リアルタイムキネマティックの傾斜計への応用

浪江 宏宗*・安田 明生**・岡村 知則***

Application of Real-Time Kinematic GPS to Clinometer

Hiromune NAMIE, Akio YASUDA and Tomonori OKAMURA

Abstract

Real-Time Kinematic (RTK) GPS has an ability to fix a position as the cm order by measuring the range from the GPS satellites with the accuracy of the 1/100 order of a carrier wavelength. The authors tried to evaluate the accuracy of the angle measurement of inclination by inferring the accuracy of altitude determination by RTK-GPS. A GPS antenna of user station is mounted on the edge of an oscillating table with 45cm in arm length and about 10s in oscillating period. The temporal variation of altitude agrees very well with the output of the capacitive type clinometer mounted on an oscillating center except the high frequency vibration of about 2cm standard deviation which is measured at the stable condition. The output delay of the fix position is also measured to be 135.90 ms which can be neglected in the measurement of the ship's attitude. The application of the filtering may improve the accuracy in the angle measurement.

1. はじめに

リアルタイムキネマティック (Real-Time Kinematic GPS; 以下RTK) は衛星測位システムの 1 つで、センチメートルオーダーの高精度測位が可能である。また、単独測位等と同様に、最低 4 機のGPS衛星さえ連続的に追尾できれば、時間、場所等に制限されることなく、世界中で24時間の実時間利用が可能である。

RTKでは、4 機以上のGPS衛星から送信される搬送波を、それぞれ基準局、利用者局受信機で同時に追尾し、その位相積算値データを測定することによって、利用者局受信機と各々2衛星との距離差を求める。このとき、距離差計測の基準として用いられる搬送波の波長は、L1帯 (約1.6GHz) で約19cm、L2帯 (約1.2GHz) で約25cmである。その波長の1/100に近い位相分解能を得ることができ、センチメートルオーダーの高精度測位が可能となる⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

利用例としては、建設現場での建築資材等の位置決定、航空機の離着陸時における支援、船舶の自動離着陸時における支援等が注目され始めている。また、RTKを用いた傾斜計も開発されている。

ここで、既にASHTECH社より市販されている、L1帯、L2帯2周波を観測可能な、24チャンネル装備のRTK傾斜計3DF ADUでは、動揺の測定精度は受信アンテナの間隔が1mの場合、標準偏差で0.1°。また、位相に関しても顕著な差は認められないと聞いている。しかし、測定値には、明らかに2°前後の誤差が生じたり、かなりの位相遅延が観測される場合もあるようである⁽⁶⁾。さらに、搬送波位相積算値データや、角度出力値に対して、何らかのフィルタ処理を行っているようで、この処理によって発生する遅延、そして実時間性については明らかにされていない。

本研究では、これらの不明瞭なスペックを明確化し、RTKの実時間で高精度な測位データが取得できるという利点を利用し、さらに高精度な傾斜計としての、利用可能性を検討する基礎的な評価実験を行った。

* 学生会員 東京商船大学大学院 (〒135 東京都江東区越中島 2-1-6)

** 正 会 員 東京商船大学 (〒135 東京都江東区越中島 2-1-6)

***非 会 員 東京商船大学学部 (〒135 東京都江東区越中島 2-1-6)

2. 実験の概要

図1に実験の概念図を示す。まず、あらかじめ測量を行い、正確に位置の分かっている地点に、基準局受信機のアンテナを設置した。次に、その地点から約14m離れた位置にある、一軸動揺台の一端に、利用者局受信機のアンテナを設置した。動揺台の支点からアンテナまでの距離は45cmであった。また、支点上に較正に用いた傾斜計を設置した。そして、支点を中心に動揺台をシーソー運動させ、その振動をRTKと傾斜計で同時に測定した。なお、動揺台の振動周期は、約5秒から1分間の間で適宜変え、数回実験を行った。

実験に使用した受信機は、NovAtel社製3151R型2台で、表1にその仕様を示す。基準局受信機と利用者局受信機は、RS-232Cケーブルで直結しており、基準局受信機で測定された搬送波位相積算値データは、直接利用者局受信機に伝送している。また、較正に用いた傾斜計は、Lucas社製P/N02755-01で、傾斜による液面の変化を4枚のキャパシタプレートで静電容量の変化に変換し、ピッチとロールの2軸をそれぞれ同時に出力できるものである。検証の結果、傾斜計の測角誤差は $\pm 0.5^\circ$ 以下であった。しかし、応答周波数に限界があり、動揺台の振動周波数が0.5Hz以上になると、応答遅延が発生する。データのサンプリング周波数は、RTKが5Hz、傾斜計は約15kHzであった。

受信機の測位精度を調べるために、実験に先だって取得したRTK定点測位データの中、測高度の時間変化例を図2に示す。同図より、定点測位であるにもかかわらず、高度は一定の値を示さず、ランダムに変動しており、標準偏差 σ は2cm程度であることが分かる。

