

平成30年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「回転軸の軸ガタ検出機能を付加した自己校正型ロータリエンコーダの開発」

研究開発成果等報告書

平成31年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人長野県テクノ財団

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	5
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7

第2章 本論

① 歯車型磁気式ロータリエンコーダの原理確立	8
② 歯車型磁気式ロータリエンコーダの信号処理回路の開発	9
③ 歯車型磁気式ロータリエンコーダのセンサの開発	10
④ 商品化戦略	13

最終章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果	14
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	14

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

工作機械は、5軸加工機や複合加工機といった多軸化による高い自由度を備えることにより、より複雑な形状の加工を実現してきた。近年、非球面レンズなどの小型自由曲面形状から、航空機部品や自動車部品、金型などの大型で複雑な特殊曲面形状の加工に対して、川下製造業者からの①「更なる加工精度の高精度化・高緻密加工の可能性への要求」と、②「複雑化した工作機械の故障予知とメンテナンス作業の効率化への要求」が急速に高まってきている。これらの要求に答えるためには、工作機械の各軸の回転精度の高精度化が必須である。

回転精度のパラメータには、大きく分類して角度精度と軸ガタがある。

- 角度精度：角度精度は、高速回転中の回転速度の制御、低速回転中や停止時の角度位置決めへの制御を行う時に影響を与える。回転軸の角度精度の悪化は加工時の形状精度の低下を引き起こす。
- 軸ガタ：軸ガタとは回転軸の振動を言う。軸ガタが発生すると加工精度の低下を及ぼすばかりでなく、軸の振動が軸受けの許容値をこえると工作機械の故障というトラブル発生の要因となり、さらに加工時の騒音、振動、発熱により作業環境の悪化と民生利用における使用感の低下を起こす要因となる。

一台1億～1.5億円する高額な工作機械には、エアベアリングと光学式ロータリエンコーダが用いられており、数10nmの軸ガタ条件の下で数秒の角度精度による高精度な形状加工を実現しているものもある。しかしその台数は工作機械全体の数パーセントであり、川下製造業者が所有している大半の工作機械（小型～中型：2～3千万円）（大型：7～8千万円）は、ボールベアリングと歯車型磁気式ロータリエンコーダを使用している。その理由はボールベアリングと歯車型磁気式ロータリエンコーダとが耐油耐水耐塵に優れ且つ安価であるからである。

しかし一方で、歯車型磁気式ロータリエンコーダの一般的な角度精度はおおよそ100秒であり、径φ200mm程度のワークの加工時に、外周面に目視で判別できる±50μm程度の加工横スジが発生してしまうため、切削スジをあまり気にしない汎用加工部品や荒削り加工品の製作が主となっている。またボールベアリングは、使用とともに磨耗による回転軸の軸ガタが増加し、加工精度に影響を与え、ひいては工作機械の故障に発展することがある。

そこでかねてより川下製造業には、光学式ロータリエンコーダと同程度の10秒の角度精度を持つ歯車型磁気式ロータリエンコーダと、工作機械の軸ガタを常時1μm～数100μmで検出できる軸ガタ検出器に関する技術のニーズがあった。

「特定ものづくり基盤技術の高度化に関する指針」に定める川下製造業者等の抱える課題及びニーズのうち、当該研究開発が対象とする項目は以下のとおりである。

(Ⅱ)機械制御に係る技術に関する事項

1 機械制御に係る技術において達成すべき高度化目標

(4) 川下分野特有の事項

4) その他の分野に関する事項

d.工作機械分野に関する事項

①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

イ.高効率性・高機能性

本事業では、角度誤差検出と軸ガタ検出機能を持ち合わせるインテリジェントな「軸ガタを検出する機能を付加した高精度な歯車型磁気式ロータリエンコーダ」を実用化することにより、過酷環境下で利用される工作機械のモータ主軸の角度制御の高精度化と継続的な故障予知による寿命管理技術に資する研究開発を行った。

当該研究の技術開発の方向性に基づき当該研究開発における研究項目は以下の4項目になる。

- ① 歯車型磁気式ロータリエンコーダの原理確立
- ② 歯車型磁気式ロータリエンコーダの信号処理回路の開発
- ③ 歯車型磁気式ロータリエンコーダのセンサの開発
- ④ 商品化戦略

