都市部における RTK-GPS の信頼性向上^{*1}

RTK-GPS Reliability Improvement in Dense Urban Areas

白 井 友 子^{*2}・久 保 信 明^{*2}
Tomoko SHIRAI and Nobuaki KUBO

Key Words : RTK-GPS, Ratio Test, Reliability

Abstract : It is expected that the use of GNSS technology in urban areas will be increased. Since there are many buildings in urban areas, the direct signal from satellite occasionally can be reflected or diffracted. As a result, we are faced with big errors due to multipath. It is strongly required to improve reliability considering the use of GNSS for future ITS. In order to do that, the ability to detect the inferior observations of GNSS is required. The objective of this paper is to improve reliability and availability in RTK-GPS. Firstly, this study reveals the relationships between reliability and availability according to the quality check of GPS observation data. For example, reliability decreases when the measurement calculation is done with four numbers of satellites compared with five numbers or more of satellites. Then the detection algorithm to remove the inferior observations of GPS is proposed. The performance was checked by using raw GPS data obtained in major cities and it is confirmed that the performance was improved by using our proposed method.

1. は じ め に

RTK-GPS (Real-Time Kinematic GPS) は数 cm の精度で、瞬時に位置決定が可能な測位システムである。現在、測量や地殻変動推定など、静止点や周囲に電波を遮るものが少ないところで多く利用されている。今後は ITS (Intelligent Transport Systems) や精密農業など、移動体や周囲に電波を遮る建物の多い場所、都市部での積極的な利用が期待される。ITS は道路交通が抱える事故や渋滞、環境対策など、様々な課題を解決するためのシステムとして考えられている。移動体の制御支援に RTK-GPS を利用する場合、正確な位置情報を入手することが重要となる。本研究では、都市部における RTK-GPS の信頼性向上を目的とした。RTK 測位で重要となるアンビギュイティ決定には、アンビギュイティ探索手法の 1 つとして確立している LAMBDA 法¹⁾ (Least-square Ambiguity Decorrelation Adjustment) と Ratio テスト²⁾ を利用した。信頼性向上のため、具体的には、Ratio テストや信号強度、可視衛星数などが測位精度に与える影響について報告する。本論文の流れは以下の通りである。まず、RTK-GPS 測位の概要と都市部での現在の性能について述べ、提案する手法として信号強度や可視衛星数に着目した方法を述べた。次に名古屋、丸の内、月島の 3 カ所において行った実験結果と考察を述べ、都市部移動体での信頼性や利便性についてまとめた。

2. RTK-GPS の概要と現状

2.1 RTK-GPS の概要 本研究では 2 周波の観測データを用いており、L1 帯と L2 帯の信号を受信する。衛星側と受信機側の時計誤差を消去する二重差の観測方程式を用いた。また、アンビギュイティ決定には LAMBDA 法を使い、推定されたアンビギュイティを検証するため Ratio テストを利用した。通常、Ratio テストの値が 3 以上であれば FIX 解と判定される³⁾。しかしこの定数 3 についての明確な統計的、確率的な基準はなく目安に過ぎない。

ITS への利用を考慮した場合、道路や自動車の大きさなどから水平誤差 1 m 以内程度が最低の条件となってくる。そのため、本研究では測位回数に対して FIX 解が求められた割合を利便性とし、すべての FIX 解のうち水平絶対誤差 1 m 以内である割合を信頼度として計算した。Ratio テストを満たし、FIX 解と判定されたにもかかわらず、水平誤差 1 m 以上となるミス FIX の判定には、POSLV⁴⁾ (ニコン・トリニブル社) で算出される精密位置を利用した。POSLV の方式は慣性計測装置、距離計測指標、GPS を利用しており、数 cm 程度の精度で常時測位可能である。メーカーの公称位置精度は、本論文の実験場所においても 10 cm 以内であった。よって FIX 解の誤差と見なしている値に、POSLV の誤差は 10 cm 以内程度見積もられる。第 1 図に本研究における信頼度チェック手順をフローチャートにしてまとめた。

