

「RTKLIB の RTK 及び PPP に関する質問」とその回答

2024 年 2 月 21 日

Rev.A 2024 年 2 月 25 日

高須

Q1.

`pntpos.c` 内で衛星システム間の時計バイアスを推定する、しないに関わらず、デザイン行列 H の列数を固定していると思います。そのためランク落ちを避けるために使用していない衛星システムの誤差分散項に 0.01 を代入していますが、このテクニックはランク落ちを避けるための一般的なテクニックなのでしょうか。またこのテクニックを使用する場合、デザイン行列の列数を可変させた手法と比較して精度が落ちる可能性は考えられないでしょうか。

A1.

ランク落ちした正規行列による最小二乗法を解くアルゴリズムとしては、SVD (特異値分解) を使う方法または擬似逆行列を使う方法が最も一般的です。ただし、この方法は、正規行列を LU 分解またはコレスキー分解で解く方法に比較して、計算コストがかなり増えます。最小二乗法の各種手法の計算コストについては以下資料 p.6 を参照ください。

https://gpspp.sakura.ne.jp/ppp/JAXA_PPP_20191018.pdf

RTKLIB で採用している、適当な初期値に緩い拘束条件を追加する方法は一般的ではないと思います。RTKLIB の過去履歴を調べると、ver. 2.4.2 p4 以前の版では GPS と GLONASS の混合測位時のランク落ち対策として、GPS または GLONASS のデータが入力されない場合、GPST-GLONASS 差項に対応する計画行列の列を除去する方法 (計画行列をシュリンクする方法) をとっていました。ver. 2.4.52 p5 で Galileo 及び BeiDou のサポートを追加する際に、アルゴリズムを簡単化するために本方式を導入しました。~~ランク落ち対策のための拘束条件としては十分緩い値 ($\sigma=100$ m) としていますので、最終解精度への影響は十分小さいと考えています。~~と、観測データに GPS が含まれない場合に解が得られない問題の対策のために本方式を導入しました。

例えば、観測データに Galileo が含まれない場合、GPST-GALT オフセットを含んだ観測方程式が含まれないので、対策をしない場合には、正規行列が正則とならないので最小二乗が解けません。GPST-GALT オフセットに拘束条件を与えることにより、正規行列が正則となり、最小二乗を解くことができます。この際、どんな拘束条件を与えたとしても、他の観測方程式に影響はないので最終解の精度が落ちることはありません。

問題があるとすると、観測データに GPS が含まれない場合です。例えば観測データに Galileo しか含まれない場合、受信機クロックバイアスに拘束条件が追加され、この推定値は常に 0 となります。また、GPST-GALT オフセットとして、GALT で推定された受信機クロックバイアスが入ります。RTKLIB では、測位解の時刻タグには、GPST で測った真の受信時刻が入るという仕様としていますが、このケースではこの仕様を逸脱する（常に観測データの時刻タグが入る）こととなります。といっても、これを簡単な方法で回避するのは難しいので、仕様の例外規定が必要かもしれません。

Q2.

幾何距離の計算をする *geodist* 関数内でサニャック項を近似計算で補正していますが、この近似式を導出している参考文献等がありますでしょうか。(自分で導出できなかったため) また伝搬時間を求めた後に衛星位置を回転させた後に、幾何距離を計算する場合と比較して優位な差分は生まれませんか。

A2.

以下資料 p.26 参照ください。知る限り、この近似計算の導出を解説した文献は他にはありません。

https://gpspp.sakura.ne.jp/ppp/JAXA_PPP_20191018.pdf

geometric range の厳密計算には ECEF-ECI 間の座標変換が必要なため、計算コストが高く、また地球回転パラメータの入力も必要なため、本近似計算が使われることが多い様です。他解法については、以下資料 p.13 参照ください。RTKLIB の開発開始前にシミュレーションで確認した範囲では、本近似計算の誤差は全てのケースで 1 mm 未満と搬送波位相の誤差に対して十分小さく、かつ繰り返し計算が必要ないため、全面的に採用しました。近年の高精度受信機を使った多数 GNSS 環境での PPP-AR においても十分な精度を確保できるかは再検討が必要かもしれません。

https://gpspp.sakura.ne.jp/ppp/JAXA_PPP_20191004.pdf

Q3.

