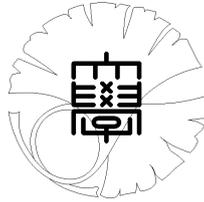


数理科学実践研究レター 2024-2 October 23, 2024

Grinding 作業における研削フェイズのモデリング

by

西川 奏



UNIVERSITY OF TOKYO

GRADUATE SCHOOL OF MATHEMATICAL SCIENCES

KOMABA, TOKYO, JAPAN

Grinding 作業における研削フェイズのモデリング

西川奏¹ (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻)

Kanade Nishikawa (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

概要

近年, 金属加工における Grinding 作業への産業用ロボットの導入が進んでいる. しかし, その過程ではロボットに非常に多くの学習を行わせる必要があり, 時間と金銭的なコストが大きい. 本研究の目的は Grinding 作業に対してモデル化を行い, ロボットの学習コストを減らすことである. 特に研削フェイズに対してモデリングを行い, 研削終了時刻の概算を行う手法を提案する.

1 はじめに

金属加工において, 砥石を用いて金属表面をなめらかにする作業を Grinding と呼ぶ. Grinding は主に2つの作業工程, 「研削」と「研磨」からなる. 研削とは金属表面の荒削りを行って, 金属の形状を変化させ粗く整える工程である. そのため, 加工精度よりも作業効率がより重要となる. 一方, 研磨とは研削の工程が終了した後に金属表面を滑らかにする工程であり, 表面の滑らかさの精度を上げることが重要となる繊細な作業である. 各々の定義に明確な違いは存在しないため, 研削工程中に加工対象の金属がどのような状態となったら, 研磨の繊細な工程に移行すべきかという判断基準の設定が重要となる. この基準値は扱っている機械の性能や対象となる製品に依存するものである.

Grinding 作業は長い間, 金属加工を専門とする職人が知識と経験に基づいて行ってきたが, その作業は非常に重労働であった. 近年, 産業用ロボットの実用化が進み, Grinding 作業をロボットにより自動化する現場が増加している.

しかし, Grinding 作業のロボットによる自動化には, 次のようにいくつかの課題がある.

- 金属加工職人が Grinding を行う際には, 金属から発せられる火花や音, 反発力や振動など, 様々なアナログデータをもとに加工対象の様子を総合的に判断して作業を行う. しかしそのようなアナログデータをデジタルデータとしてロボットに取り込み, フィードバック制御を行うことは非常に難しい.
- Grinding を行う対象は同じ品物であっても初期形状が異なっていたり, 砥石の状態も時刻によって異なるなど不確定要素が多い. それらに柔軟に対応するためには, ロボットに膨大な量の学習を行わせる必要がある. 学習の過程で必要な時間と材料のコストが大きい.

こういった点から, Grinding 作業を数理モデルで記述し, それを元にロボットに学習を行わせることが学習の効率を上げる点で重要である. しかし, Grinding のモデル化についても次のような課題がある.

- Grinding 作業を行う過程で砥石内の砥粒が摩耗, 脱落し, 砥石の研削・研磨能力が低下するが, その記述をモデル化することが非常に困難である. 特に, 砥粒が脱落できず摩耗した砥粒が表面に残り続けることにより研磨力が低下する目つぶれ現象や, 砥粒が摩耗せずにほぼ原粒の状態で脱落してしまう目こぼれ現象はモデルによる記述が難しい.
- 実際の金属加工現場で制御できるパラメータは, 砥石を金属に押し付ける押し付け力, 砥石を移動させる送り速度, 砥石の位置や回転速度のみである. これらのパラメータのみを用いて様々な研削対象に対して有効なモデルを考慮しなければならない.

そこでまずは, Grinding の研削フェイズから研磨フェイズへ移行するタイミングを概算する課題について取り組むこととした. 繊細な作業が必要となる研磨と比較すると, 研削はロボットによる自動化への適性がある. 研削フェイズをモデリングし, 研削終了時刻を概算することができれば, 研削を手動で行う必要がなくなるのみならず, 研削終了時刻まで人による監視の必要性がなくなるため, 有意義な課題である. 研削フェイズについてモデリングを行うことで, 設定した基準値よりも表面の荒さ(表面の高さの分散)が小さくなるタイミングを研削フェイズ終了時刻とすれば良い.

