

# 三周波アンビギュイティ決定による PPP の初期収束時間の短縮 Reducing Initial Convergence Time of Precise Point Positioning by Three-Frequency Ambiguity Resolution

小野裕喜<sup>†</sup>, 佐藤友紀<sup>‡</sup>, 小西麻緒<sup>‡</sup>, 島岳也<sup>‡</sup>, 辻井利昭<sup>†</sup>

<sup>†</sup>大阪府立大学

<sup>‡</sup>三菱電機株式会社

Yuki Ono<sup>†</sup>, Yuki Sato<sup>‡</sup>, Mao Konishi<sup>‡</sup>, Takeya Shima<sup>‡</sup>, Toshiaki Tsujii<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Osaka Prefecture University

<sup>‡</sup>Mitsubishi Electric Corporation

**Abstract** Precise Point Positioning (PPP) is a positioning method that mainly uses high-accuracy carrier phase observation data and does not require a reference station. Therefore centimeter-class positioning can be performed regardless of the user receiver location. In this research, we consider using three frequencies in a method called PPP-AR (Ambiguity Resolution), which resolves the integer ambiguity of carrier phase, in order to reduce the initial convergence time.

## 1. 研究背景・目的

PPP は場所を問わずセンチメートル級の測位が可能な測位方式であるが、正確な位置決定を行うのに 10~20 分程度要するという技術課題が存在する。移動体において、高層ビル間など衛星信号が頻繁に遮断されるような環境下での利用を考慮すると、初期収束に長時間を要することは致命的である。したがって初期収束時間の短縮を本研究の目的とした。

今回、搬送波位相のあいまいさであるアンビギュイティを正確に算出することで、高精度で素早い位置決定を実現できる特徴を持つ、PPP-AR と呼ばれる測位方式に着目した。アンビギュイティとは受信機で信号を受信し始めたときの位相の整数部分のことを表す。しかし、現状の二周波利用 PPP-AR ではアンビギュイティを正確に解くのに時間を要するという課題がある。初期収束時間短縮のために、アンビギュイティの真偽を判定する Fix (アンビギュイティ決定) 条件を緩めに設定するという手段もあるが、アンビギュイティを誤って算出してしまふ (ミス Fix する) ことが頻繁にあり、それによってオフセット誤差が生じていた。そこで、近年 L5 帯という新しい周波数帯の信号を配信する衛星が増加していることから、本研究ではアンビギュイティ決定に三周波を利用する。これにより Fix 条件が緩い場合でもアンビギュイティを正確に決定するとともに、初期収束時間の短縮を図る。

## 2. PPP の概要

PPP において三周波の GNSS 受信機を仮定すると、各衛星*i*に対して以下の 6 つの観測方程式が得られる<sup>[1]</sup>。

$$P_1^i = \rho^i + cdt - cdt^i + I_1^i + T^i \quad (1)$$

$$P_2^i = \rho^i + cdt - cdt^i + I_2^i + T^i \quad (2)$$

$$P_5^i = \rho^i + cdt - cdt^i + I_5^i + T^i \quad (3)$$

$$\Phi_1^i = \rho^i + cdt - cdt^i - I_1^i + T^i + \lambda_1 N_1^i \quad (4)$$

$$\Phi_2^i = \rho^i + cdt - cdt^i - I_2^i + T^i + \lambda_2 N_2^i \quad (5)$$

$$\Phi_5^i = \rho^i + cdt - cdt^i - I_5^i + T^i + \lambda_5 N_5^i \quad (6)$$

ここで、各パラメータは次のとおりである。

$P_1^i, P_2^i, P_5^i$  : 擬似距離観測値[m]

$\Phi_1^i, \Phi_2^i, \Phi_5^i$  : 搬送波位相観測値[m]

$\rho^i$  : 衛星と受信機間の幾何学的距離[m]

$c$  : 光速[m/s]

$dt$  : 受信機時計誤差[s]

$dt^i$  : 衛星時計誤差[s]

$I_1^i, I_2^i, I_5^i$  : 電離圏遅延量[m]

$T^i$  : 対流圏遅延量[m]

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_5$  : 搬送波波長[m]

$N_1^i, N_2^i, N_5^i$  : 搬送波位相アンビギュイティ[cycle]

