

# 円環形球面超音波モータの画像処理による回転位置検出と制御

青柳 学<sup>†a)</sup> 藤田 泰喜<sup>†</sup> 高野 剛浩<sup>††</sup> 田村 英樹<sup>††</sup>  
富川 義朗<sup>†††</sup>

A Detection and Control of Rotary Position of a Disk-Type Spherical Ultrasonic Motor by Image Processing

Manabu AOYAGI<sup>†a)</sup>, Taiki FUJITA<sup>†</sup>, Takehiro TAKANO<sup>††</sup>, Hideki TAMURA<sup>††</sup>,  
and Yoshiro TOMIKAWA<sup>†††</sup>

あらまし 筆者らが考案した球面超音波モータの回転角度検出並びに制御について報告する。従来、球状ロータの回転位置検出には3軸に組み合わせたポテンシオメータが用いられるが、検出部が大型・複雑で小型化には不利であるなどから、非接触の検出方法が望まれる。本モータは球状ロータの表面がステータの上下の2箇所に露出しており、一方を機械出力、他方をロータの位置検出に利用できる。ロータ表面にマークを貼り付け、小型CCDカメラによって撮影する方法を考案した。画像からマークのみを抽出し、その移動量を計測することで回転角を算出する。しかし、球状ロータ表面は光沢を有し、不要なものが映り込むため、画像処理によるマークだけの検出が困難である。そのため、ロータ撮影面を外光から遮光し、カメラのシャッターが閉じている間に紫外線LEDを蓄光性マークに照射し、マークの残光を撮影するように工夫した。実験の結果、マークの抽出が容易であり、使用するカメラの画素数に依存する分解能で計測が可能であった。その計測結果を用いて制御システムを構築し、PID制御により本モータの定置制御及び追従制御を行った結果、良好な動作が安定して得られた。

キーワード 球状ロータ, 画像処理, 多自由度, 超音波モータ, 制御

## 1. ま え が き

人間の関節や眼球の動きをする制御システムには1自由度当り1個のモータが使用され、全体では複数個が必要になる。このような動作を1台で実現する球面モータが電磁式、超音波式[1]~[5]で実現されている。球面モータはシリアルリンクマニピュレータのようにアクチュエータがシリーズにつながる場合のトータルの重量の増加を防ぎ、システムの小型化・単純化が実現できる。また、回転の中心が全軸で一致するため、運動方程式が簡単になり、制御が簡単になるなどの特徴がある[6]。更に、球面超音波モータは自己保持

力を有し、巻線を必要としないため、小型化や機構の単純化が可能になる。しかし、多軸方向に回転する球状ロータを保持・予圧する機構が必要になり、駆動面以外で摩擦損失の発生や大型化になる問題がある[7]~[9]。以上のことより、二つのステータでロータを挟み込む方法が筆者らによって考案され、保持とトルク合成を可能にする方法が実現されている[9],[10]。また、球状ロータの回転位置検出はポテンシオメータを使用する方法[11]やレーザ距離計を使用する方法[7]、磁化球を使用する方法[12]、CCDカメラや二次元イメージセンサを使用する方法などが報告されている[13],[14]。しかし、トルク合成を行った際に回転位置を検出できる簡便な方法はなく、この種の球面超音波モータに応用しにくい問題があった。

本論文では、円環形超音波モータの球状ロータをもつ球面超音波モータの問題点である位置検出に関して、小型化・単純化の観点から、CCDカメラを用いた新たな回転位置計測法を提案し、計測と制御の実験結果からその有用性の検討する。

<sup>†</sup> 室蘭工業大学, 室蘭市

Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Muroran-shi, 050-8585 Japan

<sup>††</sup> 東北工業大学, 仙台市

Tohoku Institute of Technology, 35-1 Kasumi-cho, Yagiyama, Taihaku-ku, Sendai-shi, 982-8577 Japan

<sup>†††</sup> 山形大学工学部, 米沢市

Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa-shi, 992-8510 Japan

a) E-mail: maoyagi@mmm.muroran-it.ac.jp

## 2. 円環形球面超音波モータ

本研究では、筆者らによって試作された円環形球面超音波モータ [10] を使用する。このモータは図 1 に示すように、五つに電極分割された圧電板がステータに貼り付けられてある。図 2 に圧電板の電極配置のモデル図を示す。電極 A または B に正弦波電圧を印加した場合、図 3(a) に示すような変位の直交する二つの屈曲振動モードが励振される。また、電極 C に正弦波電圧を印加した場合、図 3(b) に示す径方向広がり振動モードが励振される。径方向広がり振動モードと屈曲振動モードを  $90 [\text{deg}]$  の位相差をもたせて組み合わせることで X, Y 軸回転が実現できる [1], [4], [10]。ま

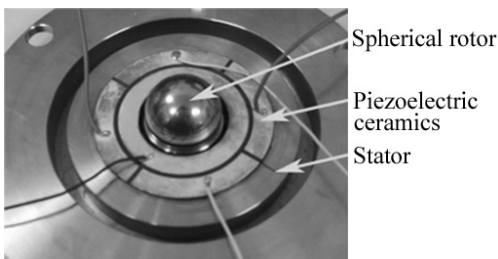


図 1 円環形球面超音波モータ  
Fig. 1 Spherical ultrasonic motor using a disk vibrator.

