応用力学論文集 Vol.13, pp.621-629 （2010 年 8 月） 土木学会

大地震発生時の戸別倒壊状況把握のための GPS 無線センサネットワークの通信システムの開発

Development of Communication System of Wireless Sensor Network Equipped with GPS for Post-Seismic Building-wise Damage Identification

宮崎知洋* ・小國健二** ・坎本尚葵*** ・佐伯昌之****
Tomohiro MIYAZAKI, Kenji OGUNI, Naoki YURIMOTO and Masayuki SAEKI

*学士（工） 慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科
**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 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1）
***学生員 学士（工） 東京理科大学 理工学部土木工学科
****正会員 博士（工） 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）

Development of communication system of wireless sensor network equipped with GPS for post-seismic building-wise damage identification is presented in this paper. Sensor node equipped with GPS antenna and receiver is installed on the top of the roof of each and every building. The position of this sensor node is measured before and after earthquake. This information is sent to a main server through a static, single-hop wireless sensor network. The final goal of this system is to i) identify the displacement of the roof of the house with a few centimeter accuracy and ii) collect the information of displacement of the roof of the houses in the area of 3km x 3km within 30minutes. This paper focuses on the wireless communication and the technical contents mainly discussed here are i) algorithm for automatic ID assgnment of sensor nodes and ii) data compression in the retrieval of lost packets. These functions are essential for enhancing the scalability of the whole system.

Key Words : *GPS, wireless sensor network, wireless communication protocol*

1. はじめに

首都直下地震など，都市部を襲う大規模・広域地震災害が発生したとき，消防・警察・自治体などの限られたリソースを適切に配置して被害の拡大を防ぐことは重要な課題である．とりわけ，密集市街地においては，地震による家屋の倒壊とそれに伴う道路閉塞の状況の迅速な把握は的確な初動体制の発動のためには必要不可欠である．ところが，災害の規模が大きくなればなるほど，被害状況の把握の精度・スピードともに低くなっていく．さらに，基幹通信ネットワークが機能する可能性も低下する．

このような背景を鑑みると，基幹通信ネットワークに依存せず，かつ，多数の計測点での計測データを無線を介して集約できる無線センサネットワークによる被害状況の把握を目指すことは自然な流れである．特に，個々の家屋の屋根に GPS を搭載した無線センサノードを設置して，それらのノードからなるセンサネットワークを介して個々の家屋の屋根の変位情報を収集するという手法は，直接的であるが故に容易に思いつくアイデアである．しかし，GPS の測位精度と価格の関係から，この選択肢はほぼ自動的に棄却されてきた．また，現在市販されている無線センサネットワークの多くは省電力の制約を重視しており，センサノード間の無線通信の距離が（10m 程度と）短い[1)2)3)]．そのため，市販のセンサノードを用いて広いエリアをカバーするセンサネットワークを作るためには，状況に応じて無線通信の経路を組みかえながら通信を確保するアドホック・マルチホップ通信を行わなくてはならない．このような無線通信はデータ欠損が起こりやすく，これを処理するために再送要求や無線経路の組み換えなど，複雑かつ脆弱な通信アルゴリズムを用いる必要がある．広域地震災害発生時など，多くのセンサノードが損傷するような非常時においては，このような脆弱なセンサネットワークによる情報集約がうまく機能する可能性は低い．

これまでに著者らのグループは，社会基盤センシングのためのセンサネットワークについての研究[4)]を進めてきた．その中で，通信距離が長い無線通信ユニットを用いて，スタティック・シングルホップ・ブロードキャスト通信を基本としたロバストな無線通信システムを実現するためのハードウェア開発，ソフトウェア開発を行ってきた[5)]．また，佐伯が主体となって開発している GPS 測位解析アルゴリズムは，安価なハードウェアを用いつつ，高い測位精度・高い信頼性を確保できる手法である[6)7)8)]．

これらの要素技術の蓄積を背景に，著者らのグループは個々の家屋の屋根に GPS を搭載した無線センサノー

ドを設置して，それらのノードからなるセンサネットワークを介して個々の家屋の屋根の変位情報を収集するシステムを開発してきた．本論文では，このシステムのうち特に通信システムに焦点を絞り，システムの全体像，システムを構成する機能群のうち特に重要な機能，自動 ID 割り振り機能と欠損データの再送要求の際のデータ圧縮について詳述する．これらの機能は，システムのスケーラビリティ（ノード数が増加してもシステム全体がうまく機能する性質）を確保するために必要不可欠な機能である．

2. 戸別倒壊状況把握のための無線センサネットワークシステム

本研究で提案する戸別倒壊状況把握のための無線センサネットワークシステムは，GPS を搭載したセンサノードからなる無線センサネットワークを用いて，首都直下地震などの大規模広域地震災害発生直後に家屋倒壊や道路の閉塞状況についての情報を生成・集約することを目指したシステムである．また，集約した情報を GIS（地理情報システム）のレイヤーのひとつとして視覚的に表示できるようにし，災害発生直後の初動体制における意思決定をサポートする，信頼度の高い情報を提供することも目指したシステムである．

個々の建物の屋上に GPS を搭載した無線センサノードを設置し，地震発生前後に屋根の位置を計測，個々の建物の変位の情報をセンサ間の無線ネットワークを介して管理者のサーバに集約する．管理者のサーバ上の GIS に建物の変位情報を投影することにより，個々の家屋の倒壊状況の詳細とともに道路の閉塞状況も把握可能となる．

