

生産加工における適応制御

神戸大学工学部 教授 岩田 一 明

1. まえがき

不連続生産形態として代表的な工作機械による生産加工の分野に適応制御^{注1)}が導入されたのは1960年初頭のことであり、今日まで僅かに10年あまりが経過したに過ぎない。それにも拘らず、工作機械の数値制御、群制御の発達にともない適応制御の効用が認識されて以来、急速な研究、開発が進められてきた。我国でも、研削盤、フライス盤、マシニングセンタ等、種々の工作機械に適応制御が試みられ、1部は実用機として稼動する段階に入っている。

数値制御より1段上の制御レベルをもつ適応制御が生産加工の分野でとりわけ注目されている背景には、加工工程あるいは工作機械そのものが種々の外乱たとえば、びびり振動、加工物材質の不均質等により不確定性をもつことがあげられる。たとえば、切削加工、塑性加工、電解加工にしろ、工具を用いる加工にあっては加工の進行にともなって工具摩耗が増加するが、工具摩耗あるいは工具寿命の外乱によるばらつきは極めて大きく、3倍程度の寿命の差異はまれではない。この1例からも明らかのように加工工程の動特性はあらかじめ把握できず、常に最適加工状態を保つには時々刻々の変化に応じて制御パラメータを調整するいわゆる適応制御が必要になってくるのである。

注1) 1964年アメリカの Bendix 社は、本格的な適応制御フライス盤の試作を発表した。しかし、簡単な工作機械適応制御システムについては1956年のIFACにおいて Korbinsky らが発表している。

一般に適応制御システムは、「あらかじめ設定された評価関数に関する特性値を連続的あるいは間歇的に測定して、評価関数が最適となるようにパラメータを逐次修正するシステム」¹⁾とか、「システムの作動条件が不完全に定められていた場合とかあるいは変化した場合に、システムの状態を最適にするために制御期間中に得た情報によりシステムのパラメータ、構造、制御論理をかえるプロセス」²⁾と定義されている。これを工作機械による加工の場合についてみると、「適応制御工作機械とは、あらかじめ設定された評価関数に関する特性値（たとえば、工具摩耗速度、切削量、精度、びびり等）を切削中あるいは切削間歇中に計測し、評価関数（たとえば、生産費用、生産速度等）が最適となるように切削パラメータ（切削速度、送り、切り込み）、工具経路、工具位置、動的剛性などを適宜修正制御する工作機械」ということができる。

いま、これらの定義にもとづいて工作機械の適応制御系をまとめると図1に示すようになる。この系は従来の数値制御に検出システムと

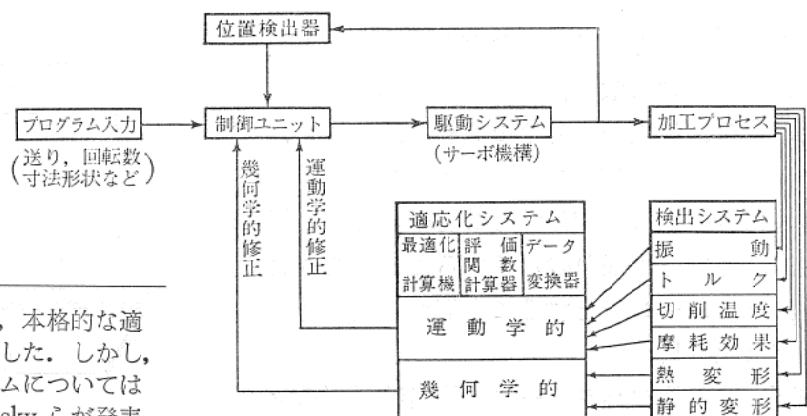


図1 工作機械における適応制御系

適応化システムが附加されたものとみることができる。

これら適応制御系は、具体的には、設定する評価の対象によって、加工の経済性あるいは生産性を主対象とした制御（以下、生産性適応制御と呼ぶ）、製品の加工精度を主対象とした制御（以下、精度適応制御と呼ぶ）及び、びびり振動を主対象とした制御（以下、動特性適応制御と呼ぶ）に大別される。以下、本文ではまず、これら適応制御に関して基本的事項となる動的検出装置について述べ、次いで生産性、精度及び動特性適応制御の代表例について概観したいと思う。なお、評価関数と制約条件、最適化の手法については紙面の都合で省略するが、必要のむきには文献³⁾を見ていただければ幸甚である。

2. 動的検出装置

適応制御加工を行なうには制御しようとする温度、トルク、振動などのパラメータに関するセンサ (sensors) を開発することが緊要である。現在直面している適応制御の成否はセンサの開発の可否と密接に関連しているといっても過言ではない。

センサは制御しようとするパラメータの種類によって異なるのは勿論であるが、一般的な必要条件としては、感度がよく、ノイズが少なく、精度が良好なこと、堅牢でコンパクトなこと、寿命が長く、信頼性が高いこと、低廉なことがあげられる。さらに、加工物などの温度変化を受けないこと、潤滑剤、切削油等の使用による影響がでないこと、加工物回転の場合には回転時の測定が可能であることなども条件として配慮しなければならない。

このほか、加工面精度用センサの場合には、仕上面あらさの測定ができるようにできるだけ小さなスタイラスを使用することや接触面の損傷や摩耗をできる限り少なくするためにできれば非接触型のセンサとすること等が必要条件となつてこよう⁴⁾。

以下、代表的なパラメータと検出装置（センサ）及び適用例を簡単にのべてみよう。

2.1. 工具摩耗に関連する検出装置

加工における評価関数には未知数として工具寿命が含まれているので、工具摩耗に関する検出には多くの研究がなされている。切削時間ともなう工具摩耗は、直接かつ連続的に測定することが困難なため、切削温度、音波振動あるいは切り込み量の変化といった間接的な方法が多くとられる。間歇的測定が許される場合の例としては、顕微鏡による単刃工具摩耗幅の測定⁵⁾、光電セルとポテンシオメータによる切断砥石の外径変化測定⁶⁾等がある。

