

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24300033

研究課題名(和文)人称性を考慮した地図データ可視化のための制約付き最適化手法の研究

研究課題名(英文)Constrained Optimization for Visualizing Map Data through Specific Person Views

研究代表者

高橋 成雄(Takahashi, Shigeo)

東京大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：40292619

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：我々が普段手にする鉄道路線図や旅行ガイドマップに見られるような地図は、一般的に地図の見やすさのため、人の手を介して実際の地理上のレイアウトに変形が施されたのち、様々な付加情報が注釈ラベルとして挿入される。さらに、その地図情報の可視化は、地図を見る人の視点(人称性)に応じて大きく異なる。本研究では、そのような人の視点に応じて異なる地図の視覚的な美的基準を、路線図や道路網などを表現するグラフ構造に対する制約ととらえ、地図の可視化を制約付き最適化問題として定式化を行った。

研究成果の概要(英文)：In general, commercially available railway maps and touristic guide maps are often designed by illustrators, in such a way that the original geographic layouts are deformed and then annotated with labels having additional information to fully enhance the map readability. However, such schematic design of maps largely depends on the specific person views of the users who use the maps. In this study, we established aesthetic criteria of designing maps as constraints imposed on the railway and road networks contained in the map according to the person views, and the further formulated the associated map visualization as constrained optimization problems.

研究分野：可視化学

キーワード：地図データ 可視化 制約付き最適化 美的基準 人称 レイアウト生成 路線図 ラベル配置

1. 研究開始当初の背景

路線図の可視化は、駅の接続関係をノード(駅)とリンク(駅をつなぐ路線)で表現されるグラフと考え、情報可視化(Information Visualization)におけるグラフ描画の問題ととらえることができる。一般的に世界の各主要都市で用いられている地下鉄路線図は、実際の地理的レイアウトを単純化し、その位相的なつながりだけを図式的にわかりやすく表現したものが用いられる。このような表現は、イギリスの製図工であったHarry Beck氏が描いたロンドンの地下鉄路線図に起源があり、長い年月を経て最近のような美的基準が確立されてきた。一方、地下鉄車内に掲載される地図は、現在乗車している路線の情報に焦点を当てるため、その路線だけを抜き出し直線状に配置するなど、異なる美的基準が用いられることが多い。

このように路線図あるいは道路網などの地図データの可視化は、使う人の視点の違いによってその美的基準が大きく異なる。しかし、このような美的基準を満たす地図データの可視化はその重要性に関わらず人手によるところが大きく、さらにユーザの視点を反映した美的基準の数理的定式化の成功例については皆無に等しい。

本研究では、この地図を使う側の視点を人称性にとらえ、大局的な配置(第3人称)と局所的な配置(第1人称)、さらにこの2つの中間(第2人称)のそれぞれの視点において、地図可視化に関する視覚的な美的基準を定式化し、それらを地図に対応するグラフへの制約ととらえることで、地図の可視化の問題をグラフに対する制約付き最適化問題としてモデル化することが目的である。

2. 研究の目的

我々が普段手にする鉄道路線図や旅行ガイドブックに見られるような道路地図は、一般的に地図の見やすさのため、人の手を介して実際の地理上のレイアウトに変形が施されたのち、さまざまな付加情報が注釈ラベルとして挿入される。さらに、その地図情報の可視化は、地図を見る人の視点(人称性)に応じて大きく異なる。しかし、このように地図を使う人の視点に応じて、コンピュータが選択的に地図の可視化を最適化する手法の開発は、まだ発展途上にある。本研究の目的は、このような人の視点に応じて異なる地図の視覚的な美的基準を、路線図や道路網などを表現するグラフ構造に対する制約として定式化し、地図の可視化を制約付き最適化問題として定式化することにある。

3. 研究の方法

本研究計画では、上述の地図可視化の制約付き最適化問題を、2次元のグラフ構造(A.)に対してまず定式化を行い、さらにそれを、注釈ラベルを伴う場合(B.)に拡張する。加えて、可視化対象を3次元の地図データ表示(C.)、携帯デバイス表示(D.)、アニメーション表示(E.)へと広げていく。各課題は以下のように列挙される。

- A. グラフ構造描画の制約付き最適化モデルの構築
- B. グラフ構造と注釈ラベルのハイブリッド最適化モデルの構築
- C. 3次元地図データ表示への拡張
- D. 携帯デバイス表示への拡張
- E. アニメーション表示への拡張

