

GPS と慣性センサを利用した 浮体動揺観測システムの開発と検証

Floater motion measurement by using GPS and inertia sensors and verification

山口 敦**
Atsushi YAMAGUCHI

石原 孟**
Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

著者らは浮体動揺時にドップラーライダーの計測原理に基づいて動揺の影響を補正する手法を提案し、数値シミュレーションと実測データを用いた検証を行った¹⁾。この研究では浮体動揺が既知であるとしていたが、実際の浮体上のライダーによる風速計測を行うためには、浮体動揺を計測する必要がある。

水槽実験においては、カラートラッカーなどを用いて浮体上の3点の変位を計測し、浮体が剛体であると仮定して浮体動揺の並進3成分・回転3成分を計測することが行われている²⁾が、同様の手法を実スケールの浮体に適用するためには、高価なGPSシステムが3セット必要となる。また、浮体と陸上基地局の距離が長い場合、GPSの欠測は避けられない。

そこで本研究では、福島浮体サブステーション浮体を対象とし、慣性センサ、サテライトコンパス、RTK-GPSシステムを用いて浮体の6自由度動揺を同定する手法を定式化するとともに、実測データにより検証した。

2. 浮体動揺の計測

ドップラーライダーを搭載した浮体が剛体であると仮定すると、その運動は併進3成分(サージ・スウェイ・ヒープ)と回転3成分(ロール・ピッチ・ヨー)の計6成分を用いて記述することができる。本研究では福島浮体サブステーションにおける観測データを用いてサブステーションの動揺を計測した。

2.1 計測装置

本研究では福島浮体サブステーション*)での計測結果を用いて浮体動揺の同定を行った。使用した計測装置の一覧を表1に示す。

浮体上のメインデッキにはRTK-GPSセンサ3台が設置されている。また、浮体から20km離れた陸上の変電所にRTK基準局が設置されており、リアルタイムに基

準局を参照することにより、高精度な絶対変位を計測可能である。RTKモードで測位した場合の測位精度は標準偏差が数cm程度である。衛星の受信状況によってはRTKモードで測位できない場合があるが、その場合には測位精度が大幅に低下するため、本研究では欠測として扱った。

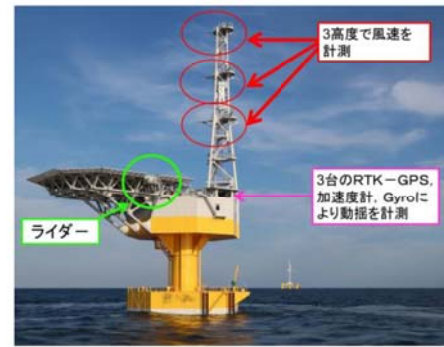


図1 福島洋上サブステーション

表1 福島洋上サブステーションでの浮体動揺計測装置

センサ	計測項目	サンプリング周波数	装置数
RTK-GPS	緯度・経度・高度・GPS測定モード	1Hz	3
サテライトコンパス	方位角	1Hz	1
ジャイロ	ロール角・ピッチ角・ヨー角	20Hz	1
加速度計	方向加速度3成分	20Hz	1

サテライトコンパスはGPSにより浮体の方位角を同定するセンサである。ジャイロによって計測されたヨー角は大幅にドリフトするためヨー角の同定にはサテライトコンパスを用いた。

ジャイロは、浮体の回転運動3成分を計測するが、前に述べたようにヨー角についてはドリフトが大きいため、ロール角とピッチ角のデータのみを用いた。また、センサを浮体に設置する際

*平成27年11月27日第37回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 会員 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

の誤差のため、ゼロ点を同定する必要があるが、これについて 3.1 節で詳しく述べる

加速度計は GPS と併用することにより浮体の並進成分を測定するために用いた。この手法については 3.2 節で詳しく述べる。

2.2 3 台の RTK-GPS による浮体動揺の計測

浮体動揺の全 6 成分を観測するための方法の一つは浮体上に固定された 3 点の絶対変位を計測する方法である。水槽実験では地面にされたカメラを用いて浮体上の任意の点の絶対変位を計測することが可能であるため、この方法は浮体の水槽実験で広く用いられている²⁾。ここでは、3 台の RTK-GPS センサによって測定された浮体上の 3 点から浮体動揺の 6 成分を同定する手法について説明する。