工具摩耗と切削温度との間にはかなり良好な対応のあることが古くから経験的に認められている。このため熱電対法、赤外線法等、多くの切削温度測定法が比較、検討されてきているが、実用上工夫のいるのはフライス盤のような回転する多刃カッタから熱起電力を同時に取り出す方法である。これに対する1方法は、図2⁷⁾に示すような連続回転接触する Garter Spring Pickups を用いることである。これは、Garter Spring が Slip ring にくらべ Signal to noise ratioが高く、かつ、取扱いが簡単であるという

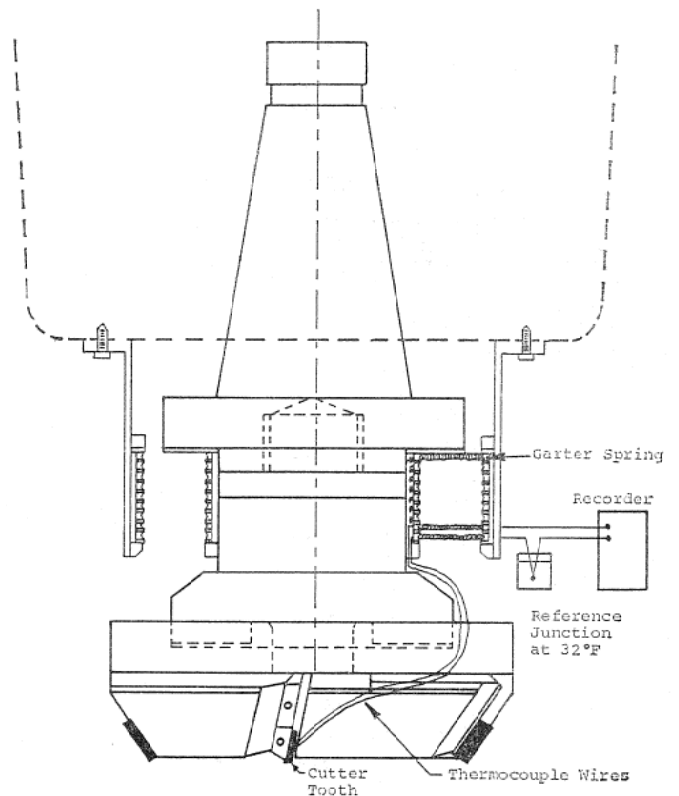


図2 多刃工具温度測定法（模型図）

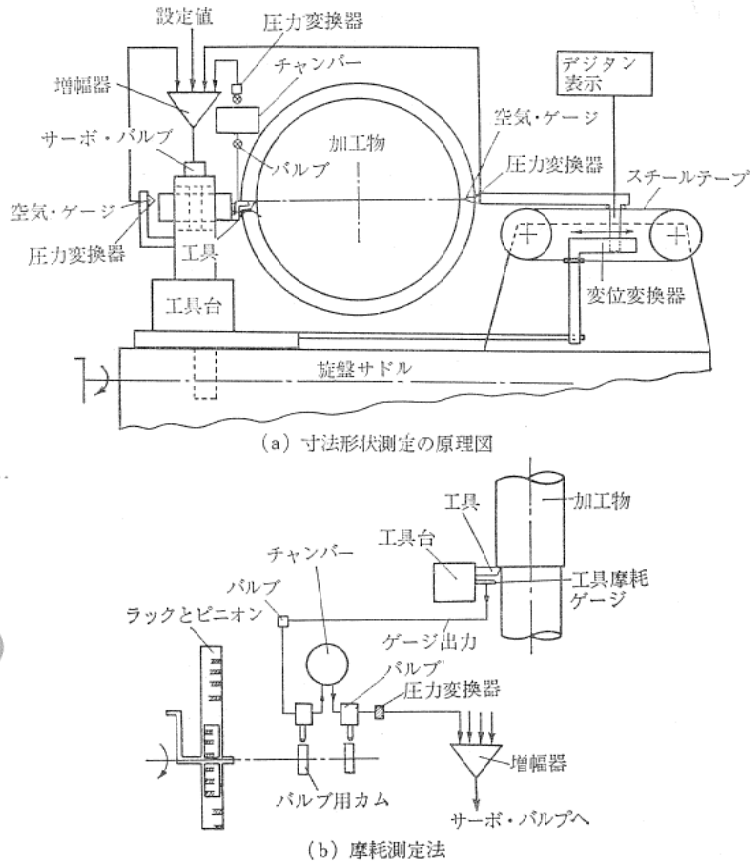


図3 空気・ゲージ (air gauge) による測定法

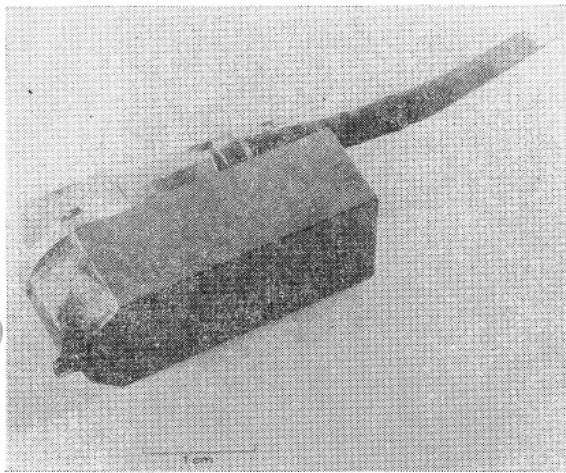


図4 空気ゲージの外観

特徴を利用したものである。図2の方法によると多刃工具の各切刃に生じる平均温度の測定が可能となり、切削時及び空転時の加熱、冷却サイクルも明瞭に求めることができる。

次に、切り込み変化による方法でとくに興味があるのは図3に示す空気ゲージによる方法⁹⁾である。これは、図3(a)に取りつけられたゲ

ジで加工物の径を測定し、同時にこれと連動する左側の空気ゲージ(図3(b)参照)で工具摩耗を測定するものである。空気ゲージの外観を図4に示す。ゲージ寸法は径1.1mm、長さ2.5mm、供給圧力は1.75kg/cm²程度が用いられており、その周波数応答の直線性は約100Hzまで保持されている。この空気ゲージは電気、光学あるいは機械的接触ゲージにくらべ、センサとして最もすぐれていると認められており、この点が注目される。

