

工具寿命の制御を目的としたエンドミル加工のプロセス制御

End Milling Process Control to Regulate Tool Life

○正 茨木 創一 (京大) 学 清水 拓也 (京大) 正 松原 厚 (京大)

Soichi IBARAKI, Takuya SHIMIZU, Atsushi MATSUBARA, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto

Numerous researches have been reported in the literature on the cutting force control in end milling processes. There have been, however, very few practical applications actually employed in commercial products. The paper presents a simple, practically feasible and effective scheme to regulate the tool life through a long-term control of cutting force. Cutting force is monitored only at tool path check points, set typically at intervals of several dozen meters. Feedback control focuses only on a long-term point-to-point regulation of cutting force, targeting tool life providing cutting for the given desired distance. The effectiveness of the present approach is experimentally investigated by an application example to contour-parallel cutting of hardened steel.

Keywords: end milling, cutting force control, tool wear, tool life

1. 緒言

機械加工の加工能率や精度は、その大部分が工程設計によって決定され、熟練者の経験と知識が必要とされる。非熟練者でも適切な加工が行えるよう、加工状態の観察と加工条件の決定を工作機械が自ら行う加工プロセス制御に関する研究はこれまで多く研究されてきた。特に切削抵抗の制御という形で、加工条件の自律的最適化を行う研究は、60年代に提案され、これまでに盛んに研究されてきた。切削抵抗が目標値より大きければ工具損傷の発生を防ぐため送り速度を低減し、目標値より小さければ加工能率を上げるため送り速度を増大させる。これが過去の研究の多くに共通する制御目的である。

しかし、これらの研究成果が実用化された例は極めて少ない。その原因として、我々は以下のように考える。第一は、このような手法を実装するために必要な、CNCシステムのオープン化が十分ではないことである。第二に、切削抵抗をモニタリングするセンサの信頼性とコストが挙げられる。圧電式の工具動力計等が普及しているが、高価であり、広く導入するのは難しい場合が多い。

第三に、より単純な、フィードバックを用いないモデルベースの送り速度スケジューリング法であっても、一般的な加工であれば、十分な精度で切削抵抗の一定化が行える場合が多い。その場合、高いコストをかけてフィードバック制御を導入するメリットが明らかでない。過去の研究の多くは、「どのように」制御するのかの研究に集中しすぎ、「なぜ」制御するのか十分検討されてこなかったと我々は考える。

図1は工具寿命と加工能率の間の一般的なトレードオフの関係を模式的に表したものである。一般に、加工速度を上げると工具寿命は短くなり、工具コストが上昇する。実際の加工では、この関係に様々な制約が与えられる。例えば、ある納期までに加工を完了させる必要がある場合、加工時間への制約が与えられる。また例えば金型加工では、加工精度の観点から、1つのワークを一本の工具だけで加工したい場合がある。これは工具寿命に対する制約と考えられる。

本論文では、与えられた制約に対し、図1中の●で示すような最適なプロセスを実現することを目的として、工具摩耗の進行に伴う加工プロセスの変化を陽に考慮した、新しい加工プロセスの制御法を提案する。

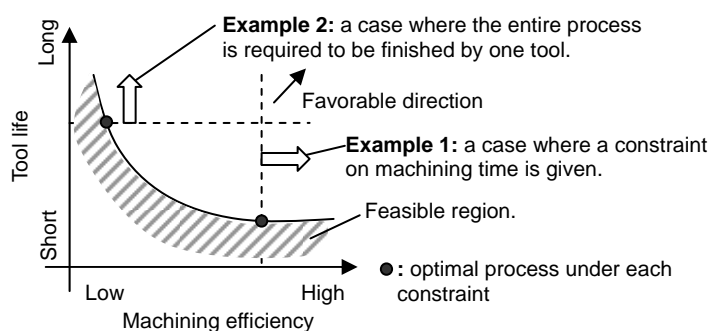


Figure 1: Trade-off between machining efficiency and tool life.

