

UAV 搭載レーザ計測システムの開発

河村 倫明

情報化施工の推進は、測量分野においても成果の活用面で本格的な取組みを推進させている。その一つに UAV を用いた 3 次元解析への取組みが挙げられる。本報告では、情報化施工に重要である地表面情報を高密度・高精度に取得するための取組みとして、レーザ測量システムを UAV に搭載した事例を紹介する。産業用ラジコンヘリコプターへの機材搭載から基礎的なデータ取得と精度検証、さらなる改良によるドローンタイプへの搭載と実地検証における処理速度を中心に報告する。

キーワード：情報化施工，UAV，航空レーザ測量，基本性能，現場検証，処理速度

1. はじめに

平成 25 年 3 月には情報化施工推進会議において「情報化施工推進戦略」が取りまとめられ、起工測量の効率化や出来高・出来形管理等、情報共有のプロセスに測量が位置付けられた¹⁾。これにより、情報化施工に対する測量成果の活用に関して本格的な取組みが進展してきた。

これと並行して、無人航空機（Unmanned aerial vehicle：以下「UAV」）に関しても急速な発展をしてきた。特に近年の動向として、構成機器の高性能化や軽量化によりペイロードが格段に向上し搭載するセンサー等の自由度も広がった。機体自体の価格も安価となり、安定した操縦性能は専門の操縦者を選ばないところまで発展している。

さらに UAV から得られた空中写真を解析し 3 次元情報を生成する SfM（Structure from Motion）ソフトウェアも比較的安価に提供されはじめた。これにより UAV によって撮影された空中写真から 3 次元情報を作成する業務が飛躍的に発展している状況である。

測量分野においては、UAV 写真測量の基礎研究を踏まえ、「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」（平成 28 年 3 月：国土地理院）が発行された。これにより、公共事業における UAV 写真測量の活用は様々な方向へ発展することが容易に想定できる。

各種センサーのダウンサイジングは、UAV への搭載を飛躍的に発展させた。UAV の高性能化とセンサーの小型化は、従来有人の航空機でしかできなかった空中からの様々な計測を可能とさせている。このシステ

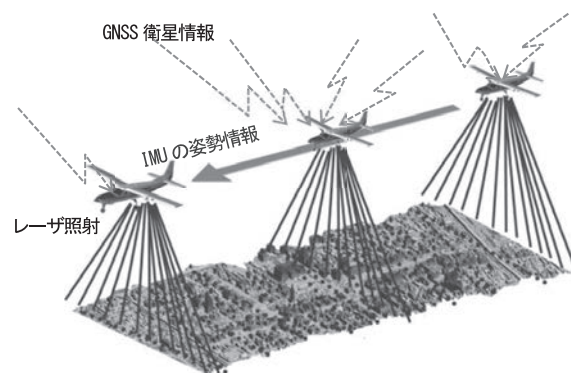
ムによって、平成 26 年 10 月に有人機で実施している航空レーザ測量システムと同様の構成で小型化されたシステムを UAV に搭載し初計測を行った。その後、システムを改良しながら計測を実施している。本論では、航空レーザシステムの UAV 搭載までの基礎検討、性能評価・現場検証、今後の課題等について報告する。

2. UAV 搭載レーザ計測システム

(1) 航空レーザ測量の概要

航空レーザ測量システムは、GNSS/IMU とスキャン式レーザ測距装置を移動体に搭載することで、面的な計測を実施するシステムである（図—1）。航空レーザ測量のメリットは、高密度な標高点を計測することで、写真測量では取得が困難である植生等に覆われた地表面等の情報を取得できることである（図—2）。

航空レーザ測量において、植生下の地表面を計測す



図—1 航空レーザシステムの概念図



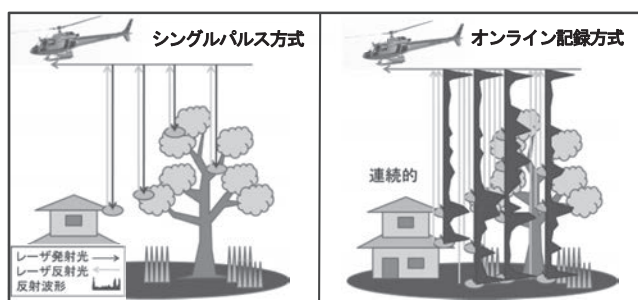
図—2 レーザ点群の横断表現

るためには、点密度が高くかつ微弱な反射を取得できる低高度の計測が望ましいが、一方で低高度の計測は計測幅が狭くなることがデメリットとなる。計測面積に対して効率的な飛行高度、レーザの発射回数を設定し所定の照射密度で計測することが重要となる。