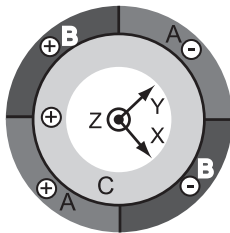


図 2 圧電板の電極配置  
Fig. 2 Arrangement of electrodes of a piezoelectric ceramic plate.

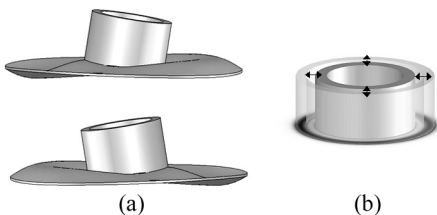


図 3 振動モード (a) 屈曲振動モード  
(b) 径方向広がり振動モード

Fig. 3 Vibration modes. (a) Bending mode.  
(b) Radial mode.

た、二つの屈曲振動モードを  $90 [\text{deg}]$  の位相差をもたせて組み合わせることで Z 軸回転が実現できる。

本モータはロータに対して適切な予圧を付加することで、性能を向上させることが可能である。本研究では、図 4 に示す球面軸受けによる予圧法 [9] を採用し、モータを駆動した。

## 3. 円環形球面超音波モータの回転位置検出

本研究では円環形球面超音波モータの球状ロータに対して CCD カメラを用いた回転位置検出法を検討する。本モータは現存する球面超音波モータの中で唯一、機械的出力を二つもつ構造である。出力の一つを回転位置計測に利用する。図 5 に示すように CCD カメラをモータの底部に配置し、ロータの底部を撮影する。ロータの底部にはマークが取り付けられており、そのマークを得られた画像から抽出し、算出したマークの

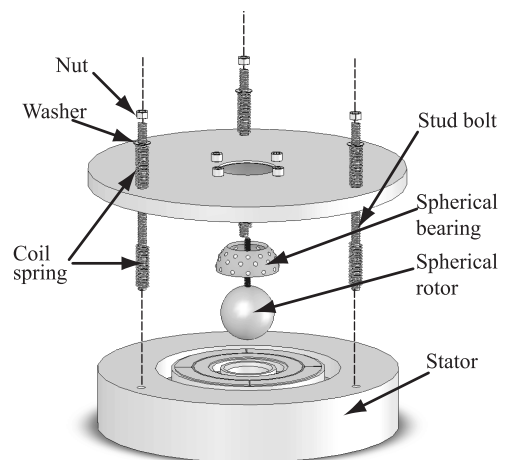


図 4 球面超音波モータの予圧機構  
Fig. 4 Preload mechanism of a spherical ultrasonic motor.

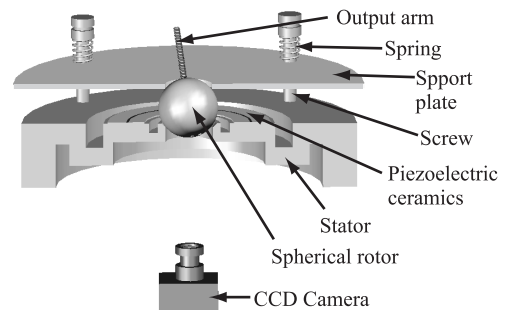


図 5 球面超音波モータの構成  
Fig. 5 Construction of a MDOF ultrasonic motor.

座標からロータの回転位置を算出する．

### 3.1 画像処理によるマーク抽出の安定化

球状ロータは光沢をもっていることから，外部から不要な映り込みが発生し，マークのみの抽出は容易でない．そこで本研究では，蓄光素子を利用したマーク抽出法を考案した．蓄光素子は光を当てると自らも明るく発光する性質をもっている．周囲を遮光し蓄光性マークのみが光ることにより，マーク以外は視覚的にとらえることができなくなるため，マークのみの抽出が容易となる．しかし，蓄光素子の明るさは長時間持続しないため，CCD カメラのシャッター時間を利用し，光源により発光エネルギーの供給を行った．CCD カメラはシャッターの開閉をフレームレートごとに繰り返している．シャッターが開いているときに画像を取り込むので，その状態のときに光源を消す．シャッターが閉じているときのみ光源を発光させることにより光源が映りこまずに，蓄光素子を明るく保つことが可能である．

図 6 にシャッターの開閉タイミングと光源の点灯タイミングを示す．また，光源には蓄光素子に効率良く光エネルギーを供給でき，高速応答であることから紫外線 (UV) LED を使用した．

図 7(a) に蓄光素子のマークをロータに取り付けた画像を示す．図 7(b) は本抽出法を利用して撮影した画像である．マークのみが安定に撮影されていることが確認できる．得られた画像に対して，2 値化処理でマークのみの抽出を行い，ラベリング処理によってマークの重心位置を算出することで位置検出を行う．撮影されたマークは多少ゆがんでいるが重心位置の算出に大きな影響はない．

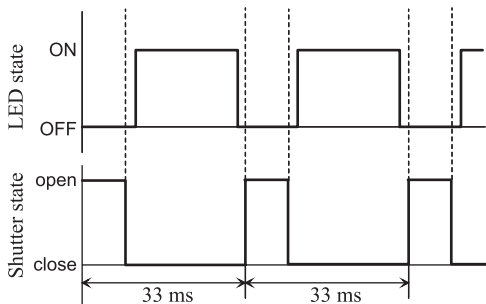


図 6 LED スイッチング及びシャッター動作のタイミングチャート

Fig. 6 Timing chart of LED switching and shutter operation.

