様 式 Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９ （共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２６ 年　 ６ 月 １８ 日現在

機関番号：１２６１２
研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2011～2013
課題番号：２３３０００５８
研究課題名（和文）マルチエージェントプランニングにおける環境適応型動的連携形態変更機構の創出

研究課題名（英文）Proposal of adaptive coordination formation control mechanism for multiagent plannin g

研究代表者
栗原　聡（Kurihara, Satoshi）

電気通信大学・大学院情報システム学研究科・教授

研究者番号：３０３９７６５８

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　7,100,000円、（間接経費）　　2,130,000円

研究成果の概要（和文）：家庭向け自律ロボットや次世代電子秘書システム等などの自律システムが，生活環境に多数遍在する状況が訪れようとしている。この時，個々のシステムが「どの人にどのような働き掛けをどのように実行するのかを決定するプランニング」を行う必要があり、ここで重要となるのが，「個々のシステムがお互いに如何に連携してプランニングを行うか」という問題である。本研究では、各システムの処理能力や動的に変化する負荷、そしてシステム間で発生する競合問題等を考慮し、それぞれがサービスを一時停止せず常に最適なプランニングの実行を維持するための、状況に適応して動的に協調の連携形態を変化させる仕組みの創出と確立を目指す。

研究成果の概要（英文）：In this study we have studied adaptive multiagent planning formation change algori thm. Centralized type, direct coordination type, and indirect coordination type is typical formation. This time, we have mainly adopted multiagent based traffic control system as case study, and proposed multi ag ent based traffic light control framework for intelligent transport systems. For smooth traffic flow, real -time adaptive coordination of traffic lights is necessary, but many conventional approaches are of the ce ntralized control type and do not have this feature. Our multi agent based control framework combines both indirect and direct coordination. Reaction to dynamic traffic flow is attained by indirect coordination, and green-wave formation, which is a systematic traffic flow control strategy involving several traffic li ghts, is attained by direct coordination. We show the detailed mechanism of our framework and verify its e ffectiveness through comparative evaluation through simulation.

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：知能情報学

キーワード：マルチエージェント　プランニング　協調メカニズム　動的適応　交通制御　間接制御　連携形態　中央制御

１．研究開始当初の背景

携帯端末の処理能化向上や GPS の搭載、そして無線通信コストの低価格化による常時インターネット接続が可能となりつつあることで、位置と時刻に基づいて有用な情報を能動的にユーザに伝達する電子秘書システム等のサービスが稼働し始めている。また、高齢化や核家族化の加速により、家庭にて人の日常生活をサポートする自律ロボットや、家そのものをロボット化して人の振る舞いを見守り、住人の円滑な生活をサポートしようという研究も進んでいる。電子秘書システムの完成度の向上は、人がより的確な情報をより的確なタイミングにて獲得できることを実現する。また、ロボット等による日常生活のサポートの実現とその質の向上は、円滑な生活に加え、日常生活における安全安心を確保する意味でも重要である。一人暮らしの高齢者や、重大な事故の多くが家庭内にて発生している乳幼児等にとって、現在においてはカメラ等で常にその振る舞いを見守るレベルは実現されつつあるものの、振る舞いを常時見守ることに加え、事故の発生を未然に防止するための人への能動的な働き掛けを行う仕組みについては、現在においてはまだ確立されてはいない。そして、電子秘書システムにおいても自律ロボットにおいても、共通する重要な機能が、「それぞれのシステムが、どの人に対してどのような働き掛けをどのような手段にて実行するのか」を決定する仕組みであり、これはプランニングと呼ばれ、特に複数の自律システムが連携してプランニングを行う枠組みは「マルチエージェントプランニング」と呼ばれる。

