



数値制御工作機械の消費エネルギー削減に関する研究

林, 晃生

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2014-03-25

(Date of Publication)

2015-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6087号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006087>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 _____ 林 晃生 _____

専 攻 _____ 機械工学 _____

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

数値制御工作機械の消費エネルギー削減に関する研究

指導教員 _____ 白瀬 敬一 _____

近年、地球温暖化やエネルギー資源の枯渇といった問題から、省エネ化は世界のあらゆる場で推進され、生産現場においても消費エネルギーの削減が強く望まれている。工場でのエネルギー使用量の割合は生産設備が 8 割以上を占めていることから、生産設備の中核を占める数値制御工作機械の消費エネルギー削減は重要である。さらには、工作機械市場において諸外国との競争が激化する中で、工作機械の省エネ化は重要な発展課題の一つとされている。そこで、本研究では運転方法、加工方法および送り駆動系の仕様の観点からそれぞれ数値制御工作機械における消費エネルギー削減方法を検討した。

第 2 章では数値制御工作機械である立て形 5 軸マシニングセンタの送り駆動系における消費電力の測定実験を行うことで、その消費電力に影響を及ぼす因子を明らかとした。まず、各軸を送り速度を変えて動作させた時の消費電力を測定することで、各軸の消費電力の違い、重力による影響、および送り速度の影響について調査した。その結果として、消費電力が速度とトルクに依存することを確認した。また、重力の影響を受ける Z 軸は、運動方向によって消費電力が大きく違うことや、直前の運動方向によって停止中の消費電力が違うことが明らかとなった。Z 軸停止中の消費電力の違いについては、案内面との摩擦力の影響であると考え、摩擦力をバネ要素で表したモデルを用いることで、その現象について考察を行った。一方、回転軸の消費電力は、C 軸に比べ重力の影響を受ける B 軸の消費電力が極端に大きく、B 軸停止中の消費電力はその時の角度とトルクに依存していることを明らかとした。さらに、B 軸停止中の消費電力が、機械的なクランプによって削減可能であることを示した。

つぎに、制御パラメータである加減速時定数や位置ループゲインを変更することで、それらの違いによる影響について調査した。さらに、そのときの運動に要する総消費エネルギーを算出し比較することにより、制御パラメータの変更による運動エネルギー削減の可能性を検討した。その結果、これらの制御パラメータは加減速時の消費電力に影響を及ぼすことが明らかとなった。一方、位置ループゲインは運動時間に影響を及ぼさないため、運動精度が要求されない場合において、位置ループゲインを小さく設定することで、運動に要する消費エネルギーを削減可能である。

最後に、円運動と円すい台加工運動をさせたときの消費電力を測定し、同時多軸制御運動時の消費電力について調査した。このとき、各軸に同じ動きをさせた場合の消費電力を測定することで、同時多軸制御時の消費電力が各軸の消費電力の合計であらわされることを明らかとした。また、各軸の消費電力をみることで、同時多軸制御時の消費電力において、重力の影響を受ける Z 軸の消費電力が支配的であり、その運動の大小によらず、全体の消費電力に大きな影響を及ぼすことを明らかとした。

以上の結果に基づいて送り駆動系の消費電力が削減可能となれば、工作物の設置方向や工具経路、送り速度や加減速パラメータを適切に決定するだけで消費電力の削減が実現できるようになり、工作機械の消費電力削減に大きく貢献できる。

第3章では、第2章で得られた結果から、工作機械送り運動時の消費エネルギーが工具経路やその送り速度によって変化することが予想されたため、工具経路の違いによる工作機械運動時の消費エネルギーの違いについて調査を行った。また、送り駆動系の消費エネルギーに基づいた工具経路における消費エネルギーの推定方法を提案することにより、工具経路を消費エネルギーの観点から評価した。その結果として、提案する指標により、工具経路と送り速度の違いによる消費エネルギーの違いを推定でき、その大小を評価できることを示した。また、実際の加工を想定した工具経路においても経路の違いによる消費エネルギーの大小を評価できることを確認した。さらに、工具経路の違いによる消費エネルギーへの影響として、工具の移動距離が最も短く、運動時間も短い工具経路よりも、各軸の移動距離の合計が短い工具経路のほうが、送り運動に要する消費エネルギーは少ないことや、一定距離を送るのに要する消費エネルギーが最小になる送り速度が存在することが明らかとなった。

