

ロボット用高精度モーションセンシングユニット

High-Precision Motion Sensing Unit for Robots

藤田 孔明
Koumei Fujita

中原 充也
Mitsuya Nakahara

佐藤 祐之
Hiroyuki Satou

寺尾 篤人
Atsuhito Terao

要 旨

産業用ロボットに用いられるセンサユニットには、3次元動作の検出、進行方向や傾斜の検知、広範な温度および振動環境下での使用ができることが求められる。筆者らは、シリコンMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 検出素子を採用した角速度センサと加速度センサに対し、ユニット化による多軸化、高精度な温度特性の補正、姿勢角出力、耐振動性の改善を行った。本稿では、 $-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ の範囲においてZ軸のオフセット誤差角速度 0.1 deg/s 、加速度 0.2 m/s^2 、スイープ振動試験 ($\pm 9.8\text{ m/s}^2$, $10\text{ Hz}\sim 300\text{ Hz}$) においてヨー角変動が 0.2 deg を実現した、広範な温度および振動環境下で使用できる高精度なモーションセンシングユニットについて報告する。

Abstract

There is a pressing need to quickly and efficiently develop highly accurate orientation detection for robots along with functions such as position estimation. The newly developed motion sensing unit improves the temperature characteristics and reliability and also enables highly accurate sensing. The offset error of the Z axis is in the range of -40°C to 85°C , the angular velocity is 0.1 deg/s , and the acceleration is 0.2 m/s^2 . In the vibration test, the yaw angle fluctuation was 0.2 deg .

1. はじめに

1.1 背景

3軸の角速度センサと3方向の加速度センサが物体の姿勢や位置を推定する用途に使用され始めている[1]。一方、製造現場の自動化、省人化の流れや少子高齢化などを背景として、産業用ロボットやサービスロボットなど高精度な制御が求められるロボティクス市場が急成長しており、姿勢検出や位置推定などの機能を効率的に開発する必要性が高まっている。

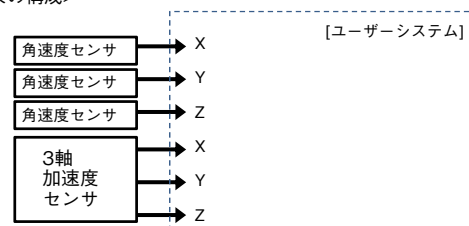
しかし、当社で量産している従来の角速度センサ単体では1軸方向のみしか検知できず、3次元方向の検知を行うには複数のセンサを用いる必要があった。さらに、走行制御や姿勢制御などにおいて、正確な制御を行うにはロボットメーカー側にてセンサ出力値から姿勢角などを算出するソフトウェアを自社開発する必要があった。

このような課題に対し、ユニット内に6軸 (3軸の角速度および3方向の加速度) を検知するセンサを搭載し、姿勢角出力^(注1)までを算出する構成とした。これにより、ユーザーはシステムをより簡易に構成することができる (第1図参照)。

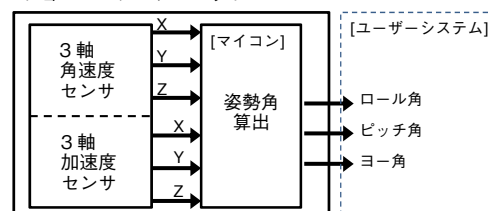
また、搬送ロボットや農業ロボットなどの産業用途での使用には、スマートフォンやデジタルカメラなどの民生用途に比べ広い温度範囲や耐振動性要求が厳しい使用

(注1) 進行方向をXとしたとき、X軸周りの回転角をロール角、Y軸周りの回転角をピッチ角、Z軸周りの回転角をヨー角と定義しており、3つの回転角のことを総称して姿勢角と呼称している。

<従来の構成>



<モーションセンシングユニット>



第1図 ユニット化・姿勢角算出機能によるユーザーシステムの簡易化

Fig. 1 Simplification of user systems through posture angle calculation function

環境で用いられることを想定する必要がある。

本稿では、産業用ロボットに求められる3次元動作の検出と進行方向や傾斜の検知、および広範な温度および振動環境下での使用が可能なセンサユニットを“モーションセンシングユニット”と定義し、その実現に向けたユニット化による多軸化、高精度な温度特性の補正、姿勢角出力、耐振動の取り組みについて報告する。

