

GPS 静的測位解析の検定における Ratio と PDF-Ratio の比較

東京理科大学 正会員 ○佐伯 昌之

1. 研究の背景と目的

著者等は、多点高密度に変位を計測することを目的として、安価な1周波GPS(Global Positioning System)と無線センサネットワークの技術を結合したGPS無線センサネットワークの開発を進めてきた¹⁾。このシステムでは低消費電力化するために、GPS受信機を1時間に5分程度だけ間欠動作させており、短時間の連続データを静的測位解析して相対位置を求める必要がある。

その解析において、著者等はこれまで解検定の手法としてRatio Testを使用してきたが、正解を推定している場合でもRatio値が低い場合や、特に衛星数が少ない場合にはRatio値が高いにも関わらずミスFixする場合などが散見された。

本研究では、短時間データを静的測位解析した場合を想定し、解の検定手法であるRatio TestとInteger Aperture Estimation (IA Estimation)²⁾を比較し、その結果を考察する。

2. 検定における Ratio と PDF-Ratio について

GPS 静的測位解析において整数値バイアスを決定する場合には、まずフロート解を推定し、次に式(1)の残差二乗和 J が最小となる整数値ベクトルが探索される。

$$J = (\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N})^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}^{-1} (\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N}) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{N}$ は整数値バイアスを成分とする未知の整数ベクトル、 $\hat{\mathbf{N}}$ は整数値バイアスのフロート解、 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}$ は $\hat{\mathbf{N}}$ を推定した際の分散共分散行列である。

式(1)の最小値を J_1 、2番目に小さい値を J_2 とすると、Ratio の値は式(2)により計算される。

$$\text{Ratio} = \frac{J_2}{J_1} \quad (2)$$

この Ratio の値が大きいほど、 J_1 を与える整数ベクトルが正解である可能性が高いことを意味し、経験的に3~5以上の値で解はFixされたと判定する。

一方、IA estimation では、最小の残差二乗和を与える整数ベクトルが正しくFixされる確率を推定し、これがある一定以上となる場合にFixしたと判定する。ただし、正解確率の推定には確率密度関数の積分を含むために計算が困難となることから、積分の代わりに確率密度関数そのものを計

算することで近似的に正解確率を計算することが提案されている³⁾。今、フロート解の推定値がガウス分布に従うとすれば、フロート解の確率密度関数は

$$f_{\hat{\mathbf{N}}}(\mathbf{N}) = e^{-J/2} \quad (3)$$

となり、整数値バイアスが正しくFixされる確率は近似的に

$$\text{PDF - Ratio} = \frac{f_{\hat{\mathbf{N}}}(\mathbf{N}_1)}{\sum_k f_{\hat{\mathbf{N}}}(\mathbf{N}_k)} \quad (4)$$

となる。この値はPDF-Ratioと呼ばれている。本研究では、さらに分母の計算負荷を減らすために、整数値バイアスは残差二乗和が小さい方から3つ目までを考慮することとした。

3. 解析に使用したデータおよび解析方法

3.1. 解析に使用したデータについて

Ratio と PDF-Ratio の比較に用いたデータは、著者等の過去の研究でも使用した、周囲に衛星からの電波を遮るものが少ないビルの屋上で取得したもの(以下、理想環境)と、東側以外を4階建て以上のビルで囲われている厳しい条件下のもの(以下、現場環境)を使用した³⁾。それぞれ、2013年5月8日、2014年12月12日に1秒サンプリングで24時間連続収録したデータである。時間帯にも依存するが、理想環境においては平均して8.8個の衛星を、現場環境においては7.46個の衛星を捕捉している。

3.2. 静的測位解析の方法および条件

本研究では、通常の静的測位解析とは若干異なり、修正された搬送波位相の二重差を直線で近似し、この近似式から修正された搬送波位相の二重差を再計算して観測値として使用している⁴⁾。他にも一般的な方法とは些細な点で異なる部分もあるが、基本的にはGPSの通常の観測方程式を用い、位置に関する未知数が時間的に変化しない条件で最小二乗法により解いている。

また、既往の研究により、上記の理想環境のデータでは、搬送波位相の二重差に含まれる誤差はガウス分布に従い、その標準偏差は天頂方向の標準偏差 σ_0 と衛星仰角 θ により精度よくモデル化されることが分かっている。

$$\sigma_{\theta} = \sigma_0 / \sin \theta \quad (5)$$

キーワード: GPS, 無線センサネットワーク, Ratio Test, Integer Aperture Estimation

連絡先: 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 東京理科大学理工学部土木工学科 TEL: 04-7124-1501(代)

一方、現場環境のデータでは、仰角 50 度以上であれば式(5)はよく成立するが、それ以下の低仰角ではモデルからかい離がある。そのため、本研究では式(5)のみならず、理想環境のデータでモデル化した式(6)も使用する。この式は理想環境を元に作成したことから、現場環境とは完全には一致しないが、式(5)よりは高い一致度を示している³⁾。

$$\sigma_{SN} = 63.7e^{-0.173 SN} \quad (6)$$

本研究では、著者が開発を進めている GPS 無線センサネットワークに組み込むことを前提としていることから、1 回の解析で使用するデータは 4 分間の連続データとする。3.1 節で述べた 24 時間連続データから 4 分間を切り出して相対位置を推定するまでを 1 回とし、切り出すデータを 1 秒ずつシフトしながら 86400 (=24*60*60) 回弱の解析を行った。この解析結果から、Ratio 値が 5 以上の場合の相対位置の推定値を抜き出し、平均を計算したものを真値とした。さらに、真値から半径 5cm 以内の推定値が得られた場合を正解、そうでない場合を不正解とした。その他の条件としては、使用する衛星の最低仰角は 5 度とし、搬送波位相の最低 SN 比は 35 dB とした。

4. Fix 率およびミス Fix 率の比較結果

表-1 に Ratio と PDF-Ratio を用いて Fix 判定した場合の Fix 率およびミス Fix 率を示す。Ratio による判定では 5 以上を Fix とし、PDF-Ratio の場合には 99.9%以上を Fix とした。また、表の a)は観測ノイズのモデルとして一般的な式(5)を用いた場合の解析であり、b)は式(6)を用いて解析した場合である。

まず表-1 a)を見ると、Ratio を用いた場合に比べ、PDF-Ratio を使用した方が高い Fix 率を示すことが分かる。しかしながら、ミス Fix 率も大幅に悪化しており、PDF-Ratio を使用するメリットは感じられない。

一方、表-1 b)を見ると、Ratio と比較して PDF-Ratio の結果は Fix 率が向上しているだけでなく、ミス Fix 率が低下していることが分かる。この様に、単純に PDF-Ratio を使用すれば結果が改善する訳ではなく、観測ノイズのモデルも重要となる。

PDF-Ratio は確率密度を計算する際にガウス分布を仮定していることから、指数関数の計算を含む。そのため、残差二乗和 J の値の大きさが問題となる。一般に解析に使用する衛星数が少ない場合、多い場合と比べて J の値は小さ目に算出される。その場合、式(4)の分子と比較して分母が大きくなるため、PDF-Ratio は小さな値、すなわち低い正解確率として算出される。これによりミス Fix 率が低減していると思われる。一方、

表-1 Ratio と PDF-Ratio の比較

a) 観測ノイズのモデルとして式(5)を使用した場合

	理想環境		現場環境	
	Fix 率	ミス Fix 率	Fix 率	ミス Fix 率
Ratio	98.17	0.00	70.98	0.30
PDF-Ratio	99.97	0.05	83.81	1.22

b) 観測ノイズのモデルとして式(6)を使用した場合

	理想環境		現場環境	
	Fix 率	ミス Fix 率	Fix 率	ミス Fix 率
Ratio	98.78	0.00	72.92	0.48
PDF-Ratio	99.89	0.00	83.27	0.14

Ratio を指標に用いた場合には、 J の大きさは意味を持たず、分子分母で打ち消すことになる。そのため、衛星数が少ない場合でも Ratio の値が大きくなる場合があり、ミス Fix の可能性が高まると考えられる。

5. まとめ

本研究では、4 分程度の短時間データを解析して整数値バイアスの Fix 判定を行うことを想定して、通常よく使用される Ratio および PDF-Ratio の性能を比較した。衛星仰角による観測ノイズの推定を用いた場合には PDF-Ratio 使用のメリットは見られなかったが、ノイズモデルを適切なものに改善することにより、PDF-Ratio の Fix 判定が改善されることを示した。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(A) JP16H02365 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 佐伯昌之, 澤田茉伊, 志波由紀夫, 小國健二: 準静的変位モニタリングのための GPS 無線センサネットワーク, 土木学論文集 A2(応用力学), Vol.67, No.1, p25-38, 2011.
- 2) P. J. G. Teunissen and S. Verhagen: On the Foundation of the Popular Ratio Test for GNSS Ambiguity Resolution, ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division, 21-24 Sept. 2004, Long Beach, CA.
- 3) 高橋佑莉沙, 西宏次郎, 佐伯昌之: GPS 無線センサネットワークを用いた変位モニタリングの精度改善, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 72, No.2, I_699-I_706, 2016.