

RTK-GNSSにおける 未来の測位精度予測のための指標の設計と評価

仲秋 喬介^{1,†1,a)} Tiphath Areeyapinun^{1,†1} 太田 拓伸^{1,†1} 木谷 友哉^{1,†1,b)}

概要: RTK-GNSS とはセンチメートル精度を実現する高精度衛星測位技術である。センチメートル精度を実現するためには、十分な数の衛星からの信号を良好に直接波として受信する必要がある。都市部においては、建物などの障害物により高い精度が得にくく、測量などの精度を求めるサービスへの影響が考えられる。RTK-GNSS の精度指標を設計し、未来の測位精度を算出することで、先の問題の解決を図った。精度指標には、RTK-GNSS の精度に関係し、未来の値が既知である補足可能衛星数とその衛星配置をもとに7段階の指標を設計した。精度指標の設計には、オープンスカイ環境での実測値から、特定の補足可能衛星を排除することで、測位衛星が建物などの障害物に遮られ、補足できないようなシチュエーションを想定し、約2400場面（総エポック（時刻）数：約200万）の再現を行い、場面毎の測位演算結果を用いた。設計した精度指標を別の実測値を用いて約3700場面（総エポック（時刻）数：約300万）の再現からの測位演算結果より評価を行った結果、精度指標値が下がるにつれて、高精度な位置の得やすさも下がるといった整合性を確認することができた。

キーワード: 衛星測位システム (GNSS), RTK 測位, 位置推定精度, 精度予測

1. はじめに

本研究では、センチメートル精度を実現する次世代高精度衛星測位システムである RTK-GNSS (RealTime Kinematic - Global Navigation Satellite System) において、衛星の捕捉状況から FIX 解の得やすさを表す指標を提案し、実測データを用いた評価を行う。FIX 解とは RTK-GNSS において算出される高精度な位置である。

RTK-GNSS において高精度な受信機の位置を算出するためには、十分な数の衛星からの信号を良好に直接波として受信する必要がある。都市部においては、高層ビルなどの障害物により衛星からの電波が阻害され、FIX 解が得にくいという問題がある。そのため、ドローンによる自動配達や測量などのリアルタイムで精度が求められるようなサービスへの利用性に影響が考えられる。

そこで、事前に未来の RTK-GNSS の精度を予測し、高い精度を実現可能な時間帯を提供することで、リアルタイム

で精度が求められるようなサービスは高い精度を実現可能な時間帯に活動できることから、利用性を改善できる。我々は、未来のある地点での RTK-GNSS の精度を、そのときの衛星位置と3次元建造物地図を用いて予測するシステムを提案している [1]。

RTK-GNSS では、位置が既知である地上基準局からの補正情報を受信することで、高精度測位を実現する。そのため、単独測位における精度には、電離層遅延や対流圏遅延など様々な要因が影響してくるのに対して、RTK-GNSS による測位では測位誤差の要因をある程度は排除できる。

提案システムでは、事前に未来のある地点での RTK-GNSS の精度を予測することから、未来の値が既知な要因を用いて、RTK-GNSS が可能かを示す指標が必要となる。ここでは、そのような要因の中で、大きく精度に影響を与えと考えられる LOS (Line of Sight) 衛星数と GDOP (Geometric Dilution of Precision) 値を変数として、FIX 解の得やすさの指標を設計する。LOS 衛星とは、衛星と地上受信機間が遮られていない衛星を示す。GDOP 値とは、幾何学的衛星配置の良し悪しを示す値であり、値が小さいほど衛星配置が良いことを示す。設計した精度指標は実測値を用いて整合性を確認し、精度指標の有用性を示す。

¹ 情報処理学会

IPJSJ, Chiyoda, Tokyo 101-0062, Japan

^{†1} 現在、静岡大学大学院総合科学技術研究科情報学専攻
Presently with Department of informatics, Graduate School
of Integrate Science and Technology, Shizuoka University

a) k-nakaaki@kitanilab.org

b) t-kitani@kitanilab.org

2. GNSS 測位と現状

GNSS とは、Global Navigation Satellite System の略称で、各国が開発を進めている測位衛星システムの総称である。現在、地球を周回する測位衛星の数は急速に増加している。全世界をカバーするシステムとしては、米国の GPS が最低 24 機 (2016 年 4 月時点で 31 機)、ロシアの GLONASS が 24 機、中国の BeiDou が 35 機 (2007 年 4 月～16 年 3 月に 22 機打ち上げ済)、欧州のガリレオが 30 機 (2011～15 年に 12 機打ち上げ済) の 4 システムが運用・開発されている。地域をカバーするシステムとしては、わが国のみちびきは最終的に 7 機 (現在は 4 機) で、インドの IRNSS が 7 機が運用・開発されている。これらがすべて完成する 2020 年代半ばには、地球を回る測位衛星の総数は、予備機も含めると 130 機を超えることになる [2]。

