

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04949

研究課題名(和文) 河川堤防と水面下の変状を同時に迅速、高精度かつ低コストで検知する計測技術の研究

研究課題名(英文) Study on measurement technology to detect river bank and subsurface deformation simultaneously, accurately, and at low cost

研究代表者

西山 哲 (nishiyama, satoshi)

岡山大学・環境生命科学学域・教授

研究者番号：00324658

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：1) 移動型レーザ点群計測システムの実現：SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)アルゴリズムを活用した3次元計測システムを実用化した。2) 3次元データのリアルタイム処理技術の開発：1)の手法と組み合わせ、リアルタイムで河川堤防、河道内および河川構造物の変状発生個所を検出するレーザ点群処理ソフトが構築できたことを実証した。3) 水中を透過し河床の計測を可能にするグリーンレーザーの活用：波長515nmの緑色レーザーの水中透過能力と河川の濁度の関係を検証し、目視で確認できる深さの約1.5倍までの水深個所をレーザにて計測できるスキャナの実現させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多発する豪雨による浸水被害に対処するため、河川のより一層詳細な点検作業が求められている。その一方で技術者不足や財政難に備えて、どのように点検作業を効率化するのは重要な課題である。そこで、我が国が誇る最先端のICRT【ICT: Information and Communication Technology+IRT: Information and Robot Technology】技術を活用した河川モニタリングの実現を図る研究を実施した。近年、中小河川での浸水・堤防決壊が相次いでおり、人材・財政不足が特に深刻化している自治体における河川管理の高精度化と高効率化に有用な技術になると考える。

研究成果の概要(英文)：1) Realization of mobile laser point group measurement system: A three-dimensional measurement system utilizing SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) algorithm has been put into practical use. 2) Development of real-time processing technology for 3D data: In combination with the method described in 1), it was demonstrated that laser point group processing software could be constructed to detect the location of deformation of river embankments and river structures in real time. 3) Utilization of green laser that penetrates water and enables measurement of riverbed: We verified the relationship between the water penetration capacity of a green laser with a wavelength of 515 nm and the transparency of rivers, and the water depth is up to about 1.5 times the depth that can be visually confirmed.

研究分野：自然災害科学・防災学

キーワード：河川巡視・点検 3次元計測 レーザ点群 グリーンレーザー 河道計測 河川構造物 河床地形 リアルタイム処理

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地球規模の環境変化の影響により、時間雨量 50mm を超える短時間強雨や総雨量が数 100mm から数 1,000mm を超える大雨が多発し、全国各地で毎年のように甚大な氾濫や堤防決壊による浸水被害が発生している。一方、現状の河川堤防の健全性は、出水期、台風期および出水後の徒歩による目視点検あるいは 200m ごとの定期縦断および横断測量の結果により判断されている。2017、2018 年の九州北部および西日本豪雨時では、国管理だけでなく県が管理している河川が破堤し甚大な被害を引き起こされた。線状構造物である河川堤防は、1 箇所でも破堤すると甚大な被害が発生するので、豪雨が増加する傾向を考慮すれば、膨大な延長距離にわたる堤防の健全性を綿密に点検することが、より一層重要になる。しかしながら特に自治体における技術者と予算の不足は深刻化しており、点検作業の詳細化や回数増加を図ることは不可能である。また主に実施されている目視点検では、経験に基づいた健全性の判断に頼っており、定量的なデータが無いために、必要な箇所を優先的に対策するための客観的な根拠に乏しいのが実情である。そこで MMS (Mobile Mapping System) と称される手法が注目されている。これはレーザースキャナやデジタルカメラ等を車両に搭載し、走行しながら堤防の 3 次元座標を取得する測量手法である。機器と同じ天板に装備した GNSS (GPS) や IMU (慣性計測装置) よって、走行中のレーザ一照射位置と角度を把握して測量する技術である。効率よく堤防を点検する手法として、航空レーザ一測量も活用されているが、300m 以上の上空から測量するため、レーザ一点群密度の向上に限界があり、本川と中小河川との合流点の変状などを詳細に計測することは困難であり、さらに計測コストが高いために頻繁に実施できない課題がある。近年ドローンを使った測量も検討されているが、レーザ一など重量のある計測機器を搭載した場合は、電池の寿命の関係で飛行時間が数 10 分に制限されてしまい、広範囲を効率よくモニタリングすることは不可能である。そこで、広域を迅速かつ低コストで計測できる MMS による堤防計測が実用化されてきたが、次のような課題が残っている。

