RTK-GPS測位における伝送遅延に関する研究

伊勢嶋 潤*・高須 知二**・海老沼 拓史***・安田 明生***

Performance Evaluation of the RTK-GPS Positioning with Communication Delay

Jun ISEJIMA, Tomoji TAKASU, Takuji EBINUMA, and Akio YASUDA

Abstract

Real-time kinematic (RTK) GPS is a technique which allows a mobile user to measure its position with a cm-level precision in real-time by using carrier-phase differential corrections of reference stations. The RTK technique has found a number of industrial applications in the various areas. One of the problems of the RTK-GPS positioning is communication delay between the rover receiver and the reference station. The RTK-GPS system generally requires a continuous wireless transmission link to transmit raw observation data or correction messages from the reference station to the remote rover. Recently, the RTK-GPS has been applied to precise navigation of mobile platforms such as cars or aircrafts. One of the problems in such mobile application environment is communication delay. In this paper, we proposed new methods to correct satellite clock bias and ionospheric delay errors caused by the communication delay. In order to evaluate the proposed methods, we investigated fix rates and positioning accuracy in the existence of up to 30-second communication delay in several baseline lengths.

Keywords : RTK-GPS, Communication Delay

キーワード: RTK-GPS, 伝送遅延

1. はじめに

RTK-GPS 測位を行う際、基準局データを何らかの方法で移動局に伝送する必要があるが、基準局データをどのような方法で伝送しても送信時間を要する。さらに GPS 受信機内での遅延も存在するため、移動局では常に古いデータを用いて測位計算をしている。移動局と基準局の基線長が短く、両局での観測時刻が同期している場合、観測値の二重差を取ることで、受信機時計バイアス、衛星時計バイアス、電離層遅延、対流圏遅延という誤差要因を消去することができる。しかし、基準局と移動局で時刻の同期が取れていない状況では、時間的に変化するこれら誤差要因を二重差によって取り除くことができない

ため、RTK-GPS の測位性能が劣化するという問題がある⁽¹⁾。

そこで本研究では、時間的変動の大きな衛星時計バイアスと電離層遅延について、その時間的変化をモデル化することにより、同期が取れていない観測値に対して補正を行う手法を提案した。さらに、本提案手法により伝送遅延による測位性能の劣化をどの程度抑制できるのか、FIX 率と測位精度について評価を行った。

理想的な条件での本提案手法の効果を評価するために、まずゼロベースラインでの実験を行った。本実験では、取得した基地局と移動局データに対して、意図的に 0 秒から 30 秒の伝送遅延を付加し、測位精

* 学生会員 東京海洋大学 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)

** 非会員 東京海洋大学 産学官連携研究員

*** 正会員 東京海洋大学大学院 ebinuma@kaiyodai.ac.jp

度と FIX 率の劣化の傾向を調査した。次に、基線長の増加に伴う測位性能の劣化についても評価するため、本手法を 10 km から 20 km の短・中基線の観測値に対しても応用し、その効果を確認した。

これら評価試験の結果、どの基線長であっても衛星時計バイアスの補正により FIX 率と測位精度が大幅に改善されることが確認された。しかし、同様に時間変化が大きいと考えられた電離層遅延は、測位性能の劣化にほとんど影響がなく、補正による改善は見られなかった。

本稿では、伝送遅延によって時刻同期の取れていない観測値に対する補正手法の詳細と、実際に観測値を用いた評価試験の結果について報告する。

2. 測位計算

2.1 観測方程式

RTK-GPS に必要な観測値である擬似距離 P と搬送波位相 ϕ は、次式のように表すことができる⁽²⁾。

$$\phi = \rho + c(dt - dT) - I + T + \lambda N + \xi \quad (1)$$

$$P = \rho + c(dt - dT) + I + T + \zeta \quad (2)$$

ここで、 ρ は幾何学距離、 dt は受信機時計バイアス、 dT は衛星時計バイアス、 I は電離層遅延、 T は対流圏遅延、 λ は搬送波の波長、 N は搬送波サイクルの整数値バイアス、 ξ と ζ はそれぞれ搬送波位相と擬似距離の観測雑音である。

