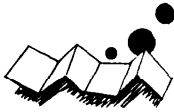


解説

FA 用要素システム



機械加工機能の自動検査†

村田 良 司††

1. まえがき

最近の機械加工システムは種々の必要性から、ほとんど人手を要しない高度自動化システムへと変わりつつある。しかも、従来の自動化システムと異なり、一種類の品物を大量生産するばかりではなく、不特定多種類の品物を中小量生産すること(フレキシビリティ)が要求されている。例えば FMS (Flexible Manufacturing System) がそれであり、機械工場の FA 化における中心的要素となっている。^{1),2)}

機械加工では種々の加工誤差要因(工作機械の熱膨張, 工具の摩耗など)や障害発生要因(工具切刃の欠損, 切屑のつまり, びびり振動など)がある。これらは機械加工に固有なものであって、軽減はできても完全に排除することは不可能である。しかも対象加工物と加工条件の選択によって、その程度と性質が著しく変化する。

在来型の有人個別生産システムではオペレータの経験と熟練によって、これらの問題を処理していた。また大量生産システムでは対象の加工物について事前に十分な加工実験を実施することによって、必要な補正量や対策を知り、これに対処してきた。

しかし、対象加工物が一定しないフレキシブルな加工システムの自動化においては上記の方法では対処できない。そこで、加工中に種々の加工情報をリアルタイムで計測し、自動監視することによって、常に加工機能を把握しつつ加工プロセスを補正し制御することが必要となる。つまり加工機能の自動検査が必要である。

コンピュータの発展と信頼性の向上によって、高度で複雑な制御方式でも制御装置そのものは容易に実現できるようになった。しかし加工機能あるいは加工情報のインプロセス計測は良いセンサがないため容易に

は実現できない。

もちろん、温度、長さ、加速度と言った基本的な物理量を計測できるセンサはすでに確立したものがある。これらを利用して、加工機能と言う複雑で微妙な量をいかに計測するかが問題である。また、加工と言ういわば材料を破壊し変形させている場において、いかに妨害を排除して計測するかが問題なのである。

この意味のセンサ技術は本格的 FMS 実現のためのキーテクノロジーの一つであり重要な研究課題である³⁾。

ここでは加工機能の自動検査のためのリアルタイムあるいはインプロセスの計測技術について解説したい。

2. 加工機能に関する計測の対象

加工の目的は所望の形状、寸法を得ることであり、所定の表面品質(表面あらさ等)を実現することである。したがって、加工の機能はまず加工システムの出力である製品の寸法精度、仕上面あらさ等によって評価される。つまり、これらは加工機能に関する計測対象の一つである。

次に加工機能の状態を知るためには、加工機能と密接な関係をもつ工具摩耗、砥石減耗等の量を計測する

表-1 加工機能に関する計測の対象

量の種別	対象となる主な項目
加工物の品質 (加工プロセスの出力)	寸法精度, 形状精度(真円度, 円筒度, 直角度, 平行度, 同心度, 平面度) 仕上面あらさ, 加工変質層など
切削パラメータ (加工プロセスの状況)	工具摩耗, 工具欠損, 刃先付着物, 砥石減耗, 切削抵抗, 工具振動, 切削音, びびり振動, 切削温度, 切屑など
加工システムの状態 (自動保守情報)	工作機械の振動, 主軸温度, 変形, 熱変形, 異常音, シーケンスコントロール系の異常, 回転速度, 消費電力, 潤滑状況など
アセンブリの品質 (加工組立プロセスの出力)	アセンブリの寸法, 形状, 機能など

† Automatic Testing of Cutting Functions by Ryoji MURATA
(Mechanical Engineering Laboratory).

†† 機械技術研究所

必要がある。更に、工具欠損のような加工機能の致命的異常を検知するとともに加工装置である工作機械の熱変形、温度分布、制御系の異常の有無等のような加工システムの状況を示す量も知る必要がある。

また、加工システムが組立プロセスを含むような場合には、中間組立品や組付け用部品の機能検査、挿入姿勢などの組立適合性のチェック等も必要となる。

表-1 はこれらの事情を示す。

3. 加工機能のインプロセスセンサ

3.1 工具摩耗のインプロセス計測

工具の摩耗はすくい面と逃面に発生し (図-1参照)、その摩耗量がすくい面摩耗深さで 0.03~0.06 mm, 逃面摩耗幅で 0.3~0.6 mm に至ると、加工機能が著しく低下するので新工具と交換する必要がある。すなわち切削工具の摩耗は加工システムにとって重要な量であり、種々のインプロセス計測法が研究されている⁴⁾。表-2 は主な事例を示す。最も直接的な方法としては ITV 等による摩耗面の直接観察方法⁵⁾があり一部で実用化⁶⁾している。

