

GNSS を活用した土木工事の生産性向上

高精度衛星測位の現状と都市土木への活用事例

岡 本 修

衛星測位は携帯電話をはじめ、多くのものに利用されている。ユーザは小型省電力な受信機を持つだけで、数 m ~ 数十 m の精度で測位できる。衛星測位には様々な測位法があるが、実時間に数 cm の高精度で測位できるリアルタイム・キネマティック法（以後、RTK 法）がある。1990 年代の導入当初は衛星数が少なく、利用環境に制限がある等の問題が多かったが、現在では我が国が管理運営する「みちびき」をはじめ、他の衛星システムの配備が進んだことで多衛星時代となり、その性能向上から新時代を迎えている。近年では、自動車等の自動運転への応用をターゲットにした高性能なローコスト受信機が複数登場している。本稿では、高精度 GNSS 測位の問題点と展望や測位性能を解説するとともに、生産性向上に寄与する都市土木への活用事例を紹介する。

キーワード：Multi-GNSS, RTK, low-cost, positioning

1. はじめに

今日では携帯電話をはじめ、カーナビゲーション、デジタルカメラ、腕時計など身の回りの多くのものに GNSS 測位が利用されている。ユーザは小型省電力な受信機を持つだけで、それらを運営管理する衛星システム全体を意識することなく、地球上のどこにいるのかを数 m ~ 数十 m の精度で測位することができる。

衛星測位には様々な測位法があり、受信機の種類により利用できる測位法が異なる。より高精度な測位が可能な測位法の一つとして、実時間に数 cm の高精度で測位できる RTK 法がある。この測位法に対応した受信機は、1994 年に日本に導入され、建設分野を中心に利用されてきた。工事測量をはじめ、地すべり計測や斜面崩壊の監視等の防災分野にも多く利用されている。導入当初、利用できる衛星システムは米国が管理運営する GPS のみで衛星数は多くなかったが、現在では日本独自の衛星測位システムであるみちびきをはじめ、他の衛星システムの配備が進んだことで複数の衛星システム（以後、マルチ GNSS）の利用による多衛星時代となった。近年では自動車や農機等の自動運転への応用や、これらをターゲットにした 5G（第 5 世代移動通信システム）における大手キャリアの新たな高精度測位サービス等が話題となっている。

本稿では高精度 GNSS 測位に焦点を当て、その問題点と展望および、最新のローコスト受信機の実力を

解説する。また、GNSS による生産性向上について、都市土木へ応用した地下埋設物可視化システムを紹介する。

2. 高精度 GNSS 測位の問題点

(1) 測位可能範囲の制限

GNSS 測位の普及を阻む問題の一つとして測位可能範囲の制限がある。高精度 GNSS 測位では同時に 5 つ以上の衛星を継続して受信する必要がある。しかし、複数衛星からの直接波を測距することで測位計算する GNSS 測位は、写真-1 のような構造物や木々が障害物となる環境において遮蔽やマルチパスの影響で測位に必要な衛星数を確保できない場合がある。現在、GPS 衛星は 31 機が利用可能（2019 年 7 月時点）



写真-1 衛星数の確保が厳しい測位環境

であり、上空が開けていれば7機～12機程度の衛星を受信可能であるが、高層ビルが建ち並ぶ都市部や木々に被われる山間部では、上空が見える範囲が大きく制限されるため、必要な衛星数を受信することさえ困難な場合がある。例えば1階建ての建造物が一つしかない環境であっても、建造物の壁際では上空が半分遮蔽され観測できる衛星数が大きく制限されるため、高精度GNSS測位が難しい。実際に利用したい環境で測位できない場所が多く存在するため、他の測量機器との併用といった対策が必要となる。

(2) 導入コスト

高精度GNSS測位は、携帯電話やカーナビゲーションで利用される一般的な受信機とは異なり、衛星から放送される信号を地上まで送り届ける搬送波の位相を観測できる受信機が必要となる。図—1に高精度衛星測位に必要なシステム構成の一例を示す。①基準局では座標値が既知の点に受信アンテナを三脚で固定して受信する。②得られる観測データは通信手段を介してリアルタイムに移動局へ送信する。③移動局では計測点で得られる観測データと合わせて解析し、移動局の位置を算出する。このように高精度GNSS測位では2台の受信機が必要となる。日本へ導入された1990年代当初は数千万円していた高精度GNSS受信機は、2000年代には数百万円程度となった。基準局で得られる観測データは、国土地理院が構築した電子基準点で得られる観測データを配信する商用サービスで代用できるが、月2万円程度の配信サービスを契約する必要がある。このように高精度GNSS測位の利用は高コストなことから普及の障害となっていた。

