

ハイサンプリング GPS を用いた地震による変位観測に関する基礎的検討

盛川 仁¹⁾, 一ノ瀬達郎²⁾

1) 東京工業大学大学院 総合理工学研究所 准教授, morika@enveng.titech.ac.jp

2) 東京工業大学工学部 土木工学科 学生, ichinose.ta@m.titech.ac.jp

1. はじめに

構造物の耐震性能評価を行なうためには、地震時に震源域で発生する地盤の変位やひずみを正確に把握することが重要となる。これまで地盤の変位やひずみを把握するために強震記録の時間積分が使用されてきたが、この手法では積分値が発散して正しい地盤変位が求まらない例も少なくない。一方、近年、GPS 観測技術が急速に発達している。日本でも国土地理院による GPS 連続観測システム網が整備され、全国約 1200ヶ所に設置された電子基準点で GPS 連続観測を行なっている。また GPS では永久変位も計測可能であり、強震計に比べて長周期成分を確実に捉えられる GPS を変位地震計として利用する動きが活発化している [1]。東京工業大学すずかけ台キャンパスの 20 階だての高層免震棟 (J2 棟) の屋上にも 20 Hz の高速サンプリングが可能な GPS 受信機を設置し、建物内に既に設置済みの加速度計 [2] の時間積分による変位との比較を行うことができる環境が整いつつある。

一般に GPS による測位には、相対測位と単独測位の二種類が用いられる。相対測位は単独測位と比べ、精度がよいといわれているが、得られる受信機位置は基準局との相対位置である。地震時には地盤震動が広範囲におよぶため、基準局も同時に動いていることが想定され、相対測位が必ずしも適切な解析法であるとはいえない。また、単独測位による高精度な測位手法も提案されているが [3]、解析の負荷がきわめて大きく、高速サンプリングのデータを用いた解析には大きな負担がかかる場合がある。

そこで、本研究では、J2 棟における GPS による変位計測をはじめにあって、その解析アルゴリズムや解析精度について、検討を行うことが目的である。すなわち、GPS を利用した単独測位を用いて簡便に動的な変位を求める手法を新たに開発しようとするものである。

2. 単独測位による変位計測のためのアルゴリズム

IGS (衛星軌道・衛星時計誤差を含む衛星最終歴) [4]、スタティックな受信機位置を既知として使用し、観測された位相データ (L1, L2 の搬送波) を用いて、キネ

マティックな受信機位置を決定する。解析の手順を図 1 に示す。

まず、電離層の影響を取り除くために L1, L2 搬送波の位相の線形結合により衛星 k と受信機との位相疑似距離 RR_k を求める。次に、対象とする時刻 $t = t_i$ における i のデータを衛星が送信した時刻を t_i と仮定して、 $t = t_i$ における衛星 k の位置ベクトル $X_k^S(t_i)$ を IGS データをラグランジェ補間して求める。この時、既知のスタティックな受信機の位置ベクトル X_k との幾何学距離 $\rho_k^{(0)} = |X_k^S(t_i) - X_k|$ は大きな誤差を含む。これは衛星 k からの電波が受信機に到達するまでに、およそ $\rho_k^{(0)}/C$ 秒 (ここでは C は光速) の時間を要するためであり、エポック i の信号を衛星 k が送信した時刻はおよそ $t = t_i - \rho_k^{(0)}/C$ であると推定される。そこで、改めて $t = t_i - \rho_k^{(0)}/C$ における衛星位置を求めてスタティックな受信機との幾何学距離 $\rho_k^{(1)}$ を求める。 $\rho_k^{(j)}$ は十分大きい j に対して収束することが経験的に確かめられたため、 j に関する繰り返し計算によって ρ_k を収束させ、エポック i の信号が送信されたときの衛星 k の位置ベクトル $X_k^S(t)$ を決定する。衛星位置を決定するための手順を図 2 に示す。

受信機時計の誤差を同定するにあたって、それぞれの衛星からの距離の和が、受信機とそれぞれの衛星の間の距離の和と等しい等距離面 C を考える (図 3 参照)。このとき、受信機が地震により移動する面 C' と C が、スタティックな受信機位置で接しているものと仮定する。このとき、地震により受信機が移動してもその結果は十分に微小であると見なせるので、受信機は C 上にあると考えることができる。その結果、受信機位置はほぼ等距離面上に乗っていると考えることができる。そして、この仮定のもとでは、衛星とキネマティックな受信機との間の疑似位相距離の和 ($\sum_k RR_k$) と衛星とスタティックな受信機との間の幾何学距離の和 ($\sum_k \rho_k$) は等しくならない。 $\sum_k \rho_k$ は前のステップから求められているので $\sum_k \rho_k - \sum_k RR_k$ が受信機時計の誤差による衛星キネマティックな受信機との間の距離の誤差の和となる。受信機時計の誤差を補正することにより、エポック i のデータを送信したときの衛星位置 $X_k^S(t)$ に誤差が生じるため、図 1 に示すようにエポック i のデー

