

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 月 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560276

研究課題名（和文） 道路周辺環境モニタリングシステムの実証的な研究

研究課題名（英文） Experimental study of road environment monitoring system

研究代表者

瀧口 純一（TAKIGUCHI JUN-ICHI）

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：50449344

研究成果の概要（和文）：本研究では移動計測車両を用いた平常時から災害時まで使用できる道路周辺環境の計測モニタリングシステムを構築することを目的とし、計測車両によって取得される道路周辺環境の三次元点群データから、道路平坦性の評価や時系列データの比較による変化域抽出、不必要な計測データの自動除去機能を構築した。さらに実際にシステムを平常時と災害時に運用することで、各機能の有効性の確認とシステムの有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to construct a monitoring system using vehicle which can be operated in daily management as well as a disaster situation. In the system, we developed functions as below from 3D point cloud data around road environment: road flatness evaluation function, difference extracting function, needless data removing function. We confirmed the effectiveness of the system and functions from operations in both normal and disaster situation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 知能機械学・機械システム

キーワード：情報システム、モバイルマッピングシステム、三次元計測

1. 研究開始当初の背景

日本における道路の総延長は120万Kmを超え、これらの道路は国や地方自治体により管理されているが、広域に渡る道路管理の費用は莫大であり、道路管理の高効率化が求められている。また一方、現在、大規模災害が発生した直後の、被害状況の迅速な情報収集は人命救助や、災害後の早期復旧に有効であるとされている。大規模災害の際、自治体が発行する罹災証明は、全壊証明であっても詳

細な建物被害の専門家の調査査定が必須である。阪神淡路大震災では、全戸調査完了に半年を要した。この間、建物の取り壊しや、倒壊家屋の撤去による道路復旧も行えず、仮設住宅での生活を長引かせる要因のひとつとなった。2004年の中越地震の際にもこの状況は改善されず、せめて道路に面した家屋だけでも簡易査定による迅速な判定が望まれている。また、災害時のシステムとして開発されたものが、実際の災害時に操作方

法が分からず使用できなかったということが起きており、防災システムは災害時だけでなく平常時から使用できることが望ましいと言われている。また一方で、大規模災害直後の広域に渡る被害状況の迅速な把握には、航空機からのレーザ計測や航空写真測量、また衛星画像からの解析などを使用し行われている。これらは、広範囲に渡る情報を短時間で収集できるが、雲や天候による影響を受けやすく、また上空からという特徴上、建物の横や高いビルの陰、樹木の下やトンネル内などの状況を把握することが不可能である。

一方、我々はこれまでに、車両上部に3台のGPSとIMUからなるGPS-Gyro/IMU複合航法装置、カメラ、2台のレーザスキャナを搭載し、車両周辺の三次元情報を自動収集するシステム(MMS: Mobile Mapping System)を開発してきた。本システムは、道路周辺のカラー三次元情報の自動作成ができ道路のくぼみや轍も計測することが可能である。また、容易に道路横断面図や縦断面図が作成できる。また、道路で走行可能な箇所であれば航空機や衛星よりも、より詳細なデータ収集が可能である。本システムで計測されたデータは、航空測量と同様に、緯度経度標高の情報を持っているため、異なる時間帯に計測を行い、時系列的にデータを比較し変化域の自動抽出が容易に行え、さらにGISに登録しやすいという特徴を持つ。また、車両にGPSなどのセンサを搭載したMMSは近年世界中で盛んに研究開発されており、日本においても、一部メーカーが販売を始めており、今後普及が見込まれるが、MMSによって取得されたデータ解析・管理技術は機能が不十分なものが多く、平常時から災害時まで使用できる道路環境モニタリングシステムとして現状のままでは、不十分である。

2. 研究の目的

本提案では、我々がこれまでに開発してきた道路周辺環境を三次元で高精度に計測する車両であるモバイルマッピングシステム(MMS)を用い、平常時には、道路管理台帳付図作成補助や、道路性状管理などに使用し、災害時には、地震前後のデータ比較を行うことで、建物の傾斜や崩落、道路の断裂状況等検出し、自動被災状況判定を行う、緊急時だけでなく平常時から使用可能な道路周辺モニタリングシステムの構築を目標とし以下の点を明らかにすることを当初の目的としている。

