

令和元年6月1日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18163

研究課題名（和文）道路網における交通信号群の最適系統制御：ネットワークモデル・アプローチ

研究課題名（英文）Optimization modeling of coordinated traffic signal control and its stochastic extension: Network modeling approach

研究代表者

和田 健太郎 (Wada, Kentaro)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：20706957

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：これまで、交通信号群の系統制御に対する多くの研究が蓄積されてきた。しかし、非線形である信号制約や交通流モデルを最適化問題として取り扱う複雑さから、その最適化法の確立には至っていない。本研究の目的は、ネットワークモデルという新たな視点から、見通しのよい系統制御最適化手法を構築し、最適制御特性について考察を行うことである。まず、交通流の時空間ダイナミクスを考慮した上で、制御パラメータを同時最適化する最適化問題を提案し、その確率的拡張を行なった。次に、それらの効率的なアルゴリズムを開発した。最後に、最適制御パターンの特性分析、実道路路線における信号制御改善のケーススタディを数値実験により行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の枠組みは、交通信号群最適化の学術研究において全く考えられてこなかった「最適信号制御 = ネットワーク最適化」という視点を与えるところに特色がある。ネットワーク最適化は膨大な研究の蓄積があるため、そのアルゴリズムを活用することにより効率的な最適化手法の開発が期待できる。また、本研究の提案問題は、実用面を重視した（3種類の）信号パラメータの段階決定という実態に対して、最適制御という一貫した考え（同時最適化）に基づく指針を提供できる。さらに、本研究の知見は、シミュレーションベースの最適化手法のベンチマークとすることができる。そのため、学術研究としてのみならず、工学的、実務的にも意義がある。

研究成果の概要（英文）：This study considers an optimal coordinated traffic signal control under both deterministic and stochastic demands. We first present a new mixed integer linear programming (MILP) for the deterministic signal optimization wherein traffic flow is modeled based on the variational theory and the constraints on a signal control pattern are linearly formulated. The resulting MILP has a clear network structure and requires fewer binary variables and constraints as compared with those in the existing formulations. We then extend the problem so as to treat the stochastic fluctuations in traffic demand. We here develop an accurate and efficient approximation method of expected delays and a solution method for the stochastic version of the signal optimization by exploiting the network structure of the problem. Using a set of proposed methods, we finally examine the optimal control parameters for deterministic and stochastic coordinated signal controls and discuss their characteristics.

研究分野：交通工学

キーワード：交通信号 系統制御 信号制御 交通流 変分理論 組合せ最適化

1. 研究開始当初の背景

交通信号は個別交差点部の交通流を安全かつ円滑に流すだけでなく、都市中心部における信号の集積である信号群制御は道路ネットワークの性能を決定づける重要な役割を担っている。そのため、路線あるいは面的に広がる信号群を系統的に制御する手法の研究が多数蓄積されてきた (Papageorgiou et al., 2003)。

信号群の系統制御の枠組み自体は、交通需要を与件として、遅れ時間等を最小化するように、共通サイクル長、スプリット、オフセットの3種類のパラメータを決定するというシンプルなものである。しかし、制御パターンが組み合わせ的に増大することや、隣接交差点間の相互作用など、孤立交差点にはない困難さが存在する。それゆえ、基本的な制御パラメータ設定法が確立し実務マニュアル (交通工学研究会, 2006) にも反映されている孤立交差点の制御に比べて、その基本特性の理解は限定的である (例えば, 越, 1975)。

この困難性を回避するために、多くの研究や実務的に採用されているのが、制御パラメータを段階的に決定するという手法である (典型的には、共通サイクル長 → スプリット → オフセット)。ただし、各段階の目的関数や制約条件の整合性は担保されておらず、その最適性も保証されない。また、様々なソフトウェア (e.g., TRANSYT) も存在し、これらは、現実的かつ詳細な条件を考慮して3種類の制御パラメータを同時決定できる。しかし、得られた制御パラメータによりどの程度 (大域的に) 最適化がなされているかは不明である。

