

リアルタイムロボットによる力覚加工システムの開発

櫻庭 洋平, 鎌田 英博, 戸羽 篤也, 鶴谷 知洋
 安田 星季, 佐藤 栄治*, 阿部 孝*, 高橋 忠 *
 杉村 規春**, 東海林 貞雄**

Development of Force-Controlled Processing-System with Real-Time-Controlled Robot

Yohei SAKURABA, Hidehiro KAMATA, Atsuya TOBA, Tomohiro TSURUYA
 Seiki YASUDA, Eiji SATOH*, Takashi ABE*, Tadashi TAKAHASHI*
 Noriharu SUGIMURA**, Sadao SHOJI**

抄 録

近年の国内製造業では、技能労働者の高齢化による技術の継承や作業負担の軽減が大きな課題である。その対策のひとつに、生産機械を知能化することで、製造現場を自動化・省力化するという方法が挙げられる。

そこで本研究では、力覚制御による速度調節機能を持つ異方向穴あけ加工装置を作成し、有人による穴あけ作業の力加減を再現することで、可能な限り加工時間を短縮させながら同時に装置や被削物への過負荷を自律的に抑える力覚加工システムを構築した。また実験で得られた技術を応用して、北海道内にある木製家具工場の製造ラインで、汎用マニピュレータロボットにより木製椅子の穴あけ、座面切削、座面研磨の3工程を行う自動加工システムを構築した。

キーワード：ロボット，力覚制御，自動加工システム

Abstract

Manufacturing industries in Japan recently, it is great important to preserve the aging workers' skill and to reduce the working load. For solving them, automating and applying intelligence system is effective. In this study, we developed the multi-axis drilling machine and the variable speed system by force feedback control. And we constructed the force feedback system so that we could reduce machining-time and prevent the over-load for tool automatically. It's like human's drilling work. On the other hand, we constructed the factory automation system in the factory of wooden furniture in Hokkaido, by applying the technique that we got in this study. This system could make three uninhabited manufacturing processes by using industrial robot, such as drilling, cutting and grinding to wooden parts of chair.

KEY-WORDS : robotics, force feedback control, factory automation system

* エノ産業株式会社

* ENO SANGYO Co., Ltd.

** クラレインテリア株式会社

** KURARAY INTERIOR Co., Ltd.

事業名：一般研究

課題名：リアルタイムロボットによる力覚加工システムの開発

1. はじめに

近年の国内製造業では、担い手である熟練技能労働者の高齢化が大きな問題となっている。2007年問題といわれる団塊世代の大量退職に伴う技能の継承、また労働人口全体の減少による後継者世代への負担増大などが主だった課題であり、とりわけ全国平均を上回る勢いで人口の高齢化が進む道内では、その影響は他の地域以上に深刻である。

この課題に対する技術的対策のひとつに、生産機械の知能化による製造現場の自動化が挙げられる。特に少量多品種生産が多くを占める道内製造業では、職人技に依存した製造工程が多く残されていることから、知能化した汎用生産機械でそれを代替することが、技能の継承や作業者負担の軽減に大きく貢献するものと考えられる。

本研究では力覚による機械制御技術の蓄積を目的として、力覚制御を組み込んだ異方向穴あけ加工装置を試作し、そこに組み込んだ力覚制御の効果を検討した。またこれと並行して、道内の木製家具工場に蓄積技術の移転を行い、力覚制御などを応用した自動化生産ラインを構築したので報告する。

2. 実験方法

2.1 力覚制御実験

2.1.1 実験装置

実際の木製家具工場で大量生産を行う場合、高剛性かつ大出力の専用加工機により、位置決めや寸法精度の高い穴あけ加工を行っている。しかし多品種少量生産の場合、専用加工機を導入しても頻繁に段取り換えが必要で、その作業が必ずしも簡単ではないことや導入・維持管理経費の面でも負担が大きいことから、技能労働者の手作業に頼るケースが多い。こうした事情から、異方向穴あけ加工を力覚制御の実験対象とした。

