鑄仕上ロボットシステムのエンジニアリング*

野 田 敦 彦**

Engineering of a Robot System for Fettling of Castings*

Atsuhiko NODA**

This paper deals with a robotic fettling system which aims at taking the place of one of the most hazardous manual jobs in industry. The system has attained a 95 % success rate in fettling castings and has already been put into production. This paper describes the engineering procedures of how to implement the system. Emphasis is placed on optimizing the cost performance of the system by analyzing and comparing different system components, such as tools, micro-processors, and program languages, which are readily available in the marketplace.

This paper also discusses the peripheral equipment which enable the fettling system to adapt its functions to the variety of shapes and to the position of flaws on the work-pieces.

1. ま え が き

鑄仕上とは Fig. 1 のように、鑄造後鑄物の表面に残ったバリなどの余分なものを工具で切除し、表面を滑らかに仕上げる作業を指す。これは危険で苦渋な作業であり、従来から自動化の必要が言われながら、なかなか実現しなかった。

本文ではこの鑄仕上をほぼ 95 % の成功率で行ない、かつ単に作業環境を改善するだけでなく、性能/コスト比の点でも人手に対抗できるものとして実用化された、ロボットシステムのエンジニアリング手法を述べる。

鑄仕上のロボット化がむずかしいのは、まず鑄物が代表的な多種少量品で、ロット数は小さく、かつ切除箇所の種類、形状、位置もまちまちなため、機械的に処理できない点にある。溶接用やプレス用などほかのロボットに比べても同じシステムの繰り返しが少なく、台数効果によるコストダウンが期待できない。

この問題に対処するため以下に述べるシステムでは、制御、工具から周辺機器に至る各構成要素にできるだけ

Fig. 1 Fettling work for castings

市販品標準品を使って、コストの上昇を押さえると共に、システム設計変更がし易いように考えた。

人手作業を解析して可能なものは自動化したが、必ずしも完全自動化にこだわらず、人手に残すべきものは残した。

また鑄仕上げ作業中は、工具を把持するロボットのアームに大きな切除力がかかる上に、同じロットでもワークごとに切除箇所の位置も形状も異なる。大きいワークになると、ワーク自体の寸法さえ数 mm の許容差がある。

この問題は通常のプレイバックロボットでは対応できないので、切除時に工具が受ける反力をインプロセスで

* 原稿受付 1987. 3. 9

** グラフテック 株式会社 技術本部 Graphtec Corporation, JAPAN : 3-19-6, Nishishinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141, JAPAN

Key Words : robot, system design, fettling, deburring, castings.

検出し、教示軌跡を自動的に修正する、力・位置のハイブリッド制御を採用した。

なおシステムが円滑に作動するためには、工具の自動交換やワークの位置の検出など周辺機器の整備も必要であった。

2. システムの課題

鑄仕上ロボットシステムを設計する上での課題はつぎの如くである。

2.1 需要

鑄仕上はその多様さのために、自動化には機能が柔軟なロボットに期待されるところが大きい。最近の調査¹によれば、現在わが国の鑄造工程に導入されているロボットは891台と推定され、同じくアーク溶接用の8,946台、プレス用の7,910台などと比べてはるかに少ない。しかしアーク溶接用およびプレス用の伸びの予想が、今後5年間に年率12～13%であるのに対し、鑄造用は22%と高い。

特に鑄造工数全体の20～40%を占める鑄仕上は、苦渋度が高いにもかかわらず自動化がおくれており、自動化の需要が大きい。

2.2 性能とコスト

Table 1¹は鑄造、アーク溶接およびプレス用ロボットの機能と価格を比べたものである。表によると鑄造用ロボットはほかの2機種に比べて、機能は高くないが、価格では上回っている。これは鑄造用ロボットが大型で強力な構造を必要とするためであろう。とくにロボットのアームはバリの切除中に100 Nのオーダの力で加工し、仕上精度は1 mm以内とか、0.1 mmのオーダを要求されることが多い。研磨の場合は要求精度が0.01 mmに達することもある。また、仕上残しが出れば手直しのためにシステムの処理能力が落ち、削りすぎて母材にキズを付けるとワークの廃却を招く恐れもある。

