

Leica GS18 T

世界最速

GNSS RTK ローバー



leica-geosystems.com



- when it has to be **right**

Leica
Geosystems

Dr. Xiaoguang Luo, Stefan Schaufler, Bernhard Richter,
Leica Geosystems AG, Switzerland

要旨

GNSSと慣性計測装置（IMU）の融合というセンサーの急速な発展は、生産性の向上と高精度RTK測量という素晴らしいチャンスをユーザーにもたらしめています。技術の進歩に合わせて、新しいLeica GS18 T GNSS RTKローバーは、GNSSとIMUを組み合わせて、ポールの垂直からの傾きを自動的に調整します。これにより、生産性が向上し、RTKの適用範囲が広がり、人的ミスが減少します。このIMUをベースとしたチルト補正アプローチは、磁氣的擾乱に対して耐性があり、現場でのキャリブレーションが不要、傾斜角度が大きくても適用可能です。これらの機能により、効率性と柔軟性が向上し、厳しい環境においても高精度のRTKが可能になります。本稿では、GS18 Tの技術的背景について説明し、生産性、精度、信頼性に関してIMUベースのチルト補正を適用することの利点について説明します。Leica GeosystemsのGS18 Tは新しい道を切り拓き、使いやすいセンサーフュージョン技術によって正確なGNSS測位のための新しい基準を打ち立てます。

はじめに

RTK測量では、GNSS受信機は目標点を直接測定するのではなく、アンテナを中心に位置を測定します。GNSS信号の受信を最適化するために、通常、ローバーはポールに取り付けられポールの先端を測量したい地点に置きます。従来のRTK測量では、ポールの気泡管を使用してマニュアルで水平を取る必要があり、アンテナの位相中心オフセット（PCO; Hofmann-Wellenhof et al., 2008, p. 148）とポールの長さを考慮することによって、位相の中心点がポールの先端となるようにしています。このアプローチには、高精度RTKのパフォーマンスを制限する次のような欠点があります。

- 生産性の観点からは、特に何度も杭打ちを繰り返す必要がある場合、ポールの水平をとるのに時間がかかります。
- 精度の面では、ポールを垂直に保持しなければならず、人的ミスや気泡管の調整不備など機器の不完全性の影響を受けます。
- 適用性に関しては、例えば建物の角を計測する場合、常に目標点に垂直にポールを保持することができるとは限りません。

そのため、ポールの水平をとらずにターゲットポイントの正確なRTK測量をすることが望まれます。



図1 - Leica CS20フィールドコントローラを搭載したLeica GS18 T GNSS RTKローバー

独自の利点

高精度RTK測量の生産性とユーザーエクスペリエンスを向上させるために、Leica GS18 Tは次のような独自の利点を提供します。

- 現場でのキャリブレーション不要
- 電磁障害を排除
- 大きな傾きにも適用可
- 方位支援3Dビジュアル化

GNSS、慣性およびマルチセンサー統合ナビゲーションシステム (Jekeli, 2001年; Titterton and Weston, 2004年; Groves, 2013年) の急速な発展により、ポールの傾きを自動的に調整するRTKのチルト補正が可能になりました。それにより、ポールの高さが分かっている場合、ポールの高さ (または角度方向) が正確に決定できれば、傾斜による位置誤差を補正できます。ポールの高さは、例えば加速度計があれば正確に測定することができますが、ポールの地理的な向きを測定することは、はるかに困難な作業です (Hong et al., 2005)。

従来のチルト補正機能付きGNSS RTKローバー製品は、磁力計測定に依存し、磁北に対して磁極の向きを提供する電子コンパスを使用しています (Nichols and Talbot, 1996; Kurtovic and Pagan, 2009)。

- このような磁力計に基づく計測方法には、次のような欠点があります。現場でのキャリブレーションが必要であり、時間がかり生産性を低下させます。
- 高品質で、計算コストの高い磁気モデルが必要です。そうした磁気モデルがない場合、局地的な方位角 (地理的北と磁北の間の角度) は、局所的な擾乱磁場がなくても、最大3度程度の誤差がでる可能性があります (Dusha, 2017)。
- 磁力計による測定値は、通常RTKの調査環境に存在する鉄系金属 (例: 自動車、構造用鋼鉄のある建物) および電流 (例: 電力線、電気設備) によって引き起こされる磁気妨害の影響を受けます。
- 磁力計で測定される磁場は傾斜角によって大きく異なり (Pedley, 2012)、チルト補正範囲は15度に制限されることがあります。

上記の欠点を回避するために、Leica GS18 Tのチルト補正ソリューションは、測量用に特化した工業用グレードのマイクロ電気機械センサー (MEMS) からの正確なIMU測定を利用しています。長年にわたり航空および海洋航法に適用されてきた技術からインスピレーションを得て (Crassidis and Markley, 2003)、カスタマイズされた慣性航法システム (INS) とGNSSを洗練された方法で統合し、世界最速で使いやすさを提供する GNSS RTK ローバーが開発されました。

生産性とユーザーエクスペリエンス

GS18 Tは、高精度RTK測量の生産性とユーザーエクスペリエンスを向上させるように設計されています。図2は、GS18 Tを世界最速のGNSS RTKローバーとしている主要コンポーネントを示しています。チルト補正によりポールを水平にする必要がないため、従来のGNSS RTK測量法よりも平均20%生産性が向上します。さらにGS18 Tは、MEMS IMUからの高速加速度と角速度を利用してリアルタイムでポールの高さを決定します。こうしたIMU測定は磁場の影響を受けないため、GS18 Tは磁気妨害の影響を受けず、時間のかかる現場でのキャリブレーションを必要としません。箱から出してすぐに動作し、磁力計ベースのシステムよりも高速です。

★さらに、短縮RTKと組み合わせたIMUベースのチルト補正技術は、特に地形測量において最高の生産性を可能にし、手動でポールを水平にすることによって行われる測定と同等の精度を提供します。

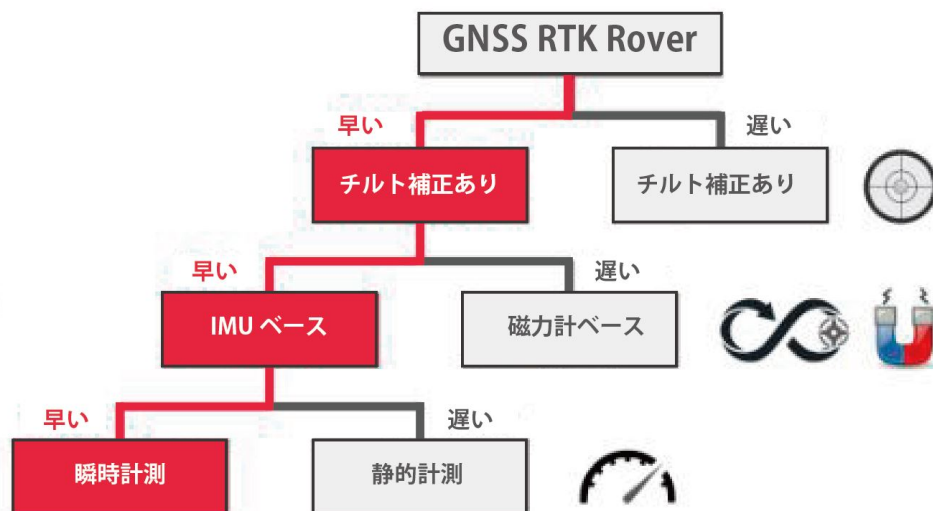


図2 - IMUベースのチルト補正を備えた最速GNSS RTKローバーとしてのLeica GS18 T

ユーザーエクスペリエンスに関しては、GS18 Tは高精度RTKの適用範囲を広げ、現地調査におけるユーザーの利便性向上に焦点を当てています。IMUベースのチルト補正を適用することで、建物の角や障害物のある点（図3）など、これまでGNSSではアクセスできなかったターゲットでも、たとえば30度を超える大きな傾斜角RTKで直接測定できるようになりました。集中を必要とするポールレベリングがなければ、ユーザーは通過車両や作業機械などの調査環境における安全にもっと注意を払うことができます。

さらに、傾き情報は、センサーの向きに応じて周囲の3D表示が自動的に更新されるので、ユーザーが現場で自分の向きを変えるのに役立ちます。これは杭打ちを行うときに特に役立ちます。チルト補正された測定の傾き情報は完全に追跡可能であり、ユーザー自身とそのクライアントの品質保証を可能にします。GS18 Tで達成された生産性とユーザーエクスペリエンスの向上は、特にGNSS信号追跡とセンサーフュージョン技術における、さまざまな技術革新の賜物です。



