

稠密多点配置を考慮した GPS 相対測位手法の開発

Development of GPS relative positioning method taking dense sensor deployment into consideration

坂本尚葵*・佐伯昌之**・宮崎知洋***・小國健二****

Naoki YURIMOTO, Masayuki SAEKI, Tomohiro MIYAZAKI, and Kenji OGUNI

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

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

*** 非会員 慶應義塾大学 理工学部システムデザイン工学科 (〒223-8522 神奈川県横浜市港区日吉 3-14-1)

**** 正会員 Ph.D. 慶應義塾大学准教授 理工学部システムデザイン工学科 (〒223-8522 神奈川県横浜市港区日吉 3-14-1)

We have been developing a system for immediate damage estimation of urban area due to a large earthquake, called "GPS on Every Roof". In this system, a L1 GPS receiver is mounted on a wireless sensor node as a displacement sensor. The relative positioning algorithm with carrier phases is implemented in this system to achieve a few centimeters accuracy. Relative positioning can be carried out when a single CPU possesses GPS data of both reference and unknown nodes. Therefore wireless communication is required. To avoid numerous wireless communications, in this system, the sensor nodes share their GPS data locally and calculate relative position to each other. Only positioning result is transferred to the central server machine. This approach largely decreases the wireless communication cost. Each sensor node analyzes the relative position from several reference nodes and evaluates the reliability. The accuracy of relative positioning is improved by taking the reliability into consideration.

Key Words: wireless communication, GPS, relative positioning, dense sensor deployment

1. はじめに

首都圏には、港区や新宿区などのオフィス街が存在する一方、下町と呼ばれる古い低層の住宅が密集する地域も多く存在する。後者の地域では、古い木造建築が多く、巨大地震が首都圏を直撃した時には沢山の家屋が倒壊する可能性が考えられる¹⁾。このような被災時に、住宅密集地域の家屋倒壊とそれによる道路閉塞の様子を即時に把握することができれば、被害が大きい地区の特定や、その地区に行くためのルート選定などが行え、救命・消火活動を効率よく進めることができると考えられる。そのため、著者等は GPS 無線センサネットワークを用いた家屋倒壊推定システムの開発を進めている。そして、そのシステムを GPS on Every Roof と呼んでいる。

これまで著者らは GPS と無線センサネットワークの技術を結合した GPS 無線センサネットワークの開発を進めてきた²⁾。このシステムは、サーバと多数のセンサノードから構成されており、各センサノードに搭載された GPS 受信機により、センサノードの変位を計測するものである。動作としては、まず、サーバからの命令によりセンサノードは一定時間 GPS データを受信する。そして、GPS デー

タ受信終了後に、そのデータをサーバに転送し、サーバはそれらを干渉測位解析することによって、センサノードの相対位置を計測する。この相対位置の変化により、各センサノードの変位を計測する。本研究では、この GPS 無線センサネットワークを家屋倒壊推定システムに適用することを考える。ただし、これまでに開発されてきた GPS 無線センサネットワークを、そのまま家屋倒壊推定システムに適用することを考えると多くの技術的課題が存在する。

技術的課題の一つは、通信時間の大幅な削減である。著者らの従来のシステムでは、干渉測位解析はサーバで行っている。これは、干渉測位解析には倍精度の数値計算が可能な CPU と十分なメモリが必要になるため、センサノードを安価・低消費電力とするためには、サーバで解析させた方が有利であったからである。そのため、センサノードで受信した GPS データをサーバに集める必要があった。その一方で、無線モジュールとしては、低消費電力化のために特定小電力無線を使用し、また比較的通信距離の長い低周波数のモジュールを使用している。この場合、例えば、干渉測位解析に5分間のデータを使うとすると、サーバへの GPS データ転送に一つのセンサノードあたり約22秒か

かり、センサノードが250個存在すると仮定した場合、データの転送時間のみで約92分かかってしまうことになる。これでは被災時に道路閉塞の様子を即時に把握することはできないため、このデータ転送時間を大幅に削減する必要がある。そこで、本研究では、この技術的課題を克服するために、各センサノードに小型のCPUを搭載し、センサノードは近隣のセンサノードとのみGPSデータを共有し、お互いの相対位置を推定する方法を考える。これにより、通信負荷の大きいGPSデータの通信量を大幅に削減し、データ量の少ない解析結果(x,y,z)のみをサーバに伝送することとする。

別の技術的課題としては、各センサノードの測位精度の向上が存在する。GPSの干渉測位解析では、整数値バイアスさえ正しく推定することができれば、センサ間の相対位置を数センチメートルの精度で推定することが可能である。しかしながら、本システムではセンサノードを安価・低消費電力にするために、GPS受信機としては1周波GPS受信機に小型のパッチアンテナを接続して使用している。この場合、短時間のGPSデータでは、整数値バイアスを正しく求めることが難しくなる。そのため、本研究では、センサノードが極めて高密度に多点配置されていることを利用して、整数値バイアスの決定成功率を向上させることを試みることにする。

本論文では、GPS無線センサネットワークを家屋倒壊推定システムに適用することを前提に、システムを実装した。さらに、上述の技術的課題を解決し、実証試験を行った。以下に、その成果を紹介する。

2. 家屋倒壊推定システムのイメージ

家屋倒壊推定システムのイメージを図-1に示す。本システムは3段階の階層構造を形成している。上位には全体の制御を行う「サーバ」を配置する。中位にサーバからの指示を受け取り、各家庭に設置するセンサノードを制御するための「中継点」を配置し、約200m四方の範囲内にあるセンサノードを管理する。下位には対象となる地域の全ての家屋に安価な1周波GPS受信機と小型のパッチアンテナを搭載した「センサノード」を配置する。