以上の結果から、同一形状の製品を加工する際にも工具経路および送り速度を考慮することで、運動に要する消費エネルギーが削減可能であることを示した。提案する指標に基づいて工具経路における消費エネルギーを推定し、CAMにより生成された工具経路を評価することで、送り軸の消費エネルギーの観点から最適な工作物の設置方向、工具経路および送り速度を設定することが可能となり、生産現場における消費エネルギー削減に大きく貢献できると考えられる。

第4章では、ボールねじ駆動およびリニアモータ駆動による1軸送り駆動系における消費電力を測定することで、消費エネルギーに影響を及ぼす因子を調査するとともに、そのエネルギー収支を明らかとした。その結果として、送り駆動系のエネルギー収支において、サーボアンプで消費されるエネルギーが非常に大きく、運動に必要なとされるエネルギー、モータおよび摩擦損失の占める割合は小さいことがわかった。また、ボールねじ駆動の場合、リニアモータ駆動の場合よりも摩擦の発生する箇所が多いため、送り駆動系全体で大きなエネルギーを必要とすることが明らかとなった。

さらに、直動転がり案内に使用するグリースを変えることで、摩擦特性の影響についても調査した。この結果として、リニアモータ駆動の送り駆動系において、直動転がり案内の摩擦特性が消費エネルギーに大きな影響をおよぼし、摩擦力の小さいグリースを充填することで消費エネルギーを削減できることを示した。さらに、各損失の関係により消費エネルギーを最小とする送り速度が存在することから、適切な送り速度を設定することで消費エネルギーを削減できることを示した。

最後に、速度応答性による影響を調べるために速度ループゲインを変えし実験を行った結果、速度ループ比例ゲインが大きくなると、速度が振動的になることで消費エネルギーが増大するため、速度の振動が生じないようなゲインを設定することで消費エネルギーを削減できることを示した。

これらの結果に基づいて送り駆動系の消費エネルギーを削減することが出来れば、工作機械における消費エネルギーのみならず、生産設備全体における省エネルギー化が期待できる。また、これまで送り駆動系の仕様について、その消費エネルギーが考慮されることはなかったが、各部での損失を考慮した最適な仕様が設定可能となると考える。

第5章では、切削加工時における数値制御工作機械の主軸および送り駆動系の消費電力を明らかにすることを目的として、材料除去率の違いと、上向き削りと下向き削りの違いの2つの観点で、それらが消費電力に及ぼす影響を調査した。その結果、材料除去率が高いと単位材料除去量あたりの切削時間が短くなり、各部の損失によるエネルギー消費が低く抑えられるため、材料除去率が高いほうが単位材料除去量あたりの消費エネルギーは小さくなることが明らかとなった。主軸回転の接線方向と送り運動方向が同じである下向き削りでは、機械駆動損失が小さくなるため、上向き削りと比べて単位材料除去量あたりの消費エネルギーが小さくなることが明らかとなった。

また、主軸の数学モデルを構築し、切削トルクを印加したときの主軸トルクのシミュレーションを行った。この結果から、測定結果と同様に主軸トルクが切削トルクよりも大きくなり、主軸の回転速度を維持するためにエネルギーが消費されていることが明らかとなった。

以上のことから、エンドミル加工時における主軸および送り駆動系の消費エネルギーが、材料除去率や切削方式により影響を受けることが明らかとなり、これらを考慮することで、工作機械加工中の消費エネルギー削減が可能であるといえる。

各章で得られた結果より、数値制御工作機械の加工運動中における消費エネルギーが工具経路、送り速度、切削条件を考慮することにより削減可能であることが明らかとなり、それぞれの削減方法を示すことができた。また、送り駆動系単体の消費エネルギー収支を明らかにし、送り駆動系の駆動方法や制御パラメータ、摩擦特性などの仕様を考慮することでその消費エネルギーを削減可能であることを示した。

これらの結果を基に、工作機械の省エネ化を運転方法、加工方法および送り駆動系の仕様の面からそれぞれすすめることができれば、工作機械の新たな発展につながるとともに、さらには生産現場における省エネ化に大きく貢献できる。

