

高速切削加工における工具挙動の可視化技術の開発

機械技術部 南 晃

Development of Visualization Technology of Tool Action in High-speed Cutting

Akira MINAMI

平成13年度の研究で、高速回転する工具の挙動を高速度カメラを用いて測定し、定量化するシステムを開発した。しかし、マシニングセンタにおける工具挙動を測定・管理するには測定システムは大型であり、一連の処理もマニュアル操作で行う必要があった。平成14年度の研究では、より小型化・自動化を図った測定システムを構築し、生産現場のマシニングセンタに搭載して工具の振れ回り測定試験を行った。その結果、工具の振れ回りは日々変動していること、その測定・管理は測定システムによって可能であることがわかった。

keyword: Visualization, High-speed, 高速加工, 工具挙動

1. 緒言

切削加工においては、工具に様々な力が加わり、振れ回り・たわみ・ねじれなどの工具挙動が発生する。

これらの工具挙動は加工精度や工具摩耗に影響を及ぼすと言われており、切削加工の高速化が顕著である現在においては無視できないものとなっている。しかし、現状では静的な測定であるため、回転時の動的な挙動には対応できない。

平成13年度には、回転する工具挙動を高速度カメラで撮影し、画像処理で解析し、定量的に把握する工具挙動可視化システムを構築した。

平成14年度では、この研究結果をもとに、マシニングセンタに搭載できるコンパクトなシステムを構築し、生産ラインにおいて下記のような用途に使用するための実用化に関する検討を行った。

- ・マシニングセンタの振れ回りを工程稼働中でも定期的に測定・管理する振れ回り測定システム
 - ・加工中の工具挙動を測定し、その情報をNC装置にフィードバックして、状況に適應する加工条件の抽出や学習機能による制御を行うインプロセス制御システム
- なお、本研究は中小企業庁の補助事業「中小企業技術開発産学官連携促進事業」で平成13年度～14年度に行ったものである。

2. 工具挙動測定システムの開発

2.1 工具の挙動について

工具は回転し、加工を行うとき様々な力が加わり変形する。工具の変形の種類はたわみ、ねじれ、振れ回りの三種類に大別できる。本研究ではこれらの挙動を測定対象とする。

2.1.1 たわみとその検出方法

切削加工を行うと工具は半径方向の抵抗を受けて、図1に示すようにたわみが発生する。このたわみにより工具の中心軸は移動する。この移動量を測定することでたわみの測定が可能である。

また、たわみと切削抵抗には相関がみられ、たわみの測定により切削抵抗の間接的な測定も可能である。

2.1.2 ねじれの発生と検出方法

切削加工を行うとき、工具は接線方向の力を受け、図2に示すように、ねじれが発生する。工具は形状が複雑であるため、ねじれが発生するとその見かけの形状、見かけの工具幅は変化する。この工具幅の変化を測定することでねじれの検出が可能である。

2.1.3 振れ回りの発生と検出方法

たわみとねじれは切削加工時における工具の挙動であるが、振れ回りは加工を行わない空転時の工具挙動である。

図3に示すように、工具が回転するとその重心に遠心力が加わる。工具、ホルダー、主軸などで構成される回転系が回転軸を中心に完全にバランスが取れているときは振れ回りは発生しない。しかし、現実にはアンバランスが生じており、重心が遠心力の影響を受けることによって振れ回りが発生し、これは回転速度とともに増大する。