図3- ライカGS18 Tを使用して、従来の垂直ポールによるRTK測量では測定できなかった建物の隅や障害物のある点を測定する

高性能GNSS信号トラッキング

チルト補正RTKにおける課題チルト補正を用いた高精度RTK測量において、すべての周波数帯域におけるGNSS信号の堅牢で高感度の追跡が、特に大きな傾斜角において非常に重要です。図4に示すように、ポールが衛星からt度だけ傾斜している場合、アンテナ地平線に対する入ってくるGNSS信号の仰角も同様にα（垂直極）からβ（傾斜極）までtだけ減少します。

与えられた仰角αに対して、傾斜tが大きいほど、角度β小さくなります。これは、垂直ポールを用いた従来のRTK測量の場合、高い仰角で受信されたGNSS信号が、傾斜角と傾斜の方向によってはチルト補正において低仰角信号になる可能性があることを示しています。さらに、建物の角やフェンスや壁の近くでRTK測量を行うと、マルチパスや近くの干渉によってノイズ信号の受信が増加します。これらの課題に対処するために、GS18 Tは高度な信号追跡技術を備えており、チルト補正RTKソリューションのための最大数の観測を提供します。

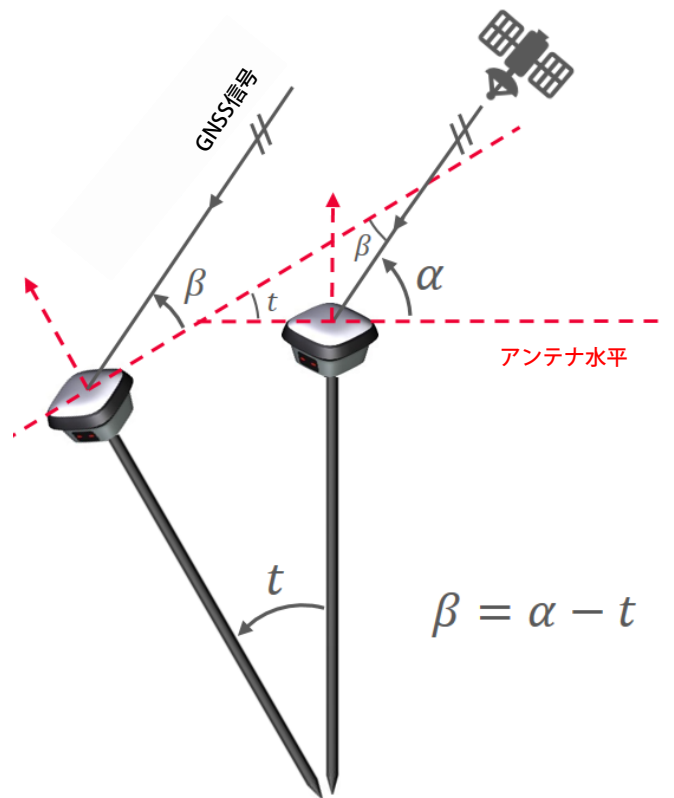


図4- ポールを衛星から離れる方向に傾けたときのGNSS入力信号の仰角の減少（α：垂直ポールの衛星仰角、β：傾斜ポールの衛星仰角、t：傾斜角）

高度な信号追跡技術

GNSS RTKローバーのアンテナ素子と測定エンジン(ME)は、GNSSおよびLバンド補正信号の追跡に重要な役割を果たします。GS18 Tのアンテナは高性能パッチアンテナで、小型ながら平面構造と薄型構造を維持します。平面アンテナは通常、空気と金属接地面との間の界面に沿って伝播する表面波を不可避免的に励起する可能性があります。こうした波はグラウンドプレーンの端で回折し、空間のあらゆる方向へ放射を引き起こします。GNSSアプリケーションでは、そうした望ましくない放射はマルチパスまたは近くの干渉による雑音信号の受信を増加させます。

表面波の伝播を抑制することによってアンテナ放射パターンを最適化するための寄生循環アレイローディング技術が、Yang and Freestone (2017) によって開発されました。この技術の概念を図5に示します。図から分かるように、周囲のらせん形状の反応性/抵抗性負荷モノポールが、主アンテナ素子の周りに円形に配列されて、引き起こされた表面波を操作します。寄生モノポールと相互作用した後、表面波は散乱波となり、自由空間に再放射されます。このようにして、低仰角追跡能力を向上させるためにアンテナ放射パターンが再形成されます。高高度の衛星で高いゲインを維持しながら低高度の衛星を追跡する機能は、都市の渓谷や密な天蓋などの困難な環境でのRTKアプリケーションに特に重要です。

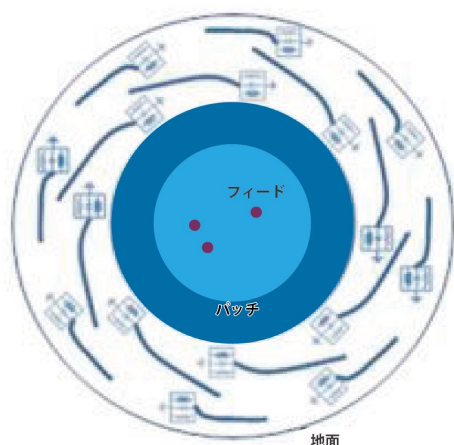


図5 - スパイラル形状の周辺

寄生円形アレイローディングを持つアンテナの概念
(Yang and Freestone, 2016)

さらに、改良された低高度追跡性能は、高緯度の静止衛星からLバンド補正信号を受信するのにも有益です
(Yang and Freestone, 2016)

寄生円形アレイローディング技術に加えて、特許取得済みの超広帯域アンテナ給電技術 (Yang and Gilbertson, 2016) が、GNSS帯域幅全体にわたって優れた円偏波と対称放射パターンを実現するために使用されています。一例としてL1周波数を見ると、GS18 TアンテナのGeo++絶対場較正

(Schmitzet al., 2002) からの北および東のPCO値は、それぞれ-1mmおよび-0.3mmであり、1mm以下の位相中心安定性を示しています。さらに、GNSS信号はアンテナに供給される複数の供給点を使用しており、均一な放射パターンおよび低い交差偏波をもたらしています

(Caizzone et al., 2018)。アンテナ理論によると、交差偏波は強いマルチパスノイズと低い放射効率の主な原因の1つです。

高性能パッチアンテナの他に、GS18 Tは最新世代の測定エンジンME7を搭載しています。555チャンネルのアーキテクチャを持ち、GPS、GLONASS、Galileo、BeiDou、QZSS、NavICなど、複数の周波数で現在および将来のすべての衛星配置を追跡できます。本稿執筆時点では、Galileo衛星は18機の運用衛星で構成されています。これらの衛星は、Luo et al. (2017) に示されているように、すでにマルチGNSS RTK測量に役立っています。

2018年末までに合計19基のBeiDou-3衛星 (18基のMEOと1基のGEO) が打ち上げられ、初期の運用能力に到達します (Yang, 2017)。QZSSシステムは、サービスエリア内の3つの衛星の連続的な可視性を提供する4衛星体制を達成しています (Steigenberger et al., 2018)。

チルト補正の場合、GPSやGLONASSに加えてこれらの新しいシステムを使用することで、建物の角や家の壁などの近くで高精度のRTKソリューションを維持するのに役立ちます。ME7は、ナビゲーション衛星信号だけでなく、TerraStar増強衛星からのマルチチャンネルLバンド補正信号を追跡し、リアルタイム、cmレベルの補正を可能にします。

SmartLinkサービスLeica SmartLinkは、RTKデータを使用せずに高精度GNSSソリューションを作成するために、精密ポイントポジショニング (PPP) 技術を利用しています。よりスピーディーな信号取得、より高いトラッキング感度、そしてより良いマルチパス除去により、ME7はチルト補正RTKのために優れた信号トラッキング性能を提供します。

高度な信号追跡の利点

屋外での高度な信号追跡の利点を実証するため、GS18 Tからの信号対雑音比 (SNR; Luo, 2013, Sect.5.1) の測定値を、別の商用測量レベルのGNSSスマートアンテナ (Rober A とする) と比較します。24時間の1Hzデータを分析することによって、図6は、5度の仰角ピンを持つGPS信号の中央値SNRを示しています。