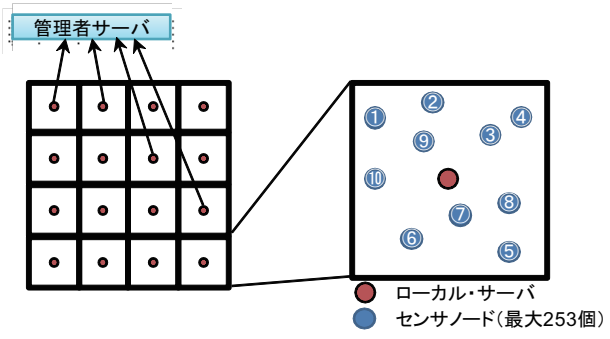
ひとつの管理者サーバがカバーするエリアの目標値は 800m 四方（この中に 1 個あたり最大 253 個のセンサノードからなるネットワークを制御するローカル・サーバが 16 個．また無線ユニットが用意できる ID は最大 254 個でありローカル・サーバが 1 個使うのでセンサノードは最大 253 個），空間分解能の目標値は各戸の倒壊状況（倒壊したか否かのバイナリー判定のみならず，倒壊した方向，倒壊建物の瓦礫の到達位置までの詳細な情報）と，倒壊建物の瓦礫による道路（細い路地まで）の閉塞状況の把握であり，ひとつの管理者サーバへのデータ集約・情報生成の所要時間の目標値は 20 分である．このシステムを複数並列配置することにより東京 23 区などの広いエリアをカバーする，階層型のセンサネットワークシステムである（**図–1**）．

2.1 システムの動作概要

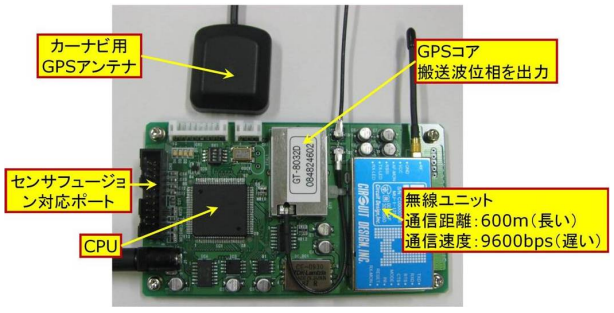
戸別倒壊状況把握システムは，以下のように動作する．

1. **図–2** に示す，GPS，無線ユニット，CPU を搭載したセンサノードを個々の建物の屋上に設置し (**図–3**(a))，GPS 測位を開始する．それぞれのセンサノードは，GPS レシーバーで観測された GPS 衛星電波の搬送波位相の情報を用いて，参照点からの相対位置を決定する干渉測位解析を基板上の CPU で行い，計算の結果得られた相対位置のみをローカル・サーバに集約する．
2. 大地震発生後，再び GPS 測位を開始する．
3. 大地震発生後の測位データを最適の無線伝送経路でローカル・サーバに集約する．集約された測位データと地震発生前の測位データの差を取り，個々の建物の屋根の変位 (GPS アンテナの変位) を求める（**図–3**(b)）．
4. 個々の建物の屋根の変位を GIS(地理情報システム) 上に表示し，倒壊状況の詳細 (**図–3**(c))，あるいは倒壊状況から道路閉塞の状況 (**図–3**(d)) の詳細が把握可能となる．

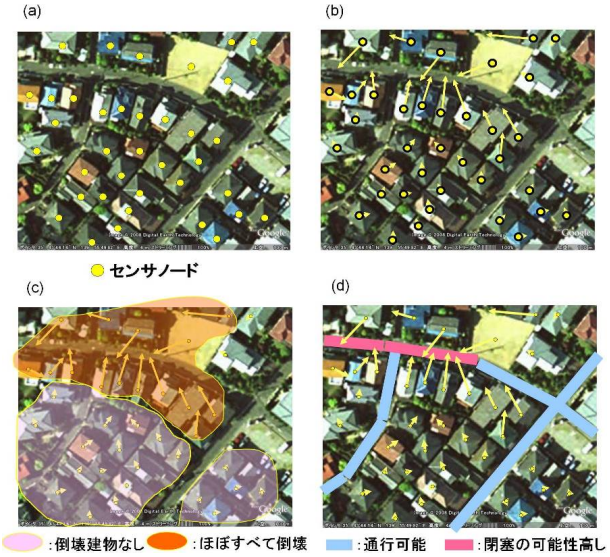
このシステムは，東京 23 区のような広いエリアについて，地震発生後 30 分以内での戸別倒壊情報の生成を目指している (すべての管理者サーバの情報を集める時間を 10 分とし、30 分という目標を設定している)．また，倒壊に際して，センサノード間の位置関係が変化し，電波環境が悪化して無線通信でのデータ欠損を起こすセンサノードが発生したり，センサノード自体が損傷を受け，システムの中のいくつかのセンサノードが動作しない，といったデータ欠損やノード欠損が生



