

## 2. 【現在までの研究状況】(図表を含めてもよいので、わかりやすく記述してください。様式の変更・追加は不可(以下同様))

- ① これまでの研究の背景、問題点、解決方策、研究目的、研究方法、特色と独創的な点について当該分野の重要文献を挙げて記述してください。
- ② 申請者のこれまでの研究経過及び得られた結果について、問題点を含め①で記載したことと関連づけて説明してください。  
なお、これまでの研究結果を論文あるいは学会等で発表している場合には、申請者が担当した部分を明らかにして、それらの内容を記述してください。

### ■研究の背景

エネルギー問題の解決や経済の活性化のために、リニアモーターカー・水素燃料・ドローンなどの革新的な技術が開発されている。これらの技術を都市に実装するにはインフラを敷設する必要があり、それを経済的に適えるための理論研究のひとつがシュタイナー問題である[Melzak, 1961]。シュタイナー問題は「平面上の複数与点を連結するグラフの中で、辺の長さの総和が最短のものを求める問題」と定義され、送電線網などのインフラ敷設コストの最小化問題に適用されてきた。

### ■問題点・解決方策

シュタイナー問題を実空間に適用する場合の課題は、既存の都市構造の制約ゆえに、インフラ敷設コストが空間的に一様ではないことである。例えば、地価が高ければ土地収用に掛かるコストが増大する。また、自然・文化保護地域の開発は禁じられ、コストは無限大に等しい。しかし、こうした制約を扱えるシュタイナー問題の解法の開発は進んでこなかった。なぜなら、単位長さあたりのコストが一様でない空間上で、最小コスト経路を求めることが困難であったからである。

この困難に対して申請者は、ランダムドロネー網[今井・藤井, 2007]という稠密なメッシュを用いて空間を離散化し、一様でない空間上の最小コスト経路を、そのメッシュ上で近似できることを確認している[田端他, 2019]。ランダムドロネー網上でシュタイナー問題を扱うことにより、空間の単位長さあたりのコストが一様でない場合(重み付きシュタイナー問題)でも、その解(重み付き最小シュタイナー木)を求められる。

### ■研究目的

本研究は、ランダムドロネー網に基づく重み付きシュタイナー問題の近似解法の構築を目的とする。そして、構築した解法により、重み付き最小シュタイナー木の特性を明らかにする。さらに、実空間での適用により、解法の実用性と重み付き最小シュタイナー木の経済性を示す。

### ■研究方法・研究経過及び得られた結果

以下の成果の一切を申請者が担当し、今春に査読付き論文へ筆頭著者として投稿中である。

#### 1. 重み付きシュタイナー問題の近似解法の開発

まず、ランダムドロネー網上の与点の全域木に、総コストが小さくなるように微小変形を繰り返すアルゴリズムを構築した。全域木は無数に存在するため、タブーサーチで発見的に探索する(図-1)。判明している厳密解との比較から、本手法で厳密解と同形状の近似解を得られることが明らかになった。

#### 2. 重み付き最小シュタイナー木の特性の解明

まず、重み付き最小シュタイナー木の経済性を明らかにするために、比較的構築が容易な最小全域木との総コストの比較を行った。その結果、最小全域木に比べて近似解の総コストを最大35%減らすことができた。この経済性は、インフラ敷設という経済規模を考える上では到底無視できないものであり、本手法の意義を示すものである。

次に、重み付き最小シュタイナー木の形状特性を把握するため、異なる単位長さあたりのコストを連続的に変化させて解を描画したところ、その形状は不連続に変化することが明らかになった。この不連続な形状の変化は直感的には理解しづらいにも関わらず、本手法は解を求めることができ、小敷設コストの線状インフラ設計に有用であることは明らかである。

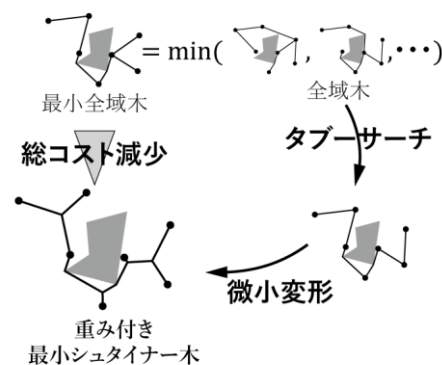


図-1 解法の流れ

(現在までの研究状況の続き)

