

# 技術紹介

## 7

## RTK 測位と IMU との相互補完技術の開発

### Development of complementary technologies for RTK-GNSS and IMU

高井 一輝

Kazuki Takai

商品開発センター

阿部 建二

Kenji Abe

商品開発センター 技術シニアマネージャー 博士(理学)

キーワード: IMU、RTK-GNSS、障害物環境、スマート農業、i-Construction,

Keywords: Inertial Measurement Unit, RTK-GNSS, Obstacle Environment  
Smart Agriculture, i-Construction

### 要 旨

農業や建設業での働き手不足が深刻である理由から、ICTを活用した政策であるスマート農業や i-Construction が取り組まれています。これら政策の重要な要素である農機や建機の自動化にあたっては、車体位置の高精度な計測が必要です。高精度な計測においては、cm 級精度である GNSS を利用した RTK 測位がキー技術になります。しかし GNSS は障害物環境下において、衛星信号が障害物で反射する理由で測位精度が低下します。そこで IMU との相互補完によって、障害物環境下においても精度を維持する技術を開発しております。本稿では、この開発の有用性と、障害物環境下での測位評価実験について報告します。

### SUMMARY

Due to serious labor shortages in the agriculture and construction industry, so-called smart agriculture and i-Construction based on policies promising to utilize ICT have been gradually progressing. For the automation of agricultural and construction machinery which are important factors for those policies, high accuracy measurement for the vehicle's position is required. In high accuracy measurements, RTK positioning uses GNSS with cm-level accuracy is a key technology. However, in an obstacle environment, GNSS decreases positioning accuracy due to reflection of satellite signals by obstacles. Therefore, we have been developing a technology to maintain accuracy by mutual complement with IMU even in an obstacle environment. This paper reports the usefulness of this development and an experiment to evaluate for positioning in an obstacle environment.

## 1. はじめに

日本は世界でも有数の超高齢社会で、多くの産業の中でも農業や建設業は先んじて労働者の高齢化が深刻です。特に農業分野では、世界の人口増加と気候変動による食料生産環境の悪化が予測される理由から、革命的な生産性向上を求められています。<sup>1)</sup>このような不確実性が高まる社会情勢に対応するために、ロボットや ICT を活用した政策であるスマート農業や i-Construction が、産学官連携で進められています。これら政策の重要な要素である農機や建機の自動化には、車体位置の高精度な計測が必要です。高精度測位の実現では、cm 級精度の測位が可能な RTK (Real Time Kinematic) 測位がキー技術になります。RTK 測位とは、GNSS (Global Navigation Satellite System) を利用して位置を測定する技術のひとつです。しかし GNSS を利用した測位技術は、農機や建機の走行先となる防風林や法面のような障害物環境下においては、衛星からの信号の反射により測位精度が低下します。障害物環境下でも高精度な測位を実現した自動走行が可能でなければ、前述した革命的な生産性向上に繋がりません。

そこで当社では、防衛や宇宙分野で培ってきた慣性航法技術を応用した IMU (Inertial Measurement Unit) と RTK 測位との相互補完で、障害物環境下においても高精度な測位が可能な技術を開発しております。RTK 測位の精度が低下した場合は、計測環境で精度が左右されない IMU 単独での測位を実施することで精度の維持を行います。本稿では、RTK 測位と IMU との相互補完技術についてご紹介し、障害物環境下での測位評価結果を報告します。

## 2. RTK 測位と GNSS 情報

### 2.1 RTK 測位の概要

RTK 測位は、ユーザー（移動局）が受信する搬送波位相と、位置が精度良く計測されている基準局で観測される搬送波位相の情報を合わせて利用する測位方法です（図 1）。GNSS で、最もよく利用される単独測位では、L1 搬送波（1.57542 GHz）に重畳される C/A と呼ばれるコード信号を利用した測位を行います。その解像度は L1 搬送波一波長の約 19 cm ですが、搬送波位相を利用すると、解像度は搬送波一波長の 1/100 程度まで上げることができます。