まず、衛星ごとに観測データ品質チェックを行い、測位に利用する衛星を決定する。品質チェックの結果、衛星数が 4 機以上であれば測位計算可能であるが、衛星配置により誤差が異なるので、HDOP のチェックも行う。測位計算可能であれば、LAMBDA 法によりアンビギュイティ決定を行い、Ratio テストにより FIX 判定を行う。本論文では、

^{*1} © 2012 日本航空宇宙学会
平成 23 年 6 月 17 日原稿受付
^{*2} 東京海洋大学

第1図 信頼度チェックのフローチャート

Float 解を利用せず, FIX 解と擬似距離の DGPS 解を用いた. その理由は, 1 エポック (1 回の観測) ごとにアンビギュイティを推定し, 測位解を算出する場合, これまでの実験結果より, Float 解の精度は DGPS の精度とあまり変わらなかったためである. また, 都市部での Float 解の精度は 1m を超えることも多く, 多少ミス FIX があっても FIX 解を用いる方が, 精度が良いと考えた. 1 エポックごとにアンビギュイティを推定する理由は, 都市部移動体では時々刻々と周囲の環境が変化し, 電波の遮蔽と受信が繰り返されるため, サイクルスリップ等が頻発した場合でも, その影響を受けないようにすることができるからである. 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が, 本稿ではすべての実験で 1 エポックでの性能を調査した. 最後に POSLV の精密位置と比較し, ミス FIX と誤差の少ない FIX 解の判別を行う. この手順を全エポックに行った後, 利便性と信頼性の評価を行う.

2.2 RTK 測位の現状 都市部では周囲の建物により上空の視界が大きく異なるため, 衛星からの電波が遮断されたり, マルチパスの影響を受けやすくなっている. RTK 測位の現状を示すため, 測位環境の異なる 2 カ所の静止点 (屋上とビル付近) において 12 時間 1 Hz データを取得した. 基線長は 2 地点ともに 1 km 未満であった. 2 地点の上空視界を魚眼レンズで撮影したものを第 2 図に示す. ビル付近での測位環境が都市部での測位環境に類似していると考えられる. そのため, 屋上に比べビル付近では利便性,

第2図 都市部と屋上の上空視野

第1表 観測地点別, 信頼性と利便性

観測地点	利便性	信頼性
屋上	43200/43200 (100%)	42862/43200 (99.2%)
ビル付近	12075/43200 (28.0%)	11519/12075 (88.9%)

信頼性ともに低下することが予想される. 測位結果を第 1 表にまとめた. この表において, 利便性は測位回数に対して FIX 解が求められた割合, 信頼性はすべての FIX 解のうち水平誤差 1 m 以内である割合を示している. また, 利便性の分母は全測位回数, 分子は FIX 回数を示し, 信頼性の分母は FIX 回数, 分子は FIX 解のうち水平誤差 1 m 以内であった測位回数を示している. 観測データ品質チェックは最低信号強度 (L1 帯の信号強度 30 dB 以上) と, マスク角 10 度の条件で行っている. 屋上においては測位回数 43200 回のうち全エポックで FIX 解を得ることができた. そのため, 利便性は 100% となった. また, FIX 解のうち水平誤差 1 m 以内の割合は 99.2% であった. 一方で, ビル付近の都市部に近い環境においては利便性 28%, 信頼性 88.9% となった.

屋上での結果に比べ, ビル付近では利便性は 3 分の 1 以下となり, 信頼性も 90% に満たないことがわかる. 利便性, 信頼性は主に 3 つの理由により低下したと考えられる. 1 つは反射波や回折波などマルチパスの影響である. もう 1 つは電波を遮断されたことによる可視衛星数の減少. そして, 衛星配置による DOP の増加である. ここでは静止点での性能を示したが, 移動体でも同様に, 都市部では RTK 測位の性能が格段に低下することが予想される.

RTK-GPS の現状をチェックするため本解析では名古屋, 丸の内, 月島の 3 カ所でデータを取得した. 名古屋駅周辺や丸の内では高層ビルが多く, 性能が月島より悪くなることが予想される.

