複数の並進加速度計を用いた多自由度運動センサに関する研究

小 野 寺　良　二*

Study on Multi Degrees of Freedom Motion Sensor System Using Multiple Linear Accelerometers

by Ryouji ONODERA

本研究は複数の並進加速度計を用い，個々の加速度計から得られる並進と回転成分が混在する加速度信号を統合し，６軸方向（並進３軸と回転３軸）の加速度に再構築する多自由度の運動計測センサシステムの開発と評価および応用に関するものである。このような多自由度の運動センサが必要とされる背景には，以下の２点が挙げられる。第一に，ロボットや車両あるいはヘリコプターなどの空間移動体などの重力下での３次元運動は，並進と回転方向にそれぞれ３自由度を有する多入力・多出力の多自由度の運動体であるため，それらの運動の計測・制御や自律化のためには，６自由度の運動の正確な検出（計測）を可能とするセンサが必要とされるということである。第二に，単純に１自由度の計測を行いたい場合においても他の自由度を考慮した計測が必要とされるということである。明らかな１自由度の直線運動でない限り，実際は他軸の影響を受けるため，計測対象方向に感度をもつ１自由度の運動センサでは，回転と並進成分が混合され検出される。したがって，そういった多自由度の計測が必要とされない状況においても，各自由度の成分を考慮した計測が必要とされる。

従来，そういった６自由度の運動の計測・制御に用いられるセンサシステムとして，並進および回転運動の計測にはそれぞれ加速度計，角速度計が用いられるケースが多い。角速度計は，ロケットや航空機向けに開発された機械式や光学式のジャイロセンサや，近年MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術の発展に伴い，振動ジャイロやマイクロマシンジャイロなどが開発されている。これらのセンサを用いた高精度６自由度システムでは前者の高精度ジャイロセンサと高精度加速度計を組み合わせた慣性航法装置（Inertial Navigation System，通称INS）が知られている。通常，慣性航法装置には高精度のリングレーザージャイロとサーボ型加速度計が使われる。前者の機械式や光学式のジャイロは高精度で安定しているが，精度を上げるために構造上，MEMSセンサと比較しても大型で小型化されたものがなく，非常に高価である。そのため，小型の移動体や移動ロボットには搭載が困難であった。一方，後者のMEMSセンサは小型で比較的安価であり，カメラの手振れ防止やカーナビゲーションなど，身近なものに使用されているが，計測精度や安定性などに課題があり改良が続けられている。

通常，センシングにおいて計測精度と安定性がセンサ性能の指標として扱われる。本センサシステムのような多自由度センサにおいて，計測精度，安定性という視点で考えた場合，多自由度センサでは他の軸と干渉する軸間干渉という多自由度特有の問題を有する。これは，真の運動に他軸の運動が混入す

*新潟大学大学院自然科学研究科
現在　鶴岡高等専門学校
〔新潟大学博士（工学）　平成19年３月26日授与〕

ることで，本来の運動とは全く異なる結果を検出し，計測精度が著しく損なわれる問題である。言い換えると，多自由度センサでは，この軸間の干渉を最小限に抑え，各軸における成分をいかに正確に計測できるかが重要である。過去に提案されたものでは，運動自体の信号の軸間干渉に加え，各軸でのゲイン誤差やオフセット誤差などの計測誤差の干渉が誤差の増大速度を助長し，安定性が失われることが報告されている。そういった問題を抑制するためには，センサキャリブレーションを予め精密に行うことが重要となる。並進方向は，定格が重力加速度程度でそれほど高精度を要求しない加速度計については，重力加速度を基準にキャリブレーションすることができる。それに対し，ジャイロなどの角速度計における回転方向については，重力のような基準がないため，基準となる精密でノイズの少ない回転運動の生成が必要となる。この回転運動の生成には，精密な専用の動揺テーブルが必要となるが，一般的ではなくユーザー自身でのキャリブレーションは困難である。また，運動センサを用いて計測を行う場合，並進と回転成分を正確に検出するにはセンサ本体を回転（運動）中心に設置しなければならないが，実際には困難なため，センサ座標系から運動座標系への座標変換を行う必要がある。しかし，上述した角速度計と加速度計を用いた従来のシステムでは，並進と回転の検出値の次元が異なることで，その座標変換に煩雑な操作が必要となる。それに対し本センサは6自由度の運動が同一次元の加速度であるため，その際の座標変換が比較的容易である特長を有する。

