応用力学論文集 Vol.12, pp.975-982 （2009 年 8 月） 土木学会

GPS 無線センサネットワークを用いた準静的変位モニタリングの精度に関する基礎的検討

Fundamental study on the accuracy of displacement monitoring of GPS wireless sensor network

佐伯昌之*・井上忠治**・澤田茉伊***・志波由紀夫****
Masayuki SAEKI, Tadaharu INOUE, Mai SAWADA and Yukio SHIBA

*正会員 博士（工学）東京理科大学 理工学部 土木工学科 講師（〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641）
**非会員 修士（工学）株式会社システム計画研究所（〒 150-0031 東京都渋谷区桜丘町 2-9 カスヤビル）
***正会員 修士（工学）大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所（〒 245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1）
****フェロー会員 博士（工学）大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所（〒 245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1）

We have been developing the GPS wireless sensor network system to monitor displacement of civil structures. The sensor node in this system has a L1 GPS receiver, a wireless communication module, a micro-controller unit and a small battery. In order to make the sensor node work longer, its energy consumption should be smaller that results in shorter data length. Therefore, it is needed to develop an algorithm to estimate displacement in accurate analyzing data with short length. The objective of this paper is to improve the accuracy of displacement measured by the GPS wireless sensor network. In this paper, we study the effect of elimination of antenna noise on the accuracy and the effect of segmentation of observation time. We also investigate the relationship between actual accuracy and the index for forecasting accuracy that is estimated using information of satellite orbit.

Key Words : *GPS, wireless sensor network, displacement monitoring, energy consumption*

1. はじめに

著者等の一人は，これまで GPS（Global Positioning System）と無線センサネットワークの技術を結合した，高密度に多点で変位を計測できるシステムの開発を進めてきた[1),2),3)]．このシステムの開発にあたっては，変位の計測精度は数センチ程度（高性能な GPS 受信機・アンテナを用いた場合，数 mm の精度が達成される）とする一方，設置が簡易であること，システムの維持管理が簡易であること，センサが小型・軽量・安価で高密度・多点に設置可能なことを目標としてきた．そのため，変位センサとしては比較的安価・低消費電力な 1 周波 GPS 受信機を，データ収集システムとしては自立・自律動作する無線センサネットワークを採用している．変位センサとしての GPS のメリットは，計測スケールのレンジが非常に広いこと，変位を計測する際に基準となる固定点と計測対象である移動点とが直接視認できる必要がないこと等が挙げられる．その為，盛土や斜面の変位をモニタリングすることを目的とした研究や，システムとして市販されているものがある[4)]．また，無線センサネットワークは，社会基盤構造物を維持管理するためのデータ収集システムとして，近年注目を集めており，現場適用の研究が盛んに行われている[5)]．

さて，著者等は現在，上記システム（以降，GPS 無線センサネットワークと呼ぶ）を 1 日の変位が 1mm 以下となるような準静的な地盤変位のモニタリングに適用するための研究を進めている．現在，主たる研究課題として次の 2 つが挙げられる．

1）変位の計測精度の向上
2）センサノードの長寿命化（バッテリーで数ヵ月）

変位の計測精度を向上する方法としては，GPS アンテナの高性能化などのハードウェア的対策と，変位解析アルゴリズムの改善によるソフトウェア的対策がある．最終的には両者を合わせることで変位計測精度を向上させるが，本論文では，このうちのソフトウェア的な対策に的を絞って述べる．もちろん，本論文で示す手法は，より高性能な GPS アンテナや受信機を用いた場合に対しても有効な方法である．

変位の計測精度を向上するには，一般的には，データを連続して取得し，平滑化処理などを施すことが有効である[6)]．ただし，その様なデータを取得するためには，GPS 受信機に電力を供給し続ける必要がある．この場合，消費電力が増大してしまうために，電源ケーブルか，もしくは大きなバッテリーや太陽電池パネルを設置する必要があり，目標とする簡易な設置が実現できなくなる．

センサノードを長寿命化するためには，消費電力を低く抑える必要がある．第 2 節でも詳しく述べるが，センサノードの消費電力を低く抑えるためには，GPS 受信機の通電時間を短くすることが最も有効である．ただし，消費電力を抑えることで要求精度が満足できな

くなると意味がないため，精度を保ちつつデータ取得時間を短くする方法を検討する必要がある．

そこで，本研究では，できるだけ短い観測時間で数 mm の変位計測精度を達成することを最終目的として，1) アンテナ誤差の除去手法の適用，2) 観測データのセグメント化による高精度化の検討，3) 前記 2 手法を実際のシステムに適用するための検証実験・技術的課題の抽出，4) 適切な観測時間帯を予測するための指標の基礎的検討を行った．