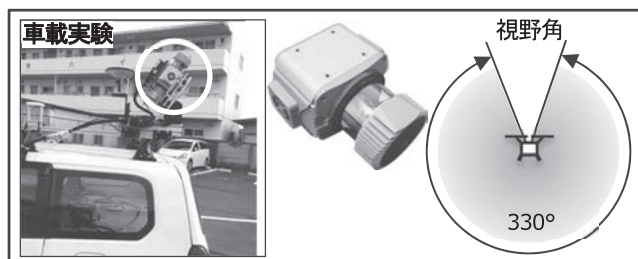
有人機での航空レーザ測量では、レーザの照射密度に応じて地図情報レベル(縮尺精度)を設定している。照射密度が $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ に 1 点の場合は地図情報レベル 1000, $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ に 1 点の場合は地図情報レベル 500 としている²⁾。

(2) UAV に搭載するレーザ測距装置の性能

UAV に搭載するレーザ測距装置は、シングルパルス式の簡易なもの(小型)から照射中のパルスすべてを波形として記録することができる連続波形記録方式(大型)まで様々である(図—3)。シングルパルス式では、基本的に写真測量と同様に植生下の地表面データが取得できないため、樹木・下草・地表面に照射されたパルスを分離し、高精度な地表面データの取得が可能となる連続波形計測データをオンラインで波形解析可能な VUX-1 (リーグル社)(以下「本測距装置」



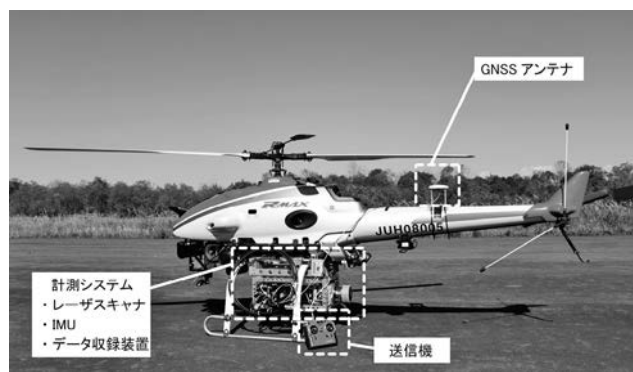
図—3 波形記録方式の特徴



図—4 本測距装置の外観

表—1 本測距装置の性能

項目	性能
最大測定距離	920 m (ターゲット反射率 60%)
最大測定距離	550 m (ターゲット反射率 20%)
測定精度	10 mm
最短計測距離	3 m
レーザクラス	クラス 1 (アイセーフ)
有効測定レート	500,000 回/秒
視野角 (FOV)	330 度 (直下 + 片側 165 度)



図—5 ヘリコプターへのシステム搭載状況

という)を採用した(図—4, 表—1)。

本測距装置の性能検討には、農薬散布や写真撮影等の飛行実績がありペイロードも大きい産業用ラジコンヘリコプター R-MAX を使用した(図—5)。

(3) 基礎的データの取得

本測距装置による基礎的データの取得は、2014 年 10 月 15 日から 2 日間かけて北海道胆振地方にある白老滑空場及び錦多峰川(2号遊砂地周辺)にて実施した。

白老滑空場では、飛行高度の違いによる精度検証に加え、計測幅や標高分解能等の基礎的な検討を行った。

レーザ測量は光を用いた計測であり、光エネルギーは距離の二乗で減衰する。有人機を用いた高高度(300 m 以上)より UAV を用いた低高度(150 m 以下)の方が理論上データの劣化は少ない。樹木下の地形データ検知力向上を期待して錦多峰川 2 号遊砂地周辺で植生の影響評価のための基礎的なデータ取得を行った(表—2)。

