大型ピストン加工用FMSの構築

金 明秀** 高橋 勝*** 奥山義彦*** 樋口俊郎**

Construction of FMS for Large-size Piston Machining

Myung-Soo KIM, Masaru TAKAHASHI, Yoshihiko OKUYAMA and Toshiro HIGUCHI

The introduction of FMS (Flexible Manufacturing System) in machining of large-size pistons (greater than outer diameter 170 mm) has been desired, because various shapes are demanded and moreover the production lot size is small. The automation in FMS construction is essential, but in large-size pistons this is very difficult because the following problems have to be overcome: (1) The integration of various operations for effective floor space utilization. (2) The robot loader with the ability of accurate positioning as well as heavy movable load carrying capacity is demanded, because the positioning accuracy is necessary to the same degree of small (or middle)-size piston. (3) Measurement after every operation is essential to prevent the production of defective pistons, because the unit cost of the large-size piston is very high. (4) The dimension of the outer diameter in the machining of large-size pistons should be automatically controlled, but it has been dependent on the worker's skill owing to the complicated shape and its variety. The FMS construction for large-size piston machining was completed by applying the following representative techniques: (1) Integrated system of multiple operations for effective floor space utilization. (2) Automatic conveyor system consisting of robust robot loaders with accurate positioning and AGV (Automated Guided Vehicle). (3) Inner cooling pipe sensing by the ultrasonic inspection instrument and measuring system. (4) Development of non-circular outer diameter finishing machine being capable of machining complicated profiles and any type of piston. The advantage of constructed FMS is that the productivity increases to about 3 times as compared to the conventional manual line.

Key words: FMS, piston, integrated system, robust robot, ultrasonic inspection, non-circular machining, productivity

1. 序 言

内燃機関用ピストンは、エンジンの高性能化、高出力化、さらには車種の多様化に伴い、多様な形状が要求される。さらに、大型ピストン（ピストンの外径が $\phi 170 \sim 400 \text{ mm}$ のものを大型ピストンと呼ぶことにする）に関して言えば、その要求と共に生産方式も、小・中型ピストンにおける少品種大量生産に適している生産プロセスの専用化を図る専用自動化方式に対して、その生産ロット数の少なさから、生産プロセスに柔軟性を持たせて多様化を図るフレキシブル生産システム（FMS）の導入が望まれている。

しかし、大型ピストン加工において自動化する場合は、

- (1) ピストン加工工程が複雑であるため、工程数が多くなる。従って、フロア占有面積が大きくなりコスト増になって、自動化を進める上での障害要因の一つになる。このため、フロア占有面積を少なくする工程集約（高集約）が必要となる。
- (2) ピストンが大型で重い（ $\phi 400 \text{ mm}$ の場合、重さは約 200 kg となる）ため、可搬重量が大きく、さらに、高精度なロードが必要である。
- (3) ピストン単価が高いため、加工不良を出すことは望ましくない。従って、各工程加工完了ごとのワーク計測が必須である。
- (4) 外径形状が複雑・多様であるから、作業者が寸法管理しながら加工を行っている。従って、複雑・多様な外径形状に対して、自動加工ができる外径加工機が必要となる。

などの解決すべき問題点がある。

従来、大型ピストンの加工は、主に単能機を並べた一つまたは複数のラインにおいて、数個から数十個のバッチ生産（Batch Production）を行っていた。そして、各工程にはそれぞれ専任の作業者がついてマニュアル加工していたので、生産性が極めて低かった。

今回、大型ピストン加工の自動化を目指すとき解決すべき問題点をクリアし、大型ピストン加工用FMSを構築した。そして、構築したシステムの評価を行った結果、従来の生産ラインに比べて、生産性は約3倍に増えた。

そこで、本研究では構築した大型ピストン加工用FMSの概要、要素技術およびその評価に関して報告する。

2. 自動生産システムの概要

2.1 基本仕様

序言で述べた大型ピストン加工の問題点を解決するため、基本的方策として高集約型FMSを選択した。そして、幾つかの加工システムに関して経済性評価を行い、比較検討した結果、基本仕様は以下のように設定した。

