

光ジャイロと GPS

森 元 誠 一

Relation of Optical Gyros and GPS in Inertial Systems

Seichi MORIMOTO

A gyroscope is a sensor for detecting rotational movement and a spinning-mass type of the gyroscope based on the spinning top principle has been used for a long time. In the 20th century, an optical gyroscope making use of the Sagnac effect has been developed and extensive studies have been made to construct a sensor used in an inertial navigation system. Recently, a new technology for reducing the error of the gyroscope has been developed for practical use, where a hybrid technology of the global positioning system (GPS) and the inertial navigation system is employed. In this report, I describe the relationship between the GPS and optical gyroscope.

Key words: ring laser gyro, fiber-optic gyro, inertial system, hybrid navigation, global positioning system (GPS)

1. 光ジャイロ

光ジャイロの原理は、サニャック効果に基づいており、図1にその原理図を示す。ある閉じた円環状の系に右回りと左回りの光がおのおの独立に伝搬していたとする。この系に回転角速度 Ω が加わったとすると、A から左回りに走行した光が一周する間に、A は A' の位置に移動しており、回転角速度が加わっていない場合に比べて同じ位置に戻る時間が短く観測される。一方、逆の右回りの光は、同様に時間が長く観測される。この2つの光の時間差 Δt は、次式で表される。

$$\Delta t = (4\pi r^2/c^2)\Omega \quad (1)$$

ここで、 r は光路の半径、 c は光速である。この伝搬時間差は見かけ上、2つの光の光路差として観測され、その光路差 ΔL は光路が囲む面積を A として

$$\Delta L = (4\pi r^2/c)\Omega = (4A/c)\Omega \quad (2)$$

となる。以上がサニャック効果の原理であり、この原理を利用した光ジャイロは図2に示すように大別して能動型、受動型の2つに分類される。能動型の代表例は閉じた光路内にレーザー光源をもつリングレーザージャイロ (ring

laser gyro: RLG) であり、受動型の代表例は半導体レーザー等を光源とし、光ファイバーを用いて閉じた光路を構成した光ファイバージャイロ (fiber optic gyro: FOG) である¹⁾。

1.1 リングレーザージャイロ

能動型で実用化されている RLG の原理図を図3に示す。RLG は、三角形 (または四角形) の石英ブロックをレーザー光が通過できるようにくり抜き、その中にヘリウムとネオンの混合ガスを封入し、高電圧の印加により、右回りと左回りのレーザー光を発振させたものである。この右回りと左回りの2つのレーザー光はコーナーキューブと読み出しミラーを経て、フォトセンサーに集光される。RLG に回転角速度 Ω が印加されると、式(1)のとおり右回りと左回りの光路差 ΔL が発生し、 ΔL は波長 λ のレーザー光において、

