

第2回マルチGNSSによる高精度測位技術の開発に関する委員会

衛星系、受信機及びGNSS解析ソフトウェアの 技術仕様調査業務

平成23年12月19日

日本電気株式会社

目次

1. 衛星系の調査
 - ・各測位衛星系の整備スケジュール
 - ・各衛星系の最新状況
 - ・時系、座標系、軌道等のサマリ

2. IGS動向調査

3. 受信機の調査
 - ・調査対象受信機と調査項目

4. 解析ソフトウェアの調査
 - ・Bernese、GAMITのマルチGNSS対応
 - ・RTKLIBの調査

5. 調査のための情報収集
 - ・ION-GNSS2011での最新情報調査結果サマリ

1. 衛星系の調査:各測位衛星系の整備スケジュール

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021~
GPS	▲ 30機で運用中			▲ 1st L1C Sat.		▲ L2C FOC				▲ L5 FOC	▲ 2026年 L1C FOC
GLONASS	▲▲	▲ GLONASS-K1*		▲ GLONASS-K2**						▲ CDMAでFOC(24機)	
Galileo	▲ 2IOVs	▲▲ IOV 3 and 4	▲ 2 Galileo.	▲ IOC:18機					▲ FOC:30機		
QZSS	▲ みちびき								▲ 4機体制		▲ 将来的に7機体制
									(開発・整備・運用は内閣府が行う。)		
Compass	▲ 10機	▲ Regional Service: 14機								▲ Global Coverage: 35機	

IOC: Initial Operational Capability; FOC: Full Operational Capability; IOV: In-orbit validation;

CDMA: Code Division Multiple Access(符号分割多元接続); FDMA :Frequency-Division Multiple Access(周波数分割多元接続)

*: GLONASS-M signal + CDMA signal in L3(test);

** : GLONASS-M signal + CDMA signals in L1, L2, and L3.

情報源: ION学会情報、2011年9月; 宇宙開発戦略本部閣議決定、2011年9月

1. 衛星系の調査：各衛星系の最新状況

	～2011前半	2011後半	2012	2013	2014
GPS	BlockIIA(10機) BlockIIR(12機) BlockIIR-M(7機) BlockIIF(1機)	▲ Block IIF(2号機)	▲ ▲ 7月 9月 Block IIF. 計8機の打上予定.		▲ 1st L1C Sat.
GLONASS	27機が軌道上、 (23機がオペレー ショナル、1機がコ ミッション中、3機が メンテナンス中)	▲ ▲ ▲ ▲ 10/3 11/4 11/28 GLONASS-M (1 機、3機、1機)打 上	▲ 2月 GLONASS-K1 24機で FOC(12/8)		▲ GLONASS-K2
Galileo	GIOVE-A(2005 年) GIOVE-B(2008 年)	▲ 10/21* 2IOVs打 上(*:2009年の計画よ り約1年遅れ)	▲ ▲ 7月 IOV3 12月 2 Galileo. and 4		▲ IOC:18機
QZSS ▲	2010/9/11 「みち びき」打上				
Compass	MEO 1機 GEO 4機 IGSO 3機	▲ ▲ 7/27 12/1 9機目 10機目	▲ Regional Service: 14機		

1. 衛星系の調査:時系、座標系、軌道等のサマリ

	衛星数 (FOC)	軌道 傾斜 角 (度)	高度(km)	軌道面 数	準拠座標系	時系	備考
GPS	24	55	20200	6	WGS84	GPST (UTC(USNO)に準 拠)	
GLONASS	24	64.8	約19100	3	PZ90.02	(UTC(SU) + 3hrs) に準拠	FDMAから CDMAに移 行中
Galileo	30	56	23222	3	Galileo Terrestrial Reference Frame (based on GRS80)	GST (Galileo system time)	
QZSS	7*(TBD) *: 複数 QZSと静止 衛星の組 み合わせ	43	近地点高度: 31567 遠地点高度: 40002 (QZS-1)	TBD	JGS(日本衛 星測位測地 系)	QZSST (UTC(NICT)に準 拠)	
Compass	14/35	55	MEO:21500 IGSO:36000	MEO:3 IGSO:3	China Geodetic Coordinate System 2000(CGCS 2000)	Beidou time (UTC(NTSC)に準 拠; National Time Service Center of Chinese Academy of science	

