

1. はじめに

GPS 衛星を利用すると、自身の位置を知ることができることは一般的に知られている。ではいったいどの程度の精度で自身の位置を知ることができるかという、それは使用する受信機やアルゴリズムまたはデータ取得場所の状況に応じて数 cm の精度から数十 m の精度まで変化する。本研究では、特に数 cm の精度を達成することのできる精密測位について紹介する。実際に今年の 1 月にやよいの実験航海で取得したデータを用いて説明する。実験結果より、東京湾における精密測位では海上を航行している場合、可視衛星数が 4 個未満の場合を除いて、ほぼ 99%以上の時間帯で精密測位が可能であることがわかった。ただし実験データを取得した時間帯における GPS 衛星の可視衛星数と衛星配置が良かったことを考慮すると、99%に達しない時間帯も存在することが予想される。

2. 精密測位について

2.1 概要

GPS を利用した測位には、大きく分けて 3 つの測位手法が存在する。GPS 衛星から送信されるコードを利用した単独測位。同じくコードを利用し、さらに基準局からの補正データを利用して測位を行う DGPS。コードだけでなく、GPS 衛星の搬送波位相そのものを利用し、かつ基準局のデータも利用する精密測位。さらに最近では基準局のデータを利用せずに単独で精度を 10cm 程度のレベルまで改善する手法も開発されている。

ここで精密測位とはどのような手法であるかを紹介する。まず精密測位に必要な主な機材を下にあげる。なお、計算に必要なソフトウェア等は GPS 受信機に組み込まれているものとする。実際に自身の位置を知りたいのは移動局側である。

基準局の GPS 受信機(搬送波位相出力可能)と GPS アンテナ(2 周波用が望ましい)
移動局の GPS 受信機(搬送波位相出力可能)と GPS アンテナ(2 周波用が望ましい)
補正データを伝送するための機器

上記に加えて、電源や測位結果をリアルタイムで観測するための PC 等も必要である。GPS アンテナは基本的に空の見える場所であればどこに設置してもかまわない(マルチパス等を無視すると)。GPS 受信機と GPS アンテナをケーブルでつなぎ、電源を入れる。基準局と移動局では同じ作業となる。さらに補正データを伝送するための機器を基準局、移動局ともに設置し基準局側から移動局側に向けてデータ通信が可能である状態を作り出す。以上のような作業の後、精密測位用のソフトウェアが正常に動作し、十分な可視衛星が確保されれば(最低 5 衛星以上)精密測位が可能となる。なお今回の実験では、リアルタイム

で補正データを送信するのではなく、基準局と移動局で同時に GPS の生データをファイルに取得し、その 2 つのファイル中の生データを利用して後処理で精密測位を行っている。精密測位に必要な生データとは、擬似距離、搬送波位相そして衛星軌道暦の 3 つである。

2.2 精密測位のアルゴリズム

本研究室で使用されているアルゴリズムは、一般の精密測位のアルゴリズムと同様、搬送波位相と擬似距離の二重位相差を利用している。通常のコード DGPS では、擬似距離のみ（もしくは搬送波位相も擬似距離のスージングに利用）を利用して測位計算を行っているのに対し、数 cm の高精度測位を達成する精密測位では、搬送波位相を積極的に利用している。搬送波位相を利用するにあたっての困難な点は、搬送波位相の整数値バイアスを決定することである。本アルゴリズムでは、この整数値バイアスを、コード DGPS による測位領域の検定と搬送波位相における残差の検定を用いて決定する。さらに残差の ratio 比較によるチェックも行っている。ここでアルゴリズムの手順を簡単に説明する。

