

運輸省港湾技術研究所

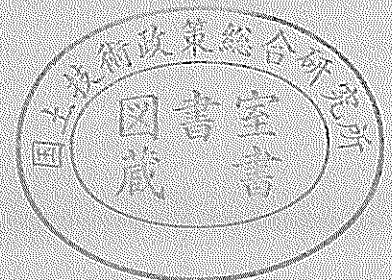
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL.39 NO.3 SEPT. 2000

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第39巻 第3号 (Vol. 39, No. 3), 2000年9月 (Sept. 2000)

目 次 (CONTENTS)

1. 東京湾盤洲干潟の短期地形変動特性とそのメカニズムについて
..... 内山雄介 3
(Suspended Sediment and Morphological Response on Banzu Intertidal Sand-flat, Tokyo Bay, Japan
..... Yusuke UCHIYAMA)
2. 都市臨海部地震被害予測のための街路閉塞現象のモデル化の試み
..... 赤倉康寛・高橋宏直・中本 隆 19
(A Street Blockage Model for Earthquake Damage Estimation at Water Front City
..... Yasuhiro AKAKURA, Hironao TAKAHASHI and Takashi NAKAMOTO)
3. GPSとレーザーレベルを組み合わせた測量システムの開発
..... 白井 一洋・吉江 宗生・横井 博志・剣持 知弘 43
(Survey System Combined GPS and Laser Level
..... Kazuhiro SHIRAI, Muneo YOSHIE, Hiroshi YOKOI and Tomohiro KENMOTI)

GPS とレーザーレベルを組み合わせた測量システムの開発

白井 一洋*・吉江 宗生*・横井 博志**・剣持 知弘***

要 旨

沈下観測は人工島や海上空港などの埋立地の建設、維持管理に重要なものである。従来、沈下観測のための水準測量はトランシットやレベル等の測量機器を使用して行われているが、人力に頼るところが多く省力化、効率化に課題がある。特に供用中の空港においては、測量できる時間帯が制約されており、迅速に測量できる効率的な測量システムの開発が望まれている。

本研究では、3次元位置を測定できるGPSと従来の測量機器の組み合わせに関して実験・検討を行い、双方の特徴を活かし、短所を補う最適なシステムとして、RTK-GPSとレーザーレベルによる測量システムを考案した。また、本測量システムの測量精度の向上、測量作業の省力化、効率化のための各種補正機構を考案した。RTK-GPS、レーザーレベル、各種補正機構について室内実験・検討を行い改良を加えて「GPSとレーザーレベルを組み合わせた測量システム」を完成させた。本システムは、計測車方式、台車方式、人力方式の3方式があり、現場条件により最適な方式を選択できるようになっている。ケーススタディーとして東京国際空港の沈下計測を本システムで行う場合について、実験結果をもとに3方式の特徴に関して比較検討し、東京国際空港の水準測量に導入する測量システムとして、台車方式を選定した。

GPSとレーザーレベルを組み合わせた測量システムの特徴は、以下の通りである。

- ・測量データ取得から各種補正演算、測量結果出力までの一連のデータ処理をパソコンで自動に行う省力化・自動化に優れた、連続測量が可能な3方式の測量システム（計測車方式・台車方式・人力方式）である。
- ・測量精度は、3級水準測量相当である。
- ・水平方向の測位精度は、RTK-GPSの測位精度である。

キーワード：水準測量，RTK-GPS，レーザーレベル，自動化，効率化

*機械技術部主任研究官

**前機械技術部計測施工研究室長（現財団法人沿岸開発技術研究センター）

***前機械技術部計測施工研究室研究員（現第二港湾建設局横浜機械整備事務所）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 運輸省港湾技術研究所

電話：0468-44-5041 Fax：0468-44-0575 e-mail:shirai@phri.go.jp

Survey System Combined GPS and Laser Level

Kazuhiro SHIRAI*

Muneo YOSHIE*

Hiroshi YOKOI**

Tomohiro KENMOTI***

Synopsis

A settlement observation is important for a construction and maintenance of an artificial island and an airport. There are problems for many labor savings, getting an efficiency, though a level survey for a settlement observation has been done by human power, using a survey machine of transit and a level. At an airport because the time that we can survey is decided, a development of an efficient survey system is hoped.

In this research, we examined performance depend on combinations of GPS and conventional survey machines, and we developed a survey system depending on a combination of RTK - GPS and laser level, as the most suitable system to utilize both characteristics, and to make up for a each weak point. On the other hand, we devised several auxiliary devices for improvement of a survey precision of this survey system, for labor saving of a survey work, for getting an efficiency. We carried out indoor test for RTK - GPS, laser level, several auxiliary devices, and developed the new survey system combined GPS and laser level.

There are 3 method for this system to be able to choose the most suitable method for a scene condition. The first method is using a car, the second method is using a hand cart, and the third method is using human power. We carried out field test with this system and several auxiliary devices at Tokyo international airport. We experimented to compare a precision of this system and a conventional survey. By the result of the field test we choosed the leveling method using a hand cart for a using system in Tokyo international airport.

A characteristic of the survey system combined GPS and laser level, is following.

- This system is a good system for labor saving that automatically calculating from getting data to outputting.
- A survey precision is suitable the 3rd class level survey.

Key Word : level survey, RTK - GPS, laser level, labor savings, efficiency

* Senior Research Engineer, Machinery Division

** Former Chief of Instrumental Construction Control Laboratory, Machinery Division
(Coastal Development Institute of Technology at present)

*** Former Member of Instrumental Construction Control Laboratory, Machinery Division
(Yokohama Machinery Improvement Office, Second District Port Construction Bureau at present)

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-445041 Fax : +81-468-440575 e-mail : shirai@phri.go.jp

目 次

要 旨	43
1. まえがき	47
2. 研究目的と周辺状況	47
3. 基本システムの検討	47
3.1 GPSの検討	47
3.2 光学式測量機器の検討	49
3.3 GPSと光学式測量機器の組み合わせの検討	49
4. システムの概要と基本原理	51
4.1 システムの概要	51
4.2 基本原理	51
4.3 GPSを基準とした測量とベンチマークを基準とした測量	52
5. 本システムの水準測量精度に関する検討	52
5.1 レーザーレベルの精度確認実験	52
5.2 RTK-GPSの高さ方向の精度と平均化処理	53
5.3 本システムの高さ方向の精度に関する検討	54
6. 測量システムの構成	55
6.1 基本部	55
6.2 補正機構	57
6.3 自律航法の検討	60
7. ケーススタディー	63
7.1 現地測量実験	63
7.2 実験に使用した主要測量機器	67
7.3 実験方法と結果	67
7.4 各方式の運用上の特性	71
7.5 運用上の作業効率	72
7.6 東京国際空港導入に適した方式	72
8. 結論	73
8.1 本システムの精度と特徴	73
8.2 東京国際空港への適応性について	73
9. あとがき	74
謝辞	74
参考文献	74

1. まえがき

港湾や海上空港など埋立を伴う海洋土木施設の建設、維持管理において沈下管理は重要であり、面的なデータを得るために多数の測点網からなる沈下観測が行われている場合も多い。ただし、トランシットやレベル等を用いた測量は人手に頼るところが多いため、沈下観測には膨大な労力を伴っているのが現状であり、その省力化が求められている。特に供用中の空港においては、測量が出来る時間帯その他の制約が厳しい場合もあって、迅速に測量できる効率的なシステムの開発が望まれている。

一方、近年普及がめざましいリアルタイムキネマティック方式のGPS (RTK-GPS) は遠距離基準点からの補正情報を基に、移動しながらリアルタイムに測位することが可能であり、これは従来の測量機器とは比較にならない機動性をもたらす。しかし、GPSは、一般に水平精度に比べて高さ精度が多少劣っており、RTK-GPSの場合にも、高さ計測値は常に数センチメートルの誤差を含んでいる。このため、要求精度にもよるが一般に沈下計測に必要な測量精度は得られない。

そこで着想されるのが、近距離の範囲で高精度に水準測量 (Z座標) ができる光学式機器と遠距離の基準点から精度良く水平位置の測量 (X-Y座標) ができるRTK-GPSの各々の長所を組み合わせることによって、従来の測量機器と同程度の精度を有し、かつ、迅速に沈下観測ができる測量システムである。このたび開発したシステムは、測点の水平位置を計測するためのGPS及びテレメータ受信機、高さを計測するためのレーザーレベル (プレーナー) 及び受光器、周辺機器等で構成される。標準的な運用形態としては、レーザープレーナーを測量エリアの中心付近に据え付けておき、GPSとレーザー受光器を搭載した測定車が、測線に沿って走行しながら連続的に測量を実施していくことを想定している。

2. 研究目的と周辺状況

現状の測量業務は、そのほとんどの作業が人手によって行われているため読みとり誤差などが発生しやすく、しかも作業の効率化を図ることが困難であった。一般に水準測量はオートレベルやトータルステーションを用いて行っているが、能率を向上するためにGPSを用いて測量した例が多く発表されている。GPSは、基準局から10数kmの範囲の測量が可能であるため人工島のような広範囲の測量に適している。

GPSには、リアルタイムに測量が出来るRTK-GPSがあるが、高さ方向の測定精度が劣るため高精度な測量が要求される場合には改善が必要である。GPSを使用したシステムでは、一般的な測量への利用の他に測量船の位置計測、作業船の位置決めシステム、建設機械の遠隔操作のための位置測定等がある。

レーザーレベルに関しては、水準測量や沈下計測以外に、バックホーのバケットの自動位置決め制御等に使用されている。

測量業務の省力化、効率化のための装置としては、自動追尾式のトータルステーションを走行台車に搭載したもの、姿勢センサーとレーザー光による高さ測定装置を組み合わせる自動車で搭載し、道路の縦断面を計測するための装置が開発されている。しかし、これらの装置では、3~4kmの広範囲に及ぶ測量範囲を効率的に高精度で測量するには適していないため、広範囲を高精度で効率的に測量でき、省力化に優れた測量システムの研究開発を行った。

本開発研究では以下の方針にしたがって開発を行った。

- ① 3~4kmの広範囲の測量が可能である。
- ② 効率的な測量を行うため、GPSを使用したシステムとする。
- ③ 測量精度は、3級測量に相当するものとする。
- ④ 省力化のため計測の自動化を図るとともに、データ処理においても自動化を図る。

3. 基本システムの検討

人工島や空港等で広範囲の水準測量を高効率・高精度に実施可能な測量システムの開発のため、GPSと従来の光学的手法を組み合わせた測量システムの検討を行った。

3.1 GPSの検討

(I) GPSの概要

GPSは、Global Positioning Systemの頭文字を取ったもので「汎地球測位システム」と訳すことがある。このシステムは、海上、陸上を問わず航空機、船舶など地球上のどの地域でも連続的に測位可能な衛星航法システムであり、また、移動体の速度や進行方向、正確な時間も求めることが出来る。

GPSは、1970年代に米国国防総省によって開発が開始され、1993年末に完全運用状態となった。GPS

は、高度約 20,000km の円軌道を飛行する 24 個の人工衛星からなる測位システムであって、開発された主目的は、米国と同盟国の軍事用であるが、一部が民間に開放されている。¹⁾ (図-1.2)

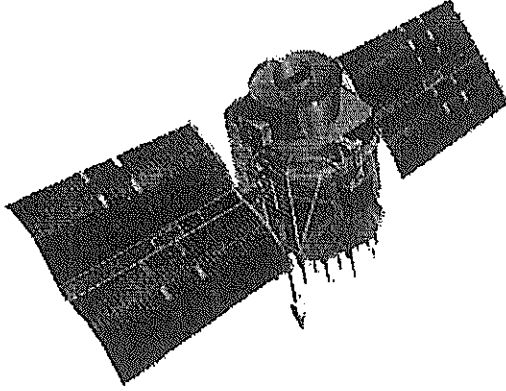


図-1 GPS衛星

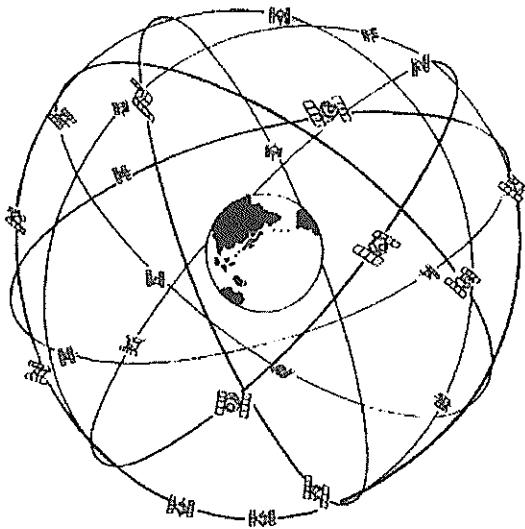
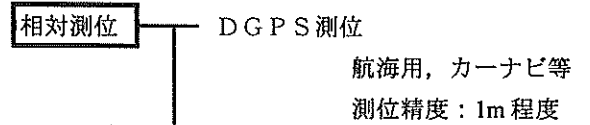
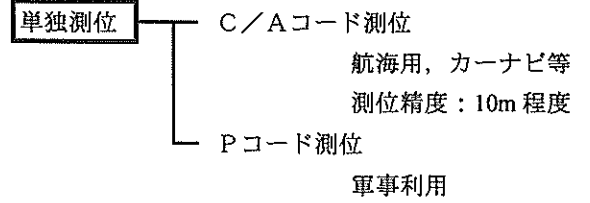


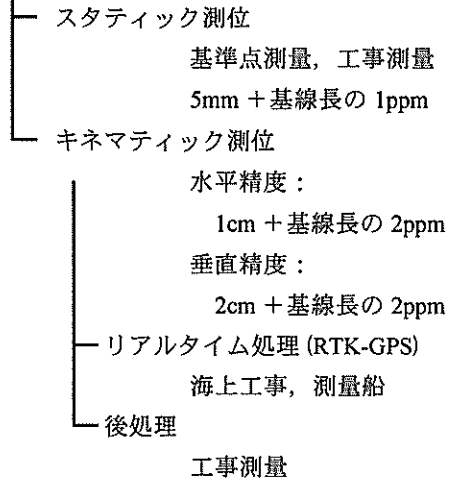
図-2 GPS衛星軌道の概念図

GPSの測位技術は、単独測位と相対測位があり、相対測位はDGPSと干渉測位に分類され、測量に使用できるような高精度なものは相対測位の中の干渉測位である。干渉測位の中にはスタティック測位とキネマティック測位がある。

GPSの測位形態



干渉測位



(2) スタティック測位

スタティック測位は座標既知点に基準局を固定し、各測点に新点用GPSを移しながら、観測データを収録する。(図-3) 各測点での観測データ収録時間は30分~数時間を要する。収録した既知点と各新点間の基線データを