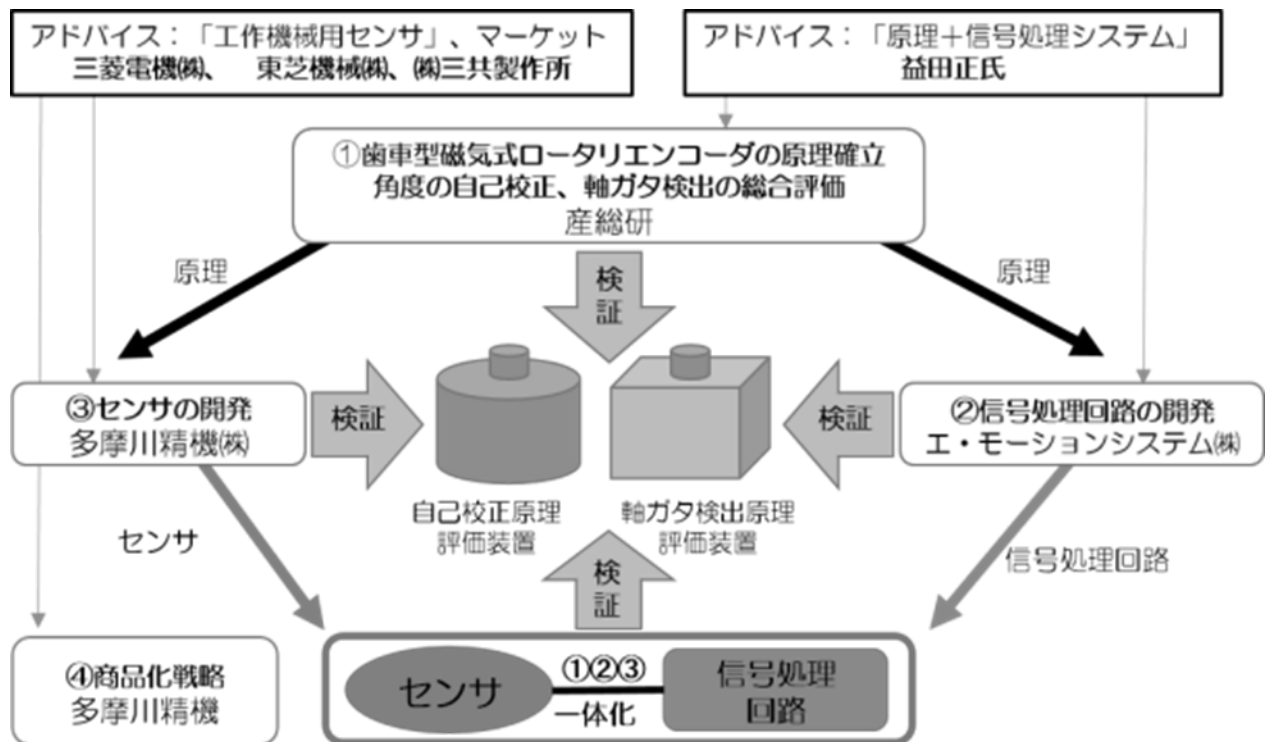
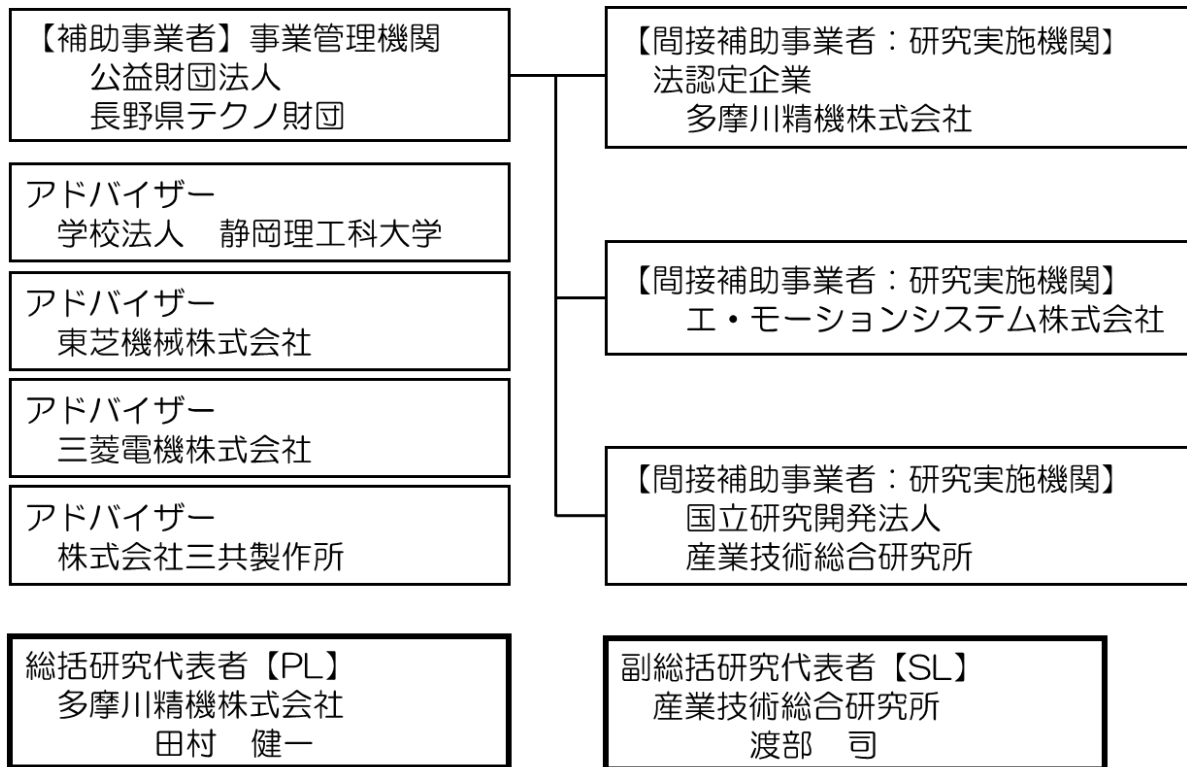


