船舶の目：海洋におけるレーザ検出

ヴィットリオ・リッペイ

レーザ検出技術は、船舶の安全性と効率の向上を支援する上で有意義な役割を果たしている。

欧州海上保安機関（European Maritime Security Agency:EMSA）は2014～2019年の間に、28の欧州旗を掲げた2万1392隻の商船が関与する1万9416件の海難事故を記録し、それらの事故の負傷者は6210人、死者は496人にのぼる。これらの事故の半数は、内水または湾港水域内で発生している。米国海域内、または、世界各地の米国旗を掲げた船舶については、同期間に1万9586件の事故が、米運輸省（Department of Transportation）によって報告されている。事故に関与した船舶は2万5790隻で、負傷者は689人、死者は194人、物的損害総額は70億2200万ドルにのぼる。

毎年、世界の保険請求額の40%が船舶事故に関連しており、1件あたりの平均請求額は43万ドルである。事故には、船舶同士の衝突や、岸壁、プラットフォーム、紛失コンテナや浮氷塊などの半没水物体との衝突などがある。国家沿岸警備隊がそれ以上に懸念するのは、部分的に没水している場合もある、より小さな船舶による、麻薬密輸や密入国である。

大西洋の両岸において、レーザは船舶の安全を強化するための主要要素として認識されている。欧州連合（EU）は、現行の一連の船舶センサでは「困難な海洋層を観測できない」として、SMARTER（Surveillance of MARi Time surroundings through lasER）技術プロジェクトを2016年に立ち上げた。

図1　商船三井（Mitsui OSK Ltd.：MOL）のRORO船「さんふらわあごーるど」（載貨重量トン数[dwt]：4458トン）上で行われた、インテリジェント認識及び機械学習システムの試験は成功に終わったが、そのセンサにはOPALのレーザレーダーが含まれていた。この船舶は、来島海峡を通って日本の神戸と大分の間を運航している。来島海峡は非常に混雑しており、小型漁船や漁網が多くて、特に夜間の運航は困難である。（写真提供：商船三井とフェリーさんふらわあ）

2016年から2019年には、英国ロンドンのグローバルマリタイムサービシズ社（G.M.S. Global Maritime Services）を中心とするコンソーシアムが、250万ユーロの資金を受けて、新しい海洋センサをレーザ距離測定器から開発する作業に取り組んだ。

新しい海洋センサの設計

船舶センサは、監視員や橋警備員を上回る能力で、以下を行う必要がある。

- 周辺海洋を360°の範囲とより長い距離にわたって、リアルタイムかつ連続的に知覚する
- 海洋層に関する3D/4Dの連続的な情報を、便利かつ判読可能な形で提供する
- すべての環境、天候、交通条件下で、昼夜を問わず監視を行う
- 正確なデータの保存と再現を可能にして、後で確認できるようにする

新しく導入するセンサは、レーダー、音響測深機、航法、サイドソナーからなる現行の一連のセンサを上回るか、それを補完する能力を備える必要もある。また、国際海事機関（International Maritime Organization：IMO）と船級協会（ship classification society）が、新しいセンサの安全性を承認する必要がある。

