



生物環境工学基礎実験 距離と位置の計測

石井 一暢

ici@agr.hokudai.ac.jp

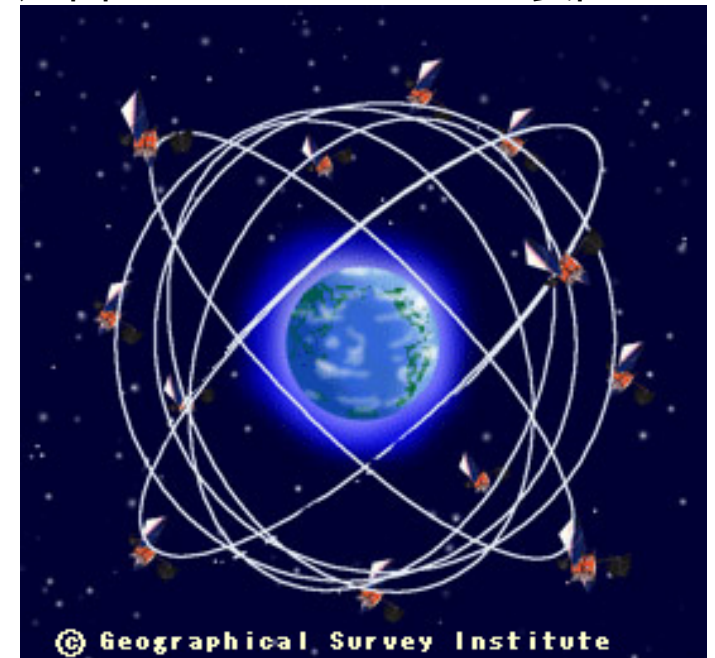
GNSSとは？



Global Navigation Satellite System(s)(全地球航法衛星システム)の略称で、地球全域で位置計測を可能とする測位システムの総称です。その代表的なものがアメリカの開発したGPSです。

GPS(Global Positioning System)は、米国防総省(DoD: Department of Defense)が1970年代に、航空機・船舶等の航法支援用として開発されたシステムです。GPS衛星は軌道高度約20,000km、周回周期0.5恒星日(約11時間58分)、6つの軌道面に4個ずつ合計24個の衛星で構成されています。衛星の重量は約800~2,000kg、複数のセシウムおよびリビジウム原子時計、衛星の管理・運営のためのさまざまな装置を搭載しています。衛星から発信された電波は受信機によって受信され、その中の情報を用いて位置を算

出することができます。このような測位システムは利用範囲が広いことから、各国での開発が進み、ロシアのGLONASS、中国のCompass、EUのGalileoなどが運用されるようになった。更に、補強システムとして、日本のQZSS、中国の北斗、フランスのDORIS、インドのIRNSSなども開発されるようになった。



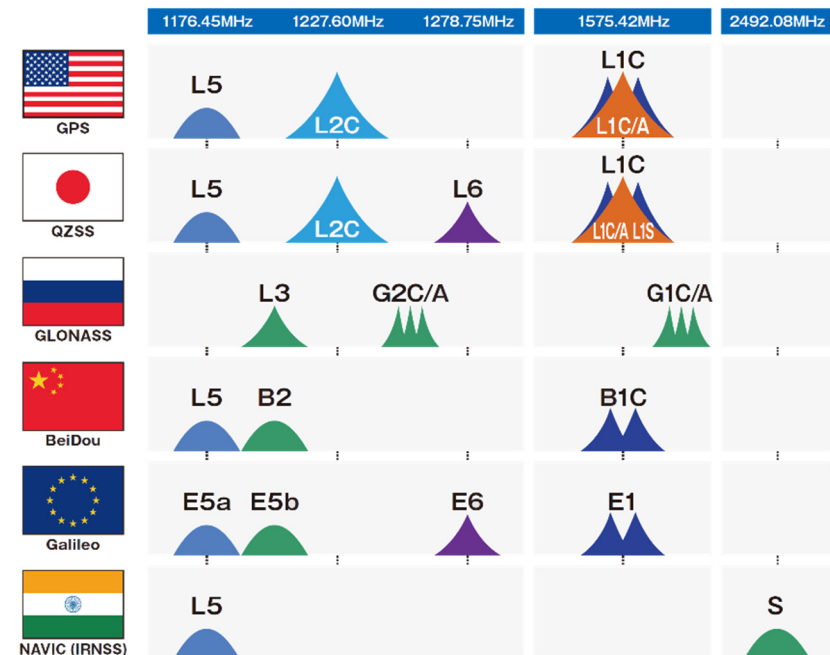
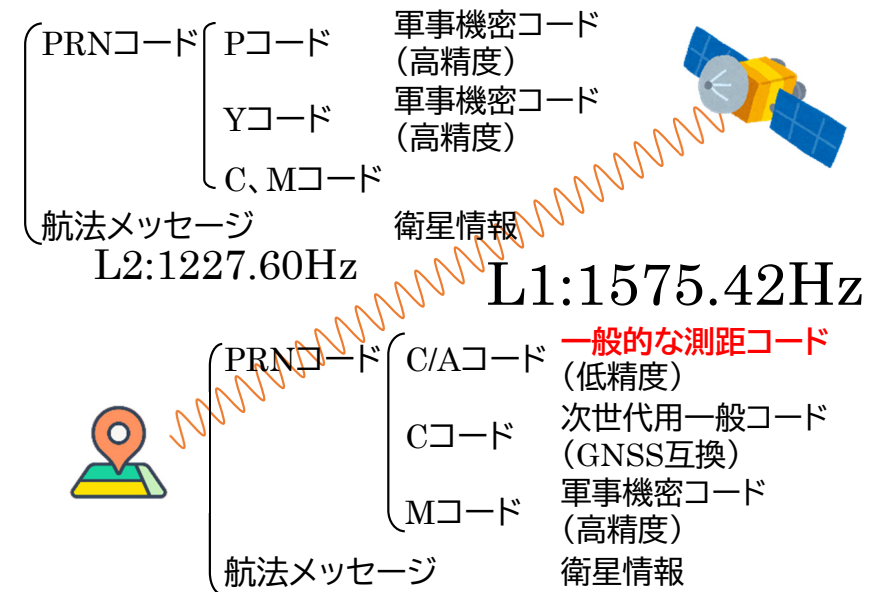
GNSS信号

