切削トルクの予測結果と実測結果の定量比較による加工異常検出システム
(第1報 工具摩耗による加工異常検出)西田 勇^{*1}, 立川 宗治^{*2}, 佐藤 隆太^{*1}, 白瀬 敬一^{*3}Cutting trouble detection system based on quantitative comparison
between predicted and measured cutting torques
(1st report Cutting trouble detection for tool wear)Isamu NISHIDA^{*1}, Muneharu TATEKAWA^{*2}, Ryuta SATO^{*1} and Keiichi SHIRASE^{*3}^{*1,*3} Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Kobe University

1-1 Rokko-dai, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657-8501 Japan

^{*2} Toyota Motor Corporation

1 Toyota-chou, Toyota-shi, Aichi 471-8571, Japan

Received: 26 September 2017; Revised: 15 November 2017; Accepted: 1 December 2017

Abstract

This study aims to develop a monitoring system, which can automatically detect tool wear in end-milling operation. A feature of this system is the utilization of the predicted cutting torque for detecting the difference between normal and cutting trouble. The cutting torque predicted by a cutting force simulator is compared with the cutting torque measured and evaluated from the driving torque of a spindle motor. Because the dynamic change of the cutting torque can be predicted by the cutting force simulator as the reference cutting torque, it is possible to detect cutting trouble correctly without disturbance arise from the changes of the cutting conditions and the machining form at every moment. In the cutting simulator, this study uses the workpiece voxel model in order to calculate the uncut chip thickness for the estimation of the cutting force. For the tool wear detection, 200 % increase of the average cutting torque is set as the threshold to detect 300 μm flank wear. In an experimental milling of a workpiece with holes using a worn square end mill, it is confirmed that the increase of the average cutting torque can be identified clearly in both of stationary and transient milling situations. It was verified that the tool flank wear could be detected correctly even in the dynamic change of milling operation.

Keywords : Cutting trouble detection, End milling, Cutting torque, Simulation, Monitoring

1. 緒 言

現在、コンピュータによる数値制御で自動運転を行う NC 工作機械は世界中で広く普及しており、必要となる部品形状を高精度に高効率で加工できることから、多くの製造現場で利用されている。NC 工作機械の普及に伴い、NC 工作機械の制御に必要な NC プログラムの作成を支援する CAD/CAM などのソフトウェアが急速に発展するとともに、工程設計や NC プログラム作成を自動化するための多くの研究がなされている(濱田他, 2012, 杉村, 2006, 上野, 中本, 2015, El-Mehalawi et al., 2003a, 2003b, 西田他, 2017)。これにより、NC 工作機械による機械加工に必要な段取り作業が軽減され、多品種少量生産においても生産リードタイムが短縮し、低コストでの機械加工が実現できるようになっている。

また、最近では工作機械にセンサを取り付け、これをインターネットにつないでネットワーク化することで、工作機械の稼働状況をモニタリングし、製品の保守や生産ラインの効率化に活用するといった先進的な動きがある。このように工場全体をネットワーク化してモニタリングすることで、工作機械の無人運転を実現する取り組

No.17-00433 [DOI:10.1299/transjsme.17-00433], J-STAGE Advance Publication date : 11 December, 2017

^{*1} 正員, 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)^{*2} トヨタ自動車 (〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町 1)^{*3} 正員, フェロー, 神戸大学大学院工学研究科

E-mail of corresponding author: nishida@mech.kobe-u.ac.jp

みが推し進められている(西岡, 2017)。しかしながら, NC 工作機械による機械加工の自動運転は従来から実現されているものの, 加工異常の検出や加工異常が発生した際の対処が非常に難しく, 現場の作業者がこれらの加工状態を監視しながら加工トラブルとならないように対処している。特に, エンドミル加工は様々な部品の加工に用いられ, 高速加工, 難削材加工など工具に負担がかかる加工も行われるにもかかわらず, 加工中の工具寿命の測定, 管理技術は確立されておらず, 熟練技術者の経験に依存している部分が多い(南, 2006)。そのため, 機械の無人運転を行う場合, 工具摩耗や工具欠損といった加工異常が発生しないように, 信頼できる工具を使用して安全な加工条件を決定せざるを得ないことから, 結果的に工具コストの増大と加工効率の低下につながる。

