

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「静電容量式変位センサ及びそれを用いた

測長タッチセンサの開発」

研究開発成果等報告書

平成25年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社メトロール

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 1
- 1-2 研究体制（研究組織・管理体制・研究者名、協力者） 2
- 1-3 成果の概要 8
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口 9

第2章 本論

- 2-1 小型静電容量式変位センサの開発背景と原理 10
- 2-2 PSoCを用いた静電容量式変位センサの開発 12
- 2-3 FPGAを用いた静電容量式変位センサの開発 14
- 2-4 静電容量式変位センサの可動子の軸ずれシミュレーション 18
- 2-5 小型光学式変位センサの概要（サブテーマ①補完） 19
- 2-6 ツール測長タッチセンサの開発（サブテーマ②） 22
- 2-7 タッチセンサ用表示装置の開発（サブテーマ④） 26
- 2-8 ゲージの開発（サブテーマ⑤） 28

第3章 全体統括

- 3-1 技術開発成果 29
- 3-2 事業化展開 31
- 3-3 おわりに 32

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

CNC 工作機械における切削加工では、CNC マシニングセンタ用工具長セッタや CNC 旋盤用刃先センサなどのタッチスイッチを用いて、刃物工具の刃先位置を機内 CNC システムで自動的に補正し、高精度な加工を行っている。本研究では、近年のミクロンレベルの精度要求に応えるべく、タッチスイッチに変位センサを組み込み、刃先の測長位置を出力することで高精度加工に対応できる測長タッチセンサ（位置決めセンサ）を開発する。従来の刃物工具長検出器であるタッチスイッチは、ミクロン単位の切削時はオペレータによる微調整が必要であるが、測長タッチセンサを開発することにより静電容量式変位センサからの位置情報を表示装置で確認することで、ミクロン単位の高精度加工を行う。

研究の目標は、測定長 $\pm 1\text{mm}$ 、分解能は $0.1\mu\text{m}$ 等のサブミクロン表示とし、使用温度範囲での指示精度 $5\mu\text{m}$ 、電極部の直径で 8mm 以下の小型静電容量式センサの開発を行う。また、このセンサを使用した製品やそれに付属する表示器の開発も行う。

小型静電容量センサの開発においては静電方式を用い小型で安価なデバイスを作ることになる。可動子、固定子ともに円筒形状の電極で構成されるもので、非常に単純な構成となる。可動子が、固定子の間を移動することで、2つの受信電極に発生する電圧が変化して、それを差動アンプで増幅して同期検波すると、可動子の位置に比例した電圧が出力され測長が行える。変位ゼロの中央付近の入出力特性も良好である。このような単純構造の変位センサが、歴史的にみて長い間実用にならなかったのは、固定子電極の信号を電極すぐ近くのところで増幅する必要があり、電気回路の実装で、小さく作れなかったのが背景にあると推測される。この課題を克服する電気回路は、アナログ混在型のマイコン PsoC である。これは、1チップの中に、アナログ回路も含んだもので、その大きさは $5 \times 5\text{mm}$ ほどで、静電変位センサのすぐ近くに組み込むことができる。

測長機能を備えたことから、従来なしえなかった刃物工具の磨耗状態を把握できるようになり、切削加工のトータル的な高精度高速化、効率化を図り、機械加工分野に貢献できる。今後この新方式である静電容量式変位センサは多くの応用が進んでいくものと推察される。今回の開発では、静電容量式変位センサの技術とタッチセンサへの要求が結びつくもので、事業展開が期待できる。

1 - 2 研究体制

最終目的を実現するために、以下のサブテーマを設定し、各テーマはそれぞれの技術に精通した担当者により開発を行う事とした。

① 小型静電容量式変位センサの開発

(実施：株式会社青電舎、株式会社パターンアート研究所、株式会社メトロール)

最適な電極形状、絶縁距離や材料を再検討して、更に最適な電気回路をシミュレーションし、目標仕様達成を目指す。分解能 $0.1\mu\text{m}$ を実現するためにアナログ回路からソフトまで開発する。

当初目標は PsoC で回路構成を考えたが、初年度の研究の結果、実現不可能と判明したため、新たにアナログ回路を見直し FPGA を使用した回路とソフトに方向変換した。静電容量式センサの開発終了を待ってサブテーマ②～⑤を達成するには時間がない為、代替センサとして光学式センサを開発して、乗り切る事とした。

② ツール測長タッチセンサの開発 (実施：株式会社メトロール)

タッチセンサとして、接点距離分解能 $0.1\mu\text{m}$ を達成するために、変位センサからの出力を表示器に送り、従来器同様に定点で ON/OFF の接点信号を発生させると同時に、ON 領域と OFF 領域の判別を行い、ラインドライバで出力する。

④ タッチセンサ用表示装置の開発 (実施：株式会社メトロール)

ツール測長タッチセンサまたはバイト測長タッチセンサの測長結果を表示するための表示装置を開発する。これは、タッチセンサから離れた場所に設置されるもので、場合によっては工作機械に組み込まれることも想定して設計する。川下企業のニーズを調査した上で小型形状の表示装置を開発する。使いやすい仕様で設計試作し一連の信頼性評価を行う。

⑤ ゲージの開発 (実施：株式会社メトロール)

ゲージのローコスト小型化を最優先し、設計する。同時に表示装置の開発も行う。このセンサはコンペティターとの優位性を出すために小型化を図り、且つ部品点数の削減を図る。また、回路基板は業界最小の小型をはかり、ノイズ対策として出力信号はアナログ信号でなく、デジタル信号で送る。表示装置もコンペティターとの互換性を出すために寸法設計し、ソフトもほぼ同等とする。(サブテーマ③と統合する)

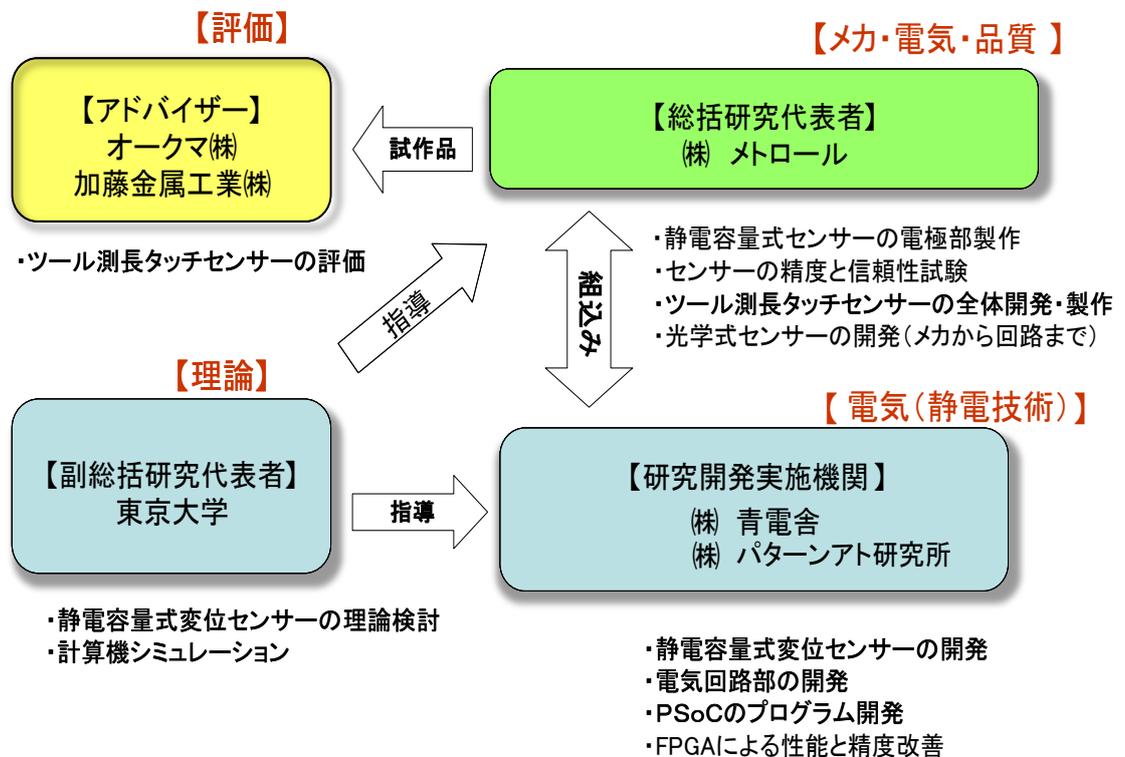
⑥ 静電容量式変位センサ理論の検証（実施：国立大学法人東京大学）

同軸状態にある可動子に傾きが発生した場合について、3次元モデルによって電場の漏れを考慮した解析を行う。

センサを構成する可動子電極と固定子電極は互いに同軸であることを前提としている。しかしながら動作中に同軸状態から逸脱してしまうことが懸念されるため、当該時の発生誤差についてシミュレーションによる予測を行う。

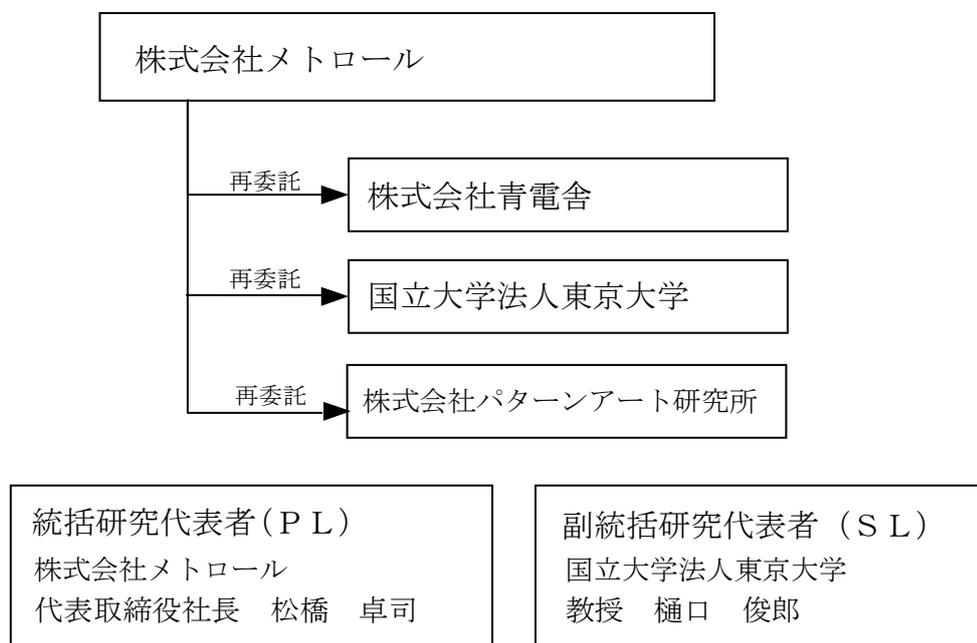
本センサで応用するキャパシタは、電磁気学に基づく理論公式で前提とされる微小ギャップを満たさないことから、理論公式ではなく有限要素法による数値解析によって検討を行う。

