

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)	財団法人富山県新世紀産業機構 (石井 隆一)	所在地	〒930-0866 富山市高田 5 2 9 (Tel: 076-444-5607)		
技術分野	ロボット部品分野	技術区分	センサ関連技術	研究開発課題	小型・軽量化技術、高精度化技術
テーマ名	ロボット用 6 軸運動センサに関する研究開発		研究開発期間	平成 16 年 4 月 1 日から 平成 17 年 2 月 28 日	

1. 委託業務の概要

従来、加速度センサと角速度センサは別々に商品化され、両センサとも 1 軸のものが大半を占めている。元来、加速度、角速度とも力と同様ベクトル量であり、従来の 1 軸加速度センサでは正確に測定するためには 3 個必要であり、それぞれ直交する方向に配置する必要があったため、3 軸センサと比べ 3 倍のコストを要している。また、物体の動きを正確に捉えるためには、3 軸加速度と 3 軸角速度を同時に検出する 6 軸運動センサが不可欠といえる。しかしながら、6 軸運動センサは、株式会社ワコーが所有する特許で保護されている商品であり他には存在しない。ロボットの動作や姿勢を制御するのに適した加速度及び角速度を同時に検出することができる運動量センサを開発するため、マイクロマシニング技術により検出素子部の小型化及び信号処理回路部の IC 化による小型化を行い、検出部と同一のパッケージ内に納め、劇的な小型軽量化を行う。また、IC チップ内に出力補正用データを記録した EEPROM を内蔵して高精度化を図る。更に、センサ単体で高精度化できない他軸感度や直線性について MPU による演算処理で補正し更なる高精度化を行う。また、ロボット内の環境(温度、振動、ノイズ)に対応するため、MPU とセンサパッケージを筐体内に納め、センサ出力をデジタル出力するユニットタイプを作成する。

2. 技術目標値

1) 検出範囲	加速度	±2G、	角速度	±180deg/sec	
2) 感度	加速度	0.5V/G、	角速度	5mV/deg/sec	
3) 分解能	加速度	500 μV、	角速度	0.3deg/sec	
4) 応答周波数	加速度	DC ~ 70 Hz、	角速度	DC ~ 20Hz	
5) 他軸感度	パッケージタイプ :	加速度	±8%、	角速度	±8%
	ユニットタイプ :	加速度	±3%、	角速度	±3%
6) 直線性	パッケージタイプ :	加速度	±3%、	角速度	±3%
	ユニットタイプ :	加速度	±1%、	角速度	±1%
7) 共振周波数	角速度	2KHz			

3. 目標値を達成するための解決策と具体的方法

1) 検出素子部の開発

(課題)

平成 15 年度の開発の結果、6 軸運動センサの基本的性能を決めるのは検出素子部であり、特に「検出感度」と「安定性」が課題であることが分かった。「検出感度」と「安定性」は信号処理回路部を IC 化する上でも重要である。

平成 15 年度は、ガラス基板接合不良によるリークが原因で良好な共振特性が得られなかった。今年度はこの問題を解決し、共振特性を得ることを目的とした。

(解決策と具体的方法)

MEMS の製造上の要素技術を再検討し最適条件を見出す予定である。具体的には検出素子部を構成する部材関係の改良、設計の見直し、プロセスの改善を行う。

センサ内部のリークによる真空度の悪化を抑えるために、ガラスとシリコンの陽極接合条件を検討した。ガラスとシリコンの熱膨張係数の違いによるソリの発生を抑えるために、サンプルの剛性を低下させないプロセスの構築および接合条件を見いだした。

2) 信号処理回路部の開発

(課題)

信号処理回路での環境ノイズへの対応を確実に行う必要があるとともに、信号処理回路 IC 化検討のため、各回路ブロックの仕様の確定と特性改善を速やかに行う必要がある。

(解決策と具体的方法)

検出素子と信号処理回路の整合性を採り易くするため、検出素子開発の方では、シミュレーションにより、センサ出力レベルや共振周波数の予測を行う。信号処理回路設計は、シミュレーションによる予測値を踏まえてある程度自由度のある回路設計と検討用基板試作を行い、実際に検出素子が出来上がった時点でのセンサ出力の各性能試験を速やかに行えるようにする。信号処理回路部の IC 化のためのプロセスはマスク図の作成に留める。

