【原著論文】

空間統計アプローチに基づいた GNSS 測位精度向上手法の開発

李 亮源*・柴崎亮介**

Development of spatial statistical method for GNSS accuracy improvement

Yang-Won LEE and Ryosuke SHIBASAKI

Abstract: Multipath is one of the main causes of degraded position accuracy in the Global Navigation Satellite System (GNSS) because portions of the signals can be reflected by high buildings in dense urban areas. Multipath mitigation techniques based on hardware enhancement or signal processing help to improve GNSS accuracy for high-precision surveying. Geographic Information System (GIS) is also used in the signal propagation model to predict multipath effects. In addition to these existing approaches, we found that spatial statistical methods are useful in multipath mitigation because a unique spatial distribution of user positions can be produced by the multipath. In this paper, we present a spatial statistical method for mitigating multipath and improving the accuracy in GNSS positioning. Multipath tends to be associated with spatial outliers in simulated user positions (SUPs) and contributes little to the spatial clustering of SUPs. Using these spatial characteristics, we developed a method for identifying multipath satellites, which consists of the components of deviation distance, deviation load, and deviation ratio. Once the identified multipath satellites are excluded, a user position is determined using a mean spatial center of the SUPs from the remaining satellites. The effects of such multipath mitigation were validated by examining whether our method correctly identified multipath satellites and by comparing the position errors with and without the method. We demonstrated the applicability of our solution with a simulation experiment for Shinjuku, using a precise ephemeris for the Global Positioning System (GPS) and the orbital parameters for the proposed constellations of the GALILEO and the Quasi-Zenith Satellite System (QZSS).

Keywords: GNSS, マルチパス (multipath), 測位精度 (position accuracy), 空間統計 (spatial statistics)

1. はじめに

ナビゲーションとは車両や人のある場所から他の場所へ案内するシステム (Kaplan, 2006) であり, GNSS (Global Navigation Satellite System) は現代ナビゲーションで最も重要な役割を果たす. 米国の GPS (Global Positioning System) とロシアの GLONASS (Global Navigation Satellite System) はすでに運用中であり, ヨーロッパ連合の GALILEO と日本の準天頂衛星システム (Quasi-Zenith Satellite System: QZSS) は現在一部が実験運用中で, 2010 年代中半ごろ完全稼働の予定である. このように様々な GNSS が統合すると, 衛星の個数が大幅に増加するなど, ナビゲーション・サービスの可用性がより向上する (Dellago et al, 2003; Kawano et al, 2004; Seynat et al, 2004; Wu et al, 2004; Feng and Wang, 2007; Januszewski, 2007; Lavrakas, 2007).

特に, 高密度な都市空間でもより多数の衛星が確保できることの意義は大きい. しかし, ビルなどの電波反射によるマルチパス (multipath) の影響のため, 測位精度の向上には課題も少なくない.

マルチパスは, 衛星電波がビルなどに反射し, 複数の経路に沿って受信機に到達する現象 (Townsend et al, 2000) であり, 都市空間での測位精度を大きく劣化させる最大の原因となっている. 特に衛星個数が増える際にはマルチパスの影響を受けた衛星が混入する可能性が高くなる.

近年では, マルチパスの影響を緩和し, 測位精度を向上させるために, 新しいアンテナデザイン (例えば, Ray et al, 1999; Santos and Farret, 2002; Kunysz, 2003; Stolk and Brown, 2003; Basilio et al, 2007) や, 受信信号処理 (例えば, Townsend et al, 1995; Garin and Rousseau, 1997; Van Dierendonck and Braasch, 1997;

* 非会員 釜慶大学 衛星情報科学科 (Pukyong National University, South Korea)

** 正会員 東京大学 空間情報科学研究センター (The University of Tokyo)

〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 Tel : 04-7136-4290 E-mail : shiba@csis.u-tokyo.ac.jp

McGraw and Braasch, 1999; Fante and Vaccaro, 2003) が主な方法として提案されている。また、マルチパス・スペクトラム分析のためのウェーブレット法 (例えば, Souza and Monico, 2004; Satirapod and Rizos, 2005; Aram et al., 2007; Zhong et al., 2008) や、擬似距離 (pseudorange) 方程式を解くためのニューラルネットワーク法 (例えば, Chansarkar, 2000; Jwo, 2004; Mosavi, 2006; Vigneau et al., 2006) などが導入されている。また、3 次元 GIS を用い、地形起伏により異なる信号到達やマルチパスの影響などをシミュレーションする研究 (例えば, Li et al., 2006; Suh and Shibasaki, 2007; Taylor et al., 2007) も行われている。

上記のアプローチとは独立に、空間統計手法によるマルチパス影響の軽減手法も適用できる。マルチパスが含まれている衛星から計算したユーザ・ポジションは本当の位置から外れる傾向があり、その外れ傾向に大きく寄与する衛星は、マルチパス衛星である可能性が高いと言える。このような空間分布特性に関連する既存の手法 (Lee et al., 2008) では、様々な衛星の組み合わせから生成される測位点群からクラスタ密度分布を作り、外れ傾向を定量化したが、そのクラスタ密度分布はリアルタイムで生成できないため、受信機アルゴリズムに適用するには限界がある。

