

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.514

January 2009

中低速移動体への RTK-GPS 適用化技術の開発に関する技術資料

—ソフトウェア仕様書—

金澤文彦・有村真二・湯浅直美

Application of integrated RTK-GPS/INS systems for construction machinery

—The specifications for softwares—

Fumihiko KANAZAWA, Shinji ARIMURA, Naomi YUASA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

中低速移動体への RTK-GPS 適用化技術の開発に関する
技術資料
— ソフトウェア仕様書 —

金澤文彦*, 有村真二*, 湯浅直美*

Application of integrated RTK-GPS/INS systems
for construction machinery
— The specifications for softwares —

Fumihiko KANAZAWA*, Shinji ARIMURA*, Naomi YUASA*

概要

本研究では、平成 15 年度から平成 19 年度の 5 ヶ年において、作業用車両（建設機械等）等の中低速移動体において、連続的高精度 RTK-GPS 測位が可能となる技術基盤の構築を行った。

本仕様書は、開発したソフトウェアの仕様を、民間等における研究成果の活用のために公開するものである。

キーワード： RTK-GPS, 準天頂衛星, 中低速移動体

Synopsis

In this research, we built a technology base which enable construction machinery to continuous highly precise RTK-GPS positioning, from 2003 to 2007 (fiscal year).

This note publishes the specification for software made in the research, for application in the private enterprise and so on.

Key Words : RTK-GPS, the Quasi-Zenith Satellites System,
Construction machinery

* 高度情報化研究センター 情報基盤研究室

目次

1 章 一般事項	1
1-1 適用範囲	1
1-2 参考文書	1
1-3 用語の説明.....	2
1-4 ソフトウェアの概要	3
1-4-1 マルチパス誤差低減技術.....	4
1-4-2 RTK-GPS 高速初期化技術.....	5
1-4-3 慣性航法複合技術.....	6
1-4-4 ソフトウェアの特徴.....	7
1-5 ソフトウェアの動作環境.....	8
1-5-1 動作環境.....	8
1-5-2 開発環境.....	8
1-5-3 機器構成.....	8
2 章 ソフトウェア仕様	10
2-1 機能	10
2-2 全体処理フロー	11
2-3 入力データ.....	11
2-4 出力データ.....	16
3 章 マルチパス誤差低減処理	17
3-1 マルチパスの検出.....	17
4 章 RTK-GPS 高速初期化処理	19
4-1 処理フロー.....	19
4-2 二周波搬送波位相モデルによる電離層遅延の算出.....	19
4-3 SAASTAMOINEN モデルによる対流圏遅延の算出.....	21
4-4 躍度モデルの算出.....	22
4-5 イノベーションによるサイクルスリップの検出.....	32
4-6 観測方程式の算出.....	33
4-7 カルマンフィルタ（アンビギュイティ実数解の算出）	36
4-8 アンビギュイティ整数解の探索.....	37
4-9 アンビギュイティ整数解の検定.....	41
4-10 位置探索手法.....	42
4-11 移動局位置の算出.....	44

5 章 慣性航法複合演算処理	45
5-1 処理フロー.....	45
5-2 座標系の定義.....	46
5-3 慣性航法演算.....	48
5-4 誤差方程式の算出.....	54
5-5 位置オフセット処理.....	62
5-6 LOOSELY COUPLED 方式.....	64
5-7 TIGHTLY COUPLED 方式.....	72
5-8 フィルタ変数の引継ぎ（切換え方式）.....	82
5-9 拡張カルマンフィルタ.....	84
参考 ソフトウェアの構築例	86

中低速移動体への RTK-GPS 適用化技術の開発に関する技術仕様書

1 章 一般事項

1-1 適用範囲

本仕様書は、GPS 相対測位である RTK-GPS(Real-Time Kinematic GPS)における高速初期化技術とマルチパス誤差低減技術が組み込まれた測位演算処理及び RTK-GPS と IMU(Inertial Measurement Unit)を複合させた RTK-GPS/IMU 複合航法演算のソフトウェアについて規定する。

1-2 参考文書

- (1) 土屋淳, 辻宏道: 新・GPS 測定の基礎, 社団法人日本測量協会 (2002 年 9 月).
- (2) 佐田達典: GPS 測量技術, オーム社 (2003 年 10 月).
- (3) GPS/GNSS シンポジウム 2004 テキスト
- (4) W. Gurtner, "RINEX, The Receiver Independent Exchange Format Version 2.10,"
- (5) P. J. G. Teunissen: The Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation, J. Geodesy, Vol. 70, pp. 65-82, 1995.
- (6) P. J. de Jonge and C. C. J. M. Tiberius: The LAMBDA Method for Integer Ambiguity Estimation: Implementation Aspects, No. 12 of LGR-Series, Delft Geodetic Computing Centre, Netherlands, 1996.
- (7) 近藤賢太郎, RTK-GPS 搬送波測位の整数 ambiguity の初期化決定における正解/不正解決定の発生確率の理論的計算, 第 47 回宇宙科学技術連合会講演会講演集, pp. 1369-1374 (2003 年).
- (8) P. Misra and P. Enge: *Global Positioning System -- Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press, Massachusetts, 2001.
- (9) G.M.Siouris: *Aerospace Avionics Systems, A Modern Synthesis*: Academic Press, San Diego, 1993.
- (10) R.M.Rogers: Large Azimuth INS Error Models for In-Motion Alignment Land-Vehicle Positioning, *Proceedings of The Institute of Navigation, National Technical Meeting 2001*, Long Beach, CA, January, 2001.
- (11) 片山徹: 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店 (2000 年 1 月).
- (12) U.S. Air Force, Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interface, ICD-GPS-200, IRN-200C-002, Rev.C, Sept 1997.

1-3 用語の説明

本仕様書で使用している用語を以下に示す。

- | | |
|----------------|---|
| (1) GPS | Global Positioning System : 全地球測位システム |
| (2) RTK | Real Time Kinematic : 移動体高精度 GPS 測位
2つの受信機からある衛星までの距離の差を搬送波の位相を使って求め、基線ベクトルを決定する計測方法 |
| (3) 擬似距離 | 衛星と受信機間の距離のことであり、受信機の時計誤差に起因する比較的大きい誤差が含まれるため「擬似」と呼ばれる |
| (4) 搬送波位相 | 搬送波の位相変化分を積算したものであり、擬似距離よりも精密な衛星・受信機間の測距が可能であるが、整数波長分の不確定性を含む |
| (5) アンビギュイティ | 搬送波位相観測量に含まれる、整数分の不確定性 |
| (6) ドップラ周波数 | GPS 衛星と受信機間の相対的な距離変化に起因するドップラ効果により生じる受信機で観測される搬送波周波数の変化分 |
| (7) エフェメリス | GPS 衛星の軌道計算の6要素 |
| (8) アルマナック | 概略の GPS 衛星の軌道情報 |
| (9) 高速初期化 | RTK-GPS におけるアンビギュイティを高速に決定する技術 |
| (10) サイクルスリップ | RTK-GPS において観測中に衛星電波受信に瞬断があると、GPS 受信機での位相積算も一時中断してしまい、位相データにずれが生じる現象 |
| (11) マルチパス | 衛星から発射された電波が2つ以上の経路で受信機に届く現象 |
| (12) 精度低下率 DOP | 衛星配置による測位精度の低下率を数字で表したもの。
DOP(Dilution of Precision)は数値が大きくなるほど精度が低くなる(測位誤差が大きくなる)ように表される。DOP にはその定義の仕方によって種々の指標がある。GDOP (Geometrical DOP) は幾何学的な精度低下を表す指標、PDOP (Position DOP) は三次元的な位置の精度低下を表す指標、HDOP (Horizontal DOP) は水平方向の精度低下を表す指標、VDOP (Vertical DOP) は上下方向の精度低下を表す指標、TDOP (Time DOP) は時間の精度低下を表す指標である |
| (13) 二重位相差 | 相対測位において波数の観測値に含まれる衛星時計と受信機時計の誤差の影響を除去するため、2個の衛星と2個の受信機間での観測値の差 |
| (14) 基準局 | 相対測位において位置が既知である GPS 受信機のこと。 |
| (15) 移動局 | 相対測位において位置が未知である GPS 受信機のこと。 |
| (16) IMU | 3軸のジャイロと3軸の加速度計から構成される慣性装置
Inertial Measurement Unit |

(17) INS	Inertial Navigation System: 慣性航法装置
(18) ジャイロ	物体の角速度を得るためのセンサ
(19) 慣性航法演算	角速度と加速度を積算して、初期位置からの移動量及び速度、姿勢・方位を演算する手法
(20) アライメント	INSにおける初期姿勢、初期方位を求める初期化处理
(21) 複合航法	GPS と IMU を組み合わせた測位技術
(22) Loosely Coupled	GPS 測位演算で求めた位置、速度を用いる複合航法方式
(23) Tightly Coupled	GPS 信号の擬似距離、搬送波位相を用いる複合航法方式
(24) カルマンフィルタ	線形な状態空間モデルで記述されるシステムの状態推定を、最小 2 乗規範の下で逐次的に行う推定器
(25) RINEX	受信機のデータ出力に関する共通データ形式として多く使われているもので、観測データ (O ファイル)、航法メッセージ (N ファイル)、気象観測 (M ファイル) の 3 種類がある。 Receiver INdependent EXchange Format

1-4 ソフトウェアの概要

本ソフトウェアは GPS の二周波受信機データと IMU データを用いて、RTK-GPS 測位演算と RTK-GPS/IMU 複合航法演算を行い、結果を出力する。以下にマルチパス誤差低減技術、RTK-GPS 高速初期化技術及び慣性航法複合技術の概略を説明し、ソフトウェアの特徴について記述する。

1-4-1 マルチパス誤差低減技術

一般にマルチパスとは、電波の伝播において送信側から送出された信号が2つ以上の経路を
通って受信側に到達する現象のことである。GPSにおいては、衛星から送出された電波がアン
テナに直接到来する直接波と受信アンテナ周囲の建物や地表で反射された反射波が重なり合
った現象をマルチパスと呼ぶ。

マルチパスが発生する環境において、GPS受信機で直接波と反射波を同時に受信すると、
GPS受信機は両者が合成された信号を基に測位を行うことになる。この直接波と反射波が合成
された信号は、直接波の波形を崩し受信機の動作に影響を及ぼす。その影響はGPS受信機で
の擬似距離測定のエラーとなって現れる。また、GPS衛星と受信アンテナ間に障害物が存在し、
直接の見通しが無いにもかかわらず、衛星からの電波がその障害物を回り込んで受信アンテ
ナに届く現象である回折波もマルチパス誤差の原因の1つであり、反射波と同様に、GPS衛
星から届く信号波形を乱し測距誤差を生じさせる。

移動体においては、信号の反射位置は常に高速で変化するため、適切なモデルを利用するこ
とが難しい。特に都市部においては建物等によるマルチパスの影響を受け、大きな測位誤差が
生じることが問題となる。このような背景から移動体測位において、マルチパス誤差の低減が
重要な技術課題となっている。

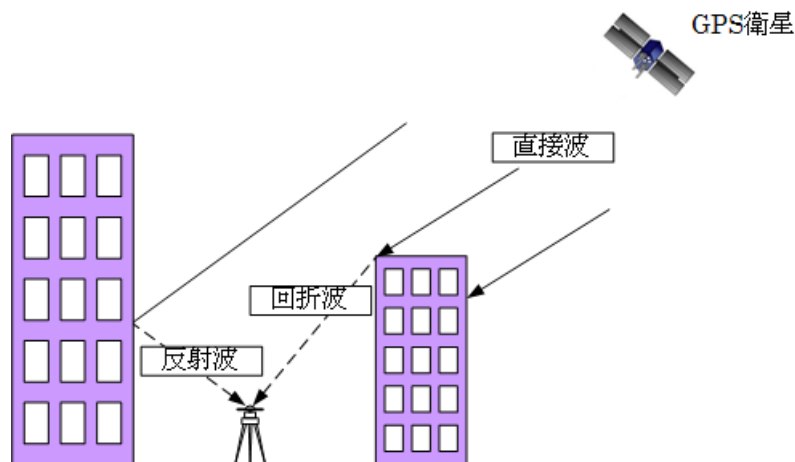


図 1-4-1 反射波と回折波の例

本仕様書では図 1-4-1 のように障害物によって反射・回折された GPS 信号が、直接波と比
較して信号強度が低くなる傾向を用いて、マルチパス誤差の低減を図る。この特徴を利用すれ
ば、受信機で実際に受信した信号強度と直接波が到達した場合の信号強度推定値とを比較する
ことで、劣化信号を特定することができる。

1-4-2 RTK-GPS 高速初期化技術

RTK-GPS は GPS 衛星から送られる搬送波の位相を測定し、搬送波の波数を推定することにより、高精度に位置を求める相対測位手法である。この手法では、基準局と移動局との搬送波の行路差上にある波数を推定する初期化処理が必要である (図 1-4-2)。この波数の整数部を “Integer Ambiguity”、日本語では「アンビギュイティ」又は「整数値バイアス」と呼び、初期化処理では波数の小数部は観測量から求められるが、アンビギュイティは未知量となる。初期化処理の際にこのアンビギュイティの値によって無数の基線ベクトルの候補 (多重解) が存在し (図 1-4-3)、この多重解から真の解 (整数解) を求めるのに数十秒から数分を要してしまう。本仕様書は、この問題に対し、中低速移動体における継続した高精度位置を特定するため、アンビギュイティを高速に初期化するアルゴリズムを記述する。

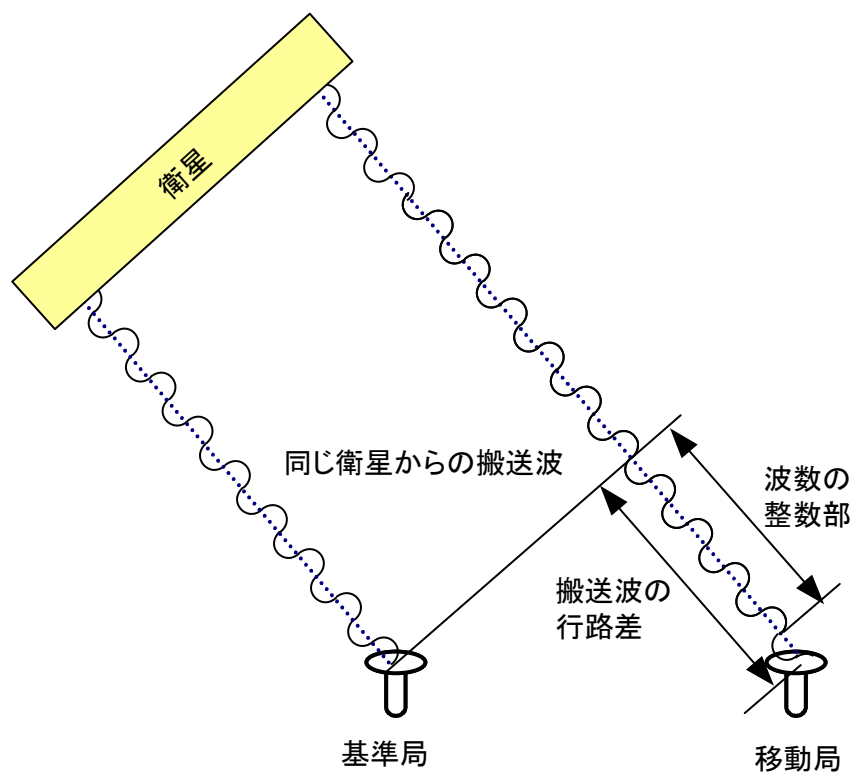


図 1-4-2 搬送波におけるアンビギュイティ

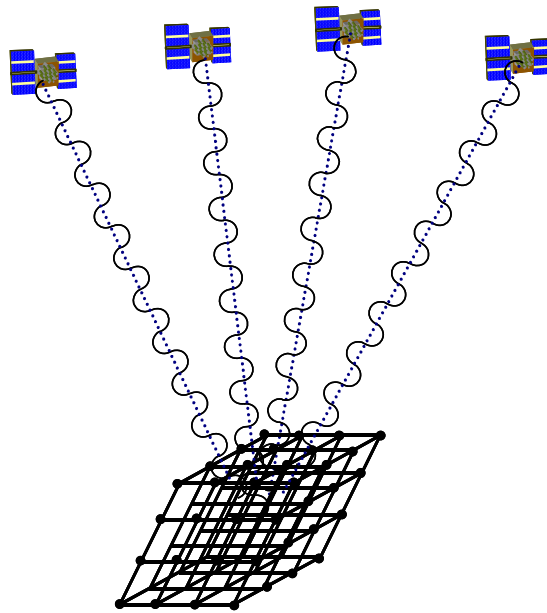


図 1-4-3 基線ベクトルの候補 (多重解)

1-4-3 慣性航法複合技術

前項に記載した RTK-GPS 測位技術を用いることで、中低速移動体に適用できる高精度測位が可能となるが、この技術は GPS 衛星が 4 基以上可視できるような上空視界の良好な場所で使用することが前提となる。よって、山間部の谷間など上空視界が良好でない場所では移動体には適用できない。(図 1-4-4)

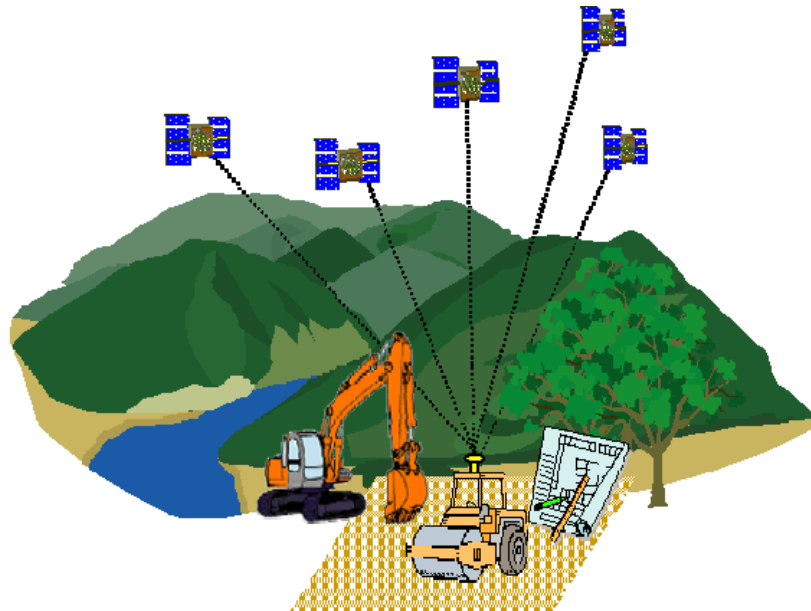


図 1-4-4 建設現場の GPS 測位環境

上記の問題を解決するために、本仕様書では移動体の 3 次元位置・姿勢を検出する慣性航法

装置（INS）の演算処理を記述する。RTK-GPS 測位が不可能な上空視界の良好でない場所では、電波環境に依存せず、搭載したセンサのみで測位できる INS は有用である。しかし、INS における問題点として、センサから得られる加速度や角速度を積分して位置を求めるため、センサ固有のバイアスやドリフトに起因する誤差が時間の経過とともに蓄積され、測位精度を劣化させる点が挙げられる。さらにコストを下げるために低価格な INS を用いた場合、誤差が急激に増大するため、作業用車両への適用は困難である。この誤差の増大を抑える方法として、RTK-GPS と INS を組み合わせて、互いの欠点を補いながら最適な航法性能を維持・向上させる複合航法演算方法について記述する。

1-4-4 ソフトウェアの特徴

本ソフトウェア（高精度測位ソフトウェア）は、GPS データ、IMU データ及び設定パラメータを入力とし、測位演算処理を行い、演算結果を出力する。構成図を図 1-4-5 に示す。

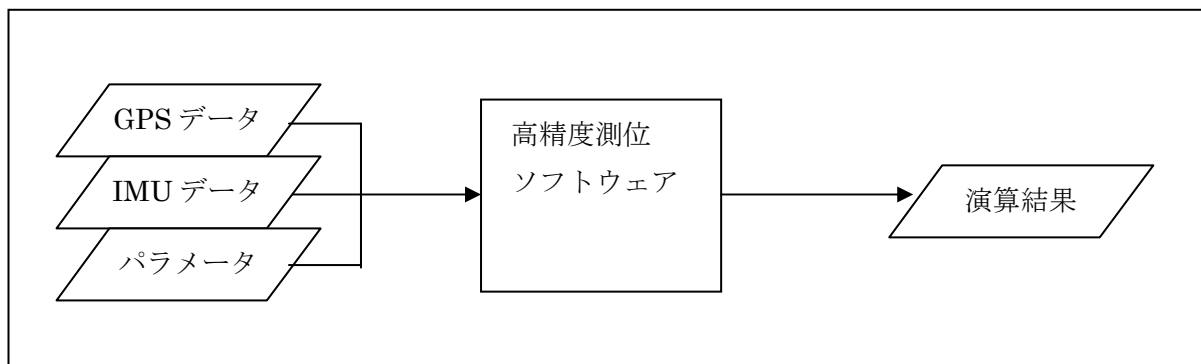


図 1-4-5 高精度測位ソフトウェアの構成

1-5 ソフトウェアの動作環境

1-5-1 動作環境

本ソフトウェアの動作環境例を表 1-5-1 に示す。

表 1-5-1 動作環境例

No.	項目	内容
1	動作機器	PC/AT 互換機等
2	OS	Microsoft Windows XP SP2 等
3	メモリ	1G byte 以上
4	HDD	20 G byte 以上
5	シリアルポート	3 ポート (通信によるデータ入力時は必要)

1-5-2 開発環境

本ソフトウェアの開発環境例を表 1-5-2 に示す。

表 1-5-2 開発環境例

No.	項目	内容
1	開発ツール	C コンパイラ
2	開発言語	C++

1-5-3 機器構成

ソフトウェアをリアルタイムに動作させる機器の構成例を図 1-5-1 に示す。

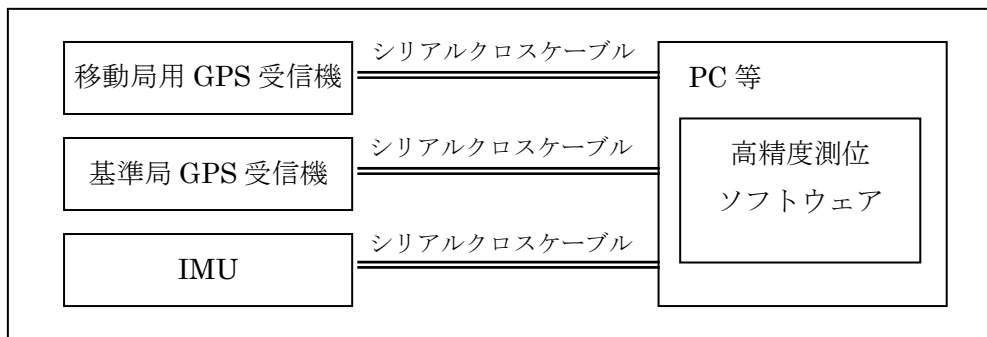


図 1-5-1 機器構成例

また、PC へ接続させる GPS 受信機と IMU の仕様を表 1-5-3 と表 1-5-4 に示す。

表 1-5-3 GPS 受信機の仕様

項目	GPS 受信機
Time interval	1 [Hz]
性能	2 周波 GPS 受信機 (L1,L2)

表 1-5-4 IMU の仕様

項目		IMU
Time interval		50 [Hz]
角速度	検出範囲	$\pm 200^\circ /s$
	バイアス	$20^\circ /hrms$
	スケールファクタ	$\pm 0.2\%$
加速度	検出範囲	$\pm 29.4m/s^2$
	バイアス	$0.098 m/s^2$
	スケールファクタ	$\pm 0.2\%$

2章 ソフトウェア仕様

2-1 機能

本ソフトウェアはGPSデータとIMUデータを用いてRTK-GPS高速初期化技術と慣性航法複合技術より高精度な測位演算処理を行い、演算結果を出力する。以下に仕様を示す。

本ソフトウェアの機能を表 2-1-1 に示す。RTK-GPSは高速初期化を行うための技術であり、複合航法はRTK-GPSが測位不能時に位置精度を補完する技術である。アルゴリズムについては次章以降に示す。

表 2-1-1 ソフトウェアの機能

処理	機能	内容
RTK-GPS 高速初期化技術	運動モデル	躍度モデル
	初期位置探索	アンビギュイティの探索範囲の拡大
	電離層モデル	二周波搬送波位相モデル
	対流圏モデル	Saastamoinen モデル
	サイクルスリップ検出	カルマンフィルタのイノベーション検定
	マルチパスデータ除去	電波強度判定
	アンビギュイティ探索	LAMBDA 法
	アンビギュイティ検定	残差の二乗和の比
慣性航法複合技術	慣性航法	ストラップダウン演算処理
	複合方式	Loosely coupled 方式と Tightly coupled 方式の切換え
	フィルタ	拡張カルマンフィルタ
	オフセット処理	GPS アンテナ位置と IMU 位置のオフセット補正

2-2 全体処理フロー

本ソフトウェアの全体処理フローを図 2-2-1 に示す。

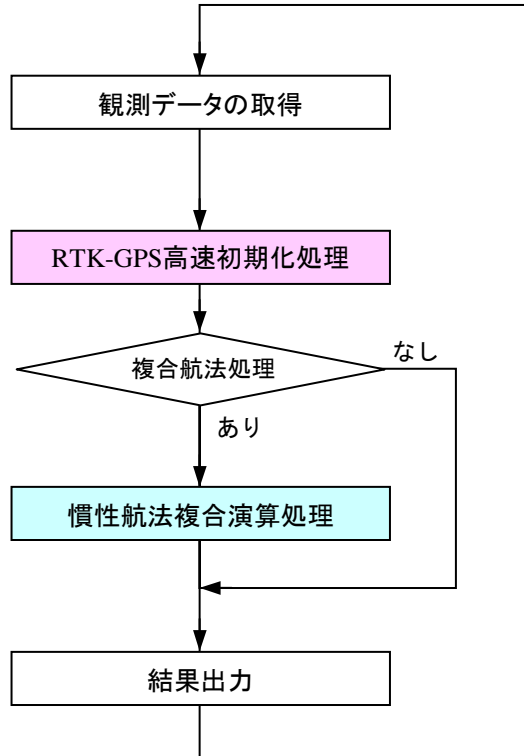


図 2-2-1 全体処理フロー図

2-3 入力データ

本ソフトウェアの入力データは以下となる。

- ①基準局 GPS データ
- ②移動局 GPS データ
- ③エフェメリスデータ
- ④アルマナックデータ
- ⑤IMU センサデータ
- ⑥演算用パラメータ

各入力データの内容を以下に示す。

(1) 基準局 GPS データ

基準局 GPS データは基準局 GPS 受信機から送信されるデータである。基準局 GPS データの内容を表 2-3-1 に示す。

表 2-3-1 基準局 GPS データ内容

No.	項目	単位	仕様
1	Num	-	GPS 衛星の観測数
2	PRN	-	衛星番号
3	C1	m	擬似距離
5	L1	cycle	L1 帯搬送波位相積算値
	L2	cycle	L2 帯搬送波位相積算値
7	D1	Hz	L1 帯ドップラ周波数
	D2	Hz	L2 帯ドップラ周波数
8	S1	db·Hz	L1 帯 CN 比
	S2	db·Hz	L2 帯 CN 比
9	locktime	sec	ロックタイム
10	Status	-	トラッキングステータス

(2) 移動局 GPS データ

移動局 GPS データは移動局 GPS 受信機から送信されるデータである。データの内容は基準局 GPS データと同じである。

(3) エフェメリスデータ

エフェメリスデータは移動局 GPS 受信機から送信されるデータである。エフェメリスデータの内容を表 2-3-2 に示す。

表 2-3-2 エフェメリスデータ内容

No.	項目	単位	仕様
1	PRN	-	衛星番号
2	tow	sec	Time of week
3	health	-	衛星の健康状態
4	IODE1	-	エフェメリスの発行番号 1
5	IODE2	-	エフェメリスの発行番号 2
6	week	-	GPS week
7	z week	-	周番号
8	toe	sec	軌道の元期
9	A	M	軌道長半径
10	ΔN	rad/sec	平均運動の補正值
11	M_0	rad	元期の平均近点角
12	ecc	-	離心率
13	ω	rad	近地点引数

No.	項目	単位	仕様
14	cuc	rad	緯度引数に対する余弦補正係数
15	c us	rad	緯度引数に対する正弦補正係数
16	c rc	m	軌道半径に対する正弦補正係数
17	crs	m	軌道半径に対する余弦補正係数
18	c ic	rad	軌道傾斜角に対する余弦補正係数
19	cis	rad	軌道傾斜角に対する正弦補正係数
20	I ₀	rad	元期の軌道傾斜角
21	I _{dot}	rad/sec	軌道傾斜角変化率
22	ω_0	rad	元期の昇交点経度
23	ω dot	rad/sec	昇交点経度変化率
24	iodc	-	クロック情報番号
25	toc	sec	クロック時刻
26	tgd	sec	電離層群遅延誤差
27	a ₀	sec	衛星時計バイアス
28	a ₁	sec/sec	衛星時計ドリフト
29	a ₂	sec/sec/sec	衛星時計ドリフト率
30	AS	-	Anti-Spoofing
31	N	rad/sec	平均運動
32	URA	-	ユーザー距離精度

(4) アルマナックデータ

アルマナックデータは移動局 GPS 受信機から送信されるデータである。アルマナックデータの内容を表 2-3-3 に示す。

表 2-3-3 アルマナックデータ内容

No.	項目	仕様
1	α_0	電離層遅延パラメータ
2	α_1	電離層遅延パラメータ
3	α_2	電離層遅延パラメータ
4	α_3	電離層遅延パラメータ
5	β_0	電離層遅延パラメータ
6	β_1	電離層遅延パラメータ
7	β_2	電離層遅延パラメータ
8	β_3	電離層遅延パラメータ

(5) IMU センサデータ

IMU センサデータは IMU センサから送信されるデータである。IMU センサデータの内容を表 2-3-4 に示す。

表 2-3-4 IMU センサデータ内容

No.	項目	単位	仕様
1	GPS 時刻 時	hr	分解能：1 範囲：0～23
2	GPS 時刻 分	min	分解能：1 範囲：0～59
3	GPS 時刻 秒	sec	分解能：60/2 ¹⁵ 範囲：0.000～60.000
4	角速度 X 軸	deg/s	分解能：200/2 ¹⁵ 範囲：±200
5	角速度 Y 軸	deg/s	分解能：200/2 ¹⁵ 範囲：±200
6	角速度 Z 軸	deg/s	分解能：200/2 ¹⁵ 範囲：±200
7	加速度 X 軸	m/s ²	分解能：98/2 ¹⁵ 範囲：±98
8	加速度 Y 軸	m/s ²	分解能：98/2 ¹⁵ 範囲：±98
9	加速度 Z 軸	m/s ²	分解能：98/2 ¹⁵ 範囲：±98

(6) 演算用パラメータ

演算用パラメータは、測位演算に用いる設定用のパラメータである。演算用パラメータの内容を表 2-3-5 に示す。

表 2-3-5 演算用パラメータ内容

No.	項目	単位	仕様
1	測位方式	-	測位方式(RTK-GPS 高速初期化 or 慣性航法複合技術)
2	緯度	deg	基準局位置(WGS84 座標系) 緯度
3	経度	deg	基準局位置(WGS84 座標系) 経度
4	高度	m	基準局位置(WGS84 座標系) 楕円体高
5	仰角マスク	deg	衛星仰角マスク
6	c	m/s	光速
7	f1	Hz	L1 帯搬送波周波数

No.	項目	単位	仕様
8	f2	Hz	L2 帯搬送波周波数
9	GPS 周期	Hz	GPS 入力データの周期
10	IMU 周期	Hz	IMU 入力データの周期
11	pi	-	円周率
12	EARTH_RATE	Rad/s	地球自転角速度
13	G	-	重力パラメータ
14	地球の長半径	m	地球の長半径
15	離心率の平方数	-	離心率の平方数
16	std_dev_R	m	搬送波位相の観測誤差の標準偏差
17	std_dev_R_pr	m	擬似距離の観測誤差の標準偏差
18	std_dev_R_ion	m	電離層遅延誤差の標準偏差
19	std_dev_R_trop	m	対流圏遅延誤差の標準偏差
20	std_dev_Pp	m	位置の初期標準偏差
21	std_dev_Pv	m/s	速度の初期標準偏差
22	std_dev_Pa	m/s ²	加速度の初期標準偏差
23	std_dev_Pj	m/s ³	躍度の初期標準偏差
24	std_dev_Pn	cycle	整数値バイアスの初期標準偏差
25	std_dev_Pion	m	電離層遅延の初期標準偏差
26	td_dev_Ptrop	m	対流圏遅延の初期標準偏差
27	std_dev_j	m/s ³	躍度のシステム雑音の標準偏差
28	std_dev_a	m/s ²	加速度のシステム雑音の標準偏差
29	std_dev_v	m/s	速度のシステム雑音の標準偏差
30	std_dev_x	m	位置のシステム雑音の標準偏差
31	std_dev_ion	m	電離層遅延のシステム雑音の標準偏差
32	std_dev_trop	m	対流圏遅延のシステム雑音の標準偏差
33	alpha_m	-	時定数の逆数
34	height_h	m	相対湿度 HR の観測地点の高さ
35	height_t	m	気温の観測地点の高さ
36	height_p	m	気圧の観測地点の高さ
37	humid_trop	%	相対湿度 HR
38	tempe_trop	°C	気温
39	press_trop	hPa	気圧
40	CN0_mp_loss	-	マルチパスによる電波強度 C/N0 の減衰量
41	ratio_threshold	-	アンビギュイティ検定における残差二乗和の比の閾値
42	cs_hazard_rate	-	サイクルスリップ検出における危険率
43	bunsan	-	カルマンフィルタ初期共分散値 (複合航法)

No.	項目	単位	仕様
44	kansoku_noise	-	カルマンフィルタ観測ノイズ分散値（複合航法）
45	system_noise	-	カルマンフィルタシステムノイズ分散値（複合航法）
46	offset	m	GPS と IMU のオフセットパラメータ[X,Y,Z]

2-4 出力データ

本ソフトウェアの出力データを表 2-4-1 に示す。

表 2-4-1 出力データ仕様

No.	項目	単位	仕様
1	測位技術	-	使用測位技術を示すフラグ 1:RTK-GPS、2:複合航法
2	総 epoch 数	-	演算処理したエポック数
3	GPS 日付	-	測位演算に使用した GPS データの日付
4	GPS 時刻	-	測位演算に使用した GPS データの時刻
5	捕捉衛星数	-	測位演算に使用した GPS データの捕捉衛星数
6	GDOP	-	測位演算結果 GDOP 値
7	PDOP	-	測位演算結果 PDOP 値
8	HDOP	-	測位演算結果 HDOP 値
9	VDOP	-	測位演算結果 VDOP 値
10	緯度	deg	測位演算結果 現在位置(WGS84 座標系) 緯度
11	経度	deg	測位演算結果 現在位置(WGS84 座標系) 経度
12	高度	m	測位演算結果 現在位置(WGS84 座標系) 楕円体高
13	ロール角	deg	測位演算結果 ロール角（複合航法演算時）
14	ピッチ角	deg	測位演算結果 ピッチ角（複合航法演算時）
15	方位角	deg	測位演算結果 方位角（複合航法演算時）
16	アンビギュイティ決定状況	-	測位演算結果 アンビギュイティ決定状況 1：決定、2：未決定
17	サイクルスリップ発生回数	回	測位演算結果 サイクルスリップ発生回数
18	マルチパス発生回数	回	測位演算結果 マルチパス発生回数

3章 マルチパス誤差低減処理

3-1 マルチパスの検出

マルチパスの検出処理内容を以下に示す。

(1) 機能

マルチパス誤差が含まれた GPS 衛星を特定する。

(2) アルゴリズム

一般に障害物によって反射・回折された GPS 信号（劣化信号）は、直接波と比較して信号強度が低くなる傾向を持つ。この特徴を利用して劣化信号を特定し除去する。

具体的なアルゴリズムは、

$SS_{oba}(t)$: 移動局側で受信した衛星信号の信号強度の観測値

$EV_{oba}(t)$: 移動局側で受信した衛星の仰角の計算値

$SS_{ref}(\theta)$: 信号強度を衛星仰角 θ の変数として表した関数
とすると、

$$SS_{DIFF}(t) = SS_{ref}(EV_{oba}(t)) - SS_{oba}(t) \quad (3-1-1)$$

と表すことができる。

受信している各衛星に対して、1 エポック毎に、式(3-1-1) より $SS_{DIFF}(t)$ を計算し、その値があらかじめ定めた閾値によりも大きい場合は、その衛星の信号は劣化信号と判断して測位計算から除外する。劣化信号除去手法処理部の処理フローを図 3-1-1 に示す

ステップ 1 : 別の処理部から、信号強度・衛星仰角データ・衛星使用フラグを読み込む。

ステップ 2 : 読み込んだ仰角データから $SS_{ref}(EV_{oba}(t))$ の値を計算する。

ステップ 3 : $SS_{DIFF}(t)$ の値を計算する。

ステップ 4 : $SS_{DIFF}(t)$ と設定した閾値とを比較し、閾値以上であれば衛星使用フラグを変更し、測位計算に使用する衛星から取り除く。

ステップ 5 : 衛星使用フラグを測位計算ルーチンに渡す。

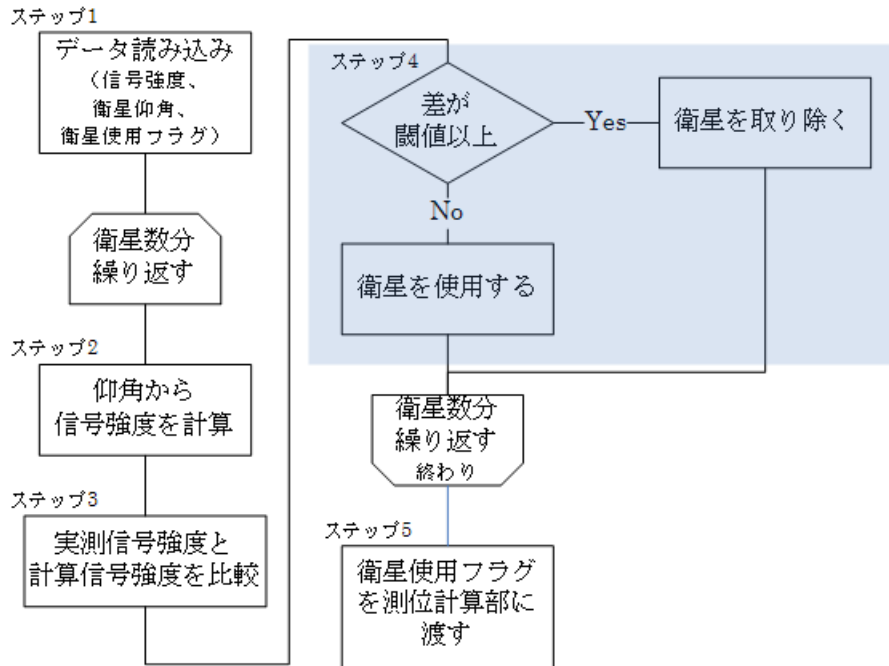


図 3-1-1 マルチパスデータ除去フロー

劣化信号除去手法処理部の外部インターフェースを表 3-1-1 に示す。

表 3-1-1 外部インターフェース

区分	項目	内容
入力	信号強度	受信機が出力する信号強度
入力	衛星仰角	衛星位置とアンテナ位置から計算することが出来る。
入力	衛星使用フラグ	劣化信号除去により衛星信号を除去するかのフラグ
出力	衛星使用フラグ	劣化信号除去により衛星信号を除去するかのフラグ

4 章 RTK-GPS 高速初期化処理

4-1 処理フロー

RTK-GPS 高速初期化技術の処理内容について説明する。全体処理フローを図 4-1-1 に示す。

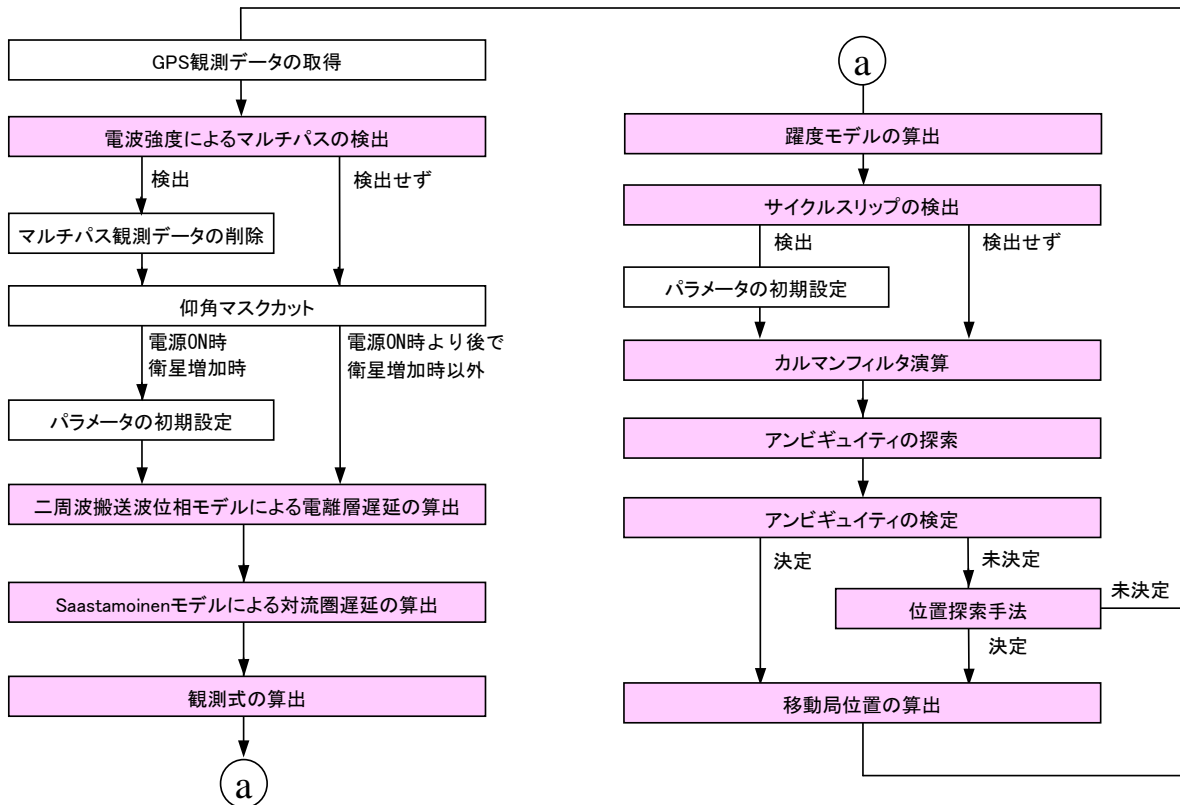


図 4-1-1 RTK-GPS 処理フロー

4-2 二周波搬送波位相モデルによる電離層遅延の算出

二周波搬送波位相モデルの算出内容を以下に示す。

(1) 機能

電離層遅延誤差をカルマンフィルタで推定するために、二周波搬送波位相モデルを構築する。

(2) アルゴリズム

電離層モデルの算出値は予測値であるため、実際と異なってしまうと、アンビギュイティに誤差が常に残留してしまい、アンビギュイティを決定することができない。そこで、観測データをもとに電離層遅延量を算出するモデルを考え、電離層遅延推定量を真値に収束させ、アンビギュイティを高速に決定できるようにする。

電離層遅延を算出できる観測データとして擬似距離と搬送波位相がある。擬似距離は 0.5m 程度の受信機雑音を含んでいるとされており、これを用いて計算すると、式(4-2-1)に示すように、電離層遅延量に約 1m の雑音 $\varepsilon_{\rho,l}$ が含まれてしまう。ここで、 f_1 及び f_2 は L1 帯及び L2 帯搬送波の周波数、 $\varepsilon_{\rho,r}$ は擬似距離の受信機雑音である。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\rho,l} &= \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \sqrt{\varepsilon_{\rho,r}^2 + \varepsilon_{\rho,r}^2} \\ &= \frac{(120 \times 1.023 \times 10^7)^2}{(154 \times 1.023 \times 10^7)^2 - (120 \times 1.023 \times 10^7)^2} \sqrt{0.5^2 + 0.5^2} \\ &\cong 1.09\end{aligned}\quad (4-2-1)$$

一方、搬送波位相の受信機雑音は 0.002m 程度とされているため、これを用いて計算しても、式(4-2-2)に示すように、電離層遅延量に 0.004m 程度の雑音しか含まれない。ここで、 $\varepsilon_{\phi,r}$ は擬似距離の受信機雑音である。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\rho,l} &= \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \sqrt{\varepsilon_{\phi,r}^2 + \varepsilon_{\phi,r}^2} \\ &= \frac{(120 \times 1.023 \times 10^7)^2}{(154 \times 1.023 \times 10^7)^2 - (120 \times 1.023 \times 10^7)^2} \sqrt{0.002^2 + 0.002^2} \\ &\cong 0.004\end{aligned}\quad (4-2-2)$$

以上の理由から、受信機雑音が小さい搬送波位相を用いて、電離層遅延を求めることにする。

L1 帯及び L2 帯搬送波位相は式(4-2-3)及び式(4-2-4)で表される。ここで、 k はエポック、 λ_i は L_i 帯 ($i=1,2$) 搬送波の波長、 $\varphi_{Li ku}^{1q}$ は二重位相差、 r_{ku}^{1q} は衛星と受信機間の距離の二重差、 δr_{ku}^{1q} は擬似距離方向の衛星位置誤差の二重差、 $I_{Li ku}^{1q}$ は L_i 帯搬送波の電離層遅延二重差、 T_{ku}^{1q} は対流圏遅延二重差、 $N_{Li ku}^{1q}$ は衛星番号 1 と q の L_i 帯搬送波二重位相差のアンビギュイティ、 $\varepsilon_{\varphi_{Li ku}}^{1q}$ は L_i 帯搬送波位相の観測雑音、 q は衛星番号である。

$$\lambda_1 \varphi_{L1 ku}^{1q}(k) = r_{ku}^{1q}(k) + \delta r_{ku}^{1q}(k) - I_{L1 ku}^{1q}(k) + T_{ku}^{1q}(k) + \lambda_1 N_{L1 ku}^{1q}(k) + \lambda_1 \varepsilon_{\varphi_{L1 ku}}^{1q}(k) \quad (4-2-3)$$

$$\lambda_2 \varphi_{L2 ku}^{1q}(k) = r_{ku}^{1q}(k) + \delta r_{ku}^{1q}(k) - I_{L2 ku}^{1q}(k) + T_{ku}^{1q}(k) + \lambda_2 N_{L2 ku}^{1q}(k) + \lambda_2 \varepsilon_{\varphi_{L2 ku}}^{1q}(k) \quad (4-2-4)$$

式(4-2-3)と式(4-2-4)を引き算することにより、式(4-2-5)及び式(4-2-6)を得ることができる。

$$\lambda_1 \varphi_{L1 ku}^{1q}(k) - \lambda_2 \varphi_{L2 ku}^{1q}(k) = -I_{L1 ku}^{1q}(k) + I_{L2 ku}^{1q}(k) + \lambda_1 N_{L1 ku}^{1q}(k) - \lambda_2 N_{L2 ku}^{1q}(k) + \varepsilon_{ku}^{1q}(k) \quad (4-2-5)$$

$$\varepsilon_{ku}^{1q}(k) = \lambda_1 \varepsilon_{\varphi_{L1ku}}^{1q}(k) - \lambda_2 \varepsilon_{\varphi_{L2ku}}^{1q}(k) \quad (4-2-6)$$

一方、 L_i 帯搬送波の電離層遅延 I_{Li} は式(4-2-7)で表される。ここで、 TEC は総電子数である。

$$I_{Li} = \frac{40.3 \cdot TEC}{f_i^2} \quad (4-2-7)$$

式(4-2-5)及び式(4-2-7)により、 $L1$ 帯搬送波の電離層遅延二重差は式(4-2-8)のように表される。

$$I_{L1ku}^{1q}(k) = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \left(\lambda_1 \varphi_{L1ku}^{1q}(k) - \lambda_2 \varphi_{L2ku}^{1q}(k) - \lambda_1 N_{L1ku}^{1q}(k) + \lambda_2 N_{L2ku}^{1q}(k) \right) \quad (4-2-8)$$

$L1$ 帯搬送波の電離層遅延二重差の観測量は推定の前に求める必要があるため、アンビギュイティ実数解の一段予測量を用いることにする。以上のこと及び式(4-2-8)をもとに、 $L1$ 帯搬送波の電離層遅延二重差の観測量 I_{L1ku}^{1q} を式(4-2-9)のように表すことにする。ここで、 $N_{Liku}^{1q}(k|k-1)$ は二重位相差のアンビギュイティ実数解の一段予測量である。

$$I_{L1ku}^{1q}(k) = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \left(\lambda_1 \varphi_{L1ku}^{1q}(k) - \lambda_2 \varphi_{L2ku}^{1q}(k) - \lambda_1 N_{L1ku}^{1q}(k|k-1) + \lambda_2 N_{L2ku}^{1q}(k|k-1) \right) \quad (4-2-9)$$

式(4-2-9)を用いて、電離層遅延二重差を求めるモデルを二周波搬送波位相モデルを構築する。

4-3 Saastamoinen モデルによる対流圏遅延の算出

Saastamoinen モデルの算出内容を以下に示す。

(1) 機能

対流圏遅延誤差をカルマンフィルタで推定するために、Saastamoinen モデルを構築する。

(2) アルゴリズム

Saastamoinenm モデルは GPS の観測点における温度、気圧、湿度を与えて対流圏遅延を計算するモデル式である。そこで、対流圏遅延量は、

$$T_{trop} = \frac{2.277 \times 10^{-3} \left\{ P + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - \tan 2\lambda \right\}}{\cos \lambda} \quad (4-3-1)$$

となる。ただし、

λ : 衛星の天頂角[rad]

P : 気圧[hPa]

T : 気温($K^\circ = C^\circ + 276.16$) [K]

e : 水蒸気分圧[hPa]

である。ここで、水蒸気分圧 e は、相対湿度 RH [%]から

$$e = 6.108(RH / 100) \exp\left\{\frac{(17.15T - 4684)}{T - 38.45}\right\} \quad (4-3-2)$$

で求める。

4-4 躍度モデルの算出

カルマンフィルタで位置を推定するための状態方程式のモデル式として躍度モデルを適用する。以下に算出内容を示す。

(1) 機能

躍度モデルを組み込んだカルマンフィルタの状態方程式の算出を行う。

(2) アルゴリズム

カルマンフィルタにおける予測精度を向上させるため、躍度が一次マルコフ過程であると仮定した運動モデル(躍度モデル)を考える。このとき、躍度 $\gamma(t)$ は式(4-4-1)のように表される。ここで、 α は躍度の時定数の逆数である。

$$\dot{\gamma}(t) = -\alpha\gamma(t) + w(t) \quad (4-4-1)$$

連続型状態方程式は式(4-4-2)～式(4-4-8)で表される。ここで、雑音 $w(t)$ は平均0、分散 I の標準正規分布に従うものとし、 $r(t) \in R^3$ は移動局位置、 $v(t) \in R^3$ は移動局速度、 $a(t) \in R^3$ は移動局加速度、 $\gamma(t) \in R^3$ は移動局躍度、 m は衛星数、 σ_w はシステム雑音の標準偏差、 $\sigma_{N_{Li}}$ は Li 帯搬送波二重位相差のアンビギュイティの標準偏差、 $\sigma_{I_{Li}}$ は電離層遅延二重差の標準偏差、 σ_T は対流圏遅延二重差の標準偏差、 $N_{Li}^{1q}(t)$ は Li 帯($i=1,2$)搬送波二重位相差のアンビギュイティ、 $I_{L1ku}^{1q}(t)$ はL1帯搬送波の電離層遅延二重差、 $T_{ku}^{1q}(t)$ は対流圏遅延二重差、 q は衛星番号、 m は衛星数である。

$$\dot{\eta}(t) = F\eta(t) + Gw(t) \quad (4-4-2)$$

$$\begin{aligned} \eta(t) &\equiv \begin{bmatrix} r^T(t) & v^T(t) & a^T(t) & \gamma^T(t) & N_{L1}^T(t) & N_{L2}^T(t) & I_{L1}^T(t) & T^T(t) \end{bmatrix}^T \\ &= \begin{bmatrix} \xi^T(t) & N^T(t) & I_{L1}^T(t) & T^T(t) \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (4-4-3)$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-4-4)$$

$$G = \begin{bmatrix} O & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & \sigma_w I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & \sigma_{N_{L1}} I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & \sigma_{N_{L2}} I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & \sigma_{I_{L1}} I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & \sigma_T I \end{bmatrix} \quad (4-4-5)$$

$$N_{Li}(t) = [N_{Liku}^{12}(t) \quad N_{Liku}^{13}(t) \quad \cdots \quad N_{Liku}^{1m}(t)]^T \quad (4-4-6)$$

$$I_{L1}(t) = [I_{L1ku}^{12}(t) \quad I_{L1ku}^{13}(t) \quad \cdots \quad I_{L1ku}^{1m}(t)]^T \quad (4-4-7)$$

$$T(t) = [T_{ku}^{12}(t) \quad T_{L1ku}^{13}(t) \quad \cdots \quad T_{ku}^{1m}(t)]^T \quad (4-4-8)$$

躍度 $\gamma(k)$ に関する相関関数の代表的なモデルは式(4-4-9)で表される。ここで、 σ_γ^2 は躍度の分散である。

$$r(\tau) = E[\gamma(t)\gamma(t+\tau)] = \sigma_\gamma^2 e^{-\alpha|\tau|} \quad (4-4-9)$$

図 4-4-1 のように躍度の確率分布を設定する。図 4-4-1 において $P_\gamma(\gamma)$ は躍度の確率、 Γ_{\max} は躍度の最大値である。図 4-4-1 に示す躍度の確率分布は、加速度が一次マルコフ過程である Singer モデルの加速度の確率分布を参考にして、離散分布と連続分布を取り入れたものである。躍度の分散を求めると、式(4-4-10)のように表される。

$$\begin{aligned} \sigma_\gamma^2 &= P_{\max} \Gamma_{\max}^2 + P_{\max} (-\Gamma_{\max}^2) + 2 \int_0^{\Gamma_{\max}} \frac{1 - (P_0 + 2P_{\max})}{2\Gamma_{\max}} \gamma^2 d\gamma \\ &= \frac{\Gamma_{\max}^2}{3} (1 + 4P_{\max} - P_0) \end{aligned} \quad (4-4-10)$$

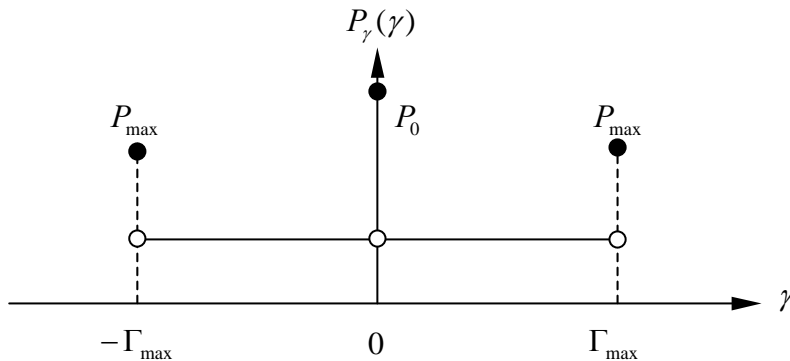


図 4-4-1 躍度の確率分布

式(4-4-9)の相関関数 $r(\tau)$ をフーリエ変換すると、式(4-4-11)のように展開できる。

$$\begin{aligned}
R(\omega) &= \mathfrak{F}\{r(\tau)\} \\
&= \mathfrak{F}\{\sigma_a^2 e^{-\alpha|\tau|}\} \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_\gamma^2 e^{-\alpha|\tau|} e^{-j\omega\tau} d\tau \\
&= \int_{-\infty}^0 \sigma_\gamma^2 e^{\alpha\tau} e^{-j\omega\tau} d\tau + \int_0^{\infty} \sigma_\gamma^2 e^{-\alpha\tau} e^{-j\omega\tau} d\tau \\
&= \sigma_\gamma^2 \left\{ \int_0^{\infty} e^{\alpha\tau'} e^{j\omega\tau'} (-1) d\tau' + \int_0^{\infty} e^{-\alpha\tau} e^{-j\omega\tau} d\tau \right\} \\
&= \sigma_\gamma^2 \left\{ \int_0^{\infty} e^{(j\omega-\alpha)\tau} d\tau + \int_0^{\infty} e^{-(j\omega+\alpha)\tau} d\tau \right\} \\
&= \sigma_\gamma^2 \left\{ \frac{-1}{-\alpha+j\omega} + \frac{-1}{-(\alpha+j\omega)} \right\} \\
&= \frac{2\alpha\sigma_\gamma^2}{\alpha^2 + \omega^2} \\
&= \frac{1}{j\omega + \alpha} \cdot \frac{1}{-j\omega + \alpha} \cdot 2\alpha\sigma_\gamma^2 \\
&= H(j\omega)H(-j\omega)S(\omega) \tag{4-4-11}
\end{aligned}$$

ここで、 $H(j\omega)$ 、 $S(\omega)$ は式(4-4-12)及び式(4-4-13)のように表される。

$$H(j\omega) = \frac{1}{j\omega + \alpha} \tag{4-4-12}$$

$$S(\omega) = 2\alpha\sigma_\gamma^2 \tag{4-4-13}$$

システム雑音の分散 σ_w^2 を用いて、式(4-4-14)を得ることができる。

$$\sigma_w^2 = 2\alpha\sigma_\gamma^2 \tag{4-4-14}$$

式(4-4-2)の解 $\eta(t)$ に対して、関数 $e^{-Ft}\eta(t)$ を考え、伊藤の連鎖則を適用すると、式(4-4-15)を得ることができる。ここで、 $\Phi(t, \alpha)$ は状態遷移行列、 $u(t)$ はシステム雑音である。

$$\eta(t) = e^{Ft}\eta_0 + \int_0^t e^{F(t-\tau)}Gw(\tau)d\tau \tag{4-4-15}$$

$$\Phi(t, \alpha) = e^{Ft} \tag{4-4-16}$$

$$u(t) = \int_0^t e^{F(t-\tau)}Gw(\tau)d\tau \tag{4-4-17}$$

共分散関数を計算すると、式(4-4-18)のようになる。

$$\begin{aligned}
\text{var}[\eta(t)] &= \left(\int_0^t e^{F(t-\tau)}Gw(\tau)d\tau \right) \left(\int_0^t w^T(t)G^T e^{F^T(t-\tau)} dt \right) \\
&= \int_0^t e^{F(t-\tau)}GQ_wG^T e^{F^T(t-\tau)} d\tau \tag{4-4-18}
\end{aligned}$$

ここで、 Q_w は式(4-4-19)で表される。

$$\begin{aligned}
Q_w &= E[w(\tau)w^T(k)] \\
&= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \delta(\tau-k) \tag{4-4-19}
\end{aligned}$$

式(4-4-20)に示すように、逆ラプラス変換を用いて、状態遷移行列 $\Phi(t, \alpha)$ を求めていく。

$$\begin{aligned}
\Phi(t, \alpha) &= e^{Ft} \\
&= L^{-1}\{(sI - F)^{-1}\} \tag{4-4-20}
\end{aligned}$$

$(sI - F)$ の逆行列を計算するために、式(4-4-21)及び式(4-4-22)に示すように、 $(sI - F)$ の固有値を求める。

$$\begin{aligned}
&\det(\lambda I - F) = 0 \\
&\begin{vmatrix} \lambda I & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda I & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda I & -I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda I + \alpha I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda I \end{vmatrix} = 0 \tag{4-4-21} \\
&\lambda^7(\lambda + \alpha) = 0
\end{aligned}$$

$$\lambda = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -\alpha\} \tag{4-4-22}$$

固有値及び余因子行列を用いて、式(4-4-23)に示すように、 $(sI - F)$ の逆行列を求めていく。

$$\begin{aligned}
(sI - F)^{-1} &= \frac{1}{s^4(s+\alpha)} \begin{bmatrix} s^3(s+\alpha)I & s^2(s+\alpha)I & s(s+\alpha)I & sI & O & O & O & O \\ O & s^3(s+\alpha)I & s^2(s+\alpha)I & s^2I & O & O & O & O \\ O & O & s^3(s+\alpha)I & s^3I & O & O & O & O \\ O & O & O & s^3I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & s^3(s+\alpha)I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & s^3(s+\alpha)I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & s^3(s+\alpha)I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & s^3(s+\alpha)I \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \frac{1}{s}I & \frac{1}{s^2}I & \frac{1}{s^3}I & \frac{1}{s^3(s+\alpha)}I & O & O & O & O \\ O & \frac{1}{s}I & \frac{1}{s^2}I & \frac{1}{s^2(s+\alpha)}I & O & O & O & O \\ O & O & \frac{1}{s}I & \frac{1}{s(s+\alpha)}I & O & O & O & O \\ O & O & O & \frac{1}{s+\alpha}I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & \frac{1}{s}I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & \frac{1}{s}I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & \frac{1}{s}I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & \frac{1}{s}I \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \frac{1}{s}I & \frac{1}{s^2}I & \frac{1}{s^3}I & \left\{ \frac{1}{\alpha^3} \frac{1}{s} - \frac{1}{\alpha^2} \frac{1}{s^2} + \frac{1}{\alpha} \frac{1}{s^3} - \frac{1}{\alpha^3} \frac{1}{s+\alpha} \right\} I & O & O & O & O \\ O & \frac{1}{s}I & \frac{1}{s^2}I & \left\{ -\frac{1}{\alpha^2} \frac{1}{s} + \frac{1}{\alpha} \frac{1}{s^2} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{1}{s+\alpha} \right\} I & O & O & O & O \\ O & O & \frac{1}{s}I & \left\{ \frac{1}{\alpha} \frac{1}{s} - \frac{1}{\alpha} \frac{1}{s+\alpha} \right\} I & O & O & O & O \\ O & O & O & \frac{1}{s+\alpha}I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & \frac{1}{s}I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & \frac{1}{s}I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & \frac{1}{s}I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & \frac{1}{s}I \end{bmatrix} \tag{4-4-23}
\end{aligned}$$

