

筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

論文の引用関係からみる  
学術分野の発展推移の可視化

佐々木 耀

指導教員 三末 和男, 志築 文太郎, 田中 二郎

2015年 1月

## 概要

研究者が専門とする学術分野の研究動向を把握することは、研究テーマを決定し、研究の新規性、技術的发展を示す上で重要である。従来の研究動向の把握方法は、専門分野に関連する過去の論文を1つずつ閲覧することや、分野について広く取り上げた文献やWebサイトを閲覧することであった。しかし、新しい概念や要素技術がいつ出現したかや、どのような研究がどのような研究に影響を受け发展していったのかという過程を把握することが大変であった。

本研究では論文の引用関係に着目し、「時系列に沿った研究分野の发展の推移」と、「類似する論文の集合や引用の関係」を階層的に表現する可視化手法を開発した。ある論文が最も影響を受けたと思われる論文を選出し、それを元に類似する論文の集合を定義した。それらを1つのまとまりとして、関係の連結、時系列に沿った配置をおこなうことによって、学術分野の发展の過程を表現した。類似する論文や引用の関係を表現することによって、着目した論文の集合や個々の論文についての詳細な情報の探索を可能にした。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	学術論文と引用関係	1
1.2	学術分野の発展推移と研究動向の把握	1
1.2.1	学術分野の発展推移	1
1.2.2	研究動向の把握とその支援	2
1.3	本研究の目的とアプローチ	2
1.4	本研究の貢献	3
1.5	本論文の構成	3
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>4</b>
2.1	研究分野の発展動向の可視化に関する論文	4
2.2	学術論文の探索支援における可視化に関する論文	4
2.3	学術論文の引用分析に関する論文	5
2.4	ネットワークの可視化手法に関する論文	5
<b>第3章</b>	<b>研究動向の把握についての要求</b>	<b>7</b>
3.1	学術分野の発展推移に関する情報	7
3.1.1	新概念、要素技術の出現	7
3.1.2	発展の過程	8
3.2	研究動向の把握のための要求	8
<b>第4章</b>	<b>研究動向の把握を補助するための手法</b>	<b>10</b>
4.1	利用データ	10
4.2	前処理	10
4.3	可視化手法	12
4.3.1	系統樹	12
4.3.2	モジュールの描画	12
4.3.3	親子関係以外の引用関係描画	14
<b>第5章</b>	<b>グラフの描画規則</b>	<b>15</b>
5.1	マクロ構造を表現するグラフの描画	15
5.2	ミクロ構造を表現するグラフの描画	16
5.2.1	パラメタの調整	17

<b>第 6 章</b>	<b>ユースケース</b>	<b>18</b>
6.1	ツールの開発 . . . . .	18
6.2	UIST における 10 年分の論文を用いた学術分野進化系統樹の作成 . . . . .	18
6.3	InfoVis における 8 年分の論文を用いた学術分野進化系統樹の作成 . . . . .	22
6.4	考察 . . . . .	25
<b>第 7 章</b>	<b>議論</b>	<b>26</b>
<b>第 8 章</b>	<b>結論</b>	<b>27</b>
	参考文献	<b>29</b>

# 目 次

4.1	親子関係のモジュール化 . . . . .	12
4.2	モジュールの連結表現 . . . . .	13
4.3	親子以外の引用関係の描画 . . . . .	14
5.1	透明なエッジによるモジュール内部表現 . . . . .	16
6.1	2004 年から 2013 年に発表された UIST の論文を可視化した例 . . . . .	20
6.2	着目する最も大きな木 . . . . .	21
6.3	2006 年から 2013 年に発表された InfoVis の論文を可視化した例 . . . . .	23
6.4	着目する木の一覧 . . . . .	24

# 表目次

6.1	木に含まれるモジュールの表す論文の題目例 . . . . .	21
6.2	木に含まれるモジュールの表す論文の題目一覧 . . . . .	24

# 第1章 序論

## 1.1 学術論文と引用関係

情報技術の発展により、文献は電子データとして保管されるようになった。学術論文（以下論文とする）についても同様であり、デジタルライブラリなどによって電子的に保管される。

論文は書誌情報を持つ。具体的には「著者名」、「出版年」、「会議名」、「キーワード」、「引用情報」などであり、それらはメタデータとして論文と共に保管される。書誌情報は論文の検索に利用される。研究者は論文を探索する際、ある著者やある研究テーマに関して、書誌情報から検索をおこなうことで目的の論文を見つける。

論文に含まれる書誌情報には、どの論文を引用しているかの「引用情報」が含まれる。ある論文が他の論文を引用している場合、その論文間には引用、被引用の関係がある。論文がある論文を直接引用している関係を直接引用と呼ぶ。多く引用されている論文は、学術分野に大きな貢献をした価値のある論文として評価される。論文の関係を示す指標には直接引用だけでなく、同じ論文を引用している「共引用」や、同じ論文に引用されている「書誌結合」などが存在する。また、これらの引用関係によって、論文は大規模なネットワーク構造を形成する。

## 1.2 学術分野の発展推移と研究動向の把握

本論文における「学術分野」は、学術雑誌や学会が存在する分野単位を表す。研究者は自らの研究についての論文を執筆し、新しい概念や技術を学術分野に提供することによって、その分野の発展に貢献する。学術分野の発展推移は論文の発表と論文間の関連によって表すことができ、それらは研究の動向を把握する上で重要な役割を担う。論文間の関連は引用関係、著者の共通、キーワードや研究テーマの類似によって表す。

### 1.2.1 学術分野の発展推移

学術分野の発展は、新概念や要素技術の出現とそれらの関連によって表される。新概念や要素技術を提唱する論文は時系列情報を持ち、関連は古いものから新しいものへの推移として表すことができる。

本論文では学術分野の発展推移について「新概念、要素技術の出現」と「発展の過程」に注目する。「新概念、要素技術の出現」は、学術分野の発展に大きく貢献するような論文、研究の出現である。「発展の過程」は、時系列に沿った継続的な論文の出現を表す。

### 1.2.2 研究動向の把握とその支援

研究者が研究テーマを決定し、研究の新規性、技術的發展を示す上で、研究分野の動向を把握することは非常に重要である。研究動向の把握には前項で述べた、その学術分野の発展推移についての知識を獲得することが必要となる。なぜならば、どのような過程を経て分野が発展していったのかを知ることで分野としての特徴を理解し、現在どのような研究テーマが注目されているのかについて把握し、これからどのような研究テーマが注目されるかを予測するための助けになるためである。

研究者は研究動向を把握するために、その学術分野について関連のある論文や書籍を閲覧する。閲覧する論文については、Google Scholar<sup>1</sup> や Microsoft Academic Search<sup>2</sup> などの、学術論文に特化した検索エンジンを用いて検索をおこなう。論文を読むことによって得られる知見は局所的であるため、研究動向の把握のために研究者は膨大な数の論文を読む必要がある。書籍については、ある学術分野について広くとりあげたものが多く存在する。新しく研究をはじめめる研究者や、新しくその研究分野に取り組む研究者は特に、書籍を閲覧することで関連分野に関する広い知識を得る。

現状、論文や書籍の閲覧は、研究動向の把握を支援するために広く用いられる手段であるが、いずれも新概念や要素技術の一部や、発展の推移の一部を参照するものである。学術分野について「発展の過程」を俯瞰し、気になる研究テーマについて、時系列に沿って関連を辿ることで、着目すべき「新概念、要素技術の出現」を発見し、それに関連する論文や論文の引用群を参照、閲覧することが可能ならば、より効率的な研究動向の把握のための知識獲得を実現することができる。

## 1.3 本研究の目的とアプローチ

本研究はある学術分野についての研究動向の理解補助を目的とする。これを実現するために、論文の引用関係を用いた、学術分野における発展推移を可視化する「学術分野進化系統樹」を制作する技術を開発する。

