

リングレーザとカメラを用いた大型構造物の3次元計測のための Structure from Motion による光切断面の統合

樋口 寛^{*1}, 藤井 浩光^{*1}, 谷口 敦史^{*2}, 渡辺 正浩^{*2}, 山下 淳^{*1}, 浅間 一^{*1}

Integration of cross sections by Structure from Motion for 3D measurement of large structures using a ring laser and a camera

Hiroshi Higuchi^{*1}, Hiromitsu Fujii^{*1}, Atsushi Taniguchi^{*2}, Masahiro Watanabe^{*2},
Atsushi Yamashita^{*1} and Hajime Asama^{*1}

^{*1} Department of Precision Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

^{*2} Hitachi, Ltd., Research & Development Group
292 Yoshida-chou, Totsuka-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 244-0817, Japan

For manufacturing large technical products such as railway vehicles, escalators, and elevators, skilled mechanics manually measure the large structure in assembly process, where assembly accuracy must be a millimeter order or smaller. To make the assembly process speedier and less dependent on mechanics' skills, efficient high-accuracy 3D measurement of the structure is required. In this paper, the efficient 3D measurement method using Structure from Motion and light-section method is proposed.

Key Words : Strucutre from Motion, Light-section method, 3D measurement

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要求されている⁽¹⁾。鉄道車両を例に挙げると、車両の組み立て作業において、屋根、床、および側面のパネルの溶接後、設計値との誤差を修正するための作業が行われる。この作業では設計寸法に対してミリメートルオーダーでの位置合わせが求められ、現在は職人による手作業で行われている。しかし、手作業による計測では広範囲の計測には時間がかかる。全体形状を自動で3次元計測することにより、このような作業の合理化が可能である。

高精度な3次元計測手法に光切断法がある⁽²⁾。光切断法はレーザスリット光を対象物体に投光し、その反射光をカメラで撮影することで投光部の3次元座標を三角測量により求める手法である(図1)。この手法は高精度な計測が可能であるだけでなく、レーザの投光部を変化させることにより任意の点の3次元座標を実スケールで計測することができる。しかし、得られるのはカメラ座標系における3次元座標である。レーザ投光部を変化させるためにカメラも同時に移動させ

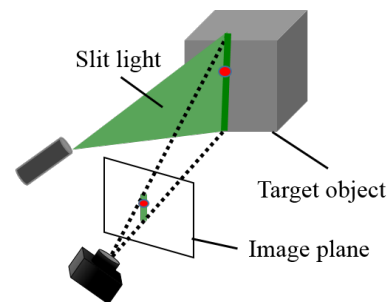


Fig. 1 Light-section method

る必要がある。異なる画像間の計測結果を統合するにはカメラの移動情報を元に座標変換を行う必要がある。よって、全体の形状を復元するためには位置・姿勢の変化が必要である。

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、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。SfM は1台のカメラのみを用いて計測が可能なので、光切断法と組み合わせることにより新

^{*1} 東京大学工学部精密工学科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{*2} 株式会社 日立製作所 研究開発グループ (〒 244-0817 神奈川県横浜市戸塚区吉田町 292)

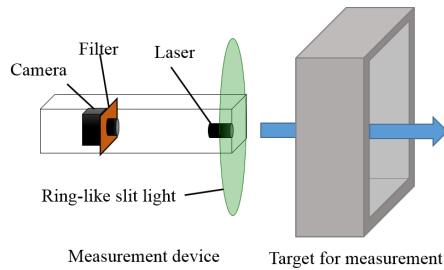


Fig. 2 Measurement device

たにセンサを追加することなくシンプルなシステムで3次元計測が可能である。

しかし、SfMと光切断法を組み合わせた3次元計測手法の課題として、それぞれの手法に必要な情報が干渉することが挙げられている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。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明るい環境でなければならない。しかし、光切断法で必要となる画像上におけるレーザ照射点を検出する際に明るい環境では環境光がノイズとなり誤ってレーザが投光されていない点を選択される問題がある。

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課題に対処している。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り、後者にはレーザ光のみが写るのでそれぞれの画像をSfMと光切断法に使用することが可能である。しかし、この手法が使用できるのは環境光の操作が可能な環境に限られる。

本研究ではこの課題を解決するために1枚の画像から各手法に必要な情報を分離することにより同一画像を用いてSfMと光切断法を同時に行う計測手法を提案する。

2. 提案手法

2.1 手法の概要 本手法では図2に示す装置を用いて計測を行う。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にあたり、断面形状を全周輪切りにした形状が取得できるリングレーザによる光切断法が有効である⁽²⁾⁽³⁾ため、本手法でもリングレーザを使用する。また、レーザが投光される計測点すべてに対してピントが合うように、レンズの結像面とレーザ平面が平行になるように配置する。さらに、光軸から離れた点ほど画像中心から離れた位置に写るので、レーザ光の全周をカメラの視野内に収めるために、カ

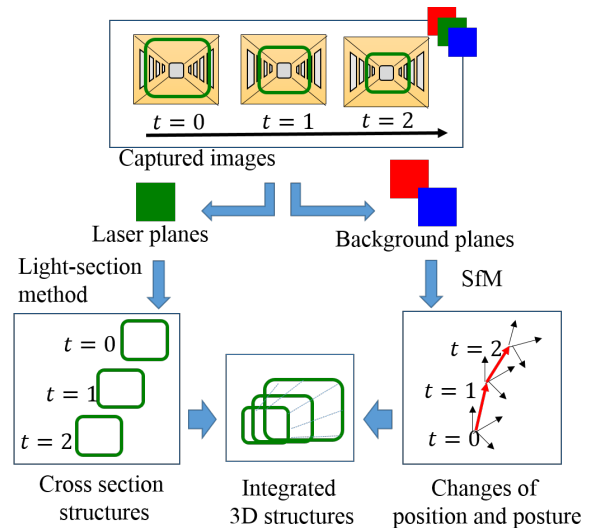


Fig. 3 Flow of measurement

メラとレーザを離して配置する。この装置を構造物内で画像を撮影しながら移動させ、取得した画像に画像処理を行うことにより3次元形状を復元する。

画像処理の流れを図3に示す。まず、同一画像からSfMに必要な対応点と光切断法に必要なレーザ光を取得するために、テクスチャ情報を含む背景画像と環境光の影響を抑えたレーザ光画像の2枚の画像に分離する。そのために、特定の波長の光のみを透過するカラーフィルタを通して撮影した画像をRGBカラープレーンに分解する。

次に、各カメラ座標系におけるリングレーザによる光切断面の3次元形状を求めるためにレーザ光画像を用いて光切断法を行う。カメラとレーザ平面との相対位置から三角測量により画像上のレーザ光の3次元座標を計測する。

続いて、光切断面の統合のためにSfMによりカメラの位置・姿勢の変化を推定する。フレーム間で対応点の検出を行い、対応点情報からカメラの回転と並進方向の推定を行う。その後、SfMの計測ではスケール情報を含まない結果が得られるため、並進移動距離を推定するためのスケール復元の処理を行う。

最後に、SfMによる移動推定結果を元に光切断法により得られたレーザの断面形状を統合し対象の3次元形状を復元する。

2.2 レーザ光情報とテクスチャ情報の分離 第1章で述べたように同一画像から同時にSfMと光切断法を行う場合、明るい環境では環境光の影響によりレーザ光が正しく認識されない場合がある。このような問題に対して、過去にカラーフィルタを用いた手法が提案されている⁽⁸⁾。この研究ではレーザの中心波長

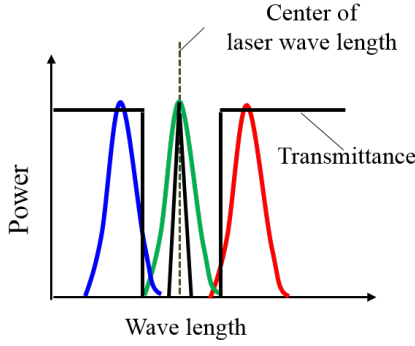


Fig. 4 Character of filter

の光のみを透過するバンドパスフィルタの特性をもつカラーフィルタを通して画像を取得することにより、環境光の影響を抑えている。この手法では画像取得時にテクスチャ情報が失われてしまうが、本研究ではSfMに必要な対応点を取得するためにテクスチャ情報も必要である。そこで、本手法では図4に示す特性をもつカラーフィルタを使用する。このフィルタはレーザ中心波長に加えてレーザからある程度離れた波長の光も透過する特性をもつ。このフィルタを通して得られた画像をレーザと同色のプレーン（レーザ光画像）とそれ以外の色のプレーン（背景画像）に分解することにより情報の分離が可能となる。例えば、緑色レーザを使用する場合、フィルタを通して取得した画像のGプレーンをレーザ光画像として取り出すことにより、レーザ周波数以外を遮断するバンドパスフィルタと同じ効果が得られるため、レーザ光以外の波長の光のほとんどが遮断される。またRBプレーンを背景画像として取り出すことにより、テクスチャ情報も同時に取得することが可能である。

2.3 レーザ光画像からの中心線の抽出 前節で得られたレーザ光画像から光切断法に必要なレーザが照射されている点の画像座標を取得する。

まず、レーザ光画像には環境光も含まれているので、レーザ光のみが写った画像を生成する。レーザ光と異なる波長の光はフィルタの影響により減衰しているので、しきい値を設定し、輝度値がしきい値以下の画素の輝度値を0とすることにより、レーザ光のみが写った画像を得ることができる。

次に、レーザ光領域をエッジとして抽出する。計測対象に照射されたレーザ光は幅を持った領域として撮影される。そのため、光切断法による3次元計測を行うためにはレーザが照射された帯状の領域から代表となる中心線を抽出する必要がある。得られた画像に対してカメラ座標系の画像中心を中心とする極座標を考

え、偏角を固定して半径方向に走査を行い、輝度に対して重心をとる。ある走査で n 個の点を走査した場合、 i 番目の走査点 (u_i, v_i) での輝度値を g_i とすると、この走査線上の代表点を

$$u_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i u_i \quad (1)$$

$$v_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i v_i \quad (2)$$

と重心 (u_g, v_g) を計算することによりサブピクセルで求めることができる。この操作を偏角を変化させながら行うことにより、各偏角に対して代表点を抽出する。

2.4 光切断法によるレーザ断面の3次元計測 レーザ光画像上で抽出された2次元座標 (u, v) から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) の関係は次のように表せる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3)$$

(f_x, f_y, c_x, c_y) はカメラの内部パラメータ、 λ は媒介変数である。一方、カメラ座標系におけるレーザの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。

$$z = ax + by + c \quad (4)$$

画像座標 (u, v) は前節の処理により得られ、カメラの内部パラメータ、レーザ平面のパラメータはキャリブレーションによりあらかじめ求めることができる。よって、式(3)、(4)から得られる4つの方程式を連立させることにより x, y, z, λ の4つの未知数が決定するので、3次元座標を求めることができる。

2.5 背景画像を用いたSfMによる位置・姿勢推定 各画像に対して得られる光切断法の計測結果を統合するために、画像間でのカメラの位置・姿勢の推定をSfMにより行う。

まず、SfMで必要となる環境中の同一点の対応付けを背景画像を用いて行う。各画像において特徴量の大きな点を特徴点として抽出し、特徴量の近い点同士を対応させる。特徴点の抽出には拡大縮小・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Scale Invariant Feature Transform (SIFT)⁽⁹⁾を使用する。

