

距離と位置の計測

1. 目的

ほ場内で作業する上で、いまどこにいるのかを高精度に知ることができれば、農作業技術は予想もできないような変革が期待できる。今日、航空機・ロケット・車両などの移動体の測位または航法技術の重要性が増す一方で、高精度航法に向けての技術革新が営々と続けられている。この最先端に位置するものが GPS (Global Positioning System) で、米国防総省 (DoD: Department of Defense) が 1970 年台に開発を始め、現在運用している。この技術は当然農業現場へも応用でき、既に GPS を応用した農作業技術に関する研究が米国・ヨーロッパを中心に始められている。また、

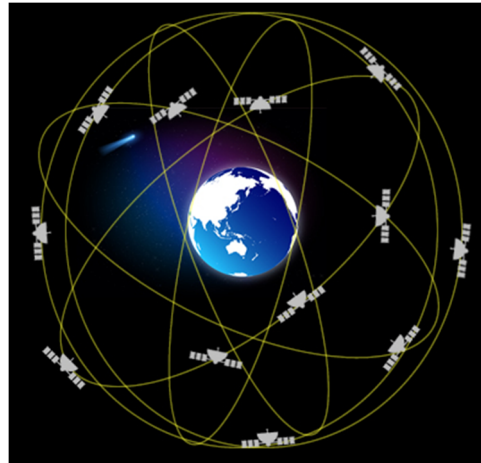


図1 GPS 衛星配置のイメージ

農用移動ロボットのナビゲーション技術に対しても GPS を利用することで飛躍的に進展することは自明である。特に、高精度に測位できるリアルタイム位相干渉型 DGPS が実用化したことに伴い、いままで夢であったロボット農業も現実的となっている。このような背景から、各国で測位技術の開発が進み、ロシアでは GLONASS、中国では Compass、EU では Galileo が運用を開始している。また、これらを補強し測位精度を高めるための衛星測位システムとして、日本の QZSS、中国の北斗、フランスの DORIS、インドの IRNSS も開発されている。これらを総称し、現在は GNSS (Global Navigation Satellite System(s)) と呼ばれている。

本実験では、GNSS の測位原理を学び、その測位精度を評価してみる。単独測位、トランスロケーション方式の Differential-GNSS、リアルタイム・キネマティクス GNSS のそれぞれの位置計測精度を実験により確認し、それぞれの長所・短所を考察することが目的である。

2. GNSS の測位原理と座標系

1) GNSS 信号と受信機

表1に GNSS 信号 (GNSS Satellite Signals) の仕様を示した。衛星は GNSS 信号として L1(1575.42MHz)と L2(1227.6MHz)を搬送波として送信し、その上に利用者が使用する PRN コード (Pseudo Random Noise Code) と航法メッセージ (Navigation Message) が変調されている。2 波を送信するのは電波の電離層遅延補正のためであるが、L1、L2 の2周波を受信できる受信機は高価であり、L1 だけ受信するものもある。測距信号である PRN コードは3種類あり、それぞれ C/A コード (Clear and Acquisition Code)、P コード (Precision Code) および Y コード (Y Code) である。このうち、C/A コードは L1 搬送波に載せられており、一般の利用者に公開され、自由に使用することができる。また、衛星毎に異なったコードが割り当てられており、1ms に相当する 1023 ビットのデータ長である。一方、C/A コードよりも高精度に測距

表1 GNSS 信号(GNSS Satellite Signals)の仕様

| | PRN コード | | 航法メッセージ |
|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| | C/A コード | P(Y)コード | L1、L2 |
| 搬送波 | 1575.42MHz (L1) | 1575.42MHz (L1) 1227.6MHz (L2) | |
| コード長 | 1023bit=1ms | 約 6×10^{12} bit=7day | 900bit (Ephemeris) + 600bit (Almanac) =1500bit |
| チップレート | 1.023Mbps | 10.23Mbps | 50bps |
| その他 | 衛星ごとに異なる PRN コードが割り 当てられている | | Ephemeris は1時間ごとに更新。 Almanac は不定期に更新され、 1/25 ずつ送信し、全ての情報を 収集するのに12.5 分かかる |

