二重差タイトカップリング相対測位における外れ値検出手法の研究

板 東 幹 雄*・川 股 幸 博*・大須賀 公 一**

Study of Fault Detection in Double Difference Tight Coupling Relative Positioning

Mikio BANDO*, Yukihiro KAWAMATA* and Koichi OSUKA**

In this paper, the proposed fault detection method detected outliers of the pseudo-range which are one of the problems in tight coupling relative positioning. The tight coupling relative positioning is a technique to calculate a relative position using the velocity vector of the each antennas traveling, and the pseudo-range was calculated by the propagation delay time from the satellite observed from two GNSS antennas. The proposed fault detection of pseudo-range considers an innovation process to be one signal in the tight coupling using the motion of GNSS antenna state and tries to isolate the signal by using the stationarity state. The proposed method judge the stationarity state to have an effect such as the cycle-slip or the multi-path when a signal was able to separate and handle the signals for outliers. The effect of the proposed method was inspected by using a vehicle. As a result, the proposed method proved that the technique was particularly to effective in the area where there were few common visible satellite number. On the other hand, the proposed method had less efficient in the area where there were many common visible satellites, thus it was necessary to devise a more suitable techniques such as combining plural techniques.

Key Words: GNSS, fault detection, tight coupling, relative positioning

1. はじめに

近年、あらゆる機器がネットワークで繋がる IoT (Internet of Things) が科学技術の共通基盤となるとされ、超スマート社会「Society 5.0」においても、その活用について検討が進められている。IoT の活用は移動体の分野において多くの事例があり、自動車、建設機械、農業機械やロボットなどで、自動運転、ガイダンス機能などのアプリケーション開発の機運が高まりつつある。これら屋外での移動体ではその位置推定技術が重要な要素となっている。屋外における位置推定としては、GPS、GLONASS などを用いた衛星測位 (GNSS: Global Navigation Satellite System) を用いることが一般的である。GNSS を用いたアプリケーションを例に挙げると、農業機械分野では衛星測位ガイダンスや自動操舵装置、建設機械分野では ICT 活用工事などに応用され始めており、近年急速に伸び始めている¹⁾。この GNSS も IoT を活用し、他端末と繋がることにより、高度化されることが期待されている。

GNSS を用いた位置推定には大きく分けて、擬似距離によ

る測位²⁾と搬送波による測位³⁾が存在する。搬送波測位の例としては、高精度な位置決めが必要な場合に使用される公称誤差 2 cm といわれる RTK (Real Time Kinematic) 測位、近年開発が進められている準天頂衛星などを用いた、高精度単独測位 (PPP: Precise Point Positioning) などがある。これら高精度な測位を実現するためには、整数値バイアス⁴⁾を推定し一意に決める必要がある。一方で、数 cm の精度が不要な場合には、擬似距離による測位が用いられることが多い。擬似距離による測位は整数値バイアスを決定するの不需要のため計算量が少なく簡便な手法であり、廉価な受信機でも実現可能なため、小型端末やスマートフォンなどに実装されている。擬似距離による測位は単独では 10 m ほどの誤差が発生するが、基地局で作成する補正情報を用いる相対測位³⁾によって数 m 範囲内の精度を達成することができる。この相対測位の基本原理は、測位衛星から発信される電波に生じる誤差を基地局にて推定し補正情報として配信、測位を実施する端末にて各衛星から受信する電波に生じる誤差を補正情報を用いて修正することである。

IoT 時代と呼ばれるネットワークに繋がることが当然となる時代では、さまざまな位置情報を用いるアプリケーションが急増すると考えられ、従来よりも精度の高い位置情報を提供可能な低価格な受信機が望まれる。低価格な GNSS 受信機でも相対測位による位置の高精度化が可能であるが、その信頼性には課題が残る¹⁾。本稿では、低価格な GNSS 受信機による相対測位の信頼性の向上について検討した結果について

* (株)日立製作所研究開発グループ ひたちなか市堀口 832-2

** 大阪大学大学院工学研究科 吹田市山田丘 2-1

* Research & Development Group, Hitachi, Ltd., 832-2 Horiguchi, Hitachinaka

** Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita

(Received January 22, 2018)

(Revised April 10, 2018)

述べる。

2. 理 論

本章では GNSS を用いた相対測位の課題を述べ、その解決策を提案する。また提案する解決策の理論について説明する。

2.1 同一衛星を用いた相対測位計算

GNSS を用いた相対測位は、ディファレンシャル測位とも呼ばれ、GNSS の測位精度を向上させるために一般的に使われる手法で、既知の位置に固定された基準局を設置し、基準局で観測される衛星の補正情報を生成する。その補正情報を移動局へ通信することで移動局にて観測される衛星信号を補正し、測位計算することで高精度に位置を算出できる。

ディファレンシャル測位の重要な点は、基地局の位置が既知であることである。この位置情報が存在することで衛星と基地局との正確な距離がわかるため、三角測量の原理を用いた測位計算の補正情報が生成可能になる。このディファレンシャル測位を用いることで各アンテナの位置を高精度に測位することが可能であるが、正確な位置が計測された基地局の設置、補正信号の受信などのインフラストラクチャをそろえる必要があり、導入のためのコストが課題となる。そのため、低コストかつ高精度な相対測位を実現する方法が望まれる。

