

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

Data reduction method for L1 GPS receivers of wireless sensor network system

高坂朋寛*・金子昌平**・佐伯昌之***

Tomohiro KOSAKA, Shouhei KANEKO and Masayuki SAEKI

*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)

**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)

***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)

The objective of present research is to reduce amounts of GPS data transferred through wireless communication in multi-point displacement monitoring system that consists of low cost L1 GPS receivers and wireless communication devices. In this paper, we investigate the essentially required data for static displacement measurement and present the data reduction method. This method decreases the size of data up to 29 byte an epoch. This helps the system safely send data to the server. Then the multi-point displacement monitoring system will become more robust and reliable. We also develop the hardware of measurement unit and conduct some experiments. This result of analyzing data show that the relationship between success rates and data length highly depends on a settlement of patch antenna.

Key Words : L1 GPS, low cost, wireless, displacement monitoring

1. はじめに

本研究の目的は、安価な 1 周波 GPS 受信機と無線通信を用いた高密度多点変位計測において、その通信データ量を削減することである。これにより、無線通信による電力消費を低減させることができ、さらに、通信データ量の削減は通信によるデータ欠損率を低下させることから、変位計測システム全体としての信頼性を向上させることができると期待される。

本研究の背景を以下に述べる。建設時や建設後の構造物の沈下量や、地震直後における重要構造物の残留変位などの計測は重要である。そのため従来より、測量用の GPS を用いた変位計測が様々試みられている。実際に、GPS を用いた地盤変位計測のための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位の計測と精度検証といった研究が行われている³⁾。

ただし、これらで用いている測量用のアンテナは高価なため広範囲を高密度で計測するには費用が高く、また通信手段が有線通信であるためにケーブルの破断リスクがあり、設置に膨大な労力がかかるなどの問題がある。一方で、無線センサネットワーク技術の発展によりマイクロコントローラを搭載した小型の無線通信デバイスが開発され⁴⁾、これに安価な 1 周波 GPS 受信機を接続することで安価な計測ユニットが構成でき、高密度に多点で変位をモニタリングするシステムの開発が可能となってきた。著者等によるこれまでの開発に

より、既にプロトタイプが完成しており、その性能も示されている⁵⁾。ただし、未だ開発途上であり、残された研究課題も多い。

その様な課題の 1 つが、通信データ量の削減である。無線センサネットワークでは、通信距離が比較的短い無線装置 (ノード) を用い、ノード間で相互に通信しながらデータをサーバに転送する。このとき、伝送するデータ量が多いと通信が困難になり、データに欠損が生じる。また、データ量に比例して消費電力も大きくなることから、無線デバイスの低消費電力化にはデータ量削減は必要不可欠な課題となっている。特に、本研究が対象とする高密度多点変位計測システムでは、ノード数が数十～数百となることが想定されるため、通信回線の混乱を避けるためにはデータ量削減技術が重要となる。ちなみに、市販されている無線センサネットワークのデバイスの 1 つに mote があるが、この無線通信における 1 パケットのサイズはデフォルトの設定で 36 byte であり、その内データ長として使用できるのは 29 byte に設定されている⁶⁾。そこで、本研究においても、1 パケットのサイズを 29 byte 以内に抑えることを目標としている。

さて、一方で無線通信デバイスに接続する 1 周波 GPS 受信機の出力データであるが、現在我々が使用している GPS 受信機の場合では、1 回のサンプリング (1 エポックと呼ぶ) で出力されるデータのサイズはバイナリ形式で 266 byte に及ぶ。この場合、データ長 29 byte のパケットで情報を伝送するためには、10 パケットが必

要となる。さらに、この10パケットのうち1パケットでも欠損すると、このエポックは使用できなくなるのであるから大変に非効率である。そのため、出力されるデータから本当に必要な情報のみを抽出し、1エポックの情報量を29 byte以下にすることが重要となる。

そこで、本研究では、まずGPS受信機が出力するデータの中で、本当に必要な情報だけを厳選することを行う。ただし、必要な情報は解析アルゴリズムに依存するため、データ量を極限まで削るためには、解析アルゴリズムの修正は避けて通ることができない。そこで、第2章では、解析アルゴリズムを見直しながら、本当に必要な情報を厳選することを行う。次に、第3章においては、GPS受信機から出力されるデータを実際にどのようにして削減するかを、開発したハードウェアと併せて説明する。第4章では、実証試験として、実測データを解析することで本手法の適用性を検証する。また、変位を精度よく求めるのに必要な観測時間が短いほどデータが少なくなることから、観測時間と結果の信頼性の関係についても検討することとする。最後に、第5章で本研究で得られた知見をまとめ、今後の研究課題を明らかにする。

2. 測位解析アルゴリズムの修正と必要なデータの検討

この章では、測位解析に本当に必要なデータが何かを検討する。ただし、本研究で対象とするのは、数分間にGPS受信機が動かない(準静的な)状況においてノードの相対位置を求める問題とする。構造物の沈下量や残留変位の計測を考慮した場合では、この様な仮定は妥当であると思われる。

