

学位論文審査の要旨、最終試験の結果の要旨および審査上の意見

学位請求論文提出者氏名 米本 涼
論文題目 グリーン製造におけるエネルギー効率化スケジューリングの
実装とその効用に関する研究
論文審査委員 主査：諏訪晴彦，副査：伊藤譲，副査：川野常夫

1. 予備審査

2020年12月10日に提出された上記論文の草稿について、12月16日に博士学位授与委員会が開催された。本委員会において、予備審査開始、並びに上記の主査、副査による審査会の構成が承認され、博士論文予備審査が開始された。

予備審査は、主査および副査による論文草稿の事前審査を行った後、下記の予備審査会において実施された。

<予備審査会>

- (1) 日時：2020年12月21日（月）18:00–19:00（発表30分，質疑討論30分）
- (2) 場所：1号館4階M科共通ゼミ室(2)
- (3) 質疑討論内容：
 - ・当該研究の新規性および有用性の確認
 - ・対象被削材および工作機械の妥当性について
 - ・ミニチュア製造モデルでのジョブ投入順序とエネルギー効率性の関係について
 - ・プレゼン資料およびプレゼンの構成などについて
 - ・論文の構成について

2. 博士論文審査

主査、副査による論文草稿審査および予備審査会での指摘事項を踏まえ、加筆修正の後、正式に博士論文が2021年1月25日に提出された。主査、副査による審査会は審査を継続しつつ、下記の公聴会を実施した。

<博士学位請求論文審査公聴会>

- (1) 日時：2021年2月22日（月）10:00–11:00（発表40分，質疑討論20分）
- (2) 場所：1243教室，およびTeamsによるライブ配信
- (3) 質疑討論内容：
 - ・加工方法（工程）と消費エネルギーの関係について
 - ・ミニチュア製造のシミュレーションモデルとしての妥当性について
 - ・対象とする切削実験（アルミ合金のフライス加工）の一般性について
 - ・機械故障の想定条件の妥当性や一般性について
 - ・工作機械全体エネルギーと切削エネルギーの関係について
 - ・搬送マニピュレータのエネルギー効率化スケジューリングの役割について
 - ・計測制御プラットフォームの実効性能評価について

3. 学会等公表状況

本論文は下記の査読付き投稿論文 2 編, および査読付き国際会議論文 2 編から構成されており, 十分に社会的に公表し, また評価を受けた内容からなっている。

■査読付き論文

- (1) Yonemoto, R. and Suwa, H., 2020, “Task scheduling of material-handling manipulator for enhancing energy efficiency in flow-type FMS,” International Journal of Automation Technology, 14-6, pp.943-950. (2020年11月公開, 月間ダウンロード数: 5位(同年12月), 1位(2021年1月))
- (2) Yonemoto, R. and Suwa, H., 2019, “Evaluation of energy efficiency and productivity in scheduling by using physical simulator,” Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers (システム制御情報学会論文誌), 32-5, pp.185-191.

■査読付き国際会議論文

- (1) Yonemoto, R. and Suwa, H., 2020, “Scheduling-based adaptive operations of handling manipulators to reduce downtime in manufacturing systems,” Proceedings of the 2020 International Symposium on Flexible Automation, ISFA2020-9639, V001T04A003, 4 pages.
- (2) Yonemoto, R. and Suwa, H. and Samukawa, T. 2017, “Evaluation of energy efficiency in scheduling by using cyber-physical manufacturing simulator,” International Symposium on Scheduling, pp.111-116.

4. 最終試験

下記の専門関連英語論文の要約と考察を, レポート課題として提出させた。

(1) 課題論文:

著者: Gahm, G., Denz, F., Dirr, M. and Tuma, A.