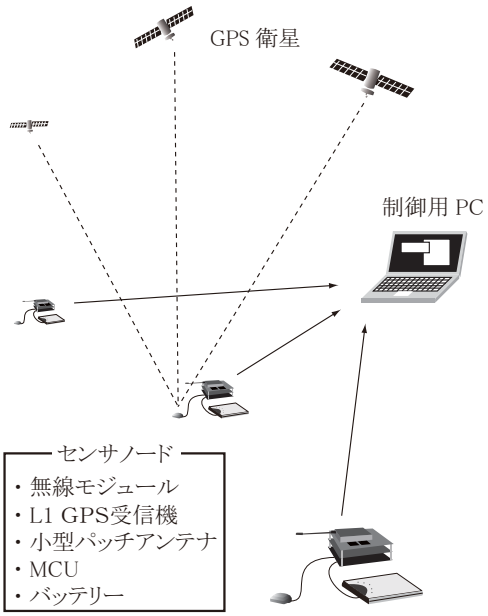
2. GPS 無線センサネットワークの概要

2.1 システムの概要

GPS 無線センサネットワークのイメージを**図–1** に示す．このシステムは，多数のセンサノードとそれらを管理する制御用 PC から成り立っている．制御用 PC は，ある一定時間（数秒）毎に「仕事はないので xx 秒間スリープ状態でいなさい」や「xx 秒後に GPS データを受信しなさい」などのコマンドをブロードキャストし，センサノードの動作を管理しつつ，GPS データを収集する．

センサノードは通常はスリープ状態（低消費電力の状態）にあり，制御用 PC が発するブロードキャスト信号の殆どは無視される．この状態では，GPS 受信機や無線モジュール，MCU など全ての電子部品をスリープ状態にし，低消費電力を実現している．センサノードがスリープ状態にある時，MCU は内部クロックのカウンタを更新し，そのカウンタがオーバーフローすると自動的に起動し，無線モジュールに通電する．そうすると，制御用 PC のブロードキャスト信号を受信することができる．特に仕事がなければ再びスリープ状態に戻り，逆に，GPS データ観測の指示があれば，無線モジュールの電源を切った上で，GPS 受信機を起動し，GPS 衛星から送信されるデータを受信する．受信したデータはデータ量を削減[2]した上で不揮発性メモリに保存する．指定された観測時間分だけのデータを受信した後は，センサノードは GPS 受信機の電源を切り，無線モジュールを起動して，サーバからのデータ送信要求に従ってデータを送信する．これがセンサノードの基本的な動作である．このように，センサノードはできるだけ電力を消費しないように，こまめに電子部品の電源管理をするようにプログラムされている．

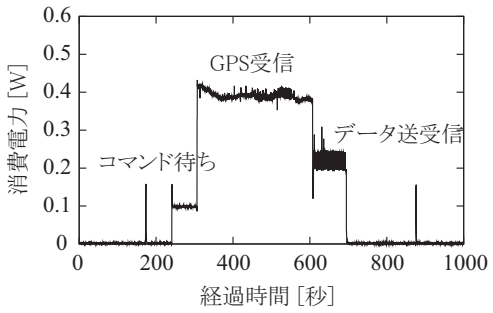
現バージョンのシステムでは，センサノードは制御用 PC とのみ通信するようになっている．使用している無線モジュールの通信距離は 300m 程度であるため，現場の状況にもよるが，現在のシステムで変位モニタリングできる範囲はおおよそ半径 300m 以内の領域となる．



図–1 GPS 無線センサネットワークのイメージ図

2.2 センサノードの消費電力

センサノードの消費電力の時間変化を実測したものを**図–2** に示す．この例では，センサノードは最初にスリープ状態にあり，コマンドを 1 度聞いた後に再びスリープ状態に移行している．その後再度コマンドを聞いて，数十秒後に GPS 受信機を起動している．GPS 信号を 300 秒受信した後，100 秒程度でデータを制御用 PC に送信し，その後スリープ状態に移行している．**表–1** にそれぞれの動作時における平均的な消費電力の値を示す．この表から，低消費電力化を実現するためには，いかに GPS 受信機に通電する時間を短くすることが重要であるかが分かる．



図–2 センサノードの消費電力の時間変化

表–1 センサノードの平均的な消費電力

動作モード	消費電力 (mW)
スリープ	2
コマンド待ち	150
GPS 信号受信	400
データ送信	220

3. 本研究における問題設定

3.1 観測条件

本システムの動作条件から，GPS の観測条件は以下の様にまとめることができる．

1) 相対位置を計算する受信機間の基線長はせいぜい数百 m 程度である．
2) 受信機は 1 日の間でほとんど変位しない．
3) 消費電力を低減させるため，GPS 信号を受信する時間はできる限り短くしたい．

3.2 解くべき連立方程式

観測データは，L1 周波数帯の搬送波位相である．GPS 衛星 k から放射される電磁波を受信機 i で時刻 t に受信した搬送波の位相を $\phi_i^k(t)$ とする．一般に，干渉測位解析では，搬送波位相の二重差（$*_{ij}^{kl} = *_i^k - *_j^k - *_i^l + *_j^l$）を計算し，それを観測値として受信機の相対位置を推定する．本研究が扱う問題では，受信機間の基線長が数百 m と短いため，対流圏遅延や電離層遅延といったノイズは効果的に除去されるため，搬送波位相の二重差 $\phi_{ij}^{kl}(t)$ は，次式によりモデル化される[8]．

$$\phi_{ij}^{kl}(t) = \rho_{ij}^{kl}(\mathbf{x}, t) + \lambda N_{ij}^{kl} + \Delta_{ij}^{kl}(t) + \epsilon_{ij}^{kl}(t) \qquad (1)$$