対応点検出の際の注意すべき点は、背景画像においてもレーザ光が完全には除去されずに残る場合である。環境中でのレーザ照射領域は装置の移動に伴い変化するため、レーザ投光部付近のテクスチャは時間的に変

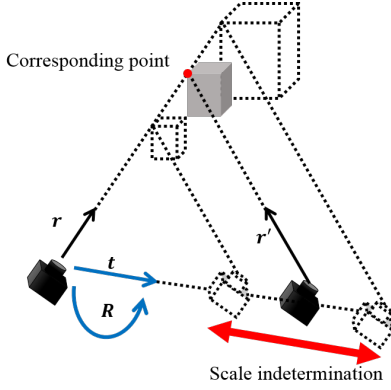


Fig. 5 Structure from Motion

化する．よって、動的に変化するレーザ投光部付近の特徴量は対応付けに使用することができない．そこで、レーザ投光部のテクスチャによる対応点の誤検出を避けるため、特徴点がレーザ領域に含まれる場合には対応点候補から除外する．

続いて、得られた対応点を用いて SfM による位置・姿勢の変化の推定を行う．図 5 のように移動の前後のカメラの光線ベクトルと並進移動ベクトルは同一平面上に存在するという幾何学的条件が存在する．この条件から次のような関係が成立する．

$$\mathbf{r}'^T \mathbf{E} \mathbf{r} = 0 \quad (5)$$

$\mathbf{r} = (x, y, z)^T$, $\mathbf{r}'_i = (x', y', z')^T$ は移動前後のカメラ座標系における対応点の光線ベクトルである．

また、 $\mathbf{E}$ は基本行列と呼ばれるもので、次の関係を満たす．

$$\mathbf{E} = \mathbf{R} \mathbf{T} \quad (6)$$

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$\mathbf{R}$ は移動前から移動後へのカメラ姿勢の回転、 $\mathbf{t} = (t_1, t_2, t_3)^T$ は並進移動ベクトルである．

式 (5) から基本行列を計算することにより $\mathbf{R}$ と $\mathbf{T}$ が求まり、カメラの位置・姿勢の変化を推定することができる．ただし、式 (5) を解いて得られる $\mathbf{E}$ は定数倍の不定性をもつ．そのため、得られるのはカメラの移動前後での回転 $\mathbf{R}$ と、並進移動ベクトル $\mathbf{t}$ の方向ベクトルである．

2.6 スケール復元 SfM により回転と並進移動方向の推定ができたので、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．

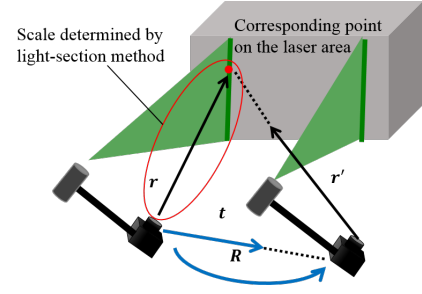


Fig. 6 Scale determination

SfM によりスケール情報が得られないのは図 5 に示すように、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、対応点と移動前後のカメラ原点を結ぶ三角形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的に定まり、 $|\mathbf{t}|$ が求まる．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に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実スケールでの 3 次元座標が求まっているので、図 6 のようにレーザが投光されている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、SIFT による特徴点検出を行う場合に述べたように、レーザ領域周辺のテクスチャ情報はレーザの投光によりフレーム間で変化するため、追跡点の周辺のテクスチャを比較するだけでは正しい対応点の検出はできない．そこで、レーザ光の影響を除外したうえでテクスチャの比較を行うために、ブロックマッチングを用いたレーザ光に対して頑健な対応点検出手法を提案する．

ブロックマッチングでは移動前画像から追跡点の周辺画素をテンプレート画像として切り取り、移動後画像に重ね合わせた状態での類似度が最大になる点を探査する．図 7 に通常のブロックマッチングの例を示す．この例ではレーザパターンによるテクスチャの類似度が優先され、誤った対応付けがなされている．

