GPS 無線センサネットワークを用いた 変位モニタリングの精度改善

高橋 佑莉沙¹・西 宏治郎²・佐伯 昌之³

¹ 学生員 東京理科大学 理工学研究科土木工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

² 正会員 元東京理科大学 理工学研究科土木工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

³ 正会員 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: saeki@rs.noda.tus.ac.jp

著者等は、無線センサネットワークのセンサとして安価な 1 周波 GPS を採用した変位モニタリングシステムの開発を進めてきた。1 点あたりのコストが低減するため、多点高密度な変位モニタリングが実現できると考えている。本研究では、まず、実現場と同等な環境下で準静的変位モニタリング実験を行い、カルマンフィルタ適用後の推定値で約 1cm の精度が得られることを確認した。また、急激な変位が発生した場合の測位性能の改善を試みた。急激な変位が発生する問題は、通常の GPS 測位解析と同様に整数値バイアスを決定する必要があるが、SN 比を用いたフィルタや重みづけにより Fix 率の改善を試みた。さらに、決定しづらい整数値バイアスが存在する場合には、その整数値バイアスを決定しない再探索アルゴリズムを導入することで、Fix 率が改善することを示した。

Key Words: L1 GPS, wireless sensor network, displacement monitoring, positioning algorithm

1. はじめに

(1) 本研究の背景と目的

著者等は、多点高密度に変位を計測することを目的として、安価な 1 周波 GPS (Global Positioning System) と無線センサネットワークの技術を結合した GPS 無線センサネットワークの開発を進めてきた。無線センサネットワークとは、特定小電力無線、MCU (Micro Control Unit)、バッテリーなどから構成される小型・低消費電力のセンサノードが通信ネットワークを形成し、センサで取得したデータをサーバに集約するシステムである。近年、IoT (Internet of Things) 関連の技術としても注目を集めており、土木分野への適用も盛んに研究されている¹⁾²⁾。著者等が開発を進めてきた変位モニタリングシステムは、無線センサネットワークのセンサ部分に安価な 1 周波 GPS モジュールを搭載したシステムである。

著者等はこれまでに、静的・近接条件に特化したデータ圧縮技術³⁾や変位解析手法⁴⁾などの要素技術を開発し、システムを試作してきた。さらに、試作機を用いて変位モニタリング実験を実施し、屋外環境下でシステムが正常に動作することを確認するとともに、周囲に高い障害物がない基線長 10 m 程度の理想的な環境において変位

モニタリング実験を行い、準静的変位を数 mm~cm の精度で計測できることを確認している⁵⁾。一方周囲に衛星からの電波の遮蔽物があり、さらに基線長が 100m を超え、受信機間に高低差があるような実現場に近い状態での変位モニタリング精度は検証されておらず、また、急激な変位が生じる場合については想定すらしていない。そこで本研究では、以下のことを目的として研究を行った。

- 1) より実現場に近い環境において、センサに準静的変位を与え、そのモニタリング精度を確認する。
- 2) 地震等による急激な変位が発生した場合を想定して測位性能を検証し、その測位性能を改善する手法を検討する。

(2) 本研究で扱う問題と既往の研究との関係

1 周波 GPS を用いた変位モニタリングの研究事例は以前より多数みられる⁶⁾⁷⁾。例えば清水らによる一連の研究⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾では、1 周波 GPS 受信機を用いて地滑りのモニタリングを試みている。そのシステムでは、連続的に受信される GPS データに静的測位解析を適用し、さらにトレンドモデルと呼ばれる平滑化処理法を適用して数 mm~cm の精度が達成されている。さらに、増成らによ

り上空障害物による異常データの削除や、現場気象データを用いた大気遅延の補正により精度改善がなされている^{11,12)}。これらの研究では、外部から、もしくは十分なサイズの太陽電池パネルにより電力を供給し、GPS受信機が常時動作し続けられるように配慮されている。そのため、十分な長さの連続データを解析することができ、整数値バイアスと呼ばれる未知数を容易に決定することが可能となる。これにより、数 cm の精度は保証され、研究の主眼は数 mm の精度を達成するための解析技術の向上となる。