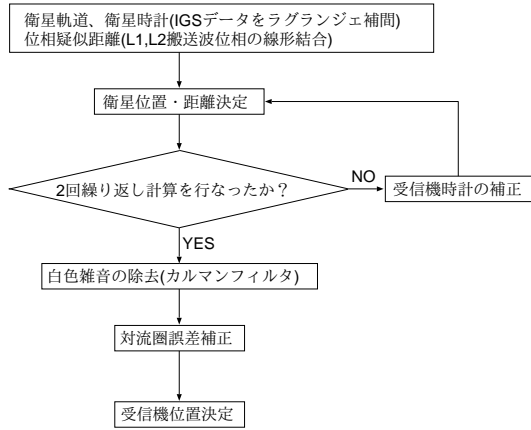


図 1: 変位計測の手順

タ送信時の衛星位置を再決定する．なお，衛星位置および受信機時計の誤差の補正は，両者を 2 回程度繰り返すことでいずれも十分に収束することを確認しており，以下の解析でも 2 回の繰り返しを採用する．

エポック i のデータ送信時の衛星位置および受信機時計の誤差を補正したのちもキネマティックな疑似位相距離は大きな系統誤差ゆらぎを持っている．この系統誤差の多くは対流圏屈折に因るものと考えられるが，対流圏屈折が記録に与える影響は時々刻々と変化する大気の状態や電波の伝播方向に大きく依存するため，その補正は容易ではない．そこで本研究では対流圏屈折による誤差はある一定のアンビギュイティのもとではエポックに対して線形関数で表現可能で，かつその線形関数からのゆらぎはホワイトノイズであると仮定することとした．この仮定には物理的根拠はないが次節で述べるとおり実用上ほぼ妥当なものであることが確かめられた．

対流圏屈折に起因すると考えられる線形な補正関数は，ある一定のアンビギュイティのもとで適応カルマンフィルタを用いて同定する．これにより，ランダムなゆらぎも除去され，種々の系統誤差が補正されたキネマティックな位相疑似距離 $\hat{R}R_k$ が得られる．得られたキネマティックな位相疑似距離は既知のスタティックな受信機位置 X_R から求められるスタティックな幾何学距離に近い値をとる．また，キネマティックな受信機位置 $X_R(t_i)$ は X_R の近傍に存在するはずであるため，観測されたすべての衛星とキネマティックな受信機との位相疑似距離を満足する $X_R(t_i)$ を X_R の近傍でグリッドサーチにより決定する．すなわち，

$$\sum_k |X_R^k(t_i) - X_k^S(t_i - \Delta t) - \hat{R}R_k(t_i)| \rightarrow \min \quad (1)$$

