

**平成 16 年度戦略的基盤技術力強化事業
研究開発成果報告概要**

事業管理法人名 (代表者氏名)	JFEテクノロジー 株式会社 (藤井 徹也)	所在地	〒100-0005 東京都千代田区丸の内一丁目1番2号 (Tel : 03-3217-2018)		
技術分野	ロボット部品分野	技術区分	アクチュエータ 関連技術	研究開発課題	小型・軽量化/ 制御性向上技術
テーマ名	位置情報フィードバックが可能な多自由度モータ に関する研究開発		研究開発期間	平成 16 年 4 月 1 日から 平成 17 年 2 月 28 日まで	

1. 委託業務の概要

近年の産業の発展に伴い様々な分野で、複雑な動きが実現可能なマニピュレータに対する需要が高まっている。特にアクチュエータは関節あたりの自由度が多ければそれに比例した個数を必要とするため、小型・軽量化を常に意識しなければならない。

しかし、従来の電磁モータは高回転でしか実用的なトルクが取り出せず減速機を用いるため小型・軽量化を困難にしてきた。よって、減速機を必要とせず且つ単体で多自由度駆動出来るアクチュエータが望まれる。

そこで本委託業務では、単体で3自由度を有する多自由度(球面超音波)モータに関して、その性能を実用レベルまで引き上げることを目的とする研究開発を行う。

2. 技術目標値

項目	H15 年度 実績	H16 年度 実績		H17 年度 最終目標値	
	Bタイプ	ABタイプ	Bタイプ	ABタイプ	Bタイプ
ロータ径	45	30	45	30	45
定格トルク (kg.cm)	ステータ、 圧電素子、 ロータ等の 要素開発を 完了	ステータ、 圧電素子、 ロータ等の 要素開発を 完了	2.7	1.5	5
保持トルク (kg.cm)			5.5	3	10
定格回転数 (rps)			1	1	1
センシング方式			原理試作を 完了	-	非接触式を 組込
分解能 (P/R)			120	-	240
モータサイズ (mm)			85×45	60×40	75×50
モータ重量 (g)			350	200	250

3. 目標値を達成するための解決策と具体的方法

技術目標値を達成するための解決策

	小型・軽量化	制御性向上
課題	トルクアップ	非接触方式の高精度センシング技術
その根拠	同サイズモータであれば、トルクアップする事により小型軽量化したとも考えられる。 それ故、本開発ではトルクアップに重点を置く。	これまでは、性能重視の点ではエンコーダ等を用いた接触方式としており（接触負荷トルクが生じ回転動作を阻害する）、ホールセンサと磁化球での非接触方式では分解能が粗く中心軸廻りのセンシングが不可能であった。
解決方法	有限要素法の活用 ステータ押付け機構の分割能動化	ロータに指向性を持った2つの受光素子を内蔵し、ハウジングの底面又は側面に多数の発光素子をマトリクス状に配置する。検出方法は、マトリクス状の発光素子を端から1つずつ又は列状に走査発光させて、受光素子がそれぞれ光源を最も強く検出したときの発光素子の光源位置からロータの角度を検出する。
その根拠	<p>各種計測機器の値から捉えにくい現象や問題点を、有限要素法を用いることで容易に観測出来る見通しが立っている。</p> <p>構造上、一方のステータを駆動してロータを回転させる際、他方の非駆動側のステータとロータとの間に生じる摩擦抵抗によって、駆動トルクが減少する問題があった。 その非駆動側ステータとの摩擦抵抗で生じるトルクロスを低減し当該ステータからも有効なトルクを発生させることで駆動トルクの大幅な向上を目指せると考えた。</p>	角度検出部を球面アクチュエータのハウジング内に収納し、安価で精度の良い角度検出装置を提供することが出来る。また、外来ノイズに対しても脆弱部となる受光素子が2つで、シールドも容易に出来ることから十分な耐性を持たせることが出来る。
過去の実績	<p>これまでの研究開発で収集したデータ等を有限要素法に取り込み、各ステータをモデル化し、駆動特性の比較検証を行ってきた。 これにより、共振状態を画像的に捉えることが可能になった。</p> <p>これまでに、非駆動側のステータの表面に定在波や任意波形の振動を発生させ、非駆動側のステータとロータとの接触面積を小さくしてロータの摩擦抵抗を軽減させることに成功している。 本解決方法は、その実績を更に向上させる開発と確信する。</p>	本解決方法と同様な原理実験を行って、実用可能である感触を得ている。