一方で、本研究で開発を進めている GPS 無線センサネットワークは、小型のバッテリーを用いることから、消費電力を最低限に抑えるために GPS 受信機を間欠動作させる。そのため、測位解析に使用できるデータ長も短くなり、本研究でも 1 秒サンプリングで 1 時間に 1 回 4 分程度の連続データしか収録していない。第 3 章では、実現場に近い環境下において収録された短時間データを解析した場合でも、準静的変位の仮定を用いることで整数値バイアスを決定でき、数 cm の精度で変位モニタリングできることを示す。

ところで、地震時のような急激な変位が発生した場合には、準静的変位の仮定は成立せず、受信機のおおよその位置が不明となる。この場合、短いデータで整数値バイアスを決める必要があることから、RTK (Real Time Kinematic) - GPS における初期化の問題と同等となる。この解析方法はすでに確立されており、LAMBDA (Least-squares AMBiguity Decorelation Adjustment) 法¹³⁾の名で知られている。本システムでもこの手法を用いるが、安価な 1 周波 GPS で収録した短時間データでは、整数値バイアスの決定確率が低いのが現実である。本研究では、決定確率を改善するために SN 比を用いたデータの取捨選択法¹⁴⁾や、データの重みづけを検討した。さらに、決まらない未知数は決めないアルゴリズムを導入し、整数値バイアスの決定確率の改善を試みた。

2. 本システムにおける変位解析手法

本システムの解析方法は、著者等によるアレンジはあるものの、基本的には専門書にある一般的な GPS 測位解析手法¹⁵⁾とほぼ同等である。本論文の試みを明確にするために、本システムで従来より採用している解析方法の概要を以下に示す。

(1) 観測方程式とフロート解

一般に 1 周波 GPS の観測方程式は次式で表される。

$$\mathbf{U}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \lambda\mathbf{N} + \mathbf{e}(t) \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{U}(t)$ は修正された搬送波位相の二重差を成分にもつ観測ベクトル、 $\mathbf{A}(t)$ は受信機と衛星の位置から計算される係数行列、 $\mathbf{x}$ は位置の補正值に関する 3 成分の未知ベクトル、 λ は搬送波の波長 (約 19cm)、 $\mathbf{N}$ は整数値バイアスの二重差を成分とする未知ベクトル、 $\mathbf{e}(t)$ は観測誤差ベクトルである。GPS の測位原理は三辺測量と同じであり、位置が既知の GPS 衛星からの距離を計測することにより測位する。高精度の測位では、距離データとして搬送波位相を用いるが、衛星と受信機間に波が何サイクル含まれるかは不明であるため、これが未知数となる。この未知数は整数値バイアスと呼ばれている。式(1)は、捕捉した衛星数を n とすると、 $n-1$ の方程式と $n+2$ の未知数をもつ。

通常は、式(1)を複数の時刻に対して求め、最小二乗法により未知数を推定する。本システムでは、式(1)の連立方程式を求める際に、著者等が開発した直線近似法⁹⁾を用いている。この方法は、修正された搬送波位相の二重差の時系列データを直線に近似し、データ区間の最初と最後のエポックに関する式のみを使用して式(1)の連立方程式を構成する方法である。いずれの方法にしても、式(1)を最小二乗法で解いた場合には、整数値バイアスは実数として得られる。この実数解のことを Float 解と呼ぶ。この Float 解を基に、整数値バイアスを整数化し、さらに $\mathbf{x}$ を再計算したときの解を Fix 解と呼ぶ。

式(1)を最小二乗法で解く際にはデータに重みを付けるが、一般的な方法としては、衛星仰角を用いる。天頂方向の搬送波の位相に含まれる誤差の標準偏差を σ_{90} とすると、仰角 θ の衛星の誤差の標準偏差は

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{90} / \sin \theta \quad (2)$$

でモデル化される。本システムの場合、式(2)から計算される分散の逆数を、修正された搬送波位相の二重差の近似式を推定する際の重みとして使用する。また、近似直線を推定する際に得られる推定誤差の分散を対角成分にもつ分散共分散行列を計算し、これの逆行列を式(1)を解く際の重みとして使用する。

