

長基線 RTK-GPS/GNSS の現状、課題と展望

高須 知二* (東京海洋大学)

Overview of long-baseline RTK-GPS/GNSS technology
Tomoji Takasu* (Tokyo University of Marine Science and Technology)

Abstract

Long-baseline RTK-GPS/GNSS over the length of 100 km has many issues to be resolved. One issue is how to eliminate ionosphere and troposphere effects in the positioning algorithm. Another issue is the development of the efficient and robust strategy for integer ambiguity resolution under the existence of large error sources. The author have been developing an open source RTK software RTKLIB. RTKLIB v.2.3.1 will support the features for the long-baseline RTK. We conducted some experiments to evaluate the RTK performance of RTKLIB v.2.3.1 with the baseline length of from 100 km to 1000 km. The preliminary results of the experiments are also presented in the paper.

キーワード : RTK, GPS/GNSS, 長基線, 精密測位, 海底地殻変動, 津波計

(Keywords, RTK, GPS/GNSS, Long-baseline, Seafloor Geodetic Observation, Tsunami Monitoring System)

1. はじめに

RTK-GPS/GNSS (リアルタイム・キネマティック GPS/GNSS, 以下 RTK と呼ぶ) は GPS/GNSS (Global Positioning System, Global Navigation Satellite System) によるリアルタイム精密測位技術である⁽¹⁾。RTK では GPS/GNSS から送信された測位信号を移動ユーザ受信機と基準局受信機の両者で受信し、両者の観測データを同時に解析することにより、cm 級の精度で移動ユーザ受信機の位置をリアルタイム計測することができる。RTK は既に測量、建機制御、精密農業、地図作成等の分野で使われており、その精密測位性能から、今後さらに多くの新しい応用で利用されることが期待されている。

RTK において、ユーザ受信機と基準局受信機を結ぶベクトルを基線と呼ぶ。この基線の長さ (基線長) が長くなるにつれて、色々な原因で RTK の性能は劣化し、通常の状態では数 10 km 以上の基線長で実用的な測位性能を維持するのは難しい。この基線長の制約は、ユーザ受信機の近傍に基準局を設置できない条件、例えば海上 (船、ブイ)、空中 (飛行機)、宇宙 (人工衛星) 等の環境での RTK による精密測位の利用を困難にしている。例えば、GPS 津波計⁽²⁾ では、既にブイの精密位置を求めるために RTK が使われているが、その設置位置は海岸線から 20 km 以内に限定されており、早期警報の観点で限界がある。もし、数 100 km 程度の長基線 RTK で実用的な測位性能が得られるようになれば、より有効な早期津波警報システムの構築が可能になる。

この例に見るように長基線 RTK の潜在的な応用は多数あると考えられ、技術開発が望まれている。

本稿では、現状の長基線 RTK の技術的な課題を整理して、その解決に向けての方策と今後の技術展望を述べる。

2. 長基線 RTK の課題と対策

2.1 基線長の影響

RTK の通常のアプローチにおいては、一旦ユーザ受信機と基準局受信機の観測値間の二重差観測値を作りこの擬似的な観測値を基に観測方程式を立てて、その方程式を解くことによりユーザ受信機の位置を求める。この二重差処理の目的は二つある。

- (1) ユーザ受信機、基準局受信機の観測値間に含まれる共通の誤差項を消去して観測方程式を単純化する。
- (2) 搬送波位相に含まれるバイアス項のうち衛星起因のバイアスと受信機起因のバイアスを消去し、整数バイアス項のみを抽出する。この処理により搬送波位相バイアスの整数化が可能になり、この整数バイアスを解くことにより収束時間や測位精度を改善する。