$$\Delta f = \Delta L (f/\lambda) = (4A/\lambda L)\Omega \quad (3)$$

の周波数差が生じる。この周波数差はフォトセンサー上で光学的な干渉縞となり、回転角速度に比例した縞の変動をデジタル信号として読み出すと回転角速度が検出で

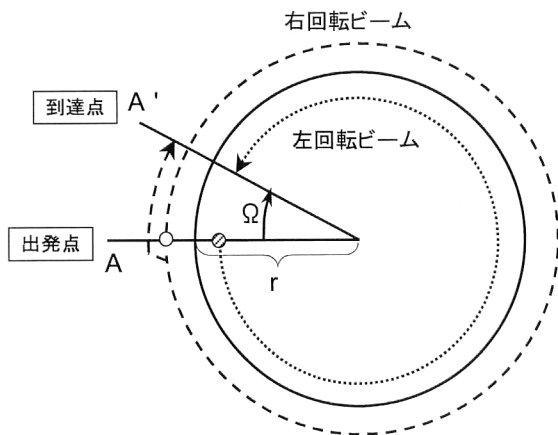


図1 円形光路でのサニャック効果。出発点 A は、 Ω により光が1回転するまでに A' 点に移動している。

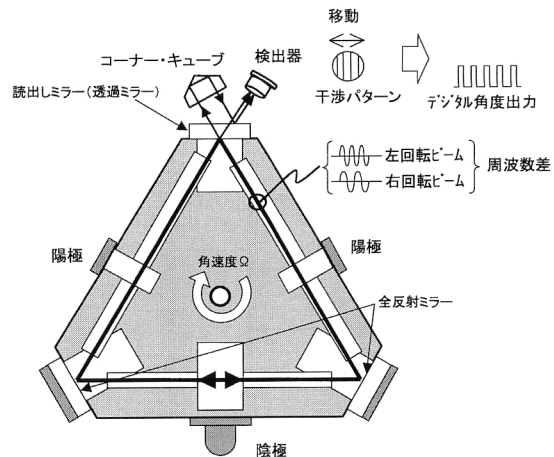


図3 RLG 基本原理。

きる。

RLG の性能を決定する重要なファクターとしてミラーがある。このミラーは用途に応じて全反射型と透過型の2種類を使用しており、いずれも基板（ガラス）上に酸化物質を蒸着して成膜する誘電体多層膜ミラーである。全反射型は散乱、吸収、透過を計測不可能状態、すなわち 100% 反射するものであり、透過型は全反射ミラーの成膜中に膜総数/膜厚の調整を行い、一部の光が透過し、それ以外はほぼすべてを反射するようにしたものである。なお、このような高精度誘電体成膜技術は、重力波検出ミラー用として天文学研究の一助をなしている。

RLG は、1970 年代に航空機用慣性航法装置に使用される高精度ジャイロとして実用化され、従来のコマ式にない以下の特長を有している。

- ・ ダイナミックレンジが広い (400°/s 以上)

- ・ 原理的に加速度による誤差が発生しない
- ・ 長寿命、高信頼性
- ・ ウォームアップ不要の瞬時作動

1.2 光ファイバージャイロ

受動型で実用化されているのは、干渉型 FOG (interferometer fiber optic gyro: IFOG) である。図4に、実用化されている IFOG の構成例を示す。IFOG は信号処理方式により2つの方式に大別される。1つは図4(a)に示したオープンループ式 IFOG であり、他方は図4(b)のクロズドループ式 IFOG である。いずれも光源として半導体レーザー等を使用する。しかし、高い精度の IFOG では、ファイバー中の散乱光の影響を打ち消すため、光源にスーパーミネセントダイオード (SLD)、ディスク用マルチモード半導体レーザー等、低コヒーレンス光源の使用が一般的である。また、最近では、光通信用に開発されたエルビウムドープファイバー (EDF) を用いる研究も進められて