(2) 準静的変位を仮定した変位推定

本研究では、1 時間の変位が数 mm 以下となるような変位を準静的と呼んでいる。本システムでは、例えば 1 時間に 1 回 4 分程度の連続データを収録する。前回観測時からの変位量が、搬送波の波長である 19cm よりも十分に小さい場合には、受信機の位置は既知として扱え、式(1)から整数値バイアス $\mathbf{N}$ を容易に決定することができる。整数値バイアスが決めれば、未知数は実質的に $\mathbf{x}$ の 3 成分となり、常に方程式の数の方が多くなる。そのため、未知ベクトル $\mathbf{x}$ は推定可能となる。

さらに、測位解析により推定された相対位置および分

図-1 準静的変位モニタリング実験の様子

散共分散行列を入力データとして Kalman Filter を適用した。ただし、状態の時間遷移モデルは、位置が一定で、システムノイズを 1mm とした。

(3) 急激な変位を仮定した変位推定

波長 λ 程度の大きさの変位が発生した場合には、未知ベクトル $\mathbf{x}$ と $\mathbf{N}$ は Float 解として推定される。この時、 $\mathbf{N}$ の Fix 解（整数解）は、式(3)の目的関数 J を最小とする整数ベクトルとして探索される。

$$J = (\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N})^T Q_N^{-1} (\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N}) \quad (3)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{N}}$ は整数値バイアスの Float 解、 Q_N は $\hat{\mathbf{N}}$ の分散共分散行列である。式(3)を最小とする整数ベクトルの同定問題を効率的に解く方法として、先に述べた LAMBDA 法が用いられる。整数値バイアスの Fix 解が正しく決まれば、式(1)を用いて未知ベクトル $\mathbf{x}$ を精度よく推定することができる。

一般に、Fix 解の推定値が正しいかどうかを判定する検定手法として、ratio test が用いられる。式(3)を最小とする整数値バイアスの残差二乗和 J_1 と、2 番目に小さい J_2 との比をとり、この値が 3~5 を超えると、経験的に正しい整数値バイアスが Fix されたと判断する。

$$\text{ratio} = J_2 / J_1 \quad (4)$$

本論文では、ratio の値が 5 以上のときに解が Fix されたと判断するものとする。

3. 変位モニタリングの精度検証

(1) 準静的変位モニタリング実験の概要

著者の一人が以前に行った準静的変位モニタリング実験¹⁰⁾の様子を図-1に示す。実験は、4階建てのビル（東

図-2 準静的変位モニタリング実験における解析結果

京理科大学野田キャンパス 5 号館) の屋上とその付近の空き地で行った。実現場を想定し、約 130m の基線長と約 15m の高低差を設けた。高低差を与えることで、基線長が短くても大気遅延による誤差の影響を受けることが知られている¹²⁾。基準点とする ID2 は雑草の生えた地面に固定し、ID3 と ID4 はビルの屋上に設置した。また ID2 と ID4 は、地面からのマルチパスノイズを抑えるため、小型パッチアンテナを直径 10 cm のコンクリート供試体の上に固定した。ID3 では、数ミクロンの精度で変位を 3 次元に制御できる移動ステージの上に、測量用の GPS アンテナを固定した。この測量用 GPS アンテナは、コンクリート供試体の上に小型パッチアンテナを設置した時と同程度のノイズが混入することを確認している。実験スケジュールは平成 25 年 11 月 20 日から約 80 日間で、ID3 は最初に約 7 日間静止させた後、東西、南北、鉛直方向の順に約 25 日間ずつ、速度を一定に保ちながら 90mm 変位させた。観測方法は、1 時間に 1 回、1 分間の初期化の後、4 分間 GPS データを受信した。本実験では、GPS データは 1 エポック 28byte に圧縮され、240 パケットを 1 時間毎に保存した。

(2) 準静的変位モニタリングの精度検証

ID2 を基準とした ID3 の相対位置を 2 章(2)節で述べた手法で解析した結果を図-2 に示す。図の横軸は経過日数、縦軸は上から順に東西、南北、鉛直方向の変位である。また、赤線は 2 章(2)節で述べた手法による解析結果、

図-3 24時間連続データ取得実験の様子

緑線は Kalman Filter をさらに適用した結果、青線は移動ステージにより制御した変位を表している。測位解析では、使用するデータの仰角マスクを 15 度とし、これより低い仰角をもつデータは解析から排除した。