浮体上の一直線上にない 3 点の変位がわかれば、浮体を剛体と仮定することにより、浮体動揺の 6 成分を同定することが可能である。浮体が動揺していない場合の GPS センサの重心からの位置ベクトルを $\mathbf{p}_i (i = 1, 2, 3)$ 、動揺時の GPS センサの観測値を $\mathbf{p}'_i(t) (i = 1, 2, 3)$ 、動揺時の浮体重心の変位ベクトルを $\mathbf{x}_g(t)$ とすると、浮体重心と各センサ間の距離は同様の前後で変化しないため、(1) 式が成り立つ。

$$|\mathbf{p}_i| = |\mathbf{p}'_i(t) - \mathbf{x}_g(t)| \quad (1)$$

この式を解くことによって浮体重心の変位、すなわち浮体動揺の並進成分を求めることができる。

浮体動揺後の GPS センサ観測値 $\mathbf{p}'_i(t)$ は浮体重心の変位 $\mathbf{x}_g(t)$ 、浮体動揺の回転行列 $\mathbf{R}(t)$ および GPS センサの位置ベクトル $\mathbf{p}_i$ を使って、(2) 式のように表すことができる。

$$\mathbf{p}'_i(t) = \mathbf{x}_g(t) + \mathbf{R}(t)\mathbf{p}_i \quad (2)$$

この式を解くことにより、浮体運動の回転成分を求めることができる。

この方法により 3 台の GPS センサを用いれば、浮体動揺の全成分を同定することが出来るが、RTK-GPS に必要な二周波対応 GPS センサは高価であるのに加え、浮体の大きさが小さい場合には浮体上 3 点の絶対座標から浮体運動の回転運動を求めることは現実的でない。このため、ジャイロなどの慣性センサと 1 台の GPS を組み合わせて浮体動揺を計測することが考えられる。ジャイロセンサによって浮体動揺の回転成分が計測できれば、1 台の GPS 観測値を用いて (2) 式を解くことによって浮体重心の変位、すなわち浮体動揺の並進成分

を求めることができる。しかし、浮体に対してジャイロセンサを取り付けた角度を正確に知ることができないため、ジャイロセンサの初期値が不明である。

また、陸上に設置された RTK 基準局との距離が遠い場合にはしばしば RTK モードでの計測ができない。浮体動揺を計測するためには、RTK モードでの GPS 計測の精度が必要であるため、RTK モードで計測できなかった場合には、浮体動揺が計測できないという問題点がある。この問題を解決するために加速度計を利用することが考えられるが、加速度計を積分して求めた変位には無視できないドリフトが含まれるため、加速度計と GPS を組み合わせる手法が必要である。

次節では福島洋上サブステーションでの浮体動揺計測において、ジャイロセンサの 0 点を求める手法と、加速度計と RTK-GPS を併用して浮体動揺を計測する手法について説明する。

3. 浮体動揺の補正

3.1 回転成分の補正

前節で説明したように、ジャイロセンサ設置時の誤差によりピッチ角・ロール角の 0 点が、実際の浮体運動の 0 点とは必ずしも一致しないという問題がある。浮体運動は長期の平均をとるとピッチ角・ロール角が 0 度となると考えられるため、本研究では、長期の平均値をジャイロによる計測値から引くことでピッチ角・ロール角の補正を行った。この際の平均化時間を変化させ、3 台の GPS から求めた動揺を参照値とした場合の誤差の分布を評価し、図 2 に示す。

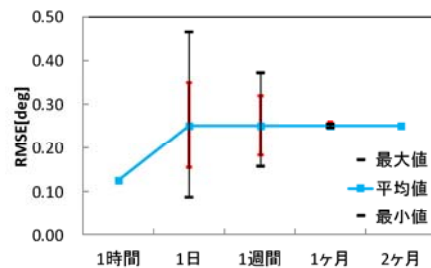


図2 平均化時間を変化させた場合の浮体のピッチ角の誤差分布

平均化時間を 1 日とした場合にはばらつきが大きいのが平均化時間を 1 カ月以上取ればばらつきが無視できるほど小さくなる。図 3 には平均化時間を 1 カ月として推定した浮体のピッチ角と、3 台の RTK-GPS を用いて求めた浮体のピッチ角(参照値)との比較を示す。両者はほぼ一致しており、1 カ月の平均値をジャイロの計測値から引くことにより、ジャイロにより浮体のピッチ運動を計測することが可能であることがわかる。

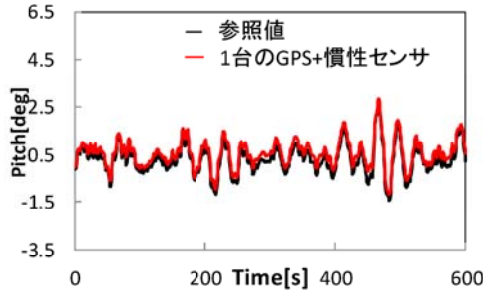


図3 浮体のピッチ角

3.2 並進成分の補正

浮体運動の並進成分を計測するためには、GPS データを利用すればよいが、2.1 節で述べたように RTK モードで計測できない場合には GPS データは欠測とするため、加速度計との併用が必要である。本研究では GPS データと加速度計を積分して求めた変位データを周波数空間で合成することにより GPS センサ位置の変位を求めた。なお、表 1 に示すように GPS と加速度計ではサンプリング周期が異なるが、本研究では数十秒周期の浮体動揺を対象としているため、加速度計のデータは 1 秒平均を行い、GPS と同じサンプリングレートに変換してから以下の処理を行った。

