

3I14 移動体 RTK における準天頂衛星の効果について

久保信明、安田明生（東京海洋大学）

The effects of QZSS in the RTK in urban areas

Nobuaki Kubo and Akio Yasuda (TUMST)

Key Words: GPS, GNSS, RTK, QZSS

Abstract

It is known that the availability of RTK in urban areas is not so good. There are two main reasons. One is frequent cycle slips. The second one is the bad constellation of satellites. In this paper, the effect of the number of visible satellites on RTK was investigated. Furthermore, the availability of RTK in urban areas was investigated using GPS or using GPS with three QZS. Since QZS has not been launched yet, it was analyzed in the simulation from the scheduled signal of QZS.

1. 目的及び概要

都市部移動体における RTK は、利便性が非常に悪いことが知られている。その主な理由として、頻発するサイクルスリップや可視衛星が不足することによる衛星の配置の悪さがあげられる。本研究では、まず可視衛星数の RTK に対する影響を明らかにした。実際の都市部における電波環境で、どの程度 RTK 測位がうまくいくのかを調査した。可視衛星数や信号強度は、実際に都市部を車で走行して取得した生データを利用した。また、現在の GPS 衛星群に準天頂衛星 (Quasi Zenith Satellite : QZS) が 3 機加わった場合の効果についても言及した。準天頂衛星は、まだ打ち上げられていないため、予定されている信号より、シミュレーションで解析を行った。

2. 可視衛星数と RTK の性能の関係

2 - 1 RTK のアルゴリズム

RTK のアルゴリズムの中で、最適かつよく知られている手法は、LAMBDA 法である[1]。この手法は、整数最小二乗法において、最適な解を探索することができる。一方、この手法以外にも、Hatch のアンビギュイティ決定手法（以下では Hatch 法と呼ぶ）等が知られている[2]。都市部移動体で RTK を行うには、1 エポックでアンビギュイティを解くことは大きなメリットとなる。なぜなら、搬送波位相のサイクルスリップ等が頻発した場合でも、影響がないからである。ただし、搬送波位相のトラッキングがある程度継続できる場合は、常に 1 エポックで解く必要はなく、バランスが重要であるといえる。ここでは、

可視衛星数と RTK の性能を同条件で比較するため、1 エポックでの性能を調査した。

2 - 2 1 エポックでの FIX 率

1 エポックでの FIX 率を、国土地理院の基準点データを用いて調査した。1 エポックの意味は、そのエポックの生データのみで解の候補を 1 つに絞ることである。可視衛星数との関係を比較するために、可視衛星数ごとに分けて FIX 率（単位は%）を調査した。FIX 率とは、正しく FIX した回数を、計算した全回数で割った値である。例えば、可視衛星数が 5 個である全回数が 500 回で、そのうち正しく FIX した回数が 250 回であれば、FIX 率は 50%となる。

データは 2007 年 8 月 5 日から 8 月 11 日の 1 週間分である。可視衛星数が 5 個以上の時間帯で比較した。基線長が約 0.3km の場合（筑波 1 と筑波 2）と約 13.3km（市川と花見川）の場合で比較した。また、LAMBDA 法と少し改良した Hatch 法[3]の両方で計算することにより、双方の計算手法による性能差もチェックした。表 1 に LAMBDA 法での結果、表 2 に Hatch 法での結果を示す。それぞれ、1 行目は可視衛星数を示し、2 行目は基線長が約 0.3km での FIX 率、3 行目は基線長が約 13.3km での FIX 率である。表 3 には可視衛星数ごとではなく、全ての時間での FIX 率を基線長ごとに示した。

LAMBDA 法では、0.3km のときのマスク角を 15 度、13.3km のときのマスク角を 20 度とした。Hatch 法は、いずれもマスク角は 10 度である。このようにマスク角を設定した理由は、LAMBDA 法では、仰角

の低い衛星を利用すると、FIX 率が安定しない現象がみられたからである。表 1 と表 2 を比較して、可視衛星数ごとの FIX 率を見ると、Hatch 法の結果が悪く見えるが、実際には、マスク角 10 度のときの可視衛星 5 個の時間帯は非常に短く、一方、マスク角 20 度のときの可視衛星 5 個の時間帯は長かったので、表 3 のような結果になった。なお、Hatch 法では、アンビギュイティの探索に際して、DGPS の水平位置でのチェックも行っている。

表 1 LAMBDA 法：1 週間の可視衛星数毎の FIX 率

	5	6	7	8	9	10	11
0.3km	100	99.2	99.9	100	100	100	100
13.3km	75.6	88.6	94.7	97.7	99.2	100	