(a) 対地高度と標高精度・水平精度

平坦地に基準点を 4 点設置し、基準点を中心とした 25 cm 四方内のレーザ点と実測値を比較した(図—6)。

標高精度及び水平精度の検証結果を表—3 に示す。標高精度の標準偏差は、全ての対地高度で 1 cm 以下であり、真値からのバラつきが少なく全体をシフトす

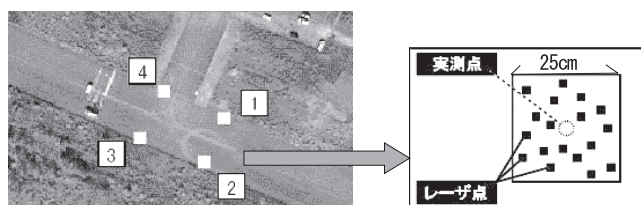
表—2 基礎的データの取得状況

検証項目	対地高度	検証方法	実施場所
標高精度	150 m, 100 m, 50 m	実測値との比較	白老滑空場
水平位置	150 m, 50 m	実測値とレーザ点群トレース	〃
計測幅	150 m, 100 m, 50 m	点群の到達範囲を解析	〃
標高分解能	50 m	点群断面による解析	〃
植生下標高	80 m	実測値との比較	錦多峰川

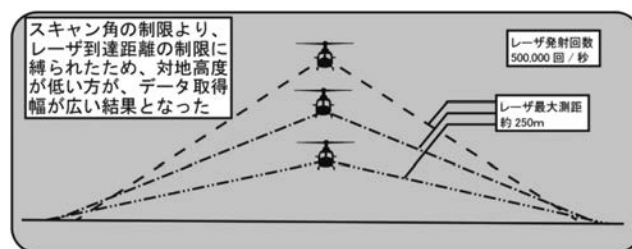
表—3 対地高度別の標高・水平精度検証結果

項目	対地高度 150 m		対地高度 100 m		対地高度 50 m	
	平均較差	標準偏差	平均較差	標準偏差	平均較差	標準偏差
標高精度	-0.102 m	0.009 m	-0.051 m	0.004 m	-0.059 m	0.006 m
水平位置	0.033 m	0.017 m	-	-	0.024 m	0.010 m

※標高精度は平均較差をオフセットすることで軽減可能



図—6 基準点の設置状況



— 対地：約 150m - - 対地：約 100m ... 対地：約 50m
取得幅：約 420m 取得幅：約 475m 取得幅：約 490m

図—7 対地高度と計測幅（実点群幅を再トレース）

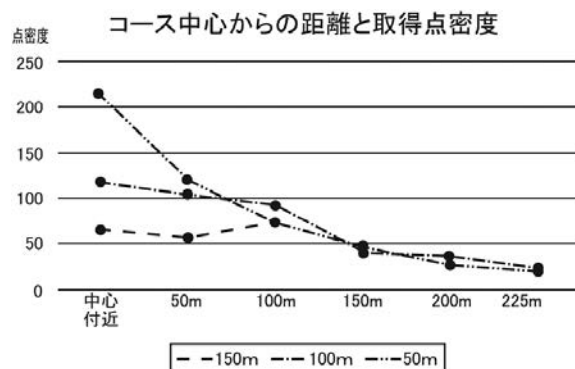
ることで標高調整が可能であることを示している。実測値との対地高度別の標高較差は、150 m が最大で 100 m と 50 m は近似していた。これは、100 m と 50 m は同一フライトで計測したため、GNSS の影響が同等であったことが要因と考えられる。対地高度別の水平精度に関しては、150 m と 50 m で検証した結果、平均較差は 150 m で 3.3 cm, 50 m で 2.4 cm であった。

(b) 飛行高度と計測幅・点密度

本測距装置の測定レートを最大（500,000 回／秒）に設定し、対地高度毎の計測幅を検証した。測定レートは可変式であり、最大にしたことにより 1 照射のレーザエネルギーは小さくなり測距が 250 m 程度と短くなる。

検証結果は、高高度計測の方がデータ取得幅が狭い結果となっているが、実際の計測では対地高度が高いほど構造物の影は少なくなる。また、レーザ光線の入射角が高高度になるほど大きくなりフットプリント（レーザ光の広がり）が小さくなるため、コース端部の精度は高高度の方が良好であると考えられる（図—7）。

