

屋内位置測定システムの研究

宮崎 俊之, 新井 浩成, 波 通隆

Research of Indoor Positioning System

Toshiyuki MIYAZAKI, Hironari ARAI, Michitaka NAMI

キーワード：GPS, INS, 加速度センサ, 振動ジャイロ, GPS 中継装置

KEY-WORDS：GPS, INS, accelerometer, vibrating gyros, GPS relay equipment

1. はじめに

1.1 電波を用いた位置計測手法

地球上での絶対位置を計測する「測位」は航法や測量にとって非常に重要な技術である。電波を用いた測位は、(a)センサを小型軽量化でき、(b)機器の姿勢などに関わらず測位が可能であり、(c)測位可能なエリア(測位空間)を広くすることができるなどの長所を有し、移動体への搭載に適している。

近年、GPS(Global Positioning System)の登場により、小型・軽量の受信機で、伝搬経路の変動などの影響を受けづらく、全世界的に高精度・高確度の測位が可能になった。また民間への使用が開放されたことから、比較的安価に精度の良い測位が行えるようになり、カーナビゲーションシステムなどを中心に急速にその利用が広まった。

1.2 GPS 測位空間の拡大

GPSは衛星から送信されるスペクトラム拡散(SS)信号から計算される時刻・距離情報に基づき三角測量を行っており、雑音などには比較的強いが、電波が遮蔽されるビルの陰や屋内などにおいては測位の精度が著しく低下、または測位不能となる。これを解決するため、例えばカーナビゲーションにおいては、(a)車より取得した車速情報、(b)搭載したジャイロによる姿勢情報を用い、(c)車が地表上にあること、(d)水平であること、(e)道路上を走ること(マップマッチング)などの条件を付けることで位置を推定し、実用的な測位を可能としている。しかし、歩行者ITSなど、携帯機器等

への搭載を考えた場合、これらの条件、手法はそのまま用いることはできず、なんらかの手法でGPS使用不能時の測位を行う必要がある。

本研究では、安価かつ、現行のGPSアプリケーションに大幅な改造や装置の付加を行うことなく測位空間の拡大を可能とするシステム(GPS測位補助システム)として(1)GPS中継装置を用いた手法、(2)簡易INSを用いた手法について考察を行った。

2. GPS 中継装置による測位空間の拡大

2.1 GPS 中継装置

GPSの測位空間を広げる一手法として、GPSからの信号を測位可能な場所で受信し、ケーブル等で屋内等に伝送後、再放射するGPS中継装置がある。擬似衛星を用いる手法に比べて設置性がよく、また安価であるため、GPSの測位空間を経済的に広げるのに有効であると考えられる。

GPS中継装置(以下、中継装置)の例を図1に、また仕様を表1に示す。中継装置はGPS信号を屋外等で受信する受信アンテナ、マイクロ波増幅器、GPS信号を屋内で再放射する送信アンテナより構成され、また微弱電波機器の区分(3m離れた地点で $35\mu\text{V}/\text{m}$)に適合したものが多い。

2.2 中継装置を用いた再放射の問題点

三角測量の原理で位置座標、時刻を測定するGPSにおいては、信号の行路長の影響が測位精度に大きな影響を及ぼす。二つの衛星からの電磁波が同一の中継装置の屋内送信アンテナより再放射されると、屋内ではそれぞれの信号は同一伝搬経路となるため、各衛星から受信機への行路差は衛星から中

事業名：一般試験研究

課題名：屋内小電力無線位置測定システムの研究

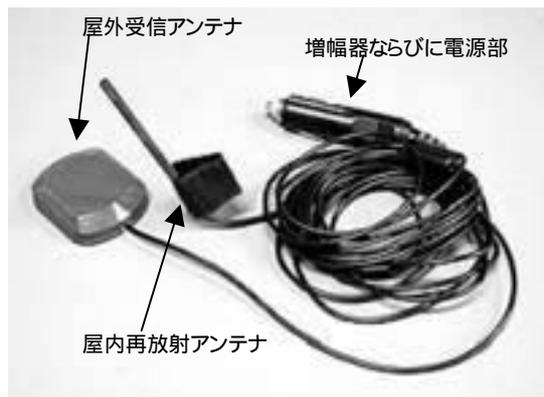


図1 GPS 中継装置

形状	58×48×15mm
質量	65g
総合利得	30dB
出力インピーダンス	50Ω
ケーブル長	4m
供給電源	7~14V DC
消費電力	28mA ± 3mA
動作温度	-30 ~ 85℃
相対湿度	95 %
耐水性	完全防水

