

多種多様なロボットで構成されたシステムの操業設計技術

Operation Design Technology for Heterogeneous Robot System

菅原 弘樹^{*1} 岡田 優也^{*2} 畑中 健志^{*2}
Hiroki Sugawara Yuya Okada Takeshi Hatanaka

近年、プラントに導入可能なロボットが登場し、現場での巡回点検作業や緊急時のファーストレスポンドとしての活用の検討が進んでいる。しかし、現行のロボットは事前の設計や学習の通りにしか機能しないため、多様な状況が発生する現場ではロボットを適用できる業務が限定される。一方で、ロボットの機能拡張による対応作業の拡大や廉価版の登場による導入台数の増加も期待され、これらが実現した場合、ロボットの操業が人では扱いきれないほど大規模化することが予想される。当社はプラントの設備や操業自体が学習し、適応することを目指す Industrial Autonomy を提唱しており、その実現にはプラントでのロボット操業の自律化が望ましいと考える。そこで、各ロボットの運用計画を設計する技術開発に取り組み、その成果として、実運用上で想定される計算時間の制限を満たす、実運用に適した操業計画設計アルゴリズムを開発した。

In recent years, robots that can be deployed in process plants have begun to emerge and their use for on-site patrol inspections or as first responders in emergencies is being actively considered. However, current robots operate based only on pre-designed motions and pre-trained behaviors. This limits the tasks they can perform in real environments where diverse situations arise. Meanwhile, expanding the range of tasks through enhanced robot functionality and the development of low-cost robots is expected to increase the number of robots deployed. As these developments progress, robot operation will grow to a scale too massive for humans to handle. We aim to realize “Industrial Autonomy” and hypothesize that it is desirable for a robot management system to control all robots deployed in the field. To this end, we have been developing technology to design operation instructions for individual robots. In particular, we have developed a design algorithm that meets the computational time constraints required for real-world operations and is suitable for practical use.

1. はじめに

近年、プラントオペレーションの現場は、人手不足、ベテラン作業員の引退に伴う若手後継者の育成、競争力強化といった様々な課題を抱えている⁽¹⁾。これらの課題の解決策としてデジタルトランスフォーメーション（DX）の推進が進められており、Boston Dynamics, Inc. の SPOT、三菱重工業株式会社の EX ROVR、ExRobotics B.V. の ExR-2、ANYBotics AG の ANYmal、Taurob GmbH の Inspection などが登場している。今後も新たなロボットの登場や機能拡張が期待されており、プラントオペレーション向けのロボットの市場規模は、年 10% 程度の成長率で拡大することが予想されている⁽²⁾。

当社では、産業の自動化である Industrial Automation からプラントの設備や操業自体が学習し、適応する Industrial Autonomy の実現に向けた道筋として IA2IA

(Industrial Automation to Industrial Autonomy) を掲げており、ロボットを要素技術の一つと位置付けている⁽³⁾。当社は、プラント操業システムと各種ロボットをシームレスに接続するロボット管理コア（OpreX Robot Management Core）を開発し、プラント現場でのロボット導入検証をお客様と共に進めている。操業の自律化が実現されたプラントでは、**図 1** のように、多種多様なロボットが導入され、互いに補完しあいながら自律して作業をこなしていくことが想像される。しかしながら、現時点でプラントへの導入が可能な各種ロボットは、マニュアル操作、もしくは事前に定義した動作の再生による自動走行による操業を前提にしている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。したがって、事前定義時に想定されなかった様々な状況にもシステムが対応できるようにするには、いくつかの新機能の開発が必要である。

そこで、本研究では、ロボット操業を自律化するための技術の一つとして、状況に応じて適切なロボットの操業計画を設計する技術を開発した。本稿では、この開発した技術について述べる。

