# 平成25年度ものづくり中小企業連携支援事業 (戦略的基盤技術高度化支援事業)

「産業用移動機械向けに低価格で実現する高精度マシン制御システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成26年3月

委託者 中 国 経 済 産 業 局 委託先 公益財団法人ひろしま産業振興機構

# 目 次

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	7
1-4	当該研究開発の連絡窓口・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
第2章	本論	9
2 - 1	研究開発の内容及び成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
2 - 1 -	- 1 産業用移動機械向け高精度測位・マシン制御システムの開発・・・・・・	9
1	1周波RTK-GPSアルゴリズムの研究開発	9
2	GPS計算サーバの開発	1 5
3	1周波GPS基地局装置の開発	18
4	モーションセンサによる1周波RTK-GPS情報の補間アルゴリズム開発	24
(5)	移動局モーションセンサユニットの開発	3 0
6	オペレータガイダンスモニタの開発とレーザデータ取得	40
7	道路等3次元CAD/CAMソフトウェア開発	4 4
2-1-	- 2 実証実験の実施 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4 9
第3章	全体総括	57
3-1	研究開発成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5 7
3 - 2	今後の課題と事業化計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5 8

#### 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

# (1) 研究開発の背景

現在、国の直轄道路土工・舗装工事において、ICTを活用した「情報化施工」が標準的な施工管理方法となり、バックホー・ブルドーザ等の産業用移動機械では高精度測位システムが必要となるが、既存のシステムは1500万円以上と高価なため普及が遅れており、川下企業からは平均的な中小企業でも技術習得が容易な、300万円程度の低価格化システムが強く求められている。

一方、東南アジア等海外においてもインフラ整備が急ピッチに進められていることから、特に、日本の流 通価格と比較して圧倒的に安価で使いやすい機器と道路CAD/CAMシステムが望まれている。

# (2) 研究の目的

屋外作業ロボットや自動化建設機械を開発するためには、高精度な位置検出センサが必要であるが、そのために従来からセンチメートル単位の精度が得られる2周波RTK-GPS装置しか使用できないのが現状である。この打開に①低価格・高精度な1周波RTK-GPS装置の開発、②ジャイロ・3軸加速度センサを組込んだ低価格・高精度な低速移動体モーションセンサの開発、また、③道路等3次元CAD/CAMシステムの導入により、川下企業の短納期・高品質化が促進され、国内・外での競争力を飛躍的に向上させることを目的とする。

# (3)研究の概要

以下の研究開発を実施する。

- ① 1周波RTK-GPSアルゴリズムの研究開発を実施し、1周波GPSの最大の弱点である初期化時間を短縮する。
- ② GPS計算サーバを開発する。
- ③ 1周波GPS基地局装置の開発は現場設置が簡単なパイロン型をベースにする。
- (4) モーションセンサによる1周波RTK-GPS情報の補間アルゴリズムを開発する。
- ⑤ 移動局モーションセンサユニットの開発でバックホー・ブルドーザ等重機に簡単に取付設置できる構造 とする。
- ⑥ オペレータガイダンスモニタの開発で重機の位置による予定工事(設計)と実施工事データの差分をリアルタイムに表示しオペレータに知らせる。
- ⑦ 道路等3次元CAD/CAMソフトウェアを開発する。

(高度化目標及び技術的目標値)

- ・GPS精度: 平面内精度=3cm、高さ精度=5cm (国土交通省施工管理基準は5cm以内)
- ・初期化時間=10秒以内
- ・GPS応答周波数5Hz

(2周波GPSと比較して精度は同等、応答周波数は若干劣るがジャイロ等でカバーする)

- ・1周波GPSのOEM価格は10万円(2周波GPS価格は200万円~、数社寡占)
- ・モーションセンサ応答周波数100Hz
- ・3D道路・地形モデリングに取り込むレーザデータは15億点以上
- ・システムの販売価格目標 300万円以内

# (4) 研究の実施内容と目標

区分	23年度(1年目)	24年度 (2年目)	25年度(3年目)
①産機械度シス開発 開発 開発 関ル の 関ル の 関系 の 関系 の 関係 の 関係 の 関係 の の の の の の の の の の の の	10cm 、初期化時間:30 秒、応答周波数:1Hzを達	・精度:平面6cm、高さ8cm、初期化時間:20秒、応答周波数:2Hzを達成するようにプログラムを改良する。 ・モーションセンサの現場適応機に組込むことができるようにプログラムを改良する。	<ul> <li>精度: 平面3cm、高さ5cm、初期化時間:10秒、応答周波数:5Hzを達成するようにプログラムを改良する。</li> <li>モーションセンサが100Hzで安定動作するようにプログラムを改良する。</li> </ul>
	を行う。 ・モーションセンサの設計を行い、プロトタイプを製作する。 ・3次元描画部のプログラムを作成する。 施工の差分データを取得し情報化施工の有用性を評価するプロトタイプ・プログラムの試作をする。 ・レーザデータ100万点が扱えるCAD/CAMソフトウェ	<ul> <li>・モーションセンサ現場適 応機を製作する。</li> <li>・施工の差分データを取得 し情報化施工の有用性を 評価するプログラムの作 成をする。</li> <li>・レーザデータ1億点が扱え るようにプログラムを改</li> </ul>	<ul><li>・レーザデータ15億点が扱 えるようにプログラムを</li></ul>
②実証実験の 実施	えるCAD/CAMソフトワェ アを設計し、プログラミ ングを行う。 ・機能評価のための部分統 合実験を行い、GPS精度: 平面10cm、高さ10cm、初 期化時間:30秒、応答周 波数:1Hzを確認する。	良する。	<ul> <li>・総合評価のための統合実験を行い、GPS精度:平面3cm、高さ5cm、初期化時間:10秒以内、応答周波数:5Hzを確認する。</li> <li>・トータルステーションによる測量を行う。</li> </ul>

以上の目標達成により、産業機械向けの高精度なマシン制御システムを低価格で実現することを目指す。

# (5) 所在地

# ①事業管理機関

公益財団法人ひろしま産業振興機構(最寄り駅:広島電鉄広電本社前電停) 〒730-0052 広島県広島市中区千田町三丁目7番47号

**②研究実施場所**(主たる研究実施場所については、下線表記のこと。)

株式会社三英技研(最寄り駅: JR 広島駅)

〒730-0014 広島県広島市中区上幟町3番26号

日本システムデザイン株式会社(最寄り駅: JR 広島駅) 〒734-0001 広島県広島市南区出汐 三丁目4番地1号 3F

独立行政法人 産業技術総合研究所つくば研究センター

(最寄り駅:つくばエキスプレスつくば駅)

〒305-8568 茨城県つくば市梅園一丁目1番1号 中央第2

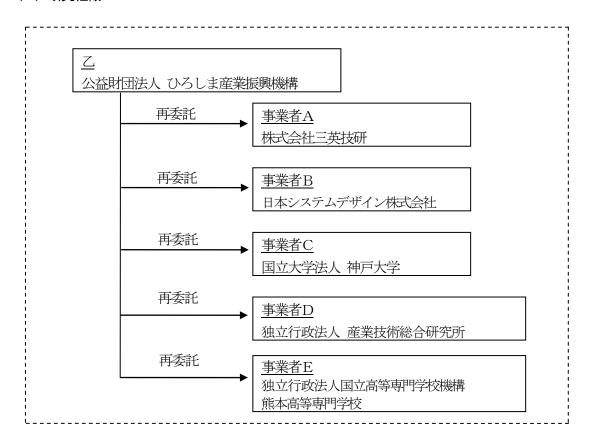
独立行政法人 国立高等専門学校機構 熊本高等専門学校

(最寄り駅:肥薩おれんじ鉄道肥後高田駅)

〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627

# 1-2 研究体制

# (1) 研究組織



総括研究代表者(PL)

所属:株式会社三英技研

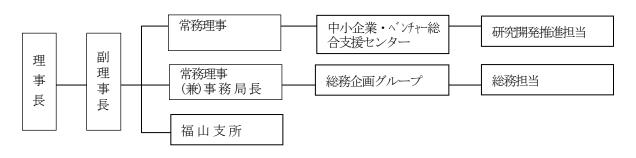
役職:代表取締役 氏名:山本 忠 副総括研究代表者(SL)

所属:日本システムデザイン株式会社

役職:代表取締役 氏名:麥田憲司

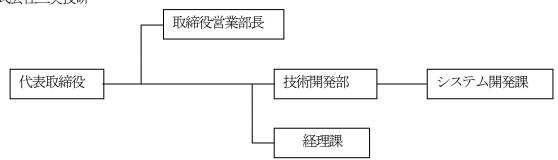
# (2)管理体制

# ① 事業管理機関 [公益財団法人ひろしま産業振興機構]

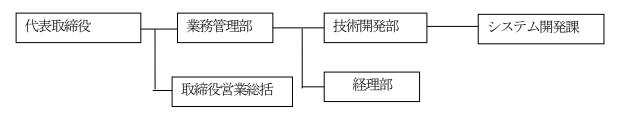


# ② (再委託先)

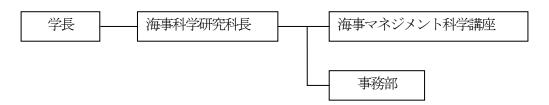
株式会社三英技研



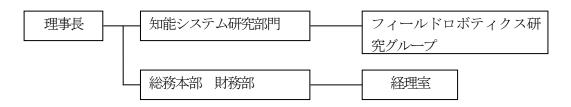
# 日本システムデザイン株式会社



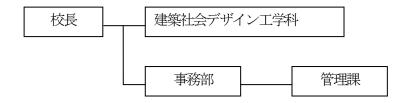
# 国立大学法人神戸大学



# 独立行政法人産業技術総合研究所



# 独立行政法人 国立高等専門学校機構 熊本高等専門学校



# (3)他からの指導・協力者

氏 名	所属・役職	備考
藤島 崇	一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第3部 技術課長	アドバイザー
堀道明	古野電気株式会社 営業担当部長	アドバイザー
村井 重雄	西松建設株式会社 土木事業本部 土木計画部 部長	アドバイザー
小林 康秀	公立大学法人広島市立大学大学院 情報科学研究科 教授	アドバイザー
高須 知二	国立大学法人東京海洋大学 海洋工学系 産学官連携研究員	アドバイザー

#### 1-3 成果概要

「産業用移動機械向け高精度測位・マシン制御システムの開発」で下記の成果を得た。

#### ①-1 1周波RTK-GPSアルゴリズムの研究開発

1周波RTK-GPSを使い、複数衛星の搬送波位相値残差を流用してアルゴリズムの確認を行った。結果、 $\pm 3$ cm の残差誤差が 9 衛星の平均を取れば、 $\pm 0.7$ cm に改善された。これは4倍の改善であり、このシミュレーションによると9局のデータを使えばレーン幅が等価的に約80 cmに広げられたのと同じ効果が期待できる。この結果、GPS精度について平面 3cm、高さ 3cm、初期化時間 1 秒、応答周波数 5Hz を達成した。

# ①-2 GPS計算サーバの開発

1周波QS-RTKネットワークサーバシステム無線通信(WiFi)の通信制御とGPS基地局・GPS移動局の衛星情報の収集と解析(測位演算)及びその結果の各重機への配信を 5Hz で行うGPS計算サーバを作成した。

# ①-3 1周波GPS基地局装置の開発

GPS/GLONASS対応1周波GPS基地局装置のGPS及びGLONASSの情報に基づくRTK-GPS計算アルゴリズムを修正・改良をした。この結果受信精度平面3cm、高さ5cm、初期化時間10秒、応答周波数5Hz、RTK 演算を行うのに必要なGPSデータが正しく出力されていることを確認した。

#### ①-4 モーションセンサによる1周波RTK-GPS情報の補間アルゴリズム開発

GPSとIMUの実験記録データを記録し、再生し、補間アルゴリズム処理を何度でも模擬実験できる環境を作成した。国土地理院指定の任意の平面直角座標系で使え、任意の現場座標系を個別に与えることができるソフトウェアを開発した。実機ホイールローダに搭載し良好な動作を確認した。

#### ①-5 移動局モーションセンサユニットの開発

防滴ケース内蔵でコンパクトなマシン搭載用移動局装置を製作し、平成24年度改造の移動局モーションセンサユニットで開発したファームウェアの組み込みテストを行った。

移動局モーションセンサを使ったマシン制御のために、マシンアームの傾きを検出できる傾斜センサを製作した。また、マシン搭載用移動局装置と傾斜センサをマシンに搭載して性能評価を行った。 この結果モーションセンサが100Hzで安定動作した。

#### ①-6 オペレータガイダンスモニタの開発とレーザデータ取得

レーザデータ15億点の出力、施工の差分(誤差)と情報化施工の有用性を評価するプログラムを 製作した。また、施工の差分を制御量として報知可能となった。

#### ①-7 道路等3次元CAD/CAMソフトウェア開発

レーザデータ15億点の操作、3D面モデルの作成・保存ができるようにソフトウェアの高機能化を実施した。複雑な道路モデルを作成可能にした。

# ② 実証実験

フィールド実験を行い基地局、移動局、モーションセンサの精度確認を行った。 この結果、平面3cm、高さ5cm、初期化時間 10秒、応答周波数 5Hz、モーションセンサの100Hz安定動作 を確認した。

# 1-4 当該研究開発の連絡窓口

# ① 事業管理機関

機関名	連絡先
	所在地: 〒730-0052 広島県広島市中区千田町三丁目7番47号
公益財団法人	連絡先担当者:神田 敏和
ひろしま産業振興機構	TEL: 082-240-7712