- (1) システムの形態：多品種少ロット対応FMS
- (2) 生産品：内燃機関用ピストン（ $\phi 170 \sim 400 \text{ mm}$ ）
- (3) 対象アイテム数：約 80 種
- (4) 最小ロット数：10
- (5) 加工工程数：最大 60 工程
- (6) 稼働時間/日：22h
(有人運転時間[2交代]：16h, 無人運転時間：3h×2回)
- (7) 段取り(アイテム変更)回数：20回/月
- (8) 時間稼働率：85%以上
- (9) オペレータ人員（1交代あたり）：生産時（1名）、段取り時（2名）

* 原稿受付 平成 11 年 6 月 2 日

** 正 会 員 東京大学工学系研究科（東京都文京区本郷 7-3-1）

*** イズミ工業（株）（桶川市赤堀 2-17）

(10) CT (サイクルタイム) :13 分～60 分(アイテムによる)
また、基本仕様を満足させるためのシステム構成を以下に示す。

2.2 自動生産システムの構成

今回構築した FMS の外観を図 1 に示す。また、そのシステム構成を図 2 に示す。特徴としては、段取り時間（ここではアイテム変更時にワークのアウトプットが停止している時間と定義する）の最短化を目指し、全体を 2 つのブロックに分けている。段取り要領は次の通りである。いま、A ブロックが段取りに入っているとすると、その間に A、B 間の中間ストックにストアされたワークを取り出し、B ブロックは生産を続ける。次に B ブロックが段取りに入ると、ワークのアウトプットは停止

するが、A ブロックでは新規アイテムの生産が再開され、ワークは中間ストックにストアされる。以上の場合、アウトプット停止時間は「B ブロック段取り時間」+「B ブロック加工時間」のみとなり、全体が 1 つのブロックの場合と比較すると約 1/2 となる。以上の段取り方法を実現させるために、

- (1) 各ブロック単独運転ができるよう、独立制御とした。
- (2) 中間ストックには、通常生産時のワーク搬送機能と、段取り時またはトラブル発生時に有効に働くストア機能としての 2 つの機能を持たせた。

Fig.1 Appearance of the FMS for large-size piston

Fig.3 Robot loader

Fig.2 Layout of the FMS for large-size piston

Fig.4 Automated guided vehicle

3. 自動生産システムの要素技術

ここでは本FMSを構成する重要な要素技術に関して述べる。

3.1 ワーク自動搬送システム

(1) ガントリー型ロボットローダの採用

本FMSで採用したロボットローダの外観を図3に示す。本システムを成立させるためのローダに対する要求事項としては、

①ワーク最大可搬重量：200kg（ハンド重量除く）

②加工機ジグにワークを取り付ける際のはめあいすきま $+0.03\text{mm}$ 以下でもクリアできること（この点に関してはロボットの位置決め精度だけでは不十分で、ワーク取付けジグの基準径部を自動可変タイプとした）。

③段取り時の作業スペースを十分に確保できるよう配慮する。などがあげられるが、各種ロボットローダを比較検討した結果、ガントリー型ロボットローダを採用した。

また、ローダの動作フローに関しては、次のような特徴を持たせている。非定常時（初品加工開始時、図2のK1、K2、K3工程の検査・測定によって、不良品が見つかった場合、及びロットの最終品排出時）には、それに対応できるサブフローを対応させている。さらに、A、B各ブロックのネック工程（CTが最も長い工程）の場合は、ワーク搬入・搬出を最優先するネック工程優先フローを適用し、ネック工程の稼働率を上げる。

(2) 簡易型AGV (Automated Guided Vehicle) の採用

Bブロックより面取りステーションに向けて完成品を搬出するために、コスト、スペース効率、レイアウト上のフレキシビリティ等を考慮し、図4に示すような簡易型AGVを採用した。また、Bブロックでの完成品の受渡しはガントリーロボットから直接移載するため、AGVにはリフト機構を持たせてある。また、面取りステーションではワークを載せたパレットを下ろし、その後、空のパレットを積載しAGVステーションに戻る。

3.2 超音波冷却管検出システム

従来、作業者が手作業で行ってきた各種計測・調整を、本システムではすべて自動化する必要があった。ここではインライン計測システムの中でも特に開発に時間のかかった超音波冷却管検出システムについて述べる。