### 3.2 画像処理による回転位置計算

図 8 にロータの座標系を示す．出力軸の位置を基準に座標系を定義する．ロータの出力軸の傾きを X-Y-Z 固定角の表現である Roll, Pitch により X 軸回転角度 ( $\phi_x$ ), Y 軸回転角度 ( $\phi_y$ ) を表している．また，ロータの出力軸上の回転角度 ( $\theta$ ) を Yaw と定義する．

マークは図 9 に示すように，一方のマークの重心が出力軸上に位置するように配置し，他方のマークをそこから  $L$  だけ離れた位置に配置する．これらのマークを Z 軸方向から撮影して各回転角度の算出を行う．出力軸の傾き角度 ( $\phi$ ) は，出力軸上に取り付けられたマークの位置とロータの中心位置との距離  $d$  を算出し，既知のロータ半径  $r$  との関係から式 (1) より求まる．

$$\phi = \sin^{-1} \frac{d}{r} \quad (1)$$

図 10 はカメラの撮影方向からロータを見た図である． $\phi_x, \phi_y$  は  $d$  の x 成分  $d_x$ ,  $d$  の y 成分  $d_y$  及び式 (1) を利用し，それぞれ式 (2), 式 (3) で表すことができる．

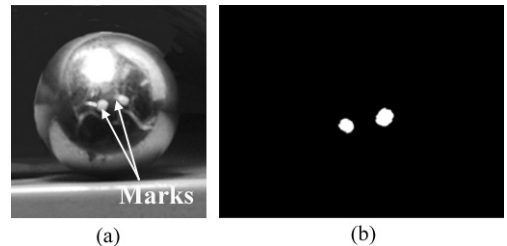


図 7 蓄光素子を貼り付けたロータと CCD カメラからの測定画像 (a) 球状ロータ上の二つのマーク (b) マーク撮影画像

Fig. 7 Photos of rotor with luminous marks and measured image from CCD camera.

(a) Rotor with marks. (b) Obtained image.

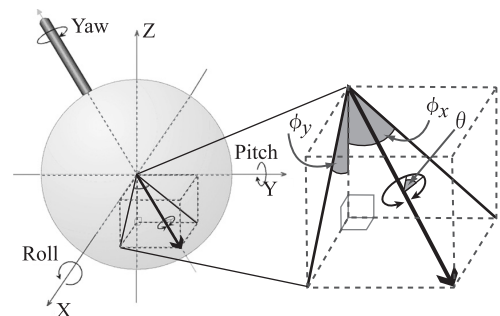


図 8 ロータ上の座標系

Fig. 8 Coordinate system of a rotor.

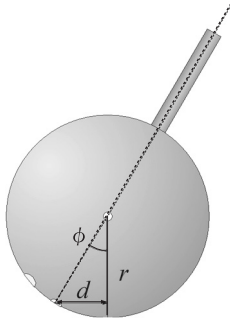


図 9 ロータの側面のパラメータの定義

Fig. 9 Parameter definition on side view of a rotor.

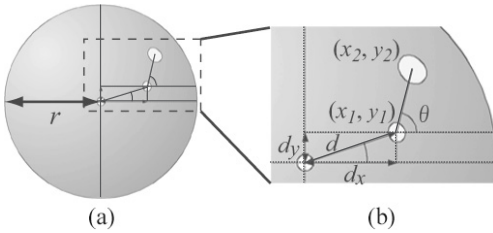


図 10 測定パラメータの定義 (a) ロータの底面と (b) その詳細

Fig. 10 Measurement parameters. (a) Bottom view of a rotor. (b) Detail view.

$$\phi_x = \sin^{-1} \frac{d_x}{r} \quad (2)$$

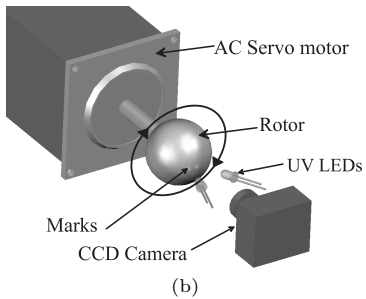
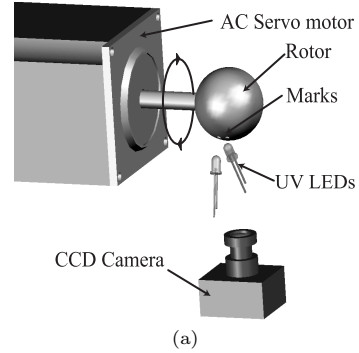
$$\phi_y = \sin^{-1} \frac{d_y}{r} \quad (3)$$

