

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：13901  
 研究種目：若手研究  
 研究期間：2018～2019  
 課題番号：18K13670  
 研究課題名（和文）動コンプライアンス自動同定／再生びびり自動抑制を実現するスマートターニング技術  
  
 研究課題名（英文）Smart turning technology realized by automatic identification of dynamic compliance and automatic suppression of regenerative chatter  
  
 研究代表者  
 早坂 健宏（Hayasaka, Takehiro）  
  
 名古屋大学・工学研究科・助教  
  
 研究者番号：70779917  
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、動コンプライアンスの自動同定を可能とする革新的スマートターニング技術を開発する。動コンプライアンスはびびり振動の発生有無を決める一つの要素であり、一般的には専門知識と時間を要するインパルス応答試験によって事前に求められる。本研究では、旋削開始時のランプ状の切削力が広い周波数帯域の入力を含んでいることに着目し、その力によって発生した機械構造の振動をその力で割ることで、切削中に動コンプライアンスを同定する技術を開発する。本研究では提案技術を突っ切り加工で検証し、本手法で得られた動コンプライアンスと従来技術で得られた動コンプライアンスが概ね一致していることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
 従来では動コンプライアンスを事前に別の試験で同定する必要があり、そのために時間が必要であった。一方で、提案手法では切削のプロセスそのものを利用するため、動コンプライアンスの同定のために別の試験を要さない革新的な技術である。また、切削中の情報を利用するため、将来的には工作機械の内部情報（主軸トルクやエンコーダ情報）を用いることで、その同定をさらに簡易に行える可能性がある。したがって、実用的にも価値が高い技術であることが窺える。

研究成果の概要（英文）：In this research, a smart turning technology is developed to realize automatic identification of the dynamic compliance of a flexible tool/workpiece. The dynamic compliance is one of the factors that affect the generation of chatter vibration, and it is generally obtained preliminarily by a hammering test which needs expert knowledge and time. In this research, the beginning of the turning process is focused, and the initial ramp-like force input and the vibration generated from it are utilized to identify the dynamic compliance. Since the ramp-like input consists of a wide range of frequency components, it excites the flexible structure which may cause chatter. Hence, the proposed method can identify the dynamic compliance during cutting and without preliminary tests. The proposed method is tested in a plunge cutting process, and it is verified that the dynamic compliance identified by the proposed method and the hammering test agree well.

研究分野：切削

キーワード：動コンプライアンス びびり振動

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

びびり振動は切削加工時の能率向上を、切削幅（切込み）の観点で阻んでいる要因であり、加工の限界を決めていると言っても過言ではない。びびり振動の一種である再生びびり振動のメカニズムを図1に示す。図1から分かるように、例えば旋削などのプロセスでは一回転前の切削時に生じた振動が、現在の切削時に切り厚変動を生む効果（再生効果と呼ばれている）である。この過去の振動が、現在の振動との間の最も危険な位相差で再生することにより、それらの差である切り厚変動に比例した材料除去（切りくずを生成するプロセス）力変動を生み、この力により機械構造が加振され再び振動が発生することにより、再生びびり振動が成長する。びびり振動は一度成長する振動が上げ止まるまで成長し、仕上げ面性状劣化や工具損耗などを引き起こす。したがって、通常はびびり振動の発生を防ぐために切削幅（切込み）を小さくするが、その反面加工能率は低下する。したがって、びびり振動の抑制は古くから大きな課題として学術的に取り挙げられ、実用的にも望まれている。

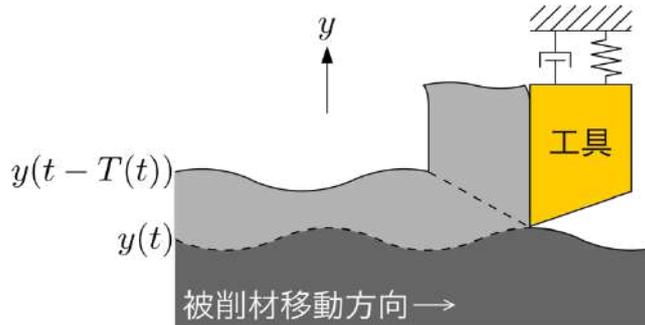


図1 再生びびり振動のメカニズム

歴史的には、Tlustý や Tobais らがびびり振動解明の基礎を築き[1-2]、旋削時の再生びびり振動に対する安定限界切削幅を容易に求められるようになった。それ以降も再生びびり振動以外の振動問題の発見[3-4]や、旋削以外の切削プロセスへの応用[5-6]やびびり振動の抑制[7-8]に関する研究も多く行われている。また、学術的な取組みだけでなく、実用的な取組みも行われている。例えば、オークマ（株）の加工ナビは、Smith らの自動抑制技術[9]を応用し、再生びびり振動の自動抑制を回転速度の最適設定により実現している（図2参照）[10]。さらに、昨今では Industry 4.0 や IoT の推進により、情報を利用した研究・技術も盛んに行われており、例えばオペレータを利用したびびり振動のモニタリングなどが行われている[11]。

