

1 周波 RTK-GNSS システムにおける リアルタイム 1 秒サンプリング精密測位の検証

新 村 太 郎 (熊本学園大学経済学部)

Validation of Real-Time 1-second Sampling Precise Positioning Data Using Single- Frequency Type RTK-GNSS System

Taro SHINMURA

abstract

This study was conducted to verify real-time precise positioning data using single-frequency signals (e.g., L1 for GPS satellites) using an inexpensive and convenient RTK-GNSS positioning system and to examine the feasibility of its use. All data acquired during a 24-hour period on November 1, 2001, using the reception and data processing system constructed by Shinmura and Nasu (2020)¹, which includes an antenna on the roof of a seven-story school building, were analyzed. The total number of data acquired was 73,211, of which 93.4 % were FIX values, with a standard deviation of approximately 3.1×10^{-8} degrees for both latitude and longitude. And the reason for the appearances of FLOAT values, SOLO values (single mode data) and poor-quality FIX values was explored from the time series variation of the positioning data, and it was found that these data appeared intermittently for relatively short periods of time, about 40 to 300 seconds on average. Within each occurrence period, almost all FLOAT and poor-quality FIX values were found to be continuous with SOLO values with Age values exceeding 30. Such deterioration of Age values was probably caused by the slow network line speed or temporary overload of the caster server. When real-time data every second is used continuously, it is necessary to send the reference data directly from the base station to the rover station, or to send the data via a caster server which stable operation is guaranteed in a stable and limited network.

キーワード：精密測位, 低コスト RTK-GNSS, キャスタサーバ

key word : Precise Positioning, Low-Cost RTK-GNSS, Caster Server

1. はじめに

新村・那須（2020）¹，新村・那須（2021）² および新村・那須（2022）³ で検証してきた安価で手軽な RTK-GNSS システムは，GPS 衛星の L1 信号に代表される 1 周波の信号のみを使用しているが，近年 L2 さらに L3 信号に代表される 2 周波，3 周波を使用する比較的安価な受信機も市場に出回り始めた（例えば 2 周波の u-blox 社製 ZED-F9P⁴，3 周波の Septentrio 社製 Mosaic-X5⁵）。使用する信号の種類が多くなるにつれてマルチパスを含む受信環境の悪化による影響が小さくなるために，測位精度が向上するばかりでなく，受信条件が悪い場所でも RTK 測位で FIX 値を得やすくなる。一方で，受信機は従来の業務用のタイプと比較して安価とはいえ，価格是对応周波の増加とともに増加する。

プレート運動やマグマ活動における地盤の変形のリアルタイム観測を高密度で行うためには，数多くの RTK-GNSS 受信機を配置することが必要となり，極力コストを下げた RTK-GNSS システムの導入が求められることが予想される。そのため本研究では 1 周波タイプによる RTK-GNSS 精密測位データの 1 秒サンプリングを試みて，システムの動作の安定性および，データの精度と再現性の検証を行った。

2. システムの概要と使用データ

図 1 に本システムを構成する機器とデータの流れを示した。本システムの詳細は新村・那須（2020）に記載されているため，ここではそれを引用して概略を述べる。7 階建て校舎の屋上にある見晴らしの良い箇所に基準局および移動局用の 1 周波対応 GNSS アンテナをそれぞれ設置した。アンテナで受信された信号は u-blox 社製の RTK 受信機で処理された後に USB 経由で小型コンピュータへ送られた。コンピュータとしてラズベリーパイ 3B+ を使用した。両局のラズベリーパイにはそれぞれ USB ドングルタイプの 4G ルータを接続して，モバイル通信サービスによって常時インターネット接続した。基準局では，算出された基準局情報をインターネット経由でキャスタサーバとよばれる汎用の NTRIP サーバに送り，移動局はそれを経由した基準局情報を受け取って精密測位データの算出のために使用した。低コ