擬似距離の二重差を用いて計算した受信機の位置より、ワイドレーン（L1 帯と L2 帯の情報の線形結合）の整数値バイアスの初期推定値を計算する。真の整数値バイアスは初期値を中心とする一定の決められた範囲にある。整数値バイアスの初期推定誤差の標準偏差は約 50cm 程度（一般的な高性能受信機を使用した場合）である。ワイドレーンの波長は約 86cm であるから初期値 ± 2 サイクルの範囲内に解はほぼ存在する（99%）。観測した衛星から最も RDOP（Relative Dilution of Precision）の小さい 4 衛星を選び主衛星とする。主衛星の整数値バイアスが決めれば、計算されたアンテナ位置を用いて他の衛星（従衛星）の整数値バイアスも直ちに求められるので、以下では主衛星を用いて測位計算を行い全ての整数値バイアスを推定する。二重差をとるため、主衛星の整数値バイアスの個数は 3 である。したがって、初期値 $\pm j$ 個の範囲を探索するとすれば、解の候補は $(2j+1)^3$ 個となる。よってワイドレーンの場合には 125 個である。

整数値バイアスの各候補に対して測位計算を行い、観測領域および測位領域での棄却検定を行う。観測領域での検定では、観測残差の二乗和を計算し、二乗検定により決まった式を満たす候補を棄却する。測位領域での検定では、計算したアンテナ位置の局所水平成分と、擬似距離で求めた位置の水平成分との差が、決まった式を満たす解の候補を棄却する。ここで、水平方向の推定位置のみを評価しているのは、一般に GPS では垂直方向の測位精度が水平方向に比べて悪いからである。さらに残差の ratio 比のチェックを行い、例えば 2 つの候補の残差における比がある一定値以上になると、残差の大きい方を棄却する。

整数値バイアスの候補が 1 個になればそれを FIX 解とする。複数あれば次のエポックにうつる。解の候補が一個になるまで から を繰り返す。使用した総エポック数が M を越えると にもどる。ワイドレーンの FIX 解が求まった後、L1 帯にお

ける FIX 解を求めることになるが、方法はワイドレーンの場合とほぼ同様であるのでここでは省略する。検定における標準偏差等を変更する必要がある。

3. やよいを利用した航海中の GPS データ取得

2004 年 1 月 8 日の午後 13 時より 15 時頃まで、やよいを利用して東京湾の GPS データを取得した。基準局は東京海洋大学情報工学研究室の屋上に設置している。移動局の GPS アンテナはやよいに設置している。使用した GPS 受信機は、ノバテル社製 OEM3 (基準局側) と OEM4 (移動局側) である。アンテナは JAVAD 製チョークリング (基準局側) とノバテル社製 GPS600 (移動局側) である。図 1 は GPS アンテナを設置した状態のやよいの写真である。実験航海で移動した場所は図 2 に示した。東京海洋大学越中島キャンパスのドックを出発し、4 つの橋の下を通過後、さらにレインボーブリッジを通過し、レインボーブリッジから約 5km の地点までと約 10km の地点までの 2 回の往復を行った。なお、最大の基線長は約 13.55km であった。実験時の天候は晴れ、波の高さは特に大きくはなかった。本実験では、基準局と移動局のデータをファイルに蓄積し、本研究室で開発している後処理用のソフトウェアで解析を行った。



図 1 アンテナ概観 (やよい)



図 2 実験航路概観 (東京湾)

4. 解析結果

図 3 に可視衛星数を示す。マスク角は 10 度である。最初と最後の部分で 4 つの橋下を通過する際に可視衛星数が 0 個になっており、さらにレインボーブリッジの真下を通過する際にも可視衛星数が 2, 3 個になっている。レインボーブリッジにおいて可視衛星数が 0 個にならない理由は、橋と海面の距離が他の 4 つの橋に比べると非常に高いからである。解析時間は 1 Hz でトータル 7296 秒である。そのうち 3 次元測位が不可能な可視衛星数 4 個未満になったのは 122 秒であったので、可視衛星数が 4 個以上であった時間はトータル

の約 98.3%である。4つの橋下を通過する際に、可視衛星数4個未満になった秒数は8秒間から20秒間であった。またレインボーブリッジの真下を通過した際は3,4秒間であった。

