

MMS の最新動向

西川 啓一・富樫 健司

道路、トンネル、上下水道などの社会インフラの維持管理用データとして3次元化が進み、なおかつ計測には高精度化・コスト低減・効率化・新鮮なデータが求められている。モバイルマッピングシステム (Mobile Mapping System) はこの要求に応えるものとして期待され始めている。

以下、モバイルマッピングシステムの高精度、高効率を支える各種の技術として、GPS 測位技術とこれを補完する技術・運用の仕方について説明する。あわせて特殊なモバイルマッピングシステムの例としてトンネル専用の車両を紹介する。また、公共測量や社会インフラの維持管理分野でのモバイルマッピングシステムの利用例について述べる。

キーワード：モバイルマッピングシステム、公共測量、走行計測、移動体計測、GPS、道路台帳、3次元地形データ、3D-GIS

1. はじめに

近年、測量関係や空間情報関係の展示会あるいは雑誌で「モバイルマッピングシステム」について海外、国内メーカーが揃って数多くの紹介を行っている。MX8, Street Mapper, Lynx Mobile Mapper, VMX-250, IPS-2, LISA, MMS 等多様である。それぞれのメーカーの強み、特徴が打ち出されている。

モバイルマッピングシステムがこれほど急激に話題となっているのは、パソコンの性能向上によるものが大きいと考えている。CPU やグラフィックスエンジンの性能向上、メモリや HDD の低価格化と容量の増大、OS の進化、さらに高速ネットワークの整備などで大容量のデータを扱うことができるような環境が揃ってきた。このような中、ゲリラ豪雨や自然災害が発生した際、これらの解析により詳細な地形モデルを利用することも行われるようになってきている。

モバイルマッピングシステムの定義をするならば、

- ①車に GPS 等の測位装置とカメラやレーザスキャナ等の計測装置を搭載していること
- ②道路を走りながら周辺の3次元形状を行うことが可能であること

になると考える。単に移動しながらの計測ということであれば、航空レーザ計測やドクターイエローも含まれてしまうので、ここではあえて、「道路を走りながら」ということにしておく。周辺の計測装置としては、今

後、地中レーダや舗装面試験装置等いろいろなセンサが搭載されると思われるが、これも、3次元形状ということにしておきたい。

2. 計測システム

各車両とも、GPS および慣性計測装置 (IMU: Inertial Measurement Unit) の組合せにより車両の自己位置と姿勢を計算し、そこからカメラおよびレーザスキャナによる計測結果の解析を行っている。

(1) GPS 測位

GPS には各車両の特徴がみられる。GPS アンテナが1個のもの、2個のもの、3個のものがある。さらに、GPS の測位方式として、単独 GPS による測位、D-GPS (Differential GPS) 測位、RTK-GPS (Real-Time Kinetic GPS) 測位、ネットワーク型 GPS 測位などが採用されている。

公共座標系の中の測位という意味で計測した地物に座標を与える方法として、あらかじめ数10 m から数100 m 間隔で GCP (Ground Control Point) を設置しておき、それを計測対象に含めておいて、GCP の座標から全体の計測結果に座標を与える方法を採用している。この方式は測位方式に単独 GPS や D-GPS を採用している車両に使われている。

一方、GPS より与えられる座標をそのまま計測結

果の座標として利用しているものもある。これはネットワーク型 GPS を採用している車両に使われている。

いずれの GPS 測位の方式でも、これに IMU やオドメータ（距離計）を付加して、GPS が受信できなくなるような状態でも位置、姿勢が計算できるシステムを準備している。

(2) 3D 化

車両の位置および姿勢が決定したら、搭載されているカメラまたはレーザスキャナで計測したデータから走行車両周辺の 3D 化が可能になる。この手法として、複数カメラによるステレオ視、単独カメラによるモーションステレオ方式を採用した車両がある。また、レーザスキャナにより直接 3D を計測する方法を採用している車両もある。さらにカメラとレーザスキャナを合わせてカラー点群を生成している車両もある¹⁾。

カメラ画像によるステレオ視は 3D 化に複雑な計算が必要であるが、計測点（対象物における計測密度）が多く、エッジもきれいに表現されるなど景観等の視的品質が求められる場合に都合が良い方法である。この方式は複数の画像にタイポイントを見つけて 3D 化するため、画像的にはっきりしない対象物は計測しにくい。また、夜間の計測も苦手としている。

レーザスキャナによる 3D 計測は直接的であり、精度が高いという特徴がある。一方でエッジが正確に直接計測できないという欠点もある。エッジの場合は後に、エッジを構成する面を計算し、面と面との交線をエッジとして求めている。

計測したデータをどのように利用するかによってカメラかレーザスキャナかを選択する必要がある。

3. MMS の特徴

以下、モバイルマッピングシステム、MMS の精度に関して特徴を述べる。MMS の開発コンセプトは、高精度、高効率である。MMS にて計測した点に正確に公共座標を与えることと、計測そのものの作業や計測後の処理も迅速に行うことを可能とし、なおかつ再測や解析不能を極力少なくするように工夫している^{2)~4)}。以下、そのキー技術について述べる。

(1) FKP

MMS の車両位置は FKP (Flächen Korrektur Parameter: 面補正パラメータ) 方式による高精度 GPS 測位を利用している。

FKP 方式はネットワーク型 GPS の一種であり、測

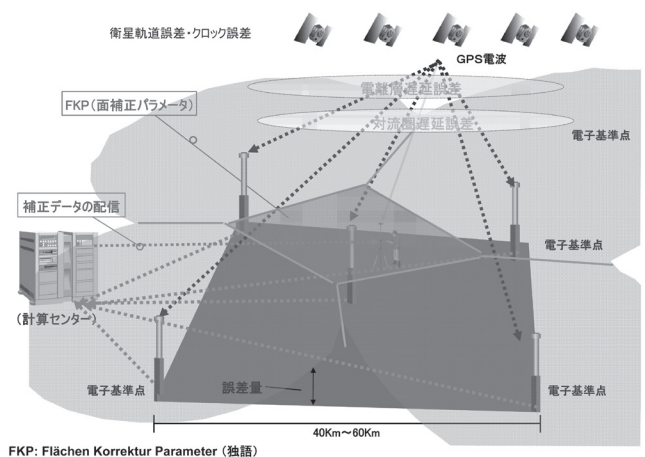
位エリアを囲むように配した電子基準点のデータを解析することによって、GPS 衛星の電波伝搬に与える、対流圏・電離層・衛星軌道等による遅延誤差量を明示的に計算し、測位点における GPS 衛星との擬似距離を正確に求めることにより高精度に座標取得を行うものである。

- ✓ SAPOS (ドイツ全国測量衛星測位サービス機構) はじめ EU 内複数国のリアルタイム GPS 測位の標準方式である
 - ✓ 緯度・経度方向に 1 cm 程度、高さ方向に 3 cm 程度の精度
 - ✓ 移動体測位可能
 - ✓ 補正データ有効エリアが広い
 - ✓ 補正データの片方向通信 (放送型) が可能
- といった特徴を備えている^{5)~7)}。

国土地理院が全国に 1200 点以上の電子基準点を設置している。FKP はこれら電子基準点をネットワーク化し GPS 観測データをセンチにて収集する。センチでは、各電子基準点の観測データを解析することで、対流圏、電離層等の全ての誤差要因を求める (図-1)。

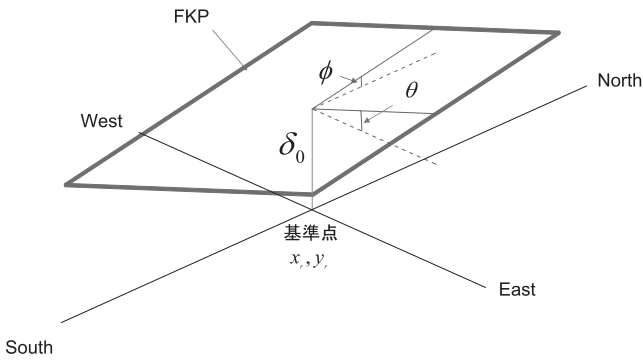
FKP 方式では、各電子基準点を中心として誤差の空間モデルを計算し、そのモデルを表すパラメータを補正データとする。つまり、図-2 のように誤差中心における補正量 δ_0 と誤差平面の傾き ϕ (東西方向の面の傾き)、 θ (南北方向の面の傾き) とをパラメータとして補正データとしている。したがって、測定点では、概略位置から補正中心となる電子基準点までの概略の相対的位置を計算することにより、その測位点での補正量を求めることができる。

