

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)（特設分野研究）

研究期間：2017～2021

課題番号：17KT0044

研究課題名（和文）分業の創発とそれを活用した人工物システムの持続可能性向上の追求

研究課題名（英文）Improving sustainability, flexibility, and robustness of artifactitious systems using emergence of divisional cooperation

研究代表者

菅原 俊治（Sugawara, Toshiharu）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70396133

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、自律的に判断をする複数のエージェント（自走ロボットなど）から構成されるマルチエージェントシステムにおいて、システムの持続可能性や頑健性を維持するために必須な、取替・更新・定期点検などで停止したときに発生する、一時的な効率・性能低下を緩和するために、エージェント達が自らのタスクを委託し合う交渉手法と、全体の効率を上げるための自律的な組織化・分業化を達成する学習法を追求した。成果は、当該分野でのトップレベルの国際会議で採択されるなど、学術的な評価を得ているものと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

少子化問題や危険箇所での作業など、人間の代理として作業する機械（ロボット等）が期待されている。特に、広大な範囲や複雑な作業が必要な時には、複数のロボットなどの協力が不可欠である。エージェントは、これらの機械を制御するソフトウェアであり、中心的な存在である。本研究では、これらの知的なエージェントが、学習を通じて自ら担当する作業を決定する分業化により全体の効率を上げると共に、更新や定期点検などが予定されている場合には、やはり自律的な交渉を通じて協力的に仕事を補完・委託し合い、その効率低下を最小限に抑える手法を提案している。

研究成果の概要（英文）：Recent developments in computer/AI and machine technology have led to promising applications of multi-agent systems consisting of multiple intelligent agents (e.g., self-driving robots) that make decisions autonomously and cooperate/coordinate with each other. Because agents are often software programs running on computers and/or controlling machines, their replacement, renewal, and periodic inspections are mandatory to maintain the sustainability and robustness of the system. However, there is a temporary but significant loss of performance that occurs when they are stopped for these purposes. To mitigate this, we proposed a negotiation method in which agents delegate tasks, especially important ones, to others. We also pursued a learning method that builds organization and division of labor among agents in a bottom-up manner to increase overall efficiency. We believe that our results have received academic recognition, including presentations at top-level conferences in this field.

研究分野：マルチエージェントシステム

キーワード：マルチエージェントシステム 持続可能性 分業 強化学習 交渉 自律分散システム

## 1. 研究開始当初の背景

情報通信技術、センサ・ロボット等のデバイス・機械技術の発展により、実世界をモニタシ、人間の活動の補助、安全安心の実現をめざしたシステムが導入され始め、今後も多くの応用が期待されている。たとえば IoT (Internet of Things) のビジョンのように、実世界の広大な空間とそこで発生する多数の現象やイベントをカバーし、それに関する大量のデータを実時間で処理するには、多数の計算機や制御プログラムを連携・協調させる技術が重要になる。さらに、このような人間社会に融合したシステムには、柔軟性のほか、故障とシステム更新を想定した頑健性と持続可能性を実現する技術が必須となる。

システムの自律的連携の学術的研究は、人工知能(AI)の分野では、ソフト・ハードウェアをエージェントとモデル化し、それらの分業と協調による効率化として提案されてきた。既存研究では、担当作業・範囲の分割は既知・自明としている。実環境では、適切な分割・分業は、エージェントの能力と相互作用、環境の特徴などに依存するが、それらすべてを予め反映することは困難である。さらに、環境や作業内容の変化、エージェントの故障、更新・追加もありうる。特に持続可能性の向上には、エージェントの故障時には他者がこれを補い、一方システムの一部が技術革新により高機能化されたときにはそれを十分に活用する自律的分業、個々のエージェントよりはむしろ全体として効率化と相互補完を実現する方法論が必要である。しかし、分業を自律的に創発させ、その最適化やチーム組織化の研究は無い。また、複数の構成要素からなる「人工物システム」の持続可能性を視野に入れた研究も見られない。