1. 衛星系の調査:IGSプロダクトの公開情報

		精度		間隔	作成までにかかる時間	備考
最終暦 (IGS)		衛星位置	~2.5 cm	毎木曜日	13から20日	衛星位置 は15分間隔で推定されている。 クロックは30秒ごと。
		クロック	~75 ps RMS ~20 ps SDev			
速報暦 (IGR)		衛星位置	~2.5 cm	毎日 17:00UTC	17 - 41 hours	衛星位置 は15分間隔で推定されている。 クロックは5分ごと。
		クロック	~75 ps RMS ~20 ps SDev			
超速報 暦 (IGU)	最初の24時間 間はIGSの観測された軌道	衛星位置	~3 cm	at 03, 09, 15, 21 UTC	3 - 9 hours	衛星位置 は15分間隔で推定されている。 クロックも15分ごと。
		クロック	~150 ps RMS ~50 ps SDev			
	次の24時間は観測された軌道から外挿された予報暦	衛星位置	~5 cm	at 03, 09, 15, 21 UTC	リアルタイム	
		クロック	~3 ns RMS ~1.5 ns SDev			
GLONASS		~5 cm		毎木曜日		最終暦のみ

1. 衛星系の調査：公開情報

	衛星周波数間バイアス 信号間バイアス	衛星アンテナ 位相中心	太陽輻射圧モデル
GPS	○ (Bern大学)	○ (IGS,NGS)	○ (IGS)
GLONASS	×	×	×
Galileo	△ (航法データで放送)	×	×
QZSS	△ (航法データで放送)	○ (IS-QZSS)	×
Compass	×	×	×

○：公開されている ×：調査の範囲では公開されていない

情報源：ION学会情報、GLONASS ICD, 2008; Galileo ICD, 2010; IS-GPS200E, 2010; IS-QZSS1.3, 2011;

2. IGSの動向調査

<p>プロダクト概要</p>	<p>11のIGS解析センタが独立にIGSデータセットを解析し、結果をコーディネータに渡し、コーディネータが受けた結果を最終的に1つのIGSプロダクトを生成する。 プロダクトは前頁に掲げたような軌道・クロック以外にIGSのTracking Station位置、EOP,対流圏パラメータ等を公開している。</p>		
<p>リアルタイム暦の動向</p>	<p>精度</p>		<ul style="list-style-type: none"> • RTPP(リアルタイムパイロットプロジェクト)の活動を通じてRTCMver3 SSR*¹形式のメッセージとしてNTRIP*²を使ってインターネット上で放送され誰でも利用できる。 この情報にはGLONASSの精密軌道やクロックが含まれており、GPSとGLONASSを組み合わせることにより測位精度の向上が期待できる。
<p>衛星位置</p>	<p>~100 cm</p>		
<p>クロック</p>	<p>~5 ns RMS ~2.5ns SDev</p>		
<p>マルチGNSS観測計画</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Call for Participation for the IGS Multi-GNSS Global Experiment (M-GEX)がIGS mail 6459 (2011.年8月31日)でアナウンスされている。 • IGS M-GEXの主目的は現在のIGSオペレーション(GPSとGLONASSのみ)と同様なグローバルなGNSS 信号トラッキング実験を行うことにある。 • 新GNSS信号にフォーカスするのが目的。 • 新しい信号はGPS GLONASSの近代化した信号を含む。COMPASSやQZSS、SBASもこれに含まれる。Galileoの信号に関しては現在はGIOVEで代替する。 • 2012年2月1日 実験開始予定 		

*1 SSR: State Space Representation

*2 NTRIP: Networked Transport of RTCM via Internet Protocol

情報源: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/ac.comb.table.html>;

http://gpspp.sakura.ne.jp/tutorial/html/gps_symp_2005_2.htm;

3. 受信機の調査

◆ 下記のマルチGNSS受信機を対象として調査を実施中

受信機メーカー	調査対象受信機
JAVAD社	DELTA-G3T、ALPHA-G3T TRIUMPH-1、TRIUMPH-VS
Trimble 社	R8 GNSS、BX98
TOPCON 社	GR-5、GR-3、NET-G3A
Leica 社	GX1230+GNSS、GS12
Novatel 社	DL-V3

