

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	設備自動点検のための異種ロボット群タスク割り当て最適化
Title(English)	Optimal Task Assignment for Automatic Equipment Inspection with Heterogeneous Robots
著者(和文)	岡田優也
Author(English)	Yuya Okada
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第266号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:畑中 健志,早川 朋久,三平 満司,倉林 大輔,山北 昌毅
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第266号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	システム制御 システム制御	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	岡田 優也		審査員主査： Chief Examiner	畑中 健志	

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文では、工場設備の自動点検システム構築に向けた異種ロボット群タスク割り当て最適化について考察する。各章の概要は以下のとおりである。

第1章「序論」では本研究の背景と動機を示す。まず、工場の設備点検における社会的課題と、複数ロボット群を使用した設備点検導入の意義を論じる。つぎに、複数ロボット群による作業分担を考える際に必須となる、複数ロボット群タスク割り当て問題 (Multi-Robot Task Allocation: MRTA) について紹介し、その代表的なアプローチや最適化手法について概観する。また、工場における実際的な制約を考慮するため、タスク完了の時間制約とロボットのエネルギー残量を考慮した MRTA について論じる。最後に、本論文の目的が工場のような大規模な環境で効率的な求解が可能な異種ロボット群タスク割り当て最適化問題の提案と検証であることを述べる。

第2章「工場モデルと数学的準備」では工場の設備点検を数理的にモデル化し、本論文で中心的な役割を果たす命題論理とその不等式変換方法および混合論理的システムについて既存の結果を導入する。はじめに、本論文全体ととして使用する工場モデルについて、工場の領域、ロボット、ターゲット、タスクなどの用語、記号、パラメータ、さらにはそれらの関係について説明する。つぎに、工場における制約を記述するために必要となる論理表現と、論理表現を不等式制約に変換するための手法を導入する。最後に、2つのモードに切り替わる線形システムに対して適用可能な混合論理的システムモデルについて紹介する。

第3章「異種ロボット群タスク割り当て最適化」では、異種ロボット群タスク割り当て問題の定式化と検証を行う。はじめに、工場における点検作業やロボットの仕様をもとに遵守すべき規則と制約を、ロボットの割り当てを意味する論理変数を用いて論理式によって表現する。つぎに、これらの論理式を、先に用意した論理変数の真偽を0-1で表現したバイナリ変数を用いて不等式条件へ変換する。さらに、変換した不等式を制約とし、すべての点検項目を早期に達成することを意図する目的関数を最小化するタスク割り当て最適化問題を定式化する。最後に、定式化したタスク割り当て最適化問題によって得られる解の妥当性を数値シミュレーションによって確認する。一方、工場の大規模化にとまない、タスク割り当て最適化問題の求解が困難となることを指摘する。

第4章「階層型異種ロボット群タスク割り当て最適化」では、大規模問題に対してもタスク割り当て最適化問題の実行可能解を実用的な計算時間で算出する効率的な最適化手法を提案する。まず、ロボットの作業空間を複数の領域に分割し、ロボットに領域とタスクを割り当てる上層と、割り当てられた領域ごとにロボットを点検箇所割り当てる下層に分割した階層型のタスク割り当て最適化問題を定式化する。このとき、上層ではロボットの領域間での移動を最小化し、下層ではすべてのタスクがより早期に終了することを目的とした最適化問題を設計する。つぎに、単純に問題を分割しただけでは、上層の最適化問題で得られた解によっては、下層の最適化問題の実行可能解が存在しない場合があることを例示する。この不可解性を回避するため、上層の最適化問題に追加する新たな制約条件を提案する。さらに、数値シミュレーションによって提案手法が与える解の妥当性を確認するとともに、分割前の最適化問題を計算した結果と比較し、求解効率の向上を明らかにする。

第5章「作業効率の差異を考慮したタスク割り当て最適化問題」では、異種ロボットの性能差を考慮した、より現実的なタスク割り当て最適化を考察する。まず、ロボットの速度差から、単位時間内に点検可能な設備数を作業効率パラメータとして定義し、そのパラメータを先に提案した階層型タスク割り当て問題に組み込む。つぎに、このアドホックな修正では階層型最適化問題でも解を得られない場合があることを例証する。この不可解性を回避するために、ロボットが割り当てるタスクの数を追跡する変数を用意し、新たな最適化問題を提案する。このとき、新たな変数を導入することによって、タスク割り当て最適化問題をハイブリッドシステムの動的最適化、さらには整数計画問題に帰着できることを示す。最後に、数値シミュレーションによって提案手法が与える解の妥当性を確認する。

第6章「結論」では、本論文の研究成果についてまとめ、今後の研究の発展方向を議論する。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： システム制御 系
Department of Graduate major in システム制御 コース
学生氏名： 岡田 優也
Student's Name

申請学位(専攻分野)： 博士 (工学)
Academic Degree Requested Doctor of
審査員主査： 畑中 健志
Chief Examiner

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In this thesis, we investigate optimal task assignment of heterogeneous robots towards an automatic inspection system for factory equipment and demonstrate the proposed optimization problems and solutions through simulation.

We begin by describing the logical expression of the rules and constraints required in the factory inspection with logical variables representing the assignment of the robots. The logical expressions are then converted into inequality conditions, and we formulate the optimization problem with the obtained inequalities as constraints. Finally, we numerically solve the formulated optimization problem and demonstrate validity of the resulting assignment. We also point out that the solution may be computationally intractable for a large-scale factory.

To address the above issue, we propose a computationally efficient hierarchical optimization, where the upper-layer optimization assigns robots to areas while the lower-layer assigns robots to inspection contents within areas assigned in the upper layer. We further introduce new logical constraints in the upper layer to guarantee feasibility of the lower-layer optimization. Finally, we numerically solve the proposed hierarchical optimization problem, and compare the results with the above one-shot optimization in order to confirm computational efficiency of the present hierarchical approach.

We next refine the present hierarchical optimization problem so that heterogeneous work efficiency among the robots is reflected. To this end, we parameterize work efficiency based on the performance differences of the robots and incorporate them into the constraints of the aforementioned optimal task assignment. We then illustrate that just introducing the parameters does not always guarantee feasibility of the lower layer problem, and hence we introduce new binary variables that represents the number of tasks to be executed, and redesign the constraints to ensure lower-layer feasibility. Specifically, it is shown that time evolution of the additional binary variables can be tracked as linear dynamical equation. Accordingly, the optimization in the upper layer is reduced to mixed integer optimization based on the concept of dynamic optimization of a hybrid system. Finally, we simulate the proposed optimization problem and discuss validity of the solution.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).