

平成 21 年 6 月 22 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2008

課題番号：16078215

研究課題名（和文） 多自由度アクチュエータ

研究課題名（英文） Actuator with Multi Degrees of Freedom

研究代表者

矢野 智昭 (YANO TOMOAKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員

研究者番号：90358218

研究成果の概要：1台で人間の肩関節や手首関節のような多方向の動きを実現する多自由度アクチュエータの新しい構造を2種類提案し、設計、試作、運転実験により駆動原理の正しさを確認した。これらのアクチュエータは軸対称な構造をしており、出力軸が大きく傾いた状態でも安定した制御を実現し、かつ大きな力を出すことができる。本アクチュエータが普及すれば多自由度システムの小型・軽量・高性能化を通して地球環境保全に貢献できる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	11,700,000	0	11,700,000
2005年度	13,000,000	0	13,000,000
2006年度	12,400,000	0	12,400,000
2007年度	14,400,000	0	14,400,000
2008年度	4,600,000	0	4,600,000
総計	56,100,000	0	56,100,000

研究分野：アクチュエータ

科研費の分科・細目：機械工学・機械機能要素

キーワード：アクチュエータ、多自由度、球面、電磁型、高トルク、三次元座標計測、地球環境保全

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 人間型ロボットやペットロボットの関節駆動や工作機械の多軸ステージなど、アクチュエータを多数必要とするアプリケーションにおいて、1台で多自由度の動きを実現する多自由度アクチュエータの要求が高まり、国内外で多自由度アクチュエータの研究が活発に行われるようになった。

(2) 国内外で試作された多自由度アクチュエータの中には位置決め精度が高いものがあったが、高トルクを実現したものはほとんどなく、あっても垂直軸周り以外では制御性や出力が急激に低下する欠点を有していた。

(3) 日本ロボット学会誌などの雑誌で多自由度アクチュエータの特集が組まれるようになった。平成14年度に科研費基盤研究(c)(1)調査企画研究「次世代アクチュエータの予測調査研究」が行われた。平成14年4月より電気学会産業応用部門リニアドライブ研究会で多自由度アクチュエータの調査研究が開始された。

(4) 2005年に京都議定書の発効を控え、温室効果ガス削減が注目された。次世代アクチュエータの予測調査研究成果報告書に、多自由度アクチュエータは複数台のアクチュエータを1台で置き換えることができるため実

用化すれば温室効果ガスの削減効果が大きいことが記載された。

## 2. 研究の目的

- (1) 高トルクを実現する多自由度アクチュエータの実用化に向けて高トルク多自由度アクチュエータの構造と駆動原理を提案する。
- (2) 提案した多自由度アクチュエータの設計・試作・実験を行い、提案した構造と駆動原理が正しいことを確認する。
- (3) 高トルク多自由度アクチュエータの実用化に向けた問題点と解決方法を示す。

## 3. 研究の方法

- (1) すでに試作された多自由度アクチュエータを整理・分類し、高トルクに適した構造を検討する。
- (2) 電磁場解析ソフトウェアを使用して高トルク多自由度アクチュエータを設計する。
- (3) 多自由度アクチュエータの位置測定装置を試作する。
- (4) 多自由度アクチュエータのトルク測定装置を試作する。
- (5) 高トルク多自由度アクチュエータを試作し、位置決め精度、出力トルクを測定する。
- (6) 実験結果にもとづき、高トルク多自由度アクチュエータの実用化に向けた問題点と解決方法を示す。

## 4. 研究成果

- (1) すでに試作された多自由度アクチュエータは1軸ドライブが1軸ドライブの上に重ねられている入れ子構造と、全ての電磁吸引力が直接ロータを駆動する構造があり、後者が高トルク多自由度アクチュエータに適していることを明らかにした。
- (2) 全ての電磁吸引力が直接ロータを駆動する、多極球面同期モータの構造を提案し、設計・試作・実験を行った。図1に試作した多極球面同期モータを示す。

