

Title	ロボット用パワー超音波モータの非線形特性解析と制御
Sub Title	Non-linear analysis and control of power ultrasonic motor for robots
Author	前野, 隆司(MAENO, TAKASHI) 竹村, 研治郎(TAKEMURA, KENJIRO)
Publisher	
Publication year	2009
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2008. )
JaLC DOI	
Abstract	超音波モータのスタート・ストップ時の過渡応答特性を精密計測するとともに, 圧電変換・接触変換を含むモデルを作成することによって, 超音波モータの特性を解析する手法を開発した。また, 構築したモデルに基づき, 超音波モータの非線形制御系を構築し, 超音波モータのトルク制御を実現した。さらに, 超音波モータを用いた5指ロボットハンドおよび義手、超音波振動子を用いた触覚ディスプレイを開発し、新たなロボットへのアプリケーション例を示した。
Notes	研究種目：特定領域研究  研究期間：2004～2008  課題番号：16078213  研究分野：工学  科研費の分科・細目：機械工学 知能機械学・機械システム
Genre	Research Paper
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_16078213seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_16078213seika</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

平成 21 年 5 月 30 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2008

課題番号：16078213

研究課題名（和文） ロボット用パワー超音波モータの非線形特性解析と制御

研究課題名（英文） Non-Linear Analysis and Control of Power Ultrasonic Motor for Robots

研究代表者

前野 隆司 (MAENO TAKASHI)

慶應義塾大学・大学院システムデザイン・マネジメント研究科・教授

研究者番号：20276413

研究成果の概要：超音波モータのスタート・ストップ時の過渡応答特性を精密計測するとともに、圧電変換・接触変換を含むモデルを作成することによって、超音波モータの特性を解析する手法を開発した。また、構築したモデルに基づき、超音波モータの非線形制御系を構築し、超音波モータのトルク制御を実現した。さらに、超音波モータを用いた5指ロボットハンドおよび義手、超音波振動子を用いた触覚ディスプレイを開発し、新たなロボットへのアプリケーション例を示した。

交付額

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	13,500,000	0	13,500,000
2005年度	11,700,000	0	11,700,000
2006年度	7,400,000	0	7,400,000
2007年度	3,600,000	0	3,600,000
2008年度	1,900,000	0	1,900,000
総計	38,100,000	0	38,100,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 知能機械学・機械システム

キーワード：超音波モータ、振動計測、解析、制御、ロボットハンド、触覚ディスプレイ

## 1. 研究開始当初の背景

超音波モータは低速高トルク、高保持トルク、静粛などの特徴を持ち、ロボット用パワーアクチュエータとして適している。しかし、スタート・ストップ時の過渡応答特性の計測やモデル化が十分に行われていなかったため、ロボットの高速制御用アクチュエータとしての実用化はいまだ発展途上にあった。

## 2. 研究の目的

本研究では、超音波モータのスタート・ストップ時の過渡応答特性を精密計測するとともに、圧電変換・接触変換を含むモデルを

作成することによって、超音波モータの特性を解析可能とする。また、構築したモデルに基づき、超音波モータの非線形制御系を構築し、高速・高応答性を実現できる超音波モータのトルク制御手法を開発する。

さらに、上記の解析法・制御法を用いて、超音波モータを20個用いた5指ロボットハンド、超音波モータを用いた5指なじみ機構を有する義手型ロボットハンド、超音波振動子を用いた触覚ディスプレイを開発し、新たなロボットへのアプリケーション例を示す。

## 3. 研究の方法

それぞれの研究ごとに、研究の方法について以下に述べる。

超音波モータのスタート・ストップ時の過渡応答特性の精密計測においては、本補助金により購入したレーザ変位系を用いて、これまで明らかにされていなかった超音波モータのスタート・ストップ時の振動特性および駆動特性を様々な条件下で精密測定した。また、本計測結果を参考にしつつ、トライボロジや圧電変換に関する最先端の知見を利用することによって、圧電変換・接触変換を含む超音波モータの駆動モデルを作成した。最後に、作成した数値シミュレーションモデルによる解析結果と実験結果の比較を行った。

