

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

Development of the multipoint displacement measurement system based on a low cost L1 GPS receiver and a wireless LAN device

佐伯昌之*・高坂朋寛**・堀宗朗***

Masayuki SAEKI, Tomohiro KOSAKA and Muneo HORI

*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)

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

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

The objective of this research is to develop the multipoint displacement measurement system for infrastructures. This paper describes the developed prototype of this system and shows the results of the field experiments. This system consists of a GPS server and sensor nodes. A low cost L1 GPS receiver and a wireless LAN device are equipped on the sensor nodes. A GPS server is able to gather the GPS data received at sensor nodes and to estimate their accurate positions by analyzing the L1 carrier phases. Field experiments were conducted with three sensor nodes. The results show that the positions of the sensor nodes are monitored by the accuracy of a few centimeters. The integer ambiguities, that are needed to estimate the accurate position, are correctly determined in 10 minutes in the experiment.

Key Words : L1 GPS receiver, low cost, wireless LAN, sensor network

1. はじめに

本研究の目的は、地震時における社会基盤構造物の変位を、高密度に多点で計測するシステムを開発することである。そこで、本研究では、システムのプロトタイプを開発し、実証試験を行うことで性能の検証および問題点の洗い出しを行った。

また、このシステムは、ハード・ソフト両面において後述の階層型センサネットワークと共通する部分が多く、これへの実装も同時に重要な目的としている。そこで、本論文では、まず本研究の主題である多点変位計測システムと階層型センサネットワークとの関係を次節において明らかにし、その後、本研究の主題である多点変位計測システムの開発について述べることにする。

1.1 階層型センサネットワークへの実装

現在、社会基盤構造物のヘルスマonitoringの重要性が指摘され、多くの研究がなされている。一方で、ユビキタス時代に備えて、無線通信を用いたセンサネットワークの研究が盛んに行われており、この技術を構造物のヘルスマonitoringに応用することが考えられている¹⁾²⁾。その理由として、物理量に基づいた定量的な診断を行うためには、巨大な社会基盤構造物を高密度で計測することが必須となるが、有線通信を用いる方法では初期投資コストが非常に高くなることが挙げられる。さらに、無線通信とすることで、地震時のケー

ブル破断によるデータ欠損リスクを回避できることから、無線通信をもちいたセンサネットワークの活用が期待されている。

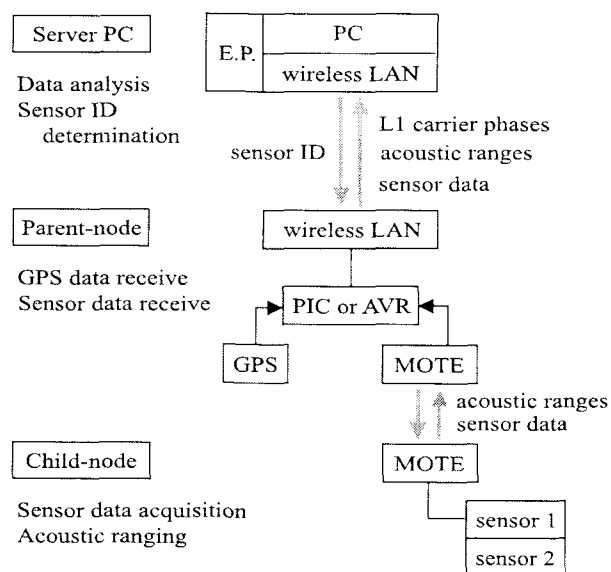
上述の様なシステムは、センサを大量に設置することが容易であることから、従来にない稠密なセンサネットワークを形成することが可能である。ただし、センサネットワークの一連の研究において、克服すべき重要な課題がいくつか残されている。その1つは、センサの位置同定である。設置される膨大な数のセンサの位置を1つ1つ測量により特定することはコスト面からも現実的でなく、自動で全てのセンサ位置を特定する機構を組み込む必要がある。Khor(2005)は、近隣のセンサ間の距離を音波を用いて計測し、この情報のみを用いて空間的に広がる全てのセンサの相対位置を誤差を累積することなく推定する手法を提案し、実証している³⁾。ただし、この手法では各センサの相対位置は定まるが、絶対位置は特定できないため、絶対位置を特定するための機構が別途必要となる。

また、一般的なセンサネットワークの別の課題として、センサで取得される膨大な情報を如何に伝達するかという問題がある。センサネットワークでは、全てのセンサノードは均質であり、各ノードが無線通信機能とCPUを有しているのが特徴である。これにより、動的に通信ネットワークが形成され情報を通信することができる。一般に、被害状況を把握して次の対策を練るという意味決定の過程では、センサで取得したデー

タはある中央処理施設に全て集められ、そこで適切な情報に変換される必要があるが、この時、中央処理施設に近いノードは遠方のノードから送られてきた膨大な量のデータを転送する役割を担う必要がある。そのため、バッテリー電源を急速に消耗してノードとしての役割を担えなくなるという問題が発生している⁴⁾。