できるPコードは機密扱いであったが、これを受信できる受信器も製品化されていた。PコードはL1とL2の両搬送波に変調されているが、有事の際にはPコードを軍事用のYコードに変更し、当局の関係者以外は使用することができない。このことをA-S(anti-spoofing)と呼ぶ。しかし、長年の間にPコードも民間に知れ渡るようになっており、軍事利用にはYコードのみが使用されるようになった。さらに、有事に敵国がPコードを使用できないよう、C/AコードにはS/A(Selective Availability)と呼ばれる故意の精度劣化情報が含まれていたが、2000年5月2日以降恒久的に解除されることとなった。この結果、単独GNSSでの精度が飛躍的に向上し、民生用途へのGNSS普及が加速することとなった。また、利用者がGNSSを用いて測位する上で、衛星の軌道を取得することが必要となる。この航法メッセージは50bit/sでPRNコードと同時送信される。衛星の軌道情報と時計の補正データをエフェメリス(Ephemeris)といい、1時間毎に更新され、逐次の衛星位置の計算に使用される。また、全ての衛星のおおよその軌道情報であるアルマナック(Almanac)と呼ばれるデータも、エフェメリスとともに送信されている。

2) 測位原理と精度

GNSSによる測位は、WGS84(World Geodetic System)と呼ばれる基準座標系を用いており、衛星と受信機位置の疑似距離(Pseudo range)によって計算される。図1に示したように、衛星*i*からの疑似距離 PR_i はGNSS信号の送信時刻 t_{si} と受信時刻 t_{ai} の差に光速*c*を掛けたものとして定義される。

$$PR_i = c(t_{ai} - t_{si}) = \rho_i + c\Delta t + \varepsilon_i \quad (1)$$

ここで、 ρ は補正疑似距離になり、 Δt は衛星時計と受信機時計との間の時差、 ε は誤差を表している。したがって、 ε を無視するとGNSS受信機位置(x_r, y_r, z_r)について以下の関係式を導くことができる。

$$(PR_i - c\Delta t)^2 = (x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2 + (z_r - z_i)^2 \quad (i=1 \sim 4) \quad (2)$$

すなわち、受信機の3次元位置を算出するためには、同時に4衛星のエフェメリスからの衛星位置(x_i, y_i, z_i)と疑似距離 PR_i を計測して、時差 Δt と受信機位置(x_r, y_r, z_r)を含む4未知