ここで，$\rho_{ij}^{kl}(t)$ は衛星と受信機間の真の距離の二重差，N_{ij}^{kl} は整数値バイアスの二重差，$\Delta_{ij}^{kl}(t)$ はアンテナ誤差の二重差，$\epsilon_{ij}^{kl}(t)$ はホワイトノイズの二重差であり，λ は搬送波（L1 帯）の波長である．

本研究では，1 [mm/日] 以下のゆっくりとした変位をモニタリングすることを想定している．搬送波の波長は約 19cm であり，変位量に比べて十分に波長は長いため，一度受信機の位置を決定できれば，その後の $\rho_{ij}^{kl}(\mathbf{x}, t)$ は高精度に推定することができる．また，式 (1) の左辺は観測値であり，さらに $\Delta_{ij}^{kl}(t)$, $\epsilon_{ij}^{kl}(t)$ は誤差で 1 よりも十分に小さい．これらのことから，整数値バイアスの二重差 N_{ij}^{kl} は式 (1) を最も説明する整数値として求めることができる．

結局のところ，N_{ij}^{kl} を観測値 $\phi_{ij}^{kl}(t)$ に含めてしまえば，観測方程式は次式の様になる．

$$\phi_{ij}^{kl}(t) = \rho_{ij}^{kl}(\mathbf{x}, t) + \Delta_{ij}^{kl}(t) + \epsilon_{ij}^{kl}(t) \qquad (2)$$

ここで，受信機の初期位置を $\mathbf{x}_o$，ある時刻における変位を $\Delta\mathbf{x}$，その時の受信機の位置を $\mathbf{x}$ とすれば，

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_o + \Delta\mathbf{x} \qquad (3)$$

となる．これを式 (2) の $\rho_{ij}^{kl}(\mathbf{x}, t)$ に代入し，$\Delta\mathbf{x}$ について線形化すれば，解くべき連立方程式を得る．これを行列表示すれば，次式のようにまとめることができる．

$$\mathbf{U}(t) = A(t)\Delta\mathbf{x} + \mathbf{e}(t) \qquad (4)$$

ここに $\mathbf{U}(t)$ は観測ベクトルに相当し，その成分は $\phi_{ij}^{kl}(t) - \rho_{ij}^{kl}(\mathbf{x}_0, t)$ である．$A(t)$ は係数行列で受信機の初期位置 $\mathbf{x}_0$ と衛星の幾何学的関係できまる量である．また，$\mathbf{e}(t)$ は誤差ベクトルで，その成分にはアンテナ誤差 $\Delta_{ij}^{kl}(t)$ とホワイトノイズが含まれる．仮に N_s 個の衛星からの電波を受信していれば，式 (4) の方程式の数は $N_s - 1$ 個であり，一方で未知数は変位 3 成分のみであるので，式 (4) は最小二乗法により解く事ができる．

本研究では，式 (4) を解く際に著者等の一人が開発した直線近似法を用いることとする[3]．本システムでは，GPS 受信機を起動してデータを取得する際，数分程度のまとまった連続データを取得し，解析する．直線近似法では，受信機の相対位置が変化せず，かつ短時間であれば，式 (4) の左辺にある観測ベクトルの各成分は時刻 t に対して直線に近似できる，という性質を利用する．そして，推定された近似式を使って改めて幾つかの時刻 t_i における $\mathbf{U}(t_i)$ を計算する．受信機の位置はこの短時間の間に変位していないと仮定しているので，結局，幾つかの時刻 t_i における式 (4) を最小二乗法で解くと，次式を得る．

$$\Delta\mathbf{x} = G^{-1}\left(\sum_i A^T(t_i)R^{-1}(t_i)\mathbf{U}(t_i)\right) \qquad (5)$$

ただし

$$G = \sum_i A^T(t_i)R^{-1}(t_i)A(t_i) \qquad (6)$$

である．ここに，$R(t_i)$ は観測ベクトル $\mathbf{U}(t_i)$ に対する誤差共分散行列である．

4. アンテナ誤差除去に関する検討

直線近似法では，式 (4) の左辺の各成分を，時刻 t に対する直線の式に近似する．その際，近似直線は最小二乗法により推定する．誤差はホワイトノイズと仮定して推定するため，バイアス成分をもつアンテナ誤差 $\Delta_{ij}^{kl}(t)$ は直線式の推定結果に大きな影響を与え，変位の推定結果を悪化させてしまう．そこで，アンテナ誤差を除去する方法を検討することとする．

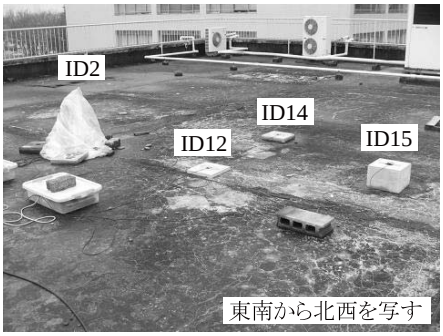
アンテナ誤差は，GPS 受信機に接続したアンテナ周辺の電波環境が変化せず，かつアンテナと GPS 衛星の幾何学的関係が等しい場合に，等しくなることが知られている[7]．GPS 衛星は軌道上を周回しており，アンテナの変位が十分に小さい場合，各 GPS 衛星とアンテナの幾何学的関係はおおよそ 23 時間 56 分で等しくなる[9]．アンテナ誤差の主な要因は，固定点と移動点に設置されたアンテナの特性の違いと，アンテナ周辺の地物からの反射波によるマルチパスノイズがある．どちらも日によって変化がなければ，おおよそ 23 時間 56 分おきにアンテナ誤差は等しくなるはずである．