RTK-GPS では、観測値に含まれる衛星と受信機の時計バイアスを消去するため、二重差観測値を新たな測定値として導出する。ある時刻に二つの受信機 u, r で受信された二つの衛星 a, b の観測値を考える。これら観測値に対する二重差は、次式で定義される。

$$\phi_{ur}^{ab} = (\phi_u^a - \phi_u^b) - (\phi_r^a - \phi_r^b) \quad (3)$$

$$P_{ur}^{ab} = (P_u^a - P_u^b) - (P_r^a - P_r^b) \quad (4)$$

ここで、各観測地の下付き文字は対応する受信機を、上付き文字は対応する衛星を表している。

二つの受信機間の基線長が短ければ、任意の衛星から受信機までの伝搬経路はほぼ同じとみなすことができる。したがって、受信機間で同時に測定された観測値の差を取ることで、衛星と伝搬経路に関連した誤差である衛星時計バイアス、電離層遅延、対

流圏遅延を取り除くことができる。このような観測値を一般に一重差と呼ぶ。

一重差観測値において、消去されない誤差要因は受信機時計バイアスである。この受信機時計バイアスは、異なる衛星間の一重差観測値の差を取ることで取り除くことができる。このような観測値を一般に二重差と呼び、次式で表すことができる。

$$\phi_{ur}^{ab} = \rho_{ur}^{ab} + \lambda N_{ur}^{ab} + \xi_{ur}^{ab} \quad (5)$$

$$P_{ur}^{ab} = \rho_{ur}^{ab} + \zeta_{ur}^{ab} \quad (6)$$

2.2 搬送波位相による測位

二重差観測値を用いて測位計算を行う際には、移動局の位置ベクトルに加えて、Eq. (5)に示される搬送波サイクルの整数値バイアスの二重差である N_{ur}^{ab}

も未知パラメータとして、最適な整数解を求めなければならない。このプロセスを Ambiguity Resolution (AR) と呼ぶ。また、AR が成功し、その結果得られた移動局の位置ベクトルを FIX 解と呼ぶ^(3,4,5)。

これまでに、様々な AR 手法が提案されているが、どの手法であっても完全に FIX 解を求めることは難しい。AR が不成功となる原因としては、まず基準局と移動局の基線長が挙げられる。二重差観測値においては、二つの受信機で観測される測位信号の伝搬経路が等しいと仮定している。これにより、衛星と伝搬経路に関連した誤差要因を取り除くことができる。しかし、基線長が長くなれば、伝搬経路を等しいとする仮定が成り立たなくなり、二重差観測値から誤差要因を取り除くことが難しくなる。その結果、AR によって正しい整数値バイアスの推定に失敗し、FIX 解を得ることができなくなる。一般に、充分な AR 成功率が得られる基線長は数十 km 程度であることが知られている。

同様の現象は、二重差に用いられる観測値の時刻同期が得られないときにも生じる。二重差観測値において、受信機時計バイアスは受信機間で相関を持たないため、観測時刻の同期に関係なく完全に消去することができる。しかし、衛星時計バイアス、電離層遅延、対流圏遅延は、時間と共に変化するため、時刻同期の取れていない観測値間では異なる値を示すことになる。このような同期の遅延はレイテンシ (latency) と呼ばれ、レイテンシが長いほど二重差観測値に生じる誤差は大きくなる。

RTK-GPS においては、測位計算を行う移動局は基

地局の観測データを何らかの通信手段によって受信しなければならない。したがって、このレイテンシによって生じる二重差観測値の誤差は避けることのできない問題となる。

3. 伝送遅延による誤差の補正

3.1 提案手法の概要

RTK-GPS において、基線長が短く、基準局と移動局で観測時刻が同期している場合にのみ、二重差観測値から衛星時計バイアス、電離層遅延、対流圏遅延を消去することができる。

しかし、基地局から移動局へ観測データを送信するための伝送遅延が存在することにより、二局間で時刻の同期が取れず、衛星時計バイアス、電離層遅延、対流圏遅延の時間的な変化分だけ二重差観測値に誤差が生じることになる。