衛星測位による受信機位置は、二つの衛星の位置と衛星から受信機までの距離より三角測量を用いて求める事が可能である。実際には、カルマンフィルタと呼ばれるモデル上の世界において計算した値と実測値を用いて計算した値の残差を 0 に近づけることによって、受信機位置を求める [3]。

2.1 コード測位

衛星からは、同一の長さのコードが繰り返し放送されていて、コード測位では、信号が衛星から送信され受信機に到達するまでの時間差を、繰り返されているコードの中のどの部分を受信しているかを検知することで、衛星と地上受信機の疑似距離を求める [4]。さらに、求めた疑似距離とカルマンフィルタで計算した距離との残差を 0 に近づけることで受信機位置を求めることが可能である。しかしながら、衛星の原子時計に比べて、受信機の水晶時計はあまり高精度ではないことから、衛星と受信機の時刻は同期しておらず、受信機の時計誤差も疑似距離を求める計算で考える必要がある。そこで、既知数である疑似距離 r_i 、衛星位置 X_i, Y_i, Z_i 、光の速度 c とするとき、受信機位置 x, y, z と受信機の時計誤差 Δt の 4 つの未知数を方程式 (1) - (4) で解くことで、同距離線の交点 (受信機位置) を求める。そのため、4 つの未知数を解くためには、図 1 のように最低 4 機の衛星から信号を受信する必要がある。またコード測位は、表 1 と図 2 のようなランダム誤差が関係しているため、高精度な測位結果は望めない。

$$r_1 = \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 + (z - Z_1)^2} + c\Delta t \quad (1)$$

$$r_2 = \sqrt{(x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2 + (z - Z_2)^2} + c\Delta t \quad (2)$$

$$r_3 = \sqrt{(x - X_3)^2 + (y - Y_3)^2 + (z - Z_3)^2} + c\Delta t \quad (3)$$

$$r_4 = \sqrt{(x - X_4)^2 + (y - Y_4)^2 + (z - Z_4)^2} + c\Delta t \quad (4)$$

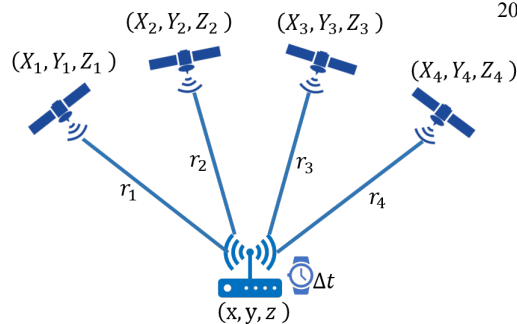


図 1 疑似距離の算出

表 1 コード測位における主なランダム誤差要因

誤差要因	誤差量
衛星軌道	最大で約 10m
衛星クロック	最大で約 3m
電離層遅延	最大で約 10m
対流圏遅延	最大で約 0.5m
受信機	最大で約 0.5m
マルチパス	約 1m から 10m

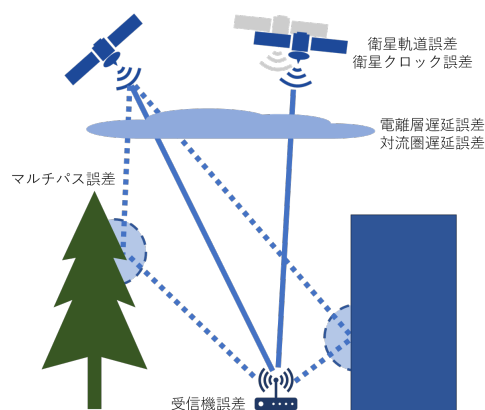


図 2 コード測位における主なランダム誤差要因

2.2 RTK-GNSS 測位

RTK-GNSS は、図 3 のようにコード測位で用いられるコード位相の代わりに、より細かい分解能の搬送波位相を用いて測位演算を行う。移動中の受信機が、位置が既知である地上基準局から補正情報を受け取り、地上基準局から相対的に位置を決定する測位方法である。RTK-GNSS ではより正確な測位が可能である。