# ② 再委託先

研究実施機関 (機関名)	連絡先
株式会社三英技研	所在地:〒730-0014 広島県広島市中区上幟町3番26号 連絡先担当者:山本 忠 IEL:082-228-2221 FAX:082-211-1238 E-mail:yamamoto@sanei.co.jp
日本システムデザイン株式会社	所在地:〒734-0001 広島県広島市南区出汐 三丁目4番1号 連絡先担当者:麥田 憲司 TEL:082-256-7100 FAX:082-256-6622 E-mail:mugita@jsdkk.com
国立大学法人 神戸大学	所在地:〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町五丁目1番1号 連絡先担当者:大学院海事科学研究科 井澗 健二 TEL:078-431-6348 FAX:078-431-6348 E-mail:itani@maritime.kobe-u.ac.jp
独立行政法人 産業技術総合研究所 つくば研究センター	所在地:〒305-8568 茨城県つくば市梅園一丁目1番1号 中央第2 連絡先担当者:知能システム研究部門フィールドロボティクス研究グループ 小谷内 範穂 TEL:029-861-7087 FAX:029-861-3388 E-mail:n.koyachi@aist.go.jp
独立行政法人 国立高等専門学校機構 熊本高等専門学校	所在地:〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627 連絡先担当者:建築社会デザイン工学科 入江 博樹 TEL:0965-53-1282 FAX:0965-53-1289 E-mail:irie@kumamoto-nct.ac.jp

#### 第2章 本 論

- 2-1 研究開発の内容及び成果
- 2-1-1 産業用移動機械向け高精度測位・マシン制御システムの開発
  - ① 1周波RTK-GPSアルゴリズムの研究開発(国立大学法人神戸大学)
  - ①-1 GPS搬送波位相観測方程式

GPSの搬送波位相を用いた場合の観測方程式は、次の通りである。

 $\Phi = \rho + c \cdot (dt - dT) + \lambda N - d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_{\Phi}$  (1)

ここで、 p はメートル単位で表された受信機と衛星間の距離で、

c は真空中での光速 (m/sec)、  $\Phi$  は搬送波位相の観測値(m)、

 $\lambda$  は搬送波長 (m)、 Nは、位相アンビギュイティ(整数値バイアス)、

 $d_{ion}$  電離層遅延誤差 (m)、 $d_{tron}$  対流圏遅延誤差 (m)、

dt は衛星時計の同期誤差(s)、 dT は受信機時計の同期誤差(s)、

⟨⟨でする。)は観測雑音、又はモデルにできない白色雑音を示す。

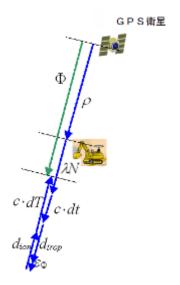


図1-1. 観測方程式の概念図

2つの局が同時に同じ衛星を捉えて観測を行う場合の受信機間一重差の方程式は、次式で表すことができる。受信機間一重差は衛星時計の誤差を除去し、又、短基線長での測位では、GPS衛星の軌道、大気圏での信号遅延誤差等の影響を大幅に減少させることができる。

$$\Delta \Phi = \Delta \rho - c \cdot \Delta dT + \lambda \Delta N - \Delta d_{ion} + \Delta d_{trop} + \Delta \varepsilon_{\Phi}$$
 (2)

二重差観測は、基準となる衛星の一重差の観測値を同様にして得られた他の衛星での一重差観測の値から 差し引くことによって得られる。受信機間、衛星間の二重差観測は以下の式で表現することができる。二重 差観測は二つの受信機時計に存在する同期誤差の影響を取り除くことができる。

$$\nabla \Delta \Phi = \nabla \Delta \rho + \lambda \nabla \Delta N - \nabla \Delta d_{ion} + \nabla \Delta d_{trop} + \nabla \Delta \varepsilon_{\Phi}$$
 (3)

時間差方式の観測方程式は、時刻 k における観測値を前の時刻 k-1 の観測値から差し引くことによって得ることができる。 2 つの二重差観測に時間差方式を採用することによって、三重差の観測方程式を得る。 三重差では、時刻とは無関係の搬送波位相のアンビギュイティ、整数値バイアスを消去することができる。

$$\delta \nabla \Delta \Phi = \delta \nabla \Delta \rho - \delta \nabla \Delta d_{ion} + \delta \nabla \Delta d_{trop} + \delta \nabla \Delta \varepsilon_{\Phi} \tag{4}$$

記号 $\delta$ は、時間差方式の観測を表す演算子、又、 $\Delta$ (\*) と  $\nabla\Delta$ (\*)は、それぞれ一重差、二重差を示す演算子である。

# ① -2 アルゴリズム

本RTKでの初期化のアルゴリズム を説明する。図1-2の(a)に示すよう に、まず、O点に子機(赤)を置き、P 点に親機(黄)を置く。親機と子機の位 置は近傍であればどこでも良い。次に 図1-2の(b)のように、O点にある子 機をA点へ移動する。この移動量 &X を決定するのに時間差方式を用いる。 その際、O点の位置が必要であるが、 例えばコードを用いた単独測位の結果 を利用するのが簡便である。この際、 搬送波を用いてスムージングを行った コードを利用して測位精度を改善する 事も可能である。ここで、P点にある 親機の位置が、子機と同じ位置にある (基線長がゼロである) と仮定する。 以上の事から、前述の一重差の観測方 程式(式(2))のテーラー展開を行い、 式(5)を得る。

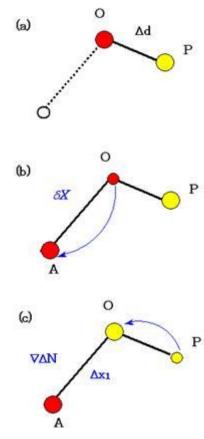


図1-2. 初期化の概念図

 $\Delta \Phi^{i} - \Delta \rho^{i} - \lambda \Delta N^{i} + \Delta d_{ion}^{i} - \Delta d_{trop}^{i} = -e_{x}^{i} x - e_{y}^{i} y - e_{z}^{i} z + \Delta dT$  (5)

ここで、 $\Delta \Phi^i$  は i 番目 (i=1,...,n) の衛星に対する搬送波位相の一重差の観測値、 $\Delta \rho^i$  は、衛星受信機間の距離の理論値、 $\Delta N^i$ は、一重差での整数値バイアス、 $\Delta d_{xp}^i$  及び  $\Delta d_{ton}^i$  は、一重差での対流圏、電離層での信号の伝播遅延誤差、 $-e_x^i$  、 $-e_y^i$  及び $-e_z^i$  は、i 番目の衛星に対する衛星、受信機間の単位ベクトルの要素、x、y、z及び  $\Delta dT$  は、観測局の近似位置に対する補正値と相対的な時計の誤差(メートル)である。

ゼロ基線長であると仮定すると、 $\Delta p=0$  が成り立つ。観測の時間間隔が短い場合、電離層、対流圏での伝播誤差の変動は小さく、無視できるものと考えられる。

$$\Delta \Phi^{i} - \lambda \Delta N^{i} = -e_{x}^{i} x - e_{y}^{i} y - e_{z}^{i} z + \Delta dT \tag{6}$$

二重差を取り、時計の誤差を取り除くと、式(7)のように更に簡単な式を得る。

$$\nabla \Delta \Phi^{i1} - \lambda \nabla \Delta N^{i1} = (-e_x^i + e_x^1)x - (-e_y^i + e_y^1)y - (-e_z^i + e_z^1)z$$
 (7)

$$\nabla \Delta \Phi^{i1} - \lambda \nabla \Delta N^{i1} + e^{i1} \delta \mathbf{X} \approx 0 \tag{8}$$

三重差を取ると、更に整数値バイアスが取り除かれ、位相差の変化が移動した距離として扱うことができる。

$$\delta \nabla \Delta \Phi^{i1} + e^{i1} \delta X \approx 0 \tag{9}$$

この方程式を解き、移動距離(ベクトル) ※な得る。最小自乗法の方程式は以下の通りである。

$$\partial \mathbf{W} = \mathbf{A} \cdot \partial \mathbf{X} + \mathbf{V} \tag{10}$$

ここで  $\delta W$  は時間差方式での観測残差ベクトル、A は近似値  $X^0$  を基に得られたヤコビアン行列、 $\delta X$  は  $X^0$  に対する修正値、V は残余である。観測値が同等の精度を有しない場合、観測方程式には適当な重み付けが必要である。この際の重み行列をP とする。二重差を用いる場合、行列P と、正規行列N、ベクトルU を用い、 $(\hat{V}^TP\hat{V}\to \min)$ とする最小自乗法理論を式(10)に応用することにより、最小自乗解を得る。現時刻 k におけるヤコビアン行列 A が、前時刻 k-1 と同一であると仮定すると、得られる最小自乗解が2つのエポック間の移動距離である。

$$N = A^T P A \tag{11}$$

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{A}^T \boldsymbol{P} \delta \boldsymbol{W} \tag{12}$$

$$\delta \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{U} \tag{13}$$

移動距離  $\delta X$  が得られたら、 $\mathbf{Z}1-2$ の(c)にあるように、親機をO点に移動し、A点にある子機との間で、二重差の観測方程式を用い整数値バイアス $\mathbf{V}\Delta N$ の決定を行う。これで、親機を基準局、子機を移動局としてRTK測位が行える状態となり、一区間 $\Delta x_1$ の測定が行われる。

以上が1周波QS-RTKの基本アルゴリズムであるが、ネットワーク型1周波RTK-GPSアルゴリズムは、(1)式における搬送波位相の観測値Φ (m)をネットワークで複数個集め、その平均値を観測値として使用するものである。即ち、平均を取る事でランダム誤差であるマルチパス誤差が削減され、初期化時間の短縮が期待される。

一般に知られている事であるが、

#### http://kuchem.kyoto-u.ac.jp/ubung/yyosuke/uebung/stat06/stat06 lec04.htm

では、

多数回の測定を行うのは、同じ確率分布に従う多数の独立な値を得るということです。それを足し合わせた値は、測定回数 N に比例して大きくなり、標準偏差は測定回数の平方根に比例して大きくなります。標本平均 m について言うと、その平均  $\mu$  m は個々のデータの平均  $\mu$  に等しく、分散  $\sigma$  m2 は  $\sigma$  2/N になります。

 $\langle m \rangle = \langle (1/N) \quad \Sigma \times i \rangle = \langle (1/N) \quad \Sigma \langle \times i \rangle = \langle (1/N) \quad N \quad \mu = \mu$ 

 $\sigma m2 = (N \sigma 2) / N2 = \sigma 2 / N$ 

誤差を標準偏差で評価すれば、相対誤差  $\sigma$  m/ $\mu$  m は測定回数の平方根に反比例して小さくなっていくわけです。つまり「100 回測れば精度が10 倍になる」わけです。

と、解説されている。

即ち、 $25個の観測値の平均を取れば、ランダム誤差であるマルチパス誤差が削減されて搬送波位相の観測値<math>\Phi$  (m) の精度は5倍になる次第である。

ただし、RTK測位にこれを適用する場合、平均値を取るそれぞれの観測値は同一地点で同一時刻に観測されたものである必要があるが、これではマルチパスの誤差も同一であるので、平均処理をしても精度向上には寄与しない。そこで、異なった地点の搬送波位相の観測値 $\Phi$  (m)をネットワークで複数個集め、その平均値を観測値として使用する。しかし、これではそれぞれの観測値は同一地点ではないので、位置の違いによる受信機と衛星間の距離p (m)でそれぞれの観測値 $\Phi$  (m)を補正して同一地点で同一時刻に観測された如くの観測値を求め、それらの平均値を計算することで、ランダム誤差であるマルチパス誤差が削減された搬送波位相の観測値 $\Phi$  (m)を得る。

# ①-3 アルゴリズムをプログラム化する際の注意

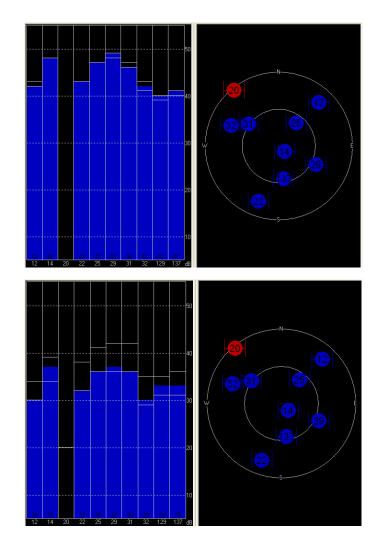
平均処理をする場合、更に精度を上げる為に入力データである信号の感度で重み付けをする事が多いが、 RTK で用いる GPS 搬送波位相データに関しては以下の様な信号強度と測位精度に関する知見が有るので紹介する。

RTK 測位精度に関して、衛星信号の感度(CNO)が単純に下がっても、ステータス(追尾状態)が保たれておれば測位精度の劣化は僅かであるが、障害物によって直接波信号が反射波や再輻射波と重畳された事によって衛星信号の感度(CNO)が乱された(上がっても下がっても)場合、精度の劣化は大きい事が確認される。

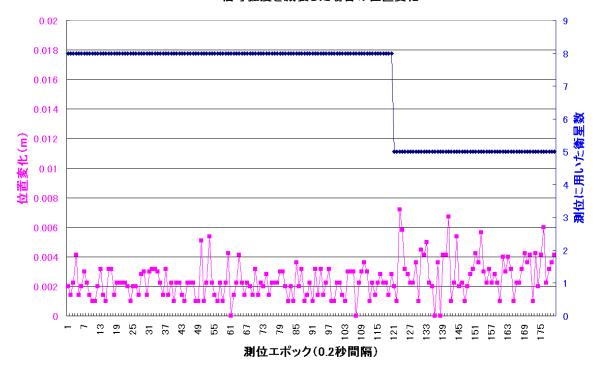
右図は GPS 受信状態を示すモニタ画面のコピーである。上図は通常の受信状態の時で、画面右側は天空の衛星配置を表しており、画面左側はそれらの衛星の信号強度を表している。通常の受信状態では信号強度が 40dB以上の衛星が 4 衛星以上あり、RTK 測位演算が続けられる。