これら誤差要因の中で、衛星時計バイアスと電離層遅延は、時間的な変化が特に大きい。そこで、本研究では、これら二つの誤差要因の時間的変動モデルから伝送遅延の間に生じる誤差を推定し、補正することを考える。

3.2 衛星時計誤差の補正

短時間であれば衛星時計バイアスは線形的に変化するものと仮定し、航法メッセージに含まれている GPS 衛星時計補正係数の一次の項 a_{f1} を用いて、次式のように衛星時計バイアスの補正を行った。

$$\bar{\phi}_r^a(t) = \phi_r^a(t - \Delta t) + ca_{f1}^a \Delta t \quad (7)$$

$$\bar{P}_r^a(t) = P_r^a(t - \Delta t) + ca_{f1}^a \Delta t \quad (8)$$

ここで、 Δt は伝送遅延、 ϕ_r^a と P_r^a は基地局より送信された伝送遅延を含む搬送波位相と擬似距離観測値、 $\bar{\phi}_r^a$ と $\bar{P}_r^a$ は衛星時計バイアス補正後の観測値である。

3.3 電離層遅延誤差の補正

電離層遅延誤差の補正を行うために、まずは 2 周波観測値の幾何学フリー線形結合から電離層遅延を求めた。幾何学フリー線形結合とは、L1 帯および L2 帯の異なる周波数で受信された観測値に適当な係数を掛けて線形結合することにより、観測値から周波数に依存しない幾何学距離、衛星時計バイアス、

受信機時計バイアス、対流圏遅延の項を消去し、電離層遅延と整数値バイアスの項のみを抽出する手法である。

搬送波位相および擬似距離の幾何学フリー結合によって得られる電離層遅延成分である ϕ_{GF} と P_{GF} を、それぞれ次式に示す。

$$\begin{aligned} \phi_{GF}^a &= \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} (\phi_{L2}^a - \phi_{L1}^a) \\ &= I_{L1}^a + \lambda_{GF} N_{GF}^a + \zeta_{GF}^a \end{aligned} \quad (9)$$

$$P_{GF}^a = \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} (P_{L2}^a - P_{L1}^a) = I_{L1}^a + \xi_{GF}^a \quad (10)$$

ここで、 f_{L1} と f_{L2} はそれぞれ L1 帯と L2 帯の搬送波周波数である。同様に、他のパラメータの下付き文字は、対応する周波数帯を示している。

幾何学フリー線形結合により、電離層遅延成分が抽出されているが、新たな雑音成分である ξ_{GF}^a およ

び ζ_{GF}^a や、整数値バイアス N_{GF}^a が生じてしまう。これら不要な成分を効率的に取り除くために、整数値バイアスを含まない擬似距離の幾何学フリー線形結合を、雑音成分は小さいが整数値バイアスを含む搬送波位相の幾何学フリー線形結合でスムージングする Carrier Phase Leveling という手法を利用する⁽⁶⁾。

同じ衛星から観測された幾何学フリー線形結合の擬似距離と搬送波位相の差は、次式で表される。

$$P_{GF}^a - \phi_{GF}^a = -\lambda_{GF} N_{GF}^a + \varepsilon_{GF}^a \quad (11)$$

ここで、 ε_{GF}^a は Eq. (9) と Eq. (10) の差分によって新たに生じる雑音成分である。Eq. (11) において、雑音以外の成分である整数値バイアスは、サイクルスリップが生じない限り一定値であるため、時間平均を取ることによって ε_{GF}^a を低減させ $-\lambda_{GF} N_{GF}^a$ のみを抽出することができる。したがって、電離層遅延は次式から推定することができる。

$$I_{L1}^a = \left(\phi_{GF}^a + \overline{(P_{GF}^a - \phi_{GF}^a)} \right) \quad (12)$$

ここで、 $\overline{(P_{GF}^a - \phi_{GF}^a)}$ は Eq. (11) の時間平均を示し

$$\overline{(P_{GF}^a - \phi_{GF}^a)} \approx -\lambda_{GF} N_{GF}^a \quad (13)$$

