

研究種目：特定領域研究
研究期間：2004～2008
課題番号：16078204
研究課題名（和文） 超精密モーションコントロールに用いるエネルギー環流駆動方式の弾性表面波モータ
研究課題名（英文） Energy Circulation Drive Surface Acoustic Wave Motor for Precision Motion Control
研究代表者
黒澤 実 (KUROSAWA MINORU)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授
研究者番号：70170090

研究成果の概要：

弾性表面波モータのサーボシステムの基礎となる、摩擦駆動の物理モデル構築と、現象論としての表現モデル構築を行った。前者はコンタクトメカニクス概念を適用してモデル化を行い、実験結果と一致する特性シミュレーションに成功した。後者は応答を表すブロック図表現を求め、モータの過渡応答をシミュレーションすることに成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	15,400,000	0	15,400,000
2005年度	15,400,000	0	15,400,000
2006年度	15,400,000	0	15,400,000
2007年度	15,400,000	0	15,400,000
2008年度	15,400,000	0	15,400,000
総計	77,000,000	0	77,000,000

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：アクチュエータ，超音波モータ，圧電，弾性表面波，MEMS，マイクロアクチュエータ，超音波，レイリー波

1. 研究開始当初の背景

これまで我々が、世界に先駆けて独自に研究開発を行ってきた弾性表面波モータは優れた基本性能を有していることを示してきた。しかし、波動からの速度・推力への変換機序とその定量的な関係を明らかにする物理モデルが確立されておらず、実験的に性能を評価するにとどまっていた。また、駆動方法として効率向上が見込まれるエネルギー環流駆動方式を提案し、試作を行っていたが、その駆動特性についてはモデル化ができておらず、制御対象としてのモデル化とサーボアクチュエータとしての検討が必要とされていた。

2. 研究の目的

(1) 弾性表面波モータの駆動周波数である10-100 MHz程度、波動の振動振幅1-10 nm程度という微小な振動状態での、弾性波動からモータとしての速度・推力への変換機序を解明するために、そのモデル化を行い、動作過程を把握できるようにする。

(2) PID制御法を適応しサーボアクチュエータとして機能させるために動作特性に関して詳細な検討を行い、制御アルゴリズムの実装について検討する。弾性表面波モータを用いた高性能な超精密・ナノシステムを実現する方法を検討する。

3. 研究の方法

(1) 弾性波動からモータとしての速度・推力への変換機序を解明するために、摩擦と弾性変形を考慮した物理モデルを構築する。そのモデル化を通して、数値シミュレーションにより弾性波動からモータ機械出力への変換過程を見通せるようにして、モータ動作過程を把握できるようにする。

(2) 弾性表面波リニアモータの応答特性は非線形性の応答特性に関して詳細な測定を行い、裸特性としてどのような挙動をするデバイスとして表現できるか検討する。モータをサーボシステムへ組み込むために応答を表すブロック図表現を求め、制御方法について検討する。

4. 研究成果

(1) 摩擦駆動のメカニズムに関して、動作状態の測定と駆動プロセスのモデル化による検討を行なった。2体の接触問題に弾性と摩擦を取り入れたコンタクトメカニクスの概念を適用して、ステータとスライダの接触・摩擦に関するモデル化に成功した。単独の突起が、ステータ面に接触するときが発生する垂直方向の応力と水平方向の応力を、ステータ表面およびスライダ突起基礎面について解析し、単純な解析解として表されることを明らかにし、図1に示すモデルを導いた。

(2) 上述のステータとスライダの接触・摩擦に関するモデルを用いて動作シミュレーションを行った。実際の実験結果との比較検討を行い、構築した動作シミュレーションモデルが、現実の実験結果を良く表していることを示した。一例として、スライダ突起径を変化させた場合の予圧-推力特性の例を図2に示す。