遠心力の式を(1)式に示す。¹⁾

$$\text{遠心力 } F = m r^2 \cdot \cdot \cdot (1)$$

m : アンバランス重量

: 角速度

r : 中心からの距離

振れ回りの測定はたわみの場合と同様に、工具の中心軸の移動量を求めることで可能である。

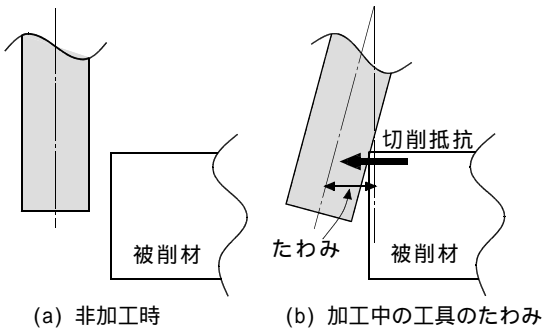


図1 たわみの発生と検出

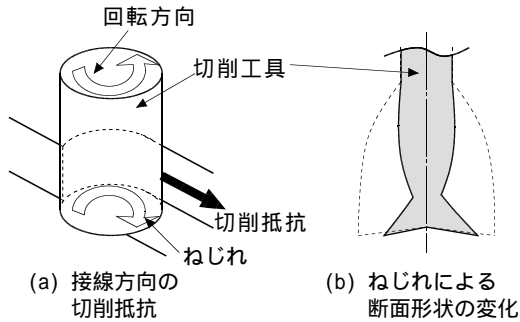


図2 ねじれの発生と検出

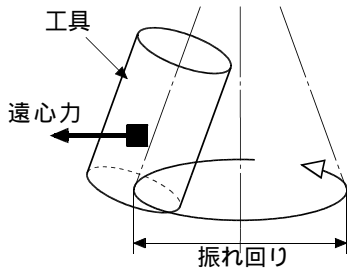


図3 振れ回り発生と検出

2.2 撮影した工具の画像処理

2.2.1 画像処理の手順

撮影した工具の画像処理の手順を図4に示す。²⁾

高速度カメラにより撮影された工具の画像を2値化変換する。工具の両端エッジ位置を検出し、その距離やエッジ間の中心座標を算出する。このエッジ間距離や中心座標の変化量が工具挙動の変化を表す。

片方のエッジだけの測定でも可能ではあるが、両端エッジを検出し、その中心位置座標を測定することでより安定した測定が可能になる。

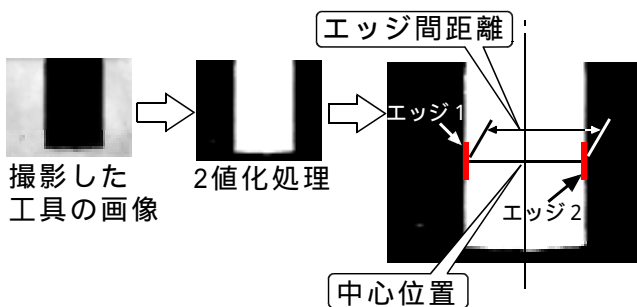


図4 画像処理の手順

2.2.2 工具挙動量の算出

たわみ

工具のたわみは半径方向の切削抵抗によって発生する。工具に切削抵抗がかかるとたわみによってその中心位置が移動する。

したがって、非加工時における工具の中心位置座標と加工中における工具の中心位置座標を比較することでたわみは算出可能である。

非加工時における中心位置座標を $X_{b'}$ 、加工中における工具の中心位置座標 X_b とすると、工具のたわみ量は(2)式で表される。

$$\text{工具たわみ量} = X_b - X_{b'} \dots (2)$$

ねじれ

工具の刃部は複雑な形状をしており、少しの位相の変化でもその断面形状及びエッジ間距離は大きく変化する。主軸回転と撮影タイミングを同期させて測定する場合、ねじれが発生しないときは工具直径すなわちエッジ間距離の変化はない。しかし、工具に接線方向の力が加わりねじれが発生すると位相が変化しエッジ間距離が変化する。このエッジ間距離を測定することでねじれの発生が検知できる。

振れ回り

たわみ同様、エッジ間距離の中心位置座標を求めることで算出可能である。振れ回りは工具先端が円運動を行っており、見かけ上は往復運動に見える。従ってこの往復運動の振幅量が振れ回り量と言える。振れ回り量の測定は位相を変化させながら、往復運動の最大幅を測定することで可能である。振れ回り量の測定方法を図5に示す。中心位置の最小座標を $X_{d'}$ 、最大座標を X_d とすると、工具の振れ回り量は(3)式で表される。

