

平成23年度第3次補正予算事業 戦略的基盤技術高度化支援事業

「非励磁型コイルレス磁歪リング式トルクセンサの研究開発」

研究開発成果等報告書

平成25年2月

委託者 東北経済産業局
委託先 財団法人青葉工学会

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-1-1 研究背景	1
1-1-2 研究目的	3
1-1-3 研究目標	4
1-1-4 実施結果の概要	4
1-2 研究体制	5
1-3 成果概要	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口	10
第2章 本論	11
2-① 磁歪リング式トルクセンサ要素技術の開発	11
2-①-1 磁歪リング式トルクセンサの小型・高感度化	11
2-①-2 小型ピックアップ磁歪センサデバイスの製作	13
2-② 小型軽量トルクセンサユニットの組立・実証テスト	14
2-②-1 健診機器：皮膚状態診断センサへの適用	15
2-②-2 電動アシスト型移動体への適用	16
最終章 全体総括	18
1 研究開発成果	18
2 研究開発後の課題	19
3 事業化展開	19

第1章 研究開発の概要

これまでの独自の急冷凝固材料製造プロセス技術の蓄積により、強度と加工性を有する新しい鉄基磁歪合金（非(減)希土類系（Fe-Ga-Al系 Galfenol, Fe-Co系, FePd系等））の開発に成功し、これらを用いた磁歪リング式トルクセンサ(特許申請中)の研究開発を進めてきている。ここでは、高感度磁歪合金（特許）からなる薄肉リングを回転シャフトに装着し、磁歪合金の逆磁歪効果を利用してねじり力に比例して発生する装着リングからの漏れ磁束を直読する方式を採用している。これは、従来型のトルクセンサ方式と違い、外部からの磁化コイルと励磁回路が不要となり、非接触型の漏れ磁束直読式なので、単純構造、部品点数の削減による小型・軽量化とともに低コスト化も可能となる。

本研究開発は、この磁歪リング式トルクセンサにエンコーダとDCモータを連携・集積化させ、回転力・位置（角度）制御用センサユニットとして開発する。これにより、従来の様なモータ駆動電流変化でなく、動作側の回転軸力（トルク）信号を直接フィードバックでき、減速ギア空間もさらに確保できて高精度駆動制御が可能となる。

このことにより、省エネ型自動車関係センサの実現のほか、自立型知能ロボット関節部、医療診断・福祉機器マニピュレータ、産業用発電および精密加工機等への広範な適用分野と商品優位性が可能となる。

最終的にはこのトルクセンサ製品の性能・特長と大量生産、価格メリットを生かせるエネルギー機器、パワーリフト用機器、自動車のステアリングや車輪駆動部、さらにはロボット産業へと導入するが、当面は実用化に近い商品をターゲットとすることとし、1) 医療福祉機器（皮膚状態診断センサなど）、2) 病院内患者移送ベッド用のトルクセンサの実用化を目指して研究開発を行い、業界の期待に応えるものである。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1. 研究開発の背景

我々の身の回りの産業機器(移動体機器、精密加工機器、ロボット、エネルギー開発機器等)には、動力伝達機器として、電磁モータや回転力駆動・変換機構（トランスデューサ）が組み込まれている。今後の高効率省エネルギー操業やヒューマノイド小型軽量化ロボット革新技術を実現させるためにも、機械力伝達のもっとも基本要素としての力・変位制御アクチュエータ・センサユニットのモジュール化は不可欠な研究開発テーマに位置付けられる。例えば、現在、多くの自動車・車両製造メーカーは、次代的（10年後先）な電気モータ自動車や高齢者運転時代を見据えて、軽量化（燃費改善）、低コスト機械組み立て部品数減少、信頼性を高めた操作性を生むセンサ・アクチュエータ統合型デバイス、いわゆるスマート化技術の指針で自動車の革新技術を模索している。また、次世代型の多様な関節動作を可能とする自立型知能ロボットを実現させ、対外的なロボット技術優位性を維持するためには、先ず、現在よりも大幅に小型軽量で、手先の微妙な動作（力・位置）を素早く高精度に制御できる、フィードバック型センサ・アクチュエータ(力・位置)連携制御の研

究が重要な課題となって来ている。さらに、小型化を促進できれば、各種精密加工機器の刃先の高精細制御等への工場生産工程展開も可能となり、また、医療機器分野での生体内治療処置補助用マニピュレータ、内視鏡治療具、福祉器具、モバイル型アミューズメント器具などの生活密着分野等が視野に入り、この技術（高感度・力・位置制御、センサ・アクチュエータ統合スマートデバイス化）の波及分野は、機械システム・精密加工学機器の全分野に及び駆動システムの省エネ高効率・小型軽量化への基盤的技術進歩を促進させ得る。当該分野での代表的な構成要素技術の動向とニーズを例示してみる。

1) 自動車用トルクセンサ

“ステアバイワイヤ用の力センサ”としての中型（数cm規模）の操縦トルクセンサ、ブレーキ反力センサおよび車輪部トルクセンサなどが要求されている。既存品に対し重量比で 1/10、寸法比で 1/4、部品数で 1/3 以下が望ましい。軽量化と電力費軽減策が急務な次世代EV車への適用が6～7年後になると予想されており、それまでに、軽量・小型化が必須の力・位置アクチュエータ・センサ制御ユニット組み入れ製品へのターゲットを探す対応策が要ると判断されている。

2) スマートアクチュエータ、センサー一体化ユニット

最近の固体アクチュエータ/センサ、特に圧電デバイス、形状記憶合金、高分子機能性材料の開発には目を見張るものがある。特に、小型ロボット駆動部や医療福祉治療機器処置具には、力・変位や雰囲気などの情報を自己センシングする機能を付加したスマートアクチュエータが求められている。そして、これらの新方式アクチュエータ/センサの市場規模は、近い将来1兆円に達すると考えられる。

3) ロボットハンド、医療福祉機器、低侵襲型マニピュレータ治療器具

ロボットハンドでの物体の把持・操作には、関節部のみならず指先部においても自由度が高く、かつ、高精度に力・位置を計測し、制御することが要求される。しかし、現在までに次世代のモバイル機器や知能ロボット等に組込可能な超小型軽量、単純構造のトルクセンサは市販されていなく、ロボット関節部での小型軽量化に優れた力（トルク）センサ新技術が切望されている。また、近年の医療現場では、バーチャルリアリティ技術を応用した遠隔操作の手術シミュレータが注目されている。実用化されている米国 Intuitive Surgical (IS 社) の「da Vinci (ダヴィンチ)」は内視鏡手術支援ロボットの代表選手であるが、大型で患者にのしかかるような圧迫感を与える。操作性を維持しつつ、小型・軽量化した内視鏡手術支援ロボット開発が必要である。高齢化やQOLの増進で、医療福祉機器（院内移送ベッド、車イス、手術処置・操作具）分野にも近年需要は拡大している。

図1には、本研究グループが提案している“小型軽量、非励磁式コイルレスを特長とする磁歪リング式トルクセンサ開発”の意義と広範囲に及び技術波及効果を示す。回転体力計測のユニットとして工業製品化できれば、大きな市場展開が見える。