である。

さらに、電離層遅延の時間的な変化を求めるために、補正を行いたい時刻直前の 30 エポック分の電離層遅延を、最小二乗法により 2 次関数でフィッティングを行った。これより、伝送遅延を含む観測値は次式で補正される。

$$\bar{\phi}_r^a(t) = \phi_r^a(t - \Delta t) + a_2 \Delta t^2 + a_1 \Delta t + a_0 \quad (14)$$

$$\bar{P}_r^a(t) = P_r^a(t - \Delta t) - a_2 \Delta t^2 - a_1 \Delta t - a_0 \quad (15)$$

ここで、 a_n は電離層遅延のフィッティングで得られた n 次項の係数である。

4. 伝送遅延補正の評価実験

4.1 評価手法

提案手法の効果を評価するために、異なる伝送遅延における RTK-GPS の FIX 率と測位精度の評価を行った。FIX 率とは、全観測エポック数に対して、AR の成功したエポック数の比率を表し、次式で表される。

$$\text{FIX 率} = \frac{\text{AR 成功エポック数}}{\text{全観測エポック数}} \quad (16)$$

本研究では、現在最も広く利用されている単一エポック AR (瞬時 AR) 手法である LAMBDA 法を用いて整数値バイアスを求めている⁽⁷⁾。AR 成功の判断には様々な評価法が提案されているが、今回は LAMBDA 法と併用されることの多い Ratio Test を用いている⁽⁸⁾。

また、解析プログラムには、測地分野の研究などで実績のある RTK-GPS 用測位演算ライブラリである RTKLIB を利用している⁽⁹⁾。

Table 1 Zero-baseline setups

Observation Span	2008/01/21 14:00:00 2008/01/22 14:00:00
GPS Receiver	NovAtel OEM4
GPS Antenna	NovAtel GPS702
Measurement Rate	1 Hz
Elevation Mask	15 deg

4.2 ゼロベースライン測位実験

二重差観測値に不要なバイアス成分が生じ、RTK-GPS の測位性能が劣化する原因としては、伝送遅延の他に、基地局と移動局間の基線長の影響がある。そこで、まずは伝送遅延に対する本提案手法の有効性を評価するために、ゼロベースラインでの実験を行った。ゼロベースラインとは、1 つのアンテナで受信された測位信号を分配器によって 2 つの受信機で受信することで、基線長をゼロとする手法である。ゼロベースラインでは、2 つの受信機観測される信号の伝搬経路は一致するため、衛星時計バイアス、電離層遅延、対流圏遅延の影響を二重差観測値から完全に取り除くことができる。

さらに、伝送遅延による影響を様々な遅延量に対して評価するために、ゼロベースラインで取得した基地局データに対して、意図的に 0 秒から 30 秒の遅延を与え二重差観測値を生成し、FIX 率と測位精度の評価を行なった。観測データ取得の条件と使用した機材を Table 1 にまとめる。

今回は、それぞれの遅延量に対して、補正なし、電離層遅延補正のみ、衛星時計バイアス補正のみ、両補正ありの 4 つのケースについて評価している。これら評価のケースと、本節以降の図中に使用するマーカーとの対応を Table 2 に示す。

Table 2 Fix rate test cases

Marker	Test case
◇	Without correction
□	Ionospheric correction
△	Satellite clock correction
○	Ionospheric & satellite clock corrections

Fig. 1 Fix rates in zero-baseline tests

Fig. 2 Horizontal errors in zero-baseline tests

Fig. 3 Vertical errors in zero-baseline tests

4.3 ゼロベースライン測位実験の結果と考察

伝送遅延時間の変化に対する FIX 率の変化を Fig. 1 に示す。また、AR に成功したエポックの水平方向の測位誤差 (RMS) を Fig. 2 に、高さ方向の測位誤差 (RMS) を Fig. 3 に示す。

すべてのケースにおいて、伝送遅延の増加と共に、FIX 率が低下し測位精度が劣化している。ゼロベースラインの実験では、基線長に依存した電離層遅延や対流圏遅延などの空間的誤差は存在しないため、伝送遅延の増加による測位性能の劣化が確認された。

