

# 低コスト GNSS 受信機を利用した構造物のリアルタイムの動揺監視

高橋 漱<sup>†</sup> 久保 信明<sup>†</sup> 山口 範洋<sup>‡</sup> 横島 喬<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究所 〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6

<sup>‡</sup> 清水建設株式会社技術研究所 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17

E-mail: <sup>†</sup> nkubo@kaiyodai.ac.jp, <sup>‡</sup> yamaguchi.norihiro@shimz.co.jp

**あらまし** 衛星測位分野において、悪環境下での RTK 測位の利便性向上は重要なテーマであり、特定の悪環境下では、その環境に応じた適切な計算手法を取り入れることで、RTK 測位の Fix 率や測位解の信頼性等を大幅に向上させられることが分かっている。本研究では、建物の壁面に対して垂直にパッチアンテナを取り付けて、低コスト GNSS 受信機で 24 時間の測位を実施し、実用レベルの精密な構造物の動揺のリアルタイムモニタリングに成功した。地震や地すべり等が起きた際の建物の屋上部分の動揺ではなく、壁面部分が引き起こす構造力学的な動揺や、構造物に日々生じる微小な移動量や傾き量を、高価な測量機器や測量級 GNSS 受信機ではなく、低コスト GNSS 受信機を利用した単一の小さなキットで正確に捉えたいという動機が本研究にある。

**キーワード** RTK 測位, 低コスト GNSS 受信機, 測量級 GNSS 受信機, 構造物, 動揺監視

## 1. はじめに

近年、位置情報を利用するスマートホン等のアプリケーションを中心に、正確な位置情報利用のニーズが高まってきている。また、欧州連合の Galileo や中国の BeiDou の衛星数増加によるマルチ GNSS の近代化、高性能な低コスト GNSS 受信機の台頭により、高精度測位が誰でも容易に行える時代に突入したといえる。センチメートルの精度で位置が分かる RTK 測位は、周囲に電波伝搬を阻害するような遮蔽物の少ないオープンスカイ環境では問題ないが、とりわけ低コスト GNSS 受信機を使用した建物が多い都市部等での測位に関しては、反射波や回折波等の影響により、測位解の信頼性や利便性が低下し、問題点が浮き彫りになることはよく知られている。本研究では、特定の環境下での測位に焦点をあて、利便性が大きく改善される提案手法を紹介したい。

企業による耐震偽装等の問題が頻繁に報道で取り沙汰されているように、地震大国である日本では、安全の観点から地震や地すべりが起きた時に、どの程度建築物が動揺するのかといった情報を事前に把握しておくことが建築の分野では求められている。高価な測量機器を用いれば、建物の位置は正確に分かるが、地震発生時にどれほどの動揺を引き起こすのかといった精度の高い定量的なデータを取得することは既存の手法では極めて難しい。そこで、RTK 測位を構造物の壁面に適用し、リアルタイムで構造物の動揺を監視できる手法を用いることで、地震等発生時にどの程度の動揺が起きているのかを定量的かつ低コストで把握することが可能になる。建築物の屋上で RTK 測位を用いれば、建物の屋上部分の動揺を正確に把握することは

きるが[1]、実際には高層建築物等の壁面部分が引き起こす構造力学的な複雑な動揺を把握するニーズが建築の分野では大きい。本研究では、Tallysman 社製の低コストで小型の GNSS パッチアンテナを、建物の壁面に取り付け、100 ドル以下の価格帯で購入できる u-blox 社製の低コスト GNSS 受信機と受信機の電源であるモバイルバッテリー (図 1) のみを用いて RTK 測位を行った。単純に壁面にアンテナを取り付けて測位を行うと、回折波の影響や衛星配置の劣化により、擬似距離による測位誤差が拡大するため、通常の RTK 測位のアルゴリズムでは Fix 解を得ることは難しい。そういった課題を克服する提案手法を 2 章の 2.2 に、実験状況を 3 章に、測位結果を 4 章に、そしてまとめと今後の課題を 5 章に示す。