小型・軽量コイルレスの磁歪リング式トルクセンサ開発

広い適用性＝精密加工機械、高効率自動車、エネルギー高効率制御、知能ロボット分野、生体医療・福祉機器分野への精細な力・位置制御可能

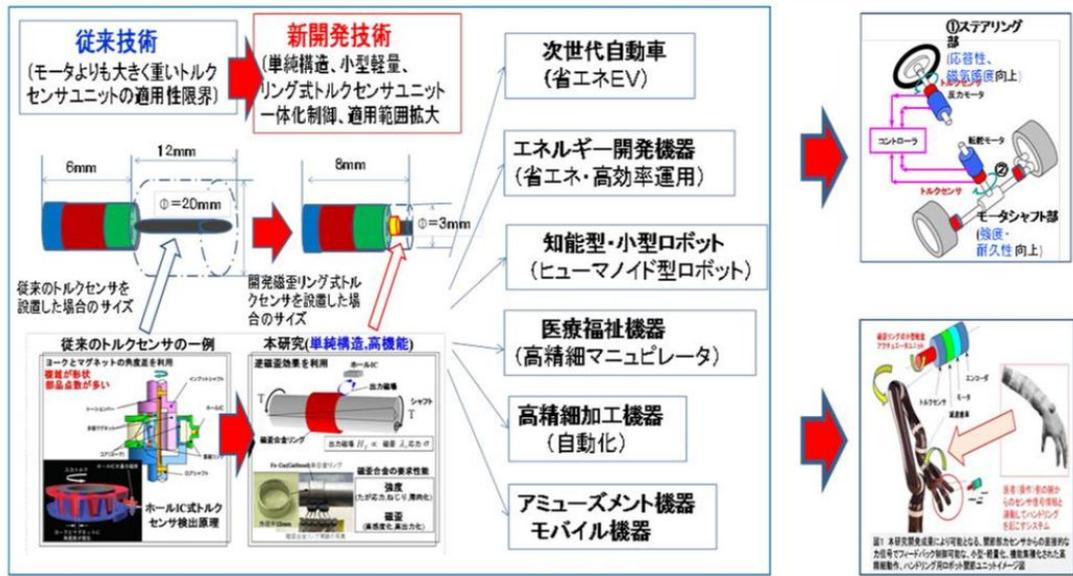


図1 本提案の単純構造・小型磁歪リング式トルク(力・位置)センサユニットの特徴とその広い応用範囲事例

例えば、我が国のロボット市場予測（2001年度時点）を顧みると、需要動向の大きな逸脱（10%未満の普及）が明白で、生活密着型・医療福祉・生体分野における需要予測が伸びていないことがその最大原因である。大きな理由は、生体筋肉組織や人の行動動作に柔軟かつ精細に力（変位）で追従できる高精細制御、信頼性あるアクチュエータが未開発なことが挙げられる。以上からしても、当該分野における研究開発、すなわち、従来のモータ電流変化でなく、回転軸からの直接的な力（トルク）センサ信号をフィードバック可能で、軽量シンプル構造を特長とする、コストパフォーマンスに優れた“マン・マシンインターフェース用力・位置制御トルクセンサユニット”は近未来の機械システム・精密加工学機器の全分野変革に大きく貢献できる必須のキーテクノロジーでとなっている。

1-1-2. 研究目的

産業機器（移動体機器、精密加工機器、ロボットなど）には、動力伝達機構として電動モータや回転力駆動変換機構が組み込まれているが、動力伝達機構の機械部品は数が多く複雑なため、操作性、電力消費量、価格面等に課題が多く、力制御用のセンサ・アクチュエータ部分の一層の高感度化、小型軽量化、操作性の向上が求められている。そこで本研究開発では、高強度と加工性を有する新しい鉄基磁歪合金を用いた非励磁式、コイルレス、小型・単純構造、軽量・低コストの回転軸力計測・制御用の磁歪リング式トルクセンサを開発する。従来のモータ電流変化でなく回転軸力信号を直接フィードバックでき、アクチュエータの高精細制御と省エネルギー駆動の特長を生かせる、医療福祉機器（皮膚診断器、電動アシスト型移動体等）、電動車両（電動補助自転車等）用のトルクセンサを研究開発することを目的とする。

1-1-3. 研究目標

本研究開発は、弘前大と東北大が共同開発してきた、高性能、低コストで機械加工が可能な、鉄基磁歪合金を用いて、磁歪リング式トルクセンサにエンコーダと電磁モータを連携・集積化させ、回転力・位置（角度）制御用センサユニットとして開発する。これにより、従来の様なモータ駆動電流変化でなく、動作側の回転軸力（トルク）信号を直接フィードバックでき、減速ギア空間もさらに確保できて高精度駆動制御が可能となる。このトルクセンサ製品の性能・特長と大量生産、価格メリットを生かせるエネルギー機器、パワーリフト用機器、自動車のステアリングや車輪駆動部、さらにはロボット産業へと導入するが、当面は実用化に近い商品をターゲットとすることとし、1) 医療福祉機器（皮膚状態診断センサ、患者搬送用ベッドなど）、2) 病院内患者移送用ベッド用の力センサの実用化を目指して研究開発を行い、産業界の期待に応えるものである。

<本研究開発の技術的目標値>

①磁歪リング式トルクセンサ要素技術の開発

①-1 磁歪リング式トルクセンサの小型・高感度化

【技術的目標値】 トルク範囲=0.2Nm(100rpm)-10Nm(Orpm)
直径 ϕ =14-26mm、磁歪リング厚 t=0.8-2mm

①-2 小型ピックアップ磁気センサデバイスの製作

【技術的目標値】 感度 $\geq 200\text{mV/G}$ (1V/pC)、
(漏磁束 2 Oe 以上、使用温度特性 (0~60°C))
サイズ=2×5×t(t $\leq 0.4\text{mm}$)
(Hall-IC 型センサを使用)

②小型軽量トルクセンサユニットの組立・実証テスト

②-1 健診機器：皮膚状態診断センサへの適用

【技術的目標値】 皮膚接触圧力=0.05MPa
半自動低速スキャン($\geq 5\text{mm/sec}$)可能

②-2 電動アシスト型移動体への適用

【技術的目標値】 トルク感度 $\leq 0.2\text{Nm}$ 、検出回転角度 $\leq 1^\circ$
寸法(全体):L50mm× ϕ 30mm、磁気シールド被覆処理

