

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350402

研究課題名(和文) 写真測量を導入した慣性測量の測位精度向上に関する研究

研究課題名(英文) Study on Improving the Positioning Accuracy of Inertial Surveying Incorporated with Photogrammetry

研究代表者

小泉 俊雄 (KOIZUMI, toshio)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：10083883

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：慣性測量装置(IMU)にカメラを搭載し、写真測量を用いて算出したカメラの自己位置を、慣性測量の誤差を補正するカルマンフィルタの外部情報として取り入れて、慣性測量の測位精度を向上させる手法を構築した。

具体的には、カメラの位置情報を用いた慣性測量を開発した。慣性測量装置より得られる加速度と、カメラの撮影時の位置を時間で2回微分して得られるカメラの加速度を用いて、多視点写真測量(SfM)より得られた座標にスケール(縮尺)を付与する手法を開発した。SfMとIMUを組み合わせた測量方法を提案し、その有効性を提示した。写真測量と慣性測量を組み合わせた測量の新たな応用例を提示した。

研究成果の概要(英文)：This research establishes a technique for improving the positioning accuracy of inertial surveying. The study used an inertial measurement unit (IMU) with a camera, and the camera's position as it took photographs was calculated using photogrammetry. This data was used as input for the external information on the Kalman filter to correct inertial surveying errors.

Our results are as follows. (1) An inertial surveying method using camera position information was developed. (2) A technique for adding a scale to the coordinates acquired using the structure from motion (SfM) method was developed. (3) A hybrid surveying method consisting of SfM and an IMU was proposed, and its effectiveness was proven. (4) A new application example of the surveying method created by combining photogrammetry with inertial surveying was demonstrated.

研究分野：測量学

キーワード：慣性測量 SfM 写真測量 位置測定

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は GNSS (汎地球測位システム) の次世代の測量方法として慣性測量を位置付け、さまざまな取り組みを行ってきた。このような研究方針の中で、慣性測量の精度を向上させる一つとして、移動と停止を繰り返す作業の中で、停止した際、速度が 0m/s で移動していると仮定し、この仮定をカルマンフィルタの外部情報として取り込む方法を開発した (間欠停止カルマンフィルタ)。そして、その延長として、慣性装置の位置を、慣性装置とは別に何らかの方法で計測し、その計測データをカルマンフィルタの外部情報として取り込むことはできないかと考えた。なお、本研究は人が持って測量する方法を視野に入れているために、速度計は採用しない。

2. 研究の目的

研究の目的は、慣性測量の測位精度を向上させるための手法を開発することである。

3. 研究の方法

慣性測量装置にカメラを搭載し、写真測量で求めた撮影時のカメラの位置を、カルマンフィルタの外部情報として慣性測量の測位精度を向上させる方法である。

4. 研究成果

(1) カメラの自己位置情報を用いた慣性測量の開発

本研究で考案した方法は、慣性計測装置 (IMU) にカメラを搭載し、撮影時のカメラの位置を写真測量から算出する。カメラの位置は慣性測量の誤差を補正するカルマンフィルタの外部情報として取り入れ、慣性測量の測位精度を向上させる。カメラの位置を取得する方法は、近年開発が著しい多視点写真測量 SfM (Structure from Motion) に着目し導入した。本研究ではこれを IMU/SfM/カルマンフィルタ手法と名付けた。図 1 に本研究の全体構成を示す。

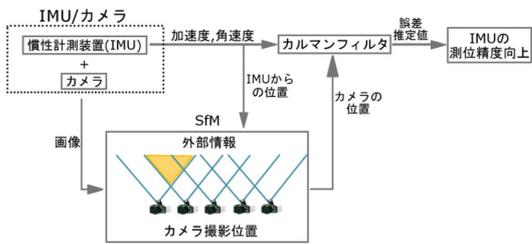


図1 研究の全体構成 (IMU/SfM/カルマンフィルタ手法)

本研究における用語の定義と説明

用語を以下のように定義する。

() Zupt 処理: 停止している時の対地速度は 0m/s であるから、この時に算出された速

度は誤差であるとして速度誤差を時間に比例配分して補正する。

() 間欠停止カルマンフィルタ: 計測中に移動を時折停止し、停止時の速度 0m/s を観測値としてカルマンフィルタを構成する。

() IMU/SfM/カルマンフィルタ手法 (停止時): 間欠停止カルマンフィルタに加え、移動停止時に SfM より得たカメラの撮影位置を観測値として利用したカルマンフィルタ。

() IMU/SfM/カルマンフィルタ手法 (停止時+移動時): ()に加え、停止時のみでなく移動時にもカメラの撮影位置を観測値として利用したカルマンフィルタ。

装置

図 2 に使用した慣性計測装置 (IMU) を、表 1 にその性能を示す。図 3 に使用したカメラ (Canon EOS-1Ds Mark2 DIGITAL) を、表 2 にその仕様を示す。



表 1 IMU(TA7458-1)の性能

項目	測定
外形・寸法	124×188×124mm
質量	2.5±0.5kg
消費電力	50W以下
ジャイロバイアス	0.37°/h rms
ジャイロドリフト	200µm rms
加速度バイアス	400µG rms
加速度ドリフト	500µm rms

図2 IMU(TA7458-1)



表 2 Canon EOS-1Ds Mark2 DIGITAL の性能

型式	デジタル一眼レフAF AEカメラ
記録媒体	CFカード、SDメモリーカード
撮像素子	56×24mm
形式	単反鏡・縦向き大型単眼CMOSセンサー
画素数	約1670万画素
画素ピッチ	約4.75µm
アスペクト比	3:2
カラーフィルタ方式	液晶色フィルター
ローパスフィルター	従来型、撮像直前に配置
記録フォーマット形式	CR2、0、IFB、およびRAW
記録解像度	1165、851、631
ファイル形式	RAW: DNG (492×332画素)
専用レンズ	EF55mm 1/2 (焦点距離35mm)

図3 Canon EOS-1Ds Mark2 DIGITAL

実験

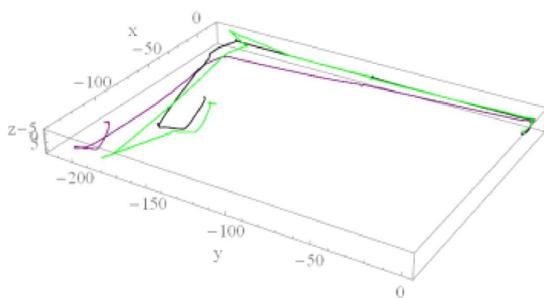
実験は国土交通省国土地理院本院構内の道路にて行った。図 4 に実験場所の平面図を示す。移動経路は約 400m のアスファルト舗装の平坦地である。図中に示した A~F の地点にて基準点を設置し、基準点を結ぶ黄色い線を移動経路とした。なお、本実験は移動を手持ちの場合と、装置を台車に乗せて移動した場合、そして、移動速度をゆっくり、普通、速いに分けて行った。



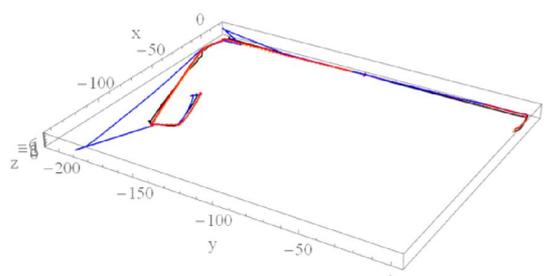
図4 実験場所平面図

図5 と図6 に装置を手を持って普通で移動したときに結果を示す。なお、本実験

における SfM の与点は基準点 A~C の 3 点に与えた。実験の結果、基準点 D まではどの解析結果も GNSS (真値) の計測値との差があまり見られないが、距離が長くなる基準点 D 以降では Zupt 処理、間欠停止カルマンフィルタ、IMU/SfM/カルマンフィルタ手法(停止時)、IMU/SfM/カルマンフィルタ手法(停止時+移動時)の順で精度が向上していることが分かる。図 7 は各解析結果の 3 次元距離の誤差を示したものである。間欠停止カルマンフィルタと IMU/SfM/カルマンフィルタ手法(停止時)は、基準点 D-E の区間のような長い経路では誤差が大きく発散しているのが分かる。それに対し、IMU/SfM/カルマンフィルタ手法(停止時+移動時)はそのような誤差の発散は見られないことから、本手法が良いことが分かる。



—GNSS —(a)Zupt処理 —(b)間欠停止カルマンフィルタ
図 5 手持ち解析結果[移動速度普通]



