

**特集** 多次元ドライブシステム

## 多次元センシング

## Multi-dimensional Sensing

脇若 弘之 (信州大学) 正員

Hiroyuki WAKIWAKA Saikyo University Member

This report describes sensors for measuring and controlling displacement and position in XY plane in the multi-dimensional drive systems. New sensors which could measure the XY direction by single sensor would be recently developed. Here, those sensors are classified into two groups and introduced as follows. (1) Analog type simple structured two-dimensional sensors. (2) Digital type highly accurate two-dimensional sensors.

**Keywords:** Linear drive, multi dimensional sensing, linear sensor, encoder.

## 1 まえがき

位置決め制御系などの駆動系において位置や速度を精度よくセンシングすることは駆動システムの性能を左右するといっても過言ではない。直線状の位置変化を測定するには各種動作原理のセンサが実用化され、一次元のセンサを構成しているが、可動部の動作がある平面や立体内のある領域内を自由に動き回るとなるとセンシング技術もそれに対応する必要がある。

ロボットの動作、バーチャルリアリティ、また、コンピュータ支援手術などは、ある空間内の位置(x,y,z)と姿勢 (Pitch, Yaw, Roll) の6自由度が要求され、多次元センシングが必要な応用分野と言えよう。それらの要求に対して、電磁界分布による手法、超音波を利用する手法などによる3次元位置センサが一部実用化され始めている。

本稿では、電気学会「多次元ドライブシステム調査専門委員会」の活動の一環として調査した、多次元ドライブのためのセンサの中から、主にXY平面内の変位・位置を測定するためのセンサについて解説する。

これまでXY平面内の動作に対して可動部の変位・位置を測定する方法は、1次元のリニアセンサを「親亀子亀」方式で複数使用する方法が利用されてきた。これらの方式では、センサをドライブシステムに組み込む構造をシンプルにできず、場合によっては取り付け位置による誤差や、アッベ (Abbe) の誤差が入り込む余地があった。そこで、最近では、2次元ドライブ (XY

モータ、サーフェスモータまたはプレーンモータ) システムに組み込むため、XY方向測定用ヘッドを一体にしたセンサが開発されるようになった[1]。また、平面内動作に対応して、X、Yの他に $\theta$ も測定する工夫がなされている。

ここでは、それらのセンサを便宜的に以下の様に分類して紹介する。

- (1) 簡易的2次元センサ
- (2) 高精度2次元センサ

## 2 簡易的2次元センサ

簡易的2次元センサは、センサ構造、信号処理回路等を比較的簡易に構成でき、測定位置に対応してアナログ動作するものである。これらは、本質的に測定範囲内の絶対位置信号を得ることができるもので、測定範囲に対して0.1%程度の精度であるが、シンプルで、高機能高性能センサへ発展させることができる。

## 2.1 静電容量式

Fig.1,2 に示すように、可動側に対して、4枚の電極を固定側に設置し対向させる方式[2]の変位センサがXY-LDMに組み込まれて使用された。これは、可動側と固定側のギャップが一定で、可動側と電極間の対向面積が変位によって変化するので、これを静電容量の変化として変位信号を取り出すものである。

この容量変化はきわめて小さく外乱の影響を受けやすいため、電極を移動方向に対して差動的に配置してノイズなどの影響を抑制している。LDM駆動XYステージに組み込んだ例では、X、Y方向共に可動範囲3 mmの約1%の精度であった。

連絡先: 脇若 弘之, 〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1, 信州大学工学部電気電子工学科,  
e-mail: wakiwak@gipwc.shinshu-u.ac.jp

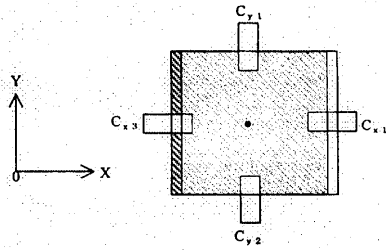


Fig. 1 Capacitance type displacement sensor.

