1周波GPSを用いた変位モニタリングにおける観測時間帯と精度についての基礎的研究

東京理科大学　正会員　○佐伯昌之
株式会社システム計画研究所　井上忠治
大成建設株式会社　正会員　澤田茉伊
大成建設株式会社　フェロー会員　志波 由紀夫

1. はじめに

著者らは，地盤などの準静的な変位をモニタリングする簡易なシステムの開発に取り組んでいる．装置を小型・安価にするために，変位センサとして小型パッチアンテナ接続の1周波GPS受信機を使用することを検討している．

現状，幾つかの課題が存在するが，本論文では精度改善と低消費電力化の問題について扱う．簡易な設置を可能にするためには，センサをバッテリーで駆動する必要があり，さらに小型・軽量・安価を実現するためには，そのバッテリーはできるだけ小さい方がよい．小型のバッテリーを採用する際に問題となるのが消費電力である．

GPSを用いて変位をモニタリングする場合，受信機は衛星からの搬送波を捕捉し続けるために，通常は電源をONし続ける．そして，毎秒もしくは毎数十秒ごとに搬送波位相を取得し，これを解析することで，受信機間の相対位置を推定する．この相対位置の時間変化が変位であるが，通常はデータがばらつくため，平滑化処理などにより精度を向上させる．すなわち，精度向上には連続観測が有効であり，その場合，消費電力が大きくなるのである．

センサの消費電力を削減するためには，観測時間を短くする必要があるが，その場合，精度劣化が発生する．ただし，劣化の度合いは上空の衛星配置に依存する．そこで，本研究では，短い観測時間で精度を保つ方法を検討することを目的として，観測時間帯と測位精度の関係を調べた．

2. 観測方程式と問題設定

(1) 解くべき観測方程式

本研究では，準静的な変位をモニタリングすることに問題を特化するので，解くべき観測方程式は次式となる[1]．

$$\phi_{ij}^{kl}(t) = \rho_{ij}^{kl}(t) + \Delta_{ij}^{kl}(t) + \epsilon_{ij}^{kl}(t) \tag{1}$$

ここに，記号$*_{ij}^{kl}$は二重差（$*_{ij}^{kl} = *_i^k - *_j^k - *_i^l + *_j^l$）を表し，$\phi_{ij}^{kl}(t)$，$\rho_{ij}^{kl}(t)$，$\Delta_{ij}^{kl}(t)$，$\epsilon_{ij}^{kl}(t)$はそれぞれ観測された搬送波位相，衛星と受信機間の真の距離，アンテナに関するノイズ，ランダムノイズの二重差を表す．また，下添え字のiとjは受信機のIDを，kとlは衛星のIDを表す．

式(1)を解いて変位を求めることを考える．受信機の初期位置を$\mathbf{x}_o$，ある時刻における変位を$\Delta\mathbf{x}(t)$，その時の受信機の位置を$\mathbf{x}(t)$とし，

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_o + \Delta\mathbf{x}(t) \tag{2}$$

これを式(1)の$\rho_{ij}^{kl}(t)$に代入し，$\Delta\mathbf{x}(t)$について線形化する．各衛星について得られた方程式を連立し，行列表示すると，次式を得る．

$$\mathbf{U}(t) = A(t)\Delta\mathbf{x}(t) + \mathbf{e}(t) \tag{3}$$

ここに，$\mathbf{U}(t)$は観測ベクトルで，衛星数をN_sとするとN_s-1個の成分をもつ．$A(t)$は受信機の初期位置と衛星の幾何学的関係によって決まる係数行列で$(N_s-1)\times 3$である．$\mathbf{e}(t)$はノイズベクトルである．

本研究では，式(3)を直線近似法[2]によって解く．直線近似法は，数分程度の短時間のデータで，かつ受信機の相対位置が変化していない場合に適用できる手法で，観測ベクトル$\mathbf{U}(t)$の各成分を時刻に対して直線に近似する．その上で，近似直線を用いて幾つかの時刻t_iにおける$\hat{\mathbf{U}}(t_i)$を計算する．結局，幾つかの時刻t_iに関する連立方程式を最小二乗法で解けば，変位は次のように求めることができる．

$$\Delta\mathbf{x}(t) = G^{-1}\left(\sum_i A^T(t_i)R^{-1}(t_i)\hat{\mathbf{U}}(t_i)\right) \tag{4}$$

ただし

$$G = \sum_t A^T(t_i)R^{-1}(t_i)A(t_i) \tag{5}$$

である．ここに，$R(t)$は観測ベクトルに対する誤差共分散行列である．

(2) 問題設定

さて，本研究は，式(4)を解く際に使用する観測時間帯と変位の推定精度の関係を調べることを目的とする．本研究では，1日に受信機の電源をONすることができる時間長を数分に限定した場合，観測時間帯の選択方法によって変位の精度がどのように変化するかを調べることとする．

Key Words: *GPS*，変位モニタリング，精度，消費電力
〒278-8510 千葉県野田市山崎2641　東京理科大学理工学部土木工学科 TEL:04-7124-1501(ex 4057)

