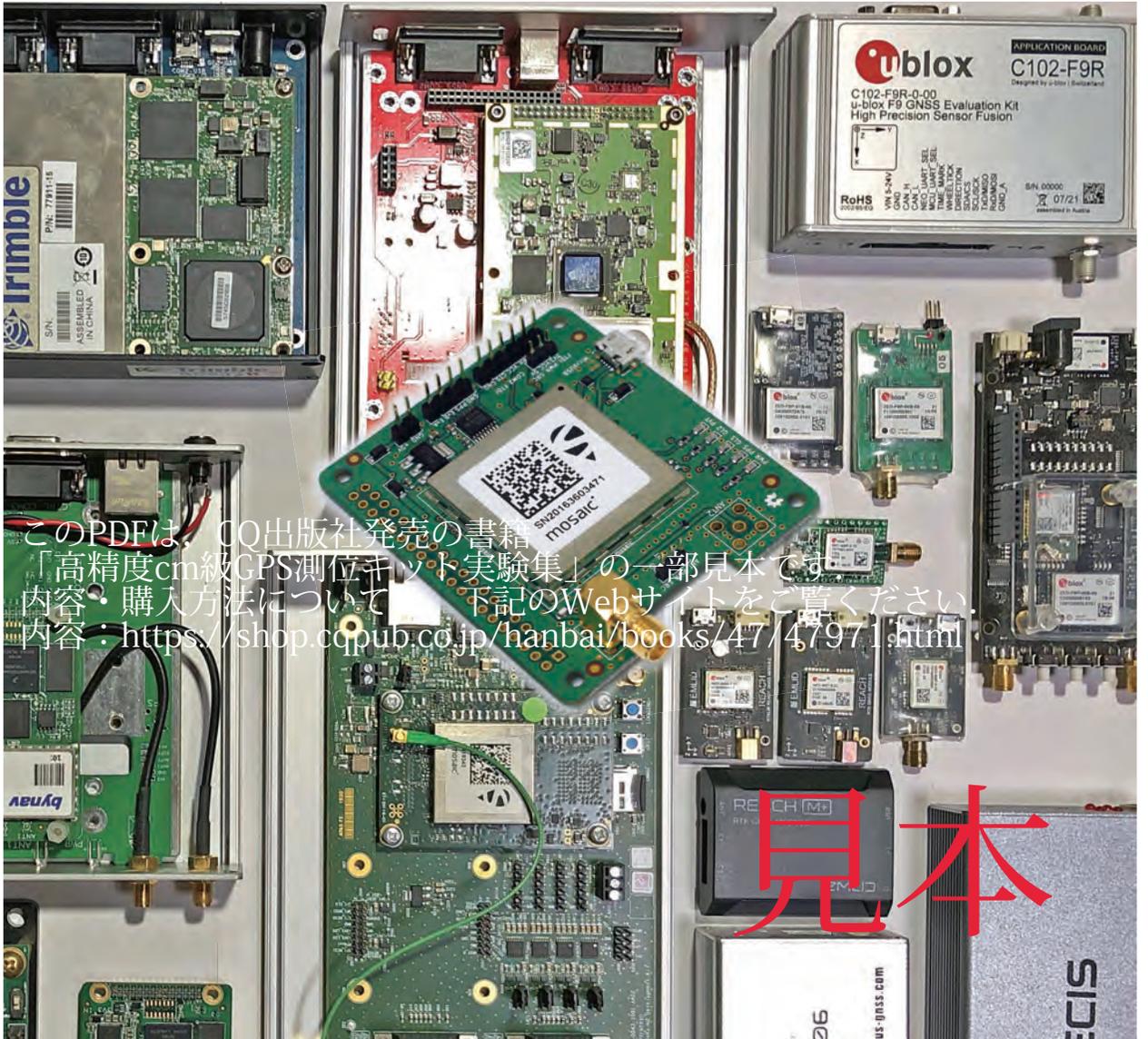


標準GPSとは桁ちがい! 自動運転から農業まで注目!

高精度cm級GPS 測位キット実験集



このPDFは、CQ出版社発売の書籍
「高精度cm級GPS測位キット実験集」の一部見本です。
内容・購入方法について、下記のWebサイトをご覧ください。
内容：<https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/47/47971.html>

見本

第1章

ドンドン広がる実用化！ 高精度cm級GPS測位ワールド

——農業にクルマにドローンに…標準GPSとは違う測位と受信機

高須 知二

米国GPS以外の測位衛星が増えてきた… 総称は「GNSS」

米国が運用する測位衛星GPS(Global Positioning System, 正式名Navstar GPS)は、1970年代に軍事目的のために開発されました。1990年代にその民生利用が解放され、さらに2000年に意図的な精度劣化措置(SA: Selective Availability)が解除され測位精度が向上して以降、爆発的にユーザの数が増えてきました。現在では、カーナビ、スマートフォン、腕時計、といった多くの民生用電子機器にGPS受信機が内蔵されて、人々の生活になくてはならないものになっています。

近年、GPSに加えて米国以外の国々が運用する測位衛星も利用できるようになってきました。ロシアのGLONASS、欧州連合(EU)のGalileo、日本の準天頂衛星、中国のBeiDou(北斗)、インドのNavIC、といった測位衛星です。最近ではこれらの衛星を総称してGNSS(Global Navigation Satellite System)と呼ぶことが多いので、以下ではGNSSという用語を使います。

標準的なGNSS測位とはちがう 「高精度」GNSS測位

- 一般のGNSS測位は誤差数mだがそれを数cm～数十cmに収める技術が実用化されている

一般用のGNSS受信機から出力される受信機位置(方程式を解いて求めるので測位解とも呼ばれる)には、通常、数mから数十mの誤差が含まれています。

一方、GNSSを使って、数cmから数十cm程度の精度で受信機位置を求める高精度GNSS測位技術が開発され、改良されてきました。このうち、現在最も普及している測位方式がRTK(Real-time Kinematic)です。

しかしRTKを利用するためには特別なGNSS受信機が必要で、少し前まではこれらの受信機は非常に高価でした。そのため、特定の専門家以外のユーザが、高精度GNSS測位の恩恵を受けることは困難でした。

数年前からこれらの機器の低価格化が進み、例えば十年前に数百万円以上した受信機とほぼ同等の機能・性能を持ったものが、現在では十万円前後で手に入るようになってきました。

表1 GPSをはじめとする衛星測位の総称を「GNSS」という…「標準」と「高精度」に分類できる

項目	標準GNSS測位	高精度GNSS測位
観測データ	疑似距離	搬送波位相および疑似距離
測定誤差(RMS)	およそ30cm以下	およそ3mm以下
マルチパス	30cm~30m	1~3cm
信号感度	高感度、 C/N_0 は20dB-Hz未満でも実用	低感度、 C/N_0 はおよそ30dB-Hz以上必要
測位精度(水平RMS)	数m~数10m(単独測位), 1m~数m(DGNSS)	2cm以下(RTK), 2~6cm(PPP-RTK), 5~20cm(PPP)
アンビギュイティ	なし	推定または決定が必要
観測データ連続性	連続	不連続(サイクルスリップ) ^注
使用測位信号	主に1周波(L1帯)	2周波または3周波(L1帯, L2帯, L5帯)
受信機価格	低(1万円以下)	高(多くは10万円以上)
主な応用分野	カー・ナビ、スマートフォン、腕時計、GNSSロガー、ドライブ・レコーダー、カメラ、ドローン、航空機・船舶航法、貨物追跡、車両管理、鉄道保安、位置ゲーム、スポーツ	測地観測、GNSS測量、情報化施工、精密農業、ドローン、自動運転、地すべり監視

注. サイクルスリップが発生すると、搬送波位相による観測は(大きい場合)数万kmも飛ぶことがある。不連続を想定した特別な処理が測位計算時に必要

cm級高精度のための GPS/GNSS受信機

—— 低価格化と高性能化は進む

高須 知二

高精度GNSS測位についてその特徴を解説しました。次に、今後の高精度GNSS測位についての展望を述べていきたいと思います。低価格な高精度GNSS測位モジュールを写真1に示します。

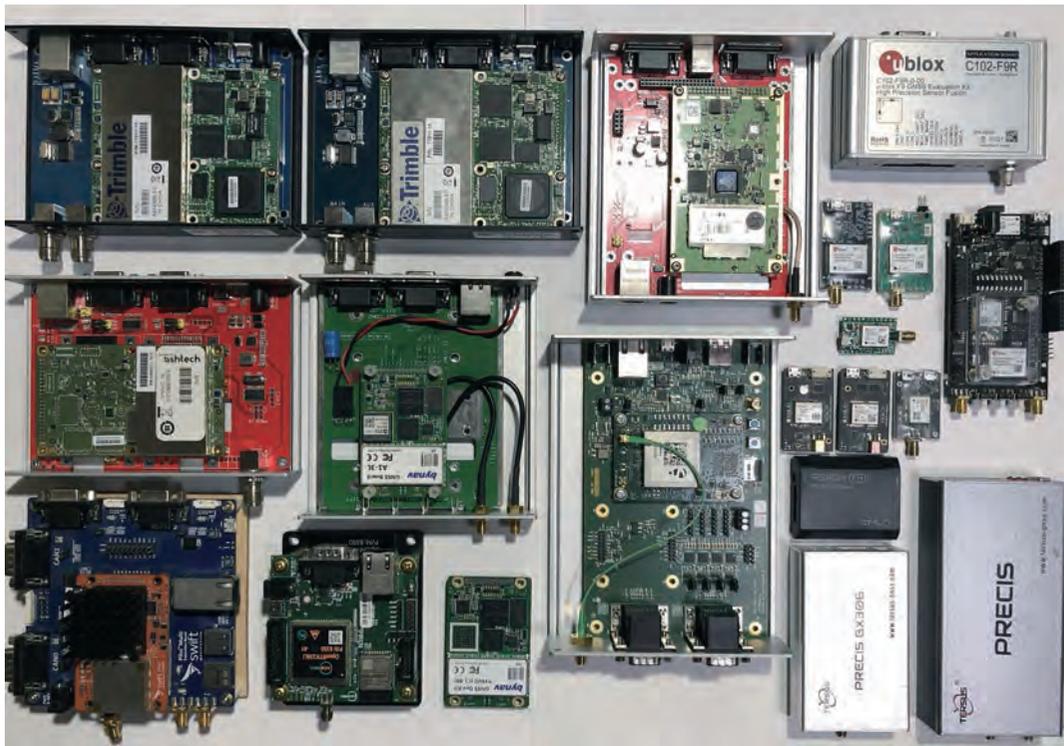
高精度GNSS受信機に低価格化の波

● 低価格モジュールのはじまり

早くに製品化された低価格RTK用受信機の1つは、2016年発売のNEO-M8P(ユーブロックス)です。当

時100万円以上した一般のRTK用受信機に比べ、2桁安い価格でcm級測位が可能ということで、関係者に衝撃を与えました。ただし、L1帯のみの1周波受信機であったこと、GLONASSとBeiDouを同時利用できなかったこと、準天頂衛星に対応していなかったことなどにより、測位性能は必ずしも満足いくものではありませんでした。NEO-M8Pについては文献(1)に紹介があります。