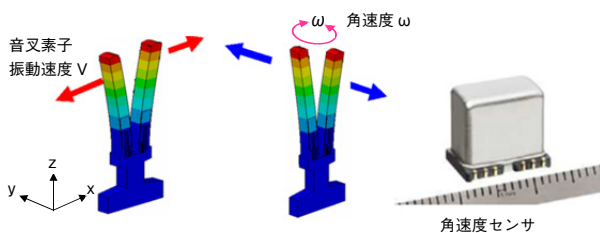
1.2 角速度センサおよび加速度センサの原理

まず、従来用いられている単体の角速度センサについ

て説明する。角速度センサの方式は光学式、回転式、振動式、流体式に分けられるが、普及しているのは光学式と振動式である。光学式は光路が運動したときに光路長が変化するようにみえるサニャック効果を利用したもので、高い検出精度をもち、主に航路維持用途に使用されているが、十分な長さの光路が必要になるため小型化できないという制約がある[2]。振動式は回転座標系の中で移動する物質に加わる慣性力（コリオリ力）が移動方向に対して垂直に発生する現象を利用したもので、光学式に比べ小型化が可能な方式である。

振動式の一例として音叉（おんさ）振動子を用いた角速度センサを第2図に示す。音叉上には圧電体を形成しており、逆圧電効果により駆動力を発生し（第2図（a）参照）、また圧電効果により変位を電荷に変換する構造になっている（第2図（b）参照）[3][4]。

当社では上述の音叉型の振動式角速度センサをカーナビゲーション用途および車両制御用途に現在量産を行っている。外形写真を第2図（c）に示す。



第2図 当社にて量産中の角速度センサ（車載用途）

Fig. 2 Angular velocity sensor in mass production

また、加速度センサは静電型を採用しており、くし歯状の検知固定電極と可動部で構成し、可動部はばね構造で支持している。加速度が印加されると可動部が移動し、検知固定電極との間隔に変化が生じる。この間隔の変化による検知固定電極と可動部間の容量変化を検知することにより加速度を検知する方式である。

センサ構造体の形成にはシリコンウェハを用いており、マイクロマシニング技術を使った高精度加工ならびにウェハプロセスを用いることで大量生産を実現している

が、シリコン特有の大きな熱膨張係数によりオフセットの温度変動に対する補正が必要となっている。加速度センサは集積化による多軸化が進んでいるが、角速度センサにおいては集積化が進んでおらず単軸の製品となっている。

また、車両用途で使用する際に懸念される外乱振動に対応するため、振動絶縁という意味での防振対策を施しており、モーションセンシングユニットに搭載する各センサは、車載の耐振動要求を十分満足する性能である。

2. 開発のねらい

角速度センサおよび加速度センサは民生品から産業用途、航空用途まで幅広い用途で用いられている。

産業用途では使用される環境が多様で、用途ごとに重要となる特性が異なり、 -40°C ～ 85°C の広い温度範囲での精度保証、耐久性などの要求があるが、同等以上の特性が求められる車載対応製品の産業用途への展開は十分可能と考えている。

産業用途で用いる際の要求を分類すると主として下記3つが挙げられる。

- (1) XYZ軸の回転運動とXYZ方向の直進運動の6軸検出：3次元動作が検出できる。
- (2) 姿勢角出力：GPS（Global Positioning System）などが使用できない環境においても進行方向や傾斜を確認できる。
- (3) 耐振動：さまざまな環境下で使用できる。

上述の要求に対し、従来の当社センサのみでは耐振動性・耐熱性は高いが単軸の出力であり、姿勢角の算出はなく、高精度化のためにはシリコン特有の温度変動に対応した追加補正が必要になる。また、スマートフォンなどに用いられている民生用IMU（Inertial Measurement Unit）では、6軸出力の対応があるものの、姿勢角出力、耐振動には対応できていない[5]。そこで、モーションセンシングユニットの開発においては、産業用途における主要求（6軸出力、姿勢角出力、耐振動）に対応するため、ユニット化、高精度な温度特性の補正、姿勢角出力、耐振動対応の取り組みを行った（第1表参照）。

