

建設機械技術解説

GPS 測位を巡って

杉本末雄・久保幸弘

米国のGPSに代表される衛星測位システムは、その本来の利用目的である航法（ナビゲーション）に留まらず、精密測量や地殻変動の監視、ネットワークの時刻同期等々の分野で活用され、今日の重要な社会インフラの1つとなっている。本稿では、GPSシステムの概要とその測位原理について解説する。また、各国における衛星測位システム整備の動向、GPSシステムの利用法とその周辺技術、および建設機械等の自立操縦で必要となる複合航法について述べる。

キーワード：GNSS, GPS, 準天頂衛星, 複合航法, 自立操縦, 建設機械, カルマンフィルタ

1. はじめに

米国のGPS (Global Positioning System) に代表される衛星測位システムは、近年ではGNSS (Global Navigation Satellite System)と総称され、カーナビゲーションシステム、精密測量などに活用され、本来の目的である航法 (navigation) のみならず、地震や火山活動による地殻の変動の測位、GPS気象学への応用、携帯電話への搭載など、広範な利用が進んでいる¹⁾。

ところで、現在稼働しているGNSSとしては、米国が開発したGPS、ロシアによるGLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikkavaya Sistema-Global Navigation Satellite System) の2つがある。

一方、実験段階にあるものとして、2005年12月28日には、欧州連合によるGalileoシステム初の測位衛星が打ち上げられ、現在試験運用が始まっている。また、中国の北斗衛星ナビゲーションシステム (Compass Navigation Satellite System) では、2010年8月現在5機の測位衛星が打ち上げられている。他のGNSSとしては、いよいよ打ち上げが迫っているわが国のGPS補強型の準天頂衛星システム (QZSS: Quasi Zenith Satellite System)^{a)}と、GPSを進化させる米国のGPS近代化計画がある。

2. GPSの概要

米国国防総省により開発されたGPSは、正式にはNAVSTAR/GPS (NAVigation System with Time And Ranging/Global Positioning System)という。GPSシステムは24個の衛星 (宇宙部分: space segment)、これらの衛星を管理する地上の制御局 (control segment)、および利用者 (ユーザ部分: user segment) の3つにより構成されている。1994年3月9日に24番目の衛星が打ち上げられ、1995年4月27日、米空軍宇宙局 (U.S. Air Force Space Command) によって、完全運用 (FOC: Full Operational Capability) が宣言されたのち、既に15年の歳月が経過したことになる。

GPS衛星は、周期を0.5恒星日 (約11時間58分)、軌道半径を約26,560 [km]とする円軌道 (正確には楕円軌道) で、地球を周回し、赤道面と55度の傾斜角 (inclination angle) をもつ6つの軌道面に4個ずつ (実際には予備の衛星が存在し、2010年8月現在32機が運用中) 配備されている。各衛星からは (1) 衛星自身の精密な位置情報のパラメータ (ephemeris)、 (2) 衛星が搭載している時計の時刻情報、 (3) 全衛星の概略位置情報 (almanac)、 (4) 電波伝搬遅延の補正パラメータ等が航法メッセージとして送信されている。GPS衛星は年代順にブロックI、II、IIA、IIR、IIR-M、IIFと呼ばれるバージョンに分類されている。GPS衛星の最新情報については、米国沿岸警備隊航法センター (US Coast Guard Navigation Center) のwebページ²⁾から調べることができる。各衛星

a) 2010/9/11に第1号機が打ち上げられる予定、本稿が出版されている頃には「みちびき」衛星が天空を舞っているものと思われる。

はSVN (Space Vehicle Number) とPRN (Pseudo Random Noise) という2つの番号が付けられ区別されている。SVNはブロックI衛星の初号機から付けられている通し番号であり、PRNは衛星から送信される擬似雑音符号(PNコード)の系列を特定する番号である。なお、PRNは1～32の範囲と定められているため、新たに打ち上げられる衛星には既に退役した衛星のPRNが繰り返し使用される。