(3) 駆動面における表面電荷と水分による影響が、駆動状態に大きく影響している可能性があるという知見を得た。特に、摩擦電化による吸着現象が、動作の不安定性に大きく影響している可能性を指摘し、ブラックLN基板を用いた動作実験を行った。その結果、これまでは困難であった、平面スライダでの

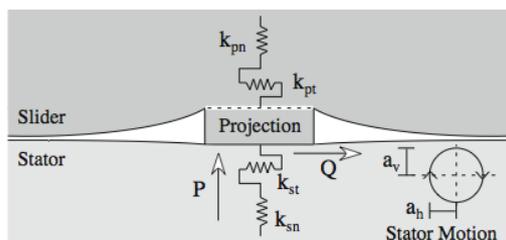


図1 突起の弾性摩擦接触モデル

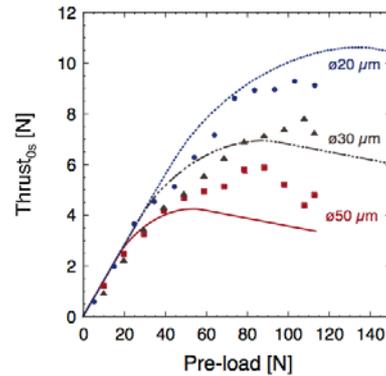


図2 突起直径による推力の変化

動作を実現することに成功し、今後のデバイス設計に関して受有用な指針を明らかにできた。

(4) 摩擦駆動の物理モデルシミュレーションソフトに改良を加え、突起の配列を考慮した計算アルゴリズムを導入した。突起での機械出力への変換と、摩擦による損失の割合を負荷特性とともに計算したところ、摩擦による駆動力変換効率が最大で60%に達することが見積もられた。さらに、モータの始動時には大きな摩擦ロスが起きている様子がわかり、始動/停止時の駆動状態が摩擦対策から重要であることが示された。

(5) 弾性表面波モータの動きをコントロールする試みとして、モータ特性の持つ不感帯を取り込んだモデル化を行い、制御アルゴリズムの実装と検証を行なった。速度制御を行なったところ、指令値通りほぼ正弦波状の速度応答を実現することができ、ゼロクロス付近での応答の劣化も少なく良好な応答となった。動作例を図3に示す。

(6) 弾性表面波モータの動的な応答特性に関して詳細を検討するために、過渡的な動作特性の詳細を計測により求めた。その結果、

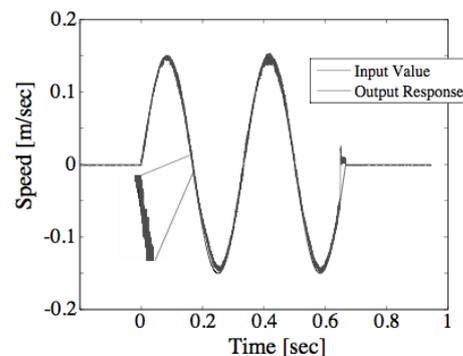


図3 不感帯を考慮した速度制御応答

これまでの単純な不感帯と一時近似によるモータ速度応答特性だけでは、モータの挙動を制御対象としてモデル化するには不十分であり、応答に履歴を持ったような特性として計測されることを明らかにした。それまで一般的には、不感帯の閾値は始動時と停止時で異なると考えられていたが、測定時の応答の遅れにより閾値が変動しているように観測されているだけであることを明らかにした。不感帯は図4に示すような推力特性として示されることがわかった。