このような背景から, 加工中の工具や被削材の状態をリアルタイムでモニタリングし, 適応制御といった加工の高効率化を図る研究(茨木他, 2004)や加工異常を自動で検出する研究(頼他, 1984)が数多く行われてきた。加工状態のモニタリング方法の代表例として, 工具に作用する切削力や切削トルクの変化をモニタリングする方法があげられる。切削力や切削トルクのモニタリングでは圧電式の切削動力計を用いた方法があり, 高精度なモニタリングが可能であるものの, 工場の全ての工作機械に切削動力計を実装することはコストやスペースの観点で実用化は困難である。このため主軸の変位から切削力を測定する手法(松原他, 2001)や, 工作機械の内部センサを利用してモニタリングを行う方法(Denkena et al., 2014, Aly et al., 2006, 周藤他, 2011, 小池他, 2015), 送り駆動系のサーボモータの電流やトルク指令値からセンサレスで切削力を推定する方法も提案されている(茨木他, 2004)が, 検出精度や信頼性の課題があり実用化されるには至っていない。

また, 加工中の工具摩耗を検出するモニタリング技術も確立されていない。大量生産の場合には, 工具摩耗に対しては工具の使用時間を目安にして工具を交換することが行われるが, 安全のためには使用できる工具を廃棄しなければならない。工具欠損に対しては正常な加工時の切削負荷を記録しておいて切削負荷の違いから異常を検出する方法が有効であるが金型等の一品加工には適用できない。多品種少量生産や一品生産において機械加工の無人化を実現するためには, 多様な加工状態に対して加工異常を正確に検出する技術が求められる。

本研究ではエンドミル加工を対象とし, 工具摩耗による加工異常を正確に検出することを目的とした加工異常検出システムを提案する。このシステムは切削力シミュレータで予測できる切削トルクと主軸モータの駆動トルクから検出できる切削トルクを比較し, その差から加工異常を検出する点に特徴がある。切削条件や加工中の被削材の形状変化に応じた切削トルクの時間変化をシミュレーションで予測するため, 切削条件や多様な加工状態に左右されることなく加工異常を検出することが可能となる。つまり, 切削条件や多様な加工状態ごとに加工異常検出のための切削トルクを決めることなく加工異常が検出できる。

2. 加工異常検出方法

これまでの加工異常検出方法では, センサから得られる信号の大きさ, 周波数成分などに着目して検出を行うため, 検出のためのしきい値を切削条件や多様な加工状態ごとに変更しなければならず, しきい値の膨大なデータベースを予め作成する必要がある。また, しきい値のデータベースを作成する労力とコストは, 大量生産においては許容できても, 多品種少量生産や一品生産においては許容できない。

本研究で提案する加工異常検出システムの概要を図1に示す。このシステムでは, 本研究グループで開発している被削材形状をボクセルモデルで表現する切削力シミュレータを用いて予測される切削条件や加工中の被削材の形状変化に応じた切削トルクと, 切削加工中に主軸モータの駆動トルクから検出される切削トルクを比較することで加工異常を検出する。例えば, 工具摩耗の状態を検出する場合, 摩耗が小さい状態では切削トルクの予測結果と測定結果の差異も小さいが, 工具摩耗が進展するにつれて加工中の切削トルクが大きくなり, 切削トルクの予測結果と測定結果の差異が大きくなる。その差異の程度から工具摩耗を検出することができる。

切削トルクの予測に用いる切削力シミュレータでは, 切削条件や加工中の被削材形状の変化に応じた切削トルクの時間変化を予測することができる。そのため, 加工異常を検出するためのしきい値を切削条件や多様な加工状態ごとに決めて予めデータベースを作成する必要がない。

Fig. 1 Proposed system to detect automatically tool wear of cutting edge in end-milling operation by comparing the monitored cutting torque with the simulated cutting torque

2・1 被削材形状をボクセルモデルで表現する切削力シミュレーション

本研究で用いる切削力シミュレーションでは、被削材形状をボクセルモデルで表現し、工具と被削材の干渉状態から実切込み厚さを算出し、実切込み厚さから瞬間切削力モデル（Tlustý and MacNeil, 1975, Montgomery and Altintas, 1991, Altintas and Lee, 1996, Shirase and Altintas, 1996）を用いて切削力を算出する。