本研究では、外れ責任量という新たな空間統計的手法に基づいたマルチパス緩和及び受信位置計算手法を提案する。すなわち、マルチパスエラーが発生している衛星からの信号を判別・排除し、マルチパスエラーの発生していない衛星だけの組み合わせにより受信位置を計算する手法である。既存の空間統計手法とは違って、ほぼリアルタイムに計算ができる。また、東京都新宿区でのシミュレーションを通じ、本手法の有効性を評価する。

マルチパス衛星を判別する考え方は以下の通りである。

- ①対象となる受信位置に対して、可視衛星の組み合わせにより複数個の「仮想測位点」を算定する。仮想測位点とは、マルチパス衛星が含まれている・いないにかかわらず選んだ衛星の組み合わせから算定した受信機位置である。

可視衛星数が n 個であれば、構成できる衛星の組み合わせの数、また、仮想測位点の数は、 ${}_nC_4 + {}_nC_5 + \dots + {}_nC_n$ となる。

- ②その仮想測位点の空間中心を求め、全体の仮想測位点の分布の代表点とする。

- ③マルチパス衛星が含まれている仮想測位点は、その空間中心から外れる傾向が強いと期待される。

- ④その外れ傾向を用い、可視衛星各自のマルチパスエラーの発生可能性を推定する。

本章では、研究の背景と目的を簡略に述べ、第 2 章では、マルチパス緩和及び位置精度向上手法を具体的に記述する。第 3 章では、本手法検証のための評価モデルを紹介し、第 4 章では、本手法を用いたシミュレーションとその結果を考察する。第 5 章では、本研究の活用性と今後の課題を記述する。

2. 位置精度向上手法

本研究の衛星測位手法では、将来の統合 GNSS 環境で GPS, GALILEO, 準天頂衛星システムの信号が相互運用できること (クロックの誤差なども補正可能であるなど, GALILEO, 準天頂衛星システムがそれぞれ現在の GPS 衛星と等価であること) を前提としている。民間にオープンされている GPS L1 信号の中心周波数は 1575.42 MHz であり、GALILEO の E2-L1-E1 バンドは 1559 ~ 1592 MHz の範囲で、中心周波数 1575.42 MHz を持ち、準天頂衛星システムの L1 信号も GPS と同一の中心周波数で設計されている。本手法は、受信部、処理部、出力部で構成する GNSS 受信機を想定し、特に GNSS 信号から受信位置を計算する処理部のアルゴリズムに特色がある。処理部は図 1 のように、前処理部、仮想測位点 (simulated user position: SUP) 算出部、第一空間中心 (1st spatial mean center) 算出部、外れ距離 (deviation distance) 算出部、外れ責任量 (deviation load) 算出部、マルチパス衛星判別部、第二空間中心算出部、第三空間中心算出部で構成する。

図1 GNSS 受信機のプロトタイプ

2.1. 前処理部

受信位置を計算するためには、衛星の位置と信号の伝達時間などが必要である。実際の受信機では衛星信号に相関処理を行いトラッキングするが、シミュレーション環境ではこうした処理を実装することはせず、各衛星の位置は軌道パラメータデータから、信号の伝達時間は Suh and Shibasaki (2007) のマルチパス発生モデル（計算方法は3章に記載）から得られていると想定している。衛星軌道パラメータにおいては、31機のGPS衛星データはIGS（International GNSS Service）からダウンロードし（<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/>）、27機のGALILEO衛星データはESA（European Space Agency）のシナリオを、3機の準天頂衛星データはJAXA（Japan Aerospace Exploration Agency）のシナリオを利用する。

2.2. 仮想測位点算出部

一般的に、受信位置を計算するには、少なくとも4個の衛星が必要である。真の受信機位置からの変化量ベクトルを $\Delta \mathbf{x} = [\Delta x_u \Delta y_u \Delta z_u \Delta s_u]^T$ 、衛星各自の擬似距離残差ベクトルを $\Delta \mathbf{r} = [\Delta r_1 \Delta r_2 \cdots \Delta r_n]^T$ 、衛星の幾何学的配置を表す行列を G とすると、4個の衛星を利用する位置計算は、 $\Delta \mathbf{x} = G^{-1} \Delta \mathbf{r}$ 、5個以上の衛星の場合、 $\Delta \mathbf{x} = (G^T G)^{-1} G^T \Delta \mathbf{r}$ の形になる。