音波振動を利用して工具摩耗を間接的に測定する方法⁹⁾は、切削加工系(被削材—工具切刃—工具ホルダー—工作機械)から発生する音波振動を適当な振動器たとえばピエゾ加速度計を工具保持部にとりつけて測定し、得られた信号とあらかじめ設定した比較音波振動比とを図5のブロック線図に示すようにして比較する。この方法は工具摩耗が生じると音波振動に高周波振動成分(4000~8000Hz)があらわれる点に着目したもので、切削中連続測定が容易にできる特色があるが、実用には解決せねばならぬ問題が残っている。

次に、工具摩耗を直接かつ間歇的に測定する切断研削の場合⁹⁾についてみる。図6に示す切断研削の模型図において、砥石直径(D)の測定は2個の光電セルとポテンシオ・メータを用いて行なう。砥石摩耗径(ΔD)は微小量であるため砥石の中心附近にとりつけたポテンシオ・メータによりピボット・アームの位置の変位を測定し、これを角度変化に変換し制御に用いている。

2.2. 切削抵抗、トルクに関する検出装置

切削抵抗、トルクに関する検出装置としてはストレイン・ゲージをセンサとしたものが大部分である。1例として、図7にCincinnati Milacron社の主軸トルク及び工具変位検出法¹⁰⁾を示す。主軸トルクは主軸上部の回転方向のねじれをストレイン・ゲージで検出し、スリップ・リ

ングで取り出す。一方、工具変位は主軸に4方向からセラミック・シューを押しつけ、その変

位を差動トランスで検出している。

2.3. 振動、動特性に関する検出方法

振動、動剛性に関しては加速度計による検出が多くみられるが、1種の間接法として切削中の切削力と加工物の変位の測定から計算で推定しようとする Kwiatkowski と Bennett¹¹⁾ の方法がある。これは得られた信号の相互相関係数からダイレクト・レセプタンスとクロス・レセプタンスを求めめるもので、計算時間はかなりかかるものの許容しうる最大加工条件を求めることができる。

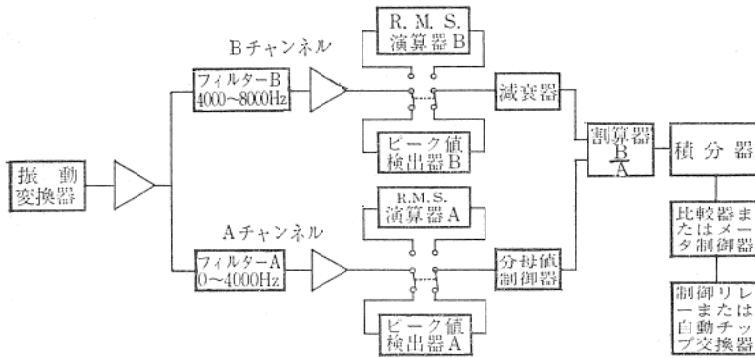


図5 工具摩耗検出器において振動変換器で測定した振動情報を処理するために用いた振動比比較システムのブロック線図

2.4. 精度に関する検出装置

精度の検出に際しては、まず検出の基準線をどこにとり、センサを基準線のどこに設けるかを考慮しなければならない。

前者は、旋盤を例にとると図8に示すように、加工物の回転軸、横送り台の移動軸およびサドル移動軸の3軸が考えられる。

後者は、マンドレル、ベッド、サドル、工具台の4個所が一般に考えられるが、これらはいずれも精度に関する十分な情報を与えない。しかし、不満足ながら実用に供しうるのは工具台で、工具台と加工物間の相対運動や工

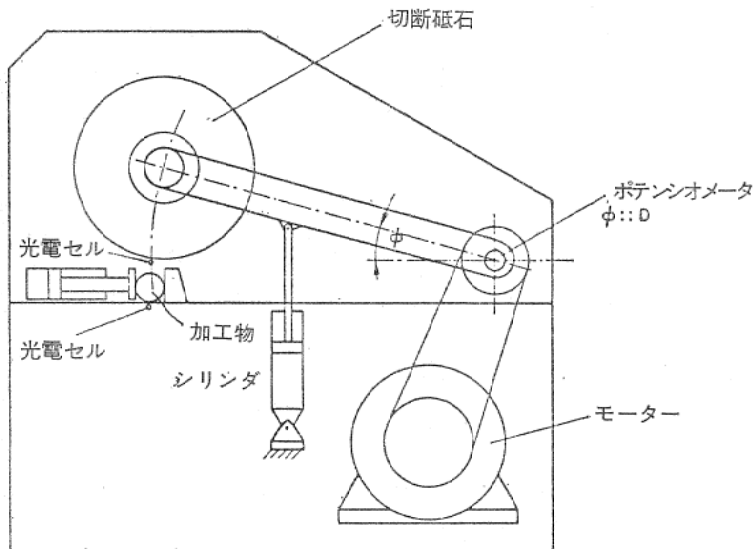
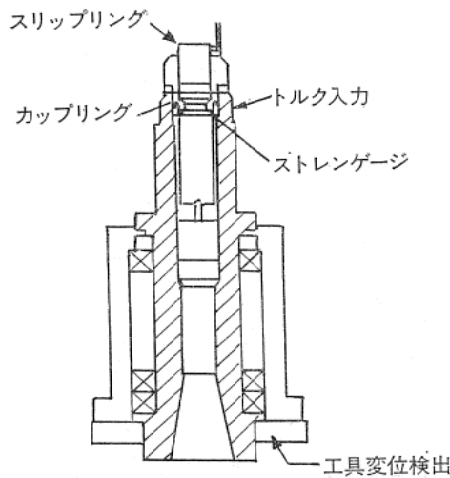
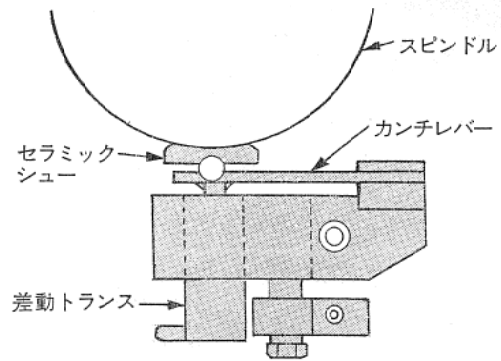