Fig. 1 において、補正なしのケースと比較して、衛星時計バイアスの補正を加えた場合、伝送遅延が 5 秒のときに 20%、10 秒のときに 45% の FIX 率の改善がみられた。しかし、電離層補正による FIX 率の改善は確認できなかった。

Fig. 2 および Fig. 3 においても、FIX 率と同様に衛星時計バイアスの補正を加えることにより、補正なしと比較して、伝送遅延が 10 秒のときに 1.8 cm、20 秒のときに 6.5 cm の改善がみられた。また、Fig. 1 では電離層補正による FIX 率の改善がみられなかったが、測位精度は電離層補正により改善されることが確認された。

ゼロベースラインにおける評価の結果、衛星時計バイアスの補正は、測位性能の改善に非常に効果的であることが確認された。しかし、電離層遅延の補正による改善効果は少なく、FIX 率においては伝送遅延が 15 秒以上であると、補正なしの場合より僅かではあるが FIX 率が低下している。この原因としては、Eq. (12) に示す Carrier Phase Leveling で十分な雑音成分の低減が行えなかった可能性と、2 次関数によるフィッティングのため、補正後の雑音成分が増加したことが考えられる。

4.4 短・中基線条件測位実験

ゼロベースラインの実験は、電離層遅延や対流圏遅延といった空間的誤差のない環境での測位性能の評価であった。しかし、実際の RTK-GPS において

Table 3 Short and medium baseline setups

Observation span	2004/12/01 24 hours
Reference Station	Fujisawa
Rover 1 (Baseline length)	Yokohama Izumi (11 km)
Rover 2 (Baseline length)	Yokosuka (19 km)
Measurement Rate	1 Hz
Elevation Mask	15 deg

は、必ず基地局と移動局間で電離層遅延や対流圏遅延といった空間的な誤差が生じる。そこで、伝送遅延に加えて、基線長による空間的な誤差を含んだ評価を、基線長 10 km 程度の短基線と、20 km 程度の中基線について実施した。

このときの観測条件を Table 3 にまとめる。基準局および移動局には、国土地理院の電子基準点データを利用している。

4.5 短・中基線条件測位実験の結果と考察

横浜泉－藤沢間の短基線における FIX 率と測位精度の評価結果を、それぞれ Fig. 4 と Fig. 5 に示す。同様に、横須賀－藤沢間の中基線の結果を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。

Fig. 4 と Fig. 6 において、基線長の増加による FIX 率の低下が確認できた。どちらのケースにおいても、伝送遅延がゼロであっても、電離層遅延や対流圏遅延といった空間的な誤差の影響により、Fig. 1 に示されるゼロベースラインのように FIX 率が 100%と

なることはない。基線長と瞬時 AR による FIX 率の関係については、Abousalem らによる統計的な解析結果を参照していただきたい⁽¹⁰⁾。一方、Fig. 5 と Fig. 7 において、基線長の増加による測位精度の劣化は見られなかった。

衛星時計バイアスの補正は、基線長に関わらず、FIX 率を大幅に改善することが確認できた。しかし、ゼロベースラインでの実験と同様に、電離層遅延の補正による FIX 率の改善は見られなかった。また、ゼロベースラインでは、電離層遅延の補正により測位精度の改善が見られたが、Fig. 5 と Fig. 7 からは電離層の補正による測位精度の改善は確認できなかった。これは、電離層遅延の空間的な誤差の増加が、伝送遅延による時間的な増加より大きなためと考えられる。

したがって、本研究で提案した補正手法のうち、衛星時計バイアスの補正が、伝送遅延と基線長の両者を考慮した実際の RTK-GPS において、有効であるといえる。

Fig. 4 Fix rates in short baseline length

Fig. 6 Fix rates in medium baseline length

Fig. 5 Horizontal errors in short baseline length

Fig. 7 Horizontal errors in medium baseline length

5. まとめ

本研究では、RTK-GPS において基地局から移動局へデータを転送する際の伝送遅延によって生じる時間的誤差要因を補正する手法を提案し、その効果を 24 時間分の実データから統計的に評価した。

伝送遅延により二重差観測値に生じる誤差としては、衛星時計バイアス、電離層遅延、対流圏遅延があるが、本研究ではこの中で時間的変動が大きな衛星時計バイアスと電離層遅延について補正を行った。

衛星時計バイアスの時間変動は、衛星搭載原子時計の種類や衛星個体により異なるが、短時間であれば線形的に変化するものと仮定し、航法メッセージに含まれる衛星時計補正係数の 1 次の項を用いて補正を行った。電離層遅延については、2 周波観測値の幾何学フリー線形結合から電離層遅延を推定し、その時間的な変化を 2 次関数でフィッティングすることで補正を行った。

さらに、提案手法の有効性を評価するために、24 時間分の実データを利用して、意図的に加えられた 0 秒から 30 秒の伝送遅延に対して FIX 率と測位精度を求めた。その結果、基地局と移動局の基線長に関係なく、衛星時計バイアスの補正は、FIX 率と測位精度を大幅に改善することが確認された。

しかし、電離層遅延の補正による FIX 率の改善はみられなかった。この原因の一つとして、2 次関数によるフィッティングにより、補正後の観測値の雑音が増加してしまうことが考えられる。また、ゼロベースライン実験では、電離層遅延の補正により測位精度が改善されたが、短・中基線においては測位精度に変化はみられなかった。これは、基線長の増加による電離層遅延誤差の増加が、伝送遅延による増加より大きいためと考えられる。

評価実験の結果、提案した補正手法のうち、衛星時計バイアスの補正が、伝送遅延と基線長の両者を考慮した実際の RTK-GPS において有効であることが確認された。電離層遅延の補正においては、より雑音成分の少ない電離層遅延量の推定手法と時間変化モデルの構築が今後の課題である。

謝辞

本学における衛星航法工学の研究に対する船井電機株式会社のご支援に謝意を表します。

参考文献

- (1) 田中直人: RTK-GPS の基準局データ伝送遅延による測位精度劣化の評価に関する研究, 東京商船大学修士論文, 1999.

- (2) P. J. G. Teunissen and A. Kleusberg (ed.): GPS for Geodesy, 2nd ed., Springer, New York, 1998.
- (3) 高須知二: 搬送波位相測定値による精密測位の理論及び解析処理, GPS/GNSS Symposium 2005.
- (4) 高須知二: RTK-GPS 及びネットワーク型 RTK-GPS 測位技術, GPS/GNSS Symposium 2007.
- (5) 高須知二, 久保信明, 安田明生: 低レート基準局網観測データを使った移動体キネマティック GPS 測位, 電子情報通信学会 宇宙・航空エレクトロニクス研究会 (SANE), 2007.
- (6) Y. Gao, *et al.*: Ionosphere Modeling Using Carrier Smoothed Ionosphere Observations from a Regional GPS Network, Geomatica, Vol. 56, No. 2, pp. 97-106, 2002.
- (7) P. J. G. Teunissen, P. J. De Jonge, and C. C. J. M. Tiberius: The LAMBDA method for fast GPS surveying, Proceedings of International Symposium on GPS Technology Applications, Bucharest, Romania, pp. 203-210, 1995.9.
- (8) P. J. G. Teunissen: On GNSS Ambiguity Acceptance Tests, Proceedings of International Global Navigation Satellite System (IGNSS), Sydney, Australia, 2007.12.
- (9) 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, GPS/GNSS Symposium 2007.
- (10) M. Abousalem, S. Han, X. Qin, W. Martin and R. Lemoine: Ashtech Instant-RTK: A Revolutionary Solution for Surveying Professionals, Proceedings of the 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Cairo, Egypt, 2001.1.

質疑応答

坂井丈泰 (電子航法研究所):

瞬時 AR により整数値バイアスを決定しているが、これは 2 周波観測値を利用しているのか。また、電離層の補正に効果がありみられないのは、2 周波データを使用しているからと解釈してよいのか。

安田明生:

瞬時 AR には 2 周波観測値を利用している。電離層遅延の補正においては、2 周波観測値は電離層遅延量の推定のみを利用しており、線形結合による電離層遅延の除去は行っていない。電離層の補正による効果が少なかったのは、遅延量の推定と補正の際に生じる雑音成分が大きかったためと考えられる。