図 1. 低コスト GNSS 受信機セット

## 2. 既存の解析ソフトウェアと提案手法

提案手法のアルゴリズムについて言及する前に、RTK 測位の計算において前提とする幾つかの条件について触れる。u-blox 社製の受信機は、搬送波位相の受信瞬間等が起きた時に立つ LLI (Loss of Lock Indicator) のフラグが出力されるようになっているた

め、搬送波位相を使用するか否かの判定、すなわち測位計算に使用する衛星の選択に関しては、本研究では LLI フラグを信用した。また、一般的に、構造物壁面に対して垂直にアンテナを取り付けた場合、上空視野が壁面により半分程度遮蔽され、特に見通し不可の衛星から伝搬してくる NLOS (Non-Line-of-Sight) と呼ばれる回折波の影響を考慮しなくてはならない。一方、壁面に接していることから、反射波が持つ搬送波位相観測値の遅延量は非常に小さいため、搬送波位相マルチパスの影響は考慮しなくてよいことが分かっている。衛星配置の偏りによる DOP の劣化に関しては、必要な精度に応じた閾値を設定することで、影響を小さく抑えることができる。また、既存の衛星選択手法の研究として、魚眼カメラを利用した NLOS 衛星の判定があるが[2]、u-blox 社製の M8 シリーズの受信機を用いた多くの実験結果より、捕捉した衛星のデータが NLOS であるかそうでないかを判定するための最適な信号強度の閾値が約 35dB-Hz であることが分かっているため(図2)、その値を解析の設定で採用した。さらに、壁面に対して垂直に設置することが最適な測位状況であるかどうかを測るために、壁面に対して水平に設置する方法と 45° 傾けて設置する方法も初期実験も実施した(図3)。初期実験の結果より、壁面に対して垂直に設置する方法が一番良好なデータを取得できることが分かり、本研究では垂直の方向を採用した。

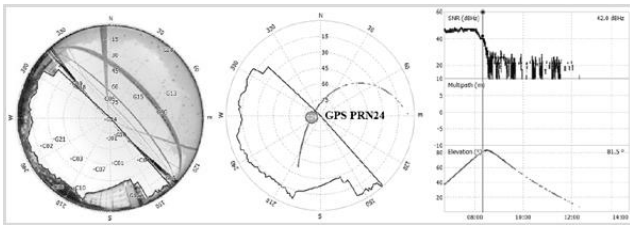


図 2. 上空画像と NLOS 衛星の信号強度の推移

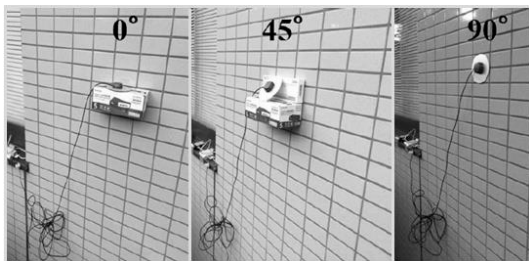


図 3. 初期実験 (壁面に対して垂直, 45°, 水平)

## 2.1. RTKLIB による解析

取得したデータを解析するために、無料で入手可能な GNSS 測位計算ソフトウェアとしてよく知られている、東京海洋大学の客員研究員である高須知二氏が開発した RTKLIB (ver. 2.4.3 b29) を使用した。RTKLIB の後処理測位計算機能である RTKPOST を使用し、取得したデータの解析をあらゆる設定で試し、一番良いと思われる結果を提案手法に対する比較材料として用

いた。一般に、厳しい環境でデータを取得して RTKLIB で解析する際に、一番良好な最終結果が得られる設定を見つける作業は労力を伴うが、仰角マスクや信号強度マスク、サイクルスリップ判定値などの最適値を見つけて適用すると、魚眼カメラ等を用いた時の衛星選択手法で見られる改善度合いと同等の改善が期待できることが本研究では分かっている。

