

PWMを用いた弾性表面波リニアモータの速度制御*

小谷 浩之*¹, 高崎 正也*²
石野 裕二*³, 水野 毅*²

Velocity Control of Surface Acoustic Wave Linear Motor Using PWM

Hiroyuki KOTANI, Masaya TAKASAKI*⁴,
Yuji ISHINO and Takeshi MIZUNO* Graduate School of Science and Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

Surface acoustic wave (SAW) linear motor is a kind of ultrasonic motors. The SAW linear motor has several advantages, such as thin structure, high thrust force, high velocity and precise positioning. Relationship between applied voltage and output velocity, however, had non-linearity in low velocity range due to friction drive principle. Therefore the SAW linear motor cannot obtain stable driving without feedback control at low velocity. To realize low velocity, PWM (pulse width modulation) control and flexible slider structure are employed. The flexible structure is installed to cancel vibration due to PWM carrier frequency. In this research, PWM is applied for controlling the slider velocity. Lower velocity in non-linear range is realized. Influence of the flexible structure upon precise positioning is investigated.

Key Words: Actuator, Ultrasonic Motor, Surface Acoustic Wave, Motion Control, PWM, Velocity Control, Positioning

1. はじめに

近年、半導体製造技術や産業用ロボットなどの発展に伴い、アクチュエータには高性能・高機能な技術が求められている。超音波モータは取り出せる推力が大きい、保持力・保持トルクが大きい、磁場を発生しない、減速機構を必要としないなどの様々な特長を有しており、産業への適用が期待され一部は製品化されているものもある。その中でも弾性表面波 (surface acoustic wave: SAW) の超音波モータへの応用に関する研究が行われてきた。これまでに、駆動周波数を9.6 MHzとしスライダにルビーボールを利用した弾性表面波リニアモータの駆動に関する報告⁽¹⁾⁽²⁾が行われ、その後シリコンウエハ表面にドライエッチングにより多数の突起を作成したシリコンスライダが導入され⁽³⁾⁽⁴⁾、突起サイズ、突起間隔、予圧を最適化することで駆動力10 N⁽⁵⁾、スライダ速度1 m/sの駆動性能が実現されている⁽⁶⁾。また弾性表面波リニアモータの駆動周波数は数十 MHzであることから、弾性表面波をパルス状に励振することでスライダの微小ステップ駆動が可能となり2 nmのステップ駆動が報告されている⁽⁷⁾。また

駆動周波数の高周波化による弾性表面波リニアモータの小型化⁽⁸⁾やシリコンスライダをレール状にすることによる長ストローク化⁽⁹⁾、エネルギー還流弾性表面波リニアモータによるスライダ駆動の高効率化⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾なども行われている。このように弾性表面波リニアモータは、高速、高推力、数十 mmのロングストロークかつnmオーダーの精密位置決めが可能であり、高エネルギー密度、支持が容易、小型化が可能といった数多くの長所を有している。しかしながら弾性表面波リニアモータは他の超音波モータと同様に摩擦駆動であるため、印加電圧(電流)の調節のみではスライダの安定な駆動が実現できない低速度領域が存在し、その不安定な速度領域における速度の実現はいまだ行われていなかった。実際に産業へのアプリケーションとして応用する場合には低速度領域での駆動は重要であり、実現することにより付加価値の高い高機能なアクチュエータを実現することが可能となる。

本稿では評価用の弾性表面波リニアモータを製作し、印加電圧の調節のみではスライダの安定な駆動が実現できない不安定な速度領域での速度の実現を行った。その低速度領域での安定な駆動の実現を行うために、DCモータなどの制御に用いられるPWM (pulse width modulation) を応用した。また弾性表面波リニアモータは応答性が高いことから、搬送波の影響を受けてし

* 原稿受付 2005年10月19日。

¹ 学生員、埼玉大学大学院理工学研究科(☎338-8570 さいたま市桜区下大久保255)。² 正員、埼玉大学大学院理工学研究科。³ 埼玉大学総合研究機構。

E-mail: masaya@mech.saitama-u.ac.jp

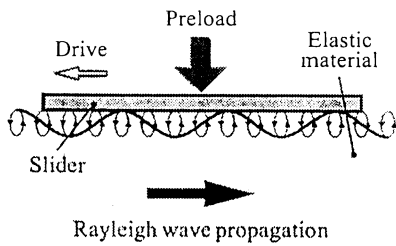


Fig. 1 Principle of friction drive.