そこで，本システムにおいてもアンテナ誤差除去手法を適用し，変位計測精度が実際に向上するか確認することとする．

4.1 テストデータの取得

アンテナ誤差除去手法の効果を確認するため，周囲に GPS 衛星からの電波を遮蔽するものが無いビルの屋上で，5 日間連続観測を行った．**図–3** に GPS データ取得の様子を示す．GPS アンテナは，図に示す様に 4 つ設置している．ID12 と ID14 のアンテナは，マルチパスノイズが小さくなるように，薄いモルタル板の上に直に貼り付けている．ID2 は高さ 50cm くらいの棒の上に，ID15 は厚さ 15cm のモルタル板の上に固定し，意図的にマルチパスノイズが多く混入するように設置した．

GPS データは，センサノードに使用している GPS 受信機およびアンテナと同じものを用いて取得した．ただし，データ収録部は異なる．これは，現バージョンのセンサノードは 1 度に 4 分程度のデータしかメモリに保存できず，精度改善を詳細に検証するにはデータ量が不十分であるためである．GPS データは，1 秒サンプリングで 5 日間連続で受信した．



図–3 ビル屋上でのアンテナ設置の様子（理想的環境）

4.2 解析における誤差除去手法

式 (2) を用いれば，アンテナ誤差を推定することができる．解析では，まず最初の 23 時間 56 分のデータを使用して受信機の位置 $\mathbf{x}_0$ を推定する．そして，得られた位置から式 (7) を用いてアンテナ誤差を計算する．

$$\hat{\Delta}_{ij}^{kl}(t) = \phi_{ij}^{kl}(t) - \rho_{ij}^{kl}(\mathbf{x}_0, t) \qquad (7)$$

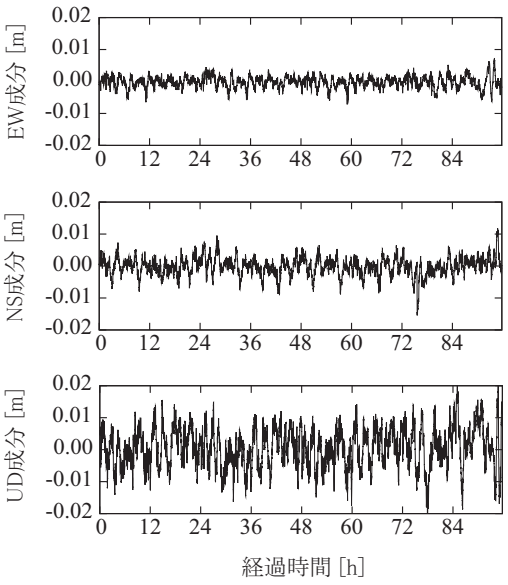
次に，23 時間 56 分以降のデータを用いて変位を解析する際には，式 (4) の左辺の観測ベクトルの各成分から，式 (7) で推定したアンテナ誤差を差し引いてから計算する．本研究では，直線近似法により解析するので，直線の式を推定する前にアンテナ誤差を除去することになる．

ところで，式 (7) で推定されたアンテナ誤差は，搬送波位相の二重差に含まれるホワイトノイズ $\epsilon_{ij}^{kl}(t)$ と，受信機の位置 $\mathbf{x}_0$ の推定誤差によるバイアス成分を含む．ここで，バイアス成分が問題になるように思われるが，実際には，変位の推定結果は $\mathbf{x}_0$ からの変位量として求められるため，このバイアス成分が変位の推定結果に与える影響は小さい．

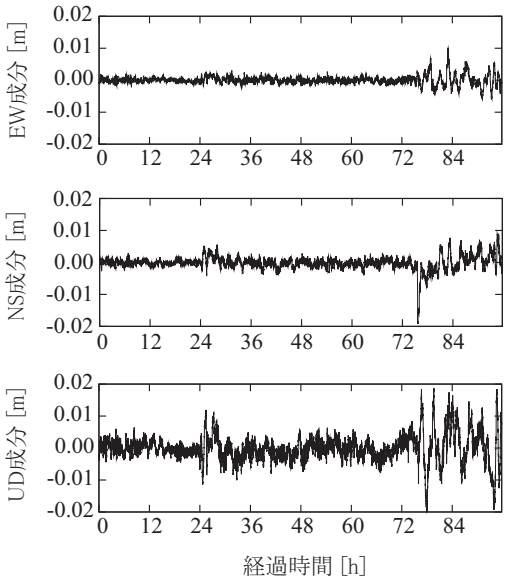
4.3 解析結果の比較

変位の解析では，まず連続的に取得したデータから 4 分間切り出し，変位を 1 つ推定する．そして，10 秒間だけ切り出すデータをシフトさせて，もう 1 度同じように解析する．これを最初の 23 時間 56 分以降のデータに対して行った．

ID12 を固定点，ID14 を移動点として変位を推定した結果を**図–4** と**図–5** に示す．**図–4** はアンテナ誤差を除去していない場合で，**図–5** はアンテナ誤差を除去した場合である．図は，上から EW 成分，NS 成分，UD 成分を表している．また，それぞれの図の縦軸は変位を，横軸は最初の 23 時間 56 分以降の経過時間を表している．また，全ての図の縦軸は ±2 [cm] になるように統一している．



