全周ラインレーザと広角カメラを用いた 大型構造物内部の3次元計測

樋口寛[†],藤井浩光[†],谷口敦史^{††},渡辺正浩^{††},山下淳[†],淺間一[†] [†]東京大学,^{††}日立製作所

本研究は鉄道車両,エスカレータ,エレベータなどの奥行のある大型構造物の製造合理化において必要と される高精度3次元計測システムを提案する.提案システムでは全周ラインレーザと広角カメラを搭載した 計測装置を環境中で移動させ,光切断法により高精度に計測した断面形状をStructure from Motion (SfM) に より推定したカメラの移動情報を利用して統合する.本研究ではレーザ光と環境光の両方が写る同一画像か ら光切断法を実行するためにカラーフィルタを利用したレーザ光検出手法を提案する.さらに,カメラの移 動推定に利用する対応点の検出処理において,誤対応の要因となる環境中のレーザパターンの影響を考慮し たブロックマッチング手法を新規に提案する.実験では延長約1,500 mmの構造物の計測を実施し,提案する 3次元計測システムの有効性を確認した.

1. 序論

3 次元計測手法は製造において重要な技術であ り,自動車部品などの製造物を中心にリバースエ ンジニアリングや製品検査の目的で実用化が進ん でいる.しかし,大型構造物の計測技術については まだ発展途上であり,社会インフラやプラント,船 体などの計測技術の確立が課題となっている[1].

例えば,鉄道車両の製造において溶接による組 み立てを行う際には、フレーム自体の形状誤差や 溶接時の熱の影響により設計値との誤差が発生す る.そのため、車両全体を組み合わせた後に誤差を 修正する作業が必要となる.現在,修正作業で必要 となる誤差計測は職人による手作業で行われてい るが、計測作業の自動化による作業者の負担軽減 が求められている[2].大型構造物全体の3次元形 状を内部から高精度に自動計測する技術により、 このような作業の効率化が可能である.

高精度な計測には一般的にレーザ計測が使用される.レーザ計測ではレーザを照射している領域 (以下,レーザ照射領域と呼ぶ)の3次元座標を計 測するため,広範囲の計測にはレーザ照射領域の 位置を変化させる必要がある.一般的な3次元計 測デバイスでは,受信器を固定してレーザの照射 方向を変化させる方法が使用される.計測対象が 小型であればこの方法により全体の形状を計測す ることができるが,大型の構造物を計測する場合 には,計測できない範囲が発生する.本研究では高 精度なレーザ計測手法である光切断法を用いた移 動計測により,奥行のある大規模構造全体を高精 度に計測する手法を提案する.

2. 関連研究

本研究に関連する研究として,鉄道の保線作業のためにトンネルやプラットフォームの内部を高

速・高精度に計測するためのシステムが提案され ている[3].カメラと全周ラインレーザを搭載した 計測装置を線路上で移動させながら、ラインレー ザの照射領域からなる計測対象の断面(以下,光切 断面と呼ぶ)を光切断法により高精度に計測して いる.しかし、この研究では線路上の障害物を検査 するために各断面を高精度に計測することに重点 が置かれており、計測対象物全体の3次元形状を 復元することは目的としていない.

これに対して配管の 3 次元モデル生成のために Structure from Motion (SfM) [4]を用いてカメラの位 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[5]. 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,2枚の画像を取得することで、 SfM の対応点検出に必要なテクスチャを含む画像 と、光切断法に必要なレーザ光のみが写る画像を それぞれ取得している. この手法は画像を取得す る際に装置を静止させる必要があるため、計測に 時間がかかる点が課題である.本研究ではレーザ 光とテクスチャの両方が写る画像から光切断法と SfM を実行するアプローチ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.

3. 提案する3次元計測手法の概要

<u>3.1 計測システム</u>

鉄道車両のように細長い形状の構造物を内側から計測するためには、全周ラインレーザを用いた 光切断法が有効である[3][5].対象内部の横断面の 全周にレーザを照射することができるため、装置 を奥行方向に移動させることにより、一度の走査 で全体の形状を効率的に復元することが可能であ る.全周ラインレーザとカメラを使用して大型構 造物を高精度に計測するための要求仕様として以

下の2点が挙げられる.

- レーザ照射領域の正確な検出が可能であること
- ・大きなレーザ断面を視野内に収めることが可 能であること

これらの制約を満たすように構築した計測系を 図1に示す.まず,正確なレーザ照射領域の検出を 行うために、リングレーザの照射光が張る平面で あるレーザ平面とカメラ光軸が垂直になるように カメラとレーザを配置し、すべてのレーザ照射領 域に対して焦点を合わせる.さらに、大型の対象を 計測する場合でもレーザ光の全周を視野内に収め るために、カメラとレーザ光源までの距離を大き くとり、広角のレンズを使用する.この装置を計測 対象の内部で奥行方向に移動させながら画像を取 得し、取得画像を用いて3次元計測を行う.

<u>3.2 3次元計測の流れ</u>

3 次元計測は光切断法による光切断面の形状計 測と SfM によるカメラの位置・姿勢推定の処理に 分かれる.提案手法ではレーザを照射しながら装 置を移動させるため,取得画像には環境光とレー ザ光が写り込む.取得画像から光切断法に必要な レーザ照射領域と SfM に必要なテクスチャ情報を 分離抽出することにより,2種類の処理を実行する (図 2).

まず,光切断法による光切断面の形状計測を行う.光切断法では光切断面上の点をサンプリング し,各サンプリング点に対して3次元座標を求める.このサンプリング点をレーザ投光点と定義する.本手法では後述するカラーフィルタを用いた 手法により環境光を含む画像からレーザ投光点を 正確に検出し(4.1節,4.2節),光切断法によりレ ーザ投光点の3次元座標を計算することで,光切 断面の形状を計測する(4.3節).

次に、光切断法により得られる計測結果を統合 するために SfM により位置・姿勢変化を推定する. まず, 拡大縮小・回転・照明変化に強い Scale Invariant Feature Transform (SIFT) [6]によりフレー ム間で対応点の検出を行い(5.1節),取得した対 応点を用いて 8 点法[7]により位置・姿勢を推定す る(5.2節). しかし, SfM による計測では, 一般 にスケールの情報が得られない.本研究では光切 断法により3次元座標が既知のレーザ投光点につ いてフレーム間で対応を得ることでスケールを復 元する. レーザ投光点の対応点検出においてはレ ーザ照射により生じるテクスチャが誤対応の要因 となるため、本研究で新規に提案するレーザの影 響に頑健なブロックマッチングにより対応点を検 出する(5.3節). その後, SfM の結果を初期値と して, 取得したレーザ対応点を用いたバンドル調 整を行い、スケールを復元する(5.4節).



図1提案する3次元計測システム



図2 3次元計測の流れ

最後に,光切断法により計測した断面を,SfMによる位置・姿勢の推定結果を利用して統合することにより全体の3次元形状を復元する.

<u>4. 断面形状の計測</u>

4.1 取得画像からのレーザ照射領域の検出

提案手法では光切断法に加えて SfM を実行する ため,環境光を含む画像からレーザが照射されて いる領域の検出を行う必要がある.

同様の問題を扱った研究において、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ことによりレー ザ光を検出する手法が提案されている[8].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 われる.

そこで、テクスチャ情報を保持しながらレーザ 光の検出が可能なカラーフィルタを新規に提案す る(図3).このカラーフィルタはレーザ中心近傍 波長に加えて、図3(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.

提案するフィルタによるレーザ照射領域の検出 手法を緑色レーザを使用した場合を例に説明する. フィルタを使用せずに取得した画像において赤, 緑,青の3色の光が図3(b)の画像に示すように分 布しているとする.フィルタを通して取得した画 像(図3(c))において緑色波長付近の領域ではレー 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,テクスチャ情報は 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.一方,カメラの内部には一般にRGB 原色フィルタが内蔵されており,撮影画像は対応 する原色フィルタを通して得られる各色のプレー ンから構成される.そのため,レーザと同色のGプ レーンを取り出すことにより図3(d)に示すように,



図3 提案するカラーフィルタの特性と緑色レーザに対する適用例,(a)提案するカラーフィルタの波長特性,(b)提案するフィルタを使用しない場合の波長分布,(c)提案するフィルタを使用した場合の波長分布(SfMに使用),(d)提案するフィルタを使用した場合のGプレーンの波長分布

提案するカラーフィルタと原色フィルタを 2 重に 適用した結果が得られ,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可能である. 4.2 レーザ照射領域からのレーザ投光点抽出

4.1節で述べたカラーフィルタを用いた手法によ り得られる環境光の影響を抑えた画像に対してし きい値処理をほどこすことで、レーザ光のみが写 ったレーザ光画像を得ることができる.

レーザ光画像においてレーザ照射領域は中央で 輝度値のピークをもつ帯状の領域として撮影され る.よって,光切断法を行うためにはレーザ照射領 域から輝度が最も高い中心線上の点を抽出する必 要がある.そのために次の処理を行う.

まず,画像中心を原点とする極座標を考え,偏角 を固定し半径方向に一定間隔で走査を行う(図4). 偏角θにおける走査でi番目に参照する画素の座標 **x**_iは以下の式により得られる.

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{s} \cdot \mathbf{i} \ [\cos\theta \quad \sin\theta]^T + \mathbf{x}_0 \tag{1}$$

ただし、 \mathbf{x}_0 は画像中心座標,sは走査の間隔である. 上記の走査により参照すべき座標 \mathbf{x}_i は実数値で得られるのに対して、画素はピクセル単位で輝度値をもつため、バイリニア補間によりサブピクセル座標における輝度値を近似的に求める.このようにして得られた点群から走査線上で輝度値が最大となる座標をガウス近似法[9]により算出する.

各偏角に対して以上の処理を実行することにより、レーザ投光点を抽出することが可能である. 4.3 光切断法による3次元座標の計測

レーザ投光点の画像座標(*u*, *v*)から光切断法に よりカメラ座標系における 3 次元座標(*X*, *Y*, *Z*)を 求める. (*u*, *v*)と(*X*, *Y*, *Z*)の関係は未知数λとカメ ラの内部パラメータ行列Aを用いて次のように表 せる.

$$\begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix}^T = \lambda \mathbf{A} \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^T \tag{2}$$

一方,カメラ座標系におけるレーザ平面の方程

式はパラメータ(*a*,*b*,*c*)を用いて次のように表す ことができる.

$$aX + bY + cZ = 1 \tag{3}$$

式(2),式(3)の関係を図5に示す.レーザ投光 点の画像座標(u,v)は4.2節の処理により与えられ ており,Aはキャリブレーションにより事前に求め ることができる.また,計測中カメラとレーザは固 定されているため、レーザ平面の方程式のパラメ ータ(a,b,c)も計測前にキャリブレーションによ り求めることが可能である.よって,式(2),式 (3)を連立させることにより4つの未知数 (X,Y,Z,λ)に対して4つの方程式が得られるため, 計測点の3次元座標(X,Y,Z)を求めることができ る.

<u>5.位置・姿勢推定</u>

5.1 レーザ照射領域外の対応点検出

SfM で必要となる環境中の同一点の対応付けを 取得画像を用いて行う.特徴点の抽出および対応 付には拡大縮小・回転・照明変化に強いロバストな 特徴量を抽出することが可能な SIFT を使用する.

本研究で使用する画像からの対応点検出の処理 においてはレーザ照射領域付近の対応点の検出が 困難である.これは環境中で装置の移動に伴いレ ーザ光源の位置も変化するため、レーザパターン の投光によりレーザ照射領域付近のテクスチャは 画像ごとに変化することが原因である.本研究で はレーザが照射されている領域は既知であるため、





 (a) スケールの不定性
(b) スケールの決定
図 6 SfM のスケール不定性とレーザ投光点を 利用したスケールの決定

レーザ照射領域周辺を除く領域から特徴点を検出 することにより、誤対応点の発生を防ぐ. 5.2 SfMによる回転・並進方向推定

SIFT により得られた対応点を用いて 8 点法によ る位置・姿勢の変化の推定を行う.対応点に対する 移動の前後のカメラの光線ベクトルr,r'と並進ベ クトルtには同一平面上に存在するという幾何学的 な拘束条件がある.この条件から次のような関係 が成立する.

$$\mathbf{r'}\mathbf{E}\mathbf{r} = \mathbf{0} \tag{4}$$

ここで、基本行列EはE = TRを満たす行列である. ただし、Rは移動前から移動後へのカメラ姿勢の回転を表す行列、Tは並進ベクトルtの各成分からなる歪対称行列である. SIFT による対応点を用いて式(4)を、Random Sample Consensus (RANSAC) [10]により外れ値を除去したうえで解くことによりEを求める.求めたEをRとTに分解することにより、カメラの位置・姿勢の変化を推定することが可能である[11].ただし、式(4)を解いて得られるE は定数倍の不定性をもつため、得られるのはカメラの移動前後での回転と並進方向のみである. 5.3 レーザ対応点の検出

SfM における対応点とカメラの位置・姿勢の関係を図 6 に示す. SfM によりスケール情報が得られないのはベクトルr, r', tのいずれの長さも与えられていないため、対応点と移動前後のカメラ原点を結ぶ三角形(図 6(a)で破線により示した三角形)の大きさが定まらないことが原因である.本研究では、光切断法により 3 次元座標が既知であるレーザ投光点の対応点を利用することにより、スケールを復元する(図 6(b)).

そのために、あるフレームの画像上に写るレー ザ投光点を、異なるフレームの画像から対応点と して検出する必要がある.以下、レーザ投光点を参 照するフレームを参照フレーム、対応点を探索す るフレームを探索フレーム、参照フレームにおけ るレーザ投光点に対応する追跡フレーム上の点を レーザ対応点と呼ぶ.このレーザ対応点をテクス



図8 レーザ光の影響に頑健な提案するブロック マッチング

チャの類似性に基づいて検出する際に,環境中に 照射されるレーザパターンが大きな問題となる. レーザ照射領域にはライン状のレーザパターンが 投影されるが,5.1節で述べたように参照フレーム と探索フレームで環境に対するレーザ照射領域は 異なる.そのため,図7に示すようにレーザ照射領 域のテクスチャを比較することにより誤った対応 点が検出される場合がある.この問題に対して本 研究では,レーザ光の影響に対して頑健なブロッ クマッチング手法を提案する.

まず、4.2節の処理により抽出したレーザ投光点 を参照することにより、ブロックマッチングで対 応付けを行う点を参照フレームから検出する.続 いて、参照フレームと探索フレームのレーザ照射 領域のマスキングを行う. レーザ照射領域は4.1節 の処理により既知であるため、レーザ光画像を参 照することにより自動でマスキングすることが可 能である.提案手法では図8に示すようにテンプ レートを探索フレームに重ね合わせた状態でいず れの画像においてもマスクされていない画素の類 似度を正規化相互相関により評価する.以上の処 理により、レーザパターンの影響を受けずに、テク スチャの類似度を評価する事が可能である. その 後,類似度が最大となる位置とその周囲での類似 度を利用してパラボラフィッティング[12]により, サブピクセル精度でレーザ対応点を算出する. 5.4 レーザ対応点を用いたスケール復元

一般に SfM の処理の後に, バンドル調整と呼ば れる手法を適用することにより計測結果を向上さ せる処理が行われる[13]. バンドル調整では SfM に よる計測結果を初期値として, カメラの位置・姿勢 と計測点の 3 次元座標から計算される再投影誤差 を最適化計算により最小化する. SfM により得ら れるのは 2 フレーム間の対応点情報のみを用いた 結果であるが, バンドル調整ではより多くのフレ ームの対応点を同時に利用するため精度の向上が 可能である. バンドル調整においても 5.3 節で述べ た理由によりスケールは一意に定まらない. しか し、本研究では 3 次元座標が既知のレーザ対応点 の再投影誤差を最適化することにより、スケール を復元するとともに高精度な位置・姿勢の推定を 行う.

具体的には,一般的なバンドル調整ではカメラ の位置・姿勢に加え,対応点の3次元座標が最適化 の変数であるのに対して,本手法では対応点の3次 元座標を光切断法により高精度に実スケールで計 測することにより,回転と並進のみを変数とする. したがって,図6におけるベクトルrの値が固定さ れ,スケールを決定することが可能である.最適化 には Levenberg-Marquardt 法[14]を使用する

6. 3 次元計測実験

6.1 実験環境

提案手法の有効性を検証するために 3 次元計測 実験を行った.実験に使用した装置を図9に示す. 装置には全周ラインレーザの光源とカメラを 1 台 ずつ搭載した.レーザは COHERENT 製 OBIS532LS 80mW を,カメラは SONY 製 α6000 を使用した. 3.1 節で述べたように,カメラのレンズは広角の SONY 製 SEL1018 を使用し,カメラとレーザは光 軸とレーザ平面が垂直になるように約1,300 mm 離 して配置した.4.1 節で述べたカラーフィルタはカ メラのセンサの前面に貼り付けた.本実験では緑 色のレーザを使用したため,赤色,青色およびレー ザ中心波長の光を透過する性質の光学フィルタを 使用した.

