

2 GPS

12NInst:02-01

航法システム(測位システム)

古典的？

→ _____

→ _____

地上(定点)からの電波を利用
(双曲線: 2定点からの距離差の一定な点の軌跡)

衛星からの電波を利用

電波航法システム

2.1 電波航法システムの発展

02-02

1865	マクスウェル	電磁波を理論的に予言
1899	マルコニー	電磁波(電波)を用いた通信に成功 (英仏海峡で実証実験)
1902		無線方位測定を試み
1935		レーダの実用化 DECCAの実用化
1942	LORAN-A	業務開始
1950		レーダの国内輸入許可
1951		国内初のレーダ製造許可
1957	LORAN-C	業務開始
1970年代	OMEGA, NNSS	業務開始 (1990年代 終了)
1980年代後半	GPS	業務開始
2000年以降	Galileo, 準天頂衛星システム等	新技術の開発

2.2 GPSの概要

02-03

GNSS(Global Navigation Satellite System) = _____

○GPS : GNSSの一種

GPS = _____

NAVSTAR (Navigation System with Time and Ranging) /GPS
ともいう

地球の周りを回る衛星からの電波を受信し、正確な時計と
組み合わせて衛星からの距離を計算し、受信点の地球上で
の位置(緯度・経度・高度)を算出・測定する。

もともと軍用として_____国が開発、運用している。

他のシステム

GLONASS(Global Navigation Satellite System) : ソ連 / ロシア
Galileo(開発中) : EU = 欧州連合 中心
北斗・北斗2(コンパス) : 中国
QZSS(Quasi Zenith Satellite System) : 日本

○衛星航法の発展

02-04

1957	スプートニク1号(世界初の人工衛星)打ち上げ(ソ連)
1960	トランジット衛星打ち上げ(米国)
1964	NNSS(Navy Navigation Satellite System) が実用化
1967	NNSS 一般利用可能
1972	NAVSTAR / GPSの開発開始
1974	GPSの試験衛星打ち上げ
1993	GPS 24衛星の配備でシステムが完成 (随時更新)
2000.5	GPSのSA(Selective Availability: 選択利用性)が解除
2010以降	ガリレオ(EU), QZSS = 準天頂衛星(日本)

○GPS のシステム概要

02-05

衛星軌道	_____ 軌道
高度	約 _____ km
周期	_____ (約 ____ 時間 ____ 分)
衛星数	約 _____ 機
周波数	1,575.42 MHz 1,277.6 MHz
変調方式	位相シフトキーイング (PN符号拡散スペクトル)
ビットレート	1.023 Mbps (C/A code) 10.23 Mbps (P code)
帯域幅	約 2 MHz (C/A code) 約 20 MHz (P code)
測位方式	距離測定 (単独) ・ 位相測定 (干渉)
応用	船舶・航空機・ロケットの航法援助, 時刻比較, 測量・地殻変動の測定

○GPS の利点・欠点

02-06

・利点

利用精度: _____
 利用時間: _____
 利用範囲: _____ (_____)
 対妨害電波性: _____
 応用範囲: _____

・欠点

2.3 GPSの衛星と電波

12NInst:02-07

○衛星

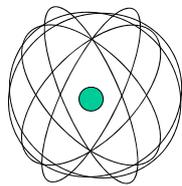
個数： 約_____機

軌道： _____ × _____軌道面(赤道に対して_____傾斜)

高度： 約_____

周期： _____(_____時間_____分)

世界中、どこでも常に_____個の衛星を観測できるようにしている
(3次元測位には最低_____個以上の衛星が必要)



_____衛星/軌道 × _____ = _____ + α : 約_____

図2-6: GPS衛星の配置

○衛星から送られてくる電波

02-08

_____ (Pseudo Random Noise Code: PRN code)

_____ (Phase Shift Keying: PSK) により
_____ (Spread Spectrum) された信号

周波数: L1 $10.23 \times 154 = 1575.42$ MHz

L2 $10.23 \times 120 = 1227.6$ MHz

154:120で正しく位相関係の一定した搬送波

(2つの周波数を用いるのは、電離層の屈折に基づく誤差を
補正するため)

コード: _____ (Clear and AcquisitionまたはCourse and Access)
_____ (PrecisionまたはProtect)