第1表 産業用途の主要求を満たすためのモーションセンシングユニット開発における取り組み

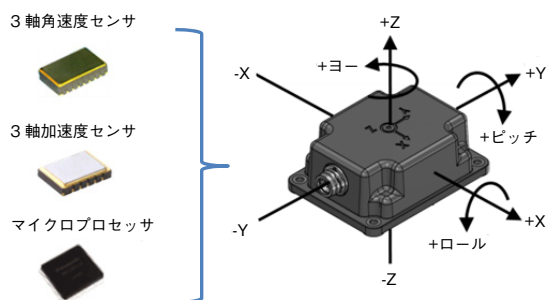
Table 1 Approach to development of motion-sensing unit

産業用途の要求	当社センサ	民生IMU	モーションセンシングユニット	取り組み
6軸	-	○	○	3.1 ユニット化
姿勢角出力	-	-	○	3.2 姿勢角出力 4.1 高精度な温度特性の補正
耐振動対応	○	-	○	4.2 耐振動対応

3. 姿勢角の精度向上

3.1 ユニット化

3次元動作の検知には、X、Y、Zの3軸周りの角速度および3軸方向の加速度の検出が不可欠である。モーションセンシングユニットでは角速度センサと加速度センサを同一ケース（外寸80 mm×60 mm×30 mm）内に搭載している（第3図参照）。



第3図 角速度センサと加速度センサのユニット化により6軸の検出を行うモーションセンシングユニット

Fig. 3 Motion sensing unit that detects 6 axes

角速度センサは高速動作時の精度は高いがドリフト成分をもつため、角度算出時は時間とともに誤差が大きくなる。また加速度センサは低速動作時の精度は高いが振動の影響を受けやすい特徴をもっている。互いに異なる特性をもつ角速度センサ、加速度センサの情報をモーションセンシングユニットに搭載しているマイクロプロセッサ内のカルマンフィルタ（Kalman Filter）にて統合している。カルマンフィルタは誤差のある観測値を用いて、ある動的システムの状態を推定あるいは制御するための無限インパルス応答フィルタの一種である。ノイズを含む角速度センサと加速度センサの情報を用いて、姿勢角の値を推定する際に用いている。ユニット化により、XYZ方向の回転運動と直進運動の6軸の検出を行い、3次元動作をユーザーが把握できるようにしている。

3.2 姿勢角出力

正確な走行制御、姿勢制御にはロボットの姿勢や向きを示す姿勢角を正確に検知し、その姿勢角に応じた動作の調整が必要になる[6]。

〔1〕静止判定による姿勢角の誤差低減

モーションセンシングユニットはカルマンフィルタを搭載しており、姿勢角としてロール角、ピッチ角、ヨー角の算出まで行っている。

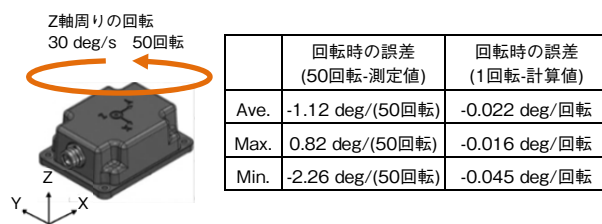
角度算出時において角速度センサ出力にオフセット誤差が生じると、角度に誤差が累積される。この累積誤差

を低減させるためにモーションセンシングユニット動作中の一定期間の加速度出力および角速度出力のセンサ出力値を測定し、このセンサ出力値が閾（しきい）値以下のときには静止状態と判定し、そのときの出力値を新しいオフセット量として採用する機能を設けている。この機能により、動作途中の静止状態ごとにオフセットが自動的に調整され、姿勢角算出時の誤差低減を図ることができる。判定閾値が大きいとオフセット誤差の低減効果が期待できるが、閾値範囲内に含まれる信号成分も増大するため、角度算出時の誤差が大きくなる懸念が生じる。しかし判定閾値がセンサの静止時のノイズ量よりも小さいと、オフセット誤差の排除効果が十分に発揮されない。このため、判定閾値は使用するセンサのノイズ量よりも大きく、信号成分を排除しないよう可能な限り小さなセンサ固有の最適値に閾値を設定している。

〔2〕姿勢角の誤差測定

Z軸周りに角速度30 deg/sを連続50回転（10 min）印加した際のヨー角の誤差を測定した。機構的なストップにて既定される開始位置を0 degとした状態から、Z軸周りの角速度30 deg/sを連続50回転印加する動作を行った後、再度開始位置に戻ったときのモーションセンシングユニットのヨー角の出力誤差を計測した結果を第4図（b）に示す。試験は5回試行し、理想出力0 degに対し最大誤差-2.26 deg/（50回転）となっている。1回転当たりの誤差に換算すると-0.045 deg/回転となる。