ローバーAと比較して、GS18 Tは全仰角範囲にわたってより高いSNRレベルを示しています。そこではより低い周波数帯L2とL5でより顕著な改善が見られます

(図6b、c)。平均して、中央値SNRは、GPSのL1、L2 およびL5信号に対して、それぞれ2dBHz、4dBHzおよび8dBHz増加しています。通常の条件下では、SNRが大きいほど信号品質は良くなり、観測ノイズは小さくなります。

GS18 Tは、空が部分的に見えている場所でのRTKアプリケーションに特に適しています。たとえば、並木の近くや木陰、またはビルの谷間などでの作業に適しています。困難な環境での高度な信号追跡の利点を示すために、図7はサイクルスリップの数を比較しています。このような環境では、木が生い茂っている部分では、GS18 TとRober Aの間でGNSS信号がブロックされたり、減衰されたり、反射されたりして、大量のサイクルスリップにつながります。ご覧のように、4時間の間にGS18 TはRober Aよりもかなり少ないサイクルスリップを生み出します。

特に仰角 75°~ 80°(50%)、55°~ 60°(64%)、および 30°~ 35°(43%)でその傾向が顕著に見られます。これは、広い標高範囲にわたる堅牢で高感度の信号追跡が可能なGS18 Tの利点を示しており、GS18 Tは、拡張測位ソリューションのための最大数の連続GNSS観測を提供します。

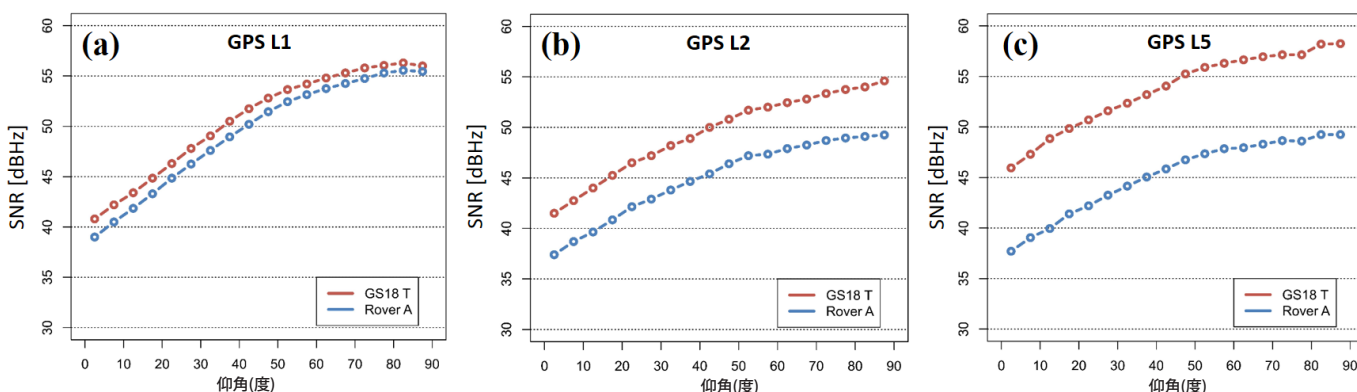


図6- 屋外でのGS18 TとRober A間のGPS信号対雑音比 (SNR) 測定値の比較 (24時間の1 Hzデータ、仰角カットオフ: 0度)

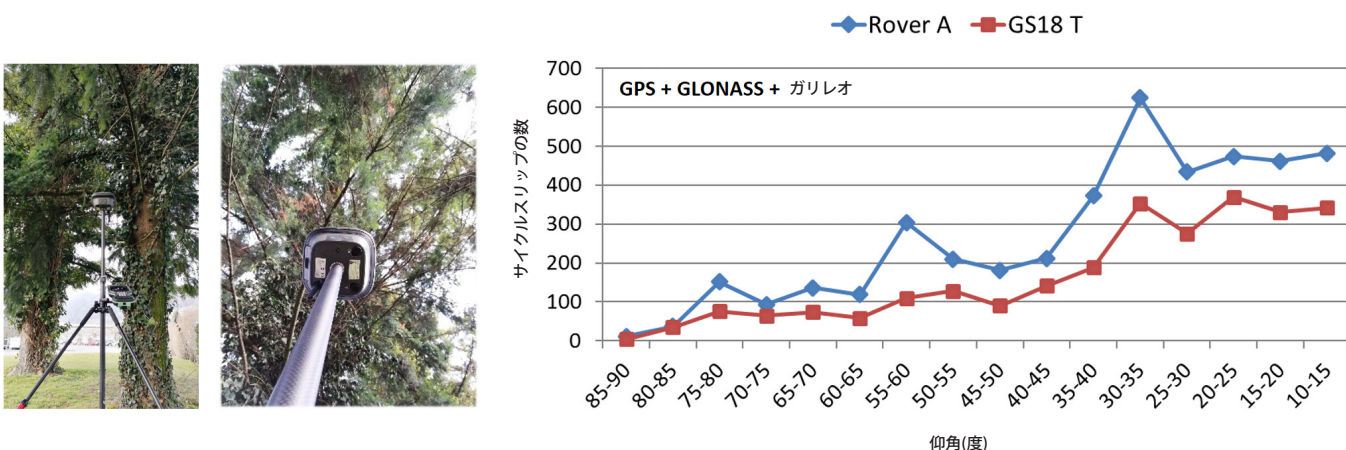


図7- 生い茂った木陰でのGS18 TとRober Aのサイクルスリップ数の比較 (4時間の1 Hzデータ、標高カットオフ: 10度)

IMUを使用したRTKチルト補正

ポールの傾きの解釈

ポールの長さがわかっている場合、ポールの傾きによる位置誤差はポールの傾きを正確に決定することで補正することができます (Luo et al., 2018)。図8は、傾斜、傾斜方向、およびセンサーの向きからなる、GS18 Tのポールの傾きの解釈を示しています。傾斜 t は、局所天頂とポールとの間の角度を示しています。傾斜方向 λ は、地理的北に対する水平面上のポールの正射影の角度方向を表しています。方位 γ は、センサーが向いている方向を示すと同時に、地理的北も示しています。ポールが垂直である場合、方位 γ は明確に定義されていますが、この場合水平面上のポールの正射影は単一点であるため、傾斜方向 λ は存在しないことになります。傾きコンポーネント自体とは別に、Leica Captivateフィールドソフトウェアは、3D傾き決定の全体的な不確実性ととも、対応する品質評価も提供します。



図8 - 傾斜 t 、傾斜方向 λ 、およびセンサー方位 γ を使用した、ライカGS18 Tのポールの傾きの解釈

GNSS / INS統合

2つのナビゲーション情報源の補完的な特徴を利用して、航空宇宙産業で長年使用されてきた統合GNSS / INS航法システムを測量アプリケーションでも利用することが可能になりました (Scherzinger, 2009; Dusha, 2017)。図9は、Leica GS18 TのGNSS/INS統合を概略的に示しています。MEMS IMUは三軸加速度計および三軸ジャイロスコープを利用しています。各IMUは、Leica Geosystemsによって全動作温度範囲にわたって個別に工場で較正されています。IMUからの正確な加速度と角速度の測定値が、GNSSによる位置と速度の高度な推定値とともにINSに提供されます。INSアルゴリズムは、IMU測定値を数学的に回転させて積分し、ポールの傾きおよび関連する品質測定値を決定します。

さらに、GNSSとIMUのセンサーフュージョンにより、加速度計とジャイロスコープのバイアスのリアルタイム推定が可能になり、傾きソリューションの時間依存ドリフトが最小限に抑えられます。現場で使用されるソフトウェア、Leica Captivateは、GNSSの位置、INSの傾き、ポールの長さに基づいて、GNSSとINS双方の不確かさを考慮しながらチルト補正されたポール先端の位置と座標品質 (CQ) を計算します。さらに、方向情報は、周囲の3D視覚化を自動的に更新し、ユーザが調査環境内で自分自身の位置を容易に方向付けるのを助けるために使用されます。

GS18 Tは自己初期化型のため、現場でのキャリブレーション手順は不要です。推定される3D傾きの不確かさ（図8の「全体的な傾斜品質」を参照）が2度以下/ 以上の場合、内部品質管理メカニズムにより傾斜補正の自動開始/停止が可能になります。十分な動きがある通常の状態下では、2度の傾きの不確かさは、メーターレベルの

動きによって、数秒以内に達成されます。GNSSとINSの間では整合性が絶えずチェックされ、ポールが激しい衝撃を受けた場合でも対処できる堅牢なシステムです。傾斜補正位置の計算に磁力計による測定は含まれていないため、GS18 Tは磁気的な擾乱の影響を受けません。