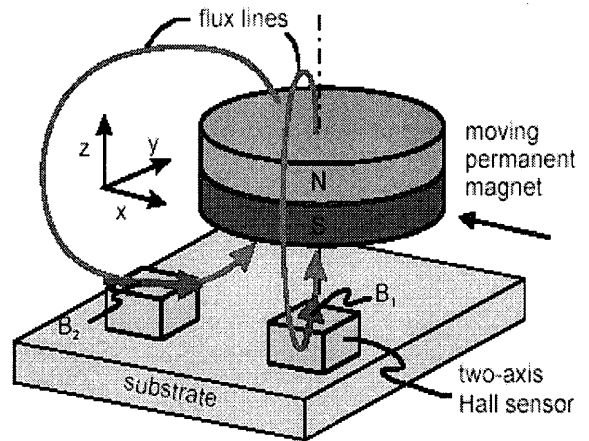


Fig. 3 Magnet position sensor using Hall element.

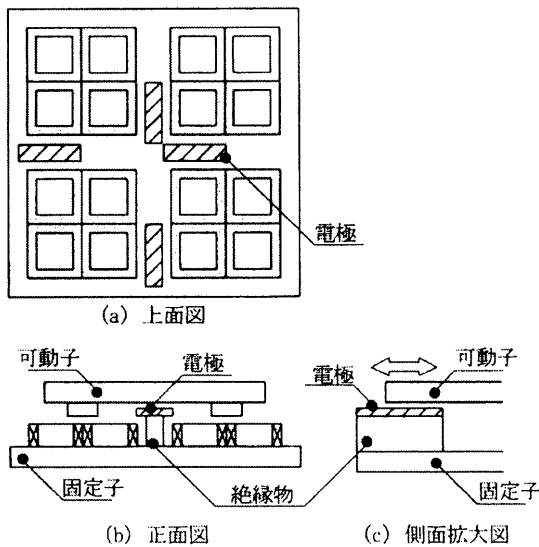


Fig. 2 XY-stage with C-type sensor.

2.2 磁気センサ利用方式

Fig.3 に示すように、磁気センサとして2軸感度出力のホール素子を2個配置し、近傍の磁石の位置を演算によって求める方式である[3]。磁石によってホール素子1にX, Y方向の磁界  $B_{x1}$ ,  $B_{y1}$  が加わり、素子2には  $B_{x2}$ ,  $B_{y2}$  が加わる。素子1から磁石中心までの距離を  $L_x$ ,  $L_y$  とすると以下の関係になる。

$$\frac{B_{x1}}{B_{y1}} = \frac{L_x}{L_y}, \quad \frac{B_{x2}}{B_{y2}} = \frac{A - L_x}{L_y} \quad (1)$$

ここで、 $A$  は素子1と2の間隔である。Z方向の影響を抑えながらXY方向に1mm×1mm程度の範囲の位置信号を誤差1%以下で簡易的に測定できるため、ジョイスティックや関節動作測定のためのセンサとして使用できる。

磁気センサとして、GMRブリッジを2組使用してロボットの腕の運動を測定し制御した例も報告されている[4]。

2.3 光起電力式

高抵抗半導体基板に点光源を照射すると、光起電力効果によって光電流が生成されることを利用したセンサで、1次元、2次元のためのセンサ素子(PSD)が商品化されている。Fig.4は、2次元PSDの片面の抵抗層に4つの電極を付けたもので、光電流は同一抵抗層で4分割され位置信号として取り出すことができる[5]。各アノードに流れる電流と点光源の位置との関係は以下のようなになる。

$$\frac{I_{x2} - I_{x1}}{I_{x2} + I_{x1}} = \frac{2x}{L_x}, \quad \frac{I_{y2} - I_{y1}}{I_{y2} + I_{y1}} = \frac{2y}{L_y} \quad (2)$$

ここで、 $x$ ,  $y$  は PSD 中心からの位置、 $L_x$ ,  $L_y$  はそれぞれアノード間の距離である。ここで、測定範囲は光学系の倍率で設定でき、位置検出誤差は1%程度である。

点光源の位置を電気信号に変換して位置センサを構成する方式として、PZT厚膜に格子状電極パターンを印刷したXY位置センサの報告例もある[6]。報告され

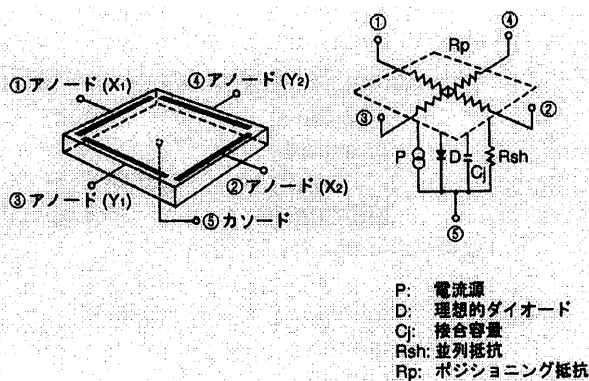


Fig. 4 Basic structure and equivalent circuit of two-dimensional PSD.