1-1-4. 実施結果の概要

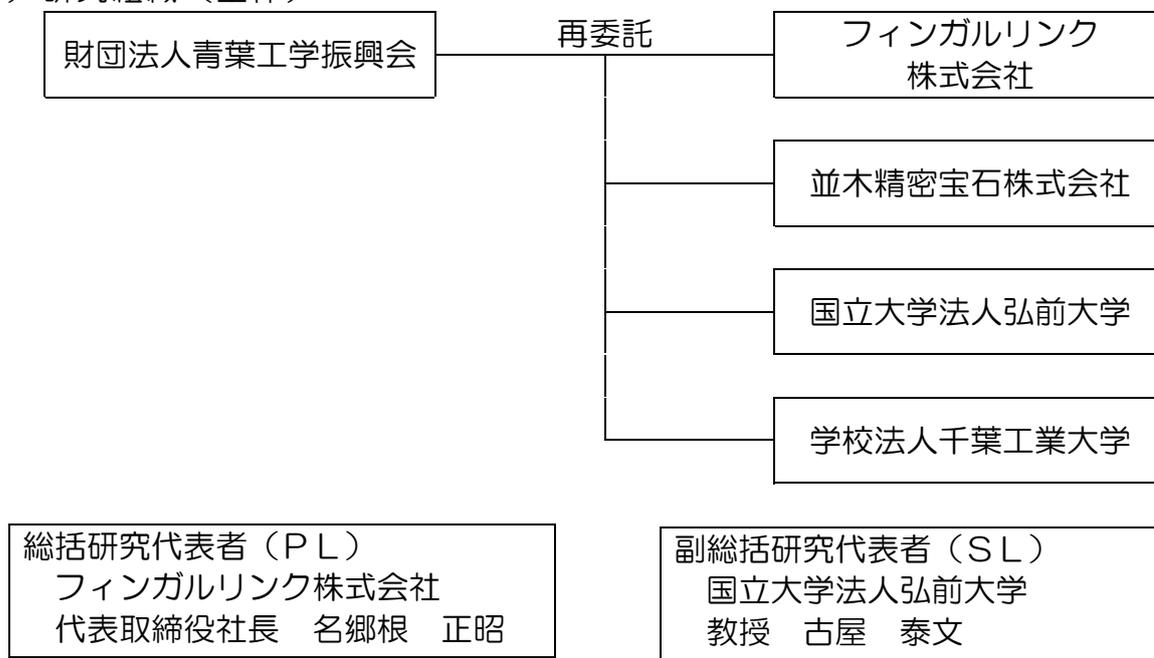
磁歪リング式トルクセンサ要素技術の開発項目における、①-1 磁歪リング式トルクセンサの小型・高感度化（主担当：弘前大、東北大）について、FeCoV（パーメンジュール）の溶解工程、熱処理、結晶組織改善により、当初の磁歪、磁化特性パラメータ（残留磁化、保磁力、磁歪感度）を達成し、型から小型（ $\Phi 6\text{mm}$ ）までの磁歪リングが機械加工で製造した。さらに、①-2 小型ピックアップ磁気センサデバイスの製作（主担当：千葉工大、並木精密宝石社）については、リングからの漏れ磁束をピックアップするホールICの温度特性および外乱遮断を電子回路設計で改善して、高感度化を達成した。

次に、②小型軽量トルクセンサユニットの組立・実証テストについて、②-1 健診機器：皮膚状態診断センサへの適用（主担当：東北大、並木精密宝石社）では、Φ6シャフトに組み込んだ磁歪リング式トルクセンサ（並木精密宝石社作製）を組み入れた皮膚状態診断センサを作製出来た。皮膚にあてて接触移動させると磁束漏れセンサ信号は接触圧（歪ゲージで同時計測）とともに変化を確認した。次に、②-2 電動アシスト型移動体への適用については、院内患者移送用ベッドを試作目標モデル（主担当：フィンガルリンク社、弘前大）として取り組み、中型Φ12mmトルクセンサを荷台の床下部に車輪と連結させて設置し、DCモータとバッテリーも連結制御させ、走行テストを実施した。

1-2 研究体制

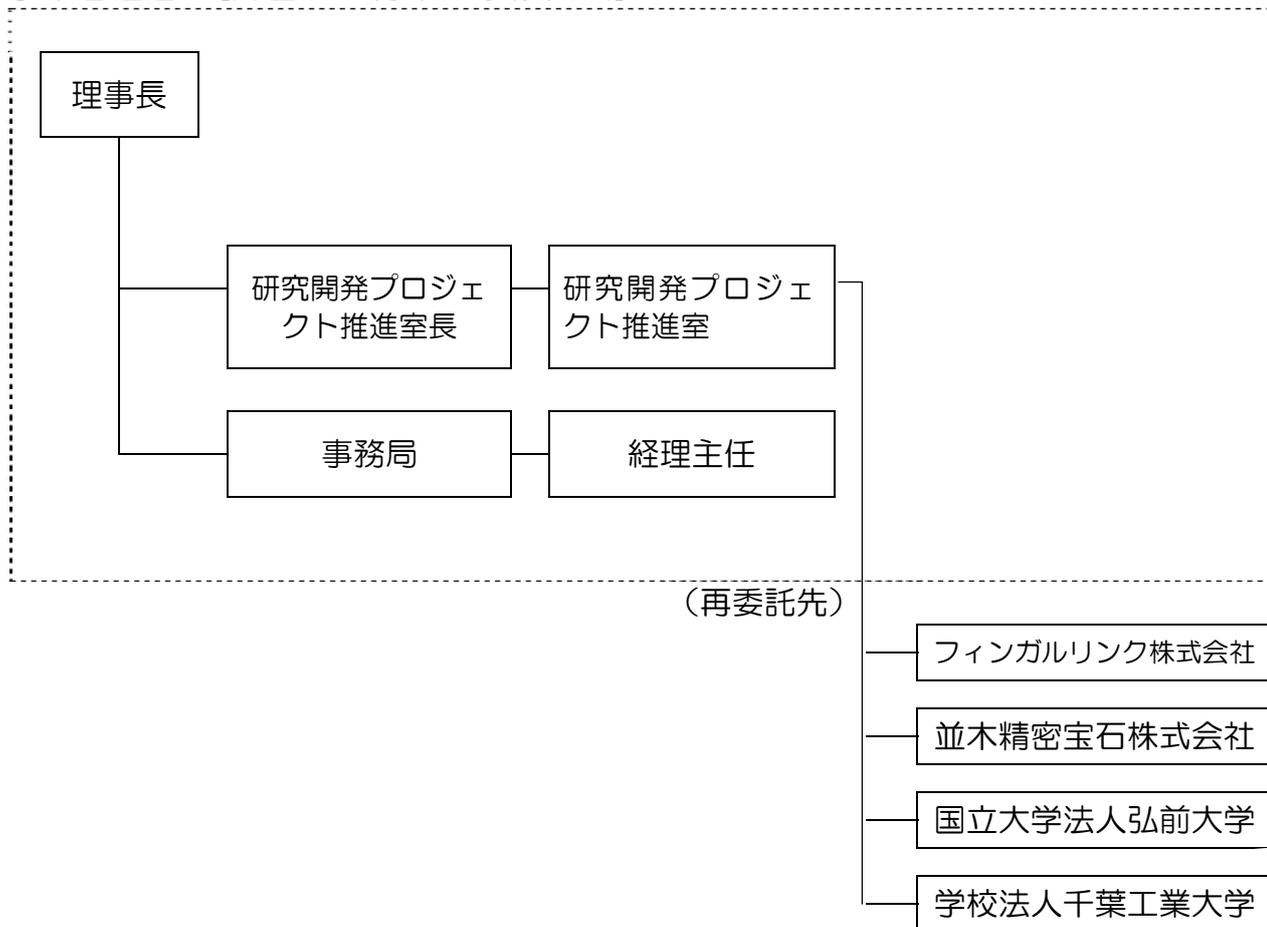
(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）