Table 1 Investment of robots, their functions and unit price¹

(The values are after the results of questionnaires)

used for	foundries	arc welding	press
higher grade* of control	60 (16%)	1,324 (88%)	99 (8%)
others**	304 (84%)	173 (12%)	1,188 (92%)
total	364 (100%)	1,497 (100%)	1,287 (100%)
($\times 10^3$ yen) average price	10,370	5,410	6,630

* playback, NC, intelligent robot

** others

したがって鑄仕上システムは、強力な上に高い性能と高い信頼性が必要だが、他方で鑄造業界では設備投資が抑制される傾向もあって、性能と共に性能/コスト比も重要な課題である。

3. 開発の要点

この鑄仕上ロボットシステムの開発にあたっては、次の諸点に注意を払った。

3.1 標準部品の使用

差し当たりほかのロボットほど台数効果によるコスト低減が期待できないので、アームや制御機器はもちろん、工具やプログラム言語に至るまで、できるだけ実績のある市販標準品を使い、コストを抑えると共に部品の調達、アセンブリ、保守などの負担を軽くした。

たとえばこのシステムの1号機に8ビットのマイクロプロセッサを使った。当時すでに16ビットのプロセッサも相当使われていたが、デバッグのために現場に持ち込むインサーキットエミュレータが、安定普及していないことが16ビット機を使わない理由の1つであった。

3.2 システムの拡張・縮小

同一システムを多数生産することがあまり期待できないので、ロボットの機能を対象ワークに応じて変更し易くした。特にワークが簡単になった場合に機能を縮小できることを心がけた。

たとえば直角座標形ロボットを用い、基底の直動型3自由度が工具のワークへの接近・後退と長い切除線の追跡を受け持ち、これら直動型アームの先に取り付けた回転関節に工具のワークへの当て方や切除、退避を行わせている。直角座標型のアームはワークの大小に応じてスパンの設計変更が容易だからである。

また切除線が直線状の簡単なワークには、自由度3のロボットを使って成功したこともある。

3.3 人手作業に似た動作

鑄仕上は苦渋な作業であるが、決して単調ではない。そこで熟練者の人手作業を分析し、ロボットにそれに似た動作を行なわせた。

たとえば人間は1本の直線バりを切除する間にも、速度を色々変えて母材への削り込みを防いだり、過大な切除力を押さえている。時には速度をマイナス、すなわち工具を後退させている。そこで切除抵抗の大きい箇所に対して、工具に進み→停止、あるいは進み→一寸後退→再前進、をくり返す切除サブプログラムを導入して成功を収めた。

3.4 人手に残す作業

完全自動化を目指し過ぎてシステムの性能あるいは性能/コスト比に無理がかからぬよう、人手作業でも危

陰や苦渋の少ない部分は人手に残した。

たとえば背の高いバリを切除するとき、作業者は初めハンマでバリを叩き折って、2~3 mmの高さに揃えてからグラインダで切除している。グラインダだけで切除すれば長さ1 m 当り 250 s かかるところを、ハンマを併用して 150 s で済ませた例がある。

しかしハンマと似た打撃工具をグラインダと一緒に組み込んで、バリの背を叩き折りつつ、同時に切除してみたが成功しなかった。この複合工具は単一グラインダより早く切除する力はあったが、ハンマがバリを叩く瞬間の衝撃で、グラインダがワークに食い込むのが不成功の原因だった。

この場合バリをハンマで叩き折るのは思ったほど苦渋でなく、人手に残してもそれほど問題にならなかった。

3.5 手持ち工具の利用

ここではできる限り在来手持ち工具を利用した。手持ち工具は永年の使用実績によって改善され、鑄仕上作業に適した品が揃っている。前述の市販標準品を使う趣旨にも適っている。

たとえば、0.01 mm の精度を要する研磨仕上では、工具を押しつけた時の工具のバネ特性を利用して、研磨面にならって作業をさせる。その際工具の押付力/撓み特性が制御の成否を左右するが、Fig. 2 に示すように多くの市販工具が品揃えされており、これらを適宜に選択して研磨仕上の自動化ができる。

Fig. 2 Deflection curve of grinding tools

なおここでは鑄仕上の問題のほとんど²を占める手持振動工具による作業を対象にしている。手持振動工具以外にもバーナ、アーク、レーザあるいはプレス・切削加工などによって鑄仕上を行なう工法があるが、適用範囲が狭いので対象としなかった²⁻⁴。

3.6 プロセッサ

鑄仕上では工具の切除速度をあまり上げると、仕上面が焼けたり、工具の劣化を早めたりする。そこで工具を把持するアームの速度は高々数 10 cm/s であり、たとえ

ば塗装用ロボットのアームが数 m/s の速度を要求されるのと比べて遅い。

したがってアームの制御演算もそれほど早くなくて済むので、多少演算速度は遅くても、実績が豊富で周辺機器が整備されているプロセッサを選んだ。特に 1 号機では 8 ビット系を使った。

8 ビット系の演算速度が遅いのを補うため、Fig. 3 のように 3 個のマイクロプロセッサを単一共通バスで結合した。この系で注意せねばならないのは各プロセッサから共通メモリへのアクセス競合のため処理時間が長引くことである。

テストの結果 Fig. 4 のようにプロセッサの数が 4 個までならば、競合のない場合に比べて処理時間が 10 % しか増さないことが判った。なおこのテストは供試プロセッサが共通メモリをアクセスすると、必ず外のすべて

Fig. 3 Multi-processor system

Fig. 4 Overhead due to access contention between multi-processors

Fig. 5 Monthly total of engineers' hours spent for an automatic system development

のプロセッサが先にアクセスするという、最も悪い条件で行なったものである。

3.7 ソフトウェア

この種の自動化システムではソフト開発コストが大きい。特に同じシステムの繰り返し使用をあまり期待できない鑄仕上の場合、ソフトウェアのコストが割高になる。そこでアセンブラ言語より高位で開発効率が良く、ツールやマニュアルも普及しているものの一つである PL/M 言語を選んだ。

普及している言語を選んだのは、システム設計者との関係者との意思疎通を容易にするためである。たとえば Fig. 5 はバリ取りに似たある金属仕上加工の自動化システムの開発時間を集計したものである。図に示すように、開発が進むにつれてシステム設計者はコーディング、機器あるいはテスト関係者との共同作業が多くなる。これらの関係者とシステム設計者が相互に正しく効率よく理解するには、プログラムが高位言語で書かれている方がはるかに良い。

4. ハイブリッド制御

4.1 制御の課題

Fig. 6 は最大荷重 350 N, 最大ストローク 1,900 mm の直角座標形ロボットの基底部の自由振動を有限要素法で解析したものである。図のように、アームを伸ばしたとき (A) と、縮めたとき (B) とで先端の振れに大きな差がある。

鑄鉄鑄物では長さ 2 m 程度のものも少なくない。ま

Model A : Arms are extended

Model B : Arms are withdrawn

Fig. 6 Modal analysis of a body of robot

た、バリの切除中には 100 N のオーダの、軽切削の工作機械並みの反力がかかるので⁵、アームの剛性だけで

前に述べた 0.1 mm もの精度をロボットの全作業領域にわたって維持するのはむずかしい。さらに鑄仕上げの場合、ワークごとに切除箇所的位置も形状も異なるため、位置軌跡の繰り返しプレイバック形の制御では工具が空を切ったり、あるいは反対に切除し過ぎて母材をキズ付けたりする。

4.2 制御方式

このシステムでは工具の側にある程度弾性を持たせ、切除時に工具とワークの間の接触を保つ。また、工具にかかる反力をインプロセスで検出し、その値が小さければ教示位置を越えて工具をワークに近付け、反対に大き過ぎれば後退させる修正制御を行なった。この工具の移動は 3.2 で述べたように回転関節が受け持つ。

回転関節が動けば工具の切除点のワールド座標が変わり、ワークと工具の関係位置が崩れる。これを直角座標型の 3 直動アームの運動で補償する。ただし切除点の変位を元どおりの教示軌跡に沿うように完全に補償すると、上で述べた反力信号による修正制御をしないも同然になる。

そこでこのシステムでは、まず切除点を元どおりにするための直動 3 アームの変位分を計算し、その値に 1 より小さい適当な係数を乗じたものを 3 直動アームへの変位指令値とする。

係数の適正な値は工具の性能や軌跡の教示の仕方によっても変わるので、教示作業の度に熟練者が設定する。

この方式は多分に熟練者の技能に依存しているが、組立作業で用いられている⁶力・位置のハイブリッド制御の一つと考えられる。

ここで述べたハイブリッド制御を使って 150 kg の鉄鋼物の鑄仕上げを行なった例を Fig. 7 に示す。このワークで初めの教示位置と実際のバリとの間のズレが位置にして 10 mm 以内、姿勢にして 3.5° 以内ならば、0.1 mm のオーダの精度で鑄仕上げができた。

なおこの修正機能があるため、バリの形状やワークそのものの寸法に不揃いがあっても、ワークごとに一々教示し直すことなく仕上ができ、教示がラフでも良いので教示時間を短縮できる。

たとえば後出 Fig. 10 (b) に示すアルミ鑄物の鑄仕上げでは、プレイバック形ロボットでは 400 点の教示が要ったものを、128 点というラフな教示点数でプレイバックと同等の仕上げができた。

反力は十分大きいので在来ロードセルや工具電流によって精度がよく検出できた。

5. 周辺技術

システムが円滑に作動するために次のようなロボット

(a) Before fettling

(b) After fettling

Fig. 7 Results of the automatic fettling

の周辺の整備も必要だった。

5.1 工具摩耗の補正

摩耗のために工具の寸法が変わると、軌跡プログラムを修正しなければ工具とワークの関係位置が狂う。

Fig. 8 で正常な工具を投光/受光器の間に進入させ光が遮られた瞬間のアームの位置を記憶する。工具が摩耗してきたら、前と同じ方法でアームの位置を決めて両者の差を求めればそれが工具の半径方向の減り分 Δl_2 である。

そこで、工具が Δl_2 だけ摩耗したら l_2 の代わりに $(l_2 - \Delta l_2)$ を使ってワールド座標を求め直す必要がある。また工具が摩耗すると単に軌跡位置が変わるだけでなく、目詰りや片減りその外のために切除特性が落ちる。した

Fig. 8 Sensing of the wear of tools

がって切除速度をはじめ各設定パラメータも変更する場合が多い。

5.2 工具交換

複数の工具を使わないと1個のワークを仕上げられない場合には工具の自動交換装置を設ける。市販工具の寸法形状は様々だから、工具を交換すると工具先端の位置が変わるので、前記の工具の摩耗の時と同様に、新しい工具に合わせて座標の変換演算を行なう外、種々の設定パラメータを切り替える必要がある。この作業は人間よりも自動演算の方がはるかに正確に早くできる。

また自動交換だから、危険度の高い鋳仕上げ作業の領域に作業者が立ち入る機会を少なくする意義もある。

しかし人手作業では、視覚に基づく判断や歩く機能、あるいは身体の屈伸を利用して効率よく工具を持ち替えており、現在の交換装置で人間以上の効率を得るのは容易でない。

5.3 ワークの位置誤差の修正

ワークの位置決めが所定の値から多少ズレても、ロボットの軌跡のプログラムの方をワークの実際の位置に合わせて修正して、正しい切除を行ないたい。ズレを許容できないと位置決めをロボットと同等の精度で行なわねばならず、位置決め装置のコストも位置決め時間も増加するからである。

ワークの位置や姿勢を検出するには視覚センサが適している点が多く⁷、その性能/コスト比も急速に向上している。しかし鋳造用ロボットに対する許容投資額がおおよそ1,000万円といわれる¹のに対し、空間の1点を $\pm 1\text{ mm}$ の精度と2sの測定時間で検出するのに、市販の視覚センサでは1,000万円近いコストが見込まれた経験がある。測定時間を15sまで許容しても、コストは百万ないし3百万円のオーダーでまだ割高であった。

そこでとりあえず位置ズレだけを検出するため、ワークの形状を代表する箇所にあらかじめ印を付けておき、これを位置決め後マニピュレータに付けたセンサで走査検出し、予定の位置との差を検出することにした。

これには簡単な方法がある。ワークが鋳物であることを利用し、ワークの代表箇所にFig. 9のような鋳出し部を作る。それも図のように α の角度を付けておくと、投光/受光器が走査してちょうど鋳出し部にきたとき反射が最大となり、検出のS/N比が良い。鋳出し部を後で機械加工してしまう箇所に選んでおけば、ほとんど余分のコストや労力をかけずにワークの位置を検出できる。

6. 実例—アルミホイールの仕上げ—

Fig. 10 (a) は20 kg 程度のアリミホイールの鋳仕上のために以上に述べた手法を使って開発したロボットシス

Fig. 9 Cast bump as the reference point of workpiece

(a) Overall view

(b) Fettling of aluminum wheels

Fig. 10 The automatic fettling system

テムである。諸元をTable 2 に示す。

工具はヤスリで、これを上下動させつつ一定の力でワークの面に押し付けてバリを擦り取る。バリと母材との切除抵抗の差が大きいののでバリだけ切除し、 $+0$ ないし -0.3 mm の仕上げ精度を得ている。仕上げ箇所の例をFig. 10 (b) に示す。

Table 2 Specification of the automatic fettling system

	item	specification
body-arm	robot body	3×cartesian 2×link
	X: fore/back	span: 950mm speed: 0.3m/s
	Y: left/right	span: 950mm speed: 0.3m/s
	Z: up/down	span: 400mm speed: 0.3m/s
	α : angular	span: 480° angular vel: 200°/s
	β : angular	span: 210° angular vel: 200°/s
	rated load	150N
	accuracy of repetition	± 0.4mm
controller	drive	DC servo
	memory	2500 points
	control	force sensor: load-cell
	outer signal	I/O 10 points
power	electric power	AC200V 60Hz, 8kVA
	pneumatic	0.5MPa, 1Nm ³ /h
periphery	position of workpiece	optical sensing
	periphery	roller conveyor

このシステムはすでに実働し、5,000個以上のワークを処理した結果では全作業の85%が自動化された。残り15%のうち、5%は搬送ラインへのワークの挿入に使われ、仕上げ後の目視検査と手直しに10%が費やされている。曲率のきつい隅内部に時折削り残しが出るので切除成功率は95%である。

コストは1,200万円、5.3で述べた鋳造ロボットの許容投資額1,000万円を少し上回るが、従来の人手作業の85%を自動化できるので、2年強で投資回収ができ、性能/コスト比の点でも実用に耐える。

方式はつぎのとおりである。

- ・構造：工具の当て方が常に垂直に近いのでアームの自由度を6から5に減らした。
- ・制御：位置のラフな教示の後、再生時はロードセルにより反力を検出し、力・位置のハイブリッド制御を行なう。Fig.10(b)で指で示しているホール部を5点教示するだけで仕上げできた。
- ・周辺：位置決めの後、ワークの鋳出し部を光学センサで走査して軌跡を自動修正した。

7. むすび

鋳造工程で自動化が望まれながら実施が遅れている鋳仕上作業を、ほぼ95%の成功率で人手に代わって行なうロボットシステムを述べた。

鋳仕上の自動化が困難なのは、ロボットが①強力な切除作業を相当高い精度で行なう、②ワークのロット数が小さく、切除箇所は複雑で同じ軌跡の繰り返し効かない、の2つが重なっている点に在る。

本文では人手作業に対抗できる性能/コスト比を実現したロボットシステムの開発のエンジニアリング手法を説明した。すなわち極力市販の標準品を使い、システムを変更し易くするとともに、人手作業の内自動化すべきものは自動化し、人手に残すべきものは残した。

またプレイバック形では困難な、不規則なバリの切除を、工具の反力を利用した力・位置のハイブリッド制御で実用化した。

さらに工具交換をはじめ周辺機器を充実させてシステムの機能を高め、結局、人手作業の85%をロボットで行なえるようになった。

なお本文に記した内容の一部は(株)神戸製鋼所が中小企業事業団の委託を受けて研究した結果である。また開発に当り同社内外の多数の方の御指導と御支援をいただいた。中でも同社山本豊氏、堀口史郎氏、渡辺康次氏、今西悦二郎氏には特に御協力願ったのでここに謝意をこめて記させていただく。

8. 付 録

前出4.2のハイブリッド制御で、Fig.11の回転関節が反力信号によって動作し、初めの教示軌跡から外れるのを基底の直動型3アーム(X, Y, Z)の動作で補償する。工具の切除点Pの座標(x, y, z)を工具座標系O₁からワールド座標系OのP(X, Y, Z)に移す座標変換

Fig. 11 World and tool coordinates

マトリクスを

$$A = A_\alpha A_\beta A_\gamma \quad (1)$$

とする。

さて、 $\cos \alpha, \sin \alpha, \dots$ を $ca, sa, \dots$ と略すと、

$$A_\alpha = \begin{bmatrix} ca & -sa & 0 \\ sa & ca & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_\beta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\beta & -s\beta \\ 0 & s\beta & c\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_\gamma = \begin{bmatrix} c\gamma & 0 & s\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\gamma & 0 & c\gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

今 α, β, γ 軸をそれぞれ微少量 $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$ だけ動かしたとき、点 P のワールド座標上の変位 ΔP はつぎのようになる。

$$\Delta P = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \left(\Delta\alpha \frac{dA_\alpha}{d\alpha} A_\beta A_\gamma + \Delta\beta A_\alpha \frac{dA_\beta}{d\beta} A_\gamma + \Delta\gamma A_\alpha A_\beta \frac{dA_\gamma}{d\gamma} \right) \begin{bmatrix} l_2 \\ 0 \\ -l_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで(5)式の $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$ の代わりに

$$k_1 \Delta\alpha, k_2 \Delta\beta, k_3 \Delta\gamma \quad (6)$$

を使って

$$\Delta P' = \begin{bmatrix} \Delta X' \\ \Delta Y' \\ \Delta Z' \end{bmatrix} \quad (7)$$

を求め、直交直動3アームの移動でこの $\Delta P'$ だけを補償する。

ここに k_1, k_2, k_3 はある係数で、0と1の間の値を取り、熟練者が設定する。

参 考 文 献

- 1) 産業用ロボット長期需要予測報告書：日本産業用ロボット工業会, pp. 345~423 (1985)
- 2) 鋳造作業安全自動システム化技術開発：日本産業用ロボット工業会, pp. 46~134 (1976)
- 3) 大中：鋳仕上技術の現状と動向，総合鋳物，Vol. 22, No. 2, pp. 1~9 (1981)
- 4) 松本：ロボット利用動向調査部会報告，素形材センタ (1984)
- 5) 吉村：工作機械におけるモード解析，ファクトリオートメーション，No. 1, pp. 51~66 (1985)
- 6) M. Raibert & J. Craig：Hybrid position/force control of manipulators, TRANS ASME, Vol. 102, pp. 126~133 (1981)
- 7) 佐藤，長谷川：視覚フィードバックによるロボットの制御，計測と制御，Vol. 126, No. 2, pp. 122~127 (1987)