旋削などの連続切削では、切刃は切削中いつも切屑に覆われているから直接には見る事ができない。し

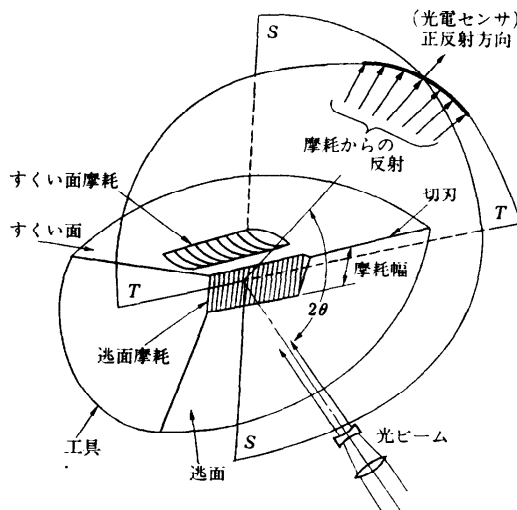


図-1 工具摩耗とその光反射による計測

表-2 工具摩耗のインプロセス計測の事例

方法	原理	摘要
切削力の測定	切削力 ($F = F_c + \sigma \cdot VB$) の増加	動力計 回転数低下 負荷電流などによって検出
材料の太り	$2 \tan \beta \cdot VC$ (刃先の後退)	種々のギャップセンサによる
送り方向の寸法変化	$\tan \beta \cdot VB$ (刃先の後退)	"
切削音の変化	レベルの増大 ピーク周波数の低下	実時間分析器とレベル計 周波数計
アコースティック・エミッション	エミッションの増加	AE 計解析装置
同期反射光	反射光量による/反射光のパルス幅	断続切削に限る
ITV	摩耗面直接観察	断続切削ではストロボ画像
加速度	工具振動の変化	実時間分析器
刃先温度	刃先温度の上昇	熱電対, 放射計
仕上げ面あらし	あらし, 光沢の変化	インプロセスあらし計

かし被加工物の交換などの切削休止時期には観察が可能である。これは厳密にはインプロセスセンサではないが (インタプロセスセンサ), 工具摩耗は通常、徐々に増加する性質をもつ量なので、これでも差支えないことが多い。

むしろ問題は切削油や切刃付着物による妨害である。油は空気噴射、洗浄などの方法によって除去できるが、切削時の高温によってへばりついた付着物は容易には除去できない。しかも加工ごとにその量が微妙に変化する。また工具摩耗の形状は一般に複雑であって、その境界があいまいであることが多い。ITV で得られる画像の質も決して良くない。そこで、摩耗の測定のためには、画像信号の2値化あるいは平均化、前回測定時の画像との照合、形状認識の手法による境界線の抽出⁶⁾、学習などの方法による境界認識⁷⁾、多方向からの照明に対する応答の比較など種々の画像処理上の工夫が試みられる。

なお切刃付着物を除去するためには各測定前に高速軽切削を極く短時間実施すると有効なことが多い。

また正面フライス切削のような回転工具による断続切削の場合であれば、主軸一回転中のある期間は工具切刃が空間に出ている。この期間 (非切削期間) を利用して、高感度の撮像管と強力なストロボ照明により回転する切刃を ITV で観察できる⁸⁾。この時、すくい面摩耗の観察は容易であるが、逃面摩耗の観察は移動方向に対し直交方向なので切削速度 200~300 m/min の場合 0.3 μs 程度以下の短発光時間の光源が必要である (図-2)。