図1は力覚制御の実験用として作成した装置で、加工物に様々な位置・姿勢で穴あけを行うことができる。装置の動作軸は、ドリルの送り動作を担当する第1軸と、ドリルの方向や傾きを調節する第2・3軸の合計3軸で構成している。動作は各軸に設けたACサーボモータ(定格トルク:3.7N・m, 以下:モータ)により行っている。ドリル送り動作は、モータの回転をタイミングプーリとボールねじを介して送り機構へ伝えている。なお使用したサーボドライバ(以下:ドライバ)の過負荷防止リミッタにより、送り速度は7.5mm/sに制限されている。

また、方向・傾きの調節は、モータの動作をそれぞれ同軸上に配したタイミングプーリに伝え、図2の4個のマイタギアにより動作している。この機構では、2台のモータの回転方向や回転速度の差でドリル軸の方向と傾きを調整するため、両モータの連動が不可欠となり動作指令が若干煩雑になるが、



図1 実験装置外観

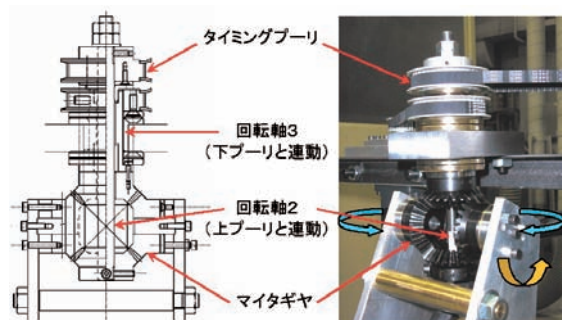


図2 方向・傾き調節機構

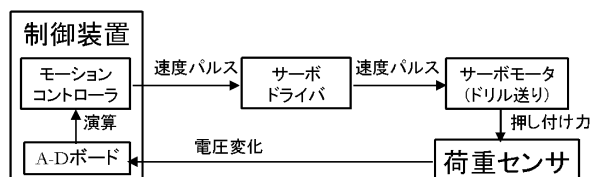


図3 信号フロー図

表1 力覚制御実験に用いた装置等の概要

名称	内容	仕様(型式)
マニピュレータ	機構部	三軸動作 ・ドリル送り:1軸 ・方向・傾き調節:2軸
	動力部	FX280A-TG20 (オリエンタルモータ製) ・定格トルク:3.7 N・m
ドリルツール	主軸モータ	AD-130AV(RYOBI製) ・最大回転数:1,100 rpm ・単相 交流 100V 出力530W
	ドリル	21 mm(木工用), 8.5 mm(鉄工用)
制御装置	本体	PC/AT互換パーソナルコンピュータ
	OS	Windows2000 Professional (Microsoft製)
	制御プログラム	Visual C++ Version 6.0 (Microsoft製)
	モーションコントローラ	PCI-7211C (Interface製) ・2 ch, インクリメンタル型, 二台
荷重センサ	A-D変換ボード	PCI-3171A (Interface製)
	切削動力計	ATS-ZMM (佐藤マシナリー製) ・定格最大測定値:250kg

反面2軸の動作機構がコンパクトになるメリットがある。

動作機構の仕様を表1に、指令の信号フローを図3に示す。制御装置内のモーションコントローラからドライバを介して、送り量分のパルスを送信する。

力覚情報の検出は、加工物の下に荷重センサを置き、ドリル刃先と加工物との接触で生じる軸方向推力(以下：スラスト)を一定時間間隔で検出し、制御装置内のA-Dボードを介して制御装置内に取り込んでいる。その大きさと変化に応じて、プログラム側で第1軸のドリル送り速度を計算し、モータに新たな送り速度を指令している。これを指令した送り量に達するまで繰り返している。

2.1.2 制御方法

力覚制御の制御対象には、前述のとおりドリル送り動作の速度調節機能を選んだ。

実際の加工現場で人手により穴あけ加工を行う場合、最初は比較的低速にドリル刃を送り、ドリル刃の側面が穴内面に接した段階で送り速度を増加させている。これは刃先が加工物に接触する時、位置決め穴ができるまでは刃先の流れを抑え、あるいは流れた刃先を戻すため、微調整しているものと考えられる。特に異方向穴あけ加工では、刃先が加工物表面と垂直以外の角度で接触するため、刃先のすべりや刃先の荷重分布の不均一さにより位置ずれが起こりやすい。このため、刃先が加工物と接触する初速度を低く抑えることで穴がずれたままの位置で加工されるのを防ぎ、さらに刃先の過負荷を抑制する効果も期待できる。

