

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25280116

研究課題名(和文) マルチエージェントシステムによる帰宅・通勤困難者のための路線網構築法

研究課題名(英文) Generation of Public Transportation Network for Commuter Stranded Problem with Multi-Agent System

研究代表者

間島 隆博 (Takahiro, Majima)

国立研究開発法人 海上技術安全研究所・運航・物流系・副系長

研究者番号：30392690

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：大規模災害に憂慮される帰宅困難者の輸送システムとして、路線網を自動構築する手法を研究した。

ネットワーク成長法により初期路線集合を生成し、1つの路線を1つのエージェントと見立てたマルチエージェントシステムにより路線網を構成する手法を開発した。本手法はベンチマーク問題で最良の解を出力することに成功した。さらに、首都圏を対象とした大規模な問題に対し、複数の輸送モード(バス、水上バス)が混在した路線網を実用的な計算時間で出力できることが確認できた。また、コミュニティ抽出法を応用した初期路線集合の生成法、ハブスポークネットワークのハブとなる停留所の最適位置を求める手法も開発し、その特性を把握した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a method to generate the transportation line network for the stranded commuters that is concerned in disasters.

In the developed method, initial set of transportation lines are generated by a network growing model and those lines evolve in the framework of the multi-agent system. The method successfully output the best solutions for a benchmark problem. Furthermore, it applied to the large scale problem for the stranded commuters considering the two transportation modes, bus line and waterbus line. It was found that the method can generate transportation line network for the large scale problem in practicable computation time.

In addition to the above developed method, a method applying community detection algorithm to generate initial set of lines and a method to find out the best position of a hub station in the hub-spoke network were also developed and their characteristics were investigated.

研究分野：シミュレーション、ネットワーク理論

キーワード：防災 帰宅困難者 交通システム 複雑ネットワーク コミュニティ抽出法 ネットワーク成長法

1. 研究開始当初の背景

首都圏における大規模災害で、帰宅困難者の問題が懸念されている。鉄道の途絶により、帰宅困難者数は数百万人規模となるため、一斉帰宅について危険性が指摘されてはいるが、いずれは帰宅しなければならない。また、運行停止期間が長引けば、「通勤」困難者にもなり得、代替輸送機関としてバスだけでなく船舶にも期待が寄せられている。

2. 研究の目的

本件では、帰宅困難者の輸送問題を路線網の構築問題としてとらえ、停留所間の移動需要を所与として、輸送会社、利用者の双方にとって効率的な路線網を自動構築するとともに、復旧・復興に伴い頻発する条件変化(停留所の廃止、新設、通路の閉塞、開通など)に対して容易に対応可能な手法を研究する。

路線網の構築は、停留所が少数でも組み合わせの爆発が発生する問題であり、古典的最適化手法では解析困難なため、ヒューリスティクス手法(理論ではなく、経験に基づく方法)が中心となっている。帰宅困難者輸送の場合、既存路線網が無い状況から即座に新たな路線網を出力することが求められ、さらに実用的な面では、復旧過程で生じる条件変化に容易に対応できる機能(修正案の出力)や、複数の輸送機関(バスや船)が混在する条件を扱える手法が望まれる。本件ではこれらの課題に応じた手法を研究する。

3. 研究の方法

(1) 路線網を踏まえた施設配置法

帰宅困難者問題の場合、停留所の位置は比較的自由度が高くなる可能性があり、特に、ハブスポークネットワークでは、ハブとなる停留所の位置は輸送性能を左右する要因となる。施設配置を決定する類似の問題として、シュタイナー問題、ウェーバー問題などが挙げられるが、本件で扱う路線を意識した複数の停留所を経由してハブと接続するというトポロジーには適合しない。本件では、距離や移動需要といった輸送に係る情報を用いた停留所の新たな配置法を、ネットワーク成長モデルを用いて研究する。

(2) 路線網構築問題のための MAS

1つの路線を1つのエージェントとしたマルチエージェントシステム(自律的に行動する複数のエージェントで構成されるシステム。以下、MAS)を適用する。各路線エージェント(以下、路線 Ag)は路線の延長や縮小、経路やバス台数の変更などを自ら行い、路線網の利用者を他の路線 Ag との間で奪いあって進化する。解となる路線網は、この進化過程で淘汰をまぬがれた路線 Ag の集合で構成される。提案者は、これをベンチマーク問題に応用して、最良の路線網の出力に成功した。しかし、均一な路線 Ag (定員、速度が一定)を前提としたため、大量輸送に不可欠なハブスポーク型ネットワーク(支線輸送で薄い需