地震直後には、サーバから中継点へ変位計測の命令を送信する。そして、中継点は各センサノードにGPSデータを受信するよう命令を送る。各センサノードはGPSデータの受信を開始し、ある一定時間データ取得を行ったのち、隣接するセンサノードとGPSデータを共有し、相対位置を推定する。そして、その相対位置情報を無線センサネットワークで自動的に収集し、中継点にて相対位置の情報をつなぎ合わせ、各センサノードの位置を特定する。その情報をさらに上位のサーバに転送し、サーバにてGIS上に各地点の変位をプロットする。災害直後の迅速な情報提供を目指すため、著者等はサーバが起動してからGIS上に変位マップを作成するまでの時間として、現時点では、30分を目標としている。

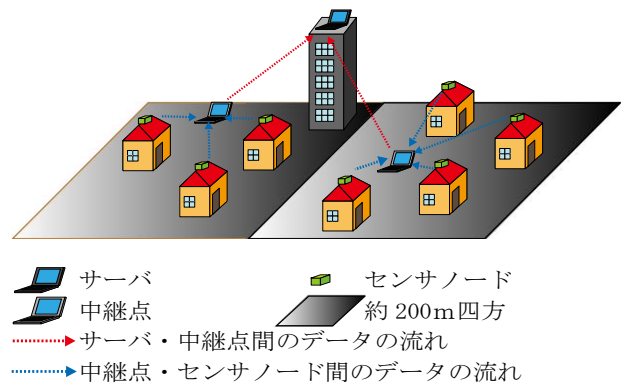


図-1 家屋倒壊推定システムのイメージ

3. GPS測位解析手法

3.1 家屋倒壊推定システムにおけるGPS測位解析手法

まず、本システムの運用状況から、測位解析手法に適用される種々の条件を明確にする。

本システムでは、平常時と地震直後にセンサノードの位置を同定する。そのような状況では、センサノードは静止していることから、本システムではセンサノードの位置同定に静的測位解析が適用される。ただし、通常の静的測位解析では十分に長いデータを取得して測位精度の向上を図るのに対して、本システムでは地震直後のセンサノードの相対位置をできるだけ早くに知る必要があることから、できるだけ短いデータ長(数分)で解析する必要がある。

ところで、地震直後に街規模で被災状況を把握しようとする目的では、センサノードの相対位置の精度は、数センチメートルで十分であり、ミリメートルの精度は要求されない。このような場合、目標精度を達成するための条件は、整数値バイアスを正しく決定することであると言える。そのため、本システムにおける測位解析は、短時間のデータで正しい整数値バイアスを決める問題であり、静的測位解析というよりもむしろ、RTK (Real Time Kinematic) の初期化時における整数値バイアスを決定する問題に近い。

別の特徴的な条件としては、センサノード間の距離が挙げられる。本システムでは、密集した家屋にセンサノードを設置するため、センサノード間の距離は非常に短い。無線センサネットワークは狭いエリアで局所的に構築されるため、参照点から未知点までの距離も長くても100~200m程度と、一般のGPS測量と比べて非常に短い状態にある。この条件のおかげで、静的測位解析においては、電離層遅延や対流圏遅延といった誤差要因を無視することができる。

本システムでは、上記の条件に特化した解析手法として、著者らが開発した直線近似法を用いている³⁾。以下に、その手法の概要を説明する。

3.2 直線近似アルゴリズムを用いたGPS測位解析手法

ある2つのセンサ間の相対位置を決める問題において、

2つのセンサが静止して、センサ間の距離が近い場合には、任意の時刻 t における搬送波位相の二重差 $\phi_{ij}^k(t)$ は、次式によりモデル化することができる。

$$\lambda\phi_{ij}^k(t) = \rho_{ij}^k(\mathbf{x}, t) + \lambda N_{ij}^k + e_{ij}^k(t) \quad (1)$$

ここに、 $*_{ij}^k$ は衛星 k と受信機 i, j を用いて計算される二重差の値を表している。 \mathbf{x} は受信機の三次元座標であり、以下のように定義した。

$$\mathbf{x} = (x, y, z)$$

また、 $\rho_{ij}^k(\mathbf{x}, t)$ は衛星と受信機間の距離の二重差、 λ は搬送波の波長、 N_{ij}^k は整数値バイアス、 $e_{ij}^k(t)$ はノイズである。受信機間の距離が短い場合、 $e_{ij}^k(t)$ は、ほぼランダムノイズとアンテナに起因するノイズの和として表すことができる。

\mathbf{x} を近似ベクトルと補正項の和 $\mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x}$ として式(1)に代入し、Taylor展開して2次以上の項を無視すれば、次式を得る。

$$U_{ij}^k(t) = \partial_x \rho_{ij}^k(\mathbf{x}_0, t) \Delta x + \partial_y \rho_{ij}^k(\mathbf{x}_0, t) \Delta y + \partial_z \rho_{ij}^k(\mathbf{x}_0, t) \Delta z + \lambda N_{ij}^k + e_{ij}^k(t) \quad (2)$$

ここに、 $U_{ij}^k(t)$ は修正された搬送波位相の二重差であり、次式により計算される。

$$U_{ij}^k(t) = \lambda\phi_{ij}^k(t) - \rho_{ij}^k(\mathbf{x}_0, t) \quad (3)$$

幾つかの衛星について式(2)を計算し、行列の形式にまとめると、次のような連立方程式を得る。

$$\mathbf{U}(t) = \mathbf{A}(t)\Delta\mathbf{x} + \mathbf{N} + \mathbf{e}(t) \quad (4)$$