02-09

C/Aコード L1のみ _____

Pコード L1とL2の両波 _____

なお、Pコードは長年の使用により、コードが漏洩した疑い
↓
現在は変更されてYコード が用いられる。

精度(目安):

	距離誤差	測定誤差 (HDOP=1.5)
C/Aコード:	4~18m	6~27m
P(Y)コード:	3~ 8m	4.5~12m

○航法メッセージ

02-10

測位には、衛星のある座標位置の情報が必要

※ GPSは周回衛星のため、その位置は時々刻々変化

_____ によって
_____ を求める

※ 正確な _____ が必要



航法メッセージ(_____)を送信

航法メッセージ: 50bps* で送信 (*コードより随分低速)

1,500bit/フレーム (1フレーム送信するのに30秒)

1フレームは5サブフレームからなる。 12.5分ごとに同じデータ

○受信波の解読

GPSからのデータを解読するには、_____が必要
 _____を掛け合わせることで信号を復調
 (逆拡散)

※_____は民間には公開されていないので使用できない

○衛星からのデータの意味

WN	週番号(1980.1.からの週の数)
L ₂ 変調	L2がPかC/Aか
C/A精度	C/Aコードの測位精度(2 ^N mのN)
Health	衛星の健康状態
T _{GT}	1周波受信機用遅延補正
AODC	時計補正データの年代
t _{0e}	時計補正用基準時間
a ₀ , a ₁	GPSシステム時間
AODE	軌道予測の年代
t _{0e}	軌道要素の基準時間
M ₀	t _{0e} における平均近点離角
e	離心率
√A	長半径の√
Ω ₀	昇交点半径
i ₀	軌道傾斜角

ω 近地点引数
 Ω_0 昇交点の摂動
 Δn 平均運動の補正
 i 軌道傾斜角の摂動
 δi $i_0 = 60^\circ \pm \delta i$

$Cuc, Cus, Crc, Crs, Cic, Cis$ 軌道の乱れの補正項

DataID フェイズ I データ/フェイズ III データ
 SV/PageID 衛星の番号/ページの番号
 $\alpha_0 \sim \alpha_3, \beta_0 \sim \beta_3$ 電離層補正用パラメータ
 t_{0a} サブフレーム4と5の基準時間

これらのデータをもとに、衛星の位置を正確に計算する

2.4 位置の計算

○測位の方式

- _____ … 通常の測位, 手軽にできる
 誤差: 100m~10m程度
 (衛星からの電波の受信状態, その他の要因で
 精度が変わる)
- _____ 方式 (Differential GPSなど)
 … 精度が高くなる 誤差: 数m程度
- _____ 方式
 スタティック測位
 キネマティック測位
 RTK-GPS (Real Time Kinematic GPS)
 … kinematic GPS (キネマティック測位)
 誤差: 数cm以下 → 土木建設工事などに利用される

○位置計算の原理

02-15

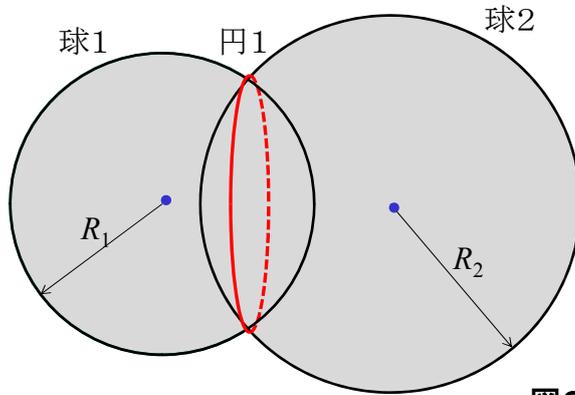


図2-8(a):

