

A1 Machining

ギヤスカイビングカッタのランニングコスト削減

AI技術による

「ギヤスカイビングカッタの寿命予測・損傷検知」

Life Prediction and Damage Detection of Gear Skiving Cutter using AI Technology – Running Cost Reduction of Gear Skiving Cutter

キーワード | AI・ギヤスカイビングカッタ・摩耗度・振動解析・切削周波数
異常摩耗・工具損傷検知

技術開発本部／開発推進部 AI開発

池田 淳 Jun Ikeda

要 旨

NACHIのスカイビング ギヤシェーブセンタ GMS450 (以下「加工機」という)は、高能率な歯車スカイビング加工で加工時間を最大1/5に短縮(ギヤシェーブ加工比)することができる。一方で加工時間が短いのに対して、工具の交換の頻度が高い傾向にある。とくに大径の歯車工作物を歯切りするギヤスカイビングカッタ(以下「工具」という)は高価な傾向があり、ユーザーには工具を限界まで使い切りたいという要望があった。しかし、加工中の工具の寿命が判定できず、まだ使える工具を安全を見て定数交換するしかなかった。この問題を解決するため、AI (Artificial Intelligence) による振動解析により、加工中の工具の寿命と損傷をリアルタイムに検知する仕組みを実現したので紹介する。

Abstract

With highly efficient gear skiving, NACHI's Skiving machining center for Gears GMS450 enables machining time reduction to as much as 1/5 compared to gear shaping. While machining time is short, tools tend to be replaced more frequently. The cost of a gear skiving cutter especially for gears with a large diameter tends to be high. There was a user requirement to use tools to the life limit. However, it was difficult to determine tool life during machining. Therefore, tools were constantly replaced with a fixed processing number due to safety concerns even though they can still be used.

To solve this problem, NACHI has developed a system with vibration analysis using AI (Artificial Intelligence) to predict tool life and detect tool damage during machining in real time. This article introduces the system.

1. 工具の平均寿命とバラツキ

図1は、スカイビング加工において、1つの工具が寿命を迎えるまで何回加工を行なえたかを概念的に示すグラフである。図1のように工具が寿命を迎える加工回数は一定ではなく、ほぼ正規分布に従いバラつくことが過去の評価実験により判明している。図1の例では、1つの工具が寿命を迎えるまで、平均40.9回、少ないもので23回、多いもので55回、加工ができたことを示している。例えば1つの工具で平均40.9回歯切りができたとしても、加工中の工具の寿命がわからなければ、生産の現場では安全を見て最小回数の23回より少ない加工回数(例えば20回)に設定して定数交換を行なうことが通常となる。逆にいえば、もし加工中の工具の寿命を正確に把握することができれば、1つの工具で平均40.9回加工ができるため、定数交換を行なう場合と比較して、約2倍多くの歯車工作物を加工できることになり、工具費用の削減効果は5割程となる。

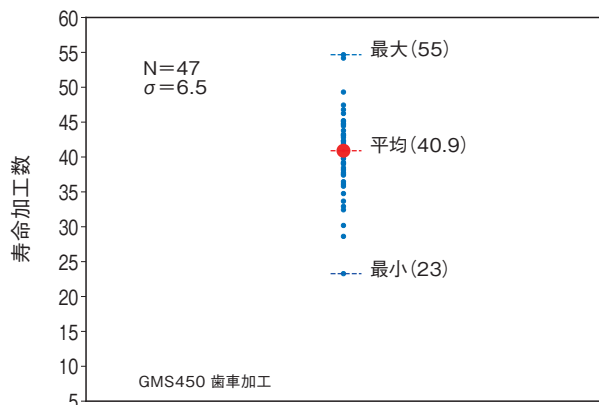


図1 工具の平均寿命とバラツキ

2. システムの概要

図2に工具の寿命予測・損傷検知システムの概要図を示す。加工機は制御盤に設置されたCNC (Computer Numerical Control) により制御される。

