

# 摩擦摺動による球体アクチュエーター

A Spherical Drive Actuator Utilizing Frictional Sliding

米 竹 淳一郎\*

Junichiro YONETAKE

## 要旨

SIDM (Smooth Impact Drive Mechanism) は摩擦摺動を駆動原理とし、ナノメートルオーダーの駆動分解能とミリメートルオーダーの可動域を実現するリニアアクチュエーターである。その応用用途としてレーザーモジュール内での光軸調整に使用するため、500  $\mu\text{m}$  の可動域内で60 nm以下の駆動分解能をもち、2軸の位置調整が可能なSIDM-Unitを開発した。

このような光軸調整には複数軸で高分解能、かつ可動域の広い調整機構が必須であるが、これを実現するために開発したSIDMを基に複数軸駆動を検討した。摩擦摺動駆動の特徴より駆動部分を球体により多自由度駆動を行う事が可能となるため、球体多自由度駆動の構造および駆動方法を考案した。

本稿においては使用したSIDMの概要とこれを用いた球体多自由度駆動についての技術紹介を行う。

## Abstract

A conventional SIDM (smooth impact drive mechanism) actuator is a linear frictional drive actuator realizing a driving resolution on a nanometer order and a range of movement on a millimeter order. To gain optimal control of the optical coupling in a laser module, we developed an SIDM actuator unit having a driving resolution of 60 nm or less in a range of movement of 500  $\mu\text{m}$ , as well as two-axis motion.

In achieving such optical coupling, high resolution multiple axes and a controlling mechanism with a wide range of movement are essential, so driving with multiple axes was studied. Because we were able to drive with multi-degree of freedom by making the drive part a sphere based on the characteristics of a frictional sliding drive, a structure having a spherical drive with multi-degree of freedom, along with its drive method, were invented. In this report, we present our developed SIDM actuator unit along the technologies of its spherical drive and multi-degree of freedom.

## 1 はじめに

種々の物体を動作させるために必要なアクチュエーターは様々な駆動原理によって構成され、今現在も新規の技術開発が成されている。その中で特に重視されている開発分野としてナノメートル以下の微小駆動が挙げられる。この背景として、各種の電子デバイスの普及に伴う小型高密度、高性能化に部品製造、配置精度の要求に対し高精度な駆動機構が必要だからである。特に後述するレーザーモジュールのように光軸調整が必要なデバイスにおいては、微小駆動だけでなくさらに最小分解能の数万倍の可動範囲も要求されることも少なくない。SIDMはこれらの条件を満たす数少ないアクチュエーターである。

さらにアクチュエーターに求められている特徴として、多自由度化が挙げられる。ロボットアームに代表される作業機械、監視カメラあるいはヒューマノイドロボットのような先端技術において複数の自由度を持ち、小型なアクチュエーターが望まれている。これに対し、一般的なアクチュエーターは基本的に1自由度を有するのみで複数自由度の駆動を行うためには必要な自由度の数だけアクチュエーターを用意しなければならない。複数自由度を持つアクチュエーターはシステム全体の小型化、各駆動方向調整の工数を減らすことも見込めるため、劇的に駆動系システムの簡易化がなされることになる。

本稿では微小駆動をなしたレーザーモジュール用のSIDM技術を紹介し、このSIDMの駆動源を応用した多自由度駆動アクチュエーターについて紹介する。

## 2 SIDMの駆動原理

SIDMは駆動源として圧電素子(Piezoelectric element)を用い、印加電圧による素子の伸縮を伝達する駆動軸(driving rod)とこの駆動軸の摩擦摺動により変位する移動体(moving body)により構成される。

移動体は駆動軸に対し一定の押圧がかかった状態で接触保持され、駆動時の圧電素子への入力電圧はFig. 2のような矩形波である。この時駆動軸は圧電素子の印加電圧の変化により変位し、移動体は、波形に対応した滑りによる移動と停止を繰り返している。

\* コニカミノルタオプト(株)  
技術開発本部 技術開発センター 機器開発部

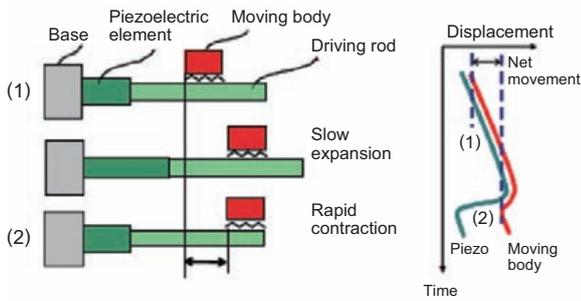


Fig. 1 Principle of SIDM.