図-2 を見ると、本システムにより準静的な変位を精度よく追従できていることが分かる。標準偏差の 2 倍値を精度とすると、この実験では、水平方向の精度は約 10 mm、鉛直方向のそれは約 13mm であった。

(3) 急激な変位が生じた場合の性能検証

次に、急激な変位が生じた場合を想定し、2 章(3)節で述べた手法を用いて、ID2 を基準とした ID4 の相対位置を解析した。このデータでは、実際には ID2 と ID4 の相対位置は変化していないが、およそその受信機の位置を未知とすることで整数値バイアスも未知数となるため、地震等による急激な変位が発生した前後と同等な条件での解析が可能となる。

解析したところ、Fix 率は 33.4 % しかなく、精度を検証するに至らなかった。また、解析における使用衛星数を増やすことで Fix 率の改善を試みたが、仰角マスクを 15 度から 5 度に変更した場合でも、Fix 率は 34.0 % までしか改善せず、短時間データで相対位置および整数値バイアスを推定するには性能が不十分であることが明らかとなった。すなわち、急激な変位を推定するには性能が不十分であった。

4. 急激な変位を推定する手法の改善

安価な 1 周波 GPS 受信機を使い、実現場と同程度の環境で短時間データを取得した場合、従来手法で解析す

ると Fix 率が非常に低く、精度よく相対位置を推定することは困難となる。そのため、急激な変位を推定するためには Fix 率の改善が重要となる。

通常の RTK - GPS では ratio が閾値以上となるまで初期化を継続する。一般的には 1 周波 GPS でも 15 分程度の連続データがあれば Fix 率は 100% 近くに達することから、データ長を長くすれば本システムでも急激な変位の推定が可能となる。しかしながら、データ長を長くすることは消費電力の増大を意味し、本システムのメリットを損なうことから、できる限り短いデータで済むための改善手法は必要となる。

そこで本研究では、Fix 率を向上させるため、GPS 圧縮データに SN 比 (Signal to Noise ratio) を付加することを考える。これにより、1 エポックあたりのデータ量は 28byte から 38byte に増加するが、Fix 率の向上を優先することとする。

(1) 解析に用いた実験データと評価手法について

図-1 に示した実験では圧縮されたデータしか収集しなかったため、SN 比のデータを損失していた。そこで、同様な環境で GPS データを再度取得することとした。

図-3 に観測装置の設置状況を示す。この実験では、ID2, 3, 4 すべてを固定し、1 秒サンプリングで 24 時間の連続データを受信した。ただし、受信には Novatel 社製の 1 周波 GPS 受信機 OEMStar と、測量用アンテナを使用した。また、ID2→3 と、ID2→4 のデータ取得は別の日に行っている。GPS 衛星は同じ軌道を 23 時間 56 分で周回することから、別の日の解析結果を比較検討しても、本論文の結果に重大な影響は与えないものと考えられる。

解析では、24 時間連続データから 4 分間の連続データを切り出し、2 章(3)節で述べた手法で解析した。そして、この操作を 1 秒ずらして約 86400 回行い、Fix 率などの結果を調べた。さらに、このような解析を、以下に述べる様々な手法を適用しつつ行い、Fix 率等の改善について考察した。

(2) 仰角マスクの変更による使用衛星数の増加

一般に、低仰角衛星からの電波は障害物や大気などの影響を強く受けることから、観測ノイズが大きくなる。そのため、高精度に測位したい場合には、15 度程度の仰角マスクを用いることで、低仰角衛星のデータを排除する。しかし、整数値バイアスを決定するためには、衛星数が多い方が有利となる場合も多く、解析に使用できるのであれば低仰角衛星も積極的に使用したい。そこで、仰角マスクを 15 度から 5 度に変更して解析した。ただし、これまでの経験上、極端に SN 比が低いデータを用いると Fix 率が悪化することから、SN 比が 35dB 以上のデータのみを解析に使用することとした。

表-1 仰角マスクを 15 度から 5 度へ低下させることによる解析結果の変化

	ID3→4 (理想的)		ID3→2 (実現場)	
仰角マスク	15 度	5 度	15 度	5 度
Fix 率[%]	97.27	98.17	70.48	70.98
ミス Fix 率	0.00	0.00	0.64	0.30
衛星数[個]	7.57	8.88	7.06	7.46