(1) GPS衛星からの信号

GPSは、発信した電波が受信機に到達するまでの時間を測定することにより、GPS衛星と測位する受信機間の距離を求めることが眼目であるので、各GPS衛星は極めて安定度の高い、セシウム(Cs)あるいはルビジウム(Rb)からなる原子時計(発振器)が搭載されている。衛星から送信される電波信号の搬送波は、原子時計より得られる $f_0 = 10.23$ [MHz]の基本周波数を154倍、または120倍して得られ、それぞれL1帯、L2帯と呼ばれる。それぞれの中心周波数 f_{L1} 、 f_{L2} は

$$f_{L1} = 154f_0 = 1575.42 \text{ [MHz]}$$

$$f_{L2} = 120f_0 = 1227.60 \text{ [MHz]}$$

の2種類である。

すなわち衛星 p から送信される信号は

$$s_{L1}^{(p)} = \sqrt{2P_{C/A}} C^{(p)}(t)D^{(p)}(t) \cos(2\pi f_{L1}t + \theta_{L1}^{(p)}) \\ + \sqrt{2P_{Y1}} Y^{(p)}(t)D^{(p)}(t) \sin(2\pi f_{L1}t + \theta_{L1}^{(p)}) \\ s_{L2}^{(p)} = \sqrt{2P_{Y2}} Y^{(p)}(t)D^{(p)}(t) \sin(2\pi f_{L2}t + \theta_{L2}^{(p)})$$

と表現できる。ただし、 $C^{(p)}$ 、 $Y^{(p)}(t)$ は衛星 p からのC/A (Clear and Acquisition, Coarse and Access)コードとP(Y) (Protect, Precision)コードを示し、 $D^{(p)}(t)$ は航法メッセージを、 $P_{C/A}$ 、 P_{Y1} 、 P_{Y2} は信号の平均パワーを示している。C/AコードとPコードの内容は公開されているが、通常PコードにはスクランブルがかけられYコードとなっている。Yコードの内容は非公開(軍事用)である。

(2) C/Aコード、P(Y)コード

上記のように、L1帯はC/AおよびP(Y)コードで、L2帯はP(Y)コードのみで変調されている。これらのコードは、“+1”または“-1”の値をランダムに繰り返す符号系列である。C/Aコードは、10段のシフトレジスタで生成される2つのM系列の排他的論理和(exclusive or)により得られる(Gold符号化という)1023ビット(チップ)の系列である。C/Aコードは衛星ごとに異なった系列が生成され、1023チッ

プが1 [ms]周期で繰り返される。したがって、C/Aコードの周波数(チップレート)は1.023 [MHz (bps)]であり、1チップの時間幅は約1 [μ s]、距離(波長)に換算すると約300 [m]である。

Pコードの生成にも、2つのシフトレジスタから得られるビット列の組み合わせが利用される。具体的には、周波数が10.23 [MHz]で1.5秒周期で繰り返す 1.5345×10^7 ビットの系列と、これよりも37ビット長い系列を組み合わせて、約 2.3547×10^{14} ビットの系列を生成し、これを37個の部分に分割して各衛星に割り当てている。PコードのチップレートはC/Aコードの10倍となっているから、1チップの距離(波長)は約30 [m]となる。

このように各GPS衛星は固有の擬似雑音符号(PRNCode)のパターンをもつので、受信機側でそのパターンを発生させ、パターンマッチング(相関計算)により復調し、各衛星からの電波を分離受信する。このとき、コードを信号の時間的な目印として利用することで、衛星・受信機間の距離を測定(測距)する。したがって、本来の目的である軍事用に開発されたGPSでは、Pコードの方がチップ幅が短いため距離分解能が高く、測距精度が高く、最終的に測位精度が高くなるように設計されている。

一方、航法メッセージの情報(ビット列)は、 $D^{(p)}(t)$ としてC/AコードやP(Y)コードとの積として重なって送信されている。航法メッセージの送信速度は50 [bps]であり、C/AコードやP(Y)コードと比べるとゆっくりとした通信速度である。航法メッセージは全部で37,500ビットあり、全てのメッセージを送受信するためには12.5分必要となる。ただし、測位に必要な不可欠な重要な情報は、全37,500ビットの航法メッセージ中に繰り返し埋め込まれ、30秒ごとに送信されている。