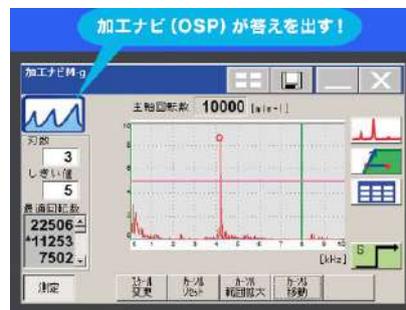


図2 オークマ（株）の加工ナビのイメージ

ここで、再生びびり振動のメカニズムについてももう少し分析する。図2は再生効果を伴う突っ切り加工（近似二次元切削）のブロック線図を示しており、 $y$ は現在の振動、 $ye^{-i\omega_c T}$ は過去の振動、 $\omega_c$ はびびり振動の角周波数、 $T$ は回転周期、 $h$ は切り厚変動、 $b$ は切削幅、 $K_t$ は背分力（切込み）方向の比材料除去力（単位切切断面積あたりに必要な材料除去力）、 $G$ は機械構造のコンプライアンス伝達関数である。この図から、ループゲイン（一巡伝達関数） $\Phi_{loop} = (1 - e^{-i\omega_c T})bK_tG$ を得ることができる。したがって、そのゲインは切削幅 $b$ 、比材料除去力 $K_t$ 、動コンプライアンス $G$ （正確には、一般的に動コンプライアンスの負実部 $G_{real}$ が再生びびり振動に影響を与える）で決まる。これらの内、 $b$ は設定するパラメータである。したがって、比材料除去力 $K_t$ と動コンプライアンス $G$ が正確に分かれれば、安定限界時の切削幅である安定限界切削幅 $b_{lim}$ を求めることが可能になる。

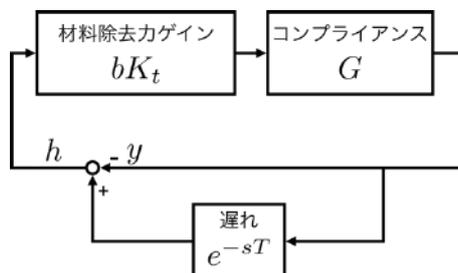


図3 再生効果を伴う突っ切り加工のブロック線図

ところで、実用的にも重要である安定限界を求める研究やびり振動の抑制に関する研究は、多くの場合、比材料除去力と動コンプライアンスの事前の測定を行うことを前提としている。これらの中、比材料除去力に関しては、例えば工具・被削材の種類によるライブラリを設けたり、Colwell の経験則などからその推定を行うなどにより、その推定は可能である。一方で、動コンプライアンスに関しては、振動源の質量・剛性・減衰で総合的に決まるため、事前の予測は難しい。この測定を行うためには専門知識と時間が必要であるため、実用的に敷居が高いと言える。加えて、オークマ(株)の加工ナビによる振動抑制などは、現状の加工条件でどの程度安定限界を超えた切削を行っているかが不明なため、その抑制には限界があるとも言える。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、動コンプライアンスの自動同定および再生びり振動の自動抑制を可能とするスマートターニング技術を開発する。具体的には、旋削における切削開始時(主軸の最初の一回転時)のランプ状の切削力入力と、それにより加振された低剛性構造物(長く突き出した工具や被削材料など)の刃先付近の振動振幅を利用して、動コンプライアンスを切削時に求める。これにより、動コンプライアンスの事前同定は不要になる。加えて、将来的にはモータ電流やエンコーダ情報などのサーボ情報を利用することにより力・変位の情報を自動的に得ることで、専門知識を必要としないスマートな同定が可能となる。さらに、本技術により動コンプライアンスのリアルタイム同定が可能になれば、オークマ(株)の加工ナビのように回転速度のリアルタイム最適化だけでなく、切削幅(切込み)の最適化も可能となる。

## 3. 研究の方法

本研究では、切削開始時(主軸の最初の一回転時)の力・変位を利用することで、動コンプライアンスを同定する。ここではまずは最も単純な突っ切り加工(近似二次元切削)を考える。この場合、図4に示すように主軸の最初の一回転時には静的な切取り厚さがランプ状に増加し、一回転後にはその厚さが設定した送り量になる。このランプ状の切取り厚さ変動に比例した切削力入力は、図5に示すように高い周波数帯までの入力を有している。したがって、一般的には機械構造の共振周波数を含む帯域まで加振することが可能であり、この入力により機械構造を振動する。この時の振動変位を、ランプ状の切削力入力で周波数領域において割り算することで、動コンプライアンスを求めることが可能となる。