そこで、位置が時々刻々と動くアンテナ同士で高精度に相対位置を算出できる手法について検討する。ディファレンシャル測位では基地局で補正情報が生成できた衛星と同一の衛星を移動局の測位計算に用いることで高精度に位置を算出している。これは相対距離が近ければ、同一衛星で生じる誤差は同じであるという特徴を活用している。この特徴を活かし、本研究における相対測位では基地局の代わりに自身のアンテナ位置を用いて相手アンテナの衛星情報を通信で取得することで相手アンテナとの相対位置を算出する手法を用いる^{5)~7)}ことで、位置が刻々と変化するアンテナの相対位置は高精度に算出することが可能となる。Fig. 1 に本研究における相対測位の誤差の出方を示した概念図を示す。

Fig. 1 に示す相対位置を表わすベクトルの原点にあたる車両 1 では、アンテナで観測される衛星とアンテナ間で生じる電波遅延などによるアンテナ・衛星間距離に生じる誤差によって、位置誤差 ϵ_1 が生じる。また、相対位置を表わすベクトルの終点にあたる車両 2 では、車両 1 で測位演算に用いた同一の衛星を用い、かつ車両 1 側で観測されたアンテナ衛星間距離を元に、衛星・アンテナ間の二重差を用いて電波遅延などの誤差をキャンセルすることで、車両 2 のアンテナ・衛星間距離にも、車両 1 のアンテナ・衛星間距離と同様の誤差が生じることになる。つまり、車両 2 における位置誤差 ϵ_2 は、車両 1 で生じた位置誤差 ϵ_1 と同様の誤差が生じ、相対位置の算出においてはそれぞれのアンテナでの誤差が相殺されることになるため、相対位置が高精度に算出可能となる。

つぎに、この衛星・アンテナ間の二重差を用いる相対位置の算出手法について説明する。

Fig. 1 Concept diagram of proposed relative positioning

2.2 衛星・アンテナ間二重差による相対位置測位

GNSS アンテナ A の位置を直交座標系で $\mathbf{X}_A = (x_A, y_A, z_A)^T$, GNSS アンテナ B の位置を直交座標系で $\mathbf{X}_B = (x_B, y_B, z_B)^T$ とすると、GNSS アンテナ A から GNSS アンテナ B との間の基線ベクトル $\mathbf{L}_{AB} = (l_x, l_y, l_z)^T$ は、 $\mathbf{L}_{AB} = \mathbf{X}_B - \mathbf{X}_A$ と表わされる。

ここで、第 i 衛星が直交座標系で $\mathbf{P}_i = (X_i, Y_i, Z_i)^T$ に位置し、第 i 衛星と GNSS アンテナ A までの距離を ρ_{iA} 、第 i 衛星と GNSS アンテナ B までの距離を ρ_{iB} とすると、第 i 衛星と各 GNSS アンテナまでの距離は、

$$\begin{aligned} \rho_{iA} &= \sqrt{(X_i - x_A)^2 + (Y_i - y_A)^2 + (Z_i - z_A)^2} \\ &= \sqrt{X_{iA}'^2 + Y_{iA}'^2 + Z_{iA}'^2} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho_{iB} &= \sqrt{(X_i - x_B)^2 + (Y_i - y_B)^2 + (Z_i - z_B)^2} \\ &= \sqrt{(X_i - x_A + l_x)^2 + (Y_i - y_A + l_y)^2 + (Z_i - z_A + l_z)^2} \\ &= \sqrt{(X_{iA}' + l_x)^2 + (Y_{iA}' + l_y)^2 + (Z_{iA}' + l_z)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

と表わされる。ここで、各衛星の高度は地上高 20000 km ときわめて高く、この高度に対する GNSS アンテナ A および B の距離が十分に小さいとすると、(2) 式は以下のように近似できる。

$$\begin{aligned} \rho_{iB} &= \sqrt{(X_{iA}' + l_x)^2 + (Y_{iA}' + l_y)^2 + (Z_{iA}' + l_z)^2} \\ &\approx \sqrt{X_{iA}'^2 + Y_{iA}'^2 + Z_{iA}'^2} + \frac{2X_{iA}'l_x + 2Y_{iA}'l_y + 2Z_{iA}'l_z}{2\sqrt{X_{iA}'^2 + Y_{iA}'^2 + Z_{iA}'^2}} \\ &= \rho_{iA} + \frac{X_{iA}'}{\rho_{iA}}l_x + \frac{Y_{iA}'}{\rho_{iA}}l_y + \frac{Z_{iA}'}{\rho_{iA}}l_z \\ &= \rho_{iA} + \begin{pmatrix} \frac{X_{iA}'}{\rho_{iA}} \\ \frac{Y_{iA}'}{\rho_{iA}} \\ \frac{Z_{iA}'}{\rho_{iA}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし, (3) 式における 2 回目の近似には $\sqrt{X'_{iA}{}^2 + Y'_{iA}{}^2 + Z'_{iA}{}^2}$ 周りの 1 次テイラー展開を用いている. ここで, GNSS アンテナ A から第 i 衛星に向かう単位ベクトルを視線ベクトル $\mathbf{g}_{iA}$ とすると,

$$\rho_{iB} = \rho_{iA} + \begin{pmatrix} \frac{X'_{iA}}{\rho_{iA}} \\ \frac{Y'_{iA}}{\rho_{iA}} \\ \frac{Z'_{iA}}{\rho_{iA}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} = \rho_{iA} + \mathbf{g}_{iA} \cdot \mathbf{L}_{AB} \quad (4)$$

となる.