3. GPS測位の原理

GPSによる測位方式は、大きく分けて単独測位(point positioning)と相対測位(relative positioning)の2種類がある。単独測位は測位点の絶対位置を求めるものであり、相対測位は1地点の位置を既知として他の1地点の相対的な位置関係を求め、最終的に精度の高い測位点の絶対位置を求める。ここでは、紙面の関係から単独測位の原理について述べる。

(1) 単独測位の原理

単独測位の原理は単純であり、複数の衛星を中心と

して、各衛星から受信機アンテナ位置までの距離を半径とした球面の交点を求めることに尽きる。ただし、この測位原理に近づけるべく、様々な誤差要因を解析し、その（計算）処理をすることにより、測位精度を上げることが目標となる。

いま、受信機の位置ベクトル、衛星 p の位置ベクトル、および利用可能な衛星数をそれぞれ \mathbf{u} 、 \mathbf{s}^p 、 n_s とするとき、時刻 t における衛星・受信機間の幾何学的距離（geometric distance）は

$$r_u^p(t) = \|\mathbf{u}(t) - \mathbf{s}^p(t - \tau_u^p)\| \quad (1)$$

$$\mathbf{u} \equiv [x_u, y_u, z_u]^T$$

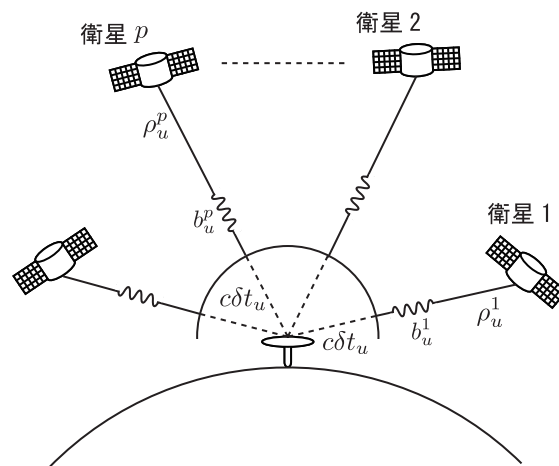
$$\mathbf{s}^p \equiv [x^p, y^p, z^p]^T \quad (\text{T は転置を示す})$$

で表わされる。GPS 測位の分野では、 r_u^p のように、上添字は上空にある衛星 p を、下添字は地上にある受信機 u を連想するような記法を用いることが多い。なお、GPS では WGS84（World Geodetic System 1984）と呼ばれる座標系が用いられる。この座標系は、地球に固定された（地球中心・地球固定（ECF；Earth Centered Earth Fixed）直交座標系であり、地球の公転・自転に伴って回転している。したがって、衛星 p から受信機 u までの電波の伝播時間 τ_u^p の間にも座標系は回転しているため、伝播時間 τ_u^p を考慮して衛星座標を修正する必要がある（Sagnac 効果）。そのため、(1) 式では時刻 t での受信機の位置ベクトルを $\mathbf{u}(t)$ とし、衛星座標 \mathbf{s}^p の時刻は受信機衛星間の伝播時間を考慮して $(t - \tau_u^p)$ と表わしている。

単独測位は、(1) 式での $r_u^p(t)$ を複数の衛星 ($p = 1, 2, \dots, n_s$) について観測し、受信機の位置ベクトル \mathbf{u} を求めるものである。このためには、衛星から送信される電波信号を受信機で解読し、(1) 衛星・受信機間の距離を測定（測距）する、(2) 衛星の位置（座標）を知る、(3) 衛星位置を中心とする複数の球の交点として受信機の座標を求めることが基本的な測位手順となる。(1) の測距は、C/A コードにより伝播時間 τ_u^p を推定し、光速 c を掛けることにより行われる。このとき、GPS 衛星の速度は、秒速約 4 [km] であるので、アインシュタインの特殊相対論による時間遅延の効果、また衛星と地表面の受信機では地球重力の差による一般相対論による時間進みの効果も無視できず、時刻補正を行う必要がある。衛星の座標は航法メッセージを用いて受信機側で算出する。

