

# 映像を用いた移動体の3次元位置の計測技術とその精度検証

安藤ハザマ 正会員 ○紫垣 萌  
正会員 早川健太郎  
正会員 澤城光二郎

## 1. はじめに

建設現場において、建機をはじめとした移動体の位置情報の計測にはGNSS（Global Navigation Satellite System）が広く活用されている。たとえば、ICT活用工事で用いられるMC（マシンコントロール）/MG（マシンガイダンス）建機等、GNSSを用いて稼働中の建機の位置情報を取得し、施工情報とひもづけて出来形や品質を管理することが定常的に行われている。GNSSを用いる際の課題として、切り立った法面や構造物の近傍ではそれらによって遮蔽されてGNSS衛星からのデータが正常に受信できず、位置情報の演算が困難となることが挙げられる。この場合、代替技術として自動追尾TS（トータルステーション）を用いて移動体を追尾する手法があるが、別途測量機器が必要になることに加え、機器構成も複雑になるという課題がある。そこで著者らはGNSSやTSに依存せず、かつ簡易な機器構成で移動体の3次元位置を計測するシステムを開発した<sup>1)</sup>。本稿ではシステムの概要とシステムの精度検証実験について報告する。

## 2. システムの概要と運用フロー

本システムは映像中のマーカを検出、トラッキングしてその軌跡を3次元座標に変換、記録するシステムである。本システムで使用する資機材は映像取得用の汎用ビデオカメラ、移動体に取り付けるマーカ、ソフトウェア処理用の汎用PCであり、運用フローは現場で行う作業とソフトウェア処理に分かれる。

システムの運用フローを図-1に、計測状況の模式図を図-2に示す。現場作業では計測範囲の4隅を基準点とし、あらかじめ基準点の座標測量を行ったのち、映像中で視認できるようにカラーコーン等で目印を設けておく。なお計測範囲は取得する映像の解像度の観点から20m×20m程度が上限となる。その後、計測対象の移動体に着色したマーカを取り付け、2台のビデオカメラを設置して作業の様子を撮影する。ここで使用するマーカは、カメラの撮影方向やマーカ自体の姿勢にかかわらず同一の形状で視認できるように形状を球体とし、色は建設現場で用いられることの少ない蛍光ピンクを選定した。また、カメラは撮影方向を90度違い、計測範囲を挟むように設置するとともに、それぞれの画角内にすべての基準点が映るよう調整し、固定する。

ソフトウェア処理では、撮影した映像と基準点座標をソフトウェアへ入力することで、画像処理技術によりマーカの3次元位置が出力される。画像処理はマーカの検出、カメラ位置の推定、マーカの3次元位置計測の3つに分類されており、それぞれの詳細を次章にて述べる。

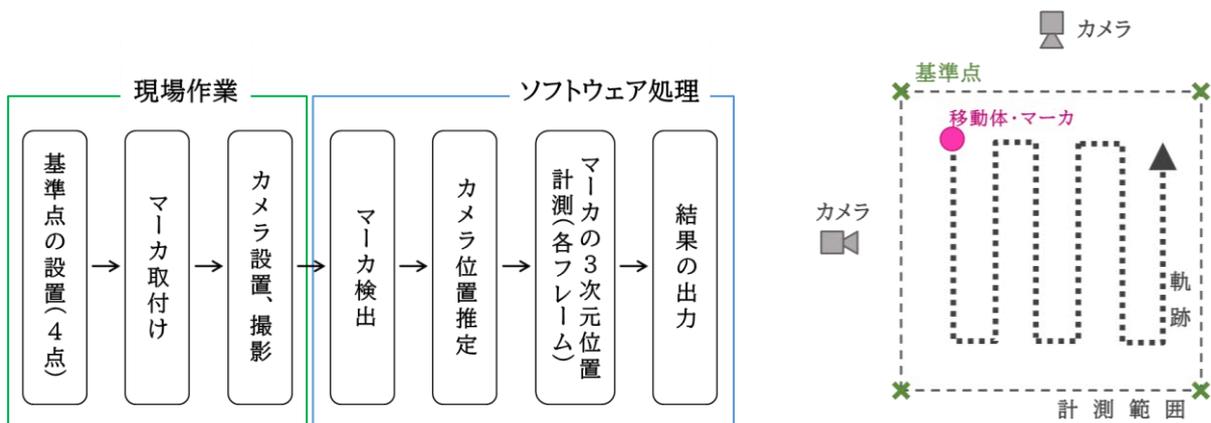


図-1 システム運用フロー

図-2 計測状況の模式図

キーワード 映像, 3次元位置計測, 画像処理, トレーサビリティ  
連絡先 〒305-0822 茨城県つくば市莉間 515-1 安藤ハザマ技術研究所 TEL 029-858-8815

### 3. 画像処理技術の詳細

#### (1) マーカ検出

ソフトウェアへ入力した映像から移動するマーカ（図-3）を検出する手法として、本システムでは色情報の閾値処理を用いた。マーカの色に近い色要素をもつ画素を映像上から抽出し、その画素が一定以上の面積をもつとき、その領域をマーカとして検出する。さらに、検出した領域の最も離れた2点をマーカの直径とみなし、直径の中点をマーカの中心座標とみなす。マーカ検出結果のイメージを図-4に示す。

#### (2) カメラ位置の推定

映像から3次元空間を再現するためには、2台のカメラの設置位置および姿勢の情報が必要である。ここでは、2台のカメラの映像中に映る基準点の座標とカメラパラメータを用いてそれらを求めている。具体的には、撮影した映像の中から基準点を視認し、その点にあらかじめ測量しておいた座標値を付与する。これにより映像平面上の基準点座標と、測量で得た基準点座標がひもづく。加えて、カメラの焦点距離および主点座標を入力することで、2台のカメラの位置と姿勢が推定される。

#### (3) マーカの3次元位置計測

ここまでで得られた結果と三角測量の原理<sup>2)</sup>により、マーカの3次元位置を計測する。図-5のように、2台のカメラの位置・姿勢から、共通する1点の位置を算出する。この位置計測を映像の各フレームに対して実施することで、移動体に取り付けたマーカの軌跡の計測および記録を行う。計測結果を3次元グラフ上に表したものを図-6に示す。

#### (4) 開発上の工夫

ソフトウェアによる画像処理速度向上のため、入力した映像のフレームレートの削減をソフトウェア内で行っている。これにより、解析対象である移動体の追跡に支障のないフレームレートへ任意に調節することが可能となった。

また、マーカ検出の際、映像の各画素の表現形式をRGB形式からHSV形式へ変換している。HSV形式は色相(Hue)、彩度(Saturation)、明度(Value)の各値で色を表現する形式であり、赤(Red)、緑(Green)、青(Blue)の各値で色を表現するRGB形式と比較して、天候や日照等といった撮影環境に即した色の定義が容易である。そのためHSV形式へ変換し映像を表現することで、より適切なマーカ検出の閾値設定を可能にしている。

### 4. 計測精度の検証

#### (1) 精度検証実験の概要

本システムで計測した3次元位置の精度を確認するため、3Dモーションキャプチャ(以下、3DMC)との比較実験を行った。3DMCは、赤外線カメラで計測範囲内の反射マーカの3次元位置を計測するシステムで、計測精度は別途実施した実験によれば±3mm以内である。

実験の様子を図-7に示す。小型締固め機での転圧作業を想定し、10m×10mの計測範囲内を2.5mのコース間隔で往復する移動体を3DMCと本システムで同時に計測した。なお、移動体には図-8の模式図に示すように、映像用マーカと3DMC用マーカを取り付けた台車を用いた。



図-3 使用したマーカ

図-4 マーカ検出結果イメージ

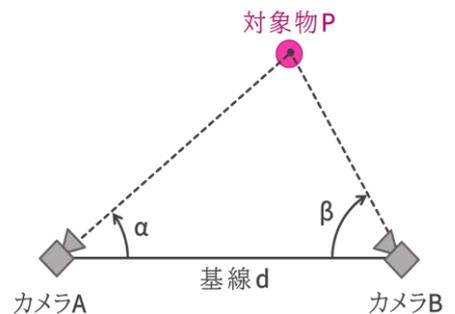


図-5 マーカ位置算出イメージ

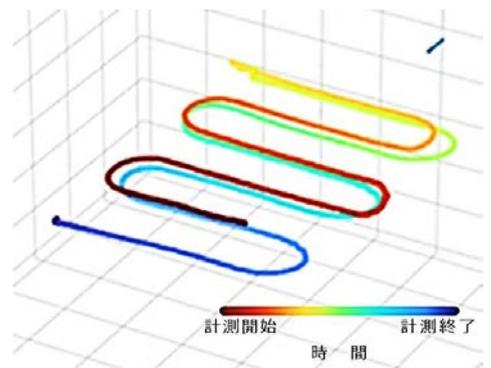


図-6 マーカ軌跡の出力結果

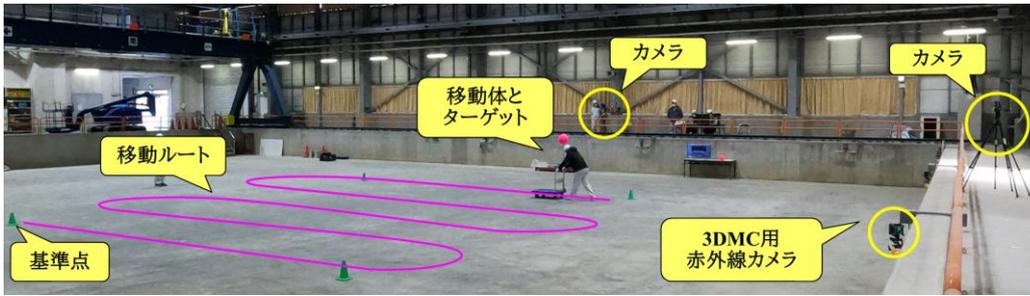


図-7 実験状況

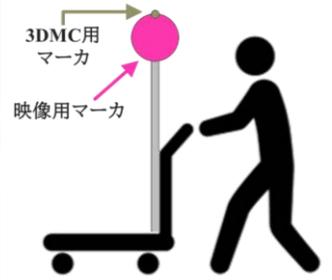


図-8 移動体の構成

また撮影条件による計測精度の差を確認するため、マーカは直径 20cm と 30cm のものを用意し、カメラは地面から 1.5m の高さで水平（仰角 0 度）に撮影するパターンと、3.5m の高さから俯瞰した視点で撮影する 2 通りで設置した上で、それぞれ 2K 解像度と 4K 解像度の映像を取得した。以上の構成を 8 つの計測ケースに分類し、3DMC の計測結果を基準として x, y, z 軸方向の較差を算出することで、精度評価を行った。

## (2) 実験結果と考察

較差の算出結果を表-1 に、時系列による較差の推移を図-9 に示す。

マーカの直径の違いによる影響として、直径 20cm の場合よりも 30cm の場合のほうが、較差が平均 0.5cm 程度小さくなり、マーカの直径が大きいほうが高精度な計測結果が得られることがわかった。これはマーカが大きくなるほどマーカを捉える画素数が多く、球体の形状が精細に描写されることから、より正確なマーカ中心座標を求めることができたためと考える。

次に、カメラの向きによる影響として、俯瞰して置いた場合、水平に置くよりも x 軸は平均 4.5cm 程度、y 軸は平均 1cm 程度較差が小さく、一方で z 軸は平均 0.5cm 程度較差が大きく

表-1 3DMC との較差

計測ケース	ターゲットの直径(cm)	カメラ取付位置	映像の解像度	平均較差(cm)			
				x軸	y軸	z軸	位置
case1	20cm	水平	2K	13.28	5.22	2.24	15.40
case2			4K	7.20	3.70	1.72	9.45
case3		俯瞰	2K	7.75	4.02	4.34	10.23
case4			4K	2.22	2.47	0.86	3.70
case5	30cm	水平	2K	12.22	4.62	2.11	14.10
case6			4K	6.66	3.48	1.72	8.75
case7		俯瞰	2K	8.05	3.68	3.69	10.09
case8			4K	2.68	2.13	0.73	3.85

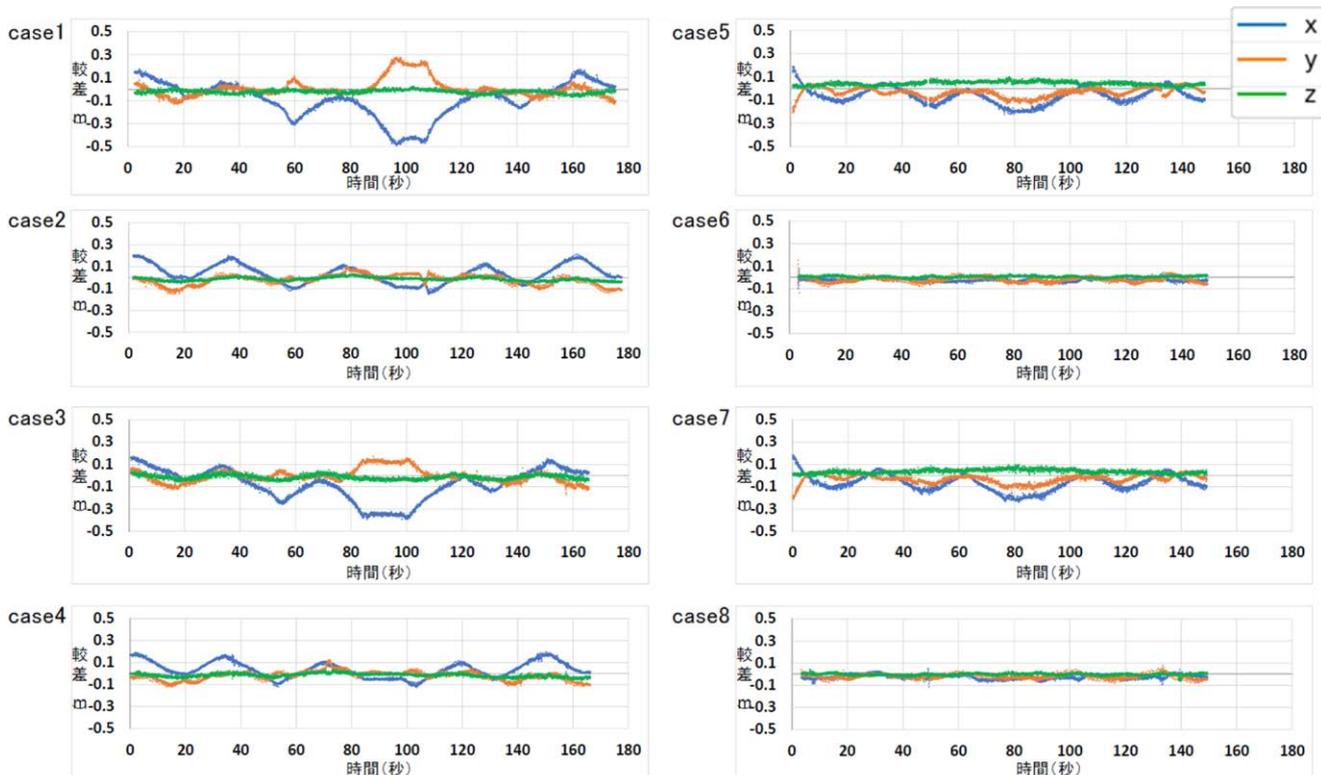


図-9 時系列による較差の推移（グラフ縦軸：較差（m）、横軸：時間（秒））

なり、カメラの向きにより計測精度に差が出る結果となった。これは、俯瞰した映像では x, y 軸方向の移動が平面的に捉えやすく、z 軸方向の移動が捉えにくかったため、較差に違いが生じたと考える。

また、解像度の違いによる影響を比較すると、2K 映像と比べ 4K 映像の方の較差は平均して 3cm 程度小さくなった。映像の解像度により計測精度に差が出る要因としては、マーカ直径に関する考察と同様、解像度が高いほど、映像中でマーカの形状がより正確に再現されるためと考える。

さらに図-9 より、多くの実験ケースにおいて 100 秒付近の x, y 軸較差が大きくなっている。計測開始から 100 秒時点でのマーカは、移動ルート上で 2 台のカメラから最も離れた位置にあったことから、2 台のカメラからの距離が離れると計測精度が低下することがわかった。これも、カメラとマーカの距離が離れることで、映像中でマーカを捉える画素数が少なくなり、マーカ形状の再現が困難になったためと考える。

総じて本システムの計測結果の位置精度は、2K 映像では約±15cm、4K 映像では約±10cm となった。

## 5. 実工事への適用と今後の展望

### (1) 実工事への適用例と課題

第 4 章の実験によって、本システムは GNSS 情報等の測量機器を用いることなく映像から移動体の位置情報が取得できることを確認した。そこで、構造物近傍の舗装工事で稼働する振動ローラ、プレート転圧機等の作業状況を撮影し、本システムが実工事で使用される機械へ適用できるかを検証した。検証の状況を図-10 に示す。その結果、構造物際の舗装等の小規模工事の場合、施工範囲の形状が細長い場合が多く、全域をカメラ画角内に収めるためにはカメラの位置が施工範囲から遠くなり、映像上のマーカが小さくなるため検出が困難になるという課題が明らかとなった。またマーカを取り付けている建機の向きや、人物および他の建機の往来により、マーカがカメラから遮蔽されトラッキングが途切れることが多くあった。この検証ではこれらの課題について、マーカを取り付ける位置を変更することやカメラを据え替える等、運用方法の工夫によって対応したが、遮蔽物によるトラッキングの途切れについては、次のようなソフトウェアの機能向上が必要である。すなわち、データ欠損の無い安定した 3 次元位置計測を行うためには常に 2 方向からマーカを捉えた映像が必要であることから、使用するカメラの台数を増やし複数台で撮影した映像から遮蔽されていない映像を選択して処理する等の対策が考えられる。

### (2) 本システム適用先の想定

本システムを実工事へ適用するさらなる展開先として、小型締固め機による構造物際の転圧作業やパイプレータによるコンクリート締固め作業等があげられる。これらの工種へ本システムを適用することで、GNSS 情報が利用困難な環境下の作業においても、位置情報と品質情報を関連付けることができ、施工のトレーサビリティ確保に貢献できるものとする。また、入力する映像が高解像度であるほど計測精度が高くなるため、高い精度で品質管理を求められる作業では 4K 等の高解像度な映像を用いる等の使い分けが考えられる。

今後は、小規模土工や舗装工等の施工管理要領を視野に入れた、様々な現場条件下での本システムの運用方法を検討していくことで、現場での実用性を高めていきたい。

## 謝辞

本システムの開発および精度検証にあたり、日本アルゴリズム株式会社様には多大なご協力をいただきました。この場を借り、深く御礼申し上げます。



図-10 検証状況

## 参考文献

- 1) 紫垣萌, 早川健太郎, 澤城光二郎: 映像を活用した移動体の 3 次元位置計測システムの開発, 土木学会年次学術講演会, VI-173, 2021.
- 2) ステレオ画像法|地理空間情報技術ミュージアム,  
<http://mogist.kkc.co.jp/word/7f0ccba0-ff0d-4a6c-9956-36a9eaea5632.html>  
(2021.07.30 入手).