

バーチャル木型による曲がり外板加工方案生成手法の開発

47116705 孫 晶鈺

指導教員 稗方 和夫 准教授

An approach of generating the curved shell plates' processing method using virtual template is discussed. First, to extract the curved shell plates from the point cloud obtained from laser scanner which include obstacles, an automatic efficient curved shell plate extraction engine is proposed. Also, the flow of the measurement and analysis is totally automated by an automation engine for ease of use by workers. On the basis of efficient data measurement, by virtualizing the templates of curved shell plate, the processing plan is automatically generated by comparing the measured curved shell plate and virtual template. Then the practical processing plan is finally generated through the worker's revision to automatically generated plan based on the template review in virtual environment.

Key words: laser scanner, curved shell plate, virtual template, B-spline curve fitting, Lagrange, ICP

1 緒言

造船所における船首尾を構成する曲がり外板の加工方案の設計、すなわち、ぎょう鉄と呼ばれる曲がり外板を加工するための手続きの決定は、曲がり外板のフレーム線ごとに木型を板の上に固定して行う目視確認の結果に基づいて属人的に行われている。なお、木型とは設計データから作成される底辺と棒からなる曲がり外板の曲面形状を評価するテンプレートである。このように、属人的な目視確認結果に基づく加工方案設計に必要なパラメータ（木型間の角度、板とのずれの程度など）は定量的に計測できない。また、作業者によって設計される加工方案には個人差があり、仕上がりのばらつきが生じることがあるといった問題が存在する。

本研究では、バーチャル木型による曲がり外板加工方案の生成手法を提案する。熟練職人の経験と勘によって行われている曲がり外板加工方案の設計を、レーザスキャナによる曲がり外板の 3 次元計測データと船舶の設計データから生成されるバーチャル木型から自動で行う手法を開発する。さらに、自動生成された加工方案の妥当性をバーチャル木型による目視確認環境で熟練職人により評価を行う。

2 提案システム

2.1 システム概要

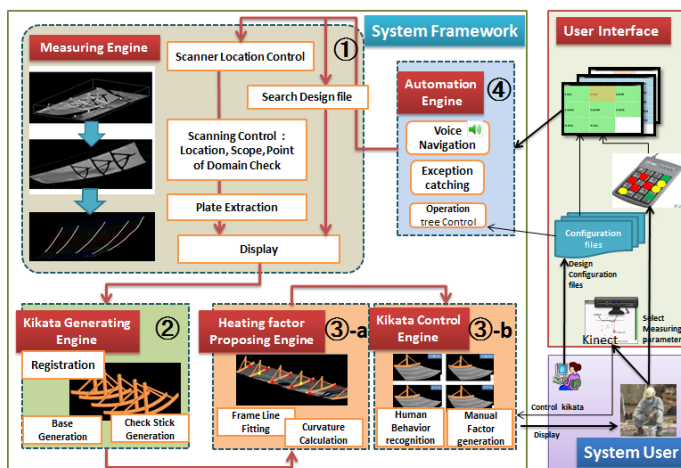


Fig. 1 System overview

本研究で開発したシステム図を Fig. 1 に示す。本シ

テムは大きく分けて①外板抽出エンジン、②バーチャル木型生成エンジン、③-a 加工方案自動生成エンジン、③-b バーチャル木型コントロール・確認エンジン、④自動化エンジンの 4 つのエンジンと自動化パラメータ入力インターフェイスからなる。

2.2 外板抽出エンジン

レーザスキャナで取得した外板データには、地面や木型の影、作業中の水など多数の障害物も同時に含まれてしまうため、Fig. 2 のようにこれら不規則な障害物を取り除き、自動的に外板部分だけを取り出せるエンジンを開発した。詳細を以下に述べる。

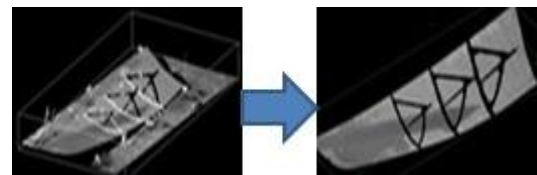


Fig. 2 Curved Shell Plate's Extraction

まずは、Fig. 3 のように外板の任意の一点 P_{start} を起点とし、計測データが連続する領域 A を平面フィッティングにより得る。Kalogerakis のエッジ検出手法¹⁾により端部の点列を領域 A のエッジとして抽出する。