また、PLC(Programmable Logic Controller) は、CNCに内蔵されており、加工機のシーケンス制御を実行する。また、PLCはシーケンスプログラムによって、CNC以外の外部機器とのやり取りも行なうことができる。ユーザーは操作盤のWindows PC上で稼働するタッチパネルを通してPLCに信号を送り、加工機を制御することができる。なお、Windows PCとCNCとの通信はOFC (Optical Fiber Connection) により行なわれる。「ギヤスカイビングカッタの寿命予測・損傷検知を実行するプログラム」(以下「プログラム」という)は操作盤のWindows PC上で稼働し、PLCと制御インターフェースを取ると同時にWindows PCのGUI(Graphical User Interface)を通してユーザーへ

操作画面および、表示画面を提供する。また、加工機には工具主軸と工作物主軸の計2箇所に振動加速度センサーが設置されている。PLCにより制御されたデータロガーは、スカイビング加工中のみ、振動加速度値を時系列にデジタル化し、LANを通してWindows PC上のプログラムへ送信する。プログラムはPLCとインターフェースを取り、加工機が稼働状態であること、データロガーが稼働状態であること、スカイビング加工中であることを認識し、PLCよりスカイビング加工に使用される工具番号、切れ刃通過周波数(工具の刃数と回転数[rpm]で一意に決まる。以下「切削周波数」という)、加工カウンタの情報を受け取り、データロガーから送られた振動加速度の時系列データを解析する。また、プログラムは解析結果をWindows PCのタッチパネルの画面に表示する。

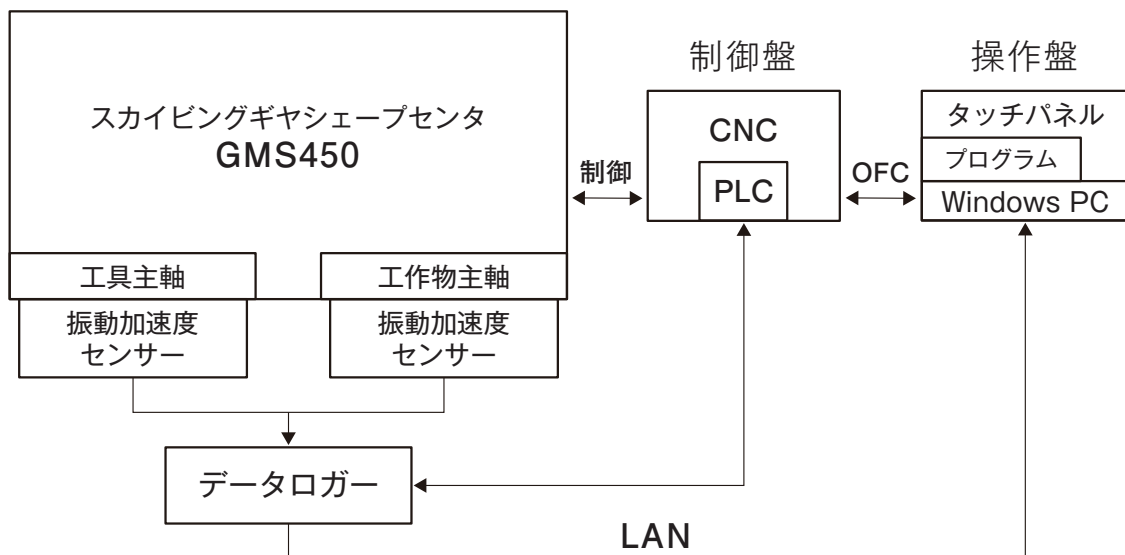


図2 システム概要図

3. システムの特長

加工機はATC (Auto Tool Changer) を備えており、1つの工作物のスカイビング加工に対し、複数の工具を用いることができる。これに対応し、プログラムはPLCから送られる信号により工具番号を認識し、1つの工作物加工に関して複数の工具の振動特性を連続加工中に学習し、連続加工中に摩耗度および、判定を工具毎に行なうことができる。

プログラムは、振動特性の解析から現在加工中の工具の摩耗度を算出し、工具の状態を機械学習により「正常(初期)」、「正常(中期)」、「警告」、「異常」の4段階に分類する。算出した摩耗度および、工具の状態はグラフィカルにタッチパネル上に表示されると共にPLCへ送信され、PLCは「異常」信号を受信すると加工機を停止することができる。ユーザーはGUI画面を操作して学習曲線に4段階の閾値を任意に設定することができる。プログラムはユーザーが閾値を変更する毎に過去の推論に遡り摩耗度を再計算しタッチパネル上に更新された摩耗度および、工具の状態を再表示する。

プログラムは追加再学習機能を提供する。追加再学習機能がONの場合、プログラムは推論結果を用いて学習曲線を修正し、学習データを更新することができる。学習データが更新されるとプログラムは過去の推論に遡り摩耗度を再計算しタッチパネル上に更新された摩耗度および、工具の状態を再表示する。

また、プログラムは加工中にFFT(Fast Fourier Transform)をリアルタイムに計算し、振動周波数ピークが切削周波数と許容範囲で一致しているかどうかを計算し工具の損傷を検知することができる。損傷を検知した場合は、「異常」信号をPLCに送り加工機を停止することができる。また、FFTと切削周波数の位置はグラフィカルにタッチパネルに表示され、ユーザーは振動周波数ピークと切削周波数の一致の状態を視覚的に確認することができる。図3にユーザー画面の一例を示す。