搬送波位相とは、受信機で復調した測位信号の搬送波位相角を連続的に測定したものである。搬送波位相を L (m) として、その観測モデルは式 (5) のように表すことができる。ここで、 λ は搬送波波長 (m)、 ϕ は搬送波位相 (cycle)、 ρ は衛星と観測地点の幾何学距離 (m)、 c は光速 (m/sec)、 dt は受信機時計誤差 (sec)、 dT は衛星時計誤差 (sec)、 I は電離層遅延 (m)、 T は対流圏遅延 (m)、 N は整数値バイアス (cycle)、 σ_L は搬送波位相測定における観測誤差 (m) である。

$$L \equiv \lambda\phi = \rho + c(dt - dT) - I + T + \lambda N + \sigma_L \quad (5)$$

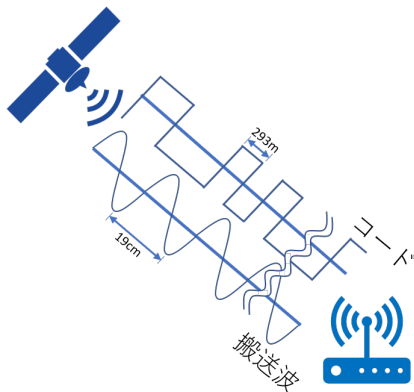


図3 コード位相と搬送波位相の比較

搬送波位相には、連続的な測定では固定値となる整数値バイアス N (cycle) と呼ばれるバイアス誤差が含まれており、式 (6) より表すことができる。ここで、 ϕ_{0r} は受信機初期位相 (cycle)、 ϕ_0^s は衛星初期位相 (cycle)、 n は整数不定性である。

$$N = \phi_{0r} - \phi_0^s + n \quad (6)$$

搬送波位相は整数部 (1 波長の数) と小数部で構成され、小数部は正確に測定できるが、整数部の絶対値は整数値バイアスのため正確に測定できない。整数値バイアスはその名の通り整数値となるが、衛星ごと、受信機ごとに異なる値を示す。そこで、搬送波を連続的に観測できている期間においては、整数値バイアスは固定であるため、一度決定できると連続的に正確な搬送波位相の数を得ることができる [6]。

さらに表 1 のようなランダム誤差要因は、図 4 のような行路差を 2 つの衛星から求め、互いの行路差を引いた 2 重差を求めることで、クロック誤差を除去し、基線長 (地上基準局と受信機の距離) が短距離であれば、電離層遅延や対流圏遅延、衛星軌道誤差を除去できる。ここで、求めた 2 重差とカルマンフィルタで計算した 2 重差との残差を 0 に近づけることで基準局から受信機までの 3 次元ベクトルを求め、受信機位置を求めることが可能である。

ここで、RTK-GNSS において整数値バイアスの決定が問題となる。整数値バイアスを決定する方法として LAMBDA 法が挙げられる。LAMBDA 法では、FLOAT 解アルゴリズムと呼ばれる整数値バイアスを未知数の 1 つとして考えて逐次近似計算によって求める方法 [6] を用いて整数値バイアスを決定する。

RTK-GNSS のアルゴリズムは、衛星と地上基準局との間の搬送波位相の正確な数を計算しようとする。RTK-GNSS による測位では、出力として FIX 解と FLOAT 解という結果を返す。FLOAT 解は、搬送波位相の数を計算する過程

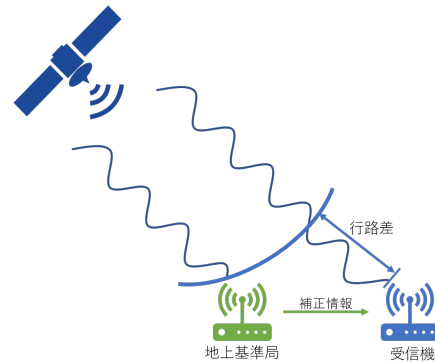


図4 搬送波位相の行路差

で整数値バイアスが定まらない測位解であり、測位精度は最大 5m である [7]。一方で FIX 解は、正確に搬送波位相の数が定まった測位解であり、測位精度はセンチメートルである。FIX 解を算出するためには、一般的に衛星数が十分であり、衛星配置 (DOP) がよく、地上基準局との通信が良好である必要がある。