数理最適化に基づくアプローチは、Gartner et al. (1975) の混合整数計画問題の提案に端を発し、様々な定式化が提案されている。ただし、初期の研究は、交通流ダイナミクスを非常に単純化しており (e.g., store-and-forward モデル)、待ち行列の延伸などの隣接交差点間の相互作用を適切かつ統一的に扱える枠組みではない。一方、この課題の解決を試みた代表的研究である Lo (2001) では、より現実的な交通流モデルである Cell-Transmission Model (CTM) を考慮した上で、遅れ時間を最小化する混合整数計画問題を提案している。しかし、if-then 条件として表される (i.e., 非線形である) 制御パラメータ間の関係や CTM を線形化するために、(本質的に必要とされる数倍もの) 離散変数・制約条件が必要となる。そのため、問題が煩雑化し、現実規模の問題ではその求解が困難となる。

以上を鑑みると、信号群の系統制御の最適パターンの体系的な理解やそのための最適化手法が確立されているとは言い難い。特に、交通流の状態方程式や信号制約を最適化という枠組みで無理なく表現することができていない点が本質的な課題として残る。これは、最適化問題に明快な構造がなく (あるいは、把握できず)、効率的なアルゴリズムの開発という点でも難点である。さらに、こうした現状は、信号制御システム高度化 (効率化) の目標点を明確化できないことを意味し、工学的にも実務的にも重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、交通信号群の系統制御に対する見通しのよい最適化手法を構築し、大域的に最適な制御パターンの特性を明らかにすることを目指す。具体的には、(a) 交通流の時空間ダイナミクスを考慮した上で、3種類のパラメータを同時最適化する新たな問題の提案、(b) 問題を効率的に解くアルゴリズムの開発、(c) 数値実験による最適制御パターンの特性分析、を行う。

3. 研究の方法

(1) 最適信号制御問題の定式化とその拡張

最適信号制御問題を明快な構造を持った問題として定式化するための基本アイデアは、(i) 交通流の変分理論 (VT) (Daganzo, 2005) に基づき目的関数 (i.e., 信号遅れ) を評価する; (ii) 信

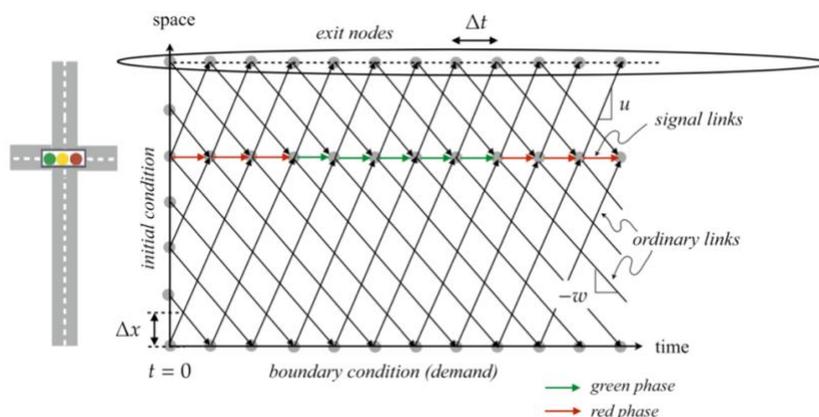


図1 交通流の変分理論における時空間ネットワーク

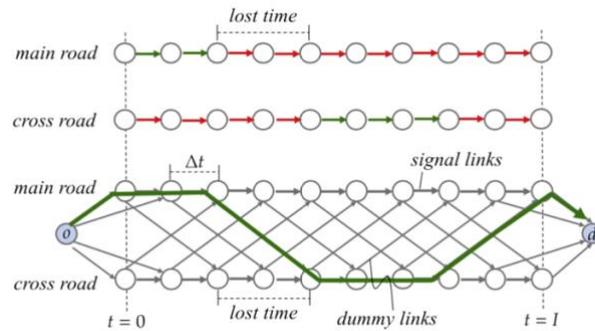


図2 信号オン・オフパターンのネットワーク表現

号制御パラメータを明示的な変数とせず、物理的な性質を満たす信号「オン・オフパターン」のみを変数とする、という点である。

VT によれば、交通流ダイナミクスは時空間平面上に構築したネットワーク（図1）における最短経路問題（i.e., 最適化問題）の解となる。そのため自然な形で信号最適化の枠組みで表現できることが期待される。また、VT において信号のオン・オフはネットワークのリンクを加える・除くことに対応しており、最適信号制御とはネットワーク最適化であると解釈できる。