表1 使用したGPS 中継装置の仕様

継器までの行路差のみとなり、中継器からの受信機までの距離は、そのまま測位の誤差となる。これを解決するには、屋内でも屋外と同様の平面波状の伝搬環境を作る必要がある。

また行路長の問題の他に、信号の到達距離の問題がある。GPS 衛星からの信号は平面波の状態になっていると考えられるため、通常の使用においては、距離による電界強度の減衰の影響はほとんど考える必要はない。しかし、中継装置からの再放射波の電力は距離の二乗に反比例するため、一つの中継器のみで屋内等を全てカバーするのは不可能である。屋内における中継器使用時の限界を調べるため、再放射波の伝搬シミュレーションを行った。

2.3 位相シミュレーション（中継器数2）

屋内で少数のGPS 中継器で測位空間を形成する場合は、二次波源が非常に少ないため、各衛星からの行路長を一意に決定することが難しくなる。図2は1m離れた地点に設置された二つの中継装置から再放射されるGPS 信号の伝搬状況をシミュレートしたものである。

GPS 信号(L₁)の波長19cm(1575.42MHz)に比べて中継装置の間隔が同程度ないし大きい場合には、空間で二つの同波長の波が干渉を生じ、干渉縞が発生する。この環境内に置かれたGPS 受信機には、それぞれの中継装置を通ってきた

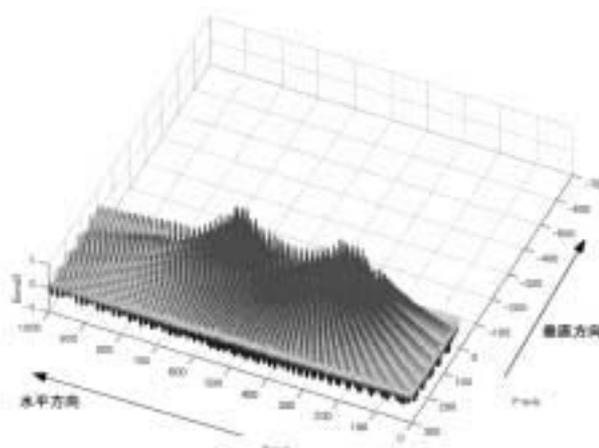


図2 GPS 中継装置による再放射（中継器数2，間隔1m）

同一衛星の信号が異なる行路長を持つマルチパス波となって入射し、それぞれの信号強度が同程度で、かつ信号の相関性が高いためその分離は難しくなり、測位精度が大きく悪化する。また、窓などから直接入射する信号に対しても、増幅器の利得と伝搬損失が同程度となる距離では、直接波と再放射波との干渉が生じ、中継装置内部の増幅器による位相シフトとあわせて非常に複雑な伝搬環境が発生し、測位精度を大幅に低下させる。

2.4 位相シミュレーション（中継器数16）

図3は波長に比べて充分小さい間隔で中継器を並べた場合の屋内における再放射波の位相・振幅状態をシミュレートしたものである。中継器はx軸（水平）方向に300cmから470cmまで10cm間隔（ $\sim \lambda/20$ ）、y軸（垂直）方向には一定に16個設置してある。それぞれの中継器に同一位相のGPS 搬送波信号が入射しているとすると、中継器の直下である $x = \{300\text{cm} \sim 470\text{cm}\}$ の範囲では、y軸方向に数m程度離れた地点においても位相のそろった平面波が形成され、屋