$\theta$  は二つのマークの成す角度の測定により算出される。二つのマークの座標をそれぞれ  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  とした場合,  $\theta$  は式 (4) により算出できる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \quad (4)$$

### 3.3 画像処理による計測精度の測定

AC サーボモータと CCD カメラ (MINTRON 社, MTV-63K80AN, 27 万画素) を用い, 本計測法の精度を確認する実験を行った。図 11 に示すように AC サーボモータの回転軸にロータ (半径 12.7 [mm]) を取り付けた。ロータをサーボモータによって 1 [deg] ずつ回転させ, CCD カメラ画像から得られた計測結果と比較することで本計測法の精度を測定した。カメラはロータから 4 [mm] 離れた位置に設置され, 測定画面上の 1 [pixel] は実距離 14.8 [ $\mu$ m] に相当した。Roll, Pitch 方向の回転角度  $\phi$  の精度を確認する場合及び Yaw 方向回転角度  $\theta$  の精度を確認する場合について, 実験時のモータやカメラ, マークの配置の概要

図 11 検出角度の精度測定の方法 (a) X 軸, Y 軸の回転角計測の場合 ( $\phi = 90$  [deg]) (b) 出力軸の回転角計測の場合 ( $\phi = 0$  [deg])Fig. 11 Outline of experiment to measure accuracy of detection angle. (a) In the case of rotation angle on X-axis or Y-axis. ( $\phi = 90$  [deg]) (b) In the case of rotation angle on output-axis. ( $\phi = 0$  [deg])

を図 11 (a), 図 11 (b) にそれぞれ示す。本実験では平均直径 1 [mm] の円形マークを出力軸上に配置し, 4 [mm] 離れた位置に平均直径 0.6 [mm] の円形マークを使用した。マークの大きさや形状はマークの重心計算の容易さや誤差に影響するため, 小さすぎない大きさを選んだ。

サーボモータの設定値と画像処理で得られた結果の誤差を測定した。図 12 及び図 13 に Roll, Pitch 回転角の測定誤差と Yaw 回転角の測定誤差をそれぞれ示す。ステータ振動子の下側にはロータの表面が露出しており, マークがステータに隠れずに検出できる範囲が X 軸, Y 軸回転の場合に約 70 [deg] に制限されているため, 中心位置から 35 [deg] の範囲について測定した。Roll, Pitch 方向では  $\pm 0.2$  [deg] 程度, Yaw 方向で  $\pm 0.6$  [deg] 程度の誤差が発生することを確認した。

ここで, Roll, Pitch 方向の分解能について述べる。画像処理による位置検出は画素数によって位置検出の精度が決まる。1 [pixel] だけマークが移動したときの

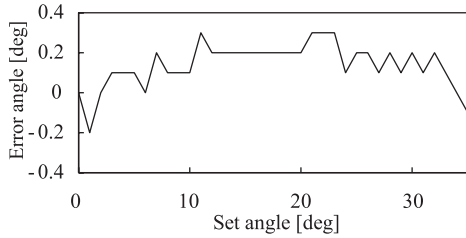


図 12 最小角ステップ動作時の回転軸の検出角誤差 (X 軸, Y 軸周りの回転の場合 ( $\phi = 90 [\text{deg}]$ ))

Fig. 12 Detected error angles to set rotation angle when moving unit angle step. (In the case of rotation angle on X-axis or Y-axis. ( $\phi = 90 [\text{deg}]$ ))

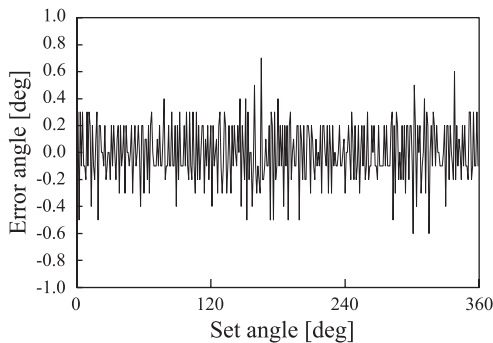


図 13 最小角ステップ動作時の回転軸の検出角誤差 (出力軸周りの回転の場合 ( $\phi = 0 [\text{deg}]$ ))

Fig. 13 Detected error angles to set rotation angle when moving unit angle step. (In the case of rotation angle on output-axis. ( $\phi = 0 [\text{deg}]$ ))

角度変化  $\Delta\phi$  を分解能と考える．傾き角度によって単位角度の移動距離は変化するため，傾き角度によって分解能は異なる． $\Delta\phi$  は式 (1) を用いて式 (5) で表される． $d'$  は 1 [pixel] の移動によるロータの移動距離であり，本測定時では 40 [ $\mu\text{m}$ ] であった．

$$\Delta\phi = \sin^{-1} \frac{d}{r} - \sin^{-1} \frac{d-d'}{r} \quad (5)$$

上式より，理論分解能は 0 [deg] 付近 ( $d \approx 0$ ) 及び計測可能な最大傾き角度である 35 [deg] 付近 ( $d \approx 7.28$ ) でそれぞれ 0.18 [deg] 及び 0.22 [deg] である．更に Yaw 方向の分解能について述べる．マーク間距離が  $x_{px}$  であり，一方のマークだけ 1 [pixel] だけ移動したとすると，もう一方のマークとのなす角が変わる．この 1 [pixel] の移動分で変化する角度  $\theta_{MIN}$  が Yaw 方向の分解能と考えられ，次式で表される．

