

自律型水中ロボットの能動型レーザー距離計測システムの開発

Development of the Active Laser Ranging System for Autonomous Underwater Vehicles

柳 善鉄*・浦 環**

Son-Cheol YU and Tamaki URA

1. はじめに

柱や港の壁面のような水中の構造物の外観検査は安全検査に欠かせない。水中の調査や安全検査などは危険な作業である上、経済的な負担も大きいので自律型水中ロボット(AUVs: Autonomous Underwater Vehicles)による全自動化が期待されている。水中は視界が悪いので前述の外観検査のためには1m程度以内の距離まで接近する必要があるが、AUVに良く使われている超音波センサーは壁や柱などが多い水中構造物の中では干渉や多重反射、媒質の音波吸収などの問題で前述の接近は難しい [1], [2], [3], [4].

本論ではダイバー用小型Laser PointerとAUVに内蔵されているCCDカメラを利用した能動型Laser距離計測システムを提案する。このシステムは搭載が容易で1m前後で誤差が1cm以下の測定精度を保有し、前述した検査任務に利用できる。

2. AUV用Laser測定システムの開発

AUV用のLaser測定システムの開発は次のような問題がある。

1) 水中環境の特殊性：水中は空气中に比べて光の吸収性が極めて高くLaserの使用可能範囲も空气中に比べて短い。又波長によって吸収性が違うので波長によって到達距離が違ふし [5], 浮遊物によるLaserの光の吸収や隠蔽も問題である。

2) AUVの制約：殆どのAUVは電池をエネルギー源として動いていて、小型AUVではPayloadが少ない。従って、搭載可能なLaserの大きさや重さが厳しく制約される。Laser装置をAUVの外に装着して、ロボットの内部に配線する場合は防水処理や圧力容器の改造の負担も大きくなる。

システムの信頼度を重視した場合、装置が大型化し2)

の制約の問題が大きくなる [6]。搭載容易性を重視した場合は1)の信頼度が問題になる。信頼性と搭載容易性を両立させるためには、1)要求条件だけに合わせた単純で単機能を持つようにし、信頼度を確保しながら、2)AUVの既設装置を充分に活用してLaserセンサーを搭載容易な軽量小型化することである。

1) 要求される精度：前述の検査に必要な距離計測精度は通常のAUVの位置決め精度が数cmであることを勘案すれば、1cm前後である。

2) AUVの既設装置の活用：Laser距離計測方法の中でCCD式Laser距離計測方法は発射したLaser光の反射位置をCCDカメラで調べて距離計測を行う方式である。AUVはCCDカメラを搭載しているの、AUVの外部にLaser Pointerだけを装着すればCCD式Laser計測が可能になり、圧力容器の一切の配線作業や専用のCCDカメラが要らなくなり、搭載が容易になる。

水中はFig. 1に示すように光の波長により吸収減衰率が

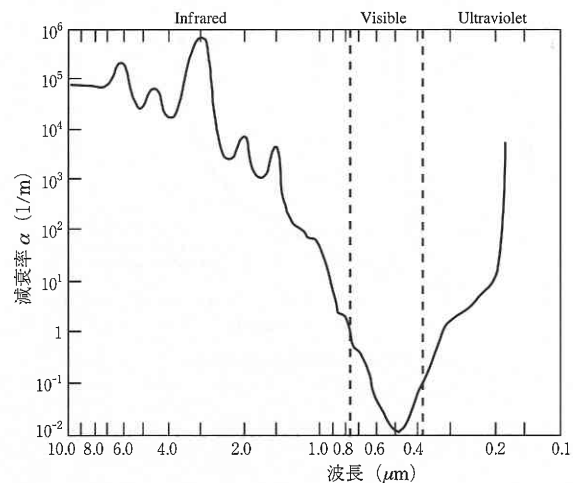


Fig. 1 Light Attenuation in Underwater

*東京大学大学院工学系研究科

**東京大学生産技術研究所 海中工学研究センター

大きく異なる。赤色 Laser は短距離でしか使えず、緑色 Laser が長距離の場合に好ましい。ここで Table 1 に示す市販のダイバー用 Laser Pointer を利用する。