2.1 測位解析に必要なデータ

一般にGPS受信機は標準的な出力データであるNMEAや衛星航法データなど様々なデータを出力することができるが、本研究が対象とする用途、即ち受信機間が極めて近い静的測位の場合には、使用するデータはその一部に限られる。GPS受信機から出力されるデータのうち、測位解析に必要なデータとしてはRINEX(Receiver independent exchange format)形式に含まれるものが挙げられる。RINEXは測量用にも用いられる標準的なデータフォーマットで、その名前の通り受信機に依存しない。1周波GPS受信機を使用する場合、RINEXに含まれるデータの主なものとして以下のデータが挙げられる。

- a) 受信機のおおまかな座標値(12 byte)
- b) データを受信した時刻(4 byte)
- c) 受信した衛星の数(1 byte)
- d) 受信した衛星のID(1 byte/衛星)
- e) 搬送波位相(4 byte/衛星)

f) コード擬似距離(4 byte/衛星)

上述の各項目の括弧内の数値は、データをバイナリ形式で表したときに必要とするバイト数である。通常の測位解析を実行するには、少なくとも上述のデータが必要となる。これらのデータは各エポック毎に出力され、数分間に得られたデータを使用して測位解析される。ちなみに、1度に捕捉する衛星の数は最大で10~12程度であるので、1エポックに含まれるデータ量としては、107~125 byteになる。以下に、これらのデータの必要性を議論する。

a) は正確な受信機の位置を推定する際に必要となる。測位解析では、当然のことながら受信機の座標は未知であるが、与えられる観測方程式は未知点の座標について非線形であるため、摂動法を用いて方程式を線形化してから座標値を推定することになる。その際に受信機のおおまかな座標値を仮定する必要がある。この仮定値の精度は数mもあれば十分である。さて、多点変位計測システムでは隣合うノード間の距離は最長でも50m程度である。これは無線装置の通信距離が50m程度であるためである。もし仮に参照点のノードの位置を未知点のおおまかな座標値として仮定することができれば、a)の情報は削除することができる。この可否については、次節において検証する。

b) はc)~f)の情報を取得した時刻を表す。データを受信した時刻は、衛星の位置を計算するために必要であるため、削除することは不可能である。

c) は、あるエポックに受信した衛星の数である。これはd)の情報があれば後から数えることができるので、特に必要とはしない。

d) は受信した衛星のIDで、e)とf)の情報がどの衛星に対応するかを示すものであり、必ず必要となる。

e) は、衛星から送信された電波の搬送波が受信機で捕捉された瞬間の位相の値であり、衛星と受信機間の距離を数mm~cmの精度で計測したデータに相当する。高精度の測位を行う場合にはこの情報は必須である。ただし、この搬送波位相は、位相情報であるため $2\pi N$ のアンビギュイティを持つ。そのため、整数部分については本来意味を持たない。しかし、通常の測位解析では、この整数部分は大変に重要となっている。それは、 $2\pi N$ のアンビギュイティのために衛星と受信機間の距離は不明であるが、 N はサイクルスリップ¹を起さない限り一定であり続けるという性質をもち、通常はこの性質を利用して測位解析を行うからである。ただし、本研究が対象とする用途では、次節で述べる手法によりサイクルスリップを修正できるため、整数部分は必要としない。搬送波位相の少数部分は4 byteの内、丁度最後の1 byteに相当するので、この1 byteのみが

¹ サイクルスリップとは、整数値バイアス N の値が整数値だけジャンプする現象のことで、受信機と衛星を結ぶ直線距離上に障害物が通過した場合などに発生する。通常はサイクルスリップが起きないように様々な工夫をする。

必要となる。

f) は、受信機のおおまかな座標値を計算したり、受信機が衛星からの電波を捕捉した本当の時刻を計算するために必要となる。ただし、GPS 受信機の中にはデータを出力する前に電波の捕捉時刻を補正しているものがあり、その様な GPS 受信機を用いる場合にはコード擬似距離のデータを必ずしも必要としない。本研究で用いている 1 周波 GPS 受信機は、擬似距離のデータを必要としない受信機である。

さて、以上の議論により必要であるデータが明らかになったので、これを 29 byte 以下になるようにパッケージ化する。図-1 に 1 パッケージに相当するフォーマットの例を示す。パッケージにはパッケージの始まりを示す start flag を 2 byte 準備し、その後に捕捉衛星数、データを受信した時刻、そして各衛星からのデータである衛星 ID および搬送波位相を保存することにする。この例では、衛星の ID と搬送波位相の他にも、信号の SN 比の情報も含めている。この情報はデータに重みをつける際に使用することがある。さて、全体で 29 byte の制限のため、送信できる衛星データの数に 10 が限界となる。実際の測位解析においては衛星が 10 も捕捉されていれば問題なく位置を特定できる。パッケージの最後にはデータが正常に届いたかどうかを確認できるための check sum を着けている。以上で、丁度 29 byte となる。