PPP 測位時にアンビギュイティ、位置、受信機時計誤差、対流圏遅延量を求めるために、搬送波位相の他に搬送波位相及び搬送波位相を利用していますが、通常擬似距離の観測ノイズを搬送波位相の 1000 倍程度に設定しています。個人的には擬似距離が測位計算時に殆ど寄与していないように見えており、これはただランク落ちを避けるだけの意味しかないのでしょうか。

例えばサイクルスリップが発生していない2エポックの搬送波位相のみを利用して、位置 $\{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)\}$ と対流圏遅延量 (ZTD_1, ZTD_2) と受信機時計誤差を求める場合、収束時間が短縮される等のメリットは考えられないでしょうか。

A3.

「擬似距離の観測ノイズを搬送波位相の1000倍程度」はRTKPOSTのオプション「Code/Carrier-Phase Error Ratio」を指していると思われませんが、このオプションのデフォルト値は100です。この値は、多数の測量級受信機の実データの解析から得られた擬似距離と搬送波位相の誤差比で、通常解析ではこの値を基準にして、使用受信機や周辺環境に応じて調整することを推奨しています。

DCB (differential code bias) 補正データを入力しない場合、デフォルト値のままでは擬似距離に含まれるDCBがPPPの収束時間を悪化させるため、収束時間を改善するためにこのオプションを1000程度に設定し、擬似距離の重みを十分に下げることが行われます。この場合、指摘の通り擬似距離が測位計算にほとんど寄与していないことになります。

ただし、原則としてDCB補正をきちんと施し、観測誤差を考慮した適切な重みを与えるのが、正しい方法です。擬似距離の重みを下げる方法は、現行RTKLIBが最新のDCBフォーマットであるSINEX BIASに対応していない点、各精密暦時計の時刻基準が仕様として曖昧な点、等を考慮したアドホックな対応策と考えてください。

Q4.

L6Eより送信している位相バイアスを利用したPPP-ARをMADOCALIBで簡易評価しておりますが、次の2点でARのメリットを実感できない次第です。

1点目はPPP-ARのFloat解が10cm程度の精度に達した時にFixしており、収束時間が余り短縮していません。目安としてどの程度の精度の位相バイアスがあればよいかご存じでしょうか。

2点目はFix解の測位解の精度が良くない点です。電離層遅延量との分離に失敗しているためだと思いますが、この点の対策は無いでしょうか。例えば3周波を利用することで電離層遅延量を推定しやすくするのが良いでしょうか。

また比較用にZTD及び位置、受信機時計誤差の参照値を得るのは比較的容易ですが、視線方向の電離層遅延量を比較する場合は、どのように参照値を得るほうが良いでしょうか。

A4.

過去、JAXA殿の委託研究でMADOCAのPPP-AR拡張を行った際のPPP-ARの収束時間の評価結果については、以下資料p.27を、PPP-ARの精度についてはp.24を参照ください。ここで、使用衛星系はGPS+GLONASS、アンビギュイティはGPSのL1、L2のみ解いています。このケースでは、PPPに比較して、PPP-ARの収束時間はほとんど改善せず、

精度については若干の改善がみられるという結論でした。

https://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/ukaren_2015_ttaka.pdf

なお、ここで使用している PPP クライアントソフトウェアは、この研究用に開発した PPP-AR 対応の RTKLIB 改造版です。内閣府から配布されたソースコードを読む限り、MADOCALIB はこの RTKLIB 改造版を、ほとんどそのまま利用していると思われます。現在、QZSS L6E で試験放送されている MADOCA-PPP の FCB については、その内容、品質や精度について詳細を承知していませんが、結果はおおむね予想通りという印象です。