ユーブロックス社はその後、NEO-M8Pの次世代高精度GNSS測位用受信機として、2018年にZED-F9P



(上段)Trimble BD982×2, NovAtel OEM729, u-blox ZED-F9R, u-blox ZED-F9P×3, u-blox NEO-M8P
(中段)Trimble BD990, Bynav A1-3L, Septentrio mosaic-X5, Emlid Reach×2, u-blox NEO-M8P, Emlid Reach M+
(下段)SwiftNav Piksi Multi, Aceina OpenRTK330LI, Bynav C1-8S, Tersus Presis-BX306, Tersus Preci-L1L2

写真1 高精度GNSS測位モジュールの低価格化が進んでいる

筆者のRTK用受信機のコレクション。このうち8種類を同じアンテナから分配した信号で同時に動かして測位性能を比較した

測位性能を大きく左右する GNSS アンテナ入門

—— わずか -130dBm の電波を受け取るアクティブ・アンテナのしくみ

ジョン・レニー / 翻訳 太田 聡実

GNSS用にいろいろなアンテナが販売されています(写真1, 図1)。アンテナが違っていると、何が違ってくるのでしょうか。アンテナ・メーカーのエンジニアが基本的な考え方を解説します。

わずか -130dBm ! 衛星からの電波を受け取る重要パーツ「GNSSアンテナ」

- GNSS受信機の世界はソフトウェアで進化したがGNSSの世界では、一般的なユーザが利用できるハ



写真1 大きささまざまなGNSSアンテナは何が違うのか？
小峰無線電機のQZシリーズなど

ードウェアに大きな変化がありました。RTKやCLASなど、複雑な計算を行って高い位置精度が得られる受信機が低価格になってきました。高品質基準局を提供するオンライン・サービスが拡大し、わずかな料金で簡単に利用できるようにもなっています。今後GNSSシステムの新しい応用がますます増えるでしょう。

こうした新しいGNSS測位の中心に位置するのは受信機です。ソフトウェアの設定で簡単に高度な衛星測位ができるようになりましたが、だからといってハードウェアの重要性が下がったわけではありません。

- 衛星からのわずか -130dBm を受信する「アンテナ」
見落とされがちですが、衛星と受信機の間をつなぐ重要な部品がアンテナです。

アンテナは、遠く宇宙にいる衛星からRF信号を受信し、受信機へ伝える役割を担っています。GNSS信号が強ければ話は簡単ですが、平均的なGNSS信号の受信強度はおおよそ -130dBm 程度です。携帯電話の信号がおおよそ -80dBm あるのに比べ、GNSS信号は10万分の1という弱い信号です。

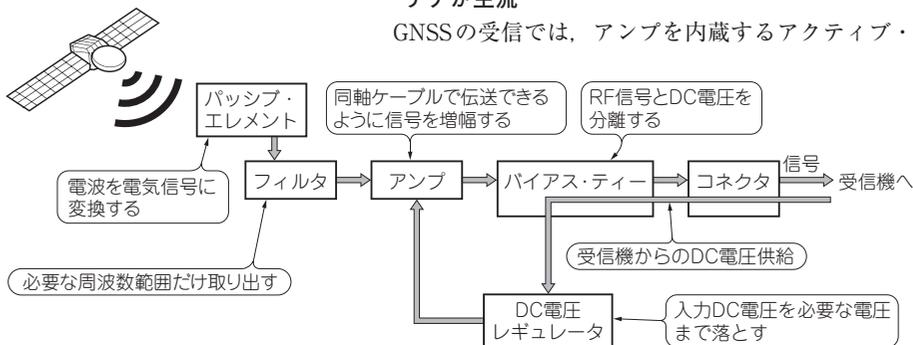
測位精度を悪くする要因は、受信する信号が微弱であることだけではありません。後で実験結果を紹介しますが、私たちが日々生活する際に使用する電子機器のノイズなどさまざまな影響で、GNSS衛星からの電波を受信しにくくなってしまっていることがあります。

- アンプやフィルタを内蔵するアクティブGNSSアンテナが主流

GNSSの受信では、アンプを内蔵するアクティブ・

図1 GNSSアンテナの内部構成

フィルタやアンプが内蔵されたアクティブ・タイプが主流。受信機から供給されるDC電圧で動く



第1章

標準的なGPSで位置が計算できるメカニズム

—— いまどきの当たり前…GPS/GNSS衛星測位の内側

三菱電機 鎌倉製作所

衛星からの電波で位置がわかるしくみ

● 専用の人工衛星があるから位置が測れる

衛星測位とは、「人工衛星から到来する電波を利用して、位置を測る方法」のことをいいます。衛星測位のための電波を放送している人工衛星を測位衛星と呼び、それら測位衛星を構成するシステムのことを測位衛星システムと呼びます。

測位衛星システムの代表的な存在が、米国の運用するGPS(Global Positioning System)です。今や位置を知る手段・方法として一般名詞となったGPSですが、正確には米国が運用する測位衛星システムの名前です。

GPSのような測位衛星システムが提供するサービスは測位(Positioning)、航法(Navigation)、時刻(Timing)の3つで、頭文字をとってPNTと呼ばれます。航法は「自分の位置を測定(測位)しながら目的地や経由地に導く方法」のことをいいます。航法は測位と異なる意味を持ちますが、航法に必要となる測位のことを指す場合もあります。

もう1つの時刻は一見、測位に関係ないように思えます。しかし、衛星測位の原理を知ると、なぜ時刻が関係するのか理解できるでしょう。

● 衛星測位の原理

測位衛星から到来する電波を利用してどのように位置を測るのでしょうか。基本原理を図1に示します。

衛星測位は、衛星とユーザの間の距離を測ること(測距)で実現しています。そのために測位衛星が放送している電波を測距信号といいます。測距信号の中には、測位衛星が電波を放送した時刻の情報(t^T)が含まれています。受信機は測距信号を受信した時刻(t^R)と、測位衛星が電波を放送した時刻との差分、つまり電波の伝搬にかかった時間を求めます。これに電波の速度 = c (光速)を掛けると、測位衛星と受信機(アンテナ)間の距離 r が求まります。

$$r = c(t^T - t^R) \dots \dots \dots (1)$$

測位衛星との距離がわかるということは、衛星を中

心にその距離が描く球上のどこかにユーザが位置していることとなります。これを複数の測位衛星で計算すると、球が複数できます。それらの球が1点で交わるところが、ユーザの位置になります。ある測位衛星 p との距離は、その衛星 p の位置 x^p, y^p, z^p と、ユーザ u の位置 x_u, y_u, z_u を使って式(2)のように表せます。ユーザ u の位置を表す3つの未知数があるので、連立方程式を立てて解くには、最低でも3機の測位衛星との測距を行う必要があります。

$$r_u^p = \sqrt{(x^p - x_u)^2 + (y^p - y_u)^2 + (z^p - z_u)^2} \dots \dots \dots (2)$$

ところで、この方法で正確な測距を行うには、測位衛星と受信機が共に正確な時間を刻んでいる必要があります。時刻が1 nsずれると、約30 cmの測距誤差が発生します。測位衛星は原子時計を搭載しており、高い精度で時を刻んでいます。一般的な受信機ではそうはいきません。そこで、受信機の時計誤差を4つ目の未知数として扱います。時計誤差を δt_u としたとき、距離 r^p は式(3)で表されます。時計誤差は単位をメートルに統一するため光速 c をかけています。未知数が4つなので、最低限4機の測位衛星との測距を行うことで、ユーザの位置、そして受信機時計の誤差を求めることができます。

$$r_u^p = \sqrt{(x^p - x_u)^2 + (y^p - y_u)^2 + (z^p - z_u)^2 + c\delta t_u} \dots (3)$$

これこそが測位衛星システムに時刻が関係する理由です。位置が高い精度で求まると、受信機の時計誤差も高い精度で見積もることができます。

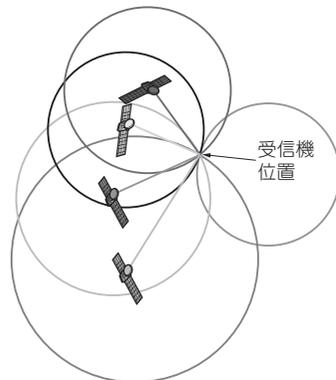


図1 衛星測位の基本原理

測位信号から、それぞれの衛星からの距離が求まる。距離がひとつに交わる点が受信機的位置

基準局によるcm級測位・ 基準局いらずのcm級測位

——高精度cm級GNSS衛星測位のタイプ

宮 雅一

本章では、高精度測位の各測位方式における補正の原理を解説します。

測位衛星から受信機までの距離が数mm～数cmのレベルでわかると、高精度な自己位置を算出できる条件が整います。

測位衛星と受信機の距離は、測距信号の伝搬時間を計測して求めますが、得られた距離情報には図1に示すような、さまざまな誤差が含まれています。

この誤差を含んだ距離情報を正確にしていくには、各要因の誤差量をユーザ側(受信機側)で推定する、外部から得た補強情報で補正する、といったことが必要になってきます。

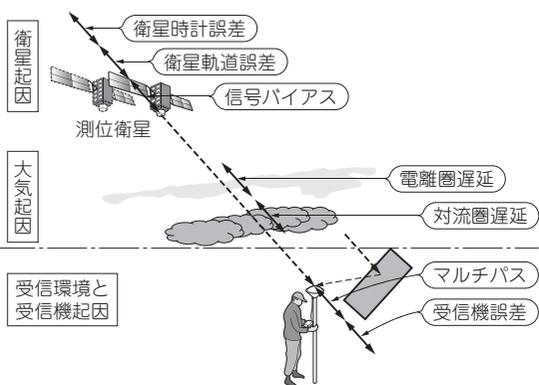


図1 衛星測位における誤差要因

表1 ディファレンシャル補正による誤差要因の変化

誤差要因	補正の可否	備考
衛星軌道	○	長基線では効果が低下する*
衛星時計	◎	十分に補正できる
電離圏遅延	○	活動が激しいと低下する
対流圏遅延	△	高度差が大きいと低下する
マルチパス	×	むしろ増加する
受信機雑音	×	むしろ増加する

