

中低速移動体におけるRTK-GPS適用化技術

金澤文彦* 有村真二** 湯浅直美***

1. はじめに

平成19年5月に地理空間情報活用推進基本法の制定、平成20年4月に地理空間情報活用推進基本計画の閣議決定があり、国内におけるGPS(Global Positioning System)など衛星測位の利用拡大が想定される。現在、国内では、カーナビゲーションで約1,800万台、携帯電話で約3,000万台が利用されており、国民生活の中にGPSは大きく普及してきている。産業分野においては、トラックなどの移動体やコンテナや荷物などの物流の管理、さらに子どもや高齢者の安心安全を目的とした人の見守りシステムにもGPSを始めとする位置情報が活用されている。

今後、衛星測位の活用分野として期待されている分野として、土木工事などにおける情報化施工がある。

情報化施工に利用されるRTK-GPS測位(Real Time Kinematic-GPS測位)は、cmレベルの高精度な位置特定が可能であるが、初期化が数分以上かかる場合もある。また、5基以上の衛星からの電波を受信し続ける必要があるが、GPSは干渉や信号変動に極めて弱いため、一瞬でも電波が遮られると測位が中断され、継続して利用できないという問題もある。そのため、RTK-GPS測位は、衛星配置や電波遮断・初期化の課題が解決されると、ロボット化や無人化の進展とあいまって高度な情報化施工が実現していくことになる。

本稿では、RTK-GPS測位について連続的かつ高精度な測位技術を開発し、開発した技術を作業用車両に適用して屋外実験を行うとともに、実験結果の分析において準天頂衛星の有無による利用効果の検討を行った結果を報告するものである。

2. 情報化施工における課題

RTK-GPSを利用した情報化施工では、図-1に示すように、利用可能な範囲や時間が短くなる理由

として、

- (1) 他の建設機械や建物によるマルチパス(反射波)による位置誤差が増大
- (2) GPS受信機内のサイクルスリップによる位置誤差が増大
- (3) RTK-GPS初期化時間が数十秒～数分必要で、効率が低下
- (4) 電波遮蔽が多い山間部では連続したRTK-GPS測位は困難

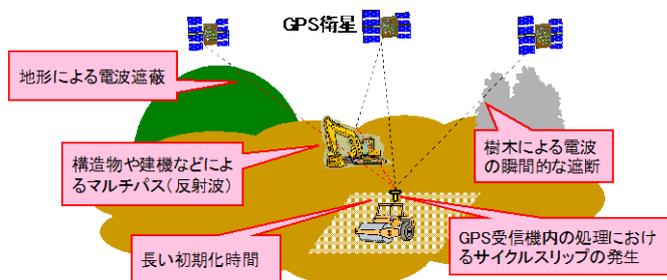


図-1 情報化施工における課題

などが上げられる。連続しての利用が困難な場所が多く、利用範囲や時間を限定しての利用となり、情報化施工は普及していないのが現状である。

そのため、本研究では、情報化施工におけるRTK-GPSの技術課題を解決する手法の開発を行った。

本研究では、平成16年度から平成18年度にわたり、

- (1) マルチパス誤差(劣化信号)低減技術の開発
- (2) RTK-GPS高速初期化技術の開発
- (3) 慣性航法複合技術の開発

を行い、開発したアルゴリズムをもとに高精度測位ソフトウェアとして開発し、平成18年度にはシミュレーション実験、平成19年度には屋外実験を行い、開発技術の評価を行った。

3. 手法の開発

3.1 マルチパス誤差低減技術の開発

GPS受信機が反射波や回折波を受信処理した場合、擬似距離誤差となり測位処理や測位精度に悪影響を与える。カーナビや携帯電話では、安価

なGPS受信機が用いられているため、大きな測位誤差が生じる。

RTK-GPSにおいても、アンビギュイティ(基準局と移動局との搬送波の行路差のことであり、既知の基準局からの相対的な移動局の位置を特定するための値)決定前に解の探索範囲を絞り込む必要があり、障害物によって反射・回折され信号が劣化することによって発生するマルチパス誤差の低減がRTK-GPSの高速初期化を左右することになる。

一般に障害物によって反射・回折されたGPS信号(劣化信号)は、直接波と比較して信号強度が低くなる傾向を持つ。この特徴を利用して劣化信号を特定し除去する手法を開発した。直接波の信号強度は衛星仰角の関数として表すことができ、この関係はアンテナ、ケーブル及び受信機の構成で決まる。これらの関係を利用し、図-2に示すように閾値より低いものを劣化信号と判断して除去する。