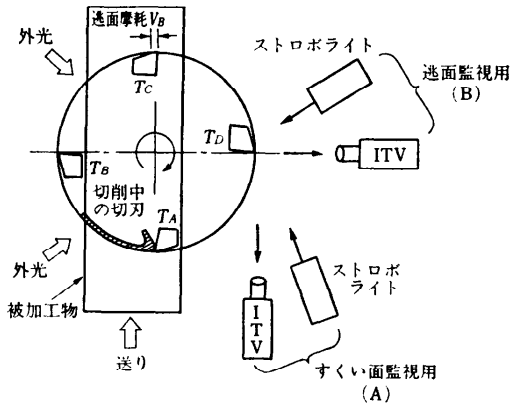


図-2 正面フライス切削における摩耗のインプロセス計測

また、回転工具に対し、レーザ光等の細い光束を照射すれば、工具摩耗（逃げ面摩耗）面からほぼ摩耗量に比例した反射量と反射光継続時間が得られる（図-1参照）。これからも、摩耗量を測定しよう^{9),10)}。しかし実際には外乱光による S/N 比の劣化、工具逃げ面や摩耗面あらさによる散乱等に対する配慮と対策が大切であり、かつ光源、受光器、工具摩耗部分を結ぶ光軸合せが必要である。これはかなり厄介なので、実用加工システムへの応用はなかなか難しい。

その他、間接的な測定方法としては、切削中に発生する音のレベルが工具摩耗により増加することを利用する¹¹⁾。同じく切削音の周波数の変化を利用する¹²⁾。工具摩耗に基づく AE (Acoustic Emission) の発生を利用する¹³⁾。摩耗による切刃後退に基づく加工寸法の変化を検出するもの。摩耗による切削力の増加を検出するもの¹⁴⁾など多数考案されている。これらは十分可能性がある方法ではあるが、いざ実用加工システムで使うとなると、工具摩耗との相関性の不完全さ、種類の外乱妨害、取扱性などの点で困難なところがある。工具摩耗の測定と言う意味ではまだ研究段階であり実用例は少ない。

3.2 工具欠損のインプロセスセンサ

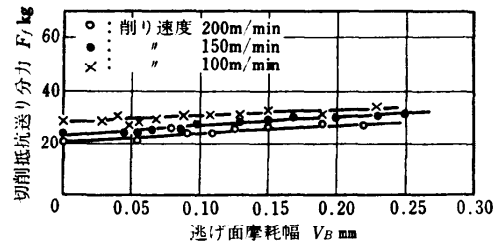
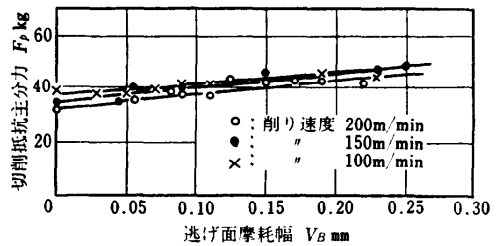
摩耗によって工具の切削機能は徐々に低下すると考えられる。しかし切刃が欠ける場合は直ちに切削機能を失う。たとえ、切削はできても加工寸法が変わってしまうので工具の欠損は致命的である。しかも欠損の発生は偶発的であり、予測不可能とされている¹⁵⁾。

したがって、FMS などの自動化システムでは、少なくとも工具欠損を自動的に検出し、処理する必要があり、このため種々の工具異常検出処理システムが開

発されている。欠損は摩耗とは異なるものであるが、結果的には摩耗の著しい場合と似ているとも考えられる。このため、表-2 の摩耗センサは原理的にはほとんどそのまま欠損センサとしても有効である。

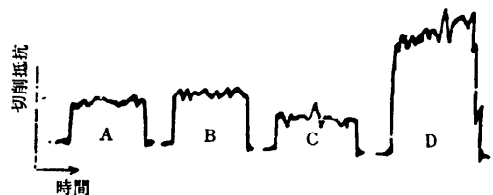
実用的な例としては加速度の rms 値（これは一種の平均化操作である）をしきい値と比較するもの¹⁶⁾、モータ負荷電流の増加を比較するもの¹⁷⁾、負荷トルクを検出できるセンサを内蔵した電動機¹⁸⁾、AE センサを利用したもの等が加工システムに組み込まれ、または異常検出装置として市販されている。

しかし、これらのセンサでは欠損検出のしきい値は切削条件、加工装置、被削材によって当然変化する。



(a) 逃げ面摩耗 V_B と切削抵抗の関係¹⁴⁾

被削材: S45C; 工具: P20 超硬工具 (0, 0.6, 6, 45, 45, 0.5); 送り: 0.2 mm/rev; 切込み: 1 mm.



