

Title	インターセクションの扱いが可能なクラスターグラフ の力指向による自動描画法の研究
Author(s)	表, 寛樹
Citation	
Issue Date	2000-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/656
Rights	
Description	Supervisor: 杉山 公造, 知識科学研究科, 修士

修 士 論 文

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科知識システム基礎学専攻

表 寛樹

2000年3月

1

1.1	本研究の背景.....	1
1.2	本研究の目的.....	3
1.3	力指向によるインターセクションがあるクラスターグラフの応用.....	4
1.4	本論文の構成.....	8

2

2.1	定義.....	9
2.1.1	クラスターグラフ.....	9
2.1.2	インターセクションがあるクラスターグラフ.....	11
2.2	美的基準.....	13

3

3.1	はじめに.....	15
3.2	スプリングモデル.....	16
3.2.1	フックの法則.....	16

3.2.2	スプリングモデルの改良.....	17
3.3	クーロンモデル.....	20
3.3.1	クーロンの法則.....	20
3.3.2	クーロンモデル.....	21
4		
4.1	仮想頂点の配置.....	23
4.2	スプリングによる力.....	27
4.3	電荷による力.....	28
4.4	アルゴリズムの実装.....	28
4.4.1	オブジェクトの移動.....	29
4.4.2	クーロン・スプリングモデルによる描画アルゴリズム.....	29
5		
5.1	評価項目の測定.....	31
5.1.1	実験方法.....	31
5.1.2	評価項目.....	36
5.1.3	測定結果.....	38
5.1.4	測定結果の考察.....	40
5.1.5	描画例.....	42
5.2	計算時間の測定.....	52

6.1 本論文のまとめ.....	54
6.2 展望.....	55
.....	56
.....	57

1.1	図言語の基本系と複合系.....	2
1.2	クロスサークルがあるKJ法の例.....	5
1.3	ハイグラフの例.....	6
1.4	オブジェクト指向プログラミング言語の多重継承の例.....	7
2.1	クラスターグラフの例.....	10
2.2	クラスターグラフの構造.....	10
2.3	インターセクションがあるクラスターグラフの例.....	12
2.4	インターセクションがあるクラスターグラフの構造.....	12
2.5	部分有向グラフ.....	13
3.1	スプリンによる力と電荷による力の違い.....	16
3.2	頂点間の隣接スプリング.....	18
3.3	クラスタリングに用いるスプリング.....	19
3.4	インターセクション領域形成に用いるスプリング.....	20
3.5	クーロン力.....	22
4.1	仮想頂点の配置.....	24
4.2	インターセクション領域形成の例.....	25

4.3	クラスター領域の重なり回避の例.....	25
4.4	クラスタリングの悪い例.....	25
4.5	実際のクラスタリングの例.....	26
4.6	クラスタリングの例.....	26
4.7	インターセクションへの頂点の配置の例.....	27
5.1	クラスタリングパターンA.....	33
5.2	クラスタリングパターンB.....	33
5.3	クラスタリングパターンC.....	33
5.4	3種類のクラスタリングパターンから成るインターセクションがあるクラスター グラフの例.....	33
5.5	頂点の配置成功率の測定.....	37
5.6	頂点の配置成功率の測定結果.....	38
5.7	クラスター同士の重なり箇所率の測定結果.....	39
5.8	頂点同士の重なり箇所数の測定結果.....	39
5.9	Gが木でクラスタリングパターンAの描画例.....	43
5.10	Gが木でクラスタリングパターンBの描画例.....	44
5.11	Gが木でクラスタリングパターンCの描画例.....	45
5.12	Gが一般無向でクラスタリングパターンAの描画例.....	46
5.13	Gが一般無向でクラスタリングパターンBの描画例.....	47
5.14	Gが一般無向でクラスタリングパターンCの描画例.....	48

5.15	クラスター同士の重なり回避過程の例 1	49
5.16	クラスター同士の重なり回避過程の例 2	50
5.17	クラスター同士の重なり回避過程の例 3	51
5.18	計算時間.....	53

5.1 実験に用いたグラフ 1	34
5.2 実験に用いたグラフ 2	34
5.3 描画規則に従うとき考慮する描画のための力.....	35
5.4 スプリングパラメータ	36
5.5 クーロンパラメータ	36
5.6 評価結果.....	41

1.1

図は、情報の表現や伝達、思考の道具として広い分野にわたって用いられている。図の中で意味単位（図素）や構文法（図素の配置規則）がはっきりしており、文章や数式と同じように、意味が一義的に導き出せるものを特に図言語と呼んでいる[7]。図言語の基本系として、行列系、連結系、領域系、座標系の4つが識別されているが、これらはそれぞれ、行列、グラフ、集合、座標といった数学的概念を2次元平面上に表現したものである[14]。連結系、領域系およびそれらの複合系は、数学的にはグラフとして表現できる。図1.1に基本系と複合系の図の例を示す。自動グラフ描画は、これらの図を人間が手で描画するのではなく、コンピュータに自動的に描画させる情報可視化の技術の1つである。グラフを描画させる際には、「見やすさ」、「描画するものの形、大きさ、位置の制約」など、描画する側の意図を反映した描画が可能な技術の開発が必要である。

従来、コンピュータによって図を描画する研究は、木、有向グラフ、無向グラフなど比較的単純なグラフのクラスを扱うものが多かった。最近では、点と線から構成される図にさらに包含関係を加えた、より複雑な複合グラフの自動描画法の開発が研究され始めてきている。複合グラフの描画例では、包含辺は頂点の幾何学的な包含関係、隣接辺は頂点を結ぶ折れ線の矢として描かれることが多い[13]。図をコンピュータで自由に扱うことは従来のコンピュータでは計算量の増大など困難な問題を多く抱えてい

た。しかし、近年のコンピュータの性能向上にしたいがい、一般向けのコンピュータでも大きなグラフィックの扱いが可能になっている。この環境により、近年ではビジュアルインタフェースとして図を用いたインタフェースが多く見られる。

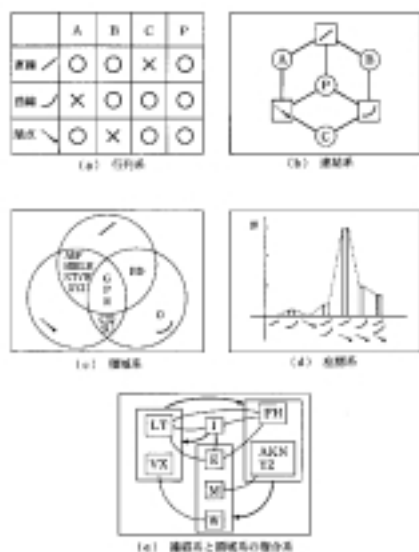


図 1.1 図言語の基本系と複合系 ([2]より転載)

力指向による描画法は、グラフを仮想物理モデル上に置くものとし、オブジェクト*にかかるエネルギーを最小に近づけるように、オブジェクトを少しずつ移動させ最適な配置を求める。Eades[2]は無向グラフの描画法において頂点を鉄のリングに、辺をスプリングとしたスプリングモデルを開発し、これが力指向による描画法の研究に端を発した。スプリングモデルは様々に改良されている。Kamada & Kawai[8]は頂点をどの