3. GNSS測位の展望

(1) 各国の衛星測位システムの発展

米国が管理運営するGPSは、1995年に全24機の

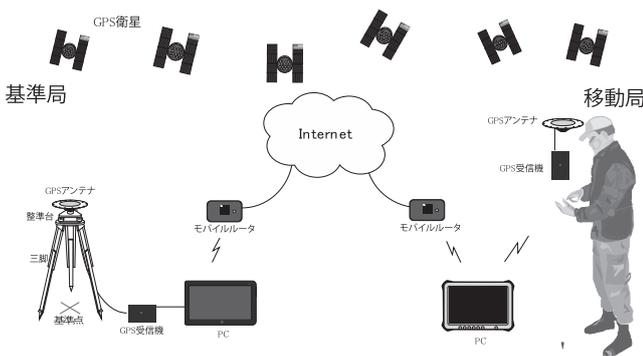
衛星配備が完了し正式運用が開始され、民生利用への無償開放が全世界にアナウンスされた。これまでGPSは一度もシステムダウンすることなく順調に運用され、現在31機(2019年7月時点)の衛星が利用可能となっている。GPSは、6つの軌道面に各4機が配置されており1日に地球を約2周する周回軌道に投入されている。地上からは、衛星が見える方向が時々刻々と変化し、異なる衛星が時刻により入れ替わりに観測される。

GLONASSはロシアが管理運営する衛星測位システムである。3つ軌道面に各8機が配置されており、現在24機(2019年7月時点)の衛星が利用可能である。GPSと違い、北極や南極を避けた周回軌道ではないため、北半球に位置する日本での利用は、GPSに比べて北側の衛星をより多く観測することができる。一時、経済状況の悪化から衛星を打ち上げできず、また短い衛星寿命の影響により数も減少して、一日中継続して利用することが困難な時期もあったが、現在では24時間利用可能となっている。GLONASSは衛星毎の放送周波数が異なるFDMA方式を採用していることから、基準局と移動局で異機種(他メーカー)の組合せとなる測位においてIFB(Inter Frequency Bias: GLONASS衛星毎のコードおよび位相で発生するバイアスで、後述する初期化の際に間違っただけに収束したり、収束できない問題を引き起こす)の問題を抱えている。GPSと同様のCDMA方式の衛星(GLONASS-K2衛星)への切り替えが予定されており2026年頃には切り替えが完了する計画となっている。

BeiDouは中国が管理運営する衛星測位システムである。静止衛星および8の字軌道と周回軌道の3つの軌道を組み合わせた衛星配備を進めており、現在33機(2019年7月時点)の衛星が利用可能となっている。日本では、静止衛星を中心に南西の上空に片寄り観測することができる。GPSと同様にCDMA方式であることから、IFBの問題を抱えるGLONASSに代えて利用するユーザーが増えつつある。

Galileoは欧州連合が管理運営する衛星測位システムである。30機の軌道周回衛星の衛星配備を進めているが、欧州の経済危機等により当初の計画よりも整備が遅れており、現在22機(2019年7月時点)の衛星が利用可能となっている。

今後、マルチGNSSを利用することで衛星数は飛躍的に増加する。図—2¹⁾に衛星数の推移を示す。2013年当時、GPSとGLONASSで54機であったが、BeiDouおよびGalileoの配備が進んだ数年後には100機以上の衛星数となった。衛星数の増加は、前述した