*基線とは、補正信号を生成する元の観測を行っている基準局と、ユーザの間の距離のこと

高精度を実現する相対測位の方法

● 精度改善の基本…ディファレンシャル補正

単独測位では、エフェメリスにより求めた衛星の位置と距離情報(疑似距離)から、自己の位置を算出します。逆に、自己の位置が正確にわかっている場合、距離情報に含まれる誤差を求めることができます。

この仕組みを利用すると、位置が分かっている基準局に設置した受信機で観測したデータを使用して、各衛星に対する距離誤差の補正情報を生成できます。基準局近傍に位置するユーザに向けて、その補正情報を配信する方式が、一般にDGPS(またはDGNSS)と呼ばれるディファレンシャル補正方式です(図2)。

ディファレンシャル補正では、図1に示す各誤差要因のうち、受信環境と受信機起因に依存するマルチパス、受信機クロック誤差、受信機信号間バイアス以外の、誤差の大部分を相殺でき(表1)、数mオーダーでの位置精度が期待できます。

ディファレンシャル補正方式には、基準局の距離情報(疑似距離)そのものを配信する方式と、距離誤差(擬

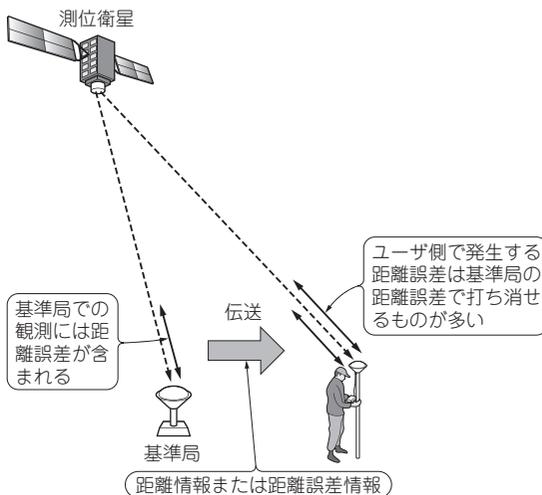


図2 ディファレンシャル補正やRTKのしくみ

第1章

「基準局いらず=単独」でかんたん! シラス cm級衛星測位CLASのしくみ

—— みちびきが無償で放送している基準局相当の測位補強データ

宮 雅一 / 川口 貴正

無償で使える高精度向け シラス 測位補強サービスCLAS

● みちびきで自前基準局いらずのリアルタイム cm級測位

日本の航法衛星システムである準天頂衛星システム「みちびき」(QZSS: Quasi-Zenith Satellite System)の運用が2018年11月開始されました。準天頂衛星システムの特徴的なサービスの1つにセンチメートル級測位補強サービス (CLAS: Centimeter Level Augmentation Service, 愛称「シラス」)があります。L6Dと呼ばれる信号を使用して、測位補強情報を送信しています。準天頂衛星の初号機、2~4号機のL6D信号(中心周波数1278.75 MHz)を使用するサービスですが、7機体制(コラム参照)の下でも継続して運用されます。ユーザは、携帯電話やWi-Fiなどの通信機能、あるいは自前の基準局がなくても、無償かつ移動局単独でセンチメートル級の位置情報を得られます。

● 無償利用できる測位補強サービスとして世界初

CLASは、表1のように世界中で数あるGNSS(Global Navigation Satellite System)の測位補強サービスのうち

でも、世界に先駆けて日本が最初に運用を開始しました。マスマーケットである運転支援分野(市販車)での利用も始まり⁽¹⁾、CLAS対応端末の市場が急拡大しています。今後、個人で購入できる価格帯のCLAS対応端末の普及が期待されます。本章では、このCLASの仕組みについて解説していきます。

● 移動体で精度10 cm程度

センチメートル級測位補強サービスCLASでは、日本全国に約1300カ所に設置されている国土地理院が運用する電子基準点のGNSS観測データとその座標値を基に、センチメートル級精度の測位に必要な補強情報を推定し、それを準天頂衛星から送信しています。

CLASの主なサービス仕様を表2に示します。ユーザは、送信されている情報を利用することで、PPP-RTK(Precise Point Positioning Real Time Kinematic)方式の測位が可能で、単独測位が開始されてから約1分で、自分の現在の位置をセンチメートル級の精度で求められます。精度は、静止体では、水平方向が6 cm(95%)、垂直方向が12 cm(95%)、移動体では、水平方向が12 cm(95%)、垂直方向が24 cm(95%)です。

ユーザインターフェース仕様書IS-QZSS-L6は、準

表1 各国で始まる衛星システムによる無償の測位補強サービス

中国のBeiDouは、2020年8月に中国周辺をサービスエリアとしたPPP方式のサービスを開始している。欧州のGalileoでは、2022年のサービス開始を目指したグローバルなPPP方式の補強サービスGalileo HAS(High Accuracy Service)を開発中。オーストラリアとニュージーランドでは両国周辺をサービスエリアとするPPP方式の補強サービスSouthPANを開発中。ロシアのGLONASSや韓国のKPSでも補強サービスを開始する計画がある

航法衛星システム	サービス・エリア	補強方式	補強対象の航法衛星システム	信号	開始時期
Galileo(欧州)	全世界	PPP	Galileo, GPS	E6 (1278.75 MHz)	2022年以降
	地域限定	Fast-PPP			
GLONASS/ SDCM(ロシア)	地域限定	PPP	GLONASS, GPS, Galileo, BDS	L3C (1202.025 MHz)	PPP:2021年以降 PPP-RTK:2030年以降
		PPP-RTK			
BeiDou(中国)	地域限定	PPP	BDS, Galileo	B2b (1207.14 MHz)	2020年
QZSS(日本)	地域限定	PPP/PPP-AR	QZSS, GPS, Galileo, GLONASS	L6 (1278.75 MHz)	MADOC(A PPP): 2023年 CLAS(PPP-RTK): 2018年
	国内限定	PPP-RTK			
SouthPAN (オーストラリア、 ニュージーランド)	地域限定	PPP	GPS, Galileo	L1 (1575.42 MHz)	2023年
KPS(韓国)	地域限定	未定	未定	L6 (1278.75 MHz)	未定

cm級測位演算ソフトウェア CLASLIB入門

——定番F9Pでも使えるオープンソースで仮想の
基準局データ計算 & RTK測位

宮 雅一 / 川口 貴正

オープンソースのCLAS用 測位演算ソフト CLASLIBとは

CLASは、PPP-RTKと呼ばれる、比較的新しい方式を採用している測位補強サービスです。そのため、サービスを提供する準天頂衛星システムサービスや開発にあたった三菱電機から、受信機開発の参考になるソースコードを含むオープンソースのツール・キット CLASLIBが一般公開されています⁽¹⁾。本章では、CLASLIBの概要や使い方について説明していきます。

● 入手方法

CLASLIB(CLAS Test Library)は、CLASに対応した製品開発を検討されている方向けに、参照実装として提供するオープンソースのツール・キットです。

日本国内のGNSS精密測位用プログラムとして広く利用されているRTKLIB(An Open Source Program Package for GNSS Positioning)と国土地理院公開のGSILIB(GNSS Survey Implementation Library)をベースに作成しています。

CLASLIBは次の3つで構成されています。

- (1) マニュアル(PDF)
- (2) CLASで配信するCompact SSR形式のL6メッセージのデコード・データ変換処理ツール〔状態空間表現(SSR)から観測空間表現(OSR)への変換ツール〕【モジュール名称: `ssr2osr`】
- (3) PPP-RTK(精密単独キネマティック測位)対応の後処理測位解析ツール【モジュール名称: `rnx2rtkp`】

(2)と(3)は、後処理専用ツールとなっています。ユーザー側でCLASをサポートする測位ソフトウェアを開発する際の参考となるはずですが、なお、ダウンロードによる配布は(1)および(2)のみとなっています。(3)のPPP-RTK対応の後処理測位解析ツールは、準天頂衛星システムサービスのCLASLIBページ⁽²⁾に記載されているCLASサポート窓口へ電子メールで申請すると入手できます。

● 推奨コンパイル環境^注

2021年9月時点では、CLASLIBで推奨するコンパイル環境はMinGW/Cygwinです。昨今、サービス提供サイドではサポートの容易性や利便性を考慮し、Windows 10のWSL(Windows Subsystem for Linux)で動くUbuntu上のgccでのコンパイルも確認しています。今後、このgcc/UbuntuはCLASLIBの推奨環境に加える予定です。

CLASLIB 0.7.2版(2021年9月に公開)でも動作に問題ないことは確認できているため、本章ではこのWindows 10のWSLで使えるUbuntu上でCLASLIBを実行するときの環境構築例とサンプル・ファイルの実行例を示します。

有償ソフトウェアとして広く普及するMicrosoft Visual Studioにおけるコンパイル/動作に関しては、サポート外となりますが、今回は、そのコンパイル方法の例についても示します。

● 環境構築

▶ Step.1 WSLを有効化する

スタート・ボタンを右クリックして「アプリと機能」をクリックします。現われたウィンドウで、下のほうにある、関連設定の「プログラムと機能」をクリックします。コントロール・パネルの「プログラムと機能」のウィンドウが開くので、「Windowsの機能の有効化または無効化」をクリックします。「Windows Subsystem for Linux」または「Linux用Windowsサブシステム」をチェックすると、WSLのインストールが始まります。終わったら再起動します。

▶ Step.2 Ubuntu18.04LTSのインストール

Windowsのスタート・メニューからMicrosoft Storeを開きます。「Ubuntu」と検索して、18.04LTSを選び、入手ボタンをクリック、インストールの完了を待ちます。

▶ Step.3 初期設定

WindowsのスタートからUbuntuを起動して、初期設定の完了を待ちます。その後、次に示すコマンドでaptコマンド用のソースリストを日本国内に変更します。

注：一般に、ソフトウェアのバージョンや対応も環境は更新されていくため、適宜読みかえてください

実際のcm級CLAS測位システムをしてみる

—— 仮定の基準局データを出力する

CLAS小型レシーバDrogger VRSCの実際

矢口 尚

CLASの情報は衛星から放送されるので、誰でも自由に使えます。衛星からの電波だけで高精度な測位が可能になるので、魅力のあるサービスです。しかし、受信機が高価なため、なかなか誰でも使える状況になっていませんでした。そんな中登場した低価格でCLAS(PPP-RTK)を実現する受信機VRSC(ビズステーション)を使ったシステム構成を図1に、外観を写真1に示します。従来の2周波RTK受信機と組み合わせて使います。

