

航空機搭載型レーザースキャナーの精度検証手法に関する研究

国際航業株式会社
空間計測技術部 織茂郁、横尾泰広

1. はじめに

近年、3次元地形を計測する手法として航空機搭載型レーザースキャナーの利用が高まっている。従来の写真測量と比較すると短時間に、高精度な地形データが得られることが要因となっている。また、リアルタイム配信対応の電子基準点がさらに整備されることによって、航空機搭載型レーザースキャナーによる計測の簡便性が向上し、さらに需要が拡大すると思われる。しかし、電子基準点の配点密度は、三角点の配点密度に対して疎であるため、プラットフォームと地上 GPS 基準局が大きく離れる場合が出てくる。そこで、「国土交通省国土地理院との共同研究、詳細地理情報を用いた実用的GISアプリケーションの開発に関する研究」において、地上 GPS 基準局とプラットフォーム間の基線長および地表面の植生の有無、地形などの外部要因とレーザ点群精度の関係を検証した結果をここに報告する。

2. 概要

(1) 実験の方法

本研究は、岐阜県の大垣市の山間部、都市部の2地区にて行った。航空機搭載型レーザースキャナーと外部要素が与える精度評価の要素として以下の項目について検討を行った。研究対象地域を図1に示す。

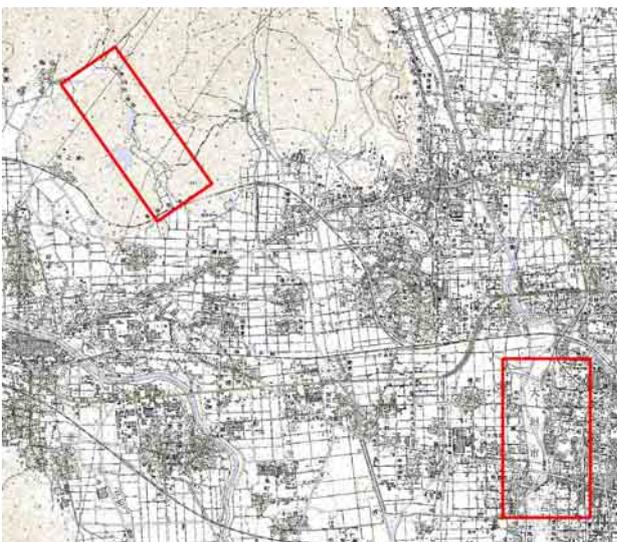


図1 研究対象地域

1) GPS 基線長に関する精度評価

複数の GPS 基準点を利用し、GPS 基線長と点群データの精度評価。

2) DSM 間隔と精度

標高単点密度の違いによる DSM の精度評価。

3) 土地被覆状態

植生、地形など自然条件と DSM の評価。

(2) レーザースキャナー計測

レーザ計測は、表1のとおり行った。

表1 計測諸元

プラットフォーム	航空機(固定翼)
FOV	18度
対地高度	8500ft
飛行速度	110kt
スキャンレート	24Hz
パルスレート	24000Hz
データ密度	概ね1点/4m ²
計測日	2002年1月19日

3. GPS基線長に関する精度評価

航空機搭載型レーザースキャナーにおいて、計測したデータは、図2に示す工程で解析が行われる。ここでは、研究対象地域周辺にある複数の電子基準点(表2)を使用し、各工程においてGPS基線長が与える影響について、以下の3項目について評価した。

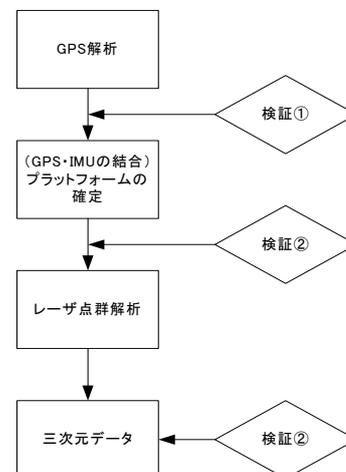


図2 解析工程および検証点

表2 使用した電子基準点

電子基準点名	山間部	都市部	所在する都道府県
本巢	16.7km	16.3km	岐阜県
甚目寺	34.5km	28.4km	愛知県
マキノ	45.2km	50.7km	滋賀県
水口	58.1km	58.5km	滋賀県
白鳥	59.8km	61.1km	岐阜県
加茂白河	62.1km	59.3km	岐阜県
越前	79.0km	84.9km	福井県
額田	86.8km	80.7km	愛知県
渥美	99.4km	93.9km	愛知県
室生	102.3km	101.3km	奈良県
飯田	116.3km	112.1km	長野県
大阪	122.4km	123.8km	大阪府