PPP-AR の性能劣化が MADOCA-PPP 補正データ生成側に起因するのか、PPP クライアントソフトウェア側に起因するのか不明ですが、今後双方での改良と相互調整が必要と思います。

マルチ GNSS 環境における PPP-AR の性能（精度、収束時間）改良については、ここ 10 年以内に多数の研究が行われており、まずはこれら研究の論文のサーベイから始めることをお勧めします。内容が少し古いですが PPP-AR については以下資料も参照ください。

https://gpspp.sakura.ne.jp/ppp/JAXA_PPP_20191122.pdf

「目安としてどの程度の精度の位相バイアスがあればよいか」→
いくらでもミスフィックスが起こっても良いなら、瞬時フィックスすることは容易なので、AR にどの程度の信頼度を要求するかによって変わります。

「視線方向の電離層遅延量を比較する場合は、どのように参照値を得るほうが良いでしょうか」→

STEC 絶対値を精度よく求めるのは原理的に無理です。STEC の衛星間差分であれば PPP-AR でアンビギュイティを正しく解ければ、自動的に mm 精度で求まることになります。

Q5.

2006 年頃の備忘録に 1Hz-PPP は 30s-PPP に比べて不安定になりやすいとの記載されてきました。この問題は ZTD の変動と高度方向の変動が重なるために起こるためだと認識していますが、Kinematic-PPP では解決できないのでしょうか。

また PPP-AR の際には視線方向の電離層遅延を同時に推定しますが、高度方向の変動、ZTD の変動、視線方向の電離層遅延の変動の分離が困難に思えます。その場合はアンビギュイティを整数化してもその後の測位演算で高精度な位置が得られない可能性は無いでしょうか。

A5.

30 秒間隔 PPP 解に比較して、1 Hz PPP 解が不安定になりやすいのは、推定に使用する観測誤差のモデルが妥当でないのが主な原因と考えています。すなわち PPP の一般的な観測モデルでは観測誤差がエポック間で独立である（相関がない）と仮定していますが、現実の環境では、主にマルチパスのために成立しません。すなわち、観測誤差モデルとしてホワイトノイズの代わりに適切なカラードノイズを導入すべきということになります。1 Hz 解に比較して 30 秒間隔解の場合、観測間の相関が小さいためモデル不整合の影響が出にくいと考えられます。

カルマンフィルタではエポック間の観測誤差が独立であることを仮定することが多いので、現実の誤差モデルを測位アルゴリズムにどう反映すればよいのかは自明ではありません。RTKLIB でもいくつかの方法を試験実装しましたが、よい結果が得られなかったので採用しませんでした。現行、RTKLIB では 1 Hz 等の高頻度解析の場合、観測誤差設定値を増やす、対流圏遅延や搬送波位相バイアスのプロセスノイズを増やす、等のアドホックな対応をする場合が多いです。

ジオメトリ的に、高度+ZTD と、電離層遅延の分離は難しくありません。高度と ZTD の分離が難しい点はその通りで、衛星の数が増えれば改善はしますが、原理的に完全な分離は難しいのではないのでしょうか。高度方向の位置精度が出にくいのは GNSS 単独では改良が難しく、外部気象データを利用する方法、気圧センサ・慣性センサ等の他センサを複合する方法、等が有効と思います。

Q6.

MADOCA-PPP 測位時において、タイムウインドウを変化させながら収束時間を確認したところ、測位開始時刻によって収束時間が変化します。オープンスカイ環境で GPS/QZSS/GALILEO/GLONASS を利用しているため、使用衛星はそこまで大きな要素ではないと考えており、また Mops モデルと国土地理院が求めている ZTD を比較しても差分は年間最大で 30cm 程度でした。そのため収束時間を変化させているのが DOP ぐらいしか考えられないのですが、収束にそこまで影響するのでしょうか。

A6.