超音波モータのトルク制御手法の開発においては、上記と同様、綿密な計測を行うとともに、その特性を参照することによりトルク変動に対してロバストな超音波モータのトルク制御手法を開発した。最後に、作成した制御系を用いた実験を行い、制御方の検証を行った。

超音波モータを20個用いた5指ロボットハンドの開発においては、遠隔手術などの高度な動作をロボットハンドに伝達することを念頭に、人間とほぼ同じ自由度を有する20自由度ロボットハンドを開発した。また、開発したロボットハンドの動作検証を行った。

超音波モータを用いた5指なじみ機構を有する義手型ロボットハンドの開発においては、上のロボットハンドとは逆に、ひとつのモータで5指を駆動し、ハンドがつかむ物体の形状に応じて手の形を変えられるなじみ機構を考案し実装した。また、開発したロボットハンドの動作検証を行った。

超音波振動子を用いた触覚ディスプレイの開発では、超音波アクチュエータの安定な振動を利用し、超音波振動を振幅変調することにより、様々な触感を呈示できる触覚ディスプレイを開発した。また、心理物理実験によりその触覚呈示特性を検証した。

また、上述と同様、実験による現状把握と数値シミュレーションによるモデリングを併用した手法を用いて、様々な超音波モータの開発や、超音波モータを用いたロボットの開発を行うとともに、それぞれについての実験的検証を行った。

#### 4. 研究成果

それぞれの研究の成果について以下に述べる。

超音波モータのスタート・ストップ時の過渡応答特性の精密計測においては、作成した数値シミュレーションモデルによる解析結果は、実験結果とよく一致した。特に、実際に見られる超音波モータの非線形特性を定量的に把握できる数値モデルはこれまでなかったため、超音波モータの特性把握のため

に極めて有益なモデルであることを確認した。

超音波モータのトルク制御手法の開発においては、上記と同様、駆動制御特性を評価した結果、従来は行い得なかった高精度制御を行うことが可能であることを確認した。

超音波モータを20個用いた5指ロボットハンドの開発においては、開発したロボットハンドの動作検証を行った結果、モータを手指に内蔵したロボットハンドとしては世界最高の応答特性を有することを確認した。

超音波モータを用いた5指なじみ機構を有する義手型ロボットハンドの開発においては、ひとつのモータで5指を駆動し、ハンドがつかむ物体の形状に応じて手の形を変えられるなじみ機構の動作検証を行った結果、超音波モータを1個しか用いていないにもかかわらず、従来の電動義手よりも多様な物体を把持することが可能であることを確認した。

超音波振動子を用いた触覚ディスプレイの開発では、心理物理実験によりその触覚呈示特性を検証した結果、従来の最高レベルの触覚ディスプレイと同等または卓越したレベルの触覚呈示が可能であることを確認した。

また、上述と同様、実験による現状把握と数値シミュレーションによるモデリングを併用した手法を用いて、様々な超音波モータの開発や、超音波モータを用いたロボットの開発を行い、超音波モータ、超音波アクチュエータおよびそれらを利用したロボティクス・メカトロニクス機器に関する研究分野の発展に貢献した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

神川康久, 前野隆司, ヒトの把持力分布を模倣した5指なじみ機構を有する義手の開発, 日本機械学会論文集 74 巻 746号C編, 2008年, pp. 2542-2548, 査読有

Kenjiro Takemura, Shinsuk Park and Takashi Maeno, Control of Multi-DOF Ultrasonic Actuator for Dexterous Surgical Instrument, Journal of Sound and Vibration, 311, 2008年, pp. 652-666, 査読有

Akira Saito, Yosuke Nakagawa and Takashi Maeno, Non-linear Dynamic Analysis of Traveling Wave-Type Ultrasonic Motors, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and