可視衛星数が n 個であれば、構成できる衛星の組

み合わせは、 ${}_nC_4, {}_nC_5, \dots, {}_nC_n$ となる。一つの組み合わせあたり一つの仮想測位点（最終的に決定される受信位置ではなく、特定の衛星組み合わせに対して得られる受信位置であり、「仮想」測位点と呼ぶ）ができる。マルチパスを含んでいない状態なら、どのコンビネーションも自然な擬似距離の誤差（想定方法は4章に記載）に起因するばらつきの範囲で、ほぼ同一の位置座標となるが、マルチパス環境であれば、 ${}_nC_4 + {}_nC_5 + \dots + {}_nC_n$ 個の互いに必ずしも一致しない仮想測位点群になると思われる。なぜなら、マルチパス衛星を含んだ組み合わせで計算した仮想測位点は、本当の位置からより大きく外れる傾向が強いと期待されるからである。逆に言うと、大きい外れ距離を持つ仮想測位点を生成した衛星は、マルチパス衛星である可能性が高い。そこで、仮想測位点の空間分布パターンと使用されている衛星の組み合わせを分析すれば、マルチパス衛星の判別ができる。図2は、 $n=7$ の場合、仮想測位点の空間分布を例示している。

図2 衛星組み合わせによる仮想測位点（例示）

2.3. 第一空間中心算出部

仮想測位点の空間分布パターンは、マルチパスの有無と擬似距離誤差の量により異なる。しかし、最大の誤差の要因であるマルチパスに影響されている衛星数は、補足可能衛星数の中ではそれほど多くないため、ほとんどの場合、多くの仮想測位点は、比較的まとまった空間クラスターに属し、比較的少数の仮想測位点が、全般的なパターンから外れる空間外

れ値 (spatial outlier) になると期待される。そこで、その比較的まとまった空間クラスターの代表点として、全ての仮想測位点を代表する一つのポイントを決め、第一空間中心とする (図 3)。第一空間中心は、式 1 のように x , y 座標各自の相加平均 (mean center) で表す。

$$(x_{mc}, y_{mc}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right) \quad (式 1)$$

図 3 第一空間中心

2. 4. 外れ距離算出部

第一空間中心からそれぞれの仮想測位点までの距離を外れ距離と定義する。仮想測位点の中心クラスターは、マルチパスのない衛星から得られる仮想測位点群のほぼ中心にあると期待されるので、外れ距離はつまり、マルチパス衛星の寄与の程度だと考えることができる。外れ距離は図 4 のようにユークリッド距離 (Euclidean distance) で定義する。

2. 5. 外れ責任量算出部

仮想測位点の外れ距離は、衛星の組み合わせそれぞれにより算出されるので、ある一つの外れ距離に対する衛星各自の「責任量」を定義することができる。例えば、図 4 で {S2, S3, S4, S5, S6} の衛星の組み合わせにより算出した外れ距離 dd_{21} に対する衛星別外れ責任量は均等配分し、 $dd_{21}/5$ とする。

すなわち、外れ距離 dd_j に対する衛星 SV_i の外れ責任量を、式 2 のように求める。

$$DL(SV_i @ DD_j) = \frac{DD_j}{NumOfSV @ DD_j} \quad (式 2)$$

ここで、 $NumOfSV$ は仮想測位点の算定に利用した衛星数を表す。責任量とは概念的には仮想測位点の誤差の大きさにその衛星がどの程度寄与しているのかを示している。

図 4 では、可視衛星数が 6 個であり、22 個 (${}_6C_4 + {}_6C_5 + {}_6C_6$) の仮想測位点、また dd_1 から dd_{22} までの 22 個の外れ距離が算出される。その 22 個の外れ距離に対する衛星別の外れ責任量を合計すると、現在の受信位置に対する衛星別の外れ責任量となり、式 3 のように求める。

図 4 仮想測位点の外れ距離

$$DL(SV_i) = \sum_{j=1}^{NumOfDD} DL(SV_i @ DD_j) \quad (式 3)$$

外れ責任量はメートル単位の値を持つ。便宜のため、0 から 1 までの値にスケールし、外れ責任率 (deviation ratio) で表す。外れ責任率は、外れ責任量の最大値と最小値を用い、式 4 のように求める。

$$DR(SV_i) = \frac{DL(SV_i) - \min[DL(SV_{all})]}{\max[DL(SV_{all})] - \min[DL(SV_{all})]} \quad (式 4)$$

2.6. マルチパス衛星判別部

衛星の外れ責任量と外れ責任率が閾値を超える場合、その衛星をマルチパス衛星と判定する。閾値を厳しくするとマルチパス衛星を除去できる可能性は大きくなるが、利用可能な衛星数が大きく減少する可能性もある。また緩い値とするとマルチパス衛星を十分除去できない。その閾値は測位精度を最大化するという観点からシミュレーションにより、または将来実際に衛星が利用可能になれば実験的に設定可能である。例えば、本論文ではシミュレーション結果に基づき、GPS、GALILEO、準天頂衛星を合わせて61個の衛星が利用可能な場合には、可視衛星の数に応じて、以下のような外れ責任量の臨界値を与えた。また、外れ責任率の臨界値も、0.9、0.95のように与えることができる。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Threshold}(DL) = 50m & (\text{if } \text{NumVis} < 8) \\ \text{Threshold}(DL) = 10m & (\text{if } \text{NumVis} < 10) \\ \text{Threshold}(DL) = 5m & (\text{otherwise}) \end{array} \right\}$$