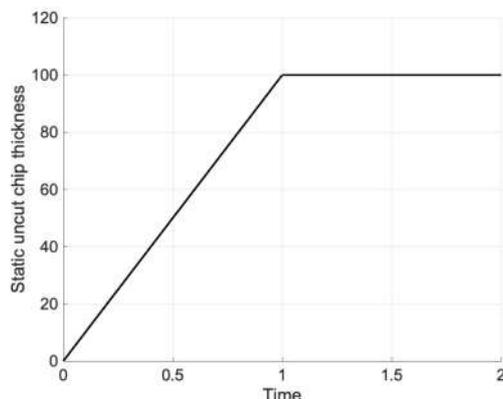


図4 主軸の最初の一回転時の静的な切取り厚さのランプ状増加

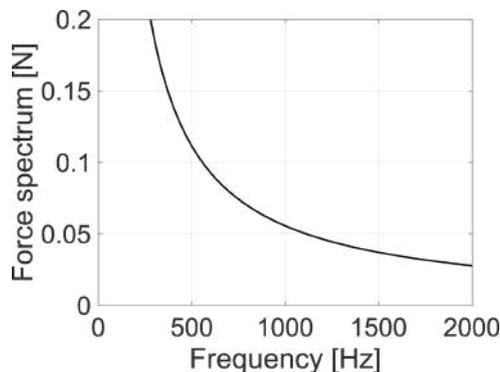


図5 ランプ状の切削力入力のフーリエ変換結果

ここで、この方法により同定される動コンプライアンスについて補足する。本手法では主軸の最初の一回転時の力・変位のみを用いる。このため、過去の振動は切削プロセスに影響を与えない。一方で、現在の振動は、切削プロセスにおいて付加的な剛性として働く[12]。これにより、同定される動コンプライアンスの共振周波数は増大し、動コンプライアンスの絶対値は減少する。この増大/減少の程度は、低剛性構造の等価剛性・等価質量との相対的な関係で決まる。同定される動コンプライアンスのイメージを図6に示す。図より、本手法では現在の振動による付

加的な剛性が加わった動コンプライアンス $G'$ が同定される。なお、再生びり振動はこの付加的な剛性が加わった動コンプライアンスにおける共振周波数付近で発生するため、 $G'$ の同定も有用である。あるいは、事前に比材料除去力 $K_t$ が分かっていたら、切削プロセスの付加的な剛性による共振周波数の増分を同定することが可能である。逆に考えて、動コンプライアンス $G$ が事前の測定で判明していれば、比材料除去力 $K_t$ を求めることが可能になる。

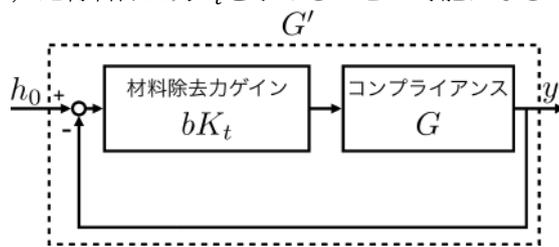


図6 同定される動コンプライアンス

#### 4. 研究成果

提案する手法を実証するための実験を実施する。図7は実験の外観を示している。図に示すように、汎用旋盤において黄銅のパイプを端面突っ切り加工することにより、近似二次元切削を行う。ここでは工具を低剛性な構造としており、それによりびり振動が発生する。実験条件を表1に示す。本実験では基礎実験であるため、工具直下に設置した動計力により切削力を測定し、工具に設置した加速度計により背分力方向の振動加速度を測定する。なお、動力計の動特性（力入力による力出力）を事前に測定しており、工具の共振周波数（2000 Hz 程度）付近においては一定の出力を示すことが分かっているため、測定した切削力そのものを使って動コンプライアンスを同定する。



図7 実験の外観（左：被削材，右：工具）

表1 実験条件

Nominal cutting speed	[ $\text{min}^{-1}$ ]	768
Workpiece material	-	Brass pipe
Width of cut	[mm]	2
Feed rate	[mm/rev]	0.050, 0.100, 0.150

図8は送り量0.05 mm時の切削力の一例を示している。赤色は主分力、青色は背分力を示している。これらの切削力の内、背分力が再生びり振動を主に引き起こす。なお、実際には主分力によりクロスコンプライアンス（背分力方向の振動変位出力を主分力方向の力入力で割ったもの）による振動も発生するが、一般的にはそのコンプライアンスは小さいため、ここではその影響を無視する。図9はこの切削時に発生した背分力方向の振動加速度を示している。