Frequency Control, Vol. 55, No. 3, 2008年, pp. 717-725, 査読有  
 中川洋祐, 斎藤彰, 前野隆司, 進行波型超音波モータの非線形動特性解析, 日本機械学会論文集 73 巻 727 号 C 編, 2007年, pp. 708-715, 査読有  
 音川佳代, 竹村研治郎, 前野隆司, 単層駆動型多自由度超音波モータ, 日本機械学会論文集 73 巻 726 号 C 編, 2007年, pp. 577-582, 査読有  
 小河原洋一, 前野隆司, 摩擦接触モデルを用いた進行波型超音波モータのトルク制御, 日本機械学会論文集 72 巻 714 号 C 編, 2006年, pp. 441-448, 査読有  
 山野郁男, 前野隆司, 超音波モータと弾性要素を用いた5指ロボットハンド開発, 日本ロボット学会誌 23 巻 8 号, 2005年, pp. 977-985, 査読有  
 小山辰也, 竹村研治郎, 前野隆司, 超音波ブレーキの開発, 日本機械学会論文集 71 巻 703 号 C 編, 2005年, pp. 875-880, 査読有  
 Kenjiro Takemura, Yuji Ohno and Takashi Maeno, Design of a Plate Type Multi-DOF Ultrasonic Motor and its Self-Oscillation Driving Circuit, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 9, No. 3, 2004年, pp. 474-480, 査読有  
 Shinsuk Park, Kenjiro Takemura and Takashi Maeno, Study on Multi-DOF Ultrasonic Actuator for Laparoscopic Instrument, Bulletin of JSME, Series C, Vol. 47, No. 2, 2004年, pp. 574-581, 査読有

[学会発表](計 39 件)

Takashi Maeno, Dynamic Characteristics Analysis and Control of Power Ultrasonic Motors, International Symposium on Next-Generation Actuator Leading Breakthroughs, 2008年12月8日, 東京  
 Takashi Maeno, Haptics of Humans and Robots, Invited Speech, 18th International Conference on Artificial Reality and Telexistence, 2008年12月3日, 横浜  
 Yasuhisa Kamikawa and Takashi Maeno, Underactuated Five-Finger Prosthetic Hand Inspired by Grasping Force Distribution of Humans, Proc. IEEE/RSJ Intl. Conference on

Intelligent Robots and Systems, 2008年9月22日, pp. 717-722, ニース  
 Yuta Shiokawa, Atsushi Tazo, Masashi Konyo and Takashi Maeno, Hybrid Display of Realistic Tactile Sense using Ultrasonic Vibrator and Force Display, Proc. IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008年9月22日, pp. 3008-3013, ニース  
 Yuta Shiokawa, Atsushi Tazo, Masashi Konyo and Takashi Maeno, Hybrid Display of Realistic Tactile Sense using Ultrasonic Vibrator and Force Display, APCOSE, 2008年9月22日, 横浜  
 五味淳, 前野隆司, 川淵一郎, 小型超音波モータ内蔵型 20 自由度ロボットハンド, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 講演論文集, 2008年6月6日, 1A1-A07, 長野  
 塩川雄太, 前野隆司, 昆陽雅司, 超音波振動子と力覚呈示装置の統合に基づく複合触感呈示法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 講演論文集, 2008年6月6日, 1A1-H20, 長野  
 Akira Saito and Takashi Maeno, Nonlinear Transient Response Analysis of Traveling-Wave-Type Ultrasonic Motors, Proc. IEEE 7th International Symposium on Applications of Ferroelectrics, 2008年2月27日, サンタフェ  
 Takashi Maeno, Non-Linear Analysis and Control of Power Ultrasonic Motors, International Symposium on Next-Generation Actuator Leading Breakthroughs, 2007年11月20日, 那覇  
 Takashi Maeno, Dynamic Characteristics Analysis and Control of Power Ultrasonic Motors, International Symposium on Next-Generation Actuator Leading Breakthroughs, 2007年11月19日, 那覇  
 Takashi Maeno, Recent Progress of Ultrasonic Motors in Japan, The 4th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators, 2007年9月13日, p. 85, 南京