$$\theta_{MIN} = \tan^{-1} \frac{1}{x_{px}} \quad (6)$$

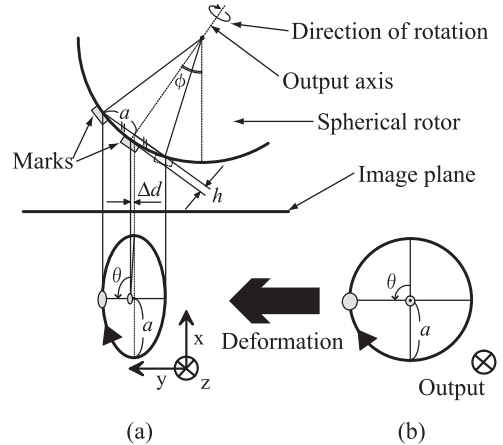


図 14 マークの円軌跡の変形と出力軸の傾きによる中心の移動 (a) 変形軌跡と (b) 円軌跡

Fig. 14 The deformation of a circular trajectory and the shift of a center position by an inclination of output axis. (a) Cause for error. (b) Circular trajectory.

マーク間距離は 100 [pixel] であったため，Yaw 方向の分解能  $\theta_{MIN} = 0.57 [\text{deg}]$  が得られる．

したがって，Roll, Pitch, Yaw 方向のいずれも，最少誤差程度で計測可能であることが分かった．

### 3.4 出力軸の傾きによる Yaw 方向に発生する誤差の低減

ロータの出力軸が傾いた状態での Yaw 方向の検出について考える．画像平面に対してロータの出力軸が傾いた状態を図 14 に示す．マークの配置は 3.2 で示したとおりである．出力軸上でロータが回転する場合，画像平面上では出力軸上にあるマークを中心にして，もう一方のマークが図 14 (b) のように円軌跡を描いて移動する．出力軸が傾いた場合，円軌跡は画像平面に傾いて投影され楕円軌跡に変形する．したがって，前節までの算出方法では Yaw 方向の誤差が非常に大きくなる．また，マーク同士の高さの差  $h$  も誤差の要因となる．図 14 (a) に示すように，撮影平面に投影した場合，マークの位置が楕円軌跡の中心位置から  $\Delta d$  だけずれることが分かる．この中心位置のずれ幅  $\Delta d$  によって検出角度に大きな誤差が生じる．マークの間隔  $L$  やロータ半径  $r$  から  $\Delta d$  の値は式 (7) より算出可能である．

$$\begin{aligned} \Delta d &= h \sin \phi \\ &= r \left( 1 - \cos \frac{L}{r} \right) \sin \phi \end{aligned} \quad (7)$$

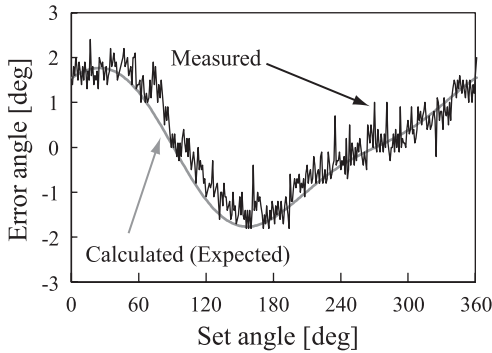


図 15 出力軸が 10 度傾いたときの計算値及び検出値の比較 ( $\delta = 90$  [deg])

Fig. 15 Comparison between calculated value and measured one in the case that output axis is tilted at 10 deg. ( $\delta = 90$  [deg])

### 3.5 誤差の計算値と実測値の比較

中心のずれた楕円軌跡の式 (8) から出力軸が傾いたときの検出値が予想可能である。

$$\begin{cases} \Delta x = a \cos(\theta + \delta) \\ \Delta y = a \cos \phi \sin(\theta + \delta) + \Delta d \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $a$  はマークの描く円軌跡の半径、 $\phi$  は中心軸の傾き角度、 $\theta$  は出力軸の回転角度、 $\delta$  は出力軸が傾く方向である。  $-x$  方向に傾いたときを  $\delta = 0$  としている。画像より得られた成分差  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  から予想される検出値  $\theta'$  を式 (4) と同様の考え方で得られる式 (9) より算出する。

$$\begin{aligned} \theta' &= \tan^{-1} \frac{\Delta y}{\Delta x} \\ &= \tan^{-1} \frac{a \cos \phi \sin(\theta + \delta) + \Delta d}{a \cos(\theta + \delta)} \end{aligned} \quad (9)$$

正しい検出角度  $\theta$  と誤差を含んだ予想される検出値  $\theta'$  の差を、予想誤差  $\Delta\theta$  とする。式 (9) より  $\theta$  は PC による数値計算により求められる。出力軸の傾き  $\phi$  が 10 [deg]、出力軸の傾き方向が  $+y$  方向 ( $\delta = 90$  [deg]) の場合について、 $\Delta\theta$  と実際に測定した検出誤差のデータとの比較結果を図 15 に示す。ほぼ計算値どおりの誤差が生じていることが分かった。以上より実測値に対して発生する誤差が予想できることから、実測値を補正することで、より精度の良い回転位置の計測が可能になった。