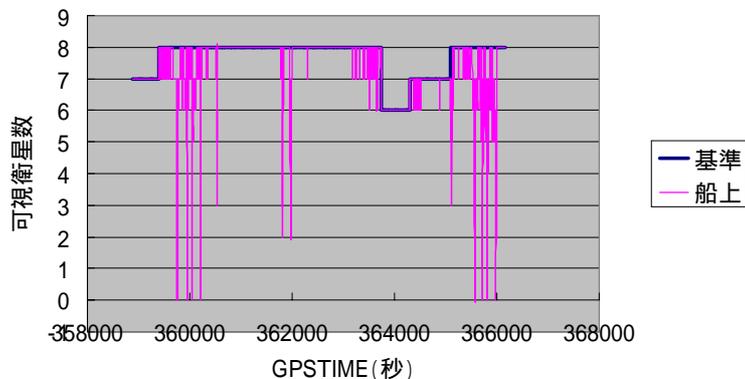


図3 可視衛星数 (マスク角 10 度)

次に本実験データを利用した DGPS 測位結果を示す。DGPS 測位は上記で求めた可視衛星数が4個以上の時間帯で解析可能である。図4に水平方向の結果を、図5に楕円体高度方向の結果を示す。GPS 測位では地球中心を原点としており、その原点に対応した WGS84 の楕円体に基づいて高度方向を計算している。東京の海面高度は楕円体高で 40m 前後である。水平方向の結果を見るとおおよその航路を把握することができる。また高度方向の結果を見ると 1m 前後からたまに 5m 以上の変動が見られる。これは実際に船が高度方向に動いているわけではなく、測位誤差によるものである。実際の船の高度方向における変動はあとの精密測位結果で示す。一般的に GPS 測位では水平方向よりも高度方向の誤差が大きくなる傾向があるため、水平方向の誤差はこれほど大きくはなっていないと思われる。

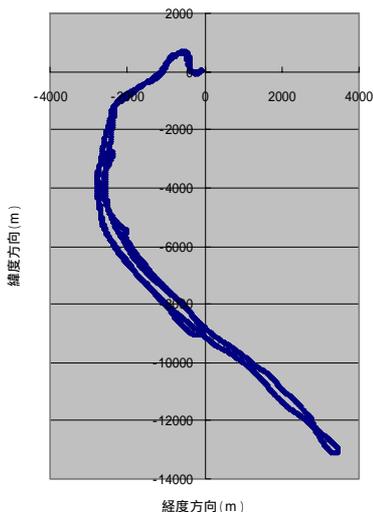


図4 DGPS 測位結果 (水平)

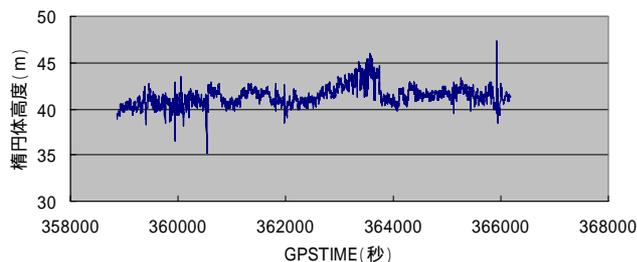


図5 DGPS 測位結果 (高度)

次に本実験データを利用した精密測位結果を示す。図 6 に水平方向の結果を、図 7 に楕円体高度の結果を示す。高度方向の結果を見ると、明らかに DGPS 測位よりも精度が 10 倍以上良いことがわかる。また、船の高度がどのように変動していたかが明瞭である。レインボーブリッジ付近から羽田空港沖に向けて進んでいるときは高度方向が減少し、逆に引き返しているときは高度方向が増加していることがわかる。これは、2 回の往復の結果に相当している。このような考察は DGPS 測位結果からは判別できないことである。さらに出航時のドック内での楕円体高度が 40.8m 程度であるのに対して、寄航時のドック内での楕円体高度は 41.2m 程度である。よって 40cm 程度高度方向が上昇している。これは、海上保安庁から報告されている芝浦における潮汐日報の値に近いことがわかっている。潮汐の値は 13 時で 173cm、14 時で 190cm、15 時で 215cm であった。出航時間が 13 時で寄航時間が 15 時であることから、ドック場所は越中島で芝浦からは離れているが、芝浦における高度方向の増加分 38cm と測位結果からの高度方向の増加分がほぼ一致していることがわかる。

