

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1263 December 2012

不同沈下測定を目的とした車載型レーザースキャナ測量

渡部 要一
田中 政典

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 計測方法	4
2.1 前方スキャン用の機種	5
2.2 側方スキャン用の機種	5
3. データ整理	7
3.1 点群情報	7
3.2 走行ごとのデータ補正	9
3.3 全体データの相対的なずれに対する補正.....	10
3.4 データの活用	12
4. まとめ	13
謝辞	14
参考文献	14

Leveling with Mobile 3D-Laser Scanner to Measure Differential Settlement

Yoichi WATABE*¹

Masanori TANAKA*²

Synopsis

Airport facilities, such as runway, taxiway and apron, are required to be flat as plane structure. In addition, elevation of the ground surface is very important information corresponding to land settlement in case of man-made island on soft clay deposit. Ground elevation has been measured by leveling, but recently, it is replaced by GPS measuring at some new airport facilities. GPS observation condition is generally ideal at airport facilities, because there is no obstacle in the sky to catch GPS signals. To avoid large manpower and long working period, leveling and GPS measuring prefer to be replaced by an efficient measuring system such as automated one. In this study, leveling using mobile 3D-laser scanner was attempted at the D-runway of the Tokyo Haneda Airport. Comparing a front scanner with a side scanner, outline of the system and measuring method are described, then measured data sets were treated to transform from point group to allocated mesh data. The data sets obtained by both methods are strongly affected by the errors of GPS observation; however, relative error during the measuring period was sufficiently small in an acceptable level in practice. To cover the runway of 80 m width, the front scanner requires four round (or eight one-way) drives because its scan range is narrow (less than 15 m); while the side scanner requires two round drives because scan range is wide (more than 50 m). To correct GPS error, it is recommended that at least one point where its elevation is known is included in the measuring range of mobile 3D-laser scanner.

Key words: leveling, differential settlement, mobile laser scanner, GPS, elevation

*1 Director of Geotechnical Engineering Field

*2 Research Specialist (formerly Senior Researcher of Soil Mechanics and Geo-environment Group)
1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5053 Fax : +81-46-844-4577 e-mail: watabe@ipc.pari.go.jp

不同沈下測定を目的とした車載型レーザースキャナ測量

渡部要一¹⁾・田中政典²⁾

要 旨

滑走路や誘導路といった空港施設では、路面の勾配や角折れが規定を満足しなければならず、かつ、埋立地に立地する空港では標高情報は沈下量管理とも直結する重要な情報である。これらの計測は一般に水準測量（レベル測量）によって行われているが、一部の新しい空港施設では GPS 測量も導入されている。しかし、広大な空港施設での計測は時間と労力を要することから、自動化された計測手法のような効率的な計測方法があれば、置き換えが進むものと期待される。本研究では、2010 年 10 月に供用開始した羽田空港 D 滑走路において、車載型のレーザースキャナの適用性を検討することを目的として、スキャン方向が異なる 2 機種、すなわち、走行方向前方をスキャンする機種と走行方向側方をスキャンする機種を取り上げ、それぞれの計測方法について、計測装置の概要や計測方法、計測結果例、データ整理方法についてとりまとめた。前方をスキャンする方法と側方をスキャンする方法について、どちらの方法でも GPS の計測誤差に基づく絶対値の誤差がありうるが、計測時の相対的な誤差については十分な精度の測定結果を得ることができることを確認した。前方スキャンの場合、測定範囲が狭いので計測回数が多くなる欠点があり、側方スキャンの方が、測定範囲が広いので計測回数が少なく、空港測量にはより適していることがわかった。数時間の計測時間中における相対的な誤差は小さいことから、絶対値としての GPS 観測誤差を補正するために、標高が既知な点を計測範囲に含むことが有効である。

キーワード：測量，不同沈下，車載型レーザー，GPS，標高

1) 地盤研究領域長（兼 土質研究チームリーダー）

2) 専門研究員（元 土質研究チーム主任研究官）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5053 Fax：046-844-4577 e-mail: watabe@ipc.pari.go.jp

1. はじめに

滑走路や誘導路といった空港施設では、路面の勾配や角折れが規定を満足しなければならず、かつ、埋立地に立地する空港では標高情報も重要になる。標高情報は沈下量管理とも直結する重要な情報である。これらの計測は一般に水準測量（レベル測量）によって行われているが、広大な空港施設での計測は時間と労力を要することから、自動化された計測手法のような効率的な計測方法があれば、置き換えが進むものと期待される。

供用中の滑走路では滑走路が閉鎖される夜間しか作業ができないため、広大な滑走路全体を効率的に十分な精度で計測する技術が必要とされている。例えば、東京国際空港（羽田空港）のD滑走路（2010年10月21日供用開始）では、維持管理のために週に2回、23:30から5:30までの6時間のみ閉鎖されている（2012年1月現在）。滑走路の運用前の点検が5:00から開始されるので、維持管理のための各種作業は23:30から5:00までしか実施できない状況にある。一方で、設計・施工時の想定では、施工後100年間の予測沈下量は、最大で70cm程度と予測されており、標高情報の取得は維持管理上重要となっている。

多くの場合、空港の測量では、空港内に設けられた基準点からトランシットとスタッフを用いたレベル測量が実施される。埋立空港の場合、供用開始後も残留沈下が継続するため、基準点そのものが沈下することに留意する必要がある。このため、定期的に水準点のような標高が既知の点から施設内の基準点まで測量を展開し、基準点の設定値が許容される誤差内にあるかどうかを確認する。許容誤差から逸脱した場合には、基準点の情報を更新することになる。空港の場合、水準点までの距離が遠いことが多く、許容される誤差が相対的に大きいため、基準点情報が更新されると標高データが突然数cm分シフトすることになる。また、レベル測量では、広大な空港内で測量を行うと、基準点から遠い地点では誤差の蓄積も起こりうる。

近年ではGPSによる測量技術が発達してきており、水準点や基準点からレベル測量を展開する必要がないなどの手軽さから、建設現場などさまざまな場面で活用されるようになった。実際、一部の新しい空港施設では、従来のレベル測量をRTK-GPS測量に置き換えて実施しているところもある。RTK-GPS測量は、レベル測量に比べて簡易に計測できること、誤差の蓄積がないこと、などが利点である。しかし、GPSの計測誤差が無視し得ないほどに大きい可能性は否定できない。しかし、上述のように、建設中や供用開始後も沈下が進む海上空港では、基準

点そのものが沈下して標高がずれていくことから、レベル測量とGPS測量を比較した場合、どちらが優れているかを一概に言い切ることができない。

空港施設は全天にわたって建造物等がGPS衛星を遮らないため、当該地点・時点において利用可能なすべてのGPS衛星を捉えることができる。これは、GPS計測を行うのに理想的な条件であるといえる。もちろん、GPSの計測精度を超えることはできないが、計測条件が良いために計測中の値の揺らぎは比較的小さく、計測結果全体の標高データが絶対値として数cmずれていたとしても、計測中の値のシフトはほとんどない。このことを踏まえて考えると、広大な空港施設を効率的に測量する装置として、車両搭載型（以下では車載型と称する）のレーザースキャナの適用が有効であると考えられる。