- 研究開発体制は、下図のとおりである。（株メトロールの「メカ・品質」、(株)青電舎と(株)パターンアート研究所の「電気」、東京大学の「理論」、工作機械ユーザーであり今回のプロジェクトアドバイザーであるオークマ(株)が「評価」というくりに分けられ、役割がはっきりした体制となる。



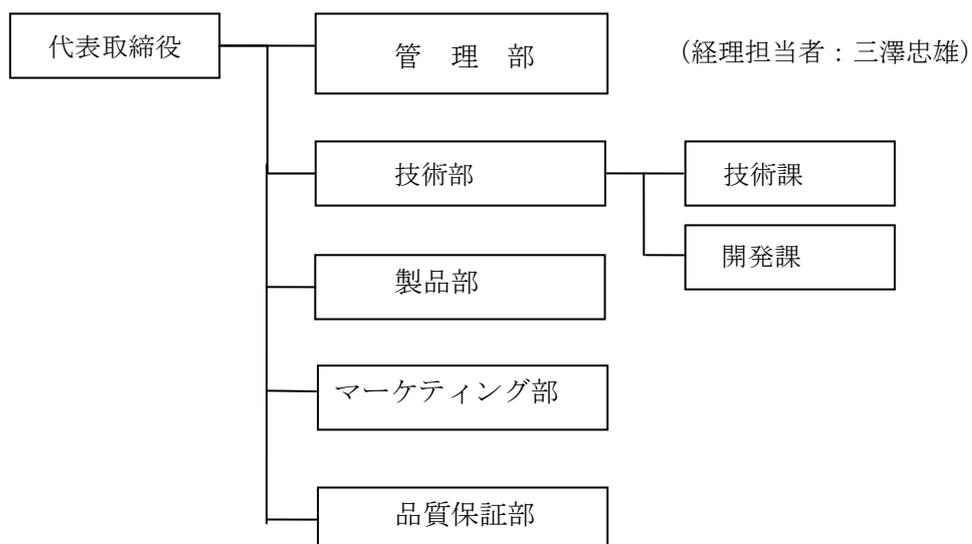
1) 研究組織（全体）

具体的な研究組織及び管理体制を以下に示す。



2) 管理体制

① 株式会社メトロール内管理組織

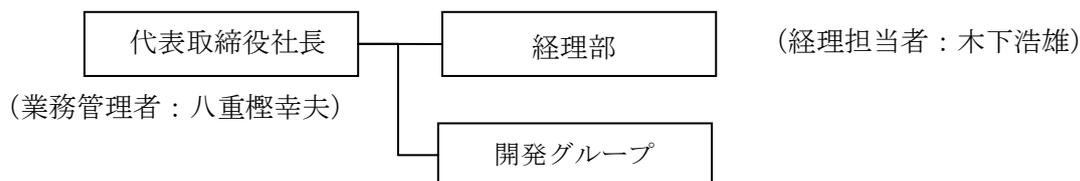


② 再委託先

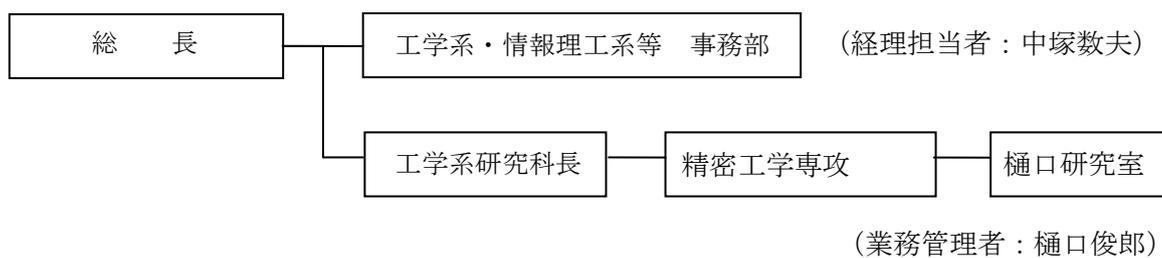
[株式会社青電舎]



[株式会社パターンアート研究所]



[国立大学法人東京大学]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】株式会社メトロール

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
松橋 卓司	代表取締役社長	⑦
三澤 忠雄	管理部経理課	⑦
箕輪 こずえ	マーケティング部	⑦
吉岡 崇元	技術部 開発課長	⑦

② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
吉岡 崇元 (再)	技術部 開発課長	①②④⑤⑥
菅野 隆行	技術部 技術課長	②
和佐 有祐	技術部 開発課	①④⑤
石垣 正夫	技術部 開発課	①④⑤

【再委託先】

(研究員)

株式会社青電舎

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
権藤 雅彦	代表取締役社長	①
グジャヌ・アリスト・ファン	技術開発部長	①

株式会社パターンアート研究所

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
中村 雄	開発グループ・マネージャー	①
鎌田 勝裕	開発グループ	①

国立大学法人東京大学

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
樋口 俊郎	工学部精密工学専攻 教授	⑥
木村 文陽	工学部精密工学専攻	①⑥
井上 俊太郎	工学部精密工学専攻	①⑥

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

株式会社メトロール

(経理担当者) 管理部経理課 三澤 忠雄

(業務管理者) 代表取締役社長 松橋 卓司

(再委託先)

株式会社青電舎

(経理担当者) 代表取締役 権藤 雅彦

(業務管理者) 技術開発部長 ゲジヤヌ・アリスト・ファン/権藤雅彦

株式会社パターンアート研究所

(経理担当者) 経理部部长 木下 浩雄

(業務管理者) 代表取締役社長 八重樫 幸夫

国立大学法人東京大学

(経理担当者) 工学系・情報理工学系等 事務部長 中塚 数夫

(業務管理者) 工学部精密工学専攻 教授 樋口 俊郎

(4) アドバイザー

氏名	所属・役職
堀 康德	オークマ株式会社 技術本部本部長
加藤 豊成	加藤金型工業株式会社 代表取締役

1-3 成果の概要

① 小型静電容量式変位センサの開発（サブテーマ①）

㈱青電舎においては安価な PsoC（特殊 IC）を利用してすべての仕様を満足させる予定であったが、分解能 $0.1\mu\text{m}$ を目指したが $1\mu\text{m}$ も達成できず、応答時間の遅延も 3 桁（700 倍）も遅くなることが判明したため、サブテーマ②とサブテーマ⑤に使用できない事も判明した。それに加え指示精度の直線性も研究の結果達成できないことが確認でき、23年7月開催の研究開発推進委員会で十分検討した結果、今後の㈱青電舎での研究開発は中止と決定し、新たな方向で開発を進めることとなった。

㈱パターンアート研究所で行っている FPGA による高速化については高速演算が可能になったが、数値の安定が悪く改善検討をしていたがノイズの低減が難しく長時間に渡り試行錯誤を繰り返しているが、解決に至っていない。

そこで24年度は東京大学で研究している FPGA を使用した回路を試作して応答時間の改善と精度改善を図った結果、ほぼ全域で指示精度の改善が図られた。

小型静電容量式変位センサの開発は上記に示すとおり、世界でも実用化されていない非常に難しい研究であったので、本研究の基本目的達成のために、手段である静電容量式変位センサに固守せず、本来の目的であったデジタル表示式工具長セッタの開発のために、手段を静電容量から他の手段を検討した。今回の手段としては光学スケールの開発を並行して行うこととした。全くの未知の開発であったが、1年間のブランクを取り返すために、通常では3~4人で2~3年程度かかる開発を約半年で達成し、初期目標精度仕様を全て解決した。この光学スケールの開発により今後サブテーマ②、サブテーマ③、サブテーマ④、サブテーマ⑤の商品化に移行する手段を得た。

② ツール測長タッチセンサの開発（サブテーマ②）

今回開発した小型光学スケールを既存の工具長セッタに組み込み、サブテーマ④で開発した表示装置で表示ができた。精度も目標値を大きく上回る性能のデジタル工具長セッタ（ツール測長タッチセンサ）を開発することができた。パソコンの USB ポートのみでの接続で数値表示可能なアプリケーションの開発も行い、ユーザーオリエンテッドな商品も考案した。

③ バイト測長タッチセンサの開発（サブテーマ③）

構造機能がサブテーマ⑤に同等のため⑤に統合する

④ タッチセンサ用表示装置の開発 (サブテーマ④)

光学スケールデバイスを用いたため、前年度の表示器は使用できないため、新たに表示器を開発した。従来品との互換性を持たせながらデジタル数値表示、リセット、プリセット入力はもちろん、-NG、OK、+NG等の機能も新たに付け完成させた。

⑤ ゲージの開発 (サブテーマ⑤)

今回開発した小型光学スケールを組込み試作を行った結果、指示精度、繰返精度、ヒステリシスなど全ての精度仕様を達成できた。ただし、ABS (アブソリュート) スケールでない為、原点も必要になったため、インクリメンタル出力線のみで6本になっている。

⑥ 静電容量式変位センサ理論の検証 (サブテーマ⑥)

青電舎が開発した静電容量式変位センサとは別の検出原理 (差動容量トランス方式) を用い、原理試作を終了させている。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

本プロジェクトに関連した問い合わせに対する窓口は次の通り。

1) プロジェクト全体の運営に関する事項

株式会社メトロール (TEL : 042-527-3278 FAX : 042-528-1442)

代表取締役社長 松橋 卓司 (matsuhashi@metrol.co.jp)

2) 静電容量式センサの電気・評価関係に関する事項

株式会社青電舎 (TEL : 042-770-9588 FAX : 042-770-9688)

代表取締役 権藤 雅彦 (gondo@seidensha.net)

3) 静電容量式センサの電気・評価関係に関する事項

株式会社パターンアート研究所 (TEL : 042-770-9588 FAX : 042-770-9688)

代表取締役 八重樫 幸夫 (yaegashi@p-art.co.jp)