(b) 切削抵抗の出力波形の変化¹⁴⁾

$V=137$ m/min
 $f=0.1$ mm/tooth
 $d=2.0$ mm
 $E=45$ deg

図-3

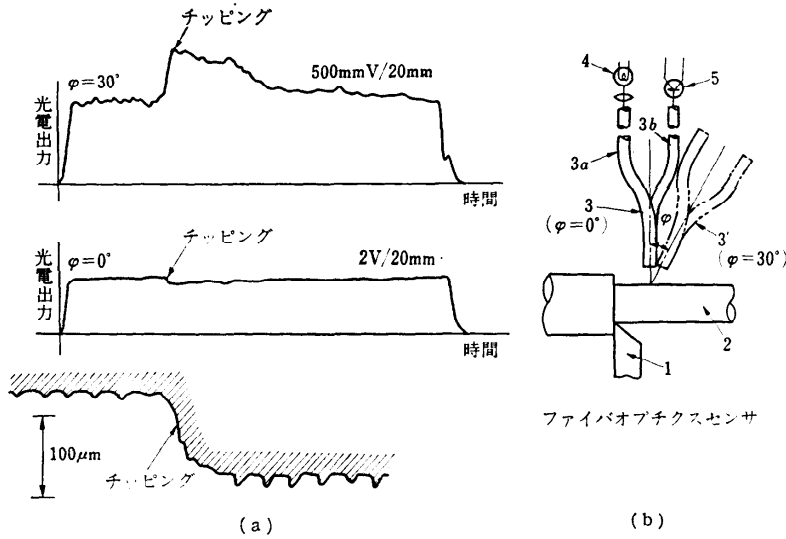


図-4 ファイバオプティクスによるチッピングセンサ

そこで、しきい値の設定等のため、十分な事前実験が必要である。この意味では、これらの検出装置はむしろ大量生産システムに有効であるが、FMS 向きではないとも言える。本格的な FMS 向きのセンサ技術の開発はこれからの課題であり、現象に密着した研究とともに、高度な欠損判定方式の研究が必要である。

欠損判定のための特徴抽出方式として、現在のところは次のような方法が良く用いられている。例えば、切削抵抗は図-3 (a)に示すように摩耗の増加によって、比例的に増加するが、その増加率はそう大きくない。欠損の発生する場合は少し異なると図-3 (b)のようになる。

すなわち、切削抵抗は初期値Aから摩耗によってBのように多少大きくなる。しかし欠損が発生すると、切刃が等価的に後退するので、実質送りが減って、切削抵抗はCのように減ってしまう。欠けが大きければ、被加工物から離れてしまうこともありうる(切削抵抗は零になる)。しかし、やがて、送り運動によって、工具が再び切削するが、この時、切刃は欠けによって鈍角になっているので、Dのように切削抵抗が急増することになる。したがって、「一旦低下し、再び上昇するパターン」を判定論理に組み込むと、比較的容易に欠損を判定できる。このようなパターンは加速度のレベルや、切削音のレベルについても認められることが多い。

このような現象に基因した有用なパターンをいかに

利用するかが、この種の技術の実用化の鍵となる。

図-4 は光学的な手法によるチッピングセンサ(チッピングは欠けの小規模なものを言う)である¹⁹⁾。工具切刃にチッピングが発生すると図-4 左下のように仕上面に段差(図では約 100 μm)ができる。これを測定角 φ を変えた 2 組のファイバオプティクスセンサによって計測(みかけの反射率を測っていると考えて良い)する。この時 φ によって、段差の部分の変化が反対であることが分かる。よって、2つのセンサの出力比をとれば段差(チッピング)が容易に検出できる。着目する信号は比であるから、仕上面の色や材料としての反射率には影響されない。この方式による段差の