図1 具体的研究開発の流れ

○当該研究開発の具体的な流れは、図1に示すように「軸ガタを検出する機能を付加した高精度な歯車型磁気式ロータリエンコーダ」を実現するための①原理に即した、②信号処理回路と③センサの開発を行い、その角度の自己校正機能による高精度化と軸ガタ検出機能の①評価を行いながら、エンコーダ全体の小型化と低価格化を実施する。歯車型磁気式ロータリエンコーダの2つの機能評価としては、それぞれ自己校正原理評価装置と軸ガタ検出原理評価装置を用いる。①②③の研究開発に平行して、④商品化戦略を行い市場展開を検討する。

1-2 研究体制

1-2-1 実施体制・管理体制



1-2-2 研究者等氏名

【研究実施機関】 多摩川精機株式会社

氏名	所属・役職	実施項目	備考
田村 健一	技術品質統括部 技術管理課	総括研究代表者 ③-1、③-2、③-3、④-1、④-2	PL
矢澤 利弘	技術品質統括部 部長	③-1、③-2、③-3、④-1、④-2	
小島 隆臣	技術品質統括部 技術管理課	③-1、③-2、③-3、④-1、④-2	
小久江 幸二	技術品質統括部 技術管理課	③-1、③-2、③-3、④-1、④-2	
下平 勝紀	モータロニックス研究所 センサ技術課 技管	③-1、③-2、③-3、④-1、④-2	
久保田 宗明	モータロニックス研究所 センサ技術課 主任	③-1、③-2、③-3、④-1、④-2	
磯村 翼	モータロニックス研究所 センサ技術課 主任補	③-1、③-2、③-3、④-1、④-2	

星野 侑宏	モータロニクス研究所 センサ技術課	③-1、③-2、③-3、④-1、④-2	
常盤 大樹	モータロニクス研究所 センサ技術課	③-1、③-2、③-3、④-1、④-2	

【研究実施機関】 エ・モーションシステム株式会社

氏名	所属・役職	実施項目	備考
大貫 康治	代表取締役社長	②-1、②-2、②-3	
永澤 知人	技術部課長 ソフト開発部主任	②-1	
水船 雅年	技術部 ソフト開発部	②-1、②-2、②-3	
白岩 夏樹	技術部 機構部	②-1	
鈴木 隆	技術部 機構部主任	②-1、②-2、②-3	
小倉 康二	技術部 電気部	②-1、②-2、②-3	
久保田 剛史	技術部 電気部主任	②-1、②-2、②-3	
永澤 信治	技術部 ソフト開発部	②-1	
清水 拓磨	技術部 機構部	②-1、②-2、②-3	
渡部 恵教	営業部	②-1、②-2、②-3	
大村 努	技術部 設計開発部	②-1	
柳瀬 竣裕	技術部 電気部	②-3	

【研究実施機関】 産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	実施項目	備考
渡部 司	工学計測標準研究部門 上級主任研究員	副総括研究代表者 ①-1、①-2	SL

1-3 成果概要

歯車型磁気式ロータリエンコーダの開発において、以下の成果が得られた。

1. 角度精度の高精度化に関しては、マルチヘッドを用いた角度の自己校正法により、角度 ± 10 秒以下の高精度化が実現できた。ハードウェア回路処理による高精度信号の生成試験用サンプルを製作し、正常動作していることを確認した。
2. 軸ガタ検出機能に関しては、1 μm 以下の感度にて軸ガタ検出ができることを確認した。歯車型磁気式ロータリエンコーダを製作し、軸ガタ検出用ハードウェア回路処理BOXの動作試験を実施し、正常動作していることを確認した。
3. 自己校正機能と軸ガタ検出機能を搭載したユニットの設計製作を行なった。軸ガタ検出ユニットをモータ実機へ搭載して軸ガタ検出試験を実施した。平常時と軸ガタ印加時の比較測定を行い、ガタが検出できていることを確認した。
4. 川下産業殿への事業化適用計画は以下の内容で実施及び計画中
 - ① 三菱電機製モータに軸ガタ検出ユニットを搭載した実験を行い、印加した軸ガタが検出できることを確認した。
 - ② 三共製作所製回転テーブルに歯車型磁気式エンコーダを組み込む基礎試験を完了し、実機搭載に向けての設計を開始した。平成 31年度の展示会出展を目標に取り組み中である。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