4) 静電容量式センサのメカ・光学スケール評価関係に関する事項

株式会社メトロール (TEL : 042-527-3278 FAX : 042-528-1442)

技術部開発課 吉岡 崇元 (m-design6@metrol.co.jp)

5) 静電容量関係のシミュレーションに関する事項

国立大学法人 東京大学 (TEL : 03-5841-6449 FAX : 03-5800-6968)

教授 樋口 俊郎 (higuchi@aml.t.u-tokyo.ac.jp)

第2章 本論

2-1 静電容量式変位センサの開発背景と原理

2-1-1 開発背景

従来のタッチスイッチへの組み込みを前提にした測長器または変位計は、小形、低価格が必須条件となる。光学式エンコーダや磁気式エンコーダは、分解能には優れるが、高コストとなる。差動トランス式変位計は、歴史も古く比較的小型にできるが、次の欠点がありタッチセンサへの用途には適さない。

- 1, 1次巻線、2次巻線とトランス構造となっており、サブミクロン単位の微小な測長を行うには、その巻線の大きさが無視できなくなってしまい、なんらかの補正手段が必要になる。
- 2, 工作機械によっては、刃物工具が装着されるスピンドルモータがすぐ近くで回転する場合がある。このときの磁場によって、差動トランスの出力に誤差を含むことになる。
- 3, 差動トランスは、可動子であるコア(磁心)が中央部付近にあるときの出力/変位の直線性が渦電流や回路ドリフトなどの影響を受けやすい。
- 4, トランス巻線には電流を流すために、わずかであるがジュール熱が発生し、温度ドリフトの原因となる

そこで、新規に開発するのが静電容量式変位センサである。これは図 2-1.1 に示すように、可動子、固定子ともに円筒形状の電極で構成されるもので、非常に単純な構成となる。可動子の位置に比例した電圧が出力される。変位ゼロの中央付近の入出力特性も良好である。また、静電容量式変位センサは多数のセンサを同時に使用する場合において、差動トランス式と異なり、磁束漏れによるセンサ相互間の影響がないメリットがある。

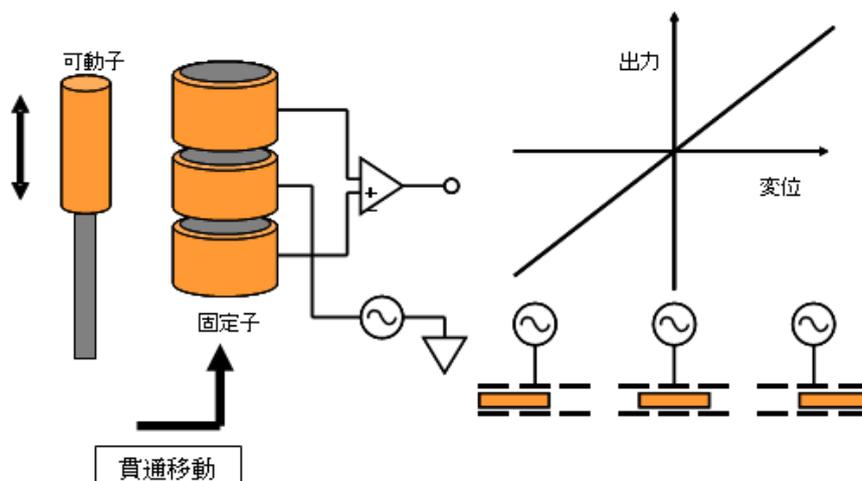


図 2-1.1 静電容量式変位センサの原理

2-1-2 開発方針

このような単純構造の変位センサが、歴史的にみて長い間実用にならなかったのは、固定子電極の信号を電極すぐ近くのところで増幅する必要があり、電気回路の実装で、小さく作れなかった事が背景にあると推測される。

そこで、電気回路の課題を克服するためにアナログ・デジタル混在型マイコンの PSoC や FPGA を利用し、電極近傍での回路の配置・回路の小型化を狙う。

2-1-3 センサ本体の試作

本体試作の際に熱による本体の歪みなどが精度に影響を与える事がわかった。その上で温度特性の対策のためにシールドケースの半田付け廃止、固定電極の半田を誘導エポキシ接着剤に変更、60°C48 時間のエージングの実施を行った。

以下の仕様で試作を行い、以降の電気回路部で使用して開発を行った。

センサ直径	: 8.9mm	稼働長	: 6mm
電極材質	: 真鍮	可動子直径	: 4.0~4.3mm
可動子軸	: セラミックス	電極ホルダー	: ベスperl

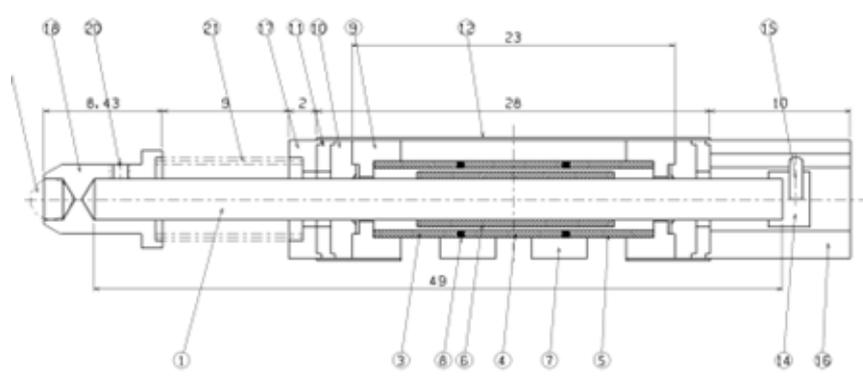


図 2-1.3 設計図



図 2-1.4 本体部とシールドケース

2-2 PSoC を用いた静電容量式変位センサの開発

2-2-1 PSoC を用いたセンサの全体構成

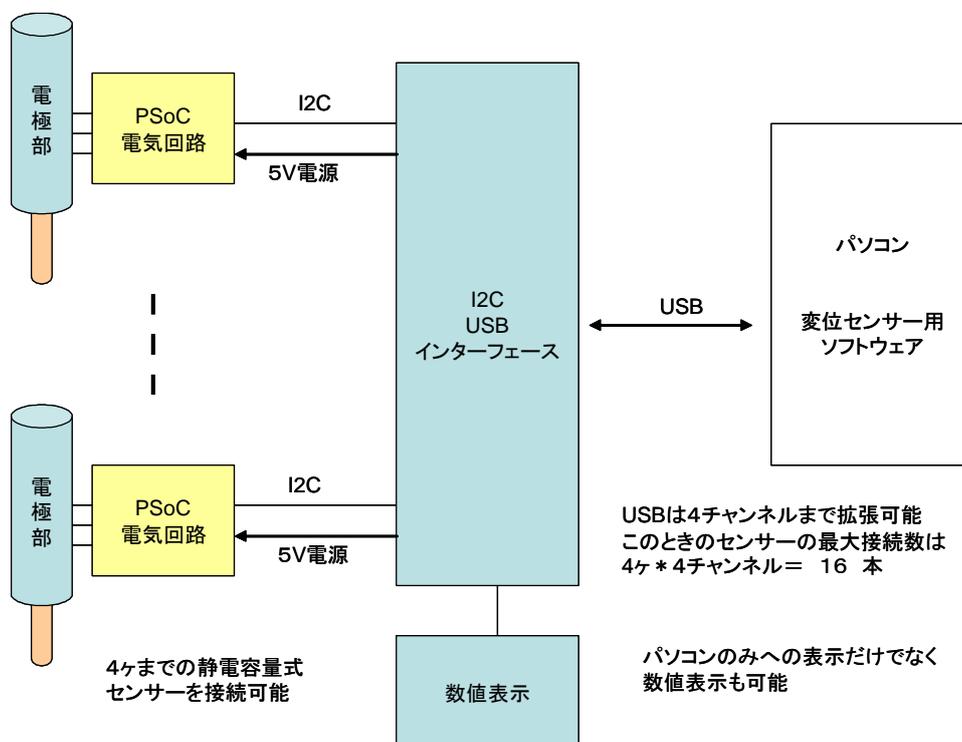


図 2-2.1 全体システムのブロック図

PSoC を用いた電気回路部の開発方針は次のとおり。

- 1, 固定子電極部のすぐ隣に PSoC からなる電気回路部を配置し、信号線の引き回しを最小にする。
- 2, PSoC からの出力は I2C のシリアルインターフェースを用いる。
センサからのケーブルは、マイクロ USB コネクタを用いて、コネクタ脱着型として利便性を確保する。
- 3, パソコンへの接続は、I2C/USB 変換インターフェース回路を用意する。
I2C/USB 変換インターフェース回路には、4ヶの静電容量式変位センサを取り付けでの同時計測を可能とする。
- 4, パソコンにて USB を通じてデータを入力するために、データ取り込み並びに評価用ソフトを作成する。

2-2-2 開発結果

図 2-2-2 は、表示カウンタをスタンドアロンモードで接続した状態を示す。この表示カウンタの後側から USB ケーブルを介して静電容量式変位センサに直接接続されるようになっている。この方法はやっかいな設定が不要となり、すぐに静電容量式変位センサを使用することができるメリットがある。



図 2-2.2 PSoC を用いたセンサシステムの全体図

安価な PSoC（特殊 IC）を利用してすべての仕様を満足させる予定であったが、分解能 $1\mu\text{m}$ も達成できず、また応答時間の遅延が 3 桁（700 倍）も遅くなることが判明し、サブテーマ②とサブテーマ③とサブテーマ⑤に使用できない事が判明した。それに加え指示精度の直線性も研究の結果達成できないことが確認でき、研究開発推進委員会での検討の結果、PSoC での研究開発は中止と決定した。

2-3 FPGA を用いた静電容量式変位センサの開発

2-3-1 FPGA を用いたセンサの全体構成

アナログ回路部はセンサからの信号の I-V 変換、バッファ、AD 変換を行う。デジタル回路部は電極 C に流す駆動電流の生成、データ処理、位置出力を行う。全体のブロック図を図 2-3.1、FPGA のブロック図を図 2-3-2 に示す。