式(4-4-23)を逆ラプラス変換し、観測データのサンプリング間隔を Δt とし、離散化すると、状態遷移行列 $\Phi(t, \alpha)$ は式(4-4-24)のようになる。

$$\begin{aligned}
\Phi(\Delta t, \alpha) &= e^{Ft} \\
&= L^{-1} \left\{ (sI - F)^{-1} \right\} \\
&= \begin{bmatrix} I & \Delta t I & \frac{1}{2} \Delta t^2 I & \frac{1}{\alpha^3} \left(1 - \alpha \Delta t + \frac{\alpha^2}{2} \Delta t^2 - e^{-\alpha \Delta t} \right) I & O & O & O & O \\ O & I & \Delta t I & \frac{1}{\alpha^2} (-1 + \alpha \Delta t + e^{-\alpha \Delta t}) I & O & O & O & O \\ O & O & I & \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \Delta t}) I & O & O & O & O \\ O & O & O & e^{-\alpha \Delta t} I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & I \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4-4-24}$$

式(4-4-17)をもとにシステム雑音 $u(k)$ は式(4-4-25)のように展開できる。但し、離散型で表現した。

$$\begin{aligned}
u(k) &= \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{F((k+1)\Delta t - t, \alpha)} G w(t) dt \\
&= \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} \begin{bmatrix} I & \{(k+1)\Delta t - t\} I & \frac{1}{2} \{(k+1)\Delta t - t\}^2 I & \frac{1}{\alpha^3} \left[1 - \alpha \{(k+1)\Delta t - t\} + \frac{\alpha^2}{2} \{(k+1)\Delta t - t\}^2 - e^{-\alpha \{(k+1)\Delta t - t\}} \right] I & O & O & O & O \\ O & I & \{(k+1)\Delta t - t\} I & \frac{1}{\alpha^2} [-1 + \alpha \{(k+1)\Delta t - t\} + e^{-\alpha \{(k+1)\Delta t - t\}}] I & O & O & O & O \\ O & O & I & \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \{(k+1)\Delta t - t\}}) I & O & O & O & O \\ O & O & O & e^{-\alpha \{(k+1)\Delta t - t\}} I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & I \end{bmatrix} \\
&\quad \begin{bmatrix} O & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & \sigma_w I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & \sigma_{N_{L1}} I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & \sigma_{N_{L2}} I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & \sigma_{I_{L1}} I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & \sigma_T I \end{bmatrix} w(t) dt \\
&= \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} \begin{bmatrix} O & O & O & \frac{\sigma_w}{\alpha^3} \left[1 - \alpha \{(k+1)\Delta t - t\} + \frac{\alpha^2}{2} \{(k+1)\Delta t - t\}^2 - e^{-\alpha \{(k+1)\Delta t - t\}} \right] & O & O & O & O \\ O & O & O & \frac{\sigma_w}{\alpha^2} [-1 + \alpha \{(k+1)\Delta t - t\} + e^{-\alpha \{(k+1)\Delta t - t\}}] I & O & O & O & O \\ O & O & O & \frac{\sigma_w}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \{(k+1)\Delta t - t\}}) I & O & O & O & O \\ O & O & O & \sigma_w e^{-\alpha \{(k+1)\Delta t - t\}} I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & \sigma_{N_{L1}} I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & \sigma_{N_{L2}} I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & \sigma_{I_{L1}} I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & \sigma_T I \end{bmatrix} w(t) dt
\end{aligned} \tag{4-4-25}$$

式(4-4-25)をもとにシステム雑音 $u(k)$ の共分散行列 $Q(k)$ を式(4-4-26)～式(4-4-30)のように展開できる。

$$\begin{aligned}
Q(k) &= E[u(k)u^T(k)] \\
&= \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} \begin{bmatrix} O & O & O & \sigma_w a I & O & O & O & O \\ O & O & O & \sigma_w b I & O & O & O & O \\ O & O & O & \sigma_w c I & O & O & O & O \\ O & O & O & \sigma_w d I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & \sigma_{N_{L1}} I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & \sigma_{N_{L2}} I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & \sigma_{I_{L1}} I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & \sigma_T I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} O & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & I \end{bmatrix} \\
&= \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} \begin{bmatrix} O & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O & O & O \\ \sigma_w a I & \sigma_w b I & \sigma_w c I & \sigma_w d I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & \sigma_{N_{L1}} I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & \sigma_{N_{L2}} I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & \sigma_{I_{L1}} I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & \sigma_T I \end{bmatrix} dt \\
&= \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} \begin{bmatrix} \sigma_w^2 a^2 I & \sigma_w^2 a b I & \sigma_w^2 a c I & \sigma_w^2 a d I & O & O & O & O \\ \sigma_w^2 a b I & \sigma_w^2 b^2 I & \sigma_w^2 b c I & \sigma_w^2 b d I & O & O & O & O \\ \sigma_w^2 a c I & \sigma_w^2 b c I & \sigma_w^2 c^2 I & \sigma_w^2 c d I & O & O & O & O \\ \sigma_w^2 a d I & \sigma_w^2 b d I & \sigma_w^2 c d I & \sigma_w^2 d^2 I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & \sigma_{N_{L1}}^2 I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & \sigma_{N_{L2}}^2 I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & \sigma_{I_{L1}}^2 I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & \sigma_T^2 I \end{bmatrix} dt
\end{aligned} \tag{4-4-26}$$

$$a = \frac{1}{\alpha^3} \left[1 - \alpha \{(k+1)\Delta t - t\} + \frac{\alpha^2}{2} \{(k+1)\Delta t - t\}^2 - e^{-\alpha \{(k+1)\Delta t - t\}} \right] \tag{4-4-27}$$

$$b = \frac{1}{\alpha^2} \left[-1 + \alpha \{(k+1)\Delta t - t\} + e^{-\alpha \{(k+1)\Delta t - t\}} \right] \tag{4-4-28}$$

$$c = \frac{1}{\alpha} \left(1 - e^{-\alpha \{(k+1)\Delta t - t\}} \right) \tag{4-4-29}$$

$$d = e^{-\alpha \{(k+1)\Delta t - t\}} \tag{4-4-30}$$

$Z = (k+1)\Delta t - t$ とおくと、式(4-4-26)を式(4-4-31)～式(4-4-41)のように展開できる。

$$\begin{aligned}
Q(k) &= \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} \begin{bmatrix} \sigma_w^2 a^2 I & \sigma_w^2 abI & \sigma_w^2 acI & \sigma_w^2 adI & O & O & O & O \\ \sigma_w^2 abI & \sigma_w^2 b^2 I & \sigma_w^2 bcI & \sigma_w^2 bdI & O & O & O & O \\ \sigma_w^2 acI & \sigma_w^2 bcI & \sigma_w^2 c^2 I & \sigma_w^2 cdI & O & O & O & O \\ \sigma_w^2 adI & \sigma_w^2 bdI & \sigma_w^2 cdI & \sigma_w^2 d^2 I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & \sigma_{N_{L1}}^2 I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & \sigma_{N_{L2}}^2 I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & \sigma_{I_{L1}}^2 I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & \sigma_T^2 I \end{bmatrix} dt \\
&= \int_{\Delta t}^0 \begin{bmatrix} \sigma_w^2 a^2 I & \sigma_w^2 abI & \sigma_w^2 acI & \sigma_w^2 adI & O & O & O & O \\ \sigma_w^2 abI & \sigma_w^2 b^2 I & \sigma_w^2 bcI & \sigma_w^2 bdI & O & O & O & O \\ \sigma_w^2 acI & \sigma_w^2 bcI & \sigma_w^2 c^2 I & \sigma_w^2 cdI & O & O & O & O \\ \sigma_w^2 adI & \sigma_w^2 bdI & \sigma_w^2 cdI & \sigma_w^2 d^2 I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & \sigma_{N_{L1}}^2 I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & \sigma_{N_{L2}}^2 I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & \sigma_{I_{L1}}^2 I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & \sigma_T^2 I \end{bmatrix} d(-Z) \\
&= \int_0^{\Delta t} \begin{bmatrix} \sigma_w^2 a^2 I & \sigma_w^2 abI & \sigma_w^2 acI & \sigma_w^2 adI & O & O & O & O \\ \sigma_w^2 abI & \sigma_w^2 b^2 I & \sigma_w^2 bcI & \sigma_w^2 bdI & O & O & O & O \\ \sigma_w^2 acI & \sigma_w^2 bcI & \sigma_w^2 c^2 I & \sigma_w^2 cdI & O & O & O & O \\ \sigma_w^2 adI & \sigma_w^2 bdI & \sigma_w^2 cdI & \sigma_w^2 d^2 I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & \sigma_{N_{L1}}^2 I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & \sigma_{N_{L2}}^2 I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & \sigma_{I_{L1}}^2 I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & \sigma_T^2 I \end{bmatrix} dZ
\end{aligned}$$

(4-4-31)

$$\begin{aligned}
a^2 &= \left\{ \frac{1}{\alpha^3} \left(1 - \alpha Z + \frac{\alpha^2}{2} Z^2 - e^{-\alpha Z} \right) \right\}^2 \\
&= \frac{1}{\alpha^6} \left(1 - 2\alpha Z + 2\alpha^2 Z^2 - \alpha^3 Z^3 + \frac{\alpha^4}{4} Z^4 - 2e^{-\alpha Z} + 2\alpha Z e^{-\alpha Z} - \alpha^2 Z^2 e^{-\alpha Z} + e^{-2\alpha Z} \right)
\end{aligned} \tag{4-4-32}$$

$$\begin{aligned}
b^2 &= \left\{ \frac{1}{\alpha^2} (-1 + \alpha Z + e^{-\alpha Z}) \right\}^2 \\
&= \frac{1}{\alpha^4} (1 - 2\alpha Z + \alpha^2 Z^2 - 2e^{-\alpha Z} + 2\alpha Z e^{-\alpha Z} + e^{-2\alpha Z})
\end{aligned} \tag{4-4-33}$$

$$\begin{aligned}
c^2 &= \left\{ \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha Z}) \right\}^2 \\
&= \frac{1}{\alpha^2} (1 - 2e^{-\alpha Z} + e^{-2\alpha Z})
\end{aligned} \tag{4-4-34}$$

$$\begin{aligned}
d^2 &= (e^{-\alpha Z})^2 \\
&= e^{-2\alpha Z}
\end{aligned} \tag{4-4-35}$$

$$\begin{aligned}
ab &= \left\{ \frac{1}{\alpha^3} \left(1 - \alpha Z + \frac{\alpha^2}{2} Z^2 - e^{-\alpha Z} \right) \right\} \left\{ \frac{1}{\alpha^2} (-1 + \alpha Z + e^{-\alpha Z}) \right\} \\
&= \frac{1}{\alpha^5} \left(-1 + 2\alpha Z - \frac{3}{2} \alpha^2 Z^2 + \frac{\alpha^3}{2} Z^3 + 2e^{-\alpha Z} - 2\alpha Z e^{-\alpha Z} + \frac{\alpha^2}{2} Z^2 e^{-\alpha Z} - e^{-2\alpha Z} \right)
\end{aligned} \tag{4-4-36}$$

$$\begin{aligned}
ac &= \left\{ \frac{1}{\alpha^3} \left(1 - \alpha Z + \frac{\alpha^2}{2} Z^2 - e^{-\alpha Z} \right) \right\} \left\{ \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha Z}) \right\} \\
&= \frac{1}{\alpha^4} \left(1 - \alpha Z + \frac{\alpha^2}{2} Z^2 - 2e^{-\alpha Z} + \alpha Z e^{-\alpha Z} - \frac{\alpha^2}{2} Z^2 e^{-\alpha Z} + e^{-2\alpha Z} \right)
\end{aligned} \tag{4-4-37}$$

$$\begin{aligned}
ad &= \left\{ \frac{1}{\alpha^3} \left(1 - \alpha Z + \frac{\alpha^2}{2} Z^2 - e^{-\alpha Z} \right) \right\} e^{-\alpha Z} \\
&= \frac{1}{\alpha^3} \left(e^{-\alpha Z} - \alpha Z e^{-\alpha Z} + \frac{\alpha^2}{2} Z^2 e^{-\alpha Z} - e^{-2\alpha Z} \right)
\end{aligned} \tag{4-4-38}$$

$$\begin{aligned}
bc &= \left\{ \frac{1}{\alpha^2} (-1 + \alpha Z + e^{-\alpha Z}) \right\} \left\{ \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha Z}) \right\} \\
&= \frac{1}{\alpha^3} (-1 + \alpha Z + 2e^{-\alpha Z} - \alpha Z e^{-\alpha Z} - e^{-2\alpha Z})
\end{aligned} \tag{4-4-39}$$

$$\begin{aligned}
bd &= \left\{ \frac{1}{\alpha^2} (-1 + \alpha Z + e^{-\alpha Z}) \right\} e^{-\alpha Z} \\
&= \frac{1}{\alpha^2} (-e^{-\alpha Z} + \alpha Z e^{-\alpha Z} + e^{-2\alpha Z})
\end{aligned} \tag{4-4-40}$$

$$\begin{aligned}
cd &= \left\{ \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha Z}) \right\} e^{-\alpha Z} \\
&= \frac{1}{\alpha} (e^{-\alpha Z} - e^{-2\alpha Z})
\end{aligned} \tag{4-4-41}$$

式(4-4-31)を計算すると、式(4-4-42)～式(4-4-56)のようになる。

$$Q(t) = \begin{bmatrix} q_{11}I & q_{12}I & q_{13}I & q_{14}I & O & O & O & O \\ q_{21}I & q_{22}I & q_{23}I & q_{24}I & O & O & O & O \\ q_{31}I & q_{32}I & q_{33}I & q_{34}I & O & O & O & O \\ q_{41}I & q_{42}I & q_{43}I & q_{44}I & O & O & O & O \\ O & O & O & O & q_{55}I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & q_{66}I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & q_{77}I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & q_{88}I \end{bmatrix} \tag{4-4-42}$$

$$\begin{aligned}
q_{11} &= \frac{\sigma_w^2}{60\alpha^7} (-90 + 60\alpha\Delta t - 60\alpha^2\Delta t^2 + 40\alpha^3\Delta t^3 - 15\alpha^4\Delta t^4 \\
&\quad + 3\alpha^5\Delta t^5 + 120e^{-\alpha\Delta t} + 60\alpha^2\Delta t^2 e^{-\alpha\Delta t} - 30e^{-2\alpha\Delta t})
\end{aligned} \tag{4-4-43}$$

$$\begin{aligned}
q_{12} = q_{21} &= \frac{\sigma_w^2}{8\alpha^6} (4 - 8\alpha\Delta t + 8\alpha^2\Delta t^2 - 4\alpha^3\Delta t^3 + \alpha^4\Delta t^4 \\
&\quad - 8e^{-\alpha\Delta t} + 8\alpha\Delta t e^{-\alpha\Delta t} - 4\alpha^2\Delta t^2 e^{-\alpha\Delta t} + 4e^{-2\alpha\Delta t})
\end{aligned} \tag{4-4-44}$$

$$\begin{aligned}
q_{13} = q_{31} &= \frac{\sigma_w^2}{6\alpha^5} (-9 + 6\alpha\Delta t - 3\alpha^2\Delta t^2 + \alpha^3\Delta t^3 + 12e^{-\alpha\Delta t} + 3\alpha^2\Delta t^2 e^{-\alpha\Delta t} - 3e^{-2\alpha\Delta t})
\end{aligned} \tag{4-4-45}$$

$$q_{14} = q_{41} = \frac{\sigma_w^2}{2\alpha^4} (1 - 2e^{-\alpha\Delta t} - \alpha^2\Delta t^2 e^{-\alpha\Delta t} + e^{-2\alpha\Delta t}) \tag{4-4-46}$$

$$q_{22} = \frac{\sigma_w^2}{2\alpha^5} \left(1 + 2\alpha\Delta t - 2\alpha^2\Delta t^2 + \frac{2}{3}\alpha^3\Delta t^3 - 4\alpha\Delta t e^{-\alpha\Delta t} - e^{-2\alpha\Delta t} \right) \tag{4-4-47}$$

$$q_{23} = q_{32} = \frac{\sigma_w^2}{2\alpha^4} (1 - 2\alpha\Delta t + \alpha^2\Delta t^2 + 2\alpha\Delta t e^{-\alpha\Delta t} - 2e^{-\alpha\Delta t} + e^{-2\alpha\Delta t}) \tag{4-4-48}$$

$$q_{24} = q_{42} = \frac{\sigma_w^2}{2\alpha^3} (1 - 2\alpha\Delta t e^{-\alpha\Delta t} - e^{-2\alpha\Delta t}) \tag{4-4-49}$$

$$q_{33} = \frac{\sigma_w^2}{2\alpha^3} (-3 + 2\alpha\Delta t + 4e^{-\alpha\Delta t} - e^{-2\alpha\Delta t}) \tag{4-4-50}$$

$$q_{34} = q_{43} = \frac{\sigma_w^2}{2\alpha^2} (1 - 2e^{-\alpha\Delta t} + e^{-2\alpha\Delta t}) \quad (4-4-51)$$

$$q_{44} = \frac{\sigma_w^2}{2\alpha} (1 - e^{-2\alpha\Delta t}) \quad (4-4-52)$$

$$q_{55} = \sigma_{N_{L1}}^2 \Delta t \quad (4-4-53)$$

$$q_{66} = \sigma_{N_{L2}}^2 \Delta t \quad (4-4-54)$$

$$q_{77} = \sigma_{I_{L1}}^2 \Delta t \quad (4-4-55)$$

$$q_{88} = \sigma_I^2 \Delta t \quad (4-4-56)$$

4-5 イノベーションによるサイクルスリップの検出

カルマンフィルタのイノベーションを用いたサイクルスリップの検出手法を以下に示す。

(1) 機能

サイクルスリップの検出を行う。

(2) アルゴリズム

サイクルスリップ検出方法はカルマンフィルタのイノベーションを用いて χ^2 検定で検出を行う。

カルマンフィルタのイノベーション $v_\varphi(k)$ は共分散行列 $M_\varphi(k)$ の正規性白色過程である。したがって、コレスキー因子分解により、 $M_\varphi(k)$ に対して式(4-5-1)となるような正則な行列 $L(k)$ が存在する。

$$M_\varphi(k) = L(k)L^T(k) \quad (4-5-1)$$

式(4-5-2)に示すように $v_s(k)$ を定義すると、 $v_s(k)$ の共分散行列は式(4-5-3)のように単位行列になる。

$$v_s(k) \equiv L^{-1}(k)v_\varphi(k) \quad (4-5-2)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[v_s(k)] &= \text{Cov}[L^{-1}(k)v_\varphi(k)] \\ &= E[L^{-1}(k)v_\varphi(k)v_\varphi^T(k)L^T(k)] \\ &= L^{-1}(k)M_\varphi(k)L(k) \\ &= I \end{aligned} \quad (4-5-3)$$

式(4-5-3)より、 $v_s(k)$ のそれぞれの要素は互いに独立な標準正規分布に従う。したがって、式

(4-5-4)で表される検定統計量 $T(k)$ は自由度 $2m-2$ の χ^2 分布に従う。

$$\begin{aligned} T(k) &= \mathbf{v}_s^T(k) \mathbf{v}_s(k) \\ &= \mathbf{v}_\varphi^T(k) L^T(k) L^{-1}(k) \mathbf{v}_\varphi(k) \\ &= \mathbf{v}_\varphi^T(k) M^{-1}(k) \mathbf{v}_\varphi(k) \end{aligned} \quad (4-5-4)$$

もしサイクルスリップが起こると、イノベーションの共分散行列は変化する。そこで、下記に示す2つの仮説を立てる。

- ・ 仮説 $H_{\chi,0}$: イノベーションの共分散が変化しなかった。
- ・ 仮説 $H_{\chi,1}$: イノベーションの共分散が変化した。

そこで、危険率 α_χ を定め、この仮説に対する検定を自由度 $2m-2$ の χ^2 分布に基づいて行くと、以下のように仮説を採択できる。

- ・ $T(t) \leq \chi_{\alpha_\chi}^2(2m-2)$ の場合、仮説 $H_{\chi,0}$ を採択する。
- ・ $T(t) > \chi_{\alpha_\chi}^2(2m-2)$ の場合、仮説 $H_{\chi,1}$ を採択する。

4-6 観測方程式の算出

カルマンフィルタに適用する観測方程式の算出内容を以下に示す。

(1) 機能

GPS データから観測方程式の算出を行う。

(2) アルゴリズム

L_i 帯搬送波二重位相差 $\varphi_{Liku}^{1q}(k)$ のベクトル $\boldsymbol{\varphi}_{L_i}(k)$ 、擬似距離二重差 $\rho_{Liku}^{1q}(k)$ のベクトル $\boldsymbol{\rho}_{L_i}(k)$ 、L1 帯搬送波の電離層遅延二重差 $I_{Liku}^{1q}(k)$ のベクトル $\boldsymbol{I}'_{L_i}(k)$ 及び対流圏遅延二重差 $T_{ku}^{1q}(k)$ のベクトル $\boldsymbol{T}'(k)$ を式(4-4-1)～式(4-4-9)のように離散型で表す。ここで、 c は光速、 (x_k, y_k, z_k) は基準局位置、 (x_u, y_u, z_u) は移動局位置、 (x^q, y^q, z^q) は衛星番号 q の衛星位置、 $\boldsymbol{\varepsilon}_{\varphi_{Liku}^{1q}}(k)$ は $N(0, R_{\varphi_{L_i}})$ に従う二重位相差の観測雑音、 $\boldsymbol{\varepsilon}_{\rho_{Liku}^{1q}}(k)$ は $N(0, R_{\rho_{L_i}})$ 及びに従う擬似距離二重差の観測雑音、 $\boldsymbol{\varepsilon}_{I_{Liku}^{1q}}(k)$ は $N(0, R_{I_{L_i}})$ に従う電離層遅延二重差の観測雑音、 $\boldsymbol{\varepsilon}_{T_{ku}^{1q}}(k)$ は $N(0, R_T)$ 及びに従う対流圏遅延二重差の観測雑音である。

$$\begin{bmatrix} \varphi_{L_1}(k) \\ \varphi_{L_2}(k) \\ \rho_{L_1}(k) \\ \rho_{L_2}(k) \\ I'_{L_1}(k) \\ T'_{L_1}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{L_1}(r(k)) \\ h_{L_2}(r(k)) \\ h_{L_1}(r(k)) \\ h_{L_2}(r(k)) \\ O \\ O \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{L_1}(k) \\ N_{L_2}(k) \\ O \\ O \\ O \\ O \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{\lambda_1} I_{L_1}(k) \\ -\frac{1}{\lambda_2} \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} I_{L_1}(k) \\ I_{L_1}(k) \\ \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} I_{L_1}(k) \\ I_{L_1}(k) \\ O \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_1} T(k) \\ \frac{1}{\lambda_2} T(k) \\ T(k) \\ T(k) \\ O \\ T(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{\varphi_{L_1}}(k) \\ \varepsilon_{\varphi_{L_2}}(k) \\ \varepsilon_{\rho_{L_1}}(k) \\ \varepsilon_{\rho_{L_2}}(k) \\ \varepsilon_{I_{L_1}}(k) \\ \varepsilon_T(k) \end{bmatrix} \quad (4-6-1)$$

$$\varphi_{L_i}(k) = [\varphi_{Liku}^{12}(k) \quad \varphi_{Liku}^{13}(k) \quad \cdots \quad \varphi_{Liku}^{1m}(k)]^T \quad (4-6-2)$$

$$\rho_{L_i}(k) = [\rho_{Liku}^{12}(k) \quad \rho_{Liku}^{13}(k) \quad \cdots \quad \rho_{Liku}^{1m}(k)]^T \quad (4-6-3)$$

$$h_{L_i}(r(k)) = [h_{Liku}^{12}(r(k)) \quad h_{Liku}^{13}(r(k)) \quad \cdots \quad h_{Liku}^{1m}(r(k))]^T \quad (4-6-4)$$

$$\begin{aligned} h_{Liku}^{1q}(r(k)) = & \frac{f_i}{c} \left\{ \sqrt{(x_k - x^1)^2 + (y_k - y^1)^2 + (z_k - z^1)^2} \right. \\ & \left. - \sqrt{(x_k - x^q)^2 + (y_k - y^q)^2 + (z_k - z^q)^2} \right\} \\ & - \frac{f_i}{c} \left\{ \sqrt{(x_u - x^1)^2 + (y_u - y^1)^2 + (z_u - z^1)^2} \right. \\ & \left. - \sqrt{(x_u - x^q)^2 + (y_u - y^q)^2 + (z_u - z^q)^2} \right\} \end{aligned} \quad (4-6-5)$$

$$\varepsilon_{\varphi_{L_i}}(k) = [\varepsilon_{\varphi_{Liku}}^{12} \quad \varepsilon_{\varphi_{Liku}}^{13} \quad \cdots \quad \varepsilon_{\varphi_{Liku}}^{1m}]^T \quad (4-6-6)$$

$$\varepsilon_{\rho_{L_i}}(k) = [\varepsilon_{\rho_{Liku}}^{12} \quad \varepsilon_{\rho_{Liku}}^{13} \quad \cdots \quad \varepsilon_{\rho_{Liku}}^{1m}]^T \quad (4-6-7)$$

$$\varepsilon_{I_{L_1}}(k) = [\varepsilon_{I_{L_1ku}}^{12} \quad \varepsilon_{I_{L_1ku}}^{13} \quad \cdots \quad \varepsilon_{I_{L_1ku}}^{1m}]^T \quad (4-6-8)$$

$$\varepsilon_T(k) = [\varepsilon_{Tku}^{12} \quad \varepsilon_{Tku}^{13} \quad \cdots \quad \varepsilon_{Tku}^{1m}]^T \quad (4-6-9)$$

式(4-6-1)において $h_{L_i}(r(k))$ を一段予測値 $\hat{r}(k|k-1)$ のまわりでテーラー級数展開し、2次以上の項を削除すると、 $h_{L_i}(r(k))$ は近似的に式(4-6-10)のように表される。

$$h_{L_i}(r(k)) \approx h_{L_i}(\hat{r}(k|k-1)) + \left. \frac{\partial h_{L_i}(r(k))}{\partial r(k)} \right|_{r(k)=\hat{r}(k|k-1)} (r(k) - \hat{r}(k|k-1)) \quad (4-6-10)$$

ここで、式(4-6-11)及び式(4-6-12)に示す $y(k)$ を定義する。

$$y(k) \equiv \begin{bmatrix} \varphi_{L_1}(k) \\ \varphi_{L_2}(k) \\ \rho_{L_1}(k) \\ \rho_{L_2}(k) \\ I'_{L_1}(k) \\ T'(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{L_1}(\hat{r}(k|k-1)) - H_{L_1}(k)\hat{r}(k|k-1) \\ h_{L_2}(\hat{r}(k|k-1)) - H_{L_2}(k)\hat{r}(k|k-1) \\ h_{L_1}(\hat{r}(k|k-1)) - H_{L_1}(k)\hat{r}(k|k-1) \\ h_{L_2}(\hat{r}(k|k-1)) - H_{L_2}(k)\hat{r}(k|k-1) \\ O \\ O \end{bmatrix} \quad (4-6-11)$$

$$H_{L_i}(k) = \left. \frac{\partial h_{L_i}(r(k))}{\partial r(k)} \right|_{r(k)=\hat{r}(k|k-1)} \quad (4-6-12)$$

式(4-6-10)～式(4-6-12)を用いて、式(4-6-13)～式(4-6-20)に示す線形化された観測方程式が得られる。

$$y(k) = \begin{bmatrix} H_{L_1}(k) & O & O & O \\ H_{L_2}(k) & O & O & O \\ H_{L_1}(k) & O & O & O \\ H_{L_2}(k) & O & O & O \\ O & O & O & O \\ O & O & O & O \end{bmatrix} \xi(k) + \begin{bmatrix} N_{L_1}(k) \\ N_{L_2}(k) \\ O \\ O \\ O \\ O \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{\lambda_1} I_{L_1}(k) \\ -\frac{1}{\lambda_2} \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} I_{L_1}(k) \\ I_{L_1}(k) \\ \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} I_{L_1}(k) \\ I_{L_1}(k) \\ O \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_1} T(k) \\ \frac{1}{\lambda_2} T(k) \\ T(k) \\ T(k) \\ O \\ T(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{\varphi_{L_1}}(k) \\ \varepsilon_{\varphi_{L_2}}(k) \\ \varepsilon_{\rho_{L_1}}(k) \\ \varepsilon_{\rho_{L_2}}(k) \\ \varepsilon_{I_{L_1}}(k) \\ \varepsilon_T(k) \end{bmatrix} \quad (4-6-13)$$

$$= C(k)\eta(k) + \varepsilon(k)$$

$$C(k) = \begin{bmatrix} H_{L_1}(k) & O & O & O & I & O & -\frac{1}{\lambda_1} I & I \\ H_{L_2}(k) & O & O & O & O & I & -\frac{1}{\lambda_2} \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} I & I \\ H_{L_1}(k) & O & O & O & O & O & I & I \\ H_{L_2}(k) & O & O & O & O & O & \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} I & I \\ O & O & O & O & O & O & I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & I \end{bmatrix} \quad (4-6-14)$$

$$H_{Li}(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_{Liku}^{12}}{\partial x_u} & \frac{\partial \varphi_{Liku}^{12}}{\partial y_u} & \frac{\partial \varphi_{Liku}^{12}}{\partial z_u} \\ \frac{\partial \varphi_{Liku}^{13}}{\partial x_u} & \frac{\partial \varphi_{Liku}^{13}}{\partial y_u} & \frac{\partial \varphi_{Liku}^{13}}{\partial z_u} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \varphi_{Liku}^{1m}}{\partial x_u} & \frac{\partial \varphi_{Liku}^{1m}}{\partial y_u} & \frac{\partial \varphi_{Liku}^{1m}}{\partial z_u} \end{bmatrix} \quad (4-6-15)$$

$$\frac{\partial \varphi_{Liku}^{1q}}{\partial x_u} = \frac{1}{\lambda_i} \frac{(x_k - x^1)}{\rho_u^1} - \frac{1}{\lambda_i} \frac{(x_k - x^q)}{\rho_u^q} \quad (4-6-16)$$

$$\frac{\partial \varphi_{Liku}^{1q}}{\partial y_u} = \frac{1}{\lambda_i} \frac{(y_k - y^1)}{\rho_u^1} - \frac{1}{\lambda_i} \frac{(y_k - y^q)}{\rho_u^q} \quad (4-6-17)$$

$$\frac{\partial \varphi_{Liku}^{1q}}{\partial z_u} = \frac{1}{\lambda_i} \frac{(z_k - z^1)}{\rho_u^1} - \frac{1}{\lambda_i} \frac{(z_k - z^q)}{\rho_u^q} \quad (4-6-18)$$

$$\rho_u^q = \sqrt{(x_u - x^q)^2 + (y_u - y^q)^2 + (z_u - z^q)^2} \quad (4-6-19)$$

$$\varepsilon(k) \equiv \left[\varepsilon_{\varphi_{L1}}^T(k) \quad \varepsilon_{\varphi_{L2}}^T(k) \quad \varepsilon_{\rho_{L1}}^T(k) \quad \varepsilon_{\rho_{L2}}^T(k) \quad \varepsilon_{I_{L1}}^T(k) \quad \varepsilon_I^T(k) \right]^T \quad (4-6-20)$$

4-7 カルマンフィルタ(アンビギュイティ実数解の算出)

カルマンフィルタの演算内容を以下に示す。ここで、アンビギュイティの実数解の算出を行う。

(1) 機能

カルマンフィルタの演算を行う。

(2) アルゴリズム

状態方程式と観測方程式をカルマンフィルタに適用すると、以下のように表される。

a) フィルタ方程式

$$\hat{\xi}_i(k+1|k) = \Phi_i(\Delta t, \alpha) \hat{\xi}_i(k|k) \quad (4-7-1)$$

$$\hat{\xi}_i(k|k) = \hat{\xi}_i(k|k-1) + K(k) \left[y(k) - H(k) \hat{\xi}_i(k|k-1) \right] \quad (4-7-2)$$

b) カルマンゲイン

$$K(k) = P(k|k-1)H^T(k) \left[H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k) \right]^{-1} \quad (4-7-3)$$

c) 推定誤差共分散行列

$$P(k|k-1) = \Phi_i(\Delta t, \alpha)P(k-1|k-1)\Phi_i^T(\Delta t, \alpha) + Q(k) \quad (4-7-4)$$

$$P(k|k) = P(k|k-1) - K(k)H(k)P(k|k-1) \quad (4-7-5)$$

4-8 アンビギュイティ整数解の探索

アンビギュイティ整数解の算出内容を以下に示す。

(1) 機能

LAMBDA 法を適用してアンビギュイティの整数解を探索する。

(2) アルゴリズム

ここでは LAMBDA (Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment) 法について解説する。LAMBDA 法は、整数値バイアスの推定法として最も実用化が進んでいるアルゴリズムの一つである。その名が示すように整数値バイアスの各要素の無相関化を行い、整数解を求めるものであり、LAMBDA 法を応用した手法も各種考案されている。この計算アルゴリズムは以下のステップからなる。

ステップ 1 : 最小 2 乗法で実数解を求める (4-7 節のカルマンフィルタで求める)

ステップ 2 : 整数値バイアスの無相関化を行う

ステップ 3 : 整数解の探索空間を定め、解を得る ($\tilde{\chi}^2$ の設定については 3 項で述べる)

前節で、観測方程式を説明したが、以下では一般性を損なわないように、新たに観測方程式を次のように定義する。

$$y(t) = H(t)\xi(t) + N + \varepsilon(t),$$

y : 観測ベクトル
 $\xi \in R^3$: 未知局座標
 $N \in Z^{n_s}$: 整数値バイアス
 ε : 観測雑音

(4-8-1)

LAMBDA 法の目的は、重み付き最小 2 乗規範により、未知量 x 、 N の推定値 $\tilde{\xi}$ 、 \tilde{N} を

$$(\tilde{\xi}, \tilde{N}) = \arg \min_{(\xi, N) \in R^3 \times Z^{n_s}} \sum_{t=1}^{n_s} \|y(t) - H(t)\xi(t) - N\|_{R^{-1}(t)}^2 \quad (4-8-2)$$

として求めることである。この問題を解くために LAMBDA 法では、まず最初は N を実数値とみなして最小 2 乗解 $\hat{\xi}$ 、 \hat{N} を求める。すなわち、

$$(\hat{\xi}, \hat{N}) = \arg \min_{(\xi, N) \in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^{n_a}} \sum_{t=1}^{n_a} \|y(t) - H(t)\xi(t) - N\|_{R^{-1}(t)}^2 \quad (4-8-3)$$

具体的には前記のカルマンフィルタを適用して求めることができる。この実数解 \hat{N} を用いて、整数解 \tilde{N} についての規範：

$$\tilde{N} = \arg \min_{N \in \mathbb{Z}^{n_a}} \|\hat{N} - N\|_{Q_N^{-1}} \quad (4-8-4)$$

により \tilde{N} を求めることが目的である。また整数解 \tilde{N} が求まると、次式により最小 2 乗解 $\tilde{\xi}$ が求まる。

以上の計算過程での問題点は式(4-8-4)での \tilde{N} の推定である。最小 2 乗規範の重み行列である Q_N^{-1} が対角行列でないため（すなわち \hat{N} の各要素が相関をもつため）、 \hat{N} の各要素についての四捨五入操作により、最近傍の整数値を推定値 \tilde{n} として求められないことである。このために、LAMBDA 法では以下のような推定誤差共分散行列 Q_N^{-1} の対角化（ \hat{N} の無相関化）が提案されている。

1) 無相関化と整数値の探索

式(4-8-3)の実数解 \hat{N} の推定誤差共分散行列 Q_N （対称行列）に対して、直交行列 Z により対角化を行い、その対角行列を $Q_{\hat{z}}$ とする。すなわち

$$Q_{\hat{z}} = Z^T Q_N Z \quad (4-8-5)$$

ここで、

$$\hat{z} = Z^T \hat{N} \quad (4-8-6)$$

とすると、式(4-8-4)は

$$\tilde{N} = \arg \min_{N \in \mathbb{Z}^{n_a}} (\hat{z} - Z^T N)^T Q_{\hat{z}}^{-1} (\hat{z} - Z^T N) \quad (4-8-7)$$

と表現できる。

式(4-8-7)の $Q_{\hat{z}}^{-1}$ が対角行列であり、整数 N から変換された $z \equiv Z^T N$ も整数であれば、四捨五入操作により推定値 \tilde{N} を求めることができる。しかし、 z が整数であるためには、変換行列 Z の要素がすべて整数でなければならない。そこで、行列 Z の要素が整数となり、 $Q_{\hat{z}}$ がほぼ対角行列となる変換法が、 LDL^T 、 UDU^T 分解を用いて以下のように提案されている。

- i) Q_N^{-1} を対角要素がすべて 1 である下三角行列 L_1 により、 $Q_N^{-1} = L_1 D_{L_1} L_1^T$ に分解する。ここで D_{L_1} は対角行列である。
- ii) L_1 の要素を四捨五入した行列を \tilde{L}_1 とし、また、 $Q_{L_1}^{-1} = \tilde{L}_1 Q_N^{-1} \tilde{L}_1^T$ とする。
- iii) $Q_{L_1}^{-1}$ を対角要素がすべて 1 である上三角行列 U_1 により、 $Q_{L_1}^{-1} = U_1 D_{U_1} U_1^T$ と分解する。ここに D_{U_1} は対角行列である。
- iv) U_1 の要素を四捨五入した行列を \tilde{U}_1 とし、 $Q_{U_1}^{-1} = \tilde{U}_1 Q_{L_1}^{-1} \tilde{U}_1^T$ とする。
- v) \tilde{L}_1 または \tilde{U}_1 が単位行列となるまで i) ~ iv) を繰り返す。

以上のアルゴリズムにより、i) ~ iv)までの繰り返し回数を l とすると、変換行列 Z および誤差共分散行列 Q_z を

$$Z = \prod_{k=1}^l \tilde{L}_k \tilde{U}_k \quad (4-8-8)$$

$$Q_z = Z^T Q_N Z$$

として求める（実際には、若干の行、列の入れ換えのための基本行列が \tilde{L}_k 、 \tilde{U}_k の間に挟まれる）。

次に整数値バイアスの候補点を求めるため探索を行う。すなわち、領域(楕円体)

$$(\hat{z} - z)^T Q_z^{-1} (\hat{z} - z) \leq \tilde{\chi}^2 \quad (4-8-9)$$

内に含まれる整数点を探索する。 $\tilde{\chi}^2$ は探索空間の大きさを決定するパラメータである。 Q_z は完全には対角化されていないが、整数解の候補点の範囲が狭められており、この範囲に含まれる候補点の中で式(4-8-7)の解を選出する。

以下では、LAMBDA法で用いられている探索方法を示す。ただし、ここでは N 、 Q_N^{-1} に対する探索方法を示す。上で述べた無相関化を施した z 、 Q_z^{-1} に対しても全く同様の探索が可能であり、より効果的な探索が可能である。 Q_N^{-1} を LDL^T に分解すると、式(4-8-4)は

$$(\hat{N} - N)^T Q_N^{-1} (\hat{N} - N) = \sum_{i=1}^{n_a} d_i \left[(N_i - \hat{N}_i) + \sum_{j=i+1}^{n_a} l_{j,i} (N_j - \hat{N}_j) \right]^2 \quad (4-8-10)$$

となる。ただし N_i 、 \hat{N}_i は各々 N 、 \hat{N} の i 要素、 $l_{j,i}$ は L の (i,j) 要素、 d_i は D の (i,i) 要素である。ここで

$$\hat{N}_{i|i+1, \dots, n_a} \equiv \hat{N}_i - \sum_{j=i+1}^{n_a} l_{j,i} (N_j - \hat{N}_j) \quad (4-8-11)$$

と定義すると $d_i^{-1} = \sigma_{\hat{N}_{i|i+1, \dots, n_a}}^2$ (条件付き分散) なる関係から式(4-8-10)は

$$\sum_{i=1}^{n_a} \frac{(N_i - N_{i|i+1, \dots, n_a})^2}{\sigma_{\hat{N}_{i|i+1, \dots, n_a}}^2} \leq \tilde{\chi}^2 \quad (4-8-12)$$

と表現できる。もし無相関なら $L = I_{n_a}$ であり $l_{j,i} = 0$ ($i \neq j$)より

$$\hat{N}_{i|i+1, \dots, n_a} = \hat{N}_i \quad (4-8-13)$$

が成立する。

2) 要素ごとの範囲の計算

$N_{i+2} \sim N_{n_a}$ が既知であり、 $N_1 \sim N_i$ が未知である場合、 N_{i+1} の探索範囲を求める方法を以下に示す。式(4-8-10)より

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^i d_k \left[(N_k - \hat{N}_k) + \sum_{j=k+1}^{n_a} l_{j,k} (N_j - \hat{N}_j) \right]^2 \\
& + d_{i+1} \left[(N_{i+1} - \hat{N}_{i+1}) + \sum_{j=i+2}^{n_a} l_{j,i+1} (N_j - \hat{N}_j) \right]^2 \\
& + \sum_{p=i+2}^{n_a} d_p \left[(N_p - \hat{N}_p) + \sum_{j=p+1}^{n_a} l_{j,p} (N_j - \hat{N}_j) \right]^2 \leq \tilde{\chi}^2
\end{aligned} \tag{4-8-14}$$

が成立する。

ここで $\alpha^2 + \beta^2 \leq \gamma^2 \Rightarrow \beta^2 \leq \gamma^2$ より、上式左辺の第1項目を消去し、第3項目を右辺に移項し両辺を $d_{i+1} (\neq 0)$ で割ると式(4-8-15)が得られる。

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\left[(N_{i+1} - \hat{N}_{i+1}) + \sum_{j=i+2}^{n_a} l_{j,i+1} (N_j - \hat{N}_j) \right]^2}_{left_{i+1}} \\
& \leq \frac{\tilde{\chi}^2}{d_{i+1}} - \frac{1}{d_{i+1}} \sum_{p=i+2}^{n_a} d_p \underbrace{\left[(N_p - \hat{N}_p) + \sum_{j=p+1}^{n_a} l_{j,p} (N_j - \hat{N}_j) \right]^2}_{right_{i+1}}
\end{aligned} \tag{4-8-15}$$

さらに i についても式(4-8-15)と同様に

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\left[(N_i - \hat{N}_i) + \sum_{j=i+1}^{n_a} l_{j,i} (N_j - \hat{N}_j) \right]^2}_{left_i} \\
& \leq \frac{\tilde{\chi}^2}{d_i} - \frac{1}{d_i} \sum_{p=i+1}^{n_a} d_p \underbrace{\left[(N_p - \hat{N}_p) + \sum_{j=p+1}^{n_a} l_{j,p} (N_j - \hat{N}_j) \right]^2}_{right_i}
\end{aligned} \tag{4-8-16}$$

が得られ、結局、式(4-8-17)の関係を得る。

$$\underbrace{\left[(N_i - \hat{N}_i) + \sum_{j=i+1}^{n_a} l_{j,i} (N_j - \hat{N}_j) \right]^2}_{left_i} \leq \frac{d_{i+1}}{d_i} \underbrace{\left[(N_{i+1} - \hat{N}_{i+1}) + \sum_{j=i+2}^{n_a} l_{j,i+1} (N_j - \hat{N}_j) \right]^2}_{right_{i+1}} \tag{4-8-17}$$

これは $i = n_a - 1, \dots, 1$ まで $left_i$ 、 $right_i$ を逐次的に計算できることを示している。すなわち逐次計算は $i = n_a$ から始まり、 $i = n_a$ では式(4-8-10)より

$$\underbrace{(N_{n_a} - \hat{N}_{n_a})^2}_{left_{n_a}} \leq \frac{\tilde{\chi}^2}{\underbrace{d_{n_a}}_{right_{n_a}}} \tag{4-8-18}$$

である。 N_i に対して有効な整数値の候補の範囲は式(4-8-17)の平方根をとって

$$\left| (N_i - \hat{N}_i) + \sum_{j=i+1}^{n_a} l_{j,i} (N_j - \hat{N}_j) \right| \leq \sqrt{right_i} \tag{4-8-19}$$

すなわち

$$\hat{N}_i - \sqrt{right_i} - \sum_{j=i+1}^{n_a} l_{j,i} (N_j - \hat{N}_j) \leq N_i \leq \hat{N}_i + \sqrt{right_i} - \sum_{j=i+1}^{n_a} l_{j,i} (N_j - \hat{N}_j) \tag{4-8-20}$$

として N_i に対する探索範囲を定める。この範囲は左から右(下限から上限)へ一直線に探索され、この範囲にある有効な整数値に対して、式(4-8-11)を用いて N_{i-1} への補正が行われる。このような探索法を **depth-first search** と呼ぶ。ある整数値バイアス要素 N_i に対して有効な候補がない、つまり範囲内にない場合、1つ前の整数値バイアス要素 N_{i+1} に戻って次に有効な N_{i+1} の候補で **depth-first search** を始める。 N_1 まで式(4-8-20)を満たせば完全な整数値バイアスペクトル N の候補ができあがる。これをすべての有効な整数値バイアス要素に対して行い、候補を絞り込む。

また、式(4-8-19)は

$$-\sqrt{\text{right}_i} \leq (N_i - \hat{N}_{i|i+1, \dots, n_a}) \leq \sqrt{\text{right}_i} \quad (4-8-21)$$

と表現できる。この不等式は N_i の候補の中心が $\hat{N}_{i|i+1, \dots, n_a}$ であり、 $\hat{N}_{i|i+1, \dots, n_a}$ の四捨五入値が最も適切な候補であることを示している。

3) $\tilde{\chi}^2$ の設定

この値により楕円体の大きさが変わり、楕円体内の候補点の個数も変化する。したがって大きな $\tilde{\chi}^2$ では探索範囲の候補数が増え、探索の計算処理時間が増加する。このため楕円領域を徐々に狭めていく方法がとられている。すなわち、式(4-8-4)を満足する候補ベクトル \tilde{N} が求まると、ノルム $\|\hat{N} - \tilde{N}\|_{Q_N^{-1}}^2$ を計算し、その値から新しい $\tilde{\chi}^2$ を設定し、候補数が2個になるまで繰り返す。 $\tilde{\chi}^2$ の初期値は $\|\hat{N} - \text{round}(\hat{N})\|_{Q_N^{-1}}^2$ で与えられる。

4-9 アンビギュイティ整数解の検定

アンビギュイティ整数解の検定手法を以下に示す。

(1) 機能

アンビギュイティ整数解の検定を行う。

(2) アルゴリズム

LAMBDA法で求めたアンビギュイティの第1候補と第2候補における残差の二乗和の比を算出し、その比が閾値以下である場合、第1候補がアンビギュイティ整数解であると決定する。閾値より大きい場合、第1候補がアンビギュイティ整数解でないと判断する。数回連続して、残差の二乗和の比が閾値以下である場合にアンビギュイティを決定する。

4-10 位置探索手法

アンビギュイティ決定が可能な位置の探索手法を以下に示す。

(1) 機能

アンビギュイティ決定が可能となる位置の探索を行う。

(2) アルゴリズム

アンビギュイティを高速に決定するためにはアンビギュイティにかかわる誤差を低減する必要があり、それらの誤差の一つに位置誤差がある。この項では位置誤差がある程度の大きさである状況においてもアンビギュイティを決定できる方法について説明する。

図 4-10-1 は位置誤差とアンビギュイティ決定との関係を表す概念図である。推定位置が真値から数十 cm あるいは約 1m の範囲であれば、アンビギュイティを決定できる。この範囲をアンビギュイティ決定範囲と呼ぶことにする。しかし、推定位置の初期値は DGPS で求めるため、数 m の誤差が推定位置に含まれてしまうことがある。このため、推定位置がアンビギュイティ決定範囲に入るまでに長い時間の観測データを要する。そこで、推定位置の周りでアンビギュイティを決定できる位置を探索することにより、高速にアンビギュイティを決定する。この手法をアンビギュイティ決定のための位置探索手法と呼ぶことにする。

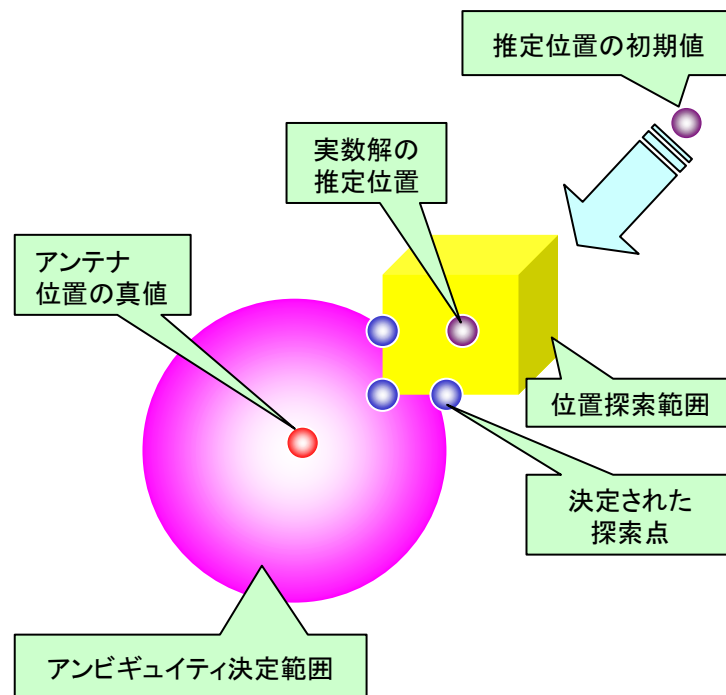


図 4-10-1 アンビギュイティ決定状況

この位置探索アルゴリズムを図 4-10-2 に示す。

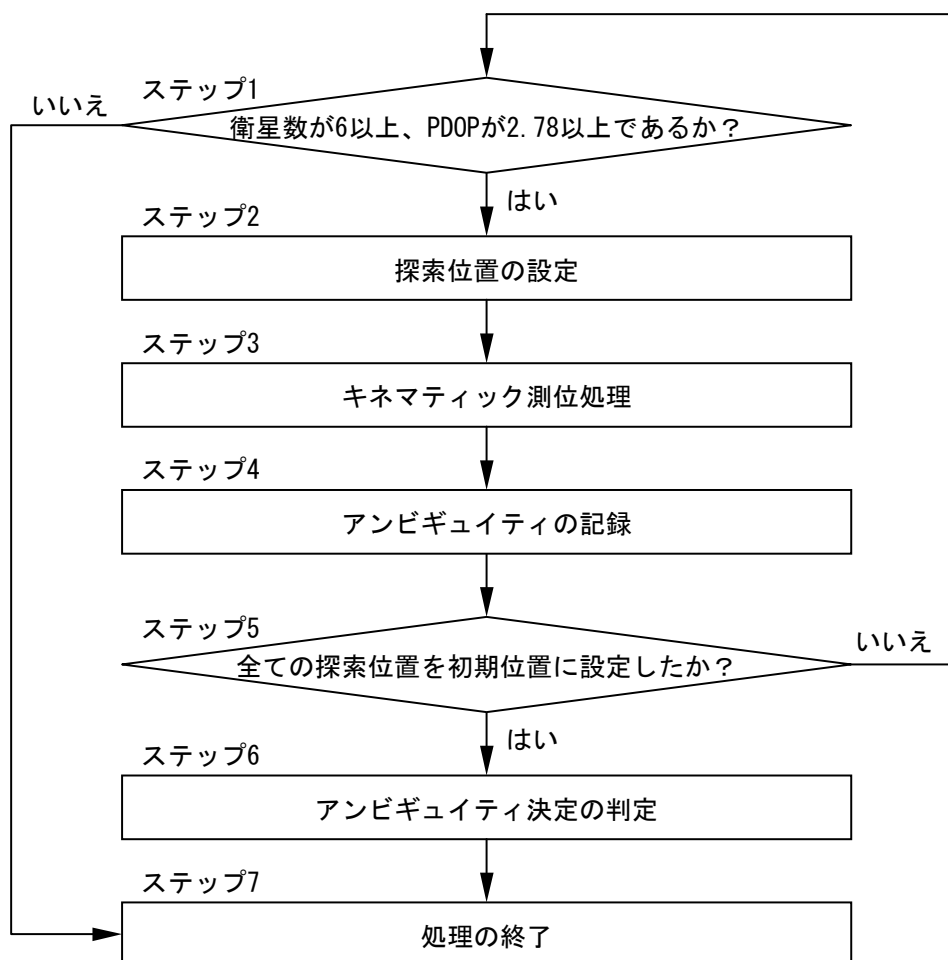


図 4-10-2 アンビギュイティ決定のための位置探索アルゴリズム

ステップ 1：衛星数が 6 以上、PDOP が 2.78 以上である場合、ステップ 2 に進む。5 以下である場合、ステップ 7 に進む。

ステップ 2：推定位置に探索範囲のバイアスを加え、それを初期位置とする。バイアスは東西、南北、上下方向のそれぞれについて-0.25m、0.00m、0.25m を設定する。その組み合わせは、(0.00,0.00,0.00)を除いた 26 通り (=3×3×3-1) である。

ステップ 3：図 4-1-1 に示す RTK-GPS アルゴリズムを実施する。

ステップ 4：ステップ 3 でアンビギュイティを決定できた場合、アンビギュイティを記録する。

ステップ 5：全ての探索位置を初期位置に設定した場合、ステップ 6 に進む。設定していない場合、ステップ 1 に進む。

ステップ 6：決定されたアンビギュイティの種類が 1 つである場合、それをアンビギュイティとする。2 つ以上である場合、アンビギュイティが決定されないと判定する。

ステップ 7：アンビギュイティ決定のための位置探索処理を終了する。

4-11 移動局位置の算出

決定されたアンビギュイティを用いた移動局位置の算出方法を以下に示す。

(1) 機能

決定されたアンビギュイティを用いて位置の更新を行う。

(2) アルゴリズム

式(4-11-1)を用いて、アンビギュイティ整数解 N をもとに移動局位置 $r_{fix}(k)$ を計算する。ここで、 $\hat{r}(k|k)$ は移動局位置の推定量、 $P_{\hat{N}}(k|k)$ はアンビギュイティの推定誤差共分散行列、 $P_{\hat{x}\hat{N}}(k|k)$ は移動局位置の推定量とアンビギュイティ実数解の推定量の分散共分散行列、 $\hat{N}(k|k)$ はアンビギュイティ実数解の推定量である。

$$r_{fix}(k) = \hat{r}(k|k) - P_{\hat{x}\hat{N}}(k|k)P_{\hat{N}}^{-1}(k|k)\{\hat{N}(k|k) - N\} \quad (4-11-1)$$

5章 慣性航法複合演算処理

5-1 処理フロー

慣性航法複合演算処理の全体処理フローを図 5-1-1 に示す。

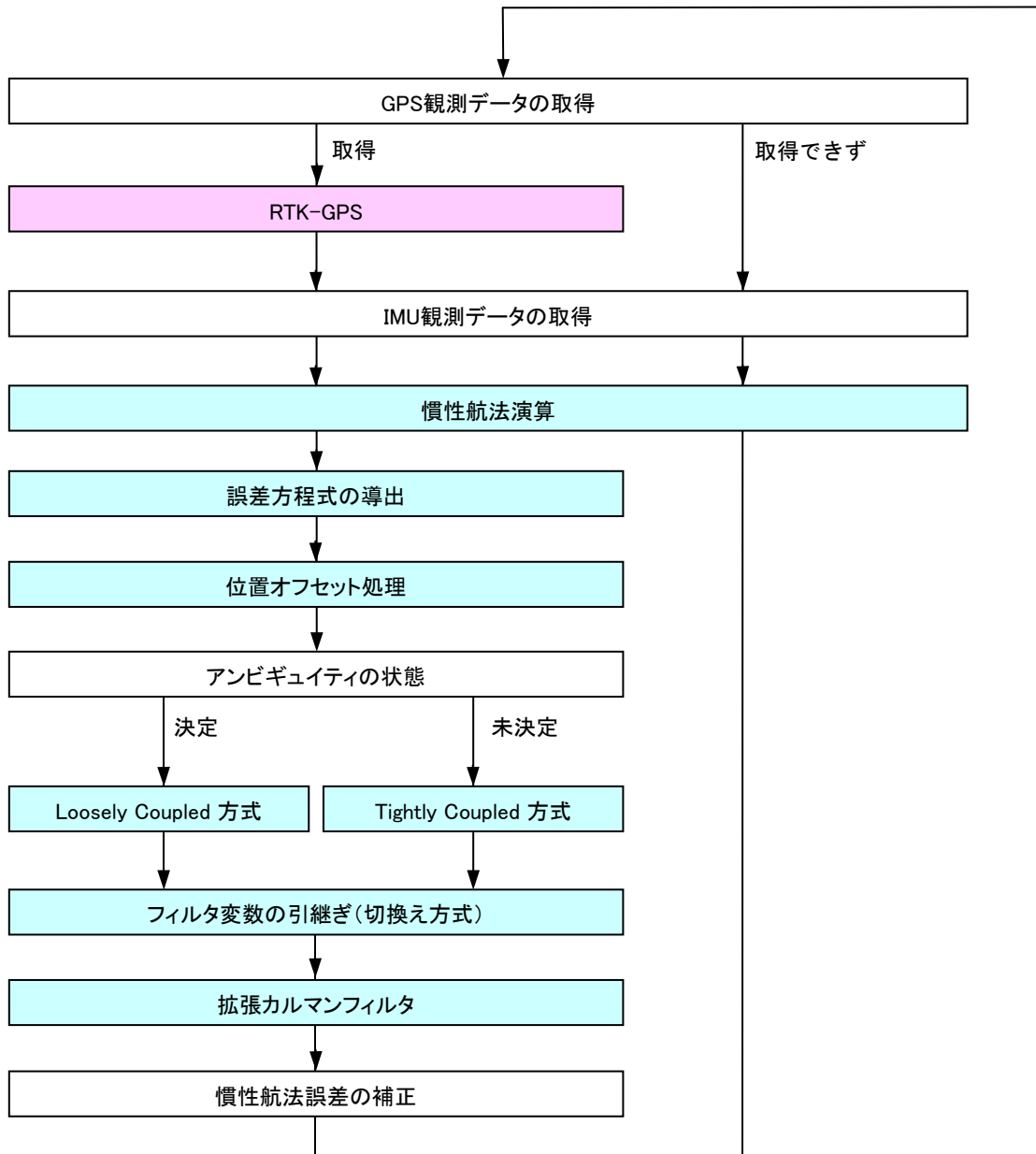


図 5-1-1 複合航法の処理フロー

5-2 座標系の定義

慣性航法複合演算処理の説明を行う前に本ソフトウェアで用いる座標系について説明する。

移動体の位置（緯度、経度、高度）、姿勢角及び方位角を慣性航法演算によって求めるためには、座標軸の設定が重要である。これらは、基本的に右手系の直交デカルト座標系であるものとし、座標軸を (X, Y, Z) で表す。

(1) I 座標系 (X_I, Y_I, Z_I) Inertial Frame

I 座標系は地球の質量中心を原点にとり、 Z_I 軸は北極点の方向を正とする地軸上に、 X_I 軸と Y_I 軸を赤道面にとり、 X_I 軸は遠い星方向（春分点の方向とする場合もある）を向いているものとする。

(2) E 座標系 (X_E, Y_E, Z_E) Earth-Centered Earth-Fixed Frame

E 座標系は地球と共に回転し、24 時間（正確には恒星日）ごとに I 座標系に一致する。 Z_E 軸は Z_I 軸と等しく北極点の方向を正とする地軸上に、 X_E 軸はグリニッジ子午線と赤道面の交点の方向を正とし、 Y_E 軸を、 X_E 軸を含む赤道面上で Z_E 、 X_E 軸と右手系を成す方向（東経 90 [deg]）に定めたものである。E 座標系は、緯度、経度など移動体の位置を表すために用いられる。

(3) L 座標系 (X_L, Y_L, Z_L) Locally Level Frame

L 座標系は、移動体の現在位置を原点とする局地水平座標系である。北向きを X_L 軸、東向きを Y_L 軸とし、下向きに Z_L 軸をとる NED (North-East-Down) 座標系である。この座標系は、移動体の速度を表すために用いられる。

(4) C 座標系 (X_C, Y_C, Z_C) Computer Frame

C 座標系は計算機内に作り出される座標系で、計算機座標系やワンダーアジマス座標系 (Wander-Azimuth Frame) と呼ばれる。L 座標系と同様、移動体の現在位置を原点とする。北向きを X_C 軸、西向きを Y_C 軸、鉛直上向きを Z_C 軸とした右手系を、 Z_C 軸まわりに "wander angle" と呼ばれる角度 α だけ回転させたものとして定義される。wander angle α は真の北方向に対して西向きを正とするような角度である。

航法座標系として L 座標系を用いないのは、L 座標系の X_L 軸は絶えず北を向いているため、移動体が高緯度で東向きに移動する場合、 Z_L 軸まわりには座標系を保つような大きな回転角が必要になるためである。このような問題を避けるために、真の北向きからのずれを考慮した座標系を定義して信頼性を向上させている。図 5-2-1 に E、L、C 座標系を、図 5-2-2 に局地水平面内での wander angle と L、C 座標系の関係を示す。