ここで、式(4)中で未知であるものは、位置に関する補正項 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ を成分としてもつベクトル $\Delta\mathbf{x}$ および整数値バイアスの二重差 N_{ij}^k を成分にもつベクトル \mathbf{N} の2つである。

さて、 $U_{ij}^k(t)$ はデータ長が短い場合には、時間 t に関して直線に近似できることが分かっている。直線近似法では、 $U_{ij}^k(t)$ を直線に近似した上で、改めてデータ長の最初と最後のエポックに相当する値を近似直線から推定し、それらの値を観測値として用いる。線形化された観測方程式(2)は、結局のところ、幾つかの衛星に対して、データ長の最初と最後のエポックに関してのみ立てられる³⁾。

3.3 整数値バイアス決定手法

未知ベクトル $\Delta\mathbf{x}$ および \mathbf{N} は、式(4)に最小二乗法を適用することで、実数として求めることができる。この解はフロート解と呼ばれる。整数値バイアスの二重差 N_{ij}^k は整数値であるため、フロート解を基に整数値を推定する必要がある。この解はフィックス解と呼ばれている。フロート解を $\hat{\mathbf{N}}$ 、フィックス解を $\bar{\mathbf{N}}$ とすれば、フィックス解は次の目的関数を最小とする整数値ベクトルとして同定される。

$$J = (\hat{\mathbf{N}} - \bar{\mathbf{N}})^T \mathbf{Q}_N^{-1} (\hat{\mathbf{N}} - \bar{\mathbf{N}}) \rightarrow \min \quad (5)$$

ここに、 \mathbf{Q}_N は $\hat{\mathbf{N}}$ の推定誤差に関する分散共分散行列である。

さて、RTKにおける初期化の問題では、整数値バイアスを確定する際に、その解の信頼性を評価するためのテストが行われる。最も広く使用されているレシオテスト(ratio test)では、式(5)の最も小さい値 J_1 と2番目に小さい値 J_2 との比 J_2/J_1 が一般に3以上となるまでデータの取得と解析を続ける。これは、この比が小さい場合には、間違った整数値バイアスを同定してしまう場合が多いからである⁴⁾。

本論文中で提案しているシステムでは解析精度を上げるためにできるだけ多くの衛星からのデータを受信したセンサノードを参照点としたい。またそれに加え30分という時間的制約がある。これらの制約より、GPS観測・GPSデータの共有・GPS測位解析を同時にできず、上述のようなレシオテストの値が3未満の時はデータの取得と解析を繰り返し、レシオテストが3以上になると解析終了という動作をさせることができず、予め決まった長さのデータを受信し、解析しなければならぬ。そのため、衛星配置や混入するノイズによって解析が終了した際のレシオテストの値が3以上に大きい場合や、逆に、3より小さい場合が存在することになり、解の信頼性を担保できないという問題が存在する。この問題の扱いについては、第6節で論じることとする。

4. 中継局・センサノードの設計と実装

4.1 システムの設計

第1節で述べたように、これまでに開発してきたGPS無線センサネットワークをそのまま家屋倒壊推定システムに適用することは困難である。この節では一つ目の技術的課題である通信時間の大幅な削減について述べる。

(1) 従来のシステムでの所要時間

GPSを用いて数センチメートルの精度で変位を推定するためには、搬送波位相を観測データとする干渉測位解析を行う必要がある。干渉測位解析では、基準となる参照点と相対位置を求めたい未知点の両方のGPSデータを使用し、未知点の参照点からの相対位置を推定する。そのため、相対位置を推定するためには、参照点と未知点の両方のデータを持つことが前提となる。

ところで、これまで著者らが開発してきたシステムでは、時間的制約が弱く、むしろセンサノードが安価で低消費電力であることを第一目的としてきた。そのため、各センサノードには、マイクロコントローラを搭載し、必要最低限の通信制御のみが行えるように設計し、観測されたGPSデータはサーバに転送するようにしていた。また、無線通信モジュールも、比較的消費電力で、かつ通信範囲の広い特定小電力無線を採用している。ここで、これまで開発されてきたGPS無線センサネットワークを家屋倒壊推定

システムに適用した場合、どの程度の時間が必要かを考える。

センサノードとサーバ間のデータ通信には特定小電力無線を用いている。それを用いてデータを1パケット転送するためにかかる時間 $T(\text{msec})$ は、データシート⁵⁾によると以下の式によって計算される。

$$T = n \times 1.04 + 34 \quad (6)$$

ここで n はパケットに含まれるデータ数(byte)を表している。

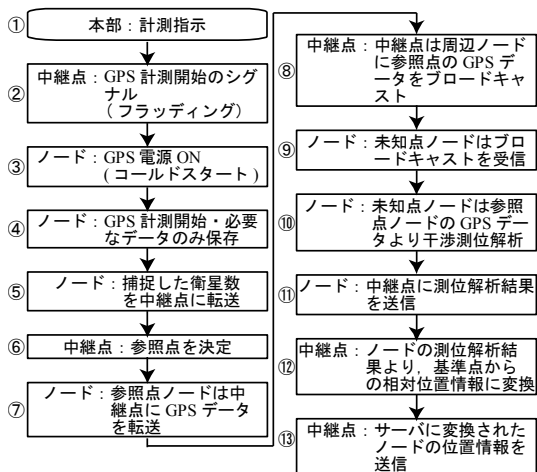
また、著者らが開発しているシステムの GPS 干渉測位解析に使用しているデータは毎秒 GPS 電波の搬送波位相をサンプリングしたものである。GPS データ1エポックのデータ量は266byteであるが、GPS 干渉測位解析に使用するデータのみを転送することによって、1エポックを38byteに圧縮できる⁶⁾。つまり、送信するパケット1つのデータ量は38byteである。一つの中継局が管理するセンサノード数は250個、GPS 観測時間は5分間とすると、全てのセンサノードからデータを回収し終えるまでにかかる秒数 T は、

$$T = \{(38 \times 1.04) + 34\} \times 300 \times 250 / 1000 = 5514(\text{sec}) \quad (7)$$