次に、図3に、受信機から直接取得した、搬送波位相積算値データを用いて計算した二重位相差の時間変化例を示し、さらに、図4に、この二重位相差の回帰曲線に対する分散を示す。その標準偏差は1波長の約0.045倍で、距離に換算すると約8.8mmとなる。よって、この値が、今回使用した受信機の測距精度であるといえる。DOPの値と併せて、これら3つのパラメータにより、ほぼこの受信機の測位精度が評価できる。

本実験では、GPS受信機から出力されている1PPS信号を用いて、RTKと傾斜計の出力に対して、誤差1ms以内の同期を取っている。1PPS信号は、受信機から1.000000s毎に出力される幅200 μ sのパルスであり、GPS時間と完全に同期している。そして、毎秒

図1 実験の概念図

表1 GPS受信機の仕様

NovAtel Communications 社製の3151R型	
GPS単独, DGPS, RTK-GPS 測位可能	
受信周波数	L1帯 (1.6GHz)
受信コード	C/Aコード
受信チャンネル	12 (最大12衛星)
最短測位周期	0.20s
外部入出力	2つのRS-232Cポート
測位利用衛星	全可視衛星

図2 RTK定点測高度の時間変化例

図3 二重位相差の時間変化例

図4 二重位相差の回帰曲線に対する分散

の正秒に出力されている。この信号を、傾斜計のA/D変換出力値の間に挿入、マークすることによって、傾斜計の出力値と同期を取っている。一方、RTK測位データには、測位時刻を示すGPS時間が含まれており、その含まれている正秒の時刻と、1PPS信号の出力時刻を一致させて同期を取っている。

図5に、実験時における衛星の幾何学的配置図を、地平面図で示す。実験中は、常時6機から8機の衛星がRTK測位に利用されており、VDOPの値は、1.80から2.01の間で変化していた。

3. 実験結果

図6に、RTKの測高度から求めた計算角度と、比較に用いた傾斜計の出力角度の時間変化例を示す。なお、図中の直線は、角度が 0° の位置を示す。RTKによる計算角度は、傾斜計の出力角度に対して、小振幅の振動をしていることが分かる。次に、これらの値を、高度変化に変換したものを図7に示す。RTKでは、傾斜計と比較して、振幅2cm程度の小刻みな振動が見られ、先の計算角度にも、それが現れていることが分かる。これは、RTKの定点測位データ中の測高度が、標準偏差 σ 2 cm程度でランダムに変動していたことから、当然の結果であるといえる。動揺台の振動周期を変えても、ほとんど同様の結果が得られた。

ここで、RTKの測高度から求めた計算角度誤差 Ea は、

$$Ea = \tan^{-1}(\sigma/l)$$

で表される。ただし、 σ はRTKの測高度の標準偏差2 cmであり、 l は動揺台の支点—アンテナ間距離である。今回の実験のように、 l が45cmの場合は、 Ea は 2.5° にもなる。しかし、船舶上で使用し、 l が25m程度取れるとすると、 Ea が 0.1° 以下の高精度な傾斜計を構成できることになる。

図5 GPS衛星の幾何学的配置図(地平面図)

図6 RTKと傾斜計の計算角度の時間変化例

図7 RTKと傾斜計の高度変位の時間変化例

図8 測定時間と1PPS信号の概念図

4. 実時間性評価

次に、RTKの実時間性を評価するために、RTK測位における遅延時間を測定した。図8に、実際に測定した時間を模式的に示す。遅延時間は、受信機より出力されている1PPS信号の出力時刻から、利用者局受信機において、RTKの測位データを出力し始めるまでに要した時間を、約15kHzのA/D変換器内部クロックを用いて測定した。測位データには測位時刻を示すGPS時間が含まれているので、1PPS信号が出力されてから、測位データが出力されるまでの時間を測定すれば、遅延時間を求めることができる。

図9に、この遅延時間の測位毎の変化を示す。平均値は135.90ms、標準偏差は19.61msである。遅延時間がかなり長いものもあるが、これは利用者局受信機より、パソコンに向けて、RTK測位データだけではなく、パソコンを制御するためのデータも出力されているためであり、この制御データが出力されている時間帯では、遅延時間が長くなっている。また、この遅延時間は、測位計算に利用している衛星の数によっても変化し、同図より、利用衛星数が6機的时候よりも7機的时候の方が、遅延時間が長くなっていることが分かる。衛星数にもよるが、この135.90msが、今回使用した受信機における、RTKの実時間性の限界であると考えられる。

