

水中SLAMにおける音響ソナーセンサと DVLセンサ間の自己校正手法の提案

木原 優輝^{1,a)} 池田 貴希¹ 岩口 堯史¹ Thomas Diego¹ 川崎 洋¹ Tang Yi¹

概要: 近年、水中 SLAM の需要が高まっている。しかし、水中 SLAM では 3 次元形状の取得精度が低い、自己位置特定が困難であるなどの問題がある。本発表では、高精度かつ高密度な 3 次元形状取得を実現するために、複数のクロスラインレーザーを用いた 3 次元計測手法を提案する。また、音響センサと視覚オドメトリの軌跡をマッチングさせ、各スキャンの 3 次元形状を蓄積し、広いシーンを復元する自己校正手法を提案する。さらに、レーザーが検知できない環境では、音響ソナーを組み合わせることで頑健に三次元復元を行う。

1. 序論

近年、海底調査・港湾施設点検・海洋資源探査などにおいて、水中での Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) の需要が高まっている。しかし、水中での正確かつ広範囲での形状取得は、水の濁りによる減衰や散乱現象などから画像品質が著しく低下するため、音響センサが唯一の実用的な解決策であった。一方、水中では電波が減衰し届かないため GPS を使用できず、水中探査に用いられる Remotely Operated Vehicle (ROV) の位置特定も困難である。

本論文では、ラインレーザーの出力が強いため濁った水でも使用できることから、複数のクロスラインレーザーを用いて正確かつ高密度な三次元計測を実現する手法を提案する。この三次元復元には自己位置の推定が必要である。我々の先行研究では、カメラを用いて光切断法により三次元形状を復元するために、同じカメラを用いた Visual Odometry (VO) アルゴリズムにより推定された姿勢を利用してきた。しかしながら、水の濁りがある環境下では画像ベースの SLAM 手法が脆弱である。そのため本手法では、Doppler Velocity Log (DVL) などの水の濁りなどに頑健な音響オドメトリを自己位置として用いることで、レーザーによる三次元形状を蓄積する。ここで、画像と音響センサ間の自己校正を行うことで高精度な蓄積を実現する。DVL による経路と VO による経路の 2 つの経路間の剛体変換を最小二乗最適化により推定することで、自己校正を

実現する。キャリブレーションが完了したら、DVL で推定された自己位置を用いることで各フレームのレーザー スキャン結果を蓄積し、三次元復元領域を拡大する。

また、今回用いるレーザーセンサには計測距離に制限があり、濁度の高い環境ではレーザーが検知できない。そこで本手法では音響ソナーを用いることで、低精度・低密度ながらも頑健に三次元復元を実現する音響三次元復元手法を提案する。

2. 関連研究

2.1 画像ベースの姿勢推定

カメラの姿勢推定は高精度なため盛んに研究が行われている。画像を用いた姿勢推定では Structure From Motion [1], [2], [3] や Visual Odometry [4], [5], [6] がよく知られている。しかし、検出される特徴点が少ない場合は頑健さに欠ける。

我々の先行研究ではこの VO のうちテクスチャの少ないシーンに比較的強い Direct Sparse Odometry (DSO) [7] を用いていたが特徴点が極端に少ないシーンや水の濁度が高いシーンでは姿勢推定が失敗する。本論文ではこのような悪条件を補うために音響オドメトリを用いた三次元復元手法を提案する。

2.2 音響ベースの姿勢推定

水中では電波の減衰が著しく GPS などは機能しない。そのため水中では音響を利用した測位システムが主流である。Long Base Line (LBL) [8] や Short Base Line (SBL) [9] は音波の反響する時間から絶対的な位置を推定する。また DVL はドップラー効果により速度を求め、