### 3. 実空間上での本手法によるインフラ敷設コスト最小化シミュレーション

本手法を用いて、ドローンによる貨客、貨物輸送のための航行路網の敷設を想定したシミュレーションを行った(図-2)。騒音、建築の制限による不動産価値減少に対して、飛行ルート  
の長さ  
と基準地価格に比例した補償費用を与える。このとき、補償費用が最小の航行路網は重み付き最小シュタイナー木になる。シミュレーションにより得られる航行路網は、ドローンの必要最低限の性能で運用でき、ドローンの航行路網として十分に実現可能性のある案である。一方で、重み付き最小シュタイナー木上の頂点間の移動は、迂回が大きくなり運用の効率が下がるため、運用の高効率化を目的とするグラフの生成アルゴリズムが必要であると展望された。

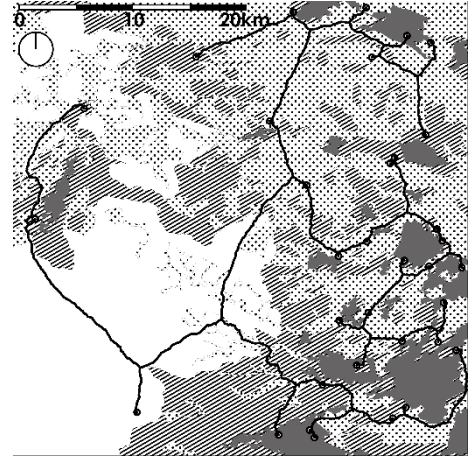


図-2 シミュレーション結果

黒線：シミュレーション結果、白点：拠点、  
白部、森林地域、点部：農業地域  
斜線部：都市地域、墨部：DID  
濃い領域ほど単位長さあたりのコストが大きい

#### ■特色と独創的な点

重み付きシュタイナー問題の解法に関する研究は稀有であり、本研究はこれに先立つものである。空間の離散化の方法を工夫することで、重み付き領域が地域区分などの複雑な形状の場合でも、その複雑さに対して安定した計算量、記憶容量で実行できる解法である。また、新たな貨客、貨物輸送の担い手として開発途上にあるドローンであるが、その航空路網の敷設に関する研究は例を見ず、本研究はそれに先鞭をつけるものである。

### 3. 【これからの研究計画】

#### (1) 研究の背景

これからの研究計画の背景、問題点、解決すべき点、着想に至った経緯等について参考文献を挙げて記入してください。

#### ■研究計画の背景、問題点

申請者はこれまでの研究で、重み付きシュタイナー問題を発見的に解くアルゴリズムを構築して、既存の都市構造の制約下で線状のインフラ敷設コストを最小化することを可能にした。一方で、運用効率の高いグラフ形状の生成方法については未解明のままである。インフラは更新が難しいため、あらかじめ高効率化を図って計画することが重要であり、そのためには、高効率化を適えるグラフ形状を生成する理論が必要である。

鉄道などのように、人・物が拠点間を行き来するインフラを最も効率良くに運用するには、任意2拠点間が最短距離で結ばれた完全グラフの形状であれば良いが、一方でインフラ敷設コストは膨大になる。このように、現実的なインフラの計画には単目的の最適化では不十分である。しかし、小敷設コストかつ高効率化という多目的最適化されたインフラ計画を支援する理論は存在しない。

#### ■解決すべき点、着想に至った経緯

敷設コストはグラフの総コスト、効率は任意2頂点間の総移動距離(以下、単に総移動距離)に数学的に置き換えられる。総コストが最小のグラフは重み付き最小シュタイナー木として既に得られており、それに閉路を内挿し、総移動距離が徐々に小さくなるように、微小変形を施すアルゴリズムを実装することで多目的最適なグラフが得られると期待できる。実際、グラフに含まれる閉路が総移動距離を小さくすることが指摘されている[Otto, 2009, pp. 71-72]。このことから、申請者がこれまでの研究で開発した解法の延長に、グラフに閉路を内挿する数理的な方法を導入すれば、既存の都市構造の制約を考慮したグラフの総コスト最小化と総移動距離最小化の多目的最適化ができるかと着想した。