図—1 高精度測位のシステム構成の一例

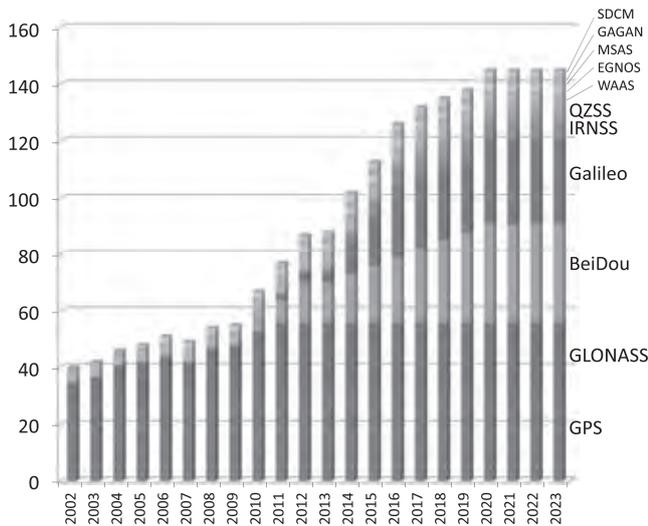


図-2 マルチ GNSS の衛星数の推移
(宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 小暮聡氏提供)

高精度 GNSS 測位の問題点を容易に解決できる。これは高精度衛星測位にとって、これまでにない大きな変革をもたらしている。

(2) みちびきによる補完・補強

我が国が管理運営する準天頂衛星システムとしてみちびきがある。みちびきには、補完と補強の2つの効果がある。

補完は、みちびき衛星を GPS 衛星の補完として利用することを指す。日本における米国の GPS 利用を補完するため、1つの衛星が仰角 70° 以上に8時間程度日本上空に留まるような8の字軌道を採用した。特に上空が制限される都市部での受信衛星数の増加が期待できる。現在、1～4号機が運用されており、将来的には7機体制を目指している。みちびきを受信することのメリットは、単に受信衛星数が増えることに留まらない。高精度 GNSS 測位では、測位計算をする際にメイン衛星を決めるが、メイン衛星の切り替えは高精度測位を維持することを妨げる場合がある。一般的に受信が途切れる可能性が少ない一番高い仰角の衛星をメイン衛星として選択するが、みちびきを受信できる場合、このメイン衛星をみちびき衛星のまま長時間受信し続けることができるメリットがある。近年、みちびき衛星の受信をサポートする高精度 GNSS 受信機が発売されている。

補強は、みちびき衛星から放送される補強信号を受信して、測位精度を改善することを指す。補強には、サブメータ級の補強信号サービスとなる SLAS (エスラス: Sub-meter Level Augmentation Service)、センチメータ級の補強信号サービスとなる CLAS (シーラ

ス: Centimeter Level Augmentation Service) の他、JAXA が開発する精密衛星軌道・クロック推定ソフトウェア MADOCA (マドカ: Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) により生成した補強信号を放送するサービスがあり、全て無料で利用できる。このうち、高精度衛星測位に関係する CLAS と MADOCA の補強信号サービスを説明する。

CLAS は、日本全土をサービス領域とした補強信号サービスで、2018年11月より正式運用を開始した。国土院が管理する電子基準点のデータを利用して衛星毎の軌道、クロック、バイアス誤差を推定することに加え、日本の地域毎(12地域)の電離圏、対流圏誤差を推定して補強信号を生成する。受信および測位計算には専用の受信機が必要となる。CLAS による測位方法は PPP-RTK 法と呼ばれ、受信機1台で高精度測位できることが特長となる。収束時間1分程度で水平方向 10 cm 程度(公称精度は水平方向 12 cm (95%値))となる測位精度が得られる。

MADOCA の補強信号サービスは、日本周辺の広範囲な海域において、受信機1台で高精度測位できる PPP 法と呼ばれる測位方法に必要な補強信号サービスである。みちびき 2～4号機から放送(2019年7月現在)される補強信号の受信および測位計算には、専用の受信機が必要となる。全世界に配置される 100局程度の GNSS 基準局網により推定した衛星毎の精密な軌道、クロック、バイアス誤差を利用する。収束時間 15～30分程度で水平方向 15cm 程度となる測位精度が得られる。

CLAS や MADOCA の補強信号サービスに対応した受信機は、今後順次発売される予定である。

(3) 高精度 GNSS 測位に対応する受信機のローコスト・小型省電力化

構造物や植栽といった障害物のある環境では、上空の見える範囲が制限されるため測位に影響がある。近年、GPS に加えて他の衛星システムを同時利用するマルチ GNSS に対応した受信機を利用して衛星数を確保することが一般的である。高精度 GNSS 測位法の一つである RTK 法では、搬送波の位相を受信できる受信機が必要となる。受信機は、衛星から放送される2つ以上の周波数の受信が可能なマルチバンド受信機と、1つの周波数の受信のみのシングルバンド受信機に大別される。高精度 GNSS 測位で一般的に利用されるマルチバンド受信機は、出荷台数が少なく開発費もかかるためシングルバンド受信機に比べて非常に