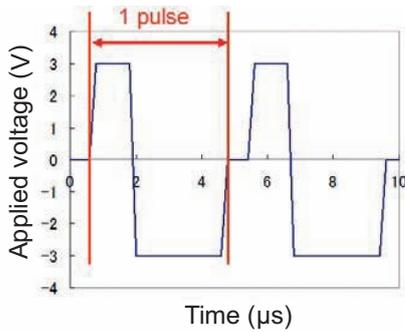


Fig. 2 Waveform of applied voltage.

### 3 SIDMの性能

レーザーモジュールの光軸調整を最適に行うために、可動範囲は300 μm以上、駆動分解能として100 nm以下の性能がSIDMに求められた。

Fig. 2のような矩形波を200~480 kHzの周波数で入力することによりSIDMの移動体が駆動する。駆動時の最適駆動周波数は360 kHz、印加電圧は3 Vppであり、この条件下での矩形波パルス数と変位置の関係はFig. 3のようになる。

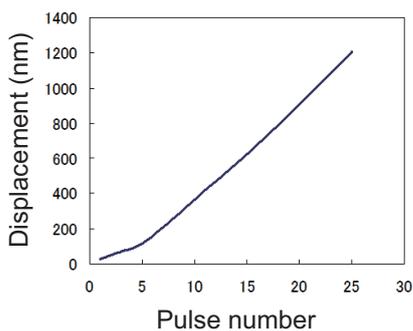


Fig. 3 Displacement vs. input pulses.

光軸調整はおおまかな調整位置を見つける粗動とレーザーパワーピークに調整する微動の2種類の駆動を使い分ける事により光学調芯を行った。粗動は印加20パルスで約1.0 μm、微動は印加2パルスで約50 nmの下で使用し、想定通りの光学調整が<sup>1)</sup>確認できた。また、摩擦駆動によるアクチュエーターであるため、摩擦による耐久性、動作の安定性が懸念されたが、Perfluoropolyester系潤滑油を選別<sup>2)</sup>し使用することで改善を図ることがで

きた<sup>3)</sup>。開発した2軸駆動のSIDM-UnitをFig. 4に示す。レーザーモジュールは光学調整に2枚のレンズを用いており、それぞれを移動体に搭載し、光軸に垂直な面上で水平方向、垂直方向の位置調整を2個のSIDMをユニット化することで実現している。

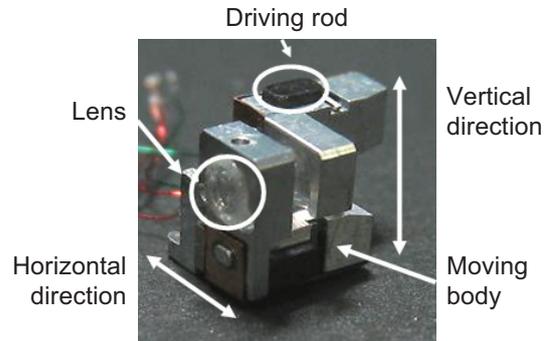


Fig. 4 SIDM actuator unit. Size: W4.6 mm × H4.6 mm × D7.0 mm

## 4 SIDMによる球体駆動

### 4.1 球体の駆動による多自由度化

駆動の多自由度化にはアクチュエーターの原理に基づいた様々な方法があるが、例えば電磁式モーターの場合回転軸を複数設けそれぞれの回転軸を駆動させる方法で実現が可能である。