¹ 九州大学
Kyushu-u University
^{a)} kihara.yuki.729@s.kyushu-u.ac.jp

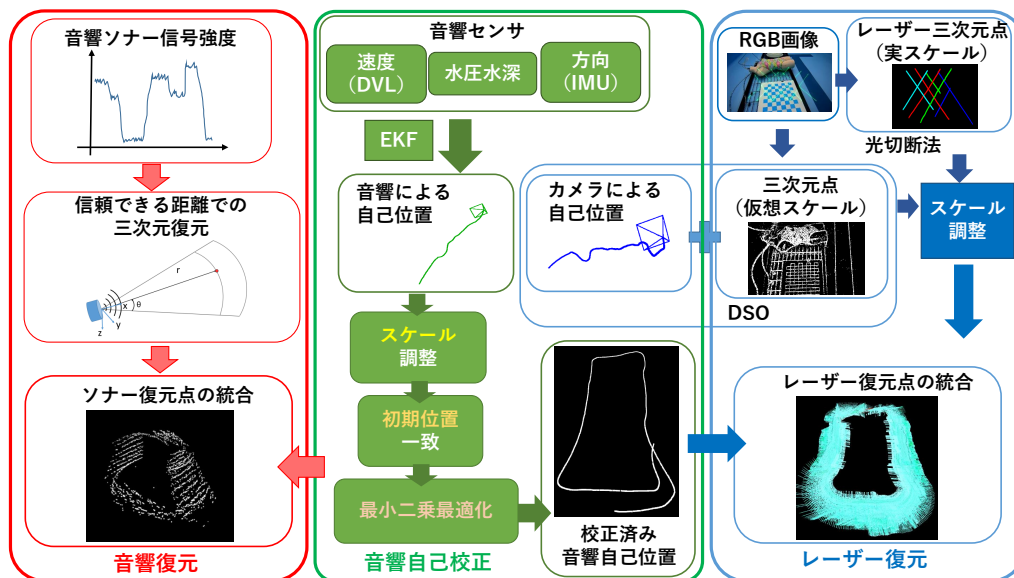


図 1 提案手法の概要

その速度を積分することで位置を算出することが可能である [10]. 本手法では、この高精度な DLV センサによる自己位置を自己校正することで画像センサと組み合わせ、三次元復元結果の蓄積を行う。

2.3 水中での三次元復元

水中での三次元計測は、これまでソナーなどの音響を利用したものが主流であった。音響ソナーは、水の濁りや特徴点の少なさなどには頑健な形状取得が可能である。音響ソナーには、1つの音波センサで音波の往復時間から対象までの距離を推定するシングルソナーや、この音波センサを複数内蔵し三次元形状を取得する三次元マルチソナーなどが存在し、これらの音響ソナーを用いた研究は盛んに行われている [11], [12], [13], [14], [15].

一方、音響ソナーには低精度であるという弱点が存在するため、高精度なレーザーを用いた技術が盛んに研究されている [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22]. その中で光切断法が有名であるが、各フレームで一本の復元結果しか得られないため疎な形状しか取得できないという問題がある。近年、高密度な三次元計測を実現するために複数のクロスラインレーザーを用いる手法が提案されている [17], [18], [19], [23], [24]. 本手法では、複数のクロスラインレーザーを自己校正した音響 DVL による自己位置で蓄積する、高精度・高密度な水中 SLAM 手法を提案する。また、レーザーが検知できない環境では音響ソナーの復元結果を音響 DVL による自己位置で蓄積する非常に頑健な水中 SLAM 手法を提案する。

3. 提案手法

3.1 手法の概要

ROV は DVL・慣性計測装置 (IMU)・複数のラインレ

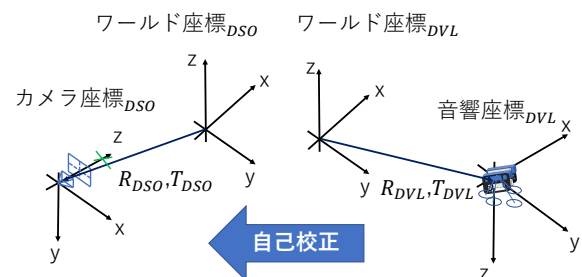


図 2 異なる座標系間の校正

ザー・カメラ・音響ソナーを搭載している (図 7). 図 1 に手法の概要を示す. ROV は遠隔操作で操縦し, DVL による位置・IMU による姿勢・画像シーケンス・ソナー信号を保存する. 校正のために, ROV の軌道を DVL と DSO の二つの方法で推定する. そして二つの軌道からセンサ間の剛体変換を推定する. 三次元計測では, 各フレームに対して光切断法により三次元形状を取得し, 自己校正された DVL による位置情報を用いて復元結果を蓄積する. また, レーザーが検知できないシーンでは, 音響ソナーにより三次元形状を取得し, DVL による位置情報により蓄積する.

3.2 音響オドメトリの自己校正

提案手法は, 音響センサ (DVL) と画像センサ (カメラ) を用いて軌跡を推定する. DVL とカメラはそれぞれ独自の座標系を持っているため, カメラ画像から生成された光切断結果を DVL で取得した位置と統合するためには, キャリブレーションが必要である (図 2). また, それぞれのセンサが異なる位置に設置されている場合, 座標系を一致させても経路が一致しない (図 3).