GPSの特徴

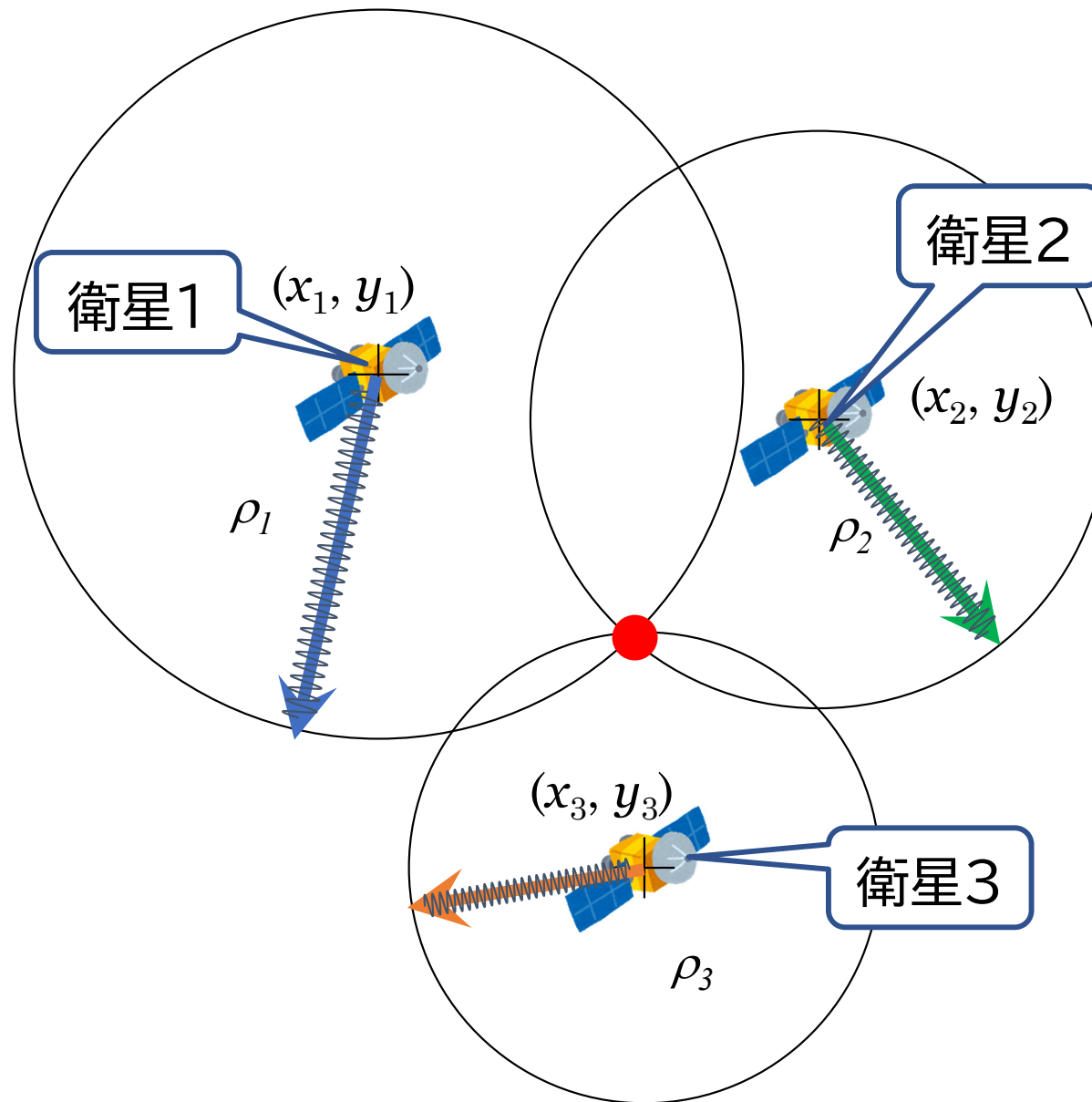
基本衛星数	24
高度	20,180km
搬送波周波数	L1(1575.42MHz) L2(1227.60MHz) L3(1381.05MHz) L4(1379.913MHz) L5(1176.45MHz)
軌道傾斜角	55度
周期	11時間58分

航法メッセージ

- 送信日時・時刻
- 衛星位置 (Ephemeris)
- 他の衛星の軌道 (Almanac)
- 電離層モデル (Klobuchar)



GNSSの測位原理



2次元で考えると

もし、既知の3点からの距離が正確に測定可能であれば、3つの円の交点から、正確な位置を計算することが可能！

信号の送信時刻 t_{si} 、受信時刻 t_{ai} 、光速を c とすると、

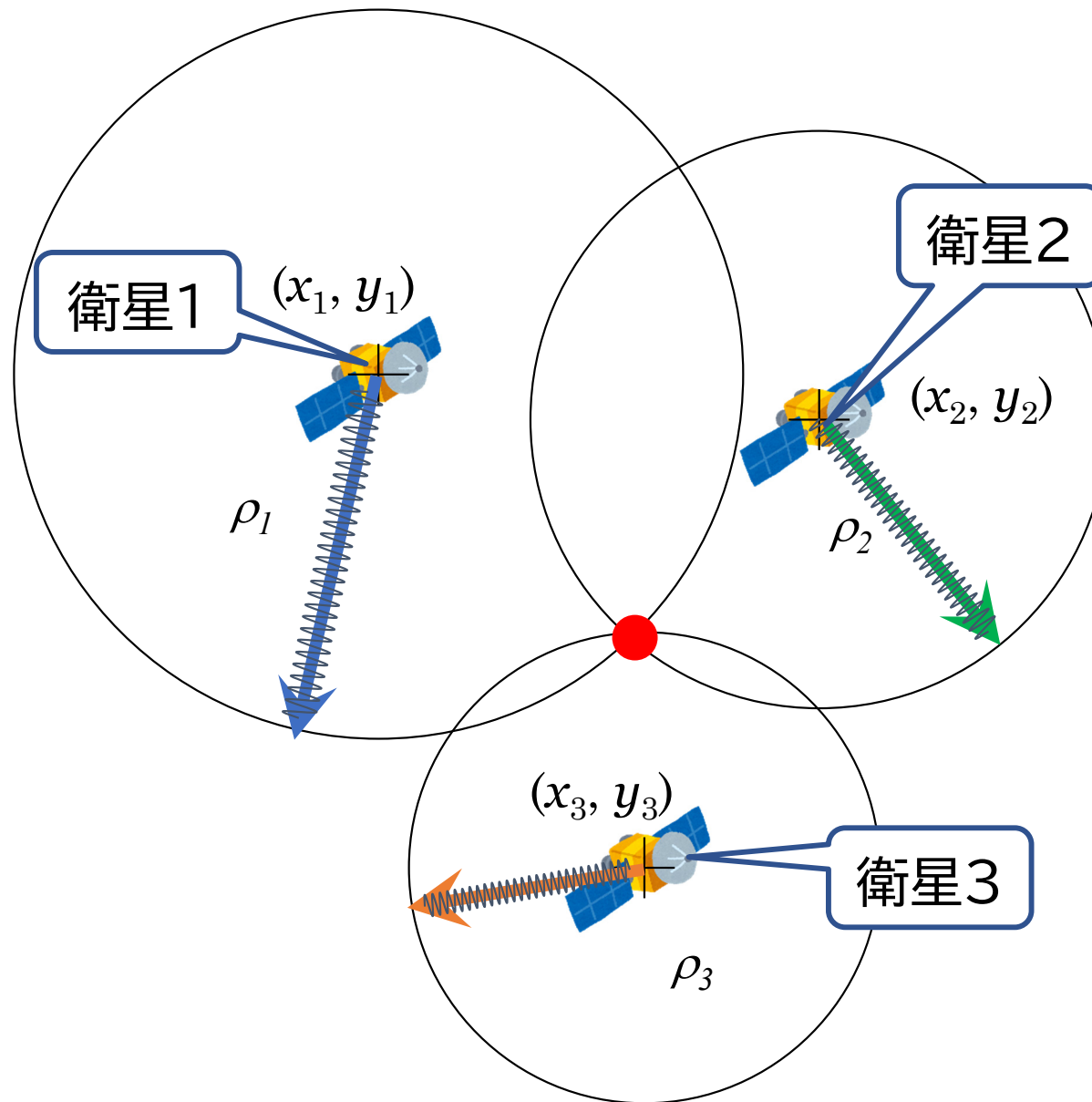
$$PR_i = c \cdot (t_{ai} - t_{si})$$

となる。実際には衛星時計と受信機時計の時差 Δt や誤差 ε があるため、補正疑似距離 ρ は、

$$\rho_i = PR_i - c \cdot \Delta t - \varepsilon_i$$

となる。

GNSSの測位原理



ここで誤差がないと考えると、 ε を無視することができ、受信機の位置 (x_r, y_r) は、

$$(PR_i - c \cdot \Delta t)^2 = (x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2$$

