

GNSS による自動車の高精度位置決定に関する研究

久保信明（東京海洋大学）

Performance Evaluation of GNSS Based Precise Positioning for Automobile
Nobuaki Kubo (Tokyo University of Marine Science and Technology)

Key Words: GPS, GNSS, QZSS, RTK, Multipath

Abstract

We are currently just in the transition period from GPS to Multi-GNSS. Now, it is very important to evaluate the performance of multi-GNSS in terms of discovering the potential applications and interoperability in each GNSS. In this paper, full constellation differential RTK-GNSS using both commercial RTK engine and our developed RTK engine were tested under several environments. The receivers used in those tests were Trimble NetR9 and SPS855.

1. 目的および背景

車両等の移動プラットフォームにおいて、数 cm の精度をリアルタイムでかつ高信頼で得られると、自律で農業機械を動かすための支援が可能となる。さらには自動車の自動運転支援にも役立てることができ、様々な分野における応用が考えられる。これらの可能性を図る上で、きちんとした移動体での RTK 評価を実施することは重要である。

本稿は、これまで測量で利用されてきた RTK の技術を移動体で利用した時の性能についてまとめたものである。特に都市部等では、衛星の可視性が悪くかつマルチパスの影響を受けやすいため、RTK の性能が大きく劣化することが知られていた。一方、GNSS の動向に目をむけると、米国の GPS だけでなく、ロシア、中国、日本、欧州の衛星測位システムも利用できるようになり、マルチ GNSS と呼ばれている。特にこのマルチ GNSS による性能評価実験を行ったのでここに報告したい。

2. マルチ GNSS による車両実験と結果

本節では、実際のマルチ GNSS による車両実験について報告する。大きく 3 つのデータを利用した。

- ① 東京都内の丸の内高層ビル街を含む経路
- ② 東京都内の丸の内高層ビル街経路
- ③ 東京都内の中高層ビル街経路

2.1 東京都内の丸の内高層ビル街を含む経路

2014 年 8 月 13 日から 14 日にかけて、約 25 分 (5Hz) の上記経路で 5 回実験データを取得した。使用した受信機はトリンブル社製 NetR9 と SPS855 である。

NetR9 は基準局として利用し、東京海洋大学第 4 実験棟の研究室の屋上にアンテナ (Trimble Zephyr2 geodetic) を常設している。なおこの基準局受信機の補正データは他の研究者や企業の方にも解放している。詳細は以下のサイトを参照されたい[1]。移動側の車両には、SPS855 受信機とノバテル 703GGG アンテナをルーフに設置した。SPS855 受信機は RTK 移動局用の受信機であり、補正データさえ受信することができれば、リアルタイムの出力結果を得ることができる。今回の実験では、インターネット経由で基準局より放送している補正データ (受信機の NtripCaster を利用) を EMOBILE の PocketWiFi (GL09P) を介すことにより、ノート PC 上の RTKLIB[2]の strsvr(Ntrip で受信)を利用して受信し、シリアル経由で移動側の受信機に渡すことにより RTK を可能とした。なお補正データのフォーマットは CMRx とした。この補正データには、マルチ GNSS の全ての衛星 (GPS、GLONASS、Galileo、BeiDou、QZSS) の補正データが含まれている。図 1 に取得した経路を示した。海洋大越中島キャンパスを出発し、江東区から中央区にまたがる経路である。比較的道路の車線は広いが、時間にして 2-3 分の高架上の道路以外は中高層ビルに囲まれた経路である。表 1 に取得した時間帯を示した。

表 1 取得時間帯 (日本時間)

テスト	走行した時間
1 回目	2014/8/13 13:07 - 13:32
2 回目	2014/8/13 17:26 - 17:52
3 回目	2014/8/13 22:26 - 22:50
4 回目	2014/8/14 8:36 - 9:02
5 回目	2014/8/14 12:07 - 12:35