図–4 変位の時間推移（ID12→ID14, アンテナ誤差含む）



図–5 変位の時間推移（ID12→ID14, アンテナ誤差除去後）

図–4 と**図–5** を比較すると，アンテナ誤差を除去した効果が明確に分かる．ただし，24 時間付近と 72 時間以降については，アンテナ誤差除去の効果が殆ど見られないようである．データを取得した日は，当初晴天であったが，その後，断続的に雨が降り続いていた．明確な原因は特定できていないが，恐らく，降雨によってアンテナのごく周辺に水が溜まり，アンテナの特性に影響を与えたものと思われる．この点については，今後，意図的に片方のアンテナのみを水溜りに浸けて実験をするなどして原因を特定するとともに，アンテナ設置方法を工夫することで降雨の影響を少なくすることを考える必要がある．

次に，アンテナ誤差除去の効果を定量的に把握するため，標準偏差の 2 倍値を求めた．ただし，72 時間以降はアンテナ誤差除去の効果が見られないため，それ以前のデータのみを用いて標準偏差の 2 倍値を計算した．**表–2** にその結果をまとめる．

表–2 アンテナ誤差除去前後での変位の標準編差の 2 倍値の比較（単位 mm）

	ID12 → ID14			ID15 → ID02		
	EW	NS	UD	EW	NS	UD
除去前	3.6	5.8	12.4	9.1	14.6	29.8
除去後	2.7	4.2	8.9	2.3	3.5	6.8

表–2 を見ると，アンテナ誤差除去前では，マルチパスノイズが小さい場合（ID12 → ID14）と大きい場合（ID15 → ID02）を比較すると，その標準偏差は 3 倍弱も異なる．ところが，アンテナ誤差を除去することにより，ほぼ同程度の標準偏差となっている．このことからも，アンテナ誤差が上手く除去されていることが分かる．今回はアンテナを全く変位させていないために，アンテナ周辺の電波環境は日によって殆ど変化していない．そのような状況では，**表–2** に示される程度の改善が期待できることが分かった．ただし，実際の環境下では，日々の変位によりアンテナ周辺の電波環境も少しずつ変化することが予想される．その場合，アンテナ誤差の変化による見かけの変位がどの程度になるか，今後検討する余地がある．

5. 観測時間のセグメント化の効果

前節では，理想的な環境下において取得した GPS データからアンテナ誤差を除去し，変位を解析した．その結果，変位の標準偏差の 2 倍値は 1cm 弱程度となった．地盤変位をモニタリングするためには，さらに精度を改善する必要がある．

ところで，**図–4** と**図–5** は，ある連続した 4 分間のデータを解析した結果である．連続する 4 分間のデータを取得する場合，GPS 衛星は殆ど移動しないため，その間に得られる方程式は一次従属に近いものとなる．連立方程式を精度よく解くには，できるだけ独立した情報が欲しいことから，GPS 衛星は上空に広く分布している方がよい．（式 (4) の係数行列 $A(t)$ は受信機と衛星の幾何学的関係のみで決まる．）そこで，連続した 4 分間のデータを取得するのではなく，これを連続する 2 分間のデータ 2 つに分割することで，高精度化を試みる．本論文では，分割したデータの 1 つの塊をセグメントと呼ぶことにする．

5.1 セグメントに分割する場合の解析手法

それぞれのセグメントに対しては，直線近似法を適用する．また，2 つのセグメント間での変位は無視しえるほど小さいものと仮定する．この場合，変位の推定値は式 (5) により計算することができる．違いは，i について和をとる時刻が増えるだけである．

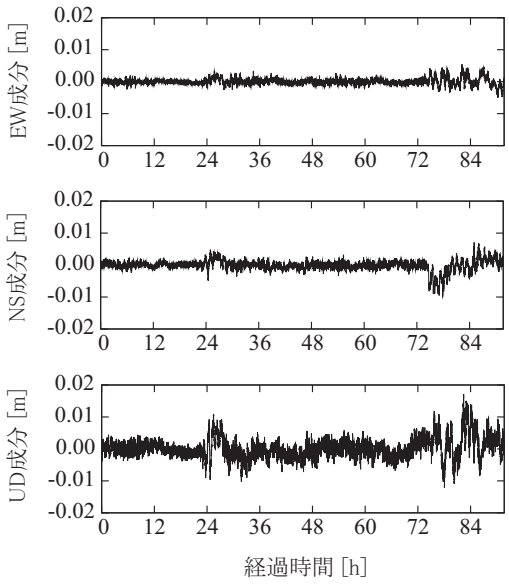
5.2 解析結果の比較

図–6 に，アンテナ誤差を除去し，さらに 2 つのセグメントに分割して解析した変位の時間推移を示す．この例では，データ長 2 分間のセグメントを 2 回取得し，セグメント間は 1 時間に固定して計測した場合を想定して計算している．図の見方は**図–5** と同じである．**図–6** を見ると，推定値が変位ゼロ付近にばらついており，正しく解析できていることが分かる．ただし，**図–5** と比較してより高精度になったかどうかは明瞭には分からない．そこで，**表–3** に，72 時間以前の変位について標準偏差の 2 倍値を計算した結果をまとめる．表中には，比較のために 4 分間連続データを解析した結果も載せているが，これは**表–2** の ID12 → 14 の結果を転載したものである．時系列グラフでは明確に分からなかったが，**表–3** を見ると，2 つのセグメントに分割することで，標準偏差が大きく改善されることが分かる．また，改善率はアンテナ誤差を除去した場合の方が良いようである．