図6 適応制御切断研削盤の模型図



(a) 主軸トルク検出器



(b) 工具変位検出器

図7 Cincinnati M. M. 社の検出器

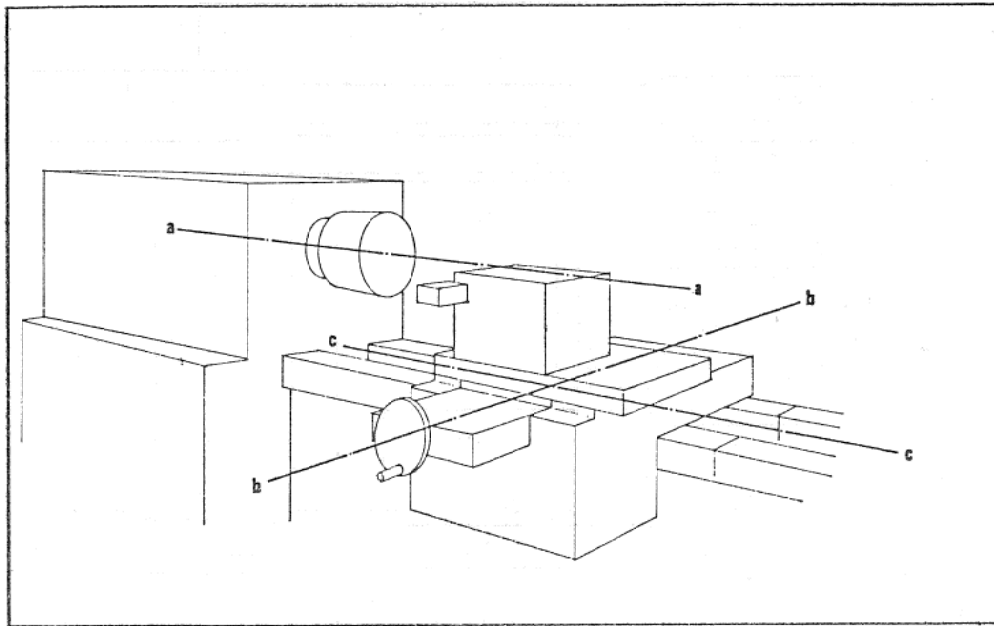


図8 旋盤における精度検出のための基準線

- a-a 加工物回転軸
- b-b クロス・スライド移動軸
- c-c サドル移動軸

具摩耗などによる切削過程の不規則にもとづく周期的変動を求めることができる。しかし、ピッチのようなラセン状に沿う流れは求められない。

精度測定用センサとしては、図3に示した空気ゲージのほか、Fotonic sensor (Fibre optics, 直径2mm) と Proximeter (Inductive transducer, 直径7mm) が検討されている⁴⁾。Fotonic sensor等を用いて得られたデータは図9に示すように3種類のフィルターにかけて寸法偏差、うねり、真円度が求められると報告されている。

3. 生産性適応制御

加工の生産性あるいは経済性を主対象としたかなり本格的な適応制御工作機械は、まず Bendix社において試作された¹²⁾。それは、図10のブロック・ダイアグラムで示すもので、評価関数は生産性指数である。これは、切削温度とトルクがオン・ラインで測定されて工具摩耗速度が計算されると最大勾配法を用いて生産性指数を最大にする切削速度と送りが決定されるようになっている。この方法を用いて実際に加工

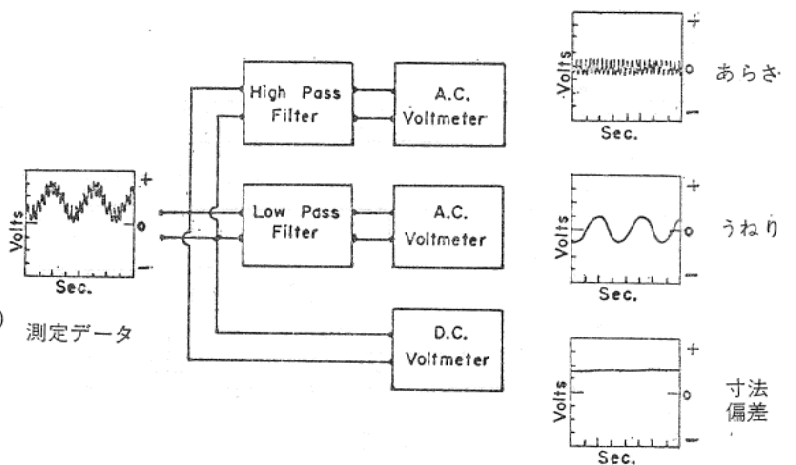


図9 精度測定データの解析

した結果、加工費用はかなり低くなり、とくに切り込み量の変動する場合にメリットが大きくなることを明らかにしている。

Shillam¹³⁾ は最大切りくず除去をうるために切削温度と背分力を同時に制御する適応制御旋盤を発表している。とくに、切削温度は図11に示す制御システムを用いて、工具・被削材間の熱起電力がある設定値内になるように切削速度を制御し、一方、背分力は工具ホルダの後端にとりつけたピエゾ型動力計を利用して設定背分力以下で加工するように送り量を制御するもので