車載型のレーザースキャナは、レーザ計測の分野において最も新しい種類のもので位置づけられ、今後の期待も大きい¹⁾。装置は、幾つかの会社によって開発されているが、これまでの利用実績のほとんどは道路沿いでの計測であり、滑走路のように広大な場所において、複数回の走行で得られる計測結果を統合して、広大な空間情報を構築するといった利用実績はなかったのが実情である。このため、いざレーザースキャナを滑走路や誘導路で適用しようとする、克服すべき様々な技術的課題が出てくるとともに、道路で利用するなどの従来の利用法以上に、機種ごとの長所・短所が明瞭に現れてくるのが予想された。

そこで、本研究では、2010年10月に供用開始した羽田空港D滑走路において、車載型のレーザースキャナの適用性を検討するために、スキャン方向が異なる2機種、すなわち、走行方向前方をスキャンする機種と走行方向側方をスキャンする機種を取り上げ、それぞれについて滑走路への適用性を検討した。以下では、計測装置の概要や計測方法、計測結果例、データ整理方法についてとりまとめる。

2. 計測方法

車載型レーザースキャナを使ったときに、移動方向に関しては連続的なデータが得られることから、例えば、滑走路の縦断方向に移動しながらスキャンすると、縦断方向に関しては施設の維持管理の上で必要となる勾配や角折れに関するデータが連続的に得られる。むしろ、常時GPS観測により位置情報を更新し続ける車載型レーザースキャナの方が、通常のレベル測量で起こりうる誤差の蓄積を生まないため、広大な施設の測量には適してい

表-1 前方スキャン用に使用した機材の仕様

項目	仕様
位置精度	0.06m(車両位置) 0.10m(レーザー照射点)
高さ精度	0.15m
方位精度	0.18°
ピッチ精度	0.36°
ロール精度	0.72°
標準計測速度	40km/h以下(推奨)
最高計測速度	80km/h
許容段差	最大10cm
連続記録容量	8時間
最大記憶容量	500時間

るともいえる。そこで、D滑走路を対象として、走行方向前方をスキャンする機材と走行方向側方をスキャンする機材についてそれぞれ適用性を検討した。

以下に本研究で検討した2機種の特徴をとりまとめる。なお、ここで選定した2機種はそれぞれ前方スキャン用機材と側方スキャン用の機材の一例に過ぎず、同等あるいはそれ以上の性能を有する機材は他にもあり得ることを予め断っておく。計測技術の進歩には目覚ましいものがあり、レーザーสキャナによる測量を実務で適用する際には、最新の技術動向を踏まえて、適切な機材を選定する必要があるといえる。

2.1 前方スキャン用の機種

前方スキャン用に検討した機種は、移動体（自動車）と一体になった装置である²⁾。当該機種はGPSを3機搭載し、3基のGPSが形成する三角形の空間情報から精度の高い位置情報を取得できる。IMU（Inertial Measurement Unit：慣性姿勢計測装置）も搭載されている。計測は走行方向に対して直近前方の位置において幅約15mの範囲をスキャンする。レーザー距離は短いですが、サンプリングレートが毎秒約100,000点と大きいため、移動体の走行速度はある程度速くても対応できる。なお、実際の計測は、作業の安全性を考慮して20～30km/hで実施した。計測に用いた機材を写真-1に示し、その仕様を表-1にまとめた。滑走路に適用する場合には、走行ごとの測定範囲がある程度ラップするように、滑走路幅10mごとに走行ルートを設定して計測し、路肩を含め幅80mある滑走路を10m幅ごとに分割し、8回の走行（4往復または8片道）により滑走路全体を計測した（図-1）。

2.2 側方スキャン用の機種

側方スキャン用に検討した機材は、縦置きに設置した



写真-1a 前方スキャン用の車載型レーザースキャナの外部観（車両と一体型）



写真-1b 前方スキャン用の車載型レーザースキャナ（車両搭載部の拡大）

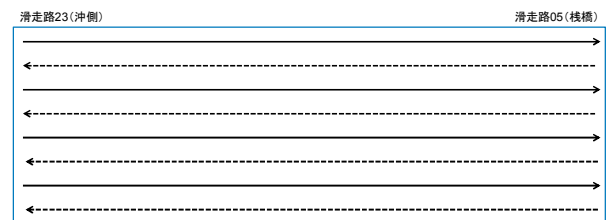


図-1 前方スキャン用機材による走行位置のイメージ図（左が滑走路23（埋立側）、右が滑走路05（桟橋側））

場合、移動体（自動車）の走行方向に対して直角方向片側（使用した機材では進行方向左側）をスキャンする。GPSによる位置情報のほかに、ジャイロと加速度計を使ったIMU（Inertial Measurement Unit：慣性姿勢計測装置）により姿勢情報を取得し、対象物の三次元空間情報を精度よく評価することができる。装置を横置きに設置すれば、移動体の前方をスキャンすることもでき、仕様は異なるが、上述の前方スキャン用の機種と同等の計測も可能である。本検討では、装置を縦置きにした標準的な使用方法を採用した。当該装置は取り外してヘリコプターや小型航空機（横置き）、船舶（縦置き）などにも搭載し、様々な移動体からのスキャンングに使用することもできる。

表-2 側方スキャン用に使用した機材の仕様

項目	仕様	
レーザー スキャナ部	計測距離	300m(反射率80%) 100m(反射率20%)
	計測最短距離	2m
	精度	±6mm
	レート	8333/秒
	計測範囲	80°
	ライン数	1~20/秒
モーション センサー部	方位精度	0.01°
	ローリング	0.01°
	ピッチング	0.01°
	速度	0.005m/s
	レート	100Hz

サンプリングレートは毎秒約8000点とやや小さいため、今回の検討では高密度な計測を行うために移動体の走行速度を20km/h以下とした。レーザー距離は300m程度と長いですが、レーザーの入射角が浅くなると計測精度が落ちる。一方で、レーザーの入射角が浅いデータは点群が粗になり、データ数が少なくなる。このため、複数回の計測データを重ね合わせて整理すると、入射角が浅いために誤差が大きくなることの影響は実質的に無視することができる。計測に用いた機材を写真-2に示し、その仕様を表-2にまとめた。なお、当該装置はレーザースキャナとモーションセンサーについて別々に購入して組み合わせられており、仕様をそれぞれに示す形で表示してある。路肩を含め幅80mの範囲を2往復の走行により滑走路全体を計測した(図-2)。

前方スキャン用の機種と側方スキャン用の機種についてとりまとめたが、上述したように、仕様は機種ごとに異なるばかりでなく、技術開発とともに改良されていくことに留意が必要である。ここで記述した前方スキャン用の機種の特徴として、3台のGPSを搭載することにより、3点の位置情報から形成される三角形の空間情報からGPSデータの高精度化を図っていることが挙げられる。これに対し、側方スキャン用の機種の特徴として、IMUによる姿勢情報の高精度化や長距離レーザーの利用が挙げられる。両方式にはそれぞれ長所・短所があり、一概にどちらが優れているとは言えないが、段差の激しい箇所を走行しない限り、測定結果は基本的にはGPSの測定精度に依存するところが大きい。

計測は、供用開始から約3カ月後の2011年1月19日未明に前方スキャンによる計測、それから約1年後の2012年1月11日未明と18日未明に前方スキャンと側方スキャンの両手法による計測をそれぞれ行った。2012年の調査では1



写真-2a 側方スキャン用の車載型レーザースキャナの外部観 (車載状況)



写真-2b 側方スキャン用の車載型レーザースキャナ (車両搭載部の拡大。今回の計測で使用した治具は異種のもので、かつ、夜間作業のためカメラは取り付けずに使用)