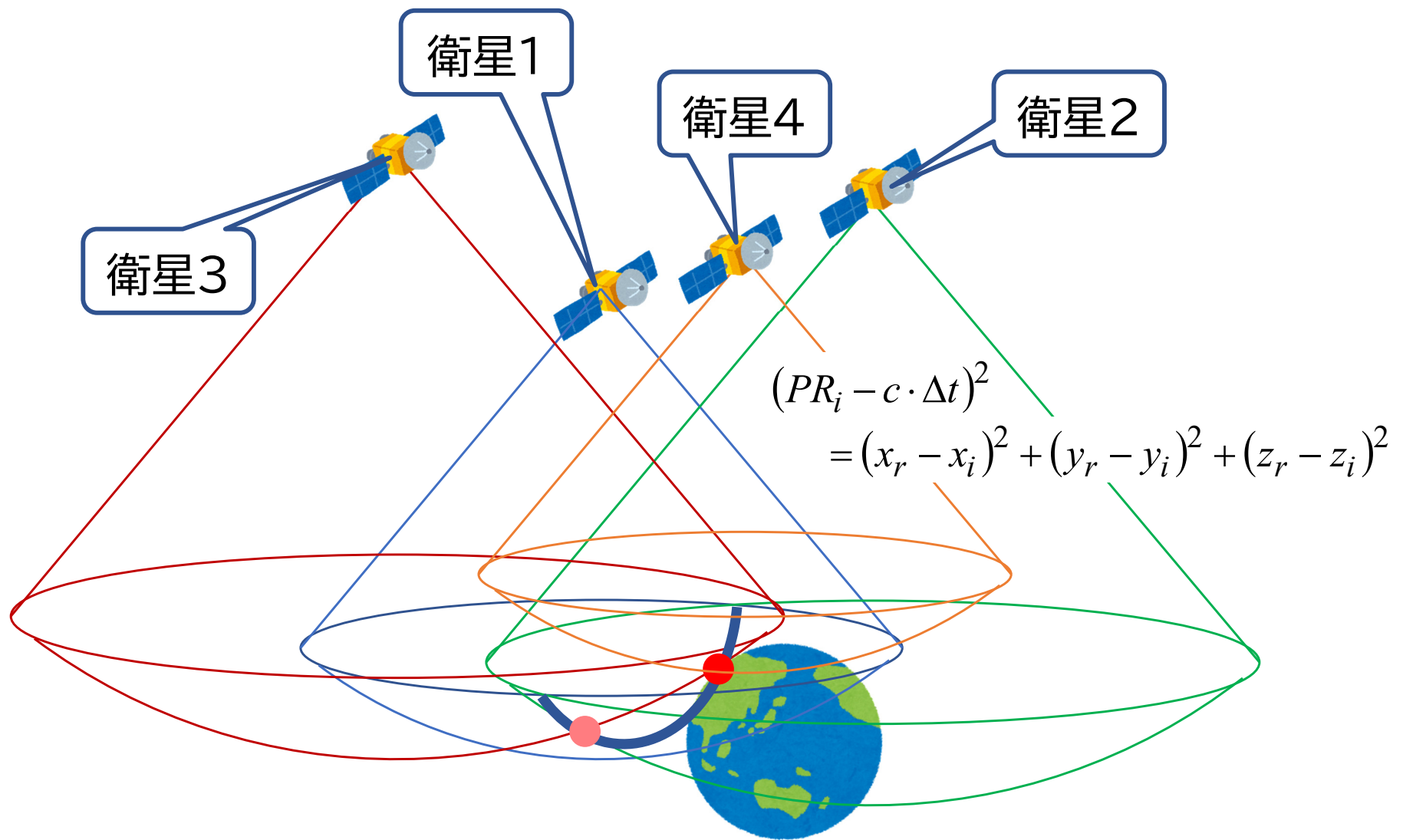
となり、

$$c^2 \cdot (t_{ai} - t_{si} - \Delta t)^2 = (x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2$$