### 3.6 画像処理と制御システムの構成

球面超音波モータの計測と制御に用いた実験系の

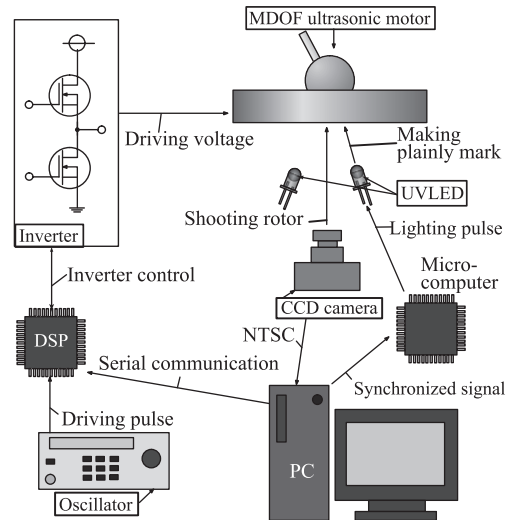


図 16 制御及び測定システムの概略

Fig. 16 Outline of control and measurement system.

簡略図を図 16 に示す。ロータの撮影による位置計測に CCD カメラ (WATEC 社製「WAT-230 VIVID」、38 万画素) を使用した。CCD カメラから得られたロータ撮影画像は PC に接続されている画像処理ボード (Interface 社製「PCI-5524」) に NTSC 信号で送られる。送られた画像を画像処理ポートにより解析し、得られたロータの位置データを、DSP にシリアル通信で送信する。DSP は得られた位置データで制御入力を決定し、モータ駆動パルス生成する。生成されたパルスに従いインバータが動作し、球面超音波モータに電圧が印加され動作する。

また、ロータを照らす光源は、カメラのシャッターに同期させる必要があるため、画像処理ボードから生成される撮影フレームとの同期信号をマイコンで受信し、光源の制御を行う。

## 4. 球面超音波モータの制御

本研究で採用した球面超音波モータに対して、画像処理による回転位置計測を使用した場合の制御特性を示す。

### 4.1 球面超音波モータの制御方法

(1) 本計測法での位置データのサンプリング間隔は、カメラのフレームレートに従うため 33 [ms] である。したがって、制御周期を 33 [ms] とした。

(2) 本球面超音波モータは各軸回転方向の駆動電極が独立していない。したがって、三軸同時の制御がで



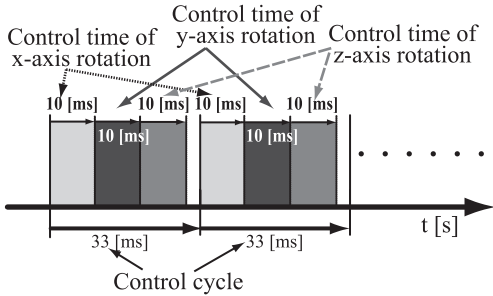


図 17 制御サイクルと各回転軸の制御時間の関係  
Fig. 17 Relation between control cycle and control time of each rotation axis.

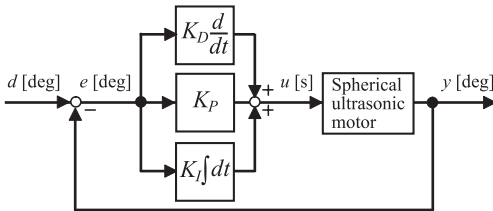


図 18 制御系のブロック線図  
Fig. 18 Block diagram of control system.

きないため、周期的に制御対象の回転軸を切り換えて制御を行う。図 17 に示すように制御周期を 10 [ms] ずつ 3 分割し、それぞれの軸回転の制御時間とした。制御時間内の電圧印加時間を制御入力  $u$  [s] とする。

(3) 制御方式は PID 制御法を用いた。図 18 に本制御系のブロック線図を示す。目標値  $d$  [deg] と画像処理によって検出した現在位置  $y$  [deg] から偏差  $e$  [deg] は式 (10) で表される。

$$e = d - y \quad (10)$$

式 (11) の PID 制御式に従って制御入力  $u$  [s] を決定する。 $K_P$  (比例ゲイン),  $K_I$  (積分ゲイン),  $K_D$  (微分ゲイン) はそれぞれの項の重みを決めるための係数である。

$$u = K_P e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (11)$$

PID 制御の各係数 (比例ゲイン, 積分ゲイン, 微分ゲイン) は動作を確認することで決定した。

(4) 本制御法を実際に用いて動作した結果, 切り換えにより駆動音が鳴り続ける問題があった。しかし, 動作自体は安定であったことから本制御法を用いて特性計測を行った。

#### 4.2 球面超音波モータの制御特性

実際に球面超音波モータを上述の制御方法を用い

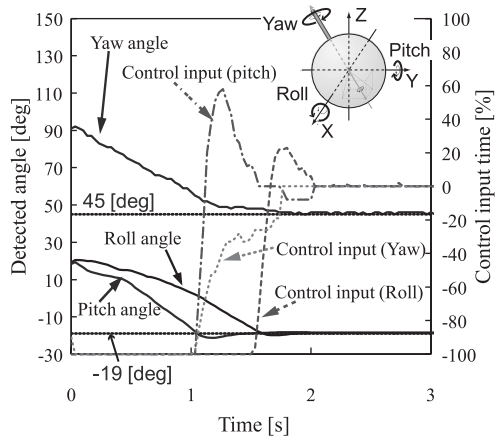


図 19 各回転方向の目標値と検出値 (ヨー, ピッチ, ロール)  
Fig. 19 Control inputs and detected angles for each rotation directions (Yaw, Pitch, Roll).