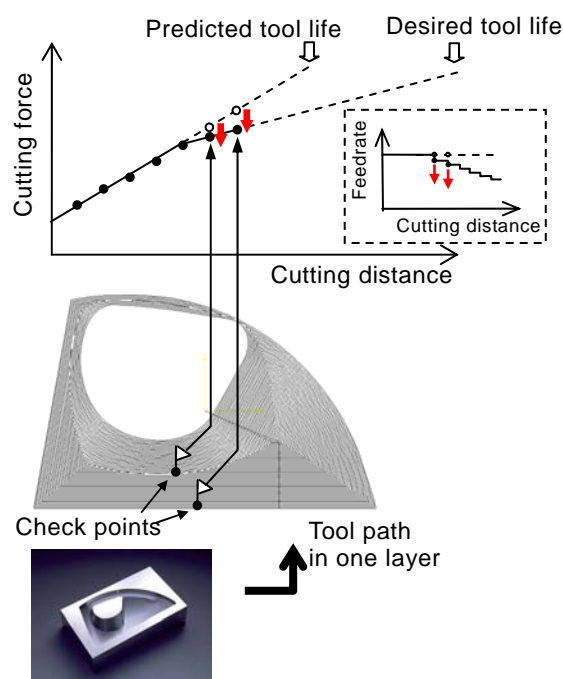


Figure 2: Concept of tool life control through cutting force control.

2. 提案する工具寿命の制御法の概要

図2に本論文で提案する工具寿命の制御法の概要を模式的に示す。一般に、工具摩耗の進行に伴い、工具に作用する切削抵抗は増大していく。この切削抵抗の上昇を

制御することで、工具寿命を陽に制御する。提案法の主な特徴は以下のようにまとめられる。

- 工具経路の形状によって生じる切削抵抗の変動は、モデルベースの送り速度スケジューリング法²⁾によって NC プログラムの送り速度を最適化することで一定化する。
- フィードバック制御は、ゆっくりと上昇していく切削抵抗を制御するために、送り速度のオーバライドを一定距離（通常数十メートルの切削距離）毎に修正する目的で適用される。
- 上記の制御目的のために、切削抵抗は工具経路中に一定距離毎に設置された「チェックポイント」でのみ限定的にモニタリングをする。常時モニタリングする必要がないため、低コストのセンサであっても十分な信頼性が得られると考える。

3. ケーススタディ

図 3 に示す等高線工具経路を用いて、工具寿命を制御する切削実験を行った。共通加工条件は表 1 に示す通りである。NC プログラムの送り速度は、切削抵抗が標準切削抵抗となるように予め送り速度スケジューリングがなされている。ステップオーバ量は 0.3mm で、1 層の切削距離は約 37 m である。この加工を工具寿命に至るまで繰り返す。

加工中にチェックポイント（図 3 中の 1 点破線部分）で切削抵抗を測定する。図 4 にチェックポイントの詳細を示す。図 4 中の数字は加工面の円弧半径を示している。切削抵抗測定の影響を小さくするため、工具パス一周のなかに複数の測定点（○印）を配置し、その切削抵抗の平均値を評価する。

予備実験として、送り速度スケジューリングのみを用いて、送り速度の更新を行わずに加工を行ったところ、切削距離 1000 m 以上加工することができた。そこで、「工具寿命にいたるまでに切削距離 600 m を加工できることを確保した上で、加工効率を最大化する」ことを制御目的と設定して、制御実験を行った。また予備実験により、切削抵抗が 420N に達したときに工具寿命に至るものとした。

なお本実験では、主軸変位による切削抵抗測定法³⁾を用いて切削抵抗の推定を行った。この手法は温度による主軸ユニットの変位の影響が大きいなど、切削抵抗の常時モニタリングを行うためには解決すべき課題は多いが、チェックポイント毎のモニタリングであれば十分な信頼性を得ることは比較的容易である。