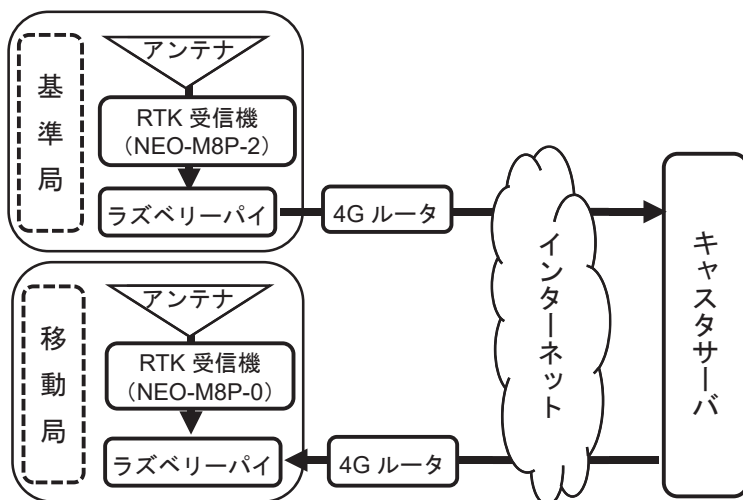


図1 システムの概要

本研究で使用した RTK-GNSS 精密測位のために構築したシステムの機器構成とデータの流れ。基準局，移動局，キャスタサーバから構成され，インターネット経由の NTRIP によってデータのやりとりを行う。詳細は本文中に記載した。新村・那須（2020）の図を一部修正して使用した。

ストの運用を目的としていたために、無料で利用できる CQ 出版社が管理するキャスタサーバ⁶を利用した。移動局で算出された位置情報とそれに関連するデータはラズベリーパイ内のストレージ（microSD カード）に記録してネットワーク経由で外部に取り出した。

3. リアルタイム 1 秒サンプリングデータ解析の目的と方法

一般的な測量目的で固定した点を測位する場合には、十分に信頼のあるデータを得るために最低でも数分から数十分かけることが多いことから、同様の状況を想定して、新村・那須（2022）は前述のシステムを使用して連続的に取得した 1 秒毎の RTK 測位データのうち、2021 年 11 月の約 1 ヶ月間の全データから 10 分毎におけるベストエフォート値を取り出して評価した。その結果、屋上定点の全 FIX データ（ $n=3,588$ ）のうち 99.99%を超えるデータは誤差が 3cm 以内であり、1 周波 RTK-GNSS 測位では衛星データの受信環境が良好であれば測量目的としては十分に精度の高い位置データを得られることが分かった。しかしながらこの方法で得られたデータは 10 分間のベストエフォート値であるために、最大で 10 分前のデータを採用する場合もあることから、リアルタイム性が保証されない。そのため本システムが、災害の発生をいち早くとらえるための地殻変動や地盤変動の監視、ドローンをはじめとした無人の移動体の制御や自動運転等に適用可能であるかを評価するために、本研究では上記のようなベストエフォート値ではなく元の 1 秒毎のデータに対してリアルタイム性、精度および安定性の検証を行った。2021 年 11 月 1 日の約 24 時間における 1 秒毎のデータ（ $n=73,211$ ）を使用した。評価においては、新村・那須（2022）と同様に 1 ヶ月間計測して得られた緯度、経度および高度の最頻値（北緯 32.80379056 度、東経 130.73054082 度、高度 86.375m）を真の値と仮定して、測定値とその差を誤差として使用した。測位開始から数十秒間はデータが安定しないため、10 分毎に最初の 90 秒間のデータは使用していない。

4. 結果・考察

① Ratio 値と水平および垂直方向の精度

2021 年 11 月 1 日の約 24 時間に 1 秒毎に取得した 1 周波 RTK-GNSS による測位結果を表 1 にまとめた。データのうち演算結果の Ratio 値が 3 以上で信頼性の高い FIX 解として得られたものが FIX 値であるが、これは全データの大部分である 93.4%を占めた。Ratio 値が 0 より大きく 3 未満であり、RTK データにおける FIX 解が得られなかった信頼性が劣ると判定されたものが FLOAT 値であるが、これは全体の 1.0%であった。また、基準局データが送信されてから移動局でそれを受信するまでの時間を秒単位で表現した数値（Age 値）が 30 以上である場合は、基準局データを使用せずに一般の GPS 受信機やスマートフォンと同じように単独測位の結果が出力されるが、ここではこれを SOLO 値として表現した。SOLO 値のデータの精度は概ね FLOAT 値より悪く、データ数は全体の 5.6%であった。測位結果から得られた FIX 値の緯度と経度の標準偏差は 10^{-8} 度、高度では 10^{-2} m の桁にあり、水平方向ではサブ cm レベル、垂直方向では cm レベルの高い精度であった。FLOAT 値では FIX