よって, 第 i 衛星と各 GNSS アンテナ間の一重差 $\Delta\rho_{iAB}$ を用いて, 基線ベクトル $\mathbf{L}_{AB}$ との関係は以下のように表わされる.

$$\begin{aligned} \Delta\rho_{iAB} &= \rho_{iB} - \rho_{iA} = \rho_{iA} + \mathbf{g}_{iA} \cdot \mathbf{L}_{AB} - \rho_{iA} \\ &= \mathbf{g}_{iA} \cdot \mathbf{L}_{AB} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで, 第 i 衛星と GNSS アンテナ A の距離測定値である擬似距離には, 第 i 衛星に搭載されている原子時計の誤差 δt_i , GNSS アンテナ A に繋がる GNSS 受信機に搭載されている時計の誤差 δt_A , 電離層における電波遅延時間 I_{iA} , 対流圏での電波遅延時間 T_{iA} , およびノイズなどによる誤差 ϵ_A がのる. よって, 第 i 衛星と GNSS アンテナ A の擬似距離 p_{iA} は以下のように表わされる⁸⁾.

$$p_{iA} = \rho_{iA} + c(\delta t_A - \delta t_i) + I_{iA} + T_{iA} + \epsilon_A \quad (6)$$

ただし, c は光速を表わしている.

第 i 衛星と GNSS アンテナ B の擬似距離 p_{iB} も同様に表わされるので, (7) 式に擬似距離を代入すると, 第 i 衛星に搭載されている原子時計の誤差や, 電離層, 対流圏での電波遅延誤差が打ち消され, 以下のように表わされる.

$$\begin{aligned} \Delta\rho_{iAB} &= \rho_{iB} - \rho_{iA} = p_{iB} - p_{iA} - c(\delta t_B - \delta t_A) + \epsilon_{AB} \\ &= \mathbf{g}_{iA} \cdot \mathbf{L}_{AB} \end{aligned} \quad (7)$$

ただし, ノイズなどによる誤差は, 受信機間で相関がないとして, $\epsilon_{AB} = \epsilon_A - \epsilon_B$ と表わした.

さらに, 各 GNSS 受信機に搭載されている時計の誤差 δt_A , δt_B は, 衛星とは無相関であるため, 第 j 衛星と各 GNSS アンテナ間の一重差 $\Delta\rho_{jAB}$ と $\Delta\rho_{iAB}$ の差分をとり, 二重差とすることで打ち消すことができる.

$$\begin{aligned} \Delta\rho_{iAB} - \Delta\rho_{jAB} &= p_{iB} - p_{iA} - c(\delta t_B - \delta t_A) + \epsilon_{AB} \\ &\quad - p_{jB} + p_{jA} + c(\delta t_B - \delta t_A) - \epsilon_{AB} \\ &= p_{iB} - p_{iA} - p_{jB} + p_{jA} \\ &= (\mathbf{g}_{iA} - \mathbf{g}_{jA}) \cdot \mathbf{L}_{AB} \end{aligned} \quad (8)$$

第 i 衛星および第 j 衛星の位置がわかれば, 求めたい変数は基線ベクトルの三つと, 視線ベクトルで用いる GNSS アンテナ A の三次元位置の合計六つである. よって, 相対位置を計測する二つの GNSS アンテナにて, 七つの共通衛星を観測できた場合には独立な方程式が六つ成り立ち, 基線ベクトル

$\mathbf{L}_{AB}$ を最小二乗法などにより求めることができる.

2.3 タイトカップリングによる相対位置測位

前節では衛星とアンテナとの距離を用いる手法で相対位置を計算する手法を示した. しかし, 七つの共通衛星が必要となり, 測位できる可能性が低くなることに欠点がある. そこで, 共通衛星が少なくても相対位置を計算できるように, アンテナの移動ベクトルを計測し, 直接方程式に加えることで少ない共通衛星でも相対位置を測位可能な手法を示す.

まず, 未知変数として存在しているアンテナ位置 (三変数) を削減することを考える. アンテナ位置は (8) 式から, アンテナ A の視線ベクトル $\mathbf{g}_{*A}$ でのみ使用されているため, アンテナ A の一つだけわかればよい. そこで, アンテナ A の位置を以下の方法で推定する.

- (1) アンテナ A が観測した衛星との距離四つ以上を用いて測位計算する.
- (2) 推測航法により過去のアンテナ A の位置から現在のアンテナ A の位置を推定する.

一つ目の方法は, GNSS アンテナ A がある時刻において観測した衛星から, 擬似距離を算出し, 測位計算をすればよい. ただし, もう一方の GNSS アンテナ B で共通衛星を使用する都合, GNSS アンテナ A で各衛星を観測した時刻と同時刻に GNSS アンテナ B においても同じ四衛星以上を観測していることが必要である. しかし, この条件をすべてのサンプリング時刻で達成することは難しく, 条件がそろわない場合は相対位置の算出ができなくなる. この相対位置算出が不可能な区間の補間のため二つ目の方法を用いる. 二つ目の方法は, 過去のアンテナ位置を速度ベクトルなどにより更新する手法であり, アンテナの移動を考慮に入れて 1 サンプル前のアンテナ位置からの移動ベクトルを計測することで, 現在の位置を推測できる.

