狭隘環境条件における3次元船型形状の計測技術*

桐 谷 伸 夫** 山之内 博** 今 里 元 信***

Measurement Technology of Three-dimensional Shape of Ship at Ship in Narrow Space

By Nobuo KIRIYA, Hiroshi YAMANOUCI, Motonobu IMASATO

At the narrow space in the dry dock, it is extremely difficult to measure the three-dimensional (3-D) surface profiling of the ship. Therefore, the authors considered to draw on our knowledge and experience for the 3-D laser beam scanning equipment. Because the 3-D laser beam scanner is a three-dimensional noncontact surface profiling equipment, this is much help to the effective work for the measurement of 3-D shape on the ship with an ease never before possible. Furthermore, the latest in 3-D laser beam scanners are becoming increasingly cheaper and more powerful.

In this case, we had to use the 3-D laser beam scanner at the narrow space in the dry dock. Therefore, we adopted the way which is the measurement of 3-D surface profiling of the ship at the ground points on the parallel line to the keel line. This is an effective work procedure to get the information of the 3-D surface profiling of the ship.

1. はじめに

通常の造船工程においては、基本設計の段階を経て船体線図や中央断面、一般配置図が作成され、船型等が明らかとなる。すなわち、これらの図面によって船型が決められ、記録されることから、図面を精査することによって、その形状を知ることが容易である。換言するならば、基本設計の出力結果である図面類が無い場合に船体形状を知るためには、直接的に対象船舶の船型形状を計測することが必要となる。そこで、このような状況で船型形状を明らかにすることを求められた事例での技術的なアプローチ手法を示した。

既存船舶の形状計測には、当然のことながら3次元計測が求められる。机上において計測が可能な程度の大きさの対象物であれば、接触あるいは非接触方式の3次元測定機器が種々提案されており、比較的容易に計測することが可能である。しかし既存船舶の3次元形状を計測するとなると、乾ドックにおいて船台上に置かれた状態での船体の計測が必然となる。従って、計測者の立場から見ると、狭く自由度のないスペースでの作業実施が求められている。

乾ドック内のような狭隘な作業環境での3次元形状計測の手段として、スキャナー機能付きの3次元レーザ計測装置の活用を提案し、その実用的な活用方法と計測技術の実際を報告する。

3次元レーザースキャナー装置は非接触での3次元形状計測機器として、ひじょうに有用であるが、かつてはひじょうに高価であることや高い精度が容易に得られないなどの短所があった。しかし最新機では大型対象物に対してミリレベルの計測精度を持つ機器の汎用化や低価格化が実現されており、3次元形状計測の場面において有効な手段となっている。

本報告は、乾ドック内にある既存船舶の3次元形状を非接触3次元レーザースキャナー装置によって計測する技術の事例を示したものであり、狭隘計測環境条件下での実用的な応用計測技術を明らかにした。

2. 3次元レーザースキャナー装置

図1 3次元レーザースキャナー装置外観

*原稿受付 平成22年6月14日。
**正会員 海上技術安全研究所（三鷹市新川6-38-1）。
*** 海上技術安全研究所（三鷹市新川6-38-1）。

図2 乾ドック内での計測作業の状況

図3 計測結果の3次元データ表示画像

2. 1 レーザースキャナー装置概要 図1に計測に使用した3次元レーザースキャナー装置を示し、表1にその機能仕様¹⁾を示した。本機は、レーザー距離測定器と2軸のビームスキャニング機構によって構成された正確な距離測定を実行する表面イメージングシステムと位置付けられる。

計測原理としては表1に示すように、機器内部に組み込まれたレーザーダイオードから発射された近赤外線波長 ($0.9\mu\text{m}$) のレーザー光が対象物に当たり、散乱光がフォトダイオードに受光されるまでの時間、この飛行時間を精密測定して、本機と観測対象物との距離を得るものである。このような測距データは基本的には1次元的な情報であるが、本機の場合、回転するポリゴンミラーによってレーザービームの上下縦方向のスキャニングを実行し、同時にポリゴンミラーが格納された機器ヘッド部自体を回転させることによって、左右横方向のスキャニングを実行している。この結果、