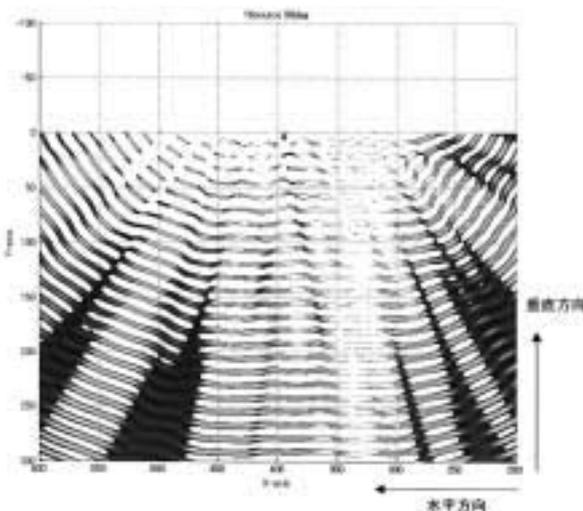


図3 GPS 中継装置による再放射（中継器数16，間隔0.1m）

外と同等の測位が可能であることが解る。またホイゲンス・フレネルの定理により、平面波形状 (TEM 状態) の場合には電磁波のエネルギーは拡散しづらくなり、中継器数 2 の場合に比べて、中継器からの距離方向の電界強度の減衰率は小さくなっていることが解る。

2.5 中継装置を使った測位空間の拡大の限界

以上の結果により、中継装置を使って測位空間の拡大をする場合、(a)電界強度の減少、(b)干渉波の発生の二つの問題があることが解った。これらの問題を解決するためには、中継器間隔を波長に比べて1/10程度と十分に密に、また多数配置することが必要となり、現時点では経済的にも、また物理的にも有効では無いと考えられる。従って、中継装置は互いに干渉を生じない距離に配置し、測位確度が通常の GPS の確度 (10m 程度) と同程度となる中継装置近傍を GPS 測位空間のホットスポットとして用い、この地点で GPS 受信機を用いて絶対位置を取得し、ホットスポット間は他の手法により測位を行う事が現実的であると思われる。

3 . GPS 測位補助装置

3.1 簡易 INS

GPS の測位不能空間において自律的に測位補助を行う装置 (GPS 測位補助装置) を考える。GPS 測位補助装置は GPS 受信機と GPS アプリケーション間に付加し、(1)GPS 測位可能な空間では GPS 信号をそのまま (スルー) 伝送し、(2)GPS 信号測位不能空間、または衛星の幾何学的配置状態を示す DOP 値が悪化し誤差が大きくなった場合に、内部の自律測位装置により自己位置を推定、その結果を GPS 信号に変換し、GPS アプリケーションに渡す。

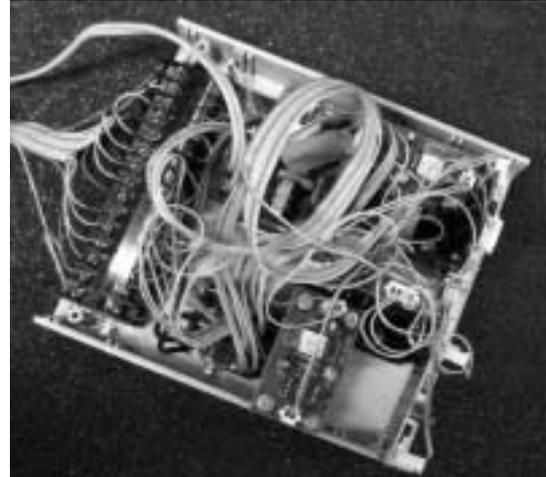
自律測位を加速度センサとジャイロで行うものは INS (Inertial Navigation System : 慣性航法装置) と呼ばれ、航空機や船舶の航法装置として実用化されている。しかしセンサ情報のみで長時間、高精度な測位を行うためには、使用する加速度センサ、ジャイロには極めて高い精度と安定性が要求されるが、この様なセンサは高価であり、また形状も比較的大きいため、携帯機器等における GPS 測位補助装置には利用しづらい。