た例では、12 mm×12 mm を 64 ピクセルに分割し、X, Y それぞれ 7 mm の範囲で 4 μm に相当する分解能の信号が得られたとしている。

### 3 高精度 2 次元センサ

#### 3.1 3 軸レーザ干渉計による方式

平面内を動作する可動部の自由度が XY の 2 に限定されている場合には、リニアセンサ、エンコーダを 2 軸使用する方法が一般的に行われていた。可動部の自由度が θ も含めて 3 になる場合には、エンコーダもその動きに対応させて設置する必要があり、様々なエンコーダの方式が提案されている。

XY 駆動モータの可動部位置を精密に測定するために、3 軸レーザ干渉計が使用されている[7]。Fig.5 に示すように 3 軸レーザ干渉計を配置して、X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> および Y 軸の変位を測定する。測定した各軸の位置信号は、以下の式によって x, y, θ 位置信号に変換される。

$$x = x_1 + x_2, \quad y = y, \quad \theta = f(x_1 - x_2) \quad (3)$$

得られた位置信号に基づいて X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, Y モータが駆動、位置制御され、平面サーボモータとして構成されている。その主な仕様は、ストローク 500 mm×500 mm, 可動部質量 6 kg, 最大速度 0.5 m/s, 位置繰り返し性 ±0.1 μm, 精度 ±1 μm である。

レーザ干渉計の一軸分は Fig.6 に示したように構成され、固定側に設置されたミラーまでの光路長によって干渉縞が発生し、移動するので、干渉縞の移動を PDA (フォトダイオードアレー) によって測定し、これによって可動部の位置信号を求めている。ここで、平面

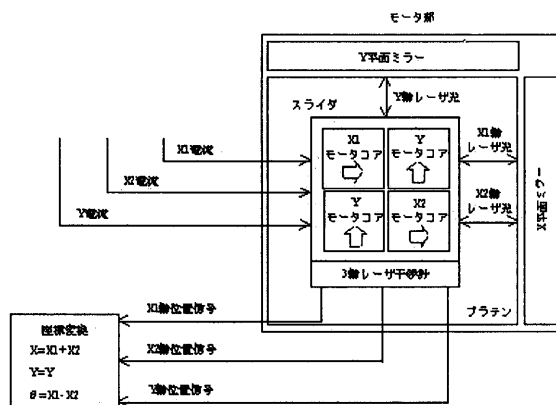


Fig. 5 Schematic of 2-D angle sensor.

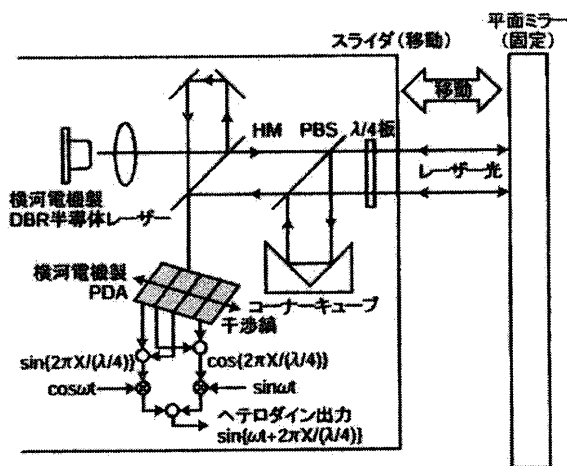


Fig. 6 Three-axis laser interferometer.

モータが θ 方向に振れすぎると制御範囲から外れてしまうが、±0.1 度以下では位置検出ができるよう構成されている。

可動部にミラーを設置し X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, Y を測定することによって可動部を完全にワイヤレスにすることもできる[8]。

#### 3.2 光学系を集積化した2次元エンコーダ

1次元のリニアエンコーダを直交させ、2次元のエンコーダが作成されている。この場合、XY軸の干渉、傾き等の影響を抑えて高精度を保つ光学系設計が必要になる。Fig.7 は、反射回折干渉方式[9]の1次元リニアエンコーダとその光学系を基に構成された2次元エンコーダの原理構成の例である。