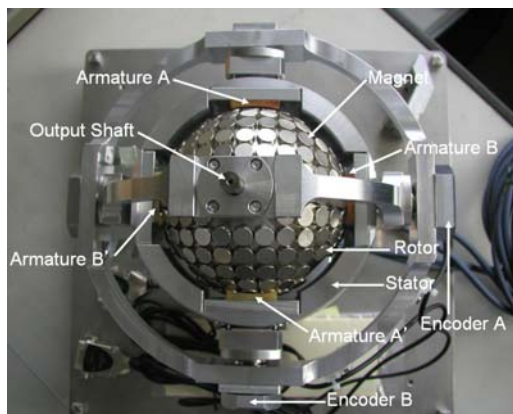


図1 多極球面同期モータ

多極球面同期モータの駆動原理は以下の通りである。ロータ表面に永久磁石をN極とS極が回転軸周りにそれぞれ同心円上に配置し、ステータ上に界磁巻線ユニットAA'およびBB'を互いに回転軸が直交する位置に配置する。界磁巻線ユニットは図2に示すように3個の界磁巻線を磁石4個のスペースに配置している。したがって、界磁巻線ユニット近辺の構造は三相リニア同期モータと同じになる。

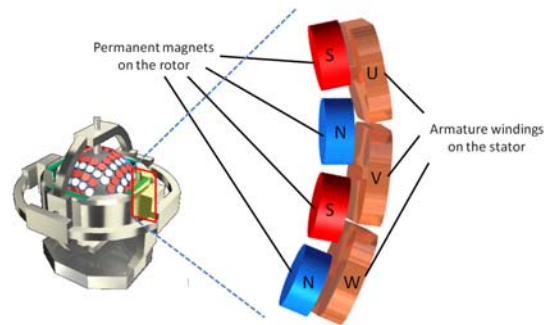


図2 永久磁石と界磁巻線の配置

界磁巻線ユニットAA'に三相交流を流すとロータがエンコーダAの周りに回転する。界磁巻線ユニットBB'に三相交流を流すとロータがエンコーダBの周りに回転する。界磁巻線ユニットAA'およびBB'に同時に三相交流を流すとロータはそれぞれの回転を合成した方向に回転する。提案する多極球面同期モータは三相リニア同期モータのドライブ2組で駆動することができる。

試作した多極球面同期モータは2自由度を有し、繰り返し位置決め精度0.00348deg、最大出力トルクは界磁巻線ユニットAA'とBB'に同時に三相交流を流した時で0.69Nmであった。Y軸周りのトルク測定結果を図3に示す

アマチュア巻線の面積を拡大し、永久磁石の形状を最適化し、バックヨークと鉄心を採用すればさらに高トルク化することができる。

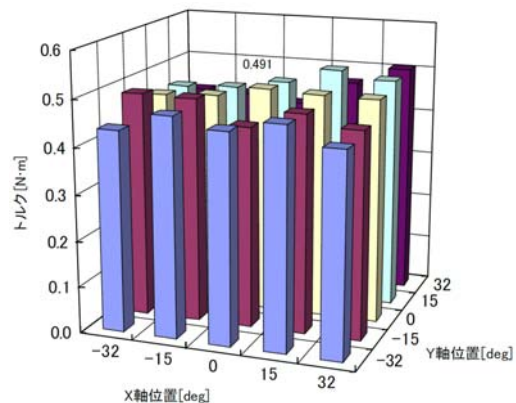


図3 Y軸周りのトルク測定結果

(3) 全ての電磁吸引力が直接ロータを駆動する、球面ステッピングモータの構造を提案し、設計・試作・実験を行った。図4に試作した球面ステッピングモータを示す。

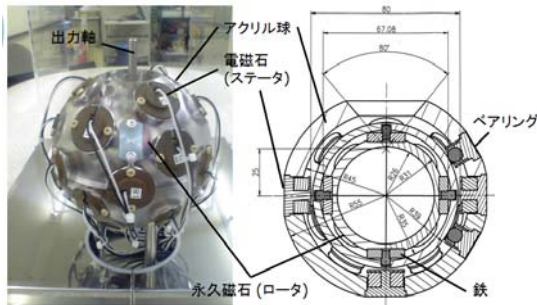


図4 球面ステッピングモータ

球面ステッピングモータの駆動原理は以下の通りである。ロータに内接する仮想正六面体の8個の頂点に永久磁石をN極とS極が隣り合うように配置する。ステータに内接する仮想正八面体の6個の頂点に界磁巻線を配置する。

