

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11975

研究課題名（和文）大規模グラフの可読性向上のためのモーフィングエッジ描画手法に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Morphing Edge Drawing Methods for Improving Readability of Large-Scale Graphs

研究代表者

三末 和男（Misue, Kazuo）

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：50375424

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：モーフィングエッジ描画（MED）は部分エッジ描画（PED）のアニメーションによる拡張で、各エッジが、部分的に省略された部分描画と完全描画の間をモーフィングにより繰り返し変化する。モーフィングの形態のバリエーションを検討するために、まず静止画であるPEDに関して多くのバリエーションを検討した。また、MEDでは周期的にモーフィングが行われるが、読み取り速度を向上させるためには周期の短縮が重要と考えた。そこで、スケジューリングアルゴリズムの3種類のバリエーションを完成させた。これらの手法の有効性を検証するためには、我々はさらに実験を行う必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

グラフ描画におけるアニメーションの利用はこれまでも提案されているが、主にエッジの向きや流量などを表す目的で利用されていた。視覚的乱雑を低減させ可読性を向上させるという目的でのアニメーション（表現空間の時間軸）の利用は未開拓であり、そのような手法を開発し発展させることには学術的意義がある。モーフィングエッジ描画は、表現空間をXY平面+時間（短時間の繰り返し）とすることで新しいグラフ描画問題あるいは情報可視化の課題を提起するものである。可視化のための新しい設計空間を示すことにより、理論家と実践家の両方を巻き込む新しいグラフ描画研究だけでなく、可視化手法の新たな枠組の提供にもつながる。

研究成果の概要（英文）：Morphing edge drawing (MED) is an animated extension of partial edge drawing (PED), in which each edge repeatedly morphs between partially omitted and fully drawn edges. To design variations in morphing form, we first examined a number of variations with respect to PED, which is a static drawing. In addition, although morphing occurs periodically in MED, we considered it important to shorten the period in order to improve the reading speed. Therefore, we completed three variations of the scheduling algorithm. To validate the effectiveness of these methods we need to conduct further experiments.

研究分野：情報可視化

キーワード：情報可視化 グラフ描画 モーフィングエッジ描画 スケジューリング 部分エッジ描画

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

情報可視化は、抽象的なデータを視覚的に表現することで、データに対する洞察を支援する。なかでも、グラフ構造を備えるデータを対象とする可視化は「グラフ描画 (Graph Drawing)」と呼ばれ、ネットワーク分析の要素技術として重要な役割を担っている。

グラフの視覚的表現には、大きく分けて連結図 (Node-link Diagram) と行列表現がある。連結図はネットワークの視覚的表現として直感に合っており、パス探索のような大局的な構造の観察に優れている。ただし、エッジ密度が高いグラフの場合には、しばしば視覚的乱雑 (ヘアボール状態) を引き起し、観察に支障をきたす。そのため、視覚的乱雑への対策が求められている。

視覚的乱雑への対策としては、エッジを束ねて描く手法[1]、ノードのクラスタに着目してレイアウトを求める手法[2]などの他、本研究の基礎となる部分エッジ描画 (Partial Edge Drawing; PED) が提案されている[3]。部分エッジ描画は、エッジの交差が視覚的乱雑の主要因であるという考えから、エッジの一部を省略することで見かけ上の交差を無くしたものである。そして、完全エッジ描画 (Complete Edge Drawing; CED) (図1) と部分エッジ描画 (図2) は、グラフの可読性 (読み取り精度と速度) に関して異なる特性を備えていることが分っている[4,5]。

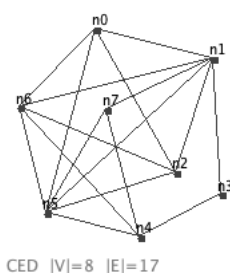


図1 完全エッジ描画 (CED)

