

# 大型構造物内部の3次元計測における 投影光の影響を考慮した対応点検出による光切断面統合

樋口 寛† 藤井 浩光† 谷口 敦史‡ 渡辺 正浩‡ 山下 淳† 浅間 一†

† 東京大学 ‡ 日立製作所

E-mail: higuchi@robot.t.u-tokyo.ac.jp

## Abstract

大型構造物の製造工程において、高精度な3次元自動計測技術が必要とされている。本研究では、リングレーザとカメラを使用して構造物の3次元形状を内部から計測する手法を提案する。光切断法により高精度に計測したレーザ断面の形状を Structure from Motion (SfM) による装置の移動推定情報をもとに統合する。従来手法よりも短時間で計測が可能な手法を構築するためにカラーフィルタによるレーザ光の抽出を行い、レーザ投影パターンの影響を考慮したブロックマッチング手法により移動推定に必要な対応点を検出する。提案手法を検証するために2種類の実験を行い、3次元形状を復元できることを確認した。

## 1 序論

現在、鉄道車両、エスカレータ、エレベータなどの大型構造物の製造の合理化が求められている [1]。このような構造物の製造工程では全体の組立を行った後に行われる誤差修正の作業において、内部から高精度に3次元形状を計測する必要がある。現在では、この作業は職人が手作業により行っているため、計測を自動化することにより作業の効率化が可能である。したがって、細長い大型構造物を内部から高精度に自動計測する手法が必要である。

高精度な計測には一般にレーザを用いた手法が使用される。レーザ計測ではレーザを計測対象に照射し、カメラでその反射光を撮影することでレーザ投光点の3次元座標を計測する。このため、広範囲を計測するためにはレーザ照射領域の位置を変化させる必要がある。計測領域の位置を変化させる方法として、カメラを固定してレーザの照射方向を制御する方法が一般的である。しかし、この方法はカメラが固定されているために計測可能な範囲が制限される。

これに対して、カメラとレーザを一体として移動させる方法がある [2][3][4]。これはセンサ自体が移動するために広範囲の計測が可能である。しかし、計測によ

り得られるのはカメラ座標系における位置である。よって、全体の形状を復元するためには異なる複数の位置・姿勢におけるレーザ計測の結果を統一された座標系に統合する必要がある。したがって、移動するカメラの位置・姿勢の変化を推定する必要がある。

この課題に対して Structure from Motion (SfM) を用いて装置の位置・姿勢を推定し、光切断法により得られる断面形状を統合する手法が提案されている [3][4]。SfM は画像情報のみから物体の形状の復元とカメラ間の相対的な位置・姿勢を同時に推定する手法である [5]。撮影した画像間で環境中の同一点を対応点として検出し、幾何学的な拘束条件をもとに位置・姿勢と対応点の3次元座標を推定する (図1)。

光切断法と SfM を組み合わせた計測の問題は、それぞれの手法に必要な情報を分離することである。SfM では画像間での対応点が必要であるが、対応点の検出はテクスチャ情報を比較する必要があるので環境中にレーザ光以外の照明が必要である。しかし、照明による環境光がノイズとなり光切断法で必要となるレーザ照射領域が正しく検出されない場合がある。

松井ら [3] の手法では計測装置を移動させながら画像を撮影する際に照明の ON/OFF を切り替え、装置の各位置・姿勢に対して2枚の画像を撮影することによりこの問題に対処している。1枚は照明 ON、もう1枚は照明 OFF の状態で撮影する。前者には周囲の風景が写るため SfM に使用することができる。また、後者にはレーザ光のみが写るので光切断法に使用することが可能である。

この手法の課題は画像を取得する際に装置を静止させる必要があるため、計測に時間がかかる点である。また、計測される3次元点群の点群密度は装置の移動間隔に依存するため、密な点群が得られないという課題もある。

これらの課題を解決するために、本研究では同一画像を用いて光切断法と SfM を実行することにより、連続的な移動による計測が可能な手法を提案する

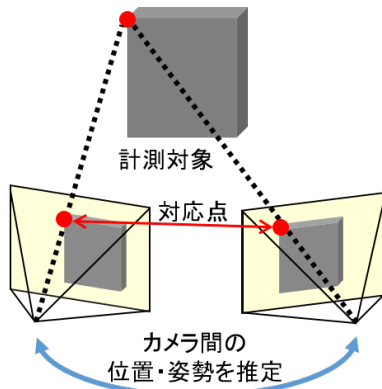


図1 Structure from Motion

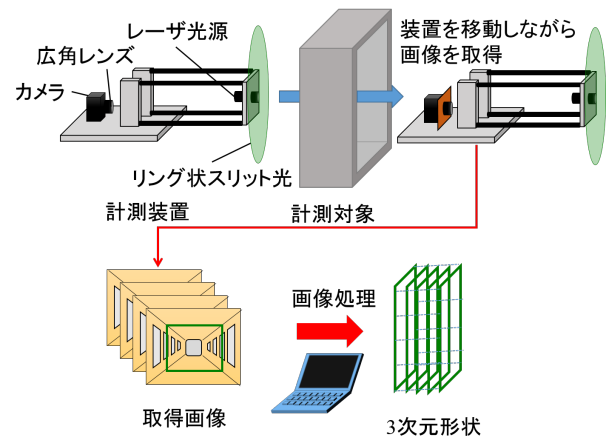


図2 提案する3次元計測システム

## 2 提案手法

### 2.1 計測システム

鉄道車両のように細長い形状を内側から計測するためには、装置を奥行き方向に移動させながらリングレーザーにより対象の断面を全周輪切りにする光切断法が効率的である [2][3][4]。また、高精度な計測を行うためにはレーザーが投影されている点の画像座標を正確に検出する必要がある。結像面とレーザー平面が平行になるようにカメラとレーザーを配置すれば、レーザーが投影される計測点すべてに焦点を合わせて画像を撮影することができる。また、レンズの光軸からの距離が大きい点ほど画像の中心座標から離れた位置に写るため、計測する断面が大きくなると視野から外れて計測できない点が発生する。カメラとレーザー光源までの距離を大きくし、広角のレンズを使用することにより、大型の対象を計測する場合でもレーザー光の全周が視野内に収めることが可能である。

以上の制約を満たすように構築した計測系を図2に示す。計測装置はカメラとリングレーザーから構成されている。レーザー光を視野に収めるためにレーザー光源はカメラから離れた位置に光軸とレーザー平面が垂直になるように固定し、広角のレンズを使用する。この装置を計測対象の内部で奥行き方向に移動させながら画像を取得し、取得画像に対して画像処理を施すことにより3次元形状を計測する。

### 2.2 画像処理の概要

画像処理はレーザー断面の形状を計測するための光切断法の処理と断面形状を統合するためにカメラの位置・姿勢の変化を推定するSfMの処理に分かれる。提案手法ではこの2種類の処理を同一の画像を用いて行う。

まず、光切断法によるレーザー断面の形状計測の処理について説明する。光切断法では入力として、レーザーが投影されている点の画像座標が必要である。そのため取得画像からレーザーが照射されている点を抽出する。

この処理でレーザーが照射されていない点が誤って選択されると、環境中に存在しない点が計測結果として出力されるため大きな誤差となる。本手法では後述するカラーフィルタを用いた手法により、環境光の影響を抑え、レーザー投光点を正確に検出する。得られたレーザーの画像上の2次元点群をレーザーとカメラの相対的な位置・姿勢の関係から3次元点群へ変換し、レーザーによる光切断面の形状を取得する。

次に位置・姿勢変化の推定処理について説明する。画像を取得する度にカメラは移動するので、各画像から光切断法により得られる計測結果は異なるカメラ座標系における3次元座標である。そこで、統一された座標系へと座標変換を行うためにSfMにより位置・姿勢の変化を推定する。SfMは入力として連続する2枚の取得画像間で対応する点の組が必要である。本手法では対応点の検出に拡大縮小・回転・照明変化に対してロバストなScale Invariant Feature Transform (SIFT) [6]を使用する。SIFTにより得られた対応点を用いて、各画像における対応点の光線ベクトルとカメラの並進移動ベクトルが同一平面上に存在するという幾何学的な拘束条件から位置・姿勢の変化を推定する。SfMによる計測では一般にスケールの情報は得られないため、回転と並進移動方向の推定はできるが並進移動距離は定まらない。そこで、回転と並進方向の推定を行った後に、スケール復元の処理を行う。本研究では光切断法により3次元座標が既知の計測点を利用したスケールの復元を行う。

最後に光切断法により得られた各画像における計測結果をSfMによる位置・姿勢の推定結果を元につなぎ合わせることで全体3次元形状を復元する。

以下の節では同一の画像から光切断法とSfMを実行するにあたり問題となる情報の分離とスケールの復元処理について説明する。



### 2.3 同一画像からの情報の分離

光切断法と SfM を同一画像を用いて行う場合に問題となるのは、SfM では対応点取得に必要なテクスチャ情報を得るため環境光が必要であるが、光切断法に必要なレーザ投光点を検出する際には環境光がノイズとなる点である [7][8]。このような明るい環境で取得した画像を用いて光切断法を行うために、レーザの中心波長近傍の光のみを透過する狭帯域バンドパスフィルタを通して画像を取得する手法が過去に提案されている [9]。レーザと異なる周波数の光は画像を取得する段階で大きく減衰するため、取得画像にしきい値処理をかけることによりレーザが照射領域だけが写った画像を生成することができる。しかし、この手法は光切断法のみを行うことを目的としているため、SfM で必要となるテクスチャ情報も失われてしまう。

そこで、本手法ではレーザ中心波長近傍に加えて、図 4(a) に示すようなレーザ中心波長から離れた波長の光も透過する特性をもつカラーフィルタを利用する。この特性により、フィルタを通して取得した画像からレーザと同色のプレーンを取り出すことにより、環境光の影響を抑えることができる。ただし、この手法はレーザ光が取得画像のプレーンの分割により分離が可能であることを前提としているので、レーザの波長は赤、緑、青のいずれかに近い波長である必要がある。

緑色レーザを使用する場合の例を図 4(b)、図 4(c)、図 4(d) に示す。フィルタを使用せずに取得した画像が図 4(b) の画像のように赤、緑、青の 3 色の光が均等に分布しているとする。フィルタを通して取得した画像 (図 4(c)) では緑色の領域ではレーザ中心波長以外の光が遮断される。この画像には赤、青の光が含まれているため、テクスチャ情報も保持されており、SfM の対応点検出に使用することができる。この画像の G プレーンを取り出すと赤、青の光も遮断されるため、レーザ光以外の波長の光の影響を抑えた画像を取得することができる (図 4(d))。これにより、レーザ中心波長の光のみを透過するフィルタを通して画像を取得する場合と同じ効果が得られる。

### 2.4 スケール復元

提案手法では取得画像間の位置・姿勢の変化を推定するために SfM を使用する。SfM は各対応点に対して移動前画像における光線ベクトル  $\mathbf{r}$ 、移動後画像における光線ベクトル  $\mathbf{r}'$ 、並進ベクトル  $\mathbf{t}$  の 3 つのベクトルが同一平面上に存在するという幾何学的条件から位置・姿勢の推定を行う。しかし、2.2 節で述べたように SfM により回転と並進移動方向の推定が可能であるが、スケールは一意に定まらない。よって、カメラの位置・姿勢の変化を求めるために並進移動距離  $|\mathbf{t}|$  が必要である。

SfM によりスケール情報が得られないのはベクトル  $\mathbf{r}$ 、 $\mathbf{r}'$ 、 $\mathbf{t}$  のいずれの長さも与えられていないため、対

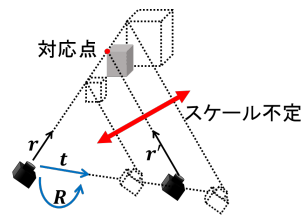


図 5 SfM におけるスケールの不定性

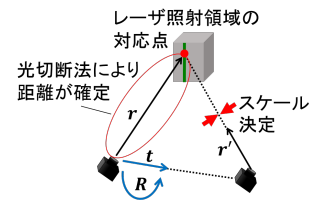


図 6 レーザ投光点によるスケールの決定

応点と移動前後のカメラ原点を結ぶ三角形 (図 5 で破線により示した) の大きさが定まらないことが原因である。よって、いずれか 1 辺の長さを決定することができれば三角形の各辺の長さが幾何学的に定まり、図 6 に示すようにスケールが一意に定まる。そこで、光線ベクトル  $\mathbf{r}$  の長さが求まっている 3 次元座標が既知の点を対応点として用いることによりスケールを決定する。各画像において光切断法を行った点は 3 次元座標が求まっているので、図 7 に示すようにレーザ投光点をフレーム間で対応付けることにより、並進移動距離を決定する。

そのために、移動前画像のレーザ領域の点に対応する点を移動後画像から検出する必要がある。しかし、計測中に計測対象は静止しているのに対してレーザ光源は移動するため、レーザ領域周辺のテクスチャ情報はフレーム間で異なる。よって、追跡点周辺のテクスチャの比較だけではレーザパターンに影響され、誤った対応点が検出される場合がある。そこで、レーザ光の影響に対して頑健なブロックマッチングを提案する。

ブロックマッチングを行うためにまず、追跡する点を移動前画像上のレーザ領域から選択する必要がある。これは光切断法の入力に使用したレーザ投光点の画像座標を参照することにより行う。次に、選択した追跡点の周りをテンプレートとして切り出し、移動後画像上で移動させ、両画像の重なり部分の類似度を評価する。類似度が最も高くなる位置での画像中心が対応点として検出されるため、通常ブロックマッチングではレーザパターンの類似度が優先され、図 7 に示すような誤った対応付けがなされる場合がある。そこで、提案するブロックマッチングではテンプレート画像と移動後画像のレーザ領域をマスキングする。マスキングは 2.3 節で得られるレーザ光のみが写る画像のレーザ領域を参照することにより行う。テンプレート画像を比較対象の画像に重ね合わせた状態でいずれの画像においてもマスキングされていない領域に対してのみ類似度の評価を行い、マスキングされた画素は類似度評価の対象から除外する (図 8)。この手法により、レーザ照射領域付近のテクスチャ情報の影響を受けずに、レーザ領域から対応点を検出することができる。

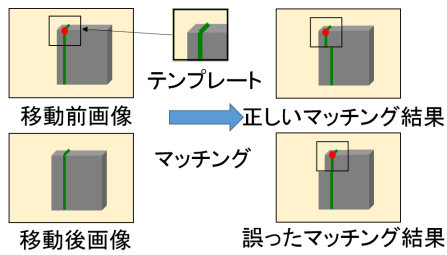


図7 ブロックマッチングによるレーザー領域上の対応点検出

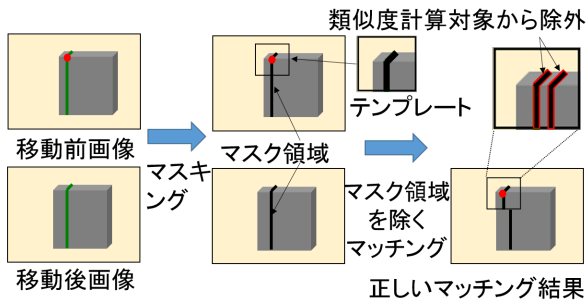


図8 レーザ光の影響に頑健なマッチング

### 3 実験

#### 3.1 実験環境

提案手法の有効性を検証するために2種類の実験を行った。まず、実験1においては鉄道車両などの奥行きのある構造物内での計測を想定し、図9(a)に示す廊下を計測対象とした。緑色レーザースリット光を照射しながら図中の矢印方向に装置を移動させて赤色の線で囲まれた領域を計測した。この実験では提案手法の評価に必要な真値を計測するためにリニアガイドにより装置を移動させた。画像の取得は10mm間隔で行い、合計31枚の画像を取得した。計測では第2章で述べたように光切断法によるレーザー断面の3次元計測結果をカメラの移動情報を未知として、取得画像のみを用いて推定することにより統合した。

次に、実験2においては装置に回転を含む移動をさせて3次元計測を行った。この実験は構造物の内部に曲がり角などが存在する場合においても提案手法が適用できることを検証するために行った。計測対象には図9(b)の赤色の線で囲まれたポスター展示用のパネルを利用した。装置を台車に乗せ、図中の矢印に示すような軌跡で移動させながら108枚の画像を取得した。本実験でも実験1と同様に提案手法により取得画像のみを用いて3次元形状の復元を行った。この実験では、評価に使用する真値の移動情報はモーションキャプチャによる計測結果を使用した。

#### 3.2 実験結果

##### 3.2.1 レーザ光抽出結果

取得画像からのレーザー領域の抽出処理の実行結果について述べる。実験1の1フレーム目の画像(図10(a))を入力した場合の出力結果を示す。実験では緑色レーザーの中心波長付近と赤色、青色の光を透過するフィルタを通して画像を取得したので、取得画像においてレーザー光の波長周辺の緑色光は減衰している。そのため、取得画像のG成分のみを取り出すことにより図10(b)に示すようにレーザー照射領域の輝度値が高い画像が得られた。この画像に対してしきい値を設定し、しきい値以下の画素の値を0とすることにより図10(c)に示すレーザー光のみが写ったレーザー光画像を生成した。この結果から環境光の影響を受けることなくレーザー光の照射領域を抽出できることが確認できた。

##### 3.2.2 レーザ投光点追跡の結果

スケール復元に使用するレーザー投光点の追跡結果について述べる。実験1の1フレーム目と2フレーム目を入力画像とした場合の対応点の検出結果を図11、図12に示す。図11は通常の、図12は提案するブロックマッチングの結果である。図11(a)、図12(a)中の青色矩形領域をテンプレートとしてそれぞれ次フレームとのマッチングを行った結果、最も類似度が高いと評価された領域が図11(b)、図12(b)中の青色矩形領域である。ただし、図11中の赤色で塗りつぶされたマスク領域は類似度評価の対象から除外した。また、図11(b)、図12(b)中の緑色矩形領域は探索領域である。マッチングの結果、各画像の青色矩形領域の中心の青色の点に対応点として検出された。これらの結果から、図11に示す通常のブロックマッチングの結果ではレーザーパターンに影響され、誤ったマッチングがなされているのに対し、図12に示す提案手法による結果では正しく対応点が検出されていることが確認できた。

##### 3.2.3 3次元形状の復元結果

実験1、実験2における3次元形状の統合結果をそれぞれ図13、図14に3次元形状の統合結果を示す。

図13(a)、図14(a)は提案手法を評価するためにそれぞれリニアガイドとモーションキャプチャによって得られたカメラの移動情報を真値として光切断法の結果を統合した結果である。一方、図13(b)、図14(b)はいずれも提案手法により取得した画像のみを用いて3次元形状を復元した結果である。

実験1、実験2のいずれにおいても移動情報を既知とした場合の結果と近い形状が提案手法により復元された。



(a) 計測対象 1

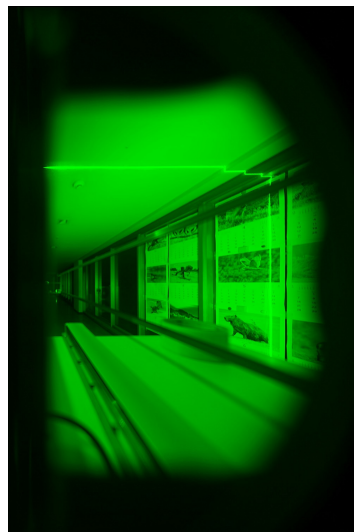


(b) 計測対象 2

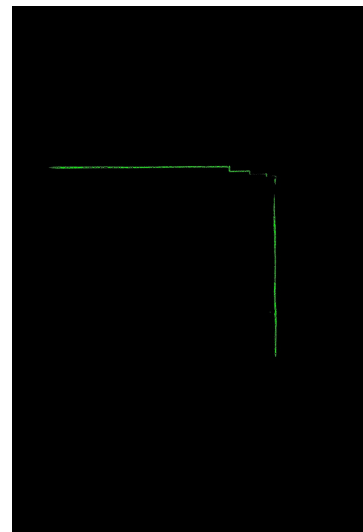
図 9 計測対象



(a) 入力画像



(b) 取得画像 G プレーン

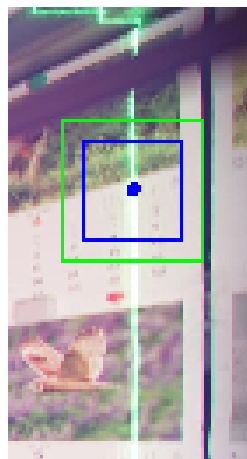


(c) レーザ光領域

図 10 取得画像からのレーザ投光点抽出結果

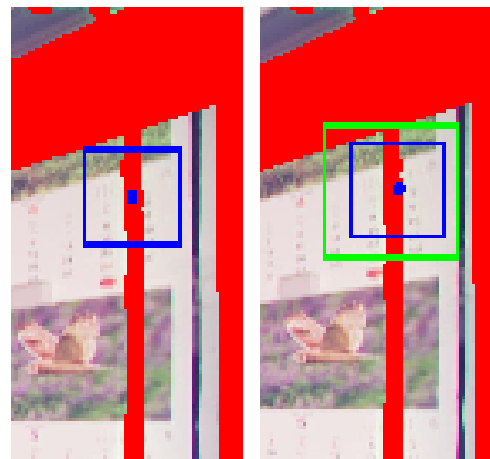


(a) 移動前画像

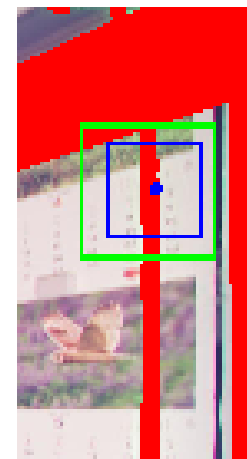


(b) 移動後画像

図 11 通常のブロックマッチング結果

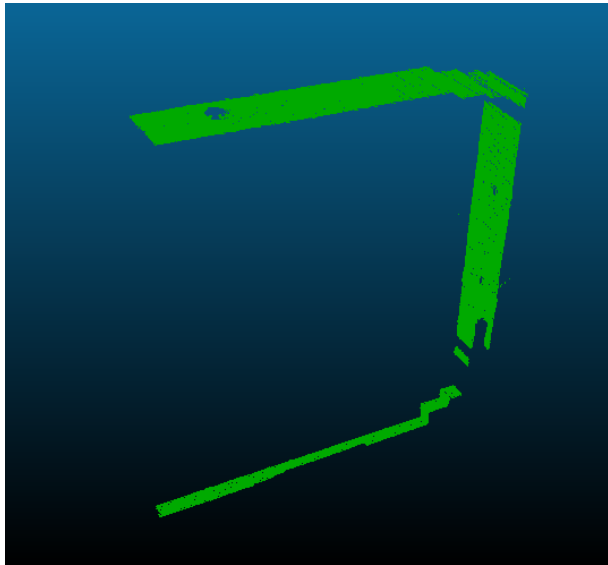


(a) 移動前画像

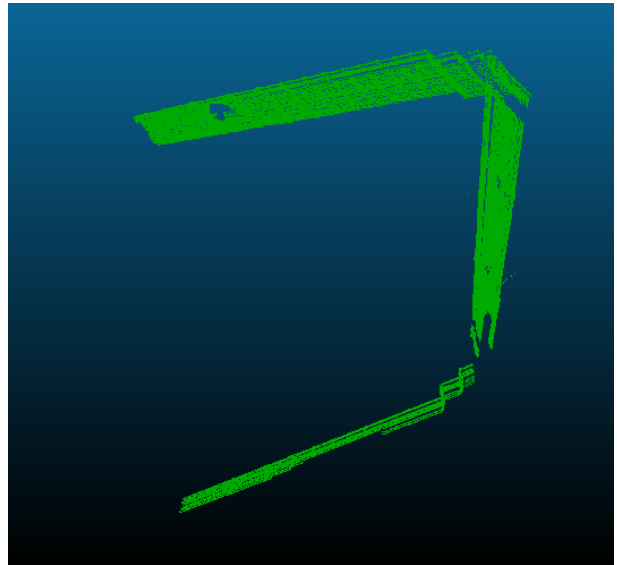


(b) 移動後画像

図 12 提案手法によるブロックマッチング結果

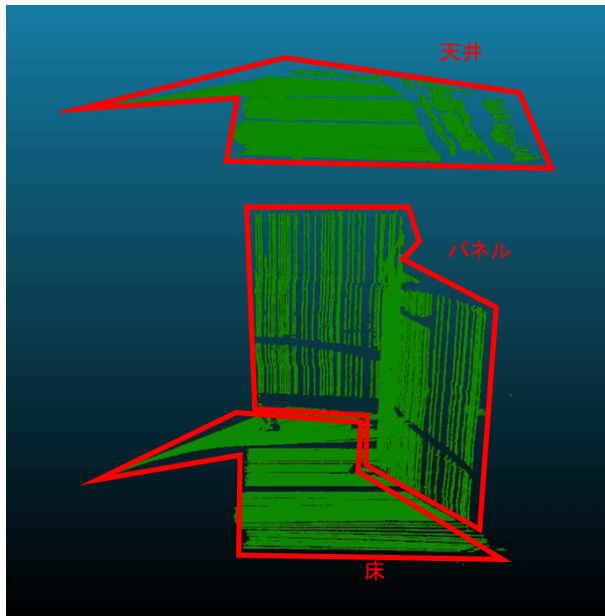


(a) リニアガイドの移動情報（真値）を用いた結果

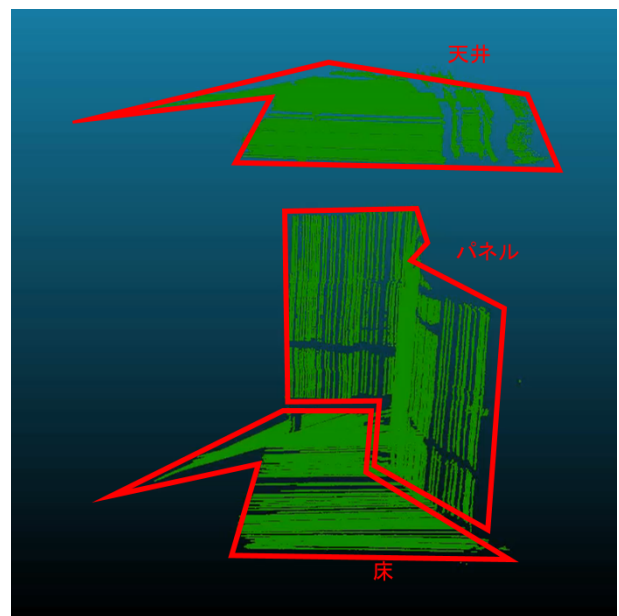


(b) 提案手法による結果

図 13 計測対象 1 の統合結果



(a) モーションキャプチャによる移動情報（真値）を用いた結果



(b) 提案手法による結果

図 14 計測対象 2 の統合結果

表 1 位置・姿勢変化の推定評価

	実験 1	実験 2
誤差平均	3.6 mm	9.5 mm
誤差標準偏差	1.3 mm	12.0 mm

表 2 3次元形状の評価

	実験 1	実験 2
誤差平均	51.9 mm	161.7 mm
誤差標準偏差	42.0 mm	86.1 mm

### 3.2.4 3次元形状の復元結果の評価

3次元計測結果を定量的に評価した結果について述べる。位置・姿勢推定と3次元形状復元についてそれぞれ評価を行った。

位置・姿勢はフレーム間でのカメラ原点の並進移動ベクトルを真値と提案手法とで比較した。評価は真値と提案手法の並進ベクトルの差のノルムを1回の移動の誤差として、全ての連続するフレーム間の移動の誤差を計算し、平均と標準偏差を計算した(表1)。

また、復元された3次元形状の評価を行った。これは真値と提案手法による結果の3次元点群の各点に対して距離を計算し、平均と標準偏差を計算した(表2)。

評価の結果、いずれの実験でも目標としているmmオーダーの精度には到達していないことが確認できた。誤差の主な原因としては位置・姿勢推定に用いる対応点の誤検出と、カメラキャリブレーションが不十分であったことが考えられる。全体として実験2の誤差が実験1に比べて大きくなっている。これは、実験2では回転を含む運動をしており、計測範囲が実験1に比べて広いなどの要因が考えられる。また、実験1、実験2の両方で3次元形状の評価結果が並進移動の結果に比べて大きな誤差が生じている。これについては、計測点が初期位置から離れるほど位置・姿勢推定の誤差の蓄積により真値による統合結果とのずれが大きくなるためと考えられる。

## 4 結論

本研究ではリングレーザの断面形状を光切断法により計測し、その結果をSfMによる移動推定情報を用いて統合することで大型構造物を内側から3次元計測する手法を提案した。同一画像からSfMと光切断法を同時に行うために、カラーフィルタを用いた手法により取得画像からのレーザ光の抽出を行った。また、SfMのスケール復元に必要なレーザ領域からの対応点検出のために、対応点の誤検出の原因となるレーザパターンの影響を除去するブロックマッチングの手法を提案した。実験により提案手法が有効に機能していることを

検証し、3次元形状が復元可能であることを確認した。

今後の展望は計測精度を向上させるために、より高精度な対応点検出、キャリブレーション手法を構築することである。

## 参考文献

- [1] 月山陽介, 菅野明宏, 新田勇, 大川永, 鈴木正毅, 久保田遼, 西脇正, 磯辺光一: “鉄道車両用レーザ3次元座標測定システムのデータ接続手法の開発”, 精密工学会誌, Vol. 80, No. 7, pp. 675–681 (2014)
- [2] 高橋英二, 迫田尚和, 朝日賢一, 福本陽三: “高精細高速画像処理カメラによるトンネル形状自動計測装置”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 48, No. 12, pp. 863–871 (2012)
- [3] 松井建樹, 山下淳, 金子透: “全方位レーザ・全方位カメラからなるレンジファインダの自己位置推定と配管の3次元モデル生成”, 電気学会論文誌 C, Vol. 130, No. 9, pp. 1504–1512 (2010)
- [4] A. Yamashita, K. Matsui, R. Kawanishi, T. Kaneko, T. Murakami, H. Omori, T. Nakamura, and H. Asama: “Self-localization and 3-D model Construction of Pipe by Earthworm Robot Equipped with Omni-directional Rangefinder”, *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1664–1671 (2011)
- [5] T. S. Huang and A. N. Netravali: “Motion and Structure from Feature Correspondences: a review”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 82, No. 2, pp. 252–268 (1994)
- [6] D. G. Lowe: “Object Recognition from Local Scale-invariant Features”, *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 1150–1157 (1999)
- [7] L. Brignone, M. Munaro, A. G. Allais, and J. Opderbecke: “First Sea Trials of a Laser Aided Three Dimensional Underwater Image Mosaicing Technique”, *Proceedings of the 2011 IEEE OCEANS*, pp. 1–7 (2011)
- [8] A. Duda, J. Schwendner, and C. Gaudig: “SRSL: Monocular Self-Referenced Line Structured Light”, *Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 717–722 (2015)
- [9] C. Mertz, S. J. Koppal, S. Sia, and S. Narasimhan: “Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints”, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, Issue 2, pp. 91–110 (2004)