最初に、透過型リニアスケールを 2 枚直交させ重

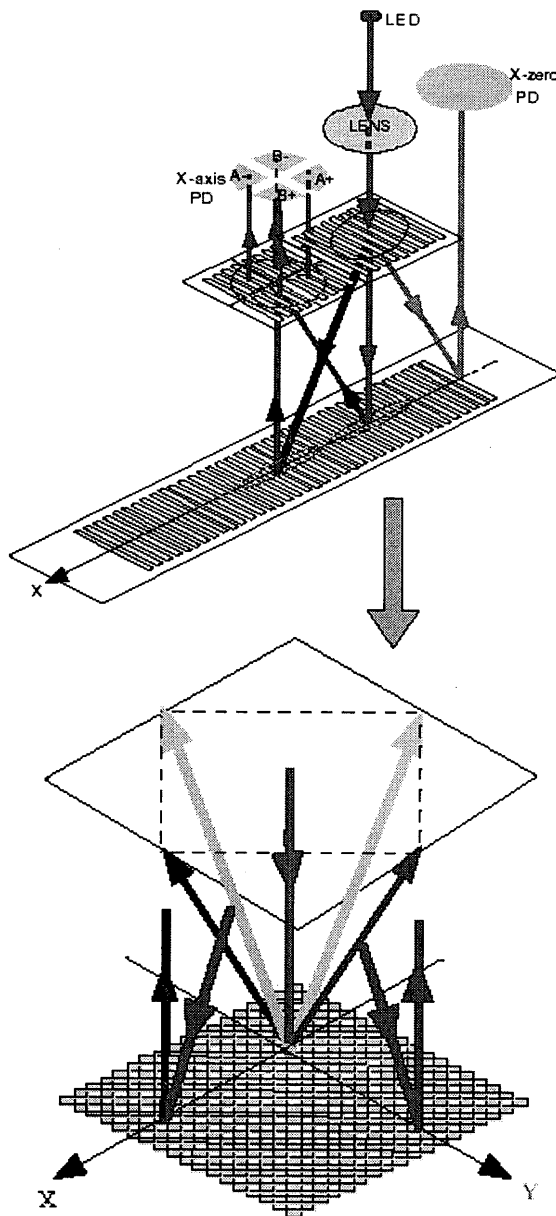


Fig. 7 Principle of two-dimensional encoder.

ね合わせる。すなわち、 $0, \pi$  のラメラ格子を交差させて近接積層すると  $0, \pi, 2\pi$  の部分からなる位相格子と等価になる。ここで、 $2\pi$  の部分を  $0$  と置き換えると千鳥格子となる。ラメラ格子干渉計は波面分割で2光束を作る方式で、格子による1次以上の回折光も現れるが、2光束干渉計には0次光を用いる。格子面での反射率がほとんど100%であるため効率も100%に近い。

0次格子を45°回転配置し、格子ピッチを $\sqrt{2}$ 倍し

た反射型回折格子にするとX方向、Y方向それぞれの $\pm 1$ 次回折光を用いて、X-Y軸独立に格子干渉エンコーダを構成すれば、2次元リニアエンコーダになる。

2次元エンコーダは、平面2自由度の位置検出が可能な2次元角度格子とセンサを組み合わせたエンコーダであり、XYエンコーダ、サーフェスエンコーダ、またはプレーンエンコーダと呼ばれている。

2次元エンコーダを利用することによって、加工物、測定物直下での平面上での位置決め、測定を精度よく行うことができる。また変位センサのためのスペースが小さく出来、可動部にミラーを複数個搭載する必要がなく、可動部の位置を直接検出するのでアッペ誤差を無くすることができるのでモータや機構の設計の自由度が増す。

Table 1は、光学式リニアエンコーダメーカー各社が発表している2次元エンコーダの主な仕様をまとめたもので、2003年4月に発表されたものもある。いずれも2次元スケールとそれに対応するヘッドから構成されているが、それぞれ格子の構成方法、光学系に工夫が施され興味深い。

Table 1 Two-dimensional encoders of 4 companies[10].