¹kanade.nishikawa@ipmu.jp

2 研削モデル

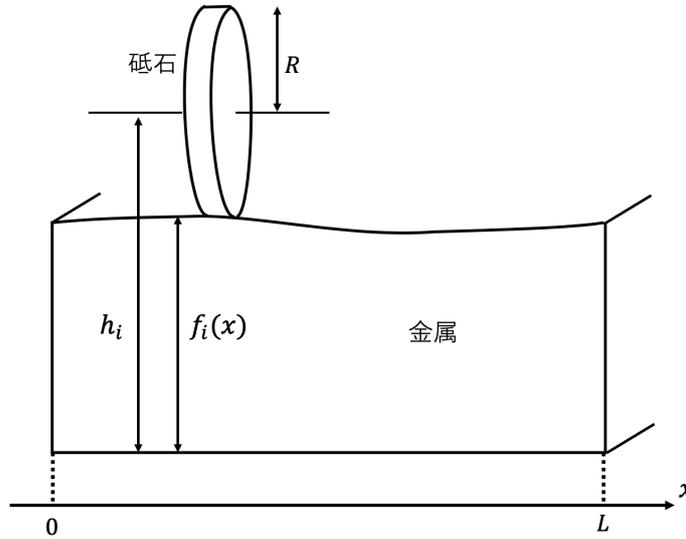


図 1: 砥石が金属表面を研削する様子

次のような設定のもとでの研削を考える (図 1). 金属表面は 2 次元であるため, 本来であれば砥石も 2 方向へ動かす必要があるが, 本モデルでは 1 方向にのみ動かすことを考える. 砥石を移動させる方向に x 座標を設定し, 金属表面は $0 \leq x \leq L$ に存在するとする. 砥石を $x = 0$ から $x = L$ まで, 送り速度を一定 ($v > 0$) で移動させるプロセスを 1 回分の研削と考える. 次のように物理量や変数を定義する.

R : 砥石の半径. 研削作業中は一定であると仮定する. (1)

$f_i(x)$: i 回目の研削後の表面高さ. $f_0(x)$ は金属表面の初期状態. (2)

h_i : i 回目の研削時の砥石回転中央の高さ. 各 i について x によらずに一定にとる. (3)

押し付け力はあらわには用いずに, 砥石の回転中央の高さ h_i で代用する. この設定のもとで, 次のように i 回目の研削後の表面高さの分散を定義する.

$$\bar{f}_i \equiv \frac{1}{L} \int_0^L dx f_i(x), \quad (4)$$

$$V_i \equiv \frac{1}{L^3} \int_0^L dx (f_i(x) - \bar{f}_i)^2. \quad (5)$$

経験則である Preston の法則, “研削量は押し付け力に比例する” という法則を用いると, i 回目の研削で削られる金属の高さ $f_{i-1}(x) - f_i(x)$ は, 押し付け力に比例する. ここで, 応力 (σ) とヤング率 (E), 歪み (ϵ) に関するフックの法則

$$\sigma = E\epsilon, \quad (6)$$

を用いる. このモデルでは, i 回目の研削における位置 x における砥石の歪みは

$$\epsilon_i(x) = \frac{R - (h_i - f_{i-1}(x))}{R}, \quad (7)$$

と計算される. 押し付け力はフックの法則における応力に対応しており, これは歪み (7) に比例するので, 定数 α を用いると次のような等式が成立する.

$$f_{i-1}(x) - f_i(x) = \alpha(R - h_i + f_{i-1}(x)). \quad (8)$$

α は実験により測定される値であり、砥石や加工対象の素材に依存する。この漸化式を解くことで、 n 回の研削後の表面高さとして次の表式が得られる。

$$f_n(x) = (1 - \alpha)^n f_0(x) + \alpha \sum_{i=1}^n (1 - \alpha)^{n-i} (h_i - R). \quad (9)$$

また表面の分散については、(9) の第 2 項が x に依存しないことから、

$$V_n = (1 - \alpha)^n V_0 \quad (10)$$

が得られる。ただし、 V_0 は加工物表面の分散の初期値である。表面の高さの分散は表面の粗さを表しており、分散に関して適切に基準値（扱っている機械の性能や対象となる製品に依存する）を設けることで、研削フェイズから研磨フェイズへの移行のタイミングを判断することができる。特に研削フェイズの終了時に欲しい表面高さの分散の値に従って、何回研削を行えば良いかを概算することができる。表面の高さ自体ではなく分散を状態を記述する値として扱うことで、初期状態の不確定要素を軽減しているといった側面もある。

3 終わりに

本論文では、研削フェイズの終了段階について概算するモデルを提案した。研削対象の物性や砥石の表面状態によらない一般的な結果である。また、本論文では実際の金属加工現場で制御可能なパラメータや、測定可能な値のみを用いてモデル化を行った。砥石や加工物の物性などに依存する定数 α を実験により測定するだけで、研削終了時刻を概算することができる実用的な結果である。

今後の方向性としては、本論文で提案した計算手法と実験結果を比較して妥当性を検証することが挙げられる。また、本モデルで用いなかったパラメータ（砥石の状態を表す変数等）を実際の現場でも測定することが可能になれば、より精密で実用的なモデルを考案することができる。

4 謝辞

社会数理実践研究ロボット班へ課題提供をしてくださった、三明機工株式会社の久保田和雄様、西田真幸様に心より感謝申し上げます。また、課題内容に関して議論を重ねてくださった、東京大学大学院新領域創成科学研究科の佐藤知正氏、株式会社トキワシステムテクノロジーの今井倫太郎氏、東京海上ディーアール株式会社の矢野良輔氏に感謝申し上げます。本研究は東京大学数物フロンティア国際卓越大学院プログラム (WINGS-FMSP) による助成を受けています。