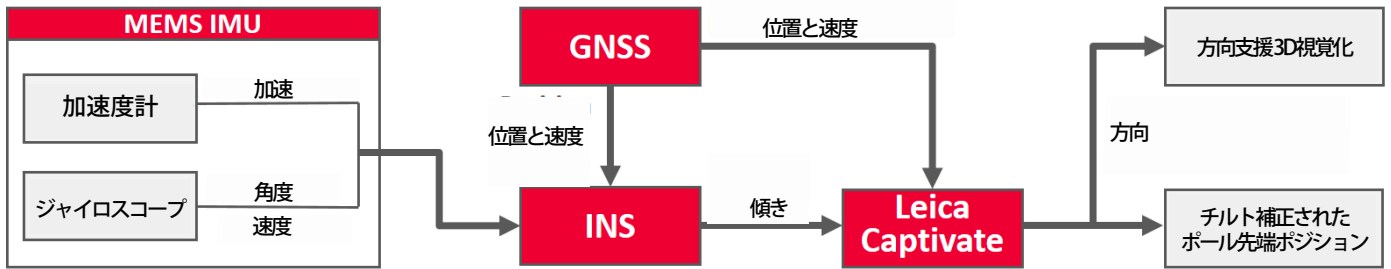


図9 - Leica GS18 Tに実装されたGNSS / INS統合の概略図と簡略図

精度について

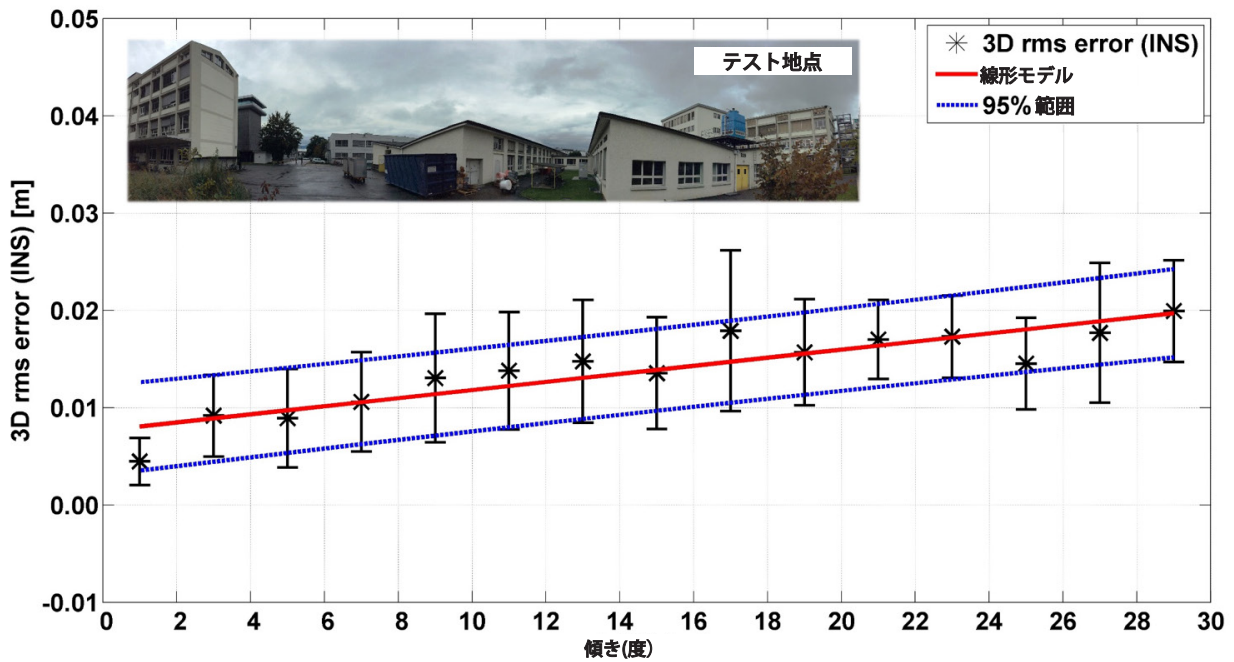


図10 - 基準としてレーザーベースの測定システムを使用した際の、INS傾き誤差によるポールチップ位置の3D二乗平均平方根 (rms) エラー (ポールの長さ：1.8m、傾斜ピン幅：2度)

ポールが剛体である場合、傾斜補正されたポール先端位置の誤差は主にGNSS位置誤差とINS傾き誤差に起因します。基準としてレーザーベースの測定システムを使用することによって、GS18 Tの個々の誤差源が全体の

磁極端位置誤差に与える影響を分析できます。スタティック、キネマティック、ストップアンドゴーなどさまざまなポールダイナミクスを含む代表的なデータセットに基づいて、図10は、ポール先端位置の3D二乗平均平方根 (rms) 誤差を示しています。

これは純粋に長さ1.8mのポールのINS傾き誤差によって引き起こされるものです。2度のビン幅がチルト角に使用され、垂直バーはビン内の3Dエラーサンプルの分散を示します。線形回帰モデルを使用すると、傾きが1度から30度に増加した場合、傾き誤差による3D rms位置誤差が8 mmから2 cmに増加します。

GNSS位置誤差とINS傾き誤差との間の相関を無視すると、極先端位置誤差と個々のGNSS/INS誤差成分との間の関係は、以下のように、誤差伝播則に従って表すことができます。

$$\sigma_{PT} = \sqrt{\sigma_{GNSS}^2 + \sigma_{INS}^2}, \quad (1)$$

ここで、 σ_{PT} はポール先端の位置誤差、 σ_{GNSS} はGNSS位置誤差であり、 σ_{INS} はポールの長さによるINS傾き誤差によって引き起こされる位置誤差を表します。

チルト角が大きくなると、信号トラッキングの劣化により σ_{GNSS} が大きくなります(図4) また、図10に示すように、 σ_{INS} も大きくなります。したがって、ポール先端位置の誤差 σ_{PT} は、傾きが大きくなるにつれて大きくなります。

表1は、2つの独立した精度試験によるGS18 TのGNSSおよびINS誤差成分を示しています。ここで、傾きは0.2度の平均誤差で正確に決定されていることが分かります。3D全体の傾き誤差は1.5度未満であり、磁極端位置誤差 σ_{INS} への影響は、長さ1.8mのポールに対して2cmより小さくなっています。また、式(1)を使用して計算したポール先端位置の誤差は、ミリメートルレベルでの基準値と非常に一致しており、GNSS成分とINS誤差成分との間の無視できる相関関係を示しています。S18 Tの現在の傾斜補正アルゴリズムでは、ポールの長さが長くなるにつれて測位精度を大幅に低下させるようなポールの曲げ効果は考慮されていません。したがって、指定された精度を達成するには、安定した2メートルのカーボンファイバー製ポールを使用することをお勧めします。

	位置の数	傾きエラー (度)	3D傾き誤差 (度)	σ_{GNSS} [m]	σ_{INS} [m]	σ_{PT} [m]	σ_{PT} (数式(1)) [m]
テスト 1	18986	0.15	1.014	0.018	0.011	0.022	0.021
テスト 2	20499	0.21	1.498	0.024	0.017	0.026	0.029

表1 - レーザー測定システムを基準として使用した場合のLeica GS18 Tの傾きと位置の誤差 (ポールの長さ: 1.8m、試験位置については図10を参照)

パフォーマンス分析 スタティック測量 VS 短縮測量

スタティックRTK測定では、目標点は、通常短時間(例えば5秒間)占有され、そこで複数の位置が集められて加重平均解が得られます。ポールの水平をとる必要がある従来のRTK測量では、このアプローチには、気泡の位置を調整する際のヒューマンエラーを減らすという利点があります。ですが、傾斜補償の場合、ポールを水平にする必要がないので、この利点はもはや存在しません。さらに、そのような短時間にわたるスタティック(静的)な占有は、衛星の位置、大気条件およびマルチパス効果の無相関化から利益を得ることはありません。HofmannWellenhofら(2008, p.158)によると、高さ2mのアンテナの場合、はマルチパスエラーのためのおよそ16分必要です。特に地形測量でできるだけ速くRTK測定をするためには、短縮法が適しています。測定時間タグの座標が隣接する2つの

エポックの位置の間で補間されて、わずかな動きの影響を除去します。

表2は、屋外でGS18 Tを使用して既知の点を計測し、その傾斜補正されたスタティックおよび短縮測定からのrms誤差を比較したものです。GNSS RTK測量で一般的に使用されている5、15、30秒といった異なる観測時間で比較を行っています。3つのテストすべてにおいて、スタティック測定値と短縮測定値のrms誤差は同程度です。スタティック測定で費やされる追加の時間は測位精度の向上にはつながらず、むしろ短縮法のほうが生産性が高いことを示しています。表2のテスト3を例にとると、図11は、2次元(水平)位置誤差を比較したのですが、30秒のスタティック測定と短縮測定の間で同等の精度性能を示しています。