$$t = t_r - t_s$$

$$R = c \cdot t$$

02-16

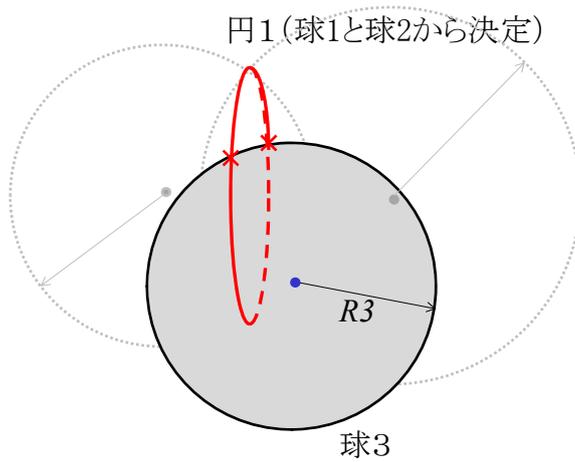
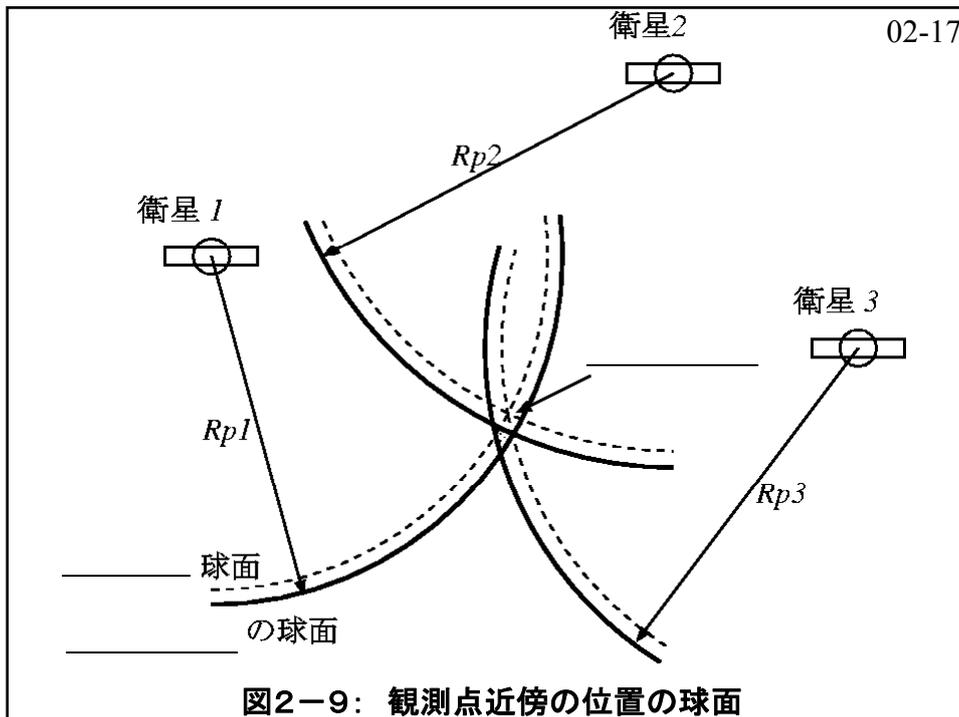


図2-8(b):