実験は鉄道車両などにおける奥行方向への計測 をを想定して,図10に示す延長約2,000 mmの屋 内環境で行い,テクスチャを貼り付けた壁面およ び床面を計測した.計測に使用する画像は,装置を カメラ光軸方向,環境に対しては図10中の矢印方 向に移動させて取得した.装置は1,500 mmの距離 を移動させて,5 mm間隔で301枚の画像を取得し た.取得画像の例を図11に示す.

6.2 3 次元復元結果

計測結果を図 12 に示す. 図 12(a)は提案手法による3 次元復元結果である. 取得画像の情報のみから光切断面の形状計測とカメラの移動推定を行い,移動推定結果を利用して断面形状を統合した. 一方,図 12(b)は提案手法による結果と比較するための真値であり,光切断法による計測結果を事前に得られている装置の移動情報(光軸方向に5mm間隔)を利用して統合した結果である. これらの結果から提案手法により真値と極めて近い形状が得られていることが分かる.



図 9 計測装置



図 10 計測対象



図 11 取得画像例

7. 結論

本研究ではカメラと全周ラインレーザを利用し た奥行のある大型構造物内部の高精度 3 次元計測 手法を提案した.

提案手法では、計測に使用する画像を効率的に 取得するためにレーザ光と環境光の両方を含む画 像から SfM と光切断法を同時に行った.取得画像 から光切断法に必要なレーザ光を検出するために、 レーザ光周辺の波長の光を遮断する特性をもつカ ラーフィルタを提案した.また、SfM のスケール復 元に必要なレーザ対応点検出のために、誤対応の 原因となるレーザパターンの影響を考慮したブロ ックマッチングの手法を提案した.

本提案手法では 3 次元的な特徴の乏しい環境で カメラの移動を推定するために, テクスチャ情報 を利用した.実環境は本実験で使用した環境ほど にはテクスチャが豊富ではないと考えられるため, さらにロバストな対応点検出手法を構築すること が今後の課題である.



(a) 光切断法による計測断面を SfM の移動推 定結果に基づき統合した結果(提案手法)



(b) 光切断法による計測断面を移動情報を既知と して統合した結果(真値)

図 12 3 次元復元結果

参考文献

- [1] 河村幸二: "3 次元計測の最近技術と市場動向", 精密工学会誌, vol. 79, no. 5, pp. 388-391, 2013.
- [2] 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, 磯部光一: "鉄道車両用 レーザ三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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] A. Yamashita, K. Matsui, R. Kawanishi, T. Kaneko, T. Mu-rakami, H. Omori, T. Nakamura, and H. Asama: "Self-localization and 3-d model construction of pipe by earthworm robot equipped with omni-directional range finder", Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1017-1023, 2011.
- [6] D. G. Lowe: "Object recognition from local scaleinvariant features", Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision, vol. 2, pp. 1150-1157, 1999.
- [7] R. I. Hartley: "In defense of the eight-point algorithm", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 19, no. 6, pp. 580-593, 1997.
- [8] C. Mertz, S. J. Koppal, S. Sia, and S. Narasimhan:

"A low-power structured light sensor for outdoor scene reconstruction and dominant material identification", Proceedings of the 2012 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, pp. 15-22, 2012.

- [9] R. B. Fisher and D. K. Naidu: "A comparison of algorithms for subpixel peak detection", Image Technology, pp. 385-404, 1996.
- [10] M. A. Fischler and R. C. Bolles: "Random sample consensus: a paradigm for model tting with applications to image analy-sis and automated cartography", Communications of the ACM, vol. 24, no. 6, pp. 381-395, 1981.
- [11] R. Y. Tsai and T. S. Huang: "Uniqueness and estimation of three-dimensional motion parameters of rigid objects with curved surfaces", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, no. 1, pp. 13-27, 1984.
- [12] 清水雅夫,奥富正敏: "画像のマッチングにおける高精度なサブピクセル推定手法",電子情報通信学会論文誌 D, vol. 84, no. 7, pp. 1409-1418, 2001.
- [13] B. Triggs, P. F. McLauchlan, R. I. Hartley, and A. W. Fitzgib-bon: "Bundle adjustment-a modern synthesis", Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms, pp. 298-372, 1999.
- [14] D. W. Marquardt: "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters", Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, pp. 431-441, 1963.