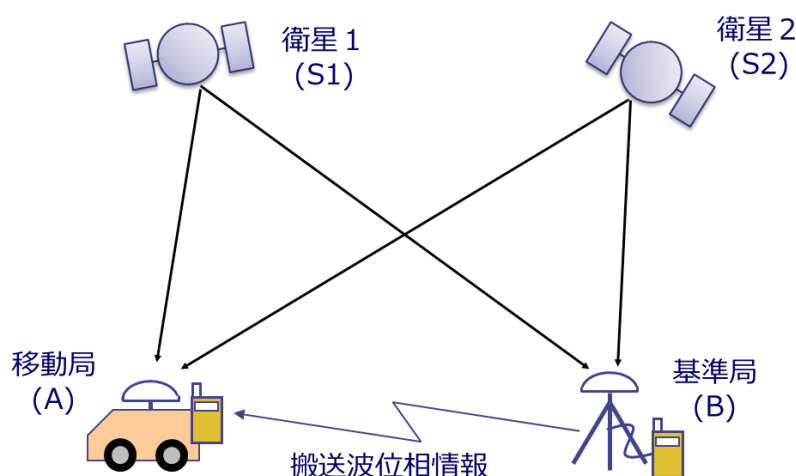


図 1. 移動局と基準局

GNSS 測位で生じる誤差要因には、搬送波の電離層遅延や対流圏遅延、衛星時計誤差、受信機時計誤差、マルチパスの影響、受信機内のノイズなどがあります。そして、受信機の捉える搬送波位相は、真の距離相当分に誤差による寄与を足し合わせたものになります。RTK 測位では、二つの受信機に二つの衛星から送られる搬送波位相を用いて、二重位相差と呼ばれる観測量を用います（式 1）。

$$\Phi_{A,B}^{S1,S2} = (\Phi_A^{S1} - \Phi_B^{S1}) - (\Phi_A^{S2} - \Phi_B^{S2}) \quad \text{式 1}$$

$\Phi_{A,B}^{S1,S2}$  は、衛星 1 と衛星 2 から基準局と移動局における搬送波位相の二重位相差を表し、 $\Phi_A^{S1}$  は、衛星 1 (S1) から移動局 (A) が受信する搬送波位相を表します。式 1 の各項を書き下していくと、電離層遅延、対流圏遅延、衛星時計誤差、受信機時計誤差の項が消えて、真の距離相当分の項とマルチパスの項、ノイズの項のみが残ります。この二重位相差という観測量を用いることが RTK 測位の大きな特徴です。搬送波位相の真の距離相当分には搬送波の整数倍と小数点以下の部分があります。この整数倍の部分には曖昧さが残ります。この曖昧さを整数アンビギュイティと呼びます。このアンビギュイティが LAMBDA 法 (Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment Method) 等によって解けた場合は、<sup>2,3)</sup> 高精度な測位を実現できます。

## 2.2 RTK 測位の例と GNSS 情報

整数アンビギュイティを解いた測位結果を **FIX 解** と呼び、**cm** の位置精度が得られます。またアンビギュイティが決定していない測位結果を **FLOAT 解** と呼びます。図 2 に RTK 測位の **FIX 解** の例を示します。使用したのは 2 周波の低コスト受信機です。静止状態で、オープンスカイにおける約 10 分間の観測データです。