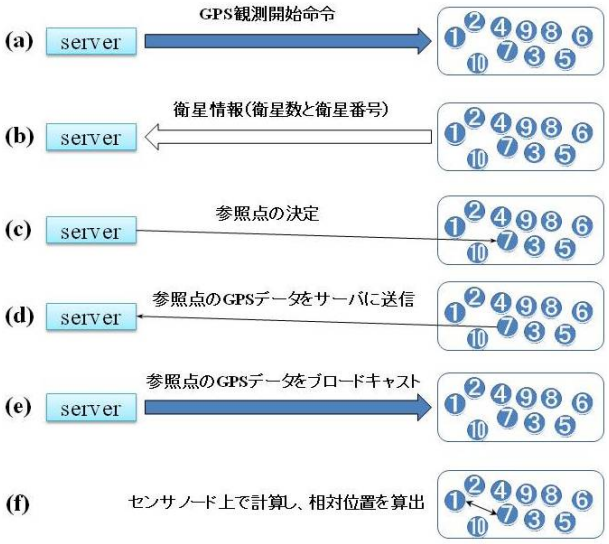
図–1 システムの階層



図–2 センサノード



図–3　システムの動作概要



図–4　位置測定の流れ

じる可能性が高い．したがって，このシステムは迅速な処理と欠損に対するロバスト性を兼ね備えたシステムでなくてはならない．

2.2　GPS 測位とデータ共有

戸別倒壊状況把握システムで GPS 測位に要求される測位精度は数 cm である．通常のカーナビなどで用いられている GPS の測位精度は数 m であり，個々の建物の倒壊状況を反映させるには，精度不足である[9]．一方，GPS 測量のように数 mm の精度を実現させるには，高価かつ精密な観測装置が必要となる．本研究では，佐伯による，静的・近接の仮定を導入した相対干渉測位アルゴリズム[6)7)8)]を**図–2** のセンサノードに搭載された CPU に実装し，数 cm，状況によっては数 mm 精度での相対測位解析をセンサノード上での解析（オンボード解析）で実現した．本論文では，測位解析アルゴリズムやセンサノード上の CPU への実装の詳細は割愛する．以下，通信システムに焦点を絞り，欠損が生じることを前提にしながら，ロバストに相対干渉測位を実現するためのデータ共有の方法について詳述する．

図–4 に GPS 相対干渉測位の流れを示す．全てのセンサノードは，ローカル・サーバからの命令によって制御される．また，**図–2** に示す通信距離の長い無線通信ユニットを用いることによって，ローカル・サーバとその支配下にある全てのセンサノードとの通信をワンホップで行うことができるスター型のネットワークトポロジーとなっている．

1. **図–4** (a) のようにローカル・サーバが GPS の観測を始めるよう命令をブロードキャストで一斉送信し，このローカル・サーバの支配下にある全てのセンサノードが GPS の観測を開始する．
2. 観測が終了すると，今度は**図–4** (b) のようにそれぞれのセンサノードが観測した衛星番号と衛星の数という二つの情報だけをローカル・サーバに集約する．衛星番号と衛星数が必要な理由は，相対位置の基準となるセンサノード (参照点) を決めるためである．また，干渉測位は参照点で観測された GPS 搬送波位相と各センサノードで観測された GPS 搬送波位相との差を使って参照点と各センサノードとの相対位置を計測しているので，参照点と他のセンサノードが同じ衛星から同時に送信された電波を受信していないと正しい相対位置の計測はできない．衛星は動き続けているため，違う時刻に送信された二つの電波の位相差をとっても意味はない．
3. ローカル・サーバは送られてきたすべてのセンサノードの衛星番号と衛星数を比較し，最も多くの衛星からの電波を受信したセンサノードを参照点に決定する (**図–4** (c))．
4. 参照点となったセンサノードは**図–4** (d) のようにローカル・サーバに GPS の観測データを圧縮して送信する．
5. 参照点の GPS 観測データを**図–4** (e) のようにローカル・サーバから支配下の全センサノードに向けてブロードキャストで一斉送信する．参照点以外のセンサノードは参照点の GPS の生データと自らの GPS の生データを使ってオンボードで測位解析をし参照点との相対位置を算出する (**図–4** (f))．そして，算出された相対位置の座標のみをローカル・サーバに送信する．

このような，ローカル・サーバから必要なデータと命令を支配下のセンサノードにブロードキャスト送信して，個々のセンサノードからローカル・サーバへの

通信は常に 1 対 1 で行う単純な通信プロトコルを採用することにより，本研究で提案するシステムの通信のロバスト性は確保されている．

また，GPS の観測データは，5 分間の衛星観測を行うと，各センサノードに 300epoch（1 秒 1epoch）のデータが蓄積される．ローカル・サーバの支配下に最大 253 個までセンサノードを展開することができるが，全てのセンサノードの GPS 観測データをローカル・サーバに集約して，ローカル・サーバ上で相対干渉測位解析を行うとすれば，ひとつのローカル・サーバが支配するローカル・ネットワーク内で膨大な量の GPS 観測データを送受信する必要がある．本研究で提案するシステムでは，1epoch の GPS 観測データを 1 回の無線通信で送信できるようにデータ圧縮されているが，通信回数は最大 75900 回となり，無線通信によるデータ欠損率がたとえ 0.1%であっても，75 個のパケットロスが生じる．また，1 回の通信のためのタイムスロットを 50 ミリ秒としても，GPS 観測データをローカル・サーバに送信するだけで 3795 秒（1 時間以上）の時間が必要である．これに対し，本研究で用いたデータ共有手法では，ローカル・サーバに送られる GPS 観測データは参照点の観測データのみであり，ローカル・サーバから全ての支配下センサノードに参照点の GPS 観測データのみをブロードキャスト送信すればよいので，データ流通量は劇的に抑制されている．このように基本的な方法でデータ流通量を減らしており，文献[10]などでも同様のアプローチをとられている．