	テスト 1: スタティック観測時間 5 秒			テスト 2: スタティック観測時間 15 秒			テスト 3: スタティック観測時間 30 秒		
	3D	2D	1D	3D	2D	1D	3D	2D	1D
スタティック	0.013	0.011	0.005	0.014	0.013	0.007	0.014	0.013	0.005
短縮	0.010	0.009	0.005	0.014	0.012	0.008	0.014	0.012	0.006

表2 - Leica GS18 Tを使用した、傾斜補正されたスタティックおよび短縮測定によるrms誤差[m]の比較
(ポールの高さ: 1.8m、屋外、試験ごとに100回の測定)

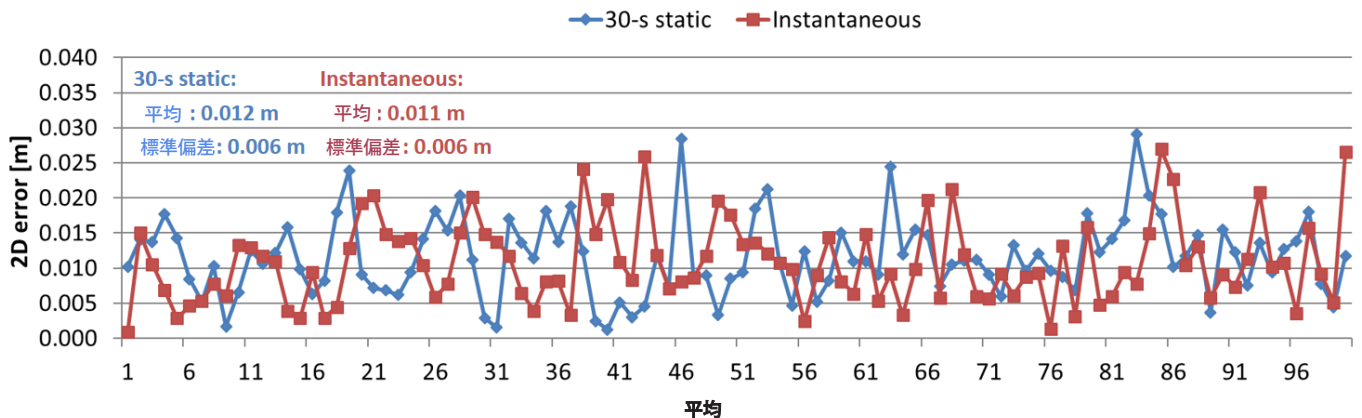


図11 - Leica GS18 Tを使用した、チルト補正された30秒間のスタティックおよび短縮測定による2D位置誤差の比較
(ポールの高さ: 1.8m、屋外。表2のテスト3を参照)

従来型RTK VS チルト補正RTK

チルト補正の利点を実証するために、屋外のマルチパスが強い条件下でGS18 TとローバーAのベンチマークテストを実施しました。屋外テスト (図12) では、8 m離れた2つの既知点P1とP2を短縮法で10分間交互に測定しました。ローバーAを使用した場合、短縮測定を行う前にポールを正確に水平にする必要があります。これは、チルト補正が可能なGS18 Tには必要ありません。10分間の観測数は、生産性の単純な指標です。

表3は、生産性と正確性に関する屋外テストの結果をまとめたものです。ポールの水平をとる必要がないGS18 Tでは、測定に費やされる時間が大幅に短縮され、10分間に測定点の数が57から76へ、33パーセント増加しています。チルト補正の場合、傾き決定からの追加の誤差にもかかわらず、3D rms誤差はローバーAと比較してわずかに3 mm大きい2.4 cmであり、これはほとんどの地形測量で許容範囲と認められます。

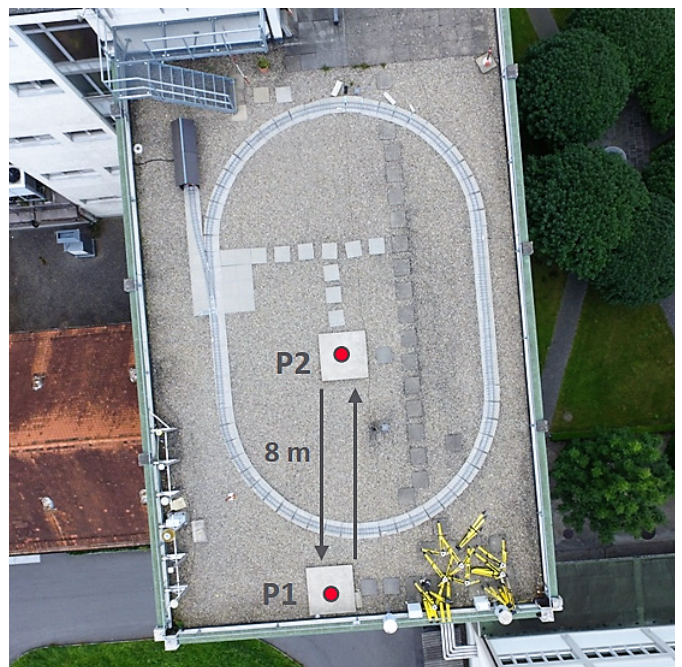


図12 - 短縮モードで2点を交互に10分間測定することによる、屋外でのRTK性能ベンチマーク
(ローバーAとGS18 T、ポールの高さ: 1.8m)

マルチパスの影響を強く受ける条件下でのテスト（図13a）では、建物に非常に近い場所で、かつ、ポールを垂直に保持してローバーAで測定できる既知の点を選択しました。さらに、磁気妨害に対するGS18 Tの耐性を示すために金属製のファサードを備えた建物を選択しました。さまざまな衛星位置で合計200回の短縮測定を行い、表4に可用性、精度、信頼性に関する結果をまとめています。チルト補正付きのGS18 Tを使用した場合、ローバーAを使用する従来のRTKと比較してRTK固定ソリューションの可用性が15%向上します。測位の精度は、平均で50%と大幅に向上します。位置誤差がCQの3倍未満という数字は、GS18 Tの信頼性を表わしています。ただし、水平方向の誤差に関しては、わずかに（最大6%）高くなっています。GS18 Tによるこれらの改善は、

- 1) 困難な環境での堅牢で高感度のGNSS信号追跡能力、
- 2) 測量ポールの傾斜によりアンテナから建物までの距離が遠かった（図13b）ためにマルチパスの影響が弱かったこと、
- および3) 正確なチルト補正可能にする洗練されたGNSS/INS統合、の結果だと考えられます。

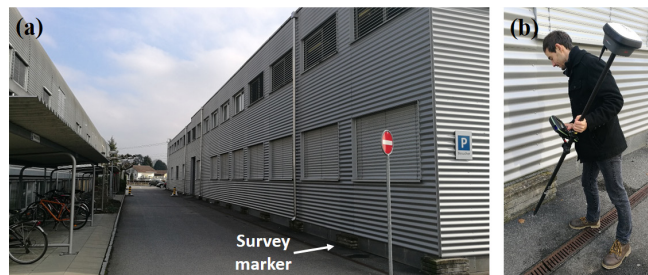


図13- 強いマルチパス環境(ポールの長さ：1.8m)でのRTK測位テスト
(a)金属製ファサードのある建物の近くに接地したテストマーカー、
(b)Leica GS18 Tを使用したチルト補正RTK測定

このテストのような強力なマルチパス環境は極端な場合であり、精度と信頼性の仕様に関連する標準条件をはるかに超えています。さらに、この場合、目標地点でポールを水平にすることは不可能であり、建物からの距離が10 cmより短い地点ではローバーAで測定することは不可能です。

	ポールの傾き	観測点数	3D [m]	2D [m]	1D [m]
ローバーA	水平	57	0.021	0.014	0.016
GS18 T	傾斜	76	0.024	0.021	0.012

表3- 10分間の測定点数とその結果に関するGS18 TとローバーAのrms誤差の比較
(屋外、ポールの長さ：1.8m、短縮測定)

	ポールの傾き	RTK固定/合計	可用性 [%]	精度 (rms) [m]			信頼性 [%]		
				3D	2D	1D	3D	2D	1D
ローバーA	水平	141/200	70.5	0.101	0.084	0.057	96.5	92.9	95.7
GS18 T	傾斜	171/200	85.5	0.051	0.039	0.032	99.4	98.8	99.4