## (2) 研究目的・内容 (図表を含めてもよいので、わかりやすく記述してください。)

- ① 研究目的、研究方法、研究内容について記述してください。
- ② どのような計画で、何を、どこまで明らかにしようとするのか、具体的に記入してください。
- ③ 所属研究室の研究との関連において、申請者が担当する部分を明らかにしてください。
- ④ 研究計画の期間中に異なった研究機関（外国の研究機関等を含む。）において研究に従事することを予定している場合はその旨を記載してください。

### ■研究目的

本研究の目的は、既存の都市構造の制約下で小コストかつ高効率なインフラの計画を支援するために、ランダムドロネー網に基づき、総コストと総移動距離を目的変数とする多目的最適グラフを生成するアルゴリズムを構築し、グラフ形状の特徴を明らかにすることである。

### ■研究方法・研究内容

本研究の全体像を図-3に示す。一切を申請者が担当する。

#### 1. 総移動距離を減じる手法の構築

申請者の予備実験により、与点数が3, 4の場合には、重み付き最小シュタイナー木に閉路を内挿する微小変形によって、完全グラフまで連続的に変形できることを確認している。これを任意の与点数に適用できるように昇華させる。

#### 2. パレートフロントの導出

1の手法で得られるグラフを総コスト-総移動距離上にプロットすることで、ふたつのトレードオフを表すパレートフロントを得る。

1の手法だけではパレートフロントの全てが得られない可能性があるが、その場合は、完全グラフの辺を縮約して総コストを減じる手法を構築する。

#### 3. 多目的最適グラフ形状の特徴の解明とパレートフロントに基づく既存インフラの評価

パレートフロント上のグラフ形状を観察し多目的最適グラフの特徴を分析する。さらに、既存のインフラのグラフ形状を総コスト-総移動距離上にプロットし、パレートフロントとの差異を測ることで、総コストと総移動距離の観点からの合理性を評価する。

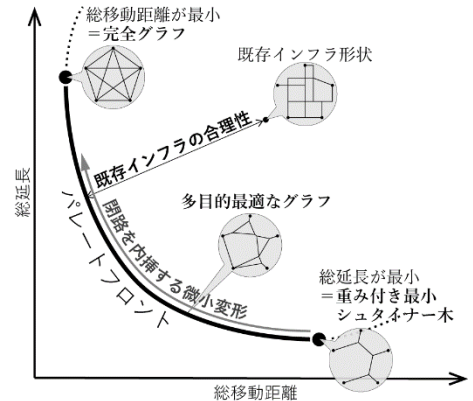


図-3 研究の全体像

## (3) 研究の特色・独創的な点

次の項目について記載してください。

- ① これまでの先行研究等があれば、それらと比較して、本研究の特色、着眼点、独創的な点
- ② 国内外の関連する研究の中での当該研究の位置づけ、意義
- ③ 本研究が完成したとき予想されるインパクト及び将来の見通し

### ① 先行研究と比較して、本研究の特色、着眼点、独創的な点

総コストや総移動距離に関するそれぞれの単目的最適化問題に関する研究は古くからあり、一定の成果が上げられていて応用例は多い。申請者の重み付きシュタイナー問題の発見的解法に関する先行研究もそのひとつである。次なる研究領域として、総コストと総移動距離に関する多目的最適化は自然に要請されるものであるが未だ取り組まれてこなかった。本研究は、その未知なる領域へと足を踏み入れる先駆的な研究である。さらに、ランダムドロネー網という数理幾何ツールを用いることで、一様でない空間に理論を発展させようという独創的で意欲的な研究でもある。本研究が成功すれば、地物などの障害物や地理的・社会的条件で開発費用の高騰する領域を考慮して合理的な線状インフラを計画する一助になる。

### ② 国内外の関連する研究の中での当該研究の位置づけ、意義

シュタイナー問題は、辺の方向が制限された問題[Hanan, 1966]や、グラフの中で与点を結ぶ最小コストの部分グラフを求める問題[Dreyfus & Wagner, 1972]、さらに、辺だけでなく頂点のコストも加味した問題[Bienstock et al., 1993]に発展してきたが、いずれも総コストの最小化のみを考える問題であった。本研究は、新たな目的変数として総移動距離を導入することで、シュタイナー問題の発展の新たな方向性を示すものであり、この切り口は、建築や都市における人・物の移動を追究する申請者独自のものである。

(研究の特色・独創的な点の続き)

また、関連する研究領域のひとつに、「ネットワーク最適化」がある[Magnanti & Wong, 1984]. ネットワーク最適化問題は、与えられたネットワーク形状の各辺が通行可能か否か、または、どれだけの通行量を許容できるかを、目的に合わせて割り振る問題である. ネットワーク最適化では、インフラ形状は計画者が前もって模索的に決定して問題に与えなければならない. それに対し本研究は、総コストと総移動距離という観点での合理的なインフラ形状そのものを求める問題であり、インフラ形状を設計する際の省力化に寄与する点で意義深い.