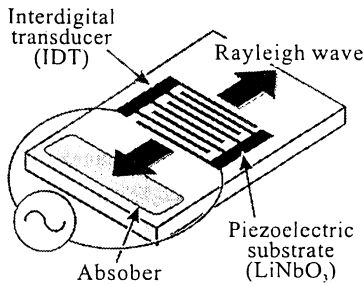


Fig. 2 Excitation and absorption of surface acoustic wave.

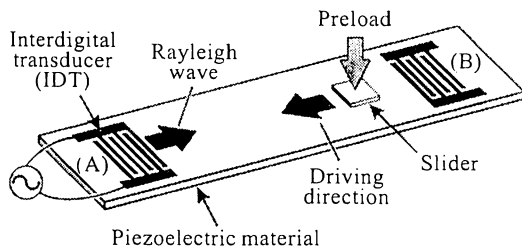


Fig. 3 Schematic view of the SAW linear motor.

まう可能性があるため、柔軟構造物をもったスライダを採用し、適切な搬送波の周波数の選定を行った。弾性表面波リニアモータは摩擦駆動であるため、駆動面の状態が時々刻々と変化してしまうことから、一定速度駆動を実現するために閉ループ制御系を構成し、低速度領域における速度の実現を行った。さらに本構成における精密位置決めについても検討した。

2. 弾性表面波リニアモータ

2.1 駆動原理 弾性表面波リニアモータは超音波モータの一種であり、超音波振動としてレイリー波と呼ばれるモードの弾性表面波を用いている。弾性体媒体中のレイリー波の進行波において、基板表面の粒子は図1に示すように楕円運動をしており、この表面

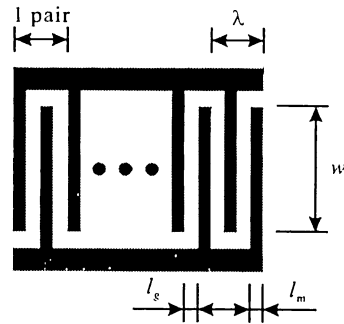


Fig. 4 Configuration of the IDT electrode.

にスライダを接触させることにより、スライダは摩擦力を介してレイリー波の伝播方向とは逆方向（図中の白矢印の方向）に駆動される。またスライダ上方より予圧を与えることにより、大きな摩擦力が得られ、より大きな推力を得ることが可能になる。

レイリー波は圧電基板表面にくし型電極 (interdigital transducer: IDT) を形成し、その幾何形状により決定される共振周波数の交流電圧を IDT に印加することにより容易に励振・伝播させることができる。図2にレイリー波の励振・伝播を示す。レイリー波は IDT から図中の矢印の方向のように前後方向に伝播する。レイリー波は接着剤などの塗布により吸音することが可能である。

2.2 弾性表面波リニアモータ 弾性表面波リニアモータの基本構成を図3に示す。本研究では圧電媒体に LiNbO_3 128° Y-cut X-prop 基板を用いた。 LiNbO_3 表面の両端には IDT が配置されており、電圧を IDT (A) に印加するとスライダは左方向へ、IDT (B) に印加すると右方向に駆動することができ、電圧を印加する電極を選択することにより、中間で接触しているスライダの駆動方向を選択することができる。また IDT の背後（基板両端）に吸音材を配置し、進行波を吸収し基板端での反射を防ぐことによりレイリー波の進行波を得ることができる。弾性表面波リニアモータとして使用するステータ振動子は駆動周波数が 9.6 MHz であり、サイズは $17 \times 53 \times 1 \text{ mm}^3$ 、ストロークは 24 mm となっている。また IDT の形状は図4に示すように、電極幅 l_m は $100 \mu\text{m}$ 、間隔 l_g は $100 \mu\text{m}$ とし 20 対で構成され、交差指幅 w は 12 mm である。この構成における弾性表面波の波長 λ は $400 \mu\text{m}$ である。