2.3 DOP について

DOP (Dilution of Precision) とは、図 5 のように衛星配置の良し悪しを示し、値が低いほど衛星配置が良いことを示す。DOP は、PDOP (Position Dilution of Precision)、TDOP (Time Dilution of Precision)、GDOP (Geometric Dilution of Precision) に分類され、それぞれ位置精度劣化度、時刻精度劣化度、幾何学的精度劣化度を示す [8]。なお目安として、GDOP が 5 以下であれば実務上支障のない範囲である [9]。本研究で利用する GDOP 値を算出する式を式 (7) - (9) [10] に、 AZ_n と EL_n は衛星番号 n の方位角と仰角を表す。

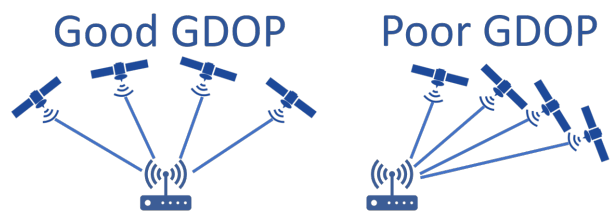


図5 GDOP 値

$$G = \begin{pmatrix} -\sin AZ_1 \cos EL_1 & -\cos AZ_1 \cos EL_1 & -\sin EL_1 & 1 \\ -\sin AZ_2 \cos EL_2 & -\cos AZ_2 \cos EL_2 & -\sin EL_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\sin AZ_N \cos EL_N & -\cos AZ_N \cos EL_N & -\sin EL_N & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$C = (G^T G)^{-1} \quad (8)$$

$$GDOP = \sqrt{C_{11} + C_{22} + C_{33} + C_{44}} \quad (9)$$

2.4 GNSS 受信機について

衛星信号は、L1 (1575.420MHz)、L2 (1226.600MHz)、L5 (1176.400MHz) のようないくつかの周波数帯の中で、

変調された信号が搬送波に乗せられて衛星から放送されている。一般的に用いられるのは L1 周波数帯であり、受信機は受信した信号を受信機内部の同一周波数の信号を用いて復調を行うことで、受信した信号から衛星の位置情報やクロック情報などを取得する。本研究では L1 信号のみを対象とする。

これまでの、コンシューマ向け受信機はコード測位のみ対応するものであったのは、当初は使用可能な衛星数が少なく、搬送波位相を用いた測位が困難であったためである。しかしながら、近年は各国の衛星測位システムの開発が進み、使用可能な衛星数が増え、搬送波位相を用いた測位が現実味を帯びてきた。さらに、搬送波位相測定値を出力する機能を有した受信機が低価格となっていることもあり、ユーザが気軽に搬送波位相を用いた高精度測位を利用可能になってきた。

RTK-GNSS のような干渉型高精度衛星測位には地上基準局が必要となるが、静岡大学木谷研究室は株式会社シーポイントラボの協力の下、静岡大学浜松キャンパスに設置された次世代衛星測位 RTK-GNSS 用基準局データを常時配信する [11] など、条件が合えば、地上基準局の設置は必要ない。また、国土院の GEONET [12] から基準局のデータを公開しているため、後処理解析での利用が可能である。

3. 先行研究 [1]

先行研究では、私の所属する研究チームからより RTK-GNSS 精度予測システムが提案されている [1]。

RTK-GNSS 測位では高精度な位置である FIX 解を算出するためには、十分な数の衛星から信号を良好に直接波として受け取る必要があり、図 6 のように衛星と地上受信機間が遮られている衛星である NLOS (non-line-of-sight) 衛星からの信号を受信することで RTK-GNSS 測位精度は悪くなる。都市部においては、高層ビルが数多く建ち並び、地上受信機は NLOS 衛星からの信号を受信してしまうことで、RTK-GNSS 測位による高精度な測位は難しく、ドローンによる自動配達や測量など精度が求められるようなサービスへの影響が考えられる。そこで、図 7 のように衛星位置は時間とともに変化することから、RTK-GNSS 精度予測システムでは、未来のある地点での RTK-GNSS 測位精度を、その時の衛星位置を 3 次元建築物地図を用いて予測することで、先の問題の解決を図る。

3.1 RTK-GNSS 精度予測システム

RTK-GNSS 精度予測システムへの入力は、時間、受信機位置、衛星の位置、受信機位置付近の 3 次元建築物地図である。図 8 が示すように、ユーザは時間と受信機位置を入力するとことで、入力値の場所と時間の RTK-GNSS 測位予測精度を受け取る。システムは政府が公開している衛