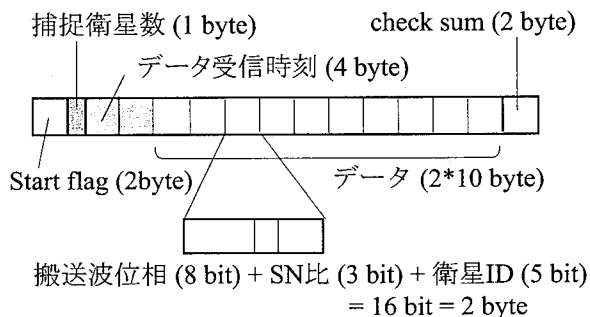


図-1 データ削減後のフォーマット例

2.2 サイクルスリップの修正

前小節で述べた通り、データ量削減のために本手法では搬送波位相の上位 3 バイトを削除している。これは搬送波位相の整数部分を無視していることに等しく、さらに言えば、これはエポック毎に全ての衛星データがサイクルスリップを起していることに等しい。そのため、サイクルスリップを修正しなければ、正確な位置を推定することができない。サイクルスリップの修正方法については、著者等による先の論文においても示している⁵⁾が、今回の様に、未知点のおおよその位置が分らず、かつ各エポックでサイクルスリップを起

している場合には、従来の手法をそのまま適用することは不可能である。そこで、ここではサイクルスリップの修正方法について議論する。

一般に、未知点の位置を推定するための方程式は次式で与えられる⁷⁾。

$$U_{ij}^{kl}(t) = X_{ij}^{kl}(t)\Delta x + Y_{ij}^{kl}(t)\Delta y + Z_{ij}^{kl}(t)\Delta z + N_{ij}^{kl} + e_{ij}^{kl}(t) \quad (1)$$

ここに、 i, j を受信機番号、 k, l を衛星番号として、 $U_{ij}^{kl}(t)$ は搬送波位相の二重差を受信機-衛星間の距離 (近似値) の二重差で補正した値であり、これを観測値として使用する。また、 $X_{ij}^{kl}(t), Y_{ij}^{kl}(t), Z_{ij}^{kl}(t)$ は観測方程式を線形化したときに出てくる係数で、衛星の位置と受信機の近似値のみに依存する関数であり、計算により既知となる。未知変数は受信機の位置の摂動である $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ および整数値バイアスの二重差 N_{ij}^{kl} の 4 つである。 $e_{ij}^{kl}(t)$ は二重差の計算によって除去できなかった誤差であり、ここでの誤差とは、主にマルチパスノイズと電氣的ノイズが含まれる。式 (1) で示す通り、測位解析では衛星の位置を直接求めるのではなく、ある仮定値からの摂動を求めることで真の位置を推定する。

さて、式 (1) を見ると、サイクルスリップが発生せず、かつ受信機の位置が正確に分かっている場合 ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$) には、 $e_{ij}^{kl}(t)$ が無視できると仮定すると、観測値 $U_{ij}^{kl}(t)$ はある一定の整数値 N_{ij}^{kl} に等しいことが分る。また $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ がゼロでない場合には、係数 $X_{ij}^{kl}(t), Y_{ij}^{kl}(t), Z_{ij}^{kl}(t)$ が短時間では直線に近似できるため、 $U_{ij}^{kl}(t)$ も直線に近似できる。式 (1) から明らかな様に、直線の傾きは $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ の大きさのみに依存する。実際には、 $U_{ij}^{kl}(t)$ の近似直線上に誤差 $e_{ij}^{kl}(t)$ が乗る。誤差の具体的な数値は、電氣的ノイズが約 2cm、マルチパスノイズが最大でも波長の四分の一 (約 5cm) 程度である。

図-2 に、実際に観測したデータを用いて式 (1) により計算した $U_{ij}^{kl}(t)$ の一例を示す。また、図-3 には図-2 で与えられた $U_{ij}^{kl}(t)$ を単純に $U_{ij}^{kl}(t) - U_{ij}^{kl}(t - \Delta t)$ を最小とするように $U_{ij}^{kl}(t)$ を整数値だけ修正して求めたものを示す。それぞれの図は、第 4 章で説明する実験において実際に観測されたデータをもとに計算したものであり、データ長は 180 秒としている。また、未知点の仮定値は、本来の座標値から (x, y, z) 方向にそれぞれ 50m ほど離れた地点に設定した。(未知点のおおまかな座標が分からないため参照点の位置を初期値とした場合を想定している。)

図-2 の点線は、サイクルスリップが無い場合の $U_{ij}^{kl}(t)$ である。搬送波位相の上位 3 バイトを削除して式 (1) により計算したものが実線である。図から、 $U_{ij}^{kl}(t)$ の値は整数値だけ上下にふらつくことが分る。次に、図-3 を見ると、図-2 と比較して、 $U_{ij}^{kl}(t)$ のふらつきがなく

