# 背景差分法によるラインレーザとステレオカメラを用いた リアルタイム 3 次元計測

○野中隼矢 †, Sarthak Pathak ‡, 梅田和昇 ‡

 $\bigcirc$  Shunya NONAKA † Sarthak PATHAK ‡ and Kazunori UMEDA ‡

†:中央大学大学院理工学研究科, nonaka@sensor.mech.chuo-u.ac.jp
‡:中央大学理工学部, {pathak, umeda}@mech.chuo-u.ac.jp

<要約>本論文では、ラインレーザを用いたマーキングにより、ステレオカメラの3次元計測の精度を向上させる 手法を提案する.ステレオカメラの左右画像における対応点探索は計測物のテクスチャ量に依存する.また、単 眼カメラと光投影装置を用いたアクティブステレオ法に基づく装置がしばしば提案されるが、精密な校正が必要 となる.そこで、ステレオカメラとラインレーザを組み合わせた新規の計測システムを開発した.この計測シス テムでは、ラインレーザを背景差分法によって抽出し、計測範囲を Region of Interest (ROI)を用いて限定するこ とでリアルタイムな3次元計測を行う.また、ラインレーザとステレオカメラとの校正を必要としない. <キーワード>ステレオカメラ、ラインレーザ、3次元計測

#### 1 序論

近年,カメラを用いた3次元計測技術は多くの場面 で広く利用されている. 例えば、インフラの整備や部 品の検査、人体の計測などがある.これらの用途には、 様々な手法が用いられているが、中でもステレオ法が しばしば利用される [1]-[3]. ステレオ法にはパッシブス テレオ法とアクティブステレオ法の2種類がある.前 者は、視点の異なる2台以上のカメラを用いて、三角 測量の原理で距離を算出する手法である [4,5]. この手 法では、計測密度が高く計測領域が広いという利点が ある反面,一般的に計算コストが高く,テクスチャの 乏しい物体を計測する場合には対応点探索が困難であ るという欠点がある.後者は、パッシブステレオ法に おける片方のカメラを構造化光等の光投影装置に置き 換えた手法である [6]-[8]. この手法は、パッシブステレ オ法に比べて対応点探索が容易であるという利点があ る.ただし、計測密度は光投影装置に依存し、走査等 の操作を必要とすることがある. テクスチャレスな物 体の計測を高精度に行いたい場合は、アクティブステ レオ法を用いるのが一般的である. Rui らは、単眼カ メラとラインレーザを用いた3次元計測システムを構 築した [9]. しかし、このシステムではカメラとレーザ

の校正を高精度に行う必要があり、それが3次元計測 の精度に影響してしまうという課題がある. Lingli ら は,構造化ストライプを光投影装置として用いる方法 を提案した [10]. この手法では、正確な物体の 3 次元計 測を行うことができるが,カメラと光投影装置を正確 にキャリブレーションする必要がある.また、装置の 位置関係が固定されているため、死角が発生しやすい という問題もある. 吉村らは, ステレオカメラの計測 精度向上のため手書きのマーキングを用いた3次元計 測手法を提案した [11, 12]. しかし, この手法にはマー キングに手間がかかることや、マーキングできる物体 の大きさや色が限定されてしまうといった課題がある. そこで我々は、ステレオカメラの対応点探索の補助と してラインレーザを使用した,計測物のテクスチャ量 に依存することなく高精度な3次元計測手法を提案し た[13]. この手法では、ラインレーザをR=255のしき い値で抽出し計測を行っているが, R=255 以外のレー ザ箇所を抽出できないことや計測時に環境光を除去し なければならないという課題がある.そこで、本研究 では、ラインレーザを背景差分法を用いてロバストに 抽出し、計測範囲を Region of Interest (ROI) を用い て限定することとメディアンフィルタによるノイズ除 去処理を加えることで,リアルタイムかつ環境光の影 響を受けづらくすることで,3次元計測の高精度化を 実現する.また,本手法において,ラインレーザは自 由に動かすことができ,カメラとレーザの校正を必要 としない利点がある.