要を集約し、大型あるいは高速機材に載せ換えて幹線輸送を行う。)を本質的に出力できない。本件では、路線 Ag が、機材の特性を変更する手法を導入し、ハブスポークのような効率的輸送網を自ら生み出すアルゴリズムを研究する。また、MAS では、異質なエージェントを組み込むことが容易であるため、複数の輸送機関が混在する条件を扱える。さらに、エージェントの削除や追加は、MAS が本質的に持つ機能であり、復旧過程に伴う条件変化に対し、柔軟な対応(不都合な路線を削除し、新たな路線を追加して進化過程に委ねる。)が可能となる。

(3) MAS のための初期路線集合の生成

本研究で研究する MAS では初期集合の依存性(初期路線 Ag 集合が解や計算時間に影響を与える)があるため、生成される路線 Ag を精査する必要がある。効率的な路線経路は需要が密に繋がる停留所(ノード)を結ぶことで得られるため、リンクが密に繋がるノード群をクラスター化するコミュニティ抽出法の応用が期待できる。従来研究では、効率的にコミュニティを見つけ出す様々なアルゴリズムが提案されているが、その指標は主にノードを結ぶリンクの有無のみを利用し、輸送問題への応用として不可欠な距離、需要といった重みを持つ情報が欠けている。本件では輸送問題に適合した新たな指標を導入し、効率的な路線 Ag の生成法を研究する。

4. 研究成果

(1) 路線網を踏まえた施設配置法

複雑ネットワークの研究は複雑ネットワークを生成するネットワーク成長モデルの研究とともに発展し、数多くのモデルが発表されている。ネットワーク成長モデルは時間進行とともにネットワークに新規ノードが追加され、あらかじめ規定したルールに従って、新規追加ノードの接続先ノードが既存ネットワーク内のノードの中から決定される。新規追加ノードの接続先ノードの選択にユークリッド空間上のノード間距離を指標として成長するモデルが提案され、現実の公共交通機関である地下鉄の路線網を再現できたことが報告されている。本稿はこのモデルを基礎として発展させ、初期生成路線の集合を形成している。本ネットワーク成長モデルを図 1,2 で説明する。

図 1 では目的地となるバス停や駅(以下、目的地ノード、図ではノード 0)を1つだけ選択し、そのバス停へ向かう必要があるバス停(接続元ノード、図では 0 以外のすべてのノード)を1ステップに1つだけ追加していく。その接続元ノードは目的地ノードに近い順番に選択する。(図では 1、2、3・・・の順番となり、図 1 は 3 ステップ目の状態を表している。)次に、接続元ノードのリンク先となる接続先ノードは、既にネットワークに接続されている全ノード(接続先ノード候補、図ではノード 0、1、2)の中から後述する評

価関数を用いて決定し、1つのリンクを生成して、これをバス路線とする。なお、接続先ノードから目的地ノードまでは、接続先ノードを終点とした既存の路線と同じルートをたどることとする。ただし、接続先ノードとの接続方法には図2のように2つの方法がある。

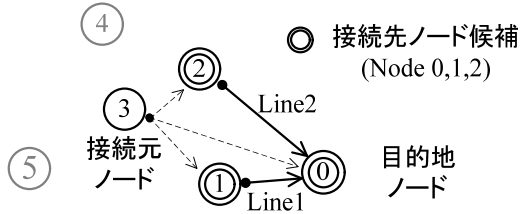


図1 路線網成長モデルの概要

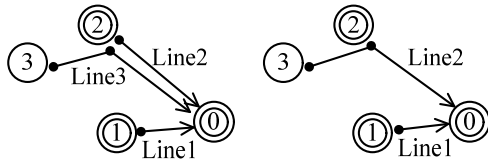


図2 路線網成長モデルの接続型式
(左図：追加型、右図：吸収型)

1つは追加型接続で接続先ノードから目的地ノードへ向かう既存路線には何ら影響を与えず、新たに路線を追加する形態であり、路線数が1増加する。もう一つは吸収型であり、接続先ノードから目的地ノードへ向かう既存路線と融合するため、路線数は増加しない。接続先ノードを決定する評価関数は次式を採用した。これは、路線網構築問題で数多く採用されており、バス台数と所要時間は路線網を評価する上で基本的な指標となるためである。

$$\min Z = Z_1 + Z_2 = \sum_{S_i} T_{S_i} D_{S_i} + w \sum_{L_k} B_{L_k} \quad (1)$$