3) パッケージタイプセンサの開発

パッケージタイプセンサは検出素子部(MEMS)と信号処理回路部から構成され、それぞれの課題と解決方法について述べる。

a. 検出素子部

(課題)

平成 16 年度の課題は、平成 15 年度に開発した検出素子をより高感度で安定的なものにすることである。本研究開発で開発する 6 軸運動センサは、中央に形成された振動子が 4 本の梁にて支持された構造となっており、加速度、角速度は、振動子とそれに対向するガラスに形成された電極との距離の変化によって検出される。その振動子とガラスとの距離が微小であり、角速度検出感度の向上のためには、振動子を Q 値(共振ピークにおける振幅増幅率)が最大となる真空内部に納める必要がある。また、有限要素法(FEM 解析)による設計値に従った検出素子を作製し、共振周波数を一致させることが重要である。

さらに特性の安定化には、検出素子に働く応力を取り除く必要がある。

(解決策と具体的方法)

- ・平成 15 年度では本検出素子において Q 値が最大となる真空度を十分に把握できなかった。平成 16 年度ではまず検出素子の真空度と Q 値の関係を実測し、Q 値が最大となる真空度以上で陽極接合を行う。
- ・実際に作製した検出素子の寸法を実測し、設計値寸法とのズレが無いかを確認する。
- ・平成 15 年度に作製した検出素子は錘を支える梁の部分にいくつかの膜が堆積しており、それらの膜と Si との熱膨張係数の違いが振動子の動きに影響を与えるものと考えられる。そこで、作製工程の順序とマスクのパターンを一部変更した。

b . 信号処理回路部

(課題)

加速度 3 軸成分及び角速度 3 軸成分の合計 6 軸成分の感度、零点出力、温度特性を如何に正確に補正するかが重要な課題である。

(解決策と具体的方法)

セラミックパッケージに収められた検出素子部からの容量信号を電圧に変換 (C / V 変換) し、検出素子部の性能を正確に測定する。その測定結果に基づき、感度は倍率、零点出力はオフセット電圧、温度特性は温度をパラメータとした特性などの補正データを作る。その補正データを EEPROM に書き込み、センサからの出力と EEPROM からの信号を演算処理して出力する。この出力値は、6 軸全てが補正されたアナログデータとなる。

4) ユニットタイプセンサの開発

(課題)

平成 15 年度のユニットタイプセンサの開発において、電子回路の設計が終了し、ソフト開発に於いてデータ処理のモジュール分割、各モジュールのフローチャート及び実行タイミングの検討を行った。平成 16 年度初頭に電子回路を作成し、各種補正・演算処理・通信のためのソフトウェアを開発し、ユニットタイプセンサの早期完成を目指す。

技術的課題としては仕様に挙げた分解能を保証するために、信号処理回路の構成、A/D コンバータのビット数、変換方式及びデジタル出力を得るためのデータ演算処理について検討する必要がある。

(解決策と具体的方法)

信号処理回路部分では、特にノイズを留意した設計を行う。A/D コンバータのビット数については、MPU による演算処理によってビット数を抑えて実質的に高ビット数のデータが得られるかを検討する。また、データ演算処理では、他軸感度補正演算、直線性補正演算等の演算途中での桁落ちに留意し、しかも演算時間の小さいプログラムを作成する。

5) パッケージタイプセンサの性能評価

(課題) 取得データが、温度ドリフトで安定しない。

(解決方法) 温度特性評価を行い、EEPROM に補正データを投入する。

6) ユニットタイプセンサの性能評価

(課題) 取得データが、温度ドリフトで安定しない。

(解決方法) 基本特性及び温度特性を行い、データ演算処理にて、他軸感度補正、直線性補正等を行う。

7) 実機組込評価

- a) 周波数応答試験装置へのシリアルインターフェース部追加改造
- b) ユニットタイプセンサの周波数応答試験装置による評価
- c) ユニットタイプセンサの実機評価装置(ロボット本体)における評価
- d) ユニットタイプセンサの耐環境性能の評価
をそれぞれ実施し、評価の結果をセンサ開発にフィードバックした。
- e) ~i)パッケージタイプセンサの評価