現在運用が開始されている電子秘書システムでは、ユーザの位置と時刻に関連する行動パタン等に基づき有用な情報を提示するしくみが実現されているものの、どの状況においてどのような情報を提示するかは、事前の人手による設定が必要である。家庭向け自律ロボットにおいても、ハード面、即ち身体機能に対する開発は急速に進んでいるものの、サービスの提供においては予め設定された簡易な動作に留まっており、家をロボット化するシステムにおいても、そのコンセプトを紹介するための、事前に設定されたデモ的な動作が実現されている段階である。人の日常生活はある程度は習慣化されているとはいえ、常に何等かの変化があり、予想外の出来事の発生や普段と異なる振る舞いをするなど、起こり得るすべての事象に対するサポートを事前に設定することは非現実的である。そもそも、日常生活に密接に関連するシステムは、いわば社会生活におけるインフラであり、その導入や運用において人手による設定・調整を極限まで不要とすることが必須である。よって、日常生活での実用化を実現するためには、システムが自律的に状況を判断して能動的に人に対する働き掛けを行う仕組みを確立する必要がある。そして、個々の携帯端末やロボットがそれぞれプランニングを実行することを考えると、自身の計算能力と実行するプランニングの規模の大きさに依存して、個々がそれぞれプランニングを実行する形態が好ましい場合や、計算能力の高いサーバ等で一括してプランニングを行う形態が望ましい状況もある。また、サーバへの負荷が過度に集中した場合や端末とサーバ間での通信品質が劣化した場合には、一部のシステムにおいては端末でのプランニングを行う形態の方が好ましい場合など、個々のシステムがそれぞれ最適なプランニングを実行するために他のシステムと連携する形態は状況により異なる。更に、これら自律システムの導入が普及し日常生活の様々なところに遍在し、人のサポートを目的としてそれぞれが勝手にプランニングを行うことで、異なるシステムがそれぞれのプラン実行のために同一のデバイスの制御権の獲得を巡る競合問題も表面化する。例えば、介護ホーム等での利用を想定したロボット型電動車椅子のハードウェア開発が進んでいるが、個々の車椅子が高齢者の意思のまま最短経路にて勝手に移動すれば、狭い廊下での鉢合わせや、トイレ等の目的地に同時に到着することによる競合等が発生してしまうことから、ナビゲーションのための車椅子同志の連携が必要となる．また，社会システムにおける別の例としては，交通制御システムが考えられる．交通システムは運転者側と信号機側という２面性を持つ．運転者側は基本的に利己的な存在であり，自らの効率的な移動が目的である．これに対し，信号機側はエリア全体としての効率達成が目的である．このため，交通制御システム全体は，この２つの制御系による動的平衡状態をどのように維持するかに依存される．つまりは，それぞれのシステムでのプランニングシステムがお互いにどのように連携することで，効率的な平衡形を形成させせることができるか，ということになる．

２．研究の目的

上記研究背景に基づき，各システムが、自分の計算能力やプランニングの実行における動的に変化する負荷を考慮しつつ、他のシステムとの間で発生する競合問題を協調して解消し、しかも、実行中のプランニングを一時停止させることなく常に最適にプランニングを実行するために、他のシステムと連携してプランニングを行う枠組みを創出・確立する必要があり、これを本研究の目的とする。そして、連携の仕方においては、その最

適な連携形態が状況に応じて異なることから、動的に連携形態を変更できる仕組みが必要であり、加えて連携形態を変更させる過程では、個々のシステムが立案中のプランや実行中のプランの整合性を維持・保証できなければならない。

３．研究の方法

まずは，初年度において中央制御型プランナーと関節協調型プランナーの２種類の最も両極端な典型的プランナーの連携から着手することとした．そして，次年度において，初年度と異なる連携方法を，交通制御システムを例として展開し，最終年度においては，今後の研究展開を念頭に，様々なプランナーの連携を可能とする方法についての検討を開始した．

