

穴あけ加工のドリル破損予兆の検出

横山哲也*、田畑克彦*、山田俊郎**、小川公輔†

Predictive detection of drill breakage in drilling

YOKOYAMA Tetsuya*, TABATA Katsuhiko*, YAMADA Toshio** and OGAWA Kousuke†

穴あけ加工では、設定した加工数や加工時間に達したときにドリルを交換することで、ドリルや加工物の破損を未然に防いでいる。この設定値は安全率を反映した値となっており、現実にはまだ使用できるドリルを交換することになる。そのため、ドリルの破損を予知できる仕組みが構築できれば、ドリルを有効に使い切ることが可能となり、コストの削減につながる。そこで本研究では、穴あけ加工時の加工機の電流データから特徴量を算出し、外れ値検知手法を用いてドリルの破損予兆を検出できる仕組みを試作した。

1. はじめに

加工中にドリル破損が生じるとドリルの一部が被削材に食い込み、加工物が不良品となるため、ドリル破損を未然に防ぐ必要がある。その対策として、設定した加工時間や加工数に達したときにドリルを交換している。しかし、この設定値は安全率を反映した値となっており、現実にはまだ使用できるドリルを交換することになる。そのため、ドリル破損の予兆を検出できれば、ドリルが破損する直前まで使い切ることが可能となり、コストが削減できる。

ドリル破損を予知するには、異常を示す変化を見つける必要がある。IoT 技術を用いて加工機の計測データを継続的に収集することで、定常時のデータを得ることができる。定常時のデータから外れたデータが測定された場合は、何らかの状態変化が生じたと考えられる。異常データの取得が困難な加工では、定常時に得られたデータを正常データとみなし、正常データの分布から外れたデータを検知することで、ドリル破損の予兆検出ができるようになる。

本研究では穴あけ加工時の加工機のモータ電流を計測し、計測データから算出した特徴量の統計データをもとに外れ値を検知することで、ドリルの破損予兆を検出できる仕組みを構築する。

2. 特徴量の算出

本研究ではドリル破損の数穴前に破損予兆を検出することを想定している。そこで、1穴の加工ごとに、計測データからドリル破損を示唆する特徴量を計算する。

2.1 対象加工

対象とする加工は穴あけのノンステップ加工で、多数の穴の連続加工である。被削材は超硬で、ダイヤモンド

コーティング処理を施した超硬ドリルで穴あけを行う。加工時の主軸回転数は一定で、刃先が被削材に食いつく前と後で、送り速度を変更している。

2.2 データ計測

本研究では過去の破損データから推測される以下の破損要因に対して、破損予兆の検出を行う。

- ・ドリル径方向の切削抵抗の増加によるねじれ破損
- ・ドリルの食いつき不良に伴う座屈現象による破損
(以下、座屈破損)

上記のいずれもドリルに働く切削抵抗が大きくなり破損に至ることから、切削動力計を用いて切削抵抗を計測することで、破損の予兆を検出する方法がある。また、切削抵抗を計測せずに被削材の変形・破壊時に生じる振動を、アコースティックエミッションセンサを用いて周波数解析し、破損予知を試みる方法もある¹⁾。しかし、いずれも専用の計測装置が必要であり、導入費用がかかる。本研究では企業で導入可能な安価なシステムを目指すため、汎用装置を用いてモータ電流を計測する。