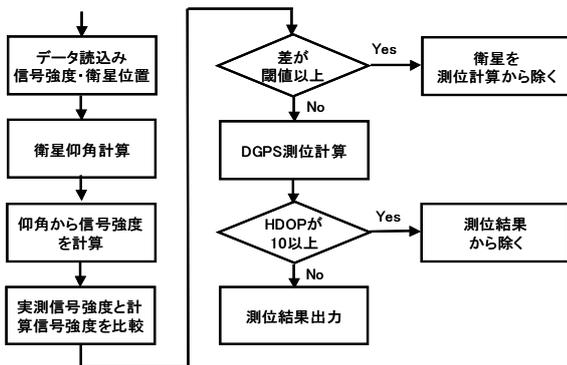


図-2 劣化信号除去の処理フロー

3.2 RTK-GPS高速初期化技術の開発

1回のデータ取得(ワンエポック)でアンビギュイティを決定するためには、エポック毎の正解率を高めることが重要であり、以下のアルゴリズムを検討した。処理フローを図-3に示す。

(1) 最適衛星選択

1) 高仰角を優先して選択

衛星仰角が低くなると電離層や対流圏による影響が大きくなるため、仰角の低い衛星データを測位計算に利用しない。

2) 衛星配置を考慮して選択

仰角で重み付けした位置精度劣化指数(PDOP: Position Dilution of Precision)を考慮して選択する。

(2) 移動体運動モデル

アンビギュイティ実数解の推定精度を高めるため移動体の運動から現在位置を予測する。幾つかの運動モデルを比較し、加速度を、一つ前の状態のみに依存するという一次のマルコフ過程と仮定した運動モデルを採用する。

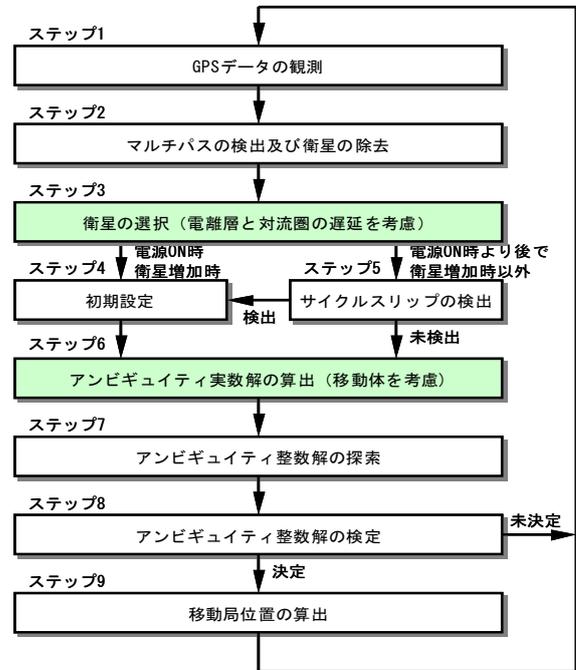


図-3 ワンエポック決定の処理フロー

3.3 慣性航法複合技術の開発

建設機械搭載に適切な価格の慣性航法装置(INS: Inertial Navigation System)と、RTK-GPS測位技術を組み合わせ、衛星電波が遮蔽されRTK-GPS測位が一時的に中断した場合においても継続して高精度測位が可能な技術を開発した。ブロック図を図-4に示す。

(1) 初期化アライメント

INSで位置・速度を得るには事前に初期姿勢角・方位角を求めるアライメント処理が必要である。地表面に対する相対速度0データを利用する静止アライメントと、GPSから得られる観

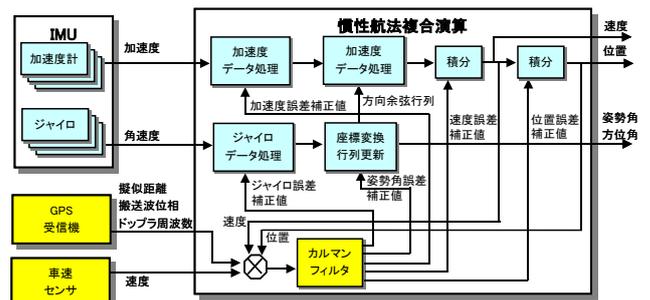


図-4 慣性航法複合方式のブロック図

測データを用いる移動アライメントの2方式を検討した。

(2) 慣性航法演算と複合航法フィルタの設計

加速度・角速度データから3次元位置・姿勢を求める慣性航法演算、GPSの観測データを用いたINSの誤差を補正する複合航法フィルタ(カルマンフィルタ)を検討した。

(3) 高精度複合航法方式とアルゴリズムの検討

可視衛星数が4基以下の場所においても測位を継続できる慣性航法複合方式を検討した。複合航法においては、RTK-GPS測位演算結果の位置、速度を用いる既存複合航法方式(Loosely Coupled方式)ではなく、GPS受信機の観測データである擬似距離、搬送波位相データ等を直接使用する方式(Tightly Coupled方式)を設計し評価した。

4. 実験・評価

4.1 実験の目的

開発したマルチパス誤差低減技術、RTK-GPS高速初期化技術、慣性航法複合技術を適用したシミュレーションソフトウェアをリアルタイム化し、RTK-GPS受信機(信号処理部)とIMU(Inertial Measuring Unit)を接続できる屋外実験の高精度測位ソフトウェアを開発した。そして、実際の建設機械を用いての屋外実験を行い、従来製品と高精度測位ソフトウェアを利用した位置測位を行い、高精度測位ソフトウェアの測位可能な時間(情報化施工で利用できる時間)の評価を行うこととした。

4.2 実験内容

(1) 屋外実験の概要

屋外実験は、図-5のように試験場で転圧ローラを利用して、GPS受信機、IMU装置を搭載し、リアルタイムで位置精度を評価する。本実験では、次の項目を評価する。

- 1) 初期化時間：RTK-GPSにおいてアンビギュイティを決定するまでの時間を表す。この項目はRTK-GPS高速初期化のみの評価項目となる。
- 2) アンビギュイティの決定率：全実験時間におけるアンビギュイティが決定している時間の割合を評価する。
- 3) 利用率および位置誤差：事前に測量したポ

イントに対し、移動パターンを決定後、想定した軌跡に対しての位置誤差を評価する。また、有効な測位結果が得られている時間の割合を表す。

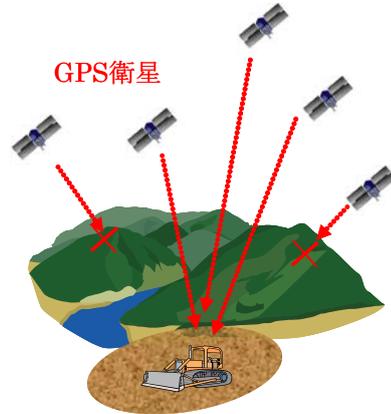


図-5 測位環境のイメージ図

(2) 屋外実験の機器構成

RTK-GPS測位を行うために基地局からの補正情報を取得する通信インフラの構築を行う。高精度測位技術でも使用される高精度測位システムは、建設機械に搭載する装置と補正情報を配信する基準局から構成される。図-6に、概略の構成を示す。ここで、比較評価のため、同一のRTK-GPS受信機での測位も行う。

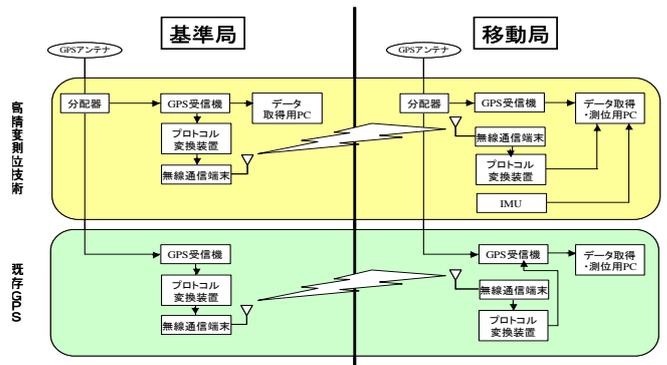


図-6 実験システムの概略構成

(3) 屋外実験の評価

屋外実験で求めた初期化時間、位置誤差などについて評価を行い、高精度測位技術の情報化施工への適用を検討する。また、平成19年度に開発したシミュレーションソフトにて、同一場所、同時刻、すなわち同じ衛星配置で同様な遮蔽を模擬したシミュレーションを行い、準天頂衛星の効果についても検討を行う。

評価を行う際、実験場所において、GPS電波の遮蔽環境が異なるように作業領域の範囲を分けて評価を行う。

屋外実験場所における電波遮蔽を考慮した作業範囲の分け方は、図-7のように20m×50mの実験場所における林側、建設機械側、全面の3つの範囲に分けて評価を行う。それぞれの実験場所の詳細を表-1に示す。

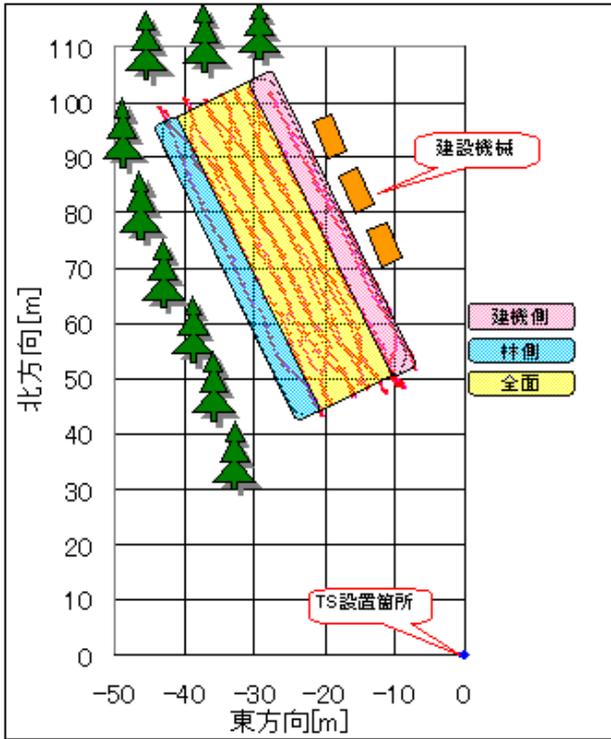


図-7 評価場所の分け方

表-1 評価場所

実験場所	建設機械の動き
林側	北から南西まで樹木に囲まれた場所で往復動作
建設機械側	東側にショベルを3台設置させた場所での往復動作
全面	20m×50mの範囲において転圧ローラの動作

4.3 屋外実験の評価・分析

(1) 初期化時間の評価

初期化時間の実験結果を表-2に示す。初期化時間は静止時と移動時において同じ条件で実験を行った結果である。静止時の初期化時間の結果は、衛星数が多い時間帯と少ない時間帯に分けて実験を行い、移動時の初期化時間の結果は衛星数が少ない時の結果である。

表-2 初期化時間結果

		初期化時間[sec]		
		回数	開発ソフト	既存製品
静止	【多い】 平均衛星数 5基以上	1	2	43
		2	2	13
		3	5	29
		4	7	17
		5	2	24
	【少ない】 平均衛星数 5基未満	1	8	61
		2	11	47
移動	【少ない】	1	10	21

開発ソフトはRTK-GPSの高速初期化技術により、衛星が多い場合と少ない場合においても高速にアンビギュイティが決定していることが分かる。一方、既存製品は初期化するまでに数十秒時間がかかる結果となった。表-3は、開発ソフトと既存製品の初期化にかかった平均時間を表した結果である。

表-3 平均初期化時間結果

	平均初期化時間 [sec]	
	開発ソフト	既存製品
静止時	5.6	41.4
移動時	10	21

静止時における開発ソフトの平均初期化時間は既存製品の41.4秒に比べて、5.6秒の高速な初期化時間の結果となった。また、移動時においても開発ソフトは既存製品の半分の時間で初期化が行われている。以上より、開発ソフトにおける高速初期化技術の位置探索手法と運動モデル、アンビギュイティ検定の技術によってアンビギュイティの高速化が実証された。

(2) 位置誤差の評価

位置誤差の評価は、屋外実験の真値（真の位置）が不明であるため、既存製品と開発ソフトにおいて屋外実験結果のアンビギュイティが決定している演算位置の差分で評価を行う。位置誤差は、開発ソフトの位置から既存製品の位置を引いた値をグラフ化する。なお、既存製品の位置精度は0.02m（RMS（Root Mean Square））である。

図-8に水平面位置誤差の結果を示す。ほぼアンビギュイティが決定しているデータにおいて、

既存製品の位置精度のRMS (Root Mean Square) が2cmであるのに対し、既存製品と開発ソフトの位置差分のRMSが2.5cmの結果が得られた。したがって、開発ソフトの演算位置は、既存製品と同等な位置精度である。

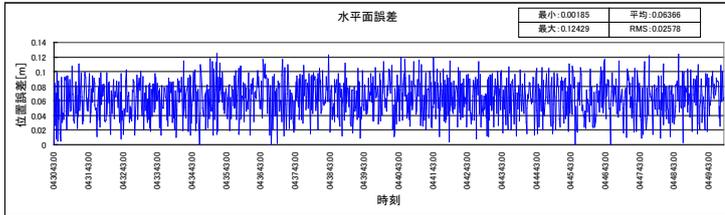


図-8 水平面位置誤差結果

(3) アンビギュイティ決定率・利用率の評価

走行した実験を16回 (1回20分) 実施し、開発ソフトと既存製品各々のアンビギュイティ決定率と利用率の実験結果を図-9に示す。ここで、図におけるRTK-GPSと複合航法の結果が開発ソフトの評価結果である。

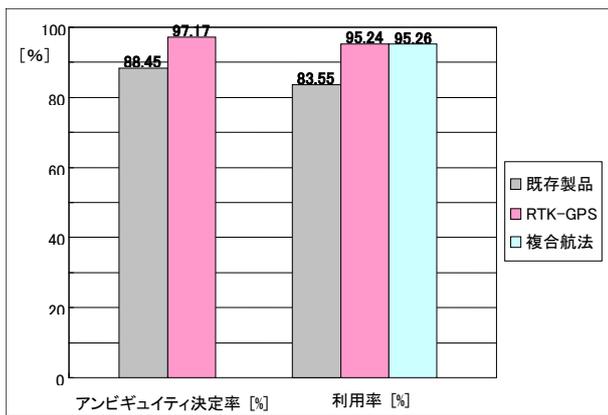


図-9 屋外実験の評価結果

開発ソフト (RTK-GPS) は屋外実験の環境下において、高速なアンビギュイティの初期化が行われているため、既存製品よりアンビギュイティ決定率と利用率が10%程向上した。利用率がアンビギュイティ決定率よりも数%減少した原因は、アンビギュイティの誤決定による測位精度の低下である。

複合航法の結果は、RTK-GPSが97.17%のアンビギュイティで決定しているため、利用率に大きな効果が得られなかった。

屋外実験によって、高精度測位技術を組み込んだ開発ソフトは既存製品よりも有用であることを裏付ける結果が得られた。

(4) 準天頂衛星の効果

準天頂衛星 (QZSS (Quasi Zenith Satellite

System) 測位における効果を確認するため、屋外実験と同等な測位環境を模擬して、同時刻で同じ場所において、準天頂衛星が有る場合と無い場合を開発ソフトでシミュレーションして、評価した。

シミュレーション実験では、準天頂衛星が1基存在することによる、アンビギュイティ決定率と利用率の向上が確認できた。図-10に全データ (320分間) のシミュレーション結果を示す。シミュレーション実験においては、準天頂衛星が1基存在することでアンビギュイティ決定率と利用率は約15%向上した。

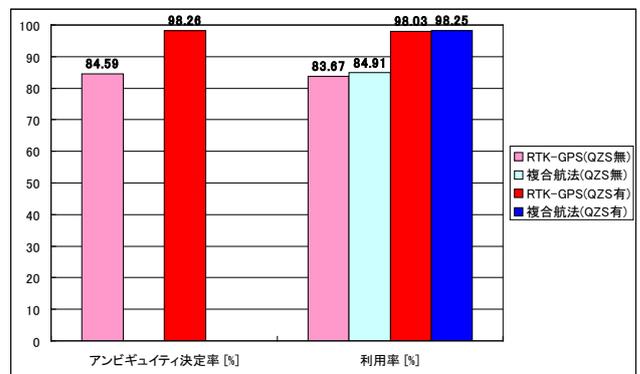


図-10 準天頂衛星の有無によるシミュレーション実験結果

なお、図-9及び図-10について、遮蔽物など実際の環境を完全には模擬できておらず、傾向として評価している。

次に、測位環境が異なる実験エリアにおいて、準天頂衛星の有無による測位結果の評価を行った。測位場所は屋外実験と同様に林側、全面、建設機械側の場合に分けて、準天頂衛星が無い場合とある場合の測位状況の変化を求めて可視化を行った。

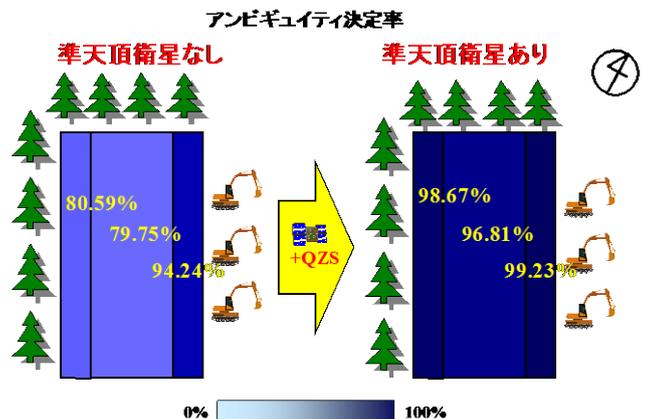


図-11 準天頂衛星の有無によるアンビギュイティ決定率の変化状況

図-11は、衛星数が準天頂衛星により1基増加した場合におけるアンビギュイティ決定率の変化の結果である。林側、全面、建設機械側のそれぞれの場所においてアンビギュイティ決定率が大幅に向上していることが分かる。また、準天頂衛星によって平均約80%の測位環境から96%以上の測位環境が得られた。

図-12は、図-11と同様な準天頂衛星による利用率の変化の結果である。利用率においても大幅に向上していることが分かる。

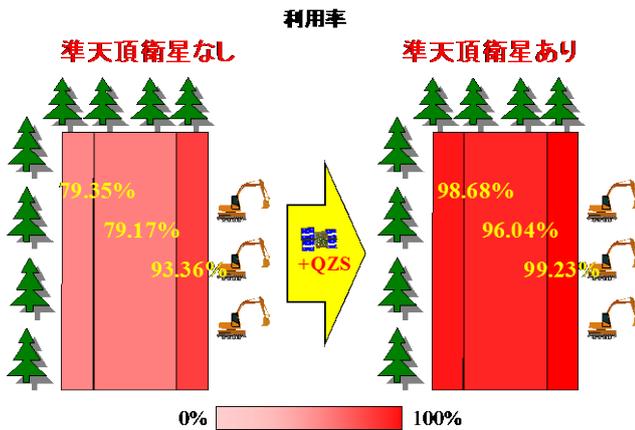


図-12 準天頂衛星の有無による利用率の変化状況

なお、図-11及び図-12について、測位場所による違いは、同時刻に測定していないことによる衛星配置、電離層の状況など誤差要因の違いが影響していると考えられるため、QZSの有無による違いを評価している。

(5) 評価業務のまとめ

この屋外実験において、遮蔽物が存在する条件下で、今回開発した高精度測位ソフトウェア（開発ソフト）の、従来製品と比較した効果を確認できた。

1) 初期化時間（搬送波の波数を再び確定させるまでの時間）の短縮効果を見込める事が確認できた。

実際の情報化施工において、作業時間の短縮や作業の効率化が期待できる。

2) アンビギュイティ決定率の向上が見込める事が確認できた。

実際の情報化施工において、作業エリアの拡大、GPS測位ができず作業を中断する回数、時間の削減が期待できる。

3) 準天頂衛星が存在する場合、さらなる初期化時間短縮とアンビギュイティ決定率の向上が見込める事が確認できた。

5. おわりに

平成19年、地理空間情報活用推進基本法が制定され、GPSや準天頂衛星などの衛星測位の今後の利用拡大への期待も大きくなってきている。国土院などが中心となって整備している基盤地図と高精度な衛星測位により、ナビゲーションなど国民へのサービス、子ども・高齢者・障害者などの移動弱者支援、災害避難支援など安全・安心分野での利用が拡大し、物流の効率化など産業分野での利用も大きくなりつつある。しかし、衛星測位は環境により利用可能な範囲が制限される場合がある。そこで、本検討業務で開発した要素技術が解決の糸口になればと思っている。

謝 辞

最後に、本検討業務の実施に当たってご教示、ご協力をいただいた皆様方に心より御礼申し上げます。

金澤文彦*



前国土交通省国土技術政策総合研究所高度情報化研究センター情報基盤研究室長
Fumihiko KANAZAWA

有村真二**



国土交通省国土技術政策総合研究所高度情報化研究センター情報基盤研究室 主任研究官
Shinji ARIMURA

湯浅直美***



国土交通省国土技術政策総合研究所高度情報化研究センター情報基盤研究室 研究員
Naomi YUASA