以上，通信のロバスト性とスケーラビリティを向上させ，位置情報を得るまでの時間を短縮するために，本研究で提案するシステムではローカル・サーバからのブロードキャストを基本としたデータ共有と個々のセンサノード上でのオンボード測位解析を採用した．

2.3 センサノードのハードウェア

図–2 に示すセンサノードの主要な構成要素は，GPS レシーバ，無線通信ユニット，CPU である．GPS，無線ユニットともに CPU との有線シリアル通信によってコントロールされている．

ブロードキャストを基本としたデータ共有を実現するために，無線通信ユニットとして，サーキットデザイン社の MU - 1[11]を採用している．MU - 1 は比較的ノイズが少なくクリーンな電波環境が得られる 1252MHz 帯で通信をする特定小電力無線装置であり，送信出力は 10mW である．無線局設置の免許が不要でありながら，通信距離は 600 m と長い．この長い通信距離が，シングルホップでのロバストなデータ共有のカギとなっている．代表的な市販センサノード，MOTE[1)2)3)]などで使われる無線モジュールは主に数十 m の通信範囲のものが多い．このような短距離通信しか行えず，マルチホップ通信を前提とせざるを得ない無線通信モジュールは，広域に展開し，社会基盤全体をロバストに計測し続ける無線センサネットワークにはあまり適していない．

CPU にはルネサステクノロジ社の SH - 2 シリーズのうち，SH7144F を使用している．SH7144F は RISC(Reduced Instruction Set Computer) 方式の命令セットを持っており，基本命令は 1 命令 1 ステート (1 システムクロックサイクル) で動作するので，命令実行速度が速い．また内部 32 ビット構成となっており，データ処理能力が高い．しかしセンサネットワークの分野では SH - 2 のような高機能 CPU の使用は一般的にはあまり推奨されていない．その理由が電力消費である．センサネットワークは多数のデバイスを自然環境など比較的広範囲な環境に展開して使うというスタイルを想定して開発されてきたため，バッテリ駆動を前提としている．SH シリーズのような高機能 CPU は，電力の消費量も多いため，通常のセンサネットワークシステムではその使用がためらわれる[12)]．

本研究では，データ流通量を抑制し，かつ，位置情報を得るまでの時間を短縮するために，センサノード上での測位解析，オンボード測位解析が必要不可欠である．そこで，電力消費のデメリットをおして SH-2 を採用した．その理由は，SH-2 の倍精度演算機能である．佐伯の相対干渉測位解析には倍精度演算が必要であり[6)7)8)]，オンボード測位解析を無理なく行うための自然な選択肢として SH-2 を採用した．本研究で提案するシステムでは，建物の屋根の上にセンサノードを取り付けるので，平常時は家庭用 AC 電源からの電力供給が可能である．地震後に停電が発生した場合はバッテリに切り替えて駆動させる．現在までに行った実験では，単三電池 3 本で少なくとも 8 時間程度駆動し続けることが確認されているため，オンボード測位解析のために SH-2 を用いることは，センサネットワーク研究の中では特異な選択であるが，社会基盤としてのセンサネットワークのためには妥当な選択であると考えられる．

3. スケーラビリティとロバスト性の向上のための要素技術

本研究で提案する GPS 無線センサネットワークシステムは，広域展開されるシステムであり，設置すべきセンサノード数は膨大である．また，甚大な被害を及ぼす地震により多数のセンサノードが損傷しても，生き残ったセンサノードは継続的に動作して変位計測を行えるシステムでなくてはならない．センサネットワークを展開・設置する時の労力を軽減し，ネットワーク内のセンサノード数の増減に柔軟に対応できるようにシステムを作っておかないと，システムのスケーラビリティは確保されない．このための最も基本的な機能

が，個々のセンサノードへの自動的 ID 割り振り機能である．

また，無線通信においては，通信パケットが失われる「パケットロス」によるデータ欠損は必ず起こる問題である．これを適切に処理して欠損したデータを回収する機能は，システムのロバスト性向上のために必要不可欠である．

以上，自動 ID 割り振り機能とデータ欠損処理機能は，多数のセンサノードから構成される無線センサネットワークシステムのスケーラビリティとロバスト性を実用的なレベルにするための基本機能である．本研究で提案するシステムの構成とセンサノードのハードウェアの特徴を考慮して特別にカスタマイズした「自動 ID 割り振り機能」と「GPS 観測データ欠損処理機能」について以下に詳述する．

3.1 自動 ID 割り振り

無線センサネットワークにおいて，個々のセンサノードの ID は通信タイミングの制御，データの発信元の管理など，通信のほぼ全てのフェーズで利用される．センサノード数が少なく，かつネットワーク内のノード数の増減やノードの入れ替わりがない「小規模・固定・故障確率ゼロ」のシステムならば，個々のセンサノードに組み込むプログラムにノード ID を固定値として書き込み，これらのセンサノードを制御するローカル・サーバにもネットワークを構成するセンサノードの ID リストを記録しておけばよい．