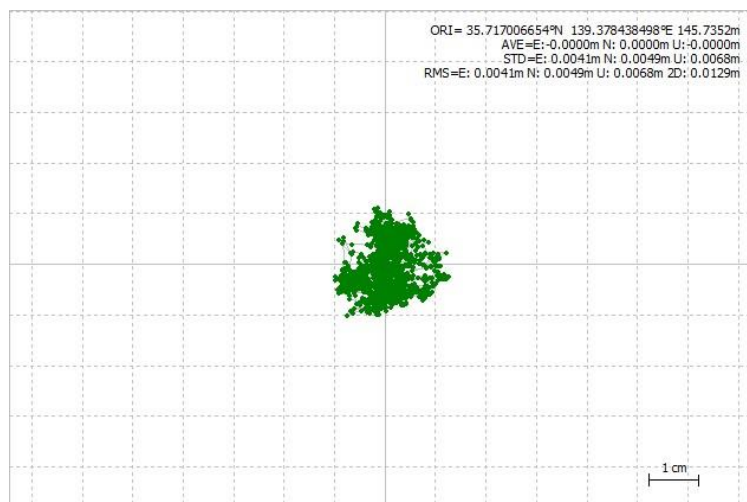


図 2. 静止状態での RTK 測位例

次に、移動しながら測位した例を示します。図 3 は、上空の開口率がある程度確保できている場所から、屋根で遮られた障害物影響下に移動する例になります。

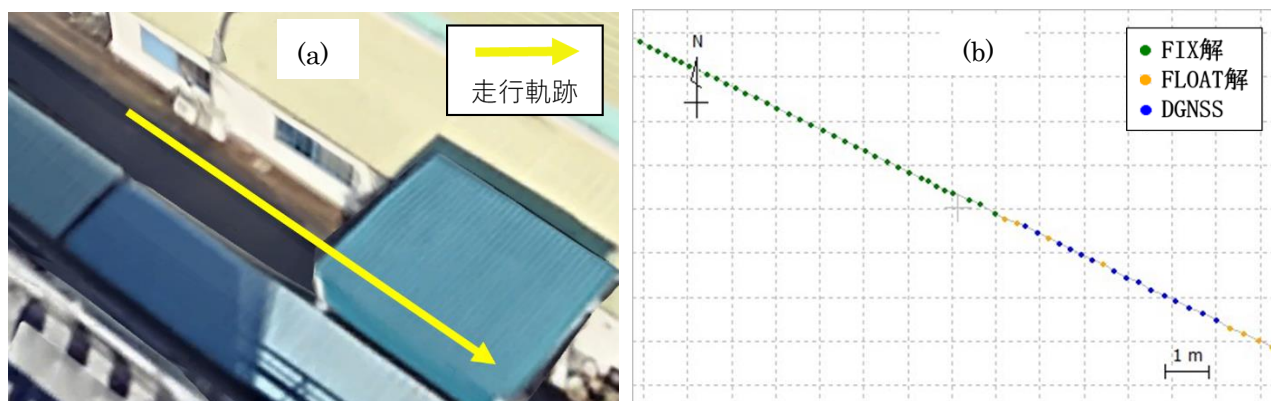


図 3. 障害物環境下を通過する測位例

(a) 走行軌跡, (b) RTK 測位結果

図 3 (a) の矢印で示した位置を時速 5 km 程度で移動した測位結果を図 3 (b) に示します。この図の緑の点は **FIX 解**、黄色の点は **FLOAT 解**、青い点はディファレンシャル測位 (**DGNSS**) を表します。GNSS 受信機が出力する情報には、位置、速度以外にも、測位品質 (**FIX 解**、**FLOAT 解**、**DGNSS** などの種類)、観測衛星数、**DOP** (**Dilution Of Precision** : 衛星配置による精度低下率) などがあります。

図 3 で示した測位時に GNSS 受信機から出力された GNSS 情報の例を図 4 に示します。図 4 の 4 秒付近から屋根の影響で観測衛星数が減少し、7 秒後より FIX 解から FLOAT 解や DGNSS に変わり、測位品質が低下しています。また観測衛星数と HDOP も併せて変化していることが分かります。