SIDM振動子を用いた多自由度駆動は球体を摩擦駆動することでの多自由度駆動を実現する。球体の多自由度駆動はこれまでも研究開発が行われており<sup>4)5)</sup>一定の成果が出ている。この球体多自由度駆動において微小駆動を安定的に実現したレーザーモジュール用のSIDMを使用することにより多自由度性とナノメートルレベルの分解能を有したアクチュエーターを製作する事が本目的である。また、球体を駆動させることによりリニアな多軸駆動とは異なる多軸の回転アクチュエーターとしての多方面展開が期待できるものと考えられ、例えば小型なロボットの眼(人間の眼のように動作する)のようなアプリケーションも想定できる。

### 4.2 球体駆動の原理

球体駆動は下記のように定義し、概略図をFig. 5に示す。  
・球体がその中心を通る回転ベクトルによって回転しているとみなせる状態を維持しながら駆動可能であること

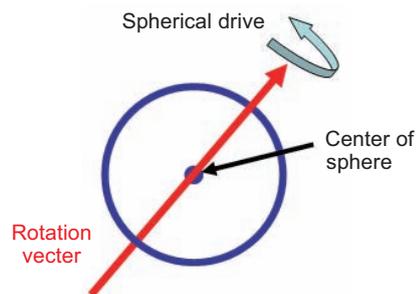


Fig. 5 Definition of spherical drive.

上記の定義において球体中心を通る回転ベクトルは、あらゆる方向から作用させる事ができるため、これを実現することで球体多自由度駆動をなす。この球体多自由度駆動を行うためには、次のような課題が挙げられる。

- ・球体中心位置を空間固定する構造
- ・球体に作用する回転ベクトルの生成

これらについてそれぞれ保持構造と駆動力伝達の構造にて詳述する。

#### 4.2.1 保持構造

球体の中心位置が常に一定の位置に固定されていなければ、上記球体に作用する回転ベクトルを生成しても駆動し続ける事が困難となる。すなわち保持構造とは球体中心位置を任意の空間に固定するための構造である。

この条件下において、球体中心に直接外力を作用させて保持することは困難であり、球体表面に任意の外力を作用させることにより球体位置を固定するのが一般的な保持方法となるが、球体の駆動においては負荷要素として作用してしまうことが問題点として挙げられる。さらに保持には最低でも球体表面に3点以上の接触点で外力を与える必要がある。

#### 4.2.2 駆動力伝達の構造

保持構造によって球体中心が任意の空間に保持されている場合、球体表面の接線方向に作用する外力を与えることにより、球体中心周りの回転ベクトルとして作用し球体駆動が可能となる。当然複数の自由度を実現するためには複数の外力が必要である。また、球体多自由度駆動においては駆動される球体の姿勢を決める要素として球体中心を原点とした相対座標軸上のX, Y, Z軸の回転のみとなる。

#### 4.3 球体駆動の構成

球体駆動構造を構築するためには保持構造と動力伝達構造を一体とするのが望ましいが、異なる2種類の要素であるため一元的に考えるのは極めて困難であり、球体駆動における最大の課題である。

球体駆動を行う上で開発したSIDMの振動子（圧電素子と駆動軸からなる部分で以降SIDM振動子と呼称：Fig. 6）は保持構造、駆動力伝達の構造において有利に作用する。これは下記の特徴に起因する。

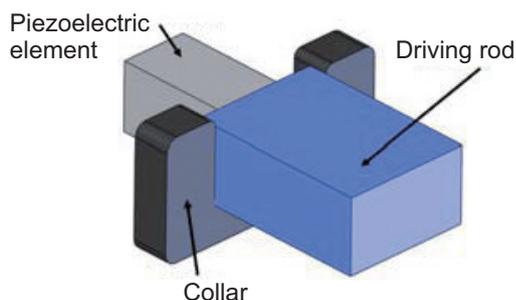


Fig. 6 SIDM vibrator.