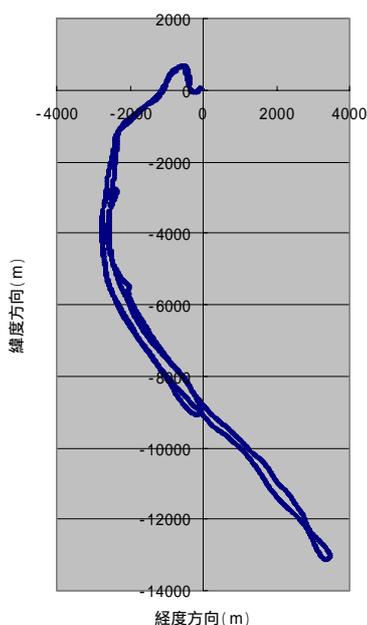


図 6 精密測位結果（水平）

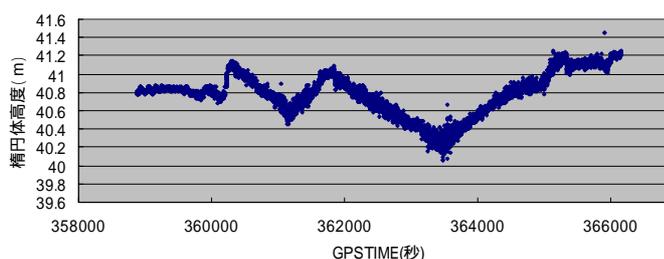


図 7 精密測位結果（高度）

次に精密測位で重要な指標値となる FIX 解決定までの時間について調査した結果を示す。全体としては、可視衛星が 4 個以上であった時間が 7174 秒であったのに対し、FIX 解が正しく決定され精密測位が行われていた時間は 7148 秒であった。よって 99.6% 程度の時間帯で精密測位が行われていたことになる。可視衛星数が 4 個未満の橋下も含めると、約 98.0% 程度の時間帯で精密測位が可能であったことになる。表 1 にさらに詳細な結果を示す。FIX 解を再探索する必要があったのは、橋下を通過するときがほとんどであり、基準衛星の変

更はこの 2 時間のあいだにはほとんど見られていない。主衛星の変更は何回か行われているが、従衛星で前もって算出されている整数値バイアスを使用することができる。これは可視衛星数がこの時間帯に比較的多く存在し、さらに衛星の配置も良かったことが影響しているものと思われる。FIX 解決に要する時間は 2, 3 秒以内であった。なお FIX 解決を行っている数秒の間は DGPS 測位結果を利用することができる。

表 1

アンビギュイティを再探索した時刻	アンビギュイティ決定に要した時間	備考
358874	1 秒	データ取得開始時
359743	1 秒	1 番目の橋の手前
359765	1 秒	1 番目の橋を通過後
359863	1 秒	2 番目の橋を通過後
359956	2 秒	3 番目の橋を通過後
360212	2 秒	4 番目の橋を通過後
360532	3 秒	レインボーブリッジ付近
361824	1 秒	レインボーブリッジ付近
361981	2 秒	レインボーブリッジ付近
365125	2 秒	レインボーブリッジ付近
365588	2 秒	4 番目の橋を通過後
365733	3 秒	3 番目の橋を通過後
365830	2 秒	2 番目の橋を通過後
365991	3 秒	1 番目の橋を通過後

5 . まとめ

東京湾における精密測位の可能性について、研究室で開発してきたソフトウェアを用いて評価することができた。結果としては、可視衛星数の多い時間帯及び衛星配置の良い時間帯では、99%以上の時間帯で数 cm 程度の精度で船に設置しているアンテナ位置を算出することが可能であることがわかった。ただし、アンテナの設置場所、船の航路と周囲の障害物との関係そして可視衛星数(衛星配置も含む)によっては、99%を達成できない時間帯も存在することが考えられる。また今回は 15km 未満の基線長で実験を行ったが、15km から 20km 以上の基線長になると、電離層や対流圏等の影響により、FIX 解を得ることが困難であることが一般的に知られている。