CLASの技術的な情報は、CLASの仕様書とCLASLIBのソースコード以外にほとんどなく、筆者は、これらの理解に多くの時間を要しました。今回はその経験をもとに、これからCLASに触れてみたい方、より理解したい方に向けて、理解しやすくなる補足を加えながら、観測データを生成する方法を紹介します。

次世代の高精度測位CLASで使われるPPP-RTK方式とは

- 誤差を要素ごとに分離した状態空間表現SSRデータ
CLASで送られてくる誤差情報は、SSR(状態空間表現)と呼ばれる形式で、さまざまな誤差を分離して

表現しています。対して、RTKで使う観測データはOSR(観測空間表現)と呼ばれています。

- RTKと組み合わせると高精度測位ができる

SSRはPPP(精密単独測位)を行うための情報ですが、観測データのOSRに変換すると、RTKを行えます。この測位方式をPPP-RTKと言います。

写真1に示すVRSCは、みちびきのL6D信号を受信し、その中に含まれるCLASメッセージから観測データを生成します。RTKで使われるRTCM形式に変換して出力するので、仮定のRTK基準局として動作します。VRSCは、RTK受信機DG-PRO1RWS(ビズステーション、ユーブックスZED-F9P搭載)を組み合わせると、CLASを使った高精度測位ができます。

- RTKで使っている観測データは衛星との距離情報

RTKの移動局で使用する基準局データを補強データや補正データなどと呼びますが、正確には観測データです。その中身は、コード測位による衛星までの距離と搬送波測位による衛星までの波数が主なものです。表1は観測データの例です。

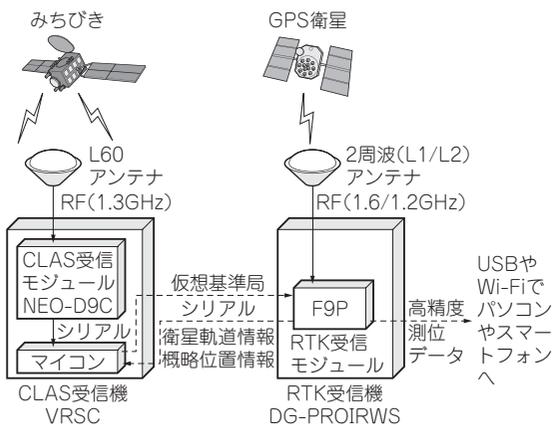


図1 本稿で紹介するCLASを使った高精度測位のハードウェア構成



写真1 CLAS信号の受信機VRSC(図1左側)…仮定の基準局データを計算して出力する

第1章

かんたんcm級衛星測位 CLASキットmosaic入門

—— 測量界からやってきたホープは使い方が超かんたん！

鈴木 太郎

センチメートルの精度が得られる高精度GPS測位が農業や自動運転など、いろいろな用途に応用されるようになってきました。それに伴い、より高性能な受信機も、低価格で手に入るようになってきました。その例として、セプテントリオ社の^{モザイク}mosaicシリーズを紹介します。

cm級GPS測位では位置が既知の「基準局」が必要となるのですが、最近は基準局をいちいち設置しなくて済むしくみがいくつかあり、超お手軽になってきています。写真1のような実装済み基板や評価キットが入手可能になっています。

〈編集部〉

cm級GPS測位の精度の決め手

● GNSS測位の中で最も高精度なRTKが基本

GNSS(Global Navigation Satellite System, GPS)だけではない衛星測位システムの一般名称)による高精度測位技術は、自動車や歩行者のナビゲーション、自動運転、無人配送ロボット、ドローンの自律飛行など、さまざまなアプリケーションで利用されています。

さまざまな測位手法がある中でもRTK(Real-Time Kinematic)やPPK(Post-Processing Kinematic)と呼ばれるGNSS基準局を利用した測位手法では、センチメートル精度での位置推定が可能です。

RTK-GNSSは、主に高価な測量用の受信機などで

利用されてきました。数年前から低価格化が進み、10万円以下の低コストGNSS受信機でも、RTK-GNSSが搭載されるようになってきました。

● 「受信衛星」数と「対応周波数」数が多いほど高精度

RTK-GNSSでは、位置が既知の基準局受信機のGNSS搬送波位相の観測値と、位置を求めたい移動局受信機のGNSS搬送波位相の観測値から、受信機間の差分、衛星間の差分を計算することで、搬送波位相の観測値に含まれる誤差を除去し、衛星からの正確な距離を算出します。

搬送波位相の観測値から差分で算出した距離には、整数値バイアス(整数個の波長分の距離バイアス)が含まれているため、位置の推定と同時に、この整数値バイアスを推定する必要があります。

この整数値バイアスが正しく整数で推定された測位解のことをFix解、整数化できず小数で求められた測位解のことをFloat解と呼びます。Fix解が求まっているときは、センチメートル精度で位置推定できている可能性がかなり高くなります。

この整数値バイアスを正しく推定するには、一般的に多くの衛星からの観測値、さらに同一の衛星からの複数周波数の観測値があるほど、有利になることが知られています。

GPS受信機に押しよせる 「低価格化」と「高性能化」の波

● 低価格で定番F9PはL1/L2の「2周波」対応

これまでの低コストGNSS受信機では、回路規模や処理能力の制限から、全てのGNSS信号に対応するのは難しく、何かしらの制限がありました。

例えば、低コストのRTK-GNSS用途に最も良く利用されている受信モジュールZED-F9P(ユーブックス)は、対応している周波数のバンドがL1とL2(とL5の一部)に限られます。GPSのL5信号は受信できません(周波数バンドについてはコラム1を参照)。同時に受信できる信号の数も184チャンネルです。



写真1 測量用受信機並みの受信能力で数万円台と低コストになった受信モジュールmosaic(セプテントリオ)の搭載製品
左がラズベリー・パイに重ねられる基板のmosaicHAT、右側がケース入り評価キットのmosaic-go

かんたんcm級衛星測位 シリーズ CLAS & 3周波キット実験

—— 注目モジュール mosaic-CLAS/mosaic-X5 の実力

鈴木 太郎

センチメートルの精度が得られる高精度GPS測位が農業や自動運転など、いろいろな用途に応用されるようになってきました。それに伴い、より高性能な受信機も、低価格で手に入るようになってきました。その例として、ベルギー Septentrio(セプテントリオ)社の mosaic シリーズを紹介し^{モザイク}ます。

製品としてはモジュールで、基板に実装しないと使えませんが、写真1のような実装済み基板や評価キットが入手可能です。

前章では、アンテナをつなぐだけで高精度測位が可能になる mosaic-CLAS の使い方を紹介しました。

本章では3周波 RTK の mosaic-X5 を例に mosaic シリーズで RTK 測位を行う方法を紹介し、実際に車に載せて測位してみます。 〈編集部〉

測位モジュール mosaic を Web サーバとして設定する

● PC との接続は USB

入門向け mosaic-go や ラズベリー・パイ 対応 mosaicHAT に搭載されている mosaic モジュールとパソコンの間で通信する方法は、COMポート経由と TCP/IP 経由の2通りあります。TCP/IP 経由だと、Web ブラウザから動作確認や設定ができて格段に便利です。 mosaic-go や mosaicHAT にはイーサネットのコネクタがついていませんが、 mosaic モジュールは Ethernet-over-USB をサポートしているので、パソ



写真1 測量用受信機並みの受信能力で数万円台と低コストになった受信モジュール mosaic(セプテントリオ)の搭載基板 ラズベリー・パイと組み合わせやすい基板の mosaicHAT と、ケース入り評価キットの mosaic-go

コンと USB で接続して、TCP/IP 経由の通信を使えます。

● PC への mosaic 用ドライバのインストール

Ethernet-over-USB を有効にするには、パソコンに専用のデバイス・ドライバをインストールする必要があります。ここでは Windows パソコンを例にします。

mosaic-HAT とパソコンを USB ケーブルで接続します。すると、図1のように CD ドライブとして認識されます。この CD ドライブをエクスプローラから開き、driver フォルダにあるインストーラ(今回は USB_driver_3_0_2_Installer.exe)を実行し、ドライバをインストールします。

ドライバのインストール後、 mosaic-HAT とパソコンをつなぐ USB ケーブルをいったん抜き、再び接続すると、図2のように mosaic モジュールが新たなネットワークとして認識されています。

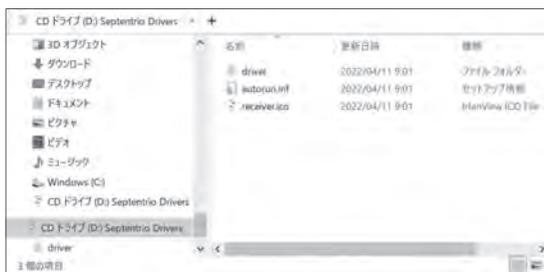


図1 まず mosaic-HAT を PC と USB 接続してドライバをインストールする

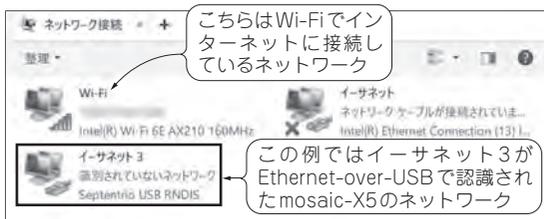


図2 USB 接続した mosaic モジュールが新しいネットワークとして認識される

みちびきCLAS信号対応 300ドル受信機TAU1302キット

—— みちびき L6帯のCLAS/MADOCA補強信号をとり出せる

高橋 賢

準天頂衛星のみちびきからは、受信するとcm精度の衛星測位が可能になる補強信号が放送されています。利用は無料なのですが、一般のGPS受信機では対応しないL6(1278.75 MHz)を受信する必要があります。

本稿では、比較的安価に入手できるL6専用受信機を使って、センチメートル級補強サービスCLASや、衛星の精密軌道&時刻情報MADOCAの信号を受信、取り出してみます。

L6受信機で取り出せるのは補強信号だけなので、RTK対応受信機を組み合わせると、CLASを使った高精度衛星測位にチャレンジします(図1)〈編集部〉

「基準局いらず」cm級測位のために みちびきが発するL6信号

L6信号を受信&デコードしてデータを出力できる受信機は、Javad Alpha G3Tなどの測量級受信機にL6信号受信オプションをつけるなどの高価なものしかありませんでした。