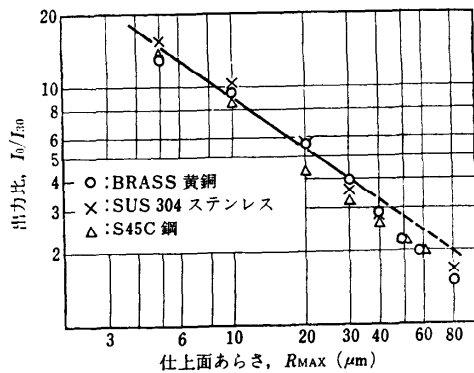


図-5 ファイバセンサによる仕上面あらさの測定

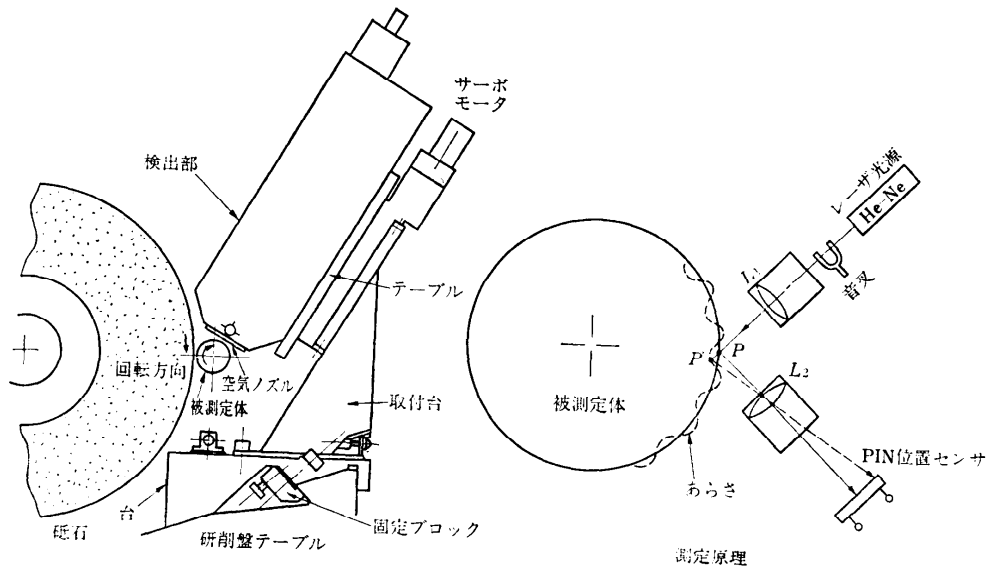


図-6 レーザスポットによる研削面あらさと真円度の測定

検出はかなり感度が良いが、実際にインプロセスで使用するためには2つのセンサの信号の混合が起らないように異なる周波数で変調することが必要である。また切削油の付着を空気噴射等で排除する必要がある。

3.3 仕上面あらさのインプロセス計測

被加工物を工作機械から着脱すると取付誤差が発生するから、仕上面あらさをインプロセスあるいは少なくともオンマシンで自動計測したい。この目的のため光学的なセンサが試みられている。

図-5は基本的には図-4と同じ方式のセンサである。段差(チップング)のない場合の2つの光電出力の比は図-5に示すように仕上面あらさと良い相関があり、これから、仕上面あらさを知ることが可能である。

図-6はレーザー光などの細い光束(6 $\mu\text{m}\phi$)を仕上面に傾けて照射し、仕上面の凹凸によって、輝点PがP'に移動するのを光電位置センサで検出するものである¹⁸⁾。

これは円筒研削盤に応用した例で、被測定体の回転を利用して、あらさ曲線を得ることができる。また信号の極低周波成分を抽出することによって真円度を測定することもできる。あらさの測定は0.5 μm Rmax程度まで可能である。その他、種々のセンサが試みられている。

3.4 寸法・形状のインプロセス計測

機械加工において、寸法、形状は最も重要な商

品価値である。このため従来から、種々の自動計測技術が開発され利用されてきた。空気マイクロメータ等を利用する自動寸法装置はその代表的なものであり、最近ではレーザー光等を用い被加工物の影の大きさから非接触で寸法を自動計測する装置も使われつつある。FA化、FMS化において、格別の障害はないかのように思えるが、そうでもない。たとえば、どんな自動寸法装置でも寸法誤差がつきものである。これは加工条件、被加工物の寸法、形状、工作機械の熱膨脹などにより変化する。量産システムならば、運転開始時に何回かのテストを実施し、寸法位置をセットすれば、以後時折チェックすれば足りる。しかし、毎回、被加工物が変わるフレキシブルな加工システムではこの方式ではすべて不良品となるおそれがある。つまり、相対的な寸法計測では不足で、いわば絶対的な寸法計測が望ましい。現状で利用されている方法はマスターゲージを備え、これと比較しながら計測するもの(図-7

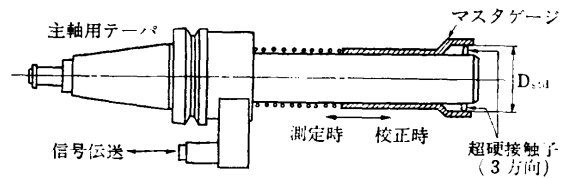


図-7 内径計測センサの一例(大阪機工)

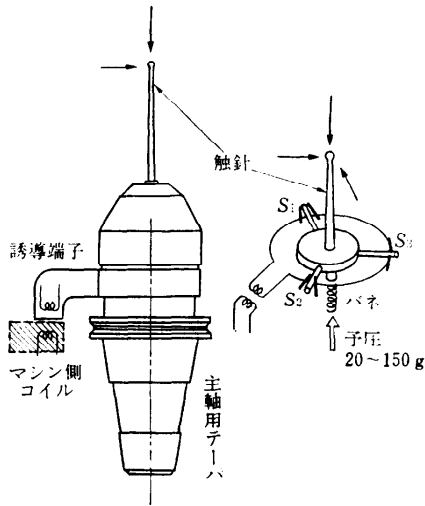


図-8 タッチプローブ (レニショウ社)

どの方向から接触しても触針が倒れ S_1, S_2, S_3 のいずれかの接点 OFF になる。これをマシン側から検出する。

はその1例), 接触点を検出するプローブ (図-8 はその1例) を備え, NC 工作機械の数値制御された運動を利用して計測するもの等がある。

現状の FMS はまださほどの高精度を要求されていないことが多いが, より高精度の自動計測技術は今後の課題であろう。また3次元自由曲面の自動計測技術も十分確立されていない。

4. 被削性および工具性能の自動検査

材料の削られ易さ (被削性: Machinability) は切削速度などの加工システムの運用条件を左右する重要な要因である。被削性は同一規格の材料であっても, 製造条件や構成成分の変動によって, 微妙にかつ大幅に変化することがある²⁰⁾。もちろん切削工具の性能もまた必ずしも一定とは限らない。したがって, 加工システムの安定な運用のためには供給される被削材と工具の性質を常に検査することが望ましい。

また加工システムの運用条件は切削工具の進歩に合わせて, 変更して行かなければならないが, このためには新工具の性能を正確に調べておく必要がある。さらに未経験の新材料を加工する場合には, 予じめ種々の加工条件における挙動を調べ適正加工条件を探索しておく必要がある。

いずれの場合も, 切削試験 (主に工具寿命試験) を実施することになるが, このためには実際に切削する時間だけではなく, 実験を計画する時間, 工具摩耗を

計測する時間などが切削する時間の何倍も必要であり, 多大の時間と労力がかかる。また摩耗計測の個人差による誤差も少なくない²²⁾。これを克服するために, 被削性と相関をもつ物理量 (例えば硬さと伸びの積) をもって代用しようとする簡易試験法が種々提案されているが, 相関のコヒーレンスが不十分で実用的なものほとんどない。そこで, 切削時間だけは仕方がないが, その他の時間を節約するため自動切削試験装置が開発されている⁶⁾。

これは要するに, ハードウェアとしては CNC 工作機械をベースマシンとし, これに自動的な工具摩耗計測装置を組み合わせたものである。機械技術研究所の例²¹⁾では図-9のような構成になっている。この自動切削試験装置では「所定の切削時間ごとに切削を中断して工具摩耗を計測し, 計測終了後また切削を再開する」基本動作を自動的に繰り返し実行し, ソフトウェアによる制御によって実験計画, 測定値のプロット, 最小自乗回帰や寿命方程式の算出, 統計的検定などを自動的に行う。現状のものはまだ固定的な実験計画であって, 試験条件は予じめ順に入力しておくか, または会話型で変更しうるにすぎない。将来は実験過程のデータの値によって自動的に実験計画を変更し, つね

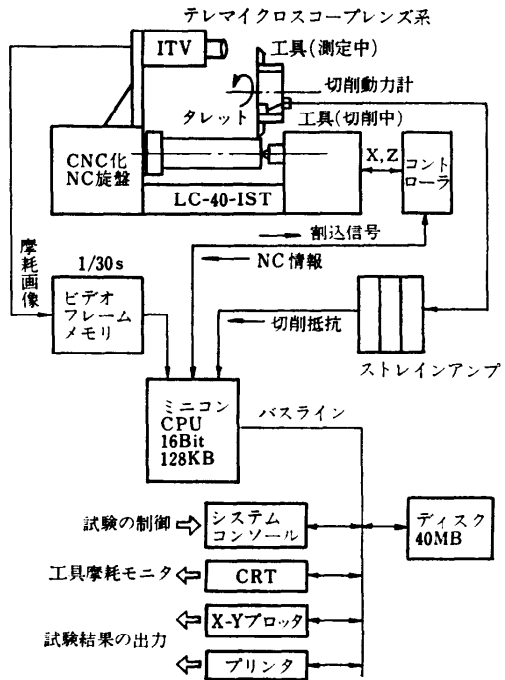
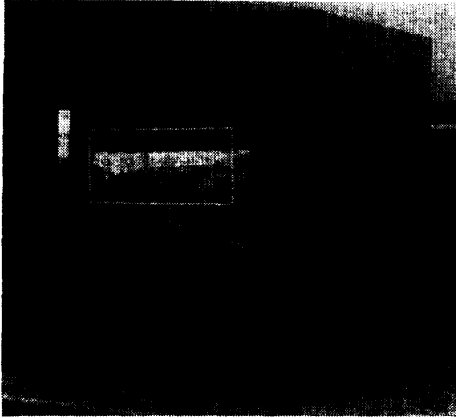
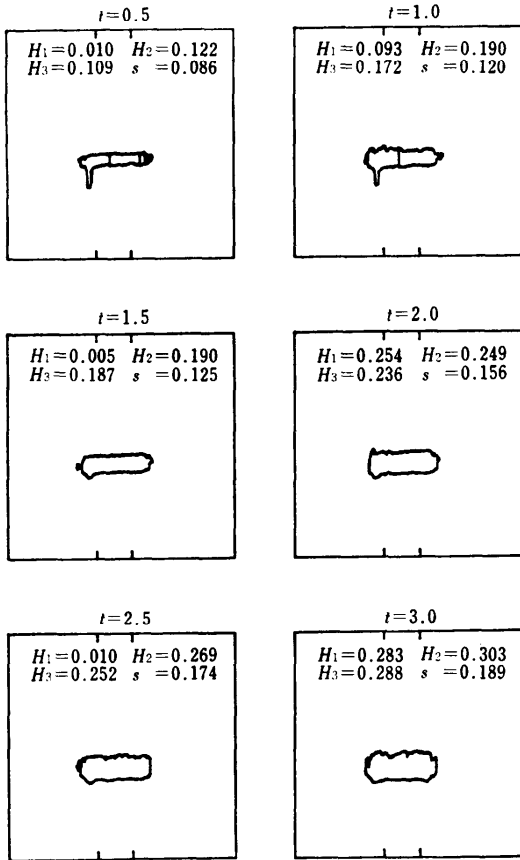


図-9 自動切削試験装置の構成



(a) CRT モニタ上の工具摩耗像
(白枠は計測対象領域, 左端は傾度レベルを示す)

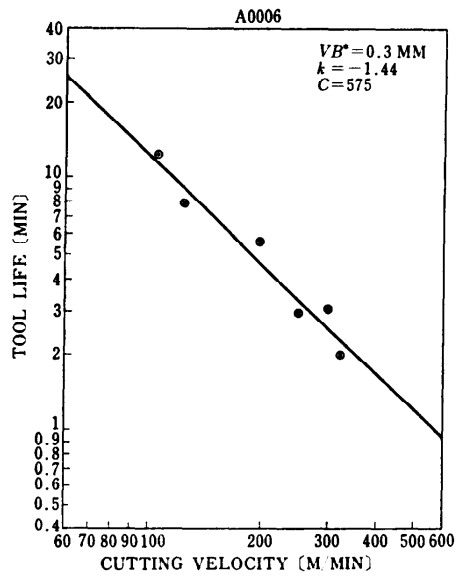


(b) 画像処理ソフトで抽出した工具摩耗パターン

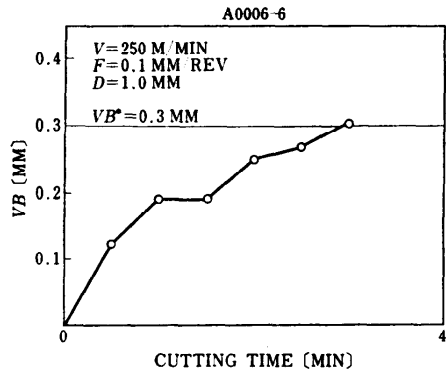
図-10

に最小費用で最大の情報が得られるようにソフトウェアを改良する予定である。

ここで、一つ注意すべきことは、一般の数値制御装置 (NC) では上述の基本動作をすることができないので、切削試験装置に向かないということである。通常の NC 制御では工具を空間の一点から他の点まで指定の軌道にそって移動することができるが、このシーケンスの途中での停止、切削条件の変更、行先の変更、戻り等はできない。また時間的な制御はやっていない。これに対し、切削試験ではシーケンス途中であっても、所定の計測時間が来れば切削を中断し計測す



(a) 工具寿命線図



(b) 工具摩耗経過曲線

図-11 自動切削試験装置の出力例

る必要があり、その結果もし摩耗量が限界を越えればその試験を終了し、次の試験（一般には試験条件も変わる）に移らなければならない。単なる NC 制御ではこれらの機能がないからできない。そこで、工作機械の運動をコンピュータで直接制御する方式（CNC）が必要である。

もう一つのポイントは工具摩耗センサである。前記のように工具摩耗の自動的な計測はなかなか容易ではない。今のところ、計測精度等の点から、ITV 方式による工具摩耗センサが主に用いられている。

図-10(a)は ITV 方式でとらえた工具逃面の画像であり白く輝いている部分が摩耗である。この領域を前記のような手法で認識し、摩耗幅を計測するのであるが、立体図形の認識に用いられるような複雑な手法を用いるとミニコンレベルでは時間がかかりすぎる。また、種々の汚れ、付着物、ハレーション等に対する判断も必要である。そこで、この事例では、まず汚れを空気噴射で除去し、画像を最適レベルで2値化し、摩耗近傍以外をマスクして消し、計測値をその左右の値と比較し変化の過大なものを除く、摩耗幅にわたって平均化する等によって簡便でありながら比較的安定した測定を実施している。図-11はその事例であり、画像データの取込みから摩耗幅の計測、寿命判定（限界摩耗）まで3～5秒かかる。タレットの動作、工具の早送り復帰を含めて、約10秒程度で切削1回分の摩耗計測が自動的にできる。以上は逃面摩耗であり、すくい面摩耗については自動計測をしていない。

5. あとがき

以上、FMS などのフレキシブルな加工システムの高度自動化に際して重要な切削機能のインプロセス計測技術とその一つの応用として自動切削試験装置について概説した。この分野の技術は決して確立されたものではなく、極めて不十分な状況であり、より高度で信頼性のあるものを求めて、各所で研究が進められている。

参 考 文 献

- 1) 伊東：FMS 入門，日刊工業（昭和58年）。
- 2) 古川：FMS，日刊工業（昭和57年）。
- 3) 中小企業研究所，生産工程自動化のためのセンサ技術に関する研究，報告書番号83-36（通巻854号），中小企業事業団（昭和57年）。
- 4) 村田：切削加工のインプロセス計測，応用機械工学，p. 124（Jan. 1976）。
- 5) 竹山ほか3名：日本機械学会誌，73-619，p. 1141（1970）。
- 6) 柏川ほか：精密機械，42-2，p. 106（1974）。
- 7) Matsushita, K. et al. : Ann. CIRP, 28-1, p. 43（1979）。
- 8) 超高性能レーザ応用複合生産システム中間報告書，機械技術研究所，p. 73（昭和54年）。
- 9) 村田ほか：精機学会講演論文集，p. 111（昭和51年10月）。
- 10) Jacobs, H. J. et al. : Proc. ICPE 2, p. 239（1976）。
- 11) Weller, E. J. et al. : Trans ASME, J. Engng. for Ind., 91 B, 3, p. 525（1969）。
- 12) 竹山ほか：精密機械，42-11，p. 1063（1976）。
- 13) 岩田ほか：精機学会前刷，p. 31（昭和50年4月）。
- 14) 竹山ほか：機械学会論文集，34-261，p. 992（昭和43年5月）。
- 15) Hirao et al. : Ann. CIRP, 28-1, p. 29（1979）。
- 16) 能ほか：精機学会講演論文集，p. 329（昭和53年4月）。
- 17) 小松製作所，工具異常監視装置カタログ等。
- 18) 超高性能レーザ応用複合生産システム中間報告 II，機械技術研究所，p. 55（昭和56年）。
- 19) 関口ほか：機械学会論文集，43-374，p. 3893（1977）。
- 20) 切削性分科会，精密機械，34-10，p. 680（1968）。
- 21) 中小企業研究所，中小企業における計測技術に関する研究（機械工作），報告書番号84-21-2（昭和58年）。
- 22) 村田：精密機械，42-2，p. 100（1976）。
- 23) 宮坂ほか：機械学会講演論文集，835-3，p. 69（Nov. 1983）。

（昭和59年2月14日受付）