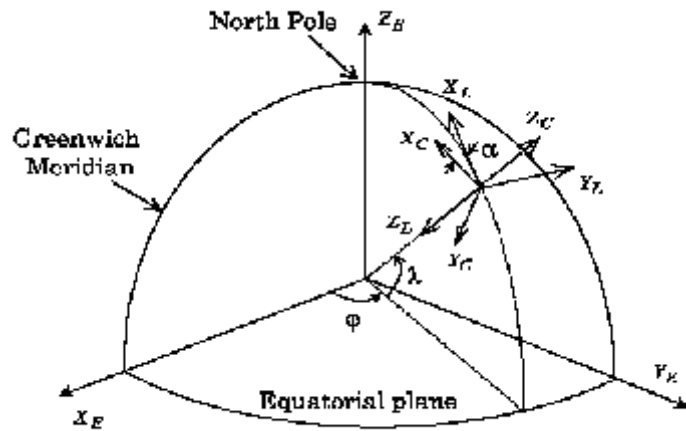


図 5-2-1 E、L および C 座標系

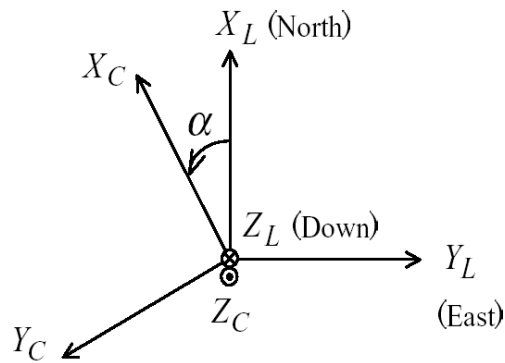


図 5-2-2 局地水平面内での wander angle と L および C 座標系

(5) B 座標系 (X_B, Y_B, Z_B) Body Frame

B 座標系は移動体の質量中心を原点にとる座標系で、機体座標系と呼ばれる。これは、車両の先頭方向を X_B 軸 (ロール軸、roll axis)、車体の右側を Y_B 軸 (ピッチ軸、pitch axis)、 X_B - Y_B 平面に対して垂直下向きを Z_B (ヨー軸、yaw axis) の正方向として表す。加速度計、ジャイロは車体に直接固定して設置され、B 座標系の座標軸に沿った加速度、角速度を検知する。図 5-2-3 に B 座標系と、移動体に搭載された加速度計、ジャイロを模式的に示す。

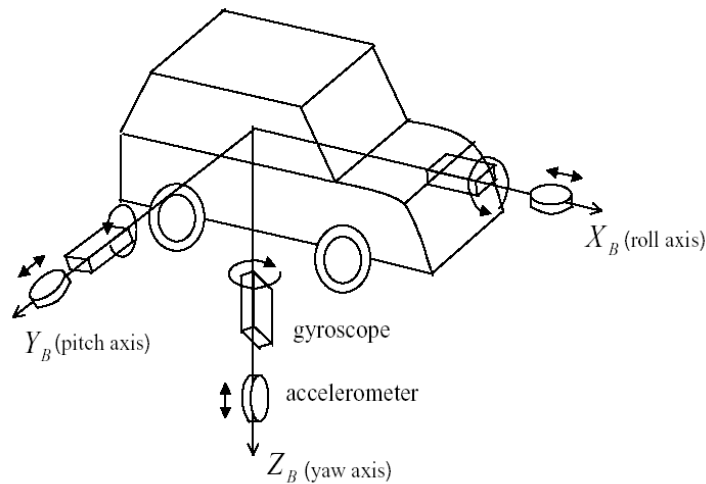


図 5-2-3 B 座標系と加速度計、ジャイロ

5-3 慣性航法演算

INS の慣性航法演算（ストラップダウン方式）の算出内容を以下に示す。

(1) 機能

IMU データを用いて位置、速度、姿勢、方位を算出する。

(2) アルゴリズム

1) 初期化处理

慣性航法演算を行うために、まず B 座標系から C 座標系への座標変換行列の初期値、および E 座標系から C 座標系への座標変換行列の初期値を求める。B 座標系から C 座標系への座標変換行列の初期値を求めるために、ロール角 Φ_0 、ピッチ角、 Θ_0 よりクォータニオンの初期化を行う。クォータニオンの初期値は

$$w_0 = \cos \frac{\Theta_0}{2} \cos \frac{\Phi_0}{2} \quad (5-3-1)$$

$$x_0 = \cos \frac{\Theta_0}{2} \sin \frac{\Phi_0}{2} \quad (5-3-2)$$

$$y_0 = \sin \frac{\Theta_0}{2} \cos \frac{\Phi_0}{2} \quad (5-3-3)$$

$$z_0 = -\sin \frac{\Theta_0}{2} \sin \frac{\Phi_0}{2} \quad (5-3-4)$$

となる。得られた $(w_0 \ x_0 \ y_0 \ z_0)$ を用いて、B 座標系から C 座標系への変換行列 T_B^C を求めると、

$$T_B^C = \begin{bmatrix} w^2 + x^2 - y^2 - z^2 & 2(xy - wz) & 2(xz + wy) \\ 2(xy + wz) & w^2 - x^2 + y^2 - z^2 & 2(yz - wx) \\ 2(xz - wy) & 2(yz + wx) & w^2 - x^2 - y^2 + z^2 \end{bmatrix} \quad (5-3-5)$$

となる。E座標系からC座標系への変換行列は、緯度、経度の初期値に加え、求めた wander angle の初期値を用いて

$$T_E^C = \begin{bmatrix} -\cos \alpha_0 \sin \lambda \cos \varphi + \sin \alpha \sin \varphi & -\cos \alpha \sin \lambda \sin \varphi - \sin \alpha \cos \varphi & \cos \alpha \cos \lambda \\ \sin \alpha \sin \lambda \cos \varphi + \cos \alpha \sin \varphi & \sin \alpha \sin \lambda \sin \varphi - \cos \alpha \cos \varphi & -\sin \alpha \cos \lambda \\ \cos \lambda \cos \varphi & \cos \lambda \sin \varphi & \sin \lambda \end{bmatrix} \quad (5-3-6)$$

となる。その他に航法演算を始める準備として、座標変換行列 T_E^C を用いて地球の重力モデルの計算（後述の手順 11）参照）を行う必要がある。

上記の初期化処理を完了させた後、図 5-3-1 に示す慣性航法演算を行い、得られた INS 位置及び速度を基に、カルマンフィルタを適用した複合航法演算が行われる。

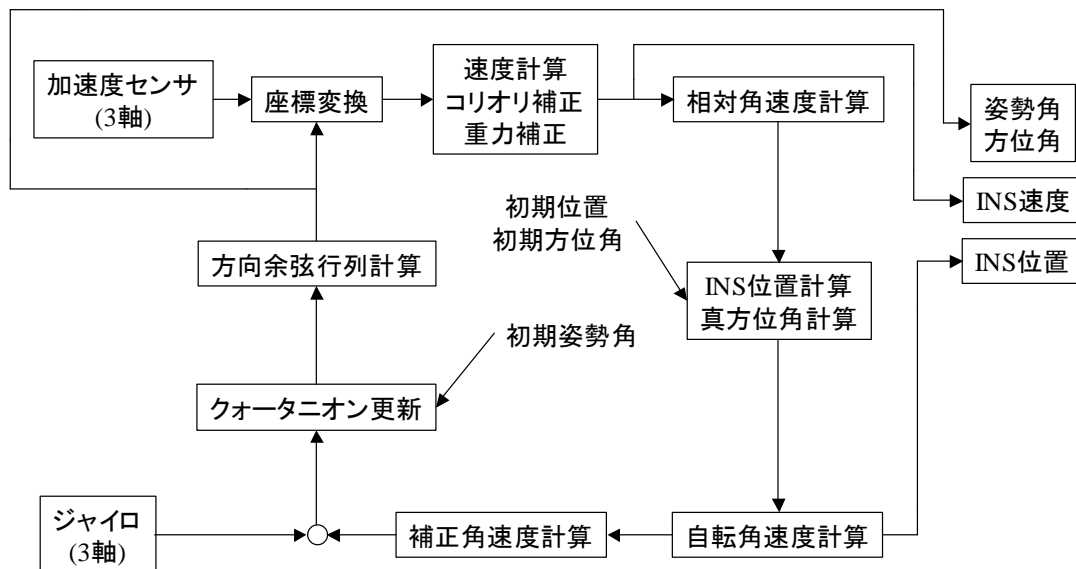


図 5-3-1 慣性航法演算ブロック図

2) 航法演算開始

アライメントが完了し、移動体が運用モードに移行すると同時に、慣性航法演算が開始される。ここで、INS の航法演算間隔を ΔT とする。

3) 角速度前処理

移動体の ΔT 間の姿勢変化に伴う、角速度の C 座標系でのふるまいは、地球自転角速度 Ω と相対角速度 ρ の補正を行って

$$\begin{cases} \omega_{C,x} = (-\Omega_{C,x} - \rho_{C,x})\Delta T \\ \omega_{C,y} = (-\Omega_{C,y} - \rho_{C,y})\Delta T \\ \omega_{C,z} = (-\Omega_{C,z} - \rho_{C,z})\Delta T \end{cases} \quad (5-3-7)$$

となる。次に、これを B 座標系の 3 軸成分に変換すると

$$\begin{bmatrix} \omega_{B,x} \\ \omega_{B,y} \\ \omega_{B,z} \end{bmatrix} = (T_B^C)^T \begin{bmatrix} \omega_{C,x} \\ \omega_{C,y} \\ \omega_{C,z} \end{bmatrix} \quad (5-3-8)$$

が得られる。

4) 角速度処理

ジャイロが時刻 t に出力する角速度を $\omega_{B,x}(t)$, $\omega_{B,y}(t)$, $\omega_{B,z}(t)$ とする。このとき、演算間隔 ΔT で生ずる移動体の角変動量 ($rad / \Delta T \cdot s$) は、 $\omega'_{B,x}$, $\omega'_{B,y}$, $\omega'_{B,z}$ を用いて

$$\begin{cases} \omega'_{B,x} = \omega_{B,x}(t) - \omega_{B,x}(t - \Delta T) \\ \omega'_{B,y} = \omega_{B,y}(t) - \omega_{B,y}(t - \Delta T) \\ \omega'_{B,z} = \omega_{B,z}(t) - \omega_{B,z}(t - \Delta T) \end{cases} \quad (5-3-9)$$

となる。

5) 座標変換行列 T_B^C の更新と姿勢角算出

まず、式 (5-3-9) で算出された角速度を用いて、クォータニオンの時間更新を行う。更新式は

$$\underline{\dot{q}}(t) = \Omega(\underline{\omega}(t))\underline{q}(t), \underline{q}(t_0) = \underline{q}_0 \quad (5-3-10)$$

となる。ただし、

$$\underline{\dot{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{w} \end{bmatrix} \quad \Omega(\underline{\omega}) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & \omega_z & -\omega_y & \omega_x \\ -\omega_z & 0 & \omega_x & \omega_y \\ \omega_y & -\omega_x & 0 & \omega_z \\ -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z & 0 \end{bmatrix} \quad \underline{q} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix}$$

とする。更新されたパラメータを式 (5-3-5) へ代入し、 T_B^C の更新を行う。更新された T_B^C より、移動体の姿勢角を求める。ロール角 Φ 、ピッチ角 Θ 、およびヨー角 Ψ はそれぞれ、

$$\Phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{2(yz + wx)}{w^2 - x^2 - y^2 + z^2} \right\} \quad (5-3-11)$$

$$\Theta = \sin^{-1}\{2(xz - wy)\} \quad (5-3-12)$$

$$\Psi = \tan^{-1}\left\{\frac{-2(xy + wz)}{w^2 + x^2 - y^2 - z^2}\right\} \quad (5-3-13)$$

となる。

6) 加速度変換処理

加速度計から直接出力された B 座標系の加速度を、C 座系の加速度へ変換する。すなわち、

$$\begin{bmatrix} a_{C,x} \\ a_{C,y} \\ a_{C,z} \end{bmatrix} = T_B^C \begin{bmatrix} a_{B,x} \\ a_{B,y} \\ a_{B,z} \end{bmatrix} \quad (5-3-14)$$

となる。

7) 速度補正演算

C 座標系の速度 $v_{C,x}, v_{C,y}, v_{C,z}$ を算出する。この際、C 座標系の加速度に加え、地球の自転角速度 Ω 、相対角速度 ρ 、重力加速度 g が必要となる。

速度補正演算の式は

$$\begin{cases} \dot{v}_{C,x} = a_{C,x} - (\rho_{C,y} + 2\Omega_{C,y})v_{C,z} + (\rho_{C,z} + 2\Omega_{C,z})v_{C,y} + g_{C,x} \\ \dot{v}_{C,y} = a_{C,y} - (\rho_{C,z} + 2\Omega_{C,z})v_{C,x} + (\rho_{C,x} + 2\Omega_{C,x})v_{C,z} + g_{C,y} \\ \dot{v}_{C,z} = a_{C,z} - (\rho_{C,x} + 2\Omega_{C,x})v_{C,y} + (\rho_{C,y} + 2\Omega_{C,y})v_{C,x} + g_{C,z} \end{cases} \quad (5-3-15)$$

となる。

8) 相対角速度算出

移動体の C 座標系の速度 $v_{C,x}, v_{C,y}$ より、相対角速度は

$$\rho_{C,x} = \frac{-v_{C,y}}{R_x + h} \quad (5-3-16)$$

$$\rho_{C,y} = \frac{v_{C,x}}{R_y + h} \quad (5-3-17)$$

$$\rho_{C,z} = 0 \quad (5-3-18)$$

となる。ただし、

$$R_x = \frac{R_p R_m (1 + \tan^2 \alpha)}{R_p + R_m \tan^2 \alpha} \quad R_y = \frac{R_p R_m (1 + \tan^2 \alpha)}{R_m + R_p \tan^2 \alpha}$$

$$R_m = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \lambda)^{\frac{3}{2}}} \quad R_p = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \lambda}}$$

とし、 h : 高度、 a : 地球の赤道面での長半径、 e : 離心率とする。

9) 座標変換行列 T_C^E の更新と位置の算出

手順 k で求めた相対角速度 ρ を用いて E 座標系から C 座標系への変換行列 T_C^E を更新すると、

$$T_C^E(t_k + \Delta T) \cong \{I + \Omega(t_k)\Delta T\}T_C^E(t_k) \quad (5-3-19)$$

となる。ただし、

$$\Omega(t_k) = \begin{bmatrix} 0 & -\rho_{C,z} & \rho_{C,y} \\ \rho_{C,z} & 0 & -\rho_{C,x} \\ -\rho_{C,y} & \rho_{C,x} & 0 \end{bmatrix}$$

とする。更新された T_C^E より、緯度 λ 、経度 φ 、wander angle α について

$$\lambda = \sin^{-1} C_{33} \quad (5-3-20)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{C_{32}}{C_{31}} \quad (5-3-21)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{-C_{23}}{C_{13}} \quad (5-3-22)$$

を得る。ただし、

$$T_C^E \equiv \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$$

とする。

10) 地球自転角速度の算出

移動体の現在緯度 λ 、wander angle α より、地球自転角速度の C 座標系における 3 軸成分は、

$$\Omega_{C,x} = \Omega \cos \lambda \cos \alpha \quad (5-3-23)$$

$$\Omega_{C,y} = -\Omega \cos \lambda \sin \alpha \quad (5-3-24)$$

$$\Omega_{C,z} = \Omega \sin \lambda \quad (5-3-25)$$

となる。ただし、 $\Omega = 7.2921159 \times 10^{-5}$ [rad/sec] とする。

11) 地球重力モデルの計算

更新された座標変換行列 T_C^E より、C 座標系における重力成分は

$$g_{C,x} = g_n \times h \times C_{33} \times C_{13} \quad (5-3-26)$$

$$g_{C,y} = g_n \times h \times C_{33} \times C_{23} \quad (5-3-27)$$

$$g_{C,z} = -\left(g_0 + g_{l1} \times C_{33}^2 + g_{l2} \times C_{33}^4\right) \times \left\{1 - \left(g_{h1} - g_{h2} \times C_{33}^2\right) \times h + g_{h3} \times h^2\right\} \quad (5-3-28)$$

となる。ただし、h: 高度[ft] とし、

$$g_0 = 32.087686 [ft / s^2]$$

$$g_{l1} = 0.1693891$$

$$g_{l2} = 7.47483 \times 10^{-4}$$

$$g_{h1} = 9.6227 \times 10^{-8}$$

$$g_{h2} = 6.409 \times 10^{-10}$$

$$g_{h3} = 6.8512 \times 10^{-15}$$

$$g_n = 1.619 \times 10^{-8}$$

とする。

12) 地球モデルの計算

移動体の現在緯度 λ 、wander angle α が算出されたので、地球モデル、すなわち C 座標系での曲率半径は

$$R_x = \frac{R_p R_m (1 + \tan^2 \alpha)}{R_p + R_m \tan^2 \alpha} \quad (5-3-29)$$

$$R_y = \frac{R_p R_m (1 + \tan^2 \alpha)}{R_m + R_p \tan^2 \alpha} \quad (5-3-30)$$

となる。ただし、

$$R_m = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \lambda)^{3/2}} \quad R_p = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \lambda}}$$

とし、h: 高度、a: 地球の赤道面での長半径、e: 離心率とする。

以上 3) ~ 12) の処理が繰り返される。

5-4 誤差方程式の算出

慣性航法における誤差をカルマンフィルタで補正するための誤差方程式を算出する。

(1) 機能

慣性航法における誤差方程式を算出する。

(2) アルゴリズム

INS の航法誤差は慣性センサから得られる物理量を航法演算の基準となる演算座標系(C 座標系)での値に座標変換を行う際に生じると考え、その座標変換行列の誤差はINSの誤差源と上記で述べた初期誤差により生じると考える。したがって、局地水平面座標系(L 座標系)から C 座標系への座標変換行列において方位角誤差による航法誤差への影響を考慮する。なお、INSの誤差源は加速度センサ、ジャイロの誤差のみと仮定する。また、航法誤差は位置誤差、速度誤差、姿勢角誤差、方位角誤差を考え、アライメントにおける方位角誤差は方位角に相当するwander angleの誤差とする。

以下では、

- 1) 位置誤差
- 2) 速度誤差
- 3) 姿勢角誤差
- 4) 方位角誤差
- 5) 慣性センサの誤差

に分けて誤差方程式の導出をおこなう。

1) 位置誤差方程式

INS航法演算において緯度、経度は座標変換行列 T_E^C から求める。よって、位置誤差(δr_L)は C 座標系と E 座標系との座標変換行列の誤差 δT_E^C と考えることができる。しかし、移動アライメントの前提条件を考慮すると、方位角誤差($\delta\alpha$)が大きいために α の回転によって求められる座標系(C' 座標系)が真の C 座標系に比べて大きくずれていると考えられる。したがって、大きな誤差を含んだ座標変換行列 \bar{T}_E^C を局地水平面が X 、 Y 軸まわりに微小な傾きを持ち、 Z 軸まわりに大きくずれた C 座標系に変換する座標変換行列としてモデル化する。なお、演算によって求まるものは \bar{T} 、真とするものは T 、その誤差は δT として表す。そこで、 \bar{T}_E^C は

$$\begin{aligned}\bar{T}_E^C &= \bar{T}_L^C \bar{T}_E^L \\ &= (T_L^C + \delta T_L^C) \{I - (\delta r_L \times)\} T_E^L\end{aligned}\tag{5-4-1}$$

と考えることができる。ここで、 $(\delta r_L \times)$ はベクトル $\delta r_L = [\delta r_{L,x} \ \delta r_{L,y} \ 0]^T$ の要素によって決まる歪対称行列である。次に、式(5-4-1)より δT_E^C は

$$\begin{aligned}
\delta T_E^C &= \bar{T}_E^C - T_E^C \\
&= (T_L^C + \delta T_L^C) \{I - (\delta r_L \times)\} T_E^L - T_L^C T_E^L \\
&= \left[\delta T_L^C \{I - (\delta r_L \times)\} - T_L^C (\delta r_L \times) \right] T_E^L
\end{aligned} \tag{5-4-2}$$

となる。ここで式(5-4-2)において、位置誤差の要因となる行列を位置誤差行列 E とし、 $\sin \delta\alpha$ 、 $(\cos \delta\alpha - 1)$ を γ 、 β として表すと δT_E^C は

$$\begin{aligned}
\delta T_E^C &= E T_E^L \\
&= \begin{bmatrix} (\beta) \cos \alpha - (\gamma) \sin \alpha & -(\beta) \sin \alpha - (\gamma) \cos \alpha & (\beta + 1) \delta r_{C, y} - (\gamma) \delta r_{C, x} \\ -(\beta) \sin \alpha - (\gamma) \cos \alpha & -(\beta) \cos \alpha + (\gamma) \sin \alpha & -(\beta + 1) \delta r_{C, x} - (\gamma) \delta r_{C, y} \\ -\delta r_{L, y} & \delta r_{L, x} & 0 \end{bmatrix} T_E^L
\end{aligned} \tag{5-4-3}$$

となる。ここで、式(5-4-3)の両辺を微分すると

$$\begin{aligned}
\delta \dot{T}_E^C &= E \dot{T}_E^L + \dot{E} T_E^L \\
&= \dot{E} T_E^L - E (\rho_{E/L}^L \times) T_E^L \\
&= \{ \dot{E} - E (\rho_{E/L}^L \times) \} T_E^L
\end{aligned} \tag{5-4-4}$$

となる。ここで、 $(\rho_{E/L}^L \times)$ は L 座標系における(上添字)、 E 座標系に対する L 座標系(下添字)の相対角速度ベクトルの要素で決まる歪対称行列とする。次に、 δT_E^C を以下のように考えると

$$\begin{aligned}
\delta T_E^C &= \bar{T}_E^C - T_E^C \\
&= -(\bar{\rho}_{E/C}^C \times) \bar{T}_E^C + (\rho_{E/C}^C \times) T_E^C \\
&= \left[-(\bar{\rho}_{E/C}^C \times) \{ (T_L^C + \delta T_L^C) \{ I - (\delta r_L \times) \} \} + (\rho_{E/C}^C \times) T_L^C \right] T_E^L
\end{aligned} \tag{5-4-5}$$

となる。よって式(5-4-4)と式(5-4-5)より位置誤差行列 E は

$$\begin{aligned}
\dot{E} &= E (\rho_{E/L}^L \times) - (\bar{\rho}_{E/C}^C \times) \left[(T_L^C + \delta T_L^C) \{ I - (\delta r_L \times) \} \right] + (\rho_{E/C}^C \times) T_L^C \\
&= E (\rho_{E/L}^L \times) - (\bar{\rho}_{E/C}^C \times) (T_L^C + E) + (\rho_{E/C}^C \times) T_L^C
\end{aligned} \tag{5-4-6}$$

となり、位置に関する誤差方程式を導くことができた。ここで、

$$\rho_{E/L}^L \times = \begin{bmatrix} 0 & -\rho_{L, z} & \rho_{L, y} \\ \rho_{L, z} & 0 & -\rho_{L, x} \\ -\rho_{L, y} & \rho_{L, x} & 0 \end{bmatrix}, \quad \rho_{E/C}^C \times = \begin{bmatrix} 0 & -\rho_{C, z} & \rho_{C, y} \\ \rho_{C, z} & 0 & -\rho_{C, x} \\ -\rho_{C, y} & \rho_{C, x} & 0 \end{bmatrix} \tag{5-4-7}$$

であり、これまでの座標変換行列と同様に $(\delta \rho \times) = (\bar{\rho} \times) - (\rho \times)$ として考えることができるので、式(5-4-6)を展開することで

$$\begin{aligned}
\delta \dot{r}_{C, x} &= \delta r_{C, y} \{ (\beta + 1) \rho_{C, x} + (\gamma) \rho_{C, y} \} \{ (\beta + 1) \delta r_{C, y} - (\gamma) \delta r_{C, x} \} \\
&\quad - \bar{\rho}_{C, y} \delta r_{C, y} \{ (\beta + 1) \delta r_{C, x} + (\gamma) \delta r_{C, y} \} - (\gamma) \bar{\rho}_{C, y} + (\beta) \rho_{C, x} + (\beta + 1) \delta \rho_{C, x}
\end{aligned} \tag{5-4-8}$$

$$\begin{aligned} \delta \dot{r}_{C,y} = & -\delta r_{C,x} \{(\beta+1)\rho_{C,x} + (\gamma)\rho_{C,y}\} \{(\beta+1)\delta r_{C,y} - (\gamma)\delta r_{C,x}\} \\ & + \bar{\rho}_{C,y} \delta r_{C,x} \{(\beta+1)\delta r_{C,x} + (\gamma)\delta r_{C,y}\} + (\gamma)\bar{\rho}_{C,x} + (\beta)\rho_{C,y} + (\beta+1)\delta\rho_{C,y} \end{aligned} \quad (5-4-9)$$

となる。ただし、ストラップダウン方式では $\rho_{C,z} = 0$ とする。また、 $\delta\rho_{C,x}$ 、 $\delta\rho_{C,y}$ は

$$\delta\rho_{C,x} = -\frac{\delta v_{C,y}}{R_x + h} + \frac{v_{C,y}}{(R_x + h)^2} \delta h \quad (5-4-10)$$

$$\delta\rho_{C,y} = \frac{\delta v_{C,x}}{R_y + h} - \frac{v_{C,x}}{(R_y + h)^2} \delta h \quad (5-4-11)$$

として考えることができるので、

$$\begin{aligned} \delta r_{C,x} = & \delta r_{C,y} \{(\beta+1)\rho_{C,x} + (\gamma)\rho_{C,y}\} \{(\beta+1)\delta r_{C,y} - (\gamma)\delta r_{C,x}\} \\ & - \left\{ \rho_{C,y} + \left(\frac{\delta v_{C,x}}{R_y + h} - \frac{v_{C,x}}{(R_y + h)^2} \delta h \right) \right\} \delta r_{C,y} \{(\beta+1)\delta r_{C,x} + (\gamma)\delta r_{C,y}\} \\ & - \left\{ \rho_{C,y} + \left(\frac{\delta v_{C,x}}{R_y + h} - \frac{v_{C,x}}{(R_y + h)^2} \delta h \right) \right\} (\gamma) + (\beta)\rho_{C,x} \\ & + \left(-\frac{\delta v_{C,y}}{R_x + h} + \frac{v_{C,y}}{(R_x + h)^2} \delta h \right) (\beta+1) + u_{r,x} \end{aligned} \quad (5-4-12)$$

$$\begin{aligned} \delta r_{C,y} = & -\delta r_{C,x} \{(\beta+1)\rho_{C,x} + (\gamma)\rho_{C,y}\} \{(\beta+1)\delta r_{C,y} - (\gamma)\delta r_{C,x}\} \\ & + \left\{ \rho_{C,y} + \left(\frac{\delta v_{C,x}}{R_y + h} - \frac{v_{C,x}}{(R_y + h)^2} \delta h \right) \right\} \delta r_{C,x} \{(\beta+1)\delta r_{C,x} + (\gamma)\delta r_{C,y}\} \\ & + \left\{ \rho_{C,x} - \left(\frac{\delta v_{C,y}}{R_x + h} - \frac{v_{C,y}}{(R_x + h)^2} \delta h \right) \right\} (\gamma) + (\beta)\rho_{C,y} \\ & + \left(\frac{\delta v_{C,x}}{R_y + h} - \frac{v_{C,x}}{(R_y + h)^2} \delta h \right) (\beta+1) + u_{r,y} \end{aligned} \quad (5-4-13)$$

となる。また、Z軸方向の位置誤差(高度誤差)は次式のようにになる。

$$\delta \dot{h} = \delta v_{C,z} + u_{r,z} \quad (5-4-14)$$

以上、(5-4-12)、(5-4-13)、(5-4-14)式が位置誤差に関する方程式となる。ただし、 $u_{r,x}$ 、 $u_{r,y}$ 、 $u_{r,z}$ はモデル化されていない誤差を表すもので、ここでは互いに無相関な平均0、分散 $U_{r,x}$ 、 $U_{r,y}$ 、 $U_{r,z}$ の正規性白色雑音と仮定する。

2) 速度誤差方程式

INS 速度を求める基本方程式から

$$\dot{v}_C = f_C - (\rho_C + 2\Omega_C) \times v_C + g_C \quad (5-4-15)$$

として移動体の速度が求まる。ここで、 f は specific force と呼ばれるもので重力を除いた慣性系に対する移動体に生じる加速度のことであり、 g は重力加速度を表す。また、 Ω_C は地球自転角速度ベクトル $\Omega_E (= [0 \ 0 \ \Omega])$ を C 座標系で表したものである。しかしながら、演算速度 \bar{v}_C は姿勢角、方位角の初期値を決定しないため誤差を含んでいるものと考えられるので速

度誤差を考慮する際の誤差を含んだ specific force(\bar{f}_C)と重力加速度(\bar{g}_C)は次のように表すことができる。

$$\bar{f}_C = [I - (\delta\theta_C \times)] f_C + \delta f_C \quad (5-4-16)$$

$$\bar{g}_C = g_C + \delta g_C \quad (5-4-17)$$

ただし δf_C は加速度センサ誤差であり、 $\delta f_C = b_C$ とする。また、式(5-4-17)の C 座標系における重力は $g_C = [0 \ 0 \ -g]^T$ のベクトルで表現できる。また、 δg_C は、真の C 座標系に対し微小な角度誤差 $\delta\theta_{C,x}$ 、 $\delta\theta_{C,y}$ 、($\delta\theta_{C,z} = 0$)がある場合に発生する重力加速度誤差として考えると

$$\delta g_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\delta\theta_{C,y} \\ 0 & 1 & \delta\theta_{C,x} \\ \delta\theta_{C,y} & -\delta\theta_{C,x} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g\delta\theta_{C,y} \\ -g\delta\theta_{C,x} \\ -g \end{bmatrix} \quad (5-4-18)$$

として、 X 、 Y 軸それぞれの重力加速度誤差は $g\delta\theta_{C,y}$ 、 $-g\delta\theta_{C,x}$ として表すことができる。なお、 $\delta\alpha$ 軸に関しては重力加速度誤差は発生しない。これより、移動アライメント時の演算速度 \bar{v}_C は

$$\begin{aligned} \bar{v}_C &= [I - (\delta\theta_C \times)] f_C + b_C + g_C + \delta g_C \\ &\quad - \{(\rho_C + \delta\rho_C) + 2(\Omega_C + \delta\Omega_C)\} \times (v_C + \delta v_C) \end{aligned} \quad (5-4-19)$$

として考えることができる。

以上より、移動アライメント時の速度誤差 $\delta\dot{v}_C$ は

$$\begin{aligned} \delta\dot{v}_C &= \bar{v}_C - \dot{v}_C \\ &= f_C \times \delta\theta_C + b_C + v_C \times (\delta\rho_C + 2\delta\Omega_C) - (\rho_C + 2\Omega_C) \times \delta v_C \\ &\quad - (\delta\rho_C + 2\delta\Omega_C) \times \delta v_C + \delta g_C \end{aligned} \quad (5-4-20)$$

と示すことができる。これより、 X 軸速度誤差について整理すると

$$\begin{aligned} \delta\dot{v}_{C,x} &= -f_{C,z} \delta\theta_{C,y} + b_{C,x} - (\delta\rho_{C,y} + 2\delta\Omega_{C,y})(v_{C,z} + \delta v_{C,z}) - (\rho_{C,y} + 2\Omega_{C,y}) \delta v_{C,z} \\ &\quad + (\delta\rho_{C,z} + 2\delta\Omega_{C,z})(v_{C,y} + \delta v_{C,y}) + 2\Omega_{C,z} \delta v_{C,y} + g \delta\theta_{C,y} \end{aligned} \quad (5-4-21)$$

となる。ここで Z 軸の相対角速度誤差は(5-4-30)式より求まり、 X 、 Y 軸の相対角速度誤差は式(5-4-10)、(5-4-11)のようになる。また後述の式(5-4-26)より地球自転角速度誤差 $\delta\Omega_C$ を式(5-4-21)に代入すれば

$$\begin{aligned} \delta\dot{v}_{C,x} &= - \left[\frac{\delta v_{C,x}}{R_y + h} - \frac{v_{C,x}}{(R_y + h)^2} \delta h - 2\Omega_{L,x} \{(\beta) \sin \alpha + (\gamma) \cos \alpha\} \right. \\ &\quad \left. + 2\Omega_{C,z} \{(\beta + 1) \delta r_{C,x} + (\gamma) \delta r_{C,y}\} \right] (v_{C,z} + \delta v_{C,z}) \\ &\quad + \left\{ -\Omega_{C,y} \delta r_{C,x} + \Omega_{C,x} \delta r_{C,y} - \delta\theta_{C,x} (\rho_{C,y} + \Omega_{C,y}) \right. \\ &\quad \left. + \delta\theta_{C,y} (\rho_{C,x} + \Omega_{C,x}) - d_{C,z} \right\} (v_{C,y} + \delta v_{C,y}) \\ &\quad - (\rho_{C,y} + 2\Omega_{C,y}) \delta v_{C,z} + 2\Omega_{C,z} \delta v_{C,y} - f_{C,z} \delta\theta_{C,y} + b_{C,x} + g \delta\theta_{C,y} + u_{v,x} \end{aligned} \quad (5-4-22)$$

を得る。同様にして Y 、 Z 軸の速度誤差も導出し、以下の式を得る。

$$\begin{aligned}
\delta \dot{v}_{C,y} = & \left[\frac{v_{C,y}}{(R_x+h)^2} \delta h - \frac{\delta v_{C,y}}{R_x+h} + 2\Omega_{L,x} \{ (\beta) \cos \alpha - (\gamma) \sin \alpha \} \right. \\
& \left. - 2\Omega_{C,z} \{ (\beta+1) \delta r_{C,y} - (\gamma) \delta r_{C,x} \} \right] (v_{C,z} + \delta v_{C,z}) \\
& - \left\{ -\Omega_{C,y} \delta r_{C,x} + \Omega_{C,x} \delta r_{C,y} - \delta \theta_{C,x} (\rho_{C,y} + \Omega_{C,y}) \right. \\
& \left. + \delta \theta_{C,y} (\rho_{C,x} + \Omega_{C,x}) - d_{C,z} \right\} (v_{C,x} + \delta v_{C,x}) \\
& + (\rho_{C,x} + 2\Omega_{C,x}) \delta v_{C,z} - 2\Omega_{C,z} \delta v_{C,x} + f_{C,z} \delta \theta_{C,x} + b_{C,y} - g \delta \theta_{C,x} + u_{v,y}
\end{aligned} \tag{5-4-23}$$

$$\begin{aligned}
\delta \dot{v}_{C,z} = & \left[\frac{\delta v_{C,x}}{R_y+h} - \frac{v_{C,x}}{(R_y+h)^2} \delta h - 2\Omega_{L,x} \{ (\beta) \sin \alpha + (\gamma) \cos \alpha \} \right. \\
& \left. + 2\Omega_{C,z} \{ (\beta+1) \delta r_{C,x} + (\gamma) \delta r_{C,y} \} \right] (v_{C,x} + \delta v_{C,x}) \\
& + \left[\frac{\delta v_{C,y}}{R_x+h} - \frac{v_{C,y}}{(R_x+h)^2} \delta h - 2\Omega_{L,x} \{ (\beta) \cos \alpha - (\gamma) \sin \alpha \} \right. \\
& \left. + 2\Omega_{C,z} \{ (\beta+1) \delta r_{C,y} - (\gamma) \delta r_{C,x} \} \right] (v_{C,y} + \delta v_{C,y}) \\
& + (\rho_{C,y} + 2\Omega_{C,y}) \delta v_{C,x} - (\rho_{C,x} + 2\Omega_{C,x}) \delta v_{C,y} + f_{C,x} \delta \theta_{C,y} - f_{C,y} \delta \theta_{C,x} + b_{C,z} + u_{v,z}
\end{aligned} \tag{5-4-24}$$

以上、式(5-4-22)、(5-4-23)、(5-4-24)が速度誤差に関する方程式となる。ただし、 $u_{v,x}$ 、 $u_{v,y}$ 、 $u_{v,z}$ はモデル化されていない誤差を表すもので、ここでは互いに無相関な平均 0、分散 $U_{v,x}$ 、 $U_{v,y}$ 、 $U_{v,z}$ の正規性白色雑音と仮定する。

3) 姿勢角誤差方程式

姿勢角誤差は C 座標系と B 座標系の関係を与える角度の誤差として考える。すなわち、ロール角、ピッチ角、ヨー角のずれを姿勢角誤差 $\delta \theta = [\delta \theta_{C,x} \quad \delta \theta_{C,y} \quad \delta \theta_{C,z}]^T$ として考える。ただし、前述したように Z 軸まわりの Yaw 角誤差 $\delta \theta_{C,z}$ は、wander angle 誤差 $\delta \alpha$ に比べて小さいので無視する。そこで姿勢角誤差は C 座標系を局地水平に保つための地球に対する相対角速度、地球自転角速度の補正誤差、そしてジャイロのバイアス誤差により生ずるとし

$$\delta \dot{\theta}_C = \delta \rho_{E/C}^C + \delta \Omega_C + \delta \theta_C \times \omega_{I/C}^C + d_C \tag{5-4-25}$$

を姿勢角の誤差方程式とする。ここで、 d_C はジャイロのバイアス誤差とし、 $d_C = [d_{C,x} \quad d_{C,y} \quad d_{C,z}]^T$ とする。また、 $\Omega_L (= [\Omega_{L,x} \quad \Omega_{L,y} \quad \Omega_{L,z}]^T)$ は L 座標系で表した地球自転角速度であり

$$\begin{aligned}
\delta\Omega_C &= \bar{\Omega}_C - \Omega_C = \delta T_E^C \Omega_E \\
&= E T_E^L \Omega_E = E \Omega_L = E \begin{bmatrix} \Omega_{L,x} \\ \Omega_{L,y} \\ \Omega_{L,z} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \Omega_{L,x} \{(\beta) \cos \alpha - (\gamma) \sin \alpha\} + \Omega_{L,z} \{(\beta+1) \delta r_{C,y} - (\gamma) \delta r_{C,x}\} \\ -\Omega_{L,x} \{(\beta) \sin \alpha + (\gamma) \cos \alpha\} - \Omega_{L,z} \{(\beta+1) \delta r_{C,x} + (\gamma) \delta r_{C,y}\} \\ (\delta r_{C,x} \sin \alpha + \delta r_{C,y} \cos \alpha) \Omega_{L,x} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5-4-26}$$

となる。また、

$$\begin{aligned}
\delta\theta_C \times \omega_{I/C}^C &= \begin{bmatrix} \delta\theta_{C,x} \\ \delta\theta_{C,y} \\ \delta\theta_{C,z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \rho_{C,x} + \Omega_{C,x} \\ \rho_{C,y} + \Omega_{C,y} \\ \rho_{C,z} + \Omega_{C,z} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \Omega_{C,z} \delta\theta_{C,y} \\ -\Omega_{C,z} \delta\theta_{C,x} \\ (\rho_{C,y} + \Omega_{C,y}) \delta\theta_{C,x} - (\rho_{C,x} + \Omega_{C,x}) \delta\theta_{C,y} \end{bmatrix}, \quad (\delta\theta_{C,z} \cong 0)
\end{aligned} \tag{5-4-27}$$

となる。これより、式(5-4-26)、(5-4-27)を式(5-4-25)に代入することにより、姿勢角誤差方程式を得る。

$$\begin{aligned}
\delta\dot{\theta}_{C,x} &= \Omega_{L,x} \{(\beta) \cos \alpha - (\gamma) \sin \alpha\} + \Omega_{L,z} \{(\beta+1) \delta r_{C,y} - (\gamma) \delta r_{C,x}\} \\
&\quad + \frac{v_{C,y}}{(R_x + h)^2} \delta h - \frac{\delta v_{C,y}}{R_x + h} + \Omega_{C,z} \delta\theta_{C,y} + d_{C,x} + u_{\theta,x}
\end{aligned} \tag{5-4-28}$$

$$\begin{aligned}
\delta\dot{\theta}_{C,y} &= -\Omega_{L,z} \{(\beta+1) \delta r_{C,x} + (\gamma) \delta r_{C,y}\} - \Omega_{L,x} \{(\beta) \sin \alpha + (\gamma) \cos \alpha\} \\
&\quad - \frac{v_{C,x}}{(R_y + h)^2} \delta h + \frac{\delta v_{C,x}}{R_y + h} - \Omega_{C,z} \delta\theta_{C,x} + d_{C,y} + u_{\theta,y}
\end{aligned} \tag{5-4-29}$$

$$\begin{aligned}
\delta\dot{\theta}_{C,z} &= \delta\rho_{C,z} + (\delta r_{C,x} \sin \alpha + \delta r_{C,y} \cos \alpha) \Omega_{L,x} \\
&\quad + (\rho_{C,y} + \Omega_{C,y}) \delta\theta_{C,x} - (\rho_{C,x} + \Omega_{C,x}) \delta\theta_{C,y} + d_{C,z} \\
&\cong 0
\end{aligned} \tag{5-4-30}$$

ただし、 $u_{\theta,x}$ 、 $u_{\theta,y}$ はモデル化されていない誤差を表すもので、ここでは互いに無相関な平均0、分散 $U_{\theta,x}$ 、 $U_{\theta,y}$ の正規性白色雑音と仮定する。

4) 方位角誤差方程式

方位角誤差に関する誤差方程式は、位置誤差方程式と同様に式(5-4-6)から導くことができる。ここで、位置誤差行列 E を

$$\begin{aligned}
E &= \begin{bmatrix} (\beta)\cos\alpha - (\gamma)\sin\alpha & -(\beta)\sin\alpha - (\gamma)\cos\alpha & (\beta+1)\delta r_{C,y} - (\gamma)\delta r_{C,x} \\ -(\beta)\sin\alpha - (\gamma)\cos\alpha & -(\beta)\cos\alpha + (\gamma)\sin\alpha & -(\beta+1)\delta r_{C,x} - (\gamma)\delta r_{C,y} \\ -\delta r_{L,y} & \delta r_{L,x} & 0 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} A & B & (\beta+1)\delta r_{C,y} - (\gamma)\delta r_{C,x} \\ B & -A & -(\beta+1)\delta r_{C,x} - (\gamma)\delta r_{C,y} \\ -\delta r_{L,y} & \delta r_{L,x} & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5-4-31}$$

とする。ここで、式(5-4-6)の左辺 \dot{E} を導出するにあたり \dot{A} 、 \dot{B} は

$$\begin{aligned}
\dot{A} &= -\dot{\alpha}(\beta)\sin\alpha + (\dot{\beta})\cos\alpha - \dot{\alpha}(\gamma)\cos\alpha - (\dot{\gamma})\sin\alpha zsd \\
&= -\dot{\alpha}\{(\beta)\sin\alpha + (\gamma)\cos\alpha\} + (\dot{\beta})\cos\alpha - (\dot{\gamma})\sin\alpha \\
&= \dot{\alpha}B + (\dot{\beta})\cos\alpha - (\dot{\gamma})\sin\alpha
\end{aligned} \tag{5-4-32}$$

$$\begin{aligned}
\dot{B} &= -\dot{\alpha}(\beta)\cos\alpha - (\dot{\beta})\sin\alpha + \dot{\alpha}(\gamma)\sin\alpha - (\dot{\gamma})\cos\alpha \\
&= -\dot{\alpha}\{(\beta)\cos\alpha - (\gamma)\sin\alpha\} - (\dot{\beta})\sin\alpha - (\dot{\gamma})\cos\alpha \\
&= -\dot{\alpha}A - (\dot{\beta})\sin\alpha - (\dot{\gamma})\cos\alpha
\end{aligned} \tag{5-4-33}$$

となる。また、 E の右辺は ($\rho_{C,z} = 0$) とし、 Z 軸の相対角速度 $\rho_{L,z}$ は方位角の時間微分要素 $\dot{\alpha}$ と考えることができることより

$$\begin{aligned}
\dot{A} &= B\rho_{L,z} - \rho_{L,y}\{(\beta+1)\delta r_{C,y} - (\gamma)\delta r_{C,x}\} \\
&\quad - \delta\rho_{C,z}\{(\beta+1)\sin\alpha + (\gamma)\cos\alpha\} + \bar{\rho}_{C,y}\delta r_{L,y} \\
&= B\dot{\alpha} - \rho_{L,y}\{(\beta+1)\delta r_{C,y} - (\gamma)\delta r_{C,x}\} \\
&\quad - \delta\rho_{C,z}\{(\beta+1)\sin\alpha + (\gamma)\cos\alpha\} + \bar{\rho}_{C,y}\delta r_{L,y}
\end{aligned} \tag{5-4-34}$$

$$\begin{aligned}
\dot{B} &= -A\rho_{L,z} + \rho_{L,x}\{(\beta+1)\delta r_{C,y} - (\gamma)\delta r_{C,x}\} \\
&\quad + \delta\rho_{C,z}\{-(\beta+1)\cos\alpha + (\gamma)\sin\alpha\} - \bar{\rho}_{C,y}\delta r_{L,x} \\
&= -A\dot{\alpha} + \rho_{L,x}\{(\beta+1)\delta r_{C,y} - (\gamma)\delta r_{C,x}\} \\
&\quad + \delta\rho_{C,z}\{-(\beta+1)\cos\alpha + (\gamma)\sin\alpha\} - \bar{\rho}_{C,y}\delta r_{L,x}
\end{aligned} \tag{5-4-35}$$

となる。ここで、式(5-4-34)の両辺に $\cos\alpha$ を、式(5-4-35)の両辺に $\sin\alpha$ を乗じ、互いを差し引くことにより

$$\dot{\beta} = \rho_{C,y}\{(\beta)\delta r_{C,y} - (\gamma)\delta r_{C,x}\} - (\gamma)\delta\rho_{C,z} - \delta\rho_{C,y}\delta r_{C,y} \tag{5-4-36}$$

を得る。また、同様にして式(5-4-34)の両辺に $\sin\alpha$ を、式(5-4-35)の両辺に $\cos\alpha$ を乗じ、互いを加えることにより

$$\dot{\gamma} = -\rho_{C,x}\{(\beta+1)\delta r_{C,y} - (\gamma)\delta r_{C,x}\} + (\beta+1)\delta\rho_{C,z} + \bar{\rho}_{C,y}\delta r_{C,x} \tag{5-4-37}$$

を得る。一方、 $\delta\rho_{C,z}$ は式(5-4-30)より求められるので、式(5-4-36)、(5-4-37)に代入すると

$$\begin{aligned}\dot{\beta} = & \rho_{C,y} \{(\beta)\delta r_{C,y} - (\gamma)\delta r_{C,x}\} \\ & + \left\{ (\delta r_{C,x} \sin \alpha + \delta r_{C,y} \cos \alpha) \Omega_{L,x} + (\rho_{C,y} + \Omega_{C,y}) \delta \theta_{C,x} \right. \\ & \left. - (\rho_{C,x} + \Omega_{C,x}) \delta \theta_{C,y} + d_{C,z} \right\} (\gamma) - \delta \rho_{C,y} \delta r_{C,y} + u_{\beta}\end{aligned}\quad (5-4-38)$$

$$\begin{aligned}\dot{\gamma} = & -\rho_{C,x} \{(\beta+1)\delta r_{C,y} - (\gamma)\delta r_{C,x}\} - \left\{ (\delta r_{C,x} \sin \alpha + \delta r_{C,y} \cos \alpha) \Omega_{L,x} \right. \\ & \left. + (\rho_{C,y} + \Omega_{C,y}) \delta \theta_{C,x} - (\rho_{C,x} + \Omega_{C,x}) \delta \theta_{C,y} + d_{C,z} \right\} (\beta+1) \\ & + \left\{ \rho_{C,y} + \left(\frac{\delta v_{C,x}}{R_y + h} - \frac{v_{C,x}}{(R_y + h)^2} \delta h \right) \right\} \delta r_{C,x} + u_{\gamma}\end{aligned}\quad (5-4-39)$$

以上、式(5-4-38)、(5-4-39)が方位角誤差に関する方程式となる。ただし、 u_{β} 、 u_{γ} はモデル化されていない誤差を表すもので、ここでは互いに無相関な平均0、分散 U_{β} 、 U_{γ} の正規性白色雑音とする。また、それら β 、 γ を用いて方位角誤差 $\delta\alpha$ は

$$\delta\alpha = \tan^{-1} \frac{\sin \delta\alpha}{1 + (\cos \delta\alpha - 1)} \quad (5-4-40)$$

として求めることができる。

5) 慣性センサの誤差モデル

加速度センサ、ジャイロの誤差は共に強い自己相関をもつ量と考えられる。したがって慣性センサの誤差を、各軸成分がそれぞれ指数関数で表されるような自己相関を持つ有色雑音として取り扱い、1次のマルコフ過程としてモデル化し以下のように表現する。

$$b_{B,x} = -\frac{1}{\tau_b} b_{B,x} + u_{b,x} \quad (5-4-41)$$

$$b_{B,y} = -\frac{1}{\tau_b} b_{B,y} + u_{b,y} \quad (5-4-42)$$

$$b_{B,z} = -\frac{1}{\tau_b} b_{B,z} + u_{b,z} \quad (5-4-43)$$

$$d_{B,x} = -\frac{1}{\tau_d} d_{B,x} + u_{d,x} \quad (5-4-44)$$

$$d_{B,y} = -\frac{1}{\tau_d} d_{B,y} + u_{d,y} \quad (5-4-45)$$

$$d_{B,z} = -\frac{1}{\tau_d} d_{B,z} + u_{d,z} \quad (5-4-46)$$

ただし、 $u_{b,x}, \dots, u_{d,z}$ は互いに無相関で、平均0、分散 $U_{b,x}, \dots, U_{d,z}$ の正規性白色雑音であり、 τ_b 、 τ_d は相関時間である。

5-5 位置オフセット処理

実環境において、慣性航法複合演算を実施する際、GPS アンテナと IIM の座標の違いによるオフセットを考慮しなくてはならない。慣性航法複合演算における Loosely Coupled 方式は GPS の位置、速度と IMU の位置、速度を用いて観測量を計算するため、GPS、IMU それぞれの座標を統一する必要がある。ここでは、IMU と GPS アンテナの設置箇所による座標の違い（位置オフセット）に対し、補正を行う手法について説明する。

(1) 機能

GPS アンテナと IMU の位置オフセット量から GPS の位置を IMU の位置へ補正する。

(2) アルゴリズム

位置オフセットの概略図を図 5-5-1 に示す。

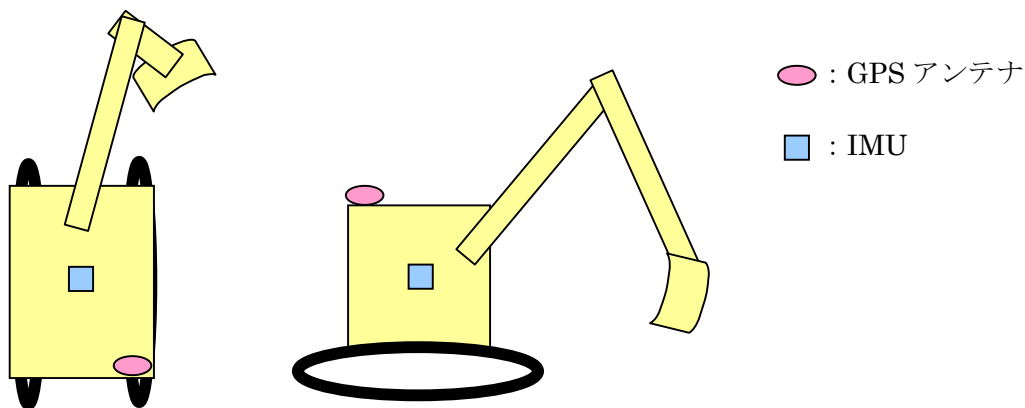


図 5-5-1 IMU と GPS アンテナの物理的オフセット

(左図：上から見た図、右図：横から見た図)

1) 初期設定

IMU の ENU 座標を $[0,0,0]^T$ とし、ロール角 Ψ 、ピッチ角 Ξ 、方位角 Φ がそれぞれ 0 [deg] であった場合の GPS アンテナ箇所における物理的オフセット量を求める。水平方向に対して東方向に m [m]、南方向に n [m]、鉛直高さ方向に h [m] とすると GPS アンテナの ENU 座標は $[m, -n, h]^T$ となる。また、静止している状態で IMU に角速度 $\underline{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ だけ印加されると、機体座標系での IMU の速度は $v_i = [0,0,0]^T$ であり、角速度による GPS アンテナにおける速度は $v_g^{\omega} = \underline{\omega} \times s^g$ (\times : 外積) となる。

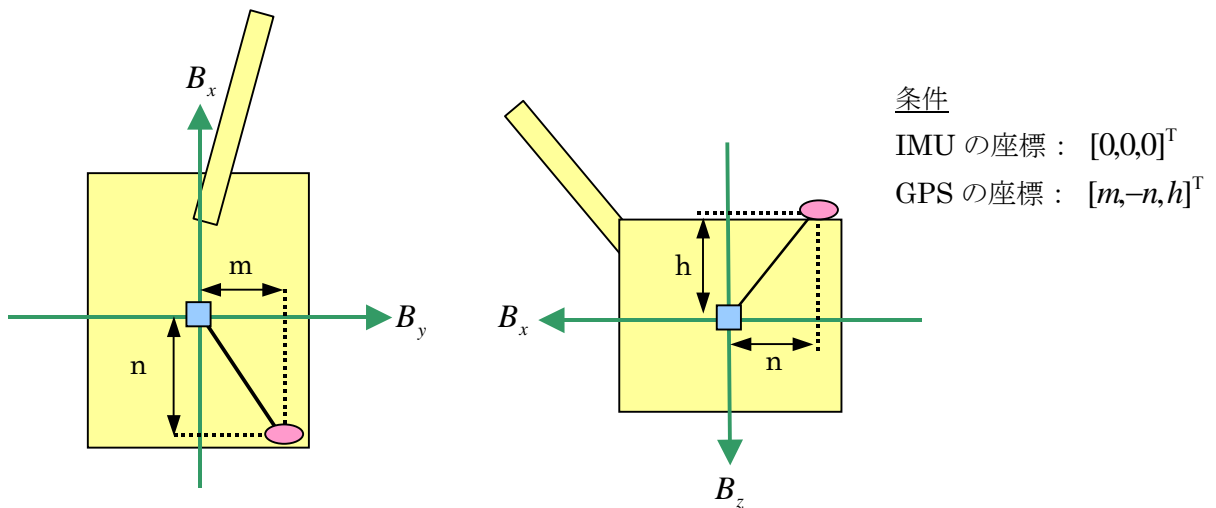


図 5-5-2 オフセットパラメータの詳細

(左図：上方より見た図、右図：側面より見た図)

2) GPS アンテナの座標からの IMU 座標での GPS 位置の算出

IMU における真の角度 (ロール角 Ψ 、ピッチ角 Θ 、方位角 Φ) を用いて機体座標 (B_x, B_y, B_z) から局地平面(ENU)座標 (L_x, L_y, L_z) への座標変換は

$$\begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} T_B^L \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (5-5-1)$$

となる。ここで、 T_B^L は、機体座標 (B_x, B_y, B_z) から局地水平面(NED)座標 (L'_x, L'_y, L'_z) への座標変換行列であり、以下の式で表される。

$$T_B^L = \begin{bmatrix} \cos\Theta\cos\Phi & \sin\Psi\sin\Theta\cos\Phi - \cos\Psi\sin\Phi & \cos\Psi\sin\Theta\cos\Phi + \sin\Psi\sin\Phi \\ \cos\Theta\sin\Phi & \sin\Psi\sin\Theta\sin\Phi + \cos\Psi\cos\Phi & \cos\Psi\sin\Theta\sin\Phi - \sin\Psi\cos\Phi \\ -\sin\Theta & \sin\Psi\cos\Theta & \cos\Psi\cos\Theta \end{bmatrix} \quad (5-5-2)$$

よって、IMU 座標における GPS 座標は物理的オフセット量 $(B_x, B_y, B_z) = (-n, m, -h)$ を用いて

$$\begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} T_B^L \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (5-5-3)$$

となる。

3) GPS アンテナでの速度から IMU 座標での GPS 速度の算出

GPS アンテナでの速度 $[v_g^E, v_g^N, v_g^U]^T$ が与えられているとき、IMU 座標における GPS アンテナの速度 $\underline{v}_i = [v_i^E, v_i^N, v_i^U]^T$ は、IMU の角速度と物理的オフセット量により以下の関係式となる。

$$\underline{v}_i = \begin{bmatrix} v_i^E \\ v_i^N \\ v_i^U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_g^E \\ v_g^N \\ v_g^U \end{bmatrix} - T_B^L v_g^\omega = \begin{bmatrix} v_g^E \\ v_g^N \\ v_g^U \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} T_B^{L'} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -n \\ m \\ -h \end{bmatrix} \quad (5-5-4)$$

5-6 Loosely coupled 方式

慣性航法複合演算において、慣性航法演算の誤差を補正する手法の Loosely coupled 方式について説明する。

(1) 機能

Loosely coupled 方式のモデル式を算出する。

(2) アルゴリズム

5-4 項において、INS の航法誤差に関する方程式が得られ、Loosely coupled 方式の INS 航法誤差を表 5-6-1 に示す。慣性航法複合演算における Loosely coupled 方式は表 5-6-1 に示した INS の航法誤差を、GPS の位置と速度を用いて推定し補正する。

表 5-6-1 Loosely coupled 方式の状態変数

1. $\delta r_{C,x}$: X_C 軸まわりの位置誤差	9. $b_{B,x}$: X_B 軸加速度バイアス
2. $\delta r_{C,y}$: Y_C 軸まわりの位置誤差	10. $b_{B,y}$: Y_B 軸加速度バイアス
3. $\delta v_{C,x}$: X_C 軸方向の速度誤差	11. $b_{B,z}$: Z_B 軸加速度バイアス
4. $\delta v_{C,y}$: Y_C 軸方向の速度誤差	12. $d_{B,x}$: X_B 軸ジャイロバイアス
5. $\delta \theta_{C,x}$: X_C 軸まわりの姿勢角誤差	13. $d_{B,y}$: Y_B 軸ジャイロバイアス
6. $\delta \theta_{C,y}$: Y_C 軸まわりの姿勢角誤差	14. $d_{B,z}$: Z_B 軸ジャイロバイアス
7. δh : Z_C 軸方向の高度誤差	15. γ : $\sin \delta \alpha$
8. $\delta v_{C,z}$: Z_C 軸方向の速度誤差	16. β : $(\cos \delta \alpha - 1)$

Loosely coupled 方式は図 5-6-1 に示すような構成であり、GPS の測位結果（位置、速度）を用い、表 5-6-1 の各変数を推定する。以下では Loosely coupled 方式における状態方程式および観測方程式を示す。

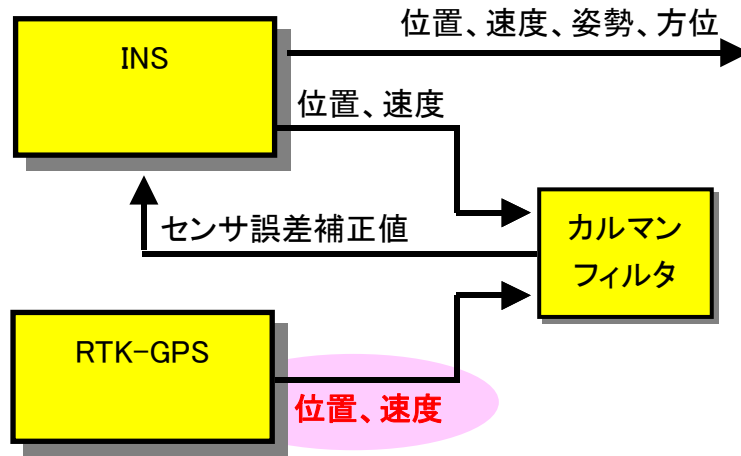


図 5-6-1 Loosely coupled 方式のシステム構成

1) 状態方程式 (Loosely 方式)

表 5-6-1 に示した INS の位置誤差、速度誤差、姿勢角誤差、方位角誤差、及び慣性センサのバイアス誤差を状態変数とし、状態ベクトルを次のように定義する。

$$x_L \equiv [\delta r_{C,x} \ \delta r_{C,y} \ \delta r_{C,z} \ \delta v_{C,x} \ \delta v_{C,y} \ \delta \theta_{C,x} \ \delta \theta_{C,y} \ \delta h \ b_{B,x} \ b_{B,y} \ b_{B,z} \ d_{B,x} \ d_{B,y} \ d_{B,z} \ \gamma \ \beta]^T$$

したがって、 x_L を用いると連続時間の状態方程式は

$$\dot{x}_L(t) = \tilde{f}(x_L(t), t) + u_L(t) \quad (5-6-1)$$

の形で表すことができる。ただし、関数 \tilde{f} は 5-4 項に示した INS の航法誤差に関する方程式から定まる既知のベクトル関数である。また、 $u_L(t)$ は 16 次元の正規性白色雑音ベクトルであり

$$u_L(t) \equiv [u_{r,x}(t) \ u_{r,y}(t) \ u_{v,x}(t) \ u_{v,y}(t) \ u_{\theta,x}(t) \ u_{\theta,y}(t) \ u_h(t) \ u_{v,z}(t) \\ u_{b,x}(t) \ u_{b,y}(t) \ u_{b,z}(t) \ u_{d,x}(t) \ u_{d,y}(t) \ u_{d,z}(t) \ u_\gamma(t) \ u_\beta(t)]^T$$

$$E[u_L(t)] = 0$$

$$E[u_L(t)u_L^T(t)] \equiv U_L(t) \\ = \text{diag}\{U_{r,x}(t), U_{r,y}(t), U_{v,x}(t), U_{v,y}(t), U_{\theta,x}(t), \\ U_{\theta,y}(t), U_h(t), U_{v,z}(t), U_{b,x}(t), U_{b,y}(t), \\ U_{b,z}(t), U_{d,x}(t), U_{d,y}(t), U_{d,z}(t), U_\gamma(t), U_\beta(t)\}$$