ところが2019年末、L6D(CLAS)やL6E(MADOCA)が受信できる中国Allystar(エイリスター)社のチップが搭載された評価キットが出てきました(写真1)。

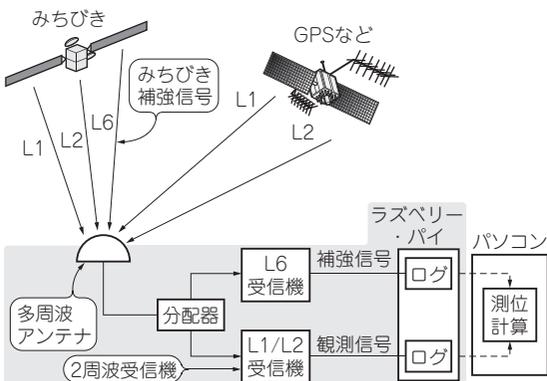


図1 みちびきのL6信号受信機があれば既存の2周波GNSS受信機と組み合わせて高精度衛星測位が可能

● 通常の測位信号とは周波数の異なるL6帯信号

衛星測位に用いられる周波数帯には、Upper L帯(バンド)と呼ばれる1.5 GHz帯と、Lower L帯と呼ばれる1.2 GHz帯があります。

みちびきは、前者としてL1帯信号(中心周波数1575.42 MHz)、後者としてL5帯信号(1176.45 MHz)、L2帯信号(1,227.6 MHz)、およびL6帯信号(1278.75 MHz)を用います。

Lower L帯は、Upper L帯と比較して帯域幅が広いので、ローコスト受信機ではすべての信号受信をあきらめることがほとんどです。加えてL6帯信号周波数は、L5帯信号周波数やL2帯信号周波数とも違います。

今回使用する受信機は、ローワーL帯ではL6帯信号専用、アッパーL帯ではL1帯信号専用です。

CLASなどのみちびきL6信号対応の 300ドル受信機TAU1302評価キット注

測位チップHD9310(Allystar社)に必要な周辺部品、具体的にはTCXO(temperature compensated crystal oscillator: 温度補償水晶発振器)、アンテナ・インピーダンス・マッチング回路などを付加した2周波受信モ

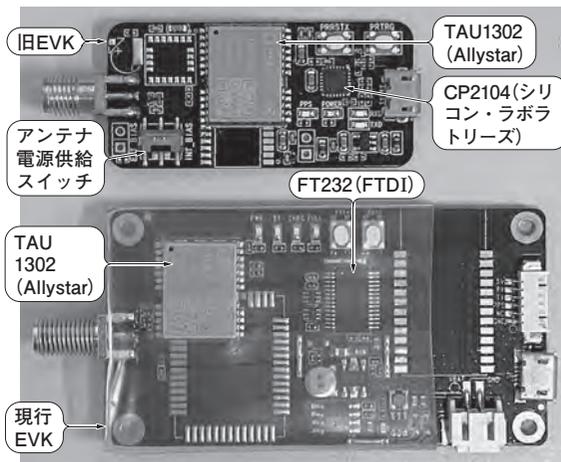


写真1 みちびきL6信号が受信できるTAU1302評価キット
旧EVK基板と後から入手したEVK基板。機能的には同じ

注：ハードウェアやソフトウェアはバージョンアップすることがあり得るので適宜読みかえてください

実測CLAS信号から 仮想的な基準局データを計算

—— みちびき L6補強信号の実際とRTKに食わせるまで

高橋 賢

準天頂衛星のみちびきからは、受信するとcm精度の衛星測位が可能になる補強信号が放送されています。利用は無料なのですが、一般のGPS受信機では対応しないL6(1278.75 MHz)を受信する必要があります。

本稿では、比較的安価に入手できるL6受信機(300ドル2周波モジュールTAU1302)を使って、センチメートル級補強サービスCLASや、衛星の精密軌道&時刻情報MADOCAの信号を受信、取り出してみます。

L6受信機で取り出せるのは補強信号だけなので、第4部第3章～第5章を通して、RTK対応受信機を組み合わせ(図1)、CLASを使った高精度衛星測位にチャレンジします。前章は、この受信機セットを使って、受信ログを取りました。また、TAU1302から出力されるバイナリ・データのログを取り、その中からCLASのRawデータを取り出すプログラムを作成しました。

〈編集部〉

L6受信機の出力からRawデータを抽出して状態を確認してみる

● 自作Rawデータ抽出プログラムからわかること

前章では、TAU1302が出力するバイナリ・データから、CLASまたはMADOCAのRawデータを抽出するフィルタ・プログラムfilter.pyを作りました。こ

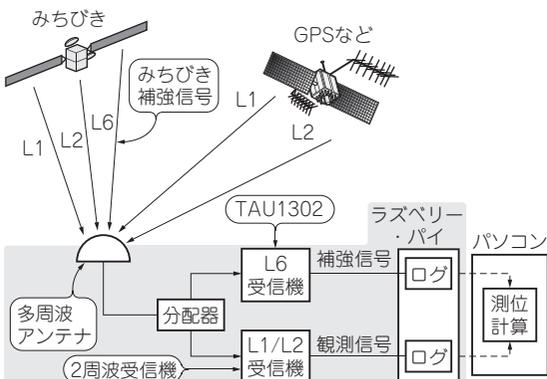


図1 L6信号の受信機があれば既存の2周波GNSS受信機と組み合わせると高精度衛星測位が可能

のプログラムは、次のようなデバッグ情報も同時に標準エラー出力します。

```
194 2163 90051 43 ← みちびき2号機
195 2163 90051 44 ← みちびき4号機
199 2163 90051 43 ← みちびき3号機
--> prn 195(snr 44)
194 2163 90052 42
195 2163 90052 44
199 2163 90052 42
--> prn 195(snr 44)
```

最初の列はPRN(pseudo random noise number)であり、193はみちびき初号機、194は2号機、195は4号機、199は3号機を表します。

2列目と3列目はGPS形式の観測時刻で、216390051は、UTC時刻では2021年06月21日01:01:09です。2列目が1980年1月6日からの週番号(week number)、3列目が週初めからの秒数(TOW: time of week)なのですが、GPS時刻にはうるう秒が含まれないために、UTCよりも18秒だけ進んでいます(2022年1月時点)。時間換算は、Webサイト⁽¹⁾や、Pythonプログラム⁽²⁾で行えます。

4列目はSNRを表します。

今回はエラーがないので表示されていませんが、TAU1302の出力するデータのflagにエラーがあるときや、チェック・サムが一致しないときには、5列目にそのエラー内容が表示されます。

GPS時刻の異なるデータが観測されると、Rawデータの選択が行われ、その結果が矢印記号で表示されます。この例では、みちびき4号機(PRN195)のRawデータが採用されている状態です。

● cm級補強用CLAS & MADOCAのSNRの分布

固定受信と移動受信、CLAS信号とMADOCA信号のそれぞれに対して、SNR変動をプロットしてみます。衛星への見通しが遮蔽され、また衛星までの距離が遠くなると、SNRは小さくなります。固定受信であってもSNRは変化します。

エラーの有無により受信成功と受信失敗にわけて集

◆参考文献◆

(1) RACELOGIC: GPS Time Calculator.
<https://www.labsat.co.uk/index.php/en/gps-time-calculator>

計算した仮想基準局データによる cm級RTK測位

—— もう1つの基準局いらずMADOCAデータもしてみる

高橋 賢

準天頂衛星のみちびきからは、受信するとcm精度の衛星測位が可能になる補強信号が放送されています。利用は無料なのですが、一般のGPS受信機では対応しないL6(1278.75 MHz)を受信する必要があります。

そこで第3章～第5章では、300ドル程度で入手できる2周波受信機TAU1302(Allystar)でL6信号を受信できます。L6受信機で取り出せるのは補強信号だけなので、図1のようにRTK対応受信機を組み合わせ、高精度衛星測位にチャレンジします。

前々章では、センチメートル級補強サービスCLASや、衛星の精密軌道&時刻情報MADOCAの信号を受信してログを取り、そのログからRawデータを取り出しました。

前章では、みちびきのサービス公式のサンプル・プログラムCLASLIBを使って仮想基準局(VRS)の受信データを生成、RTK測位がうまくいく条件を調べました。

本稿では、移動しながら取得したL6信号およびL1/L2信号のログから測位計算を行います。

〈編集部〉

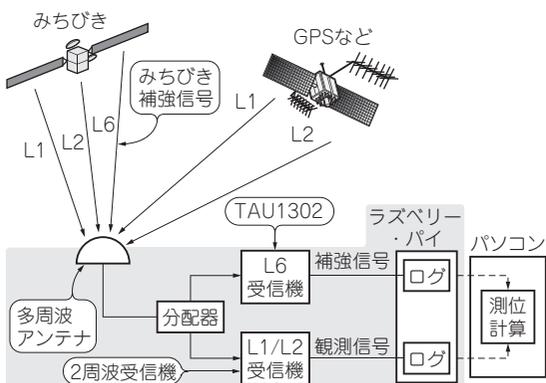


図1 L6信号の受信機があれば既存の2周波GNSS受信機と組み合わせて高精度衛星測位が可能

移動しながら実測した CLASデータによるcm級RTK測位

● 移動コース全体でのFix率

移動受信においては、衛星電波強度の減衰により、測位不可となる可能性があります。与える航法データとCLASのRawデータの品質によって、仮想基準局データの生成に失敗する可能性があります。CLASデータで生成した仮想基準局によるRTK測位(VRS-RTK)は、L6を受信して得るCLASデータのデコードと、L1を受信して得る測位信号(航法データ)のデコードがともに成功したときに、はじめて達成されます。

▶使用データ

航法データは、2周波GNSS受信器ZED-F9P EVKから得たものを用います。CLASのRawデータについては、L6信号が受信できるTAU1302から得たものと、CLASアーカイブ⁽¹⁾から得たものの両方を用いて結果を比較します。CLASのRawデータ復号は高いビット・レートを扱う上に、連続した5データ・パートの受信を求められるため、測位信号の複号よりも困難ではないかと予想したからです。

▶結果

測位方法、CLASのRawデータ取得方法、衛星システムに対するデータ取得数とFix率を表1にまとめます。

測定時間は3709秒間であり、1秒間に1データを取得したので、データ取得数の最大数は3710です。

表1 移動受信により取得したログでFixとデータ取得数の比較

衛星システム	測位方法	CLASのRawデータ	Fix率	データ取得数
GPS Galileo みちびき	仮想基準局 RTK	観測	49.9%	3012
		ダウンロード	56.9%	3048
	ローカルRTK	-	80.5%	3244
	単独	-	-	3586
GPS みちびき	仮想基準局 RTK	観測	55.5%	3351
		ダウンロード	63.6%	3387
	ローカルRTK	-	71.2%	3412
	単独	-	-	3675