*1 マーケティング本部イノベーションセンター DX 事業創出部

*2 東京科学大学 工学院 システム制御系 畑中研究室

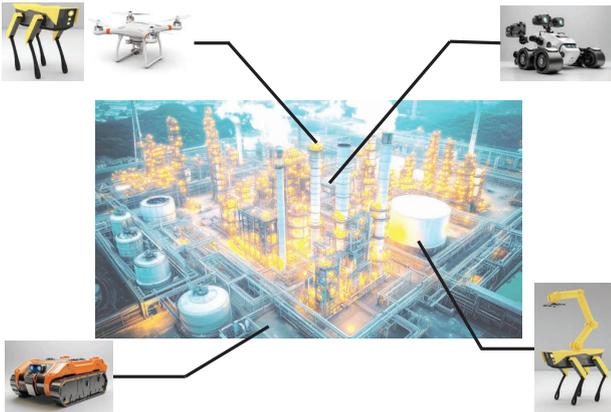


図1 プラントでのロボット操業の将来構想図

2. プラントでのロボット操業上の問題と技術課題

2.1 ロボット操業上の問題

現在、プラントでは、人が優れた五感を用いて点検作業を行なっている。一方、ロボットは、搭載機能が限定されているため、対応できる作業とできない作業があり、搭載機能に応じてロボットを使い分ける必要がある。したがって、人の場合、外観、温度、異音などのすべての項目を一人の作業者が点検でき、作業割当は機器、または区画単位となる(表1)。一方、ロボットの場合、作業項目に応じて対応機能を持ったロボットが分担し、互いに補完し合いながら各機器の点検作業をこなすことが想定される(表2)。

対応可能な時間をみても、人の場合は所定の就業時間内(シフト時間内)であればいつでも対応が可能であるが、ロボットの場合はバッテリーの仕様により連続稼働時間が決定される。この仕様を無視すると、ロボット稼働中にバッテリーが切れて現場で停止してしまうなどの問題が発生するため、図2のようにシフト時間内に充電のための停止期間を設けなければならない。

また、ロボットは、プラントを操業する上での制約にもより影響を受ける。制約の例として、現場の安全上のルールなどによりフィールドパトロールの実施時刻が指定される、点検中に装置のオンオフが切り替わる、などがある。装置のオンオフが切り替わる場合、事前に実施のタイミングがノウハウ化されていることも多いが、その場合でも実施時刻は指定されることになる。

こうした制約を満たしながらロボットの適切な操業を設計するためには、各制約やロボットの運用方針を定式化した Multi-Robot Task Allocation 問題(MRTA 問題)と呼ばれる問題を解く必要がある。MRTA 問題に対しては、表3に示すアプローチ⁽⁶⁾がこれまでに提案されている。

市場型アプローチは、いわゆるオークションのように特定の作業に対する各ロボットの受諾時のコストを提示させ、最も良い提示をしたものに順次割当てていく方式である。最適化アプローチは、操業におけるすべての制約を数

式で表現し、ロボットの操業方針を目的関数として定式化した最適化問題を解くことで所望の計画を取得する方式である。ロボットの操業方針としては、可能な限り作業を早く実施することや、ロボットのランニングコストを可能な限り抑えることなどが挙げられる。一般的には最適化アプローチの方が性能の良い結果が得られると言われている⁽⁷⁾。

表1 人の場合の作業割当の想定例

機器	作業項目	作業員 A	作業員 B
X	外観目視	✓	
	温度	✓	
	振動	✓	
	異音	✓	
	液面	✓	
Y	外観目視		✓
	温度		✓
	振動		✓
	異音		✓
	計器確認		✓

表2 ロボットの場合の作業割当の想定例

機器	作業項目	ロボット α	ロボット β	ロボット γ
X	外観目視	✓		
	温度		✓	
	振動			✓
	異音		✓	
	液面	✓		
Y	外観目視	✓		
	温度		✓	
	振動			✓
	異音		✓	
	計器確認	✓		

2.2 技術課題

MRTA 問題は NP 困難と呼ばれる問題⁽⁸⁾であり、プラントでのロボット操業計画向けの問題設定の規模になると、非常に高い計算コストがかかることで知られている。

一方で実際の操業では、設備からのアラームや状態に基づいた追加作業、前シフトからの申し送り事項、ロボットの故障といった様々な変動要因が考えられる。したがって、ロボット操業の自律化を実現するにあたり、現場環境の変動や作業の追加などが発生した場合でも随時対応できるような操業計画設計手法が必要である。

随時対応の方法として、変動が発生した時点でのロボット操業の状況を取りまとめ、再度計画を設計し直す方法が

時刻	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00
人	勤務												
ロボット	稼働	充電				稼働	充電						

図2 人とロボットのシフト内の想定実働状況

表3 MRTA 問題へのアプローチ

アプローチ	概要
最適化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 操業上の制約や作業の要求機能、ロボットの仕様上の制約などを定式化し、操業方針を記述した目的関数を基に適切な割当を導き出す ・ 計算コストが高い傾向がある
市場型	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各作業に対して、それぞれのロボットの実施コストを評価し、その中で最も良い割当パターンを随時決定していく ・ 計算コストは最適化手法と比較して低い傾向がある ・ ロボットの運営方針や優先度を反映した評価方法が必要である