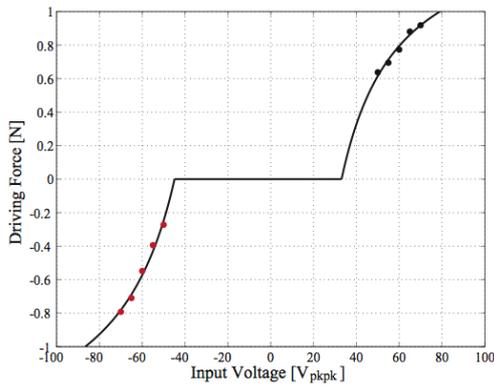


図4 推力特性の実測値

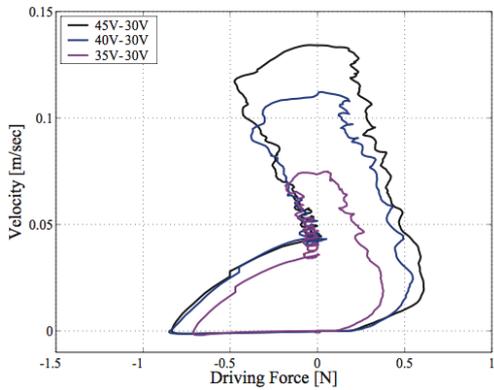


図5 不感帯を含む速度推力特性

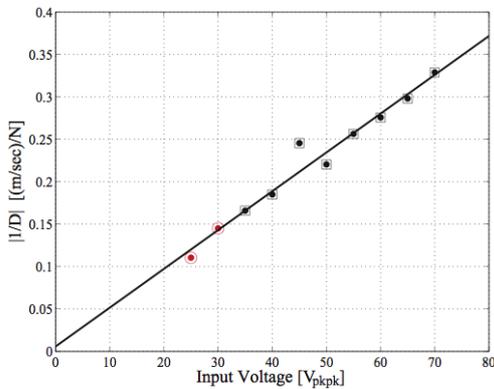


図6 不感帯を含む制動係数測定結果

(7) 不感帯での応答特性を求める方法として、駆動可能な状態から不感帯となる駆動電圧に低下させて、モータの挙動を求める手法を開発した。その結果、図5のような、不感帯での速度-推力応答を明らかにした。