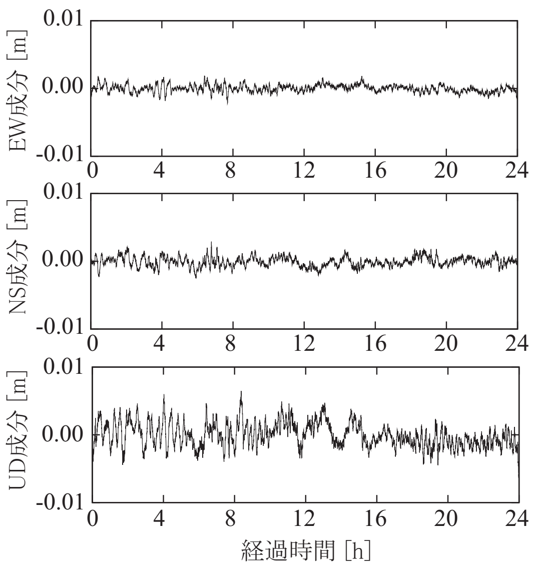
3. 観測時間帯と変位の推定精度の関係

(1) 解析に使用したデータ

解析に使用するデータは，GPS 衛星からの電波の遮蔽物の無い，ビルの屋上にて取得した．小型のパッチアンテナを薄いモルタル板の上に固定し，1 秒サンプリングで 5 日間連続でデータを取得した．解析においては，最初の 24 時間のデータを用いて翌日以降のデータからマルチパスノイズを除去した．また，今回の実験では観測時間中にアンテナを変位させていないので，解析結果は変位量ゼロとなるはずである．

(2) 解析と結果

解析では，連続データから 4 分間のデータを切り出し，式 (4) を解いて変位を推定した．この操作を切り出す時間を 10 秒ずつシフトさせて，4 日間分のデータを解析した．その内の最初の 24 時間分を**図-1** に示す．図をみると，数 mm 程度のふらつきで変位を推定できていることが分かる．



図–1 4 分間の連続データを解析した結果

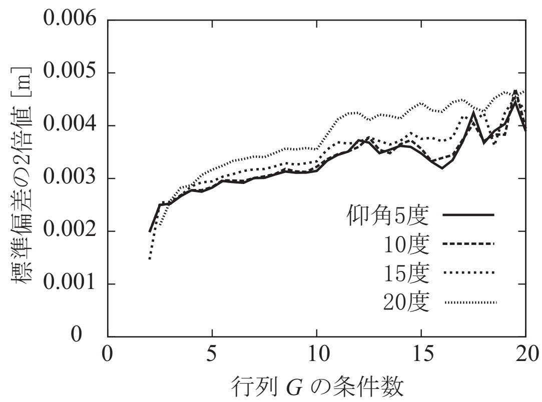
次に，4 分間のデータを 2 分間のデータ 2 つに分割することを考える．1 時間の間隔をあけて 2 つの 2 分間のデータを切り出し同様に解析した．推定された変位の標準偏差の 2 倍値を**表-1** にまとめる．表には，比較のために，**図-1** に示した変位の標準偏差の 2 倍値の値も記述した．両者を比較すると，同じデータ長であれば，時間を分割した方が精度が高くなることが分かる．連続した 4 分間だと，その間に GPS 衛星が移動する距離は非常に短いが，1 時間の間隔を置くことで GPS 衛星が十分に移動し，そのため，より様々な方向からの情報を得ることができたために，精度が改善したと考えられる．

さて，観測時間を分割した方が精度が良くなる可能性があることが分かった．実際の変位モニタリングに適用することを考えると，観測する前から，最も精度が良くなる時間帯の組み合わせを予測できると効率的である．そこで，最初の 24 時間のデータを使用し，2 分間のデータを切り出す全ての組み合わせにおいて，変位と係数行列 G の性質を表す指標を計算し，その関係を調べた．指標としては，係数行列 G の条件数（最大固有値を最小固有値で除した値）を検討した．条件数は小さいほど行列の性質が良いことを表す指標である．

表–1 変位の標準偏差の 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

全ての組み合わせで計算した結果を条件数でクラス分けし，それぞれのクラスで標準偏差の 2 倍値を計算した．その結果を**図-2** に示す．図を見ると，条件数が小さいほど標準偏差が小さいことが分かる．この結果から，適切な観測時間帯を予測する指標として，係数行列 G の条件数を使用できる可能性があることが分かった．



図–2 標準偏差の 2 倍値と条件数の関係

4. まとめ

GPS による変位モニタリングで，観測時間帯と推定精度の関係を調べた．データ長が短い場合，観測時間を分割した方が精度がよくなることが分かった．また，条件数が小さくなるような観測時間帯を設定することで，比較的短い時間で効率よく精度を向上できる可能性があることが分かった．

参考文献

1) 佐伯昌之，井上忠治，畑明仁：1 周波 GPS 受信機を用いた変位計測におけるマルチパスノイズ除去手法の適用と精度検証, 土木学会・第 63 回年次学術講演会，2008 年 9 月
2) 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