

## 複数 GPS 端末の誤差特性とその評価

高野 真一\*<sup>1</sup>, 平山 哲也\*<sup>1</sup>, 小高 佑樹\*<sup>2</sup>, 樋口 政和\*<sup>3</sup>, 村上 仁己\*<sup>4</sup>

The evaluation of the error characteristics of Plural GPS terminals

Shinichi TAKANO\*<sup>1</sup>, Tetsuya HIRAYAMA\*<sup>1</sup>, Yuki ODAKA\*<sup>2</sup>,  
Masakazu HIGUCHI\*<sup>3</sup>, and Hitomi MURAKAMI\*<sup>4</sup>

**ABSTRACT** : In recent years, LBS(Location Based Services) attracts attention due to the spread of mobile phone GPS, and it is applied to various applications. Now, when mobile phones have become ubiquitous terminals, many mobile phone GPS terminals may be unevenly distributed within local locations. Our study examines the error characteristics of them that are located between short distances. We used GPS loggers by this experiment because investigate the change effect of satellites. In this paper, we consider that positioning errors in GPS terminals depend on the difference of number of satellites to use for positioning calculation and satellite numbers. In addition, we perform theoretical analysis of GPS errors and study error characteristics of GPS loggers.

**Keywords** : Plural satellite, mobile phone GPS, error reduction, Newton's method

(Received March 22, 2011)

### 1. はじめに

現在日本での携帯電話は、国民誰もがいつでも、どこでも 24 時間身につけている、ユビキタス端末となっている。これらを背景に、2007 年 GPS 機能を携帯電話に装備することが標準化された。このような位置情報機能を携帯電話に装備することで、GPS はナビゲーションや各種ゲームに応用されており、今後さらに応用範囲を拡大していくことは必須である[1]。

このような環境では、携帯電話を保持した人がグループとなって移動するなど、複数 GPS が小領域に遍在することが多々生じる。また、RFID などのセンサーに GPS 機能がインストールされ、これらセンサーが固まりとなって動作することも、今後予想される。

そこで我々は複数携帯電話 GPS 端末を用いて、近距離間に置かれた複数 GPS の誤差特性について調べてきた[2]-[5]。その結果、複数 GPS 端末間で誤差が大きく変動することを確認している。その理由として、マルチバ

ス等に加え、複数 GPS 端末間で測位計算に用いる衛星の数や衛星番号の変動が考えられる。

一方、携帯電話 GPS のみならず、センサーに使用されるような GPS 専用機が群となることも同様に予想される。携帯電話 GPS は GPS 専用機の測位方法と異なっている。携帯電話は通話することが主機能であるため、GPS 機能に大きな消費電力を使うことは望ましくない。また、高感度の GPS アンテナを装備するのも、コストの面で難しい。そのため、携帯電話 GPS では、衛星から受信機の擬似距離の他に携帯電話基地局から受信機の距離や補正データを用いた特有の方法を用いている。また、消費電力の減少のため使用衛星数も GPS 専用機で使用する数よりも少なく、アンテナの感度により、GPS 専用機ほど携帯電話 GPS は衛星を追跡できない。このような測位方法の違いにより携帯電話 GPS と GPS 専用機の GPS 誤差特性が異なることが考えられる。

本稿では、複数 GPS 衛星にアクセス可能な場所で、測位計算に用いる衛星の変動効果を実験的に調べるとともに理論的な解析を行った[6]。なお、衛星の変動効果の検討は、携帯電話 GPS に関して詳細に調べることが難しいことから、GPS 専用機について行った。今後、GPS 専用機が群となると予想されることも、実験に用いた理

\*1: 情報科学科学部学生

\*2: 理工学研究科理工学専攻修士学生

\*3: 情報科学科博士研究員

\*4: 情報科学科教授 (hi-murakami@st.seikei.ac.jp)

由である。そして、GPS 専用機の誤差特性についても調べ、携帯電話 GPS の誤差特性との比較を行った。

## 2. 実験の構成

本実験では GPS 専用機を同時に複数使用して GPS 測位を行った。GPS 端末は Wintec 社の WBT-202 を使用し、同機種を 8 台用いた。WBT-202 の GPS チップは u-blox 社の u-blox5 である。u-blox 社の GPS 評価ソフトウェア u-center を使用し、NMEA メッセージ[7]を保存した。

WBT-202 は購入時の設定ではスタティックホールドされていて、端末が移動しないとき測位計算を行わないように設定されている。そのため、u-center によりスタティックホールド作動しないように設定を変更した。また、測定間隔も 1 秒から 1 分に変更し、測位モードを自動車用から定点観測用に変更している。測位方法は初期設定の状態である単独測位にした。測定は 1 分間隔で、24 時間以上行った。

測定場所は GPS 衛星が良く観察できる、成蹊大学建物の屋上である(図 1)。なお、図 2 に示すように、Trimble 社の「GPS 衛星飛来予測プログラム planning software」のシミュレーションソフト[8]を用いると、この場所から見える衛星数は最大 12 個、常時 5 個以上の GPS 衛星が捕捉できる。



図 1 実験場所

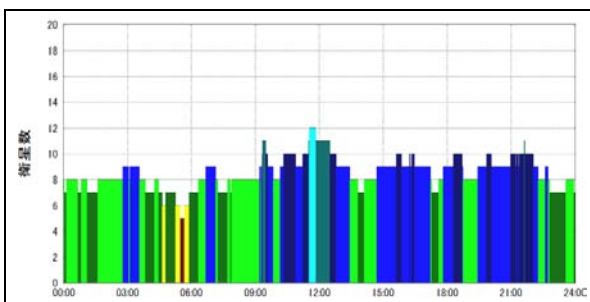


図 2 成蹊大学の屋上から見える衛星数

実験風景を図 3 で示す。GPS を PC に繋げて測位データを保存している。また、高級ディファレンシャル GPS 機の Crescent A100(Hemisphere GPS 社)も同時に同じ場所で測位を行った。また、真値はこの高級機を持って測定した値である。

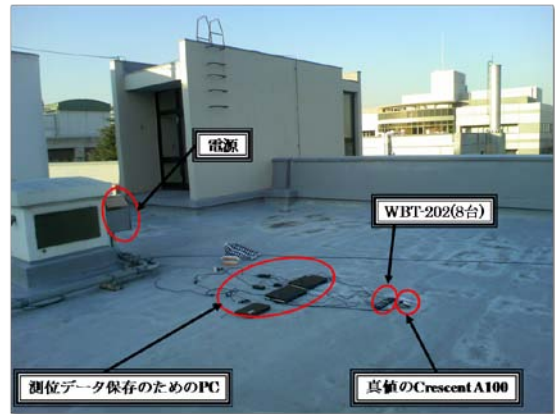


図 3 実験風景

## 3. 実験結果

端末 8 台を用いて実験を行ったが、実験中に 1 台が測位停止となった。よって、端末 7 台での 24 時間以上のデータ (1400 点以上の測定結果) が得られた。