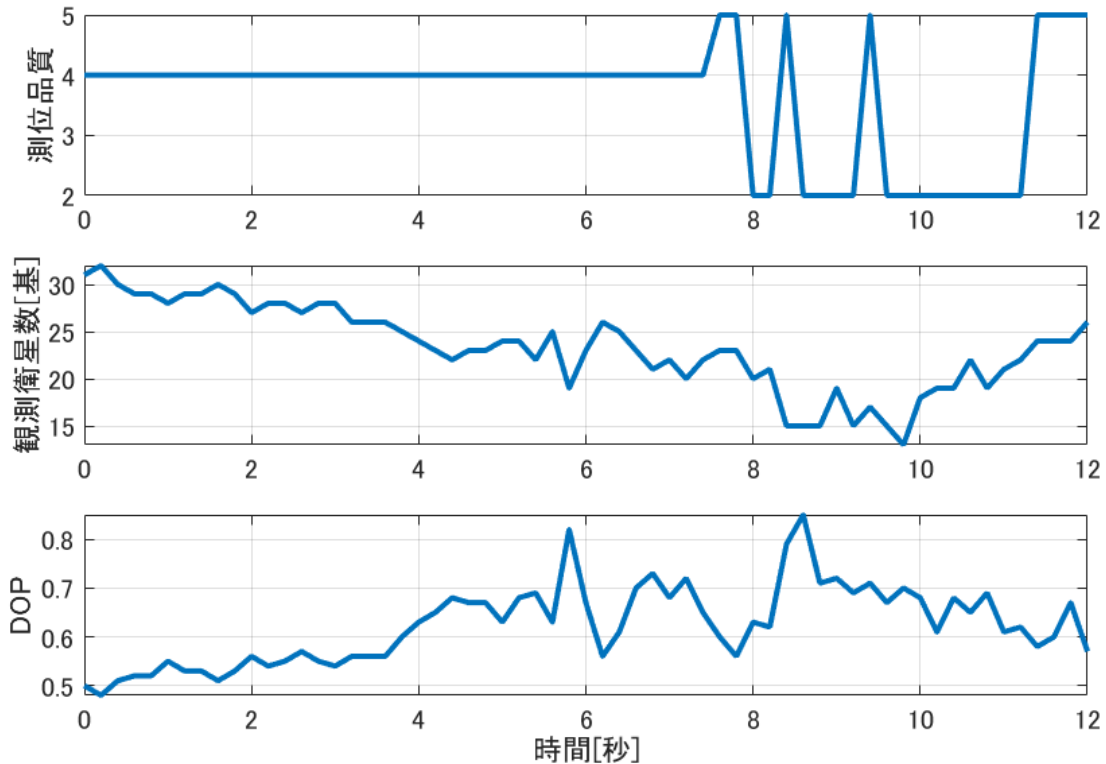


図 4. GNSS 情報

測位品質は 5:FLOAT 解、4:FIX 解、2:DGNSS

HDOP は DOP の水平方向成分

### 3. RTK 測位と IMU との相互補完技術

#### 3.1 補完対象

RTK 測位と IMU が、どのような情報を補完し合うのかを表 1 に示します。IMU は低コストである MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) センサを利用した IMU で、RTK 測位は低コストの 2 周波受信機を使用した場合で設定しています。これはコストを低く抑えることで、農業や建設業で普及されるようにするためです。IMU は更新レートが高く、位置や速度、姿勢角の精度が計測環境に左右されません。しかし位置は、加速度と角速度の積分による算出で誤差が増大し、時間に対して精度が低下します。一方で RTK 測位は、位置の精度が cm 級で非常に高く、時間に対して精度が低下しません。しかし更新レートが低く、防風林等の障害物により精度が低下します。このような両者の短所を、相互に補完するアルゴリズムを開発しました。

表 1. IMU と RTK 測位が補完し合う対象

	MEMS IMU	RTK-GNSS 測位 (低コスト受信機)
位置精度	× 時間に対して精度が低下	○ 非常に高く (cm 級精度)、 時間に対して精度が低下しない
計測の更新レート	○ 高い (50 Hz 程度)	× 低い (5 Hz 程度)
計測環境への依存	○ 計測環境に精度が左右されない	× 障害物により精度が低下

#### 3.2 相互補完方式

障害物環境での高精度測位を実現するためには、RTK 測位と IMU との相互補完方式をクローズドループにする必要があります。相互補完方式には、クローズドループとオープンループの 2 種類があります。<sup>4)</sup>これら方式の簡易的な演算ブロック図を図 5 に示します。ここでのカルマンフィルタとは、RTK 測位の観測値と慣性航法の出力値を使用して、慣性航法での誤差を統計的に推定する演算を指します。オープンループは、慣性航法の出力値と誤差推定値との差をとって出力する方式です。開発は簡易ですが、RTK 測位の精度が低下した場合は、慣性航法の誤差が増大している理由から、相互補完の効果がなくなります。一方でクローズドループは、推定した誤差を慣性航法にフィードバックする方式です。開発は比較的難しいですが、フィードバックにより慣性航法で増大する誤差を定常的に消去するため、RTK 測位の精度が低下した場合でも、短時間の間は高精度の測位を維持できます。

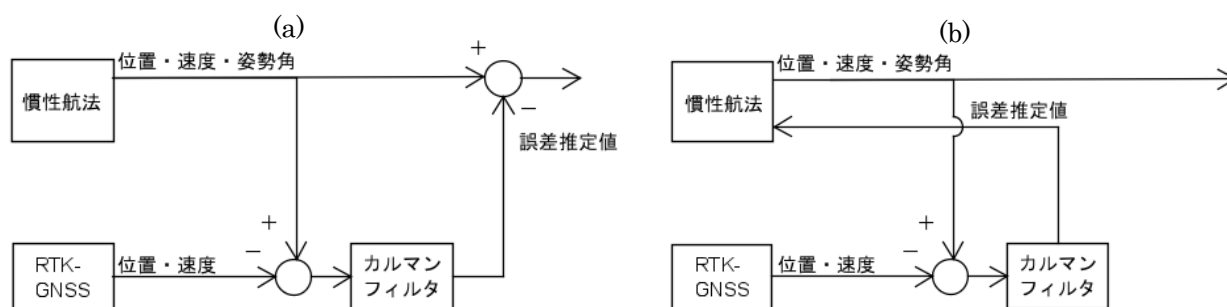


図 5. オープンループとクローズドループの概要ブロック図

(a) オープンループ、(b) クローズドループ



### 3.3 GNSS 誤差判定

障害物環境での高精度測位を実現するためには GNSS 誤差判定が必要です。誤差が大きいと判定した場合は、計測環境で精度が左右されない IMU 単独での測位を実施することで高精度を維持します。この判定処理を含めた相互補完ブロック図を図 6 に示します。

