

GPSを用いたキネマティック単独測位による地震動の変位計測法に関する研究

一ノ瀬 達郎¹・盛川仁²

¹ 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻
(〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7)

E-mail: ichinose.t.ac@m.titech.ac.jp

² 東京工業大学准教授 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻
(〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7)

E-mail: morika@enveng.titech.ac.jp

近年、GPS(Global Positioning System) 観測技術が急速に発達し、日本では国土地理院による GPS 連続観測システム網 (GEONET) が整備されてきた。これに伴い、強震計に比べて長周期成分や大きな変位を捉えられる GPS を変位地震計として利用する動きが活発化している。本研究では、GPS を変位地震計として利用し、簡単に変位を連続的に測定する手法を開発する。本研究で変位計測の簡略化のために用いた理論・手法に対する検証を行ない、また、実地震時のデータに対して解析を行ない、本研究での GPS の利用による連続変位計測の精度について検討を行なう。

Key Words : GPS, 変位地震計, 連続変位計測, 単独測位

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⁾。

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²⁾、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、GPS による変位計測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

て簡単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)³⁾、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

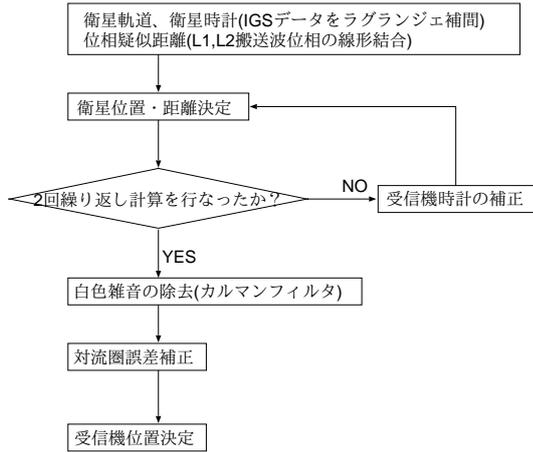


図-1 変位計測の手順

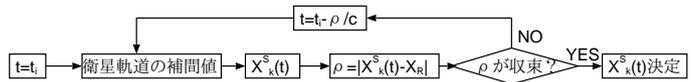


図-2 衛星位置決定法の詳細

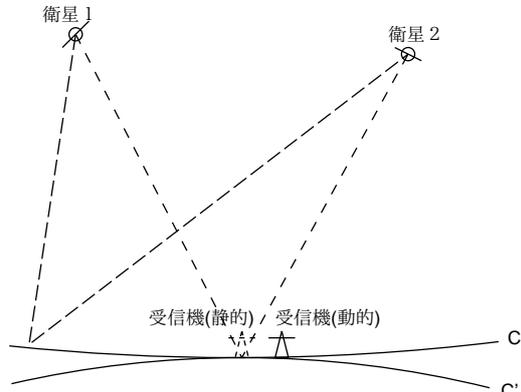


図-3 受信機時計補正の概念図

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 $\sum \rho_k - \sum RR_k$ 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 3 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 3 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 RR_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、

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

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を検討する。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^{4),5)}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

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

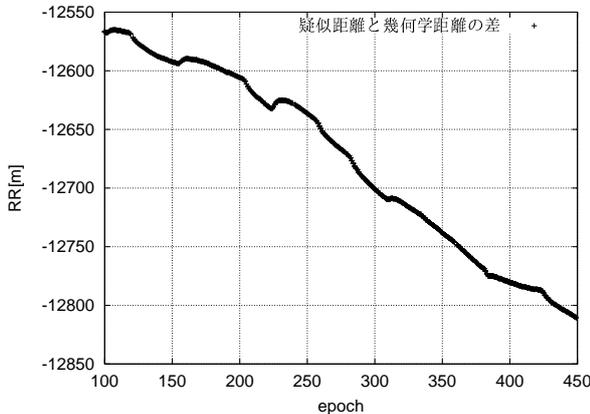


図-4 疑似距離と幾何学距離の差(受信機時計誤差)