検証①：GPS 解析後の標準偏差について精度評価した。

検証②：最も基線長が短い本巢の電子基準点から解析したデータを基準とした GPS・IMU 結合後のプラットフォームの位置姿勢精度を GPS 基線長に対して相対評価した。

検証③：電子基準点ごとにレーザ点群解析を行い、レーザ点群を生成する。そのレーザ点群から等高線を発生させ、DM データ上のある一定以上の面積をもつ構造物上において各基線から作成した等高線の水平位置の較差を評価した。

(1) GPS 解析後の標準偏差

電子基準点ごとに GPS 解析を行い、解析結果の標準偏差の平均を図 3 に示す。ここでいう標準偏差とは、測定した搬送波位相のデータを GPS 衛星の位置誤差を無視して所定の計算式に乗せて計算した結果であるため、搬送波位相測定のばらつきが大きく影響する。従って、プラットフォームの位置精度を直接示しているものではない。しかし、搬送波位相測定のばらつきは、解析状況の良否を示しているため、ここでは精度評価に用いた。GPS 解析において、基線長が長くなるほど標準偏差が大きくなる傾向がある。これは、搬送波位相のばらつきが大きくなり、プラットフォームの位置決定が困難になっていることを示している。

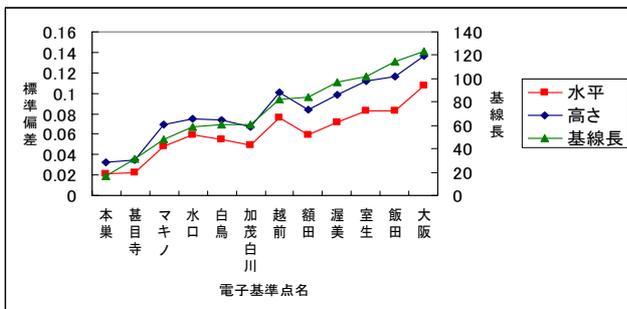


図3 基線長と標準偏差の関係

(3) プラットフォームの相対評価

GPS 解析を行った結果を用いて GPS・IMU 結合解析を行った。図 4 に、本巢の電子基準点を基準とした GPS・IMU 結合解析後のプラットフォームの相対位置を示す。また、図 5 に、航空機搭載型レーザスキャナ計測と同時に行ったデジタルカメラによる撮影の写真主点から求めた位置・傾きを、本巢の電子基準点を使用した場合と比較した較差の平均を示す。IMU データとの結合結果から、位置においては最大約 15cm、ロール角とピッチング角の姿勢においては約±0.00003° となった。また、ヘディング角の姿勢においては最大-0.0007° と良好な結果となった。GPS 解析で生じた航空機の位置座標誤差に対して誤差推定計算が良好に働き、誤差を補正したことを示している。

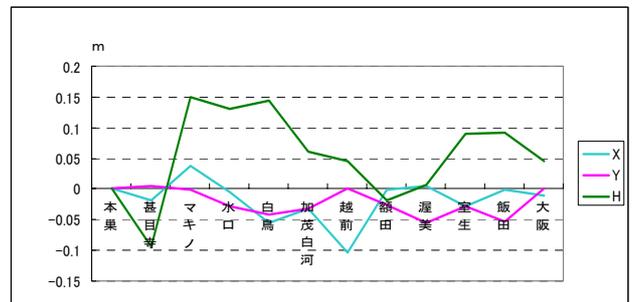


図4 GPSとIMU 結合後、プラットフォーム相対精度(位置)

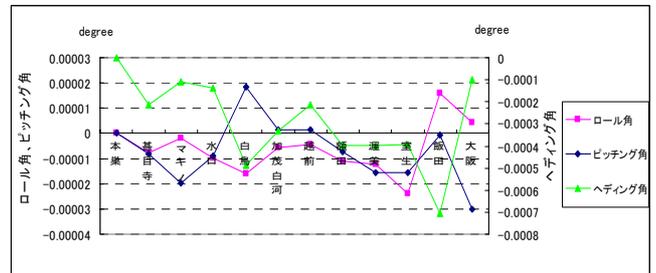


図5 GPSとIMU 結合後、プラットフォーム相対精度(姿勢)