# 2 提案手法

#### **2.1** 提案手法の概要

提案手法のフローチャートを図1に、システム概念 図を図2に示す.まず、ステレオカメラによって計測 したい物体を撮影する.このとき、計算量の低減と計 測物体周囲の環境光などの影響の除去のために,手動 で左右画像の計測したい物体部分のみを長方形で囲い, ROI 抽出を行う.次に、左右画像で ROI 抽出したライ ンレーザを照射していないフレームをベースフレーム として保存する.そして、ラインレーザを計測物に照 射し,保存したベースフレームとの差分を取ることで ラインレーザ箇所を抽出する. 差分を取ってレーザ箇 所を抽出する際にはごましおノイズやレーザスペック ルによるノイズがあるため、それらを除去するために メディアンフィルタによる平滑化を行う. これにより. ラインレーザ箇所だけを正確に抽出することが出来る. 抽出されたレーザ領域は数ピクセルの幅を持ち、正確 な三次元座標を算出するためには、抽出された画像の 横軸の中心座標を求める必要がある.抽出した箇所の グレースケール値の重心座標を中心座標として算出す る. 左右画像で求められた中心座標より視差を取得し, 三角測量の原理により距離計算を行う.以上の処理を ラインレーザを走査しながら行うことで, 走査した分 の三次元点群を取得することが出来る.提案手法のポ イントは2つある.まず、カメラとレーザの校正が不 要であることである.これは、ラインレーザがステレ オカメラで撮影した左右画像中に写ってさえすれば計 測が行えるためである.カメラとレーザの位置関係を 考慮する必要がないため、校正が不要で、手間がかか らない計測システムである.次に、物体の反射率や環 境光に依存せず計測が行えることである. 最初に計測 物を ROI 抽出することで、計測環境周囲の光の反射な どの環境光の影響を除去することが出来、計算量も減 らすことが可能である.また,ラインレーザをしきい 値などを設けて抽出せずに差分を取ることで抽出する



ため、物体の色や反射率の影響を受けづらい.そのため、ロバスト性に優れた計測システムを実現できる.

#### 2.2 Region of Interest (ROI)

処理をする前に,左右画像において ROI 抽出を行う. 具体的には,画像中の測定物のみを手動で長方形で囲む.これを行うことによって,計測における環境光の 影響を減らすことが出来る.また,範囲を限定して以 降の処理を行うため,処理速度が向上する.手動で行う理由は,物体検出などを使った ROI を適用した場合, その検出精度に依存して正確な計測が困難となってし まうからであり,手動で行うことで確実に測定物を認 識することが出来る.中心座標算出までを ROI の座標 系で計算を行い,視差を求める段階から元の画像の座 標系に戻して処理を行う.実際に ROI 抽出を行った例 を図 3 に示す.



(a) 左画像の ROI



(b) 右画像の ROI図 3 ROIの例

#### 2.3 背景差分法によるラインレーザ抽出

ステレオカメラで撮影した左右の RGB 画像におい て、ラインレーザの写っていないベースフレームとラ インレーザの写っているレーザフレーム間の差分を取 ることで、照射箇所を抽出する.図4は、実際にベー スフレームとレーザフレーム間の差分を取ることで照 射箇所を抽出した例である.この時、差分画像は二値 画像で示している.

# 2.4 メディアンフィルタによるノイズ除去

差分を取ることでラインレーザ照射箇所を抽出する 際に、図 5(a) に示すようなごましおノイズや、レーザ 照射箇所にもスペックルによるノイズが生じてしまう. そこで、ノイズを除去するためにメディアンフィルタ による平滑化を行う.カーネルサイズは3×3に設定 した.メディアンフィルタは、他の平滑化フィルタや ガウシアンフィルタなどに比べて、エッジ部分がぼけ



(a) 左ベースフレーム画像 (b) 右ベースフレーム画像





(c) 左レーザフレーム画像 (d) 右レーザフレーム画像





(e) 左差分二値画像 (f) 右差分二値画像

図 4 背景差分法によるラインレーザ抽出の例

ることがなく差分によって抽出したレーザ箇所への影響を抑えられる.そのため,計測精度を低下させることなくノイズ除去を行うことが出来る.図5にノイズ処理結果を示す.