表4- 強力なマルチパス環境でのGS18 TとローバーA間のRTK固定位置の可用性、精度、および信頼性の比較
(ポールの長さ：1.8m、短縮測定)

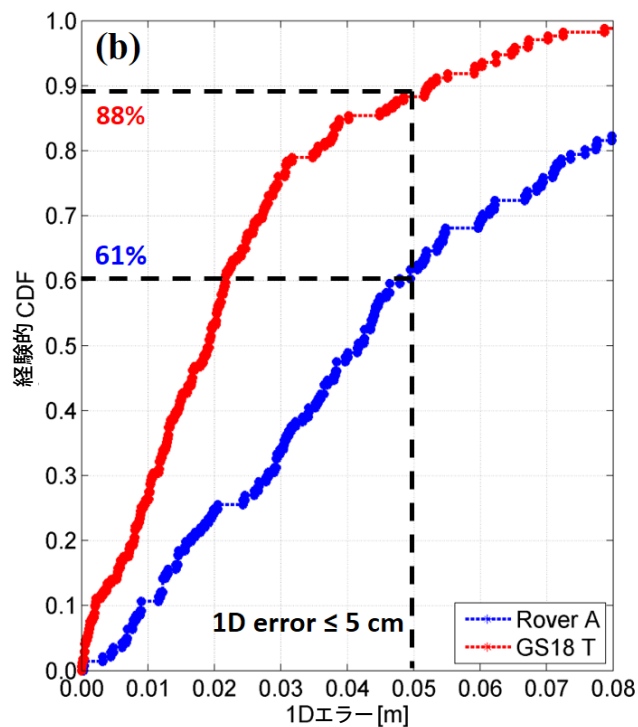
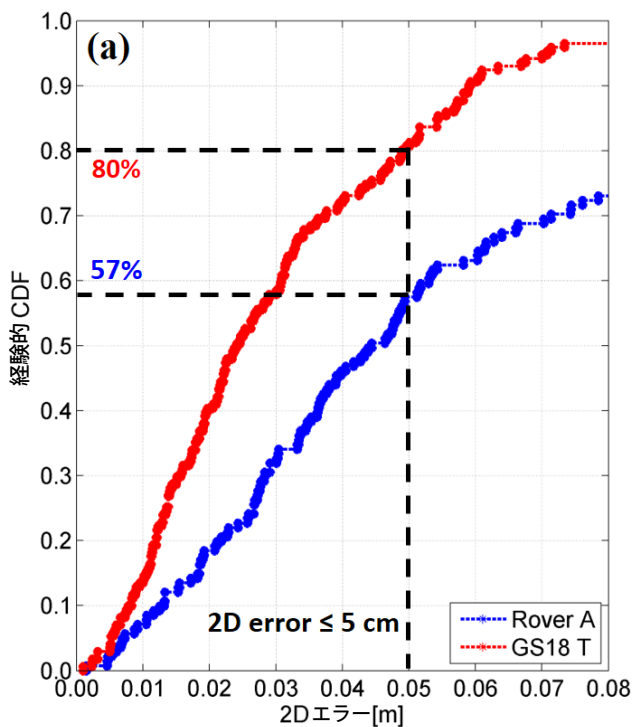


図14 - 強いマルチパス環境でのGS18 TとローバーAの誤差分布の比較
(ボールの長さ：1.8m、短縮測定) (a) 2D誤差CDF、(b) 1D誤差CDF

精度の観点から、図14はRTK固定位置の2Dおよび1D誤差の経験累積分布関数（CDF）を示しています。

ここで、ローバーAおよびGS18 Tのサンプルサイズはそれぞれ141および171です（表4）。

ローバーAを使用した従来のRTKと比較して、GS18 Tでチルト補正RTKを適用すると、2D（1D）誤差が5 cm以内となる確率が23パーセント（27パーセント）増加します。

さらに、高さについて水平要素を比較した場合、その傾向はより顕著であるように思われます。

磁力計ベースのアプローチ VS IMUベースのアプローチ

現場でのキャリブレーションが不要という利点のほかにも、磁場の乱れに対する耐性が大きいということも、磁力計ベースのアプローチよりもIMUベースのチルト補正のほうが優れている大きな利点のひとつです。

通常のRTK測量環境では、自動車、電力線、および構造用鋼鉄のある建物によって局所的な磁気妨害が引き起こされる可能性があります。磁気妨害に対するGS18 Tの堅牢性を示すために、駐車場の既知の点の1秒間のスタティック測定を行いました。ローバーBと呼ばれる別のサーベイグレードのGNSSスマートアンテナも使用しました。

これにより、最大15度までの磁力計ベースのチルト補正が可能になります。

図15は、GS18 TおよびローバーBを用いた100回のスタティックRTK測定の2D誤差およびCQを示しています。

図15aにおける2D誤差と比較すると、GS18 Tは、ローバーBよりも高い精度および一貫性を提供しています。

さらに、2D CQを見ても、現実的な測位精度を反映して、同様の2D誤差を示しています。図15bに示されたローバーBの結果に関しては、磁気擾乱が検出された場合、2D CQ値は2D誤差よりも著しく大きく、そのチルト補正ソリューションが信頼できないことを示しています。

この場合、ユーザーは測定を繰り返すか、従来のRTKモードに切り替えなければならない、生産性が低下します。

ある特定の状況下では、例えばより大きい傾斜角で点を測定する場合、磁力計ベースのシステムでは表示された精度が達成できなくても、ユーザーはそのことを知ることができません。表5にまとめたrms誤差を見ると、GS18 Tの2D精度はローバーBの2D精度より約2 cm優れていますが、1D精度はほぼ同じです。

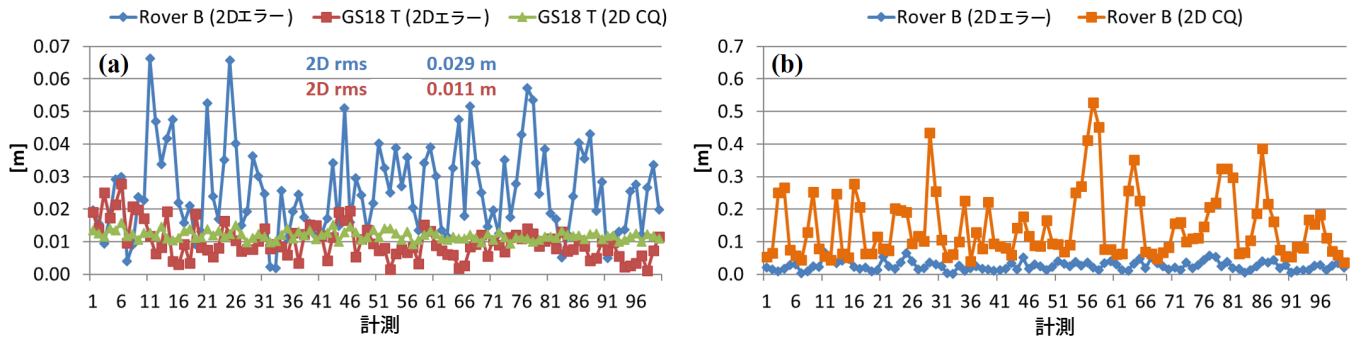


図15 - 磁気擾乱下でのGS18 TとローバーB間の2D位置誤差とCQの比較 (駐車場、ポールの高さ：1.8m、1秒スタティック測定)

	チルト補正	測定回数	3D [m]	2D [m]	1D [m]
ローバーB	磁力計ベース	100	0.039	0.029	0.026
GS18 T	IMUベース	100	0.025	0.011	0.023

表5 - 磁気擾乱下でのGS18 TとローバーB間のrms誤差の比較 (駐車場、ポールの高さ：1.8m、1秒スタティック測定)

大きい傾斜角の性能

GS18 TのIMUベースのチルト補正の場合、十分な数のGNSS衛星が追跡されて高精度RTKソリューションを提供できる限り、最大傾斜角の制限はありません。したがって、GS18 Tは、隠れた角の測定や、駐車中の車で部分的に遮られた点など、隠れた点の測定にも適用できます。図16aは、テストマーカーが車に遮られていて、ポイントを測定するにはポールを大きく傾けなければならない例を示しています。図16bは、36度から56度の傾斜角の範囲で行った100回の短縮測定による3D誤差ならびにCQを示しています。