以上のうち、共通の誤差項には以下が含まれる。

- (1) 衛星エフェメリス誤差
- (2) 衛星及び受信機クロックバイアス
- (3) 電離層遅延
- (4) 対流圏遅延

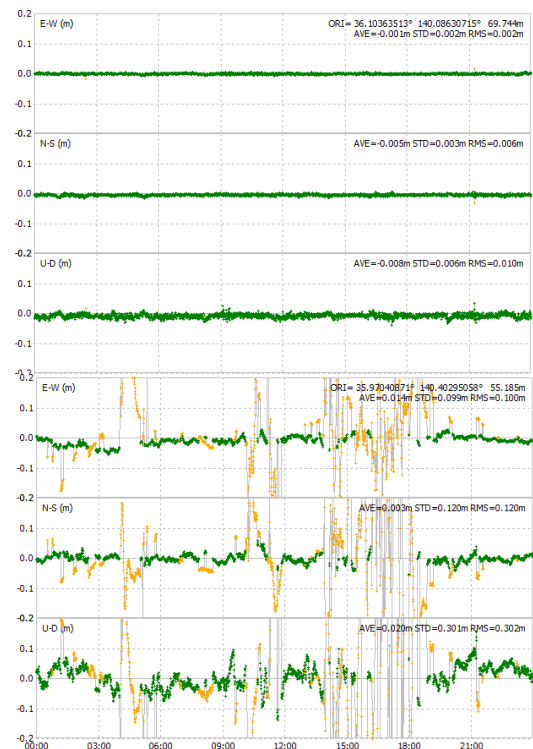


図1 RTKにおける基線長の影響
(上: 0.3 km 基線、下: 32.2 km 基線)

(5) アンテナ位相中心変動、地球潮汐、位相windアップ
以上のうち(1)、(3)、(4)、(5)は位置的に近い受信機の観測値に含まれる誤差項が同様の大きさを持つ。すなわち空間的な相関を持っているという事実を利用している。受信機間の距離が遠ざかる、つまり基線長が長くなるにつれてこれらの相関が小さくなり、二重差処理による誤差項の消去がうまく働かなくなるというのが、長基線RTKにおいて性能が劣化する主な原因である。

図1にRTKにおける基線長の影響を示す。上が0.3 km基線、下が32.2 km基線におけるRTKでの測位誤差の例を示しており、明らかに長い基線長で測位性能が劣化していることが分かる。

2.2 エフェメリス誤差

エフェメリスはGPS衛星から測位信号に重ね合わせて送信される衛星軌道を表すパラメータである。受信機の測位処理においては、エフェメリスに従い衛星信号送信位置を計算して最終的にユーザ位置を求める。

エフェメリスはGPSの地上セグメントで生成される。地上セグメントでは、世界各地の地上局で観測したGPS観測データを使って衛星の精密軌道決定を行っている。この軌道決定値からエフェメリスが生成され、軌道予測値として衛星にアップロードされてユーザに放送される。

以上の軌道決定プロセスおよび軌道予測モデルの不確実性によりエフェメリスは誤差を持っており、RTKにおいてもこの誤差が最終的な測位性能に影響する。短基線条件で

は先に述べた二重差処理により大部分の誤差は消去されるため測位性能の劣化は僅かである。ただしエフェメリス誤差の影響は基線長が延びるにつれて大きくなる。エフェメリス誤差がRTKの二重差観測値に対する影響は以下の式で概算することができる。

$$\Delta r = \Delta e \times BL(\text{km}) / 20000(\text{km})$$

ここで Δr が測位観測値への影響、 Δe がエフェメリス誤差、 BL が基線長である。エフェメリスの精度はGPSの地上セグメントのシステム更新等により徐々に改善されているが2010年現在、全衛星の平均誤差として0.8 m RMS程度の値となっている。すなわち100 km基線RTKにおいては4 mm、500 km基線では2 cmの影響を及ぼす。この誤差は搬送波位相観測値の受信機雑音の標準的な値2 mm RMSに比較して無視できない。

エフェメリス誤差はユーザ側で低減するのは難しく、より良い軌道推定値すなわち精密暦を別途入手して利用するのが現実的である。現在リアルタイムで利用できる精密暦はいくつかあるが、最も一般的なのがIGS (International GNSS Service) (3) が提供している超速報暦 (Ultra-rapid) である。超速報暦は世界中のIGSのGPS地上局ネットワークの観測データを基に後処理解析により計算されたもので、6時間毎の解析結果がインターネット上に無料公開されている。超速報暦には24時間分のGPS軌道決定値と24時間分のGPS軌道予測値が含まれており、軌道予測値はリアルタイムの利用が可能である。図2にIGS超速報暦の制度例を示す。2010年3月におけるIGS超速報暦の公称精度は約5 cmとされており、エフェメリスに比較し1桁以上精度が良い。すなわち、500 km基線のRTKにおいてもその誤差の影響はほぼ無視できる。