#### **2.5** 中心座標の算出

差分を取り、ノイズ除去により抽出したレーザ領域 には数ピクセルの幅がある. 正確な三次元座標を算出 するためには、抽出したラインレーザ箇所の横軸の中 心座標を求める必要がある. 中心座標の算出は、グレー スケール値の重心を求めることで行う. 抽出したレー ザ箇所の元画像におけるグレースケール画素値を出力 し、横軸のグレースケール重心を画像全ての列で算出 する. 中心座標 x<sub>q</sub> の算出には式 (1) を用いる.

$$x_g = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} \tag{1}$$

このとき, $w_i$  ( $i = 1 \sim n$ ) はレーザ照射箇所のグレー スケール画素値, $x_i$  ( $i = 1 \sim n$ ) は画像の横軸を x 軸 としたときのその x 座標値である.中心座標の算出結 果の例を図 6 に示す.





(b) ノイズ除去の例 図 5 メディアンフィルタによるノイズ除去

# 2.6 視差と3次元座標の取得

左右画像において算出したレーザ照射箇所の中心座 標より視差を求め,三角測量の原理に基づいて3次元 情報を取得する.図7に視差についての例を示す.こ のとき,ステレオカメラの2つのカメラの間でステレ オ平行化を行っているため,視差は左右の画像におい て同一の行で取得することが出来る.そして,得られ た視差より三次元座標への変換を行う.その変換式は, 式(2)-(4)のようになり,x<sub>gn</sub>は左画像座標系のn行目 のレーザの中心座標,fはカメラの焦点距離,bはカメラ 間距離,Sは撮像素子の画素サイズである.レーザの 3次元座標(X,Y,Z)は,左カメラの座標系に基づいて いる.

$$X = \frac{bx_{gn}}{s\left(x_{gn} - x_{gn}'\right)} \tag{2}$$

$$Y = \frac{bx_{gn}'}{s\left(x_{gn} - x_{gn}'\right)} \tag{3}$$

$$Z = \frac{bf}{s\left(x_{gn} - x_{gn}'\right)} \tag{4}$$





(a) 左画像

図 6 中心座標の算出





Disparity

# 3 球の計測による精度評価実験

提案手法と別の手法の精度を球の計測によって比較 する実験を行った.比較した手法として,R=255の固 定しきい値でレーザを抽出して計測を行う手法を用い た.中心座標の算出方法に関しては提案手法と同様で, グレースケール値の重心から求めた.ただし,比較手 法では ROI 抽出は行なっていない.その理由として, ROI 抽出は提案手法によって新たに導入した処理だか らである.それぞれの手法で球体の計測を行い,取得 した3次元点群に対して CloudCompare の RANSAC Shape Detection により球体の形状推定を行った.真値 との寸法誤差を求めることで,精度評価を行った.ま た,リアルタイム計測のためそれぞれの処理速度に関 しても評価を行った.

# 3.1 実験環境

図 8 に示すように, 直径が 100mm の発泡スチロー ルでできている球体を計測物として用いた.また,ス テレオカメラは図 10 に示す StereoLabs 社の ZED2 を 使用し, ラインレーザは図 11 に示す STS 社のマーキ ングレーザ ML-7010 の赤色を使用した.それぞれの装 置の仕様を表 1 に示す.計測環境は図 9 に示す通りで



あり,約 500mm離れた真上から撮影して計測を行うような環境で実験を行った.これは,工場での部品検査を想定している.

提案手法と比較手法のそれぞれにおける計測方法に ついて述べる.ラインレーザはアルミフレームに取り 付けてあり,そのアルミフレーム上で走査を行った.た だし,走査時間や走査速度,走査間隔は任意であり,十 分に計測が出来たと判断した段階で計測を終了した.カ メラにレーザさえ写っていれば計測は可能であるが,本 実験では計測物の3次元点群の取得を分かりやすくす るため,レーザはできるだけ計測物に対して垂直に照 射した.

それぞれの手法によって取得した三次元点群を評価す るために、フリーの3次元点群処理ソフトである Cloud-Compare を用いて形状推定を行なった.形状推定に は、RANSAC Shape Detection [14] を用いた.これ は Ruwen らによって提案された自動形状推定アルゴリ ズムを使用しており、外れ値が含まれたデータに対し て外れ値の影響を除去して形状推定を行うことができ る.本実験では、球の推定を行なった.精度評価の指 標として、真値である球体の直径と推定された球体の 直径の寸法誤差を用いた.また、点群取得終了時のフ レームレートをリアルタイム処理の評価指標とした.