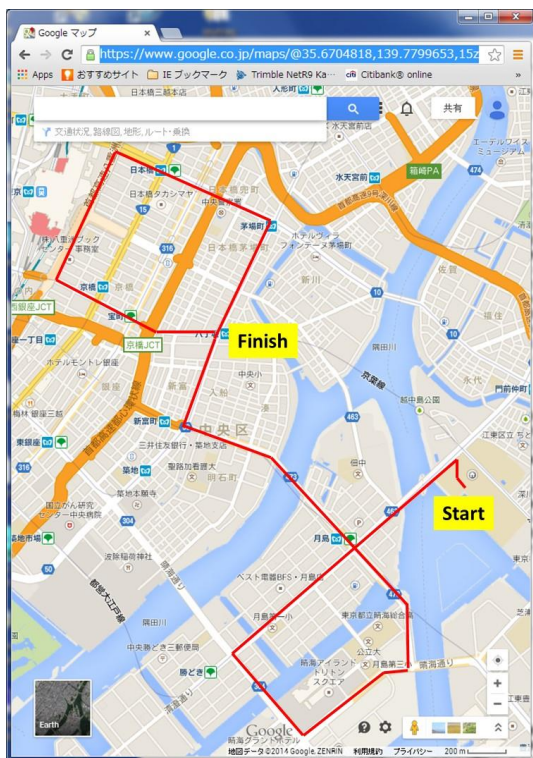


図 1 実際の走行経路

1 回目のテストの結果を以下に詳細に示す。まずトータルで 7550 エポックのうち、7550 エポックで測位結果が得られた。なお短時間ではあるが高架下を 3 回走行し、陸橋の下も 1 回通過している。このときの測位解の種類は、単独測位（フラグ 1）、DGNSS（フラグ 2）、FLOAT 解（フラグ 5）、FIX 解（フラグ 4）の 4 種類であった。

追尾が可能であった衛星数の変化を下の図 2 に示した。これを見るとわかるように、衛星数の変化が非常に激しく、最大で 23 機程度追尾できていた衛星が、多くの時間帯でその半分以下であることがわかる。実際に測位に利用できる衛星数は、このグラフよりもさらに低いことに注意したい。特に RTK 等を行うには、複数周波数で搬送波位相が追尾できていることが極めて重要である。図 3 に測位解のフラグ

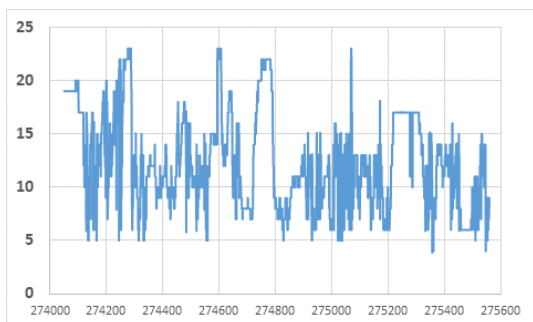


図 2 可視衛星数の変化

の変化を示した、前記の通り、4 が FIX 解である。図 1 の左下の周回道路から高架上を通過して新富町駅付近までは比較的よく FIX しており、日本橋付近や八重洲付近では東京駅前の比較的開けた場所を除いてほとんど FIX していないことがわかる。さらに補正データの遅延時間を図 4 に示した。ほとんどの時間帯において、1 秒前後で推移しており、274600 秒付近で 20 秒以上遅延していたことがわかる。なお、トリンプルの RTK エンジンでは、10 秒以内の遅延では RTK にトライし、10 秒から 60 秒では DGNSS にトライしている。60 秒以上遅れたデータについては単独測位となる。