- (1) MMSによる時系列計測データを用いた高精度な変化域の自動抽出
- (2) 変化域でのデータにおける構造物の被害状況の数値化による判定
- (3) 道路平坦性などの数値化による道路管

理の高効率化

(4) 平常時から災害時まで使用可能な道路周辺モニタリングシステム

また、研究期間中には実際の市街地において運用試験を行い本システムの有効性を確認する。

3. 研究の方法

(1) 研究方法概要

本研究ではMMSを用いた道路周辺環境モニタリングシステムを構築するために、いくつかの段階に分けて機能ごとに研究開発を行う。まず第1段階においては、モニタリングシステムの機能作成に必要なデータをそろえるため、MMSによる市街地の実データの収集を行う。第2段階においては、MMSを平常時にも使用できるシステムとするために、道路管理のための路面性状評価機能の作成を行う。MMSは道路表面の詳細な形状情報が収集可能なため、この形状情報から道路の平坦性を評価・数値化することで補修工事の必要性の判定基準の作成を行い、CADへの連携も図る。第3段階においては、計測データの時系列比較による差分抽出を行い、変化域抽出の自動化を行うことにより、災害時における被害状況の判定や復興進捗度の判定を行う機能の開発を行う。

またMMSで計測を行う際には、他の交通を止めることなく計測を行うため、対向車線の車や人が三次元データの中に映ってしまう問題点があり、変化域として誤抽出されることが予想される。そこで、MMSの計測データから画像レーザ複合による移動物体の除去を行うアルゴリズムの構築を行う。最終段階では、これらの作成した機能とGISとの連携を行い図1に示すシステムの構築を行い、評価試験として実際の市街地において運用実証試験を行う。

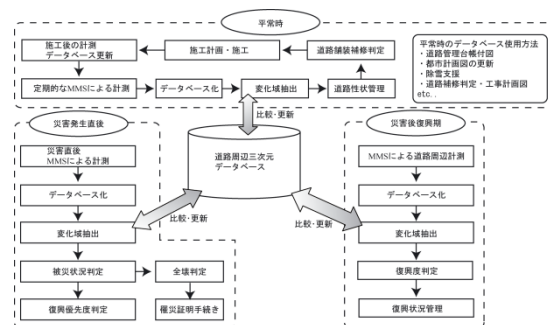


図1 道路周辺環境モニタリングシステム

(2) 路面性状算出機能の開発

路面性状は道路平坦性とわだち掘れ量から求める必要がある。

道路平坦性はMMSの三次元計測点群から縦

断面プロファイルを求めることで算出する。縦断プロファイルは車線ごとに、MMS で計測した車道の車線中心から左右に 1m の 2 箇所を求め、求めた縦断プロファイルから一定距離を平坦と仮定した基準線からの高低差 Δh の標準偏差を求め、道路平坦性 σ_{flat} を式(1)により求める。

$$\sigma_{flat} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta h - \overline{\Delta h})^2}{N-1}} \quad (1)$$

ここで、 $\overline{\Delta h}$: 基準線と計測点の高低差の平均値、 N : データ数である。

わだち掘れ量は、通常の路面を表す点群によって形成される近似直線と、わだち掘れ部分をクラスタリングし、わだち掘れ部分と近似直線との高低差から算出する。

求めた平坦性とわだち掘れ量はそれぞれ閾値と比較し、閾値以上の箇所は要補修箇所として、GIS に登録する。閾値は平坦性では 2.4mm 以下、わだち掘れ量では 30mm 以下と規定されているため、その値を用いた。

それぞれ求めた路面性状値を管理者に分かりやすくするために、Google Earth に登録を行う。Google Earth には kml 形式で現況形状の情報として、3 次元計測結果、縦横断形状、路面管理指標、3 次元 CAD による設計図面、調査箇所の写真、緯度経度高度、車両の走行方向、計測速度、計測日時を登録する。MMS では地表面の絶対位置計測精度が高い為、道路面の緯度経度高度とともに日時を登録することで、再現性の高い路面形状の時系列比較が可能となる。従来の道路毎の起終点管理による手法に比べ、局所的な交通量や道路利用に応じた緻密な道路舗装管理が可能になるため、道路全体のライフサイクルコストの低減に有効となる。