前野隆司, 超音波モータの最近の動向, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演資料集 Vol. 8, 2007 年 9 月 11 日, pp. 202-203, 吹田

Atsushi Tazo and Takashi Maeno, Tactile Displaying Method using Ultrasonic Vibrator for Controlling Sense of Roughness and Softness, 19th International Congress on Acoustics, 2007 年 9 月 3 日, pp. ULT-17-016, マドリッド

Makoto Toeda and Takashi Maeno, Design of a ring-type ultrasonic motor by use of mixed vibration modes for improvement of efficiency and life time by reduction of slippage, 19th International Congress on Acoustics, 2007 年 9 月 3 日, pp. ULT-09-016, マドリッド

Hideaki Kanasugi and Takashi Maeno, Design of a Multi-DOF Linear Ultrasonic Motor by use of a First Longitudinal Mode and Two First Bending Modes, 19th International Congress on Acoustics, 2007 年 9 月 3 日, pp. ULT-09-015, マドリッド

元木陽平, 山田浩史, 昆陽雅司, 田所諭, 前野隆司, 超音波振動を用いた触覚インターフェースのための小型振動子の開発, 第 12 回ロボティクスシンポジウム, 2007 年 3 月 12 日, pp. 466-471, 長岡  
Takashi Maeno, Novel Ultrasonic Motors and Their Applications, 1st International Symposium on Next-Generation Actuator Leading Breakthroughs, 2006 年 12 月 18 日, pp. 123-126, 仙台

Takashi Maeno, Kayo Otokawa and Masashi Konyo, Tactile Display of Surface Texture by use of Amplitude Modulation of Ultrasonic Vibration, IEEE Ultrasonics Symposium, 2006 年 10 月 4 日, pp. 62-65, パンクーバー

昆陽雅司, 音川佳代, 前野隆司, 超音波振動の振幅変調を用いた人工触感呈示法, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2006 年 9 月 14 日, 2K13, 岡山

戸枝誠, 前野隆司, 高効率化のための低摺動リニア超音波モータの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06 講演論文集, 2006 年 6 月 27 日, 1A1-C12, 東京

21 田蔵淳史, 前野隆司, 遺伝的アルゴリズムを用いた多自由度超音波モータの設計方法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06 講演論文集, 2006 年 6 月 27 日, 1A1-C13, 東京

22 金杉英明, 前野隆司, 複数の回転子を有する多自由度超音波モータの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06 講演論文集, 2006 年 6 月 27 日, 1A1-C14, 東京

23 M. Toeda and T. Maeno, Design of a Slip-Free Linear Ultrasonic Motor for Efficiency Improvement, Proc. 10th International Conference on New Actuators, 2006 年 6 月 15 日, pp. 611-614, プレーメン

24 H. Kanasugi and T. Maeno, Development of a Multi-Degree-of-Freedom Ultrasonic Motor with Multiple Rotors, Proc. 10th International Conference on New Actuators, 2006 年 6 月 15 日, pp. 588-591, プレーメン

25 A. Tazo and T. Maeno, Design Method of a Multi-Degree-of-Freedom Ultrasonic Motor using Genetic Algorithm, Proc. 10th International Conference on New Actuators, 2006 年 6 月 15 日, pp. 563-566, プレーメン

26 田蔵淳史, 前野隆司, 遺伝的アルゴリズムを用いた多自由度超音波モータの設計方法, 第 6 回日本機械学会機素潤滑設計部門講演会講演論文集, No. 06-6, 2006 年 5 月 30 日, pp. 275-278, 松島

27 Takashi Maeno, Recent Progress of Ultrasonic Motors, The First International Workshop on Ultrasonic Motors and Actuators, 2005 年 11 月 14 日, pp. 15-18, 横浜

