人間中心生産システムの研究*

(第4報, NC 工作機械用人間介入形制御の研究)

中 沢 弘^{*1}, 鐘 江 徹^{*2}

Study of a Human-Oriented Manufacturing System (4th Report, Human-Interactive Control for CNC Machine Tools)

Hiromu NAKAZAWA and Tohru KANEGAE

This paper deals with the concept of human interactive control (HIC) which is one of the basic technologies for the implementation of a human oriented manufacturing system. The HIC system was incorporated in a CNC lathe with a laser displacement meter. Higher machining accuracy was obtained through the HIC system compared with the conventional feedback control system. Moreover, higher satisfaction of both beginners and skilled workers was obtained for the HIC system than for the conventional one.

Key Words: Human Oriented Manufacturing System, Human-Interactive Control, CNC Lathe, Machining Accuracy, Worker Satisfaction, Laser Displacement Meter

1. 序 論

1・1 はじめに 産業革命以来続けてきた工業技術の発達により, 人間は機械システムの高性能化を繰り返してきた。そのため, 生産技術はより複雑化し, それを自動化することにより高効率化が図られてきた。しかし, その結果現場における作業者の存在は軽視され, 人間は機械に合わせた単純な作業を行うことを強いられるようになると同時に, 創造力や独創性といった人間の尊厳にかかわるような能力ではなく単純な肉体労働が要求されてきたことで生産現場が魅力の感じられない職場となってしまった。このような製造業の完全自動化の流れにおいては, 作業者の負担は確かに減少するが, 一方でそのように高度に自動化されたシステムでは多種多様な生産条件に柔軟に対応することは困難であり, 生産性も思うようには向上せず, 設備投資の過剰を招く結果となってしまっている。またそのような自動化された生産形態では熟練作業者は育たず, 技術の伝承という面においても非常に困難な状況

にある。

1・2 人間中心生産システムの概念 このような状況に対して, これまでの完全自動化のように人間を機械に従属させるのではなく, 人間の優れた能力を積極的に取り込み, 自動化とうまく融合していくことでシステム全体の能力や柔軟性を高めようという考え方として提案されたのが人間中心生産システム(Human-Oriented Manufacturing System HOMS⁽¹⁾⁽²⁾)である。これは実際に作業に携わっている人間が, システムを自分の意志で自由に操作でき, 作ることに誇りと喜びが感じられ, さらに作業者の経験や勘が製品に生かされることを目標としている。

1・3 人間介入形フィードバック制御 従来の制御理論の中心はフィードバック制御(図1)であった。このフィードバック制御は, 加工精度向上のためにも広く用いられていてきた。しかし, この制御方式ではフィードバックするための情報を取り出す場所が問題

Fig. 1 Conventional feedback control

* 原稿受付 1995年1月20日。

^{*1} 正員, 早稲田大学理工学部 (〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)。

^{*2} バイオニツ(株) (〒359 所沢市花園4-2610)。

となる。

加工精度の信号を切削直後に取り出してフィードバックをかけられれば、このような単純なフィードバック制御でも十分な加工精度が得られる。しかし、現実には加工形状は複雑多岐にわたるので、切削直後の加工誤差を検出することはほとんど不可能である。

したがって現在の補正技術はほとんどが、加工後にオンラインかそれもできないときはオフラインでワークの代表的な寸法を計測し、それをもとに補正値を加えるという方式をとっている。しかし、この場合には様々な条件が絡み合って適切な補正が行えないのが現状である。例えば、材料などはロットにより微妙な差が生じることがあり、これが加工においてわずかながら影響を及ぼしてくることがある。さらに、工具の熱膨張や室温の変化なども加わってくる。また同じ切込みでも切削速度を変えると切削力も変わりワークのたわみも変化する。またワークの剛性は場所によって変わるのでどこも同じ切込み深さで補正してしまうと場所によってかえって誤差が出てしまう。このように実際の加工では、ソフトウェアだけではカバーしきれない誤差に影響を与える多くの因子が存在する。

しかし、熟練した作業になるとこれらを経験などによって無意識に判断しているものと考えられる。このようなノウハウなどを完全にシステムに取り込むことはほとんど不可能である。むしろ人間が介入して、人間の勘や暗黙知や創造性といったものを積極的にシステムに取り入れる必要がある。その部分を人間の能力に置き換え、システムに取り入れることができれば、フレキシブルで高性能な生産システムを開発できる可能性がある。そこで、図2のような新しい人間介入形のフレキシブルなフィードバック制御を提案する。

ここで、介入する人間が熟練者である場合、その制御動作は一般的な伝達関数などではまず表現できないような、非線形的で高度なものとなり、目標以上の結果を得ることが期待できる。また、初心者であっても、熟練していけば機械化では真似できないような、柔軟で創造的な制御動作を行うことのできる可能性がある。