下図は信号ケーブルの所で信号を約10dB減衰させた状態(単純に下がった)の時でRTK測位演算に必要な衛星が4衛星以上あり、RTK測位演算が続けられている状態である。

通常この様な状況が起こるのは、アンテナケーブルを長くしすぎたり、径の細い物を使ったり、アンテナへの供給電源電圧が落ちた時に生じるものである。



#### 信号強度を減衰した場合の位置変化



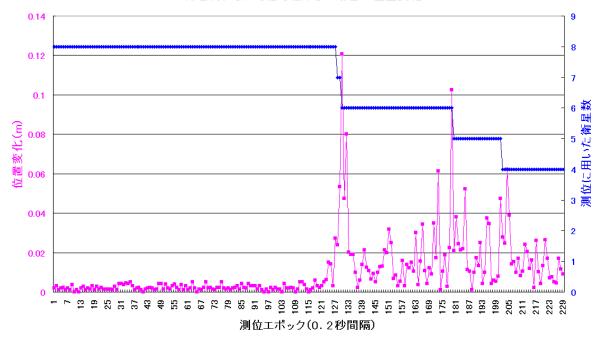
上のグラフは信号を減衰させて受信感度を落した場合のエポック間 (0.2 秒間) の位置変化を表している。この実験は、静止状態で行なっているので真の位置変化は零 m である。実験は、先ず受信信号が正常で測位に 8 衛星が利用されていた状態から、アンテナケーブルの所で信号強度を約 10dB 減衰させ、利用可能衛星を 5 衛星に減らした。当初の位置変化は平均 0.002m だったのが、信号強度を約 10dB 減衰させると、位置変化は平均 0.003m と変化した。測位精度は悪くはなっているが、それほど顕著だとは言えない程度である。

次に、障害物によって直接波信号が反射波や再輻射波と重畳された事によって未受信衛星が増えた(利用 可能衛星が減った)場合について実験を行った。

実験では、右の写真の様にアンテナを鉄塔の傍に置き障害物によって直接波信号が反射波や再輻射波と重畳された事によって未受信衛星が生じる状況を作り出した。



障害物によって信号低下した場合の位置変化



上のグラフは、障害物によって直接波信号が反射波や再輻射波と重畳された事によって未受信衛星が増えた (利用可能衛星が減った) 場合のエポック間 (0.2 秒間) の位置変化を表している。この実験は、静止状態で行なっているので真の位置変化は零 m である。実験は、先ずアンテナを鉄塔の下に置いた状態でも受信信号が正常で測位に 8 衛星が利用されていた状態から、アンテナの周りで金属反射板を動かして利用衛星を4衛星に減らしたものである。当初位置変化の誤差は平均 0.003m だったのが、金属反射板を動かして未受信衛星を増やすと、誤差は平均 0.020m と変化した。この状況の場合、測位精度は約 7 倍悪くなり、その劣化度は大変大きなものであった。

以上の結果は、測位に利用している情報が GPS 電波の搬送波位相値であり、これは信号自体が弱くなって も追尾状態が保たれている限り位相値情報はあまり失われていないので測位精度はそれほど悪くはならない と考えられる。一方、反射波等が重畳した場合は信号の搬送波位相値が大きな誤差を持つ事になり、その結 果測位精度が大きく損なわれる事になると考えられる。なお、精度劣化には利用衛星配置の要素も関係する 事も考慮する必要がある。

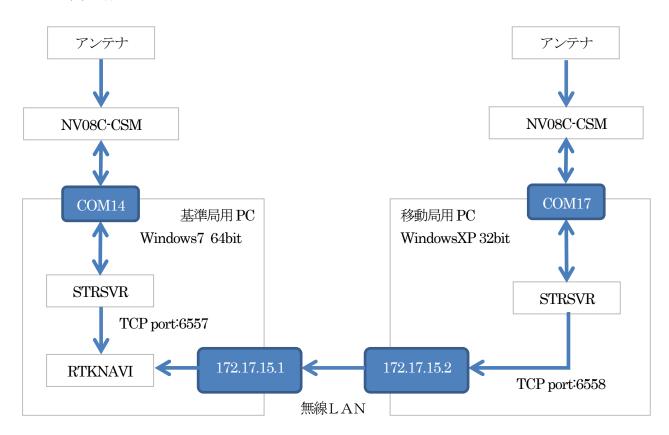
# ② GPS計算サーバの開発(株式会社三英技研)

平成23年度は、移動局1台、基準局1台で測位ペアを組んでRTK測位するGPS計算サーバーを作成した。しかし、実際の施工現場で複数の建機の動作を管理するためには、単一の測位ペアだけでなく、複数の測位ペアを管理できる必要があり、GPS計算サーバーに、移動局の管理、基準局の管理、クライアントへの情報通知、移動局&基準局の状態表示の機能が必要になる。

平成24年度、平成25年度は、複数の測位ペアを管理できるようにGPS計算サーバープログラムの改良を行った。特に、移動局、基準局のデータを無線で収集する必要があるため、無線通信(WiFi)での通信制御の実現に注力した。また、GPS計算サーバーの開発効率向上のために、オープンソースソフトウェアであるRTKLIBを活用した。

# ②-1 RTKネットワークサーバシステム無線通信(WiFi)の通信制御

# • 装置構成図



※COM 番号、IP アドレス、ポート番号は実際の環境に合わせて設定する。 ※OS のバージョンは動作確認を行った環境を示している。

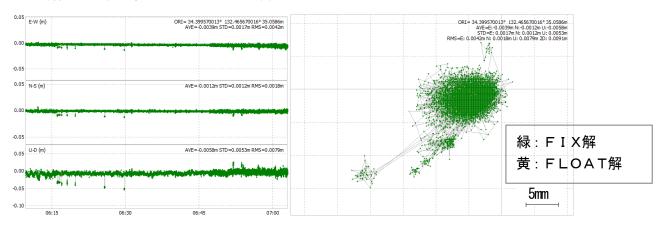
図2-1. 装置構成図

- NV08C-CSM: GPS・GLONASS受信機
- アンテナ: NV08C-CSM付属のGNSS用アンテナ
- STRSVR: RTKLIBに含まれるデータ通信用アプリケーション
- RTKNAVI: RTKLIBに含まれる測位用アプリケーション

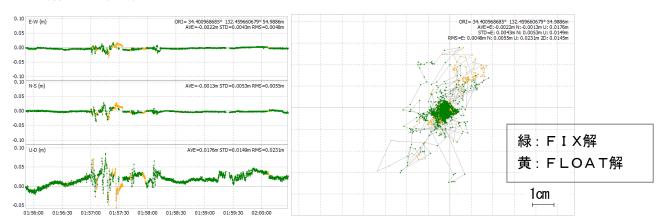
# ②-2 RTK測位

②-1で構築したRTK測位環境の精度を評価するために、基線長 $0\,\mathrm{m}$ 、 $1\,\mathrm{m}$ 、 $2\,\mathrm{m}$ の場合の測位テストを行った。

# ・基線長0m(室内、リピータを用いた実験)



# ·基線長1m(屋外)



# ·基線長2m (屋外)

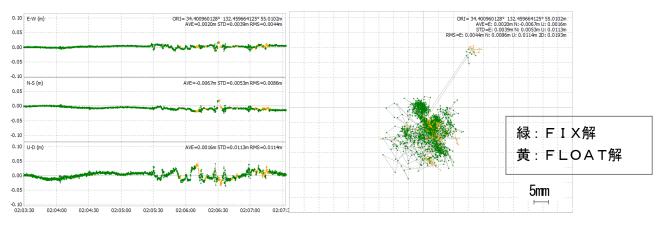


図2-2. RTK精度確認

RTK測位テスト結果

基線長	測位時間	応答周波数	平面 RMS	高さ RMS
0 m	約1時間	10Hz	9. 1mm	7. 9mm
1 m	約5分	10Hz	14. 5mm	23. 1mm
2m	約5分	10Hz	19. 3mm	11. 4mm

目標であるGPS精度(平面3cm、高さ5cm)、応答周波数5Hzが実現できていることが分かる。また、RTK演算もほぼFIX解が得られており、必要なGPSデータが正しく出力されていることが分かる。



図2-3. 屋外実験場所(広島城)



図2-4. 基線長2mの場合のアンテナ配置

以上より、無線通信(WiFi)で RTK 測位できることが確認できた。今後は、複数の建機の動作を管理するために、移動局の管理、基準局の管理、クライアントへの情報通知、移動局&基準局の状態表示の機能を実現していく必要がある。

#### ③ 1周波GPS基地局装置の開発(熊本高等専門学校)

平成 24 年度に製作したGPS/GLONASS対応1周波GPS基地局装置のGPS及びGLONASSの情報に基づくRTK-GPS計算アルゴリズムを修正・改良した。上記のRTK-GPSアルゴリズムに基づいて、同装置の改造、組込みソフトの修正・改良について検討した。

# ③- 1 屋内でのマルチ GNSS 実験環境の整備

1周波 GPS 基地局装置の開発を行なうに先立ち、実験環境の整備を行なった。この実験環境システムは、 熊本高専八代キャンパスの共同研究実験棟3階の観測室に設置した。このマルチ GNSS 観測システムは次の 3種類の信号発生源を有しており、各種の衛星測位の受信機開発のために実験環境を提供できるように構成 している。

# (1) チョークリング付きマルチ GNSS アンテナ

実際の衛星からの電波信号を受信し、屋内の GPS 受信機や再放射装置から再び電波として放射するための装置である。チョークリングとは、波長の4分の1にあわせてリング上の金属の溝を作ってやることにより、アンテナ下部から飛来する電波を減衰させる器具である。大地やビル壁などで反射した電波がアンテナの側面から混入するのをチョークリングで減衰させることができる。マルチ GNSS では複数の周波数帯を利用するため、GPS と GLONASS 用の周波数も捉えられるようにアンテナが調整されている。写真③-1では、レドームと呼ばれるプラスチック製のカバーで保護した状態を示す。

#### (2) マルチ GNSS 信号発生シミュレータ装置

実験環境システムの中核をなす機器で、複数のGNSS 信号を各種の条件で発生する。GPS のほか、GLONASS、WAAS、QZSS、IMES に対応しており、同時に複数の衛星信号を生成が可能である。将来的にはBeiDouやGalileo等にも対応予定である。擬似的に衛星の動き作り出し、リアルタイムで実際に利用されている電波と同等の信号を発生する。地球上のあらゆる場所のいろいろな時刻での環境を模して、静止体や移動体で受信した状態の電波信号をつくり出すことが可能となる。写真③-2と写真③-3にシミュレータ本体と条件設定用PCを示す。大気や電離層の影響、マルチパス環境など、実際の電波信号に近い状態を作り出したり、純粋な状態を作ったりと様々な実験条件で実験することができる。

(3) マルチ GNSS 対応の高周波信号レコーダ装置 複数の GNSS 衛星からの生の電波信号(RF 信号)を受信して、デ ジタル信号としてコンピュータに記録することが可能である。 また、記録した信号をリアルタイムで再生する機能を持ってい る。写真③-4に示すようにポータブルな装置なので、定点で



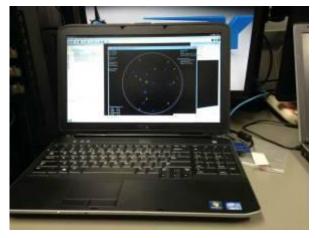
写真③-1 チョークリング付き マルチ GNSS アンテナ



写真③-2 マルチ GNSS シミュレータ 装置 (写真中央)

観測するほか、バッテリー駆動により、屋外に持ち出して、あらゆる場所でのマルチ GNSS 衛星信号を記録し、実験室で再生出来る。例えば、ビルの谷間や森林地帯など GPS 測位があまり得意でない環境化での受信機の振る舞いを調べたり、最適パラメタを調べたりするために利用する。

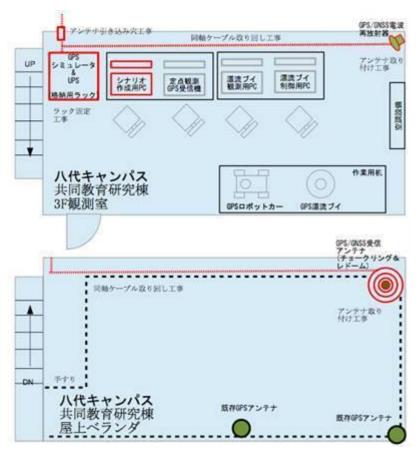
図③-1に各装置の配置図を示した。





写真③-4 RF レコーダ装置

写真3-3 GNSS シミュレータの制御用 PC



図③-1 マルチGNSS 実験環境での配置図

これら3つの実験装置は、1つの切替え装置に接続されており、それぞれを切り替えて、再放射アンテナから出力がされる。各種のマルチGNSS実験環境をつくり出す事ができる。

# ③-2 1周波GPS基地局装置のソフトウェア

本プロジェクトで開発する 1 周波 G P S 基地局装置は、小型のマイコンボード(たとえば、Beagle Bone など)を使用するため、基本 0S (Operating System) に、Linux を採用した。また 1 周波 GPS 受信機には、モジュール型で RAW データと呼ばれる「搬送波位相、擬似距離、エフェメリシス(放送暦)」などの測位計算の元データを出力する機能を有する受信機を利用する。今回は、GPS/GLONAS に対応した受信モジュールとして NVS 社の NV-08c を使用する。また、1 周波数で RTK-GPS 測位を行うためのソフトウェアとしては、RTKLIB を使用する。