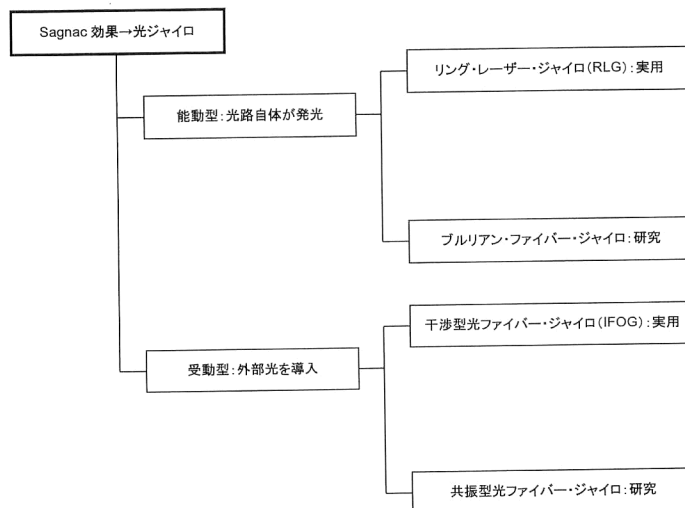


図2 光ジャイロの分類。

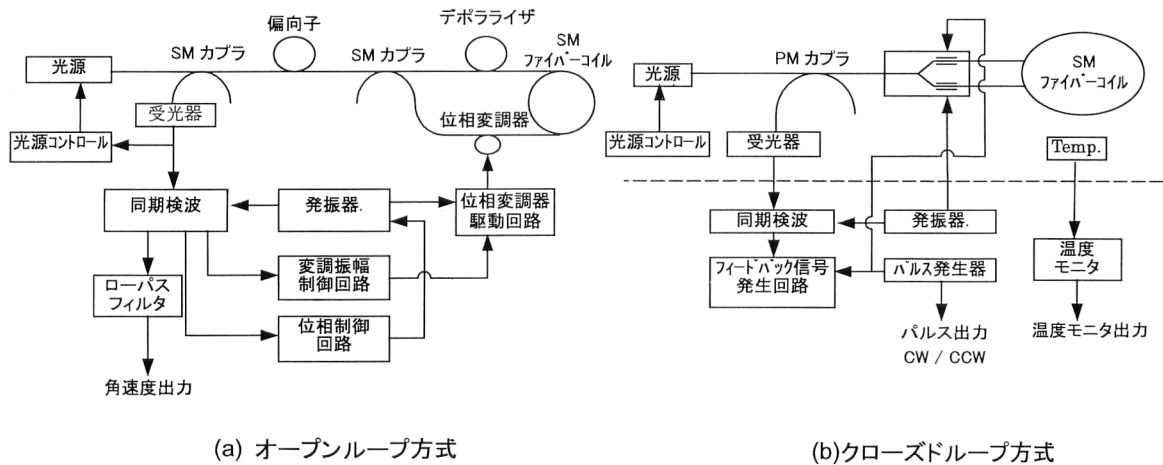


図4 IFOGの構成.

いる。

オープンループ式 IFOG は、通常、光学部をオールファイバー構成としている。この方式は、サニャック効果により生じた左右両回り光の位相差検出の際、検出感度を最適にするために、ファイバーコイルの一端に圧電素子にファイバーを巻いた位相変調器を配して光の位相を変調し、受光器出力の交流成分を変調周波数で同期検波する方式が一般的に用いられている。このオープンループ式 IFOG は、出力が入力角速度に対して正弦波状に変化するため計測できる角速度範囲が制限されるが、光通信等で一般的に用いられている光ファイバー型デバイスにより光学系が構成できるため、低価格な IFOG に適している方式である。

クローズドループ式 IFOG は、オープンループ方式 IFOG の計測角速度範囲の制限を改良した方式で、ニオブ酸リチウム結晶の高い電気光学定数により、光の変調機能と入力角速度に比例したフィードバック位相制御機能を実現させ、回転角速度により生じた左右両回り光の位相差を常にゼロにするようにフィードバックをかける方式である。この方式は、角速度範囲を広くとれ、入力に対する出力の直線性にすぐれるため、航空宇宙用を中心に中～高精度領域の IFOG に使用されている。

光ファイバージャイロでは、ファイバー中の偏波変動が誤差（ゼロ点ドリフト）要因となるため、光ファイバーコイルには偏波面保存ファイバーを用いるのが一般的であるが、ファイバーコイル長が 100～1000 m 程度の長尺となるためコスト高となる。筆者らは、この対策として、デポーライザーを光ファイバーコイルに挿入した光学系を開発した。この光学系は、デポーライザーにより左右両回りの光を無偏光で伝搬させることにより、光ファイバーに低価格な通信用シングルモードファイバーを用いるようにしたものであり、従来の偏波面保存ファイバーで構成した場

合と同等の性能を達成している。

また、光源に EDF を用いた高精度、高感度、高分解能 IFOG は、地震による回転角速度成分を検出する研究に使用されている。

IFOG は RLG に続く第 2 世代の光ジャイロで、1976 年の原理発表後、1990 年ごろから航空機、産業機器等で実用化されている。IFOG は RLG に比べ達成している性能は劣るものの、広ダイナミックレンジ、長寿命、瞬時起動等の特長をすべて備えており、さらに形状的な自由度が高く、低価格といった特長を有する。なお、プリユアンファイバージャイロや共振型 FOG は、RLG と IFOG の両者の利点を生かした新しい方式で、現在基礎研究が進められている。

2. 慣性装置と光ジャイロ

慣性装置は「慣性センサーを使用した装置」であり、ジャイロ、加速度計を使用して、「他からの援助（情報）を受けることなく自己の動きを知ることができる装置」として、航空機、船舶、車両に広く使用されている。慣性装置は、図 5 に示すように、プラットフォーム方式とストラップダウン方式に大別される。プラットフォーム方式は、ジンバル構造を有した機械的に安定なプラットフォーム上に慣性センサー（ジャイロ、加速度計）を配置し、ジャイロを使ってプラットフォームが常に局地水平になるように制御する方式である。ストラップダウン方式は、加速度計とジャイロを運動体に直接取り付ける方式であり、局地水平を装置のコンピューター上につくりだす方式である。