これら2つの問題を解決するには、絶対位置が特定でき、かつ十分な電力と通信能力をもつ特別なノードを適切に配置することが有効であると考えられる。そして、その様なノードは、本研究において開発を進めているシステムを実装することにより達成される。

上述のような特別なセンサノードを持つセンサネットワークを階層型センサネットワークと呼ぶことにする。図-1に、階層型センサネットワークにおける各階層の役割と階層間との関係を示す。図中、親ノード (Parent-node) についてはこの論文で、子ノード (child-node) については Khor(2005) で詳しく述べられている。



PIC or AVR はワンチップマイコンの1種で、小型で汎用の処理器。MOTEは無線通信機能を有する市販のセンサプラットフォーム (Mica2) のこと。Khor(2005)参照

図-1 階層型センサネットワークにおける各階層の役割

1.2 多点変位計測システムとしての役割

地震時には、社会基盤構造物の被害状況を即座に把握し、その後の迅速な復旧作業に役立てる必要がある。ここで、社会基盤構造物の被害について、特にその構造物が使用できるかどうかを判断するのに、変形の情報が重要であるため、構造物の様々な点で変位を計測することは意義がある。

変位を精度よく計測する方法として、GPSは有力な候補の1つであり、その有効性も検証されている⁵⁾。また、従来はGPS受信機が高価であったために密にセン

サを配置することは現実的に難しかったが、現在では安価な1周波GPS受信機を入手することが可能になっている。さらに、1周波GPS受信機に汎用のカーナビ用のパッチアンテナを使用した場合でも、数cmの精度で位置が同定できることが実証されており、多点変位計測システムへの適用の可能性が示されている⁶⁾。

そこで、本研究では、安価な1周波GPS受信機を用いた多点変位計測システムを開発することを目的として、そのプロトタイプを開発し、実証試験を行った。実証試験の結果、受信環境が良い場合では、水平方向で±1.0 cm程度、鉛直方向で±3.0 cm以下の精度で変位をモニタリングできることが示された。また、サイクルスリップが頻発するような受信環境が悪い場合でも、受信機の位置が固定されてさえいれば、10分程度のデータを使用することにより、位置を正確に決定できることが分かった。本論文では、プロトタイプの設計および開発、解析アルゴリズム、実証試験とその結果について述べる。

2. 多点変位計測システムに要求される性能

この章では、多点変位計測システムに要求される最低限の性能について検討する。まず、システムに要求される性能を以下に列挙し、その後、それぞれについて解説する。

多点変位計測システムに要求される性能としては、以下のものが挙げられる。

- 1) センチメートルの精度で位置を特定できる。
- 2) リアルタイム計測が可能である。
- 3) 安価である。
- 4) 観測データの収集・保存・解析が自動で行われる。
- 5) 外部電源がない状態でも、内蔵のバッテリーで数時間程度は稼動する。
- 6) 相応に離れたノード間、またノード・サーバ間での無線通信が可能である。

まず1)の要求項目について説明する。構造物の被害を推定するのに、変位の情報は大変に重要である。特に地震発生直後には、高速道路やガス管の地上部などの社会基盤構造物が使用可能かどうかを即時に判断する必要がある。そのためには、構造物の変形を知る必要がある。これにはセンチメートルの精度は最低限必要であると考えられる。一方で、精密な健全性評価は緊急的には必要とされないため、極端な高精度は要求されないと考えられる。

2)の要求項目は、1)と同じく、構造物の健全性を迅速に把握するのに必要となる。地震発生の前後の変形を計測するだけでは、その構造物がどのような変形を受けたかが分からない。そのため、地震時における変位の時系列を取得することが重要である。さらに、これをリアルタイムとすることで、迅速な対応が可能と

なる。

3) の要求項目は、対象とする社会基盤構造物が大規模であること、および、その被害は局所的であることに対応する。事前の調査により、被害が発生しそうな箇所はある程度把握できると思われるが、社会基盤構造物は大規模であるため、その様な箇所全てにセンサを設置するには、膨大な数が必要となる。そのため、初期投資コストを現実的なものにするためには、1つ1つのセンサが安価であることが重要となる。

4) の要求項目のうち、自動収集・保存は、膨大な数のセンサが出力する大量の情報を取得することを考慮すると、当然である。さらに、構造物の被害を推定するには、センサからの出力に適切な処理を施すことが必要であり、構造物の常時モニタリングを行うには、データの収集から解析までの一連の操作を全て自動化する必要がある。

5) の要求項目において、システムになんらかのバックアップ電源が必要となることは自明である。ただ、問題はその時間である。本震および余震による被害を考えた場合、最低でも数時間は装置が稼動する必要があると思われる。ただし、これには議論の余地がある。

