



# 目 次

<b>1. GPS/GNSS の概要</b> ..... [杉本末雄, 久保幸弘].....	1
1.1 GPS の概要.....	1
1.1.1 宇宙部分.....	2
1.1.2 制御部分.....	2
1.1.3 ユーザ部分.....	3
1.1.4 衛星信号.....	3
1.2 GPS 測位の原理と応用.....	4
1.2.1 単独測位.....	5
1.2.2 相対測位と DGPS.....	6
1.2.3 精密測位.....	7
1.2.4 GPS の利用法とその周辺.....	8
1.3 GPS の進化, その他の測位衛星技術.....	10
1.3.1 GPS の近代化.....	10
1.3.2 GLONASS.....	11
1.3.3 Galileo.....	11
<b>2. 衛星軌道と軌道決定</b> ..... [村田正秋].....	15
2.1 衛星軌道.....	15
2.1.1 N 体問題.....	15
2.1.2 2 体問題.....	16
2.1.3 2 体問題の解.....	16
2.1.4 軌道要素.....	19
2.1.5 時系と座標系.....	21
2.1.6 衛星にはたらく摂動力.....	24
2.1.7 衛星の運動方程式.....	27
2.2 軌道決定.....	28
2.2.1 軌道決定とは.....	28
2.2.2 最小 2 乗法.....	31
2.2.3 逐次推定.....	33
2.2.4 軌道決定の実際.....	37
<b>3. 衛星から送信される信号</b> .....	40
3.1 GPS から送信される信号..... [一色 浩, 久保幸弘].....	40
3.1.1 衛星における信号の変調.....	40
3.1.2 PRN コードの生成.....	40
3.1.3 航法メッセージの内容・構造.....	40
3.2 RINEX ファイルフォーマット..... [藤田征吾].....	52
3.2.1 RINEX フォーマットの構成.....	52

3.2.2	RINEX 観測データファイル (o-file) .....	52
3.2.3	RINEX 航法データファイル (n-file) .....	56
3.2.4	RINEX 気象データファイル (m-file) .....	59
3.2.5	RINEX 航法データファイル-GLONASS (g-file) .....	60
3.2.6	RINEX 航法データファイル-GPS 補強用静止衛星 (h-file) .....	62
<b>4.</b>	<b>伝播路と大気圏遅延誤差</b> .....	<b>64</b>
4.1	電離圏遅延と全電子数 .....	[丸山 隆] 64
4.1.1	電離圏の基礎 .....	64
4.1.2	電離圏中の電波伝播 .....	66
4.1.3	GPS 電波の伝播と電離圏効果 .....	67
4.1.4	全電子数の推定 .....	68
4.1.5	周期的な TEC 変動 .....	70
4.1.6	突発的な TEC 変動 .....	72
4.1.7	電子密度不規則構造 .....	75
4.1.8	赤道異常 .....	77
4.2	電離圏遅延の補正 .....	[藤田征吾, 久保幸弘] 78
4.2.1	Klobuchar モデル .....	79
4.2.2	全地球電離圏マップ .....	81
4.2.3	IONEX ファイルの取得方法 .....	81
4.2.4	IONEX フォーマット .....	83
4.3	GPS 測位への大気伝播遅延の影響 .....	[市川隆一] 87
4.3.1	大気伝播遅延とその推定モデル .....	88
4.3.2	大気遅延の方位異方性 .....	94
4.3.3	数値天気予報データの遅延量推定への応用 .....	95
<b>5.</b>	<b>受信機</b> .....	<b>104</b>
5.1	受信信号と復調の原理 .....	[一色 浩] 104
5.1.1	受信機で受信される信号 .....	104
5.1.2	ナビゲーション信号 $d^i$ が既知の場合の信号処理 .....	104
5.1.3	受信機における実際の処理 .....	105
5.1.4	ナビゲーション信号 $d^i$ が未知の場合の信号処理 .....	108
5.2	測位信号受信装置の構成と機能 .....	[荒井 修] 108
5.2.1	擬似距離観測 .....	108
5.2.2	搬送波観測 .....	110
5.2.3	受信機構成概要 .....	113
5.2.4	信号処理ソフトウェア .....	115
5.2.5	測位演算部 .....	116
5.2.6	相関器出力の観察 .....	116
5.2.7	参 考 .....	117
5.3	高感度 GPS 受信機 .....	[松本一実] 119
5.3.1	高感度の実現 .....	119
5.3.2	高感度受信機の課題 .....	122