しかしながら低速送りの場合、作業時間が長くなり、特に穴の数が多い場合には生産ライン全体のボトルネックとなるため、送り速度はある程度高める必要がある。

したがって、本実験の力覚制御の目標は次のとおりである。

- ・刃先接触時の低速・低スラスト送りを再現し、位置決め時間を可能な限り確保する。
- ・加工物へのスラストを可能な限り平準化し、極端な負荷を抑制する。
- ・スラストに余裕がある場合には可能な限り増速し、加工時間を短縮する。

ドリル送り速度の制御フローを図4に、ブロック線図を図5に示す。最初に送り量と始動速度を入力し、動作を開始する。スラストの変動は、送り開始後一定時間間隔で検出している。スラストが閾値として設定した値よりも小さい場合は、刃先が接触していないと判断し送り速度は固定にするが、閾値を越えた時点で刃先が接触したと判断して加減速を始める。このとき、閾値以下の場合には加速して切削時間を短縮し、閾値を超えた場合には減速して荷重を安定させる。ただし、スラスト変動がごく小さい場合には送り速度は変えず、過度の速度変更を抑制している。このループを、最初に入力した送り量に達するまで繰り返している。

2.1.3 実験条件

穴あけ加工の実験には、21mmの木工用ドリル(図6上、

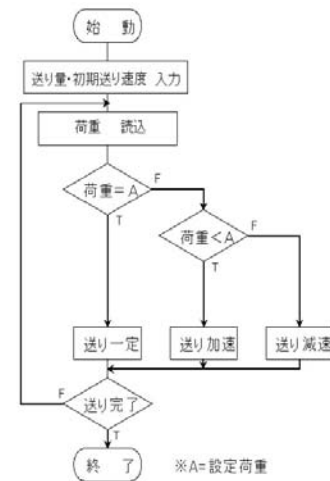


図4 速度制御フロー図

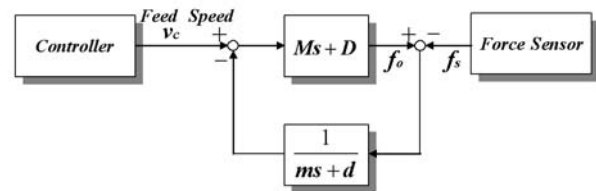


図5 ブロック線図



図6 ドリル外観

以下：ドリルA)と8.5mmの鉄工用ドリル(図6下、以下：ドリルB)の二種類の刃を使用した。

ドリルの送り速度は、力覚制御なしの固定速送りの条件は表2のとおりとした。尚、ドリルAでは5.0mm/sの送り速度で駆動力不足による回転停止状態となったため、実験は4.0mm/sまでとした。ドリルBでは送り機構のモータ限界速度(7.0mm/s)まで実験可能であった。

次に、力覚制御ありの動作条件は表3のとおりとし、初期送り速度はいずれも2パターンとした。初期送り速度を低速にした理由は、加工物との接触速度を低速にするという制御目標があるためで、最初から刃先が高速で接触すると実験目的にそぐわないと判断したためである。

またスラスト検出のサンプリングタイムは、力覚制御あり・なし共に4ms間隔で行い、力覚制御もこの間隔で行っている。

表2 ドリル送り速度条件 (力覚制御なし)

Name	φ	Type	Feed Speed (mm/s)
Drill A	21.0	Wood	1.0, 2.0, 3.0, 4.0
Drill B	8.5	Metal	1.0, 3.0, 5.0, 7.0

表3 ドリル送り速度条件 (力覚制御あり)

Name	Feed Speed (mm/s)	Change Speed (mm/s)	Maximum Force (N)
Drill A	1.0, 2.0	± 0.005	140
Drill B	1.0, 3.0	± 0.005	85