表 2 Hatch 法：1 週間の可視衛星数毎の FIX 率

	5	6	7	8	9	10	11
0.3km	47.6	81.7	93.6	98.5	99.1	99.8	99.9
13.3km	19.7	63.7	92.0	97.0	98.6	98.7	99.6

表 3 全時間での FIX 率の比較 (1 週間分)

	LAMBDA 法	Hatch 法
0.3km	99.9%	96.0%
13.3km	90.5%	94.1%

上の結果より、可視衛星数と FIX 率の関係は明らかである。可視衛星数が多ければ多いほど、FIX 率は高くなり、基線長が長くなると FIX 率は低下している。アンビギュイティを求める手法の比較では、最適な手法である LAMBDA 法が優れていることも確認できた。短基線では、ほぼ 100% の FIX 率であった。以上の結果より、比較的周囲の開けた屋上のデータでは、おおかた上記のような性能になることが予想される。都市部等の可視衛星数の少ない場所では、LAMBDA 法を用いた場合でも、期待する FIX 率を得ることは容易に期待できないことが予想される。都市部では、疑似距離及び搬送波位相のマルチパス等もさらに誤差の要因となるためである。

3 . 都市部生データの解析

3 - 1 都市部における衛星の可視性

都市部における、衛星の可視状態を把握するために、2005 年に車で東京 23 区内を走行した時の生データより、捕捉衛星とその信号強度を取り出した。30 分程度の走行を様々な場所で繰り返し行ったため、それらのデータを全てつなぎ合わせ、12 時間分の生

データを抽出した。使用受信機は 2 周波で高精度測位用の NovAtel 社製 OEM4 受信機で、使用アンテナは NovAtel 社製 GPS702 であった。この 12 時間での可視衛星数の割合を表 4 に示した。一番左は 4 個未満の割合、一番右は 8 個以上の割合である。

表 4 都市部移動体での可視衛星数の割合 (%)

	~4	4	5	6	7	8~
割合	20.1	16.2	19.1	18.6	12.9	13.1

表 4 からわかるように、都市部では、可視衛星数が 4 個未満の測位不能の時間帯が約 20% 存在している。信頼性の高い RTK 測位に必要な可視衛星数は、7 個から 8 個程度以上であることから、都市部では、可視衛星数だけの観点からみても、数 cm の高精度測位には厳しい状況であることがわかる。

3 - 2 RTK 測位シミュレータ

3 - 1 項で述べた、都市部生データを利用して、RTK の利便性を解析するために、本研究室では測位用シミュレータを開発してきた[4]。実際に移動体データと同時に取得した基準局データを用いて、RTK の計算をすることは可能であるが、移動体の場合、真値を求めることが非常に困難であるため、正確に FIX 率等を算出することができない。また、測位シミュレータを用いれば、新たな信号を追加した場合にも、すぐに対応することが可能である。特に、GNSS の近代化で、第 3 番目の周波数が追加されることは決定しており、その効果を解析することにした。また、日本の準天頂衛星が 3 機追加された場合についても解析した。

測位シミュレータ内での解析の手順は、図 1 に示す通りである。アンビギュイティ決定手法は、先に述べた Hatch 法を用いた。できるだけ、都市部の状況を正確に反映するために、可視衛星数と信号強度は、生データそのものを利用した。疑似距離と搬送波位相の雑音による誤差は、生の信号強度に基づいて計算した。さらに、都市部での GPS のマルチパス統計データを利用して、人工的にマルチパスを発生させ、疑似距離と搬送波位相のマルチパス誤差を計算し、付加した。受信機内部の重要なパラメータも変更可能とした。特に本解析では、代表的なナローコリレータ (narrow correlator) とストロボコリレータ (strobe correlator) の 2 種類で解析した[5,6]。追加する準天頂衛星の信号は、GPS と同様として計算した。表 5 に GPS 及び準天頂衛星の代表的な信号パラ

メータを示し、図 2 に準天頂衛星の軌道を示した。
 なお、準天頂衛星の離心率は 0.099、軌道傾斜角は 45 度とした。

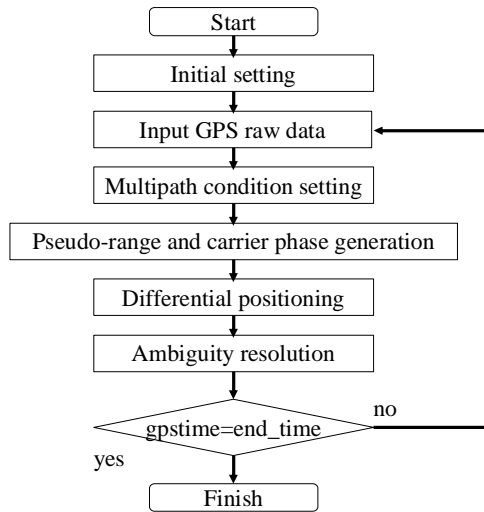


図 1 測位シミュレータの解析手順

表 5 代表的な衛星の信号パラメータ

周波数帯:	L1	L2	L5
搬送波 [MHz]	1575.42	1227.6	1176.45
チップ率 [MHz]	1.023	1.023	10.23
バンド幅 [MHz]	20	20	20
受信電力 [dBm]	-158	-165	-158

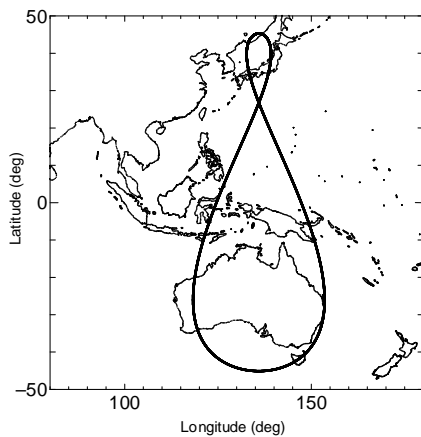


図 2 準天頂衛星の軌道

4 . 解析結果

ここでは、本研究室で開発した測位シミュレータを用いて、解析した結果を示す。

4 - 1 . 準天頂衛星 3 機による可視性の向上

まず、3 機の準天頂衛星を都市部生データにおける GPS 衛星群に付加した場合の、可視衛星数の相対頻度を表 6 に示した。

表 6 都市部移動体での可視衛星数の割合 (%)

	~4	4	5	6	7	8~
割合	8.0	8.1	14.1	19.3	20.9	29.6

表 4 の GPS のみの場合と比較すると、大幅に可視性が向上していることがわかる。準天頂衛星は、日本付近の上空を長時間滞在することから、GPS が 3 機追加された場合よりも効果が出ていると思われる。1 エポックでの RTK に必要な可視衛星数は 5 個であるが (Hatch 法の場合) 5 個以上の可視率でみると、GPS のみの場合の 64% から、準天頂衛星を 3 機追加したことにより 84% まで向上している。これは、RTK 測位の観点からみると、非常に有益であるといえる。

4 - 2 . DGPS の測位結果

表 7 及び表 8 に、GPS のみの場合と、GPS + 準天頂衛星の場合の DGPS 測位結果を示した。DGPS 測位は、測位シミュレータで生成した疑似距離のみを利用している。それぞれの表の 1 行目は、DGPS 測位の水平誤差の絶対値の範囲を、2 行目はストロボコリレータを用いた場合の誤差範囲に対応する相対頻度、3 行目はナローコリレータを用いた場合の誤差範囲に対応する相対頻度を示した。この結果より、準天頂衛星を 3 機付加した場合でも、精度はそれほど変化していないことがわかる。しかし、DGPS 測位を行うには、最低 4 個の可視衛星が必要であり、DGPS 測位を行うことができた利便性の観点からみると、GPS のみの場合の 80% から、3 機の準天頂衛星を追加したことにより、92% まで増加していることに注目しなければならない。ストロボコリレータとナローコリレータで大きな差が出ている理由は、受信機内部のコリレータの性能の差と考えてよい。ストロボコリレータは、マルチパス波の遅延距離が 30m 程度以上のマルチパスの影響を受けにくいのに対して、ナローコリレータは遅延距離が 30m 以上のマルチパスの影響を受けるため、大きなビルが立ち並ぶ都市部の環境では、性能の差が出やすいことがわかる。

表 7 DGPS 水平測位誤差の分布 (GPS のみ)

水平誤差 (m)	0-1	1-2	2-4	4-6	6-
Strobe (%)	73.8	16.0	6.5	1.3	2.4
Narrow (%)	33.5	26.7	26.6	6.6	6.6

表 8 DGPS 水平測位誤差の分布 (GPS+QZS)

水平誤差(m)	0-1	1-2	2-4	4-6	6-
Strobe (%)	72.2	17.8	6.2	1.4	2.4
Narrow (%)	39.0	27.0	24.5	4.8	4.7

4 - 3 . RTK の測位結果

4 - 3 - 1 . GPS (2 周波) の場合

表 9 に、GPS の L1,L2 帯の情報を利用した場合のアンビギュイティ FIX 率に関する結果を示した。表の 2 列目は 1 エポックで正しく FIX した割合、3 列目は誤って FIX した割合、4 列目は可視衛星が 4 個以下であった割合を示している。

表 9 FIX 率 (GPS with L1,L2)

	1epoch Fix	Wrong	No-RTK
Strobe (%)	40.0	22.8	37.2
Narrow (%)	24.5	38.4	37.2

表の結果より、GPS のみでは、可視衛星数自体が少なく、全体の 6 割程度しかないことがわかる。FIX 率を見ると、コリレータの性能差が出ていることがわかる。アンビギュイティ決定の性能は、搬送波位相だけでなく、疑似距離の測位精度にも強く依存しているため、できるだけマルチパス誤差を低減させることが重要であることがわかる。

4 - 3 - 2 . GPS (3 周波) の場合

表 10 に、GPS の L1,L2 帯及び L5 帯の情報を利用した場合のアンビギュイティ FIX 率に関する結果を示した。表の内容は前記の通りである。第 3 の周波数が追加されたことにより、L2 と L5 の線形結合から、以前よりも長い仮想的な搬送波位相の波長を作り出すことができる(約 5.8m)。よって、DGPS 測位誤差が 2-3m 以上に達しているような場合でも、正しいアンビギュイティを求めることが可能になっていることがわかる。いずれのコリレータでも正しい 1 エポックでの FIX 率が上昇し、誤った FIX 解が減少している。

表 10 FIX 率 (GPS with L1,L2 and L5)

	1epoch Fix	Wrong	No-RTK
Strobe (%)	58.3	4.5	37.2
Narrow (%)	49.9	12.9	37.2

4 - 3 - 3 . GPS+QZS (3 周波) の場合

表 11 に、GPS と QZS の L1,L2 帯及び L5 帯の情報を利用した場合のアンビギュイティ FIX 率に関する結果を示した。表の内容は前記の通りである。表 11

より、GPS のみでは、可視衛星数が不足していた時間帯においても計算できるようになり、その時間帯が、ほとんどそのまま正しい FIX 率の向上につながっていることがわかる。可視衛星数を増加させることが、RTK 測位の利便性を向上させる重要なポイントの 1 つであることがわかる。

表 11 FIX 率 (GPS,QZS with L1,L2 and L5)

	1epoch Fix	Wrong	No-RTK
Strobe (%)	79.8	3.8	16.4
Narrow (%)	71.0	12.6	16.4

5 . まとめ

本稿では、都市部移動体での RTK の利便性の観点より解析を行った。特に可視衛星数と RTK の関係、マルチパス誤差と RTK の関係、新たな周波数の追加と RTK の関係を調査した。

実際の生データ及び測位シミュレーションの結果より、可視衛星数を増加させることは、RTK の利便性を向上することに直結することが示された。その意味で、日本付近では、3 機の準天頂衛星を追加した場合の効果が大きいことがわかった。また、マルチパス誤差の低減は引き続き重要な課題であることもわかった。GNSS 近代化により、第 3 番目の周波数が追加されることが見込まれているが、この効果も確認することができた。

今回の解析に用いたアンビギュイティ決定手法は最適なものではないので、今後は、最適な LAMBDA 法での解析、開発した測位シミュレータの精度向上を目指していくことが必要である。すでに、静止データでは、測位シミュレータの妥当性を確認しているため、移動体データによる、測位シミュレータでの結果と、実際の生データでの結果の比較検証を行う予定である。

謝辞

本稿の執筆及びソフトウェア開発に際し、有益な情報を提供して下さった、高須知仁氏に大変感謝いたします。

参考文献

- [1] Teunissen, P., Joosten, P. and Tiberius, C. (2002): A Comparison of TCAR, CIR and LAMBDA GNSS Ambiguity Resolution, ION GPS 2002, pp. 2799-2808.
- [2] Hatch R. (1991): Instantaneous Ambiguity Resolution ,

Proceedings of International Association of Geodesy
Symposia 107 on Kinematic Systems in Geodesy,
Surveying and Remote Sensing, New York,
Springer-Verlag, pp. 298-308

- [3] Tsujii, T., M. Murata, M. Harigae, T. Ono and T. Inagaki
“Development of Kinematic GPS Software, KINGS, and
Flight Test Evaluation,” TECHNICAL REPORT OF
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY, October
1998.
- [4] N.Kubo, A.Yasuda, “How multipath error influences
modernized GNSS ambiguity resolution in urban areas”,
European Navigation Conference 2007, Geneva.
- [5] Van Dierendonck, A.J., Fenton, P. and Ford, T., Theory
and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS
Receiver Navigation, Journal of the Institute of
Navigation, USA, Vol.39, No.3, Fall 1993, pp.265-283.
- [6] L. Garin, Dr. F. van Diggelen, J.M. Rousseau, Strobe &
Edge Correlator - Multipath Mitigation for Code, ION
GPS-96, Kansas City, KS, September, Part1, pp.657-664.