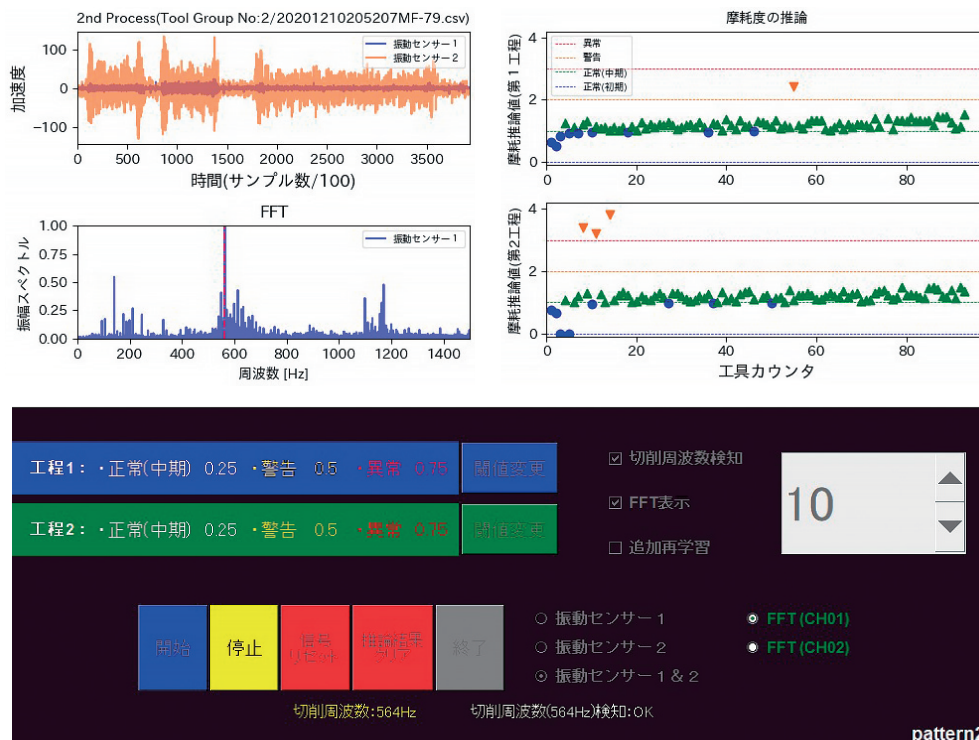


図3 ユーザー画面

4. AIによる工具寿命予測の原理

プログラムが振動加速度の時系列データから工具の寿命を予測する原理を説明する。図4は横軸を時間、縦軸を振動加速度値とし、ある1つの工具で31個の歯車工作物を切削した際の、それぞれ28加工目、29加工目、30加工目、31加工目のグラフを表す。グラフの膨らみは工具が歯車工作物を切削している箇所を表わす。この場合、3パス加工であるため3回膨らみがある(2回削って3回目で仕上げの加工を行なっている)。振動加速度センサーは2か所に設置しており、青色(重なり部分は濃い茶色)は工具主軸に設置したセンサー(CH01)による加速度を、薄い茶色は工作物主軸に設置したセンサー(CH02)による加速度を示す。この工具は31加工目で異常摩耗により寿命を迎えた。濃い茶色に注目すると、28加工目から31加工目に至るまで、膨らみ箇所の面積が徐々に増加していることが分かる。図5は振動加速度の包絡線を積分した面積を加工毎に求めたグラフを示す。グラフから、おおむね5加工目までが初期摩耗、6～27加工目までが定常摩耗、28～31加工目までが異常摩耗と考えられ、工具の摩耗状態の推移を良く表わしている。すなわち、説明変数を加工番号、目的変数を包絡線面積とする曲線をAIに学習させることにより、工具の寿命予測が可能となる。

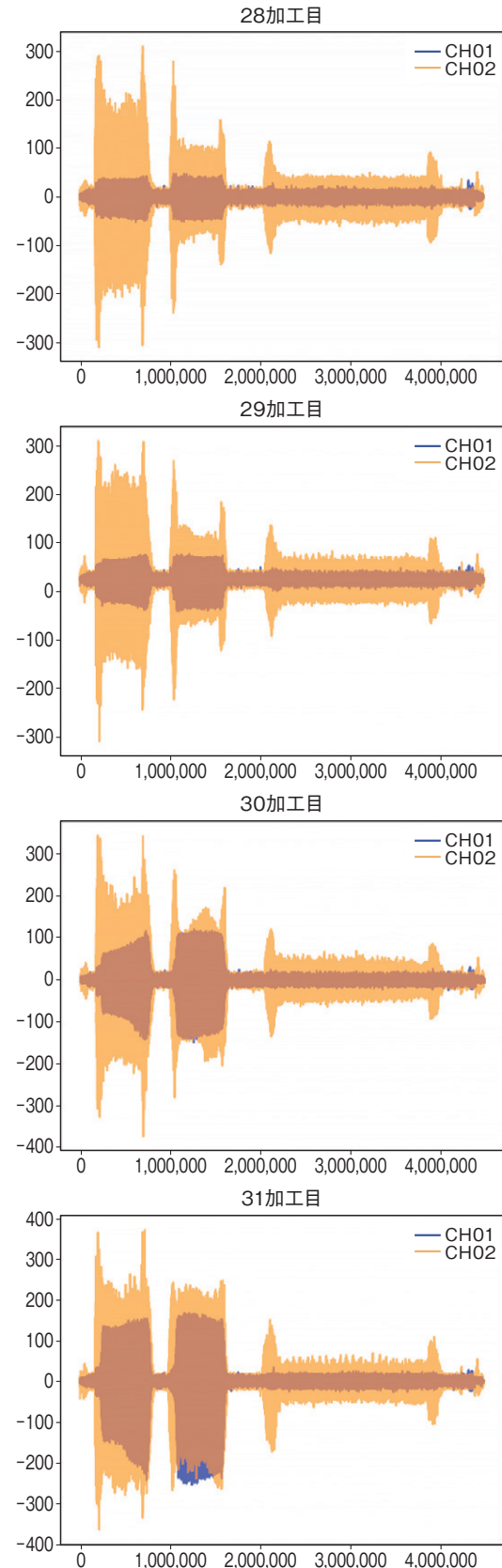


図4 加工数と振動加速度

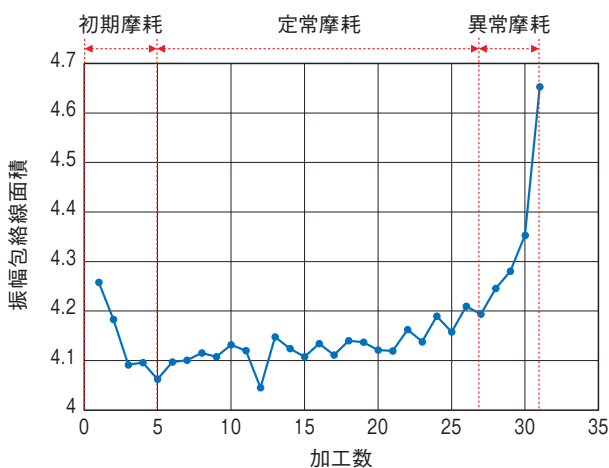


図5 加工数と振動包絡線面積

5. 切削周波数による損傷検知の原理

プログラムが振動加速度のFFTから振動周波数ピークを計算し工具の損傷を検知する原理を説明する。加工中に工具は歯車工作物と周期的に接触・非接触を繰り返す。繰り返す頻度、すなわち一分間に何回、工具が歯車工作物に接触するかは、工具の回転数[rpm]に工具の刃数を掛けあわせた積に等しい。一秒間に工具と歯車工作物が接触・非接触を繰り返す周期[秒]は、この積を60で割った数と等しくなり、この周期の逆数を求めたものが切削周波数となる。

工具に損傷(異常摩耗)がない正常な状態では、工具と歯車工作物が1秒間に接触・非接触を繰り返す回数は、切削周波数と正確に等しく、振動周波数ピークの基本周波数は切削周波数と一致する。ところが、工具に損傷(異常摩耗)がある場合は、工具が歯車工作物と接触

する回数が減少するため、振動周波数の基本周波数ピークは切削周波数より低い周波数へシフトする。

図6は刃数が37枚の工具を用いて回転数937[rpm]で歯車工作物を加工中の振動加速度のFFT計算結果の一例を示す。図6の青色が正常な工具の周波数分布を示す。この場合、青色の振動周波数の第一ピークは切削周波数($37\text{刃} \times 934\text{[rpm]} / 60\text{s} = 576\text{Hz}$)と一致している。これに対し、赤色が(摩耗がすすんだ)異常摩耗状態の同じ工具の周波数分布を示す。図6で示すとおり、工具が損傷(異常摩耗)した状態では、工具が歯車工作物と接触する回数が減少するため、振動周波数第一ピークが切削周波数より低い周波数にシフトしているのが分かる。

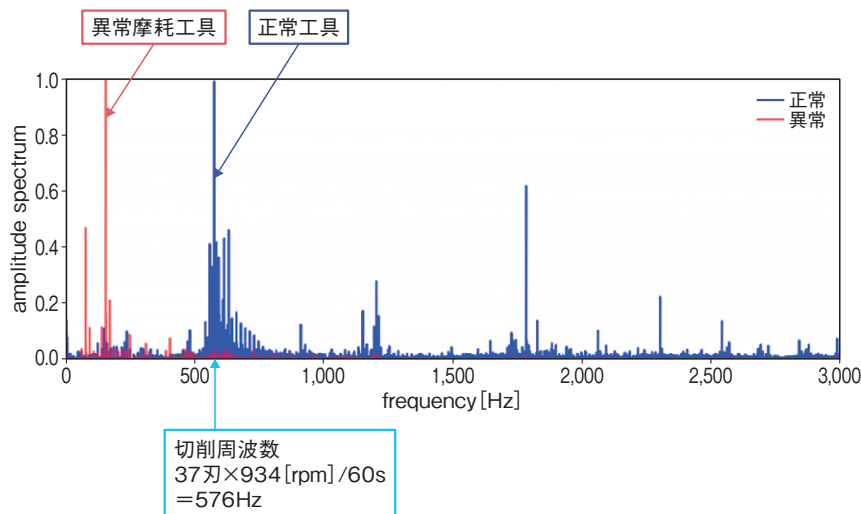


図6 切削周波数と振動周波数ピーク

6. まとめ

以上、本稿では、加工中のギヤスカイビングカッタの寿命と損傷を検知する仕組みの一部を紹介した。

一般的にAIによる判定は完全(100%)ではない。AIだけによる判定は不正解となる確率を含む。このAIが本来有する不完全性を補うため、本稿で紹介した

システムは、ギヤスカイビング加工中の切削周波数と振動周波数ピークを比較する方法を採用した。この比較方法を用いてAIの判定は修正され、より確からしい判定へとつながった。