表–3 セグメント化による変位の標準編差の 2 倍値の比較（単位 mm）

	4 分間連続			2 分間 ×2		
	EW	NS	UD	EW	NS	UD
除去前	3.6	5.8	12.4	2.7	3.7	8.2
除去後	2.7	4.2	8.9	1.3	2.1	4.8

この結果から，さらに多くのセグメントに分割すれば，さらに精度を改善できるものと思われる．現に，国土地理院が配備する電子基準点のデータは，サンプリング間隔 30 秒で連続的に保存されている[10]．ただし，その様なデータを取得するためには，GPS 受信機に通電し続ける必要があるため，消費電力が著しく大きくなり，我々が目標とする簡易なシステムを構築するこ



図–6 セグメント化による変位の時間推移（ID12→ID14, アンテナ誤差除く）

とはできない．

GPS 受信機は，電源 OFF の状態（もしくはスリープモード）から動作状態になったとき，まず GPS 衛星からの電波を探索する．受信機内のメモリーに衛星の軌道情報や受信機の位置などの情報があれば比較的速くに電波を検出し，解析に必要な搬送波位相の情報を出力する．一方で，有効な情報をもたない場合には，GPS 衛星からの電波の探索に時間がかかることから，搬送波位相の出力結果を得るまでに時間を要する．メモリーに保持している情報にもよるが，前者をホットスタートと呼び，幾つかの衛星について搬送波位相を出力し始めるまでに数秒程度の準備時間を要する．一方で，後者はコールドスタートと呼ばれ，30 秒程度の時間を要する．我々が開発を進めているセンサノードの場合，消費電力を抑えるためにデータを受信しない時間は受信機の電源を切っており，メモリーには情報は何も残されない．そのため，必ずコールドスタートとなり，最低でも 30 秒程度は余分に電力を消費してしまう．また，著者の経験上，より多くの衛星からの電波を捉えようとすれば，さらに長い時間を要する．

多くのセグメントに分割すれば，精度の向上が期待できるが，一方で余分な消費電力も増大してしまう．そのため，消費電力も含めた最適な観測時間の配分を今後研究する必要がある．

6. 実現場を想定した動作確認と課題の抽出

前節までに，アンテナ誤差の除去およびセグメント化による高精度化について検討した．ただし，それは理想的環境下で観測された 5 日間の連続データに基づいたものである．ここでは，実際にシステムを運用することを想定して実験し，アンテナ誤差除去およびセグメント化の手法が適用可能であるかどうかを調べることとする．また，この実験により実用上の課題も抽出することを試みる．

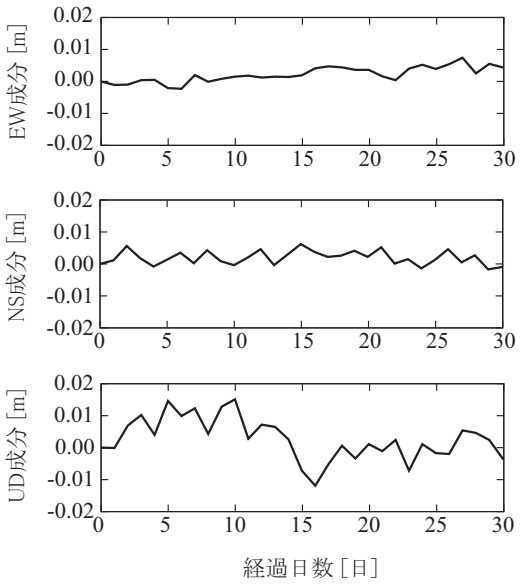
6.1 実現場を模した実験の概要

実現場を模して，比較的開けた平らな広場において 1ヵ月以上連続して観測実験を行った．アンテナは，地面に厚さ 10cm 程度のモルタル板を設置し，その上に固定した．固定点と移動点に設置したアンテナ間の基線長は約 4m である．今回の実験では，GPS 衛星がほぼ 1 周する 23 時間 56 分の間に 2 回の計測を行っており，1 回の計測時間は 4 分間である．ただし，4 分間のデータを保存する前に，1 分間ほどコールドスタートのための時間をとっているので，合計で 10 分程度 GPS 受信機を ON している．観測時刻は，できるだけ多くの衛星を利用できるような時刻を選定しており，2 つのセグメントの間隔は約 15 時間であった．データのサンプリング間隔は 1 秒である．