の連立方程式を解けば良いこととなる。

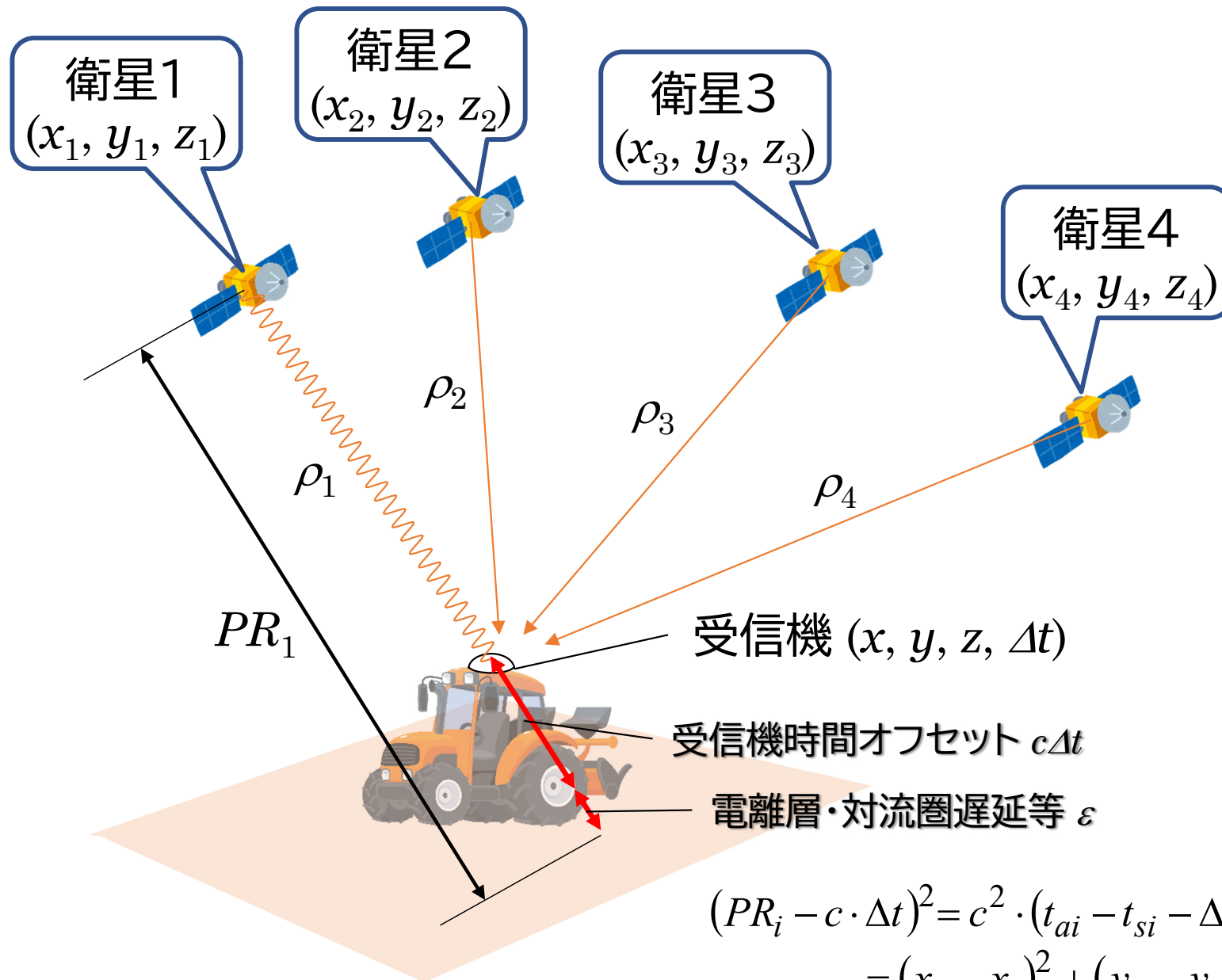
では、3次元では？

GNSSの測位原理



x_r 、 y_r 、 z_r 、 Δt の4つの未知数を含む連立方程式を解くことになるので、4つの衛星からの信号を受信する必要がある。

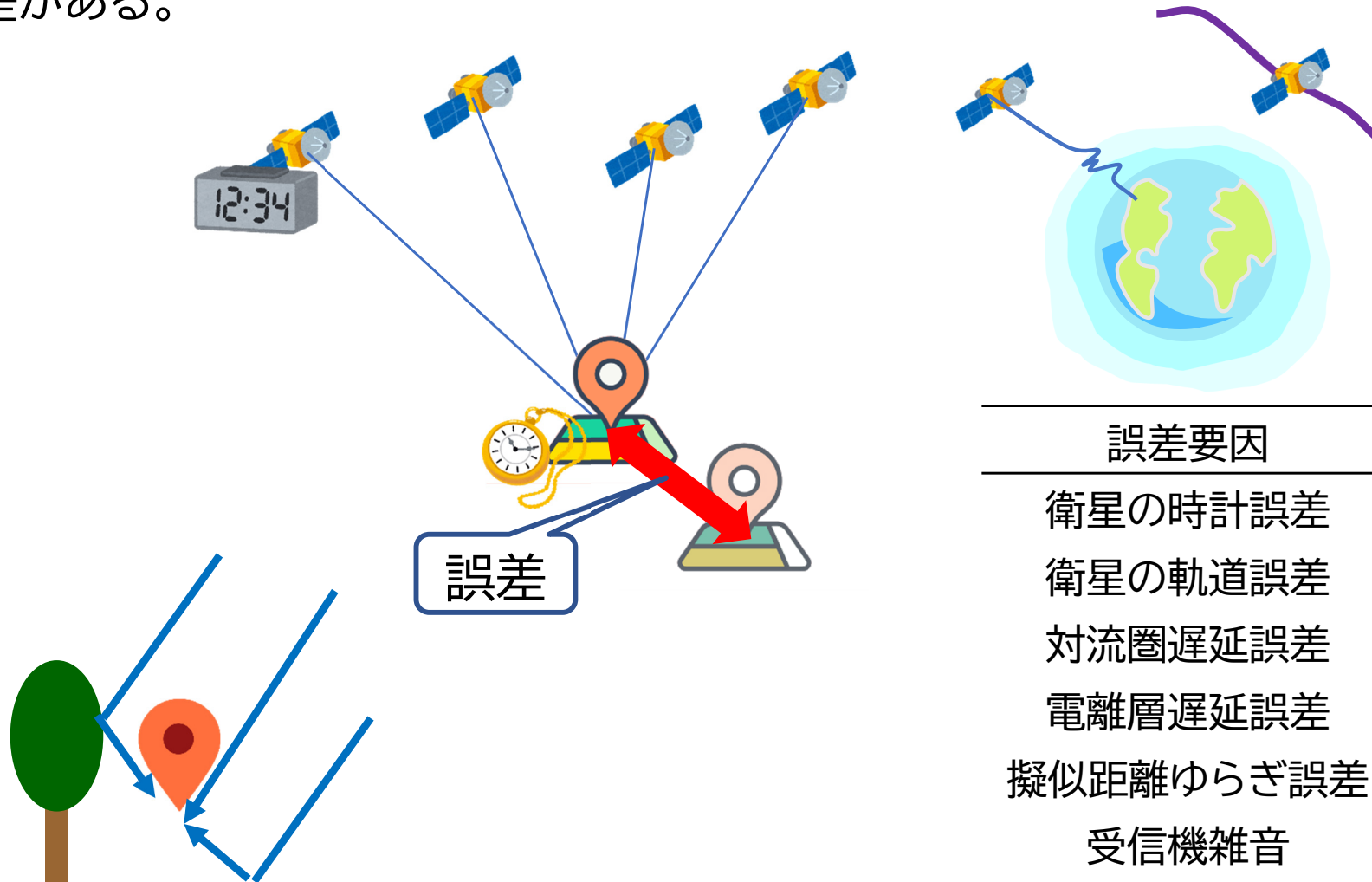
GNSSの測位原理



$$\begin{aligned}(PR_i - c \cdot \Delta t)^2 &= c^2 \cdot (t_{ai} - t_{si} - \Delta t)^2 \\ &= (x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2 + (z_r - z_i)^2\end{aligned}$$

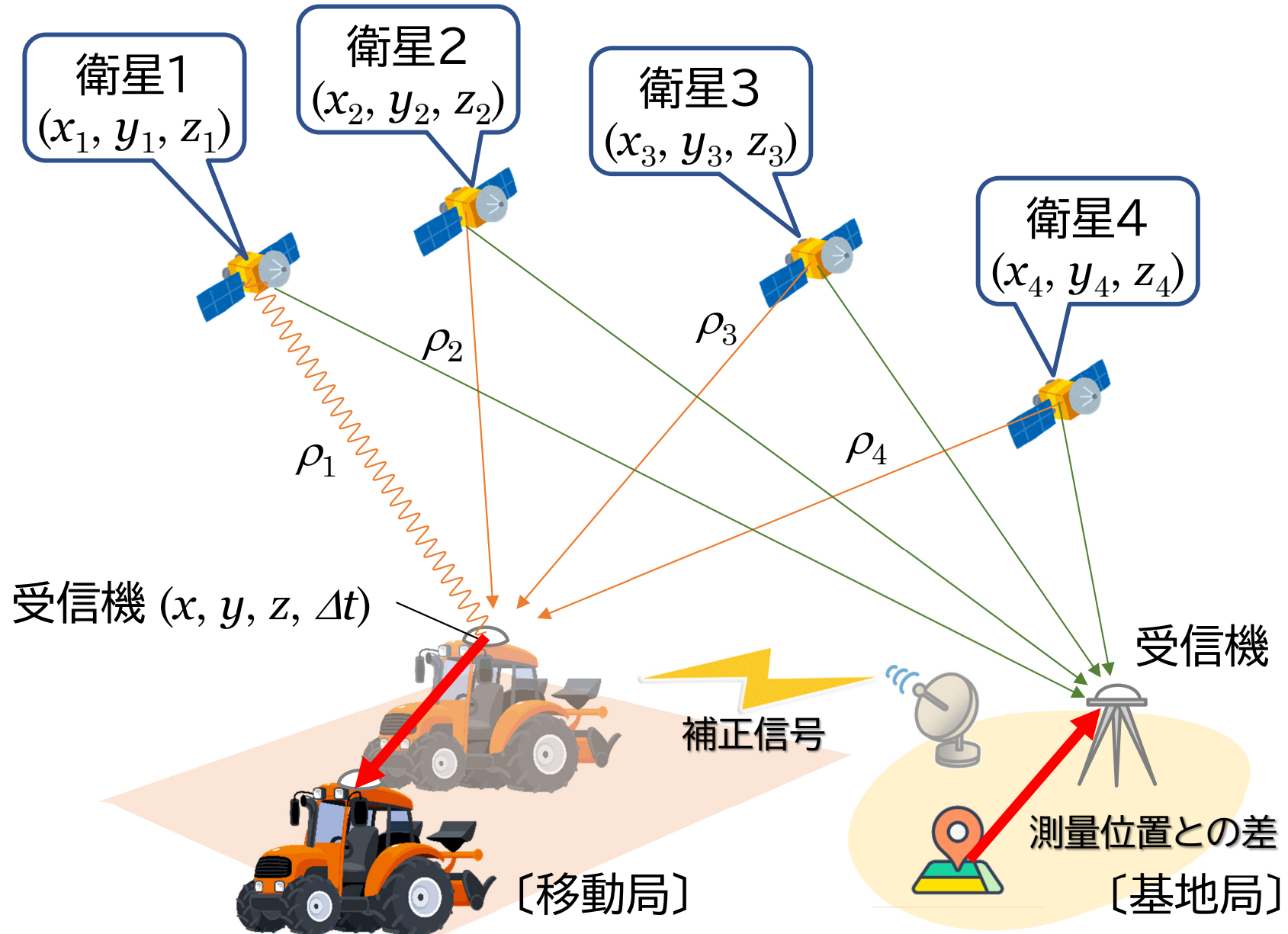
誤差要因

電離層や対流層の電波遅延, 衛星軌道誤差, 受信機周辺の障害物への信号反射によるマルチパスにより, SPS(Standard Positioning Service)で10~20mの誤差がある。