4. 研究成果

本研究で得られた成果は、特に研究期間の前半の成果については既に論文としてまとめることができているが、研究期間後半に得られた結果については論文が現在投稿中、または今後論文投稿を準備する段階にある。

以下に、得られた成果について代表的なものを記す。概要として、4.1)特定の経路を中心に据えた図式的路線地図の生成、4.2)空間効率を考慮した注釈付き路線図生成、4.3)経路の遮蔽を回避する3次元都市生成とそのアニメーション、4.4)縮尺に応じた注釈ラベルの取捨選択について、以下順次記していく。

4.1)特定の経路を中心に据えた図式的路線地図の生成

一般的に地下鉄の路線図においては、縦・横・斜めの8方向に路線方向をそうように配置し、路線の地理的な配置よりもその接続関係を強調する図式的表現が頻繁に用いられる。これは、イギリスの製図工であったHarry Beck氏が描いたロンドンの地下鉄路線図に起源を發しているが、視覚の面からもその8方向の線を特に認識しやすいことを考慮に入れた美的基準であると考えられる。しかしながら、このような路線図は人の手で描かれることが多く、自動的な図式的路線図レイアウト生成は、長年技術的に難しいとされてきた。

近年この路線図レイアウト問題に対し、線形計画法の整数版である混合整数計画法を用いて解く計算アルゴリズムが示され、結果として制約付き最適化問題を解くことで、自動的な図式的路線図レイアウト生成への道が開かれるようになった。図1はその例を示している。具体的には、図1(a)のように与えられるオリジナルの地理的レイアウトを入力にとり、図1(b)のような8方向に路線が配置される図式的路線図レイアウトを得ることができる。

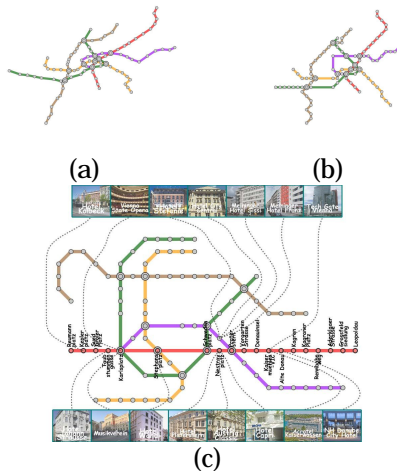


図 1: ウィーンの路線図 . (a)オリジナルの地理的レイアウト, (b)路線が 8 方向にそった図式的レイアウト, (c)特定の経路を中心に配置した注釈付きレイアウト(提案手法)

本研究では、この表現をさらにユーザの視点に立った、第 1 人称の表現を得るため、ユーザの旅行経路が路線図の中心に配置される路線図レイアウトと、経路に注釈ラベルを付加する手法を新たに開発した。まず、路線図上の特定の経路を中心に配置する計算アルゴリズムは、従来の混合整数計画法に基づく路線図レイアウト手法において、入力となる各路線の初期方向に加えて、指定されて経路が直線状になるように新たな制約を追加することで実現している。この際、指定した経路とそれ以外の路線との間にレイアウトのギャップが生じないように、指定した経路の制約をそれ以外に路線に伝播させる処理を導入した。また、ユーザが対話的に路線図のレイアウトを編集できる機能も、合わせて路線図設計システムとして実装した。

さらに、中心に指定された特定の経路上にある駅に、付加情報を追加するための注釈ラベル配置アルゴリズムも実現した。ここでは、路線図の上下の余白に注釈ラベルを配置する境界ラベリング法を採用し、駅と注釈ラベルまでのリーダ形状に関しては、ネットワーク理論における最小コスト最大流量問題の概念を利用して、路線図との交差の少ない適切なパス形状を求め、曲線を用いて結ぶことで、わかりやすい注釈付けを実現した。

評価には、アンケートの他注視点計測装置を用いた実験も行い、中心に据えた経路が十分視覚注意を誘導できることを確認した。

ちなみに本研究成果は、上記課題の A. に対応し、図 1(a),(b),(c)はそれぞれ、路線図の第 3 人称、第 2 人称、第 1 人称の表現として捉えられることに注意する。

4. 2) 空間効率を考慮した注釈付き路線図生成

4. 1) の路線図レイアウト設計において

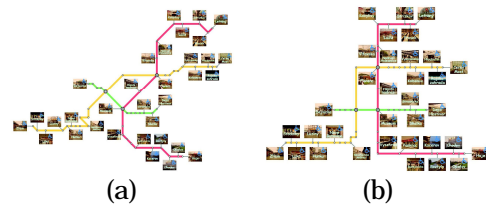


図 2: 空間効率を考慮した注釈付き路線図 . (a)通常の図式的な注釈付き路線図レイアウト . (b)空間効率を考慮した注釈付きレイアウト .