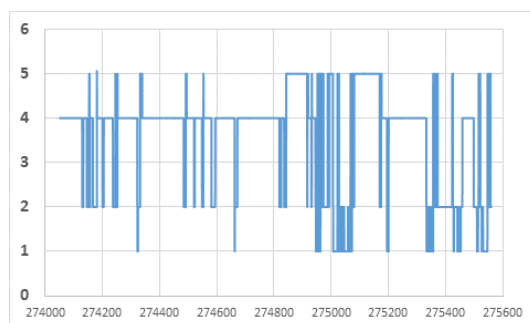


図 3 測位解のフラグの変化

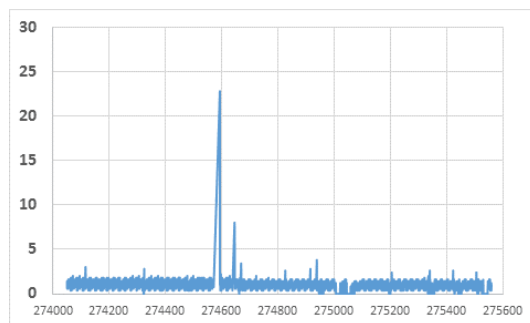


図 4 補正データの遅延時間

図 5 にはこのときの HDOP の時系列推移を示した。途中 20-40 を超える時間帯が数回みられたが、ほぼ 15 程度以内におさまっていることがわかる。RTK の測位結果は、多少のマルチパスが搬送波位相に混入していても、約 2cm の搬送波位相測定精度が保たれるため、おおむね約 30cm 以内の精度（HDOP が 15 のケース）が保たれているといえる。最後の時間帯の 50 を越えている時間帯は、最大 160 程度に達していた。

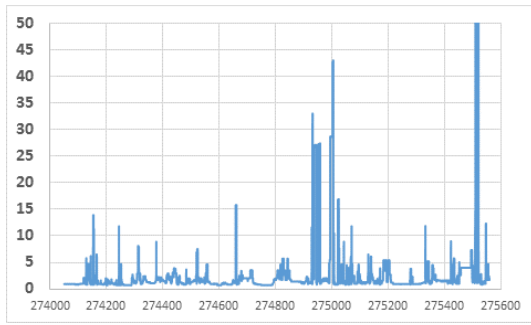


図5 HDOPの時系列推移

次に重要な FIX 率を調査した。トータル 7550 エボックのうち、4431 回 FIX していた。FIX 率は 58.7% であった。図 6、7 に FIX 解のみを抜き出した水平プロット図と高度 (楕円体高度) プロット図を示した。

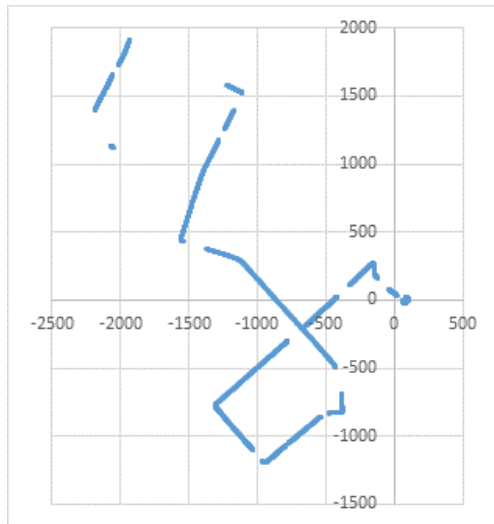


図6 1回目テストの FIX 解の水平プロット図

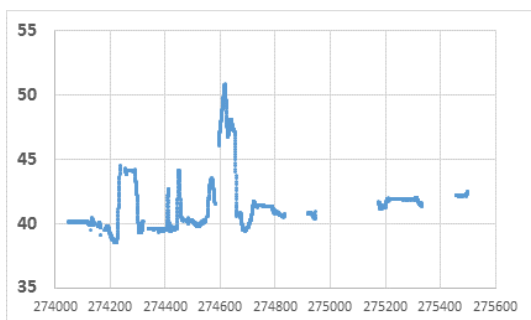


図7 1回目テストの FIX 解の高度プロット図

FIX 解の信頼性については、後の節で述べるが、通常の都市部では 99%以上正しい FIX であることを確認している。丸の内や新宿等の極めて厳しい環境ではもう少し下がるケースが見られる。最後に INS 等と融合する際に重要な FIX 解を得られない時間間隔を、図 8 に示した。