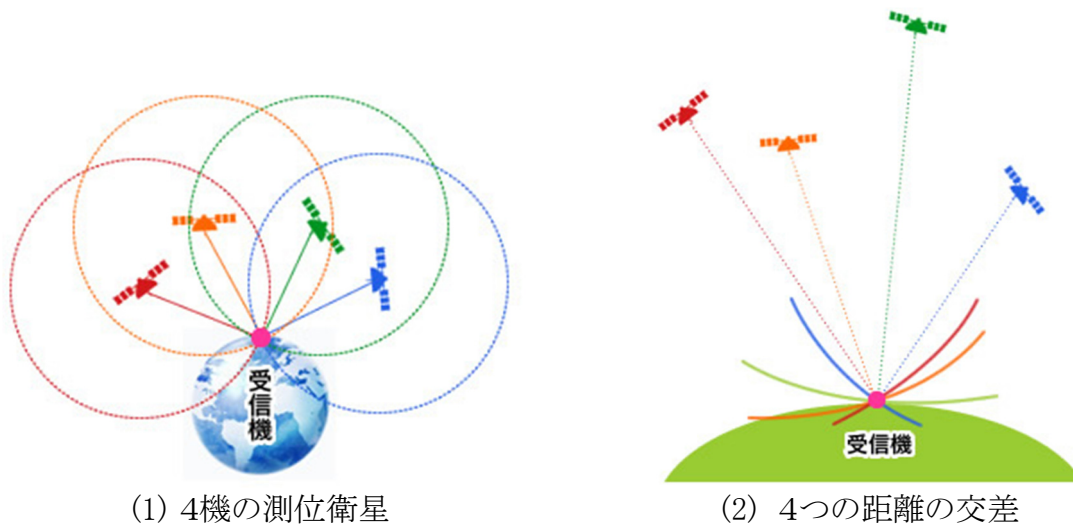


図2 衛星測位のイメージ

数を含む連立方程式を解く必要がある。しかし、ここで使用した補正疑似距離には電波の電離層遅延、対流圏遅延などの誤差 ϵ が含まれ、精度を向上させるためには、L1、L2の2波を使用する、もしくは航法メッセージのパラメータを用いた補正モデルを用いて、補正疑似距離 ρ を算出することが要求される。

GNSSの測位精度は、C/Aコードと航法メッセージだけを使う一般ユーザーのためのSPS (Standard Positioning Service)と米国の許可を受けて、L1、L2の2周波数とPコードが使用できるPPS (Precise Positioning Service)があり、一般ユーザー向けのSPSの測位誤差は10~20mに及ぶ。この誤差原因としては衛星から受信機に電波を送る際の電離層、対流層の電波遅延、衛星の時計誤差、衛星軌道の誤差、受信機周辺の障害物に衛星信号が反射して受信アンテナに入射するマルチパスの影響などがあげられ、各要因のおおよその誤差は

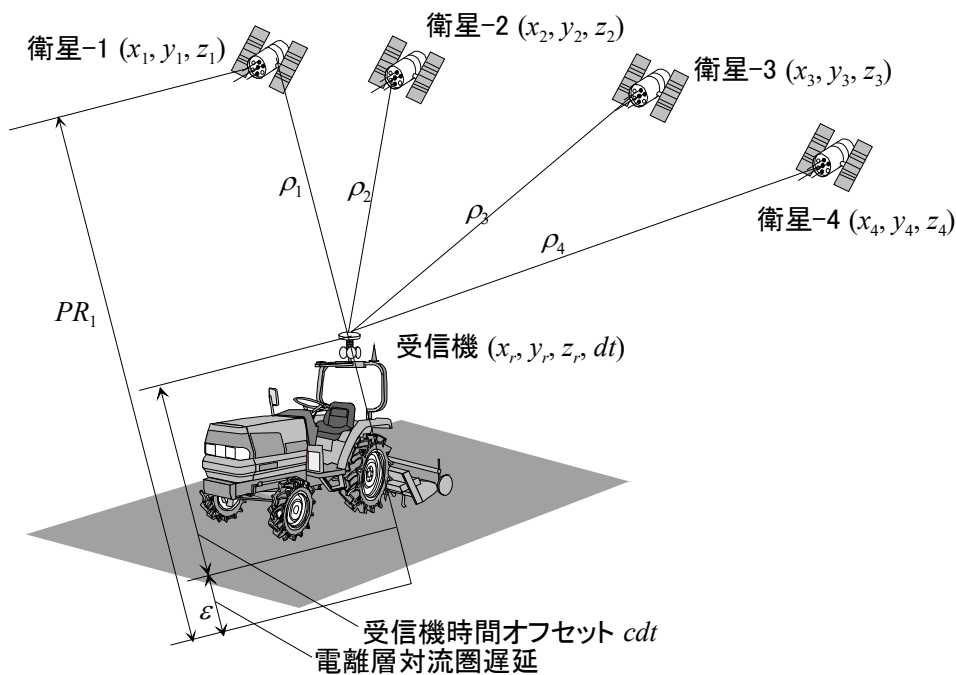


図3 GNSS 単独測位の原理

表2 GNSS の精度と誤差要因

| 誤差要因 | 単独測位GNSS | トランスロケーション方式DGNSS |
|-----------|----------|-------------------|
| 衛星の時計誤差 | 1m | 0m |
| 衛星の軌道誤差 | 10m | 0m |
| 対流圏遅延誤差 | 2.5m | 2ppm |
| 電離層遅延誤差 | 10m | |
| 擬似距離ゆらぎ誤差 | 1m | 1m |
| 受信機雑音 | 0.4m | 0.5m |
| マルチパス | 0.5m | 0.5m |