一方で、エージェントは、ハードウェアの制御ソフトウェアや電子的にサービスを提供するプログラムである。そのため、システムとしても持続的に機能を発揮するには、ハードウェア・ソフトウェアにかかわらずそれらを作動させる機器の故障、定期点検、取替更新による一時的な停止は不可避である。この際に、継続的に動作させることはもとより、停止による機能低下を最小限に押さえることが必要である。特に、システムの機能の停止や変動を最小限に抑えながらシステムの入替えや更新を効果的に実現する手法が重要と考える。

## 2. 研究の目的

将来の実用システムは、各種の変化に柔軟かつ自律的に対応し、組織(グループ)として最大限の能力を引き出すべきである。我々はこれまで巡回探索・継続的イベント監視を例題として協調作業の仕組みを提案してきたが、そこでエージェントによる分業の部分的発現を実現し、高い効率化への着想を得た。本提案では、その課題を一般化しながら分業の仕組みを解明し、これを利用したシステムの持続可能性の向上を狙う。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の内容で研究を進めた。

### (1) 適切な分業を創発させるアルゴリズムの考案と作業の効率化(分業の創発)

本提案では、エージェントの協調的な移動活動を重み付きグラフ上のマルチエージェント(協調)連続巡回問題として一般的なモデルで定式化し、その課題における分業の創発に取り組んだ。ここで分業の創発とは、(a) エージェント自らの能力に応じて分業と作業分担を同定(分業の発現)させ、(b) そこで適切な作業戦略を学習させる(分業行動戦略学習)ことであり、その結果、作業の公平性と効率性を高める。「分業の創発」と既存の「分業」研究との違いは、作業内容の区分け(分業の単位)も外部から与えずに自律的に決定させることである。一般に区分けの方法は、環境やエージェントの能力やサイズと作業負荷のバランスに依存する。ここではバランスのとれた分業体制を自律的に構成することを目指した。

## (2) チームの再構成による公平化と機能追求（チーム再構成）

これまでの知見から、分業の過程で作業の分割と分担内容に応じたエージェントのチームが自然に構成できるとの示唆を得たが、その構成は偶発的な要因もあり、最適とはならない。そこで、能力に応じてメンバを交換し、多様多数な要求タスクをシステム全体で公平で適切な分担を実現するための組織構造とその再編を促す交渉プロトコルを実現する。これを通して、全体として負荷のバランスをとり、同時に不要な移動を避けるために、適切なエージェント間でタスクの一部を交換することを自律的に実現し、個別の効率よりはむしろ全体効率を最大限に向上させる分業体制を達成することを目的とする。

## (3) 環境の変化への戦略的・効率的適応の実現

持続可能システムの実現には、故障あるいは老朽化・陳腐化したエージェントを戦略的かつ漸次的に交換して最新のものへと変化させ、その過程でも適応しながらチームの再編、適切な作業分割と分業等を再構成する必要がある。そのため、上記の交渉を利用し、停止するエージェントが環境内で重要と自ら判断したタスクを、他のエージェントに委譲し、また、その過程あるいは停止後の変化を認知して、残りのエージェントが全体をカバーするような手法を提案し、変化への適応と、システム持続性の確保にチャレンジする。

## 4．研究成果

### 4.1 平成 29 年度

以下、年次ごとに成果を報告する。

初年度である平成29年度では、「適切な分業を創発させるアルゴリズムの考案と作業の効率化」に焦点をあて、分業創発に関するアルゴリズムと評価について議論してきた。さらに、分業創発において省エネルギーを目指した行動戦略と、グラフを用いた巡回問題の定式化と、クラスタリング手法を用いた一般化手法を試みた。

研究計画と照らし合わせると、当該年度計画では、マルチエージェント（協調）連続巡回問題として一般化し、その課題における分業の創発に着手することであった。ここで分業の創発とは、(a) エージェント自らの能力に応じて分業と作業分担を同定（分業の発現）し、(b) そこで適切な作業戦略を学習する（分業行動戦略学習）ことであり、その結果、作業の公平性と効率性を高めることとしていた。