表 1 ロータの初期位置と目標位置  
Table 1 Initial position and target position of rotor.

	Roll [deg]	Pitch [deg]	Yaw [deg]
Initial position	19	19	90
Target position	-19	-19	45

て目標位置まで球状ロータを回転させる制御実験を行った。図 19 に計測結果を示す。同図中に示すように Roll, Pitch, Yaw を制御のパラメータとした。表 1 に示す初期位置から目標位置に回転させる場合について実験を行い, そのときの位置と時間の関係を制御入力とともに計測した。軸初期位置から目標位置までスムーズに収束することが確認できた。しかし, ロータの移動中, 制御入力が増大となっていたことから, 収束の速さは本モータの性能限界によるものといえる。

次に, 目標値を時間的に変化させ追従制御を行った。Yaw は 90 [deg] を目標値に設定し, Roll, Pitch を 10 [s] で一回転するような円軌跡を描くように目標値を設定した。目標値は 100 [ms] ごとに更新している。モータを制御したときの目標値と検出値の測定結果を図 20 に示す。本モータはそれぞれの目標値に追従して動作しているが, 制御遅れをもっていた。Roll, Pitch に対して, ともに 200 [ms] 程度の遅れが生じていたが, 安定に追従させることが可能であった。遅れの原因として, 制御サイクル内で各軸回転の駆動を切り換えた際の不感帯の存在や回転速度の立ち上がり時間及び計算時間などが考えられる。

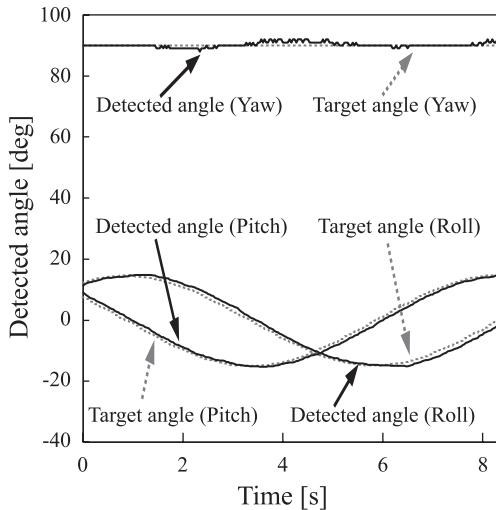


図 20 追従制御の実験結果

Fig. 20 Results of follow-up position control.

## 5. む す び

画像処理による球状ロータの位置検出は、使用するカメラの画素数で定まる分解能で計測が可能であった。また、画像処理を用いた球面超音波モータの位置制御も安定であった。以上より、球状ロータで構成される多自由度機構に対して画像処理という手法が有用であると考えられる。今後の課題としてはカメラの高解像度化による検出精度の向上と高フレームレート化による制御性の向上、計測システムの小型化が挙げられる。また、1台のカメラによるとロータ外周部のマークの検出の精度の低下により計測が困難になるため、ロータの動作角度を大きくした場合にカメラの増設やマークの配置や個数などについて検討が必要であると思われる。