5.4	ソフトウェア GPS 受信機	[Dinesh Manandhar, 小神野和貴, 鳥本秀幸]	123
5.4.1	ソフトウェア GPS 受信機とハードウェア GPS 受信機のおもな相違		124
5.4.2	処理速度と柔軟性		126
5.4.3	GPS の中間周波数データ		126
5.4.4	GPS レプリカ信号の生成		128
5.4.5	信号の捕捉		128
5.4.6	信号の追尾		132
5.4.7	航法メッセージの復調		135
5.4.8	位置の計算		137
6.	観測方程式	[一色 浩]	138
6.1	系統的観測誤差		138
6.2	レンジの計測と観測方程式		138
6.3	系統的誤差の除去		141
6.4	線形結合		143
6.5	周波数が3個以上ある場合		145
6.5.1	ワイドレーン結合とジオメトリフリー結合を活用する方法		145
6.5.2	ワイドレーン結合をカスケード式に活用する方法		147
6.6	幾何学的な不定性決定法		149
7.	測位アルゴリズム		151
7.1	基本的な測位方法	[久保幸弘]	151
7.1.1	単独測位と相対測位		151
7.1.2	整数値バイアスの取扱いと一般論		153
7.1.3	簡便な推定法		153
7.1.4	整数値バイアスの探索手法		153
7.1.5	観測モデル		154
7.1.6	FARA 法		155
7.1.7	LAMBDA 法		156
7.1.8	整数値バイアスの検証		160
7.2	GNSS 回帰モデルによる測位アルゴリズム	[杉本末雄]	163
7.2.1	GNSS 回帰モデル		163
7.2.2	GR モデルによる PPP 測位アルゴリズム		165
7.2.3	カルマンフィルタによる PPP アルゴリズム		167
7.2.4	複数の未知局での GR モデル-VPPP		171
7.2.5	未知局と既知局での GR モデル-相対測位		174
7.2.6	2つの GR 式の結合		175
7.2.7	相対測位に対するカルマンフィルタによる定式化		176
7.2.8	1重差について		177
7.2.9	多数の既知局からの VTEC のローカルモデル		180
7.2.10	GEONET を用いた VTEC モデル		182
7.2.11	VTEC のローカルモデル		182
7.3	精密測位のモデルと精密単独測位	[高須知二]	185
7.3.1	観測モデルおよび補正モデル		185

7.3.2	精密単独測位	195
7.3.3	精密単独測位の応用	196
7.4	GNSS 受信機の完全性自律監視システム [Jinling Wang, 久保幸弘]	197
7.4.1	背景	197
7.4.2	GNSS による位置推定のための数学的モデル	198
7.4.3	最小 2 乗残差による RAIM 誤り検出	199
7.4.4	システムの信頼限界と RAIM の利用性	200
7.4.5	パリティ変換に基づく RAIM	202
7.4.6	誤りの検出と排除	203
7.4.7	GNSS RAIM の一般化	203
7.4.8	GNSS RAIM の品質管理	205
8.	マルチパス誤差および低減法 [久保信明]	208
8.1	マルチパスの特徴とモデル	209
8.1.1	受信信号の数式化	209
8.1.2	GPS/GNSS の電波伝播の特徴	209
8.1.3	マルチパス伝搬モデル	210
8.2	GPS/GNSS 受信機におけるマルチパス誤差の影響	212
8.2.1	受信機内部でのコードマルチパス誤差発生メカニズム	212
8.2.2	マルチパス誤差の例	214
8.3	マルチパス誤差低減手法	216
8.3.1	アンテナ設置場所による低減	216
8.3.2	アンテナによる低減	216
8.3.3	受信機の信号処理による低減	217
8.3.4	マルチパス低減効果の評価方法	219
8.4	新たな信号の変調方式	219
8.5	搬送波位相マルチパスについて	220
9.	補強システム	222
9.1	広域補強システム MSAS/SBAS [坂井丈泰]	222
9.1.1	広域ディファレンシャル GPS	222
9.1.2	GPS のインテグリティ	222
9.1.3	ICAO SBAS 規格	223
9.1.4	SBAS の開発	231
9.2	狭域補強システム GBAS [福島荘之介]	235
9.2.1	開発の経過	235
9.2.2	システム構成	237
9.2.3	補強情報	237
9.2.4	データ伝送	238
9.2.5	航空機の測位と保護レベル	240
9.2.6	安全性要求と保証	242
9.3	ネットワーク型 RTK [五百竹義勝, 白井澄夫, 齋藤雅行]	245
9.3.1	概要	245
9.3.2	仮想基準点方式	246