先述の仰角マスクの変更により、解析結果は表-1 のように変化した。ID3→4 は、基準点と未知点の 2 つの受信機がともに屋上にあり、理想的な環境下で得られた結果である。この場合、解析に使用した衛星数は平均で 7.57 個から 8.88 個に増加し、Fix 率は 97.27% から 98.17% に改善した。一見したところ、大した改善には見えないかもしれないが、Fix できなかった割合が 2.73% から 1.83% まで低下したことを考えれば、大きな改善であることが分かる。一方、未知点を地面に置いた ID3→2 は実現場を模した環境であるが、平均衛星数は 7.06 個から 7.46 個、Fix 率は 70.48% から 70.98% の増加にとどまり、殆ど改善は見られなかった。

理想的な環境下では、低仰角衛星からの電波を遮る障害物が少ないため、解析に使用できる衛星数は増加した。また、障害物が少ないことからデータの質低下も限定的であり、Fix 率の改善につながったと考えられる。一方で、実環境に近い場合は、仰角マスクを下げたところで衛星が可視となる領域が狭いため、衛星数の増加は小幅にとどまる。さらに、使用衛星数が増えたとしても、マルチパスの影響を強く受けたデータが多く、必ずしも結果は改善しないようである。実際に推定結果を個別にみると、仰角マスクを低下させることで ratio が 5 未満から 5 以上に変化したエポックが多い一方で、元々 Fix に成功していたにも関わらず改悪してしまった例も同数程度みられた。ただし、ミス Fix 率は半分以上に低下している。ミス Fix 率は、ratio の値が 5 以上となって整数値バイアスが決定されたと判断されたにも関わらず、誤った整数値バイアスを Fix してしまった確率である。衛星数の増加は、ミス Fix 率の改善に効果があることが示唆される。

(3) SN 比マスクの導入

上空に障害物のない理想的な環境下であれば、衛星仰角に対して標準的な SN 比が定まることが知られている。ところが、障害物などにより電磁波の伝搬が影響を受けると、信号強度が低下するため SN 比は悪化する。そのため、SN 比が標準的な値と比較して著しく低い場合には、異常データとして削除する方法が提案されている¹⁴⁾。そこで、ID3→4 (理想的環境) のデータを用い、衛星仰

図-4 各衛星仰角における SN 比の相対頻度

図-5 ID3→4 (理想的) の衛星仰角と SN 比の関係

図-6 ID3→2 (実現場) の衛星仰角と SN 比の関係

角と標準的な SN 比の関係を求めることとした。

図-4 は各衛星仰角における SN 比の相対頻度をプロットしたものである。この解析では、衛星仰角を 10 度毎に分割し、それぞれのクラスで SN 比の頻度分布を求めて相対頻度に変換した。図の横軸は衛星仰角、縦軸は SN 比であり、各仰角の相対頻度を縦方向に表示している。図-4 から、衛星仰角の低下により SN 比の相対頻度のピーク値が、SN 比の低い方へシフトしていることが

表-2 衛星仰角マスク 5 度 (SN 比マスク 35 dB) に式(5)の SN 比マスクを追加した場合の解析結果の変化

	ID3→4 (理想的)		ID3→2 (実現場)	
SN マスク	35 dB	式(5)	35 dB	式(5)
Fix 率[%]	98.17	99.26	70.98	74.06
ミス Fix 率	0.00	0.00	0.30	0.66
衛星数[個]	8.88	8.81	7.46	7.23

分かる. このピーク値を通るように, 衛星仰角と SN 比の標準的な関係を次のように求めた.

$$SN(\theta) = -0.0024\theta^2 + 0.3429\theta + 38.643 \quad (5)$$

測位解析では, 観測データの SN 比が式(5)で定めた値より 5 dB 以上低い場合に, そのデータを使用しないように設定した. 図-5 に, ID3→4 のデータから得られた衛星仰角と SN 比の関係を散布図で示す. 同様に, 図-6 に ID3→2 のデータから得られた衛星仰角と SN 比の散布図を示す. 図中の実線は, 式(5)から計算される SN 比マスクの値であり, この値よりも低い SN 比を持つデータは測位解析に使用しないことを意味する.

