

平成27年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「小型・低消費電力・高精度で安価な農機用航法センサの研究開発」

研究開発成果等報告書

平成28年3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 公益財団法人新産業創造研究機構

目 次	頁
第 1 章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	4
1-3 成果概要	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	5
第 2 章 本論	6
2-1 1周波受信方式の RTK-GPS 測位演算技術の開発	6
2-1-1 概要	6
2-1-2 設計・試作	6
2-1-3 成果	10
2-1-4 課題	11
2-2 大幅コストダウンと小型化・低消費電力化を実現する航法センサシステムの開発	12
2-2-1 概要	12
2-2-2 設計・試作	12
2-2-3 成果	16
2-2-4 課題	17
2-3 航法センサの測位率の向上・ロバスト化	18
2-3-1 概要	18
2-3-2 設計・試作	18
2-3-3 成果	21
2-3-4 課題	22
2-4 GPS コンパス方式による停止・低速時の方位精度向上	23
2-4-1 概要	23
2-4-2 設計・試作	23
2-4-3 成果	29
2-4-4 課題	29
2-5 農機用航法センサシステムのフィールド評価試験	31
2-5-1 概要	31
2-5-2 農業用走行支援システムの開発と評価試験	31

2-5-3	各種圃場での受信・測位試験	34
2-5-4	各種農機と組み合わせた農作業評価試験	35
2-5-5	成果と課題	36
第3章	研究開発の概要	37
3-1	研究開発成果および課題	37
3-2	事業化展開	38

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

農業人口の減少や TPP（環太平洋パートナーシップ協定）対応等のために、農業の効率化・省人化・ロボット化技術の開発が急がれており、トラクタなど農機の運転アシストや自動走行に必要な、高精度で安価な航法センサ（位置・姿勢・方位・センサ）の商品化が要望されていることから、RTK-GPS（基準局からの補正情報を移動局へ伝送して測位精度を上げた人工衛星使用のリアルタイム測位システム）と IMU（加速度・角速度センサによる慣性計測ユニット）の統合航法技術により、既存の航法センサと機能・性能は同等でありながら、コストを既存製品の 1/10 以下にした、高精度な農業用航法センサの研究開発を行う。

農機向けの航法センサとして、1 周波受信方式 RTK-GPS での測位演算技術と GPS/IMU の統合航法の開発を行い、低価格で既存の 2 周波受信方式製品と同等の機能・性能を実現する。目標性能としては、RTK-GPS 測位の初期化時間 1 分以内、位置精度 2cm、高さ精度 4cm、速度精度 0.01m/sec。価格 35 万円以下、消費電力 0.7W 以下。統合航法と GPS コンパスの導入で、姿勢角精度 1 deg、データ更新レート 50Hz 以上。

上記目標達成のための開発サブテーマと、今年度の目標を以下に示す。

① 1 周波受信方式の RTK-GPS 測位演算技術の開発（長田電機株式会社）

既存の RTK-GPS 方式の航法センサは、GPS の L1 信号と L2 信号の 2 周波数受信方式であるが、本研究では、受信機のハードウェア構成を簡素化するために、L1 信号のみの 1 周波受信方式の開発を行う。1 周波数受信方式は、初期化時間（受信機の電源が起動してから、RTK-GPS 測位が完了するまでの時間）が長すぎるものが課題となり、実用化が遅れている。（既存の 2 周波数受信方式の初期化時間は 1 分以内であるが、1 周波数受信方式では 10 数分以上とされている）

本研究では、マルチ GNSS（米国の GPS、ロシアの GLONASS、日本の QZSS など全地球衛星航法システムの総称）L1 信号の 1 周波受信方式の RTK 測位演算アルゴリズムの開発により、2 周波受信方式と同等の測位精度と、1 周波受信方式の課題である RTK 初期化時間の大幅な短縮を目指す。

最終目標性能としては、RTK 初期化時間を 1 分以内、位置精度 2cm、高さ精度 4cm を目指す。

② 大幅コストダウンと小型化・低消費電力化を実現する航法センサのシステム開発（長田電機株式会社）

最終目標性能としての、マルチ GNSS に対応したセンサシステムで、既存の 2 周波 RTK-GPS 航法センサの 1/10 以下の価格の実現、小型化・低消費電力化は 0.7W 以下の消費電力と、GPS 時刻同期方式無線伝送による 10kbps 以上の通信速度を目指す。

当初予定では、既存の航法センサに比べて大幅コストダウンを実現するために、1周波受信方式、RTK 測位演算処理を外部接続の PC や ECU で行う方式、及び基準局データ伝送を特定小電力無線(920MHz/2.4GHz)での GPS 時刻同期の高速通信方式の開発であったが、サブテーマ①項の RTK 測位演算アルゴリズムの開発成果により、移動局センサーユニット側の汎用 CPU で RTK 測位演算をさせることが可能になり、当初予定していた、基準局、移動局、及び PC (または ECU) のシステム構成から、PC (または ECU) を削除した構成とし、大幅コストダウンを達成させる。

③ 航法センサの測位率の向上・ロバスト化 (長田電機株式会社)

IMU の組込みと、マルチ GNSS の対応による統合航法システムの開発により、GPS 受信中断時のバックアップ、RTK 測位の初期化時間・再初期化時間の短縮、姿勢角(ロール、ピッチ、方位)の計測、測位データ更新レートの高速化を実現し、測位率の向上・ロバスト化の実現を図る。

最終目標性能としては、マルチ GNSS 対応の RTK-GPS と IMU の統合航法アルゴリズムの開発により、下記の機能・性能を目指す。

- ・GNSS 受信中断中でも、測位継続可能とする：1分以上の GNSS 受信中断時でも、サイクルスリップなしで測位継続を実現する。
- ・GNSS 受信中断後のサイクルスリップ(位置飛び)発生時の再初期化時間の短縮を行う。
- ・50Hz 以上の高速更新レートを実現する。
- ・姿勢角計測により、農機の傾きによる測位ずれの補正を行う。

④ GPS コンパス方式による、停止・低速時の方位精度向上 (長田電機株式会社)

既存の RTK-GPS システムは、1アンテナ・1GPS 受信部方式の GPS なので、低速になると方位精度が劣化し、停止すると方位の計測不可能となる。本研究開発では、2アンテナ・2GPS 受信部方式を採用し、2アンテナ間の基線ベクトル演算で方位を計測することで、高精度な方位計測ができる GPS (マルチ GNSS) コンパス方式を開発する。

さらに、GPS コンパスと IMU との統合航法アルゴリズム開発により、GPS 受信中断時のバックアップや、方位計測の更新レートの高速化を行う。

また、オプション機能として、3アンテナ・3GPS 受信部方式の GPS コンパスの試作を行い、GPS による姿勢・方位計測も可能とする。

最終目標性能としては、GPS コンパス方式の方位精度 1度以内、方位データ更新レート 50Hz 以上を目指す。

⑤農機用航法センサシステムのフィールド評価試験（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター、国立大学法人神戸大学、学校法人立命館、長田電機株式会社）

研究開発の各段階で農機用航法センサシステムの圃場でのフィールド試験を行い、研究開発にフィードバックすることを目的とする。

⑤-1 農機用走行支援システムの開発と評価試験

圃場の計測、マッピング、作業計画・管理、走行支援機能などの、農機用走行支援システムによる航法センサの評価を実施する。

⑤-2 各種圃場での受信・測位試験

色々な圃場での GPS、GLONASS、QZSS の受信状況調査と測位性能の評価試験と、IMU、GPS コンパスとの統合航法の評価試験を実施する。

⑤-3 各種農機と組み合わせた、農作業評価試験

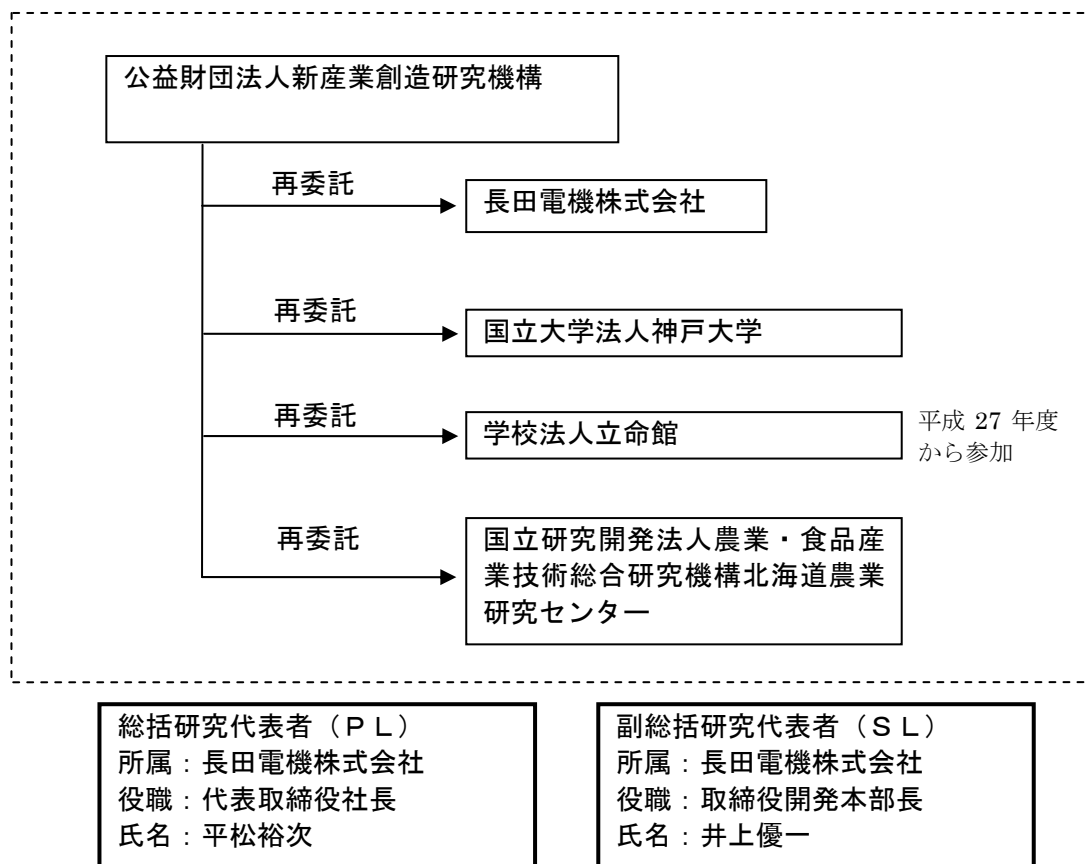
トラクタと色々な農機の組み合わせで、耕起・種蒔・田植え・防除・施肥・収穫などの農作業で、フィールド試験を実施する。

なお、⑤-2、⑤-3 の試験については、兵庫県加西市の兵庫県立農林水産技術総合センターと北海道札幌市の農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センターの圃場で実施する。

⑥プロジェクトの管理・運営（公益財団法人新産業創造研究機構）

頻繁な情報交換や推進委員会の運営、日程や進捗状況の管理など、開発を効率的に行うための管理・運営を行う。

1-2 研究体制



1-3 成果概要

①1 周波受信方式の RTK-GPS 測位演算技術の開発

GNSS のみによる測位更新周期では、測位演算のプログラムをシングルタスク方式からマルチタスク方式に変更し、演算速度を向上させることにより、従来の 1Hz 更新から、5Hz 更新を実現した。さらに、IMU との統合航法、GPS コンパス対応の開発により、GNSS での更新周期の間の更新は、加速度・ジャイロセンサーでの補完による測位で更新できるようになる。このほか、測位精度及び初期化時間の改善を実現した。

②大幅コストダウンと小型化・低消費電力化を実現する航法センサのシステム開発

高性能な CPU チップ新製品の採用などにより演算速度向上、CPU 基板サイズの小型化、コストダウンを実現した。GNSS (GPS、QZSS、GLONASS の L1 信号) 対応とした試作機を製作し、評価試験を実施した。

③航法センサの測位率の向上・ロバスト化

ハードウェアは GPS、QZSS、GLONASS の L1 信号に対応した。QZSS 対応アルゴリズムは PC での評価を実施した。恒温槽組み込みのレートテーブルを使って、キャリブレーション用データを収録し、IMU（加速度、角速度センサー）のキャリブレーションが可能となった。また、IMU による位置推定アルゴリズムの開発評価を行った。