スライダにはシリコンスライダ⁽³⁾⁽⁴⁾を用いる。このシリコンスライダは図5に示すように表面にはドライエッチングによって形成された直径 $10 \mu\text{m}$ 程度の突起が分布している。基板と接触する突起の上面は平面に

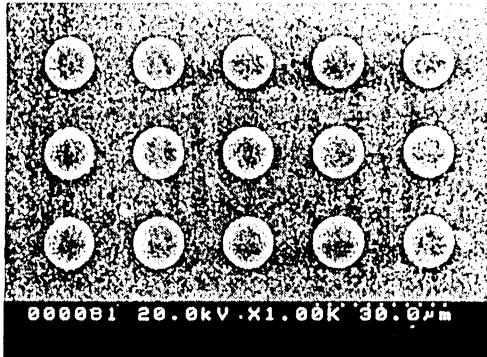


Fig. 5 SEM image of the silicon slider surface.

なっており、接触面積を確保しつつ高い接触圧力（数十 MPa）が得られるようになっている。この結果、大きな推力が得られる。

2.3 実験装置 試作した弾性表面波リニアモータを図 6 に示す。スライダは予圧機構を含む構成とし、直線運動に案内するためにリニアガイドを用いている。また一定予圧を与えるために板ばねを使用し、ひずみゲージを貼り予圧の測定を行う。シリコンスライダは基板と平行に接触しなければ駆動が困難となる。そのため同図に示すようにシリコンスライダを剛性の高い半球に接着し、ロール及びピッチに対する自由度を持たせている。組み立ての際にシリコンスライダとステータ振動子は一樣に接触するようになり平行が保たれ、その上方から球に荷重（予圧）を加えると力のベクトルは中心に向かうため、シリコンスライダは基板と垂直に力が作用し、姿勢制御の困難さは解消される。スライダの位置と速度はリニアエンコーダにより検出及び算出される。可動部であるスライダ全体の質量 M は 100 g に対しシリコンスライダの質量 m は 27 mg である。

3. PWM を用いた低速度の実現

弾性表面波リニアモータは摩擦駆動であるため、電圧（電流）の調整ではスライダの安定な駆動が実現できない速度領域が存在する（予圧によって異なるが、後述の例では約 50 mm/s 以下である）。そこで本研究では PWM を応用することによりこの領域での速度の実現を図る。PWM とは、信号レベルに比例してパルス列のパルス幅（Duty 比）を変化させる変調法のことである。PWM のようにバースト駆動をさせることで不安定な低速度領域の制御が可能になると考えられる。弾性表面波リニアモータに適用する場合、制御信号である矩形波に応じて ON/OFF を行い、駆動周波数 9.6

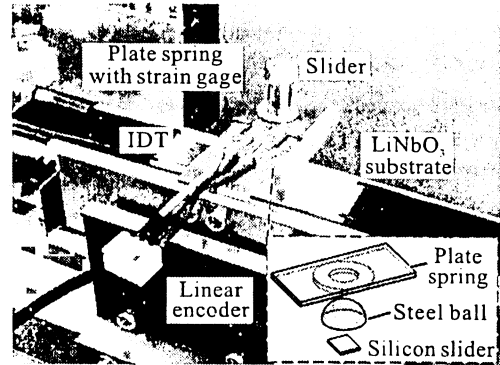


Fig. 6 Experimental apparatus.

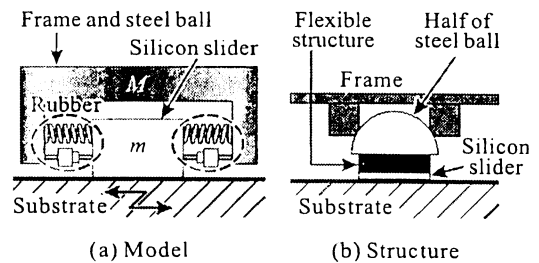


Fig. 7 Structure of the slider with a rubber membrane.