(3) 等高線による位置精度の確認

各電子基準点から解析したレーザ点群 (ランダム) から TIN を作成した後、DM データ上のある一定の大きさの面積を持つ構造物において等高線を発生させ、水平位置のずれを評価した。図 6 に等高線と 1/2,500 都市計画図を重ね合わせた図を示す。各電子基準点の解析データから作成した等高線は、構造物と重なることがわかる。各電子基準点の解析データから作成した等高線を比較すると、水平位置の最大較差は東西方向約 25cm、南北方向約 18cm となった。また、最も基線長が短い本巢の電子基準点の解析データとのずれを比較すると、水平位置の最大較差は東西方向約 12cm、南北方向約 12cm となった。

また、基線長が約 120km の電子基準点を用いた場合でも約 30cm という良い結果を得た。

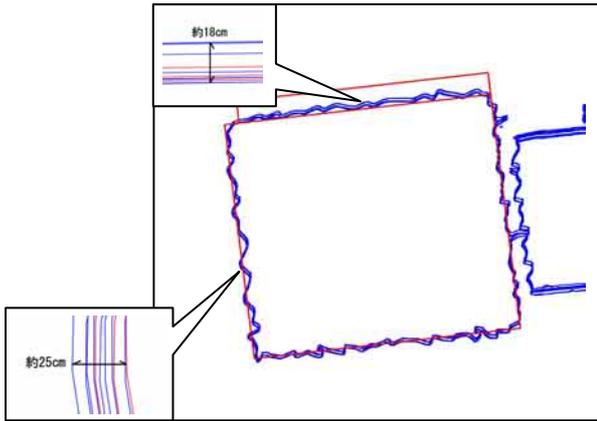


図6 等高線と都市計画図の重ね合わせ

4. DSM グリッド間隔と精度

航空機搭載型レーザスキャナで計測したランダムなレーザ点群から DSM (グリッド間隔: 1m、2m、5m) を作成し、以下の項目について地形表現の評価を行った。

(1) DSM グリッド間隔と地形表現

レーザ点群から作成した DSM グリッド (間隔: 1m、2m、5m) について、以下の地表の構造物がビューア上で表現されているかどうか評価した。基準となるデータは、地上型レーザスキャナで計測した 3 次元データとした。また、表現されているかどうかの判断は、人間が目視によって行った。評価対象としたのは、以下に示す地形を評価対象とした。

- 1) 土手上的の道路 (幅員約 7m)
- 2) 土手下の道路 (幅員約 4m)
- 3) 溝 (幅約 2m)

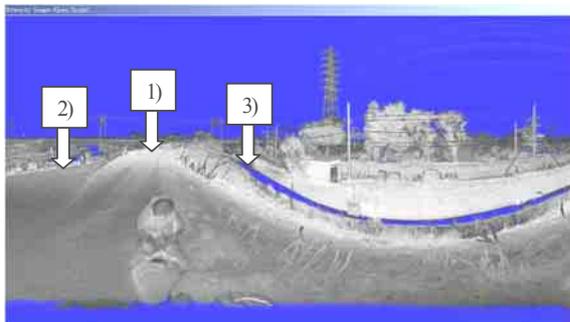


図7 地上型レーザスキャナによる 3 次元データ

それぞれのグリッドにおいて土手上的の道路が表現されていることがわかる。しかし、グリッド間隔が大きくなっていくにつれて、土手や河岸の境が不鮮明になる。また、幅約 4m の道路においては、5m グリッド DSM では、表現されていない。5m のグリッドに関しては、このような人工的地形を表現する精度には至っていないといえる。

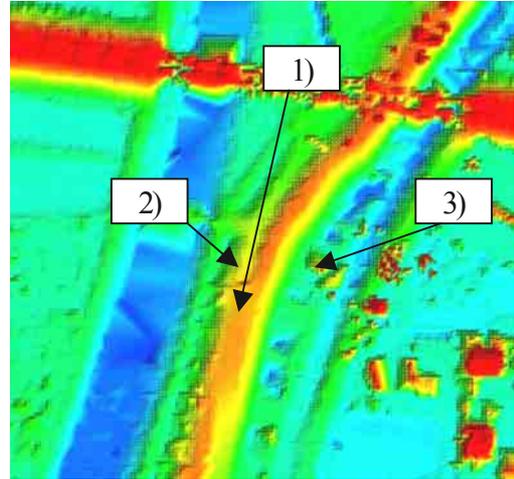


図8 航空機搭載型レーザスキャナによる DSM データ(1m)