- ・ MMS は走行時の揺れや振動の影響を排除して、測量時のレーザ一位置を精密に求める必要があるため、複数の GNSS を用いて自己位置を測位する必要がある。そのため車両を小型化できず、低コスト化も進まない。整理された天端が存在する国管理の 1 級河川では効率良く堤防の沈下箇所等を抽出できるが、中小河川は幅の広い天端など走行できる箇所が少なく、結果として中小河川への箇所が少ないのが実情である。

- ・ 航空測量と異なり、レーザ一点群密度が高く、広範囲で精密なデータを取得できるが、その処理に要する時間と労力を減らすことが出来ず、リアルタイム計測が実現できていない。

- ・ レーザ一光は水中を透過しないため河床の状態までは把握できない。水部などの護岸基礎部の洗掘や河岸浸食は相変わらず目視できる範囲で危険度を判定するのみである。さらに河川横断測量は人的、コスト的負担が大きく、流下能力の定量的評価を効率化できない。

本研究は上記の背景を鑑み、1 級河川から自治体管理の 2 級および準用河川まで、あらゆる河川に適用できる MMS を実現し、さらに定期縦断に加えて河床の変動把握を可能にする横断測量もリアルタイムでモニタリングできる点検技術を完成させるものである。

2. 研究の目的

本研究では、次の技術の集積を図る。

1) 無人自動運転技術の適用による小型低コスト MMS 計測車両の実現

MMS は、GNSS や IMU の値をリファレンスとして利用したカルマンフィルタで測位する密結合方式 (Tight Coupling) と称される解析技術で測量中の自己位置を測位する。この技術には、複数の高精度の GNSS をレーザ一と一体化して車両に設置する必要がある、システムの小型化および低コスト化が困難である。そこで本研究では、車輪に取り付けられたオドメトリ (回転量計) から自己位置を測位するデッドレコニングと称される測位を用い、さらにレーザ一で求める走行軌跡で当該測位を修正する graph-based SLAM アルゴリズムを導入する。自動運転の制御技術としての SLAM には幾つもの方法があるが、オドメトリは一般車両にも設置されている簡便な機器構成であり、MMS ではトンネル内などの GNSS が受信できない状況での測位を補完するため使用してきたので、同じデッドレコニングを用いる graph-based SLAM は、これまでの MMS のノウハウが活用できる。graph-based SLAM は高精度で自己位置測位が可能で、GNSS を補完的に 1 台使用するだけで、緯度・経度方向 10mm、高さ方向 30mm の高精度測位が可能となる。これにより、従来のような車両天板に複雑な機器を搭載する必要がなくなり、結果として走行場所の制約が少ない小型車の MMS が完成する。そのため中小河川の天端や法尻の走行ができ、また低コスト化も可能なので中小河川の管理にも使用できる。

2) 高密度 3 次元データのリアルタイム処理技術の開発

同じく無自動導運転の分野で実用化されている ICP アルゴリズム (Iterative Closest Point) を用いたレーザ一点群解析技術を導入し、走行時にリアルタイムで河川堤防および河床の異常箇所を検出するソフトを開発する。ICP は、ある時期に計測されたレーザ一点群を、別の時期に計測された点群にフィットさせるために、どれだけ移動させたら良いのかを計算するアルゴリズム

である。物体認識や車両自己位置推定用としてオープンソース化されており、レーザー一点群間のノルム誤差を最小にする特異値分解を求めるプロセスによって高速処理できる。本研究は、MMSが走行するだけで瞬時に変状を検知するICP処理ソフトを開発する。

3) 水中を透過し河床および構造物の洗掘等の計測を可能にするグリーンレーザーの活用

一般のレーザーに使用される近赤外線（波長：1,064nm）に対して、緑色である515nm波長のレーザーは水中を透過するのが特徴である。航空機に専用のスキャナを搭載して計測する技術は、既にALB（Airborne LiDAR Bathymetry）と称されて実用化されており、透明度の約4倍の水深の3次元座標を取得することができる。本研究は、近赤外線と緑色のレーザースキャナを車両に搭載し、堤体の変形と河床変動、河岸浸食や護岸前面の深掘れ等の状況などを同時に計測する計測技術を構築し、車両移動型河川縦断と横断の同時測量を実現する。