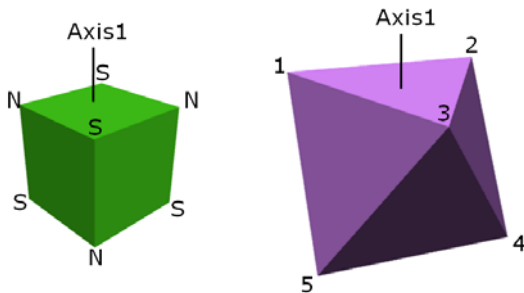


図5 ロータとステータの概念図

ロータに内接する仮想正六面体とステータに内接する仮想正八面体が図5に示す位置関係にあるとする。それぞれの上面の永久磁石と界磁巻線の関係は通常の三相2極ステッピングモータと同じである。したがって、界磁巻線(1, 2, 3)に三相交流を流すとロータが軸1周りに回転する。それぞれの底面の永久磁石と界磁巻線の関係も通常の三相2極ステッピングモータと同じである。したがって、界磁巻線(4, 5, 6)に三相交流を流すとロータが軸1周りに回転する。界磁巻線(1, 2, 3)と(4, 5, 6)同時に三相交流を流すと出力トルクが加算される。

次にロータに内接する仮想正六面体とステータに内接する仮想正八面体の左側面が平行の位置関係にあるとする。それぞれの左側面の永久磁石と界磁巻線の関係は通常の三相2極ステッピングモータと同じである。したがって、界磁巻線(1, 3, 5)に三相交流を流すとロータは(1, 3, 5)の中心を回転軸として回転する。その裏側も同様である。

三相交流を流す界磁巻線の組み合わせにより、ロータは界磁巻線の中心を回転軸とし

て回転する。

提案する球面ステッピングモータは三相ステッピングモータのドライバと、三相交流を流す界磁巻線の組み合わせを切り替えるスイッチで駆動することができる。

試作した球面ステッピングモータは3自由度を有し、最大回転速度 300rpm、最大出力トルク 0.013Nmであった。ロータとステータの相対角度をパラメータとして出力トルクを測定した結果を図6に示す。バックヨークと鉄心を採用すればさらに高トルク化することができる。

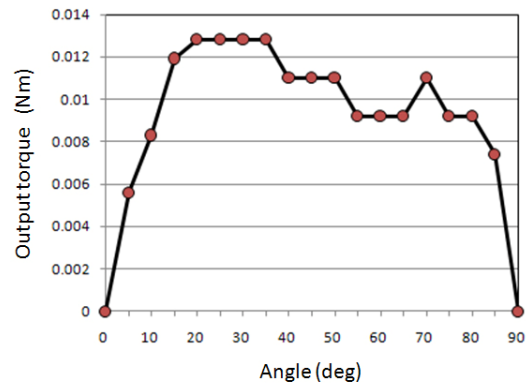


図6 ロータの相対位置とトルク

(4) 試作した球面ステッピングモータは正六面体と正八面体にもとづく構造をとっている。これらの多面体を正十二面体、切頂八面体をはじめとする多数の多面体と置き換えることにより違う構造の球面ステッピングモータを設計できる。置き換え可能な多面体の例を図7に示す。

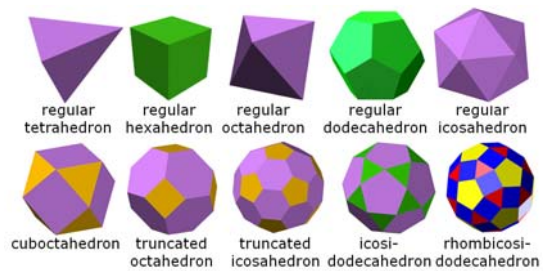


図7 多面体の例

これらのうちロータに内接する仮想正六面体の頂点に永久磁石、ステータに内接する仮想正四面体の頂点に界磁巻線を配置した球面ステッピングモータおよびロータに内接する仮想切頂八面体の頂点に永久磁石、ステータに内接する仮想正十二面体の頂点に界磁巻線を配置した球面ステッピングモータをとりあげ、試作した球面ステッピングモータと比較して、製作の難易度、制御の難易度、回転方向変更の難易度、位置決め精度、出力トルクについて考察し、得失を明らかにした。

(5) 移動する対象物を追尾してレーザ光を当て、対象物までの距離を測定するレーザトラックの構造を提案し、設計・試作・実験を行った。試作したレーザトラックを図8に示す。