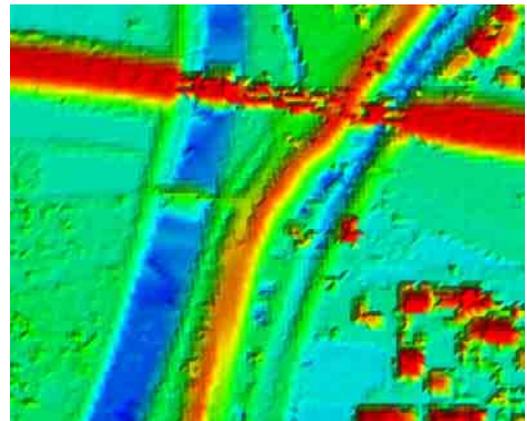


図9 航空機搭載型レーザスキャナによる DSM データ(2m)

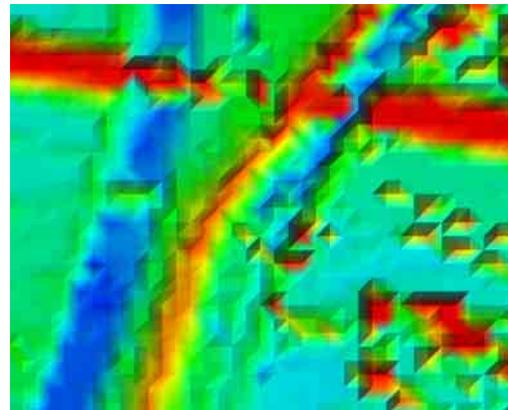


図10 航空機搭載型レーザスキャナによる DSM データ(5m)

(2) DSM 間隔と等高線

レーザ点群から作成した DSM グリッド (間隔 : 1m、2m、5m) について等高線を作成し、DM データの等高線形状と比較した (図 11~図 13)。グリッド間隔が拡大するにつれ微地形を表現しなくなり等高線が滑らかになる。しかし、等高線の位置には、差が見られないことがわかる。

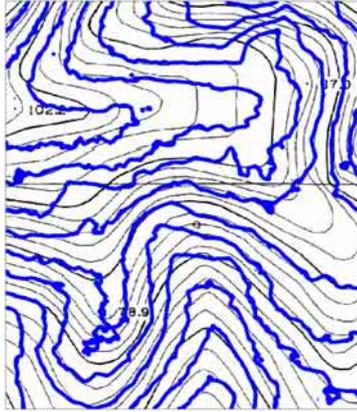


図11 1mグリッドから発生させた等高線(青)とDMデータの等高線(黒)

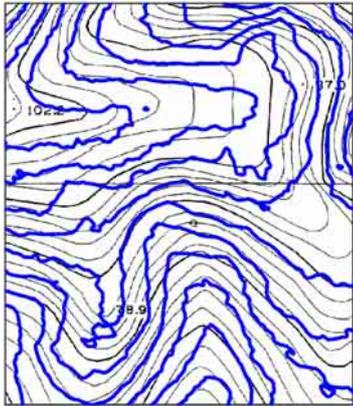


図12 2mグリッドから発生させた等高線(青)とDMデータの等高線(黒)

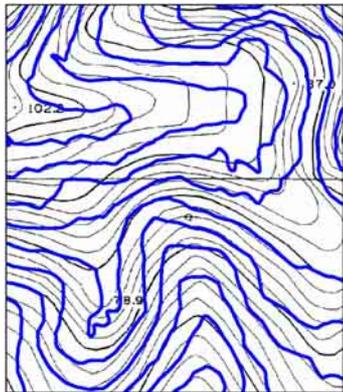


図13 5mグリッドから発生させた等高線(青)とDMデータの等高線(黒)

5. 土地被覆状態とデータ点群密度の関係

大垣市の都市計画図 (DM データ) を参考に、土地被覆を分類し、(1) 土地植生被覆状態とレーザ点群密度について、(2) 植生被覆下での標高精度について評価した。