これらから求めた現在位置と各衛星との擬似距離の値から, 最尤推定などにより相対距離を求める. 衛星とアンテナ間の距離から測位した値と, 速度ベクトルによる変化を最尤推定するルーズカップリングに対して, 上記のような衛星とアンテナ間の距離の変化を速度ベクトルなどを用いて更新し測位する方式を, タイトカップリングという⁷⁾. このタイトカップリングを用いることで, 最低四つの共通衛星が存在すれば測位可能となる. さらに, アンテナ B の移動ベクトルも使用すれば, 相対距離の推定値が求まり, この推定値の補正をかける意味では最低二つの共通衛星を用いることで測位が可能となる.

タイトカップリングを用いたディファレンシャル測位計算は, 前節における計算順序と同じである. (2) 式におけるアンテナ位置は以下のように更新する. たとえばアンテナ A の位置 (x_A, y_A, z_A) が地表のある点を原点とした座標系の速度ベクトル (v_e, v_n, v_u) で dt のサンプル時間だけ移動したとする. このとき, 時刻 t におけるアンテナ位置は以下のように表わすことができる.

$$\begin{pmatrix} x_A(t) \\ y_A(t) \\ z_A(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_A(t-1) \\ y_A(t-1) \\ z_A(t-1) \end{pmatrix} + \sum_{t=T_0}^t \begin{pmatrix} v_e(t) \\ v_n(t) \\ v_u(t) \end{pmatrix} dt \quad (9)$$

このアンテナ位置を用いて、視線ベクトル行列を以下のよう求める。

$$\begin{pmatrix} G_{x_{ij}} \\ G_{y_{ij}} \\ G_{z_{ij}} \end{pmatrix} = \frac{(X'_{iA}, Y'_{iA}, Z'_{iA})^T}{\sqrt{X'^2_{iA} + Y'^2_{iA} + Z'^2_{iA}}} - \frac{(X'_{jA}, Y'_{jA}, Z'_{jA})^T}{\sqrt{X'^2_{jA} + Y'^2_{jA} + Z'^2_{jA}}} \quad (10)$$

(10) 式をすべての衛星の独立な組み合わせに対して求め、一つの行列にまとめ、(11) 式から擬似距離差ベクトル $\mathbf{P}(t)$ 、相対位置ベクトル $\mathbf{L}(t)$ によって表わすと以下になる。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(t) &= \begin{pmatrix} \vdots \\ p_{iB} - p_{iA} - p_{jB} + p_{jA} \\ \vdots \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{x_{ij}} & G_{y_{ij}} & G_{z_{ij}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Lx_{AB} \\ Ly_{AB} \\ Lz_{AB} \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{G} \bullet \mathbf{L}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

また、相対位置ベクトルも時間の経過により変化する。相対位置ベクトルの更新はアンテナ A とアンテナ B の相対速度ベクトルから求め、以下のように表わされる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} Lx_{AB}(t) \\ Ly_{AB}(t) \\ Lz_{AB}(t) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} Lx_{AB}(t-1) \\ Ly_{AB}(t-1) \\ Lz_{AB}(t-1) \end{pmatrix} \\ &+ \left(\begin{pmatrix} v_{Be}(t) \\ v_{Bn}(t) \\ v_{Bu}(t) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} v_{Ae}(t) \\ v_{An}(t) \\ v_{Au}(t) \end{pmatrix} \right) dt \end{aligned} \quad (12)$$

(12) 式を更新式、(8) 式を観測式としてカルマンフィルタを構築することでタイトカップリング方式の相対測位を計算することができる。

以上のように、同一衛星を用いて相対位置を算出することで簡易にかつ高精度に相対位置を算出することが可能となる。

2.4 タイトカップリング相対測位における外れ値除去手法

カルマンフィルタを用いたタイトカップリング相対測位では、相対位置を二つの移動体における速度ベクトルで更新し、擬似距離差を観測値として用いる。観測値である擬似距離差の誤差の大きさは、受信機から出力される値を用いることが可能であるが、時として想定以上の誤差が含まれ、最尤推定の結果に大きな誤差をもたらすこととなる。そこで、このような観測値を外れ値として除去する必要がある。外れ値の除去

には一般的に χ^2 検定などの統計的手法を用いた手法が多く使われる^{9), 10)}。この検定の元となる分布は、車両の車輪速度や GNSS のドップラー速度などを用いて生成される速度ベクトルから求めた相対位置の誤差分布である。この分布は、多くの場合、偏った誤差や数式化が困難な現象のために生じる誤差が含まれ、正規分布とならずに、正常な値を外れ値と誤判定する。われわれはこのような誤差や現象が発生する場合の外れ値除去手法を提案している¹¹⁾。

提案手法では GNSS 受信機が出力する位置の時系列の定常性から同時無相関化により、信号分離を試み、信号が分離できる場合には外れ値が含まれると判断する手法を採用している。これをタイトカップリングに適用し、二つの GNSS 受信機が出力する擬似距離差に対して、定常性を確認し、外れ値が含まれると判断できる擬似距離差を用いないことにした。