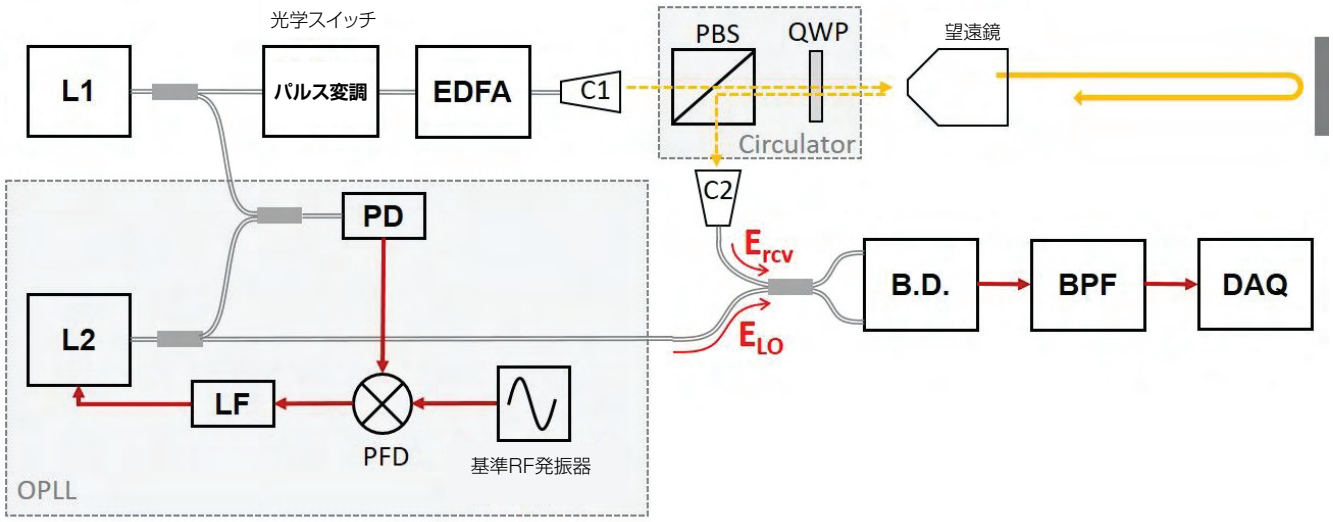

図2　提案されたヘテロダイン検出に基づくパルス式LADARシステムの構成。L1とL2は連続波レーザ源、EDFAはエルビウム添加ファイバ増幅器、C1は光学コリメータ、PBSは偏光ビームスプリッタ、QWPは1/4波長板、C2は自由空間を光ファイバに結合するカプラ、PDは光検出器、OPLLは光位相同期ループ、LFはループファイバ、PFDは位相周波数検出器、BDはバランス検出器、BPFはバンドパスフィルタ、DAQはデータ収集ボードである。（図提供：ADDのソン氏他）

船舶に搭載されるライダ（light detection and ranging：LiDAR、光検出と測距）は、ToF（Time of Flight）手法の適用によって、高精度な科学測定や港湾における距離測定を行うと、広く認識されていた。一部の船舶において、海上で標的を検出するライダを、CCDカメラによるその後の解析と識別に組み合わせることの有効性が、既に確認されている。しかし、受信器へと後方散乱するときに、距離測定器のパルスには、標的の性質と動作に関する情報も含まれており、全体形状を考察する際には、その情報の抽出が、さらに詳しい識別に役立つ。過去に取得した信号のアーカイブを使用して、全体形状の解析と比較を行うことにより、検出と特性評価を行うことができる。標的候補のデータベースは、さまざまな視角から事前に作成されているか、機械学習によって漸進的に構築することができる。

信号取得の効率は、受信望遠鏡の口径、検出器の面積と技術、選択されたレーザ帯域幅に依存する。この手法を実装することにより、船員に対するレーダーに勝る大きなメリットが期待できる。つまり、より短い光波長によって、海面に漂う物体やほとんど海面下に没した状態の物体（漂流物、小型ボート、紛失コンテナ、浮氷塊）など、より小さな領域の細部を識別することができる。さらに重要なのは、この新しいセンサが、港湾や港湾までのアクセス航路など、混雑したエリアを通過する際にレーダーの測定値が乱される問題に対する解決策になることである。距離測定器は能動的に動作するため、識別の可否は、標的の可視性（夜間航海灯など）に依存しない。

海洋上の第１の目

大気の透明度によっては、最大およそ10～100kmの距離から、レーザ測距による船舶サイズのプロファイリングを行うことができる[1]。救命ボートや漂流物など、標的が小さくなるほど、その距離は短くなる。上述の仕様に従って船舶に適した小型装置を製造するには、レーザ出力、アイセーフティ、受信器感度、プロファイリングソフトウエアの最適な組み合わせによって、センサを設計する必要がある。

上述の原則を適用した船舶センサの2つの最新例が、「OPAL」3D LiDARと「LADAR」である（**図1**）。OPALは、加ネプテック・テクノロジーズ社（NEPTEC Technologies）によってカナダで製造されている。LADAR（LAser Detection And Ranging）は、SMARTERプログラムの産物として英国で製造されている。

OPALは、波長1550nmで動作し、「OPAL P500」と「OPAL P1000」の2種類で提供されている。最大距離はそれぞれ500mと1000mである。OPALは、ソフトウエア開発キット「3DRI」と互換性がある。3DRIは、標的検出、追跡、分類のアプリケーシ

ョン開発のためのアルゴリズムライブラリである。データは、x、y、z、tの形式で提供され、強度も含む。このセンサは、電子海図情報表示装置(Electronic Chart Display and Information System：ECDIS)と電子海図装置(Electronic Chart System：ECS)に、簡単に組み込むことができる。