が、路線図自体のレイアウトと注釈ラベルの配置は独立に処理がなされていた。しかしながら、地図の紙面などの空間効率を考慮に入れた注釈付き路線図を生成するには、路線図と注釈レイアウトを同時に最適化する枠組みが構築できることが望ましい。実際、このような注釈付き路線図は、旅行者のガイドマップとして利用されていることはもとより、デザインスタジオで制作されたハンカチーフや絵葉書などにも商品のデザインとしても多用されるようになってきている。そのため、このような空間を効率的に利用できる路線図の設計は、実用に加えて美術作品としても価値が高く、その計算機による支援の実現は大きな意義があると考えられる。

本研究では、この空間効率を最大化する注釈付きの路線図配置問題全体を、ひとつの混合整数計画法の問題として定式化することを初めて実現した。図 2 の例はそのひとつの事例を示しており、図 2(a)の元々の図式的な注釈付き路線図配置に比較して、図 2(b)ではより空間効率の高い注釈付き路線図配置が実現されており、同じスペースでも図 2(b)の方がより大きな注釈ラベルを配置できていることに注意したい。

しかしながら実際に定式化した混合整数計画問題を一度に解くには、解空間が広すぎてその計算時間が莫大になってしまう問題が生じる。本研究では、この問題を、いくつかの計算ステップに分解して、効率よく解くことに成功した。具体的には、(1)図式的レイアウトを求める、(2)一様に十分拡大した路線図レイアウトの余剰空間に注釈ラベルを、路線図や他のラベルと交差なく配置する、(3)路線図レイアウトを可能な限り縮小して空間効率を最大化する、という 3 つのステップを通じて解く計算アルゴリズムを提案した。

しかしながら実際に定式化した混合整数計画問題を一度に解くには、解空間が広すぎてその計算時間が莫大になってしまう問題が生じる。本研究では、この問題を、いくつかの計算ステップに分解して、効率よく解くことに成功した。具体的には、(1)図式的レイアウトを求める、(2)一様に十分拡大した路線図レイアウトの余剰空間に注釈ラベルを、路線図や他のラベルと交差なく配置する、(3)路線図レイアウトを可能な限り縮小して空間効率を最大化する、という 3 つのステップを通じて解く計算アルゴリズムを提案した。

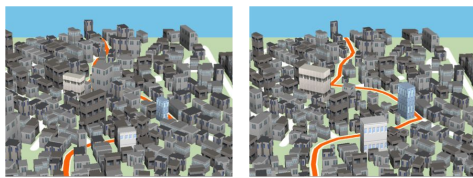


図 3: 道路の遮蔽を回避しランドマークとなる建物を強調した 3 次元都市地図レイアウト . (a)オリジナルのレイアウト . (b)最適化したレイアウト .

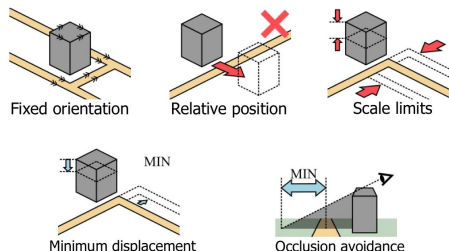


図 4: 導入された 5 つの設計基準 . 上 3 つは、ハード制約として、下 2 つはソフト制約として定式化されている .

図 4 は、そのような 3 ステップアルゴリズムにおける、注釈付き路線図の設計プロセスの実例を示している .

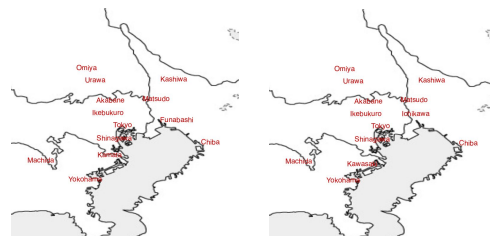
このようにして得られた路線図においては、注釈付きレイアウトに関する様々な制約が導入されている . 評価実験として、1 つずつ導入した制約を外した路線図レイアウトを被験者に提示し、該当する制約が真に意味があるかどうかを個々に判断してもらった . 結果として概ねすべての制約が肯定的に評価されており、我々の定式化の正当性を証明することができた .