考えられる。この場合、変動が発生するたびに計算コストの高い MRTA 問題を解く計算処理が必要となる。計画の変更は実運用中に行い、ロボット操業に支障をきたさないようにしなければならない。このことから MRTA 問題に対する計算の軽量化アプローチが必要である。

3. 提案手法

本研究では、計算の軽量化を実現すべく、図3のような計算アルゴリズムを提案した⁽⁹⁾。

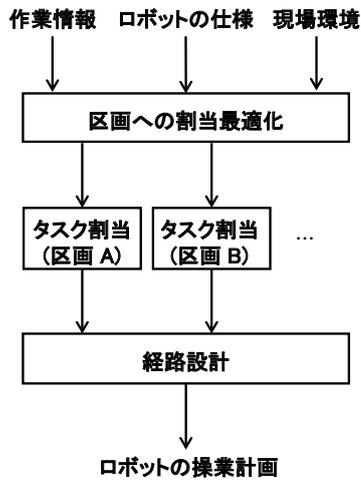


図3 操業計画設計計算アルゴリズム

従来の MRTA 問題では、ロボットへの作業割当と動作経路が相互に作用するため、非常に計算規模が大きくなる。そこで、ロボットへの作業割当と動作経路設計を個別に解くことで計算コストを軽量化した。さらに、事前に現場をいくつかの区画に分割し、区画ごとに作業割当の計算を行うことで計算コストの低減を試みた。ロボットは区画間で共有のリソースであることから、区画ごとのロボットへの作業割当計算の整合性を保つため、上位にロボットの区画割当計算を行うことで実現可能な計画を設計できるものとなっている。以降でこのアルゴリズムの詳細を述べる。

3.1 問題設定

まず、ロボットの操業設計問題の設定について述べる。

ロボットの作業対象はそれぞれ [作業位置, 必要な機能, 実施時刻の指定] で構成されるものとした。作業位置は後述の現場の走行環境と合致するように設定した。時刻は離散ステップで表現されるものとし、ステップ幅を 30 分とした。実施時刻が指定されている作業は、対応する時刻ステップ番号で実施するように指定した。

現場の走行環境は、走行経路、作業の実施位置、各ロボットの充電位置などを図4のようなグラフで表現した。作業の実施位置や充電位置をノードで表現し、このノード間の移動が可能である場合はエッジで結びつけることで移動経路として表現した。ノード間の移動距離はエッジに重みとして付与することで表現した。現場を任意の区画に事前に分割し、各ノードにその情報も付与した。

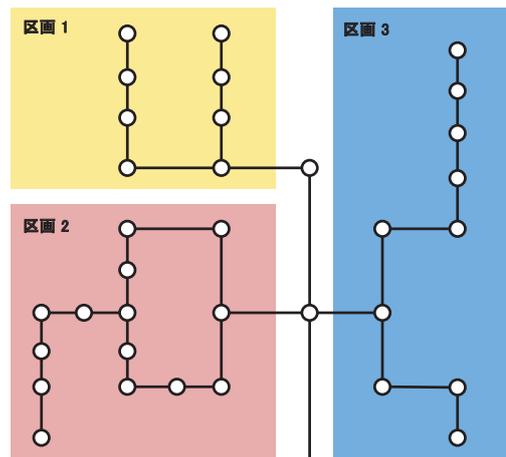


図4 現場環境のグラフ表現例

3.2 ロボットの区画への割当最適化

3.1 節で述べた問題設定に基づいて、ロボットの区画割当の最適化計算を行った。区画割当では、各区画に存在するすべての作業を、時間的な制約を満たしながら実施できるようにロボットを割当てる必要がある。そこで、実施作業の区画と要求機能で情報をとりまとめ、各時刻ステップ

で着手可能になる作業数と完了していなければならない作業数を制約とした。さらに、任意の時刻期間内で実施されなければならない作業数も制約とした。

ロボットが1ステップあたりに実施できる作業数は、自身の充電位置や各区画との距離から設定した。前述の制約を満たすようにロボットを割当ててことで、次の各区画でのタスク割当の最適化が実現可能である。さらに、区画へ割当てられなかったロボットを、自身の充電位置で充電するようにすることでバッテリーの制約を組んだ。

3.3 各区画でのロボットへのタスク割当

3.2節の結果を踏まえて各区画に割当てられたロボットに対して、区画内に存在する作業を割当てて計算を行った。ここでは、3.1節のとおり、各作業に必要な機能や実施時刻の指定を制約化して割当の最適化計算を行った。