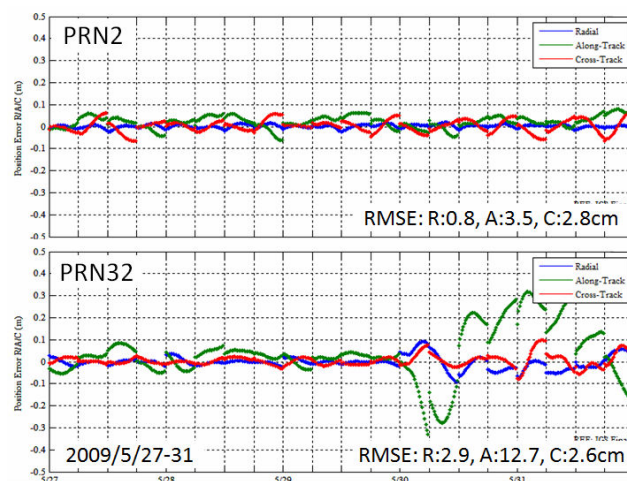


図2 IGS超速報暦(予測値)の精度例
(2009/5/27-31、PRN2およびPRN32)

2.3 電離層の影響

電離層の影響は通常数10 kmを超える基線長から徐々に

RTK 測位性能を劣化させる。図 3 に 100 km 基線、500 km 基線で解析した、基線両端の受信機における電離層遅延差例を示す。電離層遅延は通常仰角の小さい衛星において大きくなる傾向を示すが、この図はこの仰角による影響を補正し L1 周波数における電離層の鉛直方向の遅延に変換している。図に示すように 100 km 基線でも RMS で 10 cm 以上の遅延差を示しており、最終的にこの差が二重差観測値に誤差として現れる。また基線長が長くなればなるほどその差が大きくなる傾向がある。従って、長基線 RTK においても何らかの補正が必須である。

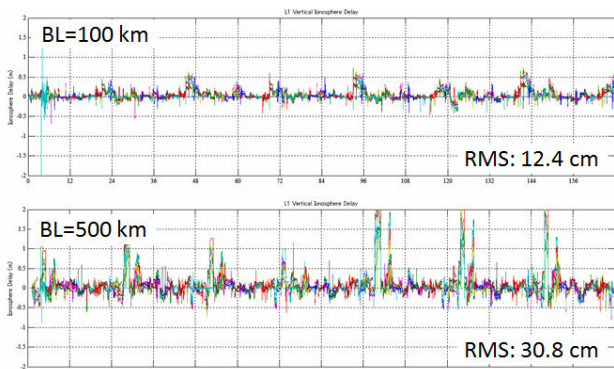


図 3 基線両端における電離層 L1 鉛直遅延差例
(上: 基線長 100 km、下: 基線長 500 km、目盛: 50 cm)

GPS/GNSS の測位信号周波数では電離層遅延の一次項は搬送波周波数の二乗に反比例するため、電離層遅延は二周波 (L1、L2) 観測値を使って補正することができる。単純には二周波擬似距離、搬送波位相観測値それぞれの線形結合 (電離層フリー線形結合) を取ることで電離層の影響をほぼ完全に消去できる。ただし、電離層フリー線形結合では搬送波位相に含まれる整数バイアスの整数性が失われて、最終的に整数バイアスを解くことができなくなる。この問題を解決するための処理上の工夫は幾つか提案されているが、この問題についての解決策は後の整数バイアス決定の問題の項で述べる。

2.4 対流圏の影響

対流圏の影響も数 10 km 以上の基線長で無視できない。図 4 に 100 km 基線、500 km で解析した基線両端における全天頂対流圏遅延の差を示す。図は冬 (1 月)、夏 (7 月) の両者の例を示している。図で示すように夏は気温が高く大気中に含まれる水蒸気量が大きくなるために、大気中の水蒸気に起因する対流圏遅延の差や時間的な変動も大きい。それに比較して冬は対流圏遅延の空間変動、時間変動共に小さく、長基線 RTK 性能への影響は小さい。

通常、対流圏の影響は対流圏のモデルで補正することが多いが、特に水蒸気による遅延はモデル化が難しく、モデルの誤差が大きい。また地上での気温、気圧、湿度の計測もそれほど有効でないことが知られている。従って、精密測位では天頂方向の対流圏遅延量は適当な時間方向の相関

を仮定した未知パラメータとして推定し、仰角の寄与はアプリアリなマッピング関数で補正するという戦略をとることが多い。ただし、この戦略は受信機座標が固定的であるスタティック測位ではうまく働くが、受信機座標をホワイトノイズとして同時推定するキネマティック測位では原理的に座標の鉛直成分と天頂対流圏遅延の誤差の分離が難しく、推定値の独立性を確保するのが難しい。従って、数値気象予報モデルの導入等何らかの外部情報が必要になると思われる。