Fig.5 Inner cooling pipe and machining position

Fig.6 Ultrasonic inspection system of inner cooling pipe

比較的大型のピストン内部には、ヘッド部冷却のために冷却管（スチールパイプ）がアルミニウムで鋳ぐるまれている。図2のOP2工程において、ピン穴荒加工後にピン穴内側より冷却管に至る冷却油出入り口を加工する必要がある。ピン穴荒加工を行った段階では、パイプは露出しておらず、パイプの位置も誤差が大きい（最大 $\pm 3.5\text{mm}$ ）ため、従来は作業者が手動で前加工（実際の寸法よりも溝幅を狭く、溝深さを浅く加工）を行い、パイプの位置を探り当ててから冷却溝（図5参照）加工を行っていた。

今回、冷却管検出システムを開発するにあたっては、前加工の有無、検出精度、環境磁場影響度、雰囲気影響度、等について各種システムの比較検討を行ったが、最終的に高精度な検出を安定して実行できる超音波による検査方式を採用した。超音波冷却管検出システムの概要を図6に示す。このシステムはOP2のMC（マシニングセンタ）に組み込まれ、超音波探触子（帝通電子製、MODEL 4720 10C6N-DL）の駆動はNC制御装置によって制御される。動作要領としてはピン穴荒加工後の切削面上を探触子が移動し、スチールパイプ位置と深さを測定して、データをMC本機のNC制御装置に送る。NC側では送られてきたデータをもとに最適位置に最適深さの溝入れ加工を実行する。

Fig.7 Block diagram of non-circular machine

3.3 ピストン外径仕上げ非円加工機

一般に、ピストンの外径形状はエンジン運転中のピストン自身の熱的、機械的変形、及びシリンダボアの変形を考慮して、常温時、横断面形状が楕円に近い非円形状、縦断面形状がテーパおよび樽型となっている。また、その種類も多様である。

従来からは、ピストンの外径加工は倣い加工方式¹⁾で行っている。倣い加工方式は、ピストンと同形状の倣いモデルを機械主軸台に、ピストンと同軸上に取り付け、倣い装置により加工する方法である。しかし、倣い加工方式は、倣い装置の追従性に限界があるため回転数が低い、段取りに時間がかかる、さらには、倣いモデルの製作形状に制限があるなどの理由から、ピストン加工の自動化を目指すとき、外径仕上げ加工機として適していない（特に、大型ピストン外径加工の場合は、小・中型ピストンに比べると外径形状がより複雑・多様であるから、作業者が寸法管理しながら加工を行っていた）。従って、ピストン加工の自動化を目指すとき、ピストン外径仕上げ加工機には、高性能、高精度、そして多様な外径形状が加工できることが要求される。

著者らは、その要求に対して、変位量が 0.1~1mm 程度で、駆動パワー・高速応答性を共に備えた位置決め機構として、電磁石による電磁吸引力を用いた高速位置決め機構を開発し²⁾、その位置決め機構をバイトの位置決め機構として用いることにより、加工性能が高い（倣い加工方式に比べて約3倍以上の回転数で加工できる）ピストン外径仕上げ非円加工機（以下、非円加工機と呼ぶ）を開発した³⁾。また、非円加工機は、計算機

Fig.8 Developed non-circular machine

で制御されるので、任意の外径形状も加工できる加工機である。ここでは、開発した非円加工機のシステム構成に関して簡単に述べる。

図7に非円加工機の構成、図8に実際の非円加工機の外観を示す。非円加工機は、位置決め機構、計算機、そしてNC旋盤から構成されている。ピストンの加工には送り方向に対して任意に変化する断面形状の入力データと断面形状の基本径が変化するテーパ加工データが必要である。非円加工機では、あらかじめ断面形状の入力データは計算機へ、断面形状の基本径が変化するテーパ加工データはNC旋盤のコントローラへ格納する。

Table 1 Comparison of manual system vs. constructed FMS

Estimation items	Manual system	Constructed FMS	Efficiency
1.Space occupation (Index)	1	0.33	1/3
2.Number of machines	30	7	1/4
3.Number of operators (Index)	1	0.23	1/4
4.Operating hours (Per day)	8h	22h	2.8 times
5.Lead time (Index)	1	0.1	1/10
6.Utilization ratio (Equipment efficiency)	65	80	15% up
7.Productivity (Index)	1	2.94	3 times

断面形状の加工は、旋盤の主軸に取付けられた 512 pulses/rev のエンコーダにより主軸の回転角を検出し、計算機内に格納されている入力データを、エンコーダからの検出信号によって、順次、位置決め制御系へ出力することによりバイトの位置決めを行い加工する。また、テーパ加工も、エンコーダからの検出信号に同期して、NC旋盤のコントローラ内に格納されているテーパ加工データを出力し、NC旋盤のサーボモータを駆動することによって位置決めを行い加工する。従って、バイトの位置決め方向の動きとテーパ方向の動きは同期している。

また、高精度を実現するため、学習制御の一種類である、逆伝達関数補償法を組み合わせた繰返し制御⁴⁾を適用した。これは、フィードフォワード制御の一種で誤差（入力と出力との差）を数回繰返して補償することによって、最終的には誤差をなくす高精度制御方法である。

以上のように、非円加工機は計算機制御によって、いかなる外形形状も加工でき、多様な外形形状が要求される大型ピストン加工には必要不可欠である。

4. 評価

今回構築したFMSの評価は、従来の生産方式との比較から生産性の側面から行った。その結果、当初設定した基本仕様は、構築したFMSによりほぼ達成された。また、表1からも明らかなように、従来の生産方式との比較をすると、生産性は約3倍に増えた。

5. 残された問題点と今後の課題

5.1 無人化対応能力の向上

(1) 切粉処理に関して特にアルミニウム鍛造品を加工した場合、切粉がカール状につながりやすく、機内からの切粉排出が困難となる。現在までに高圧クーラント(6.5MPa)による切削点処理対策を行ってきたが、十分な効果は得られていない。

この点に関しては、より高圧(15.0MPa)にしないと切粉の破断には至らないと推定される。

(2) 監視機能の強化

① 工具破損検出：現状では機内タッチセンサを用いて、加工サイクルごとに破損検出を行っているが、サイクルタイムが延びるという欠点がある。将来的にはAEセンサ等を用いたリアルタイム検出方法の適用が考えられる。

② 自動補正機能に関して：現状においても仕上げ工程の一部で計測機からのフィードバック補正を行っているが、その他の残された工程に関しても、重要部位については機内計測後、自動補正を行う必要がある。そのためにはさらに機内計測精度を高める必要がある(±0.01mm以内)。

5.2 フレキシビリティの向上

システムのフレキシビリティを向上させるためには、多種多様なワークを加工できることと同時に、短時間のうちにそのアイテム変更を行えることが要求される。そのためには段取りの自動化(人が介在して調整することなく、ジグを交換し、良品確認を完了させる)が必要となってくる。そのためには、主に(1)ロボットによるジグ交換の自動化と、(2)品質確認の自動化のためのインライン計測システムの充実の2点をあげられる。

6. 結 言

大型ピストン加工の高効率化をはかるために加工システムの自動化を目指し、その過程における諸問題をクリアし、大型ピストン加工用FMSを構築した。

また、構築したシステムの評価を行い、従来の生産ラインと比較した結果、代表的パラメータとしての生産性は約3倍に増えた。

また、本システムは、将来構想としてのファクトリーオートメーション(FA)に向けた第1ステップとして、また、そのサブシステムとしても機能するよう十分配慮して開発を行った。

以上の結果をふまえ、当初設定した基本仕様をほぼ満足するシステムを構築することができたといえる。今後はFMSとしての完成度をより高め、同時にFAへ向けての展開をはかってゆく予定である。

参 考 文 献

- 1) 自動車用ピストン編集委員会編著：自動車用ピストン，山海堂，(1998) 221.
- 2) 樋口俊郎，山口智実：電磁吸引力を用いた高速位置決め機構（第3報高速非円加工への応用），1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論集，(1989) 441.
- 3) 樋口俊郎，金 明秀，山口智実，田中 実：内燃機関用ピストン加工高速NC旋盤の開発，1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論集，(1990) 119.
- 4) 樋口俊郎，山口智実：逆伝達関数補償法を組合わせた繰返し制御を適用したバイトの位置決め制御，システムと制御，30，8 (1986) 503.