距離測定方法は CCD Laser 式距離測定方法を使用している。Fig. 2 (a) のようにカメラから対象物までの距離 $Dist A$ が幾何学的な相似を利用して次の式から求められる。

$$Dist A = (f \times i) / (f \tan \theta_1 + a).$$

Fig. 3 のように Laser の角度 θ_1 が計測可能距離と精度に及ぼす影響を調べるために陸上実験を行った。i を 20 cm に固定してカメラ (Sony XC-999, 1/2 inch CCD, 768 Hx 494 V, f = 6.0 mm) から対象物までの距離を変化させる。 θ_1 を 0° , 30° , 45° , に変化させながら測定を行った結果, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 で示しているように計測範囲はそれぞれ 80-540 cm, 30-120 cm, 25-45 cm に変化し, 最大

誤差はそれぞれ 11.63 cm, 0.21 cm, 0.29 cm であった。角度 θ_1 を増加させることによって計測精度は向上したが, 計測可能範囲が小さくなった。45° の計測精度が 30° より悪かったのは Laser Pointer が計測用ではなかったための Laser 光の低い精度が原因と思われる。

Laser Pointer を Fig. 2 (b) のように二つ設置し, k の中央にカメラを置いた場合, 対象物とカメラとの直交線の傾斜角 θ_2 は次の式から求められる。

$$\theta_2 = \tan^{-1} ((Dist B - Dist A) / k), \text{ Counterclockwise+}.$$

距離変化による傾斜角 θ_2 の精度変化を調べるために陸上実験を行った。二つの Laser Pointer の距離 k を 40 cm にして, 常に θ_2 が 0° になるようにしながら対象物とカメラとの距離を変化させ, その時の精度を調べた。実験結果, Fig. 7, Fig. 8 のように最大角度誤差は約, 計測可能範囲は 50-300 cm を得た。

Table 1 Specifications of Miracle Beam Model 2030

Range	Underwater Max. 30m
Laser Wavelength	550nm(Semi-Conductor,Green)
Size	2.5cm(Diameter) x 18.5cm (Length)
Max Power	5mW
Laser Class	III a
Power Source	3V DC(AA Type Battery)

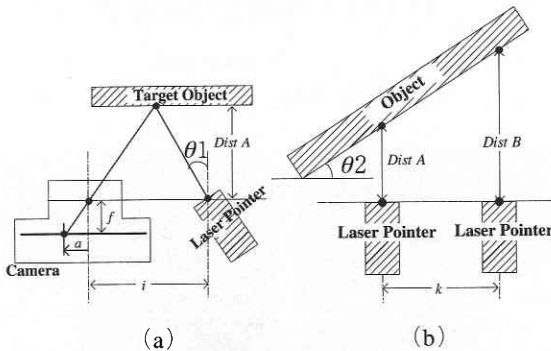


Fig. 2 Geometrical Configuration of Angle

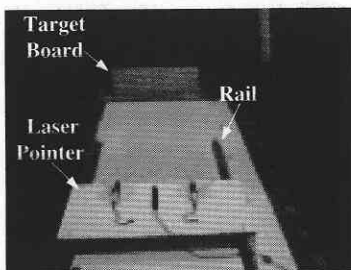


Fig. 3 Proposed Measurement System Exp. Overview

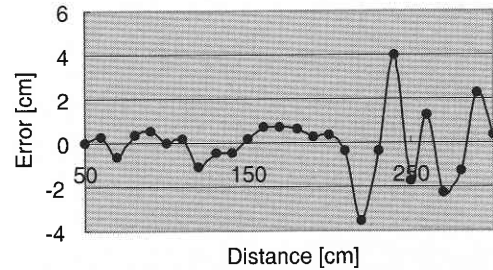


Fig. 4 Distance Error in Air ($i = 20 \text{ cm}$ $\theta_1 = 0^\circ$)

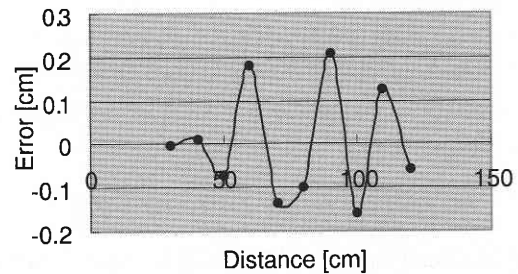


Fig. 5 Exp. Result, Distance Error ($i = 20 \text{ cm}$ $\theta_1 = 30^\circ$)