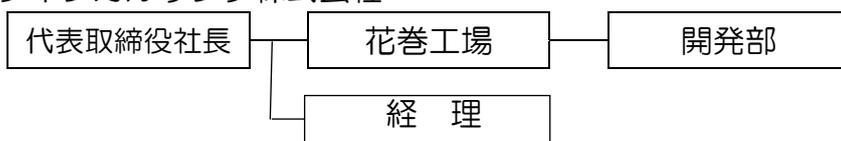
2) 管理体制

① 事業管理者 [財団法人青葉工学振興会]

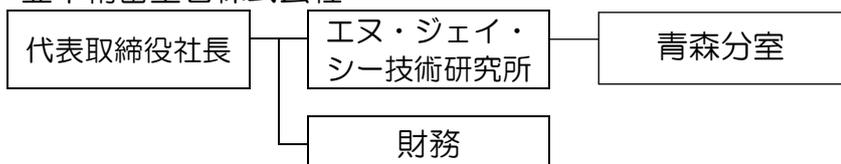


② (再委託先)

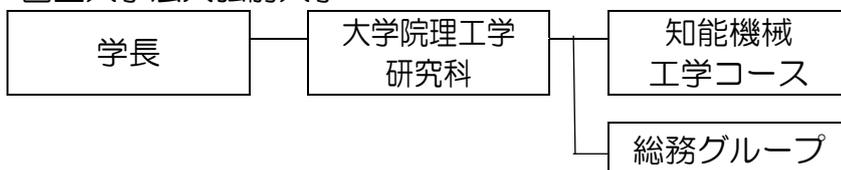
フィンガルリンク株式会社



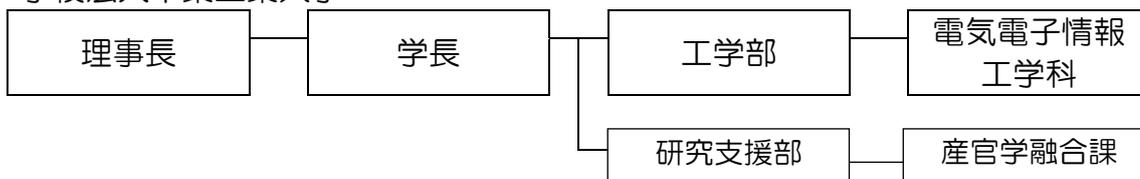
並木精密宝石株式会社



国立大学法人弘前大学



学校法人千葉工業大学



(2) 研究者及び管理員

【事業管理者】 財団法人青葉工学振興会

① 研究員

氏名	所属・役職
奥山 武志	研究員 (東北大学大学院大学院工学研究科 助教)
棚橋 善克	研究員 (東北大学大学院工学研究科 客員研究員)
木村 久道	研究員 (東北大学金属材料研究所 准教授)
山浦 真一	研究員 (東北大学金属材料研究所 准教授)
横山 雅紀	研究員 (東北大学金属材料研究所 助教)

② 管理員

氏名	所属・役職
霜山 忠男	研究開発プロジェクト推進室 室長
米谷 いし子	事務局 経理主任
櫻井 正彦	研究開発プロジェクト推進室 契約主任
四十川 千秋	研究開発プロジェクト推進室 産学連携アドバイザー（技術担当）
菊地 美幸	研究開発プロジェクト推進室 室員

【再委託先（研究員）】

フィンガルリンク株式会社

氏名	所属・役職
名郷根 正昭	代表取締役社長
久保田 康弘	花巻工場 開発部 主任
伊藤 克也	花巻工場 開発部
津田 修	花巻工場 開発部
佐々木 勝洋	花巻工場 開発部

並木精密宝石株式会社

氏名	役職・所属
土井 敬一郎	エヌ・ジェイ・シー技術研究所 所長
清水 幸春	エヌ・ジェイ・シー技術研究所 副所長
斉藤 千尋	エヌ・ジェイ・シー技術研究所 研究員

国立大学法人弘前大学

氏名	役職・所属
古屋 泰文	理工学研究科 教授
佐藤 裕之	理工学研究科 准教授
岡崎 禎子	理工学研究科 機関研究員
島田 宗勝	北日本新エネルギー研究所 教授
久保田 健	北日本新エネルギー研究所 准教授

学校法人千葉工業大学

氏名	役職・所属
室 英夫	工学部 教授

(3) 協力者 研究推進会議 委員

氏名	所属・役職
霜山 忠男	財団法人青葉工学振興会 研究開発プロジェクト推進室長
四十川千秋	財団法人青葉工学振興会 産学連携アドバイザー（技術担当）
奥山 武志	国立大学法人東北大学工学研究科 助教
棚橋 善克	国立大学法人東北大学工学研究科 客員研究員
木村 久道	国立大学法人東北大学金属材料研究所 准教授
山浦 真一	国立大学法人東北大学金属材料研究所 准教授
横山 雅紀	国立大学法人東北大学金属材料研究所 助教
古屋 泰文	国立大学法人弘前大学理工学研究科 教授
佐藤 裕之	国立大学法人弘前大学理工学研究科 准教授
岡崎 禎子	国立大学法人弘前大学理工学研究科 機関研究員
島田 宗勝	国立大学法人弘前大学北日本新エネルギー研究所 教授
久保田 健	国立大学法人弘前大学北日本新エネルギー研究所 准教授
室 英夫	学校法人千葉工業大学工学部 教授
名郷根正昭	フィンガルリンク株式会社 代表取締役社長
久保田康弘	フィンガルリンク株式会社 花巻工場 開発部 主任
津田 修	フィンガルリンク株式会社 花巻工場 開発部
清水 幸春	株式会社並木精密宝石 NJC 技術研究所副所長
斉藤 千尋	株式会社並木精密宝石 NJC 技術研究所研究員
尾谷 敬三	カルソニックカンセイ株式会社 材料加工部門リーダー
本田 力男	本田精機株式会社 代表取締役・会長
岩井 恒彦	資生堂株式会社 技術企画・品質保証・フロンティアサイエンス事業担当
須田 信行	オリンパス株式会社 ものづくり革新センター技術員

1-3 成果概要

本年度（H24）分の研究開発は、1)リング用磁歪合金の高感度化（合金種類の選択、組織改良）、2)その素材を使った回転軸トルクセンサ・デバイスの高感度化（目標値到達）、それを踏まえて、3)医療機器用（皮膚診断・評価用）小型力センサモデル実証および4) 中型トルクセンサユニットを組み込んだ病院・介護福祉用移動体ベッドへの適用性予備試験である。以下に各項目での成果概要と達成度（%）を示した。

①磁歪リング式トルクセンサ要素技術の開発項目

①-1 磁歪リング式トルクセンサの小型・高感度化（主担当：弘前大、東北大）については、FeCoV（パーメンジュール）の溶解工程、熱処理、結晶組織改善により、当初の磁歪、磁化特性パラメータ（残留磁化、保磁力、磁歪感度）を完全に達成（100%）出来た。機械的強度も組織改質後も保持できており、中型から小型（Φ6mm）までの磁歪リングが機械加工で製造できた。（100%）、ただし、小型リングに於いて、円周方向に漏れ磁束の変動（80%）が残り、その平滑化が課題が残った。

