多関節型ロボットによる船舶用プロペラの翼面形状の自動計測および機械加工*

山根八洲男** 尹 榮生*** 三宅正幸† 鳴瀧則彦**

Measuring and Cutting a Propeller for a Ship by an Articulated Robot

Yasuo YAMANE, Rong Sheng YIN, Masayuki MIYAKE and Norihiko NARUTAKI

An articulated robot is used for measuring and cutting a propeller for a ship. The measuring system for the profile of the propeller consists of an articulated robot, a laser type displacement sensor which is attached to the wrist of the robot, a rotary table which turn the propeller, and a personal computer. The sensor, the robot and the rotary table are controlled by the computer automatically. In the cutting operation, several cutting conditions were tried, because of the low stiffness of the robot. Consequently, it has been cleared that up cut milling with the side milling cutter is the best way of milling by the robot. Therefore, the side milling cutter, rotated by a flexible shaft, is attached to the wrist of the robot. In order to determine the part to be cut, a surface profile of a cast propeller is measured by the system described above; then the data thus obtained is compared to the design data of the propeller.

Key words: propeller, robot, automatic measuring system, laser, milling

1. はじめに

船舶用プロペラは特殊なものを除き典型的な多品種少量生産品であり、通常、鋳造後同時5軸以上のNC加工機による翼面の機械加工の後、人手による手持ちのグラインダあるいはカッタでのNC加工時のピックフィードマークの除去、さらに翼面全体の磨き加工を経て製品となる。また、NC機による加工が経済的に困難な小型のプロペラについては、鋳造後直接人手による切削・研削加工もなされている。さらに、NC機による加工についても、鋳造品と設計値との比較による基準面の設定、あるいは削り代の決定等人手のかかる作業が多く存在する。

本研究は、このように人手に頼る割合の多いプロペラ翼面の機械加工へ、設測も含めて、多関節型ロボットの適用を試みた。実験では、素材と設計データが与えられれば、ロボットにより素材を自動計測し、設計データとの比較を行い削り代を自動的に算出、ロボットにより加工する、というシステムを目指した。計

測、加工を一貫して行うシステムについては、マシンングセンタを利用したシステムが提案されているが、加工を目的とした工作機械上で計測を行うことは、本研究が対象としているような小型プロペラでは工作機械のランニングコストからして経済的に困難である。

なお、産業用ロボットを利用した機械加工としては、バリ取り¹⁾やきさげ作業²⁾³⁾あるいは研磨作業⁴⁾への応用例が示されているが、本研究のような繰返しへの衝撃力が加わる断続切削へのロボットの適用はあまり例を見ない。本来、工具、工作物、機械を含めた総合剛性が重要視される切削加工に低剛性のロボットを用いることに対しては疑問視される向きも多いが、現実問題として工作機械の使用が困難な場合は、汎用性、自由度、経済性に優れたロボットの使用は、有効な解決策の一つと考えられる。なお、低剛性のロボットを加工に用いることから、本研究ではいかに切削抵抗の少ない加工条件を選定するかに注意を払った。

また、船舶用プロペラは形状精度(通常 ± 0.1 mm)よりもむしろ表面粗さが重視される点も工作機械に比べ剛性および精度が大きく劣る多関節型ロボットによる計測・加工を試みた理由の1つである。

2. プロペラ翼面形状の自動計測

プロペラ翼面の加工を自動化しようとする場合、素

* 原稿受付 平成3年1月25日、1990年度精密工学会秋季大会学術講演会(平成2年9月28日)にて発表

** 正会員 広島大学工学部(東広島市鏡山1-4-1)

*** 学生会員 広島大学工学部(現、(株)鷺宮製作所; 狭山市笹井535)

† 中島プロペラ(株)(岡山市上道北方688-1)

Fig. 1 Experimental setup for the measurement of a propeller's profile

材の形状の把握がまず必要となる。ただし、通常、素材は鋳肌面であることから高精度の計測は必ずしも必要ではない。そこで本研究では、ロボットによるレーザ変位計を用いた非接触計測を試みた。