「学術分野進化系統樹」は「時系列に沿った研究分野の発展の推移」と、「類似する論文の集合や引用の関係」を階層的に表現することで実現する。「学術分野進化系統樹」を利用することで、研究者はある学術分野についていつどのような研究が出現し、研究がどのような研究から影響を受け、どのような研究テーマの発展に貢献したかを知ることができる。つまり、研究動向の理解を補助し、研究を効率的に進めることができるようになる。

---

<sup>1</sup><http://scholar.google.co.jp/>

<sup>2</sup><http://academic.research.microsoft.com/>

## 1.4 本研究の貢献

本研究は、研究動向の理解を補助するために、学术论文の引用関係に着目し、木構造を描画するための機能を提案した。研究者はこれを用いて描画されるグラフを操作することで、そのデータセットがあらわす学術分野の発展の推移を確認するとともに、その要素である学术论文を確認し、アクセスすることができる。また、発展の推移を確認することで、現在主流になっているようなテーマや、今後発展が期待されるテーマを効率的に発見することができる。特に、その分野に関して知識の乏しい、研究の初心者が利用することで、より効率よく分野全体についての知識を獲得できるようになる。

## 1.5 本論文の構成

本章では研究動向の把握とその補助について説明し、研究の目的とアプローチを述べた。第2章では関連研究を述べ、第3章では目的を満たすための要求を挙げる。第4章では開発した手法の概要を述べ、第5章でグラフを描画するための仕様について説明する。第6章では実際の論文データについて可視化をおこない、考察を述べる。第7章で本手法が要求を満たしているかの議論をおこない、第8章で結論を述べる。

## 第2章 関連研究

本論文に関連する論文として、研究分野の発展動向の可視化に関する論文、学術論文の探索支援における可視化に関する論文、学術論文の引用分析に関する論文、ネットワークの可視化手法に関する論文の4つを挙げる。

### 2.1 研究分野の発展動向の可視化に関する論文

研究分野の発展動向においては、主に分野間の発展の推移から、今後どのような分野が発展していくのかなどの未来予測のために可視化を用いることがある。Elmqvistらは、科学系論文の引用ネットワークを可視化するための拡張可能なフレームワークであるCiteWizを開発した[1]。データの概要としてのタイムラインと詳細な影響を見るための複数ビューをインタラクティブな操作によって繋いだ。Kurokawarらは、共著ネットワークから今後の研究活動への洞察を得るユーザーをサポートする可視化システムを開発した[2]。共著関係をノードリンク diagram で表現し、ノード内にパイチャートを描画することでキーワードの分布を表した。HenryらはAVI、CHI、UIST、InfoVisと呼ばれる、ヒューマンコンピュータインタラクションにおける4つの代表的なカンファレンスについての分析、可視化をおこなった[3]。Chenらは科学文献における研究テーマの発展動向把握のための統合環境であるCiteSpaceを開発した[4]。論文と論文間の引用関係に加えて、論文を表したノードのリングに付いた色の変化によって、年による論文の被引用情報を表した。Chenらの研究では分野ごとにまとめて複数分野について可視化することで、よく引用された科学文献クラスターを発見できる。

本研究ではChenらの研究と同様に論文間の引用関係を利用するが、着目したある1つの分野について、論文ごとの引用関係を可視化する。また、研究分野の発展動向を理解するために、Henryらの研究と同様に、その分野の代表となるようなトップカンファレンスに関する論文情報を利用する。

### 2.2 学術論文の探索支援における可視化に関する論文

学術論文の探索、いわゆるサーベイについて、作業を支援するために可視化を用いる研究が行われている。Edwardらは検索結果として出力された複数の論文について、それらを研究トピックによってクラスタリングし、treemapと呼ばれる可視化手法によって表現するResultMapsを開発した[5]。Vanらは論文間を引用関係で接続することによって論文の探索を支援するCitNetExplorerの開発をおこなった[6]。また、Sarahらは、研究者のサーベイに対する要求を

集め、これらを満たすための視覚的表現を開発した [7]。Sarah らは、調査から著者、共著関係、論文及び共引用関係が重要とし、それぞれについてプロトタイプとして可視化手法の提案をおこなった。

本論文では、Sarah らの示した要求の中で、特に論文とその引用関係について注目し、可視化をおこなう。

## 2.3 学術論文の引用分析に関する論文

学術論文の引用分析は、古くから研究が行われている。Pricera は、「論文のうちの極少数が多数の論文から引用される」ということを発見した [8]。本論文ではこれを前提として可視化の設計をおこなう。また、少数の高被引用論文からなる密な集合をリサーチフロントと呼び、それらが学術領域における一分野を形成するとした。Jeh らは、類似するオブジェクト同士は類似するオブジェクト同士に関連付けられるという仮定より、オブジェクトとオブジェクトの関係から類似度を求める SimRank というアルゴリズムを開発した [9]。SimRank は再帰的に全てのオブジェクトの類似度を計算するものである。本論文についても、論文間の類似度を計算するため、Jeh らの手法を参考とした。

## 2.4 ネットワークの可視化手法に関する論文

本論文で扱う引用関係は比較的大規模なネットワークを形成する。大規模なネットワークを表現するための表現技術として、幾つかのミクロ構造とそれらミクロの構造をノードとするマクロ構造に分けてレイアウトや表示を行う技術が存在する。このような 2 種類以上の構造を合わせて提示するグラフは複合グラフと呼ばれる。

三末らは、情報構造やモデル構造などの概念の表現や伝達を目的とした複合グラフの自動描画法を提案した [10]。本研究においては限定的な要求に対して、三末らの研究と同様に断片的情報群の整理、組織化を行うための複合グラフを設計する。Pater らは、一般グラフ構造と木構造の両方の特性を持つクラスタグラフの描画手法を提案した [11]。Henry らは、行列表現とノードリンクダイアグラムの複合グラフによって大規模グラフの把握を支援する手法を提案した [12]。これは密な連結関係にある部分グラフに行列表現を用いるハイブリットな形式の手法である。Baur らは、大規模なネットワーク構造に対して、ミクロ構造として円周配置をおこない、マクロ構造として力指向レイアウトを用いることにより、概観の把握と詳細な情報の把握を支援した [13]。また、Baur らは円を周回するようにエッジの配線を工夫することにより、エッジの可読性を向上させた。

Baur らのように、大規模なネットワークをエッジの表現手法に関して、ネットワークの連結度が高くエッジが密な場合は、エッジの煩雑さを解消するための工夫が必要となる。Holten らは、エッジを緩やかにまとめあげることによって視覚的な煩雑さを解消する Edge Bundling の手法を提案した [14]。Dwyer らは、同一のエッジを持つノードをモジュールでまとめあげ、エッジの置き換えをおこない、エッジを減らす手法を提案した [15]。また、このモジュール

表現の最適な視覚化を目指した。Dwyer らの研究では、単に視覚的な煩雑さの解消を目指すためだけではなく、意味単位としてモジュール構造を用いることについても述べられている。本研究では、視覚的煩雑さを解消すると同時に、この「意味を持つモジュール」の表現を用いる。

## 第3章 研究動向の把握についての要求

本章では、学術分野の発展推移に関する情報について整理し、研究動向の把握を支援するための要求を挙げる。

### 3.1 学術分野の発展推移に関する情報

本論文では、発展推移の理解に必要な情報として「新概念、要素技術の出現」と「発展の過程」に着目する。

第1章で述べたように、学術分野の発展は、新概念や要素技術の出現とそれらの関連によって表される。新概念や要素技術を提唱する論文は「出版年」という時系列情報を持ち、関連は古いものから新しいものへの推移として表すことができる。