Company	C	H	M	R
Name	2次元 Linear Encoder	Two- Coordinate Encoder	XY Linear Encoder	RGX Planar Encoder
Measuring range(mm)	35×25	68×68	13×13 90×90	70×70
Signal peri- ods	1.6 μm	8 μm	40 μm	40 mm
Accuracy	—	±2 μm	±1 μm	±2 μm
Resolution	1.6 nm	10 nm	100 nm	—
Maximum velocity	—	1 m/s	600 mm/s	—

Fig.8は、2次元角度格子と2次元角度センサを組み合わせたエンコーダの原理構成を示している[11]。2次元角度格子は、精密旋盤で直径55mmのアルミニウム円板を平面旋削加工して作成され、片振幅0.3 μm、周期300 μmの正弦波の重ねあわせで表される。

$$f(x, y) = 0.3 \sin\left(\frac{2\pi}{300}x\right) + 0.3 \sin\left(\frac{2\pi}{300}y\right) \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4)$$

格子の形状とピッチ誤差を軽減するため、レーザービームは複数の格子の同じ位相位置に照射するマルチス

ポット法としている。

Fig.9 は、ここで使用している2次元角度センサの光学系の原理構成図である。LD (レーザダイオード) から出た光は、45度プリズム角度格子に照射され、その反射光が4分割PD (フォトダイオード) に集光され、オートコリメータの原理によって2次元の角度変化を検出する。角度センサの出力は、以下の式で表されるのでX、Y方向の位置が測定できる。

$$\gamma(x) = \partial f / \partial x, \quad \lambda(y) = \partial f / \partial y \quad (5)$$

リニア直流モータにより駆動されるサーフェスマータに、このサーフェスエンコーダを組み込んで駆動制御するシステムが構成された。作成された角度格子の大きさから、可動制御範囲は、X、Yともに±20 mm、 $\theta$  ±12度となり、駆動実験の結果、1軸駆動において約1 μm、2次元駆動において約6 μmの位置決め誤差が報告されている。

Fig.10 は、X,Y軸ともに10 μmの格子ピッチからなるグリッドと光学系から構成されるプレーナエンコーダである。XYグリッドで反射される一次回折光をX、Y方向に設置されたプリズムを通して、X、Yそれぞれ独立に5 μmピッチの正弦波信号が出力される。Fig.11に示すように、受光素子は3相分の90個がアレー化され3相出力が得られる。得られた正弦波信号を14ビットで内挿分割することによって0.3 nmの分解能でX、Y方向の位置を精密に測定できる。センサヘッドとグリッドの間のクリアランスは12 mmで、取り付けが比較的容易である。レーザ干渉計は変位とレーザ光の方向が同じであるため波長の安定性に依存して精度が保たれているが、プレーナエンコーダは、3相信号を利用することによって、レーザパワー変動、グリッドの反射率変動などの影響を抑え、レーザ干渉計に匹敵する精度と分解能のセンサとなっている[12]。測定範囲は40 mm×45 mmから380 mm×380 mmまであり、最大応答速度は700 mm/sのエンコーダが実用化されている。

以上の他にも、レーザ光が粗面などによって散乱、反射することで生じるスペックルパターンを利用した変位・速度測定法も有望と考えられる。この方法は、測定面に微細な凹凸があればスペックルパターンが利用できるため、スケール等を用いることができない場合、実構造物の測定などに適している。また、レーザ光を利用するため、高温及び低温での計測、静的及び動的な荷重への適用が可能である。

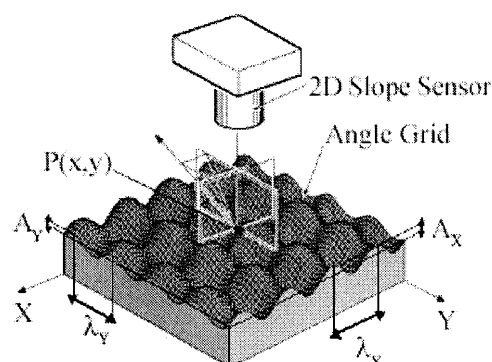


Fig. 8 Schematic of surface encoder.

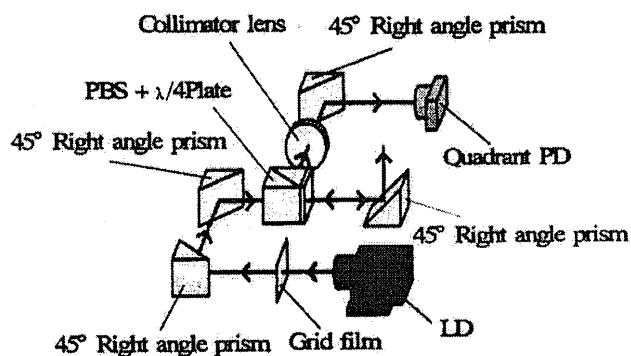


Fig. 9 Schematic of the 2-D angle encoder.