観測中はセンサノードの相対位置が変化するような原因は特に考えられないため，1ヵ月程度であれば変位がゼロであると見なすことができるものと思われる．

6.2 変位の解析結果

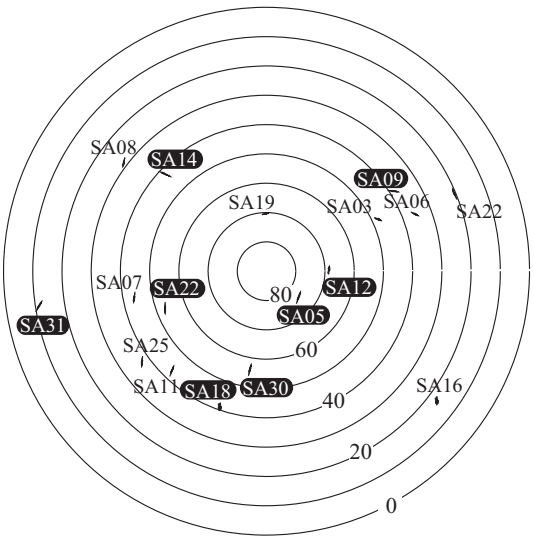
31 日間分のデータを解析した結果を**図–7** に示す．図を見ると，水平 2 成分のふらつきは比較的小さく，幅 5mm 程度で推移している様子が見える．鉛直成分については，特に最初の 15 日間に ±1cm 以上のばらつきがあり，少なくとも要求精度は満たしていない．この様な結果が得られた原因はまだ特定できていないが，恐らくアンテナのごく周辺の環境が固定点と移動点で異なったためと思われる．



図–7 定期観測における変位の時間推移

図–8 は，観測初日，10 日目，20 日目，30 日目の観測時間帯における衛星の軌道を描いたものである．黒字はセグメント 1 における衛星の軌道を，黒地に白抜きはセグメント 2 のそれを示す．図の中心に移動点の受信機があり，上と右はそれぞれ北と東を示す．同心円は衛星の仰角を表しており，例えば，セグメント 2（白抜き文字）の SA12 は仰角 70 度で北上している．

各衛星の軌道は短いが，これは各セグメントのデータ長が 4 分と短いためである．また，図上では衛星によって移動量に違いがある様に見えるが，実際には移動量ではなく，日によって衛星の位置が異なることによる．すなわち，軌道が短く見える衛星は，観測開始から 30 日目までの間は，23 時間 56 分でほぼ同じ位置に戻ってきていることを意味し，逆に軌道が長く見える衛星は，日々少しずつ衛星が早く進むか，遅れるかしているということである．マルチパスノイズは衛星と受信機の幾何学的関係に依存するため，衛星の位置が日々異なる場合，ある特定の時間帯で観測しているとマルチパスノイズも変化してしまう可能性がある．そこで，実際に意図的に 2 分程度ずらして解析してみたが，少なくとも今回のデータを解析した限りでは大きな影響は見られなかった．



図–8 観測時間帯における衛星の軌道

6.3 課題の抽出

実現場を模した 1ヵ月の連続実験を通して，実用上，次のことが新たに課題となることが分かった．

(1) アンテナ誤差データの使用期限と変位の接続

本システムでは，アンテナ誤差を除去するために，衛星の配置が同じになる時間帯を狙って観測スケジュールを決定する．しかしながら，**図–8** に示した衛星軌道を見ると，23 時間 56 分でほぼ同じ位置に戻る衛星もあれば，日々ずれていく衛星もある．今回の観測の例では，アンテナ誤差データは，1ヵ月程度は使用可能となる結果が得られたが，常に成立する保証はない．さらに連続データを長期間取得してアンテナ誤差の使用期限を確認する必要があると考えられる．また，今回の観測では見られなかったが，GPS 衛星の軌道が意図的に変えられる場合もあり，そのような場合はアンテナ誤差を計算し直す必要がある．異なるアンテナ誤差を使用した場合，当然，変位の推定結果も変化するため，アンテナ誤差の更新前後での変位をスムーズに接続する技術も必要となる．

(2) 制御用 PC・センサノードの時刻管理

今回の実験では，制御用 PC にインストールしたプログラムにバグがあったため，本来観測すべき時間帯から毎日 4 秒ずつシフトするトラブルが発生した．今後，高精度化のために多くのセグメントに分割することを試みるが，1 つのセグメントの時間が短くなるほど，制御 PC とセンサノード間での時刻管理が重要となってくる．決められたスケジュール通りにシステムが稼働しない場合，取得したデータの時間帯がずれるために，アンテナ誤差を除去できないばかりか，搬送波位相の二重差の計算もできなくなる．

(3) 最適な観測スケジュールの決定

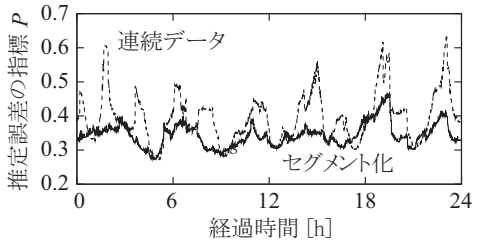
今回の実験では，衛星の数が多くなるような時間帯を選択して観測スケジュールを組んだ．その時間帯における衛星の配置は**図–8** に示した通りである．この衛星の配置を見ると，幾つかの衛星は密集し，逆に東南の方向の衛星数が少ないことが分かる．精度を改善するためには，あらゆる方向からの電波を受信し，個々の連立方程式をできるだけ一次独立となるようにすべきであると考えられる．消費電力も踏まえつつ，式 (4) の係数行列 $A(t)$ の性質を改善する最適な観測スケジュールを決定するアルゴリズムが必要となる．