ここで S_i は接続先ノード、 T_{S_i} はノード S_i を発地とする利用者の所要時間、 D_{S_i} はノード S_i で単位時間当たり発生する利用者の人数(需要)、 B_{L_k} は路線 L_k のバス台数、 w は重み付けの係数である。 Z_1 は所要時間の総和を意味し利用者のコストを、 Z_2 はバス運行会社のコストを意識したものであり、両者のバランスは係数 w で考慮できる。また、所要時間 T は移動時間 T_m と待ち時間 T_w に分離されて計算される。複数の路線が乗り入れるバス停での待ち時間は、以下の式で計算する。

$$T w_i = t_1 \left[\frac{1}{2} + \sum_{r=1}^{N-1} \frac{(-1)^r t_1^r}{(r+1)(r+2)} \right] \quad (2)$$

$$\sum_{j_1=2}^{N-r+1} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-r+2} \dots \sum_{j_r=j_{r-1}+1}^N \frac{1}{t_{j_1} t_{j_2} \dots t_{j_r}}$$

ここで、 t_i は乗り入れている路線 i の到着間隔を表すが、 t_i はその中でも最小の到着間隔に設定する。なお、路線 L_i の到着間隔は路線 L_i の往復移動時間、 T_{L_k} およびバス台数、 B_{L_k} により次式で計算する。

$$t_{L_i} = T_{L_i} / B_{L_i} \quad (3)$$

路線を運行させるバス台数 B_{L_i} は追加型、吸収型の2つの路線接続型別に計算する。追加型では、以下の式を用いる。

$$B_{L_i} = \lceil T_{L_i} D_{S_i} / B_{capa} \rceil \quad (4)$$

ここで、 B_{capa} はバスの定員(バスに依存せず一定)である。これは、接続元ノードの需要を満たす最小のバス台数を表す。吸収型の場合、バス台数は以下の式による。

$$B_{L_i} = \lceil T_{L_i} D_{S_i} / B_{capa} + B_{L_j} T_{L_i} / T_{L_j} \rceil \quad (5)$$

ここで、添え字の L_j は接続先ノードから目的地ノードへ向かう吸収される既存路線を意味する。上式の第1項は、接続元ノードの需要を満たすバス台数であり、第2項は接続先ノードから目的地ノードにいたる間にあるバス停でのサービスレベル(運行間隔)を維持するために必要なバス台数である。よって、この式は既存のネットワーク内にあるバス停におけるサービスレベルを維持もしくは向上(バスの到着間隔の減少)させる側に働く。まとめると、接続先ノード候補別、2つの接続型別に評価関数による計算を行い、最小値となる接続先ノードと接続型が選択され(いわゆる貪欲法)ネットワークが成長していく。よって、ネットワークは目的地ノードを起点として外側に向かって成長し、「木」の構造を持つことになる。このモデルでは、目的地は1つのバス停に限られている。首都圏のバス路線では、鉄道駅に向かう需要が集中している場合が多く、本モデルはこの需要パターンに有用と考えられる。

次に、上記手法に対して、ただひとつ設定される目的地(地域のハブとなるバス停)の位置を最適化の枠組みで求める。手法として遺伝的アルゴリズムを用い、求めるべき x, y 座標にそれぞれ10ビットを割当、合計20ビットの染色体で表現する。染色体の適応度は式(1)で表される路線網の評価値 Z の逆数とした。これより、従来のハブに直行するリンクを仮定したトポロジーの制約を緩和し、複数のバス停を経由して、ハブと接続する問題へ拡張することができる。

図3と図4は、本手法による、三鷹駅南側に位置する路線網の最適化結果である。センサデータから三鷹駅へ向かう需要を抽出して新たなハブ駅への需要として用い、最適となるハブ駅の位置を求めた。図3より、染色体の適応度の最大値は進化ステップとともに上昇することが確認できる。また、図4