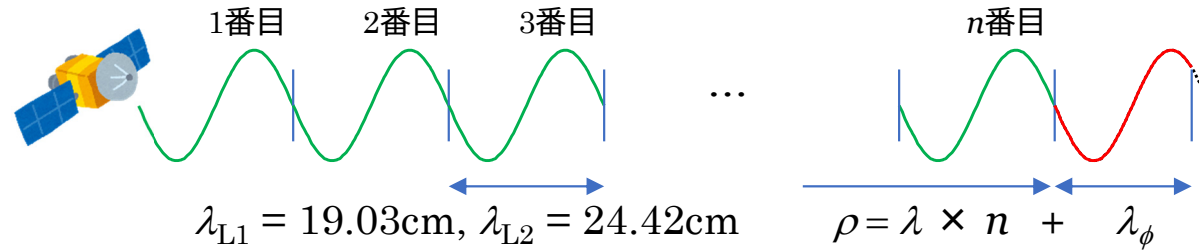
誤差の補正

Differential-GNSS(Differential Code GNSS)

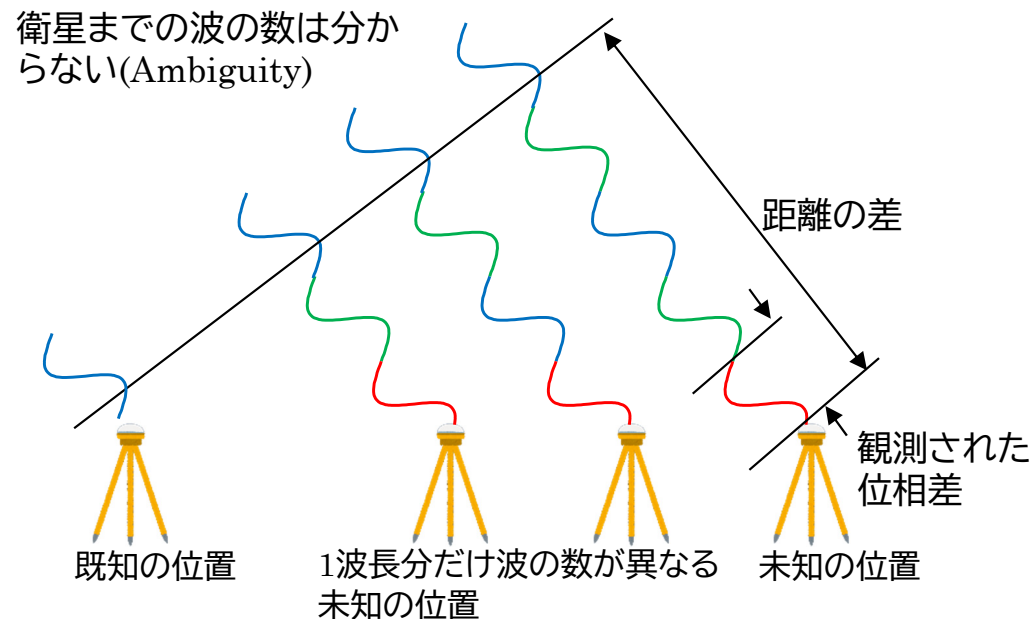


誤差の補正

位相干渉型D-GNSS(Differential Carrier GNSS)

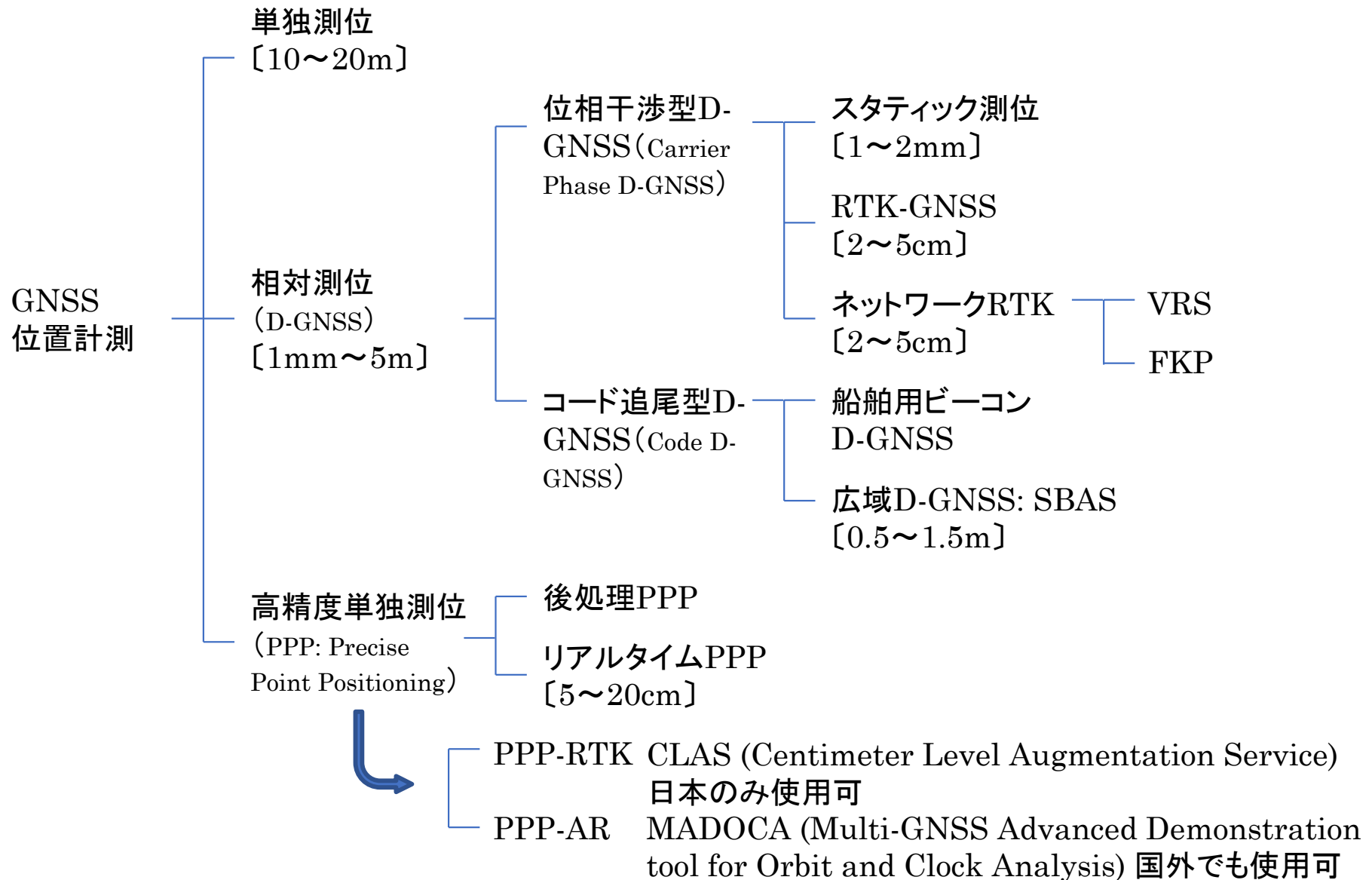


受信するL1、L2の搬送波を使用して、基準局と移動局の搬送波位相差から相対位置を計算する。L1の搬送波波長は19.03cm、L2は24.42cmであり、その位相差から擬似距離を計算することで数mmの精度で測定することが出来る。



受信位置までの波数が整数値バイアスとしての曖昧さ (ambiguity) として残る問題や、周辺の障害物によって電波がとぎれた時の測位回復法 (on-the-fly ambiguity resolution) が課題とされていたが、これらを解消する方法も開発され、様々な場所で利用されている。

誤差の補正



世界中のGNSS衛星



GPS

(32)

L1,L2/L2C,L5
Working



GLONASS

(26)

L1,L2,L3
Working



Galileo

(27)

E1,E5,E6
Working



BeiDou

(42)

B1,B2,B3
Working

Global orbital satellites



WAAS

(4)



EGNOS

(3)



MSAS

(2)



GAGAN

(2)

Working

Augmentation satellites

SBAS (satellite-based augmentation system)