## 2.2. 提案手法による解析

提案手法の RTK 測位のアルゴリズムの大部分は、標準的な手法であり、整数値アンビギュイティを決定する LAMBDA 法や、LAMBDA 法で求められた Fix 解の信頼性を検定する Ratio テストなどを採用している。

### A) Float 解とアンビギュイティ決定

標準的な RTK 測位の計算部では、擬似距離観測値と搬送波位相観測値の二重差が計算され、二重差を利用することで、受信機と衛星固有のバイアス成分を相殺している。加えて、対流圏遅延による影響も、基準局と移動局の距離が離れていなければ (10km 以内)、効果的に取り除くことができる。二重差観測値のモデル式は以下のように定義される[3]。

$$(1) \quad DDP = (P_{erf}^{sv1} - P_{ref}^{sv2}) - (P_{rov}^{sv1} - P_{rov}^{sv2}) = \rho_{code} + \varepsilon_{code}$$

$$(2) \quad DD\Phi = (\Phi_{erf}^{sv1} - \Phi_{ref}^{sv2}) - (\Phi_{rov}^{sv1} - \Phi_{rov}^{sv2}) \\ = \rho_{phase} + \lambda N + \varepsilon_{phase}$$

ただし、 $p$  [m]、 $\Phi$  [m] はそれぞれ擬似距離観測値と搬送波位相観測値を表し、 $\rho$  [m] は二重差による幾何学的距離を、 $\lambda$  [m] は搬送波の波長、 $N$  は二重差による整数値アンビギュイティ、 $\varepsilon$  [m] はマルチパスによる影響を含んだ二重差のノイズ誤差を表す。

はじめに、三次元位置 (Float 解など) と実数のアンビギュイティを決定するために、二重差観測値が利用される。Float 解の推定に関する詳細は後述の C 節にて参照されたい。その次に、最適化による整数値アンビギュイティ決定 (AR 計算部) がなされる。AR 計算部ではコスト関数を最小化する方法で最適な整数値アンビギュイティを探索する。コスト関数は以下のように定義される。

$$(3) \quad C(N) = (N - \hat{N})^T W_N (N - \hat{N})$$

ただし、 $N$  はコスト関数内で最小化された整数値アンビギュイティを表し、 $\hat{N}$  は Float 解のアンビギュイティを、 $W$  は共分散行列の逆行列を表す。

LAMBDA 法は AR 計算部で一般的に用いられる最小二乗法を根幹とした手法であり[4]、最適な整数値アンビギュイティを決定する手法としては最も普遍的なも

のと位置づけられている。

### B) 整数値アンビギュイティ検証

LAMBDA 法によって整数値アンビギュイティが決定された後は、そのアンビギュイティが信頼できるか否かを検定する。幾つかの検定手法が存在するが[5]、本研究では標準的な Ratio テストと呼ばれる検定手法を用いる。整数最小二乗法に基づく Ratio テストは厳しい環境下で取得されたデータに対して効果的な検定手法であることが分かっている。本研究では、短基線の RTK 測位のデータを使用しているため、Ratio テストの閾値は固定値を採用した。Ratio テストの定義では、コスト関数によって算出された Float 解のアンビギュイティ残差からの差分を用いて算出した比が、閾値以上であるかどうか比較評価される。

Ratio テストで算出される Ratio 値は以下のように定義される。

$$(4) \quad \text{Ratio} = \frac{C(N_2)}{C(N_1)} > \text{Threshold}$$

ただし、 $C(N_1)$  は候補として最有力の整数値ベクトルのコスト関数の出力値を、 $C(N_2)$  は候補として二番目に有力な整数値ベクトルのコスト関数の出力値を表し、*Threshold* は閾値を表す。上式は、算出される比が閾値よりも大きければ、その整数値アンビギュイティの組み合わせが信頼されることを意味する。設定すべき閾値は経験的に決まっており、環境に応じて 2~3 の値が通常使用される。本研究では、閾値は 3 を採用した。