タイトル: Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: A review and research framework

(製造業におけるエネルギー効率化スケジューリング: レビューと枠組み)

出典: European Journal of Operational Research, 248-3, pp.744-757 (2016)

総ページ数: 14 ページ

(2) 結果:

上記課題論文の内容すべてを理解した上で和訳した後, 各章の重要なポイントと全体を通じての考察がまとめられている。口頭試問により学位申請者が考案する手法と課題論文との関連性および位置付けを論理的に説明できることを確認した。英語の能力と学術論文の読解力は高いと認められたので, 最終試験を合格とした。

以上

学位申請者氏名 米本 涼

論文題目 グリーン製造におけるエネルギー効率化スケジューリングの
実装とその効用に関する研究

論文審査の結果の要旨

環境負荷の低減や脱炭素化、資源の持続可能性を目標とする製造活動の生産技術および方法論は、総称して「グリーン製造」と呼ばれる。製造のグリーン化の取り組みは、生産設備個々の消費エネルギー削減への対応が最も有用であると言えるが、生産システム全体を対象としたエネルギー効率化の観点では異なる。生産システム全体での電力供給量には制限があるため、常にすべての機械で高能率加工を行うわけにはいかず、生産システム全体のエネルギー最適化を考慮すると各種生産設備に供給する電力エネルギーを融通し合う必要がある。

学位申請者の研究では、グリーン製造のエネルギー最適な運用の実現を目指すべく、実証検討に立脚したエネルギー効率化スケジューリングの効用を明らかにすることを目的とする。研究を推進するにあたり、学位申請者自ら次の三つの研究方を定めた。すなわち、1) 計測制御プラットフォームを構築し、それと実システムを接続した製造実行シミュレータを開発した上で、実証検討に基づくエネルギー効率化スケジューリングの評価基盤を構築する。2) ジョブの投入順序が生産システム全体の消費電力量に与える影響を観察し、エネルギー最適な生産スケジュールの特性を分析する。3) エネルギー効率化スケジューリングのシステム化・自動化を実現するための一つのアプローチとして、マテリアルハンドリングシステムの動作計画によるジョブの工作機械への投入制御を提案する。

方策 1) について、汎用計測制御言語の LabVIEW を基盤とし消費電力の計測と、簡易スケジューリング機能を実装した計測制御プラットフォームを完成させ、モデルケースとしてミニチュア FTL (Flexible Transfer Line) を接続した製造実行シミュレータを開発した。本シミュレータによる数種類の製品をサイクリックに製造する大量生産を想定した実験を通じて、ジョブの投入順序が生産システム全体の消費エネルギーに影響を与えることと、生産性阻害事象を、エネルギー効率性、および生産性の時間変化に伴う劣化から判断することが可能であることを示した。

続いて方策 2) では、フロー型柔軟製造システムを対象として、マテリアルハンドリング

システム（搬送マニピュレータ）の動作計画が、生産システム全体のエネルギー効率と生産性に与える影響を調査するための研究を行った。6軸マテハンマニピュレータを搭載した2軸 CNC 旋盤と3軸立形マシニングセンタから構成される製造システムテストベッドを構築し、マテハン作業を含む旋削加工と転削加工の二つの工程からなるサイクリック・スケジューリングを対象とした実験を行った。その結果、搬送マニピュレータ動作時に増加する消費電力は、製造システム全体の0.9%から3%程度であり、消費電力への影響は相対的に小さいこと、それを踏まえて搬送マニピュレータの適応動作による生産システムのピークシフト・スケジューリングの実行可能性を示した。

以上の成果と知見を踏まえ、学位申請者は、搬送マニピュレータの動作如何により生産システムのエネルギー効率を向上させることが可能なのではないかとこの着想を得た。そこで、エネルギーロスに直結する不確定的事象の生起に即応するマニピュレータの適応的動作に着目し、搬送マニピュレータのハンドに装備されたカメラと画像認識機能を用いて自律的な操作手順を考案した。工作機械のランダムなダウンタイムを伴うスケジューリング・物理シミュレーションを実施したところ、ダウンタイムの規模が大きいほど、適応的動作によるスケジュール遅延の低減効果が高く、シミュレーション全体の平均で約38%低減されたことを明らかにした。また、適応的動作の場合は故障発生後から、劣化した生産サイクルタイムが徐々に回復し始め、比較対象の汎用的動作に比べて、短時間で定常生産状態へ回復するという製造レジリエンスにつながる成果をも得た。

以上の研究成果は、査読付学術論文2編および査読付国際会議論文2編、さらには国際工作機械見本市などの研究成果出展において公表されている。学位申請者の一連の研究は、エネルギー効率化スケジューリングの実用化の端緒として、関連学術分野に新たな知見をもたらすものである。さらに、製造活動の脱炭素化指向の運用に加え、生産システムのスマート化の技術開発にも資する。よって本論文は、博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。