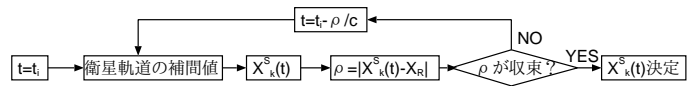


図 2: 衛星位置決定法の詳細

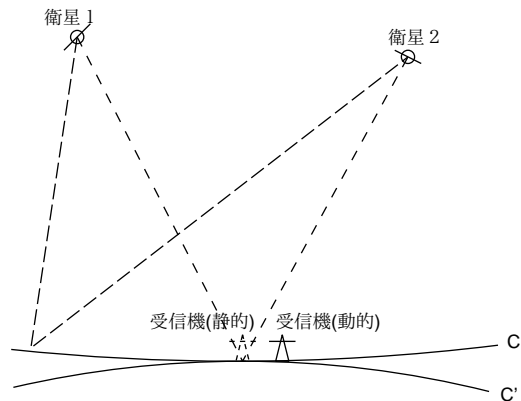


図 3: 受信機時計補正の概念図

を満足する $X_R^k(t_i)$ を決定する．

3. 提案アルゴリズムの妥当性の検討

前節で示したアルゴリズムには受信機時計誤差の補正法，対流圏屈折による誤差の補正法および位相疑似距離のゆらぎの除去という 3 つのプロセスが含まれ，これらが任意の GPS データに対して適用可能であるかどうか検討する．そこで，異なる位置および異なる日時に記録された地震が発生していない静的な状態の 1 時間分 (30 秒間隔) のデータを用いる．電子基準点 [5, 6] の泉 (熊本県) および涌谷 (宮城県) の記録を用いて受信機時計の誤差分に相当するキネマティックな位相疑似距離 RR_k とスタティックな幾何学距離 ρ_k (衛星 k とスタティックな受信機位置 X_R の間の距離) の差を図 4 に示す．これを 1 時間分の受信機の時計の誤差に換算すると表 1 のようになる．表 1 には受信機出力データ (RINEX データ) に記録されている大まかな時計の遅れを合わせて示しているが，提案手法によって得られた受信機時計の誤差の補正はおおむね妥当なものと考えられる．

次に受信機時計の誤差を補正したキネマティックな位相疑似距離 RR_k とスタティックな幾何学距離 ρ_k の差を図 5 に示す．図 5 には適応カルマンフィルタ [7, 9] を用いてフィルタリングした結果も合わせて示しているが，対流圏屈折による系統誤差がほぼ線形関数で近似できることが分かる．線形関数の不連続はアンビギュイティの変化に伴うものである．

カルマンフィルタの適用にあたって， RR_k のゆらぎの白色性及び正規性を検討した．白色性については，ゆらぎのスペクトルに周波数特性がないことを目視により確認した．一方，正規性については， χ^2 適合度検定

表 1: 提案法による受信機時計誤差と記録に含まれる受信機時計遅れ

地点名 (観測日)	提案法 (秒)	RINEX データ (秒)
泉 (2008/11/11)	0.00432 ~ 0.00462	約 0.004 ~ 約 0.005
涌谷 (2008/11/11)	0.0048 ~ 0.00528	約 0.004 ~ 約 0.006
涌谷 (2008/10/10)	0.00498 ~ 0.00514	約 0.005

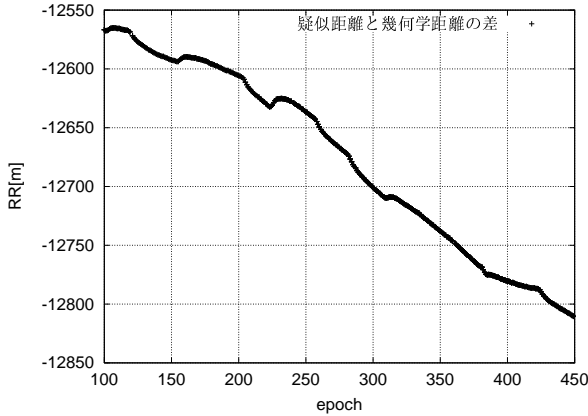


図 4: 疑似距離と幾何学距離の差 (受信機時計誤差)

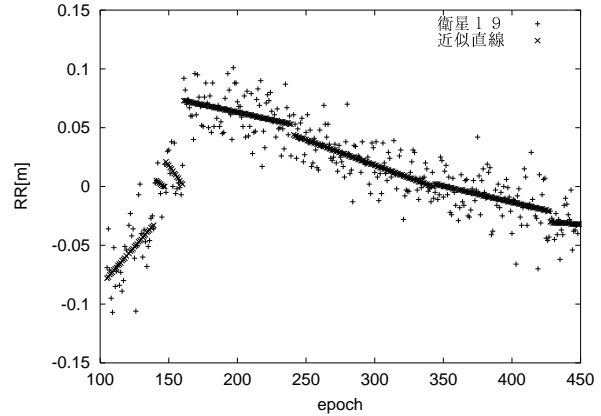


図 5: 疑似距離と幾何学距離の差 (対流圏誤差)

を用いて、帰無仮説「ゆらぎは正規分布に従う」の妥当性について統計的に検討した [10]。図 6 にゆらぎのヒストグラムを、表 2 に検定の結果を示す。図 6 の実線は観測値から求めた標準偏差を持つような正規分布の確率密度関数の形状を示している。図 6 より目視ではヒストグラムと理論分布は比較的良好な対応を示しているように見えるが、統計的には観測値が正規分布には適合していない場合があることがわかる。いことがわかる。以上の検討の結果、白色性および正規性についてある程度の妥当性を見ることはできたものの、データによっては統計的に有意ではない場合があることが明らかとなった。

5. まとめ

本報告では、最初に GPS によるキネマティックな変位の測定法に関する基本的事項を整理したうえで、GPS を変位地震計として利用してキネマティックな変位を得るための比較的簡便な解析アルゴリズムの可能性について検討を行った。また、その理論および手法の妥当性についてスタティックな状態の GPS 記録を用いて検討を行った。