ストラップダウン方式は、使用ジャイロに広いダイナミックレンジが必要であったが、1970 年代の広ダイナミックレンジを特長にもつ光ジャイロ（RLG）実用化とマイクロコンピューターの発達により、現在の主流の方式となって

	プラットフォーム方式	ストラップダウン方式
概念図		
センサーの取付け	センサー(ジャイロ、加速度計)は3自由度を有するジンバル上に取付けられる。	センサー(ジャイロ、加速度計)は機体に直接固定される。
原理	機体の姿勢にかかわらず、加速度計の出力を直接積分することにより速度、位置を求める。	ジャイロ、加速度計の出力をコンピュータにより、機体座標から航法座標へ座標変換し速度位置を求める。
特徴	複雑なジンバルメカがあり、寸法、重量が大きくなり、信頼性もやや劣る	高性能なCPUと高精度なセンサーにより実現され、小型、軽量化が図れ信頼性も優る。

図5 プラットフォーム方式とストラップダウン方式。

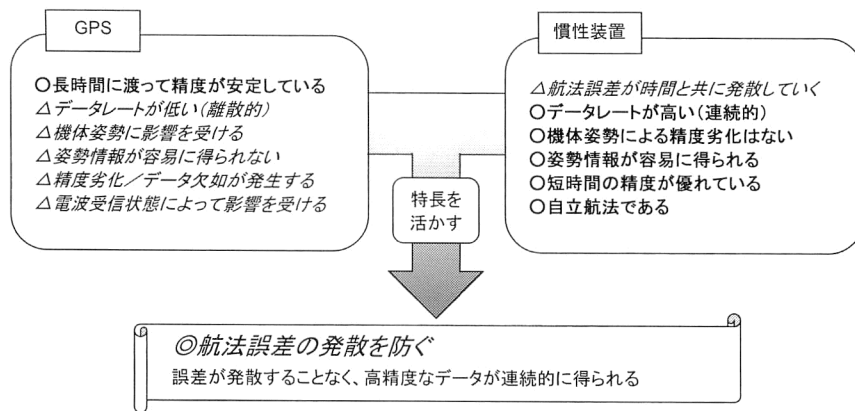


図6 GPS 複合航法の概念。

いる。

光ジャイロの実用化によって飛躍的發展を遂げた慣性装置であるが、原理的にセンサー出力の積分計算によって姿勢、方位、速度、位置を算出しているため、誤差が時間とともに蓄積していく特性をもっている。この誤差低減が慣性装置開発における長年の課題であったが、global positioning system (GPS) と慣性装置の複合航法技術により、センサー誤差の推定と補正を行い、装置として長時間にわたり安定した性能を維持することが可能となった。

3. 複合航法 (ハイブリッド航法) 技術

3.1 ハイブリッド

ハイブリッドとは、異種を混合することであるが、昨今

はハイブリッドカー (エンジンとモーターの混合) に代表されるように、異なった特長を組み合わせる新たな特長を生み出すという考え方の製品、技術を示すことが多くなっている。GPS との複合航法 (ハイブリッド航法) 技術も同様である。慣性装置は誤差が時間とともに蓄積していく特性をもつが、急激な姿勢・位置変化検出が可能という特長を有する。一方、GPS は一時的な精度劣化やデータ欠如が発生する特性をもつが、長時間において精度のよい位置検出が可能である特長を有する。GPS との複合航法は、これら両システムの特長を生かし、さらに最適状態推測フィルター (カルマンフィルター) を用いて高精度な航法を可能にする技術である²⁾。複合航法の概念を図6に示す。