MHz の弾性表面波駆動信号をバースト駆動させる。

3.1 搬送波に起因する速度むらの低減 PWM を応用する上で問題となるのが搬送波の周波数（パルス列の周波数）である。弾性表面波リニアモータは応答が速いため、スライダが搬送波に追従して駆動してしまう可能性がある。そこで搬送波の影響を緩和するためにシリコンスライダと鉄球との間に柔軟構造物を付加した。本研究では柔軟構造物に天然ゴムの膜を用いた。図 7(a) にモデル図を、図 7(b) に柔軟構造物を含めたスライダの実際の構成の概念図を示す。可動部全体の質量が M 、シリコンスライダの質量が m となっており、その間のばね及びダンパに相当する部分をゴム膜で補う。

3.2 駆動特性 本構成を用いたときの駆動特性を以下に示す。駆動特性の取得には駆動周波数を 9.661 MHz とし 4 mm 角のシリコンスライダを使用した。駆動条件を予圧 18 N 一定とし電流を 0.51 A_{0-p} から 1 A_{0-p} まで入力したときのステップ応答を図 8 に示す。図より入力電流（電圧）が高いほど到達できる定常速度は速くなるのがわかる。最大で約 0.3 m/s まで到達できることが確認できる。入力電流をさらに大きくすることにより、最大約 1 m/s の速度が実現できる⁽³⁾。

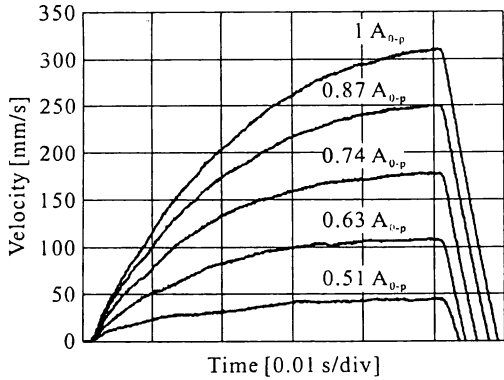


Fig. 8 Step response with the change of applied current.

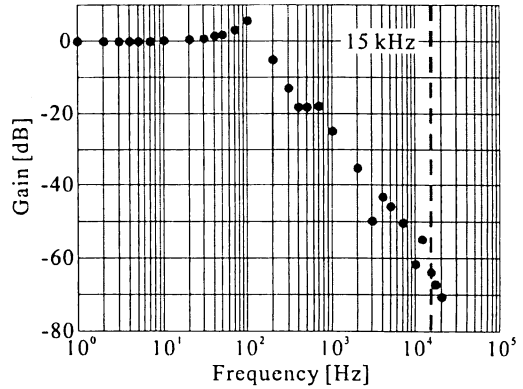


Fig. 10 Frequency response of the slider velocity with a rubber membrane.

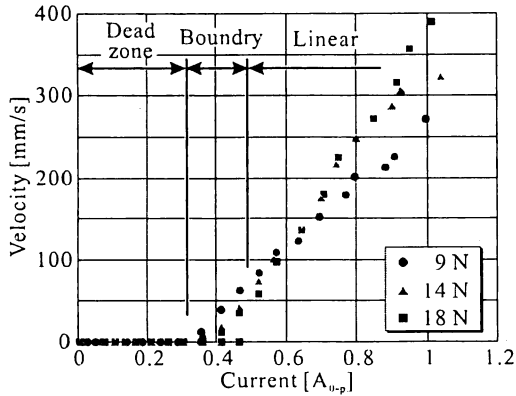


Fig. 9 Voltage versus traverse velocity.