とする。ここで、式(5-6-1)を観測データである GPS 信号の更新間隔 Δt でオイラー近似し離散化すると

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{x_L(k+1) - x_L(k)}{\Delta t} = \tilde{f}(x_L(k), k) + u_L(k) \quad (5-6-2)$$

$$\begin{aligned} x_L(k+1) &= x_L(k) + \tilde{f}(x_L(k), k)\Delta t + q_L(k) \\ &\equiv f(x_L(k), k) + q_L(k) \end{aligned} \quad (5-6-3)$$

となり離散時間系の状態方程式が得られる。ただし、

$$\begin{aligned} q_L(k) &\equiv u_L(k)\Delta t \\ f(x_L(k), k) &= x_L(k) + \tilde{f}(x_L(k), k)\Delta t \end{aligned}$$

である。また、 $q_L(k)$ は平均が0、共分散行列

$$\begin{aligned} E[q_L(k)q_L^T(k)] &\equiv Q_L(k) \\ &= \text{diag} \left\{ Q_{r,x}(k), Q_{r,y}(k), Q_{v,x}(k), Q_{v,y}(k), Q_{\theta,x}(k), \right. \\ &\quad Q_{\theta,y}(k), Q_h(k), Q_{v,z}(k), Q_{b,x}(k), Q_{b,y}(k), \\ &\quad \left. Q_{b,z}(k), Q_{d,x}(k), Q_{d,y}(k), Q_{d,z}(k), Q_\gamma(k), Q_\beta(k) \right\} \end{aligned}$$

であるような正規性白色雑音ベクトルである。

2) 観測方程式

Loosely coupled 方式では GPS より得られる位置、速度と INS が出力する位置、速度との差を観測量として観測方程式を導出する。すなわち、

$$\text{INS演算誤差} = \text{INS演算値} - \text{GPS観測量}$$

として、INS 演算誤差を観測量とすることを考える。ただし、GPS 位置は E 座標系、GPS 速度は L 座標系で観測されるため、上記の関係に当てはめるには GPS 観測量を航法演算座標系である C 座標系に適切に変換する必要がある。そこで以下では、方位角が未知であるために生じる座標変換の誤差を考慮した位置、速度観測量について述べる。

ここで、INS から得られる諸量には” i ”、GPS から得られる諸量には” g ”を各変数の右肩に付加する。例えば、 $v_{C,x}^i$ は INS から得られる C 座標系での X 軸に関する速度である。また、GPS データは離散的に得られ、データ更新間隔は Δt とする。

(i) 位置誤差観測量

INS と GPS より得られる緯度 λ と経度 φ の差を位置誤差観測量とする。したがって、この位置誤差観測量を C 座標系に適切に変換する。まず、 E 座標系と L 座標系の関係について考える。 E 座標系での INS 演算の緯度誤差 $\Delta\lambda$ 、経度誤差 $\Delta\varphi$ は

$$\Delta\lambda = \lambda^i - \lambda^g \quad (5-6-4)$$

$$\Delta\varphi = \varphi^i - \varphi^g \quad (5-6-5)$$

として GPS 位置観測量を基準とすることで与えられる。

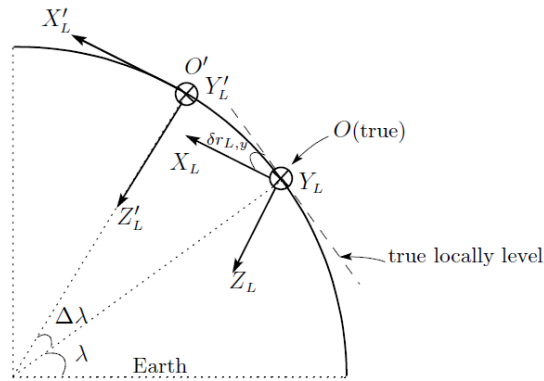


図 5-6-2 緯度誤差と $\delta r_{L,y}$ の関係

緯度誤差 $\Delta\lambda$ と $\delta r_{L,y}$ の関係を図 5-6-2 に示す。 $\Delta\lambda$ により、移動体の真の位置 O で E 座標系から L 座標系へ座標変換を行うと O' を原点とする L' 座標系 (X'_L, Y'_L, Z'_L) が構成される。しかし、この L' 座標系は実際の位置 O で構成されるべき L 座標系とは異なる。すなわち、緯度誤差が $+\Delta\lambda$ である場合、INS 演算によって構成される局地水平面 (L' 座標系) は、真の局地水平面に対して Y_L 軸まわりに関して、 $-\delta r_{L,y}$ だけ傾いてしまうことが分かる。したがって、次式の関係を得る。

$$\Delta\lambda = -\delta r_{L,y} \quad (5-6-6)$$

次に、経度誤差 $\Delta\varphi$ が INS 演算によって構成される局地水平面に及ぼす影響について考える。緯度誤差の場合と同様に経度誤差 $\Delta\varphi$ により、INS 演算によって構成された L' 座標系は真の L 座標系とは異なる (図 5-6-3)。 $\Delta\varphi$ は X_E 軸まわりの回転角であり、 L' 座標系は真の局地水平面に対して X_L 軸まわりに関して、 $\delta r_{L,x}$ だけ傾くことが分かる。しかし、 X_L 軸と X'_L は赤道上以外は平行な関係ではないので、 $\Delta\varphi = \delta r_{L,x}$ の関係は成り立たない。したがって、経度誤差による $\delta r_{L,x}$ を考慮する際、 $\Delta\varphi$ の物理量を適切に変換する必要がある。図 5-6-4 に示すように、 $\delta r_{L,x}$ は緯度 λ を用いて次のように表すことができる。

$$\delta r_{L,x} = \Delta\varphi \cos \lambda \quad (5-6-7)$$

ただし、 $\Delta\varphi$ による Z_L 軸まわりの誤差 $\delta r_{L,z}$ は、方位角誤差 $\delta\alpha$ に含まれるものとして 0 と仮定する。

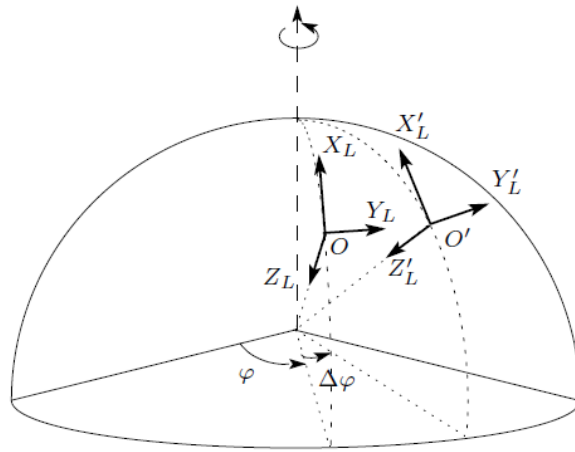


図 5-6-3 L' 座標系と真の L 座標系の関係

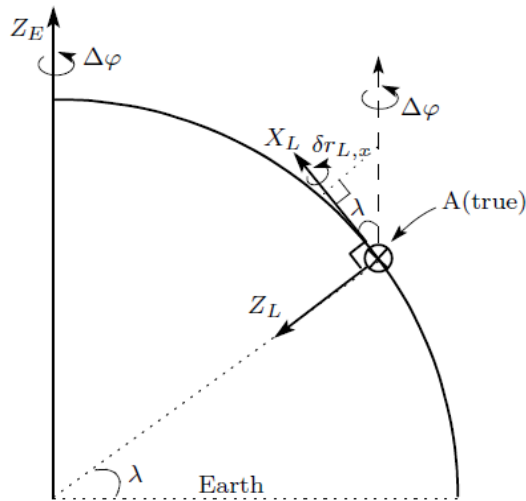


図 5-6-4 経度誤差と $\delta r_{L,x}$ の関係

以上より、 E 座標系での INS 演算の位置誤差 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\varphi$ は L 座標系において

$$\begin{bmatrix} \delta r_{L,x}^i \\ \delta r_{L,y}^i \\ \delta r_{L,z}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\varphi \cos \lambda \\ -\Delta\lambda \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5-6-8)$$

と示され、更に C 座標系に変換すると

$$\begin{bmatrix} \delta r_{C,x}^i \\ \delta r_{C,y}^i \\ \delta r_{C,z}^i \end{bmatrix} = T_L^C \begin{bmatrix} \Delta\varphi \cos \lambda \\ -\Delta\lambda \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5-6-9)$$

と表すことができる。式(5-6-9)を $\delta\alpha$ による座標変換行列の誤差 δT_L^C を考慮し展開すると

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \delta r_{C,x}^i \\ \delta r_{C,y}^i \\ \delta r_{C,z}^i \end{bmatrix} &= (\bar{T}_L^C - \delta T_L^C) \begin{bmatrix} \Delta\varphi \cos \lambda \\ -\Delta\lambda \\ 0 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & -\cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varphi \cos \lambda \\ -\Delta\lambda \\ 0 \end{bmatrix} \\
&\quad - \begin{bmatrix} (\beta) \cos \alpha - (\gamma) \sin \alpha & -(\beta) \sin \alpha - (\gamma) \cos \alpha & 0 \\ -(\beta) \sin \alpha - (\gamma) \cos \alpha & -(\beta) \cos \alpha + (\gamma) \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varphi \cos \lambda \\ -\Delta\lambda \\ 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5-6-10}$$

となる。ただし、

$$\gamma \equiv \sin \delta\alpha, \quad \beta \equiv \cos \delta\alpha - 1 \tag{5-6-11}$$

である。したがって

$$\begin{aligned}
\Delta\varphi \cos \lambda \cos \alpha + \Delta\lambda \sin \alpha &= \delta r_{C,x}^i - [\Delta\varphi \cos \lambda \sin \alpha - \Delta\lambda \cos \alpha] \gamma \\
&\quad + [\Delta\varphi \cos \lambda \cos \alpha + \Delta\lambda \sin \alpha] \beta \\
&\quad - \Delta\varphi \cos \lambda \sin \alpha + \Delta\lambda \cos \alpha \\
&= \delta r_{C,y}^i - [\Delta\varphi \cos \lambda \cos \alpha + \Delta\lambda \sin \alpha] \gamma \\
&\quad - [\Delta\varphi \cos \lambda \sin \alpha - \Delta\lambda \cos \alpha] \beta
\end{aligned} \tag{5-6-12}$$

となる。これらをまとめ、さらに GPS 観測雑音 $n_{P,x}$ $n_{P,y}$ $n_{P,z}$ を考慮すると

$$\begin{aligned}
z_{P,x} &\equiv r_{C,x}^i - r_{C,x}^g \\
&= \delta r_{C,x}^i + (r_{C,y}^i - r_{C,y}^g) \gamma + (r_{C,x}^i - r_{C,x}^g) \beta + n_{P,x}
\end{aligned} \tag{5-6-13}$$

$$\begin{aligned}
z_{P,y} &\equiv r_{C,y}^i - r_{C,y}^g \\
&= \delta r_{C,y}^i - (r_{C,x}^i - r_{C,x}^g) \gamma + (r_{C,y}^i - r_{C,y}^g) \beta + n_{P,y}
\end{aligned} \tag{5-6-14}$$

として位置誤差に関する観測量を得る。また、高度誤差 δh に関しては

$$\begin{aligned}
z_{P,z} &\equiv h^i - h^g \\
&= \delta h + n_{P,z}
\end{aligned} \tag{5-6-15}$$

となる。

(ii) 速度誤差観測量

GPS 速度 (L 座標系) を C 座標系に座標変換し、INS 速度との差を速度観測量とする。したがって、方位角誤差 $\delta\alpha$ を考慮し方位角を $\alpha + \delta\alpha$ として L 座標系と C 座標系の関係を示す(図 5-6-5)。

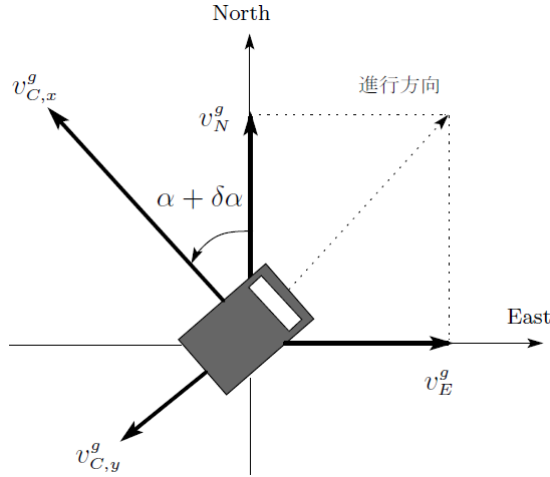


図 5-6-5 GPS 速度の C 座標系への変換

これより、GPS 速度を基準とすると INS 演算速度誤差は

$$\begin{aligned}
 \delta v_C^i &= v_C^i - T_L^C v_L^g \\
 &= v_C^i - (\bar{T}_L^C - \delta T_L^C) v_L^g \\
 &= v_C^i - \bar{T}_L^C v_L^g + \delta T_L^C v_L^g
 \end{aligned} \tag{5-6-16}$$

と表すことができる。ここで、位置誤差観測の場合と同様に γ 、 β を用いて展開すると

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \delta v_{C,x}^i \\ \delta v_{C,y}^i \\ \delta v_{C,z}^i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v_{C,x}^i \\ v_{C,y}^i \\ v_{C,z}^i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & -\cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_N^g \\ v_E^g \\ v_D^g \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} (\beta) \cos \alpha - (\gamma) \sin \alpha & -(\beta) \sin \alpha - (\gamma) \cos \alpha & 0 \\ -(\beta) \sin \alpha - (\gamma) \cos \alpha & -(\beta) \cos \alpha + (\gamma) \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_N^g \\ v_E^g \\ v_D^g \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5-6-17}$$

となる。したがって

$$\begin{aligned}
 \delta v_{C,x}^i &= v_{C,x}^i - v_N^g \cos \alpha + v_E^g \sin \alpha \\
 &+ (v_N^g \cos \alpha - v_E^g \sin \alpha) \beta - (v_N^g \sin \alpha + v_E^g \cos \alpha) \gamma
 \end{aligned} \tag{5-6-18}$$

$$\begin{aligned}
 \delta v_{C,y}^i &= v_{C,y}^i + v_N^g \sin \alpha + v_E^g \cos \alpha \\
 &- (v_N^g \sin \alpha + v_E^g \cos \alpha) \beta - (v_N^g \cos \alpha - v_E^g \sin \alpha) \gamma
 \end{aligned} \tag{5-6-19}$$

$$\delta v_{C,z}^i = v_{C,z}^i - v_D^g \tag{5-6-20}$$

となる。さらに GPS 観測雑音 $n_{v,x}$ $n_{v,y}$ $n_{v,z}$ を考慮すると

$$\begin{aligned}
 z_{v,x} &\equiv v_{C,x}^i - v_{C,x}^g \\
 &= \delta v_{C,x}^i - v_{C,x}^g \beta - v_{C,y}^g \gamma + n_{v,x}
 \end{aligned} \tag{5-6-21}$$

$$\begin{aligned}
z_{v,y} &\equiv v_{C,y}^i - v_{C,y}^g \\
&= \delta v_{C,y}^i - v_{C,y}^g \beta + v_{C,x}^g \gamma + n_{v,y}
\end{aligned} \tag{5-6-22}$$

$$\begin{aligned}
z_{v,z} &\equiv v_{C,z}^i + v_{C,z}^g \\
&= \delta v_{C,z}^i + n_{v,z}
\end{aligned} \tag{5-6-23}$$

と表すことができ、速度誤差の観測量を得る。

(iii) 観測方程式

式(5-6-13)～(5-6-15)、式(5-6-21)～(5-6-23)をまとめ、ベクトル・行列表現すれば、時刻 k での観測方程式は

$$z_L(k) = H_L(k)x_L(k) + n_L(k) \tag{5-6-24}$$

と表すことができる。ただし

$$\begin{aligned}
z_L(k) &= [z_{p,x}(k) \ z_{p,y}(k) \ z_{p,z}(k) \ z_{v,x}(k) \ z_{v,y}(k) \ z_{v,z}(k)]^T \\
n_L(k) &= [n_{p,x}(k) \ n_{p,y}(k) \ n_{p,z}(k) \ n_{v,x}(k) \ n_{v,y}(k) \ n_{v,z}(k)]^T \\
H_L(k) &\equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 0_{6 \times 6} \quad \begin{bmatrix} r_{C,y}^i - r_{C,y}^g & r_{C,x}^i - r_{C,x}^g \\ -r_{C,x}^i + r_{C,x}^g & r_{C,y}^i - r_{C,y}^g \\ 0 & 0 \\ -v_{C,y}^g & -v_{C,x}^g \\ v_{C,x}^g & -v_{C,y}^g \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5-6-25}
\end{aligned}$$

であり、平均 0 で共分散行列が $E[n_L(k)n_L^T(k)] \equiv R_L(k)$ のように与えられる正規性白色雑音とする。

5-7 Tightly coupled 方式

慣性航法複合演算において、慣性航法演算の誤差を補正する手法の Tightly coupled 方式について説明する。

(1) 機能

Tightly coupled 方式のモデル式を算出する。

(2) アルゴリズム

GPS の測位結果（位置、速度）から観測量を構成する Loosely 方式に対し、Tightly 方式はコード擬似距離や搬送波位相積算値から直接観測量を構成し、INS 航法誤差を推定し補正する方式である。したがって、Loosely 方式では移動体に設置された受信機の 3 次元座標と受信機時計誤差を得るために、4 機以上の可視衛星が必要であったが、Tightly 方式ではコード擬似距離、搬送波位相積算値が得られれば観測量を構成することができるため、1 機以上の GPS 衛星が観測できれば INS 航法誤差を推定することが可能である。Tightly 方式のシステム構成図を図 5-7-1 に示す。

以下では、コード擬似距離、搬送波位相積算値の観測量について述べ、INS 演算誤差を状態変数とした慣性航法複合演算における観測方程式を導出する。また、以下では簡単のために、コード擬似距離については C/A コード、搬送波位相積算値については L1 波のみを用いる場合について説明するが、L2 波やその他の周波数帯についても同様に扱うことができる。

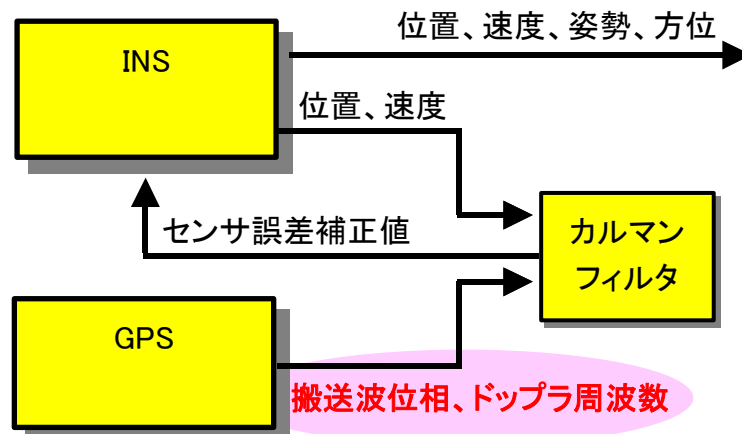


図 5-7-1 Tightly 方式のシステム構成

表 5-7-1 Tightly 方式における状態変数

(λ_1 は L1 帯の波長、 m は受信衛星数)

1. $\delta r_{C,x}$: X_C 軸まわりの位置誤差	12. $d_{B,x}$: X_B 軸ジャイロバイアス
2. $\delta r_{C,y}$: Y_C 軸まわりの位置誤差	13. $d_{B,y}$: Y_B 軸ジャイロバイアス
3. $\delta v_{C,x}$: X_C 軸方向の速度誤差	14. $d_{B,z}$: Z_B 軸ジャイロバイアス
4. $\delta v_{C,y}$: Y_C 軸方向の速度誤差	15. γ : $\sin \delta\alpha$
5. $\delta\theta_{C,x}$: X_C 軸まわりの姿勢角誤差	16. β : $(\cos \delta\alpha - 1)$
6. $\delta\theta_{C,y}$: Y_C 軸まわりの姿勢角誤差	17. $\lambda_1 N_{L1,ku}^{12}$: 整数値バイアス (距離の単位)
7. δh : Z_C 軸方向の高度誤差	∴ ∴ ∴
8. $\delta v_{C,z}$: Z_C 軸方向の速度誤差	∴ ∴ ∴
9. $b_{B,x}$: X_B 軸加速度バイアス	∴ ∴ ∴
10. $b_{B,y}$: Y_B 軸加速度バイアス	∴ ∴ ∴
11. $b_{B,z}$: Z_B 軸加速度バイアス	∴ $\lambda_1 N_{L1,ku}^{1m}$: 整数値バイアス (距離の単位)

(i) 状態方程式

Tightly 方式における INS 航法誤差の状態変数を表 5-7-1 に示す。本方式では、Loosely 方式時の未知量 x_L に加え、表 5-7-1 中の 16 番以降に示される整数値バイアス

$$N_{L1} \equiv \left[\lambda_1 N_{L1,ku}^{12} \cdots \lambda_1 N_{L1,ku}^{1m} \right]^T \quad (5-7-1)$$

が状態変数に追加される。すなわち、Tightly 方式における状態変数ベクトルは

$$\mathbf{x}_T \equiv \left[\mathbf{x}_L^T \ N_{L1}^T \right]^T \quad (5-7-2)$$

である。いま、 N に関して、

$$N_{L1}(k+1) = F_{N_{L1}} N_{L1}(k) + \mathbf{q}_{N_{L1}}(k) \quad (5-7-3)$$

とモデル化する。ただし $F_{N_{L1}}$ は既知の $(m-1) \times (m-1)$ 行列、 $\mathbf{q}_{N_{L1}}$ は $m-1$ 次元の正規性白色雑音である。このとき、Tightly 方式における状態方程式は

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_L(k+1) \\ N_{L1}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\mathbf{x}_L(k), k) \\ F_{N_{L1}} N_{L1}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{q}_L(k) \\ \mathbf{q}_{N_{L1}}(k) \end{bmatrix} \quad (5-7-4)$$

となる。

(ii) コード擬似距離および搬送波位相積算値

既知受信機座標、未知受信機座標をそれぞれ $[x_k(k) y_k(k) z_k(k)]^T$ 、 $[x_u(k) y_u(k) z_u(k)]^T$ とし、両受信機で共通に m 個の衛星を捉え、基準衛星を 1 とすると、その組み合わせは以下のよう表せる。

$$(i, j) = \{(1, 2), (1, 3), (1, 4), \dots, (1, m)\}$$

このとき、独立な二重差は $(m-1)$ 組得られ、コード、搬送波位相の観測方程式はそれぞれ以下のように表すことができる。

$$\Delta_{CA}(k) = \mathbf{h}(\boldsymbol{\eta}(k)) + \mathbf{n}_{CA}(k) \quad (5-7-5)$$

$$\Delta_{L1}(k) = \mathbf{h}(\boldsymbol{\eta}(k)) + \mathbf{N}_{L1} + \mathbf{n}_{L1}(k) \quad (5-7-6)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \Delta_{CA}(k) &\equiv [R_{ku}^{12}(k) R_{ku}^{13}(k) \cdots R_{ku}^{1m}(k)]^T \\ \Delta_{L1}(k) &\equiv [\lambda_1 \phi_{ku}^{12}(k) \lambda_1 \phi_{ku}^{13}(k) \cdots \lambda_1 \phi_{ku}^{1m}(k)]^T \\ \boldsymbol{\eta}(k) &\equiv [x_u(k) y_u(k) z_u(k)]^T \\ \mathbf{n}_{CA}(k) &\equiv [n_{CA,ku}^{12}(k) \quad n_{CA,ku}^{13}(k) \quad \cdots \quad n_{CA,ku}^{1m}(k)]^T \\ \mathbf{n}_{L1}(k) &\equiv [n_{L1,ku}^{12}(k) \quad n_{L1,ku}^{13}(k) \quad \cdots \quad n_{L1,ku}^{1m}(k)]^T \end{aligned}$$

とし、 N を整数値バイアス、 λ_1 を搬送波周波数の波長とする。このとき、観測雑音ベクトル $\mathbf{n}_{CA}(k)$ は平均 $\mathbf{0}$ 、共分散行列 \mathbf{R}_{CA} 、 $\mathbf{n}_{L1}(k)$ は平均 $\mathbf{0}$ 、共分散行列 \mathbf{R}_{L1} の正規性白色雑音と仮定する。ここで、下添え字の CA は C/A コード、 $L1$ は L1 帯の搬送波を意味する。また、ベクトル関数 $\mathbf{h}(\boldsymbol{\eta}(k))$ の各要素 $h_{j-1}(\boldsymbol{\eta}(k))$ 、 $(j = 2, 3, \dots, m)$ は

$$\begin{aligned} h_{j-1}(\boldsymbol{\eta}(k)) &= \{\rho_u^1(k) - \rho_k^1(k)\} - \{\rho_u^j(k) - \rho_k^j(k)\} \\ &= \left\{ \sqrt{(x_u(k) - x^1(k))^2 + (y_u(k) - y^1(k))^2 + (z_u(k) - z^1(k))^2} \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{(x_k(k) - x^1(k))^2 + (y_k(k) - y^1(k))^2 + (z_k(k) - z^1(k))^2} \right\} \quad (5-7-7) \\ &\quad - \left\{ \sqrt{(x_u(k) - x^j(k))^2 + (y_u(k) - y^j(k))^2 + (z_u(k) - z^j(k))^2} \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{(x_k(k) - x^j(k))^2 + (y_k(k) - y^j(k))^2 + (z_k(k) - z^j(k))^2} \right\} \end{aligned}$$

となる。この場合、式(5-7-6)の搬送波位相積算値 Δ_{L1} は距離の単位で表現されていることに注意する。式(5-7-7)より、ベクトル関数 $\mathbf{h}(\boldsymbol{\eta}(k))$ は非線形であるので、線形近似を行う。そこで、 $\mathbf{h}(\boldsymbol{\eta}(k))$ を INS 演算値のまわりでテーラー展開し、1 次の項までの近似を行うことで INS 航法誤差における観測方程式を導出する。INS 位置(単位 [m])を $\mathbf{r}_i(k) \equiv [x_i(k) y_i(k) z_i(k)]^T$ とすると

$$\mathbf{h}(\boldsymbol{\eta}(k)) \cong \mathbf{h}(\mathbf{r}_i(k)) + \tilde{\mathbf{H}}(k)(\boldsymbol{\eta}(k) - \mathbf{r}_i(k)) \quad (5-7-8)$$

となる。ただし、下添え字の E は地手系直交座標系である E 座標系を意味する。また、

$$\begin{aligned} \tilde{H}(k) &\equiv \left[\frac{\partial h(\boldsymbol{\eta}(k))}{\partial \boldsymbol{\eta}(k)} \right]_{\boldsymbol{\eta}(k)=\mathbf{r}_i(k)} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(\boldsymbol{\eta}(k))}{\partial x_i(k)} & \frac{\partial h_1(\boldsymbol{\eta}(k))}{\partial y_i(k)} & \frac{\partial h_1(\boldsymbol{\eta}(k))}{\partial z_i(k)} \\ \frac{\partial h_2(\boldsymbol{\eta}(k))}{\partial x_i(k)} & \frac{\partial h_2(\boldsymbol{\eta}(k))}{\partial y_i(k)} & \frac{\partial h_2(\boldsymbol{\eta}(k))}{\partial z_i(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial h_{m-1}(\boldsymbol{\eta}(k))}{\partial x_i(k)} & \frac{\partial h_{m-1}(\boldsymbol{\eta}(k))}{\partial y_i(k)} & \frac{\partial h_{m-1}(\boldsymbol{\eta}(k))}{\partial z_i(k)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5-7-9)$$

$$\frac{\partial h_{j-1}(\boldsymbol{\eta}(k))}{\partial x_i(k)} = \frac{(x_i(k) - x^1(k))}{\rho_i^1(k)} - \frac{(x_i(k) - x^j(k))}{\rho_i^j(k)} \quad (5-7-10)$$

$$\frac{\partial h_{j-1}(\boldsymbol{\eta}(k))}{\partial y_i(k)} = \frac{(y_i(k) - y^1(k))}{\rho_i^1(k)} - \frac{(y_i(k) - y^j(k))}{\rho_i^j(k)} \quad (5-7-11)$$

$$\frac{\partial h_{j-1}(\boldsymbol{\eta}(k))}{\partial z_i(k)} = \frac{(z_i(k) - z^1(k))}{\rho_i^1(k)} - \frac{(z_i(k) - z^j(k))}{\rho_i^j(k)} \quad (5-7-12)$$

とする。式(5-7-5)、(5-7-6)、(5-7-8)より、線形化されたコード擬似距離、搬送波位相積算値の観測方程式

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{CA}(k) &\equiv \Delta_{CA}(k) - \mathbf{h}(\mathbf{r}_i(k)) \\ &= \tilde{H}(k)(\boldsymbol{\eta}(k) - \mathbf{r}_i(k)) + \mathbf{n}_{CA}(k) \\ &= \tilde{H}(k)(-\delta \mathbf{r}_i(k)) + \mathbf{n}_{CA}(k) \end{aligned} \quad (5-7-13)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{Ll}(k) &\equiv \Delta_{Ll}(k) - \mathbf{h}(\mathbf{r}_i(k)) \\ &= \tilde{H}(k)(\boldsymbol{\eta}(k) - \mathbf{r}_i(k)) + N_{Ll} + \mathbf{n}_{Ll}(k) \\ &= \tilde{H}(k)(-\delta \mathbf{r}_i(k)) + N_{Ll} + \mathbf{n}_{Ll}(k) \end{aligned} \quad (5-7-14)$$

を得る。ただし、 $\delta \mathbf{r}_i(k)$ は E 座標系における位置誤差[m]を表す。ここで、式(5-7-13)、(5-7-14)の観測方程式を慣性航法複合演算に適用するため、 $\delta \mathbf{r}_i(k)$ を航法演算座標系である C 座標系の位置誤差[rad]に変換することが必要である。

まず、 $\delta \mathbf{r}_i$ を L 座標系における位置誤差[rad]に変換することを考える。ただし、省略のため時刻の表記 k を省略して表記する。ここで、座標変換行列 T_L^E を用いて L 座標系における位置誤差[m]に変換すると

$$\delta \mathbf{r}_i = T_L^E \delta \mathbf{r}_{L,i} = T_L^E \begin{bmatrix} \delta x_{L,i} \\ \delta y_{L,i} \\ \delta z_{L,i} \end{bmatrix} \quad (5-7-15)$$

となる。ただし、座標変換行列 T_L^E は、緯度 λ 、経度 φ を用いて

$$\begin{aligned}
T_L^E &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \lambda & 0 & -\cos \lambda \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \lambda & 0 & -\sin \lambda \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} -\cos \varphi \sin \lambda & -\sin \varphi & -\cos \varphi \cos \lambda \\ -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi & -\sin \varphi \cos \lambda \\ \cos \lambda & 0 & -\sin \lambda \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5-7-16}$$

とする。次に、弧度法を用いて式(5-7-15)を変換すると以下のようにになる。

$$\delta \mathbf{r}_i = T_L^E \begin{bmatrix} (R_p + h)\Delta\lambda \\ (R_p + h)\Delta\varphi \\ \delta z_{L,i} \end{bmatrix} \tag{5-7-17}$$

ただし、 R_p は曲率半径であり、 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\varphi$ はそれぞれ緯度誤差、経度誤差を表す。

ここで、緯度誤差、経度誤差と L 座標系の関係について考える。まず、緯度誤差 $\Delta\lambda$ と $\delta r_{L,y}$ の関係を図5-7-2に示す。 $\Delta\lambda$ により、移動体の真の位置 O で E 座標系から L 座標系へ座標変換を行うと O' を原点とする L' 座標系(X'_L, Y'_L, Z'_L)が構成される。しかし、この L' 座標系は実際の位置 O で構成されるべき L 座標系とは異なる。すなわち、緯度誤差が $+\Delta\lambda$ である場合、INS演算によって構成される局地水平面(L' 座標系)は、真の局地水平面に対して Y'_L 軸まわりに関して、 $-\delta r_{L,y}$ だけ傾いてしまうことが分かる。したがって、次式の関係を得る。

$$\Delta\lambda = -\delta r_{L,y} \tag{5-7-18}$$

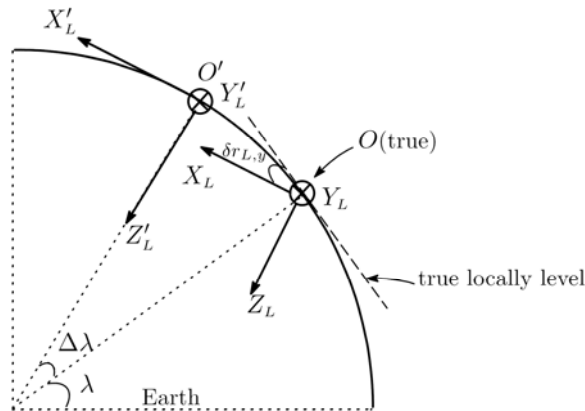


図 5-7-2 緯度誤差と $\delta r_{L,y}$ の関係

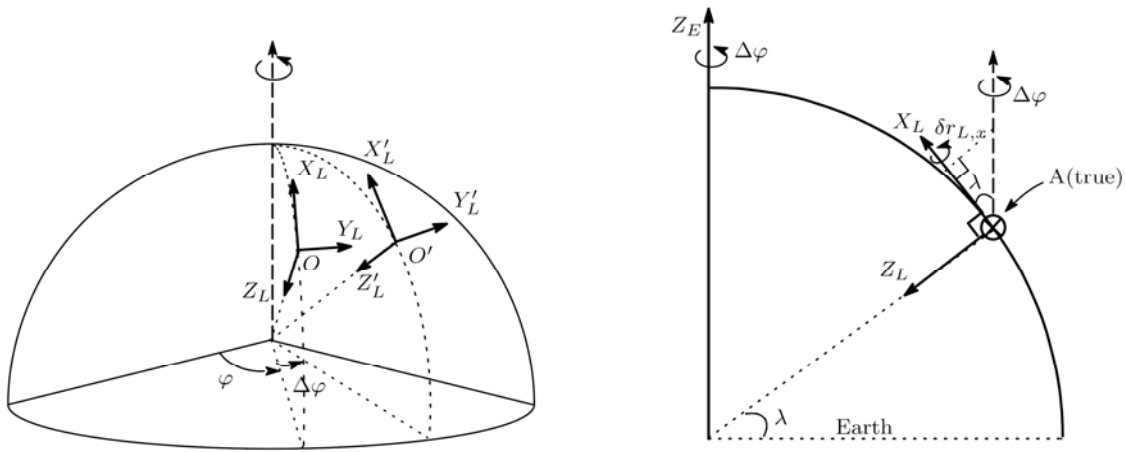


図 5-7-3 L 座標系と真の L 座標系の関係 (左)、経度誤差と $\delta r_{L,x}$ の関係 (右)

次に、経度誤差 $\Delta\varphi$ がINS演算によって構成される局地水平面に及ぼす影響について考える。緯度誤差の場合と同様に経度誤差 $\Delta\varphi$ により、INS演算によって構成された L 座標系は真の L 座標系とは異なる(図5-7-3(左))。 $\Delta\varphi$ は X_E 軸まわりの回転角であり、 L 座標系は真の局地水平面に対して X_L 軸まわりに関して、 $\delta r_{L,x}$ だけ傾くことが分かる。しかし、 X_L 軸と X'_L は赤道上以外は平行な関係ではないので、 $\Delta\varphi = \delta r_{L,x}$ の関係は成り立たない。したがって、経度誤差による $\delta r_{L,x}$ を考慮する際、 $\Delta\varphi$ の物理量を適切に変換する必要がある。図5-7-3(右)に示すように、 $\delta r_{L,x}$ は緯度 λ を用いて次のように表すことができる。

$$\delta r_{L,x} = \Delta\varphi \cos \lambda \quad (5-7-19)$$

したがって以下のような関係が得られる。

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda \\ \Delta\varphi \\ \delta z_{L,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta r_{L,y} \\ \delta r_{L,x} \\ \cos \lambda \\ \delta r_{L,z} \end{bmatrix} \quad (5-7-20)$$

したがって、式(5-7-17)は

$$\delta r_i = T_L^E \begin{bmatrix} -(R_p + h)\delta r_{L,y} \\ (R_p + h)\delta r_{L,x} \\ \cos \lambda \\ \delta r_{L,z} \end{bmatrix} \quad (5-7-21)$$

となり、 δr_i を L 座標系における位置誤差[rad]に変換することができた。更に C 座標系に変換すると δr_i は以下のように表すことができる。

$$\delta r_i = T_L^E T_A^E T_B^E T_C^E \begin{bmatrix} \delta r_{C,x} \\ \delta r_{C,y} \\ \delta r_{C,z} \end{bmatrix} \quad (5-7-22)$$

ただし、

$$T_A = \begin{bmatrix} -(R_p + h) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_p + h}{\cos \lambda} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-7-23)$$

$$T_C^L = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & -\cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5-7-24)$$

である。したがって、式(5-7-13)及び式(5-7-14)は

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{CA}(k) &= -\tilde{H}(k)T_L^E(k)T_A(k)T_B T_C^L(k)\delta \mathbf{r}_c(k) + \mathbf{v}(k) \\ &= \hat{H}(k)\delta \mathbf{r}_c(k) + \mathbf{n}_{CA}(k) \end{aligned} \quad (5-7-25)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{L1}(k) &= -\tilde{H}(k)T_L^E(k)T_A(k)T_B T_C^L(k)\delta \mathbf{r}_c(k) + N_{L1} + \boldsymbol{\varepsilon}(k) \\ &= \hat{H}(k)\delta \mathbf{r}_c(k) + N_{L1} + \mathbf{n}_{L1}(k) \end{aligned} \quad (5-7-26)$$

となる。ただし、 $\hat{H}(k)$ の各要素は、省略のため時刻の表記 k を省いて以下のように表す。

$$\hat{H}(k) = [\mathbf{a}(k) \quad \mathbf{b}(k) \quad \mathbf{c}(k)] \quad (5-7-27)$$

$$\begin{aligned} a_{j-1}(k) &= \frac{(R_p + h)}{\cos \lambda} \left(\frac{\partial h_{j-1}}{\partial x_i} \sin \varphi - \frac{\partial h_{j-1}}{\partial y_i} \cos \varphi \right) \cos \alpha \\ &+ (R_p + h) \left\{ \left(\frac{\partial h_{j-1}}{\partial x_i} \cos \varphi + \frac{\partial h_{j-1}}{\partial y_i} \sin \varphi \right) \sin \lambda - \frac{\partial h_{j-1}}{\partial z_i} \cos \lambda \right\} \sin \alpha \end{aligned} \quad (5-7-28)$$

$$\begin{aligned} b_{j-1}(k) &= \frac{(R_p + h)}{\cos \lambda} \left(-\frac{\partial h_{j-1}}{\partial x_i} \sin \varphi + \frac{\partial h_{j-1}}{\partial y_i} \cos \varphi \right) \sin \alpha \\ &+ (R_p + h) \left\{ \left(\frac{\partial h_{j-1}}{\partial x_i} \cos \varphi + \frac{\partial h_{j-1}}{\partial y_i} \sin \varphi \right) \sin \lambda - \frac{\partial h_{j-1}}{\partial z_i} \cos \lambda \right\} \cos \alpha \end{aligned} \quad (5-7-29)$$

$$c_{j-1}(k) = - \left(\frac{\partial h_{j-1}}{\partial x_i} \cos \varphi + \frac{\partial h_{j-1}}{\partial y_i} \sin \varphi \right) \cos \lambda - \frac{\partial h_{j-1}}{\partial z_i} \sin \lambda \quad (5-7-30)$$

(iii) 観測方程式

以上より、Tightly 方式の慣性航法複合演算における観測方程式は

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_{CA}(k) \\ \mathbf{y}_{L1}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{T,INS} & \mathbf{0}_{(m-1) \times (m-1)} \\ \mathbf{H}_{T,INS} & \mathbf{I}_{(m-1) \times (m-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_L(k) \\ \mathbf{N}_{L1}(k) \end{bmatrix} \mathbf{x}_{LW} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{CA}(k) \\ \mathbf{n}_{L1}(k) \end{bmatrix} \quad (5-7-31)$$

ただし、

$$\mathbf{H}_{T,INS}(k) \equiv \begin{bmatrix} a_1(k) & b_1(k) & & c_1(k) & \\ a_2(k) & b_2(k) & & c_2(k) & \\ \vdots & \vdots & \mathbf{0}_{(m-1) \times 4} & \vdots & \mathbf{0}_{(m-1) \times 9} \\ a_{m-1}(k) & b_{m-1}(k) & & c_{m-1}(k) & \end{bmatrix} \quad (5-7-32)$$

である。

以上より、Tightly 方式の場合は式(5-7-4)、(5-7-31)に拡張カルマンフィルタ等を適用することで INS の誤差を推定し、複合航法を行うことが可能である。

(iv) ドップラ観測量

ここでは、Tightly 方式の複合航法システムにおいてドップラ情報を活用する場合のシステムモデルについて述べる。

衛星と受信機間に相対的な動きがある場合、受信機で観測される電波の周波数はドップラ効果によって変化する。したがって、衛星から送信される搬送波の周波数を f_T 、衛星・受信機間の距離を r 、電波の伝搬速度を v_s とすると、受信機で受信される周波数 f_R は

$$f_R = f_T \left(\frac{v_s - \dot{r}}{v_s} \right) = f_T \left(1 - \frac{\dot{r}}{v_s} \right) \quad (5-7-33)$$

となる。ゆえに送信周波数と受信周波数の差は次のように表される。

$$f_T - f_R = \frac{f_T}{v_s} \dot{r} = \frac{\dot{r}}{\lambda} \quad (5-7-34)$$

一般に受信機では離散的に観測が行われるため、サンプリング区間での距離変化、すなわち平均のドップラシフト量が観測される。実際には、受信機、衛星時計誤差、電離層、対流圏の影響等々加わる。したがって、ドップラ観測量の観測モデルは、式(5-7-35)に示すような擬似距離観測モデルを時間微分して求めるのが合理的である。

$$\rho_u^p(t) = r_u^p(t, t - \tau_u^p) + \delta I_u^p(t) + \delta T_u^p(t) + c \left[\delta t_u(t) - \delta t^p(t - \tau_u^p) \right] + e_u^p(t) \quad (5-7-35)$$

ただし $r_u^p \equiv \sqrt{(x_u - x^p)^2 + (y_u - y^p)^2 + (z_u - z^p)^2}$ 、 δI_u^p : 電離層屈折効果、 δT_u^p : 対流圏屈折効果、 δt_u : 受信機時計誤差、 δt^p : 衛星時計誤差、 e_u^p : 雑音、 τ_u^p : 衛星 p から受信機 u への電波伝搬時間である。上式を微分して D とおくと、ドップラ観測モデルは次のようになる。

$$\begin{aligned} D_u^p &= \dot{r}_u^p + \delta \dot{I}_u^p + \delta \dot{T}_u^p + c[\delta i_u - \delta i^p] + \dot{e}_u^p \\ &= \dot{r}_u^p + c\delta t_u + \varepsilon_u^p \end{aligned} \quad (5-7-36)$$

ただし

$$\varepsilon_u^p \equiv \delta \dot{I}_u^p + \delta \dot{T}_u^p - c\delta i^p + \dot{e}_u^p \quad (5-7-37)$$

である。ここで、 \dot{r}_u^p について考える。

$$\dot{r}_u^p = \left(\frac{\partial r_u^p}{\partial x_u} \dot{x}_u + \frac{\partial r_u^p}{\partial x^p} \dot{x}^p \right) + \left(\frac{\partial r_u^p}{\partial y_u} \dot{y}_u + \frac{\partial r_u^p}{\partial y^p} \dot{y}^p \right) + \left(\frac{\partial r_u^p}{\partial z_u} \dot{z}_u + \frac{\partial r_u^p}{\partial z^p} \dot{z}^p \right) \quad (5-7-38)$$

であるが、

$$\frac{\partial r_u^p}{\partial x_u} = \frac{(x_u - x^p)}{r_u^p}, \quad \frac{\partial r_u^p}{\partial y_u} = \frac{(y_u - y^p)}{r_u^p}, \quad \frac{\partial r_u^p}{\partial z_u} = \frac{(z_u - z^p)}{r_u^p} \quad (5-7-39)$$

$$\frac{\partial r_u^p}{\partial x^p} = -\frac{(x_u - x^p)}{r_u^p}, \quad \frac{\partial r_u^p}{\partial y^p} = -\frac{(y_u - y^p)}{r_u^p}, \quad \frac{\partial r_u^p}{\partial z^p} = -\frac{(z_u - z^p)}{r_u^p} \quad (5-7-40)$$

すなわち

$$\frac{\partial r_u^p}{\partial u} = -\frac{\partial r_u^p}{\partial s^p} \quad (5-7-41)$$

ただし

$$u \equiv [x_u, y_u, z_u]^T, \quad s^p \equiv [x^p, y^p, z^p]^T \quad (5-7-42)$$

なる関係がある。したがって

$$g_u^p \equiv \left[\frac{\partial r_u^p}{\partial u} \right]^T = -\left[\frac{\partial r_u^p}{\partial s^p} \right]^T = \left[\frac{\partial r_u^p}{\partial x_u} \quad \frac{\partial r_u^p}{\partial y_u} \quad \frac{\partial r_u^p}{\partial z_u} \right] \quad (5-7-43)$$

$$v_u \equiv [\dot{x}_u, \dot{y}_u, \dot{z}_u]^T, \quad v^{s^p} \equiv [\dot{x}^p, \dot{y}^p, \dot{z}^p]^T \quad (5-7-44)$$

と定義すると、式(5-7-36)-(5-7-44)よりドップラ観測式は

$$D_u^p = g_u^p \left(v_u - v^{s^p} \right) + c\delta i_u + \varepsilon_u^p \quad (5-7-45)$$

となる。

(v) ドップラ情報活用時の状態方程式および観測方程式

衛星の速度 v^{s^p} は航法メッセージより既知であるので、式(5-7-45)における未知数は、受信機時計誤差の変化率 $c\delta i_u$ である。受信機時計の精度は、使用する受信機に依存するが、ここでは一般的に離散時間系において

$$c\delta t_u(k+1) = F_D c\delta t_u(k) + q_D(k) \quad (5-7-46)$$

とモデル化できるものと仮定する。ただし F_D は既知の係数、 u_D は正規性白色雑音とする。

したがって、Tightly 方式でのドップラ情報活用時における状態ベクトル、および状態方程式は次のようになる。

$$\mathbf{x}_{TD} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{x}_L^T & \mathbf{N}_{L1}^T & c\delta t_u \end{bmatrix}^T \quad (5-7-47)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_L(k+1) \\ \mathbf{N}_{L1}(k+1) \\ c\delta t_u(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\mathbf{x}_L(k), k) \\ F_{N_{L1}} \mathbf{N}_{L1}(k) \\ F_D c\delta t_u(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{q}_L(k) \\ \mathbf{q}_{N_{L1}}(k) \\ q_D(k) \end{bmatrix} \quad (5-7-48)$$

一方、式(5-7-45)に示した速度は、基本的に WGS-84 座標系に基づいたものであるため、観測方程式を記述する際は式(5-7-22)で行ったような座標変換を行う必要がある。前述のように、C 座標系における INS 速度、および INS 速度誤差の間には

$$\mathbf{v}_c^i = \mathbf{v}_c + \delta \mathbf{v}_c^i \quad (5-7-49)$$

ただし

$$\mathbf{v}_c^i \equiv \begin{bmatrix} v_{c,x}^i \\ v_{c,y}^i \\ v_{c,z}^i \end{bmatrix}, \quad \delta \mathbf{v}_c^i \equiv \begin{bmatrix} \delta v_{c,x} \\ \delta v_{c,y} \\ \delta v_{c,z} \end{bmatrix} \quad (5-7-50)$$

なる関係がある。また、座標変換行列 T_C^L 、 T_L^E を用いると

$$\mathbf{v}_u = T_L^E T_C^L \mathbf{v}_c \quad (5-7-51)$$

と表すことができ、式(5-7-45)、(5-7-50)および式(5-7-51)より

$$\begin{aligned} \tilde{D}_u^p &\equiv D_u^p + g_u^p v^{s^p} - g_u^p T_L^E T_C^L \mathbf{v}_c^i \\ &= -g_u^p T_L^E T_C^L \delta \mathbf{v}_c^i + c\delta i_u + \varepsilon_u^p \\ &= \begin{bmatrix} -g_u^p T_L^E T_C^L & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{v}_c^i \\ c\delta i_u \end{bmatrix} + \varepsilon_u^p \end{aligned} \quad (5-7-52)$$

となる。したがって受信衛星数を m とし、

$$\mathbf{y}_D \equiv \begin{bmatrix} \tilde{D}_u^1 & \cdots & \tilde{D}_u^m \end{bmatrix}^T \quad (5-7-53)$$

とすると、Tightly 方式においてドップラ情報を利用する場合の観測方程式は、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_{ca}(k) \\ \mathbf{y}_{L1}(k) \\ \mathbf{y}_D(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{T,INS} & \mathbf{0}_{(m-1) \times (m-1)} & \mathbf{0}_{m \times 1} \\ \mathbf{H}_{T,INS} & \mathbf{I}_{(m-1) \times (m-1)} & \mathbf{0}_{m \times 1} \\ \mathbf{H}_{D,INS} & \mathbf{0}_{(m-1) \times (m-1)} & \mathbf{1}_{m \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_L(k) \\ \mathbf{N}_{L1}(k) \\ c\delta t_u(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{ca}(k) \\ \mathbf{n}_{L1}(k) \\ \mathbf{n}_D(k) \end{bmatrix} \quad (5-7-54)$$

ただし

$$H_{D,INS}(k) \equiv \begin{bmatrix} 0 & 0 & h_d^{x,1} & h_d^{y,1} & 0 & 0 & 0 & h_d^{z,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & h_d^{x,m} & h_d^{y,m} & 0 & 0 & 0 & h_d^{z,m} \end{bmatrix} \quad (5-7-55)$$

$$\begin{bmatrix} h_d^{x,p} & h_d^{y,p} & h_d^{z,p} \end{bmatrix} \equiv -g_u^p T_L^E T_C^L \quad (p=1,2,\dots,m) \quad (5-7-56)$$

$$\mathbf{n}_D \equiv \begin{bmatrix} \varepsilon_u^1 & \cdots & \varepsilon_u^m \end{bmatrix} \quad (5-7-57)$$

である。

5-8 フィルタ変数の引継ぎ(切換え方式)

慣性航法複合演算において、高精度な測位を行うために 5-6 節と 5-7 節で説明した複合方式の効率的な切換えの方法を説明する。

(1) 機能

Loosely coupled 方式と Tightly coupled 方式のフィルタ変数の引継ぎを行う。

(2) アルゴリズム

運用時の GPS 利用状況によって、Loosely coupled 方式と Tightly coupled 方式を適宜切換えて使用することによって、より効果的な複合航法を行う。すなわち、

アンビギュイティが決定している場合：RTK-GPS 方式により高精度な GPS 測位結果（位置・速度）が利用可能である。

アンビギュイティが決定していない場合：RTK-GPS 方式では十分な精度の測位結果が得られないが、GPS 観測量（擬似距離、搬送波位相、ドップラ等）は利用可能である。

GPS 衛星が利用できない場合：GPS が全く利用できない。

の 3 つの状況に応じて、表 5-8-1 に示すような複合航法方式を適用することとする。

表 5-8-1 GPS 利用状況と、複合航法方式

RTK-GPS 利用状況	RTK-GPS 測位の可否	複合航法方式
アンビギュイティ決定	○	Loosely coupled 方式
アンビギュイティ未決定	×	Tightly coupled 方式
使用不可	×	慣性航法演算

複合航法方式の切換え時においては、システムモデルの変更が必要となるため、拡張カルマンフィルタ等の初期値を設定する必要がある。以下にその詳細を示す。

(i) Loosely coupled 方式→Tightly 方式の切換え

Loosely coupled 方式から Tightly coupled 方式への切換え時には、整数値バイアス N_{L1} 、 N_{L2} および受信機時計誤差 $c\delta t_u$ の初期値が必要となる。例えば、時刻 j で切換えが行われるとすると、時刻 $j-1$ までの航法結果を有効に活用して初期値を設定するために、以下のように $\hat{N}_{L1}(j|j-1)$ 、 $\hat{N}_{L2}(j|j-1)$ を設定できる。

$$\hat{N}_{L1}(j|j-1) = \mathbf{y}_{L1}(j) - \tilde{H}(j)(-\hat{\delta}\mathbf{r}_i(j|j-1)) \quad (5-8-1)$$

$$\hat{N}_{L2}(j|j-1) = \mathbf{y}_{L2}(j) - \tilde{H}(j)(-\hat{\delta}\mathbf{r}_i(j|j-1)) \quad (5-8-2)$$

また、 $c\delta t_u$ に関しては事前情報がないため、以下のように設定する。

$$c\hat{\delta}t_u(j|j-1) = 0 \quad (5-8-3)$$

(ii) Tightly coupled 方式→Loosely coupled 方式の切換え

Tightly coupled 方式から Loosely coupled 方式への切換え時には、整数値バイアス N_{L1} 、 N_{L2} および受信機時計誤差 $c\delta t_u$ が状態変数から削除される。したがって新たに初期値等を求める必要はなく、時刻 j で切換えが行われるとすると、時刻 $j-1$ での予測推定値を初期値として使用することができる。

5-9 拡張カルマンフィルタ

慣性航法演算処理における拡張カルマンフィルタの演算内容を説明する。

(1) 機能

拡張カルマンフィルタを用いて INS の航法誤差を推定する。

(2) アルゴリズム

拡張カルマンフィルタはシステムモデルに含まれる非線形関数を、テーラー展開による線形化によって近似し、カルマンフィルタのアルゴリズムを適用するものである。拡張カルマンフィルタアルゴリズムを以下に示す。

フィルタ方程式

$$\hat{x}_{k+1|k} = f(\hat{x}_{k|k}, k) \quad (5-9-1)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \left[y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1} \right] \quad (5-9-2)$$

カルマンゲイン

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T \left[H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \right]^{-1} \quad (5-9-3)$$

推定誤差共分散行列

$$P_{k+1|k} = \hat{F}_k P_{k|k} \hat{F}_k^T + Q_k \quad (5-9-4)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k H_k P_{k|k-1} \quad (5-9-5)$$

ただし、 $\hat{F}(k)$ は次式とする。

$$\hat{F}_k = \left(\frac{\partial f_k}{\partial x_k} \right)_{x_k = \hat{x}_{k|k}} \quad (5-9-6)$$

初期値

$$\hat{x}_{0|-1} = \hat{x}_0 \quad (5-9-7)$$

$$P_{0|-1} \equiv \Pi \quad (5-9-8)$$

$$= \text{diag} \{ \Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{16} \}$$

以上のアルゴリズムより得られる状態推定値を INS の演算の各ステップにおいて補正することで、慣性航法複合演算を実現する。

参考 ソフトウェアの構築例

目次

I ソフトウェアの構成	88
I-I 機能.....	88
I-II データインターフェース	94
I-III 関数仕様	108
II 画面仕様	111
II-I 画面遷移.....	111
II-II 画面詳細仕様	112
III プログラム実行環境	127
III-I フォルダ構成	127
IV ファイル仕様	131
IV-I ファイル一覧.....	131
IV-II ファイル詳細仕様	134
V 入力データ	166
V-I IMU センサデータ仕様.....	166
V-II 基準局 GPS データ仕様	167
V-III 移動局 GPS データ仕様.....	168
VI 出力データ	172
VII 処理仕様	175
VII-I 測位演算処理.....	175
VII-II IMU センサデータ取込処理.....	175
VII-III 受信データ同期処理	176
VII-IV 演算結果ファイル作成処理.....	178
VIII モジュール構成	179
VIII-I リアルモード実行時.....	181
VIII-II 後処理モード実行時	186
IX 詳細処理	191
IX-I IMU スレッド.....	191

IX-II 基準局 GPS スレッド.....	193
IX-III 移動局 GPS スレッド.....	194
IX-IV 画面表示メイン.....	198

I ソフトウェアの構成

I-I 機能

本ソフトウェアは IMU センサ、基準局 GPS 受信機、移動局 GPS 受信機からシリアル通信により観測データを受信し、リアルタイムに測位演算処理を行い、演算結果の画面表示およびファイル出力を行う。

測位演算処理を行う処理方式は“RTK-GPS 演算方式”、“複合航法演算方式”の2種類とし、演算に必要な各種パラメータを初期設定ファイルとして設定することが可能である。また、IMU センサ、基準局 GPS 受信機、移動局 GPS 受信機から受信した観測データはファイルに格納し、後処理モードとしてこのファイルから観測データを読み込み、測位演算処理を行い、演算結果の画面表示およびファイル出力を行うことが可能である。

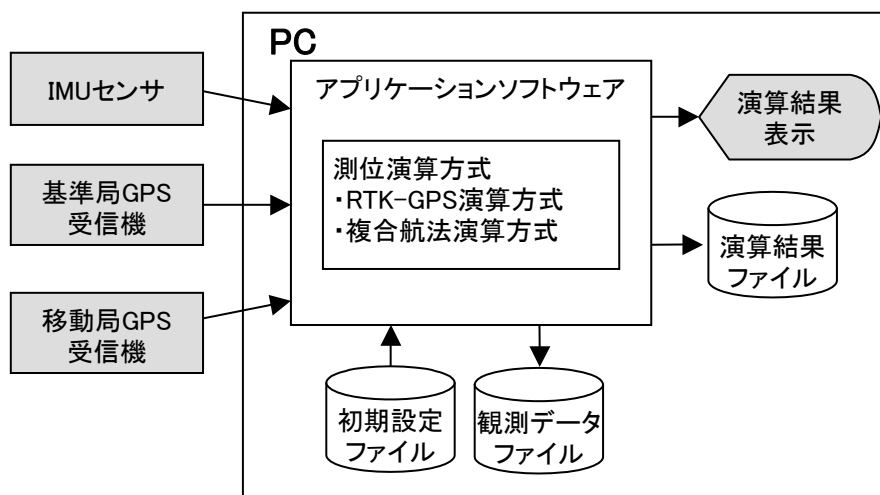


図 I-I-1 ソフトウェアの全体構成（リアルタイム処理時）

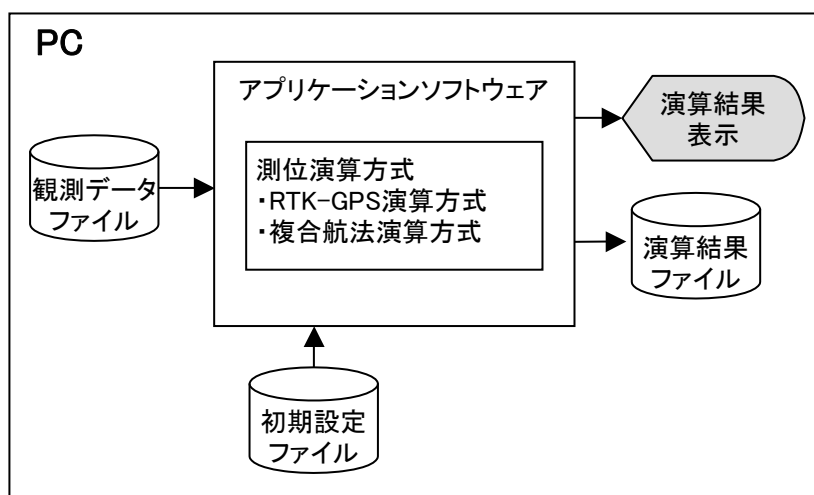


図 I-I-2 ソフトウェアの全体構成（後処理時）

本ソフトウェアの機能は図 I-I-3 に示す処理機能を持つ。

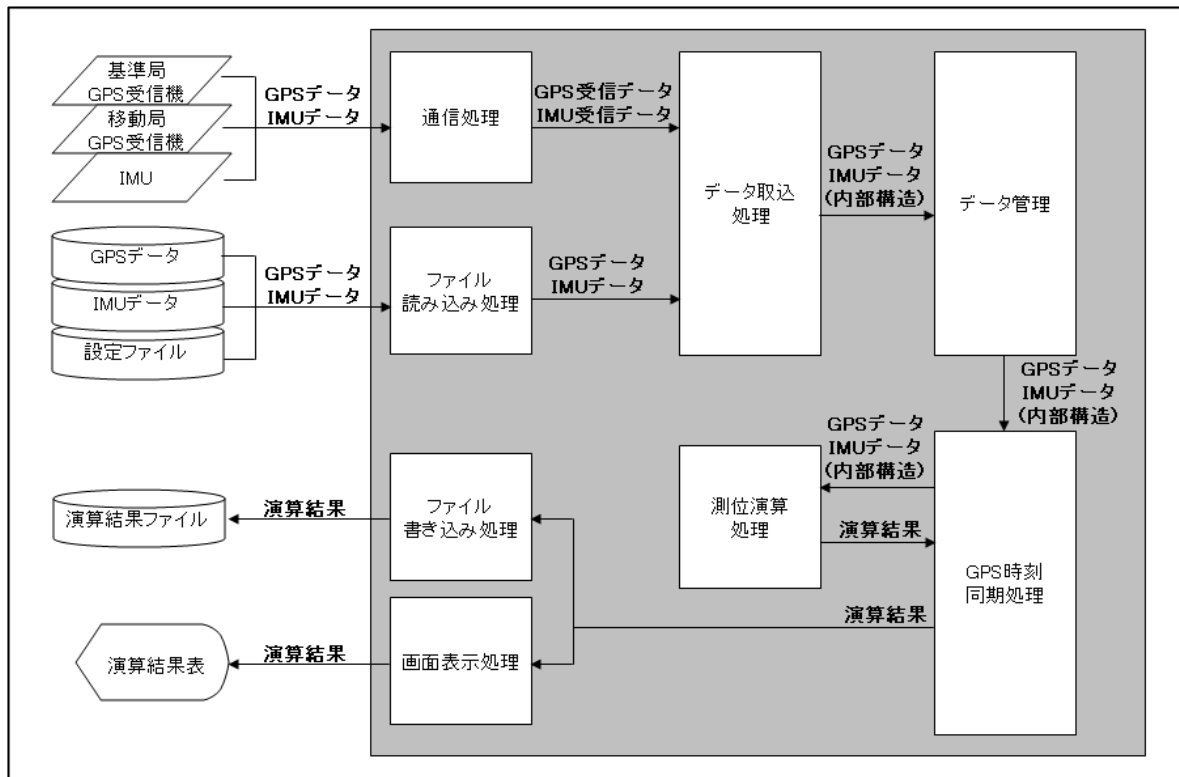


図 I-I-3 ソフトウェア機能の構成図

図 I-I-3 における各処理の機能とその処理内容を表 I-I-1 に示す。

表 I-I-1 ソフトウェア処理一覧

No.	処理	仕様
1	通信処理	<p>以下の機能を持つ</p> <p>①IMU センサ通信機能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ IMU センサとのシリアル通信の制御を行う機能 ・ 通信ポートのオープン・クローズ、通信パラメータの設定、データの送信・受信を行う。 ・ データを受信した場合、直ちに IMU センサデータ変換機能に受信データを受け渡す。 <p>②基準局 GPS 受信機通信機能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 基準局 GPS 受信機とのシリアル通信の制御を行う機能 ・ 通信ポートのオープン・クローズ、通信パラメータの設定、データの送信・受信を行う。