衛星数やジオメトリに差がないのに、実行タイミングによって PPP の収束時間に大きな差が生じるとすると、最初に考えられる原因は、MADOCA-PPP の暦誤差が衛星毎に大きくばらついている可能性です。例えば特定の衛星だけ暦精度が悪い場合でも、その衛星の可視時間帯と非可視時間帯では PPP 性能は大きく食い違うはずですが。

MADOCA-PPP の暦精度を IGS 等適当な精密暦を基準に評価し、PPP 性能との相関を調べてください。少なくとも、実績が多い GPS の暦精度に比較して、GLONASS、Galileo、QZSS の暦精度が同等とは考えにくいです。衛星系毎に暦精度に差がある様であれば、適切

な重みづけが必要です。MADCOCA-PPP では URA (user range accuracy) として暦品質に関する情報が暦と同時に送られますのでこれら重みづけのために有用かもしれません。また、特定衛星に起因した性能劣化であれば適当な衛星除外アルゴリズムを導入する等の対策も有効と考えられます。

Q7.

ECI 座標系への変換時に歳差・章動モデル、地球回転パラメータが必要かと思いますが、これらの精度はどの程度重要なのでしょうか。現状の PPP 測位において ECI 座標系は精密暦を使用する際に使用するだけだと思いますが、仮に地球回転パラメータを適切なものを使用しない場合の精度が気になっています。

A7.

RTKLIB の場合、ECI 座標系での計算が必要になるのは、衛星姿勢計算と地球潮汐モデルのために太陽と月の位置を計算する部分のみです。地球回転パラメータファイルが入力されない場合、RTKLIB 内部では $x_p=0$, $y_p=0$, $UT1-UTC=0$ として近似計算しますが、この近似誤差の衛星姿勢や地球潮汐モデルへの影響は無視できる程度だと思います。なお、精密暦の計算は ECEF 座標系における補間計算なので、ECI 座標系での計算は必要ありません。

Q8.

RTKLIB では逆行列を求める際に LU back-substitution を使用して求めています。測位演算においてどの程度の精度の逆行列が必要なのでしょうか。単独測位レベルですが逆行列を求める精度によって最小二乗法の収束計算の回数が変わることを確認しており、もう少し精度を落としても可能なのか(計算速度を早くする)、また精度を上げると収束時間等の短縮等の好影響を期待できるのでしょうか。

A8.

厳密な必要精度は不明ですが、経験的には倍精度計算の有効桁数(約 15 桁)あれば十分だと思います。なお、よほど悪条件の正規行列でない限り、どんな手法を使用しても逆行列計算の結果に大きな差が出ることはありません。「逆行列を求める精度によって最小二乗法の収束計算の回数が変わる」がどのような方法で実施されたのか不明ですが、倍精度計算を行っている限り、考えにくい挙動です。

なお、ガウス-ニュートン法による非線形最小二乗計算の収束回数は、与える初期値に大きく依存します。RTKLIB の場合、単独測位計算は最初のエポックだけ初期値として地球中心をとり、普通 5~6 回のイタレーション、2 エポック目以降は前エポックの測位解を初期値にとり、収束判定を含めてほぼ 2 回のイタレーションで収束してループを抜けています。

組み込み CPU 等の非力な計算機において、倍精度計算をエミュレーションで行っている

場合、倍精度計算の一部を単精度計算に置き換えることにより、計算速度を改善できる可能性があります。ただし、カルマンフィルタの更新を長期間繰り返すと、計算誤差の蓄積が原因で有効桁数が徐々に低下し、最終的にフィルタが発散する場合があるので、単精度計算の場合には UD 分解や SRIF 等の改良型更新則を適用する必要があります。RTKLIB ではカルマンフィルタに、最も計算コストの低い標準更新則を採用していますので、この行列演算を単精度計算に置き換えるのは推奨しません。

Q9.

PPP 測位において、シミュレーション上で搬送波位相、擬似距離等生成し、大気圏誤差の変動や精密歴、精密時計誤差に誤差を与えることでの収束時間や精度の変動、そして PPP-AR が Fix するために必要な条件の探索を行いと考えています。LEO を利用したシミュレーション上での PPP に関連する研究はありますが、一般的な PPP に関連するシミュレーションは余り見たことがありません。(需要が無いだけかもしれませんが) 上記に上げたシミュレーションを利用した考察以外に、考えられるアイデア等がありますでしょうか。

A9.

PPP-AR は、近年、世界中で活発に研究が進められている分野なので、まずはこれらの研究に関する論文をサーベイされることをお勧めします。例えば Google Scholar で「PPP ambiguity resolution」で検索すると大量の論文がヒットします。それらから色々なアイデアは得られるのではないのでしょうか。

個人的な意見ですが、実データが得られないあるいは得るのが困難な領域の研究ではシミュレーションは非常に有用ですが、PPP-AR の様に実データが容易に得られ、シミュレーションで考慮しにくいファクターが結果に影響を与えやすい領域の研究では、それほど有効ではないのでは、と思います。

Q10.

Is it possible to use time-difference carrier phase measurement (TDCP) with Iono free LC measurements to shorten convergence time in PPP? Since in RTKLIB, it mainly used iono free LC for PPP. Assumption is that ambiguity is constant (open sky). Maybe some ideas or insights can also help.

A10.

I don't think so. TDCP might not bring shorten convergence time of PPP. The information in TDCP is not different from CP (carrier-phase) itself.

Theoretically, using iono-free LC CP is identical to using individual (dual or triple) frequency CPs with slant iono-delay estimation as white-noise model. That means iono-delay

estimation with appropriate time-constraint by using dual or triple frequency CPs could lead to improvement of PPP convergence time. The idea seems worthful to examine.

In GNSS algorithms like RTK and PPP, an ambiguity is conventionally handled as a constant value without cycle slips. In many cases, the assumption is almost true, that means the phase biases are adequately stable in both of satellite- and receiver-side. However, some exceptions exist. So called IFCB (inter-frequency clock bias) between estimated precise clocks derived from different frequency carrier-phases has been recently found in some satellite signals. For details, refer the following paper.

K. Su et al., GNSS carrier phase time-variant observable-specific signal bias (OSB) handling: an absolute bias perspective in multi-frequency PPP, GPS Solutions, 2022

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10291-022-01255-x>

Q11.

Kinematic の *Continuous* や *HOLD* モードで実装されているカルマンフィルタによるアルゴリズムについて、可能な範囲で詳細をお聞きしたいです。過去の講義資料などがあるとありがたいです。

A11.

RTKLIB の「continuous」および「instantaneous」モードについては以下 RTKLIB ver.2.4.2 マニュアル Appendix E.7 (4) を参照ください。

https://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf

RTKLIB の「Fix and Hold」モードについては以下論文の「IMPROVEMENT OF FIXING RATIO」章を参照ください。

T. Takasu and A. Yasuda, Kalman-Filter-Based Integer Ambiguity Resolution Strategy for Long-Baseline RTK with Ionosphere and Troposphere Estimation, Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010), September, 2010, Portland, OR, US, pp.161-171

https://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/ion2010_paper_ttaka_revA.pdf

このモードはもともと長基線 RTK のフィックス率改善を目的として、RTKLIB ver.2.4.1 で導入したのですが、短基線の移動体 RTK においてもフィックス率改善に有効な場合があり、RTKNAVI または RTKPOST のオプションで選択可能としています。ただし、副作

用として、一度ミスフィックスした場合に連続的に誤った解を出し続けて、なかなか回復しない問題があり、適用する場合には慎重な配慮が必要です。

Q12.

HOLD モードで一度 *FIX* したアンビギュイティについて、測位可能な最低衛星数を担保できている限りにおいて、衛星数が減ってきてても *HOLD* できればと考えていますが、すでにそのような実装になっていますでしょうか。

A12.