高価となる。

RTK 法は、測位結果の解の種類として Float 解と Fix 解がある。それぞれの水平方向の精度は、Float 解で数 m ~ 20 cm 程度、Fix 解で数 cm となり、常に Fix 解である数 cm の精度が得られる訳ではない。測位開始時は Float 解であり、収束計算を経て Fix 解へ移行する。この移行の過程を初期化と言う。初期化には、周囲に障害物がなく上空が開けている理想的な環境で 20 秒程度かかる。周囲の障害物により受信できる衛星数が少ない場合、初期化に時間がかかり、条件によっては初期化できない場合がある。また、一度初期化が完了しても受信する衛星数が 4 機未満となる場合や高架下の通過による瞬断等でも Float 解に戻り、再初期化が必要となる。

マルチバンド受信機は高価格である反面、Fix までの収束を短時間に完了できる。シングルバンド受信機はローコストである反面、Fix までの収束に時間がかかり、GPS のみに対応した受信機では初期化に 10 分以上かかるため、RTK 法では実用できる性能を有していなかった。しかし、他の衛星システムを同時受信できるマルチ GNSS 受信機を利用することで衛星数を多く確保できるようになったため、ローコストなシングルバンド受信機であっても 30 秒から数分の収束時間で Fix できるようになった。

ここ数年、自動車等の自動運転をターゲットにしたマルチバンド受信機の登場でコストダウンが進み、数十万円から販売され注目されている。そこで次章では、このローコスト・マルチバンド受信機の測位性能を紹介する。

4. ローコスト・マルチバンド受信機の測位性能

ローコスト・マルチバンド受信機として注目される u-blox 社の F9P の測位性能を評価する。測位性能を評価するに当たり、ローコスト・シングルバンド受信機となる M8T を比較対象とした。F9P は受信機に搭載される測位エンジンによる測位計算を行った。M8T は、RTK 測位エンジンを搭載しておらず、測位計算プログラムパッケージ RTKLIB²⁾ を利用して RTK 測位計算をしたため、以後は M8+RTKLIB と表記する。実験は、同一アンテナを信号分配して、2 機種で同時に測位させて比較評価する。衛星測位が苦手とする遮蔽が厳しくマルチパスが懸念される測位環境で評価した。



写真-2 スライドレールの設置状況

(1) 構造物周辺におけるスライドレール

アンテナを搭載した台車を 2.5 m 程度の直線軌道上で往復移動させて、測位結果の再現性から移動体の測位精度を評価する。マルチパスの影響が懸念される写真-2 のような構造物周辺において、台車上のアンテナを 2.5 m の直線軌道を片道 10 秒（時速約 1 km）で移動する。端で 10 秒静止と移動を繰り返す 24 往復する実験となる。測位結果の軌跡のブレ幅から移動体の測位精度を評価する。

図-3 に水平方向の測位結果（移動軌跡）を示す。F9P のぶれ幅は、最大最小範囲で 23 mm となった。同時に実験した M8+RTKLIB では、Fix 解を維持できず、ぶれ幅は 40 mm 以上になる。また、スライドレールの実験中は一度も Float 解に落ちることは無かった。実験の準備を通して F9P を観察したが、初期化が早く Float 解を見ることがほとんど無かった。

(2) 構造物周囲を周回するときの Fix 維持性能

写真-3 の平屋の構造物周囲を周回する際の Fix 解の維持性能を評価する。この実験では、測位精度を比較するのではなく、遮蔽やマルチパスの影響が懸念される厳しいルートを徒歩で移動する中、測位精度数 cm の指標となる Fix 解のフラグをどの程度維持できるのかを評価する。また、Float 解に落ちてもすぐに Fix 解に復帰できるのかを比較する。