QZSS

(4+3)

L1(S,Sb),L2,L5S,L6
Working (4)



NAVIC(IRNSS)

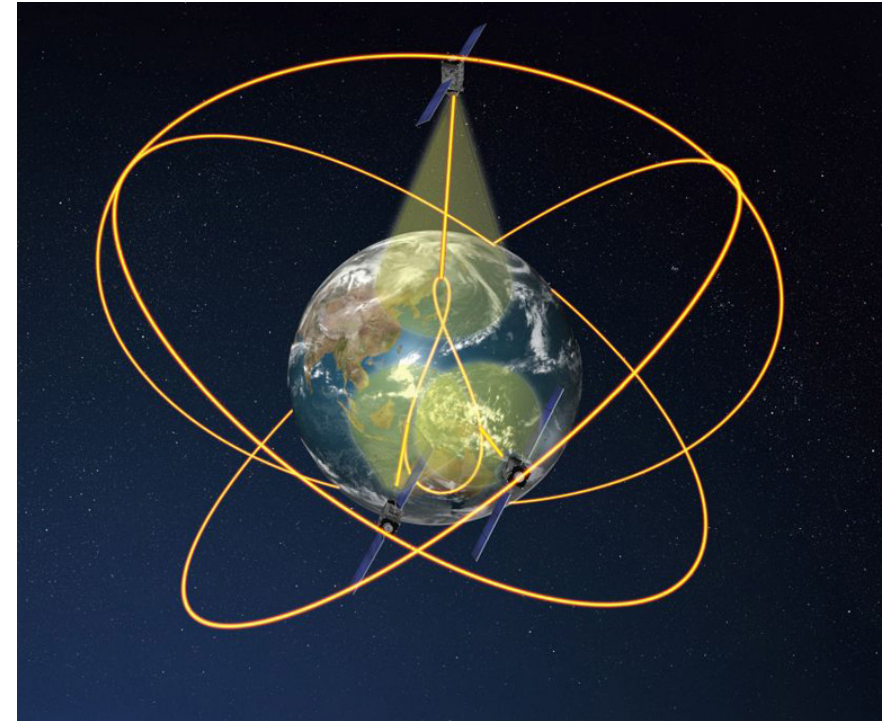
(8)

L5
Working

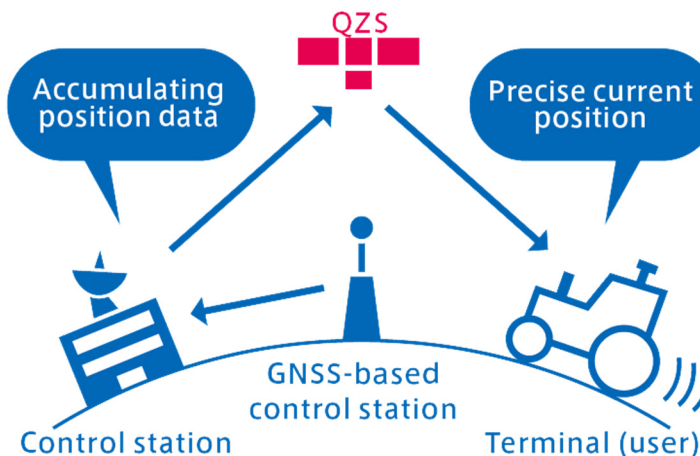
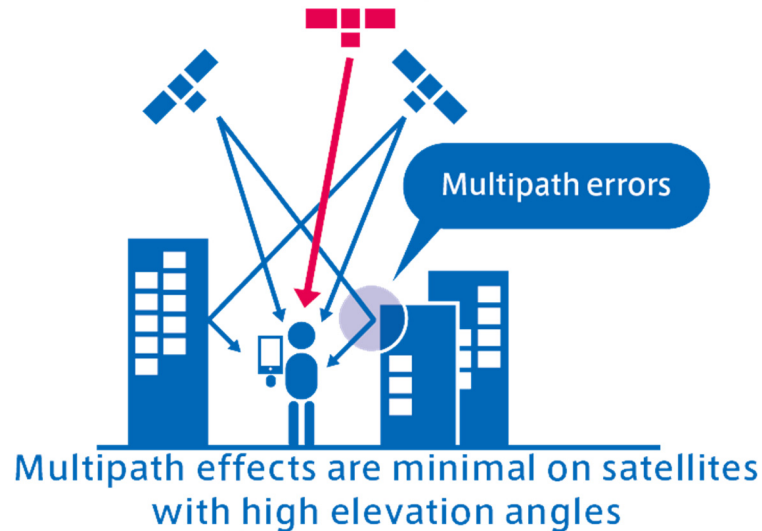
Satellites for specific region

準天頂衛星システム(QZSS)

準天頂衛星システム(QZSS: Quasi-Zenith Satellite System)は、日本を含むアジア・オセアニア地域をカバーする複数の衛星からなるGNSSです。日本のほぼ上空(準天頂)に長時間留まるように設計された初の準天頂衛星「みちびき」を利用することで、山や高層ビルなどGNSS信号が届きにくい場所での測位だけでなく、補強信号を利用することで測位精度を数cmまで上げることができます。2018年11月より4台体制で運用開始。2023年度頃に7台でのサービス提供を目指して開発を進めています。



Improved positioning accuracy by multipath reduction



GNSS信号フォーマット

NMEA-0183 Ver.2.1 フォーマット

- フォーマット表記法

\$メッセージID,データ(ない場合は空)*チェックサム<CR><LF>

- 緯度、軽度

ddmm.mmmmもしくはdddmm.mmmm(dは度、mは分)という形式で表記される。

- 時刻

協定世界時(UTC: Coordinated Universal Time)を用いて、hhmmss.ccという形式で表記される。

- 主なNMEAメッセージ

メッセージ	機能	メッセージ	機能
GGA	UTC、位置、測位に関連するデータ	GSV	衛星数、PRN、仰角、方位、SNR
VTG	方位角、対地速度	ZDA	UTC、ローカル時間とのオフセット

GGAの例

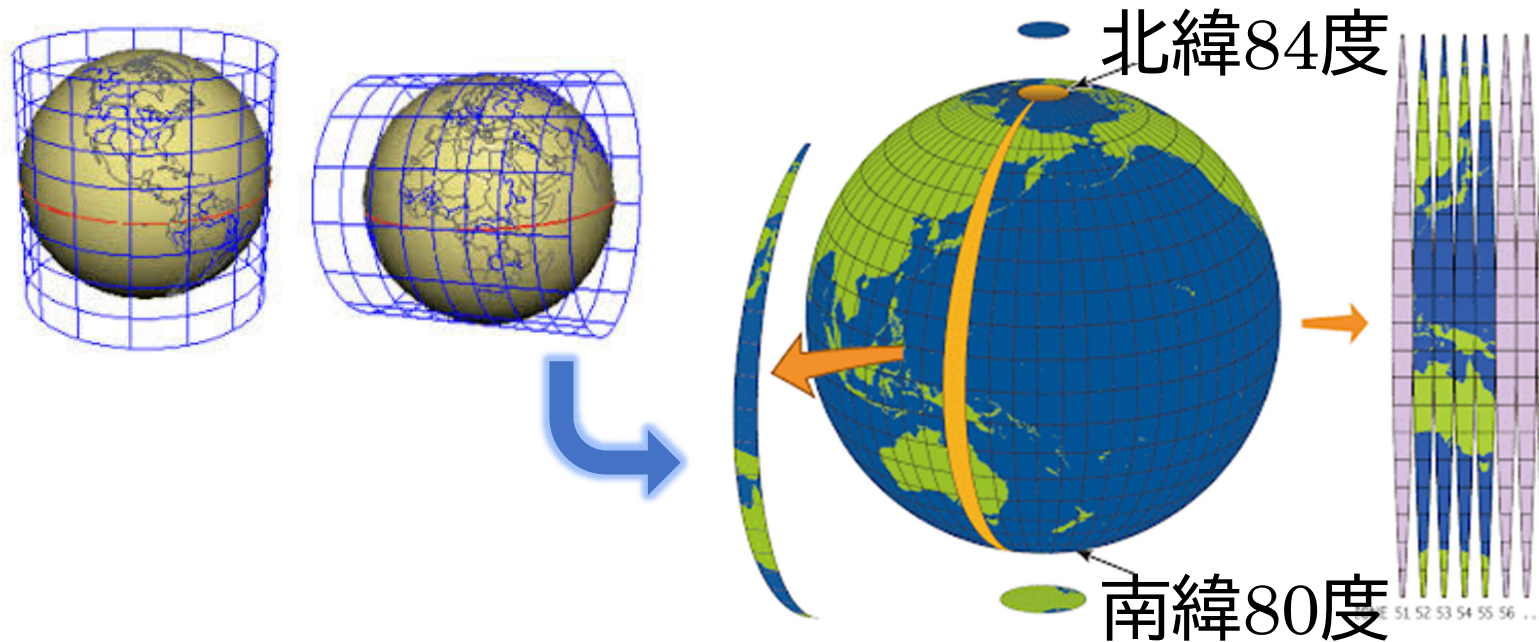
\$GPGGA,172814.0,3723.46587704,N,12202.26957864,W,2,6,1.2,18.893,M,-25.669,M,2.0,0031*4F