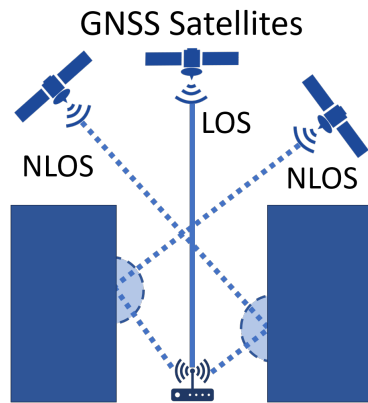


図 6 NLOS 衛星による RTK-GNSS 精度の悪化

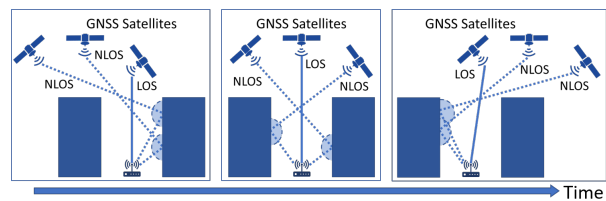


図 7 時間による LOS 衛星の変化

星の位置と OpenStreetMap などの地図アプリから得られる 3 次元建築物地図を RTK-GNSS 精度予測アルゴリズムに入力する。RTK-GNSS 精度予測アルゴリズムでは、自前の RTK-GNSS 測位の精度指標によって、入力値の値から予測精度を出力する。3 次元建築物地図が存在しない場合、受信機位置での観測データの SNR (信号雑音比) を用いて、3 次元建築物地図を作成し、入力し直す。

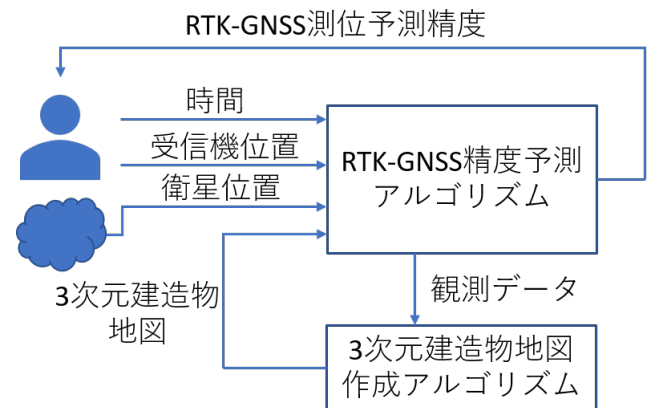


図 8 RTK-GNSS 精度予測システム

4. RTK-GNSS 精度指標の設計

未来のある位置において、RTK-GNSS 測位による FIX 解が得られるか否かは、受信機が捕捉可能な LOS 衛星数と GDOP 値が関係している [1][10]。この 2 つを変数として FIX 解の得やすさの精度指標を設計する。複雑にならないように各変数をそれぞれ 3 段階とし、それぞれの変数の重みの合計が大きくなるにつれて、RTK-GNSS の FIX

解の得やすさを表すように次節による実験により、境界線と重みを導出した。設計した精度指標を表 2 に示す。

表 2 提案する精度指標

(Proposed Score)		RTK Possible		
		Poor	Normal	Good
LOS Satellites	Quantity	< 8(0)	8-11(2)	> 11(4)
	DOP	> 5(0)	3-5(1)	< 3(2)

4.1 精度指標設計のための実験方法

オープンスカイ環境の受信機から実測値を取得し、LOS 衛星数が変化せず、GDOP 値が低く、SNR (信号雑音比) が高い時間帯を切り取る。そこから、建物に隠れてしまう可能性のある仰角 60 度以下かつ方位角が近い衛星をまとめ、排除する衛星の組み合わせを測位ソフトウェアである RTKLIB[13] のオプションに指定し、FIX 率を算出するシステムを構築し、実験を行った。様々なシチュエーションでの FIX 解の得やすさを導出するために、衛星を選択的に排除することによって、あたかも衛星が建物などの障害物に遮られ、可視できなくなる状況を生み出した。衛星排除パターンの例を図 9 に示す。赤色の一点鎖線は線以下に位置する衛星を排除する仰角マスクを表し、緑色の破線は仰角 60 度を表し、青色の実線に囲まれた衛星は排除する衛星を表す。この例では G (GPS) R (GLONASS) E (Galileo) から受信し、{G27}, {G16}, {E02・R10}, {G01}, {R22・G11}, {G07}, {G30} の組合せパターンで衛星の排除を行う。なお G27 であればアメリカの測位衛星システム GPS の 27 番の衛星を指す。GDOP 値は搬送波測位における各データ取得タイミングであるエポック (Epoch) ごとに計算し、切り取った時間帯の平均を取る。実験環境を表 3 に示す。