この実験では写真-4 のように、できる限り構造物の壁に接して歩き、軒下に入り込むようにして移動するルートを設定した。軒下に入るルートでは、天頂さえも遮蔽される環境となり、受信衛星数が大きく減る。構造物西側では隣接する 3 階建て構造物と植栽の影響を強く受ける。また、構造物の南側では北側が完全に遮蔽され、構造物の北側では南側が完全に遮蔽さ

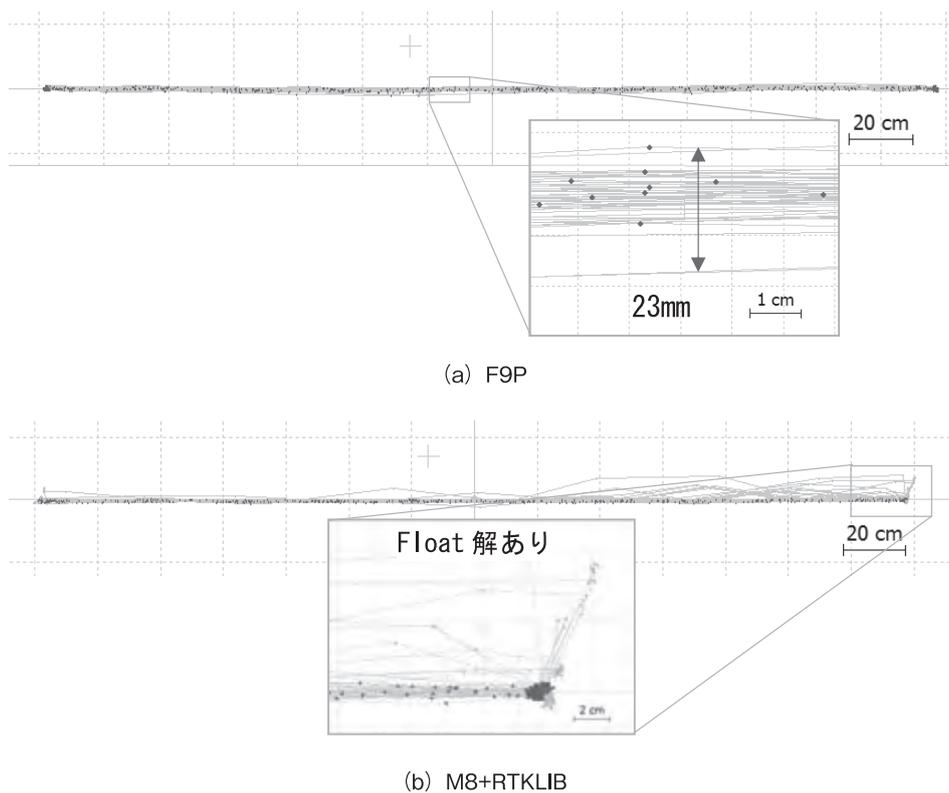


図-3 スライドレール往復時の水平方向の測位結果の軌跡 (24 往復)