全く同じ機種を用い、同じ場所でもかつ同時刻で GPS 誤差を測定した場合、アクセスする GPS 衛星の数、種類は同じと想定されたが、図 4、5 と表 1 が示すように、補足する衛星数と誤差計算に用いる衛星には、若干ではあるが差異が観測された。同時に 7 端末の使用衛星数と使用衛星番号が一致するのは 1440 回の測位で 189 回のみであった。

図 4、5 は実験で使用した端末 7 台のうちの 2 台から見える衛星と使用衛星の数を表している。

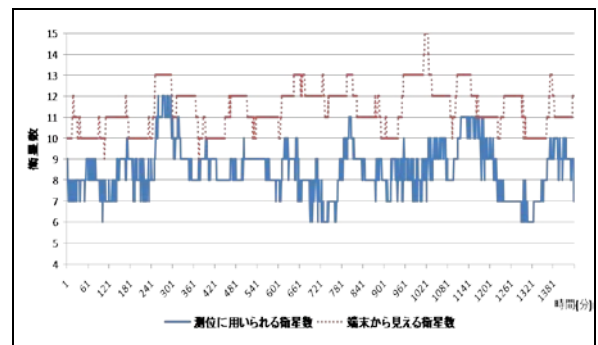


図 4 端末 A から見える衛星数と使用衛星数

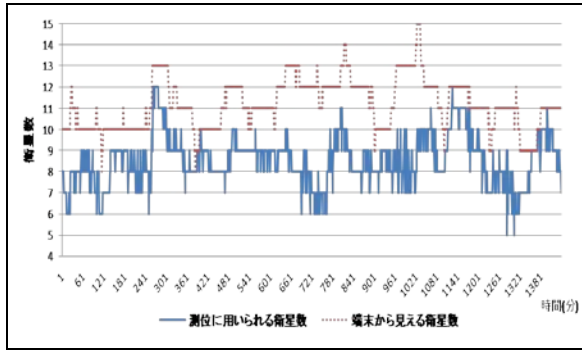


図5 端末Bから見える衛星数と使用衛星数

表1は端末Aと端末Bの使用衛星の違いを表している。○は両端末、▲は端末Aのみ、▼は端末Bのみが測位に使用したことを表す。

表1 端末Aと端末Bの使用衛星の違い(一部省略)

		時間(分)																																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	58	59	60	61		
中継衛星	2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	11	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	12	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	13	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
17	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
23	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
26	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
28	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
29	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
使用機	A	8	8	8	8	7	8	8	7	7	8	8	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8	7	7	7	8	8	8	8	7	8	8	8	8	8	8		
端末	B	8	8	8	8	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6		

そこで、このような観測衛星および種類の違いがGPS専用機のGPS誤差にどの程度の影響を与えるか、以下の項目について検討を行った。

- ① GPS誤差の理論的解析
- ② GPS専用機の群特性
- ③ 真値の選択

また、誤差の算出方法として、検討①ではRINEXファイル[7]の観測データに含まれる概略位置を真値とし、WGS-84測地系[9]で真値と測定値の差を求めている。検討②、③ではヒュベニの公式に代入することで算出した[10]。Crescent A100(Hemisphere GPS社)を用い、7端末と同じ位置で測定した位置を真値とした。Crescent A100では95%の割合で測位精度0.6m以内を実現できる。

#### 4. GPS誤差の理論解析

3章で述べたように、GPS誤差の計算では、たとえN個の衛星(本実験では最大15個)にアクセスできる環境でも、実際の計算に用いられるのはM個(本実験では、

5-12個)の場合があり、この衛星数Mも時間とともに変動することが、実験で確認された。これは、同じ場所、同時刻でのGPS誤差測定において、端末ごとに用いる衛星が異なることを意味する。そこで、計算に用いる衛星数の変化によるGPS誤差への影響を解析した。

#### 4.1 GPS測位計算について

時刻tでの受信機iから衛星jまでの幾何学的距離は、

$$\rho_i^j(t) = \sqrt{(X^j(t) - X_i)^2 + (Y^j(t) - Y_i)^2 + (Z^j(t) - Z_i)^2} \quad (1)$$

と表すことができる。 $\rho_i^j(t)$ は幾何学的距離を、 $X^j(t), Y^j(t), Z^j(t)$ は衛星jの位置、 $X_i, Y_i, Z_i$ は受信機iの位置を表している。しかし、実際には受信機時計と衛星時計の進みの誤差が加わる。よって、時刻tでの受信機iから衛星jまでの測定値は、

$$R_i^j(t) = \rho_i^j(t) + c\Delta\delta_i^j(t) \quad (2)$$

となる。ここで $R_i^j(t)$ は擬似距離、 $C$ は光速度を表す。 $\Delta\delta_i^j(t)$ は時計誤差で、受信機に関する誤差 $\delta_i(t)$ から衛星に関する誤差 $\delta^j(t)$ を引いた値である。

未知量は観測点座標(3成分)と時計誤差の4つであるるので、最低4機の衛星からの擬似距離を用いて連立方程式を解くことになる。また、擬似距離は誤差を含んでいるのでさらに複数の衛星の擬似距離を用いて、最小二乗法を使い観測点を推定する。

衛星jの位置は暦と呼ばれる軌道データを用いて計算する。暦には概略暦、放送暦、精密暦の3つがあるが、通常のGPS測位には精度1mの放送暦が使用される。

放送暦から、表2のケプラー軌道要素を利用、計算することで衛星軌道は求められる。

表2 ケプラー軌道要素

軌道要素	注記	軌道要素	注記	軌道要素	注記
$\Omega$	昇交点赤経	$i$	軌道面傾斜	$\omega$	近地点引数
$a$	軌道楕円の長半径	$e$	楕円の離心率	$T_0$	近地点通過時刻

以下の式は、時刻tにおける衛星位置の計算に必要なパラメータの計算式である。

$$M = M_0 + \left[ \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} + \Delta n \right] (t - t_e)$$

$$\begin{aligned}
l &= l_0 + \Omega'(t - t_e) - \omega_E(t - t_0) \\
\omega &= \omega_0 + C_{uc} \cos(2u) + C_{us} \sin(2u) \\
r &= r_0 + C_{rc} \cos(2u) + C_{rs} \sin(2u) \\
i &= i_0 + C_{ic} \cos(2u) + C_{is} \sin(2u) + i'(t - t_e)
\end{aligned} \quad (3)$$