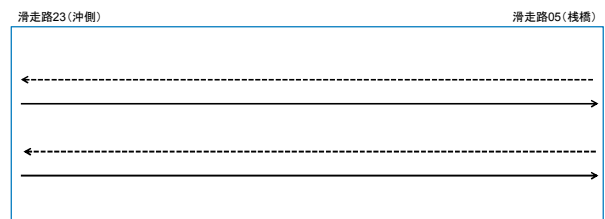


図-2 側方スキャン用機材 (進行方向左側をスキャン) による走行位置のイメージ図 (左が滑走路23 (埋立側)、右が滑走路05 (棧橋側))

週間間隔で2回調査した結果を比較することにより、調査結果の再現性 (信頼性) を確認した。前方スキャンと側方スキャンでは、スキャンしている範囲が違うため、両手法で計測した2012年1月11日に得られた点群情報を

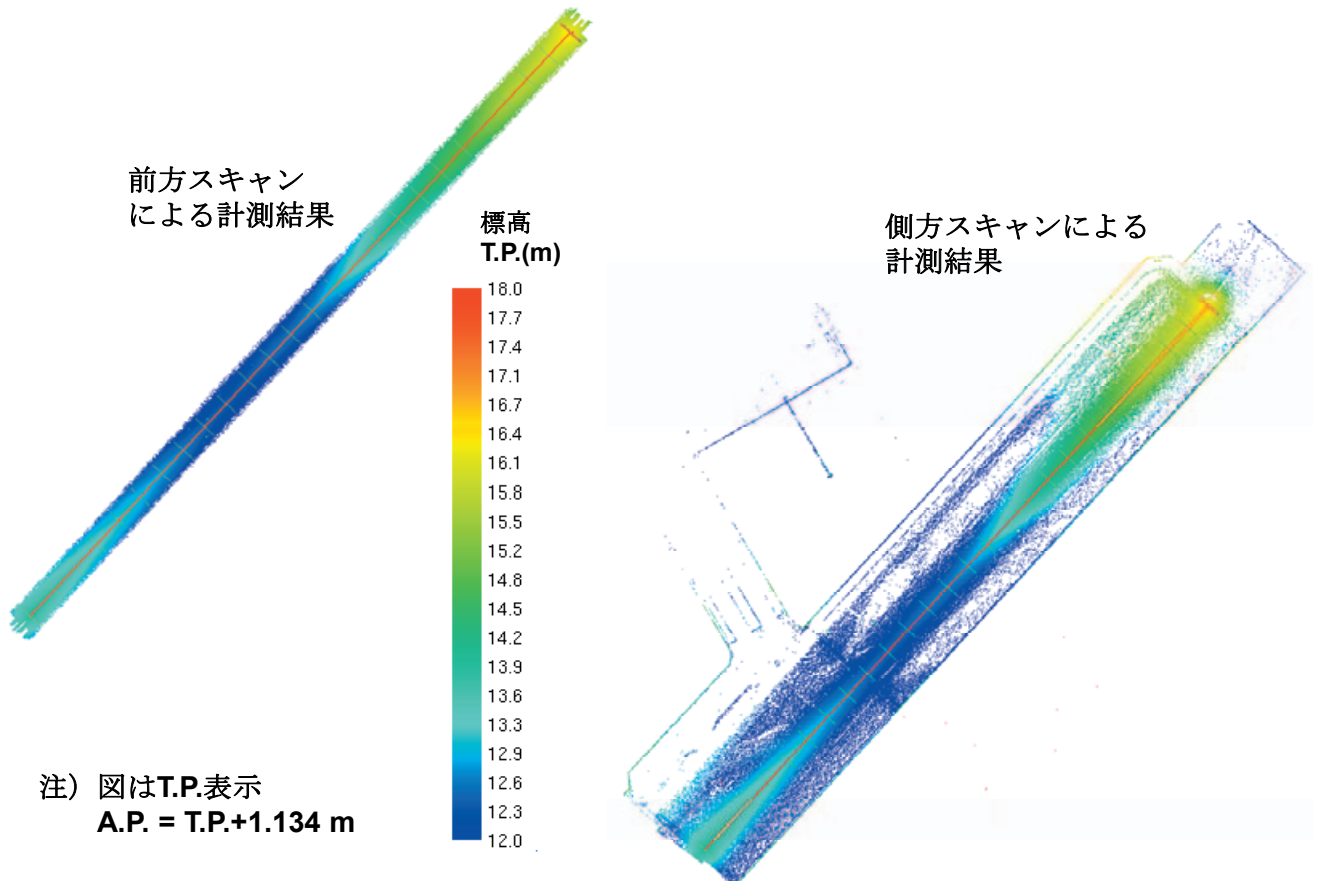


図-3 車載型レーザースキャナで得られたD滑走路の標高データの点群情報。

ロットすると、図-3のように違いが現れる。しかし、計測のターゲットとしている滑走路部分については、後で述べるようにGPSによる計測誤差がそれぞれにあるものの、ほぼ同様の点群データが得られている。ここで表示しているデータは、GPSの測定結果に基づきジオイド面に対応したT.P.で表示しているが、空港工事の標高管理で使われているA.P.で表すには+1.134mを補正する必要がある。

3. データ整理

3.1 点群情報

計測された点群情報のままでは、情報量が膨大すぎるとともに、様々なノイズや、走行ごとの計測誤差なども含まれているため、維持管理に使いがたい。そこで、データを使いやすいように平均化処理し、情報量を少なくすることにした。

滑走路の縦断面図と横断面図の一例として、2012年1月11日ならびに18日に取得した点群データについて、滑走路センター位置での縦断面図（図-4）と滑走路23端部（埋立側端部）から200m位置での断面図（図-5）を示す。ここ

で、図-4は左側が埋立側（滑走路23側）、右側が栈橋側（滑走路05側）となっている。また、図-5は、滑走路23側から見た断面となっている。これらの断面図上の点群は、注目している断面から奥行き方向に±0.5mの範囲に入る点群情報を抽出してプロットしたものである。標高は、ジオイド面を基準にした標高（T.P.に相当する。A.P.表示にするためには+1.134mを補正する必要がある）としている。

縦断面図および横断面図のいずれからも読み取れるように（ただし、縦断面図は縦軸の表示範囲が広いために読み取りにくい）、側方スキャンによる標高計測結果に対し、前方スキャンによる標高計測結果が80mmほど低くなっている。このような計測結果の違いが生じる要因として、両者におけるGPSデータの処理方法の違いが考えられる。

GPSによる位置情報計測は、ネットワーク型RTK-GPSにより処理しているが、この処理方法にはVRS方式とFKP方式の2方式がある。側方スキャン用の機材ではVRS方式を採用しているのに対し、前方スキャン用の機材ではFKP方式を採用している。