表1 2021年11月1日の約24時間に1秒毎に取得した1周波RTK-GNSSによる測位結果の内訳

全データ n = 73,211		FIX 値	FLOAT 値	SOLO 値
判定の根拠	Ratio 値	≥ 3	$0 < < 3$	0
	Age 値	< 30	< 30	≥ 30
データ数		68,405	727	4,079
全データ数に対する割合		93.4%	1.0%	5.6%
緯度の標準偏差 (度)		3.1×10^{-8}	3.6×10^{-6}	8.5×10^{-6}
経度の標準偏差 (度)		3.1×10^{-8}	5.0×10^{-6}	9.4×10^{-6}
高度の標準偏差 (m)		1.0×10^{-2}	1.7	3.0
水平方向誤差平均値 (cm)		0.3	72.8	113.7
垂直方向誤差平均値 (cm)		0.7	195.3	240.8

値と比較してそれぞれ2桁精度が下がり、SOLO値ではさらにFLOAT値の2倍程度精度が下がった。図2から図4では、緯度と経度の 1×10^{-8} 度を1mmとして水平方向の誤差を長さに換算した。誤差の平均値は標準偏差と傾向が同様であった。水平方向では全データの91.7%が誤差1.0cm以内に入った(図2A)。FIX値のみに限ると誤差の平均は約0.3cmであり、全体の97.8%は誤差が1.0cm以内に入った。その内のRatio値が約250以上の範囲にある少数のデータでは誤差が最大約5cmまで広がっていた。図2Bは図2AのうちRatio値が0-10の低い範囲を表示したものであり、誤差が10cmを超えた範囲に縦方向に並ぶ2つのクラスタが見られる。これらのクラスタにはRatio値が最大で3のデータが3つある。それぞれ誤差と測位時刻は107.4cm(測位時刻6時22分43秒)、18.9cm(20時12分48秒)、102.9cm(21時51分48秒)である。これらはFIX値でありながら精度が非常に低いミスFIX値に該当し、RTK-GNSS測位におけるデータの品質を下げる存在である。FLOAT値には、誤差が1.7cm以下の比較的精度の良いデータは全体の31.6%存在するものの、誤差の平均値は72.8cm、最大値は約129.4cmであり、半数以上のデータの誤差は10-13cmであった。SOLO値での誤差はさらに大きく、誤差の平均値は113.7cm、最大値は278.6cmであった。

垂直方向では誤差が1.0cm以内に入っているデータは全体の75.3%、全体の92.5%は誤差が3cm以内であった。水平方向と同様にRatioが高い(約350以上)範囲に誤差が大きいデータもあり、最大で約27cmまで広がっていた(図2C)。このうちFIX値では誤差の平均値は0.7cm、最大値は26.5cmで、3.0cm以内のデータは全体の98.6%であった。図2Dは図2CのうちRatio値が0-10の低い範囲を表示したものであり、誤差が10cmを超えると極端に大きな誤差をもつデータがあらわれる。そのうちの3つはRatio値が3であることから、これらはミスFIX値と判断した。FLOAT値の範囲で誤差が3cm以内の比較的良好なデータも存在するが大部分のデータは誤差が大きい。FLOAT値の誤差の平均値は230.1cm、最大値は約933cmであった。