明示的に船舶を対象に設計されているこの欧州のセンサには、海洋表層を探査するための波長520nmの青緑色レーザが搭載されており、短波長によって、水線下をいくらか透視することができる。

LADARは、標的がどれだけ海面上に出ているかにもよるが、1ヤード(0.9m)から1海里(1852m)の距離から、物体の検出と分類を行うことができる。重要な追加機能は、没水または半没水状態の標的を、水深10m(濁度にもよるが約5.5ファゾム)まで確認できることである。アルゴリズムによって、処理結果を連続的に改善しながら、標的の検出と特性評価を行う。これは、時に船舶固有の具体的な動作条件に合わせて、システムを適応させるための重要なアセットである。

データは、x、y、z、tの形式で表示され、ECDISなどの現時点で搭載されている電子状況認識システムを使用して、その全体または一部を再現することができる。ECDISは、ほぼすべての商船に搭載されている。

今後の開発

次のステップの目的は、信号取得プロセスを改善することによって、センサの検出距離を延長することである。

どちらのシステムも、小型と中型の船舶に理想的な最大距離を備える。しかし、大型船舶に対しては、有効な場合もあるが、必ず有効というわけではない。重量と運動エネルギーが大きい船舶を停止させるには、かなりの時間が必要になる。緊急強制停止にさえも、5～10分の時間がかかる。2021年3月にスエズ運河で座礁して航路をふさいだエバー・ギブン号のように、理想的な条件下においても、適度な速度で運航している積載重量26万6000トン、全長400mのコンテナ船は、完全停止までに1海里以上の距離を必要とする[2]。

海峡または北極海航路上の多くの状況下で、障害物回避は実用可能な選択肢ではない。規模の経済性に基づき、より大型のコンテナ船やタンカーが双方向の貿易において好まれており、受信口径の拡大とセンサ感度の向上のいずれかまたは両方によって、センサの検出距離を1海里以上にまで延長することが不可欠となっている。

韓国国防科学研究所(Agency for Defense Development：ADD)のフジャン・ソン博士(Dr. Hujan Song)率いるチームは最近、ヘテロダイン検出機構を提案した。この機構は、パルス式ライダで試験済みである(**図2**)。同氏らは、この手法によって2770m(1.5海里)離れた場所の3D画像を、高いフレームレートで取得できる可能性を実証した。これは、将来の船舶センサの検出距離を大幅に改善するものである[3]。

「われわれのチームの目標は、コヒーレント検出またはシングルフォトンカウンタを使用して、ライダの検出距離を1000m以上にまで延長することである。その2つの機構の感度は同等だが、ダークカウントレートに起因して、シングルフォトン検出は誤検知が生じやすい。コヒーレント検出は、誤検知は少ないが、検出手法が非常に複雑であるためにコストが高くなる。受信信号を自由空間からシングルモードに結合する必要がある。アライメントが完璧でなければ、受信信号に大きな損失が生じる。また、コヒーレント検出の振幅は、標的が固定であるにもかかわらず、ランダムに変化する。これは、反射信号のスペックルに起因すると、われわれは考えている」とソン氏は述べている。

「コヒーレント検出を利用する場合、感度を著しく向上させることができるが、コスト、複雑さ、結合損失の検討が必要である」とソン氏は続けた。これらの技術の開発に対する投資には、回収の見込みがある。Fortune誌によると、2021年の世界海洋船舶市場の規模は1707億5000万ドルで、2028年には1885億7000万ドルにまで成長すると予測されるためである。商船には、19世紀の蒸気機関に匹敵する革命が起きつつある。

自動運航船、無人船、遠隔制御が、海洋上のフォトニクスにおけるこの革命を推進している。

注記

OPALは、加ネプテック・テクノロジーズ社の商標である。

参考文献

(1) J. C. Van den Heuvel et al., Proc. SPIE, 7323, 73230Y (2009); doi:10.1117/12.8184262.
(2) F. Wirz, Simulation und Optimierung des Notstopp-Manövers von Schiffen mitlangsamlaufenden Zweitaktmotoren und Festpropellern, Technische Universität Hamburg, ISBN 978-3-89220-654-5 (2011).
(3) H. Song et al., Rev. Sci. Instrum., 90, 125001 (2019); doi:10.1063/1.511390.

著者紹介

ヴィットリオ・リッペイ(Vittorio Lippay)は、英国物理学会(Institute of Physics)及び船舶仲立人協会(Institute of Chartered Shipbrokers)の会員。e-mail: vlippay@physics.org

LFWJ