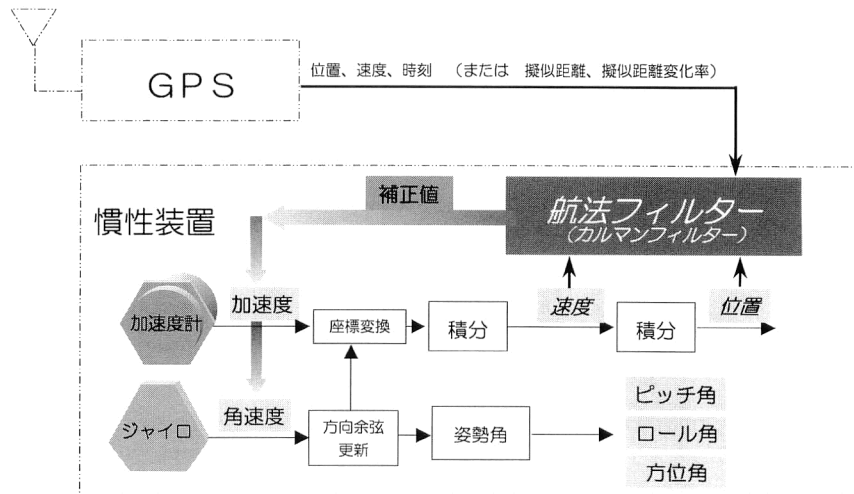


図7 慣性装置とGPSの複合航法。

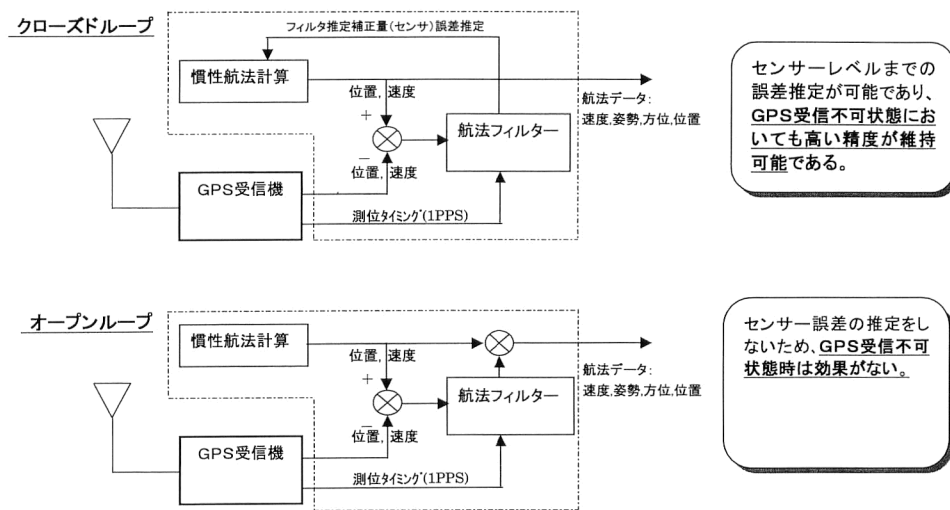


図8 クローズドループ/オープンループ。

3.2 複合航法のアルゴリズム

慣性装置とGPSとの複合航法では、図7のように、慣性装置が算出する位置、速度データとGPSのPVTデータ（P：位置、V：速度、T：時間）またはPVTデータの源泉となる擬似距離（pseudo-range）、擬似距離変化率（pseudo-range rate）を観測値とするカルマンフィルターにより、慣性装置のセンサー発生誤差およびGPS誤差を推定して誤差補正を行う。このカルマンフィルターを用いた複合航法では、光ジャイロ、加速度計の誤差推定/センサー補正によりセンサー精度の改善を行うので、GPSが一時的に測位不能状態の間も連続して良好な出力をすることが可能である。また、低精度な慣性センサーを使用した場合でも、センサー誤差を推定し航法精度を向上させることが可能となる。なお、GPSにはDGPS（differential GPS）、RTK-GPS（real time kinematics GPS）があるが、いず

れのGPSもPVTが出力されるので、慣性装置との複合航法という観点では差異がなく、複合航法が可能である。

3.3 複合化の方法（クローズドループ/オープンループ）

図8に示すように、GPSと慣性装置の複合化の方法には、大別してクローズドループとオープンループの2つの方法がある。おのおのの特長は以下のとおりであるが、慣性装置におけるGPS複合航法はクローズドループ方式が効果的である。

- ・クローズドループ：カルマンフィルターで推定したセンサーレベルの誤差推定結果を慣性計算部へフィードバックする。したがって、センサーレベルの補正でGPSが測位不能状態の純慣性状態においても、高い精度維持が可能である。また、位置、速度のみならず姿勢、方位についても精度向上が可能である
- ・オープンループ：カルマンフィルターによるセンサ