SN 比マスクを用いて解析した結果を表-2 に示す. 比較のため, 表-1 で示した仰角マスク 5 度 (SN 比マスク 35 dB) の場合の結果も記載している. この表から, 理想的な環境下および実現場を模した環境下ともに Fix 率が改善したことが分かる. 障害物が少ない理想的環境下においては, SN 比マスクの影響はあまり見られないと予想していたが, 平均衛星数は約 1%低下し, Fix 率は 1%程度の改善となった. 理想的環境下として 4 階建てビルの屋上を使用しているものの, 周囲には若干高い建物があり, これが影響したと考えられる. 障害物が多い実現場に近しい環境では, 異常データが排除され, 解析に使用した平均衛星数は約 3%低下し, それに伴い Fix 率は 3%程度改善した. ただし, 衛星数が減少したためか, ミス Fix 率は悪化した.

(4) SN 比を用いた重み付け

第(3)節までの解析では, 衛星仰角を用いて式(2)から重みを算出していた. しかし, ID2 が設置された環境では低い SN 比をもつデータが多数存在しており, 衛星仰角のみで重みを計算するのは不適切と考えられる. 図-7 は衛星仰角と観測ノイズの標準偏差の関係を示したものである. 図中の赤丸は ID3→4 (理想的), 緑三角は ID3→2 (実現場) のデータから求めた観測ノイズの標準偏差を表す. また, 青い実線は理想的な環境から得られたノイズの標準偏差を基に推定した近似曲線であり, 式(2)において天頂方向の標準偏差 σ_0 を 1cm とした場合のものである. この図から, 式(2)のモデルは理想的環境

図-7 衛星仰角と観測ノイズの標準偏差の関係

図-8 SN 比と観測ノイズの標準偏差の関係

下では非常に当てはまりがよいが, 一方で, 実現場を模した環境では仰角が 40 度を下回るとモデルからの乖離が大きくなることが分かる. この結果は, 観測実験を行った環境を踏まえると妥当だと思われる.

そこで, ここでは SN 比を使った重みづけを試行する. 図-8 は SN 比と観測ノイズの標準偏差の関係を示したものである. 図中の近似曲線は, ID3→4 の SN 比とノイズの標準偏差の関係から推定した曲線で, 次式により計算される.

$$\sigma(SN) = 63.7e^{-0.173SN} \quad (6)$$

図-7 と図-8 を見比べると, SN 比を使う方が, 衛星仰角を使う方法よりも観測ノイズの標準偏差を適切に推定できるようなのである. 誤差率を式(7)で算出したところ, 図-7 に示したノイズモデルの誤差率は 1.10 であり, 図-8 のそれは 0.10 であった. このことから, SN 比を用いてノイズの標準偏差を推定した方が当てはまりが良いと言える.

$$\sum (\sigma_{\text{モデル}} - \sigma_{\text{データ}})^2 / \sum \sigma_{\text{モデル}}^2 \quad (7)$$

表-3 SN比マスクを35 dBの一定値とし、SN比から計算した重みを使用した場合の解析結果の変化

	ID3→4 (理想的)		ID3→2 (実現場)	
SN利用法	マスク	重み	マスク	重み
Fix 率 [%]	99.26	98.78	74.06	72.98
ミス Fix 率	0.00	0.00	0.66	0.48
衛星数 [個]	8.81	8.88	7.23	7.46

ここで、 $\sigma_{\text{モデル}}$ は図-7 と図-8 で示した曲線上の値であり、 $\sigma_{\text{データ}}$ は△マークの点の値である。

表-3 に、SN 比マスクを 35 dB の一定値とし、式(2)の代わりに式(6)から計算される分散の逆数を重みとした場合の計算結果を示す。表を見ると、SN 比を重みとして使用すると、マスクとして使用した場合と比べて Fix 率が低下することが分かる。ただし、表-2 と比べると分かるが、SN 比を重みとして使用した場合でも、従来の衛星仰角から重みを計算する方法よりは若干の改善がみられる。また、SN 比をマスクとして使用した場合よりは、ミス Fix 率が改善していることが分かる。これは、解析に使用する衛星数が増加したことが一因であると思われる。