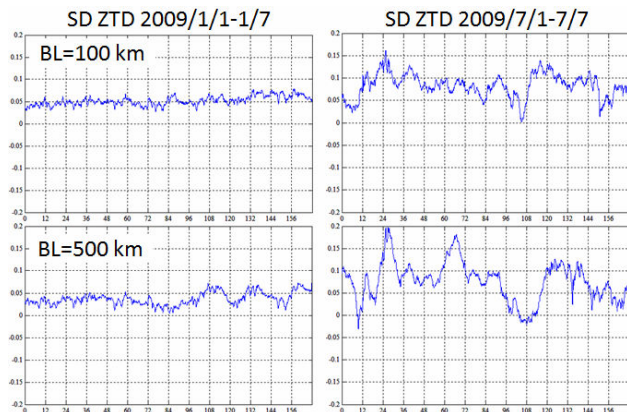


図 4 基線両端における鉛直対流圏遅延差例
(上: 基線長 100 km、下: 基線長 500 km、
左: 1 月、右: 7 月、目盛り: 10 cm)

2.5 その他誤差項の影響

基線長が延びることにより、無視できないその他誤差項としては、受信アンテナ位相中心変動、衛星アンテナ位相中心変動、地球潮汐、位相ウィンドアップ効果がある。

このうちアンテナ位相中心変動はユーザ受信機と基準局受信機のアンテナ機種に応じて、標準的なアンテナの検定モデルが存在するのでその変動モデルを適用すれば良い。衛星アンテナ位相中心変動、地球潮汐、位相ウィンドアップの影響は基線長 500 km 以下では通常 1 cm 以下であり、電離層や対流圏の影響に比較して無視してもそれほど大きな問題は無い。ただし基線長が 500 km を超える場合には補正が必要になる。これらの補正は既に確立された実績のある補正モデルが存在するため、それらの補正を適用すれば良い⁽⁴⁾。

2.6 整数バイアス決定の問題

RTK においては搬送波位相観測値に含まれる整数バイアスを解くことにより収束時間と測位精度を改善する。整数バイアスを解いた解をフィックス解、整数バイアスを解かない解をフロート解、と呼ぶが、通常 cm レベルの精度が得られる RTK 解はフィックス解のみである。従って長基線 RTK においても整数バイアス決定の方式が最終的な RTK 性能に直結することになる。

色々な技術改良の結果、短基線 RTK においては OTF (オンザフライ) 型の整数バイアス決定手法で実用的な性能が

得られるようになっている。ただし、この手法をそのまま長基線 RTK に適用することはできない。問題点としては以下の通りである。

- (1) OTF 型整数バイアス決定では最初に整数バイアスをフロート（実数）値として推定し、その推定値を統計的に最適な整数値に丸めることにより整数解を求める。長基線 RTK では各種の誤差項によりフロート推定値の推定誤差が大きくなり、整数に丸める際の間違い確率が大きくなり、実用的な性能が得られない。
- (2) 誤差項のうち最大のものである、電離層の影響を二周波の観測値を使って補正する場合、観測値に含まれる整数バイアスの整数性を維持したまま処理する必要があり、単純な処理手法は適用できない。

長基線 RTK における整数バイアス決定については幾つかの手法が提案されているが、まだ決定的な手法は存在しない。主な手法としては以下が上げられる。

- (a) ワイドレーン・ナローレーンバイアスを順次解くもの
二周波の搬送波位相測定値と擬似距離観測値を使って電離層フリー、整数バイアスの整数性を維持した線形結合を作ることができる。またこの整数バイアスの波長はワイドレーン波長 86 cm であり、単純な整数丸めで整数解を求めることが容易である。この線形結合の平均と整数丸めを使ってワイドレーンバイアスを解いた後、電離層フリー線形結合の整数バイアス推定値を使って、ナローレーンバイアスを整数化する。もともとは長基線の後処理スタティック測位様に開発された手法である。ただしキネマティック条件では一般に誤差項の影響を受け易く、収束時間が延びる傾向がある。今後新しい測位衛星が登場し、三周波観測値が得られるようになると新しいワイドレーン観測値（エキストラワイドレーン）が作れるようになり、より性能が上がると思われる。
- (b) 電離層・対流圏・整数バイアス推定、整数最小二乗
電離層、対流圏パラメータおよび整数バイアスを二周波の観測方程式に直接導入し推定を行う。推定した整数バイアス解を整数最小二乗により最適な整数値に丸める。短基線 RTK の整数バイアス決定手法を拡張した手法である。統計的には最適な手法であるが、処理は複雑で色々な誤差モデルのチューニングの必要もありその実装は簡単でない。整数バイアスの検定手法が確立されていない。

以上を再度まとめると長基線 RTK における整数バイアス決定手法そのものは確立された技術とは言いがたく、今後まだ手法の提案、評価がなされていく分野であると考えられる。

3. 長基線 RTK の実装と評価

3.1 RTKLIB

RTKLIB は筆者らが現在開発を続けている RTK 測位プログラムパッケージである⁽⁵⁾。RTK 測位アルゴリズムの内部評価用に開発した非常に単純な後処理基線解析プログラムを基にしている。現在では、色々な拡張を加えることによりリアルタイムの RTK 測位アプリケーションプログラムを含んだ多目的測位ソフトウェアパッケージとなっている。2009 年 1 月にリリースした RTKLIB 2.2.0 版からオープンソースソフトウェアと GPLv3 ライセンスにより公開を開始した⁽⁶⁾。プログラムパッケージにはソースコードも含まれており、誰でも GPLv3 ライセンスの制限のもとで無償で利用、修正、配布することができる。

2010 年 3 月現在の最新版は 2.3.0 版であるが、次の版 2.3.1 では長基線 RTK に必要な各種の機能を追加しておりその機能を使って長基線 RTK の性能評価を実施した。

3.2 長基線 RTK 実験結果

国土地理院の電離基準点から約 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 1000 km の基線の観測局を選択しその観測データを RTKLIB 2.3.1 版の後処理基線解析モードで処理を行いその性能（測位精度、フィックス率）を測定した。期間は 2009 年 1 月 1 日～7 日、2009 年 7 月 1 日～7 日とし、30 秒周期の観測データを使い、長基線 RTK と同一の条件で解析を行った。精密層は IGS 最終層、電離層と対流圏は推定、受信機アンテナ位相中心変動補正を入れ、整数バイアス決定は 2.4 (b) で示した手法を実装した。

表 1 にその結果をまとめて示す。また図 5 に 100 km 基線、300 km 基線の結果を示す。冬の結果では概ね良好な結果が得られており、測位手法に問題が無いことを示している。ただし、に夏の結果では冬に比較して明らかに性能が落ちており、対流圏の影響ではないかと考えられる。これについては今後その原因を調査し対策をとる予定である。

この結果はまだ予備的な実験結果と考えており、最終的な 2.3.1 版では色々な改良が加えられる予定である。

Rov	Ref	BL (km)	2009/1/1-1/7				2009/7/1-7/7			
			SDE	SDN	SDU	Fixing	SDE	SDN	SDU	Fixing
	3023	50.6	0.5	0.6	1.6	99.8%	1.6	1.9	5.7	90.2%
	0586	100.2	0.7	0.9	2.5	98.7%	4.0	2.7	9.3	78.1%
	0562	150.8	0.6	0.8	2.4	99.0%	3.7	2.2	6.6	83.6%
	0241	200.4	0.7	0.9	2.2	99.5%	3.4	3.4	15.0	85.2%
	0601	250.3	0.7	1.0	2.7	96.8%	3.2	2.1	6.5	79.1%
2110	0174	300.0	0.7	1.0	2.8	98.7%	2.0	1.8	5.2	88.0%
	0579	351.9	0.9	0.9	2.8	99.3%	3.4	3.9	11.2	81.3%
	0324	400.6	1.0	0.9	2.9	96.7%	2.6	2.0	6.5	74.3%
	0905	450.6	3.2	5.4	21.2	64.8%	7.2	5.7	19.7	63.2%
	0369	500.4	1.0	0.9	3.3	98.7%	2.4	1.8	6.0	85.6%
	0837	995.6	3.1	1.9	8.5	91.4%	7.0	7.3	19.4	66.0%

SDE/SDN/SDU: Standard Dev E/N/U (cm), v.2.3.1b, Eph=IGS

表 1 長基線 RTK 測位性能

4. おわりに

長基線 RTK の技術の現状について、課題とその対策について述べてきた。RTKLIB による予備的な実験評価結果についても述べた。最初に述べたように長基線 RTK は潜在的に多数の応用が見込まれており今後の技術開発が望まれる分野であると考えられる。