①-2 小型ピックアップ磁気センサデバイスの製作（主担当：千葉工大、並木精

密宝石社)については、リングからの漏れ磁束をピックアップするホールICの温度特性および外乱遮断を電子回路設計で改善して、高感度化(≧500%)、磁気シールドハウジング(容器)、回転角度エンコーダをセットとした小型ユニット製作を達成した。(100%)

②小型軽量トルクセンサユニットの組立・実証テスト:

②-1 健診機器:皮膚状態診断センサへの適用(主担当:東北大、並木精密宝石社)では、Φ6シャフトに組み込んだ磁歪リング式トルクセンサ(並木精密宝石社作製)を組み入れた皮膚状態診断センサを作製出来た。(70%)皮膚にあてて接触移動させると磁束漏れセンサ信号は接触圧(歪ゲージで同時計測)とともに変化した。ただし、信号強度がまだ弱く、外乱(ノイズ)レベルにも近いので、PCデータ解析上で平滑化処理を行い、負荷トルクと皮膚状態の傾向は出すことが出来た。(100%)ただし、まだ、場所や信号のバラつきが相対的に大きく(40%)、さらなるトルクセンサ感度向上策と外乱削除によるSN比改善対策が必須である。

②-2 電動アシスト型移動体(主担当:フィンガルリンク社、弘前大)への適用については、院内患者移送用ベッドを試作目標モデルとして取り組んだ。Φ12mmの中型トルクセンサを試作して荷台の床下部に車輪と連結させて設置し、DCモータとバッテリーも連結制御させ、走行テストに成功(100%)した。ただし、電動アシスト時の切り替えがまだスムーズではなく、また、患者負荷が加わった場合の、不快感少ないスムーズなモータ出力切り替え制御、凹凸面カーブ付坂道走行(70%)などの制御、さらに繰り返し耐久性テストもまだ出来ていないので、実用化への課題は残っている。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属	財団法人 青葉工学会 研究開発プロジェクト推進室
氏名	霜山 忠男
電話	022-795-3862
FAX	022-795-3579
E-mail	shimoyama@eng.tohoku.ac.jp
所属	フィンガルリンク株式会社
氏名	名郷根 正昭
電話	03-3625-6543
FAX	03-3625-6545
E-mail	nagone_masaaki@finggal-link.com
所属	国立大学法人弘前大学大学院 理工学研究科 知能機械工学科
氏名	古屋 泰文
電話	0172-39-3677
FAX	0172-39-3677
E-mail	furuya@cc.hirosaki-u.ac.jp

2. 本論

本研究では、産業機器（移動体機器、精密加工機器、ロボットなど）には、動力伝達機構として電動モータや回転力駆動変換機構が組み込まれているが、動力伝達機構の機械部品は数が多く複雑なため、操作性、電力消費量、価格面等に課題が多く、力制御用のセンサ・アクチュエータ部分の一層の高感度化、小型軽量化、操作性の向上が求められている。そこで本研究開発では、高強度と加工性を有する新しい鉄基磁歪合金を用いた非励磁式、コイルレス、小型・単純構造、軽量・低コストの回転軸力計測・制御用の磁歪リング式トルクセンサを開発する。従来のモータ電流変化でなく回転軸力信号を直接フィードバックでき、アクチュエータの高精細制御と省エネルギー駆動の特長を生かせる、医療福祉機器（皮膚診断器、患者搬送用ベッドなど）、電動車両（電動補助自転車など）用のトルクセンサを研究開発することを目的とする。以下に、研究項目（課題分担）毎に成果を記載する。

2-① 磁歪リング式トルクセンサ要素技術の開発

軸力（トルク）と回転角度（エンコーダ読み）を、同一回転軸上で統合・合体化し、高感度磁歪合金（特許）からなる薄肉リングを回転シャフトに装着し、ねじり力逆磁歪効果による装着リングからの漏れ磁束を直読する方式を採用する。回転駆動部力計測・制御用の小型軽量化・シンプル構造のスマートセンサユニットを研究開発する。

2-①-1 磁歪リング式トルクセンサの小型・高感度化

（弘前大学、東北大学、フィンガルリンク社、財団法人青葉工学振興会）

【実施内容】

- ・鉄基磁歪合金（FeCoV）の熱処理と磁気特性の調査（東北大学・金研）
- ・加工リングを装着した磁歪リング式トルクセンサの特性の検討（弘前大学）
- ・磁歪リング式トルクセンサの小型化（弘前大学）

1. 小型トルクセンサの作製

磁歪リングには素材 A（市販材） $\text{Fe}_{49}\text{Co}_{49}\text{V}_2$ [at%] 合金を用いた。合金をリング径状（外径 7 [mm]、内径 6.2 [mm]、長さ 8 [mm]）に加工したのち 850°C 3h 焼鈍を施した。小型トルクセンサの磁歪リングとシャフトの嵌め代は 5 [μm]、10 [μm] に設定し、冷し嵌め法により磁歪リングとシャフトを勘合した。（図 2）



漏れ磁束測定用磁気センサは試験用シャフトに取り付けられている（図 3）。この同軸機構は、ベアリングの使用によりシャフトに固定する機構となっており、ホルダーはパーマロイ製であり、磁気シールドの役割も果たしている。このホール IC 基盤のゲインは 0.42V/G となっている。

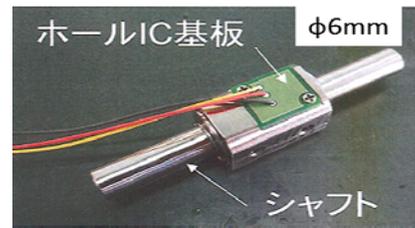
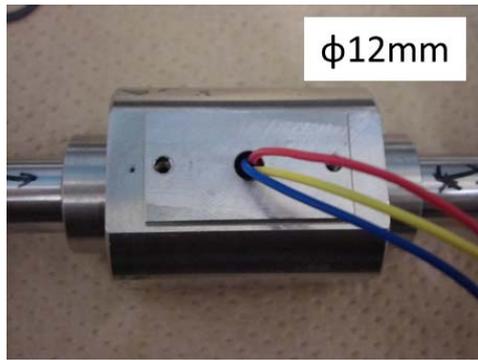


図3: ホールIC実装基盤とシャフトの同軸機構(φ12mm用、φ6mm用)

実装基板を用いたトルク感度測定(動的負荷=60rpm)の結果を図4に示す。φ12mm、φ6mmのいずれの実装基板においてもトルクの負荷除荷最中に大きなヒステリシスは見られず線形的な出力が得られている。よって信頼性の高いセンサが構成されていることになる。各々の場合の直線勾配からの感度は以下になった。