に示す通り、新ハブ駅の最適位置は、現三鷹駅から2Kmほど南下した位置となった。

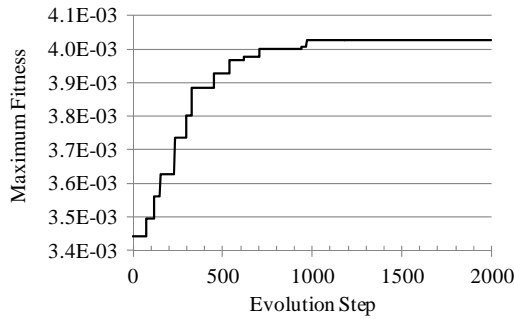


図3 最大適応度の進化履歴

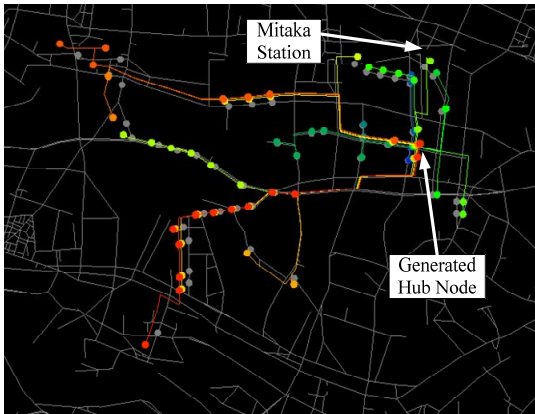


図4 三鷹駅南に形成された路線と新たなハブ駅

(2) 路線網構築問題のためのMAS

前節と異なり、複数の目的地を考慮すべき時は、目的地別に前節のアルゴリズムを適用して初期路線集合を生成し、得られた各路線をエージェント化したMASにより路線網の進化を促す。各路線エージェント（以下、路線Ag）は路線の延長や縮小、経路やバス台数の変更などを自ら行い、路線網の利用者を他の路線Agとの間で奪いあって進化する。解となる路線網は、この進化過程で淘汰をまぬがれた路線Agの集合で構成される。

図5は、本MASの流れ図である。前節(1)のネットワーク成長モデルにより初期路線集合を形成（図5#1）した後、路線網利用者の経路選択過程が実行される（図5#2）。路線網利用者は与えられた路線網の中で最短時間の経路を選択することを仮定している（この時、利用者を獲得できなかった路線Agは削除される。）。次いで、この利用者の経路解析結果を利用した、路線の進化過程（図5#3-7）に移る。（本MASでは、経路解析過程と路線Agの進化過程を交互に繰り返してステップが進む。）路線Agの進化では、各進化ステップで最大の利益を持つ路線Agのみに進化の権利を与えるSmall Evolution Model (SEM) と、全ての路線Agに権利を与えるLarge Evolution Model (LEM)の2つの大き

な流れがある。SEMは微小な変化により進化が進み、最適化の度合いが高くなる。LEMでは、SEMほどの高度な最適化は期待できないが、計算時間を大幅に短縮できる特徴を持つ。

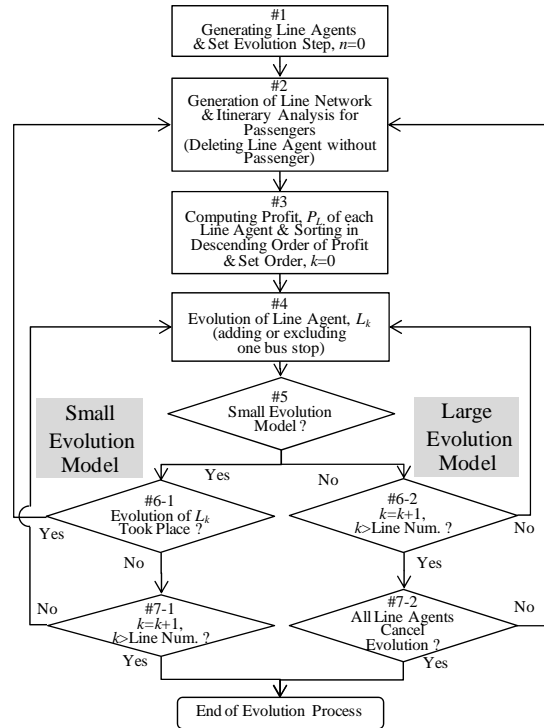


図5 MASの流れ

路線Agの進化ルールは、

- ・ 経路上に無いバス停を取込む。
- ・ 経路上にあるバス停を削除し、かつ、削除されたバス停と当該路線Agの経路を結ぶ新たな路線Agを生成する。

上記2つのパターン、バス停の組み合わせすべてを精査し、利益（利用者数-係数 × 機材台数）が最大となる組み合わせを選択するルールとした。また、経路ネットワークは道路と航路の識別子を持ち、これに対応して、バス路線Agは道路ネットワーク上、水上バス路線Agは航路ネットワーク上の経路しか選択できない制約を課した。これより、複数の輸送モードが混在する解析が行えるようになった。さらに、同一輸送モードであっても、輸送機材の定員や移動速度といった特徴が異なる路線Agも混在させることが出来るようになった。これより、低速で小型な機材を持つ路線Agが薄い需要を集約する支線輸送を担い、高速で大型な機材を持つ路線Agが幹線輸送を行うハブスポークネットワークを創発することに成功した。