3. RTK-GPS の信頼性

衛星測位の精度は測距誤差と衛星配置によって決まる. 測距誤差の主な原因は短基線の場合, 観測データに含まれるマルチパスの影響である. そのため, あるべき信号強度によるチェックとマスク角の設定を行うことで観測データの信頼度を向上させる. 衛星配置は DOP としてよく知られている. 本実験では水平誤差を重視しているため, HDOP をチェックする.

また、観測データに含まれる誤差により、アンビギュイティ決定に利用する LAMBDA 法と Ratio テストにも影響がでる。このことを国土地理院のデータを用いて次の 3.1 節に示す。

3.1 観測データの品質とミス FIX の関係 ミス FIX とは、Ratio テストを満たし FIX 解と判定されたにもかかわらず、アンビギュイティが正しく推定されなかったため、誤差の大きい測位結果を意味する。国土地理院の電子基準点観測データを用いて可視衛星数に対する Ratio テストの閾値とその測位結果の信頼性を調査した。電子基準点は測量における基準点、観測点の 1 つであり、周囲に電波を遮るものが少なく高精度 GPS 受信機を利用している。Ratio テストの閾値における信頼性を測位衛星数ごとに第 3, 4 図で示した。横軸は Ratio テストの閾値、縦軸は信頼性 (%) を示している。Ratio テストの閾値は例えば 2 であれば 2 以上を FIX 解と判定することを意味する。Ratio テストの値は、LAMBDA 法により推定されたアンビギュイティの最善解と次善解の残差の比である (Ratio テストの値 = 次善解の残差 ÷ 最善解の残差)。そのため、Ratio テストの閾値を 1 以上に設定することは、残差の比の大きさにかかわらず、最善解を必ず FIX 解とみなすことを意味する。第 3 図は基線長 9km である場合に対し、第 4 図は基線長 3km の場合の結果を示す。電子基準点は周囲に衛星からの電波を遮断する建物が少ないため可視衛星数が多い。本稿では、可視衛星数が少ない場合を検討しているためマスク角を 30 度とした。

基線長に関係なく、可視衛星数 5 機以上である場合は Ratio テストの値が 1.5 以上であれば十分な信頼度が得られる

第3図 信頼性と Ratio 閾値 (基線長 9km)

第4図 信頼性と Ratio 閾値 (基線長 3km)

ことがわかる。また、第 4 図から衛星数 5 機以上の場合、基線長が短く、電離層が安定していて国土地理院の観測点である場合、Ratio テストは必要ないレベルであることがわかる。一方で可視衛星数 4 機である場合、基線長の距離により信頼性が低下することが読み取れる。基線長が長いほど主に電離層のバイアスの影響を受けることが知られている。衛星の仰角にもよるが、電離層遅延量による誤差は基線長 10km において約 1 cm 程度の誤差が含まれる⁵⁾。1 cm 程度のノイズが衛星数 4 機で計算を行う場合、LAMBDA 法と Ratio テストに大きな影響を与えられられる。

このことから、アンビギュイティ探索手法として利用した LAMBDA 法と Ratio テストは可視衛星数 4 機の場合、わずかな測距誤差であっても影響を受けやすいため、誤差が少ない観測データを利用するとより正確なアンビギュイティ決定が可能となることがわかる。

3.2 観測データの品質チェック 観測データの品質チェックは従来のマスク角と最低信号強度 (L1 帯の信号強度 30 dB 以上) の他に、「あるべき信号強度によるチェック」⁶⁾を行う。

「あるべき信号強度によるチェック」は、すでに 2004 年に提案されている手法である。以下にアルゴリズムの概要を説明する。周囲の開けた場所において、長時間の GPS データを取得すると、同機種の受信機、アンテナ及びケーブルを用いることにより、仰角と信号強度の一定の関係が明らかになる。その結果を第 5 図に示した。この図より、仰角を決定すると、本来あるべき信号強度を求めることができる。もしマルチパスや回折等の影響を衛星が受けている場合、その衛星の信号強度は、上記のラインよりも低くなるケースがほとんどである。よって、上記のラインよりある閾値以下の信号強度の衛星を、測位に利用しないと判断するのが本手法である。本稿では、LAMBDA 法が前節 3.1 からわかるように、観測データ誤差に敏感なため、新たに L2 帯でも同様のチェックを試みた。L2 帯をチェックすることで、より誤差の少ない観測データを使用できると考えられる。