2.7. 第二空間中心算出部

外れ責任量と外れ責任率が一定の臨界値以上であるものはマルチパス衛星と見なし、受信位置計算過程から排除することで、マルチパス影響が緩和できる。つまり、マルチパス衛星が関与する仮想測位点を除くと、仮想測位点の中心クラスタがより明確になり、本当の位置に近づく可能性も高くなるので、第二空間中心は、マルチパス衛星が関与しない仮想測位点のみ用い算出する。

2.8. 第三空間中心算出部

第二空間中心の算出後、まだ残っている可能性のある空間的外れ値の影響を排除するために、第二空間中心から標準距離円 (standard distance circle) を作図し、その円内部の仮想測位点のみ用い再度空間中心を算出し、第三空間中心とする。図5で第三空間中心は、第二空間中心より左上になり、右下の空間的外れ値の影響を少し減らすことができている。その第三空間中心を最終受信位置として出力する。

図5 第三空間中心算出と受信位置決定

3. 評価モデル

マルチパス衛星を判別・排除するシミュレーションのためには、受信信号に含まれるマルチパスをシミュレーションにより発生させることが必要である。本手法を適用した結果、マルチパス衛星の判別が正しいかどうかを評価するには、シミュレーション・ベースのマルチパスをできるだけ現実に忠実に発生させることが重要である。また、本手法の測位精度を評価するために、既存手法のうち、比較的よく利用されている重み付きの最小二乗法と比較した。

3.1. マルチパス発生モデル

本研究では、3次元建物データとレイ・トレーシング (ray tracing) 法を用い衛星位置からユーザ位置までの信号到達経路をシミュレーションする Suh and Shibasaki (2007) のモデルを利用した。そのモデルで、マルチパスは同一の入射角と反射角を持つ鏡面反射の原理を用いて再現する。すなわち、衛星→地物サーフェス→受信機の幾何学的関係が鏡面反射に該当すると、その衛星からの信号はマルチパスを生じていると見なす (図6)。実際のマルチパスはより複雑な反射過程を通じて発生していると考えられるが、反射により経路が長い信号が受信機に到達することをシミュレートすれば、マルチパスによる疑似距離誤差はおおむね再現できると考えられる。なお、反射によって信号強度は文献や実験結果から30%減衰すると想定した。

ある受信機に到達するマルチパスを判別するためには、可視衛星各自の位置と共に、受信機位置から一定半径以内のすべての建物サーフェスに対し鏡面

反射の有無を調査する必要がある。この際に、二回以上の反射を通じて受信機に到達するマルチパス（例えば、衛星→地物サーフェス A →地物サーフェス B →受信機）は取り扱わないこととする。これは複数回反射した信号は強度が大きく減衰しており、信号強度を利用したマスキング手法などにより比較的簡単に検知できると予想したためである。

図6 マルチパスの鏡面反射

このようはマルチパス判別のためには、衛星軌道データと3次元地物サーフェス・データが必要である。特に、3次元建物データにおいては、DiaMapのDXF（Drawing Exchange Format）ファイルを用い3次元位相構造が構成された。DiaMapは図7に示すように、1メートル解像度のIKONOS衛星画像と30センチメートル解像度のDEM（digital elevation model）から製作された3次元ベクトル・マップである。

シミュレーション環境でマルチパスと見なされた電波からマルチパス誤差を算出するには、コリレータのような計算が必要である。Suh and Shibasaki (2007) のモデルでは、衛星→反射ポイント→受信機からなる反射信号経路の長さと、衛星→受信機の直達信号の経路長さをを用い、直達波と反射波のコリレーションをシミュレーションする。図8は、マルチパスのない場合、イン・フェーズのマルチパスまたはアウト・フェーズのマルチパスが含まれている

図7 DiaMapの3次元建物サーフェス・データ

場合、それぞれのコリレーション関数の一例を示す。マルチパス誤差は、直達信号だけから生成されるコリレーションのピークと、レイトコリレータとアーリーコリレータの midpoint との差に相当する。コリレータ間隔はパラメータとして任意に与えられる。また、このようなコリレーション関数を作る際に、マルチパスの信号減衰率は30%と設定した。

3.2. 測位精度モデル

可視衛星数 $n > 4$ になる場合、衛星各自に含まれている擬似距離誤差の程度が異なることを考慮し、重み付きの最小二乗法を利用して測位計算ができる（Conley et al., 2006；坂井, 2007）。この際に受信位置を求めるには、 $\Delta x = (G^T W G)^{-1} G^T W \Delta r$ のように、受信機位置からの変化量ベクトルを計算する。このためには、まず式5のような重み行列 W が必要である（坂井, 2007）。

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1/\sigma_2^2 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1/\sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (\text{式5})$$

ここで、 σ_i は衛星各自の擬似距離誤差の標準偏差である。ただ、一般にマルチパスも含め衛星各自の擬似距離誤差が事前に分からないので、仰角の低い衛星に関する擬似距離は測定精度が良くないことを利用し、重み行列を構成する手法がある（坂井, 2007）。仰角と測位誤差の関係は図9のようであるが、本研究では、図10のような指数関数を使用した。