信号制御における最低限の物理的制約は「主・交差道路が同時に青にならない」、「信号切り替え時に全赤時間が存在する」である。この制約を満たすオン・オフパターンは、ネットワークを流れるフローであることが見てとれる（図2）。そのため、制約条件が簡潔に表現可能となる。さらに、信号制約ネットワークは VT の信号リンクから構成されるため交通流モデルと極めて親和性が高い。

この基本アイデアをベースに、定周期制御/感応制御を表現可能な信号制約（共通サイクル長制約、最小青時間制約等）の構築、車両のランダム到着を考慮した確率的な拡張を行う。

(2) 効率的なアルゴリズムの開発

本研究で取り扱う問題は組み合わせ最適化であるため、汎用解法（e.g., 分子限定法）で効率的に求解が可能であるとは限らない。そのため、問題のネットワーク構造を活用することのできる分解原理を活用した厳密解法、および、比較的高速に次善解を得るためのヒューリスティクス解法の開発を行う。また、解空間を制約条件を追加することで狭める等の定式化レベルでの改善も検討する。

(3) 数値実験による最適制御パターンの分析

仮想的な道路や実際の道路を想定した数値実験により最適制御パターンの考察を行う。より具体的には、前者では従来の信号設定手法との比較を目的とし、後者では現状の信号設定からの改善可能性について検討を行う。

4. 研究成果

(1) 最適信号制御問題の定式化とその拡張

本研究では、交通需要の確定的な到着に基づく「確定的な最適信号制御問題」、および、ランダム（ポアソン）到着を考慮した「確率的な最適信号制御問題」を提案した。

上述の基本アイデアに基づく確定的な問題（信号遅れ最小化問題）は、目的関数自体が最適化問題として表現されるため、全体としては二段階問題となる。しかし、VT による交通流ダイナミクスおよび遅れ時間がともに同じ状態変数（累積交通量）で表現されるという特性を利用することで、一段階の混合整数計画問題に帰着させることに成功した。また、最適化の結果として得られるオン・オフパターンが定周期となることを保証する現実的な信号制約（最小青時間制約、サイクル長制約）が、図2の信号ネットワーク構造の修正等により追加的な離散変数を必要とせずに表現できることを明らかにした。上述の2つの望ましい性質の結果として、提案問題は Lo (2001) の定式化に比べて、離散変数の数を 1/3、制約数を 1/2 に削減することができた。

信号遅れは、特に飽和交通流に近い状況において、交通需要のランダム到着に大きく影響を受け遅れが増大することが知られている。そのため、信号遅れの期待値（あるいは分布）を考慮することは重要である。孤立交差点ではそのための期待遅れの解析式が複数提案されており（e.g., Webster の遅れ式）、標準的な信号設定の枠組みに組み込まれている。しかし、系統制御に対してはそのような解析式は存在せず、ほとんどの研究が確定的な枠組みでの評価に終始しており、また、計算コストの高い交通シミュレーションを用いたモンテカルロ (MC) 法による評価研究がわずかにあるのみである。これに対して本研究では、ランダム到着を考慮した VT モデルに基づ

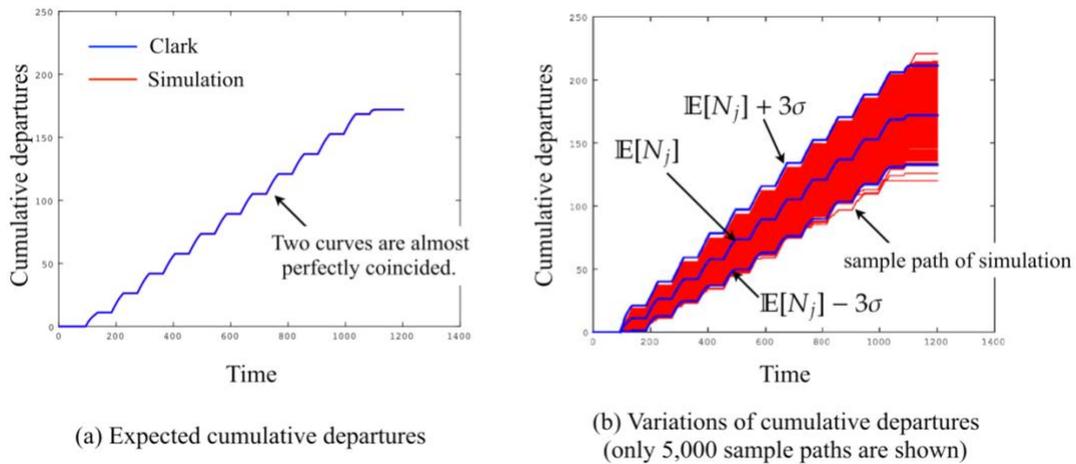


図3 解析近似およびMC法（10万回）による道路下流端の累積交通量の比較

き期待遅れを解析的に近似する手法を考案し、この手法を上記の信号制約と組み合わせた確率的な最適制御問題を提案した。この手法は、モデルが（交通ネットワーク理論でよく知られた）Probit型の最短経路問題になること、および、Clark近似（Clark, 1961）を利用した確率的交通流モデルであり、交通流理論の文脈でも従来にない新たな貢献である。また、その近似精度が多くの場合で極めて高い（誤差が1%以内におさまる）ことを数値計算により確認した（図3）。

(2) 効率的なアルゴリズムの開発

信号は通常秒単位で設定されることから、本研究で対象とする問題の離散変数は単純な場合でも極めて多く（1交差点あたり評価時間秒分）、現実的な信号制約なしに3種類の信号パラメータを同時最適化するのは極めて困難である（実際に困難であることを確認した）。そこで、共通サイクル長を与件とした（共通サイクル長制約を課した解空間の小さい）最適化問題を解くことで最適スプリット・オフセットを求め、それを評価したい共通サイクル長分繰り返すこと（i.e., 次元探索）で最適なサイクル長を決める、という2段階の方法で同時最適化を行った。

まず、共通サイクル長を与件とした確定的な問題に対して商用の最適化ソフトウェア Gurobi Optimizer による数値計算実験を行なった。その結果、(i) 小規模な問題（例えば、3交差点を含む路線の15分程度の最適化）では対象時間程度の時間で厳密解が求められる、(ii) サイクル長に加えスプリットも与件としたオフセット最適化問題ではより規模の大きい問題でも実用的な時間で厳密解が得られる、ことがわかった。また、信号パターンを与件とした信号遅れが、極めて解くことが容易な最短経路問題に帰着することを活用した Benders の分解原理に基づくアルゴリズムも検討したが、Gurobi Optimizer に比べた高速化は達成できなかった。問題構造を十分に活用した専用（厳密）解法の構築は今後の課題である。

次に、より効率的に次善解を得るために、組合せ最適化問題に対して有効な手法として広く適用例のある Cross-Entropy (CE) 法 (Rubinstein & Kroese, 2004) を用いた解法を開発した。これは、より大きな規模の問題に対して有効であるのみならず、通常の数理最適化問題に帰着しない確率的な最適信号制御問題に対しても適用が可能であるという利点がある。CE法は、ある確率分布に従って解候補を生成し、優れた解ほど高い確率で生成されるようその確率分布のパラメータを更新するものであるが、変数間に複雑な制約がある本研究のような問題においては確率分布の表現法がポイントとなる。本研究では、変数の満たすべき制約が（信号制約）ネットワークとして表現されていることを活用することで、確率分布をネットワーク上の推移確率として表現できること、また制約を満たす解がその推移確率に基づくマルコフ連鎖により効率的に生成できることを示した。一方、各解候補に対する目的関数の評価は、確定的な問題では最短経路問題、確率的な問題では提案した解析近似手法により効率的に計算が可能である。特に後者では、最短経路問題を多数解く必要のあるMC法による信号遅れの期待値評価を使う場合に比べて、（問題規模やMC法の回数にもよるが）約10倍～100倍の高速化が達成されることがわかった。このCE法を適切なパラメータの下で、10交差点程度の道路路線/対象時間15分の中規模問題に適用した結果、確定/確率的な問題とともに、対象時間程度の（あるいはそれより短い）時間で次善解が得られる（CE法が収束する）という結果を得た。

(3) 数値実験による最適制御パターンの分析

以上で開発した手法を用いた数値実験により得られた結果を述べる。まず、仮想的な3交差点を含む一本の道路路線（系統路線）とその路線を交差する道路に対して、確率的な最適化（戦略S）、確定的な最適化（戦略D）、および、実務的に広く用いられる段階的設定（戦略P）による信号パラメータを求め、その差異や期待信号遅れの違いを考察した。ここで、段階的設定では、

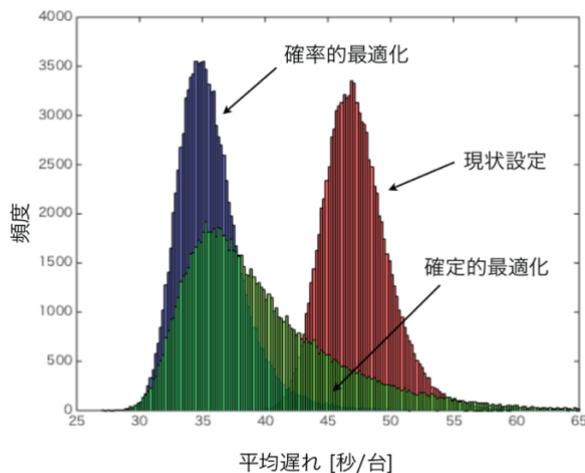


図4 車両一台当たりの平均遅れの頻度分布（駒沢通りにおけるケーススタディ）

Webster の最適サイクル長をまず決定し、スプリットを各交差点毎の需要率から設定し、最後に確定的な問題によりオフセットのみ最適化を行なった。得られた結果およびその考察は以下の通りである。

- 共通サイクル長は、戦略 P が最も長い傾向にある。これは、戦略 P のサイクル長が孤立交差点を想定した期待遅れ最小化により与えられており、系統制御における次の特性：(i) 交通需要のばらつきは（上流）信号によって整流化される、(ii) 適切なオフセットの実現には交差点間距離に応じた適切なサイクル長の設定が重要である（越, 1975）、を原理的に考慮できないためであると考えられる。これに対して、戦略 S は両特性を、戦略 D は (i) の特性を考慮できるため、信号遅れの大勢を決めるサイクル長を短縮することができる。
- 一方で、サイクル長の短縮は各交差点の交通容量を減少させ、捌け残り（過飽和状態）の発生による遅れの増大をもたらす可能性も孕む。戦略 D では、交通需要のばらつきによるこうした捌け残りの可能性を無視してパラメータの同時最適化を行なっているため、短いサイクル長の設定により最も期待遅れが大きくなる場合がある。一方、戦略 S では、各交差点の交通容量は少なく（サイクル長は短く）とも、交通需要のばらつきによる過飽和状態を回避しつつ、車両が通過しない無駄青時間を極力生じさせないスプリットとオフセットを同時最適化により設定できるため、期待信号遅れが最小となる。戦略 P は各交差点の交通容量を十分確保することにより過飽和状態を回避しているが、（必要以上に）長いサイクル長、および、一貫性を欠いた段階的設定による無駄青時間の発生等により、信号遅れ時間は相対的に大きくなる。

次に、実道路路線の信号制御改善に対する提案手法の有効性を確認するために、7つの信号交差点を含む駒沢通り約 1.4km 区間（呑川橋脇～東京医療センター前交差点）におけるケーススタディを行なった。具体的には、現状の信号設定と戦略 S および戦略 D による信号遅れの比較を行なった。図 4 に、それぞれの信号設定に対して、10 万回ランダムな交通需要（ポアソン到着）を与えたシミュレーションを行い、得られた車両一台当たりの平均遅れの頻度分布を示す。

上記の考察でも述べたように、戦略 D（確定的最適化）では、期待値としては現状設定から改善がなされているものの、遅れのばらつきが大きく、過飽和状態の発生による遅れの増大が見取れる。一方で、戦略 S（確率的最適化）では、平均遅れの期待値が約 25%減少しており（サイクル長は 110 秒から 90 秒に短縮）、パラメータの同時最適化による信号設定が大きく現状を改善する可能性を示している。また、この実験の結果は、戦略 S が期待遅れの減少だけでなく、遅れのばらつきの観点からも望ましい特性を持つ（効率的であるのみならず頑健な戦略である）ことを示唆している。なお、先の仮想道路における数値実験およびこのケーススタディの考察から、実務的に同時最適化は難しくとも、「適切なサイクル長の範囲でそれぞれ最適なオフセットを検討し、期待遅れの小さいサイクル長を決定する」といったより実用的な手続きを行うことで、現在の状況を大幅に改善し、戦略 S に近い性能が得られる可能性があることも示唆された。