田村 健一

多摩川精機株式会社

電話：0265-21-1910、メール：kenichi-tamura@tamagawa-seiki.co.jp

大貫 康治

エ・モーションシステム株式会社

電話：03-5437-1160、メール：onuki@e-motionsystem.com

渡部 司

独立行政法人産業技術総合研究所 計測標準研究部門

電話：029-861-4041、メール：t.watanabe@aist.go.jp

第2章 本論

① 歯車型磁気式ロータリエンコーダの原理確立

産業技術総合研究所で開発した自己校正機能付ロータリエンコーダの原理を高度化し、歯車型磁気式ロータリエンコーダによる軸ガタ検出の原理を開発する。具体的内容は以下のとおりである。

①－１．角度自己校正方式と軸ガタ検出の方式検討 （産業総合技術研究所）

平成28年度に光学式ロータリエンコーダの自己校正原理と軸ガタ検出原理をもとに、歯車型磁気式ロータリエンコーダの高分解能化、信号処理方式のシミュレーションを実施した。平成29年度はシミュレーション結果を検討し、実現可能な原理を提案した。

自己校正後の角度精度は平成29年度内に ± 10 秒程度を達成していた。しかし、製品化において製品仕様として ± 10 秒を実現するためには、さらなる高精度化が必要である。平成29年度に特許出願した技術と新たに導入した精度安定化回路を用いて、角度誤差の低減方法の原理を確立した。

①－２．評価 （産業総合技術研究所）

平成28年度は光学式ロータリエンコーダの自己校正原理と軸ガタ検出原理をもとに、歯車型磁気式ロータリエンコーダの高分解能化、信号処理方式のシミュレーションを実施した。平成29年度は実現可能な新たな原理を提案した。平成30年度は②、③で開発される歯車型磁気式ロータリエンコーダを用いて新たな原理の検証を行い、アドバイザーである益田正氏の協力を得て製品化に向けたセンサ配置やセンサ取り付け方法を検討し、川下製造業者に即した工作機械への組込み評価実験を行った。

特許技術と新規の精度安定化回路を導入した歯車型ロータリエンコーダを評価した。評価した結果の詳細は③にて説明する。結果として、 ± 10 秒を上回る高精度化を実現しているとの評価結果を得ることができた。軸ガタの検出感度に関しては、29年度で達成していた $1\ \mu\text{m}$ 以下の検出感度を維持しつつ、製品化を目指した小型化②、③を実施した。この開発した歯車型磁気式ロータリエンコーダを開発し、その性能評価を行った結果、同様に $1\ \mu\text{m}$ 以下の検出感度を得ることが評価された。



図2-1 自己校正原理の評価用に開発した「自己校正原理評価装置」

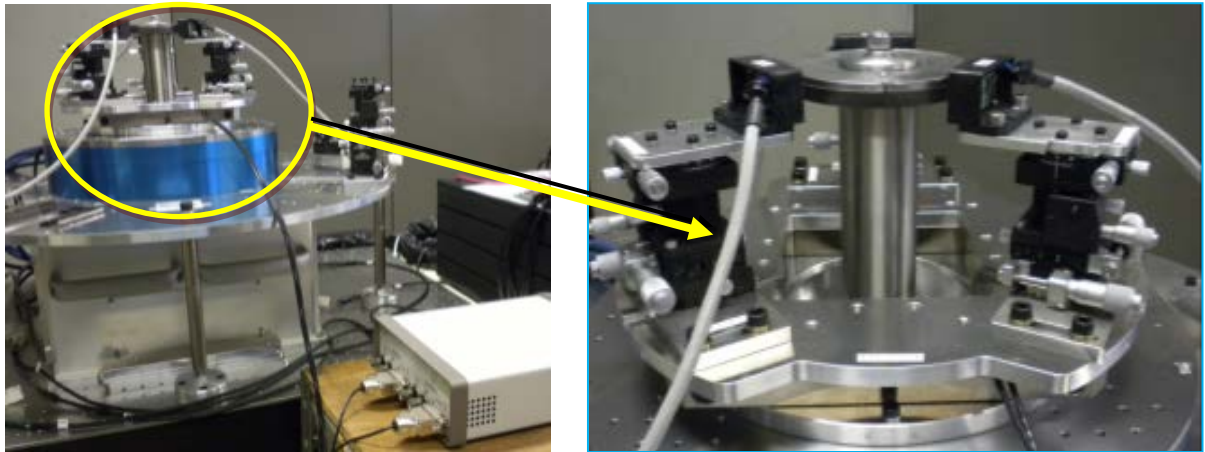


図2-2 XY ピエゾステージ（右）を応用した「軸ガタ検出原理評価装置」（左）

② 歯車型磁気式ロータリエンコーダの原理確立

①ー1の原理の提案を受けて、歯車型磁気式ロータリエンコーダの角度自己校正と軸ガタ検出の両機能が動作し、小型化、低価格化、耐振動化に対応したFPGAによる信号処理回路を開発し、歯車型磁気式ロータリエンコーダへの組み込みを実現する。具体的内容は以下のとおりである。