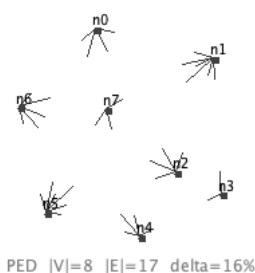


図2 部分エッジ描画 (PED)

2. 研究の目的

部分エッジ描画にエッジのモーフィングを取り入れた描画手法を、報告者は「モーフィングエッジ描画 (Morphing Edge Drawing; MED)」と名付けた[6]。MED では各エッジが完全描画と部分描画の間をモーフィングにより繰り返し変化する。図3は図1や図2と同じグラフをMEDで表現した例である。ただし、MEDはアニメーション表現であるため、図3では時間軸に沿ったスナップショットで示している。なお、図3において赤いエッジは周期の最初にモーフィングを開始したことを、背景がグレーのフレームは次の周期 (2周目) であることを表している (図7~10においても同様)。

本研究での目的は、モーフィングエッジ描画 (MED) によるグラフ描画手法を洗練させるとともに効果的な設計指針を明らかにすることである。技術的な課題を下のように設定する。なお、ここで言う「可読性」とはグラフの読み取り精度と読み取り速度によって計測するものとする。

- 可読性に関して、完全エッジ描画と部分エッジ描画の強みを兼ね備えた手法を開発する。
- さらに、完全エッジ描画や部分エッジ描画を越える可読性を備えた可視化手法を開発する。

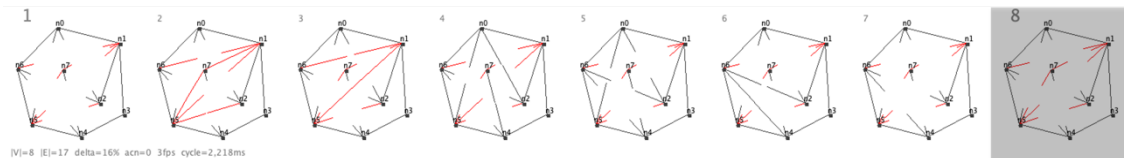


図3 モーフィングエッジ描画 (MED) のスナップショット

3. 研究の方法

設計空間に関する以下の項目に沿って研究を進めた。

(1) **モーフィングの形態** : PED ではエッジの一部を省略することが基本であり、図3に示した例では、中央部分が省略されたエッジの残りの長さをモーフィングにより変化させている。その

他のバリエーションとしては、エッジの中央部分ではなく片方を省略する形態も可能であり、有向エッジの表現にはおそらくその方が適している。また、PEDの変形として、エッジの一部を省略する代わりに、線分の透明度を段階的に高くすることでエッジ中央付近を見えなくする表現も考えられ、このような表現でも交差を無くし視覚的乱雑を低減させる効果が期待できる。そのため、色や透明度のような視覚属性を段階的に変化させるようなモーフィングも含めて、様々なモーフィングの形態を検討する。また、モーフィングを用いることで、静止画では使えなかったゲシュタルトの法則(共通運命の法則)が表現に利用できるため、その有効活用も視野に入れる。

(2) **モーフィングのスケジューリング**：国際会議 GD 2019 で発表した手法[6]では、PED に比べてエッジの交差を増さないように、部分描画されたエッジがモーフィングによって交差しないようにスケジューリングした。またモーフィングの総時間を短くするためにエッジが完全な線分になる時間を短時間に設定した。しかしながら、新たな交差が発生しないという条件では、大規模グラフを対象とした場合には、多くのエッジがモーフィングの開始を待つことになり、総時間が長くなってしまふ。そこで、瞬間的な交差数を最大 k までは許容するという条件を新たに設定し、それらを満足するようなスケジューリングのアルゴリズムを開発する。

(3) **モーフィングの速度**：モーフィングの速度は、読み取り速度と読み取り精度の両方に影響し、直感的には読み取り速度とは正の相関があり、読み取り精度とは負の相関があると推測される。ただし、描画対象となるグラフの規模や、モーフィングの形態やスケジューリングにおける要件との関連も高いと考えられることから、可読性の評価実験を通して検討する。