2.2 実用化試験

図7に実用化試験で使用した実験機器とシステムの概要を示す。表4は、主な機器の仕様である。使用したマニピュレータロボットは、PC(パソコン)から制御できるタイプと専用コントローラから制御するタイプの2種類である。専用コントローラ(D20)からはロボット言語で制御することになる。PCによる制御方式では、ロボット言語のほかWindows上のVisual C++によるリアルタイム制御も可能となっている。

図8に示したように、木製の椅子では、背や脚の部品が座板の穴で締結されることが多い。特に民芸調家具の場合、穴の数も多く、ほぼ全ての穴に傾斜をつけているためマニピュレータロボットでの代替を試みた。

また、切削加工用の工具(milling tool)の駆動には、軽量で高速回転のミリングモータを採用した。一般的な加工機に用いられている高周波モータが最適と思われるが、可搬重量に制限があるため、マニピュレータロボットのエンドエフェクタへ用いる場合には不利である。そこで、削り深さや送り量、送り速度等とトルクの関係を観察し、本方式で十分な加工性能があると判断して採用した。

さらに木製部品の加工工程には研削・研磨工程が必須である。特に曲面研削は、複雑な作業であることから人手で丁寧な仕上げる場合が多い。本システムでは、この工程にもマニピュレータロボットを活用して自動化を図った。

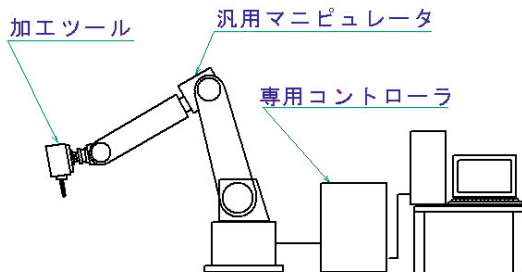


図7 実用化試験用装置外観

表4 実用化試験に用いた装置等の概要

名称	内容	仕様(型式)
マニピュレータロボット	機構部	FS10N, FS20N (川崎重工) 位置繰り返し精度 ±0.1mm 合成最大速度 8,100mm/sec
	制御部	D20 (川崎重工)
ドリルツール	主軸モータ	定格回転数 14,000rpm
	ドリル 主軸モータ	φ24, 21, 18, 15, 12, 10 mm (高速度鋼) 無負荷回転数 14,000rpm 最大トルク 1.98N·m
カッターツール	エンドミル	φ50mm 送り速度 4000mm/min
	カセンサ	カ3軸、モーメント3軸 IFS-90MB1A 50-1 50 (ニッタ) Fx, Fy: 200N, Fz: 400N
研磨ツール	研磨器	ダブルアクション方式 回転数 10,000rpm バットサイズ: φ123mm 比重 0.82, 含水率 10%
	加工物	樟(カバ材)



図8 民芸調家具の外観

3. 結果と考察

3.1 力覚制御実験

3.1.1 試作機によるドリル加工実験

力覚制御の効果検証の前に、予備実験として力覚制御なしの場合の穴あけ加工を行い、スラスト変化の傾向を確認した。

図9と図10は、ドリルAおよびドリルBの加工時間とスラストの関係を示す。

まず送り速度と加工時間の関係については、A, Bのドリルとも、スラストが急激に低下するまでの経過時間は送り速度が速いほど短くなっている。グラフの間隔から、送り速度と加工時間がほぼ正確に反比例していることが確認できた。

次にスラストと時間の関係を見ると、低速送りほど接触時のスラストの増加も遅く、スラストの極大値も小さい。また、ドリルBの7.0mm/sのように、穴あけ終了直前までスラストが増加し続けているのは、刃先の切削速度及び切りくずの除去がドリル送り速度に追いつかず、刃先が加工物を押しつけているためだと考えられる。両者とも1.0mm/sの低速域ではスラストの最大値も低く、切削動力にも余裕があるものと考えられる。ドリルAの4.0mm/s送りでは、今回使用した荷重センサの測定上限を越えたため、グラフに示すようにスラストが一定であるが、このあと5.0mm/s送りで停止したこ