主な調査項目は以下の通り

- ・受信可能な信号
- ・保存データ容量および内部メモリ
- ・リアルタイムデータ配信プロトコルの有無
- ・データフォーマット
- ・市場価格

4. 解析ソフトウェアの調査： Bernese GAMITのマルチGNSS対応計画

ソフトウェア	マルチGNSS対応計画
<p>Bernese 現状Ver.5. 0でGPSとGLONASSに対応</p>	<p>Berneseの次のバージョンアップ(2011年末リリース予定のVer.5.2)で予定される改良</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆Galileo, SBAS, Compass, および QZSS の2周波ユーザ向けの処理 (準備完了しているが、データが揃わず試験が未完了) ◆GNSS依存の受信機アンテナ補正 ◆GLONASS クロック推定の改良
<p>GAMIT / GLOBK 現状Release10.4でGPSとGLONASSに対応</p>	<p>GAMIT / GLOBKで予定されている改良 調査中</p>

4. 解析ソフトウェアの調査: RTKLIB (ver.2.4.1)

処理	説明
外部入力	RINEX 2.10, 2.11, 2.12 OBS/NAV/GNAV/HNAV , RINEX 3.00 OBS/NAV , RINEX 3.00 CLK , RTCM v.2.3 , RTCM v.3.1 , NTRIP 1.0 , RTCA/DO-229C *1, NMEA 0183 *2, SP3-c , IONEX 1.0 , ANTEX 1.3 , NGS PCV および EMS 2.0 *3
リアルタイム測位	ローバおよび基準局からの生観測データによるOTF (On The Fly)アンビギュイティ決定によるRTK-GPS
フロート解の算出	①単独測位による初期近似解算出 ②二重差観測量を用いたカルマンフィルタによる相対測位
整数アンビギュイティ決定	LAMBDA/MLAMBDA法
電離層補正	RTK: 基線毎の電離層遅延をエポック毎に推定 PPP: 電離層フリー線形結合により電離層遅延消去
基線推定	単一基線のみ
マルチGNSS対応	現在GPS、GLONASS、SBAS、QZSSを公式サポート Galileoを公式サポートへ(次のver.2.5.0)

情報源: <http://www.rtklib.com/>、東京海洋大学高須先生へのヒアリング
2nd Asia Oceania Regional Workshop on GNSS 2010

*1 RTCA/DO-229C: SBASの規格

*2 NMEA0183: National Marine Electronics Associationによる規格

*3 EMS: EGNOS Message Server

5. ION GNSS2011での情報収集

- サマリ - (1/2)

タイトル	講演者	所属	キーワード	概要
Computation of a High-Precision GPS-Based Troposphere Product by the USNO	S. Syram	USNO	<ul style="list-style-type: none"> ・精密補正情報 ・対流圏 	USNOが2011年7月から作成しているIGS高精度対流圏遅延量推定値(IGS Final troposphere Product)に関する発表。
GLONASS Inter-frequency Biases and Their Effects on RTK and PPP Carrier-phase Ambiguity Resolution	N. Reussner	TU Dresden	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数間バイアス 	GLONASSのCode, Carrier観測データそれぞれに含まれるIFBの特徴と、それらのRTK、およびPPPそれぞれでのアンビギュイティ除去への影響について。
Interchangeable Integration of GPS and GLONASS by using a Common System Clock in PPP	T. Melgard	Fugro Seastar, Norway	<ul style="list-style-type: none"> ・複数衛星系 ・精密測位サービス ・アルゴリズム 	GPSとGLONASSとの共通時計という概念を導入し、複数衛星系を使用した測位に必要な最低衛星数を、単独衛星系の場合と同じ4機とするという内容。
Filling in the gap of RTK with Regional PPP	C. Garcia	GMV, Spain	<ul style="list-style-type: none"> ・精密測位サービス ・アルゴリズム 	RTKとPPPとの中間として、観測点網がPPPよりは狭い範囲ですみ、RTKよりは広域にサービスを提供しようとするRegional PPPを提案したものの
GNSS Geodetic Reference Frames: Consistency, Stability and the Related Transformation Parameters	M. Bahrami	University College, UK	<ul style="list-style-type: none"> ・準拠座標系 ・GPS, GLONASS 	GPS、およびGLONASSの準拠座標系のITRF(IGS05)に対する一貫性の評価結果に関する発表。

5. ION GNSS2011での情報収集

- サマリ - (2/2)

タイトル	講演者	所属	キーワード	概要
Statistical Characterization of GLONASS Signal-in-Space Errors	L. Heng	Stanford Univ.	<ul style="list-style-type: none"> ・軌道精度 ・GLONASS 	2009年～2011年8月までの放送暦および精密暦を使用した、GLONASSのSISUREの統計的な特性評価結果に関する発表。クロック誤差は評価から除外。
Differential Integer Ambiguity Fixing with Soft Baseline Constraints and Kalman Filtering for RTK	P. Henkel	Technical University Munich	<ul style="list-style-type: none"> ・Ambiguity ・アルゴリズム ・RTK 	基線長、および2受信機間の相対的位置関係の事前知識を利用することにより、アンビギュイティ算出にかかる時間を短縮し、かつマルチパスの影響を抑えるというアルゴリズムに関する発表。
Triple-Frequency Phase-only Algorithm for Modernized GPS Kinematic Positioning	F-Y. Chu	National Cheng Kung Univ., Taiwan	<ul style="list-style-type: none"> ・3周波 ・線形結合 	コード観測量を使用しないキネマティックアルゴリズムについて。コードの代わりにIonosphere-reduced combinationという3周波の搬送波の線形結合からレンジ情報を得る。
PRECISIO – Design, Development and Testing of a Multi-constellation, Multi-frequency Software Receiver	W. Roberts	Nottingham Scientific Ltd.	<ul style="list-style-type: none"> ・マルチ対応受信機 	欧州のFP7の助成を受けて開発中のPRECISIOというS/W受信機の開発状況について。GPS(L1, L2C, L5)、Galileo(E1, E5, E6)、GLONASS(L1, L2)、Compass(B1, B2)に対応。
Development of Triple Frequency Based Ionosphere Correction for Software GNSS Receiver	S-J. Ko	University of FAF Munich	<ul style="list-style-type: none"> ・3周波 ・電離層補正 	3周波を使用することにより、電離層遅延量の高次項まで補正するアルゴリズムとその評価結果について。

5. ION GNSS2011での情報収集

- 各論文の概要 - (1 / 5)

- Computation of a High-Precision GPS-Based Troposphere Product by the USNO, S. Syram, USNO
 - USNOが2011年7月から提供しているIGS高精度対流圏遅延量推定値(IGS Final troposphere Product)に関する発表
 - 推定にはBerneseを使用(2011年まではJPLがGIPSYで推定)
 - 垂直遅延量の平均値で1mm以下、標準偏差で3mm以下のレベルでJPLの結果と一致しており、従来のJPLによるプロダクトと同等品質と言える
- GLONASS Inter-frequency Biases and Their Effects on RTK and PPP Carrier-phase Ambiguity Resolution, N. Reussner, TU Dresden
 - GLONASSのCode、Carrier観測データそれぞれに含まれるIFBの特徴、および、それらのRTK/PPPでのアンビギュイティ除去への影響について。
 - Carrierに含まれるIFBは受信機依存性が高く、比較的よくモデル化できる。したがって、GLONASSを使用したRTKでのアンビギュイティ除去は、GPSを使用した場合と大きく変わらず、難しいことはない。
 - Codeに含まれるIFBは同じ型番の受信機であっても個体差が大きく、また周波数特性もリニアではないためにモデル化が難しい。したがって、Codeを使用するPPPではIFBに対する考慮が必要だが、実際は難しい。
 - 論文では、EUREF Permanent Network(EPN)からGLONASSの観測データを得ていた。

5. ION GNSS2011での情報収集

- 各論文の概要 - (2/5)

- Interchangeable Integration of GPS and GLONASS by using a Common System Clock in PPP, T. Melgard, Fugro Seastar, Norway
 - 通常、GPS/GLONASSを同時に使用して測位する場合、最低5つの衛星が必要になる。これを、共通クロックという概念を導入することにより、単独衛星系を使用した場合と同様に4つとするという発表。
 - Fugro社が提供するPPPサービスでは、GPSおよびGLONASSの時計誤差をCommon Clockとの差として提供。
 - これを使用することにより、未知数を1つ減らすことができ、4衛星あればGPS, GLONASS混在の衛星セットでも測位可能となる。
 - Common Clockを使用する方法、およびGPS/GLONASSそれぞれのシステムクロックを使用する方法の測位精度を比較。衛星数が多い場合は同等レベル、衛星数が少なくなるとコモンクロック方式の方がややよい精度という結果が示された。

5. ION GNSS2011での情報収集

- 各論文の概要 - (2/5)

- Filling in the gap of RTK with Regional PPP, C. Garcia, GMV, Spain
 - RTKとPPPとの中間として、観測点網がPPPよりは狭い範囲ですみ、RTKよりは広域にサービスを提供しようとする、Regional PPPを提案した発表。
 - Regional PPPは、サービス対象エリア周辺の観測点網のデータから生成された衛星軌道／クロック推定値を使用して精密測位を行うもの。
 - Regional PPPでは軌道／クロックの推定値はグローバルで利用できるものである必要はなく、サービス対象エリア内で十分な測位精度が得られればよいという考え。
 - オーストラリア、およびブラジルでの実験結果が示され、それぞれの国内に5局の基準局を配置しただけで、**その国内ではmmレベルの測位精度が実現可能**という結果が示された。
 - 基準局網からの距離が離れるにつれて測位精度は劣化。オーストラリアの例では、インドネシアのユーザは数mm～1cm程度の誤差、フィリピンのユーザは～6cm程度の誤差。

5. ION GNSS2011での情報収集

- 各論文の概要 - (3/5)

- GNSS Geodetic Reference Frames: Consistency, Stability and the Related Transformation Parameters, M. Bahrami, University College, UK
 - GPS、およびGLONASSの準拠座標系のITRF(IGS05)との一貫性の評価結果に関する発表。2006年11月～2011年3月の間にわたり座標系間のHelmert変換パラメータを推定し、その大きさ及び安定度を評価。
 - 評価期間を通じて、WGS84→IGS05のHelmert変換パラメータは非常に小さく、かつ安定しており、ほとんどのアプリケーションでは両座標系は同一と考えてよい。
 - GLONASSのPZ-90.02系とIGS05との原点の差は、評価期間を通じた平均で数10cm程度(x方向2.53cm、y方向0.4cm、z方向25.7cm)、標準偏差で、xおよびy方向10cm程度、z方向20cm程度。
- Statistical Characterization of GLONASS Signal-in-Space Errors, L. Heng, Stanford University
 - GLONASSのSIS UREの統計的な特性評価結果に関する発表
 - 評価には2009年～2011年8月までの放送暦および精密暦を使用
 - GLONASSの精密クロックは存在しないため、クロック誤差を除いたUREを定義して評価
 - クロック誤差を除いたUREの評価期間を通じたRMSは、ほとんどの衛星で1m未満。
 - 衛星によってはアロングトラックおよびラジアル方向の誤差が0平均でなかったり、ガウス分布から大きく外れていたりする

5. ION GNSS2011での情報収集

- 各論文の概要 - (4/5)

- Differential Integer Ambiguity Fixing with Soft Baseline Constraints and Kalman Filtering for RTK, P. Henkel, Technical University Munich
 - 基線長、および2受信機間の位置関係(仰角、方位角)の事前知識を利用することにより、アンビギュイティ算出にかかる時間を早め、かつマルチパスの影響を抑えるというアルゴリズムに関する発表
 - 観測データはコード、およびキャリアのダブルディファレンス
 - 事前知識を使用することにより、アンビギュイティの探索範囲を狭めることができ、**フロート解の収束に要する時間が1/10になったと説明**
- Triple-Frequency Phase-only Algorithm for Modernized GPS Kinematic Positioning, F-Y. Chu, National Cheng Kung Univ., Taiwan
 - コード観測量を使用しないキネマティックアルゴリズムについて。
 - コードの代わりにIonosphere-reduced combinationという3周波の搬送波の線形結合からレンジ情報を得る。
 - **コードを使用しないため、マルチパス耐性が強い**

5. ION GNSS2011での情報収集

- 各論文の概要 - (5/5)

- PRECISIO – Design, Development and Testing of a Multi-constellation, Multi-frequency Software Receiver, W. Roberts, Nottingham Scientific Ltd.
 - 欧州のFP7の助成を受けて開発中のPRECISIOというS/W受信機の開発状況について
 - 参画機関、メーカーはm3systems, JAST, NSL, gmv, Nottingham大, Helios
 - GPS(L1, L2C, L5)、Galileo(E1, E5, E6)、GLONASS(L1, L2)、Compass(B1, B2)に対応。
 - ICDの提供を受けて、Compassとも提携
- Development of Triple Frequency Based Ionosphere Correction for Software GNSS Receiver, S-J. Ko, University of FAF Munich
 - L1, L2, L5等の3周波を使用して、電離層遅延量の高次効果まで補正するアルゴリズムについて
 - アルゴリズムは線型方程式を用いた単純なもの
 - 提案するアルゴリズムをSW受信機に実装して評価
 - 電離層遅延量の1次項が10m程度、二次項が30cm程度で、これらの和はクロバッチャモデルによる電離層補正量の2倍程度という評価結果。