### ③本研究が完成したとき予想されるインパクト及び将来の見通し

水素燃料を効率的に供給するにはパイプラインが、ドローンを安全に航行させるには航空路網が必要である. こうした新しい線状インフラと既存の都市構造との間には齟齬が生じることが多い. 本研究が完成すれば、そのような齟齬を最小限に、経済的な線状インフラの敷設が可能になる. また、「一带一路構想」や「西アフリカ諸国経済共同体」など、現在目されている国を越えた経済圏の構築の際に、本研究は、自然・文化遺産の保護と経済的なインフラの敷設の両立を可能にする.

将来的には、より合理的なグラフ形状を得るために、より多くの目的変数を設けることが考えられる. それに伴い導出の難易度が增大するが、本研究のようにグラフ形状を微小変形させながら最適化を目指す手法の成功は、より多くの目的関数を最適化するグラフ導出の可能性を広げる.

さらに、本研究の成果は、原初的な人間社会の街路構造の理解につながる可能性がある. ミュンヘンオリンピックスタジアムの設計で有名な Otto(2009)は、人の自由な歩行の結果としてできた街路構造が持つ最適性を追究し、グラフの総延長と総移動距離のパレートフロントに着目している. Otto はグラフ形状を実験的に生成したが、一方で本研究は数理的なグラフ生成手法を開発することで、実験では成し得ない多数の分析を可能にし、街路構造の最適性の理解に貢献できる.

## (4) 研究計画

申請時点から採用までの準備状況を踏まえ、研究計画について記載してください。

研究計画の四半期ごとのタイムスケジュールを表-1 のように立てる. 年度末には研究成果を報告する.

表-1 研究のタイムスケジュール

|                                   | 1 年目    | 2 年目 | 3 年目  |
|-----------------------------------|---------|------|-------|
| (a)アルゴリズム A1 の開発                  | ● ● ● ● |      |       |
| (b)アルゴリズム A2 の開発                  | ● ● ● ● |      |       |
| (c) C と T のパレートフロントの近似            |         | ● ●  |       |
| (d) C と T のトレードオフと<br>グラフ形状の関係の解明 |         | ● ●  | ●     |
| (e)既存インフラ形状の合理性評価                 |         |      | ● ● ● |

C : 総コスト, T : 総移動距離

### ■1 年目 (採用までの準備)

1 年目では、総移動距離が小さくなるように重み付き最小シュタイナー木を変形する(a)アルゴリズム A1 の開発と、総コストが小さくなるように完全グラフを変形する(b)アルゴリズム A2 の開発を行う. どちらも、入力するグラフに対し、頂点や辺の挿入・移動・削除による微小変形を施し、同時に総コストと総移動距離を算出するアルゴリズムであるが、頂点や辺の選び方とそれに対する変形方法の組み合わせの数は無数に存在する. そこで、辺や頂点の選択と変形を遺伝子とする多目的遺伝的アルゴリズムを A1 と A2 に実装する. 交叉率や突然変異を起こす確率などのパラメータを調整し、実用性も鑑みて、解の精度を第一義に、収束時間が 1 時間程度に収まることを目指す.

(研究計画の続き)

## ■2年目

2年目では、まず、A1とA2を実行する過程で得られる(c)総コストと総移動距離のパレートフロントを近似する。A1とA2だけではパレートフロントの全域を補間することができない可能性があるが、その際は、重み付きシュタイナー木や完全グラフではないグラフを初期解とする別のアルゴリズムの開発を行う。パレートフロントの近似が完了したら、(d)パレートフロント上にあるグラフ形状を分析し、総コストと総移動距離のトレードオフとグラフ形状の関系の解明に着手する。分析項目として、グラフの類似性を表すハミング距離や、グラフ構造の偏りを表す媒介中心性などに着目し、パレート最適なグラフが持つ性質を議論する。