表2の通りである。

3) Differential-GNSS (Differential Code GNSS)

上述した誤差を除去でき、GNSS の測位精度を向上させる上で、有効な方法に相対測位法、D-GNSS がある。この方法が実用化したことによって、GNSS の農業分野への応用研究が盛んになった背景もある。D-GNSS は位置が正確にわかった基準局で測定した擬似距離に基づく補正值もしくは位相情報を移動局に送ることによって、測位精度を向上させる技術であり、コード追尾型の受信機を使用して構成する方式と L1、L2 の搬送波の位相を使用して測位する方式に分類される。両者とも基準局と移動局の受信機が同じ衛星信号を受信して同時測位することが条件となる。このうち、簡易に構成できるコード受信機による D-GNSS をトランスロケーション方式 D-GNSS と呼ぶ。一般に D-GNSS というはこのトランスロケーション方式を指すことが多く、測位誤差は 0.5~5m といわれており、上述した誤差因子のほとんどを除去することができる。図2にトランスロケーション方式の概念図を示し、表2に単独測位と

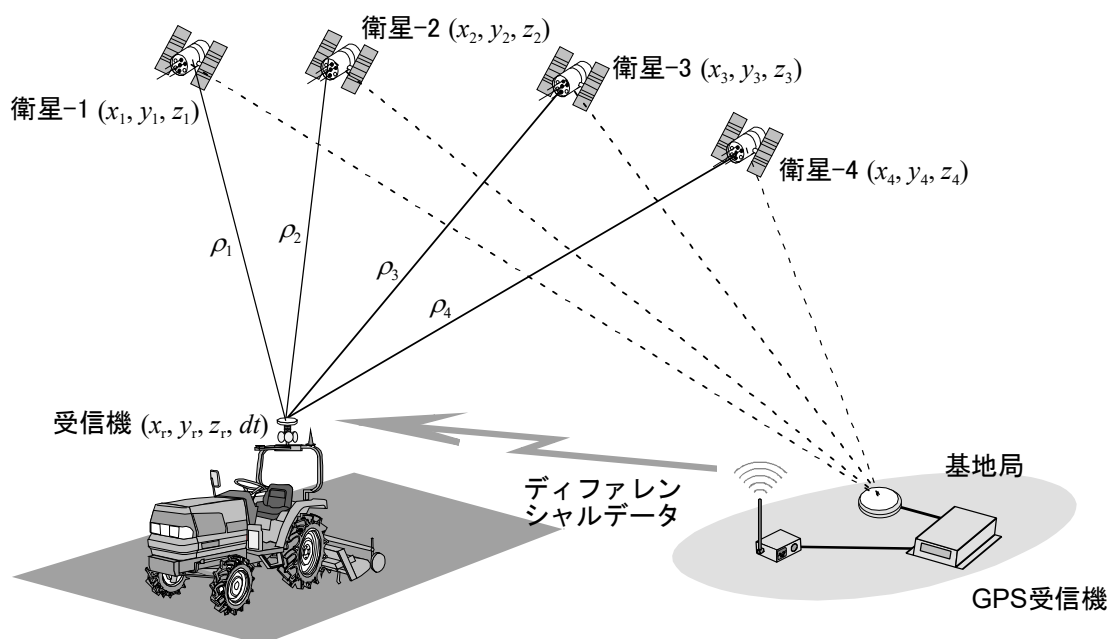


図4 DGNSS の測位原理

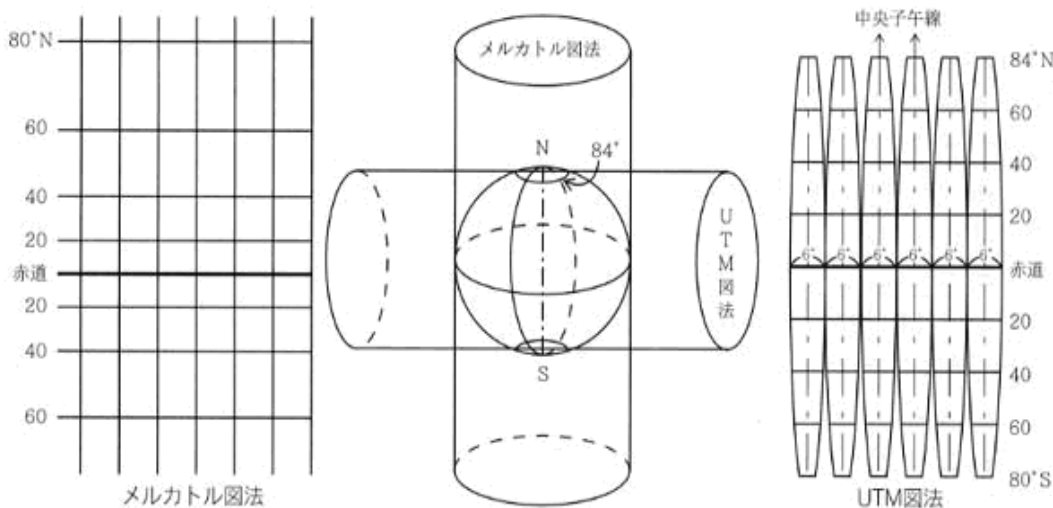


図5 メルカトル図法と UTM 図法の概念

比較した測距精度の向上度合を併記した。この技術は既に米国の湾岸輸送に実用化されており、基準局が受信した衛星信号から疑似距離の補正値を求め、その値を利用者に放送する方式で、ローカルエリアの高精度測位を可能にしている。

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