上付き*i*は衛星番号, 下付き 1,2,5 は  $L_1, L_2, L_5$  帯周波数を表す。

ここで、(1), (2), (4), (5)式の観測方程式に対して電離層遅延量 $I_1^i, I_2^i$ を消去するための線形結合 (電離層フリー線形結合) を行う。その結果、擬似距離と搬送波位相の観測方程式及び電離層フリー搬送波位相アンビギュイティ  $B_{LC,12}^i$ [m] は次のようになる。

$$P_{LC,12}^i \equiv \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1^i - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2^i \\ = \rho^i + cdt - cdt^i + T^i \quad (7)$$

$$\Phi_{LC,12}^i \equiv \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_1^i - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_2^i \\ = \rho^i + cdt - cdt^i + T^i + B_{LC,12}^i \quad (8)$$

$$B_{LC,12}^i = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 N_1^i - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 N_2^i \quad (9)$$

ただし  $f_1$  は周波数を表し、GPS 信号において  $f_1 = 1575.42\text{MHz}$ ,  $f_2 = 1227.60\text{MHz}$  である。

同様に、今回三周波を利用するにあたり、 $L_1, L_5$  帯観測値の電離層フリー線形結合も行う。ただし、 $f_5 = 1176.45\text{MHz}$  である。

$$P_{LC,15}^i \equiv \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_5^2} P_1^i - \frac{f_5^2}{f_1^2 - f_5^2} P_5^i$$

$$= \rho^i + cdt - cdt^i + T^i \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{LC,15}^i &\equiv \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_5^2} \Phi_1^i - \frac{f_5^2}{f_1^2 - f_5^2} \Phi_5^i \\ &= \rho^i + cdt - cdt^i + T^i + B_{LC,15}^i \end{aligned} \quad (11)$$

$$B_{LC,15}^i = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_5^2} \lambda_1 N_1^i - \frac{f_5^2}{f_1^2 - f_5^2} \lambda_5 N_5^i \quad (12)$$

PPP では衛星の精密暦を補強データとして利用することで、衛星位置( $X^i, Y^i, Z^i$ )と衛星時計誤差 $dt^i$ を既知の値としてその他の未知パラメータを推定する。m機の衛星で一定期間観測できるものと仮定して、推定値パラメータベクトル $\mathbf{x}$ は次のようになる。

$\mathbf{x} = (x, y, z, cdt, T_z, B_{LC,12}^1, \dots, B_{LC,12}^m, B_{LC,15}^1, \dots, B_{LC,15}^m)^T$   
 求める未知数は 4 種類に分けられ、 $x, y, z$ が受信機アンテナ位置[m],  $cdt$ が受信機時計誤差[m],  $T_z$ が天頂方向対流圏遅延量[m],  $B_{LC,12}^i, B_{LC,15}^i$ が(9),(12)式で表される衛星*i*の電離層フリー搬送波位相アンビギュイティ[m]である。拡張カルマンフィルタ(EKF)を使用して観測更新と時間更新を交互に行うことで、推定値パラメータベクトル $\mathbf{x}$ は一定値に収束していく<sup>[2]</sup>。  $N_1^i, N_2^i, N_5^i$ を正しい整数値として算出できると正確な位置決定が可能となるが、PPPではこれらをいかに正確に速く求めるかが初期収束時間を決めるうえで重要になる。

### 3. 三周波利用アンビギュイティ決定方法

L1 帯アンビギュイティ $N_1$ は次の手順で求めることができる<sup>[3]</sup>。

- ① L2,L5 帯観測値の Melbourne-Wübbena 線形結合によりエキストラワイドレーンアンビギュイティ $N_{EWL}$ を求める。

$$\begin{aligned} MW &= \lambda_{EWL} \left( \frac{\Phi_2}{\lambda_2} - \frac{\Phi_5}{\lambda_5} \right) - \lambda_{ENL} \left( \frac{P_2}{\lambda_2} + \frac{P_5}{\lambda_5} \right) \\ &= \lambda_{EWL} (N_2 - N_5) \end{aligned}$$

$$N_{EWL} = N_2 - N_5 = \text{Round}(MW/\lambda_{EWL})$$

ここで、各パラメータは次のとおりである。

エキストラワイドレーン $\lambda_{EWL} = 1/(1/\lambda_2 - 1/\lambda_5)$

L2,L5 帯間ナローレーン $\lambda_{ENL} = 1/(1/\lambda_2 + 1/\lambda_5)$

- ② L1,L2 及び L1,L5 帯観測値の電離圏フリー線形結合により電離圏フリーアンビギュイティ $B_{LC,12}, B_{LC,15}$ を求める。

$$B_{LC,12} = \Phi_{LC,12} - P_{LC,12}$$

$$B_{LC,15} = \Phi_{LC,15} - P_{LC,15}$$

- ③  $N_{EWL}$ を用いて以下の式により実数値ワイドレーンアンビギュイティ $B_{WL}$ 、及びその分散 $v_{WL}$ を求める。

$$\begin{aligned} B_{WL} &= \frac{1}{\lambda_1 \left( \frac{f_1 f_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 f_5}{f_1 - f_5} \right)} \left\{ (f_1 + f_2) B_{LC,12} \right. \\ &\quad \left. - (f_1 + f_5) B_{LC,15} + \lambda_1 \frac{f_1 f_5}{f_1 - f_5} N_{EWL} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{WL} &= \left\{ \frac{(f_1 + f_2)}{\lambda_1 \left( \frac{f_1 f_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 f_5}{f_1 - f_5} \right)} \right\}^2 v_{LC,12} \\ &\quad + \left\{ \frac{(f_1 + f_5)}{\lambda_1 \left( \frac{f_1 f_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 f_5}{f_1 - f_5} \right)} \right\}^2 v_{LC,15} \end{aligned}$$

$v_{LC,12}, v_{LC,15}$  : カルマンフィルタにおける電離層フリーアンビギュイティの推定分散値

- ④ L1,L2 帯観測値の Melbourne-Wübbena 線形結合から $B_{WL}$ を求め、③で求めた $B_{WL}$ との分散による重みづけ平均を計算し、結果を四捨五入することでワイドレーンアンビギュイティ $N_{WL}(= N_1 - N_2)$ を算出する。なお、L1,L2 帯観測値の Melbourne-Wübbena 線形結合より求めた $B_{WL}$ の分散値は次のとおりである。 $sig$ は仰角にのみ依存する観測誤差係数である。

$$v_{WL} = \frac{f_1^2 + f_2^2}{(f_1 + f_2)^2} sig^2$$

- ⑤  $N_{EWL}, N_{WL}, B_{LC,12}, B_{LC,15}$ を用いて、以下の二式により二通りの L1 帯実数値アンビギュイティ $B_1$ を求める。

$$B_1 = \frac{B_{LC,12}}{\lambda_1 f_1} - \frac{f_2}{f_1 - f_2} N_{WL} \quad v_1 = v_{LC,12}$$

$$B_1 = \frac{B_{LC,15}}{\lambda_1 f_5} - \frac{f_5}{f_1 - f_5} (N_{WL} + N_{EWL}) \quad v_1 = v_{LC,15}$$

- ⑥ 二通りの $B_1$ の分散による重みづけ平均を計算し、結果を四捨五入することで L1 帯アンビギュイティ $N_1$ を算出する。

- ⑦ 設定した Fix 条件をもとに、重みづけ平均された分散値から $N_1$ の真偽を判定する。Fix 条件を満たした場合のみ、求めたアンビギュイティは(9),(12)式を用いて再びカルマンフィルタに代入され、Fix 解をもとにした位置の更新が行われる。

## 4. 測位精度評価

### 4.1. データ解析方法

2020 年 3 月 4 日に増田宇宙通信所において取得された地上静止点データ (GPST:0~1 時)を用いて、三周波利用アンビギュイティ決定による初期収束時間短縮に対する有効性の検証を行った。解析ソフトとして、GNSS 解析ソフトウェア RTKLIB<sup>[4]</sup>を使用した。主要な設定を以下に示す。

表 1 RTKLIB の主要な設定項目

解析ソフトウェア	RTKLIBver2.4.2-master
測位方式	後処理PPP-AR (static)
利用衛星	GPS
利用周波数帯	L1,L2,L5
衛星精密暦ファイル	cnt.sp3, cnt.clk (CNES)
衛星位相バイアスファイル	cnt.bia (CNES)
衛星仰角マスク	10°
電離圏補正	電離圏フリー線形結合
対流圏補正	天頂遅延量推定

なお、本研究ではアンビギュイティの推定分散値による Fix 判定条件をあえて緩めに設定することで、初期収束時間の短縮を図った。

#### 4.2. データ解析結果

三周波 PPP-AR による水平方向測位誤差を二周波の場合と比較して図 1 に示す。また、Fix 判定に要する時間と Fix 判定後の水平方向精度について表 2 にまとめる。真値として、観測点近くの電子基準点との相対測位解の時間平均値を使用した。