### C) 悪環境下でのロバスト RTK 手法

壁面測位等の悪環境下で RTK 測位の性能を上げるには、正しいアンビギュイティを探索するアルゴリズムに改良を施す必要がある。また、良質な衛星を選択することも非常に重要である。一般的には、Float 解のノイズ誤差を低減できるカルマンフィルタに基づく RTK 測位と信号強度に応じた衛星選択手法が用いられる。本研究では類似の衛星選択手法を取っているが、ノイズ誤差等を除去するための手法としてカルマンフィルタは採用していない。なぜなら、通常、建造物の動揺は極めて小さく、動揺の速度も遅いといわれており、橋梁であっても一日に 10cm 以下の動揺といわれているためである。建造物の動揺を検知するという目的においては、予め動揺の程度が分かっているため、アンテナの移動量に関する制約を厳しく設定することが可能である。また、提案手法では移動局のアンテナの初期精密位置を事前に把握しておくことが極めて重要である。仮に精密位置の情報がなかったとしても、測位をしたい箇所にアンテナを取り付け、一度 RTK 測位で正確な位置を知ることができれば、その位置を初

期位置として利用することができる。壁面での RTK 測位で最も障害となる要因が、大きな擬似距離マルチパスであり、通常アルゴリズムで RTK 測位をすると、結果の信頼性は低くなる。一方、予めアンテナの位置が 10cm 以内で正確に分かっていたら、既に高精度な Float 解を持っていて、それが利用可能なことと同義であるため、搬送波位相のアンビギュイティを決定する計算部分で擬似距離観測値が利用できなくても特に問題はない。上記の手法（以下、ロバスト RTK 手法と呼ぶ）を用いることで、上空視野が半分程度遮られている環境でも、RTK 測位の性能は通常アルゴリズムと比較して劇的に向上する。また、そういった環境では、価格帯で 10,000 ドルを超える測量級 GNSS 受信機の内部の測位エンジンを使用したとしても、RTK 測位の性能は非常に低下することが分かっている（4章の b）。

ロバスト RTK 手法を用いると同時に、各衛星に対して既に求められたアンビギュイティを保持する手法も同時に利用する。サイクルスリップを起こす衛星に注意しながら、予め求められているアンビギュイティを利用して Fix 解を算出する。ロバスト RTK 手法で求められた位置とアンビギュイティを保持することで求められた二つの位置を確保し、その二つの位置がアンテナの精密位置である初期位置から 10cm 以内であるかどうかを調べた後、どちらかを採用し、最終的に出力する Fix 解の信頼性を高める。さらに、大きな地震等が起きた際、サイクルスリップが起きていない幾つかの衛星のアンビギュイティ情報を保持でき、1 秒間に数 cm 以上の速度で建造物が動揺していると判定できた場合は、アンビギュイティを保持することで得た Fix 解を信頼する。なお、本手法では、使用可能である衛星が最低でも 5~6 機に満たない場合は、位置を算出することは不可能である。大きな動揺が生じた際には、高層ビルの上層では 50cm をゆうに超える動揺が生じるといわれている。ロバスト RTK 手法においては、アンビギュイティの探索範囲の制限により、20cm を超える動揺を追尾することは難しいという理由から、上述のアンビギュイティを保持する手法も取る。図 4 に提案手法のアルゴリズムのフローチャートを示す。