具体的な実施内容

実施項目	実施内容
<p>サブテーマA：技術総括管理及び個別技術分析・評価 実施項目 技術総括管理及び中間試作モータ個別技術分析・評価</p>	<p>技術総括管理及び中間試作モータの特性試験と評価、角度センサーの特性試験と評価、PCによるモータ制御の評価を行う。</p>
<p>サブテーマB：多自由度モータの各部要素の研究開発及び製品設計 実施項目 トルクアップ開発</p>	<p>有限要素法ソフトウェアのNASTRANを用い、更にこれまでの豊富なデータを加味して解析し最適ステータを開発する。ステータの押付け機構の能動化支持機構を開発する。</p>
<p>実施項目 多自由度モータ全体機構開発</p>	<p>モータハウジング、ロータ等の構成部品の開発設計、構成部品や圧電素子の材料選定やシミュレーション設計、制御回路・駆動ソフト開発を行い、各々のシミュレーション解析を行う。</p>
<p>実施項目 試作・評価工程</p>	<p>内製による部品加工、外注加工品の受け入れ検査等を経て得られた各種部品・購入品類を開発設計要領にて正確に組立てる。評価・分析用の専用測定ユニット等を製作する。それらを駆使しての評価分析を行い、データ収集を行う。</p>
<p>実施項目 角度検出システム開発</p>	<p>固定側に発光素子を多数配列し、ロータに指向性を持った受光素子を2個内蔵した機構を構築する。その試作品で走査発光させ、実際のセンシング制御技術を確立する。</p>
<p>実施項目 実証テスト用多用途型PC制御ユニット開発、製作</p>	<p>改善ソフトによる試作モータ搭載ロボット接続テストを行う。</p>

(以下次頁)

実施項目	実施内容
<p>サブテーマC：管内検査ロボットにおける実証テスト 実施項目 管内検査ロボット試作機製作及び作動テスト</p>	<p>試作機は、カメラヘッド部・水中ケーブル部・制御装置部で構成する。カメラヘッド部は、防水構造でテレビカメラ・Bタイプモータ・LED照明を組込む。</p> <p>試作機を使用し、実証テストを行う。モータノイズやケーブル長に関する基礎テストを行い、従来モータとの比較・検討をする。総合テストでは、カメラを模擬配管に挿入し実際の映像を記録する。</p> <p>多くの人々が実際に見て触れられる様に、システムをコンパクトにまとめる。要望があれば会議・展示会・デモに出品し市場性を調査する。</p>
<p>サブテーマD：ヘビ型ロボットジョイント部における実証テスト 実施項目 ヘビ型ロボットジョイント部の試作機の製作と検証</p>	<p>ネジ式ヘビ型ロボットジョイント部のDCモータ版と球面モータ版それぞれの試作品を製作し比較・検証を行う。</p>
<p>サブテーマE：多自由度モータに関する技術・特許動向及び応用・市場規模調査 実施項目 超音波モータ適用可能ロボットの絞り込み及びユーザーニーズ調査</p>	<p>実用化の可能性が高いロボットを特定し、ユーザーニーズを具体的に調査して数値目標化する。</p>
<p>実施項目 先行特許の詳細調査</p>	<p>本研究開発に抵触するおそれのある先行特許を検索・抽出し、個別に抵触検討を行う。</p>
<p>実施項目 超音波モータ実用化促進のための活動</p>	<p>販売チャンネルの調査およびビジネスモデルの検討を行う。</p>
<p>サブテーマF：応用技術の検証・評価 実施項目 中間試作モータのロボットへの応用技術の検証・評価</p>	<p>中間試作モータのヘビ型ロボットへの応用技術の検証・評価</p>

4. 当該年度における技術目標値の達成状況と意義

1) サブテーマA：技術総括管理及び個別技術分析・評価

(東京農工大学)

開発は計画通り順調に進捗。モータ単体の性能は安定しており、商品化に近い仕上がりである。また、周辺技術(ドライバー、センサー、制御法)も順調に開発が進んでいる。実際に利用する立場からも問題点を洗い出し、より商品化へと進んでいる。

2) サブテーマB：多自由度モータの各部要素の研究開発及び製品設計

(ダブル技研株式会社)