携帯機器などでは、ユーザーは GPS 利用空間と利用不能空間を短時間 (数分~数時間程度) で移動すると考えられ、必要な精度を限定する (10m/h ~100m/h 程度) ことができる場合は、小型軽量で安価なセンサを用いることが可能となる。この様に限定された条件における GPS の測位補助用の自律測位装置を簡易 INS と呼ぶこととする。

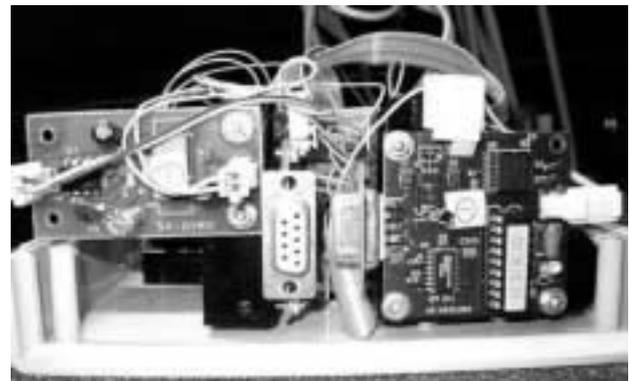
3.2 簡易 INS のシステム構成

試作した簡易 INS を図 4、システム構成を図 5、プロッ

クダイアグラムを図 6 に示す。センサとしては、小型・軽量で低消費電力という特徴を有する半導体型加速度センサと振動ジャイロを用いた。加速度センサはデューティ比、振動ジャイロは電圧の形で出力され、これを評価用 PC に搭載した 12bitAD 変換機により 50kHz でサンプリングならびに量子化を行っている。



(a) 全体図



(b) センサ部拡大

図 4 簡易 INS

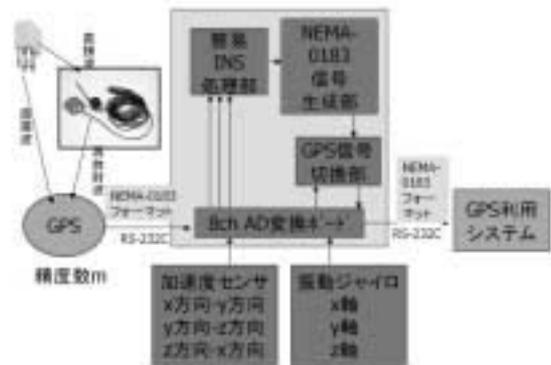


図 5 簡易 INS システム構成

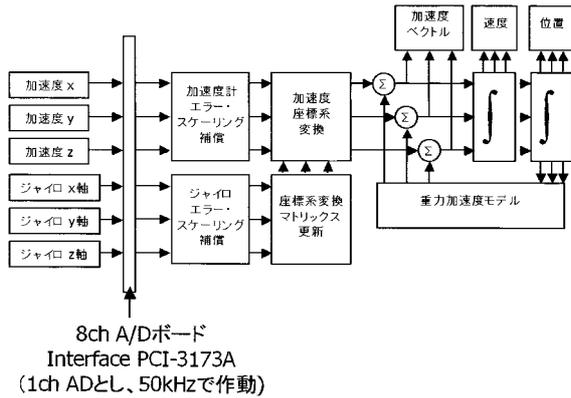


図6 簡易INSのブロックダイアグラム

3.3 センサデータの平滑化

加速度センサ、ジャイロから得られる出力値にはノイズが含まれており、精度の良い計測をするためにはこれらの影響を除去する必要がある。センサ出力に含まれる白色雑音などの非周期性の雑音の影響は、ある時間内での平均をとることで効果的に取り除くことができることが知られているが（移動平均法）、センサ出力自体にも高周波成分をカットすることによる波形のひずみ、また前後の値を用いて値を推定するための時間遅れが生じる。

