

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

東京理科大学 正会員 ○佐伯昌之
東京理科大学 学生員 井上忠治
大成建設株式会社 正会員 畑明仁

1. はじめに

著者らは、土木構造物や地盤の準静的な変位をモニタリングするための簡易なシステムの研究に取り組んでいる。このシステムでは、高密度でしかも簡易な設置が可能となるように、小型・軽量・安価な 1 周波 GPS 受信機を変位センサとすることを計画している。

本研究における変位モニタリングシステムの計測対象は、土木構造物や地盤の準静的な変位であり、短期間では殆ど変位しないものを想定している。この条件は、GPS 干渉測位解析において強い条件であり、幾つかの技術的課題を解決する。技術的課題の 1 つに精度があるが、変位が殆ど発生しない条件下では、観測値に含まれるマルチパスノイズが日によって変化しない状態が期待でき、観測値から効果的に除去できる可能性がある。

そこで、本研究では、実際に簡易な GPS 受信装置を試作して同様の手法を適用することで高精度化を試み、実験によりその精度を検証した。以下にこれを説明する。

2. 観測方程式と干渉測位アルゴリズム

(1) 問題設定と観測方程式

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。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¹⁾。

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

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 $\rho_{ij}^{kl}(t)$ 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。

$$\phi_{ij}^{kl}(t) = \rho_{ij}^{kl}(t) + \Delta_{ij}^{kl}(t) + \epsilon_{ij}^{kl}(t) \quad (2)$$

ここで、受信機の初期位置を $\mathbf{x}_0$ 、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、

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x} \quad (3)$$

となる。これを式 (2) の $\rho_{ij}^{kl}(t)$ 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。仮に N_s 個の衛星からの電波を受信していれば、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、最小二乗法により解く事ができる。また、精度を上げるには、幾つかの時刻のデータを使って同時に解けばよい。

(2) マルチパスノイズ除去手法

マルチパスノイズは、搬送波位相に含まれるノイズであり、式 (2) 中の $\Delta_{ij}^{kl}(t)$ に相当する。マルチパスノイズは、衛星から直達する電磁波だけでなく、地面などに反射した電磁波を受信機が同時に受信することで発生する。そのため、周辺の電波環境が等しく、かつ衛星と受信機の幾何学的関係が等しければ、マルチパスノイズは必ず等しくなる。一方で、衛星と地球上の受信点の幾何学的関係は、約 1 日で同じ状態に戻る。そのため、日毎の変位を追跡する場合には、予めマルチパスノイズ $\Delta_{ij}^{kl}(t)$ を推定しておき、観測値から差し引く方法が有効であるとされている²⁾。

本研究で試作した GPS 受信装置では、センサを小型・安価にするために、カーナビ等で使用される小型パッチアンテナを採用している。このセンサは、非常に安価である反面、マルチパスノイズの影響を強く受けるという欠点をもつ。そこで、本研究では先に説明した既存のマルチパスノイズ除去手法を適用し、これにより変位計測精度を改善することを試みる。

Key Words: GPS, マルチパスノイズ, 精度, 変位モニタリング

〒 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 応用力学研究室 TEL:0471-24-1501(ex 4057)

3. 実証試験による精度検証

本研究では、変位の計測精度検証のために、マルチパスノイズの影響が比較的少ない理想的な環境(実験1)と、そうではない環境(実験2)において実験を行った。

(1) 実験1：理想的な環境下での実験

この実験では、2つの小型パッチアンテナをコンクリート地面に直接固定し、1つを固定点、もう1つを移動点とした。移動点と固定点の距離はおおよそ2 m程度である。約24時間の観測の後、移動点を東におおよそ10 cmだけ動かした。これらは、全て手動で行ったため、実験自体の精度はあまり期待できない。

変位後の24時間のデータを用いて変位を解析した結果を図-1に示す。解析では、連続する4分間のデータを取り出して平均し、これを1つの観測値 $\phi_{ij}^{kl}(t)$ として変位を計算した。そして、使用するデータを1秒ずつずらし、同様の操作を約86400(=60×60×24)回行って時系列グラフを得た。縦軸は変位であり、幅は3 cmに統一している。横軸は変位後からの経過時間である。

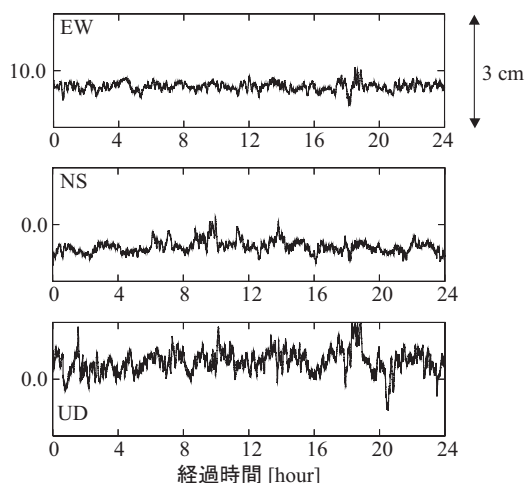


図-1 推定変位のバラつき(時系列変化)

図を見ると、変位にバイアスがあることが分る。これは、アンテナを手動で動かしたために、思った位置にアンテナを移動できなかったために発生したと考えられる。そのため、精度を評価するために、各成分の時系列から標準偏差の2倍値を計算した。これを表-1に示す。

次に、変位前の24時間連続データを使用してマルチパスノイズを推定し、その値を用いて観測値 $\phi_{ij}^{kl}(t)$ を補正して同じ様に変位の時系列を得た。表-1を見ると、ノイズ除去後では、各成分おおよそ15～20[%]の改善が見られる。

(2) 実験2：マルチパスノイズの影響が強い状態

次に、マルチパスノイズの影響が強い状態で実験を行った。この実験では、変位精度をより正確に把握するために、

表-1 変位の精度(標準偏差の2倍値)単位[cm]

	$2\sigma_x$	$2\sigma_y$	$2\sigma_z$
実験1	0.22	0.28	0.58
実験1 (ノイズ除去)	0.17	0.24	0.48
実験2	1.32	1.51	2.83
実験2 (ノイズ除去)	0.67	1.00	1.60

ミクロンオーダーの精度で変位を3次元制御できる移動ステージを用いた。実験風景を図-2に示す。図の様に、高い位置に小型パッチアンテナを固定している。この様にすると、地面からの強い反射波のために、マルチパスノイズが多く混入し、変位の解析結果を相当に悪化させる。



図-2 移動ステージを用いた実験風景

実験では、固定点は実験1と同様にコンクリート地面に固定し、約24時間の観測を行った。その後、移動点を東に1 cmだけ変位させて24時間観測を行った。そして、実験1と同様の解析を行い、変位の精度(標準偏差の2倍値)を計算した。表-1から、マルチパスノイズを除去することにより、精度が50%程度改善していることが分る。

また、求めた変位の24時間平均を計算したところ、与えた変位からのずれは1～2[mm]となり、バイアス値は十分に小さいことも確認できた。

4. まとめ

本研究により、小型パッチアンテナ接続のGPS受信機を用いた変位計測においても、既存のマルチパス除去手法を適用することにより精度を改善できることが示された。今後は、さらにデータを蓄積し、精度検証の信頼性を高めると共に、さらなる精度改善に取り組む予定である。

参考文献

- 1) Hofmann, B. - Wellenhopf, H. Lichtenegger & J. Collins (2001), *GPS, Theory and Practice*, SpringerWien-NewYork.
- 2) 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