図8 コリレータにおけるマルチパス誤差の発生計算

図9 仰角と擬似距離の関係 (坂井, 2007)

図10 仰角と擬似距離の関係を関数化

可視衛星数が n の場合、衛星の組み合わせから計算する受信位置のケースは ${}_nC_4 + {}_nC_5 + \dots + {}_nC_n$ となる。この際に、最終受信位置として特定のケースを選択するより、すべてのケースの平均を求め、最終計算結果と見なす。この受信位置の精度と本手法の精度を比較することで、本手法の有効性を評価する。

4. シミュレーションによる本手法の評価

高層ビルの多い東京都新宿区に対するシミュレーションを行い、マルチパス衛星の判別率と受信位置精度を求めることで、本手法の有効性を検討する。東京都庁近辺の 400×600 メートルのテストエリアから、250箇所のランダムポイントを選び、2009年3月20日の一日を1時間間隔に分け、6000ケース (250箇所 $\times$ 24時間) のシミュレーションを実施した。対象地域と測位シミュレーションを実施した地点の分布を図11に示す。

測位衛星はおおむね一日を一周期として配置を変動させるので、任意の一日を取り上げてシミュレーションすることで十分な数の配置パターンに対するシミュレーションを行うことができる。シミュレーション日のGPSウィークは500で、便宜のた

図 11 測位シミュレーション地点（250 点）の分布

め GALILEO と準天頂衛星も同じウィークで設定した。現在運用中の 31 機の GPS 衛星軌道パラメータは IGS の天体位置表（ephemeris）から得て、計画中の 27 機の GALILEO 衛星と 3 機の準天頂衛星の軌道パラメータは ESA（表 1）と JAXA（表 2）のシナリオに準拠した。

表 1 GALILEO 衛星の軌道シナリオ

No.	Semimajor axis (km)	Eccentricity	Inclination	RAAN (°)	Argument of perigee (°)	Mean anomaly (°)
1	29600.318	0	56	0	0	0
2	29600.318	0	56	0	0	40
3	29600.318	0	56	0	0	80
4	29600.318	0	56	0	0	120
5	29600.318	0	56	0	0	160
6	29600.318	0	56	0	0	200
7	29600.318	0	56	0	0	240
8	29600.318	0	56	0	0	280
9	29600.318	0	56	0	0	320
10	29600.318	0	56	120	0	13.33
11	29600.318	0	56	120	0	53.33
12	29600.318	0	56	120	0	93.33
13	29600.318	0	56	120	0	133.33
14	29600.318	0	56	120	0	173.33
15	29600.318	0	56	120	0	213.33
16	29600.318	0	56	120	0	253.33
17	29600.318	0	56	120	0	293.33
18	29600.318	0	56	120	0	333.33
19	29600.318	0	56	240	0	26.66
20	29600.318	0	56	240	0	66.66
21	29600.318	0	56	240	0	106.66
22	29600.318	0	56	240	0	146.66
23	29600.318	0	56	240	0	186.66
24	29600.318	0	56	240	0	226.66
25	29600.318	0	56	240	0	266.66
26	29600.318	0	56	240	0	306.66
27	29600.318	0	56	240	0	346.66

(Source: GALILEO System Simulation Facility, European Space Agency)

表 2 準天頂衛星の軌道シナリオ

No.	Semimajor axis (km)	Eccentricity	Inclination	RAAN (°)	Argument of perigee (°)	Mean anomaly (°)
1	42164.17	0.099	45	0	270	239.8
2	42164.17	0.099	45	120	270	119.8
3	42164.17	0.099	45	240	270	359.8

Source: Kogure et al. (2007)

GPS, GALILEO, 準天頂衛星の電波信号は、必然的に擬似距離誤差を持つが、それは、受信機クロックと衛星クロックの誤差、衛星の軌道データの誤差、電離層や水蒸気による電波到達遅延などが原因である。擬似距離誤差は UERE (user-equivalent range error) と呼ばれ、誤差原因それぞれの寄与度の RSS (root-sum-square) で表す (Conley et al., 2006)。表 3 は、2000 年 6 月 8 日全球で観測された GPS L1 信号のエラーソースの寄与度を示している (US Army Corps of Engineers, 2003)。より現実的な擬似距離誤差を衛星電波に入れるために、その 7.22 メートルの UERE とマルチパス発生モデルからの誤差を合わせて、GPS, GALILEO, 準天頂衛星信号をそれぞれ発生させ、本シミュレーションで使用した。

表 3 GPS L1 信号の UERE 推定値

Error source	1 σ error (m)
Navigation message curve fit	0.20
Tropospheric model	0.25
C/A code phase bias	0.27
Orbit	0.57
Receiver noise	0.80
Satellite clock	1.43
Ionospheric model (global average)	7.00
System UERE (RSS)	7.22

Source: US Army Corps of Engineers (2003)