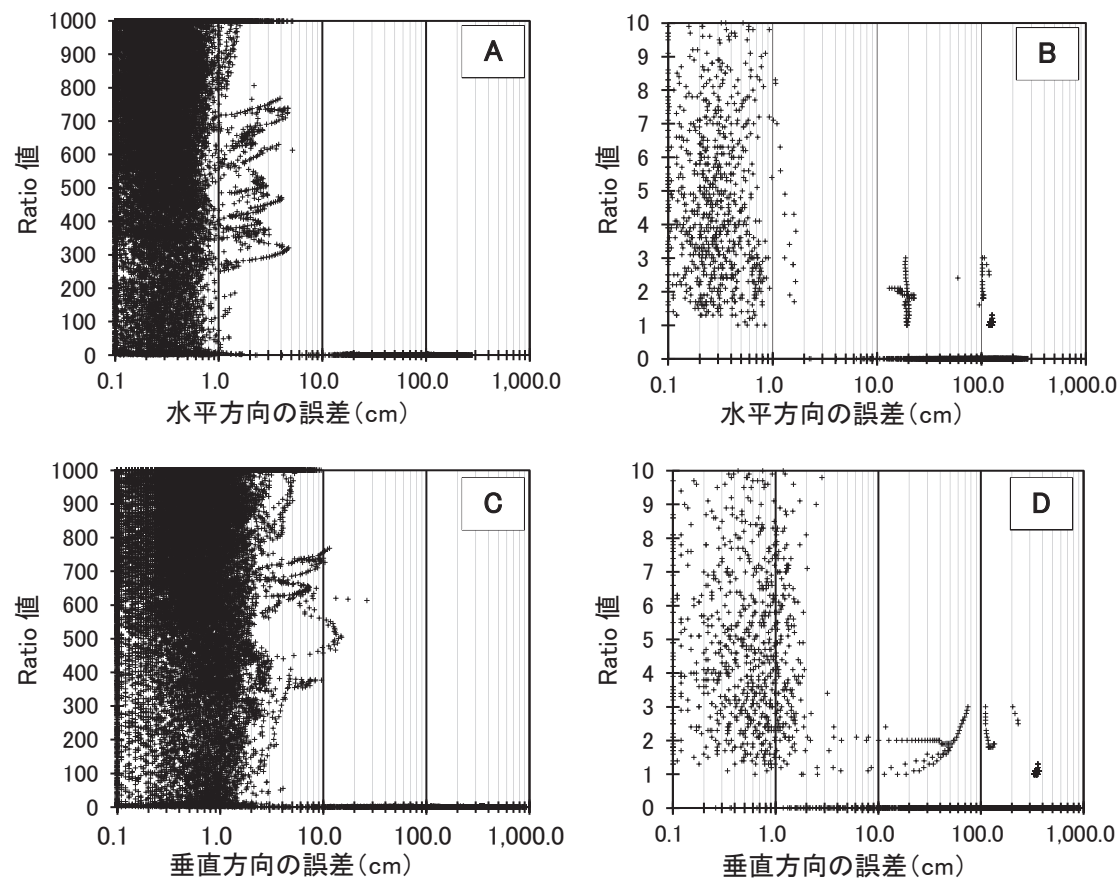


図2 RTK-GNSS 測位の 1 秒毎データの誤差と Ratio 値

2001 年 11 月 1 日の約 24 時間の測定において取得した 73,211 個のデータについて水平方向と垂直方向それぞれの誤差と Ratio 値をプロットした。水平方向の誤差は、緯度および経度について、それぞれの最頻値との差の 2 乗の和の平方根を、 1×10^8 度 = 1mm とし換算した値を使用した。垂直方向の誤差は、最頻値との差を使用した。誤差が 0.1cm 未満の値は、グラフ上ではすべて 0.1mm として表示した。A：水平方向の誤差と Ratio 値の全データ、B：グラフ A の Ratio 値が 0-10 の範囲だけを表示、C：垂直方向の誤差と Ratio 値の全データ、D：グラフ C の Ratio 値が 0-10 の範囲だけを表示した。

② 測位精度の時系列変化

新村・那須（2022）では、10 分間ごとのベストエフォート値の集計結果から、捕捉する GNSS 衛星の数がデータの質に大きく影響し、特に 15 以上ではほとんどが FIX 値であった。しかし 1 秒毎のデータをみると、捕捉衛星数が 15 以上であっても FIX 値以外のデータもあることから、10 分間より短い時間にデータの質の変動が起きていたことになる。そのため変動の原因を探るために誤差の値の時系列変化を調べた(図 3)。ここでは水平方向と垂直方向、FIX 値とそれ以外（FLOAT 値と SOLO 値）に分けて図を分けており、図 3A は水平方向の FIX 値、図 3B は垂直方向の FIX 値、図 3C は水平方向の FLOAT 値と SOLO 値、図 3D は垂直方向の FLOAT 値と SOLO 値である。前節で指摘した 3 つのミス FIX 値が、図 3A および 3B のそれぞれ同じ時刻にあらわれている。水平および垂直とも FIX 値の上に突出している部分が独立して存在していることから、比較的誤差が大きくなる時間が不連続に存在したことが分かる。また FIX 値の縦方向に伸びている空白部分が所々みられるが、これらは