$$\text{工具振れ回り量} = X_d - X_{d'} \dots (3)$$

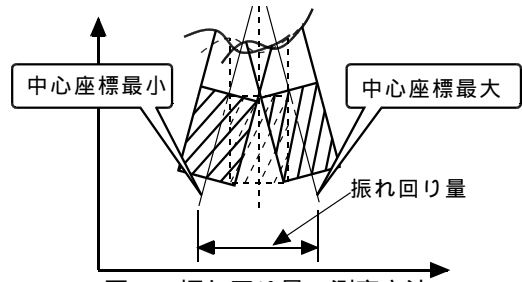


図5 振れ回り量の測定方法

2.3 インプロセス制御技術

従来、加工条件の設定は作業従事者の経験や過去の事例により行われてきたが、刻々と変化する加工状態に応じて、自動的に加工条件を変更する適応制御が望まれている。

インプロセス制御はマシニングセンタ等のNC工作機械において、各種センサを用いた加工状態の認識と監視を加工中にリアルタイムに制御する技術である。³⁾

近年パソコンの高性能化や普及率の増加に伴い、パソコ

ンでNC装置をコントロールできるオープンCNCが開発された。その結果、パソコンが入出力ライブラリを有することにより、CNCのコントローラいわゆるMMC (Man-machine controller)として活用されている。

図6にMMCによるインプロセス制御システムの構成を示す。MMCは光ケーブルを介してオープンCNCをコントロールすることができると共に、LANに接続することにより、外部からのプログラム変更や加工状態の監視を行うことが可能である。

工具挙動測定システムをこの制御システムのセンサ部に組み込むことで、工具挙動の変化に対応した加工条件のインプロセス制御が可能になる。

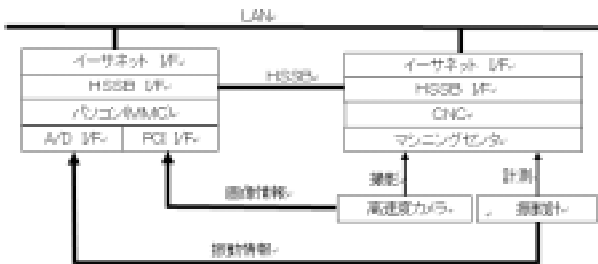


図6 MMCによるインプロセス制御システムの構成

3. 工具挙動測定システムの概要

平成13年度に構築したシステムは

- ・大型でマシニングセンタに搭載できない
- ・一連の処理が自動化されていない

など生産ラインに組み込むことは困難であった。

しかし、平成14年度に構築したシステムは下記に示すような特徴を持つ。

- ・小型軽量で、マシニングセンタに搭載可能である。
- ・撮影からデータ転送・画像処理・定量化など一連の処理を短時間に自動で継続的に実行できる。
- ・非加工時の振れ回り及び加工時の工具挙動の測定が可能である。
- ・情報が画像データであるために情報量が多く、多種類の情報を抽出可能で、多様な目的に使用できる。
- ・非接触での測定が可能である。

図7にシステムの概要を、図8にシステムの外観を示す。基本的な構成は平成13年度に構築したシステムと同じである。工具の回転をレーザーセンサで検知し、その信号と同期させて高速度カメラで撮影を行う。光源はバックライトとし、表面を荒らしたアクリル板を通すことで光を拡散させ、均等に照らすようにした。

撮影された画像は画像処理システムに送られ、この中で画像処理によって定量化される。

データを解析するときにはデータ収集システムを通してパソコンに保存可能である。

また、画像処理システムの中でしきい値を設定し、OK / NGを判別することも可能であるので、その信号を定期的を送ることでインプロセス制御システムのセンサ部としても使用可能である。

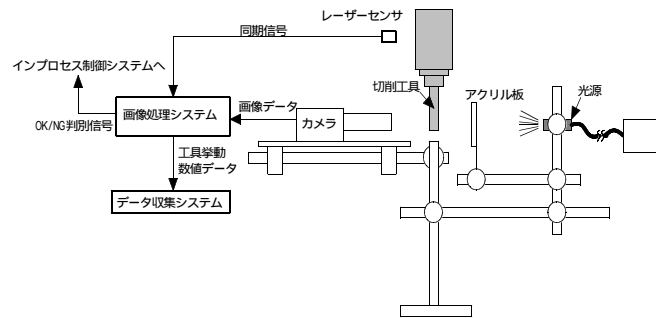
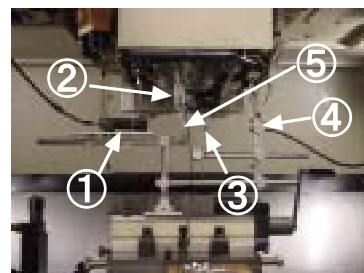