φ12: 1.27G/Nm、φ6: 3.00G/Nm

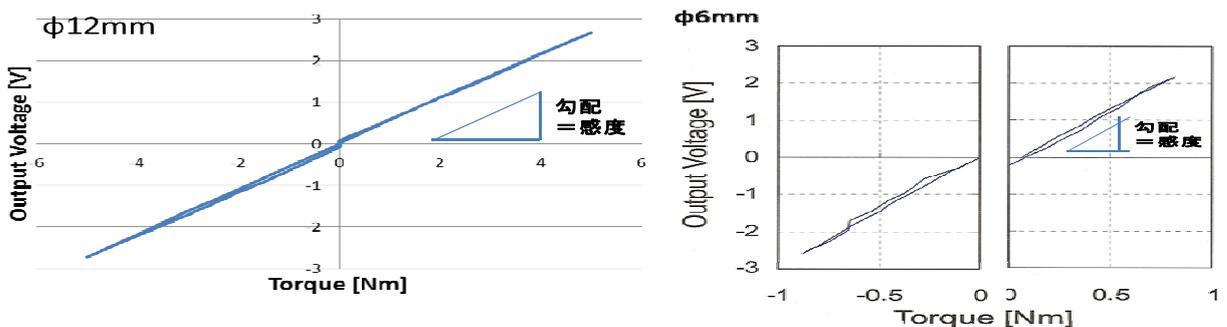


図4: 実装基板を用いたトルク感度測定結果(φ12mm、φ6mm)
(直線勾配からの感度 = φ12: 1.27G/Nm、φ6: 3.00G/Nm)

2. まとめ

【目標値達成度】

(1) センサ感度(実施したトルク範囲=0.2Nm~10Nm (電動アシスト型移動体用想定トルク範囲で 100%) (健診機器: 皮膚状態診断センサトルク範囲(0.5Nm)で静的負荷でばらつきあり 80%、動的負荷で 100%)

実験シャフト直径(リング内径に対応) = φ6mm、φ12mm
磁歪リング厚 $t=0.4\text{mm}$ (φ6mm シャフト 100%)、 $t=0.8\text{mm}$ (φ12mm シャフト 100%)

(2) 高感度化について

鉄基 FeCoV 磁歪合金からなる薄肉リングを回転シャフトに装着した。嵌め代がリング周方向の残留応力(たが応力 σ_θ)に影響を与えており、φ12mm 中型シャフトリング固着の場合、シャフトとリング内径差 $\delta=20\mu\text{m}$

の平均トルク感度は 0.71[G/Nm]で最大となり、このことから最適な嵌め代は 20 μ m であると判断した。また素材 B（研究所作製の FeCoV 溶解後鍛造材）の平均トルク感度は 1.28[G/Nm]となり市販材 A（溶解後引き抜き加工材）と比べ 1.8 倍の感度を得ることができた。

1) 中型リングセンサ (Φ 12mm) の場合：

市販材 (FeCoV 棒)：トルクセンサ感度=0.71[G/Nm] (90%)
研究所作製素材 (FeCoV, 熱間鍛造材) トルク感度は 1.28[G/Nm] (150%)

2) 小型リングセンサ (Φ 6mm) の場合：

研究所作製素材 (FeCoV, 熱間鍛造材)
嵌め代 δ =5[μ m]：トルクセンサ感度=1.7[G/Nm] (200%)
嵌め代 10[μ m]：トルクセンサ感度=3.3[G/Nm] (400%、但しバラつきあり)

(3) リング固着方法と負荷履歴 (ヒステリシス)

回転シャフトへの磁歪リング固定法は、シャフト周方向の磁束のばらつきや負荷履歴の少なさから、電子ビームが好ましいことが分かった。(ばらつきがあり、70%)

2-①-2. 小型ピックアップ磁気センサデバイスの製作

(弘前大、千葉工大、並木精密宝石社)

【実施内容】

- ・小型化・機能集積化磁気センサデバイス加工(弘前大学)
- ・アンプ回路設計と電子回路信号処理(千葉工業大学)

1. 小型化・機能集積化磁気センサデバイス加工(弘前大学)

自動車用操舵・転舵系(ステアバイワイヤ(SBW)システム)用磁歪リング式トルクセンサ向けに研究実績がある汎用のホールIC使用の磁気センサデバイスに、更なる磁気センサ感度改善策(磁気シールド)を行う。また、千葉工大・室教授が開発済みの信号処理IC回路導入によるSN比向上策と小型集積化トルクセンサ・デバイスを電動アシスト車両用に改良する。

弘前大から提供した Φ 12mmシャフトを用いた、自動車ハンドル用のトルク計測用ピックアップ磁気センサデバイスの製作ができた。基板の外形サイズは27 \times 14.25 \times 1 mm、ヨーク領域は27 \times 4 \times 0.5 mm、漏れ磁束検出のセンシング部分のホール直径は0.5~1 mmとなった。

【目標値達成度】 目標は、感度=100mV/G(1V/pC)、漏磁束 2 Oe 以上であったが、以下のように大幅な高感度化を達成した。(表1)

項目	目標値	結果	達成度
磁気検出感度	100 mV/G 以上	322, 896 mV/G	≥100 %

センサ本体部分のサイズ（Hall-IC 直径は 1 mm ≤ 2 × 5 × 0.4mm、(100%)）（表 1）

2. ホール IC プリント基板の回路設計及び試作

磁気検出素子にはホール IC (旭化成製 EQ430L, 13mV/G) を用い、信号処理回路は差動増幅回路とローパスフィルタを有するような最終増幅回路という形で設計した。増幅回路を 2 段にすることで増幅率を 34.7 倍とし、磁気検出感度を 13 [mV/G] × 34.7 = 451 [mV/G] に設定した。また、ローパスフィルタのカットオフ周波数は 100 Hz に設定した。また、この回路はホール IC の製品一つ一つのオフセット電圧及びオフセット温度特性を調整できる。オフセット温度特性を調整する回路として、信号処理回路の 2 段目のオペアンプの基準電圧を調整する+端子にダイオードを用いたバイアス回路を接続した。よって、1 段目でオフセット電圧の調整、2 段目でオフセット温度特性の調整ができる回路となっている。

3. まとめ

表 2 に目標値に対する結果と達成度をまとめる。磁気検出感度は目標値 200 mV/G に対して試作基板は 322 mV/G 及び 890 mV/G と上回った。使用温度範囲は目標値 0~60℃ に対して、可変抵抗でオフセット温度特性調整する機能を持たせることで -20~120℃ で使用することを可能とした。またローパスフィルタについても試作基板のカットオフ周波数は 100 Hz であり、全ての項目で達成度は 100 % であった。

表 2 目標値達成度

項目	目標値	結果	達成度
磁気検出感度	200 mV/G 以上	322, 896 mV/G	100 %
使用温度範囲	0~60 °C	-20~120 °C	100 %
ローパスフィルタ	100 Hz	100 Hz	100 %

2-② 小型軽量トルクセンサユニットの組立・実証テスト

(フィンガルリンク株式会社、並木精密宝石株式会社、弘前大、青葉工学会) 本研究では、東北大バイオロボティクス・医療福祉工学分野、田中研究室の皮膚接触触覚の定量化処置具へ 6mm サイズの小型“磁歪リング式小型アクチュエータ・センサユニット”を装着、診断時の微妙な力（接触捻じり力）・位置（回転角度）を計測し、皮膚状態診断センサへの適用有効性を実証する。また軽量でかつ省エネ型の電動アシスト移動体を目指して、“院内患者搬送ベッド”向けの中型トルクセンサを試作し、その車輪部シャフトに“回転力が計測できるトルクセンサユニット”を組み込みその効果を確認した。

2-②-1 健診機器：皮膚状態診断センサへの適用

(フィンガルリンク株式会社、並木精密宝石株式会社、青葉工学振興会)