氏名	林 晃生		
論文題目	数値制御工作機械の消費エネルギー削減に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	白瀬敬一
	副査	教授	横小路泰義
	副査	教授	長尾陽一
	副査	准教授	佐藤隆太
	副査		
要 旨			
<p>近年、地球温暖化や資源の枯渇といった問題から、世界のあらゆる場で省エネ化が推進され、生産現場においても消費電力の削減が望まれている。工場では生産設備のエネルギー使用量の割合が8割以上を占めていることから、生産設備の中核を占める数値制御工作機械の消費電力削減は重要である。そこで、本研究では、数値制御工作機械の消費エネルギー削減を目的に、運転方法と設計方法の両面からその削減方法を検討している。</p> <p>第1章では研究背景として数値制御工作機械の高機能化、知能化、今後の技術課題と共に、消費エネルギー削減の現状について説明している。また、生産設備の中核である数値制御工作機械の省エネ化が工場の消費エネルギー削減に大きく貢献できるものの、周辺装置の省エネ化ばかりが注目され、運転方法や設計方法の観点から消費エネルギーの削減が検討されていないという問題点を指摘している。</p> <p>第2章では立て形5軸マシニングセンタの送り駆動系の消費電力に影響を及ぼす因子を明らかにするため、各軸の送り速度を変えて動作させた時の消費電力を測定し、各軸の消費電力の大小、重力による影響、送り速度の影響を考察している。特に、重力の影響を受けるZ軸は、運動方向によって消費電力が大きく違うことや、停止直前の運動方向によって停止中の消費電力が違ふことを明らかにしている。Z軸停止中の消費電力の違いについては、案内面の摩擦力の影響であると考え、摩擦力をバネ要素で表したモデルでその現象を説明している。一方、回転軸の消費電力は、C軸に比べ重力の影響を受けるB軸の消費電力が極端に大きく、B軸停止中の消費電力は停止角度を維持するためのモータトルクに依存することを明らかにしている。また、B軸停止中の消費電力が機械的なクランプによって削減可能であることを示している。</p> <p>次に、加減速時定数や位置ループゲインの違いによる消費エネルギーの大小を調査している。その結果、加減速時定数は加減速時の消費電力と運動時間に影響を及ぼすため、運動に要する消費エネルギーを最小にする加減速時定数が存在することを示している。一方、位置ループゲインは運動時間に影響を及ぼさないため、運動精度が要求されない場合は、位置ループゲインを小さく設定すれば運動に要する消費エネルギーが削減可能であることを示している。</p> <p>最後に、円運動と円すい台加工運動を例に、同時多軸制御運動時の消費電力を調査している。円運動時(同時2軸制御時)の消費電力では、2つの軸の消費電力の合計に等しくなることを明らかにしている。また、円すい台加工運動時(同時5軸制御時)の消費電力でも、5つの軸の消費電力の合計に等しくなることを明らかにしている。各軸の消費電力の中でも、重力の影響を受けるZ軸の消費電力が支配的であり、運動の大小によらず消費電力に大きな影響を及ぼすことを明らかにしている。</p> <p>第3章では、工具経路やその送り速度の違いによる工作機械運動時の消費エネルギーの違いを調査している。また、送り駆動系の消費エネルギーの実験値に基づいた消費エネルギーの簡易推定法を提案することにより、機械加工を行う工具経路の違い(運転方法の違い)によって変化する消費エネルギーの大小を比較検討している。その結果、提案した簡易推定法により、工具経路や送り速度の違いによる消費エネルギーの大小関係が定性的に評価できることを示している。また、実加工を想定した3種類の工具経路に対しても消費エネルギーの大小関係が定性的に評価できることを確認している。さらに、一連の実験結果から、工具の移動距離が最も短く、移動時間も短い工具経路よりも、各軸の移動距離の総和が短い工具経路(運転方法)のほうが、送り運動に要する消費エネルギーが少ないことや、一定距離の移動に要する消費エネルギーの大小が送り速度によって変化する、消費エネルギーが極小になる送り速度が存在することを明らかにしている。</p>			

氏名	林 晃生
<p>こうした結果は、製品を機械加工する際に、工作物の設置場所や設置姿勢、工具経路や送り速度を適切に選べば、工作機械の運転に要する消費エネルギーの削減が可能であることを示しており、既存の工作機械に対しても消費エネルギー削減の効果が期待できる。</p> <p>第4章では、ボールねじ駆動およびリニアモータ駆動による1軸送り駆動系の消費電力を測定し、消費エネルギーに影響を及ぼす因子を考察してエネルギー収支を明らかにしている。その結果、送り駆動系が消費する総エネルギーに対して、サーボアンプで消費されるエネルギーが占める割合は非常に大きく、送り駆動に必要とされるエネルギー、モータおよび摩擦損失で消費されるエネルギーが占める割合は小さいことがわかった。また、ボールねじ駆動は、リニアモータ駆動と比較して摩擦が発生する箇所が多いため、送り駆動系としては大きなエネルギーを必要とする。一方、リニアモータ駆動は、サーボアンプで消費されるエネルギーが占める割合が大きく、エネルギー効率の観点ではボールねじ駆動のほうが高効率であることを明らかにしている。さらに、直動転がり案内に使用するグリースを変更して、摩擦特性がエネルギーの消費に及ぼす影響も調査している。この結果、リニアモータ駆動の場合、直動転がり案内の摩擦特性が消費エネルギーの大小に大きく反映され、摩擦力の小さいグリースを使用すれば消費エネルギーが削減できること、消費エネルギーが極小となる送り速度が存在することを明らかにしている。最後に、速度応答性と消費エネルギーの関係を調べるために、速度ループゲインを変更して消費電力を測定している。速度ループ比例ゲインを大きくして送り速度が振動的になると消費エネルギーが増大することから、送り速度の振動が発生しないように速度ループゲインを設定すると消費エネルギーを削減できることも明らかにしている。</p> <p>こうした結果は、送り駆動系の設計段階で消費エネルギーの収支が考慮できることを示しており、使用条件に応じた送り駆動系の最適設計による消費エネルギー削減が期待できる。</p> <p>第5章では、加工中の工作機械の主軸および送り駆動系の消費電力を調査する目的で、材料除去率と切削方向(上向き削りと下向き削り)の違いが消費電力に及ぼす影響を調査している。また、主軸の数学モデルを構築し、主軸トルクのシミュレーションを行っている。ここでは実測した加工中の切削力から瞬間切削力モデルを用いて切削トルクを推定している。この切削トルクが主軸の負荷となるように主軸トルクのシミュレーションを行った結果、測定結果と同様に、主軸トルクは切削トルクよりも大きくなり、主軸の回転速度を維持するためにエネルギーが消費されることを明らかにしている。</p> <p>また、条件の違いによる消費エネルギーの測定結果を考察して、材料除去率が高いほうが加工時間は短くなり、損失によるエネルギー消費の割合が低く抑えられ、単位材料除去量当りの消費エネルギーが小さくなることを示している。また、主軸の回転方向と送り運動方向が同じになる下向き削りでは、送り駆動系の駆動損失が小さくなり、下向き削りでは上向き削りと比べて単位材料除去量当りの消費エネルギーが小さくなることを明らかにしている。</p> <p>こうした結果は、加工中の主軸および送り駆動系の消費エネルギーが、材料除去率や切削方向の違いを考慮することで、消費エネルギー削減が可能であることを示している。</p> <p>第6章では各章で得られた成果をまとめている。工作機械の加工運動中に消費されるエネルギーが工具経路、送り速度、切削条件を考慮することにより削減可能であることを明らかにし、消費エネルギーの削減方法を示している。また、送り駆動系の消費エネルギー収支を明らかにし、駆動方式や制御パラメータ、摩擦特性を考慮して工作機械の送り駆動系を設計することで、消費エネルギーの削減が実現できることを示している。</p> <p>以上のように本研究では、数値制御工作機械の消費エネルギー削減を目的に、運転方法と設計方法の両面からその削減方法を検討し、消費エネルギーの削減を実現するための具体策を明らかにしている。これらの成果は、数値制御工作機械の省エネ化に貢献すると共に、工場や生産設備の省エネ化にも貢献できることを示したものと非常に価値がある。提出された博士論文は、工学研究科が定める学位論文評価基準を満たしており学位申請者の林 晃生 は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>	