7. 適切な観測時間帯を予測する指標の検討

前節で課題として挙げた最適な観測スケジュールの決定を行うためには，観測する前からどの程度の精度が期待できるかを予測する指標が必要となる．ここでは，**図–6** と同じデータを使用して，その指標について検討する．

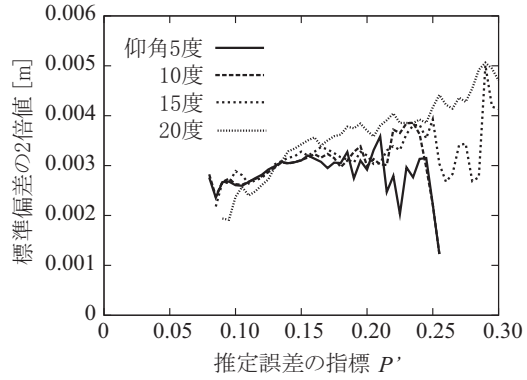
本論文では，指標の 1 つとして式 (6) で計算される行列 G の逆行列 G^{-1} の対角項の和の平方根を検討することにする．G^{-1} は，推定値 $\Delta\mathbf{x}$ の誤差共分散行列と等しくなることが示される[8]．その対角項はそれぞれ x, y, z 成分の変位の推定誤差の分散を表しているので，この和の平方根は変位の推定誤差の標準偏差として考えることができる．本論文では，その指標を P として表すことにする．GPS の世界で測位精度の指標として用いられる PDOP (Position Dilution of Precision) は，G^{-1} の計算において R を単位行列とした場合のものであり，この値は小さいほど精度が良いことを意味する．

図–9 に，**図–6** と**図–5** の場合のそれぞれの P の値を時系列にして示す．横軸は経過時間で，最初の 24 時間だけを抜き出している．これを見ると，セグメント化により指標 P が改善されていることが分かり，1 つの指標として検討に値することが分かる．



図–9 セグメント化による推定誤差指標 P の変化

次に，指標 P の値で推定変位をクラス分けし，それぞれのクラスの標準偏差を調べることとする．**図–9** は，2 つのセグメントの間隔を 1 時間に固定した場合の時系列変化であるが，実際にはセグメントの間隔は 23 時間 56 分の範囲内で任意に設定できる．そこで，1 つのセグメントのデータ長を 4 分として，セグメント間隔を 120 秒単位で変更して全てのセグメントの組み合わせについて推定変位と指標 P の値を計算した．ただし，指標 P は変位推定に使用する衛星数が多いと値が大きくなる傾向が見られることから，ここでは指標として $P' = \sqrt{P^2/N}$（N は解析に使用した衛星数）を用いることとする．解析に使用したデータは，**図–9** と同じ最初の 24 時間に相当する部分とした．**図–10** に推定誤差の指標 P' と実際の標準偏差の関係を示す．



図–10 推定誤差の指標 P' と実際の標準偏差の関係

図–10 には，仰角マスク（これ以下の仰角の衛星は解析に使用しない）を 5, 10, 15, 20 度としたときの解析結果から求めたそれぞれのグラフを示している．また，グラフの両端でデータが暴れているのは，サンプル数が少ないためであり，9 割弱のサンプルが 0.10∼0.15 の間に存在している．この図から，大雑把ではあるが，推定誤差の指標 P' の値が小さい方が推定誤差の標準偏差を小さくする傾向にあることが分かる．P' の値は，実際に計測するよりも以前に計算することができる指標であるため，適切な観測スケジュールを決定する 1 つの指標になりえるものであると考えられる．

8. まとめ

本論文は，簡易に変位計測できる GPS 無線センサネットワークを準静的な変位モニタリングに適用するために，その精度向上について基礎的な検討を行った．その際，単に高精度化するだけでなく，低消費電力を保持しつつ高精度化する技術に的を絞っている．本研究により，以下のことが明らかになった．

1) アンテナ誤差の除去手法は，本システムでも適用可能である．ただし，制御 PC とセンサノードの時刻管理，アンテナ誤差データの使用期限について，さらに検討する必要がある．また，アンテナ誤差データを更新する際に，変位の推定結果をスムーズに接続する技術を開発する必要がある．
2) 観測時間帯をセグメント化することで，精度を向上させることができる．ただし，セグメント化はコールドスタートによる消費電力の増大につながるため，賢い観測スケジュール決定方法が必要となる．
3) 観測スケジュールを決定する指標として，係数行列 G^{-1} の対角項が使用できる可能性を示した．今後，他の指標も含めて，さらに検討する必要がある．

参考文献

1) Saeki, M. and Hori, M : Development of an accurate positioning system using low-cost L1 GPS receivers, *Conputer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 21, p.258-267, 2006
2) 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
3) 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
4) 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
5) 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
6) 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
7) 畑中雄樹：GPS 観測におけるマルチパス等の影響について，月刊地球，号外 No.25，p. 200-204, 1999
8) Hofmann, B. - Wellenhof, H. Lichtenegger & J. Collins (2001), *GPS, Theory and Practice*, Springer-WienNewYork.
9) 坂井丈泰：GPS 技術入門，東京電機大学出版局，2003
10) 国土地理院 HP，http://terras.gsi.go.jp/ja/index.html

(2009 年 4 月 9 日 受付)