(8) 動作域での速度-負荷特性と不感帯の応答測定から、モータの垂下特性の傾きに対応するダンピング値の逆数の値が、図6のように求まることを明らかにした。

(9) 過渡応答特性の立ち上がり応答より、速度-負荷特性に関する、負の推力側の特性が、図7のように表現されることを明らかにした。

(10) (6)~(9)の成果から、図8のような形で弾性表面波モータの応答を表すブロック図が求められることを提案した。

(11) ブロック図をもとにモータの過渡応答波形を求めたところ、図9に示すように実測結果とよく一致することを明らかにした。

(12) ブロック図より、モータの垂下特性を描いたところ、実測値とよく一致する結果が図10のように得られた。

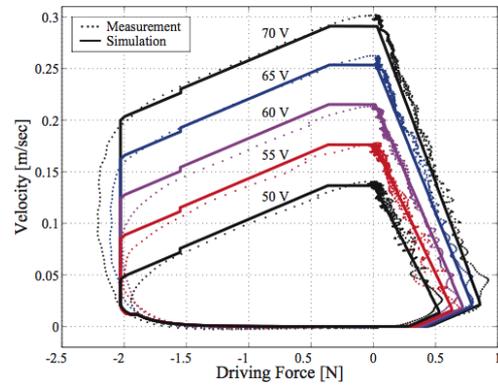


図7 第2象限を含むモータの特性

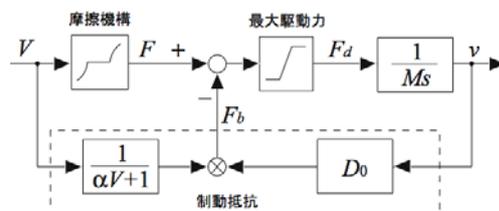


図8 等価ブロック図

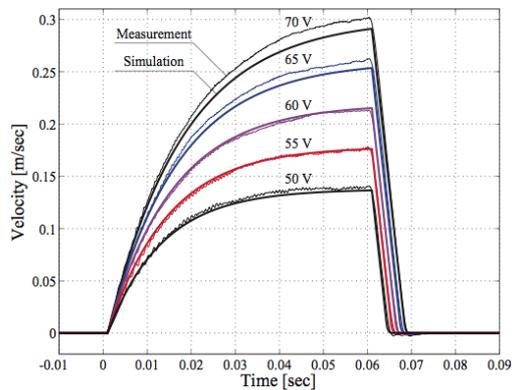


図9 等価モデルと過渡応答実測の比較

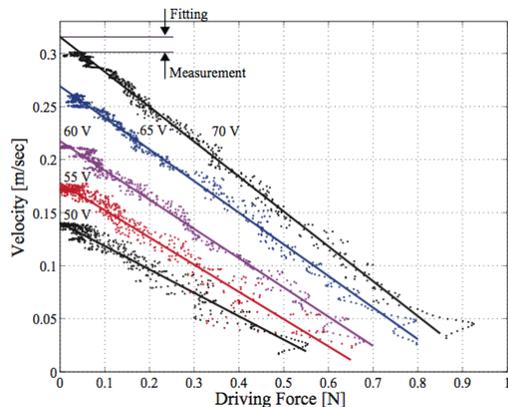


図10 等価モデルと垂下特性の実測値との比較

(13) 制御用DSPボードと高分解能リニアスケールを用いた実験システムを作製し、速度制御および位置決め制御について検討を行った。制御性を検討した結果、低速度域での制御性に問題があるため、バースト駆動の持続時間を変化させることで、低速駆動の実現を図った。また、リニアスケールの分解能をさらに拡張するために、独自のデジタル信号処理方式を用いた復調器を研究開発した。

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12件)

1, 黒澤実, “弾性表面波モータの電力密度と機械出力,” 日本機械学会, 査読有り, Vol. 111, No. 1074, pp. 424-427, 2008.

2, 黒澤実, “弾性表面波アクチュエータ,” トライボロジスト, 査読有り, 53巻, 2号, pp. 82-87, 2008.

3, 黒澤実, “弾性表面波モータ,” 電気学会誌, 査読有り, 127(5), pp. 285-287, 2007.

4, 黒澤実, “超音波モータのマイクロ化の試み,” 超音波 TECHNO, 査読有り, 19(2), pp. 93-98, 2007.

5, T. Shigematsu and M. K. Kurosawa, “Friction Drive of an SAW motor Part V: Design Criteria,” IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 査読有り, vol. 55, no. 10, pp. 2288-2297, 2008.

6, T. Shigematsu and M. K. Kurosawa, “Friction Drive of an SAW motor Part IV: Physics of Contact,” IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 査読有り, vol. 55, no. 10, pp. 2277-2287, 2008.

7, T. Shigematsu and M. K. Kurosawa, “Friction Drive of an SAW motor Part III: Modeling,” IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 査読有り, vol. 55, no. 10, pp. 2266-2276, 2008.

8, T. Shigematsu and M. K. Kurosawa, “Friction Drive of an SAW motor Part II: Analyses,” IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 査読有り, vol. 55, no. 9, pp. 2016-2024, 2008.

9, T. Shigematsu and M. K. Kurosawa, “Friction Drive of an SAW motor Part I: Measurements,” IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 査読有り, vol. 55, no. 9, pp. 2005-2015, 2008.

10, M. K. Kurosawa and T. Shigematsu, “Friction Drive Simulation of Surface Acoustic Wave Motor Characteristics Based on Contact Mechanics,” Jpn. J. Appl. Phys., 査読有り, vol. 47, no. 5, pp. 4287-4291, 2008.

11, M. K. Kurosawa, Y. Miyazaki, and T. Shigematsu, “Study of Scattering by Surface Acoustic Wave Motor Slider Using Finite Element Method Simulation,” Jpn. J. Appl. Phys., 査読有り, vol. 46, no. 7B, pp. 4915-4920, 2007.