瞬間切削力モデルでは、ねじれ刃による複雑な切削機構が数式で表現され、現実的な計算時間と精度で切削力を計算することができる。この切削モデルでは、図2に示すようにエンドミルを工具軸方向に沿って微小薄板要素に分割して、個々の要素ごとに微小切削力を計算する。この微小切削力を力の方向を考慮しながら足し合わせて、工具に作用する切削力を求める。微小切削力は各薄板要素の切れ刃先端に作用すると仮定し、切れ刃に垂直な面内での加工を二次元切削状態で近似している。それぞれの薄板要素に作用する切削力の接線方向成分 dF_t 、半径方向成分 dF_r 、軸方向成分 dF_a は以下の式で表される。

$$dF_t = [K_{te} + K_{tc} h(\theta, z)] dz \quad (1)$$

$$dF_r = [K_{re} + K_{rc} h(\theta, z)] dz \quad (2)$$

$$dF_a = [K_{ae} + K_{ac} h(\theta, z)] dz \quad (3)$$

ここで、 K_{te} 、 K_{re} 、 K_{ae} 、 K_{tc} 、 K_{rc} 、 K_{ac} は切削係数、 $h(\theta, z)$ は工具半径方向の実切込み厚さ、 dz は工具軸方向に分割した微小薄板要素の厚さである。切削係数は様々な送り速度で実測した切削力の平均値から実験的に求めることができる。

瞬間切削力モデルでは工具半径方向の実切込み厚さ $h(\theta, z)$ を求めて切削力を計算する。本システムでは図3に示すように被削材形状をボクセルモデルで表現して、工具切れ刃が通過して除去されるボクセルの個数から離散的に実切込み厚さを求める。これにより、工具と被削材の接触状態が非一様になる場合でも切削力の予測が可能となる。

実切込み厚さ $h(\theta, z)$ は x 方向成分 $h_x(\theta, z)$ と y 方向成分 $h_y(\theta, z)$ 、 z 方向成分 $h_z(\theta, z)$ を用いて次式で表すことができる。

$$h(\theta, z) = \sqrt{h_x(\theta, z)^2 + h_y(\theta, z)^2 + h_z(\theta, z)^2} \quad (4)$$

Fig. 2 Minute disk element of tool, which the cutting edge is divided into in line with the tool shaft, and the cutting force on the cutting edge for instantaneous rigid force model

Fig.3 Workpiece voxel model for the calculation of the uncut chip thickness

ここで、 $h_x(\theta, z)$ と $h_y(\theta, z)$ 、 $h_z(\theta, z)$ は工具切れ刃が通過して除去されるボクセルの個数から離散的に求められる。図4に示すように各薄板要素における工具中心点と工具切れ刃を結ぶベクトル上に存在するボクセルを抽出し、抽出された各軸方向のボクセルの個数とボクセルの一边の長さの積から $h_x(\theta, z)$ と $h_y(\theta, z)$ 、 $h_z(\theta, z)$ が計算でき、そこから実切込み厚さ $h(\theta, z)$ を求めることができる。ここで、工具切れ刃が通過して除去されるボクセルの算出では、被削材をボクセルで表現しているため、一つ前の切れ刃の軌跡が被削材に表現されている。そのため、切削力の推定に必要な実切込み厚さを被削材形状から精緻に算出することができる。また、被削材をボクセルで表現しているため、被削材形状が穴を有している場合や平面でない場合でも実切込み厚さを精緻に算出することが可能である。

Fig.4 Geometric relationship between the removal voxels and the cutting edge, and the uncut chip thickness calculated from the each axis component h_x , h_y , and h_z