これに対して、レーザ照射領域を除いた追跡点周辺のテクスチャ情報を比較することで、図 8 に示すような正しい対応点検出を行う．まず、レーザ光画像から得られるレーザ照射領域を参照し、移動前後の背景画像に対してレーザ照射領域をマスキングする．テンプレートマッチングを行う際には、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クされていない領域に対してのみ類似度

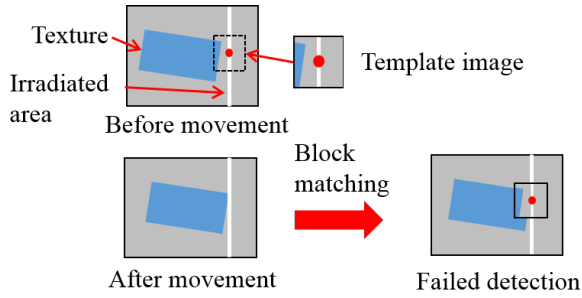


Fig. 7 Block matching

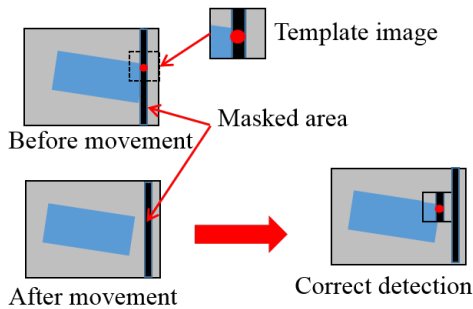


Fig. 8 Block matching in proposed method

の計算を行い、マスクされた画素は類似度計算の対象から除外する。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、テンプレート画像との類似度を計算することができる。

3. 実験

3.1 実験環境 図9に実験に用いた装置の概要を示す。装置は通常視野のカメラと緑色スリット光を照射できるリングレーザから構成されている。カメラには使用した緑色レーザの中心波長と赤色、青色の光を透過させるフィルタを取り付けた。

実験は図10に示すエレベータホールで行い、緑色の線で囲まれた領域を計測した。SfMによる位置・姿勢推定の評価を行うために、装置の移動方法としてリニアガイドを使用した。リニアガイドはレーザ平面と垂直方向に移動することができ、10 mm 間隔で撮影を行いながら180 mm 移動させた。SfMによるカメラ位置・姿勢の推定は1枚目と4枚目、4枚目と7枚目のように3フレーム間隔、すなわち30 mm の間隔で行った。1枚目と2枚目、2枚目と3枚目のような自己位置推定を行わなかった画像の位置・姿勢変化は1枚目と4枚目の間の変化の3分の1だけ並進移動を行っているというように、位置・姿勢を推定した画像の間では装置は等速で直線的に動いていると仮定して補間