4. 研究成果

(1) モーフィングの形態

①表現形態のバリエーションとしては、まずは静止画の状態における有効性を確認すべきだと考え、部分エッジ描画 (PED) における表現形態のバリエーションを次のように設計した。

- (a) 部分描画されたエッジからエッジの長さを推測しやすくするために、ノードを中心として同心円を描く。
- (b) 視覚的混雑を抑えつつ隣接関係を読み取りやすくするために、部分エッジ描画において省略された部分を薄い色で描く。

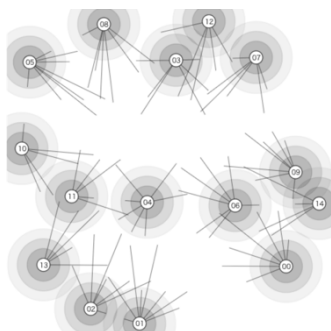


図 4 部分エッジ描画への同心円の付加



図 5 部分エッジ描画への薄色線の付加

これらの形態の有効性を確認するための評価実験を行なったところ、ノードを中心として同心円を描くものは、同心円とエッジの交差が発生することから、視覚的混雑を増加させる結果となった。その一方で、部分エッジ描画の省略部分を薄い色で描く方法は、好感を得られたことが分った。これにより、半透明の薄い色の利用はグラフの可読性向上に有用であると考えに至った。この成果は、情報処理学会 HCI 研究会で発表した[7]。

②グラフの可読性はエッジの交差の影響を受ける。そこで、交差を構成する 2 本のエッジの透明度が異なるとした場合に、透明度が可読性にどう影響するかを調べる実験を行った。グラフを視覚的に表現した連結図を見て、指定した二つのノード間に条件に合うパスが存在するかどうかを読

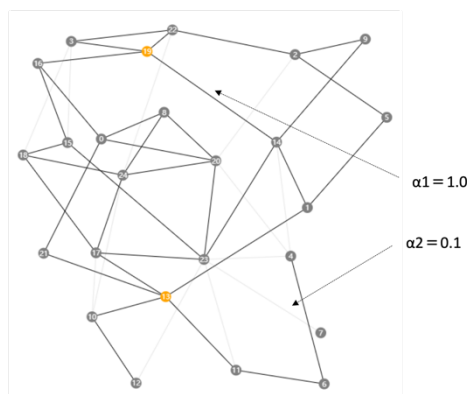


図 6 不透明度の異なるエッジによる表現

み取るタスクを行うことで、可読性の評価を行うことにした。連結図を作成するにあたり、「指定する二つのノードに接続するエッジに交差するエッジ群」とそれ以外のエッジ群で不透明度を変える（揃える場合も含む）ことにした（図6）。不透明度を10%から100%（=不透明）まで10段階とし、それらの組み合わせ（不透明度が同じ場合も含む）100通りについて、連結図を作成し、可読性評価を行なった。全般的にはパスを追いたいエッジの不透明度が高く、それに交差するエッジの不透明度が低い方が読み取りには有利であることは確認できたが、規則性を見出すには追試およびさらに詳細な分析が必要である。

(2) **スケジューリングアルゴリズムの開発**：モーフィングの周期が読み取り速度に影響を与えると考え、3種類の観点でスケジューリングを発展させた。

- ① **周期を重ねる**：すべてのエッジが最短の状態に戻る前に次の周期を開始しても、必ずしも交差は発生しないことに注意して、周期を短縮する（図7）。

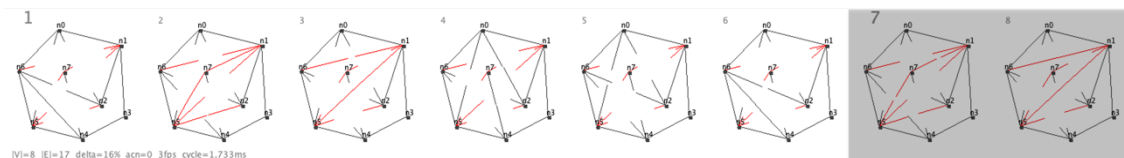


図7 周期を重ねたスケジューリングの例

- ② **1周期内で複数回モーフィングを行う**：これまでのスケジューリングでは、1周期中にひとつのエッジは1回しか伸縮しないが、エッジによっては交差を発生させずに2回以上の伸縮が可能である。これらにより、エッジ毎の平均モーフィング周期を短縮できる可能性がある（図8）。

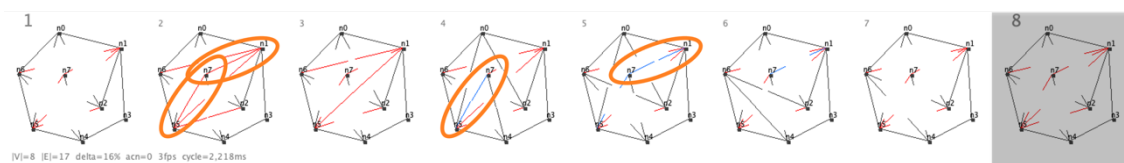


図8 1周期内に複数回の伸縮を行うスケジューリング例

オレンジ色の楕円で囲んだエッジが1周期内で2回伸縮している。

- ③ **交差を許容する**：交差数を増やさないという条件を緩めて、瞬間的な交差数を各エッジにつき最大 k までには許容することにすれば、モーフィング周期を短縮できる可能性がある（図9）。

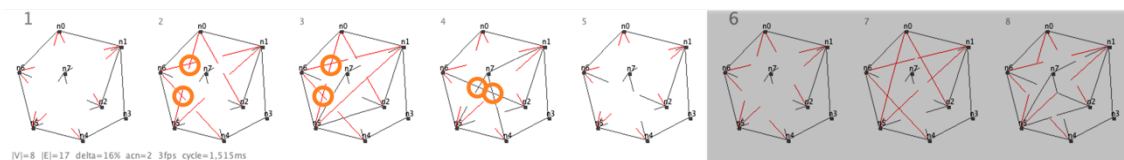


図9 交差を許容するスケジューリング例

オレンジ色の円内で交差が発生している。

図10は①から③をすべて組み合わせたスケジューリングの例を示している。これらについて、プログラムの実装が完了した。この成果は、グラフ描画に関する国際会議で発表した[8]。

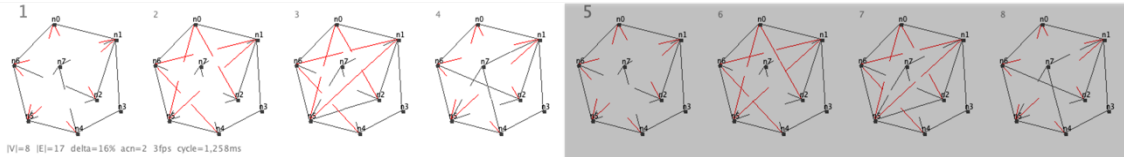


図 10 周期の重ね合わせ、1 周期内での複数回伸縮、交差の許容を、全て組み合わせたスケジューリング例

(3) モーフィングエッジ描画の可読性評価：MED の可読性に関しては先行研究[6]においても行われていたが、スケジューリングアルゴリズムの拡張等を踏まえて、さらに踏み込んだ実験を試みた。比較対象として考慮した観点は以下の通りである。

(a)部分描画されたエッジの伸縮速度：伸縮速度が速い方がモーフィングの周期を短くできるが、読み取りがしにくくなる。伸縮速度が読み取り時間と読み取り精度にどう影響を与えるかを調べる。なお、そもそも完全描画と部分描画の間をモーフィングによって変化させること自体の有効性も調べるために、伸縮速度を無限大にした場合、すなわちエッジを徐々に変化させるのではなく部分描画と完全描画を一瞬で切り替えるものも含めた。