(1) 土地植生被覆状態とレーザ点群密度について

大垣市の都市計画図 (DM データ) を参考に、土地被覆を分類し、各項目ごとに 1km² あたりのデータ密度を算出し、その数値を基に、反射率を算出した (表 3)。

反射率の計算式は、数式 1 のとおりに各植生被覆状態の 1km² あたりのデータ点数を今回計測した裸地の 1km² あたりの平均点数で除することにより、算出した。また、森林においては、フィルタリング前の 1km² あたりの平均点数でフィルタリング後に残った点数を除することにより、残存率を求めた。

表 3 土地被覆状態とデータ点群の残存 (反射) 率

項目	1km ² あたりの点数	平均値	残存率
森林	526933	1118548	47%
項目	1km ² あたりの点数	平均値	反射率
草地	469448	401042	117%
水田	345980	401042	86%
畑	327220	401042	82%
空き地	388579	401042	97%
建物	314972	401042	79%
道	284587	401042	71%
水面	76448	401042	19%

数式 1 反射率の算出式

$$\text{反射率} = \frac{\text{各植生被覆状態の 1km}^2 \text{あたりの点数}}{\text{裸地における 1km}^2 \text{の点数}}$$

計測時期が 1 月と言う事もあり、水田には、稲はなく地表面が露出している状態であったため、1km² あたりの点数において畑とほぼ同数となった。一般的に道路は、黒色のアスファルトで舗装されているため、データのリターン率が低下する。河川 (水面) においては、水面にレーザ光線を照射すると鏡面反射を起こすこと、また、水面へとレーザ光が吸収されてしまうことで、一般的には、反射したレーザ光線をほとんど観測できない。しかし、水面の波や水面付近に浮遊するゴミ等によって、若干のリターンパルスが得られるため、今回の結果となった。

(2) 植生被覆下での標高精度

植生被覆下での標高精度については、森林内にて地上型レーザスキャナで計測した地表面データを基準とし、航空機搭載型レーザスキャナから取得した点群データと比較した。検証を行った箇所を図14に示す。航空機搭載型レーザスキャナの点群データは、本県の電子基準点を用いて解析した。その後フィルタリングを行い、地表面抽出を行ったデータを用いた。

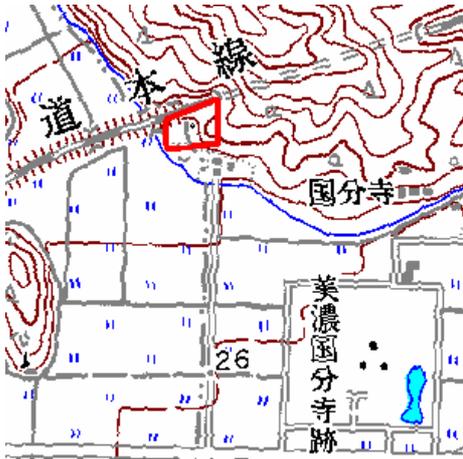


図14 検証位置



図15 地上型レーザスキャナによる3次元画像



図16 地上型レーザスキャナ計測作業風景写真

検証のフローを図17に示す。地上型レーザスキャナで計測した3次元データをCAD上に読み込みTINを作成した。その後、フィルタリング後の航空機搭載型レーザスキャナで計測したデータをCAD上に読み込み、航空機搭載型レーザスキャナのレーザ点群とTINを作成した地上型レーザスキャナの較差を検証した。