具体的な計算方法を以下に示す。

Step 1. 観測値ベクトル $\mathbf{P}(t)$ の取得

GNSS 受信機からの擬似距離を取得し、(8) 式により擬似距離差を計算し、左辺を観測値ベクトル $\mathbf{P}(t)$ とする。

Step 2. 状態変数ベクトル $\mathbf{L}(t)$ のアップデート

(12) 式右辺を計算し、左辺を状態変数ベクトル $\mathbf{L}(t)$ とする。

Step 3. イノベーション $\mathbf{e}(t)$ の計算

(8) 式右辺に Step.2 でアップデートした状態変数ベクトルを代入し、観測値から引くことでイノベーション $\mathbf{e}(t)$ を計算する。 $\mathbf{e}(t) = \mathbf{P}(t) - \mathbf{G} \bullet \mathbf{L}(t)$

Step 4. イノベーションの時系列を一定区間分蓄積

イノベーションを一定区間 (たとえば m ステップ分) だけ、蓄積する。

$$\mathbf{R}_m = \frac{1}{m} \sum_t^{t+m} (\mathbf{e}(t))(\mathbf{e}(t))^T \quad (13)$$

$$\mathbf{R}_n = \frac{n}{m} \sum_{t=t_p}^{t_p+n} (\mathbf{e}(t))(\mathbf{e}(t))^T \quad (14)$$

ここで $\mathbf{R}_m$ はイノベーションの時系列の自己相関行列を形成するための長時間窓であり、 $\mathbf{R}_n$ はイノベーションの時系列の最近小区間窓である。本研究においては、長時間窓は $m = 11$ ステップ、最近小区間窓 $n = 3$ ステップとした。長時間窓は対象とする信号が定常的である範囲で選択する必要がある。本研究では 10 Hz のサンプリング周期で通常走行する自動車の運動を前提に考えるため、1 秒程度であれば定常運動であると考え 11 ステップとした。最近小区間窓は、信号の分離を考えて長時間窓の半分以下、かつ後述の固有値の数にかかわっているため、少なくとも 2 ステップ以上が必要である。またステップ数が大きくなると計算時間がかかるため、本研究では 3 ステップとした。

Step 5. 定常性の判断

長時間窓で形成したイノベーションの自己相関行列と小区間窓で形成したイノベーションの窓で形成したベクトルとで同時無相関化を用いた定常性の判断により、信号の分

離を試みる．同時無相関化は以下のように，正規化された固有値行列 B の存在を仮定して固有値を求める．

$$R_m = R_n \lambda \Leftrightarrow B R_m B^T = B R_n B^T \lambda \quad (15)$$

$$R_m B^T = R_n B^T \lambda \quad (16)$$

固有値は小区間窓の長さ分だけ求めることができ，固有値の数が複数ある場合，信号が分離可能であると判断する．ここで，固有値の数は，すべての固有値を正規化し，その最大値が閾値よりも大きいかどうか，および正規化された固有値の最大値と 2 番目に大きな値との差が閾値よりも大きいかどうかの二つの基準で判断する．本研究では，正規化された固有値は最大値は 0.6 より小さい，もしくは最大値と 2 番目に大きな値との差が 0.4 より小さい値であれば分離可能であるとした．正規化された固有値において，全体の 6 割以上の大きさ，かつ 2 番目に大きな固有値の三倍以上の大きさをもつ固有値が一つある場合，支配的な信号が一つだけであると判断できると考え，上記の値を設定した．

Step 6. 擬似距離差行列へのノイズ設定

対象とする擬似距離差のイノベーション時系列が分離可能であった場合，その擬似距離差行列の誤差共分散行列の対象要素を無限大に設定（プログラム上は 10^{10} ）する．

Step 7. タイトカップリング計算

以上のステップを踏むことで，マルチパスやサイクルスリップなどの外れ値を含む信号を検出し，除去することで精度よく相対位置を算出することができる．

3. 実験結果と考察

本章では提案した相対測位の精度検証のため，乗用車を用いた実験した結果について述べる．

3.1 実験場および設備の概要

提案した相対測位手法の従来手法に対して有利な点や不利な点を明らかにすべく，実際に GNSS のデータを計測しその効果を確認した．相対位置を算出するために使用した GNSS 受信機は，廉価な一周波測位受信機を用いた．計測機器の構成を Fig. 2 に示す．

Fig. 2 GNSS receiver overview

使用している GNSS 受信機からは出力レート最大 10 Hz, GPS/GLONASS それぞれの L1 信号を受信可能である．また，出力可能なメッセージは NMEA³⁾と RTCM ver3⁴⁾の一部（Message Type 1004, 1006, 1008, 1012, 4002, 4010,

1019, 1020）である．

試験場は Fig. 3 に示すような走行経路であり，南北方向に約 1 km，東西方向には約 300 m の経路である．試験場の北東に位置する経路は山林エリアであり，山林エリアを除く走行経路の多くは天空が開けた平坦な未舗装路である．