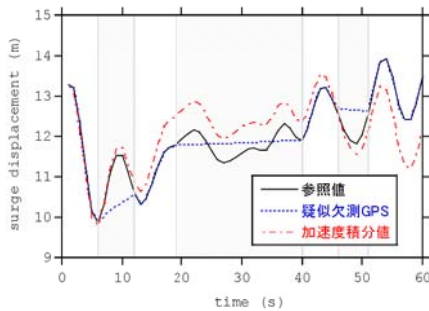


図4 2015/10/6 13:40-13:41 における GPS センサ位置での x 方向変位

本設では提案したアルゴリズムの有効性を実証するため、欠測がなかった 2014 年 10 月 6 日 13 時 40 分～41 分までの GPS 観測データを参照値とし、人工的に 6 秒から 12 秒まで、19 秒から 40 秒まで、46 秒から 51 秒までの 3 区間を欠測とし、欠測データは線形補完によって補完し、疑似欠測 GPS データを作成した。また、加速度データは同時刻の実際の加速度データを浮体の回転運動を考慮して GPS センサの位置に変換したものをを用いた。図 4 は 2014 年 10 月 6 日 13 時 40 分～41 分の GPS 位置のサージ変位の参照値 ($x_{\text{ref}}^{(1)}(t)$)、疑似欠測 GPS データ ($x_{\text{gps}}^{(1)}(t)$) および加速度データを 2 階積分して求めた変位 ($x_{\text{acc}}^{(1)}(t)$) を示す。なお、加速度の積分は

ドリフトを最小限にするために周波数空間で行った。加速度計の観測値を積分した結果は細かい変動を捉えているが、ドリフトにより徐々に値がずれている。

このことをもう少し詳しく見るために、各時刻歴データをフーリエ変換し ((3)～(5)式)、その絶対値(パワースペクトル密度)を示したのが図 5 である。この図からわかるように、周波数 0.02Hz 以下では加速度計積分により求めた変位が参照値と大きく乖離しているのに対し疑似欠測 GPS の変位と参照値は大きく変わらない。一方、0.1Hz 以上では加速度計積分により求めた変位のパワースペクトル密度が参照値とほぼ一致しているのに対し、疑似計測 GPS の変位のパワースペクトルは小さな値を示すことがある。これは欠測区間を線形内挿したためと考えられる。

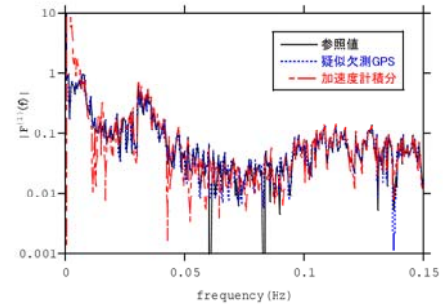


図5 GPS センサ位置における x 方向変位のパワースペクトル密度

$$F_{\text{gps}}^{(j)}(f) = \mathcal{F}[x_{\text{gps}}^{(j)}(t)] \quad (3)$$

$$F_{\text{acc}}^{(j)}(f) = \mathcal{F}[x_{\text{acc}}^{(j)}(t)] \quad (4)$$

$$F_{\text{ref}}^{(j)}(f) = \mathcal{F}[x_{\text{ref}}^{(j)}(t)] \quad (5)$$

そこで、本研究では GPS 計測値と加速度計の 2 階積分値のフーリエ変換の実部・虚部それぞれに対して (6) 式に示すように周波数別の重み付き平均を求めた。

$$\Re[F_p^{(j)}(f)] = g(f)\Re[F_{\text{gps}}^{(j)}(f)] + [1 - g(f)]\Re[F_{\text{acc}}^{(j)}(f)] \quad (6)$$

$$\Im[F_p^{(j)}(f)] = g(f)\Im[F_{\text{gps}}^{(j)}(f)] + [1 - g(f)]\Im[F_{\text{acc}}^{(j)}(f)]$$

ここで、 $g(f)$ は (7) 式に示す重み関数である。

$$g(f) = \begin{cases} 1 & (f \leq f_a) \\ \frac{f - f_b}{f_a - f_b} & (f_a < f \leq f_b) \\ 0 & (f_b < f) \end{cases} \quad (7)$$