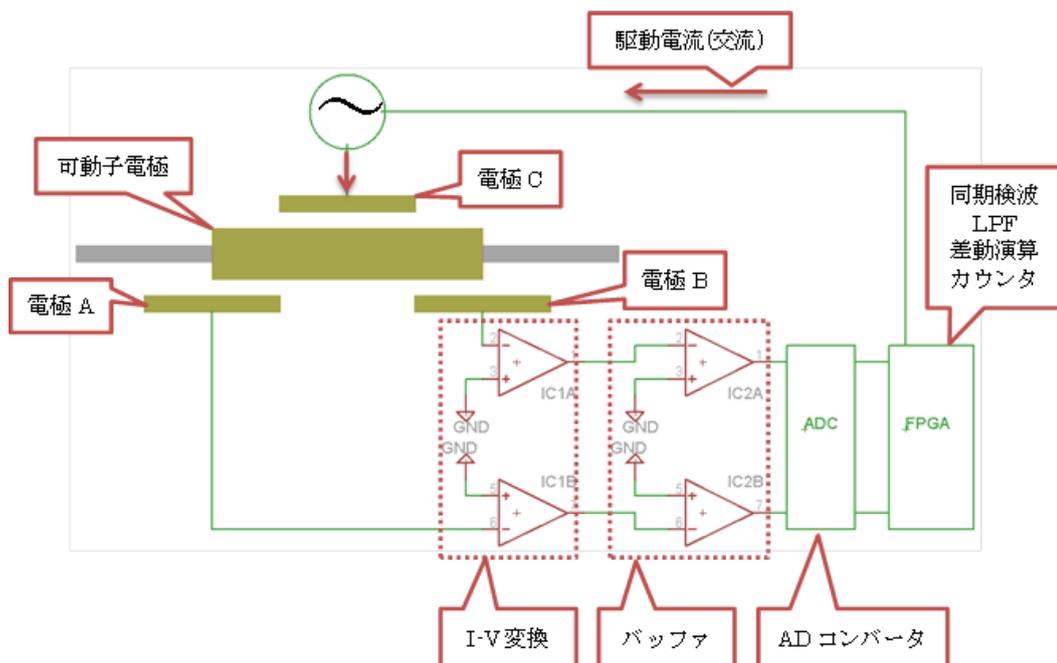


図 2-3.1 FPGA を用いたセンサの全体ブロック図

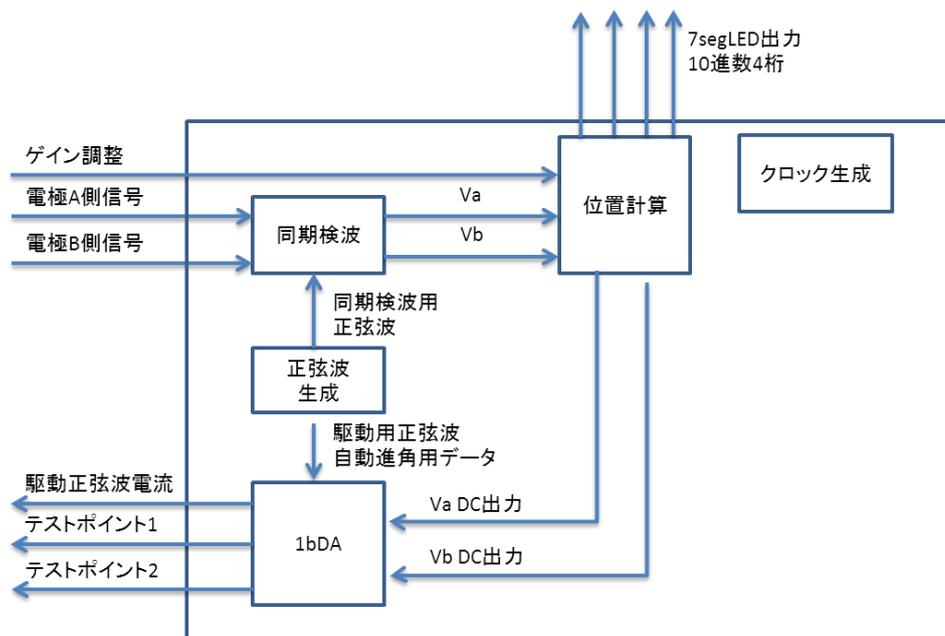


図 2-3.2 FPGA のブロック図

2-3-2 試作結果

●センサ本体

最初は PSoC 使用回路で用いたセンサで実験を行った。実験を行ううちにセンサ本体の機械的な要素がリニアリティに影響があると考えられたので、検証を行うためにセンサ本体を新たに組み立てた。センサの構造に変更は無い。この際、可動子電極の外径を測定したところ、両端で外径が異なりテーパが付いていることを確認した。このテーパがリニアリティ誤差の一因と考えられる。

●基板

図 2-3.3 に試作基板の外観を示す。

片面ベタ GND のユニバーサル基板を用いて試作した。基板の端に取り付けたセンサの固定子電極から配線を出して回路と接続した。

回路構成の概要はアナログ部分に I-V 変換・バッファのオペアンプ、AD コンバータを配置し、デジタル部分に FPGA、調整用のロータリースイッチ・プッシュスイッチ、表示用の 7 セグメント LED となっている。

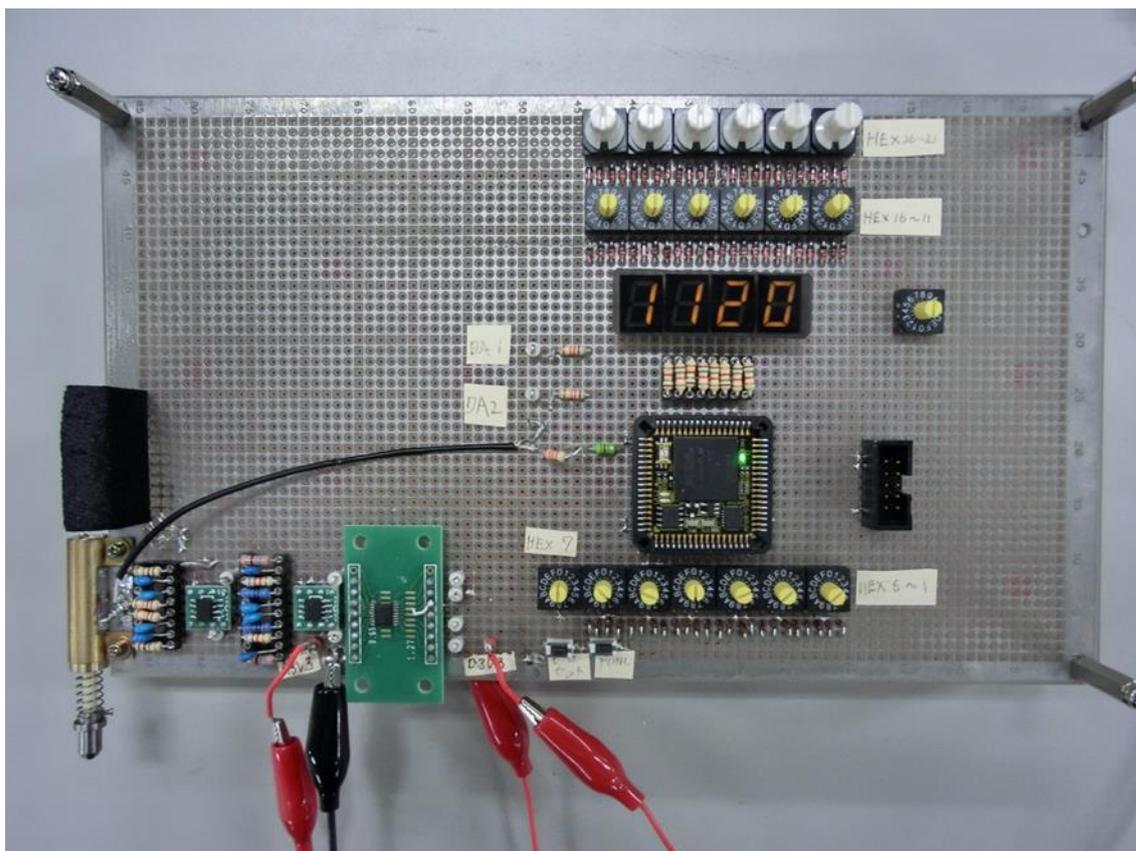


図 2-3.3 FPGA 使用回路の試作基板

2-3-3 最終出力のリニアリティ測定

センサ、アナログ部、デジタル部全てを含んだ最終出力のリニアリティを測定した。マイクロメータでセンサの押し込み量を制御し、4桁の7セグメントLEDの表示とFPGAから出したテストポイントの電圧値を測定してリニアリティ測定を行った。

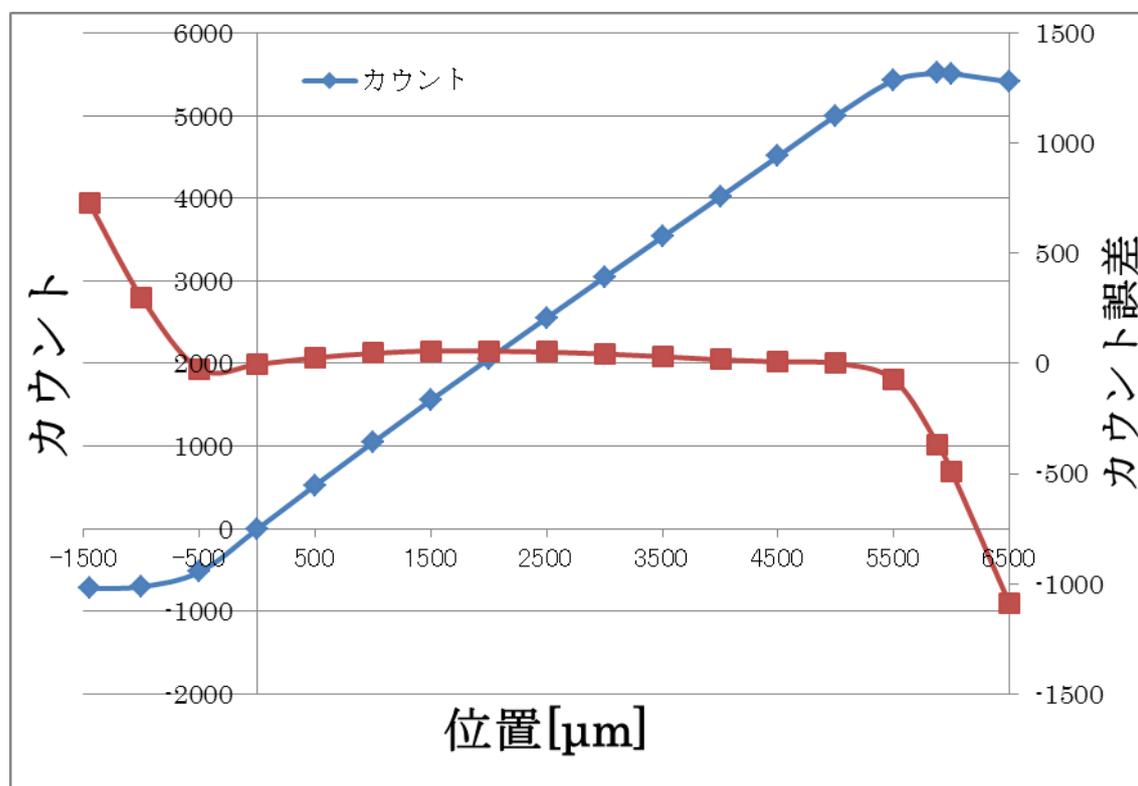


図 2-3.3 位置とカウント、カウント誤差の関係

図 2-3.3 の結果より、センサの変位が 0~5mm の区間でカウント値の誤差は最大で 50 カウント程度となった。1 カウント=1 μ m となるようにゲイン調整を行なっているため、最終的な出力の誤差は最大で 50 μ m 程度といえる。