上記1)、2)および3)は、いまだ車両走行型モニタリング技術には取り入れられていない独創的技術であり、河川管理の課題をICRT技術で解決する創造性を発揮する。

2017年九州北部豪雨を踏まえて「全国の中小河川の緊急点検」が実施された結果、浸水被害想定区間として400河川（300km）、的確な避難判断が必要な箇所約5,000河川（5,800箇所）が指摘され、対策の強化が図られたにも拘わらず、平成30年7月豪雨では西日本に多大な被害が発生した。我が国では、全国1,742市区町村中で1,687市区町村（96.8%）が10年間に1回以上、半数以上の925市区町村（53.1%）が10年間に10回以上の水害に見舞われている。さらに気象変動が警告されている中、約20,000にのぼる広範囲の中小河川の管理の効率化は未着手である。本研究は、困難かつ緊急を要する河川管理の課題を、実用化されている最先端のICRT技術を集積して研究期間内に解決する。

3. 研究の方法

車両移動型計測（MMS）は、道路周辺構造物の情報を取得して道路台帳現況図を更新する測量機器であった。研究代表者は2013～2015年度科学研究費補助金基盤研究（C）において、走行測量技術の改良により、堤防の天端沈下を約±20mmの精度で計測するMMS技術を世界で始めて構築した。さらに2016～2018年度科学研究費補助金基盤研究（C）において、レーザー機器を高所に設置する等の高度化技術により、堤防全体の形状変化を迅速に検出する計測法を構築した。これらの成果により、2018年度までには全国の国土交通省地方整備局ごとにMMSが1台配置され、代表的な1級河川で本計測が適用される状況になった。その状況の中、近年の豪雨災害を考慮すると自治体管理の中小河川に発展する計測が必要と考える。これまでの成果を活用すれば投資額が少なくかつ短期間で目標に到達できると考え、本研究のテーマである中小河川用MMSの開発を申請するに至った。その研究方法は次の通りである。

1) 無人自動運転技術の適用による小型低コストMMS計測車両の実現について

MMSは、一般車両にレーザースキャナを搭載し、他にカメラ画像等の車外情報を取得しながら走行する。自動運転を実現するリアルタイムでの自己位置測位および事物認識技術は、多大な投資の元で開発が進められ、高精度化を追求したアルゴリズムの多くがオープンソースの形で開放される段階になった。自動運転車とMMSは同じ機器構成であるため、相互に技術を転用するためのハード開発は不要であり、測位精度や変状検出に要求される精度と解析ノウハウは、これまでの研究により蓄積されている。グリーンレーザーも既にALB計測で実績を有しており、最適なSLAMアルゴリズムおよびグリーンレーザー機器を選択し応用することで本申請内容が実施できる。このように、提案する高度化技術が、過去の実績を発展させることで実現できるのが本研究の強みである。また前述の2013～2015年度科学研究費補助金基盤研究（C）「河川防災のための迅速、広域かつ高精度での河川堤防の3次元変状検知技術の研究」において、河川堤防の天端上を走行しながら、±20mm以下の精度で堤防の沈下状況をMMSで測量することを可能にした。具体的には国土地理院が設置する電子基準点を用いたネットワーク網を使った面補正パラメータ方式と称される手法により数cmの高精度測位を可能にし、さらに車両にオドメータを設置し、その値とGNSS、IMU値とを観測量としたカルマンフィルタの適用により高精度測量を可能にした。また、2016～2018年度科学研究費補助金基盤研究（C）「河川堤防および河川構造物の維持管理のための高精度車両走行計測技術の研究」において、150m以上の対象物の3次元座標を50mm間隔以下の高密度で取得するレーザースキャナ機を伸縮可能で剛性の高い昇降機に設置し、堤体全体の形状変化を測量するMMS計測を実現した。これまで、走行車両の揺動の影響で機器の測位誤差が大きくなり、高所からのレーザー測量の高精度化が実現できなかった。本研究では、上記①の測位技術を改良し、路面上3.6m高度からの高精度レーザー測量を可能にした。その結果、レーザーの入射角度が鋭角になり、堤防上の植生の影響を除外できるので、堤防全体の形状変化の把握が可能になった。本研究目的は、これらの技術を基にして開発していく。

2) 高密度3次元データのリアルタイム処理技術の開発

本研究は航空レーザー測量のデータ処理として開発を実施しており、斜面モニタリングの手法として実用化されている。本研究では、この技術を1)の手法と組み合わせることで実現させる。

3) グリーンレーザーによるリアルタイムデータ処理技術について

本研究は2018年度の国土交通省からの受託研究「ALB計測工程の最適化と高度化による低コスト海底地形把握技術の開発」における研究成果を活用して実施する。これは透明度や波浪の影

響と計測深度の関係を把握し、グリーンレーザーによる海底地形の 3 次元計測の最適条件を確立させるもので、本研究での河床横断測量開発用のハードおよびソフトを提供する。

以上、すべて 2018 年度に実施完了される研究成果を基に本申請技術が実施され、各研究時の研究協力者が引き続き対応する組織で実施する。

4. 研究成果

1) 無人自動運転技術の適用による小型低コスト MMS 計測車両の実現：走行軌跡を使って自己測位を行う SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)アルゴリズムを活用した河川堤防 3 次元計測システムの実用性を試行した。当測位技術を構築することで、中小河川の天端や法尻を、車両走行だけでなく徒歩あるいは自転車の走行によって 3 次元計測ができる計測システムを実現するのが目標である。研究期間全体のわたって岡山県内に流れる旭川流域において、携帯型レーザースキャナと SLAM による測位の組み合わせで計測した座標値の精度検証を実施した。その結果、開発した SLAM による自己測位精度を導入した 3 次元計測システムにより、河川堤防あるいは河川構造物の変状計測を可能とする走行型計測手法が実用レベルにあることを実証した。

2) 高密度 3 次元データのリアルタイム処理技術の開発：1)の手法と組み合わせて、リアルタイムで河川堤防、河道内および河川構造物の変状発生個所を検出するレーザ点群処理ソフトを開発するのが目標である。研究期間内に実施された計測にて取得されたレーザ一点群を用いて、河川堤防の形状をリアルタイムかつ高精度に再現できるアルゴリズムが構築できたことを実証した。

3) 水中を透過し河床および構造物の洗掘等の計測を可能にするグリーンレーザーの活用：波長 515nm の緑色レーザーの水中透過能力と河川の濁度の関係を検証した。その結果、目視で確認できる深さの約 1.5 倍までの水深個所をレーザにて計測できるスキャナの開発を実現させた。これにより緑色のレーザー スキャナを用いて、堤体の変形と河床変動、河岸浸食や護岸前面の深掘れ等の状況などを同時に計測する計測技術を構築できることを明らかにした、以上、豪雨災害に対する効果的な中小河川の管理に適用できるモニタリングシステムの実現を可能にした。

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 堺 浩一、間野 耕司、橘 菊生、西山 哲	4. 巻 27
2. 論文標題 UAVグリーンレーザ計測による河川構造物点検への適用検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 51～56
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11532/river.27.0_51	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 堺浩一、間野耕司、橘菊生、西山哲	4. 巻 31
2. 論文標題 グリーンレーザドローンの計測精度と計測特性の把握に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 応用測量論文集	6. 最初と最後の頁 99-110
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 崎田晃基、西山哲	4. 巻 30
2. 論文標題 河川堤防地形測量における3次元データの取得法とその活用に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 情報地質	6. 最初と最後の頁 101, 109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.6010/geoinformatics.30.3_101	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Nanoka Akiyama, Satoshi Nishiyama, Koki Sakita, Fumiaki Yamazaki
2. 発表標題 APPLICATION OF THREE-DIMENSIONAL LASER POINT CLOUDS TO RIVER MANAGEMENT
3. 学会等名 7th Int. Conf. on Structure, Engineering & Environment (SEE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山菜乃香, 西山哲, 照屋市朗, 中原浩実, 富井隆春
2. 発表標題 河川DX実現のための陸上・水中ドローン技術の研究
3. 学会等名 日本応用地質学会中四国支部 研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐守 直人, 西山 哲, 崎田 晃基, 藤木 三智成, 佐藤 直人
2. 発表標題 2種類の車両走行型計測によるレーザ点群を用いた道路周辺の地物変化の抽出
3. 学会等名 第76回 土木学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山 菜乃香, 西山 哲, 崎田 晃基
2. 発表標題 河川管理のためのSLAM技術を導入した三次元レーザ点群の活用方法
3. 学会等名 第76回 土木学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山 菜乃香, 矢原 諒, 崎田 晃基, 吉田 圭介, 西山 哲, 山崎 文明
2. 発表標題 SLAM 技術を導入した LiDAR 計測による河川堤防モニタリング手法の開発
3. 学会等名 土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋山 菜乃香, 西山 哲, 崎田 晃基, 山崎 文明
2. 発表標題 SLAM技術を導入した携帯型レーザシステムによる河川堤防モニタリング手法の検討
3. 学会等名 土木学会土木情報学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 酒井多樹, 崎田晃基, 西山哲, 吉岡裕嗣, 川村裕, 間野耕司
2. 発表標題 海底地形モニタリングに向けた差分解析手法の検討
3. 学会等名 土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐守直人, 西山哲, 崎田晃基, 藤木三智成, 小野尚哉
2. 発表標題 MMSによる法面モニタリング手法のための差分解析手法の精度検証
3. 学会等名 土木情報学シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------