表 3 精度指標設計における実験環境

日時 使用時間	2017/12/01, 02, 04, 05 の 4 日間 測位頻度 1Hz (のべ 7200 エポック)
測位演算 プログラム	RTKLIB ver2.4.3 b23, RNX2RTKP, 1 周波 L1, Kinematic, Continuous モード, 仰角マスク 20 度
受信機	Trimble NetR9
使用衛星 システム	GPS, GLONASS, Galileo
観測地点 (固定点)	静岡大学浜松キャンパス 情報学部 2 号館屋上 (静岡県浜松市中区城北 3-5-1)
補正用 電子基準点	国土地理院 S 浜松 (基線長 5.053km) (静岡県浜松市東区天王町)

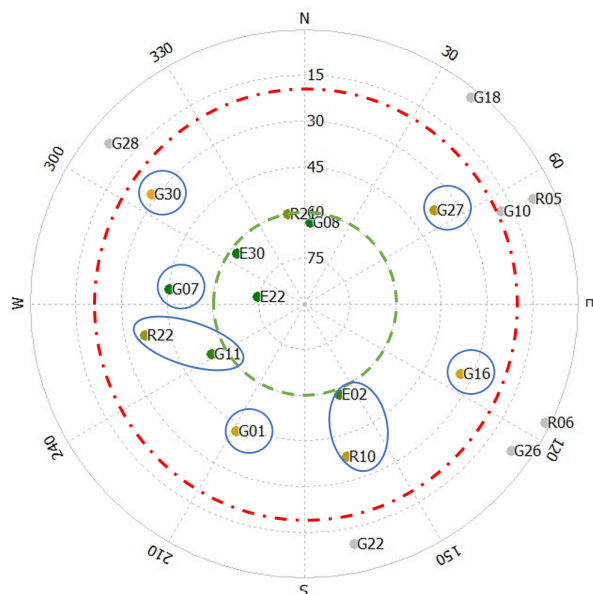


図 9 衛星排除パターンの例

4.2 精度指標設計における実験結果

本節の実験より導出された、LOS 衛星数と GDOP 値による FIX 解の得やすさを図 10 に示す。図 10 より、FIX 解の得やすさが大きく変化する境界は、LOS 衛星は 12 と 11, 8 と 7 の間であり、GDOP 値は 3 と 5 であることが分かる。よって、精度指標の境界を表 2 のように設定する。

次に、精度指標の境界を設定し、本節の実験での測位結果を各変数の境界ごとにプロットしたものを表 4 と図 11 に示す。図 11 より、LOS 衛星数が Good の時と GDOP 値が Good の時から、変数のどちらかが Normal に下がった時、LOS 衛星数が Normal に下がった時のほうが、GDOP が Normal に下がったときよりも FIX 解が得にくいことが分かる。よって、重みを表 2 のように設定し、各変数の重みの合計を精度指標として扱う。

図 11 において、LOS 衛星数が Good, GDOP 値が Normal の時や、LOS 衛星数が Good, GDOP 値が Poor の時は、LOS 衛星の配置が極端に偏っている場合であるため、稀なケースとなり、信頼区間が大きかったりと、そのケースを再現できていない。

5. 精度指標の評価実験方法

4.1 節と同様な方法で、別の日に新たに取得した実測値から、RTK 演算を行い、LOS 衛星数と GDOP 値による FIX 解の得やすさを算出する。実測値の取得環境を表 5 に示す。算出した値を提案した精度指標に当てはめることで、提案した精度指標と実際の FIX 解の得やすさに整合性が取れているかを確認する。また、今回の実験では真値が静止で既知であることからミス FIX 解を特定できる。ミス FIX 解とは、測位位置が真位置から大きく外れているにもかかわらず FIX 解として得られてしまう測位結果のことである。日本の準天頂衛星みちびきが目指す水平測位精