シミュレーションの 6000 ケースにおいて、GPS 衛星の場合、仰角 0 度以上の可視衛星数の平均は、3.9、最小値は 0、最大値は 10 であった。一方、全ての GNSS 衛星 (GPS, GALILEO, 及び準天頂衛星) を対象とした場合、仰角 0 度以上の可視衛星数の平均は、9.1、最小値は 1、最大値は 18 であった (表 4)。つまり、GNSS 衛星の全てを対象とすることにより、可視衛星数を増やすことができ、マルチパス衛星を排除しても、測位に使用できる衛星の数を確保しやすいという利点が生じる。さらに、可視衛星数が 12 以上になる場合には、仰角の高い順に 12 個の衛星を選別することで、建造物などに邪魔されがちである低高度衛星を前もって排除することにした。

表4 シミュレーション環境での可視衛星統計

GPSのみ			GPS+GALILEO+準天頂衛星		
Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
0	10	3.9	1	18	9.1

また、図12にはシミュレーションにおいて、可視衛星数ごとにマルチパスが生じている衛星がどの程度、混入しているかをまとめた。可視衛星数が増えたケースではマルチパス衛星が含まれている比率が高く、マルチパス衛星の除去が重要であることが分かる。

図12. マルチパス衛星の混入率

この条件下で、各時間帯の地点毎の測位精度を計算した。ここで測位精度は、図11に示しているサンプルポイントの地図上の位置と、本手法で算出した受信位置との2次元距離の平均値とした。またその2次元距離の標準偏差を計算し、誤差の揺れ幅の評価を行った。ただ、本手法は測位衛星数の冗長性を利用する統計的なアプローチなので、仮想測位点が20以下になる、つまり可視衛星数が5以下の場合(約6~7%のケース)には適用しなかった。

表5から表8はシミュレーションの結果を示す。ここで、第3欄は、30メートル以上の擬似距離誤差(long delay)を持つ衛星を正しく判別した割合である。コリレータは、通常のチップ間隔1.0と、ナロー・チップ間隔0.1に設定し、仰角マスクは、0度と10度とし、それぞれ4パターンのシミュレー

表5 本手法適用の結果

(1.0チップコリレータ、仰角マスク0度)

可視衛星数	ケース数	本手法		仰角重みつき		通常	
		判別率(%)	測位精度(m)	標準偏差(m)	測位精度(m)	標準偏差(m)	測位精度(m)
5以下	345	-	-	-	-	-	-
6	302	90.73	9.16	16.54	18.68	32.10	34.97
7	525	88.19	6.72	12.30	15.04	26.71	31.78
8	731	85.77	4.28	10.03	10.85	20.12	33.28
9	828	85.51	3.96	5.94	12.54	24.32	31.37
10	910	80.44	3.21	5.12	13.49	30.39	24.82
11	768	80.99	3.61	5.86	14.27	30.64	21.12
12以上	1591	77.31	4.11	7.71	17.79	34.12	23.59
合計	6000	83.35	4.41	8.63	14.75	29.49	27.21

表6 本手法適用の結果

(1.0チップコリレータ、仰角マスク10度)

可視衛星数	ケース数	本手法		仰角重みつき		通常	
		判別率(%)	測位精度(m)	標準偏差(m)	測位精度(m)	標準偏差(m)	測位精度(m)
5以下	425	-	-	-	-	-	-
6	390	91.28	9.56	21.72	16.89	28.05	32.39
7	667	87.71	6.67	12.14	13.64	23.04	33.49
8	923	84.51	4.10	7.83	12.45	23.51	21.65
9	1003	88.33	3.42	5.48	10.48	21.66	21.91
10	952	80.57	3.03	6.07	10.23	21.89	16.44
11	716	84.50	3.30	10.37	11.20	23.78	16.51
12以上	924	81.17	3.35	6.72	13.07	29.67	15.73
合計	6000	85.90	4.26	9.85	12.11	24.44	21.33

表7 本手法適用の結果

(0.1チップコリレータ、仰角マスク0度)

可視衛星数	ケース数	本手法		仰角重みつき		通常	
		判別率(%)	測位精度(m)	標準偏差(m)	測位精度(m)	標準偏差(m)	測位精度(m)
5以下	345	-	-	-	-	-	-
6	302	97.68	7.03	16.71	15.42	30.43	43.23
7	525	97.90	4.40	9.65	9.93	16.40	22.39
8	731	94.53	2.66	5.84	7.94	20.38	19.10
9	828	97.83	2.54	6.01	9.75	25.51	24.69
10	910	92.86	2.30	5.16	9.84	26.29	18.01
11	768	96.74	2.26	6.32	10.80	26.54	17.56
12以上	1591	95.98	2.90	8.89	14.54	34.92	21.31
合計	6000	96.17	2.99	8.15	11.34	27.91	21.75

表8 本手法適用の結果

(0.1チップコリレータ、仰角マスク10度)