02-18

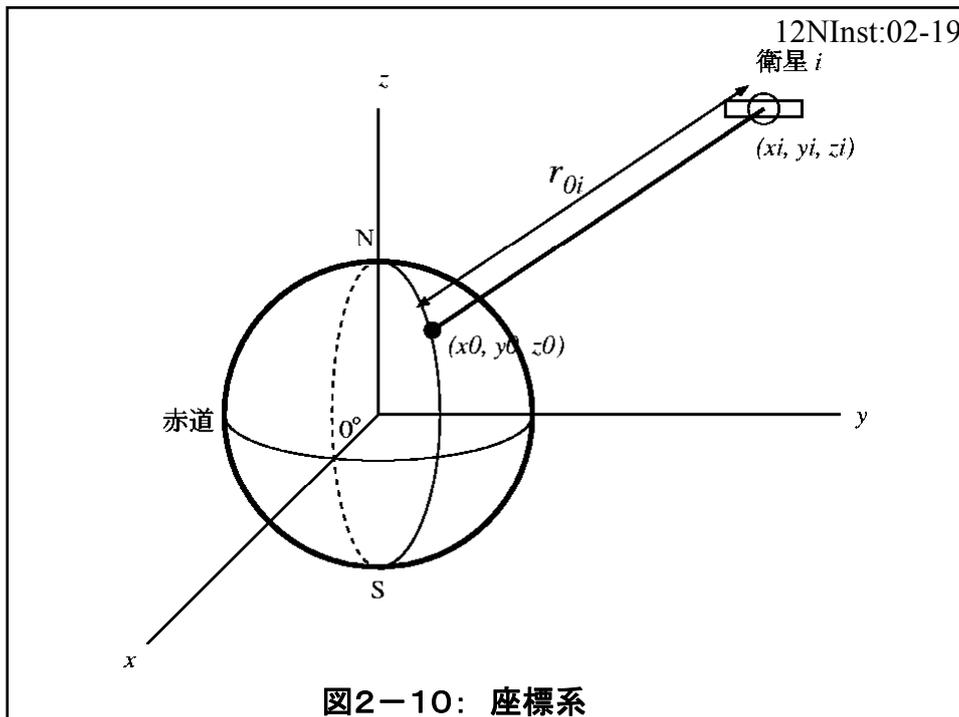
GPSにおける位置計算の手順

- ① _____
- ② _____
- ③ _____ × _____ = 測定距離

←

受信機時計のずれによる誤差を含んだ測定距離を
擬似距離 (pseudo range) と呼ぶ.

- ④ _____
(複数の衛星 → 連立方程式)



座標系の導入

02-20

地球の中心を原点, 赤道と経度0度の交点方向を x 軸,
北極方向を z 軸とする座標系
(図2-3)

受信地点 (x_r, y_r, z_r) における衛星 i との真の距離 R_i は,
衛星の位置を (x_i, y_i, z_i) とすると

$$R_i = \sqrt{\quad\quad\quad}$$

衛星 i の位置の座標: (x_i, y_i, z_i)
 観測位置の座標: (x_r, y_r, z_r) ... 求めるべき解
 解の初期値: (x_0, y_0, z_0) ... 大体の位置

求めるべき観測位置を初期値からの差分 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ で表す.

$$x_r = x_0 + \Delta x$$

$$y_r = y_0 + \Delta y$$

$$z_r = z_0 + \Delta z$$

$$R_{pi} = R_{i0} + \frac{\partial R_{pi}}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial R_{pi}}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial R_{pi}}{\partial z} \Delta z + c \Delta t_r$$

初期値 R_{i0} との差分

$$\Delta R_{pi} = \frac{\partial R_{pi}}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial R_{pi}}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial R_{pi}}{\partial z} \Delta z + \Delta S$$

$$\Delta S = c \Delta t_r$$

とする.

疑似距離 と 初期値(位置)による推定距離 との差分

$$\Delta R_{pi} \doteq R_{pi} - \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}$$

偏微分項は

$$\frac{\partial R_{pi}}{\partial x} \doteq \frac{-(x_i - x_0)}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}$$

$$\frac{\partial R_{pi}}{\partial y} \doteq \frac{-(y_i - y_0)}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}$$

$$\frac{\partial R_{pi}}{\partial z} \doteq \frac{-(z_i - z_0)}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}$$

これら偏微分項を連立方程式の係数 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ とし各衛星(衛星が4つの場合 $i = 1 \sim 4$)に対して, つぎの行列を得る.

$$\begin{pmatrix} \Delta R_{p1} \\ \Delta R_{p2} \\ \Delta R_{p3} \\ \Delta R_{p4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \alpha_4 & \beta_4 & \gamma_4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta S \end{pmatrix}$$

この行列より, 連立方程式を, 位置の補正值($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) と受信機の時計の補正值(ΔS) が十分に小さくなるまで, 繰り返し逐次計算する.

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \alpha_4 & \beta_4 & \gamma_4 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\Delta P = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta S \end{pmatrix}$$

$$\Delta R = \begin{pmatrix} \Delta R_{p1} \\ \Delta R_{p2} \\ \Delta R_{p3} \\ \Delta R_{p4} \end{pmatrix}$$

とおくと

$$\Delta R = A \cdot \Delta P$$

$$\Delta P = A^{-1} \cdot \Delta R$$

具体的な計算手順

- 手順1: (x_r, y_r, z_r) に適切な初期値 (x_0, y_0, z_0) を設定する.
手順2: 式(2-11)により ΔR_{pi} を求める.
手順3: 行列 A を求める.
手順4: 式(2-20)により ΔP を求める.
手順5: ΔP の要素 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ が十分小さいかどうか判定する.
→ 十分小さければ終了し, (x_0, y_0, z_0) を解として出力する.
→ 十分小さくなければ (x_0, y_0, z_0) に $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ を加え 手順2に戻る.

実際には受信している衛星は4つ以上になることが一般的で未知数4つに対して連立式が過剰となる. そのため, すべての方程式を用いて, できるだけ差分(誤差)が小さくなるような工夫がなされている.(重み付き最小自乗法など)