RTK-GPS では図-3 に示すように基準点の近傍 (3 km 程度) であれば測位精度は高いものの、基準点から離れるに従って徐々に測位精度が悪化する。そのため走行計測する場合は、数 km 毎の既知点に GPS

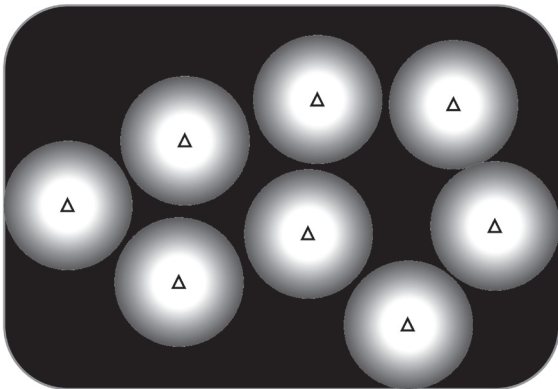


FKP: Flächen Korrektur Parameter (独語)

図-1 FKP 概念図



図一2 FKP 補正パラメータ

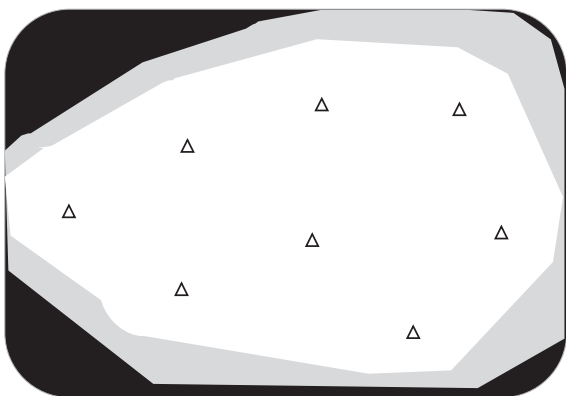


△: 電子基準点
精度:悪 精度:良
図一3 RTK による補正の効果

基準点を設ける必要がある。

一方、FKP 方式では図一4 に示すように基準点で囲まれた範囲は均一に高精度測位が得られるので、自由自在に走行しても問題なく測位することができる。

FKP 方式はリアルタイム補正が可能であるものの、走行計測ではセンタとの通信に携帯電話等を利用することになるが、圏外の場合も多いため走行後の一括処理をしている。したがって、センタではMMS 走行後、その時間帯、走行エリアに対応したFKP 補正データをインターネット経由ダウンロードできるようにしている。



△: 電子基準点
精度:悪 精度:良
図一4 FKP による補正の効果

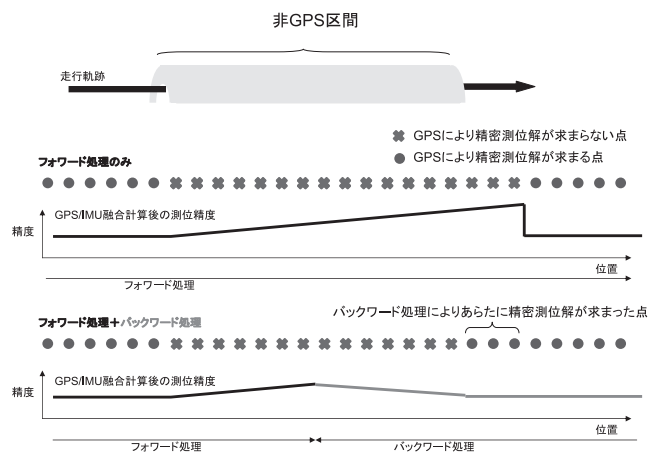
(2) GPS・IMU・オドメータ

MMS ではGPS,IMU に加えてオドメータ (タイヤ回転計) を加えた3種のセンサの複合測位計算を行っている¹⁾。GPS・IMU・オドメータ複合計算の目的は、①GPS 単独の位置計算に含まれる高周波ノイズの影響と、IMU 単独の位置計算に含まれる低周波誤差成分の影響、およびオドメータによる距離計算に含まれるスケールファクタの誤差を相互に補完して正確に測位すること、②GPS が受信できない箇所での測位、の二つである。

GPS による測位は誤差の時間的蓄積はないものの、高周波数的なノイズが含まれる。IMU データは測量車両の加速度、角加速度の運動量であり、この加速度と角加速度を計算して位置を計算する。この計算は積分を含む処理であり、測位結果には時間とともに蓄積する誤差が含まれる。さらにオドメータはタイヤの回転数より移動距離を求めるが、気温、空気圧、乗車人員等によりタイヤ一回転あたりの移動距離には係数が掛かる。この係数を求めるために、GPS が十分に捕捉されている環境下においてFKP 精度で位置および姿勢を計算しながらIMU やオドメータの学習・校正を行う。ビルの陰やトンネル内などGPS が十分に捕捉できない所では、IMU とオドメータで位置計算を行い、精度を保つようにしている⁸⁾。

通常、GPS による位置計算は時間経過に沿って行うが、MMS 後処理は図一5 のようにGPS, IMU, オドメータとの複合処理を正順 (フォワード)、逆順 (バックワード) 両方の計算を行っている。これによりGPSFIX の点が増え、IMU の累積誤差も抑えられることにより位置・姿勢の精度を向上させている。

GPS とIMU の複合計算は一般的には粗結合方式 (Loosely-Coupled 方式) と密結合方式 (Tightly-Coupled 方式) の2種類に大別される。粗結合方式は、



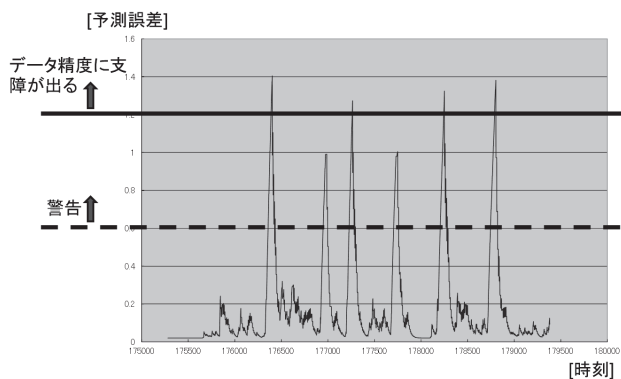
図一5 バックワード処理による効果

GPS, IMU, オドメータそれぞれのセンサで別個に位置・姿勢計算し, それらの結果をさらに調整計算を行う方式である。一方, 密結合方式は, GPS, IMU, オドメータそれぞれのセンサより基本観測量を求め, 両者合わせて一括して位置・姿勢計算を行う方式である。MMS は後者の密結合方式を採用している。

以上のように MMS はその他のモバイルマッピングシステムが採用している GCP による座標確定を必要とせず, 直接的に座標を得ることが可能としている。

(3) 予測誤差

MMS では計測中に計測精度がどの程度か見積もり表示している。これを予測誤差モニタという。図一六は予測誤差モニタの例である。図のように GPS・IMU・オドメータの複合計算をしても GPS が長い間受信できなければ車両の測位精度が徐々に悪化していく。GPS が受信できれば予測誤差モニタも精度が回復する。



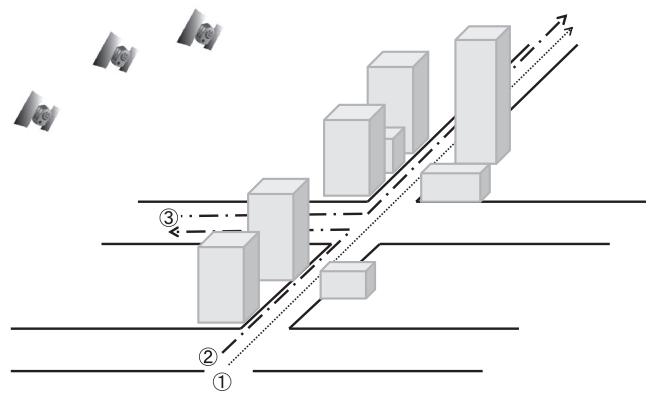
図一六 予測誤差

以下, 予測誤差モニタを利用した計測方法について説明する。

必要精度に対する予測誤差の上限値を決めておく。計測開始後, GPS の受信できない状態が続き, 仮に予測誤差が上限値に近づいたなら, 一旦, GPS の受信できる位置に移動し, GPS 受信を行う。仮に予測誤差が上限値を超えた場合, その状態で計測したデータは利用しないようにする。

図一七のようにビル等により GPS が遮蔽される場合, ①のコースのように走行計測すると予測誤差が増大する。この場合, ②のコースのように一旦 GPS が受信できる場所に退避して精度回復し, 再び③のように元のコースに戻り計測することにより, 全体として精度が確保できる。

MMS の後処理を行うと, 点群の緯度経度, 平面直角座標および標高, 計測時間等とともに精度指標が付



図一七 精度確保のための運用

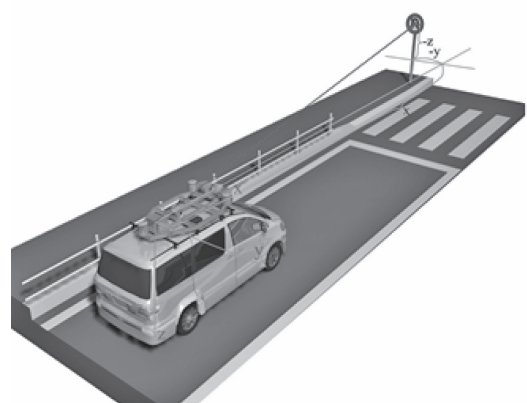
与されて出力される。この精度指標が予測誤差の処理後の確定値であり, 求める精度を満たしているかの唯一の判断材料となる。

目的とする成果の精度を満たさない場合は精度指標によりデータを棄却し, 良いもののみを利用することで成果の精度担保が可能となる⁹⁾。

(4) ランドマークアップデート

予測誤差等を考慮にいて計測しても, トンネルや高架下など実際の計測を行った結果, 精度指標が目的とする成果の精度を満たさない場合がある。その場合はランドマークアップデートにより精度回復が可能である。

ランドマークアップデートとは, 計測した点群に正確な座標を付与することによって, その点を計測した時刻の車両位置・姿勢を逆算し, GPS による測位結果が求まったことにして, あらためて GPS・IMU・オドメータの正逆順複合計算を行うことである。GPS が受信できない地点を走行し, なおかつ精度指標が目標より悪化していた場合 (図一八), 標識の座標をトータルステーション等で測量する。MMS にて標識と対応した点群または写真より MMS 車両の位置・姿勢を再計算し同地点での GPS による測位の代



図一八 ランドマークアップデート¹⁰⁾

替として利用する。

ランドマークアップデートの効果について説明する。GPSが受信できない区間が長く続くと精度が劣化する。図-9はある実験の結果を示したもので、1 kmに渡りGPSが受信できないとしたら、中央付近で約90 cm程度のずれが発生している。このずれ量は、速度、発進、停止の繰り返し数や道路の曲率や凹凸等で変化する。500 m、200 m、100 m 間隔にランドマークアップデートの位置参照点を設けた場合の誤差量をそれぞれプロットしている。

この実験の場合、500 mでは19 cm、200 m間隔では8 cm、100 m間隔では6 cmとなった。どれぐらいの間隔でランドマークアップデートの位置参照点を設けるかは目的とする精度に依存する。なお、従来のGCP補正がステレオカメラやレーザ計測による計測点そのものの位置（座標）を全体的にずらすのに対して、本ランドマークアップデートでは、誤差の元である車両の位置・姿勢そのものを補正するため、位置参照点間隔によらず、過補正になることはない。

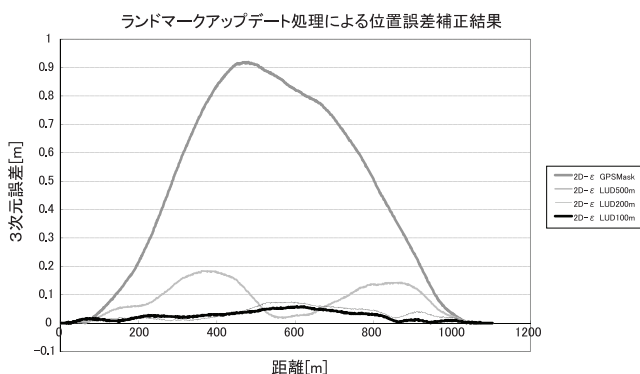


図-9 ランドマークアップデートの効果

4. MMSの活用

現在、MMSは主にインフラの維持管理に利用されている。以下、利用例について説明する。

(1) 道路・上下水道台帳

MMSは名前の由来からも分かるように地図を作成するシステムとして開発された。道路台帳付図や上下水道台帳付図作成に多く利用されている。道路や上下水道の管理者は国や自治体であるため、公共測量として実施しなければならない。MMSによる測量は新しい技術であるため「機器等及び作業方法に関する特例」として国土交通省公共測量作業規程の準則第17条により計画機関（自治体等）より国土地理院に独自測量作業マニュアルを提出し、技術的な助言・承認を得る