但し,

$$u = \omega_0 + v, \quad r_0 = a(1 - e \cos E)$$

である。ここで  $M$  は平均近点離角,  $l$  はグリニッジ子午線から昇交点までの角度,  $\omega$  と  $i$  は表 2 のケプラー軌道要素,  $v$  は真近点離角,  $r_0$  は地心距離,  $E$  は離心近点離角,  $r$  は補正した地心距離を表す。また,  $t_0$  は現 GPS 時刻の開始時刻であり,  $\omega_E = 7292115.1467 \cdot 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$  は地球の自転角速度である。その他のパラメータは表 3 の放送暦に含まれている値である。また, 放送暦に含まれている衛星時計パラメータから時刻  $t$  での衛星時計誤差が次の式で計算できる。

$$\delta^s = a_0 + a_1(t - t_c) + a_2(t - t_c)^2 \quad (4)$$

ここで, 用いられているパラメータは表 3 に示す通りである。

表 3 放送暦

パラメータ	内容
$t_e$	放送暦の基準時刻
$\sqrt{a}$	長半径の平方根
$e$	離心率
$M_0$	基準時刻における平均近点離角
$\omega_0$	近地点引数
$i_0$	軌道傾斜角
$l_0$	現 GPS 週開始時の昇交点赤経
$\Delta n$	平均運動差
$i'$	軌道傾斜角の変化率
$\Omega'$	昇交点赤経の変化率
$C_{uc}, C_{us}$	補正係数(丘地点引数)
$C_{rc}, C_{rs}$	補正係数(地心距離)
$C_{ic}, C_{is}$	補正係数(軌道傾斜)
$t_c$	衛星時計の基準時刻
$a_0$	衛星時計のオフセット
$a_1$	衛星時計のドリフト
$a_2$	衛星時計周波数のドリフト

次に端末位置の計算方法について述べる。式(1)の単独測位のモデル式は, 非線形の連立方程式である。そのため, 受信機の位置( $X_i, Y_i, Z_i$ )を解くのに, 通常は適当に与えた初期値のまわりで線形化を行い, ニュートン法で求める。

幾何学的距離  $\rho_i^j(t)$  を初期値  $\rho_{i0}^j(t)$  と新しい未知量  $\Delta\rho_i = [\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i]$  に分解する。これをテーラー展開し一次の項までで打ち切る以下のように線形な式にできる。

$$\rho_i^j(t) \approx \rho_{i0}^j(t) - \frac{X^j(t) - X_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)} \Delta X_i - \frac{Y^j(t) - Y_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)} \Delta Y_i - \frac{Z^j(t) - Z_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)} \Delta Z_i \quad (5)$$

この式を式(2)の単独測位のモデル式に代入し既知量を左辺に移すと,

$$\begin{aligned}
R_i^j(t) - \rho_{i0}^j(t) + c\delta^j(t) \\
= -\frac{X^j(t) - X_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)} \Delta X_i - \frac{Y^j(t) - Y_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)} \Delta Y_i - \frac{Z^j(t) - Z_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)} \Delta Z_i + c\delta_i^j(t)
\end{aligned} \quad (6)$$

と 4 つの未知量  $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i, \delta_i^j(t)$  の線形の式で表せる。ここで簡略化のため,

$$l^j = R_i^j(t) - \rho_{i0}^j(t) + c\delta^j(t) \quad (7)$$

$$a_{X_i}^j = \frac{X^j(t) - X_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)}, \quad a_{Y_i}^j = \frac{Y^j(t) - Y_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)}, \quad a_{Z_i}^j = \frac{Z^j(t) - Z_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)} \quad (8)$$

と置くと衛星数が  $N$  個のとき線形化した式は

$$\left\{ \begin{aligned}
l^1 &= a_{X_i}^1 \Delta X_i + a_{Y_i}^1 \Delta Y_i + a_{Z_i}^1 \Delta Z_i + c\delta_i^1(t) \\
l^2 &= a_{X_i}^2 \Delta X_i + a_{Y_i}^2 \Delta Y_i + a_{Z_i}^2 \Delta Z_i + c\delta_i^2(t) \\
l^3 &= a_{X_i}^3 \Delta X_i + a_{Y_i}^3 \Delta Y_i + a_{Z_i}^3 \Delta Z_i + c\delta_i^3(t) \\
&\vdots \\
l^N &= a_{X_i}^N \Delta X_i + a_{Y_i}^N \Delta Y_i + a_{Z_i}^N \Delta Z_i + c\delta_i^N(t)
\end{aligned} \right. \quad (9)$$

となる。以下のように行列表示,

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} a_{X_i}^1 & a_{Y_i}^1 & a_{Z_i}^1 & c \\ a_{X_i}^2 & a_{Y_i}^2 & a_{Z_i}^2 & c \\ a_{X_i}^3 & a_{Y_i}^3 & a_{Z_i}^3 & c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{X_i}^N & a_{Y_i}^N & a_{Z_i}^N & c \end{bmatrix} \quad \bar{x} = \begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \\ \delta_i^j(t) \end{bmatrix} \quad \bar{l} = \begin{bmatrix} l^1 \\ l^2 \\ l^3 \\ \vdots \\ l^N \end{bmatrix} \quad (10)$$

を用いれば式 (9) は以下の行列ベクトル式で表せる。

$$\bar{l} = \bar{A}\bar{x} \quad (11)$$

式(11)の  $\bar{x}$  について解き, その成分  $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$  を初期値  $X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0}$  に加える。その値を新しい初期値とし, 式(10)の行列およびベクトルを作り, 式(11)の行列ベクトル

式を計算する。この過程を繰り返し行い、 $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$  が十分小さくなれば (0 に近づけば) 解が得られたことになる。また方程式の数が未知数より多いときは最小二乗法により  $\bar{x}$  を推定する[9]。

#### 4.2 使用衛星の変動による誤差

4.1 節の計算式から GPS 測位プログラムを作成し、使用する衛星数を変化させて理論的測位を行った。実験結果は図 6 である。

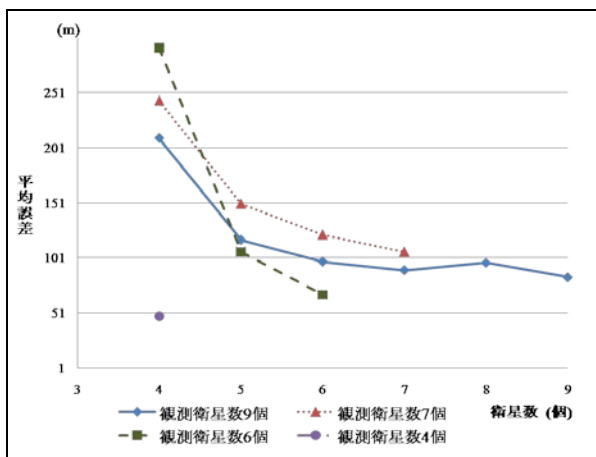


図 6 使用衛星数の変化による誤差特性

ここで用いた衛星と擬似距離は国土地理院のホームページから取得した電子基準点のデータである[11]。使用した電子基準点は 34 ヶ所である。この結果より、測位に使用する衛星数が増えると測位誤差が減少する。すなわち、衛星数が 6 個までは急激に精度が向上し、以降衛星数が増加してもその精度向上はほとんどないことが確認された。