しかし，本研究で提案するシステムは，大量のセンサノードからなる大規模センサネットワークシステムであること，センサノード数の増減が頻繁に起こっても動作し続けること，この二つの要求を満たさなくてはならない．大量のセンサノードと増減の自由という条件の下では，個々のセンサノードに ID だけを変更したプログラムを組み込むことは極めて非効率である．また，センサノードの取り換え，故障などの際に，ID リストを逐次手作業で更新したり，空き ID に新規センサノードの ID を割り当てるといった作業を行うことは，システムバグの潜在的な要因にもなる．これを回避し，システムのスケーラビリティを確保する自動 ID 割り振り機能は，大規模センサネットワークでは最も重要な機能の一つである．

自動 ID 割り振りのための基本情報として，センサノード一つ一つが異なる値を持ち区別できるものが必要である．通常は，個々のセンサノードに搭載されているハードウェアの機器 ID を用いる．本研究では，無線通信ユニットの MU-1 にある 8 桁の数字からなるシリアルナンバーをハードウェア固有 ID として用いる．

各センサノードは搭載されている MU-1 のシリアルナンバー（以下，SN と記述）をローカル・サーバに無線で報告する．ローカル・サーバは報告された SN に ID を順次割り振っていく．

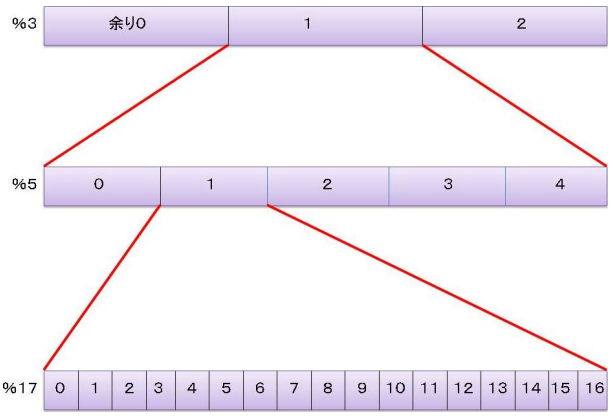
ここで問題になるのがセンサノード同士の送信タイミングの衝突である．各センサノードが確実に送信を成功するには，それぞれのセンサノードが約 70msec のタイムスロットを占有する必要がある．しかし，スケーラビリティ確保のために全てのセンサノードに同じプログラムが組み込まれており，初期状態では全てのセンサノードが同じ動作を行う．つまり，個々のセンサノードに異なったタイムスロットを割り当てることができない．そこで，全てのセンサノードへの組み込みプログラム内に，自分に搭載されている無線通信ユニットの SN を読みだす機能と，SN を送信するタイミングを自分の SN の関数として制御する機能を追加する．

本節では，効率の良い関数を作成し，多数の（ひとつのローカル・サーバあたり最大 253 個の）センサノードからなる無線センサネットワークでも短時間で確実に動作する自動 ID 割り振り機能の設計と実装について詳述する．SN 送信タイミング制御のための効率の良い関数の条件は，以下の 2 つである．

1. できる限りタイミングが重ならないようにすること．
2. 不必要な待ち時間を極力減らすこと．

例えば SN をそのまま使い，SN × 70msec をそのノードの送信タイミングとすると，条件 1 は満たすが条件 2 は満たさない．ひとつのローカル・サーバの下にある（最大 253 個の）センサノードの SN が 1 からの連番なら問題ないが，飛び飛びの数の時は，通信が行われないタイムスロットを大量に確保することになり，不必要な待ち時間が生じる．SN が 8 桁の範囲にまたがった場合，愚直に SN × 70msec で確保したタイムスロットの総和は，約 81 日となる．つまり，どのような場合でも確実に通信タイミングの衝突を回避して条件 1 を満たす，安全側のタイムスロット設計では，上記のような膨大な待ち時間が必要となる．

そこで，タイミングが多少重なることを許容しつつ，8 桁にまたがる数字の範囲を狭めて不必要な待ち時間



図–5 段階的素数フィルター

を減らす関数として，SN の剰余を用いたフィルターを提案する．

剰余を利用すると，割る数によって数の幅を制御することができる．例えば 10 で割った場合，余りは 0〜9 となり SN を 10 種類の数字で表すことができ，これを余り 0 から順番に 70msec の SN 送信タイムスロットに割り当てる．上記の条件 1 を満たしつつ適度にタイミングをばらけさせるため，素数の剰余を使用する．特に，**図–5** のような素数の剰余 (**図–5** の%とは剰余のことである．つまり%3 は 3 で除したときの余りを表している．) での分類を段階的に行うフィルターにより，SN 送信タイムスロットを制御する．素数の剰余で分類された数をさらに異なる素数の剰余で分類することにより，SN を偏りなく均等にばらけさせることができる．

この，段階的素数フィルタの設計において重要な設計パラメターは，タイムスロットの総数である．割る数が小さい，つまり，タイムスロットの総数が少なければ，必然的に同じタイムスロットに入る SN の数が増える．一方，割る数が大きい，つまりタイムスロットの総数が多いと全ノードが送信終了するまで不必要に時間がかかってしまう．(その極端な例が SN を愚直に割り当てた場合の約 81 日である．)