12, 黒澤実, 鈴木貴也, 浅井勝彦, “不感帯を考慮した環流型弾性表面波モータの速度制御,” 日本AEM学会誌, 査読有り, vol. 15, no. 2, pp. 125-131, 2007.

[学会発表] (計42件)

1, 岡野雅樹, 黒澤実, “定在波を用いた弾性表面波モータの微小駆動の検討,” 日音講論集, pp.1211-1212, 東京・東京工業大学

- (2009.3-17-19).
- 2, 山盛憲一, 黒澤実, “小型弾性表面波モータにおける駆動特性評価,” 日音講論集, pp.1209-1210, 東京・東京工業大学 (2009.3-17-19).
 - 3, M. Okano and M. K. Kurosawa, “Low Speed Control of Surface Acoustic Wave Motor,” in Proc. of Int. Congr. on Ultrasonics 2009, Santiago, Chile, January 11-17, 2009.
 - 4, 黒澤実, 岡野雅樹, “弾性表面波モータの動的特性のモデル化,” 信学技報, US2008-12, pp. 7-11, 横浜・東京工業大学(2008.12.9).
 - 5, K. Sakano, M. K. Kurosawa, and T. Shigematsu, “Surface Acoustic Wave Motor with Flat Plane Slider,” in Proc. of MHS 2008, pp. 243-248, Nagoya, Japan, Nov. 6-9, 2008.
 - 6, 黒澤実, 重松隆史, “弾性接触モデルによる弾性表面波モータの摩擦駆動解析,” 信学技報, US2008-40, pp. 47-52, 仙台・東北大学 (2008.9.25-26).
 - 7, 山盛憲一, 黒澤実, 重松隆史, “駆動周波数 100 MHz の小型弾性表面波モータにおける駆動特性評価,” 日音講論集, pp. 1305-1306, 福岡・九州大学 (2008.9.10-12).
 - 8, 坂野広樹, 黒澤実, 重松隆史, “平面スライダを用いた弾性表面波モータに関する研究,” 日音講論集, pp. 1303-1304, 福岡・九州大学 (2008.9.10-12).
 - 9, M. Okano and M. K. Kurosawa, “Model Based Position Control of Surface Acoustic Wave Motor,” in Proc. of 11th Int. Conf. on New Actuators, Actuator 08, pp. 172-175, Bremen, Germany, 9-11, June, 2008.
 - 10, M. K. Kurosawa and T. Shigematsu, “Friction Drive Simulation of a SAW Motor with Slider Surface Texture Variation,” in Proc. of the 3rd Int. Conf., Smart Materials, Structures and Systems, Acireale, Sicily, Italy, June 8-13, 2008.
 - 11, 北村佑太, 黒澤実, 重松隆史, 高木秀樹, “自走型弾性表面波モータの実現に向けた検討,” 日音講論集, pp. 1357-1358, 千葉・千葉工業大学 (2008.3.17-19).
 - 12, 岡野雅樹, 黒澤実, “モデルに基づく弾性表面波モータの位置制御に関する研究,” 日音講論集, pp. 1221-1222, 千葉・千葉工業大学 (2008.3.17-19).
 - 13, 黒澤実, 重松隆史, “弾性接触モデルを用いた SAW モータの動作シミュレーション,” 圧電材料・デバイスシンポジウム 2008 講演論文集, pp. 45-50, 仙台・東北大学 (2008.1.24-25).
 - 14, M. K. Kurosawa and T. Shigematsu, “Friction Drive Simulation of a Surface Acoustic Wave Motor by Nano Vibration,” in Proc. the European Nano Systems 2007, pp. 8-13, Paris, France, 3-4 Dec. 2007.