②ー1. 歯車型磁気式ロータリエンコーダの信号処理回路の開発（エ・モーションシステム㈱）

①ー1の原理の提案を受けて、歯車型磁気式ロータリエンコーダの角度自己校正と軸ガタ検出の両機能が動作し、小型化、低価格化、耐振動化に対応したFPGAによる信号処理回路を開発し、開発歯車型磁気式ロータリエンコーダへの組み込みを実現した。平成28年度は自己校正原理評価装置に軸ガタのない状態で歯車型磁気式ロータリエンコーダを取付けて、目標とする角度精度の達成に必要な信号処理回路の開発に成功した。平成29年度は開発した信号処理回路の精度評価実験を実施し、目標とする±10秒を実現した。

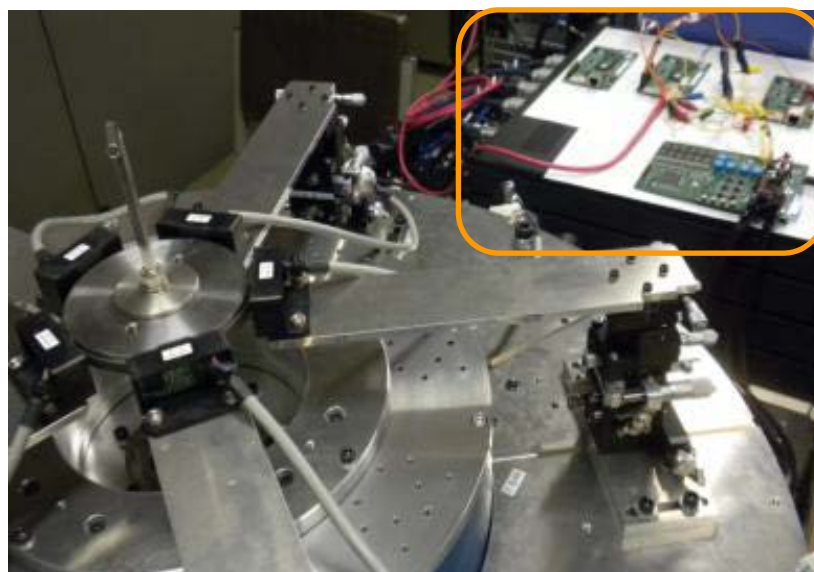


図2-3 FPGAによる信号処理回路（図の四角枠の中）開発風景

②-2. 軸ガタの信号処理方式の開発

(工・モーションシステム株)

軸ガタ検出評価装置により軸ガタ信号処理回路の評価を実施。その結果軸ガタ検出能力が10 μm 以下となる信号処理回路開発の可能性を確認した。平成29年度は平成28年度に着手した軸ガタを定量的に発生させることができる軸ガタ検出原理評価装置を完成し、軸ガタ検出精度の達成に必要な信号処理回路を開発した。

②-3. 自己校正方式と軸ガタ検出の両用信号処理回路の開発

(工・モーションシステム株)

磁気式エンコーダ信号処理による自己校正回路と軸ガタ検出回路を併用する信号処理ボードの試作版をさらに小型化した50mm×50mmの信号処理回路を開発した。その小型信号処理ボードを含む小型の軸ガタ表示器を開発し、各種エンコーダとの組み合わせ評価を行い目標値1 μm ～数100 μm を達成することを確認した。

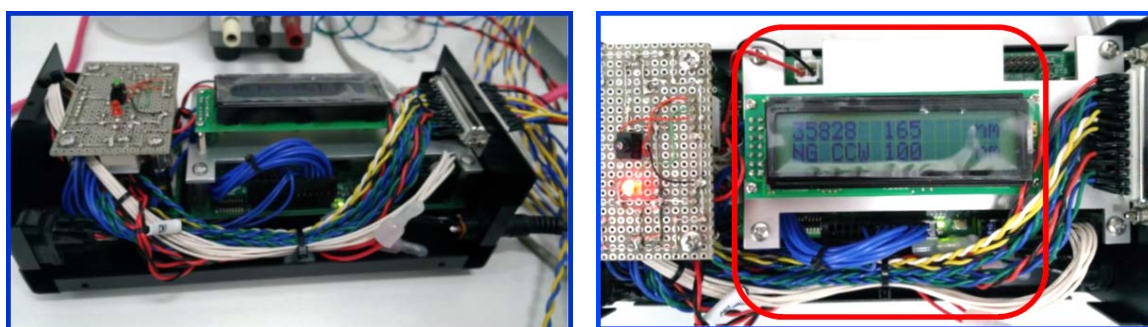


図2-4 50mm×50mmのサイズに小型化した信号処理回路

③ 歯車型磁気式ロータリエンコーダのセンサの開発

歯車型磁気式ロータリエンコーダで、角度の自己校正と軸ガタ検出を可能とする歯車と磁気センサヘッドの開発を行う。①にて検討された原理に基づき、ガタ成分抽出感度の能力とエンコーダ出力の高精度との関係を検証し、高感度センサの開発を行う。具体的内容は以下のとおりである。