となり、全てのセンサノードからデータを集めるために約92分かかってしまうことが分かる。これでは被災直後に迅速に被災状況を把握することは困難である。

(2) GPS on Every Roof でのシステム動作設計

上述の通り、従来の GPS 無線センサネットワークをそのまま家屋倒壊推定システムに適用することはできない。また、無線モジュールは、比較的通信距離が長く、かつ低消費電力であることが望まれるため、従来システムで使用しているものと同じ特定小電力無線を使用するメリットは大きい。そこで、著者らはデータ転送時間が長くなる原因である中継点での測位解析を諦め、ある基準点の GPS データをセンサノードに共有させ、GPS 測位解析を行わせる。そしてその解析結果のみを中継点に集約することを考



図—2 家屋倒壊推定システムの設計

える。こうすることで、通信負荷を劇的に減らし、より短時間で変位マップを取得できるようになる。このようなデータの削減手法は一般的な方法であり、文献7)の中でも同様のアプローチで通信データ量の削減を図っている。図—2に全体の動作フローを示す。

まずサーバのプログラムを起動すると、①サーバは中継点にシステム起動のシグナルを送信する。②受信した中継点は周辺ノードと通信を結び、周辺のセンサノードのIDを把握する。③④GPSデータを観測・保存させる。一定時間データを取り終えた後、⑤補足衛星数の多いものを参照点とするため、中継点は周辺のセンサノードに捕捉衛星数を転送させる。⑥捕捉衛星数が多いものを参照点と任命する。⑦⑧その後参照点に任命されたセンサノードのGPSデータを、中継点を経由してブロードキャストというデータ送信方法を用いて未知点で共有させる。⑩未知点にGPS測位解析を行わせる。⑪中継点に未知点のある参照点からの相対位置データを収集する。⑫参照点からの各ノードの相対位置を用いてある一つの基準点からの相対位置を決定する。⑬変換した基準点からの相対位置をサーバに転送し、サーバはそのデータをGIS上にマッピングする。

この動作をさせることによって、どの程度通信データ量を削減できたかを検証する。センサノード250個の時の図—2の各動作で行っているデータ通信量の合計と従来システムのデータ転送量の比較は表—1に示すとおりである。

表—1 従来システムと本システムの転送データ量

| | 新システム | 従来システム |
|--------------|-------|---------|
| 通信データ量(byte) | 42832 | 2850000 |

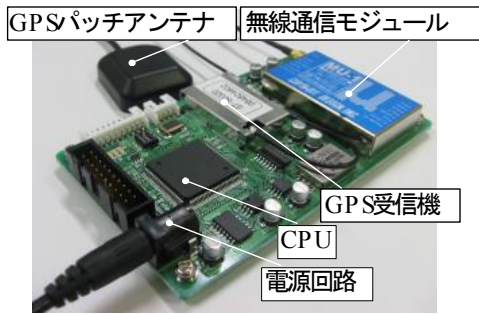
新システムの動作フローの場合、通信データ量は従来のシステムの1.5%程度となっている。よってこのシステム動作では、大幅な通信データ量削減が達成されたと言える。

4.2 センサノードの試作

上述の動作を行うことが可能なセンサノードを試作した。センサノードは、倍精度の計算が可能なCPU、通信を行う無線通信モジュール、GPSを受信するためのGPSパッチアンテナと受信機、電源回路、中継点とのネットワーク構成可能なソフトウェアから構成される。センサノードは家屋密集地域の全ての家屋に設置することを考えているため、安価な部品を採用する。

本試作機においてはセンサノードのCPUとしてRENASAS社のSH2シリーズからSH7144Fを採用している。SH7144Fの最高動作周波数は50MHzで、32bit×32bit、32bit×64bitの乗算器を備えている。内蔵ROMは256KB、内蔵RAMは8KBであり、外部とのシリアル通信ポートを4つ持っている。動作電圧は3.0V～3.6Vとなっている。本研究で開発したセンサノードの試作機では、上記のSH7144Fに2MBの外部メモリを増設している。

無線通信モジュールは、Circuit Design社のMU-1-1252を採用している。実効通信速度は約6800bpsと遅いものの、



図—3 センサノード外観

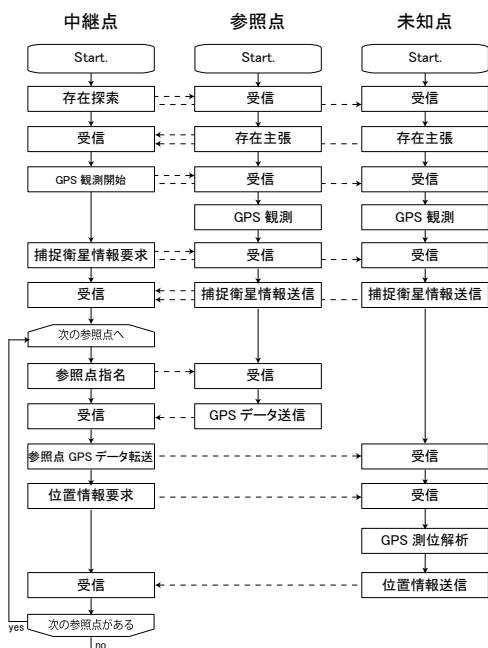
見通しで約 600m の通信距離をもつ特定小電力無線である。消費電力は送信時で 60mA, 受信時で 35mA となっている。

GPS 受信機は、古野電気社製の GT8032 を用いている。元々時刻同期用に開発された 1 周波 GPS 受信機であり、通常の NMEA フォーマットの他に、Furuno Binary 形式で搬送波位相のデータも出力できるようになっている。本システムでは、この受信機にカーナビ等で使われる小型のパッチアンテナを接続して使用している。

センサノードへの電源の供給は、平常時は一般家庭の商用電源から供給することを考えている。また、停電していても地震直後の数週間の余震に対応するための備え、1.2V のニッケル水素充電電池を直列に 3 本使用し、3.3V に降圧したバッテリーも用意した。バッテリーの放電に関する考慮も今後の研究課題としている。

また、試作機では SH2 を用いてネットワーク管理と GPS 解析どちらも行っているが、次世代版のセンサノードでは消費電力を抑える目的で ネットワーク管理を他の低消費電力の CPU で行う予定である。

4.4 システムの実装



図—4 家屋倒壊推定システムの動作フロー

本論文では、一つの中継点とその管轄内のセンサノードのソフトウェアを作成し、実装した。その動作フローを図—4 に示す。

5. 開発したシステムを用いた実証試験

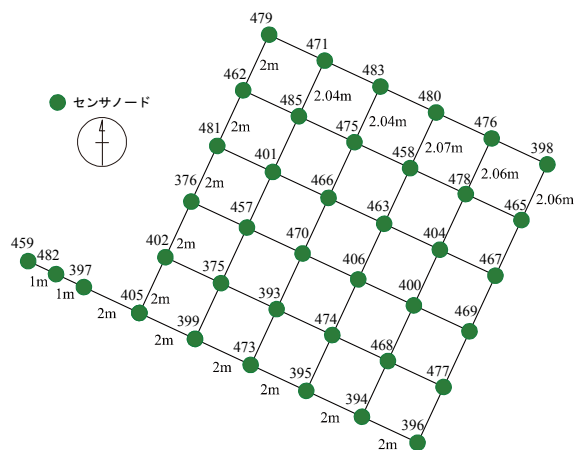
5.1 実験概要

開発した家屋倒壊推定システムの動作を確認するために屋外実験を行った。実験は慶應義塾大学矢上キャンパスグラウンドで行い、センサノードは 39 個用いた。このセンサノードの数は実稼働を考えているセンサノード数 250 個よりも大幅に少ない。GPS アンテナは地面に直置きにした。GPS 観測時間は 300 秒、GPS 受信機のコールドスタートは 60 秒とした。また、センサノードは図—5 のように配置した。センサノードの右下等書いている数字はそのセンサノードの番号を示している。

実験は、次のように 2 回に分けて行った。

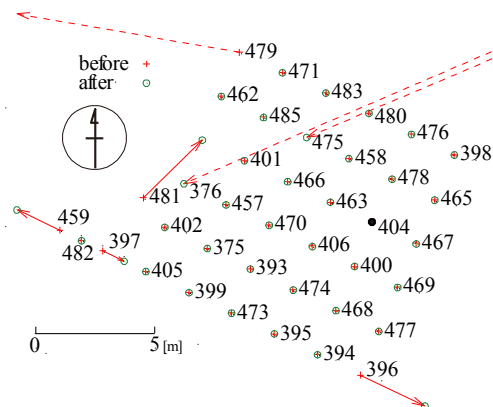
観測①：被災前を想定し、あらかじめ初期配置図を作るためにシステムを起動する。

観測②：被災後を想定し、いくつかのセンサノードを移動させ、もう一度システムを起動する。



図—5 センサノードの配置

5.2 実験結果



図—6 センサノード配置図と変位ベクトル

(1)動作実験結果

実験の結果としてセンサノード 404 を基準としたセンサノード配置図を作成し、それを図—6 に示す。+印が小節 5.1 の観測①, o印が小節 5.1 の観測②の結果を示している。矢印は各センサノードが観測①と②の解析結果により算出した変位ベクトルである。破線ベクトルはベクトルの一部が図—6 の外側にあることを示している。センサノードの右に書いてある番号がセンサノードの ID である。

まず小節 5.1 の観測①の結果をみる。観測①では、39 個のセンサノードのうち、36 個の位置を正しく求めることができた。また、センサノードの 376, 475, 481 は整数値バイアスを正しく推定できなかったため、計算した相対位置は正しく求められていなかった。

次に 5.2 節の観測②の結果を見る。被災後を想定したため、396, 397, 459, 479 の 4 つのセンサノードを移動し、実験した。である。その結果 4 つのセンサノード全てで与えた変位を検出することができた。全体をみると、39 個すべてのセンサノードの位置をほぼ正しく推定することができていると言える。

以上より、本研究で開発したシステムは、整数値バイアス決定の失敗はあるが、位置を算出するまで動作させることができたと言える。

(2)所要時間結果

第 1 章で述べた通り、本システムは被災後迅速に道路の閉塞状況を把握するシステムである。そのため、システム開始から 30 分以内に把握できるシステムの開発を目的としている。実験では 39 個のセンサノードを用いた。この実験条件での従来のシステムの通信手法を用いた場合と本論文で提案した通信手法を用いた場合の中継点起動から終了までの所要時間を比較する。

まず従来のシステムの場合を考える。一つの中継点でセンサノードを 39 個管理していた場合、それにかかる時間は以下のように計算できる。センサノードからサーバに 5 分間分のデータを転送する場合、式(6)より約 22 秒かかる。センサノード 39 個の場合は、約 860 秒、すなわち約 14 分かかる。これに GPS 観測時間と GPS 受信機のコールドスタート時間を足し合わせると、従来システム稼働時間は約 20 分となる。