④GPS コンパス方式による、停止・低速時の方位精度向上

GPS コンパスの方位・姿勢角検出のソフトウェアを作成し、アルゴリズムの検証を行った。開発したアルゴリズムによる姿勢推定が妥当に行われていることが確認できた。

⑤農機用航法センサシステムのフィールド評価試験

今年度の最終開発試作機について、農機用航法センサとしての実圃場作業での適応性や性能を評価した。IMU と GPS の統合航法については、評価装置を構築し、圃場などにおいて評価試験を行った。また、開発した航法センサ試作機を使ってトラクタの自動走行試験を実施した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属・役職： 公益財団法人新産業創造研究機構 研究一部 部長

氏名： 神田克己

電話： 078-306-6801

FAX： 078-306-6812

E-mail： kanda@niro.or.jp

第2章 本論

2-1 1周波受信方式のRTK-GPS測位演算技術の開発

2-1-1 概要

既存のRTK-GPS方式の航法センサーは、GPSのL1信号とL2信号の2周波受信方式であるが、本研究では、受信機のハードウェア構成を簡素化するために、L1信号のみの1周波受信方式の開発を行う。1周波受信方式は、初期化時間（受信機の電源が起動してから、RTK-GPS測位が完了するまでの時間）が長すぎるものが課題となり、実用が遅れている。（既存の2周波受信方式の初期化時間は1分以内であるが、1周波受信方式では10数分以上とされている）

本研究では、マルチGNSS（米国のGPS、ロシアのGLONASS、日本のQZSSなど全地球衛星航法システムの総称）L1信号の1周波受信方式のRTK測位演算アルゴリズムの開発により、2周波受信方式と同等の測位精度と、1周波受信方式の課題であるRTK初期化時間の大幅な短縮を目指す。

最終目標性能としては、RTK初期化時間を1分以内、位置精度2cm、高さ精度4cmを目指す。

2-1-2 設計・試作

(1)測位更新周期の高速化

本研究では、当初、航法センサー試作機のRTK測位をデータ入力、測位演算、結果出力を一連の連続処理としてシングルタスクで実現してきた。しかしこの方式では測位更新周期の高速化やSDメモ리카ードへの書き込みを実現するためには困難である。そこでこれらの問題解決を図るためプログラムのマルチタスク化を行うことにした。

マルチタスクとしてのタスクをクロックタスク、インプットタスク、アウトプットタスクおよびRTK演算タスクの4タスクに分けてそれぞれ並行処理を行いCPU空き時間を効率よく使うようにした。

(2)各タスクの処理概要と優先レベル

表 2-1.1 各タスクの処理概要

タスク名	処理概要	優先レベル 値大が優先高い
クロックタスク	10 ミリ秒毎に動作し、CPU の LED フリッカー、電源電圧の読み込みおよびウォッチドッグタイマの管理を行う	4
インプットタスク	USB データおよび GPS データの入力処理を行う。また、RTK 演算タスクへの演算開始メッセージを送る	3
アウトプットタスク	測位結果の SD 収録、USB 出力、RS485 出力および RF への出力を行う	2
RTK 演算タスク	インプットタスクからの演算開始メッセージを受け、所定のメモリから GPS データを取り出し RTK 測位演算を行う	1

(3)マルチ GNSS 対応

(ア) 無線伝送量の増加

基準局から移動局へ観測データを送る手段として 920MHz の無線伝送を使用しているが GPS のみの場合では 400 バイト/秒の容量があれば可能であった。しかしマルチ GNSS 対応では伝送量が増加しバッファサイズを検討する必要がある。

920MHz の特定小電力無線では、単一チャンネルでの伝送は、50kbps であり、2 チャンネル同時使用での伝送は、100kbps となっている。

2 チャンネル同時使用モードの場合に伝送できる最大衛星数は下記のようになる。

920MHz の 2CH モードで使用したときの可能出力バイト数

帯域幅 : 100KBPS (1CH モードは 50KBPS)

バイト数 : 12.5K バイト = 100KBPS / 8 ビット

出力制限 : 10%

出力可能バイト数 : 1.25K バイト = 12.5K バイト * 10%

基準局からの出力データ量

観測データ (0x0215) + RF920 の無線コマンド (0x0101)

4 + 16 + 32 * 衛星数 + 14

基準局からの基準位置データ出力 (\$ SBBAS)

62 + 14 バイトを 1 分毎に出力

最大出力データ量と可能出力バイト数の関係は

4 + 16 + 32 * 衛星数 + 14 + 62 + 14 = 1.25K

衛星数 = (1.25K - 112) / 32

= 35.5625

したがって、35 衛星までであれば基準位置を每秒出力しても 1230 バイトなので問題はない。(参考: これまでの長田電機屋上の GNSS 受信実験では 28 衛星が Max)

(イ) 測位精度

測位精度として 1 日分の固定点 Fix データの標準偏差 (mm) を求めた。

調査に利用したデータ : 2015 年 6 月 24 日

収録場所 : 長田電機屋上

収録データ : 移動局、基準局の各センサーで SD 収録

比較データ : 各基準モードの初期化終了後からのデータを使用

測位演算 : 収録データを PC により移動局基準および基準局基準でそれぞれ測位演算

移動局基準 : 移動局の観測データを受信した段階で計算 (基準局のデータより 1 秒遅れ)

基準局基準 : 基準局と移動局の観測データの時刻同期をとって計算

(試作機ではリアルタイム性を重視するため移動局基準の演算を行う)

表 2-1.2 移動局基準の場合の精度標準偏差と Fix 率

移動局基準	緯度(mm)	経度(mm)	高度(mm)	Fix 率(%)
GPS	4.895	4.461	11.036	99.36
GPS+GLONASS	3.825	3.936	9.457	99.00

表 2-1.3 基準局基準の場合の精度標準偏差と Fix 率

基準局基準	緯度(mm)	経度(mm)	高度(mm)	Fix 率(%)
GPS	4.582	3.274	10.900	99.62
GPS+GLONASS	3.427	3.521	8.200	99.47

表 2-1.4 QZSS を追加した場合の移動局基準での精度標準偏差と Fix 率

移動局基準	緯度(mm)	経度(mm)	高度(mm)	Fix 率(%)
GPS+QZS	4.478	4.431	9.752	99.19
GPS+GLONASS +QZSS	3.668	3.957	8.615	99.44

表 2-1.5 QZSS を追加した場合の基準局基準での精度標準偏差と Fix 率

基準局基準	緯度(mm)	経度(mm)	高度(mm)	Fix 率(%)
GPS+QZSS	4.213	4.045	8.962	99.53
GPS+GLONASS +QZSS	3.314	3.526	7.636	99.70

上記データからは試作機で使用する移動局基準のばらつきは GPS、GLONASS および QZSS の衛星組み合わせの構成の場合がよい結果となっている。

(ウ) 初期化と再初期化

下記の条件で GPS 単体および GPS+GLONASS 構成の初期化および再初期化時間を計測

<条件>

初期化計測時間： 24 時間（移動局の電源 5 分間 ON 後、電源 1 分間 OFF の繰り返し）

再初期化計測時間：24 時間（アンテナ分配器の電源 5 分間 ON 後、電源 1 分間 OFF の繰り返し）

表 2-1.6 GPS 単体時の計測結果

時間	初期化	再初期化
30秒未満	—	12
60秒未満	27	38
90秒未満	47	41
120秒未満	31	26
120秒以上	85	76
No Fix	48	46
平均時間	129秒	114秒

表 2-1.7 GPS+GLONASS 構成時の計測結果

時間	初期化	再初期化
30秒未満	—	21
60秒未満	41	52
90秒未満	72	60
120秒未満	48	25
120秒以上	72	52
No Fix	16	25
平均時間	104秒	91秒

2-1-3 成果

(1) 測位更新周期の高速化

GNSS と IMU の統合航法により測位更新周期 50Hz を目指しているが、GNSS のみによる測位更新周期では、測位演算のプログラムをシングルタスク方式からマルチタスク方式に変更し、演算速度を向上させることにより、従来の 1Hz 更新から、5Hz 更新を実現した。さらに、2-3 項、2-4 項の IMU との統合航法、GPS コンパス対応の開発により、GNSS での更新周期の間の更新は、加速度・ジャイロセンサーでの補完による測位で更新できるようになる。このとき、GNSS の更新周期が 1 Hz の場合は、加速度・ジャイロセンサーのバイアス・係数の変動により、補完による測位のずれが大きくなるが、5Hz 対応により補完による測位のずれが小さくなる。

(2) 測位精度改善

GPS のみの測位から GPS+GLONASS にすることで固定点での測位精度が改善されている。現在、測位センサーには GPS+GLONASS の機能が搭載されているが PC による演算

では GPS+GLONASS+QZSS 構成の測位精度はさらに改善されている。

(3) 初期化時間の改善

GPS 単独にくらべ GPS+GLONASS 構成による初期化時間および再初期化時間は平均で 25 秒および 23 秒短くなっており初期化時間が改善されている。改善要因は測位に使用する受信衛星数の増加によるものと思われる。

2-1-4 課題

(1) QZSS 測位機能の組み込み

現センサー試作機には GNSS として GPS と GLONASS が組み込まれているがプログラムメモリには余裕があるもののメインメモリ容量不足のため QZSS については PC 上でのみ動作している。今回の測位精度結果から QZSS を追加するとさらにより結果となっており、現試作機の使用メインメモリ容量を減らし QZSS を組み込む必要がある。使用メモリを減らすにはデータ構造や処理バッファメモリの取扱を検討し変更する必要がある。

(2) 基準局の観測データの伝送フォーマットとして、RTCM SC-104 の採用

一般的に使用されている基準局データの伝送フォーマットとして、RTCM SC-104 Ver.2.3、Ver.3.2、CMR、CMR+などがあるが、伝送容量が小さい RTCM SC-104 Ver3.2 を採用し、他社製 RTK-GNSS 受信機向けに基準局データの提供が行えるようにする。

注 1 : RTCM SC-104 : Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee No.104 : 米国海上無線技術委員会 第 104 特別会議)

注 2 : CMR、CMR+ : トリンプル社の独自フォーマット。Trimble Compact Measurement Record

2-2 大幅コストダウンと小型化・低消費電力化を実現する航法センサのシステム開発

2-2-1 概要

最終目標性能としての、マルチ GNSS に対応したセンサシステムで、既存の 2 周波 RTK-GPS 航法センサの 1/10 以下の価格の実現、小型化・低消費電力化は 0.7W 以下の消費電力と、GPS 時刻同期方式無線伝送による 10kbps 以上の通信速度を目指す。

当初予定では、既存の航法センサに比べて大幅コストダウンを実現するために、1 周波受信方式、RTK 測位演算処理を外部接続の PC や ECU で行う方式、及び基準局データ伝送を特定小電力無線（920MHz/2.4GHz）での GPS 時刻同期の高速通信方式の開発であったが、サブテーマ①項の RTK 測位演算アルゴリズムの開発成果により、移動局センサーユニット側の汎用 CPU で RTK 測位演算をさせることが可能になり、当初予定していた、基準局、移動局、及び PC（または ECU）のシステム構成から、PC（または ECU）を削除した構成とし、大幅コストダウンを達成させる。

2-2-2 設計・試作

(1) 基準局・移動局のハードウェア設計・試作・評価

2 次試作改良版 CS1 試作機の評価と、この評価結果を反映させた、3 次試作 CS2 試作機的设计・試作・評価を行った。

主な仕様変更項目としては、CPU の変更（ARM-4 系の 2 CPU 方式→ARM-7 系の 1 CPU 方式）、RAM 容量増加（128KB x 2 →384KB x 1）、CPU クロック周波数変更（96MHz →300MHz）であり、マルチ GNSS 対応での測位演算能力の改善を図った。