【実施内容】

- ・小型軽量トルクセンサユニットの組立（並木精密宝石株式会社）
- ・健診機器：皮膚状態診断センサへの適用（東北大学大学院工学研究科）

1. 小型軽量トルクセンサユニットの組立

皮膚状態診断センサへ組み込む小径トルクセンサを研究開発する上で、目標値を設定した。それら目標値に対する達成度を表3に示す。全項目について達成度は100%であった。しかし、磁歪リングの周方向の漏洩磁束密度分布が大きく、この問題を克服しなければトルクセンサとして成り立たない。弘前大学ではこの課題に対してセンサ軸φ12.6mmにおいて、磁歪リングとシャフトの接合方法や着磁などの基礎実験や試作を積み上げてきた。これらの成果をこの小型トルクセンサのセンサ軸6mmにも適用することで今後の改善が期待できる。

表3 目標値達成度

項目	目標値	実験値	達成度
トルク感度	0.5 G/(Nm)	8.0 G/(Nm)	100%
トルク域	0.2 Nm	0.2 Nm	100%
応答速度	≥10 Hz	10 Hz	100%
温度域	室温	室温	100%

2. 皮膚状態診断センサへの適用

並木精密宝石株式会社によって試作された小径トルクユニットを用いて、図5に示す皮膚状態診断センサを製作した。本センサは、文献「日本機械学会バイオエンジニアリング講演会講演論文集 2005(18), 327-328.」を基にして試作し、本トルクセンサユニットの利点である回転軸に対して非接触にトルクを計測できることを活用した構造となっている。主な構造は、モータ、トルクセンサユニット、接触子、それらを接続するためのカップリング、筐体からなっている。モータには、小型のオリエンタルモーター製ステッピングモーターPK513PAを用いた。トルクセンサのシャフト径は直径6mmで、接触子の直径は、20mmである。カップリングは、ステンレス製で、筐体および接触子はABS樹脂で製作した。また、接触子の表面には、接触対象との摩擦力を大きくするために、1mm間隔で微小な突起があるサージカルテープを巻きつけてある。システムとしては電源、モータドライバ、コントローラからなっており、コントローラからトルクセンサのホール素子基板へ電源を供給している。ホール素子から出力電圧は、AD変換器を介して保存する。

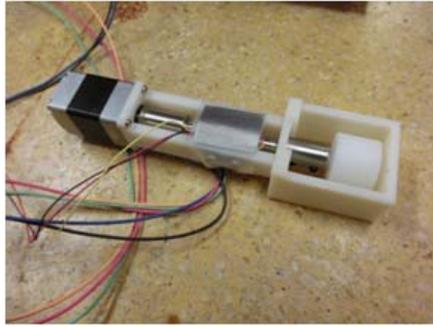


図5 試作した皮膚センサの写真

3. まとめ

小型軽量トルクセンサユニットを皮膚状態診断センサの接触力推定のために適用した試作センサシステムを構築し、既存の小径トルクセンサが有する周方向変動を補正する信号処理手法を導入し、変動の影響を除去することに成功した。また、補正処理を行うことにより、接触力の増加に伴うトルク出力の増加を確認でき、本ユニットによる接触力の推定に成功した。また、本プロジェクトにより課題点も明らかにできた。本センサに用いた処理は、リアルタイム計測に不向きであるため、リアルタイムでより時間分解能の高い接触力推定には、①エンコーダの導入、②周方向変動の軽減などが今後、必要である。

また、目標値と試作センサのスペックの比較を表4に示す。皮膚接触圧力については、接触力と接触面積から算出されるが、接触面積は、接触子が円筒であるため、変化する。そのため、筐体の接触面積から計算すると、0.01MPaとなり、目標に達しなかった。一因は、接触力を増加させるとモータトルクが足りないことである。そのため、モータを大きくし、モータトルクを上げることで接触圧力を増加できる。また、回転速度については5mm/sで回転することが可能であることを確認している。

表4 目標値達成度

項目	目標値	試作スペック	達成度
皮膚接触圧力	0.05 MPa	0.01MPa 程度	20 %
低速スキャン	≥5 mm/sec 可能	5mm/sec 可能	100%

2-②-2 電動アシスト型移動体への適用

(フィンガルリンク株式会社、並木精密宝石株式会社、弘前大、青葉工学振興会)

【実施内容】

- ・電動アシスト型移動体への適用 (フィンガルリンク株式会社)

1. 研究開発の概要

電動アシスト自転車では、上手にロスなく電源消費を抑えるため、正確なペダル～バッテリー間のサポート切り替え用のペダルシャフト組み込み型“回転力・回転角計測用トルクセンサユニット”が有効になる。本研究ではその適用モデルとして、

フィンガルリンク社の業務分野である医療福祉機器向けのトルクセンサユニットを試作し、その適用の検討のためモデル台車ユニットを製作し実験検証を行った。

2. 研究開発の方法と結果

フィンガルリンク社による市場調査（医療機関へのインタビュー調査）により医療現場に於いて、患者用医療ベッド等の移動をアシストする器具の要望が大きいことがわかった。この市場をターゲットにトルクセンサユニットを用いた研究開発をスタートさせ、まず今年度の研究開発目標としては、モデルとなる台車を製作しトルクセンサユニットの実効性についての検証を行った。

今年度のモデル台車の検討では、トルクセンサユニットにより操作者が台車を押しそうとする力を検出して、アシストするモータを自動的にスタートさせる機構を制御することが出来た。

3. モデル台車外観



図6 試作したモデル台車外観図

4. まとめ

今年度の検討では、磁歪式トルクリングセンサユニットが電動アシスト移動体の動作開始検出用のアクチュエータとして使用することが可能であることが、モデル台車装置を製作して実験することにより確認できた。

患者用医療ベッド等のアシスト移動体の実用化のためには今後さらにモータのパワーを高めることや移動中のトルク量の検出方法の確立により制御方法の向上が必要であると考えられる。

また磁歪式トルクリングセンサユニット単体においてはさらなる感度の向上と周方向の性能の安定性が望まれる。

今後の事業展開として病院内には移動アシストを必要とする機器が多数あるので、効率的な移動体アシスト機能のシステムが確立できれば大きな市場規模が望める。

本年度（H24）分の研究成果は、申請書（原書）に記載した様に、前半部で達成しなければならない小型化・高感度化に適した1）磁歪合金素材決定と2）トルク計測感度が目標達成であった。すなわち、3大学（弘前大、東北大、千葉工大）が主体で実施する、トルクセンサに使用する、①-1）リング用磁歪合金の高感度化（合金種類の選択、組織改良）、①-2）その素材を使った回転軸トルクセンサ・デバイスの高感度化（目標値到達）、それを踏まえて、応用展開グループが主に実施する、②-1）医療機器用（皮膚診断・評価用）小型力センサモデル実証および②-2）中型トルクセンサユニットを組み込んだ病院・介護福祉用移動体ベッドへの適用性予備試験である。以下に各項目での成果概要と達成度（%）を示した。

1. 研究開発成果

① 磁歪リング式トルクセンサ要素技術の開発項目

①-1 磁歪リング式トルクセンサの小型・高感度化に目途：

主担当弘前大、東北大グループは、FeCoV（パーメンジュール）の溶解工程、熱処理、結晶組織改善により、当初の磁歪、磁化特性パラメータ（残留磁化、保磁力、磁歪感度）を完全に達成（100%）出来た。機械的強度も組織改質後も保持できており、中型から小型（Φ6mm）までの磁歪リングが機械加工で製造できた。ただし、リングサイズによっては周方向の磁束のバラつきがあり、改善策が要る。（80%）

