ロボットによる鋳物素材仕上げ加工作業の自動化*

(工法設計支援システムの開発)

杉 田 真 一^{*1}, 竹 内 芳 美^{*2}
山 本 克 己^{*3}, 杉 浦 哲 二^{*3}

Automation of Deburring and Finishing Works by Robot in Casting (Development of Process Planning System)

Shinichi SUGITA, Yoshimi TAKEUCHI^{*4},
Katsumi YAMAMOTO and Tetsuji SUGIURA

^{**}Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, University of Electro-Communications,
1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

The study deals with the development of a practical process planning system to remove and finish burrs existing in cast workpieces. There are many processing methods in accordance to variety of materials and cast workpiece shapes. The selection of processing methods has been made by skilled workers since processing methods and their knowledge are not systematically classified. In addition, as burrs on workpieces are not necessarily kept constant, and the performance of deburring and finishing tools deteriorates by abrasion of tools, they make the automation and optimization of the works extremely difficult. In terms of achieving the total automation of manufacturing system, the systematization of deburring and finishing works is indispensable, but, has not been realized due to the lack of compilation of important knowledge concerning workpieces to be deburred, deburring tools, deburring condition, etc. Thus, a knowledge database was constructed by classifying workpieces and extracting processing methods. A process planning system was developed by making use of knowledge database. As a result, it is found that the system can offer the appropriate process plan in terms of minimum cost or shortest processing time.

Key Words: Casting, Deburring, Finishing, Robot, Automation, Processing Method, Knowledge Base, Process Planning System

1. 結 論

鋳造工程における鋳物素材の仕上げ加工作業は、その付加価値性からおもに中小企業での熟練技能者に依存してきた。しかし近年の、技能者の高齢化や若年層の製造業離れへの対応と、鋳物生産におけるコスト競争力強化の必要性から、工程作業を自動化したいという要求が高まっている。これに対して、工程に要求する加工精度や生産コストを考慮して、産業用ロボットを設備の構成要素として選択し、これを用いてバリ除去・仕上げ加工作業を自動化するための研究と実用化が進められてきた^{(1)~(4)}。しかし現実には、ロボットによる加工技術の課題とロボットの教示作業に関する課題が存在し⁽⁵⁾⁽⁶⁾、自動化活動は必ずしも成果をあげていない。

鋳物素材における加工対象の材質や形態は多様であり、適用される工法は多岐に渡るが、加工技術が体系的に整理されていないために、加工対象に応じた適切

な工法の設定は、熟練者の技能に依存している。さらに、工作物のばらつきと刃具の加工能力劣化が外乱要因となって加工品質の達成を阻害するので、これらを考慮した工法の最適化が必要であるが、ロボットを扱う作業者の知識不足から配慮がいき届かないために、設備諸元の適切な設定ができず、設備を効率よく活用していないという実態がある。

また、従来のロボット教示方法では、その作業の熟練性と加工軌跡を定義することによる膨大な作業工数から、多品種小ロット生産を前提とした設備では設備稼働率を高く維持できず、投資採算が合わない。

そこで本研究においては、これらの課題を解決する実用的な『鋳物素材仕上げ加工作業の自動化システム』の実現に取り組んでおり、ここでは、特に加工技術に関する課題の解決を目指している。

この熟練知識に関する課題を解決するためには、加工対象に応じて適切な工法・工程を設計できるシステムの構築が必要である。今までに「鋳バリ除去用工程設計システム」を開発した事例はあるが⁽⁷⁾、そこでは、多様な工法についての体系的整理や外乱要因に対する加工品質確保の考慮がなされていなかった。

本研究においてはすでに、加工対象を材質や加工形態で層別分類し、これらに適用されるべき工法諸元と

* 原稿受付 2001 年 6 月 29 日。

^{*1} 正員, 電気通信大学大学院 (〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1)。

^{*2} 正員, 電気通信大学電気通信学部。

^{*3} 豊田工機索形材加工システム部 (〒448-0803 刈谷市野田町北地蔵山 1-7)。

E-mail: takeuchi@mce.uec.ac.jp

して加工原理・刃具・工具・補償機能・加工条件等の工法要素を抽出して、『ロボットによる加工技術の体系化と工法諸元情報の知識データ化』を行っている⁽⁶⁾。本報では、加工対象に応じて適切なロボット工法を設計して提示することができ、あわせて加工技術の蓄積と継承にも役立つ実用的な『工法設計支援システム』を開発したので報告する。

2. 鋳物素材仕上げ加工の自動化システム構想

本研究で目指す『鋳物素材仕上げ加工システム』の構想を図1に示す。システムは、加工技術情報を体系的に蓄積する「知識ベース部」と、これから工法の抽出と最適化設定を行う「工法設計部」、工作物の三次元CADデータから最適な工具経路を設定する「工具経路生成部」、さらに加工作業品質が達成されていることを認識し、加工条件をリアルタイムに調整する「作業補償部」で構成される。

センサによる計測、またはオペレータからの入力により、「工法設計部」は工作物における加工対象の形態とその除去寸法を認識し、これらの情報に基づいて「知識ベース」から工法を抽出し、さらに最適化する。「工具経路生成部」は、工法諸元情報と工作物形状の三次元データから適切な加工経路を算出し、これと動作条件をロボットに指令する。加工作業の間、「作業

補償部」は、個々の工法に応じた手法により、加工品質を常に監視し、目標品質値の達成を維持するように加工条件を調整する。また、ロボットが行った加工結果は、センサ、あるいはオペレータによって認識と判定が行われ、追加加工の指令や知識データの修正が行われる。

3. 工法設計支援システムの概念

3・1 システムの活用概念 開発システムの活用概念を図2に示す。まず、工法の検索抽出条件となる工作物や加工部位に関する情報と、加工品質、サイクルタイム、コスト、設備仕様等の要求情報をシステムに対して入力する。システムは、加工技術に関する情報と経験事例が登録された『知識ベース』から、該当する情報を抽出し、かつ最適化し、刃具、工具、加工条件、補償機能等の工法情報として提示する。オペレータはこの提示情報に基づき、実際の設備において実践し、加工条件の調整をおこない、さらにその結果は知識ベースに帰還されて、データの追加や修正が行われる。

このような仕組みを構築することにより、加工技術と知識の定量的な蓄積と継承が可能となり、各所で得られた情報の一元化活用と業務の効率化に役立てることができる。

3・2 コンセプト 開発するシステムでは、実用性を重視して、以下の七つのコンセプトを定義した。

(1) 過去の事例情報より工法を抽出し、さらに最適化すること

Fig. 1 Ideal automation system for casting finishing work

Fig. 2 General idea by use of process planning system

- (2) 加工対象に応じて、効率よく要求加工品質が達成できる加工原理を抽出すること
- (3) 加工対象形状と寸法に応じて、加工ツーリングが成立する刃具・工具を選択すること
- (4) 設備側要求仕様として、工具数や工具動力源、ロボット耐反力等の制約を考慮すること
- (5) 加工品質の達成を阻害する加工対象のばらつきを考慮して、適切な補償機能を設定すること
- (6) サイクルタイムとランニングコストを評価すること
- (7) オペレータの理解を助けるために、テキスト、画像、映像等さまざまな情報を扱うこと

4. 知識ベースとシステムが扱う情報

表1に示すように、知識ベースは「加工対象」と「工法」、「適用結果」の三つの情報で構成される。「加工対象」では、工作物の材質、製造法、寸法・質量、寸法ばらつき等の一般情報と、加工形態、加工寸法等が記録される。「工法」では、加工するために適用された工法として、加工原理、刃具、工具、工具ホルダ、適用ロボット、補償機能、加工条件に関する詳細な仕様が記録される。また「適用結果」では、その「工

法」を適用した際に得られた加工品質、加工能率、刃具寿命に関する情報が適用事例、実験データとして記録され、いずれも画像や映像が参照可能な情報として割付けられる。

そして図3に示すように、開発システムでは、この知識ベースに対し加工対象と、加工品質、コスト等の要求事項に加えて、サイクルタイム、工具、ロボット等の設備側からの制約条件を入力することで、それらを実現するための最適化された工法を出力することをねらいとしている。