2・2 切削トルクのセンサレスモニタリング

2・2・1 切削トルクのモニタリング方法

本研究では、主軸モータの駆動トルクを FANUC 製のサーボ情報モニタリングソフトウェア「SERVO GUIDE」を用いて取得する。主軸モータの駆動トルクは NC 工作機械が出力できる最大トルク T_{max} に対する割合 T_p [%] で出力される。切削トルク T は切削加工時の主軸モータの駆動トルクから非切削加工時の主軸モータの駆動トルク T_α を引くことで求められ、式(5)で表される。なお、実験で使用した NC 工作機械 (NMV1500 DCG HSC) の主軸モータの最大トルク T_{max} は 6.98 Nm である。

$$T = \frac{T_p}{100} \times T_{max} - T_\alpha \quad (5)$$

2・2・2 実加工によるモニタリング精度の検証

主軸モータの駆動トルクから検出される切削トルクの精度を検証するため、ドリル加工実験を行い、式(5)から求められるモニタリング結果と動力計から得られる測定結果を比較した。ここで、ドリル加工を行った理由としては、切削トルクは工具切れ刃に作用する接線方向成分の切削力により発生するため、工具を半径方向に移動させず、工具回転方向のトルクを測定できる動力計を使用して測定誤差を可能な限り小さくしたためである。実験には 5 軸制御高精度立て形マシニングセンタ (NMV1500 DCG HSC) に水晶圧電式動力計 (KISTLER 9272) を取り付けてドリル加工を行った。このとき、動力計および主軸モータの駆動トルクのサンプリング周波数を 1000Hz とし測定を行った。切削条件を表 1 に示す。送り速度が 350 mm/min の場合に動力計で測定された切削トルクと主軸モータの駆動トルクから検出された切削トルクおよびそれぞれの移動平均線を図 5(a), (b) にそれぞれ示す。また、各送り速度における平均切削トルクの測定結果とモニタリング結果を表 2 に示す。平均切削トルクは単純移動平均で算出し、次式で求められる。工具 1 回転当たり 60 点の切削トルクを算出しており、平均切削トルクはある点 i から工具 1 回転分の平均切削トルクを算出している。

$$\bar{T}_i = \frac{T_i + T_{i-1} + \dots + T_{i-59}}{60} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

図 5、表 2 からわかるように、動力計で測定された切削トルクと主軸モータの駆動トルクから検出された切削トルクがよく一致し、主軸モータの駆動トルクから切削トルクが精度よくモニタリングできていることが確認できる。

Table 1 Cutting conditions of drilling experiment

Workpiece	A5052	
	Thickness (mm)	10
Cutting tool	ϕ 8.0 drill	
	Number of flutes	2
	Material	HSSCo8
	Coating	No coating
Cutting conditions	Spindle speed (min^{-1})	3000
	Feed rate (mm/min)	200, 250, 300, 350, 400

Fig.5 Measured and monitored drilling torques compared with the moving average (Feed rate = 350 (mm/min))

Table 2 Comparison between measured and monitored average cutting torques

Feed rate (mm/min)	Measured average cutting torque (Nm)	Monitored average cutting torque (Nm)	Differences (%)
200	0.57	0.53	7.1
250	0.68	0.67	1.3
300	0.79	0.78	1.8
350	0.85	0.91	6.3
400	0.99	1.05	5.9

2・3 工具摩耗の検出方法

本研究では切削トルクの予測結果を測定結果と比較することで、簡便で信頼性の高い工具摩耗検出を行う。エンドミルの主な摩耗形態は逃げ面摩耗とすくい面摩耗に大きく分かれる。特に逃げ面摩耗幅は工具の再研磨や摩耗による工具交換の判断指標となっており、本研究でも逃げ面摩耗幅に着目して、新品の工具（正常状態）と逃げ面が摩耗した状態の工具（摩耗状態）で切削実験を行って平均切削トルクを比較した。

切削実験は、図 6(a)に示す正常状態の工具と工具逃げ面摩耗幅が約 300 μm の摩耗状態の工具を用いて行った。逃げ面が摩耗した状態の工具は、予め被削材 SS400 を用いて、新品の工具で切削を行い、切削後に工具逃げ面摩耗幅を測定し、摩耗幅が約 300 μm に達するまで繰り返し切削を行うことで準備した。切削条件を表 3 に示す。一刃当たりの送り量を変化させて切削トルクを主軸モータの駆動トルクから検出して平均切削トルクを算出し、逃げ面摩耗による平均切削トルクの増加割合から工具摩耗を検出するためのしきい値を調査した。

正常状態および摩耗状態の工具で加工した場合の平均切削トルクを一刃当たりの送り量ごとにプロットしたグラフを図 7 に示す。このグラフから平均切削トルクの増加割合（摩耗状態の工具で加工した場合の平均切削トルクを正常状態の工具で加工した場合の平均切削トルクで除算したもの）を一刃当たりの送り量ごとにプロットしたグラフを図 8 に示す。