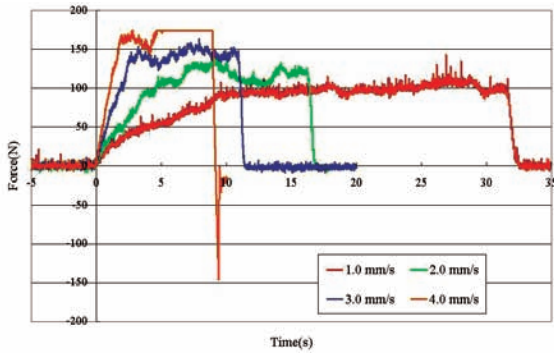


図9 加工時間とスラストの関係
(力覚制御なし, ドリルA)

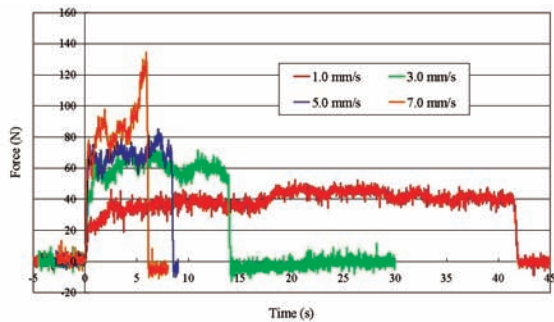


図10 加工時間とスラストの関係
(力覚制御なし, ドリルB)

とを考えると、ドリルBの7.0mm/sと同様に穴あけ終了までスラストが増加し続けているものと考えられる。

なお、ドリルAの4.0mm/sのみ、戻りの際に大きなマイナス反力が現れている。これはドリル刃の戻り時に加工物がドリル刃に引っ張られていることを意味しており、次のような原因が考えられる。

- ・ドリル刃送り速度が高速で、刃先が加工物に圧入された状態で戻り動作を開始した。
- ・穴あけ開始時にドリル刃先が流れ、そのまま穴あけが進んだため、戻り時にドリル刃の側面と穴の側面が接触したため。

この状況が発生した直後に加工面を観察したが、原因につながる痕跡は見当たらなかった。しかし、加工時間短縮の際には、適正な送り速度の範囲を逸脱しないよう十分な配慮が必要と思われる。

3.1.2 力覚制御実験

ドリルAに力覚制御を組み込んだ場合の実験結果を図11に、またこのときの送り速度変化を図12に示す。力覚制御ありの初期送り速度1.0mm/s、力覚制御なしの送り速度は傾向が顕著な1.0mm/sと4.0mm/sの結果を示す。

制御なし1.0mm/sの荷重変化と比べたところ、穴あけ時間で6割、約19秒の加工時間を短縮することができた。これは低速送りの場合に閾値よりも低い値で推移しているため、

スラストが閾値に到達するまで速度を高めている効果が出ているためである。またスラストのばらつきを計算したところ、表5のとおり、測定した速度すべてで力覚制御ありの標準偏差が小さな値を示した。

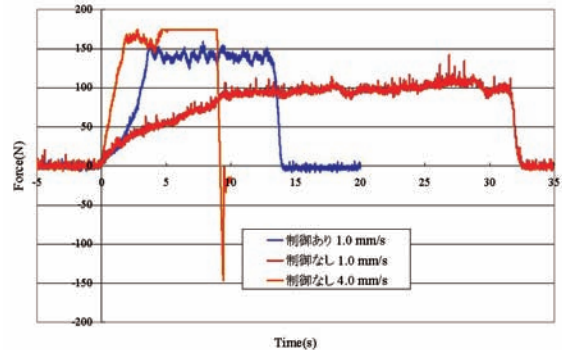


図11 加工時間とスラストの関係
(力覚制御あり, ドリルA)

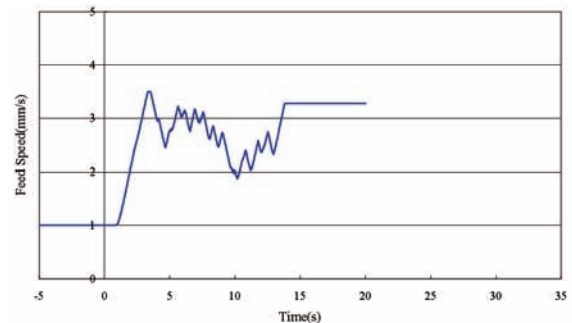


図12 加工時間と送り速度の関係
(力覚制御あり, ドリルA)

表5 スラストのばらつき (ドリルA)

	Force-controlled	Non Force-controlled 1.0 mm/s	Non Force-controlled 2.0 mm/s	Non Force-controlled 3.0 mm/s	Non Force-controlled 4.0 mm/s
Average Force	140.02	97.42	116.73	142.33	Failure
Standard Deviation	4.69	5.69	9.03	6.54	Failure

次に制御なし4.0mm/sとの比較だが、この場合は力覚制御ありの平均送り速度が約2.1mm/sであるため、加工時間の点では制御ありのほうが不利になる。しかしながら、接触開始時のスラスト変化は制御なしでは衝突に近い急激な上昇となっているのに対し、制御ありでは接触開始直後から約40Nまでは制御なしの1.0mm/sに近いスラスト増加を示している。制御ありの閾値に到達する時間を比べた場合、制御ありは制御なしよりも約2.3倍、2.0秒遅くすることができた。ドリルAの場合、刃先がドリル側面に9.0mmの距離があり、刃先の接触からドリル側面の接触まで、送り速度により表6のような時間差が生じている。力覚制御ありの場合は、速度変化のグラフから計算して4.2秒かかっていることから、位置

決めの時間を力覚制御なしの場合の2.1mm/s送り相当まで抑えることができた。

スラストのばらつきについては、荷重センサの測定限界を超えたため計算できなかったが、ドリルB 7.0mm/sの結果と同様にスラストが増加しているものと考えられることから、また表5の平均スラストに対する標準偏差の大小比較からも、高速域では低速域以上にスラスト安定化の効果が大きいと考えられる。

表6 ドリル側面までの接触時間（ドリルA）

	Force-controlled		Non Force-controlled		
	1.0 mm/s	2.0 mm/s	3.0 mm/s	3.0 mm/s	4.0 mm/s
Side Contact Time	4.20	9.00	4.50	3.00	2.25

(sec)

3.1.3 ドリル刃と力覚制御の関係

図13にドリルBに力覚制御を加えた場合の加工時間とスラストの関係を示す。ドリルAと比べて設定スラストや送り速度の範囲は異なるが、両グラフともドリルAと同様の傾向を示しており、低速送りとの比較では穴あけ時間の短縮、高速送りとの比較では刃先接触時の過負荷抑制が再現されていることが確認できた。このことから、閾値の調節次第でドリル刃の径や形状を問わず、力覚制御の効果が得られることが確認できた。

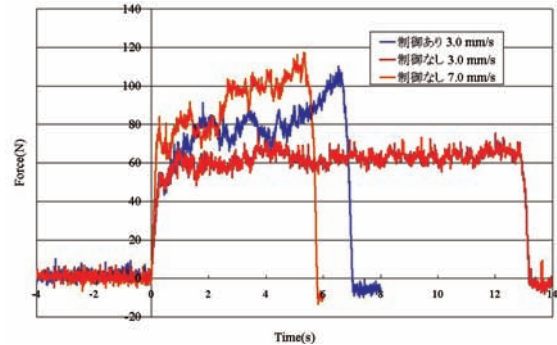


図13 加工時間とスラストの関係 (力覚制御あり, ドリルB)

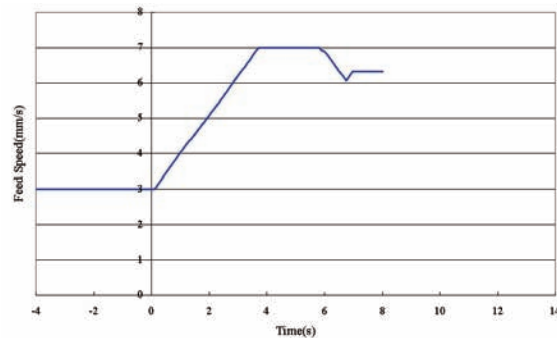


図14 加工時間と送り速度の関係 (力覚制御あり, ドリルB)