これに対して、マルチエージェント連続巡回問題としての問題の定式化を行い、分業を効果的に実現する交渉プロトコルについて研究を進め、評価をおこなった。この結果、提案プロトコルが分業を適切に切り分け、全体の効率向上が可能であることが示せた。また、研究計画には無い課題として、本研究期間中に、省エネルギーを中心とした分業体制と行動に関する研究の着手、ならびにグラフのノードに重み（巡回頻度に相当する）をつけ、それに合わせて巡回ノードのグループ化とグループ内での経路を生成する問題として抽象化し、その準最適解を求めるアルゴリズムを提案した。

### 4.2 平成 30 年度

平成 29 年度より着手した「適切な分業を創発させるアルゴリズムの考案と作業の効率化」を進めた。特に本年度では「分業行動戦略学習」の一部として、自らの行動と類似行動を学習したエージェントを同定する試みを開始した。これは定期的な停止を実現するための布石と考える。また次の研究項目である、「チーム構造の再構成による公平化と機能追求」も開始した。具体的には、簡単な交渉による分業の明確化・効率化を実現した。これらの初期結果をまとめ、抽象化したマルチエージェント巡回問題の成果として投稿し、採録された。同時に、分業の他の方法

でもある担当領域の分割を決めた後に行動する手法についても着手した。

研究計画と照らし合わせると、当該年度は、昨年度から着手した「分業の創発」と「分業行動戦略学習」についてさらに詳細な実験を加えること、「チーム構造の再構成による公平化と機能追求」に取り組み始めることであった。昨年度確認した「分業の創発」に、さらに「分業行動戦略学習」について新たな試みを加えた。前述したように分業した後に類似行動戦略をとる仲間を同定する手法を提案した。具体的には、シンプルな交渉プロトコルにより、分業をさらに明確化・専門化することに成功した。さらに近接したタイミングで通信ができるという性質を利用し、空間的かつ時間軸方向にも類似行動する他エージェントの推定手法を提案した。ここでは、分担範囲を先に決めて行動するというアプローチを取った。その結果、常に通信可能な場合と比べて遜色はなく、さらに境界に重点領域を配置すると、相互補完により効率が向上することが新たに分かった。この過程で、時間的位相は異なるが、空間的には類似行動するエージェントの存在もあり、これが相互に補完することも分かった。これは分業の質を上げるために必要であることも新たに判明した。これに付随して研究の重要性から着手したテーマとして、通信が近接条件でのみ可能な場合の分業に与える影響を調査した。また、計画では述べていないが、エージェントの不均一性を考慮した分業、環境の形状によってはこれまでの手法が適用できないこともあり、これを考慮すべきであると判断し、その拡張に着手した。

#### 4.3 平成 31 (令和 1) 年度

令和1年度では、一昨年度から案件であった、持続可能なシステムとするための前段階として、要求条件を破らない範囲でエージェントが自ら行動を抑制する（将来的には不要なエージェントは停止させ、不要なエネルギーを削減する）手法を提案した。また、継続的運用に必要な定期的メンテナンスなどで抜けたエージェントの作業の補完はできるが、その際に発生する一時的な効率低下を低減する手法に着手し、ある程度の効果を発揮する手法を提案した。これらの2手法は、持続可能性を向上させるために、今後統合する。他方、予め領域分割を行って分業する手法においても、分割形状を整え、効率低下を抑える手法を提案した。

計画では本年度から来年度にかけて、(1) 変化への効率的適応、つまり故障などの突発的なチームの変化や環境の変化に柔軟に対応する手法を提案し、それを評価・確認すること、(2) 戦略的システム持続可能性の確保、としていた。(2)は、(1)と異なり、ハードウェア等の取替更新の時期は既知とできるため、急激な作業効率低下を防ぎながらの移行を意図している。