#### 3.1.1 新概念、要素技術の出現

「新概念、要素技術の出現」は、学術分野の発展に大きく貢献するような論文の出現を表す。学術分野の発展に大きく貢献する論文とは、多くの研究者によって注目され、関連する研究がより盛んに行われるようになるような論文である。関連する研究がより盛んに行われることによって、関連する新しい概念や要素技術の出現が促される。よって「新概念、要素技術の出現」は、研究分野の動向を把握する上で重要であると考えることができる。

「新概念、要素技術の出現」において、どのくらいの影響を与えたのかという「影響の規模」や、どのような論文に影響を与えたのかという「影響の関係」を知ることが重要である。なぜならば、影響の規模を知ること、ある論文が関連分野にどれくらいの影響を与えたのかを理解し、影響の関係をj知ること、どのように分野の発展に貢献したかを理解することができるためである。

論文の学術分野に対する貢献度の指標として一般的に用いられるのは、論文がどれくらいの論文に引用されているのかを表す「被引用数」である。被引用数が多いほど、その論文が学術分野の発展に貢献したと考えることができる。また、ある論文を引用している論文群を「共引用」の関係にある論文と呼ぶ。共引用の関係にある論文群は、元となる論文に影響を受けた論文の集合と考えることができる。つまり共引用関係にある論文は、元となる論文が学術分野においてどのような影響を与えたかを表すと考えられる。

以上より、学術分野の発展推移の理解において「新概念、要素技術の出現」の理解は重要であり、そのために必要な情報として、被引用数が大きい論文とその被引用の概数、および

それを引用している論文の集合が挙げられる。

### 3.1.2 発展の過程

「発展の過程」は、論文がどのように学術分野の発展に貢献したかの継続的な関連を表す。論文の貢献における継続的な関連とは、論文がどのような論文が影響を与えたのか、どのような論文に影響を受けたのかについての継続的な関係である。影響の関係を辿ることによって、どのような過程で学術分野や研究テーマが発展していったかを知ることができる。よって「発展の過程」は、研究分野の動向を把握する上で重要であると考えられる。

「発展の過程」において、論文の時系列に沿った関連を知ること重要である。例えば、ある研究テーマに関する発展の過程に着目した際に、そのテーマに関する論文が頻繁に、かつ継続的に出現しているならば、古くから現在にかけて常に研究者に注目され続けている研究テーマであるということが分かる。

論文間の関連として一般的に用いられるのは、論文の「引用関係」である。ある論文について、引用されている論文は引用している論文に何かしらの影響を与えたと考えられる。また、論文の時系列情報は「出版年」より得ることができる。

以上より、学術分野の発展推移の理解において「発展の過程」の理解は重要であり、そのために必要な情報として、論文間の引用関係と論文の出版年が挙げられる。

## 3.2 研究動向の把握のための要求

3.1 節に基づいて、本論文では以下に挙げる 4 つの要求を考慮する。

- 類似する論文の集合の提示
- 類似する論文の集合の量的規模の提示
- 論文間のすべての関係の提示
- 論文の持つ時系列情報の提示

「類似する論文の集合の提示」と「類似する論文の量的規模の提示」は、「新概念、要素技術の出現」を理解するために重要な要求である。「類似する論文の集合」は「新概念、要素技術として有用である共通の論文に影響を受けた論文の集合」と考えることができる。よって「類似する論文の集合」に着目することによって、「新概念、要素技術」として有用な論文が与えた影響についての関係を知ることができる。影響の関係をj知ることによって、ある論文がどのように分野の発展に貢献したかについての理解を補助する。「類似する論文の量的規模」は「新概念、要素技術として有用である共通の論文に影響を受けた論文の集合の規模」と考えることができる。よって「類似する論文の量的規模」に着目することによって、「新概念、

要素技術」として有用な論文が与えた影響の規模を知ることができる。影響の規模を知ることと、ある論文が関連分野にどれくらいの影響を与えたのかについての理解を補助する。

「論文間のすべての関係の提示」と「論文の持つ時系列情報の提示」は、「発展の過程」を理解するために重要な要求である。「論文間のすべての関係」は「論文がどのような論文が影響を与えたのか、どのような論文に影響を受けたのかについての継続的な関係」と考えることができる。また、「論文の持つ時系列情報」によって、論文間の継続的な影響の関係を「時系列に沿った関連」と考えることができるようになる。よって「論文間のすべての関係」と「論文の持つ時系列情報」に着目することによって、継続的な影響の関係を時系列に沿って迎えることができる。継続的な影響の関係を時系列に沿って迎えることによって、どのような過程で学術分野や研究テーマが発展していったかについての理解を補助する。

## 第4章 研究動向の把握を補助するための手法

本章では、第3章で挙げた要求を満たすための手法の説明を行う。本手法で利用するデータについて説明し、データの加工方法を示し、具体的にどのように可視化するのかについて述べる。

### 4.1 利用データ

本手法で利用するデータは以下である。

- 論文の識別情報 (ID)
- 論文の出版年
- 論文が引用している論文の識別情報
- 論文の題目

論文の出版年は、時系列情報を提示するために用いる。論文の引用情報は論文間の関係情報の提示と類似する論文の発見のために用いる。また、論文の題目は結果の提示のために用いる。

### 4.2 前処理

本手法において論文のまとまりを表現するための集合を定義する。それを用いて、データの加工方法を説明する。

元となる論文のノードの集合を  $N$ 、その引用関係のエッジの集合を  $E$  とし、論文データ全体を  $G = (N, E)$  と表す。引用関係には、引用元と引用先という関係がある。引用元の論文を  $a$ 、引用先の論文を  $b$  としたとき、ある論文間の引用関係  $e$  について  $e = (a, b)$  と表すものとする。論文は、過去に出版された論文のみを参照するものとする。よって  $G$  は非閉路有向グラフである。

「親」を、「ある論文が最も影響を受けたと思われる1つの論文」と定義する。ある論文とその論文が引用する論文それぞれとの間の類似度を計算し、最も類似度の大きい論文を最も影響を受けた論文、つまり「親」とする。類似度の計算式は以下を用いる。

$$s(a, b) = |I(a) \cap I(b)| \quad (4.1)$$

論文  $b$  は論文  $a$  が引用している 1 つの論文とする。また、 $I(a)$  は論文  $a$  が引用している論文の集合を表す。

以下では親子関係のエッジの集合を  $E_{family}$ 、その他の引用関係のエッジの集合を  $E_{cite}$  とする。 $E_{family}$  について、親と子は 1 対  $N$  の関係を満たす。よって  $G_{family} = (N, E_{family})$  は部分グラフが木を成すと考えることができる。

「モジュール」を「共通の親を持つ論文の集合」と定義する。モジュールは、ある論文が複数の論文の親である場合にのみ存在する。あるモジュールを  $m_i$  とすると、以下のように表すことができる。

$$m_i = \{n | (n, n_i) \in E_{family}\} \quad (4.2)$$

モジュール  $m_i$  に対応する親の論文が  $n_i$  となる。 $|m_i|$  が大きいモジュールに対応する親の論文は、子の論文を多く持つ。つまり  $|m_i|$  が大きいならば、論文  $n_i$  は高被引用論文であり、学術分野の発展に貢献した、影響力の大きい論文であると考えることができる。

$E_{family}$  の要素の中には、複数の子が、共通の親に対して関係を持つ場合がある。この時、共通の親を持つ  $E_{family}$  の部分集合は、共通の親を持つ論文の集合であるモジュールと、対応する論文との関係と考えることができる。この関係の集合を  $E_{families}$  とすると以下のように表すことができる。

$$E_{families} = \{(n_i, m_i) | n_i \in N, m_i \in M\} \quad (4.3)$$

以上より、論文データ  $G$  を加工した  $G_p$  は以下ようになる。 $E_{tree}$  は親子関係を表す。

$$G_p = (N, M, E_{tree}, E_{cite}) \quad (4.4)$$

$$N = \{n_1, n_2, \dots, n_p\} \quad (4.5)$$

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_p\} \quad (4.6)$$

$$E_{tree} = \{e_1, e_2, \dots, e_q\} \quad (4.7)$$

$$E_{cite} = \{c_1, c_2, \dots, c_r\} \quad (4.8)$$

$$e_x \in \begin{cases} \{(n_i, n) | n_i, n \in N\} & (|m_i| = 1) \\ \{(n_i, m_i) | n_i \in N, m_i \in M\} & (otherwise) \end{cases} \quad (4.9)$$