Fig. 6 A new tool and a worn tool, which is used in the cutting experiment

Table 3 Cutting condition of the cutting experiment for detecting tool wear

Workpiece	A5052	
Cutting Tool	φ8.0 square end mill	
	Number of flutes	2
	Material	HSSCo8
	Coating	No coating
Cutting conditions	Cutting direction	Down cut
	Axial depth of cut (mm)	3.0
	Radial depth of cut (mm)	4.0
	Spindle speed (min ⁻¹)	3000
	Feed per tooth (mm)	0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06

Fig. 7 Comparison of average cutting torques between the new tool and the worn tool

Fig. 8 Rate of the torque by the worn tool to the torque by the new tool

図 8 では、摩耗状態の平均切削トルクが正常状態の平均切削トルクの 200～300%に増加していることが確認できる。特に、一刀当たりの送り量が 0.03 mm 以上では、平均切削トルクの増加割合がほぼ 200%と一定になることが確認できる。一方、一刀当たりの送り量が 0.03 mm 未満のとき、平均切削トルクの増加割合は大きくなっている。これは、一刀当たりの送り量が小さい場合は実切込み厚さが小さく、工具摩耗で刃先丸みが大きくなるにつれて切削力が相対的に大きくなるのが原因と考えられる。しかし、摩耗状態を検出するという目的では、主軸モータの駆動トルクから検出される平均切削トルクが、切削力シミュレータで予測される平均切削トルク（正常状態の工具で加工した場合の平均切削トルクに相当）の 200%をしきい値と設定すれば摩耗状態を検出できる。

3. 検証実験および考察

3・1 工具摩耗検出方法の検証

前述した工具摩耗検出方法で工具摩耗状態が検出できるかどうかを確認するため、正常状態（新品）の工具と工具逃げ面摩耗幅が約 300 μm の摩耗状態の工具を用いて、図 9 に示すような穴を有する被削材を用いて切削実験を行った。加工条件を表 4 に示す。この切削実験では工具が穴を通過する際に加工状態が過渡的に変化するが、平均切削トルクの予測結果と検出結果の関係を比較する。切削トルク波形の予測結果と検出結果との差異を判定できるように、切削力シミュレーションの時間間隔は、主軸モータの駆動トルクのサンプリング周波数 1000 Hz と同じになるように統一した。

平均切削トルクの予測結果と検出結果を比較して図 10 に示す。定常状態および工具が穴を通過する過渡状態のいずれにおいても、正常状態（新品）の工具による平均トルクの予測結果と検出結果は非常に良く一致している。また、摩耗状態の工具による平均切削トルクの検出結果が、正常状態（新品）の工具による平均トルクの予測結果の約 200 %に増加していることが確認できる。この結果から、加工中に加工状態の変化で切削トルクが変動しても、切削トルクの増加割合から工具逃げ面摩耗を検出できることが分かる。

Fig. 9 Workpiece with holes for the validation of the tool wear detection

Table 4 Cutting conditions to validate tool wear detection

Workpiece		A5052
Cutting tool	Tool	φ8.0 Square end mill
	Number of flutes	2
	Material	HSSCo8
	Coating	No coating
Cutting conditions	Cutting direction	Down cut
	Spindle speed (min^{-1})	3000
	Feed rate (mm/min)	300
	Radial depth of cut (mm)	4.0
	Axial depth of cut (mm)	3.0
Simulation conditions	Minimum Voxel size (mm)	0.008

Fig. 10 Experimental result of the verification for the tool wear detection, in which the variation of the simulation corresponds to that of the experiment (new tool) and the cutting force of the experiment (worn tool) is twice as large as that of the simulation.