③-1. 角度自己校正のセンサの開発

(多摩川精機株)

マルチヘッドセンサユニット化した歯車型磁気式ロータリエンコーダを製作し、自己校正原理評価装置による測定にて、角度精度を±10秒以内に向上させることが可能になり、目標値を達成した。また、①にて開発された電気内挿信号の誤差検出および補正精度を向上させる原理を評価し更なる精度向上を確認した。

③-2. 軸ガタのセンサの開発

(多摩川精機株)

平成28年度に完成させた軸ガタ検出原理評価装置を用いた軸ガタ検出機能の評価にて、目標値1 μm ～数100 μm 達成した。

③-3. 自己校正方式と軸ガタ検出の両用センサの開発

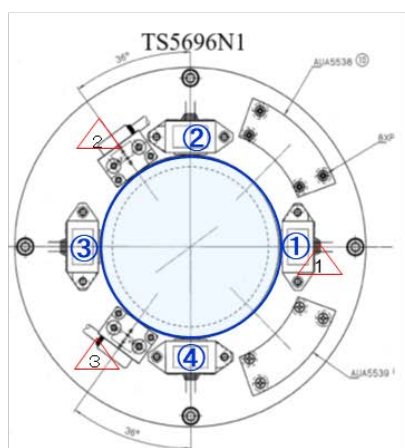
(多摩川精機株)

③-1,2の研究結果を用いて、自己校正方式と軸ガタ検出の両用可能なセンサの商品構成案の検討・設計を行い、試作品を製作した。試作品にて、角度精度の更なる向上を図るため、①にて考案した方式による調整の実施と安定した高精度を確保するための安定化回路を開発し精度評価を行

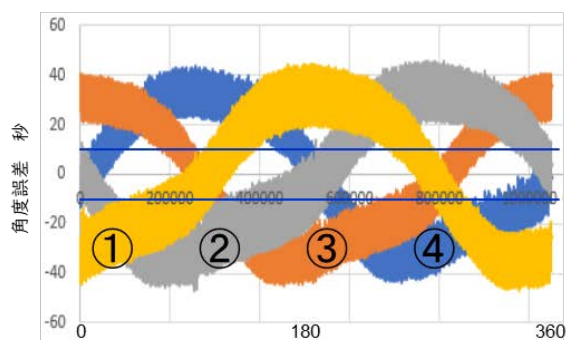
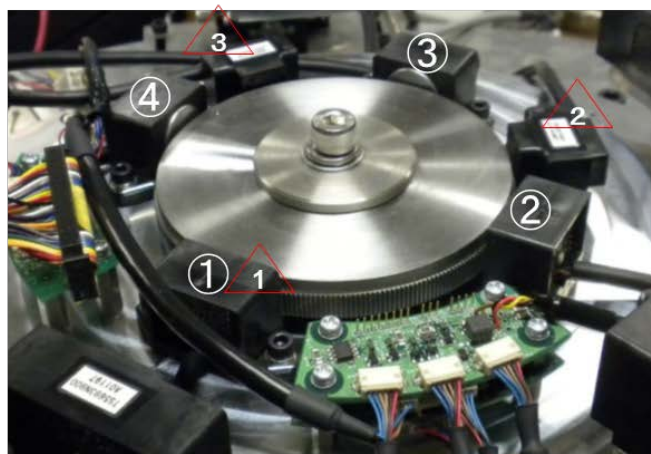
った。軸ガタ検出は、②で開発した「軸ガタ表示器」と川下製造業者製造の実機モータにて検出した軸ガタ発生量とを比較し同等であることを確認した。また、より定量的な測定が可能なレーザ測長機による軸ガタ試験機を製作・評価し、同等であることを確認した。

角度精度

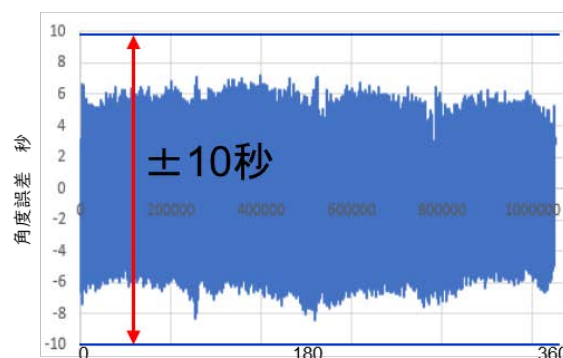
角度 ± 10 秒以下を達成する。



歯車直径(PCD) $\phi 102.4$ mm



既存の歯車型磁気式エンコーダの角度誤差



自己校正技術を導入後の角度誤差

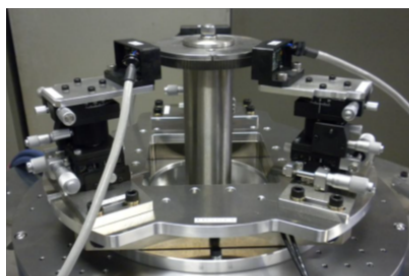
角度精度、 ± 10 秒以下を確認

図2-5 角度精度 ± 10 秒を達成した歯車型磁気式ロータリエンコーダ

図2-5は、直径 $\phi 102.4$ mm、歯数256の歯車に4個のセンサを配置することで、自己校正機能を付加した歯車型磁気式ロータリエンコーダである。このエンコーダを自己校正原理評価装置に設置し、各センサの角度誤差を評価した。図2-5の下段左下の図が示すように、各センサは従来の歯車型磁気式ロータリエンコーダとして評価されたものと同様であり、約 ± 40 秒の角度誤差を示している。（横軸は0度から360度で、縦軸は角度誤差を示している。） 大きな ± 30 秒の一周期成分は、歯車の取り付け時の軸偏心による影響を示しており、約 ± 10 秒幅の高周波成分は目盛数に相当する歯数256周期の電気内挿信号の誤差である。

この歯車型磁気式ロータリエンコーダを用いて自己校正原理を対応させた角度信号に対して、自己校正原理評価装置を用いて角度誤差を評価した結果が、図2-5の下段右下の図である。360度のすべての角度範囲で角度誤差が ± 10 秒以下であることがわかる。

軸ガタ検出機能 1 μm ～数100 μm の感度を達成する。

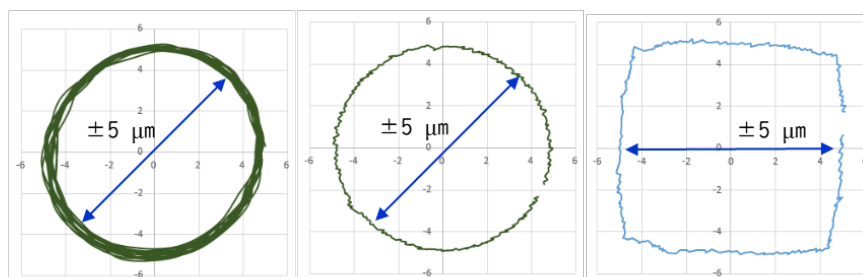


軸ガタ検出原理評価装置

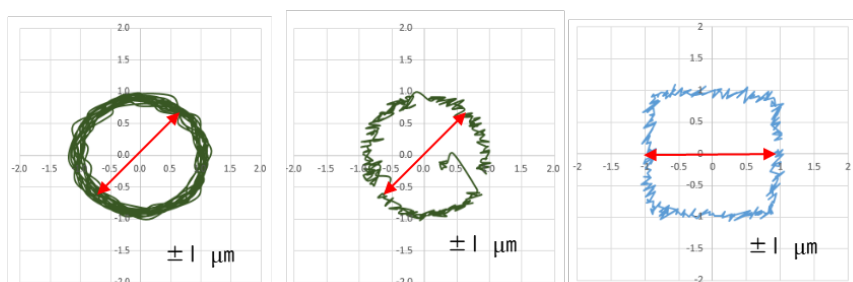
丸ガタ 5 μm $\times$ 15 回

丸ガタ 5 μm $\times$ 1 回

四角ガタ 5 μm $\times$ 1 回



軸ガタ検出試験 ($\pm 5 \mu\text{m}$) にて、1 μm 以下の角軸ガタ検出感度を確認



軸ガタ検出試験 ($\pm 1 \mu\text{m}$) にて、1 μm 以下の角軸ガタ検出感度を確認

図2-6 軸ガタ検出感度 1 μm を達成した歯車型磁気式ロータリエンコーダ

図2-6は、直径 Φ 102.4mm、歯数256の歯車に3個のセンサを配置することで、自己校正機能、および軸ガタ検出機能を付加した歯車型磁気式ロータリエンコーダを用いて、その軸ガタ検出機能を評価した結果である。

歯車型磁気式ロータリエンコーダの3個のセンサ部を、自己校正原理評価装置の上部に設置した軸ガタ検出原理評価装置に設置した。軸ガタ検出原理評価装置としてXYピエゾステージが用いられており、XYピエゾステージ上に3個のセンサ部を配置した構造となっている。本装置の原理は、軸ガタを歯車のついた回転軸で直接的に発生させるのではなく、3個のセンサー体もの(or ASSY)をXYピエゾステージを用いて並進運動させることにより、相対的に軸ガタを発生させる方法である。これにより、XYピエゾステージの可動範囲と性能で自由な軸ガタを発生させることが可能である。XYピエゾステージの内部には静電容量センサが内蔵されており、発生させた軸ガタをnmオーダーで検出することが可能である。

図2-6の右上段の図は、歯車のついた自己校正原理評価装置の回転軸が1回転する間に、左からそれぞれ、半径5 μm の軸ガタを15回発生、半径5 μm の軸ガタを1回発生、一辺10 μm の軸ガタを1回発生した時に、歯車型磁気式ロータリエンコーダが検出した軸ガタの値を示している。グラフの1目盛が1 μm 四方となっているため、1 μm 以下で軸ガタを検出していることが分かった。