次節では、L1 帯でのみチェックを行う場合と L1, L2 帯両方に利用した場合、本手法を L1, L2 ともに利用しない場合について検証実験を行ったので報告する。

また、都市部においてはたくさん的高層ビルが電波環境に

第5図 L1 帯の信号強度と仰角の関係

複雑な影響を与えるため⁷⁾、あるべき信号強度によるチェックでも、観測データの品質を維持できないケースも見られる。そこで、さらにマスク角による制限を厳しくしたケースの評価も試みた。例えば6機以上の衛星から電波を受信できる場合でも Ratio テストの値が低く、FIX と判定されない場合がある。可視衛星数が多いにもかかわらず Ratio テストを満たさなかったエポックが、マスク角や信号強度のチェックにより品質チェックを厳しくして測位計算することで、Ratio テストの値が大きくなり、FIX 解となることがある。そのため、観測データチェックを厳しくすることで利便性が向上することもある。

可視衛星数、信号強度、マスク角の信頼度に影響する3つのパラメータについて述べたが、衛星数を5機以上に保つことが、第3、4図の結果からも、信頼性向上にはきわめて重要である。衛星数が5機以上である場合 Ratio テストを満たした FIX 解は99%以上の割合で水平誤差1m以内の測位が可能である。また、観測データチェックを厳しくすることで、利便性と信頼性ともに向上するが、衛星数4機で測位を行う回数が増加すると、Ratio テストでの信頼度が低下することや HDOP の増加が原因となり、結果として信頼性の低下につながることに注意しなければならない。

4. 実験結果及び考察

前節で述べた内容について実際に名古屋、丸の内、月島の3カ所でデータを取得した。

4.1 名古屋駅周辺実験 2010年5月6日に名古屋駅周辺を車で走行し、10Hzで30分程度GPSデータを取得した。受信機は基準局と車側ともに2周波の高精度受信機で基線長は2km程度であった。周囲は高層ビルに囲まれる場所や高架下もある。第6図に走行経路を示した。真値として前述の POSLV を利用した。

第2、3表に結果を示す。表の見方は第1表と同様である。第2表はマスク角10度でそれぞれ「あるべき信号強度によるチェック」を利用しなかった場合とL1帯のみに利用した場合、L1、L2帯両方に利用した場合の結果である。第3表はマスク角30度の場合である。あるべき信号強度によるチェックを行わなかった場合でも最低信号強度(L1帯の信号強度30dB以上)によるチェックは行っている。また、第7図にマスク角30度、あるべき信号強度によるチェックを行わなかった場合の衛星数ごとの信頼性を示す。図の見方は第3図と同様である。

あるべき信号強度によるチェックをL1、L2帯に行い、観測データの品質チェックを厳しくすることで信頼性が向上した。16300回測位回数のうち、マスク角30度とした場合 FIX 回数最大となり、利便性16%となった。この結果から名古屋のような都心部ではマルチパスの影響が少なくと考えられる高仰角の衛星を測位計算に用いることでRTKの利便性が向上することがわかる。しかし、L1、L2帯両方に利用しマスク角30度の場合、マスク角10度に比べて信頼性が低下している。

第6図 名古屋駅周辺での走行経路概要

第2表 マスク角10度の場合

あるべき信号強度による チェック利用信号	利便性	信頼性
なし	2055/16300 (12.6%)	1828/2055 (89.0%)
L1のみ	1998/16300 (12.3%)	1875/1998 (93.8%)
L1+L2	1976/16300 (12.1%)	1922/1976 (97.3%)