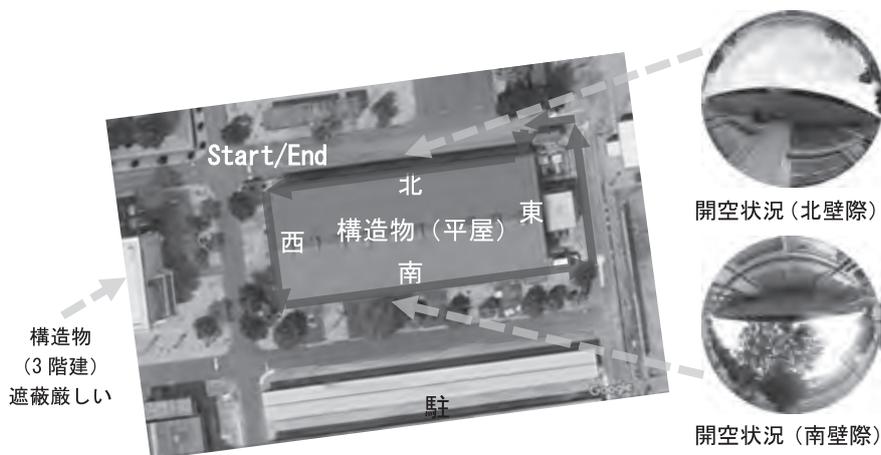


写真-3 実習工場周囲の状況

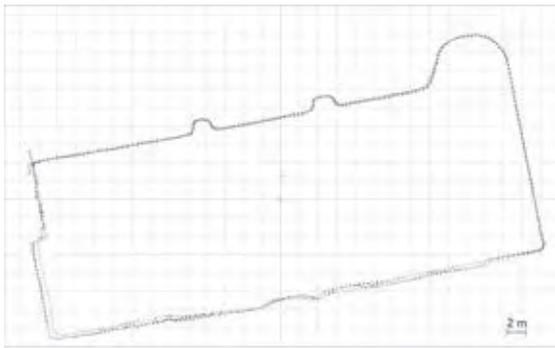


写真-4 実習工場周囲の状況 (軒下)

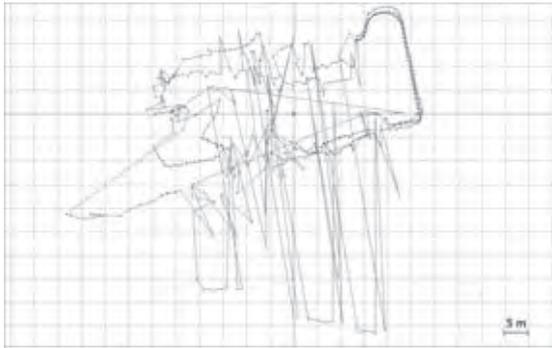
れる。Float 解に落ちた際、一般的には著しく測位精度が落ちて測位結果が暴れるが、この暴れ具合も評価する。

図-4 に F9P と M8+RTKLIB の 3 周分の水平方向の測位結果 (移動軌跡) を示す。F9P は、北側と東側で Fix 解を維持できている一方、西側と南側で Fix 解を維持できず、Float 解に落ちている。M8+RTKLIB は、東側で 3 周のうち 1 周で Fix 解が得られたものの、その他の全域で Fix 解がほぼ得られず、Float 解はルートが大きく逸脱しており、どこを歩行したのか判断できない測位結果となった。

M8+RTKLIB の測位結果では、歩行したルートを



(a) F9P



(b) M8+RTKLIB

図一四 実習工場周囲における Fix 解の維持状況

判断できない結果になるが、この受信機が劣っている訳ではなく、これまでの一般的な RTK 受信機の多くでは同様の結果になることが予想される。設定したルートは、衛星測位が困難な測位環境であるが、F9P はこのような測位環境でも高い Fix 率で歩行ルートをプロットできた。Float 解に落ちた場合でも、ルートを大きく逸脱することなく軌跡をつないでいる。F9P は、ジャイロや加速度センサを搭載せずにこの性能を得ているが、これは受信する搬送波ドップラー値のうち、品質の高い衛星のみを選択し、受信衛星が数個になっても位置を推測していると考えられる。この位置推定を高精度に行うことで、Float 解に落ちた区間をスムーズにつないでいる。

(3) 森林中における測位

衛星測位が苦手とする森林中における測位結果を評価する。森林の中では、観測衛星数の不足やマルチパスの影響により、数十 m 以上の大きな測位値の飛びが頻繁に生じるため、正確に測位することが難しい。

写真一五に森林中の環境を示す。約 5 m 程度の間

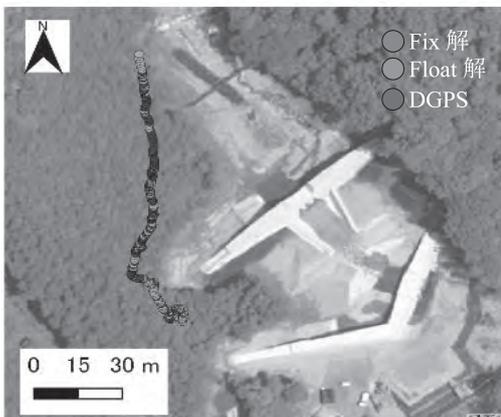


(a) 上空の様子

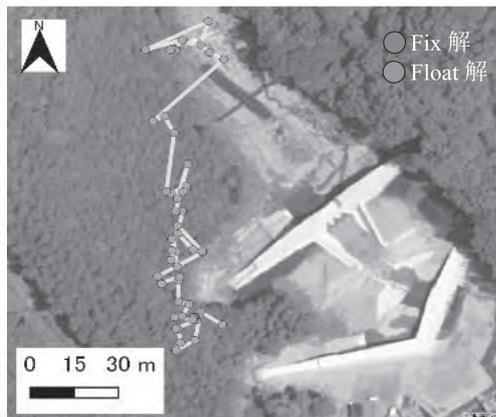


(b) 周囲の環境

写真一五 森林中の環境



(a) F9P



(b) M8+RTKLIB

図一五 森林の中を移動した際の測位結果 (地理院タイルを使用)

隔で植林され、胸高直径が約 20 ~ 30 cm に成長した杉林で、上空の開空率も少ない環境である。図—5 に森林の中を移動した際の測位結果の一部を示す。M8 + RTKLIB の結果では、Fix 解が 8% で Float 解が 92% となった。10 m 以上の測位値の飛びが多く、30m 以上の飛びも見られることから、どこを移動したのか判断がつかない。F9P の測位結果は、Fix 解が 1%、Float 解が 60%、DGPS 解が 38% で、測位値の大きな飛びが見られない結果が得られた。F9P は、上空を樹木に覆われている森の中の環境でも測位値の飛びが生じず、別の検証実験から森の中でも最大 5 m 程度の誤差で測位できることがわかった。これも前述のように、品質の高いドップラー値を選択して位置を推測していると考えられる。

5. 生産性向上の応用事例

(1) 地下埋設物可視化システム開発の背景

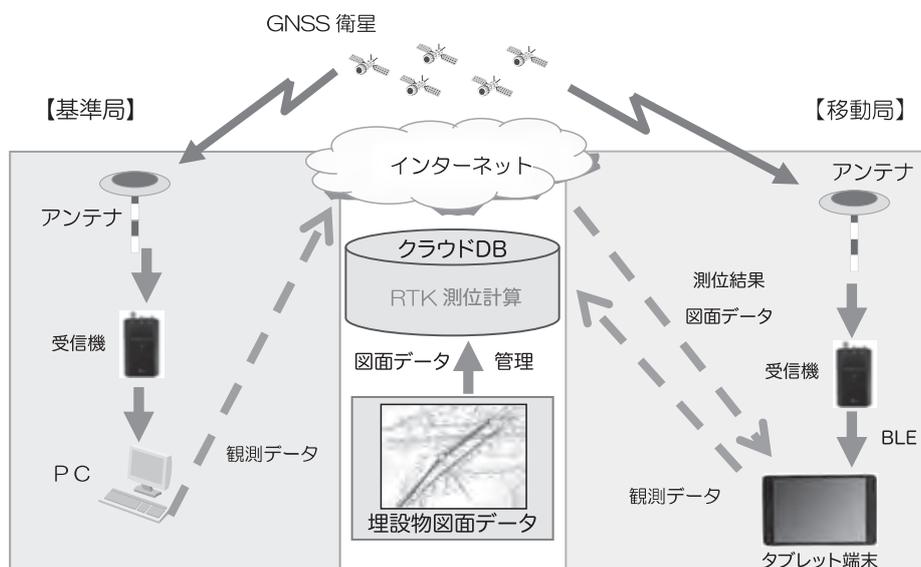
都市部における地下埋設物は、都市の近代化や人口集中に伴って多様化し、上下水道管やガス管、送電線、通信ケーブル等が複雑に入り組んでいる。開削工事や立坑工事等の地下掘削を行う工事では、埋設されたライフラインを損傷しないように、関係者全員が事前にそれらの位置関係を共有することが重要になる。地上から見ることでできない埋設物の情報を共有するには、現地に見板やスプレーで位置を表示することが一般的である。また、地下掘削をする際は、現地にて埋設物毎の複数の紙図面を広げ、地下埋設物の位置を確認する。現在、建設工事では 1 工区当たりの規模が拡大していることから、膨大な紙図面を両脇に抱え、現

場を走りまわることになる。このようなことから、見落とし等のミスで地下埋設物を傷つける事故が懸念される。そこで、衛星測位技術を利用して、タブレット端末で誰でも簡単に地下埋設物を精度よく可視化できる地下埋設物可視化システムを開発した。