1	UTC	7	補足衛星数
2	緯度(ddmm.mmmm)	8	水平精度低下率(HDOP)
3	緯度の方向 N:北緯、S:南緯	9	アンテナ高
4	経度	10	M:アンテナ高の単位、メートル
5	経度の向き E:東経、W:西経	11	ジオイド高
6	GNSS品質 0: 不可、1: 単独GNSS、2: DGPS、3: PPS、4: RTK-GPS fix解、5: RTK-GPS float解、6: デットレコニング、7: 手動入力モード、8: シミュレーションモード	12	M:ジオイド高の単位、メートル
		13	DGPSデータエイジ
		14	DGPS局ID

UTM座標変換

UTM座標系は、Universal Transverse Mercator systemの略で、球形である地球を平面に表す投影法の一つである。通常のメルカトル図法では歪みの大きくなる高緯度を比較的正確に表せるが、逆に基準となる経度から東西に離れるほど歪みが大きくなる。

メルカトル図法と横メルカトル図法



UTM座標系では基準子午線から東西に離れるほど歪みが大きくなる。そこで、南緯80度から北緯84度(当初は80度であったが、カナダ等は北緯80度ではまかない切れないときもあったため)の間を西経180度から東向きに6度ずつ1～60のゾーンに分割した。

UTM座標変換

実際には基準子午線上の縮尺を1としたとき、他の部分の縮尺が大きくなる(赤道上で基準経度から3度離れると1.00137)。そこで、これを修正するために、縮尺係数0.9996を用いる。この結果、相対誤差の絶対値は4/100,000以内となる。

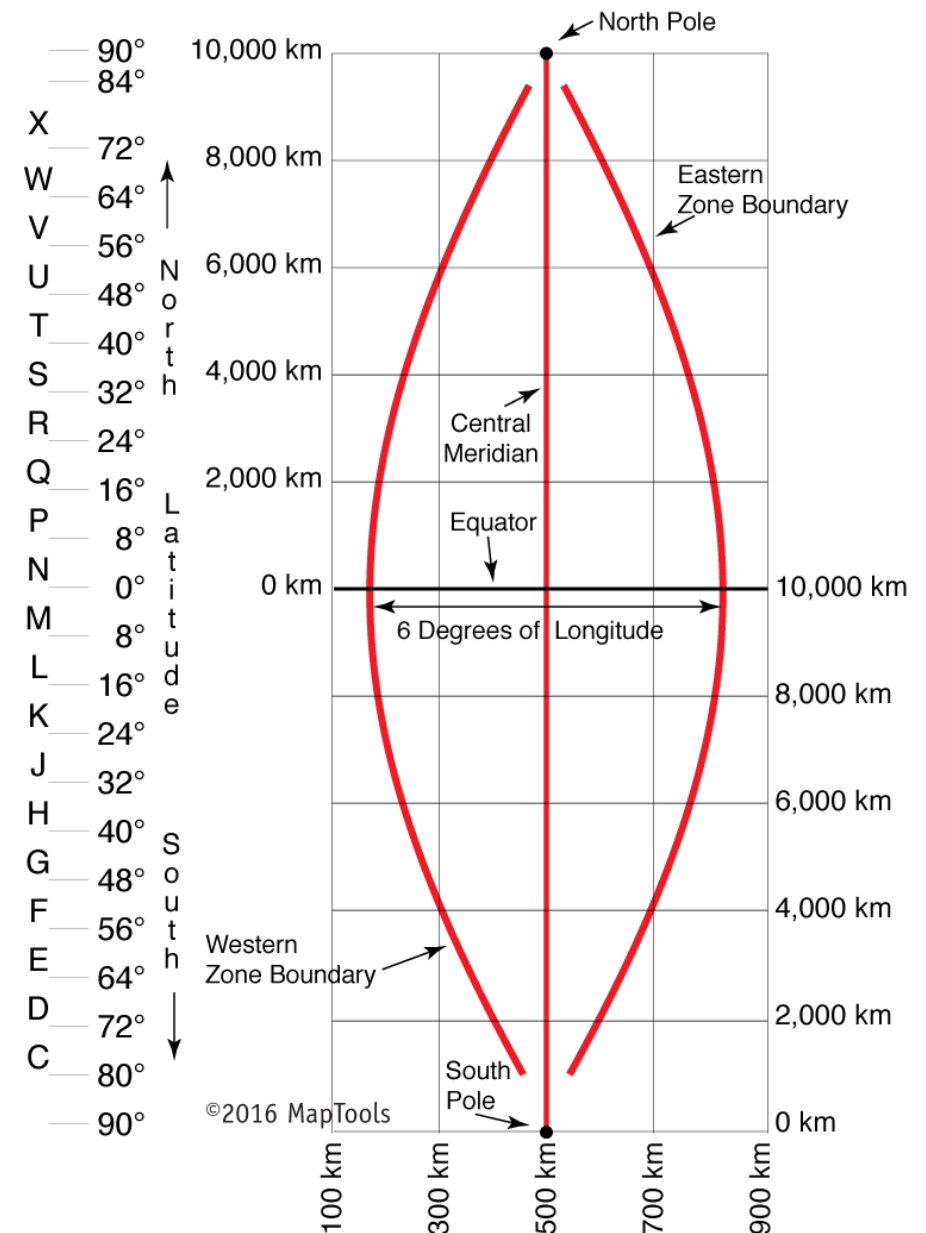
各ゾーンの基準は、赤道と中央子午線の交点とし、赤道を横軸、経線を縦軸として、それぞれをEasting、Northingと呼ぶ。

Eastingは基準子午線の値を500,000[m](500[km])と設定する。

赤道 : 160,000[m] ~ 834,000[m]

N84° : 465,999[m] ~ 515,000[m]

Northingは北半球では赤道を0[m]に、南半球では赤道を10,000,000[m](10,000[km])となるように座標を計算する。



座標換算式

地球楕円体の長半径を a 、扁平率を f 、中央子午線の経度を λ_0 としたとき、緯度 φ 、経度 λ の点からUTM座標を計算する。 N_0 、 E_0 はNorthing、Eastingそれぞれのオフセット値で、 N_0 は北半球では0[m]、南半球では 1.0×10^7 [m]を用いる。

$$n = \frac{f}{2-f}, A = \frac{a}{1+n} \left(1 + \frac{n^2}{4} + \frac{n^4}{64} + \dots \right),$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2}n - \frac{2}{3}n^2 + \frac{5}{16}n^3, \alpha_2 = \frac{13}{48}n^2 - \frac{3}{5}n^3, \alpha_3 = \frac{61}{240}n^3$$

