

カーナビ改造型 1 周波 GPS 受信機を用いた 高精度位置同定システムの開発

Development of high accurate positioning system employing remodeled car navigation GPS receivers

佐伯昌之*・堀宗朗**・井潤健二***

Masayuki SAEKI, Muneo HORI and Kenji ITANI

*正会員 博士(工学) 東京理科大学 理工学部 土木工学科 助手 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

**正会員 PhD 東京大学 地震研究所 教授 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

***非会員 古野電気株式会社 技術研究所 研究部 主幹研究員 (〒 662-8580 兵庫県西宮市芦原町 9-52)

It is one of key issues of civil engineering to monitor the health of urban infrastructures. Therefore, a variety of issues of network sensing have been extensively studied by many researchers. One subject among those in the civil engineering field is the exact positioning of the sensor units. The objective of this research is to develop a high accurate positioning system that is employing low-priced car navigation GPS (Global Positioning System) receiver. In this research, first, a prototype algorithm to estimate a relative position of GPS receivers is developed. And the performance of the developed algorithm is evaluated by analyzing L1 carrier phase observed at known fixed points of the Geographical Survey Institute. The accuracy of monitoring the relative position of the receivers is less than several centimeters. Next, a car navigation GPS receiver, that is remodeled to output L1 carrier phase, is tested. The accuracy of estimating a relative position of the receivers is less than several centimeters if integer ambiguities are correctly determined. The accuracy is considered to be enough high to detect a position of each sensor of network sensing or to monitor a deformation of shape of sensors network.

Key Words : GPS, Car navigation, network sensing, health monitoring

1. はじめに

震災時には、高速道路高架橋やガス管網などの都市域物的ストックの健全性を即時に診断する必要がある。そのためには、震災前後での地盤の変形や、構造物の加速度応答の変化などをモニタリングすることが有効であり、そのための各種装置の開発研究が進められている¹⁾²⁾。これを実現するには、様々なセンサを稠密にアレイ配置する必要があるが、土木構造物の空間的な広がりやセンサ設置の労力を考えると、各センサの位置を自動的に取得することは大変重要な課題である。さらに、各センサの位置が追跡できれば、センサのネットワーク形状の変化を見ることで、地盤や構造物の変形を計測することができる。そのため、位置情報を自動的に、高精度に、高密度に取得できるシステムの開発が求められている。

このような問題に対して、GPS (Global Positioning System の略) 技術は有力な解決策の一つである。まず GPS について簡単に説明する。現在、地球の上空を 31 個の GPS 衛星が周回しており、地上の点から常時 6 ~ 10 個の衛星を視ることができる。衛星から発信される電磁波が受信点まで伝播するのに要する時間を計測すれば、これから衛星-受信点間距離を推定でき

る。衛星の位置は分っているので、三角測量を適用することで受信点位置を特定することができる。衛星が発信する電磁波には周波数が異なる 2 つの L1 帯 (約 1.6MHz) と L2 帯 (約 1.2GHz) の搬送波があり、これらの搬送波に C/A コード、P コードと呼ばれる信号が載っている。このコード信号の伝播する時間から推定される距離をコード擬似距離と呼ぶ。カーナビではコード擬似距離を解析することで 10 m 程度の位置精度を得ている。一方で、高精度が要求される測量用途では搬送波の位相を解析する干渉測位という手法を用いることで数 mm の精度を達成している³⁾。

土木用途に GPS を適用する場合に、まず、最も重要なことは要求される精度を達成できるかということである。先に述べたネットワークセンシング用途では位置を数 cm の精度で特定することが要求されるが、干渉測位が適用できれば精度は問題ない。次に、センサの稠密アレイを構築するには大量の受信機が必要となるため、低価格であることが要求される。現在では、GPS 受信機はカーナビはもちろん携帯端末にも搭載されるようになり⁴⁾、ますます高性能化、低価格化が期待できる。さらに、従来のカーナビ用の GPS 受信機はコード擬似距離のみの出力であったため、精度は 10 m 程度であったが、最近ではカーナビ用の GPS 受信機の改

造型で搬送波位相を出力できるものが存在する。携帯やカーナビの様に大量生産・大量販売となる分野では、その技術進歩は目覚しく、さらに低価格化が期待できることから、高密度に位置情報を提供できるシステムを実現できる可能性は高い。

ただし、現状では幾つかの問題がある。まず第一に、安価にするためには小型・軽量化が必要であるが、通常、搬送波位相を精度よく計測するにはサイズの大きな専用のアンテナを使用する必要がある。衛星からの電磁波は、衛星の方向のみならず、周辺の構造物に反射してアンテナに入射する場合もある。このとき、反射して入射した電磁波のために位相がずれてしまい、位置の推定精度が悪化する。この様な電磁波（さらにそれによる誤差）をマルチパスと呼んでいるが、マルチパスを除去するには指向性を持った大きなアンテナが必要になる。カーナビ用の小型アンテナを用いる場合には、アンテナに指向性が無いため、マルチパスによる誤差の影響を強く受けるので、これにより位置推定が困難になる可能性もある。次に、搬送波を解析して位置を推定するアルゴリズムは既に市販されているが、測量用に開発されたものであるため、高性能・高精度であるがゆえに大変に高価である。さらに2点間の相対位置を同定することを基礎とするため、稠密なセンサアレイの特徴を活かした手法ではない。