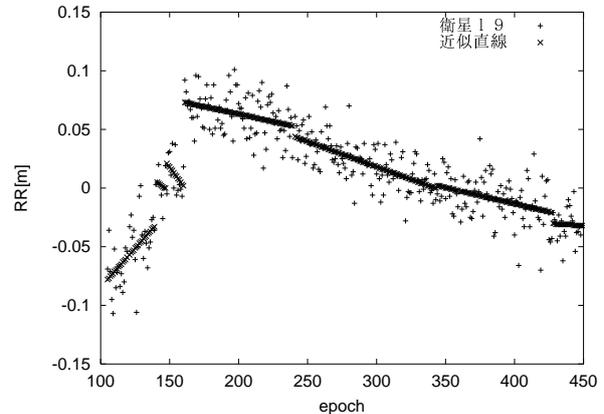
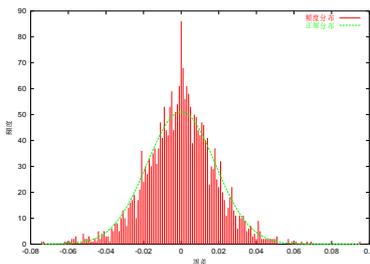
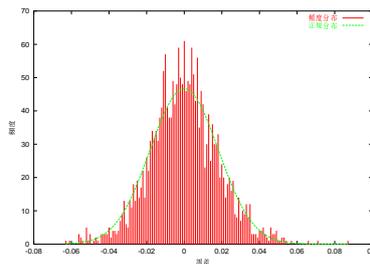


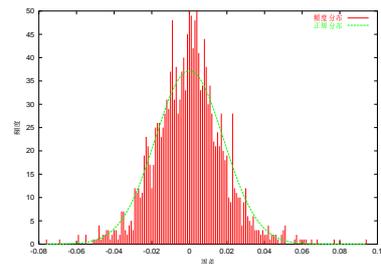
図-5 疑似距離と幾何学距離の差(対流圏誤差)



(a) 泉(2008年11月11日)



(b) 涌谷(2008年11月11日)



(c) 涌谷(2008年10月10日)

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

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^(6),7) 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⁽⁸⁾。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よい対応を示してい

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。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。

4. 実地震記録への適応

2009年2月1日に茨城県沖で起った地震の際の震源域における電子基準点(鉾田, つくば)で得られた1Hzデータを用いて提案手法によって解析を行なった。図-7 に示すように、震源は北緯36度43.0分 東経141度16.7分で深さ47km マグニチュード5.8の規模であった。また、鉾田, つくばの位置もあわせて図-7 に示す。

地震の発生時刻は21:51:51.8 UT (UTは世界時)であったが、GPSによる解析にあわせて、時刻をepochに書き直す。すなわち、00:00:00 UTを0 epochとして1秒刻みにepochをカウントすると、21:51:51.8 UT

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

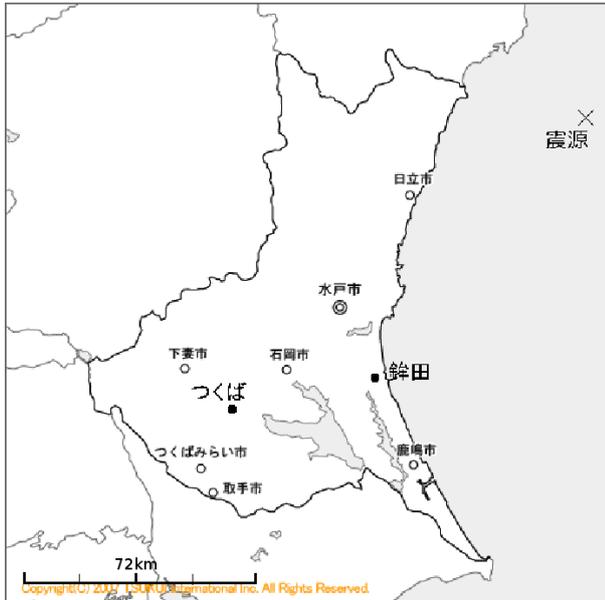


図-7 震源と鉾田，つくばの位置関係

は 78712 epoch となる．また，鉾田，つくばの震源距離はそれぞれ約 100km, 134km であり，せん断波速度をおおよそ 3km/秒とすると，鉾田，つくばに S 波が達する刻はそれぞれ 78745 epoch, 78759 epoch となると予想される．

書く観測点での変位を地心直交座標系の x 軸方向について示したものを図-8 に示す．この図よりわかる通り，鉾田，つくばの両者にいずれの地点でも，地震による変位の計測結果より誤差による見掛けの変位の方が大きく，変位の絶対量について実地震をうまく表現できているとは言えない．また，図-9 に地震波が到達した時刻の前後を拡大したものを示し，鉾田，つくばにおける地震波の到達予想時刻をそれぞれ赤，緑の鉛直な直線で示している．図-9 に示されたように，鉾田においては地震による変位と見られる変位は全く捉えられなかったが，つくばでは地震波の到達予定時刻の近くに急激な変位の変化が見られ，地震による変位を捉えられている可能性がある．ただし，S 波の走時には 50 秒程度の違いがあるため，78800 epoch 付近の変位が本当に地震によるものなのか今後詳細な検討を行なう必要がある．

また，変位の絶対量についても，詳しい検討が必要であるが，提案手法のような簡便な解析法であっても地震時の大きな変位と時刻を捉え得る可能性があることを示す結果が得られたと考えている．

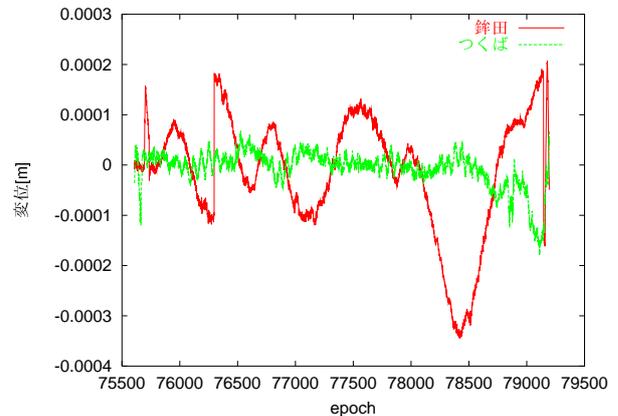


図-8 x 軸方向変位 (鉾田，つくば)

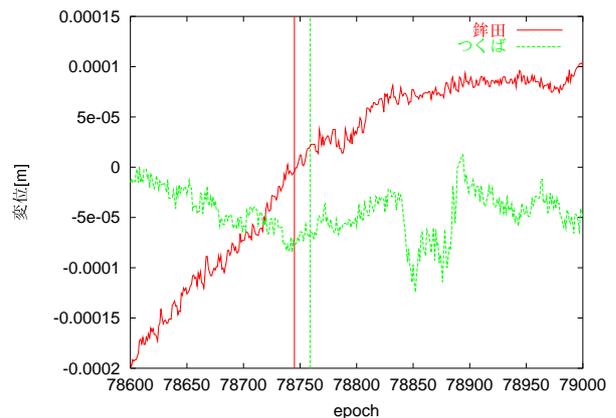


図-9 x 軸方向変位 (鉾田，つくば)

5. まとめ

本研究では，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，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，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らせそうであることがわかったものの，地震による変位の絶対値について

は誤差との区別がつかない結果となった。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と考えている。

- 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、対流圏屈折の影響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。

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) 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/>
- 3) IGS Product Availability,
http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html
- 4) 国土地理院：電子基準点とは，
http://terras.gsi.go.jp/gps/gps-based_control_station.html
- 5) 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/>
- 6) 片山徹：新版応用カルマンフィルタ，朝倉書店，2000.
- 7) 北川源四郎：FORTRAN 77 時系列解析プログラミング，岩波書店，1993.
- 8) 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.