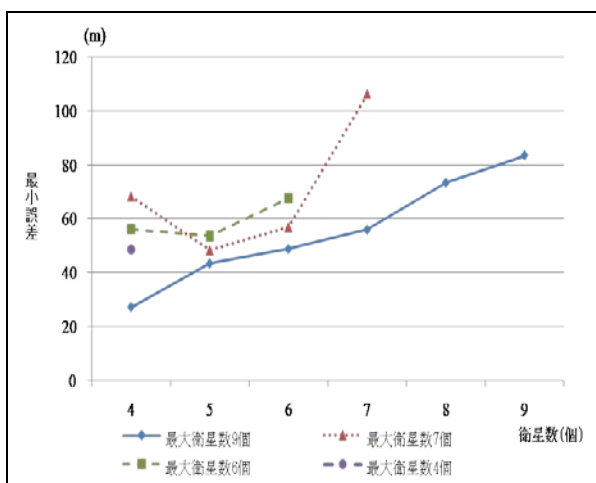


図 7 使用衛星数の変化による誤差特性

しかし、図 7 のように使用衛星数を増やすと擬似距離の精度が悪い衛星数を用いる可能性が高くなるため最小誤差は増加する場合がある。このことから、使用衛星数を減らしても、衛星を適応的に選択することで誤差縮小が可能であることが分かる。

#### 5. GPS 専用機の群特性

我々は携帯電話 GPS の群特性について研究してきたが[2]-[6]、ここでは GPS 専用機(図 8 のハンディ GPS)の群特性について評価し、携帯電話 GPS との比較を行った。1 章でも述べたが携帯電話 GPS は携帯電話の通信機能を活用した測位システムである。その測位システムの違いから携帯電話 GPS の特性を知ることができる。

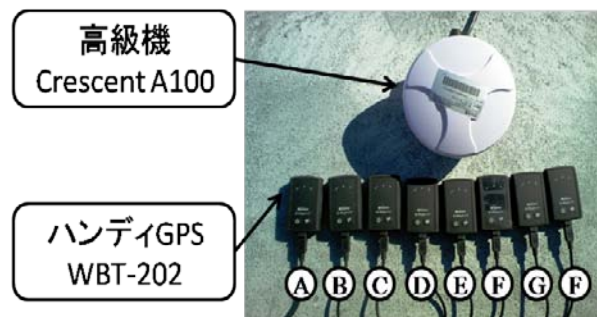


図 8 GPS 専用機(WBT-202)

##### 5.1 GPS 専用機と携帯電話 GPS の誤差特性

まず、GPS 専用機と携帯電話 GPS の誤差特性について調べた。実験に用いた携帯電話の構成は表 4 のとおり 5 機種 8 台で、その内の 2 台と 3 台が同機種である。携帯電話 GPS の誤差特性は表 5 である。稀にはあるが、GPS の有用性を著しく低下させる(距離誤差の分散を大きくさせる)大きな誤差が検出された。我々はその誤差を“同期外れによる誤差”と称し、ここでは平均誤差の約 10 倍以上の誤差と定義した。表 5 での“同期外れによる誤差”はその検出された回数を表している。

表 4 5 機種 8 台の携帯電話の機種構成

携帯電話機種	1	2	3	4	5
メーカー	A	B	C	C	D
台数	1	1	1	3	2



表 5 5機種8台の携帯電話のGPS誤差特性

機種名	①-A	②-B	③-C	④-C-1	④-C-2	④-C-3	⑤-D-1	⑤-D-2
平均誤差(m)	10	12	11	9	9	8	11	11
最小誤差(m)	0	0	0	0	0	0	0	0
最大誤差(m)	58	117	296	191	58	56	238	231
分散	59	83	646	72	50	46	180	253
同期外れ(100m)	0	1	13	1	0	0	2	8
データ数	1608	1348	1475	1590	1448	1367	904	1063

今回実験に用いたGPS専用機の誤差特性は表6である。使用したGPSは全て同機種(WBT-202)である。

GPS専用機の方が平均誤差3~4mと8~12m携帯電話GPSよりもかなり精度がよいことが分かる。また最大誤差も携帯電話GPSのように、100mを超えるような誤差は検出されなかった。このような結果の理由として、測位に使用する衛星数や携帯電話GPSの補正データの影響が考えられる。最大誤差はGPS専用機、携帯電話GPS共に端末によって大きく変動した。GPS専用機と携帯電話GPSで“同期外れによる誤差”の閾値は異なっているが、端末によって“同期外れによる誤差”の回数が大きく異なっていることが分かる。

表 6 7端末のGPS専用機の実験結果

端末	A	B	C	D	E	F	G
平均誤差(m)	3.56	3.13	3.09	3.05	4.12	3.39	2.98
最小誤差(m)	0.03	0.03	0.17	0.12	0.20	0.17	0.03
最大誤差(m)	54.89	39.70	38.75	36.76	60.42	44.20	31.02
分散	19.82	10.75	9.12	5.02	31.13	16.14	7.52
同期外れ(30m)	10	6	2	1	17	4	1

### 5.2 GPS誤差の相互相関

GPSの群特性を調べるため、GPS専用機の距離誤差と方向誤差の相関を求めた。表4の複数携帯電話GPSを用いての距離誤差と方向誤差の相関を求めた結果が表7である。

同機種同士の相互相関は多少高くなっているが、相互相関係数の平均値は0に近いことが分かる。方向誤差の相互相関が低ければ同時刻に測位した複数端末の測位点は、真値を中心としてあらゆる方向に分布すると考えられる。このことを利用し、我々はGPS誤差を加算することで、誤差特性の改善が可能であることを確認している[3]-[6]。

表 7 各組み合わせの相互相関係数(携帯電話GPS)

組み合わせ	屋内		屋外	
	距離誤差の相関	方向誤差の相関	距離誤差の相関	方向誤差の相関
[1] 1-A & 2-B	0.15	0.21	0.16	0.2
[2] 1-A & 3-C	0.16	0.22	0.06	0.13
[3] 1-A & 4-C-1	0.32	0.33	0.1	0.26
[4] 1-A & 4-C-2	0.11	0.13	0.2	0.29
[5] 1-A & 4-C-3	0.11	0.14	0.21	0.3
[6] 1-A & 5-D-1	-0.01	0	0.12	0.29
[7] 1-A & 5-D-2	0.1	0.12	0.09	0.09
[8] 2-B & 3-C	0.09	0.08	0.11	0.22
[9] 2-B & 4-C-1	0.05	0.1	0.26	0.41
[10] 2-B & 4-C-2	0.05	0.1	0.15	0.12
[11] 2-B & 4-C-3	-0.03	0.05	0.26	0.39
[12] 2-B & 5-D-1	-0.01	0.04	0.16	0.33
[13] 2-B & 5-D-2	-0.03	0.02	0.09	0.22
[14] 3-C & 4-C-1	-0.01	0.01	0.05	0.14
[15] 3-C & 4-C-2	0.22	0.23	0.03	0.2
[16] 3-C & 4-C-3	0.01	0.01	0.02	0.08
[17] 3-C & 5-D-1	0.01	0.02	-0.01	0.1
[18] 3-C & 5-D-2	0	0.01	-0.03	0.12
[19] 4-C-1 & 4-C-2	0.35	0.36	0.39	0.46
[20] 4-C-1 & 4-C-3	0.4	0.42	0.28	0.4
[21] 4-C-1 & 5-D-1	-0.01	0	0.14	0.34
[22] 4-C-1 & 5-D-2	-0.03	0	0.09	0.16
[23] 4-C-2 & 4-C-3	0.34	0.35	0.34	0.44
[24] 4-C-2 & 5-D-1	-0.01	0	0.16	0.3
[25] 4-C-2 & 5-D-2	-0.01	0	0.09	0.17
[26] 4-C-3 & 5-D-1	-0.01	0	0.2	0.31
[27] 4-C-3 & 5-D-2	-0.01	0	0.07	0.2
[28] 5-D-1 & 5-D-2	0.09	0.08	0.15	0.07
Average	0.09	0.11	0.14	0.24

一方のGPS専用機の距離誤差と方向誤差の相関は表8のようになった。

表 8 各組み合わせの相互相関係数(GPS専用機)

組み合わせ	屋外		組み合わせ	屋外	
	距離誤差の相関	方向誤差の相関		距離誤差の相関	方向誤差の相関
[1] A&B	0.50	0.46	[12] C&D	0.50	0.40
[2] A&C	0.68	0.55	[13] C&E	0.37	0.50
[3] A&D	0.46	0.31	[14] C&F	0.41	0.45
[4] A&E	0.52	0.55	[15] C&G	0.37	0.45
[5] A&F	0.50	0.47	[16] D&E	0.35	0.35
[6] A&G	0.32	0.46	[17] D&F	0.37	0.32
[7] B&C	0.64	0.53	[18] D&G	0.20	0.44
[8] B&D	0.46	0.51	[19] E&F	0.67	0.60
[9] B&E	0.45	0.51	[20] E&G	0.27	0.46
[10] B&F	0.50	0.43	[21] F&G	0.40	0.51
[11] B&G	0.42	0.52	Average	0.45	0.47

携帯電話GPSよりも相関が高いことが分かる。携帯電話GPSでも同機種同士の相互相関は多少高くなっているため、同機種のGPS専用機を使用したことも相関が高くなった原因と考えられる。

方向誤差の相関が高いGPS専用機では、我々の提案する誤差特性の改善法では、大きく誤差を縮小することは困難である。

### 5.3 GPS専用機での真値推定値

5.2 で述べたように、方向の相互相関が低いことを利用し、GPS 誤差を加算することで、誤差特性の改善が可能である[3]-[6]。この手法による真値推定値は以下の式(12)で表せる。

$$\hat{f}(x) = F(x) + \sum_{i=1}^N n(x_i) / N \quad (12)$$

$F(x)$  : 真の位置       $n(x_i)$  : 端末*i*でのノイズ  
 $N$  : GPS 誤差測定端末数

複数端末間の相互相関が低いことから測定結果は真値の回りのあらゆる方向に分布する。これによりノイズの平均値  $\sum_{i=1}^N n(x_i) / N$  は 0 に近づくことと想定される。

このような概念に基づいて、まず、基本となる1台ごとのGPS 誤差の平均と、2台から8台までの各種組み合わせでの真値推定法の結果(携帯電話GPS)を図9に示す。この図では、各端末の組み合わせである  $8Cn(n=2-8)$  についての平均推定量と最大推定量、最小推定量を示している。

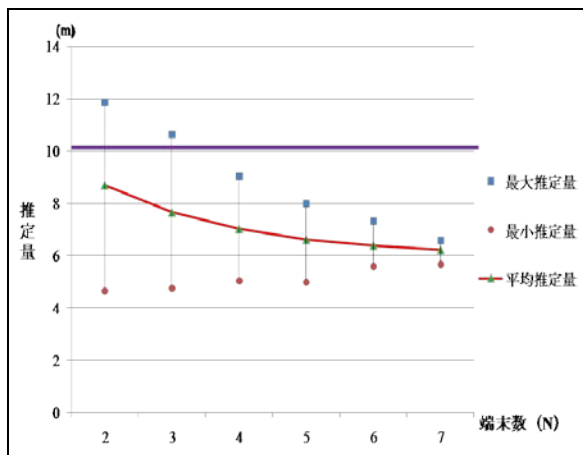


図9 端末数 N についての誤差推定量 (携帯電話 GPS)

この結果から端末数 N の値が高いほど GPS 誤差は縮小可能であることを確認した。この真値推定法を行うことで、8台の携帯電話を用いると GPS 測位誤差を単独の誤差に比べ 50%以下に抑えることが可能である。

また、図10がGPS専用機での誤差推定量を表す。端末数 N の値が高いほど GPS 誤差は縮小可能であることを確認できた。しかし、その減少は携帯電話 GPS に用いたときよりもなだらかで、平均推定量において N を大きくしても精度向上はほとんどないことが確認された。

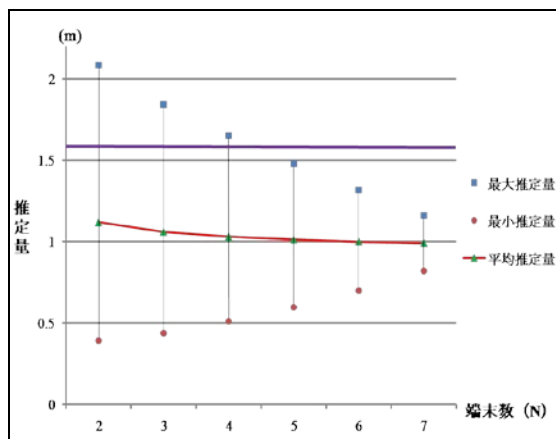


図10 端末数 N についての誤差推定量 (GPS専用機)

この真値推定法を行うことで、8台のGPS専用機を用いるとGPS測位誤差を単独の誤差に比べ75%以下に抑えることが可能である。携帯電話GPSよりも、誤差縮小率が低い理由として、距離誤差と方向誤差の相関が高いことが考えられる。