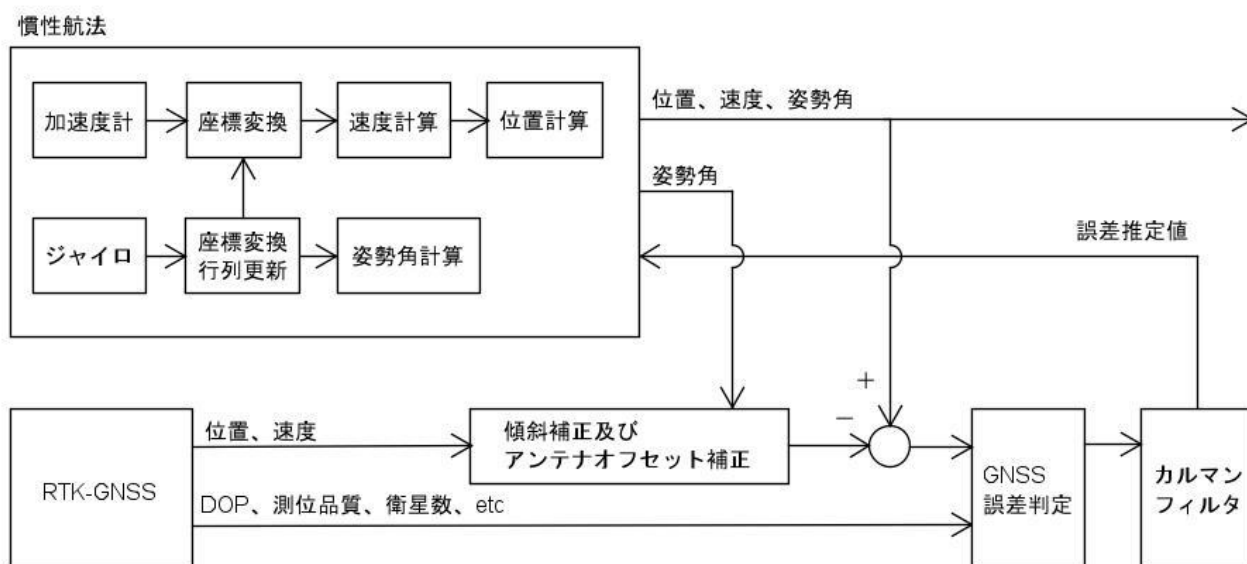


図 6. RTK 測位と IMU との相互補完ブロック図

GNSS の誤差判定にあたっては、既に DOP を使用して判定する方法が提案されています。<sup>5)</sup>ここから判定の精度向上を図るため、DOP に加えて FIX 解や FLOAT 解のような測位品質や衛星数等の情報を組み合わせた判断式を構築しました。もし 1 cm 程度の精度を示す FIX 解が得られたとしても、ミス FIX 解が発生する可能性がある理由から、例外なく誤差判定を実施します。ミス FIX 解とは、整数アンビギュイティが誤って解かれた場合の FIX 解を指します。

また、慣性航法から得られた位置や速度、姿勢角のような情報も前述の判断式に組み込むことで、誤差判定の精度向上を図っています。このように GNSS と IMU 両者の情報を組み合わせた判断を行うことで、RTK 測位で得られた測位点を使用するかどうかを判定します。

## 4. 障害物環境下での測位結果

開発した相互補完技術の有用性を検証するため、障害物環境下での測位評価実験を行いました。評価に使用した IMU は、RTK 測位が可能な低コストの 2 周波 GNSS 受信機と一体型の MEMS IMU で、当社で試作したモデル (図 7) になります。内蔵の GNSS 受信機は、LTE 通信で補正情報を受信することで RTK 測位が可能です。出力レートは、内蔵の GNSS 受信機は 5 Hz で、GNSS 受信機と相互補完した IMU は 50 Hz に設定しました。この IMU を自動車に搭載し、当社昭島事業所構内を時速 5 km 程度で走行して測位を実施しました。図 8 に当社昭島事業所構内での走行軌跡を示します。図 8 の赤枠は、長さ 7 m で高さが 2.5 m 程ある屋根で、GNSS の受信が不安定な箇所を示します。図 9 に RTK 測位結果を示します。