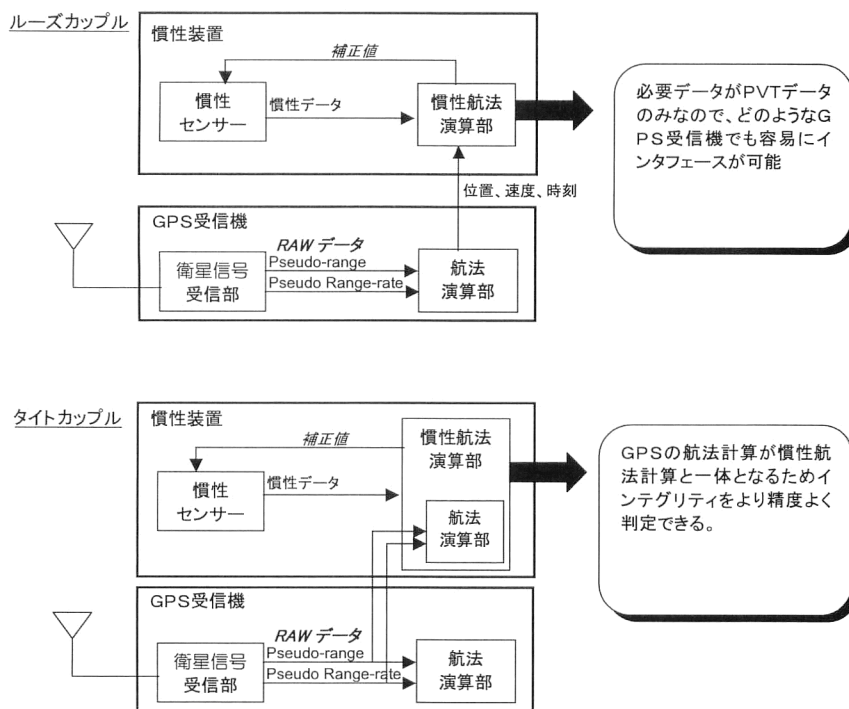


図9 ルーズカップル/タイトカップル。

一誤差推定を行わないため、機体の姿勢変化の際に発生しうるGPS測位不能状態では効果に限りがある

3.4 結合方法 (ルーズカップル/タイトカップル)

GPSと慣性装置との複合航法演算における結合方法には、図9に示すようにルーズカップルとタイトカップルの2つの方法がある。おのおのの特長は以下のとおりである。

- ・ ルーズカップル：GPSの航法計算結果 (PVTデータ) と慣性装置の基本慣性計算結果とから複合航法演算計算を行う
- ・ タイトカップル：GPSの生データ (pseudo-range, pseudo-range rate) を使用し、GPSの航法計算部を慣性装置の中に取り込み、センサーデータと一体で航法演算 (複合航法演算) 計算を行う

このルーズカップル、タイトカップルは、いずれの方法においても、センサー誤差推定が可能であるので「慣性装置の精度向上」が望め、差異はない。なお、タイトカップルは、慣性装置の位置、速度、姿勢等の情報をGPSへフィードバックすることにより、以下のようなGPSの機能、性能の向上が見込まれる。その結果、複合航法システム全体として、信頼度と精度の向上を図ることができる。

- ・ GPS精度の向上
- ・ インテグリティの向上
- ・ 電波障害/妨害への耐性向上

- ・ 衛星再捕捉時間の短縮
- ・ 捕捉衛星数が3個未満においても複合航法が可能

光ジャイロは、広いダイナミックレンジ、瞬時作動、高信頼性等々、従来のコマ式ジャイロがもつことのできなかったすぐれた特長をもっている。特に、慣性装置におけるプラットフォーム方式からストラップダウン方式への発展は、光ジャイロをなくしては成し得なかったといっても過言ではなく、これにより各種慣性装置が実用化されてきた。一方、慣性装置の「時間経過とともに誤差が増大する」特性の克服は、光ジャイロの高精度化という手段で行われてきた。GPSの登場と複合航法技術は、誤差の発散を抑え、長時間の精度維持を可能にした。また、安価なセンサーを使つての高精度慣性装置の実現も可能であり、今後、各方面での発展や展開が期待される。

文 献

- 1) A. Ohno and R. Usui: "Recent progress of the Interferometer Fiber Optic Gyroscope," *Proceeding of The 40th Aircraft Symposium* (Yokohama, Japan, Oct. 9-11, 2002).
- 2) 村脇達也, 木村剛士: "ハイブリッド航法のアルゴリズムについて", *航空電子技報*, No. 26 (2003) p.180.

(2003年6月27日受理)