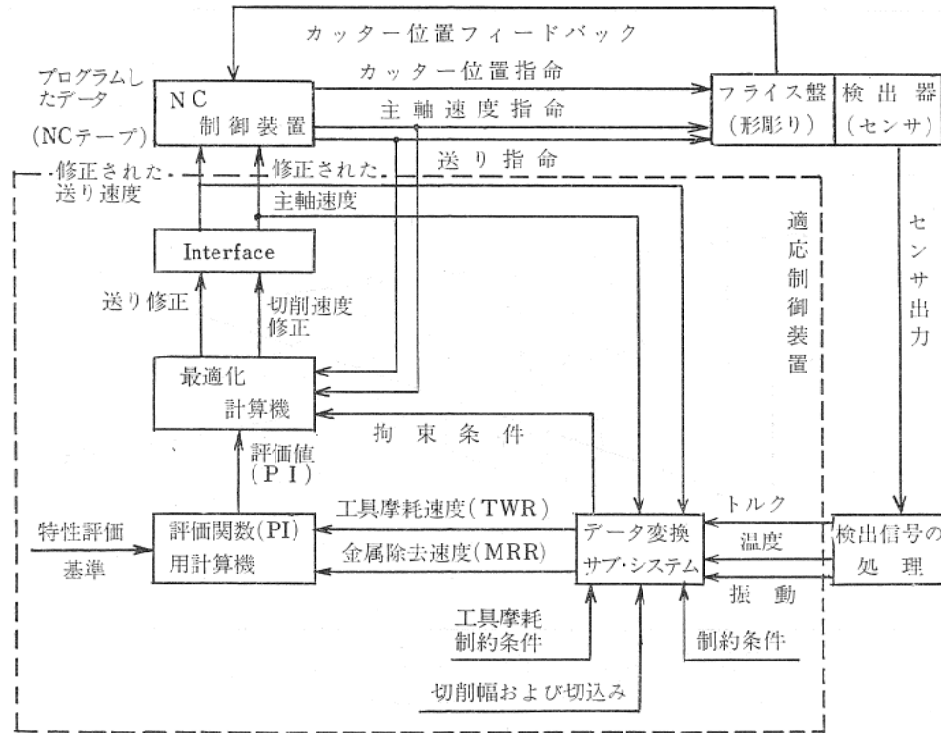


図10 Bendix 社適応制御フライス盤のブロック・ダイアグラム

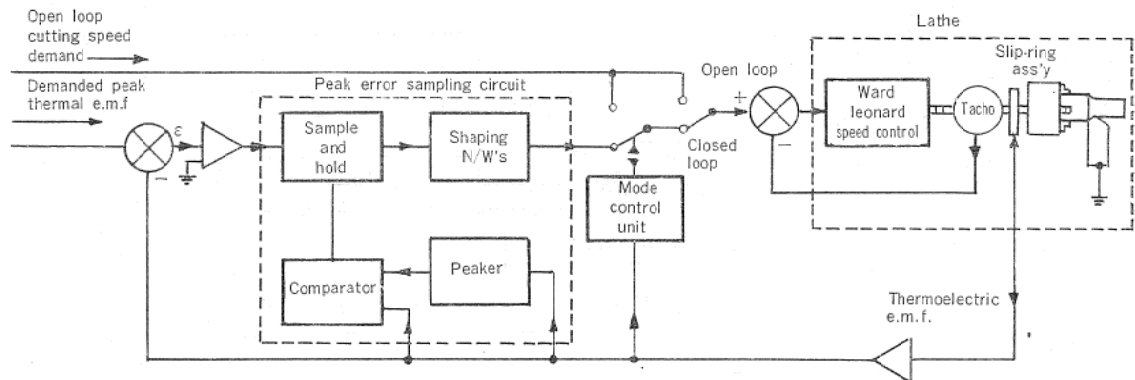


図11 切削温度制御の適応制御旋盤 (Shillam)

ある。また、同様な考え方を立型フライス盤に適用している。

この他、I-T-E Imperial社では、トルク、温度、振動、ドリル折損をすべて空気式の検出器で検出の上、最適化を計る穴あけ適応制御機¹⁴⁾を、機械技術研究所では、加工費用あたりの切削容積を評価関数とした適応制御旋盤⁵⁾を、また、豊田工機では砥石寿命と仕上面あらさを制約条件として総研削能率を評価関数とする適応制御研削盤¹⁵⁾を発表している。

ところが上述の適応制御工作機械のように種々のパラメータを同時に制御して最適化を計る

ことは実用には複雑すぎるとして、切削温度、切削力、切削動力等のうち、ある1つの拘束条件内いっばいで作業するように切削速度（あるいは回転数）と送り量を制御するいわゆる拘束型適応制御ともいべき工作機械がかなり試作、研究されてきている。

Groszmann 氏¹⁶⁾は、一定切削力の条件のもとに加工時間をできる限り短縮する制御を試みている。これは図12のブロック・ダイアグラムに示すように主軸トルクを測定し、それより主分力を求め、その値が常に一定となるように主軸回転数と送り量を制御しようとするものである

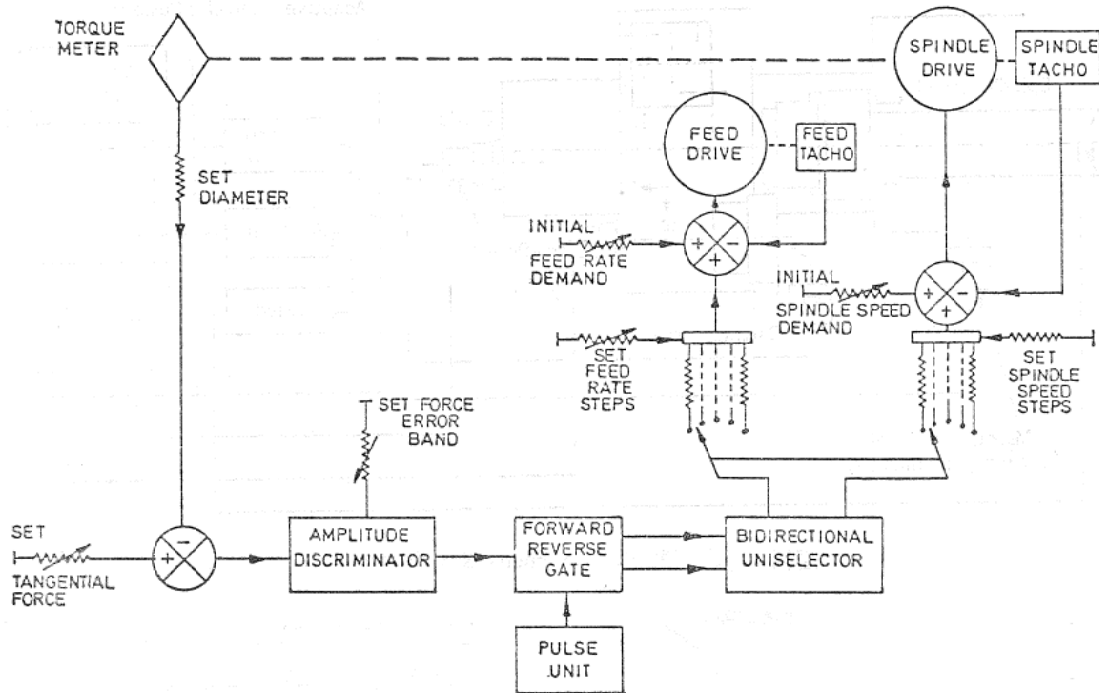


図12 切削力制御の適応制御旋盤 (Groszmann)

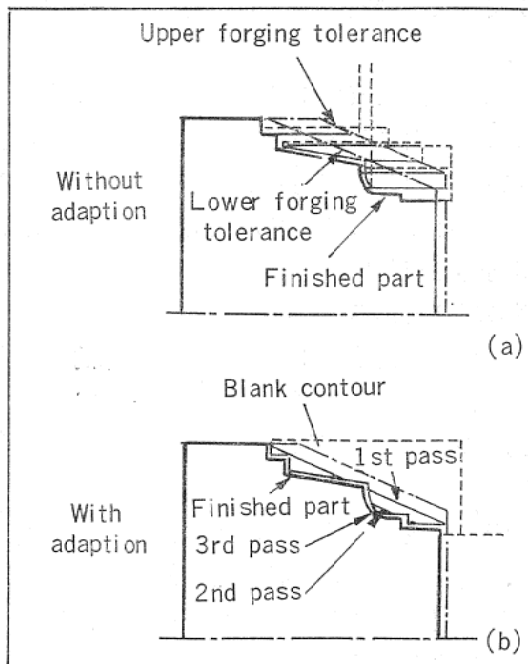


図13 適応制御工具経路決定

この結果、加工時間にして従来の約20%の節約が可能であると述べている。

次に、切削動力一定となるように主軸回転速度と送り速度を制御するものとして、Beadleら¹⁷⁾の研究がある。これはマシニングセンタの主軸トルク、主軸速度、テーブルと主軸送り速度、切削3分力を同時に測定し、これをハイブ

リッド計算機により処理させるもので、制御の結果、切削量の著しい増大あるいは25%以上の加工時間の短縮が可能であるとしている。

また、Siemens社とGildemeister社¹⁸⁾では、NC加工の荒削り段階で適応制御を導入して切削径路決定を行ない、NCプログラミングの短縮と加工条件の適正化を計る方法を提案している。たとえば図13に示す製品を加工する場合、通常の工具径路は図13(a)の様にプログラムされるが、最大許容トルクで切削するように主軸にとりつけたセンサで検出し適応制御する場合には(図14参照)、図13(b)のような工具経路が選定され、切削時間の短縮を計ることができる。

この他、Cincinnati Milacron社のACRAMIZER¹⁰⁾、RAE Farnboroughの切削温度制御旋盤¹⁹⁾、牧野フライスの適応制御マシニングセンタ等が発表されている。

4. 精度適応制御

数値制御工作機械による加工精度は現段階で3/100~5/100mm程度といわれている。これ以上の精度は種々の外乱、たとえば、切削熱による熱変形、工作機械の動剛性、切削過程における構成刃先の不安定現象等によって到達するこ

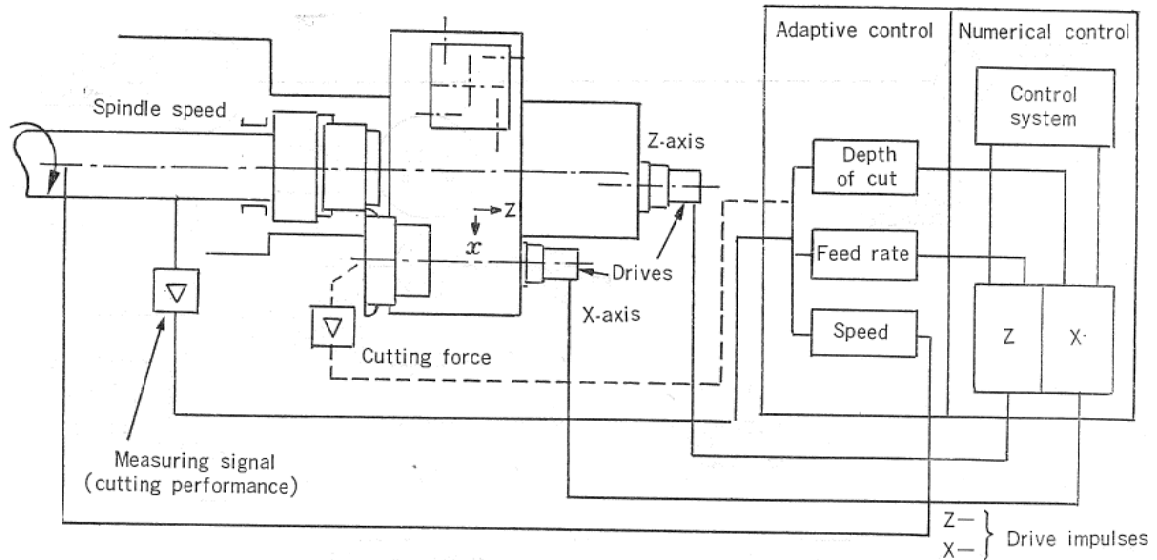


図14 適応制御旋盤 (Siemens & Gildemeister)

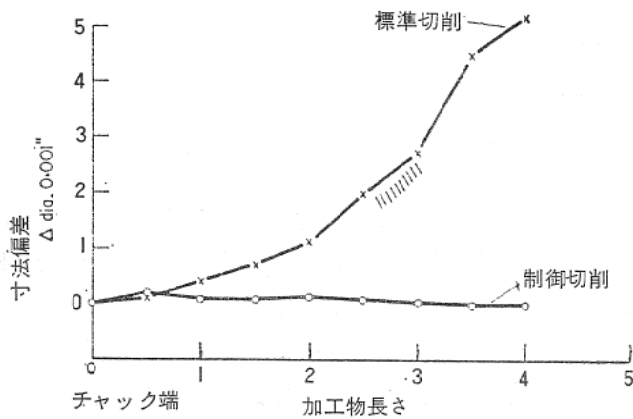


図15 標準切削とインプロセス制御切削による加工物の寸法精度の比較
(加工物径 0.5"、切り込み 0.015")

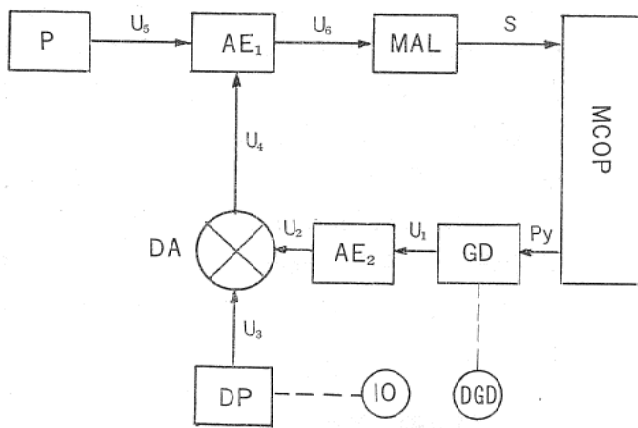


Fig. 16. Symbols of the diagram
 P = Programmer for the depth of cut
 AE₁ = Electronic amplifier 1
 MAL = Electric motor for the control of the longitudinal feed
 DA = Adding device
 AE₂ = Electronic amplifier 2
 GD = Dynamometric group
 DP = Programming device
 IO = instrument for observing force Py
 DGD = Group connected to the dynamometric group
 MCTW = Elastic system: Machine-Controls-Tool-Workpiece.

図16 背分力制御による適応制御用ブロック・ダイアグラム

とは容易ではない。そこで、精度を主対象とした適応制御が注目されるようになってきた。

精度適応制御で対象となる加工面は次の3成分より構成されていると考えられている。

(i) 長波長成分：これは加工物の寸法誤差によって生じるもので、工具の取り付け誤差及び工具摩耗、切削温度などの変動誤差が主原因となる。このうち、適応制御の主対象は切削時間変化にともなう変動予測が困難な後者の場合である。

(ii) 中波長成分：この成分は具体的には真円度からのずれや周期的な寸法変化に対応し、これらはいずれも適応制御が必要である。

(iii) 短波長成分：これは表面あらさに相当し、表面あらさの変動を材料、切削条件などから予測することが困難である現在、適応制御の対象となる。

これまで精度適応制御工作機械として試作されているものの多くは加工物の寸法精度に対するものである。N.E.L.では図3、図4に示した空気ゲージを用いて加工物の寸法、精度と工具摩耗をイン・プロセスで検出し、それにもとづいて工具の切り込み量を変化させ所定の寸法を得る方法を開発している。この原理は外丸削りのほか、中ぐり、正面削りにも

適用できる。精度は図15の1例にみるように外径 12.7mm, 長さ 127mm の片持ちの試料を $\pm 0.0003\text{in}$ ($\approx 0.0076\text{mm}$) 以内に収めることができる。また, 場合によっては研削作業の省略も期待できるという。

モスクワ工作機械設計研究所²⁰⁾では図16のブロック・ダイアグラムに示すように背分力の制御により弾性変形及び変位にもとづく加工物直径の差を約 1/3 ~ 1/5 に減少させることができることを発表した。

Jona²¹⁾ は精度適応制御の基礎研究として図17に示すブロック・ダイアグラムを示し, 測定用センサとして Fotonic sensor が有効なことを明らかにしている。

この他, 切削力による弾性変形と変位を制御して精度の向上と生産性の増大の両面を目指すハンガリーの Csepel Machine Tool Factory²²⁾ のフライス盤や工具の熱膨張を補正して精度向上を計る適応制御²⁾ 等が開発されてきている。

5. 動特性適応制御

動特性, 主としてびびり振動に関する適応制御は, 適応制御としては局部的なものであるが, 図18の破線で示すような種々の方法が検討されてきている。

まず, Comstockら²³⁾は, 図中の①すなわち, 工具の横にとりつけた変位計を用いて旋削時の工具・被削材間の相対振動を検出し, その信号に応じて工具ホルダーに直結した電気・油圧サーボ装置を背分力方向に駆動して相対振動をなくそうとしている。

図中②は Cookら²⁴⁾によって試みられているもので, 工具の振動変位をなくすために工具シャンクに添布した歪ゲージで切削力を検出し, それに応じて工具をサーボ装置で駆動するものである。

DeRoら²⁵⁾, 竹村ら²⁶⁾は図中③すなわち振動変位を検出し, その微分項に比例した減衰力をフィード・バック量としてマグネット加振器を

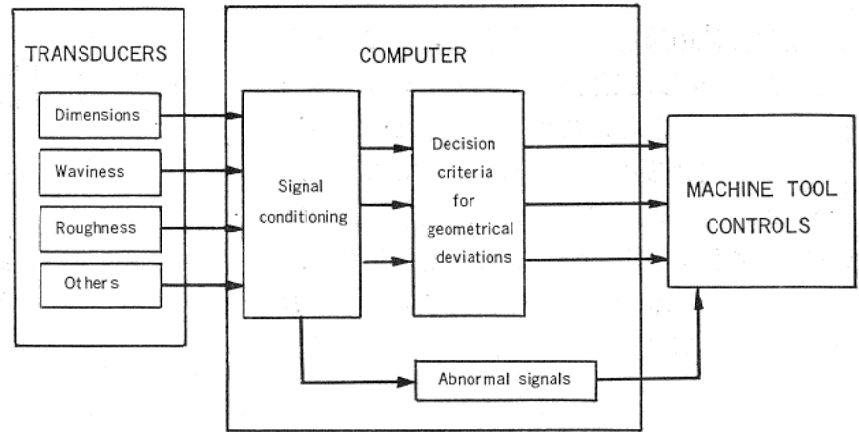


図17 精度適応制御用ブロック・ダイアグラム

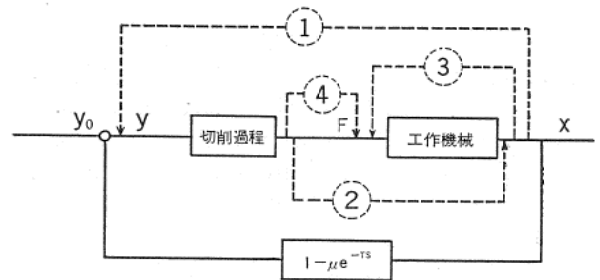


図18 びびり振動の制御の説明図

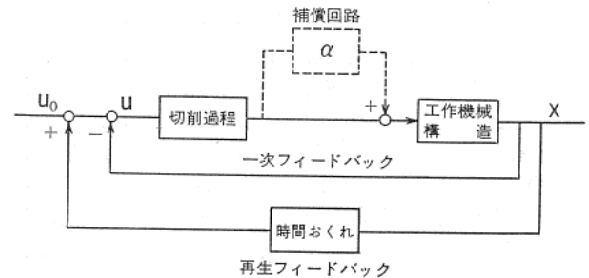


図19 フィード・フォワード式びびり振動制御

用いて与えている。

①~③は, いずれもフィード・バック制御であるが, 本研究室で開発中のフィード・フォワード制御方式をもつ④について簡単に触れておきたい²⁷⁾。これは, 工具シャンクに添布したストレイン・ゲージにより切削力を検出しその信号のもとに工具・被削材間にマグネット加振器で力を与えるもので, 切削系のブロック線図は図19に示す通りである。この方法は簡便な装置でかなり良好な制御を行いうるという利点がある。

6. あとがき

生産加工における適応制御として, とくに1

台の工作機械の適応制御に力点を置いて現状を紹介した。しかし、工作機械は群制御システムをとる方向にあるから、これに関連した種々の適応制御も考慮することが必要となつてこよう。今後、この方面の研究が発展し、工場の完全自動化と最適化が実現されることを期待したい。

終りにあたり本拙文が読者諸賢に少しでもお役に立てば幸甚の至りである。

参考文献

- 1) V. W. Evesleigh, Adaptive Control and Optimization Techniques, McGraw-Hill (1967).
- 2) 研野和人, 適応制御入門(1), 自動化技術, 第1巻1号 (1969.6) 122.
- 3) たとえば岩田一明, 切削加工の最適化(1)(2), 機械の研究, 22巻10号, 11号 (1970) 1353, 1503.
- 4) M.G. Jona, Contribution to the Development of Geometrical Adaptive Control in Turning, 11th Int. MTDR Conference (1970).
- 5) 竹山秀彦他3名, 旋削加工の最適化制御, 機械学会誌, 73, 619 (1970-8) 1141.
- 6) T. Storm, Adaptive Control in Cut-off Grinding, 11th Int. MTDR Conference (1970).
- 7) 岩田一明他2名, Temperature Responses and Experimental Errors for Multi-Tooth Milling Cutters, Trans. ASME, 90, 2 (1968) 353.
- 8) M. Bath and R. Sharp, In-Process Control of Lathes Improves Accuracy and Productivity, Advances in MTDR (1968-9) Part 2. 1209.
- 9) E. J. Weller, H. M. Schrier, and B. Weichbrodt, What Sound Can be Expected from a Worm Tool? Trans. 91 ASME, (1969-8) 525.
- 10) 矢島信之, 適応制御入門(3) — シンシナチ・ミリリング社における工作機械の適応制御について —, 自動化技術1, 3 (1969) 119より引用
- 11) A. W. Kwiatkowski and F. E. Bennett, Application of Random Force Excitation to the Determination of Receptances of Machine Tool Structure, Advances in MTDR (1965) 173.
- 12) R. M. Centner and J. M. Idelsohn, Adaptive Controller for Metal Cutting Process, IEEE Trans. on Application and Industry, 83, 72 (1964-5) 154.
- 13) N.F. Shillam, The On-line Control of Cutting Conditions Using Direct Feedback, 12th Int. MTDR Conference, Paper 801. (1971)
- 14) 本多庸悟, 機械加工の無人化のための適応制御, 機械の研究, 21, 5 (1969) 683 及び 21, 1 (1970) 261より引用
- 15) 児玉隼, 適応制御研削盤による研削試験, 昭和46年度精機学会春季大会 (1971) 91.
- 16) F. K. Groszmann and A.V. Hemming, Problems Involved in the Development of Adaptive Techniques to Improve the Productivity of NC Lathes, 11th International MTDR Conference (1970)
- 17) B. R. Beadle and J. G. Bollinger, Computer Adaptive Control of a Machine Tool, Annals of the CIRP, XVIII (1970) MS7.
- 18) A. Ledergerber, Adaptive Control for Turning Operations, 12th Int. MTDR Conference, Paper 803 (1971)
- 19) R.A. Billet, Studies of Cutting Temperature Control Applied to a Lathe Spindle Speed, Advances in MTDR (1968) 1273.
- 20) B. M. Basroff, Increasing the Geometrical Accuracy of Turned Work, Microtecnic, XXIII, 4 (1969) 232.
- 21) M. G. Jona, Scope and Possibilities of Geometrical Adaptive Control in Turning, Annals of the CIRP, XVIII (1970) MS43.
- 22) Miklós Acs, Increasing the Precision and Productivity of a Milling Machine by Adaptive Control, 10th International MTDR, paper No. 17 (1969-9).
- 23) T. R. Comstock, F. S. Tse and J. R. Lemon, Application of Controlled Mechanical Impedance for Reducing Machine Tool Vibrations, Trans. ASME (1969-11) 1057.
- 24) C. L. Nachtigal and N. H. Cook, Active Control of Machine Tool Chatter, Trans. ASME (1970-7) 238.
- 25) M. De Ro, The Magnetic Exciter as applied to Active Damping of Machine Tools, 9th MTDR Conference (1968).
- 26) 竹村, 坂上, 星, フィードバック補償による工作機械のびびり振動防止, 昭和47年度精機学会春季大会 (1972-4).
- 27) 森脇俊道, 切削力の直接補償によるびびり振動の防止, 同上 (以上)