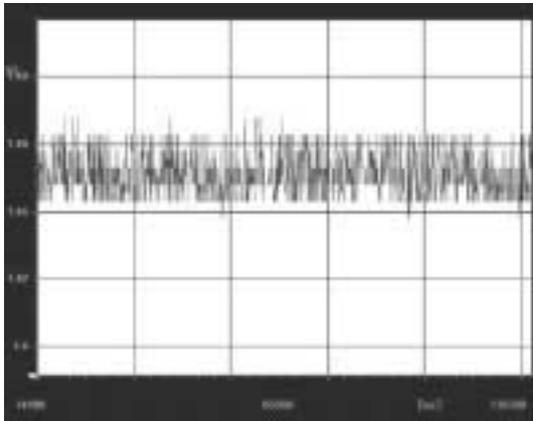


図7 振動ジャイロ出力（平滑化前）

ある時刻におけるノイズを含む出力値を、その時刻前後の離散化された出力値の平均値として表す場合、真値と平均値の「誤差」に各項（出力値）が与える影響は、中央から離れた項ほど大きくなると考えられる。中央に近い項に大きな係数を、中央から離れた項に小さな係数を「重み」として与え平均をとると、平均に用いる項を増やした場合の誤差を軽減し、効果的に雑音成分のみを相殺することができる。本研究では、sine関数を離散化した平滑化重み係数 w_i を用い、式(1)よりサンプリング k 回目の時刻における移動平均値 y_k を計算している。

$$y_k = \frac{1}{W} \sum_{i=-m}^m w_i (x_{k+i} + n_{k+i}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$W = \sum_{i=-m}^m w_i \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$w_i = \frac{3}{(4m^2 - 1)(2m + 3)} \{3m(m + 1) - 1 - 5i^2\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

x_i, n_i はサンプリング i 回目における真値とノイズである。移動平均法は、現時刻までのデータを使い、 $m/2$ 回前の時刻におけるデータを計算するため、出力に時間遅れが生じる。本研究では50kHzのサンプリングした出力に23次の移動平均を行い十分なノイズの抑制ができた。またこの時の出力の時間遅れは0.4msであり、携帯機器への搭載を考えた場合には遅延による影響はほとんどないと思われる。平滑後の出力を図8に示す。

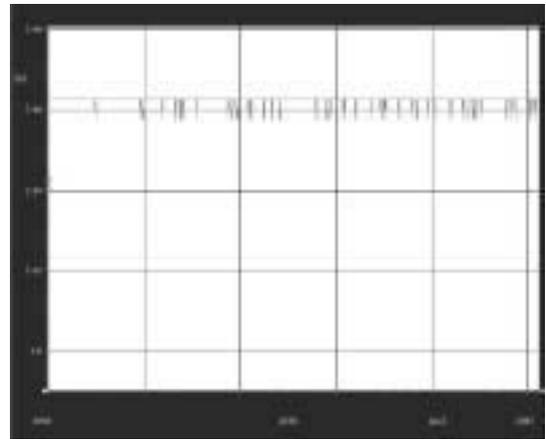


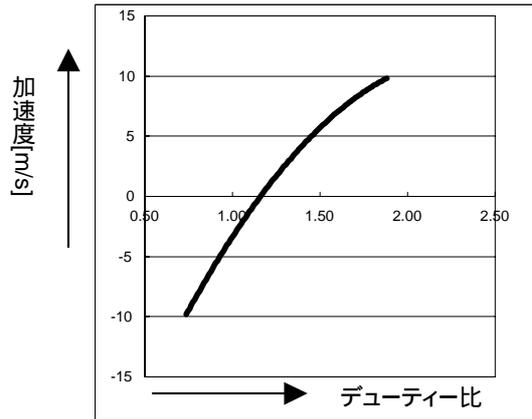
図8 振動ジャイロ出力（23次移動平均法適用後）

3.4 センサのキャリブレーション

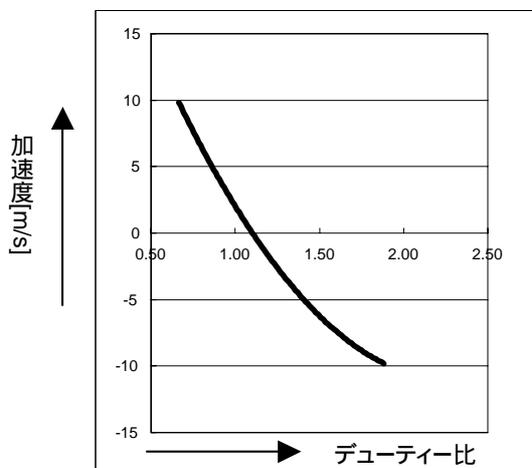
加速度センサ、ジャイロには、ノイズ成分以外にも、真値と出力から得られる値との間に、(a)バイアス、(b)スケールファクター、(c)非直線性、(d)非対称性、(e)不感ゾーン、(f)量子化などの誤差がある。これらは直接、簡易INSの精度低下に結びつき、またセンサによる固体差があるため、入力-出力特性の補正(キャリブレーション)を行う必要がある。

3.4.1 加速度センサのキャリブレーション

本研究では加速度センサの校正には重力加速度を用いた。札幌における重力加速度 9.805m/s^2 を既知とし、センサの軸が重力方向、水平方向、反重力方向ならびにその間の角度の時の出力をプロットすることで、 $-1.0\text{g} \sim 1.0\text{g}$ における校正曲線が得られる。本研究で用いたセンサは $\pm 2.0\text{g}$ の感度を持っているため、校正曲線を外挿することにより $|1.0\text{g}|$ 以上については校正をおこなっている。図9は使用した加速度センサのキャリブレーション曲線であり、バイアス、非直線性、非対称性が存在することがわかる。



(a) x 軸



(b) z 軸

図9 加速度センサのキャリブレーション曲線

3.4.2 振動ジャイロのキャリブレーション

ジャイロの校正のための精度の良い角速度のリファレンスは容易に得ることができない。二次的な方法として、出力の積分を行い、精密な計測が容易な角度に変換しキャリブレーションを行った。この場合、時間による誤差が入ってくるため、キャリブレーションの精度の低下が生じるが、時間変動要因を平均化した補正が行えるため、短時間における出力の揺らぎに対して効果的なキャリブレーションが行うことが可能である。本研究では EMI 対策用の小型電波暗室内の回転式試験台を用い、このキャリブレーションを行った。

3.5 キャリブレーションの問題点

半導体型加速度センサや振動ジャイロは比較的安価なセンサであるが、温度特性などに起因する特性の不安定や非直線性、また個体による特性のばらつきが大きく、簡易 INS として用いる場合には使用するセンサ毎にキャリブレーションを行う必要がある事がわかった。本研究では、比較的簡便な

手法でセンサのキャリブレーションを行ったが、より広入力範囲におけるの高精度の測定値が必要な場合は、他のキャリブレーション手法を検討する必要がある。

4.まとめ

本研究では、現在、需要が急速に高まっている「位置計測」の要求に応えることのできる GPS 測位補助システムの研究を行った。GPS は軽量・小型・高精度であり、従来の航法や測量などの分野だけでなく、機器の制御や歩行者 ITS など様々な応用が検討されており、屋内への GPS 測位空間の拡大に対する期待は大きい。本研究で提案した中継装置と簡易 INS の併用による GPS 測位空間の拡大は、価格・現行のアプリケーションとの親和性の面で大きなメリットがある。

簡易 INS 用センサとして半導体加速度センサと振動ジャイロを用いることは、コスト面以外にも軽量・小型という長所を持ち、携帯機器組み込み用として有力な候補である。本研究で行ったセンサのキャリブレーション手法、ノイズ平滑化手法を導入することで、安価なセンサでもこれらの目的に十分な精度・確度を得られる見通しが見ついた。今後は簡易 INS と GPS の統合を行う事で、屋内外でシームレスな位置計測が行えるシステムを開発していく予定である。また、本研究で用いたセンサは非常に小型であるため、マイコンなどと組み合わせた小型簡易 INS の開発も進めていく予定である。

引用文献

- 1) M.S.Grewal, L.R.Weill, A.P.Andews "Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration", A John Wiley & Sons, 2001.
- 2) R.F.Harrington "Time Harmonic Electromagnetic Fields", McGraw-Hill, 1961.
- 3) 多摩川精機株式会社編 "ジャイロ活用技術入門", 工業調査会, 2001.