(3) 対向車点群除去アルゴリズムの構築

対向車点群の除去アルゴリズムの流れを図 2 に示す。

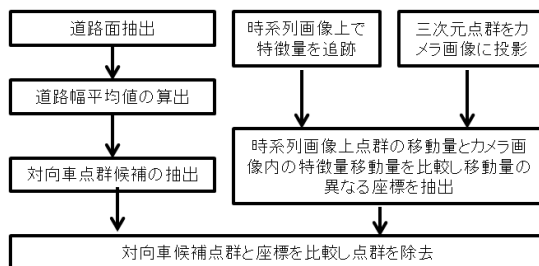


図 2 対向車点群除去フロー図

対向車除去のために、まず MMS により計測したレーザ点が道路面であるかを判別する。判別の際には道路が比較的平坦であることを利用し、隣り合ったレーザ点の変化量を閾値と比較し判別する。つぎに道路面と判定された点群から道路端を求めたうえで道路幅

を計算する。

この際、対向車が存在する場合、対向車の位置が道路端として認識されるため、道路幅は短く算出される。通常の道路では道路幅が大きく変化するの退避帯や交差点などであるが、これらの場所では道路幅が広がる傾向がある。そこで、算出された道路幅の平均値を求め、急激に道路幅が狭くなる箇所を対向車両の候補点として算出する。路面形状によっては、道路端以外のレーザ点が道路端として過検出されることがあり、このままでは対向車のみ除去は難しい。そこで MMS により取得した連続画像を用いて、過検出箇所の除去を行なう。

MMS のレーザ計測は、二次元レーザを使った断面計測を連続的に行うため、移動体であっても、静止物体のように計測されるため、レーザ計測結果のみから移動物体かどうかの判別は困難である。一方、MMS は連続的に画像を取得しており、対向車は連続した画像上で構造物などの静止物体とは異なる動きをする。そこで、三次元点群を MMS のカメラ座標系に投影した投影画像を作成し、連続画像上に投影した点群の動きとカメラ画像上の特徴点の動きを比較することで、移動物体を検出する。

画像特徴量の追跡には、画像の回転・スケール変化・照明変化に頑健な SIFT 特徴量を用いた。また点群の追跡に関しては、すべての点群が緯度経度高度、計測時刻の情報を持っているため、容易に追跡できる。

求めた特徴量の移動量を三次元点群の投影画像の移動量と比較することで、移動量の異なる特徴量を画像上の対向車両座標として抽出する。

つぎに、画像上の対向車の座標と、カメラ中心を通る LOS (Line Of Sight) ベクトルを計算し、その LOS ベクトルに最も近いレーザ計測点を選択する。画像の取得タイミングとレーザが対向車を計測したタイミングは異なり、選択されたレーザ点は必ずしも対向車の位置ではないが、選択点周辺の三次元点群には対向車の三次元点群が含まれる。そこで先ほどの三次元点群の特徴から抽出した対向車候補点の中から、最も近い候補点を対向車の点群として抽出する。対向車は路面と高さが異なることを利用して除去する。

(4) 時系列データ比較による変化域抽出

変化域抽出機能作成の段階では、テストコース内に変化点を設けることで、変化域の抽出機能を作成した。

MMS によるレーザ計測は、計測時の環境条件 (渋滞状況、走行位置、走行向きなど) によって必ずしも同じポイントを計測できるわけではない。そのため、レーザ計測点群同士を直接比較することはできない。そこで変化

域の抽出の際には空間をメッシュ状に分け、メッシュ内の点群の平均高さによって比較を行う。

作成した機能の評価を行うため、実際に広域に渡ってMMSを運用し変化域抽出が可能かどうか、また計測日時が大きく異なる場合の計測再現性についての評価を行った。また実際の運用において、時系列での差分が抽出可能なように、本研究開始前に地域全体の計測データがあった箇所を計測した。また研究最終年度においては、東日本大震災の被災地区を時期を変えて2回に渡って計測し、復興状況のモニタリングが可能かどうかの評価も行った。

4. 研究成果

本研究期間中には、研究方法に挙げた各機能についてアルゴリズムを構築し、さらに実証試験を行った。各機能それぞれの研究成果について以下に示す。

(1) 路面性状算出機能

MMSによる路面性状計測能力および、MMS計測データからの路面性状算出機能の有効性を確認するため、実際の計測データの中から適当な地域を選択し路面性状の調査を行った。評価試験はGPS衛星が十分捕捉可能な地域で行った。

図3に道路平坦性の計測例を示す。図3の写真が実際の試験環境である。写真手前側が道路が古く道路の凹凸が大きく、写真中央より奥の道路は補修後であり凹凸が小さい道路となっている。図中の青い線と赤い線に沿って路面縦断面を抽出し、平坦性を評価した。図中の左下の図は、縦軸に路面高さ、横軸に進行方向距離を取った、写真中の青線、赤線部分の路面縦断面図である。また図3右側は計測結果の高さに応じて点群を色分けした結果である。縦断面図や右図からも分かるように、補修されている道路では路面が平坦であり、補修前の道路では路面の凹凸がはっきりと見て取ることができる。平坦性は補修箇所で1.13mm、補修前の箇所で3.17mmであり平坦性の差を抽出することができている。

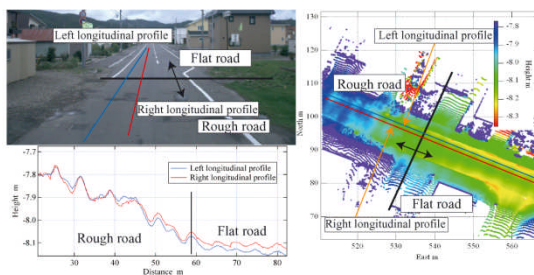


図3 路面平坦性計測例

図4にわだちの計測例を示す。計測箇所は幹線道路であり、トラックなどの重量の多い車

両の交通量が多いため、わだち掘れが発生している。図中の右の図は、路面の高さに応じて点群を色分けしたものである。図中でわだちの箇所が他の路面に比べ、低くなっていることが見て取ることができる。また左下の図は右図中の線が引かれた箇所の横断面図である。左下図中の緑の線は、わだち掘れを計算する際の基準線である。わだちの箇所が基準線よりも低くなっていることが見て取れる。

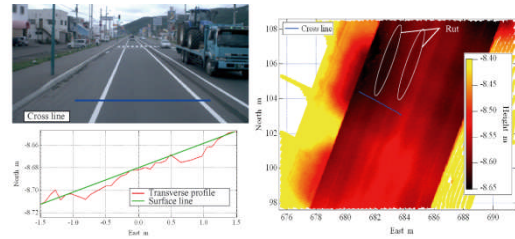


図4 わだち掘れ量計測例

これらの平坦性、わだち掘れ量の算出を他の計測箇所にも適用し、その結果をGoogle Earthに登録した。図5は、路面の計測結果をGoogle Earthに登録した結果である。図5-aは路面平坦性を図5-bはわだち掘れ量を基準値との比較結果に応じて色分けして登録した結果である。図中の白で囲われた道路は幹線道路であり、それ以外の箇所は市街地である。幹線道路では、トラックなどの重量のある車両の交通量が多いため、市街地の道に比べわだち掘れが多い。一方で、市街地の道は、補修頻度が低いため、平坦性が幹線道路に比べ凹凸が大きいことが分かる。

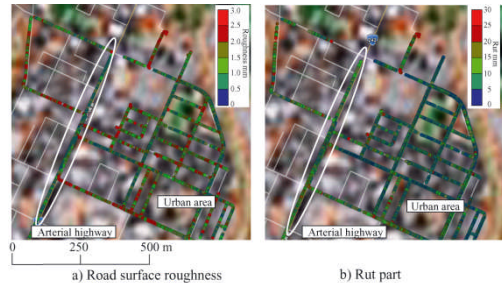


図5 Google Earthへの登録結果

(2) 計測点群データからの対向車除去

開発した手法の有効性を確認するため、評価試験を行った。評価試験は2車線道路の国道において行い、約10kmの計測を行い、その間にすれ違った対向車を対象に、本アルゴリズムを適用し、認識率の評価を行った。図6は点群から道路端を認識し、さらに点群中の対向車候補点を算出した例である。図に示すように対向車および過検出により対向車以外の点群も候補として算出されていることが分かる。

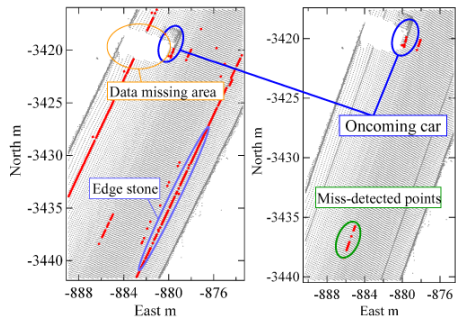


図6 縁石データを用いた対向車認識

図7に時系列連続画像の特徴点を追跡した結果を示す。また図8は図7で認識した特徴量追跡結果と画像上に投影した点群の移動量を比較し、移動体の特徴量だけを抽出した結果である。画面手前側の車両は移動量の差が大きく認識されていることが分かる一方で、画面奥の車両は画像上ではほとんど動いていないため移動体としては認識されていない。図9 対向車の点群例、図10はその対向車の点群除去結果である。図のように対向車だけが除去されていることが分かる。



図7 SIFT 特徴量追跡 図8 対向車抽出結果

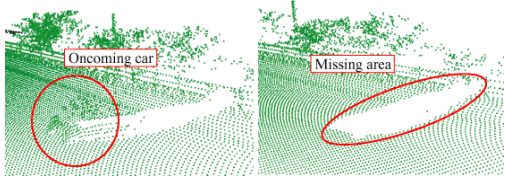


図6 対向車点群 図7 対向車点群除去結果

評価区間全域ですれ違った対向車の台数は21台あり、そのうち5台がバイク、1台は追い越し車両であった。まず三次元点群からの対向車候補の算出では21台中20台が正しく検出された。また2箇所で過検出があった。過検出された箇所は、橋梁の繋ぎ手の金属部分であり、通常の路面と比較して凹凸が大きく、変化点として検出されたものと考えられる。つぎに対向車候補として算出された結果に対して、SIFTによる特徴量追跡、三次元点群投影結果との比較による対向車抽出を行った結果、16台が正しく認識された。認識されなかった5箇所のうち2箇所はトンネル内であり、残りはカーブにおけるバイクであった。MMSは最大80km/hで使用することを前提に設計しており、高速で移動中でも画像がぶれないようにカメラのシャッタースピードを可能な限り短く設定しているため、トンネル内は、画像が暗く認識可能なレベルの画像

を取得できていないことが理由として挙げられる。

(3) 時系列データ比較による変化域抽出

MMSによる時系列データ比較による変化域を抽出するため、まずMMSの計測再現性の評価試験を行った。計測再現性はGPSが十分に使用できる環境下で異なる時期に計測した2回のデータを比較することで評価した。また単純な計測点群同士では比較できないため、縁石などの形状的な特徴がある箇所において比較を行った。その結果絶対位置での差のRMSは0.05mであり、差分抽出に十分な計測再現性があることを確認した。

(4) 東日本大震災被災地区における実証研究

本研究期間中に東日本大震災が発生したため、最終年度は本システムを被災地区の道路周辺環境モニタリングに適用する実証研究を行った。実証研究では、震災後の道路平坦性の調査、復興状況の把握、変化域抽出による余効変動量の把握を行うため、2回に渡って図8に示す道路の調査を行った。調査は3名の作業員でそれぞれ3日間、4日間で行い計測総距離は1000km以上であった。従来のように人手により、これだけの距離を調査するには同じ作業員数ではどんなに効率的に実施しても数カ月以上はかかることが予測され本システムの効率性が確認された。

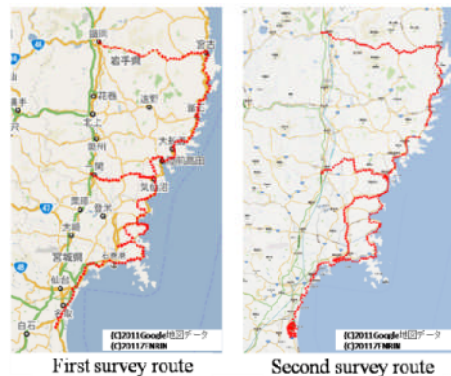


図8 東日本被災地調査区域

また調査の結果、MMSを用いることで航空写真からだけでは把握できない建物側面の情報や、山間部における樹木の下道路情報なども収集できることが確認された。また道路平坦性においては橋梁繋ぎ手における変状が大きいことや、北上川堤防天端上の道路の平坦性が著しく悪化していることが分かった。余効変動量の把握に関しては、2度に渡る調査結果の差分から震源方向に向かって20cm程度動いていることを確認した。また差分を抽出することで、道路面の補修箇所の抽出や、道路脇の瓦礫の撤去などの差分情報も抽出できることを確認した。さらに沿岸部道路の海拔高度の解析も同時に行った結果、沿岸部において海拔0m以下の箇所が多数あることも確認された。

本研究期間中にはこれらの数値を定量化することができなかったが、今後はこれらの変化域の体積などを指標として変化域をGIS上に登録する機能を構築していく。

(4)研究成果まとめ

本研究期間中に当初の目標であった下記機能についてほぼすべての機能の開発および評価試験を行い、さらに実際の災害時における実証を行い本システムの有効性を確認した。

(1) MMS による時系列計測データを用いた高精度な変化域の自動抽出

(2) 変化域でのデータにおける構造物の被害状況の数値化による判定

(3) 道路平坦性などの数値化による道路管理の高効率化

(4) 平常時から災害時まで使用可能な道路周辺モニタリングシステム

最後に、本研究で用いた MMS は研究開始当初に比べ急速に普及が進んでいる。そのため、本研究によって開発・実証した機能の普及を推進していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計5件)

①桐生翔太, 外村史輝, 佐久間裕, 石川貴一朗, 天野嘉春, 橋詰匠, Mobile Mapping Systemによる道路視点からの東日本大震災被災地域調査一時系列三次元点群比較による道路周辺環境の変化域抽出, ロボティクスメカトロニクス講演会2012, 2012. 5

②鈴木 太郎, 石川 貴一朗, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 瀧口 純一, Mobile Mapping Systemにおける広域三次元計測のためのレーザスキャナを利用したカメラ外部パラメータの推定, ロボティクス・メカトロニクス講演会2011 講演論文集, 2011. 5

③石川貴一朗, 小倉 徹也, 天野 嘉春, 橋詰 匠, Mobile Mapping Systemによる三次元点群と時系列画像を用いた対向車点群の

除去, 2010 年度精密工学会秋季大会, 2010. 9
④小倉徹也, 石川貴一朗, 瀧口純一, 天野嘉春, 橋詰匠, Mobile Mapping System による三次元点群と時系列画像を用いた道路面補完に関する研究, ロボティクスメカトロニクス講演会 2010, 2010. 6

⑤高野雅史, 石川貴一朗, 瀧口純一, 島嘉宏, 天野嘉春, 橋詰匠, モービルマッピングシステムを用いた次世代道路地図作成システムに関する研究, 第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2009. (20091226). 芝浦工業大学豊洲キャンパス

6. 研究組織

(1)研究代表者

瀧口 純一 (TAKIGUCHI JUN-ICHI)

早稲田大学理工学術院 准教授

研究者番号: 50449344

(2)研究分担者

橋詰 匠 (TAKUMI HASHIZUME)

早稲田大学理工学術院 教授

研究者番号: 90103621

清水 創太 (SHIMIZU SOUTA)

早稲田大学理工学術院 准教授

研究者番号: 20328107

(2009 年)