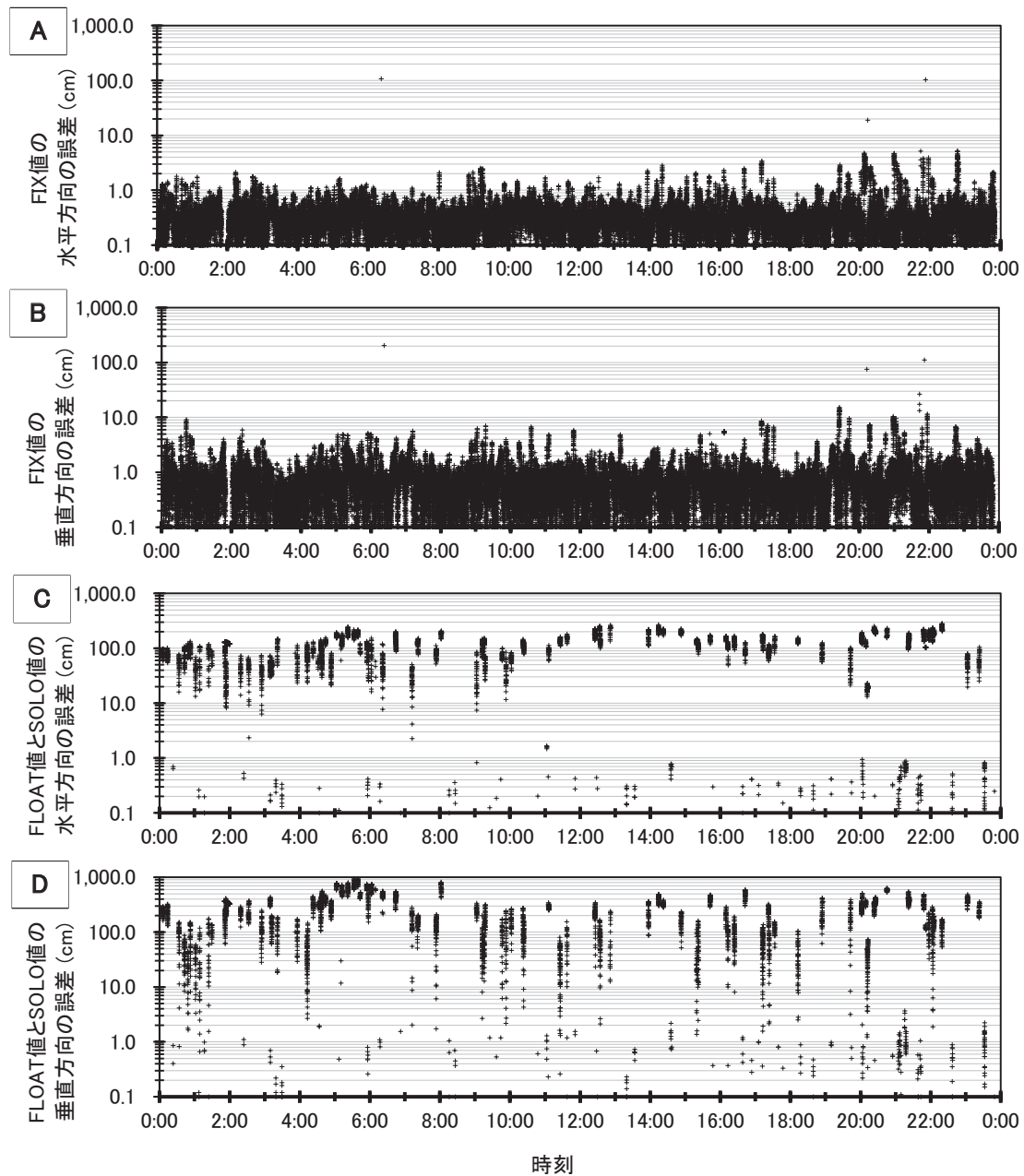


図3 時系列で表示した RTK-GNSS 測位の 1秒毎データの誤差

2001年11月1日の約24時間の測定において取得した73,211個の測位データについて、水平方向と垂直方向の誤差を、Ratio値が3以上のFIX値(68,405個)、3未満のFLOAT値(727個)およびSOLO値(4,079個)に分け時系列で表示した。水平方向の誤差の長さへの換算方法および0.1未満の表示方法は図2と同様である。A：FIX値の水平方向の誤差、B：FIX値の垂直方向の誤差、C：FLOAT値とSOLO値の水平方向の誤差、D：FLOAT値とSOLO値の垂直方向の誤差。

FLOAT値およびSOLO値として図3Cおよび図3Dに対応しており、時間的にある程度連続している。すなわちデータの質を悪くする原因が全体的に時間的に散在し、かつそれぞれがある程度継続していた。このような値が続く時間帯について衛星捕捉数、DOP、Age値を確認したところ、衛星データの受信に関する捕捉衛星数およびDOPは特に悪化していなかったが、Age値は悪化（数値の増加）していた。

③ Age 値と測位精度の関係

Age 値とは、基準局での基準局データ取得時刻と、移動局での基準局データ取得時刻との差を秒で表示したものである。これが大きくなると補正の原因となる上空の状況が変化して測位の精度が悪くなる。要求される精度にもよるが、0 から 1 程度が理想とされる。移動局の処理プログラム上では Age 値が 30 以上になると RTK 測位によらない単独測位データとして出力される。FLOAT 値と SOLO 値の誤差の大きさの時系列変化を図 4 に示した。

図 4 のように SOLO 値の大部分は水平方向と垂直方向ともにグラフ上で縦方向に連続性が見られるが、FIX 値のように横方向への連続性に乏しい。すなわち比較的短い時間で SOLO 値のデータが連続する状態が時間的に不連続に発生している。FLOAT 値のうち誤差が大きいものについても同様の傾向が見られる。このような短時間の連続性に着目して、時間的に連続している一連の SOLO 値や FLOAT 値をクラスタとして、数と継続時間をまとめた（表 2）。全 SOLO 値データ 4,079 個のうち大部分の 4,025 個は 83 の SOLO クラスタに分けられた。SOLO クラスタの平均継続時間は 48.5 秒であった。全 FLOAT 値 727 個のうち大部分の 489 個（全体の 67.3%）は 4 つの FLOAT クラスタに分けられた。そのうち 2 クラスタ（データ数 393 個）は SOLO クラスタと連続しており、Age の悪化と関係があると考えられる。また、SOLO クラスタと連続していた FLOAT クラスタの平均継続時間は 291.5 秒で、それ以外の FLOAT クラスタでは 47.0 秒であった。以上から、Age 値の悪化によって生じた SOLO 値のほぼ全ては時間的に連続しており、FLOAT 値の約半数はこの影響を受けてデータが悪化したと考えられる。これらを合わせると、全データから FIX 値を除いたデータのうち約 92.0% を占める。よって 1 周波 RTK-GNSS データの精度を上げるためには、Age 値を悪化させる原因を改善していくことが必要である。

④ Age 値が悪化する原因について

Age 値が悪化する（値が大きくなる）のは、送信された基準局データがデータの伝送過程で遅れる場合と、データ伝送が止まるもしくは一定時間を過ぎてタイムアウトになるために後に送られてきたデータを使用するという 2 通りが考えられる。前者はネットワーク上の問題とキャスタサーバでの処理の遅れが要因である。ネットワーク上で 30 秒以上データが遅れて届くということは現在のインターネットでは考えにくい。また後者については、基準局からデータが一時的に送信されない、または基準局からデータが送信されてもデータ伝送が一時的に止まるなどの状況が考えられる。本システムではインターネット接続のために 4G 回線を使用した。接続の確認のために毎分 ping によって 3 個のパケットをキャスタサーバと管理用のサーバに送信して、その結果をログとして記録した。本論で利用したデータの取得中には接続が切れることはなかった。しかしながら、ping による確認を行ったのは毎分 60 秒間のうちの 3 秒間であったため、それ以外の時間における通信状態については、接続はしているものの伝送速度の低下やキャスタサーバでの処理が滞るなどの事象が発生した場合の確認はできなかった。前述の通り無償でサービスが提供されている外部のサーバを利用したため、その動作状況を直接確認することはできなかった。インターネット回線へアクセスが集中する、キャスタサーバへ多くの基準局や移動局からアクセスが集中するなどして、ネッ

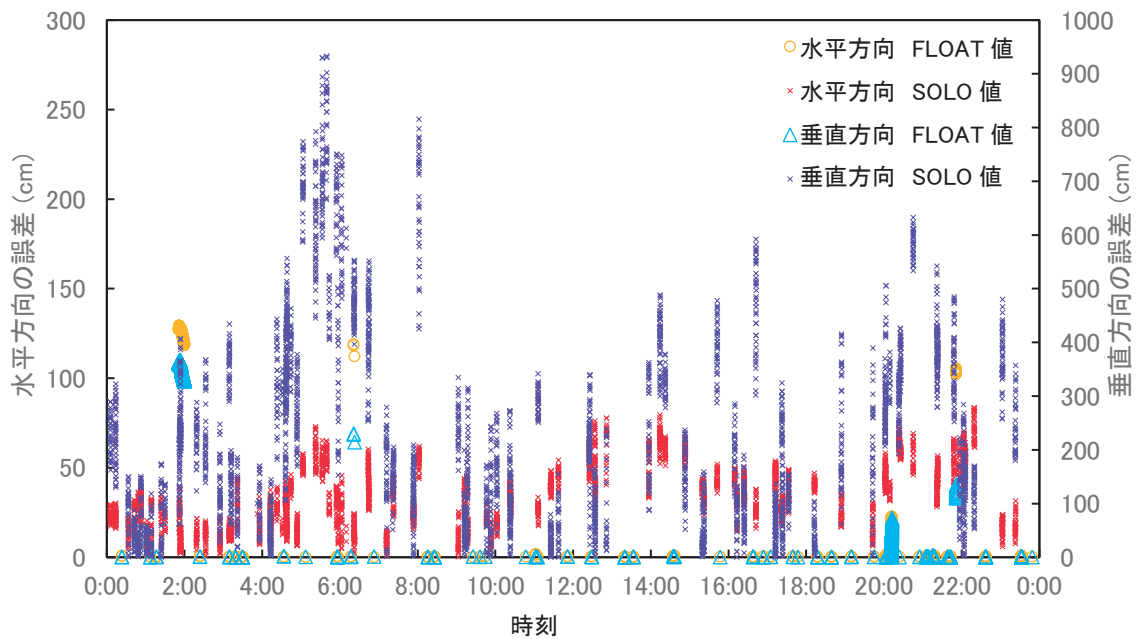


図4 時系列で表示した FLOAT 値および SOLO 値の1秒毎データの誤差

2001年11月1日の約24時間の測定において取得した測位データから FLOAT 値と SOLO 値（両方でデータ数4,806個）について水平方向と垂直方向の誤差を時系列で表示した。誤差の長さへの換算、水平方向の誤差の計算方法および0.1未満の表示方法は図2と同様である。

表2 FLOAT 値および SOLO 値のクラスタと Age 値との関連性

	SOLO 値 (n = 4,079)		FLOAT 値 (n = 727)		
	クラスタ あり	クラスタ なし	クラスタあり		クラスタ なし
			Age 値の悪化 と関係あり	Age 値の悪化 と関係なし	
データ个数	4,025	54	393	96	238
クラスタ数	83	—	2	2	—
クラスタの 平均継続時間	48.5 秒	—	291.5 秒	47.0 秒	—
各分類における割合	98.7%	1.3%	54.1%	13.2%	32.7%

トワークやサーバに大きな負荷がかかっていたことが Age 値が大きくなった原因として考えられる。

⑤ 精密測位における基準局の使い分け

固定点の測量目的に対しては、新村・那須（2022）が行ったように、外部のキャスタサーバを経由した基準局データを取得して10分毎のベストエフォート値を使用する方法は有効であった。これは、SOLO クラスタおよび FLOAT クラスタの継続時間は最長でも500秒程