このために昨年度確認した「チーム構造の再構成による公平化と機能追求」の公平化を推進すると共に、(2)の前段階の研究と位置づけられる行動と休止（充電等のため）のサイクル長を自律的に学習する手法を導入した。この発展として、要求条件を満たす範囲内で過度のエネルギー消費を抑えるために、エージェントが行動を自己評価し、要求を満たすと判断できれば停止か充電基地へ帰還をとる学習手法を提案した。さらに、定期メンテナンスやソフトウェア・ハードウェアの取替・更新を想定した計画停止を、他のエージェントに作業を委託して作業を委譲する交渉プロトコルに追加した。まだ実験段階ではあるが、これにより一部のエージェント（ロボット）の停止による効率低下のギャップを縮小できた。また本研究は、上記のエネルギーを抑える学習とともに、不要なエージェントの停止（あるいは環境の変化に対する予備）を実現し、システムの持続性とエネルギー削減行動を向上させる予定である。

別のアプローチとして、負荷を公平とするために領域を自律的に分割・調整する手法を提案してきたが、この課題として個別のインタラクションで分割境界を決めるため、分割した形状が分断された形になり、さらに時間とともに細分化し効率が低下するという課題があった。ここでは、各エージェントが自らの担当領域の形状を把握しながらその形状を整えるとともに、効率面から不利となる領域を他のエージェントに委譲する手法も提案している。

なお本研究課題に関する成果について国際会議 PAAMS2019 で招待講演を実施した。

#### 4.4 令和2年度および令和3年度（最終年度）

本来は令和2年度が最終年度の予定であったが、COVID-19の緊急事態宣言による規制や出校停止などの活動抑制、さらに半導体不足による納品遅延などがあり、令和3年度まで延長し、研究を遂行した。

令和2年度に、前年に継続して、継続的運用に必要な定期的メンテナンスなどで抜けたエージェントによる一時的だが大きな効率低下を和らげる手法の提案内容を高度化し、また実験によりその効果を測定した。また、「予め領域分割を行って分業する手法」においてもこれを拡張し、分割形状をなるべく連結とすることを、エージェントの自律的な領域獲得による領域分断を解消しながら全体の効率を維持する手法を提案した。この結果、前年度提案した意図的な計画停止手法の高度化によるさらなる効率化の実現、省エネルギーに向けたエージェントの行動に学習を組み合わせる手法、領域分割手法において環境の変化や障害物の影響などの調査についてはほぼ計画通りに進めた。

令和3年度については、COVID-19の影響で遅延した内容に取り組んだ。まず昨年を実現した継続的運用に必要な定期的メンテナンスなどで抜けたエージェントによる一時的だが大きな効率低下を緩和する交渉手法を向上させた。具体的には、部分的エージェントの停止期間中の補完行動はできたが、準備期間中に効率が低下する欠点があった。今期はこれを改善し、準備期間の短縮とその限界を調査した。また当初計画は無かったが、同様な動作を深層強化学習での可能性も合わせて試みた。前報告のようにエージェントの自律性から作業しないのが適切と学習したり、特定の領域を全エージェントが無視する学習があった。この解明に向け、学習エージェントが着目する情報が分かる工夫を提案した。しかし、これは今後研究すべき重要な課題になると考えている。

最後に、関連論文が電子情報通信学会の2021年度論文賞を受賞し、情報処理学会研究会の優秀論文賞も連続して受賞するなど、学術的な評価を受けていると判断している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計32件（うち査読付論文 32件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 18件）