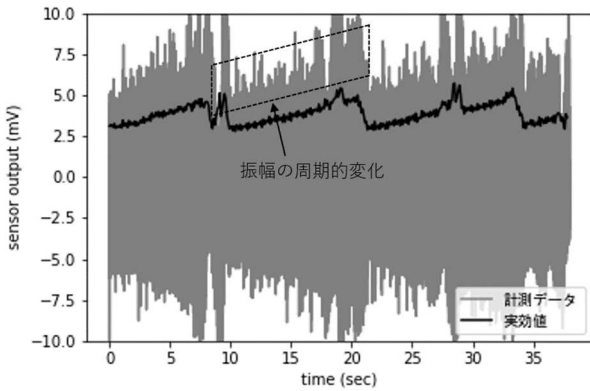
切削抵抗は加工機モータのトルクに比例し、その大きさはモータに流れる電流によって変化することから、電流を計測することで切削抵抗の変化を検出できる。本研究ではねじれ破損の予兆を検出するために主軸モータ電流を、座屈破損の予兆を検出するためにZ軸モータの電流を計測する。各々の電流は、サーボアンプとモータ間のケーブルにクランプ電流センサを取付けて計測した。

図1にモータ電流の計測データと、計測データから算出した実効値の時系列グラフ(1穴分)を示す。グラフ縦軸は電流センサの出力電圧であり、その大きさは電流の大きさに比例する。グラフ横軸は加工開始からの経過時間である。図より主軸モータの計測データは周期的に振幅(破線部)が変化し、Z軸モータにはインパルス状波形(破線部)が定期的に観察される。この2つはいずれも破損予兆を示す現象とは異なるため、ノイズとみなす。なお、主軸モータとZ軸モータでは異なる電流センサを使用したため、両者の絶対値比較はできない。

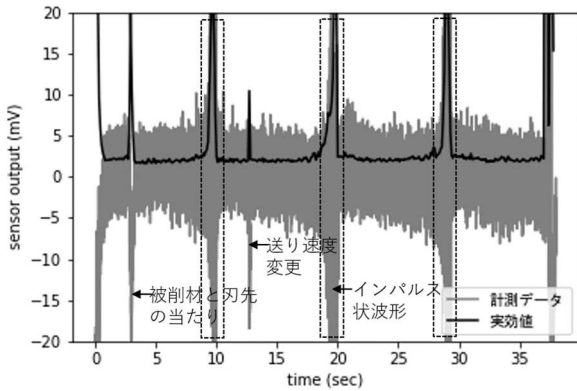
* 情報技術部

** 技術支援部

† イビデンエンジニアリング株式会社



(a) 主軸モータ電流



(b) Z軸モータ電流

図1 計測データと実効値(加工1穴分)

2. 3 電流データの特徴量算出

本研究では解析コストを考慮して、計測データから算出した実効値をもとに1穴ごとの特徴量を計算する。計測データには前述のとおりノイズが混入していることから、図2、3に示すように、実効値の時系列データに対して特徴量を算出する時間帯(以下、特徴量算出時間帯)を設けて、以下に記載する方法によりノイズの影響が小さい特徴量を算出する。

2. 3. 1 ねじれ破損の特徴量算出

ドリル径方向の切削抵抗は主軸回転周りに働くトルクであり、ブリネル硬さ、1回転当たりの送り量、ドリル径によって実験式から求めることができる²⁾。その実験式において加工中に変動する要素は送り量であることから、刃先が被削材に食いつき、送り速度が一定となった条件下で特徴量を計算する。

図1(a)に示す電流の周期的な振幅変化は、電流センサとデータロガーの計測回路がモータ電流の高調波成分を計測できないことが要因と考えられる。ただし、切削抵抗が大きくなると、電流の全周波数成分の振幅も増加することから、図2に示す実効値の波形の谷(最小値)の値も大きくなる。そこで刃先が被削材に食いつき、送り速度が一定となる加工後半に特徴量算出時間帯を設け、その時間帯で実効値の波形の谷が出現した際の特徴