2周波RTK受信機

ZED-F9P活用マニュアル

第1章

—— 数万円でリアルタイムのcm級測位が試せる！

吉田 紹一

第1話 位置精度mmの地上基準局が受信した1.5 GHzの波長との差を利用

ナビの100倍高精度！センチ・メートル測位「RTK」

第3章では、RTK移動局の設定例から始まって、基準局の設置とその応用例まで説明します。

RTK(Real Time Kinematic) (図1)とは、移動局が取得した衛星データと、基準局の観測データを使ってその差分を計算し、移動局と基準局の距離をcmレベルの精度で算出する技術です。

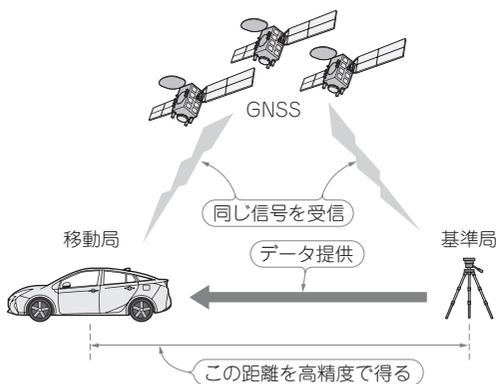


図1 RTK GPSのイメージ

基準局と移動局が同じ信号を受信し、移動局へ受信データを伝えて、差分計算することで高精度の測定を行うことができる

RTK技術はドローンやトラクタに搭載することで、高精度な移動制御が可能です。また、土木作業などに応用すれば高精度測量が可能になります。

● GPSの測位精度は数メートル

一般にスマホやカーナビで使われているGPSには、数メートルの測位誤差があります。これは、GPS衛星までの距離が長いので、宇宙空間や大気圏内で発生するさまざまな物理現象により、電波の到達時間に揺らぎが発生するからです。

市街地においては電波がさざぎられたり、建造物に反射するマルチパスが発生すると精度が悪化します。

GPSとは米国の測位衛星を指します。昔は米国のGPSしかなかったために衛星測位のことをGPSと呼んでいましたが、今は各国が衛星を打ち上げており、これらを総じてGNSS(Global Navigation Satellite System； 全球航法衛星システム)と呼称します。

GPSという名前はあまりにも一般的になりすぎて、今でも衛星を使用した測位システムをGPSと呼んでいます。各システムの名称は表1のとおりです。

日本の測位衛星システムは、2017年10月に準天頂

表1 各国で運用しているGNSSの呼び名と衛星数

国名	名称	名前の由来	衛星数*
米国	GPS	Global Positioning System (全地球測位システム)	30
日本	QZSS	Quasi-Zenith Satellite System (準天頂衛星システム)	4
ロシア	GLONASS	GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (全地球航法衛星システム)	24
中国	北斗(BeiDou)	北極星を見つけるのに使う北斗七星(おおぐま座)	48
欧州	Galileo	天文学者Galileo Galilei	23
インド	IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System (インド地域航法衛星システム)	8

*：2024年2月時点。みちびきのウェブ・サイト「各国の測位衛星」から

本章は以下文献pp.53-92の再掲です

(1)センチメートルGPS測位F9P RTKキット・マニュアル、2020年、CQ出版社。

ラズパイと定番F9PキットでRTK基準局を作る

—— cm級測位についてまわる「基準局」をなるべくかんたんに！

吉田 紹一



写真1 ラズベリー・パイと定番ZED-F9Pを使ってRTK基準局を作る

製作するRTK基準局

ユーブロックス(u-blox)は2019年に、GPSモジュールZED-F9Pを発売しました。このZED-F9Pは2波長のGPS信号を受信することが可能で、RTK演算を行う内蔵エンジンの能力も大きく改善されました。従来、なかなか座標のFixが難しかったコンディションでも、より速やかに座標確定が可能となり、cm級RTK GPS測位受信機の定番となりました。

このZED-F9Pをすぐに試せるキット「トラ技2周波RTKスタータ・キット F9P」(CQ出版社)と、ラズベリー・パイ(Raspberry Pi, ラズパイ)を使って、RTK基準局を作る方法を紹介합니다(写真1, 図1)。

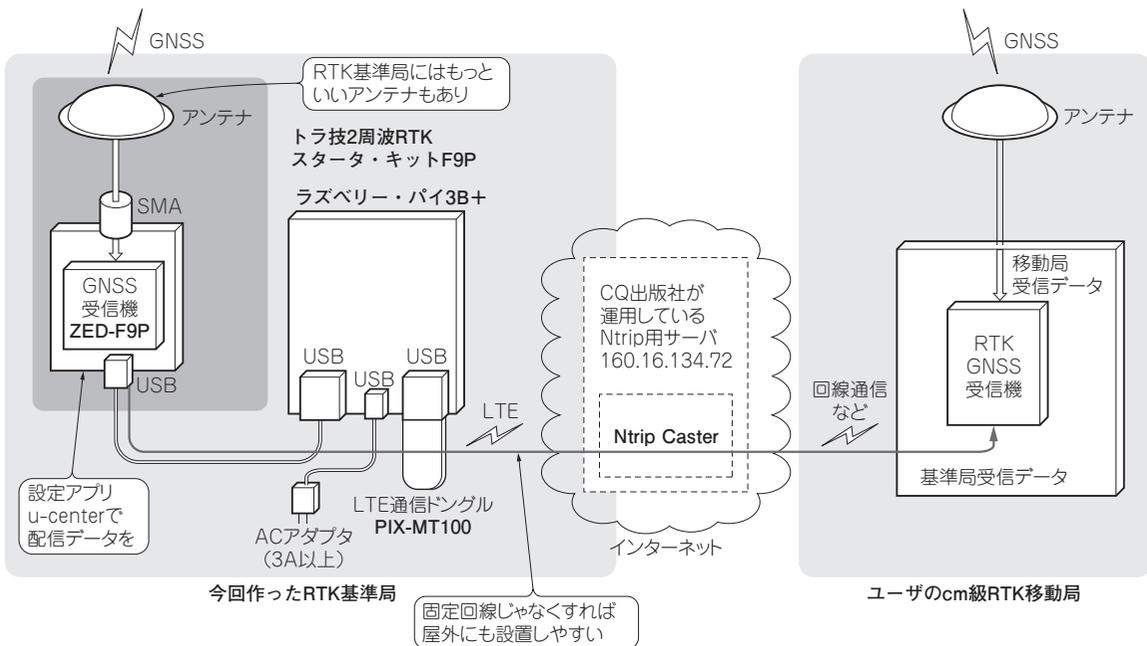


図1 製作するRTK基準局の構成

第1章

ケータイでつなぐ「基準局いらず」！ ネットワーク型RTK測位のしくみ

—— 仮想的な基準点データをサーバからもらう測量現場の技術

藤枝 勇人

近年、モバイル通信環境の普及に加え、GNSS衛星の増加、高精度測位が可能なGNSS受信機の低価格化が進みました。その結果、高精度測位可能なRTK法の利用範囲は、以前から使用されてきた測量分野に加えて、自動運転やスマート農業、宅配サービスなどさまざまな分野に広がっています。

RTK法で高精度に測位するには、観測点から10 km圏内に固定局を設置するのが望ましいのですが、固定局の設置や維持には膨大な費用と時間が発生します。そこで、国内の事業者によって、固定局の設置が不要で公共測量にも利用可能な「ネットワーク型RTK」サービスが有償で提供されています。

本章では、衛星測位システムや衛星測位法の技術、ネットワーク型RTKを利用する場合のメリット、デメリットなどを順に紹介します。

国土地理院の電子基準点と高精度GNSS測位

● 日本の衛星測位システム

衛星測位システムは、人工衛星を利用して現在位置を測位するシステムで、GNSSとRNSSに分類されます。

▶ (1)GNSS(Global Navigation Satellite System)

地球上の全地域での測位を実現する衛星測位システムで、米国のGPS、ロシアのGLONASS、欧州のGALILEO、中国のBeiDouが含まれます。

▶ (2)RNSS(Regional Navigation Satellite System)

特定地域での測位を実現する衛星測位システムで、日本のQZSS(準天頂衛星)、インドのNavIC(旧称IRNSS)が含まれます。また、日本が運用するQZSSは、GPS衛星と高い互換性をもつように設計されています。GNSSは広義としてRNSSを含んで記述されることが多く、本章ではRNSSの1つであるQZSSを含めてGNSSと表記しています。

表1 衛星測位システムの周波数帯と信号名称

相互運用性を確保するために周波数帯を合わせて設計されている

衛星システム名	周波数帯[MHz]/信号名称				
	1176.45	1227.60	1278.75	1575.42	2492.08
GPS (米国)	L5	L2C		L1C/A	
QZSS (日本)	L5	L2	L6(LEX)	L1	S-band
GLONASS (ロシア)		L3	G2		G1
GALILEO (欧州)	E5a	E5b	E6	E1	
BeiDou (中国)	L5	B2		B1	
NavIC (インド)	L5				S-band

M5Stack マイコン用F9Pキット… ネットワーク型RTK実験

—— M5F9Pキットを使った仮想基準点による測位の実際

吉田 紹一

RTK測位F9P内蔵の 箱入りマイコンM5Stackキット注

本稿では定番RTK受信機ZED-F9Pを内蔵したM5Stack用RTK測位モジュールM5F9P、箱入りマイコン・キットM5Stack本体、GPSアンテナを使って、RTK測位を行い、測位情報の記録や位置情報の表示などを行います(写真1)。

● キットの構成

M5Stack本体はESP32というデュアル・コア32ビット・プロセッサを内蔵し、320×240ピクセルのTFTカラー・ディスプレイ、Wi-Fi、Bluetooth、SDメモリ・カード・スロットなどのインターフェースを装備しています。RTK測位モジュールのM5F9Pをスタック(重ねて合体)すると、パソコンなしでRTK測位を行うことができ、microSDカードにログも保存できます(写真2)。