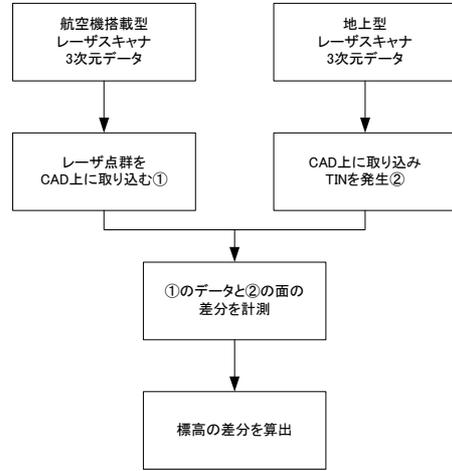


図17 検証フロー図

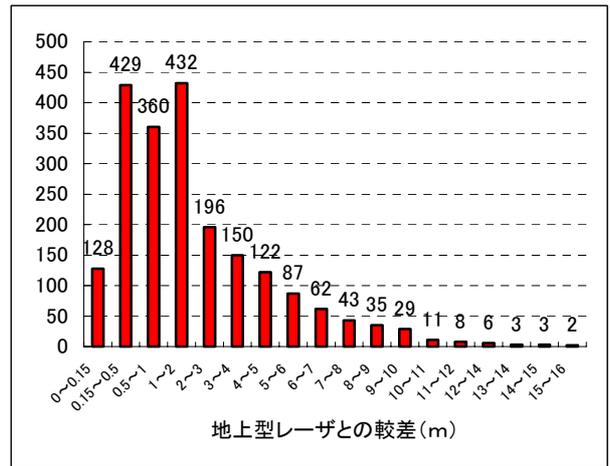


図18 植生被覆下での標高精度結果

表1 植生被覆下における地上型レーザスキャナとの比較検証

絶対値平均	2.252m
標準偏差	2.537m

検証結果において、較差の平均2.252m、標準偏差2.537mという結果になった。また、全2106個のデータのうち、約6%にあたるデータにおいて、航空機搭載型レーザスキャナのメーカー精度(15cm)以内になった。標高値は全体的に、航空機搭載型レーザスキャナから取得したデータが地上型レーザスキャナから取得したデータよりも低く

出ている。これには、以下の理由が考えられる。

航空機搭載型レーザスキャナによる計測は、地表面に対して、ほぼ垂直な位置から計測するのに対し、地上型レーザスキャナによる計測は、地表面に対して鋭角な角度で計測する。そのため、レーザ光線が真の地表面まで到達しない場合がある。

6. まとめ

本研究結果より基線長 120km までレーザ点群は、十分な精度を満たすことが実証された。しかし、電子基準点の周辺地形は、設置当時と現在の状況が大きく変わり、マルチパス等のノイズデータを取得しやすい状況になっている電子基準点も存在する。そのため、そのような電子基準点を地上 GPS 基準局とした場合、プラットフォームの位置精度を劣化させ、レーザ点群の精度に影響を与えることが考えられるため、電子基準点が取得したデータの航空機搭載型レーザスキャナ計測における良否を検証する必要がある。

DSM グリッドと地形表現においては、1m、2m グリッドともほぼ同じように地形を表現したが、5m グリッドにおいては、地形を表現するに至らない。しかし、急峻な地形において等高線、グリッド間隔が大きくなるほど、位置的なものは変化しないが、微地形を表現しなくなり、等高線の形状が滑らかになることがわかった。

航空機搭載型レーザスキャナ (固定翼) による計測は、プラットフォームが絶えず高速で移動し、レーザスキャナのミラーを左右に動かし計測しているため、同一地点の複数回の計測が非常に困難である。そのため、現状の計測データの精度評価は、上空視界が良好で平坦な裸地において、水準測量結果と最寄りのレーザ点群データと比較し、標高精度を検証する方法を採っている。しかし、この方法は限られた条件のなかでの局所的な検証であって面的ではない。また、本研究において行った地上型レーザスキャナを用いた精度検証について、地表面に下草の無い裸地や道路などにおいては、面的な精度検証が可能となり有効であるが、森林内の計測においては、地表面の下草や計測視点の影響で、比較する正確な地表面データを計測できない問題点がある。これらの問題を解決し、広範囲かつ正確に精度評価を行う手法の確立が急務であると考えられる。

今回、報告したレーザスキャナの精度検証は、一部であり、公共測量の作業方法として採用されるよう、今後も精度検証の研究を進めていく必要がある。

参考文献

土屋淳、辻宏道 著：やさしい GPS 測量：日本測量協会 2001, 328～378 頁

土屋淳、辻宏道 著：GPS 測量の基礎：日本測量協会 1999, 141～150 頁

Mohamed M.R.Mostafa and Joseph Hutton, (2001):

Airborne Kinematic Positioning and Attitude Determination Without Base Station, International Symposium On Kinematic Systems in Geodesy Geomatics and Navigation (KGIS2001)

Mohamed M.R.Mostafa and Joseph Hutton (2001)

Direct Positioning and Orientation Systems,

How Do They Work? What is the Attainable Accuracy? : The American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Meeting., St. Louis, MO, USA, 2001

問い合わせ先

国際航業株式会社

国土空間事業本部 空間計測技術部

〒191-0065 東京都日野市旭が丘 3-6-1

TEL042-583-3143

MAIL ramse@kkc.co.jp

Web <http://www.earthon.co.jp/>