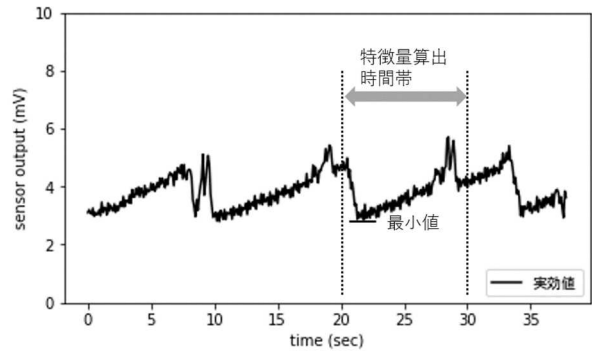


図2 主軸モータ電流の特徴量算出

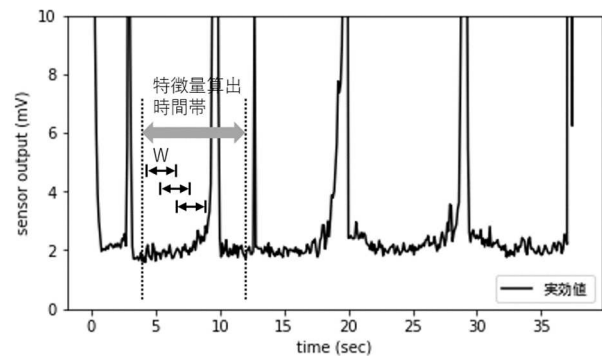


図3 Z軸モータ電流の特徴量算出

量とする。

2. 3. 2 座屈破損の特徴量算出

座屈破損は、ドリル刃先が摩耗し被削材に食いつきできない状態で軸方向の力が増加することで発生する。そのため、図1(b)に示す被削材と刃先の当たりから送り速度が変更するまでの間に特徴量算出時間帯を設け(図3)、その時間帯で特徴量を算出する。ただし、Z軸モータには一定間隔でノイズが混入し、その発生時間は加工時間と同期していないため、一定間隔より小さい時間窓Wで実効値を切り取り、特徴量を算出する。具体的には、図3に示す特徴量算出時間帯の中において時間窓Wをずらしながら実効値の平均を計算する。計算から求めた複数の実効値平均値の中から最小値を選択することで、ノイズの影響が小さい特徴量を求める。

3. 外れ値検知手法を用いた破損予兆の検出

3. 1 異常度計算

外れ値検知は正常データの分布から外れた値を検出する方法であり、異常データの取得が困難なときに用いる。ここでは特徴量の分布が正規分布に従うという仮定のもと、ホテリング T²法³⁾を用いた外れ値検知を行い、ドリルの破損予兆を検出する。

本研究では特徴量の分布を正規分布と仮定しているが、実際にはドリルの加工穴数が増えるに伴い、切れ刃のコーティング剥がれが進展し、その結果、特徴量が時間的に変化する。そこで外れ値検知を行う加工穴に対して、

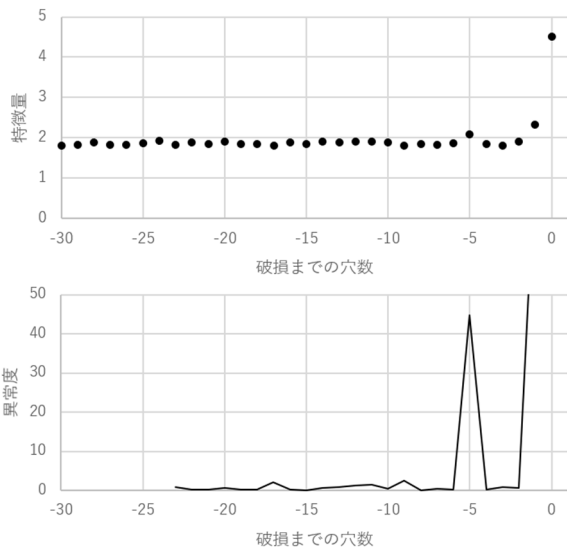


図4 ドリル破損時の特微量と異常度(Z軸モータ)

直前に加工した穴の特微量を統計量として用いることにより、時間的変化の影響を小さくし、正規分布の仮定を維持する。

i番目の穴を加工しているときの、直前に加工した穴の特微量 N 個を用いた標本平均 $\hat{\mu}$ 、標本分散 $\hat{\sigma}^2$ を以下に表す。ここで $x^{(n)}$ は特微量を示す。

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{n=i-N+1}^{i-1} x^{(n)} \quad (1)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=i-N+1}^{i-1} (x^{(n)} - \hat{\mu})^2 \quad (2)$$

ただし、主軸モータに関しては 2.3.1 項の記述のとおり、特微量算出時間帯内に実効値の波形の谷が出現しなかった場合は特微量が求まらない。その際は特微量を欠損値とし、標本平均 $\hat{\mu}$ 、標本分散 $\hat{\sigma}^2$ の計算から除外する。

ホテリング T^2 法は、正常データの分布に対して観測値がどの程度離れているかを異常度 a として定義する。異常度 $a^{(i)}$ は i 番目加工穴の計測データの特微量 $x^{(i)}$ に対して、以下のとおり計算する。

$$a^{(i)} = \left(\frac{x^{(i)} - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \right)^2 \quad (3)$$

異常度 a は N が大きい場合、自由度 1 スケール因子 1 のカイ 2 乗分布に従うことがわかっている。

ドリルが破損するまで加工し続けたときの計測データをもとに、オフラインで求めた Z 軸モータの特微量とその異常度を図 4 に示す。なお横軸は 0 を破損穴としたときの破損までの穴数である。図より破損数穴前に特微量が大きくなり、それに従い異常度も大きく変化していることがわかる。

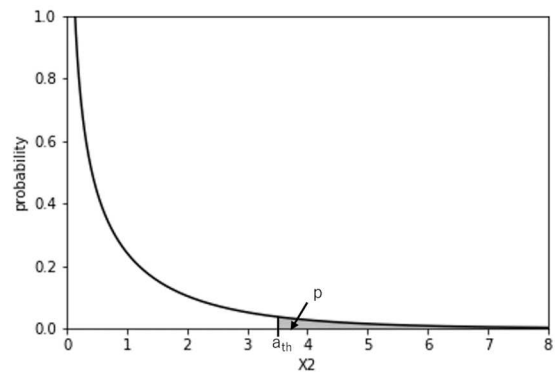


図5 カイ 2 乗分布

3.2 閾値設定

先に求めた異常度 a に対して閾値判定を行うことで外れ値を検知する。そのためには予め閾値を決めておく必要がある。実際にドリルが破損するまで加工を行い、そのときの特微量をもとに異常度を計算し、閾値を決める方法もある。しかし、異なる径と長さのドリルに対して各々破損させる必要があり現実的ではない。そのため、異常度がカイ 2 乗分布に従う性質を利用して、外れ値が出現する確率をもとに閾値を決める。

加工実績をもとに決めたドリル寿命穴数の逆数を確率 p としたとき、図 5 のカイ 2 乗分布の上側面積(図中のグレー領域)が p となる横軸を探し出す。このときの横軸の値を閾値 a_{th} とする。

3.3 適用例

図 6、7 に、主軸モータと Z 軸モータの計測データをもとにオフラインで算出した異常度の計算結果の一例を示す。図(a)は特微量を、図(b)は特微量から算出した異常度 a と閾値を示す。異常度を計算する際の統計量は直前の 30 穴のデータを用いて算出し、閾値は寿命穴数 250 穴の確率をもとに計算した。ねじれ破損と座屈破損は破損原因が異なるため、主軸モータと Z 軸モータの特微量には相関がないと判断し、異常度は主軸モータと Z 軸モータの個々で計算した。加工開始直後は標本平均、標本分散を計算するデータ数が乏しいため、異常度計算はしていない。そのため、加工初期のドリル破損を見落とす危険がある。しかし、実業務では穴加工を行う前にドリル刃先を馴染ませるための試し加工を行っており、初期破損の可能性は低いことから問題ないと考えている。なお、主軸モータの特微量が求まらない加工穴の異常度は 0 とした。

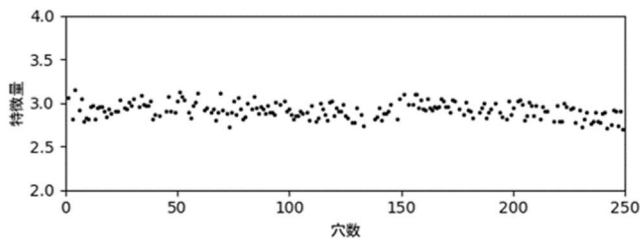
図 6、7 の加工で使用したドリルは、閾値設定で用いた寿命穴数 250 穴以下での破損が少ないことが実績からわかっている。それは主軸モータと Z 軸モータの異常度が閾値を下回ることを指しており、図の計算結果も同様な結果となっている。

計算で求めた特微量にはノイズの影響が少なからずあ

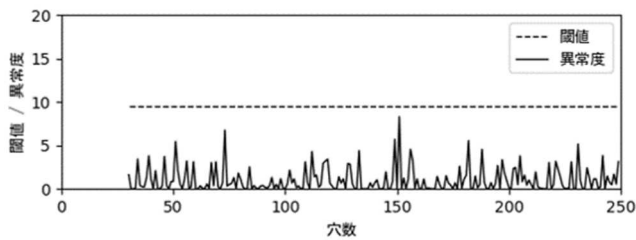
その影響により、閾値判定において誤判定となることが考えられる。そのため、センサなどの見直しを図りノイズの影響を低減する必要がある。

【参考文献】

- 1) 長谷川蘭, アコースティックエミッション法を用いた微小径ドリルの折損予知に関する研究, 埼玉工業大学工学部紀要, 第28号, pp.3-7, 2018
- 2) 例えば, M.C.Shaw, and C.J.Oxford Jr, On the Drilling of Metals 2-The Torque and Thrust in Drilling, Trans. of ASME, Vol.79, pp.139-148, 1957
- 3) 井手剛, 入門機械学習による異常検知, コロナ社, 2015

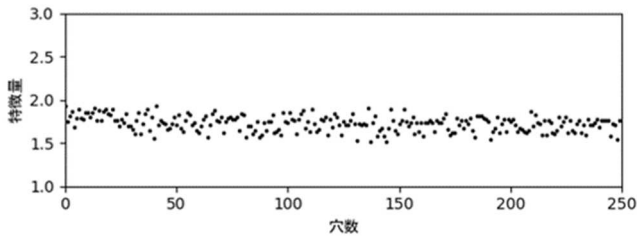


(a) 特徴量

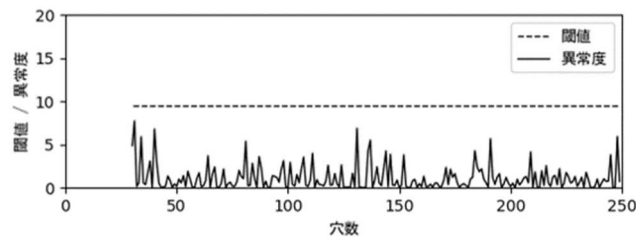


(b) 異常度

図6 主軸モータの異常度計算結果



(a) 特徴量



(b) 異常度

図7 Z軸モータの異常度計算結果

り、その結果、異常度が単発的に大きくなることがある。現状の仕組みはロバストでないため、実際の加工業務を通じて対策を施す必要がある。

4. まとめ

本研究では、穴あけ加工時の主軸モータと Z 軸モータの電流から特徴量を求め、外れ値検知手法を用いてドリル破損を予兆する仕組みを構築した。加工時の計測データから算出した特徴量の統計量をもとに異常度を計算したところ、破損の数穴前に異常度が変化することがわかり、ドリルの破損予兆が検出できる示唆を得た。今後は実際の加工業務を通じて、仕組みの評価、閾値が適切であるか検討する予定である。

今回計測した電流データにはノイズが含まれており、