* グラフを構成する頂点、クラスターのことを指す。

くらいまで近づけて配置すべきかは、頂点の数や描画のための領域に依存するために、描画面積と頂点数から頂点間の理想距離を求めて頂点を配置する方法を提案している。Fruchterman and & Reingold[5]は「近接配置」と「最小分離」という2つの描画規則を考慮したモデルを提案している。鈴木と鎌田[16]は頂点と辺に斥力を働かせることで、頂点と辺の交差を少なくすることを提案している。Sugiyama & Misue[15]は辺を磁石のスプリングと見立て、磁場をかけることで辺の方向をそろえるマグネティック・スプリングモデルにより有向グラフの扱いを可能にしている。クラスターを扱える方法として、Luders et al.[12]は仮想物理モデルとしてボイル・シャルルの法則を用いて、オブジェクトの大きさを自在に変化させている。近年ではスプリングモデルを改良しクラスターグラフを扱う方法の研究[11]が進められている。

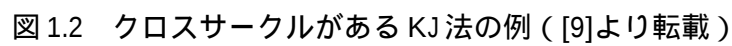
1.2

本研究は、インターセクションがあるクラスターグラフを力指向の考え方によって描画するためのアルゴリズムの開発と実装、評価を行うことを目的とする。まずインターセクションがあるクラスターグラフを扱うためにスプリングモデルを改良する。またクーロンモデルを開発し、クーロン・スプリングモデルを提案する。グラフの描画法の研究は古くから進められているが、クラスターが重なり合い、重なり部分に頂点が入るインターセクションを対象にした研究例は少ない。インターセクションを扱う場合、クラスターの重なり合いの形成、重なり部分の中へのオブジェクトの描画など、困難な課題が多い。また、力指向による描画法でクラスターを扱うときには、クラスターに属するオブジェクトの正確な配置、クラスター同士の重なり合いの回避、クラスターに属するオブジェクトとそうでないものの扱いを可能にする仮想物理モデルの設計が必要である。

1.3

クラスターグラフは、同じ属性を持つ要素を一つのグループとして配置する。クラスターグラフを拡張してインターセクションの扱いを許すと、複数の属性をもつ要素を扱うことが可能になる。このような構造を持つ場面は、人間の創造的思考を高めることを目的とした発想技法に現れる。発想技法は、数100種あるといわれる。特にKJ法[9]に適用すると、各要素の関連付け、さらにまとめあげといった、グルーピングが現れる場面にクラスターが用いられる。インターセクションは、KJ法でクロスサークルと定義されている2個以上のグループから共有される要素を扱うことを可能にする。図1.2にクロスサークルがあるKJ法の例を示す。インターセクションを許すグラフとしてハイグラフがある。(図1.3)ハイグラフは、データベース、知識表現や複雑な並列システムなどへの応用が考えられている[6]。また、インターセクションがあるクラスターグラフが持つ構造はC++、Smalltalkなどのオブジェクト指向プログラミング言語の多重継承の構造と類似する。オブジェクト指向プログラミング言語では、図1.4に示すように1個のクラスはスーパークラスを1個以上持つことができ、変数やメソッドを継承してくるときには、複数のスーパークラスから組み合わせて継承するようになっている。提供されている多くのクラス構造可視化ツールは、クラスの多重継承を階層有向グラフで表現している。これをインターセクションがあるクラスターグラフを用いて表現すると、新たな配置により別の見方ができるものと考えられる。

近代化の影響と功罪は？



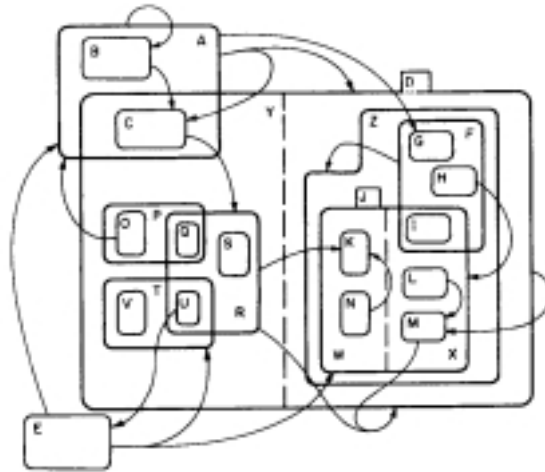


図 1.3 ハイグラフの例 ([6]より転載)

ここでは、発想技法、データベース、知識表現、オブジェクト指向プログラミング言語を例にあげた。このような人間の思考過程に即しながら、知識、情報の構造化を平面上で行うという場面は、情報、システム分野において数多く存在する。インターセクションがあるクラスターグラフの自動描画法の開発は、より複雑な知識構造の表現に役に立つ可能性をもっている。

人間は、複雑な問題を前にした際に、自分流の図を描きながら思考を進めていくことがある。このとき、点と線だけから構成される図だけではなく、類似または関連の深い点をグルーピングしたり、そのグルーピングしたクラスターを配置するといった図の描画を行うことも多い。近年では、人間が思考を進める過程をコンピュータによって支援する研究が進められており、発想支援の分野として位置づけられている。発想支援システムなどの動的な描画が行われる場合には、グラフを構成するオブジェクトを追加または削除などの作業が随時行われる。グラフの再描画を行うとき、オブ

ジェクトの配置の再計算が発生するため、空間配置が大きく変化する。これを力指向による描画法を用いて行った場合、オブジェクトの追加、削除などの操作に対して、徐々に新しい空間配置に変化するため、思考の連続性を保つことができる。また、力指向による描画は、初期配置をランダムにした場合、再配置するごとにグラフの形、配置場所が異なる。これは人間が思考を進めていく上で新しい見解を生み出すことができ、アイディアの生成を促すことに役立つ可能性がある。

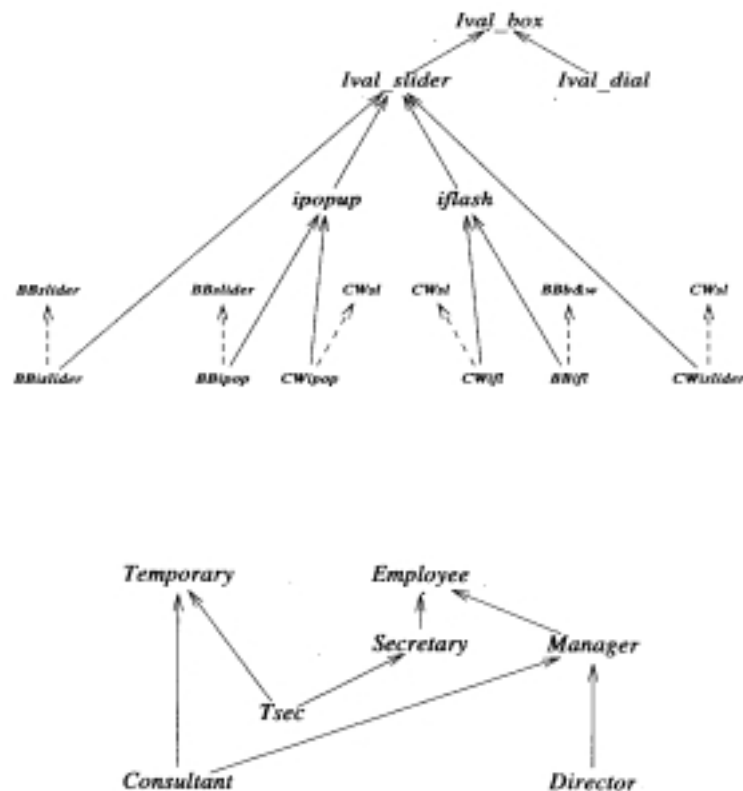


図 1.4 オブジェクト指向プログラミング言語の多重継承の例（[1]より転載）

（図 1.4 中の *Ival_box*、*Temporary* など全てクラス名であり、矢は継承を表す。）

1.4

本論文は、本章を含め 6 章から構成される。

第 2 章では、クラスターグラフを拡張し、本研究で扱うインターセクションがあるクラスターグラフを定義する。また、描画する際の美的基準について述べる。

第 3 章では、インターセクションがあるクラスターグラフを力指向による方法で描画するための仮想物理モデルについて述べる。

第 4 章では、第 3 章で述べた仮想物理モデルを、グラフ描画アルゴリズムとして実装する。

第 5 章では、本研究で提案するグラフ描画アルゴリズムを用いて、インターセクションがあるクラスターグラフを描画する。また、アルゴリズムを評価するための評価実験を行う。

第 6 章では、本研究の結論を述べ、本研究の意義と今後の展望について考察する。

この章では、クラスターグラフの定義を拡張し、インターセクションがあるクラスターグラフを定義する。また、描画するときの美的基準について述べる。

2.1

2.1.1

クラスターグラフ $C = (G, T)$ は、無向グラフ G と根付き木 T から成る [3]。ここで T の葉集合は、 G の頂点集合と同一である。 T の葉ではない各頂点 v は G の頂点から成る 1 つのクラスター $\Gamma(v)$ に対応する。ここで、クラスター $\Gamma(v)$ は、 v を根とする部分木の葉集合を表す。木 T は、クラスター間の包含関係を表す。すなわち、クラスターグラフ $C = (G, T)$ を描画するとき、各クラスターは長方形の領域 R により表され、クラスター間の包含関係は、これらの長方形の包含関係により描かれる。図 2.1 にクラスターグラフの例、図 2.2 にクラスターグラフの構造を示す。

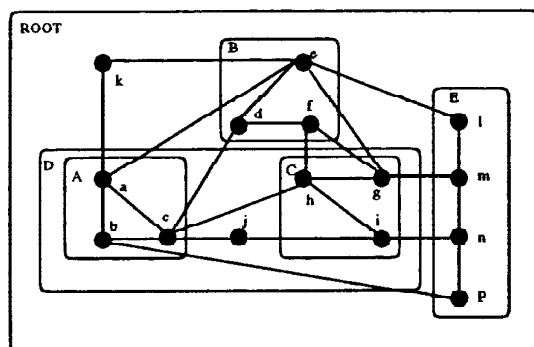


図 2.1 クラスタグラフの例 ([3]より転載)

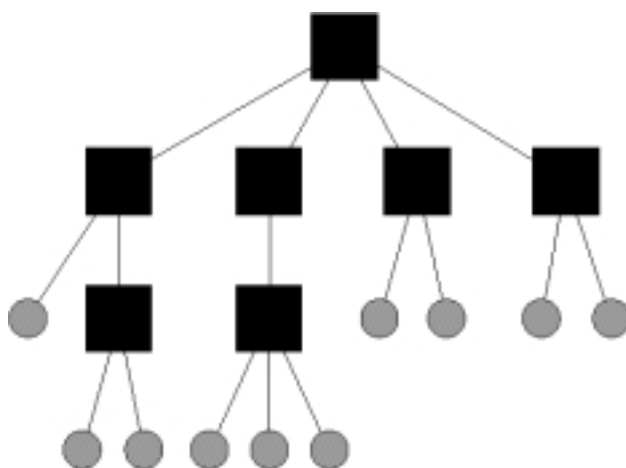


図 2.2 クラスタグラフの構造

2.1.2

ここでは、本来インターセクションをもたないクラスターをインターセクションを許すクラスターに拡張する。今後用いるクラスターは、拡張されたクラスターを指すものとする。

インターセクションがあるクラスターグラフ $C_I = (G, D_I)$ は、無向グラフ G と連結有向グラフ D_I から成る。但し、 D_I のソース^{*1}は唯一であり、 D_I のシンク^{*2}の集合は G の頂点集合と同一である。 D_I のシンクではない各頂点 v は、 G の頂点から成る 1 つのクラスター $\Gamma(v)$ に対応する。ここで、クラスター $\Gamma(v)$ は、 v をソースとする部分有向グラフのシンク集合を表す。 D_I は、クラスター間の包含関係とインターセクションを表す。すなわち、インターセクションがあるクラスターグラフ $C_I = (G, D_I)$ を描画するとき、各クラスターは長方形の領域 R により表され、クラスター間の包含関係は、これらの長方形の包含関係により描かれる。インターセクションは、2 個以上のクラスターが重なり合って描かれる。図 2.3 にインターセクションがあるクラスターグラフの例、図 2.4 にインターセクションがあるクラスターグラフの構造、図 2.5 に部分有向グラフの構造を示す。

*1 射出辺は持つが射入辺を持たない頂点のこと

*2 射入辺は持つが射出辺を持たない頂点のこと

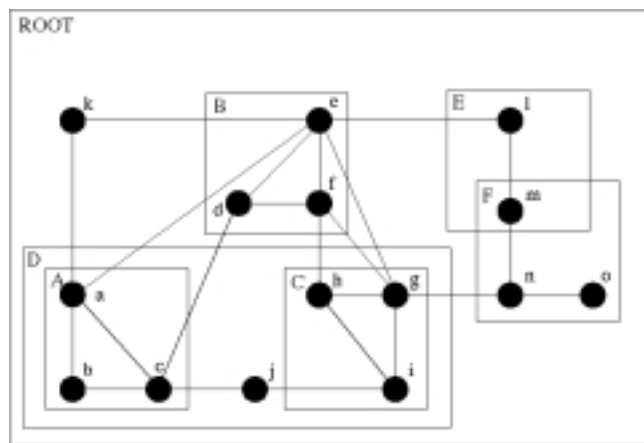


図 2.3 インターセクションがあるクラスターグラフの例

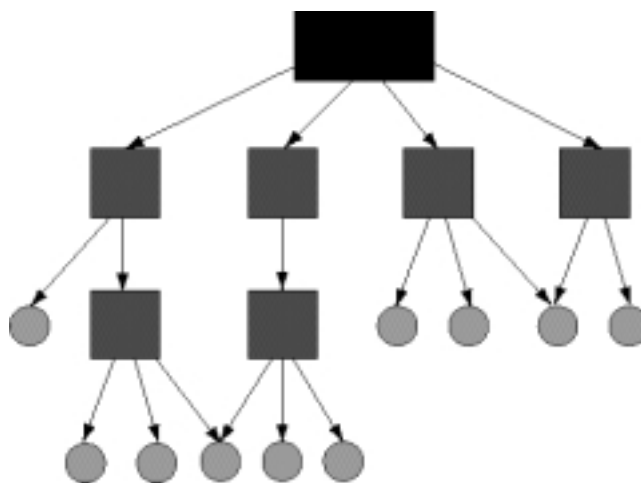


図 2.4 インターセクションがあるクラスターグラフの構造
(長方形はソース、正方形はシンクではない頂点 v 、円はシンク)



図 2.5 部分有向グラフ
(正方形はソース、円はシンク)

2.2

良い図の生成はグラフの可読性や美しさといった人間の認知に関係した多様な要求を満たすことが必要である[14]。ここでは、インターセクションがあるクラスターグラフを扱うため、特に頂点のクラスタリングに関する基準を満たすことが重要である。各頂点は、クラスターに属するののか、属しないののか、クラスターに属するのであれば、どのクラスターに属するのかなどの情報を持つ。したがって、各頂点はクラスタリングされるならば、そのクラスターのある場所へ配置され、誤って異なるクラスターのある場所に配置されることは避けなければならない。また、いずれにもクラスタリングされない頂点は、どのクラスターのある場所にも配置されることは避けなければならない。さらに、隣接する頂点が離れすぎたり、頂点同士が近づき過ぎないようにしなければならない。

描画に対し、必ず満たされなければならない制約を描画規約、できる限り満たすべき制約を描画規則と呼ぶ。規約や規則はそれぞれ独立ではなく、それらの間に競合関係や依存関係が存在する[14]。インターセクションがあるクラスターグラフを力指向によって描画するための力は頂点間に関するもの、クラスターに関するものに大きく分

けることができる。ここでの競合関係の例として、クラスターに関する力の強度を大きくして、各頂点を正確に指定された領域に描画すれば、辺の交差数の最小化を満足することは困難になる。逆に隣接頂点間のスプリング力の強度を大きくして、辺の交差数の最小化を満足することにすれば、各頂点の配置場所の正確性が低くなる。これら2つの描画のうちどちらを選択するかは描画の目的に依存しており一概には決められない。このようにアルゴリズムを開発するには規約や規則の間に優先関係を設定することが必要である[14]。本研究では、インターセクションがあるクラスターグラフを扱うため、クラスターに関する規則を優先し、描画規約と描画規則として以下を採用した。描画規則は優先順位の高いものから示す。

(描画規約)

1. G の頂点は円で描く
2. G の辺は直線で描く
3. シンクではない D_I の頂点、すなわちクラスター領域は長方形で描く
4. インターセクション領域はクラスター領域を重ね合わせて描く

(描画規則)

1. クラスターに属する頂点は、属するクラスター領域内に配置する
2. 複数のクラスターに属する頂点は、インターセクション領域内に配置する
3. いずれのクラスターにも属さない頂点は、クラスター領域外に配置する
4. クラスター同士の重なりをできるだけ減らす(インターセクション領域を形成する場合を除く)
5. 隣接した頂点はできるだけ近くに配置する
6. 頂点同士の重なりはできるだけ減らす
7. 隣接辺交差はできるだけ減らす

この章では、インターセクションがあるクラスターグラフを描画するために改良したスプリングモデルとクーロンモデルによるクーロン・スプリングモデルについて述べる。ここでは、モデルについてだけ述べ、実際にアルゴリズムとして実装し、計算を行う際の詳細については次章で述べる。

3.1

インターセクションがあるクラスターグラフを描画するため、スプリングモデルとクーロンモデルを用いる。スプリングモデルは、各頂点を質量 0 大きさ 0 の「リング」とみなし、各辺はリングをつなぐ「スプリング」とみなす。系全体のスプリングにかかるエネルギーを最小に近づけるように頂点を移動させ、頂点の最適な配置を求める。クーロンモデルは、各頂点に電荷を持たせる。各電荷間には入力した情報に基づいて、引力または斥力が働く。電荷による力は、図3.1に示すようにスプリングのような物理的な媒介なしで配置したい場所がある方向に力を働かせることができる。この特徴を用いて、2つのクラスターが重なるインターセクション領域への頂点の配置を可能にした。ここで、「スプリング」はスプリングで結ばれた頂点間の距離が大きい場合には引力が、小さい場合には斥力が働くことを意味しており、現実のスプリングのようにフックの法則に従うものである必要はない。クーロンモデルも同様に、各頂点が引き寄せられるか、反発しあうかといった振舞いを仮想物理モデル上で再現したものであ

る。従って、現実のクーロンの法則に忠実なものである必要はない。

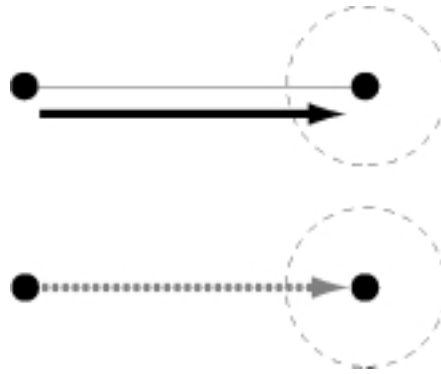


図 3.1 スプリングによる力と電荷による力の違い

(図3.1は上の矢がスプリングによる力(実線はスプリング) 下の破線矢が電荷による力の方向を示す。右の黒円は固定されており、左の円がスプリングによる力、電荷による力によって破線円内に配置される例である。スプリングによる力の場合、スプリングの自然長を破線円の半径以内にしなければ、黒円は破線円内に収まることは不可能である。電荷による力の場合、スプリングのような物理的な媒介なしで黒円を破線円内に収めることが可能である。)

3.2

3.2.1

太さ S 、長さ l の棒の両端に力 F を加えたときに、長さが Δl だけ伸びたとする。ここで $\Delta l / l = \varepsilon$ とすると、このひずみ(伸びの割合) があまり大きくなければ、それは応力—この場合は伸びに垂直な面に関する応力(張力 $f = F / S$ だけ) で表す—の大きさに比例する[10]。

$$f = E \varepsilon, \quad E = \text{const}$$

ばねにおいては自然の長さからの伸びに比例した復元力が働く。伸びを x 、そのとき加えられている力を f とすると、

$$f = -k x$$

が成り立つ。ここで k はばね定数とよばれる。

3.2.2

インターセクションがあるクラスターグラフを扱う場合、各頂点間のスプリングを全て同じ自然長にすると不都合が生じる。同じクラスター内の頂点は、なるべく近くに配置し、クラスター領域内に収める必要があり、また、異なるクラスターに入る頂点同士は、なるべく離れるようにし、各々の頂点が入るべきクラスター領域内に収まり、さらに異なるクラスター領域内に誤って配置されることを防ぐ必要がある。これらを満足させるため、スプリングモデルを改良した。ここでは、隣接する頂点間には4種類の自然長の異なるスプリング(スプリング1、スプリング2、スプリング3、スプリング4)を状況に応じて使い分ける。また、頂点をクラスター領域に配置するためのスプリング(スプリング5)を1種類、クラスター領域によってインターセクション領域を形成するためのスプリング(スプリング6)を1種類用いる。合計で6種類のスプリングを用いる。但し、スプリング5、6は描画の際には辺として描画しない不可視の仮想スプリングである。

- スプリング1

スプリング1は隣接するお互いの頂点が、同じクラスターに属するときに用いる。

- スプリング2

スプリング2は隣接するお互いの頂点が、それぞれ異なるクラスターに属するときに用いる。スプリングの長さを相対的に大きくして、頂点の行動範囲に余裕を持たせる。

- スプリング 3

スプリング 3 は隣接するお互いの頂点がインターセクションを形成する同じクラスターグループ内に配置されるときに用いる。インターセクションを生成するクラスターは、お互いが近づき合うために、異なるクラスターに入る隣接頂点間であっても、スプリング 2 を用いると、お互いの頂点が離れて配置される。このことは、クラスター領域も離れすぎてインターセクション領域の形成がうまくいかない場合が考えられる。そのためにスプリング 2 よりも自然長の小さいスプリングを用いる。

- スプリング 4

スプリング 4 は隣接するお互いの頂点が、同じインターセクション内に入るときに用いる。

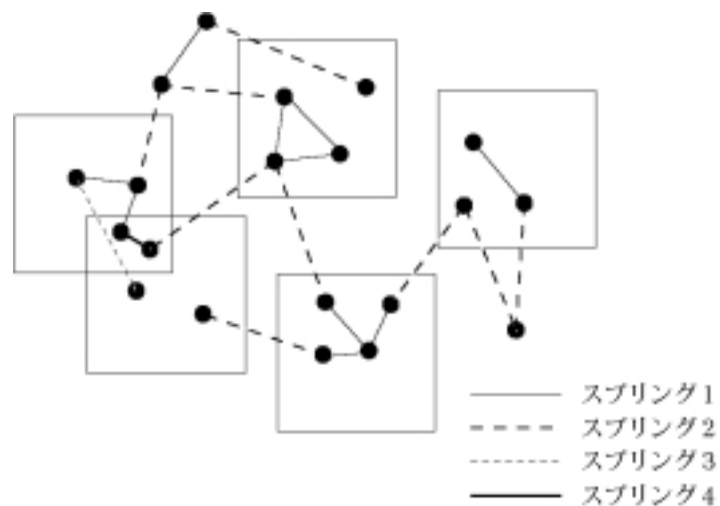


図 3.2 頂点間の隣接スプリング

- スプリング 5

スプリング 5 は頂点をクラスター領域内に配置ために用いる。クラスターに属する各頂点は各々の配置されるべきクラスター領域とスプリングで結ばれる状態となる。自然長は小さくすればするほどクラスタリングを行う力が大きくなるが、頂点がクラスター領域の中心に重なり合う可能性が高くなる。

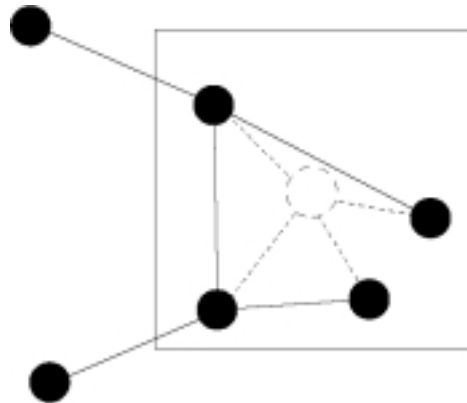


図 3.3 クラスタリングに用いるスプリング

(図3.3はインターセクションがあるクラスターグラフの一部であり、1 個のクラスターに 4 個の頂点が属する例である。破線はスプリング 5、破線による円は仮想頂点である。スプリング 5 はクラスター領域内の不可視の仮想頂点とクラスターに属する頂点間につながれた仮想スプリングであり、実際には描画されない。仮想頂点の配置については次章で述べる。)

- スプリング 6

スプリング 6 はインターセクションを形成するクラスター領域間に用いる。このスプリングは、それぞれのクラスター領域が適度に重なるように自然長を調整する必要がある。

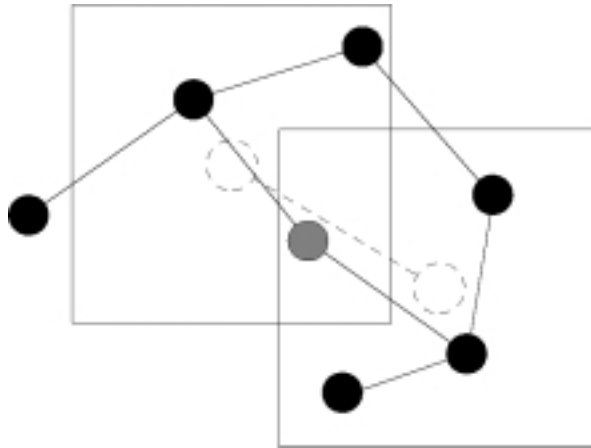


図 3.4 インターセクション領域形成に用いるスプリング

(図3.4はインターセクションがあるクラスターグラフの一部であり、2 個のクラスター領域から形成される 1 個のインターセクション領域の例である。破線はスプリング 6、破線による円は仮想頂点である。スプリング 6 はクラスター領域内の不可視の仮想頂点間につながれた仮想スプリングであり実際には描画されない。仮想頂点の配置については次章で述べる。)

3.3

3.3.1

静止した 2 電荷の間には電荷の積に比例し距離の 2 乗に逆比例する力が働く。力は一方の電荷から他方へ結ぶ直線のある方向にある[5]。電荷 q_1 に働く力 F_1 、電荷 q_1 に働く力 F_2 、 q_2 から q_1 の方向の単位ベクトル e_{12} を用いるとクーロンの法則は以下で記述できる。

$$\mathbf{F}_1 = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{e}_{12} = -\mathbf{F}_2, \quad k = \text{const}$$

したがって、クーロン力は電荷間の距離が大きければ大きいほど、働く力は小さくなり、距離が近ければ近いほど、働く力は大きくなる。極端な例では、お互いの距離が相当離れた電荷間には無視できるほどの力しか働かず、お互いが近接していれば、力は相当大きいものとなる。

3.3.2

クーロンモデルは、グラフを構成する全てのオブジェクトが電荷を持っているものとする仮想物理モデルである。オブジェクト間には、電荷を状況に応じて正または負の値を選び引力または斥力のどちらか一方が働くものとする。電荷による力（クーロン力1、クーロン力2、クーロン力3、クーロン力4）は以下の4種類とする。

- クーロン力1

クーロン力1はインターセクション領域へ頂点を配置するために、インターセクション領域を形成するクラスター領域とインターセクション領域内へ配置される頂点間に引力を働かせる。インターセクション領域に配置される頂点には、複数のクラスター領域からのクーロン力が重ね合わせの原理により働く。

- クーロン力2

Eades(1984)は、隣接しない頂点間には斥力を用いて、隣接しない頂点間が近づき過ぎないように描画することを行っている。ここでは、頂点間が近づき過ぎないようにするために、全ての頂点間にクーロン力2による斥力を働かせる。

- クーロン力3

クーロン力3はクラスター領域とクラスター領域の重なりを回避するために、イン

ターセクション領域を形成するクラスター領域の対以外の全てのクラスター領域間に斥力を働かせる。

- クーロン力 4

クーロン力 4 はいずれにもクラスタリングされない頂点がクラスター領域内への入り込みを避けるために、いずれにもクラスタリングされない頂点とクラスター領域間に斥力を働かせる。

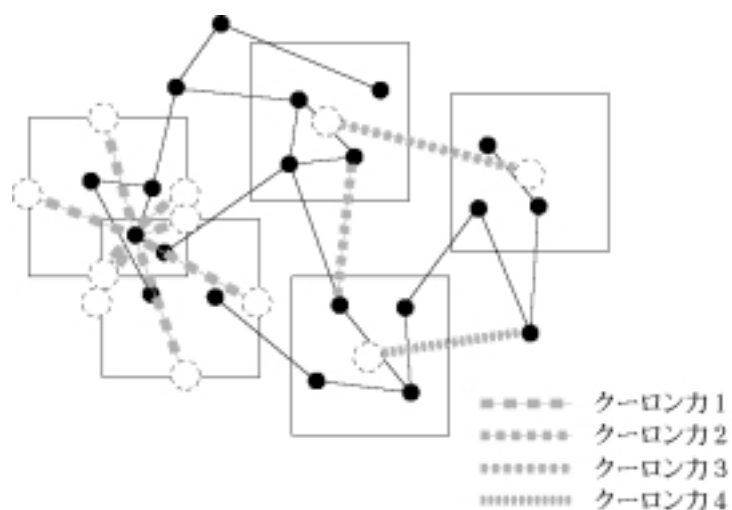


図 3.5 クーロン力

(図3.5はクーロン力が働く箇所の一例である。実際には他の該当する箇所にもクーロン力が働く。クラスター領域の電荷はクラスター領域内の仮想頂点をもつものとする。仮想頂点の配置については次章で述べる。)

この章では、3章で述べたクーロン・スプリングモデルをグラフ描画アルゴリズムとして実装した。

4.1

3章で述べた仮想物理モデルは、スプリングによるもの、電荷によるものの合計10種類の力が存在する。モデルをアルゴリズムとして実装し、それぞれの力を計算するために、3種類の仮想頂点を図4.1に示すように配置する。仮想頂点は不可視であり実際には描画されない。

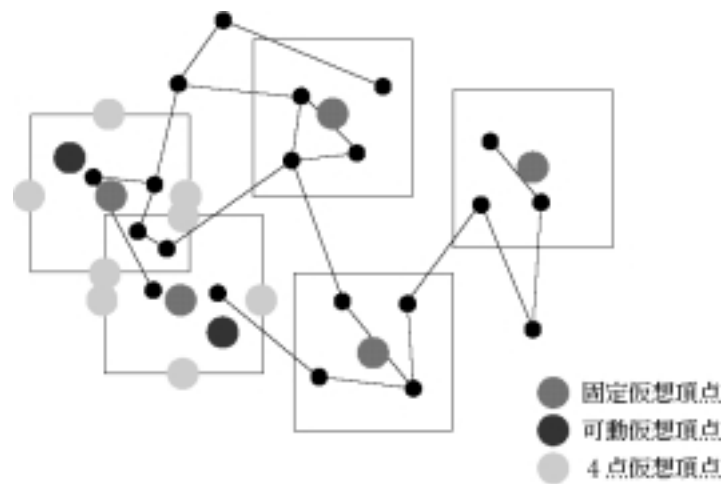


図 4.1 仮想頂点の配置

(図4.1では、可動仮想頂点はインターセクション領域を形成するクラスター領域のみ図示したものである。実際にはインターセクション領域を形成しないクラスター領域には固定仮想頂点と可動仮想頂点と同じ場所に配置される。)

・ 固定仮想頂点

固定仮想頂点は図4.2～4.3に示すように、全てのクラスター領域内の中心に配置する。これは、インターセクション領域の形成、クラスター領域の重なり回避のための計算に用いる。

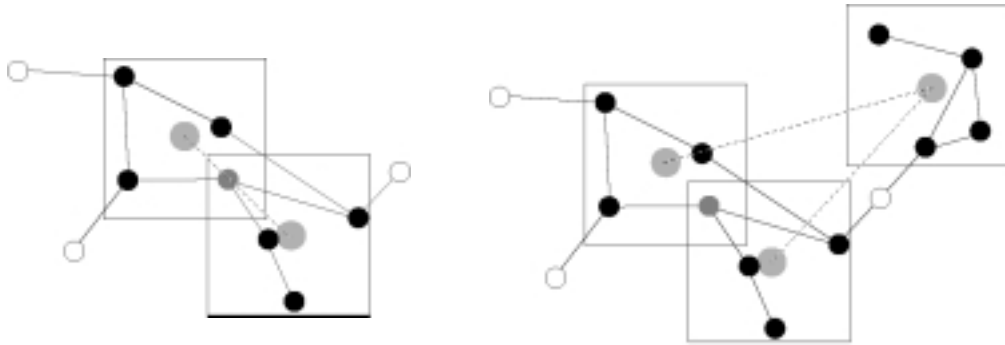


図4.2 インターセクション領域形成の例 図4.3 クラスター領域の重なり回避の例

(図4.2～4.3はインターセクションがあるクラスターグラフの一部分である。図4.2の破線は仮想頂点間につながれた仮想スプリングであり、スプリング力6を用いてインターセクション領域を形成する例である。図4.3の破線は仮想頂点間に働くクーロン力3を示しており、クラスター領域の重なりを回避する例である。)

・可動仮想頂点

可動仮想頂点は図4.4～4.6に示すように、全てのクラスター領域内に配置する。これは、クラスターに属する頂点をクラスター領域に配置するための計算に用いる。インターセクション領域を形成しないクラスターの時、可動仮想頂点はクラスター領域の中心に配置されているが、インターセクション領域を形成するクラスターの時、可動仮想頂点はクラスター領域の位置によって移動する。インターセクション領域を形成することで、クラスターに属する頂点の配置面積が減少する。このため、クラスターに属する頂点をクラスター領域に配置するための計算を、クラスター領域内の中心に配置した仮想頂点を用いて行った場合、図4.4に示すように頂点がインターセクション領域へ入り込む危険性が高くなる。クラスター領域がインターセクション領域を形成するときは、可動仮想頂点を、図4.5のようにインターセクション領域の中心を通り、2個のクラスターを貫く線分の両端へ移動させる。これによって、クラスター

に属する頂点のインターセクション領域への入り込みを避ける。

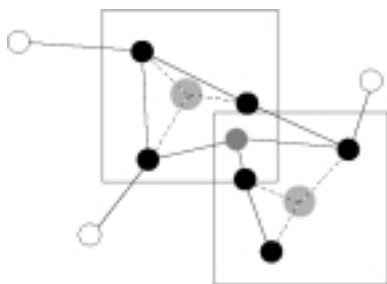


図 4.4 クラスタリングの悪い例

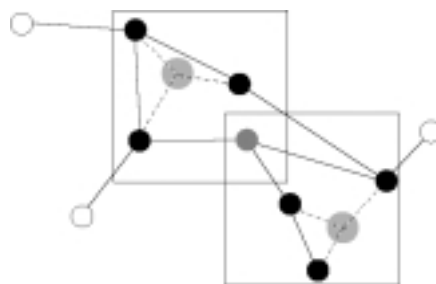


図 4.5 実際のクラスタリングの例
(インターセクション領域を形成するクラスターの場合)

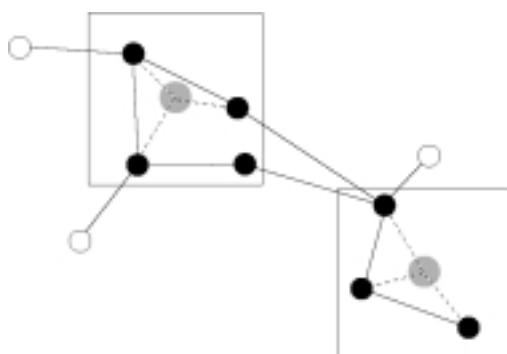


図 4.6 クラスタリングの例
(インターセクション領域を形成しないクラスターの場合)

(図 4.4 ~ 4.6 はインターセクションがあるクラスターグラフの一部である。破線は仮想頂点につながれた仮想スプリングであり、スプリング力 5 によるクラスタリングの例である。図 4.4 は仮に仮想頂点を中心に配置した場合を示しており、インターセクション領域に配置されてはいけぬ頂点が誤って配置される悪い例である。実際には図 4.5 に示す位置に仮想頂点を配置する。例では 2 個のクラスターによる左上がりの形のインターセクション領域形成であり、左上がりの線分の両端に仮想頂点が配置され

ている。右上がりの形にインターセクション領域が形成された場合には、仮想頂点は右上がりの線分の両端に配置される。インターセクション領域を形成しないクラスターの場合には、仮想頂点はクラスター領域の中心に配置される。)

- ・ 4 点仮想頂点

4 点仮想頂点は図4.7に示すように、インターセクションを形成するクラスター領域の各辺の中央に配置する。これは、インターセクション領域に頂点を配置するための計算に用いる。

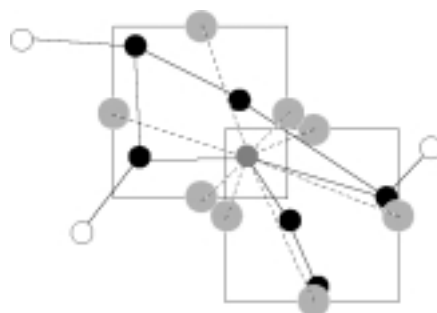


図 4.7 インターセクション領域への頂点の配置の例

(図4.7はインターセクションがあるクラスターグラフの一部である。破線はクーロン力 1 を示しており、インターセクション領域への頂点の配置の例である。)

4.2

スプリングによる力は、フックの法則に準ぜず以下の改良した式を用いて計算する。1 対のオブジェクト間に働くスプリング力 f^s は、オブジェクト u, v の位置が $p_u = (x_u, y_u), p_v = (x_v, y_v)$ のとき、オブジェクト間の距離を $d(p_u, p_v)$ とし、オブジェクト u, v に力が働くものとする、

x 軸方向に

$$f_x^S(u) = k_{uv}^S \frac{(d(p_u, p_v) - l_{uv}^S)(x_u - x_v)}{d(p_u, p_v)} = -f_x^S(v)$$

y 軸方向に

$$f_y^S(u) = k_{uv}^S \frac{(d(p_u, p_v) - l_{uv}^S)(y_u - y_v)}{d(p_u, p_v)} = -f_y^S(v)$$

で記述できる。パラメータ k_{uv}^S, l_{uv}^S は入力された頂点、クラスターの配置情報に依存する。

4.3

電荷による力もスプリングによる力と同様に、クーロンの法則に準ぜずに以下の改良した式を用いて計算した。1 対のオブジェクト間に働くクーロン力 f^C は、オブジェクト u, v に力が働くものとする、

x 軸方向に

$$f_x^C(u) = k_{uv}^C \frac{q_u q_v (x_u - x_v)}{d(p_u, p_v)} = -f_x^C(v)$$

y 軸方向に

$$f_y^C(u) = k_{uv}^C \frac{q_u q_v (y_u - y_v)}{d(p_u, p_v)} = -f_y^C(v)$$

で記述できる。パラメータ k_{uv}^C は入力された頂点、クラスターの配置場所に依存する。

4.4

ここでは、スプリングによる力、電荷による力を実際に計算しグラフを描画するためのアルゴリズムの実装方法について述べる。

4.4.1

グラフを構成するオブジェクトは、逐次的にスプリング力、クーロン力の計算を行い、移動する。移動量 Δx 、 Δy は、計算された力 f と定数 δ の積を用いる。

$$\Delta x = f_x \cdot \delta$$

$$\Delta y = f_y \cdot \delta$$

δ が大きければ、オブジェクトは速く移動し計算量も少ないが、動きが粗くなる。逆に δ が小さければ、オブジェクトの動きは滑らかになるが、遅く移動し計算量は多くなる。

4.4.2

入力：インターセクションがあるクラスターグラフ $C_I = (G, D_I)$

出力：インターセクションがあるクラスターグラフの描画

描画方法

- (1) C_I の頂点、クラスター領域をランダムな位置に配置する。
- (2) (A) ~ (G)それぞれを M 回繰り返す。

(A) 隣接辺に働く力

(A1) スプリング力 1 の計算

(A2) スプリング力 2 の計算

(A3) スプリング力 3 の計算

(A4) スプリング力 4 の計算

(B) クラスターに属する頂点(インターセクションに属する頂点を除く)をクラスター領域に配置するための力

スプリング力 5 の計算

(C) インターセクション領域を形成するための力

スプリング力 6 の計算

(D) インターセクション領域へ頂点を配置するための力

クーロン力 1 の計算

(E) 頂点同士の重なり回避のための力

クーロン力 2 の計算

(F) クラスタ同士の重なり回避のための力

クーロン力 3 の計算

(G) いずれのクラスターにも属さない頂点のクラスター領域への入り込み回避のための力

クーロン力 4 の計算

(3) C_I を描画する。

5

この章では、クーロン・スプリングアルゴリズムを用いてインターセクションがあるクラスターグラフを描画し、描画結果に対して評価実験を行う。実験は、頂点の配置成功率、クラスター同士の重なり率、頂点同士の重なり箇所を評価項目として、用意したグラフに対して測定を行う。また、アルゴリズムの計算時間の測定を行う。