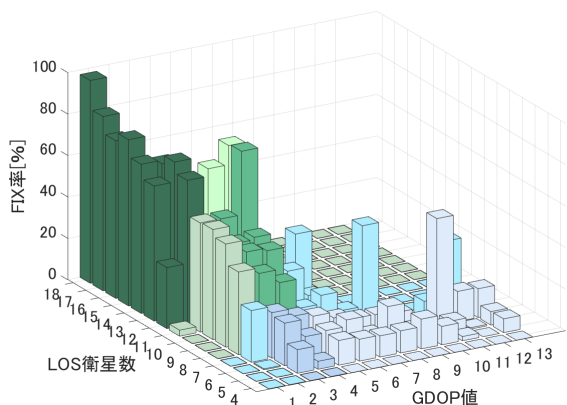


図 10 LOS 衛星数と GDOP 値による FIX 解の得やすさ

表 4 精度指標の境界ごとの FIX 解の得やすさ

LOS Satellites		Obtained fix rate[%]	Epoch
Quantity	GDOP		
Good	Good	71.70	483,300
Good	Normal	62.14	6,300
Good	Poor	0.00	900
Normal	Good	50.48	648,000
Normal	Normal	41.44	545,400
Normal	Poor	20.31	72,900
Poor	Good	21.32	24,300
Poor	Normal	19.03	172,800
Poor	Poor	12.49	206,222

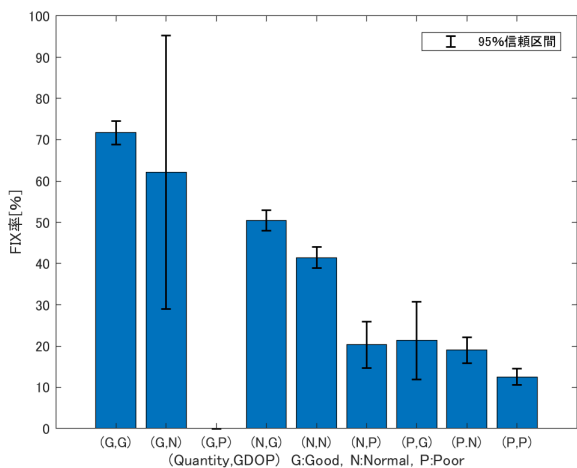


図 11 精度指標の境界ごとの FIX 解の得やすさ (表 4 のグラフ化)

度が 6cm[14] であることから、推定真位置から 6cm 以内の FIX 解のみを指標の評価に採用することで、ミス FIX 解の影響を排除した。

5.1 精度指標の評価実験結果

算出した値を精度指標に当てはめたものを、表 6 と図 12

表 5 精度指標評価における実験環境

日時 使用時間	2017/12/28, 29, 30, 31 の 4 日間 測位頻度 1Hz (のべ 7200 エポック)
測位演算 プログラム	RTKLIB ver2.4.3 b23, RNX2RTKP, 1 周波 L1, Kinematic, Continuous モード, 仰角マスク 20 度
受信機	Trimble NetR9
使用衛星 システム	GPS, GLONASS, Galileo
観測地点 (固定点)	静岡大学浜松キャンパス 情報学部 2 号館屋上 (静岡県浜松市中区城北 3-5-1)
補正用 電子基準点	国土地理院 S 浜松 (基線長 5km) (静岡県浜松市東区天王町)

に示す。以下より、精度指標値が下がるにつれて、正しい FIX 解が得にくくなっていることから、概ねの整合性が取れていることが分かる。

表 6 提案した精度指標の評価結果

LOS Satellites		Proposed Score	Obtained fix rate[%]	Epoch
Quantity	GDOP			
Good(4)	Good(2)	6	80.12	1,132,200
Good(4)	Normal(1)	5	75.47	17,100
Good(4)	Poor(0)	4	42.42	1,019,700
Normal(2)	Good(2)	4	42.42	1,019,700
Normal(2)	Normal(1)	3	27.41	533,649
Normal(2)	Poor(0)	2	11.76	131,629
Poor(0)	Good(2)	2	11.76	131,629
Poor(0)	Normal(1)	1	6.31	211,439
Poor(0)	Poor(0)	0	0.60	271,721