<引用文献>

Clark, C. E.: The greatest of a finite set of random variables, *Oper. Res.*, Vol.9, No.2, pp.145-162, 1961.
 Daganzo, C. F., 2005. A variational formulation of kinematic waves: Basic theory and complex boundary conditions, *Transp. Res. Part B* 39, 187-196.
 Gartner et al., 1975. Optimization of traffic signal settings by mixed integer linear programming, *Transp. Sci.* 9, 321-363.
 Lo, H. K., 2001. A cell-based traffic control formulation: Strategies and benefits of dynamic timing plans, *Transp. Sci.* 35, 148-164.

Papageorgiou et al., 2003. Review of road traffic control strategies, *Proc. of the IEEE* 91, 2043-2067.
Rubinstein, R. Y. & Kroese, D. P.: *The Cross-Entropy Method: A Unified Approach to Combinatorial Optimization, Monte-Carlo Simulation and Machine Learning*, Springer, 2004.
交通工学研究会 (編), 2006. 改訂交通信号の手引き, 丸善出版.
越正毅, 1975. 系統交通信号におけるサイクル制御の研究, 土木学会論文報告集 241, 125-133.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- 1) W-L. Jin and K. Wada, 2018. A new cell transmission model with priority vehicles and special lanes, *Transport. Res. Procedia* 34, 28-35, 査読有. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.11.010>
- 2) K. Wada, K. Usui, T. Takigawa, M. Kuwahara, 2018. An optimization modeling of coordinated traffic signal control based on the variational theory and its stochastic extension, *Transp. Res. Part B* 117(B), 907-925, 査読有. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2017.08.031>
- 3) 和田健太郎, 瀬尾亨, 中西航, 佐津川功季, 柳原正実, 2017. Kinematic Wave 理論の近年の発展: 変分理論とネットワーク拡張, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) 73(5), I_1139-I_1158, 査読有. http://dx.doi.org/10.2208/jscejpm.73.I_1139
- 4) 和田健太郎, 2017. 交通流の Kinematic Wave モデルの解析法, 交通工学 52(4), 15-22, 査読無.
- 5) 和田健太郎, 臼井健人, 大口敬, 井料 (浅野) 美帆, 2017. 交通流の変分原理に基づく系統信号路線の期待遅れ評価法, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) 73(1), 85-96, 査読有. <http://dx.doi.org/10.2208/jscejpm.73.85>

[学会発表] (計 10 件)

- 1) T. Nagae, R. Toda, K. Wada, 2018. A method for evaluating travel time distribution on signalized arterial roads, *The 7th International Symposium on Transport Network Reliability*.
- 2) K. Wada, K. Usui, T. Takigawa, M. Kuwahara, 2017. An optimization modeling of coordinated traffic signal control based on the variational theory and its stochastic extension, *The 22nd International Symposium on Transportation and Traffic Theory*.
- 3) A. Takayasu, Y. Hara, K. Wada, M. Kuwahara, 2016. Traffic state estimation considering stochasticity of input data based on variational theory, *The 21st International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies*.
- 4) M. Abdullah, M. Iryo, K. Wada, T. Oguchi, 2016. Comparing the effectiveness of different midblock crosswalk treatments in urban areas, 第 14 回 ITS シンポジウム.

[図書] (計 2 件)

- 1) 交通工学研究会 (編), 2018. 平面交差の計画と設計 基礎編—計画・設計・交通信号制御の手引, 丸善出版. (分担執筆: I 編 3, 5 章の 14 頁分を共同執筆)
- 2) 土木計画学ハンドブック編集委員会 (編), 2017. 土木計画学ハンドブック, コロナ社. (分担執筆: I 編 4.3.2 「交通流理論」, 173-178 頁)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

<https://researchmap.jp/wadaken/>
<https://www.sk.tsukuba.ac.jp/~wadaken/>

6. 研究組織

- (1) 研究分担者
なし
- (2) 研究協力者
なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。