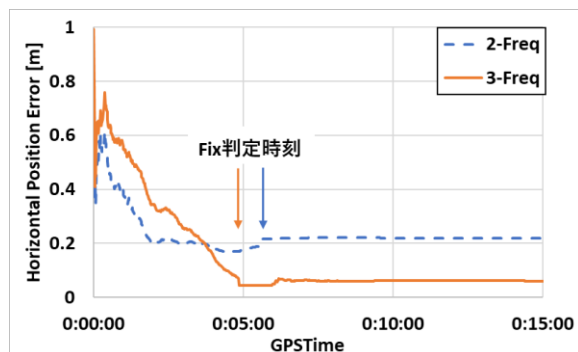


図 1 水平方向測位誤差 (二周波にミス Fix)

表 2 Fix 判定に要する時間及び Fix 判定後精度

周波数	Fixと判定されるまでの時間	Fix判定後の水平方向精度 [cm]
二周波	5分38秒	21.66
三周波	4分51秒	4.17

図 1 より、二周波 PPP-AR では測位誤差に、ミス Fix が原因として考えられるオフセットが存在することが読み取れる。それに対し、三周波を利用することでアンビギュイティ決定に正確性が増し、ミス Fix を低減させることができた。加えて、Fix 条件を緩めに設定したことで Fix 判定までに要する時間が通常の PPP の初期収束時間 (10~20 分) よりも短くなった。

また、表 3 に他の日程における結果を示すが、三周波を利用することで今回使用したすべてのデータで二周波の場合と比較し、Fix 判定までの時間を短縮でき、その平均時間は 3 分 24 秒であった。これらの結果は、三周波 PPP-AR の利用が、通常の PPP や二周波 PPP-AR よりも短時間で位置決定の実現に有効であることを示唆している。ただし、なおも平均で約 12cm の測位誤差が存在しており、ミス Fix の低減は限定的であると言える。そのため、現状の手法を用いる際は、Fix 時間がある程度短縮するうえで、ミス Fix をできるだけ低減するような Fix 条件の設定が必要である。

表 3 Fix 時間及び Fix 後精度 (他日程データ)

日付(3月)	周波数	Fixと判定されるまでの時間	Fix判定後の水平方向精度 [cm]
5日	二周波	4分41秒	56.20
	三周波	3分56秒	15.12
6日	二周波	3分48秒	59.46
	三周波	2分20秒	15.57
7日	二周波	3分22秒	51.42
	三周波	2分36秒	17.15
8日	二周波	8分17秒	38.44
	三周波	3分16秒	7.30
平均	二周波	5分09秒	45.44
	三周波	3分24秒	11.86

#### 5. 今後の課題

三周波利用によって 3 分程度でアンビギュイティを解ける見込みが得られたが、自動車などの移動体における利用を考慮する場合、少なくとも数秒・数エポックでの正確な位置決定が求められるため、まだ十分であるとは言い難い。また、測位精度も更なる改善を行う必要がある。

今回、利用周波数が異なることによる複雑さを回避するために GPS しか使用しなかったが、三周波を配信できる衛星は GPS 以外にも Galileo、BeiDou (北斗)、みちびき等があるため、マルチ GNSS 化による増強効果で更なる Fix 時間の改善を目指す予定である。また、現状のアルゴリズムでは、四捨五入によって単一のアンビギュイティを算出しているが、複数の候補で残差を計算し、その比較を行う LAMBDA (Least-squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment) 法<sup>[5]</sup>を適用すれば更なるミス Fix の低減につながる可能性があり、それに伴う Fix 時間の改善も見込めるため、今後の検討課題とする。

#### 参考文献

- [1] 杉本末雄・柴崎亮介 『GPS ハンドブック』朝倉書店, pp.185-194, 2010.
- [2] 高須知二 『RTKLIB ver. 2.4.2 Manual』 pp175-176, 2013.
- [3] 国土交通省 国土地理院 『平成 23 年度マルチ GNSS 解析技術等の開発にむけた複数周波数信号の組合せに関する調査検討業務 報告書』 pp.13-23, 2012.
- [4] 高須知二 『RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning』  
<http://www.rtklib.com/>
- [5] P.J.G.Teunissen, "The least-square ambiguity decorrelation adjustment : a method for fast GPS ambiguity estimation," J.Geodesy, Vol.70, 65-82, 1995.