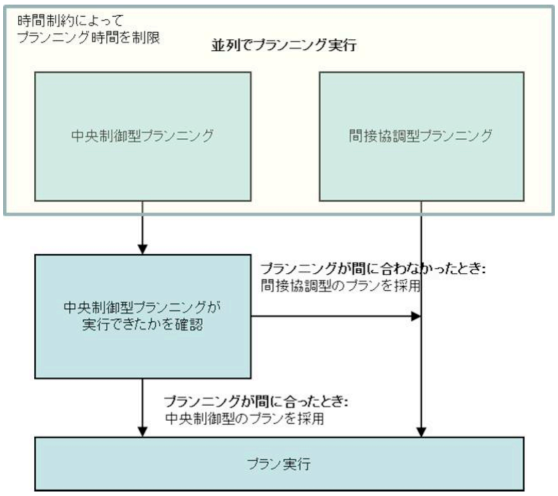

図１　連携方法の提案

４．研究成果

（１）初年度

中央制御型プランニング：既存のトップダウン的なプランニングの典型例が，環境情報をすべて把握した上で目的を達成させるために全体のプランニングを行う中央制御型のプランニングである．環境情報を踏まえた上で目的を達成するためのプランニングを行うことから作成されるプランの精度は高くなる．しかし，全てのプランニングを集中的に行うことから計算的な負荷が大きくなり，プランニング時間がかかってしまう．時間制約がある中で，プランの精度を生かしていくことが重要である．矛盾がなく合理的なプランを生成するために，各 Agent が生成したプランを一箇所に集約して協調を行う方法様々な方法が提案されている．例えば，個々の Agent が独立に生成したプランの実行において発生する競合を回避する方法として，まず STRIPS 形式により，各 Agent が独立にそれぞれの目標についてプランニングを完了する．そして生成された各 Agent のプランは，中央集権的なスケジューラに渡され，そこで個々のプランを解析することにより競合解消が行われる．この競合解消では，各 Agent のプラン間において二つの行為が並列実行可能か，いずれかが先行すれば実行可能かなどを逐一調べ，プラン全体が安全に実行されるように調整を行う．また，上記のような集中管理の方法のデメリットである計算量の多さをシンプルなルールベースにすることでアルゴリズムの完全性を維持しながら，速さも実現しようとした．しかし，シンプルなルールで完全性を保つために無駄な動きが非常に多いアルゴリズムであり，また静的な環境を対象としており，動的な環境には向かない方法であった．本研究ではこの手法を参考にして，エージェントに初期プランを独自に作成させ，それらのプランの競合を解消するアルゴリズムを中央制御型の MAS の方式として採用した．この方法は，完全性を持たない方法であるが動的な環境で用いることができるプランニングの速さを考慮して採用することとした．

間接協調型：既存のボトムアップ的なプランニングには個々エージェントが得られる局所的な情報から独立してプランニングを行い，共有メモリを用いるなどして間接的な方法を用いて協調行動を行う間接協調型のプランニングがある．分散したエージェントがそれぞれにプランニングを行うため，個々のエージェントにかかる負荷は少なくて済む一方で，情報を集中的に集めてプランニングを行う中央制御型に比べると，少ない局所的な情報でプランニングを実行しなければならないことからプランニングの精度は劣ってしまう．間接協調型の研究には，共有メモリを用いることでお互いのエージェントのプランニングと協調，プラン実行を独立して行うことを可能にし，プランニングの即応性を高めつつ，エージェント同士の協調を保持することを可能にした，例えば，エージェント同士の協調のために共有メモリ用いた手法が提案されている．直接メッセージを送るような方法よりもエージェント同士の独立

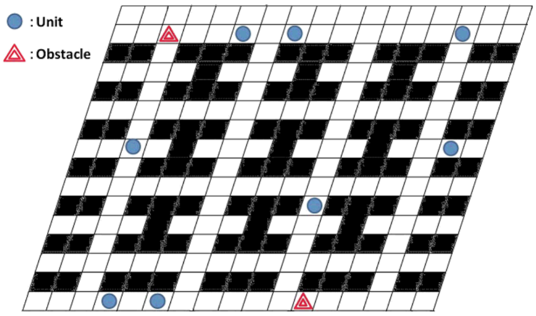

図２実装したシミュレータ

性を高めることができ，協調にかかる時間が短縮されプランニング時間を短くすることが可能になっている．本研究ではこの手法を参考にした間接協調型のマルチエージェントプランニングを採用した．

図 1 にアルゴリズムの流れを示す．中央制御型と間接協調型のプランニングを並行で実行させ，与えられた時間制約に従ってプランニングを終了する．中央制御型のプランニングが実行できたかどうかを確認する．確認の方法はいろいろあるが，今回の研究では次のプランニングが実行されるまでに作成されたプランを実行したとき，競合がないかを確認する方法を用いた．競合が確認されない場合は中央制御型のプランニングが実行できたとして，実行するプランとして採用する．競合が確認された場合，中央制御型のプランニングが間に合わず間接協調型で作成したプランを採用する．このアルゴリズムによって，エージェントの次の行動の安全は必ず保障されることになり，また中央制御型による精度の高いプランを可能な限り生かすことが可能になる．このアルゴリズムは連携させる協調方式を指定しないが，重要なことは選択した協調方式のプランニング時間である．プランニング時間はそれぞれの協調方式のアルゴリズムの計算量に依存するので，アルゴリズムの計算量を考慮して協調方式を選択することが重要である．

