

単一GPSアンテナとMEMSジャイロによる地殻変動観測ブイの姿勢モニタリング Monitoring of moored buoy attitude by single GPS antenna and rate-gyro

*本荘 千枝¹、木戸 元之¹、太田 雄策²、今野 美冴²

*Chie Honsho¹, Motoyuki Kido¹, Yusaku Ohta², Misae Imano²

1.東北大学災害科学国際研究所、2.東北大学大学院理学研究科

1.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2.Graduate School of Science, Tohoku University

【研究目的】東北大学と海洋研究開発機構（JAMSTEC）は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と共同で、津波と地殻変動のリアルタイム観測を目的とした係留ブイシステムの開発を進めている（戦略的イノベーション創造プログラム「レジリエントな防災・減災機能の強化」）。東北大学では、本システムのうちGPS音響結合方式の地殻変動観測を担当している。現システムでは、音響測距時のトランスデューサーの位置を正確に把握するため、ブイ最上部に4基のGPSアンテナを一辺が1mの正方形形状に設置し、メインアンテナの位置情報と共にGPSジャイロによる姿勢情報を得ている。4アンテナシステムの消費電力は約6Wと、光ファイバージャイロ等と比べてはるかに省電力であるが、長期係留に向けてさらなる省電力化が望まれている。そこで本研究では、1基のGPSアンテナ位置と加速度・角速度データから姿勢モニタリングする手法を考案した。試験係留時に冗長系として収録していたMEMSジャイロ（消費電力1W未満）の加速度・角速度データを用いて、本手法で得られる姿勢の精度を検証し、実運用に向けた課題を検討した。

【解析方法とデータ】用いる観測方程式は、(1) 3軸角速度と姿勢角（方位角・ピッチ角・ロール角）変化率の関係式、(2) GPSアンテナ速度の変化量が、加速度の積分量と回転による速度の変化量の和に等しいという関係式の2つである。各姿勢角の時間変動を3次B-スプライン関数で基底展開し、展開係数を非線形最小二乗法で解いた。用いたデータは、MEMSジャイロ（Xsens社、MTi-G）による加速度・角速度データ（10 Hz）と、キネマティックPPPにより解析したGPSアンテナ位置データ（1 Hz）を時間微分して得たアンテナ速度である。2014年に紀伊半島沖で実施した試験係留では、約20分間の計測を週一回、4ヶ月間にわたり定期的に行ったが、このうち、GPSデータとMEMSジャイロデータの両者がほぼ欠損なく取得された8回分（各19分間）を解析した。それとは別に、GPSジャイロデータ（JAVAD社、Sigma-Q）を用いた真の姿勢角時間変動の推定も行い、これからのずれを誤差として結果の精度を検証した。これは、GPSジャイロデータ（2.5 Hz）の単なる補間に代わり、MEMSジャイロの角速度データを併用することで、GPSジャイロデータの誤差を考慮した姿勢角時間変動の推定を行ったものである。この解析で推定されたGPSジャイロデータの誤差は公称精度とほぼ等しい0.2°、MEMSジャイロの角速度データの誤差は公称精度よりやや大きい0.6°/sであった。

【結果】本手法で得られた姿勢角の誤差は、全8回 各19分間のRMSで、方位角0.5°、ピッチ角1.3°、ロール角1.0°であった。これは、現状のGPSアンテナとトランスデューサーの配置（水平距離1.5m、鉛直距離5.5m）では水平方向に9cm、鉛直方向に3cmのトランスデューサー位置誤差に相当する。最大姿勢誤差はRMS値の2～3倍程度になることを考えると十分な精度とは言えない。しかし、この誤差には独立した二つの要因がある。一つは、MEMSによる姿勢角が基準とする座標系（MEMSジャイロ内センサーの3軸で定義）と、GPSジャイロが基準とする座標系とのずれ、つまりMEMSジャイロの取付角が厳密にゼロでないことによるもので、姿勢角誤差のバイアスとして現れる。実際に、8回の観測にほぼ共通した値のバイアス誤差があり、ここから推定した取付角は方位角・ピッチ角・ロール角で-0.1°、-1.3°、-1.0°であった。もう一つは、このMEMSジャイロ取付角を考慮してもなお残る誤差で、これがデータの精度も含めた本手法の限界と考えてよい。取付角補正後の誤差は、方位角は0.5°、ピッチ角・ロール角は大幅に減少し0.4°であった。ピッチ角・ロール角の誤差のほとんどは角速度データの誤差に起因する。実際、角速度の精度が一桁良い上位機種

のMEMSジャイロ（Xsens社、MTi-G700）を用いて、船舶による同等な試験観測を行い、本手法により姿勢角推定を行ったところ、GPSジャイロによるピッチ角・ロール角（精度0.005-0.030°）との差がRMSで0.03°という極めて良い結果を得た。一方、方位角に関しては、GPSアンテナ速度データの精度の影響が大きく、センサ性能の向上により誤差が0.5°からどの程度改善するかは不明である。しかし、トランスデューサー位置の算出や、それに続く海底局の位置決定の過程において、方位角誤差の影響はピッチ角・ロール角のそれに比べて小さいことを考える

と、方位角誤差 0.5° は十分に実用的な精度である。

【結論】単一アンテナシステムによる姿勢角の精度は、方位角は 0.5° 、ピッチ角・ロール角は高精度のMEMSジャイロを用いれば 0.03° と十分に実用的な値である。但し、GPSアンテナやトランスデューサーの位置を定めるブイ座標系と、MEMSジャイロ座標系とのずれ（MEMSジャイロ取付角）は、測距時のトランスデューサー位置の算出にそのまま姿勢誤差として影響するため、この取付角をどう推定、又は測定するかが実運用に向けた課題である。

キーワード：GPS音響結合方式海底測位、MEMS角速度・加速度センサ

Keywords: GPS/Acoustic seafloor positioning, MEMS gyroscope/accelerometer