「Fix and Hold」モードにおいて、いったんフィックスしたアンビギュイティの Hold を解除する条件は、(1) 対象搬送波位相にサイクルスリップ検出、(2) ratio-test による AR 検定不合格、(3) 衛星仰角がオプション「Min Elevation to Hold Amb」未満、です。有効衛星数が減ってきた場合 (2) の条件で Hold が解除されることがあります。また、いったん AR 検定が合格して有効衛星数が維持されていても、一部のミスフィックスが原因で AR 検定が不合格となることがあるので、その場合も Hold は解除されます。A11 で示した様に「Fix and Hold」モードは副作用があるので、適切な Hold 解除の条件が必要です。

Q13.

市販の UBLOX 等の受信機の場合、都市部での *FLOAT* 解の収束が早いように見えるのですが、もし数 m の精度のコード測位の絶対位置があれば、*FLOAT* 解で 10 秒程度で 20 ~ 30 cm に収束させることは可能でしょうか。

A13.

何と比較して「収束が早い」と判断されているのか不明ですが、過去経験では u-blox 受信機が、他の受信機と比較して「都市部での *FLOAT* 解の収束が早い」という印象はありません。また、u-blox 受信機 (ZED-F9P 受信機) の場合、L1+L2 または L1+L5 の二周波受信機であること、最大チャネル数が 184CH であり有効衛星数に制限があること、IF 帯域が狭く擬似距離雑音が比較的大きいこと、から生観測データの品質は他受信機に比較して良いとは言えません。

ただし、u-blox 受信機から出力される RTK 解 (*FIX* 解) の品質は、他受信機と比較して特に移動体において、優れているようです。これはファームウェアで実装された異常データ棄却を含めたロバスト推定アルゴリズムが優れていること、実環境で取得したデータを使った誤差モデルの最適化が進んでいること、が原因ではないかと推測しています。

u-blox 受信機を含めた市販 RTK 受信機の RTK 性能の比較評価については以下資料 p.8 ~ 20 参照ください。特に、u-blox 受信機の 30 km を超える中基線 RTK 性能が印象的です。

https://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/IPNTJ_NEXTWG_202102.pdf

u-blox 受信機における「Tight Position Bounding」と呼ぶロバスト推定アルゴリズムの概要については以下論文を参照ください。大規模な実データ解析による誤差モデルの最適化が進んでいることがうかがえます。

O. Julien et al., Tight Position Bounding for Automotive Integrity, Inside GNSS, 2021
(<https://insidegnss.com/tight-position-bounding-for-automotive-integrity>)

「もし数 m の精度のコード測位の絶対位置があれば、FLOAT 解で 10 秒程度で 20–30 cm に収束させることは可能でしょうか」→

10 秒程度では衛星のジオメトリはほとんど変化しないので、経験的には難しいのではないかと思います。

Q14.

コード測位は瞬時で位置を出せることは理解できるのですが、搬送波位相を利用した FLOAT 解の場合、搬送波位相のみでも絶対位置を出すことは可能でしょうか。過去の絶対位置情報が必要になりますでしょうか。

A14.

質問が「搬送波位相のみで」「瞬時で位置」が推定できるか、というのだとすると、未知パラメータ数（位置+アンビギュイティ）が観測データ数（搬送波位相観測値）を上回っているので、原理的に困難です、という回答になります。

「瞬時で位置」を推定するためには、搬送波位相以外の観測データか、未知パラメータに対する何らかの拘束条件が必要です。

Q15.

Adaptive カルマンフィルタが都市部の測位精度改善に効果があると聞くのですが、RTKLIB に実装することは容易でしょうか。

A15.

実装は難しくありません。RTKLIB のすべてのソースコードは公開されており、使用アルゴリズムもマニュアルに記載されています。ぜひ実装して、都市部の測位精度改善に効果があるかどうか確かめてください。

Q16.