第3表 マスク角30度の場合

あるべき信号強度による チェック利用信号	利便性	信頼性
なし	2709/16300 (16.6%)	2444/2709 (90.2%)
L1のみ	2628/16300 (16.1%)	2446/2628 (93.1%)
L1+L2	2586/16300 (15.9%)	2481/2586 (95.9%)

第7図 信頼性と Ratio テスト (マスク角30度、あるべき信号強度によるチェックなし)

第7図より衛星数5機以上で測位計算を行う場合 Ratio テストの値が3未満であっても十分な精度が求められている。そのため、衛星数を5機以上として測位計算をすることで信頼性は向上すると考えられる。一方で、衛星数4機の場合大幅に信頼性が低下していることがわかる。衛星数に対する信頼性の違いを4機の場合と5機以上の場合に分

第 4 表 衛星数, マスク角別信頼性 (%)

	マスク角 10 度	マスク角 30 度
衛星数 4 機	726/779 (93.2%)	661/765 (86.4%)
衛星数 5 機以上	1196/1197 (99.9%)	1820/1821 (99.9%)

第 8 図 水平絶対誤差の推移 (マスク角 10 度, あるべき信号強度によるチェックを L1 と L2 に用いた)

第 9 図 信頼性と Ratio テスト (マスク角 30 度, 衛星数 4 機)

け, 第 4 表にまとめた. ただし, L1, L2 両方に信号強度によるチェックを利用した場合の結果である.

第 2, 3 表において, マスク角 30 度で信頼性が低下した理由は, 第 4 表の結果より衛星数 4 機の場合が原因であることがわかる. マスク角に関係なく, 衛星数 5 機以上であれば信頼性が 99% 以上になることは注目すべきことである. マスク角 30 度に設定した場合に 10 度と比較して利便性が向上した理由は, 衛星数 5 機以上で FIX と判定される回数が増加したためである. もし, 衛星数 5 機以上の場合のみ信頼性の高い結果として利用するのであればマスク角 30 度の場合の方が信頼性も利便性も高くなる.

第 8 図に, マスク角 10 度, あるべき信号強度によるチェックを L1 帯と L2 帯の双方に用いた場合の水平絶対誤差の推移を参考に示した. 図よりわかるように 1m から 2m の間の誤差が多く見られ, 2m を超す誤差は数カ所見られた.

さらに, マスク角 30 度, 衛星数 4 機の場合について, あるべき信号強度によるチェックを L1 帯のみに用いた場合と L1 帯と L2 帯の双方に用いた場合, 利用しなかった場合の信頼性と Ratio テストの関係を第 9 図にまとめた.

第 10 図 東京駅周辺での走行経路概要

第 5 表 マスク角 10 度の場合

あるべき信号強度による チェック利用信号	利便性	信頼性
なし	936/4523 (20.7%)	885/936 (94.6%)
L1 のみ	949/4523 (21.0%)	909/949 (95.8%)
L1+L2	999/4523 (22.1%)	950/999 (95.1%)

第 6 表 マスク角 30 度の場合

あるべき信号強度による チェック利用信号	利便性	信頼性
なし	1008/4523 (22.3%)	956/1008 (94.8%)
L1 のみ	1051/4523 (23.2%)	956/1051 (91.0%)
L1+L2	1049/4523 (23.2%)	960/1049 (91.5%)

第 9 図から信号強度のチェックを厳しくすることで衛星数 4 機の場合においても Ratio テストによる判定が正しく行われ, 信頼性が向上することがわかる. このことから Ratio テストの閾値に対する信頼性の値は観測データの品質チェックを厳しくするほど改善されることがわかる. また, この時の FIX 解 (Ratio の値が 3 以上) の平均可視衛星数は, あるべき信号強度によるチェックを L1 帯と L2 帯の双方に用いた場合で 4.87 機, 利用しなかった場合で 5.01 機であった.

4.2 丸の内周辺実験 2010 年 10 月 25 日, 東京駅周辺を車で走行し, 4Hz で 20 分程度 GPS データを取得した. 受信機は基準局と車側ともに 2 周波の高精度受信機で基線長は 2km 程度であった. 第 10 図に走行経路を示した. 真値として前述の POSLV を利用した.