また、データの公開の許可が得られなかったため本文中には述べなかったが、上記の検討結果に基づいて、実際の地震時に記録された 1 秒間隔の GPS データに対して提案法を適用し、既存の商用ソフトウェア (相対測位によって epoch by epoch で位置決定を行うことができるもの [8]) と結果の比較を行い、提案手法の可能

性についても検討した。その結果、簡便な手法であるにも関わらず、地震による変位を捉えることは可能であることがわかったものの、変位の絶対値については整合性のある結果は得られなかった。この点については、前提となる仮定等に不十分な点があり、今後は以下の点について改善を行なっていく必要があることが明らかとなった。

- 受信機時計の誤差の補正は、対流圏屈折による誤差を含んだデータを用いて行なっているため、疑似距離に換算したとき、その影響が無視できないほど大きいことが考えられる。そのため、対流圏屈折による誤差を考慮した受信機時計の誤差の補正法を検討する必要がある。
- 対流圏屈折の補正にあたっては線形近似の程度がよくない時間領域も存在するため、そのようなデータの処理について工夫が必要である。
- 提案法では、ランダムなゆらぎの除去を目的として適応カルマンフィルタを適用したが、GPS の観測データは必ずしも、カルマンフィルタの適用に必要な前提条件を満足していないことが明らかとなったので、フィルタリングのアルゴリズムについて、より適切な手法の適用を検討することが必要である。

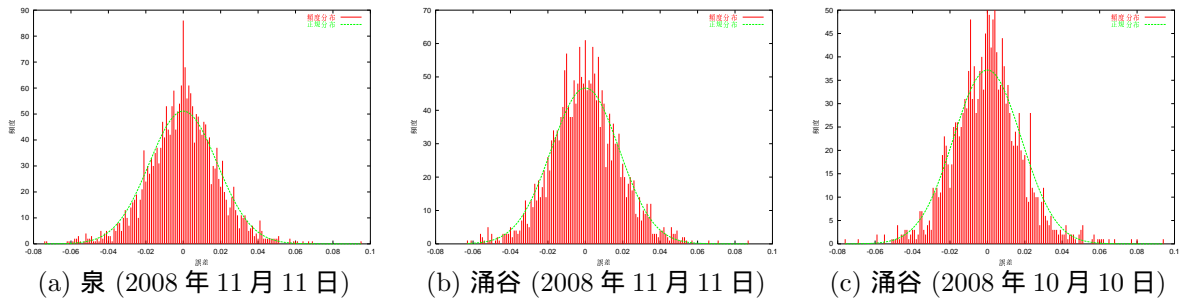


図 6: 位相疑似距離と幾何学距離の差のゆらぎの頻度分布

表 2: 位相疑似距離と幾何学距離の差のゆらぎのガウス性に関する χ^2 適合度検定の結果

観測点 (日時)	χ^2 観測値	自由度	5%有意水準の χ^2 値	検定結果
泉 (2008/11/11)	127.38	78	$\chi^2_{78;0.05} = 99.62$	棄却
涌谷 (2008/11/11)	91.89	74	$\chi^2_{74;0.05} = 95.08$	採択
涌谷 (2008/10/10)	124.16	72	$\chi^2_{72;0.05} = 92.81$	棄却

参考文献

- [1] CD-ROM テキスト 測地学 WEB 版,
<http://wwwsoc.nii.ac.jp/geod-soc/web-text/>
- [2] 山中浩明・盛川仁：首都圏南西部における強震観測，首都圏大震災軽減のための実践的都市地震工学研究の展開 平成 19 年度成果報告シンポジウム予稿集，東工大すずかけ台キャンパス，March 28, pp.5-8, 2008.
- [3] 高須知二：測位衛星による高精度測位技術の研究開発，GPS Tools, <http://gpspp.sakura.ne.jp/>
- [4] IGS Product Availability,
http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html
- [5] 国土地理院：電子基準点とは，
http://terras.gsi.go.jp/gps/gps-based/control_station.html
- [6] 国土地理院：電子基準点データ提供サービス，
<http://terras.gsi.go.jp/ja/>
- [7] 片山徹：新版応用カルマンフィルタ，朝倉書店，2000.
- [8] GeoSurf, <http://www.geosurf.net/>
- [9] 北川源四郎：FORTRAN 77 時系列解析プログラミング，岩波書店，1993.
- [10] I. ガットマン・S.S. ウィルクス：工科系のための統計概論，石井恵一・堀素夫 共訳，培風館，1968.