実際に電波の伝播時間から r_u^p を求めるためには、個々の衛星および受信機に同期のとれた高精度な時計

が搭載されている必要がある。GPS 衛星に搭載された原子時計は地上の制御部分で監視され、それらの補正情報は航法メッセージに含まれて放送されているため、衛星時計はほぼ同期するように補正できる。一方受信機側には、通常は安価な水晶発振子が用いられるため、衛星時計に対して誤差をもつ。そのため、受信機で観測される衛星・受信機間の距離には、図—1 に示すように、受信機の時計誤差 (δt_u) による共通のバイアス $c\delta t_u$ (c は光速) が含まれる。すなわち、受信機で観測される各衛星までの距離は、等しく $c\delta t_u$ だけ長い（または短い）ものとなっている。



図—1 GPS による単独測位の原理：擬似距離，受信機時計誤差，電波伝播路の影響の関係

さらに、航法メッセージ（衛星軌道、衛星時計補正パラメータ）の誤差、地球を取り巻く電離圏や大気（対流圏）の影響、建物等での反射による多重伝搬（マルチパス）の影響等の電波伝搬の過程における誤差が存在する。ここでは、これらの影響をまとめて b_u^p で表し、さらに受信機内での不規則な雑音を e_u^p で表すと、受信機で得られる距離は「擬似距離」（pseudorange）と呼ばれ

$$\rho_u^p = \|\mathbf{u} - \mathbf{s}^p\| + c\delta t_u + b_u^p + e_u^p \quad (2)$$

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{s}^p\| \equiv \sqrt{(x_u - x^p)^2 + (y_u - y^p)^2 + (z_u - z^p)^2}$$

と定式化できる。したがって実際の単独測位では、(2) 式の擬似距離 ρ_u^p ($p = 1, 2, \dots, n_s$) を観測し、 \mathbf{u} を求める問題となる。

受信機座標 \mathbf{u} を求める測位演算にあたり、 b_u^p については、測位精度を向上させるためには航法データ内の補正情報を用いたり、種々のモデル式を用いた補正が行われる。また、各衛星に対してマルチパスが生じているか否かの統計的な検定を行い、マルチパスが生じていると判断した場合は、該当する衛星からの擬似距離を測位計算には用いない等の処置を行う。実際には、

b_u^p をいかに見積もるかが、単独測位における精度向上の決め手となる。

一方、 $c \delta t_u$ は各衛星 p に対する観測量に共通に含まれるものであるから、受信機の座標に加えて、これを第4の未知数とし、 \mathbf{u} と共に求めることができる(図1を参照)。

以上の記述から、基本的な単独測位では未知数 ($x_u, y_u, z_u, c \delta t_u$) が4個である非線形な連立方程式を解くことになり、測位には最低4個の衛星が必要となる。5個以上の観測が得られる場合は、(非線形) 最小2乗法を適用する。通常、最小2乗法による推定値を求めるために、時刻 t での観測値 $\rho_u^p(t)$ の取得のたびに、逐次的に推定を行うカルマン・フィルタ (Kalman Filter) が用いられている。カルマン・フィルタの適用では、推定したい変量に対する動的な統計モデルを構成することが重要であり、このモデル内に飛行機、車両、建設機械、歩行者、静止点などの情報を加味することができ、測位精度を向上させることが可能である^{1), 3)}。