Fig. 2 Human interactive control

本研究はそのような用件を実現するために、作業者の意志を柔軟に取り込むことのできる新しいマン・マシン・インタフェースに基づいた装置の開発の一環として、人間の経験や独創性をもって介入できる CNC 旋盤用の加工誤差補正装置を開発し、高精度な加工を可能にすると同時に、このシステムを使用することにより作業者に対する満足度の向上を図ることを目的とするものである。

2. 加工誤差補正装置

2.1 ハードウェア 本システムは、CNC 旋盤を中心として、制御用のパーソナルコンピュータおよび誤差測定用のレーザ変位計から構成されている。ハードウェアの構成を図3に示す。

CNC 旋盤とパーソナルコンピュータは 24 bit のデジタル I/O で接続され、通信制御をコンピュータ側のソフトウェアによって行なっている。CNC 旋盤は、1 μ m の最小設定単位をもち、これに現在位置読取り回路および座標系シフト回路が組み込まれており、ソフトウェアによって動作の切り替えを行うことができる。現在位置読取り回路は、NC のフィードバックに使用する機械座標値を読み出す機能で、読取り単位は 1 μ m である。

座標系シフト回路は、機械座標系の原点を設定された値だけ移動する機能であり、最大 $\pm 799 \mu$ m の移動量をもっている。この機能を用いて切込み補正動作を行う。

オンマシン計測に使用するレーザ変位計は、分解能 0.2 μ m、測定精度 1.0 μ m、レーザスポット径 110 ~ 140 μ m の可視光半導体レーザを使用し、パーソナルコ

Fig. 3 Hardware system

Fig. 4 Flow chart of measuring cutting error

ンピュータとは RS-232 C を介して接続されている。

2・2 加工誤差の測定 このシステムでは、作業者はまず通常の荒加工の後、削り代を残して一次仕上げ加工を行う。その加工精度をオンマシンで測定するため、ワークはチャックに取り付けたままの状態にしておく。次に、旋盤を静止させた状態で、タレットに取り付けてある非接触のレーザ変位計測定子を移動させることによって、測定プログラムにより自動的に加工誤差を測定し、パーソナルコンピュータに取り込む。誤差測定のフローチャートを図4に示す。

ただし、本研究においては単純な円筒形状を外周旋削して、その加工誤差を測定している。まだ自由な形状を測定できるレーザ変位計測定子が開発されていないからである。したがって実用的には複雑な形状を代表できるような径および長さの円筒形状をあらかじめ決めて測定を行うこととなる。

2・3 人間の介入による補正データの作成 作業者は一次仕上げしたワークの加工誤差を測定後、その加工精度をパーソナルコンピュータの画面上で確認しながら、最終仕上げに使用する補正値を作業員自身がマウスによって入力して補正データを作成する。この際、作業員は自分の経験や勘や創造性といったものをとて、自分の納得いくデータを作成することができる。このデータは作業員により独自に作られたものである。アルゴリズム化して自動生成させることは困難であるが、コンピュータのハードディスク上に保存しておくことができ、データベースとして利用することは可能である。補正手順のフローチャートを図5に示す。

2・4 補正加工 従来の加工誤差に相当する量だ

Fig. 5 Flow chart of correction

Fig. 6 Flow chart of process of sending data just in time

け NC 命令の工具経路を修正する補正加工とは異なり、作業員自身で補正データを作成した後、この補正データをもとにして工具の刃先をシフトさせながら補正加工(最終仕上げ加工)を行う。具体的には、工具の座標値データを取得した後、その座標での補正値を NC 側に送り、その分だけ工具刃先をシフトし補正する。ここで、通信にはある時間を要するので、送信が間に合わない場合は処理をスキップし(Judge Distance)、次の処理に備える。補正加工のフローチャートを図6に示す。

実際の生産では、この最終仕上げ加工後の精度を確認の上、今度は繰り返しの自動生産に移ることを目標とする。

3. 実験および結果

3・1 実験概要 旋削加工を最もよく代表する外周円筒旋削について、本システムを利用した加工誤差の補正実験を行った。ここで、ワークとしては S45C を、工具材種は超硬 P 20 を使用し、乾切削により行った。なお加工条件としては、ワーク長 100 mm、周速

100 m/min, 送り 0.1 mm/rev, 切込みは荒加工の場合は 1.0 mm, 一次仕上げ, 最終仕上げの場合は 0.5 mmで行っている。また, すべてチェック作業で実験を行った。