#### 3.2 実験結果

提案手法と比較手法それぞれで取得した球体上部の 点群を図12,13に,RANSAC Shape Detection によっ て推定した球のモデルを図14,15に示す.また,それ

表1 実験装置の仕様

製品名	仕様
ZED2	解像度: 2208 × 1242
	フレームレート: 15 fps
	視野角: 110°(H) × 70°(V)
	基線長: 120 mm
	焦点距離: 2.12 mm
	ピクセルサイズ: 2 μm
ML-7010	波長: 635 nm
	スリット幅: 約5 mm

ぞれの手法における寸法誤差とフレームレートの結果 を表 2 に示す.



図 12 提案手法による 3 次元点群





#### 3.3 考察

図 12, 13 に示したそれぞれの手法で取得した 3 次元 点群を比較する.提案手法によって取得した点群の方 がばらつきが小さいように見える.これは,R=255の しきい値でラインレーザを抽出する場合には,幅のあ るレーザの内一部分のみを抽出してしまっているから だと考えられる.一方で,提案手法の場合,レーザの 写っていないベースフレームとレーザの写っているフ レームの差分を取っているため,画像中に写る照射箇 所を適切に抽出できる.そのため,ばらつきが少ない



(a) 3 次元モデル(提案手法) (b) 3 次元モデル(比較手法)

図 14 RANSAC Shape Detection の結果 表 2 寸法誤差とフレームレートの比較

	提案手法	比較手法
寸法誤差 [mm]	1.980	2.249
フレームレート [fps]	6.8	3.5

のだと考えられる.また、表2より、寸法誤差が提案 手法の方が小さいため、比較手法よりも高精度な計測 が出来ていると言える. これは, 先ほども述べたよう にラインレーザを適切に抽出できているからだと考え られる. また, 提案手法では, 比較手法に比べて環境 光の反射などによるノイズが発生しづらいため正確な 計測が行えているのだと思われる.フレームレートの 比較を表2より行うと、提案手法の方が比較手法の倍 近く高いことがわかる.これは、提案手法では ROI 内 でのみ処理を行っているため計算量を大きく減らすこ とができているからだと考えられる. 計測物体以外の 箇所の計測を行うことで、ラインレーザの抽出だけで なく,中心座標の算出や点群化の処理においても余分 な計算をすることになってしまうため、比較手法では 提案手法よりもフレームレートが低くなっている. そ のため、提案手法の方がよりリアルタイム計測に向い ていると言える.

# 4 複雑な形状の計測による精度評価実験

提案手法によって 3D プリンタを用いて作製した複雑 な形状を持つ物体を計測した.そして,取得した点群 と物体のメッシュモデルを比較する実験を行った.ま ず,提案手法によって物体の計測を行い,3次元点群を 取得する.取得した点群の中で物体上にない余分な点 群を手動で除去する.計測した物体のメッシュモデルと 取得した3次元点群の大まかな位置合わせを手動で行 い,その後自動位置合わせ(ICP)を行う.そして,メッ シュモデルと点群間の距離を Cloud-to-Mesh Distance により計算し,平均誤差と標準偏差を求め,精度評価 を行った.

### 4.1 実験環境

3D プリンタで作製した図 15 に示す 4 つの物体を計 測物として用いた.3D プリンタは FLASHFORGE 社 の Adventure4 を用いた.造形精度は ±0.1mm である. 計測環境を図 16 に示す.物体から約 300mm 離れた真 上から撮影して計測を行った.ステレオカメラは図 10 に示す StereoLabs 社の ZED2 を使用し,ラインレー ザは図 17 に示すキコー技研社のラインレーザ MLXL-A12-640-40 を使用した.このレーザの波長は 640nm で スリット幅は約 3mm である.また,ラインレーザはス ライドレール上を一定速度で走査するようにステッピ ングモータによって制御した.本実験において走査幅 は 300mm,走査速度は約 9mm/s,走査回数は 2 回と した.



図 15 計測物

#### 4.2 実験結果

提案手法によって取得した3次元点群の物体上にない点群を手動で除去した後の結果を図18に示す.また, 手動で位置合わせを行った後,自動位置合わせを行い Cloud-to-Mesh Distanceを計算した結果を図19に,その結果をまとめたものを表3に示す.