- ・SIDMの駆動を行うためには駆動軸に対して押圧が必要  
→球体に駆動軸を接触させることで押圧を発生させつつ、球体を保持することが可能
  - ・一定以上の押圧があれば摩擦を有する接触対象を駆動させることができる  
→振動子に対して適切な押圧の範囲内であれば球形状でも駆動が可能
- 前述の2項目により球体を駆動する構造を検討した。

#### 4.4 SIDM振動子による球体の駆動

前述の球体駆動の構成においてSIDM振動子による球体の保持構造において下記の点を考慮した。

- ・3点接触で球体姿勢保持を行うため、SIDM振動子を3個使用する
- ・磁性体の球を使用し、磁力にてSIDM振動子との間に一定以上の押圧を発生させる
- ・構成の簡単化のために各振動子は等間隔に配置する

これらの条件で考案した球体駆動構造を Fig. 7 に示す。

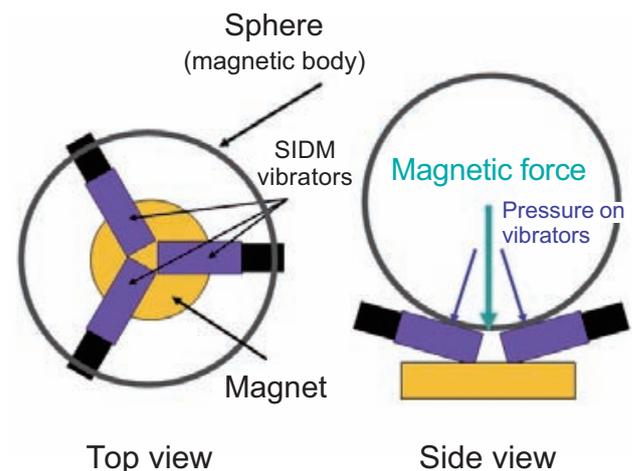


Fig. 7 Cross-sectional top view of spherical drive structure.

この構造においてSIDM振動子はそれぞれ上面から見て120[degree]おきに配置され、側面からみた傾き(10[degree])は一定に保たれている。これらの振動子に下部の磁石による引力により球体が押しつけられ、各振動子に対する押圧が一定の状態に位置が固定される事となる。

この時、任意のSIDM振動子に駆動パルスを加えることによって球体との接触点に球体接線方向の並進ベクトルが発生する。しかし、摩擦による各振動子の保持力(非動作時の摩擦力で約100[gf])は振動子1個が発生する駆動力(約8[gf])よりも大きく、球体を駆動する事ができない。そのため、複数のSIDM振動子を同時に駆動することによる並進ベクトルの合成を利用して球体を駆動する。Fig. 8, Fig. 9 にベクトル合成による球体駆動の原理を模式図で表す。

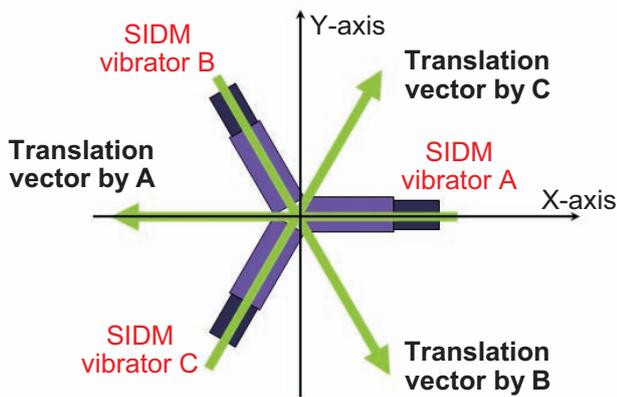


Fig. 8 Driving principle of spherical drive structure. A translation vector is generated by each SIDM vibrator. The rotation vector is generated by the synthesis of these vectors.

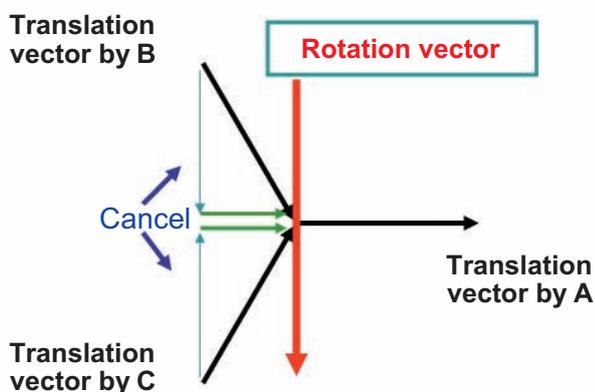


Fig. 9 Driving principle image of spherical drive structure. Where multiple vectors are allowed to affect a sphere, components of the vectors in opposite directions are cancelled.