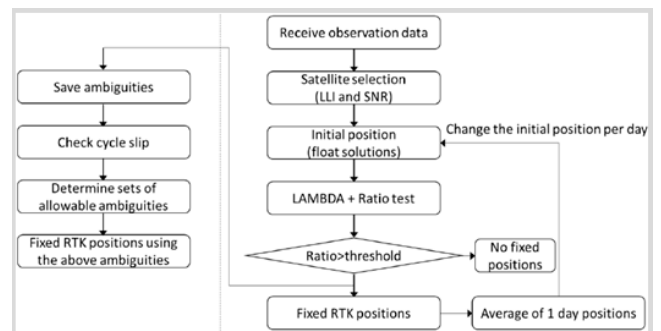


図 4. 提案手法のフローチャート

### 3. 実験概要

2017年11月中の数日にわたって、前述の測位実験を実施した。東京海洋大学海洋工学部の構内に存在する3号館の壁面（南西、北西、北東、南東の方角を向く壁面4箇所）を実験場所として選択し、23時間～24時間分のデータを取得した。使用した機材等の情報を表1に示し、実験場所を図5に、図6に南西方向の壁面の実験状況を例として示す。なお、同じ大学構内にある第4実験棟の屋上に常設の基準局が設置されている。

表1. 使用機材等

測位間隔	1 Hz
GNSS受信機	移動局: NEO-M8T SCR-u2C (u-blox) 基準局: NEO-M8T SCR-u2C (u-blox)
使用衛星	RTKLIB: GPS/QZSS/BeiDou/Galileo 提案手法: GPS/QZSS/BeiDou/Galileo or GPS/QZSS/BeiDou
アンテナ	移動局: Patch-antenna TW4721 (Tallysman Wireless) 基準局: Zephyr2 Geodetic (Trimble)
その他	モバイルバッテリー、アンテナ固定用本立て等

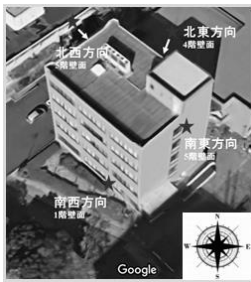


図5. 実験場所

図6. 南西方向壁面の測位

### 4. 実験結果と評価

#### a. 提案手法による測位結果

各壁面で測位した結果を以下に表と図で示す（図7～図10, 表2～表5）。表中では、Fix率[%], 信頼性[%], 測位解の真値（2章の2.2で言及した移動局アンテナの精密位置）からの水平方向のずれの標準偏差[m]と平均[m]を示している。南西方向の壁面の測位では24時間分のデータを取得したため、総エポック数は86400となり、他の方向の壁面の測位は23時間分のデータであるため、総エポック数は82800となる。なお、ここでは水平方向で真値から10cm以内の解を信頼できる解とした。

RTK測位解の信頼性は以下のように定義される。

$$(5) \quad Reliability = \frac{\text{Number of reliable solutions}}{\text{Number of fixed solutions}} \times 100$$

RTK測位のFix率は以下のように定義される。

$$(6) \quad Fix\ rate = \frac{\text{Number of fixed solutions}}{\text{Number of all epochs}} \times 100$$