今回の試験結果での誤差-0.045 degによる影響は、例えば50 m直進走行時での横方向への変動量として-4 cm相当である。



第4図 連続回転印加時のヨー角変動

Fig. 4 Yaw angle variation during rotation

4. 耐環境性能向上の取り組み

4.1 高精度な温度特性の補正

姿勢角検出において、センサのオフセット誤差や感度誤差はそのまま姿勢角の推定値への誤差となる。角速度センサのドリフトの一因はセンサ内部の温度変動であり、正確な温度補正を行うことでドリフトによるオフセット誤差を低減できる。筆者らは、角速度オフセット誤差お

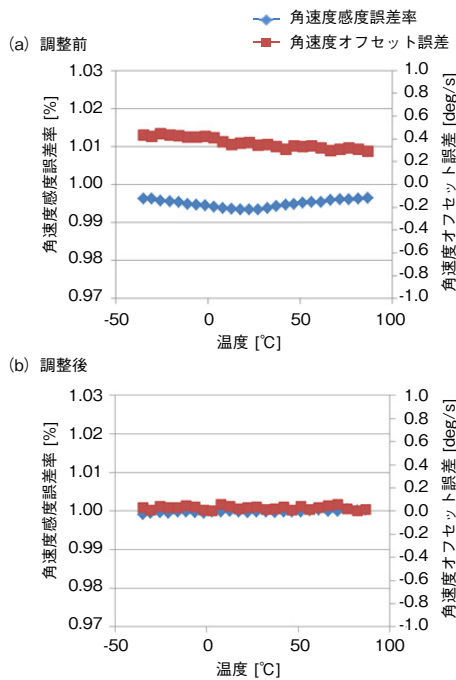
よびゲイン誤差の目標値をヨー算出時の許容誤差（±3 deg以下）からそれぞれ±0.1 deg/s以下および±0.5 %以下とし、加速度オフセット誤差およびゲイン誤差の目標値をロール角／ピッチ角算出時の許容誤差（±1.5 deg以下）からそれぞれ±0.2 m/s²および±0.5 %以下と設定して開発を行った。

条件は、-40℃から85℃まで5℃刻み（26箇所）とし、1箇所の測定は12条件（各軸±9.8 m/s²、±100 deg/sにて調整）を行い、3軸角速度、3軸加速度のオフセット、ゲイン誤差について補正している。各温度における補正値は5℃ごとの測定値に対してセンサより出力される温度情報を用いて一次線形補間を行い、約0.1℃の変化に追従している。現在の温度での補正値は(1)式を用いて算出している。

$$\begin{aligned} \text{(補正後出力)} &= \text{(補正前入力)} \times \text{(ゲイン補正値)} \\ &+ \text{オフセット補正値} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

オフセット補正値分解能としては、加速度は0.00074 m/s²、角速度は0.002 deg/s、ゲイン分解能は角速度、加速度ともに0.01 %と目標値に対し小さい値に設定している。

例としてZ軸の角速度の補正結果を第5図に示す。補正前の出力誤差として、角速度オフセット誤差0.44 deg/s、ゲイン誤差-0.7 %、補正後の出力誤差は角速度オフセット誤差-0.06 deg/s、ゲイン誤差-0.1 %と目標値以下の誤差を実現しており、特に角速度オフセットについては従来比約1/7に誤差を低減している。



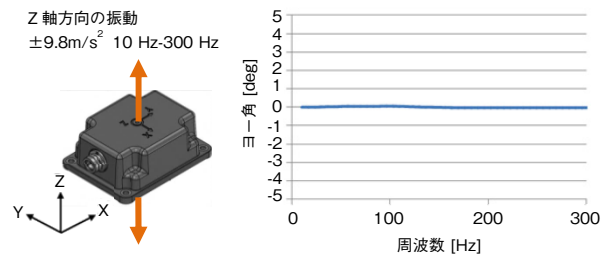
第5図 温度特性調整前後出力（Z軸角速度）
Fig. 5 Output before and after adjusting temperature characteristic