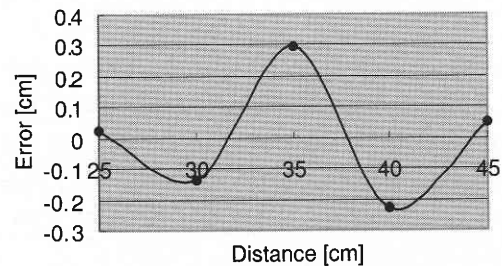


Fig. 6 Distance Error in Air ($i = 20 \text{ cm}$ $\theta_1 = 45^\circ$)

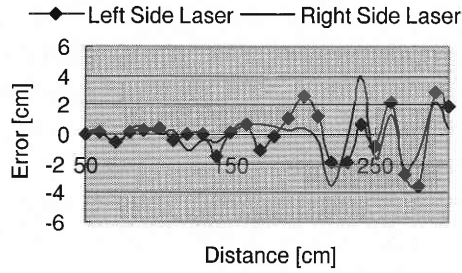


Fig. 7 Distance Error in Air ($k = 40 \text{ cm}$ $\theta_1 = 0^\circ$, 2 Lasers)

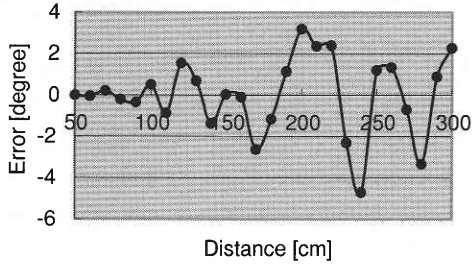


Fig. 8 Distance Error in Air ($i = 20 \text{ cm}$ $\theta_1 = 0^\circ$, 2 Lasers)

3. 画像処理

Laser 光の反射点は次のように画像から認識されている。

1) 処理範囲の制限: Laser Pointer の光は距離変化に対して光軸上を移動する。画像の光軸上だけを処理することによって信頼度向上と共に高速化をはかる。

2) 色抽出処理: カラー抽出処理によって Laser の色や輝度の範囲の物だけを抽出した後, Labeling 処理して面積中心を検出する。

3) Filtering 処理: 背景のノイズや Laser の反射光などが誤って認識されるのを防ぐため, Label の面積制限や横縦比などの環境によるノイズを除去した後, 最終的に反射点の位置を検出している。

4. 水中用 Laser システムの水中実験

前述の Laser Pointer を AUV に装着して水中計測実験を行った (Fig. 9 参照)。Laser Pointer を三つ設置すれば対象物までの3点の距離が分かり, 面の方向ベクトルが求められる。

本論では AUV が橋脚のような円筒対象物の外観を 1 m 離れて調査する作業を想定する。AUV の運動能力や対象物の自律発見, 水中の視界などを考慮すれば水中の計測範囲は 70-200 cm で測定精度は約 10 cm, 10° 以下の測定精度が必要である。前述の条件を満たすため $\theta_1 = 0^\circ$, $k = 40 \text{ cm}$ とした。

水中の精度計測実験は AUV の左右二つ Laser Pointer だ

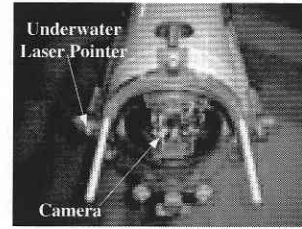


Fig. 9 3 Laser Points Implemented on Robot "Tri-Dog1"

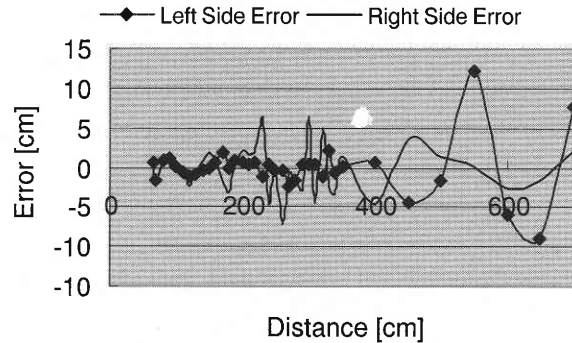


Fig. 10 Distance Error in Underwater ($k = 40 \text{ cm}$ $\theta_1 = 0^\circ$)