アナログ回路部のリニアリティ測定で記述したアナログ回路部分(IC や抵抗、コンデンサなどの部品)のリニアリティ誤差は機械的部分を含めた最終的な誤差に比較して十分に小さい。よって、アナログ回路部分がリニアリティ誤差に与える影響は小さいと考えられる。

2-3-4 開発結果

表示分解能 $1\mu\text{m}$ のときは、最小桁の数値まで安定して表示できた。この時の表示値の更新周期は、センサの変位に十分に追いついている。表示分解能 $0.1\mu\text{m}$ のときは、最小桁の数値が ± 3 程度はバラついているため、センサ全体の分解能の実力としては $0.6\mu\text{m}$ 程度が最大と思われる。

表示の安定性は、回路的な問題であり、信号へのノイズを抑えることやデータのサンプリング数の設定などで向上できると考えられる。

また、試作基板は表示分解能 $1\mu\text{m}$ を想定しているので、7seg や FPGA 内のカウンタの設定を変えないと表示分解能 $0.1\mu\text{m}$ のときは $\pm 1.6\text{mm}$ 以上の測定はできない。

- ・表示分解能 $1\mu\text{m}$ で表示の安定を確認した
 - ・表示分解能 $0.1\mu\text{m}$ では表示可能だが数値がバラつく
 - ・リニアリティ誤差は $50\sim 100\mu\text{m}$ 程度
- アナログ回路部分のリニアリティ誤差は問題なし
→機械部分（特に可動子電極、固定子電極のテーパと考えられる）のリニアリティ誤差が支配的
- ・リニアリティ誤差の補正回路を準備中
-
- 静電容量式変位センサの開発は精度・安定性など目標精度に未達成の部分もあるが、ほぼ実用領域に達した。今後は小型化のために、新検出方式と FPGA を用い小型形状のセンサの 26 年度の実現用化をめざす。

2-4 静電容量式変位センサの可動子の軸ずれシミュレーション

(サブテーマ⑥)

2-4-1 シミュレーション内容

センサを構成する可動子電極と固定子電極は互いに同軸であることを前提としている。しかしながら動作中に同軸状態から逸脱してしまうことが懸念されるため、当該時の発生誤差についてシミュレーションによる予測を行った。

本センサで応用するキャパシタは、電磁気学に基づく理論公式で前提とされる微小ギャップを満たさないことから、理論公式ではなく有限要素法による数値解析によって検討を行う。有限要素法の汎用ソフトウェアである ANSYS を用いた。

シミュレーションは以下の 2 項目について行った。

- 1, 可動子を固定子との同軸状態から一定間隔でずらした際の 2 電極間の静電容量変化を求める
- 2, 可動子の直径を変化させる。3.5mm から 4mm まで 0.1mm 間隔で変化させる

2-4-2 シミュレーション結果

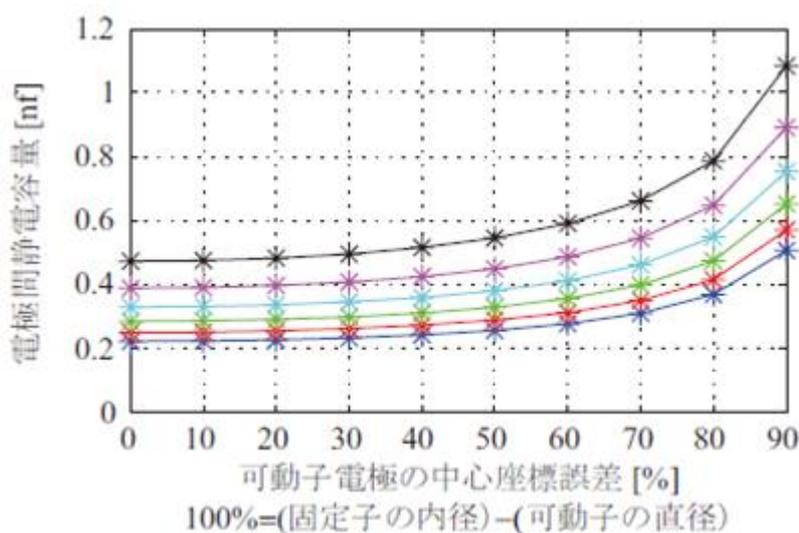


図 2-4.2 軸ずれ量を最大値で正規化した各半径における静電容量の変化

上図は各半径における静電容量の変化を示す。グラフは、上から順番に黒線は直径が 4mm、桃色線は 3.9mm、～ 青線は 3.5mm の時のシミュレーション結果である。横軸は、可動子電極の中心からのずれを示し、縦軸は静電容量を示している。可動電極と固定子電極間のギャップを 100% として、可動子電極のずれを割合に変換して示す。

2-5 小型光学式変位センサの概要

2-5-1 光学式変位センサの原理

光学式変位センサの方式には透過方式、反射方式、等が知られている。弊社においては、汎用部品が使用でき部品の入手性の良い、透過方式を選択した。原理を簡単に説明すると、下図 2-5.1 のようになる。

原理は光量の増減を信号に変換し、その信号を電氣的処理し、位置のデジタル信号を出力する。

即ち、光量の増減はメインスケールとインデックススケールに格子状（格子間隔 $40\mu\text{m}$ ）のスリット（ $20\mu\text{m}$ ）が刻まれていて、光源の LED 素子から発生した

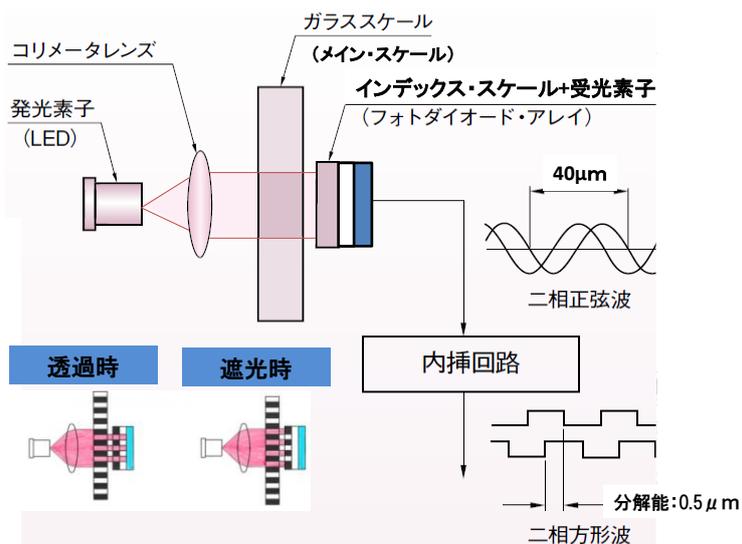


図 2-5.1：スケールの原理と信号

光はコリメータレンズで平行光にしてインデックススケールに照射されており、メインスケールの移動によりインデックススケールとの間にできたスリット間の空隙を光が透過したり遮断したりを繰り返す、光がフォトダイオードに届き光電変換される。その信号はフォトダイオードの位置とインデックススケールの配置を工夫することにより $40\mu\text{m}$ 波長の SIN 信号と COS 信号の 2 相出力が出力される。2 相出力は内挿回路に入り電氣的に最大 400 分割され、分解能 $0.1\mu\text{m}$ の A/B 相出力が生成される。A/B 相出力はケーブルで表示器（カウンター）に送られ数値表示される。

構成部品の概要

光源：LED とコリメータレンズが一体となった小型形状のもの

メインスケール：青板ガラス上にクロム蒸着しエッチングでスリット形成

インデックススケール：同上

フォトダイオード：設計は弊社、2 次試作品はマスクを作成して製造

内挿 IC：ワンチップ IC をメーカーと共同で開発（無償）

A/B 相出力 IC：差動出力

2-5-2 光学変位センサの信号と歪み対策

光学スールの原理的な出力を下図 2-5.2 に示すような 3 次高調波等の高次高調波を含んだ三角波となるので、一般対策としてはスケール間の Gap を広げることに対応している。

しかし、Gap を広げると前頁の特性で示すように出力が減衰し S/N が悪化するという問題が発生する。

そこで、今回はその対策として、インデックススケールスリットに 3 次高調波消去パターンを考案（特許出願済み）した。その対策を図 2-5.3 に示す。

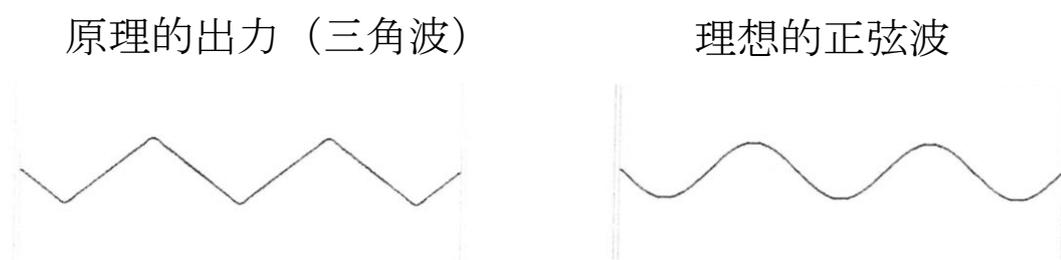


図 2-5.2 : 三角波と理想的正弦波

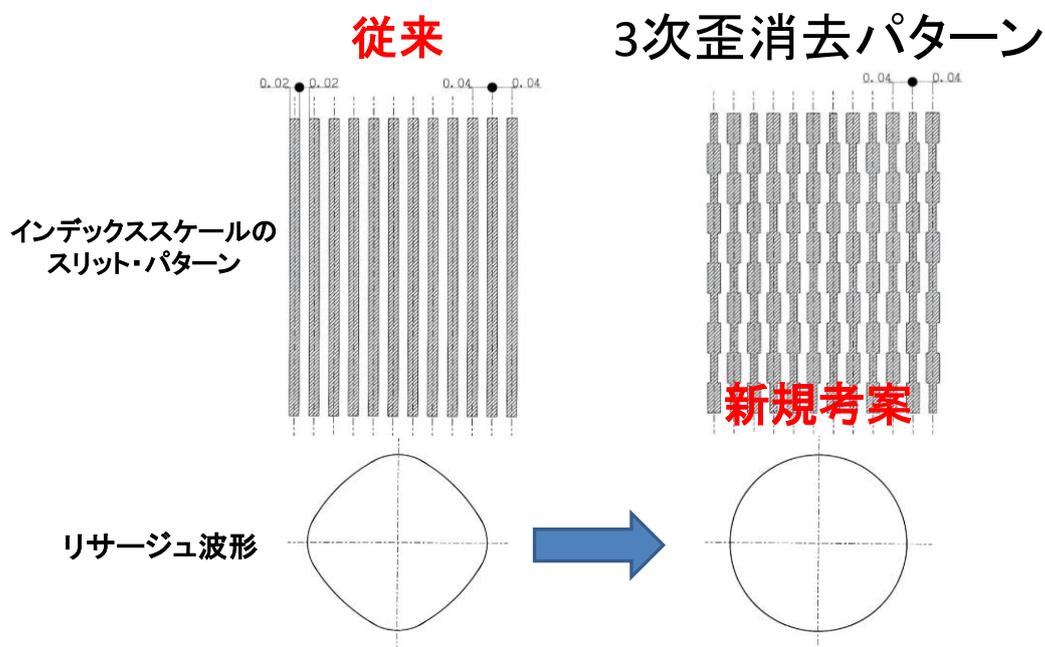


図 2-5.3 : 従来と 3 次高調波消去パターン

2-5-3 光学変位センサの信号

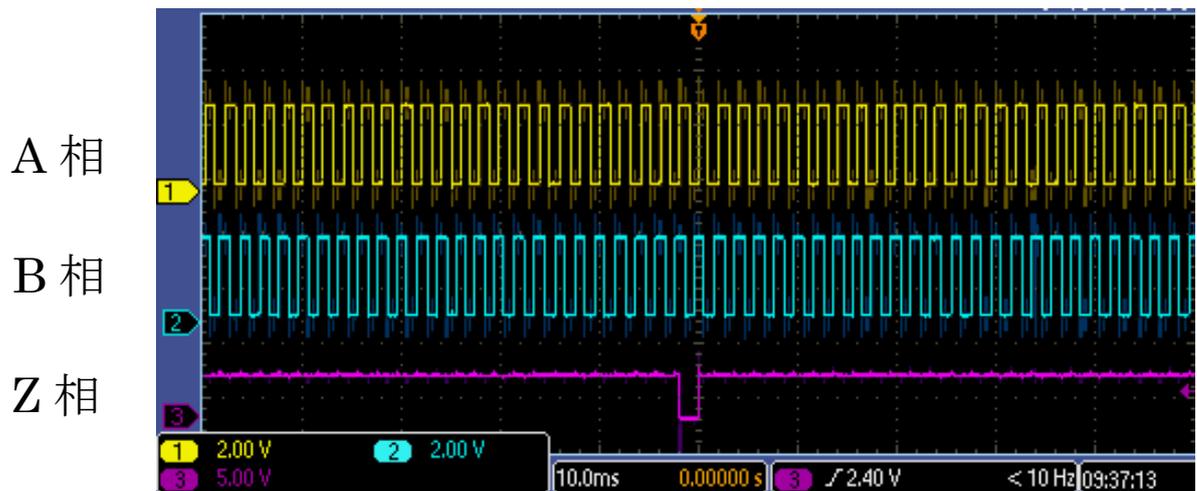


図 2-5.4 : 出力信号

2-5-4 光学変位センサの精度

変位センサ開発において精度の目標仕様を決定していたので、その項目に従って、精度測定を行った結果を表 2-5.1 に示す。測定範囲は 10mm、測定間隔は 40 μm 、繰返し測定回数 5 往復とした。

指示精度は行き方向と帰り方向の 5 往復の最悪値 (P-P) を示す。

繰返精度は 5 往復測定の同一箇所における最悪地 (P-P) の測定箇所 250 点の最も大きな値を示す。

戻り誤差は行き平均指示精度と帰り平均指示精度の同一箇所 250 点における最悪値で示す。

表 2-5.1 : 精度測定結果

	目標仕様	静電容量式 (23 年結果)	光学式
指示精度	FS の $\pm 0.05\%$ ($5 \mu\text{m}$)	$90 \sim 323 \mu\text{m}$	$0.36 \mu\text{m}$
繰返精度	$0.2 \mu\text{m}$	$1 \mu\text{m}$	$0.17 \mu\text{m}$
戻り誤差	(0)	$5 \mu\text{m}$	$0.13 \mu\text{m}$

2-6 ツール測長タッチセンサの開発 (サブテーマ②)

2-6-1 ツール測長タッチセンサへの変位センサの組み込み試作

設計においては小型光学変位センサのためスペースは長手方向の 20mm 伸長はしたが、縦と横は従来のスペース内に入れることができた。

完成品の外観を下図 2-6.1 に示す。

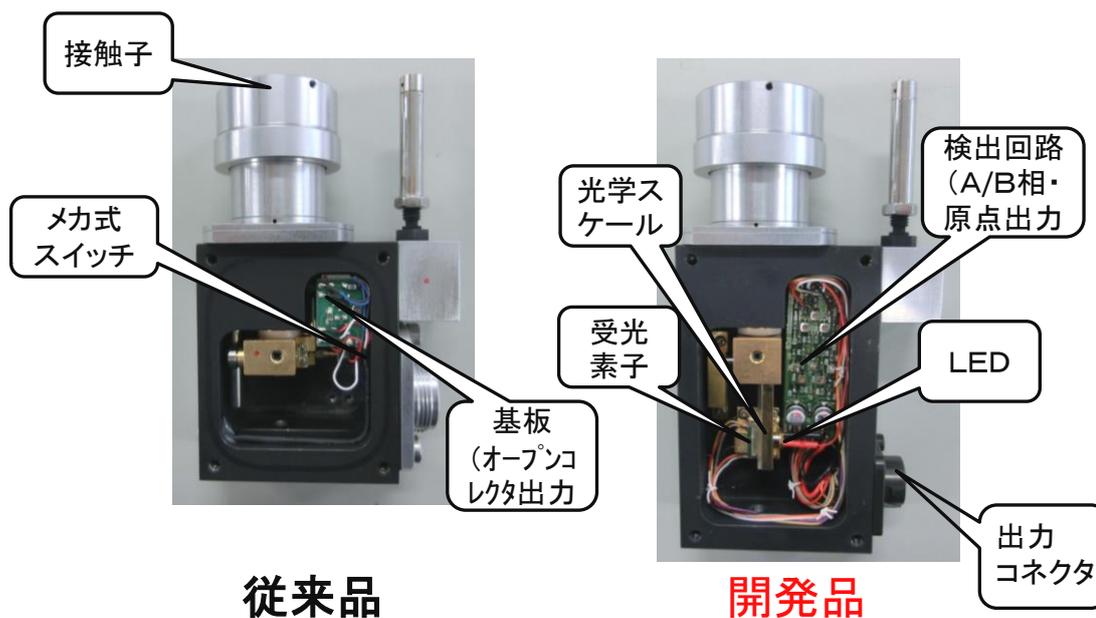


図 2-6.1 : 従来品とデジタル工具長セッタ

2-6-2 デジタル工具長セッタの組み込み評価

手直しも少なくほぼ設計構想通り組立を終了し、課題であった平行度も出た。

2-6-3 精度測定結果

測定結果を下図 2-6.2~2-6.5 に示す。全て目標仕様を満足した。

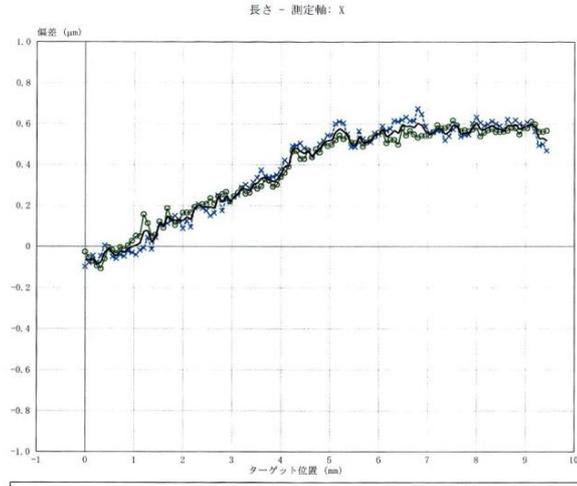


図 2-6.2 : 指示精度 $0.69 \mu\text{m}$ 、戻り誤差 $0.01 \mu\text{m}$

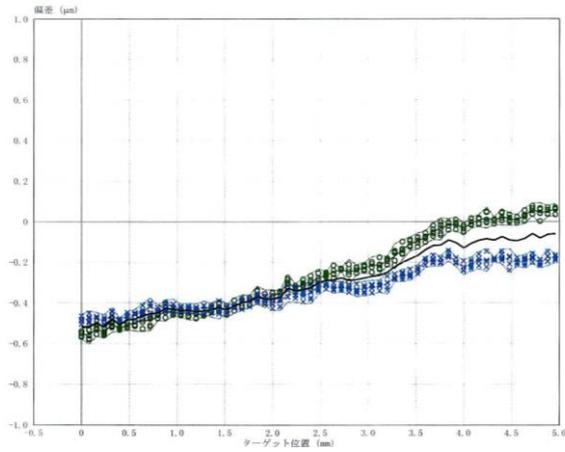


図 2-6.3 : 繰返精度 $0.13 \mu\text{m}$ (5 往復)