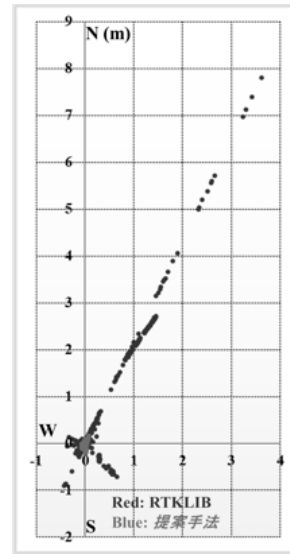


図7. 南西の水平結果

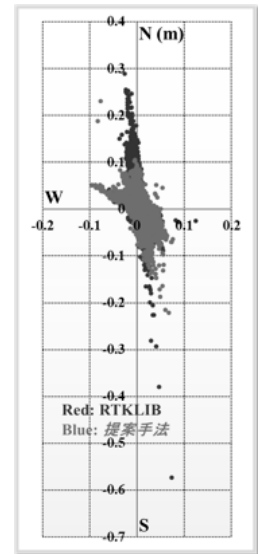


図8. 南東の水平結果

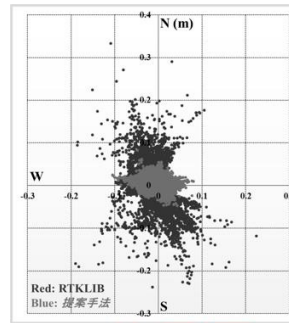


図9. 北西の水平結果

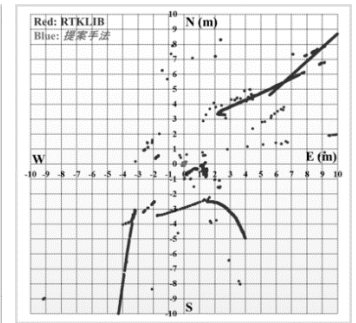


図10. 北東の水平結果

表2. 南西方向の壁面の測位結果

南西方向の壁面	RTKLIB	提案手法
RTK測位のFix率 (%)	91.8%	98.2%
Fix解の個数	79314 (GBQE)	84822 (GBQE)
水平方向の信頼性 (%)	99.15%	99.77%
信頼できる解の個数	78638 (GBQE)	84622 (GBQE)
ずれの平均 [m]	0.0214	0.0117
ずれの標準偏差 [m]	0.173	0.0117

表3. 南東方向の壁面の測位結果

南東方向の壁面	RTKLIB	提案手法
RTK測位のFix率 (%)	97.5%	96.4%
Fix解の個数	80697 (GBQE)	79805 (GBQE)
水平方向の信頼性 (%)	99.66%	99.85%
信頼できる解の個数	80426 (GBQE)	79682 (GBQE)
ずれの平均 [m]	0.0115	0.0081
ずれの標準偏差 [m]	0.0132	0.0222

表4. 北西方向の壁面の測位結果

北西方向の壁面	RTKLIB	提案手法
RTK測位のFix率 (%)	93.9%	97.4%
Fix解の個数	77739 (GBQE)	80681 (GBQ)
水平方向の信頼性 (%)	99.06%	99.99%
信頼できる解の個数	77006 (GBQE)	80676 (GBQ)
ずれの平均 [m]	0.0165	0.0119
ずれの標準偏差 [m]	0.0186	0.0085
Average number of used satellites	9.7	8.3

表 5. 北東方向の壁面の測位結果

北東方向の壁面	RTKLIB	提案手法
RTK測位のFix率 (%)	29.1%	12.5%
Fix解の個数	24133 (GBQE)	10331 (GBQE)
水平方向の信頼性 (%)	35.92%	99.40%
信頼できる解の個数	8669 (GBQE)	10269 (GBQE)
ずれの平均 [m]	20.2	0.0461
ずれの標準偏差 [m]	254	0.0173

提案手法により、どの方角の壁面においても、RTKLIBの結果よりも信頼性の高い解が増加し、改善されていることが分かる。特に南西方向と南東方向は、BeiDouの可視衛星数が多く、精度に寄与する部分が多い。また、どの方角においても、信頼性は99%を超える性能が得られた。どの方角においても、壁面に対して垂直の方向に測位解が伸びているが、これは衛星配置によるものである。北東方向の壁面でFix率が低いのは、他の方角と比較して衛星数が圧倒的に少ないことによるが、今後のQZSSやGalileoの配備、低コストの多周波対応GNSS受信機(u-blox社製のZED-F9P等)の利用により、性能は問題なくなると思われる。

結果より、少なくとも3~4cmの構造物の挙動は十分に検出可能であることが分かる。加えて、地震等が起きる際はさらに大きな動揺が生じるため、動揺が生じるタイミングと動揺の振幅を正確に把握することが可能となる。そういった情報は建築・建設に関連する企業にとって非常に重要かつ有用である。さらに、一日毎の測位解の平均を取得し、長期にわたって観測を続ければ、構造物の移動量や傾き等を確認することも可能である。

### b. 壁面での市販受信機の測位性能

リアルタイムのRTK測位の機能を備えた低コストGNSS受信機の性能を調べるために、同様の実験を2017年の4月に南東方向の壁面で実施した。u-blox社製のNEO-M8Pを使用し、5Hzの測位間隔で1時間分のリアルタイムの測位結果を取得した。図11に水平方向の測位結果を示す。