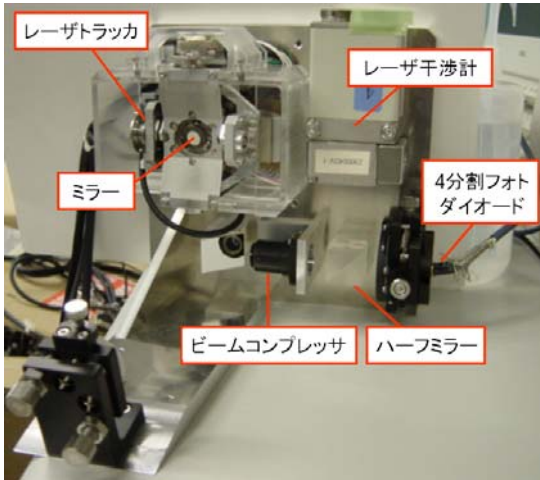


図8 レーザトラック

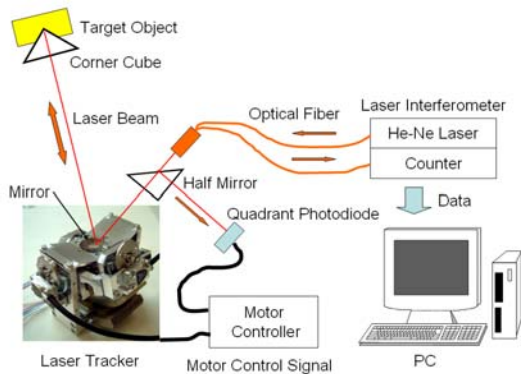


図9 レーザトラックの原理

図9にレーザトラックの原理を示す。光源から出たレーザ光がミラーで反射して対象物に向かう。対象物に付けたコーナーキューブで反射したレーザ光は再びミラーで反射し、ハーフミラーを通して片方はレーザ干渉計での距離計測に、もう片方は4分割光ダイオードの受光量変化によりミラーを駆動する対象物追尾に使用される。これによりレーザトラックは対象物を追尾し、対象物までの距離計測を行う。

レーザトラックのミラー駆動部に球面モータを採用し、寸法 88x85x71mm で測定誤差  $0.45\mu\text{m}$ 、標準偏差  $0.54\mu\text{m}$  の距離測定精度を確認した。レーザトラックの距離測定精度の測定結果を図10に示す。

本レーザトラックを4台使用すれば三辺測量の原理にもとづき、移動物体の三次元座標測定がサブミクロンの精度で可能になる。三辺測量の原理を図11に示す。

4台のレーザトラックで対象物を追尾して A1 から A12 の12点で距離を測定すると、48

個の距離データを得る。このデータから12点の座標36個と4台のレーザトラックの座標12個を求めることができる。したがって、レーザトラックをフィールドに適当に設置して対象物の三次元座標を測定できる。このような計測装置はフィールドを移動するロボットやクレーンの位置、ダムや高速道路などの建造物の経年変化から工作機械の工具位置の計測器として切望されており、実用化すれば産業界に与えるインパクトは大きい。

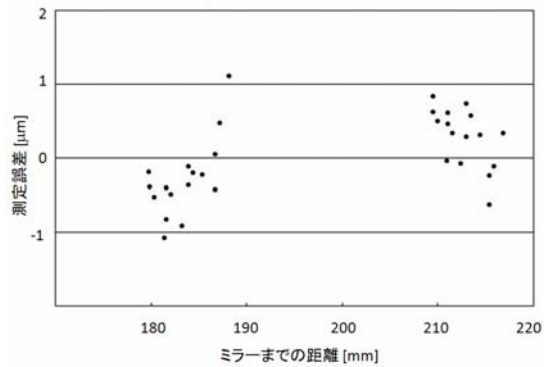


図10 レーザトラックの距離測定精度

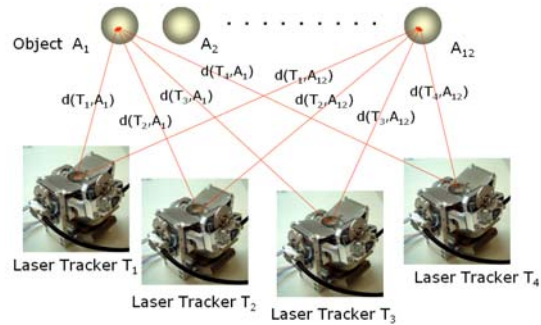


図11 三辺測量の原理

(6) 提案した多極球面同期モータおよび球面ステップモータはそれぞれ2自由度と3自由度を有し、すべての電磁吸引力が加算されてロータを駆動する構造になっている。したがって高トルク化が期待できる。試作した球面モータはいずれも制御性能を高めるために空心コイルのバックヨークなしの構造としているため、出力トルクは同じ重さの1自由度モータより劣っている。今後はバックヨークと鉄心を設け、最適設計を行って出力トルクを同じ重さの1自由度モータと同程度にする必要がある。