### 4.3 可視化手法

加工したデータを可視化する方法について説明する。本手法では、マクロ構造としての複数の木構造を表す可視化と、ミクロ構造としての可視化を階層的に表現する。可視化にはノードリンクダイアグラムを用いる。論文1件をひとつの「論文ノード」に対応づけ、図的には1つの円として表現する。

#### 4.3.1 系統樹

「学術進化系統樹」は、生物の進化やその分岐した道筋を枝分かれした図として表現する「系統樹」を模す。系統樹は共通の祖先を持つと考えられる生物種や遺伝子間の進化の関係を樹木上に表した図であり、全体は木構造を成す。枝分かれによって分岐を示し、枝の長さによって進化の程度や時間の経過を表すことがある。生物の発展の推移を相対的な位置情報によって理解することができる。また、一般的に馴染みのある図であり、誰もが直感的に発展の推移を理解することができる。

#### 4.3.2 モジュールの描画

モジュールは円で描画する。モジュールを表す円の内部には、モジュールの集合に含まれる論文ノードを描画する。この親の論文ノードと対応するモジュールをエッジで連結することで、親子関係を描画する(図4.1)。以下ではこのエッジを「親子関係エッジ」と表す。

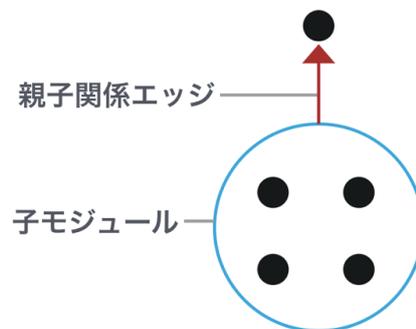


図 4.1: 親子関係のモジュール化

モジュールの描画は、本来各々を親の論文ノードとエッジで連結しなければならないものをまとめあげ、一本のエッジで表現することによって、モジュールに含まれる論文を単に集合として表現するだけでなく、エッジの本数を削減し、視覚的煩雑さを解消する。

また、あるモジュールの内部にある論文ノードについて、その論文ノードを親とするモジュールの描画をする、ということを繰り返すことで、モジュールを連結し、木構造を表現する(図 4.2)。これらはマクロ構造としての複数の木を描画する。この時、モジュールを生成しない、つまり親子関係が1対1である論文ノードに関しては、論文間を有向エッジで結合することで親子関係を表現する。

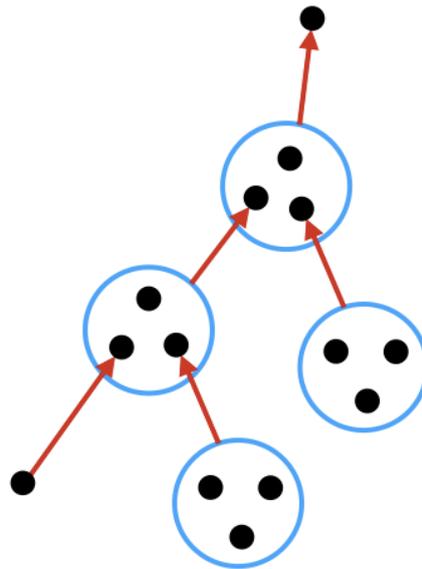


図 4.2: モジュールの連結表現

### 4.3.3 親子関係以外の引用関係描画

論文は親以外にも複数の引用を持つ。親子関係以外の引用関係を表すエッジを、半透明のエッジとして、引用元を表す論文ノードと、引用先を表す論文ノードを連結する形で描画する(図4.3)。親子関係以外の引用関係を表すエッジはマイクロ構造としてのネットワーク構造を表現する。

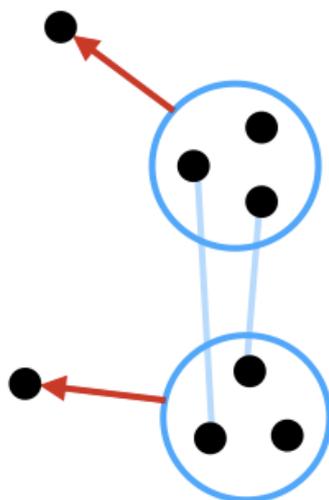


図 4.3: 親子以外の引用関係の描画

## 第5章 グラフの描画規則

本章では、描画するグラフについて、階層構造を描画するための規則とパラメタの割り当てに関する説明をおこなう。

本手法はグラフの描画にあたり、Bostockらの  $D^3.js$  ライブラリを利用した [16]。複合グラフを描画するにあたって、マクロ構造、ミクロ構造のそれぞれについての描画について説明する。

### 5.1 マクロ構造を表現するグラフの描画

マクロ構造を表すグラフは複数の木構造を持つノードリンクダイアグラムからなる。本手法ではマクロ構造を表すグラフの描画を力指向レイアウトによっておこなう。力指向レイアウトはDwyerらの手法を用いる [17]。Dwyerらの手法では、一般的なノード  $V$  とエッジ  $E$  で形成されるグラフ構造  $G = (V, E)$  を描画するために利用される。よって、本論文で扱うグラフ構造との対応付けを行う必要がある。マクロ構造を表すグラフを  $G_{macro}$  とすると、以下のように表される。

$$G_{macro} = (N, M, E_{tree}) \quad (5.1)$$

上式について、 $V = N \cup M, E = E_{tree}$  とすることで、Dwyerらの手法との対応付けを実現することができる。

また、一つの木に着目した時に、その時系列情報の把握を可能にするため、それぞれの論文ノードに「相対位置による推移の提示」と「明度による出版年の提示」をおこなう。

「相対位置による推移の提示」は、木構造を成すエッジに連結された論文ノードを描画の際に上下に移動することで実現する。 $D^3.js$  ライブラリでは、描画位置の決定の際に Verlet integration と呼ばれる手法を用いる。Verlet integration は、分子動力学法などにおいて、原子間に働く力を元に原子を逐次的に動かすことに用いられる手法である。本手法では、論文ノードの位置を上下に移動させるために、全ての論文ノードについて逐次的に以下の処理をおこなう。時間を  $t$ 、論文ノードもしくはモジュールを  $n$  とし、その位置を  $\vec{R}_n(t)$ 、質量を  $P_n$ 、かかる力の大きさを  $F_n$  とする。また、 $n$  を引用元とする親子関係エッジの集合を  $E_n^-$ 、 $n$  を引用先とする親子関係エッジの集合を  $E_n^+$  とする。 $K$  は定数である。

$$E_n^- = \{(n, a) | (n, a) \in E_{tree}\} \quad (5.2)$$

$$E_n^+ = \{(b, n) | (b, n) \in E_{tree}\} \quad (5.3)$$

$$\vec{R}'_n(t) = \vec{R}_n(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ K \cdot (|E_n^+| - |E_n^-|) \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

$$\vec{R}_n(t + \Delta t) = 2\vec{R}'_n(t) - \vec{R}'_n(t - \Delta t) + \frac{\vec{F}_n}{P_n}(\Delta t)^2 \quad (5.5)$$

これは、Verlet integration を用いて木構造を描画する際に広く用いられる手法である。実装の際は  $K = 6$  とした。以上によって、ある木に着目した際の論文ノードまたはモジュールについて、それらは古いものほど上部へ、新しいものほど下部へ移動する。