図6は、首都圏において全鉄道路線が途絶した際の帰宅困難者輸送を目的として生成された路線網の解析結果を示している。路線Agはバスおよび水上バスの2つの輸送モードが混在した条件で解析を行った。ネットワー

クの規模が大きいため、上述のLEMを用いた解析により、ノート型PCでも1分程度で結果を出力できた。図6から評価値は減少し、より良い路線網に進化していくことが確認できる。また、図7は生成された路線網を示している。

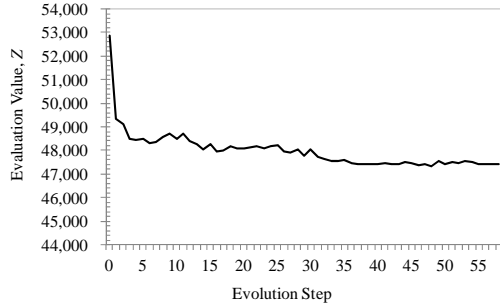


図6 路線網評価値の進化履歴

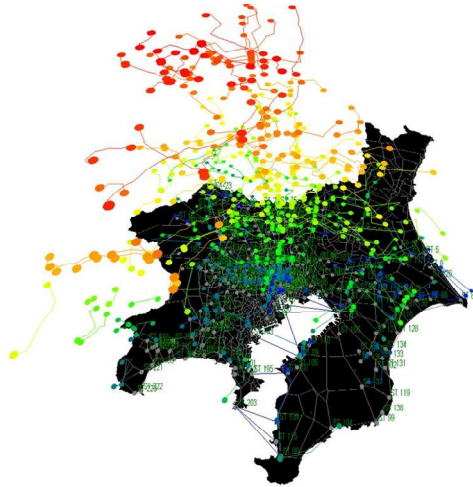


図7 首都圏、異なるモード（バスと水上バス）が混在した大規模路線網の解析例（各路線を垂直方向に異なる色で積み重ねて表示）

(3) MASのための初期路線集合の生成

移動需要が多いバス停の組み合わせを経路上に持つ路線は効率的な路線となり、ひいては、効率的な路線網となり得る。そこで、コミュニティ抽出法の指標に、輸送問題で重要となる需要と距離を導入し、1つのコミュニティに分類されたバス停の組み合わせを1つの路線の経路として利用することを試みた。ただし、各バス停には複数の路線が乗り入れることを前提とするため、1つのバス停が複数のコミュニティに属することを許容できる下式で示される手法を採用した。

$$\log P(G|\theta) = \sum_{ijz} \left\{ q_{ij} W_{ij} \log \frac{\theta_{iz} \theta_{jz}}{q_{ij}(z)} - \theta_{iz} \theta_{jz} \right\} \quad (6)$$

$$\theta_{iz}^{(k)} = \frac{\sum_j W_{ij} q_{ij}(z)^{(k)}}{\sqrt{\sum_j W_{ij} q_{ij}(z)^{(k)}}} \quad (7)$$

$$q_{ij}(z)^{(k+1)} = \frac{\theta_{iz}^{(k)} \theta_{jz}^{(k)}}{\sum_z \theta_{iz}^{(k)} \theta_{jz}^{(k)}} \quad (8)$$

$$W_{ij} = D_{ij}^\alpha / L_{ij}^\beta \quad (9)$$

ここで、 $q_{ij}(z)$ は、バス停*i*と*j*を結ぶリンクがコミュニティ*z*に所属する確率を示す。また、式(9)で定義される W_{ij} は輸送問題のために導入された指標であり、 D_{ij} および L_{ij} はバス停*ij*間の需要と距離を示す。 α および β は需要と距離が重みに与える影響を調整するための弾性係数である。上式は期待値最大化を構成しており、式(7)(8)を交互に計算することで式(6)を最大化する。なお、 k はこの繰り返し計算のステップ数である。