### 6. 真値選択による誤差の変動

これまで様々な誤差を計算し解析してきたが、誤差を求めるには基準となる真値が必要である。測位誤差は真値からどれだけ差があるかを表しているため正確な真値を利用することが必須である。しかしながら、真値は誰もわからない値である。電子基準点など正確な座標を取得できる場所もあるが、ほとんどの場合は真値の分からない場所での測位が行われる。そのことから、真値の選択によってどのように誤差が変化するかを調べた。ここで使用した真値は以下の3種類である。

- ① 高級GPS専用機の測位点
- ② Google Mapsでの座標参照
- ③ 測位に使用したGPSの平均値

①の高級GPS専用機は前述のCrescentA100を使用した。測位方法はディファレンシャルGPSであり、測位に使用したWBT-202の初期設定である単独測位よりも高精度の測位方法である。マルチパス除去機能が搭載されている、価格30万円前後の高級機である。

②のGoogle Maps[12]での座標参照は、地図上で調べたい場所をクリックすることで真値を得る方法である。GPSの測位結果はGoogle Mapsなどの地図検索サービスで使用する人が多いのでGoogle Mapsでの座標が真値であるとも言える。

最後の測位に使用したGPS(実験ではWintec社のWBT-202)の平均値はGPS評価ソフトのu-centerで使用

できる Deviation Map(偏差マップ画面)での基準位置に用いられる方法である。測位時刻によって衛星状態やマルチパス、電離層対流圏での遅延などの影響が変わるので、長時間測位した結果の平均をとることによりそれらの影響を消去している。

### 6.1 真値による偏差の移動

図 11～13 は 3 種類の真値で求めた偏差図である。平均値による真値は偏差の中心になる。また、高級機による真値でも偏差の中心あたりを位置していることが分かる(図 12)。

しかし、Google Maps での座標参照による真値では、図 13 のように西の方向に偏倚した座標点が移動している。つまり Google Maps の真値は平均値や高級機による真値よりも明らかに東側に位置していることが分かる。真値は誰もわからない値であり Google Maps による真値が間違いとは言えず、高級機や平均値による真値も正しいとは言いきれない。

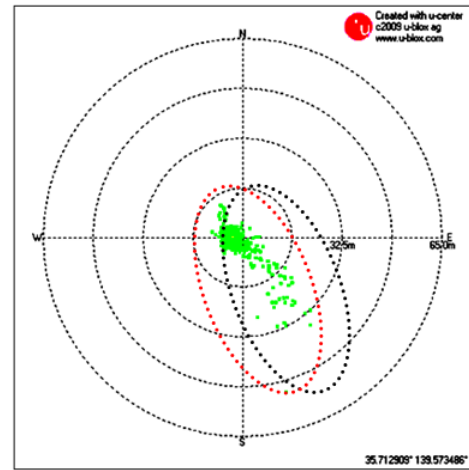


図 13 Google Maps

### 6.2 高級 GPS の誤差特性

今回使用した GPS の中でも最も高性能の GPS は高級機と称している CrescentA100 である。しかし、高級機の測位点の偏差に、GPS 専用機(WBT-202)や携帯電話 GPS には変わった特徴が得られた。その偏差図が図 14 である。

定点観測にもかかわらず、測位点は連続的に観測された。GPS 専用機や携帯電話 GPS の測位では時間に依存せず毎回様々な方向に測位点が散らばる。通常の測位では図 15 のようになる。図 14 と図 15 のデータ数は共に 1440 個(一日分)である。また、高級機の距離誤差は図 16 のようになった。距離誤差も連続的に変化し、“同期外れによる誤差”は一度も検出されなかった。