図7 システムの概要



- カメラ部
- センサ部
- フィルター
- ライト部
- 切削工具

(a)システム全体



(b)制御部



(c)カメラ部

図8 システムの外観

4. 工具挙動測定試験

4.1 挙動量の校正

画像処理されたデータ結果はピクセルで出力されるため、これを長さに変換する必要がある。

今回はマシニングセンタのテーブル移動を用いて簡易的な方法で校正を行った。

- ・測定システムをマシニングセンタテーブルに固定する。
- ・トリガーモードをオートトリガに設定し、回転停止状態にする。
- ・テーブルを工具がモニター端に来るまで移動し、そのときのピクセル値(X_p)とNCの座標値(X_m)を読み取る。
- ・工具がモニターの他端に来るまで移動し、そのときのピクセル値(X_p')とNCの座標値(X_m')を読み取る。

1ピクセルあたりの移動量Rは(4)式で表される。

$$R = \frac{X_m - X_m'}{X_p - X_p'} \quad \dots (4)$$

4.2 振れ回り測定試験

4.2.1 測定の方法

測定システムはマシニングセンタのテーブルに設置する。測定データは画像処理システムにより定量化してパソコンに転送・保存する。取り込んだ中心位置座標データの最大値と最小値の差を算出して振れ回り量を求めた。

測定条件を表1に示す。

表1 工具振れ回り測定条件

測定位相(degree)	0~360(45°毎)
回転速度(rpm)	5,000 10,000 15,000 20,000
サップリグ数(個)	500
シャッター速度(sec)	1/2,000
サップリグ周期(msec)	25
使用工具	直径:2.0mm 種類:ハイスフラットエンドミル

4.2.2 測定の結果

測定の結果を図9及び図10に示す。

図9は位相の変化と振れ回り量を表すグラフである。

工具先端は円運動をしており、見かけ上往復運動をしている。位相90°及び270°が往復運動の両端であり、この距離が振れ回り量である。

今回の測定では直径2.0mmのハイスエンドミルで最大約120µmの振れ回りが発生した。

図10は回転速度の変化と振れ回り量を表す。回転速度が大きくなるにつれて振れ回り量も大きくなるのがわかった。また、根元部よりも先端部の方が回転速度の影響を受けやすいことがわかった。

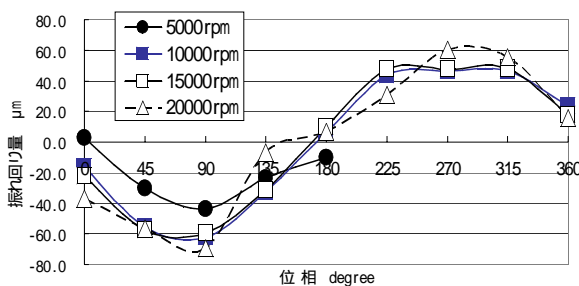


図9 位相の変化と振れ回り量

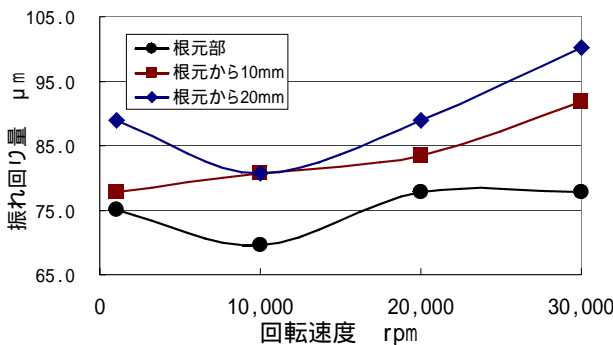


図10 回転速度の変化と振れ回り量

4.3 生産ラインにおける振れ回り測定試験

測定システムを生産ラインで稼働しているマシニングセンタに設置し、振れ回りを測定する実用化試験を行った。

4.3.1 使用するマシニングセンタ

今回使用するマシニングセンタでは直径20mmのボールエンドミルを回転速度25,000rpmで回転して加工を行っている。

マシニングセンタの外観を図11に、主な仕様を表2に示す。

表2 高速マシニングセンタの主な仕様

項目	仕様
NC装置	FANUC-15M
主軸T-ハ	BT40
主軸回転数(rpm)	1,000~25,000
主軸軸受け	磁気軸受け
テーブルストローク(mm)	X軸-600, Y軸-450, Z軸-350