第 5, 6 表に結果を示す. 表の見方は第 1 表と同様である. また, 第 11 図にマスク角 30 度, あるべき信号強度によるチェックを L1, L2 両方に利用した場合の衛星数ごとの信頼性を示す. 図の見方は第 3 図と同様である.

第11図 信頼性と Ratio テスト (マスク角 30 度, L1, L2 に利用)

第7表 衛星数, マスク角別信頼性 (%)

	マスク角 10 度	マスク角 30 度
衛星数 4 機	87/134 (64.9%)	78/165 (47.3%)
衛星数 5 機以上	863/865 (99.8%)	882/884 (99.8%)

第12図 信頼性と Ratio テスト (マスク角 30 度, L1, L2 に利用)

第5, 6表より名古屋での実験同様, マスク角 30 度よりマスク角 10 度の方が信頼性が高い. また, あるべき信号強度によるチェックを行わない方が信頼性が高くなる場合も見られた. このようになった理由は名古屋実験と同様に, 第11図からもわかるように衛星数 4 機の場合の Ratio テストの信頼度がきわめて低かったためである. マスク角や信号強度チェックにより衛星数に対する信頼性の違いを 4 機の場合と 5 機以上の場合に分け, 第7表にまとめた. ただし, L1, L2 両方に信号強度によるチェックを利用した場合の結果である.

第12図から HDOP 25 以下ではマスク角 30 度の方が 10 度に比べ信頼性が低い, HDOP 10 以下ではその関係が反対になっていることがわかる. マスク角 30 度で設定する場合, 衛星配置によるチェックも厳しくする必要があるといえる.

4.3 月島駅周辺実験 2010 年 10 月 25 日, 月島駅周辺を車で走行し, 4Hz で 20 分程度 GPS データを取得した.

第13図 月島駅周辺での走行経路概要

第8表 マスク角 10 度の場合

あるべき信号強度による チェック利用信号	利便性	信頼性
なし	1877/4996 (37.6%)	1840/1877 (98.0%)
L1 のみ	2107/4996 (42.2%)	2072/2107 (98.3%)
L1+L2	2402/4996 (48.1%)	2384/2402 (99.3%)

第9表 マスク角 30 度の場合

あるべき信号強度による チェック利用信号	利便性	信頼性
なし	1850/4996 (37.0%)	1772/1850 (95.8%)
L1 のみ	1822/4996 (36.5%)	1786/1822 (98.0%)
L1+L2	1795/4996 (35.9%)	1771/1795 (98.7%)

受信機は基準局と車側ともに 2 周波の高精度受信機で基線長は 2km 程度であった. 片側 2 車線ある. 真値として名古屋駅周辺と同様に POSLV を利用した. 第13図に走行経路を示した.

第8, 9表に結果を示す. 表の見方は第1表と同様である. また, 第14図にマスク角 10 度, あるべき信号強度によるチェックを L1, L2 両方に利用した場合の衛星数ごとの信頼性を示す. 図の見方は第3図と同様である.

第8, 9表の結果より, 名古屋, 丸の内実験と異なり, マスク角 30 度の方が利便性, 信頼性ともに低いことがわかる. 第10表にマスク角や信号強度チェックにより衛星数に対する信頼性の違いを 4 機の場合と 5 機以上の場合に分け, まとめた. ただし, L1, L2 両方に信号強度によるチェックを利用した場合の結果である.

