多機能複合形センサによる加工環境のインプロセス認識方法*

橋 詰 等^{*1}, 新 野 秀 憲^{*1}, 伊 東 誼^{*2}In-Process Monitoring Method for Machining Environment
Using Multifunctional Compact Sensor

Hitoshi HASHIZUME, Hidenori SHINNO and Yoshimi ITO

Future flexible manufacturing systems require intelligent machine tools equipped with effective in-process monitoring systems for machining environment. To meet this specification, the sensor which has properties such as multifunctionality, reliability, sensitiveness and compactness, is urgently required. Therefore, we developed a multifunctional compact sensor based on a new concept. The output of the proposed sensor contains the information concerning both thermal and mechanical behavior in a machining environment consisting of machining status, tool status, workpiece status and swarf status. Consequently, the proposed sensor can simultaneously detect the cutting force and temperature which are useful to monitor chatter vibration, tool wear, swarf flow pattern, and so on. In this paper, the static and dynamic performances of the proposed multifunctional sensor have been verified through a series of actual cutting experiments.

Key Words: Sensor, Cutting, Cutting Force, Cutting Temperature, Cutting Tool, Production System, Monitoring

1. 緒 論

近年, 社会的, 経済的, 並びに技術的要因の相互影響により, 生産システムを取り巻く環境は著しく変化し, 知能形FMC(フレキシブル生産セル)に代表されるような高度自動化生産システムの実現に対する期待が高まっている. 特に, 次世代生産環境において重要となる超精密加工システムでは, 無人化が前提となると共に, 加工対象に適した加工雰囲気による閉鎖加工環境内での加工要求も高まると予測される⁽¹⁾ことから, 合理的な加工環境の状態認識技術を確立することが極めて重要な課題となる. 一方, 生産の高度化が進展していく中で, これまで生産基盤を支えてきた熟練技能の伝承及び育成がますます困難になって来ていることも事実である. それらの傾向から次世代生産環境においては, 在来加工環境において重要な役割を果たしてきた熟練技能者の感覚機能を代替する知能形インプロセスモニタリングシステムを実現することが必要不可欠となる. そのためには, 加工中の様々な状態

を認識するためのインプロセスセンサそのものの高度化を図ることが基本的に重要となる.

ところが, 現在までに提案されているインプロセスセンサの大部分は, 適用範囲, コンパクト性, 耐環境性, 経済性のいずれをとっても実際の加工現場における厳しい要求仕様を満足できていないのが現状である. すなわち, 在来センサの大部分は, 単一の物理量の変化を捉えることにより, センシング対象において生じている現象を一定範囲内で把握することはできても, 実際の加工点近傍において生じる様々な状態変化を同時に認識可能な多機能形センシング機能を実現する段階には至っていない. センサフュージョンによる状態認識方法の有効性も指摘されてきたものの, センサデバイスの高度化についての検討がされないまま, AEセンサ等による複数のセンサ出力のソフトウェア処理⁽²⁾⁽³⁾に重点が置かれたため, 喧伝されたほどには現時点で成功していない. また, 今後要求されるひとつのセンサからの信号を最大限に利用して認識機能を高めようとする多機能センシングに対する試みについても, わずかに水晶圧電素子組込み形切削動力計による切削抵抗の静的・動的成分の監視⁽⁴⁾や加工点近傍の熱流束変化の挙動を監視することによる, びびり振動, 切り屑の排出状態, 工具欠損等の加工状態のイ

* 原稿受付 1997年3月12日.

^{*1} 正員, 東京工業大学精密工学研究所(☎226-8503 横浜市緑区長津田町4259).^{*2} 正員, 東京工業大学工学部(☎152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1).