3D rms誤差は1.6cmであり、87%の測定値で3D誤差は3D CQを下回っているため、ポールが強く傾いている場合でも高い信頼性があることがわかります。2D誤差と1D rms誤差はそれぞれ1.3 cmと9 mmです。

傾斜が大きいケースで発揮されるGS18 Tの高性能は、

- 1) 低仰角トラッキング機能の強化、
- 2) 磁力計の代わりに使用される正確なIMU測定、および
- 3) GNSS / INS統合における堅牢な品質管理メカニズム、によるものです。

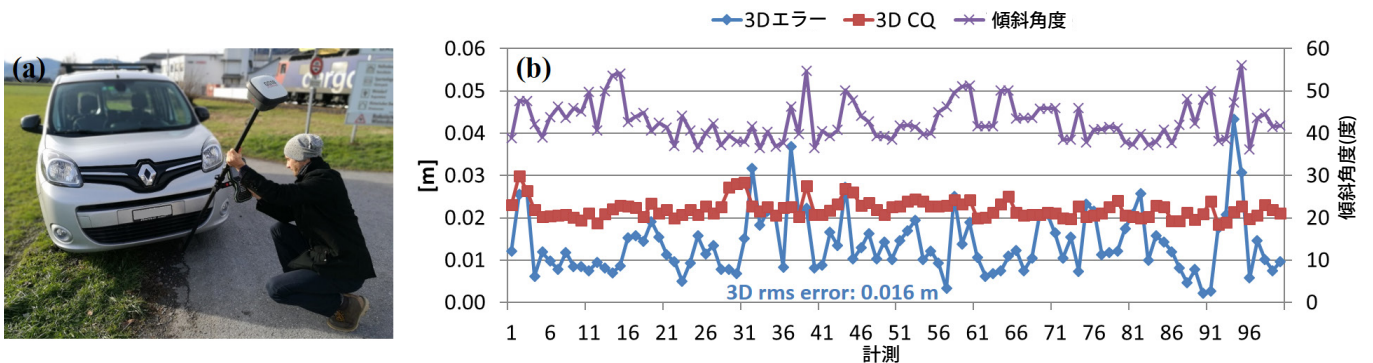


図16 - 36～56度の大きな傾斜角での短縮測定からの3D位置誤差とCQ (Leica S18 T、ポールの高さ：1.8m、屋外)

方位支援3Dビジュアル化

傾斜と傾斜方向に加えて、INSによる傾き評価にはセンサーの方位も含まれます（図8）。センサーの向きに応じて周囲の3D表示が自動的に更新されるので、ユーザが現場で自分の向きを変えるのに役立ちます。RTKの杭打ち調査を例にとると、センサーの方向が変わると、Leica Captivateフィールドソフトウェアの杭打ちビューと杭打ち指示もそれにに応じて更新されます。図17は、ポイントを杭打ちするときに、GS18 Tのナビゲーションビューで方位情報がどのように役立つかを示しています。杭打ち地点が0.5 m以上離れている場合、この図は進行方向の周囲を示し、センサーの前後を追っていきます（図17a）。3Dビューと杭打ちの指示は、現在の位置とセンサーの向きに従って自動的に更新されます。この例では、西から南へ、そして東へと変化します（図17b-d）。3Dビューにセンサーの向きを組み込むことで、ユーザーは調査環境内で自分の向きを簡単に変えて目標点に素早く移動し、ユーザーエクスペリエンスと生産性を向上させることができます。

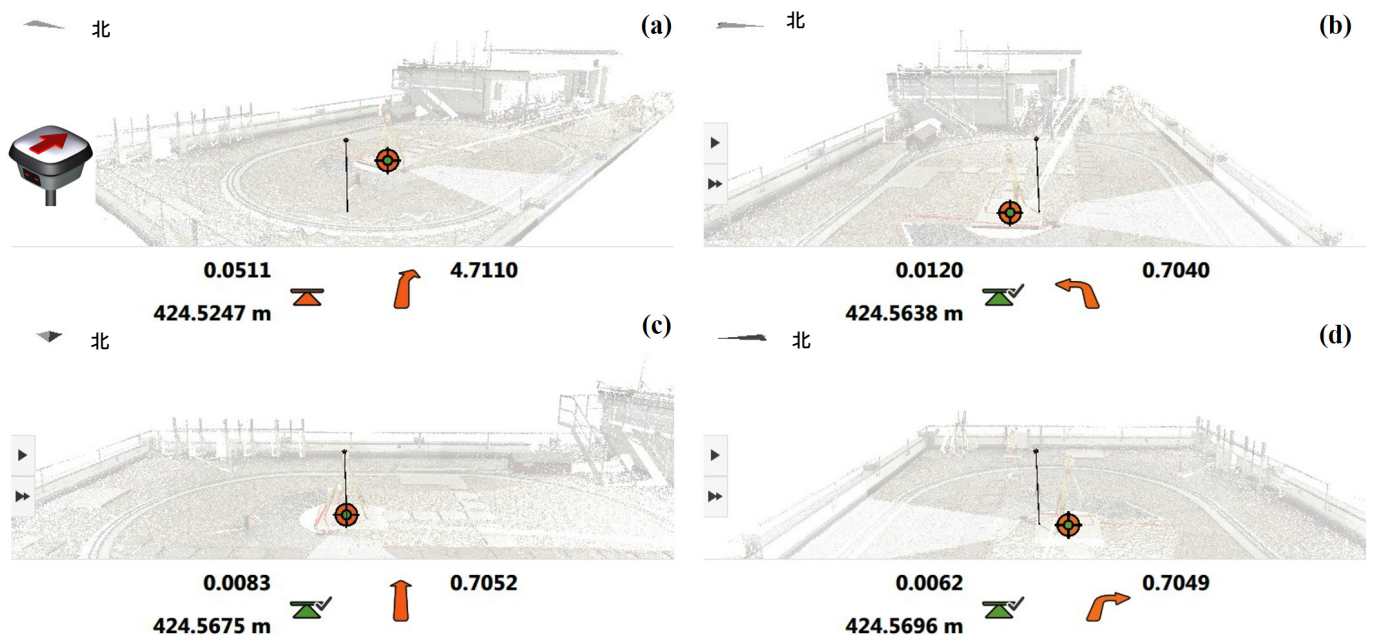


図17 - ライカGS18 Tでポイントを杭打ちするときの進行方向に沿った3Dビジュアライゼーションの例
（屋外、ポール長さ：1.8m） (a) ナビゲーションビュー、(b) 西方向へのビュー、(c) 南方向へのビュー、(d) 東方向へのビュー

傾斜補償測定のトレーサビリティ

GS18 Tを使用してチルト補正されたRTK測定を行うと、ポールの傾きとそれに関連する不確実性がポイント記録に保存され、完全なトレーサビリティと完全な品質報告が可能になります。傾き情報は、例えばスタイルシートを使用してLeica Captivateから直接エクスポートすることができます。GS18 Tの現場作業をLeica Infinityオフィスソフトウェア2.4にインポートすると、チルト補正を使用して測定された点に関して、傾斜角、最大傾斜角、傾斜方向、およびセンサーの向きを含むさまざまな傾きの要素が示されます（Hanson, 2017, p.5）（図18）。スタティック測定の場合、

「傾斜角」はポイントを保存する前に最後に測定された傾斜ですが、「最大傾斜角」は、観測中に到達した最大傾斜です。短縮測定では、傾斜角と最大傾斜角の値は同じです。Infinityにおいては、現場での入力が不正確で、最後に測定された傾きを使用してポール先端位置を再計算する場合は、ポール長を編集することが可能です。このようにすれば、チルト補正されたRTKソリューションの品質に影響を与える構成要素の完全なトレーサビリティを保持したままです正しい座標を得ることができます。

From Station	To	Tilt [°]	Max. Tilt [°]	Tilt Direction [°]	Sensor Heading [°]
RTCM-Ref 0014	STAT0017	16.8604	17.2427	185.9133	274.8734
RTCM-Ref 0014	STAT0100	10.0402	10.7563	295.0456	301.4027
RTCM-Ref 0014	STAT0033	14.9906	15.0279	180.8732	184.6618
RTCM-Ref 0014	STAT0035	11.0813	11.5379	279.9958	179.7060
RTCM-Ref 0014	STAT0093	4.0189	5.4650	188.2040	335.9238
RTCM-Ref 0014	STAT0050	12.0051	14.8526	238.9310	90.5609
RTCM-Ref 0014	STAT0019	11.9055	12.3044	261.6544	272.9070
RTCM-Ref 0014	STAT0011	24.3436	24.7415	266.7597	359.5545
RTCM-Ref 0014	STAT0094	6.7794	7.8059	269.0739	2.6027
RTCM-Ref 0014	STAT0047	25.5266	25.9783	81.3315	172.7648
RTCM-Ref 0014	STAT0034	12.8714	13.4524	244.6246	179.1467
RTCM-Ref 0014	STAT0099	11.8109	16.4238	112.4739	319.0290
RTCM-Ref 0014	STAT0029	28.3320	28.6226	7.4414	276.5981