4. 当該年度における技術目標値の達成状況と意義

技術目標値の達成状況の一覧表を以下に示す。

16年度技術目標及び実績			達成状況と意義
技術目標内容(項目)	目標値	実績値	
検出範囲 加速度 [G] 角速度 [deg/sec]	±2 ±180	±2G ±210	H16年度の目標値を達成した。 H16年度の目標値を達成した。
感度 加速度 [V/G] 角速度 [mV/deg/sec]	0.5 5	0.501 ~ 0.504 5.009 ~ 5.024	H16年度の目標値を達成した。 H16年度の目標値を達成した。
分解能 加速度 [μV] 角速度 [deg/sec]	500 0.3	500 0.3	H16年度の目標値を達成した。 H16年度の目標値を達成した。
応答周波数 加速度 [Hz] 角速度 [Hz]	DC ~ 70Hz DC ~ 20Hz	DC ~ 70Hz DC ~ 20Hz	H16年度の目標値を達成した。 H16年度の目標値を達成した。
他軸感度 パッケージタイプ 加速度 [%] 角速度 [%] ユニットタイプ 加速度 [%] 角速度 [%]	±8% ±8% ±3% ±3%	-2.36 ~ +1.76 4.07 ~ +4.93 -0.23 ~ +0.29 -0.07 ~ +0.27	H17年度の目標値を達成した。 H16年度の目標値を達成した。 H17年度の目標値を達成した。 H17年度の目標値を達成した。

直線性			
パッケージタイプ			
加速度 [%]	± 3%	-1.20 ~ +1.25	H16 年度の目標値を達成した。
角速度 [%]	± 3%	-1.57 ~ +0.65	H16 年度の目標値を達成した。
ユニットタイプ			
加速度 [%]	± 1%	-0.41 ~ +0.80	H16 年度の目標値を達成した。
角速度 [%]	± 1%	-1.21 ~ +0.50	H16 年度の目標値を達成した。
共振周波数 [Hz]	2000	842 ~ 3029	H16 年度の目標値を達成した。

1) 検出素子部

3軸角速度を検出するためには、重錘の共振による円運動が不可欠である。昨年度までは、素子内部の真空封止不良により3軸加速度は確認できたものの、角速度の検出は加速度に比べ難しかった。今年度において共振が確認されたことは、角速度検出の条件を満たしたということであり、また目標値としている共振周波数(2KHz)を達成したことは、今後実用化に向けた共振周波数(4KHz)の目標達成に向けて大きな意義がある。本年度の結果は、3層構造という難易度の高い構造を、陽極接合条件などを最適化することで実現されたものであり、今後、同じような構造を持つ新しいアイテムへの展開が可能になることも期待できる。

また、予め真空漏れした検出素子を用いて真空度とQ値の関係について調査した結果、所定の真空度で共振ピークが飽和することが分かった。新マスクを用いて検出素子部を作製した結果、900Hz~3000Hzの共振ピークが得られた。評価基板ボードの変換レートを確認して、加速度特性及び角速度特性を評価した結果、以下の特性が得られた。

<加速度特性> Ax : 67fF/G、Ay : 67fF/G、Az : 89fF/G

<角速度特性> x : 15.2aF/deg/sec、 y : 12.5aF/deg/sec、 z : 10.6aF/deg/sec

以上の結果、3軸の加速度と3軸の角速度の出力結果が得られ、6軸の運動センサとしての特性を確認することができた。

一方、最初の試作に於いて目標共振周波数(2kHz)に対して実際の共振周波数は予想より低い値となった。この原因について、実際に作製した検出素子部のSEM像を観察して調査した結果、錘形成の際のオーバーエッチングによりビーム長さが50μm長くなっている事が分かった。また、ビーム厚みは設計値が10μmに対して実際のビーム厚みは9μmであることが分かった。尚、ビーム長の増大及びビーム厚の減少により共振周波数が大幅に減少することはFEM解析によって確認した。

2) 信号処理回路部の開発

6軸運動センサの信号処理回路のノイズ及びドリフトを軽減する回路改善と、素子部の共振周波数のドリフトに対応できる自励振回路を設計した。

また、検出素子部の初期特性を測定するための回路基板である検出素子部評価用基板を製作し、共振周波数測定及び加速度測定について、本基板にて設計通り測定できることを確認した。