予圧を 9, 14, 18 N としたときの電流と速度の関係を図 9 に示す。同図よりこの範囲の予圧では、予圧が大きいほど同じ電流の時に発生できる速度が速くなることわかる。本研究ではスライダ速度と入力電流（印加電圧）が線形関係にある線形領域、試行により動く場合と動かない場合があり駆動が不安定である境界領域、電流の調整のみでは駆動できない不感帯と分類し定義する。それぞれの領域の境界は予圧によって変動する。

3.3 搬送波の周波数の選択 搬送波の影響を調べるためにバースト駆動時のスライダの周波数応答を測定した。シリコンスライダの速度 (m の速度) に対するフレームの速度 (M の速度) のゲインを計測した。搬送波の周波数を掃引させ、基本周波数の応答をゲインとし、プロットした結果を図 10 に示す。各速度はレーザードップラー振動計で測定し、ゴム膜は膜厚 1 mm とした。入力電流（電圧）を 1.06 A_{0-p} (62.9

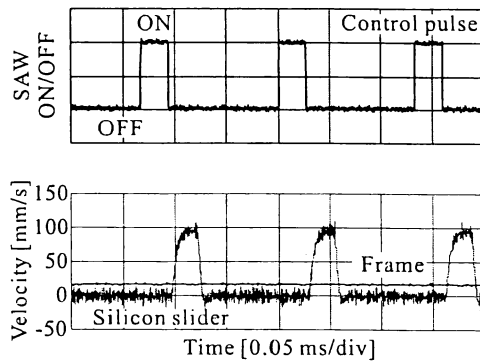


Fig. 11 Velocities comparison between silicon slider and slider frame.

V_{0-p}) とし 9.647 MHz の弾性表面波駆動信号を Duty 比 5% でバースト駆動させた結果、100 Hz 付近に共振のピークが見られ、さらに高い周波数においてはゲインが減衰していく応答となった。搬送波の周波数が 10 kHz 以上ではゲインが十分に小さくなり、15 kHz のときにはゲインが約 -60 dB となった。周波数を高くしていくとゲインが小さくなっていくが、ある周波数以上では駆動ができなくなることが予想される。それはスライダの駆動に必要なパルス幅が、レイリー波を形成するための時間と、スライダが駆動し始めるまでのむだ時間との和よりも大きくなければならぬためである。そのため、安定した駆動を得るためには周波数はできるだけ低いほうがよい。速度むらの影響を十分に抑制しつつ、できるだけ安定に駆動できる周波数として本研究では搬送波の周波数を 15 kHz とした。

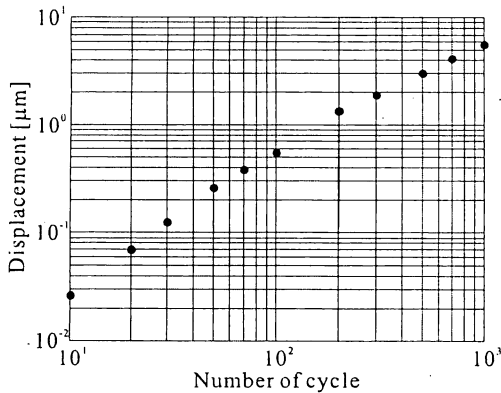


Fig. 12 Relationship between number of cycle and slider displacement.

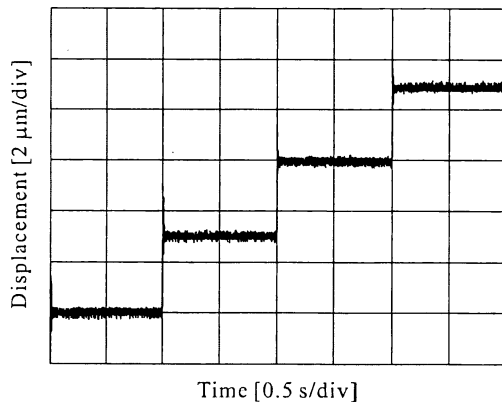


Fig. 13 Step driving with flexible structure.