・トルクアップ

・ 30 かご型ステータの駆動試験

このステータは、振動分離帯が圧電素子の外周にあり、ロータとの接触によって生じる荷重方向と振動分離帯の傾斜方向が同一なため変形モーメントが半減し、押付力に変形しにくい構造となっている。

かご型ステータの形状をさらに最適化した結果、O型にすることで昨年度の約2倍のトルクを出すことができた。

・ ロータ材質によるトルク変化

・ ステータの表面処理によるトルク変化

・ 3極式モータのトルク測定結果

・ 2極式モータのトルク測定結果

・ 20 ステータのトルク測定結果

5種類のステータをFEM解析しトルク試験を行った結果、C型タイプが現状一番トルクが大きくなる事が分かり、20ステータの基本形状を決めることができた。

・ 接触面のすり合せによる改善効果

すり合せ処理は、ステータの接触面の平滑化に有効であり、表面硬化処理を施したステータやモータの駆動特性の安定化に効果を期待できる。

・全体機構

・ 中間試作機用モータドライバの設計

このドライバは、内部にCPLDを多用しプログラムを書き換えることで、フェーズシフトの分解能やコントローラの制御方法を自在に変えることができるように設計している。このため、本機1つで2極式モータと3極式モータを駆動する事ができる。

・ ステータの共振点 - 温度特性の測定

圧電素子の共振点やインピーダンスの温度特性を測定することで、圧電素子の組込み前のチェックやバラツキ等の特性をあらかじめ合わせることができる。

・試作・評価

・ 2 極式及び 3 極式超音波モータの組立・調整

中間試作バージョンの各種モータについて、組立及びアライメント、モータドライバとのインピーダンスマッチング等の調整を行った。

・ 微小トルク試験機

起動トルクについては、ブレーキを取り付けた状態で $0.03\text{kg}\cdot\text{cm}$ 必要なことが分かった。この試験機の場合、対象とするステータは、20 でストールトルクの計測が主であることから、起動トルク以上のトルクを有しているため計測は十分可能である。また、押付力やステータの微小変位、表面温度等も良好に検出できており、これらからトルク変動時等の各値の挙動が把握できるようになった。

・角度検出システム

・多用途型 PC 制御ユニット

へび型ロボットの実機の制御に先立ち、シミュレーション制御を実施した。この結果、次のステップとして実機制御できる見通しが立った。また、へび型ロボットのアニメーション（上記シミュレーションの映像化）を作成したことにより、ねじ式へび型ロボットの動作を直観的に把握できるようになった。

3) サブテーマ C : 管内検査ロボットにおける実証テスト

(株式会社キュー・アイ)

試作機が完成し、実証テストを行った。モータノイズやケーブル長に関する基礎テストを行い、従来モータと比較・検討した。総合テストでは、カメラを模擬配管に挿入し実際に映像を記録した。温度試験・振動試験・耐久試験等も完了し、フィールドでの使用に支障無き事を確認した。

試作機は多くの人々が実際に見て触れられる様に、コンパクトに製作しトランクでの持ち運びを容易にした。今後要望があれば会議・展示会・デモ等に出品する準備が整った。

4) サブテーマ D : へび型ロボットジョイント部における実証テスト

(シリコンロボティクス株式会社)

- ・ 比較検討用ネジ式へび型ロボット(DC モータモジュール)設計、製作
 - 多自由度モータを組込む事を前提としたへび型ロボットを製作する事が出来た。
- ・ 多自由度モータの動作検証
 - へび型ロボットの使用に耐えうるモータの動作を確認出来た。
 - マネキン型ロボットへの組込を想定しての動作検証も確認出来た。
- ・ 多自由度モータを組込んだネジ式へび型ロボットのモジュール製作と実証テスト
 - DC モータモジュールと多自由度モータモジュールを組合せての動作実証試験で、多自由度モータが問題なく、動作・検証出来る事を松野研究室と共に確認出来た。
- ・ マネキン型ロボットに多自由度モータを組込む為の仕様検討
 - マネキン型ロボットへ多自由度モータを組込んだ場合に、多自由度モータの特性を生かした使い方が出来る事を確認出来た。

5) サブテーマE：多自由度モータに関する技術・特許動向及び応用・市場規模調査

(J F E テクノリサーチ株式会社)