可視衛星数	ケース数	本手法		仰角重みつき		通常	
		判別率(%)	測位精度(m)	標準偏差(m)	測位精度(m)	標準偏差(m)	測位精度(m)
5以下	425	-	-	-	-	-	-
6	390	97.69	7.26	19.87	16.43	37.72	31.42
7	667	99.10	4.01	11.88	9.71	20.11	23.19
8	923	94.15	2.79	9.15	8.62	20.62	17.20
9	1003	98.60	2.15	3.79	8.56	25.82	21.38
10	952	94.01	2.18	8.41	7.57	21.81	12.97
11	716	96.23	2.32	8.24	10.54	32.53	16.13
12以上	924	97.94	2.18	7.60	11.59	35.05	15.94
合計	6000	96.90	2.87	9.64	9.84	27.63	18.59

ションを行った。1.0 チップコリレータを使用した場合は、マルチパス衛星の判別率が85%前後、0.1 チップコリレータでは、96%以上となり、本手法はナロー・コリレータと併用した際に、マルチパス衛星の判別力が上がることが分かる。また、仰角マスクを0度にしても、10度にしても本手法の性能があまり変わらないのは、仰角0度から10度の間の低高度衛星の影響が、マルチパス衛星の判別を通じてある程度フィルタリングされたからと考えられる。測位精度においては、1.0 チップでは4～5メートルほど、0.1 チップでは3メートルほどとなった。標準偏差は両方10メートル以下であった。

今回のシミュレーションでは、本手法と重み付きの最小二乗法、また、通常の方法（重み無しの測位計算）の場合を比較してみた。仰角重み付きの最小二乗法で算出した精度は、1.0 チップで12～14mほど、0.1 チップで9～11mほどとなり、通常の場合には、1.0 チップで25mほど、0.1 チップで20mほどであった。本手法は、1.0 チップで4.41m～4.26m、0.1 チップで2.87m～2.99mの精度を示し、その有効性が確認できた。

5. まとめ

本論文では、空間統計アプローチに基づいたGNSSマルチパス影響を緩和し、測位精度を向上させる手法を提案した。本手法は、マルチパス衛星が関与する仮想測位点は、中心クラスタから外れる傾向に着目し、マルチパス衛星を判別及び排除し受信位置を計算することで、測位精度の向上を図る。東京都庁近辺の高層ビルエリアを対象としたシミュレーションで、本手法の適用可能性が確認できた。本手法の計算時間は、Intel Core 2 Duo 3.0 GHz のパソコンで、1地点あたり平均0.1秒かかる。カーナビやスマートフォン程度の端末にとってはやや負荷が高いため、今後の課題として、計算効率の向上によるモバイルデバイスへの搭載実験、実際の衛星が利用可能になった際に実データで検証を行うことが挙げられる。また、モバイルデバイス以外にも様々なGNSS受信機に対応するためには、前処理部コリレータの特性を反映し、DLL (delay lock loop)、PLL

(phase lock loop)、FLL (frequency lock loop) などにより異なるマルチパス判別条件をデリケートに調整する必要がある。

参考文献

- 坂井丈泰 (2007) GPS/GNSS の基礎知識. <http://www.enri.go.jp/~sakai/pub/symp07_tutorial.ppt>.
- Aram, M., El-Rabbany, A., Krishnan, S., Anpalagan, A. (2007) Single frequency multipath mitigation based on wavelet analysis. *Journal of Navigation*, **60**, 281-290.
- Basilio, L.I., Chen, R.L., Williams, J.T., Jackson, D.R. (2007) A new planar dual-band GPS antenna designed for reduced susceptibility to low-angle multipath. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **55**, 2358-2366.
- Chansarkar, M. (2000) Neural networks in GPS navigation. *GPS Solutions*, **4**, 14-18.
- Conley, R., Cosentino, R., Hegarty, C.J., Kaplan, E.D., Leva, J.L., De Haag, M.U., Van Dyke, K. (2006) Performance of stand-alone GPS. In Kaplan, E.D., Hegarty, C.J. eds. *Understanding GPS: Principle and Applications*. Norwood, MA: Artech House, 301-378.
- Dellago, R., Detoma, E., Luongo, F. (2003) Galileo-GPS interoperability and compatibility: a synergetic viewpoint. *Proceedings of Institute of Navigation (ION) GPS/GNSS 2003*, Portland, OR, 542-548.
- Fante, R.L., Vaccaro, J.J. (2003) Multipath and reduction of multipath-induced bias on GPS time-of-arrival. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **39**, 911-920.
- Feng, Y., Wang, J. (2007) Exploring GNSS RTK performance benefits with GPS and virtual Galileo measurements. *Proceedings of Institute of Navigation National (ION) Technical Meeting 2007*, San Diego, CA, 218-226.
- Garin, L., Rousseau, J.M. (1997) Enhanced strobe correlator multipath rejection for code and carrier. *Proceedings of Institute of Navigation (ION) GPS-*