次に、各エッジの点ごとに近傍点を算出し、四次曲面フィッティングと断面 B-Spline 曲線フィッティング²⁾により、共通領域判定を行う。

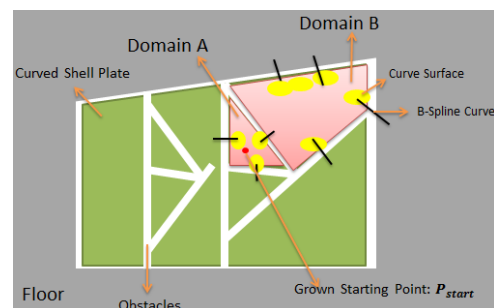


Fig. 3 Obstacle Overstriding

そして、既知連続領域のエッジで部分的に 4 次曲面フィッティングを行う。領域 A のエッジ P_{edge} の近傍点の中で同一曲面方程式と判断される点の集合 $P(P_1, \dots, P_n)$ を抽出する。

最後に、 P の点 P_i と点 P_{edge} を通る領域 A の点群に対し

て断面 B-Spline 曲線フィッティング²⁾を行う。フィッティングした B-Spline 曲線と実際に計測した断面の点群線を比較することによって、新しい領域 B を認識する。

以上のプロセスを繰り返し行うことで、障害物を除いた外板全体のデータを抽出可能である。

2.3 バーチャル木型生成エンジン

本研究では、曲がり外板の設計曲面形状の 3 次元座標から木型の底面情報を生成し、さらに上代表平面と見透し平面をバーチャル上に生成することによって、バーチャル木型を生成する。詳細を以下に述べる。

2.3.1 底辺の生成

木型の底辺を生成する際は、Lagrange 補間法を用いて離散的な設計フレーム点を曲線フィッティングすることにより、設計フレームの各点を通る木型の底面を取得する。

2.3.2 上代表平面の生成

木型の見透し棒を生成するために、上代表平面を生成する必要がある。

まず、Fig. 4 の i 番目の木型底辺中央の点 p_{mi} の単位法線ベクトルを v_i とする。各フレームの v_i を足し合わせ、正規化したものを一定の距離 H と掛け合わせて、 Hv' とする。

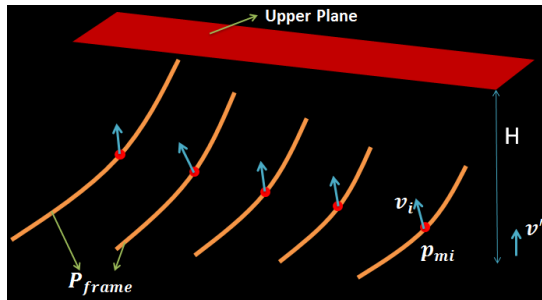


Fig. 4 Upper Plane's generation

次に、外板のフレーム点群 P_{frame} に対して最小二乗法で平面フィッティングを行い、 Hv' を用いて得られた平面を移動することにより、木型組の上代表平面を生成する。

2.3.3 見透し平面の生成

現在の曲面形状の評価では、見透し平面を基準として木型の位置を決定し、曲がり外板の精度を評価する。

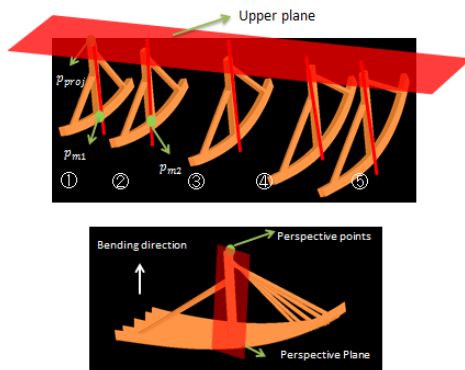


Fig. 5 Perspective Plane's generation

ここでは、Fig. 5 の上のように 1 号フレーム線の中点 p_{m1} を上代表平面に投影し、対応の投影点 p_{proj} が得られ、その二点と、2 号フレーム線中点 p_{m2} 、三点で定義される平面を見透し平面として算出する。

最後に、すべてのフレームで見透し平面が一致するようにバーチャル木型を計算機上で描画する。生成されたバーチャル木型は Fig. 5 の下のように本物の木型と同様に見透しの確認を行える。

2.4 加工方案自動生成エンジン

従来の属人的に行っている曲がり外板加工方案設計プロセスをバーチャル上に自動で再現するために、曲がり外板の 3 次元計測データとバーチャル木型を用いて加工方案を自動で設計するエンジンを開発した。ここでは Fig. 6 に示した加工方案自動生成について説明する。

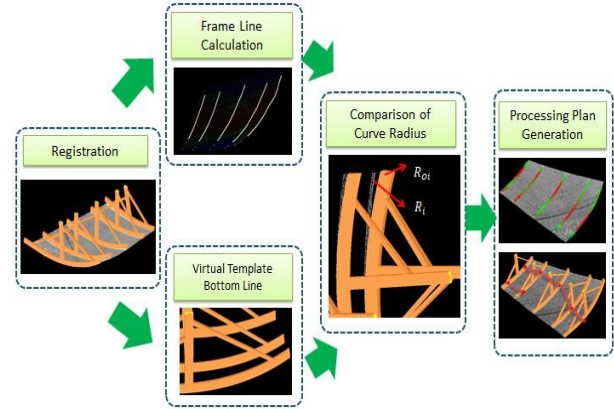


Fig. 6 Automatic generation of processing plan

まず、ICP アルゴリズム³⁾を用いてバーチャル木型と外板計測点群データの位置合わせを行う。

次に、計測フレーム線が離散的な点群であるため、B-spline 曲線²⁾を用い、計測フレーム点群を曲線にフィッティングする。

最後に、フレーム線ごとに、フレーム各点の所要収縮量を求める。曲がり外板の計測フレーム線の断面と木型の底辺を Fig. 7 に示す。 H_p はこのフレーム線の位置の板厚である。Fig. 7 のように曲がり外板加工完了状態の上表面の $1/n$ の領域に注目する。ぎょう鉄の塑性変形は、点 P_i に熱を加えると、曲がり外板の点 P_i 箇所の上表面の長さ l_i が収縮、下表面が膨張、点線で表示される中性軸の長さ l'_i は変わらない特性を利用する変形である。

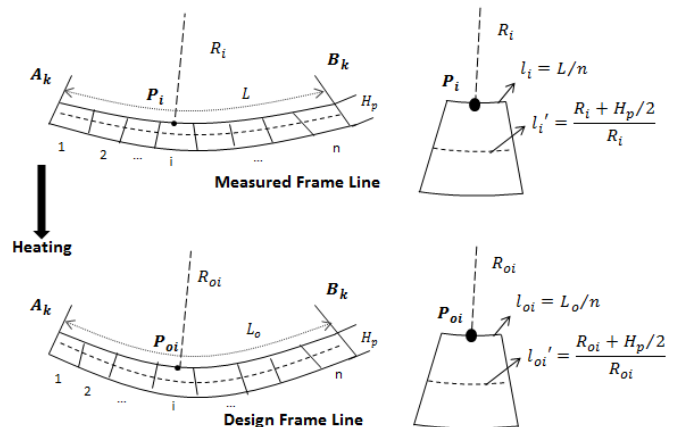


Fig. 7 Processing plan(heating line)

よって、設計形状になるまで、つまり $l_i = l_{oi}$ になるまで点 P_i に熱を加える。修正作業に必要な外板の表面収縮は式

(1)となり、式(2)を用いて1つのフレーム線の各点の所要加熱量の基準となる値を算出する。

$$\Delta l_i = l_i - l_{oi} = \frac{(R_i - R_{oi}) \times \frac{H_p}{2}}{R_i \times (R_{oi} + \frac{H_p}{2})} \times l_i \quad (1)$$

$$\mu = \frac{(R_i - R_{oi}) \times \frac{H_p}{2}}{R_i \times (R_{oi} + \frac{H_p}{2})} > \varepsilon_{thresh} \quad (2)$$

加熱線はFig. 8のように隣接するフレーム線の μ 値が閾値を超える点 $P_{k,i}$ と $P_{k+1,j}$ の間に配置し、計算機上で加工方案を出力する。

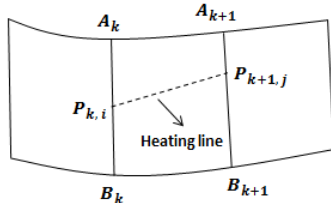


Fig. 8 Extraction of curved shell plate A

2.5 バーチャル木型コントロール・確認エンジン

現在の曲がり外板加工方案設計プロセスでは、特定の木型に注目して、外板の形状が正しいかどうかを確認している。本システム上で、現行のプロセスを再現するために、バーチャル木型を自由に動かして確認できるエンジンを開発した。具体的には、木型の底面と計測のフレーム線の一部分について、ICPを用いて位置合わせを行うことで、バーチャル木型を外板フレーム上の任意の位置に置くことができる。

また、このエンジンを用いてバーチャル木型を手動で操作することで、現在の現場と同じ方法で加工方案を生成することも可能である。現場では、Fig. 9のように見透し平面が成立する位置にフレーム線上のバーチャル木型を移動させ、曲がり外板と木型底辺の接する点の間を加熱線としている。

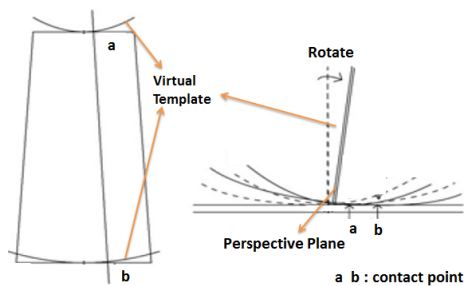


Fig. 9 Manual generation of processing plan⁴⁾

2.6 計測・分析フローの自動化エンジン

計測・分析フローの自動化エンジンはオペレーションシステムの機能を使って、システム操作コマンドを人間の代わりに送ることにより、システムとレーザスキャナのコントロールの検知を行う。

3 ケーススタディ

3.1 ケーススタディ概要

曲がり外板加工方案生成システムの基本性能の評価と

して、以下の項目の評価を行う。

- ① 外板抽出エンジンの性能
- ② バーチャル木型による加工方案生成手法の有効性
- ③ 自動化エンジンの有効性

3.2 外板抽出エンジンの性能評価

Fig. 10に示した木型をあてがってから計測した多数の障害物を含む外板 A の点群データから、外板の部分だけを抽出することを目的とする。

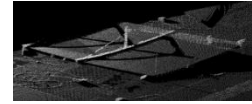


Fig. 10 Curved shell plate A with noise

Fig. 11 (上)のように逐次領域成長分のエッジを検出し、計測データが不連続な障害物周辺の点を同じ小領域に存在すると、繰り返して領域成長を行う。毎回のエッジ検出の時間として8万点のデータに約10秒かかる。

単純な領域成長法では、手動で繰り返して小領域を順次に抽出して統合するには9分かかった。本手法では、1分間程度で、Fig. 11 (下)のように外板全体を自動的に抽出した。

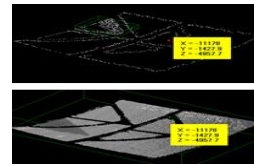


Fig. 11 Extraction of curved shell plate A

3.3 バーチャル木型による加工方案生成手法の評価

3.3.1 加工方案の自動生成

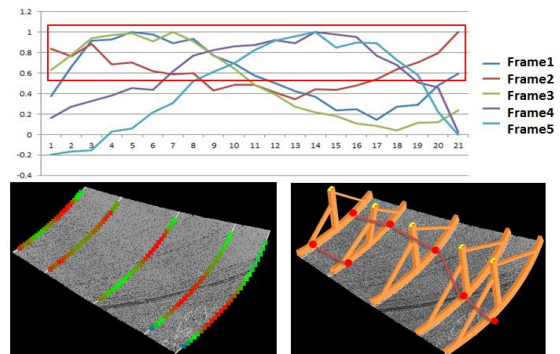


Fig. 12 Automatically generated processing plan

曲がり外板 B の5つのフレーム線を対象とし、生成したバーチャル木型により計算したフレーム線の対応代表点の設計データと計測データ間の μ 値をFig. 12(上)に示した。横軸は木型の底面方向であり、縦軸は μ 値である。 μ 値0.5以上の点が曲がり不足の点であり、修正加熱が必要であると判断される。

曲率誤差のカラーマップをFig. 12(左下)に示す。赤が曲がり不足の部分を示す。加熱線を隣接フレームの μ 値が

閾値を超える位置の間に Fig. 12(右下)のように配置する。

3.3.2 バーチャル木型による加工方案生成手法の評価

Fig. 13 のように、工場での曲がり外板の加工中に計測した曲がり外板データを用いて加工方案自動生成の検証を行なった。具体的には、現場の作業者が行なったプロセス(Fig. 13 右)の4つのステップ(②プレス後の曲がり修正加熱、③縦曲がり表面加熱、⑤反転後の裏面加熱、⑦再度反転後の表面加熱)で発生した27回の加工作業ごとに、焼く前の曲がり外板の点群データを計測し、本システムを用いて加工方案を生成する。生成した加工方案と、実際に採用された加工方案を比較することで、本システムによって提案された加工方案生成手法の妥当性を確認する。

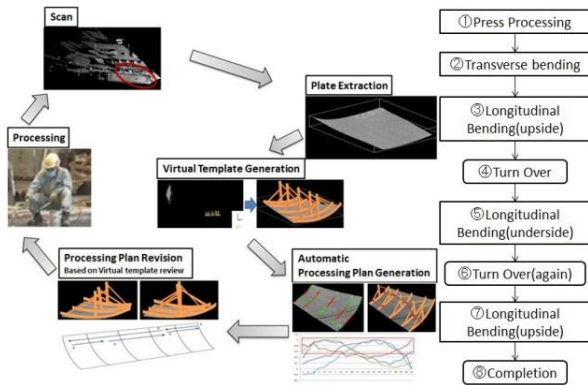


Fig. 13 Processing flow with virtual template

Fig. 14 に本システムを用いて自動生成した加工方案(左)と作業員が実際に作成した加工方案(右)を示す。加熱線の配置箇所がほぼ一致していたことを確認できた。

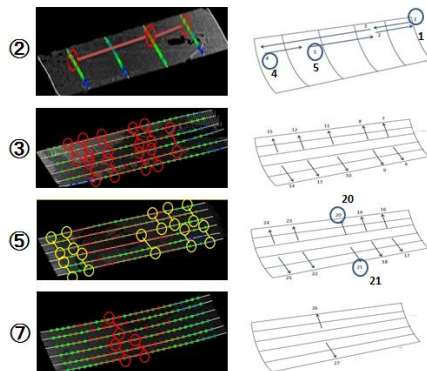


Fig. 14 Automatically generated and practical plan

また、自動生成された加工方案とは異なっていた Fig. 14 の1,4,5の加熱線は作業員が意図した妥当な加工方案であることをバーチャル木型コントロール・確認エンジンで確認した。

以上より、開発した加工方案生成システムは曲がり外板加工方案生成の自動化と検証を行えることを確認できた。

3.4 計測・分析フローの自動化

本研究で開発した自動化エンジンを取り込んで、住友重機械マリンエンジニアリング横須賀工場で外板精度評価システムの全自動化実験を行った。ユーザインタフェースを単純化するなどの工夫を行なうことで、すべての計測・分析作業を自動化でき、実運用を行えるシステムであることを確認できた。

4 考察

自動生成された加工方案と実際に行なわれた加工方案との違いについて検証するために、ぎょう鉄作業員へのインタビュー調査を行った。以下に得られた知見をまとめる。

(1) 修正加工を行うには、曲率誤差が大きい点を結ぶだけでなく、ローラー線に沿って加工する習慣がある。例えば、Fig. 14の加熱線1,4,5について、自動生成加熱線の箇所と平行な2つの直線で修正加熱を行った。

(2) 強く加熱したためにこぶ(局所的な凹凸)が発生した場合、裏面から同じ箇所に修正加熱が必要になる。例えば、⑤反転後の裏面加熱のステップでは、こぶのところを直すために、曲率誤差が大きい点の間(Fig. 14の加熱線20と21)に線状加熱を行った。

5 結言

本研究では、曲がり外板加工方案設計プロセスにおいて、レーザスキャナで計測した曲がり外板の3次元形状と曲がり外板の設計データから生成されたバーチャル木型を用いて、熟練職人の経験と勘によって行われている曲がり外板加工方案の設計を自動で行う手法を開発した。さらに、バーチャル木型を用いて自動生成された加工方案の妥当性を熟練職人により評価した。

実際の造船所でのケーススタディを通して、障害物を含む曲がり外板の計測データに対して開発した外板抽出エンジンがノイズを含む外板の計測データを正しく抽出できることを確認した。さらに、開発したシステムによって自動で生成した加工方案と曲がり外板の加工プロセスでの加工作業方案とを比べ、それらが一致していることを確認し、システムの有効性が検証された。また、システムが生成した加工方案と実際の加工方案との違いから、現場固有の作業の習慣が知見として得られた。これらにより、開発した手法の有効性が確認された。

今後は、提案手法の造船現場への適用が求められるために、開発システムの実用性とロバスト性を向上させると共に、曲がり外板加工方案設計プロセスの暗黙知を抽出し、開発手法に取り組み、更なる実用性の高い加工方案を自動生成できることを目指す。

文献

- 1) Evangelos Kalogerakis, Derek Nowrouzezahrai, Patricio Simari, Karan Singh: Extracting lines of curvature from noisy point clouds, Computer-Aided Design 41
- 2) E Catmull, J Clark: Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes, Computer-aided design, 1978
- 3) Okuda H., Hashimoto M., Kitaaki Y., Kaneko S.: 'Fast and High-precision 3-D Registration Algorithm using Hierarchical M-ICP', The Institute of Electronics, Information and communication engineers, Technical Report of IEICE, PRMU2003-54, pp1-8, 2004
- 4) 松岡一祥、砂川祐一、田中義照、富沢茂、高木英治、浅利栄二: ぎょう鉄作業と曲面の展開、海上技術安全研究所報告 4(3), 392, 2004-08-01