ンプロセス認識方法⁽⁵⁾⁽⁶⁾が挙げられるに過ぎない。

以上のような観点から、著者らは複数の物理量計測機能をひとつのデバイスに複合集積することにより、加工中の力学的挙動と熱的挙動の変化を同時に検出可能な新たな多機能複合形センサの構造概念を提示し、有限要素解析によりその基本特性を明らかにすると共に、それを具体化したセンサの出力パターンから加工中の異常状態を識別可能であることを明らかにした⁽⁷⁾。本論文では、提案した多機能複合形センサの特性分析と実切削試験を行い、さらに種々の加工条件によるセンサ出力の基本特性を明らかにすると共に、加工環境の状態認識を目的としたインプロセスセンサとしての有用性について検討する。

2. 多機能複合形センサの計測原理と構造

加工中における切削力変動や振動等の力学的特性の経時変化を監視することは、ある程度の加工状態を認識する上で必要な手段である。一方、加工中の熱的特性の経時変化を監視するためには、熱流束計測に基づくインプロセスモニタリング方法が有効であることが確認されている⁽⁵⁾。したがって、加工空間における多面的な状態を認識するためには、加工点近傍における力学的・熱的挙動の両者を常時監視することが有効であると考えられる。

提案したセンサは、図1に示すように、ホイーストブリッジ回路を形成する4個のひずみゲージ、粘弾性体、並びに平板から構成され、ひずみゲージA1及びA2を貼り付けた測定対象とひずみゲージB1及びB2を貼り付けた平板を粘弾性体で挟んだサンドイッチ構造を有している。測定対象に外力が作用し変形した場合、ひずみゲージA1及びA2の抵抗値は表面ひずみに応じて変化するが、粘弾性体により力学的に絶縁されたひずみゲージB1及びB2の抵抗値は変化しないため、ブリッジ回路からは測定対象の表面ひずみに対応した出力が得られる。また、測定対象に加熱あるいは冷却等の熱的作用が加わった場合、各ひずみゲージは測定対象及び平板の温度に応じて抵抗値が変化し、ブリッジ回路からは粘弾性体両面の温度差に対応した出力が得られる。すなわち、本センサはひずみゲージの特性を最大限に生かしたデバイス構造を有し、測定対象の熱的・力学的状態変化を同時に検出することが可能である。

本センサはひずみゲージの温度特性を積極的に利用していることを特徴としているが、一般のひずみゲージは抵抗値と温度の関係が線形ではない。そこで本センサでは、測定対象と線膨張係数が異なる材料に対

Fig.1 Device structure of multifunctional compact sensor

して校正された自己温度補償形のひずみゲージを用いている。自己温度補償形のひずみゲージは、特定の線膨張係数 α_c を有する材料に用いた場合に測定面の温度に依存しない出力が得られるが、測定対象の線膨張係数 α_t が異なる場合、次式に示すように温度 T に比例した見かけのひずみ出力 ε_T が得られる。

$$\varepsilon_T = (\alpha_t - \alpha_c)(T - T_0) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T_0 は基準温度を示す。したがって、測定対象と平板の温度を T_A, T_B 、ひずみゲージ校正対象との線膨張係数の差をそれぞれ $\Delta\alpha_A, \Delta\alpha_B$ とすると、ブリッジ回路における出力電圧 e は次式で与えられる。

$$e = \frac{EK_s}{2} (\Delta\alpha_A(T_A - T_0) - \Delta\alpha_B(T_B - T_0)) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 E はブリッジ電圧、 K_s はゲージ率を示す。したがって、測定対象と平板の線膨張係数が等しい場合には、粘弾性体両面の温度差 ΔT は次式で与えられる。

$$\Delta T = \frac{2e}{EK_s(\alpha_A - \alpha_c)} \dots\dots\dots (3)$$

なお、定常状態において、熱伝導率 λ 、厚さ d の物体を通過する熱流束 q は次式で評価できることから、センサの熱的变化に対する信号出力は粘弾性体を通過する熱流束に比例すると言える。

$$q = \frac{\lambda}{d} \Delta T \dots\dots\dots (4)$$

その結果、シンプルかつコンパクトなセンサデバイスの構造により、熱的挙動と力学的挙動の変化を同時に検出し、さらにそれら機能の相互補完が可能なセンサ機能の集積が実現される。

3. 実切削試験によるセンサ出力の特性分析

加工環境においては様々な現象が生じており、これらの状態認識の対象の中でも特に、加工精度及び加

Fig.2 Actual sensor structure of proposed multi-functional compact sensor

Fig.3 Configuration of tool-sensor system

工能率を支配する工具損耗，工具の熱膨張，切り屑の排出状態など，切削工具及びその近傍の状態認識が基本的に重要となる．そこで，それら現象のインプロセス認識の可能性評価を目的に構造用炭素鋼 (S45C) の外径旋削加工を対象として実切削実験を行った．

切削実験に使用した多機能複合形センサの構造を図2に示す．工具シャンクの材質に基づき，平板は鋼製とし，粘弾性体には熱伝導率 0.21 W/mK の室温硬化形シリコンゴムを用いた．使用したひずみゲージは金属抵抗線式自己温度補償形であり，適合線膨張係数は鋼の約2倍の $23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ，ゲージ率は2.1である．なお，図中のベークライト製スペーサはセンサ製作時においてシリコンゴムの厚さを管理するためのものである．

切削実験では，切削力による工具シャンクの曲げ変形を検出できるように，センサ本体を図3に示すように工具シャンクの下面に設置した．また，センサはストレインアンプに接続し，出力信号はデジタルデータレコーダで記録した．

実験により得られた多機能複合形センサの出力信号の一例を図4に示す．図から明らかなように，センサ出力は切削抵抗の静的・動的成分と，切削熱に起因するセンサ内熱流束成分が重畳されていることがわかる．そのため，本センサの出力パターンには加工状態

Fig.4 A typical example of sensor response pattern and characteristic parameters

Fig.5 Actual sensor response pattern in winding of chips

Fig.6 Actual sensor response pattern in chatter vibration

を認識する上で有用な情報を多数含んでいることから，高度な信号処理手法を適用することにより正確な加工状態認識が可能になると考えられる．例えば，びびり振動の発生や切り屑の排出状態の変化により，切削点における工具と被削材の接触状態や工具シャンクへの流入熱量が変化し，図5及び図6に示すように正常な切削状態とは明らかに異なる特徴的な出力パターンが得られる．このような異常状態の識別が出力パターンの形状の変化により可能であることは明らかであるが，実用上は加工データベースを参照することにより正常な切削過程における切削条件の変動や工具摩耗の進展をインプロセスモニタリングすることも必要となる．そこで，次のような正常な切削状態における各種切削条件の違いや工具摩耗の進展による出力パターンの変化について検討を行った．

Fig.7 Effect of cutting speed on characteristic parameters of sensor response pattern

Fig.9 Effect of depth of cut on characteristic parameters of sensor response pattern

Fig.8 Effect of feed rate on characteristic parameters of sensor response pattern

Fig.10 Effect of tool flank wear on characteristic parameters of sensor response pattern

3.1 センサ出力の静的特性 多機能複合形センサの静的出力特性を評価するため、ここでは、図4に示したセンサ出力の経時変化をとらえる代表値としての特徴パラメータ E_f , E_q , θ_q を設定し、それらを対象に考察する。ここで、 E_f は切削抵抗の静的成分に、 E_q 及び θ_q はセンサ内熱流束の最大値及び勾配に対応すると考えられる。

図7に、切削速度 V と特徴パラメータの関係を示す。切削速度の増大に伴い、工具に流入する熱流が増大するため最大熱流束 E_q 及びその勾配 θ_q は増大するが、切削抵抗は変化しないために E_f はほぼ一定である。一定の切削条件における E_q と θ_q はシミュレーションにより予測可能であることから、それらの特徴パラメータの変化を監視することにより加工中の切削速度の変動を認識することが可能である。

送り量 f と切り込み量 d は、切削面積を支配する重要な因子であり、それらの増大により切削抵抗及び加工点における発生熱量が増大することから、図8及び図9にそれぞれ示すように、 E_f , E_q , 並びに θ_q のいずれについても単調に増大する。

図10には、サーメット工具のフランク摩耗量の進展と特徴パラメータの変化を示す。工具欠損時のようなマクロな力学的挙動の変化が現れないために切削抵抗に基づく E_f には明確な傾向が見られないものの、工

具摩耗の進展に伴い、熱的挙動の変化に起因する E_q が経時的に増大していることがわかる。

以上の結果は、提案した多機能複合形センサにより力学的挙動と熱的挙動の両者を同時に計測し、それらの相互補完を行うことによって、より正確な認識が可能になることを示唆している。さらに、予め各切削条件で獲られたセンサ出力を格納した加工データベースを参照することにより各種切削条件による出力パターンの同定が可能であること、出力パターンに重畳されている加工状態の熱的挙動と力学的挙動をある程度分離できることから、特徴パラメータの変化を監視するだけでなく、パターンマッチング等の波形解析を行うことにより、加工状態の詳細かつ総合的なインプロセスモニタリングシステムの構築が可能になると考えられる。

3.2 センサ出力の動的特性 本研究で提案した多機能複合形センサの出力信号に含まれる動的成分は切削抵抗の動的成分に対応すると考えられる。切削抵抗の動的成分を監視することにより、切り屑形態や工具摩耗の進展等を認識できることが確認されている⁽⁴⁾ ことから、本センサ出力の動的成分は加工状態を認識する上で有用な情報を多数含んでいると考えられる。そこで、切削実験により得られたセンサの出力信号を基に高速フーリエ変換を用いてセンサ出力の振幅スペ

Fig.11 Effect of cutting speed on dynamic component of sensor output

Fig.12 Effect of feed rate on dynamic component of sensor output

クトルを求めた。ここでは、正常な切削状態におけるセンサ出力を対象としたため、解析した周波数領域（0～250Hz）において特に振幅の大きい周波数は検出されなかったことから、30～200Hzにおける振幅スペクトルの平均値を用いて動的成分の評価を行った。

図11～13に切削速度 V 、送り量 f 、並びに切り込み量 d とセンサ出力の動的成分との関係を示す。図から明らかなように、センサ出力に含まれる動的成分は切削速度の上昇とともに減少し、送り量及び切り込み量の増大に伴い増加する傾向が確認できる。このように、切削条件によりセンサ出力の動的成分が変化することから、提案した多機能複合形センサにより切削抵抗の動的成分の評価が可能であることが明らかとなった。

以上の結果から、本センサ出力の動的成分をより詳細に分析することにより、切り屑形態や工具摩耗の進展等の認識が可能になると考えられる。

4. 結 論

本研究では、次世代生産環境を実現する上で必要不可欠な知能インプロセスモニタリングシステムに組み込むための多機能複合形センサの具体的な構造を提示すると共に、そのセンサの基本特性を明らかにするための切削加工実験により検討を行い、その妥当性と有用性を確認した。その結果、本研究では以下のよう

Fig.13 Effect of depth of cut on dynamic component of sensor output

な結論が得られた。

(1) 提案した多機能複合形インプロセスセンサは、シンプルかつコンパクトな構造であるにも関わらず、力学的・熱的現象に基づく様々な加工状態の認識を行う上で有効であることを明らかにした。

(2) 力学的挙動と熱的挙動の変化を同時にひとつのセンサで捉えることにより、個別のセンサにより個別の挙動しか計測できなかった在来形センサでは困難な幅広い様々な状態の認識が、両者の計測機能の相互補完により可能になることを明らかにした。

(3) 提案した多機能複合形センサを用いることにより、びびり振動、切り屑の排出状態の変化といった異常状態の識別だけではなく、工具摩耗や切削条件の変化に代表される、より詳細な状態認識が可能であることを明らかにした。

文 献

- (1) Shinno, H., Hashizume, H., Ito, Y. and Sato, C., Structural Configuration and Performances of Machining Environment-Controlled Ultraprecision Diamond Turning Machine "Capsule", Annals of the CIRP, 41-1, (1992), 425-428.
- (2) Rangwala, S. and Dornfeld, D., Sensor Integration Using Neural Networks for Intelligent Tool Condition Monitoring, Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, 112, (1990), 219-228.
- (3) Chrysosouris, G., Domroese, M. and Beaulieu, P., Sensor Synthesis for Control of Manufacturing Processes, Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, 114, (1992), 158-174.
- (4) 頼光哲, 齊藤義夫, 伊東諄, 切削抵抗の動的成分による工具摩耗の検出, 精密機械, 50-7, (1984), 1117-1122.
- (5) Shinno, H., Rahman, M. and Inaba, C., In-Process Monitoring System for Machining Environment Based on Heat Flux Sensing, JSME International Journal, 35-2, (1992), 307-312.
- (6) 新野秀憲, 黄国金, Rahman, M., 熱流束センサによる加工状態のインプロセスモニタリング (工具摩耗の監視), 日本機械学会論文集 (C編), 57-538, (1991), 2149-2153.
- (7) Shinno, H. and Hashizume, H., In-Process Monitoring Method for Machining Environment Based on Simultaneous Multiphenomena Sensing, Annals of the CIRP, 46-1, (1997), 53-56.