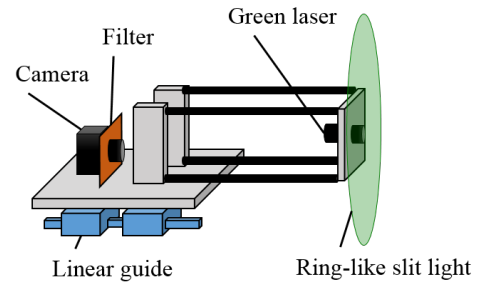


Fig. 9 Experiment device

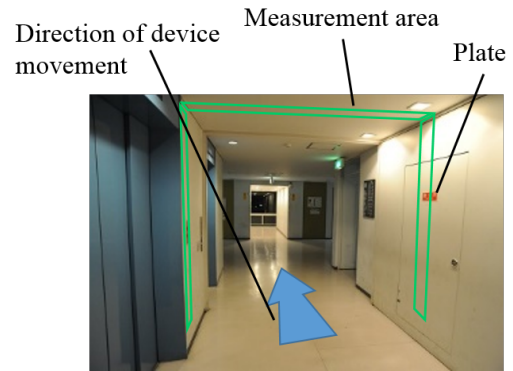


Fig. 10 Target for measurement

を行った。

3.2 実験結果 実験の結果を図11、図12に示す。図11は提案手法による計測結果で、光切断法により得られた断面形状をSfMによるカメラの位置・姿勢の推定結果を元に統合したものである。一方、図12は提案手法と比較するために光切断法により得られた断面形状をリニアガイドの移動情報を元に統合したものである。これらの結果から提案手法による位置・姿勢の推定により計測対象の3次形状が復元できていることが分かる。また、いずれの結果でも画像右上にノイズが見られるが、これは環境内で照明の光源からの直接光をフィルタにより完全に除去しきれなかったためである。

また、定量的な計測結果を得るため、図10内のプレートを利用した。図13にその拡大図を示す。図13の青色の線で囲んだ長方形部分について実寸と比較を行った結果を表1に示す。表中のActual sizeは実寸を、Result 1, Result 2は図11、図12における長方形の頂点の3次元座標から辺長を計算したものである。各頂点の3次元座標はその点にレーザが投光されている取得画像において画像内での頂点の画素が最終的な計測結果のどの点に対応しているのか追跡することにより求めた。Result 2は位置・姿勢の統合にリニアガ

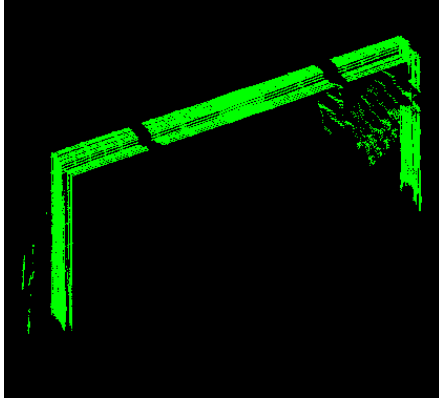


Fig. 11 Result 1

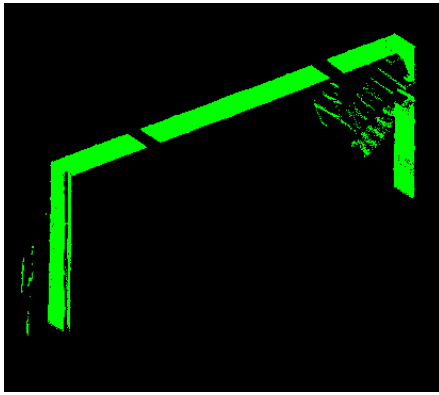


Fig. 12 Result 2



Fig. 13 Measurement area

Table 1 Quantitative results

	Upper	Lower	Right	Left
Actual size	145mm	145mm	90mm	90mm
Result 2	157mm	156mm	85mm	86mm
Result 1	130mm	130mm	85mm	86mm

イドの移動情報を用いているため、表における実寸との寸法のずれは光切断法の精度が原因である。一方、Result 1 と Result 2 では同じ光切断法の結果を用いているので、両者の寸法のずれは位置・姿勢の精度に起因するものである。

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、カラーフィルタを通して取得した画像の RGB プレーンの分解を行った。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の手法として、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。

今後の展望としては精度の向上が挙げられる。特に、SfM の対応点の検出精度を上げ、光切断法結果の統合の精度を向上させることが今後の課題である。

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(2014), pp. 675–681.
- (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(2012), pp. 863–871.
- (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(2010), pp. 1504–1512.
- (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*, (2011), pp. 1664–1671.
- (5) T. S. Huang and A. N. Netravali, “Motion and structure from feature correspondences: a review”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 82, No. 2(1994), pp. 252–268.
- (6) 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*, (2015), pp. 717–722.
- (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*, (2011), pp. 1–7.
- (8) 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(2004), pp. 91–110.
- (9) D.G. Lowe, “Object recognition from local scale-invariant features”, *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol. 2(1999), pp. 1150–1157.