本手法を14のバス停で構成される図8左図のベンチマーク問題へ応用した。この図でリンク横の数字はリンク上の移動時間である。

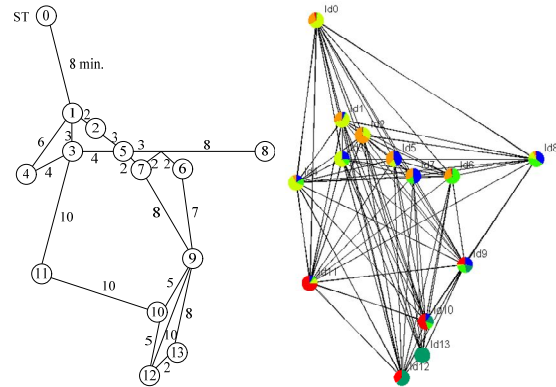


図8 ベンチマーク問題とコミュニティ分割の結果

図8右図にはコミュニティの分割結果を示す。各バス停が所属するコミュニティの割合を円グラフで表しており、色別で6つのコミュニティが表現されている。本コミュニティ分割結果から、コミュニティ別に6つの路線で初期路線 A_g を構成し、前節のMASによる進化過程を経て出力された路線網を図9に示す。

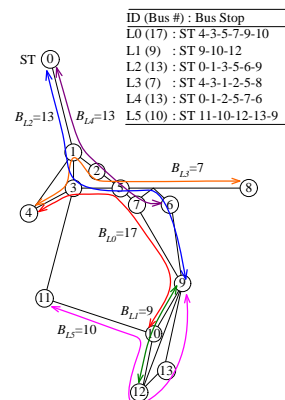


図9 ベンチマーク問題の路線網

本手法で得られた路線網は、(1)節で示したオリジナルの初期路線集合により出力できた最良の路線網には及ばないものの、それと同等の性能を示し、進化ステップはオリジナル手法の1/3程度に抑えられることが確認できた。

<引用文献>

M.T. Gastner and M.E.J. Newman, "Shape and Efficiency in Spatial Distribution Networks", *Journal of Statistical Mechanics*, P01015, 2006.

B. Ball, B. Karrer, and M. E. J. Newman, "An efficient and principled method for detecting communities in networks", *Phys. Rev. E* 84, 036103, 2011.

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9件)

Majima, T., Takadama, K., Watanabe, D., Katuhara, M., "Characteristic of Passenger's Route Selection and Generation of Public Transport Network", *SICE Journal of Control, Measurement and System Integration*, Vol.8, No.1, 2015, pp.67-73, 査読有.

Majima, T., Takadama, K., Watanabe, D., Katuhara, M., "Characteristic and Application of Network Evolution Model for Public Transport Network", *Multiagent and Grid Systems*, Vol.12, No.1, 2016, pp.1-11, DOI 10.3233/MGS-150240, 査読有.

Morimoto, S., Jinba, T., Kitagawa, H., Takadama, K., Majima, T., Watanabe, D., and Katuhara, M., "Multi-agent based Bus Route Optimization for Restricting Passenger Traffic Bottlenecks in Disaster Situations", *International Journal of Automation and Logistics (IJAL)*, 2016, pp.153-177, DOI 10.1504/IJAL.2016.074936, 査読有.

[学会発表](計29件)

間島隆博, 高玉圭樹, 渡部大輔, 勝原光治郎, 路線網利用者の経路選択傾向と路線網構築法, 計測自動制御学会, システム・情報部門学術講演会, 2013年11月, 滋賀県大津市.

Majima, T., Takadama, K., Watanabe, D., Katuhara, M., Application of Community Detection Method to Generating Public Transport Network, *BICT 2014(8th International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies)*, Dec.

2014, Boston U.S.A.

Majima, T., Takadama, K., Watanabe, D., Katuhara, M., Generating Hub-Spoke Network for Public Transportation, *SWARM 2015: The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics*, 2015, pp.48-51, Kyoto Japan.

[図書](計1件)

間島隆博、災害時における救援物資の輸送体制とシミュレータ, サプライ・チェーンリスク管理と人道支援ロジスティクス, 久保・松川編, pp.201-234, 近代科学社, 2015.

[その他]

ホームページ等

http://www.nmri.go.jp/institutes/distribution_system/logistics_research/index.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

間島 隆博 (MAJIMA, Takahiro)

国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他部局等・副系長

研究者番号: 30392690

(2)研究分担者

高玉 圭樹 (TAKADAMA, Keiki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授

研究者番号: 20345367

渡部 大輔 (WATANABE, Daisuke)

東京海洋大学・その他部局等・准教授

研究者番号: 30435771

小林 和博 (KOBAYASHI Kazuhiro)

国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他部局等・主任研究員

研究者番号: 00450677