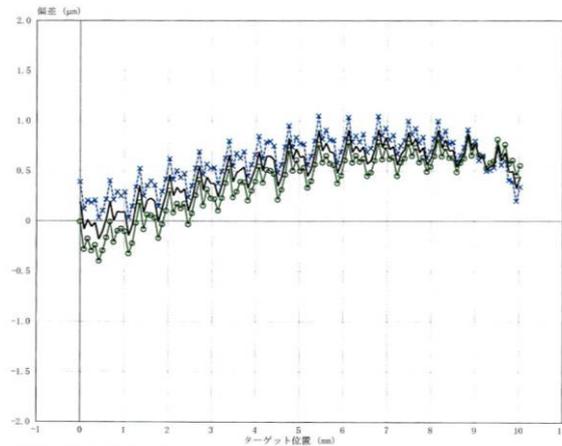


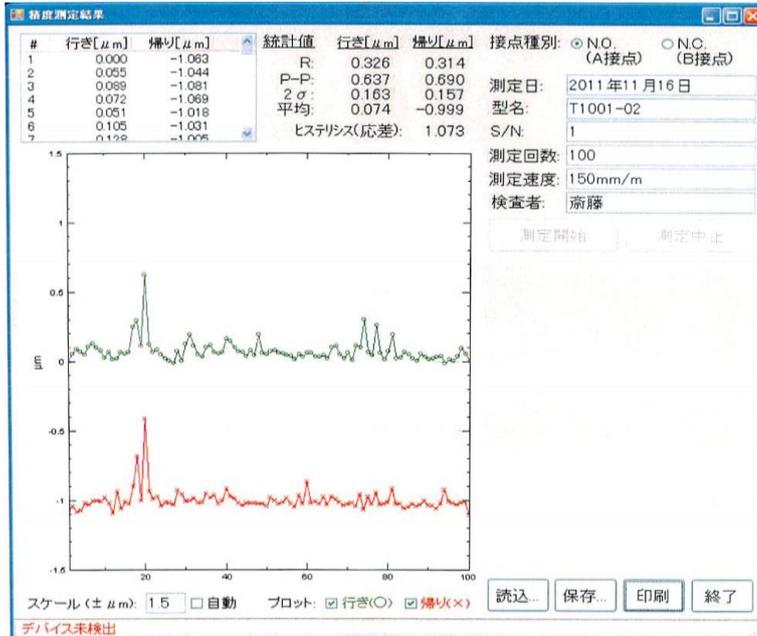
図 2-6.4 : 内挿誤差 $0.48 \mu\text{m}$

2-6-4 定点の繰返精度測定結果

従来の工具長セッタは測定子を約 0.5mm 押し込んだ地点で定点信号が出力された。本開発品も従来同様に定点精度の測定を行った。

測定は 100 回の繰返測定し、その値の最大値と最小値を繰返精度とした。

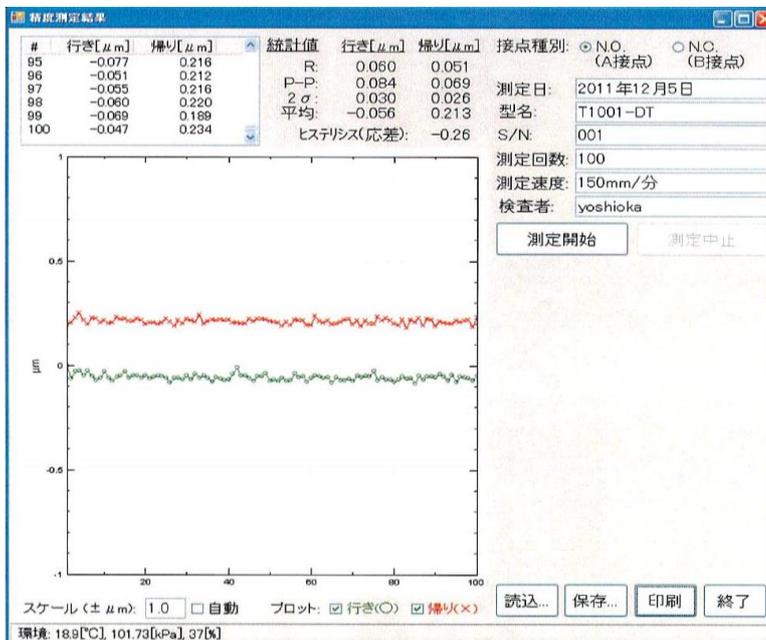
緑のプロットは行き方向、赤は戻り方向である。その差をヒステリシスと呼ぶ。



繰返精度

0.64 μm

図 2-6.5 : 従来品の繰返精度



繰返精度

0.08 μm

図 2-6.6 : 開発品の繰返精度

結果：従来品より繰返精度とヒステリシス差とも良い結果が得られた。

2-6-5 デジタル工具長セッタの特長

従来品との比較をしてその差異を表 2-6.1 に示す。

表 2-6.1：従来品との比較

項目	従来品	開発品
位置信号	定点信号	デジタル位置信号
測定点	1 点	0~10mm
構造上のアッベ誤差	有	なし
精度寿命	300 万回	半永久的
分解能	—	0.1 μ m
定点繰返精度	1.0 μ m 以下	0.1 μ m 以下
指示精度	—	1 μ m 以下
ヒステリシス差	—	0.3 μ m 以下
アラーム信号	オーバーtravel信号	オーバーtravel信号
最大応答速度	—	1 2 0 m/分
定点信号位置	固定	任意設定
位置状態クラス判別	なし	5 クラス判別と信号出力 (HH、H、GO、L、LL)
オーバーtravel信号	固定	任意設定
動作形態 (NC, NO 設定)	固定	任意設定
従来機との出力信号 互換性	—	あり

2-7 タッチセンサ用表示装置の開発（サブテーマ④）

2-7-1 表示装置の概要と仕様

本表示装置はタッチセンサ（デジタル工具長セッタ）用として開発したが、若干仕様を変えてサブテーマ⑤ゲージの表示器として使用できるよう仕様を決定した。この表示装置は従来機種とも出力互換性を保ち、融通性のある表示装置をめざした。ただし、金型を起こすことができないため、既製品の筐体を使用して試作した。基板設計は小型化のために基本ワンチップ化を念頭に設計された。

表示装置の仕様

表示	6桁符号付き LED, モード表示付
表示分解能	0.0005mm、0.00001mm 切り替え可
カウント方向	切り替え可
最大応答速度	1MHz以上（A相またはB相の一周期で） 最大計測速度：120m/分
原点検出	電源投入後1回のみ原点検出、又は原点通過時毎回検出の切り替え。
リセット機能	リセットキー及び外部入力信号(接点入力)
プリセット機能	キー入力による。(カウンタのみ)
アラーム機能	最大応答速度超過、センサケーブル断線時に表示および出力。
コンパレータ機能	任意設定値（4点）HH, H, GO, L, LLに対し、判定出力する。
外部出力（5点）	下記の出力をオープンコレクタ出力 ①High, GO(合格), Lowの3段階判定出力(遅れ時間 2ms以下) ②ゼロ点出力(カウンタ、表示0の位置)(遅れ時間 0.3ms以下) ③アラーム出力(速度超過、断線、HH、LL、のOR出力) (遅れ時間 2ms以下)
外部入力（2点）	①リセット入力②タイミング入力
ホールド機能	①最大値、最小値②P-P値③判定値
データ保存機能	分解能、カウント方向、コンパレータ設定値、プリセット値、各パラメータ。モード。
電源	DC10-30V

2-7-2 表示装置の回路設計

カウンタ IC (PCC150-A) を採用することにより CPU (R5F2132DC) のソフト上の負荷を軽減し、仕様上の機能アップが計れる設計とした。

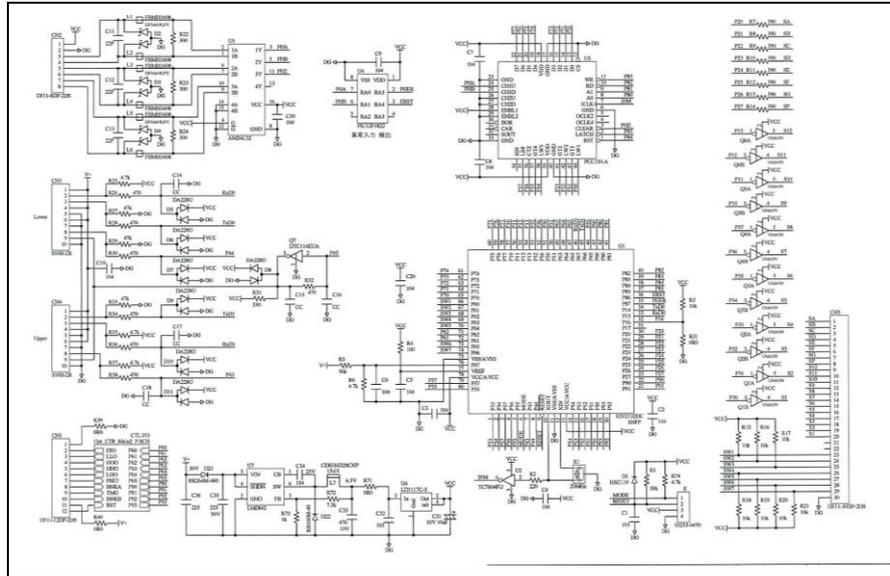


図 2-7.1 : 回路図

2-7-3 表示装置の外観

試作品の外観を図 7-3 に示す。



図 2-7.2 : 表示装置

2-7-4 表示装置の評価結果

- ① 測定速度に対する定点繰返精度と遅れ量を測定した結果、ソフトウェア処理で仕様は満足していたが、測定点の通過速度を上げると遅れが観測された。そこで、ハードウェアで処理できるように改良した結果、遅れ量が測定速度に比例しなくなり、繰返精度も向上した。
- ②操作性に問題はないが、数値設定の入力方法には若干の検討が必要である。
- ③ソフトの完成度に関しては、2-7-1 に示す仕様を全て実現できた。

2-8 ゲージの開発（サブテーマ⑤）

2-8-1 ゲージの設計試作

測定デバイスはサブテーマ①で開発した光学変位センサを組み込み、表示装置にはサブテーマ④で開発した回路を流用してソフト対応する。

このセンサは冒頭に述べた研究目的及び目標製品の応用商品の一つであり市場で一番需要のある製品でもある。そのために、構造を簡単にし、部品を安価に設計する必要があり、高い信頼性が求められる。また、コンペティタに対し機能性は同等以上とし、小型化で差別化を図る。