3.2 計測法の検討 レーザ変位計は非接触であるため, オンマシン計測する際にはプローブ等の接触式変位計と比較して, 測定子が被測定物に触れることによって生じる測定結果への影響が避けられ, 高精度に測定できる。また, 接触式のものよりも測定感度が高いため, 工具のチップングや切りくずによる表面の傷などもデータとして測定することが可能であり, 加工物自身の寸法や表面形状を知るだけでなく, 加工過程の確認や解析にも利用できる。しかし, その特性上ワーク表面の非常に微細な凸凹までデータとして取り込んでしまうため, 形状誤差と仕上げ面粗さを分離する必要がある。

前述の条件において, 直径 44.0 mm のワークを一次仕上げ加工したときの加工誤差をレーザ変位計により測定したそのまゝの結果を図 7 に示す。

この図から, 旋盤による切削を行った場合, 工具やワークの熱膨張による径を小さくする影響はあるが, 主として切削力によるワークのたわみ等の原因によって, 工作物はチャックから先端に向かって次第に径が太くなる傾向が見られる。ここではレーザにより被測定物の表面粗さも誤差データとして取得しているが, このままでは作業者が補正值を入力する際, 形状誤差の細部が判別できないので, 誤差データを平均化処理(フィルタリング)して表面粗さを除去し, 形状誤差と比較的大きい表面の凹凸だけを作業者に提供する。これをここでは加工誤差と定義し, 以後このデータを用いることにする。

また本実験においてはワークの母線上を測定しているため, 円周上の位置の違いによる測定精度への影響も考えられる。そこで, ワークの円周上の適当な 3 本

の母線上において加工誤差を測定し, その加工誤差の測定精度について比較を行い, その信頼性を検討した。また, 旋盤の送り機構の精度などによる影響も考慮するため, マイクロメータによる測定も併せて行った。その結果を図 8 に示す。

図 8 から 3 本の母線位置における測定値はほぼ同じ値を示していることが分かる。細部についても大体一致しており, 一部にばらつきが見られるが, これはワーク表面の切りくずによる傷が影響していたものと考えられるので円周上のどの母線上で測定しても問題ないことが確認された。

また, レーザ変位計の測定結果はマイクロメータによる測定結果と傾向がほぼ一致しているが, 端点に近い部分では若干値が異なっている。これは, 端面付近の加工中に切りくずが絡み, 表面に傷が付いたため測定値に差が生じたものである。レーザ変位計では, 表面粗さ上の数点をサンプリングし, それらの平均をとっているのに対して, マイクロメータでは測定領域がレーザよりかなり広く, その測定域(直径 5 mm)の中の最大値を測定しているため, 傷などに起因する突起成分が比較的現れにくくなっていると考えられる。

3.3 人間介入形制御による切削実験 補正作業を行うときには, 平均化処理した加工誤差データを単純に反転したものを自動的に提供できるようにもなっており(従来のネガティブフィードバックの考え方), これだけでも補正加工を行うことは可能である。しかし, この方法では前に述べた理由により, 誤差データとは本質的に異なるデータを補正データにも反映させてしまっているために高い精度が得られない。そこで, 本研究の目的である人間による介入を可能にしたモードが用意された。つまり, 作業者はこの反転したデータをさらに参考にして, 最終仕上げに使用する補正值データをマウスにより修正を加えながら手動入力によって作成することができる。

加工誤差を自動反転入力したフィードバック制御に

Fig. 7 Machining error measured by laser interferometer before filtering

Fig. 8 Comparison of different measuring methods

Fig. 9 Machining error after finish with automatic reversed input correction

Fig. 10 Machining error after final finish with operator intervention control

よる最終仕上げ加工, および作業員自身が補正值を作成する人間介入形制御による最終仕上げ加工を行った結果を図9, 図10に示す。また, これら二つの最終仕上げ加工後の加工誤差を比較した結果を図11に示す。

これらの結果から分かるように, 単純に加工誤差を自動反転入力した補正加工では高い精度が得られていないことが分かる。これは, 実測誤差の変動が大きいところは単に反映した補正值を与えると, 加工力の変動も大きくなり, 結果として仕上げ精度を悪くしているものと考えられる。その加工精度は半径で0~+20 μmである。逆に, 人間介入形フィードバック制御による補正加工後の加工誤差は半径で0~+3 μmの範囲に収まっており, 明らかに高い効果が現れている。人間介入形の場合の補正データはほとんど加工の経験のない者(共同研究者の一人である当時の大学院生)が行ったものであるが, それでもこの程度の成果が得られることは人間介入形制御の優れていることを説明している。

3.4 作業員の満足度評価実験 過去の研究⁽¹⁾により, 作業員の物作りにおける喜びの本質が, 技術習

Fig. 11 Comparison of machining error by two methods

熟・興味・社会貢献・創意工夫・主体性・フィードバック効果・多様性の七つの満足要因に起因していることが明らかにされた。つまりこれらの七つの満足要因をすべて満たした生産システムが重要であるということが確認されたが, 今回の実験においても本システムを使用したときの, 旋削作業における作業員の満足度評価を行った。

ここで, 本システムではまだ外周円筒旋削以外の複雑な形状の加工に対応しておらず, また実験用に準備した単一のワークのみしか切削しないので, 社会貢献度が低く感じられるのではないかと考えられる。そこで評価に際して上記の七つの満足要因のうち, 多様性と社会貢献の2要因を除いて評価した。調査方法は旋盤作業に関しての初心者・熟練者に対してアンケート調査^{(1)~(4)}(満足の度合いを7点法で評価してもらった)を行い, その結果を情報積算法⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾によりまとめて評価した。

情報積算法は複数のシステムの優劣などを決定する際, 評価しなくてはならない項目が複数個存在する場合に多くの評価項目を情報量の考え方から総合的・合理的に評価することができる方法である。また満足度の点数が各作業員, 各要因に対して求まるが, これを評価する場合, 平均点とか最大値とかでは総合的な評価にならない。情報積算法では平均値と点数のばらつき範囲が同時に評価できるという特長もある。

情報積算法においては, 情報量は少ない程良く, 情報量が零のときにはそのシステムが最も良いシステムであることを意味している。つまり, この満足度評価では, その要因において情報量が少なければ, それだけ満足度が高く, そのシステムが優れているということの意味するのである。詳しい計算方法については上記文献を参照されたい。

作業員の満足度評価結果を熟練者については図12に, 初心者については図13に示す。

図12より, 熟練者については全項目において情報

Fig. 12 Satisfaction of skilled operators

Fig. 13 Satisfaction of novices

量が低い値となっている。つまり高い満足感の得られていることが分かる。特にフィードバック効果については本システムの効果が大きく現れており、他項目と比較してその情報量が著しく減少している。これは現在のCNC工作機械は切削状態の情報に関して閉じた設計となっているが、本システムにより作業員自身が介入操作できるようになったことにより、作業員の満足感が得られたものである。この加工誤差補正システムがない場合のフィードバック効果の情報量が他の項目と比較して際だって高いことから本システムの有効性が確認される。特に加工誤差の測定については、従来オフマシンでマイクロメータ等により参考程度に行われていたが、本システムのようにオンマシンで直ちに測定を行えることや測定結果の視覚的になったことに満足感が得られたと考えられる。

また、創意工夫、主体性といった項目については、このシステムが人間の介入操作を助けるものであるため、情報量を下げる効果につながっていると考えられる。

初心者については熟練者の場合と同様にフィードバック効果において良好な結果が得られた。ここで初心者の場合に注目されるのが創意工夫・主体性の項目で

ある。システムがない場合の情報量はかなり高く、システムを使用することにより情報量が大きく減少している。これは初心者がCNCを含めた工作機械の操作に対し難しいという印象をもっており、切削加工の操作自体は変っていないのであるが、従来では熟練者でも難しかった加工誤差の補正が、初心者にも比較的容易な操作で実現できることに満足感が得られたと考えることができる。

技術習熟の項目は、初心者の場合には情報量の変化はない。これは、本システムの使用に際して、本来ならば誤差補正については経験などにより少しずつ技術的な知識を体得していくものであるのが、本システムが一般的な誤差の補正方法よりも非常に容易な操作で実現できるために、技術的な知識が得られなかったのではないかと考えられる。さらに長期間使用すれば当然この要因の満足度も高くなることが予想される。

興味についての情報量は、熟練者では減少しているものの初心者では逆に増加しており、これは初心者が自分自身で実際に加工(作業)を行った経験が少なく、興味に関する印象度が判断しにくかったのが原因であると考えられる。

4. 結 論

従来のフィードバック制御とは異なり、システムのフィードバック経路に人間(作業員)を導入させ、かつ人間の経験・知識・勘・暗黙知などという能力を柔軟に取り込むことのできるような人間介入形制御を基にしたシステムを提供することにより、高精度な加工が容易に実現できる可能性を確認した。

同時に、このようなシステムを使用することにより、作業員の満足度は従来と比べ全体的に向上し、もの作りに対する満足感が得られ、人間中心型生産システム構築の一手法として有効であることが確認された。

本研究を行うにあたり、協力をいただいた三菱重工(株)に、また、実験ならびに本論文をまとめるにあたって協力してくれた中野聡君に感謝する。

文 献

- (1) 中沢 弘・根本英樹, 60-574, C(1994), 2191.
- (2) 中沢 弘・菅谷 功, 60-574, C(1994), 2197.
- (3) 中沢 弘, やさしい精密工学, (1991), 53, 工業調査会.
- (4) 中沢 弘, 日経メカニカル, 10(1993), 40.
- (5) 中沢 弘, 情報積算法, (1992), 20, コロナ社.