

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

Development of GPS positioning algorithm based on static and dense deployment conditions

佐伯昌之*・金子昌平**・井上忠治**

Masayuki SAEKI, Shohei KANEKO and Tadaharu INOUE

*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)

**学生員 東京理科大学 理工学研究科 修士 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

This paper presents a new GPS positioning algorithm and show the results of performance evaluation. This algorithm takes account of the condition that the GPS antennas do not move in a short period of time and are deployed densely in a local area. These conditions enable to apply a linear function to the time series data of double differenced carrier phases. This constraint helps to improve the condition number of coefficient matrix of unknown vector in the observation equation. Then, the accuracy and reliability of GPS positioning are improved. In the performance evaluation, at first, two experiments are conducted in an ideal condition to observe carrier phases for 24 hours. The observed data is analyzed using the developed program and the results show that the new algorithm gives better accuracy and success rate of GPS positioning.

Key Words : GPS, displacement, monitoring, dense array, linear modeling

1. はじめに

地震などの災害時には、長大なライフラインや鉄道などの社会基盤構造物の変位・変形を被災直後に迅速に把握することは重要な課題である。面的または線的に計測された変位分布は、復旧作業における行動計画に対して、客観的な情報を提供することができる。このような迅速な被害推定のための変位計測を実施するには、社会基盤構造物の変位を常時からモニタリングしている必要がある。

変位を面的または線的にモニタリングする有力な技術の一つとして GPS (Global Positioning System) がある。これまでに様々な試みがなされているが、たとえば例を挙げると、盛土や斜面の変位を計測するための GPS を用いた変位モニタリングシステムの開発やその実用性の検証^{1),2)}、また小規模領域に高密度配置した GPS センサを用いた地盤変状の計測と精度検証といった研究が行われている³⁾。これらの研究結果からも、GPS は変位を計測するセンサとして十分に高性能であることが分る。しかしながら、それらのシステムを地震時における長大な社会基盤構造物の変位計測の問題に実際に適用することを考えると、様々な問題があることに気付く。例えば、面的または線的に変位を計測するには、GPS 受信機を高密度に配置する必要があるが、従来の数センチの精度を達成するタイプの GPS 受信機は初期コストが非常に高価となることが挙げられる。この初期コストには、GPS 受信機それ自体のコストの他に、電源ケーブルや通信ケーブルの設置や、GPS 受信機を固定する治具のコストも含まれる。

このコストの問題を解決するためには、結局のところシステム全体を見直す必要があり、その中で、安価で、小型・軽量で、低消費電力で、お互いに無線通信を自律的に行うセンサを開発する必要がある。

そこで、著者等はこれまでに、安価・小型・軽量・低消費電力な変位計測システムとして、GPS 高密度多点変位計測システムの開発を進めてきた。このシステムでは、安価な 1 周波 GPS 受信機と小型のパッチアンテナを接続して GPS センサとし、さらにこのセンサを無線センサネットワーク技術と結合している。そして、このハードウェア上で動作するソフトウェアを工夫することにより、システムとして要求される性能を満足しようとするものである。現在までに、システムのプロトタイプの開発と性能検証⁴⁾、データ圧縮法の開発⁵⁾を行っている。現状では、理想的な環境下において数分程度の観測を行えば、数センチ程度の精度で変位を計測できることが示されている。

本研究では、上述の GPS 高密度多点変位計測システムをさらに高性能化するために、その測位解析アルゴリズムを改善することを試みる。GPS 測位解析手法は、基本的な部分は既に確立されているため、ここでは詳細を工夫して精度および信頼性の改善を目指す。重要なことは、精度を保持しつつ、より短時間に高い信頼性で変位を同定することである。これにより、GPS センサの稼働時間と無線通信量を削減できるため、システムとしての低消費電力化が期待される。このことは、より安価で、小型・軽量なバッテリーの使用を可能にする。そのために、本研究では、GPS 高密度多点変位計測システムの実際の運用条件を考慮し、適切な拘束条

件を観測データに適用することで、測位解析の信頼性および精度の向上を図った。また、それらの性能をさらに高度化するための検討を行った。以下に、これを説明する。

2. 問題設定と標準的な測位解析手法

本研究では、GPS 技術を用いて社会基盤構造物の変位を高密度に多点で計測することを目的としているが、測位解析においては、基本的には、ある 1 つの受信機を参照点として、そこからの各受信機の相対位置を解析することになる。そのため、以下の議論においては、1 つの参照点から他の 1 つの点の相対位置を決定する問題を考えることにする。

2.1 GPS 高密度多点変位計測システムの運用条件

先にも述べたとおり、GPS 高密度多点変位計測システムは、地震発生直後の長大な大型社会基盤構造物の変位をモニタリングするシステムである。このため、システムが実際に運用される際には、次の二つの条件を想定することができる。

- 1) 計測ユニットは高密度に設置されている。無線通信の距離を考えると隣合う計測ユニットの距離はせいぜい 40 m 程度であり、これはキロ単位の距離を測ることが通常の GPS 測位では極めて近い距離である。
- 2) 計測ユニットが GPS データを取得する 10 分間程度の間は、アンテナの相対位置は変化しない。GPS 多点変位計測システムは計測ユニットの位置の時間変化から変位を計測するものであり、動的変位は計測しない。

GPS 測位は適用範囲が極めて広いので、さまざまな計測条件で所定の精度と信頼性を持つよう測位解析も構築されている。上記の二つの条件は、計測条件を相当に限定しているため、通常の GPS 測位解析では許されない仮定を設けることができる。後述するように、この条件に対応する仮定を設け、測位解析を特殊化し、精度と信頼性の向上を図った。

2.2 既存の標準的な手法

2 つの GPS 受信機同士が比較的近く、かつ、できるだけ短時間での測位を実行することを想定した解析手法は幾つか提案されているが、その中で、現時点で最も性能が良いとされているものは、カルマンフィルタによるフロート解の推定と LAMBDA 法⁶⁾による整数値バイアスの決定を用いた測位解析手法である。本論文では、この手法を既存の標準的な解析手法として、まず、この手法について説明する。

議論の出発点として、次の線形化された観測方程式

から始める⁷⁾。

$$\mathbf{U}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{a} + \mathbf{N} + \mathbf{e}(t) \quad (1)$$

ここに $\mathbf{U}(t)$ は観測ベクトルであり、その成分は搬送波位相の二重差である。搬送波移送の二重差とは、ある衛星 k からの搬送波を受信機 i で受信した場合の搬送波位相を $U_i^k(t)$ で表すと、次式により計算される量である。

$$U_{ij}^{kl}(t) = (U_i^k(t) - U_j^k(t)) - (U_i^l(t) - U_j^l(t)) \quad (2)$$

この式 (2) で示される二重差の演算により、様々なノイズを消去することができる。前小節 2.1 で示した 1) の条件が満足される場合には、電離層遅延や対流圏遅延、衛星の時計誤差、受信機の時計誤差といったノイズを精度よくキャンセルすることができる⁷⁾。その結果、観測ベクトルに含まれる観測ノイズとしては、主にマルチパスノイズとホワイトノイズのみを考えればよいことになる。次に、式 (1) 中の $\mathbf{A}(t)$ は既知のデザイン行列であり、その成分は衛星と受信機の幾何学的関係によってのみ決まる値である。 $\mathbf{a}$ と $\mathbf{N}$ は未知ベクトルであり、 $\mathbf{a}$ は位置の補正値を、 $\mathbf{N}$ は整数値バイアスと呼ばれる値を成分に持つ。 $\mathbf{e}(t)$ はノイズベクトルで、観測ノイズとモデル化のエラーを含む。尚、 t は時間を表しており、 $\mathbf{U}(t)$ 、 $\mathbf{A}(t)$ 、 $\mathbf{e}(t)$ は時間の関数である。未知ベクトル $\mathbf{N}$ は時間に依らない。 $\mathbf{a}$ は動的な問題を考える場合には時間の関数となるが、本論文では静的な問題を扱うため時間に依らない。また、ある時刻において n 個の衛星からの電波を受信した場合、式 (1) は衛星に関して一重差を計算することから $n-1$ 個の方程式を得る。その一方で、未知数は $n-1$ 個の整数値バイアスと 3 個の位置の補正値からなり、その合計は $n+2$ 個となる。そのため、ある時刻のみの情報で式 (1) を解くことは一般に困難となるので、通常は複数のエポックにおける観測方程式を同時に解くことにより解を求める。

一般に、式 (1) は次の手順で解かれる。

- i) 複数の時間に関する観測結果を使って式 (1) を解く。ただし、このとき本来は整数である $\mathbf{N}$ を実数として解く。そのため、この解はフロート解と呼ばれる。本論文ではフロート解を $\{\hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{N}}\}$ と表すことにする。
- ii) フロート解を用いて

$$\mathbf{J} = (\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N})^T \mathbf{Q}_N^{-1} (\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N}) \quad (3)$$

を最小にするような整数値のベクトル $\mathbf{N}$ を決定する。ここに、 $\mathbf{Q}_N$ はフロート解の分散-共分散行列である。

- iii) 上記 ii) で求めた整数値バイアス $\mathbf{N}$ を用いて、最小二乗法により位置を同定する。この整数値バイアスを用いた測位解はフィックス解と呼ばれ、この段階で数センチの精度が達成される。

既存の標準的な手法では、i) のフロート解を求めるためにカルマンフィルタを用い、ii) の整数値バイアスの決定において LAMBDA 法⁶⁾が用いられる。

ところで、先ほども述べたとおり、GPS 高密度多点変位計測システムでは受信機のアンテナが静止している状態でデータを取得するため、静的な問題として考えることができる。この場合、上記の i) によるカルマンフィルタによる解は、式 (1) に最小二乗法を適用した場合の解と一致する。ここで便宜的に式 (1) の未知ベクトルを 1 つにして $\mathbf{b} = [\mathbf{a}^T, \mathbf{N}^T]^T$ と表し、また、そのフロート解を $\hat{\mathbf{b}}$ とする。観測データとして n_s 個のエポックが使用可能である場合には、式 (1) に最小二乗法を適用することで次式を得る。

$$\hat{\mathbf{b}} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{Y} \quad (4)$$

ここで

$$\mathbf{G} = \sum_{n=1}^{n_s} \mathbf{B}(t_n)^T \mathbf{R}(t_n)^{-1} \mathbf{B}(t_n) \quad (5)$$

$$\mathbf{Y} = \sum_{n=1}^{n_s} \mathbf{B}(t_n)^T \mathbf{R}(t_n)^{-1} \mathbf{U}(t_n) \quad (6)$$

とした。 $\mathbf{B}(t)$ は未知ベクトル $\mathbf{b}$ の係数行列であり、 $\mathbf{B}(t) = [\mathbf{A}(t), \mathbf{I}]$ で与えられる。また、 $\mathbf{R}(t)$ は観測ベクトルの誤差共分散行列である。

本論文では、式 (5) と (6) を用いて測位解析する方法を標準的な方法とする。そして、以下の議論では、この標準的な手法と新しい手法による解析結果を比較することとする。

3. 静的・近接条件を用いた測位解析アルゴリズムの開発

式 (3) をみて分かれるとおり、フロート解の推定精度が高い場合には、正しい整数値のベクトル $\mathbf{N}$ を決定することは容易となる。逆に、フロート解の精度が悪い場合には、間違った整数値のベクトルが推定される可能性が高くなる。そのため、整数値バイアスのフィックス解を高い信頼性で同定するためには、フロート解を精度よく推定することが大変に重要となる。そこで、本節ではフロート解の推定精度を向上させる手法について検討する。

3.1 搬送波位相の二重差の直線近似によるフロート解の推定

新しい手法では、観測データとなる搬送波位相の二重差の時系列データに対して直線近似を適用する。そして、これにより測位解析における信頼性や精度を向上させることを試みる。

ところで、搬送波位相の二重差の時系列データが直線に近似できるという性質は、データ圧縮手法⁸⁾や、サイクルスリップの修正方法などにも利用されている。直

線に近似できる条件は、GPS 受信機同士に相対変位がなく、かつ、ノイズが十分に小さい場合である。この様なとき、十分に短い観測データに対しては直線近似が可能となる。本研究が対象とする問題では、第 2.1 節で示した条件 1) より、電離層遅延や対流圏遅延の影響を無視する事ができ、また、条件 2) より受信機の相対位置は変化しない。そのため、マルチパスノイズとホワイトノイズを観測ノイズと考えれば、この直線近似を適用することが可能となる。

(1) フロート解の推定手法

本手法では、まず、搬送波位相の二重差の時系列データを直線にモデル化し、この直線の傾きと切片を最小二乗法を用いて同定する。図-1 は、搬送波位相の二重差 $U_{ij}^{kl}(t)$ の生データと、そのデータを使用して推定された直線が示されている。ここで $U_{ij}^{kl}(t)$ は観測ベクトル $\mathbf{U}(t)$ の成分である。図-1 において、縦軸は $U_{ij}^{kl}(t)$ の値、横軸は時間 [sec] を示している。また、使用したデータの対応する衛星番号は図中の左上に示している。図からも、直線でよく近似できることが分かる。

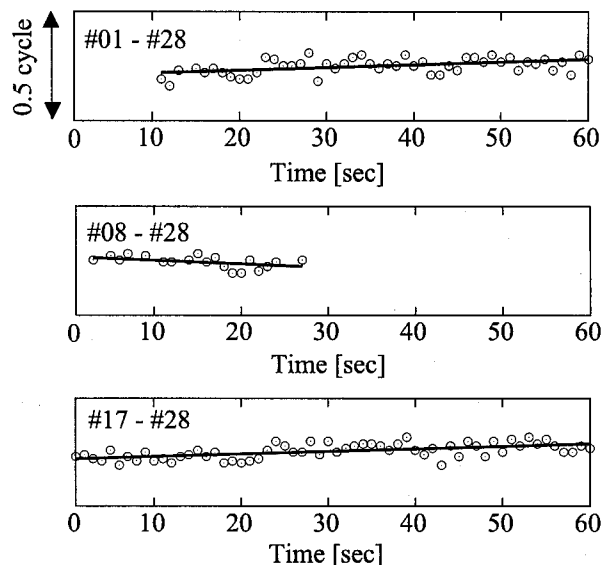


図-1 搬送波位相の二重差 $U(t)$ の生データと近似直線の一例

直線近似を適用して傾きと切片を推定した後、その近似直線を使用してもう一度搬送波位相の二重差の値を計算する。このとき、使用したデータ列の最初と最後のエポックに相当する時間についてのみ搬送波位相の二重差を計算する。また、最初と最後のエポックは衛星によって異なっても構わない。例えば図-1 に示す通り、衛星番号 #01 - #28 と #08 - #28 では最初と最後のエポックの時刻が異なっている。この新たに計算された搬送波位相の二重差を成分にもつ観測ベクトルをそれぞれ $\mathbf{U}_s$, $\mathbf{U}_e$ で表すことにする。

さて、この最初と最後のエポックに相当する係数行列を計算し、これを $\mathbf{B}_s$, $\mathbf{B}_e$ と表すことにする。本手法では、式 (5) と (6) の代わりに、以下で示す係数行列

$\mathbf{G}_L$ と修正された観測ベクトル $\mathbf{Y}_L$ を用いる。

$$\mathbf{G}_L = \mathbf{B}_s^T \mathbf{R}_L^{-1} \mathbf{B}_s + \mathbf{B}_e^T \mathbf{R}_L^{-1} \mathbf{B}_e \quad (7)$$

$$\mathbf{Y}_L = \mathbf{B}_s^T \mathbf{R}_L^{-1} \mathbf{U}_s + \mathbf{B}_e^T \mathbf{R}_L^{-1} \mathbf{U}_e \quad (8)$$

ここに、 L は Linear modeling approach を表す記号とし、 $\mathbf{R}_L^{-1}$ は直線近似法を用いた場合における重み行列で、誤差共分散行列の逆行列に相当する。

(2) 重み行列 $\mathbf{R}_L^{-1}$ について

ここで重み行列 $\mathbf{R}_L^{-1}$ について考える。元々の観測ベクトル $\mathbf{U}(t)$ の各成分は、二重差により求められているため、相互に相関をもつ。すなわち、二重差を計算する前の搬送波位相 $U_i^k(t)$ に含まれるノイズが完全にホワイトであり、かつその標準偏差が各搬送波位相について等しい場合においても、搬送波位相の二重差に関する誤差共分散行列 $\mathbf{R}(t)$ は非対角項にも値をもつ。この場合、各搬送波位相のノイズの標準偏差が等しく σ であるとする、式 (5) における重み行列 $\mathbf{R}(t)^{-1}$ は次式で与えられる⁷⁾。

$$\mathbf{R}(t)^{-1} = \frac{1}{2\sigma^2} \frac{1}{n_D + 1} \begin{bmatrix} n_D & -1 & -1 & \cdots \\ -1 & n_D & -1 & \cdots \\ -1 & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \cdots & \cdots & n_D \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここに n_D は観測ベクトルの成分数である。

一方で、直線近似を用いて新たに計算された観測ベクトル $\mathbf{U}_s$ および $\mathbf{U}_e$ の各成分は、相互にあまり相関をもたないようである。この点について、以下に詳しく述べることにする。先にも述べた通り、 $\mathbf{U}_s$ および $\mathbf{U}_e$ の各成分は、搬送波位相の二重差 $U_{ij}^{kl}(t)$ に直線近似を適用することで求めている。そのため、著者等は当初、 $\mathbf{U}_s$ および $\mathbf{U}_e$ の誤差共分散行列としては、 $\mathbf{R}(t)$ を用いればよいと考えた。そこで、式 (7) および (8) 中の $\mathbf{R}_L$ として、式 (9) で示される $\mathbf{R}(t)$ を用いて解析した。その結果、 $\mathbf{R}_L = \mathbf{R}(t)$ とした場合においても、標準的な手法と比べて、高い信頼性を得ることができた。(ここで言う信頼性とは、例えば 3 分程度のデータを観測したとき、それを測位解析した際に十分に正解に近い値を得ることができる確率であるとする。本論文では、この信頼性の指標としては正解決定率を用いている。正解決定率の定義については、後の小節 3.2 にて説明する。) とところで、もし $\mathbf{U}_s$ および $\mathbf{U}_e$ の各成分に含まれるノイズが完全にホワイトであり、かつ各成分のノイズの標準偏差が σ_e で等しいと仮定できるならば、 $\mathbf{R}_L$ は $\sigma_e^2 \mathbf{I}$ と表すことができるはずである。(ただし、 $\mathbf{U}_s$ および $\mathbf{U}_e$ の各成分は搬送波位相の二重差に直線近似を適用し、その直線を用いて再計算した値であり、それらの成分にどのような誤差が残されているかという問題については、著者等は未だ明らかにしていない。今後の検討課題の 1 つである。) ここで、誤差共分散行列 $\mathbf{R}_L$ として $\mathbf{R}(t)$ の代わりに $\sigma_e^2 \mathbf{I}$ を用いて実際に解析し

てみると、 $\mathbf{R}_L = \sigma_e^2 \mathbf{I}$ を用いた方が、 $\mathbf{R}_L = \mathbf{R}(t)$ を用いるよりも高い信頼性を得ることができた。すなわち、誤差共分散行列のうち、非対角項の値をゼロとした方が良い結果を得ることができたのである。(実際の解析結果については、後の小節 3.2 にて説明する。) このことから、直線近似を用いて新たに計算された観測ベクトル $\mathbf{U}_s$ および $\mathbf{U}_e$ の各成分は、元々のデータと比較して、その相関はあまり強くないと考えることができる。

さらに、ノイズについてより妥当な状態を考えることにする。先ほどは $\mathbf{U}_s$ および $\mathbf{U}_e$ の各成分に含まれるノイズは完全にホワイトであり、かつ各成分のノイズの標準偏差が σ_e で等しいことを仮定して $\mathbf{R}_L = \sigma_e^2 \mathbf{I}$ とした。しかしながら、実際には搬送波を受信する際の SNR (Signal-to-Noise Ratio) が全ての衛星で等しくなることはない。搬送波位相に含まれる誤差の標準偏差も衛星毎に異なるはずである。この場合、当然のことながら、搬送波位相の二重差のデータも、各成分毎でそのノイズの標準偏差が異なることになる。そこで、本研究では、重み行列 $\mathbf{R}_L^{-1}$ が対角行列となる性質のみを残し、その対角成分の値を SNR を用いたより妥当な値とすることを考える。ただし、我々は受信機の真の位置を知らない。搬送波位相に関する真の SNR の値を得ることができない。そのため、本手法では 1 周波 GPS 受信機が出力する SNR の値を用いて解析を行うこととする。さらに、SNR の値としては、それぞれの衛星について観測データ中の最小の SNR を選択することとする。

さて、GPS 受信機が出力する SNR は搬送波のシグナルレベルを σ_s 、電気的なノイズレベルを σ'_e とすると、

$$SNR = 20 \log \frac{\sigma_s}{\sigma'_e} \quad (10)$$

と表される。ここで電気的なノイズレベル σ'_e は 1 つの受信機で考えた場合、どの衛星からの搬送波を受信しても同じ値であると仮定できる。一方で、シグナルレベル σ_s は、搬送波が伝播してきた経路やマルチパスの影響により各衛星で大きく異なる値をとる。式 (10) より、 σ_s/σ'_e は次のように評価することができる。

$$\sigma_s/\sigma'_e = 10^{SNR/20} \quad (11)$$

ところで、 σ_s/σ'_e の値は搬送波と電気的なノイズの強さの比を表すものであり、搬送波位相の誤差を表すものではない。しかしながら、

$$\sigma_s \gg \sigma'_e \quad (12)$$

を仮定できる場合には、搬送波位相に混入する誤差の程度としては、 σ_s/σ'_e を考えればよいと思われる。これを図-2 を用いて説明する。図中には、複素平面上に振幅が σ_s 、位相角が $U_{ij}^{kl}(t)$ となるような点をプロットしている。そして、その点を中心として半径 σ'_e の円を描いている。半径 σ'_e の円は、誤差の範囲を表す円に相当する。このとき、電気的なノイズ σ'_e による搬送波位

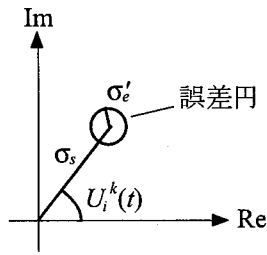


図-2 σ_s/σ'_e と搬送波位相の誤差の関係

相の誤差 $\delta U_i^k(t)$ は、式 (12) の関係を用いると、以下の様に評価することができる。

$$\delta U_i^k(t) \sim \sigma'_e/\sigma_s \quad (13)$$

この $\delta U_i^k(t)$ は誤差の程度を表すことから、各観測方程式の重みとしては、その逆数である σ_s/σ'_e を用いればよいと考えられる。

以上のことを踏まえて、各衛星のシグナルレベル σ_s を次式を用いて評価し、その自乗を重み行列 $\mathbf{R}_L^{-1}$ の対角成分とした。

$$\sigma_s = 10^{SNR/20} \sigma'_e \sqrt{k} \quad (14)$$

ここに k は、ある搬送波位相の二重差の時系列データに対して近似直線を推定する際に使用した時系列データの数である。 k の値は観測データのエポック数 n_s と比較して、以下の関係を持つ。

$$k \leq n_s \quad (15)$$

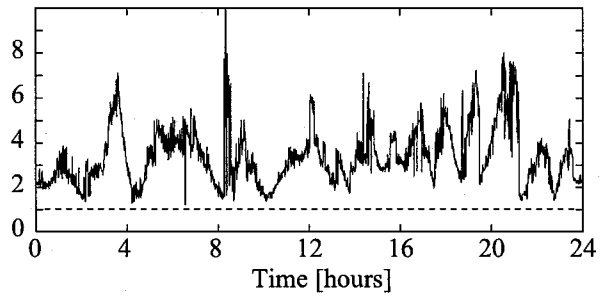
これは、図-1 でも示した通り、 n_s 個のエポックがあるからと言って、ある衛星についてみた場合に、それが必ずしも n_s 個の二重差のデータを持つとは限らないからである。そして、近似直線を推定する場合、使用するデータが多いほど σ_s/σ'_e が改善されるため、上式では $\sqrt{k}$ を乗じることとした。

以降の議論では、 $\sigma_e^2 \mathbf{I}$ と区別するために、 σ_s^2 により対角成分を計算した重み行列の逆行列を $\mathbf{R}_L^s$ で表すことにする。

(3) 係数行列の性質

本手法の性能評価の結果については次小節 3.2 において説明するが、結果を先に述べると、本手法は標準的な手法と比較して正解決定率および精度ともに良い結果を示している。その主な原因は、係数行列の性質の改善にあると考えられる。図-3(a) に、係数行列 $\mathbf{G}_L$ と $\mathbf{G}$ の条件数の比を示す。ただし、ここでは $\mathbf{G}_L$ 中の $\mathbf{R}_L$ として $\mathbf{R}_L^s$ を用いている。また、計算に使用したデータは、次節に説明する (1) パッチアンテナをコンクリート床に固定した場合のものであり、解析におけるデータ長は 1 分とした。条件数は、係数行列の固有値のうち、最大と最小のもの之比で、この値が大きいほど性質が悪く、観測誤差の影響を強く受けることが知られている⁹⁾。図-3(a) では、2つの係数行列の条件数の比を計算し、この値が大きいほど行列の性質が改善

(a) $\mathbf{G}$ と $\mathbf{G}_L$ の条件数の比



(b) 正解 ↔ 不正解の変化

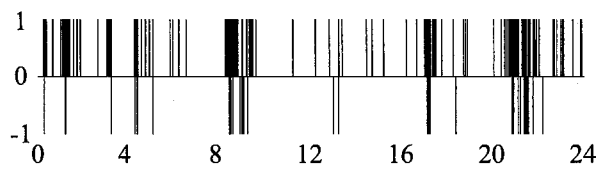


図-3 $\mathbf{G}$ と $\mathbf{G}_L$ の条件数の比と解析結果の関係

されていることを示すように表示している。また、横軸は使用した観測データの観測開始からの時間を表す。また、同図 (b) には、そのときの測位解析結果の正否を示す。すなわち、 $\mathbf{G}$ を用いて解析した結果が正解であったものが、 $\mathbf{G}_L$ を用いた場合に不正解になったときには -1、 $\mathbf{G}$ において不正解だったものが $\mathbf{G}_L$ で正解となったものは 1、 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{G}_L$ どちらを用いても結果が変化しなかったものは 0 とした。図-3を見ると、 $\mathbf{G}$ で不正解だったものが $\mathbf{G}_L$ で正解に変化した時間帯では、条件数が大きく改善している傾向が見られ、また、正解と不正解の変化が多発している時間帯では、比較的条件数の改善が小さい傾向にあることが分る。

また、条件数の比と各ケースの頻度の割合の関係を図-4 に示す。図では、横軸に条件数の比を、縦軸にケースの割合 [%] を示している。

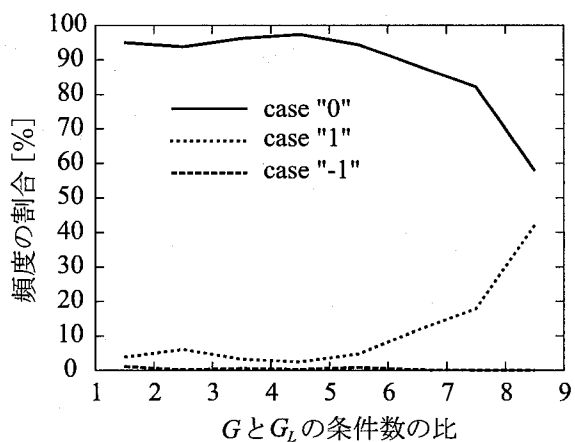


図-4 $\mathbf{G}$ と $\mathbf{G}_L$ の条件数の比と各ケースの頻度の割合の関係

ス 0, 1, -1 のそれぞれの頻度の割合を示している。頻度の割合は、まず、例えば条件数の比が 3 以上 4 未満の場合に各ケースの頻度をカウントし、それを条件数の比が 3 以上 4 未満となる総数で除すことにより求め

た。そして、その値を図中の条件数 3.5 のところにプロットしている。図-4 を見ると、条件数が大きく改善している場合には、不正解から正解へと変化したケースの割合が大きくなることが分る。

さて、ではなぜ G_L を用いると係数行列の性質がよくなるのか、という問題がある。式 (8) では、観測データ中で最も衛星の位置が異なる 2 つのエポックのみを使用している。すなわち、全ての観測方程式の中で最も独立な方程式のみを使用している。一方で、式 (6) では時時刻々と変化する衛星の位置を全て反映して係数行列を構成している。すなわち、非常によく似た行列の和になっている。両者を比較すると、前者の方が係数行列の正則性をより向上させている。本手法では、出来る限り係数行列の性質を改善するために、強い拘束条件である直線近似を用い、係数行列の正則性を向上していると言える。

3.2 開発したアルゴリズムの性能評価

前述の手法を用いて観測データを解析したところ、従来の標準的な手法に比べて、特に観測データが短い場合に、高い信頼性が得られることが分かった。ここでは、その結果について説明する。

まず、観測データの取得方法について説明する。実験サイトは、GPS にとって理想的な環境下である遮蔽物の無いビルの屋上とした。その場所で、アンテナの設置方法を変えて 2 回の観測を行った。1 回目は小型パッチアンテナをコンクリート床に直接固定し、2 回目では同アンテナを三脚の上に固定して行った。実験の様子を図-5 に示す。通常の干渉測位用の GPS アンテナ

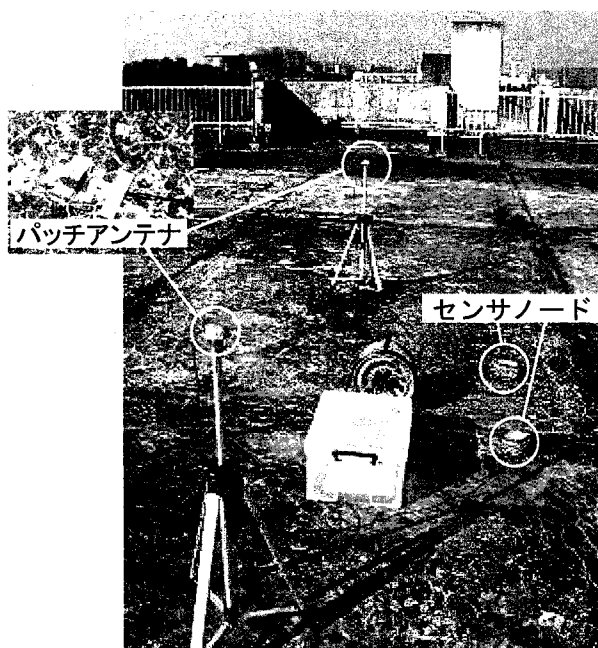


図-5 実験風景、パッチアンテナを三脚に固定した場合

ナは衛星の電波を精度よく受信できるように、上方に

指向性をもつように作られている。一方で、GPS 高密度多点変位計測システムで採用している小型のパッチアンテナは、指向性が弱いため、上方の GPS 衛星からの電波のみならず、その電波が地上やビルなどに反射した電波も受信する。そのため、地面からの反射波によるマルチパスノイズの影響を強く受ける。パッチアンテナを三脚の上に固定した場合の実験では、このマルチパスノイズの影響が強い場合を想定している。直線近似法ではマルチパスノイズをモデル化していないことから、この様にマルチパスノイズの様相が異なる場合についても性能を評価する必要がある。各実験では、24 時間の連続観測を行い、サンプリングレートは 1 Hz とした。

解析では、24 時間の連続データからある長さのデータを切り出し、これに測位解析を適用した。切り出すデータ長は 30 秒、1 分、3 分、5 分、10 分とした。そして、測位解析により得られた受信機間の相対位置の推定結果が真値から ± 5 cm の範囲に入っている場合を正解として判断した。ただし、真値は分らないため、ここでは十分に長いデータ長の解析結果をもって真値とした。このような操作を各観測データに対して 86400 ($=60 \times 60 \times 24$) 回行った。そして、正解と判断した回数を数え、これを試行回数 86400 で除して、正解決定率を算出した。また、正解が得られた場合についてのみ、その解析結果の標準偏差を計算し、その 2 倍値をもって精度とした。尚、本研究では、使用するデータは SNR が 35 dB 以上のもののみとし、35 dB 未満のデータは全て破棄することとした。干渉測位解析を行う場合、通常は衛星の最低仰角を条件とするのが一般的であり、 $5^\circ \sim 15^\circ$ が設定される。しかし、本研究では、できるだけ多くの衛星を使用したいことから、最低仰角を設定していない。一方で、データの品質を保持するために SNR が 35 dB 以上という条件を用いている。

(1) パッチアンテナをコンクリート床に固定した場合

まず、パッチアンテナを直接コンクリート床に固定した場合の結果について説明する。表-1 と表-2 に、解析により得られた正解決定率と精度を示す。表中の G & R はフロート解の推定において G と R を用いたことを示している。その他の記号も同様である。この場合、 G & R が標準的な手法の結果であり、それ以外が本論文にて提案する手法である。表-1 を見ると、本手法による正解決定率は、標準的な手法に比べて数 % 程度ほど改善していることが分る。この傾向は、特にデータ長が短い場合に顕著である。表-2 では、 H と V はそれぞれ水平方向と鉛直方向を示している。表を見ると、直線近似を用いることにより、精度も若干ではあるが改善する傾向にあることが分る。

(2) パッチアンテナを三脚に固定した場合

次に、パッチアンテナを三脚に固定した場合の結果について説明する。パッチアンテナは指向性が弱いた

表-1 パッチアンテナを床に直接固定した場合の正解決定率

データ長 [秒]	正解決定率 [%]		
	G & R	G_L & $\sigma_e^2 I$	G_L & R_L^s
30	83.0	90.2	92.6
60	94.5	97.8	98.8
180	99.8	99.9	100.0
300	100.0	100.0	100.0
600	100.0	100.0	100.0

表-2 パッチアンテナを床に直接固定した場合の精度

データ長 [秒]	精度 (標準偏差の2倍値) [cm]					
	G & R		G_L & $\sigma_e^2 I$		G_L & R_L^s	
	H	V	H	V	H	V
30	0.5	0.9	0.5	0.8	0.5	0.7
60	0.5	0.9	0.5	0.7	0.4	0.7
180	0.5	0.8	0.5	0.6	0.4	0.6
300	0.4	0.7	0.4	0.6	0.4	0.5
600	0.4	0.6	0.4	0.5	0.3	0.5

めに、マルチパスノイズの影響を強く受けることが知られている。表-3と表-4を見ると、正解決定率と精度ともに前の実験に比べて大幅に低下している様子が分かる。特に、データ長が短い場合における正解決定率が低くなっている。ただし、その場合においても、直線近似法は既存の標準的な手法に比べて高い正解決定率を示している。一方で、精度を見ると、こちらは既存の標準的な手法に比べて劣るようである。これは、マルチパスノイズを直線として近似できないためであると思われる。

表-3 パッチアンテナを三脚に固定した場合の正解決定率

データ長 [秒]	正解決定率 [%]		
	G & R	G_L & $\sigma_e^2 I$	G_L & R_L^s
30	43.2	59.8	64.3
60	67.4	79.6	82.6
180	92.9	95.1	95.1
300	97.0	98.2	98.2
600	100.0	100.0	100.0

4. 本手法のさらなる改善のための検討

先にも述べたが、GPSにおける測位解析の原理は既に確立されており、測位解析コードの性能は細部で決まる。例えば、どのデータは使用すべきで、どのデータは使用すべきでないかという判断であったり、そのデータの重みの最適値はなにか、ということである。これらは使用している受信機やアンテナの性能に依存するし、使用する環境からも当然影響を受ける。

表-4 パッチアンテナを三脚に固定した場合の精度

データ長 [秒]	精度 [cm]					
	G & R		G_L & $\sigma_e^2 I$		G_L & R_L^s	
	H	V	H	V	H	V
30	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-
180	0.9	1.5	0.9	1.6	0.9	1.7
300	0.8	1.4	0.8	1.7	0.8	1.7
600	0.7	1.2	0.7	1.5	0.8	1.6

ここでは、前節で説明した手法をさらに改善するために、性能評価において測位解析に失敗したケースをより詳細に検討することで、本手法のさらなる改善を試みる。具体的には、以下では、参照衛星の選び方および低仰角衛星の扱いについて検討する。

4.1 連立方程式の性質からみる参照衛星の選び方

(1) 観測ベクトルの誤差に関して

ここでは、参照衛星の選び方について検討する。まず、参照衛星について説明する。先にも述べた通り、式(1)の観測ベクトル U の成分は搬送波位相の二重差であり、ある衛星 k からの搬送波を受信機 i で受信した場合の搬送波位相を $U_i^k(t)$ は式(2)で表される。

さて、ある受信機 j を参照点として受信機 i の相対位置を求めるためには、捕捉した衛星の中からある衛星 l を参照衛星として選び、他の衛星 k との差を計算する必要がある。その際、参照衛星 l はどのように選ばば良いか、という問題が生じる。一般的に GPS では、仰角が最も高い衛星を参照衛星として使用する。それは、通常の条件下では仰角が高い衛星ほど SNR がよく、またマルチパスノイズなどの影響を受け難い場合が多いためである。実際に、先に説明した理想的な環境下における観測データを解析してみても、参照衛星として最高仰角の衛星を選択する方が高い信頼性と精度が得られる傾向にある。一例として、最高仰角ではなく、最もデータ数が多い衛星を参照衛星として選択した場合の正解決定率を表-5に示す。

表-5 最もデータ数が多い衛星を参照衛星とした場合の正解決定率 (表-1 と同じデータを使用)

データ長 [秒]	正解決定率 [%]		
	G & R	G_L & $\sigma_e^2 I$	G_L & R_L^s
30	83.3	88.4	91.0
60	94.8	97.3	98.3
180	99.8	99.8	99.9
300	100.0	100.0	100.0
600	100.0	100.0	100.0

表-5 は表-1 と全く同じデータを使用して解析した

結果である。表-1 は最高仰角の衛星を、表-5 はデータ数が最も多い衛星を参照衛星として選択した場合に対応する。表を見比べると、直線近似法を適用した場合には、若干ではあるが最高仰角の衛星を参照衛星とした方が正解決定率が高くなることが分る。この傾向は、他のデータを解析した場合でも同じであった。一方で、既存の標準的な方法では、その結果にあまり変化は見られなかった。

この理由について考える。標準的な方法では、分散-共分散行列は搬送波位相の二重差の計算のために生じる相互相関を考慮するため分散-共分散行列は非対角項をもつものに対して、直線近似を用いる手法では相互相関をゼロとし、分散-共分散行列において対角項のみに値を与えている。分散-共分散行列の非対角項は参照衛星に関するノイズを反映するわけであるが、そのノイズ自体が小さくなれば、当然、非対角項の本来の値もゼロに近づき、分散-共分散行列の対角項のみを考慮するモデル化がより妥当となるものと考えられる。そのため、ノイズが相対的に小さい最高仰角の衛星を参照衛星とすることで、本手法において精度および信頼性が改善したものと思われる。

(2) 係数行列の性質に関して

次に、 G_L & R_L^2 の解析結果を用いて、係数行列の条件数の違いについて調べることにする。先ほどと同様に、参照衛星として仰角が最高のものと、データ数が最多のもので比較することとする。24時間の全解析において、それぞれの条件数を算出し、これの平均値を計算した。その結果を表-6 に示す。

表-6 参照衛星の違いによる条件数の変化

データ長 [秒]	条件数	
	最大データ数	最高仰角
30	3.6×10^8	1.3×10^8
60	8.7×10^7	3.1×10^7
180	9.5×10^6	3.3×10^6
300	3.4×10^6	1.2×10^6
600	8.6×10^5	2.9×10^5

表-6 は、大量な計算結果を平均しているため、個々の事例については分らないが、少なくとも平均的に見れば、仰角が最も高い衛星を参照衛星とした方が、係数行列の性質が良くなる傾向にあることが分る。この様に、係数行列の性質の観点からも、参照衛星は仰角が最高のものを選択すべきであることが分る。

(3) 失敗した事例

上述の様に、全体的に見れば仰角が最高のものを参照衛星として選択すべきであると言える。しかしながら、その中でも個々の失敗事例を見ると、それが常に成り立つとは限らないことが分る。ここでは、その一例を示す。

図-6 に、測位解析に失敗した事例における各 GPS 衛星の軌道を示す。ただし、図では、見やすくするために 10 分間の軌道を表示している。図中の SA1 は 1 の ID をもつ GPS 衛星を表している。また 9 本の同心円は衛星の仰角を表し、中央が 90° で、一番外側の円は 0° を表している。この場合における、最高仰角の衛星は 20 番衛星である。また、解析では SA1 と SA8 は SNR が 35 dB 未満であったために使われていない。

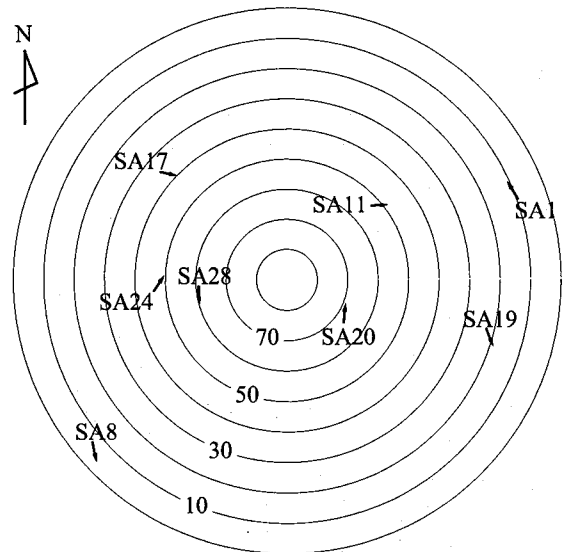


図-6 測位解析に失敗した事例における各衛星の軌道

さて、このときの 1 分間のデータを使用して解析した結果を表-7 に示す。表中では、それぞれの衛星を参照衛星としたときの条件数、そのときの測位解析の成否、式 (3) の推定における残差、決定比を示している。ここで決定比とは、式 (3) を最小にする整数値バイアス N を検索した際、最小の値 J_1 と 2 番目に小さい値 J_2 の比 J_2/J_1 であり、この値が大きいほど推定結果の信頼性が高いことを表す。一般に、この値が 3 以上であれば正解と思って間違いないとされている⁷⁾。

表-7 参照衛星の違いによる解析結果の比較

衛星 ID	成否	条件数	残差	決定比
11	○	3.1×10^7	0.45	1.6
17	○	5.4×10^7	0.21	2.2
19	○	2.0×10^8	0.73	1.4
20	×	2.2×10^7	0.86	1.1
24	○	7.5×10^7	0.82	1.2
28	○	3.2×10^7	0.43	1.5

表-7 を見ると、20 番衛星を参照衛星とした場合のみ測位解析に失敗している事が分る。いずれの場合についても、決定比が 3 を越えないので、真値を知らない状態ではどれが正解かを判断するのは難しいが、少なくとも 20 番の衛星以外の衛星を参照衛星とした方が決定比が高くなることは分る。この結果は、複数の参

照衛星を用いて解析することにより、もっともらしい解がどれであるかを判断することが可能であることを示唆する。

尚、上記の失敗事例におけるその原因は、搬送波位相の二重差におけるノイズにあった。表-7に示す通り、係数行列の性質から言えば参照衛星を20番にした方がよい。しかしながら、20番衛星を参照衛星とした場合の搬送波位相の二重差の時系列データを見ると、直線で近似する際にノイズがバイアス成分をもっていた。これにより、20番衛星を参照衛星とすると解析に失敗したと考えられる。この様に、参照衛星の選び方で二重差の計算における誤差の様子が異なるため、これにより解析結果が異なることがある。

4.2 低仰角衛星に関する方程式の価値

前節の失敗した事例においては、低仰角衛星である衛星1と衛星8はSNRが35 dB未満のため解析に使用されなかった。しかしながら、場合によってはこれらの低仰角衛星を使用した方が良い場合がある。

表-8に、解析において1番衛星を追加した場合、および1と8番衛星を追加した場合の解析結果を示す。これによると、SNRが低い低仰角衛星を使用した場合でも、決定比が改善されることが分る。

表-8 低仰角衛星を考慮することによる改善

追加衛星	成否	条件数	残差	決定比
なし	×	2.2×10^7	0.86	1.1
1	○	2.3×10^7	1.08	1.6
1と8	○	3.6×10^7	1.08	1.9

表-1と同じデータを使用して、SNRの下限値を30 dBにした場合の正解決定率を表-9に示す。表中には比較のため、SNRの下限値を35 dBとした場合の結果も合わせて載せている。表-9を見ると、今回の実験データを解析した限りでは、SNRの下限値を低下させることにより正解決定率が改善した。これまでの過去の実験結果を併せて考慮すると、SNRの下限値を低下させることにより常に結果が改善するとは言えない。しかしながら、SNRの下限値を下げることで解析可能な衛星数を増やし、これにより正解決定率を改善できる可能性があることが分った。今後の課題として、SNRが低い衛星については、どの衛星が使用可能であり、どの衛星が使用不可能であるかを定量的に判断できるようなアルゴリズムを組み込む必要がある。

5. まとめ

GPS高密度多点変位計測システムにおいて、より短時間のデータで高い信頼性を得ることを目的として、GPS測位解析アルゴリズムを改善した。そこでは、GPS高

表-9 SNRの下限値を30 dBにした場合の正解決定率

データ長 [秒]	正解決定率 [%]	
	SNR 30 dB	SNR 35 dB
30	94.9	92.6
60	99.1	98.8
180	100.0	100.0
300	100.0	100.0
600	100.0	100.0

密度多点変位計測システムの運用条件を考慮して、静的・近接の条件を抽出し、その条件下であれば搬送波位相の二重差は直線に近似できることを示した。さらに、これにより観測方程式における未知ベクトルの条件数が改善されること、および、測位解析の信頼性および精度が向上することを示した。

また、理想的な環境下ではあるが、アンテナをコンクリート地面に直接固定した場合（マルチパスノイズが小さい場合を想定）、およびアンテナを三脚に固定した場合（マルチパスノイズが大きい場合を想定）の2通りについて実験を行い、観測データを新しく開発した手法および既存の標準的な手法で解析することにより、その性能を比較検証した。その結果、本手法は精度・信頼性ともに従来の標準的な手法よりも良い結果を示すことが分った。

さらに、本手法のさらなる高性能化を目指し、その詳細を検討した。具体的には、参照衛星の選択方法および低仰角衛星の扱い方について検討し、今後の高性能化への可能性を示した。

今後の課題としては、第4.節で検討した項目について、これを実際のシステムに組み込むことが挙げられる。これを実現するためには、最適な衛星データの取捨選択方法を開発する必要がある。さらに、実際にシステムを構築し計測を行うことで、どの程度データ量が削減し、それによって消費電力がどの程度低減するかを定量的に調べる必要がある。また、一方では、観測方程式の正則性の改善が信頼性の向上にどのように影響しているかを明確にする必要がある。現状では、直線近似を導入することで、観測方程式の係数行列が改善し、かつ、測位解析における結果の信頼性が向上することは分っている。しかしながら、係数行列の正則性が改善したと言っても、条件数の値自体はその改善量と比べて非常に大きい。条件数の値は衛星の配置やデータ長にも大きく依存するが、図-3で示したケースでは $10^6 \sim 10^8$ 程度であった。図-3で示している改善量程度でも信頼性が向上することの仕組みは未だに判然としない。今後、この点についても解明していく必

要があると思われる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 堀宗朗, 小国健二, 望月一浩, 菅野高弘: RTK-GPS を用いた地盤大変位の計測と精度の検証, 土木学会論文集 No.729/III-62, pp. 177-183, 2003
- 4) 佐伯昌之, 高坂朋寛, 堀宗朗: 1 周波 GPS 受信機と無線 LAN を用いた多点変位計測システムの開発, 応用力学論文集, Vol. 8, pp. 645-652, 2005
- 5) 高坂朋寛, 金子昌平, 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, Vol. 9, pp. 709-716, 2006
- 6) Teunissen, P. J. G.: Least-Squares Estimation of the Integer GPS Ambiguities, Invited lecture, Section IV Theory and Methodology, IAG General meeting, Beijing, China, (16p.), 1993
- 7) Hofmann, B. - Wellenhopf, H. Lichtenegger & J. Collins: *GPS, Theory and Practice*, SpringerWien-NewYork, 2001.
- 8) Gassner, G., Wieser, A. and Bruvver, F.: GPS software development for monitoring of landslides, Proc. of FIG XXII Congress Washington, D.C. USA, April, 2002, in CD-ROM
- 9) 土木工学における逆問題入門, 土木学会, 2000

(2007 年 4 月 12 日 受付)