「明度による出版年の提示」は、論文ノードの色付けにおいて、新しい論文ノードほど色の明度を低く、古い論文ノードほど色の明度を高くすることで実現する。この色付けによって、ある論文ノードに着目した際におおよその出版年を把握することができる。また、あるモジュールに着目した際に、集合内に含まれる論文についてのおおよその出版年の分布を把握することができる。

## 5.2 ミクロ構造を表現するグラフの描画

ミクロ構造を表すグラフはモジュール、論文ノード、親子関係以外の引用関係エッジからなる。モジュールの集合に含まれる論文ノードをモジュールの内部に描画するために、モジュールとそれに含まれるノードを透明なエッジによって結合する。

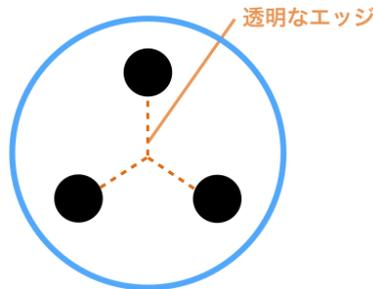


図 5.1: 透明なエッジによるモジュール内部表現

モジュール  $m$  の重心を  $m_{center}$ 、透明なエッジを  $E_{clear}$  とすると、式は以下のように表される。

$$E_{clear} = \{d_1, d_2, \dots, d_t\} \quad (5.6)$$

$$d_l = \{(m_{center}, n) | n \in m\} \quad (5.7)$$

また、親子関係以外の引用関係を表現するためのエッジ  $E_{cite}$  は、力指向レイアウトによって配置が決定したグラフ上に重畳する形で描画する。親子関係以外の引用関係を表すエッジはノード及びモジュールの配置に影響を与えない。

以上より、ミクロ構造を表現するグラフを  $G_{micro}$  とすると、以下のように表すことができる。

$$G_{micro} = (N, M, E_{cite}, E_{clear}) \quad (5.8)$$

### 5.2.1 パラメタの調整

本手法では、複合グラフを描画するにあたって複数種類のノード、エッジを定義した。よって、それぞれを描画する際に適切なパラメタを割り当てる必要がある。

本手法のグラフの描画におけるノードは、論文ノードとモジュールの2種類が存在する。モジュールの集合が持つ論文ノードの要素数は、モジュールの対応する論文がどれくらい引用されているかという量的規模を示す。この量的規模を直感的に表現するために、モジュールの集合が持つ要素数をモジュールの半径に反映させる。モジュール  $m_i$  の半径  $r_{m_i}$  は以下のようになる。 $C$  は定数とする。実装の際は  $C = 10$  とした。

$$r_{m_i} = C\sqrt{|m_i|} \quad (5.9)$$

本手法のグラフの描画におけるエッジは、親子関係エッジ、親子関係以外の引用関係を表すエッジ、モジュール内の透明なエッジの3種類が存在する。また、親子関係エッジには、論文ノードと論文ノードを結合するものと、論文ノードとモジュールを結合するものの2種類が存在する。親子関係以外の引用関係を表すエッジは重畳する形で表現するため、その他について、力指向レイアウトに必要な理想距離を設定する。親子関係エッジの理想距離を  $l_i^{parent}(a, b)$ 、モジュール内の透明なエッジの理想距離を  $l_i^{clear}(c, d)$  とすると、以下のように表す。 $S$  は定数である。実装の際は  $S = 10$  とした。

$$l_i^{parent}(a, b) = \begin{cases} r_a + 2S & (a \subset M) \\ S & (otherwise) \end{cases} \quad (5.10)$$

$$l_i^{clear}(a, b) = r_a - S \quad (5.11)$$

以上により、モジュールの集合内に含まれる論文ノードはモジュールの表す円の内部に描画され、また、木構造エッジはモジュールの内部から外部に飛び出す形で描画される。

## 第6章 ユースケース

本章では、2つのカンファレンスに採択された論文データについて、実際に「学術分野進化系統樹」を作成する。また、それによって得ることができる学術分野における研究動向に関する知見について述べる。

### 6.1 ツールの開発

本可視化手法を実際の論文データに適用させるために、ツールの開発をおこなった。本手法である「学術分野進化系統樹」について、論文ノードもしくはモジュールを選択すると、それに対応する論文の題目と出版年が画面下部に表示されるものである。着目する論文ノードまたはモジュールを選択し、その題目と出版年を確認しながら、本手法で作成した可視化手法を実際に参照していく。

### 6.2 UIST における 10 年分の論文を用いた学術分野進化系統樹の作成

User Interface Software and Technology(以下 UIST とする)の 2004 年から 2013 年に採択された 10 年分の学術論文データについて可視化を行う。UIST は、ユーザインタフェースのソフトウェア技術に焦点を当てた国際シンポジウムであり、インタフェース研究者の中では著名な学会の一つである。論文データは ACM Digital Library<sup>1</sup> から収集し、論文数は 10 年分で合計すると 468 件になった。本手法にて可視化を行った結果を図 6.1 に示す。

実際に本手法にて得ることのできる知見について述べる。目を引くのは、上部に位置する最も大きな木である。もっとも上に位置する論文は非常に大きなモジュールを持つ。このモジュールに対応する論文は「Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection」は、インタフェースにおける安価で実現可能な複数のタッチ入力の手法に関する論文であることが題目から分かる。ここ 10 年でインタフェース研究にて大きな貢献をした論文であると考えられる。モジュール内には 11 件の論文ノードが存在する。中でも継続的にエッジが連なる 5 件の論文ノードと、それに連なるノードに着目する(図 6.2)。それぞれの論文ノードに連なるモジュールの一部に関して、対応する論文の題目を表 6.1 に示す。以下では表 6.2 の識別記号を用いてモジュールに対応する論文を示す。

図 6.2(a) とそれに連なるモジュールに注目する。(a-1) (a-2) は平面ディスプレイ上のインタラクションに関する論文である。続く (a-3) は、インタラクティブに表面を変形するこ

<sup>1</sup><http://dl.acm.org/>

とができるインタフェースの論文である。平面ディスプレイ上に限定されていた操作に関する研究から、変形可能な実物体を操作する研究へと推移する様子が確認できる。また、モジュール内の論文ノードの明度が低いことから、ここ数年で盛んにおこなわれている研究であるという可能性が高い。

図 6.2(b) とそれに連なるモジュールに注目する。(b-1) (b-2) は、小さなモバイルデバイスを用いたインタラクションに関する研究である。(b-3) は、モバイルデバイスの消失、つまり端末の携帯を不要とするインタラクションに関する研究である。(b-4) は視覚的な表示を行わず、デバイスの携帯も必要としない空間的なインタラクションに関する研究である。(b-5) は装着可能な複数タッチを実現するデバイスに関する研究である。小さな携帯端末を用いた研究から、装着、携帯する必要のないインタフェースの研究へと推移する様子を確認することができる。また、後に装着型のインタフェースの再出現が確認できる。論文ノードの明度の変化が継続的に移り変わっていることから、継続的に発展を続ける研究テーマであると思われる。

図 6.2(c) とそれに連なるモジュールに注目すると、ペン入力インタフェースの研究に関する研究の発展を確認することができる。(c-1) のモジュールに続き、近年ではペンでの入力の際に物理的なフィードバックを与える研究が複数確認できる。

図 6.2(d) とそれに連なるモジュールに注目すると、テーブルトップインタフェース上でのインタラクションに関する研究の出現を確認することができる。

図 6.2(e) とそれに連なるモジュールに注目する。(e-1) は球面ディスプレイによる複数タッチ認識に関する論文である。(e-2) はコンピュータの入力に用いられるマウスについての、複数タッチ入力に関する論文である。(e-3) はタッチ入力における指の入力の強調、つまり指のどの位置でタップしたかの認識に関する研究である。(e-4) はタッチ入力における指の角度認識に関する研究である。複数のタッチ入力の識別から発展し、方向や指の位置の認識に関する研究の出現を確認することができる。