上記のような様々な理由から，ジャイロセンサを用いず加速度計のみによって6自由度運動を計測する手法が過去にいくつか提案されている。一般に6自由度の運動を計測するためには，最低6個の単軸並進加速度計が必要とされ，6自由度運動と加速度計出力はそれらの幾何学的配置によって決定される。従来提案された手法では，その加速度計の配置に問題があり，次のような問題が存在した。

まず，任意の配置により得られる6自由度の加速度の導出解において，遠心加速度成分が各軸の導出解に対して相互に存在したため軸間干渉が生じ，結果的に急激な解の発散となり安定した計測を行うことができなかった。また，別の手法では，各成分の符号しか得られないことや，低速運動になるにつれ信号中の雑音が増幅されるという問題があった。加速度計を冗長にすることで，それらの問題は緩和されたが，これによりシステムの複雑化，キャリブレーションでの同定すべき要素が増えるため，操作の煩雑化を招いてしまう。

そこで，本研究では，従来手法をもとにした，小型の移動体，移動ロボットの計測，制御への適用，あるいはゲーム機などへの3次元空間内における運動の多自由度入力装置への応用を目的とした新たな多自由度運動センサの開発を目指し，提案するシステムの安定性と計測精度に着目した。本論文では，提案するシステムに対する理論解析に基づき，試作した6軸加速度センサを用いた計測実験によりシステムの評価を行っている。さらに，機能拡張として検出加速度からの姿勢角および角速度の算出法についても検討を行っている。

第1章は，従来システムのジャイロセンサ，加速度計，多自由度運動センサシステムの基本原理，特徴，問題点について説明し，従来のシステムの現状から，本研究の意義と概要を示している。

第2章は，運動する物体上で生じる加速度の計測原理の拡張より，6自由度の計測方法を提案している。さらに試作した6軸加速度センサと使用した並進加速度計の仕様について説明している。6軸の加速度を計測するには，6個の単軸並進加速度計を必要とするが，本章では従来手法をベースに検討した結果，加速度計のより良い配置は，6個の加速度計を円周上に分散させ，少なくとも3箇所以上の異なった位置に配置するという配置条件を得ている。なお，試作した6軸加速度センサには，2軸の静電容量型のMEMS加速度計を使用し，構築している。

第3章は，2章にて構築したセンサシステムの安定性について検証している。ここでは，計測時に発生する計測誤差を仮定し，本システムにおける6軸加速度導出解から，誤差についての誤差微分方程式を導出している。その微分方程式の数値解析により，本システムでの不安定条件は，z軸まわりの回転運動に対し，x軸もしくはy軸まわりの回転運動が，整数での偶数倍になるような運動状態であるという結果を得ている。つまり，その状態において，計測誤差が急激に増幅し不安定になる可能性があるということである。解析結果をもとに，シミュレーションおよび計測実験により，実波形での安定性の検証，評価を行った。その結果，発散の原因には，解析で得られた条件とオフセット誤差の2つの要素より誤差の増大速度が助長されることが示された。しかし，

フィルタによりオフセット成分を考慮することで，不安定条件による急激な発散が抑制され，比較的安定した計測を確認している。

第４章は，計測精度において重要とされるセンサキャリブレーション法について検討している。ここでは，配置された個々の加速度計の幾何学的誤差を計算し，並進と回転成分に含まれる誤差には従属性があることを見出している。これにより４姿勢の並進基準入力のみで比較的精度良くキャリブレーションが行えることを実験により示している。言い換えると，従来，回転成分において必要とされた回転基準入力のための動揺テーブルを使うことなく，回転成分についても十分にキャリブレーションができ，ユーザーで比較的容易に行うことができるということである。さらに，キャリブレーションの更なる効率化のために，２軸の加速度計の軸間の誤差の従属性について検証した結果，より少ない回数（姿勢）でキャリブレーションが行えることを確認している。

第５章は，センサ応用として検出される加速度成分から角速度および姿勢角成分の推定について検討している。推定にはカルマンフィルタアルゴリズムを利用し，シミュレーションおよび基礎実験によりその推定法について検証した。最終的に，実車両運動の比較的複雑な運動において，アルゴリズムを拡張した手法により，各成分の推定について検証し，比較的安定した推定結果を得ている。 第6章では，本論文で得られた結果について総括している。

本論文では重力下での３次元運動を対象とする６軸加速度センサを提案し，その安定性の条件や簡易センサキャリブレーションによる計測精度の向上，さらに検出加速度からの他の慣性項の推定方法を明らかに点で新規性があり，工学的に有用である。