3) パッケージタイプセンサの開発

検出素子に合わせ定数変更を行い試作を行った。また、温度によるオフセット補正データをEEPROMに書込み、出力補正を行った。その結果、ドリフトが小さく安定した特性のパッケージタイプセンサを試作することができた。

4) ユニットタイプセンサの開発

信号処理回路を検出素子に合わせ定数変更を行い試作を行った。また、CPU による演算処理によって温度補正および主軸 / 他軸感度補正を行った。その結果、信号処理回路部の改善をユニットタイプセンサに反映したことで、CPU を用いて主軸 / 他軸感度補正および温度補正を行うことで、パッケージタイプセンサより更にドリフトが小さく、他軸感度の小さい特性のユニットタイプセンサを試作することができた。

5) パッケージタイプセンサの性能評価

パッケージセンサの出力に関して、主軸 / 他軸感度、直線性についてはほぼ目標の特性が得られた。加速度、角速度ともノイズおよび温度ドリフトの改善が必要である。

6) ユニットタイプセンサの性能評価

加速度および角速度の基本特性および温度特性を得た。主軸 / 他軸感度、直線性については目標の特性が得られた。ロボット制御に問題ない出力特性が得られた。

7) 実機組込評価

a)~d) ユニットタイプセンサ : 「a) 周波数応答試験装置へのシリアルインターフェース部追加改造」を行った後、「b) パッケージタイプセンサ、ユニットタイプセンサの周波数応答試験装置による評価」の項目を実施した。その結果、加速度・角速度線形誤差については、今年度目標値 $\pm 1\%$ 以内をほぼ達成できていた。加速度分解能についても今年度目標値 $500 \mu V$ 以下を達成できていた。角速度周波数特性については Gain の定義にもよるが、今年度目標値 20Hz を若干下回った。

次に「c) パッケージタイプセンサ、ユニットタイプセンサの実機評価装置 (ロボット本体) における評価」を実施した。加速度についてはセンサに内蔵するローパスフィルタの影響で、既存センサ出力波形に比較して、波形がなまっておき位相の遅れを示すこともあった。しかしロボットの制御上では、加速度はゆっくりとした姿勢の変化に追従できるだけの応答特性をもっていればよく、この位相遅れは充分許容できる範囲であるといえる。角速度については、既存センサ出力波形とよく重なっており、歩行動作中 (約 10 分) のドリフトも気にならないレベルであることから、実用的なレベルに近づいているといえる。

最後に「d) パッケージタイプセンサ、ユニットタイプセンサの耐環境性能の評価」を実施した。加速度と角速度共に、許容できるレベルであるといえる。しかし、角速度を停止時も含めた長時間にわたる姿勢角の計算に用いるためには、1/4 程度に改善されることが望ましい。ノイズレベルについては許容できるレベルであった。

e) ~i) パッケージタイプセンサ : 現在開発中の人型 2 足歩行型ロボットに搭載し、実機組込み評価を実施したところ、走行時においてノイズが観察された。そのため、FFT を用いてノイズを除去して、人型 2 足歩行型ロボットの走行時のセンサ出力を評価した。また、本センサの基本性能についても評価した。その結果、加速度センサ及び角速度センサの感度は目標値を満足し、分解能、直線性も共に、目標仕様を満足していることが分かった。

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

現在、静電容量検出方式のセンサを開発しているが、圧電型、ピエゾ抵抗型、サーフェスマイクロマシニング技術など他の方式で安価なセンサが登場してくる可能性が想定される。構造及び検出方法に関係なく原理特許を有するため、第三者の参入は考えにくい。しかしながら、市場に受け入れてもらうためには、価格が重要である。生産コストを下げる量産体制を構築し、低価格化、小形、高性能なセンサを開発する必要がある。

ロボット分野では、走る、踊る、音楽の演奏を行う等、より人間に近い動作を行うことが可能になってきており、警備ロボット、掃除型ロボット、エンターテイメント型ロボットの姿勢制御用小型センサの市場が拡大している。

民生分野では、デジカメの手ぶれ防止用途が期待され、更に、携帯電話に姿勢センサが搭載され始めており、今後の市場拡大が予想される。