- 97, Kansas City, MO, 559-568.
- Januszewski, J. (2007) Visibility and geometry of combined constellations GPS and Galileo. Proceedings of Institute of Navigation (ION) National Technical Meeting 2007, San Diego, CA, 252-262.
- Jwo, D.J. (2004) Incorporation of neural network-like processors for GPS navigation. GPS Solutions, **8**, 160-169.
- Kaplan, E.D. (2006) Introduction. In Kaplan, E.D., Hegarty, C.J. eds. Understanding GPS: Principle and Applications. Norwood, MA: Artech House, 1-20.
- Kawano, I., Mokuno, M., Kogure, S., Kishimoto, M. (2004) Japanese experimental GPS augmentation using Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) . Proceedings of Institute of Navigation (ION) GNSS 2004, Long Beach, CA, 175-181.
- Kunysz, W. (2003) A three dimensional choke ring ground plane antenna. Proceedings of Institute of Navigation (ION) GPS/GNSS 2003, Portland, OR, 1883-1888.
- Lavrakas, J.W. (2007) A glimpse into the future: a look at GNSS in the year 2017. Proceedings of Institute of Navigation (ION) National Technical Meeting 2007, San Diego, CA, 210-217.
- Lee, Y., Suh, Y., Shibasaki, R. (2008) A simulation system for GNSS multipath mitigation using spatial statistical methods. Computers & Geosciences, **34**, 1597-1609.
- Li, J., Taylor, G., Kidner, D., Ware, M. (2006) Prediction of GPS multipath effect using LiDAR digital surface models and building footprints. Lecture Notes in Computer Science, **4295**, 42-53.
- McGraw, G.A., Braasch, M.S. (1999) GNSS multipath mitigation using gated and high resolution correlator concepts. Proceedings of Institute of Navigation (ION) National Technical Meeting 1999, San Diego, CA, 333-342.
- Mosavi, M.R. (2006) A practical approach for accurate positioning with LI GPS receivers using neural networks. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, **17**, 159-171.
- Ray, J.K., Cannon, M.E., Fenton, P.C. (1999) Mitigation of static carrier-phase multipath effects using multiple closely spaced antennas. Navigation, **46**, 193-201.
- Santos, M.C., Farret, J.C.F. (2002) Analysis and generalization of a dual-antenna multipath mitigation technique. Proceedings of Institute of Navigation (ION) GPS 2002, Portland, OR, 487-492.
- Satirapod, C., Rizos, C. (2005) Multipath mitigation by wavelet analysis for GPS base station applications. Survey Review, **38**, 2-10.
- Seynat, C., Kealy, A., Zhang, K. (2004) A performance analysis of future global navigation satellite systems. Journal of Global Positioning Systems, **3**, 232-241.
- Souza, E.M., Monico, J.F.G. (2004) Wavelet shrinkage: high frequency multipath reduction from GPS relative positioning. GPS Solutions, **8**, 152-159.
- Stolk, K., Brown, A. (2003) Phase center calibration and multipath test results of a digital beam-steered antenna array. Proceedings of Institute of Navigation (ION) GPS/GNSS 2003, Portland, OR, 1889-1897.
- Suh, Y., Shibasaki, R. (2007) Evaluation of satellite-based navigation services in complex urban environments using a three-dimensional GIS. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE) Transactions on Communications, E90-B (7), 816-825.
- Taylor, G., Li, J., Kidner, D., Brunsdon, C., Ware, M. (2007) Modelling and prediction of GPS availability with digital photogrammetry and LiDAR. International Journal of Geographical Information Science, **21**, 1-20.
- Townsend, B., Wiebe, J., and Jakab, A. (2000) Results and analysis of using the MEDLL receiver as a multipath meter. Proceedings of Institute of Navigation National (ION) Technical Meeting

- 2000, Anaheim, CA, 73-79.
- Townsend, B.R., Fenton, P.C., Van Dierendonck, K.J., Van Nee, R.D.J. (1995) Performance evaluation of the multipath estimating delay lock loop. *Navigation*, **42**, 503-514.
- US Army Corps of Engineers (2003) Engineering and Design - NAVSTAR Global Positioning System Surveying. <<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-1-1003/entire.pdf>>.
- Van Dierendonck, A.J., Braasch, M. (1997) Evaluation of GNSS receiver correlation processing techniques for multipath and noise mitigation. *Proceedings of Institute of Navigation (ION) NTM-97*, Santa Monica, CA, 207-215.
- Vigneau, W., Nouvel, O., Manzano-Jurado, M., Carrascosa Sanz, C., Abdulkader, H., Roviras, D., Juan, J.M., Holsters, P. (2006) Neural networks algorithms prototyping to mitigate GNSS multipath for LEO positioning applications. *Proceedings of Institute of Navigation (ION) GNSS 2006*, Fort Worth, TX, 1752-1762.
- Wu, F., Kubo, N., Yasuda, A. (2004) Performance evaluation of GPS augmentation using Quasi-Zenith Satellite System. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **40**, 1249-1260.
- Zhong, P., Ding, X.L., Zheng, D.W., Chen, W., Huang D.F. (2008) Adaptive wavelet transform based on cross-validation method and its application to GPS multipath mitigation, *GPS Solutions*, **12**, 109-117.
- (2009 年 11 月 20 日原稿受理, 2010 年 11 月 19 日採用決定, 2010 年 12 月 20 日デジタルライブラリ掲載)