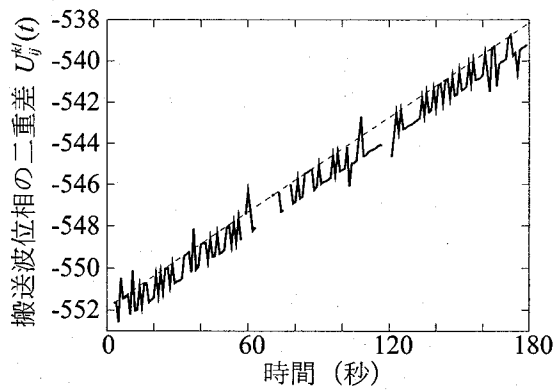


図-2 式 (1) より計算された $U_{ij}^{kl}(t)$

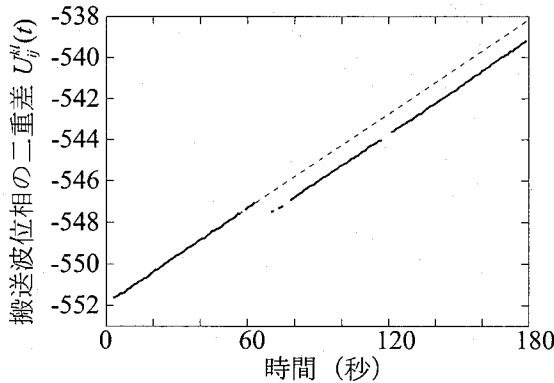


図-3 $U_{ij}^{kl}(t) - U_{ij}^{kl}(t - \Delta t)$ を最小とするように整数値だけ値を修正してサイクルスリップの修正を行った $U_{ij}^{kl}(t)$

なり、ほとんどのサイクルスリップが修正されているが、唯一 60 秒付近で不連続を起こしてしまっている。

次に、図-3 で示したデータを用いて式 (1) を解くことにする。これにより $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ を得るが、その結果は次の通りである。

$$(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (-45.7, -46.0, -48.9)$$

もともと未知点の仮定値を $(50.0, 50.0, 50.0)$ ほど真値よりずらしていたので、この結果をみると、サイクルスリップが完全には修正されていなくても数 m の精度で座標を推定できていることが分る。そこで、今度はこの値を用いて座標の仮定値を修正し、再度サイクルスリップの修正を試みる。未知点の座標値を更新して $U_{ij}^{kl}(t)$ を再計算し、先の論文で示した近似直線の推定によるサイクルスリップ修正法⁵⁾により修正した結果を図-4 に示す。図-4 より、適切にサイクルスリップが修正されている様子が見える。

ここで、図-2 と図-4 を比較すると、図-2 において点線で示したサイクルスリップがない場合の $U_{ij}^{kl}(t)$ の傾きは、適切にサイクルスリップが修正された図-4 の直線と比べると、非常に大きいことが分かる。このように直線の傾きが大きい場合には、データ欠損がある

と、サイクルスリップを適切に修正することが難しくなる。ちなみに、この解析で用いた観測データ中には 6 秒間のデータ欠損があった。

以上のサイクルスリップ修正法の流れを図-5 にまとめる。

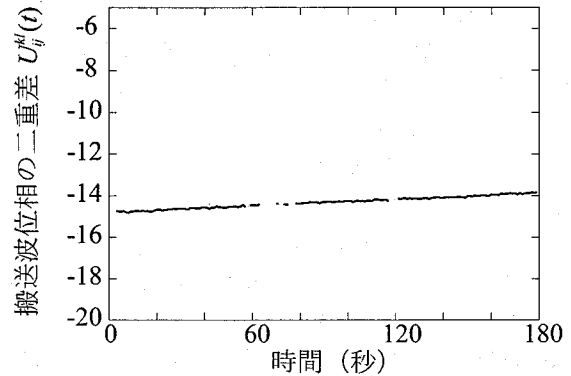


図-4 近似直線の推定により再度サイクルスリップの修正を行った $U_{ij}^{kl}(t)$

未知点の座標値を仮定 (参照点の座標)

↓
各衛星について $U_{ij}^{kl}(t)$ を計算

↓
if ($|U_{ij}^{kl}(t) - U_{ij}^{kl}(t - dt)| > 0.5$) {
 $U_{ij}^{kl}(t) = U_{ij}^{kl}(t - n)$
}