測位精度が非常に高いことと最近リアルタイム演算が可能になったことから、土木、建設、航空分野で注目を集めているのが位相干渉型 DGNSSS である。この方式はキネマテック方式(kinematic GNSS)と呼ばれ、オンラインで処理できるシステムを特にリアルタイム・キネマティクス(RTK-GNSS)と称する。この測位原理は 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逐次基準局との相対位置を計算することにある。L1、L2 の波長が 19cm、24cm であることから、数 mm の精度で疑似距離が測定されることと等価である。最近まで基準局と移動局の位相差を計算する際の波数の整数値バイアスの曖昧さ(ambiguity)をどのように処理するか、また、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)が技術的課題として残されていた。しかしながら、最近この問題を解消したシステムも実用化されており、2~5cm の誤差で、リアルタイム測位(1~5Hz)できるものも普及している。しかし、現状ではシステムが高価なため、農業機械に適用する上でコストが大きな障害である。

5) UTM 座標変換

GNSS によって測位される座標は緯度、経度といった角度情報であるため、地図やナビゲーション情報と共に用いるためには直交座標系に変換する必要がある。本来楕円体である地球を平面上の直交座標系に変換するため、その歪みを少なくするための多くの手法が考案されている。中でも現在最も一般的に使用されているのがユニバーサル横メルカトル手法である。ユニバーサル横メルカトル図法の投影は、ガウス・クリューゲル図法が適用されおり、投影は地球楕円面から直接、平面に正角横円筒投影を行う図法である。UTM 座標系は、Universal Transverse Mercator system の和訳で、各国が大きな縮尺の地図を作成する際、ガウス・クリューゲル図法を用いるに当たり国際的に決められた1投影面の適用範囲やシステム等の準則があり、それを UTM 座標系と呼ぶ。UTM 座標系は、北緯 84 度から南緯