(5) 整数値バイアスを再探索する手法の導入

第 2 章で述べた通り、整数値バイアスの Fix 解は、観測方程式(1)を解いて得られる Float 解およびその分散共分散行列を用いて、式(3)を最小とする整数値ベクトルを探索することにより同定される。この式(3)の計算では、Float 解の推定に使用したすべての衛星について、整数値バイアスの同定が試みられる。ところが、搬送波位相のデータの中には大きな観測ノイズが混入したものが含まれる。また、観測方程式の計画行列の性質上、整数値バイアスが決まりにくいものも存在する。そのような整数値バイアスまでも式(3)で評価すると、最小の残差二乗和と 2 番目に小さい残差二乗和の値が近くなり、ratio の値が低下してしまう。そこで本研究では、決まらない整数値バイアスは決めない方法を試した。この方法では、式(3)の代わりに、式(8)を用いて残差二乗和を計算する。

$$J = \sum_{i=k}^{n-1} \sum_{j=k}^{n-1} (\hat{N}_i - N_i) q_{ij} (\hat{N}_j - N_j) \quad (8)$$

ここに、 q_{ij} は Float 解の分散共分散行列の逆行列の i, j 成分、 n は解析に使用した衛星数である（整数値バイアスは衛星間で一重差をとるため、成分数は $n-1$ となる）。また、 k は整数であり $k=1$ のとき式(8)は式(3)と一致する。以下に、決まらない整数値バイアスは決めない計算手順を示す。

表-4 整数値バイアスを再計算する手法の導入による解析結果の変化

	ID3→4 (理想的)		ID3→2 (実現場)	
再計算	なし	あり	なし	あり
Fix 率 [%]	98.78	99.85	72.98	79.86
ミス Fix 率	0.00	0.00	0.48	0.47
衛星数 [個]	8.88	8.90	7.46	7.38

- ① 修正された搬送波位相の二重差の時系列データに対して近似直線を求める。重みは第 4 章(4)節で述べた方法を用いて計算する。ただし、使用する衛星データを多くするため、衛星の仰角マスクは 5 度にし、データの SN 比マスクは 35[dB] から 30 [dB] に下げた。
- ② 観測方程式(1)を重みが小さい順に並べ、最小二乗法により Float 解を推定する。
- ③ 得られた Float 解に対して式(8)の k を 1 として整数ベクトルを探索し、ratio の値を評価する。
- ④ ratio の値が 5 以上または $n-k$ が 5 未満であれば解析を終了する。（ $n-k$ が 5 未満とは、解析に使用する衛星数が 6 機以下であることを意味する。）
- ⑤ ratio の値が 5 未満であり、かつ $n-k$ が 5 以上であれば、 k の値を 1 増やして上記手順④に戻る。

要するに本手法では、できるだけ多くの衛星データを使用して Float 解を計算するが、Fix できない場合には、重みが小さい衛星データから順番に整数値バイアスの整数化を諦めつつ、ratio 値が 5 以上になるかどうかを確認する。

式(6)を用いて重みを計算する方法に加えて、式(8)を用いて整数値バイアスを再探索する方法を追加して解析した結果を表-4 に示す。本論文で試みた方法の中では、もっとも結果が改善した。

5. まとめ

著者等は、多点高密度に変位を計測することを目的として、安価な 1 周波 GPS と無線センサネットワークの技術を結合した GPS 無線センサネットワークの開発を進めてきた。本研究では、より実現場に近い環境において、センサに準静的変位を与え、そのモニタリング精度を確認した。静的測位解析結果に Kalman Filter を適用した結果、水平方向 10mm、鉛直方向 13mm 程度の精度で変位を追従することができた。

急激な変位が生じた場合を想定して測位性能を検証した。その結果、従来用いていた測位解析方法では精度よく変位を解析できないことがわかった。そこで、急激な

変位が生じた場合の測位性能を改善する手法を検討した。使用衛星数を増やすために仰角マスクを 15 度から 5 度に変更したが、Fix 率に改善は殆ど見られなかった。次に、著しく低い SN 比をもつデータを排除するマスクを導入した。また、別の方法として SN 比を用いて重み付けする方法も試行した。いずれの手法においても、一長一短はあるものの Fix 率に改善が見られた。さらに、決まらない整数値バイアスは決めず、再探索するアルゴリズムを導入することで Fix 率に大きな改善が見られた。