Fig. 3 Test course overview

本試験で用いた乗用車は Fig. 4 に示すような 2 種類の一般乗用車を活用し，実験車両とした．実験車両には，GNSS アンテナ，GNSS 受信機，GNSS 衛星情報を送受信するため無線アンテナなどを搭載した．実験車両の速度や操舵角情報は，車両のデータ通信に利用される CAN バスを記録媒体に接続し保存した．すべてのデータは GNSS から得られる時刻情報をもとに同期することができる．相対測位のため，もう 1 台，同様の車両を準備した．試験は Fig. 4 に示すように自車両となる車両のほか，他車両となる車両を 1 台準備し，環境の異なった複数の場所において走行し，自車両から相手車両の位置を算出した結果を評価した．まず，提案方式の基本的な性能を評価するため，サイクルスリップなどの検出方式を用いない場合と比較した．つぎに，提案方式の現実的な使用方法について考察するため，従来のサイクルスリップ検出方式¹²⁾を適用した場合と比較した．そして，現実的な使用方法での提案方式の性能を示すため，従来方式と提案方式を組み合わせた方式と従来方式のみの場合の相対位置精度を比較した．

実験車両に搭載した GNSS 計測装置の構成を Fig. 5 に示す．基地局および 2 台の車両に搭載した GNSS アンテナは，GPS/GLONASS の L1, L2 周波数帯をすべて受信可能な Novatel 社製 GPS-702-GG を用いた．また，GPS ケーブルスプリッタ (GPS Source 社 S14) を用いて，GNSS アンテナで受信した信号を，一周波 GNSS 受信機とリファレンス用 GNSS 受信機の二つに分配した．リファレンス用 GNSS 受信

Fig. 4 Experimental vehicles

機は Novatel 社 SPAN-CPT を用いた。これらの GNSS 受信機は同一の衛星信号を上記 GPS ケーブルスプリッタにより分配することで、同時刻の測位精度を比較できる。

Fig. 5 Experimental components and connection

リファレンス用受信機の Novatel 社 SPAN-CPT は GPS の二周波 RTK 測位が可能であり、内蔵された光ファイバジャイロを搭載した IMU を同時に計測することができる。これらのデータは、Novatel 社の後処理ソフト Inertial Explore で解析し、SPAN-CPT を用いた後処理により、水平位置精度 0.01 m、速度精度 0.02 m/s、姿勢精度（ロール角、ピッチ角）0.015 deg、方向精度 0.03 deg で値を算出することが可能¹³⁾であり、各アンテナにおける真値として用いた。

3.2 実験結果

従来手法と提案手法を用いた相対測位の実験結果を以下に示す。

3.2.1 提案手法適用時の効果検証

まずは、擬似距離の外れ値除去をしない場合と、提案手法を用いて擬似距離の外れ値を除去した場合で、提案手法によるデメリットの有無について検証した。

総合的な性能を評価するため、テストコース全域を走行したデータを用いて検証した。Fig. 6 に計測を開始してからの各時刻における相対距離誤差を示す。

相対距離は、自車両のアンテナ位置を原点とし、他車両のアンテナ位置までの二次元平面上で表わされる相対位置ベクトルの長さで定義した。各アンテナの真値となる位置の差分によって得られる相対距離を真の相対距離として、相対測位によって得られる相対距離と、真の相対距離との差を相対距

Fig. 6 Confirmation of the proposed method efficiency

離誤差とした。

縦軸は相対距離誤差、横軸は走行開始からの時間である。

Fig. 6 より、提案手法と外れ値除去しない場合とを比較すると、多くの時間帯において提案手法が精度にはほぼ影響していないことがわかる。しかし、Fig. 7 に示す時刻が計測開始から 225 秒後から 240 秒後までと、Fig. 8 に示す時刻が 295 秒から 325 秒後までの 2 箇所相対距離の精度が大きく改善している。

Fig. 7 Confirmation of proposed method efficiency at time 225-240 s

提案手法によって精度が改善している場所の特徴を調べた結果、精度が改善している時間帯の走行場所はテストコースの北東側の山であり、ちょうど木々が生い茂っている場所であった。Fig. 9 に本手法により相対距離精度が改善した場所の車両内部からの画像を例示する。

山中では車両が走行する道に対して木々が迫っており、天空が開けていないことがわかる。山中を走行中は木々により GNSS 衛星からの電波が部分的に遮断されるため、GNSS 受信機が出力する擬似距離に揺らぎが生じると考えられる。Fig. 10 に両車両に備えた GNSS 受信機が出力する共通可視衛星数の数を示す。

本手法を適用することにより精度が改善する時間帯に共通可視衛星数が大きく減っていることがわかる。共通可視衛星数が多い場合は、元々観測数が多く、カルマンフィルタなどの最小二乗の意味で最適となる手法により外れ値の影響を受けにくいようになっている。一方で、共通可視衛星数が少な

Fig. 8 Confirmation of proposed method efficiency at time 295–325 s

Fig. 9 The view from vehicle inside at the improved location with proposed method

Fig. 10 The visible satellite number while running test cause

い場合は、観測数が少ないため、一つの外れ値が推定結果に大きく影響する。タイトカップリング方式は衛星数が少なくなくても測位計算が可能となる手法であるが、最尤推定を用いて計算している限り、少ない観測値に誤差が含まれている場合、その誤差が推定結果に大きく影響する。提案手法は、この誤差をうまく取り除くことができていると考えられる。

以上から提案手法を衛星測位のタイトカップリング方式へ適用した場合、部分的に衛星数が少なくなる山林などのような場所で効果が発揮できる手法であり、それ以外の箇所では測位精度にほとんど影響を与えない手法といえる。