—GNSS —(c)IMU/SfM/カルマンフィルタ手法(停止時)
—(d)IMU/SfM/カルマンフィルタ手法(停止時+移動時)
—(e)IMU/SfM/カルマンフィルタ手法(停止時+移動時)
図 6 手持ち解析結果[移動速度普通]

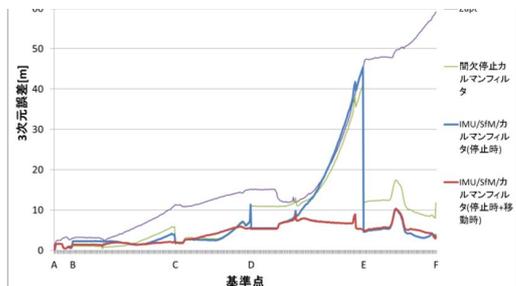


図 7 各解析結果の 3 次元誤差まとめ
[手持ち_移動速度普通]

(2) Video/IMU による加速度情報のみを用いた SfM のスケール付与方法の開発

(1)では SfM にスケールを与える点として、測量の出発点近傍の 3 箇所の点の IMU で計測した位置情報を用いた。このようにした理由は、GNSS や TS(トータルステーション)などを使用しない自律測量を目指したためである。しかし、この方法では出発点から遠ざかるにつれて SfM のスケールの信頼性が低下することが考えられる。また、出発点近傍とはいえ、IMU の時間経過による積分誤差(位置のドリフト)の増大も考えられる。そこで、本研究では SfM にスケールを与える新たな方法として、IMU の積分を用いない方法、すなわち、ドリフトが生じている IMU の位置を使用せずに IMU の加速度を用いる方法を考案した。具体的には IMU で得られた加速度を積分せずに、SfM より得られたカメラの位置を撮影間の時間で二階微分し、加速度に変換する。本研究はこれを「カメラの加速度」と定義する。本工程で得たカメラの加速度と、IMU の加速度を比較することで SfM のスケール付与が可能になる。

実験に使用した装置を図 8 に示す。装置は手ブレ防止による動画撮影の影響を軽減するため、ジンバルスタビライザーにカメラを搭載したものである。



図 8 左上:カメラ、左下:IMU、
右:ジンバルスタビライザー

実験は図 9 の原点である 0m地点から 60 m地点までの X 軸方向の一軸移動を動画撮影により行う。実験における座標軸は、IMU による初期姿勢を基準とし、図 9 に示す。撮影は装置を手で持ち移動しながら行う。スケール付与の検証は、トータルステーションにより計測した原点から検証点までの距離を以下の 3 通りで算出した 3 次元距離と比較して行う。() 基準点(与点)を用いてカメラの位置を算出した方法、() 本手法である IMU の加速度を利用した方法、() 積分で求めた IMU の位置をカメラの位置として求めた方法。

図 10 は、3 通りの方法に対しての原点から検証点までの 3 次元距離の誤差である。これによると、() の IMU の積分を用いたものに比べて、() の本手法のもの精度が向上しているのが確認できる。

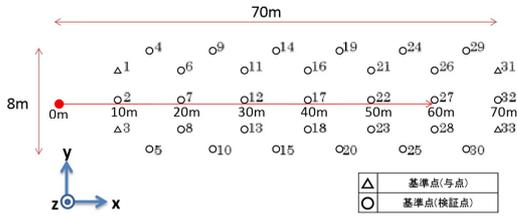


図 9 検証点の配置図

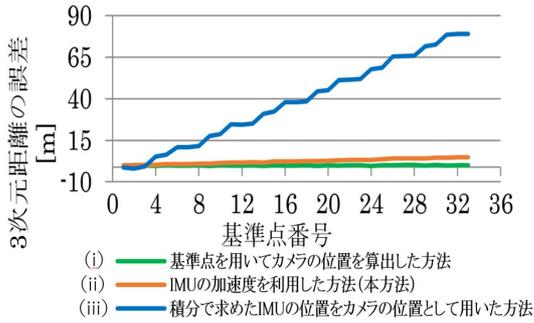


図 10 検証点を用いた精度比較

(3) SfM/IMU 測定の提案

一般的に SfM はカメラの自己位置を IMU に比べ良い精度で求めることができる。しかし、SfM は様々な外的要因(被写体の状態、撮影時の明るさなど)に影響され必ずしも全区間で安定した測定が出来るわけではない。一方 IMU は外的要因に左右されずに計測出来る利点がある。そこで本研究は、SfM で測定できなかった区間を IMU で補完する方法を提案する。これを本研究では SfM/IMU 測定と定義する。この方法を(1)で行った国土地理院でのデータをもとに、SfM が解析できない場所を仮定し実施した。

解析は図 4 に示す A~F の区間で SfM は AB 区間、CD 区間、EF 区間は計測できているが、他の区間(BC 区間、DF 区間)は計測できないと仮定して行った。IMU は全ての区間で計測はできているとした。解析条件を下記に示す。

- () IMU は間歇停止カルマンフィルタ
- () SfM のみ
- () 本節(3節)の手法(SfM/IMU)

解析結果の平面図を図 11 に、3次元距離の誤差を図 12 に示す。これによると、SfM/IMU の移動軌跡は真値の GNSS に対して、SfM よりも精度は悪いが、間欠停止カルマンフィルタよりも精度が良いことが分かる。

(4) 写真測量と慣性測量を組み合わせた新たな応用事例

写真測量と慣性測量を組み合わせた新たな測定の事例として、地中導水路の位置測定への利用を検討した。地中導水路の管径は一般的に小さく、人が入って測定が出来ないものが多く、このような管路の中心位置の測位方法は現状では模索の状況である。

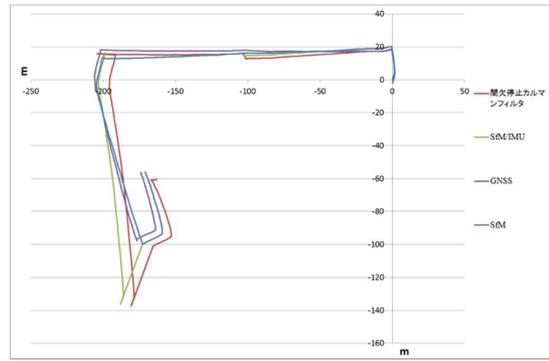


図 11 解析結果平面図

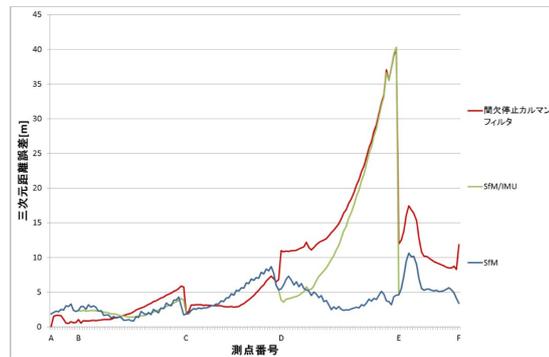


図 12 各解析結果の 3次元距離誤差

実験は図 13 に示す延長 95.3m、管径約 1m、勾配約ゼロの直線の導水路である。



図 13 実験場所

なお、SfM に実寸を与える方法については、導水路が真っすぐであり、今回は人が入って測定が出来たので、巻き尺で測定した数値を使用した。すなわち、巻き尺を導水路の進行方向の壁面に貼り付けこれを X 軸とした。そして、X 軸方向に装置を搭載した台車を 5m ピッチで停止させながら移動させた。巻き尺は写真撮影時には撤去した。巻き尺の 0m, 5m, 10m を実寸法として与えたものをケース 1 とし、0m, 5m, 95m のものをケース 2 とした。0m とは出発点の位置であり、95m とは終着点の位置である。図 14 に移動距離に対するそれぞれのケース毎の誤差と IMU のみでの誤差を示す。IMU のみでの誤差とは、5m 毎に間欠停止カルマンフィルタで補正した

ものである。これによると、ケース 1 では誤差が 4.8m 程生じているが、ケース 2 では、誤差は最大で 1m 程に減少している。なお、図中の [Cupt]とは終点の座標を既知として誤差を補正するものである。

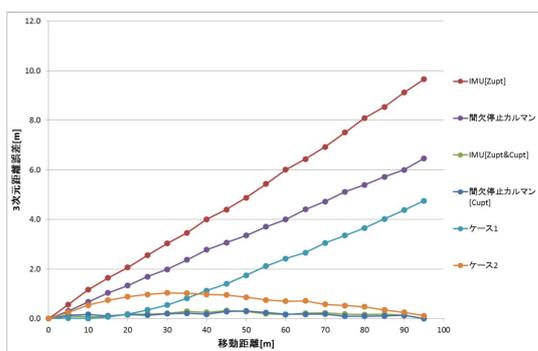


図 14 解析結果 誤差

(5) 結論

本研究で得られた結論を下記に示す。

- 本研究で考案した IMU/SfM カルマンフィルタ手法は従来の手法である Zupt 処理や間欠停止カルマンフィルタに比べ測位精度を向上させる有効な方法である事を確認した。中でも IMU/SfM カルマンフィルタ手法(停止時+移動時)が最も測位精度が良く、本手法は道路(測量)などの経路(軌跡)が算出できる長所がある。また、IMU/SfM カルマンフィルタ手法(停止時+移動時)は、間欠停止カルマンフィルタに比べ、誤差を約半分程度に抑える事が出来た。
- IMU の加速度とカメラの加速度を用い、SfM にスケールを与える方法を開発した。
- SfM/IMU 測量手法を提案し、本手法は慣性測量の測位精度向上に寄与することを示した。
- 写真測量と慣性測量を組み合わせた新たな応用事例として、地中導水路の位置測量への適応を検討し、有効であることを示した。

<引用文献>

- 熊谷秀夫, 久保幸弘, 木原正人, 杉本未雄: DGPS/INS/VMS を統合した高精度車両位置計測アルゴリズム, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 41, No. 4, pp. 77-84, 2002
- 小泉俊雄, 岡本良夫, 白井靖幸, 波田太至: 間欠的確定観測に基づくカルマンフィルタ状態推定法, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 45, No. 3, pp. 24-30, 2006
- 布施孝志, 松本圭生: モバイル機器搭載センサを統合した自己位置推定手法の開発, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 54, No. 6, pp. 290-299, 2015

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

中島崇宏、安齋翔次郎、川崎英明、岡本

良夫、小泉俊雄: SfM のカメラ自己位置推定情報を導入した慣性測量に関する研究、応用測量論文集, Vol. 26、査読有、pp.123-133、2015

川崎英明、小泉俊雄、岡本良夫、佐々木脩安、安齋翔次郎: 連続写真を用いたカメラの自己位置推定、応用測量論文集, Vol. 25、査読有、pp.125-132、2014

[学会発表](計7件)

安齋翔次郎、川崎英明、小泉俊雄: Video/IMU による加速度情報のみを用いた SfM のスケール復元 手法の開発、平成 28 年度秋季学術講演会発表論文集、日本写真測量学会、都久志会館(福岡県福岡市)、2016 年 11 月 10 日

川崎英明、安齋翔次郎、小泉俊雄: Study on improvement of accuracy in inertial photogrammetry by combining images with inertial measurement unit, XX Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, v/3 Terrestrial 3D imaging and sensors, プラハ(チェコ)、2016.7.13

中島崇宏、安齋翔次郎、岡本良夫、小泉俊雄、川崎英明: 写真測量を導入した慣性測量の測位精度向上に関する研究、日本写真測量学会、釧路市観光国際交流センター(北海道釧路市)、2015 年 10 月 30 日

安齋翔次郎、中島崇宏、小泉俊雄、岡本良夫、川崎英明: 画像と慣性装置を組み合わせた慣性写真測量の精度向上に関する研究、日本写真測量学会、釧路市観光国際交流センター(北海道釧路市)、2015 年 10 月 29 日

安齋翔次郎、川崎英明、岡本良夫、小泉俊雄: 連続写真を用いたカメラの自己位置推定の精度向上に関する基礎的研究、日本写真測量学会秋季学術講演会、サンポートホール高松(香川県高松市)、2014 年 11 月 21 日

中島崇宏、岡本良夫、小泉俊雄、川崎英明: カルマンフィルタを利用した間欠停止慣性測量、日本写真測量学会秋季学術講演会、サンポートホール高松(香川県高松市)、2014 年 11 月 21 日

内田達也、安齋翔次郎、岡本良夫、小泉俊雄、川崎英明、佐々木脩安: 連続写真における外部標定要素の計算手法の改良とその性能評価、日本写真測量学会秋季学術講演会、サンポートホール高松(香川県高松市)、2014 年 11 月 21 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小泉 俊雄 (KOIZUMI, Toshio)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号: 10083883