↓
 $n : |U_{ij}^{kl}(t) - U_{ij}^{kl}(t - dt)|$ を四捨五入

↓
未知点の座標値の計算

↓
各衛星について $U_{ij}^{kl}(t)$ を再計算

↓
近似直線の推定による
サイクルスリップの修正

図-5 サイクルスリップの修正方法

さて、以上の方法によりサイクルスリップを修正することができたが、この手法が常に使用できるとは限らない。それは「単純に $U_{ij}^{kl}(t) - U_{ij}^{kl}(t - \Delta t)$ を最小とするように $U_{ij}^{kl}(t)$ を整数値だけ修正する」ことにより、図-3 に示すように殆どのサイクルスリップを適切に修正できることを確かめておく必要がある。そこで、24 時間の連続観測データを用いて実際に $U_{ij}^{kl}(t)$ の傾きがどの程度であるかを確認した。まず、未知点の仮定値をその真値より $(1, 1, 1)$ [m] ほどずらして設定し、24 時間のデータより 180 秒間のデータを取り出して $U_{ij}^{kl}(t)$ を計算し、その傾きを求めた。これをデータを抜き出す時間を 1 秒づつずらしながら 86400 回行った。得られた傾きの頻度分布を図-6 に示す。頻度分布は、

$U_{ij}^{kl}(t)$ の傾きの値を 0.001 の幅で分割して求めた。図中の横軸は各区間の中央値を示す。この結果より、すべての場合について傾きは 0.004 より小さいことが分かった。ここで仮に未知点が参照点よりも各成分について

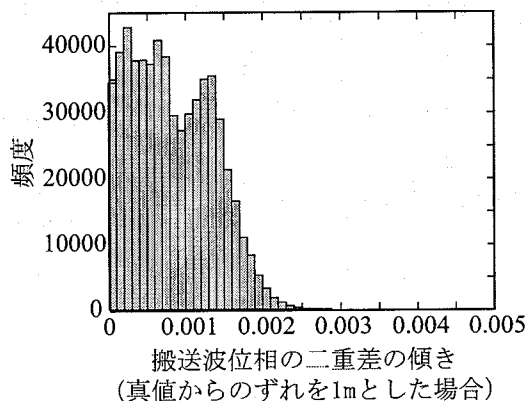


図-6 搬送波位相の二重差の傾きに関する頻度分布

50 m ほど離れた位置にあるとする。その場合、傾きの最大値は $0.004 \times 50 = 0.2$ となる。このときサンプリング間隔が 1 秒であるならば、連続する $U_{ij}^{kl}(t)$ の値の差は 0.2 となるので、 $|U_{ij}^{kl}(t) - U_{ij}^{kl}(t - \Delta t)| > 0.5$ であれば、その差が最小となる様に $U_{ij}^{kl}(t)$ を修正すれば確実にサイクルスリップを修正することができる。一方で、データ欠損によりデータ間隔が 3 秒以上になると、 $|U_{ij}^{kl}(t) - U_{ij}^{kl}(t - \Delta t)|$ の値が 0.6 となるため、適切にサイクルスリップを修正することが困難になる可能性がある。以上より、殆どのサイクルスリップを適切に修正するためには、数秒間のデータ欠損の発生回数を減らす必要があると言える。

3. 計測ユニットの高度化

この章では通信データ削減と消費電力削減を目的とした計測ユニットの高度化について述べる。本研究では、佐伯 (2005) で開発した計測ユニットに、マイクロチップ社製の PIC² を搭載することにより通信データを削減した。さらに PIC からフォト MOS リレー³ を制御することで低消費電力化を目指している。

本研究で開発した計測ユニットの概略図を図-7 に、また本研究で用いた PIC16F877 の基本的な性能を表-1 に示す。PIC16F877 には UART というシリアル通信機能を持った周辺回路モジュールが内蔵されている。この UART を用いることにより、GPS 受信機から無線装置である TCP/IP converter(以下 TIC) へのデータ転

送を行うことが可能となる。この一方向的なシリアル通信と同時に、PIC には TIC から PIC へコマンドを送信するための回線も接続する。これにより、server から無線通信を介して送信されたコマンドを、TIC を介して PIC で受信することができる。また、フォト MOS リレーへ信号を送信するための回線も接続する。

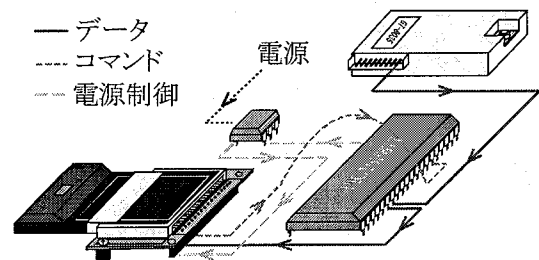


図-7 計測ユニットの概略図

表-1 PIC16F77 の主要機能

動作周波数	DC-20MHz
FLASH プログラムメモリ	8K
データメモリ (RAM)	368 バイト
EEPROM データメモリ	256
割り込み	14
シリアル通信	USART × 1