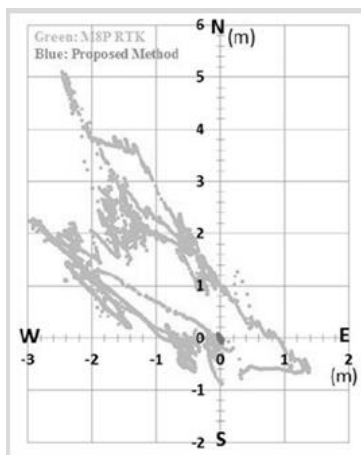


図 11. 南東の水平結果(u-blox社製 NEO-M8P 使用)

ほとんど全ての測位結果はFloat解であり、アンテナが壁面での測位といった悪環境下ではu-blox社製のNEO-M8PはRTK測位が出来ないことが分かった。

同様に、Trimble社製のSPS855測量級受信機も使用して、2017年の7月に南西方向の壁面で実験を実施した。10Hzの測位間隔で1時間分のリアルタイムの測位結果を取得した。図12に水平方向の結果を示す。

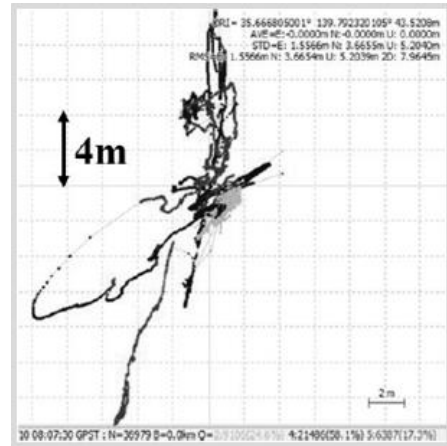


図 12. 南西の水平結果(Trimble社製 SPS855 使用)  
低コストGNSS受信機の結果と同様に、測量級受信機を使用してもFix解は得られなかった。図12では、赤のプロットが単独測位解を示し、青がDGNSS解を、黄色がFloat解を示す。よって一般的に市販されているGNSS受信機は、こういった厳しい環境でのRTK測位には対応していないということが分かる。

### c. 追加実験

前述の実験に加えて、アンテナを壁面に沿って手動で短時間動かす続け、アンテナの精密位置をFloat解として利用するロバストRTK手法のFix解がしっかりとアンテナの動きを追尾できているかどうかの検証を2017年4月に南西方向の壁面にて実施した。図13に実験状況を示し、地面に対して水平方向に1分間動かし、垂直方向に1分間動かした時の結果を図14と図15に示す。測位間隔は5Hzであり、動かした幅は左右、上下ともに約10cmである。



図 13. 壁沿いに動かす実験

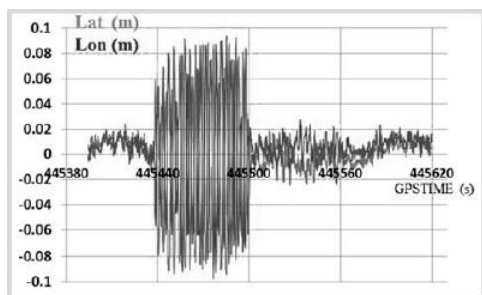


図 14. 水平方向の移動量

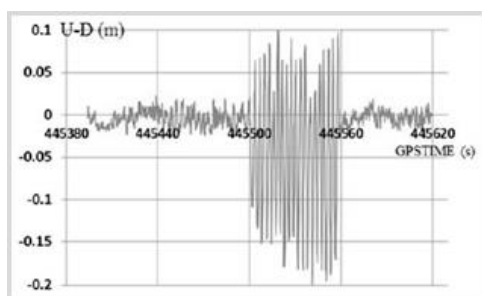


図 15. 高さ方向の移動量

結果より、水平方向、高さ方向ともにアンテナ位相中心をしっかりと追尾できていることが確認でき、この手法が有用であることが確認できた。

同様にして、アンビギュイティを保持する手法の性能を検証するために、さらに大きい動揺を想定した類似の実験を2018年1月に南西方向の壁面ににて実施した。アンテナを移動させるために使用したポールと実験状況を図16と図17に、RTKLIBを解析に使用した結果とアンビギュイティ保持の手法による結果を図18と図19に示す。アンテナ付きのポールを壁沿いに1分間動かし、弧を描くように動かした幅は約40cmである。測位間隔は5Hzである。