ここで、GPS測位の性能について述べておく。C/Aコードによる測距に基づく単独測位を標準測位サービス (SPS: Standard Positioning Service) といい、SPSの性能は水平方向で13 [m]、垂直方向で22 [m] (95%値) となっている。ただし、受信機が異なれば、そのハードウェア構成、特に信号処理アルゴリズムの異なりによって測位性能に差が現われる^{b)}。したがって上記の値は、(c1) 仰角5度以上の可視衛星を全て利用する、(c2) 電波伝搬路における影響 (電離層、対流圏、マルチパス、妨害電波の干渉等の影響) は考慮しない、(c3) 受信機に由来する雑音は考慮しない、という条件の下に求められた数値である。なお、最近では各GPS衛星からの搬送波の位相積算値データも用いて、精密単独測位 (PPP: Precise Point Positioning) の技術が開発されている¹⁾。

b) GPSによる測距アルゴリズムの開発の醍醐味はまさにこの点にある。光波計による測距では、ほぼ光波計のハードウェアの精度が直接、測距精度に影響を及ぼすが、GPS測距では知恵 (数理解析力) が測距精度に大きな影響を及ぼす。

4. GPS測位の周辺

航空機での利用においては、高い位置精度はもちろんのこと、航法システムが正常に動作しなくなった場合に適時警報を発する「完全性」(インテグリティ, integrity), およびサービスの提供を中断しない「連続性」(コンティニューイティ, continuity) 等が要求さ

れる。これらの要件を満たすために、受信機の「自律監視」(RAIM: Receiver Autonomous Integrity Monitoring) が適用されたり、GPSの機能を補強するシステムが実用化されている。補強システムには、衛星を用いてサービスを提供する「衛星型補強システム」(SBAS: Satellite-Based Augmentation System) と、地上の施設を用いてサービスを提供する「地上型補強システム」(GBAS: Ground-Based Augmentation System) がある。

SBASには、米国の「WAAS」(Wide Area Augmentation System), 欧州の「EGNOS」(European Geostationary Navigation Overlay Service), わが国の「運輸多目的衛星」(MTSAT: Multifunctional Transport Satellite) を用いた「MSAS」(MTSAT Satellite-based Augmentation System), インドのGAGAN (GPS and GEO Augmented Navigation System), 中国の北斗衛星 (COMPASS システムの一部) 等があり、静止衛星を用いて運用されている。

これらの衛星型補強システムは、洋上など世界規模で利用可能な広域 DGPS (WADGPS: Wide Area DGPS) の機能も備えており、静止衛星からGPSと同様の測距用信号、ディファレンシャル補正值、およびGPS衛星のインテグリティ情報 (使用不可または不具合の程度) を提供することで、GPSを補強している。なお、これらのシステムに対応した受信機であれば、航空機に限らずサービスを利用することができ、安価なハンディ型受信機等でも利用可能なものが多い。

航空機以外での利用については、測量やカーナビゲーション、ハンディ型受信機による歩行者のナビゲーション等が、GPS利用技術の中でも多数を占めている。このような使用方法において、ユーザにとって最も不利な状況はトンネル、ビルの谷間、高架下の道路等で衛星信号が遮断されることである。これらの状況を克服する方法の一つとして、GPS以外のさまざまなセンサ (速度計、磁気コンパス、高度計、加速度センサ、ジャイロスコープ) や地図情報 (マップマッチング) を用いてGPSデータの欠落を補完する方法がある。

また、「慣性航法装置」(INS: Inertial Navigation System) とGPSを組み合わせるものがある。INSは加速度センサとジャイロスコープで構成され、それ単体で航法が行える「自立航法システム」であるが、センサの誤差等によって航法誤差が増大、蓄積していくという欠点がある。そこで、INSとGPSを組み合わせることで、GPSが利用可能なときはGPSを利用することでINSの誤差を抑制し、互いの欠点を補完し

あう頑健な航法システムを構築することができる。もちろん、INSの利用は陸上に限定されたものではなく、航空機、船舶、宇宙船等においてGPSが出現する以前から広く用いられており、今日、INSとGPSの複合システムもさまざまな場面で応用されている。INS/GPS複合航法による測位アルゴリズムでは、最近、各種の非線形フィルタが活用されている。また、近年では「MEMS」(Micro Electro Mechanical System)と呼ばれるマイクロマシン技術の発展により、シリコン基板上に集積化された安価な加速度センサやジャイロ스코ープが開発され、それらとGPSを融合した利用方法についても活発に研究されている。