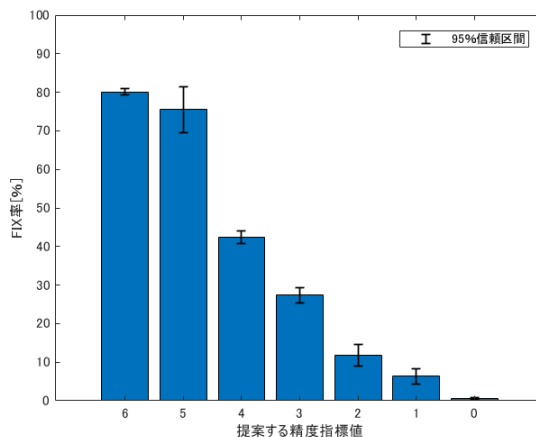


図 12 精度指標と FIX 解の得やすさ (表 6 のグラフ化)

6. まとめと今後の課題

本研究では、実測値を元に RTK-GNSS 測位における精度指標を設計し、評価を行った結果、提案した精度指標と FIX 解の得やすさに整合性が確認できたことから、FIX 解の得やすさは、LOS 衛星と GDOP 値からある程度予測できることを確認した。

今後の課題として、精度指標を改善するため、多くの観測データを適用し、各変数の境界と重み、新たな基準の設定を精査する必要がある。さらに、LOS 衛星数と GDOP 値以外にも FIX 解の得やすさに影響を与える要因を調査し、新たな変数として精度指標に追加する。また、本研究では 3 次元地図によって NLOS 衛星を完全に排除できる仮定の元、精度指標を設計・評価したが、NLOS 衛星を排除できなかった場合の FIX 解の得やすさも検証する必要がある。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 17H01731 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Areeyapinun, T.: A Framework of a Precision Forecasting System for RTK-GNSS as Its Support Infrastructure, 静岡大学大学院総合科学技術研究科情報学専攻修士論文 (2017) (指導教員: Kitani, T.).
- [2] 内閣府: 航法の歴史 (8) マルチ GNSS の登場, みちびき (準天頂衛星システム: QZSS) 公式サイト, 入手先 <http://qzss.go.jp/column/column08_160425.html> (参照 2018/01/25).
- [3] 荒井 修: 平成 29 年度 測位航法学会 セミナー資料 GNSS 受信機の概要, pp.II1-II37, AAI-GNSS 技術士事務所 (2017).
- [4] 測位衛星技術株式会社: GNSS の基本知識, 入手先 (<<https://gnss.co.jp/wp-content/uploads/2016/07/ddd790b4eae745d43594c4f302b14761.pdf>>) (参照 2018/01/25).
- [5] Takasu, T.: 搬送波位相測定値による精密測位の理論及び解析処理, 測位衛星による高精度測位技術の研究開発, 入手先 <http://gpspp.sakura.ne.jp/tutorial/html/gps_symp_2005.2.htm> (参照 2018/02/11).
- [6] 富永 麗司: LAMBDA 法によるアンビギュイティ決定に関する研究, 東京海洋大学商船学部流通情報工学課程卒業論文 (2005) (指導教員: 安田 明生).
- [7] Hall, K.W., Gagliardi, P. and Lawton D.C.: GPS accuracy part 2: RTK float versus RTK fixed, CREWES Research Report - Volume 22 (2010).
- [8] Misra, P., Enge, P.: GLOBAL POSITIONING SYSTEM Signals, Measurements, and Performance, Ganga-Jamuna Press, Massachusetts (2006). 測位航法学会 (訳): 精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機 改訂 第 2 版, 松香堂書店, (2010).
- [9] 滝上 洋之, 渡部 毅: GPS 測量ダメ話 7, 伊予の調査士トップボ話, 入手先 <<http://www.geocities.jp/toppobanasi/page374.html>> (参照 2018/02/11).
- [10] 平山 検士, 佐田 達典, 石坂 哲宏: RTK 測位に関するシミュレーションシステムの構築, 第 37 回土木学会関東支部技術研究発表会, p.IV-83 (2010).

- [11] 静岡大学木谷研究室, 株式会社シーポイントラボ: HAMAMATSU-GNSS (浜松 GNSS), 入手先 <<https://hamamatsu-gnss.org/>> (参照 2018/01/25).
- [12] 国土地理院: 電子基準点データ提供サービス, 入手先 <<http://terras.gsi.go.jp/>> (参照 2018/01/25).
- [13] Takasu, T.: RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, 入手先 <<http://www.rtklib.com/>> (参照 2018/01/25).
- [14] 内閣府: センチメートル級測位補強サービス, みちびき (準天頂衛星システム: QZSS) 公式サイト, 入手先 <<http://qzss.go.jp/technical/system/l6.html#section02>> (参照 2018/01/25).