## ■3年目

3年目では、(e)既存インフラ形状の合理性を評価する。総コスト-総移動距離上には任意のグラフ形状がプロットできる。そして、プロットとパレートフロントとの差異を測ることで、グラフの合理性を測り、インフラ設計の改善の余地を明らかにする。

### (5) 人権の保護及び法令等の遵守への対応

本欄には、研究計画を遂行するにあたって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取り扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究など法令等に基づく手続が必要な研究が含まれている場合に、どのような対策と措置を講じるのか記述してください。例えば、**個人情報**を伴うアンケート調査・インタビュー調査、**国内外の文化遺産の調査等**、**提供を受けた試料の使用**、**侵襲性を伴う研究**、**ヒト遺伝子解析研究**、**遺伝子組換え実験**、**動物実験**など、研究機関内外の情報委員会や倫理委員会等における承認手続が必要となる調査・研究・実験などが対象となりますので手続の状況も具体的に記述してください。

なお、該当しない場合には、その旨記述してください。

本研究が用いるデータが人権や法令に抵触することはないため、本研究は法令等に基づく手続が必要な研究に該当しない。

申請者登録名 田端祥太

4. 【研究遂行能力】 研究を遂行する能力について、これまでの研究活動をふまえて述べてください。これまでの研究活動については、網羅的に記載するのではなく、研究課題の実行可能性を説明する上で、その根拠となる文献等の主要なものを適宜引用して述べてください。本項目の作成に当たっては、当該文献等を同定するに十分な情報を記載してください。具体的には、以下(1)～(6)に留意してください。

(1) 学術雑誌等（紀要・論文集等も含む）に発表した論文、著書（査読の有無を明らかにしてください。査読のある場合、採録決定済のものに限ります。）

著者、題名、掲載誌名、発行所、巻号、pp 開始頁～最終頁、発行年を記載してください。

(2) 学術雑誌等又は商業誌における解説、総説

(3) 国際会議における発表（口頭・ポスターの別、査読の有無を明らかにしてください。）

著者、題名、発表した学会名、論文等の番号、場所、月・年を記載してください。（発表予定のものは除く。ただし、発表申し込みが受理されたものは記載してもよい。）

(4) 国内学会・シンポジウム等における発表

(3)と同様に記載してください。

(5) 特許等（申請中、公開中、取得を明らかにしてください。ただし、申請中のもので詳細を記述できない場合は概要のみの記載してください。）

(6) その他（受賞歴等）

(1)学術雑誌等（紀要・論文集等も含む）に発表した論文、著書

[1]田端祥太，新井崇俊，本間健太郎，今井公太郎，Desire path の再現に基づく歩行環境が歩行軌跡に与える影響の解明，都市計画論文集，日本都市計画学会，54(3)，pp. 1562–1569，2019（査読有）

(2)学術雑誌等又は商業誌における解説、総説 なし

(3)国際会議における発表 なし

(4)国内学会・シンポジウム等における発表

[2]○田端祥太，新井崇俊，本間健太郎，今井公太郎，Desire path の再現に基づく歩行環境が歩行軌跡に与える影響の解明，日本都市計画学会全国大会，177，横浜，11・2019（口頭・査読有）

[3]○田端祥太，新井崇俊，本間健太郎，今井公太郎，Desire path の推定モデル 集合住宅を事例として，日本建築学会大会学術講演梗概集，5353，金沢，9・2019（口頭・査読無）

[4]○新井崇俊，今井公太郎，田端祥太，来客者の移動手段を考慮した空き店舗の立地評価モデル，日本建築学会大会学術講演梗概集，7452，金沢，9・2019（口頭・査読無）

[5]○田端祥太，本間健太郎，新井崇俊，今井公太郎，重み付き最短路探索を用いた“けもの道”の空間特性の研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，5258，仙台，9・2018（口頭・査読無）

(5)特許等 なし

(6)その他

[6]田端祥太，新井崇俊，本間健太郎，今井公太郎，日本都市計画学会 2019 年年間優秀論文賞授賞（授賞数 6 編，全 204 編），5・2020

[7]田端祥太，2020 年度東京大学大学院工学系研究科博士課程学生特別リサーチ・アシスタント採用（博士課程 2 年次のうち 20 名），3・2020

[8] 田端祥太，第 58 回（2019 年度）竹中育英会建築助成金交付者採択（採択件数 10，応募件数 58），「等方的平面ネットワークを用いた障害付きシュタイナー問題の近似解法」，都市計画部門，7・2019

[9]田端祥太，材料計画概論課題北垣賞，建築材料からみたヘルツォーク & ド・ムーロンの建築設計手法（学内賞，上位 5%），7・2015

以下未採択

[10]田端祥太，新井崇俊，本間健太郎，今井公太郎，ランダムドロネー網を用いた重み付きシュタイナー問題の発見的解法，都市計画論文集，日本都市計画学会（査読有）

[11]○田端祥太，新井崇俊，本間健太郎，今井公太郎，インフラ敷設費用の最小化問題の発見的解法，日本建築学会大会学術講演梗概集（口頭・査読無）

## 5. 【研究者を志望する動機、目指す研究者像、アピールポイント等】

日本学術振興会特別研究員制度は、我が国の学術研究の将来を担う創造性に富んだ研究者の養成・確保に資することを目的としています。この目的に鑑み、研究者を志望する動機、目指す研究者像、アピールポイント等を記入してください。

### ■研究者を志望する動機

申請者が研究者を志望する動機は、誰も知らないことをいち早く明らかにすることが申請者にとっての快感であるからである。研究者として他の研究者に囲まれていれば、否が応でも自分の知らなかったいろいろな知見や技術を肌で感じることができ、裏を返せば未解明なことを発見しやすい。申請者は現在、その環境に身を置いていて幸せを感じているし、今後も望んでいる。

その幸せに気づくことができたのは、ほんの2年前、進学を決めたときだったのを覚えている。そこからは水を得た魚のように研究に精が出て、研究業績も順調に積みあげることができた。振り返ってみれば、自分の業績として人に胸を張れるものほとんどが研究者を志してから短期間のことで、今では研究者としての資質を申請者自身も信じられるようになった。

### ■目指す研究者像

申請者は、社会に実装しやすい形で研究の成果を表現できる研究者を目指す。研究の有用性を一般にもわかりやすく表現できるという研究者像を見定めるにあたって、印象的だった出来事を紹介したい。申請者が関わる共同研究の中で、「日本の不動産企業が見向きもしなかった土地を外国企業が相場の2倍で落札した」というエピソードを聞いた。そこで、数理計画の世界では基本中の基本であるミニ・サム配置を求める数理的分析を行ったところ、なんとその土地は、周囲の任意の地点からのアクセスが一番良い立地だったのである。この出来事を通じ、いくら高度で有用な知見を積み重ねても社会に活かされるとは限らないということ痛感したのである。

この問題意識から現在は、企業との共同研究の中で地域づくりに活かせる知見を共有し、研究成果を社会に還元しようと試みている。また、人材育成の役に少しでも立てるように、培った数理的な学識とプログラミングの技術を後学の学生に伝える勉強会に、講師として参加している。

### ■アピールポイント

#### (1)外部からの評価

初めて投稿した論文が査読を通り、その論文が学会の年間優秀論文賞を受賞したことは申請者にとって大きな励みになった(業績[6])。「設計者の意図とは異なるものであり、景観や安全性に影響を与える」経路を推定し「都市内の空間設計に有用」との評価は、社会を支援するような知見を提供しようという申請者の研究者冥利に尽きるものである。

また、外部から研究資金を調達することができたことも研究生活に弾みをつけるものであった(業績[8])。この助成を受けて成果を上げることができた研究が業績[10]、[11]である。

#### (2)行動力

申請者は知的欲求を満たすための行動力がある。学部3年次には「建築は実際に見て体験しなければ理解できない」との思いから休学を決め、この間に資金を貯めて3ヶ月の単独ヨーロッパ探訪を敢行した。海外の建築を巡る中で街並みや特色ある交通機関に触れた経験が、研究の視野を都市や社会基盤にも向ける素地になっている。

#### (3)表現力

オープンキャンパスで指揮を取り、また、成果を可視化するソフトウェアを作成した。それを見た学部の学生が昨年度、申請者と同じ研究室に進学を決めてくれ、研究成果の興味深さを伝えられたのだと実感し、同時にそれに足る表現力に自信がついた。

これからも研鑽を怠ることなく、持ち前の行動力で研究成果を社会に広く発信し、活用を促すための表現力と求心力を身に着けていく。その第一歩として申請者は、日本学術振興会特別研究員になることを志望する。

申請者登録名 田端祥太