一方、衛星信号が遮断されるという状況に対して、利用できる測距信号を人工的に増やすことで対応するアプローチがある。これは、GPSと同様の測距信号を送信する「擬似衛星」(スードライト, pseudolite)を設置することによって、通常はGPS信号が遮断され、測位が不可能となるような場所でも測位を継続できるようにするものである。擬似衛星は、先に述べた地上型補強システム(GBAS)においても利用されている技術である。

また、さらに大がかりなシステムとして、わが国で計画されている「準天頂衛星システム」(QZSS: Quasi Zenith Satellite System)がある。準天頂衛星システムでは、日本上空の天頂付近(仰角70度以上)に衛星を常に1機配置し、前述のGPS補強システムと同様、測距信号、ディファレンシャル補正情報、インテグリティ情報等を送信するように計画されている。準天頂衛星は高仰角に配置されるため、ビルの谷間や山あいの地域など、利用できるGPS衛星の数が少なくなるような箇所でも捕捉することができるため、GPS利用率の改善が期待されている。

その他、通常は捕捉できないような微弱な信号を受信し、測位に利用する高感度受信機の研究、開発も進んでいる。これによって、例えば屋内等での測位も可能となり、携帯電話等でのシームレスな測位が実現されつつある。

また、屋内測位については、建物を通過するGPS信号電波を高感度に受信するという発想を離れて、JAXAにより、地上補完システム(IMES: Indoor Messaging System)の提案が行われている。これは屋内の要所要所に準天頂衛星から送信する衛星測位信号の送信機を設置し、その航法メッセージの一部に、屋内の既知位置の情報を送信することにより携帯電話等に組み込まれたGPS受信機でシームレスな測位を実現しようという提案であり、実用化に向かっている。

GPSを用いた時刻同期についてもふれておきたい。既に述べたように、GPS受信機で測位を行う場合には受信機の時計誤差 δt_u も同時に求められ、衛星の原子時計(GPS時刻)との同期がとられる。したがって、安価な受信機でも原子時計に匹敵する数10 [ns]以上の精度と精密さで時刻(タイミング)情報を得ることができる。このようなGPSによる正確な時刻や時刻パルスは、有線、無線を問わず、世界中のさまざまなネットワークにおける時刻同期をとるために利用されたり、通信における周波数標準として利用されており、重要な社会基盤となっている。

5. おわりに

本稿では、GPSシステムの概要、GPS測位の原理とその周辺について概説した。最近のわが国におけるGPS/GNSSに対する大きな関心は、カーナビの大普及によることに起因している。また、わが国の準天頂衛星システム(QZSS)計画とその開発によることも多い。QZSS計画は紆余曲折のあったものの、平成22年9月11日には「みちびき」1号機が打ち上げられ、本稿出版時には、「みちびき」1号機の成功が伝えられているはずである。QZSS計画は政府の多くの関係省庁間を横断する大プロジェクトであるため、このプロジェクトを成功裏に実現できたことは機構上の調整とその行政上でのノウハウを確立した成果であろうが、米国の開発したGPSは、あくまでも軍事目的であることを念頭においておく必要があろう。

JICMA

《参考文献》

- 1) 杉本・柴崎(編):GPSハンドブック,朝倉書店,2010年9月(出版予定)。
- 2) U.S. Coast Guard Navigation Center, web site (<http://www.navcen.uscg.gov/>)。
- 3) 杉本末雄:GPS測位アルゴリズムと帰帰モデル-衛星頭脳を解明する-,電気学会論文誌C(電子・情報・システム部門誌),Vol. 130, No. 1,

【筆者紹介】

杉本 末雄 (すぎもと すえお)
立命館大学
理工学部 電気電子工学科
教授



久保 幸弘 (くぼ ゆきひろ)
立命館大学
理工学部 電気電子工学科
准教授