また、基準局用のソーラー電源システムを作成し、電源が供給できない圃場などでも自由に基準局の運用をできるようにした。



図 2-2.1 CS2 版試作機

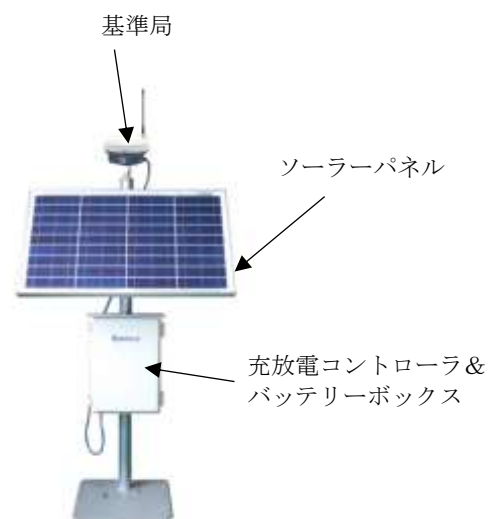


図 2-2.2 基準局用ソーラーパネル電源

表 2-2.1 CS1 と CS2 のハードウェア仕様比較表

試作機仕様項目	2次試作改良版 CS1	3次試作 CS2
CPU 基板	70mm x 80mm 4層基板	70mm x 70mm 6層基板
CPU	(2CPU 方式) ARM-4系 x 2 RAM : 128KB x 2 クロック : 96MHz	(1CPU 方式) ARM-7系 x 1 RAM : 384KB x 1 クロック : 300MHz
GNSS 受信モジュール	NEO-M8T (u-blox) GPS、GLONASS、QZSS の L1	← (同左)
無線モジュール	2.4GHz/920MHz の選択可	920MHz のみ対応
インタフェース	USB : 1ポート RS-485/CAN : 選択	USB : 2ポート (GNSS 受信モジュール用と測位データ用) RS-485/CAN : 選択
ケースサイズ	142mmφ x 96mm(H)	← (同左)

(2) 無線伝送距離測定

920MHz 無線の伝送距離を測定するために、見通し距離が確保できる場所の調査を行っていたが、Google Map で兵庫県篠山市の農道で 2km の見通し距離の場所を見つけて、無線伝送距離の実験を行い、到達距離 2km 以上を確認した。



図 2-2.3 無線伝送試験場所の地図 (兵庫県篠山市)



基準局（高さ 4.8m）

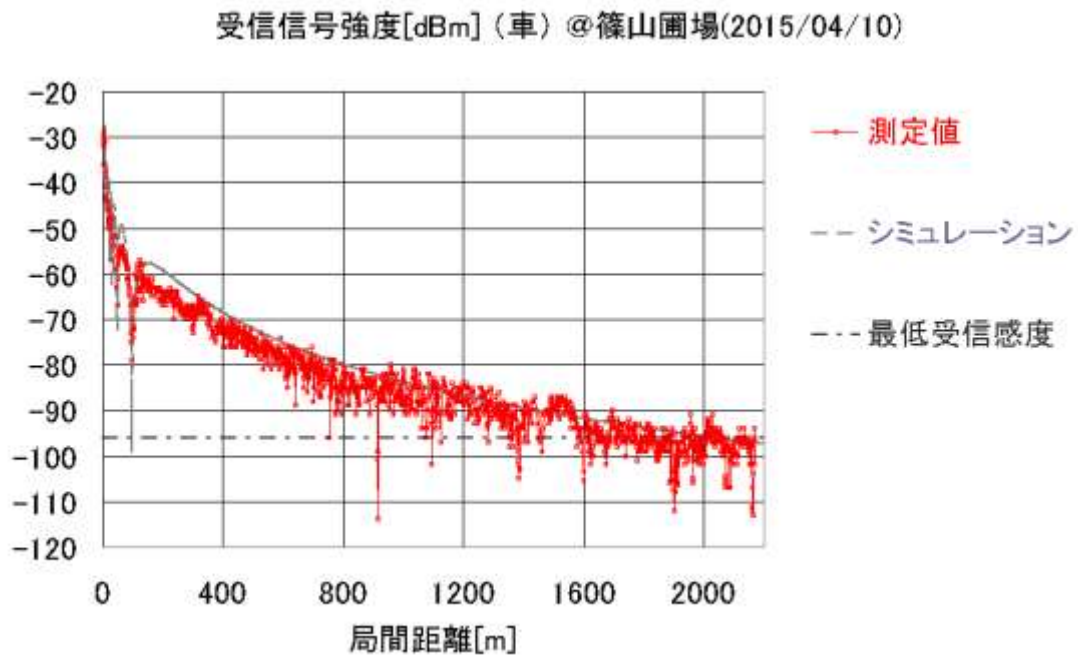


移動局（高さ 3.3m）



移動局（高さ 2.3m）

図：2-2.4 篠山圃場での無線伝送距離測定実験の写真



図：2-2.5 篠山圃場での 920MHz 無線の伝送距離

(4) GNSS 対応による受信衛星数の増加

GNSS 対応により、24 時間の受信衛星数が増加し、図 2-2.6 に示すように、常時 10 衛星以上の受信が可能となった。

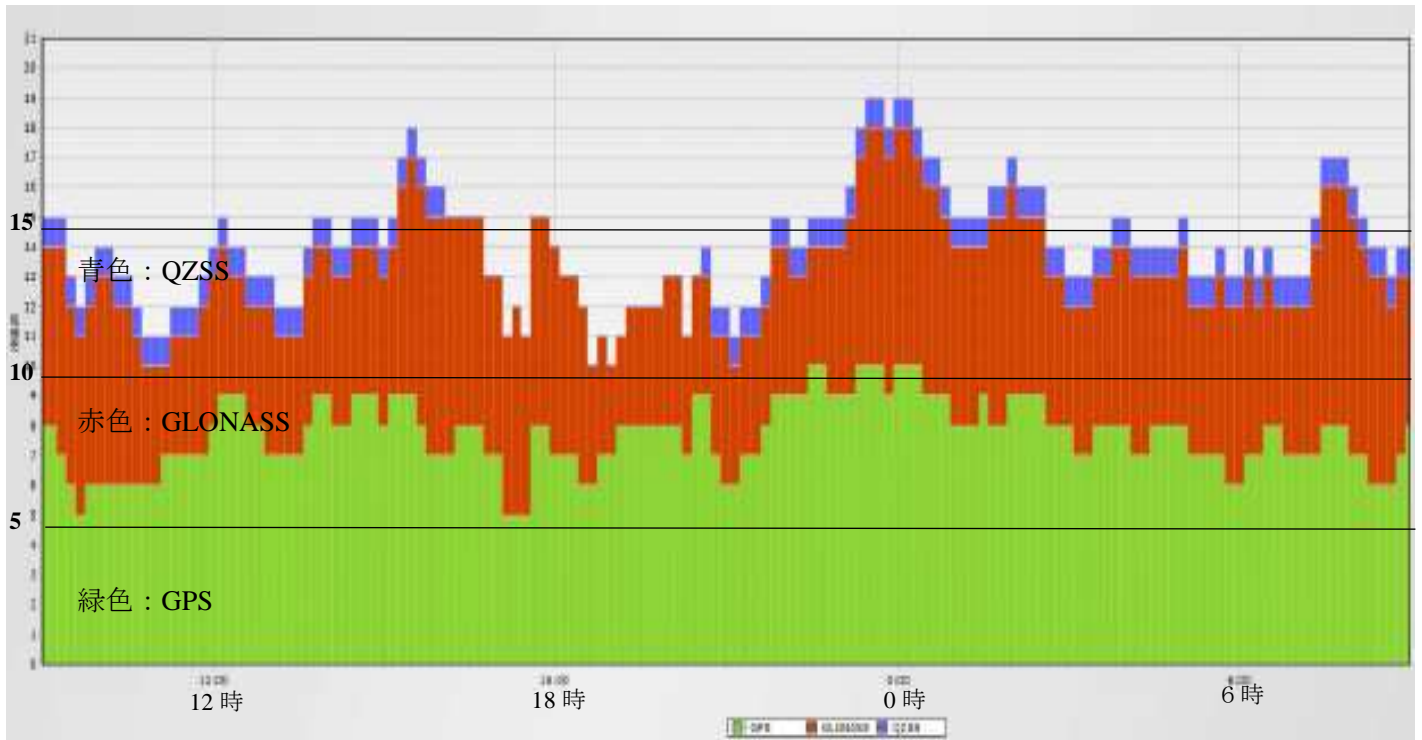


図 2-2.6 GNSS の場合の受信可能衛星数（豊中市 2016 年 3 月 1 日 マスク仰角 15 度）

(5) 北海道農業研究センターでの RTK 測位実験

北海道農業研究センター圃場で、CS2 での RTK 測位実験を行ったが、測位の比較用として、2 周波 RTK-GPS 受信機 Leica SR530、自動操舵ガイダンス AG-RiDER も実験した。



図：2-2.7 北農研での実験状況

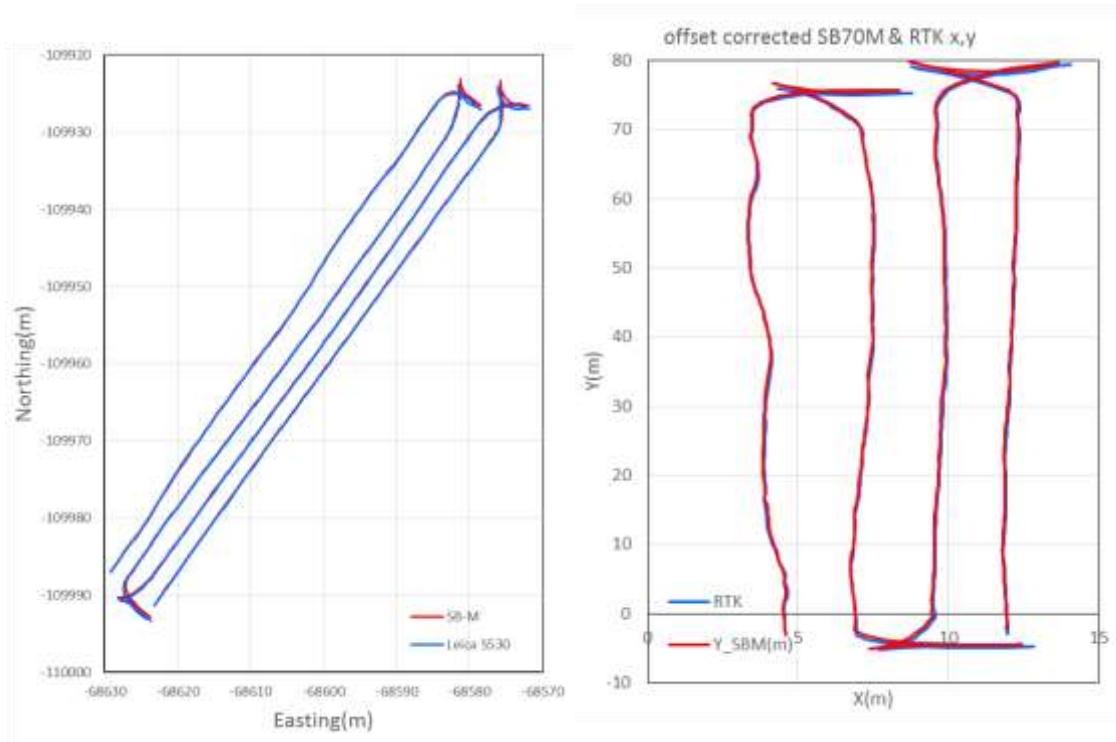


図 2-2.8 北農研での Leica SR530 との比較試験時の軌跡
直線コースは、AG-RiDER での自動運転

図 2-2.9 北農研での Leica SR530 との比較試験時の設置オフセット補正した、軌跡拡大図

2-2-3 成果

(1) 基準局・移動局のハードウェア設計・試作

センサーの CPU 基板は、2 次試作改良版 CS1 (CPU は ARM-4 系の 2 CPU 方式) →3 次試作 CS2 (CPU は ARM-7 系の 1 CPU 方式) とし、CPU クロック周波数は、96MHz→300MHz、RAM 容量は、128KB x 2→384KB x 1 と演算速度の向上を図った。

また、CS1 までは、2.4GHz 無線モジュールと 920MHz 無線モジュールの選択が可能な仕様としていたが、2.4GHz では伝送距離が 500m 程度と短距離であること、及び、920MHz での 2 チャンネル同時使用モードで伝送速度の向上ができたので、CS2 試作機以降は、920MHz 専用とすることで、CPU 基板サイズの小型化とコストダウンを実現した。