80 度間の地域に適用し、地球楕円面を経度 6 度毎の経線により楕円面を南北に輪切りにして、経度差の等しい 60 のゾーン(帯)に分割される。これらのゾーンは、経度 180 度の線を始発線として西から東に向かって、第 1 帯、第 2 帯、・・・第 60 帯と名付けられる。各帯の中央を通る経線を中央経線とし、中央経線の両側各 3 度の部分をガウス・クリューゲル図法によって一平面上に投影する。各ゾーンの原点は、赤道と中央経線の交点とし、赤道を横軸、中央経線を縦軸とします。この図法によれば、中央経線と赤道は直線となり、その他の経緯線は互いに直交する曲線となる。縮尺係数(線拡大率)は中央経線上で 0.9996 とされている。その結果、中央経線より東西に約 180km のところで縮尺係数が 1.0000 となり、これより外側は縮尺係数が 1 よりも大きくなり、1 ゾーン内の歪みが 6/10000 以内に収まるように設計されている。

3. 実験装置および実験方法

単独 GNSS、D-GNSS、RTK-GNSS による静的測位を行い、これらの精度評価を行う。また、ロボットトラクタを用いて動的測位を行い、各 GNSS の動的精度評価も行う。

1) 実験装置

(1) GNSS 受信機

1) RTK-GNSS、単独 GNSS

Trimble SPS-855 (L1、L2 波)、Topcon Legacy (L1、L2 波、単独)

2) DGNS

Trimble SPS-855 (L1、L2 波) 2台(一方を D-GNSS として使用する)

3) 1 周波 RTK-GNSS

u-blox C94-M8P (L1 波)

(2) トラクタ

2) 実験方法

3班に分かれ、①単独 GNSS と RTK-GNSS、②D-GNSS と RTK-GNSS、③1 周波 RTK-GNSS の実験を交代で行う。

(1) 静的測位実験

トラクタに RTK-GNSS 用 GNSS アンテナを取り付け、3 分程度位置の測位を行う。その後、同じ位置で単独 GNSS、D-GNSS 用アンテナ、もしくは 1 周波 RTK-GNSS 用アンテナを取り付け、3 分程度の測位を行う。

(2) 動的測位実験

RTK-GNSS と単独 GNSS について(1)と同様に計測し、トラクタを運転して移動した時のデータ取得を行う。

4. データ整理

1) 静的測位実験データから単独 GNSS、DGNS、RTK-GNSS、1 周波 RTK-GNSS のそれぞれについて、UTM 座標系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、DGNS、RTK-GNSS、(1 周波 RTK-GNSS)、それぞれについて、基準位置

からの距離誤差を求め、CEP* (Circular Error Probable)を求める。ただし、RTK-GNSS は (Easting、Northing の) 平均位置を基準位置とし、単独 GNSS、DGNSS、1周波 RTK-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。
- 4) 動的測位実験から RTK-GNSS との誤差を求め、精度を評価する。

5. 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。

実験データ・資料は、

<http://applied.bpe.agr.hokudai.ac.jp/education/lwibee/>
からダウンロードできます。

(生物生産応用工学／石井一暢)

* Circular Error Probable (CEP): The radius of a circle, centered at the user's true location, that contains 50 percent of the individual position measurements made using a particular navigation system.

[実験野帳]

実験日: 年 月 日(曜日)

チーム・メンバー: _____

1. 静的実験

| トラクタ | | ファイル名 |
|------|--------------|---------------------------------------|
| | RTK-GNSS | Static - RTK vs Single ¥ RTK-GNSS.csv |
| | 単独 GNSS | Static - RTK vs Single ¥ Single.csv |
| | RTK-GNSS | Static - RTK vs Diff ¥ RTK-GNSS.csv |
| | D-GNSS | Static - RTK vs Diff ¥ DGNSS.csv |
| | 1周波 RTK-GNSS | Static - RTK (L1) ¥ L1RTK-GNSS.csv |

2. 動的実験

| トラクタ | | ファイル名 |
|------|----------|--|
| | RTK-GNSS | Dynamic - RTK vs Single ¥ RTK-GNSS.csv |
| | 単独 GNSS | Dynamic - RTK vs Single ¥ Single.csv |

<メモ>