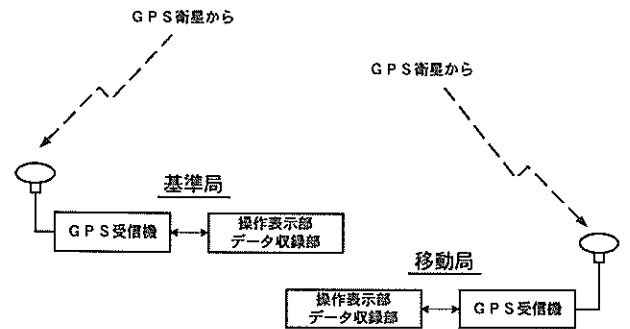


図-3 スタティック測位概念

を後処理ソフトウェアにより解析し、網平均処理して各測点の座標値を決定する方法でGPS測量方式のなかでは最も精度が良い。²⁾

(3) キネマティック測位

衛星からの信号を基準局と移動局の2点で同時に受信

し、基準局からの移動局の相対位置を求めるものである。移動局は、測点上を数秒ずつ測定し順次移動していく測量方式である。基準局は座標既知点に設置し、衛星から受信した搬送波位相やコードの情報を処理し、移動局では、移動局が衛星から受信した搬送波位相やコードの情報と基準局のデータを処理し、高精度に移動局の位置を求める。基準局のデータを移動局に送信し、リアルタイム（1回/秒）で移動局の位置を求める測位方法をRTK-GPSと呼んでいる。²⁾ (図-4)

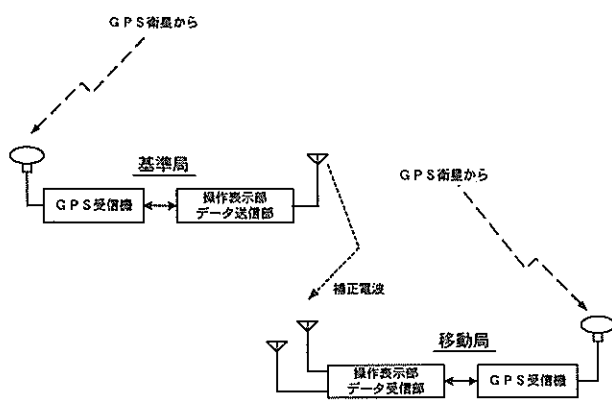


図-4 RTK-GPSの概念

(4) GPSの選択

本システム開発の目的である、迅速に測量できる効率的な測量システムを開発するためには、短時間で測量可能なGPSが必要である。そこで、高さ方向の精度は問題があるが、リアルタイムに高精度な位置測量が出来るRTK-GPSを選択した。高さ方向のデータに関しては、光学式の測量器により補正するものとする。

3.2 光学式測量機器の検討

光学式測量機器の特徴は、高精度であり一点当たりの計測時間も平均化の必要がなく高速であるが、光を利用していることと機構上の制約のため一度に測れる範囲は限られている。光学式測量機器の代表的なものを以下に示す。³⁾ (表-1)

(1) 自動追尾式光波測距儀 (ジオジメーター)

測距と測角が一台の機器で同時に測定できる電子式測距・測角機で、水平距離、高低差、目標点の座標が機械に組み込まれた計算機で自動的に計算されて出てくる仕組みになっている。

(2) 電子レベル

高精度の自動レベルに電子的に標尺目盛を自動的に読み取るバーコード方式の機能が組み込まれている。電子レベル専用標尺はインパール製の板に特異なパターン

(バーコード目盛) を刻んだものである。

(3) レーザーレベル

発光器から水平に照射されるレーザー光を回転させ、水平基準面を形成する。受光部は、このレーザー光線の中心位置を電子的に読みとり、測定基準面から受光した位置までの高さを自動的に読みとり記録する。

表-1 測量機器の特性

特 性	自動追尾式 光波測距儀	電子レベル	レーザーレベル
測量距離 (km)	約2.5km	直接測量では 約0.12km	直接測量では 約0.15km
精 度 (mm)	20~30mm (500m) 50~100mm (1km~2.5km)	2~3mm (1km)	10mm (1km)
再現性・ 反復性	良 好	極めて良好	やや劣る
夜間測量	可 能	不 可	自動化すれば 可能
気象による 悪影響	多 い	多 い	多 い
必要人員	本体側一設置 時のみ ターゲット常時 (1人)	本体側一常時 標尺一常時 (2人)	本体側一設置 時のみ 標尺一常時 (1人)
作業効率	自動化すれば 高効率	普通	自動化すれば 高効率

3.3 GPSと光学式測量機器の組み合わせの検討

GPSシステムの問題点は、高さの精度がリアルタイム測量の場合不十分なことであり、利点は測点の座標を簡単に得られることである。これに対して光学測量の問題点は位置の座標点を計測するために手間がかかることであり、利点は高さの精度が高いことである。

こうしたことから相互に補完し合うことによって極めて効率のよいシステムを構築できると考えられる。この際に必要な検討事項としては、GPSデータとの自動化を行うために光学測量機側のデータについても可能な限り自動的に電子化されるものが望ましい。また、少ない人員で計測できること、空港などの測量については夜間の使用が可能であること、システム全体のコストが小さくてすむことなどについて検討する必要がある。

(1) GPS (RTK) + ジオジメーター

GPS (RTK) + ジオジメーター方式を図-5に示す。

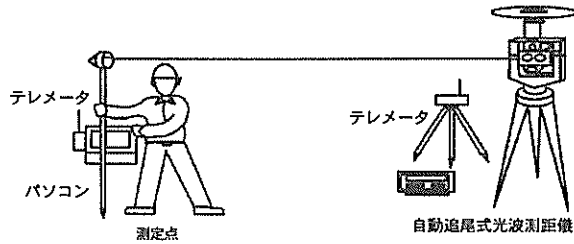


図-5 GPS (RTK) + ジオジメーター方式

ジオジメーターの長所

- ①計測可能距離が2～3 km まで可能。
- ②X, Y座標がリアルタイムで判るための測点までの誘導が可能である。
- ③ターゲットを自動追尾するため省力化が可能である。

短所

- ①装置が大きく、最初の調整に時間(15～30分)がかかる。
- ②座標結果がターゲットで判らないため伝送する必要がある。
- ③精度が水準測量器(電子レベル, レーザレベル)と比較すると一桁悪い
- ④高価である。

長距離の計測が可能であるが、数百m以上はGPSと同じような精度である上、上記のような短所があるためGPSとの組み合わせでのメリットがない

(2) GPS (RTK) + 電子レベル

GPS (RTK) + 電子レベル方式を図-6に示す。

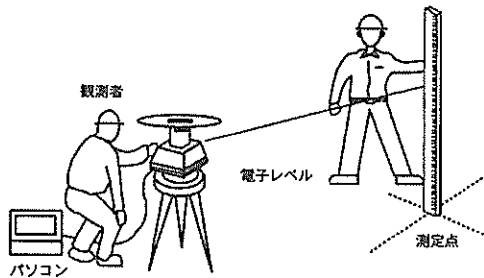


図-6 GPS (RTK) + 電子レベル方式

長所

- ①精度が数ミリと最も高精度である。

短所

- ①距離が100 m程度である。
- ②自動追尾ができない。
- ③X, Yの座標がでない。

④作業員が2名必要である。

高さの計測に関しては最も高精度であり、据え付けも容易である。しかし、水平位置がないため、GPS (RTK) を一緒に持ち運び標尺の位置を知る等の手段が必要である。その上、追尾のために作業員が2名必要であり省力化ができない。

(3) GPS (RTK) + レーザーレベル

GPS (RTK) とレーザーレベル方式を図-7に示す。

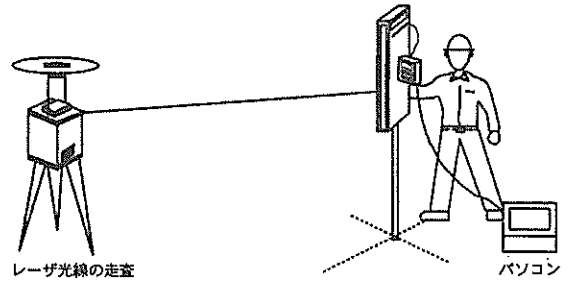


図-7 GPS (RTK) + レーザーレベル方式

長所

- ①精度が良い。
- ②読み取りが自動化できるため読み取り誤差がない。
- ③追尾の必要がない。
- ④レベル計の中では200～300 mの遠距離が測れる。

短所

- ①X, Yの座標がでない。

レーザーレベルは精度が数mmと高精度であり、目標を追尾する必要がないため省力化が可能である。水平位置ではないがGPS (RTK) を一緒に持ち運び標尺の位置をすることができる。

(4) 最適な組み合わせの決定

表-2に組み合わせによる比較をまとめたが、結論としては、夜間の使用が可能で、人員が少なく、かつ高さの精度を高く確保できるレーザーレベルとRTK-GPSの組み合わせを採用した。

表-2 組み合わせによる比較

組み合わせ方式	RTK-GPS+自動追尾光波測距儀	RTK-GPS+電子レベル	RTK-GPS+レーザーレベル
追尾	自動	手動	不要
高さ精度(150m)	GPSの精度+5mm	GPSの精度+1mm	GPSの精度+4mm
計測時間	瞬時	瞬時	瞬時

4. システムの概要と基本原理

4.1 システムの概要

RTK-GPSとレーザーレベルを組み合わせることにより相互の長所を生かし短所を保管したシステムを構築した。用途としては埋立地等の地盤沈下管理計測、空港エプロン及び滑走路等の管理などのような計測される対象の面積が大きく、かつ測点が多いケースの場合に適しており、大幅な省力化と効率化を達成するものである。

また、計測作業データの記録、データの解析、作図までの一連の作業がすべて一貫して自動化でき、省力化に優れている。さらに、実際の運用では計測場所の状況、計測内容に対応して、車両を利用する方法、人による方法などから利用しやすい計測方法を選択することが可能である。

本システムの期待される効果は箇条書きすると次のようになる。

- ① X-YはRTK-GPS, Zはレーザーレベルの精度を確保できる。
- ② 従来測量に比較して大幅に計測時間を短縮できる。
- ③ 作業の省力化と自動化が図れる。
- ④ 計測機器の設置から作図までの操作が容易となる。
- ⑤ 近くに基準点がなくても計測可能である。

4.2 基本原理

RTK-GPSはリアルタイムで遠距離の基準点から絶対値を計測できることを特徴としているが、その高さ方向の値は常時±3～5cm程度変動している。そのため、1～2cmの精度を要求される場合には、長時間のデータを平均化処理する必要がある。

また、レーザーレベルは位置を計測することができないが、高さを高精度で測定できること、データのばらつきが極めて少ないといった特徴がある。したがって、この組み合わせで両者の長所を利用し、欠点を補完することによって、位置と高さを十分な精度で測定するシステムを構築できる。(図-8)

(1) 測点の平面位置 (X-Y座標)

RTK-GPSにより求まる座標値を使用する。

(2) 測点の垂直位置 (Z座標)

① レーザーレベルによる水平発光面を基準面とし、各測点間の高さの相対位置をレーザーレベルにより測定する。

② 計測エリア内を測定している間に得られたRTK-GPSの高さ方向の測定値を平均化した値から基準面の

絶対高さを求める。

- ③ この2つの値から測点の垂直位置 (Z座標) 求める。
具体的に各測点の座標高さ (XH) の求め方を説明すれば以下ようになる。

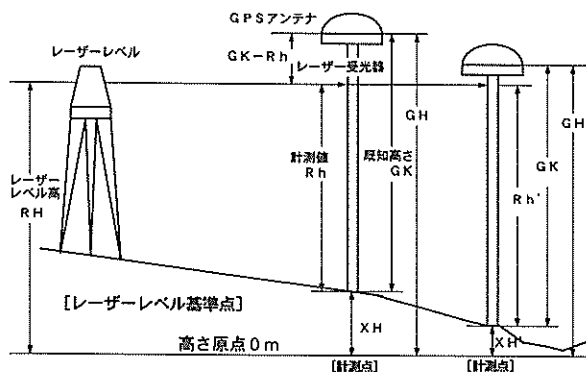


図-8 測量原理

- RH : レーザーレベル発光基準面の座標高さ
GH : GPSアンテナ位置の座標高さ
GK : レーザー受光器尺からGPSアンテナまでの寸法長さ
Rh : レーザーレベル計測値
XH : 計測点の座標高

まずレーザーレベル発光基準面の高さRHは、受光器上に固定したGPSによる計測高さGHをもとに次の式で求める。

$$RH = GH - (GK - Rh) \quad (1)$$

(1) 式の値には、GPS計測値を使用しているため、その変動誤差を含んでいる。この変動誤差は計測データを平均化することで少なくでき、かつ平均化の時間を長くとるほど精度が向上することがわかっている。このため、誤差を少なくするためにレーザー受光器の計測の間に計測したGPSデータの数だけ平均化する。

$$\overline{RH} = (1/n) \sum RH_i \quad (2)$$

平均化の時間は、高さの精度を十分確保するためには4時間以上のデータを平均化することが望ましい。

このようにして、各測点の正確な座標高さ (XH) は各点のRhデータと \overline{RH} を基準として求められる。したがって、レーザー受光器を移動しながら複数の計測点の計測を行っている間に、GPSとレーザー受光器の高さの値を連続的に収録しておくことで後処理によるレーザ

ーレベルの基準点の高さの平均化を行い、計測点の高さを精度よく求めることができる。

$$XH = \overline{RH} - Rh \quad (3)$$

本システムでは、GPSデータを長時間取得し、平均化処理することにより測量精度が向上するが、測量時間が必要なGPSデータの平均時間に満たない場合は、測量終了後、測量区域近傍でGPSデータの取得のため定点観測を行いこの定点観測時間と測量時間の合計がGPSデータの平均化時間を満たすようにすれば良い。

4.3 GPSを基準とした測量とベンチマークを基準とした測量

本システムでは、GPSを基準とした測量とベンチマークを基準とした測量という2つの方法で測量を行うことが出来る。

両者の違いは、レーザーレベルの基準高さの求め方の違いによる。

(1) GPSを基準とした測量

4.2節で説明した方法である。レーザーレベルの基準高さを求めるのに、GPSの高さデータの平均値を用いるため、水準測量で必要であった空港外の基準点からの盛り換え作業が不要である。

(2) ベンチマークを基準とした測量

従来測量と同様に、測量範囲内に仮ベンチを設け、仮ベンチ上で計測したレーザーレベルの高さデータからレーザーレベルの基準高さを求めるものである。この方法では、従来の水準測量と同様に空港外の基準点からの盛り換え作業が必要である。

しかし、基準点が従来測量と同じであるため、従来の測量データとの整合性が取り易くなる。

5. 本システムの水準測量精度に関する検討

測量システムを構成する要素機器および測量システムの特長、精度等を確認するための実験を行った。

5.1 レーザーレベルの精度確認実験

レーザーレベルは、本体から水平に回転照射される赤外線レーザーと受光器の組合せで半径150m以内の水準測量が1人で簡単に行える。また、データ出力は受光器側にあり、測点側でデータ取得出来るものである。

水平精度：±10"（150m離れて±7.3mm）

分解能：1mm

測定可能範囲：1m～150m

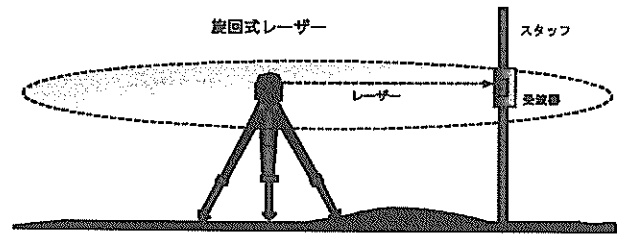


図-9 レーザーレベル

風、天候がレーザーレベルの精度に及ぼす影響を調べるために実験を行った。

表-3に使用した機器を示す。

表-3 使用機材一覧

使用機器	型式	メーカー	仕様
レーザーレベル	AL-50	Nikon	水平精度±15"以下 測定範囲175～200m
電子スタッフ	EPS-05A	Nikon	分解能1mm 測定範囲1～150m
風速計	AM-09S	リヨン	測定範囲0.05～25m/s
三脚			昇降ストローク700m(改造)
ノートパソコン	pc-9821	NEC	