(2) 測位精度向上対策

GNSS アンテナ、GNSS 受信モジュールを、GNSS (GPS、QZSS、GLONASS の L1 信号) 対応とした、CS2 版を試作し、各種の評価試験を行った。

また、GNSS 信号のマルチパス低減のために、GNSS アンテナの種類による、CCD

(Code-Carrier-Divergence) を測定して、衛星の仰角毎の CCD データをグラフ化することにより、マルチパスの影響が観測できた。

2-2-4 課題

(1) CS2 試作機でのマイクロ SD カード書込み時の雑音混入

過去の試作機 (ES3、CS1) では問題なかったが、今回の CS2 試作機で、マイクロ SD カードに書込みを行うと、GPS 受信信号の C/N0 が低下するトラブルが発生した。

マイクロ SD カードの書込み用クロック信号は、ES3、CS1 の試作機と同じ 25MHz であるが、クロックラインのパターンが GNSS 受信モジュールの入力部に接近しすぎたことが原因であった。ちなみに、25MHz の 63 倍の高調波が、GPS 受信帯域と同じ、1,575MHz となっている。

次回の基板アートワーク設計時は、マイクロ SD カードのクロック信号ラインに細心の注意が必要。

(2) 広域用 RTK 基準局

基準局センサーの高さが 4m 程度の場合、無線伝送距離は見通し距離で、最大 2km 程度であるが、北海道地区からの要望では、地方自治体や農業法人などの団体で、RTK 基準局の共同運用があり、長距離のサービスエリアの要望が多いので、基準局情報の伝送距離拡大対策が必要。

無線アンテナを外部アンテナとし、アンテナ高さを高くして、見通し距離を長くする方法、あるいは基準局の無線伝送データの圧縮、RTCM 伝送フォーマットの採用を行い、伝送速度はあまり速くないが、回折により障害物に強い 429MHz 無線の採用など、電波遮断に強くする対策などの検討を行う。

2-3 航法センサの測位率の向上・ロバスト化

2-3-1 概要

IMU の組み込みと、マルチ GNSS の対応による統合航法システムの開発により、GPS 受信中断時のバックアップ、RTK 測位の初期化時間・再初期化時間の短縮、姿勢角（ロール、ピッチ、方位）の計測、測位データ更新レート的高速化を実現し、測位率の向上・ロバスト化の実現を図る。

最終目標性能としては、マルチ GNSS 対応の RTK-GPS と IMU の統合航法アルゴリズムの開発により、下記の機能・性能を目指す。

- ・GNSS 受信中断中でも、測位継続可能とする：1 分以上の GNSS 受信中断時でも、サイクルスリップなしで測位継続を実現する。
- ・GNSS 受信中断後のサイクルスリップ（位置飛び）発生時の再初期化時間の短縮を行う。
- ・50Hz 以上的高速更新レートを実現する。
- ・姿勢角計測により、農機の傾きによる測位ずれの補正を行う。

2-3-2 設計・試作

(1) GNSS（GPS、QZSS、GLONASS）対応

RTK-GNSS センサーの GNSS（GPS、QZSS、GLONASS の L1 信号）対応は 2-1 項と 2-2 項に記載したように、GPS と GLONASS の対応は CS2 へ組み込みが完了したが、QZSS 対応については、PC 版で評価中であり、評価終了後に CS2 へ組み込む予定。GNSS 対応による測位率（Fix 率）の改善結果は、2-1 項を参照。

(2) 加速度センサー、角速度（ジャイロ）センサーのキャリブレーション

加速度センサー、角速度（ジャイロ）センサーのバイアスと係数の校正は、キャリブレーション治具を用いて収録を行った。

図 2-3.1 に示すように、試作機の CPU 基板を、レートテーブルに専用取付治具で、X 軸方向、Y 軸方向、Z 軸方向と回転軸を順次変更して取り付けて、「時計方向」、「反時計方向」の回転方向で、角速度を、0 度/秒、10 度/秒～500 度/秒と設定して、加速度、角速度のデータを CPU 基板のマイクロ SD カードに収録する方法で行った。

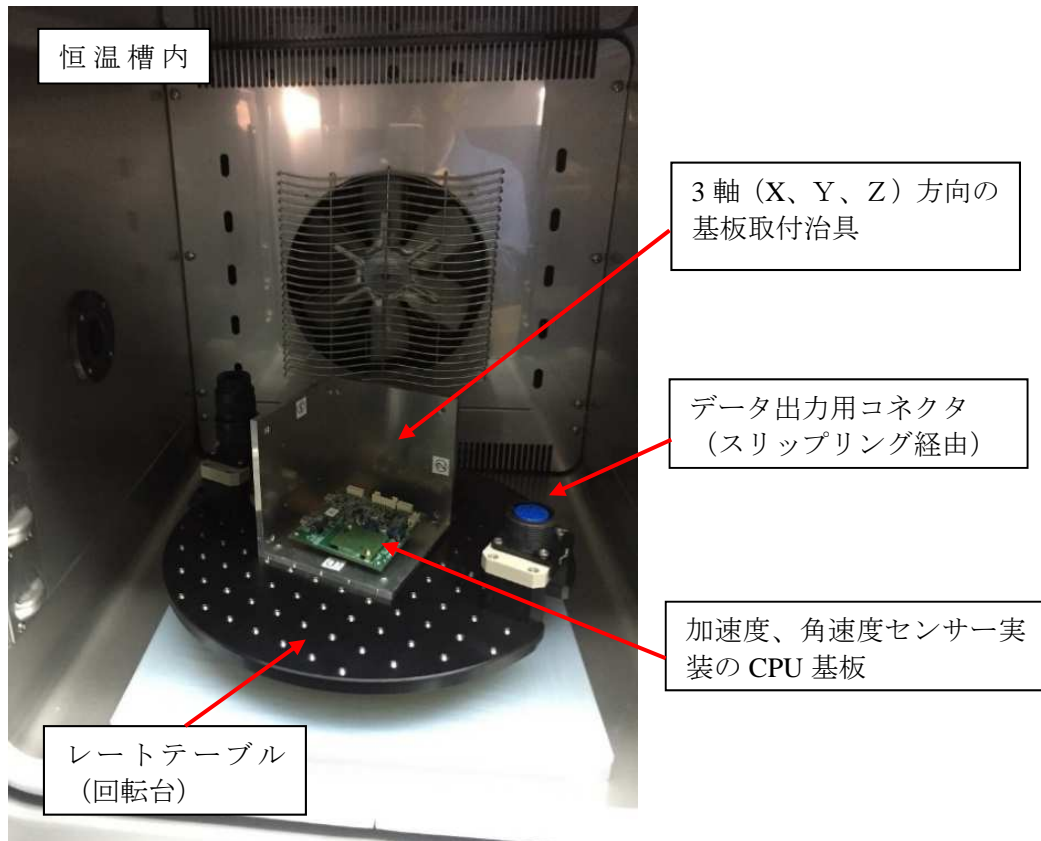


図 2-3.1 キャリブレーション用治具

(3) IMU による位置の推定アルゴリズム

本研究で開発したアルゴリズムに基づいて、ジャイロと加速度センサーのデータから位置の推定を行う処理を図 2-3.2 に示す。

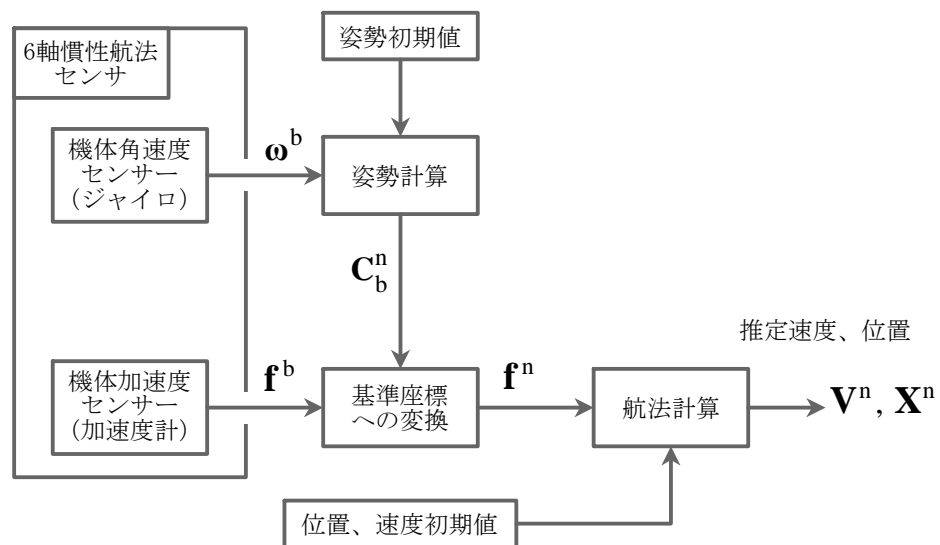


図 2-3.2 IMU による位置の推定アルゴリズム

この評価試験は、2-4 項の「GPS コンパスの評価試験」と共通の評価試験とし、実験データ収録と方位、姿勢角の推定アルゴリズムの評価を行った。

(データ収録方法などは、2-4 項を参照)

(ア) ジャイロによる姿勢（方位）推定結果と SC-30 方位データの比較。

図 2-3.3 に一回目の周回時における、市販の GPS コンパス SC-30（古野電気製）で得られた方位データと、ジャイロの検出データから得られた方位データを示す。

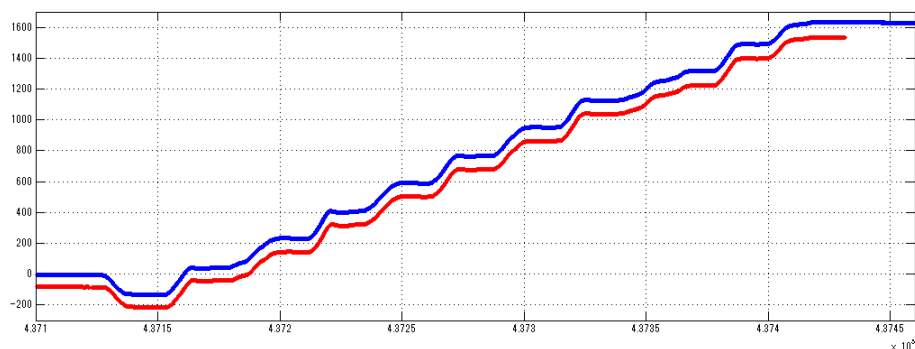


図 2-3.3 SC-30 とジャイロによる方位推定結果（赤：SC-30、青：ジャイロセンサー）

図 2-3.3 に示すように、ジャイロデータの積算によって得られた方位と SC-30 のデータとは、全体の形状は良く一致（ジャイロは相対変化しか検出できないので、一定の差分は無視してよい）している。

(イ) 加速度センサーによる速度推定

ジャイロによる方位推定の次は加速度センサーのデータを航法座標の成分（東方向、北方向）に分解し、各軸の加速度を得、これを積分し、速度、さらに積分して位置を得ることである。