そこで DVL で直接取得した軌跡と撮影した画像から DSO で推定した軌跡の 2 つのセンサーの軌跡を使用することで自己校正を行い, 座標系を一致させるための回転並

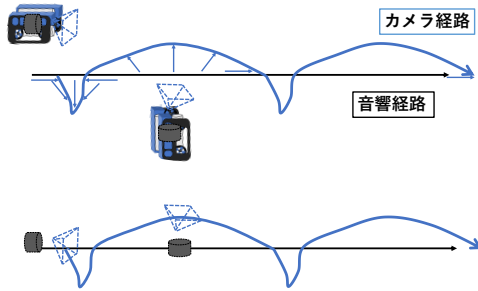


図 3 設置場所の相違による軌跡のずれ

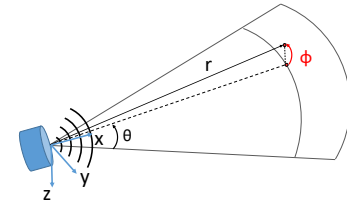
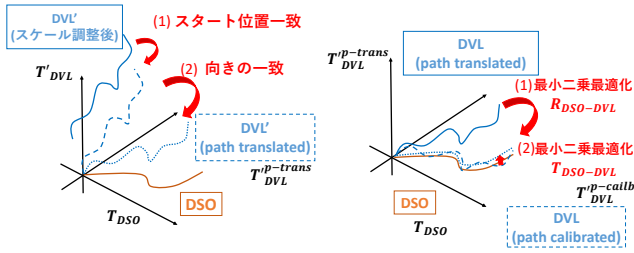


図 5 音響ソナー計測モデル



(a) 初期ポーズ合わせ (b) 最小二乗最適化による剛体変換推定

図 4 自己校正手法

びにそれぞれのセンサーの位置を推定する。

DSO の軌跡はスケールの情報がないため、まず両センサーの移動距離からスケールを算出する。

$$scale = \frac{\max(d_{DSO})}{\max(d_{DVL})} \quad (1)$$

次に DSO とスタート位置が一致するように DVL の軌跡を平行移動させる (図 4(a)(1))。

$$\mathbf{x}_{transformed}^i = \mathbf{x}^i - \mathbf{T}_{DVL}^0 \quad (2)$$

次に IMU の情報を用いて DVL の姿勢を DSO に合わせる (図 4(a)(2))。

$$\mathbf{x}_{transformed}^i = \mathbf{R}_{DVL}^{-1} \cdot (\mathbf{x}^i + \mathbf{T}_{DVL}^{-1}), \quad (3)$$

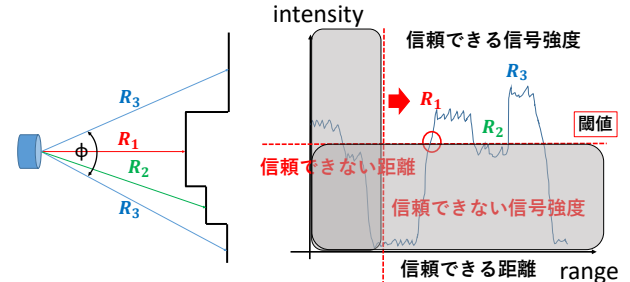
最後に最小二乗最適化法を用いて残差を最小化することで、2つの軌跡が一致するための回転並進を推定する (図 4(b))。

$$\sum_i \|\mathbf{y}^i - \mathbf{R}_{DVL-DSO} \cdot (\mathbf{x}_{transformed}^i - \mathbf{T}_{DVL-DSO})\| \quad (4)$$

3.3 音響ソナーによる三次元復元

提案手法では、音波の往復時間から対象までの距離を計測するシングルソナーが、回転しながら周囲の情報を取得する、Scanning Imaging Sonar による三次元復元アルゴリズムを提案する。

このソナーセンサでは距離 r 方位角 θ が推定できるが、仰角 ϕ には曖昧性が残る (図 5)。



(a) 対象とソナーモデル

(b) 信号の強度分布

図 6 復元する信号の選択

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

反響してきた信号データは各距離においてそれぞれの信号強度を持つ (図 6)。このうちの距離で三次元復元を行うのかにより形状が異なる (図 6(a))。

本手法では、仰角の曖昧性に対して仰角 $\phi = 0$ と仮定することで、おおよその形状を復元する。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