次に本システムでの所要時間を計算する。一つの中継点でセンサノードを 39 個管理していた場合、それにかかる時間は以下のように計算できる。存在探索(図—2①②)に 1 分 4 秒、GPS 観測(図—2③)に 6 分、GPS データ処理(図—2④)に 2 分、捕捉衛星情報転送(図—2⑤)に 4 秒、参照点(図—2⑥⑦)の GPS データを中継点に転送に 40 秒、GPS データのブロードキャスト(図—2⑧⑨)に 40 秒、GPS 測位解析(図—2⑩)に 1 分、GPS 解析結果を中継点に送信(図—2⑪)で 4 秒、合計 11 分 32 秒となる。ただし、GPS 測位解析にかかる時間は著者らの経験上の値である。また、GPS データの転送に 40 秒かかっているが、これは式(7)を

用いた計算によって導いたのではなく、著者らの経験上の値である。

次に本システムでの実験時所要時間は表—2 の通りである。

表—2 データ収集所要時間(min)

| | |
|-------------|-------|
| 観測① | 12.52 |
| 観測② | 12.67 |
| 従来システム(計算値) | 20.34 |

上表より、いずれの場合も従来のシステムよりもシステムの所要時間を短くすることができた。また、実験において GPS データ共有の段階でパケット欠損が起り、それを補正したため、実験時所要時間が上述の計算による算出値よりも約 1 分長くなった。

今回の実験では、使用したセンサノードが 39 個であったため従来システムでも 30 分以内にデータをサーバに転送することができると考えられる。しかし、本システムは実稼働時にはセンサノード約 250 個を一つの中継点で管理することを想定しており、その場合式(7)よりデータ収集に約 90 分かかってしまう。センサノードが 250 個あると仮定し、本論文で提案したシステムを用いて本実験のパケット欠損率を利用して計算すると、約 19 分でデータをサーバに収集することができると考えられる。以上よりシステムの所要時間の削減を行うことができたと言える。

5.3 実験考察

本実験、特に観測①では、いくつかのセンサノードで正しいといえる位置を算出できていない。この原因として、GPS 測位解析の上で整数値バイアスを正しく推定できていないことがあげられる。

ここで、今回の実験で正しく位置を推定できなかったセンサノードの整数値バイアスの決定比であるレシオテストをみると、表—3 のようになっていた。‘変位’は前項の実験より観測できた変位ベクトルの長さを示している。本論文のシステムでは、各センサノードは参照点からの三次元ベクトルを得ることができる。しかし、今回の実験では著者らが xy 軸の方向を正しく知ることができなかったため、実験の間にセンサノードが移動した距離、すなわちベクトルの絶対値で評価する。変位は±0.05m 以下のとき、正しく位置決定できたと考えた。これは、観測①の GPS 観測時刻と観測②の GPS 観測時刻は十分離れており、2 つの GPS 観測時刻が離れ、それらの解が±0.05m の範囲内で一致した場合、その解は正解であるという著者らの経験に基づいている。また、‘レシオテスト’は左に観測①、右に観測②の際のレシオテストを記した。

表—3 をみると、観測①で相対位置の推定に大きく失敗したセンサノード(376, 475, 481)の観測①のレシオテストの値が低くなっていることが分かる。また、それらのセンサノード以外にセンサノード(396, 397, 459, 479)の変位が大きくなっているが前小節(1)で示したように著者らが動かしたセンサノードである。396, 397, 459 にそれぞれ

表—3 各センサノードの変位量とレシオテスト

| ID | 変位(m) | レシオテスト | |
|-----|---------|--------|-----|
| | | 観測① | 観測② |
| 475 | 243.819 | 1.3 | 6.1 |
| 376 | 86.212 | 1.0 | 4.9 |
| 479 | 37.991 | 6.3 | 7.1 |
| 481 | 3.950 | 1.4 | 3.3 |
| 396 | 2.992 | 4.4 | 3.3 |
| 459 | 1.999 | 5.3 | 8.1 |
| 397 | 0.998 | 3.4 | 7.2 |
| 405 | 0.048 | 1.4 | 2.5 |
| 467 | 0.032 | 2.0 | 1.6 |
| 395 | 0.023 | 4.2 | 1.2 |
| 466 | 0.018 | 4.0 | 6.5 |
| 474 | 0.018 | 4.7 | 2.3 |
| 400 | 0.017 | 3.9 | 1.9 |
| 468 | 0.015 | 5.6 | 2.2 |
| 469 | 0.013 | 2.7 | 4.1 |
| 406 | 0.013 | 2.4 | 2.4 |
| 480 | 0.012 | 4.8 | 4.2 |
| 483 | 0.012 | 7.0 | 7.0 |
| 473 | 0.011 | 3.8 | 3.5 |
| 482 | 0.011 | 3.5 | 6.2 |
| 402 | 0.011 | 4.1 | 3.0 |
| 458 | 0.010 | 6.8 | 3.8 |
| 477 | 0.010 | 5.5 | 1.5 |
| 470 | 0.010 | 5.3 | 2.3 |
| 463 | 0.010 | 6.2 | 1.9 |
| 401 | 0.009 | 4.6 | 3.9 |
| 471 | 0.009 | 6.4 | 3.4 |
| 476 | 0.009 | 3.2 | 7.5 |
| 485 | 0.009 | 6.1 | 3.3 |
| 375 | 0.007 | 5.7 | 5.2 |
| 462 | 0.007 | 5.6 | 4.4 |
| 398 | 0.007 | 4.2 | 4.7 |
| 394 | 0.006 | 4.0 | 1.0 |
| 465 | 0.006 | 2.8 | 2.6 |
| 393 | 0.006 | 1.9 | 1.6 |
| 399 | 0.005 | 4.0 | 2.6 |
| 478 | 0.005 | 2.5 | 2.0 |
| 457 | 0.003 | 5.6 | 4.8 |