#### 4.3 考察

どの物体においても取得した点群はメッシュモデル と平均誤差が ±4µm 以内で,標準偏差は 0.3mm 程度







#### 図 17 ラインレーザ

と高精度な計測が出来ていることがわかる. 平均誤差 がどの物体においても極端に小さいのは, 手動と ICP による高精度な位置合わせができているからであると 考えられる. 計測物 1 のみが他の物体よりも標準偏差 が大きい. これは, 物体が大きいためラインレーザの 両端の輝度が小さくなり, 正確な抽出が困難であった からであると考えられる. 図 18(b) において, 上下端 は点群の密度が小さいことがわかる.

#### 4.4 結論

本研究では、ラインレーザとステレオカメラによる リアルタイム計測のための背景差分法を用いたステレ オ法を提案した.また、実験により背景差分法によっ て正確なラインレーザ抽出が出来ていることを示した. 加えて、ROI 導入による処理速度の向上を示し、本手 法の有用性を示した。今後の展望としては、更なる精 度向上のために、レーザ抽出手法とノイズ処理につい ての再検討を行い、より複雑な形状の物体を計測し評 価することで有用性の確認を行う.また、計測システ ムとしての完成度を高め、実用性の幅を広げることを 目指す.



# 参考文献

- H. Ukida and S. Takamatsu, "3D shape measurements using stereo image scanner with three color light sources," In IEEE IMTC, Italy, 2004, pp. 639-644 Vol.1.
- [2] L. Bo and G. Chen, "Measurement Method Based on Stereo Vision for Nozzle Motion," IMCCC, China, 2012, pp. 1413-1416.
- [3] Kazuyuki Miyazawa and Takafumi Aoki, "A robot-based 3D body scanning system using passive stereo vision," In IEEE ICIP, USA, 2008, pp. 305-308.

	平均誤差 [mm]	標準偏差 [mm]
計測物 1	0.0012	0.3747
計測物 2	-0.0036	0.3350
計測物 3	-0.0022	0.3145
計測物4	-0.0023	0.3272

#### 表 3 誤差計算結果まとめ

- [4] M. Z. Brown, D. Burschka and G. D. Hager, "Advances in computational stereo," In IEEE TPAMI, 2003, pp. 993-1008 Vol. 25, No. 8.
- [5] D. Scharstein, R. Szeliski, R. Zabih, "A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms," SMBV, USA, 2001, pp. 131-140.
- [6] F. Chen, G. M. Brown, and M. Song, "Overview of 3-D shape measurement using optical methods," Optical Engineering 39(1), pp. 10-22, 2000.
- [7] M. O'Toole, J. Mather and K. N. Kutulakos, "3D Shape and Indirect Appearance by Structured Light Transport," In IEEE TPAMI, 2016, pp. 1298-1312, Vol. 38, No. 7.
- [8] Z. Song and R. Chung, "Determining Both Surface Position and Orientation in Structured-Light-Based Sensing," In IEEE TPAMI, 2010, pp. 1770-1780, Vol. 32, No. 10.
- [9] R. Wang, "3D Reconstruction Using a Linear Laser Scanner and A Camera," ICAICE, China, 2021, pp. 666-673.
- [10] L. Zhao, H. Xu, J. Li and Q. Cai, "Binocular Stereo Vision Measuring System Based on Structured Light Extraction Algorithm," ICICEE, China, 2012, pp. 644-647.
- [11] Mitsuaki Yoshimura, YongHoon Ji and Kazunori Umeda, "Stereo Measurement of Cross-Sectional Shape of Weld Beads by Marking," ICPE, 2020, D-4-5.
- [12] 吉村 光顕, Sarthak Pathak, 梅田 和昇, "マーキン グによるステレオカメラを用いた 3 次元計測の高

精度化,"第22回計測自動制御学会システムインテ グレーション部門講演会講演論文集, 2021, 2B1-05.

- [13] S. Nonaka, S. Pathak, and K. Umeda, "Experimental Evaluation of High-Accurate 3D Measurement Using Stereo Camera and Line Laser," J. Robot. Mechatron., Vol.35 No.6, 2023.
- [14] CloudCompare version 2.12.4, GPL Software, 2023. http://www.cloudcompare.org/ [Accessed October 13, 2023]