VRS方式では、複数の固定電子基準点のGPS観測デー

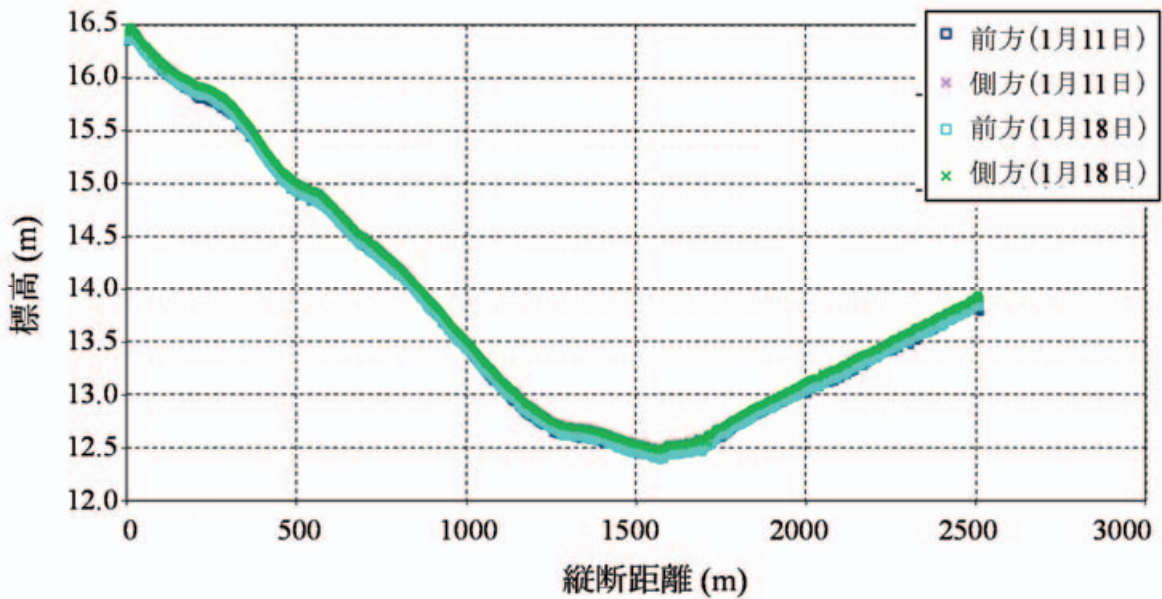


図-4 滑走路縦断面図（縦軸は標高T.P.(m)）

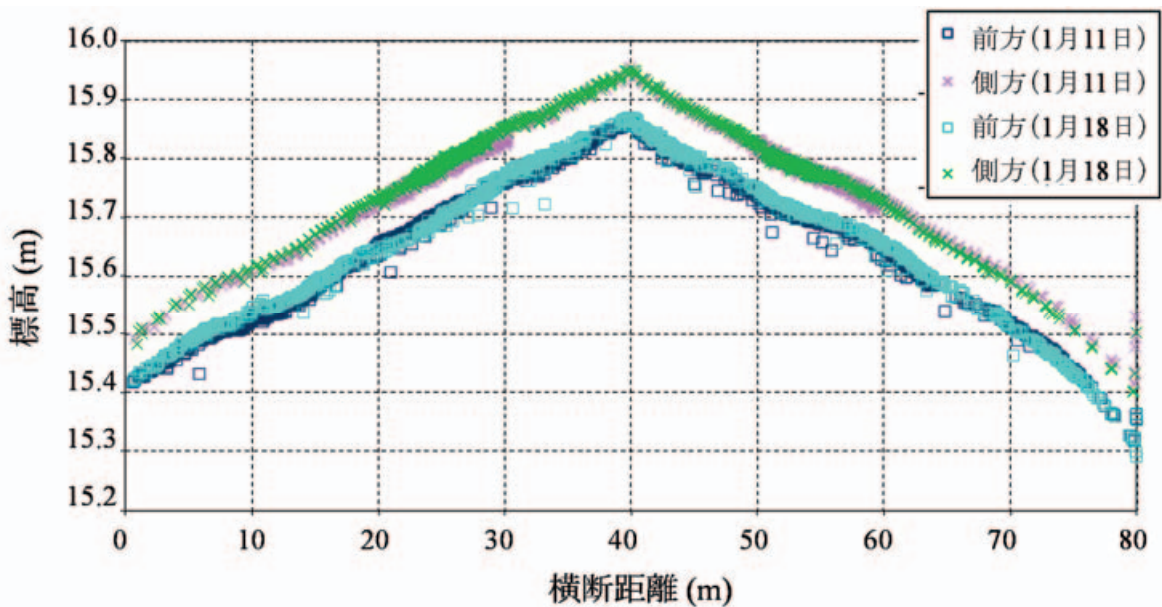


図-5 滑走路横断面図（滑走路23端から200m. 縦軸は標高T.P.(m)）

タを使って仮想基準点で生成される補正データを位置情報サービス事業者から購入して利用し、RTK観測を行う方式である。一方、FKP方式は、複数の固定電子基準点のGPS観測データを使って固定電子基準点で囲まれた空間における面補正パラメータを生成し、線形補間処理を行うことによって移動局の位置を求める方式である。なお、維持管理JVによるD滑走路の維持管理でもVRS方式を採用しているが、既存空港側の消防署庁舎屋上にGPS基準局を設置し、そこで実際に計測されたデータを基準局情報として使用したGPS処理を行っており、さらに

GPSは長時間のスタティック計測としている点から、常時移動している側方スキャン機材でのGPS処理とは、データ処理や測定精度が異なっている。

GPSによる計測結果には衛星状態等により揺らぎがあり、長時間にわたるスタティック計測を行わないと精度の高い計測結果は得られないが、移動体による瞬時の計測でも、標高データとして10cm程度の誤差でデータが得られる。なお、空港での計測では、衛星を遮る障害物がないため、移動体による計測中に衛星状態に著しい変化はなく、絶対値として誤差はあっても、計測中に生じる



図-6(a) 計測データから所定の範囲を抽出

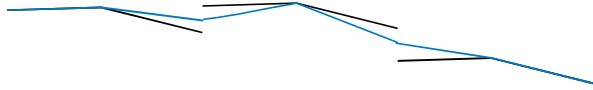


図-6(b) 計測ごとの中心を固定し隣接コースとのギャップを按分

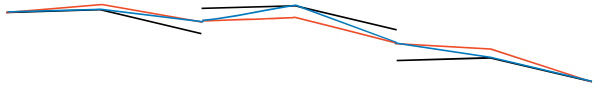


図-6(c) 各コースの中心を両端の補正量の平均値だけ移動

図-6 前方スキャンの走行ごとの測定結果の接合方法(概念図)

相対的な誤差はほとんどない。このため、複数の走行による計測結果を重ね合わせている図-5から読み取れるように、数時間の計測中には計測値の著しい相対的なずれは見られない。このことは、車載型レーザースキャナによる測定方法を滑走路や誘導路といった広大な空港施設においても利用可能であることを示唆している。しかし、GPS処理の違いによる絶対値としての計測誤差については解決しなければならないといえる。このことについては後述する方法によって解決できる。

3.2 走行ごとのデータ補正

前方スキャンの測定結果は、走行ごとのラップ部分が少ないため、図-6, 7に示すようにデータを整理した。図-6は説明用の概念図、図-7は実際のデータである。ここでは、2011年の計測結果のうち、滑走路23端部から距離495m位置での断面図を例にしてデータ整理方法について示す。なお、データ処理方法がわかりやすいように、鉛直方向を著しく拡大した図として示している。

作業手順は以下の通りである。走行ごとの10m幅の点群データを1m×1mメッシュごとに単純平均し、これを基に横断面図を作成する(図-6(a), 7(a))。なお、走行ごとに若干の値のずれがあることから、データは10m幅ごとに不連続になっている。走行ごとの計測中心を固定し、隣接走行で得られたデータとのギャップを按分してデータ間の接合を行う(図-6(b), 7(b))。次に、走行ごとのデータ両端の補正量の平均値だけ計測中心の標高を補正するとともに、左右の補正値を中心部からの距離で按分し、断面内のすべての点のデータを補正する(図-6(c),

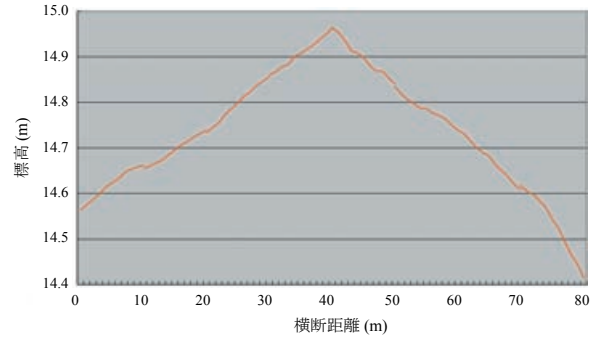


図-7(a) メッシュデータから作成した断面図

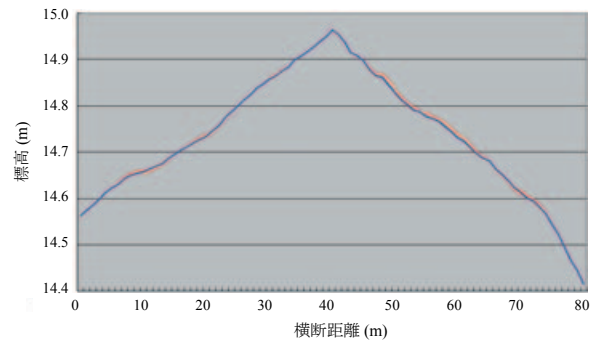


図-7(b) 計測ごとの中心を固定し隣接コースとのギャップを按分して接合した断面図

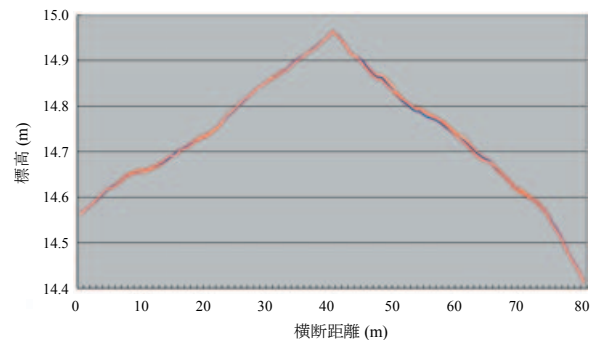


図-7(c) 各コースの中心を両端の補正量の平均値だけ移動させた断面図

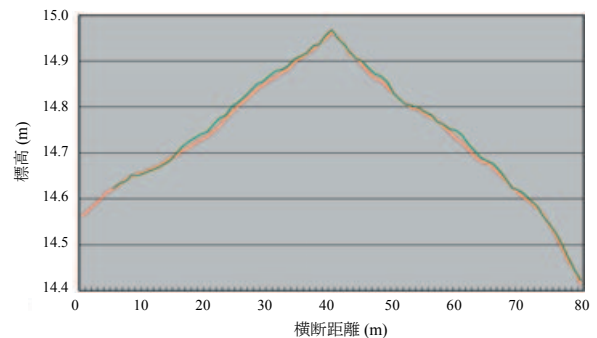


図-7(d) 上記補正断面と横断走行による計測結果との比較

図-7 前方スキャンの走行ごとの測定結果の接合方法(滑走路23端部から距離495m位置)

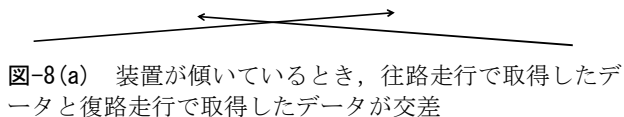


図-8(a) 装置が傾いているとき、往路走行で取得したデータと復路走行で取得したデータが交差

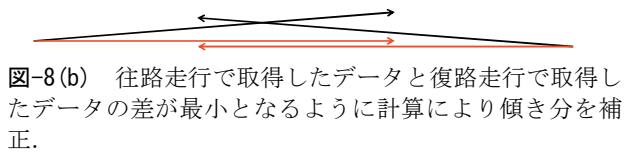


図-8(b) 往路走行で取得したデータと復路走行で取得したデータの差が最小となるように計算により傾き分を補正.

図-8 装置の傾きに対する側方スキャンデータの補正(概念図)

7(c). なお、滑走路の路肩端部は、隣り合うデータが存在しないことから、この端部の補正量は0として取り扱った。このようにして描いた断面図が図-7(d)である。同図には、別途横断方向の走行によって計測した断面図を重ねて描いているが、縦断方向に複数回走行した計測データと、横断方向に1回走行した計測データを比較してみると、両者の誤差は最大でも2cm未満であり、GPSそのものの計測誤差の範囲よりも著しく小さい範囲にあることがわかる。

側方スキャンの測定結果は、走行ごとのデータのラップ範囲が広いことから、点群情報を1m×1mのメッシュ情報にするに当たっては、各メッシュに入る点群の標高データを単純に平均化するだけで十分であった。なお、側方スキャンの機材の場合、レーザー距離が長いことから、機材の設置姿勢がわずかでも傾いていると、走行ごとにデータのギャップが生じやすい(図-8(a))。このため、設置姿勢のわずかなずれを補正するため、走行ごと

のデータ群のギャップが最小となるように修正したデータを生成し(図-8(b))、この修正データに対してメッシュ情報を作成することにした。

3.3 全体データの相対的なずれに対する補正

D滑走路の維持管理JVによる標高測量ではレベル測量を行っているが、レベル測量のためには基準点が必要である。そこで、D滑走路の接続部に基準点を設定し、基準点の標高情報をRTK-GPSによるスタティック観測で求めている。RTK-GPS観測の基準局として、既存空港施設側にある消防東庁舎屋上にGPSアンテナを設置している。スタティック観測では精度の高い情報が得られることが知られている。

そこで、車載型レーザースキャナでは絶対値としての誤差は大きい計測中の相対的な誤差は小さいこと、スタティック観測では高い精度の位置情報が得られることに着目し、両者の長所を活用することにした。すなわち、絶対的な値としてスタティック観測の情報を使い、相対的な空間情報として車載型レーザースキャナの観測結果を使うというものである。ただし、スタティック観測の位置が車載型レーザースキャナの観測範囲、すなわち、滑走路の舗装部分上ではないため、スタティック観測の結果から展開したレベル測量の結果を用いることにした。

2011年の計測と2012年の計測のそれぞれの直前に行われていたスタティック観測結果からのレベル測量結果を正しいものとして、車載型レーザースキャナの測定結果が相対的にどれだけずれていたかをまとめたものが表-3である。滑走路23端部からの距離0m, 1250m, 1695m,

表-3 車載型レーザースキャナの測定結果の相対的なずれに対する補正

計測方法・測定日		測定値				補正值	補正後			
		0m	1250m	1695m	2500m		0m	1250m	1695m	2500m
スタティック	2010/11/20・ 2010/12/25	17.727	13.899	13.697	14.990	0.000	17.727	13.899	13.697	14.990
前方スキャン	2011/1/19	17.634	13.797	13.581	14.916	0.080	17.714	13.877	13.661	14.996
スタティック	2011/11/4	17.567	13.797	13.644	14.995	0.000	17.567	13.797	13.644	14.995
側方スキャン	2012/1/11	17.639	13.885	13.757	15.075	-0.080	17.559	13.805	13.677	14.995
前方スキャン	2012/1/11	17.557	13.810	13.665	14.991	0.000	17.557	13.810	13.665	14.991

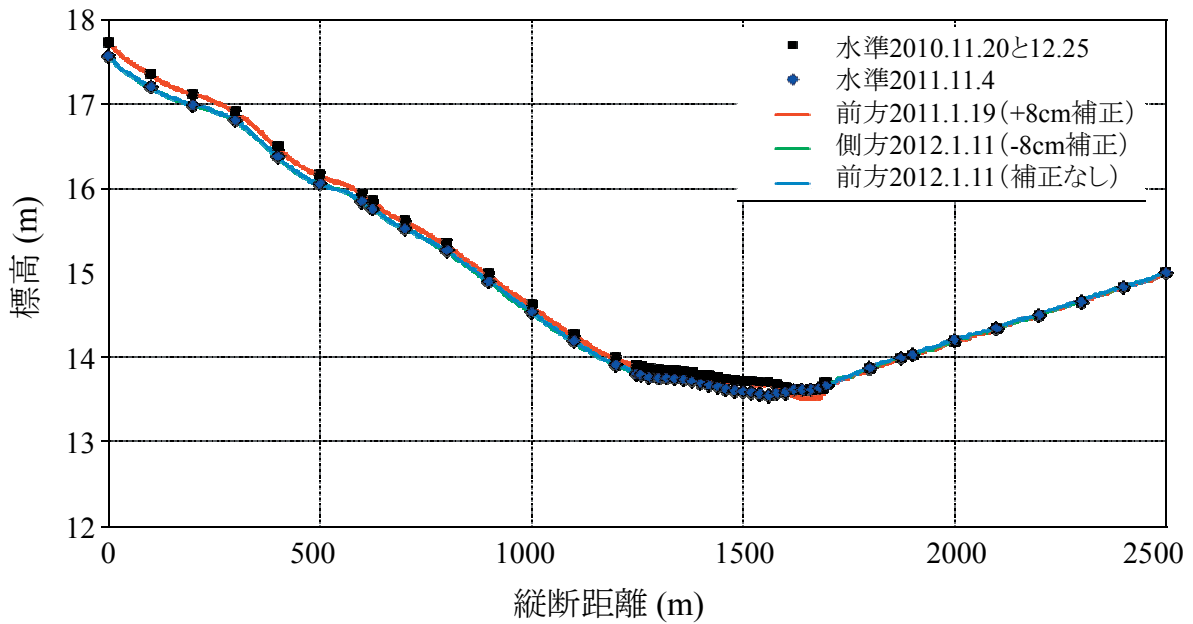


図-9(a) 滑走路センターにおける地表面標高の縦断図

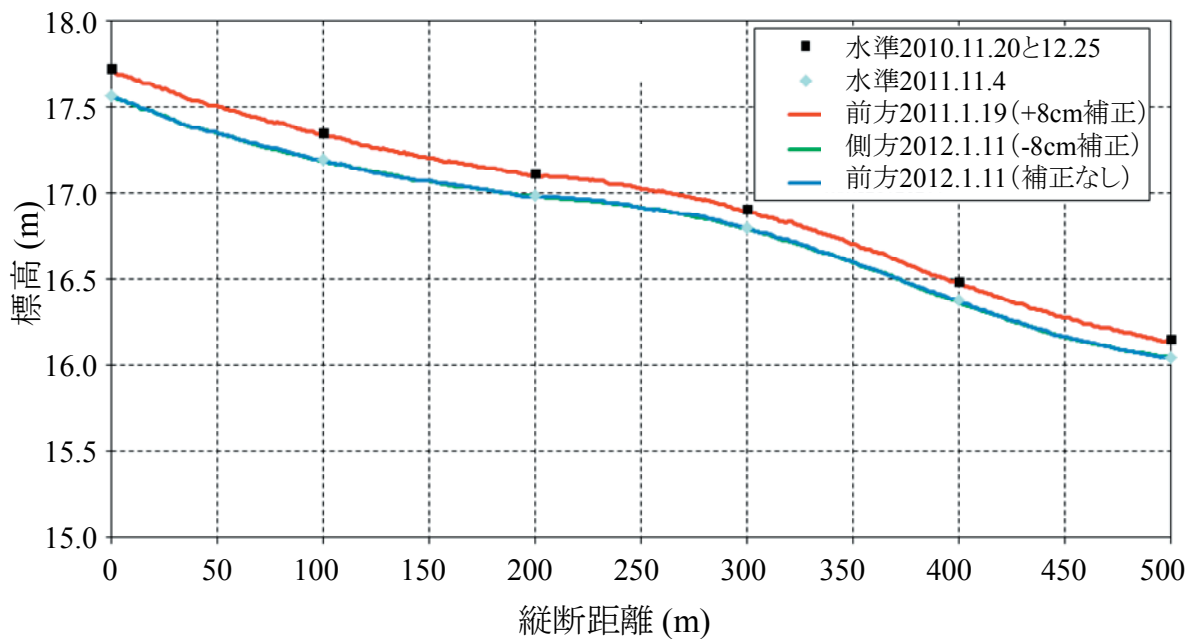


図-9(b) 滑走路センターにおける地表面標高の縦断図（距離0～500m部分の拡大図）

2500m（滑走路05端部）における滑走路中央部での標高情報を比較している。これによると、2011年の前方スキャンの結果については+8cm、2012年の前方スキャンの結果については補正なし、側方スキャンの結果については-8cmの補正を行うことにより、スタティック計測を基に展開したレベル測量結果と整合した空間情報になることがわかる。ここで興味深いのは、同じ原理の機種だからといっていつも補正が必要というわけではなく、衛星状

態等により計測精度は変化していることである。実際、前方スキャンの機種では、2011年の結果に対しては補正が必要であったが2012年の結果に対しては補正が不要であった。ただし、両者の測定に用いた機材は同種ではあるが別のものであったことを断っておく。

このように、車載型レーザースキャナによる計測では、GPS観測データを用いているために、GPS観測の誤差を含むことはやむを得ない。しかし、計測中の相対誤差は

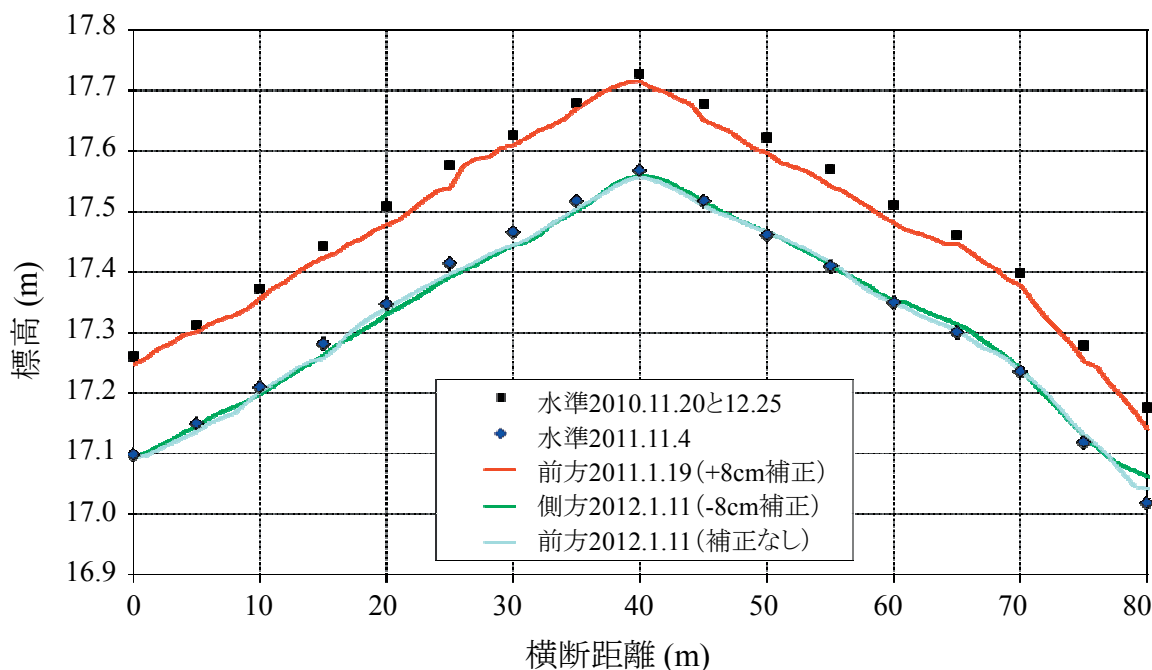


図-10 滑走路埋立側端部における地表面標高の横断図



図-11(a) 滑走路2500m全体の標高分布（平均化処理後）. 左が滑走路23（埋立側），右が滑走路05（棧橋側）



図-11(b) 滑走路23端部（図の左端）から1000mまでの範囲の標高分布（平均化処理後）の拡大図.

十分に小さいことを利用し、計測日ごとのGPS観測誤差を補正することで、誤差の問題を解決できるといえる。車載型レーザースキャナの計測範囲に標高データが既知の点を含むようにすれば、車載型レーザースキャナによる計測結果を補正できる。具体的には上述のように±8cm程度の補正が必要となることがあり得ることになる。

3.4 データの活用

計測結果の例として、滑走路中央部の縦断図と滑走路23側端部における横断図を図-9と図-10にそれぞれ示す。これらの図では、ジオイド面に対応したT.P.ではなく、空港工事における標高管理に合わせてA.P.により表示している。縦断図を見ると、棧橋部では沈下量は実質的にゼロであること、埋立部では供用開始後も沈下が継続していることなどが読み取れる。距離200m～600mの区間で明瞭に凹凸が発生しており、この不同沈下については、今後の変化傾向に着目する必要があると見られる。当該

箇所不同沈下は、過去の計測結果（舗装の途中段階を含む）においても見られていたことから、埋立て工事に生じたものであると考えられる。舗装の施工は標高ではなく層厚で管理されているため、埋立て工事に生じた不同沈下がそのまま現在の地表面形状の凹凸となっている。また、埋立部と棧橋部との接続部付近（縦断距離約1500m付近）では、複雑な挙動をしている。この部分では、沈下が滑走路で規定されている許容量2cmを超えないように、段差ができると補修工事を実施しており、その影響が計測結果にも表れている。車載型レーザースキャナによる連続的なデータは、レベル測量によって得られた点情報の間を補間している（図-9(b)や図-10）。平均化処理したデータは1m×1mメッシュとしてあるので、必要があれば1mごとの勾配分布まで計算することが可能となる。

1m×1mメッシュデータを作成することには様々なメリットがある。例えば、滑走路全体を細分してデータを

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W		
1	0	17.0961	17.10017	17.11151	17.12294	17.13545	17.14866	17.16259	17.17694	17.19176	17.20708	17.22294	17.23930	17.25612	17.27346	17.29128	17.30956	17.32828	17.34744	17.36702	17.38702	17.40744	17.42828	17.44954	
2	1	17.0974	17.09713	17.11091	17.12205	17.13211	17.14466	17.15636	17.16818	17.17951	17.19132	17.20365	17.21650	17.22987	17.24376	17.25816	17.27306	17.28846	17.30436	17.32076	17.33766	17.35506	17.37296	17.39136	17.41026
3	2	17.09331	17.09308	17.10799	17.11815	17.12812	17.14061	17.15459	17.16815	17.18135	17.19516	17.20956	17.22456	17.23996	17.25586	17.27226	17.28916	17.30656	17.32446	17.34286	17.36176	17.38116	17.40106	17.42146	17.44236
4	3	17.08971	17.08926	17.10676	17.11736	17.12729	17.14076	17.15574	17.17026	17.18534	17.19996	17.21516	17.23096	17.24736	17.26436	17.28196	17.30016	17.31896	17.33836	17.35836	17.37896	17.39916	17.41996	17.44136	17.46336
5	4	17.08654	17.08624	17.10566	17.11566	17.12544	17.13916	17.15444	17.16926	17.18464	17.19964	17.21526	17.23146	17.24826	17.26566	17.28366	17.30226	17.32146	17.34126	17.36166	17.38266	17.40426	17.42646	17.44926	17.47266
6	5	17.08377	17.08355	17.10482	17.11482	17.12444	17.13816	17.15344	17.16826	17.18364	17.19864	17.21426	17.23046	17.24726	17.26466	17.28266	17.30126	17.32046	17.34026	17.36066	17.38166	17.40326	17.42546	17.44826	17.47166
7	6	17.08111	17.08111	17.09999	17.11169	17.12461	17.13815	17.15231	17.16708	17.18246	17.19846	17.21506	17.23226	17.24996	17.26826	17.28716	17.30666	17.32676	17.34746	17.36876	17.39066	17.41316	17.43626	17.45996	17.48426
8	7	17.08899	17.08931	17.09846	17.10962	17.12141	17.13466	17.14929	17.16429	17.17956	17.19506	17.21086	17.22706	17.24366	17.26066	17.27816	17.29616	17.31466	17.33366	17.35316	17.37316	17.39366	17.41466	17.43616	17.45816
9	8	17.08956	17.08933	17.09879	17.10965	17.12169	17.13491	17.14941	17.16416	17.17916	17.19436	17.20986	17.22566	17.24176	17.25826	17.27516	17.29246	17.31016	17.32826	17.34686	17.36596	17.38556	17.40566	17.42626	17.44746
10	9	17.08542	17.08511	17.09478	17.10516	17.11626	17.12809	17.14147	17.15541	17.16991	17.18456	17.19936	17.21436	17.22956	17.24506	17.26086	17.27706	17.29366	17.31066	17.32816	17.34616	17.36466	17.38366	17.40316	17.42316
11	10	17.08156	17.08116	17.09138	17.10186	17.11266	17.12376	17.13506	17.14656	17.15826	17.17016	17.18226	17.19456	17.20706	17.21986	17.23296	17.24636	17.26006	17.27416	17.28866	17.30356	17.31886	17.33456	17.35066	17.36716
12	11	17.08294	17.08259	17.09311	17.09999	17.10954	17.12066	17.13246	17.14486	17.15786	17.17146	17.18566	17.19946	17.21386	17.22886	17.24446	17.26066	17.27746	17.29486	17.31286	17.33146	17.35066	17.37046	17.39086	17.41186
13	12	17.08012	17.08195	17.08627	17.09484	17.10668	17.12137	17.13816	17.15696	17.17676	17.19756	17.21836	17.23916	17.26096	17.28376	17.30756	17.33236	17.35816	17.38496	17.41276	17.44156	17.47136	17.50216	17.53396	17.56676
14	13	17.07423	17.07688	17.08218	17.09197	17.10332	17.11604	17.13024	17.14594	17.16314	17.18084	17.19904	17.21774	17.23694	17.25664	17.27684	17.29754	17.31874	17.34044	17.36264	17.38534	17.40854	17.43224	17.45644	17.48114
15	14	17.07022	17.07285	17.07731	17.08359	17.09161	17.10139	17.11297	17.12546	17.13886	17.15316	17.16836	17.18446	17.20146	17.21936	17.23816	17.25786	17.27846	17.29996	17.32246	17.34596	17.37046	17.39596	17.42246	17.44996
16	15	17.06743	17.06611	17.07181	17.07905	17.08769	17.10006	17.11414	17.12894	17.14454	17.16094	17.17814	17.19614	17.21494	17.23454	17.25494	17.27614	17.29814	17.32094	17.34464	17.36934	17.39504	17.42174	17.44944	17.47814
17	16	17.06503	17.06115	17.06653	17.07376	17.08237	17.10004	17.11407	17.13217	17.15061	17.16939	17.18851	17.20806	17.22796	17.24826	17.26896	17.29006	17.31156	17.33346	17.35576	17.37846	17.40156	17.42506	17.44896	17.47326
18	17	17.06209	17.05515	17.06031	17.06870	17.07837	17.09856	17.10706	17.11702	17.12834	17.14006	17.15316	17.16666	17.18056	17.19486	17.20956	17.22466	17.24016	17.25606	17.27236	17.28906	17.30616	17.32366	17.34156	17.35986
19	18	17.05749	17.04864	17.05532	17.06342	17.07344	17.08444	17.09641	17.10936	17.12326	17.13816	17.15306	17.16796	17.18286	17.19776	17.21266	17.22756	17.24246	17.25736	17.27226	17.28716	17.30206	17.31696	17.33186	17.34676
20	19	17.05416	17.04233	17.04946	17.05636	17.06506	17.07464	17.08514	17.09664	17.10914	17.12264	17.13714	17.15164	17.16614	17.18064	17.19514	17.20964	17.22414	17.23864	17.25314	17.26764	17.28214	17.29664	17.31114	17.32564
21	20	17.05117	17.03788	17.04342	17.04939	17.05679	17.06464	17.07296	17.08176	17.09106	17.10086	17.11116	17.12196	17.13326	17.14456	17.15586	17.16716	17.17846	17.18976	17.20106	17.21236	17.22366	17.23496	17.24626	17.25756
22	21	17.04924	17.03112	17.03496	17.04064	17.04826	17.05784	17.06844	17.07904	17.09064	17.10224	17.11384	17.12544	17.13704	17.14864	17.16024	17.17184	17.18344	17.19504	17.20664	17.21824	17.22984	17.24144	17.25304	17.26464
23	22	17.04749	17.02403	17.03193	17.04041	17.05074	17.06204	17.07434	17.08764	17.10194	17.11724	17.13254	17.14784	17.16314	17.17844	17.19374	17.20904	17.22434	17.23964	17.25494	17.27024	17.28554	17.30084	17.31614	17.33144
24	23	17.04769	17.01875	17.0234	17.03195	17.04286	17.05517	17.06847	17.08277	17.10007	17.11437	17.12867	17.14297	17.15727	17.17157	17.18587	17.20017	17.21447	17.22877	17.24307	17.25737	17.27167	17.28597	17.30027	17.31457
25	24	17.04102	17.01227	17.01866	17.02893	17.04161	17.05577	17.07143	17.08859	17.10675	17.12591	17.14507	17.16423	17.18339	17.20255	17.22171	17.24087	17.26003	17.27919	17.29835	17.31751	17.33667	17.35583	17.37499	17.39415
26	25	17.04004	17.00465	17.00949	17.02291	17.03824	17.05458	17.07192	17.09026	17.10960	17.12994	17.15028	17.17062	17.19096	17.21130	17.23164	17.25198	17.27232	17.29266	17.31300	17.33334	17.35368	17.37402	17.39436	17.41470
27	26	16.99817	16.99615	17.00234	17.01076	17.02164	17.03408	17.04808	17.06364	17.08076	17.09944	17.11872	17.13860	17.15908	17.17916	17.19984	17.22012	17.24096	17.26236	17.28432	17.30684	17.32992	17.35356	17.37776	17.40256
28	27	16.98961	16.99022	16.99454	17.00035	17.01472	17.02660	17.03736	17.04702	17.05558	17.06304	17.06940	17.07466	17.07892	17.08218	17.08444	17.08570	17.08596	17.08522	17.08348	17.08074	17.07700	17.07226	17.06652	17.05978
29	28	16.98234	16.98299	16.98628	16.99451	17.00566	17.01773	17.02974	17.04270	17.05656	17.07132	17.08698	17.10354	17.12090	17.13906	17.15802	17.17778	17.19834	17.21970	17.24186	17.26482	17.28858	17.31304	17.33820	17.36406
30	29	16.97475	16.97555	16.97923	16.98	16.98770	17.01041	17.02591	17.04326	17.06247	17.08357	17.10657	17.13147	17.15827	17.18607	17.21487	17.24467	17.27547	17.30727	17.34007	17.37387	17.40867	17.44447	17.48127	17.51907
31	30	16.96745	16.96742	16.97185	16.98049	16.99132	17.00432	17.01867	17.03437	17.05142	17.06982	17.08952	17.11052	17.13282	17.15642	17.18132	17.20752	17.23512	17.26412	17.29452	17.32632	17.35952	17.39412	17.42912	17.46452
32	31	16.96011	16.96	16.96626	16.97637	16.98854	16.99777	17.00994	17.02426	17.04072	17.05932	17.07912	17.09912	17.11932	17.13972	17.16032	17.18112	17.20212	17.22332	17.24472	17.26632	17.28812	17.31012	17.33232	17.35472
33	32	16.95299	16.95435	16.95926	16.97166	16.98153	16.99257	17.00489	17.01844	17.03322	17.04934	17.06680	17.08560	17.10474	17.12414	17.14374	17.16354	17.18354	17.20374	17.22414	17.24474	17.26554	17.28654	17.30774	17.32914
34	33	16.95013	16.95075	16.95313	16.96272	16.97391	16.98669	17.00117	17.01644	17.03260	17.04966	17.06762	17.08648	17.10624	17.12690	17.14846	17.17092	17.19428	17.21854	17.24370	17.26976	17.29672	17.32458	17.35334	17.38300
35	34	1																							

(2012年8月10日受付)

謝辞

本研究は、関東地方整備局からの受託研究の一部として実施されたものである。ここに記し、関係者に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 近藤雅信, 小野貴稔 (2011): 講座「わかって使うレーザー計測」2. レーザ計測による地形情報取得の基礎, 地盤工学会誌, Vol. 59, No. 10, pp. 68-76.
- 2) 西山 哲, 沢田和秀, 里 優 (2012): 講座「わかって使うレーザー計測」7. 事例その4: 車両搭載型レーザー計測装置の利用, 地盤工学会誌, Vol. 60, No. 3, pp. 63-66.

港湾空港技術研究所資料 No.1263

2012. 12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2012) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています