

映像を用いた移動体の位置計測システムの開発と現場適用性検証

紫垣 萌^{*1}・早川健太郎^{*1}

土木工事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が、切り立った法面や構造物の近傍など遮蔽物のある環境下ではGNSS データを正常に受信できず、位置情報の演算が困難となる。そこで著者らは球体マーカ、汎用カメラ、汎用PC のみの簡易な機器構成で、GNSS 情報に依存せず、映像分析により移動体の3次元位置計測情報を取得する技術を開発した。検証実験の結果、計測結果の位置精度は± 10cm ~ 15cm 程度であることや、移動体の動きを約5秒遅れで追跡可能であることがわかった。本稿では開発の経緯と当社実現場における各種検証実験について述べる。

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

1. はじめに

屋内および屋外環境における移動体の自己位置計測は、ロボットや車両のナビゲーションを実現する上で重要な要素技術のひとつである。建設業においても、マシンコントロール (MC) / マシンガイダンス (MG) 技術のように、建設機械の3次元の自己位置情報をもとに効率的、合理的な動作を支援するシステムが開発されている。

移動体の自己位置計測技術は従来から様々な手法が提案されており¹⁾、著者らは汎用カメラ映像を用いて移動体の3次元位置を計測するシステムを開発した²⁾。本稿ではシステムの概要と性能検証、現場適用性の確認について報告する。

2. 既存の位置計測技術と本システムの特徴

2.1 既存の位置計測技術³⁾

既存の主な位置計測技術の長所と短所を表-1に示す。MC/MG 技術をはじめ、移動体の位置情報を取得する手法としてGNSS (Global Navigation Satellite System) が広く用いられている。GNSS 搭載のMC/MG 建機の位置情報および移動軌跡は、盛土の転圧範囲や転圧回数といった品質管理情報として多くの現場で活用されているが、GNSS 情報を正常に受信できない屋内や構造物の近傍では、位置情報の取得が困難になる。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) を用いる手法やWi-Fi, BLE (Bluetooth Low Energy) ビーコンなどの通信機器を用いた屋内測位技術が挙げられるが、機器設置のコストや余分な工数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。そこで本研究では映像に着目し、GNSS 情報に依存せず、汎用的なカメラ

を用いて簡易に位置計測を行う技術を開発したので、その概要を報告する。

2.2 システムの概要と特徴

本システムは映像中のマーカを検出、トラッキングし、その軌跡を3次元座標に変換、記録するものである。計測状況の模式図を図-1に示す。

表-1 既存の位置計測技術³⁾

	測量機器による計測 (GNSS、自動追尾TS等)	電波情報による計測 (Wi-Fi、BLEビーコン等)	画像・映像による計測 (ステレオカメラ等)
長所	・広い範囲で利用可能	・既存のアクセスポイント (AP) を利用するため設置費用が不要	・周辺環境に依存せず計測可能
短所	・専用の機器が必要 ・(GNSS) 屋内等の遮蔽環境では利用不可	・APが少ないエリアでは低精度 ・APを新設する場合、費用がかかる	・計測可能範囲が限られる (カメラの画角内のみ)

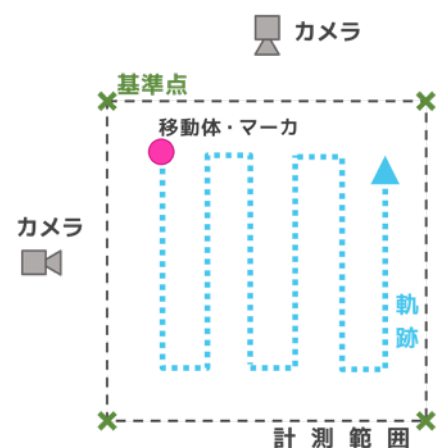


図-1 計測状況の模式図

システムの運用フローを図-2に示す。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や移動体に取付けるマーカ、基準点およびその座標値、ソフ

*1 先端・環境研究部

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からなる。

現場作業では図-1のように、計測範囲の四隅に基準点を設置し、移動体にマークを取付け、複数台のビデオカメラを計測範囲全体が映るように設置して作業の様子を撮影する。なお、カメラは画角内にすべての基準点が映るように配置する。撮影した映像中から、ソフトウェアの画像処理により、移動体に取り付けたマークを検出し、その結果をもとにマークの3次元位置を計測する。画像処理の詳細を以下に述べる。

(1) マーク検出のアルゴリズム⁴⁾⁵⁾

ソフトウェアへ入力した映像から移動するマーク(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。マーク検出結果のイメージを図-4に示す。マーク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、その領域をマークとして検出する。さらに、検出した領域の最も離れた2点をその直径とみなし、直径の中心点をマークの中心座標とみなす。

(2) カメラ位置推定のアルゴリズム

映像から3次元空間を再現するためには、カメラを設置した際の位置および姿勢の情報が必要である。ここでは、各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こととなる。加えて、カメラの焦点距離および主点座標(レンズの中心の位置)を入力することで、カメラの位置と姿勢が推定される。

(3) マークの3次元位置計測のアルゴリズム

ここまでに得られた結果と三角測量の原理⁶⁾により、マークの3次元位置を計測する。図-5のように、各カメラの位置および姿勢から、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クの軌跡の計測および記録を行う。計測結果のイメージを図-6に示す。

3. システムの機能検証

3.1 基本機能の確認

2章で述べたアルゴリズムをもつ簡易なGUI(Graphical User Interface)を装備したシステムを作成し、ねらい通りに動作するか検証した。具体的には、小型締りめ機を模した移動体にマークを取り付け、移動する様子を撮影した映像をシステムへ入力し、移動軌跡の計測結果が出力されるか検証した。

計測に適した条件を明らかにするため、カメラの配置は図-7に示すように、計測範囲の隣接する辺に沿い1台ずつ設置したもの(パターン1)と同一の辺の近い位置に2台とも設置したもの(パターン2)、同一の辺の両端付近に1台ずつ設置したもの(パターン3)の3種類とした。各パターンにおいて計測範囲を往復するマークを撮影し、取得した映像をシステムに入力してマークの軌跡が再現されるか検証した。なお、マークの数は1つとし、色は識別しやすく、かつ現場に似た色の少ない

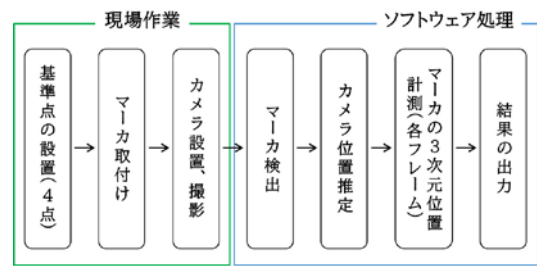


図-2 システム運用フロー



図-3 マーク



図-4 マーク検出結果イメージ

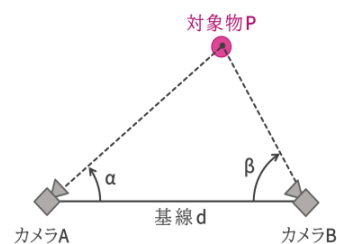


図-5 三角測量の原理

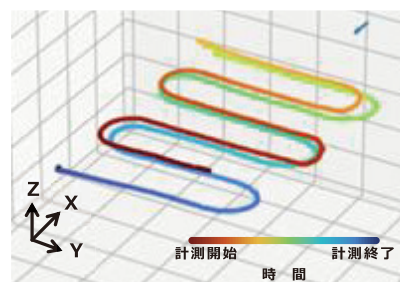


図-6 計測結果イメージ

濃い蛍光ピンク色を採用した。

この結果、最も滑らかな軌跡を得ることができたパターン1の検証結果を図-8に示す。映像上のマーカの移動軌跡を再現できており、2章のアルゴリズムにより意図していた基本機能が動作することが確認できた。一方、パターン2, 3の検証結果は実際のマーカの動きと大きく異なる軌跡が出力された。その原因としてカメラの配置パターンが偏っていると推測されることから、2台のカメラの配置に留意が必要であり、計測範囲の隣接する辺に沿い1台ずつ設置すること、すなわちパターン1のように約90度異なる方向に設置するとよいことがわかった。

3.2 検出精度（位置精度）の確認

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±3mm以内であることがわかっている。

実験状況を図-9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-10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。

また、撮影条件による計測精度の差を確認するため、映像用マーカは直径20cmと30cmのものを用意し、カメラは地面から1.5mの高さに水平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、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図-9のx軸、y軸、z軸方向の較差、およびx、y、zで示される座標間の距離を示す位置較差

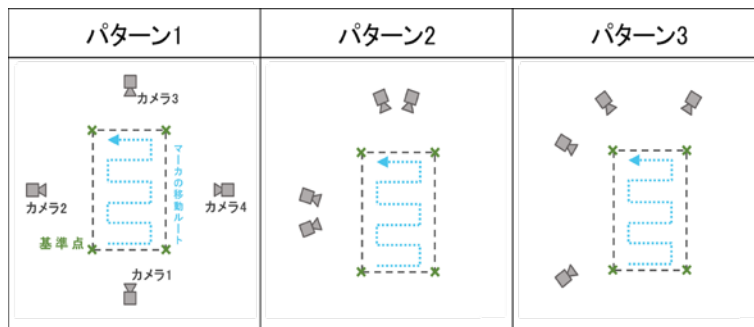


図-7 カメラ配置パターン

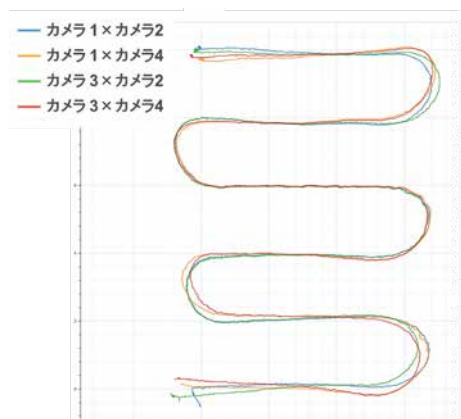


図-8 検証結果



図-9 精度検証の実験状況

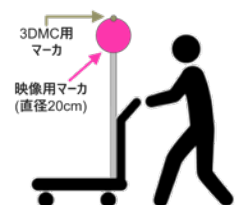
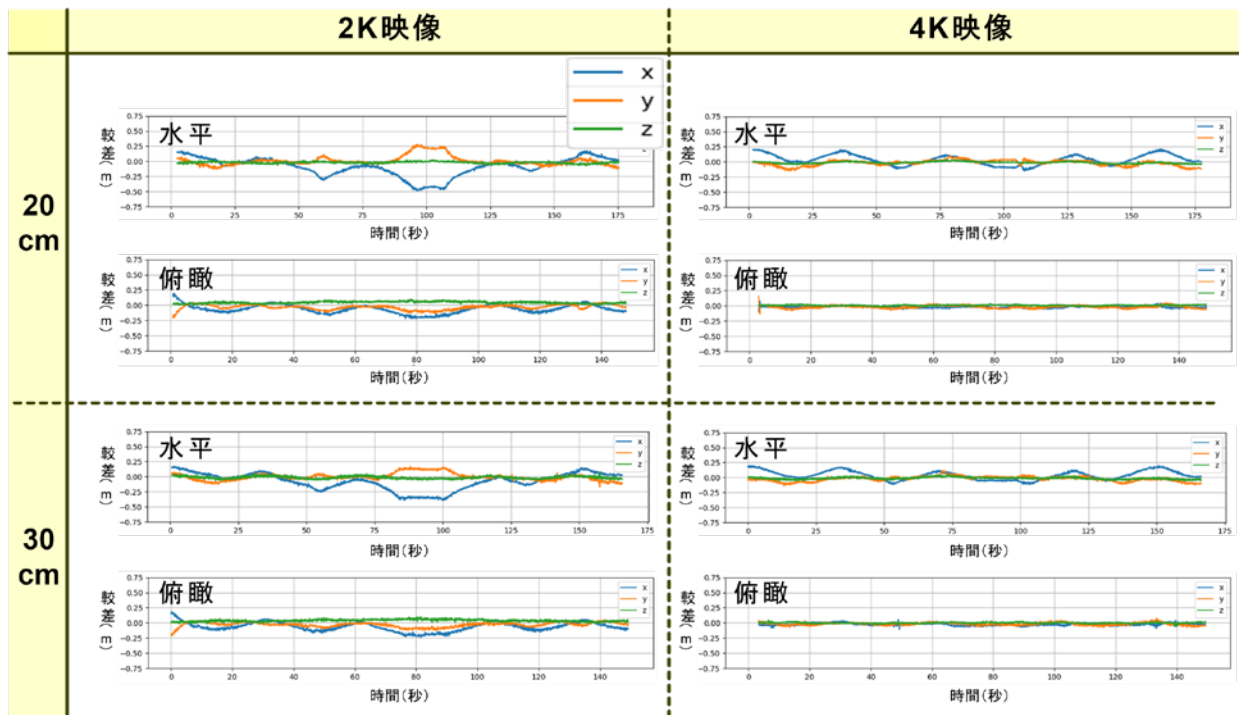


図-10 移動体の模式図

表－2 計測較差の算出結果

計測ケース	マーカの直径(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－11 時系列による較差の遷移

を算出することで、精度評価を行った。較差の算出結果を表－2に、時系列による較差の推移を図－11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、水平に置く場合よりもx軸方向は平均4.5cm程度、y軸方向は平均1cm程度較差が小さく、一方でz軸方向は平均0.5cm程度較差が大きくなり、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－11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。これについては計測開始から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によるものと思われる。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。

表－2に示した位置較差より、本システムの計測結果の位置精度は、全体として2K映像では約±15cm、4K映像では約±10cmとなった。

3.3 現場適用性（機動性）の確認

続いて、構造物近傍の舗装工事で稼働する振動ローラの作業状況を撮影し、本システムが実工事で使用される施工機械へ適用できるかを検証した。適用にあたり、撮影から計測まで現場職員が操作できるようにシステムのGUIを汎用化する改良を行った。

検証の状況を図-12に示す。約10m×30mの範囲を往復する振動ローラを2台のカメラで撮影し、計測を行った。

計測の結果、本検証のような構造物際の舗装工事では施工範囲の形状が細長く、全域をカメラ画角内に収めるためにカメラの位置が施工範囲から遠くなることから、映像上のマーカが小さくなり検出が難しいことがあった。また、マーカを取り付けている建機が転回することや、他の建機や人が往来する等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あった。本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、システムの改善が必要であることがわかった。

3.4 得られた課題とその対策

3章1～3節に述べた検証に加えて現場へのヒアリングおよび社内検討を行い、本システムの課題を以下のように整理した。

本システムを実工事へ適用する場合には、①移動体が遮蔽物に隠れた場合にカメラが球体マーカを撮像できないこと、②複数の移動体を同時に追跡するケースがあること、③再施工の可否判断のために計測結果を即座に視認したい要望があること、などが判明した。そこで本システムに3点の機能を追加し、その性能を確認するための実証実験を行った。詳細を次章に述べる。

4. 現場運用へ向けた課題解決

4.1 追加機能の開発

(1) 遮蔽対策機能

マーカが遮蔽物に隠れた場合の対策として、カメラを3台使用し、うち2台の映像でマーカの3次元位置を計測する仕様とした。これにより現場車両などの障害物がカメラとマーカの視通を横切っても、残る2つのカメラ映像から位置計測が可能となる。また3つの映像のうち計測に使用する映像の組み合わせを自動で選択する機能も実装した。

(2) 複数移動体の同時トラッキング機能

複数の移動体の計測に対応するため、検出する色情報のパラメータセットを2つ読み込み、色の異なる2つの

マーカ（たとえばピンクと緑のマーカ）を同時に計測できるようプログラムを改良した。

(3) リアルタイム計測機能

カメラと解析用PCを無線接続し、カメラ映像の取得と解析を同時に行う機能を実装した。これにより、移動体の3次元位置がリアルタイムにGUIにプロットされ、移動軌跡を即座に視認できる。

4.2 現場での動作確認

(1) 実現場での確認（遮蔽対策機能）

まず実現場にて、遮蔽対策機能の確認を行った。約25m×20mの床コンクリートの仕上げを行う騎乗式トロウエルの作業状況を3台のカメラで撮影し、計測を行った。カメラの配置を図-13に、計測結果の平面図を図-14に示す。

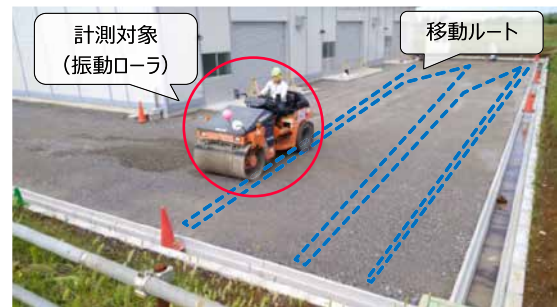


図-12 現場検証の状況

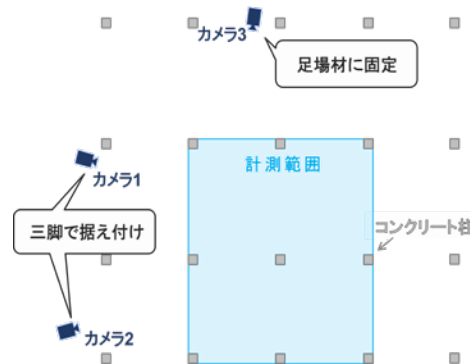


図-13 遮蔽対策機能の確認 カメラ配置

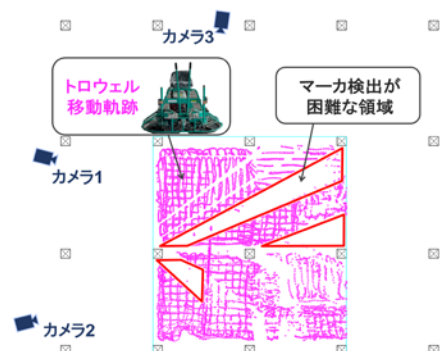


図-14 遮蔽対策機能の確認 計測結果（平面図）

計測結果の座標値を示す表-3より、マーカ検出結果を提示しているカメラが途中で切り替わっており、3台のカメラを切替えながら位置計測していることが確認できた。また図-14の赤枠で示すような、柱の影になる部分では、軌跡の途切れが多いことがわかった。これは当日の日照によるものであると考える。トロウエルが柱の付近を通り、影の濃い箇所へ出入りすると、マーカの色味が頻繁に変わり、検出できなくなる問題が発生していたことによるものである。

(2) 現場模擬環境での確認 (3つの追加機能)

次に当社技術研究所において、3つの追加機能を確認するため、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2つの移動体を以下の条件で計測した。機器の構成および配置は図-15の通りである。なおカメラ1およびカメラ3は地面から約3m、カメラ2は約8mの高さに設置している。

a-1) 遮蔽対策機能の確認

まず計測に使用する映像の組み合わせを自動で選択し途切れず計測可能なことを確認するため、計測範囲内に視通を遮る高さ約2.5mの障害物を設けた。なおカメラ2は障害物より大幅に高い位置から撮影しているため、視通が遮られることはなかった。

a-2) 複数移動体の同時トラッキング機能の確認

2つの移動体を同時に計測できることを確認するため、色の異なる球体マーカを2つ用意し、それぞれ別の移動

体へ取り付けて計測を実施した。マーカの色は建設現場で用いられることの少ない蛍光色(ピンク、緑)を採用し、2つのマーカに近い色を表現する値(色相、彩度、明度)を、幅をもたせた閾値として解析用PCへ入力している。

a-3) リアルタイム計測機能の確認

リアルタイムな3次元位置計測が可能であることを確認するため、移動体の動き始めからその移動軌跡がPC上のGUIにプロットされるまでの時間を確認し、計測のリアルタイム性を評価した。

b-1) 確認結果(遮蔽対策機能)

障害物を設置した状態での計測結果を図-16に示す。ピンクでプロットされた軌跡はカメラ1と2の組み合わせ、水色はカメラ2と3、黄色はカメラ1と3で計測された結果である。赤い破線で囲んだエリアでは、軌跡はピンクや黄色で示されているが、それ以外のエリアでは軌跡が水色を示す部分が多くなる。すなわちカメラ1とマーカが近接しており、間に障害物がない位置ではカメラ1と2で計測が行われ、カメラ1が遮蔽されている間はカメラ2と3で計測が行われていることがわかる。このことから、3台のカメラとマーカの視通状況に応じて、カメラの組み合わせをシステムが自動で切り替えながら計測しており、遮蔽物のある環境でも位置計測を継続できるため、現場適用性が向上したと言える。なお実験ではマーカの軌跡に一部欠損があったが、これはマーカと

表-3 計測結果(座標値)