ことが必要となる。

MMSでは、前章の精度向上のための技術・運用方法を取りこんだ測量作業マニュアルを作成し提出、500レベルでの精度を十分達成しているとして地理院の承認を受けている。2011年8月の時点においてすでに40以上の計画機関より17条による届け出がなされ、順次、国土地理院の承認を受けている。いずれも500レベルが主である。

図-10はMMSにより作成した道路台帳付図の例である¹¹⁾。

MMSを導入することにより台帳付図の効率的な作成ができることはもとより、交差点の見通し改善や道路路面のワダチの把握、看板や樹木のはみ出しのチェックなど、取得した3次元データからまた別の維持管理業務も可能となる。

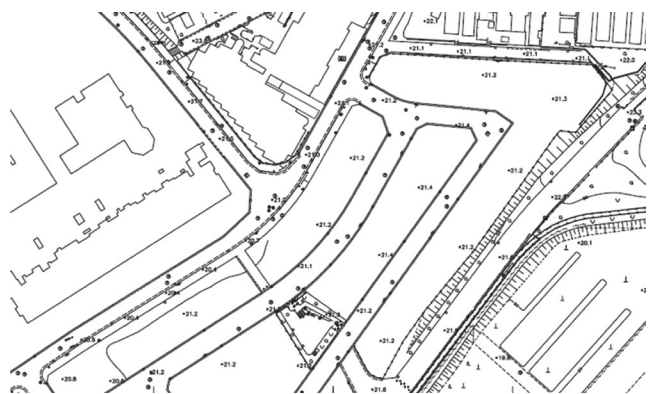


図-10 道路台帳作成例（出典：豊中市・バスコ）

(2) トンネル計測

MMSの位置・姿勢計測技術に別のセンサを付加させることにより特殊MMSを作っている。図-11はトンネル計測専用車両として開発されたMIMMである。

MIMMにはMMSの位置姿勢計測ユニットに高精度高密度レーザと高輝度LED照明およびビデオカメラ



図-11 MIMM外観

ラを16台取付けている。これにより、走行しながらトンネル覆工面の撮影と3次元形状を計測することができる。走行しながらの計測のため、交通規制なし、短時間の計測時間、安全な計測作業が実現できる。

図-12はMIMMにて撮影した覆工の写真である。カラーで撮影される。カラー画像よりひび割れ、漏水等を読み取り、写真上にプロットすることにより客観的かつ正確な変状が記録できる。これにより経年変化を正確に記録できることとなる。過去の事例において50 km/hでの走行計測で撮影した覆工写真からは0.3 mm以上のひび割れが読み取れることが判明している¹²⁾。

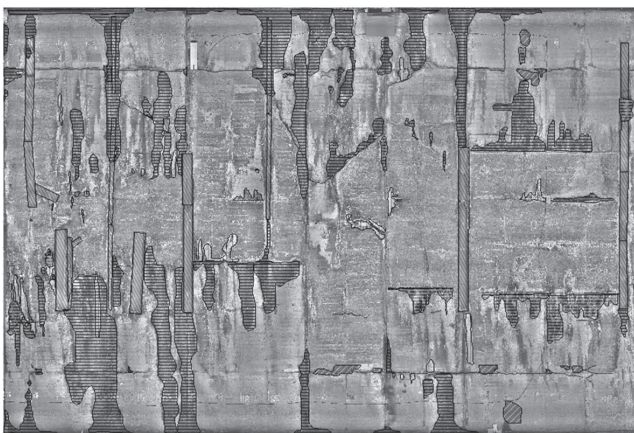


図-12 MIMMによる覆工撮影結果(変状プロット含む)

また高精度レーザでは図-13のような3D形状が計測できる。3D形状からは局所的な変形を求め、覆工写真と合わせてトンネルの健全性の評価に寄与可能である。

図-13の中ほどに映りこんでいるが、トンネル内に厚さの異なる板を貼り付けてMIMMの高精度高密度レーザで板厚計測を行った。結果を図-14に示す。

図-14において上4枚は一辺10 cm、中2枚および下2枚は一辺20 cmである。また、板の周辺の数字はノギスにより計測した厚さ(単位mm)、板の中

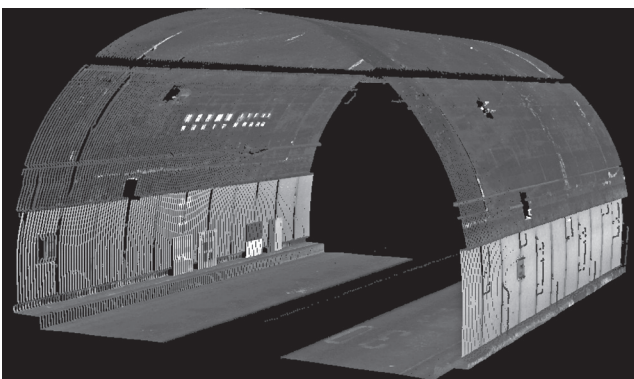


図-13 MIMMによるトンネル計測結果(点群)

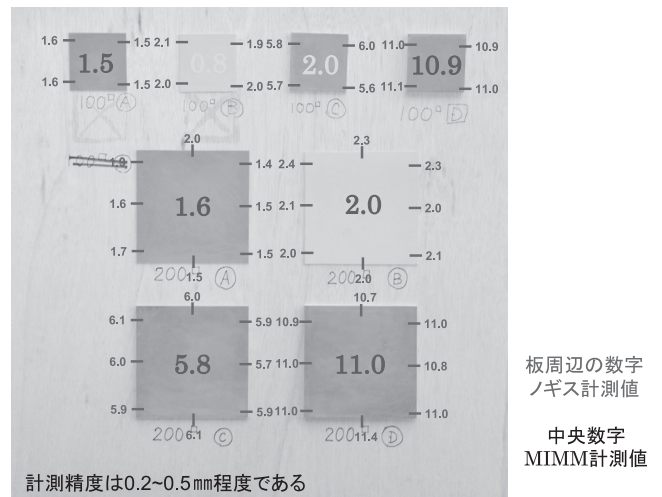


図-14 MIMMによる板厚計測結果

央の数字はMIMMにより計測した厚さ(単位mm)である。精度0.2 mmから0.5 mmの誤差で計測できていることが分かる。

上の中央2枚については大きく数値が異なっている。これは50 km/hでの走行計測のため、進行方向は15 cm程度のスキャン間隔があく。このため、この板にレーザが当たらなかったためである。今後、走行計測にあたっては、よりスキャンレートの高いレーザが必要とされる。

(3) その他活用例

台帳やトンネル以外にも社会インフラ維持管理用データの計測にMMSを利用している。以下、利用例を簡単に述べる。

MMSに地中レーダや電磁探査機を搭載し、道路舗装面より下の空洞や埋設管、通信ケーブルの位置、深さを3次元的に可視化する技術を試行している。これも走行しながら計測できるので交通規制等も不要である。検査の結果、ボーリング等の詳細調査が必要になった場合でも規制の範囲は必要最小限に特定できることが期待できる。

実際に目に見えるものだけでなく、土中の物体に3次元座標を付与することもモバイルマッピングシステムの利用法の一つである。

また、鉄道にMMSを乗せ、線路周辺の3D地形を計測することも試行している。従来、鉄道はキロ程、すなわち1次元で管理されてきたが、緯度経度高さの3次元による管理を検討しているようである。鉄道GISが始まり、将来の鉄道ITSにつながれば幸いである。

その他、電柱や電線の管理、道路面のひび割れや平坦性、摩擦係数など道路維持管理の計測にも利用できると考えている。

5. おわりに

これまで走行計測において測量精度を担保する技術、および効率化のしくみについて述べてきた。今後は3D測量がふつうになっていくと考えている。走行計測とそれからの点群生成までの効率化だけでなく、3D地図あるいは3D-GISデータ作成までの全体を効率化するために計測データの自動処理の開発を行っている。

図-15に現在自動抽出を検討している道路地物を示した。100%の自動検出は無理であると考えられるが、できるだけ検出率の向上と処理時間の短縮化を図り、最終的には走行から3D地図作成まで2~3日以内を実現したいと思っている。

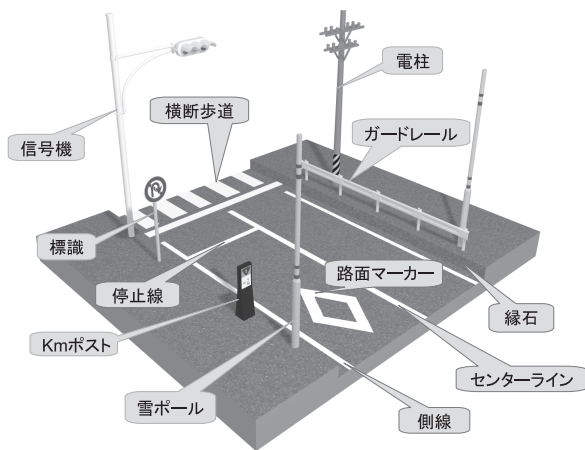


図-15 道路地物¹³⁾

そうならば、例えば現在の地形を初期値として計測しておき、通常は維持管理のための経年変化量として、災害発生時には被害査定や復興計画へ即座に供することができると考えている。モバイルマッピングシステムが社会へ貢献できることを願っている。

JICMA

【参考文献】

- 1) Kiichiro Ishikawa, Jun-ichi Takiguchi, Takumi Hashizume, Yoshiharu Amano. A Mobile Mapping System for precise road data capture based on 3D road model. : IEEE International Conference on Control Applications, 2006.10.

- 2) 吉田光伸 他. モービルマッピングシステム. : 三菱電機技報, 2007. Vol.81, No.8.
- 3) モービルマッピングを用いた道路三次元情報の活用. : 三菱電機技報, 2009. Vol.83, No.5.
- 4) 木元勝一, 西川啓一, 瀧口純一, 吉田光伸. モービルマッピングシステムと各種応用例. : 三菱電機技報, 2010年8月. pp.34-37. Vol.84, No.8.
- 5) 大山一夫, 斎藤雅行, 西川啓一, 柴原芳信. FKP方式によるリアルタイム測位. : (社)日本測量協会「リアルタイム測位技術研究発表会」資料集, 2002. pp.69-83.
- 6) 西川啓一, 笹野耕治, 田中隆, 長谷川博幸, 浪江宏宗. テレビ放送を面補正パラメータ (FKP) 伝送に利用したネットワーク RTK 測位実験. : 産業システム情報化技術委員会 (電気学会) / 第108回春季研究会 (日本航海学会), 研究シンポジウム「次世代位置情報技術」, 2003年5月23日.
- 7) 金学進, 西川啓一, 笹野耕治, 田中隆, 長谷川博幸, 浪江宏宗, 久保信明, 樊春明. Network-Based RTK-GPS Positioning Using Area Correction Parameter (FKP) via TV 17 Broadcast in Japan. : The GNSS Technology Council (GTC), The 10th GNSS Workshop, 2003年11月21日. pp.269-273.
- 8) 瀧口純一, 橋詰匠. モービルマッピングシステムにおけるGPS/IMU/オドメトリ複合航法のデータ処理と精度管理. : 日本信頼性学会誌「信頼性」2010年3月号, Vol.32, No.2.
- 9) 西川啓一, 瀧口純一, 石川貴一郎. 高精度GPS移動計測装置 三菱モバイルマッピングシステム (MMS). : 画像ラボ, 2011年1月. pp.74-81. Vol.22 No.1.
- 10) 石川貴一郎, 高野雅史, 梶原尚幸, 瀧口純一, 天野嘉春, 橋詰匠. 道路地物の測量値とGPS/IMUを複合した自己位置標定手法の研究. : 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 (CD-ROM), 2009.5.24. Vol.2009.
- 11) 今西暁久, 石井康介. 新技術MMSによる道路空間3次元計測と公共測量への適用について. : 平成22年度近畿地方整備局研究発表会, 2010年7月15日.
- 12) 京都大学. 道路トンネル健全性評価技術の研究. : 新都市社会技術融合創造研究会, 2009.
- 13) Takumi Hashizume, Yoshiharu Amano, Kiichiro Ishikawa, Jun-ichi Takiguchi. A Study of Precise Road Feature Localization using Mobile Mapping System. : IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2007年9月.

【筆者紹介】

西川 啓一 (にしかわ けいいち)
三菱電機株
IT宇宙ソリューション事業部
RFID・LBSシステムエンジニアリングセンター
LBS担当部長



富樫 健司 (とがし けんじ)
三菱電機株
IT宇宙ソリューション事業部
RFID・LBSシステムエンジニアリングセンター
LBS・COCO課
主席研究員