 - 15, 黒澤実, 重松隆史, “Friction Drive Simulation of a Surface Acoustic Wave Motor Characteristics Based on Contact Mechanics,” 第 28 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, つくば・つくば国際会議場 pp. 447-448 (2007.11.14-16).
 - 16, M. Okano and M. K. Kurosawa, “Modeling of A Single Phase Drive Surface Acoustic Wave Motor,” in Proc. the 6th Int. Symp. on Linear Drives for Industrial Applications, LDIA2007, pp. 212-213, Lille, France, Sept. 16-19, 2007.
 - 17, 石上陽平, 桐ヶ谷昌広, 佐藤正博, 黒澤実, “抵抗接続による弾性表面波アクチュエータの低消費電力駆動,” 日音講論集, pp. 1149-1150, 山梨・山梨大学 (2007.9.19-21).
 - 18, T. Shigematsu and M. K. Kurosawa, “Design Criteria for Stable friction Drive Operation of Surface Acoustic Wave Motor,” in Proc. 2007 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM 2007, AIM2007_151.pdf, Zurich, Switzerland, Sept. 4-7, 2007.
 - 19, M. K. Kurosawa, “Conversion to mechanical linear motion from RF electric power using lithium niobate (invited),” in Abst. of Int. Conf. on Electroceramics, ICE 2007, pp. 79-80, Arusha, Tanzania, 31 Jul.- 3 Aug. 2007.
 - 20, T. Shigematsu and M. K. Kurosawa, “Stability Improvement of Surface Acoustic Wave Motor Using Chemically Reduced Lithium Niobate,” in Digest of Technical Papers of the 14th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducers and Eurosensors '07, pp. 1163-1166, Lyon, France, June 10-14, 2007.
 - 21, M. Okano and M. K. Kurosawa, “Study on Modeling of Surface Acoustic Wave Motor,” in Proc. the 2007 IEEE Int. Symp., on Industrial Electronics, ISIE 2007, pp. 1508-1513, Vigo, Spain, June 4-7, 2007.
 - 22, 岡野雅樹, 黒澤実, “弾性表面波モータの不感帯近傍での駆動に関する検討,” 日音講論集, pp. 1021-1022, 東京・芝浦工業大学 (2007.3.13-15).
 - 23, 重松隆史, 黒澤実, “弾性表面波モータの摩擦駆動面設計,” 信学技報, US2006-111, pp. 1-6, 東京・オリンパス本社(2007.2.28).
 - 24, 重松隆史, 黒澤実, “還元処理ニオブ酸リチウムを用いた弾性表面波モータ,” 圧電材料・デバイスシンポジウム 2007 講演論文集, pp. 123-124, 仙台・東北大学(2007.1.29-30).
 - 25, 黒澤実, 鈴木貴也, 重松隆史, 浅井勝彦, “不感帯を考慮した環流型弾性表面波モータの速度制御,” 第 15 回 MAGDA コンファレンス in 桐生 講演論文集, pp. 484-489, 桐生・桐生市文化会館(2006.11.1-2).
 - 26, 重松隆史, 黒澤実, “弾性表面波モータの 3 次元弾性論による摩擦駆動のモデル化