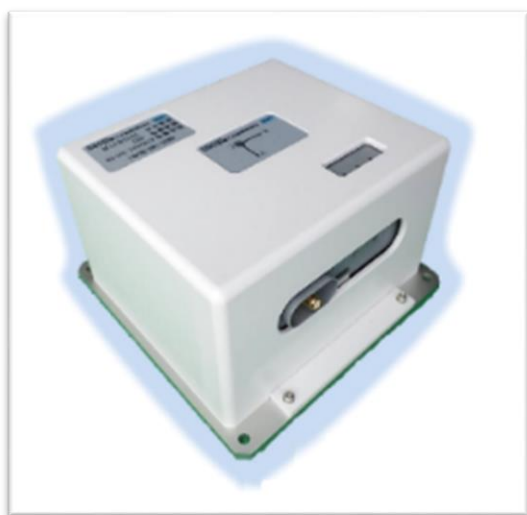


図 7. RTK 測位-IMU 試作モデルの外観



図 8. 評価実験の走行軌跡

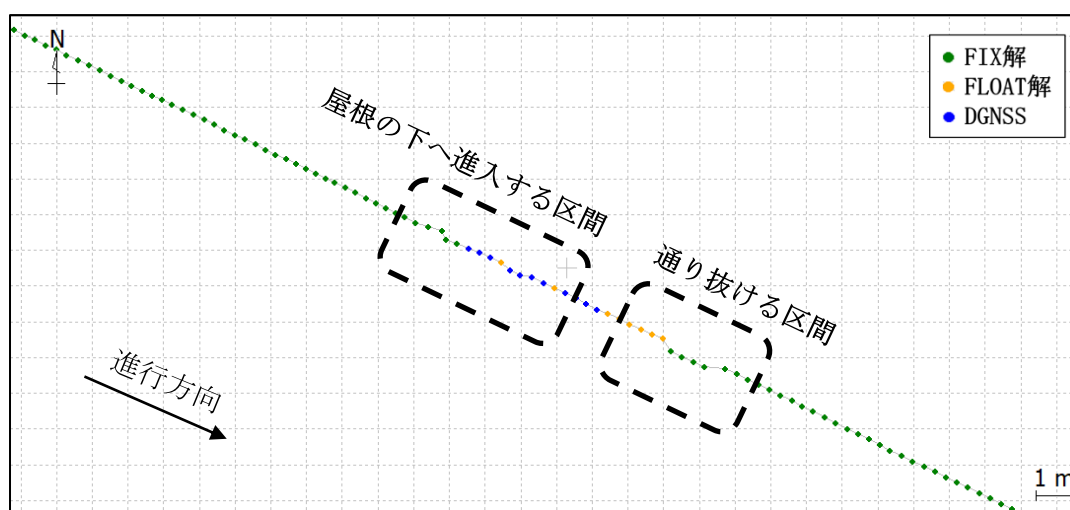


図 9. RTK 測位結果



始めに、屋根の下へ進入する区間に着目します。この区間の RTK 測位結果と、IMU との相互補完による測位結果を図 10 に示します。図 10 (a) の RTK 測位結果では、屋根の下へ進入すると測位品質が FIX 解から FLOAT 解や DGNSS に変化しています。この変化に対応するように、車両横方向にバラツキが発生しています。このように RTK 測位の精度が低下しているのに対して、図 10 (b) の IMU との相互補完では、車両横方向のバラツキを抑制した測位が確認できます。