評価は図 2 に示すシミュレータにて実施した．その結果，図 3 に示すように，連携されることにより，環境の動的な変化に対する適用力の向上を確認することができた．

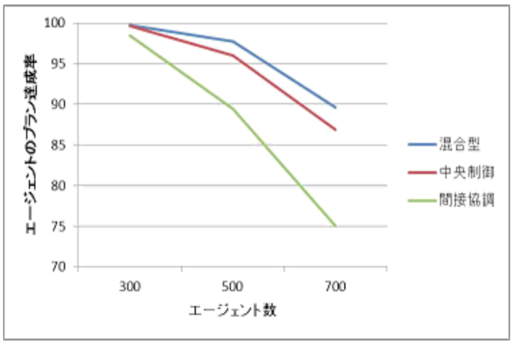

図 3 連携による効果

（2）次年度

次に，上記連携と異なる方法の展開として，冒頭にて述べた交通制御システムについて検討を行った．一般道路における渋滞の最大の原因は交差点での信号待ちであり，交差点の信号を交通量に応じていかに最適にコントロールするかが大きな課題である．現在使われている信号機制御システムには，パター

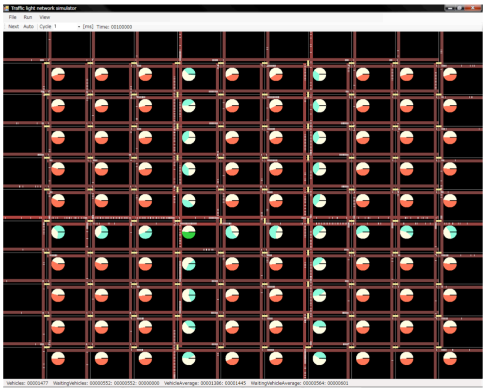

図 4 実装したシミュレータ

ン制御方式と，中央管理型の制御方式の二つがある．パターン制御方式は，事前の交通調査に基づき，交通状況に対応する複数の制御パターンを予め設定し，パラメータを何組か用意して，時間帯によって切り替える方法である．この方法では，日中や夜間などの，ある程度予測できる交通状況には対応できるが，交通事故など，突発的に 変化する交通状況には対応が難しい．中央管理型の制御方式は，個々の信号機が交通量を感知し，中央サーバが信号機の情報を制御する最適な制御パラメータを計算し，それぞれの信号 機に適応する方法である．この方法では，予期しない交通状況にも対応することができるが，中央サーバで全信号機の制御パラメータを計算するため，状況の変化に対して即応性が低くなるという問題がある．当然ながら，制御対処地域が広がると計算コストが増大するという問題もある． 以上の点から，我々は，各信号機に自律性を与え，分散して制御をおこなう方式を採用した． そして，信号機の制御においては， 1 サイクルにおける青信号の割合であるスプリット値の制御と，近隣の交差点との，一周期の開始時間のずれの値であるオフセット値の制御が重要であり，本研究では両者に対して最適な制御方法の確立を目

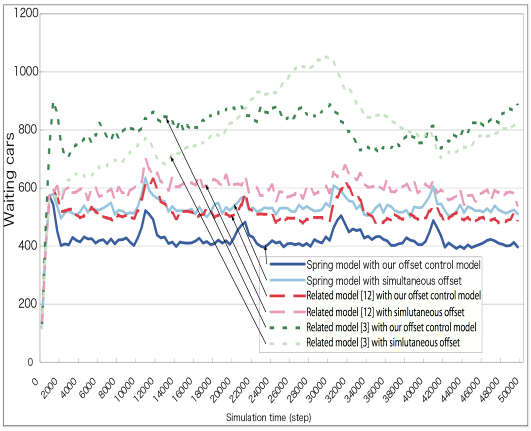

図 5 評価結果

指した．評価のため，図４に示すシミュレータを実装している．

スプリット値制御：信号機制御においても，個々の交差点にエージェントを配置させ,局所的な情報のみを 用いて自律的に制御パラメータを変化させる方法を提案した．ただし,本テーマにおいては，一つの交差点の信号機のスプリット値の比をバネモデルにてモデル化し、自身の交差点の東西方向の交通量と南北方向の交通量を比較し,交通量の差をばねのつり合い式に盛り込むことでスプリット値の調整を行う方法を提案した．

オフセット値制御：オフセット制御は通称「グリーンウェーブ型制御」とも呼ばれる．交通流の密度が高い道路において，隣接する信号機の青が開始される時間をお互いが調整することで，法定速度にて走行する場合に,その区間を赤信号に止まらずに走行できるようにする制御方法である．現在はどの区間をどのように連携させるかを経験的に手動にて決めており，動的に変化する渋滞状況に対応することができない．そこで，信号機に搭載された各エージェントが,自身が管理する交差点の状況や,隣接するエージェントとの通信から得られる情 報を用いて,互いに協調を行い,エージェントが自律的に制御パラメータを調整する手法の提案を行った．評価結果を図 5 に示す．横軸は時間であり，縦軸が渋滞に関連した車両数を示してある．青で示した提案手法が常にもっとも少ない数となっていることが確認できる．

（３）最終年度

そして，最終年度において，連携方法にお

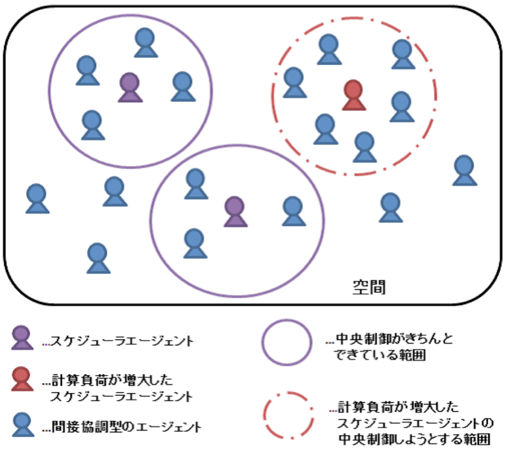

図６　影響力を考慮した連携

ける新たな方法についての検討を行った．これまでは，環境全体がいずれかのプランニングにて制御される方式であったが，実際には,様々なプランニング連携が混在することが想定される．そこで，図６に示すように各プランニング型に対して影響力を導入し，影響力に基づいた連携方法の提案を行うべく，現在研究を進めている段階となっている．

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計１２件）

[1] Koichi Moriyama, Satoshi Kurihara, and Masayuki Numao, Cooperation-Eliciting Prisoner's Dilemma Payoffs for Reinforcement Learning Agents, The 13th International Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp. 1619-1620, 2014. （査読有）

[2] Keisuke Ikeda, Yoshiyuki Okada, Fujio Toriumi, Takeshi Sakaki, Kazuhiro Kazama, Itsuki Noda, Kosuke Shinoda, Hirohiko Suwa, and Satoshi Kurihara, Agent-based Information Diffusion Model : Simulation Model for False Rumor Diffusion Process, The 6th International Workshop on Emergent Intelligence on Networked Agents, pp, 40-52, 2014. （査読有）

[3] Toshiharu Sugawara, Emergence of Conventions in Conflict Situations in Complex Agent Network Environments, The 13th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp. 1459-1460, 2014. （査読有）

[4] Junya Nakase, Koichi Moriyama, Kiyoshi Kiyokawa, Masayuki Numao, Mayumi Oyama, and Satoshi Kurihara, Effective awaking interaction learning system that uses vital sensing, IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), pp. 104-108, 2013. （査読有）

[5] Keisuke Yoneda, Chihiro Kato, and Toshiharu Sugawara, Autonomous Learning of Target Decision Strategies without Communications for Continuous Coordinated Cleaning Tasks, Proc. of 2013 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT-13), pp. 213-223, 2013. （査読有）

[6] Takashi Shirai, Yujiro Konaka, Junji Yano, Shigeki Nishimura, Koji Kagawa, Tetsuya Morita, Masayuki Numao, and Satoshi Kurihara, Multi-agent traffic light control framework based on direct and indirect coordination, 7th Int. Workshop on Agents in Traffic and Transportation, pp. 1-9, 2012.

（査読有）
[7] 清川 清，畠中理央，細田一史，岡田雅司，繁田浩功，石原靖哲，大下福仁，角川裕次，栗原 聡，森山甲一，オーエンス・ルイス:アンビエント環境制御を用いた知的オフィスチェアの提案，システム制御情報学会 システム/制御/情報，Vol. 56，No. 1，pp. 14-20，2012.（査読有）
[8] 白井嵩士，矢野純史，西村茂樹，香川浩司，森田哲郎，沼尾正行，栗原聡，マルチエージェントモデルによる信号機オフセット制御法の提案，人工知能学会論文誌，Vol.26，No. 2，pp.324-329，2011.（査読有）
[9] 松本光弘，岡野真一，森田哲郎，沼尾正行，栗原 聡，PCにおけるユーザ操作を可視化するタスク想起支援手法の提案，情報処理学会論文誌:数理モデル化と応用，Vol. 4，No. 3，pp. 35-48，2011.（査読有）
[10] Koichi Moriyama, Satoshi Kurihara, and Masayuki Numao , Evolving Subjective Utilities: Prisoner's Dilemma Game Examples , Proc. of AAMAS2011, pp. 233-240, 2011. （査読有）
[11] Toshiharu Sugawara , Emergence and Stability of Social Conventions in Conflict Situations , Proc. of IJCAI2011, pp. 16-22, 2011. （査読有）

〔学会発表〕（計１１件）
[1] 栗原 聡，多様性・関係からの知の創発~シンギュラリティに向かって~，第20回社会情報システム学シンポジウム(招待講演)，2014年02月12日~2014 年02月12日，立正大学
[2] Satoshi Kurihara, The Multi Agent Based Information Diffusion Model for False Rumor Diffusion Analysis, The 3rd Int. Workshop on Large Scale Network Analysis. In conjunction with WWW 2014(招待講演)，2014 年 04 月 08 日~2014 年04月08日，韓国，ソウル.
[3] 布施太章，諏訪博彦，栗原聡，環境の動的変化に応じて協調形態を柔軟に変化させるマルチエージェントプランニングの検討，情報処理学会知能システム研究会 Vol. 2014-ICS-173，No. 3，2014年01月23日~2014 年01月23日， NII.
[4] 池田圭祐，岡田佳之，榊剛史，鳥海不二夫，篠田孝祐，風間一洋，野田五十 樹，諏訪博彦，栗原聡，ABM に基づく情報拡散シミュレーション，情報処理学会知能システム研究会 Vol. 2013-ICS-173，No. 3，2013 年 11 月 12 日~2013 年 11 月 12 日，農工大.
[5] Satoshi Kurihara, False Rumor Diffusion Analysis based on The SIR-Extended Information Diffusion Model, International workshop on Perspective of Information Technology（招待 講演)，2013年05月27日，台湾，国立清華大学.
[6] 栗原 聡，インタラクションにおける情動系・無意識系の活用(招待講演)，第168 回 情報処理学会知能システム研究会，2012年10月24日，東京.
[7] Satoshi Kurihara, Human Information Mining as Netizen（招待講演)， IEEE International Workshop on Data Mining for Service (DMS2011)，2011 年 12 月 11日，バンクーバー（カナダ).

〔図書〕（計４件）
[1] 栗原 聡，福井健一（訳）、Ajith Abraham, Crina Grosan, Vitorino Ramos（著），群知能とデータマイニング，東京電機大学出版局，総ページ数:307ページ，2012.
[2] Satoshi Kurihara, Traffic-Congestion Forecasting Algorithm Based on Pheromone Communication Model（章分担）, Ant Colony Optimization - Techniques and Applications -, InTech, pp.163-175, 2012. （査読有）
[3] Satoshi Kurihara, Hiroshi Tamaki, Kenichi Fukui, and Masayuki Numao, Adaptive Sensor-Network Topology Estimating Algorithm Based on the ACO（章分担）, Ant Colony Optimization - Methods and Applications, Publisher: InTech, pp. 101-112, 2011. （査読有）

〔産業財産権〕
○出願状況（計０件）
○取得状況（計０件）

〔その他〕
ホームページ等
http://www.ni.is.uec.ac.jp/

６．研究組織
(1)研究代表者
栗原 聡（Kurihara Satoshi）
電気通信大学・大学院情報システム学研究科・教授
研究者番号：30397658

(2)研究分担者
菅原俊治（Sugawara Toshiharu）
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：70396133