ちなみに本研究成果は、上記課題の B. に対応し、空間効率が高い路線図レイアウトが最も第 1 人称表現に近いものとして捉えられる .

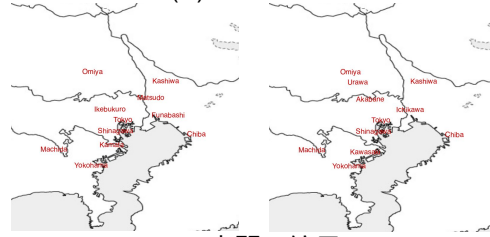
4 . 3) 経路の遮蔽を回避する 3 次元都市生成とそのアニメーション

今まで説明してきた、図式的な注釈付き路線図レイアウトにおける、制約付き最適化問題の定式化は、形を変えて 3 次元都市地図のレイアウト問題に適用することができる . 特にここでは、現在地からある特定の目的地までの経路に対する、建物の遮蔽を最大限回避しながら、ランドマークとなる建物を強調できるような、制約付き最適化問題を定式化する . 図 3 は、実際に制約付き最適化計算で得られる 3 次元都市地図レイアウトの例を示している .

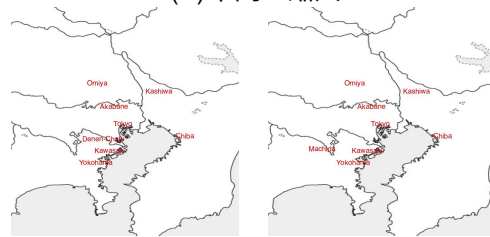
3 次元都市地図の場合も、路線図と同様に美的設計基準に対応する制約を定式化するところから始まる . 本研究では、手描きの 3 次元地図の観察から、図 4 に示されるような 5 つの設計基準を定め、それぞれを道路の一夜建物の位置、高さなどの変数に関する線形の等式、不等式、または線形和のコストに変換する . 特に、図 4 においては、上の 3 つの制約がハード制約に対応し、変数の線形等式、



(a)大きい縮尺



(b)中間の縮尺



(c)小さい縮尺

図 5: 縮尺に応じた地名ラベル配置 . (左) 縮尺ごとにラベルの配置を最適化した例 . 中縮尺で一度消失した Akabane ラベルが、小縮尺で Akabane が復活する . (右) 縮尺の範囲全体においてラベルの配置を最適化した例 . 縮尺に対し一貫性を保つラベル配置が実現できる .

不等式に変換され、下の 2 つの制約がソフト制約に変換され、結果として変数の線形和として書かれるコスト関数を構成する . そして、本手法においては、得られた線形の制約下において、コスト関数を最小化する問題を、通常の線形計画法の問題として解くこととする . 実際には、我々の研究で構築した線形計画問題は、最大限建物の経路に対する遮蔽を回避しながら、効果的な妥協点となる都市地図の最適配置を提供してくれる .

さらに本研究では、この静止画生成技法を、可読性の高い 3 次元都市地図生成技法へと拡張し、ナビゲーション応用を見据えたアニメーション表示システムの実装を行っている . その際に、建物や道路の変形や移動の速度と加速度がある一定の上限以下であるように制御できるような時空間制約を新たに定式化し、注目すべき経路以外に視覚注意を誘導するものを排除する配慮も加えた .

ちなみに、本研究は上記の課題 C. と E. に対応しており、静止画は第 3 人称の地図表示、アニメーションはより第 1 人称に近い第 2 人称の地図表示であると位置づけている .

4 . 4) 縮尺に応じた注釈ラベルの取捨選択

最後に、縮尺に応じた注釈ラベルの取捨選択について記述する . 近年は、携帯端末を用

いて地図を表示しながら，行き先を調べたり旅行計画を立てたりする機会が多くなってきている．その際，携帯端末上で，自由に縮尺を変更しながら地図を表示する機能は，ユーザの便を図る上で重要である．しかしながら，地図上の位置については点であるため大きさをもたないのに対し，それに付随する注釈ラベルはある一定の大きさが必要であり，地図の縮尺によってはそのラベルが小さい領域に密集して重なりあってしまう問題が生じる．そのため，縮尺に応じて特定の重要度が低いラベルは表示しないなどの取捨選択を行う必要がある．しかし，縮尺ごとに一貫性を保って，ラベルの取捨選択を行うのは，技術的な困難を伴う．

本研究では，地図上の緯度，経度による2次元座標系に，縮尺の3番目の座標軸を加えた3次元空間を考え，注釈ラベルをその空間を占める四角錐台であると定義する．そして，その四角錐台の3次元空間における最適配置を，最適化手法を用いて計算していく．現在は，遺伝的アルゴリズムを用いて定式化を行っており，図5が縮尺を伴う地図に実際にラベルを配置した例を示している．

ちなみに，本研究は上記の課題D.に対応しており，携帯端末などにおいて(縮尺の大きい)第3人称から(縮尺の小さい)第1人称の地図表示を提供できる定式化を実現している．

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10件)

(すべての論文は査読有り論文である.)

- 1) Hsiang-Yun Wu, Shigeo Takahashi, Chun-Cheng Lin, and Hsu-Chun Yen, Travel-Route-Centered Metro Map Layout and Annotation, *Computer Graphics Forum*, Vol. 31, No. 3, pp.925-934, 2012.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8659.2012.03085.x>
- 2) Daichi Hirono, Hsiang-Yun Wu, Masatoshi Arikawa, and Shigeo Takahashi, Constrained Optimization for Disoccluding Geographic Landmarks in 3D Urban Maps, in *Proceedings of the 6th Pacific Visualization Symposium (IEEE PacificVis 2013)*, pp. 17-24, 2013.
<http://dx.doi.org/10.1109/PacificVis.2013.6596123>
- 3) Hsiang-Yun Wu, Shigeo Takahashi, Chun-Cheng Lin, and Hsu-Chun Yen, Spatially Efficient Design of Annotated Metro Maps, *Computer Graphics Forum*, Vol. 32, No. 3, pp. 261-270, 2013.
<http://dx.doi.org/10.1111/cgf.12113>
- 4) Hsiang-Yun Wu, Shigeo Takahashi, Chun-Cheng Lin, and Hsu-Chun Yen, Voronoi-Based Label Placement for Metro Maps, in *Proceedings of the 17th International Conference on Information Visualisation (IV2013)*, pp. 96-101, 2013.
<http://dx.doi.org/10.1109/IV.2013.11>
- 5) Min Lu and Masatoshi Arikawa, Location-Based Illustration Mapping Applications and Editing Tools, *Cartographica, The International Journal for Geographical Information and Geovisualization*, Vol. 48, No. 2, pp. 100-112, 2013.
<http://dx.doi.org/10.1353/car.2013.0012>
- 6) 有川 正俊，人が認識しやすい3次元地理空間情報に関して，*日本地図学会論文誌*，Vol. 52, No. 3, pp. 5-14, 2014.
- 7) Koto Nohno, Hsiang-Yun Wu, Kazuho Watanabe, Shigeo Takahashi, and Issei Fujishiro, Spectral-Based Contractible Parallel Coordinates, *Proceedings of the 18th International Conference on Information Visualisation (IV2014)*, pp. 7-12, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1109/IV.2014.60>
- 8) Yi Gao, Hsiang-Yun Wu, Kazuo Misue, Kazuyo Mizuno, and Shigeo Takahashi, Visualizing Bag-of-Features Image Categorization Using Anchored Maps, in *Proceedings of the 7th International Symposium on Visual Information Communication and Interaction (VINCI2014)*, pp. 39-49, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1145/2636240.2635858>
- 9) Rie Ishida, Shigeo Takahashi, and Hsiang-Yun Wu, Interactive Uncluttering Node Overlaps for Network Visualization, accepted for presentation in the 19th International Conference on Information Visualisation (IV2015), 2015.
- 10) Hsiang-Yun Wu, Sheung-Hung Poon, Shigeo Takahashi, Masatoshi Arikawa, Chun-Cheng Lin, and Hsu-Chun Yen, Designing and Annotating Metro Maps with Loop Lines, accepted for presentation in the 19th International Conference on Information Visualisation (IV2015), 2015.