以上より、ある影響力の強いと考えられる論文を発端とし、それがどのように発展行ったかの推移について、モジュールからその影響力を読み取りながら理解を深めることができた。

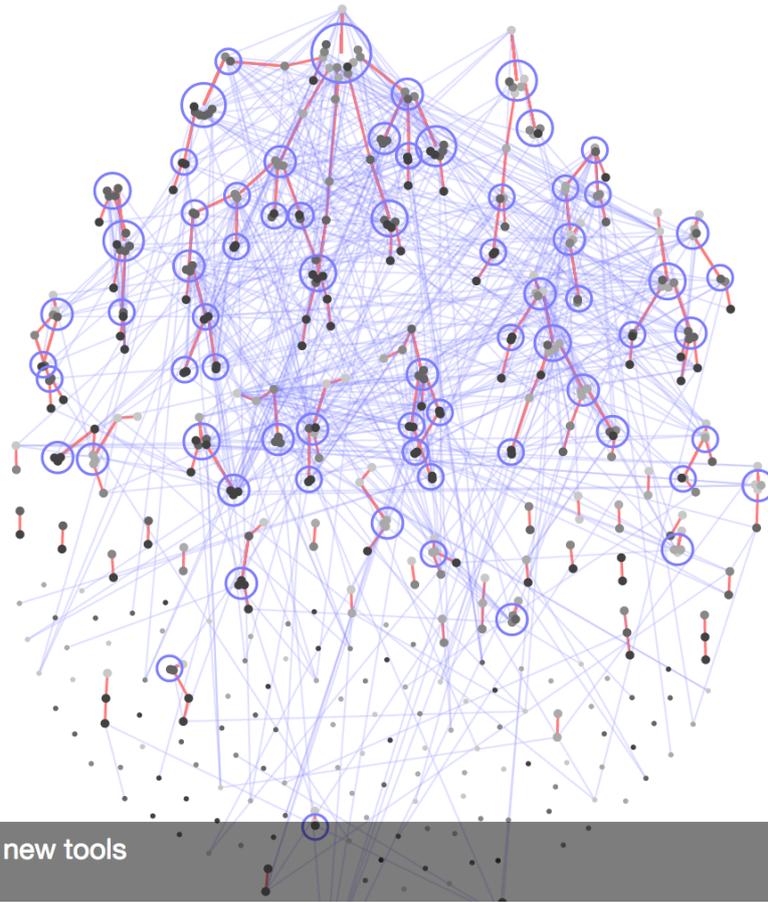


図 6.1: 2004 年から 2013 年に発表された UIST の論文を可視化した例

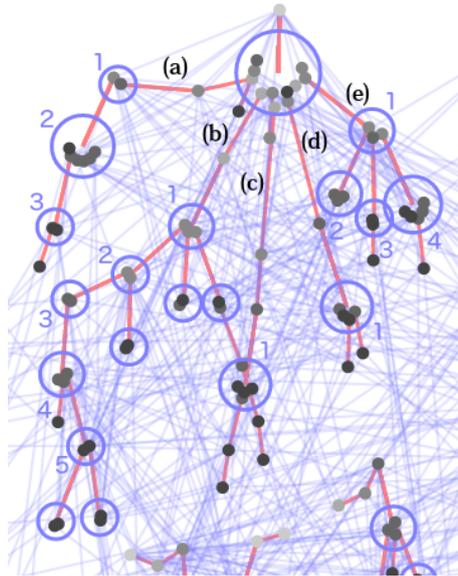


図 6.2: 着目する最も大きな木

モジュール	論文の題目
a-1	Going beyond the display: a surface technology with an electronically switchable diffuser
a-2	Interactions in the air: adding further depth to interactive tabletops
a-3	deForm: an interactive malleable surface for capturing 2.5D arbitrary objects, tools and touch
b-1	Lucid touch: a see-through mobile device
b-2	SideSight: multi-touch interaction around small devices
b-3	Disappearing mobile devices
b-4	Imaginary interfaces: spatial interaction with empty hands and without visual feedback
b-5	OmniTouch: wearable multitouch interaction everywhere
c-1	Pen + touch = new tools
d-1	Madgets: actuating widgets on interactive tabletops
e-1	Sphere: multi-touch interactions on a spherical display
e-2	Mouse 2.0: multi-touch meets the mouse
e-3	TapSense: enhancing finger interaction on touch surfaces
e-4	Detecting and leveraging finger orientation for interaction with direct-touch surfaces

表 6.1: 木に含まれるモジュールの表す論文の題目例

### 6.3 InfoVis における 8 年分の論文を用いた学術分野進化系統樹の作成

InfoVis の 2006 年から 2013 年に採択された 8 年分の学術論文データについて可視化を行う。InfoVis は、情報可視化に焦点を当てた国際シンポジウムであり、情報可視化の研究者の中では著名な学会の一つである。論文データは IEEE Computer Society Digital Library<sup>2</sup> から収集し、論文数は 277 件であった。本手法にて可視化を行った結果を図 6.3 に示す。

実際に本手法にて得ることのできる知見について述べる。大きなモジュールを持つ 5 つの木に着目し、それぞれの特徴を観察する (図 6.4)。また、それぞれの木に含まれるモジュールが表す論文の題目を表 6.2 に示す。以下では表 6.2 の識別記号を用いてモジュールに対応する論文を示す。

図 6.4(a) とそれに連なるモジュールに注目する。これは利用論文データ内でもっとも大きなモジュールを含む。このモジュールに対応する (a-1) は、エッジのまとめあげによる視覚的煩雑さの解消に関するものである。枝分かれの先には、この手法を利用した、もしくは参考にしたと思われる研究が繋がると考えられる。(a-2) は、可視化表現間の関係を示すための可視化手法である。関係性の提示にエッジを利用し、(a-1) の手法を参考にしていることが考えられる。可視化表現の関係の提示として (a-3) の研究につながっていることがわかる。また、(a-4) は遺伝子科学分野におけるシンテニーと呼ばれる現象の可視化に関する論文であるが、手法にて (a-1) を参考としていると考えられる。(a-4) がモジュールを形成していることから、情報可視化の分野では遺伝子科学分野に関する可視化の研究が多く存在することが読み取れる。

図 6.4(b) とそれに連なるモジュールに注目する。(b-1) は、可視化分野におけるインタラクションの役割に関する論文である。(b-2) は、情報可視化の分散認知に関連する論文である。(b-3) は、可視化における視覚的推論とインタラクションに関して、トップダウンの視点を用いた論文である。理論的な枠組みとして認知過程やインタラクションに関する研究が継続的に盛んに行われているということが確認できる。

図 6.4(c) とそれに連なるモジュールに注目する。(c-1) はパラレルコーディネートと呼ばれる手法における視覚的混雑の抑制に関する論文である。ここから、(c-2) のスクリーン上でのパラレルコーディネートの描画に関する論文と、(c-3) の可視化のための視覚的混雑の抑制の分類に関する論文へと枝分かれしていることが分かる。パラレルコーディネートが視覚的混雑さを議論する際に多く参照される手法であること、また、視覚的混雑の抑制の分類を行うことで可視化の設計に貢献した論文が存在することが確認できる。また、論文ノードの明度に注目すると、明度が高いものから低いものまで広く存在していることが確認できる。これは視覚的混雑さの解消に関する多数の研究が継続的に行われていることを意味すると考えられる。

図 6.4(d)、図 6.4(e) に注目する。(d-1) は統計データ可視化におけるアニメーションに関する論文である。モジュール内には同様にアニメーションに関連するものや、時系列情報に関する可視化手法の研究が多く含まれていた。(e-1) は、誰でも識別可能な、日常生活を描写する情報可視化に関する論文である。情報可視化の分野において、専門知識を必要としない