6) の要求項目は、地震時におけるケーブルの破断リスクを回避するのみならず、初期投資コストの低減の面からも重要である。データ収集のための通信手段としては、大きく分けて有線通信と無線通信があるが、有線通信の場合、ある1箇所でもケーブルが切断すると、それより先のセンサの情報を全て失うことになる。一方で、無線通信の場合はアドホックネットワークを構築することにより、1つのセンサが破壊された場合でも、あらたな通信ネットワークが形成され観測データを取得することができる。また、ケーブルを使用するシステムでは、ノードを設置する際に、その設置コストが大変に高くなるという問題もある。それゆえ、システムの無線通信化が重要となる。

3. 多点変位計測システムの設計と試作

この章では、システムの全体像の設計、および設計に従って試作したプロトタイプについて説明する。

3.1 システムの設計

前節で示した要求項目を同時に満足するシステムを構築しようとする場合、実装するデバイスの選択の自由度はあまりない。デバイスは全て、要求項目 3) の安価であることを満足できるように、汎用されているものから選択することを基本としている。

システムの全体像を図-1 を用いて説明する。多点変位計測システムは、GPS 信号を受信する多数の親ノード (Parent-node) と、そのデータを集めて解析する1台の PC からなる。(この場合、子ノード (child-node)

は特に必要としない。) PC にインストールされるシステム全体を制御するためのソフトウェアを GPS サーバと呼ぶことにする。以下、各デバイスについて説明する。

まず、センサについてであるが、要求項目 1)-3) を満足する機器として、安価な1周波 GPS 受信機を使用することとする。さらに、これにカーナビ用のパッチアンテナを接続して使用する。これにより安価なセンサを得ることができる。また、受信環境が良い場合での基本的な性能については、佐伯 (2004) により実証されており、精度・リアルタイム性も問題ない。

次に、無線通信装置であるが、これには現在広く汎用されている無線 LAN の IEEE802.11b を採用することとする。これにより数百 m 程度の通信距離を確保でき、要求項目の 3) と 6) を満足することができる。また、要求項目以外の利点として、LAN を用いることで既存の有線ケーブル LAN を介したデータ収集も可能となり、システム構築の自由度が広がることが挙げられる。ただし、消費電力がやや高いので要求項目 5) に対してはマイナス要因となる。そのため、データ量の適切な削減や、無線 LAN 通信の電源制御をするなどの工夫が必要となる。

次に、要求項目 4) を満足するために、データ収集・保存・解析は1台の PC を使用することとする。一般に、センサネットワークを形成する場合には、各ノードが CPU を持ち、分散して解析するようにシステムを設計することが有効であると考えられている¹⁾。これにより、通信量を低減できたり、中央の CPU の負荷を減らすことができるからである。しかしながら、GPS を用いた測位解析では、i) 計算量が多く各ノードに十分な CPU を持たせると高価になること、ii) センチメートルの精度を得るには相対測位解析が必要であり、そのためのデータ通信が必要となること、から観測データは中央に集めてからまとめて演算することとする。また、PC を用いる他の利点としては、LAN を使用したデータ収集が容易であること、ソフトウェアの開発環境が整っていることなどが挙げられる。

3.2 プロトタイプの開発

前述の設計に従い、ノードおよび GPS Server のプロトタイプを作製した。作製したノードの模式図を図-2 に示す。ノードは、GPS 受信機、無線 LAN、電源に関する3つの回路から構成される。1周波 GPS 受信機としては、古野社製の GT-8032 を採用した。GT-8032 は16個のチャンネルで同時に衛星からの電波を探索でき、また最大で12の衛星を捕捉できる。相対測位に必要な L1 搬送波位相や、ナビゲーション情報などは1秒に1回シリアルで出力される。

受信機から出力されたデータは、Serial to TCP/IP converter によりプロトコルが変換され、IEEE802.11b

の CF タイプカードに転送される。Serial to TCP/IP converter はアルファプロジェクト社製の EZL-80Z を使用した。本来であれば、PIC や AVR 等のワンチップマイコンを使用して、この converter を制御することにより通信を制御することになるが、試作機では、GPS 受信機の出力を直接 converter に入力している。つまり、電源を入れた瞬間から GPS データが無線 LAN により送信されるようになっている。

これらの回路へ入力する電源は、単 3 乾電池 3 本で供給している。まず単 3 乾電池 3 本で 4.5 V の電源をつくり、これを無線 LAN 用に 3.3 V に降圧、GPS 受信機用に 5.0 V に昇圧している。主要な装置の消費電力を表-1 にまとめる。後で詳しく述べるが、実証試験では、この装置を用いて連続 2 時間以上の観測が実現されている。