①-2 小型ピックアップ磁気センサデバイスの試作に目途：

千葉工大、並木精密宝石社グループは、リングからの漏れ磁束をピックアップするホールICの温度特性および外乱遮断を電子回路設計で大幅に目標値を上回り、高感度化達成（ $\geq 500\%$ ）、磁気シールドハウジング（容器）、回転角度エンコーダをセットとした小型ユニット製作が出来た。（100%）医療機器・小型マニピュレータにはさらなる数mm以下の応力センサが要求されるので、マイクロ加工技術を駆使する課題と外乱除去対策、湿度対策など生体医療適用、耐候性への実証課題（70%）が残る。

② 小型軽量トルクセンサユニットの組立・実証テスト

②-1 健診機器：皮膚状態診断センサは精度アップの研究必須：

東北大、並木精密宝石社では、Φ6シャフトに組み込んだ磁歪リング式トルクセンサを組み入れた皮膚状態診断センサを作製出来た。（100%）皮膚にあてて接触移動させると磁束漏れセンサ信号は接触圧（歪ゲージで同時計測）とともに変化した。ただし、信号強度がまだ弱く、外乱（ノイズ）レベルにも近いので、PCデータ解析上で平滑化処理を行い、なんとか負荷トルクと皮膚状態の傾向は出すことが出来た。（60%）

②-2 電動アシスト型移動体は試作一段階(初歩組立段階)：

主担当のフィンガルリンク社は、院内患者の移送用ベッドを試作目標に据えた第一段階として台車モデルを取り組んだ。Φ12mmの中型トルクセンサを試作して荷台の床下部に車輪と連結させて設置し、DCモータとバッテリーも連結制御させ、電動アシスト型の初歩的走行テストに成功(60%)した。

2. 研究開発後の課題

(1) 磁歪リング用合金素材とその材質・固着法への改善策

1) 高感度磁歪リングへの素材選択と熱処理・加工条件：ほぼ初年度で目途を付けることができた。しかし、今後の精密機器、医療福祉、精密ロボットハンドリングに重要な、φ6mm以下の小型リングに於いて、接合具合の不均質や材質バラつきなどの影響か、円周方向に漏れ磁束の変動が残った。これは、さらに精密さを要求される小型リングで高精細のトルクセンサとしての達成すべき感度のバラつきをもたらす、悪い要因であるので、リング周囲の漏れ磁束均質化(データ平滑化)への技術改善が要求残った。研究課題や改善策として、材質改善への材料設計(微視的結晶化、粉末焼結素材、再熱処理(残留応力除去焼き鈍し等)が検討要る。また、回転シャフトへの磁歪リング固着法均質化も課題であり、磁歪リング固定法も熱膨張利用(冷し嵌め)が良いのか、高価でも電子ビーム溶接法が良いのか? 製品コストとの兼ね合いで決定することが要求されてくる。

2) ピックアップ用の小型センサ：小型化の場合に必須な課題である、ピックアップ用のホールICチップ部分の感度改善については、製品化できる段階に至っている。

(2) 小型軽量トルクセンサユニットの組立・実証テスト

1) 小型医療機器(皮膚センサスキャナー、内視鏡把持器具等)への適用では、第一段階で試作したφ6mmトルクセンサでは、場所や信号のバラつきが相対的に大きく(～60%)、さらなるトルクセンサ感度向上策(≦30%)と外乱除外によるSN比改善対策が必須である。また、対内外の部位適用で大事な、接触圧力の制御しながらのスキャニング操作までに至っておらず、今後の大事な研究課題である。

2) 電動アシスト型移動体：第一段階の電動アシスト型台車モデルを作成できた。しかし、電動アシスト時の切り替えがまだスムーズでなく、また、患者負荷が加わった場合の、不快感少ないスムーズなモータ出力切り替え制御、凹凸面カーブ付坂道走行、さらには、繰り返し耐久性テストは出来ていないので、実用化への研究課題は残っている。

3. 事業化展開

強度と加工性を有する新鉄基磁歪合金を用いた非励磁式、コイルレス、小型・単純構造、軽量・低コストの回転軸力計測・制御用の磁歪リング式トルクセンサを開発する。従来のモータ電流変化でなく回転軸力信号を直接フィードバックでき、ア

クチュエータの高精細制御と省エネルギー駆動の特長を生かせる、医療福祉機器（患者搬送用ベッド、皮膚診断器など）、電動車両（電動補助自転車等）用の力センサを試作、適用効果を実証する。東北地域での2大学、4研究機関での技術シーズ、すなわち、1）新材料開発技術（東北大・金研と弘前大）、2）材料加工技術（弘前大）、3）医療機器制御技術（東北大）をもとに、企業サイドで製品モデルの試作と現場適用性や商品化可能性を調査する。

なお、本研究成果をもとに、以下の3課題を商品化して事業展開を図る。

① この事業により開発する技術を用いた製品		
	製品等の名称	製品等の概要（用途、特徴等）
(1)	電動アシスト自転車等へのトルクセンサユニット	高感度磁歪リング式力センサ、磁気式ロータリーエンコーダ（回転角度検出）の2つの機能を集積化した電動アシスト自転車、車イス、院内患者搬送ベッド等の介護福祉機器等ペダル踏み込み力や手押し力の伝達および位置制御機能を有する、小型軽量化・シンプル構造のトルクセンサユニット部品
(2)	スマートアクチュエータユニット	高感度磁歪リング式トルクセンサ、磁気式ロータリーエンコーダ、DCモータドライブ機能を集積化したロボット等の関節駆動部用に用いる力伝達および位置制御機能を有する、小型軽量化・シンプル構造のスマートアクチュエータユニット部品
(3)	生体医療診断用機器デバイス（皮膚表面形態計測用センサ、能動的内視鏡）	安全・安心な低侵襲、生体医療診断用機器デバイスである。高分子圧電材料（PVDF）を用い、皮膚上でのプローブ接触・転がり力（ねじり力や回転（位置＝角度）を小型トルクセンサユニットを組み入れて接触圧一定に半自動的に制御し、皮膚科外来診察中に、皮膚粗さと柔らかさの定量的計測が可能なる。アトピー性皮膚炎、健常肌の状態識別や加齢診断が出来る。内科外科（前立腺や直腸）部位等への内視鏡用の力・位置センサとしての発展性はあるが、厚生省認可に治験があるので事業化までには時間を要する。

② この研究開発の事業化に向けて

平成 27 年度以降の事業化では、電動アシスト型移動体ユニットに導入し、量産製品の信頼性とコスト低減化を達成する。車イス、院内患者搬送ベッド等のペダル踏み込み力や看護人の手押し力軽減化へ改良加えた医療業務用や介護福祉機器も潜在需要は多く、加えて、電動アシスト自転車等の業界からも期待されており、本デバイスユニットの川下企業からのニーズが高い。

また、開発途上国などでの人力タクシー補助具としての需要や軽荷物搬送などに物流業界からの需要も期待できる。