中間変数 t 、 ξ 、 η を以下のとおり定め、これらを用いて E (asting)、 N (orthing)を求める。

$$t = \sinh \left(\tanh^{-1} \sin \varphi - \frac{2\sqrt{n}}{1+n} \tanh^{-1} \left(\frac{2\sqrt{n}}{1+n} \sin \varphi \right) \right)$$

$$\xi' = \tan^{-1} \left(\frac{t}{\cos(\lambda - \lambda_0)} \right), \eta' = \tanh^{-1} \left(\frac{\sin(\lambda - \lambda_0)}{\sqrt{1+t^2}} \right)$$

$$E = E_0 + k_0 A \left(\eta' + \sum_{j=1}^3 \alpha_j \cos(2j\xi') \sinh(2j\eta') \right)$$

$$N = N_0 + k_0 A \left(\xi' + \sum_{j=1}^3 \alpha_j \sin(2j\xi') \cosh(2j\eta') \right)$$

配布データは
UTM座標変換済を
渡すので、
心配しないで下さい！

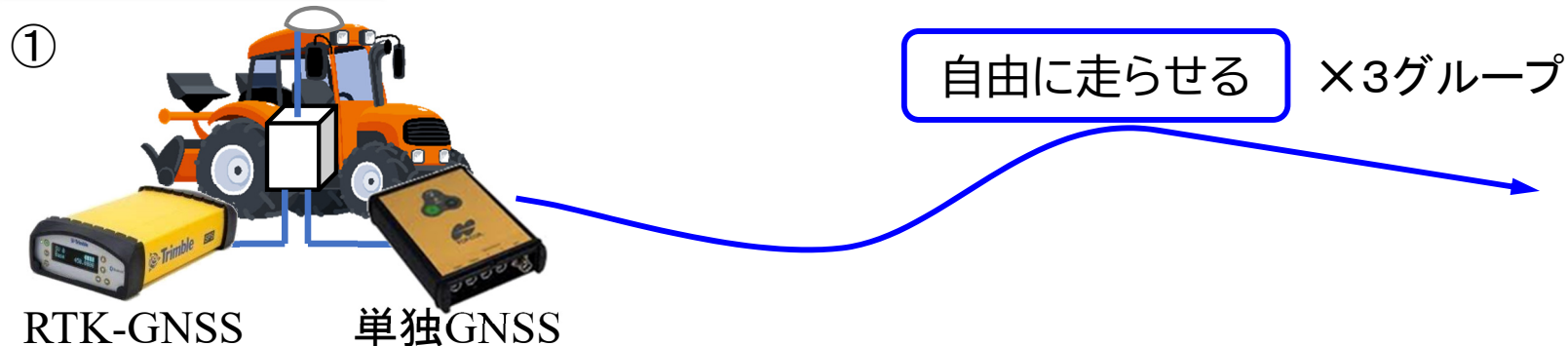
実験の内容

単独GNSS、D-GNSS、RTK-GNSSによる静的測位を行い精度評価を行う。また、トラクタに搭載して走行させることで動的精度評価を行う。

静的測位実験



動的測位実験



データ整理

- 1) 静的測位データから、単独GNSS、D-GNSS、RTK-GNSS、低価格RTK-GNSSのそれぞれについて、UTM座標系(横軸をEasting、縦軸をNorthing)での測位位置をグラフ化し、時間とともにどのように変化しているかを確認する。
- 2) 単独GNSS、D-GNSS、RTK-GNSS、低価格RTK-GNSSのそれぞれについて、基準位置からの距離誤差を求め、**CEPを求める**。ただし、RTK-GNSS、低価格RTK-GNSSは平均位置を基準位置とし、単独GNSS、D-GNSSは同時に測位したRTK-GNSSの平均位置を基準位置とする。
- 3) 動的測位実験データから走行軌跡をグラフ化する。

データの解析方法等については各自で工夫してみてください。
- 4) 動的測位実験から単独GNSSとRTK-GNSSの誤差を求め、精度を評価する。

【演習問題】

- 1) 現在のGNSSの動向および精度補正法について調べよ。
- 2) ナビゲーション技術やリモートセンシング技術において、位置や距離に限らず必要と思われるセンサを列記し、その特徴を述べよ。

データ整理

CEPを求める(RTK-GNSSと単独GNSSの例)

①まずRTK-GNSSのファイルを開きます。

②P列、Q列を小数点以下第4位まで表示にしておきましょう。

③EastingとNorthingの平均値(基準位置)を求めます。

④EastingとNorthingそれぞれについて、平均値との差を求めます。さらにそれらから距離を求めます。

⑤求めた基準位置との距離を用いてデータを並べ替える

⑥計測したデータ数の真ん中(例えばデータ数が324個なら、その半分の162番目)の距離がCEPを表すことになる。

これが基準になる位置

これが基準位置との距離

$\sqrt{\text{Eastingの差}^2 + \text{Northingの差}^2}$

Northing - Northingの平均値

Easting - Eastingの平均値

この円の中に全データの50%が入っている

基準位置

この距離が CEP

	P	Q	R	S	T	U											
319	\$GPGGA	72259	4304.36851	N	14120.21712	E	4	13	0.8	15.3	M	32	M	1	860	4768955.1895	527431.9624
320									0.8	15.3	M	32	M	1	860	4768955.1895	527431.9624
321									0.8	15.3	M	32	M	1	860	4768955.1895	527431.9624
322									0.8	15.3	M	32	M	1	860	4768955.1895	527431.9624
323									0.8	15.3	M	32	M	1	860	4768955.1895	527431.9624
324									0.8	15.3	M	32	M	1	860	4768955.1895	527431.9624

	P	Q	R	S	T	U
161	\$GPGGA	72053	4304.36851			
162	\$GPGGA	72054	4304.36851			
163	\$GPGGA	72055	4304.36851			
164	\$GPGGA	72057	4304.36851			

	P	Q	R	S	T	U
161				-0.0002	0.0037	0.003724
162				-0.0002	0.0037	0.003724
163				-0.0002	0.0037	0.003724
164				-0.0002	0.0037	0.003724

	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
161				-0.0002	-0.0098	0.009781				
162				-0.0002	-0.0098	0.009781				
163				-0.0002	-0.0098	0.009781				
164				-0.0002	-0.0098	0.009781				

データ整理

CEPを求める(RTK-GNSSと単独GNSSの例)

⑦次に単独GNSSのファイルを開きます。

GNSSステータス

- 1: 単独GNSS
- 2: D-GNSS
- 4: RTK-GNSS fix解
- 5: RTK-GNSS float解

⑧P列、Q列を小数点以下第4位まで表示にしておきましょう。

⑨EastingとNorthingの基準位置に、RTK-GNSSで求めた基準位置の値をコピーします。

RTK-GNSSのデータ

⑩ RTK-GNSS の④～⑥と同様にして、CEPを求めます。

1	\$GPGGA	71850	4304.368283	N	14120.21697	E	1	9	1.1		
2	\$GPGGA	71851	4304.368287	N	14120.21697	E	1	9	1.1	10.5455	M
3	\$GPGGA	71852	4304.368298	N	14120.21697	E	1	9	1.1	10.4736	M

10.8712	M	33.1167	M			4768954.8443	527431.8999
10.8525	M	33.1167	M			4768954.8552	527431.9016
10.8218	M	33.1167	M			4768954.8639	527431.9031
10.7895	M	33.1167	M			4768954.8724	527431.9012
10.7557	M	33.1167	M			4768954.8730	527431.8987
						4768955.1897	527431.9587

322	\$GPGGA	72302	4304.36851	N	14120.21712	E	4	13	0.8	15.3	M	32	M	1	860	4768955.189	527431.9624
323	\$GPGGA	72303	4304.36851	N	14120.21712	E	4	13	0.8	15.3	M	32	M	1	860	4768955.189	527431.9624
324																4768955.189	527431.9624
																4768955.1897	527431.9587