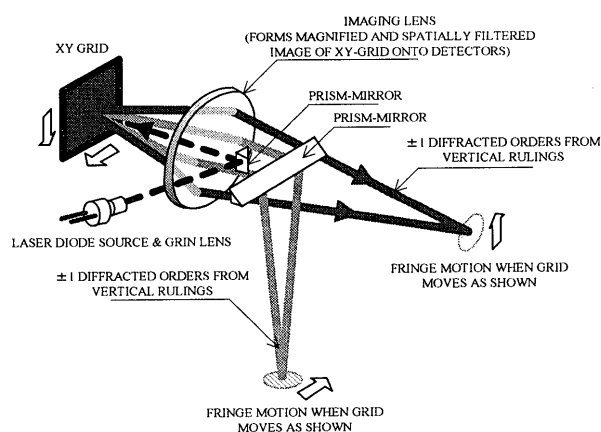


Fig. 10 Schematic of optical system of high-resolution planar encoder.

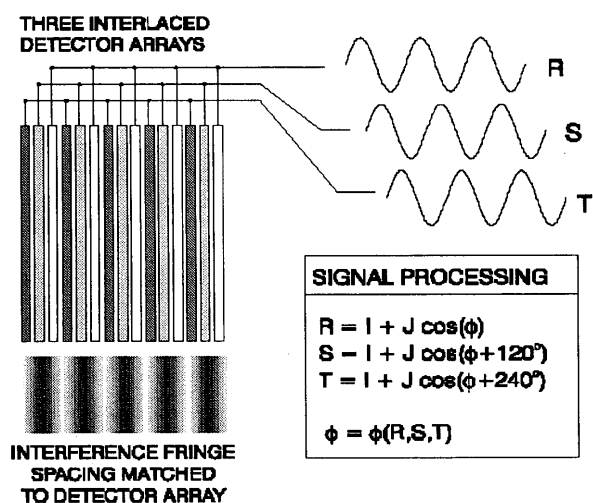


Fig. 11 Three interlaced detector arrays and signals.

#### 4 まとめ

センサは、リニアドライブの広がりや進展に対応して高性能化、低廉簡易化など多様化してきている。ここでは、主に位置決めのために使用されている2次元センサについて、最近発表されたものも含めて整理して紹介した。

今後ドライブシステムの多次元化への進展に伴ってセンサも2次元からさらに多次元に対応したものが提案されてくることが予想される。現状では、光を利用したセンサが高精度化に対応しているが、今後、他の原理に基づいたセンサの提案も行われるものと期待される。

#### 参考文献

- [1] 脇若, 梶岡, 菊池: 汎用化が進むリニアドライブの現状—リニアドライブにおけるサーボ制御用センサの現状と動向—, 電気学会, LD-03-39 (2003)
- [2] 皆川 他: 容量式位置検出器内臓 LDM 駆動 X-Y ステージの特性, 電気学会, LD-02-33 (2002)
- [3] Christian Schott, *et al.*: A new two-axis magnetic position sensor, Proc.of IEEE Sensor 2002, 54.6, 911-915 (2002)
- [4] W. Ku, *et al.*: Precision X-Y Robotic Object Handling Using a Dual GMR Bridge Sensor, IEEE Trans. on Magnetics, 36(5), 2782-2784 (2000)
- [5] [http://www.hpk.co.jp/Jpn/products/ssd/pdf/psd/psd\\_technical\\_information.pdf](http://www.hpk.co.jp/Jpn/products/ssd/pdf/psd/psd_technical_information.pdf)
- [6] V. Ferrari, *et al.*: Array of PZT pyroelectric thick-film sensors for contactless measurement of XY position, Proc.of IEEE Sensors 2002, 54.2 (2002)
- [7] 橋田 他: 平面サーボモータ PLANESERV とその要素技術, 横河技報, 45(2), 83-86 (2001)
- [8] K. Suk Jung *et al.*: Study on a novel contact-free planar system using direct drive dc coils and permanent magnets, IEEE Trans. on Mechatronics, 7(2), 35-43 (2002)
- [9] <http://cweb.canon.jp/indtech/es/index.html>
- [10] 私信および各社カタログによる
- [11] 高偉 他: サーフェスマータ駆動型多自由度ステージの位置決めの研究, 精密工学会誌, 67(12), 1981-1985 (2001)
- [12] <http://www.optra.com/NanoGridPrinciple.pdf>