名古屋, 丸の内実験と異なる点はマスク角を高く設定したことにより, 衛星数 5 機以上の場合の FIX 回数が減り,

第 14 図 信頼性と Ratio テスト (マスク角 10 度, L1, L2 に利用)

第 15 図 信頼性と Ratio テスト (L1, L2 に利用, マスク角 30 度)

第 10 表 衛星数, マスク角別信頼性 (%)

	マスク角 10 度	マスク角 30 度
衛星数 4 機	126/144 (87.5%)	1270/1293 (98.2%)
衛星数 5 機以上	2258/2258 (100%)	501/502 (99.8%)

4 機の場合の FIX 回数が増加しているところである。衛星数 4 機の FIX 回数がマスク角 10 度では 144 回に対し、マスク角 30 度では 1293 回に増加している。この結果から名古屋ほど高層ビルが立ち並んでいない月島のような環境では、マスク角 10~15 度でも良い品質の電波が届いていると考えられる。

4.4 考察 第 15 図に測位環境の異なる名古屋, 丸の内, 月島での衛星数 4 機の場合の信頼性と Ratio テストの値の関係を示した。3 カ所とも同じ条件の結果で L1, L2 両方にあるべき信号強度によるチェックを利用し、マスク角 30 度で HDOP 25 以下の結果である。第 15 図と同じ条件で第 16 図に利便性と Ratio テストの値の関係を示した。ただし、利便性を示しているため、衛星数は 4 機の場合に限らない。

3 つの実験結果を通してわかるように、測位環境によって衛星数 4 機の場合でも信頼性は大きく異なる。また、品質チェックを厳しくすることによっても同様で、厳しくするほど信頼性の高い結果を得ることができ、品質チェックを甘くするほど信頼性を損なう結果となる。衛星数 5 機以上であれば、非常に高い信頼性を維持することができることも確認された。また利便性について着目すると、RTK-GPS の場合、品質チェックを甘くすると、使用衛星数が増加するが、FIX 解が減少する事象が見られた。これは RTK-GPS で利用されている LAMBDA 法と Ratio テストのセットが、観測データの誤差、特にバイアスに敏感であることが挙げられる。よって、品質の悪い衛星が混ざるよりは、品質の良い衛星を選択することが極めて重要であるといえる。また近未来の GNSS の環境を想定した場合、使用衛星数が増加する方向にあるため、本論文で提案した、簡便な品質チェックアルゴリズムが重要になると予想される。

第 16 図 利便性と Ratio テスト (L1, L2 に利用, マスク角 30 度)

5. ま と め

都市部において、衛星数 5 機以上ならば、Ratio テストの値が 3 以上の結果は十分な信頼性が得られる。また、Ratio テストの値が 3 未満であっても信頼性が高いことがわかった。それに反して衛星数 4 機の場合、測位環境や品質チェックの厳しさによって信頼性が変化することがわかった。チェックを厳しくすることで HDOP が増加してしまうことには注意する必要がある。

1 つの方法として、地図のデータベース上で建物の高さを区分けし、アルゴリズムを変更することが挙げられるが、基本的には衛星数 4 機の場合は、都市部移動体では使用を避けたほうが良いことが、本研究よりわかった。

また、本研究で提案した複数周波数間での品質チェックが高精度測位に有効であることも確認できた。今後、衛星数が増加し、2 周波だけでなく 3 周波の信号が利用できるようになることから、品質の悪い信号を高い信頼性で見分けることがより重要になるとと思われる。

本稿の移動体実験に際して、レファレンスとなる貴重な位置データを提供して頂いた豊田中央研究所殿に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) Teunissen, P. J. G.: The Least-Square Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation, *J. Geodesy.*, **70**, 1-2 (1995), pp. 65–82.
- 2) Teunissen, P. J. G. and Verhagen, S.: On GNSS Ambiguity Acceptance Tests, *Proceedings of IGNSS Symposium 2007*, Sydney, 2007.
- 3) Alfred, L.: *GPS Satellite Surveying*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 1995, pp. 368–371.
- 4) POSLV, <http://www.applanix.com/products/land/pos-lv.html>
- 5) Misra, P. and Enge, P.: 精通 GPS (改訂第 2 版), 測位航法学会, 東京, 2010, pp. 234–235.
- 6) Kubo, N., Yasuda, A. and Shibasaki, R.: An Effective Multipath Mitigation Technique under Strong Multipath Environments, *The 2005 International Symposium on GPS/GNSS*, Hong Kong, 2005.
- 7) Lehner, A. and Steingass, A.: A Novel Channel Model for Land Mobile Satellite Navigation, *ION2005*, 2005.