プロペラは円筒座標系で表示出来ることから、翼面形状の計測では、翼面上の各点について、回転角 θ 、中心からの距離 r および基準面からの高さ H を測定すれば良い。

図1にプロペラ翼面形状の自動計測システムを示す。システムは、多関節型ロボット (ASEA IR 60/2)、レーザ変位計 (アンリツ KL 137 A)、ロータリーテーブル (酒巻 SNC 200 R)、ロータリーエンコーダ (IHI RH-2500-05) およびパーソナルコンピュータ (NEC PC-9801) で構成されている。実験に使用したロボットは5自由度を持つ汎用多関節型で、RS-232 C インタフェースを介してパーソナルコンピュータにより制御されている。繰返し位置決め精度と絶対位置決め精度は無負荷の状態では $\pm 0.1 \text{ mm}$ (実測値) であった。レーザ変位計は測定面からの反射散乱光を計測するタイプのもので、測定範囲 80 mm、繰返し精度 $\pm 24 \mu\text{m}$ (平均回数 1 回の場合)、応答周波数 4 kHz である。

計測は、回転角 θ についてはプロペラと同軸のアダプタの先端に取り付けられたロータリーエンコーダにより、中心からの距離 r についてはロボットの手首の座標から、また、基準面からの高さ H については手首の Z 座標およびレーザ変位計の読みから求めた。

なお、実験に使用したレーザ変位計の測定範囲が 80 mm と短いため、大きいピッチ (Z 軸方向に大きな値を持つ) のプロペラを測定する場合は、パソコンの判断によりプロペラの回転を一時的に止め、ロボットの手首を下げて測定を行った。

Fig. 2 Calculated depth of cut

本測定システムは $\pm 0.1 \text{ mm}$ の精度 (ロボットの位置決め精度の実測値) で 1 時間約 10 万点の測定が可能である。実験では、直径 800 mm、ピッチ 700 mm、3 枚翼面のプロペラを半径方向 10 mm の間隔で測定した。

測定したデータは以下のような手順で処理を行った。

- ① プロペラ翼面の連続性からの各翼面の輪郭の座標を求め (面貼り)、翼面のデータを半径ごとに円筒座標で整理する。
- ② プロペラの設計図面は翼面の展開図として与えられているので、これを円筒座標系に変換する。
- ③ 未加工の翼面の測定結果と設計値との差を求めることにより、プロペラの加工量を求める。図2に結果の一例を示す。図は翼面の展開図で、ハッチングの部分が切込み量に相当する。
- ④ 以上の形状データはプロペラの座標系で表されているので、これをロボットの座標系に変換する。

3. ロボットによる加工

プロペラ翼面の機械加工は、NC 機による場合は正面フライスが、人手による場合はねじれ角 0° の側フライスが使用されている。いずれの切削方式を用いるにしても、工作機械に比べ剛性の極端に劣る多関節型ロボットの使用に際しては、ロボットに加わる力 (切削抵抗) およびロボットの剛性をあらかじめ把握する必要がある。そこで切削抵抗およびロボットの動剛性をそれぞれ測定した。

3.1 切削抵抗

切削抵抗は、船舶用プロペラに使用されている銅合金 HBsCl について、圧電型工具動力計 (KISTER TYPE 9257) を使用し、フライス盤上で測定した。表1に実験に用いたフライスカッタの諸元および切削

Table 1 Cutting conditions

	Face milling	Plain milling
Size of cutter	$d=45$ mm	$d=150$, $b=20$ mm
Number of teeth	5	18
Cutting speed	247 m/min	842 m/min
Depth of cut	0.3 mm	0.3 mm
Feed rate	0.1 mm/tooth	0.02 mm/tooth
Width of cut	40 mm	20 mm

条件を示す。なお、正面フライスによる切削ではカッタには1枚のみ工具を取り付けた。また、側フライスによる切削では表1に示す条件では2枚以上の刃が同時に切削に関与することはない。

図3に切削抵抗の時間変化の例を示す。Zは切込み方向、Yは送り方向、Xはそれに直角な方向を示している。正面フライスによる切削では、切れ刃が被削材に食いつくと同時に切削抵抗は徐々に高くなり、最大値を示した後再び徐々に減少する。一方側フライスによる切削では、Up cut, Down cutのいずれも1枚の切れ刃について食いつきから離脱までに切削抵抗は正負に大きく変動している。