度であったために、10 分間の残りの時間に良好なデータを取得できていたからであった。

一方で、1 秒毎の測位データをリアルタイムで使用するためには、データの質が良いものだけを採用する方法と、根本的にデータの質そのものを向上させるという 2 通りが考えられる。前者については、表 1 のように、Ratio 値が悪い（3 未満）FLOAT 値と Age 値が悪い（30 以上）SOLO 値を除いた FIX 値が全体の 93.4% を占めるため、FIX データのみ採用するという方法で対応することができる。ごく僅かに含まれるミス FIX 値についても今回のデータを見ると、必要であれば Age 値に閾値を設定することによって避けることができる。前者は今回と同程度であれば、地殻、地盤変動の監視においておおよそ活用可能である。一方で、リアルタイムの高精度の測位データの欠損が問題となる自動車やドローン等の自動運転での利用では、後者が必要になる。今回のリアルタイムデータの解析結果から、移動局における基準局データの受信状態を良好することによって、リアルタイム測位データの質が大幅に改善されることが分かった。そのためには、閉じて安定した情報伝送経路を使用して基準局情報を移動局へ、キャストサーバを介さずに直接送ることが最も理想的である。基準局と移動局が離れている場合には、インターネットを通じて、同様に直接送ることが望まれる。事情によってキャストサーバを使用する場合は、共用のサーバではなく、負荷の軽減と管理の質を高めた状態の自前のサーバを設置することがデータの品質向上につながる。基準局と移動局間のデータ伝送をこのように整備することによって、GNSS 衛星からの電波の受信状態の良い状況では、1 周波の RTK-GNSS 測位によっても十分に精度の高い安定したリアルタイムデータを供給可能になる。

5. まとめ

安価で手軽な RTK-GNSS 測位システムを用いた 1 周波信号（例えば GPS 衛星では L1）を利用したリアルタイム精密測位データの検証と利用可能性の検討を行うために、新村・那須（2020）で構築した、7 階建て校舎の屋上に設置したアンテナを含む受信およびデータ処理システムを用いて 2001 年 11 月 1 日の約 24 時間に取得した全てのデータについて解析を行った。取得した 73,211 個のデータのうち FIX 値は 93.4%，FLOAT 値は 1.0%，SOLO 値は 5.6% であった。取得データの大部分を占める FIX 値の緯度データの標準偏差は 3.1×10^{-8} 度であり、非常に精度が高かった。FLOAT 値では 3.6×10^{-6} 度、SOLO 値では 8.5×10^{-6} 度であり、FIX 値と比較して 2 桁分精度が悪かった。FLOAT 値と SOLO 値が出現する理由を測位データの時系列変化から探ったところ、これらのデータは平均で約 40-300 秒間継続して断続的に出現し、それぞれの出現期間内には Age 値が 30 以上のデータが含まれていることが多く、FLOAT 値の約 67.3% と SOLO 値の 98.7% がこの期間に含まれていることが分かった。このような Age 値の悪化は、ネットワーク回線速度の低下やキャストサーバの一時的な過負荷が原因となっていたと考えられ、1 秒毎のリアルタイムデータを連続して使用する場合には、基準局データを基準局から直接移動局へ送るか、安定動作が保証されているキャストサーバ経由でデータを送る必要がある。

謝辞

本研究は、2022年度熊本学園大学学内研究助成による研究費を使用した。

参考資料一覧

- (1) 新村太郎・那須仁予（2020）：安価な受信機とインターネットを使用したローカル・エリア RTK-GNSS 精密測量システムの構築と検証, 熊本学園大学論集『総合科学』, 26 (1), 15-50.
- (2) 新村太郎・那須仁予（2021）：経時過程における 4G 回線を利用したローカル・エリア RTK-GNSS の精度と再現性の検証, 熊本学園大学論集『総合科学』, 26 (2), 1-20.
- (3) 新村太郎・那須仁予（2022）：安価な一周波タイプローカル・エリア RTK システムとネットワークを使用したリアルタイム精密測位の検証, 熊本学園大学論集『総合科学』, 27 (2), 25-60.
- (4) u-blox 社 ホームページ「ZED-F9P module」
<https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module>（2024 年 9 月 6 日最終アクセス）.
- (5) Septentrio 社 mosaic-X5, RTK 対応 GNSS モジュール
<https://www.septentrio.com/ja/zhpin/gps/gnssshouxinjimoshiyuru/mosaic-x5>（2024 年 9 月 6 日最終アクセス）.
- (6) 善意の基準局掲示板
<http://rtk.silentsystem.jp/>（2024 年 9 月 6 日最終アクセス）.