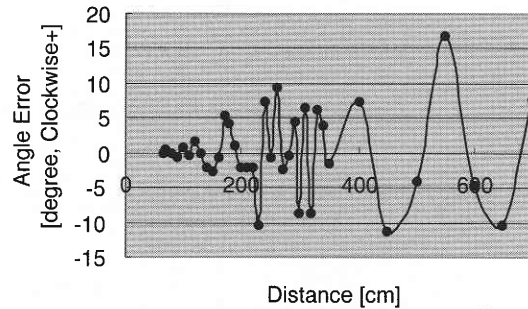
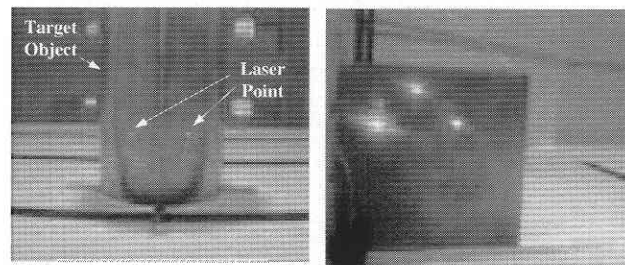


Fig. 11 Angle Error in Underwater ($k = 40 \text{ cm}$ $\theta_1 = 0^\circ$)



(a) Cylindrical Object (b) Plate Object

Fig. 12 Laser Points Test in Underwater by Robot

けを使用して 65-700 cm まで AUV と対象物までの距離を変化させながら測定を行った。

その結果は Fig. 10, Fig. 11 に示している。AUV が主に画像を撮る 1 m 前後の距離での距離誤差は 1 cm 以下, 角度誤差は以下を示して, 本論で想定している調査任務に充

分な精度である。

Fig. 12 (a) は水中の円筒に, Fig. 12 (b) 平板に Laser Pointer を照らした結果を示している。Fig. 12 (a) のように対象物がカメラに正対していない曲面である場合, 対象物に反射してカメラに入る Laser 光が平板に比べて少ないので, Fig. 12 (a) 正対の反射光のサイズが Fig. 12 (b) の Laser Pointer に比べて小さくなる。又水中で浮遊物が多い場合や対象物の表面に付着され光の吸収率が高い場合も Laser システムの信頼度が落ちる恐れがある。今後, 前述のような問題を解決し, 提案する Laser システムの実環境での信頼度を高める必要がある。

5. おわりに

本論では Laser 光を利用した能動型距離計測方法を提案した。水中で Optical Sensing は高い精度と超音波センサーの問題を補われる長所を持っているにもかかわらず, 従来の AUV の Optical Sensing 方法が受動型であったため, 十分に活用されなかった。厳しい水中画像環境の中で可能な能動型 Sensing 方法は既知の光を使用しているので認識確度も高く AUV の要求に応じて即時に情報を提供が可能で AUV の判断能力の向上にも役に立つ。水中で Optical Sensing の信頼度向上のため, 更に能動型 Sensing 方法の研

究が必要である。

制約が多い小型 AUV 用のセンサーの開発で信頼度と搭載容易性を両立するのが重要な課題である。そのためには本論で示したように, 要求に合わせた単機能, 高信頼度で AUV の既設装置を十分に活用して最大限センサーの搭載を容易にする必要がある。

(2001年7月13日受理)

参考文献

- [1] Josko A. Catipovic; "Performance Limitations in Underwater Acoustic Telemetry", IEEE Journal of Oceanic Eng., Vol. 15, No. 3, July, 1990, pp. 205-216.
- [2] 日本造船学会海中システム部会; "海中技術一般", 成山堂書店, 1999.
- [3] 田口一夫, 田畑雅洋; "海洋計測光学概論", 成山堂書店, 1997.
- [4] 超音波便覧編集委員会; "超音波便覧", 丸善, 1999.
- [5] Jules S. Jaffe; "Computer Modeling and the Design of Optical Underwater Imaging System", IEEE Journal of Oceanic Eng., Vol. 15, No. 2, 1990, pp. 101-111.
- [6] Donna M. Kocak, Frank M. Caimi, Partha S. Das and Jeffery A. Karson; "A 3-D Laser Line Scanner for Outcrop Scale Studies of Sea Floor Features", IEEE/MTS Proc. of Oceans99, 1999, pp. 1105-1114.