図9 RTK測位データの出力遅延

5. まとめ

RTKを傾斜計として利用する場合に必要なスペックを、具体化するための基礎的データを収集するために、利用者局受信機のアンテナを、シーソー運動する動揺台上の一端に設置し、RTK測位することによって、動的なRTK測位精度を評価する実験を行った。この結果は、動揺台の支点-アンテナ間距離が45cmと短いため、RTK測高度から求めた計算角度の誤差 Ea は、較正に用いた傾斜計の出力角度に対して2.5°程度となった。しかしながら、船舶上で使用する等のように、動揺台の支点-アンテナ間に相当する距離を長くとれるような場合には、このままの測高精度でも、十分に高精度な傾斜計を構成できることが分かった。

次に、RTKの実時間性を評価するために、利用者局受信機で、RTK測位データを出力し始めるまでに要する時間を測定した。この結果、平均135.90ms、標準偏差19.61ms要することが分かった。よって、この135.90msが、今回使用した受信機によるRTKの実時間性の限界であると考えられる。

現在、ASHTECH社より市販されているRTK傾斜計3DF ADUでは、計算角度、実時間性に不明瞭な点があり、実際の利用に際しては、それらを具体化する必要があると考えられる。

本研究の実験では、これらの不明瞭なスペックを明確化するための、基礎的データを収集したといえる。また、搬送波位相積算値データや、RTK測位データにフィルタ処理等を行い、スムージングすれば、RTK

を用いて、さらに高精度な傾斜計を構成することも可能であると考ええる。

今後、2 台のGPSアンテナをアームの両端に設置して、それぞれの受信機から出力された搬送波位相積算値データから、直接傾斜角を算出するもので、さらに信頼性が高く、高性能なRTK傾斜計を構成する実験を行いたいと考えている。

最後になりましたが、実験に協力して頂きました、鳥羽商船高等専門学校教官の鈴木治氏にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 王 盾・森川博之・水町守志：「キネマティックGPSにおけるサイクルスリップの逐次決定法」，信学技報，SANE93-84(1994-01)，pp.85～92，1994年1月。
- (2) 王 盾・森川博之・水町守志：「余剰GPS信号を利用するサイクルスリップの高精度決定法」，信学技報，SANE93-105(1994-03)，pp.33～40，1994年3月。
- (3) 王 盾・森川博之・水町守志：「キネマティックGPSにおけるアンビギュイティ高速解明法—整数制約条件に基づくアプローチ」，電子情報通信学会論文誌B-II Vol.J78-B-II No.5，pp.306～316，1995年5月。
- (4) 日本測地学会，「GPS—人工衛星による精密測位システム—」，社団法人 日本測量協会，1986年11月10日。
- (5) 土屋 淳・辻 宏道：「やさしいGPS測量」，社団法人 日本測量協会，1991年10月5日
- (6) 織田博行・五十嵐和之・関 信次・石井 真：「GPSを用いた運動測定システム」，日本航海学会誌126号，平成7年12月。

質 疑 応 答

塩見格一(電子航法研究所)：動揺台の支点—アンテナ間距離を長くすれば、測角精度が向上すると考えておられますが、実際の航空機や船舶では、支点—アンテナとして想定される部分が、その重量等により歪み、RTKの測角誤差より大きな誤差を生じるのではないのでしょうか。傾斜角度が大きい場合の、航空機、船舶等のボディがどの程度歪むのか、調査あるいは見当は付けられていますか。

浪江宏宗：実際に船舶にRTKを設置し、航行しながら測角する実験を行いましたが、当日はほとんど揺れがなく、これについての検討ができる程度の結果が得られませんでした。今後の検討課題とさせていただきます。

奥田成幸(運輸省海技大学校)：今回構成されましたRTK傾斜計は、アームの両端にアンテナを設置したものと、同原理の傾斜計であると思われますが、キネマティックGPSを傾斜計に利用されたのはなぜですか。

安田明生：既に同様の傾斜計が市販されていることは承知しております。本文でも示しましたように、市販されております製品の、性能等の記述は必ずしも十分ではなく、適用範囲も明確ではないようです。同製品を正しく使いこなす上でも、RTKの特性を十分に明確化する必要があり、また、今後の研究によっては、さらに高性能、高信頼性の傾斜計を構成できる可能性もあると考えます。今回はそのための基礎的データの取得に留まりましたが、今後は、アームの両端にアンテナを設置したRTK傾斜計を構成し、研究を続けたいと考えております。

奥田成幸：RTKの実時間性の評価に、測位データの出力時刻を使用されているようですが、単にデータの出力タイミングであって、リアルタイム性（データの同時刻性）を証明している訳ではないのではありませんか。

浪江宏宗：受信機より出力されている1PPS信号は、正確にGPS時間と同期しており、毎秒の正秒に出力されています。また、RTK測位データには、測位時刻（測位データの出力時刻ではない）が正秒のGPS時間で含まれています。この測位データは、本来1PPS信号と同時に出力されなければ、真に実時間とはいえません。よって、1PPS信号出力時刻から、この時刻に出力されるべき、RTK測位データの実際の出力時刻までの時間を測定することで、RTKの実時間性が評価できると考えます。