謝辞 本研究は高橋産業経済研究財団の研究助成によるものである。

## 文 献

- [1] M. Aoyagi, T. Nakajima, Y. Tomikawa, and T. Takano, "Multi-degrees-of-freedom ultrasonic actuator employing multi-vibration modes of a disk," Proc. 7th International conference on new actuators, pp.399-402, Bremen, Germany, June 2000.
- [2] T. Amano, T. Ishii, K. Nakamura, and S. Ueha, "An ultrasonic actuator with multi-degree of freedom using bending and longitudinal vibrations of a single stator," Proc. 1998 IEEE International Ultrasonics Symposium, pp.667-670, Sendai, Oct. 1998.
- [3] M. Aoyagi, S.P. Beeby, and N.M. White, "A novel multi-degree-of-freedom thick-film ultrasonic motor," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.49, no.2, pp.151-158, Feb. 2002.
- [4] 青柳 学, 富川義朗, 高野剛浩, "多重モード円環振動子を用いた多自由度超音波モータの構成," 音響春季講義集 (II), no.3-P-1, pp.979-980, March 1999.
- [5] 大野裕司, 竹村研治郎, 前野隆司, "平板状振動子を用いた多自由度超音波モータの開発," 音響春季講義集 (II), no.1-1-13, pp.903-904, March 2001.
- [6] 矢野智昭, "球面電磁モータ," アクチュエータ工学, アクチュエータシステム技術企画委員会 (編), 第4章, 養賢堂, 東京, 2004.
- [7] 川野 洋, 安藤英由樹, 平原達也, 尹 結鎬, 上羽貞行, "負荷接続状態の多自由度超音波モータの三自由度回転駆動制御手法—高臨場感伝達ロボット「テレヘッド」への応用," 信学論 (A), vol.J87-A, no.11, pp.1386-1394, Nov. 2004.
- [8] C.-H. Yun, S. Niwano, J.R. Friend, K. Nakamura, and S. Ueha, "Support mechanism for the ball rotor in the three-degree-of-freedom ultrasonic motor," Jpn. J. Appl. Phys., vol.42, part 1, no.5B, pp.3000-3001, May 2003.
- [9] 中島俊典, 青柳 学, 富川義朗, 高野剛浩, "円環形多自由度超音波モータのロータ保持・予圧方法の検討," 第23回超音波エレクトロニクスシンポジウム講演論文集, pp.255-256, Nov. 2002.
- [10] M. Aoyagi, T. Nakajima, Y. Tomikawa, and T. Takano, "Examination of disk-type multi-degree-of-freedom ultrasonic motor" Jpn. J. Appl. Phys., vol.43, no.5B, pp.2884-2890, May 2004.
- [11] 朴 伸錫, 竹村研治郎, 前野隆司, "多自由度超音波モータを用いた多自由度鉗子システムの開発," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集, no.03-4, pp.1P1-2F-B8(1)-1P1-2F-B8(2), May 2003.
- [12] 土師聡子, 豊田直樹, 遠山茂樹, "磁化球を用いた球面超音波モータの制御," 精密工学会春季大会, no.J05, p.432, May 2002.
- [13] 庭野慎一郎, 上羽貞行, 多自由度超音波アクチュエータの高性能化に関する研究, 東京工業大学大学院修士論文, Feb. 2004.
- [14] 高橋 博, 西村 修, 秋葉敏克, 田村博幸, "ダイナミッククレンジングが広い2自由度制御型球面圧電モータの開発," 精密工学会秋季大会, no.J44, pp.751-752, Sept. 2007. (平成21年12月18日受付, 22年4月14日再受付)





青柳 学 (正員)

平 3 山形大大学院修士課程了。同年山形大・工・電子情報・助手。平 11 年 9 月～平 12 年 9 月文部省在外研究員(サザンブトン大学・英国)。平 15 年 9 月室蘭工大・工・電気電子・助教授。平 19 同准教授。平 21 年 4 月同大・大学院工学研究科・もの創造系領域。平 22 年 4 月同教授、現在に至る。博士(工学)。その間、超音波工学(超音波モータ/アクチュエータ/超音波加工)に従事。本会学術奨励賞(平 6)受賞。日本音響学会栗屋潔学術奨励賞(平 9)受賞。日本音響学会、電気学会、精密工学会各会員。



藤田 泰喜

平 17 室蘭工大・工・電気電子卒。平 19 同大大学院・電気電子工学専攻了。現在、(株)ニコンシステム勤務。



高野 剛浩 (正員)

昭 41 山形大・工・電気卒。同年同大工学部電気工学科助手。昭 42 東北工大・工・通信・助手。昭 46 同講師。平 1 同助教授。平 8 同教授。同大工学部・情報通信工学科教授。平 22 定年退職。博士(工学)。圧電アクチュエータ、超音波モータ、振動発電、超音波利用粉体搬送の研究・教育に従事。日本音響学会、精密工学会各会員。



田村 英樹 (正員)

平 13 山形大・理工・生体センシング機能工了。博士(工学)。平 16 山形大・理工・助手。平 19 同助教。平 22 東北工大・准教授。専門は固体バルク振動子を用いたセンサ及びアクチュエータ。日本音響学会、精密工学会、IEEE UFFC 各会員。



富川 義朗 (正員)

昭 37 山形大・工・電気卒。同年 4 月～12 月日立製作所。昭 38 年 1 月山形大・工・電気・助手。昭 59 年 11 月同大・工・電気・教授。電気電子(応用電気)所属。平 17 同大・工・定年退職、その後、私設・バクウ研究所・開設、現在に至る。その間、電気機械振動子とその応用、超音波エレクトロニクスの研究に従事。昭 49 年 2 月工博。昭 50 年 10 月～51 年 10 月 UCLA 客員研究員。現在も超音波エレクトロニクス(超音波モータ/アクチュエータ/センサ)を継続。更に、技術相談やアミューズメント・グッズの開発などを実践。賞：電気通信学会米沢記念学術奨励賞(1971)、日本非破壊検査奨励賞(NDI 賞、1986)、同協会・NDI ポスターセッション賞(1986)、日本音響学会佐藤論文賞(2001)、本学会論文賞(2002)、同学会フェロー称号受賞(2002)など。著書：『電気電子のための固体振動論の基礎』(共著、オーム社、1982)、『Ultrasonic Motors—Theory and Applications』(共著、Oxford Science Publications 1993)『超音波エレクトロニクス振動論——基礎と応用——』(編著、朝倉書店、1998)など。日本音響学会、電気学会各会員。