に与えた変位は、3m, 1m, 2m である。479 は 396 から 50m 遠方に設置した。観測②の結果より距離を計算したところ、約 2cm の誤差で変位を検出できており、家屋倒壊推定を行い得る十分な精度を持っていることが分かった。

6. 多点配置を活かした測位精度改善手法の検討

6.1 レシオテストの導入

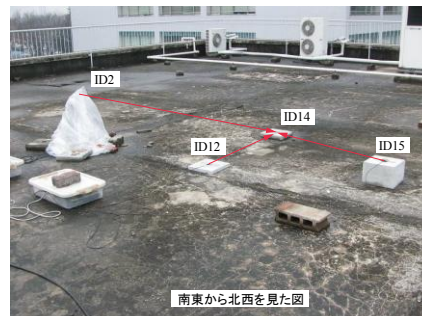
第5節で述べた通り、ある1つの中継局が管理する無線センサネットワークの部分についての実証試験が行われ、参照点を1つだけ選択し、そこからの各センサノードの相対位置を推定することに成功している。ただし、実験結果に示される通り、全てのセンサノードの相対位置を正しく推定できている訳ではない。システムの信頼性を向上させるためには、できるだけ多くのセンサノードで正しい相対位置を特定できるよう測位解析アルゴリズムを改善する必要がある。第2.2小節にも述べた通り、より信頼性の高い解を得るためには、正しい整数値バイアスを同定する必要がある。通常の市販されているGPS受信機であれば、例えばレシオテストの値が閾値を超えるまでデータを取

得し、解析を続ける。しかしながら、本システムの特性上、ある決まったデータ長で解析を行わざるをえない。そこで、ここでは空間的に密に配置されたセンサノードの特徴を活かして、整数値バイアスの決定精度を改善する手法を提案する。

6.2 アンテナ設置手法とレシオテストの値の関係

GPS測位解析において、レシオテストが3より大きい時、その解析で推定された整数値バイアスの信頼性が高く、またレシオテストが小さい時、その時推定された整数値バイアスの信頼性は低い⁴⁾。また、参照点と未知点のアンテナ設置状況が異なる時、それらのデータを解析すると整数値バイアスを正しく推定できず、測位精度が低くなること分かっている⁶⁾。そこで、レシオテストの値が大きい解を信頼したとき、正しい相対位置を得ることができるのではないかと考えた。

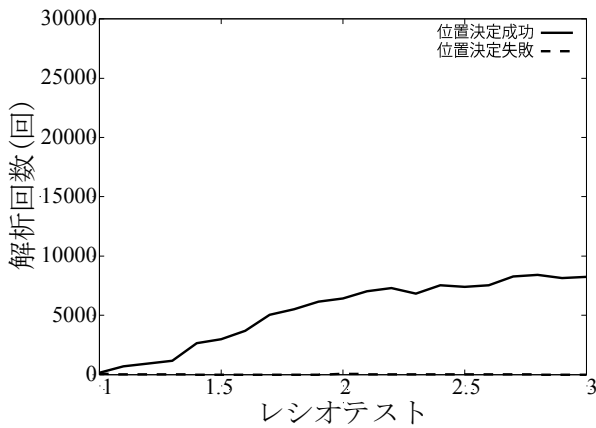
以上の仮定を検証するため、次のような実験を行った。センサノードを4つ用意し、ID2, ID12, ID14, ID15とした。ID14を未知点とし、そのGPSアンテナはモルタル板上に直に設置した。その他の点を参照点とし、ID2のGPSアンテナは三脚上に反射板と電波吸収材を使用して設置した。ID12のGPSアンテナは未知点であるID14と同様にモルタル板上に設置し、ID15のGPSアンテナはID14とは高さを変え、反射板と電波吸収材を用いてモルタル板上に設置した。図—7にその様子を示す。



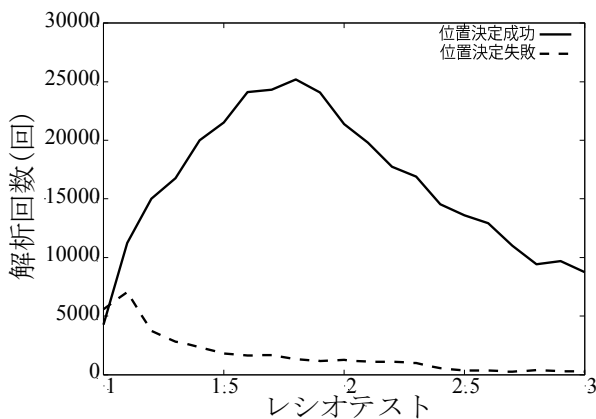
図—7 各アンテナの様子と参照点から未知点へのベクトル

これらの機材を用い、センサノードで5日間GPSの観測を行った。1回の解析に使用するデータ長を240秒とし、この実験によって得られたデータを観測開始時から1秒ずつずらして432362回GPS干渉測位解析を行った。また解析時の整数値バイアスの決定成功率を判断するためにレシオテストの値も算出した。図—8と図—9に未知点と参照点でアンテナ設置方法が同一の結果と、異なる結果を示す。整数値バイアスの決定成功失敗の判断は、正しい相対位置と考えられる位置から±0.05(m)以内の場合を正解としている。

図—8と図—9を比較すると、図—8のグラフの全データ量が少ないが、全データが432362個存在し、そのうちの74%がレシオテストの値3以上となっているため図—8のグラフ上にはプロットされていない。グラフの横軸の