(b)エッジが完全描画になった状態を維持する時間：先行研究の実験では部分描画されたエッジが接触する時間が 0（瞬間的な接触）であったことから、読み取りが難しかったと考えた。そのため接触時間を 0 より大きい場合の可読性も調べる。

(c)許容交差数交差数：伸縮速度を遅くすると読み取り易くなるが、周期が長くなる。しかしながら、交差を許容することで、周期を短くできる可能性がある。周期が同じ場合には、伸縮速度が速くても交差が無い方が可読性にとってはよいか、多少交差が発生しても伸縮速度が遅い方がよいかを調べる。

ただし、今回実施した範囲においては規則性を見出すには至っていない。今回の経験を活かして、実験参加者を増す他、実験で使用するグラフの規模や性質を見直すなどして、改めて実験を行うことを考えている。

<引用文献>

- [1] Holten, D. (2006). Hierarchical Edge Bundles: Visualization of Adjacency Relations in Hierarchical Data, In: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 12, no. 5, pp. 741-748. doi: 10.1109/TVCG.2006.147.
- [2] Nocaj, A., Ortmann, M., Brandes, U. (2014). Untangling Hairballs. In: Duncan, C., Symvonis, A. (eds) Graph Drawing. GD 2014. Lecture Notes in Computer Science (LNCS), vol 8871, pp. 101-112. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45803-7_9
- [3] Bruckdorfer, T., Kaufmann, M. (2012). Mad at Edge Crossings? Break the Edges!. In: Kranakis, E., Krizanc, D., Luccio, F. (eds) Fun with Algorithms. In: FUN 2012. Lecture Notes in Computer Science (LNCS), vol 7288. doi: doi.org/10.1007/978-3-642-30347-0_7.
- [4] Bruckdorfer, T., Kaufmann, M., Leiblle, S. (2015). PED User Study. In: Di Giacomo, E., Lubiw, A. (eds) Graph Drawing and Network Visualization. GD 2015. Lecture Notes in Computer Science (LNCS), vol 9411. pp.551-553. doi: 10.1007/978-3-319-27261-0_47.
- [5] Binucci, C., Liotta, G., Montecchiani, F. and Tappini, A. (2016). Partial edge drawing: Homogeneity is more important than crossings and ink, In: 2016 7th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA), pp. 1-6. doi: 10.1109/IISA.2016.7785427.
- [6] Kazuo Misue, Katsuya Akasaka. (2019). Graph Drawing with Morphing Partial Edges. In: Archambault, D., Tóth, C.D. (eds) Graph Drawing and Network Visualization. GD 2019. Lecture Notes in Computer Science (LNCS), vol 11904, pp. 337-349. doi: 10.1007/978-3-030-35802-0_26.
- [7] 藤沼美波, 三末和男, グラフの部分エッジ描画における読み取りを補助する表現の研究, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , 2022-HCI-200(1), pp. 1-8, 2022 年. <http://id.nii.ac.jp/1001/00221938/>.
- [8] Kazuo Misue. (2023). Improved Scheduling of Morphing Edge Drawing. In: Angelini, P., von Hanxleden, R. (eds) Graph Drawing and Network Visualization. GD 2022. Lecture Notes in Computer Science (LNCS), vol 13764. pp. 336-349. doi: 10.1007/978-3-031-22203-0_24.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kazuo Misue	4. 巻 13764
2. 論文標題 Improved Scheduling of Morphing Edge Drawing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Graph Drawing and Network Visualization. GD 2022. LNCS	6. 最初と最後の頁 336 ~ 349
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-031-22203-0_24	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazuo Misue	4. 巻 -
2. 論文標題 Improved Scheduling of Morphing Edge Drawing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1 ~ 14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48550/arXiv.2208.11305	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤沼 美波, 三末 和男
2. 発表標題 グラフの部分エッジ描画における読み取りを補助する表現の研究
3. 学会等名 情報処理学会 第200回ヒューマンコンピュータインタラクション研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------