4. 結 言

本研究ではエンドミル加工における加工異常を検出するために、切削力シミュレータで予測できる切削トルクと主軸モータの駆動トルクから検出できる切削トルクを比較することで、工具摩耗を検出する方法を提案してその効果を検証した。以下に検証の結果、得られた結論を示す。

- (1) 主軸モータの駆動トルクから検出できる平均切削トルクが、シミュレーションで予測できる平均切削トルクの200%を超える条件をしきい値と設定することで、切削条件や多様な加工状態に左右されることなく、工具逃げ面摩耗の検出ができる。

- (2) 被削材をボクセルモデルで表現して解析を行うことで、被削材に穴が存在するような加工状態が変化する場合でも工具逃げ面摩耗の検出ができる。

本研究では、工具逃げ面摩耗幅を $300\mu\text{m}$ として、そのときの切削トルクの絶対量の変化を工具正常状態での予測値と比較して工具摩耗を検出した。しかしながら、工具摩耗は切削距離に応じて大きくなるため、切削トルクの変化に応じた工具逃げ面摩耗幅を予測できると考える。そのためには、切削シミュレーションによる切削トルクの予測精度および主軸モータの駆動トルクから検出できる切削トルクの測定精度が必要となるため、今後検討を行う。

また、本研究では、工具摩耗を検出する方法を提案したが、加工異常には工具欠損が含まれる。今後は、切削力シミュレータで予測できる切削トルクと主軸モータの駆動トルクから検出できる切削トルクの比較から工具欠損を検出する方法を検討する。

謝 辞

本研究で切削実験に使用した 5 軸立て形マシニングセンタ（森精機製作所 NWV1500 DCG）は MTTRF より貸与されました。関係各位に深く感謝の意を表します。

文 献

- Aly, A., Sarhan, D., Matsubara, A. and Sugihara, M, Monitoring method of cutting force by using additional spindle sensors, JSME International Series C, Vol.49, No.2(2006), pp.307-315.
- Altintas, Y. and Lee, P., A general mechanics and dynamics model for helical end mills, CIRP Annals, Vol.45, No.1(1996), p.59.
- Denkena, B., Martin L. K. and Boujnah, H., Process monitoring with a force sensitive axis-slide for machine tools, Procedia Technol., Vol. 15(2014), pp.416-423.
- El-Mehalawi, M. and Miller, R. A., A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. Part I: representation, Computer-Aided Design, Vol. 35, No. 1(2003a), pp.83-94.
- El-Mehalawi, M. and Miller, R. A., A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. Part II: indexing, retrieval, matching and similarity assessment, Computer-Aided Design, Vol. 35, No. 1(2003b), pp.95-105.
- 濱田大地, 中本圭一, 石田 徹, 竹内芳美, 複合加工機用 CAPP システムの開発, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.791(2012), pp.2698-2709.
- 茨木創一, 坂平昌浩, 新家秀規, 松原厚, 垣野義昭, エンドミル加工における切削力の推定法, 精密工学会誌, Vol.70, No.8(2004), pp.1092-1095.
- 小池 綾, 柿沼 康弘, 青山 藤詞郎, 大西 公平, エンドミル加工における外乱オブザーバを用いたセンサレスびびり振動検出技術の開発 (第 2 報), 精密工学会誌, Vol.81, No.7(2015), pp.692-698.
- 頼光哲, 斉藤義夫, 伊東誼, 丸橋康彦, 切削抵抗の動的成分による工具摩耗の検出, 精密機械, Vol.50, No.7(1984), pp.1117-1122.
- 松原厚, 垣野義昭, 小川高志, 知能化エンドミル加工のための切削抵抗モニタリング, ファクトリーオートメーション部門講演会, (2001), pp.55-56.
- 南晃, 切削加工における工具摩耗量測定技術の開発, 鹿児島県工業技術センター研究報告, No.20(2006), pp.33-38.
- Mongomery, D. and Altintas, Y., Mechanism of cutting force and surface generation in dynamic milling, J. of Eng. for industry, Vol.113, No.2(1991), p.21.
- 西田勇, 佐藤隆太, 白瀬敏一, 加工制約条件を考慮したエンドミル加工用工程設計支援システムの提案, システム制御情報学会論文誌, Vol.30, No.3(2017), pp.81-86.
- 西岡靖之, 「つながる工場」のためのつながる仕組み, 精密工学会誌, Vol.83, No.1(2017), pp.19-20.
- Shirase, K. and Altintas, Y., Cutting force and dimensional surface error generation in peripheral milling with variable pitch helical end mills, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.36, No.5(1996), p.567.
- 周藤 唯, 柿沼 康弘, 大西 公平, 青山 藤詞郎, エンドミル加工における外乱オブザーバを用いたセンサレスびびり振動検出技術の開発 (第 1 報), 精密工学会誌, Vol.77, No.7(2011), pp.707-712.
- 杉村延広, 工程設計システムの現状と将来, 精密工学会誌, Vol.72, No.2(2006), pp.165-170.
- Thusty, J. and MacNeil, P., Dynamics of cutting forces in end milling, CIRP Annals, Vol.24, No.1(1975), p.21.