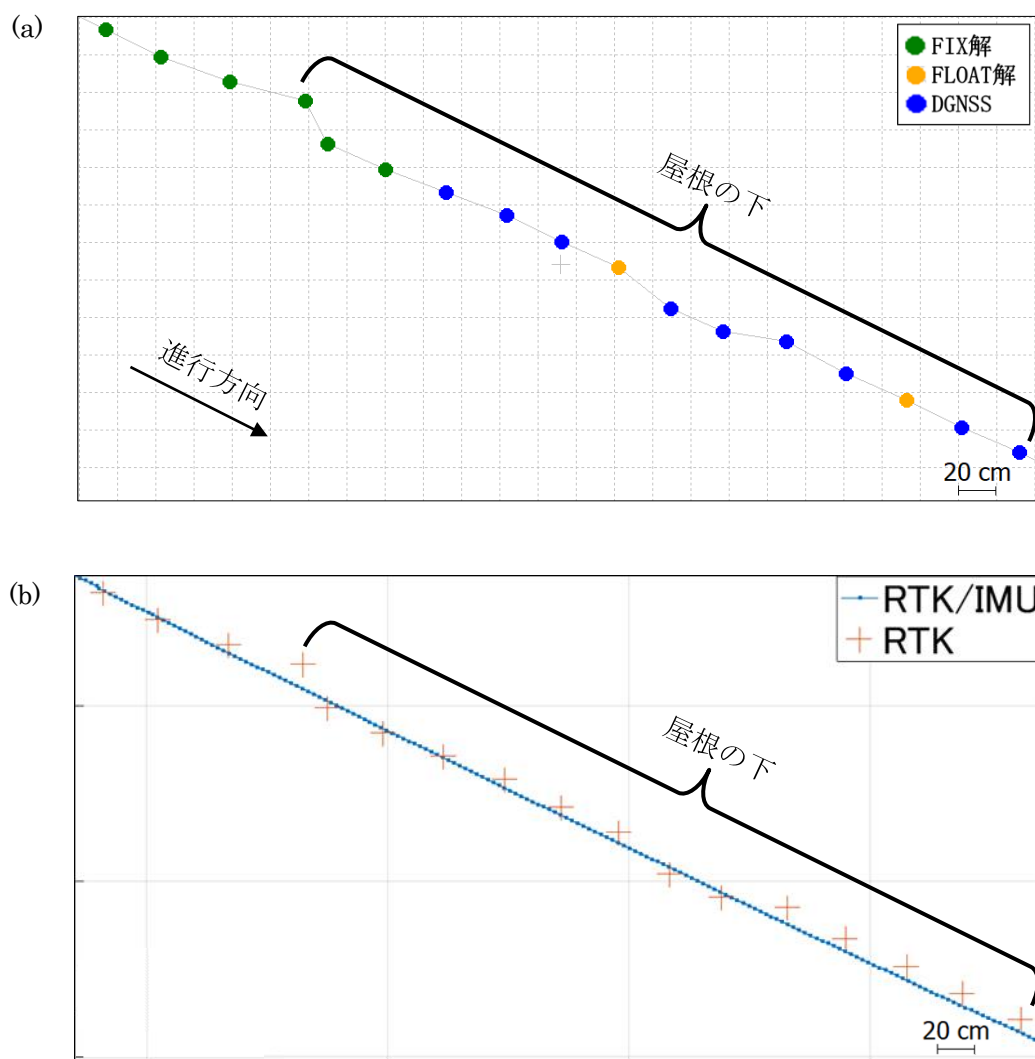


図 10. 屋根の下へ進入する区間の測位結果

(a) RTK 測位結果、(b) IMU との相互補完による測位結果

次に、屋根を通り抜ける区間に着目します。この区間の RTK 測位結果と、IMU との相互補完による測位結果を図 11 に示します。図 11 (a) の RTK 測位結果では、屋根を通り抜けた直後に、緯度方向に大きく外れた測位点があります。FIX 解にもかかわらず緯度方向に外れているため、ミス FIX 解だと推測されます。このように RTK 測位の精度が低下しているのに対して、図 11 (b) の IMU との相互補完では、ミス FIX 解の影響を抑制した測位が確認できます。

以上の結果より、障害物環境下での測位精度の維持には、RTK 測位と IMU との相互補完が有用な方

法であることを示しました。

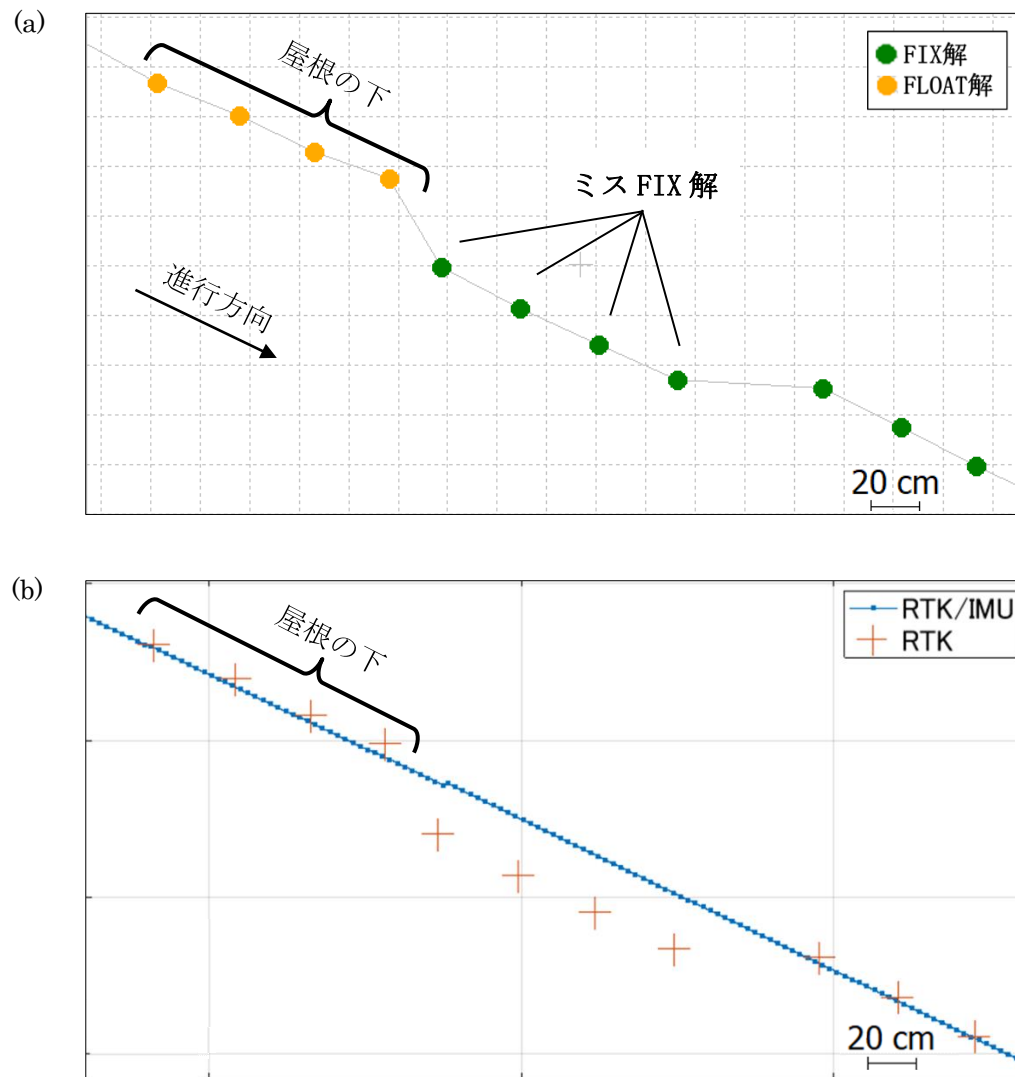


図 11. 屋根を通り抜ける際の測位結果

(a) RTK 測位結果, (b) IMU との相互補完による測位結果

## 5. まとめと今後の取り組み

障害物環境での測位評価実験を通して、相互補完技術の有用性を報告しました。この技術は、高層ビルが並ぶ都市部のような GNSS の受信が著しく不安定な場所での活用は厳しいですが、想定している防風林や法面のような場所では有用であると考えています。また農機や建機がプログラムした走行経路通りに操舵するために、方位角の精度向上も位置と併せて研究を進めています。

今後の取り組みとしては、GNSS の誤差判定にあたりニューラルネットでの判定による精度向上を考えております。ニューラルネットは信号の分類が得意なことから、RTK 測位の精度が低下しているかどうかの判断に向いています。

以上報告した取り組みにより、車両の完全自動化の実現という側面で農業や建設業へ貢献します。

### 【参考文献】

- 1) 農林水産技術会議事務局 “農林水産研究イノベーション戦略 2021” p.9 (2021/6)
- 2) P.J.G.Teunissen, Journal of Geodesy **70**, 65 (1995)
- 3) P.J.G.Teunissen, P.J.Dejonge, and C.C.J.M.Tiberius, NAVIGATION **44**, 373 (1997)
- 4) A.Noureldin, T.B.Karamat, and J.Georgy, *Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration* (Springer, Berlin, 2012), chap. 7, p. 235
- 5) 山田雅喜, 竹内竜太郎, 奥山貴之, 航空電子技報 **33**, 7 (2010)