3.2.2 従来手法との比較

つぎに、従来実施されてきたサイクルスリップなどの検出手法と比較した本手法の特徴について考察する。

Fig. 11 に従来手法と本手法を適用した場合の相対距離の誤差を比較したグラフを示す。用いたデータは前節で用いたデータと同じである。

従来方式では、共通可視衛星数が少なくなる場所で、相対

Fig. 11 Comparing conventional and proposed method

距離精度が上がる場合と変わらない場合がある。たとえば、従来手法では Fig. 12 に示す計測開始から 225 秒後から 240 秒後までは精度は全く改善していない一方で、Fig. 13 に示す 295 秒から 325 秒後までではうまく機能して精度が向上している。

Fig. 12 Comparing conventional and proposed method at 225–240 s

Fig. 13 Comparing conventional and proposed method at 295–325 s

このように、同じような傾向のある場所でも効果にばらつきがあるのは、従来手法がイノベーションの誤差共分散値と閾値とを比較してサイクルスリップを検出しているため、算出される誤差共分散値が過小である場合、閾値との比較で誤判定しやすくなる傾向にあるためだと推測される。特にサイクルスリップやマルチパスなどは衛星配置とは独立の事象であり、タイトカップリング方式で用いる車両の運動から求めた誤差共分散値は小さいまま、想定以上の誤差が出力される

ためこのような現象が起こりやすいと考える。これに対し、提案手法では過去数ステップのイノベーション過程の自己相関行列から、独立な信号の有無を判断する手法であり、過去数ステップに含まれる車両の運動による誤差も含め、異常値の混入を判断することが可能であり、安定して機能しているものと考えられる。

また、Fig. 13 をさらに詳しく見ると、提案手法は可視衛星数が少ない場所では従来手法と同等の精度であったにもかかわらず、共通可視衛星数が回復する際に相対距離精度が悪化していることがわかる。

この区間の共通可視衛星数変化を Fig. 14 にさらに詳しく示す。

Fig. 14 The visible satellite number at 290–325 s

この区間は Fig. 14 より、共通可視衛星数は四衛星以上に回復しつつあるが、増減が頻繁に起こっていることがわかった。共通可視衛星数の増減は単独測位では単純な情報量の増減を意味するが、ディファレンシャル測位では擬似距離の二重差を用いるため、一つの衛星が見えなくなることにより、擬似距離差系列の切り替えが頻繁に起こりやすくなる。

提案手法は過去数ステップのイノベーション過程の自己相関を記憶する。二重差の計算には二つの衛星がかかわるため、その内の一つの衛星が見えなくなると、二重差が途絶えることとなり、イノベーション過程も途絶え、その後しばらくの間は、対象としていた二重差については判定ができなくなる。一方で従来手法は、観測した瞬間のイノベーションの誤差共分散値を用いるため、どのタイミングでもサイクルスリップなどの検出が可能である。

このようなことから、提案手法は共通可視衛星数の変化に弱い傾向があり、そのような場面では従来手法と組み合わせるなど工夫が必要である。

3.2.3 従来手法と提案手法を併用した場合の効果検証

提案手法は部分的に衛星数が少なくなる山林などのような場所で効果が発揮できる手法であり、それ以外の箇所ではほとんど影響を与えない手法であるという特徴を活かし、従来手法と同時に適用することが可能であると考えられる。一方で、衛星変化が生じる場合には、提案手法はうまく機能しない可能性がある。そこで、特に共通可視衛星数が少ない場合

(共通可視衛星数三つ以下)では、提案手法のみを用い、衛星数が多い場合(共通可視衛星数が四つ以上)は、従来手法と提案手法を併用する手法を用いることで、従来手法と提案手法のそれぞれの長所を活かすことが可能であると考え、同データを用いた検証を実施した。Fig. 15 に、従来手法と提案手法を併用した場合の相対距離精度の結果を示す。

Fig. 15 The relative distance accuracy of combination method

これまで同様、共通可視衛星数が少なくなる時間帯のみを Fig. 16 と Fig. 17 に示す。各図の上側には同時間帯の共通可視衛星数の遷移を示している。

Fig. 16 では、共通可視衛星数が四つ以上となる範囲においても、従来手法に提案手法を組み合わせることによって相対距離精度が向上していることがわかる。一方で、Fig. 17 からは、共通衛星数が三つ以下となる範囲でも、従来手法より精度が 0.1 m 程度劣化する現象が見られる。この原因は、直前に 300 秒直前の共通可視衛星数が六つから三つまで急減している最中に、外れ値と判定された衛星信号が多く、実質測位計算に使用された衛星が一つとなっていたためである。これは、従来手法において共通可視衛星数が多いときには誤差共分散が小さくなることが多く、急激な可視衛星数減少による

Fig. 16 The relative distance accuracy of combination method at 225–240 s

Fig. 17 The relative distance accuracy of combination method at 295–325 s

分散値の変化に対応できずにすべて外れ値と判断してすることに起因していると考えられる。このように、共通可視衛星数の急変時はさらなる対策が必要と考える。

共通可視衛星数が三つ以下の場合と四つ以上の場合と全体を通した各手法の相対距離の精度を示す RMS 値を Table 1 にまとめる。

Table 1 Comparing accuracy of relative length: RMS (m)

	Number of Visible Satellite ≤ 3	Number of Visible Satellite ≥ 4	Total
No Fault Detection	0.5082	0.3161	0.3405
Conventional Method	0.5252	0.3111	0.3391
Proposed Method	0.3736	0.3123	0.3191
Combination Method	0.4274	0.2995	0.3149