上野 瑛, 中本 圭一, 複合加工機用工程設計支援システムのための加工フィーチャの提案, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.825(2015), DOI : 10.1299/transjsme. 15-00108.

References

- Aly, A., Sarhan, D., Matsubara, A. and Sugihara, M., Monitoring method of cutting force by using additional spindle sensors, JSME International Series C, Vol.49, No.2(2006), pp.307-315.
- Altintas, Y. and Lee, P., A general mechanics and dynamics model for helical end mills, CIRP Annals, Vol.45, No.1(1996), p.59.
- Denkena, B., Martin L. K. and Boujnah, H., Process monitoring with a force sensitive axis-slide for machine tools, Procedia Technol., Vol. 15(2014), pp.416-423.
- El-Mehalawi, M. and Miller, R. A., A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. Part I: representation, Computer-Aided Design, Vol. 35, No. 1(2003a), pp.83-94.
- El-Mehalawi, M. and Miller, R. A., A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. Part II: indexing, retrieval, matching and similarity assessment, Computer-Aided Design, Vol. 35, No. 1(2003b), pp.95-105.
- Hamada, D., Nakamoto, K., Ishida, T. and Takeuchi, Y., Development of CAPP system for multi-tasking machine tool, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.78, No.791(2012), pp.2698-2709 (in Japanese).
- Ibaraki, S., Sakahira, M., Saraie, H., Matsubara, A. and Kakino, Y., On the monitoring of cutting forces in end milling processes : An estimation method by geometrically combining force vectors of servo motors and a spindle motor, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.70, No.8(2004), pp.1092-1095 (in Japanese).
- Koike, R., Kakinuma, Y., Aoyama, T. and Onishi, K., Development of chatter vibration detection utilizing disturbance observer (2nd Report), Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.81, No.7(2015), pp.692-698.
- Lay, G., Saito, Y., Ito, Y. and Maruhashi, Y., Detection of tool wear by dynamic component of cutting force, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol.50, No.7(1984), pp.1117-1122 (in Japanese).
- Matsubara, A., Kakino, Y. and Ogawa, T., Monitoring of cutting forces for intelligent end milling, Factory Automation, (2001), pp.55-56 (in Japanese).
- Minami, A., Development of tool wear amount measurement method in cutting, Kagoshima Prefectural Institute of Industrial Technology Report, No.20(2006), pp.33-38 (in Japanese).
- Mongomery, D. and Altintas, Y., Mechanism of cutting force and surface generation in dynamic milling, J. of Eng. for industry, Vol.113, No.2(1991), p.21.
- Nishida, I., Sato, R. and Shirase, K., Proposal of process planning system for end-milling operation considering product design constraints, The Institute of Systems, Control and Information Engineering, Vol.30, No.3(2017), pp.81-86 (in Japanese).
- Nishioka, Y., Connected systems for connected factories—Academic frontier with a new systems Theory, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.83, No.1(2017), pp.19-20 (in Japanese).
- Shirase, K. and Altintas, Y., Cutting force and dimensional surface error generation in peripheral milling with variable pitch helical end mills, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.36, No.5(1996), p.567.
- Sudo, Y., Kakinuma, Y., Onishi, K. and Aoyama, T., Development of chatter vibration detection utilizing disturbance observer (1st Report), Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.77, No.7(2011), pp.707-712.
- Sugimura, N., Research trends in process planning, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.72, No.2(2006), pp.165-170 (in Japanese).
- Thusty, J. and MacNeil, P., Dynamics of cutting forces in end milling, CIRP Annals, Vol.24, No.1(1975), p.21.
- Ueno, A. and Nakamoto, K., Proposal of machining features for CAPP system for multi-tasking machine tools, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.81, No.825(2015), DOI : 10.1299/transjsme. 15-00108.