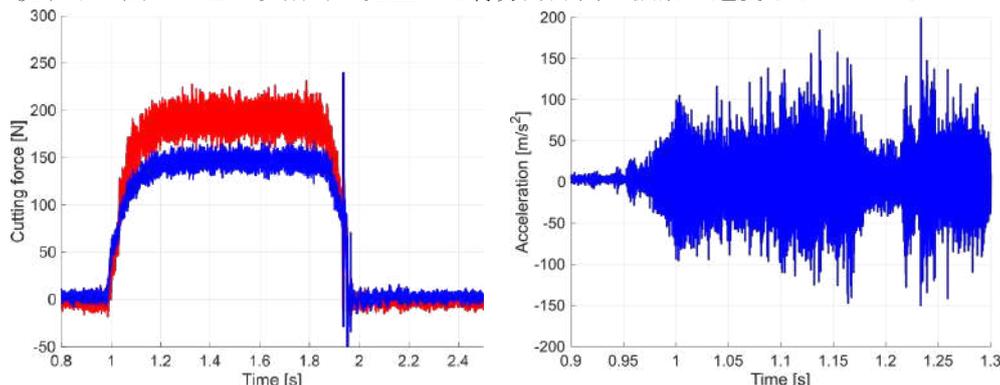


図8 (左) 測定した主分力 (赤) と背分力 (青) と (右) 測定した背分力方向の振動加速度

図8に示す背分力方向の切削力・振動加速度の内、0.097 から 1.048 s (工具1回転分に対応する時間)のそれらを用いて同定した動コンプライアンスを図9に示す。赤は同定した動コンプライアンス $G'$ を示しており、また、参考までにインパルス応答法により得られた動コンプライアンス $G$ を青で示している。これらから分かるように、同定した動コンプライアンスは工具の動コンプライアンスと良く一致している。同定した動コンプライアンス $G'$ の共振周波数が工具の動コンプライアンス $G$ よりも高いのは、現在の振動による切削プロセスの付加的な剛性が理由であると考えられる。

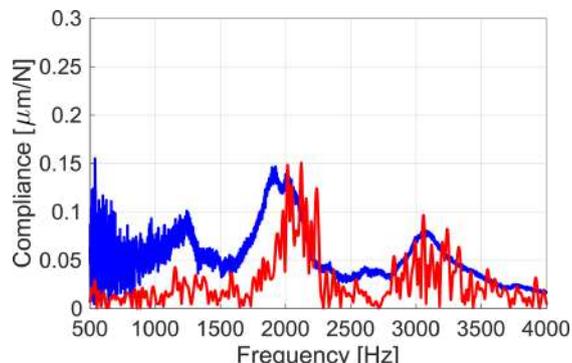


図9 同定したコンプライアンス $G'$  (赤) とインパルス応答法により測定した工具の動コンプライアンス (青)

以上より、提案手法による動コンプライアンス同定を実証した。今後は、種々の切削条件時にも同様の同定が可能であるかや三次元切削への応用、また、工作機械の内部情報を用いた自動同定にも挑戦し、実用への展開も試みる。

#### 【参考文献】

- [1] J. Tlustý et al., The Stability of the Machine tool Against Self-Excited Vibration in Machining, ASME Int. Res. in production, Pittsburgh, Vol.1, pp.465-474, 1963.
- [2] S.A. Tobias, Machine Tool Vibration, Blackie and Sons Ltd., 1965.
- [3] Y. Altintas et al., Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping, CIRP Annals, 57/1, pp.371-374, 2008.
- [4] R. N. Arnold et al., The Mechanism of Tool Vibration in the Cutting of Steel, Cutting Tools Research, 1946.
- [5] E. Budak, An Analytical Design Method for Milling Cutters With Nonconstant Pitch to Increase Stability, Part I: Theory, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 125/29, pp. 29-34, 2003.
- [6] Y. Altintas et al., Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling, CIRP Annals, 44/1, pp.357-362, 1995.
- [7] T. Hayasaka et al., Generalized design method of highly-varied-helix end mills for suppression of regenerative chatter in peripheral milling, Precision Engineering, 48, pp.45-59, 2017.
- [8] E. Shamoto et al., Suppression of regenerative chatter vibration in simultaneous double-sided milling of flexible plates by speed difference, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 59(1), pp.387-390, 2010.
- [9] S. Smith et al., Stabilizing Chatter by Automatic Spindle Speed Regulation, CIRP Annals, 41/1, pp.433-436, 1992.
- [10] 加工ナビ, <http://www.okuma.co.jp/onlyone/process/>, last observed : Jun. 14, 2020.
- [11] Y. Kakinuma et al., Detection of chatter vibration in end milling applying disturbance observer, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 60(1), pp.109-112, 2011.
- [12] R. Kataoka et al., Influence of vibration in cutting on tool flank wear: Fundamental study by conducting a cutting experiment with forced vibration in the depth-of-cut direction, Precision Engineering, 55, pp.322-329, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----