搬送波の周波数を 15 kHz としたときのシリコンスライダとフレームの速度の比較を図 11 に示す。それぞれの速度の測定にはレーザードップラー振動速度計を用いた。同図よりシリコンスライダは制御信号に応じて駆動されているものの、シリコンスライダ速度の変動成分はゴム膜によって吸収され、スライダフレーム速度には全く影響していないことが確認できた。したがって PWM に起因される速度むらの抑圧に対して、鉄球とシリコンスライダとの間に柔軟構造物を付加し、搬送波の周波数を 15 kHz とすることは有効であるといえる。

3.4 精密位置決め性能の検討 位置決め性能の評価として SAW リニアモータのステップ駆動を行った。駆動周波数を 9.675 MHz とし入力電流 1.3 A_{0-p}、予圧 10 N とし、弾性表面波駆動信号の入力サイクル数と変位量の関係を調べた。図 12 にその結果を示

す。変位の測定には静電容量型の変位センサを用いた。センサの精度より駆動信号の入力サイクル数を 50 としたときまでのデータを用い、変位量と入力サイクル数の傾きを求めた結果、5.8 nm/Number of cycle となり、この範囲では両者はほぼ線形関係にあることがわかった。同様の条件で弾性表面波駆動信号を 1 Hz 間隔で 500 サイクル印加したときの微小ステップ駆動の一例を図 13 に示す。柔軟構造物を含む構成であるため立ち上がり時にオーバーシュートが生じているが、ほぼ等間隔で駆動することができている。変位量は約 3 μm であった。実験装置の測定系の限界により、サイクル数が低い領域では正確な測定ができなかったが、数サイクルでも駆動でき、数十 nm の駆動を確認できた。SAW リニアモータの性能からさらに微小なステップで駆動することも可能であると考えられる。

3.5 速度制御 PWM を適用し、電流の調整のみでは安定な駆動の実現が困難である低速の実現を行った。弾性表面波リニアモータは摩擦駆動であるため駆動面の状態が時々刻々と変化してしまうことから閉ループ系を構成した。目標値追従のためのコントローラには PI 補償器を用い、目標値の生成およびコントローラの実現には DSP を用いた。その制御系を図 14 に示す。リニアエンコーダによりスライダ位置を計測し、DSP で微分をすることにより速度を算出し、制御に用いている。入力電流は 0.945 A_{0-p} (56 V_{0-p})、予圧は 9 N 一定とした。目標速度を 0.5, 2.5, 5 mm/s と設定したときのスライダ速度の過渡応答を図 15 上段に示す。同図よりオーバーシュートもなく、設定した目標速度を追従することができていることがわかる。また速度制御時のスライダの駆動軌跡を測定した結果を図 15 下段に示す。同図の傾きから求めたそれぞれの平均速度は 4.96, 2.46, 0.492 mm/s となり、ほぼ目標速度が達成できていることが確認できる。図 15 上段に見られる速度のばらつきは位置情報を微分する際に生じたノイズであると考えられる。弾性表面波リニアモータは適切な微分アルゴリズム及び測定系の採用によっては、さらに低い速度領域での安定駆動も実現可能であると思われる。

この結果、電流（電圧）の調整のみでは安定な駆動が不可能であった低速域での速度の実現ができた。入力電流を大きくすれば約 1 m/s で駆動することが可能であることから⁽³⁾、約 4 桁にわたる速度領域を同一のモータで実現できることになる。また微小ステップ駆動による精密位置決めも可能であることから、目標速度までを一定速度で駆動し、ステップ駆動により最終位置決めを行うことのできる高機能アクチュエータの

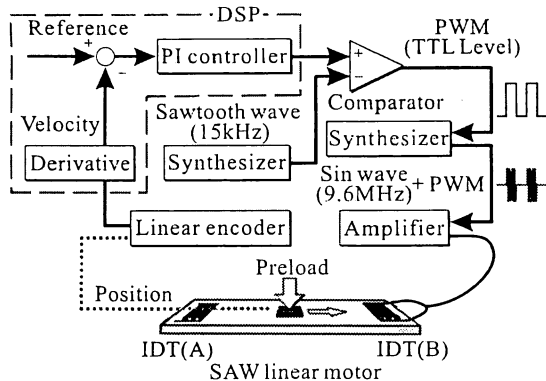


Fig. 14 Feedback control system.