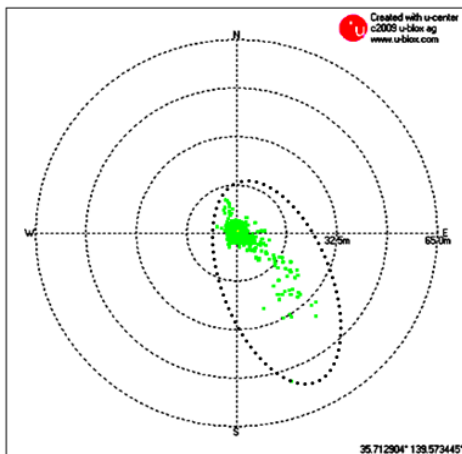


図 11 WBT-202 の平均値

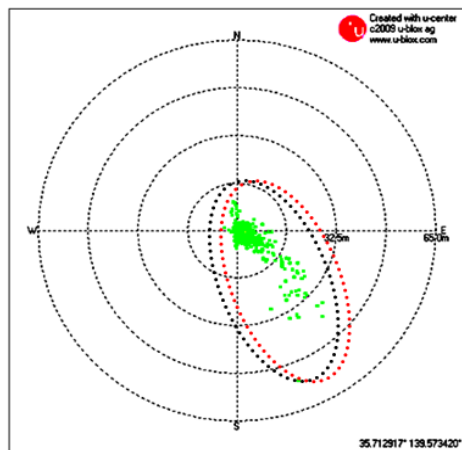


図 12 CrescentA100

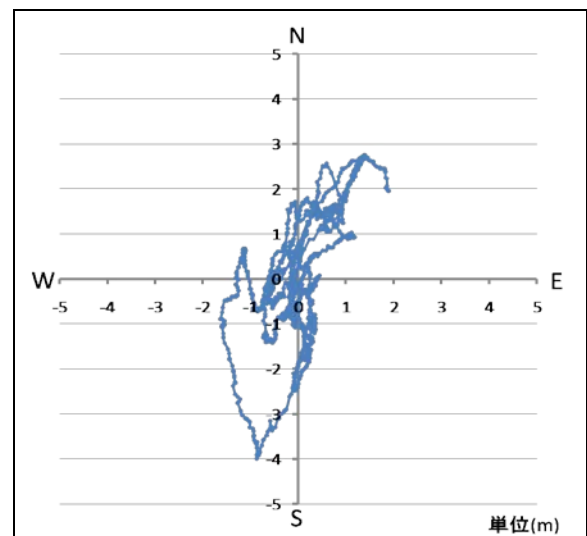


図 14 高級機(CrescentA100)の偏差図



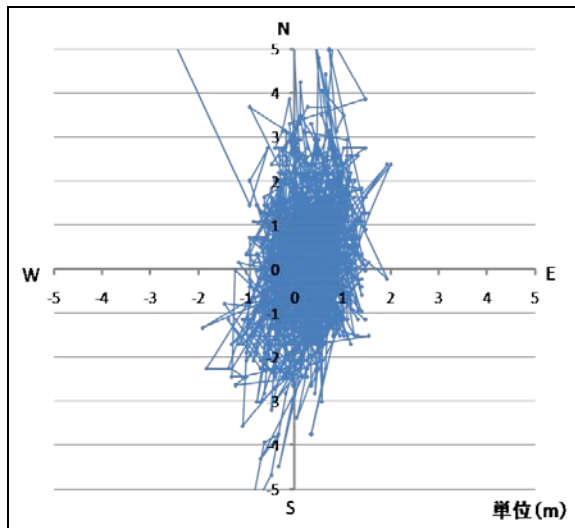


図 15 GPS 専用機 (WBT-202) の偏差図

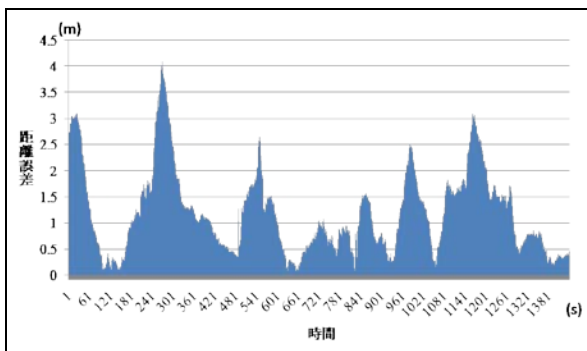


図 16 高級機の距離誤差の時間特性

図 17 は高級機の距離のある時の測位結果と 1 分後の測位結果の距離差を表している。高級機の場合、距離差はほとんど 10cm であった。一方、図 18 は GPS 専用機のある時の測位結果と 1 分後の測位結果の距離差を表している。測位結果は毎回約 1m ずれ、GPS 専用機では過去の測位点に関係なく測位されている。

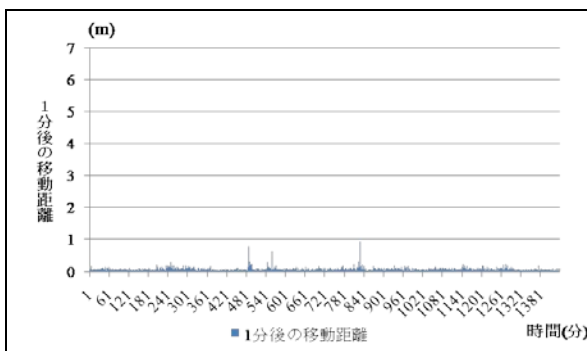


図 17 時間帯による測位結果の移動(高級機)

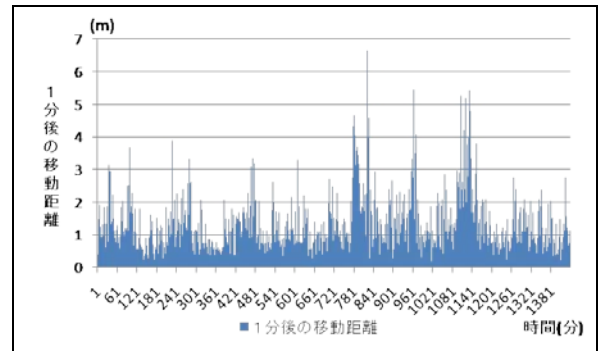


図 18 時間帯による測位結果の移動 (GPS 専用機)

これは測位間隔が 1 秒と短いため前の測位結果を、受信機が移動することを想定したフィルタがあると考えられる。このような特徴により、定点観測時には、短い測位時間では正しい位置が得られない場合がある。高級機で真値を得るためには長時間測位し、たくさんの測位結果を用いて真値を決める方がよい。

## 7. まとめ

これらの実験結果は、以下のようにまとめられる。

- ① 同時刻、同じ場所で同機種種の GPS で測位を行っても、アクセスする衛星の数と種類が異なる。
- ② 使用する衛星の数を増やすことで測位誤差は減少し、用いる衛星を適応的に選択することで測位誤差を減少することが可能である。
- ③ 距離誤差と方向誤差の相互相関は、同機種間の方が高く、GPS 専用機の方が携帯電話 GPS と比べ相関が高い。
- ④ 我々が提案する真値推定法は携帯電話の場合より劣るが、GPS 専用機においても有効であった。また、方向の相互相関が低いほどこの手法が有効であることを確認した。
- ⑤ GPS 誤差を求める上で真値の決定は非常に重要である。今回の実験では、高級機 GPS によって長時間測定した測位点を用いることが最適な真値決定法だと考えられる。

携帯電話 GPS は、社会インフラとして成長している。今後さらにその有効性は拡大するのは、必須である。この拡大の 1 つの方向として、携帯電話 GPS が群として使われることであろう。また、今後は GPS 専用機が群として使われることが想定される。このような環境を想定し、GPS を群として活用するためには、GPS の群特性を知ることは非常に重要なことである。我々は、携帯電話 GPS と GPS 専用機の群特性を調べ、複数端末の誤

差に関わる使用衛星数による誤差の変動効果を理論的に解析した。

この研究の一部は、文部省戦略的研究基盤形成支援事業によって行われた。記して感謝する。

## 参考文献

- 1) 杉山康平, 中山雅哉 “IAA システムにおける生存者情報の自動位置情報登録とその評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol103 No. 345, pp1-6, 2003
- 2) K. Hirano, Y. In, M. Kitazume, M. Higuchi, S. Kawasaki and H. Murakami, “Method of Event Location Identification Using GPS and Camera Function of Mobile Phones” WSEAS TRANSACTIONS on INFORMATION SCIENCE and APPLICATIONS ISSN:1790-0832, Issue 11, Volume 6, November 2009
- 3) 小高佑樹, 平野研人, 因 雄亮, 北爪繭子, 樋口政和, 川崎秀二, 村上仁己: 「携帯電話 GPS の誤差解析—誤差縮小への応用—」, 成蹊大学理工学研究報告, Vol.47(1), pp. 75-82, 2101.6.
- 4) 小高佑樹, 北爪繭子, 平野研人, 樋口政和, 川崎秀二, 村上仁己 “携帯電話 GPS の特性評価-GPS 誤差の群特性-” 映像情報メディア学会メディア工学研究会 2010年2月
- 5) 小高佑樹, 北爪繭子, 平野研人, 樋口政和, 村上仁己: 「携帯電話 GPS の誤差解析—誤差縮小への応用—」, 映像情報メディア学会年次大会, 2010年9月
- 6) 高野真一, 平山哲也, 小高佑樹, 樋口政和, 村上仁己: 「複数 GPS 端末間での利用衛星の変動と測位精度への影響」, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会 2011年1月
- 7) トランジスタ技術編集部, “GPS のしくみと応用技術” CQ 出版社 2009
- 8) GPS衛星飛来予測プログラム Planning Software <http://www.nikon-trimble.co.jp/support/index.html>
- 9) B.ホフマン・ウェレンホフ, H.リヘテネガー/J.コリンズ “GPS 理論と応用” Springer Japan 2005
- 10) ヒュベニの距離計算 <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/algorithm/ellipse/ellipse.htm>
- 11) 国土地理院 GPS固定点データ提供サービス [http://www.gsi.go.jp/cadusta1/inet\\_NEW/index.html](http://www.gsi.go.jp/cadusta1/inet_NEW/index.html)
- 12) Google Maps <http://maps.google.co.jp/>

## 付録1 衛星の位置計算について

4章で述べたように GPS 測位計算では衛星の軌道をケプラー軌道として扱っている。図 19 がケプラー軌道である。

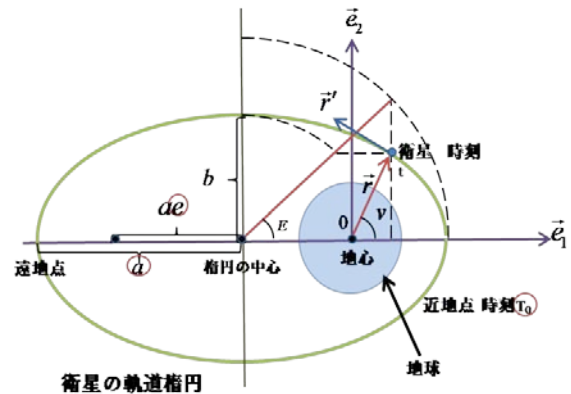


図 19 ケプラー軌道

角度  $v$  は真近点離角と呼ばれ, GPS 衛星が地球の中心に近地点から最も近づく点(近地点)から, 現在の衛星の位置までの角度を表わしている。この値により衛星の位置が確定される。ここでは放送暦データを用いた衛星位置の導き方について詳しく説明する。

時刻  $t$  での真近点離角を求めるにはまず, 放送暦データから平均近点離角  $M$ , 離心近点離角  $E$  を求める必要がある。平均近点離角  $M$  は式(13)より求められる。

$$M = M_0 + \left[ \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} + \Delta n \right] (t - t_e) \quad (13)$$

ここで  $M_0$  は基準時刻における平均近点離角,  $\mu$  は重力定数と地球質量の積で,  $\mu = 3986004.418 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$  の定数値である。 $a$  は軌道楕円の長半径,  $\Delta n$  は平均運動差,  $t_e$  は放送暦の基準時刻を表す。これらの値は放送暦のデータに含まれているので時刻と放送暦データが得られれば求めることができる。そして, 離心近点離角  $E$  は式(14)より求められる。

$$E = M + e \sin E \quad (14)$$

$e$  は離心率であり, 放送暦データから得られる値である。そして, 離心近点離角  $E$  を用いることで真近点離角  $v$  は式(15)より求められる。

$$v = 2 \arctan \left[ \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan \frac{E}{2} \right] \quad (15)$$

この値からケプラー軌道上の衛星の位置  $\vec{r}$  は式(16)のように求められる。

$$\vec{r} = r \begin{bmatrix} \cos v \\ \sin v \end{bmatrix} \quad (16)$$

GPS 計算では楕円軌道座標系ではなく、地球中心を原点とする地球基準座標系で行う。そのため座標を変換する必要がある。図 20 が地球基準座標系での衛星の位置を表した図である。

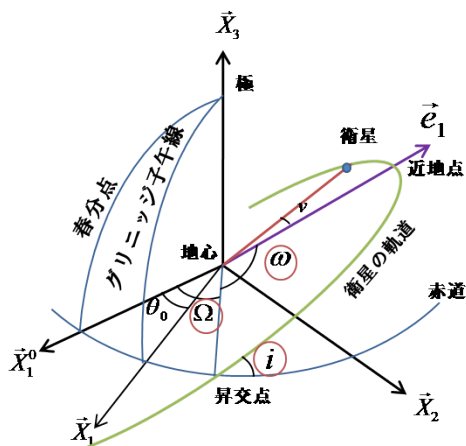


図 20 地球基準座標系でのケプラー軌道

ここで  $l$  はグリニッジ子午線から昇交点までの角度、 $\omega$  は近地点引数、 $i$  軌道面傾斜、 $\Omega$  は昇交点赤系、 $\theta_0$  は春分点からグリニッジ子午線までの角度を表す。

ケプラー軌道上の衛星の位置  $\vec{r}$  を地球基準座標系に変換するには回転行列  $\vec{R}$  を使う。回転後の座標を  $\vec{\rho}$  とする。変換は式(17)のように行う。

$$\vec{\rho} = \vec{R}\vec{r} \quad (17)$$

変換後の座標は 3 成分であるので、ケプラー軌道座標系  $\vec{e}_1, \vec{e}_2$  に直交する  $\vec{e}_3$  軸を導入し、 $\vec{e}_3$  軸成分を 0 とする。

ケプラー軌道座標系から地球基準座標系へ変換する回転行列

$$\vec{R} = \vec{R}_3\{-l\}\vec{R}_1\{-i\}\vec{R}_3\{-\omega\}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos l \cos \omega - \sin l \sin \omega \cos i & -\cos l \sin \omega - \sin l \sin \omega \cos i & \sin l \sin i \\ \sin l \cos \omega + \cos l \sin \omega \cos i & -\sin l \sin \omega + \cos l \cos \omega \cos i & -\cos l \sin i \\ \sin \omega \sin i & \cos \omega \sin i & \cos i \end{bmatrix}$$

図 21 回転行列

回転行列  $\vec{R}$  は図 20 のように 3 つの連続する回転マトリックスの積であり、図 21 のように表すことができる。こ

こで  $l$  は  $l = \Omega - \omega$  である。ここに出てくる角度の導出は章の式(3)を使う。このように放送暦データから衛星の座標を求めることができる。

## 付録 2 GPS 測位計算での最小二乗法について

GPS の計算では 章で述べたように未知数が 4 つである。そのため位置を求めるには最低でも GPS 衛星を 4 機追跡できればよい。しかし、一般的には 4 つより多い GPS 衛星を追跡し位置を求めている。式の数未知数を超えるとき、最小二乗法によって近似値を求めている。

4 章で扱ったように、位置座標の差分を表すベクトル行列式は、

$$\vec{l} = \vec{A}\vec{x} \quad (18)$$

である。使用衛星の数を  $n$  とすると、未知数の数は 4 つであるので計画行列は  $n$  行 4 列となる。 $n > 4$  のときは一般的に一意の解が求まらない。一意の解を得るには式(17)にノイズベクトル  $\vec{n}$  を加える。加えたのが式(19)である。

$$\vec{l} + \vec{n} = \vec{A}\vec{x} \quad (19)$$

この方程式の解を得るのに最小二乗原理、

$$\vec{n}^T \vec{P} \vec{n} = \min \quad (20)$$

を使うことで唯一の解が求められる。式(20)の最小二乗原理を観測方程式(19)に適用すると式(20)が得られる。

$$\vec{A}^T \vec{P} \vec{A} \vec{x} = \vec{A}^T \vec{P} \vec{l} \quad (21)$$

式(21)は未知数 4 つで式が 4 つとなる。未知量ベクトルはガウスの消去法などを用いて計算できる。