図2-6の右下段の図は、さらに、歯車のついた自己校正原理評価装置の回転軸が1回転する間に、左からそれぞれ、半径1 μm の軸ガタを15回発生、半径1 μm の軸ガタを1回発生、一辺2 μm の軸ガタを1回発生した時に、歯車型磁気式ロータリエンコーダが検出した軸ガタの値を示している。グラフの2目盛が1 μm 四方となっているため、1 μm 以下で軸ガタを検出していることが分かった。

④ 商品化戦略

5 軸加工機や複合加工機の工具側主軸旋回機構軸の位置決め用途に対応するために、歯車型磁気式ロータリエンコーダの商品化を検討する。これを川下製造業者等に提示し説明することにより、普及を図り事業化を促進するための販売戦略を確立する。具体的内容は以下のとおりである。

④-1. 小型・低価格化商品開発

(多摩川精機株)

川下製造業者への供給を可能とする製品の大きさ、コストの検討を行い、商品化戦略を明確にし、量産対応のための設計を行った。

- ・量産可能な商品化／企業化に向け10万円を切る低価格化を目指した部品選定、構造検討を行った。小型化目標であるφ130 製品を開発した。更なる小型化を達成するための検討を実施した。また、10万円を切る低価格化を検討し目処をつけた。
- ・量産に向けた更なる小型化、低価格化の方法として、信号処理回路の収納容積を最大限簡素化する回路基盤のコスト低減となるASIC（特定用途向け集積回路）化に向け、回路開発を行った。

④-2. 販売方法の確立商品化設計

(多摩川精機株)

川下製造業者のニーズやアドバイスや新たな産業モータに対応できる商品戦略を明確にし、販売計画を確立、産業にあった商品の設計を行った。また、商品戦略として産業にあった商品の設計を行ってゆくために国内に限らず、アジア、欧米諸国での調査研究を行い、国内外の市場動向やニーズを調査した。この調査結果を踏まえ、以下内容を当該研究の仕様面、価格ターゲット面に反映させた。

- ・角度精度のニーズと軸ガタ検出の必要性
- ・ターゲット価格（市場に応じた仕様と価格のグレード分け（オプション対応））
- ・当該研究開発製品への置き換え需要があると考えられる諸国への調査研究

従来の国内川下産業とともに更なるグローバルな拡販を目指し、当該研究の成果を国内外へ発信した。



図2-7 開発した歯車型磁気式ロータリエンコーダを
川下製造業者の産業用モータに取り付けて軸ガタ検出実証実験をしている様子

最終章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

当該補助事業にて提案している研究開発成果及び期待される効果は次の6点となる。

- ・ ±10 秒以下で角度精度が保証された回転制御により高精度な加工が可能になる。
- ・ 位置検出精度の向上により工作機械制御の高剛性化・静音化・低振動化につながる。
- ・ 軸ガタの 1 μm の変化を常時測定することで、主軸モータ軸受の保守時期の把握が可能となり工作機械・工具の寿命管理、生産工程の改善につながる。
- ・ 軸ガタの 1 μm の変化を常時測定することで、工作機械の故障予防となり、工作機械の信頼性、作業の安全性に寄与する。
- ・ 軸ガタ量の変化の把握により、主軸モータの最高回転数の制限を更に上げ高速化に寄与でき、加工効率を向上させる。
- ・ 小型で従来のセンサと置き換え可能なため、低価格で加工精度と加工効率が向上した高機能な工作機械に変えることができる。

本研究開発成果として得られたものを次に示す。

- ・ ±10 秒以下で角度精度が保証された回転制御により高精度な加工が可能になる。
- ・ 軸ガタの 1 μm の変化を常時測定することで、主軸モータ軸受の保守時期の把握が可能となり工作機械・工具の寿命管理、生産工程の改善につながる。
- ・ 軸ガタの 1 μm の変化を常時測定することで、工作機械の故障予防となり、工作機械の信頼性、作業の安全性に寄与する。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

川下製造業者1のスピンドルモータ、川下製造業者2の回転テーブル搭載用に試作開発を継続してゆく。事業終了後も定期的な研究開発会議を開催しながら、引続き3社とアドバイザー的体制は確保する。また、他の興味のある川下製造業者も引き込んだ体制も検討をしてゆく。多摩川精機及びエ・モーションシステムの現在の研究者部隊は、製品開発設計部隊を中心に構成している。したがって、研究事業終了後も研究開発が実施できる体制が構築されている。

研究開発内容に関する海外を含めた外部の取組状況の調査、本研究成果の開発製品事業化に向けた市場及びその妥当性の調査、国内外客先訪問打合せなどによる調査など外部資源を積極的に活用しながら、今後のグローバルな拡販可能な事業化を見据え、学会研究発表などで研究内容やその成果を世界発信していく。