特に、マルチプロトコル交換ソフトウェアの STRSVR、ならびに測位計算ソフトウェアの RTKRCV を利用する。 RTKLIBの各ソフトウェアの働きと通信の流れを図③- 2に示す。

# GPS/GLONASS NV-08c NV-08c Com6 ttvO4 STRSVR STR2STR.exe TCP/IP TCP/IP RTKRCV RTKNAV.exe TCP/IP TCP/IP Rover BeagleBone Note PC MS-Windows **Ubunt-Linux** Base Rover TCP/IP 無線LAN or Ethernet

図3-2. RTKLIBの各ソフトの働きと通信の流れ

初期の実験では、基地局受信機の処理は、Windows Note PC 上で動く RTKLIB のソフトウェアである STR2SVR. exe と RTKNAV. exe を利用した。これらは、Linux 上で動作する STRSVR と RTKRCV に対応する。H24 年度中に実施した実験の様子を図③-3に示す。

屋上に設置したアンテナで得た GPS 信号を同軸ケーブルにて屋内に引き込み、再放射アンテナで屋内へ安定した電力の電波を放射した。屋上のアンテナは全天で見晴らしのよい場所に設置されているため、屋内でも安定した電波を受信することができる。受信機は、ublox の LEA-6T を使用した。ソフトウェアはいずれも Windows 版を利用し、2つの屋外アンテナを利用することで、Realtime Kinematic 測位(いわゆる RTK- GPS 測位)を実現できた。



図③-3 パソコンを利用した RTKLIB による RTK-GPS 測位実験(屋外アンテナと再放射器)

平成 25 年度には、パソコン搭載の Linux での実験を行った。 Linux には Ubuntu を利用した。 Linux 用の RTKRCV と STRSVR を使用するために、 Linux 上の GCC コンパイラのインストールとコンパイル作業を行った。

Linux が動くコンピュータに GPS 機器を接続すると /dev/ディレクトリ下 tty から始まる名称のファイル に置き換えられるため、通常のファイルアクセスの容量で通信を行うことができる。特殊なデバイスドライバを利用せずともよいことが判った。

RTKLIB のソフトウェアを C 言語のソースコードから gcc によるコンパイルが必要である。makefile が用意されており、make コマンドで簡単にじゅんすることができた。



図③-4 RTKLIB を動作させるマイコンボード(BeagleBone)

# ③-3 マルチ GNSS シミュレータを用いた実験

マルチ GNSS シミュレータ等を用いた実験の手順について説明する。

マルチ GNSS シミュレータ (以下、シミュレータ) に、必要なシミュレーション条件は、(1)開始日時、(2)終了日時、(3)シミュレーション開始場所、(4)シミュレーション動作パターンである。これらの組み合わせたもの「シナリオ」と呼ばれている。シナリオで GNSS 信号を発生させるためには、さらに衛星の情報が必要であり、3つの違った方法で情報を与えることができる。1 つは、基本的な衛星軌道としてのメーカ設定値である。2 つめは、YUMA フォーマットと呼ばれる Navcen(通称ナブセン、米国沿岸警備隊のNavigation Center)の Web サイト (http://www.navcen.uscg.gov/?pageName=gpsAlmanacs)からダウンロードした軌道暦ファイルを用いる方法、3 つめは、SP3 フォーマットとよばれる IGS (International GNSS Service)が提供する衛星の位置に関するファイルである。IGS の SP3 フォーマットには、いくつかの種類があり、12 日から 18 日後に発表される Final と呼ばれる確定値がもっとも正確な値である。

シミュレータでは、写真③-5の様に位置の情報を入力する。衛星の位置は、写真③-の様に表示される。 この例では、GPS 衛星と GLONSS 衛星もシミュレートされた信号が出力されている。

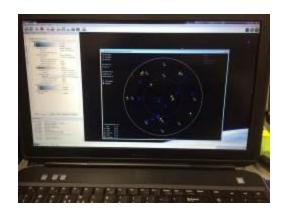
写真③-7では、ulox を用いた結果、写真③-8 はNV08c の結果である。NV08c はGLONASS の信号データも利用できるので、GPS だけしか受信しないublox よりも可視衛星数が多い。



写真(3)-5



写真(3)-7



写真(3)-6



写真(3)-8

写真③-8の緯度経度の値は北緯48度、東経11度付近を表示している。シミュレータに保存された衛星のパラメタを使って、この付近の値をシナリオとしたシミュレーション信号から測位計算したものであることが判る。

つづいて、Beaglebone 上にインストールされた RTKRCV に対して、シミュレータによる測位計算の動作確認を行った。図③-2の構成により測位結果を得ている。写真③-9は RTKRCV による測位計算結果の出力例である。

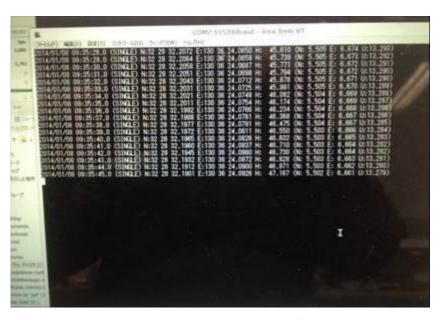


写真3-9 RTKRCV による測位計算結果

RTKRCV におり結果を得るには、パラメタの設定が重要である。マイコンボード接続した状態によりデバイスが接続された/dev 下のファイル名が決まるため、RTKRCV に指定するコンフィギュレーションファイルの設定値をあわせておく必要がある。

# ④ モーションセンサによる1周波RTK-GPS情報の補間アルゴリズム開発 (独立行政法人産業技術総合研究所)

# ④ 1 慣性航法センサ (IMU) による2周波RTK-GPS情報の補間アルゴリズム開発の概要

市販されている2周波RTK-GPS受信機2台を使った位置と方位計測システムと、市販されている慣性航法センサ(IMU)の姿勢情報を使い、10HzのGPS更新周期の間でも位置・姿勢を算出する外挿法を用いた補間アルゴリズムのプロトタイプを平成23年度作成し、平成24年度に補間アルゴリズムの方位角境界付近の取り扱いの改良を行い、平成25年度に、国土地理院指定の平面直角座標系第IX区に限定してアルゴリズムを開発してきたものを、日本の任意の区分区に対応できるようにした。同時に、産業技術総合研究所つくば研究センター北サイトの屋外実験場に設定された局所座標系に限定したアルゴリズムを任意の現場座標系に対応できるようにした。さらに、建設土木用建設機械の作業によく見られる振動・衝撃問題にも一定の対策を施すようアルゴリズムを改良した。

個別作業について以下に詳述する。

#### 4-2 RTK-GPSのための実験設備

一般に測量で使われているGPS受信機の使用法は、1 つのアンテナと1つの受信機による単独測位と呼ばれるものであり、位置精度は $10\sim15$  mと言われている。この方法で位置精度を上げるには、静止した状態で長時間計測し、平均値を求めるなどの方法が必要であり、本研究課題の移動体用には使えない。この単独測位の誤差を向上するために海上運輸やカーナビゲーションシステムなどで用いられているのが、既知位置で単独即位した結果から求めた位置差情報を無線で受信して修正する方法である。DGPS(ディファレンシャルGPS)と呼ばれるシステムで、位置精度は $1\sim$ 数mと言われている。これも移動体を制御するには精度が不十分である。これに対し、既知位置で受診したGPS電波の位相情報やGPS受信機の時計誤差による補正情報などを受信することで大きく位置精度を上げ、移動体でも用いることができるよう高速計算されるものがRTK-GPS(リアルタイム・キネマティクスGPS)と呼ばれるもので、位置精度は水平方向に $\pm 2 \, \mathrm{cm}$ 程度で、更新頻度が $10\,\mathrm{Hz}$ と言われている。これにより、移動体制御に用いることができるようになった。したがって、本研究開発では、RTK-GPSを用いる。





図4-1. RTK-GPS基準局を設置した屋外実験場とホイールローダ

RTK-GPSでは、移動体の位置情報が数cm精度で得られるので、それで十分と考えられがちであるが、実は移動体はほとんどが車輪やクローラ(無限軌道)によるもので、車輪の方向と垂直な方向には移動できない。したがって、姿勢(方位)情報が重要になる。姿勢計測を可能にするのが、複数のRTK-GP

S受信機による計測である。産業技術総合研究所では、屋外実験場に設置した1つの基準局GPS受信機と2つのRTK-GPS受信機の差分情報を独自の規格で出力するトリンブル社製のGPS受信機を用いて、移動体制御の研究を行っており、本研究開発でも、同様の機能を持ったRTK-GPS受信機を用いることとした。

図4-1に本プロジェクトで使用された山号技術総合研究所つくば研究センター北サイト旧衝突実験場に 設営されたRTK-GPSの基準局と移動体実験機として使用されてホイールローダを示す。

# 4-3 モーションセンサによるGPS補間アルゴリズムの処理

**図4-2**に本プロジェクトで開発している「モーションセンサによるGPS補間アルゴリズム」の処理の流れを記述する。

それぞれの内部処理について説明する。

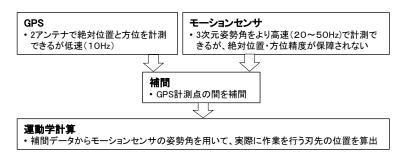


図4-2. モーションセンサによるGPS補間アルゴリズムの処理の流れ

#### ④-4 GPS情報の処理

**図4-3**に、GPS部分の処理の流れを示す。図4-3(a)は、平成24年度まで開発された産総研北サイトに限定した処理であり、図4-3(b)が、平成25年度に改良された任意の平面直角座標系と任意の現場座標系に対応した処理である。



図4-3. GPS情報の処理の流れ

GPSセンサから得られる情報は、NMEA(National Marine Electronics Association:全米海洋電子協会) -0.183 規格に則ったフォーマットで書かれた文字列である。本研究開発で用いているTrimbl e 社製SPS 461は、通常のGPS受信機回路2枚分を内蔵しており、2つのGPSアンテナを接続することができる。片方のアンテナの位置情報と2つのアンテナ間の位置の差分から得られる方位情報を出すTrimbl e 社独自の文字列情報を出力することができるMoving Baseline RTK-GPSという機能を持っているので、それを用いている。

図4-4に2つのアンテナと移動体の代表点および座標系の方向の関係を示す。この図では、バケット位

置座標の原点の位置はアンテナ中点上にあり、方位は $90^\circ$ 変換した進行方向前方をx軸としている。  $\mathbf{Z}_{\mathbf{A}}$ 0 、国土地理院で指定されている平面直角座標系の都道府県境との対応を記述した図を示す。





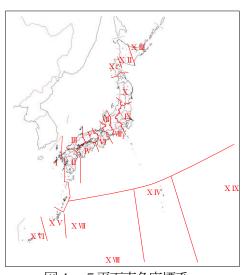


図4-5平面直角座標系

任意の平面直角座標系と現場座標系をデータファイルから指定できるようにした処理プログラムの構造が 図4-6である。



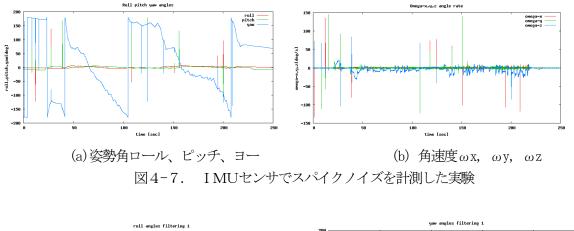
図4-6. 改良されたGPS処理プログラムの構造

#### 4-5 I MU情報の処理

平成24年度までに I MU処理アルゴリズムでは、方位角の境界 $-180^\circ$  付近と $+180^\circ$  付近の取り扱いを改良したが、慣性航法センサユニット I MU情報の姿勢角3軸、角速度3軸、加速度3軸、地磁気3軸、の計12軸のうち、姿勢角ロール角とピッチ角の2軸のみを使用してきた。姿勢角は、多くの高周波ノイズを含むとともに計測データに建設土木作業特有のスパイクノイズが入ることがある。

図4-7(a)に姿勢角ロール角、ピッチ角、ヨー角のデータにスパイクノイズが乗った実験例を示す。この時、IMUのx 軸、y 軸、z 軸の各軸まわりの角速度計のデータは $\mathbf{Z}$ 4-7(b)に示されているが、明らかに建設機械の物理性能である40 [ $^\circ$ / $^\circ$ ]を超えたあり得ない値を示している。

そこで、姿勢角および角速度データにローパスフィルターの処理を行うとともに、角速度データが物理限界を超える場合はその時の姿勢角計測値を無視してひとつ過去のデータを使用する、というフィルター処理を追加した。その結果のロール角を図4-8 (a) に、ヨー角を図4-8 (b) に示す。図4-16 および図4-17では、赤線がフィルター処理前のデータで、緑線がフィルター処理後のデータであり、スパイクノイズがうまく除去されていることがわかる。



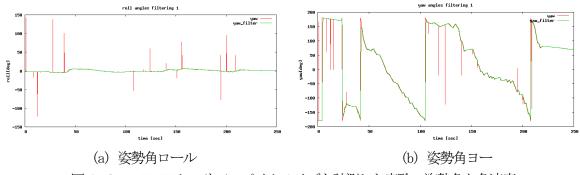


図4-8. IMUセンサでスパイクノイズを計測した実験の姿勢角と角速度

# ③ -6 GPS情報の補間アルゴリズム

本研究ではGPS情報の間をより高速なモーションセンサで補間する補間アルゴリズムを開発することを目的にしている。過去2回のGPS位置情報から、現在地を推定する外挿法を適用した。

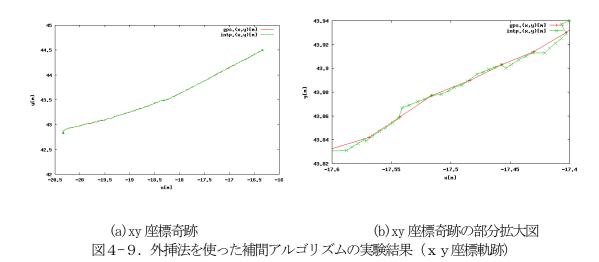


図4-9に実験結果を(x、y)の移動軌跡にしたものを示す。赤線がGPSから計測された位置を示し、緑線が外挿法を用いて補間した結果である。図4-9(a)の一部を部分拡大したものを図4-9(b)に示す。赤線のGPSが更新されていない間も緑線がうまく補間していることがよく観察できる。

# 4-7 運動学計算による刃先位置の算出

以上から、バケットの上部に取り付けられた2つのGPSアンテナの中点で代表されるバケットの位置と

方位がGPSで計測され補間アルゴリズムにより算出された。これらから、実際のバケットの刃先位置を運動学に基づいて算出することで刃先移動軌跡が求まり、マシン制御に用いることになる。図4-10に運動学計算で求められたベケット先端部の中心、左端、右端の位置の3次元座標軌跡を示す。補間アルゴリズムの効果でなめらかな曲線が得られていることが分かる。

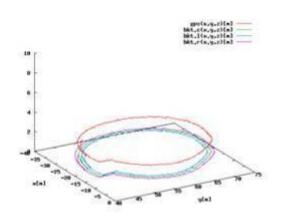


図4-10. 円軌道走行時のGPS出力と運動学計算後のバケット先端位置の軌跡

# 4-8 センサデータ記録再生機能

補間アルゴリズムプログラムおよび運動学計算の結果をグラフィカルに確認するツールとして、センサデータの記録と再生機能を追加した。図4-9にセンサデータ蓄積・再生機能とバケットの位置を3次元グラフィスクで表示する機能を組み込んだ全体の処理の流れと3次元グラフィクスの表示例を示す。

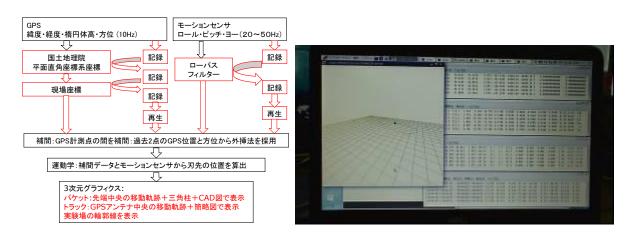


図4-11. センサデータの記録再生機構と3次元表示システム

平成24年度はバケット部分を三角柱で示していたが、平成25年度は、GPS計算サーバやオペレーターガイダンスサーバーにおけるCAD図面から生成された3次元グラフィクス表示との融合を考慮し、バケットのCAD図や作業領域に存在するダンプ・トラック、作業現場の環境例として舗装路の外縁部を表示システムに追加した。キーボード操作によるトグル構造とし、図4-12と図4-13にその様子を表す。さらに、実験場の舗装路の輪郭線を表示した。図4-14(a)は、ブラウザーソフト「Chrome」で舗装路の縁上をクリックして、「緯度・経度」情報を得ているところであり、図4-14(b)が全体図である。この結果を、表示にした結果を図4-15に示す。

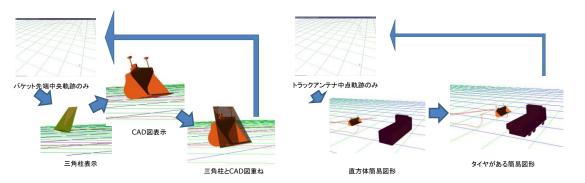
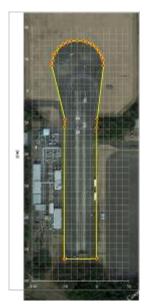


図4-12. バケットの表示のトグル

図4-13. ダンプ・トラックの表示のトグル





(a) Google Map を使用した座標値の検出 (b) 産総研実験場舗装路の多角形近似 図4-14. 実験場舗装路の位置データ取得

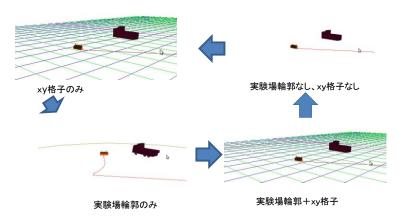


図4-15. ダンプ・トラックの表示のトグル

# 4-9 補間アルゴリズム処理のまとめ

以上により、GPS受信機による位置データの取得、IMUによる姿勢角の取得、補間アルゴリズムによる細かい位置データ更新、運動学によるバケット先端位置の算出とその表示のすべてを行うシステムを構築することができるとともに、実機のホイールローダで動作を確認することができた。

# (5) 移動局モーションセンサユニットの開発(日本システムデザイン株式会社)

#### ⑤-1. 1周波RTK-GPSに於ける移動局モーションセンサユニットの役割

GPS衛星およびGLONASS衛星から送信されるL1の電波を複数の基地局と移動局で受信したデータをRTKLIBを利用した1周波RTK-GPS/GLONASSアルゴリズムを使って解析することで、産業用移動機械(ブルドーザー等)の位置を高精度に割り出すものである。

GPS衛星およびGLONASS衛星を利用する機器の全てに共通する大きな問題点として、図5-1に示すとおり、地球の大気圏には電波を反射してしまう電離層があり、衛星からの電波がこの電離層を通過する際に電波の速度が落ちる「電離層遅延」が発生するため、ほとんどのGPS機器では精度の高い位置を求めることができない。そこで、位置固定の基地局と産業用移動機械上に設置した「移動局モーションセンサユニット」が受信したGPS情報およびGLONASS情報をもとにRTKLIBを利用した1周波RTK-GPS/GLONASSアルゴリズムを使うことにより高精度に位置を割り出すことが可能となった。

さらに、GPS衛星に加えてGLONASS衛星も使うことで利用する衛星が増え、電離層・建物・山林などの障害物によってマルチパスの影響や利用できる衛星の数が限られてしまい測位精度の低下および測位できない可能性もあるため、測位精度の向上も望めるものとなった。

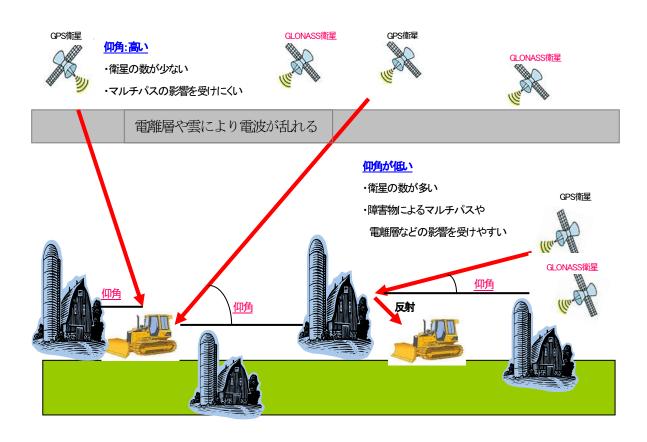


図5-1. 1周波RTK-GPSに於ける移動局モーションセンサユニットの設置場所

# ⑤-2. 移動局モーションセンサユニットの構成と改良内容

移動局モーションセンサユニットは、GPS衛星(およびGLONASS衛星)からのL1帯の電波を受信するRTK-GPSセンサ部と、建設機械の移動・旋回・アームの動きを検知する慣性航法センサ部および通信部で構成されるユニットである。



図5-2. 基地局と移動局の関係

# (A). RTK-GPSセンサ部

- 平成23年度では、GPS衛星から送信されるL1帯の電波を「複数の基地局」および「複数の移動局」で受信した信号を計算サーバーへ転送し、計算サーバーで「1周波RTK-GPSアルゴリズム」により「2周波GPS相当」の高精度な位置を演算できるシステムを研究し、そのための移動局モーションセンサユニットを開発した。
- 平成24年度では、「複数の基地局」および「複数の移動局」の構成で2周波GPS相当の精度を得るには25局以上の基地局を設置する必要性が生じた事から、25局もの基地局の設置は非現実的でありコスト面においても高コストとなるため、「1周波RTK-GPSアルゴリズム」の見直しをおこない、複数の基地局を必要としないアルゴリズム「RTK-LIB」を使ったシステムへの変更をおこなった。(図5-2)
- 平成25年度では、「GPS衛星」を使ったRTK測位に加えて、オープンスカイ上に常に多くの衛星を確保する事で高精度測位を維持できるよう「GLONASS衛星」も同時利用できるシステムに改造した。(図5-3、図5-4)
- 平成23年度から平成25年度に渡って測位アルゴリズムの変更にともない移動局モーションセンサユニットの改良時に低消費電力化・小型化・低コスト化も同時におこなった。(写真5-1)

# (B). 慣性航法センサ部

- 平成23年度では、3軸加速度センサ(X軸・Y軸・Z軸方向)と3軸角速度センサ(ピッチ軸・ロール軸・ヨー軸方向)で構成し、建設機械の移動速度や旋回速度などを検知できるように慣性航法センサ 部を構成した。
- 平成24年度では、3軸加速度センサおよび3軸角速度センサに加えて、建設機械が向いている方角を 検知できるよう磁気方位センサを追加した。
- 平成25年度では、移動局モーションセンサユニットを構成する慣性航法センサ部を別ユニット化し、 建設機械のアーム部に取り付けられるよう小型ユニットを開発した。別ユニット化した事により、建設 機械のアームの状態やバケットの状態を検知しやすくなり建設機械の制御や自立化および監視が容易と なる。

# (C). 通信部

- 平成23年度では、計算サーバーとの通信方式として近距離無線通信規格のZigBeeを利用した ノード同士の通信を主軸に構成した。
- 平成24年度では、ZigBeeに加えてイーサネット通信(LAN)をサポートする事で、多様な通信網を構築できるよう改造した。
- 平成25年度では、ユニット内部でZigBeeの電波がGPS衛星受信に影響するため、通信方法を イーサネットに変更する事で高機能化する市販の無線LANが利用できるシステムとした。

#### (D). 電源部

- 平成23年度では、大容量の電池・太陽光パネルと蓄電池・ACアダプタなど電源供給の方法を多様化させたマルチ電源対応とした。
- 平成24年度では、移動局モーションセンサユニット専用に電源を用意しておくと建設機械が動いているにもかかわらず、移動局の電源不足により移動局がダウンする可能性がある。そこで、建設機械側の発電機から電源を供給するシステムへ改良する事で安定した電源供給を確保。
- 平成25年度では、平成24年度で改良した電源の供給をイーサネットケーブルを利用したPoE (Power over Ethernet)を採用する事で通信と電源供給をイーサネットケーブル1本で可能となった。

#### (E).ケース

- 平成23年度では、プロトタイプとして市販の大型アンテナと市販の評価用無線通信ユニットおよび防 塵・防水ケースを利用しケースを加工した。
- 平成24年度では、測位アルゴリズムの変更にともない専用アンテナとRTK演算CPUに合わせて小型化した専用ケースを作成した。
- 平成25年度では、各種電子部品の影響で衛星からの電波受信に影響が出たのとGLONASS衛星対応化にともない、低消費電力・低コスト化を兼ねてケースを小型化した。

# ⑤-3. 移動局モーションセンサユニットの成果

# (A). RTK-GPSセンサ部

(図5-3) GPS衛星のみを利用した測位において、上空のGPS衛星が減少しGPS情報を受信できない状況に陥る事から高精度な測位ができず空白の時間帯が生ずる問題点に対して、(図5-4) 平成24・25年度ではGPS衛星に加えてGLONASS衛星の電波も利用する事で常に多くの衛星からの電波を受信できる環境を確保したことにより高精度な測位を維持できるようになった。



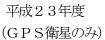
図5-3. 上空のGPS衛星が減少すると測位精度が低下する



図5-4.日本上空に現れるGPS衛星とGLONASS衛星の時間帯

#### GPS衛星のみから、GPS衛星およびGLONASS衛星からのL1帯の電波を受信へ改良。





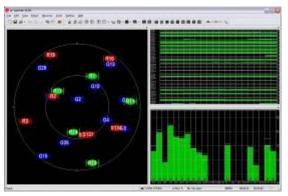




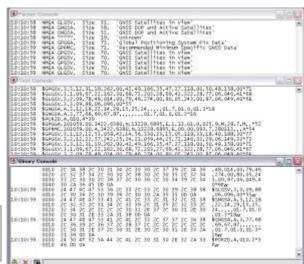
 平成24年度
 平成25年度

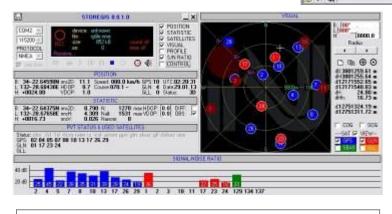
 (GPS衛星+GLONASS衛星の両対応)

(図 5-5)平成  $24 \cdot 25$ 年度版のGPS+GLONASS対応ユニットを使った電波受信感度。 測位精度に関する内容は、「②GPS計算サーバ」および「③ 1周波GPS基地局装置」を参照。



GPS+GLONASS 衛星からの受信状況を確認 良好に受信している





GPS+GLONASS 衛星からの受信状況を確認 RTK測位演算に必要なRAWデータが良好に受信できている。



図5-5. GPS衛星・GLONASS衛星から電波受信状況

### 移動局モーションセンサユニットの測位演算用CPUの検証

RTK-LIBによる1周波RTKアルゴリズム演算をする上で下記の通り演算能力に余裕がある。





CPU : AM3359AZCZ100 1GHz (Cortex-A8)

RAM : 512MBytes

LAN : Ethernet 10Mbps/100Mbps

Power : Ave 0.2A / 10V

RTKRCV でLEA-6T からのデータを受信処理した時のCPU 稼働率

をlinux のtop コマンドで確認 1.7% (余裕ありOK)

top - 06:38:25 up 8 min, 2 users, load average: 0.54, 1.73, 1.03
Tasks: 1 total, 0 running, 1 sleeping, 0 stopped, 0 zombie
%Cpu(s): 0.7 us, 1.3 sy, 0.0 ni, 98.0 id, 0.0 wa, 0.0 hi, 0.0 si, 0.0 st
KiB Mem: 507440 total, 288872 used, 218568 free, 30892 buffers
KiB Swap: 0 total, 0 used, 0 free, 198452 cached

PID USER PR NI VIRT RES SHR S %CPU %MEM TIME+ COMMAND
2788 root 20 0 17476 5660 916 S 1.7 1.1 0:03.46 rtkrcv

図5-6. RTK測位演算能力

GPS+GLONASS衛星からのL1帯受信における検証。アンテナ(TW2405)+受信機(NV08C)の組み合わせでのみ受信がNGとなる事が判明し、それ以外では良好な受信が得られた。

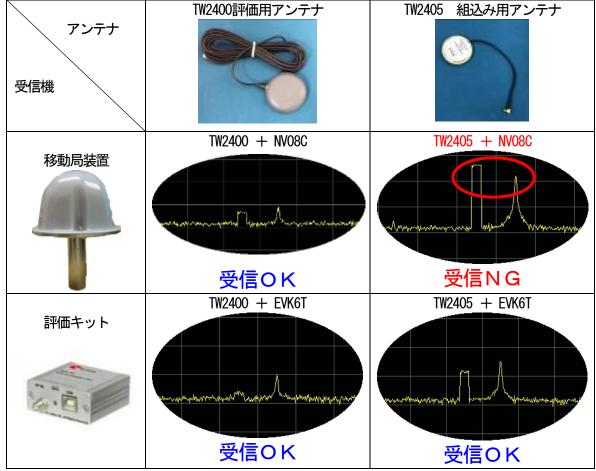


図5-7. アンテナと受信機の組み合わせによる衛星からの電波受信状況

## (B). 慣性航法センサ部

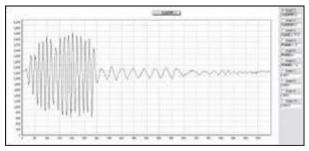
慣性航法センサを使用した補完アルゴリズムについては、「④ モーションセンサによる1周波RTK-GPS情報の補間アルゴリズム開発」を参照。



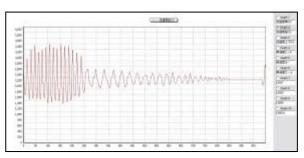
慣性航法センサで取得した「3軸加速度・3軸角速度」の感度検証

- · 3軸加速度: X軸、Y軸、Z軸
- ・3軸角速度:ピッチ軸、ロール軸、ヨー軸

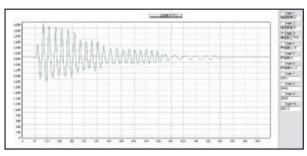
検証の結果、下記の波形の通り良好な感度が得られた。



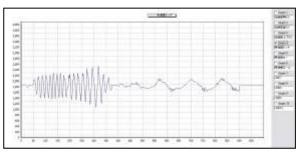
X軸方向の加速度(G)を記録した結果



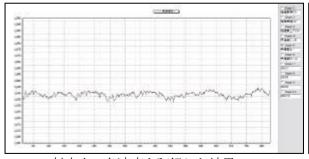
Y軸方向の加速度(G)を記録した結果



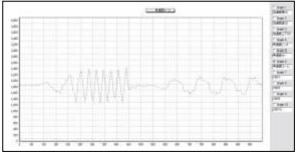
Z軸方向の加速度(G)を記録した結果



ピッチ軸方向の角速度を記録した結果



ヨー軸方向の角速度を記録した結果



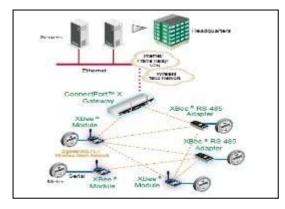
ロール軸方向の角速度を記録した結果

#### 慣性航法センサの感度

加速度センサ	感度	400mV/G
	検出範囲	±3G
角速度センサ	感度	3. OmV/degree/s
	検出範囲	±30 Odegree/s

## (C). 通信部

(図5-8)近距離無線通信のZigBeeを利用したノード間同士の通信では高速にデータを転送できない問題をイーサネット無線LANにする事で広域高速通信が可能となった。





 $\boxtimes 5-8$ . ZigBee

図5-9. イーサネット無線LAN

## (D). 電源部

さまざまな電源から電源供給をする事を想定していたが、建設機械の運転中にもかかわらず移動局の電源が 切れる可能性があるため、建設機械の電源をそのまま利用して電源を供給する事で安定した電源を供給でき るように電源供給源を改善した。(PoE対応イーサネットハブを利用する)

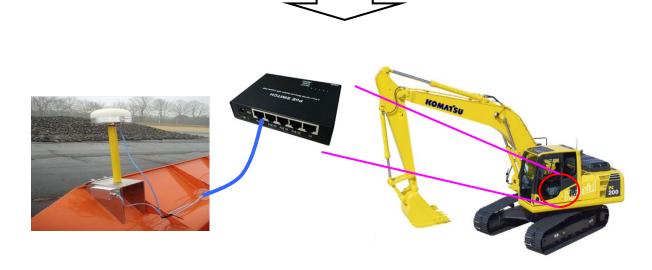




蓄電池

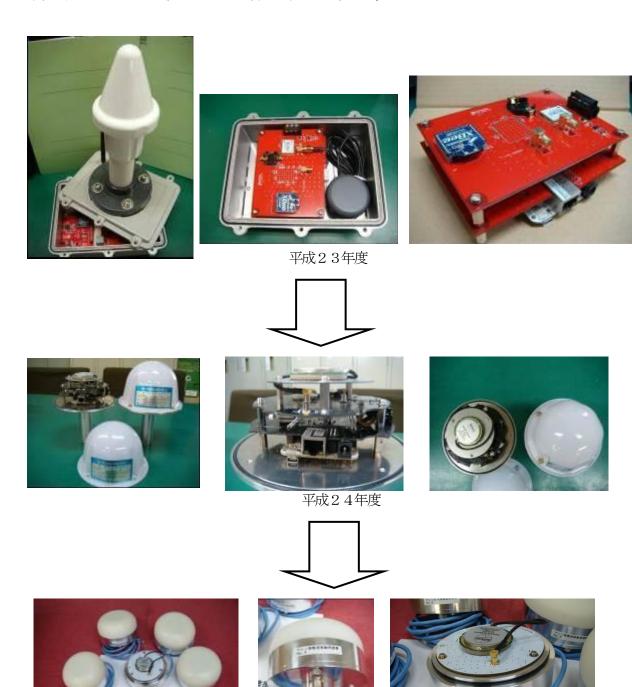
太陽光パネル+蓄電池

ACアダプタ



## (E).ケース

移動局モーションセンサユニットの改良にともない、「低消費電力化・小型化・低コスト化」を実施した結果、下記の写真の通り当初の大きさの5分の1以下を実現した。



平成25年度

写真5-1. RTK測位のアルゴリズムに応じた移動局モーションセンサユニットの改良

## **⑤** 4. 実証実験

産業技術総合研究所つくば北サイトにて、以下の写真の通りホイールローダーに基地局・移動局 および傾斜計センサを取り付けて実証実験を実施した。実験結果については、「③ 1周波GPS基地局装 置」を参照とし本項目では割愛します。

## ● 移動局装置と傾斜計センサを取り付けて実験したホイールローダ



#### ⑥ オペレータガイダンスモニタの開発とレーザデータ取得(株式会社三英技研)

平成23年度、平成24年度はガイダンスモニタ試作機の作成、および、レーザーデータの取得を実施した。作成したガイダンスモニタは次の4つの要素、①工事の完成形を表す設計データ、②のS から受信した建機の現在位置データ、③現在位置データと設計データとの標高差計算、④3次元データを画面に描画する3次元描画部、で構成される。課題として、ガイダンスモニタの頑健性、防振対策、3D表現法の改良が残った。

平成25年度は、前年度までの課題であった、3D表現法の改良を行った。

また、ガイダンスモニタの開発効率を向上するために、建機動作シミュレータとして、実機の14分の1油圧駆動モデルを用意した。建機動作シミュレータの導入により、本来であれば屋外、遠方にある実機を利用してセンサのキャリブレーションや、ガイダンスモニタとの接続試験などの試行錯誤に多大な時間を奪われていたところが、ガイダンスモニタ開発環境と同一室内の建機動作シミュレータを使って容易に実験が行えたため大幅な開発効率の向上が図れた。

さらに、今後、マシンコントロールへと発展させていくことを考えて、勾配に沿ってバケットを動かすための軌跡を算出し、シミュレーションを実施した。

### ⑥-1 マシンガイダンス

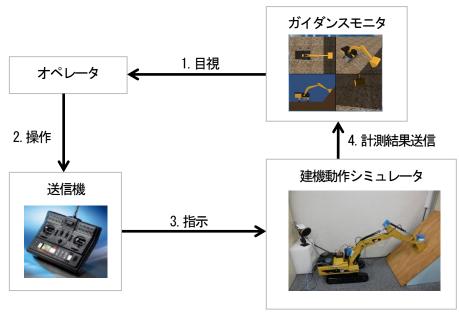


図6-1. マシンガイダンス概要図

- 1. オペレータはガイダンスモニタを目視して、建機に必要な操作量を図る。
- 2. オペレータは送信機を操作して、建機に必要な操作を指示する。
- 送信機から指示された内容に応じて、建機は動き、その状態をセンサにより計測して、 ガイダンスモニタへ計測結果を送信する。
- 4. ガイダンスモニタは、送信された計測結果から、重機の姿勢を計算して画面に表示して、 オペレータに建機の状態を報知する。

### ・ガイダンスモニタ

トップビュー
サイドビュー

クォータービュー

ドライバーズビュー

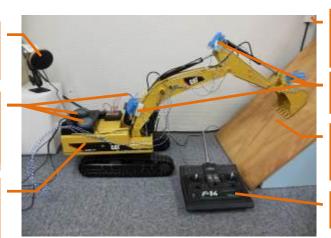
図6-2. ガイダンスモニタ画面構成

### 建機動作シミュレータ

リピータ (放射計)

GPS・ GLONASS 受信機

**建機動作** シミュレ<del>ー</del>タ



GPS屋外 アンテナ

傾斜計

地形モデル (1:0.8)

送信機

図6-3. 建機シミュレータ

ガイダンスモニタと建機動作シミュレータを連動させて、送信機から手動で動作させた結果を以下に示す。

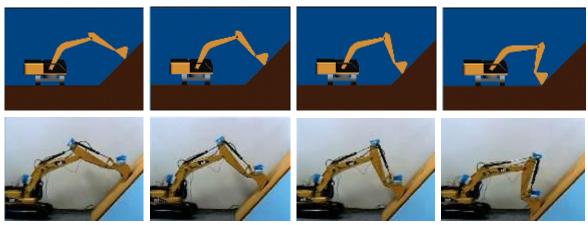


図6-4. 建機動作シミュレータとガイダンスモニタの連動動作

傾斜計により計測された建機動作シミュレータの姿勢が、ガイダンスモニタに反映されていることが分かる。

#### ⑥-2 マシンコントロール

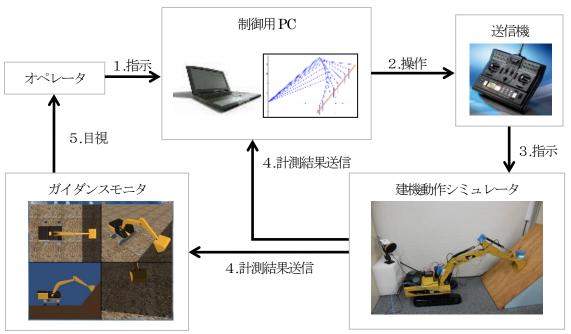


図6-5. マシンコントロール概要図

- 1. オペレータは、建機に対して、指定の勾配で施工を行うように指示する。
- 2. 制御用PCは、指定された勾配と、建機シミュレータから送信された傾斜計の計測結果から、建機の操作量を算出して送信機を操作する。(今回の実施内容ではこの部分は、実現できていない。マシンコントロール実現のためには今後の課題となる。)
- 3. 送信機は、建機動作シミュレータに、操作を指示する。
- 4. 建機動作シミュレータは、送信機により指示された内容にしたがい動作して、傾斜計で 計測した結果を制御用PCとガイダンスモニタに送信する。
- 5. オペレータは、ガイダンスモニタを目視して、指示通りに施工が進んでいることを確認 する。

#### 建機制御モデル

バケットの刃先の軌跡をシミュレーションするために、建機のブーム、アーム、バケットを以下のように モデル化する。

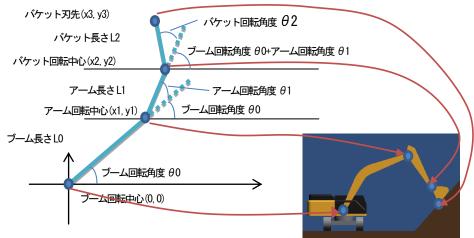
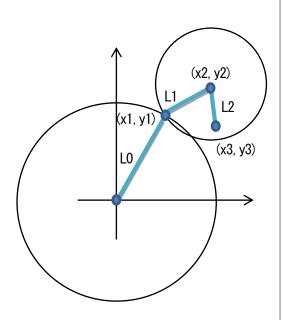


図6-6. 建機制御モデル

### ・バケット軌跡の算出



#### 交点1

 $\begin{aligned} xa &= 1.0/2.0 \times (x2^3 + x2 \times y2^2 + LL2 \times x2 - sqrt(sq1) \times y2) / r2 \\ ya &= 1.0/2.0 \times (y2^3 + (LL2 + x2^2) \times y2 + sqrt(sq2) \times sqrt(sq3) \times x2) / r2 \end{aligned}$ 

#### 交点2

 $\begin{aligned} xb &= 1.0/2.0 \times (x2^3 + x2 \times y2^2 + LL2 \times x2 + sqrt(sq1) \times y2) / r2 \\ yb &= 1.0/2.0 \times (y2^3 + (LL2 + x2^2) \times y2 - sqrt(sq2) \times sqrt(sq3) \times x2) / r2 \end{aligned}$ 

 $\begin{aligned} sq1 &= \text{-L}0^4 + 2.0 \times \text{L}0^2 \times \text{L}1^2 \cdot \text{L}1^4 \cdot \text{x}2^4 \cdot \text{y}2^4 + \\ &\quad 2.0 \times \text{LL}1 \times \text{x}2^2 + 2.0 \times (\text{LL}1 \cdot \text{x}2^2) \times \text{y}2^2 \\ sq2 &= 2.0 \times \text{L}0 \times \text{L}1 \cdot \text{LL}1 + \text{r}2, \, \text{sq}3 = 2.0 \times \text{L}0 \times \text{L}1 + \text{LL}1 \cdot \text{r}2 \\ r2 &= \text{x}2^2 + \text{y}2^2, \quad \text{LL}1 = \text{L}0^2 + \text{L}1^2, \quad \text{LL}2 = \text{L}0^2 \cdot \text{L}1^2 \end{aligned}$ 

ブーム、アームの可動範囲から交点1を選択する。 バケットの向きは法面の勾配から決まる。

図6-7. バケット軌跡算出方法

## ・勾配 1:0.8 の法面に沿ってバケットを移動させる場合の軌跡

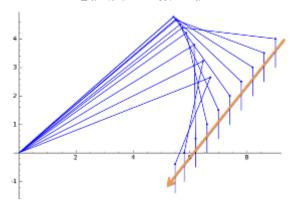


図6-8. バケット軌跡

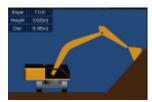








図6-9. バケット操作シミュレーション

図の静止画では、分かりにくいが、手動で動かした図6-4. の場合よりも滑らかに、指定された勾配をなぞることができる。

今後、マシンコントロールとして発展させていくためには、図6-5. で示す制御用PCから送信機への操作部分を実現していく必要がある。

#### ⑦ 道路等3次元CAD/CAMソフトウェア開発(株式会社三英技研)

マシンコントロールで使用する3次元の道路設計データを効率よく作成するため、複雑な多数線形処理が可能な3次元CAD/CAMソフトウェアを開発した。

このソフトウェアは、入力データとして地上・移動計測した巨大なレーザデータを扱うことができ、地形ポリゴンの作成、計画ポリゴンの作成、地形ポリゴンと計画ポリゴンの交差計算を行うことができる。また、この計算結果から道路の切土、盛土、舗装等の3D面モデルや3Dポリラインを作成し、保存することができる。

平成23年度はレーザデータ100万点が操作できるようにし、平成24年度はレーザデータ1億点の操作、 平成25年度はレーザデータ15億点が操作できるように改良を行った。

### ⑦-1 ソフトウェアの構成

本プロジェクトで開発したCAD/CAMソフトウェアの構成を図7-1に示す。

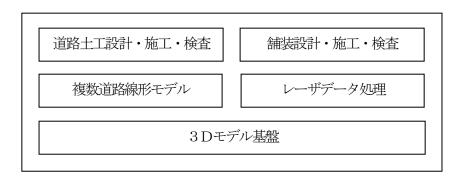


図7-1. ソフトウェアの構成

#### (1) 3Dモデル基盤

3次元図形データの管理、処理、描画を行う部分で、次のモジュールからなる。

- 3次元図形データ管理
   3次元(x, y, z) 座標で表された直線、折線、円、ポリゴン等の図形データを管理するモジュール。
- ・ 複合図形データ管理 複数の3次元図形データを組み合わせて1つの図形データとして扱えるようにするモジュール。
- 3次元図形汎用処理 3次元図形データに対する汎用的な処理(クローンの生成、変換、配置等)を行うモジュール。
- 3次元描画処理
  - 3次元図形データを画面に描画するモジュール。
- 3次元CAD汎用処理 3次元での幾何計算等の汎用的な処理を行うモジュール。

#### (2) レーザデータ処理

レーザデータに対する処理を行う部分で、次のモジュールからなる。

- 色付き点群データ処理色付きの3次元(x, y, z)座標で表された大量の点群データを管理、描画するモジュール。
- レーザデータファイル処理 レーザスキャナで取得したデータファイルに対する読み書きを行うモジュール。

#### • レーザデータ編集処理

レーザデータのノイズや不要な部分を手動で削除できるようにするモジュール。

#### (3) 複数道路線形モデル

複数の道路線形データの管理、処理を行う部分で、次のモジュールからなる。

• 道路線形データ管理

道路中心を表すデータを管理するモジュール。平面線形(位置)、縦断線形(高さ)、すりつけ(横断 勾配および拡幅)の各データからなる。

道路幅員データ管理

道路の車道や路肩の幅員を定義したデータを管理するモジュール。

• 地形データ管理

3次元化された地図データ、道路中心に沿った地形データ(縦断地形)、道路の断面の地形データ(横断地形)を管理するモジュール。

#### (4) 道路土工設計・施工・検査

道路土工の設計・施工・検査用のアプリケーション機能となる部分で、次のモジュールからなる。

• 物件データ管理

物件の名称や発注元の設定等のデータを管理するモジュール。

• 道路設計部品データ管理

道路設計で使用する部品データ(路面、保護路肩、歩道、切土、盛土等)を管理するモジュール。

• 十工定規データ管理

道路の横断面の形状を表すデータを管理するモジュール。

• 平面図作図

道路線形データを元に平面図を作図する処理を行うモジュール。

縦断図作図

道路線形データを元に縦断図を作図する処理を行うモジュール。

横断図作図

道路線形データを元に横断図を作図する処理を行うモジュール。

• 地形法面交差計算

地形ポリゴンと計画ポリゴンとの交差計算を行うモジュール。

#### (5)舗装設計・施工・検査

舗装の設計・施工・検査用のアプリケーション機能となる部分で、次のモジュールからなる。

● 舗装データ管理

舗装の設計データを管理するモジュール。

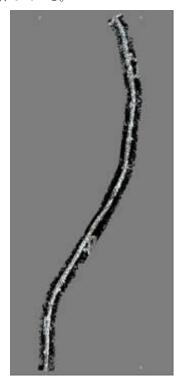
• 舗装計算処理

舗装設計に関する計算を行うモジュール。設計データから路面のポリゴンと3Dポリラインの生成、 地形ポリゴンと路面のポリゴンとの高低差の計算等を行う。

## ⑦-2 ソフトウェアの実行例

### (1) レーザデータの表示の例

レーザスキャナで取得したデータを表示した例を $\mathbf{27-2}$ に示す。この例ではレーザデータ  $\mathbf{15}$  億点を操作している。



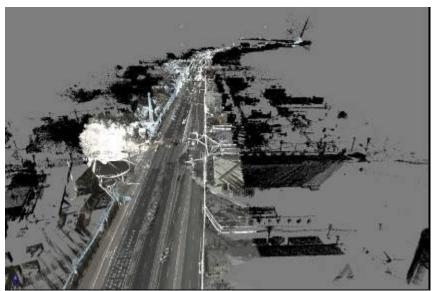
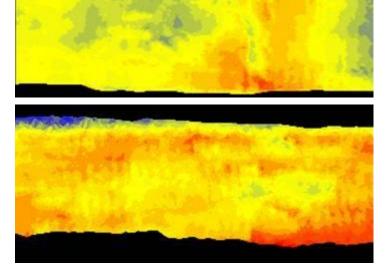


図7-2. レーザデータの表示の例

# (2) レーザデータとモデルの差分表示の例

レーザスキャナで取得した施工後のデータと計画データの差分を段彩表示した例を図7-3に示す。



地形一路面・標高差テーブル						
標高差範囲	色					
140.00 ~	+∞					
120.00 ~	140.00					
100.00 ~	120.00					
80.00 ~	100.00					
60.00 ~	80.00					
40.00 ~	60.00					
20.00 ~	40.00					
0.00 ~	20.00					
−20. 00 <b>~</b>	0.00					
−40. 00 <b>~</b>	-20. 00					
−60. 00 <b>~</b>	-40. 00					
−80. 00 <b>~</b>	-60. 00					
−100.00 <b>~</b>	-80. 00					
-120. 00 <b>~</b> −	100.00					
-140. 00 <b>~</b> −	120.00					
-8 ~ -	140. 00					
	_					

図7-3. レーザデータとモデルの差分表示の例

### (3) 地形法面交差計算の実行例

地形ポリゴンと計画ポリゴンとの交差計算が実行された例を図7-4に示す。計算結果として正確な切 土・盛土の形状の3 D面モデルが得られる。これを機械制御用のデータとして使うことで、施工を精度の良く行うことができる。



図7-4. 地形と計画の交差計算の実行例

### (4) 複数道路間での法面交差計算の実行例

複数線形間での法面同士の交差計算が実行された例を図7-5に示す。

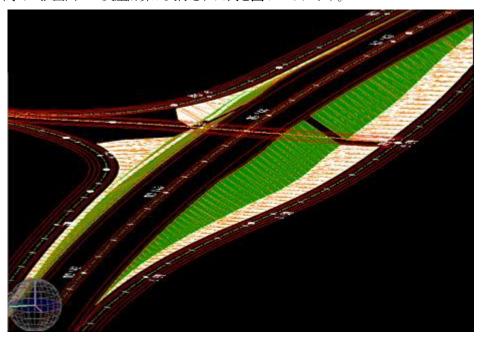


図7-5. 複数道路間での交差計算の実行例

# (5) 舗装部レーザデータ表示の例 施工後の道路をレーザスキャナで計測した例を**図7-6**に示す。

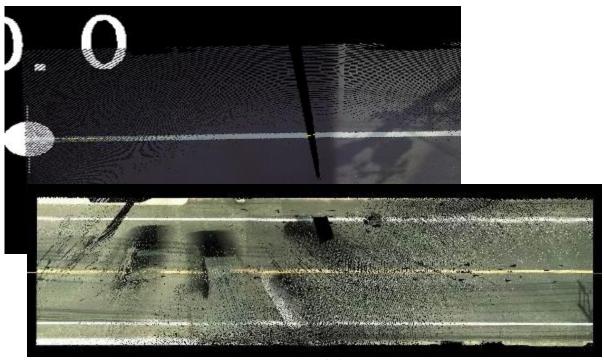


図7-6. 舗装部レーザデータ表示の例

レーザスキャナで計測したデータから TIN モデルを作成した例を図7-7に示す。

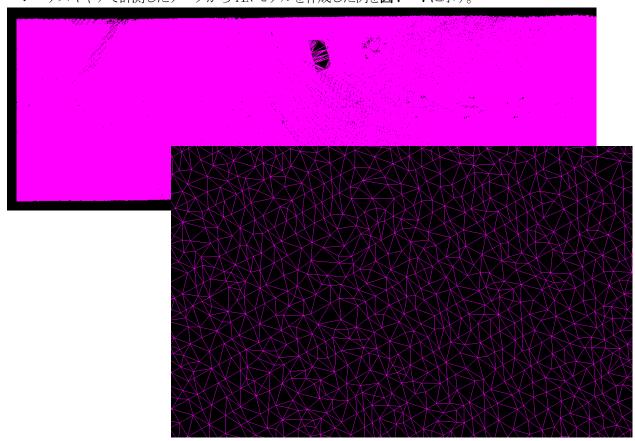


図7-7. 舗装部 TIN モデル表示の例

## 2-1-2 実証実験の実施(株式会社三英技研、日本システムデザイン株式会社、神戸大学、 産業技術総合研究所、熊本高等専門学校)

### 1) 1周波 GPS+GLONASS 装置の動作試験

実際の建設機械に試作機を搭載し、GPS+GLONASS での測位実験を行った。受信機には NVO8c を利用し、GPS と GLONASS のそれぞれの受信データについて、搬送波位相、擬似距離、航法メッセージを受信機から BINR バイナリフォーマットとしてマイコンボードにシリアル出力させる。マイコンボードでは Ubuntu-GNU/Linux が動作しており、シリアルから入力した BINR バイナリデータを RTKLIB ソフトウェア群の STR2STR で受信する。 SRT2STR はストリームサーバとし、えインターフェースメディアの変換を行うプログラムである。シリアルポートから入力された BINR データを別のシリアルポートに出力したり、TCP/IP ポートに出力したり、ファイルに保存したりすることができる。 出力型式は入力データのままのほか、RTCM 形式に変換することも可能である。本プロジェクトでは、TCP/IP の TCP サーバポートに BINR バイナリデータを出力する。STR2STR から出力されたデータを RTKRCV へ入力し、受信位置を計算する。 RTKRCV での計算方法には単独測位と基準点を利用したリアルタイムキネマティック測位(RTK 測位)を選択することができる。RTK 測位では位置を求めたい受信点の GNSS 受信機の他に、位置が既知である別の場所に基地局としての GNSS 受信機を用意する。この基地局用の受信装置も移動局で利用する機器とほぼ同じハードウェアでよく、ソフトウェアで設定値を変更して基地局と移動局を区別する。