(1) 風速による影響

実験条件

- ・自然風の影響を避けるため室内にレーザーレベルと風速計を設置

- ・レーザーレベルと電子スタッフの距離は100m

- ・送風機により風速0,2,5,10m/sの4種類の風を当てた。

実験結果

- ・風速0～5m/sまでは、上下の最大振幅（P-P値）で4mm前後

- ・風速10m/sでは、P-P値で36.9mm

- ・レーザーレベルと電子スタッフの距離100mに於いて風速5m/sまでは、風の影響を受けることなく測量が可能である。

表-4 風速による変動

風速 (m/s)	0	2	5	10
P-P値 (mm)	3.9	4.2	3.6	36.9

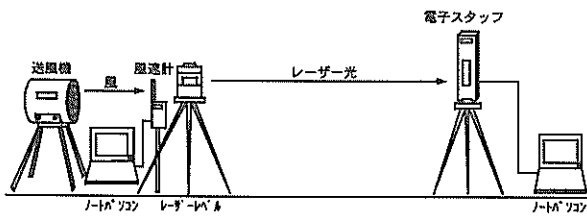


図-10 風速に関する実験

(2) 風向による影響

実験条件

- ・自然風の影響を避けるため室内で実験した。
- ・レーザーレベルと電子スタッフの距離は 20 m
- ・送風機により風速 10m/s の風を 3 方向から当てた。

実験結果

- ・風向による大きな差はない。

表-5 風向による変動

角度 (度)	90	180	270
変動幅 P-P 値 (mm)	2.8	2.1	2.4

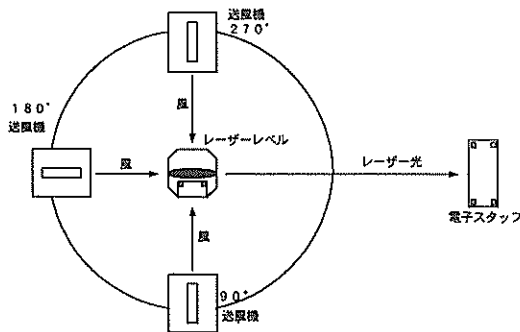


図-11 風向に関する実験

(3) 繰り返し精度

実験条件

- ・レーザーレベルと電子スタッフの距離は 100 m
- ・装置は固定したままレーザーレベルと電子スタッフの電源の ON,OFF を行う。

実験結果

- ・20 分間の計測データの平均値は、1mm 以下で再現性は良い。

表-6 繰り返し精度

	1 回目	2 回目	3 回目
平均値 (mm)	523.3529167	523.3923333	523.4592469

(4) 雨による影響

実験条件

- ・晴天時と降雨時に屋外で測定実験を行った。
- ・レーザーレベルと電子スタッフの距離は 100 m

実験結果

- ・20 分間の計測値の平均値、P-P 値とも 1mm 以下で雨の影響は無い。

表-7 雨による影響

天候	平均値 (mm)	P-P 値 (mm)
晴れ	523.4	4.8
雨	523.9	5.4
晴れ-雨	0.5	0.6

(5) まとめ

実験結果をまとめると以下のような結果となる。

- ・風速 5m/s までは、測定精度は風の影響を受けない。
- ・距離 100m において、最大変動幅は 4mm 程度である。
- ・風向による測定精度への影響はない。
- ・繰り返し測定による再現性は良い。
- ・雨による測定精度への影響はない。

5.2 RTK-GPSの高さ方向の精度と平均化処理

図-12は、移動局を基線長 2.5km の地点に固定して RTK-GPS で観測した場合の高さ方向の測定値の変動を示すものであり、時間と共に大きく変動しているのが解る。この変動は電離層や対流圏、マルチパスなどの影響によって発生するもので白色雑音と周期性を持った成分を合成したものと考えられる。

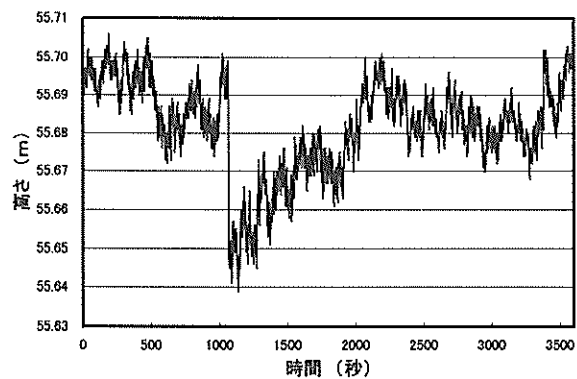


図-12 高さ方向のデータ

白色雑音は正規分布であるから、平均処理することによって変動を小さくすることが出来る。平均時間と精度

との関係を求めるため、8時間の観測データの平均値を最確値とみなし、t時間(t=30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420分)ごとの平均処理を繰り返し行い、t時間の平均値と8時間の平均値(最確値)との残差の関係を求めた。その結果を図-13に示す。図から平均化処理時間が長くなるにつれ残差が減少し、2時間以上の平均処理を行うことで最確値との差は10mm以内、4時間以上の平均処理で5mm以内になることが解る。図-13から解るように平均時間が4~5時間で安定した状態となりその後更に小さくなる傾向にあるが、測量時間等を考慮して本システムでは4時間を平均時間とする。

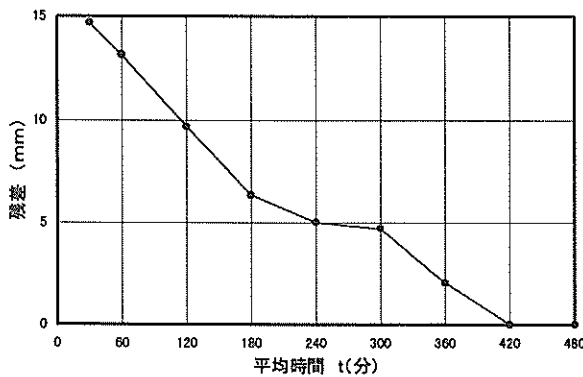


図-13 平均処理時間と高さ精度の関係

そこで、基線長が4時間平均処理に及ぼす影響を実験により求めた。基線長を2.5km, 6.0km, 9.5km, とし、それぞれ8時間の連続観測を行った。

各基線長毎に全データの平均を最確値とし、4時間平均値と最確値との差を求め標準偏差を算出した。さらに、最小二乗法にて測定精度(標準偏差)の線形近似直線を求めると次のようになる。

$$\text{測定精度 (標準偏差) (mm)} = 6 + S \quad (4)$$

S : 基線長 (km)

5.3 本測量システムの高さ方向の精度に関する検討
高さ方向の精度に関係するものとしては、GPSの精度、レーザーレベルの精度、超音波センサーの精度がある。

(1) RTK-GPSの高さ方向の測定精度

RTK-GPSの精度は、5.2節で求めた4時間平均による基線長に対する値を採用する。

$$\text{測定精度 (mm)} = 6 + S$$

(2) レーザーレベルの精度

レーザーレベルの精度は、レーザー光の水平精度で決

まり、カタログ仕様による値は、±10"以内であり100m先での理論精度は

$$100 \times \tan(10'') = 4.8\text{mm}$$

であるが、強風の影響にない範囲では、距離100mにおいて4mm前後のばらつきであった。

(3) 超音波センサーの精度

車高計に使用する超音波センサーの精度は、カタログ値では±1%FS(300mm)であるが、実測では、100~280mmの計測範囲内で、誤差が±0~1mmであった。

(4) システム全体の精度

システム全体の精度は、各誤差の総和として次式で表される。

システム全体の精度=

$$\sqrt{(\text{GPS})^2 + (\text{レーザーレベル})^2 + (\text{超音波センサー})^2} = \sqrt{(6+S)^2 + 4^2 + 1^2} \quad (5)$$

ここで、システム全体の精度は標準偏差で現され、水準測量の精度は往復の測定較差で表示されているため両者を比較するために、水準測量の精度を標準偏差に変換する。水準測量において往復の測量を行った場合、最確値の標準偏差の推定値 m_0 は次式で表される。

$$m_0 = \sqrt{d^2 / 4} \quad (6)$$

d : 往復の較差 (往復観測の差)

2級測量の場合 $d = 5\text{mm} \sqrt{S}$ であるので

$$m_{02} = 2.5 \sqrt{S} \quad (7)$$

3級測量の場合 $d = 10\text{mm} \sqrt{S}$ であるので

$$m_{03} = 5 \sqrt{S} \quad (8)$$

4級測量の場合 $d = 20\text{mm} \sqrt{S}$ であるので

$$m_{04} = 10 \sqrt{S} \quad (9)$$

図-14は、本システムによる精度及び2級から4級水準測量の精度と基線長の関係を表したものである。グラフから解るように3級水準測量に僅かに及ばないものの非常に近い値を示している。

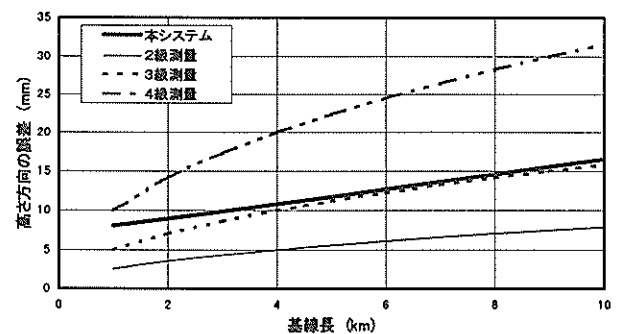


図-14 基線長に対する測定性誤差

図-15は、本システムと3級水準測量の精度の差と基線長の関係を示したものであり、基線長3.5km以上の範囲は、両者の差は1mm以下であることが解る。以上の結果から、本システムの精度は3級水準測量に僅かに及ばないものの、基線長3.5km以上では、ほぼ3級水準測量相当の精度を満たしているものと判断する。

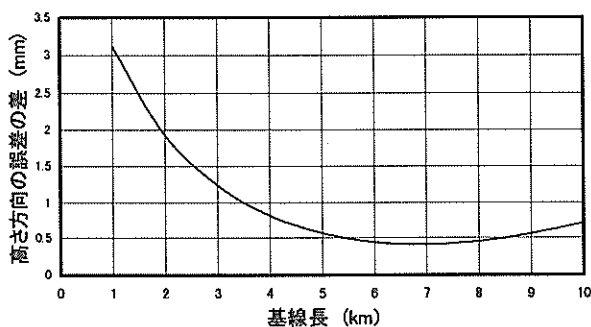


図-15 本システムと3級測量の精度の差

(5) まとめ

本システムの精度をまとめると以下ようになる。

- ・水平方向精度 (X-Y) は、RTK-GPSの測位精度となり $1\text{cm} \pm 2\text{ppm} \times \text{基線長}$ で表される。
- ・計測車方式と台車方式の高さ方向の精度 (Z) は、4時間以上RTK-GPSの測定を連続した場合、3級水準測量に僅かに及ばないものの、基線長3.5km以上では、ほぼ3級水準測量相当の精度を満たしている。

6. 測量システムの構成

6.1 基本部

(1) 基本的な構成

システムの基本部は、測点を移動するための車両等に積載する機器としてはRTK-GPS移動局および基準局からのGPS補正データの受信機、レーザーレベルの受光器、これらのデータ解析用パソコン等である。このほかは、RTK-GPS基準局、レーザーレベル発光器が主な機器となる。

運用については、コンピュータ処理により各種情報をリアルタイムでモニタ画面に表示し、測点を移動しながらデータ収録可能とする。GPS電波が遮断される地区に移動した場合には自律航法を用いて測位を続け、測量の中断を防止し、効率の高さを維持する。

さらに収録したデータの後処理を自動演算するととも

に、精度向上のための各種の補正を行えるようにシステム構築を行った。本測量システムは、計測車によるシステム、計測車が走行困難な場所での計測を考慮して、台車によるシステム、人力によるシステムの3種類のものに対応している。

(2) 運用形態

レーザーレベルを測量エリアの中心付近に設置し、GPSとレーザー受光器を搭載した測定車が測線に沿って走行しながら連続的に測量を行う。(図-16, 17)

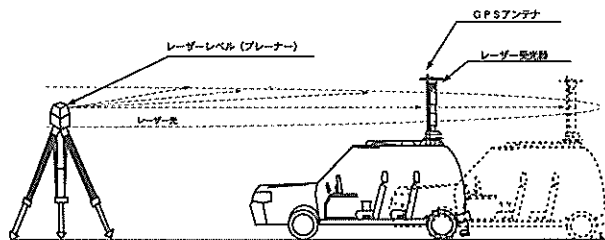


図-16 システム運用概念図

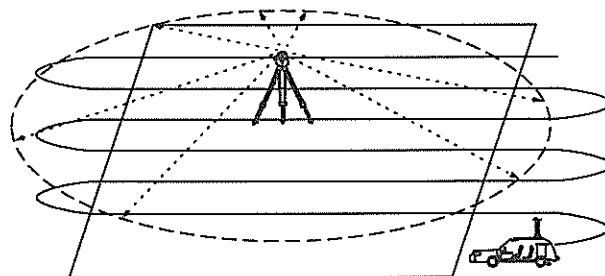


図-17 システム運用概念図

(3) 計測車によるシステム

本システムは、移動速度が早いいため作業効率が向上し、連続的にデータを取得するため、平均化処理を行うGPSの測定精度の向上が期待できる。また、車内で計測するため、天候の影響を受けず作業環境が向上する等の利点がある。一方、走行中の車体の挙動を検出し、データを補正する必要がある。

計測車の挙動を検出するため以下の補正機構、補助機構が装備されている。(図-18, 写真-1)

- ①車高計測
- ②傾斜計測
- ③レーザーレベル受光器回転装置
- ④モニタシステム
- ⑤自律航法

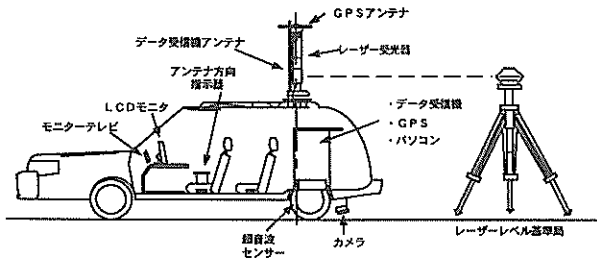


図-18 計測車システム機器配置図



写真-1 計測車システムの測量状況



写真-2 台車システム全景

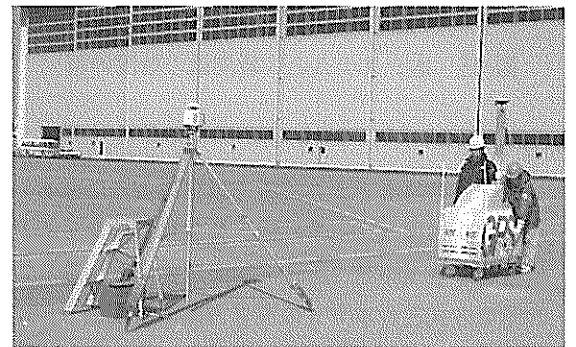


写真-3 台車システムの測量状況

(4) 台車によるシステム

計測車が走行できない場所では、計測システムを台車に搭載して台車を移動させながら計測車と同様の要領で計測する。また、計測車と同様な補正機構、補助機構が装備されている。(図-19、写真-2、3)

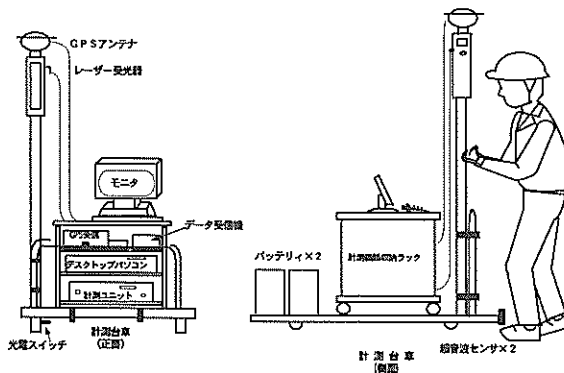


図-19 台車システム機器配置図

(5) 人力によるシステム

計測車、台車ともに走行できない場所では、最小限の機器にて人力で移動しながら計測する。補正機構、補助機構は装備されない。(図-20、写真-4)

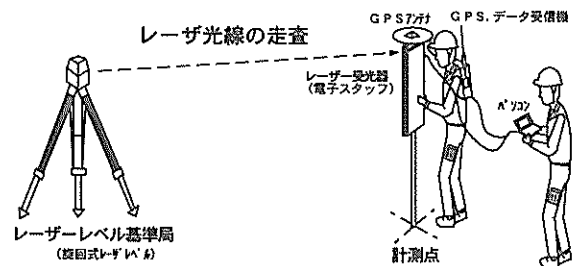


図-20 人力システム機器配置図



写真-4 人カシステムの測量状況

6.2 補正機構

本システムによる測量の場合、走行しながら連続的に測量するため車高の変化、GPS電波の遮断等の様々な誤差要因が発生する。そのため、これらの誤差要因を取り除き、リアルタイムにおける測量や後処理による地盤高の算出で測量システム全体の精度を向上させるため各種補正機構の開発を行った。

(1) GPSとその他の機器の計測信号の同期補正を行う機構

GPS受信機は、衛星からの電波を受信してから0.5～3秒間演算を行った後、測量結果を出力している。この演算時間は、GPS受信機の機種やGPS衛星の配置状況により変化する。そのため、本システムのように移動しながらGPSによる測位結果とレーザーレベル、その他の機器を組み合わせる場合には、全てのデータの同期を取る必要がある。

a) GPSの測位時刻

図-21に示すように、GPSからは1秒ごとにUTCといわれる協定世界時刻に同期した正確なパルスが出力され、このパルスの前にUTC時刻がシリアルポートからアスキー形式で出力される。したがって、シリアルポートからの出力を読みとることにより、パルス出力時の時刻を知ることができる。図-21では、測位結果の時刻が測位データGKの後に出力されており、9時50分30秒であるためS1の位置で測位していることが解る。なお、GPS受信機は、パルスの位置でGPS衛星からの電波を受信しており、管理時間は1秒単位が基準となっている。

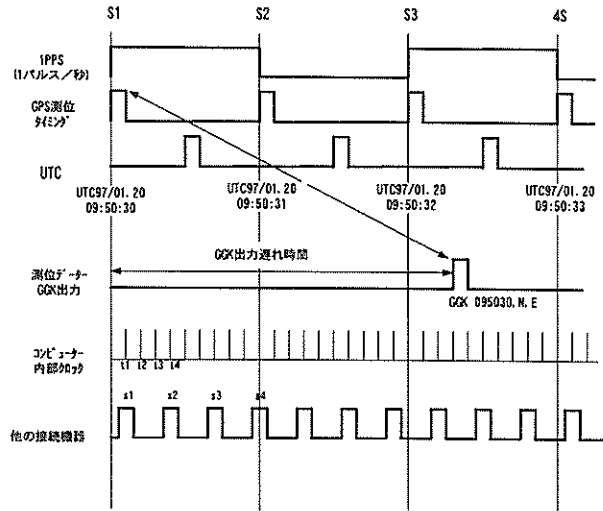


図-21 GPSと他の機器のタイムチャート

b) 他の機器との同期の方法

図-21に示すように、GPSのパルス信号と同期してコンピュータ内部にクロック(1/100秒)を作り、GPS以外の機器からのデータにタイムタグを付ける。各機器は、独自の時間管理で動いているため、GPSの測位時刻と各機器の測定時刻は完全には一致しない。このため、図-22に示すように、GPSの測位時刻に近い前後時刻の計測機器のデータを比例配分により直線補完する。

例として、図-22よりGPSの測位時刻TGの時の他の機器の測定データは、時刻T2、T3の測位データより次式で表される。

$$\Delta D = (D_3 - D_2) / (T_3 - T_2) \quad (10)$$

$$DH = D_3 + (T_3 - TG) \times \Delta D \quad (11)$$

DH : 時刻TGの時の測定データ

D_n : 時刻T_nの時の測定データ

T_n : 計測機器の測定時刻

TG : GPSの測位時刻

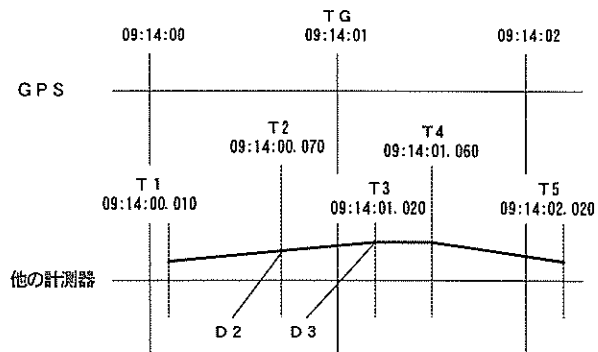


図-22 GPSと他の機器の同期補正

(2) 計測車・台車の傾斜を検出し、補正を行う機構

計測車・台車方式の場合、人の乗車位置や地盤の傾斜などの影響を受けて水平座標（X-Y座標）と高さ座標（Z座標）が変化する。この誤差を補正するため、傾斜計を取り付けピッチ角とロール角を測定し、水平座標（X-Y座標）と高さ座標（Z座標）の補正を行っている。

(3) 計測車・台車の車高の高さを検出し補正を行う機構

計測車・台車は走行しながら測量するため車高の変化が生じる。この原因は、搭載人員、燃料の量、タイヤの空気圧或いは走行による上下動の変化等である。車高の高さを検出し、測量高さを補正するものである。

計測車は、レーザーレベルの直下の左右に超音波距離計を2個取り付け、2個のセンサーからのデータを比例配分してレーザーレベル直下の車高を算出している。

台車は、走行距離測定用のタイヤをレーザーレベル直下に取り付け、タイヤの上下動をポテンショメーターにより検出し、レーザーレベル直下の車高を算出している。

(4) 共通計測点によるエリア間高さの補正と閉合処理

本システムは、人工島や空港のように数キロのわたる広範囲の測量を実施する場合、レーザーレベルの使用範囲が150mであるため測量エリアを分割して測量しなければならない。この場合、分割した各測量エリアのレーザーレベルの水平基準面を補正して同一水平面とすることにより各測量エリアが連続性を持つため、長時間連続測量をしたのと同様となり、3.3節で述べたように、GPSの平均化時間を十分に確保できるようになる。このため、GPSの高さ方向の精度が向上する。また、測量エリアのレーザー基準局を最後に閉合させることにより閉合差を求め、その差を各測量エリアで再配分することで精度が向上する。

a) 高さ補正の方法

各測量エリアが重なり合う様に測量エリアを設定し、重なった範囲内で数点の共通計測点を設定する。各共通計測点でのレーザーレベルの高さの差を平均化処理して計測し補正する。(図-23)

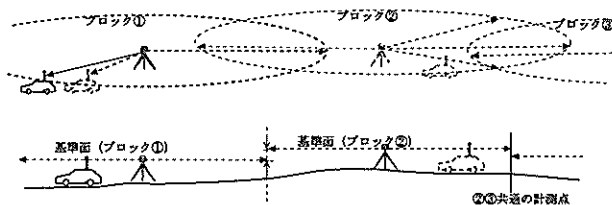


図-23 エリア間の高さ補正

b) 閉合処理の方法

測量データを測量終了後に誤差を配分し精度を向上させる必要がある。

計算例として4つのエリアを閉合する場合の演算式を以下に示す。(図-24)

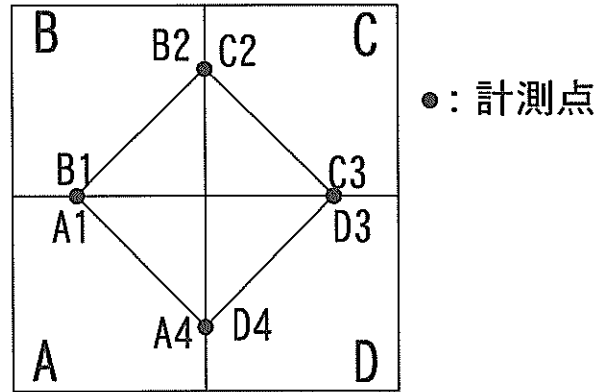


図-24 共通計測点と測量エリア

$$\delta H = (A4 - D4) / (M - 1) \quad (12)$$

$$H_n = H_n - (\delta H \times N) \quad (13)$$

- A4 : 閉合処理の始点の高さ
- D4 : 閉合処理の終点の高さ
- M : 閉合処理を行う面の個数
- δH : 補正值
- N : 0 ~ M - 1 までの整数
- H_n : 計測点の高さ

(5) 計測可能な高低差の範囲及び平面的な範囲を拡張するのに必要な機構

レーザーレベル受光器の受光有効長は500mmであるため、勾配が大きな地区での計測では、レーザーレベル基準局を頻繁に移動する事になるため、作業効率の低下と計測範囲の縮小を招くことになる。

これを避けるため図-25に示すようにレーザーレベルを取り付ける三脚に約700mmの上下スライド機構をもたせた。

台車方式では、レーザーの受光範囲をさらに拡張するため台車側の受光器を500mm昇降する機構を設けた。

なお、レーザーレベルの昇降の値は、パソコンに記録され、補正データとして保存される。

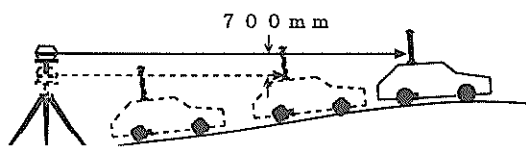


図-18 レーザーレベルの昇降

(6) 自律航法により測位を補完する方法

本システムは、滑走路のように天空が開けた場所では安定して測量が出来る。しかし、建物付近等ではGPS衛星からの電波が遮断されたりマルチパスによって、GPSが測位出来ない場合がある。この場合、GPSに代わる測位システムを併用することにより、測量を継続することが出来る。本測量システムでは、GPSと併用して自律航法を採用した。

自律航法は、移動体の移動距離と進行方向の角度から移動体の位置を演算によって求めるものである。

移動距離の検出は、計測車方式はドライブシャフトに光電スイッチを取り付けパルスを計測した（距離検出分解能は 6.28cm / パルス）。台車方式は距離計測専用車輪にロータリエンコーダを取り付けパルスを計測した（距離検出分解能は 0.23cm / パルス）。

角度検出は計測車・台車方式とも光ファイバージャイロを用い角速度を検出し、演算により角度を求めた。

一般的な自律航法の精度は3～5mであるが、本システムではより高精度な自律航法システムの開発を行った。詳細については、後で述べる。

(7) ジオイド傾斜によるGPS計測高さの補正

ジオイド (geoid) とは、「地球重力の等ポテンシャル面のうち平均海面に一致するもの」であって、簡単にいえば仮に地球全体に水を張ったときの水面の形である。

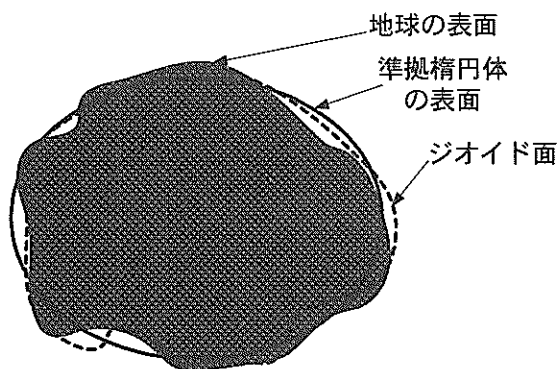


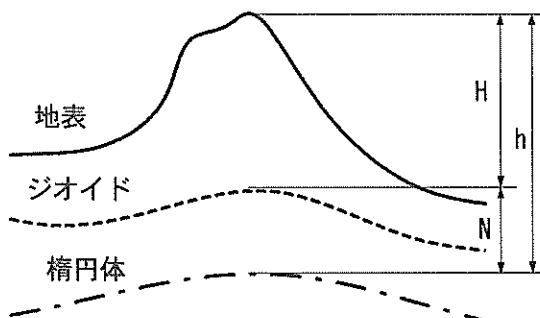
図-26 ジオイド概念図

図-26にジオイド概念図を示す。地球は、正確には球ではなく赤道方向にわずかに膨らんでいる。地球の半径約 6,400km に対して膨らみは 21km ぐらいで、0.3%程度で

ある。しかし、精密な測量ではこの膨らみは無視できない。そのため、各国、地域によって異なった楕円体を地球の形として採用し、それを測地の基準とする準拠楕円体としている。ジオイド面の凹凸の程度は最高点から最低点の間で 150m 以上にも及ぶ。なお、ジオイドには地球の自転による遠心力が含まれている。

在来の測量で準拠してきた水平面とはジオイド面またはこれに平行な面である。とくに標高はジオイド面からの高さとして定義されている。図-27に示すように、GPSの測量で得た楕円体高 (h) から在来測量の標高 (H) を求めるには精密なジオイド高 (N) が必要であるが、精密なジオイド高は不明であるので、以下の要領でジオイド高補正を求める。

- ①空港内の複数の水準点にGPSを設置し長時間測量する。
- ②各点のGPS測量高さ和水準点高さの差のジオイド高を求める。
- ③各点のジオイド高からX軸成分とY軸成分のジオイド傾斜を求める。
- ④計測点の位置座標から高さのジオイド補正量を比例計算で求め補正する。⁴⁾



H標高：ジオイド面からの高さ
 h楕円体高：楕円体面からの高さ
 Nジオイド高：楕円体とジオイドの差

図-27 標高と楕円体高

(8) GPS基準局からの補正電波の受信障害対策

RTK-GPSは、基準局からの補正情報をデータ受信機により受信して位置測定を行っているが、建物の近くや、電波障害等により補正情報を受信できない場合がある。これを解消するため、図-28に示すように補正情報を常に受信できる建物の屋上等に受信機を設置し、これに特定小電力無線機の送信機を接続して中継局を構成する。

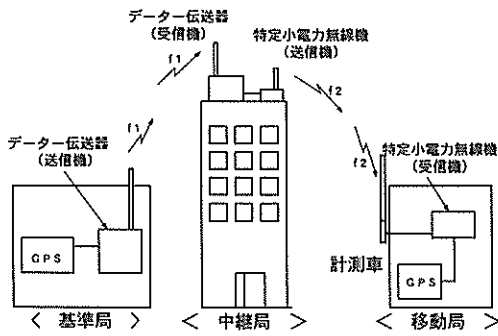


図-28 補正情報の中継局

(9) 測線誘導

測点上に計測車、台車の誘導を容易にするためにパソコン画面に計画測線、現在位置、移動軌跡、計画測線からのずれ量、車速等のデータをリアルタイムに表示する。図-29が測線誘導画面である。

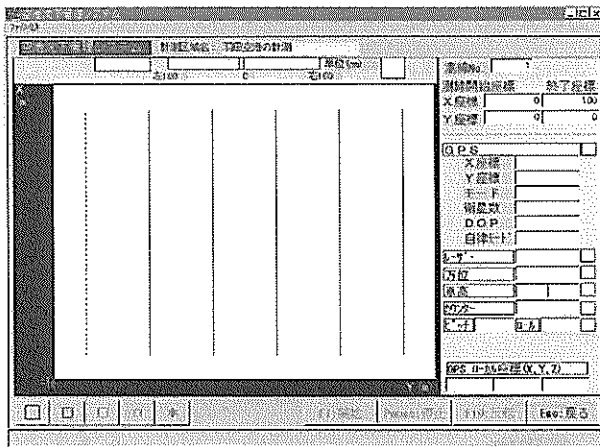


図-29 測線誘導画面

(10) 格子点補完

計測車・台車方式で測量を行った場合、計画測線の真上を走行することは難しいため図-30に示すように計測点が計画測点と一致する事はほとんど無い。そのため、計測点データを使用し、計画測点上の値を求める必要がある。補完の方法は以下による。

①図-30に示すように、計画測点の近傍のGPSデータ2点を抽出する。

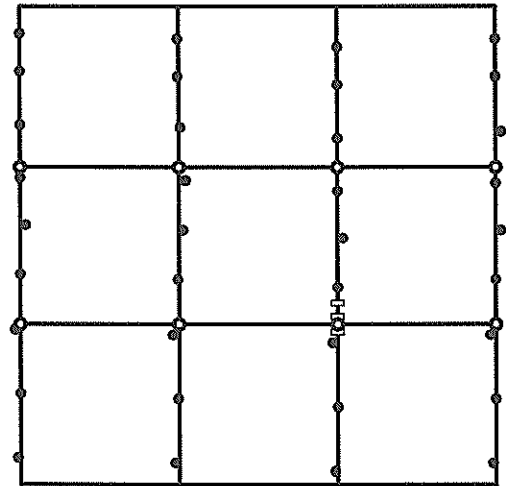
②抽出した2点のGPSデータの時刻の間に計測したレーザーレベルデータを抽出する。

(レーザーレベルデータは、1秒間に3回測定されるため2点のGPS測定時刻の間には3点のデータが得られる。)

③GPSの(X-Y)座標データから、レーザーレベ

ルのデータに時刻に対する比例配分により(X-Y)座標を付ける。

④3点のレーザーレベル座標データから、計画測点に近い2点を抽出し、この値を比例配分して計画測点のレーザーレベルデータとする。



- : 計画測点
- : GPS計測点
- : レーザーレベル計測点

図-30 計画測点と計測点

6.3 自律航法の検討

自律航法は、GPSの測位精度の信頼性が落ちたときに、計測車、台車の相対位置の変化を計測するものである。これにより、GPSの測位が不可能な区間に入っても連続して測量が可能になる。

(1) 機器構成

自律航法ユニットは、図-31に示すように32bit CPUを搭載した演算ボードにジャイロ、GPS、車速センサーが接続されている。GPSが高精度で測位しているときは、自律航法ユニットはGPSの測位データをそのまま出力し、GPSの測位精度の信頼性が落ちたときは、自律航法ユニットが独自に演算して得た測位データに置き換え出力する。

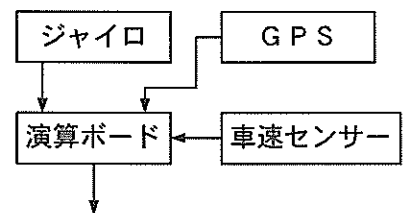


図-31 自律航法機器構成

本システムは、GPSと自律航法によりX座標とY座標を算出しているため、GPSの測位が失われたときに自律航法への切り替えを行う。切り替えは、ディファレンシャル測位、単独測位、フロートの状態に移行したときに行う。また、GPSの瞬時のエラーに対応するため、データ欠落時にも自律航法に切り替える。

(3) 後処理補正

計測データ収録後、GPSの測位時刻遅れを検出しGPSと同時に自律測位データで位置を演算する。

位置データの補正計算は次式による。

$$\theta_i = (\alpha + \Delta\alpha) + \sum \{(\omega_i + \Delta\omega) \times T\} \quad (14)$$

θ_i : 方位角 (rad)

α : GPS方位 (受信がとぎれる直前の方位) (rad)

$\Delta\alpha$: 初期方位誤差 (rad)

ω_i : ジャイロの検出回転角速度 (rad/s)

$\Delta\omega$: ジャイロの角速度ドリフト (rad/s)

T : データ計測間隔 (s)

測位位置座標 (X_n, Y_n)

$$X_n = \sum \{(L_i + \varepsilon \cdot L_i) \times \sin(\theta_i)\} \quad (15)$$

$$Y_n = \sum \{(L_i + \varepsilon \cdot L_i) \times \cos(\theta_i)\} \quad (16)$$

L_i : 車速検出パルス

ε : 距離誤差係数

式(6),(7),(8)の未知数は $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$, ε であり、 $\Delta\alpha$ はGPS受信が途絶える以前の方位平均値から、 $\Delta\omega$ はGPS受信復旧後の方位から推定、 ε はGPS再受信位置から求める。

(4) ジャイロの選択

角度検出用機器の中から、表-8に示すように本システムの自律航法には、精度、経済性、安定性、保守性の面から光ファイバージャイロを採用した。

表-8 角度検出用ジャイロの特性

種類	精度	価格	保守性	本システムへの摘要性
機械式ジャイロ	高	高	不良	×
振動ジャイロ	低	安	良好	×
光ファイバージャイロ	中	中	良好	○

(5) 光ファイバージャイロの誤差に関する実験

光ファイバージャイロは原理上、傾斜による影響とドリフトにより誤差を生じるため実験により確認した。

a) 傾斜角度による影響

光ファイバージャイロは角速度を検出しているため、

ジャイロの傾斜により誤差を生じる。この誤差を定量的に把握するため実験を行った。

実験は水平面上にジャイロを固定し、傾斜角度をそれぞれ10°, 20°, 30°と変化させて一回転させ、傾斜角度と出力値の関係を調べた。図-32に結果を示す。

傾斜角度が20°以上では誤差が大きくなるため補正が必要となる。補正は、実験から次式で可能となる。

$$\theta_{AF} = \theta_{BF} / \cos(\theta_{RP}) \quad (17)$$

θ_{AF} : 傾斜補正後のジャイロ検出角度

θ_{BF} : 傾斜補正前のジャイロ検出角度

θ_{RP} : ジャイロの傾斜角度

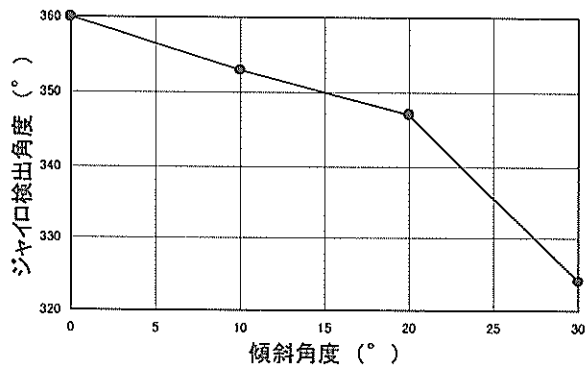


図-32 光ファイバージャイロの傾斜による影響

b) ドリフトの測定

ドリフト量を定量的に把握するため、光ファイバージャイロを水平面に固定し、1時間連続してデータを収録しドリフト量を計測した。図-33に測定結果を示す。

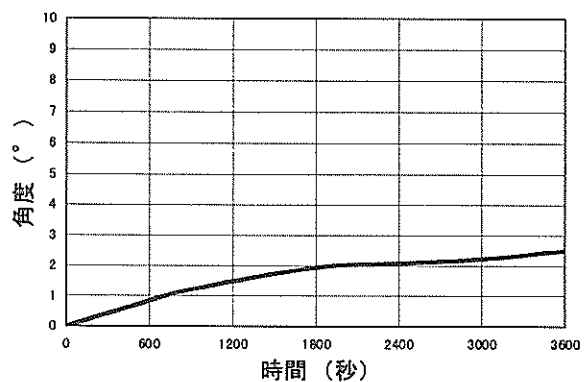


図-33 光ファイバージャイロのドリフト

1時間のデータは非線形的に変動しているが、15分間ではほぼ直線的に変動していると言える。15分程度以

ではほぼ直線的に変動していると言える。15分程度以下の測定では、ドリフト量を計測時間で比例配分することで補正が可能である。

(6) 走行距離計

a) 計測車

市販の自動車では速度計とトリップメータに速度と走行距離を表示するため、速度信号検出器が装備されている。一般にこの速度信号は車載コンピュータに取り込まれ、出力端子から信号を取り出すことが出来る。

また、これとは別にエンジンの動力を駆動輪に伝えるためのドライブシャフトの回転数を計って走行距離を求めることができる。検出方法は、ドライブシャフト（外形φ60mm）の円周上に反射テープを均等に8枚貼り、光電スイッチにより反射光を検出し、ドライブシャフトの回転数を求めるものである。

この2方式について、実測により分解能、精度について調査した。

表-9 車載コンピュータ検出方式

パルス計数値	1	5	10	15
走行距離 (cm)	39.5	201.0	372.3	622.0
1°あたり走行距離 (cm) (距離計数)	39.50	40.20	37.23	41.47
距離計数平均値 (cm/°)	39.60			

表-10 ドライブシャフト（光電スイッチ）検出方式

パルス計数値	1	5	10	15
走行距離 (cm)	6.5	30.0	62.0	96.3
1°あたり走行距離 (cm) (距離計数)	6.50	6.00	6.20	6.42
距離計数平均値 (cm/°)	6.28			

表-9, 10より光電スイッチ方式は、車載コンピュータ方式より分解能で優れており、機器の取り付けも、車体を改造することなく容易に取り付けられることから、光電スイッチによる検出方式を採用した。

b) 台車

台車に速度検出用の車輪をレーザーレベル受光器の直下に取り付けた。この車輪のシャフトの回転を検出するためロータリーエンコーダによる方法と光電スイッチによる方法の2種類について検討した。

この2方式について、実測により分解能、精度について調査した。

表-11, 12から分解能は、ロータリーエンコーダ方式が優れていることが解る。

表-11 ロータリーエンコーダ検出方式

パルス計数値	303	301	302
走行距離 (cm)	70	70	70
1°あたり走行距離 (cm) (距離計数)	0.23	0.23	0.23
距離計数平均値 (cm/°)	0.23		

表-12 光電スイッチによる方法

パルス計数値	8	8	8
走行距離 (cm)	70	70	70
1°あたり走行距離 (cm) (距離計数)	8.75	8.75	8.75
距離計数平均値 (cm/°)	8.75		

応答特性に関しては、光電スイッチの最大応答回転数は6,000rpmであり、本装置の場合、検出軸に8枚の反射テープを貼ってあるので、最大応答回転数は、

$$6,000 \div 8 = 750\text{rpm}$$

となる。

ロータリーエンコーダの応答特性は、自律航法ユニットのカウンターボードの応答特性が1kHzでロータリーエンコーダの出力パルス数は300パルス/回転であるので、最大応答回転数は、

$$1000(\text{Hz}) \div 300(\text{パルス/回転}) \times 60(\text{秒}) = 200\text{rpm}$$

となる。

表-13 速度検出の応答特性

検出方式	計測車		台車
	光電スイッチ	ロータリーエンコーダ	光電スイッチ
最大応答回転数 (rpm)	750	200	750
距離計数 (m/°)	0.0628	0.0023	0.0875
最大応答速度 (km/h)	22.6	8.3	31.5

表-13から、走行速度に対する応答性は光電スイッチ方式が優れているが、実際の走行速度は人間の歩行速度（時速4km程度）並であるので、分解能の点からロータリーエンコーダ方式を採用することとした。

(7) 前進・後進の検出方法

自律航法ユニットは、計測車・台車の前進・後進を判別しなければならない。計測車の場合は、バックランプからの電圧により前進・後進の処理を行うこととする。台車の場合は、手動で前進・後進の切り替え処理をする。

(8) 自律航法の精度確認実験

台車、計測車に装備した自律航法ユニットの精度を検証するための実験を行った。

①実験方法

台車、計測車ともに100mの距離を直線走行し、Uターンして往復し、この間のGPSによる測位データと自律航法による測位データを収録した。

また、自律航法の測位精度を向上させるため、後処理にて自律航法データの補正を行った。

②実験結果

図-34、35は、台車、計測車による自律航法データと自律航法補正演算結果をGPS測位データとの差で表したものである。

自律航法とGPSとの測位置の差は台車が最大3.8m、計測車が最大7.7mであった。

自律航法補正演算結果とGPSとの測位置の差は台車が最大0.3m、計測車が最大0.41mであった。

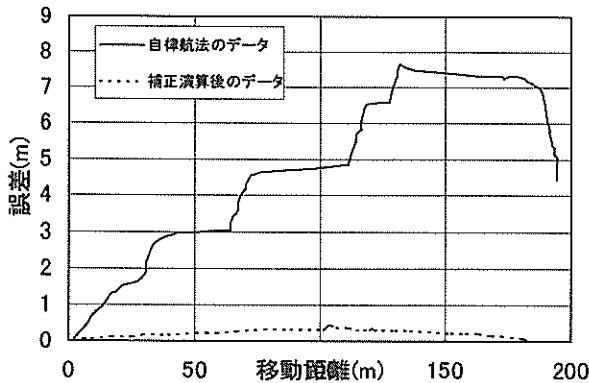


図-34 計測車による自律航法の精度

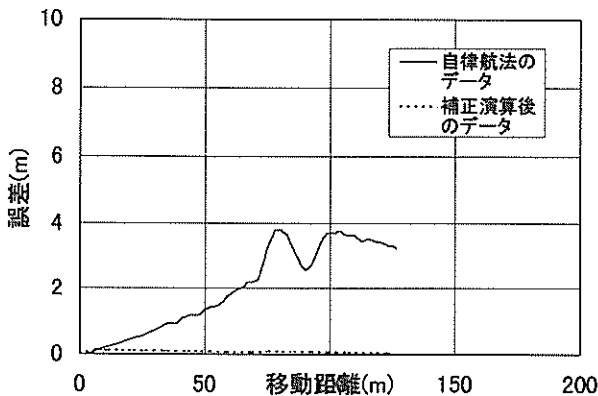


図-35 台車による自律航法の精度

③考察

本システムの自律航法ユニットはGPS測位が失われたときにGPSに代わりリアルタイムで台車、計測車の位置を表示する。しかし、自律航法の測位では長距離走行を行うと、測位精度はかなり低下するため短距離走行でのみ有効であることが解った。

後処理補正により自律航法の測位精度は向上することが解った。ただし、GPS測位が失われたまま長距離を走行すると、自律航法によるリアルタイム測位では、計画測線とかけ離れた場所を測量する可能性が高いので、後処理補正により座標修正されても計画測線から大きくずれ込むことになる。

(9) 自律航法システムまとめ

自律航法システムは、RTK-GPS測位が中断したときにも測量を継続出来るように、計測車、台車の水平位置(X-Y)を測定する補助システムである。

①自律航法システムは、光ファイバージャイロ、車速センサー、演算ボードからなる。

②光ファイバージャイロは、計測車、台車の向きの変化を測定するもので、作動原理上傾斜、ドリフトによる誤差を生じる。

・傾斜による誤差は、傾斜角度 20° 以上の時は実験式(9)により補正を行う。

・ドリフトによる誤差は、短時間(15分程度)で有れば直線的に変化するため計測時間で比例配分することにより補正を行う。

③車速センサーは、計測車、台車の走行距離を計測するためのもので、実験の結果、計測車は光電スイッチ、台車はロータリーエンコーダを採用した。

④自律航法システムの測位精度は、実験の結果リアルタイム測位では精度上の問題により短距離走行のみに使用できる。後処理補正により測位精度は向上する。

7. ケーススタディー

本システムを東京国際空港での沈下管理計測に導入する場合の適応性について検討を行った。

7.1 現地測量実験

現状の東京国際空港での沈下管理計測は、同一の測点を毎回水準測量し沈下の度合いを計測している。本システムの3方式(計測車方式、台車方式、人力方式)についてどの方式を採用するのが適切であるかを検討するため、実験機を使用して東京国際空港において測量実験を行った。実験は従来測量との比較により、計測精度、作業効率、運用性の確認を行った。

(1) 実験目的

①3方式の本測量システムによる測量と従来の水準測量を比較して、運用上の精度、実用性、作業効率について評価する。

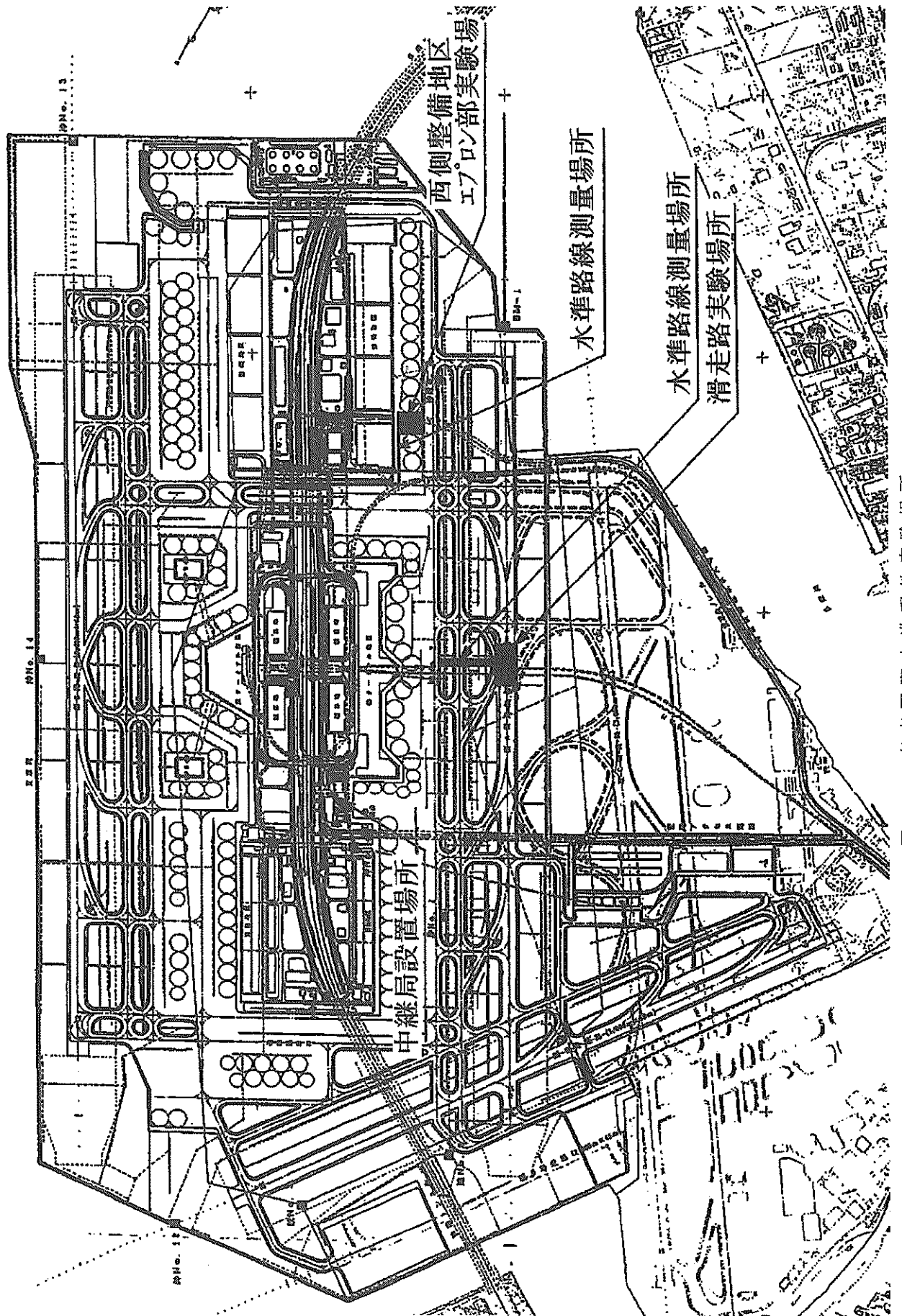


图-36 東京国際空港現地実験場所

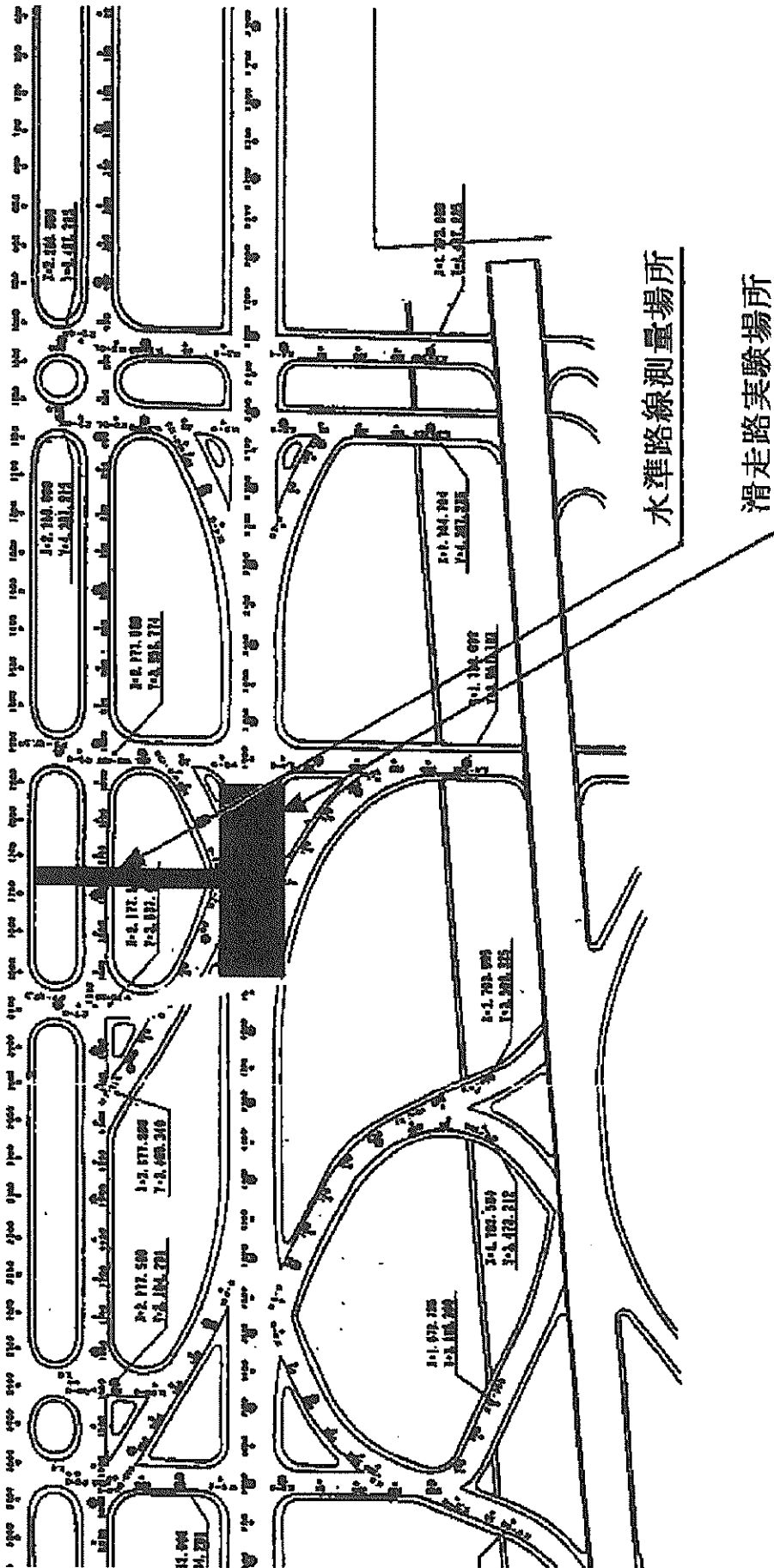


図-37 滑走路部実験場所

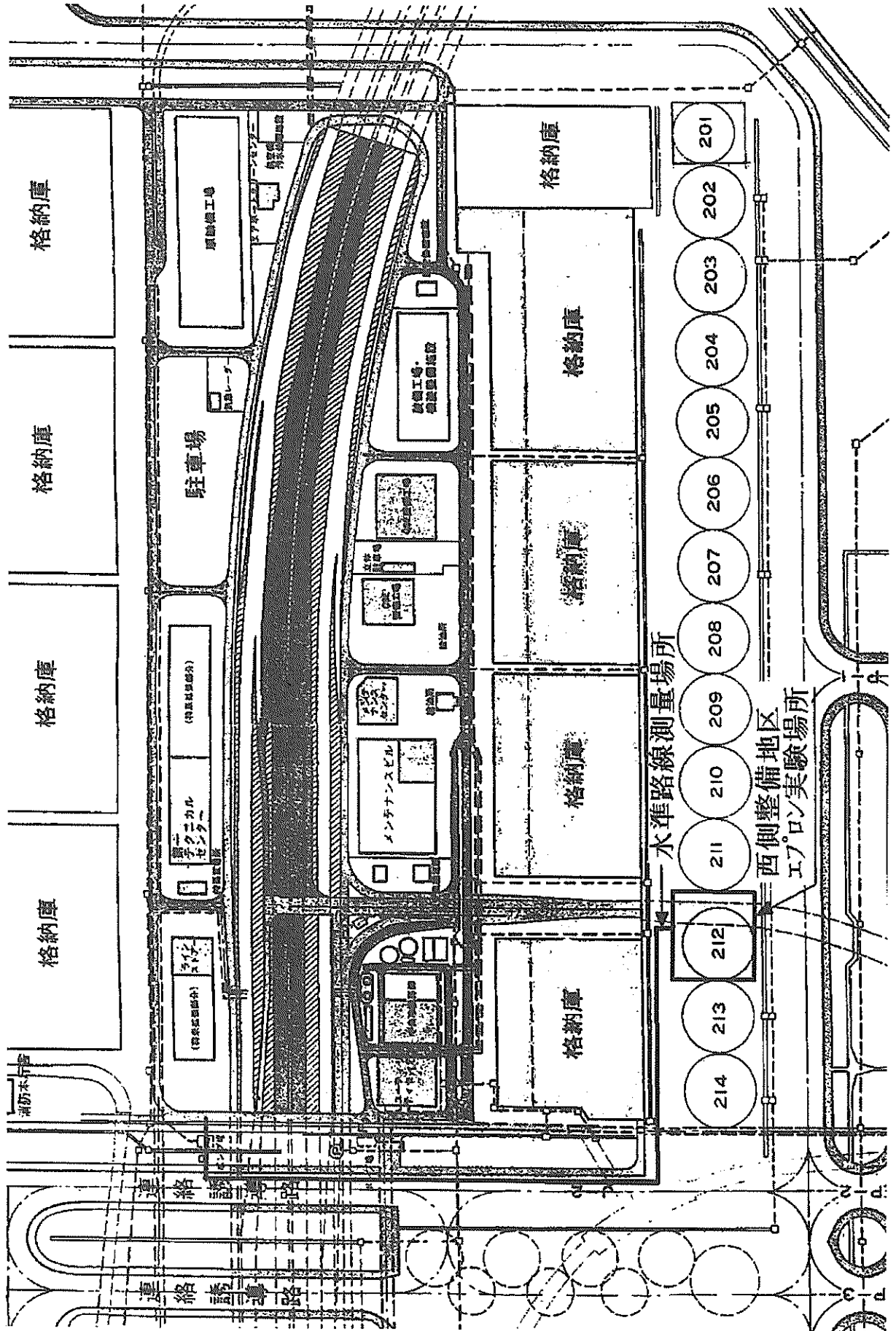


図-38 西側整備地区エプロン実験場所

①空港内の建物や障害物が本測量システムによる測量へ与える影響調査および、その対策についての効果を確認する。

③昼間と夜間における操作性の確認を行う。

(2) 実験項目

a) 事前測量

- ・従来方式による水準測量
- ・GPS基準点測量による補正値の算出

b) 本システムによる測量の精度確認

- ・人力方式によるベンチマークを基準とした測量
- ・台車方式によるベンチマークを基準とした測量
- ・台車方式によるGPSを基準とした測量
- ・計測車方式によるベンチマークを基準とした測量 (エプロン部)
- ・計測車方式によるGPSを基準とした測量 (エプロン部)

c) 補助機構の精度確認

- ・GPS基準局からの補正電波の受信障害対策
- ・自律航法の測定精度

d) GPS衛星からの電波受信に対する格納庫の影響

(3) 実験場所

東京都大田区羽田東京国際空港内、その他空港内における実験場所の詳細位置は、図-36～図-38に示す。

40に示す。

本システムによる測量実験では、測量エリアを4分割し、各測量エリアごとにレーザーレベル基準局を設置して測量した。各エリア毎に独立して測量したうえでエリア間に共通計測点を設け、共通す両エリアから共通計測点を測量しエリア間の相対関係を掌握した。全エリアの測量終了後、共通計測点を介してそれらの相対関係から全ての計測点を一つの計測点から測量したデータに補正する処理を行い、さらに測量エリアを併合させることにより閉合差を求め、その差を各測量エリアで再配分することで精度を向上させた。

なお、西側整備地区エプロン部での実験はすべて昼間に行い、新A滑走路部における実験はすべて夜間に行った。

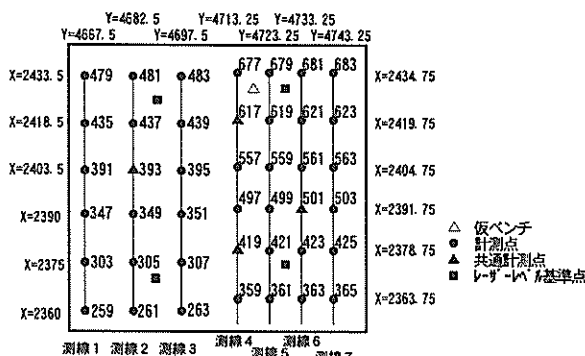


図-39 西側整備地区エプロン部測点

7.2 実験に使用した主要測量機器

本実験に使用した主要機器は以下の通りである。

(1) 本システムで用いた機器

- ・GPS装置

本システムで使用するGPSはRTK-GPSであり、基準局と移動局から構成される。基準局は海上DGPS利用推進協議会の常設局を使用した。

- ・レーザーレベル

水平方向360度にレーザー光を発射する発光基準部とレーザー光を受光し、その高さをデジタル出力する受光部から構成される。

(2) 従来の測量機器

本実験に使用した従来の測量機器は、水準測量に一般的に使用されている光学測量機器であるオートレベルを使用した。

7.3 実験方法と結果

実験全体を通して使用した測点並びに測線の配置は、西側整備地区エプロン部を図-39、新A滑走路部を図-

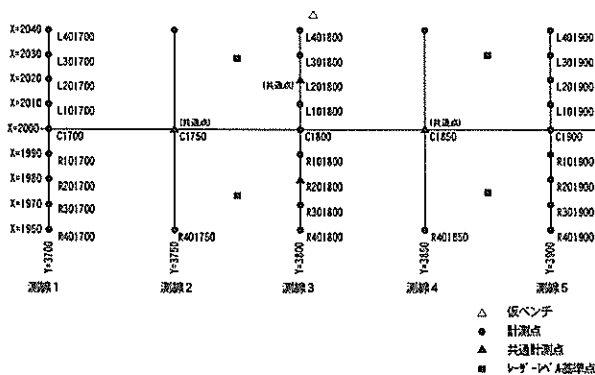


図-40 新A滑走路部測点

(1) 事前測量

a) 従来方式による事前測量

本システムによる測量結果の精度を評価するため、従来方式による測量結果と比較することとした。このため事前にオートレベルを用いて測点の水準測量を行った。

①測量方法

空港内の運輸省水準点から実験エリア内まで水準測量を行い、実験エリア内に仮ベンチを設置し、その仮ベン

ちより従来方式による計測点の水準測量を行った。

運輸省水準点は、西側整備地区エプロン部が沖 No.10-1, 新 A 滑走路部が沖 No.2 を使用した。

②測量結果

測量結果を表-14, 15に示す。測点間は、往復で測量し平均値を採用した。較差は西側整備地区エプロン部で最大 2mm, 新 A 滑走路部で最大 4mm であった。

表-14 西側整備地区エプロン部測量結果

	NC エプロン部			PC エプロン部			
点名	479	481	483	677	679	681	683
標高 (m)	6.119	6.100	6.086	6.090	6.049	5.978	5.913
点名	435	437	439	617	619	621	623
標高 (m)	5.951	5.919	5.906	5.901	5.870	5.828	5.777
点名	391	393	395	557	559	561	563
標高 (m)	5.975	5.771	5.747	5.746	5.724	5.710	5.651
点名	347	349	351	497	499	501	503
標高 (m)	5.685	5.651	5.629	5.616	5.584	5.578	5.542
点名	303	305	307	419	421	423	425
標高 (m)	5.566	5.548	5.538	5.534	5.512	5.481	5.471
点名	259	261	263	359	361	363	365
標高 (m)	5.450	5.427	5.414	5.412	5.403	5.368	5.350

表-15 新 A 滑走路部測量結果

点名	標高	点名	標高	点名	標高	点名	標高	点名	標高
L40 1700	4.454	L40 1750	4.603	L40 1800	4.405	L40 1800	4.364	L40 1900	4.333
L30 1700	4.672			L30 1800	4.457			L30 1900	4.509
L20 1700	4.791			L20 1800	4.578			L20 1900	4.595
L10 1700	4.886			L10 1800	4.716			L10 1900	4.692
C 1700	4.981	C 1750	4.877	C 1800	4.798	C 1850	4.801	C 1900	4.788
R10 1700	4.909			R10 1800	4.695			R10 1900	4.712
R20 1700	4.834			R20 1800	4.535			R20 1900	4.605
R30 1700	4.741			R30 1800	4.438			R30 1900	4.486
R40 1700	4.641	R40 1750	4.437	R40 1800	4.184	R40 1850	4.299	R40 1900	4.341

b) GPS 基準点測量による補正値の算出

従来測量は空港内運輸省水準点を基準点としていわゆる空港座標系で測量を行い、GPS とレーザーレベルを使用した測量システムは海上DGPS 利用推進協議会の基準局（川崎局）を基準点としていわゆる公共座標系で測量を行っている。公共座標と空港内の座標の整合性を確認するため海上DGPS 利用推進協議会の基準局（川崎局）を使用してGPS により測量を行い、東京国際空港内の基準点座標値との差を算出した。

①測量方法

海上DGPS 利用推進協議会の補正データを受信し、運輸省水準点沖 No.10-1 に移動局を設置し、RTK-GPS で2時間静止し測量を行った。

②測量結果

空港座標値と2時間のRTK-GPS による静止測量データを平均した結果および空港座標値との整合性をとるための補正値を表-16に示す。

表-16 GPS 補正値

	空港座標値 (m)	GPS 計測値 (m)	補正量 (m)
X 座標	2,710.340	2710.2000	-0.140
Y 座標	5,492.214	5,492.5613	0.347
Z 座標	5.825	5.6585	-0.167

本実験では、この補正値をGPS とレーザーレベルによる測量結果に適用して実験を行った。

本来、公共座標系と空港座標系は整合が取れているべきであるが、空港座標系は過去の測量経緯から複雑な座標変換の流れをもっており、平成7年度を境に整合性が取れなくなったものと考えられる。

(2) 本システムによる測量

a) 西側整備地区エプロン部

この実験区域では、以下の5方式について昼間実験を行った。

- ・人力によるベンチマークを基準とした測量
- ・台車によるベンチマークを基準とした測量
- ・台車によるGPS を基準とした測量
- ・計測車によるベンチマークを基準とした測量
- ・計測車によるGPS を基準とした測量絶対測量

①測量方法

人力による測量の場合、図-39に示すの測点上にレーザーレベル受光器とGPS アンテナを取り付けたポールを垂直に立て相対測量で数秒間、計測データを収録した。

台車・計測車による測量の方法は、予め本システムの入力しておいた計画測線と現時点での台車・計測車の位置が同時にディスプレイに表示されるので、これを見ながら台車・計測車を計画測線に沿って移動させデータを収録させた。移動速度は、台車が平均時速 2.5km/h, 計測車が平均時速 3km/h であった。測線間の移動は終点を抜けてからそのままUターンし、隣の測線を逆方向に走行するかたちで、交互に連続して測量した。

台車・計測車による絶対測量では、GPS 測量の高さを採用しているため測定精度を高めるには、大量のGPS の高さデータの平均化処理が必要である。このため、

実験での測線データでは足りないので、測線データ収録後定定点にて約2時間50分のデータ収録を行った。

②測量結果

図-41～47に測線毎の各方式の従来方式との差を示す。

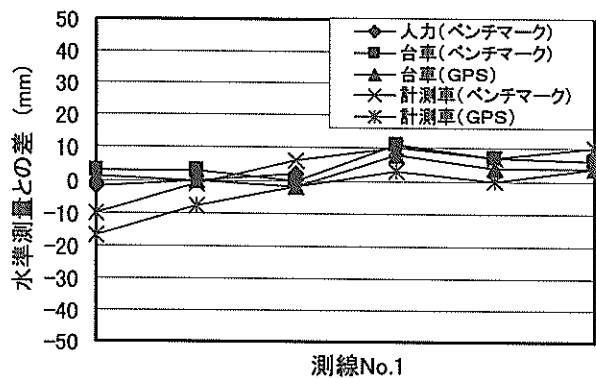


図-41 従来測量との差

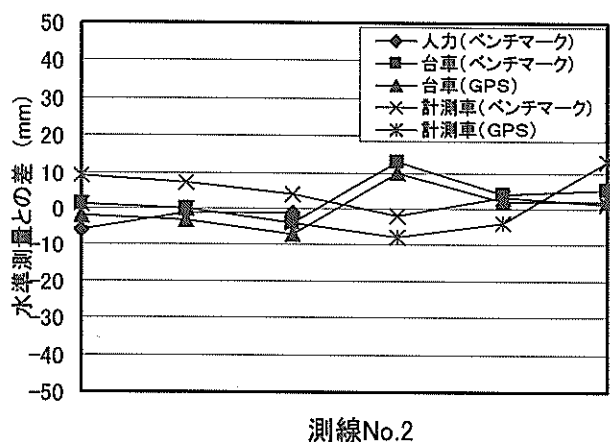


図-42 従来測量との差

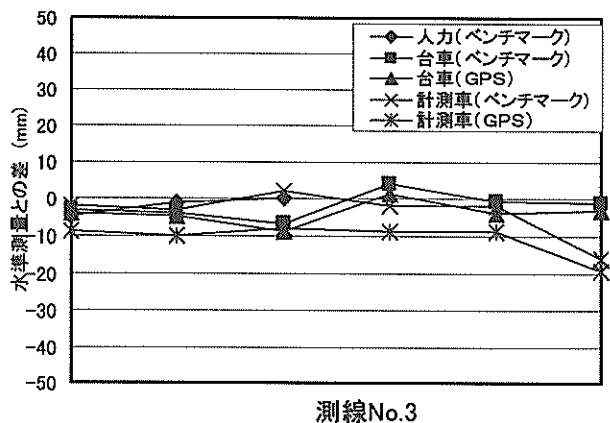
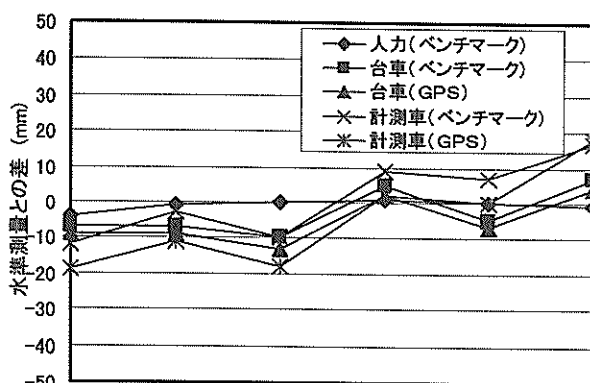
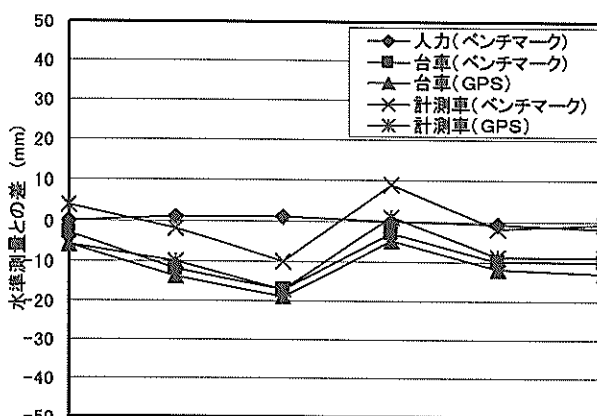


図-43 従来測量との差



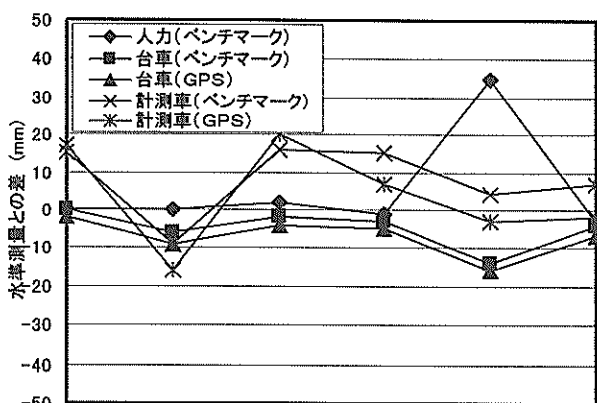
測線No.4

図-44 従来測量との差



測線No.5

図-45 従来測量との差



測線No.6

図-46 従来測量との差

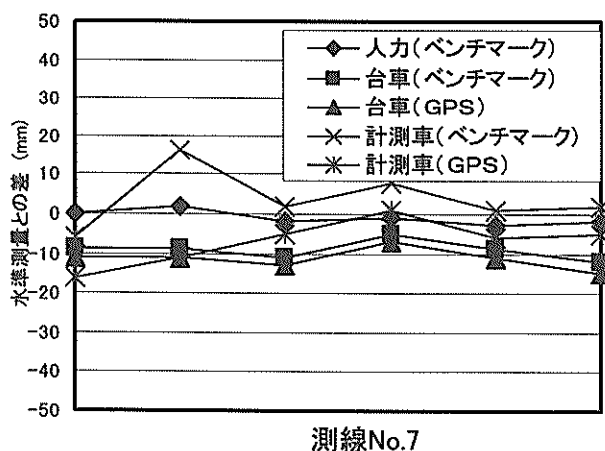


図-47 従来測量との差

測量方式毎に従来測量との差を統計処理した結果を、表-17に示す。

表-17 方式毎の測量精度 単位：mm

測量方式	標準偏差	平均値	最大差
人力方式 (ベンチマーク)	2	1	6
台車方式 (ベンチマーク)	7	3	17
台車方式 (GPS)	7	5	19
計測車方式 (ベンチマーク)	8	-2	17
計測車方式 (GPS)	10	4	-20

③考察

・人力によるベンチマークを基準とした測量では、直接測点上にスタッフを立てて測定しているため、平面的なずれが無い。このため水準測量との差が標準偏差で2mmと小さく、ほぼレーザーレベルの精度が表れた結果となった。

・台車によるベンチマークを基準とした測量及びGPSを基準とした測量では、ほぼ計画測線上を走行できたが、走行しながら断続的にデータ収集を行っているため、必ずしも測点上のデータではなく測点近傍の2点から測点上の値を計算で求めているため人力方式に比べて多少精度は落ちる。

走行時に舗装面の段差を乗り越えるときの横揺れのためデータが人力方式ほど安定していなかった。このため、標準偏差と最大値が大きくなったものと考えられる。

また、GPSを基準とした測量がベンチマークを基準とした測量より精度が落ちている原因は、GPSの平均化するデータ数が少ないためであり、4時間以上の広範囲の測量を行うことが出来ればさらに精度は向上すると思われる。

・計測車によるベンチマークを基準とした測量及びGPSを基準とした測量では、自動車を計画測線上を正確に走行させることが難しく、走行ずれを細かく修正できなかった。また、ずれ量を積極的に修正する運転では結果的に蛇行運転となってしまう、計画測線から20cm～50cm程度離れたところのデータを収録していた。結果として、人力、台車に比べて精度が低下することとなった。

GPSを基準とした測量がベンチマークを基準とした測量より精度が落ちている原因は、台車方式と同様、計測時間が少なかったために平均化するGPS測位データが少なかったためと考えられる。

b) 新A滑走路部

この実験区域では、以下の1方式について夜間実験を行った。

・計測車による相対測量

①測量方法

西側整備地区エプロン部の実験と同様の方法で夜間に測量を行った。

②測量結果

図-48に測線毎の従来方式との差を示す。

従来測量との差を統計処理した結果を、表-18に示す。

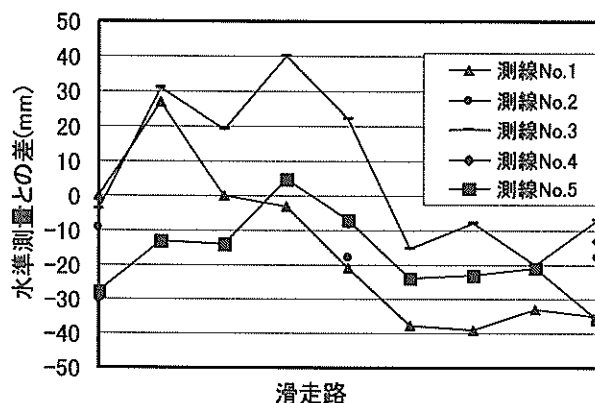


図-48 従来測量との差

表-18 測量精度 単位：mm

方式	標準偏差	平均値	最大差
計測車方式 (ベンチマーク)	20	10	-40

③考察

滑走路では、計測エリア内が一部草地であったために計測車に取り付けられている超音波式の車高センサーが草の高さを測定し、車高を正しく測定していない場合があった。舗装面上に誘導灯などがあり計画測線上の走行ができない場所があり、測線に対するずれは全般に大き

く、軌道修正にも時間を費やした。また、横断方向の勾配がエプロン部に比べて大きく、レーザーレベルの昇降操作も頻繁に行った。

上記の原因により、エプロン部での実験結果と比較するとかなり精度が落ちていることが解る。

(3) 無線中継局の有効性の確認実験

本中継局方式が東京国際空港における沈下管理のための測量に実用上有効な方式か確認するため海上DGPS利用推進協議会の基準局からの補正電波を中継する実験を行った。

① 実験方法

海上DGPS利用推進協議会の基準局は、東京国際空港の南側に位置していてその放送電波は西旅客ターミナルの陰にあたる北側にて受信不良になることが予想されるため運輸省第二庁舎屋上に中継用無線機を設置し、その受信機とGPS移動局を車両に搭載し、国道375号線に沿った空港構内道路を周回し、移動しながら受信状況を調査した。

② 実験結果

中継用無線機からの電波は良好に受信できた。しかし、中継用無線機は特定小電力無線局であるため出力が低く無線機の実用上、構造物の陰にはいると受信不良となった。また、中継局からの電波到達距離は500m程度であった。

③ 考察

空港での実工事で使用する場合は、適切な設置場所の再検討が必要である。

(4) GPS受信における格納庫の影響

格納庫に接近した場合のGPS測位への影響を調査した。

① 実験方法

西側整備地区エプロン部実験場所の測量エリアから、格納庫に向かって計測車でGPS測位を行いながら走行し、GPS測位に影響が現れる格納庫からの距離を調査した。

② 実験結果

格納庫から30m離れた地点で補足衛星数が不足(5個以下)し、RTK測位からフロート測位(測位精度が1m前後の状態)となった。

③ 考察

GPS衛星の配置は、一般に南半球に偏る傾向があり、西側整備地区エプロン部では、北東側に格納庫が面し、南側の上空が開けているためGPS測位には有利なロケーションとなっている。このため、衛星配置状態の良い時間帯では、実験場所の測量エリア内で特にGPS測位

に支障が起こることはなかった。しかしながら、周囲に障害物のない状況でも、受信できるGPS衛星の数が5個以下に減少し、その数が不足する時間帯が1日に2、3回程度(10～30分程度)あるので、その時間帯は事前に衛星配置情報を入手し、測量計画をたてることにより、効率の良い測量作業を実施することが可能である。

7.4 各方式の運用上の特性

本システムの各方式について、実験の成果を踏まえてその特性をまとめた。

(1) 計測車方式

・車内での計測が主になるため寒冷時などの作業環境の改善効果がある反面、航空機の付近の測量では様々な制約を受ける。

・各種計測器を取り付けるための車両の改造が必要である。

・測量の事前準備に時間がかかる。

・共通計測点での計測でレーザーレベル受光器とGPSアンテナが別途もう一式必要となる。

(2) 台車方式

・計測場所によっては、計測車より機動性があり連続測量が可能のため作業効率が高い。

・小型のため駐機している飛行機の近くの測量も可能である。

・測点上をほぼ正確に測量できるので、計測車より精度がよい。

・滑走路を測量する際、路面に設置されている照明器具を的確に把握出来るので破損の可能性が少ない。

・共通計測点での計測でレーザーレベル受光器とGPSアンテナが必ずしも別途もう一式必要としない。

・測量精度をあげる手法として、測点の真上で停止して計測する方法も有効である。

・台車上にレーザーレベルの昇降機構を設けているためレーザーレベル発光器の昇降機構と併せて、上下並びに平面の計測可能範囲が大幅に拡大される。

(3) 人力方式

・RTK-GPS、データ受信機、パソコン、バッテリー一等を携帯して測量を行うので、作業者の負担が大きい。

・計測車、台車が入れないところでの測量が可能である。

・静止点測量であるため精度がよい。

・測点上での静止測量であるため、移動中にGPSデータの高さが測定できないため、測量終了後一カ所に測量機器を固定し、GPSデータの高さ平均を行うのに必要な時間測定を行う必要がある。(GPSを基準とした測量の場合)

7.5 運用上の作業効率

現地総合実験の結果から、本システムの各測量方式ごとに従来測量と作業効率の比較を行った。ただし、水準測量の所要時間は水準点から仮ベンチまでの路線測量は含んでいない。

(1) 測量条件

エプロンにおける測量エリアで下記的前提条件のもとで比較検討を行った。

- ・測量エリア：4 エリア (40m × 40m × 4 エリア)
- ・測線本数 : 14 本
- ・測点数 : 42 点
- ・仮ベンチ : 1ヶ所
- ・レーザーレベル基準点：4ヶ所
- ・エリア間共通計測点 : 4ヶ所
- ・レーザーレベルの昇降操作：1 測線につき 1 回 (約 30 秒)
- ・人員配置等は表-19の通りとする。

表-19 測量システムの人員配置 (エプロン) 単位：人

	計測と記録	運転操作	受光器 (受光器) 旋回操作	標尺 (受光器) 移動	レーザーレベル 移動と操作	合計
水準測量	1	-	-	2	-	3
計測車方式			3	-	(1)	3
台車方式			2	-	(1)	2
人力方式				2	1	3

() は兼務

(2) 作業に要した時間

①水準測量

1 点当たりの測量は精度を確保するため往復で行い、その結果所要時間は平均 1 点当たりで 4 分かかり、全体で 4 分 × 42 点 = 168 分を要した。

また、測量の事前準備に仮ベンチの据え付けを含めて約 35 分を要した。

②計測車方式

1 測線当たり平均 3km/h で走行し、次の測線へのターン時間 20 秒を含めると

$$40m \div 3,000m/h \times 3,600 \text{ 秒} + 20 \text{ 秒} \approx 70 \text{ 秒}$$

となり、本測量に要する時間は、14 測線であるので

$$70 \text{ 秒} \times 14 \text{ 測線} \div 60 = 163 \text{ 分}$$

であり、測量全体では 108.3 分であった。また事前準備に約 50 分を要した。

なお、計測車に一般車両を使用したため、計測機器を車両に取り付けたまま公道を走行できないため、測量現

場に到着してから全ての機器の装着を行ったので、準備作業に多くの時間を費やした。

③台車方式

1 測線当たり平均 2.5km/h で走行し、次の測線へのターン時間 20 秒を含めると

$$40m \div 2,500m/h \times 3,600 \text{ 秒} + 20 \text{ 秒} \approx 80 \text{ 秒}$$

となり、本測量に要する時間は、14 測線であるので

$$80 \text{ 秒} \times 14 \text{ 測線} \div 60 = 18.6 \text{ 分}$$

であり、測量全体では 110.6 分であった。また事前準備に約 30 分を要した。

台車本体を搬送車にて測量現場に搬送後、積みおろし、計測機器の準備作業にかなりの時間を費やした。

④人力方式

1 点当たりの測量時間は測点間の移動を含めて平均 30 秒かかり、全測点で

$$0.5 \text{ 分} \times 42 \text{ 点} \approx 21 \text{ 分}$$

であり、測量全体では 113 分であった。また事前準備は機器の接続等に約 15 分を要した。

作業に要した時間は表-20の通りである。

表-20 作業効率

測量方式	準備 (分)	レーザー基準局移動 (分)	本測量 (分)	共通点計測 (分)	レーザー昇降操作 (分)	合計 (時:分)	備考
水準測量	35	-	168	-	-	3:23 4分50秒 (2時間)	合計所要時間 1点当たりの所要時間 (準備時間)
計測車方式	50	45 15 × 3回	163	40 5 × 8回	7 0.5 × 14回	2:38 3分46秒 (1時間)	*
台車方式	30	45 15 × 3回	18.6	40 5 × 8回	7 0.5 × 14回	2:21 3分21秒 (1時間)	*
人力方式	15	45 15 × 3回	21	40 5 × 8回	7 0.5 × 14回	2:08 3分03秒 (1時間)	*

(3) 検討の結果

水準測量に要する時間に対してGPSとレーザーレベルによる測量システムのそれぞれの測量方式に要した時間の割合は、計測車方式で78%、台車方式で69%、人力方式で63%であった。この測量では、狭い測量エリアをさらに4分割したためGPSとレーザーレベルによる測量システムでは本測量にかかる時間に比べて、準備作業時間とレーザーレベルの移設時間及びエリア間共通点の測量時間の比重が大きくなったため、これらの準備作業の少ない水準測量との所要時間差に大差がなかったが、実際の運用時には測量エリアをレーザーレベルの能力(150m)にあった大きさに設定することができるので、作業効率に関しては、より一層の向上が図れる。

7.6 東京国際空港導入に適した方式

GPSとレーザーレベルによる測量システムの測量精度については、実験結果より全ての方式が標準偏差、平

表-21 東京国際空港における実験結果

		人力方式	台車方式	計測車方式	
運用上の精度	誘導位置のズレ	0m	0~0.1m	0.5~1m	
	ベンチマークを基準とした測量	標準偏差	2mm	7mm [*]	8mm [*]
		平均値	1mm	3mm [*]	2mm [*]
	GPSを基準とした測量	標準偏差	—	7mm [*]	10mm [*]
平均値		—	5mm [*]	4mm [*]	
作業時間 40m×40m×4点	準備(分)	15	30	50	
	測量(分)	113	110.6	108.3	
連続測量		不可(点測量)	可能	可能	
作業性	0.5mを越える高低差調整	レーザーレベル側で昇降操作	台車側で移動しながら調整可能	計測を中断してレーザーレベル側で昇降操作	
	測量作業員	3人 機器を持ち運んで測量	2人 台車を押して測量	3人 自動車に搭乗して測量	
	データ処理	自動	自動	自動	
	滑走路上の機器との関連	・測位システムを携行し計測を行うため見通しが良く滑走路上の機器を損傷しない	・小型の台車を人力で押すため、周りの見通しが良く滑走路上の機器を損傷しない	・車内での測量になるため他の方式に比べて視界が狭いため、滑走路上の機器の確認が困難である	
測量箇所				車両が進入で出来ない区域がある	
自律航法の誤差 (200mあたり)	リアルタイム	不可	3.8m	7.7m	
	後処理補正後		0.3m	0.4m	
使用可能気象条件		雨不可	小雨不向き	小雨可能	

*1 測量位置の測点からのずれによる影響(27ページ参照)

均値で10mm以内に収まっている。

各測量方式の準備作業と計測作業の合計時間は、人力方式が128分、台車方式が140.6分、計測車方式が158.3分であった。しかし、これは今回の実験計測エリアが狭かったためと判断される。エプロンの測量など実際の運用時には測量エリアをレーザーレベルの能力(150m)にあった大きさに設定することで台車方式、計測車方式は、より一層の作業効率の向上が期待できる。

本システムを東京国際空港の測量に導入するにあたっては測量精度と作業効率が採択の基準となる。

計測車方式は、空港内では測量区域に進入できない場所もあり、効率よく測量することが困難であるため空港での測量に適していない。測量精度は、全ての方式が必要精度を満たしているが、現状の固定点を測量する方式では、測点への誘導性能に優れた人力方式が最も正確性を確保している。作業時間は、測点数が多くなるほど、連続的に測量している台車方式が短時間で測量出来る。また、台車方式は、連続的に測量を行っているため面的な測量が可能である。作業員数に関しては、人力方式が3人、台車方式が2人であり台車方式のほうが少人数での測量ができる。また、今後の空港の測量は、維持管理の面から現在の点による測量からより細かく測量を行う事が要望されている。したがって、効率良く連続測量が可能で作業員数の少ない台車方式が適していると判断する。表-21に各方式の特性をまとめたものを示す。

8. 結論

8.1 本システムの精度と特徴

(1) 測量データ取得から各種補正演算、測量結果出力までの一連のデータ処理をパソコンで自動に行う省力化と自動化に優れた、連続測量が可能なRTK-GPSとレーザーレベルを組み合わせた3方式の測量システムを開発した。これらの測量システムは現場条件により最適なものを選択して使用する。

- ・計測車方式
- ・台車方式
- ・人力方式

(2) 水準測量精度は、RTK-GPSの高さ方向の測定データの平均化時間を4時間以上とすると3級水準測量相当である。平均化時間が4時間に満たない場合は、測量区域の近傍に装置を停止させRTK-GPSのデータを取得し、合計時間が4時間になるようにする。

(3) 水平方向の測位精度(X-Y)は、RTK-GPSの測位精度である。

(4) 自律航法の測位精度は、後処理補正により向上する。

8.2 東京国際空港への適応性について

(1) 東京国際空港での沈下計測の場合は、決められた定点上を測定するものであり、測定点への誘導性能が測定精度に影響を与える。

(2) 誘導性，作業性に優れた台車方式が東京国際空港での沈下計測に適している。

9. あとがき

本測量システムは，平成7年度から開発研究を開始し，ほぼ実用システムとして完成した。本測量システムは，広範囲な地域の水準測量を3級測量程度の精度で短時間で効率的に行うことが可能な測量システムであり，データ取得から結果の出力までをパソコンで自動に行う等の省力化も達成している。

本測量システムは，今回現地測量実験を行った東京国際空港での使用だけでなく，他の空港，港湾への導入を期待する。

(2000年3月31日受付)

謝辞

本研究に当たって，第二港湾建設局東京空港事務所，横浜調査設計事務所から助言と測量データの提供を頂き，また東京国際空港での実験に際しては，協力を得た。ここに記して，感謝する次第である。

参考文献

- 1) 土屋 淳・辻 宏道：やさしいGPS測量，日本測量協会，1997年，pp.12-57.
- 2) 土屋 淳・辻 宏道：GPS測量の基礎，日本測量協会，1997年，pp.135-168.
- 3) 大嶋太市：測量学基礎編，共立出版，1997，pp.79-109. pp.151-170.
- 4) 土屋 淳・今給黎哲朗：GPS測量と基線解析の手引 日本測量協会，1996年，pp.49-58.