1. 著者名 Tomoki Yamauchi, Yuki Miyashita and Toshiharu Sugawara	4. 巻 1
2. 論文標題 Standby-Based Deadlock Avoidance Method for Multi-Agent Pickup and Delivery Tasks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 21st International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2022)	6. 最初と最後の頁 1427-1435
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Sota Tsuiki, Keisuke Yoneda and Toshiharu Sugawara	4. 巻 1
2. 論文標題 Task Handover Negotiation Protocol for Planned Suspension Based on Estimated Chances of Negotiations in Multi-Agent Patrolling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 proceedings of the 14th International Conference on Agents and Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 83-93
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5220/00108969000003116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 吉田 直樹, 野田 五十樹, 菅原 俊治	4. 巻 36-5
2. 論文標題 深層強化学習を用いたライドシェアリングのサービスエリアの協調制御法の提案	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 人工知能学会論文誌	6. 最初と最後の頁 AG21-D_1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1527/tjsai.36-5_AG21-D	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Tomoki Yamauchi, Yuki Miyashita and Toshiharu Sugawara	4. 巻 LNCS 12802
2. 論文標題 Path and Action Planning in Non-Uniform Environments for Multi-Agent Pickup and Delivery Tasks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th European Conference on Multi-Agent Systems (EUMAS 2021)	6. 最初と最後の頁 37-54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-82254-5_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sota Tsuiki, Keisuke Yoneda, and Toshiharu Sugawara	4. 巻 未定
2. 論文標題 Reducing Efficiency Degradation Due to Scheduled Agent Suspensions by Task Handover in Multi-Agent Cooperative Patrol Problems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 34th International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32473/flairs.v34i1.128442	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Miyashita and Toshiharu Sugawara	4. 巻 51
2. 論文標題 Analysis of Coordinated Behavior Structures with Multi-Agent Deep Reinforcement Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Intelligence	6. 最初と最後の頁 1069-1085
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10489-020-01832-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Yoshida, Itsuki Noda and Toshiharu Sugawara	4. 巻 1
2. 論文標題 Distributed Service Area Control for Ride Sharing by Using Multi-Agent Deep Reinforcement Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 101-112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5220/0010310901010112	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katsuya Hattori and Toshiharu Sugawara	4. 巻 1
2. 論文標題 Effective Area Partitioning in a Multi-agent Patrolling Domain for Better Efficiency	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 281-288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5220/001024110281028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jiahao Peng and Toshiharu Sugawara	4. 巻 LNAI 12568
2. 論文標題 Policy Advisory Module for Exploration Hindrance Problem in Multi-agent Deep Reinforcement Learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 23rd International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA 2020)	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-69322-0_9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 山内 智貴, 井手 理菜, 菅原 俊治	4. 巻 J103-D
2. 論文標題 カメラ情報を用いた公平かつ効率的なエレベータ配車制御手法の提案と推定誤差の影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 776-787
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transinfj.2019SGP0006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xiaohui Zhu and Toshiharu Sugawara	4. 巻 IEEE Xplore
2. 論文標題 Meta-Reward Model Based on Trajectory Data with k-Nearest Neighbors Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 International Conference on Neural Networks (IJCNN 2020)	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IJCNN48605.2020.9207388	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Yoshida, Itsuki Noda and Toshiharu Sugawara	4. 巻 LNAI 12092
2. 論文標題 Multi-agent Service Area Adaptation for Ride-Sharing Using Deep Reinforcement Learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 18th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS 2020)	6. 最初と最後の頁 363-375
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-49778-1_29	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Elhadji Amadou Oury Diallo, Ayumi Sugiyama and Toshiharu Sugawara	4. 巻 396
2. 論文標題 Coordinated Behavior of Cooperative Agents Using Deep Reinforcement Learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neurocomputing	6. 最初と最後の頁 230-240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neucom.2018.08.094	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Elhadji Amadou Oury Diallo and Toshiharu Sugawara	4. 巻 採択済み