28 Kayo Otokawa, Kenjiro Takemura and Takashi Maeno, A Multi-Degree-of-Freedom Ultrasonic Motor using Plural Single-Phase-Drive-Type Vibrators, The First International Workshop on Ultrasonic Motors and Actuators, 2005 年 11 月 14 日, pp. 37-38, 横浜

29 K. Otokawa, K. Takemura and T. Maeno, Development of an Arrayed Multi-Degree-of-Freedom Ultrasonic Motor, Proc. Fifth International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, 2005 年 9 月 26 日, pp. 258-261, 淡路

- 30 K. Otokawa and T. Maeno, A Multi-Degree-of-Freedom Ultrasonic Motor using Plural Single Phase Drive Type Vibrators, The 1st International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, 2005年6月23日, ソウル
- 31 昆陽雅司, 音川佳代, 前野隆司, 超音波振動の振幅変調を用いた複合触覚呈示法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05講演論文集, 2005年6月9日, 1P1-N-101, 神戸
- 32 音川佳代, 竹村研治郎, 前野隆司, 単相駆動型振動子を用いた多自由度超音波モータ, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05講演論文集, 2005年6月9日, 2A1-S-080, 神戸
- 33 Yosuke Nakagawa, Akira Saito and Takashi Maeno, Transient Analysis of Bar-Type Ultrasonic Motors, Proc. IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004年10月1日, pp. 1263-1268, 仙台
- 34 Kayo Otokawa and Takashi Maeno, Development of an Arrayed-type Multi-Degree-of-Freedom Ultrasonic Motor Based on a Selection of Reciprocating Vibration Modes, Proc. IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 50th Anniversary Joint Conference, 2004年8月25日, エドモントン
- 35 Yoichi Ogahara and Takashi Maeno, Torque Control of a Traveling Wave Type Ultrasonic Motor Impressed High Load Torque in Low Speed Range, Proc. IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 50th Anniversary Joint Conference, 2004年8月25日, エドモントン
- 36 音川佳代, 竹村研治郎, 前野隆司, 往復振動モードの選択的励振に基づく振動子複数配置型多自由度超音波モータの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04講演論文集, 2004年6月9日, 2A1-L1-65, 神戸
- 37 山野郁男, 前野隆司, 超音波モータと弾性要素を用いた5指型ロボットハンドの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04講演論文集, 2004年6月9日, 2P1-L1-9, 神戸
- 38 Takashi Maeno, Ichiro Okumura, Takayuki Tsukimoto and Takao Mori, How to Make High Efficiency Ultrasonic Motors, Proc. Intl. Conf. Acoustics, 2004年4月5日, pp. 1409-1412, 京都
- 39 Kayo Otokawa, Kenjiro Takemura and Takashi Maeno, Development of a Multi-Degree-of-Freedom Ultrasonic Motor using Single Mode Vibrations, Proc. Intl. Conf. Acoustics, 2004年4月5日, pp. 1V3231-1V3234, 京都
- 〔図書〕(計5件)
- 塩崎忠, 前野隆司, 他, 圧電材料の基礎と最新応用, シーエムシー出版, 2008年8月, pp. 199-206
- 曾根悟, 松井信行, 堀洋一, 前野隆司, 他, モータの事典, 朝倉書店, 2007年6月, 494ページ
- 樋口俊郎, 前野隆司, 他, 未来型アクチュエータ材料・デバイス その基盤技術と研究展望, シーエムシー出版, 2006年12月, 384ページ
- 前野隆司, 他, パートナーロボット資料集成, エヌ・ティー・エス, 2005年12月, 644ページ
- 樋口俊郎, 前野隆司, 他, アクチュエータ工学, 養賢堂, 2004年12月, pp. 93-106
6. 研究組織
- (1)研究代表者  
前野 隆司 (MAENO TAKASHI)  
慶應義塾大学・大学院システムデザイン・マネジメント研究科・教授  
研究者番号: 20276413
- (2)研究分担者  
竹村 研治郎 (TAKEMURA KENJIRO)  
慶應義塾大学・理工学部・専任講師  
研究者番号: 90348821
- (3)連携研究者  
なし