No.	処理	仕様
		<ul style="list-style-type: none"> ・データを受信した場合、直ちに基準局 GPS データ変換機能に受信データを受け渡す。 <p>③移動局 GPS 受信機通信機能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・移動局 GPS 受信機とのシリアル通信の制御を行う機能 ・通信ポートのオープン・クローズ、通信パラメータの設定、データの送信・受信、データ種別(GPS データ、エフェメリスデータ、アルマナックデータ)の判定を行う。 ・データを受信した場合データ種別の判定を行い、種別により移動局 GPS データ変換機能、エフェメリスデータ変換機能、アルマナックデータ変換機能に受信データを受け渡す。
2	データ取込処理	<p>以下の機能を持つ</p> <p>①IMU センサデータ取込機能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・IMU センサ受信データを解析し内部処理可能なデータ構造に変換する機能 ・IMU センサ通信機能から受け渡された受信データの変換を行い IMU センサデータ管理機能に受け渡す。 <p>②基準局 GPS データ取込機能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・基準局 GPS データを解析し内部処理可能なデータ構造に変換する機能 ・基準局 GPS 受信機通信機能から受け渡された受信データの変換を行い基準局 GPS データ管理機能に受け渡す。 <p>③移動局 GPS データ取込機能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・移動局 GPS データ、エフェメリスデータ、アルマナックデータを解析し内部処理可能なデータ構造に変換する機能 ・移動局 GPS 受信機通信機能から受け渡された移動局 GPS データの変換を行い移動局 GPS データ管理機能に受け渡す。 ・移動局 GPS 受信機通信機能から受け渡されたエフェメリスデータの変換を行いエフェメリスデータ管理機能に受け渡す。 ・移動局 GPS 受信機通信機能から受け渡されたアルマナックデータの変換を行いアルマナックデータ管理機能に受け渡す。
3	データ管理処理	<p>以下の機能を持つ。</p> <p>①IMU センサデータ管理機能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・IMU センサデータの一元管理を行う機能 ・リングバッファメモリ領域の確保・開放、データの登録・取得、アクセスの排他制御を行う。 ・IMU センサデータ変換機能から受け渡された IMU センサデータをリングバッファに登録する。

No.	処理	仕様
		<ul style="list-style-type: none"> ・時刻同期機能からの要求により IMU センサデータをリングバッファから取得し受け渡す。 ②基準局 GPS データ管理機能 <ul style="list-style-type: none"> ・基準局 GPS データの一元管理を行う機能 ・リングバッファメモリ領域の確保・開放、データの登録・取得、アクセスの排他制御を行う。 ・基準局 GPS データ変換機能から受け渡された基準局 GPS データをリングバッファに登録する。 ・時刻同期機能からの要求により基準局 GPS データをリングバッファから取得し受け渡す。 ③移動局 GPS データ管理機能 <ul style="list-style-type: none"> ・移動局 GPS データの一元管理を行う機能 ・リングバッファメモリ領域の確保・開放、データの登録・取得、アクセスの排他制御を行う。 ・移動局 GPS データ変換機能から受け渡された移動局 GPS データをリングバッファに登録する。 ・時刻同期機能からの要求により移動局 GPS データをリングバッファから取得し受け渡す。 ④エフェメリスデータ管理機能 <ul style="list-style-type: none"> ・エフェメリスデータの一元管理を行う機能 ・データ格納テーブルのメモリ領域の確保・開放、データの登録・取得、アクセスの排他制御を行う。 ・エフェメリスデータ変換機能から受け渡されたエフェメリスデータをデータ格納テーブルに登録する。 ・時刻同期機能からの要求によりエフェメリスデータをデータ格納テーブルから取得し受け渡す。 ⑤アルマナックデータ管理機能 <ul style="list-style-type: none"> ・アルマナックデータの一元管理を行う機能 ・データ格納テーブルのメモリ領域の確保・開放、データの登録・取得、アクセスの排他制御を行う。 ・アルマナックデータ変換機能から受け渡されたアルマナックデータをデータ格納テーブルに登録する。 ・時刻同期機能からの要求によりアルマナックデータをデータ格納テーブルから取得し受け渡す。
4	ファイル読み込み処理	各種ファイルからのデータ読み込みを行う機能を持つ 対象ファイルは以下

No.	処理	仕様
		①測位演算初期設定ファイル ②プロジェクト定義ファイル ③リアルタイム処理用初期設定ファイル ④RTK-GPS 初期設定ファイル ⑤複合航法初期設定ファイル ⑥RINEX Navigation ファイル ⑦基地局 GPS 観測データファイル ⑧移動局 GPS 観測データファイル ⑨IMU センサデータファイル
5	ファイル書き込み 処理	各種ファイルへのデータ書き込みを行う機能を持つ。 対象ファイルは以下 ①測位演算プログラム処理エラーログファイル ②RINEX Navigation ファイル ③基地局 GPS 観測データファイル ④移動局 GPS 観測データファイル ⑤IMU センサデータファイル ⑥リアルモード 測位演算結果ファイル ⑦基地局 GPS データ受信時刻記録ファイル ⑧移動局 GPS データ受信時刻記録ファイル ⑨後処理モード 測位演算結果ファイル ⑩後処理モード RTK-GPS 初期設定ファイル ⑪後処理モード 複合航法初期設定ファイル
6	GPS 時刻同期処理	<ul style="list-style-type: none"> IMU センサデータ、基準局 GPS データ、移動局 GPS データの GPS 時刻のチェックを行い、一致している場合は測位演算機能を起動する機能を持つ。 IMU センサデータ管理機能、基準局 GPS データ管理機能、移動局 GPS データ管理機能から各データを受け取り GPS 時刻の同期チェックを行う。同期している場合はさらにエフェメリスデータ管理機能、アルマナックデータ管理機能からそれぞれのデータを受け取り、IMU センサデータ、基準局 GPS データ、移動局 GPS データと合わせて測位演算機能に受け渡す。 測位演算機能から演算結果データを受け取り、画面表示機能、ファイル書き込み機能に受け渡す。
7	測位演算処理	<ul style="list-style-type: none"> IMU センサデータ、基準局 GPS データ、移動局 GPS データ、エフェメリスデータ、アルマナックデータを用いて測位演算を行う機能を持つ。 上記データから指定された測位演算方式(RTK-GPS 演算方式、複合航法演算方式)により移動局の現在位置、速度、姿勢を演算し、演算結果を時刻同期機能に受け渡す。

No.	処理	仕様
8	画面表示処理	<p>測位演算の結果を画面に表示する機能を持つ。</p> <p>時刻同期機能から受け渡された測位演算結果を元に、画面に以下の情報を表示する。</p> <p>①軌跡</p> <p>②測位結果 GPS 時刻、アンビギュイティ決定状況、マルチパス検出状況、サイクルスリップ検出状況、基線長、捕捉衛星数、移動局位置(ENU)、移動局速度(ENU)、移動局姿勢(方位、ロール、ピッチ)</p> <p>③DOP(GDOP、PDOP、HDOP、VDOP)</p> <p>④衛星配置</p>

I-II データインターフェース

測位演算処理が使用するデータを以下に示す。

(1) INI_DAT : 初期化データ

No.	名称	内容
1	.rov_ini_llh	原点座標(移動体の出発地点)緯度,経度,高度初期値 [rad,rad,m]
2	.base_llh	基準局座標緯度,経度,高度初期値[rad,rad,m]
3	.base_line	基線長[m]
4	.angle(1)	初期ロール角[rad]
5	.angle(2)	初期ピッチ角[rad]
6	.angle(3)	初期方位角[rad]
7	.Hz(1)	GPS データ送信周期[Hz]
8	.Hz(2)	IMU データ送信周期[Hz]
9	.Mask	仰角マスク角度[deg]

(2) PROJECT_PARA:シミュレーション条件

No.	名称	内容
1	.select(1)	準天頂衛星の有無(1:有,2:無)の選択値
2	.select(2)	シミュレーション地点(1:浦幌,2:第2東名)の選択値
3	.select(3)	電波遮蔽状況(段数:0,1,2,3,4,5)の段数値
4	.select(4)	建機種別(1:転圧ローラ、2:油圧ショベル)の選択値
5	.select(5)	使用測位技術(1:RTK-GPS、2:慣性航法複合技術、3:従来技術)の選択値
6	.scale	非リアルタイム処理時の位置誤差の各スケール値(cm)
7	.area(1)	リアルタイム処理時の軌跡画面の表示エリア値(始点 x:ENU 座標系)
8	.area(2)	リアルタイム処理時の軌跡画面の表示エリア値(始点 y:ENU 座標系)
9	.area(3)	リアルタイム処理時の軌跡画面の表示エリア値(終点 x:ENU 座標系)
10	.area(4)	リアルタイム処理時の軌跡画面の表示エリア値(終点 y:ENU 座標系)

(3) CKP_INI : キネマティック測位の初期値の構造体

No.	名称	内容
1	.prn_omit[]	測位処理に使用しない衛星番号
2	.s_time	測位開始時間 (使用しない)
3	.e_time	測位終了時間 (使用しない)
4	.std_dev_R	搬送波位相の観測誤差の標準偏差
5	.std_dev_R_pr	擬似距離の観測誤差の標準偏差
6	.std_dev_R_ion	電離層遅延誤差の標準偏差
7	.std_dev_R_trop	対流圏遅延誤差の標準偏差
8	.std_dev_Pp	位置の初期標準偏差
9	.std_dev_Pv	速度の初期標準偏差
10	.std_dev_Pa	加速度の初期標準偏差
11	.std_dev_Pj	躍度の初期標準偏差
12	.std_dev_Pn	整数値バイアスの初期標準偏差
13	.std_dev_Pion	電離層遅延の初期標準偏差
14	.std_dev_Ptrop	対流圏遅延の初期標準偏差
15	.std_dev_j	躍度のシステム雑音の標準偏差
16	.std_dev_a	加速度のシステム雑音の標準偏差
17	.std_dev_v	速度のシステム雑音の標準偏差
18	.std_dev_x	位置のシステム雑音の標準偏差
19	.std_dev_ion	電離層遅延のシステム雑音の標準偏差
20	.std_dev_trop	対流圏遅延のシステム雑音の標準偏差
21	.alpha_m	時定数の逆数
22	.Xk[]	基地局の位置
23	.org_xyz[]	ローカル座標系の原点
24	.flag_trop_data	対流圏
25	.height_h	相対湿度 HR の観測地点の高さ
26	.height_t	気温の観測地点の高さ
27	.height_p	気圧の観測地点の高さ
28	.humid_trop	相対湿度 HR (%)
29	.tempe_trop	気温 (°C)
30	.press_trop	気圧 (hPa)
31	.index_dyn_model	フィルタモデル (1 : 静的モデル、2 : 速度モデル、3 : 加速度モデル、4 : 躍度モデル)

No.	名称	内容
32	.index_search_ini_pos	初期位置探索手法(ワンエポック目)(1:なし, 2:あり)
33	.index_search_ini_pos_after	初期位置探索手法(数エポック後)(1:なし, 2:あり)
34	.index_ion_model	電離層遅延モデル (1:なし, 2:Klobuchar モデル, 3:二周波搬送波位相モデル)
35	.index_trop_model	対流圏遅延モデル(1:なし, 2:衛星仰角モデル, 3:Saastamoinen モデル, 4:Hopfield モデル)
36	.index_delay_est	電離層・対流圏遅延推定手法(1:補正, 2:推定, 3:推定及び観測)
37	.index_pr_obs	擬似距離の観測(1:なし, 2:あり)
38	.index_height_fix	高さ固定測位(1:なし, 2:あり)
39	.index_select_sat	衛星選択手法 (1:仰角設定, 2:衛星仰角, 3:重み付け DOP, 4:DOP)
40	.index_set_value_at_sat_rise	衛星増加時の変数設定方法, 1:変数引継ぎ, 2:変数初期化
41	.index_set_value_at_cycleslip	サイクルスリップ検出の変数設定方法, 1:変数引継ぎ, 2:変数初期化
42	.index_amb_test_condition	アンビギュイティ検定の実施条件, 1:毎エポック, 2:整数値バイアスの未決定時
43	.CN0_mp_loss	マルチパスによる電波強度 C/N0 の減衰量
44	.threshold_ele	衛星仰角閾値 (°)
45	.selected_sat_num	選択される衛星数
46	.range_hor	初期位置探索(東西南北方向の探索範囲)
47	.range_ud	初期位置探索における上下方向の探索範囲
48	.search_interval	初期位置探索における探索間隔
49	.threshold_num_search_ini	初期位置探索を判定する採択数の閾値
50	.threshold_times_search_ini	初期位置探索を判定する倍数の閾値
51	.time_search_ini_pos	初期位置探索の開始時間
52	.ratio_threshold	アンビギュイティ検定における残差二乗和の比の閾値
53	.max_ini_time	初期化の最大時間
54	.cs_hazard_rate	サイクルスリップ検出における危険率
55	.time_cs_detect	サイクルスリップ検出開始時間
56	.cs_time	サイクルスリップ発生の時間

No.	名称	内容
57	.cs_value	サイクルスリップ量
58	.cs_sat_L[2]	サイクルスリップ発生観測データ（衛星番号, 搬送波）
59	.num_sat_min	初期位置探索を行う最少衛星数
60	.HDOP_search_ini	初期位置探索を行う HDOP
61	.VDOP_search_ini	初期位置探索を行う VDOP
62	.threshold_num2_search_ini	初期位置探索を判定する一つのアンビギュイティの採択数
63	.period_reset_para	未決定時における初期化周期
64	.flag_2nd_cycleslip	2エポック連続に発生するサイクルスリップの対応フラグ（1:対応,1以外:対応しない）
65	.index_points_search_ini	初期位置探索手法の探索点インデックス（1：26点, 2：12点, 3：14点）
66	.index_amb_resolution_at_sat_rise	衛星増加時のアンビギュイティ決定の有無(1:未決定, 2：決定)
67	.num_satisfied_until_fix	アンビギュイティ決定までの閾値以下となる連続回数

(4) GPS_PARA : GPS のパラメータ構造体

No.	名称	内容
1	.v_light	光速(m/s)
2	.f1	L1 搬送波周波数(Hz)
3	.f2	L2 搬送波周波数(Hz)
4	.Lambda_L1	L1 波長(m)
5	.Lambda_L2	L2 波長(m)

(5) INS_GPS_PARA : 慣性航法複合処理のパラメータ構造体

No.	名称	内容
1	.base_enu	基準局座標 ENU[m, m, m]
2	.gps_interval	GPS 周期 1(HZ)
3	.ins_interval	INS 周期 50(Hz)
4	.DELTA_TIME2	GPS 周期 1(s)
5	.DELTA_TIME	INS 周期 1/50(s)
6	.PAID	円周率

No.	名称	内容
7	.EARTH_RATE_E	地球自転角速度
8	.G_para.Gn	重力パラメータ
9	.G_para.G0	重力パラメータ
10	.G_para.Gl1	重力パラメータ
11	.G_para.Gl2	重力パラメータ
12	.G_para.Gh1	重力パラメータ
13	.G_para.Gh2	重力パラメータ
14	.G_para.Gh3	重力パラメータ
15	.G_para.GGG	重力パラメータ
16	.EARRAD0	地球の長半径
17	.EAREPS	離心率の平方数
18	.MFEETSF	メートル→フィート変換 S F
19	.base_line	基線長
20	.rov_ini_llh	原点座標（移動体の出発地点）[rad, rad, m]
21	.rov_ini_xyz	原点座標 WGS-84（移動体の出発地点）[m, m, m]
22	.base_llh	基準局座標[rad, rad, m]
23	.base_xyz	基準局座標 WGS-84[m, m, m]
24	.offset	位置オフセットパラメータ [m,m,m]

(6) PROJECT : プロジェクトのパラメータ構造体

No.	名称	内容
1	.qzs_flg	準天頂衛星の有無(1:有, 2:無)
2	.point_flg	シミュレーション地点(1 浦幌, 2 第2 東名)
3	.dan_flg	電波遮蔽状況 (段数)
4	.kenki_flg	建機種別 (1:転圧ローラ, 2:油圧ショベル)
5	.nav_flg	使用測位技術 (1:RTK-GPS, 2:慣性航法複合技術)
6	.area	リアルタイム処理時の軌跡画面の表示エリア (始点 x, y 終点 x, y:ENU 座標系)

(7) INS_GPS_FLG : 初期データの構造体

No.	名称	内容
1	.filter_change	複合方式切換えフラグ (1:Loosely, 2:Tightly)
2	.inat_stat	INS 初期化フラグ (1:INS 初期設定, 2:演算処理)
3	.ini_flg	アンビギュイティ初期化フラグ (前エポックの状態)

No.	名称	内容
4	.ini_time	アンビギュイティ初期化時間計測
5	.filter_ini	INS 初期化フラグ

(8) IMU_DATA : 入力 IMU センサデータの構造体

No.	名称	内容
1	.ymd	日付
2	.time	GPS time
3	.Del_Vel	加速度 3 軸 XYZ[ft/△t ²]
4	.Del_Ang	角速度 3 軸 XYZ[rad/△t]

(9) INS_GPS_INI : 慣性航法複合処理のパラメータ構造体

No.	名称	内容
1	.cmd_data	処理モード(1:純慣性, 2:Loosely, 3:Tightly, 4 切換え)
2	.external_flg	外部センサフラグ
3	.filter_f	フィルタ選択フラグ
4	.gps_offset_flg	GPS オフセットフラグ(1:オフセット処理, 2:なし)

(10) HYB_PARA : 複合航法フィルタのパラメータ構造体

No.	名称	内容
1	.bunsan	カルマンフィルタ初期共分散値
2	.kansoku_noize	カルマンフィルタ観測ノイズ分散値
3	.system_noize	カルマンフィルタシステムノイズ分散値
4	.Qk12	カルマンフィルタパラメータ
5	.Qk13	カルマンフィルタパラメータ
6	.Qk14	カルマンフィルタパラメータ
7	.Qk15	カルマンフィルタパラメータ
8	.Qk16	カルマンフィルタパラメータ
9	.Qk17	カルマンフィルタパラメータ

(11) CKP_para : RTK-GPS 測位のパラメータ構造体

No.	名称	内容
1	.common	衛星番号
2	.Kal_Xp	状態量
3	.Kal_Pp	推定誤差共分散行列

No.	名称	内容
4	.Q	システム雑音の共分散行列
5	.F	状態遷移行列
6	.R	観測雑音行列
7	.time_cycleslip	サイクルスリップ検出開始時間
8	.time_filter	サイクルスリップ評価時間
9	.flag_stop	測位処理の実地フラグ
10	.flag_fix	整数値バイアスの決定フラグ
11	.N	整数値バイアス
12	.lat	既知局の緯度
13	.lon	既知局の経度
14	.TT	地心座標系からローカル座標への変換行列
15	.N_pre	前エポックの整数値バイアス
16	.flag_1st_cs_detect	1回目のサイクルスリップ検出
17	.num_continuation_fix	アンビギュイティの演算結果が連続して同じ値を算出した回数
18	.flag_fix_at_sat_rise	衛星が増加した際のアンビギュイティ決定フラグ
19	.common_fix	アンビギュイティが決定した共通衛星番号
20	.N_fix_continuation	アンビギュイティが連続して決定した共通衛星番号
21	.cs_common_pre	前エポックでサイクルスリップ検出を行った共通衛星番号
22	.adr1_ref_pre	基準局の L1 帯搬送波位相積算値
23	.adr2_ref_pre	基準局の L2 帯搬送波位相積算値
24	.adr1_rov_pre	移動局の L1 帯搬送波位相積算値
25	.adr2_rov_pre	移動局の L2 帯搬送波位相積算値
26	.dp1_ref_pre	基準局の L1 帯ドップラ周波数
27	.dp2_ref_pre	基準局の L2 帯ドップラ周波数
28	.dp1_rov_pre	移動局の L1 帯ドップラ周波数
29	.dp2_rov_pre	移動局の L2 帯ドップラ周波数
30	.flag_adr_dp	サイクルスリップ検出を行った衛星番号

(12) CKP_out : RTK-GPS 測位結果のパラメータ構造体

No.	名称	内容
1	.epoch	時刻情報 (エポックの構造体)
2	.PRN	移動局と基準局における共通の衛星番号

No.	名称	内容
3	.data_rov	移動局の観測データと衛星位置（観測データと衛星位置の配列）
4	.data_ref	移動局の観測データと衛星位置（観測データと衛星位置の配列）
5	.flag_fix	整数値バイアスの決定フラグ
6	.N	整数値バイアス（決定時はフィックス解の位置，未決定時はフロート解の位置）
7	.velocity	推定速度
8	.position_enu	位置（決定時はフィックス解の位置，未決定時はフロート解の位置）
9	.PRN_pre	前エポックの共通衛星番号
10	.N_pre	前エポックの整数値バイアス
11	.dd1_ion	L1 帯の電離層遅延量
12	.dd2_ion	L2 帯の電離層遅延量
13	.dd_trop	対流圏遅延量

(13) HYB_KRM : カルマンフィルタ初期値の構造体

No.	名称	内容
1	.XK	濾波推定値
2	.Xk	一段予測値
3	.Paik	状態遷移行列
4	.Pk	推定誤差共分散行列
5	.Pkm0	推定誤差共分散行列
6	.Pkm	予測誤差共分散行列
7	.Rk	観測雑音の共分散行列
8	.Qk	システム雑音の共分散行列
9	.Zk	観測ベクトル
10	.Hk	観測行列
11	.Kk	カルマンゲイン
13	.gf_ini_f	ガウスサムフィルタの初期化フラグ
14	.P_weight	ガウスサムフィルタにおける共分散行列の比率
15	.dela	ガウスサムフィルタにおける方位角誤差の初期値
16	.bunpu_num	ガウスサムフィルタにおける分布の数
17	.weight_ini	ガウスサムフィルタにおける重みの初期値

No.	名称	内容
18	.gf_Paik	ガウスサムフィルタにおける状態遷移行列
19	.gf_Pkm	ガウスサムフィルタにおける予測誤差共分散行列
20	.gf_XK	ガウスサムフィルタにおける推定値
21	.weight_m	ガウスサムフィルタにおける重み

(14) INS_INFO : INS 出力情報の構造体

No.	名称	内容
1	.time	INS 時刻
2	.Pos_llh	1 × 3 の 2 次配列 (緯度値、経度値、高度値)
3	.Pos_llh_ini	1 × 3 の 2 次配列 (緯度値, 経度値, 高度初期値)
4	.Pos_enu	1 × 3 の 2 次配列 IMU 位置値 ENU
5	.Vel_C	1 × 3 の 2 次配列 速度値 (CX, CY, CZ 軸) NWU
6	.Vel_enu	1 × 3 の 2 次配列 ENU 座標系の速度値[m/s]
7	.Angular.Roll	角度情報 ロール角[rad]
8	.Angular.Pitch	角度情報ピッチ角[rad]
9	.Angular.Yaw	角度情報ヨー角[rad]
10	.Angular.Head	角度情報方位角[rad]
11	.Angular.Wander_Ang	角度情報ワンダーアングル[rad]
12	.Angular_ini.Roll	初期角度情報 初期ロール角
13	.Angular_ini.Pitch	初期角度情報初期ピッチ角
14	.Angular_ini.Head	初期角度情報初期方位角

(15) GPS_INFO : GPS 情報の構造体

No.	名称	内容
1	.time	GPS 時刻
2	.Pos_llh	1 × 3 の 2 次配列 (GPS 緯度値, GPS 経度値, GPS 高度値)
3	.Pos_enu	1 × 3 の 2 次配列 GPS 位置値 ENU[m,m,m]
4	.Pos_xyz	1 × 3 の 2 次配列 GPS 位置値 XYZ[m,m,m]
5	.Vel_enu	1 × 3 の 2 次配列 GPS 速度値 EWU[m/s,m/s,m/s]
6	.Vel_C	1 × 3 の 2 次配列 GPS 速度値 (CX, CY, CZ 軸) NWU
7	.offset_Pos_llh	1 × 3 の 2 次配列 出力で変換するため格納
8	.offset_Vel_enu_ft	1 × 3 の 2 次配列 出力で変換するため格納
9	.Vel_enu_ft	1 × 3 の 2 次配列 GPS 速度値 EWU[ft/s,ft/s,ft/s]

(16) SD_INFO : 慣性航法演算のパラメータ構造体

No.	名称	内容
1	.Quater_par	1 × 4 の 2 次配列 クォータニオンパラメータ 値 1.0
2	.Delta_Ang_x	補正後の角速度 (補正: 地球自転、相対角速度) (B 座標系)
3	.Delta_Ang_y	補正後の角速度 (補正: 地球自転、相対角速度) (B 座標系)
4	.Delta_Ang_z	補正後の角速度 (補正: 地球自転、相対角速度) (B 座標系)
5	.Delta_Ang_x1	補正後の角速度 (補正: 推定値) (B 座標系)
6	.Delta_Ang_y1	補正後の角速度 (補正: 推定値) (B 座標系)
7	.Delta_Ang_z1	補正後の角速度 (補正: 推定値) (B 座標系)
8	.Delta_Vel_bx1	補正後の角速度 (補正: 推定値) (B 座標系)
9	.Delta_Vel_by1	補正後の角速度 (補正: 推定値) (B 座標系)
10	.Delta_Vel_bz1	補正後の角速度 (補正: 推定値) (B 座標系)
11	.Delta_Vel_cx	補正後の角速度 (補正: 推定値) (C 座標系)
12	.Delta_Vel_cy	補正後の角速度 (補正: 推定値) (C 座標系)
13	.Delta_Vel_cz	補正後の角速度 (補正: 推定値) (C 座標系)
14	.B_Matrix	3 × 3 の 2 次配列 B マトリックス (初期値 単位行列値)
15	.BM_Matrix	3 × 3 の 2 次配列 B-1 マトリックス (初期値 単位行列値)
16	.C_Matrix	3 × 3 の 2 次配列 C マトリックス
17	.Rela_Rate_x	リラテブレード (X 軸)
18	.Rela_Rate_y	リラテブレード (Y 軸)
19	.Rela_Rate_z	リラテブレード (Z 軸)
20	.Ear_Rate_cx	自転角速度 (X 軸)
21	.Ear_Rate_cy	自転角速度 (Y 軸)
22	.Ear_Rate_cz	自転角速度 (Z 軸)
23	.Ear_Rad_x	地球半径 (X 軸) (暫定)
24	.Ear_Rad_y	地球半径 (Y 軸) (暫定)
25	.Grav_cx	地球重力成分 (X 軸)
26	.Grav_cy	地球重力成分 (Y 軸)
27	.Grav_cz	地球重力成分 (Z 軸)

(17) INS_ERROR : INS 誤差のパラメータ構造体

No.	名称	内容
1	.drx	カルマンフィルタ緯度誤差推定量
2	.dry	カルマンフィルタ経度誤差推定量

No.	名称	内容
3	.evx	カルマンフィルタ速度 X 軸誤差推定量
4	.evy	カルマンフィルタ速度 Y 軸誤差推定量
5	.thx	カルマンフィルタロール角誤差推定量
6	.thy	カルマンフィルタロール角誤差推定量
7	.psiz	カルマンフィルタヨー角誤差推定量
8	.eh	高さ誤差
9	.evz	速度 Z 軸誤差
10	.ebx	ジャイロ X 軸バイアス誤差推定量
11	.eby	ジャイロ Y 軸バイアス誤差推定量
12	.ebz	ジャイロ Z 軸バイアス誤差推定量
13	.edx	加速度センサ X 軸誤差
14	.edy	加速度センサ Y 軸誤差
15	.edz	加速度センサ Z 軸誤差
16	.sina	方位角誤差推定値 ($\sin \alpha$)
17	.omcosa	方位角誤差推定値 ($\cos \alpha - 1$)

(18) EPOCH : エポックの構造体

No.	名称	内容
1	.year	年
2	.month	月
3	.day	日
4	.hour	時
5	.minute	分
6	.sec	秒
7	.time_of_day	タイム・オブ・デイ

(19) Cobs_data : 観測データの構造体

No.	名称	内容
1	.epoch	エポックデータ
2	.num_sat	衛星数
3	.PRN	衛星番号
4	.C1	L1 帯搬送波の擬似距離
5	.L1	L1 帯搬送波の搬送波位相積算値
6	.D1	L1 帯搬送波のドップラ周波数

No.	名称	内容
7	.S1	L1 帯搬送波の C/N0
8	.P2	L2 帯搬送波の擬似距離
9	.L2	L2 帯搬送波の搬送波位相積算値
10	.D2	L2 帯搬送波のドップラ周波数
11	.S2	L2 帯搬送波の C/N0

(20) CKP_result : RTK-GPS 測位結果の構造体

No.	名称	内容
1	.index_process	処理インデックス (1 : 衛星なし, 2 : 3 衛星以下, 2.5 : 測位処理中断, 3 : 測位完了)
2	.num_sat	衛星数
3	.PRN[]	衛星番号
4	.flag_fix	整数値バイアスの決定フラグ (0 : No Fix, 1 : Fix)
5	.flag_mp_rov	移動局におけるマルチパス発生フラグ (0 : 未検出, 1 : 検出)
6	.flag_mp_ref	基準局におけるマルチパス発生フラグ (0 : 未検出, 1 : 検出)
7	.PRN_mp_rov	移動局におけるマルチパス発生の衛星番号
8	.PRN_mp_ref	基準局におけるマルチパス発生の衛星番号
9	.enu_float	フロート解で算出した移動局の位置 (基準局を原点とした ENU 座標系)
10	.pos_float	フロート解で算出した移動局の位置 (org_xyz を原点とした ENU 座標系)
11	.BL_float	フロート解で算出した基線長 (m)
12	.ion_est	電離層遅延の推定量
13	.trop_est	対流圏遅延の推定値
14	.N_float	整数値バイアスの実数解
15	.vel	速度の推定量
16	.acc	加速度の推定量
17	.jer	躍度の推定量
18	.two_norm	2 つの候補解のノルム
19	.zz	イノベーション
20	.ion_rov	移動局における電離層遅延
21	.ion_ref	基準局における電離層遅延

No.	名称	内容
22	.dd_ion	L1 帯における電離層遅延量
23	.trop_rov	移動局における対流圏遅延
24	.trop_ref	基準局における対流圏遅延
25	.dd_trop	対流圏遅延量
26	.flag_cs_detect	サイクルスリップ検出フラグ (0: 未検出, 1: 検出, NaN: 未検出)
27	.cs_detect_value	サイクルスリップ検出量
28	.DOP	DOP (X 軸 DOP, Y 軸 DOP, VDOP, HDOP, TDOP, PDOP, GDOP)
29	.azimuth	方位角 (°)
30	.elevation	仰角 (°)
31	.enu_fix	フィックス解で算出した移動局の位置 (基準局を原点とした ENU 座標系)
32	.pos_fix	フィックス解で算出した移動局の位置 (org_xyz を原点とした ENU 座標系)
33	.BL_fix	フィックス解で算出した基線長 (m)
34	.N_fix	アンビギュイティの演算結果
35	.ref_azimuth	基準局における衛星方位角 (°)
36	.ref_elevation	基準局における衛星仰角 (°)
37	.ref_num_sat	基準局における衛星数
38	.ref_PRN	基準局における PRN
39	.flag_fix_search	初期位置探索によるアンビギュイティ決定フラグ
40	.flag_fix_search_after	初期位置探索によるアンビギュイティ決定フラグ 2
41	.flag_search	初期位置探索フラグ 1
42	.flag_search_after	初期位置探索フラグ 2
44	.num_ini_pos_search	初期位置探索パラメータ
45	.num_amb_search	アンビギュイティを探索する数
46	.num_amb_search_after	アンビギュイティを探索する数 2
47	.num_ini_pos_search_after	初期位置探索パラメータ 2
48	.zzs	カルマンフィルタのイノベーション

(21) OUT_DATA : 演算結果格納のデータ (ファイル出力用)

No.	名称	内容
1	.ymd_true	出力日付

No.	名称	内容
2	.time_true	出力時刻格納(GPS TIME)
3	.true_pos_enu	出力真位置格納 ENU[m]
4	.true_vel_enu	出力真速度格納 ENU[m/s]
5	.true_roll	出力真ロール角格納 [deg]
6	.true_pitch	出力真ピッチ角格納 [deg]
7	.true_houi	出力真方位角格納 [deg]
8	.gps_pos_enu	出力 GPS 位置格納 ENU[m]
9	.gps_vel_enu	出力 GPS 速度格納 ENU[m/s]
10	.sat_num_usr	移動局衛星数
11	.sat_num_ref	基準局衛星数
12	.ins_pos_enu	出力 INS 位置格納 ENU[m]
13	.ins_vel_enu	出力 INS 速度格納 ENU[m/s]
14	.roll	出力ロール角格納[deg]
15	.pitch	出力ピッチ角格納[deg]
16	.houi	出力方位角誤差格納[deg]
17	.Del_Vel	出力加速度格納[m/s ²]
18	.Del_Ang	出力角速度格納[deg/s]

I-III 関数仕様

本ソフトウェアの測位演算処理で用いる主な関数を図 I-III-1 に示す。また、関数の入出力を以下に示す。

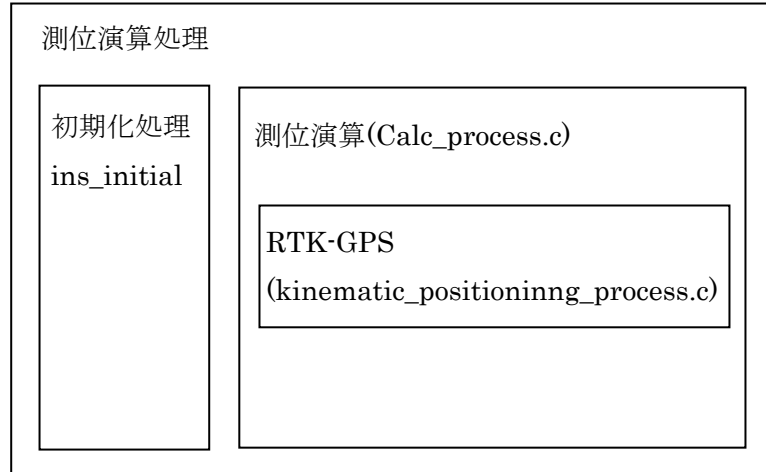


図 I-III-1 測位演算の関数

(1)初期化処理

a)関数名：ins_initial

b)入力：

No.	変数名	型	内容
1	ini_data	INI_DATA	初期データ
2	Project_para	PROJECT_PARA	プロジェクトデータ
3	hyb_mode_para	CMatrix	複合モードパラメータ
4	bunsan	CMatrix	分散データ
5	kansoku_noize	CMatrix	観測ノイズ誤差
6	system_noize	CMatrix	システムノイズ誤差

c)出力

No.	変数名	型	内容
1	KP_ini	CKP_INI	キネマティック測位の初期値
2	GPS_para	GPS_PARA	GPS のパラメータ
3	INS_GPS_para	INS_GPS_PARA	慣性航法複合処理のパラメータ
4	project	PROJECT	プロジェクトのパラメータ
5	INS_GPS_flg	INS_GPS_FLG	初期データ（ファイルから読み込みデータ）
6	IMU_data	IMU_DATA	入力 IMU センサデータ
7	INS_GPS_ini	INS_GPS_INI	慣性航法複合処理のパラメータ
8	Hyb_para	HYB_PARA	慣性航法複合フィルタのパラメータ
9	KP_para	CKP_para	キネマティック測位のパラメータ
10	KP_out	CKP_out	キネマティック測位の出力データ

No.	変数名	型	内容
11	Hyb_Krm	HYB_KRM	カルマンフィルタ初期値
12	INS	INS_INFO	INS 出力情報
13	GPS	GPS_INFO	GPS 情報
14	SD	SD_INFO	ストラップダウン演算のパラメータ
15	INS_error	INS_ERROR	INS 誤差のパラメータ
16	gosa_para	GOSA_PARA	誤差情報のパラメータ
17	True	TRUE_INFO	GPS 真値データのパラメータ
18	out_data	OUT_DATA	演算結果格納のデータ (ファイル出力用)
19	Krm_XK	CMatrix	慣性航法複合処理のカルマンフィルタの推定値

(2)測位演算処理

a)関数名 : Calc_process

b)入力 :

No.	変数名	型	内容
1	iMode	int	処理モード(リアルモード・後処置モード)
2	epoch	EPOCH	時刻情報(年、月、日、時、分、秒、time_of_day)
3	obs_data_rov	Cobs_data	移動局の観測データ
4	obs_data_ref	Cobs_data	基準局の観測データ
5	Eph_mat	CMatrix	エフェメリスデータ
6	Alm_mat	CMatrix	アルマナックデータ
7	KP_ini	CKP_INI	キネマティック測位の初期値
8	KP_para	CKP_para	キネマティック測位のパラメータ
9	GPS_para	GPS_PARA	GPS のパラメータ
10	IMU_data	IMU_DATA	入力加速度, 入力角速度
11	SD	SD_INFO	ストラップダウン演算のパラメータ
12	INS	INS_INFO	INS 出力情報
13	GPS	GPS_INFO	GPS 情報
14	project	PROJECT	プロジェクトのパラメータ
15	INS_GPS_flg	INS_GPS_FLG	初期データ (ファイルから読み込み)
16	INS_GPS_ini	INS_GPS_INI	慣性航法複合処理の初期値
17	INS_GPS_para	INS_GPS_PARA	慣性航法複合処理のパラメータ
18	Hyb_Krm	HYB_KRM	カルマンフィルタ初期値
19	Hyb_para	HYB_PARA	慣性航法複合演算のパラメータ
20	INS_error	INS_ERROR	INS 誤差のパラメータ
21	Data_box	DATA_BOX	IMU センサデータ (データ 50 個格納用)
22	KP_out	CKP_out	キネマティック測位の出力データ

No.	変数名	型	内容
23	doddi	int	移動局と基準局の共通衛星数

c)出力：

No.	変数名	型	内容
1	IMU_data	IMU_DATA	入力加速度, 入力角速度
2	SD	SD_INFO	ストラップダウン演算のパラメータ
3	INS	INS_INFO	INS 出力情報
4	GPS	GPS_INFO	GPS 情報
5	INS_GPS_flg	INS_GPS_FLG	IMU センサデータ (データ 50 個格納用)
6	Hyb_Krm	HYB_KRM	カルマン初期値
7	INS_error	INS_ERROR	INS 誤差のパラメータ
8	KP_result	CKP_result	キネマティック測位の結果
9	KP_out	CKP_OUT	キネマティック測位の出力データ
10	doddi	int	移動局と基準局の共通衛星数

(3)キネマティック測位処理

a)関数名：Kinematic_positioning_process

b)入力：

No.	変数名	型	内容
1	iMode	int	処理モード(リアルモード・後処置モード)
2	Epoch	EPOCH	時刻情報(年、月、日、時、分、秒、time_of_day)
3	obs_data_rov	Cobs_data	移動局の観測データ
4	obs_data_ref	Cobs_data	基準局の観測データ
5	Eph_mat	CMatrix	エフェメリスデータ
6	Alm_mat	CMatrix	アルマナックデータ
7	KP_ini	CKP_INI	キネマティック測位の初期値
8	KP_para	CKP_para	キネマティック測位のパラメータ
9	GPS_para	GPS_PARA	GPS のパラメータ
10	INS_GPS_para	INS_GPS_PARA	慣性航法複合処理のパラメータ
11	nav_flg	int	測位技術

c)出力：

No.	変数名	型	内容
1	KP_result	CKP_result	キネマティック測位の結果
2	KP_out	CKP_out	キネマティック測位の出力データ

II 画面仕様

II-I 画面遷移

本プログラムの画面遷移を図 II-I-1 に示す。

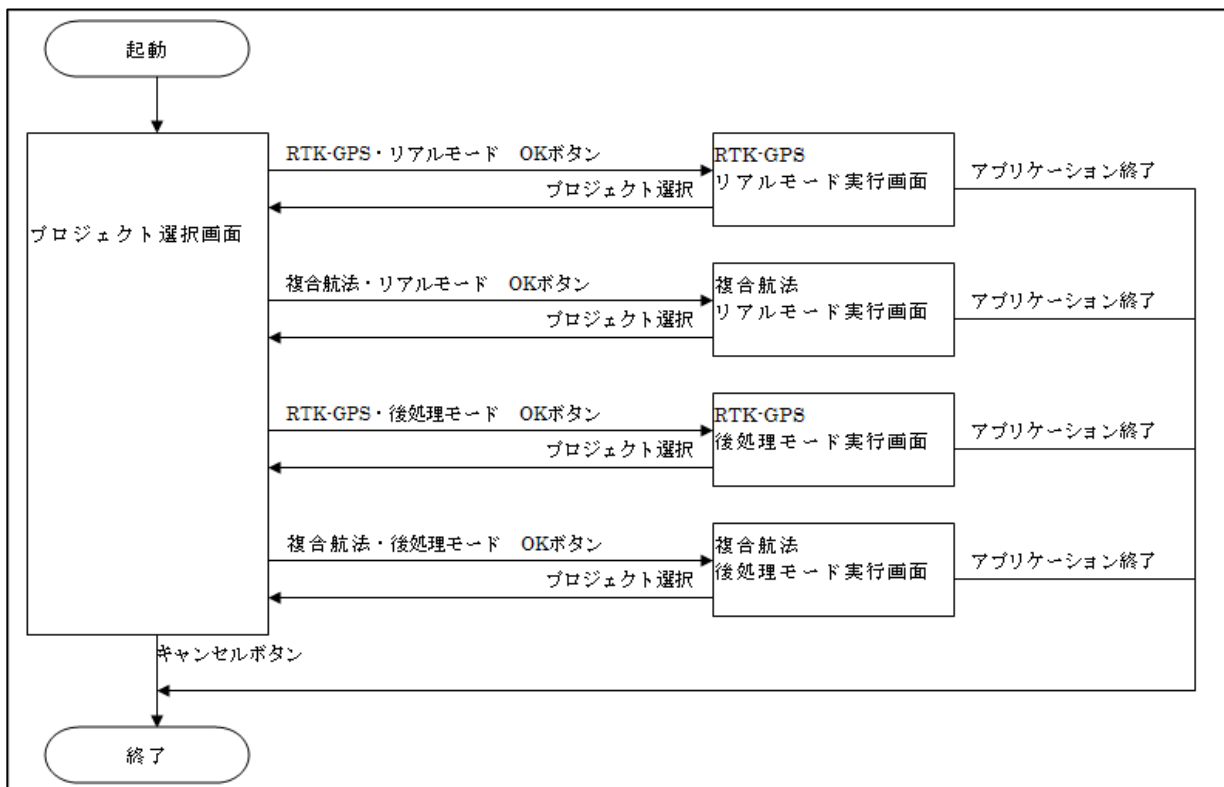


図 II-I-1 画面遷移図

II-II 画面詳細仕様

プログラム起動時、以下のプロジェクト選択画面を表示する。

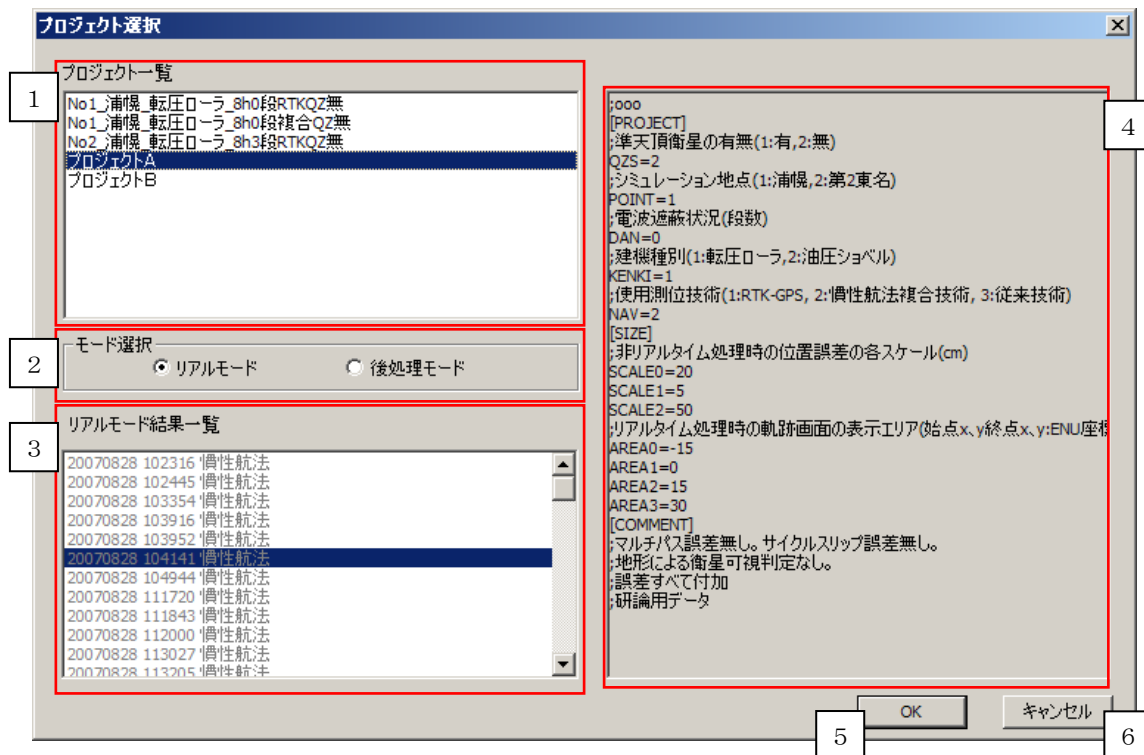


図 II-II-1 プロジェクト選択画面

表 II-II-1 プロジェクト選択画面仕様

No.	項目	説明
1	プロジェクト一覧	登録済みのプロジェクトを一覧表示する。 実験に使用するプロジェクトを選択することができる。
2	モード選択	プロジェクト一覧で選択したプロジェクトの実行モードを選択する。 (1)リアルモード：GPS、IMU センサと実際に通信を行いながら処理を行うモード (2)後処理モード：リアルモードで記録した GPS データ、IMU センサデータを用いて処理を行うモード プロジェクト一覧でプロジェクトを選択するとモード選択が可能となる。
3	リアルモード結果一覧	リアルモードで実行した結果の一覧を表示する。 モード選択で後処理モードを選択するとリアルモード結果が選択可能となる。

No.	項目	説明
4	選択プロジェクト 設定内容	プロジェクト一覧で選択したプロジェクトの設定内容を表示する。
5	OK ボタン	選択したプロジェクト、実行モードによる実行画面を表示する。
6	キャンセルボタン	プロジェクト選択画面を閉じる。 アプリケーション起動時に表示された場合は、本アプリケーションを終了する。 リアルモード実行画面および後処理モード実行画面から表示された場合は元の画面に戻る。

II-II-I 測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面

本画面は測位技術としてRTK-GPSを指定した場合に表示されるリアルモード実行画面である。GPS 受信機と通信を行い受信した GPS データを用いてリアルタイムに測位演算処理を実行し、演算結果を表示する。

The screenshot shows the 'GpsSimulation - プロジェクト B' window. It features a menu bar with 'ファイル(F)' and 'ヘルプ(H)'. The main area is divided into several sections:





- 1 測位条件 (Measurement Conditions):** Lists parameters like '準天頂衛星: 無', '地点: 北海道浦幌町', '電波遮蔽状況: なし (なし)', '建機種別: 転圧ローラ', and '測位方式' with radio buttons for 'RTK-GPS' (selected), '慣性航法', and '従来技術'.
- 2 DOP (Dilution of Precision):** Shows GDOP: 1.882, PDOP: 1.697, HDOP: 0.865, and VDOP: 1.460.
- 3 衛星配置 (Satellite Configuration):** A circular diagram showing the positions of 11 satellites (PRN 27, 28, 19, 25, 3, 11, 20, 8, 22) relative to North (N), South (S), East (E), and West (W).
- 4 軌跡 (Trajectory):** A plot showing the movement path of the receiver, with a 6m scale bar and a North arrow.
- 5 測位結果 (Measurement Results):** Displays '測位結果: 10', 'GPS時刻: 2007/08/28 10:34:57.00', 'Fix状況: Fix', 'マルチパス検出: -', 'サイクルスリップ検出: -', '基線長: 0.91 m', '捕捉衛星数: 9 基', and position/velocity data in meters and degrees.
- 6 衛星ロック状態表 (Satellite Lock Status Table):** A table showing PRN, L1/L2 lock status, S1/S2 values, elevation angle, and lock time for 11 satellites.
- 7-11 通信状態 (Communication Status):** Buttons for '開始時刻' (10:34:48) and status indicators for '基地局通信状態' and '移動局通信状態' (both showing '通信エラー' and 'データエラー' as green dots).

図 II-II-2 測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面

表 II-II-2 測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面仕様

No.	項目	説明
1	測位条件	<p>選択したプロジェクトの測位条件（プロジェクトファイルに設定されている内容）を表示する。</p> <p>(1)地点 : 北海道浦幌町</p> <p>(2)電波遮蔽状況 : 有/無</p> <p>(3)建機種別 : 転圧ローラ/油圧ショベル</p> <p>(4)測位方式 : RTK-GPS/慣性航法</p>
2	DOP	<p>測位演算で求めた各 DOP の値を表示する。</p> <p>GDOP/ PDOP/ HDOP/ VDOP</p>
3	衛星配置	<p>受信した GPS データより求めた衛星の配置（方位、仰角）を表示する。</p> <p>(1)同心円は仰角を示す。中心が 90 度、中心より第一円 60 度、第二円 30 度、第三円 0 度</p> <p>(2)衛星の色 : 緑色は捕捉している衛星 赤色は仰角マスクによりマスクされている衛星</p>
4	軌跡	<p>移動局の移動した軌跡をプロット表示する。Fix 状況によりプロットの色が異なる。</p> <p>(1)赤色プロット : 測位演算の結果、Fix となったポイント</p> <p>(2)黄色プロット : 測位演算の結果、NoFix となったポイント</p> <p>また、"project.txt"に設定された"測量ポイント"を青色の点でプロットする。</p> <p>【軌跡表示エリアの決定方法】</p> <p>(1)測量ポイントの登録がある場合 : 全ての測量ポイントが描画されるよう表示エリアを決定</p> <p>(2)測量ポイントの登録がない場合 : "project.txt"に設定された描画エリアから決定</p>
5	測位結果	<p>測位演算の結果を表示する。</p> <p>(1)GPS 時刻 : GPS データの時刻を表示する。</p> <p>(2)Fix 状況 : アンビギュイティの決定状況を表示する。</p> <p>①Fix : アンビギュイティ決定</p> <p>②No Fix : アンビギュイティ未決定</p> <p>(3)マルチパス検出 : マルチパス検出状態を表示する。</p> <p>①- : マルチパス未検出</p> <p>②○ : マルチパス検出</p> <p>(4)サイクルスリップ検出 : サイクルスリップ検出状態を表示する</p>

No.	項目	説明
		<p>①ー：サイクルスリップ未検出 ②○：サイクルスリップ検出</p> <p>(5)基線長：基地局と移動局の直線距離</p> <p>(6)捕捉衛星数：捕捉している衛星数（衛星配置で緑色の衛星の数）</p> <p>(7)位置：ローカル座標系における移動局の位置を ENU 座標系で表示する。 ローカル座標系の原点位置は“RTK-GPS 初期設定ファイル.csv”の“ローカル座標系の原点(XYZ)”により設定される。</p> <p>(8)速度：測位技術 RTK-GPS の場合、速度は表示されない。</p> <p>(9)方位：測位技術 RTK-GPS の場合、方位は常に 0[deg]となる。</p> <p>(10)ロール：測位技術 RTK-GPS の場合、ロールは常に 0[deg]となる。</p> <p>(11)ピッチ：測位技術 RTK-GPS の場合、ピッチは常に 0[deg]となる。</p>
6	衛星状態	<p>移動局が受信した GPS データから各衛星の状態を表示する。</p> <p>(1)PRN：衛星番号</p> <p>(2)L1：L1 波の受信状態を表示する。</p> <p>①Lock：L1 波を受信している ②Unlock：L1 波を受信していない ③Search：L1 波、L2 波両方とも受信していない</p> <p>(3)L2：L2 波の受信状態を表示する。</p> <p>①Lock：L2 波を受信している ②Unlock：L2 波を受信していない ③Search：L1 波、L2 波両方とも受信していない</p> <p>(4)S1：受信した GPS データ中の S1 の値を表示する。</p> <p>(5)S2：受信した GPS データ中の S2 の値を表示する。</p> <p>(6)仰角：受信した GPS データから演算した衛星の仰角を表示する。</p> <p>(7)Lock Time：L1 波、L2 波が両方とも Lock 状態の時間をカウントし表示する。 L1 波、L2 波どちらかが Lock 状態でなくなった場合、カウントは 0 クリアする。</p>
7	記録開始ボタン	<p>記録を開始するボタン。 状態によりアイコンが切り替わる。</p>

No.	項目	説明
		 : 記録開始待ち  : 記録中
8	記録停止ボタン	<p>記録を停止するボタン。 状態によりアイコンが切り替わる。</p>  : 記録開始待ち  : 記録中
9	開始時刻	記録開始ボタンをクリックし測位演算に必要なデータが受信され、測位演算処理を開始した時刻
10	基地局通信状態	<p>基地局 GPS 受信機との通信状態を表示する。</p> <p>(1)通信エラー：以下の状況が発生した場合に通信エラーとして赤色のランプを表示する。</p> <p>①基地局 GPS 受信機との通信に使用するポートがオープンできない場合 ②通信 DLL からエラー発生コールバック関数がコールされた場合</p> <p>正常の場合は緑色のランプを表示する。</p> <p>(2)データエラー：以下の状況が発生した場合にデータエラーとして赤色のランプを表示する。</p> <p>①基地局 GPS 受信機から 2 秒以上 GPS データが受信できない場合 正常の場合は緑色のランプを表示する。</p>
11	移動局通信状態	<p>移動局 GPS 受信機との通信状態を表示する。</p> <p>(1)通信エラー：以下の状況が発生した場合に通信エラーとして赤色のランプを表示する。</p> <p>①移動局 GPS 受信機との通信に使用するポートがオープンできない場合 ②通信 DLL からエラー発生コールバック関数がコールされた場合</p> <p>正常の場合は緑色のランプを表示する。</p> <p>(2)データエラー：以下の状況が発生した場合にデータエラーとして赤色のランプを表示する。</p> <p>①移動局 GPS 受信機から 2 秒以上 GPS データが受信できない</p>

No.	項目	説明
		<p>場合</p> <p>正常の場合は緑色のランプを表示する。</p>
12	メニュー	<p>メニュー構成は以下となる。</p> <p>ファイル -----プロジェクト選択・・・プロジェクト選択画面を 表示する。</p> <p> ----アプリケーションの終了・・・本アプリケーションを 終了する。</p> <p>ヘルプ -----バージョン情報・・・本アプリケーションのバー ジョン表示画面を表示す る。</p> <p>記録中はメニュー選択できない。</p>
13	プロジェクト名 称	現在選択されているプロジェクト名称を表示する。

II-II-II 測位技術：慣性航法におけるリアルモード実行画面

本画面は測位技術として複合慣性航法を指定した場合に表示されるリアルモード実行画面である。GPS 受信機および IMU センサと通信を行い、受信した GPS データおよび IMU センサデータを使用してリアルタイムに測位演算処理を実行し、演算結果を表示する。

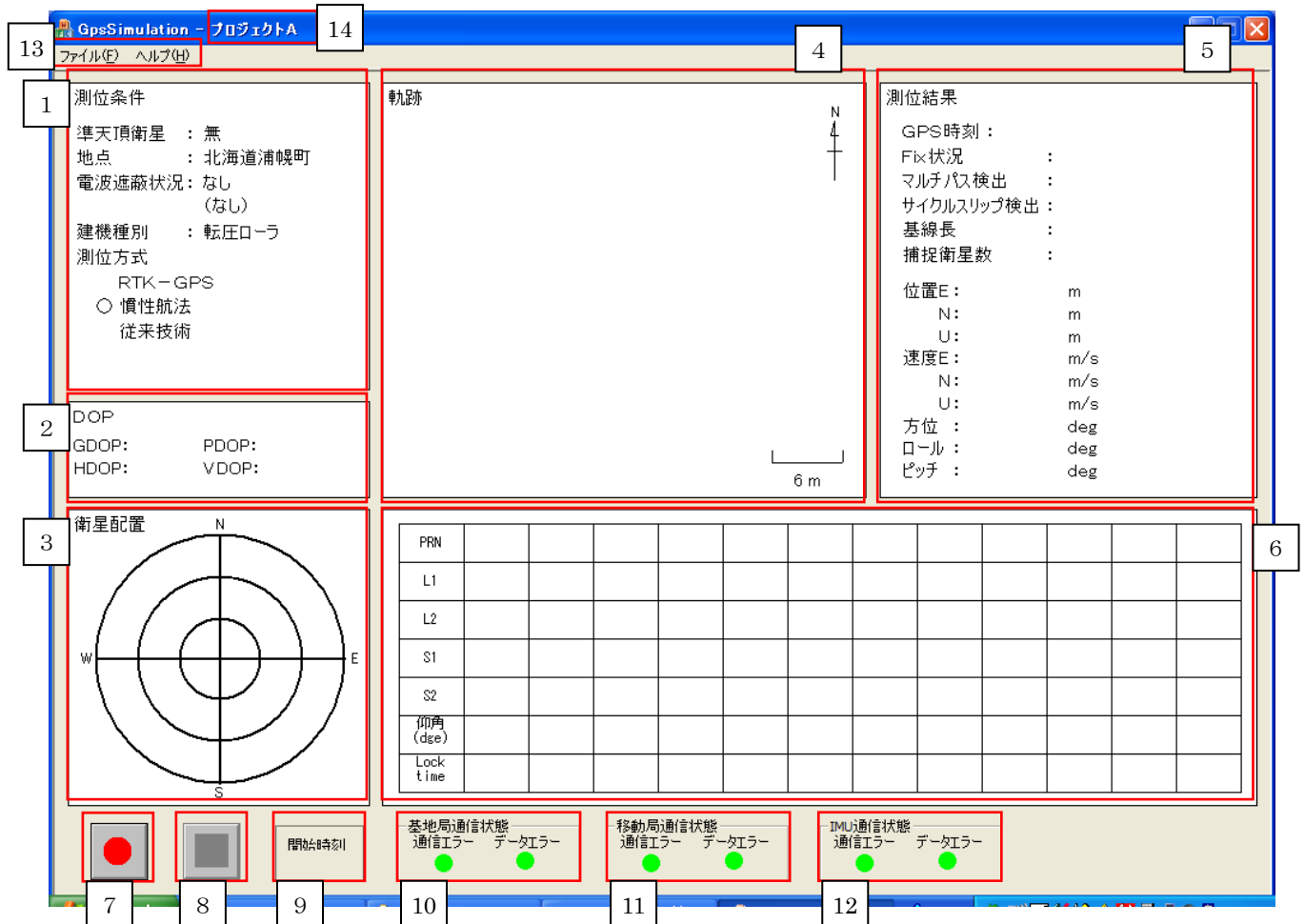


図 II-II-3 測位技術：慣性航法におけるリアルモード実行画面

表 II-II-3 測位技術：慣性航法におけるリアルモード実行画面仕様

No.	項目	説明
1	測位条件	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の測位条件と同様
2	DOP	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の DOP と同様
3	衛星配置	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の衛