9.3.3	FKP 方式	250
10.	準天頂衛星システム	[前田裕昭] 258
10.1	沿 革	258
10.2	QZSS のシステム	259
10.2.1	アーキテクチャ	259
10.2.2	サービス	262
10.2.3	データフロー	262
10.2.4	コンパティビリティ	263
10.2.5	インタオペラビリティ	263
10.3	QZS の軌道とその制御	264
10.3.1	軌道の特性	264
10.3.2	軌道制御	265
10.4	QZSS の性能	265
10.4.1	精 度	265
10.4.2	アベイラビリティ	265
10.4.3	健全性情報の通知	266
10.5	QZSS の運用	266
10.5.1	日常的な運用	266
10.5.2	長期的な運用の改善	266
10.5.3	将来の QZSS の進化	266
10.6	QZS 信号	267
10.6.1	QZS 信号の全般的な特徴	267
10.6.2	QZS 信号の種類や変調方式	268
10.6.3	QZS 信号の RF 的特性	269
10.6.4	QZS 信号の航法メッセージ	270
10.6.5	QZS 補強信号	272
11.	擬似衛星 (スードライト)	[辻井利昭] 274
11.1	擬似衛星	274
11.2	遠近問題	276
11.3	その他技術課題	277
11.4	スードライト測位システムの構成	278
11.5	インドア測位	279
11.6	逆スードライト法によるキネマティック測位実験	280
11.7	擬似準天頂衛星の開発	281
11.8	擬似準天頂衛星を用いたマルチパス評価試験	282
12.	他のシステムとのインテグレーション	[張替正敏] 287
12.1	GPS とインテグレーション	287
12.2	INS 航法	288
12.2.1	INS の原理	288
12.2.2	INS で使われる座標系	288
12.2.3	地球近傍での INS 航法	288

12.2.4	ストラップダウン INS 航法アルゴリズム	289
12.3	GPS/INS 複合航法	294
12.3.1	インテグレーションの方式	294
12.3.2	INS 誤差推定方式のアルゴリズム	295
12.3.3	GPS/INS 複合航法に特有なアルゴリズム	296
12.4	GPS/INS 複合航法の実施例	299
<b>13.</b>	<b>姿勢決定システムへの応用</b> [福田 優]	<b>302</b>
13.1	姿勢決定に関する座標系	303
13.1.1	地球中心・地球固定座標系	303
13.1.2	世界測地座標系	304
13.1.3	航法座標系	305
13.1.4	Body 座標系	305
13.1.5	慣性座標系	305
13.1.6	IMU 座標系	306
13.2	姿勢の表現方法	306
13.2.1	オイラー角による回転マトリックス	306
13.2.2	回転ベクトルによる回転マトリックス	307
13.2.3	クォータニオンによる回転マトリックス	309
13.2.4	パラメータ間の変換	311
13.2.5	姿勢の動特性	311
13.3	姿勢決定原理	313
13.3.1	TRIAD 技法による姿勢決定	313
13.3.2	q-method 技法	314
13.3.3	QUEST 技法	314
13.3.4	SVD 技法	315
13.3.5	FOMA 技法	316
13.4	GPS を用いた姿勢決定	316
13.4.1	キャリア位相差観測量	317
13.4.2	基線ベクトルの推定	318
13.4.3	姿勢の推定	318
13.5	GPS/INS 統合化システム	320
13.5.1	GPS/INS 統合化 ADS	320
13.5.2	GPS/ ジャイロ統合化 ADS	323
13.6	GPS を用いた ADS の姿勢精度	325
13.6.1	GPS に起因する誤差	325
13.6.2	慣性センサ統合に起因する誤差	327
13.7	今後の課題	328
<b>14.</b>	<b>カーナビゲーションとマップマッチング</b>	<b>331</b>
14.1	カーナビゲーションの概要と歴史 [金子一嗣]	331
14.1.1	カーナビゲーションの基本構成と機能	331
14.1.2	カーナビゲーションの歴史	332
14.1.3	カーナビゲーションの種類	332

14.2	カーナビゲーションの基本機能	[金子一嗣]	332
14.3	カーナビゲーションの位置検出センサ	[川添利洋, 金子一嗣]	335
14.3.1	GPS 受信機の動作原理と機能		335
14.3.2	車速パルスの動作原理と機能		340
14.3.3	回転角センサの動作原理		340
14.3.4	加速度センサの動作原理		341
14.4	各位置センサの補正技術	[金子一嗣]	342
14.4.1	車速パルスの補正技術		342
14.4.2	回転角センサの補正技術		343
14.4.3	加速度センサの補正技術		344
14.4.4	自律系センサによる GPS の補正		345
14.5	マップマッチングと高精度位置検出	[金子一嗣]	346
14.5.1	マップマッチングの基本動作		346
14.5.2	測位位置複数候補法アルゴリズム		347
14.5.3	パターンマッチングによる高知能アルゴリズム		347
14.5.4	3次元高精度測位の動作原理		348
14.6	高精度測位のための各種技術	[金子一嗣]	349
14.6.1	10 Hz 測位		349
14.6.2	タイヤ交換・チェーン装着などへの対応		349
<b>15.</b>	<b>時刻同期</b>	[近藤仁志]	350
15.1	GPS で扱う時刻の種類と補正パラメータ		350
15.2	GPS から正確な時刻が得られる仕組み		350
15.2.1	位置が未知のとき		350
15.2.2	位置が既知のとき		352
15.3	GPS から得られる時刻・タイミングの特徴		352
15.3.1	例題 1: アンテナケーブルの影響		352
15.3.2	例題 2: 位置の誤差の影響		354
15.4	時刻同期用受信機の動作		355
15.4.1	動作モード		355
15.4.2	衛星を受信できない場合		355
15.4.3	アンテナケーブル長補正		355
15.5	おもな利用方法と精度・確度		355
15.5.1	時刻比較		355
15.5.2	時刻・タイミング同期		356
15.5.3	周波数利用		357
15.5.4	GPS 以外の時刻同期		357
<b>16.</b>	<b>水蒸気観測と気象</b>	[岩淵哲也]	360
16.1	大気遅延と可降水量の関係		361
16.2	天頂大気遅延からの可降水量の導出		362
16.3	高精度大気遅延の推定		365
16.3.1	海洋潮汐荷重モデル		365
16.3.2	測器モデル		365



16.3.3	マッピング関数	366
16.4	大気遅延勾配マッピング関数	367
16.5	視線大気遅延	367
16.6	GPS 大気遅延および可降水量の数値モデルへの利用	368
16.7	GPS 気候学	370
16.8	海洋での GPS 可降水量観測	373
16.9	GPS 掩蔽観測	374
16.10	今後の発展と課題	376
<b>17.</b>	<b>GEONET (GPS 連続観測システム)</b>	<b>[山田 明] 379</b>
17.1	GPS 連続観測システムの整備	379
17.1.1	COSMOS-G2	380
17.1.2	GRAPES	381
17.1.3	GEONET	381
17.1.4	新 GEONET	382
17.2	GEONET の構成	383
17.2.1	電子基準点	383
17.2.2	GPS 中央局	384
17.2.3	データの流れ	386
17.3	GEONET における GPS データ解析	388
17.3.1	旧 GEONET における定常解析手法と問題点	388
17.3.2	新 GEONET の定常解析戦略	390
17.3.3	GEONET 定常解析の精度	392
<b>付</b>	<b>録</b>	<b>399</b>
<b>A1.</b>	<b>GPS/GNSS の歴史と社会的背景</b>	<b>[辻 宏道] 400</b>
A1.1	測位・航法の歴史	400
A1.1.1	天文航法	400
A1.1.2	電波航法	401
A1.1.3	衛星測位	401
A1.2	衛星測位のあけぼの	402
A1.2.1	人工衛星の登場	402
A1.2.2	初めての衛星測位システム NNSS	403
A1.2.3	ポスト NNSS	403
A1.3	GPS の時代	403
A1.3.1	GPS の誕生	403
A1.3.2	GPS の完成	404
A1.3.3	民生利用の発展	405
A1.4	GNSS の時代へ	408
A1.4.1	ロシア：GLONASS とその近代化	408
A1.4.2	欧州：Galileo	408
A1.4.3	中国：Beidou・Compass	409
A1.4.4	日本：準天頂衛星システム	409

A1.5	社会的背景	409
A1.5.1	実現の背景	409
A1.5.2	普及の背景	409
<b>A2.</b>	<b>WGS-84 などの座標系と変換</b>	[久保幸弘] 414
A2.1	WGS-84 座標系	414
A2.2	WGS-84 準拠楕円体	414
A2.3	直交座標と測地座標の関係	415
A2.3.1	測地座標から直交座標への変換	415
A2.3.2	直交座標から測地座標への変換	416
A2.4	局地水平座標系	418
A2.4.1	ECEF 座標系と ENU 座標系間の変換	419
A2.4.2	衛星の方位角と仰角	420
<b>A3.</b>	<b>単独測位の計算アルゴリズム</b>	[久保幸弘] 422
A3.1	単独測位と航法メッセージ	422
A3.1.1	擬似距離の観測モデル	422
A3.1.2	単独測位演算の方針	423
A3.1.3	単独測位の演算	425
A3.1.4	反復演算の終了条件について	426
A3.2	数 値 例	427
A3.2.1	測位演算の過程	428
<b>A4.</b>	<b>確率統計学とカルマンフィルタ</b>	[杉本末雄, 谷川原 誠] 432
A4.1	確率統計学の基礎	432
A4.1.1	確 率 と は	432
A4.1.2	硬貨投げの不規則実験と確率の公理	432
A4.1.3	確 率 変 数	433
A4.1.4	期 待 値	435
A4.1.5	推 定 論	438
A4.1.6	線形最小分散推定	439
A4.1.7	線形回帰式	442
A4.1.8	確 率 過 程	444
A4.2	カルマンフィルタ	446
A4.2.1	状態空間表現	446
A4.2.2	状態変数の平均値, (共) 分散行列について	446
A4.2.3	イノベーション過程	447
A4.2.4	逐 次 式	448
A4.2.5	ベイズの定理によるカルマンフィルタの導出	449
A4.2.6	カルマンフィルタの実装	450
A4.3	非線形フィルタ	451
A4.3.1	非線形状態空間モデル	452
A4.3.2	拡張カルマンフィルタ	452
A4.3.3	等価線形化法	452

A4.3.4	ガウス和フィルタ	454
A4.3.5	Unscented カルマンフィルタ	456
A4.3.6	粒子フィルタ	458
<b>A5.</b>	<b>ハミルトン 4 元数と INS</b>	<b>[熊谷秀夫] 461</b>
A5.1	4 元数の定義	461
A5.2	4 元数の計算	461
A5.3	回    転	462
A5.4	行列による 4 元数の積と座標系の回転	463
A5.5	角速度による 4 元数の更新	464
A5.6	姿勢角と 4 元数	465
<b>A6.</b>	<b>GPS の特殊および一般相対論的補正について</b>	<b>[福山武志] 466</b>
A6.1	特殊相対論的効果	467
A6.2	一般相対論的効果	470
A6.3	まとめと結論	473
<b>A7.</b>	<b>衛星測位システムに関する諸表</b>	<b>[朝岡則明] 475</b>
索    引		485