・超音波モータ適用可能ロボットの絞り込み及びユーザーニーズ調査

2010年以降、製造業・FA関連分野に加えて、次世代ロボットのニーズが飛躍的に高まると予測されている業種分野で実現されつつある具体的なロボットおよびその開発メーカーについて調査し、今後に資するデータを得た。

・先行特許の詳細調査

本研究開発の成果として得られる多自由度モータに係る技術が、既に出願されている特許に抵触しないかどうかの検討を行うため、約5,100件の公開系特許文献と約1,400件の登録系特許文献を検索した。上記の特許文献をリストアップし、個別に抄録や明細書を参照して内容を検討したが、本研究開発に基づく試作品、製品が抵触するおそれがありそうな特許文献は発見されなかった。

・超音波モータ実用化促進のための活動

各分野の次世代ロボットに関しては、従来にない新たな要素技術も有望視されている。それぞれの持つ課題や方向性を調査し、トレンド技術を探った。このようなトレンド技術では、異分野の要素技術が複合的に用いられるのがむしろ常態といえる。このことから、多自由度モータの販売戦略として、モータ単体だけではなく、他の要素技術と融合させたパッケージ技術、ユニット技術としての製品化という方向性が見出された。

6) サブテーマF：応用技術の検証・評価

(電気通信大学)

- ・ 比較検討用ネジ式ヘビ型ロボット(DCモータモジュール)用回路の設計・製作と評価
 - DCモータモジュール用の制御回路を設計・製作し、動作検証を行う事が出来た。
- ・ ネジ式ヘビ型ロボットのDCモータモジュールと多自由度モータモジュールの比較検証
 - 多自由度モータを組み込んだモジュールが、ネジ式ヘビ型ロボットで動作できる事をDCモータモジュールと比較・検証し、評価する事が出来た。

5 . 事業化の目標と当該年度に把握した事業化を取り巻く環境変化

市場規模を考えると、2010年の次世代ロボット市場は3兆円と推定されており提案時と変化ないが、2025年には8兆円となり、なかでも多自由度モータの用途拡大が見込める生活分野と福祉医療分野の伸びが著しいと見られる。

製品化の見通しとして、先ず本事業における最終目標のクリアにこだわらず、それ以前のスペックでも受容可能な分野への前倒し販売を計画する。(大学等での制御系教材・オブジェ・アミューズメント等々へ、本モータ単体やその組込機器として)

目標性能達成後は、本研究開発において実証中の管内検査ロボ・レスキューロボ・マネキンロボの多自由度モータ搭載製品が実現するであろう。

その他有望用途として、某自動車メーカーからのオファー案件がある。それは、ビジョンチップ(超高速、超並列画像処理センサ、1msの応答性を持つ)を搭載した機器で、本モータの多自由度機能、高応答性によりベストマッチングでのトラッキングシステムとなる。これは、本事業への応募提案書にも記載した6軸サーボモータ搭載の顔型トラッキングシステムの案件であり、当時より計画の実現化を目指していた製品である。多自由度性は勿論であるが、ビジョンチップの1ms処理速度への追随を考えるとサーボモータの応答性では不足で、本多自由度モータの製品化が待たれていた。このシステムには、以下の様な用途・市場がある。

- ・ロボット.....ヒト型ロボットの目、工作機械の制御
- ・医療・バイオ...遠隔医療システム、手術作業支援、顕微鏡下の微細物操作
- ・自動車.....自動運転、障害物回避、車載デバイス
- ・製品検査.....ラインに流れる製品の不具合や傷の探査、半導体のパターン検査

販売経路としては、既存の取引先商社及びその商社直系の大手商社との連携を図る計画である。その商社は自動車業界・半導体業界・弱電業界等への販売力が強固である。これまでの実物デモ等により、本モータ単体とその組込機器への期待が持たれている。

懸念材料として販売価格がある。ユーザー想定価格との折り合いが難しいと思われるので、当面は特殊用途などで付加価値の高い分野を販売ターゲットとする。販売実績・知名度を上げ、量産化メリットが見込めた段階で広い市場に攻勢をかける。

生産計画としては当面自社内で行う。ある程度のロット生産が見込めた時点で、製造専門会社(国内、中国等)への生産委託を考える。元々、FA機器等の製造を主業務としているので、生産に関する経験・実績には自信を持っている。