PIC とフォト MOS リレーを用いたデータ削減と電源管理について解説する。前述したように、計測ユニット内ではデータは GPS 受信機から PIC を経て TIC へシリアル通信で伝達される。PIC では、GPS 受信機から送信された観測データの内 1 エポックあたり 29 byte の必要なデータのみを保存し、1 パケットとしてメモリに保存する。その後、PIC のデータメモリに 10 パケット程度を保存する。この段階までは、消費電力削減のため TIC の電源は off となっている。PIC で 10 パケット程度のデータを保存した段階で、フォト MOS リレーに信号を送信して TIC の電源を on にし、PIC から TIC へのデータの転送を開始する。TIC にはバッファとして 1024 byte のメモリがあるので、データを受信した時点で Sever へアクセスし、通信が確立した段階でデータ送信を開始する。Server では全てのデータの受信を確認した時点で TIC へ向け受信完了のコマンドを送信する。コマンドは TIC から PIC へと伝達され、そのコマンドを合図に PIC からフォト MOS リレーに信号を送信して TIC の電源を off にする。以上のようにして無線 LAN の稼働時間を短縮し、無線通信による電力消費を大幅に削減することが期待される。現在、上記の設計理念に基づき新たな計測ユニットを開発中である。現時点では、PIC で 10 パケット程度のデータを保存し、TIC から Server へデータを送信するところまでが成功している。

² PIC とは演算処理機能やメモリをもった小型のワンチップマイコンである。

³ フォト MOS リレーは、電子回路の中でスイッチとして使用される IC であり、あるピンに電流をわずかに流すことで他のピンに大量の電流を流すことができる。

4. データ長と信頼性の関係

前章までは、1 エポックのデータをどのように削減するかを述べてきた。この章では、受信機の位置を特定するためには何エポックのデータが必要かを議論する。そのために、様々な環境を想定して受信実験を行い、そのデータを解析することでデータ長と位置推定における正決定率の関係を調べた。以下にこれを説明する。

4.1 受信実験方法

受信実験では4つの計測ユニットにパッチアンテナもしくは測量用のアンテナを接続して行った。パッチアンテナとは、カーナビ等に用いられている安価で小型なアンテナである。マルチパスノイズに大変弱く、また電波を受信する際の位相中心と幾何学的中心が一致していない。また、ここで測量用アンテナと呼んでいるものは、一般に搬送波位相を用いて測位解析を行う場合に用いられるアンテナであり、マルチパスノイズに大変強いが、高価である。

前章で説明した新しい受信装置は実験までに完成していないため、本実験では以前開発したものを使用して実験を行った。計測ユニットは単三電池で動作させ、1度の受信実験で2時間強の連続データを取得した。この受信実験を各実験について2回以上行っている。また、サンプリング周波数は1 Hz である。

実験では、マルチパスがどの程度結果に影響を与えるかを調べるため、アンテナの設置法を変えて次の3通りの実験を行った。

- 1) 理想的な環境下における実験。衛星からの電波の遮蔽物のないビルの屋上をサイトとした。アンテナは三脚の上に固定した。
- 2) アンテナ周辺の環境による影響を調べる実験。アンテナを設置する場所を参照点はコンクリートの上、未知点は芝生の上とした。
- 3) アンテナの高さによる影響を調べる実験。アンテナの高さによりマルチパスの影響が変化するため、アンテナの高さを変えて設置した。

図-8 に実験風景の一例として1) の実験の様子を示す。本実験でのアンテナ間の距離は4~5 m とした。また2章でも述べたが、アンテナ間の基線長は、社会基盤構造物への計測ユニットの実装と、無線通信の最大通信距離を考慮し、最長で約50m 程度である。

4.2 データ解析

データ解析では、受信した生データを図-?? に示したデータフォーマットに変換した後、本研究で開発した測位解析プログラムにより解析した。解析においては、まず受信した全データから解析に使用するデータ長（例えば5分）を切り出し、それを解析して位置を

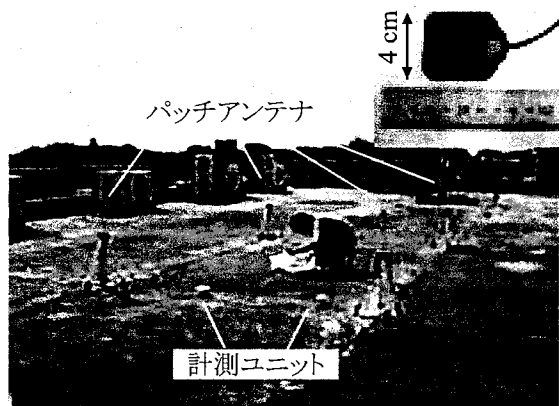


図-8 理想的な環境下における実験での計測ユニットの設置

推定した。受信機間の正確な相対位置は分っているので、結果の成否が判定される。この操作を、切り出すデータの時間帯をずらしながら多数回行った。全ての実験に対してそれぞれ12000回以上の計算を実行している。最後に、正しく整数値バイアスを決定できた回数、即ち計算に正解した回数を試行回数で除して、正決定率を求めている。

(1) 理想的な環境下における実験結果

まず、理想的な環境下における実験結果を示す。表-2 と表-3 に、正決定率および測位精度をそれぞれ示す。表中、SA1→SA2 は測量用アンテナを参照点として測量用アンテナの相対位置を求めた場合の結果を、PA1→PA2 はパッチアンテナを参照点としてパッチアンテナの相対位置を求めた場合の結果を示している。

表-2 理想的環境下における正決定率とデータ長の関係

データ長 [min]	正決定率 [%]		
	SA1→SA2	SA1→PA1	PA1→PA2
5	98.2	73.7	87.7
10	100.0	90.8	99.7
15	100.0	96.6	100.0
20	100.0	96.9	100.0

表-3 理想的環境下における測位精度とデータ長の関係

データ長 [min]	測位精度, 2σ [cm]					
	SA1→SA2		SA1→PA1		PA1→PA2	
	(H)	(V)	(H)	(V)	(H)	(V)
5	0.8	1.3	1.2	2.0	1.2	1.4
10	0.7	1.0	1.5	1.9	1.0	1.2
15	0.6	0.8	1.7	2.1	0.8	1.1
20	0.6	0.7	1.4	1.9	0.7	1.0

表-2を見ると、理想的な環境下においても、測量用アンテナを使用した方がパッチアンテナを使用した場合よりも正解決定率が高いことが分る。測量用アンテナを参照点としてパッチアンテナの相対位置を求めた解析では、他の2つと比べて正解決定率が著しく低いことが分る。これは、アンテナの種類が異なるため、マルチパスノイズの影響が異なり、それにより二重差の計算に際してノイズが除去されなかったことが原因である。

次に、表-3を見ると、やはり測量用アンテナを用いた場合が最も精度が高いことが分る。測位精度に関しても正解決定率と同様に、やはり測量用アンテナを参照点としてパッチアンテナの相対位置を求めると精度が著しく悪化することが分る。

(2) アンテナ周辺の環境による影響を調べる実験

次に、アンテナ周辺の環境が異なることの影響を調べた。参照点は先の2つの受信実験と同様にビルの屋上とした。一方で、未知点は芝生の上に三脚を用いて設置した。

表-4と表-5に解析結果を示す。表-4を見ると、測量用アンテナを使用した場合には、データ長が5分のときに正解決定率は低下するものの、先の2つの実験結果と比べてほぼ同様の結果を得た。一方で、パッチアンテナを使用した場合には、正解決定率が大幅に悪化しており、データ長が短いほど顕著であることが分る。

この傾向は、表-5の測位精度についても言える。解析するデータ長が短いほど、測位精度の悪化の程度が大きい。ただし、5分の場合においては、鉛直方向(V)の測位精度が10分の場合に比べて改善している。これは測位精度の定義のためである。測位精度は、この解析では整数値バイアスの正解が決定できたもののうち、相対位置を推定し、その標準偏差の2倍値を計算している。すなわち、正解決定率が悪ければ、それだけ悪条件のデータを使用しないために、測位精度が見かけ上改善されて見える場合がある。

(3) アンテナの高さによる影響を調べる実験

次に、アンテナの高さによる影響を調べる実験を行った。実験では、パッチアンテナ2つを三脚に固定し、またパッチアンテナ2つをコンクリートの地面に直接固定して実験を行った。場所は、ビルの屋上であり、やはり衛星からの電磁波を遮蔽するような高い建物は周囲にはない。アンテナの高さを変えた事以外は、理想的な環境下での実験と同じ条件である。

表-6と表-7に解析結果を示す。解析では、参照点と未知点ともにパッチアンテナを地面に固定した場合と、参照点は三脚に固定し未知点を地面に固定した場合の解析を行った。また、どちらも三脚に固定した実験結果は理想的な環境下における実験と等しい。

さて、表-6を見ると、参照点・未知点ともにアンテナを地面に設置した場合には、正解決定率が大変に高

表-4 周辺環境が異なる場合の正解決定率

データ長 [min]	正解決定率 [%]	
	SA1→SA2	PA1→PA2
5	91.5	64.6
10	100.0	91.1
15	100.0	97.7
20	100.0	100.0

表-5 周辺環境が異なる場合の測位精度

データ長 [min]	測位精度, 2σ [cm]			
	SA1→SA2		PA1→PA2	
	(H)	(V)	(H)	(V)
5	0.7	1.1	1.3	2.3
10	0.5	0.9	1.2	2.7
15	0.5	0.7	1.1	2.5
20	0.6	0.8	1.1	2.3

いことが分かる。先の理想的な環境下における実験では、アンテナをどちらも三脚に固定して行っているが、これと比べても相当に結果が良いことが分かる。これは、地面にパッチアンテナを設置することにより、マルチパスノイズの影響を低下させることができるからであると考えられる。

次に、表-7を見ると、精度の面からもパッチアンテナを地面に固定した方が結果がよいことが分かる。特に面白いことは、得られた精度は測量用アンテナを用いた場合よりも良いことである。現状では、4時間強のデータを解析した結果であるので、今後、データ量を増やして結果の信頼度を上げることが望まれる。

(4) 解析結果のまとめ

ここでは、前節の実験結果をまとめることとする。まず、図-9に各実験で得られた正解決定率の比較を示す。縦軸に正解決定率、横軸にデータ長をとっている。

図-9を見ると実験2(PA)と実験3(三脚)以外は、データ長が10分間もあればほぼ100[%]に近い確率で正解を決定することが分った。実験2(PA)と実験3(三脚)のケースでは、パッチアンテナを使用し、かつ参照点と未知点でマルチパスの影響が大きく異なるために正解決定率が著しく低下したと考えられる。また、例えばパッチアンテナを使用した場合でも、コンクリートの地面に直接固定した場合には、5分でもほぼ100[%]の正解決定率が得られており、現実問題への適用が期待される。

次に、図-10に水平方向の測位精度の比較を示す。今回の実験では、全ての実験において水平方向では1.5cm以下、鉛直方向では3.0cm以下の精度で相対位置を特

表-6 アンテナの高さによる正解決定率の比較

データ長 [min]	正解決定率 [%]	
	地面 → 地面	地面 → 三脚
5	99.7	70.4
10	100.0	90.1
15	100.0	97.5
20	100.0	98.7

表-7 アンテナの高さによる測位精度の比較

データ長 [min]	測位精度, 2 σ [cm]			
	地面 → 地面		地面 → 三脚	
	(H)	(V)	(H)	(V)
5	0.4	0.6	1.0	1.6
10	0.3	0.5	0.9	1.5
15	0.2	0.4	0.7	1.2
20	0.2	0.4	0.6	1.2

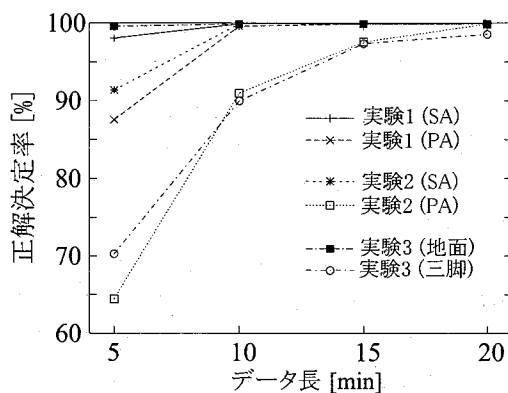


図-9 実験条件による正解決定率の比較

定できた。ただし、この測位精度はあくまで位置の推定値の標準偏差を計算し、その2倍値をとったものである。従って、バイアス成分の誤差は評価されていない。

また、正解決定率のときと同様に、パッチアンテナをコンクリートの地面に直接固定した場合の測位精度が最も良く、測量アンテナを使用した場合よりも高精度の結果を得た。今後、さらなる実験を積み重ねて、実験の信頼度を向上させることにより、パッチアンテナを使用した場合でも構造物の変位計測が高精度で行える事を実証する必要がある。

5. まとめ

本研究の成果を以下にまとめる。

1. GPS 受信機が出力するデータの内、本当に必要な情報のみを吟味することで、1 epoch のデータを

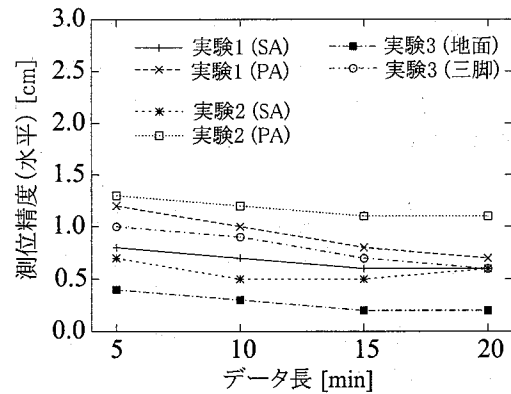


図-10 実験条件による水平方向測位精度の比較

29 byte まで減らすことができた。これにより、無線通信によるデータ送信の効率が上がり、信頼性が向上するとともに、低消費電力化されることが期待される。

2. 安価な装置（マイクロコントローラ）を用いて実際に装置を開発し、受信実験を行った。
3. アンテナ周辺の環境を様々に設定して実験を行い、正解を決定するために必要なデータ長と正解決定率の関係を調べた。

また、今後の研究課題を以下にまとめる。

1. 現状では静的変位を高密度に計測することが主な課題となっているが、今後はさらに動的な挙動を計測できるように、加速度計のデータと結合させる。
2. これまでは多くても5ノードを用いた受信実験であったが、これを数十程度に拡張して実験を行い、システム全体の安定性を調べる。
3. 低消費電力化により、電力供給が無い場合においても24時間以上の連続計測が行えるようにする。

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) 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, 東京電機大学出版局, 2005
- 5) 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
- 6) http://www.xbow.com/wireless_home.aspx
- 7) Hofmann, B. - Wellenhof, H. Lichtenegger & J. Collins (2001), GPS, Theory and Practice, Springer-WienNewYork.

(2006 年 4 月 13 日 受付)