Antenna	
Antenna Height	1.8000 m
Vertical Moving Offset	- m
Tilt	
Tilt	16.8604 °
Tilt Direction	185.9133 °
Sensor Heading	274.8734 °
Local Position	
Easting	546'676.2116 m
Northing	5'250'776.6005 m
Ortho. Height	- m
Ellip. Height	471.2921 m
Geoid Separation	- m

図18 - ポールの長さの編集が可能なLeica Infinityオフィスソフトウェア2.4でのLeica GS18 Tからの傾き情報の表示

結論

本稿では、高精度RTK測定の生産性とユーザーエクスペリエンスを向上させるためにIMUベースのチルト補正アプローチを採用した、新しいLeica GS18 Tスマートアンテナを紹介しました。磁力計ベースのチルト補正システムと比較して、GS18 Tは、現場でのキャリブレーションが不要で、磁気擾乱の影響を受けず、大きなチルト角で使用できるという大きな利点があります。典型的なテスト結果とベンチマーク調査により、GS18 Tのチルト補正を使用すると、生産性が大幅に向上し、困難な環境でのRTK測位性能が向上することがわかりました。これらの利点は、衛星信号追跡とGNSS / INS統合において革新的な技術を適用することによって達成されるものです。GS18 Tの主な特徴と利点は以下のようにまとめることができます。

- チルト補正を使用すると、スタティック測定ではスタティックRTK測定と同様の精度で測定することが可能で、さらに時間を節約することができます。
- 垂直ポールを備えた従来のRTKと比較して、チルト補正RTKは生産性を最大33%まで大幅に向上させ、可用性と精度に関してビル近くの測位性能を大幅に向上させます。

- 磁気妨害のある駐車場では、IMUベースのチルト補正は、磁力計ベースのアプローチよりも正確な位置と現実的なCQを生み出します。
- IMUベースのチルト補正付きRTKの場合、30度を超えるような大きな傾斜角に適用可能であり、2cmという精度で3D測量を行うことができます。
- 3Dビューにセンサーの向きを組み込むことで、ユーザーは調査環境内で自分の向きを簡単に変えて目標点に素早く移動し、ユーザーエクスペリエンスと生産性を向上させることができます。
- チルト補正されたRTK測定の傾き情報は完全に追跡可能であり、ユーザー自身とそのクライアントのための品質保証を可能にします。

世界最速のGNSS RTKローバー、GS18 Tは、使いやすいセンサーフュージョン技術によって正確なGNSS測位のための新しい基準を打ち立てます。

References

- Caizzone, S., Ciciu, M.-S., Elmarissi, W., Enneking, C., Felux, M., Yinusa, K.-A. (2018) Antenna pattern uniformity – Effects on pseudorange tracking error. *GPS World*, 29(2):18–32.
- Crassidis, J. L., Markley, F. L. (2003) Unscented filtering for spacecraft attitude estimation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 26(4):536–542.
- Dusha, D. (2017) Surveying system and method. US Patent US9541392B2.
- Groves, P. D. (2013) Principles of GNSS, Inertial, and Multi-Sensor Integrated Navigation Systems (2nd ed.). Artech House, Boston London, 800 pp.
- Hanson, K. (2017) Leica Geosystems Release Notes – Leica Infinity 2.4. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland, November 30, 2017, 12 pp.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Waskle, E. (2008) GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo & more. Springer-Verlag, Wien, 516 pp.
- Hong, S., Lee, M. H., Chun, H.-H., Kwon, S.-H., Speyer, J. L. (2005) Observability of error states in GPS/INS integration. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(2):731–743.
- Jekeli, C. (2001) Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications. Walter de Gruyter, Berlin New York, 352 pp.
- Kurtovic, Z., Pagan, R. (2009) A multi mode active surveying pole. European Patent EP2040029A1.
- Luo, X. (2013) GPS Stochastic Modelling – Signal Quality Measures and ARMA Processes. Springer Theses, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 331 pp.
- Luo, X., Chen, J., Richter, B. (2017) How Galileo benefits high-precision RTK – What to expect with the current constellation. *GPS World*, 28(8):22–28.
- Luo, X., Schaufler, S., Carrera, M., Celebi, I. (2018) High-precision RTK positioning with calibration-free tilt compensation. In: Proceedings of FIG Congress 2018, Istanbul, Turkey, May 6–11, 2018, 17 pp.
- Nichols, M. E., Talbot, N. C. (1996) Pole-tilt sensor for surveyor range pole. US Patent US5512905A.
- Pedley, M. (2012) eCompass: Build and calibrate a tilt-compensating electronic compass. *Circuit Cellar*, 265:1–6.
- Scherzinger, B. M. (2009) AINS enhanced survey instrument, US Patent US2009024325A1.
- Schmitz, M., Wübbena, G., Boettcher, G. (2002) Tests of phase center variations of various GPS antennas, and some results. *GPS Solutions*, 6(1–2):18–27.
- Steigenberger, P., Thielert, S., Hauschild, A., Montenbruck, O., Langley, R. B. (2018) Constellation completed: QZS-3 and QZS-4 join the Quasi-Zenith Satellite System. *GPS World*, 29(2):43–48.
- Titterton, D., Weston, J. L. (2004) Strapdown Inertial Navigation Technology (2nd ed.). IEE Radar, Sonar, Navigation, and Avionics Series, No. 17, Institution of Engineering and Technology, Stevenage Herts, 558 pp.
- Yang, C. (2017) Directions 2018: BeiDou builds, diversifies, expands. *GPS World*, 28(12):16–27.
- Yang, N., Freestone, J. (2016) High-performance GNSS antennas with phase-reversal quadrature feeding network and parasitic circular array. In: Proceedings of ION GNSS+ 2016, Portland, OR, September 12–16, 2016, pp. 364–372.
- Yang, N., Freestone, J. (2017) Patch antenna with peripheral parasitic monopole circular arrays. US Patent US20170047665A1.
- Yang, N., Gilbertson, C. (2016) Wide and low-loss quadrature phase quad-feeding network for high-performance GNSS antenna. US Patent US9343796B2.

Biographies

Xiaoguang Luo received a Ph.D. in geodesy and geoinformatics in 2012 from the Karlsruhe Institute of Technology, Germany. In September 2013, he joined Leica Geosystems as a GNSS application engineer of the GNSS product management group.

Stefan Schaufler received a M.Sc. degree in geodesy and geomatics engineering in 2016 from the Technical University of Vienna, Austria. Since September 2017, he is a GNSS product engineer in the Leica Geosystems GNSS product management group.

Bernhard Richter received a M.Sc. in geodesy from the Technical University of Vienna in 1999 and received a Master of Business Administration from the University of Gloucestershire in 2005. Since 2000, he has been working for Leica Geosystems in Switzerland. Since 2006, he is Business Director for GNSS and leads the GNSS product management group.

Leica Geosystems – when it has to be right

およそ200年にわたり計測・測量の製品および技術で変革を生んできたライカジオシステムズは、計測と情報テクノロジー業界のリーダーで、世界中のプロフェッショナルに向けて新たなトータルソリューションを開発しています。革新的な製品とソリューションの開発で知られているライカジオシステムズは、地理空間情報の利活用において、測量、土木、建築・建設、安全、セキュリティ、大規模/インフラ施設など、実に多岐にわたる業界のプロフェッショナルから信頼を得ています。ライカジオシステムズは高精度で正確な機器、洗練されたソフトウェア、そして信頼できるサービスで、社会の発展に貢献していきます。

ライカジオシステムズはHexagon(ナスダック・ストックホルム：HEXA B；hexagon.com)のメンバーで、地理空間および産業景観に最高の品質と生産性をもたらす情報技術ソリューションを提供するグローバルカンパニーです。



イラスト、説明、技術データは変更されることがあります。無断複写・複製・転載を禁じます。Copyright Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland, 2018. 878558 en - 12.18

ライカジオシステムズ株式会社

〒108-0073 東京都港区三田1-4-28 三田国際ビル18F
leica-geosystems.com

- when it has to be **right**

Leica
Geosystems