(Friction Drive Modeling of SAW Motor using Theory of Elasticity),” 第23回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, pp. 217-220, 高松・サンプォート高松 (2006.10.5-6).

27, 岡野雅樹, 黒澤実, “弾性表面波モータの動的特性に関するモデル化,” 日音講論集, pp. 897-898, 金沢・金沢大学 (2006.9.13-15).

28, M. Okano, T. Shigematsu, and M. K. Kurosawa, “Control of an energy circulation type SAW motor considering dead-zone,” in Proc. 10th Int. Conf. on New Actuators and 4th Int. Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, ACTUATOR 2006, pp. 584-587, Bremen, Germany, 14-16 June, 2006.

29, T. Shigematsu and M. K. Kurosawa, “Friction drive modeling of SAW motor using classical theory of contact mechanics,” in Proc. 10th Int. Conf. on New Actuators and 4th Int. Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, ACTUATOR 2006, pp. 444-447, Bremen, Germany, 14-16 June, 2006.

30, 岡野雅樹, 黒澤実, “弾性表面波モータが有する不感帯が駆動特性に与える影響,” 第18回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 425-426, 神戸・神戸市国際会館 (2006.5.18-19).

31, 重松隆史, 黒澤実, “弾性表面波モータの摩擦駆動の計測と解析,” 第18回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演予稿集, pp. 419-424, 神戸・神戸市国際会館 (2006.5.18-19).

32, M. Okano, T. Suzuki, T. Shigematsu, and M. K. Kurosawa, “PID control of the energy circulation type SAW motor considering dead-zone,” in Proc. the 1st Int. Workshop on Ultrasonic Motors and Actuators, pp. 87-88, Yokohama, Japan, Nov. 14-15, 2005.

33, M. K. Kurosawa, T. Suzuki, and K. Asai, “Surface Acoustic Wave Motor with Feedback Controller considering Dead Zone,” in Proc. the 31st Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2053-2058, Raleigh, North Carolina, U.S.A., Nov. 6-12, 2005.

34, 黒澤実, 鈴木貴也, 重松隆史, 浅井勝彦, “不感帯を考慮した弾性表面波モータのフィードバック制御,” 信学技報, US2005-41, pp. 13-18, 仙台・東北大学 (2005.9.29-30).

35, T. Suzuki, M. K. Kurosawa, and K. Asai, “Control of Surface Acoustic Wave Motor using PID Controller,” in Proc. the Fifth Int. Symp. on Linear Drives for Industry Applications, LDIA 2005, pp. 326-329, Kobe-Awaji, Japan, Sept. 25-28, 2005.

36, T. Shigematsu, T. Iseki, M. Okumura, T. Sugawara, and M. K. Kurosawa, “Optical Beam Steering using 2-D Surface Acoustic Wave

Actuator,” in Proc. the 13th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducers '05, pp. 1255-1258, Seoul, Korea, June 5-9, 2005.

37, T. Shigematsu, M. K. Kurosawa, and K. Asai, “Measurements of Friction Drive Dynamic in Surface Acoustic Wave Motor,” in Proc. 2nd Int. Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators, IWPCA 2005, pp. 361-369, Paderborn, Germany, May 22-25, 2005.

38, 高瀬真宏, 重松隆史, 黒澤実, 浅井勝彦, “SMSA 反射器を用いた環流型弾性表面波モータの駆動,” 日音講論集, pp. 907-908, 東京・東京農工大学 (2005.3.15-17).

39, 黒澤実, “弾性表面波モータ —現状と今後の展開— (招待講演),” 日音講論集, pp. 1189-1192, 沖縄・琉球大学 (2004.9.28-30).

40, 鈴木貴也, 黒澤実, 浅井勝彦, “駆動電極に DIDT を用いた環流弾性表面波モータ,” 日音講論集, pp. 1251-1252, 沖縄・琉球大学 (2004.9.28-30).

41, 宮崎義人, 重松隆史, 黒澤実, “有限要素法によるレイリー波とスライダ突起の接触解析について,” 日音講論集, pp. 1213-1214, 沖縄・琉球大学 (2004.9.28-30).

42, 重松隆史, 黒澤実, 浅井勝彦, “弾性表面波モータの摩擦駆動のダイナミクス,” 日音講論集, pp. 1211-1212, 沖縄・琉球大学 (2004.9.28-30).

〔図書〕 (計 3 件)

1, 黒澤実, 養賢堂, アクチュエータ工学, (2004.12.18) pp. 98-103.

2, 黒澤実, 株式会社シーエムシー出版, 未来型アクチュエータ材料・デバイス (2006.12), pp. 297-304.

3, 黒澤実, (株)産業技術サービスセンター, 実用精密位置決め技術事典 (2008.12), pp. 212-217.

〔その他〕

ホームページ

<http://www.kurosawa.ip.titech.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒澤 実 (KUROSAWA MINORU)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授

研究者番号：70170090

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし