

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：33934

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760210

研究課題名(和文) 技能教育と現場状況の変動を考慮した大規模施設作業スケジューリング支援システム

研究課題名(英文) A Scheduling Support System for Large-scale Facilities in Consideration of Skill Educations and Working Conditions

研究代表者

館山 武史 (TATEYAMA, Takeshi)

愛知工科大学・工学部・准教授

研究者番号：70336527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円、(間接経費) 450,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目標は、大型機械のメンテナンス現場などの大規模作業現場において、作業者の技能教育と作業効率のバランスを考慮した長期的なスケジューリングを支援するシステムを開発することである。まず、大型機械のメンテナンス現場のモデル化を行った。

次に、「教育値」という技能教育と作業効率のバランスを調整するパラメータを定義し、強化学習を用いて教育値を現場の状況に応じて調整するアルゴリズムを開発した。

また、離散・連続混合システムのモデリング手法である場面遷移ネットを用いて、作業者の作業の遷移を離散システム、作業者の習熟・忘却の仕組みを連続システムとしてモデル化し、シミュレーションの動作確認を行った。

研究成果の概要(英文)：As of skillful works such as maintenance works of airplanes, workers have to learn many kinds of works with OJT. However, it is difficult to balance between working efficiency and keeping the number of skilled workers by performing OJT. The purpose of this study is to develop a scheduling support system considering working efficiency and skill education. First, the author proposes an education coefficient (EC) as a parameter that adjusts the frequency of OJT and a scheduling support system for the long-term scheduling of OJT. Next, the author proposes a simulation-based scheduling support system using reinforcement learning to adjust the value of EC automatically based on the specific situations by considering the balance between working efficiency and skill education.

The author also constructs discrete-continuous hybrid system models of the maintenance workspace using scene transition nets which are graphical modeling and simulation tools for hybrid systems.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 知能機械学・機械システム

キーワード：情報システム 離散・連続混合システム 機械学習 技能教育 スケジューリング シミュレーション 強化学習

1. 研究開始当初の背景

航空機のエンジン等の大型機械や、発電プラント等の大規模設備のメンテナンス現場の作業は、通常の製品の生産ラインにおける作業と比較して作業が複雑であり、作業には高度な技能が要求される。そのため、作業にはある作業を単独で行うためには、一定の技能を取得(ある種の免許を取得)する必要がある、通常の技能教育を修了した後、実務を行いながら技能を習得する **On the Job Training (OJT)** が課せられることが多い。特に大型機械・大規模設備の場合は、**OJT** は長期にわたる教育となることが多く、技能取得者が単独で作業を行う場合と比較して作業効率が低下するため、技能教育と作業効率をバランスさせた作業計画を事前に練ることが重要となる。さらに、現場の作業者に課せられる作業の種類は多種多様である場合が多く、また近年は製品の多様化・複雑化等が進んでおり、さらに先の大震災で明らかになったように、部品の欠品、納期の変更、設備の故障、作業人数の変化等の突発的な状況変動に迅速に対応する必要性が高まっている。

しかし、作業現場の管理者が現場の状況を全て把握し、適切な作業計画を立てることは非常に困難となっており、現場管理者は経験的・試行錯誤的に作業計画の立案・修正を行っているのが現状である。そのため、技能教育と作業効率のバランスを状況に応じて調整するスケジューリング支援手法と、作成したスケジュールを評価するためのシミュレーション環境が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らが開発中の離散・連続混合システムのモデリング・シミュレーション手法である場面遷移ネットを用いて大型機械・大規模設備のメンテナンス作業現場のモデリング・シミュレーションを行い、さらに機械学習法を用いて、技能教育と作業効率をバランスさせるスケジューリングの支援を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

- (1)対象となる作業現場を、場面遷移ネットを用いて離散・連続混合システムとして詳細にモデリングし、シミュレーションを行う環境を構築する。
- (2)エージェントベースの動的スケジューリングシステムをシミュレーション環境に実装する。
- (3)機械学習法を用いて、現場の状況に応じて技能教育と作業効率のバランスを調整してスケジューリングを行うシステムを開発する。

4. 研究成果

(1)まずは、技能教育を考慮した大型機械のメ

ンテナンス作業現場のモデリングを行い、テキストベースのシミュレータを作成した。本研究では、ジェットエンジンなどの大型機械のメンテナンス現場におけるスケジューリング問題を、以下のように設定する(図1)。

作業現場では、 N_w [人]の作業員で、 N_m [台]の機械を L [年]以内にメンテナンスを行うことを考える。各機械 m_i のメンテナンスは、 N_j 種類のジョブ(作業)を全て行うことによってなされる。ここでは問題を単純化するため、 N_m [台]の機械は全て同種類の機械とする。各ジョブ j_i の実行には時間 t_i [h]を要する。また、各ジョブの実行順番には優先順位はないこととし、全てのジョブは同時刻で並列実行が可能であるとする。

各作業員 w_i には、各ジョブ j_k の技能レベルとしてレベル $LV(w_i, j_k)$ ($= 1$ or 2)が設定されており、レベル2のジョブは1名で作業が可能であるが、レベル1のジョブは、そのジョブの技能レベルが2である作業員1名が指導者となり、**OJT** を行いながら作業を行う必要がある。**OJT** の作業時間は、通常作業時間(レベル2の作業員が1名で行う場合の作業時間)の H_{OJT} (> 1)倍となる。つまり、ジョブ j_i の **OJT** の作業時間は、 $H_{OJT} \times t_i$ [h]となり、通常よりも処理時間が長くなる。また、指導者となった作業員は、自らに割り当てられている作業を中断し、**OJT** の指導に従事することとなる。よって、作業員の技能教育の頻度と作業効率との間には、トレードオフが存在することになる。

作業員は、レベル1のジョブの **OJT** を N_u 回受講すると、そのジョブの技能レベルが2にアップする。また、レベル2のジョブに T_d 年間1度も従事しなかった場合、そのジョブの技能レベルが1に低下する。よって、作業員があるジョブの技能レベルを2に保つためには、定期的な作業への従事が必要となる。

また、ジョブエージェント、管理者エージェント、作業員エージェントで構成されるエージェントベースのスケジューリングシステムについてもモデリングを行った。

さらに、スケジュール中の **OJT** 作業の頻度を容易に調整可能なパラメータである「教育値(Education Coefficient, EC)を定義し、上記のモデル中に組み込み、テキストベースのシミュレータを構築し、動作確認を行った。

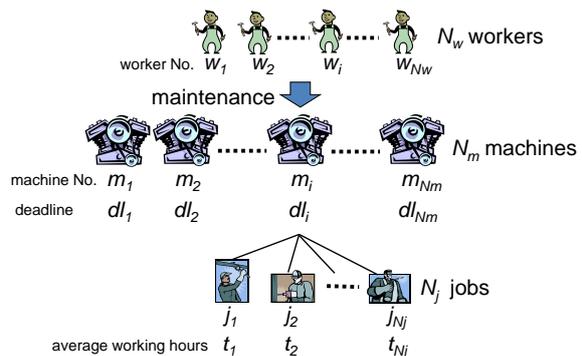


図1. 大型機械メンテナンス現場のモデル化

(2)(1)で構築したシミュレータを用いて、作業現場の状況に応じて OJT の頻度を調整するルールを自動的に取得することを目的とした、強化学習を用いた動的スケジューリング支援システムを構築・実装した。提案手法である強化学習法を用いた EC 決定支援システムの概要を下記に記す。

図 2 は、提案するシステムのプロトタイプである。本システムの目的は、現場の状況に応じて EC の値を適切に決定し、作業効率と教育効果をバランスさせたスケジューリングを実現することである。本システムにおける「現場の状況」とは、強化学習システムの「状態(state)」に相当し、EC の値は「行動(action)」として実行される。状態として定義すべきパラメータは様々なものが考えられるが、本研究では、EC を決定する際の特に関連する判断要素であると考えられる「納期までの残り時間」「各ジョブの技能者数の数」「現時点で作業可能な作業者の数」を状態のパラメータとして用いた。これらの状態パラメータが変化する毎に、システムは行動価値関数の出力値を基に、行動として EC の値を決定する。

シミュレーションによって、全てのジョブの遂行が完了すると(これを 1 エピソードとする)、システムの報酬関数が総作業時間(作業効率)と各ジョブの技能者数(教育効果)の結果を評価し、報酬を算出してシステムの行動価値関数を、強化学習アルゴリズムに従って更新する。上記の動作を繰り返すことにより、高い報酬が得られる行動価値関数が形成され、現場の状況に応じて適切に EC を決定するルール(状態と行動の組の評価関数)が得られることが期待できる。

しかし、本研究で対象とするメンテナンスの問題では、実際の航空機ジェットエンジンのメンテナンス現場のデータを元にしており、10 年以上の長期間におけるスケジューリングを対象としている。また、1 台の機械のメンテナンスに要するジョブの数も 100 前後と比較的多い。そのため、環境の状態空間のサイズは膨大なものとなってしまう、学習が収束するまでに膨大な試行回数が必要となってしまう可能性が高い。そこで本研究では、状態数を削減する有効な手法として知られている、tile coding と価値関数の線形近似を提案システムに適用した。生成したスケジュールの評価は、納期までの期間内でより高い教育効果を実現させるために、作業終了時間が納期に近いほど強化学習の報酬の値が高くなるように報酬関数を設定した。

100 台の機械のメンテナンスを 8 人の作業員で 10 年以内に完了させることとしてシステムの動作確認を行ったところ、図 3 に示すように、納期に余裕がある場合は作業完了までに要する時間を長くとり、OJT の頻度を増やすことにより、技能者が不足するジョブ数を少なく抑えるようなスケジューリングを行っていることが読み取れる。また逆に納期

に余裕がない場合は OJT の頻度を減少させ、納期に間に合うように作業時間の短縮を実現するようなスケジューリングを行っていることがわかる。そのため、技能者が不足するジョブの数は納期に余裕がある場合と比較して増加している。このように、本学習システムが、技能者が不足するジョブ数を抑えつつ、設定した納期に間に合うようにスケジューリングを行っていることが確認できた。

さらに、状況の変動(納期や作業員数の作業中の変更)が発生した際にも、状態空間の拡張や再学習の実行により、適切なスケジューリングを継続することが可能であることも確認できた。本研究成果は、5 章に記載されている雑誌論文①として 2014 年度内の掲載が決定している。

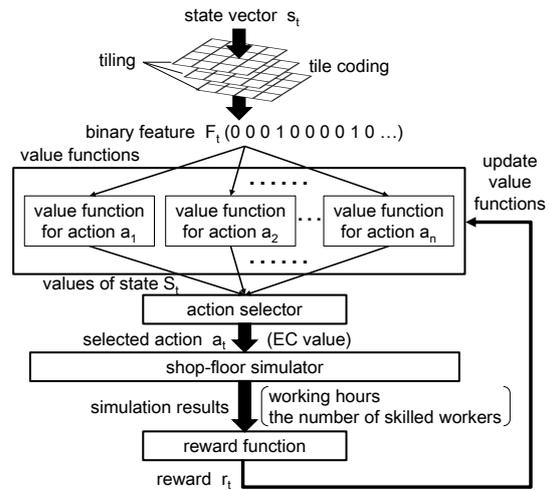


図 2. 強化学習を用いた EC 決定システム

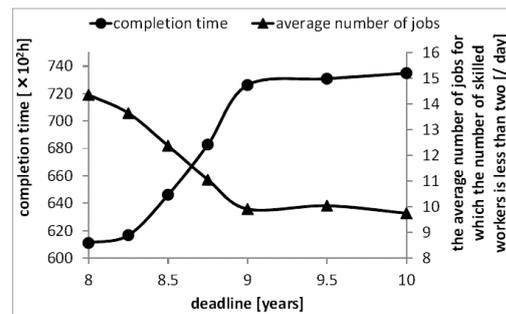


図 3. 納期別(横軸)のスケジューリング結果(左軸: 作業完了時間, 右軸: 技能不足ジョブ数)

(3)本研究で対象とする大型機械のメンテナンス現場は、大規模な生産システムと同様、離散事象システムと連続システムが混在した複雑なシステムであり、詳細なモデル化を行うことは困難であることが多い。そこで本研究では、代表者らが提案している離散・連続混合システムのモデリング・シミュレーション手法である場面遷移ネット(scene transition nets, STN)を用いて、大型機械・大規模設備のメンテナンス作業現場のモデリン

グ・シミュレーションを行う手法を提案する。

STNは、図4上に示すようにアクタ(actor), シーン(scene), トランジション(transition), アーク(arc)で構成される。アクタは状態変数(アクタ変数という)を保持し、シーンに記述されたダイナミクスに従って自らの状態変数を動的に変化させる。このアクタ変数が、出力側のトランジションに記述されている発火条件を満たしたとき、アクタは別のシーンに遷移する。つまり、アクタはアクタ変数を変化させながら、ネットワーク内を移動することになる。ユーザーはシミュレーションを実行し、各アクタの場面遷移の様子を観察することで離散事象システムの解析、またアクタ変数の時間的推移を観察することにより連続変数システムの解析を同時に行なうことが可能となる。

ユーザーは上記の要素を組合せてネットワークを構築後、シミュレーションを実行する。シミュレーションでは、各アクタの場面遷移の様子を観察することで離散事象システムの解析、またアクタ変数の時間的推移を観察することで連続変数システムの解析が同時に行えることになる。研究代表者らは、容易にSTNのモデリング及びシミュレーションを行えるGUIツールとして、STN GUI Simulator(図4下)を開発しており、生産システムやサービスシステムのシミュレーションを行っている。

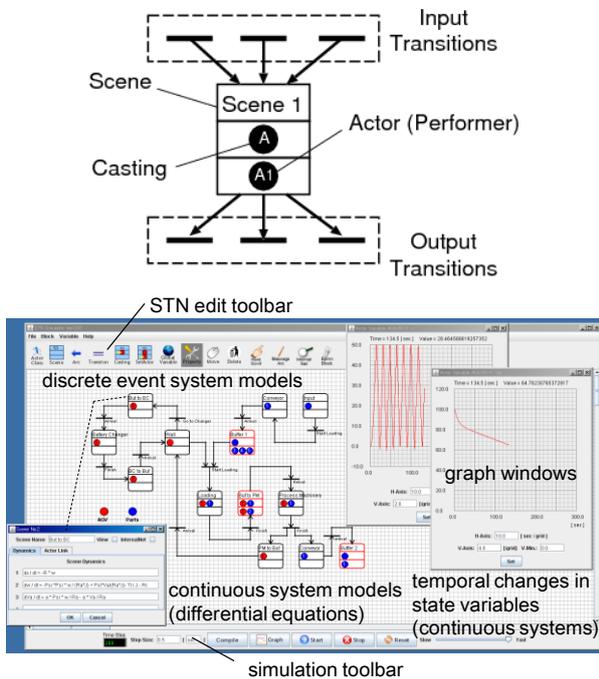


図4. 場面遷移ネット(STN)の構成要素(上)とSTN GUI Simulator(下)

しかし、大規模・複雑なシステムは、異なる目的・視点に基づいて設計された複数のシステムの組み合わせで構成されている。このようなシステムのSTNモデルを構築するには、個々のサブシステムを、それぞれ独立した視点からエンビジョニング(envisoning)(人

間)が物理システムを理解する際に、頭の中でシステムの定性的な挙動を思い浮かべることという過程によりサブモデルとしてモデル化し、一つの大規模システムをそれらのサブシステムの組み合わせとして表現する、「マルチアスペクトモデリング」が有効であることが既存研究によって示されている。

しかし、STNを用いてマルチアスペクトモデリングを行う場合、必然的に複数のSTNのサブモデルが構築されるため、必然的に同一のアクタが複数のサブモデル内に存在することになる。あるサブモデル内でのアクタの挙動は、他のサブモデル内のアクタの挙動に影響を及ぼす場合がある。しかし、従来のSTNの枠組みは、異なる(アークで接続されていない)STN間でアクタ変数の値等の情報のやりとりを行うことが不可能であったため、サブシステム間の相互作用を表現することは困難であった。

そこで本研究では、図5に示すように、複数のアクタ間でアクタ変数を共有するという概念をSTNに導入することにより、複数のSTN間の相互作用を表現することを可能とする手法を提案した。これにより、大規模・複雑なシステムを、さまざまな視点で構築された複数のサブモデルの組み合わせとして表現することが可能となった。本研究成果は、5章に記されている雑誌論文②として2013年に論文誌に掲載された。

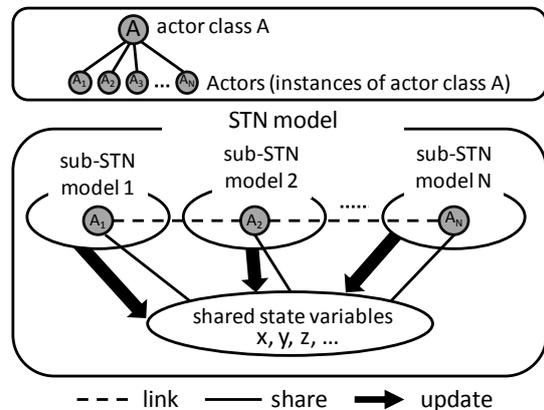


図5. STNを用いたマルチアスペクトモデリングの概念図

(4) 本研究では、(1)で定義した大規模メンテナンス現場を、STNを用いて離散・連続混合モデルとしてモデル化し、スケジューリングを支援するためのシミュレーション環境を構築することが目標の一つである。本研究では、その足がかりとして、作業者が行う作業の遷移を離散事象システムとして、作業者の習熟・忘却曲線を連続システムとして簡易的なモデル化を行い、動作を検証した。

(3)の成果であるアクタ変数の共有により、STNでは「習熟・忘却曲線のモデル」「作業プロセスのモデル」等のシステムの要素を独立して構築し、統合する、マルチアスペクトモデリングが可能である。ここでは、STNを

用いて習熟・忘却曲線の概念を導入した作業現場のモデル化を行うことが可能であることを検証することを目的とし、簡易的な作業プロセスで構成される作業現場をモデル化の対象とした。

検証では、作業対象となる機械1台のメンテナンスに要するジョブの数は5とし、作業員数は2名とした。機械の総数は100とし、各作業員はあらかじめ決定されたスケジュールに従い、担当するジョブのみを繰り返し実行することとした。作業プロセスのモデルは、作業員ごとに独立して構築した。本モデルは、それぞれのジョブを作業中であるシーン(Job1~Job5)と、待ち状態のシーン(Wait)で構成されている。作業員はスケジュールに従い、シーン Job1~Job5 とシーン Wait の間で状態遷移を繰り返す。各ジョブの作業時間(各ジョブのシーンに滞在する時間)は、後述する習熟・忘却曲線のモデルから算出された作業時間に従う。スケジュールにないジョブ(担当しないジョブ)のシーンには遷移しない。機械1台分の担当ジョブが全て完了したとき、次の機械のメンテナンスに要するジョブをスケジュールに従い、実行を繰り返す。

習熟・忘却曲線は、作業員およびジョブごとにそれぞれ独立したモデルを構築した。例えば、作業員が2名、ジョブの数が5である場合、 $2 \times 5 = 10$ のモデルを構築することになる。各作業員は、各ジョブに対して「定期的に行っている(習熟中)」であるか「一定期間以上実行していない(忘却中)」の二通りの状態をとり、前者の状態では習熟曲線、後者の状態では忘却曲線に従い、該当ジョブの作業時間が時系列で増減する。作業員のシーンは Learning と Forgetting の2つを設定し、前者には習熟曲線の関数、後者には忘却曲線の関数をそれぞれ記述した。

構築した作業員・ジョブごとの STN サブモデルを統合し、シミュレーションを行い、動作検証を行った。STN GUI simulator では、各時刻の作業員の状態を、離散事象システムとしてアニメーションによって視覚的に観測が可能である。これにより、特にモデル化対象が複雑なシステムの場合、デッドロック等のシステムの不具合や、システムの効率性を容易にチェックすることが可能となる。また、各シーンに数式を用いて記述された連続システムの挙動を、グラフを通してリアルタイムに観測することが可能である。ここでは、各ジョブの初回の作業時間を100[h]、習熟係数を0.1とした。また、作業員は100台の機械のメンテナンスを行うが、あるジョブを機械ごとに連続して担当した場合は習熟中、担当しなかった場合は忘却中に状態が切り替わることとして、シミュレーションを行った。

図6は、ある作業員が100台全ての機械において、特定のジョブを全て担当した場合の作業時間の変化を表している。グラフの横軸はメンテナンス現場に流れた機械の累積台数、縦軸はジョブの作業時間である。この場

合、ジョブの作業時間は習熟曲線に従い、減少を続ける。

一方、図7は1台目の機械から40台目までは連続してあるジョブを担当し、41台目から80台目までは担当せず、81台目以降は再びそのジョブを連続して担当した場合の作業時間の変化を表している。このように、スケジュールに応じた各作業員および各ジョブの作業時間の変化を、リアルタイムに観測することが可能となることが確認された。

Working hours [h]

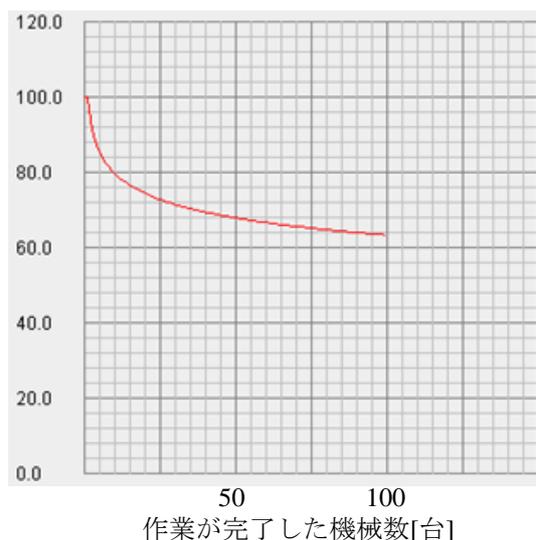


図6 定期的に行作業を担当した場合の作業時間の変化(学習のみ、忘却なし)

Working hours [h]

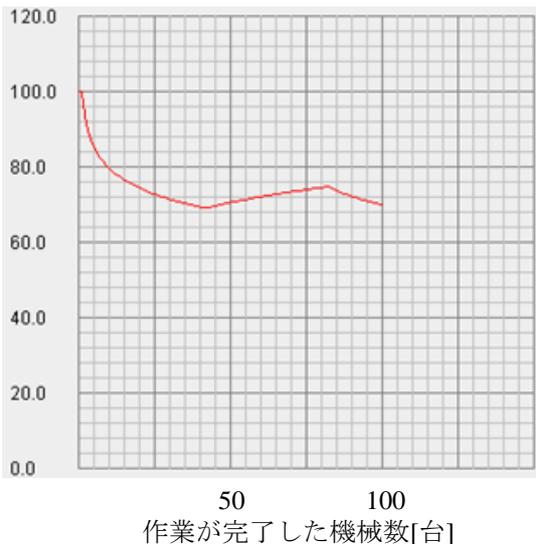


図7 忘却を伴う場合の作業時間の変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① T. Tateyama, T. Tateno and S. Kawata: A Scheduling Support System for Large-scale Facilities Using Reinforcement Learning in Consideration of Skill Educations and Working Conditions, *Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing (JAMDSM) (Special Issue on Advanced Production Scheduling)*, 掲載決定, 2014.
- ② 舘山武史, 御子柴怜志, 渡辺健太郎, 千葉龍介, 下村芳樹, 川田誠一: 場面遷移ネットに基づくサービスのマルチアスペクトモデリング手法. *日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.798, pp.p.418-428, 2013.*

[学会発表] (計 9 件)

- ① 舘山武史: 場面遷移ネットと機械学習を用いた離散・連続混合システムのシミュレーションと最適化, 平成 26 年度電気学会 C 部門大会で発表予定, 2014.
- ② 舘山武史: 場面遷移ネットを用いた大規模システムのシミュレーションと最適化, *電気学会研究会資料, Vol.ST-14-009 ~011・013~017, pp.5-10, 2014.*
- ③ 舘山武史, 舘野寿丈, 川田誠一: 離散・連続混合システムモデルを用いた、技能教育を考慮した大規模施設作業のスケジューリング支援システム, *電気学会研究会資料, ST-13, Vol.116-124, pp.1-6, 2013.*
- ④ 舘山武史, 舘野寿丈, 川田誠一: 大規模施設の現場状況と作業技能・教育を考慮した動的スケジューリング支援システム, 第 23 回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集 (CD-ROM), 2013.
- ⑤ 舘山武史, 舘野寿丈, 川田誠一: 技能教育と多種多様な現場の状況変動を考慮した, 機械学習を用いた大規模施設作業スケジューリング支援システム, *電気学会研究会資料, ST-13, Vol.018-028, pp.13-18, 2013.*
- ⑥ T. Tateyama, K. Kimita, K. Watanabe, R. Chiba, Y. Shimomura and S. Kawata: A Service Flow Simulation Method using Multi-aspect Scene Transition Nets (STNs) Modeling. In *Proceedings of CIRP, IPS2 Conference 2012, pp. 297-302, CIRP, Tokyo, Japan, 2012.*
- ⑦ T. Tateyama, S. Mikoshiha, K. Kimita, K. Watanabe, R. Chiba, Y. Shimomura and S. Kawata: A Multi-aspect Modeling Method for Service Flow Simulation Using Scene Transition Nets (STNs). In *Proceedings of the 2012 International Design*

Engineering Technical Conference (IDETC2012), CD-ROM, The American Society for Mechanical Engineering (ASME), Chicago, U.S.A., 2012.

- ⑧ 舘山武史, 舘野寿丈, 川田誠一: 技能教育と現場の状況変動を考慮した, 強化学習法を用いたスケジューリング支援システム, *電気学会研究会資料, ST-12, Vol.11-20, pp.1-6, 2012.*
- ⑨ 舘山武史, 舘野寿丈, 川田誠一: 現場作業者の技能教育と現場の状況変動を考慮した動的スケジューリング支援システム, 平成 24 年電気学会電子・情報・システム部門大会, CD-ROM, 2012.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

舘山 武史 (TATEYAMA, Takeshi)
愛知工科大学・工学部電子制御ロボット
工学科・准教授
研究者番号: 70336527