またどの距離を復元するかに関しては、機械的に信頼できる信号できる距離のうち、閾値を超える最初の信号を復元することで三次元形状を復元する (図 6(b))。

復元された結果は音響 DVL により推定された自己位置情報を元に変換を行うことで蓄積していく。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + T \quad (7)$$

4. 実験

本実験では、カメラと 4 本のクロスラインレーザー、音響測位センサと音響ソナーを搭載した水中 ROV を用いて、プールでのデータ収集を行った。音響による姿勢は、Water Linked DVL A50, Blue Robotics Bar30 High-Resolution 300m Depth / Pressure Sensor, PX4 Pixhawk IMU sensor から取得したデータを拡張カルマンフィルター (EKF)

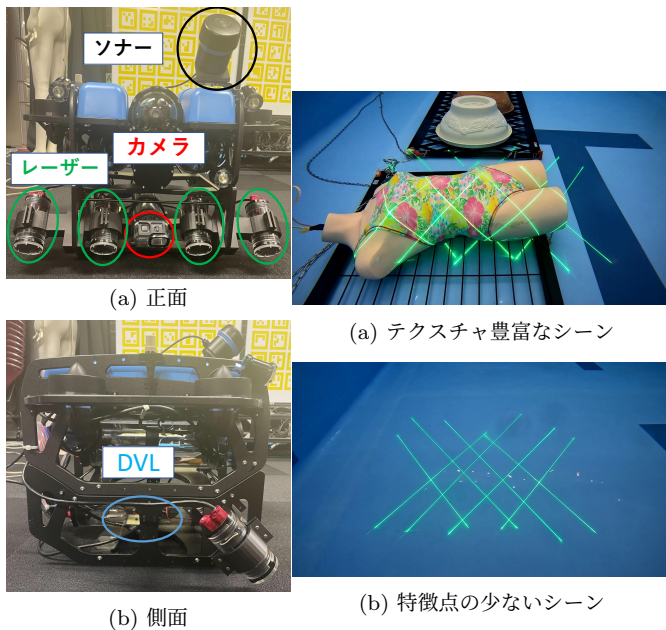


図 7 計測に用いた ROV

(a) テクスチャ豊富なシーン

(b) 特徴点の少ないシーン

図 8 計測画像

に入力することで推定している。RGB 画像は 4 本のクロスラインレーザーを GoPro HERO10 により撮影した。また、音響ソナーには Ping360 Scanning Imaging Sonar を用いて計測を行った。

以下の条件で実験を行った。

- 音響センサと画像センサの自己校正の評価のためにテクスチャ豊富なオブジェクトを沈めた (図 8(a))。
- テクスチャの少ないシーンを広範囲走行し、自己校正した音響ポーズとレーザーで三次元復元を行い、自己校正手法の評価を行った (図 8(b))。
- オブジェクトを沈めたエリアと何も設置していないエリア両方を計測することで音響ソナーによる三次元復元の評価を行った (図 8(a), (b))。

4.1 音響オドメトリの自己校正結果

提案した自己校正アルゴリズムは、DVL で取得した軌跡と DSO を用いたカメラの位置合わせを行うことで評価した。DSO は頑健な姿勢推定を行うために豊富なテクスチャを必要とするため、この実験は複数の色情報豊富なオブジェクトが沈んでいるプールで行われた (図 8(a))。図 9(a) は、スケール調整後の DVL とカメラの初期軌跡である。最小二乗最適化手法を用いた自己校正を行った結果、図 9(b) に示すように両者の軌道が正確に一致することが確認できた。図 10 に最小二乗最適化法の残差の二乗和を示します。回転成分と並進成分の両方をキャリブレーションした場合、回転成分のみのキャリブレーションと比べ残差がかなり減少していることが確認できる。このように、最適化により誤差が減少することが確認できた。

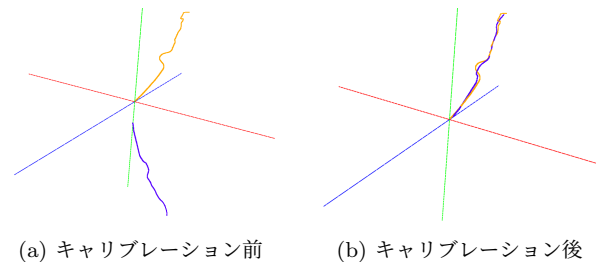


図 9 最小二乗最適化法による自己校正 (青)DVL の軌跡 (橙) DSO によるカメラの軌跡

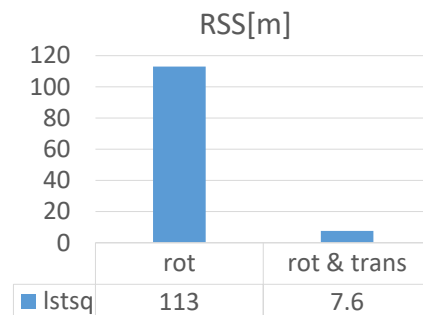


図 10 最適化の RSS (回転のみ vs 回転・並進)