3.4 ロボットの経路設計

経路設計は、各ロボットについてステップ毎に行った。時経路設計は、3.2節の区画割当の結果に応じ、一つの区画に着目して行った。さらに、着目する区画の前後ステップの割当先の状況から、着目する区画の中で前ステップの割当区画から最も近い位置を始点、次のステップの割当区画にもっとも近い位置を終点とした。そして3.3節で割当てられた作業の実施位置を経由地と設定することで、始点からすべての経由地を通過して終点に到着するまでの経路設計問題に落とし込むことができた。

この経路設計問題もNP困難な問題であり、厳密解を求めるのは計算コストの面から現実的ではない。本稿では、近似アルゴリズムの一つである挿入法（最廉挿入法）と、グラフの指定した任意の2ノード間の最短経路を求めるダイクストラ法を用いて経路設計を行った⁽¹⁰⁾。最廉挿入法は、ロボットの動作経路に、最も経路の増加量が少なくなるように順序を考慮しながら経由地を挿入することを、すべての経由地が挿入されるまで繰り返すアルゴリズムである。ダイクストラ法により、実際に経由地挿入が行われた場合の経路を設計し、経路長の増加量を算出できるため、これを全ての経由地と経由順序の候補で評価することで最廉挿入法による経路設計が可能になる。

4. シミュレーター検証

第3章で示した計算フローの有効性を検証するため、シミュレーターを用いた検証を行った。検証における最適化計算にはGurobi Optimization, LLC.のGurobi Optimizerを最適化ソルバーとして用いた。また、計算用CPUにはIntel (R) Xeon (R) Gold 5317を用いた。

4.1 検証設定

8区画、511タスクで構成されるプラントを模擬した仮想フィールドを図5に示す。

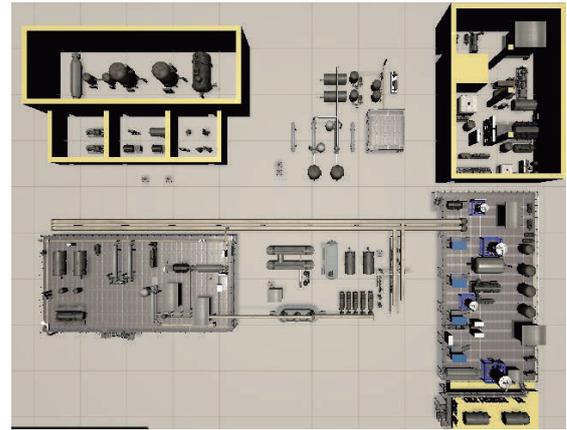


図5 シミュレーターの模擬環境

タスクの実行に必要な機能は{カメラ、サーマルカメラ、マイク、カメラ+アーム、マイク+アーム}の5種類で構成し、ロボットの仕様と構成は表4のように設定した。

これらのロボットを用いて、8時間以内で作業を実施する計画を設計する計算を行い、その計算所要時間を検証した。なお、区画割当では、作業を早期に実施させることと、遠方の区画へのロボットの割当を避けることを方針として目的関数を設計した。また、各区画でのタスク割当は、作業を早期に実施させることを方針として目的関数を設定した。

最適化ソルバーに実装されている計算手法には初期値依存性があるため、初期設定の違いにより解の計算結果や最適化計算の所要時間に変動が発生する。今回の検証では、初期設定の生成に用いる乱数シード値を5パターン設定し、それにより初期設定を変動させた上で評価を行った。

表4 ロボットの仕様・構成

	ドローン	4足ロボット	キャタピラ型ロボット
搭載機能	・カメラ	・カメラ ・マイク ・アーム	・カメラ ・サーマルカメラ ・マイク ・アーム
充電所要時間 [分]	30	120	60
連続稼働時間 [分]	90	180	120
導入台数 [台]	4	3	3

4.2 計算結果

図6に本検証で設計されたロボットの操業計画での、各区画での作業実施数の推移例を示す。各区画の累積作業実施数は緑の棒グラフで表しており、各区画の作業実施における時間上の制約は青と赤の線で示している。作業の一部には実施時間ステップが定められている物が存在する。そのためロボットを割当てても定められた時間に達していなければ、作業を実施できないケースが存在する。このよう