3.2 実用化試験

3.2.1 ドリル加工への適用

図15は傾斜した穴加工の様子で、主軸回転数1,400rpm、ドリル径24mmを用いている。この実験では、加工時に音鳴り(加工物と工具間の擦音)が生じたり、切削仕上げ面が粗悪で、明らかに切削条件が不適切であると思われた。また、送り速度に関わらず過負荷エラーの発生が頻繁であった。さらに、位置決め繰り返し精度も想定以下の精度であった。この解決策として、ツールホルダの剛性や加工精度を高めたり、搬送時のワーク把持方法を見直すなどした結果、音鳴りや繰り返し位置決め精度は、大幅に改善された。しかし、加工面性状は十分に改善されておらず課題として残っていた。また、現場の生産体制に組み込むためには、加工時間の短縮も必要であったため、前項の試作試験結果を応用してプログラムの改良を試みた。

前項の実験結果(図9)から、スラストは、工具がワークに接触した直後に増大し、また、穴深さが大きくなるに従って増加する傾向にあった。そこで、力制御を利用したところ有効に機能することを確認したが、この実用化試験の場合、穴位置が分散しており、加工物全面でスラストを測定する必要があり、装置の規模が大きくなるなど、課題も多い。そこで、スラストの変動を予測し、送り速度を調整するという方法を取り、その効果を確認した。

一般的に、工場で使用する加工物は、木目も一様で欠陥を含まない材料を選定している。したがって、工具寿命を把握していれば、加工時間とスラストの関係が推測できると思われる。そこで、力覚制御でスラストを安定させた場合(図11)の、送り速度と加工時間の関係を参考に工具の速度をパターン化した。この手法でプログラムを作成し、加工実験を行った結果、穴の面性状も向上し、過負荷による非常停止の発生が抑えられるなどの効果が認められた。



図15 マニピュレータロボットによる穴あけ加工の様子

3.2.2 切削加工への適用

図16は、非接触式形状測定器で測定した椅子座のモデルと、そのデータを3次元CAD(Rhinoceros)で編集した加工

軌道の様子である。図17に示す切削加工工程ではマニピュレータロボット手首の姿勢をZ-Y-Zオイラー角で記述する。把持しているツールホルダの座標系と刃物の姿勢から実際の軌道演算式を導き、最終的な位置情報(x,y,z,o,a,t)に変換した。一連の操作は、低価格の3次元CADでも十分に処理可能であり、図18に示すような平行軌道やU字型軌道も容易に生成できる。それぞれの加工試験を実施して性能の評価を簡単に行うことができた。

家具メーカーからは、平面と曲面の境界が明確であることが優先課題として提案された。U字型軌道の場合には、工具の回転軸を常に境界線の法線方向に傾斜させることになるが、エンドミル側面の切削痕がそのまま境界面として活用できる。また、マニピュレータロボットは回転主軸の姿勢を変更できるため、エンドミルの側面で大きな切削速度で削ることができ、切削面の向上が期待できるため、U字軌道を推奨した。特に、繊維方向性の強い木質材料では、毛羽立ちや先割れなどの欠陥発生を防ぐ観点から切削速度の高速化は効果的である。さらに、切削点を移動させれば切削点が一点に集中せず工具寿命の長期化に繋がるため、随時、軸を姿勢変化させることも効果的と思われる。

3.2.3 研削加工への適用

この工程では切削加工で生成されるピックフィードマークを除去することを目標とした。図19に示すのは周辺装置やワーク台などを装備した研削工程の外観である。当初は、研磨工具をマニピュレータのフランジ面に固定する方式を取り、前項で構築した力制御のアルゴリズムを活用して研磨作業を行った。その結果、ピックフィードマークの除去機能の有効性は確認できた。しかし、教示作業が煩雑で、オペレータの負担が大きいことが問題であったため、図19の右側のマニピュレータが把持している研磨ツールを新たに考案した。このツールは、ダブルアクションサンダ(ポータブル研削工具)を4点で支持する構造であり、その機能を図20で説明する。まず、図中1に示すようにツールの進行方向軸に対する姿勢角は固定されており、この軸をもとに教示する。図中2はツールを正面から見た様子であるが、パッドを押し付けると均等な圧力で曲面に追従させることができるような機構となっている。また、図中1の固定軸を基にしてパッド先端部を加工面に強く押し当てれば重研削に利用できる。開発したこのツールを利用することにより、汎用のマニピュレータロボットによる研磨作業の実用化を達成すると共に、教示時間の短縮を実現できた。