2. 論文標題 Multi-Agent Pattern Formation: a Distributed Model-Free Deep Reinforcement Learning Approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 International Conference on Neural Networks (IJCNN 2020)	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IJCNN48605.2020.9207657	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zean Zhu, Elhadji Amadou Oury Diallo, and Toshiharu Sugawara	4. 巻 -
2. 論文標題 Learning Efficient Coordination Strategy for Multi-Step Tasks in Multi-Agent Systems using Deep Reinforcement Learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence - Volume 1	6. 最初と最後の頁 287-294
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5220/0009160102870294	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Elhadji Amadou Oury Diallo, and Toshiharu Sugawara	4. 巻 -
2. 論文標題 Multi-Agent Pattern Formation with Deep Reinforcement Learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 34th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2020), (Student Abstract Track)	6. 最初と最後の頁 13779-13780
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1609/aaai.v34i10.7161	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ayumi Sugiyama, Lingying Wu and Toshiharu Sugawara	4. 巻 11978
2. 論文標題 Improvement of Multi-agent Continuous Cooperative Patrolling with Learning of Activity Length	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Agents and Artificial Intelligence (LNCS)	6. 最初と最後の頁 270-292
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-37494-5_14	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Miyashita and Toshiharu Sugawara	4. 巻 LNCS 11873
2. 論文標題 Coordination in Collaborative Work by Deep Reinforcement Learning with Various State Descriptions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 22nd International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems	6. 最初と最後の頁 550-558
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-33792-6_40	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Lingying Wu and Toshiharu Sugawara	4. 巻 LNCS 11873
2. 論文標題 Strategies for Energy-Aware Multi-Agent Continuous Cooperative Patrolling Problems subject to Requirements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 22nd International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems	6. 最初と最後の頁 585-593
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-33792-6_44	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Miyashita and Toshiharu Sugawara	4. 巻 LNCS 11727
2. 論文標題 Cooperation and Coordination Regimes by Deep Q-Learning in Multi-agent Task Executions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 28th International Conference on Artificial Neural Networks	6. 最初と最後の頁 541-554
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-30487-4_42	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lingying Wu, Ayumi Sugiyama and Toshiharu Sugawara	4. 巻 159
2. 論文標題 Energy-Efficient Strategies for Multi-Agent Continuous Cooperative Patrolling Problems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 23rd International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems ( Procedia Computer Science)	6. 最初と最後の頁 465-474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.procs.2019.09.201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ayumi Sugiyama, Vourchteang Sea and Toshiharu Sugawara	4. 巻 60-3
2. 論文標題 Emergence of Divisional Cooperation with Negotiation and Re-learning and Evaluation of Flexibility in Continuous Cooperative Patrol Problem	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Knowledge and Information Systems, An International Journal	6. 最初と最後の頁 1587-1609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10115-018-1285-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Miyashita and Toshiharu Sugawara	4. 巻 -
2. 論文標題 Coordination Structures Generated by Deep Reinforcement Learning in Distributed Task Executions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems	6. 最初と最後の頁 2129-2131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5555/3306127.3332033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ayumi Sugiyama, Lingying Wu, Toshiharu Sugawara	4. 巻 -
2. 論文標題 Learning of Activity Cycle Length Based on Battery Limitation in Multi-Agent Continuous Cooperative Patrol Problems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 62 ~ 71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5220/0007567400620071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Diallo Elhadji Amadou Oury, Sugawara Toshiharu	4. 巻 LNAI 11224
2. 論文標題 Learning Strategic Group Formation for Coordinated Behavior in Adversarial Multi-Agent with Double DQN	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA 2018)	6. 最初と最後の頁 458 ~ 466
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-03098-8_30	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 宮下裕貴, 菅原俊治	4. 巻 -
2. 論文標題 Deep Q-Networkを用いたマルチエージェントの分散協調探索問題における分業の創発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 エージェント合同シンポジウム予稿集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 吉村 祐, 杉山 歩未, 菅原 俊治	4. 巻 11
2. 論文標題 通信制限のある複数エージェントの協調連続巡回問題における担当領域の重複とその抑制手法の提案	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌トランザクション:数理モデル化と応用	6. 最初と最後の頁 50 ~ 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sea Vourchteang, Sugiyama Ayumi, Sugawara Toshiharu	4. 巻 10848
2. 論文標題 Frequency-Based Multi-agent Patrolling Model and Its Area Partitioning Solution Method for Balanced Workload	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 15th International Conference on the Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research (Springer Lecture Note in Computer Science)	6. 最初と最後の頁 530 ~ 545
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-93031-2_38	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Elhadji Diallo, Ayumi Sugiyama and Toshiharu Sugawara	4. 巻 IEEE Xplore
2. 論文標題 Learning to Coordinate with Deep Reinforcement Learning in Doubles Pong Game	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications	6. 最初と最後の頁 14-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICMLA.2017.0-184	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masashi Hayano, Naoki Iijima and Toshiharu Sugawara	4. 巻 IEEE Xplore
2. 論文標題 Asynchronous Agent Teams for Collaborative Tasks Based on Bottom-Up Alliance Formation and Adaptive Behavioral Strategies	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of The 15th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing	6. 最初と最後の頁 589-596
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/DASC-PICom-DataCom-CyberSciTec.2017.105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 杉山歩未, Vourchteang Sea, 早野真史, 菅原俊治	4. 巻 -
2. 論文標題 継続協調巡回問題における分業創発と環境変化への追従性	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 エージェント合同シンポジウム予稿集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ayumi Sugiyama and Toshiharu Sugawara	4. 巻 LNCS 10349
2. 論文標題 Improvement of Robustness to Environmental Changes by Autonomous Divisional Cooperation in Multi-Agent Cooperative Patrol Problem	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 15th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems	6. 最初と最後の頁 259-271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-59930_21	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 吉田 直樹, 野田 五十樹, 菅原 俊治
2. 発表標題 マルチエージェント深層強化学習を用いたライドシェアのサービスエリア制御とスケーラビリティの確保
3. 学会等名 知能システム研究会、情報処理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立木 創太, 菅原 俊治
2. 発表標題 マルチエージェント協調巡回問題における交渉を通じた エージェントの計画停止の自律的な学習手法の提案
3. 学会等名 第34回人工知能学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田 直樹, 野田 五十樹, 菅原 俊治
2. 発表標題 分散/集中制御によるマルチエージェント深層強化学習を用いた ライドシェアのサービスエリア制御の比較
3. 学会等名 第34回人工知能学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山内 智貴, 宮下 裕貴, 菅原 俊治
2. 発表標題 山内 智貴, 宮下 裕貴, 菅原 俊治
3. 学会等名 第34回人工知能学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshiharu Sugawara
2. 発表標題 Coordination and cooperation for continuous and sustainable operations
3. 学会等名 18th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Lingying Wu, Ayumi Sugiyama, Toshiharu Sugawara
2. 発表標題 Strategies for Energy-Efficient Multi-Agent Continuous Patrolling Tasks
3. 学会等名 知能システム研究会、情報処理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩田 裕登, 杉山 歩未, 菅原 俊治
2. 発表標題 巡回問題における能力の異なる複数エージェントの自律的な行動決定手法
3. 学会等名 知能システム研究会、情報処理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉山歩未, Vourchteang Sea, 菅原 俊治
2. 発表標題 マルチエージェント継続協調巡回問題における位置情報を利用したふるまいの類似度推定
3. 学会等名 電子情報通信学会 人工知能と知識処理研究会技術研究報告
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 舟戸峻也, 早野真史, 飯嶋直輝, 菅原俊治
2. 発表標題 通信遅延がある環境における効率的なチーム編成手法の提案
3. 学会等名 情報処理学会 知能システム研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三浦 雄太郎, 鳥海不二夫, 菅原俊治
2. 発表標題 限界効用逓減の法則を考慮したSNSモデルによるレシピ共有SNSの再現のためのパラメータ推定
3. 学会等名 第15回ネットワーク生態学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉村 祐, 杉山歩未, 菅原俊治
2. 発表標題 領域分割を用いたマルチエージェントの巡回清掃問題における重複抑制手法の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会 人工知能と知識処理研究会技術研究報告
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉山 歩未, Sea Vourchteang, 早野 真史, 菅原 俊治
2. 発表標題 マルチエージェント継続協調巡回における分業の創発と変化に対する柔軟性の評価
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会全国大会予稿集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 湯徳 尊久, 杉山 歩未, 菅原 俊治
2. 発表標題 マルチエージェント探索問題における粗視化とフィルタリングの統合手法による領域分割について
3. 学会等名 情報処理学会全国大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	廣津 登志夫  (Hirotzu Toshio)  (10378268)	法政大学・情報科学部・教授   (32675)	
連携研究者	福田 健介  (Fukuda Kensuke)  (90435503)	国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・准教授   (62615)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------