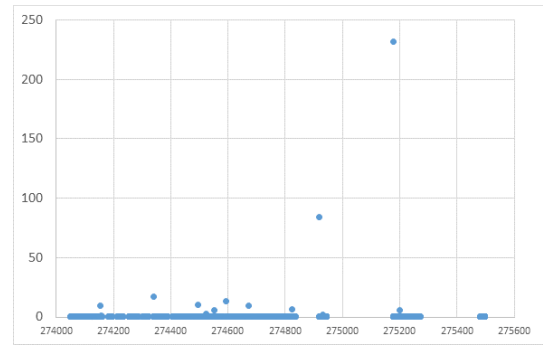


図8 FIX 解同士の時間間隔

八重洲付近の高層ビル街において、1 度 200 秒を超える 231 秒間、FIX 解が得られていない。ただし、2 番目に長い時間は 84 秒であり、3 番目以降はすべて 18 秒以内であった。この図の特徴は、受信機搭載の RTK エンジンに依存する部分があるが、おおまかにみると、マルチ GNSS 利用の RTK で、超高層ビル街を除く、通常の都市部では低コスト IMU や車載スピードセンサとの併用で水平 50cm 以内程度の精度を出すことは困難でないことが予想されるが、高層ビル街で水平 50cm あたりを担保することは低コスト IMU では困難である。

以下の表 2 に 5 走行分のテスト結果をまとめたものを示した。表 2 において、#1 は平均可視衛星数、#2 は FIX 率、#3 は補正データ遅延の最大時間、#4 は FIX 解同士の最大時間間隔とした。平均可視衛星数は RTK に利用された利用衛星数ではないことに注意されたい。

表2 5つの走行をまとめた結果

	#1	#2	#3	#4
Test1	12.3	58.7%	23 秒	231 秒
Test2	12.3	75.4%	29 秒	227 秒
Test3	13.6	65.5%	27 秒	252 秒
Test4	12.4	60.0%	22 秒	159 秒
Test5	14.2	70.5%	6 秒	95 秒

GPS のみのケースとマルチ GNSS のケースで一体どの程度 RTK の性能に差があるのかを検証した。前述の実験のうち、5 回目のテストでは、2 つの SPS855 受信機を準備し、1 つはマルチ GNSS による RTK、もう 1 つは GPS のみによる RTK を実施した。同じ GPS703GGG アンテナより分岐してそれぞれの受信機へ接続した。表 5 に比較結果を示した。左から、平均可視衛星数の結果を見てもわかるように、大きな性能差が見られた。FIX 率においては、GPS のみでは約 27%のところ、マルチ GNSS によって約 71%まで改善していた。

表 5 マルチ GNSS と GPS の比較

	#1	#2	#3	#4
マルチ	14.2	70.5%	6 秒	95 秒
GPS	5.8	26.8%	10 秒	189 秒

2.2 東京都内の丸の内高層ビル街の経路

2014 年 10 月 26 日の 13 時 10 分から 14 時 30 分にかけて、約 15 分 (5Hz) の 5 周回の実験データを取得した。ここでは重要な結果のみ紹介する。FIX 解 (研究室ソフト) の水平位置を図 10 に示した。FIX 率は 41.2% であった。水平プロット図をみるとわかるように、場所によっては、5 周回しても 1 度も FIX 解を得られないことがわかる。ミス FIX についても通常の都市部と比較してやや多くなる傾向にあった。FIX 解の出せない時間帯を見ると、最大 264 秒であった。さらに 4 回 100 秒以上 250 秒以内の間隔があったが、それ以外は全て 100 秒以内であった。