ドップラ周波数や TDCP による速度情報を利用した測位精度の改善は都市部において擬似距離より精度が良いためであると理解しています。搬送波位相による FLOAT 解は、搬送波位相にウェイトを大きくして位置を推定しているため、速度情報の利用と同様のように考えておりますが、その理解は正しいでしょうか。

A16.

原理的に、ドップラ周波数や搬送波位相は、擬似距離に比較して、マルチパスの影響を受けにくいので、障害物の多い都市部における測位精度を改善するために有用と考えられます。ただし、ドップラ周波数も（アンビギュイティの解かれていない）搬送波位相も、相対的な位置の推定にしか使用できないことに注意ください。絶対的な位置精度が必要な場合、間欠的にでも絶対位置の推定が必要です。したがって、都市部においては、条件のよい区間でアンビギュイティを解いた搬送波位相で絶対位置を算出し、条件の悪い区間ではドップラ周波数や TDCP を使った相対位置推定値を使って適切に補間する、という戦略が有効と思います。

なお、ドップラ周波数と搬送波位相の違いは、サイクルスリップの影響と観測誤差の大きさです。最適な推定にはこれらを適切に使い分ける必要があります。

Q17.

RTKLIB には RAIM の機能が実装されていると認識しております。

擬似距離測位の残差が大きいつきに位置解が出力されない設定と思います。

この部分で、擬似距離残差の大きい衛星を 1 つずつ排除して、最大 5 回程度まで排除して測位する機能を追加することは可能でしょうか。

A17.

RAIM にも各種の方式がありますが、「擬似距離測位の残差が大きいつきに位置解が出力されない」は最も単純な SSE (sum of the squared range residual errors) による解検定です。RTKLIB で実装されている RAIM は 1 衛星までの異常衛星除外を含んだ RAIM FDE (fault detection and exclusion) です。RTKLIB で実装されている RAIM FDE については以下マニュアル Appendix E.6 (5) 参照ください。

https://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf

RAIM FDE を 2 衛星以上の異常衛星除外に拡張することは難しくはありませんが、最低所用衛星数が増加すること、2 衛星以上では計算コストが急激に増えることにより、現行では 1 衛星までとしています。近年のマルチ GNSS 環境で計算速度を気にしない場合には 2 衛星以上の RAIM FDE も有効かもしれません。

Q18.

RTK の *Ratio* テストは有効なテスト手段であると認識しています。

ただ、都市部ではどうしてもミス *FIX* が見受けられます。*Ratio* テスト以外に良いテストがもしあればご教示頂けるとありがたいです。

A18.

RTKLIB で採用している AR 検定は、固定スレッシュホールド（デフォルト値 3.0）の *Ratio-Test* です。RTKLIB で *Ratio-Test* を採用した最大の理由は、*LAMBDA* と組み合わせることにより、非常に簡単に実装できるからです。開発当初に対象としていた GPS L1+L2 二周波のみを使った固定点 RTK においては、概ね良好な結果が得られていましたが、マルチ GNSS 環境や移動体 RTK においては必ずしも最適な結果が得られていません（*FIX* 率低下やミスフィックス率増加）。現行 RTKLIB の AR 検定は *PAR* (*partial ambiguity resolution*) の採用を含めて改良の余地が多いと考えています。AR 検定及び *PAR* については以下資料 p.10~11 を参照ください。

https://gpspp.sakura.ne.jp/ppp/JAXA_PPP_20191122.pdf

資料中でも参照されていますが、*Ratio-Test* 以外の AR 検定手法については以下論文が包括的によくまとまっていると思います。過去いくつかは簡単な評価をしたことはありますが *Ratio-Test* と大きな差は感じませんでした。

S. Verhagen and P. J. G. Teunissen, New global navigation satellite system ambiguity resolution method compared to exiting approaches, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2006

(<https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/29255>)

以上