表1 3次元レーザースキャナー装置の仕様

測定原理	単発レーザー光 飛行時間測定
測定距離 ①プリズム使用 ②自然物のターゲット $p > 80\%$ (p = 反射率) ③自然物のターゲット $p > 10\%$	25 mm 分解能で 350 m 25 mm 分解能で 350 m 150 m まで
最短距離	標準 2m
測定精度 (1σ 標準偏差)	$\pm 25\text{ mm}$
レーザー波長	$0.9\mu\text{m}$
レーザー光の 広がり角度	Approx. 3mrad (1mrad : 100mの距離で 10cmのビーム幅に相当)

観測された対象点の位置情報は計測器を原点とした3次元空間における位置座標として出力される。なお本機におけるスキャニング範囲は、上下角 $\pm 40^\circ$ 、回転角 $0^\circ \sim 333^\circ$ である。

図2には3次元レーザースキャナー装置を使った乾ドック内での実船舶の形状計測作業の実施状況を示し、図3に計測結果の3次元点データを使って計測対象船の形状を視点の移動を加えて表示した。このように3次元レーザースキャナー装置を使うことによって、対象物の形状を正確に計測することが可能である。しかし当然のことながら、直線的に飛ぶレーザービームが届かない隠れ面やビームと計測面との角度が浅い場合には散乱光を得られないことから、データの取得は不可である。

表1に示したように今回使用した3次元レーザースキャナー装置は既存品のいわば旧型でもあることから、その測定精度は $\pm 25\text{ mm}$ となっている。船型形状計測において、これは決して充分利用可能な精度にはなっていないが、その対策として海上技術安全研究所では同一点複数測定による平均化処理に基づく補正技術や測定面上での一次元あるいは二次元位置補正による処理技術が開発^{2,3)}されており、見かけ上の精度を $\pm 5\text{ mm}$ 程度に高めることが可能となっている。

2. 2 レーザースキャナー装置の精度検証と補正技術

前述したように今回使用した3次元レーザースキャナー装置は旧型機でもあり、その精度は決して高くない。そこで、その精度検証と向上を目的として、予備計測実験を事前実施した。

精度検証実験は、図4に示すように室内において距

図4 精度検証計測実験の概要

図5 レーザービームの受光状況

離5 m離れ、平表面を持つアルミ製テスト部材をターゲットとして実施した。この時、3次元レーザースキャナー装置より発射されたレーザービームは、図5に示したように約1.5 cmの直径で受光面であるターゲット表面に当たっていると、仕様に基づく計算によって推定される。また、この距離条件ではビームスキャン機構によって約0.6 cm間隔(図5のd)で縦及び横方向に走査されている。このようにして計測されたターゲット表面の各測定点は、3次元レーザースキャナー装置内部に設定された原点を基にXYZ軸値によって3次元空間座標を持つことになり、その位置が明らかになる。

図4による計測実験の結果を整理して、図6に示した。これは、縦方向にミラースキャンされたターゲットの表面の計測結果を示したものであり、実測された観測点の高さデータを基準表面からの変位として表示した。表1に示したように基本機能仕様として、本機は $\pm 25 \text{ mm}$ の測定精度を持っているが、ここで真値

図6 計測結果(1回計測値)

図7 計測結果(25回及び50回計測平均値)

との隔たりを評価するならば、図6より、表面高さの平均値は0.03 mm、その標準偏差: σ は約25 mmとなっている。従って、計測性能は本機の基本機能仕様に整合したものであることが明らかとなった。しかし、25 mmの標準偏差を持つデータは、船型形状の情報としては決して満足できるものではない。そこで、精度向上のための補正処理手法の検証を実施した。このような精度向上への手段としては種々の方法が考えられるが、ここでは同一箇所への複数回測定を実行し、平均値を得ることを検証した。

図7に示した結果は、縦方向のミラースキャンを25回と50回実施して、その平均値を求めたものである。検証実験の結果、25回計測の表面高さの標準偏差: σ は6.95 mm。また、50回計測の表面高さの標準偏差は6.00 mmとなった。すなわち、複数回測定の平均値を採用することによって、見かけ上の精度は約5倍程度向上できることが明らかとなった。

当然のことながら、精度向上のための処理としては、ここで示したような複数回測定による平均化処理だけでなく、ライン方向での移動平均処理や横軸方向のスキャン結果も取り入れた平面補正での処理も有効と考

図8 計測位置の決定

えられるが、現場での作業手順を考慮し、より効率的で効果的な手段として複数回測定を優先している。

3. 船型形状計測作業実施計画の策定

3. 1 計測位置の決定 対象船舶の船型形状を明らかにすることを目的として、3次元レーザースキャナ装置を用いて指定位置での船殻外形形状を計測したが、今回対象とした船舶は全長 (L_{OA}) 22.15m、幅 5.50m であることから、図8に示すように SS (Square Section)⁴⁾ だけでなく、全 15 ケ所を計測位置と定めて計測作業計画を立案した。特に船首船尾部での形状の変化が大きいことから、粗密の強弱を付けてより正確に船型形状が把握できるように努めた結果である。なお、対象船の垂線間長 (L_{pp}) は 20.00m であった。

3. 2 計測手順の決定 図8に示したような多数の計測位置であっても、対象船舶に正対して充分な距離 (350m以内程度) を取ることができれば、3次元レーザースキャナ装置の性能上は1回のスキャンで網羅することが可能であり、全データの取得ができる。しかし、今回の計測は乾ドックの中で行うことが条件付けられており、見通しでの計測では図2のような状態に限定されている。そこで、本計測では図9に示すようにキールラインに対して平行に3次元レーザースキャナ装置の移動ラインを設定し、15ヶ所の計測位置毎に移動して計測することを実施した。その手順を整理して以下に示す。

- ① 船体中央船首端・船尾端より振り下げを降ろし、ドック床面上にキールライン・ L_{OA} を設定。
- ② ①のラインと並行にドック壁近く、可能な限り離す条件で3次元レーザースキャナ装置の移動ラインを設定。
- ③ ②のラインに決定された計測位置をマーキング。
- ④ ③位置に装置を移動。
- ⑤ 計測作業実施。

図9 計測手順の概要

⑥ ④と⑤を順次実施して計測を完了。

このように本計測では、いわば尺取り虫的な移動計測を繰り返すことによって、船体形状の観測を実施した。これは十分に洗練された効率的な計測手法とはいえないものではあるが、限られた空間条件の中での最善手と考えられる。

計測手順において重要なことは、キールラインに平行に移動ラインを設定すること、装置の向きを移動ライン上で一定に保つ、この2点と指摘できる。特に、移動ライン上で装置の向きを一定に保つことは、現場作業において容易なことではないが、計測精度を十分に担保するためには必須の要件と考えられることから、各種測量機器の活用によって解決することが重要である。本計測においては、試みとしてブルワーク上端より計測位置毎に振り下げを下ろして計測点目標とすることも考慮したが、これは計測精度の向上には有効であるも、作業量が増大する結果であった。

このように精密で効率的な計測を実現するためには計測手順④に示した移動ライン上での3次元レーザースキャナ装置の設置が最も重要な要点となっている。すなわち、装置位置と移動ラインとが常に一定の位置・角度関係に保たれている必要があるからである。

そこで前述のように、位置関係を検証するためのガイドやレーザー墨出し器を活用することで、その課題を解決することに努めた。

4. 計測実施結果

今回の計測において、対象とした船舶は長さ約22mで幅は5.5mであり、作業を実施したドックの幅は約15mであった。従って、計測のために確保できた足場面積はおおよそ長さ40m幅5m程度のものであった。しかし現実にはドック壁際まで使うことは不可であり、さらに限られた空間での計測作業実施が求められる状況となっていた。