これらの問題を解決し、稠密なセンサアレイの特徴を活かしたアルゴリズムを開発するため、本研究では、その第一段階として、搬送波位相を解析して2点間の相対位置を推定するアルゴリズムの開発研究を行った。また、カーナビ改造型の1周波GPS受信機を用いて受信実験を行い、その観測データを解析することで、カーナビ改造型を用いても所要の精度でモニタリングできることを確かめた。そして受信機の性能を検証した。以下に、これを説明する。

2. 位置推定アルゴリズムの概要

搬送波位相を解析して位置を推定するアルゴリズムについては、一般のGPSの教科書⁵⁾に記載されているが、後述の説明を容易にするため、以下の小節2.1~2.3にその概要を説明する。

2.1 基礎方程式の定式化

時刻 t における i 番目の受信機の位置を $\mathbf{x}_i(t)$ 、 j 番目の衛星の位置を $\mathbf{x}^j(t)$ とし、衛星と受信機の間の距離 $\rho_i^j(t)$ を式 (1) で定義する。

$$\rho_i^j(t) = \|\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}^j(t)\| \quad (1)$$

受信機が出力する観測データは、衛星と受信機の間の距離 $\rho_i^j(t)$ に対応するもので、1周波GPS受信機の場合はL1搬送波位相と擬似距離がある。L1搬送波位

相は、L1帯の搬送波の位相であり、 $2\pi N$ のアンビギュイティを持つ。搬送波位相は一般に式 (2) でモデル化される。

$$\lambda\phi_i^j(t) = \rho_i^j(t) + \lambda N_i^j - c\Delta t_i(t) + c\Delta t^j(t) - \Delta_{ion,i}^j(t) + \Delta_{trop,i}^j(t) + \Delta_{ant,i}^j(t) + \epsilon_p \quad (2)$$

ここに λ はL1帯の搬送波の波長（約19 cm）、 c は光の速度、 Δt_i は受信機の時計誤差、 Δt^j は衛星の時計誤差、 $\Delta_{ion,i}^j$ は電離層による遅延、 $\Delta_{trop,i}^j$ は対流圏による遅延、 $\Delta_{ant,i}^j$ はマルチパスなどのアンテナに関わる誤差、 ϵ_p は受信機の電氣的な影響によるランダムな誤差、 N_i^j は位相のアンビギュイティで整数値バイアスと呼ばれるものである。

式 (2) の最後の2項 $\Delta_{ant,i}^j(t)$ と ϵ_p は解析により効果的に除去することができないので、以下では無視して話を進める。一方で、式 (2) 中の誤差 $\Delta t_i(t)$ 、 $\Delta t^j(t)$ 、 $\Delta_{ion,i}^j(t)$ 、 $\Delta_{trop,i}^j(t)$ は受信機と衛星に関して二重差をとることにより消去できる。つまり、異なる受信機 i, j について式 (2) の差をとり、さらに異なる衛星 k, l について差をとると式 (3) を得る。

$$\lambda\phi_{ij}^{kl}(t) = \rho_{ij}^{kl}(t) + \lambda N_{ij}^{kl} \quad (3)$$

ここに

$$\phi_{ij}^{kl}(t) \equiv \phi_i^k(t) - \phi_j^k(t) - \phi_i^l(t) + \phi_j^l(t) \quad (4)$$

$$\rho_{ij}^{kl}(t) \equiv \rho_i^k(t) - \rho_j^k(t) - \rho_i^l(t) + \rho_j^l(t) \quad (5)$$

$$N_{ij}^{kl} \equiv N_i^k - N_j^k - N_i^l + N_j^l \quad (6)$$

である。ただし、式 (3) を求める際に

$$\Delta_{ion,i}^k \sim \Delta_{ion,j}^k, \quad \Delta_{trop,i}^k \sim \Delta_{trop,j}^k \quad (7)$$

と仮定した。受信機 i と j が十分に近い場合には、この様な仮定が成立する。

ここで、受信機 j の位置を基準として未知ベクトル $\mathbf{x}_i(t)$ を求める問題を考える。 $\mathbf{x}_i(t)$ の各成分は式 (3) の右辺第一項 $\rho_{ij}^{kl}(t)$ の平方根の中に含まれるため、式 (3) は $\mathbf{x}_i(t)$ の各成分について非線形である。これを線形化するため、 $\mathbf{x}_i(t)$ を近似値 $\tilde{\mathbf{x}}_i(t)$ と微小量 $\Delta\mathbf{x}(t)$ の和

$$\mathbf{x}_i(t) = \tilde{\mathbf{x}}_i(t) + \Delta\mathbf{x}(t) \quad (8)$$

で表し、これを式 (3) へ代入し、Taylor 展開して2次以上の項を無視すると次式を得る。

$$\lambda\phi_{ij}^{kl}(t) = \bar{\rho}_{ij}^{kl}(t) + \frac{\partial \rho_{ij}^{kl}(t)}{\partial x} \Delta x(t) + \frac{\partial \rho_{ij}^{kl}(t)}{\partial y} \Delta y(t) + \frac{\partial \rho_{ij}^{kl}(t)}{\partial z} \Delta z(t) + \lambda N_{ij}^{kl} \quad (9)$$

ここに $\bar{\rho}_{ij}^{kl}(t)$ は近似値 $\tilde{\mathbf{x}}_i(t)$ を代入した場合の距離の二重差であり、 $\Delta x(t)$ 、 $\Delta y(t)$ 、 $\Delta z(t)$ は $\Delta\mathbf{x}(t)$ の各成分である。

結局のところ、受信機の位置ベクトル $\mathbf{x}_i(t)$ を求める問題は、修正された観測量 $\lambda\phi_{ij}^{kl}(t) - \tilde{\rho}_{ij}^{kl}(t)$ を用いて式 (9) を満足するようなベクトル $\Delta\mathbf{x}(t)$ を求める問題となる。ただし、式 (3) 中の N_{ij}^{kl} も未知数である。受信機 i, j により同時に捕捉した全ての衛星の数を n とすると、独立な式 (3) の数は $n-1$ であり、一方で未知数の数は $n+2$ (位置ベクトルが 3 成分と整数値バイアス N_{ij}^{kl} が $n-1$ 成分) であるので、このままでは解くことができない。これの解法については後述する。

後の議論を簡単化するために、式 (9) を次のように表す。

$$\Phi(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) \quad (10)$$

ここに

$$\Phi(t) = \{\lambda\phi_{ij}^{kl}(t) - \tilde{\rho}_{ij}^{kl}(t)\} \quad (11)$$

$$\mathbf{x}(t) = [\Delta x(t), \Delta y(t), \Delta z(t), N_{ij}^{kl}, \dots]^T \quad (12)$$

k, l は任意の衛星番号の組合せであり、 $\mathbf{A}(t)$ は $\mathbf{x}(t)$ の係数行列である。式 (10) を最小二乗法で解くと、次式を得る。

$$\mathbf{x}(t) = (\mathbf{A}^T(t)\mathbf{A}(t))^{-1} \mathbf{A}^T(t)\Phi(t) \quad (13)$$

2.2 静的測位

静的測位は、GPS を用いた測位の中で最も精度の高い方法である。静的測位では、未知点のベクトル $\mathbf{x}_i(t)$ が時間的に変化せず、かつ十分長い時間に渡って同じ衛星からの信号を連続受信できる場合に利用可能である。式 (10) で見ると $\mathbf{x}(t)$ が時間的に変化しないので未知数の数は変わらず、一方で時間が経過すると係数行列 $\mathbf{A}(t)$ の成分が変化するので、独立な式の数が増える。今、時刻 t_1 と t_2 に観測されたデータを用いるとすれば、式 (14) を得る。

$$\begin{bmatrix} \Phi(t_1) \\ \Phi(t_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(t_1) \\ \mathbf{A}(t_2) \end{bmatrix} \mathbf{x}(t_1) \quad (14)$$

この時、一次独立な式の数未知数の数よりも多くなるので、式 (14) に最小二乗法を適用すれば、未知ベクトル $\mathbf{x}(t)$ を得ることができる。一般に係数行列が十分に正則になるには 30 分程度が必要とされている。

ただし、式 (14) を解いて得られる整数値バイアス N_{ij}^{kl} は実数であるので、これを整数化する必要がある。得られた実数値に最も近い整数を採用した場合、必ずしも正解となる整数値バイアスを得られるとは限らないので、 N_{ij}^{kl} に幾つかの整数値を代入して、最小二乗法の推定誤差が最も小さくなる様な整数値 N_{ij}^{kl} を選択する必要がある。

2.3 RTK (Real Time Kinematic) 測位

静的測位により、一旦、整数値バイアス N_{ij}^{kl} が決まれば、連立方程式 (10) において N_{ij}^{kl} を右辺から左辺に

移項することができ、未知数は $\Delta x(t), \Delta y(t), \Delta z(t)$ の 3 つになる。であるので、衛星を 4 つ以上捕捉すれば、ある時間 t の観測データだけで受信機の位置を推定することができる。

ただし、連続的に受信していると、可視衛星が入れ替わったり、衛星からの電磁波がビルや人などの遮蔽物により一時的に途切れたりするサイクルスリップと呼ばれる現象が発生するため、 N_{ij}^{kl} の幾つかはリセットされ未知数になる。この様な時には、その衛星に対応する N_{ij}^{kl} を再び推定する必要がある。それでも、4 つ以上の衛星を捕捉し続ける限り、連立方程式の数が未知数の数以上となるので、理論上は連続的に受信機の位置を推定し続けることができる。

2.4 一般の測量と比較しての違い

ここで、通常 GPS 測量で用いられる二点間の相対位置を求める問題と、我々が対象とするカーナビ改造型 1 周波 GPS 受信機の稠密アレイによるモニタリングの問題を比較し、位置同定をする場合の有利な点と不利な点をまとめる。

有利な点：

1. 受信機間隔が近いので、二重差を計算することで対流圏遅延や電離層遅延の影響を効果的に除去できる。
2. 受信機位置は平常時にはほぼ固定されているので、静的測位を適用でき、整数値バイアスを精度よく決定できる。
3. きわめて稠密な受信機アレイを用いることで、これまでとは異なる解析手法を構築できる可能性がある。

不利な点：

1. カーナビ用の簡易型アンテナを用いるので、マルチパスなどの影響を強く受け、観測ノイズが増大する。
2. 都市域での使用が主であるため、人や車の交通による受信遮断が度々起こる。
3. 測量用と異なり、L1 帯のみの情報を使用するため、整数値バイアスや位置を特定するための情報量が少ない。

3. 作成した位置推定プログラムの動作確認

前節の式 (10) を基に、静的測位および RTK 測位のプログラムを作成し、その性能を検証した。以下に、性能検証に用いたデータと、その解析結果について述べる。

3.1 検証に使用したデータについて

プログラムの性能検証には、国土地理院が設置した GPS 固定点である墨田 (K004) と台東 (K083) において 2004/11/17 に受信した 24 時間のデータを用いた。

データは30秒間隔でサンプリングされており、24時間で2880個のデータを含む。これらは国土地理院のホームページよりダウンロードできる。

GPS 固定点の位置は国土地理院により正確に測定されており、緯度、経度、標高、ジオイド高などのパラメータで公表されている。墨田を原点とし東向きに x 軸、北向きに y 軸、鉛直上向きに z 軸をとる3次元座標系を考えた場合、緯度などのパラメータから墨田を原点とする台東の座標を求めると表-1を得る。墨田と台東の直線距離は約3.5 kmである。

表-1 検証に用いた観測点の座標（墨田を原点とする3次元座標系）

GPS 固定点	x [m]	y [m]	z [m]
墨田 (K004)	0.0	0.0	0.0
台東 (K083)	-2891.82	-1978.07	27.38

これらのGPS 固定点では、Trimble社製のL1/L2の2周波を観測できる測量用のGPS受信機が設置されている。また、対流圏遅延、電離層遅延の影響を小さくするために、衛星データは最低仰角が15度に設定されており、これよりも仰角が低い衛星のデータは削除されている。

3.2 作成したプログラムによる解析結果

上述のデータのうち最初の30分を用いて静的測位を行い、台東(K083)の座標 (x, y, z) と整数値バイアス N_{ij}^{kl} を求めた。そして、得られた座標と整数値バイアスを初期値としてRTK解析を行った。24時間連続データをRTK解析した結果を時系列で図-1に示す。また、結果から計算した各成分の平均値と標準偏差の2倍値を表-2に示す。

表-2 RTK解析の結果得られた座標の平均値と標準偏差の2倍値

	x [m]	y [m]	z [m]
平均値	-2891.84	-1978.08	27.32
標準偏差の2倍値	0.02	0.03	0.11

図-1の縦軸はそれぞれ上から x 軸、 y 軸、 z 軸の座標値を表し、推定値の平均値を中心として ± 10 [cm] の幅でプロットしている。横軸はGPS標準時 [hour] を示す。図中の破線は縦軸の中心から ± 5 cm のところに引いたものである。図から、3成分ともに殆どの時刻において推定値が中心から ± 5 cm の間に入っていることが分かる。

表-1と表-2を比べると、推定値の平均値が国土地理院から公表されているパラメータから求めた座標値と

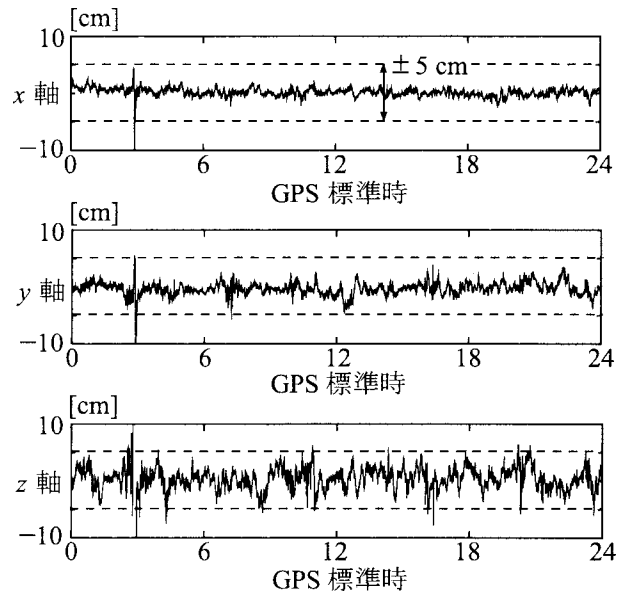


図-1 2003/11/17のデータを用いた、墨田を参照点とする台東のRTK解析の結果

異なっていることが分かる。 x 軸方向で2 cm、 z 軸方向で6 cmほどのバイアス成分があるが、この原因はまだ分かっていない。これは今後の検討課題である。

また、精度を評価するために、標準偏差の2倍値を計算した。この結果では水平方向の精度は2~3 cm程度、鉛直方向の精度は10 cm程度であった。鉛直方向の精度が10 cmと特に悪いのは、図1に見られる3時ごろに生じたスパイク状のエラーが主な原因である。

3.3 解析結果の検証

図-1を見ると、GPS標準時で3時（日本時間で12時）の辺りで推定結果が著しく悪化していた。この原因を調べるため、式(13)の行列 $\mathbf{A}^T(t)\mathbf{A}(t)$ の正則性を調べた。この正則性を表すパラメータとして、一般的にGDOP (Geometrical Dilution of Precision) という値が使用されている。GDOPは $\mathbf{A}^T(t)\mathbf{A}(t)$ の逆行列の対角項の和の平方根で定義される値であり、これに搬送波位相の観測誤差の標準偏差をかけると位置の推定精度を評価することができる⁵⁾。

$$\text{GDOP} \equiv \sqrt{\text{Trace}(\mathbf{A}^T(t)\mathbf{A}(t))^{-1}} \quad (15)$$

図-2にGDOPの時間推移を示す。図の縦軸はGDOPの値で横軸はGPS標準時である。図-2と図-1を比べると、確かにGDOPの値が大きいところで精度が悪化している様子が分かる。

次に、GDOPの値が悪化した原因を調べるために、捕捉していた衛星の数の時間変化を調べる。図-3に、墨田と台東において共通に捕捉していた衛星数の時間変化を示す。図の縦軸は可視衛星の数で、横軸はGPS

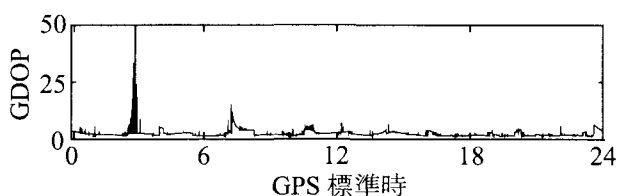


図-2 2003/11/17, 墨田と台東のデータにより計算された GDOP の時間変化

標準時を示す。図-2 および 3 を見比べると、可視衛星数が少ないところでは、GDOP 値が大きくなる傾向があることが分かる。ただし、図中の 11 時について言えば、可視衛星数が 3 時と同じ程度に低下しているにも関わらず、それほど GDOP の悪化は見られない。

GDOP は行列 $A(t)$ の性質によって決まるが、 $A(t)$ の定義から分かるように、 $A(t)$ の各成分の値は衛星の配置のみに依存する。直観的に言えば、可視衛星の数が少なくなり、衛星の配置がある方向に偏ると GDOP の値が大きくなり、位置の推定精度が低下する。ただし、衛星の数が少なくても、衛星の配置がうまく分散していれば GDOP の値はそれほど悪化しない。

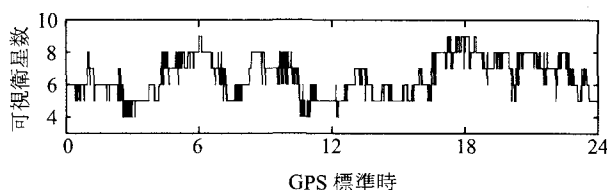


図-3 2003/11/17, 墨田と台東のデータにおいて共通に捕捉された衛星の数の時間変化

4. 理想的な状態における可視衛星数と GDOP の時間変化について

前節の実データの解析結果では、位置の推定精度が極端に悪化する時間帯があった。しかもこの精度低下は偶然ではなく、可視衛星数の減少による係数行列 $A^T(t)A(t)$ の正則性の低下という構造的な原因により生じることが分かった。もし、これが東京で位置推定をする場合の一般的な問題であるならば、実用を考えた場合に大変重要な問題となる。

そこで解決策を探るために、衛星からの電磁波の遮蔽物が一切無い理想的な状態を仮定し、東京地方で捕捉できる衛星の数の時間変化や、その結果から得られる GDOP 値の時間変化について調べた。衛星の軌道は IGS (International GPS Service) のホームページから精密暦をダウンロードして用いた。

精密暦から計算により求まる理想的な状態での可視衛星数の時間変化を図-4 に示す。図の横軸は GPS 標準時で、縦軸は GPS 固定点の墨田において理想的な観測が行われた場合の可視衛星の数である。図中には、最低仰角を 0 度とした場合と 15 度とした場合の二通りをプロットしている。また、同様に図-5 には GDOP 値の時間変化をプロットした。縦軸は GDOP の値で、図の見方は図-4 と同じである。

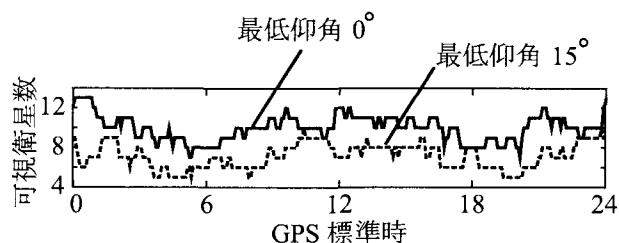


図-4 東京を観測点とした場合の可視衛星数の時間変化

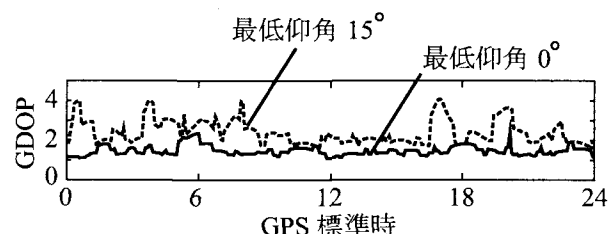


図-5 東京を観測点とした場合の GDOP 値の時間変化

図-3 と 4 を比べると、実データでは可視衛星数が理想状態と比較して、ある時間帯に著しく低下している様子が見える。これはビルなどの遮蔽物により衛星からの伝播が遮断されていることを示す。

一般に、測量用途では使用する衛星の仰角は 15 度以上に設定される。これは仰角が 15 度より低い衛星からの電磁波は電離層や対流圏の影響を強く受けるため、観測誤差が増大し、精度が著しく低下するためである。ただし、受信機間の距離が極めて近い (数百 m 以下の) 状況では、二重差を計算することで、これらの誤差要因を効果的に取り除くことができるので、稠密に分布した受信機のデータを使用する場合には、使用する衛星の仰角をさらに低く設定することができると考えられる。この場合、図-4 から分かる様に、使用できる衛星の数が全体的に 2~3 ほど増える。

図-5 には使用する衛星の最低仰角が 0 度の場合と 15 度の場合の GDOP 値の時間推移を示している。結果的には、可視衛星数の数が大きく変わっても GDOP 値は 2 倍程度しか変わらない。

通常、使用できる衛星データの数が 5 ないし 6 以上あれば RTK において数 cm の精度を出すことができる

ので、使用する衛星の最低仰角を 15 度としても問題ないように思える。しかし、前節での実データの解析結果に見られた様に、遮蔽物による受信不良などの事故により可視衛星数が 4 ないし 5 となる場合には GDOP 値が著しく低下する場合があります。その結果として位置の精度が極めて低下することがある。受信する衛星のデータ数が多いことは、遮蔽物のない理想的な観測環境においてはあまり意味をなさないが、高層ビル等による受信障害が生じる様な環境では偶発的な事故による GDOP の著しい低下を防ぐことができるので、特に都市域での使用においては重要となると思われる。

5. カーナビ改造型受信機を用いた実証試験

前節において、国土地理院が設置している高性能の測量用 GPS 受信機により受信された搬送波位相データを解析する場合には、プログラムが正常に動作し、受信機位置をモニタリングできることが確認できた。そこで次に、カーナビ改造型 GPS 受信機により受信したデータを用いてもプログラムが正常に動作することを確認した。また、解析結果より、カーナビ改造型 GPS 受信機の性能を検証した。

5.1 実証試験の概要

実証試験では、実際にモニタリングシステムを導入すると思われる現場を考慮して、東京都葛飾区にある三和橋において行った。三和橋の桁下にはガス管が通っており、震災時には橋の両岸における相対変位を知ることが重要となる。三和橋周辺は、GPS 信号の伝播の遮蔽物となる高い構造物は存在しないので、GPS の受信実験としては易しいサイトである。

三和橋の歩道上に、図-6 の様に受信機を設置して受信実験を行った。受信機は Trimble 社製の測量用の GPS 受信機を 1 台と、古野電気社製のカーナビ改造型受信機を 3 台用いた。古野電気社製の受信機のうち、2 台には搬送波位相を受信するための専用のアンテナを取り付け、残りの 1 つにはカーナビ用の簡易型アンテナを接続して実験を行った。受信機の構成を図-7 に示す。Trimble 社製のアンテナは専用の三脚に固定し、受信機の電源はバッテリーから供給した。取得したデータは受信機内のメモリに保存した。古野社製のカーナビ改造型受信機は RS232C でデータを出力するので、データはノート PC で受信して PC 内のメモリに保存した。受信機の電源はノート PC の USB から供給した。

図-6 に示したサイトにおいて、表-3 に示す観測スケジュールで受信実験を行った。Trimble と古野 2、古野カーナビはアンテナの位置を固定しており、古野 1 については観測開始から 20 分の時にアンテナ高さを 33cm ほど低くした。すべての観測点で共通に観測できた時間は約 40 分である。解析では、これらのデータの

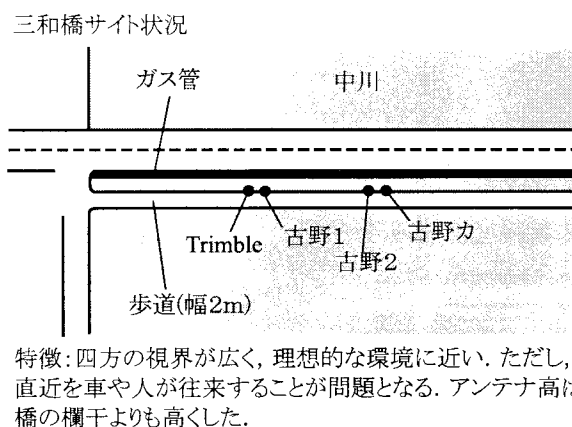


図-6 三和橋周辺での受信機の配置

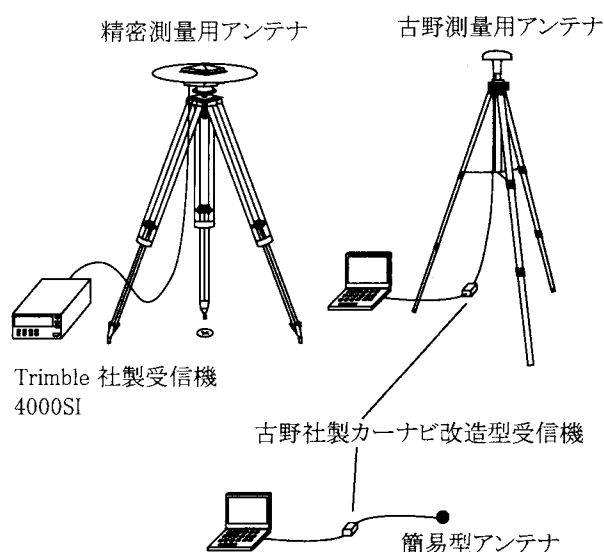


図-7 観測に用いたシステム、(左) Trimble 社製、(右)(下) 古野社製

他に国土地理院が設置している GPS 固定点により受信されたデータも使用した。

表-3 04/02/18 三和橋における観測時間

受信機	開始時間	終了時間	アンテナ高
Trimble	7:20:42	8:13:53	一定
古野 1	7:22:41	8:16:08	高 → 低
古野 2	7:25:41	8:10:10	一定
古野カ	7:27:40	8:11:10	一定

5.2 受信データの解析と結果の検証

(1) 静的測位の結果

今回は衛星の最低仰角を 15 度として解析を行った。最低仰角を 5 度に設定した場合も試みたが、現バージョンのソフトを用いた場合では、整数値バイアスを正確

に決定することはできなかった。この理由は、衛星の仰角が低い観測データではサイクルスリップが多数発生していて、かつ、それらのサイクルスリップを正確に検出し取り除くことが困難であったためである。本来は、サイクルスリップが生じたかどうかは受信機の記録から判断できるので、ここは将来的に改善され、最低仰角をより低く設定できると思われる。

小節 2.2 で述べた様に、静的測位を行う場合には、まず整数値バイアス N_{ij}^{kl} を実数として求め、その後推定誤差が最小となるような整数値の組合せを探索する。一般に、推定誤差が最小となる整数値バイアスの組合せがどれだけ正しいかを定量的に評価するために、二番目に小さい残差の値 σ_2 と最小となる残差の値 σ_1 の比 σ_2/σ_1 を用いる。つまり、この値が大きいほど整数値バイアスの推定結果が信頼できるということになる。様々な参照点と未知点について、 σ_2/σ_1 の値を比較した。結果を表-4 に示す。

表-4 整数値バイアスの決定比 σ_2/σ_1 の比較

	Trimble	古野 2	古野カ
K004	1.90	1.50	1.55
K083	1.81	1.16	Error
K084	1.11	1.52	1.56
Trimble	-	1.70	1.34
古野 2	-	-	1.46

表-4 の最左列は参照点として用いた受信機を、最上行は未知点として用いた受信機を示す。K004, K083, K084 は国土地理院の GPS 固定点であり、Trimble, 古野 2, 古野カは図-6 のそれと対応する。現バージョンの解析ソフトを用いた場合、今回の実験では測量用受信機、カーナビ改造型受信機+測量用アンテナ、カーナビ改造型受信機+簡易型アンテナの 3 つを比較しても、 σ_2/σ_1 の値にはそれほど違いが現れなかった。

一般に、整数値バイアスを正確に決定するには、 σ_2/σ_1 の値は 3 ~ 5 程度が必要といわれているが、現バージョンのソフトウェアでは全体的にそれだけの精度が達成できていない。今後、プログラムを改善して、 σ_2/σ_1 を向上する必要がある。K083 を参照点として古野カを推定した場合には、正解の決定すらできなかった。これは、ノイズのために、正解ではない整数値バイアスの組合せを用いた方が、残差を小さく評価してしまうためである。

(2) RTK 測位の結果

静的測位の結果を初期値として RTK 解析した例を図-8 と 9 に示す。図-8 は Trimble を参照点として古野 1 の相対位置をモニタリングした結果であり、図-9 は同じく Trimble を参照点として古野カの相対位置をモ

ニタリングした結果である。図の縦軸は推定した座標の平均値を中心として ± 20 cm の幅で各成分の座標を示してある。横軸は観測開始からの経過時間 [分] である。図中の点線は平均値から ± 5 cm の幅を示す。

図-8 では、観測時に受信機の位置を鉛直方向に 33cm ほど変化させているが、この変化を正確に捉えている様子が見える。図-9 からは、簡易アンテナを用いても数 cm の精度で位置をモニタリングできることが分かる。

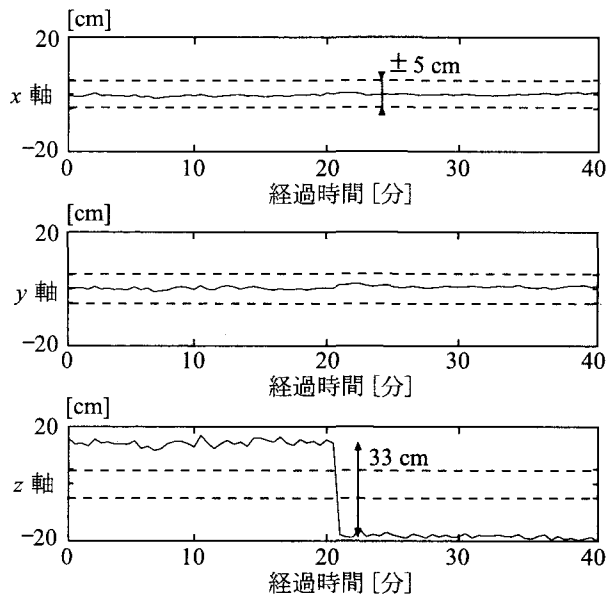


図-8 Trimble を参照点として推定された古野 1 の相対位置の時系列

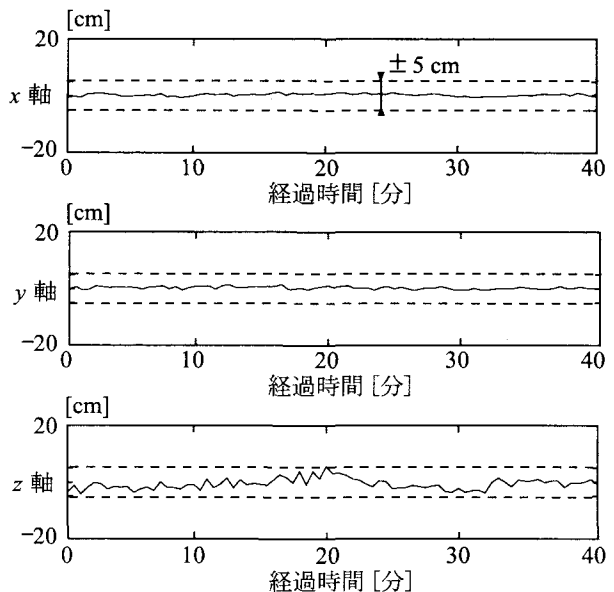


図-9 Trimble を参照点として推定された古野カーナビの相対位置の時系列

5.3 簡易型アンテナの性能検証

ここでは、測量用のアンテナと簡易型アンテナの性能を比較検討する。まず、Trimbleを参照点として古野2と古野カの座標を求めた。次に、その座標を真の位置として式(3)から λN_{ij}^{kl} の値の時系列を求めた。整数値バイアス N_{ij}^{kl} は一定値であるので、 λN_{ij}^{kl} も一定になるはずだが、実際には観測誤差のためにゆらいでいる。そこで λN_{ij}^{kl} の時系列の標準偏差を計算し、これを受信精度とした。表-5に得られた結果を示す。表の最左列は衛星の識別番号を、2列目は観測時間内の平均的な衛星の仰角を、3列目と4列目はそれぞれ古野2と古野カの受信精度を示す。式(3)の λN_{ij}^{kl} を計算するための参照衛星としては、24番衛星を用いた。この衛星の仰角は30度であった。

表-5 衛星仰角と搬送波位相の受信精度の関係

衛星番号	仰角 [度]	古野2 [m]	古野カ [m]
1	37	0.005	0.007
4	62	0.005	0.006
7	61	0.005	0.006
13	62	0.006	0.008
20	16	0.009	0.013

表-5から全体的に測量用アンテナを使用した方が精度が良いことが分かる。また、どちらの場合についても衛星の仰角が高い方が受信精度が高い。特に簡易型アンテナを用いた場合には、衛星の仰角が低い場合に受信精度が悪化する。この原因はマルチパスであると考えられる。今回の実験では参照点と未知点が極めて近い位置に設置してあるので、式(7)の仮定は満足されるため、対流圏遅延や電離層遅延の影響は完全に無視できる。一方で、式(3)では無視しているが、マルチパスと電気ノイズの影響は λN_{ij}^{kl} の計算で残っている。このうち電気ノイズの影響は衛星の仰角に関係ないので、マルチパスの影響であることが分かる。

6. まとめ

本研究では、ネットワークセンシングにおけるセンサ位置情報の取得や、稠密な受信機アレイによる地盤変形モニタリングシステムに、安価で小型・軽量のカーナビ改造型のGPS受信機と簡易アンテナを用いることを提案した。さらに、その実現可能性を確認するための実証試験を行った。また、その前段として、2点間の相対位置を決定する静的測位とRTKのプログラムのプロトタイプを開発し、動作確認および性能検証を行った。本研究の成果を以下にまとめる。

1. 2点間の相対位置を求める静的測位とRTKの解析プログラムを作成した。ただし、サイクルスリッ

プを検出するモジュールが未完成である。そのため、現状ではサイクルスリッを多数生じる低仰角の衛星データを解析に組み込むことができない。

2. 国土地理院のGPS固定点のデータを利用して、プログラムの性能検証を行った。結果より、作成したプログラムが正常に動作していることが確認できた。
3. 上述の精度検証において、位置の推定精度が著しく悪化する時間帯があることが分かったが、これの原因は捕捉衛星数の低下によるGDOP値の増大であることを示した。都市部ではビルなど衛星からの電磁波の遮蔽物があるため、捕捉衛星数は限られる。低仰角の衛星データも解析に使用できる様にプログラムを改善する必要がある。
4. 都市域にGPS受信機を設置して観測実験を行った。この実験結果を解析することで、測量用のGPS受信機とカーナビ改造型1周波GPS受信機の性能を比較した。精度はやはり測量用の受信機の方が高かったが、土木工学分野での要求精度を考えると、実用上どちらも大差がないことが分かった。さらに、受信機の高さを変化させるテストにおいても、その変動を正確に捕捉できることを確認した。

今後の課題としては、現状の2点間の相対位置を求めるプログラムを改善すると共に、稠密アレイデータ対応型のアルゴリズムを作成することで性能・精度を格段に向上する。また、実際に携帯搭載型の小型GPS受信機を用いて、これを無線ユニットと結合することで都市の物的ストックの変形モニタリングシステムを開発することを考えている。

謝辞：財団法人 地震予知総合研究振興会の池田潤一先生、東京ガス株式会社 小金丸健一様には現場実験の際、便宜を図って頂きました。東京大学地震研究所の加藤照之教授からは測量用のGPS受信機をお借りしました。ここに記し謝意を表したいと思います。

参考文献

- 1) J. P. Lynch: Decentralization of wireless monitoring and control technologies for smart civil structures. Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 2002.
- 2) 堀宗朗, 小国健二, 望月一浩, 菅野高弘: RTK-GPSを用いた地盤大変状の計測と精度の検証, 土木学会論文集, No. 729/III-62, pp.177-183, 2003.
- 3) 土屋 淳・辻 宏道, 新・GPS測量の基礎, 社団法人 日本測量協会, 2002
- 4) Furuno ホームページ, <http://www.furuno.co.jp/index2.html>
- 5) B. Hofmann - Wellenhof, H. Lichtenegger and J. Collins: GPS, Theory and Practice, SpringerWien-NewYork, 2001.

(2004 年 4 月 16 日 受付)