点密度は、対地高度 150 m では直下で 50 点 / m² 程度、対地高度 50 m では直下で 200 点 / m² 以上と高密度であるが、コース端部では 25 点 / m² 程度と高度に関係なく劣化する（図—8）。実際の計測では、コース端部を使用せず隣接コースとの重複を設定すること

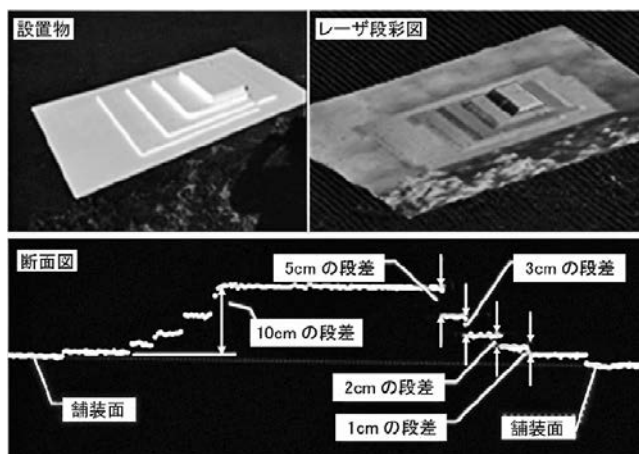


図—8 対地高度と点密度の関係

で目標とする点密度を満足する高度でフライトする必要がある。

(c) 標高分解能

標高分解能は、実際の施工等の小規模な段差等の認識能力に該当する。認識能力は点密度にも依存するが、標高分解能が高いほど物体の認識能力が高くなる。標高分解能の検証では、板厚 1 cm から 5 cm の発砲スチロール板を作成し比較対地高度 50 m で計測した。検証結果は、1 cm の段差も認識可能であった（図—9）。



図—9 標高識別能力の検証

(d) 植生下の標高

公共測量の作業規程²⁾では、植生下のレーザ点群の標高精度は定められていないが、実際の測量では植生下の地表面標高精度が重要視される。

検証箇所は、高木の下に下層植生（航空レーザでは取得が困難な笹）のある地区、無い地区を選定した。

検証結果では、全体的に実測よりレーザ計測が高めの傾向となった。下層植生の無い区域では較差6 cm程度と良好な結果であるが下層植生のある地区では最大10 cmの較差であった。実測の場合、下層植生下の落葉下の地表面を計測するのに対し、レーザは落葉の表面からの反射を計測していることによるものと考えられる（図—10、表—4）。

(4) ドローンへの搭載

検証に使用したヘリコプターは自律飛行機能が無

く、操縦者を中心とした半径150 mかつ高さ150 mの範囲内でしか飛行できない等、飛行上の制約が多かった。

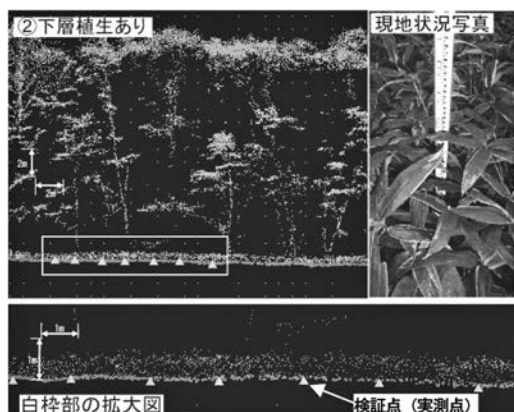
ドローン（マルチコプター）の最大の特徴は、GNSSを利用した自律飛行が可能で、計測区域を指定すれば自動的に計測コースが設定できる簡易的なソフトにより正確な計測を実施できることである。

一方で、小型化されたとはいえ総重量10 kgを超える機材、本測距装置の特徴である視野角330度の超広角計測範囲をプロペラアームやランディングスキッドが邪魔しないような機体の構造、飛行の安全・安定性を考慮したバランス設計を含めた開発が必要であった。

全体的な軽量化を進めるにあたり、特にGNSS/IMU装置の選定を行った。機体の位置姿勢情報は、GNSSによる位置情報とIMUによる機体の姿勢情報により解析される。開発時点において、既にGNSS/IMUは非常に小型化されていた。有人航空機に搭載されているものと同等の取得頻度（周波数）であったが、IMUの3軸角速度の計測精度は劣る。今後の更なる高精度化を追及した場合、GNSSボードとIMUの分離交換が可能なAP20（トリンプル社）を採用した（表—5）。