図 5 (a) に正規化切削抵抗の変化を示す（黒丸）。ここで正規化切削抵抗とは、切削抵抗を同一加工条件下で評価するための換算値である。切削距離 200 m までは送り速度オーバライドの更新を行わずに加工した。この段階で、この条件のまま加工を続けると約 1400 m で工具寿命にいたると予想された（図 5(a) 中「Estimated tool life ...」）。そこで、切削距離 600 m で工具寿命に至るように、正規化切削抵抗の目標値を図 5 (a) に示すように設定した（「Target profile」）。なお、比較のために、図 5(a) には送り速度スケジューリングのみで送り速度の更新を行わなかった場合の正規化切削抵抗の変化も示す。

工具寿命に至ることなく、切削距離の目標値 600 m の加工を行うことができた。図 5(b) に送り速度オーバライドの変化を示す。送り速度オーバライドを増大したことにより、総加工時間は、送り速度スケジューリングのみの場合と比べて 1 時間 20 分程度短くなった。

Table 1: Machining conditions

Machine	Vertical machining center
Tool	(Al,Ti)N coated sintered carbide radius end mill, $\phi 6$, 6 flutes
Workpiece	SKD61 (HRC53)
Coolant	Oil mist
Cutting direction	Down cut
Tool extension	18 mm
Axis depth of cut	6 mm

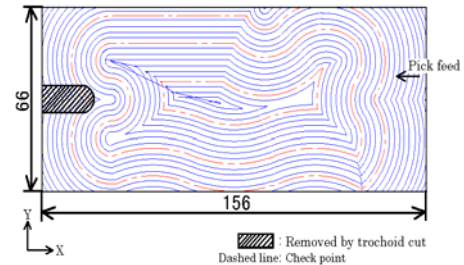


Figure 3: Tool path.

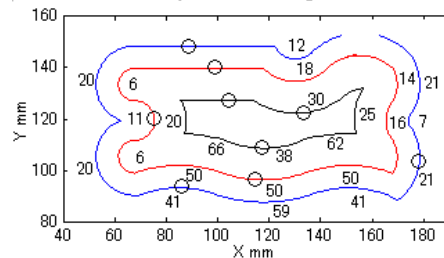
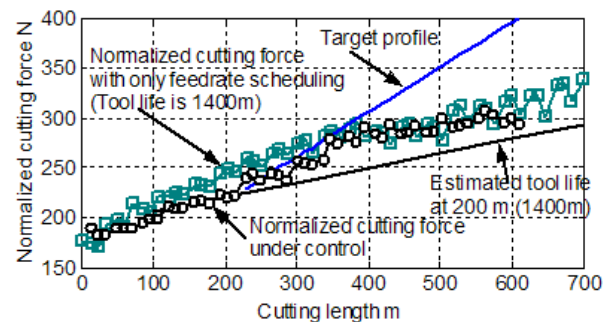
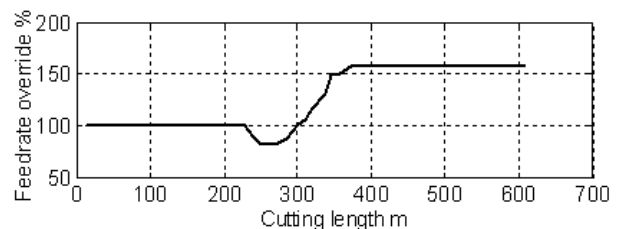


Figure 4: Check points on tool path.



(a) Normalized cutting force with and without the proposed control.



(b) Feedrate override under the proposed control.

Figure 5: Experimental results.

参考文献

- 1) Matsubara, A., Ibaraki, S.: Monitoring and Control of Cutting Forces in Machining Processes: A Review, Int'l J. of Automation Technology, 2009.
- 2) 垣野他：焼入鋼のエンドミル加工に関する研究（第1報），精密工学会誌，Vol.66, No.5, (2000), pp.730-734.
- 3) Sarhan, A. A. D.他: Monitoring Method of Cutting Force by Using Additional Spindle Sensors, JSME Int'l J., Series C, 49-2, (2006), pp. 307-31