<sup>2</sup><http://www.computer.org/csdl>

可視化手法が注目されていることが分かる。

以上より、複数の影響力の強いと考えられる論文に着目し、モジュールからその影響力を読み取ることができた。また、複数のモジュールを持つ木構造については、どのように引用されそれぞれの研究テーマがどのように発展したかの推移を確認することができた。

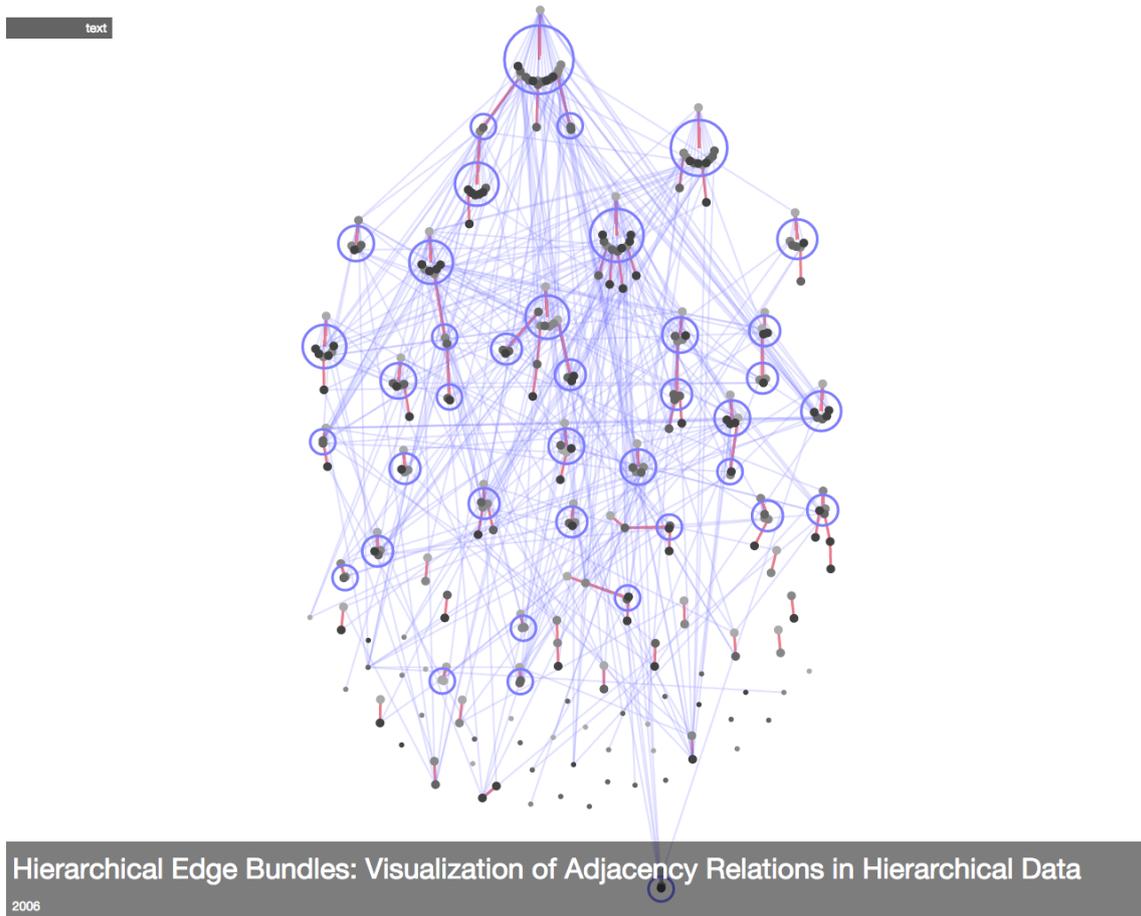


図 6.3: 2006 年から 2013 年に発表された InfoVis の論文を可視化した例

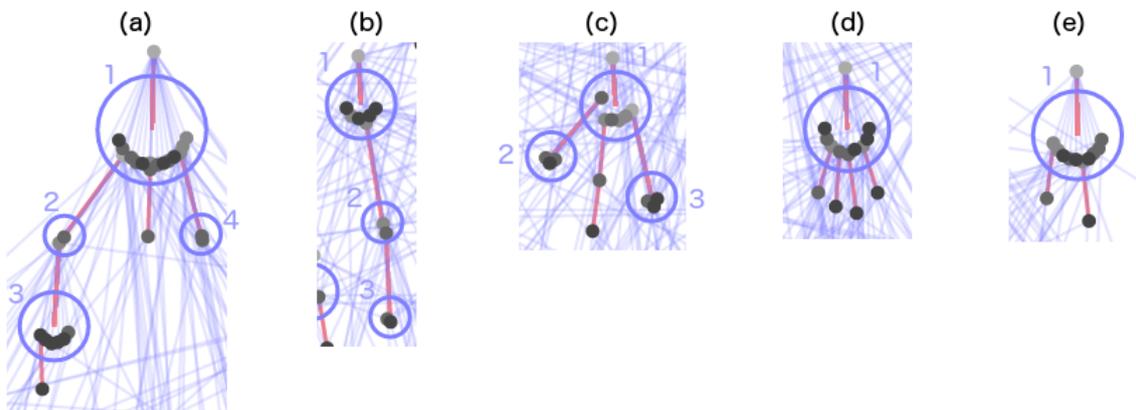


図 6.4: 着目する木の一覧

モジュール	論文の題目
a-1	Hierarchical Edge Bundles: Visualization of Adjacency Relations in Hierarchical Data
a-2	VisLink: Revealing Relationships Amongst Visualizations
a-3	Bubble Sets: Revealing Set Relations with Isocontours over Existing Visualizations
a-4	MizBee: A Multiscale Synteny Browser
b-1	Toward a Deeper Understanding of the Role of Interaction in Information Visualization
b-2	Distributed Cognition as a Theoretical Framework for Information Visualization
b-3	Mental Models, Visual Reasoning and Interaction in Information Visualization: A Top-down Perspective
c-1	Enabling Automatic Clutter Reduction in Parallel Coordinate Plots
c-2	Pargnostics: Screen-Space Metrics for Parallel Coordinates
c-3	A Taxonomy of Clutter Reduction for Information Visualisation
d-1	Animated Transitions in Statistical Data Graphics
e-1	Casual Information Visualization: Depictions of Data in Everyday Life

表 6.2: 木に含まれるモジュールの表す論文の題目一覧

## 6.4 考察

2つのカンファレンスにおける論文データを用いた学術分野進化系統樹について、そこから得られた知見とその過程について考察する。

6.2節ではインタフェース分野のカンファレンスに採択された468件の論文の可視化を行った。1つの大きな木に着目し、その中で枝分かれする複数の研究の発展推移について観察した。実際に学術分野に大きく影響を与えた論文を基としてどのように発展していったのかを詳しく知ることができた。これは、論文を検索するだけでは得ることができない情報である。なぜならば、ある論文について、それがどれくらいの、またどのような論文に引用されているかの情報しか見ることができず、それらの時系列に沿った継続的な関係性を得ることができないためである。

6.3節では情報可視化分野のカンファレンスに採択された277件の論文の可視化を行った。大きなモジュールを持つ複数の木に着目し、それぞれについて観察した。研究テーマに大きく影響を与えた論文を複数確認することで、情報可視化においてどのような研究テーマが存在し、それらが現在にかけてどのように発展しているのかについて知見を得ることができた。また、それらのモジュール内にどのような論文があるのかを観察することで、詳しく各研究テーマに関する知識を獲得することができた。