3.2.4 多能工化への適用

図21に開発した機器の設置状態を示す。切削加工用には20kgf可搬のマニピュレータロボット(川崎重工業製, FS20N, 写真左, 以下: MP2)を、仕上げには10kgf可搬の

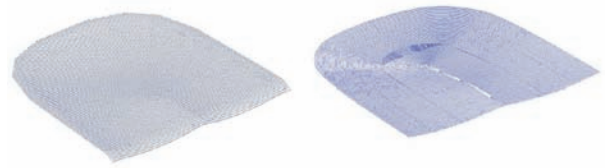


図16 3次元CADで教示した平行軌道とU字型軌道



図17 切削加工工程の外観



図18 平行軌道とU字型軌道の切削面



図19 研削工程の外観

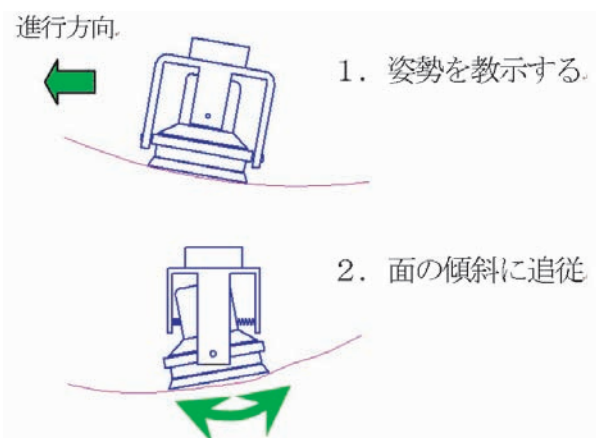


図20 研削ツールの機能

マニピュレータロボット(FS10N, 写真右, 以下: MP3)とPC(パソコン)を組み合わせたコントロールシステムを使用した。写真中央の同規模のマニピュレータロボット(以下: MP1)は搬送と穴あけ加工を担当し, ワーク台や搬入台, 搬出台をその円周上に配置して, ワーク(椅子の座板)の移送がスムーズに行われるよう配慮した。これら3台の近傍には加工作業用のワーク台を設置した。このワーク台は, 様々なサイズのワークを把持できる上, 切削や研削時に生ずる粉塵を吸引する機能や, 在席センサなどを装備している。何れもその内容については, 特許出願中である。



図21 機器の設置状況

4. まとめ

製造現場の効率化に必要な知能化制御技術について, 力覚を制御対象とした基本技術の蓄積とその実用化により, 次の成果を得ることができた。

- ・異方向穴あけ加工を対象とした実験装置の作成を通じて汎用機器を利用した力覚加工システムの構築技術を取得した。
- ・有人作業による穴あけ作業の動作を力覚制御で再現し, 機器及び被削物への過負荷を抑えながら穴あけ加工の効率を高めることができた。
- ・実験で得られた知見を応用し, マニピュレータロボットを使用して道内の木製家具工場の生産ラインを無人化する技術移転を行った。

今後は本研究で得られた技術を活用・応用し, 新たな研究開発や道内企業への技術移転を進めていく予定である。

今後の課題について, 実際に稼働している生産機械を知能化するには, 力覚制御を含めどの制御手法を採用すべきかの見極めが重要となる。今回の実用化事例の中でも試行錯誤の繰り返しであったが, 生産機械の知能化技術の普及を進めていくには, 技術移転でのノウハウ蓄積と共に, 知能化制御技術の体系的な整理も視野に入れる必要があると考えている。

謝 辞

本研究で使用したリアルタイム制御ロボットは, 日本自転車振興会の補助により整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 臼井英治: 切削・研削加工学, 共立出版 (1978)
- 2) John J.Craig: ロボティクス - 機構・力学・制御 -, 共立出版 (1995)