図–5 では 3，5，17 という素数の組み合わせを使い，3 × 5 × 17 = 255 個のタイムスロットを用意している．ひとつのローカル・サーバの配下に展開できるセンサノードの最大数 253 個に対して，不必要なタイムスロットは作成しないというポリシーで決定したタイムスロット総数である．このタイムスロットのセットに 8 桁にわたる SN を割り当てると，フィルターの全ての段階で SN の剰余が同じになり，同じタイムスロットを割り当てられる SN が多く発生し，これらの SN は送信できない．

これを解消するためにフィルタの段数を増す方法を考える．例えば**図–5** のように 255 個の箱に分類した場合の合計の送信時間は 255 × 70msec = 17.85 秒であるが，3，5，17 の素数のかわりに 2 と 7 を追加した 2，3，5，7，17 の素数を使うと 255 × 2 × 7 × 70msec = 249.9 秒となる．同じタイムスロットに入る可能性がある SN の集合のサイズが 1/14 になる代償として，総時間が 14 倍になっており，愚直に SN を並べることと同様の効果しか得られない．段数の増加は良い方法ではない．

そこで，所要時間の増加を抑制しつつタイミングの重なりを崩すため，3，5，17 を使った素数フィルターで一度送信し，タイミングが重なり送信できなかったノードだけを別の素数の組み合わせ (例えば 2，7，19) を使った素数フィルターにかけ送信するという方法を提案する．このようにすると 1 度目で重なったノードは 2 度目の素数フィルターで全く異なる送信タイミングとなる上に，1 度目の素数フィルターの送信時間は 17.85 秒，2 度目の素数フィルターの送信時間は 2 × 7 × 19 × 70msec = 18.62 秒となり合計 36.47 秒と，総所要時間を抑制できる．フィルターの種となる異なる素数のセットを複数組作り，そして順番にそのフィルターを使い送信していくことにより，出来る限り待ち時間を減らしタイミングの重なりを段階的に解消していくようになる．現段階では (3,5,17),(2,7,19),(13,23) の 3 セット作り 7 桁までの数字なら 3 つのフィルターすべてで重なる数字は存在しない．(8 桁の SN に対しても，11 のみで構成される 1 段のフィルタを加えるだけで，4 つのフィルター全てで重なる SN は存在しなくなる．)

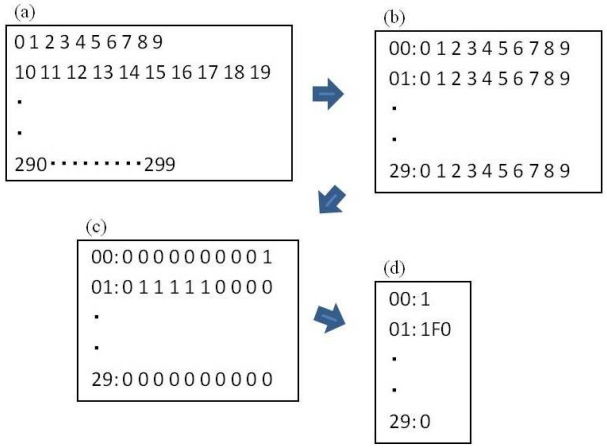
以上，愚直に SN を割り当てる方法を用いると約 81 日の時間が必要な自動 ID 割り振りの問題に対して，段階的素数フィルターによる送信タイムスロット割り当ての手法を提案した．この手法を用いると，自動 ID 割り振りのための SN 送信は，約 58 秒 (=(255+266+299+11) × 70msec) で終了する．

3.2 GPS データの欠損処理

1 秒の GPS 観測に対して 29 バイトのデータが 1 セットできる[13]．このセットを epoch という．つまり 5 分の観測で 300epoch できる．このデータを送信するのに 300 回の連続送信を行うことになる．無線による 300 回の連続送信で欠損が起きる可能性は高い．特に**図–4**(e) の参照点の GPS データをブロードキャストする際，パケットロスによるデータ欠損を起こす可能性は非常に高い．欠損が起きた状態のまま相対位置を割り出そうとすると，欠損が起きたノードの位置は誤差の大きい不確かな情報しか得られない．

本研究では，最も単純な方法で欠損を処理する．ローカル・サーバがノードに欠損の有無を照会し，ローカル・サーバは個別に欠損した epoch 番号に対応するデータパケットを再送するのみである．欠損した epoch 番号を報告する際に，想定される最悪の状態は，5 分間の GPS 観測データすべてが欠損した場合であり，この場合は，欠損パケットの ID として，0〜299 までの数字を並べた文字列を送信することになる．MU-1 での通信 1 回あたりの最大パケットサイズは 255 バイトなので，0〜299 の数字の羅列（文字総数 790 個）は，数回に分けて通信しなくてはならなくなる．欠損処理での通信回数が増え欠損処理で欠損を起こす，ほぼ無限のループに陥る．そこでどのような欠損状態であろうと一度の通信で欠損報告が行えるようにデータを圧縮する方法を開発した．送信データサイズと通信回数を減らすことにより，電力消費の抑制とシステムの信頼性の向上が見込まれる．

圧縮方法について述べる．MU-1 での通信は，文字列の送受信を基本としているため，0〜299 の数字の羅列を適切なフォーマットの文字列に圧縮することを目



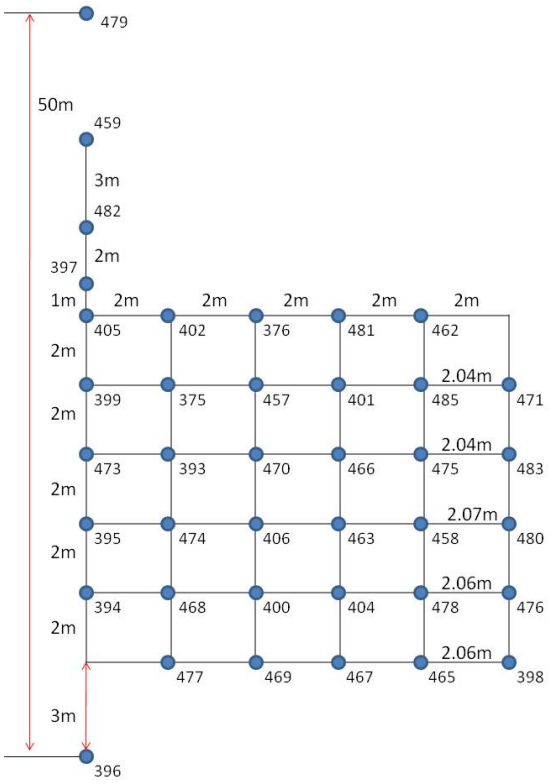
図–6 GPS 観測データ欠損パケット ID 情報の圧縮

指す．まず，図–6(a) のように数字を 10 個ずつ並べる．次に図–6(b) のように百の位と十の位を左に並べ，一の位を右に並べるように分ける．そして図–6(c) のように欠損した番号に対応する場所を 1 とし，欠損しなかった番号に関しては 0 を入れる．例えば図–6(c) だと epoch 番号 9,11,12,13,14,15 が欠損していることになる．最後に右にある 0 と 1 の羅列をビット列とみなし，図–6(d) のように 16 進数に変換する．図–6(d) の 29 の行のように右にある数字が 0 の場合，その位 (この図–6(d) の場合 290～299) に欠損がないことを示している．このようにすることで上二桁の数 2 文字と圧縮した 16 進数の 3 桁 (10 桁のビット列は 16 進数だと最大 3 桁) の数 3 文字，10 個の数字を合わせて 5 文字とすることができる．全 300epoch が欠損したとしても 5 × 30 = 150 文字となる．実際に送信する場合は，右の 16 進数が 0 の場合その部分は欠損がないので送信パケットから抜いていく．全てのパケットが欠損しても，欠損パケットの ID を最大 150 文字で送信することができる．

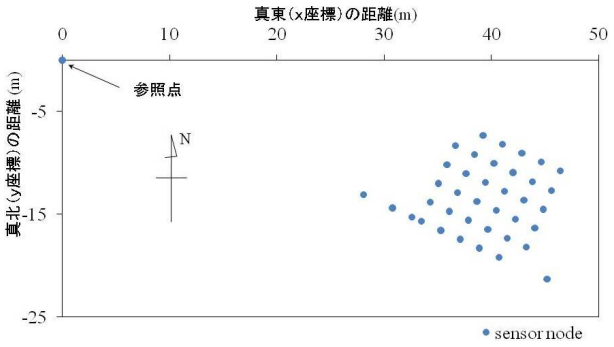
4. 実証実験

本研究で開発した GPS 無線センサネットワークシステムの一連の動作（自動 ID 割り振り →GPS 観測 → 参照点決定 → 参照点データの共有 → オンボード測位解析 → 測位解析結果のローカル・サーバへの集約）が想定通りに行われること，そのための所要時間も設計通りに抑制されていることを実証し，GPS 測位精度を確認するために，屋外で，位置を巻尺で計測しながらセンサノードをほぼ規則的に配置し，システムを稼働させる実験を行った．

図–7 のように，センサノードをほぼ 2 m間隔のグリッド上に 34 個，少し離れた場所に 4 個と 50 m離れた場所に 1 個配置した．図–7 のセンサノードの横に記載した 3 桁の整数は，個々のセンサノードの無線通信



図–7 実証実験におけるセンサノードの配置



図–8 実験の x と y の散布図

ユニットのシリアルナンバーである．

ID 割り振りは正常に機能し，39 個すべてのセンサノードに 1～39 の ID がそれぞれ割り振られた．ID 割り振りの所要時間も約 1 分と，設計通りであった．GPS 観測の結果，最も多くの衛星を補足した，ID=38 のノード（シリアルナンバー 479 のノード）が参照点となった．一番遠くで孤立しているノードである．そして参照点からローカル・サーバへの GPS 観測データ送信の際には，データ欠損は生じなかった．次の工程であるローカル・サーバからの参照点 GPS データのブロードキャストでは ID=1,7,23 が欠損を起こし，欠損パケット数はそれぞれ 1,1,40 個であった．40 個という量の欠損も 1 回で処理することができた．通信ネットワークに

関しては非常に良好な結果となった．そして測位解析の結果のｚ座標 (参照点を基準とした真上の距離) を無視し (ほぼ 0 のため)，ｘ座標 (参照点を基準とした真東の距離) とｙ座標 (参照点を基準とした真北の距離) だけをプロットし散布図にしたところ**図–8** のようになった．**図–8** と**図–7** を見比べると，全ノードがほとんどずれのない位置情報を算出していることがわかる．巻尺による位置計測の誤差を考慮しても，誤差 3cm 以内での測位に成功している．

システムの総所要時間は 12 分 40 秒となっていた．その内訳は，ID 割り振りに 1 分 3 秒，GPS 観測と GPS データ作成に 8 分，参照点からのデータ受信に 54 秒，GPS データのブロードキャストに 44 秒，欠損処理に 1 分 10 秒，位置情報を集めるのに 55 秒である．他の数秒のやり取りも含めた結果，システムの総時間が 12 分 40 秒となった．

5. まとめ

首都直下地震など，都市部を襲う大規模･広域地震災害が発生したときに，基幹通信ネットワークに依存せず，かつ，多数の計測点での計測データを無線を介して集約できる無線センサネットワークによる被害状況の把握を行うシステムとして，個々の家屋の屋根に GPS を搭載した無線センサノードを設置，それらのノードからなるセンサネットワークを介して個々の家屋の屋根の変位情報を収集するというシステムを提案した．

このシステムのうち特に通信システムに焦点を絞り，システムの全体像，システムを構成する機能群のうち特に重要な機能，自動 ID 割り振り機能と欠損データの再送要求の際のデータ圧縮について詳述した．

参照点の GPS 観測データのブロードキャスト共有とオンボード測位解析によるスケーラブルなシステムを構築し，39 個のセンサノードからなるシステムを屋外に展開して行った実証実験では，自動 ID 割り振りから測位解析結果の集約までを 12 分 40 秒で完了できることが示された．このシステム構成を用いれば，ローカル・サーバ一つに対して 253 個のセンサノードまで，ほぼ同じ時間内で自動 ID 割り振りから測位解析結果の集約までを完了できる．

一方，GPS 観測データをローカル・サーバに集め，ローカル・サーバ上で測位計算を行うシステムでは，1 個のセンサノードが GPS データをサーバに送るのに約 40 秒かかるので，全 39 個のノードが送信終了するのに少なくとも 26 分かかる。そして ID 割り振りに 1 分 3 秒，GPS 観測と GPS データ作成に 8 分を考慮に入れると、39 個のセンサノードからなるデータ集約型システムの総所要時間は約 35 分となる．この，データ集約型システムの所要時間はセンサノード数の増加に比例する．したがって，このようなシステムで本研究が目指す 30 分以内の測位データ集約を行うためのセンサノード数の上限は約 30 個となる．

参照点 GPS データ共有とオンボード測位解析による測位解析の並列化は，システムの高速化のみならず，データ流通量の抑制によるシステムのロバスト性向上にも寄与する．これが，高い電力消費というデメリットをおして倍精度演算が可能な CPU を使用してのオンボード測位解析を行うメリットである．このようなメリットを持つ，スケーラブルかつロバスト性の高いセンサネットワークは，社会基盤としての無線センサネットワークの目指すべき方向のひとつであると考えられる．

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．記して謝意を表する．

参考文献

1) J.M.Kahn, R.H.Katz and K.S.J.Pister: Mobile Networking for Smart Dust, Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Computing and Networking(MobiCom99),1999.
2) J.Hill, R.Szewcyzk, A.Woo, S.Hollar, D.Culler, K.S.J.Pister: System Architecture Directions for Networked Sensors, Proceedings of the Ninth International Conference on Architectual Support for Programming Languages and Operating Systems,2000.
3) D.Gay, P.Levis, R.Behren, M.Welsh, E.Brewer and D.Culler: The nesC Language: A Holistic Approach to Network Embedded Systems, Proceedings of the International Conference on Programming Language Design and Implementation 2003(PLDI 2003),2003.
4) 小国健二・佐伯昌之・井上純哉・菅野高弘・堀宗朗: 社会基盤センシングのための階層型センサネットワークの位置同定手法の開発, 土木学会論文集, 64, 1, 82-100, 2008.
5) 澤田茉伊・志波由紀夫・小国健二: 加速度計測のための無線センサネットワークの実用的な時刻同期手法の開発, 土木学会　地震工学論文集, 30, 30-37, 2009.
6) Saeki, M., Oguni, K., Inoue, J., and Hori, M.: Hierarchical Localization of Sensor Network for Infrastructure Monitoring, Journal of Infrastructure Systems, 14, 1, 15-26, 2008.
7) Saeki, M., Oguni, K. and Hori, M.: Development of affordable GPS displacement monitoring system, Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics, 1906-1913, 2008.
8) Saeki, M., J. Inoue, J., Khor, K.H., Kousaka, T., Honda, H., Oguni, K. and Hori, M.: Hierarchical Localization Algorithm Based on Inverse Delaunay Tessellation, Lecture Notes in Computer Science, 3868, 180-195, 2006.
9) Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, James Collins: Global Positioning System, 5th, rev.ed., Springer-Verlag Wien New York.
10) 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.
11) http://www.circuitdesign.jp/jp/
12) 安藤繁・田村陽介・戸辺義人・南正輝: センサネットワーク技術 - ユビキタス情報環境の構築に向けて -, 東京電機大学出版局, 2005.
13) 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, Vol. 9 , 2006.

(2010 年 3 月 9 日 受付)