そこで、切削の1サイクルについて切削抵抗の時間積分（図中斜線部の面積）を求め、各切削様式で比較した。図4に結果を示す。正面フライスではX, Y, Z方向、特にX, Z方向に大きな切削抵抗が作用することがわかる。一方、側フライスでは瞬間的な切削抵抗は大きな値を示すものの、切れ刃1サイクルの平均では正面フライスに比べかなり小さく、特にUp cutでは小さな値となっている。

3.2 ロボットの動剛性

実験では動剛性としてコンプライアンス伝達関数をインパルスハンマ法により測定した。測定は、ロボットの手首部をX, Y, Z3方向（Xはロボットの水平アームの軸方向、Yはロボットのベースに対し平行でかつ水平アームに対し直角な方向、Zはロボットのベースに対し垂直な方向）からインパルスハンマ（DATRAN 5801 A）で打撃し、各方向の振動を加速度ピックアップで測定、これらの信号を2チャンネルFFTアナライザにより解析した。なお、多関節型ロボットではその姿勢により動剛性が大きく変化するため、測定ではプロペラ翼面の加工時の姿勢を想定して行った。

図5に測定結果を示す。図中、左はZ方向から打撃を加えた場合のX, Y, Z方向のコンプライアンスで、右はY方向から打撃を加えた場合のコンプライアンスである。なお、X方向から打撃を加えた場合の結果はZ方向からの結果とほぼ同一であった。図

Fig. 3 Cutting forces when milling HBsCl

Fig. 4 Mean cutting forces when milling HBsCl

から、Z方向からの打撃では、X、Z方向ともに9.75 Hzに顕著な固有振動数が見られ、この周波数では大きなコンプライアンスを示している。一方Y方向からの打撃では、6.5、12、34 Hzに固有振動数が見られるが、6.5 Hzにおける振動が特に顕著である。なお、X、Z方向のコンプライアンスはY方向に比べ非常に小さい。

以上の結果から、切削時の切削抵抗による振動は数十Hz以下を避ける必要があり、カッタの回転数は出来るだけ高くする必要があることがわかる。

3.3 ロボットによる切削

ロボットによる切削は、図6に示すように、電動機の軸にアダプタを介して固定した正面フライスカッタ(3500 rpm)およびフレキシブルシャフトで駆動される側フライスカッタ(3600 rpm)をそれぞれロボットの手首に取り付けて行った。なお、送り方向はロボットのY軸方向とし送り速度50 mm/s、切込み方向はZ軸方向とした。使用したカッタは表1に示したものと同一である。

図7に正面フライスカッタで切削した場合のロボット手首におけるX、Y、Z、3方向の振幅を示す。正面フライスでは切削開始直後からX、Z方向とも同じ周波数で振幅がどんどん大きくなっていき、数秒で切削不能になった。またY方向もX、Z方向の振幅が大きくなるにつれ、大きくなることがわかる。なおX、ZとY方向の振動周波数はそれぞれ10~11.5および4.5 Hzで、それぞれ9.75および6.25 Hzでの固有振動数の振動モードによるものと考えられる。

図8に側フライスで切削した場合のロボットの手首の振動を示す。Down cutではしばしば図に示したようにZ、Y方向ともに周波数4.5 Hzで大きな振動が

Fig. 5 Compliance of the tested robot

(a) Face milling

(b) Side milling

Fig. 6 Setup for milling with the robot

Fig. 7 Vibration of the robot when face milling of HBsCl

生じ、切削不能となった。一方 Up cut の場合は振動も比較的小さく、切込み 0.5 mm においてもびびりは発生せず、安定した切削が可能であった。

ロボットによる側フライスでの Up cut 時の仕上面粗さについては省略するが、 $R_{\max} 40 \mu\text{m}$ 程度となっており、荒加工としては十分使用できるものと考えられる。

