複雑形状マシニング加工における高速な切削抵抗予測技術

埼玉大学 大学院理工学研究科 人間支援・生産科学部門 生産科学領域 准教授
金子 順一

近年の複雑形状機械部品の製造では、多数の工具を使用し、工具姿勢を連続的に変化させて切削を行う同時多軸制御加工機により、素材形状からの一貫生産が可能となりつつある。この種の部品製造では、除去効率の向上が生産性に直結するため、工作機械動作を最適化し、加工時間を短縮することが強く求められている。これに対して近年、ソフトウエアシミュレーションによる工具への負荷力の事前予測が実用化されつつあり、工具の除去状態に応じた送り速度の設定や加工誤差の事前予測や修正が可能となりつつある。ここではこれらの研究の動向と将来の課題について紹介したい。

加工条件を事前最適化

機械部品の量産において、複合加工機や同時多軸制御加工機の普及に伴い、段取り変えなしに部品を素材から直接製造する加工が普及しつつある。この種の加工は、多品種少量生産による高付加価値部品への需要が極めて高い医療機器や光学機器、切削による除去加工の実施を要求される宇宙航空機器においてよく見られる。特に宇宙航空機器では素材の難削性と加工時間短縮への要求から加工条件の事前最適化が強く求められている。

これに対して、近年、ソフトウエアシミュレーションによる切削加工工程の事前最適化が注目されつつある。従来、工具や材料の種類ごとにデータベースに従って与えられてきた固定的な工具送り速度条件を見直し、加工中に工具に作用する切削抵抗が一定となるように工具切り込みの状態に合わせて工具経路各部における送り速度を細かく変更することで加工時間の短縮を図ろうとするものである。このような切削抵抗の事前予測と工具送り速度の最適化システムは、特に重切削を伴う荒加工向けには既に商用システムとしてTHIRD WAVEの「AdvantEdge」やMALの「MACHPRO」が開発されており、数値制御（NC）プログラムの最適化が可能となっている。

さらに、最近ではソフトウエアシミュレーションの予測結果を元に静的な工具たわみや動的な工具切れ刃の変位量を定量的に推定し、これを用いて工具経路を修正することで仕上げ加工時の形状精度を向上させる試みが実現されつつある。

図1は一般的な切削抵抗のシミュレーションモデルの構成を示す。エンドミル工具に作用する切削抵抗を事前予測するためには、まず予測の対象とする位置まで工具が進行した瞬間の加工対象物の表面形状を推定する（ステップ1）。次にある工具の回転角における工具切れ刃の座標を計算し、それぞれの部分が加工対象物を除去する深さを推定する（ステップ2）。最後に工具切れ刃の各部分に作用する力をシミュレーションモデルを用いて推定し、これを積算して工具全体にかかる力を工具軸方向、工具送り方向、工具ピック方向の三方向の成分として導出する（ステップ3）。これらの処理に関して、ステップ1は工具の移動に合わせて繰り返し行われ、ステップ2と3は工具1回転を微小回転角度ごとに分割し、それぞれの工具回転角ごとに実行される。

このような計算機モデルによる処理のうち、現在、インペラ（羽根）をはじめとする複雑形状部品に対する予測においてステップ1の高速化が課題とされている。等高線工具経路が多用される3軸制御加工に比べ、同時多軸制御による荒加工では工具切れ刃通過面との干渉領域（エンゲージメント領域）が送りに伴い急激に変動する現象が多発する。そのため、短い工具移動距離ごとに多数の工具位置における切削抵抗の予測を実施するためには、エンゲージメント領域の推定を高速化する技術の開発が重要な技術になると考えられる。

従来の手法では、加工対象物の表面形状推定には一般的な切削シミュレーションで用いられた形状記述手法が用いられている。これらは、B－rep（ビーレップ）やCSGといったCADシステムに用いられているソリッドカーネルの機能の利用と、Z－MapやVOXEL（ボクセル）といった離散的な記述手法の利用に分類できる。しかしながら、切削シミュレーションは本来切削加工終了後の加工対象物を表現し、削り残しなどの形状エラーを検証する目的で開発されており、工具の移動ごとに加工対象物形状全体の情報を逐次更新することは必要とされる計算量や記述メモリー量から高速化が難しかった。

そこで、筆者らの研究グループでは、エンゲージメント領域の高速化を実現するため、グラフィックスハードウエア（GPU）と呼ばれる並列計算デバイスと、そのための幾何形状処理アルゴリズムを開発している。GPUは3次元（3D）コンピューター・グラフィックの描画デバイスから派生した計算デバイスであり、多数（最大1500個）の計算コアを同時に駆動して同一の処理を多数のデータに対して並列に実施する機能を有している。**図2**はこれを工具移動領域間の集合演算に適用したシステムの構成を示す。工具切れ刃の位置を離散的に多数（1工具位置で1回転当たり約6万点）設定し、これが加工の瞬間に加工対象物の内部に存在するかどうかの判定を多数の計算コアによって並列処理する。内外判定結果と、工具送り速度から各位置における切れ込み深さを推定し、作用切削力を導出することにより、商用コンピューター利用製造（CAM）ソフトウエアの導出したNCプログラムに対して1工具位置当たり100ミリ秒以下の時間で切削抵抗を予測することを可能としている（**図3**）。

この技術を用いたアイコクアルファの研究では、既存の商用CAMソフトウエアシステムと一体化して航空機用部品の切削抵抗を経路生成時に逐次予測し、可視化してオペレーターに提示するシステムが開発されており、切削抵抗作用の状況をオペレーターが確認しながら工具経路を生成することが可能となっている。

また、これらの予測技術の応用として、近年、従来工具送り速度の最適化に用いられてきた切削抵抗の事前予測を高度化し、加工面に生じる誤差を推定する手法を実用化しようとする研究が行われている。広島県立工業研究所のグループでは前述の並列計算によるエンゲージメント形状の導出手法に加えて、工具の動的な変形を考慮可能な定量的予測モデルを開発し、金型などの高硬度材料を対象とした加工誤差分布状態の予測に成功している。さらにこの定量的な削り残し量の分布を解析し、工具経路をあらかじめ加工誤差による切れ刃の逃げを考慮して追い込む方向に修正することにより、工具変形の影響を打ち消すことの可能な仕上げ加工経路生成アルゴリズムの開発が報告されている。

現在、市場では前述のように既存のNCプログラムに対して解析を行い、工具送り速度を細かく変更することで加工時間の短縮を図るシステムが既に多数商用化されており、既存のCAMシステムによって決定された加工条件を最適化するシステムは成熟しつつある。しかしながら、工具経路生成時にさかのぼって切削抵抗の作用の状況を推定し、工具経路の最適化や使用工具、加工条件の変更をオペレーターに示唆して多軸制御切削加工の工程全体を含めた最適化を実施することが可能なシステムはいまだに出現していない。そのため今後、多軸制御加工機を用いた高効率加工をさらに高速に支援するためには、従来の送り条件のみの最適化を対象とした単一のパッケージではなく、CAMソフトウエアシステム内部で切削抵抗予測を行い、効率的な除去が可能な工具経路を自動的に生成可能な新しいシステムの開発が重要になると考えられる。

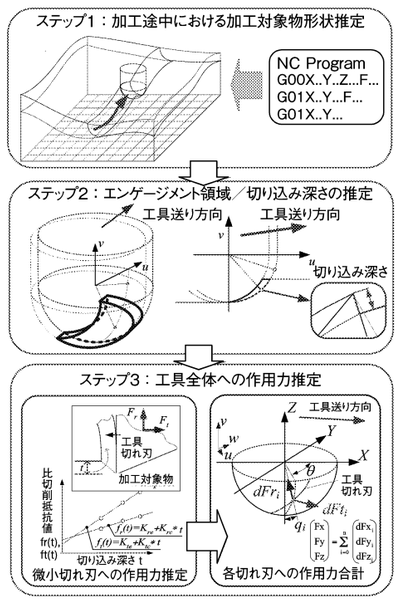


図1　一般的な切削抵抗（瞬時三分力）の予測モデルの例

加工途中の加工対象物形状を推定し、工具と加工面との位置関係からエンゲージメント領域を推定し、工具切れ刃各部分の切り込み深さを求める。最後に工具切れ刃の各部に作用する力を予測・合計して切削抵抗が求まる。

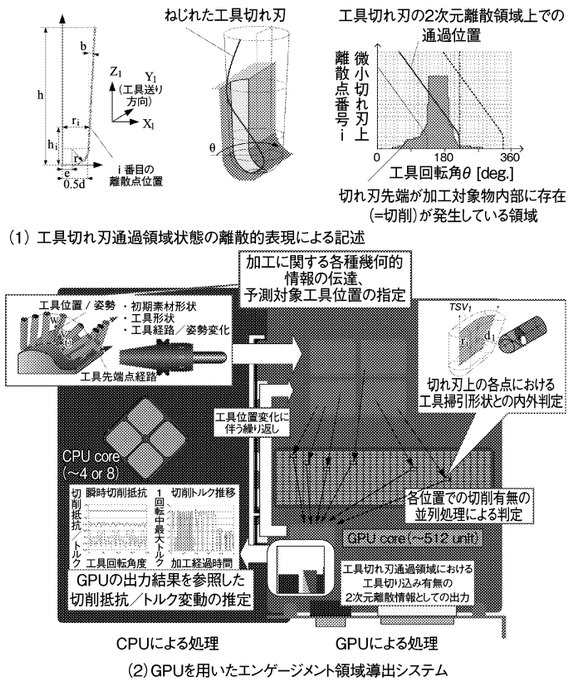
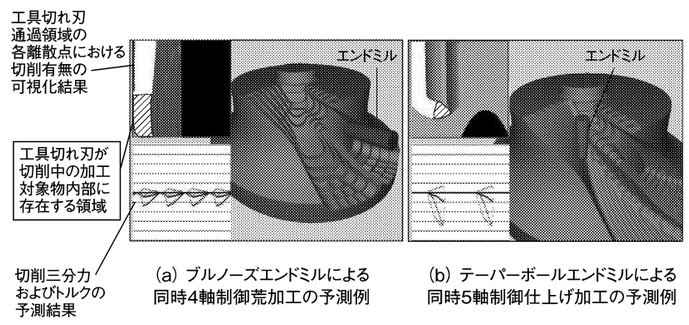
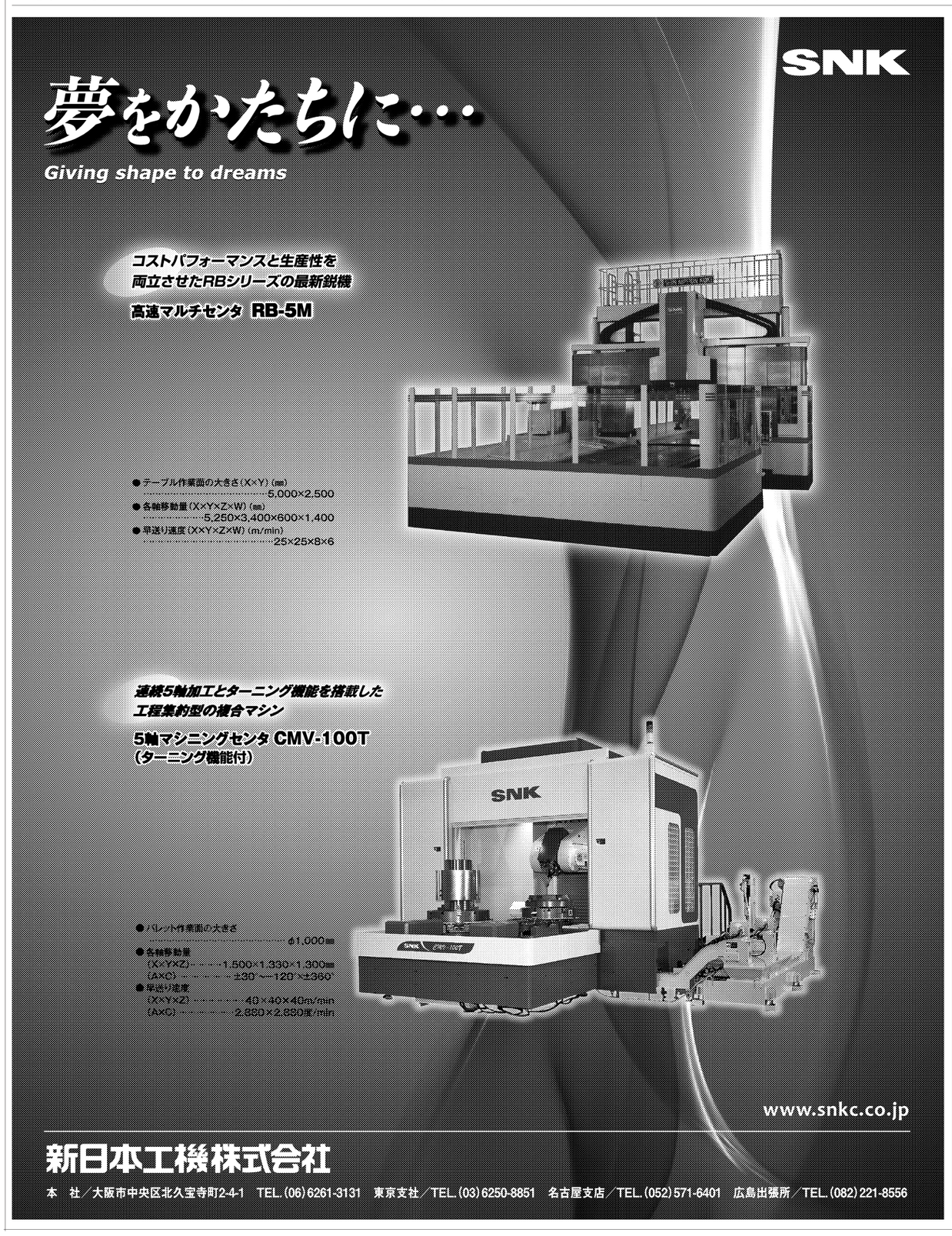


図2　GPUを用いたエンゲージメント領域導出システムの構成

工具切れ刃の通過領域を（1）のように微小な点群に分け、これらの点群が加工対象物の内側に存在するかどうかを加工対象物の初期形状、工具のこれまでの通過領域との間の集合演算で求める。その際、個々の判定を同時並列処理が可能なGPU上で実施（2）することで大幅な処理高速化を実現できる。



(a) ブルノーズエンドミルによる同時4軸制御荒加工の予測例　(b) テーパーボールエンドミルによる同時5軸制御仕上げ加工の予測例

図3　並列演算による高速な切削抵抗予測手法をインペラ製造の荒加工過程における切削抵抗予測に適用した例

（各予測結果のうち、右側は加工対象物と工具との相対的な位置関係を、左側は上が工具切れ刃各部の加工対象物への切り込みの状態、下が工具1回転中の切削三分力とトルクの変動を示す）