ここで f_a, f_b は重み関数の周波数閾値であり、本研究では $f_a = 0.02(\text{Hz})$, $f_b = 0.09(\text{Hz})$ とした。すなわち、0.02Hz以下ではGPSから求めた変位を用い、0.09Hz以上では加速度計を積分して求めた変位を用い、その間では両方のデータを重み付けして用いる。このようにして求めた $F_p^{(j)}(f)$ をフーリエ逆変換することにより、GPSセンサ位置の変位の時刻歴 $x_p(t) = (x_p^{(1)}(t) \ x_p^{(2)}(t) \ x_p^{(3)}(t))^T$ を求めた。

$$x_p^{(j)}(t) = \mathcal{F}^{-1} [F_p^{(j)}(f)] \quad (8)$$

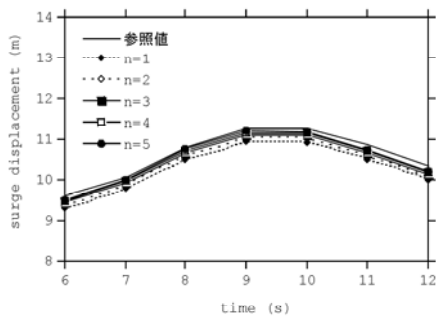


図6 GPS 欠測期間における x 方向変位

なお、このようにして求めた GPS センサ位置の変位は、GPS 欠測区間内の平均値が欠測区間の両端の値と極端に異なっている場合に大きな誤差を持つ。6 秒から 12 秒の間の GPS データ欠測期間の x 方向の変位の拡大図を図 6 に示す。n=1 で表される線が上記の方法により求めた変位である。欠測期間全期間にわたって、参照値とのずれが大きくなっている。このことを回避するために、GPS 欠測区間の両端における参照値と同定値の差の平均値を GPS 欠測区間内の中点において線形内挿した値に加え、新たにこの点と欠測区間両端の間を線形内挿したものを GPS 観測値とし、再度同じプロセスにより新たな変位を求めることとした。この過程を複数回繰り返す、最終的な変位を求めた。図 6 には反復の途中のケースも併せて示すが、反復回数が少ない場合には推定値は参照値と大きく異なるのに対し、反復回数を増やすにつれ、推定値が参照値に近づき、反復回数が 4 回を超えるとほとんど変わらなくなる。

図 3 には反復回数を増やした場合の参照値との最大誤差を示す。反復回数が 4 回を超えると誤差はほとんど減少せず、4 回程度の反復で十分であることがわかる。

このようにして求めた GPS センサ位置のサージ変位を図 7 に示す。欠測期間外では参照値とほとんど変わ

らず、欠測期間内では妥当な推定ができていていることがわかる。

GPS 位置での変位を同定した後に、浮体動揺の並進成分を同定する。GPS センサ位置の変位 $p_i'(t)$ 、浮体動揺の回転成分から求めた回転行列 $R(t)$ が既知なので(2)式を解くことにより、浮体重心位置の変位、すなわち浮体運動の並進成分を求めることができる。

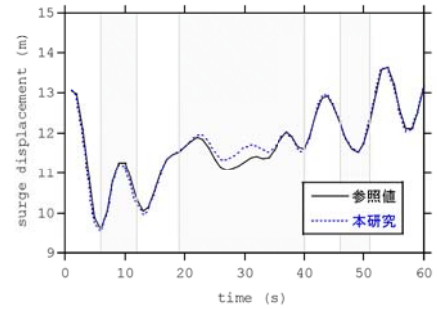


図7 2014/10/6 13:40-13:50 の GPS センサ位置における x 方向変位

4. まとめ

本研究では、浮体上のドップラーライダー観測のための浮体動揺計測システムを構築し、検証を行った。その結果、以下の結果が得られた。

- 1) ジャイロの 0 点を求める際には長期の平均値を 0 とする手法が有効であり、平均化時間として 1 カ月以上を取ればよい。
- 2) GPS が欠測する場合には、加速度計による積分と GPS による変位を周波数空間で合成する手法が有効である。また、欠測期間両端での誤差は反復により補正することが可能で、反復回数は 4 回以上必要であることを明らかにした。

謝辞

本研究は、経済産業省の委託事業である福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業(Fukushima FORWARD)の一環として実施された。また洋上サブステーションでの観測についてはジャパンマリンユナイテッド(株)に協力を頂いた。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 若林蘭, 川東龍則, 山口敦, 石原孟: 6 自由度の動揺を考慮した浮体式ドップラーライダーの計測に関する研究, 第 36 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.329-332, 2014
- 2) 原口富博, 二村 正, ビデオトラッカーを用いた三次元運動計測法について, 船舶技術研究所報告 27(5), 547-569, 1990