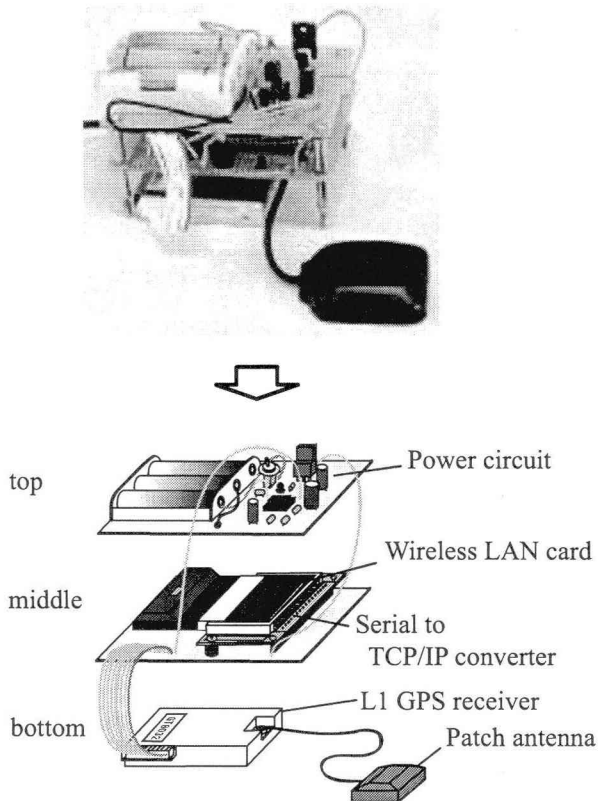


図-2 作製したノードの試作機

表-1 主要な部品の消費電力

機器	電圧	最大消費電力
GT-8032	5.0 V	450 mW
EZL-80Z	3.3 V	10 mW
無線 LAN カード	3.3 V	1122 mW

4. 測位解析アルゴリズム

測位解析アルゴリズムは、これまで多くの手法が提案されているが⁷⁾、ここでは、まず本システムで採用している解析アルゴリズムについて、その概要を述べる。次に、受信機間の距離が極めて短い場合に有効であるサイクルスリップの検出および修正アルゴリズムについて説明する。

4.1 整数値バイアス決定アルゴリズムの概要

2 つの静止した受信機 i, j があり、1 つを参照点として、もう片方の位置をセンチメートルの精度で同定する問題を考える。この様な場合には、L1 搬送波位相を解析する相対測位が用いられる。この相対測位では、観測データから種々の誤差を消すために、二重差という操作を行う。すなわち、ある受信機 i で捕捉された衛星 k の搬送波位相を ϕ_i^k とすると、搬送波位相の二重差 ϕ_{ij}^{kl} は

$$\phi_{ij}^{kl} = \phi_i^k - \phi_j^k - \phi_i^l + \phi_j^l \quad (1)$$

で得られる。L1 搬送波位相の二重差は、一般に次式によりモデル化される。

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

ここに $\rho_{ij}^{kl}(t)$ は受信機と衛星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、 $\epsilon_{ij}^{kl}(t)$ は二重差の操作により消去できなかった誤差である。

式 (2) は、未知点の正確な座標を近似値と摂動の和で表し、摂動の高次の項を無視することで線形化される。そして、未知点の参照点からの相対位置は、摂動項を求めることにより達成される。線形化された連立方程式は、以下のように表わすことができる。

$$\Phi(t) = A(t)\mathbf{x} \quad (3)$$

ここに、 $\Phi(t)$ は観測ベクトルに相当し、その成分は次式で与えられる。

$$\hat{\phi}_{ij}^{kl}(t) = \phi_{ij}^{kl}(t) - \hat{\rho}_{ij}^{kl}(t) \quad (4)$$

ここで $\hat{\rho}_{ij}^{kl}(t)$ は未知点の近似値と衛星間の距離の二重差である。また式 (3) の $\mathbf{x}$ は未知ベクトルで、その成分は位置座標の摂動項と整数値バイアスの二重差 N_{ij}^{kl} である。 $A(t)$ は式 (3) から求まる未知ベクトルの係数行列であり、未知点の近似値と衛星の位置のみに依存する行列である。今、受信機 i と j により同時に捕捉されている衛星の数が n_s 個とすると、未知数の数は、位置の摂動が 3 成分と、整数値バイアスの二重差が $n_s - 1$ 個であるので、合計で $n_s + 2$ 個となる。一方で、独立な方程式の数は、サンプリング数を n_t とすると $(n_s - 1)n_t$ となる。

式 (3) は最尤推定法により解かれ、結局、未知ベクトル $\mathbf{x}$ は次式によって与えられる。

$$\mathbf{x} = \left[\sum_t A(t)^T R_e(t)^{-1} A(t) \right]^{-1} \sum_t A(t)^T R_e(t)^{-1} \Phi(t) \quad (5)$$

ここに $R_e(t)$ は観測ベクトルの誤差共分散行列である。

式 (5) で得られる解は、整数値バイアスの値が浮動小数点であることから、一般にフロート解と呼ばれる。整数値バイアスの値は、その名のとおりの整数値でなければならない。そのような解はフィックス解と呼ばれる。整数値バイアスのフィックス解を求めることで、短時間のデータで位置を高精度に決定できるようになる。整数値バイアスの値は、次の目的関数 J を最小とするような整数値を、フロート解に近い整数値の中から探索することにより求められる。

$$J = \left(\hat{N}_{ij}^{kl} - N_{ij}^{kl} \right)^T R_N^{-1} \left(\hat{N}_{ij}^{kl} - N_{ij}^{kl} \right) \quad (6)$$

ここに、 $\hat{N}_{ij}^{kl}$ は整数値バイアスのフィックス解、 R_N は整数値バイアスのフロート解 N_{ij}^{kl} の推定誤差の共分散行列である。

4.2 サイクルスリップの検出と修正

前小節では、整数値バイアスは一定の整数値であると仮定して解いた。受信環境が良ければこの仮定は成立するが、しかし、受信環境が悪く、受信機が衛星からの電磁波を捕捉し続けることができない場合には、搬送波位相のサイクル数を正確に数えることができず、整数値バイアスは整数値ほどジャンプする。この現象はサイクルスリップと呼ばれる。

本研究では、安価なパッチアンテナを使用するが、この場合、マルチパスの影響を強く受ける。そのため、人や車が近づくとマルチパスの影響の仕方が変化し、サイクルスリップが生じることがある。サイクルスリップが生じている場合には、受信機の位置を精度よく推定することができないため、これを検出し修正する必要がある。以下に、その方法を示す。

式 (4) を L1 搬送波の波長で除したものを $N_{ij}^{kl}(t)$ とする。ここでは、 $N_{ij}^{kl}(t)$ が時間 t の関数であることを明示して、式 (2) や (6) で見られる整数値バイアス N_{ij}^{kl} と区別している。

$$N_{ij}^{kl}(t) = \hat{\phi}_{ij}^{kl}(t) / \lambda \quad (7)$$

式 (2) から分かる様に、受信機の正確な位置が既知で、かつサイクルスリップが発生していない場合には、この値は時間によらない一定の整数値となる。位置が正確に分かっていない場合、 $N_{ij}^{kl}(t)$ の値は時間と共に変化する関数となる。

さて、式 (7) から得られる $N_{ij}^{kl}(t)$ に含まれる誤差について考える。搬送波位相の観測値に含まれる誤差と

しては対流圏遅延、電離層遅延、衛星の時計誤差、衛星の位置誤差、受信機の時計誤差、マルチパスによる誤差、電氣的なホワイトノイズがある。このうち、受信機同士が近い場合には、マルチパスによる誤差と電氣的な誤差以外の誤差は二重差の計算によりほぼ完全に除去できる。さて、マルチパスによる誤差は、その仕組みから最大でも 1/4 を越えないことが知られている⁷⁾。また、本研究で用いている GPS 受信機は、搬送波位相の計測精度が 2 mm 程度であることから、電氣的なノイズによる誤差は $2.0/\lambda \sim 0.01$ 程度でやはり無視できる。すなわち、この研究でのアプリケーションを考える場合には、マルチパスによる誤差のみを考慮すれば良い。以上のことから、サイクルスリップが生じた場合でも、 $N_{ij}^{kl}(t)$ の値を 1/4 以下の誤差で推定することができれば、その推定値との差がもっとも小さくなるように $N_{ij}^{kl}(t)$ の値を整数値ほど足す（もしくは引く）ことにより、サイクルスリップを修正することができる。

$N_{ij}^{kl}(t)$ の値の推定にはカルマンフィルタを用いる。十分に短い時間では、 $N_{ij}^{kl}(t)$ はほぼ直線とみなせることから、 $N_{ij}^{kl}(t + \Delta t)$ は次式のようにモデル化できる。

$$N_{ij}^{kl}(t) = a\Delta t + b + \epsilon \quad (8)$$

ここで a , b は時間と共に徐々に変化する値であり、短時間では一定値とみなせる。以上のことから、次の観測方程式と状態方程式を得る。

$$y_k = Hx_k + \epsilon_k, \quad x_{k+1} = x_k \quad (9)$$

ここに、 y_k は観測値ベクトル、 H は観測行列、 x_k は状態ベクトルであり以下の式で与えられる。

$$y_k = \begin{bmatrix} N_{ij}^{kl}(t + \Delta t) \\ N_{ij}^{kl}(t) \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} \Delta t & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad x_k = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (10)$$

そして、通常のカルマンフィルタを用いることにより、過去のデータから x_k を推定することができる。

今、時刻 t までの観測データがあるとする。このとき、その観測データから x_{k-1} を推定することができる。そして、 x_{k-1} を用いて $N_{ij}^{kl}(t + \Delta t)$ の値を予測することができる。いま、この予測値を $\tilde{N}_{ij}^{kl}(t + \Delta t)$ とする。式 (7) から計算される値と $\tilde{N}_{ij}^{kl}(t + \Delta t)$ の差が 0.5 以上ある場合にはサイクルスリップであると判定し、 $\tilde{N}_{ij}^{kl}(t + \Delta t)$ との差が最も小さくなるように $N_{ij}^{kl}(t + \Delta t)$ を整数値だけ修正する。これによりサイクルスリップを修正することができる。

図-3 に、式 (7) により求めた値 $N_{ij}^{kl}(t)$ を示す。データは、後の章で説明する実証試験において観測されたデータを用いた。図中、縦軸は計算された $N_{ij}^{kl}(t)$ の値の時間変化、横軸は観測開始からの経過時間 [分] を表す。また、図中の番号 # は、計算に使用した衛星の ID

番号である。この実験では、サイクルスリップを生じ易いようにアンテナを設置しており、10 分間に 15 回のサイクルスリップが生じている。図中、プロットがない時間帯は無線 LAN 通信の失敗によるデータ欠損箇所である。これについては、実証試験のところで説明する。

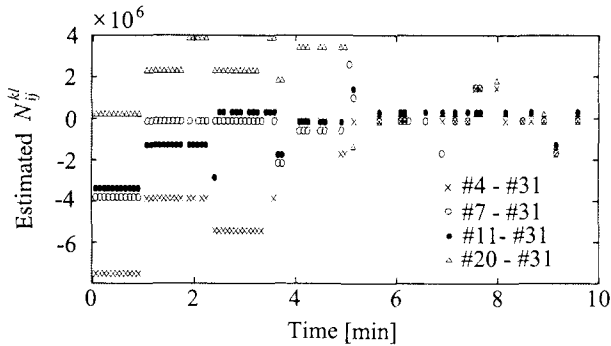


図-3 観測データから計算された $N_{ij}^{kl}(t)$ の時間変化

次に、本手法を用いてサイクルスリップを修正した後の $N_{ij}^{kl}(t)$ の時間変化を図-4 に示す。図中、縦軸は $N_{ij}^{kl}(t)$ の値で幅が 2 になるように調整している。横軸は観測開始からの経過時間 [分] を示す。図に示される通り、サイクルスリップが精度よく修正されていることが分かる。

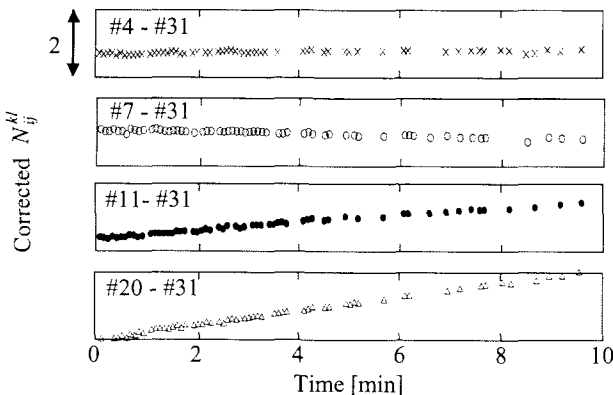


図-4 サイクルスリップを修正した $N_{ij}^{kl}(t)$ の時間変化

4.3 位置の推定アルゴリズム

(1) 整数値バイアスの特定

未知点の位置が移動していないことが分かっている場合には、節 4.2 の方法でサイクルスリップを修正した上で、節 4.1 の方法を適用することにより整数値バイアスおよび受信機の正確な座標を得ることができる。

地震時など未知点が移動している場合には、その時間区間のデータのサイクルスリップを修正することは困難な作業となる。サイクルスリップが修正されない

場合には、未知点の座標および整数値バイアスの座標を求めることはできない。

(2) 変位のモニタリング

一旦、整数値バイアスが得られれば、最低 4 つの衛星からの搬送波位相にサイクルスリップが生じない限り、ある時間 t のみの情報を用いて式 (3) を解くことにより未知点の位置を求めることができる。このとき、未知点は静止している必要は無い。また逆に、ノードの位置が推定できれば式 (7) から正確な整数値バイアスを得ることができる。これをリアルタイムに行うことで、各ノードの位置のリアルタイムモニタリングが可能となる。

ただし、サイクルスリップなどが原因となって連続して捕捉している衛星数が 3 つ以下になり、かつ同時に、地震などにより受信機の位置が移動する場合には、正確な位置をモニタリングし続けることはできない。この場合、再び受信機が静止するのを待って、新しい整数値バイアスの値を決定してから、後処理で動的な変動を解析することになる。

5. 実証試験

第 3 章にて説明した多点変位計測システムのプロトタイプを用いて受信実験を行い、得られたデータを第 4 章で説明した測位解析アルゴリズムにより解析した。以下、実験の概要と解析結果を示す。

5.1 実証試験の概要

実証試験サイトは東京理科大学野田校舎 5 号館の屋上とした。周囲には高い建物などなく、衛星からの電磁波を遮蔽するものは何も無い。パッチアンテナは三脚に固定して、サイトに 3 点ほど設置した。ノードで受信した信号は無線 LAN を介して GPS server に送られ、自動的に PC のハードディスクに保存される。解析は受信実験終了後に行った。

実証試験は受信条件を変えて 2 回行った。1 回目の受信実験では、サイクルスリップが起きないようにアンテナの高さを 1.8 m に設定し、実験中はアンテナから 1 m 以内に人が入らないようにした。実験は連続 1 時間以上の受信を行った段階で終えた。サンプリング周波数は 1 Hz とした。受信されたデータには欠損もなく、常時 8 ~ 9 の衛星の情報を得ることができた。

2 回目の実験では恣意的にサイクルスリップを起すように、受信機のアンテナを床から高さ 40 cm 程度とした。実験中は、他の実験準備のためにアンテナの周囲を我々が歩き回っていた。受信は 2 時間以上連続で行い、バッテリーが切れた段階で終了した。図-5 に 2 回目の実験でのアンテナの設置状況を示す。

2 回目の実験での受信データには、無線 LAN 通信の失敗と思われるデータ欠損が多数見られた。この原

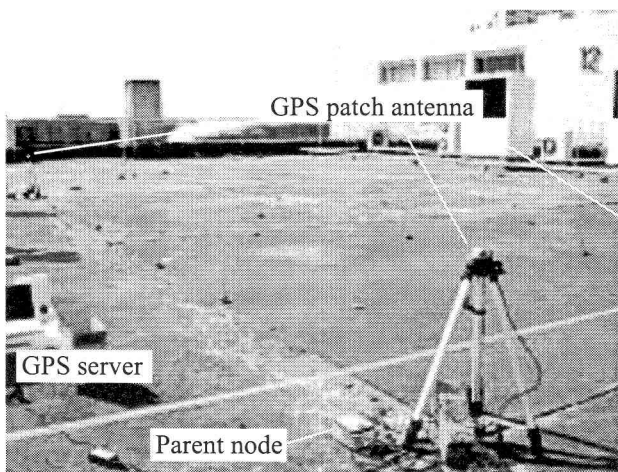


図-5 2回目の受信実験でのアンテナの配置

因は、無線 LAN の使用している電磁波は波長が短いため直進性が強く、またビルの屋上の様に遮蔽物がない場所では電磁波が反射されることがないため、GPS server とノードの直線上を人が通過したときに電磁波が遮断されデータが失われたと考えられる。また、サイクルスリップも多数回生じており、図-3 で示した通りである。

5.2 受信データの解析と結果の検証

受信実験で得られたデータを解析し、ノードの位置決め精度や、整数値バイアスの決定成功率などを調べた。以下に、それぞれについて示す。

(1) 整数値バイアスの決定成功率

まず、1時間のデータを用いて正しい整数値バイアス値を決定した。その後、連続した受信データから短いセグメントを切り出して、整数値バイアスの決定を試みた。セグメントの長さは3分、5分、10分とした。この操作を、セグメントを切り出す時間帯を5秒ずつシフトしながら多数回行った。実験1のデータに対しては、受信機1を参照点、受信機2と3を未知点としてそれぞれ600回の計算を行った。また、実験2のデータに対しては、受信機1を参照点、受信機2と3を未知点としてそれぞれ1200回の計算を行った。計算結果の内、正しい整数値バイアス値と一致するものの数を数え、試行回数で割ることにより、整数値バイアスの決定成功率を求めた。表-2に実験1と実験2で得られたデータに対する成功率を示す。ただし、実験2についてはデータ欠損が多かったためデータ長3分での計算を行わなかった。

(2) ノードの位置推定精度

次に、前小節で整数値バイアスが正しく決定できた場合に、未知点の座標を計算し、その標準偏差 σ を水平と鉛直に分けて求めた。標準偏差を2倍した値 2σ を

表-2 整数値バイアス決定成功率

データ長 [分]	実験 1 成功率 [%]	実験 2 成功率 [%]
3	96.8	-
5	98.2	94.3
10	100.0	99.4

表-3 に示す。

表-3 推定された座標値の標準偏差の2倍値

データ長 [分]	実験 1, 2σ [cm]		実験 2, 2σ [cm]	
	水平	鉛直	水平	鉛直
3	1.2	2.0	-	-
5	1.1	2.0	1.3	2.2
10	1.0	1.6	1.2	2.0

(3) 変位モニタリングによる推定値の時間変化

実証試験1のデータを用いて、座標値の時間変化を求めた。解析では、まず観測データの最初の10分を用いて正確な整数値バイアスと受信点の座標値を決定した。そして、この整数値バイアスの値を入力として、変位のモニタリングのアルゴリズムにより、各時刻での位置座標を推定した。観測点1を参照点として観測点2の座標を求めた結果の時間変化を図-6に示す。図中、グラフは上からNS成分、EW成分、UD成分である。図の縦軸は推定された座標値の時間変化で、幅は ± 3.0 [cm]としている。また、横軸は観測開始からの経過時間 [分] を表す。図中、点線は ± 1 cmの幅を示す。

図-6から、アンテナの座標値は水平方向で ± 1 cm程度、鉛直方向で ± 3 cm以下の精度で推定できていることが分かる。鉛直方向の精度が水平方向に比べて悪いのは、水平方向は 360° 全ての方向に衛星が配置されるのに対して、鉛直方向は最大で 180° しか衛星が配置されないからである。

6. まとめ

本研究では、地震時における社会基盤構造物の変形・変位をモニタリングするための多点変位計測システムを開発することを目的として、そのプロトタイプを開発し実証試験を行った。以下に、本研究の成果と今後の課題を示す。

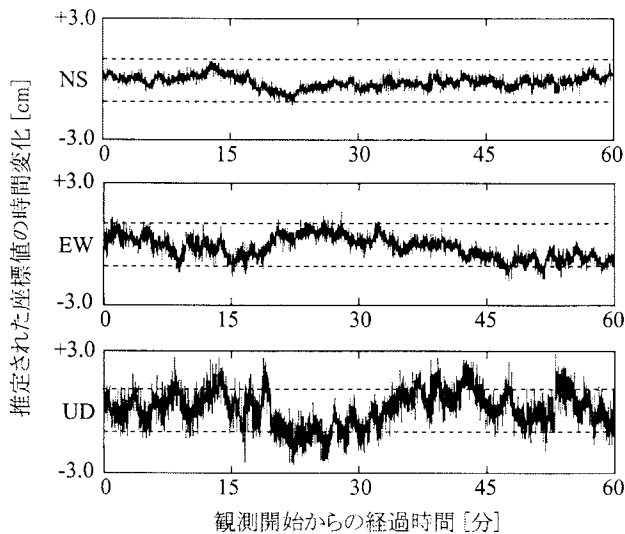


図-6 推定された座標値の時間変化

6.1 本研究の成果

本研究では、実際に多点変位計測システムのプロトタイプを作製し、実証試験をおこなった。ノードはパッチアンテナを接続した安価な1周波GPS受信機と無線LANを用いて作製した。また、ノードからのデータを受信、保存、解析するソフトであるGPS serverを開発し、ノートPCにインストールして使用した。これにより、安価なシステムを構築することができた。

プロトタイプを用いた受信実験では、受信環境が良い場合と、サイクルスリップを起しやすい受信環境の悪い場合を想定して2回の受信実験を行った。受信環境が良い場合には、ノードの位置を水平方向で1 cm程度、鉛直方向で3 cm以下の精度でモニタリングすることができることが分かった。一方で、アンテナの周囲を人や車が頻繁に通過するような受信環境が悪い場合には、サイクルスリップが頻発する場合があることが分かった。その主な原因はマルチパスによる搬送波の干渉である。どのような状況のときにサイクルスリップを起こすかは今後、詳細に検討する必要があるが、一方で、受信環境が悪い状況においても、ノードの位置が固定されていることが既知の場合には、カルマンフィルタを用いることで容易にサイクルスリップを修正することができ、受信機の位置を正確に求めることができることを示した。

6.2 今後の課題

今後の課題としては、まず、消費電力を抑えバッテリーの持続時間を延ばすことが挙げられる。ノードにおける電力消費の大半は無線LAN通信に費やされてお

り、通信が必要ない時にはスリープモードにするなどの制御をすることで使用時間を延ばすことが必要である。また、通信するデータを適切にパケット化し、正しく通信できなかったパケットに対しては再送するような制御も行う必要がある。

他の課題としては、アンテナを改善することが挙げられる。今回はパッチアンテナを使用した。このアンテナは指向性をもっておらず、下からの電磁波も拾うためにマルチパスの影響を受け易い。そのため、人や車が近づくだけでサイクルスリップを生じていた。今後、安価な他の種類のアンテナを試す必要がある。

また、解析アルゴリズムを改善し、整数値バイアスの決定成功率を高める工夫をする必要がある。今回の研究では、決定成功率を示すところまでしか行えなかったが、今後、どのような場合に失敗するのか等を詳細に調べ、その対策を講じることで決定率の向上を図る必要がある。

さらに、地震時の社会基盤構造物の挙動を把握するには、10Hz程度までサンプリング周波数を高める必要がある。これは、GPS受信機のパフォーマンスを上げるか、もしくはMEMS加速度計などによる慣性航法とのハイブリッド型のものを開発する必要がある。

参考文献

- 1) Lynch, J.P.: 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) Xu, N., et al: A Wireless Sensor Network For Structural Monitoring, Proceedings of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys 2004). (Baltimore, November 2004)
- 3) 許 国豪, 井上純哉, 本多弘明, 小国健二: センサーネットワークの位置決めのための音響測距の実装と分散型アルゴリズムの提案, 応用力学論文集, Vol. 8, submitted
- 4) Shnayder, V., et al: Simulating the Power Consumption of Large-Scale Sensor Network Applications, Proceedings of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys 2004). (Baltimore, November 2004)
- 5) 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
- 6) 佐伯昌之, 堀宗朗, 井潤健二: 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, 応用力学論文集, Vol. 7, pp. 891-898, 2004
- 7) Hofmann, B. - Wellenhopf, H. Lichtenegger & J. Collins (2001), *GPS, Theory and Practice*, Springer-WienNewYork.
- 8) Lee, H.K., J. Wang, C. Rizos, B. Li, & W.P. Park, Effective cycle slip detection and identification for high accuracy integrated GPS/INS positioning, 6th Int. Symp. on Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning & Location Services, Melbourne, Australia, 22-25 July, 2003, CD-ROM proc., paper 43.

(2005年4月15日受付)