参考文献

- 1) Lynch, J. P.: Decentralization of wireless monitoring and control technologies for smart civil structures, *Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA.*, 2002.
- 2) 長山智則, B. F. Spencer, Jr., 藤野陽三: スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア開発, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.523-535, 2009.
- 3) 高坂朋寛, 佐伯昌之: 1 周波 GPS 受信機の無線センサネットワークにおける通信データ量削減手法について, 応用力学論文集, Vol. 9, pp. 709-716, 2006.
- 4) 佐伯昌之, 金子昌平, 井上忠治: 静的・近接条件に特化した GPS 測位解析アルゴリズムの開発, 応用力学論文集, Vol. 10, pp. 639-648, 2007.
- 5) 佐伯昌之, 澤田茉伊, 志波由紀夫, 小國健二: 準静的変位モニタリングのための GPS 無線センサネットワーク, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.67, No.1, 25-38, 2011.
- 6) Seynat, C., Hooper, G., Roberts, C. and Rizos, C.: Low-cost deformation measurement system for volcano monitoring, *Proceedings of The 2004 International Symposium on GNSS/GPS*, 2004.
- 7) Gassner, G., Wieser, A. and Bruvver, F.: GPS Software development for monitoring of landslides, *Proc., FIG XXII Congress (CD-ROM)*, 2002.
- 8) 近藤仁志, M. Elizabeth Cannon, 清水則一, 中川浩二: GPS による地盤変位モニタリングシステムの開発, 土木学会論文集, No.546/VI-32, pp.157-168, 1996.
- 9) 松田浩朗, 安立寛, 西村好恵, 清水則一: GPS による斜面変位計測結果の平滑化処理法と変位挙動予測手法の実用性の検証, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp. 333-343, 2002.
- 10) Shimizu, N.: Continuous Displacement Monitoring using Global Positioning System for Assessment of Slope Stability, *the 2nd Southeast Asian Workshop on Rock Engineering*, Hanoi, pp.136-145, 2003.
- 11) 増成友宏, 武地美明, 田村尚之, 船津貴弘, 清水則一, GPS 変位計測における上空障害物の影響とその低減法, 土木学会論文集 F, Vol. 64, No. 4, 394-402, 2008.
- 12) 増成友宏, 武地美明, 船津貴弘, 清水則一, 現場気象データを用いた GPS 変位計測の補正について, 土木学会論文集 F, Vol. 65, No. 3, 356-363, 2009.
- 13) Teunissen, P. J. G., Jonge, P. J. de and Tiberius, C. C. J. M.: The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: its performance on short GPS baselines and short observation spans, *Journal of Geodesy*, 71: 589-602, 1997.
- 14) 金澤文彦, 有村真二, 湯浅直美: 中低速移動体への RTK-GPS 適用化技術の開発に関する技術資料—ソフトウェア仕様書—, 国土技術政策総合研究所資料, 第 514 号, 2009.
- 15) Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J.: *GPS, Theory and Practice*, SpringerWienNewYork, 2001.
- 16) 中村美貴, 佐伯昌之: GPS 無線センサネットワークを用いた変位計測精度, 土木学会講演会論文集, 2014.

(2016. 6. 24 受付)

ACCURACY IMPROVEMENT OF DISPLACEMENT MONITORING BY L1 GPS WIRELESS SENSOR NETWORK

Yurisa TAKAHASHI, Masayuki SAEKI and Kojiro NISHI

GPS wireless sensor network, which is a displacement monitoring system using a low cost L1 GPS receiver as a sensor of wireless sensor network, has been developed by the authors. Since the cost per a single observation point can be decreased, the dense sensor deployment is applicable to the displacement monitoring under a construction site or the estimation of disaster distribution in a large earthquake.

In this research, quasi-static displacement is monitored by using the prototype system developed by the authors. The experimental results show that the accuracy is about 1 cm after applying Kalman filter to the positioning results. In case of estimating a sudden displacement, integer ambiguities should be determined as an usual GPS positioning analysis. A data mask method and a weight estimation method using SNR (Signal to Noise ratio) of raw carrier phase data are introduced to the analysis. A re-determinataion algorithm for fixing integer ambiguities is also developed by the authors. The Fix rate of integer ambiguities is improved by introducing these technique to the GPS positioning analysis.