表—5 IMUの性能

項目	APX15 UAV	Trimble AP20
速度	0.015m/s	0.01m/s
ロール・ピッチ角	0.025 度	0.015 度
トゥルーヘディング角	0.080 度	0.035 度



図—10 植生下の計測状況（下層植生あり）



写真—1 本開発システム

表—4 植生下の標高精度検証結果

区分	検証点数	最大	最小	平均	RMS	標準偏差
①下層植生なし	22	0.056 m	-0.034 m	0.022 m	0.033 m	0.024 m
②下層植生あり	37	0.100 m	0.031 m	0.070 m	0.072 m	0.016 m

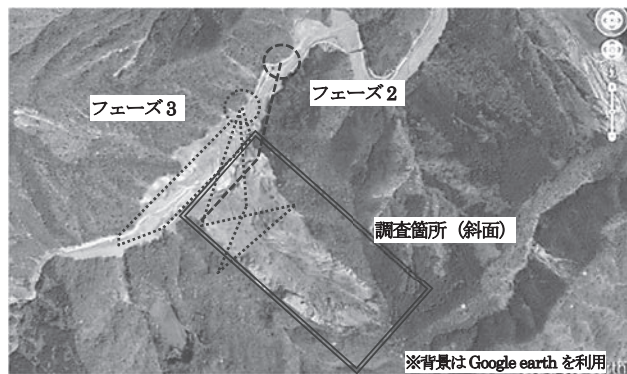
開発したドローンタイプの UAV システムは、名称を「TOKI」（以下「本開発システム」という）と命名した（写真—1）。

3. 現地検証

(1) 検証サイト

本開発システムの災害対応ロボットとしての評価を確認するため、国土交通省総合政策局の取り組みである「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」（2015年12月）に参加した³⁾。

検証フィールドは、平成23年9月の台風12号の影響により大規模崩壊が発生し、天然ダムを形成した奈良県五條市大塔町赤谷地区である。検証は、実際の災害を想定し、崩壊発生斜面からの距離に応じて、フェーズ1（被災地に近づけない）からフェーズ4（被災地近傍で対策検討）の4段階に分かれており、フェーズ2およびフェーズ3に参加した（図—11）。フェーズ2は、被災想定対象地から約1.5 km（目視で確認できない状況）、フェーズ3では約1 kmと離れている箇所であり、自律航行による計測を実施した。フェーズ2は、計測当時は目視外の飛行に対する規制はなかったが、2015年12月の航空法改正により、現在は国土交通大臣による承認が必要となり、所定の手続き（飛行申請）が必要となっている⁴⁾。



図—11 各フェーズと調査箇所の位置関係

(2) 検証データの取得と処理速度

(a) 取得データ

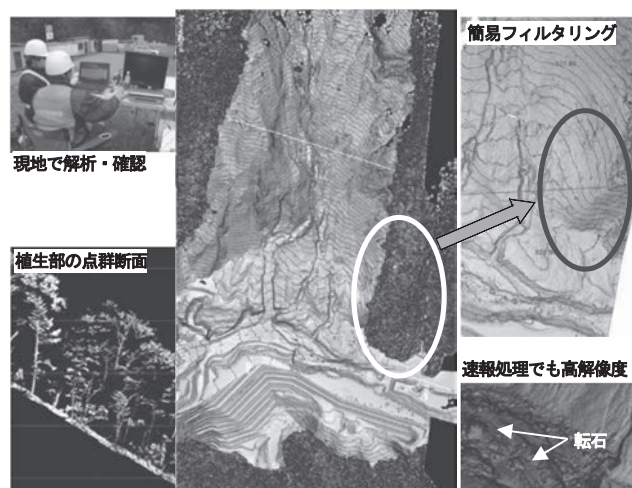
フェーズ2では、斜面から少し離れて全体を確認することを目的として、レーザの照射設定を100,000回/秒とし、斜面下部から斜面に平行する1コースで計測した。概略の点密度は100点/m²である。フェーズ3では、詳細なデータ取得のためレーザの照射設定を500,000回/秒とし斜面に平行した標高毎に8コースの計測を実施した。