設定された3次元レーザースキャナー装置移動ラインは、キールラインより平行に5.56m離れた位置に設けられた。これは極めて至近での計測状況であり、使用した機材の性能限界にも近い条件となっている。このような計測環境条件のもと、3.2節に示した手順に従って計測した結果を船舶の3次元形状情報を画像として図10及び11に示した。

本計測で目的としていることは、図8に示した計測位置における形状計測であることから、縦方向のミラースキャニングのみの実行でも良いと考えられるが、データ補正追加の可能性や今後のデータ利用を考慮して、横方向のスキヤニングも狭い範囲で実行した。

図10には船首部の3次元計測結果を示し、図11には船尾部の計測結果を示した。いずれも得られた計測点各々の3次元位置情報を用いて3次元画像として表示したものである。キールラインに平行な移動ライン上より直角方向に計測していることから、計測される点は、見通し条件としてキールラインが船体表面上の

最遠点となっている。従って、キールラインより遠方情報となる背景情報をデータ内より削除することによって、船体表面形状に限定した3次元情報にまとめることが可能となり、船体のみを表示できている。

図10 船首部の3次元計測結果画像

図11 船尾部の3次元計測結果画像

図12 計測結果に基づく対象船舶のボディプラン線図

図13 計測対象船舶全体の3次元計測結果合成画像

図10及び11として得られた船体表面形状3次元位置情報は、図8において指定された計測位置と直接的に連携していることから、それぞれでの位置での縦方向のラインプロファイル・データを与えるものとなっている。それらのラインプロファイルをまとめて整理したものが、図12に示した対象船舶のボディプラン線図である。このようにして、3次元レーザースキャナ装置を活用して船型形状が明らかにされた。

図13は、例えば図10及び11に示したような部分船体表面3次元形状データを合成することによって生成された対象船舶全体の3次元モデルである。

本計測は限られたスペースで3次元計測を実施することが主目的であったため、甲板上構造物などの形状情報が不完全であるが、複数位置からの計測に基づく形状情報を用意することができれば、船一隻丸ごとの3次元モデリングも充分に可能であることが明らかである。また、船体片側の情報のみであっても、それを基にして反対側の情報を反転コピー生成して左右両舷を持つ船体モデルを構築することも可能である。

5. まとめ

建造後に船舶の外形、船型形状データを実物から詳細数値情報として得ることはひじょうに困難な作業となる。それは、船舶自体が大きな構造物であることや全体形状が現れるのは乾ドックの中でのみであることなどに起因する。しかしながら時に図面からでなく、実物の計測に基づいた詳細外形形状の数値情報が必要となった場合には、本計測作業で実施した手順がひとつのアプローチになるものと考えられる。

狭隘な作業環境での3次元形状計測を効率的に実施

するための解決策として、本報告が示したノウハウや応用技術としての可能性は、実利的な見地において重要と考えられる。

謝 辞

本報告は、国土交通省運輸安全委員会よりの請負解析調査の一環として海上技術安全研究所が実施した作業の一部を船舶所有者の了解を得てとりまとめたものであり、ご指導を頂いた運輸安全委員会各位に深く謝意を表します。また計測作業の実施にあたり、ご厚情とご配慮を頂いた(株)ダイゾー関係者各位にも心よりの謝意を表します。

参考文献

- 1) リーグルジャパンHP, 3D Imaging Sensor LMS-Z210, <http://www.riegl-japan.co.jp/>
- 2) 山之内ほか2名, 海技研講, 第8回講集, (平成20-6), 271-272
- 3) 山之内ほか2名, 可視化情報シンポ, 可視化講 Vol. 28 No. 1, (平成20-7), 341-342
- 4) 野澤, 船・この巨大で力強い輸送システム, (平成18-9), 135-142