M5F9Pの開発元はジオセンス(<http://www.geosense.co.jp/>)で、オンラインにてキットが4~5万円程度で販売されています。

この価格は高額と感じられるかもしれませんが、か

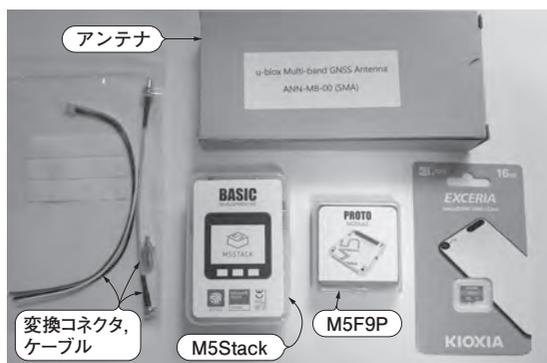


写真1 今回実験に使用した機材とM5Stack(Basic)用のRTK受信機ZED-F9P内蔵キットM5F9P

筆者はRTK測位に必要な機材がすべて含まれているMZ-M5F9PAIIオールインワンキットを利用したが、現在このオールインワンキットは販売終了しているので、実験するときには個別に用意する

つてはRTK測位の装置本体は100万円近い価格が一般的でした。ここまで価格が低下し、個人レベルでRTK測位を試すことができるようになったことは驚きです。また、小型化(5.4 cm×5.4 cm)により、無人搬送ロボット、車いす、視覚障害者の誘導、ドローン、3次元計測への組み込みなど応用範囲が広く、今後の成長が見込まれます。

● M5F9Pに内蔵されているRTK対応のGPSモジュールは定番のZED-F9P

M5F9Pに内蔵されているGNSS受信モジュールは、ZED-F9P(ユーブックス、写真3)という表面実装タイプです。RTK測位に必要なすべての演算を行います。

とても多機能なモジュールで、移動局だけでなく基準局としての設置も可能です。また、2波長のGPS信号を受信できるので、従来モデルと比較して測位性能が大幅に改善しています。



写真2 M5Stack本体とバッテリーの間にM5F9Pモジュールが挟まれている



写真3 2波長受信GPSモジュールZED-F9P(ユーブックス製)

注：ハードウェアやソフトウェアはアップデートされることがあり得るので適宜読みかえてください

みちびきが提供する高精度測位 マドカ MADDOCA入門

第1章

—— 原理的に基準局が不要なフル・モデリングPPP方式

高須 知二

もう1つの次世代「基準局いらず」 高精度測位MADDOCAの方式PPP

PPPはPrecise Point Positioningの略で日本語では高精度単独測位または精密単独測位と呼ばれています。詳細は後述しますが、CLAS以外のもう1つの次世代高精度測位方式MADDOCAでPPP方式が使われています。

高精度GNSS測位の方式は、大きくはRTK、PPPと、その中間であるPPP-RTKに分けられます。RTKとPPPの基本観測データの比較を図1に示します。

● RTKでは差を取ることでいろいろな誤差を打ち消す

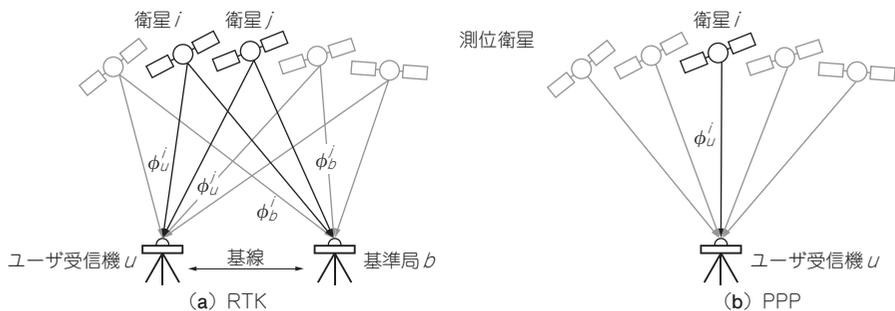
RTKの場合、基本観測データは、ユーザ受信機と基準局の2重差搬送波位相(2重位相差)です。2重差とは、受信機間差を取った後、衛星間差を取った値です(逆順でも結果は同一)。衛星間差は、重複を避けるために仰角の最も高い衛星を基準衛星とし、基準衛星と他の衛星との差を取ることが多いです。

PPPで使う、差を取らない搬送波位相には、衛星と

受信機間の物理的距離(幾何学距離)以外に、受信機・衛星クロック誤差、電離圏遅延、対流圏遅延、その他の誤差、搬送波位相バイアス、観測誤差が含まれます。

RTKのように2重位相差を取ると、このうち受信機・衛星クロック誤差は完全に消去されます。基線長が十分短い(典型的には10 km以下の)場合、測位信号は大気中のほぼ同じ経路を通過するとみなせるので、電離圏遅延と対流圏遅延は、受信機間差を取ったことで大部分がキャンセルされます。軌道暦誤差すなわち衛星位置の誤差も、受信機間差を取ることによって大部分がキャンセルされます。その他の誤差も、同様に大部分キャンセルされます。搬送波位相バイアスの衛星と受信機初期位相の項も2重位相差により消去され、アンビギュイティ(整数値バイアス)のみ残ります。

RTKにおいては、基本観測データとして2重位相差を採用することにより、搬送波位相に含まれるさまざまな誤差項を考慮する必要がなくなり、測位解を求める問題は、2重位相差の観測方程式を連立して解く、単純な問題に帰着できるのです。



観測データ：2重差搬送波位相(2重位相差) ϕ_{ub}^{ij}

$$\begin{aligned} \phi_{ub}^{ij} &\equiv \lambda((\phi_u^i - \phi_b^j) - (\phi_u^j - \phi_b^i)) \\ &= \rho_{ub}^{ij} + c(dt_u^{ij} - dt_{ub}^{ij}) - I_{ub}^{ij} + T_{ub}^{ij} + d_{ub}^{ij} + \lambda B_{ub}^{ij} + \varepsilon_\phi \\ &= \rho_{ub}^{ij} - I_{ub}^{ij} + T_{ub}^{ij} + d_{ub}^{ij} + \lambda N_{ub}^{ij} + \varepsilon_\phi \\ &\doteq \rho_{ub}^{ij} + \lambda N_{ub}^{ij} + \varepsilon_\phi \text{ (基線長} < 10\text{km)} \end{aligned}$$

観測データ：(ゼロ差)搬送波位相 ϕ_u^i

$$\begin{aligned} \phi_u^i &\equiv \lambda \phi_u^i \\ &= \rho_u^i + c(dt_u - dt^i) - I_u^i + T_u^i + d_u^i + \lambda B_u^i + \varepsilon_\phi \end{aligned}$$

上付き添字は衛星、下付き添字は受信機を示し、2重添字は差を取ることを示す

図1 定番高精度測位RTKとちがってPPP(MADDOCA)は自前の基準局不要

Φ, ϕ : 搬送波位相[m/cycle], λ : 搬送波長[m], ρ : 幾何学距離[m], dt : 受信機クロック誤差[s], dT : 衛星クロック誤差[s], I : 電離圏遅延[m], T : 対流圏遅延[m], B : 搬送波位相バイアス[cycle], N : 整数アンビギュイティ, d : その他の誤差[m], ε_ϕ : 観測誤差[m], c : 光速[m/s]

◆参考文献◆

- (1) 気象庁予報部；メソスケール気象予測の現状と展望，数値予報課報告・別冊，第66号，2020年3月。

基地局いらず…みちびきの CLASとMADOCAの実力感

——日本の補強信号による測位精度…実際のところ

岡本 修

次世代の高精度測位CLASとMADOCAが期待される背景

● RTKは通信環境がないと使えない

ZED-F9P(ユーブロックス)やmosaicシリーズ(セプテントリオ社)など、低価格なマルチバンド対応RTK受信機が出てきています。また善意の基準局掲示板のほか、ソフトバンクやNTTドコモなど新たに基準局情報配信サービスを始める企業も現われ、RTK測位の利用環境の整備が急速に進みました。さらに非公式ながら基準局からの距離が10 km超でもFixする長基線対応の受信機もあり、日本全土で利用できる環境が整いつつあります。

RTK測位の利用環境が整備されることは、社会インフラの維持管理にRTK測位が応用されることにつながり、様々な応用分野で利用が模索されています。

ただRTK測位の大きな問題として、基準局情報配信サービスがモバイル・データ通信の上に成り立っている点があります。近年頻発している豪雨や地震などの大規模災害では、堅固と思われていた通信インフラもダメージを受け、利用に支障が生じました。肝心なときに測位が継続できずダウンしてしまうのでは、社会インフラに関わる応用に展開できません。

● 衛星から放送される補強データは通信環境不要で災害時でも使える

このような問題を解決するのが、日本が独自に打ち上げて運用管理する衛星測位システム「みちびき」です。みちびきには世界に類をみない補強サービスがあります。次世代の高精度衛星測位と期待されるCLASとMADOCA-PPPです(MADOCA)。

みちびきからの補強信号に対応する受信機は、1台だけの単独運用で、センチメートル・レベルの高精度測位が可能です。しかも、契約不要の無料放送です。基準局データは不要なので、RTK測位のように他の通信に頼る必要はありません。大規模災害に強い、社会インフラに応用できる高精度衛星測位です。

このみちびきの補強サービスは、試験運用を経て

2018年11月1日から正式運用になりました。2020年11月30日からは、CLASの対象衛星が最大17機に拡大されるなど、衛星運用関係者や対応受信機メーカーの技術者の努力で、日々進化を続けています。

導入当初は、タイミングが悪くRTK受信機のローコスト化の波に押され、注目はされるものの普及が進みませんでした。

● 測位精度について実際のところを確認してみる

みちびきが提供するCLAS、MADOCA-PPPは世界に誇る先進的なサービスですが、その測位性能は数値ばかりが一人歩きしてしまい、多くの人に知られていません。

本章では、CLAS、MADOCA-PPPの両方に対応した受信機を使用して、互いの比較から測位性能を評価した結果を報告します。次世代の単独高精度衛星測位の實力に迫ります。

表1 衛星信号を受信するだけで高精度測位が可能になる補強信号サービス

どちらの信号も準天頂衛星みちびきからL6帯で放送されている

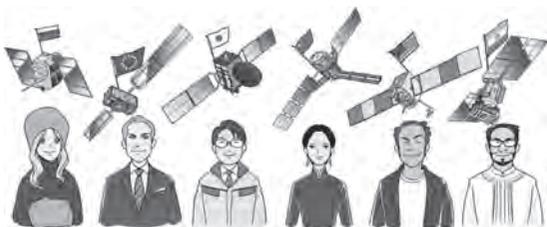
補強サービス	CLAS	MADOCA
放送信号	QZSSのL6D	QZSSのL6E
ビット・レート	2,000 bps	2,000 bps
対象衛星	GPS(L1/L2), QZSS(L1/L2), Galileo(E1/E5)	GPS(L1/L2), QZSS(L1/L2), GLONASS(G1/G2)
測位精度(水平, RMS, 移動体)	6.9 cm	10 cm
整数アンビギュエティの決定	あり(Fix解あり)	なし(Float解のみ)
初期化にかかる時間	1分	15~30分
補強対象衛星数	最大17衛星	制限なし
サービス地域	日本全土	日本および周辺海域 (アジア, オセアニア 地域など、信号を受 信できる範囲) ^注