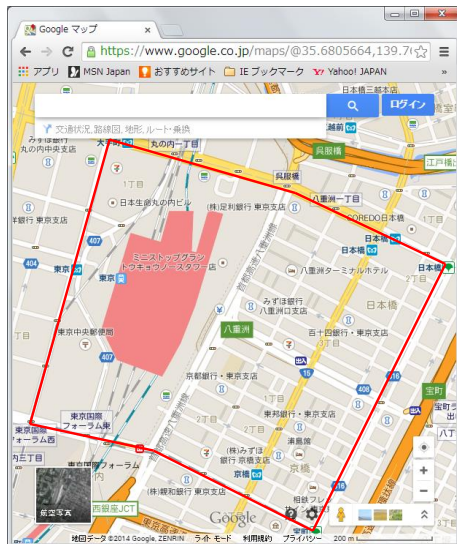


図 9 実際の走行経路

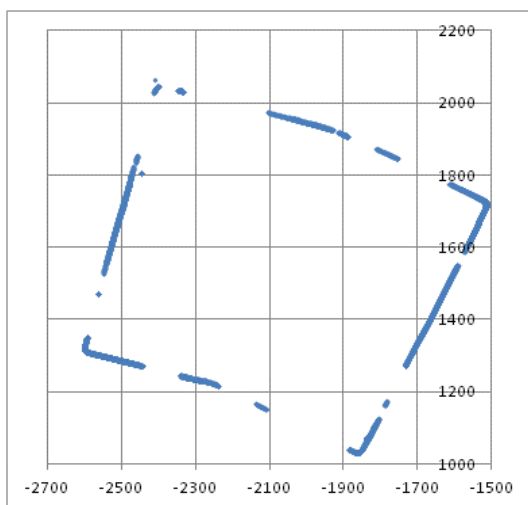


図 10 5 周回分の FIX 解の水平プロット図

2.3 東京都内東京都内の中高層ビル街経路

2015 年 5 月 15 日に越中島キャンパスから月島経路のコースを約 18 分かけて走行した (衛星配置は配慮せず 24 時間で平均的な衛星数)。このコースは 1 回の陸橋と 1 回の高架下を含み、交差点付近は高層ビルが立ち並んでいる経路である。これまでの 2.1 と 2.2 と比較すると比較的周囲の開けた場所も走行している。そのときの FIX 解 (研究室ソフト) の水平プロットと楕円体高度結果を図 11、12 に示した。FIX 率は 91.9% であり、1m を越えるような大きなミス FIX は 1-2 ケースであった。このように、丸の内や新宿といった特殊な高層ビル街を除くと、現状のマルチ GNSS で 90% 以上の FIX 解を容易に得ることがわかった。本周回コースについては、上記以外に 10 回以上テストしているが、ほぼ 90% 以上の FIX 率 (研究室ソフト) を得ている。

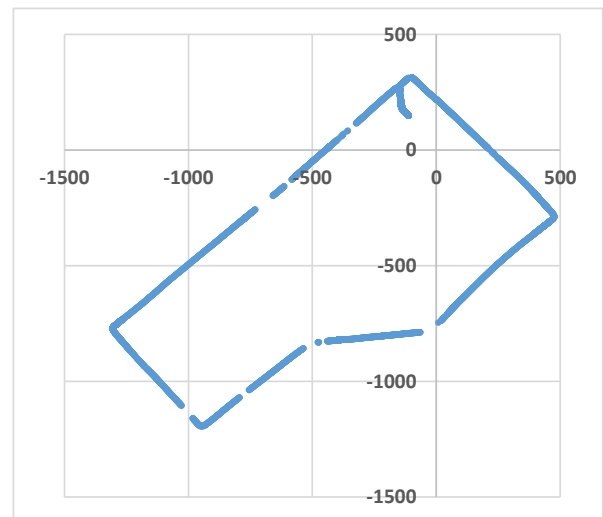


図 11 FIX 解の水平プロット図

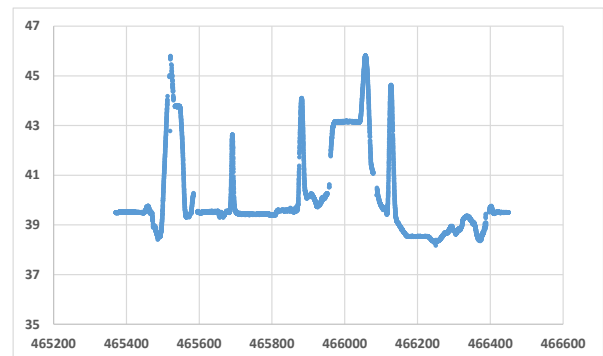


図 12 FIX 解の高度方向プロット図

3. 都市部移動体 RTK の FIX 解の信頼性[3]

ここでは都市部移動体における RTK の FIX 解の信頼性について報告したい。前節では、リアルな RTK の性能を評価したが、その FIX 解の信頼性がどの程

度なのか把握することは、アプリケーション側にとって極めて重要である。実験は東京海洋大学周辺の2つの経路で行われた。データ取得日は2013年10月2日である。使用受信機は、基準移動側ともにトリブナル製 NetR9 である。RTK に用いた衛星は GPS、QZS そして BeiDou である。2つのテストコースを以下の図13に示した。月島側は中高層ビル街で、八重洲側は高層ビル街となる。