4.2 特性変動を抑制する耐振動設計

産業用途においてさまざまな用途に適合するためには、想定する用途のうち最も厳しい使用環境に適合する必要がある。振動については、モーションセンシングユニットは耐振動設計を施した車載対応のセンサを用いており、ユニットの構造および実装部品の基板配置にも耐振動性を考慮した設計を施している。また内部に搭載したローパスフィルタ（カットオフ周波数：fc=10 Hz）により不要な振動による出力変動を抑制している。特に振動下での出力特性の変動を懸念する必要がある農機の使用環境を推定し、目標値としてヨー角変動誤差±0.5 deg以下として下記条件にて試験を行った[7]（第6図（a）参照）。

- ・印加加速度：Z軸方向 ±9.8 m/s²
- ・周波数範囲：10 Hz-300 Hz スイープ：1 Hz/s

第6図（b）に示すように、ヨー角出力の最大変動は0.2 degである。これは50 m直線走行時の横方向変動量として16.6 cmに相当し、モーションセンシングユニットが農機を想定した振動環境下においても安定したヨー角出力となることを確認している。



第6図 振動印加時のヨー角変動
Fig. 6 Yaw angle variation during vibration

5. まとめ

ユニット化による多軸化、高精度な温度特性の補正、姿勢角出力、耐振動の取り組みを行い、3次元動作の検出、進行方向や傾斜の検知、さまざまな環境下で使用することができる産業用ロボット向けモーションセンシングユニットを開発した。また、発生したノイズについて適切な判定閾値での静止判定処理を行うことにより、Z軸周りの角速度30 deg/sを50回転（10 min）印加したときのヨー角の算出時の誤差-0.045 deg/回転を実現した。

また、-40℃から85℃の範囲で5℃刻みの細かい温度間隔にて補正を行うことにより、Z軸のオフセット誤差角速度0.1 deg/s、加速度0.2 m/s²を実現した。さらに、ユニット構造、基板、信号処理に耐振動設計を適用することで、±9.8 m/s²、10 Hz-300 Hzのスイープ振動試験においてヨー角変動が0.2 degと安定していることを確認した。

引き続き、ヨー角だけでなくロール角、ピッチ角の高精度化、より複雑な振動条件下における姿勢角出力の安定化および小型化、低消費電力化についても検討を進めていく。

今回開発したモーションセンシングユニットの技術は、用途に応じた設計パラメータの変更を行うことで、今後は産業・ロボット分野だけでなく各種サービスロボット分野など、さらに幅広い用途への展開が期待できる。

参考文献

- [1] パナソニック（株），“ロボット用「モーションセンシングユニット」を開発,” <http://news.panasonic.com/jp/press/data/2016/07/jn160719-1/jn160719-1.html>, 参照 Oct. 25, 2017.
- [2] 多摩川精機（株）（編）, ジャイロ活用技術入門, (株) 工業調査会, 東京, 2002.
- [3] 藤井映志 他, “圧電薄膜の開発と角速度センサの実用化,” パナソニック（株）, https://www.panasonic.com/jp/corporate/technology-design/award/pdf/43rd_gijyutu.pdf, 参照 Oct. 25, 2017.
- [4] パナソニック（株）, “ジャイロ（角速度）センサ,” <https://industrial.panasonic.com/jp/products/sensors/sensors/angular-rate-sensors>, 参照 Oct. 25, 2017.
- [5] STMicroelectronics NV, “LSM6DSM - iNEMO inertial module: 3D accelerometer and 3D gyroscope,” <http://www.st.com/ja/mems-and-sensors/lsm6dsm.html>, 参照 Oct. 25, 2017.
- [6] 日本ロボット学会（編）, 新版ロボット工学ハンドブック, (株) コロナ社, 東京, 2005, p. 101.
- [7] 川上克己 他, “中型トラクタの農作業時座席振動” J. Rakuno Gakuen Univ., vol. 25, no. 1, pp. 25-30, 2000.

執筆者紹介



藤田 孔明 Koumei Fujita
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 インダストリアル事業開発センター
Industrial Business Development Center,
Automotive & Industrial Systems Company



中原 充也 Mitsuya Nakahara
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 インダストリアル事業開発センター
Industrial Business Development Center,
Automotive & Industrial Systems Company



佐藤 祐之 Hiroyuki Satou
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 インダストリアル事業開発センター
Industrial Business Development Center,
Automotive & Industrial Systems Company



寺尾 篤人 Atsuhito Terao
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 インダストリアル事業開発センター
Industrial Business Development Center,
Automotive & Industrial Systems Company