図 2-3.4 には、航法座標に変換した加速度センサーから得た速度を示す。

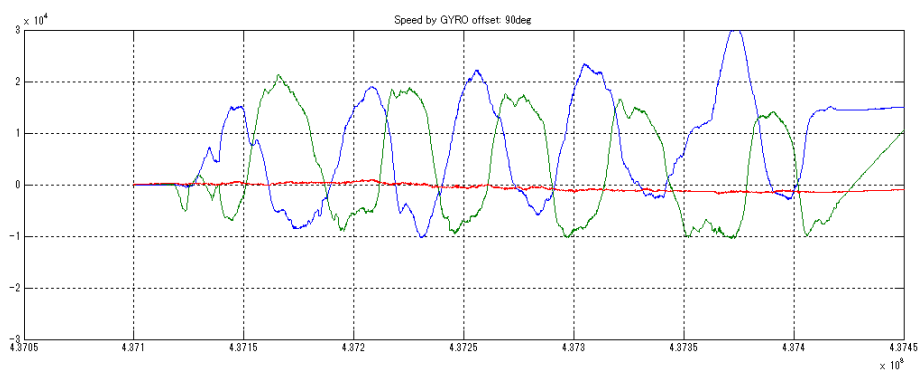


図 2-3.4 航法座標に変換した加速度センサーから得た速度

図 2-3.5 には SC-30 から得た航法座標での速度を示す。

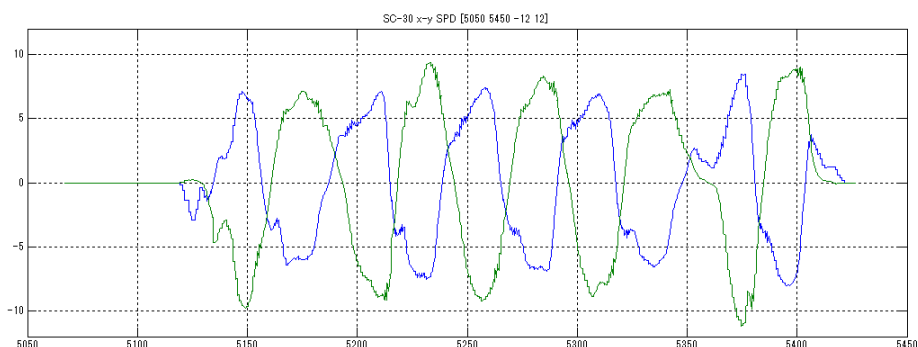


図 2-3.5 SC-30 のデータから得た航法座標での速度

図 2-3.4 のデータを積算すれば、位置のデータが得られるのであるが、今回の実験では評価に値するデータを得ることができなかった。

図 2-3.3 からジャイロのデータは妥当なものであると判断できるが、図 2-3.4 の加速度センサーのデータの SC-30 データ図 2-3.5 からの乖離が著しい。

採用した加速度センサーは、機器の傾き検出と、ごく短時間の速度変化の検出程度にしか利用できない。今後は基本的なアルゴリズムの見直しが必要と考えられる。

2-3-3 成果

(1) GNSS 対応

ハードウェアは GPS、QZSS、GLONASS の L1 信号に対応したが、RTK 測位アルゴリズムの CS2 への組み込みは、GPS と GLONASS が完了。QZSS 対応アルゴリズムは PC での評価中で、評価完了後に CS2 へ組み込み予定。

GNSS 対応による測位率の向上は、2-1 項に記載。

(2) IMU（加速度、角速度センサー）のキャリブレーション

恒温槽組み込みのレートテーブルに、CPU 基板取付治具により回転軸を X、Y、Z 方向に切り換えて、キャリブレーション用データの収録を行い、IMU のバイアス、係数のキャリブレーションが可能となった。

(3) IMU による位置推定アルゴリズムの開発

アルゴリズムの開発と評価を行ったが、今回採用したセンサーのデータでは、機器の傾き検出と、短時間の速度変化の検出程度にしか利用できないことが判明した。

IMU のセンサーの選定と位置推定アルゴリズムの見直しが必要。

2-3-4 課題

(1) GNSS 対応

GPS と GLONASS 対応の CS2 センサーへの組み込みは完了したが、QZSS の PC 版での評価終了後に、GPS、GLONASS、QZSS 対応のセンサーへの組み込みを行う。但し、マイクロ SD カード書き込みのクロック信号の雑音混入対策で、CPU 基板のバージョンアップを行うので、QZSS 対応の組み込みは、このバージョンアップ版で組み込む予定。

(2) IMU による位置推定アルゴリズムの開発

今回採用した加速度・角速度センサーのデータでは、機器の傾き検出と、短時間の速度変化の検出程度にしか利用できないことが判明したので、新たな加速度・角速度センサーの選定と、位置推定アルゴリズムの見直しが必要。

2-4 GPS コンパス方式による停止・低速度時の方位精度向上

2-4-1 概要

既存の RTK-GPS システムは、1 アンテナ・1 GPS 受信部方式の GPS なので、低速になると方位精度が劣化し、停止すると方位の計測不可能となる。本研究開発では、2 アンテナ・2 GPS 受信部方式を採用し、2 アンテナ間の基線ベクトル演算で方位を計測することで、高精度な方位計測ができる GPS (マルチ GNSS) コンパス方式を開発する。

さらに、GPS コンパスと IMU との統合航法アルゴリズム開発により、GPS 受信中断時のバックアップや、方位計測の更新レート的高速化を行う。

また、オプション機能として、3 アンテナ・3 GPS 受信部方式の GPS コンパスの試作を行い、GPS による姿勢・方位計測も可能とする。

最終目標性能としては、GPS コンパス方式の方位精度 1 度以内、方位データ更新レート 50Hz 以上を目指す。

2-4-2 設計・試作

(1) GPS コンパス方位・姿勢角検出アルゴリズムの設計

基準受信機と方位検出受信機間の最初の位置関係の検出 (=アンビギュイティ項の推定) は RTK 測位と同じアルゴリズム (カルマンフィルタによるフロート解の推定 + LAMBDA によるアンビギュイティ整数化) を用いた。

アンビギュイティが解けたあと、基線は搬送波位相二重差観測残差を用いた最小自乗推定にて求めた。基線が長くとも数(m)であることから、電離層及び対流圏の影響は無視している。基線は ECEF 座標で得られるが、これを航法座標に変換し、その East 及び North 成分から方位に換算した。

アンテナ No.1 を基準に、Roll 軸に沿って設置されたアンテナ No.2 (基線 1) と Pitch 軸上に設置されたアンテナ No.3 (基線 2) を用いて、3 アンテナ方式での姿勢角検出を行った。

姿勢角は基線 1 と基線 2 をもとに構成される機体の軸が、航法座標軸から回転した量から求めることができる。

基線 1 と基線 2 の位置関係は、既知として与えた。基線 1 と基線 2 に直交する基線 3 を計算で求め、移動体上の 3 軸のベクトルからなる行列 (Ant_body[3x3]) を求める。この値はアンテナの位置関係で決定され、移動や姿勢が変化しても変わらない。

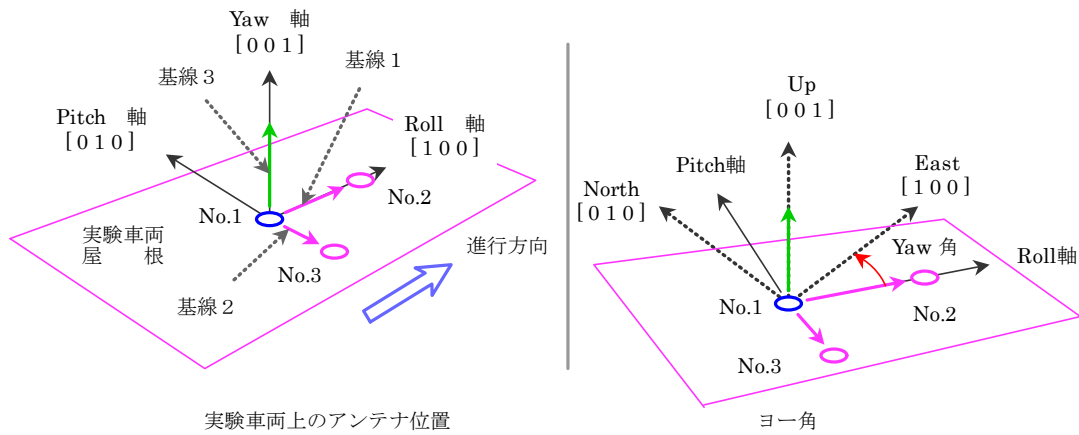


図 2-4.1 移動体固定軸とヨー角の関係

姿勢角を求めるには、まず方位検出と同じ方法で、基線 1、基線 2 を求める。これらをもとに基線 3 を計算し、航法座標上での 3 軸のベクトル ($Ant_{nav}[3 \times 3]$) を求める。 Ant_{nav} は Ant_{body} に、Roll、Pitch、Yaw 角で作ることのできる回転行列 (DCMbn) を乗じた結果である。

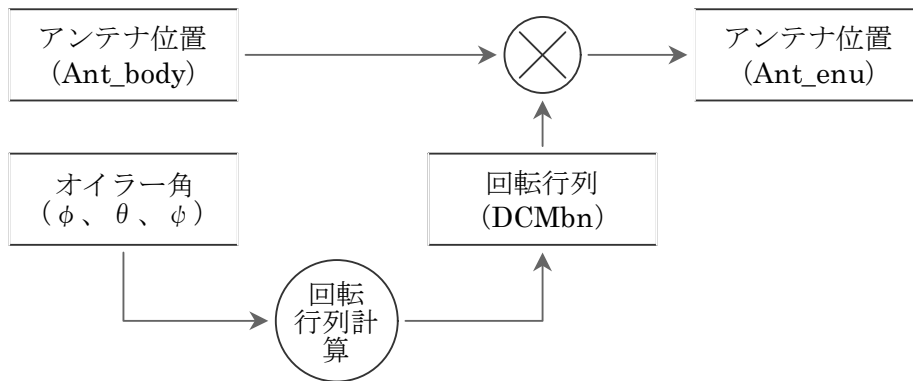


図 2-4.2 アンテナ位置と回転行列の関係

ϕ : Roll、 θ : Pitch、 ψ : Yaw としたとき、航法座標から機体座標への変換行列は

$$\mathbf{C1} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C2} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{DCM}_{bn} = \mathbf{C}_b^n = \mathbf{C3} \cdot \mathbf{C2} \cdot \mathbf{C1}$$

で求めることができる。

回転行列の計算 図 2-4-2 より、

$$\mathbf{Ant_enu} = \mathbf{DCM}_{bn} \cdot \mathbf{Ant_body}$$

であり、 $\mathbf{Ant_enu}$ 及び $\mathbf{Ant_body}$ は既知であるので、 \mathbf{DCM}_{bn} は

$$\mathbf{DCM}_{bn} = \mathbf{Ant_enu} \cdot (\mathbf{Ant_body})^{-1}$$

で得ることができる。回転行列から、Roll、Pitch、Yaw 角は以下で求める。

$$\phi = \tan^{-1}(\mathbf{DCM}_{bn}[3,2]/\mathbf{DCM}_{bn}[3,3])$$

$$\theta = \sin^{-1}(-\mathbf{DCM}_{bn}[3,1])$$

$$\psi = \text{atan2}(\mathbf{DCM}_{bn}[2,1]/\mathbf{DCM}_{bn}[1,1])$$

(atan2 は 4 象限の逆正接)

これによって、基線ベクトル 2 組 (基線 1、基線 2) から姿勢を求めることができた。

(2) GPS コンパスの評価試験

GPS+QZSS を用いた方位検出ソフトウェアを製作し、大阪市内の商業施設の屋上駐車場を走行して評価実験を行なった。

実験車 (日産キャラバン) の屋根に図 2-4.3 に示すように、4 台の受信機と、参照用に市販の GPS コンパス (古野電気製 SC-30) を搭載した。

実験は見通しの良い場所 (屋上駐車場) に約 5 分間、停止時の精度を評価するために車を停止させ、その後周回を行なうことを二度繰り返した。

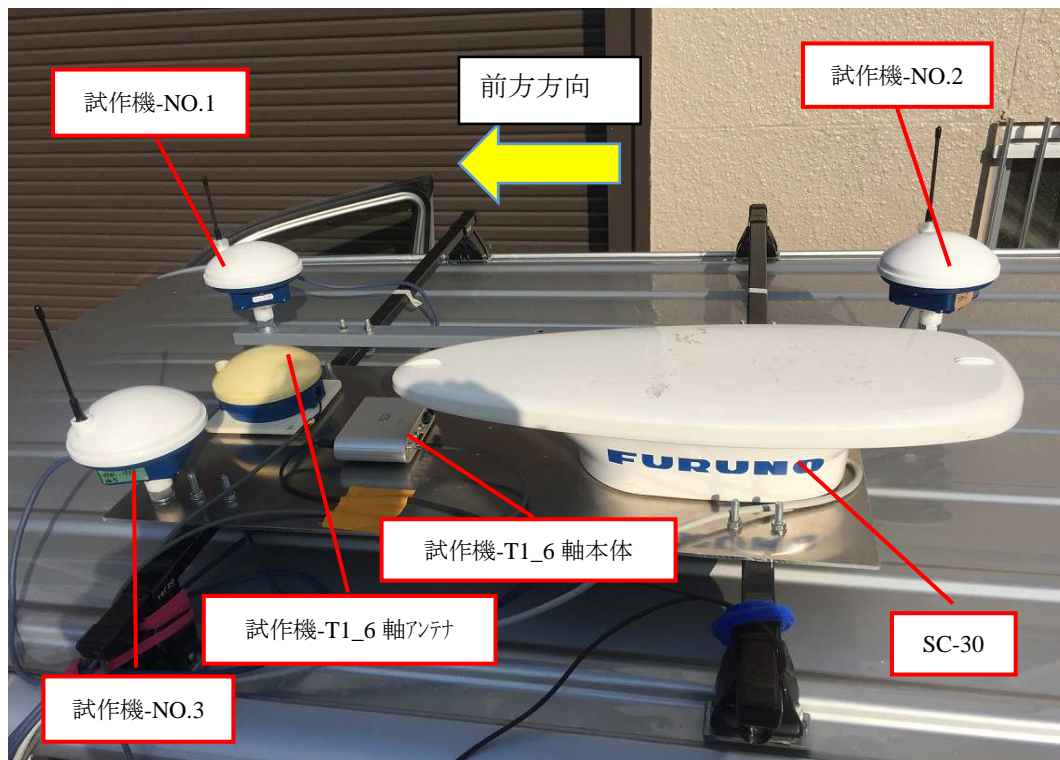


図 2-4.3 GPS コンパス用データ収録時の機器設置

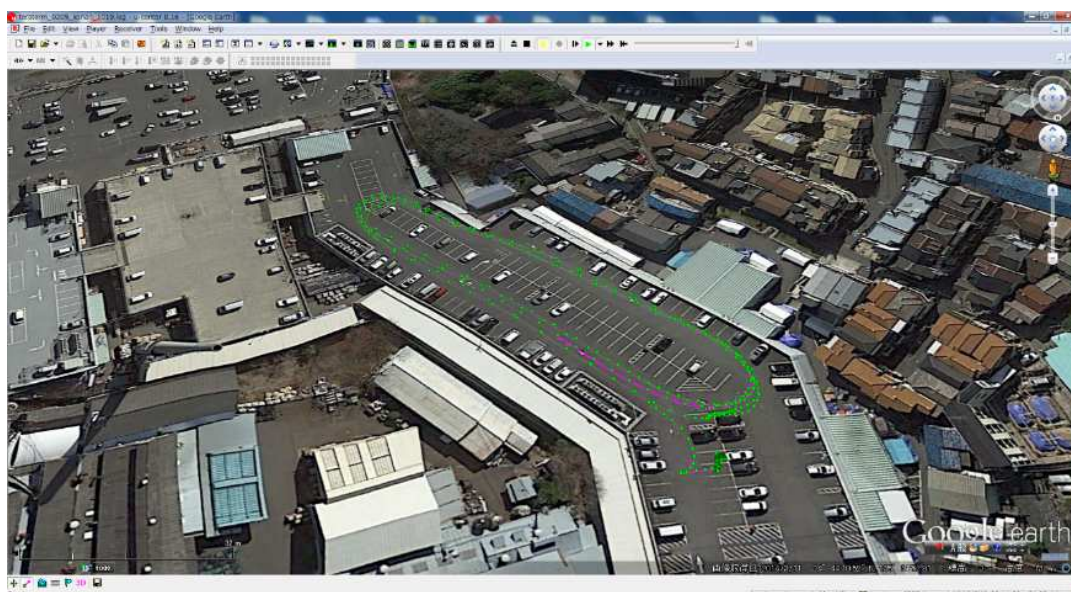
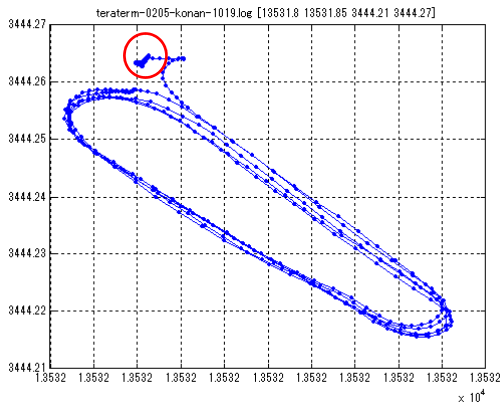
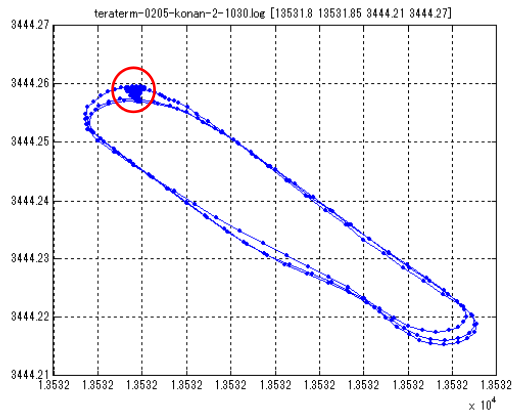


図 2-4.4 駐車場での周回コースによる評価試験 (Google Earth プロット)

注：緑点は1秒毎の軌跡



一回目の停止、周回



二回目の停止、周回 (○は停止位置を示す)

図 2-4.5 評価実験時の航跡

(1) 停止時の方位精度評価

4 台の受信機（アンテナ）間の全ての組み合わせでベクトルと方位を求めた。この結果から算出したアンテナ相互の関係を図 2-4.6 に示す。

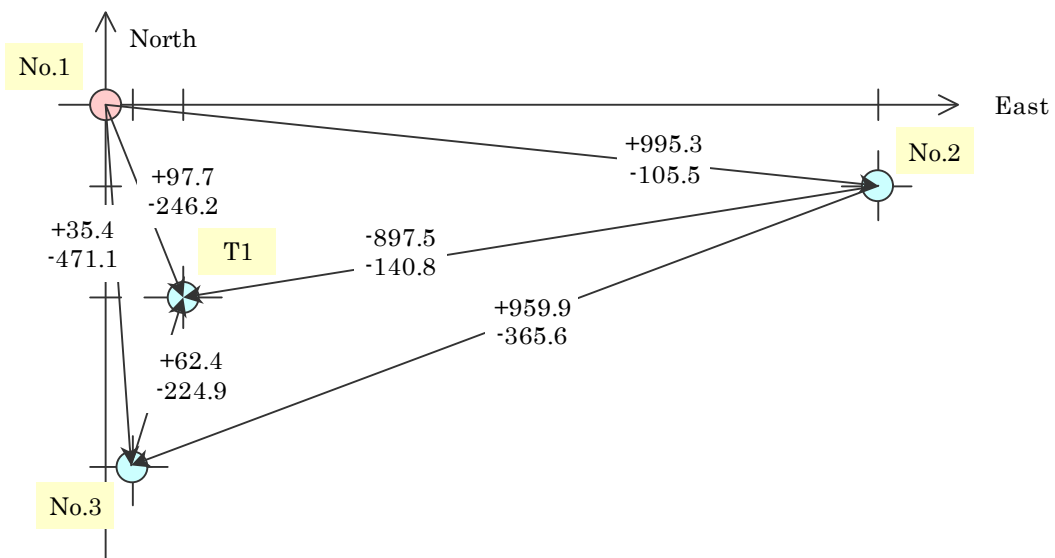


図 2-4.6 一回目の停止位置におけるアンテナ位置関係 (mm)

(2) 走行中の誤差評価

一回目の走行中の各基線から求めた方位を図 2-4.7 に示す。比較が容易となるように、方位は 360 度を越えても、ゼロにもどすのではなく、そのまま増加する形で表した。

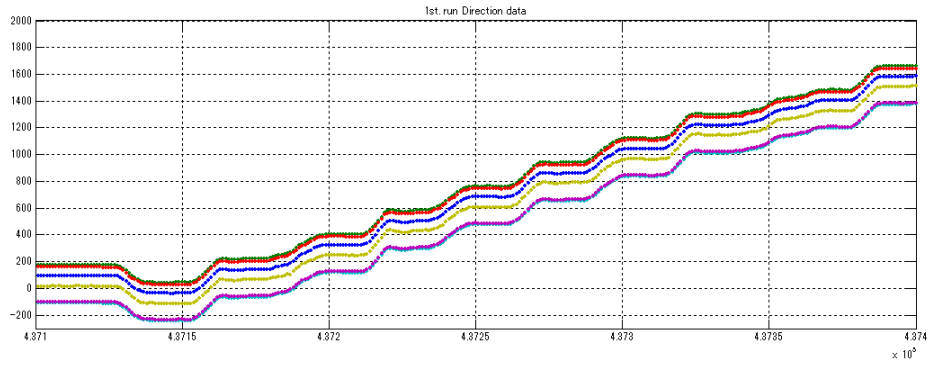


図 2-4.7 1 回目走行中の方位検出結果

停止時のアンテナ間の角度を基準に、移動中の差の平均値と標準偏差を求めた結果を表 2-4.1 に示す。

表 2-4.1 移動中の方位誤差の平均、標準偏差

データ	平均 (deg)	標準偏差 (deg)
(No.1,No.3) - (No.1,No.2)	1.01	1.19
(No.1,T1) - (No.1,No.2)	0.89	1.51
(No.2,No.3) - (No.1,No.2)	0.52	0.71
(No.2,T1) - (No.1,No.2)	-1.17	0.80
(No.3,T1) - (No.1,No.2)	4.69	3.35

(3) 姿勢角検出

方位検出と同時（同じデータ）に姿勢角検出の評価を行なった。図 2-4.8 に一回目走行中の姿勢検出結果を示す。

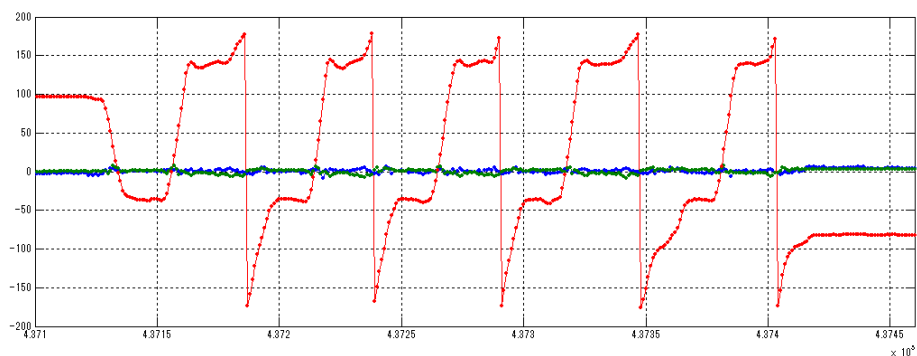


図 2-4.8 一回目走行中 姿勢検出結果

図 2-4.9 には、参照用として、SC-30 による方位検出結果を示す。

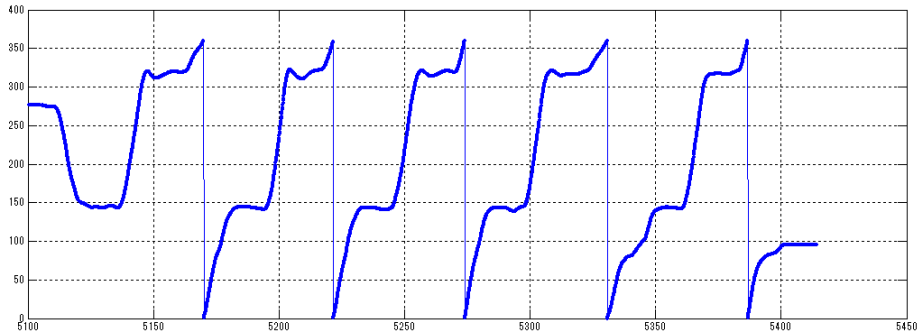


図 2-4.9 一回目走行中 SC-30 方位検出結果

方位データ（ヨー角）は、SC-30 の結果と良く一致しており、開発したアルゴリズムによる姿勢推定が妥当に行われていることが確認できた。

2-4-3 成果

(1) 方位・姿勢角検出のアルゴリズムの検証

GPS コンパスの方位・姿勢角検出のソフトウェアを作成し、アルゴリズムの検証を行ったが、方位データ（ヨー角）は、参照用の SC-30 の結果とよく一致しており、開発したアルゴリズムによる姿勢推定が妥当に行われていることが確認できた。

静止時の精度はどの基線に於いても、標準偏差 1 度未満であることが確認でき、目標の 1 度を満足することができた。

走行中の精度は静止時に比べて劣化しているため、原因の究明と対策を施したい。

(2) GNSS 対応

GPS コンパスの評価試験は、演算アルゴリズムとして GPS と QZSS のみの対応版で行ったが、GLONASS 対応版は、IMU 統合航法の開発に合わせて継続研究とした。

(3) 方位データの 50Hz 更新

GPS コンパスの開発と、2-3 項の IMU との統合航法により、50Hz 更新を行う予定であったが、IMU での姿勢角検出の見直しが必要となり、高速更新は課題として先送りして、継続研究とした。

2-4-4 課題

(1) 走行中の方位精度改善

試作機での評価試験で、静止時の方位精度は 1 度以内で目標精度を達成できたが、移動中の方位精度は静止時に比べて劣化しており、誤差が 3 度以上になる場合があったので、原

因究明と対策が必要。

(2) GNSS 対応

試作機による都市部の屋上駐車場での実験では、周囲の建物などの影響で、GPS の電波遮断があり、受信状態は良好ではなく、移動中に安定して追尾していた衛星数は5機程度であった。本年度のGPS コンパス演算アルゴリズム開発はGPS と QZSS のみで行ったが、精度や信頼性向上のためには、多くの衛星数が必要で、方位や姿勢検出に関しても、GLONASS や他の衛星航法システムの利用を進める必要がある。

(3) アンテナ相互間の干渉と最適基線長の見極め

GPS コンパスは原理上、基線長に比例して精度が向上するが、実験結果によれば、短基線で求めた方位は基線の長さ以上に誤差が大きい。

アンテナ相互間の干渉などの可能性もあり、原因の究明と、実用的な基線の長さを見極める必要がある。

(4) ロバスト化

都市部での車両での走行実験では、GPS 信号の受信中断が頻発しており、その度に方位・姿勢検出の「再初期化」が必要となる。初期化時間の短縮と合わせて、GPS 受信中断時のIMUによる補完、バックアップなどの統合航法によるロバスト化、方位検出の高速更新(50Hz)が必要。

2-5 農機用航法センサシステムのフィールド評価試験

2-5-1 概要

研究開発の各段階で農機用航法センサシステムの実圃場での位置・姿勢に関する精度などの評価試験を行い、その結果を研究開発にフィードバックすることを目的としている。

開発する安価な RTK-GPS・IMU 農機用航法センサの実圃場作業でのガイダンス利用における性能評価のために、市販のガイダンス装置と精度評価用の RTK-GPS をトラクタに搭載し、圃場走行を行い、精度評価を行う。次に、安価な RTK-GPS・IMU の統合航法の評価を行う。統合航法としては、loosely coupled 手法と tightly coupled 手法を用いる。最後に、開発する安価な RTK-GPS をトラクタに設置して、実圃場でトラクタの自動走行に関する制御性能の評価を行う。

2-5-2 農業用走行支援システムの開発と評価試験

1. 試験目的

今年度の最終開発試作品の GLONASS 対応の試作機について、農機用航法センサとしての実圃場作業での適応性や性能を評価する。そのため、基地局からの補正情報取得の限界距離と安定性、遮蔽物、建物、樹林の影響、再 Fix のための所要時間、定点観測での測位位置誤差、圃場内往復走行、直線走行での精度安定性、曲線走行、急激な走行変化等における応答性と精度などについて調べる。

2. 精度評価試験方法

開発試作品の航法センサ試作機 (GPS+GLONASS の 1 周波 RTK-GNSS のボード使用、アンテナ: MAXTENA) の基地局を試験圃場に近接した脇に設置した場合と精度評価用の市販 RTK-GPS (Leica SR530、2 周波 L1 L2) の基地局が設置してある北農研屋上の隣接した場所に設置した場合について、トラクタ (クボタパワクロ M90、67.5kW、図 2-5.1) の屋根にそれぞれの受信機を図 2-5.2 のように設置して実験を行った。



図 2-5.1 使用したトラクタ (KUBOTA M90、67.5kW)



図 2-5.2 試作機と精度評価用 RTK-GPS のアンテナ設置状況

3. 実験結果及び考察

1) 移動局近くに基地局を設置したときの往復走行試験 (Exp.1、Exp.2)

No1 スペースの脇に試作機の基地局を設置し、試作機をトラクタ屋根の車体中心線上、RTK-GPS アンテナの後方 40cm の位置に設置し(図 2-5.3 参照)、基地局からの距離 7-85m の長辺 86m、短辺 20m の積雪約 30cm の雪面において作業幅 2.5m の設定で 2 往復の走行試験を午後、30 分ほどずらして 2 回行い (Exp.1、Exp.2 とする)、Fix 状況や捕捉衛星数、走行軌跡データ等を RTK-GPS のデータと比較した。



図 2-5.3 Exp.1、Exp.2 の試験スペースと基地局設置位置

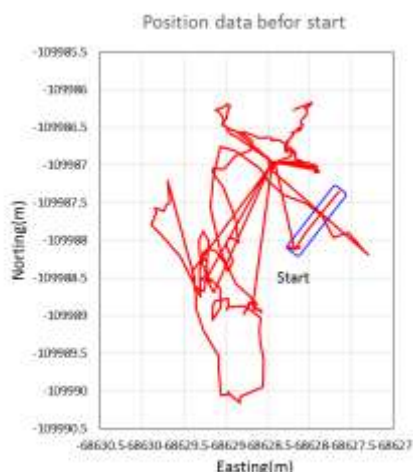


図 2-5.4 電源 ON 後の試作機の東西・南北方向位置出力データ (Exp.1)

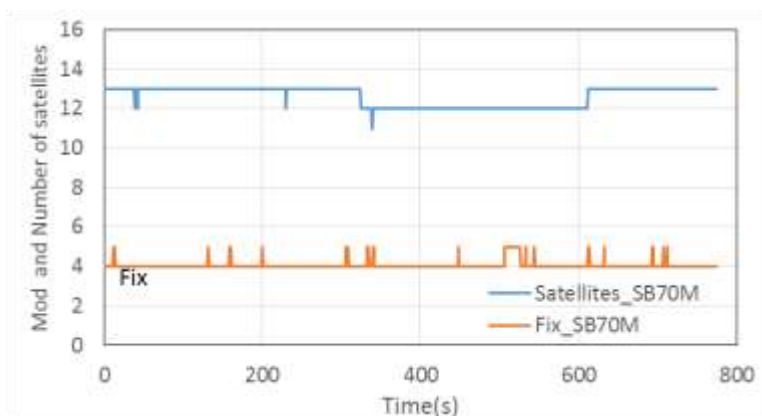


図 2-5.5 往復走行試験 Exp.2 における Fix 状況と捕捉衛星数の経過時間変化

Exp.1 において、始めに停止中、試作機の電源を入れてから Fix し、スタートする 1300sec までの緯度・経度の出力データを平面直角座標系 (公共座標系 12 系) に変換してグラフに表した結果、東西方向で 2.5m、南北方向で 4m の変動があった。Log 記録開始後 100sec くらいで始めに Fix するまで 0.4m ほど減少して一定値になったが、450-760sec の間で大きく変動した。

Exp.1 の約 30 分後に同様の試験を行った Exp.2 では、図 2-5.5 に示すように捕捉衛星数が 12-13 個で推移したが、Fix 状況は Exp.1 と同様、同程度に瞬間的に Float になる個所があった。計測開始約 70s 後のスタート地点で初期オフセット補正を行った市販 RTK-GPS との軌跡の比較では、Exp.1 と同様、旋回部を除いてほぼ一致した。スタート地点での RTK-GPS とのオフセット差を補正し、初期位置の誤差を 0 として X、Y 成分の誤差の時間変化を表示した結果、図 2-5.6 のように

なった。X 成分の誤差は往復で 2 行程目で-5cm ほどの誤差があったがそれ以外はほぼ 0cm であった。

4. まとめと今後の課題

1) 精度、安定性は GLONASS を加えた GNSS により前回よりかなり安定性を増しガイダンスとして利用可能に改良されている。しかし、基地局から見通しのよい、遮蔽物の少ない庁舎前でも常時 Fix 解が得られない状況もある。基地局からの距離と受信電波強度、基地局からのデータ取得の状況、Fix 解を迅速に安定して

得るためのアルゴリズム、処理過程の検討など更に加える必要がある。見通しが良くない場所では補正情報が安定して取得できないとすると応用場面では基地局を作業場所の近くに設置して使用するなどの制限がかかってしまうことになる。補正情報の周波数帯を再度検討することも必要と思われる。

2) Float になる頻度が多かった 13 号圃場スペースの試験では、しかし、往復の直線部分においての誤差はアンテナ設置位置の 20cm と初期位置の誤差を除けば 5cm 以内という安定した高精度であった。(オフセット位置の進行方向による補正を RTK-GPS の VTG から出力される方位角で行ったが角度誤差が多く、オフセット補正はいい結果が得られなかった)

3) .道路走行の走行試験では、木の付近などでいったん Fix がはずれた後の再 Fix までの時間が平均 156s と長く (Leica では 1 分以内) 再 Fix の時間短縮と安定性が課題である。

4) 自動操舵ガイダンスの航法センサとして使用する場合、傾斜補正が必要なので 3 軸ジャイロの併用、ハイブリッド化、あるいは試作機でチップを 2 個内蔵して電子コンパスとするなどの対応が必要である。一時的に位置情報が変動したり、取得できないときもフィルタリングにより、安定した航法データを得ることができる。ガイダンスに利用するには、最低 5Hz のデータ出力頻度が必要である。

6) ガイダンスの高精度航法センサとして大変有望であるが、補正情報の取得安定性、衛星電波のノイズ、マルチパス処理の対策、改善が必要である。改良を図った後、さらに、様々な条件下における使用での適合性について調べる必要がある。

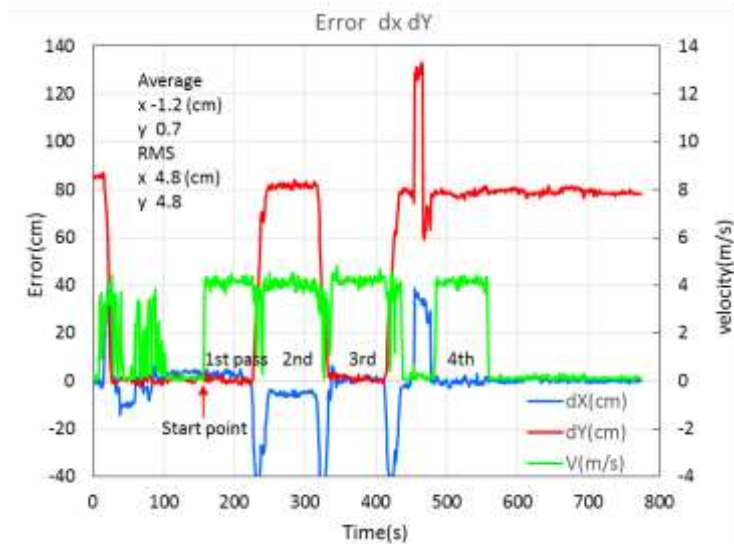


図 2-5.6 往復走行試験 Exp.2 における試作機の x,y 方向の誤差の推移 (目標進行方向を Y 軸とする)

2-5-3 各種圃場での受信・測位試験

1. 評価装置と試験圃場

ここでは loosely coupled 手法による評価について述べる。IMU と GPS(GNSS)の統合航法に対して、以下のように評価装置を構築し、圃場などにおいて評価試験を行った。開発された 1 周波 RTK-GPS 受信装置(CS2)および MEMS による安価な市販 IMU (図 2-5.7) を搭載した。また、これらのセンサによる方位角推定精度の検証、および、航法への統合を行うため、誤差 0.5[deg]での方位角計測が可能な GPS コンパス(古野電気製)を併せて搭載している。これらの航法センサを図 2-5.8 に示すように、大型トラクタの屋根に金属板を用いて固定した。



図 2-5.7 小型 IMU(3D Robotics 社製)



図 2-5.8 Loosely coupled 統合航法センサ

2. 評価試験結果

図 2-5.8 に示した航法センサによって兵庫県加西市の圃場を走行した場合の結果について述べる。得られたトラクタの走行軌跡(経路の一部を拡大)を図 2-5.9 に示す。図中の軌跡は、GPS 測位結果と IMU の計測結果を拡張カルマンフィルタ(Extended Kalman Filter、EKF)によって統合し、トラクタの姿勢や速度とともに位置を推定した結果である。市販の 2 周波 RTK-GPS 受信装置(NovAtel 社製、測位周期 5Hz)と比較して受信状況、測位状況も遜色なく高精度な測位が行われている。ただし、本試験における 1 周波 RTK-GPS 受信装置(CS2)の測位周期が 1Hz であったため、EKF の観測更新時の不連続な位置変化が平均 0.24[m]程度と大きくなっている。これは、測位周期を 5Hz に上

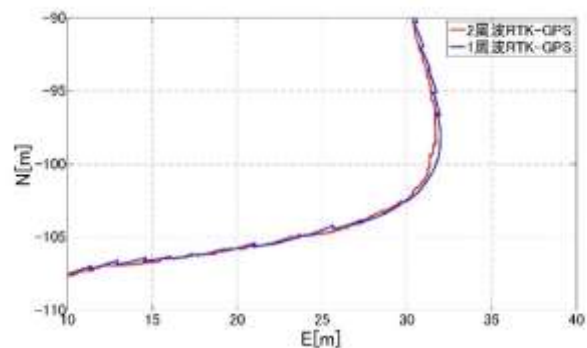


図 2-5.9 2 周波 RTK-GPS と 1 周波 RTK-GPS による位置推定結果の比較

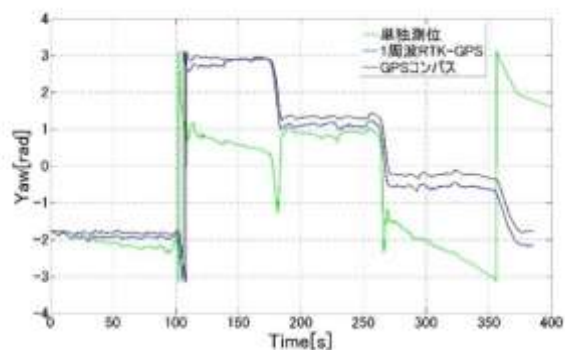


図 2-5.10 方位角の推定結果
(単独測位、GPS コンパスとの比較)

げること、2周波 RTK-GPS 受信装置の場合と同等まで小さくすることが可能と期待される。また、EKFによる方位角の推定結果が図2-5.10である。単独測位のGPSを用いた場合と比較すれば、1周波 RTK-GPS(CS2)を用いることで、安価なIMUにおいて生じる方位角誤差の蓄積を抑えられることが分かった。ただし、GPSコンパスの値と比較すると、1周波 RTK-GPS(CS2)を用いた場合でも0.3[rad]以上の大きな推定誤差を伴う。GPSコンパスとの統合が方位角などの姿勢推定精度改善に効果的であることを確認できた。

2-5-4 各種農機と組み合わせた農作業評価試験

1. 試験装置

図2-5.11に示すトラクタを用いて、本事業で開発したRTK-GPS受信装置を用いたトラクタの自動走行試験を行った。トラクタの自動走行制御は、前年度までに開発したロバスト性が高いスライディングモード制御を用いている。RTK-GPS受信機により、位置(緯度・経度)を1Hzで得るとともに、IMUは従来から用いて来た市販品のAHRSで、トラクタ内に搭載した組み込み型コンピュータに接続して、姿勢を計測している。最終的に計算された制御入力(前輪舵角指令値)はCAN(Controller Area Network)によりトラクタの制御部に送られ、操舵が可能になる。



図 2-5.11 トラクタと開発 RTK-GPS

2. 試験結果

北海道農業研究センターで走行試験を行った結果を図2-5.12に示す。上の2つの図が秒速0.4mでの走行時の走行軌跡と横偏差であり、下の2つの図が秒速0.2mでの走行時の走行軌跡と横偏差である。0.4m/sの時、最大誤差は30cm、0.2m/sの時、最大誤差は6cmであった。0.2m/sの時には十分な制御性能が得られているが、0.4m/sの時には誤差は大きく、十分なものではない。これから結論づけられることは、1Hzの受信周波数が小さく、実用上、1m/sでの走行速度を考えると、5Hzの受信周波数が望まれる。なお、昨年度に得られた10Hzの2周波GNSS受信機を用いた1m/s走行時の制御結果を図2-5.13に参考のために示す。

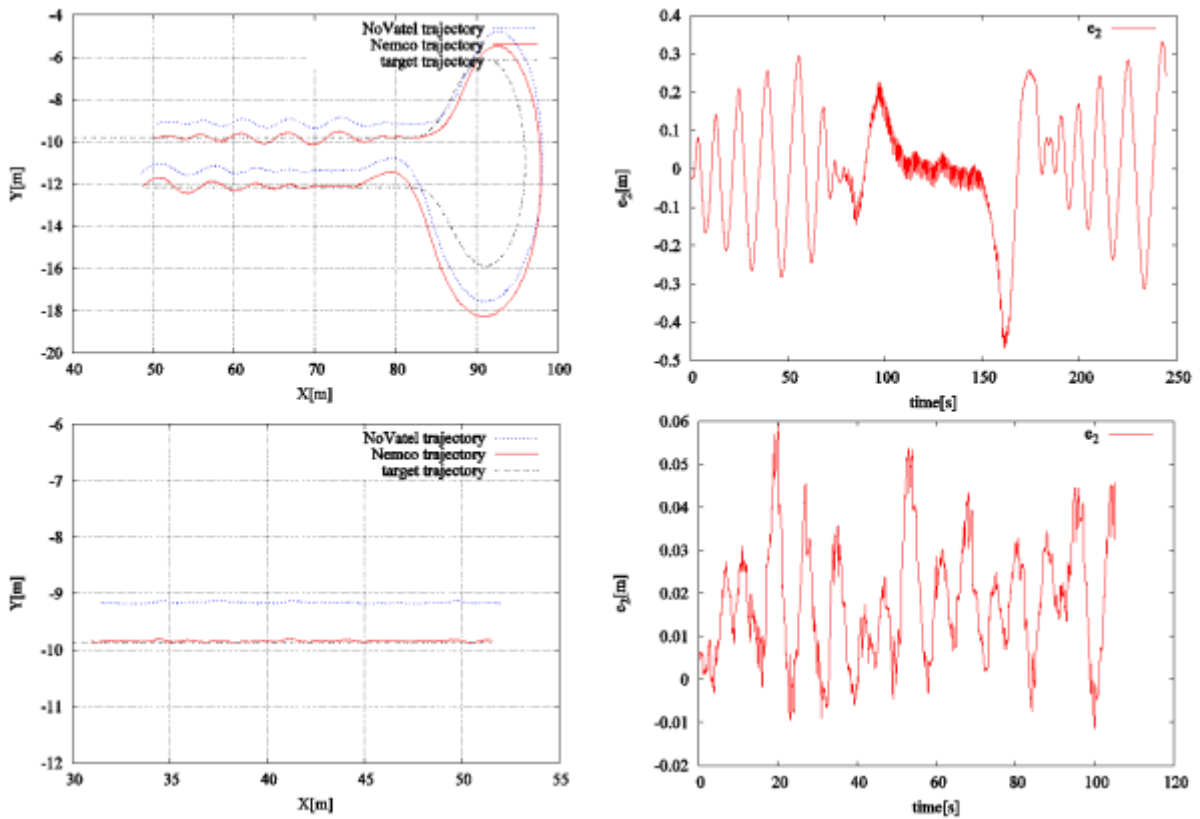


図 2-5.12 制御結果（左図：走行軌跡、右図：横偏差）

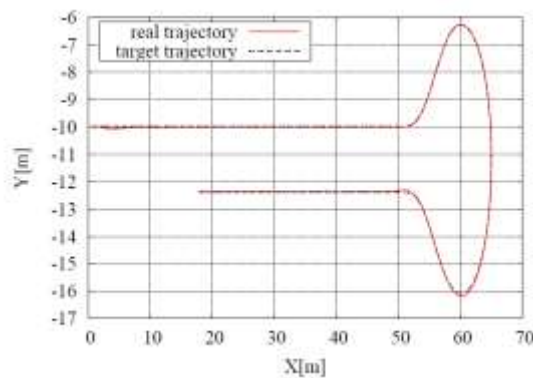


図 2-5.13 2 周波 10Hz GNSS 受信機を用いた制御結果

2-5-5 成果と課題

2-5 節においては、研究開発の各段階で農機用航法センサシステムの実圃場での位置・姿勢に関する精度などの評価試験を行い、その結果を研究開発にフィードバックするとともに、開発センサを評価することを目的として、開発を行った。その結果、「ガイダンスシステム」、「推定アルゴリズム」、「自動走行システム」に関して、開発された農機用航法センサシステムを評価することが出来た。

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果および課題

① 1周波受信方式のRTK-GPS測位演算技術の開発

L1信号の1周波受信方式RTK測位演算アルゴリズムを開発した。GNSSのみによる測位更新周期では、測位演算のプログラムをシングルタスク方式からマルチタスク方式に変更し、演算速度を向上させることにより1Hz更新を5Hzにまで改良した。

現センサ試作機では、GNSSとしてGPSとGLONASSを組み込んでいる。QZSSについては、ソフトウェアを開発したが、メインメモリ容量不足のためPC上でのみ動作している。使用メモリを減らすにはデータ構造や処理バッファメモリの取扱を検討し変更する必要がある。位置精度2cm、高さ精度4cmの目標は達成した。

② 大幅コストダウンと小型化・低消費電力化を実現する航法センサのシステム開発

サブテーマ①のRTK測位演算アルゴリズムの開発成果により、RTK測位演算を移動局センサーユニットで行うことが可能になった。すなわち、当初予定していたシステム構成（基準局、移動局、及びPC）からPCを削除した構成とすることができ、大幅コストダウンの目処をつけた。さらに、高性能CPUの採用および無線モジュールの見直しにより、CPU基板サイズの小型化とコストダウンを実現した。

③ 航法センサの測位率の向上・ロバスト化

IMUの組み込みと、マルチGNSSの対応による統合航法システムの開発を実施した。評価の結果として、IMUセンサの選定と位置推定アルゴリズムの見直しが必要である。

ハードウェアはGPS、QZSS、GLONASSのL1信号に対応した。RTK測位アルゴリズムの試作機への組み込みは、GPSとGLONASSが完了した。QZSS対応アルゴリズムはPCで評価中である。GPS+GLONASSにすることで測位精度および初期化時間が改善されている。今後QZSS追加によりさらなる改善が見込まれる。

④ GPSコンパス方式による、停止・低速時の方位精度向上

GPSコンパスの方位・姿勢角検出のソフトウェアを作成し、アルゴリズムの検証を行った結果、姿勢推定が妥当に行われていることが確認できた。静止時の精度は目標の1度を満足することができた。走行中の精度は静止時に比べて劣化しているため、原因の究明と対策を施したい。

⑤ 農機用航法センサシステムのフィールド評価試験

試作機について、農機用航法センサとしての実圃場作業での適応性や性能を評価した。IMUとGPSの統合航法については、評価装置を構築し、圃場などにおいて評価試験を行っ

た。また、開発した航法センサ試作機を使ってトラクタの自動走行試験を実施した。

3-2 事業化展開

商品化に向けて、判明している不具合等について、改良及び性能向上が必要である。さらに、基準局からの補正情報の取得安定性、衛星電波のマルチパス処理などの対策及び改善が必要である。

事業化の道筋として、本研究の成果としての農機用航法センサの開発を完成させて、本研究のアドバイザーであるヤンマーをはじめとする農機メーカーに対して、機器仕様の提案を行い商品化する。各農機メーカーのトラクタ、田植え機、コンバイン、芝刈り機等に装備して販売することを目指す。さらに、この技術を発展させて他分野に応用した商品として、産業用移動体向け航法センサ、固定点の連続変位観測システム、3次元の距離・方位センサなどの開発を順次進めていく予定である。

北海道の地方自治体や農業法人等から、本研究で開発したシステムを試用したいとの要望を受けている。現状の試作機では、基準局センサの高さが4m程度の場合、無線伝送距離は見通し距離で最大2km程度であるが、北海道地区ではRTK基準局の共同運用の要望があり、長距離のサービスエリアが求められているので、基準局情報の伝送距離拡大対策が必要である。このような利用者による評価を受けて、現場の要望に対応することで、さらに改良を進めたい。