御系を3次元フレキシブル双腕ロボットに適用し、物体の把持、運搬作業を実現した。このような作業の実現は、世界でも例がない。
4. フレキシブルアームの逆運動学・動力学について、この問題を微分代数方程式として定式化し、学習制御に基づく新しい解法を提案した。本解法の収束性について解析し、その条件を導いた。解の有効性を実験およびシミュレーションにより明らかにした。

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録していません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。