注. グローバル測位サービス(GPAS)ではインターネットを経由するNTRIP配信で商用サービスを提供している

性能を決める電波技術… マルチパスとその対策

—— 現実的に避けられないGPS/GNSS測位の天敵

鈴木 太郎



米国のGPSに代表される衛星測位システムはGNSS (Global Navigation Satellite System)と呼ばれ、すでにさまざまな国が独自の衛星測位システムを運用しています。ロシアのGLONASS、EUのGalileo、中国のBeiDou、インドのIRNSS、そして日本の準天頂衛星(QZSS)など、2021年現在で120機以上の測位衛星が運用されており、空が開けた環境であれば常時35機ほどの測位衛星からの信号が受信できる時代です。

それぞれのGNSSは複数の周波数で独自の信号を出しています。そのうちの一部は民生用信号として信号の仕様を公開しているため、現在スマートフォン内蔵のチップを含む多くの受信機は、上記の複数のGNSS信号の受信に対応しています。ここでは、GNSS信号の特徴とその構造について紹介します。

GNSS信号の電波的な特徴

● GNSS信号の1.5 GHzマイクロ波の特徴

GNSS信号は、主にLバンドと呼ばれる周波数帯域で送信されています。代表的なL1と呼ばれる信号の周波数はおよそ1.5 GHz周辺で送信されています。このGNSSのL1信号の波長は約19 cmであり、マイクロ波と呼ばれる分類になります。マイクロ波の特徴として、直進性が非常に高く、大気や降雨による減衰が比較的小さいため、GNSSは全天候型のセンサとして利用可能です。

一方、プラスチックやガラスなどは大きく減衰することなく透過するものの、木材、コンクリートなどでは吸収され減衰します。地下やトンネル内などではGNSS信号の受信はできません。また、水もマイクロ

波を吸収するため、GNSSは水中、海中では基本的に利用できません。

金属の表面などでは反射が起こります。鉄筋コンクリートなども電波を反射するため、屋内では窓の近くでないGNSS信号の受信は困難です。屋外でGNSSを利用する場合、ビルや樹木、さまざまな障害物によってGNSS信号は減衰、反射してアンテナに到達します。このなかでも建物などによって反射してアンテナに入射する信号のことを、マルチパス信号と呼びます。

● GNSS信号の受信電力

GNSS信号の特徴として、地上での受信電力が非常に小さいことがあげられます。GNSS衛星は例外もありますが、およそ高度2万 km程度で周回しており、地上での受信電力は-130 dBm程度です。GNSS受信機の帯域での常温での雑音レベルが-115 dBm程度であることから、GNSS信号は雑音の中に埋もれているといえます。

これはGNSS信号が外部からの干渉に非常に弱いことを意味します。GNSS信号の受信には、GNSSアンテナの直下にLNA (Low Noise Amplifier)が搭載されたアクティブ・アンテナを利用するのが普通です。

また、GNSS信号の送信には右旋円偏波(RHCP)という右回りの円偏波が使用されています。そのため、受信アンテナも右旋円偏波用に設計されたアンテナである必要があります。

GNSS信号のデータと変調

● 搬送波とPRNコード

図1にGNSS信号の構造を示します。ここでは例として、ほぼすべてのGNSS受信機で受信可能なスタンダードな信号であるGPSのL1C/A信号を示しています。L1C/A信号は、中心周波数1.57542 GHzの搬送波(正弦波)信号[図1(a)]を、PRN(Pseudo Random Noise; 疑似雑音符号)コード[図1(b)]と呼ばれるそれぞれの衛星固有の拡散符号によりスペクトル拡散するCDMA(Code Division Multiple Access)方式を

自動運転のキモ… 途切れないGPS測位

—— 慣性センサIMUアシストの実際

目黒 淳一

GNSSの弱点「途切れ」を解決したい

GNSSを活用した衛星測位は、絶対位置を計測することができる唯一の方法であり、さまざまな用途に利用されています。しかし、GNSSには衛星からの電波が受信できなければ位置を推定できないという致命的な欠点があります。そのため、常に位置推定ができていることが前提の用途では、GNSSと他の手法を複合することで、その欠点を補っています。

ここでは、自動車やロボットの自動運転を例として、位置推定に用いられている手法を示します。自動車やロボットでは、建物やトンネルの影響により、衛星からの電波が受信できない地点を通る必要があります。そのため、GNSSだけでなく、その他の手法と複合することで安定した位置推定を達成しています(表1)。

● 慣性センサなどでGNSS測位をアシストさせるというアイデア

とくに本稿では、慣性センサに代表される内界センサ(カメラやLiDARなどの外部をセンシングする外界

センサではなく、移動体の内部の状態を計測するセンサ)に注目をして、GNSSと複合する技術に関して紹介します。いろいろな呼び方はありますが、その複合航法技術はGNSS/DR(Dead Reckoning)、GNSS/IMU(Inertial Measurement Unit)、GNSS/INS(Inertial Navigation System)と呼ばれています。

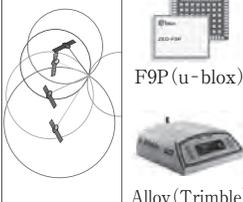
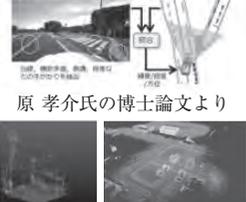
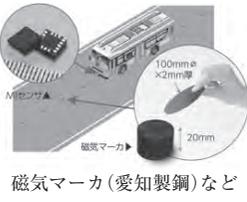
本稿では、これらのGNSSと内界センサの複合航法技術の概要と、活用されるIMUに関して詳細を解説します。

複合航法に活用されているカルマン・フィルタやパーティクル・フィルタに関する技術に関しては、文献^{注1}に定式化から解説されています。

実装例としてはオープンソース・ソフトウェア(OSS)のAutoware(<https://github.com/Autoware-AI/autoware.ai>)にカルマン・フィルタが実装されていますし、EagleEye(<https://github.com/MapIV/eagleeye>)にもGNSSドップラーを活用した複合航法が実装されています。なお、EagleEyeには、カルマン・フィルタを利用した方法も実装される予定です。

注1：(1)内村 裕：「自己位置推定ツール④ オドメトリ×カルマン・フィルタ」, pp.102-109, トランジスタ技術, 2019年10月号, CQ出版社。
(2)上田 隆一：詳解 確率ロボティクス, 第5章・第6章, 講談社。

表1 自動車やロボットで活用される位置推定技術

	自律航法(Dead Reckoning)	衛星測位GNSS	マップ・マッチング	インフラ利用
例	 車輪速計 AU7684 (多摩川精機)	 F9P(u-blox) Alloy(Trimble)	 原 孝介氏の博士論文より	 磁気マーカ(愛知製鋼)など
利点	内界センサを利用するため汎用性が高い	絶対位置がわかる	地図上の位置がわかる 位置精度が高い	確実性が高い 位置精度が高い
欠点	絶対位置が不明 積分誤差が発生	衛星が見えないと 利用できない	高精度地図が必要 地図に特徴が必要	インフラが必要 経路変更に工事が必要
対応策	他の手法と統合 (GNSSと複合する 方法が一般的)	内界センサを 利用する方法と統合	他の手法と統合 地図の特徴があるところで 運用	他の手法と統合 (RTK-GNSS/IMUと 統合が一般的)

- 本書記載の社名、製品名について — 本書に記載されている社名および製品名は、一般に開発メーカーの登録商標または商標です。なお、本文中では™、®、©の各表示を明記していません。
- 本書掲載記事の利用についてのご注意 — 本書掲載記事は著作権法により保護され、また産業財産権が確立されている場合があります。したがって、記事として掲載された技術情報をもとに製品化をするには、著作権者および産業財産権者の許可が必要です。また、掲載された技術情報を利用することにより発生した損害などに関して、CQ出版社および著作権者ならびに産業財産権者は責任を負いかねますのでご了承ください。
- 本書に関するご質問について — 文章、数式などの記述上の不明点についてのご質問は、必ず往復はがきか返信用封筒を同封した封書でお願いいたします。勝手ながら、電話での質問にはお答えできません。ご質問は著者に回送し直接回答していただきますので、多少時間がかかります。また、本書の記載範囲を越えるご質問には応じられませんので、ご了承ください。
- 本書の複製等について — 本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも認められておりません。

JCOPY (社) 出版者著作権管理機構委託出版物

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

高精度 cm 級 GPS 測位キット実験集

2024年5月15日 初版発行

©高須 知二 / 久保 幸弘 / ジョン・レニー / 太田 聡実(翻訳) /
三菱電機 鎌倉製作所 / 宮 雅一 / 佐藤 一敏 / 川口 貴正 / 矢口 尚 / 鈴木 太郎 /
高橋 賢 / 吉田 紹一 / 藤枝 勇人 / 岡本 修 / 目黒 淳一 2024

著者	高須 知二	久保 幸弘
	ジョン・レニー	太田 聡実(翻訳)
	三菱電機 鎌倉製作所	宮 雅一
	佐藤 一敏	川口 貴正
	矢口 尚	鈴木 太郎
	高橋 賢	吉田 紹一
	藤枝 勇人	岡本 修
	目黒 淳一	
発行人	櫻田 洋一	
発行所	CQ出版株式会社	
	〒112-8619 東京都文京区千石4-29-14	
	電話 編集 03-5395-2123	
	販売 03-5395-2141	

ISBN987-4-7898-4797-1

定価は裏表紙に表示してあります

無断転載を禁じます

乱丁、落丁本はお取り替えします

Printed in Japan

編集担当者：内門 和良, 上村 剛士
DTP：美研プリンティング株式会社
印刷・製本：三共グラフィック株式会社

ISBN978-4-7898-4797-1

C3055 ¥3000E

CQ出版社

定価 3,300円(本体3,000円)⑩



9784789847971



1923055030008

標準GPSとは桁ちがい! 自動運転から農業まで注目!

**高精度cm級GPS
測位キット実験集**