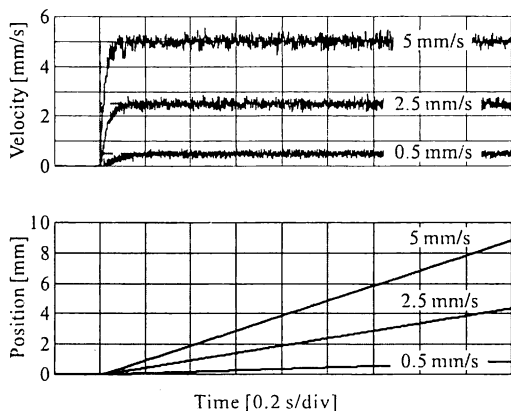


Fig. 15 Controlled slider velocities and positions.

実現が可能となった。

4. おわりに

弾性表面波リニアモータの評価用の実験装置を試作し駆動特性を取得した。PWMを適用する際の搬送波に起因される速度むらの影響はゴム膜等の柔軟構造物をもったスライダを適用し、搬送波の周波数を適切に選定することで抑制できることを確認した。柔軟構造物にゴム膜を用いた場合の駆動信号の入力サイクル数と変位量について測定し、線形関係にあることがわかった。また連続的にステップ駆動を行ったとき、オーバーシュートが生じるもののほぼ等間隔で駆動することができた。またPWMを用いて閉ループ系を構成す

ることにより 0.5 mm/s の低速度で駆動することができた。

謝 辞

本研究の一部は財団法人三豊科学技術振興協会に助成を受けて行われました。感謝いたします。

文 献

- (1) M. Kurosawa, M. Takahashi and T. Higuchi, *Friction drive surface acoustic wave motor*, "ELSEVIER", Ultrasonics, Vol.34, (1996), pp.234-246.
- (2) M. Kurosawa, M. Takahashi and T. Higuchi, *Ultrasonic linear motor using surface acoustic waves*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.43, No.5, (1996), pp.901-906.
- (3) N. Osakabe, M. Kurosawa, T. Higuchi, *Surface acoustic wave linear motor using silicon slider*, Robotics and Mechatronics Conference 1998, (1998), 2AII2-7 (1)-(2).
- (4) N. Osakabe, M. Kurosawa, T. Higuchi and O. Shinoura, *Surface acoustic wave linear motor using silicon slider*, Proceeding of IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, (1998), pp.390-395.
- (5) M. K. Kurosawa, H. Itoh and K. Asai, *Elastic friction drive of surface acoustic wave motor*, "ELSEVIER", Ultrasonics, Vol.41, (2003), pp.271-275.
- (6) M. K. Kurosawa, N. Osakabe, K. Tojo, M. Takasaki and T. Higuchi, *Surface acoustic wave motor with a silicon slider*, Technical report of The Institute of Electronics Information and Communication Engineers, US98-33/EDM98-25/CPM98-57/OME98-55, (1998), pp.55-62.
- (7) T. Shigematsu, M. K. Kurosawa and K. Asai, *Nanometer stepping drives of surface acoustic wave motor*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 50, No. 4, (2003), pp.376-385.
- (8) M. Takasaki, M. K. Kurosawa and T. Higuchi, *Miniaturization of surface acoustic wave linear motor*, Micromechatronics, Bulletin of the Horological Institute of Japan, Vol. 44, No. 3, (2000), pp.11-17.
- (9) M. Takasaki, M. K. Kurosawa and T. Higuchi, *A long stroke surface acoustic wave linear motor*, Journal of The Japan Society for Precision Engineering, Vol.71, No.8, (2005), pp.990-994.
- (10) K. Asai, M. K. Kurosawa and T. Higuchi, *Energy circulation methods for surface acoustic wave motor*, The institute of Electronics, Information and Communication Engineers Transactions A, Vol. J86-A, No. 4, (2003), pp.345-353.
- (11) K. Asai, M. K. Kurosawa and T. Higuchi, *Energy circulation methods for surface acoustic wave motor*, Electronics and Communications in Japan, Part 3, Vol. 87, No.2, (2004), pp.10-19.