No.	項目	説明
		星配置と同様
4	軌跡	<p>移動局の移動した軌跡をプロット表示する。Fix 状況によりプロットの色が異なる。</p> <p>(1)赤色プロット：測位演算の結果、Fix となったポイント (2)緑色プロット：測位演算の結果、NoFix となったポイント</p> <p>また、“project.txt”に設定された”測量ポイント”を青色の点でプロットする。</p> <p>【軌跡表示エリアの決定方法】</p> <p>(1)測量ポイントの登録がある場合：全ての測量ポイントが描画されるよう表示エリアを決定 (2)測量ポイントの登録がない場合：“project.txt”に設定された描画エリアから決定</p>
5	測位結果	<p>測位演算の結果を表示する。</p> <p>(1)GPS 時刻 : GPS データの時刻を表示する。 (2)Fix 状況 : Fix/NoFix (3)マルチパス検出 : マルチパス検出状態を表示する。 ①- : マルチパス未検出 ②○ : マルチパス検出 (4)サイクルスリップ検出：サイクルスリップ検出状態を表示する ①- : サイクルスリップ未検出 ②○ : サイクルスリップ検出 (5)基線長 : 基地局と移動局の直線距離 (6)捕捉衛星数：捕捉している衛星数（衛星配置で緑色の衛星の数） (7)位置 : ローカル座標系における移動局の位置を ENU 座標系で表示する。 ローカル座標系の原点位置は“RTK-GPS 初期設定ファイル.csv”の“ローカル座標系の原点(XYZ)”により設定される。 (8)速度 : ENU 座標系における移動局の速度を表示する。 (9)方位 : 方位角度を表示する。 (10)ロール : ロール角度を表示する。 (11)ピッチ : ピッチ角度を表示する。</p>
6	衛星状態	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の衛星状態と同様
7	記録開始ボタン	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の記録開始ボタンと同様

No.	項目	説明
8	記録停止ボタン	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の記録停止ボタンと同様
9	開始時刻	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の開始時刻と同様
10	基地局通信状態	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の基地局通信状態と同様
11	移動局通信状態	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の移動局通信状態と同様
12	IMU 通信状態	<p>IMU センサとの通信状態を表示する。</p> <p>(1)通信エラー：以下の状況が発生した場合に通信エラーとして赤色のランプを表示する。</p> <p>①IMU センサとの通信に使用するポートがオープンできない場合</p> <p>②通信 DLL からエラー発生コールバック関数がコールされた場合</p> <p>正常の場合は緑色のランプを表示する。</p> <p>(2)データエラー：以下の状況が発生した場合にデータエラーとして赤色のランプを表示する。</p> <p>①IMU センサから 1 秒以上 IMU センサデータが受信できない場合</p> <p>正常の場合は緑色のランプを表示する。</p>
13	メニュー	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」のメニューと同様
14	プロジェクト名称	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」のプロジェクト名称と同様

II-II-III 測位技術：RTK-GPS における後処理モード実行画面

本画面は測位技術としてRTK-GPSを指定した場合に表示される後処理モード実行画面である。リアルモードにおいて保存されたGPSデータをファイルから読み込み、測位演算処理を実行し演算結果を表示する。

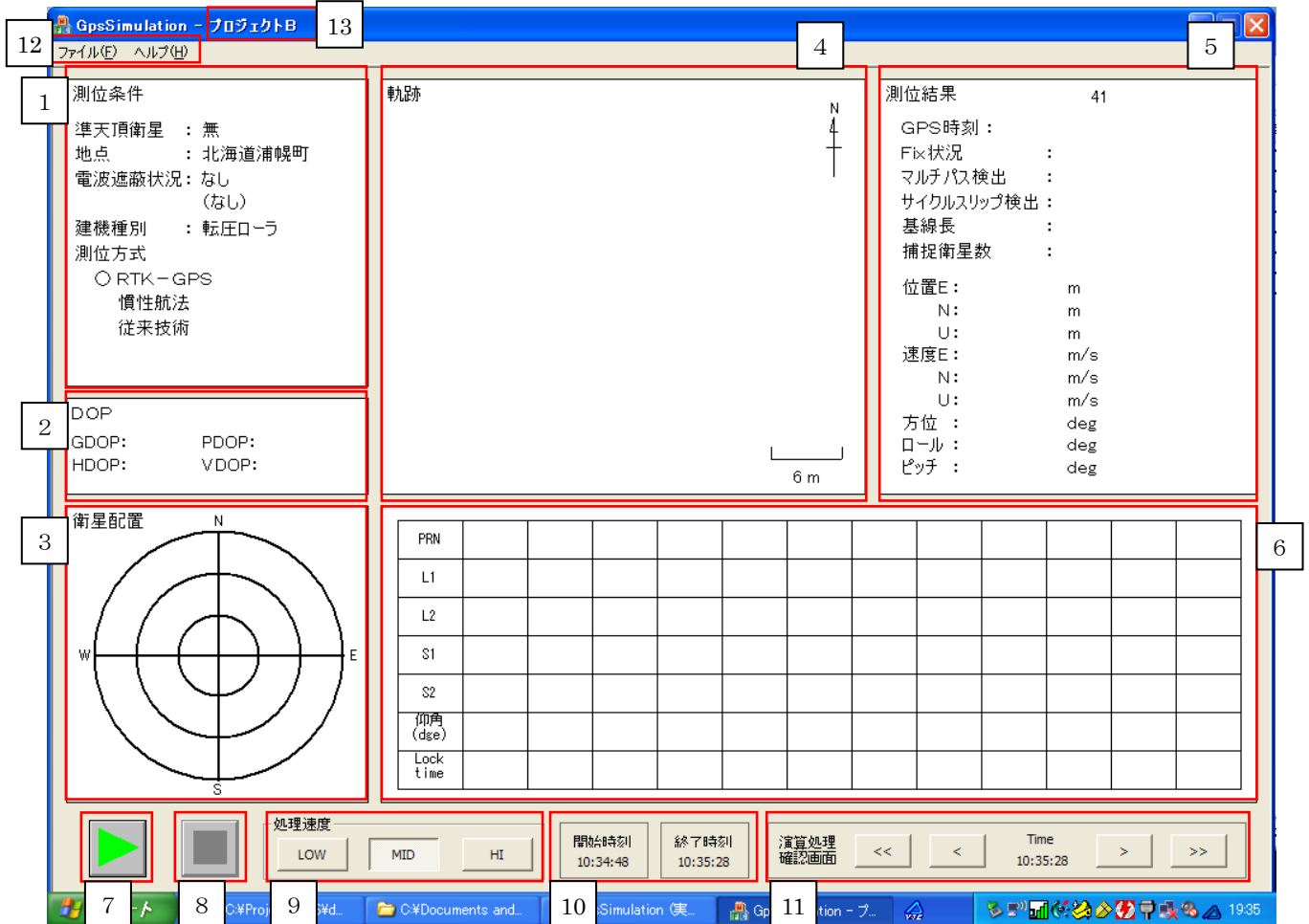




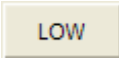

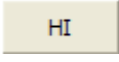






図 II-II-4 測位技術：RTK-GPS における後処理モード実行画面

表 II-II-4 測位技術：RTK-GPS における後処理モード実行画面

No.	項目	説明
1	測位条件	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の測位条件と同様
2	DOP	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」のDOPと同様
3	衛星配置	蓄積したGPSデータより求めた衛星の配置（方位、仰角）を表示する。

No.	項目	説明
		表示内容は「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の衛星配置と同様
4	軌跡	<p>移動局の移動した軌跡をプロット表示する。Fix 状況によりプロットの色が異なる。</p> <p>(1)赤色プロット：測位演算の結果、Fix となったポイント (2)黄色プロット：測位演算の結果、NoFix となったポイント また、「project.txt」に設定された”測量ポイント”を青色の点でプロットする。</p> <p>【軌跡表示エリアの決定方法】</p> <p>(1)測量ポイントの登録がある場合：全ての演算結果位置データと測量ポイントが描画されるよう表示エリアを決定 (2)測量ポイントの登録がない場合：全ての演算結果位置データが描画されるよう表示エリアを決定</p>
5	測位結果	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の測位結果と同様
6	衛星状態	<p>移動局が受信し蓄積した GPS データから各衛星の状態を表示する。</p> <p>表示内容は「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の衛星状態と同様</p>
7	後処理開始ボタン	<p>後処理を開始するボタン。 状態によりアイコンが切り替わる。</p> <p> : 後処理開始待ち</p> <p> : 後処理中</p>
8	後処理停止ボタン	<p>後処理を停止するボタン。 状態によりアイコンが切り替わる。</p> <p> : 後処理開始待ち</p> <p> : 後処理中</p>
9	処理速度選択ボタン	<p>後処理の実行速度を選択するボタン。</p> <p> : 標準速度（1秒）よりも遅い速度で後処理を実行する。 標準速度に対する実行速度の指定は、「SimDataMake.ini」のセクション[SIMULATION]、キー名称[SPEED_LOW]で設定する。</p>

No.	項目	説明
		 : 標準速度（1秒）で後処理を実行する。  : 標準速度（1秒）よりも早い速度で後処理を実行する。 標準速度に対する実行速度の指定は、”SimDataMake.ini”のセクション[SIMULATION]、キー名称[SPEED_HI]で設定する。
10	開始時刻・終了時刻	選択したリアルモード結果に蓄積されている GPS データから開始時刻・終了時刻を取得して表示する。
11	演算処理確認画面	<p>選択したリアルモード結果に蓄積されている GPS データから任意の時刻を指定して測位演算の結果を表示する。 軌跡には開始時刻から指定した時刻までの軌跡をプロットする。 Time : 現在表示している測位演算の GPS 時刻を表示する。</p> <p>  : Time に表示されている GPS 時刻の 1 秒前、1 秒後に移動するボタン</p> <p>  : Time に表示されている GPS 時刻の 1 分前、1 分後に移動するボタン (Shift キー押下状態の場合 GPS 時刻の 20 分前、20 分後に移動する)</p>
12	メニュー	<p>メニュー構成は以下となる。</p> <pre> ファイル -----プロジェクト選択・・・プロジェクト選択画面を -----アプリケーションの終了・・・本アプリケーションを終了する。 ヘルプ -----バージョン情報・・・本アプリケーションのバージョン表示画面を表示する。 </pre> <p>後処理中はメニュー選択できない。</p>
13	プロジェクト名称	「 測位技術 : RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」のプロジェクト名称と同様

II-II-IV 測位技術：慣性航法における後処理モード実行画面

本画面は測位技術として慣性航法を指定した場合に表示される後処理モード実行画面である。リアルモードにおいて保存された GPS データおよび IMU センサデータをファイルから読み込み、測位演算処理を実行し演算結果を表示する。

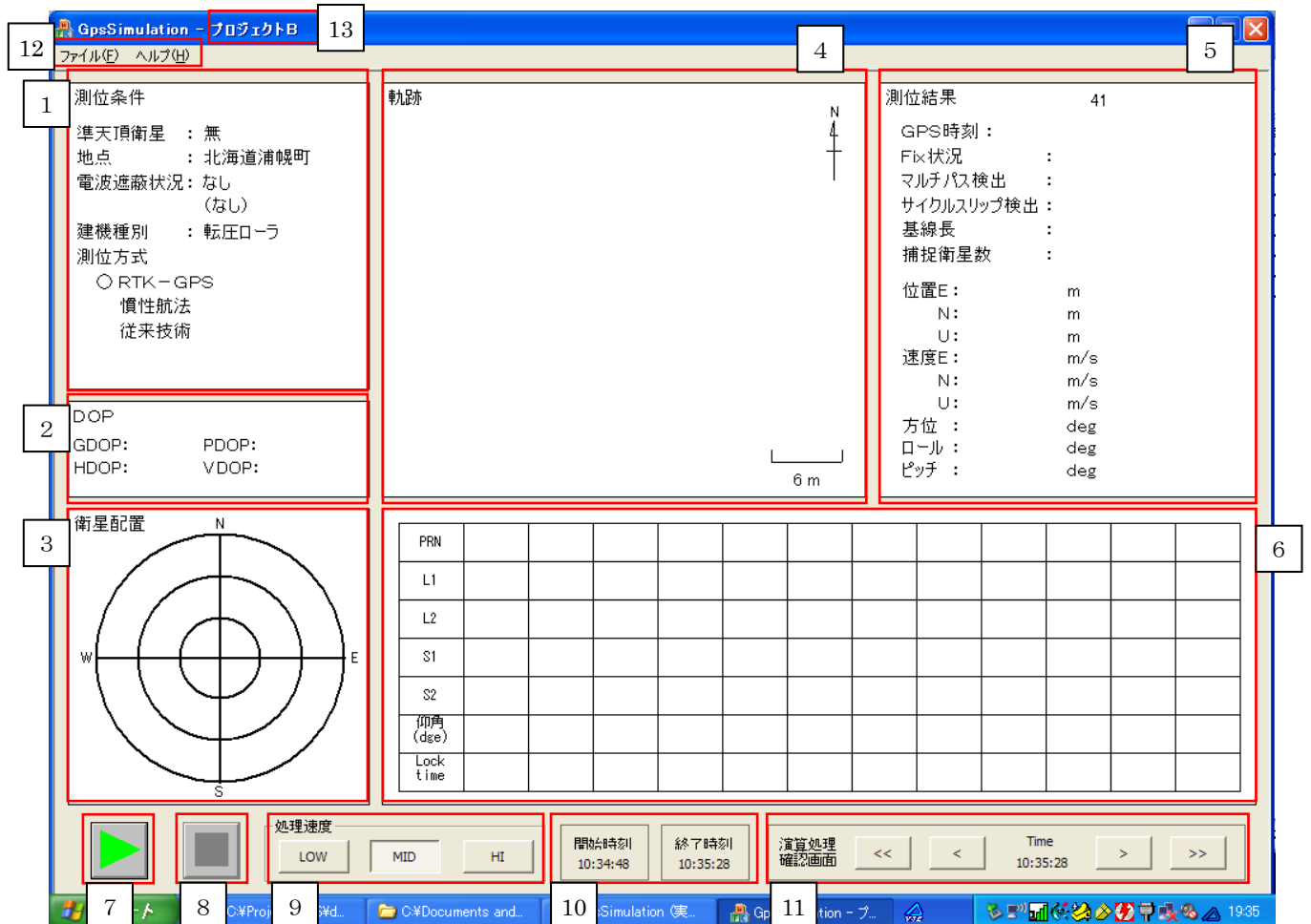


図 II-II-5 測位技術：慣性航法における後処理モード実行画面

表 II-II-5 測位技術：慣性航法における後処理モード実行画面

No.	項目	説明
1	測位条件	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」の測位条件と同様
2	DOP	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」のDOPと同様

No.	項目	説明
3	衛星配置	「 測位技術：RTK-GPS における後処理モード実行画面」の衛星配置と同様
4	軌跡	移動局の移動した軌跡をプロット表示する。Fix 状況によりプロットの色が異なる。 (1)赤色プロット：測位演算の結果、Fix となったポイント (2)緑色プロット：測位演算の結果、NoFix となったポイント また、「project.txt」に設定された”測量ポイント”を青色の点でプロットする。 【軌跡表示エリアの決定方法】 (1)測量ポイントの登録がある場合：全ての演算結果位置データと測量ポイントが描画されるよう表示エリアを決定 (2)測量ポイントの登録がない場合：全ての演算結果位置データが描画されるよう表示エリアを決定
5	測位結果	「 測位技術：慣性航法におけるリアルモード実行画面」の測位結果と同様
6	衛星状態	「 測位技術：RTK-GPS における後処理モード実行画面」の衛星状態と同様
7	後処理開始ボタン	「 測位技術：RTK-GPS における後処理モード実行画面」の後処理開始ボタンと同様
8	後処理停止ボタン	「 測位技術：RTK-GPS における後処理モード実行画面」の後処理停止ボタンと同様
9	処理速度選択ボタン	「 測位技術：RTK-GPS における後処理モード実行画面」の処理速度選択ボタンと同様
10	開始時刻・終了時刻	「 測位技術：RTK-GPS における後処理モード実行画面」の開始時刻・終了時刻と同様
11	演算処理確認画面	「 測位技術：RTK-GPS における後処理モード実行画面」の演算処理確認画面と同様

No.	項目	説明
12	メニュー	「測位技術：RTK-GPS における後処理モード実行画面」のメニューと同様
13	プロジェクト名称	「測位技術：RTK-GPS におけるリアルモード実行画面」のプロジェクト名称と同様

III プログラム実行環境

III-I フォルダ構成

本アプリケーションのフォルダ構成を図 III-I-1 に示す。

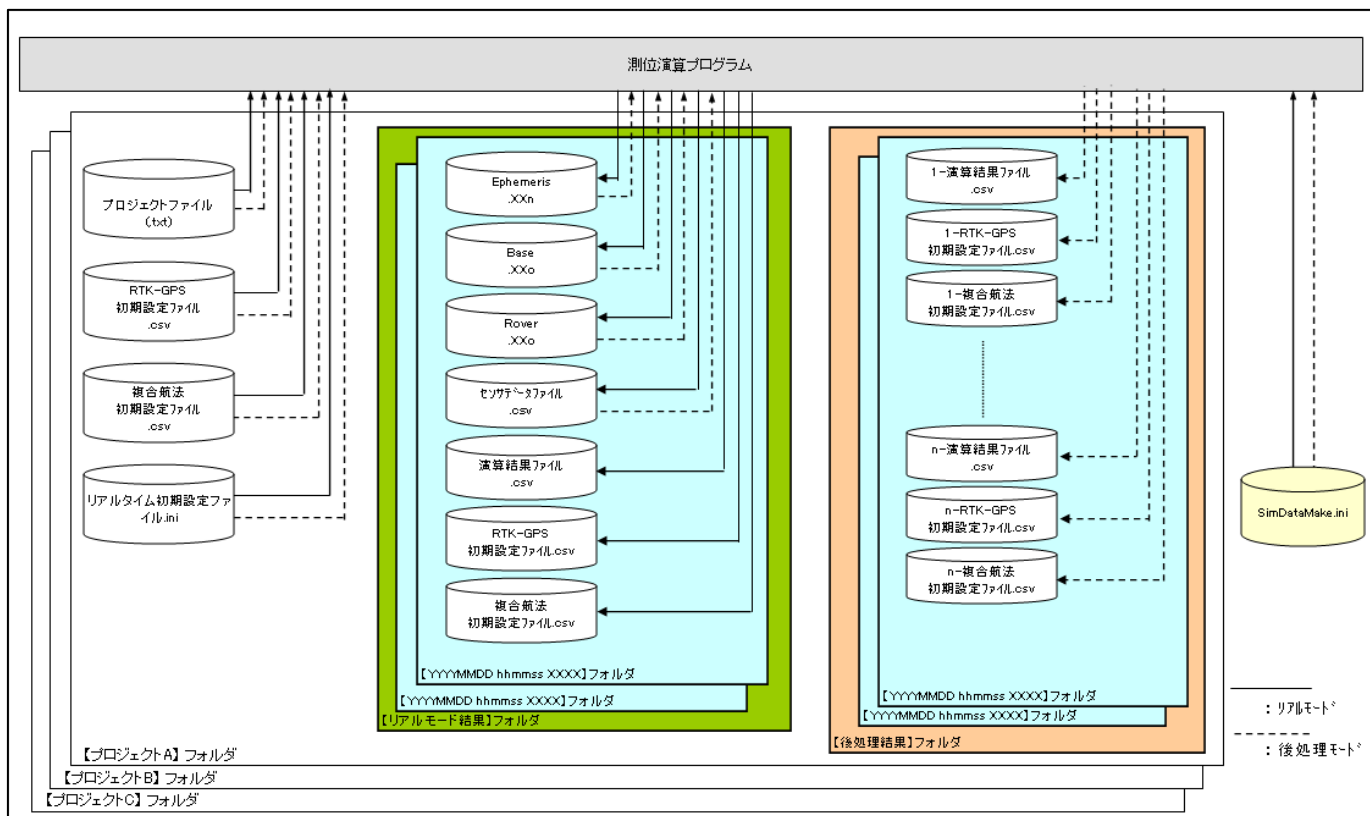


図 III-I-1 フォルダ構成

図 III-I-1 は本プログラム実行時のフォルダ構成を表した図である。

- (1) 測位演算プログラムは同じフォルダに存在する実行環境設定ファイル “SimDataMake.ini” から設定値を読み込み、初期化を行う。
- (2) 測位演算プログラムには “プロジェクト” という測位演算を行う上での作業単位があり、その作業単位毎に “プロジェクトフォルダ” が存在する。
プロジェクトフォルダの中には測位演算処理の前提となる使用測位技術を指定する初期設定ファイル “project.txt” や、指定した測位技術毎のパラメータファイル “RTK-GPS 初期設定ファイル.csv” “複合航法初期設定ファイル.csv” が存在する。
プロジェクトフォルダ名称は任意に設定することが出来る。
- (3) リアルモードで実行した各種測位演算結果ファイルは “リアルモード結果フォルダ” に格納される。格納の際、リアルモード測位演算実行毎に実行日時と使用測位技術をフォルダ名としたサブフォルダが自動作成され、測位演算実行単位で格納される。

(4)後処理モードで実行した各種測位演算結果ファイルは“後処理結果フォルダ”に格納される。格納の際、選択したリアルモード結果と同じ名称のサブフォルダが自動作成され、リアルモード結果単位で格納される。同じリアルモード結果を使用して後処理モードを実行した場合は、各測位演算結果ファイル名の頭に通し番号を付けることにより区別する。

III-I-1 フォルダ構成詳細

フォルダ構成の詳細を図 III-I-2 に示す。

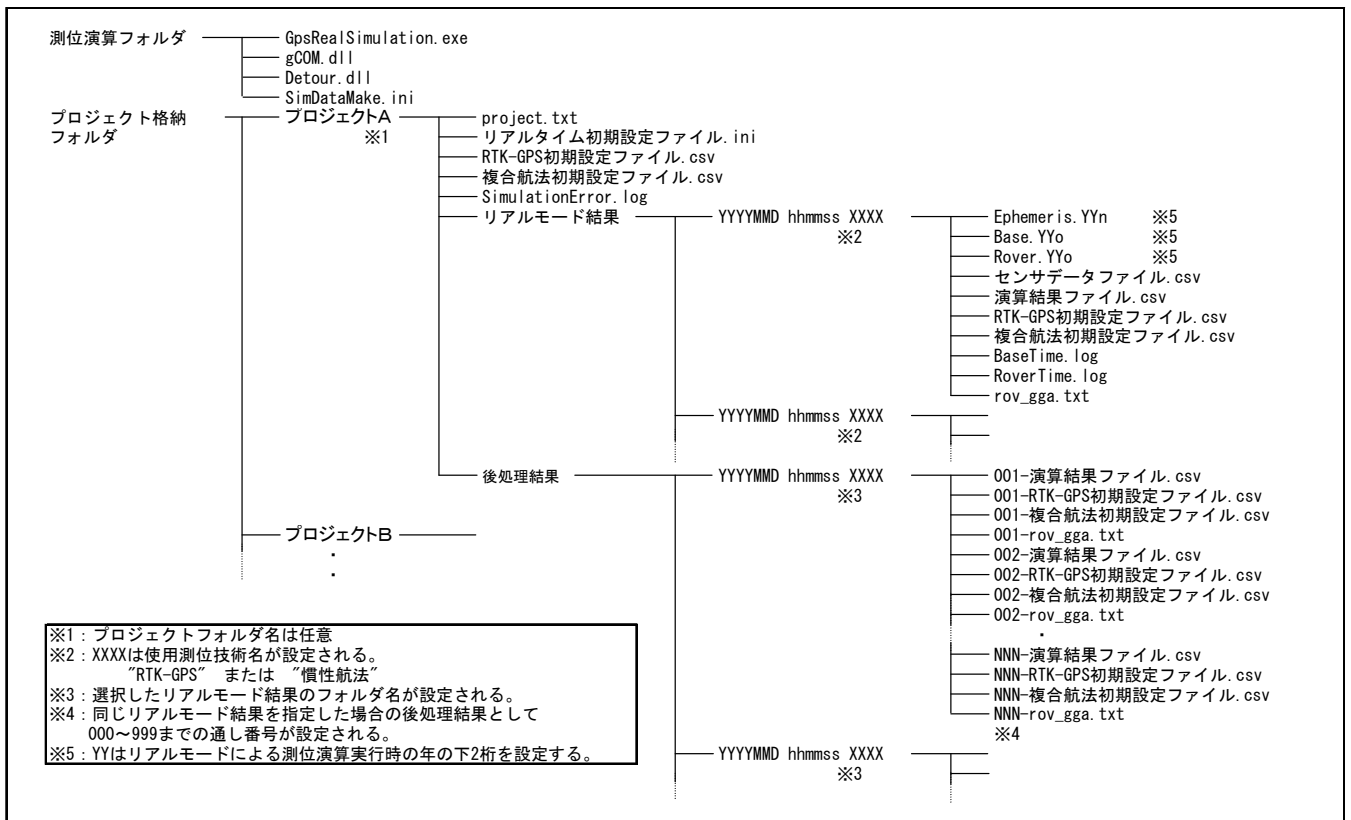


図 III-I-2 フォルダ構成詳細

フォルダ構成の詳細仕様を表 III-I-1 に示す。

表 III-I-1 フォルダ構成詳細仕様

No.	フォルダ名	仕様
1	測位演算フォルダ	測位演算プログラムの実行モジュールと実行に必要な DLL ファイル、初期設定ファイルを格納するフォルダ (1)フォルダ名称：パス、フォルダ名称とも任意 (2)格納ファイル ①GpsRealSimulation.exe

No.	フォルダ名	仕様
		②gCOM.dll ③Detour.dll ④SimDataMake.ini
2	プロジェクト格納フォルダ	測位演算の作業単位となるプロジェクトを格納するフォルダ このフォルダに格納されるプロジェクトフォルダ名称がプロジェクト選択画面のプロジェクト一覧に表示される。 (1)フォルダ名称：パス、フォルダ名称とも任意 ただし、測位演算フォルダ中の初期設定ファイル“SimDataMake.ini”に設定する。 (2)格納ファイル なし
3	プロジェクトフォルダ	プロジェクト毎の初期設定ファイルおよび測位演算結果を格納するフォルダ (1)フォルダ名称：任意 (2)格納ファイル ①project.txt ②リアルタイム初期設定ファイル.ini ③RTK-GPS 初期設定ファイル.csv ④複合航法初期設定ファイル.csv ⑤SimulationError.log
4	リアルモード結果フォルダ	リアルモード測位演算実行結果を格納するフォルダ リアルモード測位演算実行毎に実行日時と使用測位技術をフォルダ名としたサブフォルダが自動作成され、測位演算実行単位で格納される。 (1)フォルダ名称：「リアルモード結果」固定 (2)格納ファイル なし
5	リアルモード結果サブフォルダ	リアルモードによる測位演算実行単位の演算結果ファイルを格納するフォルダ (1)フォルダ名称：“ <u>YYYYMMDD hhmmss XXXX</u> ” ① ② ①測位演算を実行した日時 ②測位演算実行時の使用測位技術名（RTK-GPS・慣性航法） (2)格納ファイル ①Ephemeris.YYn ②Base.YYo ③Rover.YYo

No.	フォルダ名	仕様
		④センサーデータファイル.csv ⑤演算結果ファイル.csv ⑥RTK-GPS 初期設定ファイル.csv ⑦複合航法初期設定ファイル.csv ⑧BaseTime.log ⑨RoverTime.log ⑩rev_gga.txt
6	後処理モード 結果フォルダ	後処理測位演算実行結果を格納するフォルダ 選択したリアルモード結果サブフォルダと同じ名称のサブフォルダが 自動作成され、測位演算結果が格納される。 (1)フォルダ名称：「後処理結果」固定 (2)格納ファイル なし
7	後処理モード 結果サブフォルダ	後処理モードにおいて選択したリアルモード結果に対する測位演算実 行結果を格納するフォルダ (1)フォルダ名称：選択したリアルモード結果サブフォルダと同じ名 称 (2)格納ファイル ①NNN-演算結果ファイル.csv ②NNN-RTK-GPS 初期設定ファイル.csv ③NNN-複合航法初期設定ファイル.csv ④NNN-rev_gga.txt

IV ファイル仕様

IV-I ファイル一覧

本プログラムで使用するファイルを表 IV-I-1 に示す。

表 IV-I-1 ファイル一覧表

No.	項目	ファイル名	形式	R/W	備考
1	測位演算プログラムファイル	GpsRealSimulation.exe	EXE	—	
2	GPS、IMU センサシリアル通信モジュール	gCOM.dll	DLL	—	
3	gCOM.dll インターフェース用モジュール	Detour.dll	DLL	—	
4	測位演算初期設定ファイル	SimDataMake.ini	TXT	R	測位演算プログラムの動作環境を設定するファイル
5	プロジェクト定義ファイル	project.txt	TXT	R	測位演算プログラムのプロジェクト毎の動作条件を設定するファイル
6	リアルタイム処理用初期設定ファイル	リアルタイム初期設定ファイル.ini	TXT	R	GPS 受信機、IMU センサとの通信パラメータを設定するファイル
7	RTK-GPS 初期設定ファイル	RTK-GPS 初期設定ファイル.csv	TXT	R	CSV ファイル 測位技術「RTK-GPS」の演算パラメータ設定ファイル
8	複合航法初期設定ファイル	複合航法初期設定ファイル.csv	TXT	R	CSV ファイル 測位技術「複合航法」の演算パラメータ設定ファイル
9	測位演算プログラム処理エラーログファイル	SimulationError.log	TXT	W	測位演算プログラム全般において発生したエラーのログファイル

No.	項目	ファイル名	形式	R/W	備考
10	RINEX Navigation ファイル	Ephemeris.YYn	TXT	R/W	RINEX N ファイル リアルモード実行時、移動局 GPS 受信機から受信したエフェメリスデータ、アルマナックデータ格納ファイル
11	基地局 GPS 観測データファイル	Base.YYo	TXT	R/W	RINEX O ファイル リアルモード実行時、基地局 GPS 受信機から受信した GPS データ格納ファイル
12	移動局 GPS 観測データファイル	Rover.YYo	TXT	R/W	RINEX O ファイル リアルモード実行時、移動局 GPS 受信機から受信した GPS データ格納ファイル
13	IMU センサデータファイル	センサデータファイル.csv	TXT	R/W	CSV ファイル リアルモード実行時、IMU センサから受信したセンサデータ格納ファイル
14	リアルモード 測位演算結果ファイル	演算結果ファイル.csv	TXT	W	CSV ファイル リアルモードによる測位演算結果を格納するファイル
15	基地局 GPS データ受信時刻記録ファイル	BaseTime.log	TXT	W	基地局から GPS データを受信したシステム時刻と GPS データ中の GPS 時刻とを対にして記録したファイル
16	移動局 GPS データ受信時刻記録ファイル	RoverTime.log	TXT	W	移動局から GPS データを受信したシステム時刻と GPS データ中の GPS 時刻とを対にして記録したファイル

No.	項目	ファイル名	形式	R/W	備考
17	後処理モード 測位演算結果ファイル	NNN-演算結果ファイル.csv	TXT	W	CSV ファイル 後処理モードによる測位演算結果を格納するファイル
18	後処理モード RTK-GPS 初期設定ファイル	NNN-RTK-GPS 初期設定ファイル.csv	TXT	W	後処理モード実行条件確認用として格納された RTK-GPS 初期設定ファイル フォーマットは“RTK-GPS 初期設定ファイル”と同じ
19	後処理モード 複合航法初期設定ファイル	NNN-複合航法初期設定ファイル.csv	TXT	W	後処理モード実行条件確認用として格納された複合航法初期設定ファイル フォーマットは“複合航法初期設定ファイル”と同じ
20	リアルモード GGA ファイル	rov_gga.txt	TXT	W	GGA ファイル リアルモードによる測位演算結果を格納する GGA フォーマットのファイル
21	後処理モード GGA ファイル	NNN-rev_gga.txt	TXT	W	GGA ファイル 後処理モードによる測位演算結果を格納する GGA フォーマットのファイル

IV-II ファイル詳細仕様

IV-II-I 測位演算プログラムファイル

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	バイナリ形式 (実行モジュール)
2	ファイル名	GpsRealSimulation.exe
3	格納フォルダ	測位演算フォルダ (アプリケーションフォルダ)
4	特記事項	なし

IV-II-II GPS、IMU センサシリアル通信モジュール

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	バイナリ形式 (DLL)
2	ファイル名	gCOM.dll
3	格納フォルダ	測位演算フォルダ (アプリケーションフォルダ)
4	特記事項	なし

IV-II-III gCOM.dll インターフェース用モジュール

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	バイナリ形式 (DLL)
2	ファイル名	Detour.dll
3	格納フォルダ	測位演算フォルダ (アプリケーションフォルダ)
4	特記事項	なし

IV-II-IV 測位演算初期設定ファイル

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式
2	ファイル名	SimDataMake.ini
3	格納フォルダ	測位演算フォルダ (アプリケーションフォルダ)
4	特記事項	なし

(2)ファイルレイアウト

セクション名	キー項目名	記述内容	備考
[PATH] 測位演算プログラム 動作環境として各種 パスを設定するセク ション名	[PROJECT_PATH] プロジェクト保存先 フォルダのパス	全角半角文字可変桁 (最大半角 256 桁)	測位演算フォル ダ(アプリケーシ ョンフォルダ)か らの相対パスを 指定する。 例) ” ..¥..¥..¥da ta¥project_real”
[SIMULATION] 測位演算プログラム 動作環境として後処 理モードの実行速度 を設定するセクショ ン名	[SPEED_HI] 後処理モード時高速 処理速度	10 進数 5 桁 1~65535	標準処理速度 (1 秒周期) をに対す る倍率(掛ける 値)を設定する。
	[SPEED_LOW] 後処理モード時低速 処理速度	10 進数 5 桁 1~65535	標準処理速度 (1 秒周期) をに対す る倍率(割る値) を設定する。
[VIEWER] 測位演算プログラム 動作環境としてビュー ワの使用有無を設 定するセクション名	[MODE] ビューワ使用有無指 定	10 進数 1 桁 “0” or “1”	ビューワの使用 有無を設定する。 0 : ビューワ使用 なし 1 : ビューワ使用 あり
	[IPn] ビューワ PC の IP ア ドレス 複数指定可能 n : 1~順番に採番	10 進数指定 半角数字および区切 記号’.’ (最大 15 文字) “XXX. XXX. XXX. XXX”	3桁に満たない数 値は左詰とし、頭 に 0 を付加しな い。 例)

セクション名	キー項目名	記述内容	備考
			IP1=192.168.0.1 09 IP2=192.168.0.1 10
	[PORT] ビューワ PC のソケット接続待ちポート No	10 進数 5 桁 1~65535	ビューワ PC の TCP/IP 通信に使用するポート No を設定する。

(3)記述例

[PATH]

;プロジェクト保存先フォルダ

PROJECT_PATH=project

[SIMULATION]

;実行スピード (標準を 1 としての倍率)

SPEED_HI=10.0

SPEED_LOW=2.0

[VIEWER]

;1 : ビューワモード

MODE=0

IP1=RC211V

IP2=localhost

IP3=192.168.0.109

PORT=1000

IV-II-V プロジェクト定義ファイル

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式
2	ファイル名	Project.txt
3	格納フォルダ	測位演算初期設定ファイル” SimDataMake.ini” のセクション [PATH]、キー名称[PROJECT_PATH]で指定されたプロジェクト保存先フォルダ中の各プロジェクトフォルダ
4	特記事項	なし

(2)ファイルレイアウト

セクション名	キー項目名	記述内容	備考
[PROJECT] 当該プロジェクトの測位演算プログラム実行条件として測位技術方式を設定するセクション名	[NAV] 使用測位技術指定	10進数1桁 “1” or “2”	使用測位技術を設定する。 1 : RTK-GPS 2 : 慣性航法複合技術
[SIZE] 当該プロジェクトの軌跡画面表示エリアを設定するセクション名	[AREA0] 軌跡画面の表示エリア指定 始点 x 座標	10進数 [cm]	
	[AREA1] 軌跡画面の表示エリア指定 始点 y 座標	10進数 [cm]	
	[AREA2] 軌跡画面の表示エリア指定 終点 x 座標	10進数 [cm]	
	[AREA3] 軌跡画面の表示エリア指定 終点 y 座標	10進数 [cm]	

(3)記述例

[PROJECT]

;使用測位技術(1:RTK-GPS, 2:慣性航法複合技術)

NAV=2

[SIZE]

;リアルタイム処理時の軌跡画面の表示エリア(始点 x,y 終点 x,y:ENU 座標系)

AREA0=-20

AREA1=-20

AREA2=60

AREA3=60

IV-II-VI リアルタイム処理用初期設定ファイル

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式
2	ファイル名	リアルタイム初期設定ファイル.ini
3	格納フォルダ	測位演算初期設定ファイル” SimDataMake.ini” のセクション [PATH]、キー名称[PROJECT_PATH]で指定されたプロジェクト保存先フォルダ中の各プロジェクトフォルダ
4	特記事項	なし

(2)ファイルレイアウト

セクション名	キー項目名	記述内容	備考
[通信パラメータ設定値] リアルモード実行時、GPS 受信機、IMU センサとの通信パラメータを設定するセクション名	[PORT_B] 基地局 GPS 受信機とのシリアル通信 接続ポート No.	10進数1桁 1~8	基地局GPS受信機との通信を行うポート No.を設定する。 例：PORT_B=5
	[PORT_R] 移動局 GPS 受信機とのシリアル通信 接続ポート No.	10進数1桁 1~8	移動局GPS受信機との通信を行うポート No.を設定する。 例：PORT_R=6
	[PORT_I] IMU センサとのシリアル通信 接続ポート No.	10進数1桁 1~8	IMUセンサとの通信を行うポート No.を設定する。 例：PORT_I=7

セクション名	キー項目名	記述内容	備考
	[BAUDRATE_B] 基地局 GPS 受信機とのシリアル通信 ボーレート	10 進数	基地局 GPS 受信機とのシリアル通信速度を設定する。 例： BAUDRATE_B=57600
	[BAUDRATE_R] 移動局 GPS 受信機とのシリアル通信 ボーレート	10 進数	移動局 GPS 受信機とのシリアル通信速度を設定する。 例： BAUDRATE_R=57600
	[BAUDRATE_I] IMU センサとのシリアル通信 ボーレート	10 進数	IMU センサとのシリアル通信速度を設定する。 例： BAUDRATE_I=57600
	[DATABIT_B] 基地局 GPS 受信機とのシリアル通信 データ長	10 進数	基地局 GPS 受信機とのシリアル通信データ長を設定する。 例：DATABIT_B=8
	[DATABIT_R] 移動局 GPS 受信機とのシリアル通信 データ長	10 進数	移動局 GPS 受信機とのシリアル通信データ長を設定する。 例：DATABIT_R=8
	[DATABIT_I] IMU センサとのシリアル通信 データ長	10 進数	IMU センサとのシリアル通信データ長を設定する。 例：DATABIT_I=8
	[STOPBIT_B] 基地局 GPS 受信機とのシリアル通信 ストップビット長	10 進数	基地局 GPS 受信機とのシリアル通信ストップビット長を設定する。 例：STOPBIT_B=1

セクション名	キー項目名	記述内容	備考
	[STOPBIT_R] 基地局 GPS 受信機とのシリアル通信 ストップビット長	10 進数	移動局 GPS 受信機とのシリアル通信ストップビット長を設定する。 例：STOPBIT_R=1
	[STOPBIT_I] 基地局 GPS 受信機とのシリアル通信 ストップビット長	10 進数	IMU センサとのシリアル通信ストップビット長を設定する。 例：STOPBIT_I=1
	[PARITY_B] 基地局 GPS 受信機とのシリアル通信 パリティ	10 進数	基地局 GPS 受信機とのシリアル通信パリティ条件を設定する。 例：PARITY_B=N
	[PARITY_R] 移動局 GPS 受信機とのシリアル通信 パリティ	10 進数	移動局 GPS 受信機とのシリアル通信パリティ条件を設定する。 例：PARITY_R=N
	[PARITY_I] IMU センサとのシリアル通信 パリティ	10 進数	IMU センサとのシリアル通信パリティ条件を設定する。 例) PARITY_I=N
	[FLOW_B] 基地局 GPS 受信機とのシリアル通信 フロー制御条件	10 進数	基地局 GPS 受信機とのシリアル通信フロー制御条件を設定する。 例：FLOW_B=N
	[FLOW_R] 移動局 GPS 受信機とのシリアル通信 フロー制御条件	10 進数	移動局 GPS 受信機とのシリアル通信フロー制御条件を設定する。 例：FLOW_R=N

セクション名	キー項目名	記述内容	備考
	[FLOW_I] IMU センサとのシリアル通信 フロー制御条件	10 進数	IMU センサとのシリアル通信フロー制御条件を設定する。 例：FLOW_I=N
[測位演算設定値] 測位演算実行時、GPS 受信機、IMU センサのデータ出力周期および移動局 GPS 受信機のアンテナ取付位置を設定するセクション名	[INTERVAL_B] 基地局 GPS 受信機のデータ出力周期	10 進数	基地局 GPS 受信機のデータ出力周期を設定する。 例：INTERVAL_B=1
	[INTERVAL_R] 移動局 GPS 受信機のデータ出力周期	10 進数	移動局 GPS 受信機のデータ出力周期を設定する。 例：INTERVAL_R=1
	[INTERVAL_I] IMU センサのデータ出力周期	10 進数	IMU センサのデータ出力周期を設定する。 例： INTERVAL_I=50
	[OFFSET_E] 移動局 GPS アンテナ取り付け位置オフセット E 座標オフセット値	10 進数	移動局 GPS 受信機の ENU 座標系におけるアンテナ取り付け位置 E 座標オフセット値を設定する。 例：OFFSET_E=0
	[OFFSET_N] 移動局 GPS アンテナ取り付け位置オフセット N 座標オフセット値	10 進数	移動局 GPS 受信機の ENU 座標系におけるアンテナ取り付け位置 N 座標オフセット値を設定する。 例：OFFSET_N=0
	[OFFSET_U] 移動局 GPS アンテナ取り付け位置オフセット U 座標オフセット値	10 進数	移動局 GPS 受信機の ENU 座標系におけるアンテナ取り付け位置 U 座標オフセット値を設定する。 例：OFFSET_U=0

(3)記述例

```
[通信パラメータ設定値]
;接続ポート(Base_Rover_IMU)
PORT_B=1
PORT_R=2
PORT_I=3
;ボーレート(Base_Rover_IMU)
BAUDRATE_B=57600
BAUDRATE_R=57600
BAUDRATE_I=57600
;データ長(Base_Rover_IMU)
DATABIT_B=8
DATABIT_R=8
DATABIT_I=8
;ストップビット長(Base_Rover_IMU)
STOPBIT_B=1
STOPBIT_R=1
STOPBIT_I=1
;パリティ(Base_Rover_IMU)
PARITY_B=N
PARITY_R=N
PARITY_I=N
;フロー制御(Base_Rover_IMU)
FLOW_B=N
FLOW_R=N
FLOW_I=N
[測位演算設定値]
;データ出力周期[Hz](Base_Rover_IMU)
INTERVAL_B=1
INTERVAL_R=1
INTERVAL_I=50
;原点位置 LLH([deg][deg][m])
ORG_LAT=42.95975
ORG_LON=143.589
ORG_HI=145
;基準局位置 LLH([deg][deg][m])
BASE_LAT=42.95974934
BASE_LON=143.6012555
```

BASE_HI=145.0783
;GPS 座標オフセット量[m](ENU)
OFFSET_E=0
OFFSET_N=0
OFFSET_U=0

IV-II-VII RTK-GPS 初期設定ファイル

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式 (CSV ファイル)
2	ファイル名	RTK-GPS 初期設定ファイル.csv
3	格納フォルダ	①測位演算初期設定ファイル” SimDataMake.ini” のセクション[PATH]、キー名称[PROJECT_PATH]で指定されたプロジェクト保存先フォルダ中の各プロジェクトフォルダ ②リアルモード結果サブフォルダ
4	特記事項	本ファイルは行ごとの設定項目固定フォーマットファイル 設定値とその項目名をカンマで区切る

(2)ファイルレイアウト

行番号	項目名	記述内容	備考
1	コメント	任意文字列	
2	項目名称	固定文字列	“%%%%% キネマティック測位情報 %%%%%”
3	コメント	任意文字列	
4	使用しない衛星番号	整数	
5	項目名称	固定文字列	“% カルマンフィルタのパラメータ”
6	位相測定誤差の標準偏差	実数	
7	擬似距離測定誤差の標準偏差	整数	
8	電離層遅延測定誤差の標準偏差	実数	
9	対流圏遅延測定誤差の標準偏差	実数	
10	初期標準偏差(位置)	整数	
11	初期標準偏差(速度)	整数	

行番号	項目名	記述内容	備考
12	初期標準偏差(加速度)	整数	
13	初期標準偏差(躍度)	整数	
14	初期標準偏差(整数)	整数	
15	初期標準偏差(電離層遅延)	整数	
16	初期標準偏差(対流圏遅延)	整数	
17	加加速度標準偏差	実数	
18	加速度標準偏差	実数	
19	速度標準偏差	実数	
20	位置標準偏差	実数	
21	電離層遅延標準偏差	実数	
22	電離層遅延標準偏差	実数	
23	時定数の逆数	実数	
24	項目名称	固定文字列	“% 基準局の位置(XYZ)”
25	基準局の位置(XYZ)	実数	X座標、Y座標、Z座標の順番にカンマで区切る
26	項目名称	固定文字列	“% ローカル座標系の原点(XYZ)”
27	ローカル座標系の原点(XYZ)	実数	X座標、Y座標、Z座標の順番にカンマで区切る
28	項目名称	固定文字列	“% 対流圏遅延計算のための観測量”
29	対流圏遅延の計算に気象観測データを使用するかどうかのフラグ	整数	
30	相対湿度 HR の観測地点の高さ(水戸地方気象台)	整数	
31	気温の観測地点の高さ(水戸地方気象台)	整数	
32	気圧の観測地点の高さ(水戸地方気象台)	整数	
33	相対湿度 HR(%)	整数	
34	気温(°C)	実数	
35	気圧(hPa)	実数	
36	項目名称	固定文字列	“% パラメータ設定”

行番号	項目名	記述内容	備考
37	マルチパス検出(マルチパスによる電波強度 C/N0 の減衰量)	整数	
38	衛星仰角閾値の設定(衛星仰角閾値)	整数	
39	探索間隔	実数	
40	初期位置探索を判定する採択数の閾値	整数	
41	初期位置探索を判定する倍数の閾値	整数	
42	アンビギュイティ検定(残差二乗和の比の閾値)	実数	
43	サイクルスリップ検出(危険率)	実数 0.01 固定	
44	初期位置探索を行う最少衛星数	整数	
45	初期位置探索を判定する一つのアンビギュイティの採択数	整数	

(3)記述例

```

RTK-GPS 初期設定ファイル,,aaa
%%%%% キネマティック測位情報 %%%%%%,,
% 使用していない衛星,,
0,,
% カルマンフィルタのパラメータ,,
0.1,位相測定誤差の標準偏差,,
5,擬似距離測定誤差の標準偏差,,
0.1,電離層遅延測定誤差の標準偏差,,
0.1,対流圏遅延測定誤差の標準偏差,
3,初期標準偏差(位置),
1,初期標準偏差(速度),
1,初期標準偏差(加速度),
1,初期標準偏差(加速度),
10,初期標準偏差(整数),
1,初期標準偏差(電離層遅延),

```

1,初期標準偏差(対流圏遅延),
 0.51,加加速度標準偏差,
 0.51,加速度標準偏差,
 0.61,速度標準偏差,
 0.61,位置標準偏差,
 0.1,電離層遅延標準偏差,
 0.1,電離層遅延標準偏差,
 1.01,時定数の逆数,
 % 基準局の位置(XYZ),,
 -3760762.25334090,2773043.77209821,4327165.3053012,
 % ローカル座標系の原点(XYZ),,
 -3760649.446,2773067.146,4327223.84,
 % 対流圏遅延計算のための観測量,,
 0,対流圏遅延の計算に気象観測データを使用するかどうかのフラグ,,
 29,相対湿度 HR の観測地点の高さ(水戸地方気象台),,
 29,気温の観測地点の高さ(水戸地方気象台),,
 29,気圧の観測地点の高さ(水戸地方気象台),,
 75,相対湿度 HR(%),,
 28.6,気温(°C),,
 1009.8,気圧(hPa),,
 % パラメータ設定,,
 10,マルチパス検出(マルチパスによる電波強度 C/N0 の減衰量),
 20,衛星仰角閾値の設定(衛星仰角閾値),
 0.25,探索間隔,
 100,初期位置探索を判定する採択数の閾値,
 2,初期位置探索を判定する倍数の閾値,
 0.5,アンビギュイティ検定(残差二乗和の比の閾値)
 20,【無視】初期化の最大時間(初期化の最大時間)
 0.01,【固定】サイクルスリップ検出(危険率)
 5,初期位置探索を行う最少衛星数
 2,初期位置探索を判定する一つのアンビギュイティの採択数

IV-II-VIII 複合航法初期設定ファイル

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式 (CSV ファイル)
2	ファイル名	複合航法初期設定ファイル.csv
3	格納フォルダ	①測位演算初期設定ファイル” SimDataMake.ini” のセクション[PATH]、キー名称[PROJECT_PATH]で指定されたプロジェクト保存先フォルダ中の各プロジェクトフォルダ ②リアルモード結果サブフォルダ
4	特記事項	本ファイルは行ごとの設定項目固定フォーマットファイル 設定値とその項目名をカンマで区切る

(2)ファイルレイアウト

行番号	項目名	記述内容	備考
1	コメント	任意文字列	
1	コメント	任意文字列	
2	位置誤差 X 軸(rad ²)	実数	
3	位置誤差 Y 軸(rad ²)	実数	
4	速度誤差 X 軸(ft ² /s ²)	実数	
5	速度誤差 Y 軸(ft ² /s ²)	実数	
6	姿勢誤差 X 軸(rad ²)	実数	
7	姿勢誤差 Y 軸(rad ²)	実数	
8	姿勢誤差 Z 軸(rad ²)	実数	
9	高度誤差(ft ²)	実数	
10	速度誤差 Z 軸(ft ² /s ²)	実数	
11	加速度バイアス X (ft ² /s ⁴)	実数	
12	加速度バイアス Y (ft ² /s ⁴)	実数	
13	加速度バイアス Z (ft ² /s ⁴)	実数	
14	ジャイロバイアス X (rad ² /s ²)	実数	
15	ジャイロバイアス Y (rad ² /s ²)	実数	
16	ジャイロバイアス Z (rad ² /s ²)	実数	
17	sina	実数	
18	cosa-1	実数	
19	受信機時計誤差(c Δ t)	実数	
20	整数値バイアス(cycle ²)	実数	
21	コメント	任意文字列	

行番号	項目名	記述内容	備考
22	観測位置誤差 X 軸(rad ²)	実数	
23	観測位置誤差 Y 軸(rad ²)	実数	
24	観測速度誤差 X 軸(ft ² /s ²)	実数	
25	観測速度誤差 Y 軸(ft ² /s ²)	実数	
26	観測速度誤差 Z 軸(ft ² /s ²)	実数	
27	観測高度誤差(ft ²)	実数	
28	擬似距離観測ノイズ[C/A](m ²)	実数	
29	擬似距離観測ノイズ[P(Y)](m ²)	実数	
30	搬送波位相観測ノイズ[L1](m ²)	実数	
31	搬送波位相観測ノイズ[L2](m ²)	実数	
32	ドップラ観測ノイズ[L1](m ²)	実数	
33	ドップラ観測ノイズ[L2](m ²)	実数	
34	コメント	任意文字列	
35	位置ノイズ X 軸(rad ²)	実数	
36	位置ノイズ Y 軸(rad ²)	実数	
37	速度ノイズ X 軸(ft ² /s ²)	実数	
38	速度ノイズ Y 軸(ft ² /s ²)	実数	
	姿勢角ノイズ X 軸(rad ²)	実数	
	姿勢角ノイズ Y 軸(rad ²)	実数	
	姿勢角ノイズ Z 軸(rad ²)	実数	
	高度ノイズ(ft ²)	実数	
	速度ノイズ Z 軸(ft ² /s ²)	実数	
	加速度バイアスノイズ X (ft ² /s ⁴)	実数	
	加速度バイアスノイズ Y (ft ² /s ⁴)	実数	
	加速度バイアスノイズ Z (ft ² /s ⁴)	実数	
	ジャイロバイアスノイズ X (rad ² /s ²)	実数	
	ジャイロバイアスノイズ Y (rad ² /s ²)	実数	
	ジャイロバイアスノイズ Z (rad ² /s ²)	実数	

行番号	項目名	記述内容	備考
	sina	実数	
	cosa-1	実数	
	受信機時計誤差(c Δ t)	実数	
	整数値バイアス(cycle^2)	実数	

(3)記述例

複合航法初期設定ファイル,
 ===カルマンフィルタ共分散値初期値===,
 2.44E-16,位置誤差 X 軸(rad^2)
 2.44E-16,位置誤差 Y 軸(rad^2)
 0.1,速度誤差 X 軸(ft^2/s^2)
 0.1,速度誤差 Y 軸(ft^2/s^2)
 1.22E-05,姿勢誤差 X 軸(rad^2)
 1.22E-05,姿勢誤差 Y 軸(rad^2)
 1.22E-05,姿勢誤差 Z 軸(rad^2)
 1,高度誤差(ft^2)
 1,速度誤差 Z 軸(ft^2/s^2)
 1.03E-08,加速度バIAS X (ft^2/s^4)
 1.03E-08,加速度バIAS Y (ft^2/s^4)
 1.03E-08,加速度バIAS Z (ft^2/s^4)
 2.12E-07,ジャイロバIAS X (rad^2/s^2)
 2.12E-07,ジャイロバIAS Y (rad^2/s^2)
 2.12E-07,ジャイロバIAS Z (rad^2/s^2)
 0.4,sina
 0.8,cosa-1
 1.50E+01,受信機時計誤差(c Δ t)
 10,整数値バイアス(cycle^2)
 ===カルマンフィルタ観測ノイズ===,
 4.44E-17,観測位置誤差 X 軸(rad^2)
 4.44E-17,観測位置誤差 Y 軸(rad^2)
 0.04,観測速度誤差 X 軸(ft^2/s^2)
 0.04,観測速度誤差 Y 軸(ft^2/s^2)
 0.1,観測速度誤差 Z 軸(ft^2/s^2)
 0.02,観測高度誤差(ft^2)
 0.5,擬似距離観測ノイズ[C/A](m^2)
 0.5,擬似距離観測ノイズ[P(Y)](m^2)
 4.00E-04,搬送波位相観測ノイズ[L1](m^2)

4.00E-04,搬送波位相観測ノイズ[L2](m²)
 0.04,ドップラ観測ノイズ[L1](m²)
 0.04,ドップラ観測ノイズ[L2](m²)
 ===カルマンフィルタシステムノイズ===,
 6.25E-17,位置ノイズX軸(rad²)
 6.25E-17,位置ノイズY軸(rad²)
 1.03E-08,速度ノイズX軸(ft²/s²)
 1.03E-08,速度ノイズY軸(ft²/s²)
 5.88E-15,姿勢角ノイズX軸(rad²)
 5.88E-15,姿勢角ノイズY軸(rad²)
 5.88E-15,姿勢角ノイズY軸(rad²)
 0,高度ノイズ(ft²)
 1.03E-07,速度ノイズZ軸(ft²/s²)
 1.03E-08,加速度バースノイズ X (ft²/s⁴)
 1.03E-08,加速度バースノイズ Y (ft²/s⁴)
 1.03E-08,加速度バースノイズ Z (ft²/s⁴)
 5.41E-10,ジャイロバースノイズ X (rad²/s²)
 5.41E-10,ジャイロバースノイズ Y (rad²/s²)
 5.41E-10,ジャイロバースノイズ Z (rad²/s²)
 0.001,sin α
 0.0001,cos α -1
 1.50E-02,受信機時計誤差(c Δ t)
 0.001,整数値バイアス(cycle²)

IV-II-IX 測位演算プログラム処理エラーログファイル

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式
2	ファイル名	SimulationError.log
3	格納フォルダ	測位演算初期設定ファイル” SimDataMake.ini” のセクション [PATH]、キー名称[PROJECT_PATH]で指定されたプロジェクト保存先フォルダ中の各プロジェクトフォルダ
4	特記事項	

(2)ファイルレイアウト

No.	項目名	記述内容	備考
1	エラー発生日時	半角英数字 23 桁 YYYY/MM/DD HH:MM:SS.mmm	
2	エラーメッセージ	任意文字列	

注1) 各項目は TAB で区切る。末尾は改行コード (0x0d 0x0a) とする。

注2) 1レコードは可変長となる。

(3)記述例

2007/08/22 17:40:29.793 複合航法初期設定ファイル open error [複合航法初期設定ファイル.csv]

IV-II-X RINEX Navigation ファイル

(1) ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式
2	ファイル名	Ephemeris.YYn YY: ファイル作成日の年下 2 桁
3	格納フォルダ	リアルモード結果サブフォルダ
4	特記事項	

(2) ファイルレイアウト

```

2.10          N: GPS NAV DATA                      RINEX VERSION / TYPE
teqc 2002Mar14  GSI, JAPAN                          20060103 04:46:41UTC / RUN BY / DATE
Linux 2.0.36|Pentium II|gcc -static|Linux|486/DX+    COMMENT
teqc 2002Mar14  GSI, JAPAN                          20060101 03:14:09UTC COMMENT
2            NAVIGATION DATA                      COMMENT
DAT2RIN 2.35x  GSI, JAPAN                          01JAN06 10:06:14 GMT COMMENT
                                                    COMMENT
1.2110D-08 -7.4510D-09 -5.9600D-08 1.1920D-07      ION ALPHA
1.1670D+05 -2.4580D+05 -6.5540D+04 1.1140D+06      ION BETA
4.656612873080D-09 1.598721155460D-14 147456      1100 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
13                                                  LEAP SECONDS
                                                    END OF HEADER

```

} ヘッダー部

```

2 06 1 1 10 0 0.0 -2.322858199480D-05 9.094947017730D-13 0.000000000000D+00
1.880000000000D+02 3.634375000000D+01 4.445542156620D-09 -4.238290860460D-01
1.959502696990D-06 9.057606686840D-03 1.094117760660D-05 5.153632799150D+03
3.600000000000D+04 -1.639127731320D-07 2.938489251530D+00 -7.078051567080D-08
9.523369563370D-01 1.681250000000D+02 1.956144926870D+00 -7.866042039950D-03
-5.639520517240D-10 1.000000000000D+00 1.356000000000D+03 0.000000000000D+00
0.000000000000D+00 0.000000000000D+00 -1.722946763040D-08 4.440000000000D+02
2.881800000000D+04
4 06 1 1 10 0 0.0 1.041404902940D-04 1.239186531170D-11 0.000000000000D+00
4.100000000000D+01 4.250000000000D+01 4.418041044120D-09 1.938526277370D+00
2.315267920490D-06 7.416724110950D-03 1.128762960430D-05 5.153760982510D+03
3.600000000000D+04 -1.862645149230D-08 2.958275500890D+00 5.960464477540D-08
9.519301275960D-01 1.600937500000D+02 1.121882207010D-01 -7.743179430970D-09
-6.943146613200D-10 1.000000000000D+00 1.356000000000D+03 0.000000000000D+00
0.000000000000D+00 0.000000000000D+00 -6.053596735000D-09 4.100000000000D+01
2.881800000000D+04
7 06 1 1 9 59 44.0 4.599764943120D-04 1.034550223270D-11 0.000000000000D+00
1.620000000000D+02 -2.437500000000D+00 5.649878342950D-09 -1.312679625580D+00
2.295174179080D-08 1.323057315310D-02 4.852190613750D-06 5.153801216130D+03
3.598400000000D+04 2.793967723850D-08 1.834734928490D+00 3.930181264880D-07
9.350042941560D-01 2.737500000000D+02 -1.767531403610D+00 -8.530355088960D-09
-1.817932887560D-10 1.000000000000D+00 1.356000000000D+03 0.000000000000D+00
0.000000000000D+00 0.000000000000D+00 -1.862645149230D-09 1.620000000000D+02
3.097800000000D+04
7 06 1 1 10 0 0.0 4.599778912960D-04 1.034550223270D-11 0.000000000000D+00
1.380000000000D+02 -2.437500000000D+00 5.650235390680D-09 -1.310345971340D+00
2.048909664150D-08 1.323056872930D-02 4.852190613750D-06 5.153801218030D+03

```

} ※1

以下省略

Line1

`2 06 1 1 10 10 0.0`

= 衛星番号2番 2006年1月1日10時10分0.0秒

`-2.322858199480D-05 9.094947017730D-13 0.000000000000D+00`

左から、衛星時計バイアス[sec]、ドリフト [sec/sec]、ドリフト率 [sec/sec²]

Line2

左から、軌道の新しさを表す係数、軌道半径正弦補正係数 [rad]、平均運動補正值 [rad/sec]、元期の平均近点角 [rad]

Line3

左から、緯度引数余弦補正係数 [rad]、離心率、緯度引数正弦補正係数 [rad]、軌道長半径の平方根 [m^{1/2}]

Line4

左から、軌道の元期 [sec]、軌道傾斜角余弦補正係数 [rad]、元期の昇交点経度 [rad]、軌道傾斜角正弦補正係数 [rad]

Line5

左から、元期の軌道傾斜角 [rad]、軌道半径余弦補正係数 [rad]、近地点引数 [rad]、昇交点経度変化率 [rad/sec]

Line6

左から、軌道傾斜角変化率 [rad/sec]、L2 チャンネル上のコード、衛星の週番号、P データフラグ

Line7

左から、衛星軌道の精度[m]、衛星の健康状態、電離層群遅延誤差 [sec]、Issue of Data,Clock

Line8

Transmission time of message

IV-II-XI 基準局 GPS 観測データファイル

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式
2	ファイル名	Base.YYo YY: ファイル作成日の年下 2 桁
3	格納フォルダ	リアルモード結果サブフォルダ
4	特記事項	

(2)ファイルレイアウト

```

2.1      OBSERVATION DATA G (GPS)      RINEX VERSION / TYPE
Convert  Hitachi                      20060822 18:41:04UTC PGM / RUN BY / DATE
                                                MARKER NAME
GPS Simulation Data                    OBSERVER / AGENCY
GPS Simulation Data                    REC # / TYPE / VERS
0.0000      0.0000                      0.0000      ANT # / TYPE
0.0000      0.0000                      0.0000      APPROX POSITION XYZ
1           1                            WAVELENGTH FACT L1/2
6 L1 C1 D1 L2 P2 D2                    # / TYPES OF OBSERV
1.0000                                         INTERVAL
2006 1 1 10 10 0.0000000 GPS            TIME OF FIRST OBS
-3967874.247 3340981.729 3699025.145    ORIGIN POSITION XYZ
                                                END OF HEADER

```

ヘッダー部

```

06 1 1 10 10 0.0000000 0 10G 2G 4G 5G 7G1 0G1 3G1 7G2 3G2 4G2 7
110018679.30351 20935865.56691 -236916.816 85728828.11153 20935868.75179
-184603.855
107840554.41536 20521383.43481 30994.049 84031586.27969 20521387.02491
24157.754
134388667.38988 25573315.16086 186217.392 104718435.76784 25573316.74616
145111.009
116008618.02059 22075711.34981 335953.182 90396315.01883 22075713.99922
261788.116
120554343.29437 22940732.81973 -287181.812 93938440.31478 22940735.05252
-223771.387
111513702.48769 21220358.80970 169786.375 86893781.52001 21220361.92671
132307.556
121035956.5089 23032380.82481 423615.101 94313723.26284 23032383.07623
330096.104
124616698.27461 23713772.48813 362886.303 97103912.76244 23713774.46828
282774.998
118777361.97854 22602585.51262 237112.165 92553778.23262 22602588.06693
184769.189
127480693.34003 24258772.27369 -249921.469 99335597.69831 24258774.13923
-194737.374
06 1 1 10 10 1.0000000 0 10G 2G 4G 5G 7G1 0G1 3G1 7G2 3G2 4G2 7
110016700.38140 20935489.30488 -1977.270 85727288.88354 20935492.93476
-1538.908

```

※1

※2

以下省略

※1

06 1 1 10 10 0.0000000 0

= 2006年1月1日10時10分0.0000000秒

最後の”0”は衛星の状態。(0=正常,1=電源異常,2=その他)

10G 2 4G 5G 7G10G13G17G23G24G27

= 先頭に衛星数10個という情報

Gの後に2桁の衛星番号

(Gは空白になる時があり、一桁の衛星番号はGの後の10の位が空白)

※2

- ・青枠一個分が衛星一個分のデータ
- ・座標系は、WGS84系
- ・データの並び方

ヘッダーの、”# /TYPES OF OBSERV”の順番に並んでいる。

上段の左から右へ順に

L1 : C/A コードの 搬送波位相 [Cycle]

C1 : 移動局 (基準局) との擬似距離 [m]

D1 : L1 のドップラーシフト [Hz]

L2 : P コードの搬送波位相 [Cycle]

P2 : 移動局 (基準局) との擬似距離 [m]

データは下段に続き、

D2 : L1 のドップラーシフト [Hz]

- ・データのフォーマット

L1、C1、D1、L2、P2、D2 の各データは小数3桁までである。

小数第4位と第5位は以下の意味を持つ。

- ・小数第4位は受信回路の同期状態(LLI)

0又は空白=正常、1=ロック外れ

ロック外れの場合は、直前のエポックとの連続性がない。

- ・小数第5位は信号強度。

1桁の数字で標準化。5以上であれば問題なく使用可能

IV-II-XII 移動局 GPS 観測データファイル

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式
2	ファイル名	Rover.YYo YY：ファイル作成日の年下2桁
3	格納フォルダ	リアルモード結果サブフォルダ
4	特記事項	

(2)ファイルレイアウト

基準局 GPS 観測データファイルのレイアウトと同じである。

IV-II-XIII IMU センサデータファイル

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式
2	ファイル名	センサデータファイル.csv
3	格納フォルダ	リアルモード結果サブフォルダ
4	特記事項	1行が1サンプリングデータのレコード レコード数の制限はない

(2)ファイルレイアウト

No.	区分	行番号	項目名	記述内容	備考
1	ヘッダ部	1	ファイル説明	全半角文字	“センサ仕様ファイル” 固定
2			作成日	半角英数字 15 桁 01-YYYYMMDD D-XXX	“01-YYYYMMDD-XXX” 固定
3			精度	全半角文字	“低精度” 固定
4		2	データ部タイトル	全半角文字	“年月日,時分秒,加速度(x)[feet/sec/ Δ T], 加速度(y)[feet/sec/ Δ T], 加速度(z)[feet/sec/ Δ T], 角速度(x)[rad/ Δ T], 角速度(y)[rad/ Δ T], 角速度

No.	区分	行番号	項目名	記述内容	備考
					(z)[rad/ΔT],” 固定
5	データ部	3 行目 以降	年月日	半角数字 YYYYMMDD	IMU センサから日付データは送られてこないの 後処理モードにおいて本 データは使用していない。
6			時分秒	半角数字 HHMMSS.mm m	IMU センサデータ サン プリング時刻
7			加速度(x)	実数(指数表示) [feet/sec/ΔT]	IMU センサ サンプリン グ加速度(x)
8			加速度(y)	実数(指数表示) [feet/sec/ΔT]	IMU センササンプリング 加速度(y)
9			加速度(z)	実数(指数表示) [feet/sec/ΔT]	IMU センササンプリング 加速度(z)
10			角速度(x)	実数(指数表示) [rad/ΔT]	IMU センササンプリング 角速度(x)
11			角速度(y)	実数(指数表示) [rad/ΔT]	IMU センササンプリング 角速度(y)
12			角速度(z)	実数(指数表示) [rad/ΔT]	IMU センササンプリング 角速度(z)

注1) データ部の各項目はカンマで区切る。末尾は改行コード (0x0d 0x0a) とする。

注2) 1レコードは可変長となる。

IV-II-XIV 演算結果ファイル

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式
2	ファイル名	演算結果ファイル.csv
3	格納フォルダ	リアルモード結果サブフォルダ
4	特記事項	1行が1回の演算結果データのレコード レコード数の制限はない

(2)ファイルレイアウト

No.	区分	行番号	項目名	記述内容	備考
1	ヘッダ部	1	ファイル説明	全半角文字	“演算結果ファイル”固定
2			演算日時、 使用測位技術	YYYYMMDD_ HHMMSS_XXX X	XXXXX：使用測位技術を示す文字列 “複合航法” or “RTK-GPS” or “従来技術”
3		2	データ説明	全半角文字	“出発点座標”固定
4			出発点座標 (x)	実数(小数点表示)	“RTK-GPS 初期設定ファイル”の“ローカル座標系の原点(X)”に設定されている値
5			出発点座標 (y)	実数(小数点表示)	“RTK-GPS 初期設定ファイル”の“ローカル座標系の原点(Y)”に設定されている値
6			出発点座標 (z)	実数(小数点表示)	“RTK-GPS 初期設定ファイル”の“ローカル座標系の原点(Z)”に設定されている値
7		3	データ説明	全半角文字	“基準局座標”固定
8			基準局座標 (x)	実数(小数点表示)	“RTK-GPS 初期設定ファイル”の“基準局の位置(X)”に設定されている値
9			基準局座標 (y)	実数(小数点表示)	“RTK-GPS 初期設定ファイル”の“基準局の位置(Y)”に設定されている値
10			基準局座標 (z)	実数(小数点表示)	“RTK-GPS 初期設定ファイル”の“基準局の位置(Z)”に

No.	区分	行番号	項目名	記述内容	備考
					設定されている値
11		4	データ説明	全半角文字	“処理内容”固定
12	処理内容		全半角文字	使用測位技術を示す文字列 “複合航法” or “RTK-GPS” or “従来技術”	
13		5	データ説明	全半角文字	“基線長”固定
14	基線長		実数(小数点表示)		
15		6	データ説明	全半角文字	“総 epoch 数”固定
16	総 epoch 数		整数		
17		7	データ説明	全半角文字	“アンビギュイティ Fix 率”固定
18	アンビギュイティ Fix 率		実数(小数点表示)		
19		8	データ説明	全半角文字	“サイクルスリップ発生回数”固定
20	サイクルスリップ発生回数		整数		
21		9	データ説明	全半角文字	“マルチパス発生回数”固定
22	マルチパス発生回数		整数		
23		10	データ部タイトル	全半角文字	“年月日,時刻,可視衛星数, GDOP, PDOP, HDOP, VDOP, 緯度[deg], 経度[deg], 高度[m], 位置 E[m], 位置 N[m], 位置 U[m], 速度 E[m/s], 速度 N[m/s], 速度 U[m/s], ロール角[deg], ピッチ角[deg], 方位角[deg], アンビギュイティ, サイクルスリップ, サイクルスリップ量”固定
24	データ部	11 行目以降	年月日	半角数字 YYYYMMDD	測位演算に使用した GPS データの日付
25			時刻	半角数字 HHMMSS	測位演算に使用した GPS データの時刻
26			可視衛星数	実数(指数表示) [feet/sec/ΔT]	測位演算に使用した GPS データの可視衛星数

No.	区分	行番号	項目名	記述内容	備考
27			GDOP	実数(小数点表示)	測位演算結果 GDOP 値
28			PDOP	実数(小数点表示)	測位演算結果 PDOP 値
29			HDOP	実数(小数点表示)	測位演算結果 HDOP 値
30			VDOP	実数(小数点表示)	測位演算結果 VDOP 値
31			緯度	実数(小数点表示) [deg]	測位演算結果 現在位置 (LLH 座標系) 緯度
32			経度[deg]	実数(小数点表示) [deg]	測位演算結果 現在位置 (LLH 座標系) 経度
33			高度[m]	実数(小数点表示) [deg]	測位演算結果 現在位置 (LLH 座標系) 高度
34			位置 E	実数(小数点表示) [m]	測位演算結果 現在位置 (ENU 座標系) 位置 E
35			位置 N	実数(小数点表示) [m]	測位演算結果 現在位置 (ENU 座標系) 位置 N
36			位置 U	実数(小数点表示) [m]	測位演算結果 現在位置 (ENU 座標系) 位置 U
37			速度 E	実数(小数点表示) [m/s]	測位演算結果 現在速度 (ENU 座標系) 速度 E
38			速度 N	実数(小数点表示) [m/s]	測位演算結果 現在速度 (ENU 座標系) 速度 N
39			速度 U	実数(小数点表示) [m/s]	測位演算結果 現在速度 (ENU 座標系) 速度 U
40			ロール角	実数(小数点表示)	測位演算結果 ロール角

No.	区分	行番号	項目名	記述内容	備考
				示) [deg]	
41			ピッチ角	実数(小数点表示) [deg]	測位演算結果 ピッチ角
42			方位角	実数(小数点表示) [deg]	測位演算結果 方位角
43			アンビギュ イティ	整数	測位演算結果 アンビギュ イティ 0 : NoFix、1 : Fix
44			サイクルス リップ	整数	測位演算結果 サイクルス リップ有無 0 : 無し、1 : 有 り

注1) データ部の各項目はカンマで区切る。末尾は改行コード (0x0d 0x0a) とする。

注2) 1レコードは可変長となる。

(3)記述例

```

2007/08/22 17:40:29.793      複合航法初期設定ファイル open error [複合航法初期設
定ファイル.csv]
演算結果ファイル,20071113_121343_複合航法,,,,,,,,,,,,,
出発点座標,-3760614.571190,2773050.607500,4327264.856300,,,,,,,,,,,,,
基準局座標,-3760762.253341,2773043.772098,4327165.305301,,,,,,,,,,,,,
処理内容,複合航法,,,,,,,,,,,,,
基線長,0.000000,,,,,,,,,,,,,
総 epoch 数,933,,,,,,,,,,,,,
アンビギュイティ Fix 率,0.000000,,,,,,,,,,,,,
サイクルスリップ 発生回数,0,,,,,,,,,,,,,
マルチパス発生回数,112,,,,,,,,,,,,,
年月日,時刻,可視衛星数,GDOP,PDOP,HDOP,VDOP,緯度[deg],経度[deg],高度[m],位置
E[m],位置 N[m],位置 U[m],速度 E[m/s],速度 N[m/s],速度 U[m/s],ロール角[deg],ピッチ角
[deg],方位角[deg],アンビギュイティ,サイクルスリップ
20071113,031406,5,5.185,4.395,2.869,3.329,42.9951629,143.5949951,222.909,-16.629,-
7.673,2.210,-0.002,0.013,0.066,1.874,3.170,0.444,1,0,0.002537,0.000000,42.995163,143
.594995

```

IV-II-XV 基準局 GPS データ受信時刻記録ファイル

(1) ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式
2	ファイル名	BaseTime.log
3	格納フォルダ	リアルモード結果サブフォルダ
4	特記事項	1 行が 1 回の基地局 GPS データ受信時のレコード レコード数の制限はない

(2) ファイルレイアウト

No.	項目名	記述内容	備考
1	移動局 GPS 日時	半角英数字 19 桁 YYYY/MM/DD HH:MM:SS	受信した基地局データ内の GPS 日時
2	マシン時刻	半角英数字 23 桁 YYYY/MM/DD HH:MM:SS.mmm	基地局データを受信した時 のマシン日時

注 1) 各項目は TAB で区切る。末尾は改行コード (0x0d 0x0a) とする。

注 2) 1 レコードは固定長となる。

(3) 記述例

2007/11/14 05:10:22 2007/11/14 14:10:02.828

IV-II-XVI 移動局 GPS データ受信時刻記録ファイル

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式
2	ファイル名	RoverTime.log
3	格納フォルダ	リアルモード結果サブフォルダ
4	特記事項	1行が1回の移動局 GPS データ受信時のレコード レコード数の制限はない

(2)ファイルレイアウト

No.	項目名	記述内容	備考
1	移動局 GPS 日時	半角英数字 19 桁 YYYY/MM/DD HH:MM:SS	受信した移動局データ内の GPS 日時
2	マシン時刻	半角英数字 23 桁 YYYY/MM/DD HH:MM:SS.mmm	移動局データを受信した時 のマシン日時

注 1) 各項目は TAB で区切る。末尾は改行コード (0x0d 0x0a) とする。

注 2) 1レコードは固定長となる。

(3)記述例

2007/11/14 05:10:22 2007/11/14 14:10:02.625

IV-II-XVII GGA ファイル

(1)ファイル諸元

No.	項目	仕様
1	ファイル形式	テキスト形式
2	ファイル名	rov_gga.txt
3	格納フォルダ	リアルモード結果サブフォルダ
4	特記事項	ファイル名のNNNは001からの連番とする。

(2)ファイルレイアウト

No.	項目名	記述内容	備考
1	\$SGPGGA	ヘッダ	“\$SGPGGA”固定
2	utc	UTC 時刻 hhmmss.ss	
3	lat	緯度 DDDmm.mm	
4	lat dir	緯度方向 N：北緯、S：南緯	
5	lon	経度 DDDmm.mm	
6	lon dir	経度方向 E：東経、W：西経	
7	GPS qual	GPS データ品質 0：Fix not available or invalid 4：RTK fixed ambiguity solution(RT2) 5：RTK floating ambiguity solution(RT20)	
8	#sats	使用衛星数	
9	hdops	HDOPS	
10	alt	標高	
11	units	標高の単位 M：meters	
12	undulation	標高と WGS84 の差	
13	u-units	標高と WGS84 の差の単位 M：meters	
14	age	GPS データの世代	
15	stn ID	基準局 ID	
16	*xx	チェックサム	
17	[CR][LF]	レコードの区切り	

(3)記述例

\$GPGGA,031348.00,4259.7102930,N,14335.7000096,E,5,05,2.9,222.812,M,0.00,M,

00,0000*00

\$GPGGA,031349.00,4259.7102944,N,14335.6999918,E,5,04,3.4,222.838,M,0.00,M,

00,0000*00

\$GPGGA,031350.00,4259.7097824,N,14335.6997082,E,4,04,3.4,222.899,M,0.00,M,

00,0000*00

WORD No.	データ名	記号	データの書式																LSB	範囲*	単位
			15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0			
12	GPS時刻(秒)	GPSSEC	S	M	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	L	60/2 ¹⁵	0 ~ 60	sec	

(1)通信仕様

IMU のシリアル通信仕様を以下に示す。

- ① ボーレート : 57600bps
- ② データビット : 8
- ③ ストップビット : 1
- ④ パリティ : なし

V-II 基準局 GPS データ仕様

基準局 GPS データの仕様を以下に示す。

(1)データフォーマット

・RANGEA:衛星測距情報

```
#RANGEA, COM1, 0, 70, 0, FINESTEERING, 1348, 279093. 500, 00080000, dda7, 337; (フィールド* 1)
4, (フィールド* 2)
3, 0, 20399564. 065, 1. 308, -107200431. 855, 0. 017, -991. 188, 45. 9, 8. 344, 08109c44, (フィールド* 3~12)
3, 0, 20399563. 195, 5. 297, -83532809. 314, 0. 060, -772. 500, 38. 1, 2. 380, 01309c4b,
19, 0, 20841254. 797, 1. 311, -109521525. 666, 0. 017, 862. 938, 44. 7, 8. 320, 08109cc4,
19, 0, 20841251. 573, 1. 260, -85341462. 088, 0. 051, 672. 250, 40. 8, 4. 880, 01309ccb*9d0ddbe9
```

(2)仕様

フィールド No.	記述	フィールド内容	単位	フォーマット
1	#RANGEA, COM1, . . . , 00080000, dda7, 337	ヘッダ		
2	4	観測数		Long
3	3	衛星番号		UShort
4	0	Reserved		UShort
5	20399564. 065	擬似距離	m	Double
6	1. 308	擬似距離 標準偏差	m	Float
7	-107200431. 855	搬送波位相 積算値		Double

フィールド No.	記述	フィールド内容	単位	フォーマット
8	0.017	搬送波位相 積算値 標準偏差		Float
9	-991.188	ドップラー 周波数	Hz	Float
10	45.9	CN 比	dB-Hz	Float
11	8.344	ロックタイム	sec	Float
12	08109c44	トラッキング ステータス		ULong
13...	Next PRN offset =(ヘッダ) + 4 + (観測数 x 44)			
可変	9d0ddbe9	32bit CRC	Hex	
可変	[CR][LF]	行終端		

(1)通信仕様

GPS データのシリアル通信仕様を以下に示す。

- ⑤ ボーレート : 57600bps
- ⑥ データビット : 8
- ⑦ ストップビット : 1
- ⑧ パリティ : なし

V-III 移動局 GPS データ仕様

移動局 GPS 受信機から受け取るデータを下表に示す。

No.	項目	仕様
1	エフェメリスデータ	個々の衛星の位置を求めるためのパラメータが格納されたデータ
2	アルマナックデータ	全衛星に関する位置パラメータが格納されたデータ
3	GPS データ	各衛星の状態を表す数値が格納されたデータ

V-III-I エフェメリスデータ仕様

エフェメリスデータの仕様を以下に示す。

(1)データフォーマット

・GPSEHEMA:デコード済み GPS エフェメリス

#GPSEHEMA, COM1, 7, 82. 5, SATTIME, 1400, 451890. 000, 00000000, 9145, 1374; (フィールド* 1)
 19, 451890. 0, 0, 99, 99, 1400, 1400, 453600. 0, 2. 656028347e+07, 4. 798771317e-09, 2. 698900725e+0
 0, 3. 5069782753e-03, -1. 056651579e+00, 2. 067536116e-07, 6. 942078471e-06, 2. 42375000e+02, 4.
 40625000e+00, 1. 154839993e-07, 2. 793967724e-08, 9. 5802197742e-01, -1. 178620523e-10, 2. 7196
 61310e+00, -8. 00354767e-09, 355, 453600. 0, -1. 443549991e-08, 3. 27718e-05, 3. 86535e-12, 0. 000
 00, TRUE, 1. 458593082e-04, 4. 00000000e+00*caaac583 (フィールド* 2~35)

(2)仕様

フィー ルド No.	記述	フィールド内容	単位	フォー マ ット
1	#GPSEHEMA,COM1,... ,9145,1374	ヘッダ		
2	19	PRN: 衛星番号		ULong
3	451890.0	tow: Time of week	sec	Double
4	0	Health: 衛星の健康状態		ULong
5	99	IODE1: エフェメリスの発行番号 1		ULong
6	99	IODE2: エフェメリスの発行番号 2		ULong
7	1400	Week: GPS week		ULong
8	1400	z week: week number from subframe 1 of the ephemeris		ULong
9	453600.0	toe: 軌道の元期	sec	Double
10	2.656028347e+07	A: 軌道長半径	m	Double
11	4.798771317e-09	ΔN : 平均運動の補正值	rad/sec	Double
12	2.698900725e+00	M_0 : 元期の平均近点角	rad	Double
13	3.5069782753e-03	Ecc: 離心率		Double
14	-1.056651579e+00	ω : 近地点引数	rad	Double
15	2.067536116e-07	Cuc: 緯度引数に対する余弦補正係 数	rad	Double
16	6.942078471e-06	cus: 緯度引数に対する正弦補正係 数	rad	Double
17	2.42375000e+02	crc: 軌道半径に対する正弦補正係	m	Double

フィールドNo.	記述	フィールド内容	単位	フォーマット
		数		
18	4.40625000e+00	Cr _s : 軌道半径に対する余弦補正係数	m	Double
19	1.154839993e-07	ci _c : 軌道傾斜角に対する余弦補正係数	rad	Double
20	2.793967724e-08	ci _s : 軌道傾斜角に対する正弦補正係数	rad	Double
21	9.5802197742e-01	I ₀ : 元期の軌道傾斜角	rad	Double
22	-1.178620523e-10	Idot: 軌道傾斜角変化率	rad/sec	Double
23	2.719661310e+00	ω ₀ : 元期の昇交点経度	rad	Double
24	-8.00354767e-09	Ω dot: 昇交点経度変化率	rad/sec	Double
25	355	iodc: クロック情報番号		ULong
26	453600.0	Toc: クロック時刻	sec	Double
27	-1.443549991e-08	Tgd: 電離層群遅延誤差	sec	Double
28	3.27718e-05	a _{f0} : 衛星時計バイアス	sec	Double
29	,3.86535e-12	a _{f1} : 衛星時計ドリフト	sec/sec	Double
30	0.00000	a _{f2} : 衛星時計ドリフト率	sec/sec/sec	Double
31	TRUE	AS: Anti-Spoofing		Enum
32	1.458593082e-04	N: 平均運動	rad/sec	Double
33	4.00000000e+00	URA: ユーザー距離精度		Double
34	caaac583	32-bit CRC		Hex
35	[CR][LF]	行終端		

V-III-II アルマナックデータ仕様

アルマナックデータの仕様を以下に示す。

(1) データフォーマット

・IONUTC:電離層モデルパラメータ UTC 時刻パラメータ

```
#IONUTCA, COM1, 0, 65. 0, FINESTEERING, 1400, 451350. 108, 00000000, ec21, 1374;      (フィールド 1)
1. 210719347000122e-08, -7. 450580596923827e-09, -1. 192092895507812e-07, 5. 960464477539062
e-08, 9. 830400000000000e+04, -8. 192000000000000e+04, -1. 966080000000000e+05, 4. 5875200000
00000e+05, 1401, 61440, 3. 7252902984619141e-09, 9. 769962617e-15, 1355, 7, 14, 14, 0*3e8b2a5e
(フィールド 2~20)
```

(2)仕様

フィールド No.	記述	フィールド内容	単位	フォーマット
1	#IONUTC, COM1, . . . , ec21, 1374	ヘッダ		
2	1. 210719347000122e-08	α_0 : 電離層遅延パラメータ		Double
3	-7. 450580596923827e-09	α_1 : 電離層遅延パラメータ		Double
4	-1. 192092895507812e-07	α_2 : 電離層遅延パラメータ		Double
5	5. 960464477539062e-08	α_3 : 電離層遅延パラメータ		Double
6	9. 830400000000000e+04	β_0 : 電離層遅延パラメータ		Double
7	-8. 192000000000000e+04	β_1 : 電離層遅延パラメータ		Double
8	-1. 966080000000000e+05	β_2 : 電離層遅延パラメータ		Double
9	4. 587520000000000e+05	β_3 : 電離層遅延パラメータ		Double
10	1401	W: UTC の係数		ULong
11	61440	T: UTC の係数		ULong
12	3. 7252902984619141e-09	A_0 : UTC の係数		Double
13	9. 769962617e-15	A_1 : UTC の係数		Double
14	1355	Future week number		ULong
15	7	Day number		ULong
16	14	Delta time due to leap seconds		Long
17	14	Future delta time due to leap seconds		Long
18	0	Reserved		ULong
19	3e8b2a5e	32-bit CRC		Hex
20	[CR] [LF]	行終端		

V-III-III GPS データ仕様

移動局 GPS 受信機から受け取る GPS データは、各衛星の状態を表す数値が格納されたデータで、基地局 GPS 受信機の“GPS データ”と同じである。

VI 出力データ

本ソフトウェアの出力データの仕様を以下に示す。

No.	項目	データ サイズ	出力先		仕様
			画面	ファイル	
1	測位技術	文字列	○	○	使用測位技術を示す文字列 “複合航法” or “RTK-GPS” or “従来技術”
2	基線長	double	○	○	測位演算結果 基準局と移動局の距離 [m]
3	総 epoch 数	int	○	○	処理したエポック数
4	アンビギュイティ Fix 率	double		○	測位演算結果 アンビギュイティ Fix 率 [%]
5	サイクルスリップ発 生回数	int		○	測位演算結果 サイクルスリップ発生回数 [回]
6	サイクルスリップ発 生状況	文字列 int	○	○	測位演算結果 サイクルスリップ発生状況 サイクルスリップを検出した 場合 “○” (1) サイクルスリップを検出して いない場合 “-” (0)
7	マルチパス発生回数	int		○	測位演算結果 マルチパス発生回数 [回]
8	マルチパス発生状況	文字列	○		測位演算結果 マルチパス発生状況 マルチパスを検出した場合 “○” マルチパスを検出していない 場合 “-”
9	GPS 日付			○	測位演算に使用した GPS データ の日付
10	GPS 時刻			○	測位演算に使用した GPS データ の時刻
11	捕捉衛星数(可視衛 星数)	int	○	○	測位演算に使用した GPS データ の捕捉衛星数
12	GDOP	double	○	○	測位演算結果 GDOP 値

No.	項目	データ サイズ	出力先		仕様
			画面	ファイル	
13	PDOP	double	○	○	測位演算結果 PDOP 値
14	HDOP	double	○	○	測位演算結果 HDOP 値
15	VDOP	double	○	○	測位演算結果 VDOP 値
16	緯度	double		○	測位演算結果 現在位置(LLH 座標系) 緯度
17	経度[deg]	double		○	測位演算結果 現在位置(LLH 座標系) 経度
18	高度[m]	double		○	測位演算結果 現在位置(LLH 座標系) 高度
19	位置 E	double	○	○	測位演算結果 現在位置(ENU 座標系) 位置 E
20	位置 N	double	○	○	測位演算結果 現在位置(ENU 座標系) 位置 N
21	位置 U	double	○	○	測位演算結果 現在位置(ENU 座標系) 位置 U
22	速度 E	double	○	○	測位演算結果 現在速度(ENU 座標系) 速度 E
23	速度 N	double	○	○	測位演算結果 現在速度(ENU 座標系) 速度 N
24	速度 U	double	○	○	測位演算結果 現在速度(ENU 座標系) 速度 U
25	ロール角	double	○	○	測位演算結果 ロール角
26	ピッチ角	double	○	○	測位演算結果 ピッチ角
27	方位角	double	○	○	測位演算結果 方位角
28	Fix 状況(アンビギュ イティ)	文字列 int	○	○	測位演算結果 アンビギュイティ Fix 状況 Fix 時 “Fix” (1) NoFix 時 “NoFix” (0)、

No.	項目	データ サイズ	出力先		仕様
			画面	ファイル	
29	サイクルスリップ	int		○	測位演算結果 サイクルスリップ有無 0:無し、 1:有り
30	衛星配置 衛星方位 角	double	○		測位演算結果 衛星方位角
31	衛星配置 衛星仰角	double	○		測位演算結果 衛星仰角

VII 処理仕様

VII-I 測位演算処理

測位演算処理は 2 章の演算処理内容と同じである。

VII-II IMU センサデータ取込処理

IMU センサから一定周期（リアルタイム処理用初期設定ファイルで指定）で出力されるデータを受信し、1 秒分のデータが揃った時点で IMU センサデータ用リングバッファに格納する処理。

【仕様】

(1)0.001 秒から 1.000 秒までのデータを 1 秒分のデータ範囲とする。

出力周期が 50Hz の場合、20msec 間隔でデータが出力されるので 0.020 秒から 1.000 秒までの 50 個のデータが 1 秒分のデータとなる。

(2)1 秒分のデータ受信確定の判定は、受信したデータの msec 値が前回受信したデータの msec 値よりも小さい場合とする。

(3)途中 IMU センサからのデータが受信できなかった場合は最後に受信したデータで補間する。

出力周期 50Hz の場合の処理イメージを図 VII-II-1 に示す。

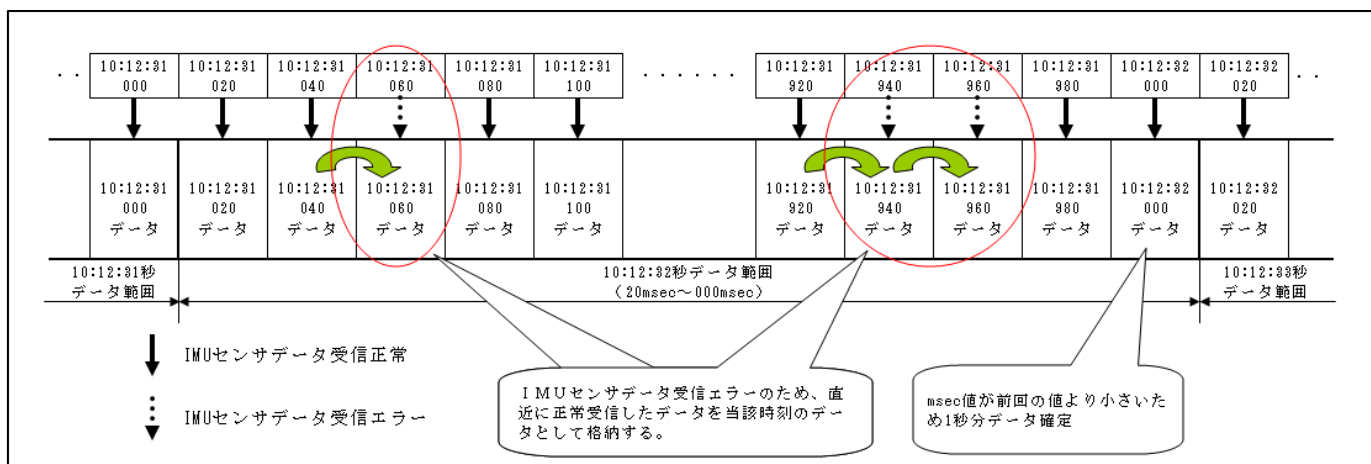


図 VII-II-1 IMU センサデータ取込処理イメージ

VII-III 受信データ同期処理

測位演算処理は IMU センサ、基準局 GPS 受信機および移動局 GPS 受信機から受信した各データの時刻を同期させて処理を行う必要がある。

【仕様】

- (1)IMU センサデータ、基準局 GPS データ、移動局 GPS データそれぞれのリングバッファから読み込みポインタが指すデータを取得する。
- (2)取得した各データの GPS 時刻を比較し異なる場合、最新時刻のデータのみを保持し他のデータは破棄する。次回データ取得は破棄したデータのみリングバッファから取得する。またこの場合測位演算処理は行わない。
- (3)取得した各データの GPS 時刻を比較し全ての時刻が一致している場合、測位演算処理を行う。測位演算処理終了後、全てのデータを破棄する。次回データ取得は全てのデータをリングバッファから取得する。

受信データ同期処理イメージを図 VII-III-1 に示す。

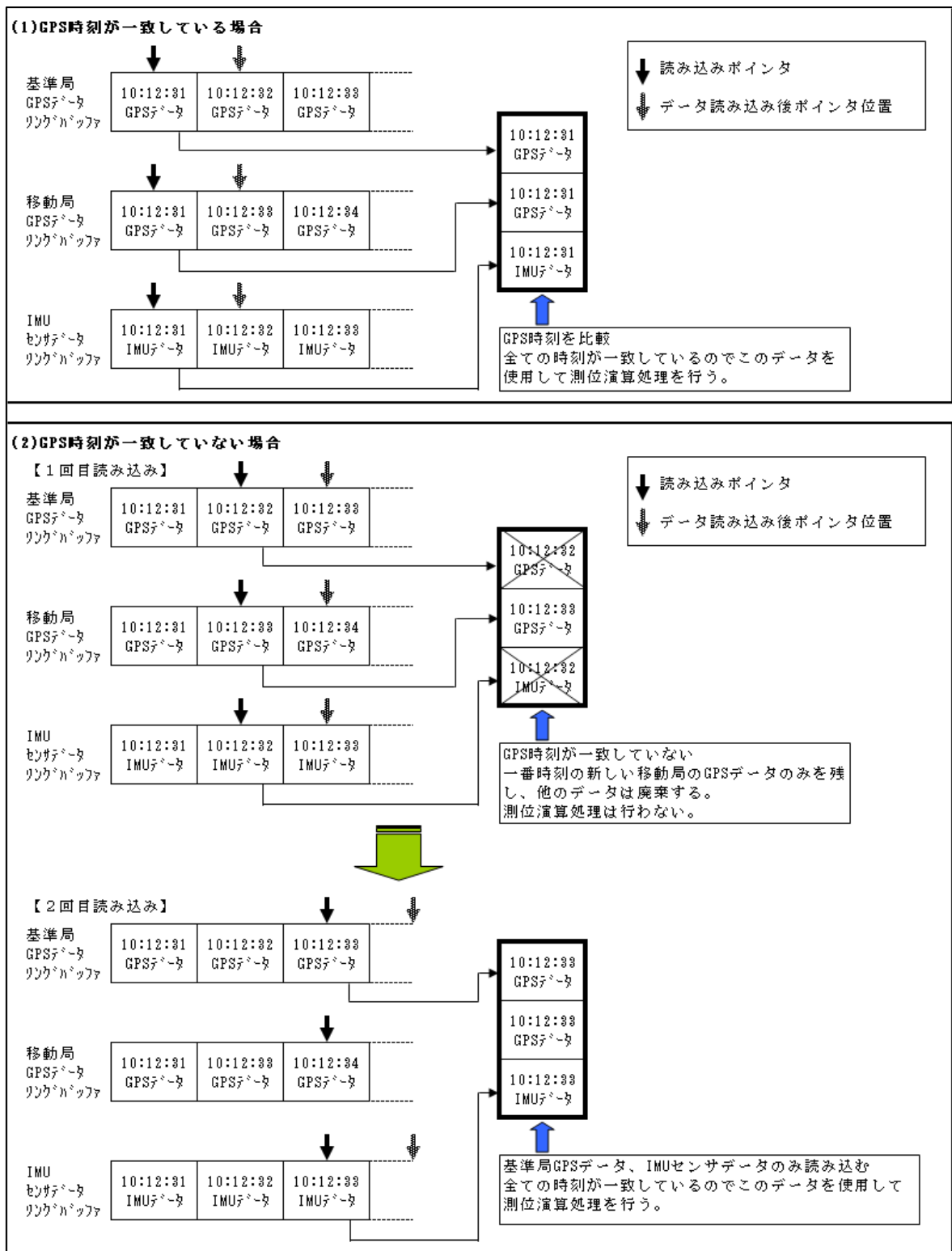


図 VII-III-1 受信データ同期処理イメージ

VII-IV 演算結果ファイル作成処理

演算結果ファイルの位置(ENU)および速度(ENU)に出力する値は測位技術およびアンビギュイティの決定状況により異なる。

表 VII-IV-1 にその内容を示す。

表 VII-IV-1 演算結果ファイル 出力内容

測位技術	アンビギュイティ 状態	ENU 位置	ENU 速度
複合航法	未決定	慣性航法処理により演算した ENU 座標系位置を設定する。	慣性航法処理により演算した ENU 座標系速度を設定する。
	決定	RTK 処理により演算した ENU 座標系位置を設定する。	
RTK	未決定	RTK 処理により演算した ENU 座標系位置を設定する。	0
	決定		

演算結果ファイルのその他項目に出力する値は測位技術およびアンビギュイティの決定状況により変わることはない。

VIII モジュール構成

本アプリケーションを構成するモジュールとその処理内容（機能）の対応を表 VII-IV-1 に示す。

表 VII-IV-1 モジュールー処理対応

No.	モジュール	処理	機能
1	IMU 通信 DLL	通信処理	IMU センサとのシリアル通信の制御を行う機能
2	BaseGPS 通信 DLL	通信処理	基準局 GPS 受信機通信機能
3	RovGPS 通信 DLL	通信処理	移動局 GPS 受信機通信機能
4	IMU スレッド	データ取込処理	IMU センサデータ取込機能
5	BaseGPS スレッド	データ取込処理	基準局 GPS データ取込機能
6	RoverGPS スレッド	データ取込処理	移動局 GPS データ取込機能
7	IMU データリングバッファ	データ管理処理	IMU センサデータ管理機能
8	基準局 GPS データリングバッファ	データ管理処理	基準局 GPS データ管理機能
9	移動局 GPS データリングバッファ	データ管理処理	移動局 GPS データ管理機能
10	エフェメリスデータバッファ	データ管理処理	エフェメリスデータ管理機能
11	アルマナックデータバッファ	データ管理処理	アルマナックデータ管理機能
12	ファイル読み込み	ファイル読み込み処理	各種ファイルからのデータ読み込みを行う機能 主な対象ファイルは以下 ①測位演算初期設定ファイル ②プロジェクト定義ファイル ③リアルタイム処理用初期設定ファイル ④RTK-GPS 初期設定ファイル ⑤複合航法初期設定ファイル ⑥RINEX Navigation ファイル ⑦基地局 GPS 観測データファイル (Base.YY0)

No.	モジュール	処理	機能
			⑧移動局 GPS 観測データファイル ⑨IMU センサデータファイル
5	ファイル書き込み	ファイル書き込み処理	各種ファイルへのデータ書き込みを行う機能 主な対象ファイルは以下 ①測位演算プログラム処理エラーログファイル ②RINEX Navigation ファイル ③基地局 GPS 観測データファイル ④移動局 GPS 観測データファイル ⑤IMU センサデータファイル ⑥演算結果ファイル ⑦RTK-GPS 初期設定ファイル ⑧複合航法初期設定ファイル
6	画面表示メイン	<ul style="list-style-type: none"> ・ GPS 時刻同期処理 ・ 画面表示処理 	<ul style="list-style-type: none"> ・ IMU センサデータ、基準局 GPS データ、移動局 GPS データの GPS 時刻のチェックを行い、一致している場合は測位演算機能を起動する機能 ・ 測位演算の結果を画面に表示する機能
7	測位演算処理	測位演算処理	IMU センサデータ、基準局 GPS データ、移動局 GPS データ、エフェメリスデータ、アルマナックデータを元に測位演算を行う機能

VIII-I リアルモード実行時

リアルモード実行時のモジュール関連を図 VIII-I-1 に示す。

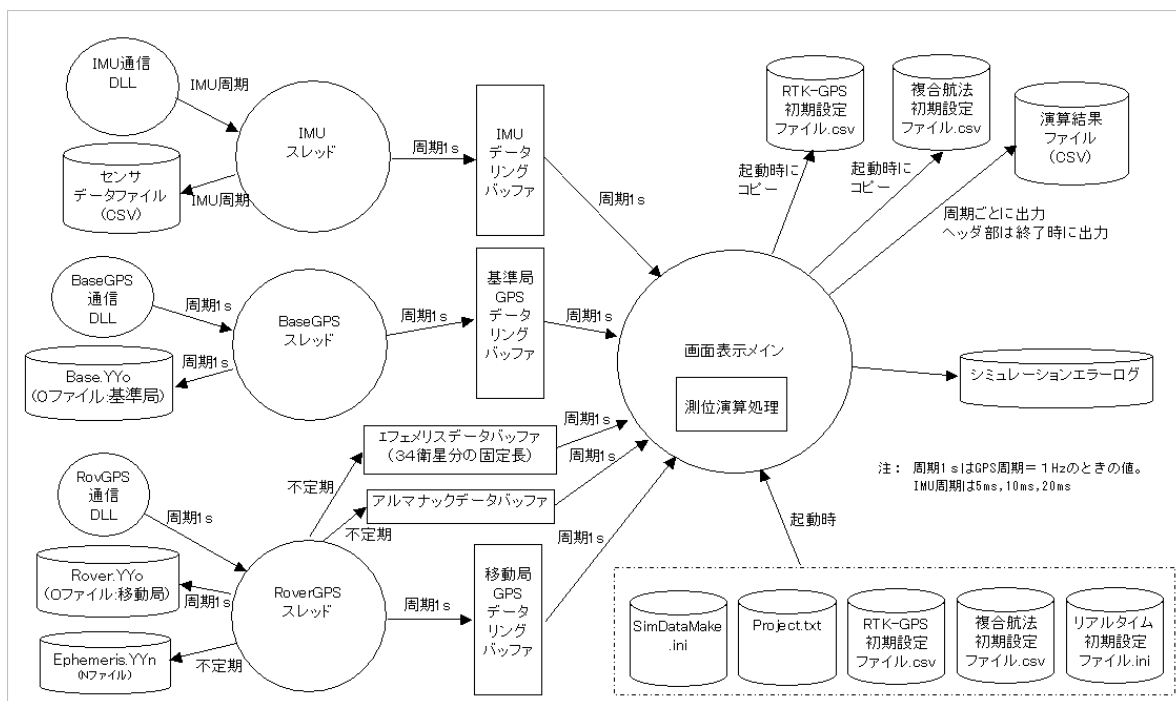


図 VIII-I-1 リアルモード実行時モジュール関連図

図 VIII-I-1 におけるそれぞれのモジュールは以下の機能を持つ。

(1)IMU 通信 DLL

- ①IMU センサとシリアル通信を行い、IMU センサから送信される IMU センサデータを受信する。
- ②受信した IMU センサデータを IMU スレッドに渡す。

(2)BaseGPS 通信 DLL

- ①基準局 GPS 受信機とシリアル通信を行い、基準局 GPS 受信機から送信される基準局 GPS データを受信する。
- ②受信した基準局 GPS データを BaseGPS スレッドに渡す。

(3)RoverGPS 通信 DLL

- ①移動局 GPS 受信機とシリアル通信を行い、移動局 GPS 受信機から送信される移動局 GPS データ、エフェメリスデータとアルマナックデータを受信する。
- ②受信した移動局 GPS データ、エフェメリスデータ、アルマナックデータを RoverGPS スレッドに渡す。

(4)IMU スレッド

- ①IMU 通信 DLL から IMU センサデータを受け取り、センサデータファイルに格納すると

同時に内部バッファに蓄積する。

- ②IMU センサデータが内部バッファに 1 秒分蓄積された時点で、1 秒分の IMU センサデータをリングバッファに転送する。

(5)BaseGPS スレッド

- ①BaseGPS 通信 DLL から基準局 GPS データを受け取り、BaseGPS O ファイルに格納すると同時にリングバッファに転送する。

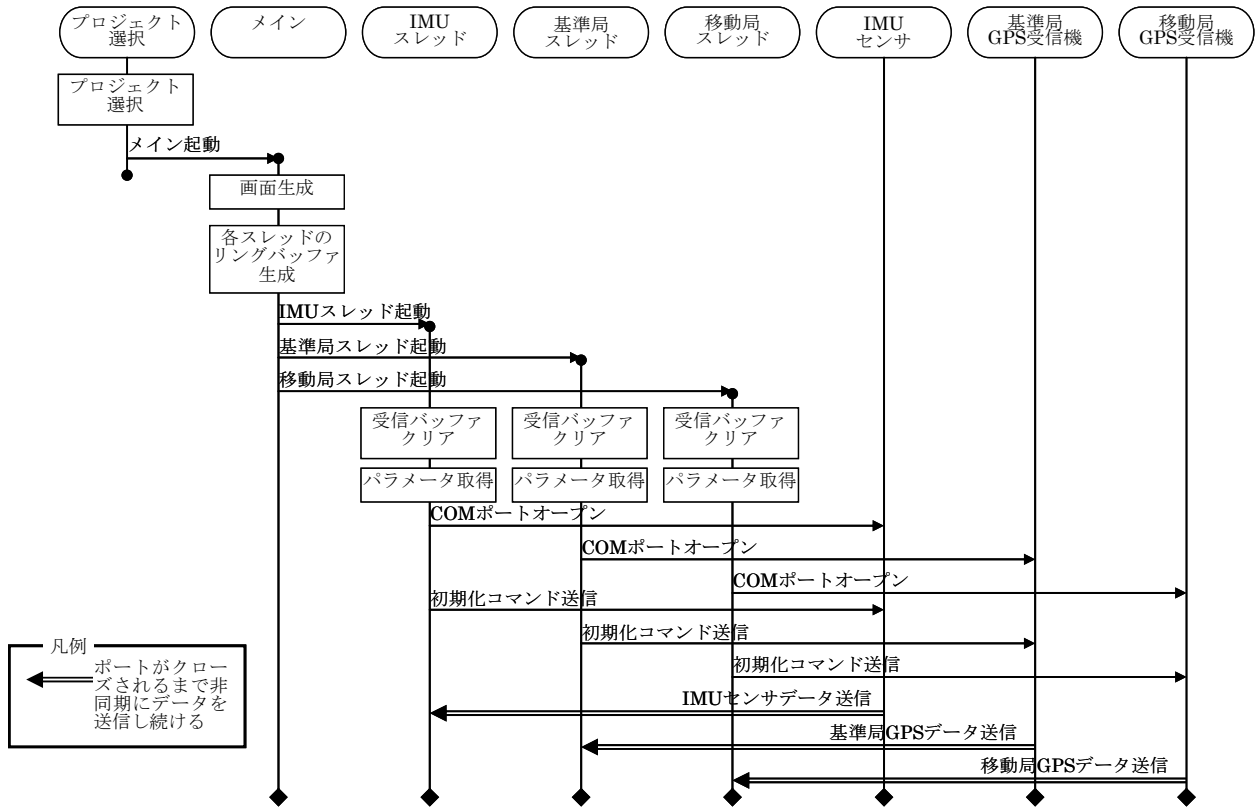
(6)RoverGPS スレッド

- ①RoverGPS 通信 DLL から移動局 GPS データを受け取り、RoverGPS O ファイルに格納すると同時にリングバッファに転送する。
- ②RoverGPS 通信 DLL から不定期に渡されるエフェメリスデータ、アルマナックデータを受け取り、Ephemeris N ファイルに格納すると同時にエフェメリスデータバッファ、アルマナックデータバッファに転送する。

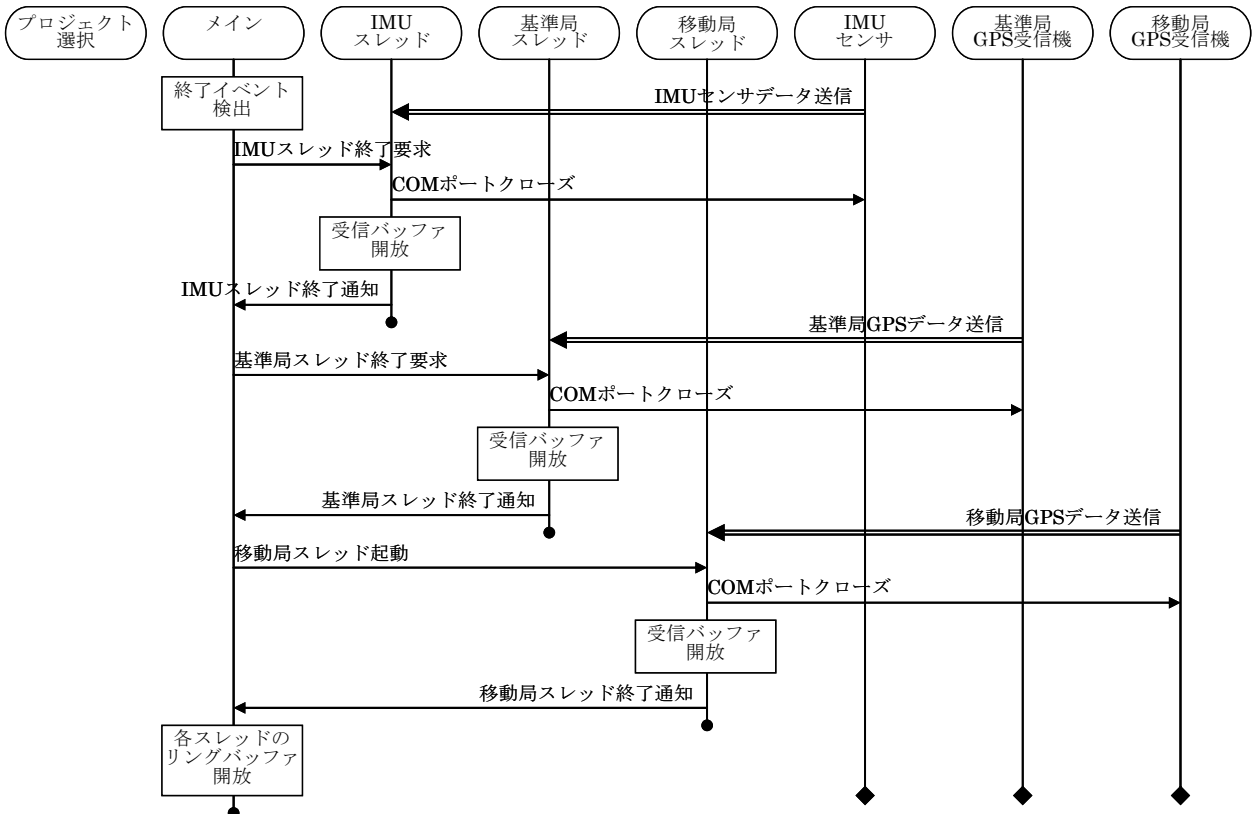
(7)画面表示メイン

- ①起動時に初期設定ファイル (SimDataMake.ini、Project.txt、RTK-GPS 初期設定ファイル.csv、複合航法初期設定ファイル.csv、リアルタイム初期設定ファイル.ini) から設定データを読み込み実行パラメータの初期化を行う。
- ②リアルモード実行時の条件確認用として RTK-GPS 初期設定ファイル.csv、複合航法初期設定ファイル.csv をリアルモード結果フォルダにコピーする。
- ③常時 IMU センサデータ格納リングバッファ、基準局 GPS データ格納リングバッファ、移動局 GPS データ格納リングバッファを監視し、ある時刻のデータが揃った時点で測位演算処理を実行する。
- ④測位演算処理実行結果を元に画面の表示を更新すると同時に測位演算処理実行結果を演算結果ファイルに格納する。
- ⑤測位演算処理においてエラーが発生した場合は、シミュレーションエラーログを出力する。

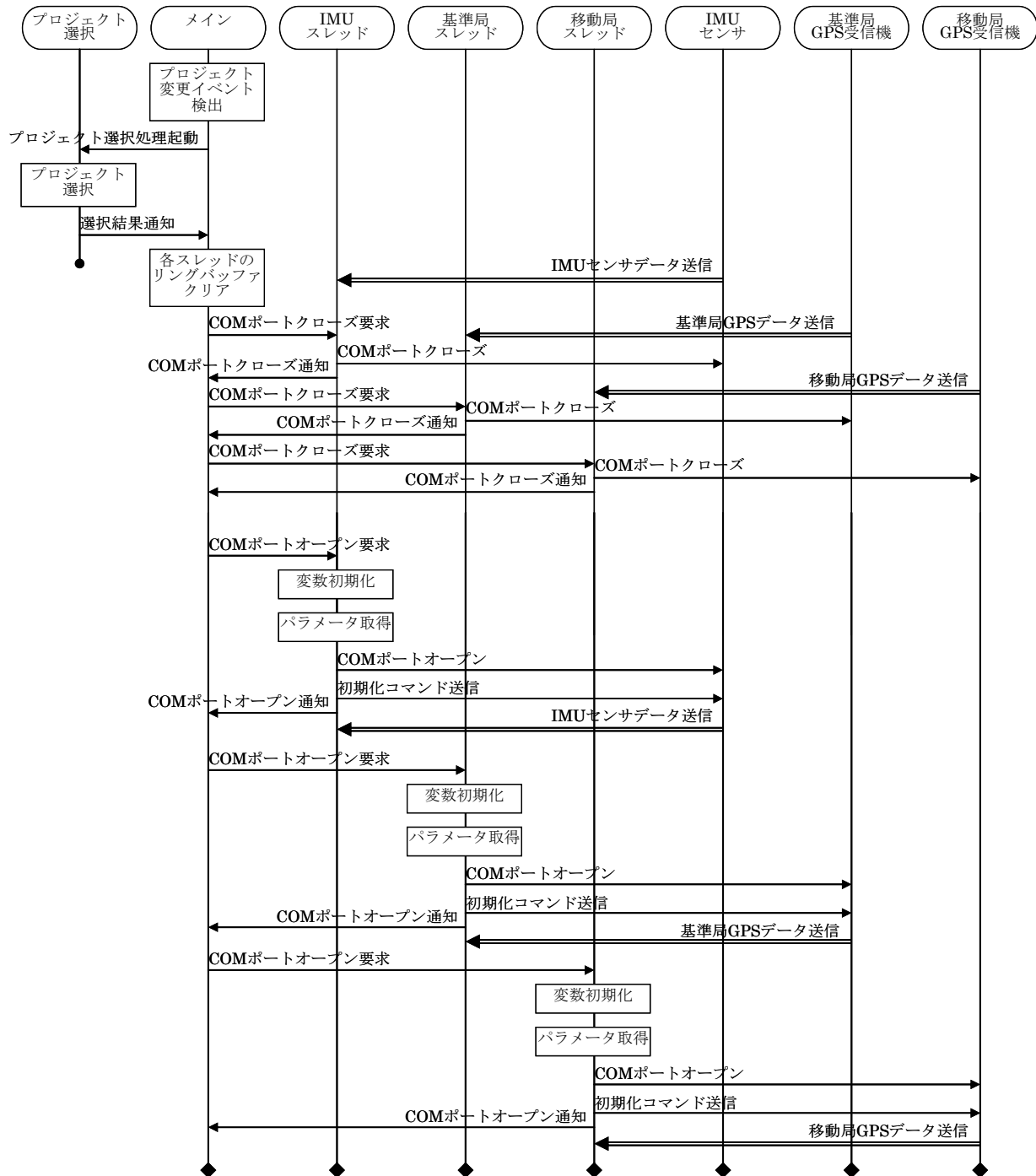
● 起動シーケンス



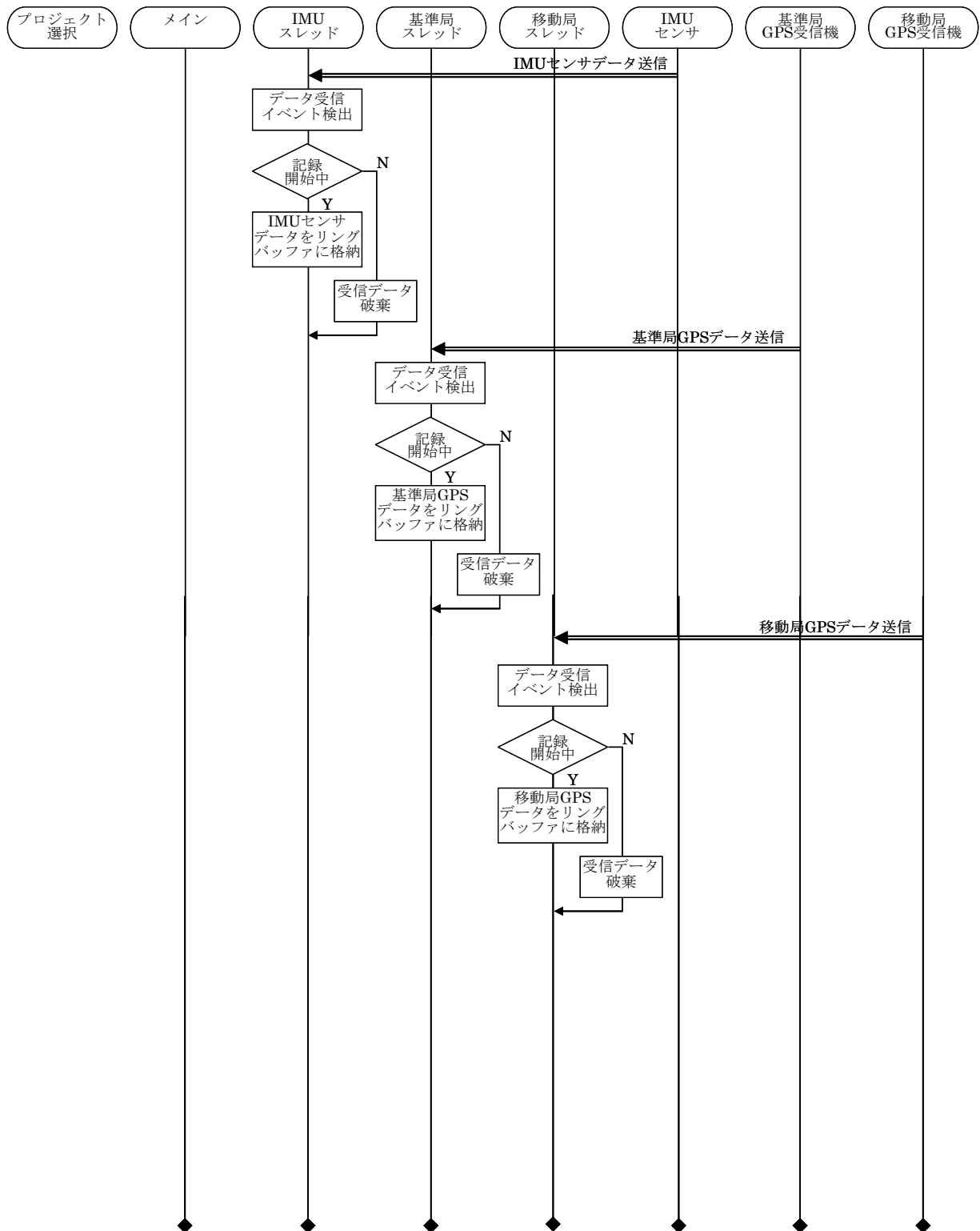
● 終了シーケンス



● プロジェクト変更シーケンス



• データ受信シーケンス



VIII-II 後処理モード実行時

後処理モード実行時のモジュール関連を図 VIII-II-1 に示す。

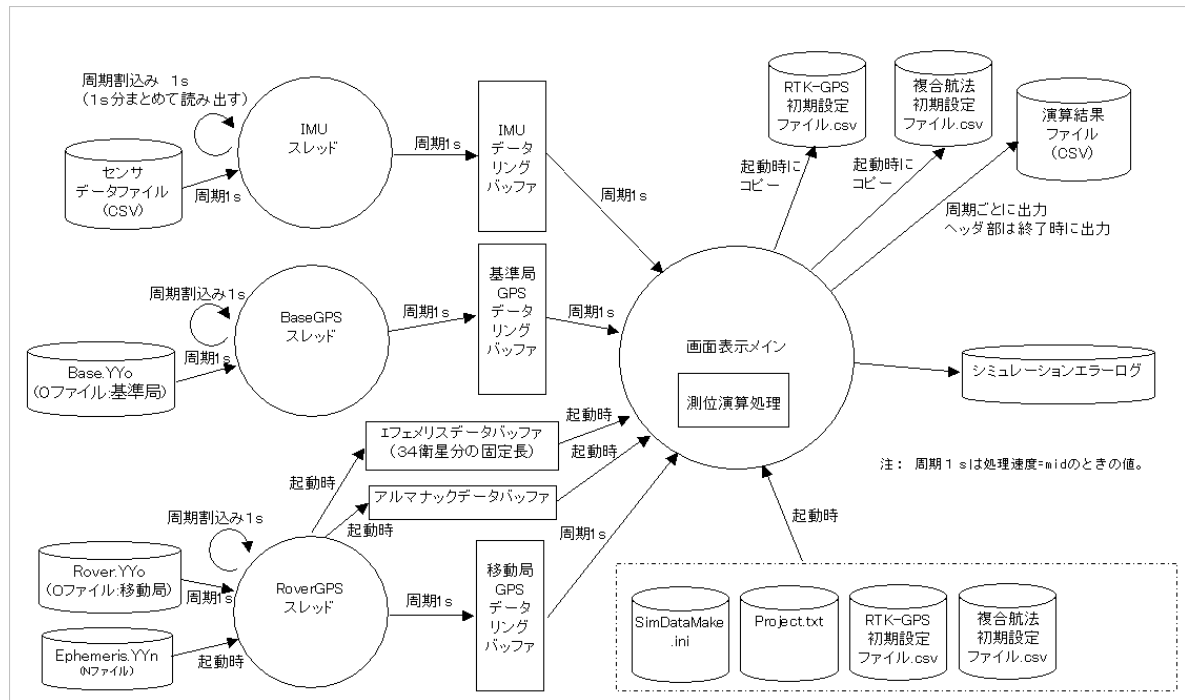


図 VIII-II-1 後処理モード実行時モジュール関連図

図 VIII-II-1 におけるそれぞれのモジュールは以下の機能を持つ。

(1)IMU スレッド

- ①割り込み周期ごとにセンサデータファイルから1秒分の IMU センサデータを読み込み、リングバッファに転送する。

(2)BaseGPS スレッド

- ①割り込み周期ごとに BaseGPS O ファイルから1秒分の基準局 GPS データを読み取り、リングバッファに転送する。

(3)RoverGPS スレッド

- ①割り込み周期ごとに RoverGPS O ファイルから1秒分の移動局 GPS データを読み取り、リングバッファに転送する。
- ②起動時に Ephemeris N ファイルからエフェメリスデータ、アルマナックデータを読み取り、エフェメリスデータバッファ、アルマナックデータバッファに転送する。

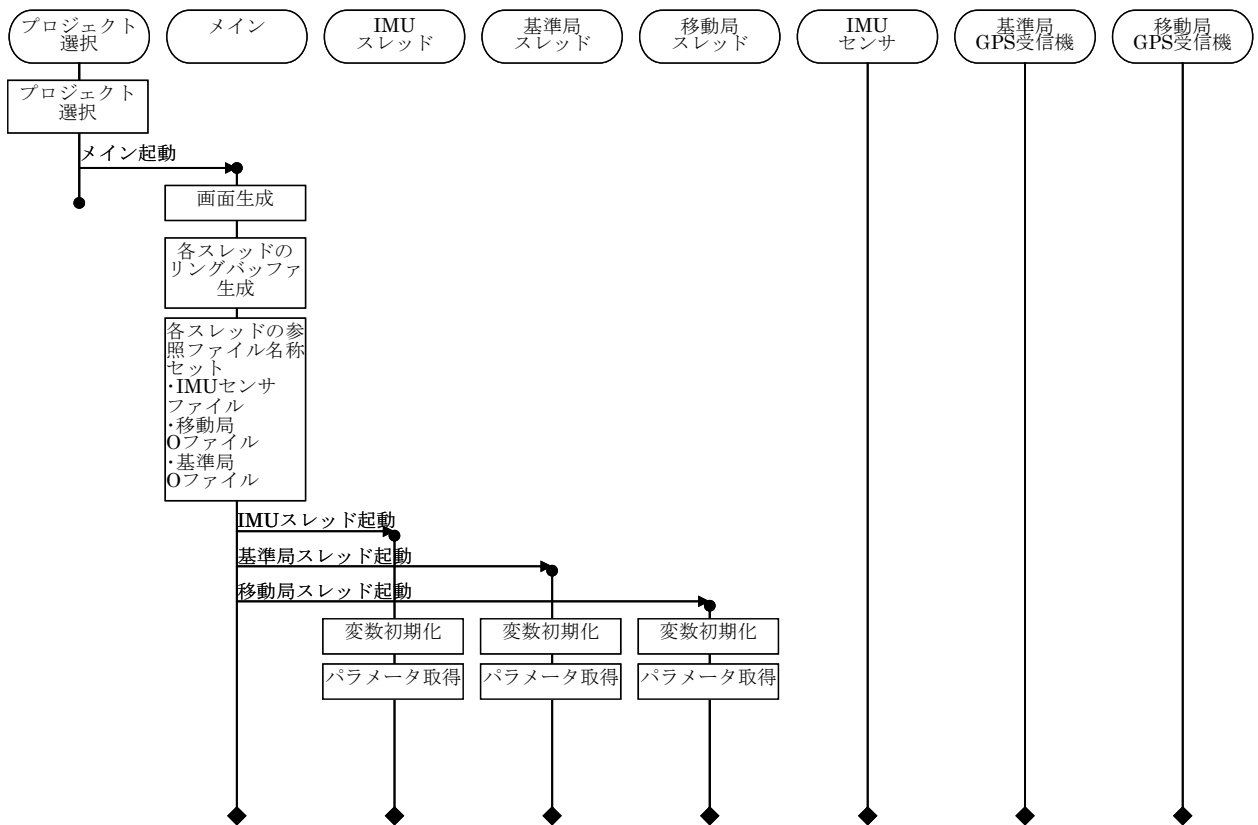
(4)画面表示メイン

- ①起動時に初期設定ファイル (SimDataMake.ini、Project.txt、RTK-GPS 初期設定ファイル.csv、複合航法初期設定ファイル.csv) から設定データを読み込み実行パラメータの初期化を行う。
- ②後処理モード実行時の条件確認用として RTK-GPS 初期設定ファイル.csv、複合航法初期

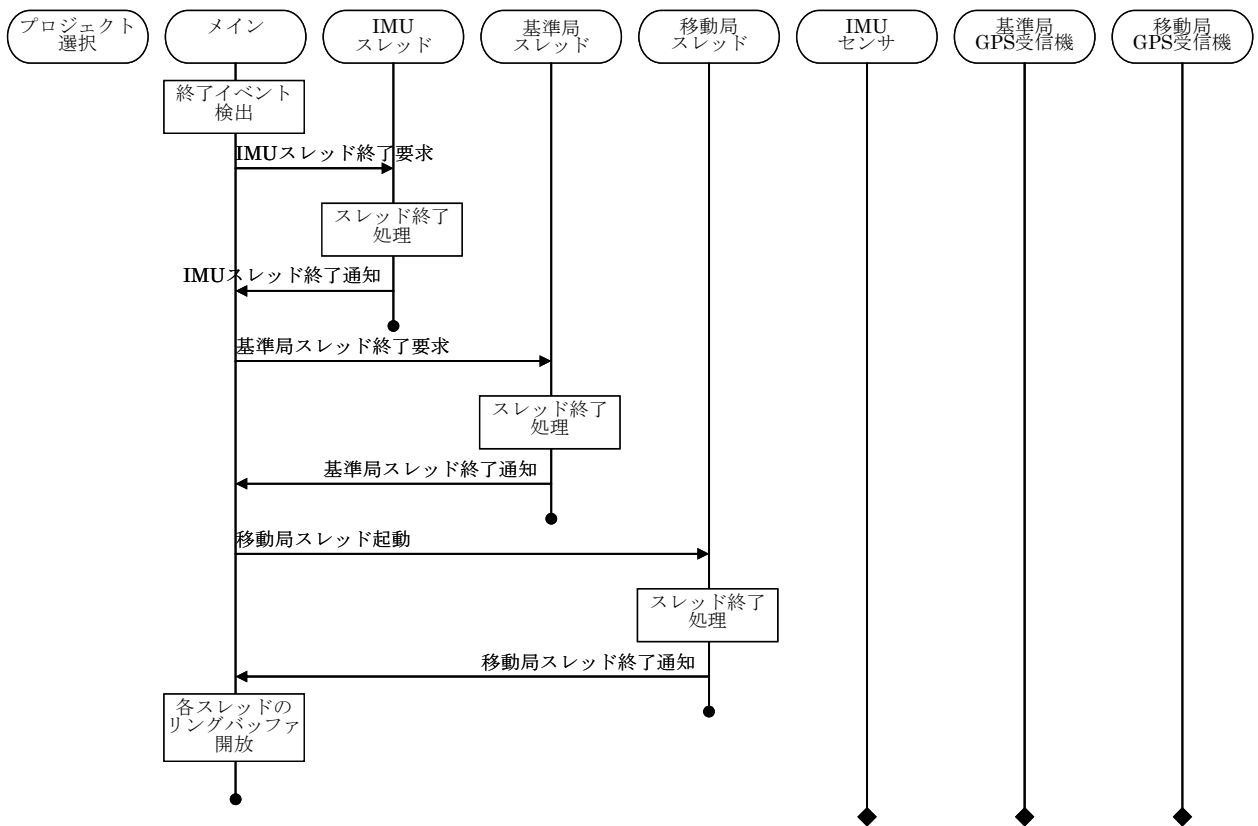
設定ファイル.csv を後処理モード結果フォルダにコピーする。

- ③常時 IMU センサデータ格納リングバッファ、基準局 GPS データ格納リングバッファ、移動局 GPS データ格納リングバッファを監視し、ある時刻のデータが揃った時点で測位演算処理を実行する。
- ④測位演算処理実行結果を元に画面の表示を更新すると同時に測位演算処理実行結果を演算結果ファイルに格納する。
- ⑤測位演算処理においてエラーが発生した場合は、シミュレーションエラーログを出力する。

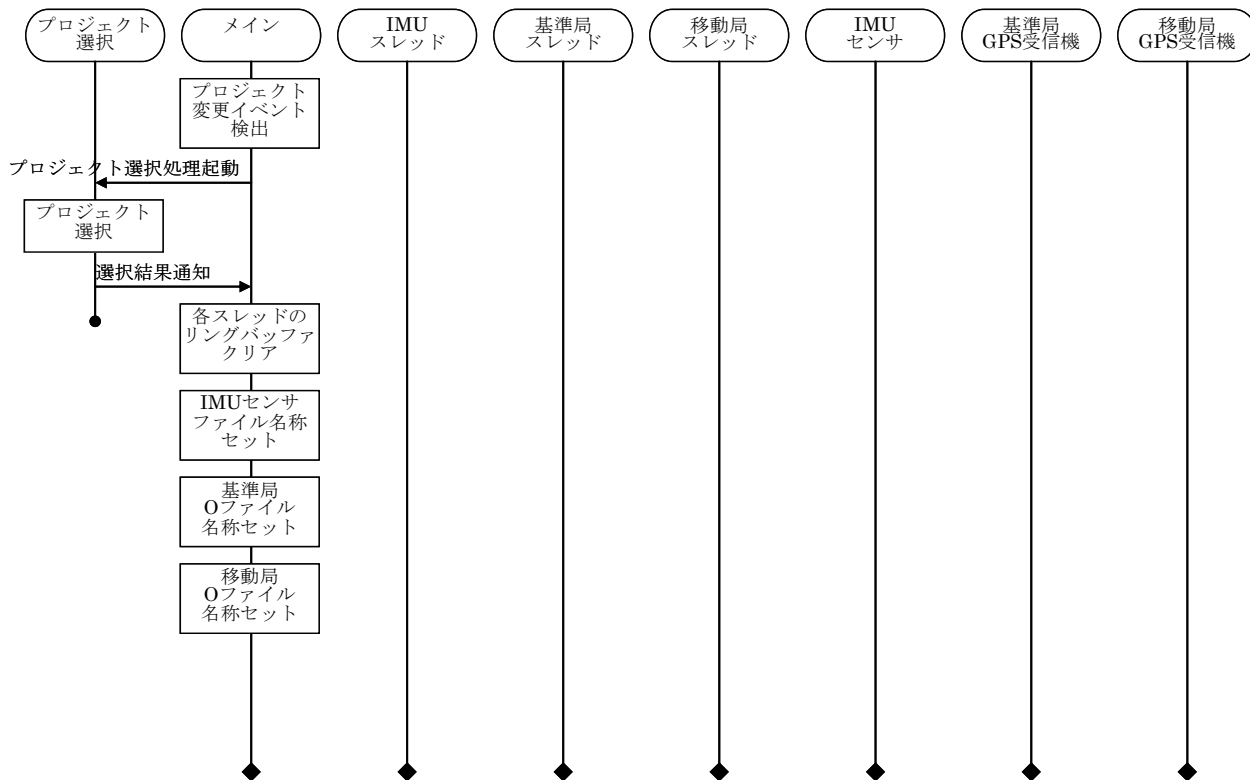
● 起動シーケンス



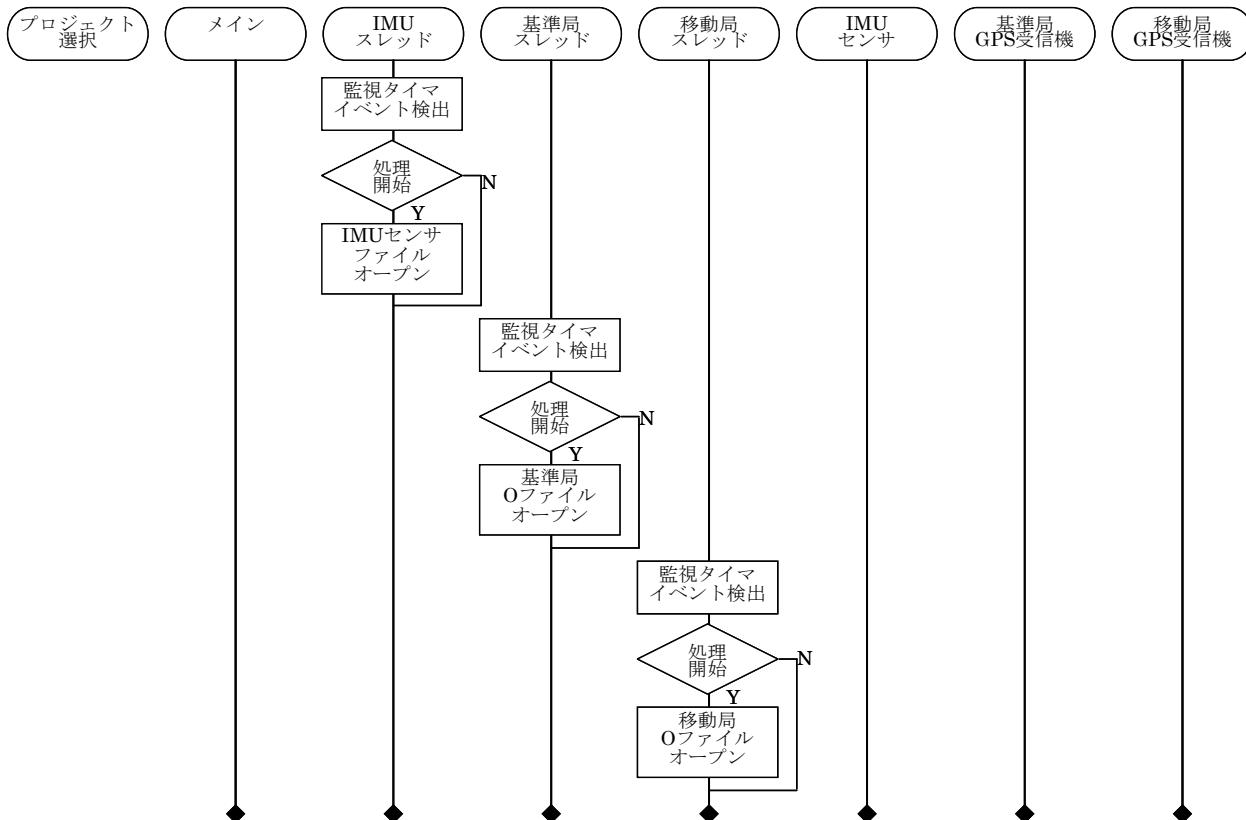
● 終了シーケンス



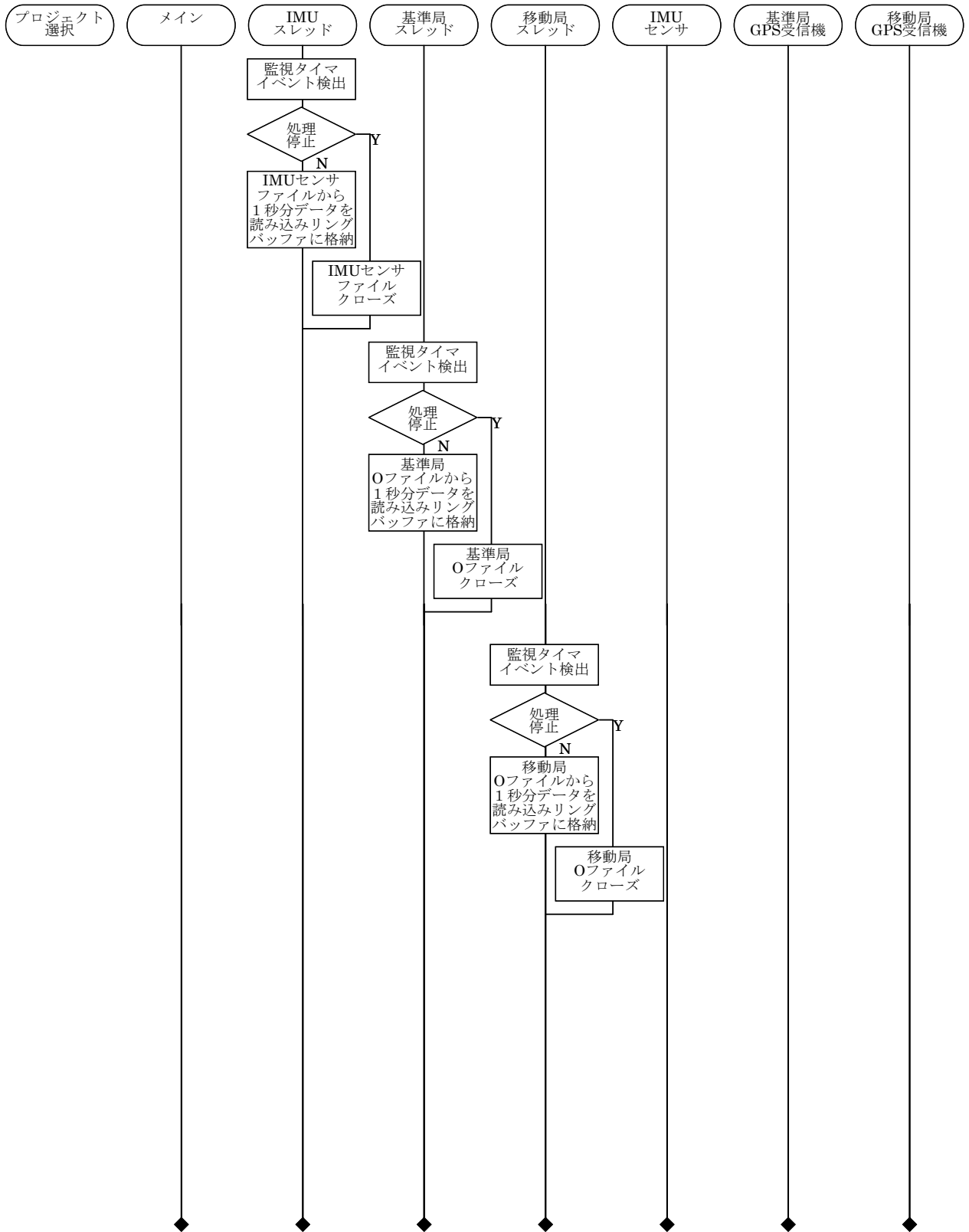
● プロジェクト変更シーケンス



● 後処理モード処理開始監視シーケンス



● 後処理モード処理中シーケンス



IX 詳細処理

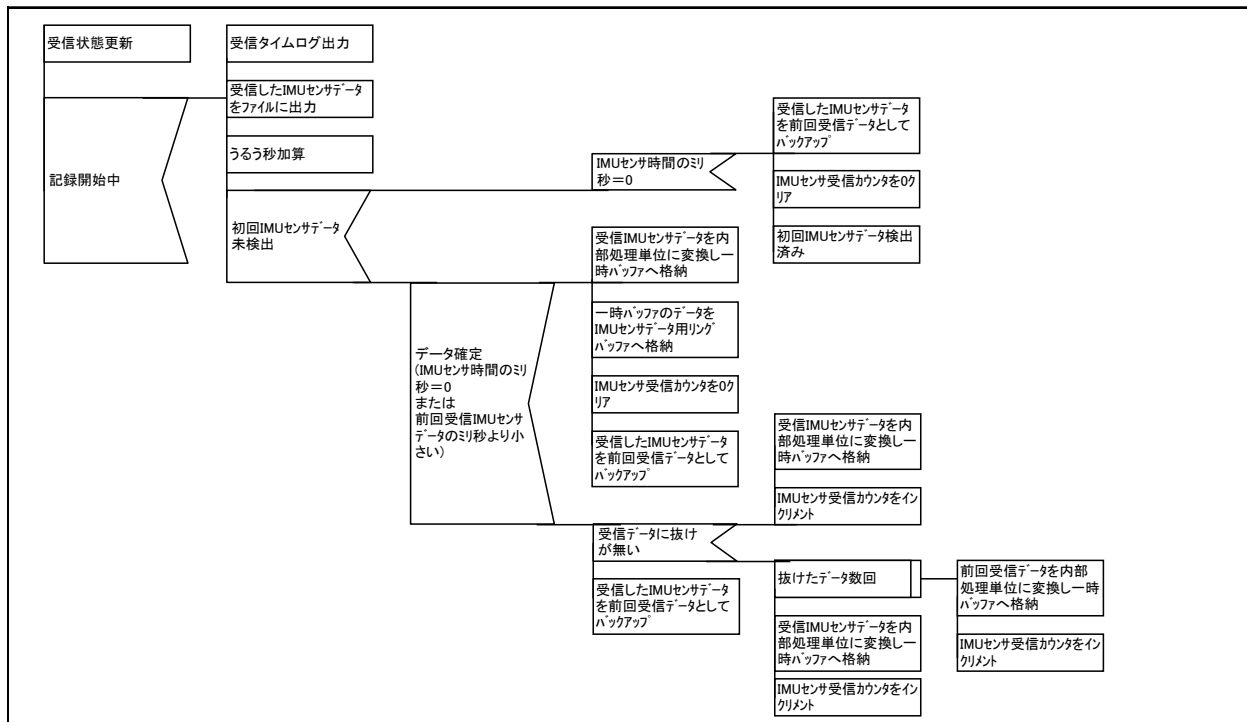
VIII 章の図 VIII-I-1 と図 VIII-II-1 で示した IMU スレッドと基準局 GPS スレッド、移動局 GPS スレッド、画面表示メインの各モジュールの詳細処理の説明を PAD 図で示す。

IX-I IMU スレッド

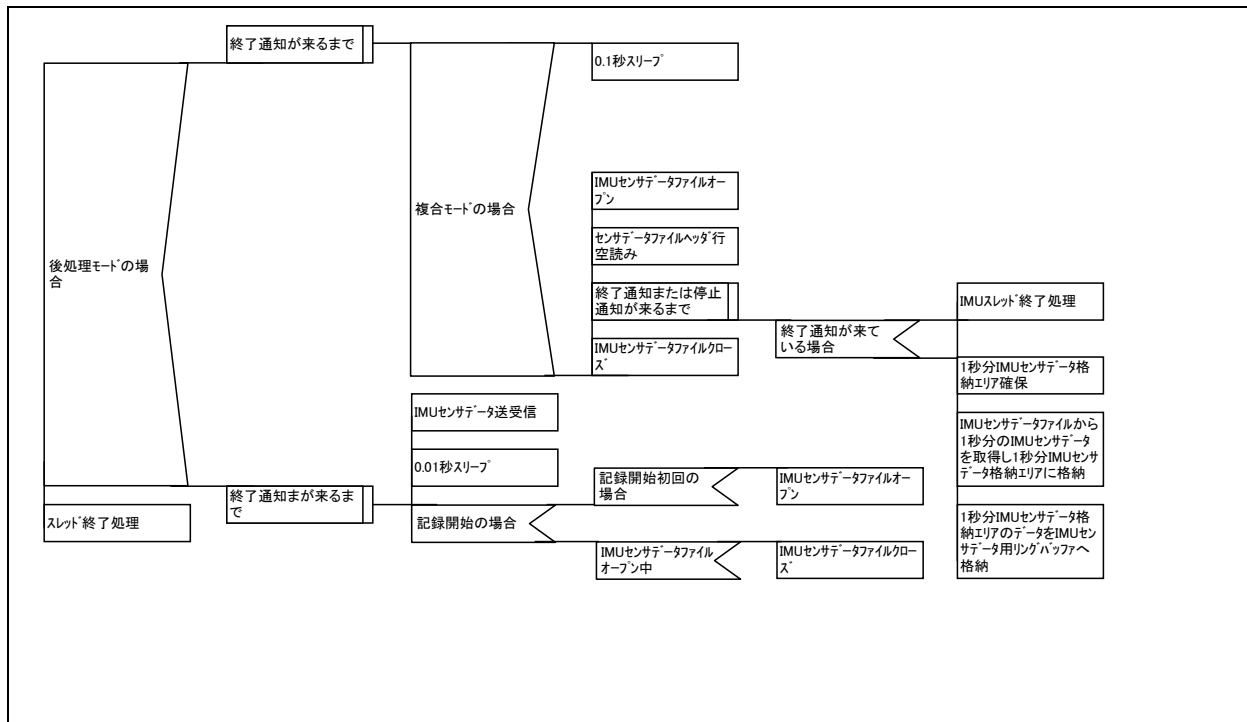
- IMU スレッド初期化処理



● IMU センサデータ受信時コールバック処理

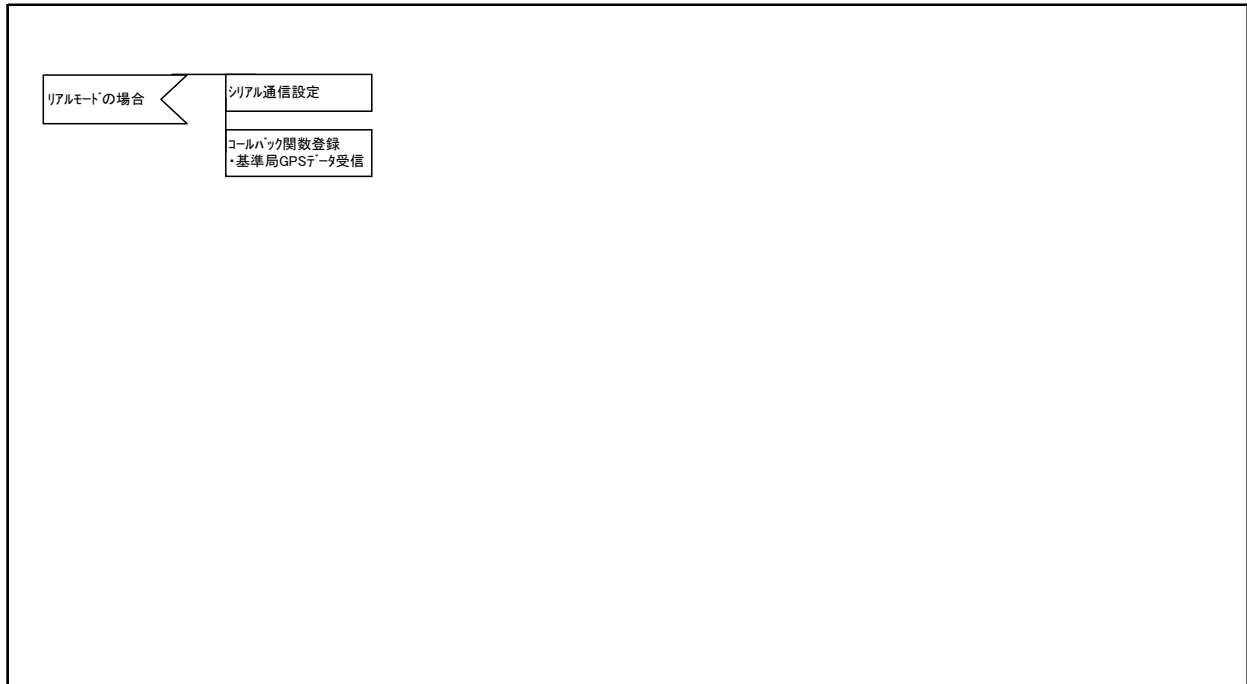


● 測位演算実行時 IMU スレッド処理

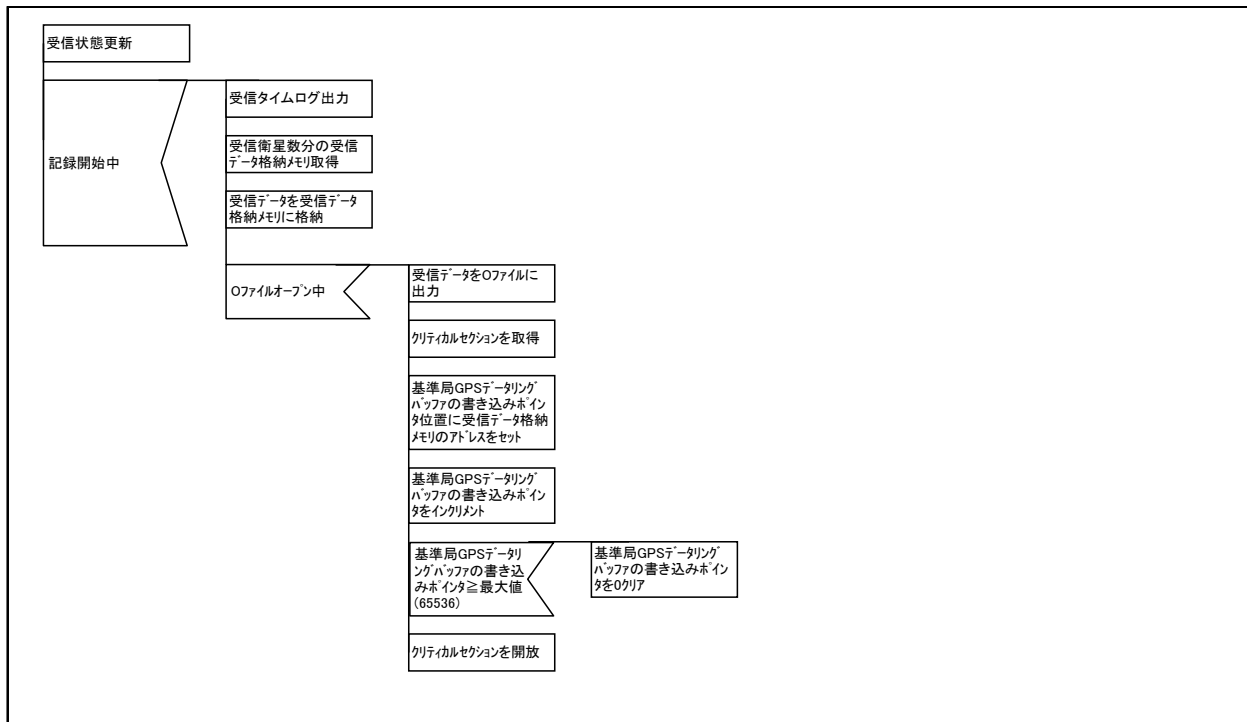


IX-II 基準局 GPS スレッド

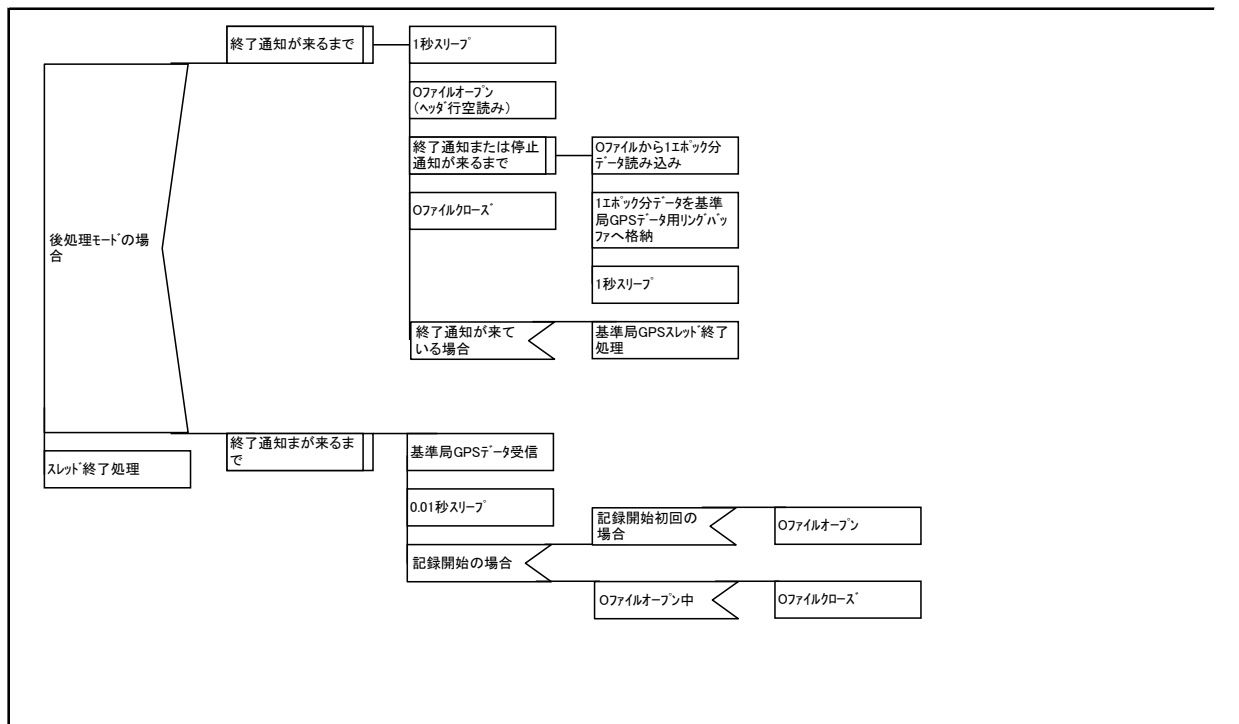
- 基準局 GPS スレッド初期化処理



- 基準局 GPS データ受信時コールバック処理

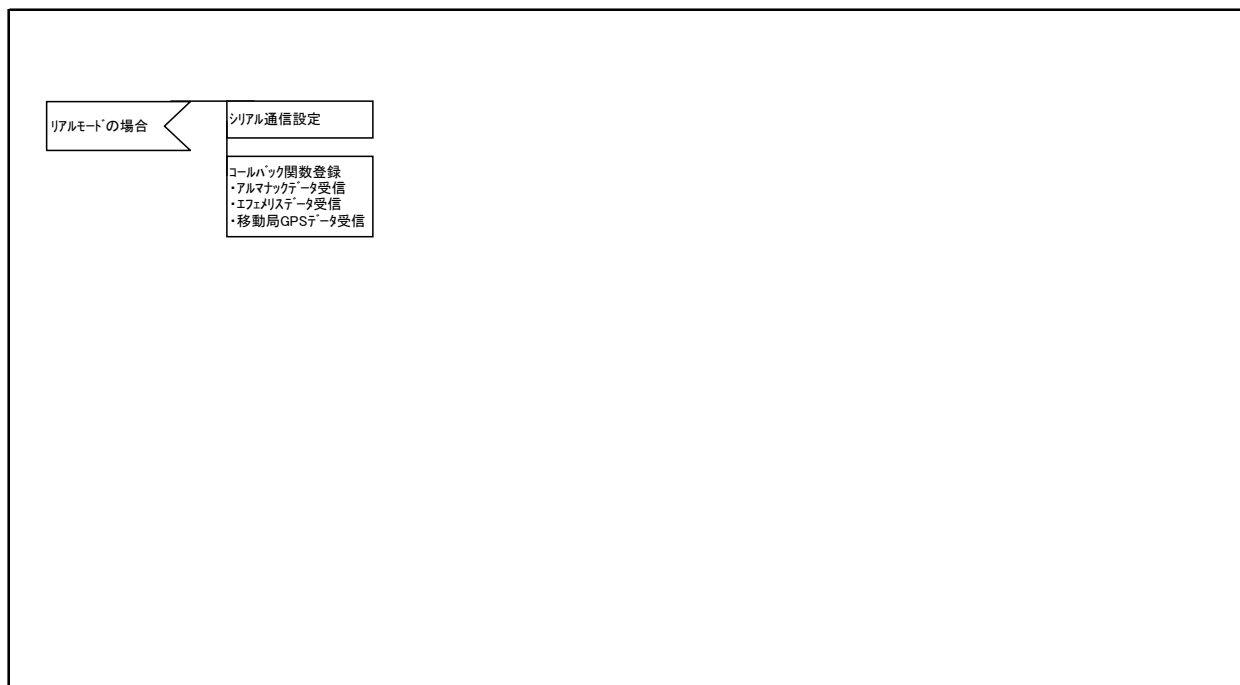


● 測位演算実行時基準局 GPS スレッド処理



IX-III 移動局 GPS スレッド

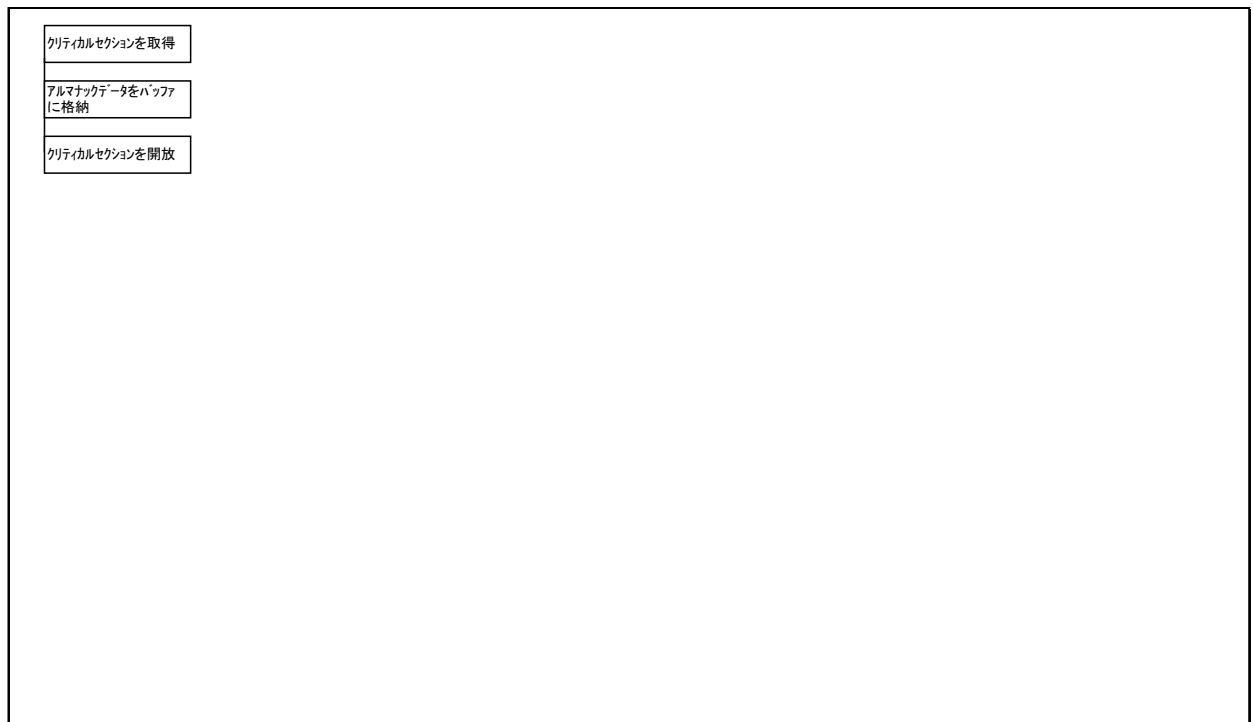
● 移動局 GPS スレッド初期化処理



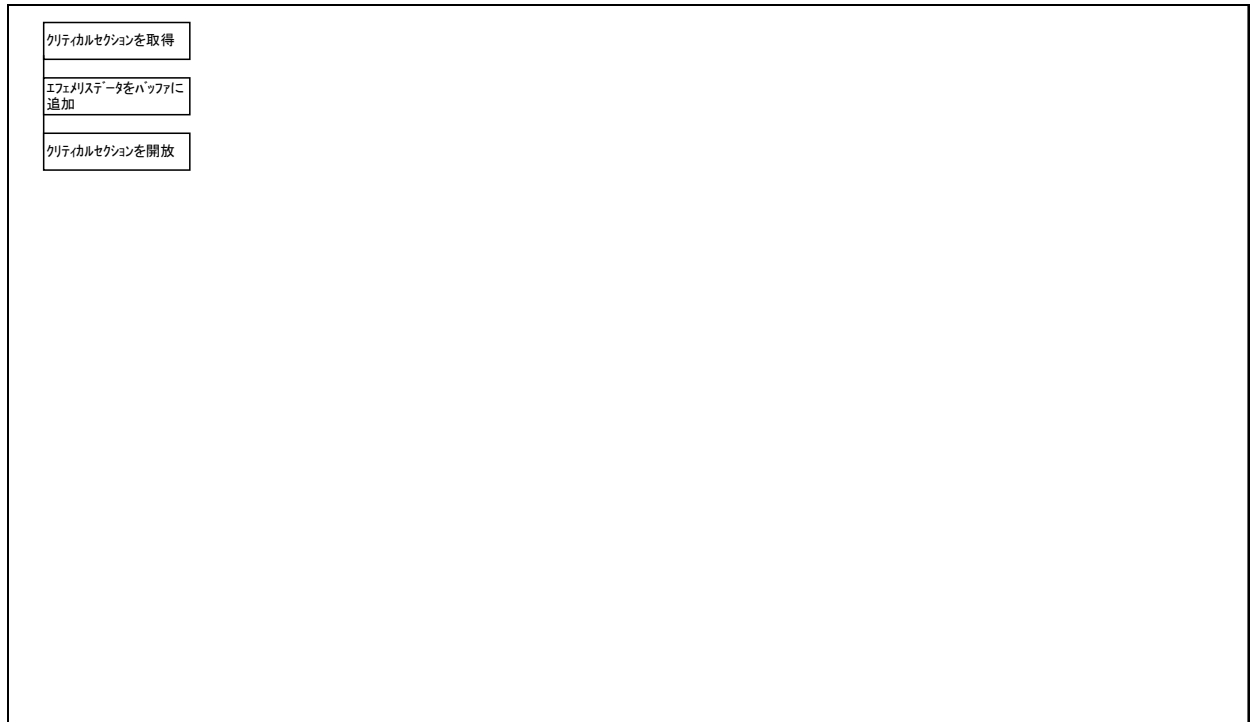
- アルマナック・エフェメリス読み込み処理



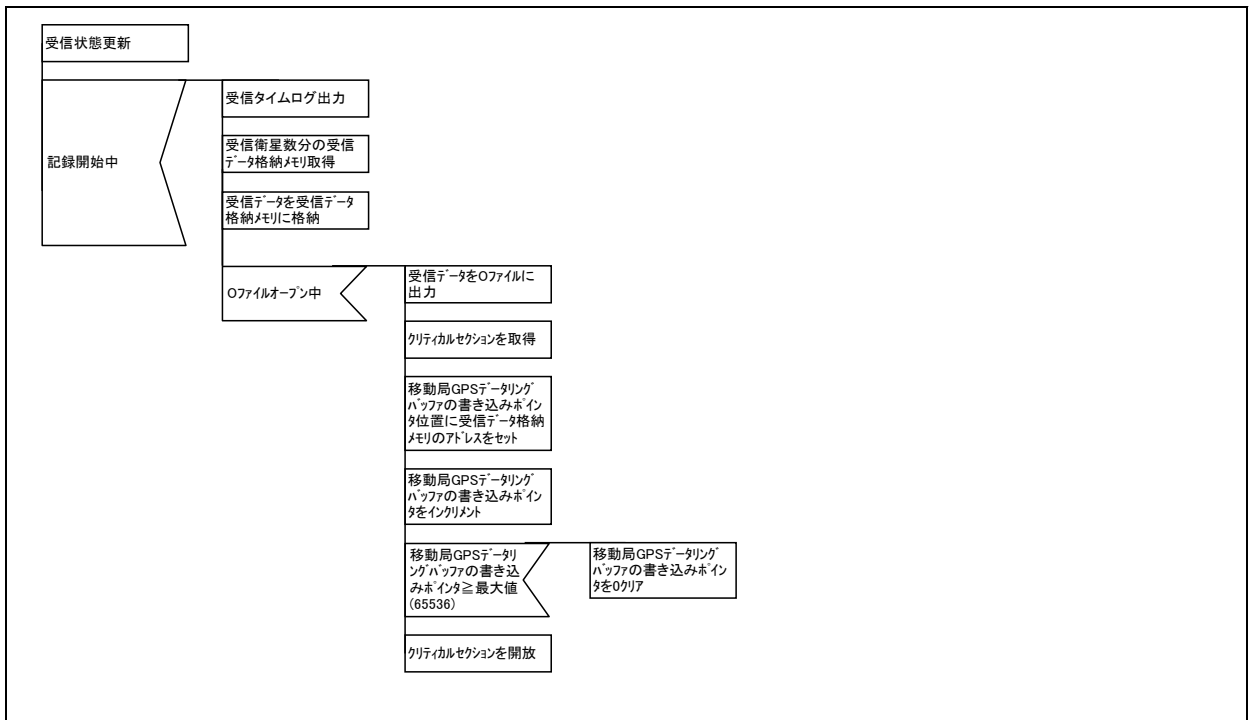
- アルマナックデータ受信時コールバック処理



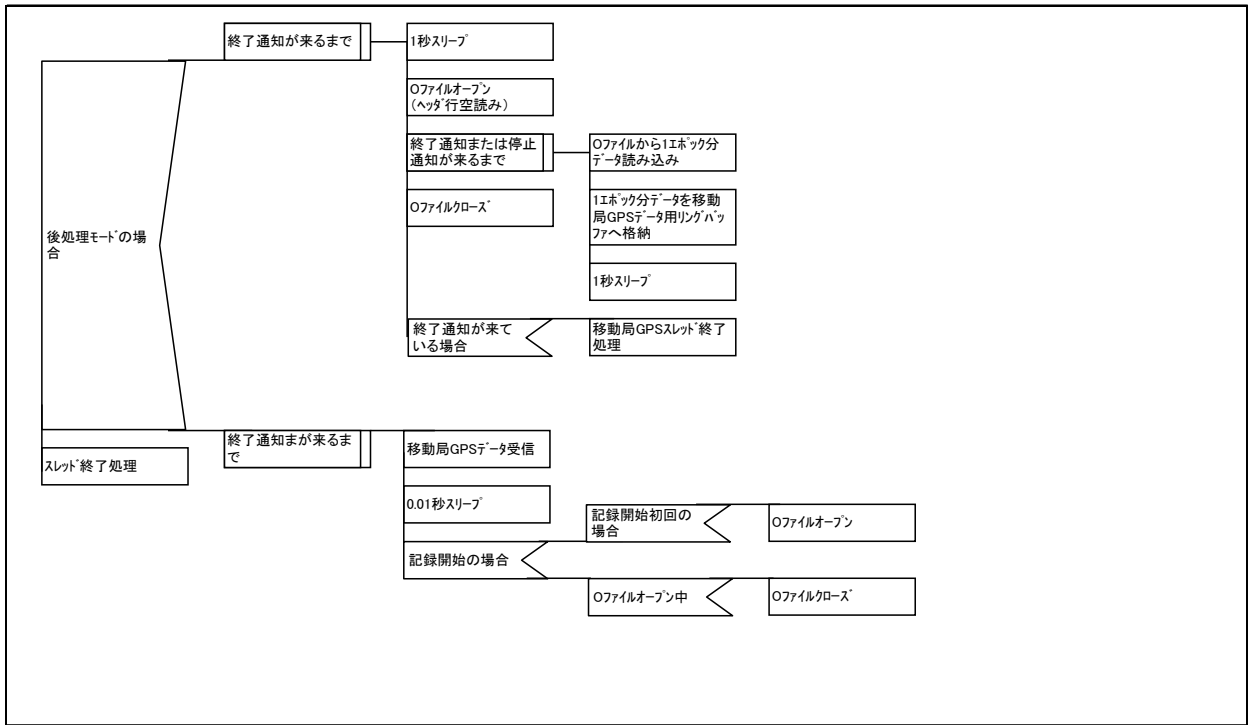
- エフェメリスデータ受信時コールバック処理



- 移動局 GPS データ受信時コールバック処理

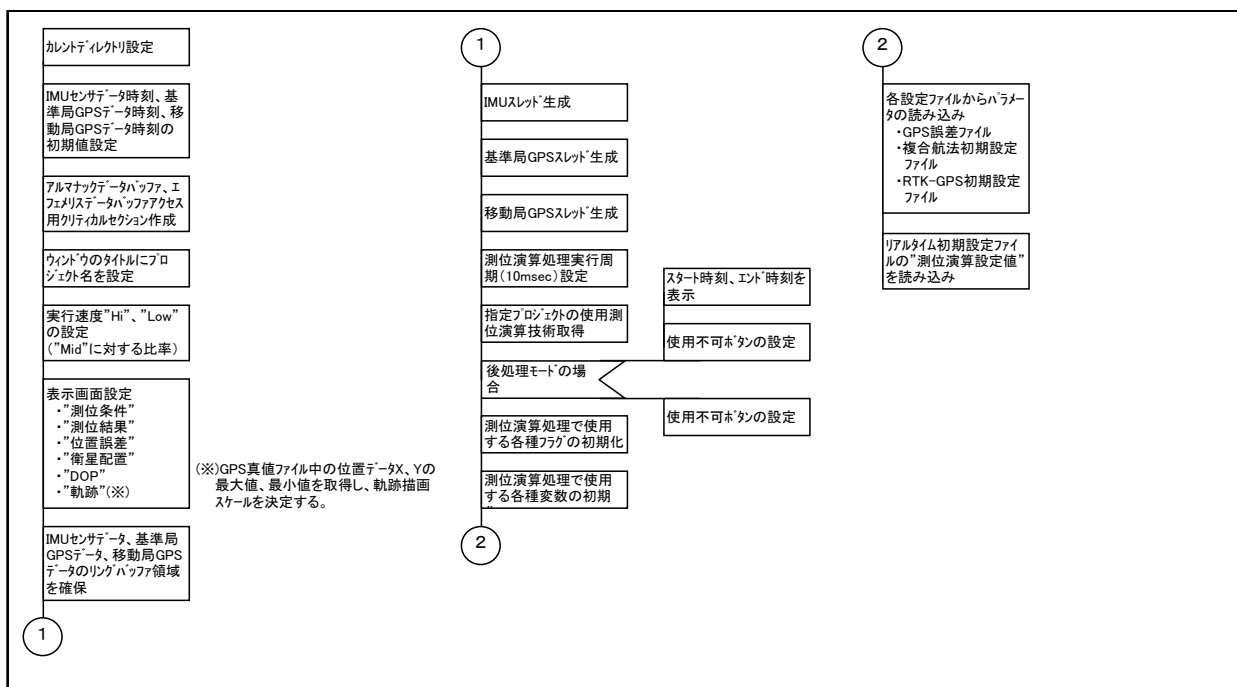


- 測位演算実行時移動局 GPS スレッド処理

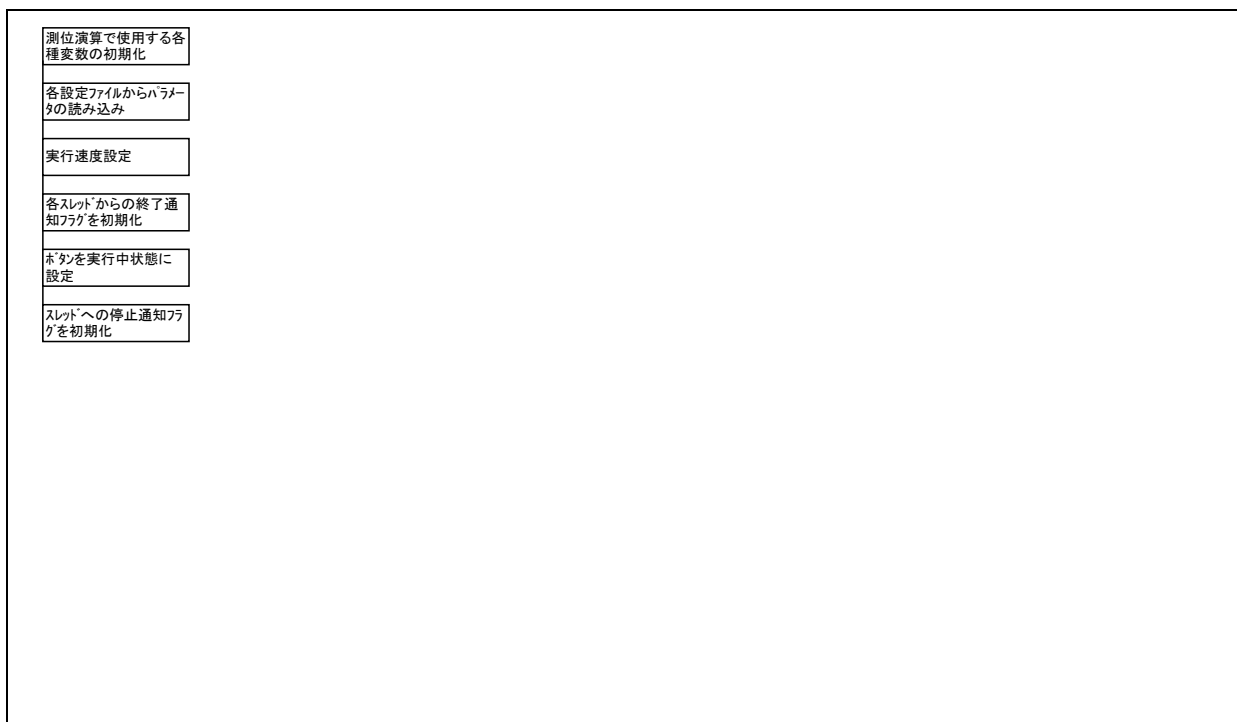


IX-IV 画面表示メイン

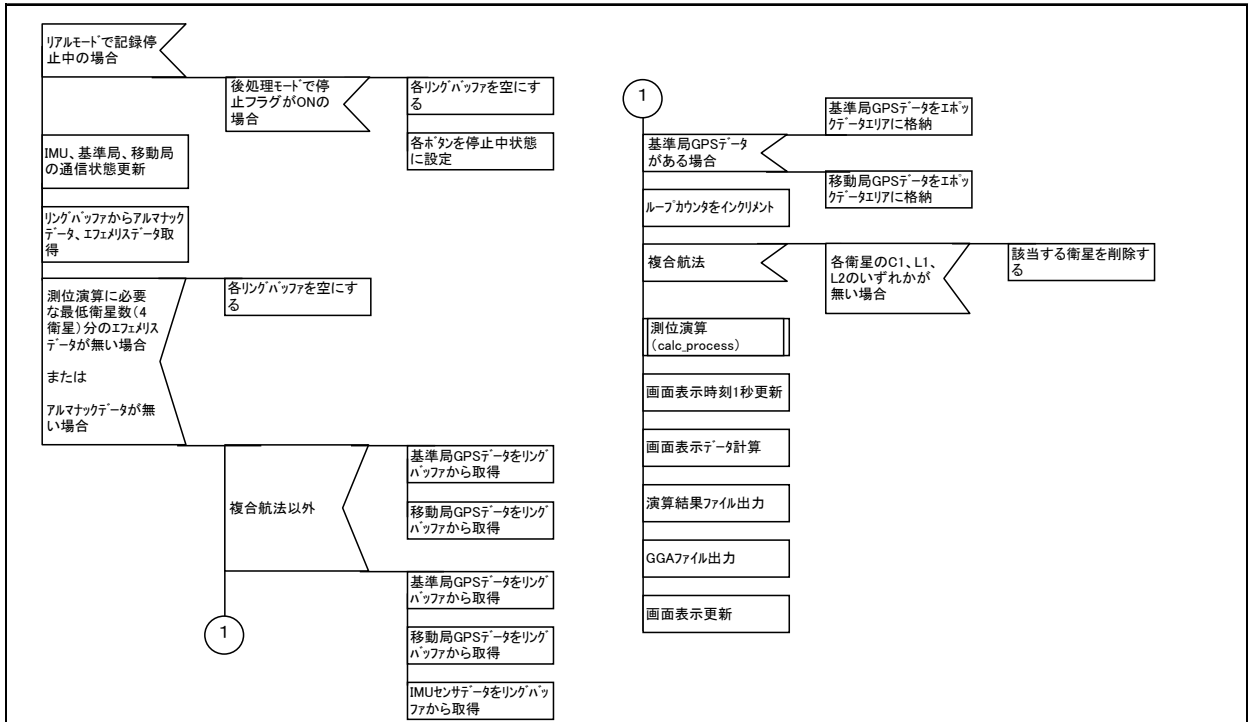
● 測位演算処理初期化処理



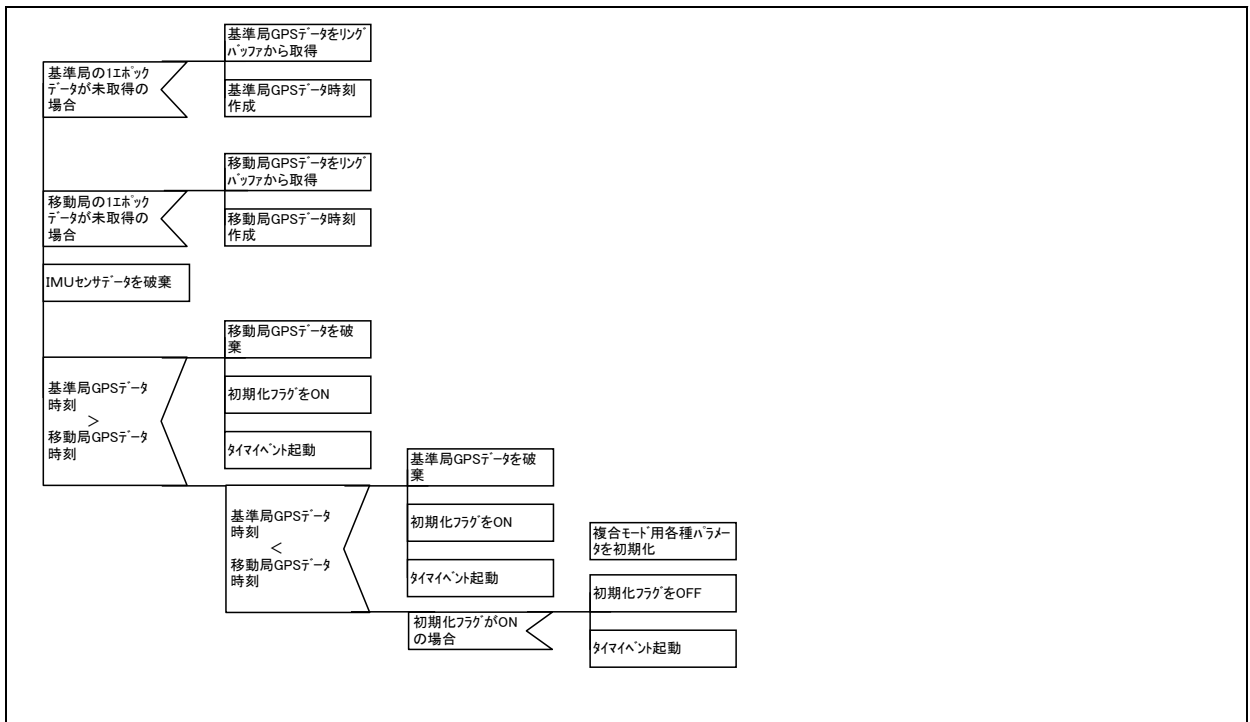
● 開始ボタンクリック処理



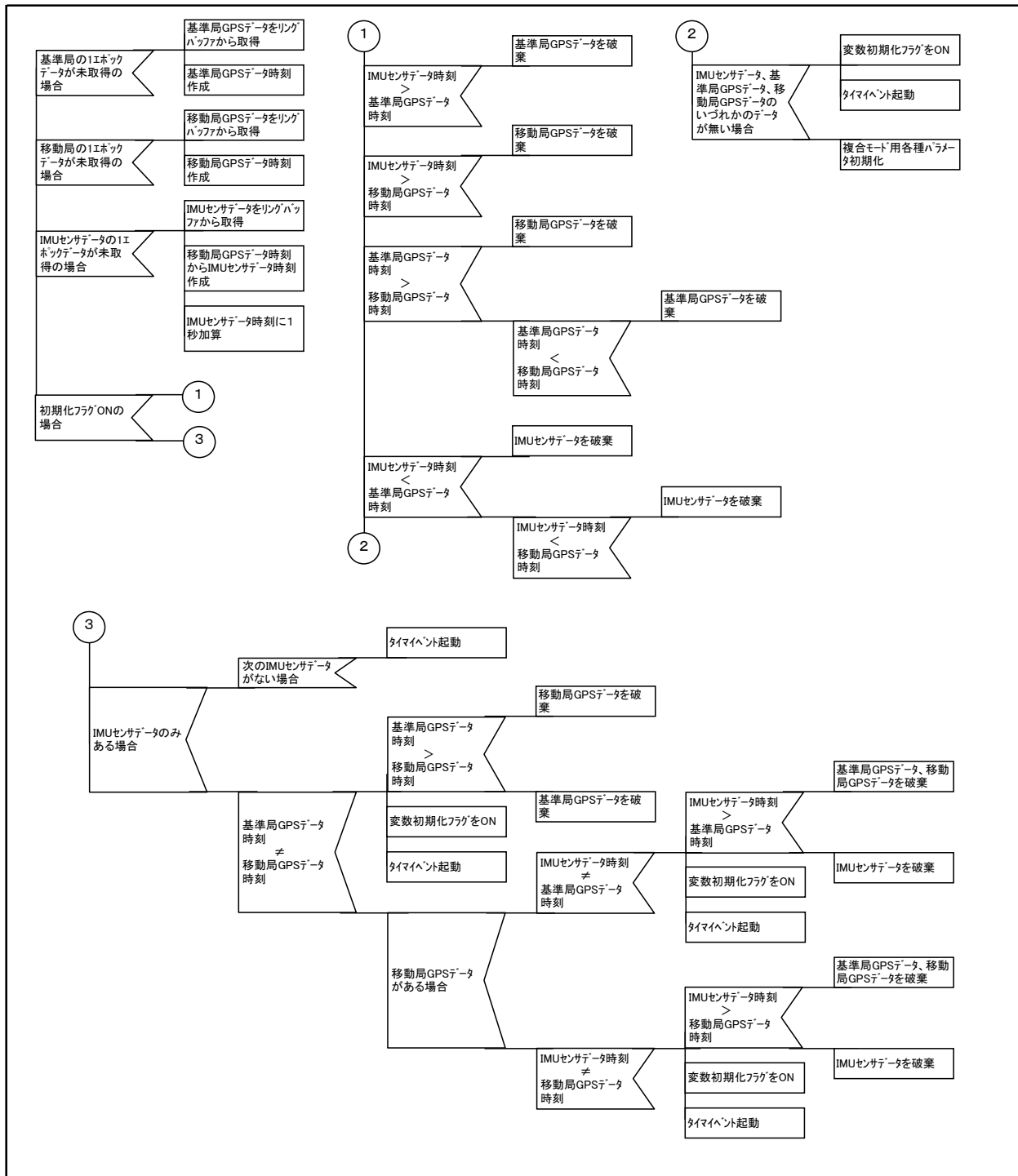
● 測位演算処理



● RTK モード時各種データ取得処理



● 複合モード時各種データ取得処理



国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of N I L I M

No. 513

January 2009

編集・発行 © 国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675