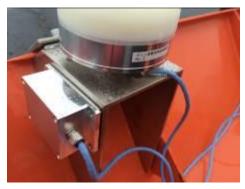


図8-1. 試作した1周波利用GPS+GLONASS受信機



図8-2. 実験に用いた車両



図8-3. 実証実験の様子

## 2) 試験試作装置の動作試験

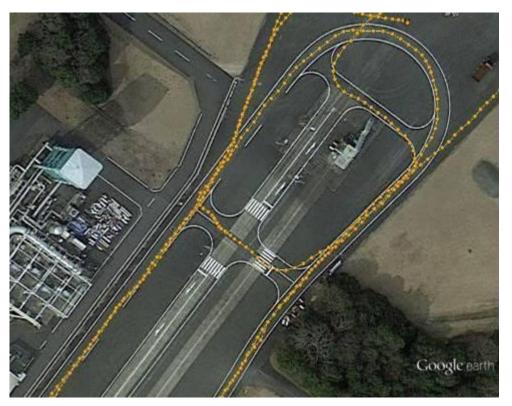
受信波は GPS+GNSS を利用し、今回は、受信機からデータを STR2STR で受けたのち、SD カードにファイルで 保存した。走行実験後に保存されたデータを後処理の形で、RTKRCV により移動体の位置を(a) 単独測位と(b) キネマティック法による精密測位とを比較した。基準局には、国土地理院の電子基準点(つくば)を利用した。各測位モードでの測定結果は次のとおりである。



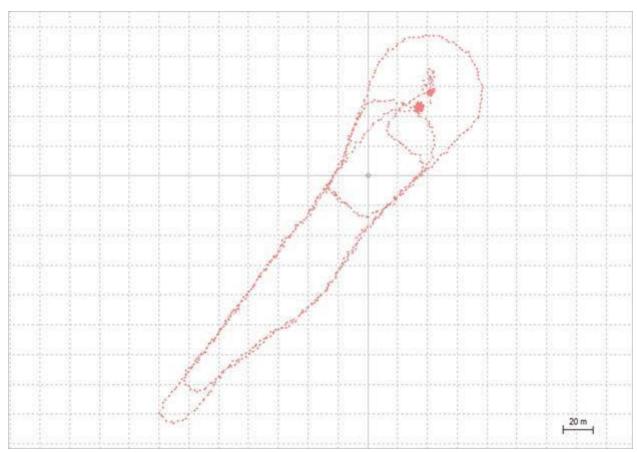
(A-1)GPS+GLONAS での単独測位モードで処理した結果



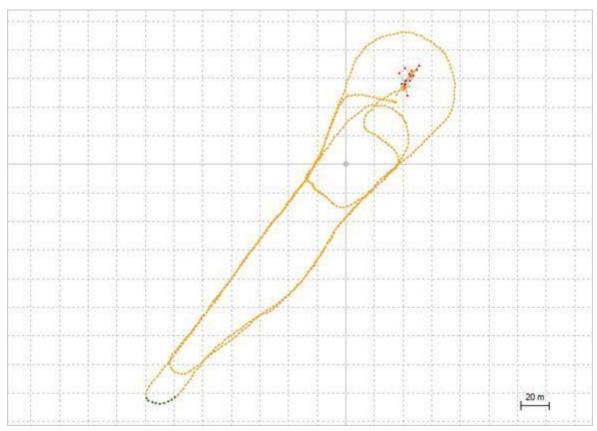
(B-1) 電子基準点をつかって「後処理キネマティック GNSS モード」で処理した結果



(B-2) 電子基準点をつかって「後処理キネマティック GPS モード」で処理した結果 (部分拡大)



(A-2)GPS のみを利用して、単独測位のみで処理した結果

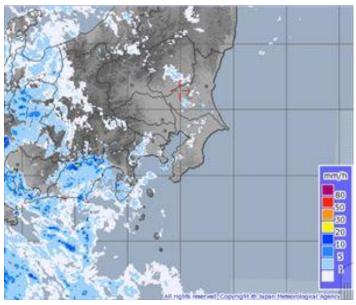


(B-3) 電子基準点をつかって「後処理キネマティック GPS+GLONASS モード」で処理した結果

# 2-1-3. 産業技術総合研究所つくば北サイトにて、ホイールローダを使った実証実験 (産業技術総合研究所、熊本高等専門学校、日本システムデザイン)

### ■実験中の天候およびGPS衛星の受信状態について

実証実験は産業技術総合研究所つくば北サイトにて実施し、天候は雲に覆われ小雨が降る空模様。 GPS衛星およびGLONASS衛星は、写真の通り10個程度受信している状態であったが、 受信感度が比較的良く仰角の高い天井方向の衛星は半数の5個程度。





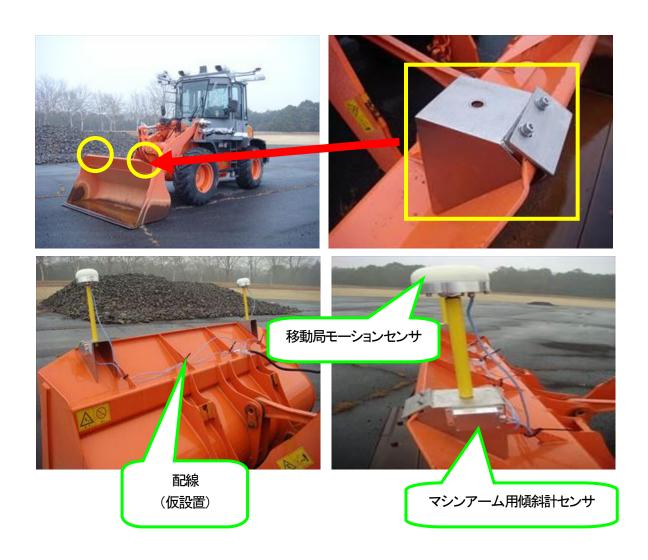


照度 LUX	目安
100,000以上	晴天昼太陽光、真夏の海岸、雪山
10,000	晴天時の日陰
5,000	>曇りの屋外
1,000~2,000	日出入時、百貨店、パチンコ店、夜のアーケード
300~800	エレベータホール、事務所、会議室の蛍光灯直下
70~200	応接間、ホテルのロビー
30~70	屋内の非常階段
5~30	屋内の駐車場、地下駐車場
1~5	街頭の近辺
0.01~0.1	歩くことのできる限界、月明かり



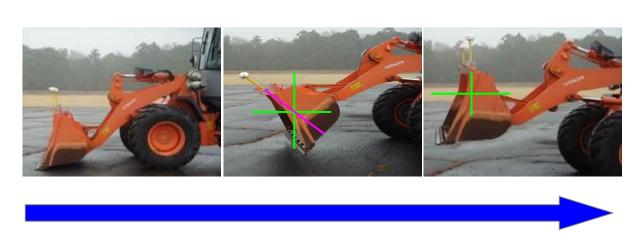
## ■移動局モーションセンサとマシンアーム用傾斜計センサの設置について

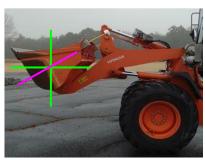
- ▶ ホイールローダのバケットに移動局モーションセンサとマシンアーム用傾斜計センサを設置するにあたり下記の金具を取り付けて、その上に移動局と傾斜計センサをネジ止め。
- ▶ 移動局と傾斜計センサをLANケーブルで操縦席まで引き込み、電力を供給できる Power over Ethernet (PoE) と呼ばれる仕組みにて電源を供給する。



## ■ホイールローダのバケットの動き

ホイールローダで、砂利をすくい上げた動きをさせた時の移動局モーションセンサの位置や傾きを撮影した写真。バケットの傾きに対して移動局モーションセンサも比較的大きく傾く事が判った。











#### ■マルチパス

ホイールローダのバケットを動かしてGPSデータの状態を確認すると、以下の(B)(C)のように移動局モーションセンサの傾きによってマルチパスを拾ってしまう事が判った。目標精度に大きな影響を及ぼすレベルかどうかはGPSデータを精査し影響があれば傾斜計センサを利用してマルチパスと思われるGPSデータを除去するか、他の手段を検討しマルチパスの影響を最大限除去する必要性があるかどうかを今後も引き続き実証実験の中で判断する事とした。ただし、これはバケットに設置する場合におけるマルチパスであり、ホイールローダの天井部に設置する場合においては問題無かった。

### (A) ノーマル状態



移動局が垂直に立っている状態なので、 GPSデータの受信は良好だった。

#### (B) 砂利を降ろした状態



移動局が前方向に倒れた状態であるため、 仰角の低い前方方向からのGPSデータの受信 および、地面からのマルチパスを拾う。

#### (C) 砂利を載せた状態



移動局を後ろ方向に倒した状態であるため、 ホイールローダから跳ね返るマルチパスを拾う。

# 第3章 全体総括

# 3-1 研究開発成果

研究開発内容の実施状況は下表のとおりである。

テーマ名、サブテーマ名、目標	目標(数値、内容)	実施結果	成果達成率 (自己評価)				
① 産業用移動機械向け高精度測位・マシン制御システムの開発							
<ul><li>①-1 1周波RTK-GPSアルゴリズム</li></ul>							
の研究開発							
• GPS精度	平面3cm、高さ5cm	平面3cm、高さ3cm	100%				
• 初期化時間	10秒	1秒	100%				
・応答周波数	5Hz	5Hz	100%				
・RTK演算を行うのに必要なGPSデータ	正しく出力されている事	正しく出力されている	100%				
①-2 GPS計算サーバの開発							
・応答周波数	5Hz	5Hz	100%				
• 無線通信	できる事	できる	100%				
・RTK演算を行うのに必要なGPSデータ	正しく出力されている事	正しく出力されている	100%				
①-3 1周波GPS基地局装置の開発							
• GPS精度	平面3cm、高さ5cm	平面3cm、高さ5cm	100%				
• 初期化時間	10秒	10秒以内	100%				
・応答周波数	5Hz	5Hz	100%				
・RTK演算を行うのに必要なGPSデータ	正しく出力されている事	正しく出力されている	100%				
①-4 モーションセンサによる1周波RT							
K-GPS情報の補間アルゴリズム開発							
・アルゴリズム改造と実機搭載の可能性	完成している事	完成	100%				
検証。	70,70	70,70					
・既存のホイールローダに搭載し良好な	良好な動作をする事	良好な動作をする	100%				
動作を確認							
①-5 移動局モーションセンサユニットの							
開発 ・モーションセンサ	10011 マケウチ/ケナフェ	10011-マナップを手がた) マン・フ	1,000/				
・プロトタイプの問題点分析と改造	100Hzで安定動作する事 完了している事	100Hzで安定動作している 完了している	100%				
		完了している					
(1)機器搭載用にコンパクト化 (2) 傾斜センサと連携してマシンの挙動	完了している事	, = :	100%				
測定テストと性能評価を実施し実用化	完了している事	概ね完了しているが、①-4のアル ゴリズム移植が未完	70%				
①-6 オペレータガイダンスモニタの開発		- 77 (C49)EX 7(0)					
とレーザデータ取得							
・ 3次元描画出来るガイダンスモニタの							
改良型試作機	完成している事	完成している	100%				
・レーザデータ15億点の出力	可能である事	可能である	100%				
①-7 道路等3次元CAD/CAMソフト	1112 417 40 4	7,12 44 / 0					
ウェア開発							
・レーザデータ15億点の操作	可能である事	可能である	100%				
・3D面モデル作成と保存	可能である事	可能である	100%				
② 実証実験の実施							
・GPS精度	平面3cm、高さ5cm	平面3cm、高さ5cm	100%				
• 初期化時間	10秒	10秒以内	100%				
・応答周波数	5Hz	5Hz	100%				
・モーションセンサ	100Hzで安定動作する事	100Hzで安定動作する	100%				

#### 3-2 今後の課題と事業化計画

今後の研究開発の課題は、下記のとおりである。 次年度以降の補完研究で下記の問題解決が重要課題となっている。

- A) GPS/GLONASS測位機器・プログラムの開発において、マルチパスの影響を改善することが最大の課題となっている。一つの方向性として当プロジェクトで成功した低価格化GPS受信機のメリットを活用して①複数台装着アンテナセットの開発、②基地局の複数台ネットワーク化、③GPS電波の反射計算が可能となる作業現場の超精密3D地図化等を補完研究で実現したい。
- B) 東京海洋大学高須先生開発の「RTKLIB」の改造が必要となる。
- C) 異常データを削除するため、衛星選択アルゴリズム開発が必要となる。
- D) モーションセンサアルゴリズム開発は、現場にあった座標系を選べるようにアルゴリズムそのものは概 ねできあがった。補間モデルについてはより建設機械の構造・特性に合ったモデルの可能性も今後検討し ていきたい。
- E) 実機適応のための改良としては、耐振動性、防水防塵性、取り付け方法の確立が大きな課題として考えられ、この対策が次年度必要である。
- F) オペレータガイダンスモニタ、CAD/CAMソフトの頑健性が求められる。
- G) 特に、当プロジェクトのアドバイザーが指摘するように、GPSの安定的な受信性能向上と受信できない原因告知が事業化成功の鍵となる。例えば、GPS受信の難所である新宿の高層ビル街や山間部での高精度で安定的な受信解析のために、外部研究機関の保有するGPSシミュレータ利用連携も鋭意進めたい。