図11 マシニングセンタの外観

4.3.2 測定の方法

1サイクル加工終了後、測定システムをマシニングセンタのテーブル上に設置する。測定を行う位置まで工具を手動で移動し、焦点の微調整を行った後、主軸を回転させて工具の振れ回りの測定を行う。オートトリガで測定し、測定終了後は測定機をテーブルから取り外す。

以上の測定を1日2回行ってデータを収集した。測定条件を表3に示す。

表3 生産ラインにおける振れ回り測定条件

測定期間	H15.1.21~2.7(1日2回)
測定回転速度(rpm)	1,000 5,000 10,000 15,000 20,000 25,000
サップリグ数(個)	1,000
サップリグ周期(msec)	1.0
シャッター速度(sec)	1/20,000
トリガモード	オートトリガ
使用工具	直径:20mm, 材質:超硬 種類:ボールエンドミル 突出し量:90mm 測定位置:工具先端から20mm

4.3.3 測定結果

今回使用したマシニングセンタでは、回転の同期をとるためのレーザーセンサを取り付けることは、加工やツールチェンジに影響するため困難で、オートトリガモードで測定を行った。オートトリガモードで測定した場合、測定する位相は任意に決められないため、必ずしも測定する位相が振幅最大である位相であるとは限らない。このため、サンプリング数を大きく設定し、その中における最大座標位置と最小座標位置の差を振れ回り量とした。

主軸回転と同期をとらない測定方法は、サンプリング数が多く測定時間が長くなる反面、システムとしては簡便になり、いろいろな構造の機械に容易に対応できるメリットを持つ。

回転速度の変化と振れ回り量の関係を図12に示す

回転速度の増大とともに振れ回り量も大きくなっている。1,000rpmというごく低速度域においても数十μmの振れ回りが発生しており、15,000rpmまでは緩やかに増加しているが、それ以降回転速度の増大とともに急激に大きくなることがわかった。

回転速度25,000rpmにおける工具振れ回り量の日ごとの変化を図13に示す。このように工具の振れ回り量は必ずしも一定ではなく、変動していることがわかった。

その要因としてはATCによる工具交換による取り付け誤差、切削抵抗による取り付け位置のずれ等が考えられるが、これらを解析し、改善することでより高い品質の加工が可能であると考えられる。

今後、工具振れ回り量と加工品質や工具寿命などの関係が明らかになれば、振れ回り量を測定・管理することで品質や工具寿命の管理が可能であることがわかった。

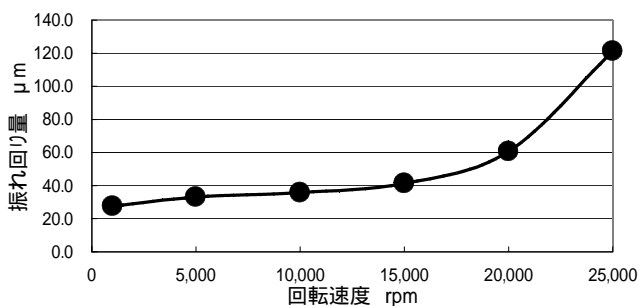


図12 回転速度の変化と振れ回り量

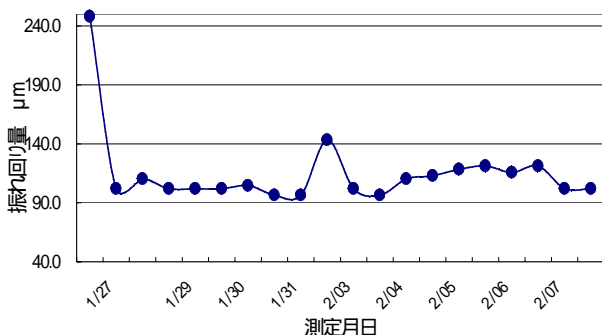


図13 25,000rpmにおける工具振れ回り量の変化

4.4 振れ回り量における機差測定試験

4.4.1 機差について

一口にマシニングセンタといっても基本構造、諸性能、製造時の個体差、使用年数、使用状況等一台一台異なる。このため、同じ加工をしても加工品質や工具の寿命等に差が生じる。これを機差と言う。

県内企業で実際に稼働しているマシニングセンタも一台一台それぞれに機差が生じていると考えられる。

4.4.2 測定の方法

県内で稼働しているマシニングセンタを対象に、回転速度を変化させたときの振れ回り量を測定した。回転速度を上げながらそのマシニングセンタの最高回転速度までの振れ回り量を測定した。

4.4.3 測定の結果

測定の結果を図14に示す。主軸を手作業で静的に回転させて測定した結果を回転速度0rpmとした。マシニングセンタによって大きな差が生じることがわかった。

個々の構造や仕様、組み付け誤差、使用頻度・年数、工具の取り付け誤差など多くの要因が複合的に絡んで生じた結果であると考えられる。

同じ回転速度における振れ回り量を測定しても機械によって大きく差が生じた。また、回転速度を変化させた時の振れ回り量の変化も一般的な曲線とはならないことがわかった。

従来、加工条件の設定は切削速度と送り速度を主としてきたが、機差が存在するために普遍的な加工条件の設定が困難であった。今後、工具振れ回り量と加工品質や工具寿命などの関係を明らかにすることで、機差を考慮に入れた加工条件の設定ができる可能性があると思われる。

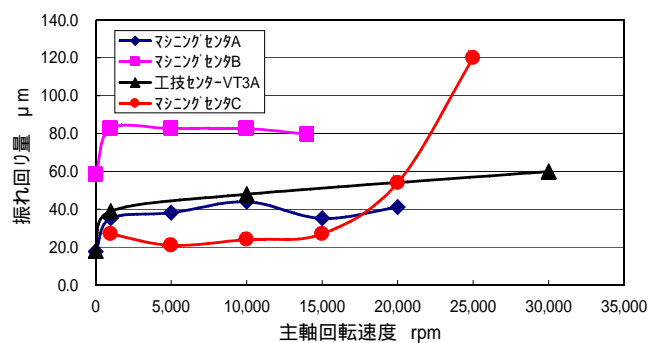


図14 振れ回り量における機差

5. 結言

高速度カメラを用いた工具挙動可視化技術に関する研究を行った結果、以下のことが得られた。

- ・回転する工具の工具挙動（たわみ、ねじれ、振れ回り）の測定技術の開発を行い、工具の振れ回り、たわみ、ねじれ等の測定が可能であることがわかった。

- ・生産ラインでマシニングセンタに搭載して工具挙動を測定するシステムを構築した。また、このシステムを使用して振れ回り測定試験を行い、生産ラインで使用可能であることがわかった。
- ・加工時の工具挙動を測定し、NC装置にフィードバックするインプロセスシステム構築のための要素技術をとじて使用可能であることがわかった。
一方、問題点としては下記のことあげられる。
- ・画像データのため、取り込むデータ量が多く、サンプリング周期が約1/50secと長い。インプロセス制御に用いるにはこれを短縮する必要がある。
- ・カメラレンズへの切削液やオイルが付着した場合、測定が困難になる。
- ・加工時の工具挙動の測定は、乾式の側面切削か穴あけ加工に限定される。

今後は、上記の問題を解決するとともに、工具挙動が加工品質や工具寿命に与える影響を明らかにすることで、振れ回り量測定による工程管理や加工条件の設定、インプロセス制御システムへの応用などを図りたい。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、有益な助言と協力を賜りました産業技術総合研究所の野崎武敏氏、水原清司氏、鹿児島工業高等専門学校の河野良弘教授、(株)アルバック精機の山下成敏氏に謝意を表します。

参考文献

- 1)大槻義彦：“物理学”，学術図書出版
- 2)尾上守夫：“画像処理ハンドブック”，昭晃堂
- 3)河野良弘ら：“2002精密工学会秋季大会学術論文集”