〔学会発表〕(計 15 件)

1. Shigeo Takahashi, Constrained Optimization for Aesthetic Design of Customized Maps, Center for Simulation Sciences, Ochanomizu University, the 2nd International Symposium, January 16, 2013, Ochanomizu University, Bunkyo-ku, Tokyo. (Invited Talk)
2. 高橋 成雄, 地図レイアウトのための計算モデルの構築, 日本地図学会平成 25 年度定期大会, 2013 年 8 月 1 日~2 日, 東京大学柏キャンパス, 柏市, 千葉県. (招待講演)
3. Min Lu and Masatoshi Arikawa, Walking on a Guidebook with GPS: a Framework Geo-enabling Pages with Illustrated Maps in LBS, The 10th International Symposium on Location Based Services, Nov, 21-22, 2013, Shanghai, China.
4. 吳 湘筠, 高橋 成雄, 有川 正俊, 廣野 大地, 林 春成, 顔 嗣鈞, 注釈ラベル配置の空間効率を考慮した地下鉄路線図設計, 全国共同利用研究発表大会 CSIS DAYS 2013, 2013 年 11 月 22 日~23 日, 東京大学柏キャンパス, 柏, 千葉.
5. 高橋 成雄, 吳 湘筠, 廣野 大地, 有川 正俊, 3 次元都市カーナビゲーションにおける時空間制約を用いた地図レイアウトの最適化, 全国共同利用研究発表大会 CSIS DAYS 2013, 2013 年 11 月 22 日~23 日, 東京大学柏キャンパス, 柏, 千葉.
6. Hsiang-Yun Wu, Designing Annotated Metro Maps Through Constrained Optimization, the 35th NII Shonan Meeting: Computer Visualization – Concepts and Challenges, May 10-13, 2014, Shonan Village Center, Hayama, Kanagawa (Invited Talk)
7. Shigeo Takahashi, Animating Occlusion-Free Driving Routes in 3D Urban Areas with Spatiotemporal Constraints, the 35th NII Shonan Meeting: Computer Visualization – Concepts and Challenges, May 10-13, 2014, Shonan Village Center, Hayama, Kanagawa (Invited Talk)
8. Ruochen Si, Masatoshi Arikawa, and Min Lu, Walking Through Maps Between Signboards and Smartphones, 日本地図学会平成 26 年度定期大会, 2014 年 8 月 6 日~9 日, 東北大学片平キャンパス, 仙台, 宮城.
9. Min Lu, and Masatoshi Arikawa, Design and Implementation of Geo-interactive Tour Guide Services Featuring Geo-enabled Illustrated Maps, 日本地図学会平成 26 年度定期

- 大会, 2014 年 8 月 6 日~9 日, 東北大学片平キャンパス, 仙台, 宮城.
10. 佐藤 史弥, 吳 湘筠, 高橋 成雄, 有川 正俊, 古地図の歪み抽出による構図のモデリング, 日本地図学会平成 26 年度定期大会, 2014 年 8 月 6 日~9 日, 東北大学片平キャンパス, 仙台, 宮城.
 11. 吳 湘筠, 高橋 成雄, 有川 正俊, 林 春成, 顔 嗣鈞, 地下鉄路線図のためのポップアップラベル設計, 東北大学片平キャンパス, 仙台, 宮城.
 12. 吳 湘筠, 潘 雙洪, 高橋 成雄, 有川 正俊, 林 春成, 顔 嗣鈞, 環状経路を中心とする地下鉄路線図レイアウト設計, 全国共同利用研究発表大会 CSIS DAYS 2014, 2014 年 11 月 21 日~22 日, 東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト, 柏, 千葉.
 13. 佐藤 史弥, 吳 湘筠, 高橋 成雄, 有川 正俊, 透視投影図の組み合わせ抽出を用いた吉田初三郎の鳥瞰図における構図の解析, 全国共同利用研究発表大会 CSIS DAYS 2014, 2014 年 11 月 21 日~22 日, 東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト, 柏, 千葉.
 14. 石田 理恵, 吳 湘筠, 高橋 成雄, ポロノイ図を用いたラベル重複を軽減するグラフィックアウト手法, 情報処理学会第 77 回全国大会, 2015 年 3 月 17 日~19 日, 京都大学, 京都市, 京都.
 15. 安田 昂平, 吳 湘筠, 高橋 成雄, 2 次元都市地図画像からのゲシュタルト特徴抽出, 情報処理学会第 77 回全国大会, 2015 年 3 月 17 日~19 日, 京都大学, 京都市, 京都.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tak-lab.org/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 成雄 (TAKAHASHI Shigeo)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号: 40292619

(2) 研究分担者

有川 正俊 (ARIKAWA Masatoshi)

東京大学・空間情報科学研究センター・教授

研究者番号: 30201510

(3) 連携研究者

吳 湘筠 (WU Hsiang-Yun)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教

研究者番号: 00706749