Table 1 から、共通可視衛星数が三つ以下の場合は、提案手法の効果が大きいことがわかる。従来手法と組み合わせでは、共通可視衛星数の急変時に精度が劣化する場面が見られたため、誤差も 5 cm 程度大きくなっている。また、共通可視衛星数が四つ以上の場合は、大きな外れ値が存在しなかったこともあり、従来手法と提案手法との間に大きな性能差はない結果となっている。提案手法を従来手法と組み合わせた場合の誤差が 2 cm 程度小さくなっているのは、共通可視衛星数が多ければ、外れ値判定によって精度を劣化させる衛星からの信号を省き、かつ測位演算に十分な数の衛星数が確保できるため、精度向上効果があったものと考えられる。

以上の結果から、提案手法は従来手法と組み合わせることで性能を向上させることができる手法であるといえる。

4. 結 論

本論文では、二つの GNSS アンテナにおいて観測される衛星からの伝播遅延時間から計算される擬似距離の二重差分と、それぞれのアンテナの移動量を表わす速度ベクトルを用いたタイトカップリングの手法において、課題となる擬似距離の

外れ値を検出、除去する手法について検討した結果について述べた。

擬似距離の外れ値検出において、アンテナの運動状態を用いたタイトカップリング方式においてイノベーション過程の定常性から信号の分離を試み、信号が分離できる場合はサイクルスリップやマルチパスなどの影響があると判断する手法を提案した。

提案手法による効果を実車両を用いて検証し、提案手法は特に共通可視衛星数が少ない場所において効果を発揮する手法であることを示した。一方、共通可視衛星数が切り替わりやすい場所では、手法の特性上使用が困難であるため、従来のサイクルスリップ手法と組み合わせることで有効に活用できることを示した。

提案手法は、搬送波を用いた測位においても、同様にサイクルスリップなどの検出が可能と考えられる。GNSS を用いた測位手法の中でも PPP や RTK 測位のように搬送波を用いた測位は特にサイクルスリップなどによる誤差がシビアに影響するため、効果が期待できる。今後、精度向上のために搬送波測位計算を導入し、その効果を確認する。

参 考 文 献

- 1) 板東, 小野, 日永田: 1 周波 RTK-GNSS を用いた位置姿勢推定ユニットの開発, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2016, 311-6 (2016)
- 2) 坂井文泰: GPS のための実用プログラミング, 東京電機大学出版局 (2007)
- 3) トランジスタ技術編集部: GPS のしくみと応用技術, CQ 出版社 (2009)
- 4) 杉本, 芝崎: GPS ハンドブック, 朝倉書店 (2010)
- 5) 湯, 筒井, 大山, 三浦, 小花: 都市部における高精度車車間相対測位手法, 信学技報, **110**-425, 1/6 (2011)
- 6) N. Alam, A.T. Balaei and A.G. Dempster: Relative Positioning Enhancement in VANETs, A Tight Integration Approach, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, **14**-1, 47/55 (2013)
- 7) E. Richter, M. Obst and R. Schubert: Cooperative Relative Localization using Vehicle-To-Vehicle Communications, 12th International Conference on Information Fusion, 126/131 (2009)
- 8) P. Misra and P. Enge: 精説 GPS—基本概念・測位原理・信号と受信機, 日本航海学会 GPS 研究会 (2004)
- 9) Z. Dai, S. Knedlik and O. Loffeld: Cycle-slip Detection, Determination, and Validation for Triple-Frequency GPS, IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium, 1060/1066 (2008)
- 10) P. Henkel and N. Oku: Cycle Slip Detection and Correction for Heading Determination with Low-Cost GPS/INS Receivers, International Association of Geodesy Symposia, 142 (2015)
- 11) M. Bando, Y. Ono, Y. Hieida and K. Yamamoto: GNSS fault detection with unmodeled error, Advanced Robotics, **31**-15, 763/779 (2017)
- 12) Y. Kim, J. Song, C. Kee and B. Park: GPS Cycle Slip Detection Considering Satellite Geometry Based on TDCP/INS Integrated Navigation, Sensors, **2015**, 25336/25365 (2015)
- 13) Novatel 社: InertialExplorer カタログ (Web), <https://www.novatel.com/assets/Documents/Waypoint/>

InertialExplorer.pdf (2012)

[著 者 紹 介]

板 東 幹 雄 (正会員)

2004 年京都大学大学院情報学研究科修了。同年 (株) 日立製作所入社, 現在に至る。研究開発グループにて位置推定の研究開発に従事。日本ロボット学会, 自動車技術会各会員。

川 股 幸 博

1993 年神戸大学大学院工学研究科修了。同年 (株) 日立製作所入社, 現在に至る。研究開発グループにて ITS 応用などの研究開発に従事。情報処理学会会員。

大須賀 公 一 (正会員・フェロー)

1984 年大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程 (制御工学) 修了。同年 (株) 東芝入社, 総合研究所勤務。86 年大阪府立大学工学部助手。その後, 講師, 助教授を経て, 98 年京都大学大学院情報学研究科助教授, 2003 年神戸大学工学部教授, 2009 年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻教授となり現在に至る。制御学, ロボティクスなどの研究に従事。日本哲学会, システム制御情報学会, 日本ロボット学会, 日本機械学会などの会員。2008 年日本機械学会フェロー。