4. ロボットによるプロペラの切削

船舶用プロペラの翼面は 3 次元曲面となっているため、この曲面を直線の切れ刃を持つ側フライスで切削する場合は曲面の傾きにに合わせて側フライスの軸を傾ける必要がある。このため本実験では図 9 に示すように、フライス軸の中心線は常にプロペラの中心軸上に向けるものとして、フライス軸の基準面に対する傾き角 α をフライスと翼面との接触点 A, B の中点 C における翼面の法線の傾きから求めた。なお、フライス軸の姿勢は円周を 2500 点に分割して各点ごとに求めた。

また、この傾き角 α は中心からの半径 r と回転角 θ の関数であり、切削実験では、加工中に随時これらのデータをコンピュータからロボットに転送していたのでは時間がかかるため、あらかじめすべての加工データをロボットのメモリーに転送した後加工を行っ

(a) Down cut milling

(b) Up cut milling

Fig. 8 Vibration of the robot when side milling of HBsCl

Fig. 9 Positioning of cutter

Fig. 10 Setup for milling the propeller with the robot

Fig. 11 Surface finish of the propeller when milling with the robot

た。

図10にロボットによるプロペラ切削時の写真を示す。切削は、第2節で求めた素材寸法と設計値との差を加工量とし、カッタを設計翼面に平行に移動させながら行った。従って取り代との関係から翼面の位置により実切込み量に変化するが、切込みは、最大切込み時においても安定して切削出来る0.5 mmを越えないよう注意した。このため、実験に用いたプロペラでは1回の加工では切削が終了せず、2回に分けて行った。なおカッタ幅は20 mm、回転速度は4 000 rpmとした。また、切削時のロータリーテーブルの回転数を0.5 rpmとしたため最外周から半径130 mmの位置まで切削するのに要した時間は1回あたり約25 minであった。

図11に切削仕上面の一例を示す。半径方向のカッタのつなぎ目を除きほぼ満足のいく結果が得られている。

5. 問題点および今後の課題

計測、加工の両方に共通することであるが、面の曲率が急激に変化するプロペラのエッジ部の取扱いが現状では非常に困難である。すなわち、変位計測器として反射光を利用するレーザ変位計を用いているため、反射面の傾きが極端に変化すると測定誤差が大きくなったり、あるいは測定不能に陥る。また、フライスによる加工もエッジ部ではカッタの回転方向とプロペラの送り方向によってはカッタの食込み等の危険がある。これを避けるためにはカッタの回転方向とプロペラの回転方向を逆にすれば逃げ勝手となるため食込みは防止できるが、カッタの回転方向を逆にするためにはカッタの取付けを変える必要があり、現在のところこの自動化ができていない。

6. 結 論

本研究は産業用ロボットによる船舶用プロペラの翼面形状の計測およびフライス加工について試み、以下の結果が得られた。

- (1) ロボットの手首に取り付けたレーザ変位計を用いてプロペラの翼面形状を自動的に計測するシステムをつくった。同システムでは ± 0.1 mmの精度で1時間当たり約10万点の計測が可能である。
- (2) 実験に用いた多関節ロボットの動特性から、ロボットに適した切削方式を求め、ロボットによる黄銅の側フライス加工が可能なることを明らかにした。
- (3) 多関節ロボットによるプロペラの翼面形状の自動計測と側フライスによる加工を組み合わせた結果、翼面のエッジ部を除き、ほぼ満足のいく結果が得られた。

参 考 文 献

- 1) 長田知郎ほか：デバリングロボットの基礎研究（第1報、鋳ばり除去作業の分析とロボット化）、昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集、(1985) 663。
- 2) 竹内芳美、坂本正史、吉田哲也、長田正博：CCDライセンサによる当たりの認識とキサゲ作業の自動化、精密工学会誌、52, 12 (1986) 2087。
- 3) 山根八洲男、尹 栄生、岡本裕幸、山田勝紀、米澤 洋、鳴瀧則彦：定盤のきさげ加工への多関節型ロボットの応用、精密工学会誌、55, 10 (1989) 1787。
- 4) 国枝正典、中川威雄、樋口俊郎：磁力研磨工具を用いたロボットによる曲面の研磨、精密工学会誌、54, 1 (1988) 125。