5. システム構成

システムはコンピュータをインターフェイスとする対話形式であり、知識ベースを基に工法の抽出と最適化を行う「工法設計機能」と、知識ベースへのデータ登録と編集を行う「情報保守機能」、および知識ベースにおいて、あらゆるカテゴリで情報の検索が行える「情報検索機能」にて構成される。ここでは中心となる「工法設計機能」について述べる。

知識ベースには、工作物、加工形態、要求事項、刃具、工具、補償機能、加工条件、適用事例に関するデータテーブルが定義され、テキスト、画像、映像等の情報と連携している。これらは工法設計の過程において、オペレータの理解を助けるために参照される。

6. 工法設計プロセスと検証

工法設計の流れ図を図4に示す。プロセスは、工作物概要と、加工形態と要求品質、および設備側制約事項の定義を行う「条件入力部」と、「工法抽出・最適化演算部」、および工法詳細情報とタイムチャートの提示を行う「工法出力部」で構成される。

以下に、この流れ図に基づく工法設計の過程を、ラックハウジングと呼ばれるアルミダイカスト製の自動車ステアリング部品で検証した事例により説明する。

Table 1 Knowledge base format

Classification of information			Detailed specifications	
Processing object	Processing shape		Deburring / Surface polishing etc.	
	Product	General	Material classification	
			Production method	
			Material group	
Processing part	Product name			
	Product number			
Processing principle	Image			
	Product dimension			
Processing principle	Mass			
	Classification of processing part			
Processing principle	Measures of the processing object (Cross section, Thickness, Height)			
	Grinding / Cutting / Hammering			
Processing method	Robot	Ability	Model	
		Performance	Loading capacity of robot	
			Withstanding capacity to reaction force	
	Processing condition	Specification	Compliance	
			Processing velocity	
			Driving speed of cutter	
			Tooling posture	
			Number of path	
	Compensation function	For workpiece, cutter, tool and robot	Contact displacement of cutter	
			Contact force of cutter	
Cutting direction				
Result of application	Quality	Processing quality	Stopping time	
			Function name	
			Technical review	
	Efficiency	Tool load	Applying condition	
			Possibility of Processing	
			Possibility of removing too much	
	Cost	Running cost	Surface roughness	
Surface flatness				
Permission of occurrence of second burr				
Case, Experiment date	Data	Permission of occurrence of burn		
		Removal volume per second		
		Cutting quantity per edge

Fig. 3 General idea in using process planning system

6.1 条件入力 表2にシステムへの入力項目を示す。まずはじめに図5に示す画面において、工作物概要情報として、加工分類、材質、製造法、寸法精度、位置決め精度の入力を行う。検証事例において、加工分類は「金属鋳造バリ除去」、材質は「アルミニウム合金 ADC12」、製造法は「ダイカスト」である。

次に図6に示す画面で、加工対象に関する詳細定義を行う。知識ベースにおいては、あらかじめ加工形態の分類定義がなされており、オペレータはこの定義に基づいて工作物上の加工対象部位を分類する。この工作物には、「湯ロゲート折り跡除去」と「穴部膜状バリ除去」、および「型合せ部バリ除去」の3種類の加工形態が存在していた。これらの加工形態ごとに、そのモデル図により指示される周辺形状と除去加工寸法・断面積、穴径・深さ等の形状寸法、ならびに加工長を入力し、さらにこれらの分類部位ごとに加工過不足許容値と、面粗度等の要求加工品質を定量的に定義する。このようにすることで、加工対象部位と要求品質を対応付けて定量的に定義できる。

次に、設備としての要求仕様と制約事項に関する定義を行う。要求仕様にはサイクルタイムとランニングコストがあり、これらは生産設備としての成立の可否

を決定する項目である。また既存の設備を活用することを前提とする場合の制約事項として、工具動力源の種別や適用可能工具数、工具持ちか工作物もちの加工ツーリング形態などが指定でき、これらも工法を決定するための条件になる。

