

|   |                                    |    |       |
|---|------------------------------------|----|-------|
| 京都大学  | 博士（工学）                             | 氏名 | 橋本 高明 |
| 論文題目  | 切削加工システムの動特性バランス設計による振動安定性向上に関する研究 |    |       |
| <p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、エンドミルを用いた切削加工において、機械システムの動特性の異方性が自励振動の安定性に与える影響を数値シミュレーションと実験によって解析し、その結果にもとづいて振動安定性を向上させるために機械システムの動特性をバランスさせる設計法についてまとめたものであり、全7章からなっている。</p> <p>第1章は緒論であり、機械システムの動特性の異方性が振動安定性に与える影響を考慮したシステム設計の必要性を述べている。機械システムの動特性には異方性があるが、エンドミル加工においては動特性の異方性が振動安定性に与える影響が明らかになっておらず、工作機械の設計や加工セットアップの検討において課題となっていることを述べている。</p> <p>第2章では、自励振動を低減するために機械システムの動特性がどのようなバランスをとるべきかについて、従来の研究を整理し、動特性バランスの設計の課題について考察している。2方向以上の工具—工作物間変位（以下変位と略す）と切削力を考慮しなければならないエンドミル加工において、機械システムの各方向の切削力から変位へのダイレクトコンプライアンスと、ある方向の切削力から他方向の変位へのクロスコンプライアンスのバランスが再生型とモードカップリング型の自励振動の安定性に与える影響については調査されていないことを示している。また、現状の工作機械の設計プロセスに、自励振動を抑制するための機械動特性の設計が含まれていないことを説明し、具体的な設計法を構築することの必要性を述べている。</p> <p>第3章では、機械システムのダイレクトコンプライアンスの違いが自励振動の安定性に与える影響を再生効果と加工プロセスの力学モデルを含んだ時間応答シミュレーションで解析し、解析結果を切削実験で検証している。機械システムの工具送り方向のコンプライアンスが直交方向のコンプライアンスよりも10%程度小さい条件でアップカットにおける自励振動が安定化されることを示した。また、加工プロセスの伝達行列の非対角項による振動のカップリングによって、ある1方向のコンプライアンスを減少させることで、もう1方向の振動振幅も低減できることを示した。</p> <p>第4章では、加工プロセスをゼロ次近似法によって時不変の伝達行列で表現して加工システムを解析し、伝達行列要素とダイレクトコンプライアンスの関係性から第3章の結果を検証している。具体的には、クロスコンプライアンスが小さい仮定の下で、再生型自励振動の安定性を向上できる振動系の特性方程式の係数を探索し、求めた係数とダイレクトコンプライアンスの関係を解析している。解析結果から、伝達行列の対角項およびダイレクトコンプライアンスの符号の組み合わせによる12のケースのそれぞれで振動安定性を向上できるダイレクトコンプライアンスのバランスを示し、加工実験によってその効果を検証している。</p> <p>第5章では、第4章と同様の解析法を用いて、ダイレクトコンプライアンスと加工プロセスの伝達行列要素の関係ならびに機械システムのクロスコンプライアンスの自励振動への影響を示し、自励振動の安定性を向上するための動特性バランスの設計指針をまとめている。ダイレクトコンプライアンスのバランスによって、再生型自励振動とモードカップリング型自励振動の周波数差が変化することを示し、第4章で示したダイレクトコンプライアンスのバランスで振動安定性が向上するメカニズムを再生型自励振動の周波数にモードカップリング型自励振動が同調しなくなるためと説明している。また、クロスコンプライアンスのバランス設計による振動安定性の向上を検討するためのパラメータスタディを行い、クロスコンプライアンスの適切な設計によりエンドミル加工の振動安定性を向上させることは可能と推測されるが、ダイレクトコンプライアンス・クロスコンプライアンス・加工プロ</p> |                                    |    |       |

|   |         |    |       |
|---|---------|----|-------|
| 京都大学  | 博士 (工学) | 氏名 | 橋本 高明 |
| <p>セスの伝達行列要素の複雑なバランスが必要であり、設計はケースバイケースとなることを示している。そして、第3章～第5章の結果をまとめて、ダイレクトコンプライアンスのバランス設計によって、アップカットでは送り方向の固有振動数を送りと直交する方向の固有振動数よりも高くし、ダウンカットでは送り方向の固有振動数を直交方向の固有振動数よりも低くすることを設計指針として提案し、その適用範囲を示した。</p> <p>第6章では、一方向配向の炭素繊維強化複合材 (CFRP) を接着して動特性バランスを変更した工作物を用いて加工実験を行って自励振動の安定性を検証し、第5章までにまとめた動特性バランスの設計指針に矛盾がないことを示している。CFRPの接着によって工作物の表面粗さによらず固有振動数を増大させることができることを示し、片持ち梁状の円柱工作物の固有振動数に約3%の異方性を与えることで自励振動の発生を抑制できることを示した。</p> <p>第7章は結言であり、以上の結果をまとめている。</p> |         |    |       |

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、エンドミルを用いた切削加工において、機械システムの動特性の異方性が自励振動の安定性に与える影響を数値シミュレーションと実験によって解析し、その結果にもとづいて振動安定性を向上させるために機械システムの動特性をバランスさせる設計法についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 機械システムのダイレクトコンプライアンスの違いが自励振動の安定性に与える影響を再生効果と加工プロセスの力学モデルを含んだ時間応答シミュレーションで解析して切削実験で検証し、機械システムの工具送り方向のコンプライアンスが直交方向のコンプライアンスよりも 10%程度小さい条件でアップカットにおける自励振動が安定化されることを示した。
2. 加工プロセスをゼロ次近似法によって時不変の伝達行列で表現して加工システムを解析し、伝達行列の対角項およびダイレクトコンプライアンスの符号の組み合わせによる 12 のケースで、振動安定性を向上できるダイレクトコンプライアンスのバランスを示し、加工実験によってその効果を検証した。
3. ゼロ次近似法を用いた加工システムの解析により、ダイレクトコンプライアンスと加工プロセスの伝達行列要素の関係性が自励振動へ与える影響を明らかにした。再生型自励振動とモードカップリング型自励振動の周波数差を増大させることが振動安定性向上につながることを示し、このためにアップカットでは送り方向の固有振動数を送りと直交する方向の固有振動数よりも高くし、ダウンカットでは送り方向の固有振動数を直交方向の固有振動数よりも低くすることを動特性バランスの設計指針として提案して、その適用範囲を明らかにした。
4. クロスコンプライアンスのバランス設計による振動安定性の向上を検討するためのパラメータスタディを行い、クロスコンプライアンスの適切な設計によりエンドミル加工の振動安定性を向上させることは可能と推測されるが、ダイレクトコンプライアンス・クロスコンプライアンス・加工プロセスの伝達行列要素の複雑なバランスが必要であり、設計はケースバイケースとなることを示した。
5. 一方向配向の炭素繊維強化複合材を接着して動特性バランスを変更した工作物を用いて加工実験を行って自励振動の安定性を検証し、提案する動特性バランスの設計によって振動安定性を向上できることを示した。

以上、本論文は、機械システムの異方性がエンドミル加工の自励振動の安定性に与える影響を基礎的に研究してその効果の利用法を示した点で、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年6月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。