(2) システムの概要

地下埋設物可視化システム（以下、本システム）は、タブレット端末内蔵のカメラで写している風景画像に、埋設物の図面を重ねて投影する AR で埋設物の存在や位置を可視化するシステムである。図—6 にシステムの機器構成と通信イメージを示す。本システムは、基準局および移動局の受信機等とインターネット上のクラウドサーバで構成される。現場事務所に設けた基準局の PC と、移動局のタブレット端末はインターネット回線で常時接続され、常に最新の観測データがクラウドサーバに送られる。クラウドサーバ上では、RTK 測位計算した結果をタブレット端末に送る。写真—6 に移動局となる操作者の装備を示す。受信機とタブレット端末は無線通信であり、GNSS アンテナと受信機はヘルメットに直接装着することも想定して小型軽量タイプとした。アンテナはヘルメットに取り付けるため、使用者は負担を感じることなく利用できる。

現場への適用では、事前に埋設物の図面データの登録が必要となる。現場では、まず電子化されていない紙ベースの図面を CAD データに変換し、図面に座標値を埋め込んだ後、クラウドサーバのデータベースに登録する。埋設物の図面データの更新は、クラウドサーバ上のデータを更新する。



図—6 システムの機器構成と通信イメージ



写真一六 操作者の装備

(3) 現場への適用と実用性の評価

本格運用に先立ち、施工中の道路新設工事において試行した。現場は都市部住宅街に位置しており多数の地下埋設物が存在することから、本システムの実用性の確認に最適である。この工事は、道路新設に当たり開削工法およびシールド工法により構築するものである。道路延長は約 1.6 km におよぶ大規模なもので、市街住宅地に位置することから多数の埋設物が縦走する。

現場における操作と実用性の評価結果を説明する。まず、移動局の使用者は、タブレット端末と GNSS アンテナ、受信機を携行して現場に向かう。地下埋設物の近傍に近づくと、周辺に存在する埋設物の対象図面リストが画面に自動表示される。使用者が利用したい図面を選択すると、図一七のように使用者がいる位置に応じた当該図面がタブレット端末に自動ダウンロードされ、図面上に自己位置が表示される。

続いてタブレット端末の内蔵カメラにより掘削工事を行う地表面を眺めると、写真一七のように直下に敷設された埋設物のラインが浮き上がるように地表面の映像上に投影される。端末を使用する位置や保持する角度等に応じて、地表面のライブ画像に埋設物の敷



図一七 タブレット端末の表示画面（埋設物図面）



写真一七 タブレット端末の表示画面（カメラ画像に埋設物図面を投影）

設ラインが自動的に追従して表示されるため、使い勝手が良く誰にでも手軽に操作できることを確認した。本システムを適用することにより事故防止の効果は高く、生産性の向上が図られた³⁾。これまでに9現場で運用されている。

6. おわりに

本稿では、高精度 GNSS 測位の問題点と展望および、ローコスト受信機の測位性能を解説した。また、GNSS 測位の生産性向上の応用事例として、地下埋設物可視化システムを紹介した。

近年のローコスト受信機の性能向上は凄まじい。建設業では、高精度 GNSS 測位を利用する多くのユーザが、2010 年頃までに導入した GPS/GLONASS 受信機を利用しているが、近年のマルチ GNSS による衛星数の増加やローコスト化は、受信機のコストパフォーマンスを著しく引き上げている。是非、新時代のローコスト・マルチバンド受信機を体験して欲しい。

JICMA

【参考文献】

- 1) 小暮聡：“アジア・オセアニア地域におけるマルチ GNSS の状況”，第 5 回 QZSS ユーザーミーティング発表資料，〈http://qz-vision.jaxa.jp/USE/is-qzss/usermeeting_report_05.html〉(2010)
- 2) 高須知二，久保信明，安田明生：“RTK-GPS 用プログラムライブラリ RTKLIB の開発・評価および応用”，日本航海学会 GPS/GNSS Symposium 2007 text, pp.213-218 (2007)
- 3) 三木浩，岡本修，西原邦治：“GNSS を活用した AR 技術「地下埋設物可視化システム」”，アーバンインフラ・テクノロジー推進会議第 29 回技術研究発表会，〈http://qz-vision.jaxa.jp/USE/is-qzss/usermeeting_report_05.html〉(2017)

【筆者紹介】

岡本 修（おかもと おさむ）
 (独)国立高等専門学校機構 茨城工業高等専門学校
 国際創造工学科 機械・制御系
 教授