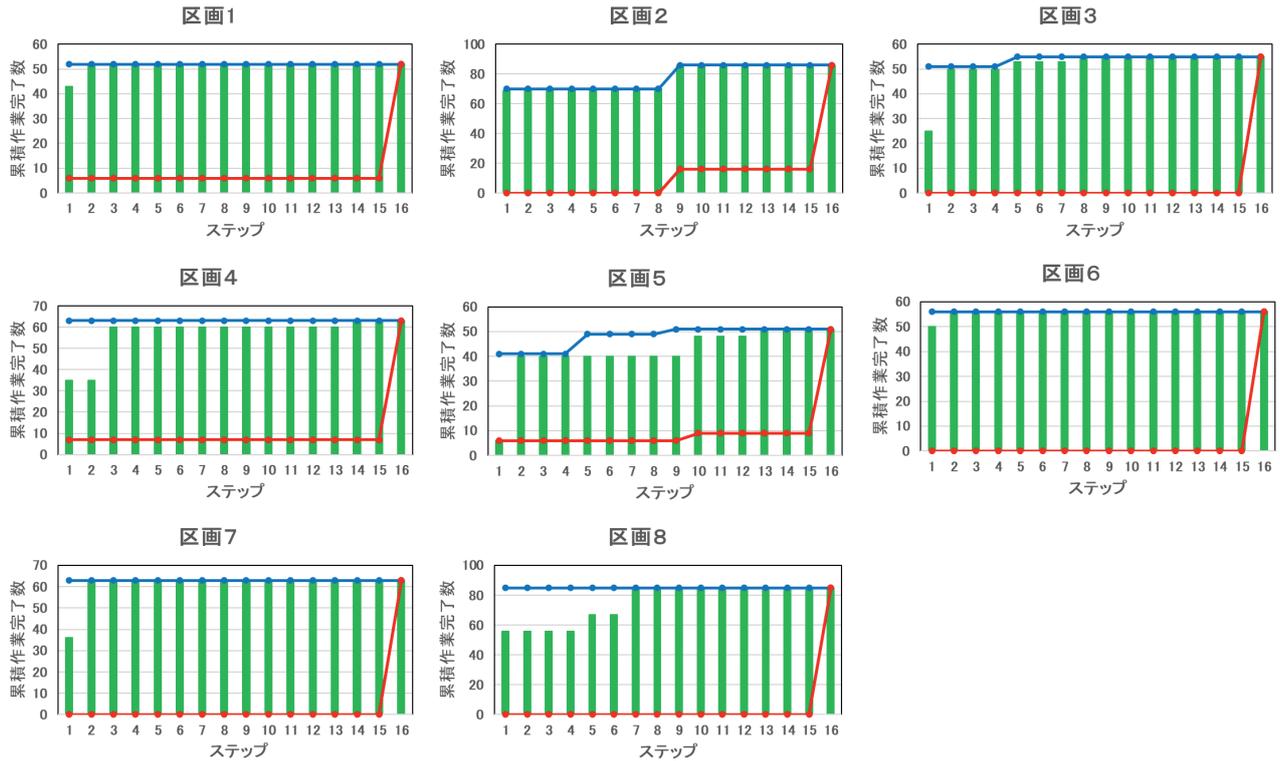


図6 設計された計画による各区画の作業実施の推移例

に作業を実施できる数の推移を青線で示している。また全ての作業はシフト内、もしくは指定された時間内で完了していなければならない。このように要求される作業完了数を赤線で示す。計画における各区画の作業実施数は実施可能数以下（青線よりも低い）であり、要求実施数以上（赤線よりも高い）であれば、制約が満たされる。図6に示した通り出力された計画での実施数の推移は、全ての区画で制約を満たしている。以上のことから、本稿で提案した計算アルゴリズムが実現可能な計画を出力できることが確認された。

また表5に本稿で開発した計画設計アルゴリズムでの所要計算時間と、設計された操業計画の各ロボットの走行距離の総和を示す。今回の問題設定規模での応答時間は1分程度であり、実用的な時間内に収まっていると判断した。

走行距離は、設定シード値により差異があった。これは、提案手法の区画割当やタスク割当の結果が設定シード値により異なり、ロボットに割当てられた作業や走行経路が変動したためと考えられる。

これらの割当の変動は、特にタスク割当と経路設計を個別化したことが要因だと考えられる。従来手法でのタスクの割当は、そのタスク実施のための移動も含めて経路設計を加味しながら行われる。一方、本アルゴリズムでは、この問題を個別化したため区画内の作業実施位置の違いがタスク割当で考慮されず、計算上では同一評価となるタスク割当結果であっても、走行距離で差異が生じる結果となった。

表5 計算結果

	計算所要時間 [秒]	総走行距離 [km]
1回目	55.0	5.06
2回目	57.1	5.06
3回目	56.6	4.97
4回目	55.5	5.07
5回目	59.2	5.04
平均	56.7	5.04
標準偏差	1.5	0.03

しかしながら、総走行経路の標準偏差から、その変動は非常に小さい。これは1ステップ当たりの稼働範囲を1区画に制限したためと考えられる。また、いずれのケースでもロボットの運用上の制約を逸脱するケースはなかった。このことから、走行経路の変動の影響は非常に軽微なものであり、実運用には影響しないと判断した。

5. おわりに

本稿では、プロセスプラントでのロボットの操業自律化に向けた計画設計フローを提案し、その設計技術開発について報告した。当社が掲げる Industrial Autonomy の実現に向け、様々な状況にその都度対応することができる軽量の計算コストで、実現可能な計画を出力できることを確認した。

現場での人手不足や技術伝承が問題となっている昨今、

ロボットの導入は一つの対応方法であり、ロボットの機能開発も進行していることから、現場でのロボットの活動範囲は今後も拡大していくと考えられる。それに伴い、ロボットを操業するために必要な工数や現場作業員の負荷の増大が予想されるが、本操業設計技術を活用してロボット操業の自律化を実現することで、現場作業員の負荷を抑えながら、ロボットを適用できるオペレーションを拡大することが可能である。

ロボット操業の自律化にむけた今後の展望として以下の2点が重要点として挙げられる。一つ目は現場環境の3Dモデリングである。本技術には現場の物理的な環境情報が必要であり、プラント施工時の図面などが利用可能であるが、操業開始後の設備更新や追加導入などにより施工時の図面と現状が乖離している場合がある。このような場合、現在の現場の計測を基に3Dモデル化することで、正確な環境情報を構築することができる。二つ目は設計した動作に基づいたロボットの動作制御機能である。現行のロボットは自身の機能以外で設計された動作を実行する機能を持たないため、本技術で設計した動作を安定して実現できる動作制御機能が必要である。当社は、引き続きロボットによるプラント操業の実現に向けた研究開発を進めていく。

参考文献

- (1) 経済産業省・厚生労働省・文部科学省, 2025年版ものづくり白書, 2025, <https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2025/pdf/all.pdf>, (参照 2025-7-22)
- (2) Tim Shea, "Robotics for the Process Industries Global Market Research 2023- 2028," ARC Advisory Group, 2024
- (3) 横河電機株式会社, IA2IA, <https://www.yokogawa.co.jp/solutions/featured-topics/ia2ia/>, (参照 2025-7-31)
- (4) Boston Dynamics, Inc., SPOT SDK, <https://dev.bostondynamics.com/>, (参照 2025-7-31)
- (5) 三菱重工業株式会社, プラント自動巡回点検防爆ロボット EX ROVR "ASCENT", https://www.mhi.com/jp/products/energy/ex_rovr.html, (参照 2025-7-31)
- (6) Alaa Khamis, Ahmed Hussein, et al., "Multi-robot Task Allocation: A Review of the Stat-of the-Art," In: Cooperative Robots and Sensor Networks 2015, Springer, 2015, pp. 31-51
- (7) Mohamed Badreldin, Ahmed Hussein, et al., "A Comparative Study between Optimization and Market-Based Approaches to Multi-Robot Task Allocation," Advances in Artificial Intelligence, Vol. 2013, 256524, 2013
- (8) Brian P. Gerkey, Maja J. Mataric, "A Formal Analysis and Taxonomy of Task Allocation in Multi-Robot Systems," The International Journal of Robotics Research, Vol. 23, No. 9, 2004, pp. 939-954
- (9) Yuya Okada, Hiroki Sugawara, et al., "Feasibility-aware hierarchical task assignment for equipment inspection robots with heterogeneous work efficiency," Advanced Robotics, Vol. 39, No. 2, 2025, pp. 114-126
- (10) 福島雅夫, 新版 数理計画入門, 朝倉書店, 2011

* SPOT は Boston Dynamics, Inc. の登録商標です。

* EX ROVR は三菱重工業株式会社の登録商標です。

* ANYmal は ANYBotics AG の登録商標です。

* Gurobi Optimizer は Gurobi Optimization, LLC. の登録商標です。

* その他, 本文中で使用されている会社名, 団体名, 商品名, サービス名およびロゴ等は, 横河電機株式会社, 各社または各団体の登録商標または商標です。