(7) 出力トルクが同じ重さの1自由度モータと同程度の多自由度アクチュエータが実用化すれば、ロボットをはじめとする多自由度システムの小型・軽量・高性能化および省エネルギー省資源が実現する。

(8) 日本の電力消費の5割以上をモータが占めている。多自由度アクチュエータが実用化すれば複数台のモータを多自由度アクチ

ュエータ1台で置き換えることができる。また、システムの小型、軽量化によりクリーンルームや恒温室などの周辺環境を小型化できる。これらにより世界の電力消費量を大幅に減らし、二酸化炭素削減および省資源を通じて地球環境保全に貢献することができる。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計20件)

- ①矢野智昭ほか3名、2自由度球面同期モータの開発、日本AEM学会誌、17巻1号、2009、29-34、査読有り
- ②矢野智昭、Design of a hexahedron-octahedron based spherical stepping motor、Proceedings of the IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science、2008、519-524、査読有り (IEEE R&A Best Paper Award)
- ③矢野智昭ほか5名、Development of a Small Spherical Motor for Driving Laser Tracker、Proceedings of the 5th International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications、2005、254-257、査読有り

〔学会発表〕(計46件)

- ①矢野智昭、高トルク球面モータの開発ー正六面体と正八面体に基づく球面ステッピングモータの解析ー、電磁現象および電磁力に関するコンファレンス、2008.11.21、日立市
- ②矢野智昭ほか3名、Basic Characteristics of a Multi-Pole Spherical Synchronous Motor、Actuator2008、2008.6.10、Bremen, Germany
- ③矢野智昭ほか5名、Development of a Small Spherical AC Servo Motor for Laser Tracker、International Conference on Electrical Machines、2006.9.4、Crete Island, Greece

〔図書〕(計6件)

- ①矢野智昭ほか42名、日本機械学会、機械工学便覧γ8編「メカトロニクス・ロボティクス」、2008、71-75
- ②矢野智昭ほか119名、産業技術サービスセンター、実用精密位置決め事典、2008、199-203
- ③矢野智昭ほか15名、養賢堂、アクチュエータ工学、2004、14-21、83-92

〔産業財産権〕

○出願状況(計7件)

名称：球面軸受および球面モータ  
発明者：矢野智昭、ほか2名  
権利者：産総研、安川電機  
種類：特許  
番号：特願2008-224667  
出願年月日：平成20.9.2

国内外の別：国内

名称：球面加減速駆動機構  
発明者：矢野智昭  
権利者：産総研  
種類：特許  
番号：特願2007-166374  
出願年月日：平成19.6.25  
国内外の別：国内

名称：球面ステッピングモータ  
発明者：矢野智昭  
権利者：産総研  
種類：特許  
番号：特願2006-273936  
出願年月日：平成18.10.10  
国内外の別：国内

○取得状況(計2件)

名称：2軸複合モータ  
発明者：矢野智昭、高辻利之ほか4名  
権利者：産総研、安川電機  
種類：特許  
番号：4222866  
取得年月日：平成20.11.28  
国内外の別：国内

名称：球面モータを用いた首振り運動光てこによる光追尾式レーザ干渉測長装置および該装置を用いた座標測定方法  
発明者：高辻利之、矢野智昭、ほか3名  
権利者：産総研、安川電機  
種類：特許  
番号：3800541  
取得年月日：平成18.5.2  
国内外の別：国内

〔その他〕

- ①報道、球面モーターー傾けても出力安定ー、日経産業新聞、2007.9.7
- ②報道、「産総研オープンラボ」が開催～今年は250研究室・300テーマに規模を拡大～次世代のアクチュエータ、球面モーター、Robot Watch、2008.10.23

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢野 智昭 (YANO TOMOAKI)  
独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員  
研究者番号：90358218

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし