

地上型補強システム（GBAS）の衛星故障モニタの検討

福島 荘之介

Sonosuke FUKUSHIMA

電子航法研究所 通信・航法・監視領域 主幹研究員

1. はじめに

地上型補強システム（GBAS : Ground-Based Augmentation System : ジーバス）は、MSAS など SBAS（エスバス）と並ぶ GPS 補強システムであり、特に次世代の進入着陸システムとして有望視されている。既にボーイング社・エアバス社は、B787・A350 などの次世代機に GBAS 機上装置を標準装備すると発表した。また、国内大手エアラインは、GBAS 対応機種を大量に導入する計画である。

ICAO（国際民間航空機関）は、2001 年に GBAS の国際標準及びその勧告方式（SARPs Annex10）を発行し、ILS 基準から導いた (1) 精度、(2) インテグリティ（完全性）、(3) コンティニューイティ（連続性）、(4) アベイラビリティ（有効性）を定義した（現在 CAT-I までを発行しており、CAT-II/III も精力的に検討されている）[1]。このうちインテグリティは、「システムに異常が生じ航法に利用してはならないとき、機上において極めて高い確率でタイムリーに警報を発生する信頼度の指標」、平たく言えば「警報がでる確実さ」であり、システムの安全に係わる重要な指標である。国際標準では、CAT-I 精密進入のインテグリティ要件を、「どの 1 アプローチにおいても $1 - 2 \times 10^{-7}$ 以下とすること」と高い確率で規定している。

インテグリティを破綻させるシステムの異常は、主に (1) GPS 衛星の故障・不具合、(2) 電離層や対流圏による GPS 信号の異常、(3) 地上システムの故障・不具合、に分類される。FAA は、地上システムの仕様にこの具体例を記述しており、脅威モデル（threat model）と呼んで、地上システムがモニタ機能を持つことを要求した[2]。上記脅威に対する GBAS のモニ

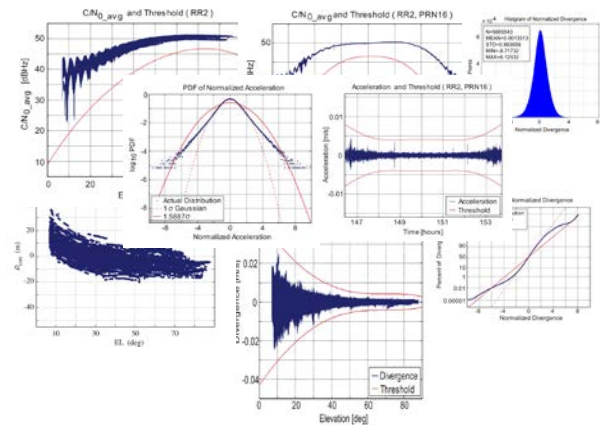


図 1 : 開発ソフトウェアのグラフ例

タは、基本的には現在の ILS のモニタと同様の目的を持つと考えてよい。ただし、ILS のモニタは自身の送信信号を監視し、異常時には送信信号を停止して、機上側で警報を発生させる。これに対し GBAS は異常な衛星だけ補正信号を送信せず、機上側では補正值が受信された正常な衛星を利用して警報を判断する仕組みである。これは、ILS と同様 GBAS が放送型のため、地上側は機上側がどの衛星を利用しているかを把握できないからである（SBAS も同様）。また、モニタ装置としての実現手段も大きく異なり、ILS ではモニタが送信部と別のサブシステムとして扱われるのに対し、GBAS では補正值を生成する主プロセス内部にモニタが存在しており、同一サブシステム内のソフトウェアとして実現される。

従来からスタンフォード大学においてモニタアルゴリズムの基礎検討が行われており、インテグリティモニタ・テストベット（IMT）と呼ばれるソフトウェアプロトタイプが開発された[3, 4]。しかし、これ以外に研究結果が報告された例はほとんどない。そこで電子航法研究所では、IMT と同等のモニタアルゴリズムを開発し、

国内の空港で連続収集した GPS 観測データを利用して性能評価を進めている。図 1 に開発したソフトウェアのグラフ例を示す。本稿では、2007 年と 2008 年の電子航法研究所研究発表会で報告した衛星異常検知モニタの検討結果について概要をまとめる。

2. GBAS とインテグリティモニタ

GBAS 地上システムは、空港内に設置される基準局受信機（通常 4 式）、データ処理部、VHF データ送信機（VDB : VHF Data Broadcast）から構成される（図 2）。放送データには、主に受信 GPS 衛星の補正值、補正值変化率の他、インテグリティ情報、最終進入パス情報が含まれる。GBAS 機上装置は、放送データから各衛星の補正值を得て、機上 GPS 受信機の擬似距離（GPS の拡散コードより求められる距離、受信機時計によるバイアス誤差を含むため「擬似」と呼ばれる）に適用しディファレンシャル GPS の原理により測位する。また、測位誤差の保護レベル（Protection Level）を計算して、しきい値と比較し警報を判定する。保護レベルは、放送データにインテグリティ情報として含まれる補正值誤差のパラメータ（ σ_{pr_gnd} ）、機上誤差源パラメータ、機上受信衛星の幾何等から計算される。

GBAS 地上システムによりモニタを必要とする脅威モデルは、（脅威 1）GPS 信号の電力低下、（脅威 2）コード・搬送波ダイバージェンス、（脅威 3）擬似距離の加速度過剰、（脅威 4）放送暦異常、（脅威 5）電離層の異常勾配、（脅威 6）信号歪み、である。このうち、（脅威 5）が自然現象である以外は GPS 衛星の故障・不具合による信号異常が原因である[5]。信号異常により GPS 測距誤差が増加したとき、保護レベルは正しく計算されない可能性があり、測位誤差が保護レベルを越える危険な事象（HMI : Hazardously Misleading Information と呼ばれる）が発生しインテグリティ要件が破綻する可能性がある[6]。機上の測位値・保護レベルは、放送される各衛星の補正值などを利用して計算される仕組みなので、地上モニタが異常衛星を

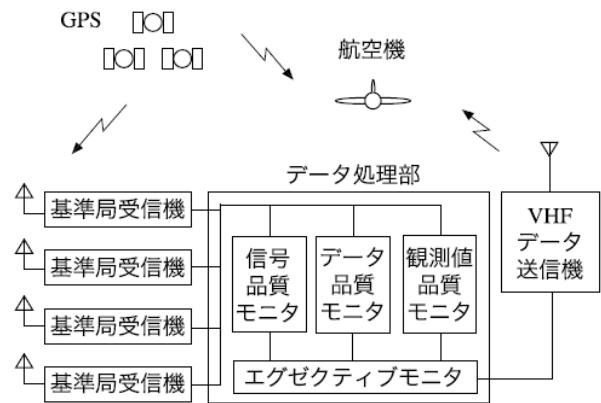


図 2 : GBAS 地上システムの構成

検知し、異常衛星の補正值を排除すれば HMI は回避することができる。

IMT のアルゴリズムは、図 2 のデータ処理部の主要要素を模擬している。IMT の入力は、4 台の基準局受信機が出力する受信 GPS 衛星の擬似距離（コード）、搬送波位相、放送暦、受信機のステータスである。IMT は、信号品質モニタ（SQM : Signal Quality Monitor）、データ品質モニタ（DQM : Data Quality Monitor）、観測値品質モニタ（MQM : Measurements Quality Monitor）、エグゼクティブ・モニタ（EXM : Executive Monitor）から構成される。このうち SQM は、GPS 受信信号レベルの低下を検知する機能、MQM は主に観測値であるコード・搬送波のダイバージェンス、搬送波位相の加速度・ランプ（傾斜）・ステップ、擬似距離変化を検知する機能、DQM は放送暦異常を検知する機能を持つ。本研究では、これら 3 つのモニタを扱った。この内、SQM の原理は、MQM と同様であるため、次章では MQM と EXM を述べる。

3. 観測値品質モニタ（MQM）の異常信号検出アルゴリズム

3. 1 オーババウンド法

観測値品質モニタ（MQM）の検出アルゴリズムの特徴は、警報のしきい値を決定するために、ガウスオーババウンド法（Gaussian Over

bounding Method) を利用することにある。本

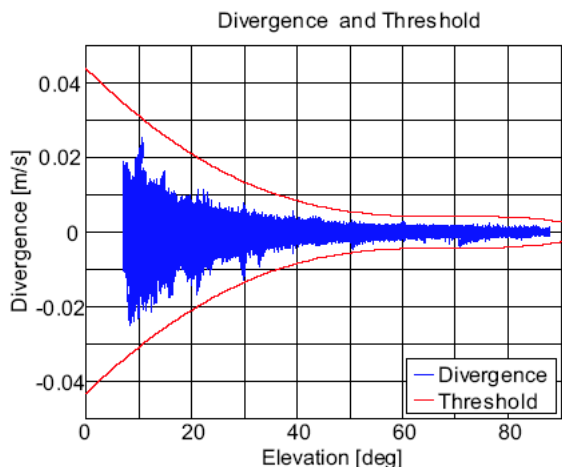


図 3 : コード・搬送波ダイバージェンス

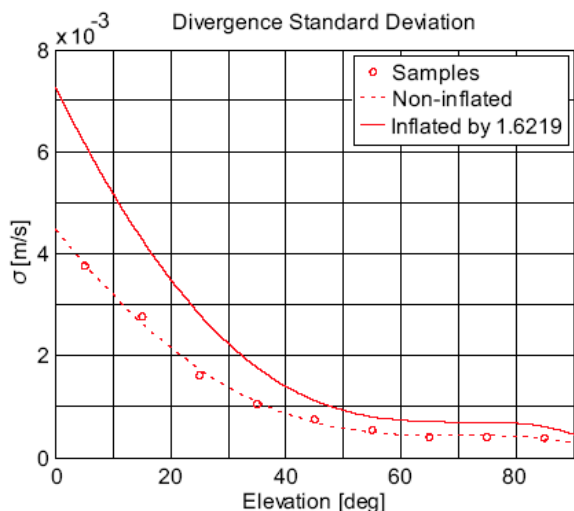


図 4 : ダイバージェンスの標準偏差

節では、(脅威 2) コード・搬送波ダイバージェンスの検定を例に本手法によるしきい値の決定法を説明する。図 3 に観測値より求めたコード・搬送波ダイバージェンスを示し、本例の検定統計量(しきい値と比較されモニタされる量)とする。本統計量は、コード擬似距離と搬送波位相から換算した距離の差分の変化量の移動平均であり、マルチパス誤差、電離層遅延量の変化率が含まれる。このため本統計量は仰角に依存し、この解消のため図 4 に示すように 10 度毎の仰角の区間でダイバージェンスの標準偏差 σ を計算し(赤丸)、4 次式で補間する(赤波線)。次に、図 5 に示すようにダイバージェンスを σ で除して正規化し頻度分布(図 6)を求める。

図 7 の青点は、この頻度分布を全サンプル数

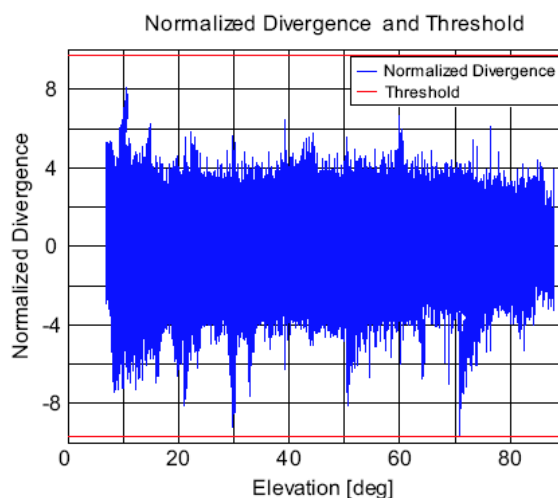


図 5 : 正規化ダイバージェンス

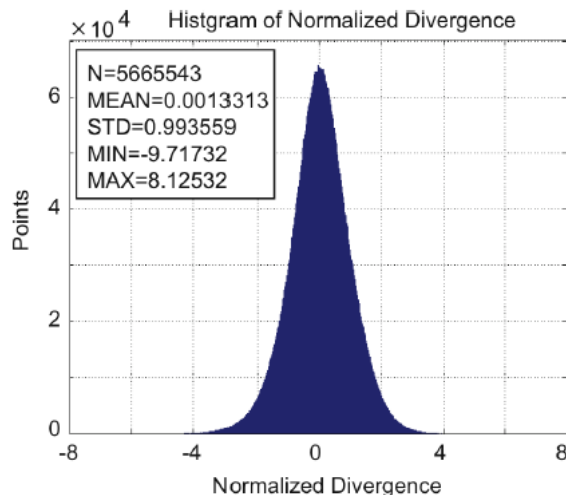


図 6 : 正規化ダイバージェンスの頻度分布

で除し、確率密度関数を求めたものである。この結果、確率密度関数は、ガウス分布(正規分布)の中心部と指数分布に近い裾野からなる混合分布と考えられる。図 7 中の赤波線は、確率密度関数の標準偏差を持つガウス分布であり、赤実線は確率密度関数をオーバーバウンドする分布と呼ばれる。オーバーバウンド分布は、 $\pm 6\sigma$ 付近で確率密度関数を越えるガウス分布である。ただし、一般に確率密度関数の全区間の累積は 1 となるため、ゼロ付近では確率密度関数よりオーバーバウンド分布が小さい。このオーバーバウンド分布の標準偏差と密度関数の標準偏差の比はインフレーション・ファクタ(inflation factor) f と呼ばれる。

図 8 は、上記の累積密度関数である。この方

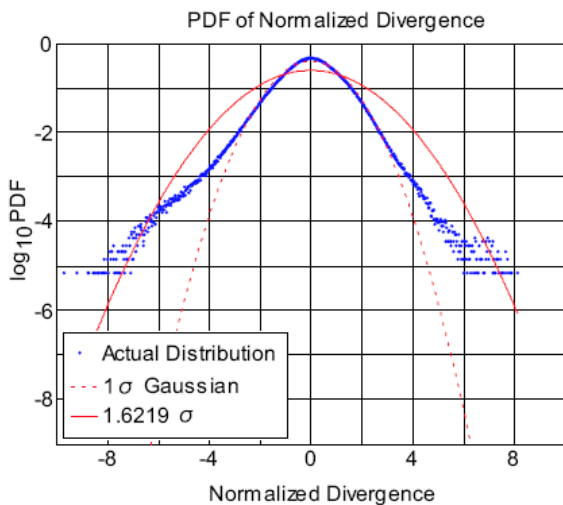


図 7：確率密度関数とオーババウンド分布

法では、 -6σ 付近でオーババウンド分布（赤実線）が累積密度関数（青点）を越え、かつ、 $+6\sigma$ では累積密度関数未満となる。確率密度関数からオーババウンド分布を求める方法は、確率密度関数の形状が特殊な場合に例外を残しており IMT では累積密度関数による方法が採用されている。このため本研究でも累積密度関数を利用した。ただし、直感的な理解には、確率密度関数とオーババウンド分布の関係図がわかりやすい。この結果決定されたオーババウンド分布の $f\sigma$ は、図 4 の赤実線である。最後に、ダイバージェンスのしきい値を $6f\sigma$ （図 4 赤実線の 6 倍）と決定する。これが、検定統計量のしきい値であり、図 3 の赤実線となる。

以上の手法は、検定統計量がガウス分布より裾野が広い分布を持つため、保守的にこの分布より大きめのガウス分布（オーババウンド分布： $f\sigma$ ）を考えて、標準偏差の 6 倍をしきい値に設定していることに等しい。6 倍はガウス分布の確率密度関数から、しきい値の誤警報確率が 1.9732×10^{-9} 以下となることを意味しており、これはコンティニューイティ要求のリスク割り当てから決める値である。このため、厳密には GBAS 地上システムの設計時に本モニタに対するコンティニューイティのリスク割り当てを決定した後に、6 倍という値を決めるべきであるが、本研究では参考にした論文と同様、暫定的に考えて検討を進めた。

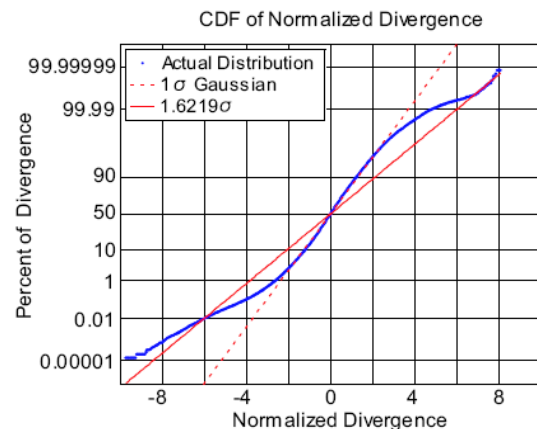


図 8：累積密度分布とオーババウンド分布

3. 2 MQM の各モニタとその適用結果

MQM は、((脅威 2) コード・搬送波ダイバージェンス、(脅威 3) 擬似距離の加速度過剰、(脅威 5) 電離層の異常勾配、を扱い、異常値を検定する。MQM は、(1) コード・搬送波ダイバージェンス検定、(2) 搬送波位相の加速度・ランプ・ステップの検定、(3) イノベーション検定、である。各検定は、必ずしも脅威項目に 1 対 1 に対応する訳ではなく、例えば (1) コード・搬送波ダイバージェンス検定は、(脅威 2) の他 (脅威 5) の電離層勾配も検知する。

また、多くの検定統計量はマルチパスにより変動し、誤警報を発生する場合もある。しかし、4 台の GPS 受信機は 100 m 以上の距離を置いて設置されるため、マルチパス誤差に対して独立と仮定できる (100 m 以上の設置基準を検討した例もある)。このため、4 章のエグゼクティブ・モニタでは、伝搬路を含む衛星側の異常と受信機側の故障が判別可能である。各検定は、3.1 節と同様、正常時のデータからオーババウンド法により、モニタ固有の検定統計量のしきい値を決定する。各検定にオーババウンド法を適用した結果については、電子航法研究所発表会予稿集に示す[7,8]。適用したデータは、仙台空港内に設置した GBAS プロトタイプ of 4 台の GPS 受信機により 2003 年 11 月 1 日に取得した観測データ (24 時間、2Hz) である。空港内の GBAS プロトタイプ of 設置状況、データ取得方法は、2006 年の電子航法研究所発表会予稿集に記載した[9]。

4. エグゼクティブ・モニタ (EXE)

のアルゴリズム

図9にGBASモニタアルゴリズムのデータフローを示す。基準局受信機が出力する n 番衛星 (PRN:1~32)、 m 番受信機 (RR:1~4) の擬似距離 ρ と搬送波位相 ϕ (図左上から入力) は、3章で述べたコード搬送波ダイバージェンス検定 (CC-Div) の他、搬送波加速度・ランプ・ステップ検定、イノベーション検定 (CSC Inno) に入力される。

この品質モニタ (MQM) で、検定統計量がしきい値を越えた場合をフラグと呼ぶ。モニタ結果は、エグゼクティブモニタ I (EXE-I) で判別され、衛星・受信機の排除処理が行われる。EXE-I では、上記モニタの他、放送暦検定 (Eph test)、受信信号レベル検定 (C/N₀ test) の結果を入力とする。EXE-I による衛星・受信機の排除処理は、次の基準でキャリアスムージング (CS) を時定数 (100 秒) の間リセットすることである。

- (1) 1 衛星・1 受信機のある検定統計量がしきい値を越えた場合：当該 1 衛星・当該 1 受信機を排除
- (2) 1 衛星・複数受信機のある検定統計量がしきい値を越えた場合：当該 1 衛星・全受信機を排除
- (3) 複数衛星・1 受信機のある検定統計量がしきい値を越えた場合：全衛星・当該 1 受信機を排除
- (4) 複数衛星・複数受信機のある検定統計量がしきい値を越えた場合：全衛星・全受信機を排除

一方、放送する擬似距離補正值を作成するため、 ρ と ϕ はキャリアスムージング (CS) 処理される (ρ_s)。次に、放送暦と基準局位置から求める真距離 (R) と衛星クロックバイアス (τ) を差し引き (ρ_{sc})、受信機クロックバイアスを調整した補正值 (ρ_{sca}) を求める。このとき、

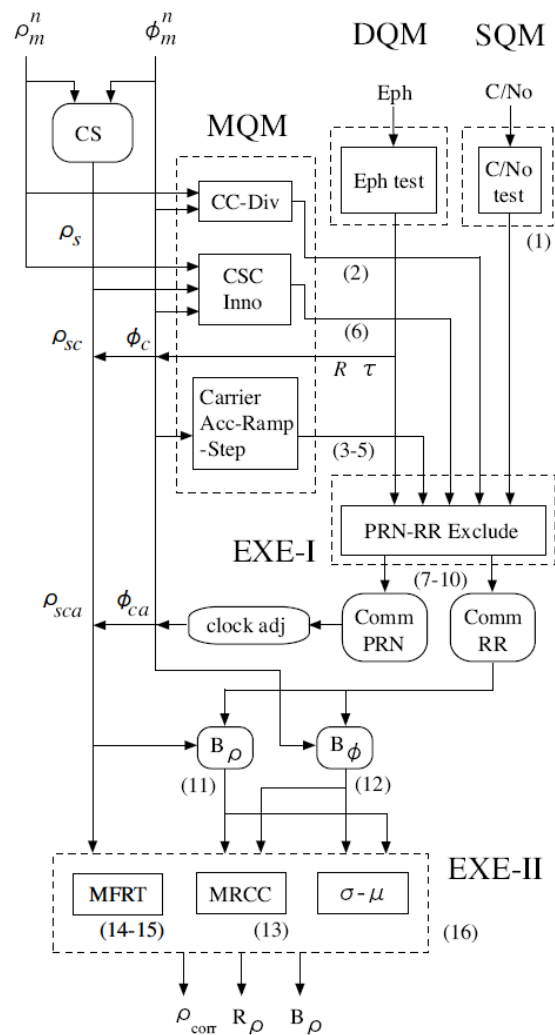


図9：IMT データフロー

4 受信機で同時に受信される共通衛星集合 (Comm PRN) が利用される。これら処理は、同様に ϕ にも適用され、クロック調整後の補正值 (ϕ_{ca}) が求められる。放送される n 番衛星の補正值 ($\rho_{corr,n}$) は、 $\rho_{sca,n}$ の共通受信機集合 (S_n) の平均として求める。また、インテグリティパラメータとして放送される B 値 (B_ρ) は、 n 衛星・ m 受信機毎に求められる。B は、補正值の残差に相当する。また、 B_ϕ は B_ρ と同様に計算され、エグゼクティブモニタ II (EXE-II) を構成する MRCC (Multiple Reference Consistency Check: 多基準一致性チェック) や $\sigma-\mu$ モニタに利用される。

$\sigma-\mu$ モニタは、インテグリティパラメータとして放送する σ_{pr_gnd} のモニタである。MFRT (Message Field Range Test) は、放送する ρ

ρ_{corr} がメッセージビット長の範囲に入ることを検定する。 ρ_{corr} は R の変化率である。EXE-II は、MRCC、 $\sigma \cdot \mu$ 、MFRT のフラグを扱い、EXE-I と同様のロジックで衛星または受信機を排除する。エグゼクティブ・モニタの連続収集データへの適用結果は、2008 年の電子航法研究所発表会予稿集で詳しく述べた[8]。

5. まとめ

本稿では、2007 年、2008 年に電子航法研究所発表会[7,8]で発表した GBAS の衛星故障モニタについて概要を報告した。インテグリティは、安全に係わる指標であるため、将来実用システムが規定値を許容するかどうかの判定は重要である。しかし、この判定は簡単でなく、現在の ILS で用いられる手法とは大きく異なる。この理由は、(1) 相対的に頻度の高い故障対象が本来別システムである GPS 衛星 (GPS 地上制御系を含む) であり、ILS のように地上システムの故障だけが対象ではない、(2) 時間により位置が変化する GPS 衛星が信号源であり、ILS のようにシステムを時不変系 (時間に依存しない) と仮定した検討ができない、(3) 扱う故障の絶対的な頻度が低く (GPS が運用されてから過去 1 回という故障もある)、故障モデルを特定するのが難しい、ことである。

本研究では、現時点で想定される衛星故障に対するモニタのプロトタイプを開発・評価し、GBAS モニタ開発への大きな一歩を踏み出すことができた。当面の課題は、自然現象に基因する電離層に関する脅威のモニタを検討することである。現在、電子航法研究所の GBAS 研究チームでは、本モニタのアルゴリズムを基盤に電離層モニタ、放送暦モニタを含む、オリジナルの GBAS テストベット (ソフトウェア) の開発に取り組んでいる。本テストベットは、将来国内での GBAS 導入に向け、様々な課題解決のプラットフォーム的ツールとして役立つことが期待される。

参考文献

[1] ICAO, International standards and

recommended practices, annex 10 to the convention on international civil aviation, vol.1, Nov. 2002.

- [2] FAA, Specification of category I local area augmentation system ground facility, FAA-E-2937A, Oct. 21, 2005.
- [3] Gang Xie, "Optimal on-airport monitoring of the integrity of GPS-based landing systems," the dissertation submitted to Stanford Univ. Mar. 2004.
- [4] Jiyun Lee, "GPS-based aircraft landing systems with enhanced performance: beyond accuracy," the dissertation submitted to Stanford Univ. Mar. 2005.
- [5] 福島荘之介, "GPS 衛星の故障・不具合による異常信号", GPS/GNSS シンポジウム 2007, チュートリアル, pp.259-265, 2007 年 11 月.
- [6] 福島荘之介, "GPS 衛星の故障と GPS 補強システムへの影響に関する一考察," 信学技報, Vol.107, No.169, SANE2007-57, pp.31-35, 2007 年 7 月.
- [7] 福島荘之介, "GBAS 信号の異常と地上型補強システム (GBAS) の観測値品質モニタ," 第 7 回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp.113-118, 2007 年 6 月.
- [8] 福島荘之介, "地上型補強システム (GBAS) のエグゼクティブモニタの検討," 第 8 回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp.81-86, 2008 年 6 月.
- [9] 福島荘之介, 齊藤真二, 吉原貴之, 藤井直樹, "GBAS インテグリティの一検討 ~長期データの収集と解析~, " 第 6 回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp.71-76, 2006 年 6 月.