図 16. 実験に使用したポール

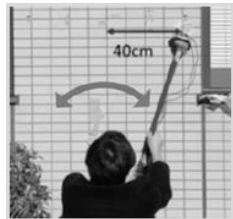


図 17. 実験状況

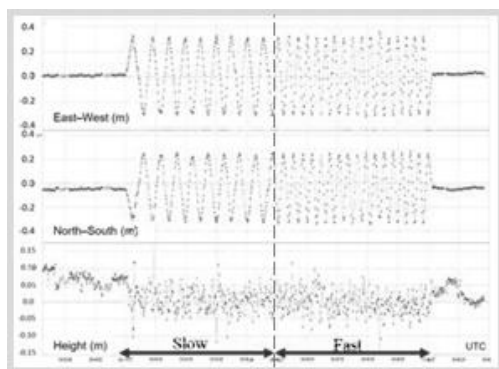


図 18. RTKLIB の結果

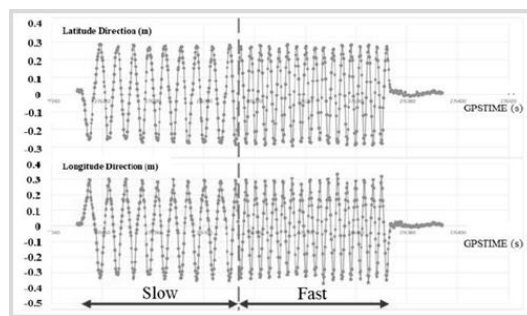


図 19. アンビギュイティ保持の手法による結果  
RTKLIB を使用して解析した結果では Float 解やミス Fix 解が見られるが、提案手法の結果の Fix 率は 100% であり、ミス Fix 解も見られなかった。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、構造物の壁面にアンテナを取り付けるといった悪環境下で、低コスト GNSS 受信機を使用し、構造物の動揺を監視する手法を提案した。南西、南東、北西方向の壁面の結果に関しては、Fix 率や信頼性、標準偏差等の値において極めて良好な値を得ており、十分に実用レベルに達していると思われる。北東方向の壁面の結果に関しては、数年以内のマルチ GNSS の近代化や低コストの多周波対応 GNSS 受信機により、同様の Fix 率や信頼性を得ることができ、方角に関係なく測位が可能になると思われる。

検証は 23 時間～24 時間分の測位データの解析であるため、今後は 1 ヶ月程度の長期のデータも解析していく予定である。また、東京海洋大学構内の建物を一例として取り上げたが、今後は実用を目指し、高層建築物の壁面のデータ等も取得する予定である。

## 参 考 文 献

- [1] Akihito YOSHIDA, Yukio TAMURA, Masahiro MATSUI and Sotoshi ISHIBASHI “MEASUREMENT OF WIND-INDUCED RESPONSE OF BUILDINGS USING RTK-GPS AND INTEGRITY MONITORING” Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Volume 68 (2003) Issue 571 Pages 39-44
- [2] Hiroko Tokura, Nobuaki Kubo “Effective Satellite Selection Methods for RTK-GNSS NLOS Exclusion in Dense Urban Environments” ION GNSS+ 2016, 15 September 2016
- [3] Misra, P., and Enge, P. “Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance Second Edition”. Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [4] Teunissen PJG “The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation” Journal of Geodesy 70.1-2.1995
- [5] Verhagen, S. “The GNSS integer ambiguities: estimation and validation” TU Delft, Delft University of Technology, 2005.