(b) 速報データの処理速度と精度

フェーズ2では、災害緊急対応を想定し現地立入りが出来ない状況かつリアルタイムでの計測結果の提示を条件とし、現地検証点を使用せず速報解析処理を行った。計測後、30分で点群データを提供した。

速報解析では、機体のGNSS/IMU情報とレーザ計測データのみで解析を行った。GNSS/IMU解析は、速報処理のため単独測位による解析を実施した。速報解析の「絶対的」な位置精度はm単位となるが、「相対的」な位置精度は高く地形形状の把握には十分である。

点群解析処理ではノートパソコンでも稼働するビューワソフトにより、簡易等高線図や点群断面図を現場で作成したほか、点群の最下点を表示する簡易的なフィルタリング機能により植生下の状況も把握した。視野角330度の超広角計測により、斜面中腹部までのデータ取得ができています（図—12）。



図—12 取得30分後のデータ状況

(c) 高精度解析データの処理速度と精度

フェーズ3ではフェーズ2同様に災害緊急対応を想定しているが、データ解析は高精度処理を行い、計測後約8時間で高精度な点群データを提供した。

高精度処理では、GNSS/IMU解析を固定局（電子基準点等）とのキネマティック解析を行うことにより、機体位置の絶対位置精度が確保され、現地に整合した点群データとなる。裸地の地表面精度は約2 cmであり、非常に高精度であることが確認できた。

点群解析処理では、専用ソフトにより精密かつ高精度な処理を行い、任意地点での縦横断解析、各種地形解析による主題図作成、地表面の状況把握等の緊急対策工事に資するデータ提供が可能となる。

(3) 検証から考えられる適用範囲と人員構成

今回の検証から、計測面積は地形・計測条件に左右されるが平均 $0.5 \sim 1.0 \text{ km}^2/\text{日}$ と想定しており、2日間で 2.0 km^2 までの範囲での利用が有効であると考えられる。配置人員は、通常1現場当り、運航担当者が2名（操縦者・モニター監視者）、見張員：最低2名（地域状況により変動）、速報処理が必要な場合は解析処理担当者が1名必要となり、さらに即日中の高精度解析処理を行う場合は、基準点測量等に2名が必要となる。

計測条件としては、航空法の改正により十分な現地把握が必要であり、DID 地区や道路等の規制に注意が必要である。

4. 現状の課題と改善の方向性

現状の課題は飛行時間にある。現状のシステムは、約10分間（直線距離で約2km）のフライトが可能であるが、産業用ラジコンヘリコプター（R-MAX）の飛行時間（約20分）に比べると圧倒的に短い。この改善には、搭載機材の更なる軽量化・省電力化と、バッテリー持続性の向上は必須である。機体性能の向上では、モータの強靱化やアンプ装置の改良等を進めながら、実際の計測作業で生じた些細な改良点も計測作業を進めながら着実に進める必要がある。

画像情報の取得も、今後の改良点の1つである。有人機の航空レーザ測量を多数手掛けてきた経験値から、写真画像があることにより作業の効率化とフィルタリング精度が向上することは明白である。しかし現状のシステムでは、高精細なデジタルカメラの搭載は機体バランス・ペイロード等の課題、レーザとの画角の違い等があり、更なる改良を進める必要がある。

5. おわりに

本報告の通り、UAV 搭載のレーザ計測システムは精度面において十分な可能性を秘めている反面、運用面の課題はまだ多い。今後、「i-Construction」の推進役を担うであろう本技術の改良を迅速に進めていく予定である。また、ユニット化された機材は UAV に限らず、様々なプラットフォームで移動計測が可能となる（図-13）。現場状況に応じた的確な計測手法の選定が、効率的な施工の一助になるものとする。



図-13 可搬式による計測事例

J C M A

《参考文献》

- 1) 情報化施工推進戦略 ウェブページ
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_fr_000015.html
- 2) 一公共測量—作業規程の準則（公益社団法人 日本測量協会）2016年6月
- 3) 災害調査技術の現場検証・評価の結果（次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会 災害調査部会）2016年3月
- 4) 無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の飛行ルール ウェブページ
http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html

【筆者紹介】

河村 倫明（かわむら ともしろ）
中日本航空(株)
調査測量事業本部
空間計測第2グループ
サブリーダー