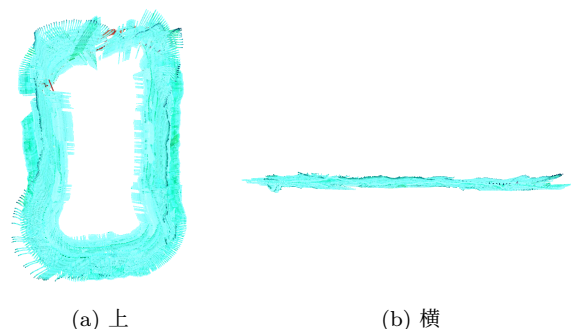


図 11 校正済み DVL とレーザーによる床の復元結果

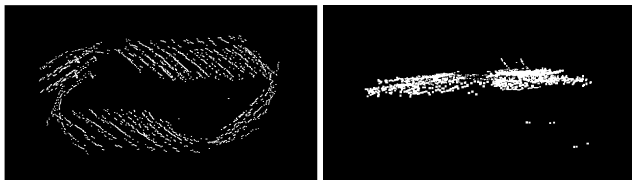
4.2 自己校正済みの音響オドメトリによるレーザーキャン形状の蓄積

約 $2m \times 5m$ の範囲を航行しながら、ラインレーザーでプールの床を照射し計測を行った。このシーンは DSO で抽出可能な特徴点が少ないため、非常に困難なシーンである (図 8(b))。そのため、ラインレーザーで復元された 3 次元点を統合するためには、校正済みの音響 DVL による自己位置に頼らざるを得ない。よって、4.1 で校正した音響 DVL 自己位置とラインレーザーによる光切断法により床の平らな形状を復元した。

図 11 が示すように、プールの床の平らな形状が復元できていることが確認できる。

4.3 音響センサによる復元

約 $2m \times 5m$ の範囲を航行しながら、音響ソナーでプールの平らな床を計測した。音響ソナーは前方 60° の範囲を繰り返しスキャンしながら計測を行う。提案した音響ソナー復元アルゴリズムにより床の大まかな形状が復元に成功した (図 12)。



(a) 上 (b) 横
図 12 音響ソナーによる床の復元結果

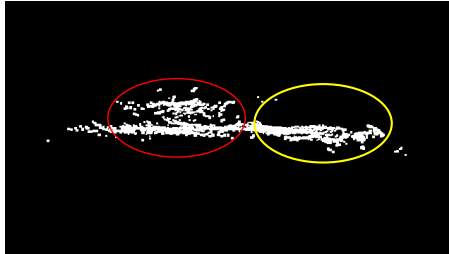


図 13 (赤) オブジェクトあり (黄) 床の復元結果

また 1 辺にオブジェクトが沈んでおり残りは平らな床の環境で計測を行った。オブジェクトを沈めた場所では、床から離れた位置に三次元点が復元されていることが確認できる (図 12 (赤))。よって提案した音響三次元復元アルゴリズムにより、大まかな形状復元が可能であることを証明した。

5. 結論

本論文では、水中シーンにおいて、VO なしで光切断法により生成された三次元形状を正しく蓄積するために、音響センサとカメラの位置関係を推定する自己校正手法を提案した。また、三次元形状を音響ソナーを用いて音響センサのみで取得する音響三次元復元アルゴリズムを提案した。提案した音響センサとカメラを用いた自己校正手法の有効性を、プールのテクスチャ豊富なシーンを撮影したデータを用いて実験的に検証した。また、この校正された自己位置を用いてレーザー復元結果を蓄積することで長距離での三次元復元を検証した。最後に、音響ソナーによるデータを三次元に変換し、音響 DVL により蓄積することでラフな形状の復元を検証した。

今後はこの音響ソナーによるラフな形状を用いて水中での自立走行を行い、最終的にレーザーキャンした結果を蓄積することで、自律での高精度・高密度な三次元復元に取り組む。