図—8 参照点・未知点のアンテナ設置手法が同一である時のレシオテストの分布



図—9 参照点・未知点のアンテナ設置状況が同一でない時のレシオテストの分布

上限が3となっている理由は、本実験の解析アルゴリズムの中ではレシオテストの値が3を超えるとその解は信頼できずとして、3.1にするようになっている。そのためグラフの横軸の上限を3とした。

まず、図—8に注目する。図—8は参照点をID12、未知点をID14として解析した時のレシオテストの分布である。上述のように、全体の74%の解析でレシオテストの値が3を超えている。これはアンテナ設置状況が同じ、もしくは似ているときに見られた。今回の実験では、参照点と未知点の組み合わせにID2を含まないときに同様の分布が見られた。しかし、図—9をみると、レシオテストの値が3より低くなっている。図—9は参照点をID2とし、未知点をID14とした時のレシオテストの分布である。今回の実験では、ID2を含む時に同様の分布が見られた。

原因として、GPS干渉測位解析では、解析の中で参照点と未知点の二重差をとっていることがあげられる。参照点と未知点の距離が近い場合、二重差を取ることで、参照点と未知点の搬送波位相データから電離層・対流圏・受信機側時計誤差を取り除くことができる。しかし、この解析手法は参照点と未知点のマルチパスノイズが似ているときに限られる。ID2とID14のように参照点と未知点でアンテナ設置方法が異なる場合には、マルチパスノイズ

が異なってしまい、二重差をとることによりノイズを削減することができない。このような時、整数値バイアスを誤って推定することが多く、また整数値バイアスの決定比であるレシオテストの値が悪くなる。レシオテストの値を判断指標として用いることにより、同じようなアンテナ設置状況の参照点を判別できる可能性が高い事がわかる。

6.3 多点配置を考慮した整数値バイアスの決定成功率改善手法

本システムは、非常に高密度多点に計測点が展開されることが大きな特徴である。つまり、あるセンサノードの無線通信可能範囲内には、多数のセンサノードが存在している。この特徴を利用し、GPS干渉測位解析の参照点を、一つの中継点の管理する範囲内に複数設定することを考える。

引き続き図—7の実験で、1つの未知点(ID14)に複数の参照点(ID2, 12, 15)を設定することを考える。それぞれのベクトルについて別々にGPS相対測位解析を行うと、表—4の左側ようになる。

表—4 ID14の各参照点からの位置決定成功率(%)

| | 参照点02 | 参照点12 | 参照点15 | 多点配置 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 未知点14 | 91.47 | 99.93 | 99.92 | 99.96 |

ここで、表—4より、ID14と同一のアンテナ設置状況のセンサノードはID12である。表—4のID12が参照点の場合をみると、他のアンテナ設置手法をしたセンサノードが参照点の場合より、位置決定成功率が高くなっている。また、参照点がID15の場合、高さが異なるものの同じモルタル板上に設置されている。モルタル板はGPS電波を通しにくいいため、マルチパスの影響が小さくなり、これもID12・ID14とほぼ同様のアンテナ設置手法とみなすことができる。そのためID12とほぼ同様の位置決定成功率を達成している。この結果はアンテナ設置手法が同一のものは正解決定率が高い³⁾、という結果と合致している。

また、第6.2小節よりレシオテストが大きくなるほど、同一のアンテナ設置手法である可能性が高くなることが分かる。

以上より、未知点の周辺に複数の参照点が存在しているとき、レシオテストの値を比較することによって、位置決定成功率を上げることができると考えられる。

そこで、参照点を複数として未知点ID14のGPS干渉測位解析を行った際に、レシオテストの値が一番大きいものを選ぶと、その位置決定成功率は表—4の右側のように上昇した。

7.まとめ

これまでに著者らが開発してきたGPS無線センサネットワークを家屋倒壊推定システムに適用し、そのシステムが動作可能なことを39点のセンサノードを用いて実証することができた。

家屋倒壊推定システムの特徴である高密度多点配置を生かし、レシオテストを用いることによって、未知点の相対位置特定の信頼性を上げることができた。

今後の課題としては、実際にレシオテストを用いた解析手法を家屋倒壊推定システムに実装し、センサノードの位置決定信頼性を向上することが可能かを実証することである。

また、本論文では参照点を複数個設定することを提案しているが、具体的な参照点の数までは言及できていない。本論文の高密度多点配置を生かした相対位置決定手法を利用し、かつ、システムの要件である30分以内という条件を満たせる最適な参照点の設定数を見つけるべきである。

謝辞：本研究は、総務省消防庁消防科学技術研究推進制度による助成（平成20年度～平成22年度）を受けて行ったものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 片山恒雄：東京大地震は必ず起きる，文藝春秋，2002
- 2) 井上忠治，池田尚秋，佐伯昌之，志波由紀夫，畑明仁，佐藤貢一；GPS測位解析におけるデータ欠損率と精度の関係について，応用力学論文集，Vol.11，pp.975-982，2008
- 3) 佐伯昌之，金子昌平，井上忠治；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，応用力学論文集，Vol.10，pp.639-648，2007
- 4) Hofmann,B.-Wellenhof,H.Lichtenegger & J.Collins:GPS,Theory and Practice,SpringerWien-NewYork,2001.
- 5) http://www.circuitdesign.jp/jp/products/manual/MU_1_1200.pdf
- 6) 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，応用力学論文集，Vol9，pp.709-716，2006
- 7) 長山智則，Spencer, Jr., B. F., 藤野陽三：スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア開発，土木学会論文集，65(2)pp.523-535,2009

(2010年3月9日 受付)