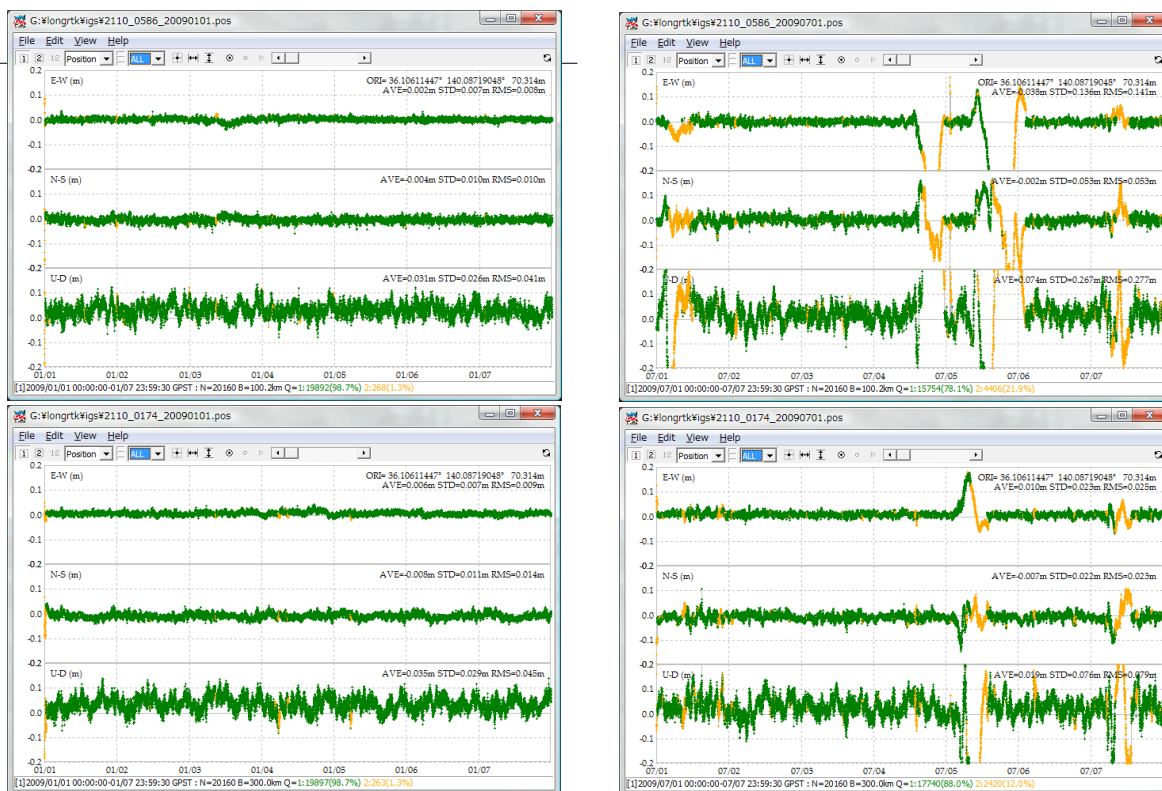


図 5 長基線 RTK-GPS/GNSS 測位精度 E-W、N-S、U-D (上下目盛: 10 cm)
30 秒間隔×168 時間、左: 2009/1/1-1/7、右: 2009/7/1-7/7、
上: 2110-0586 (基線長 100.2 km)、下: 2110-0174 (基線長 300.0 km)

文 献

- (1) 高須, 「RTK-GPS 及びネットワーク型 RTK-GPS 測位技術」, GPS/GNSS シンポジウム 2007, 2007/11/20-22, 東京海洋大学 (2007)
- (2) 加藤, 「GPS 津波計—宇宙技術を用いた津波防災システム—」, 検査技術, Vol. 7, No. 7 (2002 年 7 月号), pp. 52-57 (2002)
- (3) International GNSS Service - Formerly the International GPS Service, (<http://igsb.jpl.nasa.gov>)
- (4) 高須, 「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 シンポジウム 2005, 2005/11/16-18, 東京海洋大学 (2005)
- (5) 高須 他, 「RTK-GPS 用プログラムライブラリ RTKLIB の開発・評価及び応用」, GPS/GNSS シンポジウム 2007, 2007/11/20-22, 東京海洋大学 (2009)
- (6) RTKLIB: An Open Source Program Package for RTK-GPS/GNSS <http://gpspp.sakura.ne.jp/rtklib/rtklib.htm>