参考文献

- [1] Carlo Tomasi and Takeo Kanade. Shape and motion from image streams under orthography: A factorization method. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 9, pp. 137–54, 11 1992.
- [2] Johannes Lutz Schönberger and Jan-Michael Frahm. Structure-from-motion revisited. In *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016.
- [3] Johannes Lutz Schönberger, Enliang Zheng, Marc Polle-

- feys, and Jan-Michael Frahm. Pixelwise view selection for unstructured multi-view stereo. In *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2016.
- [4] Raúl Mur-Artal, J. M. M. Montiel, and Juan D. Tardós. ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 31, No. 5, pp. 1147–1163, 2015.
- [5] Raúl Mur-Artal and Juan D. Tardós. ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo and RGB-D cameras. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 33, No. 5, pp. 1255–1262, 2017.
- [6] X. Gao, R. Wang, N. Demmel, and D. Cremers. Ldso: Direct sparse odometry with loop closure. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, October 2018.
- [7] L. von Stumberg, V. Usenko, and D. Cremers. Direct sparse visual-inertial odometry using dynamic marginalization. In *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2018.
- [8] Yunfeng Han, Cuie Zheng, and Dajun Sun. Accurate underwater localization using lbl positioning system. In *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, pp. 1–4, 2015.
- [9] Zhai Yuyi, Gong Zhenbang, Wang Lei, Zhang Ruiyong, and Luo Huanxin. Study of underwater positioning based on short baseline sonar system. In *2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, Vol. 2, pp. 343–346, 2009.
- [10] Øyvind Hegrenæs, Audun Ramstad, Torstein Pedersen, and David Velasco. Validation of a new generation dvl for underwater vehicle navigation. In *2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, pp. 342–348, 2016.
- [11] Yang Xu, Ronghao Zheng, Senlin Zhang, and Meiqin Liu. Robust inertial-aided underwater localization based on imaging sonar keyframes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 71, pp. 1–12, 2022.
- [12] John McConnell, John D. Martin, and Brendan Englot. Fusing concurrent orthogonal wide-aperture sonar images for dense underwater 3d reconstruction. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1653–1660, 2020.
- [13] John McConnell and Brendan Englot. Predictive 3d sonar mapping of underwater environments via object-specific bayesian inference. pp. 6761–6767, 05 2021.
- [14] Eric Westman, Ioannis Gkioulekas, and Michael Kaess. A theory of fermat paths for 3d imaging sonar reconstruction. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5082–5088, 2020.
- [15] Hyeonwoo Cho, Byeongjin Kim, and Son-Cheol Yu. Auv-based underwater 3-d point cloud generation using acoustic lens-based multibeam sonar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 43, No. 4, pp. 856–872, 2018.
- [16] Miquel Massot-Campos and Gabriel Oliver-Codina. Optical sensors and methods for underwater 3d reconstruction. *Sensors*, Vol. 15, No. 12, pp. 31525–31557, 2015.
- [17] M. Bleier and A. Nüchter. Low-cost 3d laser scanning in air or water using self-calibrating structured light. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 105–112, 2017.
- [18] R. Furukawa and H. Kawasaki. Interactive shape acquisition using marker attached laser projector. In *Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and*

- Modeling, 2003. 3DIM 2003. Proceedings.*, pp. 491–498, 2003.
- [19] Ryo Furukawa and Hiroshi Kawasaki. Laser range scanner based on self-calibration techniques using coplanarities and metric constraints. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 113, No. 11, pp. 1118–1129, 2009.
- [20] Chang Woo Chu, Sungjoo Hwang, and Soon Ki Jung. Calibration-free approach to 3d reconstruction using light stripe projections on a cube frame. In *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 13–19, 2001.
- [21] J. Davis and X. Chen. A laser range scanner designed for minimum calibration complexity. In *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 91–98, 2001.
- [22] B. D. Bradley, A. D. C. Chan, and M. J. D. Hayes. A simple, low cost, 3d scanning system using the laser light-sectioning method. In *2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 299–304, 2008.
- [23] Hiroshi Higuchi, Hiromitsu Fujii, Atsushi Taniguchi, Masahiro Watanabe, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama. Speckle-based pose estimation for 3D measurement of the featureless environment by two cameras. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 11515 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, p. 115151P, June 2020.
- [24] Genki Nagamatsu, Jun Takamatsu, Takafumi Iwaguchi, Diego Thomas, and Hiroshi Kawasaki. Self-calibrated dense 3d sensor using multiple cross line-lasers based on light sectioning method and visual odometry. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2021, Prague, Czech Republic, September 27 - Oct. 1, 2021*, pp. 94–100. IEEE, 2021.