その趣旨に沿って今回設計構想をした。その図を図 2-8.1 に示す。

組立したゲージ内部構造写真を図 2-8.2 に示す。

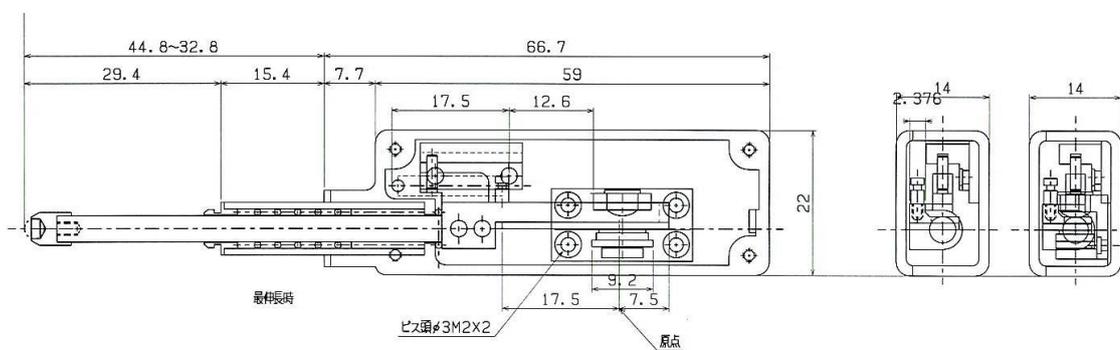


図 2-8.1 : ゲージの設計構想図

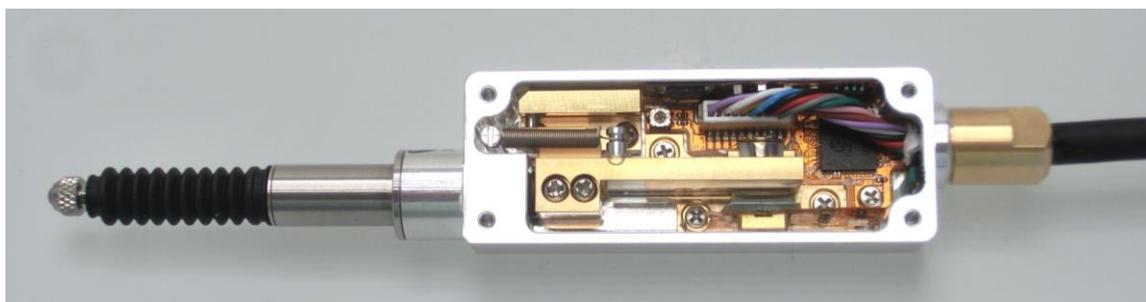


図 2-8.2 : ゲージ内部構造

2-8-2 設計の特長

- ① 表示器と組み合わせ、測定値の良否判別ができる
- ② 小型構造のため多点取り付けが可能
- ③ 分解能 $0.1\mu\text{m}$ 指示精度 $1\mu\text{m}$ と高精度測定が可能
- ④ リニアベアリングを使用しているため 2000 万回の長寿命
- ⑤ 取り付け部 $\phi 8$ のため他社製品との取付互換性あり

第3章 全体統括

3-1 技術開発成果

(1) 小型静電容量式変位センサの開発（サブテーマ①）

安価な PsoC（特殊 IC）を利用してすべての仕様を満足させる予定であったが、分解能 $1\mu\text{m}$ も達成できず、また応答時間の遅延が3桁（700倍）も遅くなることが判明し、サブテーマ②とサブテーマ③とサブテーマ⑤に使用できない事が判明した。それに加え指示精度の直線性も研究の結果達成できないことが確認でき、研究開発推進委員会での検討の結果、PsoCでの研究開発は中止と決定した。

そこで、高速化の実現のための検討も合わせて行い、高速化についてはFPGAにより可能となったが、取り込み数値の安定性が悪く、改善検討をしてきたが未だ解決に至っていない。

以上を総括し新たに、別の検出原理（東京大学考案の差動容量トランス方式）とFPGAを組み合わせた回路を試作して応答時間の改善と精度改善を図った結果、ほぼ全域での誤差は減少し、ほぼ実用精度仕様内に入っている。ただし、回路が大型の為サブテーマ②等には組込ができない。

小型静電容量式変位センサの開発は、実用化困難な非常に難しい研究課題であったので、本研究の基本目的達成のため、静電容量式変位センサに固守せず、本来の目的であったデジタル表示式工具長セッタの開発のために、静電容量から他の手段として光学スケールの開発も並行して行うこととした。全くの未知の開発で通常2~3年かかる開発であったが、初期目標精度仕様を約半年間で達成した。この光学スケールの開発により特許出願もでき、サブテーマ②、サブテーマ④、サブテーマ⑤に移行できた。

(2) ツール測長タッチセンサの開発（サブテーマ②）

今回開発した小型光学スケールを既存の工具長セッタに組み込み、サブテーマ④で開発した表示装置と接続し表示させることができた。分解能は $0.1\mu\text{m}$ 、指示精度 $1\mu\text{m}$ 以下、ヒステリシス差 $0.3\mu\text{m}$ 以下が実現できた。分解能 $0.5\mu\text{m}$ の場合の応答速度は $120\text{m}/\text{分}$ となった。表示器との組み合わせで5クラス判別信号（LL, L, G0, H, HH）と従来品との互換性のある定点出力も出せるようになった。また、精度寿命もセンサ構造が非接触検出の為半永久的に保証できるシステムが構築できた。

(3) バイト測長タッチセンサの開発 (サブテーマ③)

構造機能がサブテーマ⑤に同等のため⑤に統合する
(サブテーマ⑤参照の事)

(4) タッチセンサ用表示装置の開発 (サブテーマ④)

光学スケールデバイスのため前年度の表示器が使用できず、新たに表示器を開発した。

この表示装置は従来の機種とも出力互換性を保ち、融通性のある表示装置をめざした。ただし、金型を起こすことができないため、既製品の筐体を使用して試作した。基板設計は小型化のために基本ワンチップ化を念頭に設計された。仕様はリセット、プリセット入力はもちろん、-NG、OK、+NG等の判定出力機能も付加し完成させた。

(5) ゲージの開発 (サブテーマ⑤)

ゲージは23年度に設計構想を終え、24年度に試作検討を行った。形状の小型化の為に部品点数を極力少なくし小型基板回路を実現できた。また、構造部品も最小限にしたため、この形態のゲージでは業界最小のものができたと考えられる。

精度はツールタッチセンサ同様、分解能は $0.5\mu\text{m}$ と $0.1\mu\text{m}$ 切り替えでき指示精度 $1\mu\text{m}$ 以下、ヒステリシス差 $0.3\mu\text{m}$ 以下が実現できた。分解能 $0.5\mu\text{m}$ の場合の応答速度は $120\text{m}/\text{分}$ と高精度なゲージが試作で来た。

(6) 静電容量式変位センサ理論の検証 (サブテーマ⑥)

東京大学にて行われた。

センサを構成する可動子電極と固定子電極は互いに同軸であることを前提としている。しかしながら動作中に同軸状態から逸脱してしまうことが懸念されるため、当該時の発生誤差についてシミュレーションによる予測を行った。

本センサで応用するキャパシタは、電磁気学に基づく理論公式で前提とされる微小ギャップを満たさないことから、理論公式ではなく有限要素法による数値解析によって検討を行なった。

結果、本センサは上下に二つの測定電極を設置し測定を行うため、差動方式を用いることによって可動子ズレによる静電容量変化の影響は相殺できる可能性がある。しかしながら、同軸状態にある可動子が同軸からずれるだけでなく、傾いてしまうことも懸念される。傾きの発生が上下測定電極の中心で起きた場合には同様に差動方式によって相殺され得るが、それ以外の場所で傾きが発生した場合には、測定結果に影響を及ぼすことが懸念される。

3-2 事業化展開

3-2-1 実用化のための進捗状況

- 1) 小型静電容量式変位センサの開発は精度・安定性など目標精度に未達成の部分もあるが、ほぼ実用領域に達した。今後は小型化のために、新検出方式と FPGA を用い小型形状のセンサの 26 年度の実現用化をめざす。
- 2) ツール測長タッチセンサの開発は終了したので、アドバイザーの意見や市場動向を見極め、25 年度最終商品の形態を探る。
- 3) タッチセンサ用表示器も小型回路が試作でき、ソフトも高機能にすることができたので、実用化の為には今後小型形状の筐体に収める設計を行い 25 年度事業化を図る。
- 4) ゲージ自体の試作は順調にでき精度等の確認も行えた。しかし、生産性、コストを考えた場合は、構造設計から見直しが必要である。今後事業化においては、金型設計や生産治具の準備、梱包設計、取扱説明書の作成、パンフレットの作成等の諸業務が山積している。事業化目標は 25 年度発売を予定している。

3-2-3 今後の事業化計画

ものづくりの基盤産業である、金型、工作機械、半導体、自動車などの精密加工への波及により、経済界全体へ効果を及ぼすものと考えられる。

最近のミクロンレベルの加工に代表される高精度化の要求に対し、0.1 μm の分解能の工具長セッタの試作に成功した。測長機能を備えたことから、従来なしえなかった刃物工具の磨耗状態を直接把握できるようになり、切削加工のトータル的な高速度化、効率化を図り、機械加工分野に貢献できる。

本研究の目的はサブテーマ②のツール測長タッチセンサの開発とサブテーマ④のタッチセンサ用表示装置の開発、⑤ゲージの開発であり、計測の手段としてサブテーマ①の静電容量式センサの開発を行ってきた。中間ヒアリングで評価委員からアドバイスを受けたように、サブテーマ①の実現が困難な状況にあるため、他方式（光学スケール）での開発による計測手段により、25 年度は事業化へ移行の予定です。

しかしながら、静電容量式変位センサには、アブソリュートで位置検出が出来るという利点があるため、断念することなく新原理による検出方式と近年の FPGA の採用により、精度改善と高速応答及び低コスト化の実現に向け合わせて開発を進めて行きます。

3-3 おわりに

管理機関の株式会社メトロールの松橋卓司社長のもと研究開発を進めてきた。副統括研究代表の国立大学法人東京大学の樋口教授及び再委託先の㈱青電舎の権藤社長 ㈱パターンアート研究所の八重樫社長には、多大な開発協力をいただくとともに貴重なアドバイスをいただき、厚く御礼申し上げます。