計測結果			カメラ1 検出結果				カメラ2 検出結果				カメラ3 検出結果				
x	y	z	camera pair	u1	v1	r1	a1	u2	v2	r2	a2	u3	v3	r3	a3
0.11627	17.6879	2.13722	0	3143.5	1014.5	15.1822	396.5	2350.5	1181.5	23.7592	967.5	-	-	-	-
0.20686	18.0409	2.12927	0	3169.5	1016	13.9014	385.5	2413	1184.5	24.683	1050	-	-	-	-
0.22855	18.4496	2.12695	0	3208.5	1018.5	13.6565	339.5	2483	1184	24.0832	1045	-	-	-	-
0.15159	18.5838	2.10087	2	3231	1018.5	14.1156	370.5	-	-	-	-	2980	1061	7.07107	34.5
0.10936	18.981	2.12542	2	3275.5	1015.5	15.1162	521	-	-	-	-	2976.5	1057	11.6297	80

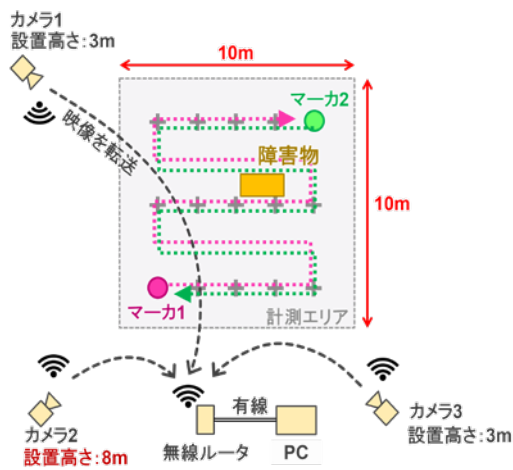


図-15 追加機能検証2: 機器の構成と配置

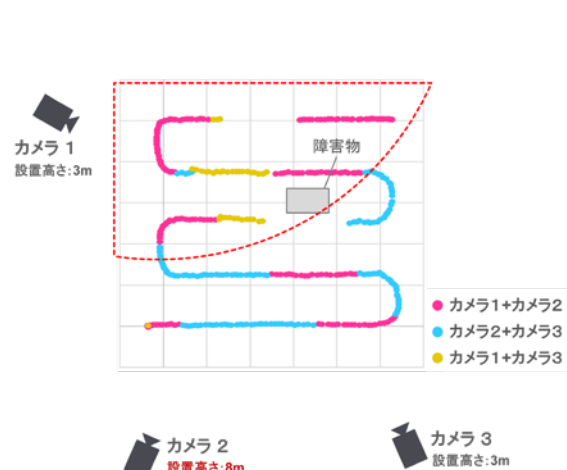


図-16 計測結果(遮蔽物対策)

似た色の物体が映像に映り込み誤検出が生じたことが確認されており、これによりマーカの正しい位置を計測できなかったものと考えている。この対策としては、誤検出された物体が確認された場合は、それをカメラの画角外へ運び出す、目隠しを施すなどの現場環境側の対応が考えられる。

b-2) 確認結果 (複数移動体の同時トラッキング機能)

2つのマーカの移動軌跡を重ねたものを図-17に示す。ピンク色の軌跡がマーカ1、緑色の軌跡がマーカ2の計測結果を示している。図の通り、計測結果に2つの軌跡がプロットされていることから、色の異なる2つのマーカを同時に位置計測できることを確認した。これにより、同時に作業する2台の建機の位置計測が可能となったため、現場運用に即した機能を実現できたと考える。

b-3) 確認結果 (リアルタイム計測機能)

移動体の動き始めからPC上で移動軌跡がプロットされるまでの時間差は最大5秒程度であり、ほぼリアルタイムな3次元位置計測ができています。この機能を追加したことで、例えば小型締固め機に適用した場合、移動軌跡から転圧が不足しているエリア等を判断し、その場で是正指示できるものとするのが考えられる。

4.3 施工管理への導入検討

本システムの計測結果は時系列の3次元座標値として出力および図化が可能である。図の表現方法は図-18a)のように計測結果の座標値をグラフ上に単色で描画していくものだが、この場合計測対象が同じ場所を複数回通過すると軌跡が重畳し、後から見返した際に通過した順序や通過回数を図から判断することが困難になる。

現場の施工管理において広く用いられているGNSSは、屋外の広い範囲で利用できるが、構造物の近傍等狭隘な場所や屋内では利用できない。そのような場所では施工情報は定量的なものが得られず、建機が現場のどこを、いつ、何回通過したか、といった施工管理項目の数値は現場職員の目視に委ねられる場合が多かった。

施工におけるトレーサビリティの確保や職員の見回り時間短縮のため、GNSS情報の取得が困難である狭隘な場所等であっても、施工管理項目の数値を得られる技術が求められる。そのため、一例としてGNSSを搭載した振動ローラによって盛土の品質管理を行う場合に用いられる既存の転圧管理システムに、本システムの計測結果を入力した。結果を図-18b)に示す。a)のピンクで示す部分と、b)の塗色されたマス目がほぼ同じ形状をしており、転圧管理システム上で本システムでの計測結果と同様の軌跡を再現していることがわかった。すなわち、既存の転圧管理システムに本システムで取得した軌跡データを入力し、転圧回数データを生成することで、施

工管理に必要な情報を得ることが可能であることがわかった。

5. おわりに

移動体の自己位置計測技術として映像に着目し、汎用カメラを用いた簡易な構成で移動体をトラッキングすることで3次元位置を記録するシステムを開発した。精度検証実験の結果、計測精度は±10～15cm程度であることを確認した。また現場実証を経て、システムを実工事の環境により適合したものとするため、①遮蔽物の存在する環境、②複数建機の同時作業、③作業中の是正指示が可能となる即時性、に対応することを課題とし、システムに追加機能を施した。そして、追加実装した機能を実証実験にて動作させ、ねらい通りの性能を有していることを確認した。

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などがあげられる。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。加えて計測結果を既存の転圧管理システムへ組み込むことでMC/MG振動



図-17 2つのマーカの移動軌跡

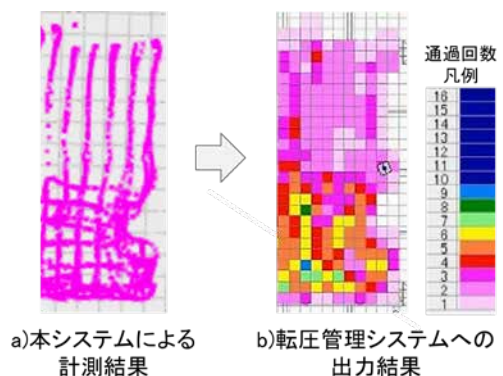


図-18 既存の転圧管理システムへの入力

ローラなどと同様の管理が可能となり、現場全域の定量的な施工情報を一元的に取得でき、職員による施工位置の確認の手間を軽減するなど、施工管理の省力化に貢献できると考える。

今後は、小規模土工や舗装工など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。

参 考 文 献

- 1) 橋本雅文：レーザと傾斜リフレクタによる移動ロボットの3次元自己位置推定法, 日本機械学会慧遠文集, 68巻665号, 2002.
- 2) 紫垣萌ほか：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, 土木建設技術発表会, I -2, 2021.
- 3) 土木情報学委員会 インドアポジショニング小委員会報告書(案), <https://committees.jsce.or.jp/cceips28/system/files/indoorreportv2.pdf>, 2022 (2022.08.26 入手).
- 4) 高橋正樹：スポーツ番組への画像応用計測技術の広がり, 精密工学会誌, Vol.84, No12, 2018.
- 5) 石井規弘：2視点からの映像を利用したサッカーボール追跡手法, 画像の認識・理解シンポジウム, S-3-19, 2007.
- 6) 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).

Development and demonstration experiment of the 3D tracking and mapping system using the images of video cameras

Moe SHIGAKI, Kentaro HAYAKAWA

The Global Navigation Satellite System(GNSS) is widely used for position measurement during construction. However, it is difficult to measure the position because GNSS data cannot be received normally in environments with obstructions such as steep slopes or near structures. Therefore, the authors have developed a technology that acquires the 3D position of a moving object by image analysis without relying on GNSS information, using a simple device configuration consisting of a spherical marker, a general-purpose camera, and a general-purpose computer. As a result of the experiment, the measurement accuracy is about ± 10 cm to 15 cm, and the movement of the marker can be tracked with a delay of about 5 seconds. This paper describes the background of the development and verification experiments at the actual site.