2つの論文データの可視化について、どのような論文かを判断するのに題目と出版年情報のみを用いた。しかしながら、実際のシーンにおいてはこれらの情報のみで論文の要旨を判断することは非常に困難であった。この問題を解決するためには、可視化表現上に木、モジュール単位で形容する語句を重畳表示することや、論文ノードやモジュールを選択した際に、それらの要旨を表示することが考えられる。

## 第7章 議論

3章にて、研究動向の把握を実現するために挙げた4つの要求について、それぞれ議論する。

まず、引用関係にある論文の類似度の計算によって論文の親を選定した。共通の親を持つ論文の集合をモジュールとして定義した。可視化を行う際は、モジュールは円として描画し、内部に論文ノードを配置した。実際に、モジュールとその内部に着目することで、関係性を直感的に認識し、「新概念、要素技術の出現」に関する理解を深めることができた。以上より「類似する論文の集合の提示」の要求を満たすことができたと考える。

モジュールの半径をモジュールの含む論文数によって変化させることで、論文がどれくらいの影響力を持つのかを示した。モジュールを表す円の大きさに着目することで、分野全体やある研究テーマにおいて、最も影響を与えたと考えられる論文、また、大きな影響を与えたと考えられる複数の論文を発見することができた。以上より「類似する論文の集合の量的規模の提示」の要求を満たすことができたと考える。

親子関係エッジに加えて、引用関係を表す半透明のエッジを描画することにより「論文間のすべての関係の提示」の要求を満たそうとした。しかしながら、引用関係は非常に密であり、すべてを描画すると煩雑で見づらいことが判明した。これに対する解決策として、モジュールや論文ノードを選択した際に関連するもののみを表示するインタラクションを用いることが考えられる。

出版年に関して、その把握と比較を容易にするために2つの手法を用いた。1つ目は、連結する2つのノードについて、古いノードを上部へ、新しいノードを下部へ移動させるものである。連結するノード間の相対位置を連続的に変化させ、上から下へと時系列に沿った探索を可能にし、木構造単位で着目した場合の、研究テーマの「発展の過程」についての理解を補助することができた。しかしながら、本手法では、隣接していない論文の相対的な位置関係を考慮していない。よって論文が出版された時期を比較する際に誤解を与える可能性があるという問題点がある。2つ目は、論文ノードの出版年を明度によって示すものである。新しい論文と古い論文、またそれらを含むモジュールの比較を容易にすることができた。以上の2つの手法より、「論文の持つ時系列情報の提示」をある程度満たすことができたと考える。

## 第8章 結論

本論文では、学術分野についての研究動向の理解補助を目的とし、「時系列に沿った研究分野の発展の推移」と、「類似する論文の集合や引用の関係」を階層的に表現する「学術分野系統樹」の開発を行った。本論文ではまず、研究動向を俯瞰し、注目すべき論文やその集合にアクセスすることを段階的におこなうことができれば、より効率的な知識獲得が実現可能であることを述べた。研究者が研究動向を把握するには、その学術分野についての発展推移を理解することが重要であることを説明し、発展推移の理解のために必要な情報について整理し、そのために必要な要求についてまとめた。要求を満たすために、論文の引用データに着目し、それらのモジュール構造を用いた階層表現を提案し、それを実現するためのデータの加工方法を提案した。また、それらを系統樹を模した形で表現することで、その発展推移をより直感的に理解することができる可視化手法を提案した。本手法である「学術分野進化系統樹」は、マクロ構造として木構造を表現することで発展推移の概形を俯瞰し、そこからミクロ構造の論文間の関係性を探ることで、注目したい論文またはその集合に関する知識の効率的な獲得を目指すものである。

ユースケースとしてカンファレンスにて採択された論文のデータを用いて可視化をおこない、そこから得ることのできる知見について考察することで、本手法が研究動向の把握を補助することを示した。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、三末和男先生には大変丁寧なご指導をいただきました。研究の進め方から論文の執筆に至るまで、様々なご助言を賜りました。心より感謝いたします。田中二郎先生、志築文太郎先生、高橋伸先生にはゼミの場で様々なご意見を頂き、研究をよりよいものとすることができました。ここに厚くお礼申し上げます。インタラクティブプログラミング研究室の皆様には沢山の貴重なご意見、アドバイスを頂きました。感謝の意を表します。特に NAIS チームの皆様に関しましては、ゼミでご意見を頂くだけでなく、研究室で相談に乗って頂き、加えて研究生活全体として、様々な形でお世話になりました。皆様と研究室生活を共にできたことをとても嬉しく思います。本当にありがとうございました。また、研究生活に限らず様々な面で支えて頂いた友人、大学生活でお世話になった人々に心から感謝いたします。最後に、私をここまで育てて頂いた家族に心から感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Niklas Elmqvist and Philippas Tsigas. Citewiz: a tool for the visualization of scientific citation networks. In *Information Visualization*, pp. 215–232, 2007.
- [2] Takeshi Kurosawa and Yasufumi Takama. Co-authorship networks visualization system for supporting survey of researchers' future activities. *Journal of Emerging Technologies in Web Intelligence*, Vol. 4, No. 1, pp. 3–14, 2012.
- [3] Nathalie Henry, Howard Goodell, Niklas Elmqvist, and Jean-Daniel Fekete. 20 years of four hci conferences: A visual exploration. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 23, No. 3, pp. 239–285, 2007.
- [4] Chaomei Chen. Citespace ii: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the American Society for information Science and Technology*, Vol. 57, No. 3, pp. 359–377, 2006.
- [5] Edward Clarkson, Krishna Desai, and James D Foley. Resultmaps: Visualization for search interfaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 15, No. 6, pp. 1057–1064, 2009.
- [6] Nees Jan Van Eck and Ludo Waltman. Systematic retrieval of scientific literature based on citation relations: Introducing the citnetexplorer tool. In *Proceedings of the First Workshop on Bibliometric-enhanced Information Retrieval*, pp. 13–20, 2014.
- [7] Sarah Faisal, Paul Cairns, and Ann Blandford. Building for users not for experts: Designing a visualization of the literature domain. In *Information Visualisation*, pp. 707–712, 2007.
- [8] P Yu and H Van de Sompel. Networks of scientific papers. *Science*, Vol. 169, pp. 510–515, 1965.
- [9] Glen Jeh and Jennifer Widom. Simrank: a measure of structural-context similarity. In *Proceedings of the eighth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, pp. 538–543, 2002.
- [10] 三末和男, 杉山公造. 図的思考支援を目的とした複合グラフの階層的描画法について. *情報処理学会論文誌*, Vol. 30, No. 10, pp. 1324–1334, 1989.

- [11] Peter Eades and Qing-Wen Feng. Multilevel visualization of clustered graphs. In *Graph drawing*, pp. 101–112. Springer, 1997.
- [12] Nathalie Henry, J Fekete, and Michael J McGuffin. Nodetrix: a hybrid visualization of social networks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 13, No. 6, pp. 1302–1309, 2007.
- [13] Michael Baur and Ulrik Brandes. Multi-circular layout of micro/macro graphs. In *Graph Drawing*, pp. 255–267. Springer, 2008.
- [14] Danny Holten and Jarke J Van Wijk. Force-directed edge bundling for graph visualization. *Computer Graphics Forum*, Vol. 28, pp. 983–990, 2009.
- [15] Tim Dwyer, Nathalie Henry Riche, Kim Marriott, and Christopher Mears. Edge compression techniques for visualization of dense directed graphs. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 19, No. 12, pp. 2596–2605, 2013.
- [16] Michael Bostock, Vadim Ogievetsky, and Jeffrey Heer. D<sup>3</sup> data-driven documents. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 17, No. 12, pp. 2301–2309, 2011.
- [17] Tim Dwyer. Scalable, versatile and simple constrained graph layout. *Computer Graphics Forum*, Vol. 28, pp. 991–998, 2009.