#### 4.5 駆動の確認

これらの検討を基に実際に作成した物を Fig. 10 に示す。球体のサイズは  $\phi 5\text{mm}$  であり、中心部にあるのは駆動確認のためのマーカーであり、これを上面部から CCD カメラにより撮影して変化量を測定した。結果として、撮影画像の解像度の制約より  $500\ \mu\text{m}$  以下の正確な測定はできなかったが、3000パルスの印加に対し約  $500\ \mu\text{m}$  の変位が確認できた。さらに振動子への印加パルス調整を行い、Fig. 8 示す X 軸方向、Y 軸方向への駆動が確認できた。加えて、同構成で球体サイズを変更し  $\phi 10\text{mm}$ 、 $\phi 3\text{mm}$  の球体駆動が可能となっている。

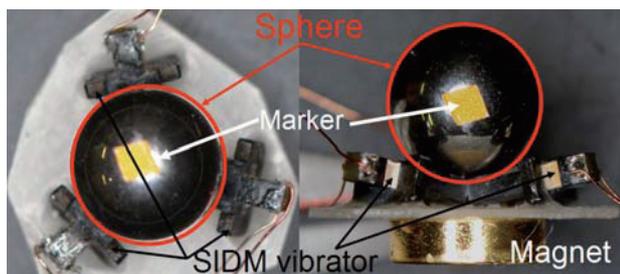


Fig. 10 Spherical drive structure of SIDM vibrators.

#### 4.6 課題

今回は動作原理の確認が目的としたため、正確な変位量測定が課題となる。Fig. 10 のように Marker を一方向から観察する方式では球体の回転によって Marker に角度が付くため、微小な変位量と駆動方向の計測をする事が困難となる。また球体は回転駆動しているため、変位量は角度で測定する方が望ましい。この測定には、レーザーオートコリメーターなどの微小角度測定機により高精度測定が可能であり、駆動時の回転方向のずれも検出可能となる。

これらの精密な変位角度、駆動方向測定を行い、印加パルスとの関係を求めることにより駆動制御の精度が高まるだけでなく、駆動部分を一体化する構成を検討する際の基礎データとして扱うことが可能となる。

#### 5 まとめ

本技術紹介において、約  $50\text{nm}$  の分解能で非常に安定的に微調可能でかつ、 $300\ \mu\text{m}$  以上の可動範囲を持つ 2 軸駆動の SIDM-Unit について述べた。

この SIDM を応用したアクチュエーターとして球体多自由度構造を考案した。この球体を駆動させる構造においては原理確認段階ではあるが、想定通りの駆動変位と駆動方向確認ができた。一方で各方向への変位量などの定量的な評価方法、多自由度駆動に対する位置と方向の制御方法などが成されておらず、検討すべき点は多い。

光学調整を想定した微調駆動が可能な多軸駆動構造として検討してきたが、当初の予測より簡易でかつ小さくまとまった構造で球体を駆動させることができたため、画像センサを搭載することによる各種の撮像デバイスの視野角の拡大や人間の「眼」のような機構の実現が期待できる。

#### ●参考文献

- 1) Y. Ozeki, Y. Hata, K. Shibatani, F. Nagai, N. Mori, Y. Nakabayashi, et al., Miniature multiple-axes adaptive optics unit employing SIDMs and its application to an efficient green laser module, Konica Minolta Tech. Rep. 6 (2009) 82.
- 2) B. Bhushan, H. Lee, S.C. Chaparala, V. Bhatia, Nanolubrication of sliding components in adaptive optics used in microprojectors, Appl. Surf. Sci. 256 (2010) 7545.
- 3) Y. Ozeki, Y. Hata, A. Iwashita, J. Yonetake, N. Mitsugi, K. Shibatani, Reliability Testing of SIDM Actuators for Optical Alignment, Konica Minolta Tech. Rep. 8 (2011) 117.
- 4) 真下智昭, 遠山茂樹, 石田寛, 球面超音波モータを用いた MRI 環境下手術支援マニピュレータの開発, 精密工学会誌第 73 巻, 2号, (2007)
- 5) 秋葉敏克, 高橋博, 戸谷公紀, 多様な運動を実現するアクチュエータ技術, 東芝レビュー Vol.64 No.1, (2009)