Table 2 Input items

Input screen	Input item	Dimension
Workpiece general	Process classification	—
	Material classification	—
	Manufacturing method	—
	Product name	—
	Product number	—
	Dimension	mm
	Mass	kg
	Workpiece's shape accuracy	mm
Workpiece condition	Positioning accuracy	mm
	Processing shape	—
	Workpiece's cross section shape	—
	Burr measure to be removed	mm
	Calculation pattern of cross section	—
	Cross section	mm ²
	Processing length	mm
	Number of divided part	—
	Hole dimension of processing part	mm
	Thickness of product part	mm
Required quality	Depth of burr existence	mm
	Workpiece's shape around target	mm
	Removing error (plus side)	mm
	Removing error (minus side)	mm
	Roughness	Rz
Required system condition	Occurrence of second burr	—
	Occurrence of scorched part	—
	Cycle time	sec
	Running cost	yen
	Robot tooling method	—
	Mass of grip-hand for workpiece	kg
	Use of automatic tool changer	—
	Number of tools	—
	Power source for tool	—
	Loading capacity of robot	kg
Parameter	Withsatnding capacity to reaction force	N
	Tool exchange time	sec
	Distance (from original position to start position)	mm
	Velocity	—

Fig. 4 Flow chart for process planning

Fig. 5 Sheet for workpiece-general input

6.2 工法抽出 先の条件入力に基づき、分類した加工対象部位ごとに知識ベースから適用可能な工法を抽出する。工法の絞り込みは、①工作物概要諸元の一致、②加工形態の一致と寸法の類似、③加工品質の達成、④刃具ツーリングの成立、⑤設備側制約事項の成立の五つの評価によって行われる。まず、工作物諸元として加工分類、材質、製造法が一致すること、次に、加工形態が一致し、除去寸法として厚さ、高さ、断面積がパラメータで設定した範囲を満たすこと、そして、加工品質として面粗度と、切削返りバリや研削焼けの発生に関する要求値を満たすこと、さらに、加工部位の形状・寸法と、刃具形状および寸法から、刃具のツーリングが成立すること、また、工具駆動源に関する要求を満たしていることなどがチェックされる。

以上により、適用可能な工法として刃具と工具が抽出され、さらに、これらと関連する適用事例などの詳細な情報を参照することができる(図7)。

6.3 工法の最適化 次に、抽出した工法候補において、①工具保持機構や計測補正機能などの補償機能の設定と、②抽出した工法における加工対象部位ごとの加工時間および刃具ランニングコストの算出と、工法組合せの最適化を行う。

補償機能とは、加工の過不足量や面粗度等の要求加工品質の確保を阻害するさまざまな外乱要因に対し、これらを打ち消すための方策をいう。外乱要因には、工作物の寸法や位置決めの際のばらつきと、バリ寸法や発生部位のばらつきなどの「工作物側要因」と、刃具の摩耗や損傷による寸法変動や加工能力劣化などの「刃具・工具側要因」、そして加工反力によるアームの撓みや、加工軌跡精度などの「ロボット側要因」があ

る。これらの誤差要因に対し、例えば工作物側要因については、「刃具の形状諸元を工夫して対応する方法」や、「加工軌跡を工作物製品形状へならわせるフローティング機構などの、工具保持部機構で対応する方法」、「位置・寸法の測定による軌跡補正や、加工反力や工具動力を測定することにより、速度や動作パターン等の加工条件を制御する方法」など、各種の補償手段が適用される。これら補償機能の適用にあたっては、工作物側のばらつきと、要求する加工品質、および工法の加工条件と加工能力を考慮して、適切な方法を設定することが必要である。

バリ除去の場合、工具のフローティング保持機構は、その搭載時に刃具のびびり振動現象が問題にならない場合において用いることができ、その適用の可否と適用可能な工具保持機構に関する詳細は、知識ベースの工法諸元テーブルに記述されている。そして、工作物の形状寸法と位置決め精度、およびバリ発生部位の製品部厚さ寸法と工具の加工能力値から、発生し得る加工誤差を算出することができ、この値と、要求加工品質である除去加工の過不足量許容値から判断して、フローティング保持機構を適用するのか、または計測補正機能や適応制御機能で対応するのかを決定することになる。なお、工具保持機構以外の手法の抽出も、知識ベースの記述に基づいて行われる。

次に、加工対象部位ごとに抽出した工法を組合せて、それぞれの組合せにおけるサイクルタイムとランニングコストを評価する。この際、設備側制約事項として入力した使用可能工具数も考慮する。サイクルタイムは、知識ベースに記述される刃具の加工能力値と、入

Fig. 6 Sheet for workpiece condition and required quality input

Fig. 7 Extracted processing condition and detailed referential information

力した除去寸法と加工長から計算される加工時間に、空間移動や工具交換等の時間を加えて算出する。またランニングコストは、知識ベースに記述される刃具の寿命情報としての除去可能体積と購入コスト、および加工断面積と加工長の積である除去加工体積により算出することができる。

この段階で提示される工法の組合せは、すべての要求を満たすものであり、最終選択はオペレータの意思に委ねられる。サイクルタイムかランニングコストのいずれかを優先することになる。検証事例では、要求を満足する二つの工法組合せが得られたので、サイクルタイムを優先して工法を決定した。

6・4 工法出力 上記のような評価により、最終的に決定した工法に関する詳細情報の提示例を図8に示す。ロボットによる加工動作もサイクル線図化して提示される。ここではロボットの空間移動、加工動作、工具交換動作、刃具寸法計測補正等、設備動作として必要な時間をすべて抽出して提示することができる。これにより、サイクルタイムのシミュレーションを可能にするばかりか、機械動作の具体化に役立てることもできる。

7. 結 言

鋳物素材仕上げ加工作業の自動化を目指し、その理想システム構築のためのステップとして、ロボット加工技術を蓄積した知識ベースに基づいて、加工課題に応じて適切な工法を設計して提示できる『工法設計支

援システム』を構築し、次のような結論を得た。

(1) 鋳物素材仕上げ加工作業と自動化における課題を明らかにし、本研究で目指す自動化システムの概念を示した。

(2) 『工法設計支援システム』の活用概念と、実用性を重視する七つの開発コンセプトを示した。

(3) 知識ベースと工法設計支援システムが扱う情報について、必要項目を整理するとともに、その具体例を示した。

(4) 工作物材質と加工形態、要求品質および設備要求仕様の入力定義と、知識ベースからの工法の抽出と最適化、さらに工法詳細情報とタイムチャートの出力に至る工法設計プロセスを明らかにし、システムを具現化した。

(5) 鋳物素材仕上げ加工情報として500を超える事例を知識ベースに蓄積し、自動車用ステアリング部品であるアルミニウム合金鋳物の仕上げ加工に関する工法設計を取り上げ、本システムの有効性を実証した。

最後に、本研究の一部は中小企業総合事業団からの支援のもとに行われ、ロボット工業会に設置された「バリ取り・仕上げロボット用熟練スキルのソフトウェア委員会」での議論を参照している。関係各位に感謝するとともに、本研究を行うにあたりご助言いただいた豊田工機株式会社の方々に御礼申し上げる。

文 献

- (1) 浅川直紀・伊藤謙一・竹内芳美, ロボットによるバリ取り作業の自動化—自由曲面上の湯口の場合—, 精密工学会誌, 64-5 (1998), 773.
- (2) 戸田健司・浅川直紀・竹内芳美, 産業用ロボットによる面取り作業の自動化(円筒面形状への穴加工の場合), 機論, 65-631, C (1999), 1288.
- (3) 浅川直紀・竹内芳美, ロボットによる磨き作業の自動化(第6報, 直型/L型工具の適用範囲の自動判別), 機論, 63-615, C (1997), 4043.
- (4) Yang, B. H. and Asada, H., Hybrid Linguistic/Numerical Control of Deburring Robots Based on Human Skills, *Proc. IEEEICRA*, Nice (1992), 1467.
- (5) 自動化省力化設備に関するアンケート調査報告書, (1993), 日本鋳造技術協会.
- (6) 平成10年度バリ取り・仕上げロボット用熟練スキルのソフトウェア報告書, (1999), 日本ロボット工業会.
- (7) 五百井俊宏・仁科健治・福田好朗・神田雄一, バリ取りと仕上げ技術研究会: 鋳バリ除去用工程設計システムの開発, 精密工学会誌, 55-2 (1989), 305.
- (8) 杉田真一・竹内芳美, ロボットによるバリ取り・仕上げ作業の自動化(バリ取り・仕上げ工法諸元の知識データ化), 機論, 67-659, C (2001), 262.

Fig. 8 Optimized processing conditions and time chart