このときの衛星配置もあわせて以下の図14、15に示した。図14は月島側のコースで、図15は八重洲側のコースである。衛星配置をみてわかるように、月島側実験時は青の準天頂衛星が85度付近に存在し、準天頂衛星の効果がでることが予想される（緑がGPS、赤がBeiDou）。一方、八重洲側実験には、GPSとBeiDou衛星が75度付近に存在した。RTKに際して、GPS+QZSの衛星群とBeiDouの衛星群で分けて二重位相差を生成し、それら観測データを用いて、LAMBDA法でアンビギュイティを決定した[4]。



図13 2つのテストコース（東京都内）

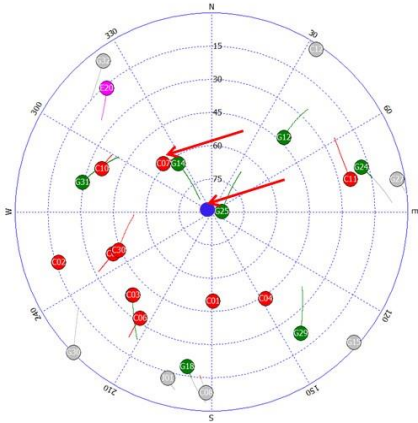


図14 月島側実験時の衛星配置

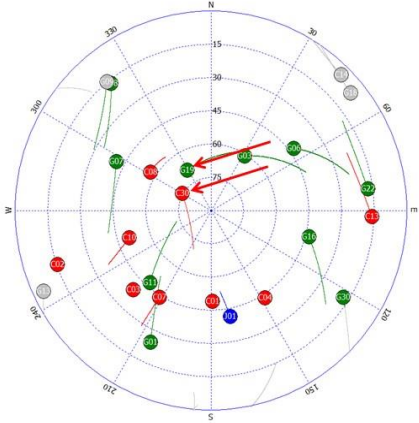


図15 八重洲側実験時の衛星配置

Ratio テストの閾値は3としている。表3と4にそれぞれのコースでの結果を示した。FIX 率（%）、FIX ができなかった最大時間間隔（秒）そして水平 50cm 以内に入った割合の3つの指標値を用いた。なお、このときのレファレンスはニコン・トリブナル社に依頼して POS/LV で算出したものである[5]。

表3 月島側コースでの RTK-GNSS の結果

	FIX 率	最大時間 間隔	水平 50cm 以内の割合
GPS	21.7	195	99.96
GPS/QZS	39.8	176	99.73
GPS/QZS/BeiDou	71.6	60	99.85

表4 八重洲側コースでの RTK-GNSS の結果

	FIX 率	最大時間 間隔	水平 50cm 以内の割合
GPS	22.0	416	99.74
GPS/QZS	27.1	415	99.80
GPS/QZS/BeiDou	33.1	128	96.56

表3と4の結果をみてわかるように、GPSのみの性能と比較して、準天頂衛星とBeiDou衛星を追加した効果は明らかである。特に準天頂衛星が天頂付近に存在する月島側コースでの性能改善は非常に大きかった。またBeiDou衛星追加による効果もみられ、GPS/QZSと問題なく併用できることが確認された。FIX解の最大時間間隔にも顕著な差が見られた。水平 50cm 以内の割合は、八重洲側の GPS/QZS/BeiDouの時に96%台に落ち込んでいるが、それ以外は99.7%以上であった。このときの絶対水平誤差を小さい値から並べた結果を図16、17に示した。横軸は累積パーセンテージを示しており、最大で100%となる。

100%のポイントは最大誤差を示している。縦軸は実際の水平絶対誤差である。図内のパーセンテージ数値は誤差50cmでの値である。この2つの図において、10-20cm程度の差が見られる部分はおそらくPOS/LV側の誤差ではないかと思われる。POS/LV側はRTKと高精度なジャイロ及び距離測定装置を用いたカップリング結果のため、RTKの結果そのままにはならないと考えられる。RTKのFIX解は実験時のHDOPがおおむね1-5前後であることもあり、5cm程度以内の精度と考えられる。一方、POS/LVとの差が50cmを超えてくる領域は、おそらくRTK側のミスFIXによるものと考えられる。その意味において、月島側でのミスFIXは10回以内であり、八重洲側では数10回発生していた。最新のソフトではさらにミスFIXの回数を減らすことが可能である。

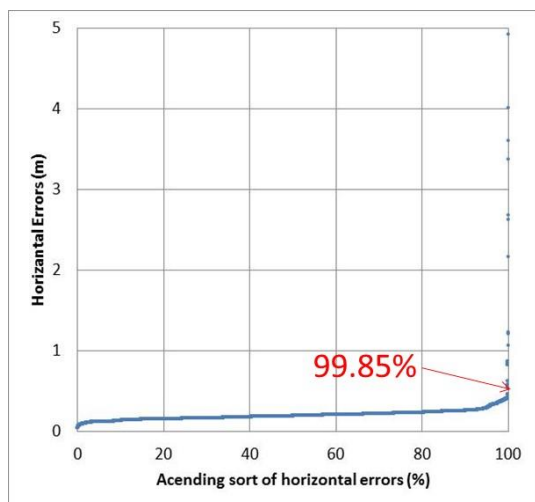


図 16 水平絶対誤差を小さい値から並べた結果
(月島側 GPS/QZS/BeiDou)

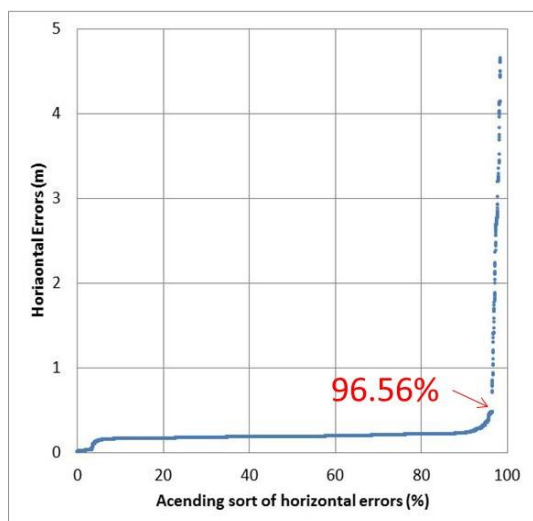


図 17 水平絶対誤差を小さい値から並べた結果
(八重洲側 GPS/QZS/BeiDou)

4. おわりに

本稿では、マルチ GNSS による高精度測位実験を都市部で実施し、その実験結果を報告した。実環境でのリアルタイムでの性能という意味において、マルチ GNSS の RTK の性能が、GPS と比較して大きく向上することが示された。都市部の異なる環境を混合した 30 分程度の走行で、おおむねどの時間帯でも 60-70% の FIX 率を得られた。また、都市部の超高層ビル街では、道路幅が広がったとしても、RTK の FIX 解を十分に得ることは、現状のコンステレーションでは厳しいこともわかった。一方周囲の比較的開けた都市部では容易に 90% 以上の FIX 率を得ることができた。日本の準天頂衛星のように、非常に高仰角に滞在する衛星は、3 節の結果からもわかるように、天頂付近に衛星がいる時間帯は、高精度測位への寄与が極めて大きいことを確認した。

FIX 解の信頼性に目を向けると、LAMBDA 法における二重位相差観測データを、2 周波で 5 機以上入力できれば、おおむね 99% 以上で DOP の値に応じた精度を出せることがわかった。マルチ GNSS の RTK の場合、他国の衛星間での二重差をとることが困難なため、基準衛星を複数設定する必要があることに注意されたい。

参考文献

- 1) <http://www.gnss-learning.org/>
- 2) <http://www.rtklib.com/>
- 3) 久保信明, “GPS からマルチ GNSS の時代へ”, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会, 5/21-23, Kyoto, 2014
- 4) P. J. G. Teunissen, “The Least-Square Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation,” *Journal of Geodesy*, Vol. 70, No. 1-2, pp. 65-82, 1995.
- 5) <http://www.applanix.com/products/land/pos-lv.html>