5.1

この節ではクーロン・スプリングアルゴリズムを用いてインターセクションがあるクラスターグラフを描画し、各評価項目を測定し考察を行う。

5.1.1

実験に用いたグラフのクラスは、木と一般無向グラフ（次数約3）であり（それぞれ頂点数20）、それぞれ20サンプル用意した。実験は木と一般無向グラフ上でクラスター数とクラスタリングパターンを変化させ、次節で述べる項目について評価する。クラスターは2個から6個まで変化させ、1個のクラスター内の頂点数は2個から5個とする。インターセクションはクラスターが4個以上のときに1箇所形成する。頂点とクラスター領域の初期配置はランダムとする。1回の測定は2000ステップと

し、それぞれのインターセクションがあるクラスターグラフ C_I を10回描画する。クラスタリングパターンは、本アルゴリズムのクラスタリング性能を評価するために定義したものである。クラスタリングパターンは以下の方法で生成する。

・クラスタリングパターンの生成

一般無向グラフまたは木が $G = (V, E)$ で定義されているとき、1個のクラスターを構成するグラフを、

$$G_X = (X, E_X), \quad X \subset V, \quad E_X = \{(u, v) \in E \mid u, v \in X\}$$

で定義する。ここで X は1個のクラスターを構成する頂点の集合である。

次に、 G_X は $G_X^1, G_X^2, G_X^3 \dots$ から成る非連結な部分グラフ(非連結成分)から構成されるものとする。すなわち、

$$\Pi(G_X) = G_X^1, G_X^2, G_X^3 \dots$$

ここで、1個のクラスター内の部分グラフ G_X^i, G_X^j の間の距離を

$$d = p(G_X^i, G_X^j)$$

で定義する。ここで $d \geq 2$ である。評価実験を行うために、図5.1～5.3に示す連結成分および $d = 2, d = 3$ のグラフから成るクラスターを用意した。以降、連結なグラフから成るクラスターをパターンA、 $d = 2$ のグラフから成るクラスターをパターンB、 $d = 3$ のグラフから成るクラスターをパターンCとする。一般無向グラフの場合、 d は部分グラフ間の最小距離を用いるものとする。

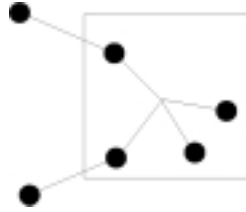


図 5.1 クラスタリングパターン A (連結成分)

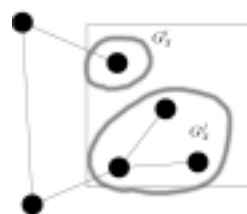
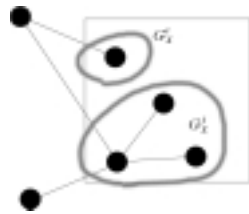


図 5.2 クラスタリングパターン B (d=2)

図 5.3 クラスタリングパターン C (d=3)

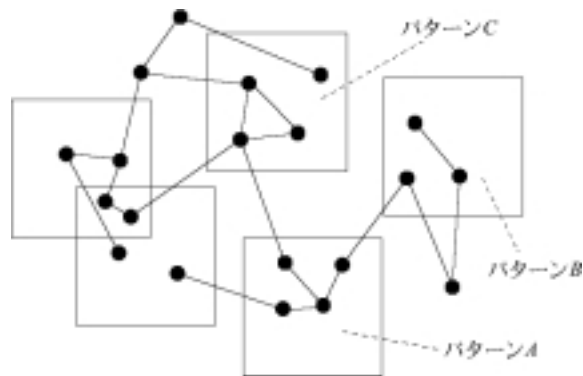


図 5.4 3種類のクラスタリングパターンから成る
インターセクションがあるクラスターグラフの例

・サンプルグラフ

表 5.1、5.2 に評価実験に用いたサンプルグラフをまとめた。実験に用いたグラフの G のクラスは、実験 1 ～ 6 が木、実験 7 ～ 12 が一般無向グラフである。

表 5.1 実験に用いたグラフ 1 (G が木)

	クラスタリングパターン	クラスター数	インターセクション
実験 1	パターン A	2	なし
実験 2	パターン B	2	なし
実験 3	パターン C	2	なし
実験 4	パターン A	4 - 6	あり
実験 5	パターン B	4 - 6	あり
実験 6	パターン C	4 - 6	あり

表 5.2 実験に用いたグラフ 2 (G が一般無向グラフ)

	クラスタリングパターン	クラスター数	インターセクション
実験 7	パターン A	2	なし
実験 8	パターン B	2	なし
実験 9	パターン C	2	なし
実験 10	パターン A	4 - 6	あり
実験 11	パターン B	4 - 6	あり
実験 12	パターン C	4 - 6	あり

・パラメータの設定

表 5.3 は描画規則に従うとき考慮する描画のための力をまとめたものである。描画規則と描画規則に従う際に考慮しなければならない力が交わる欄には丸印、複数の力が考慮される規則で特に考慮しなければならない力と交わる欄には二重丸印を付けた。

パラメータの設定は、2.2美的基準における描画規則の優先関係に従い、クラスターに関するパラメータの強度を高くした。特にインターセクションを扱うパラメータは他と比べて大きく設定した。また、一般無向グラフは木に比べ次数が高いため、一般無向グラフのスプリング力2を調整するスプリング2の自然長を大きくして、描画のための頂点の移動に余裕を持たせた。表5.3を参考に、スプリング力およびクーロン力のパラメータを決定した。表5.4にスプリングパラメータ、表5.5にクーロンパラメータをまとめた。

略記号は次を表す。

- S1: スプリング力 1 C1: クーロン力 1
- S2: スプリング力 2 C2: クーロン力 2
- S3: スプリング力 3 C3: クーロン力 3
- S4: スプリング力 4 C4: クーロン力 4
- S5: スプリング力 5
- S6: スプリング力 6

表 5.3 描画規則に従うとき考慮する描画のための力

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	C1	C2	C3	C4
規則 1	○	○	○	○						
規則 2	○	○	○	○		○				
規則 3		○								
規則 4		○								
規則 5	○	○	○	○						
規則 6									○	
規則 7	○	○	○	○						

表 5.4 スプリングパラメータ

k^{S1}	k^{S2}	k^{S3}	k^{S4}	k^{S5}	k^{S6}
5.0	5.0	5.0	5.0	2.0	1.0

$ S1 $	$ S2 $	$ S3 $	$ S4 $	$ S5 $	$ S6 $
40	150, 120*	70	40	15	70

δ^{S1}	δ^{S2}	δ^{S3}	δ^{S4}	δ^{S5}	δ^{S6}
1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	2.0

表 5.5 クーロンパラメータ

k^{C1}	k^{C2}	k^{C3}	k^{C4}
1.0	1.0	1.0	1.0

δ^{C1}	δ^{C2}	δ^{C3}	δ^{C4}
1.5	0.15	0.3	0.5

5.1.2

評価実験は、それぞれのサンプルグラフをクーロン・スプリングアルゴリズムを用いて描画し、各評価項目について結果を得る。

（評価項目 1）頂点の配置成功率

頂点の配置成功率は、クラスターに属する頂点およびいずれにもクラスタリングされない頂点が指定された場所に確実に配置することが様々な条件の下でも可能かどうかを評価するために用いる。全ての頂点は、図5.5に示すように配置場所（クラスター

* 実験 1 ~ 6 : $l^{ex}=120$ 、実験 7 ~ 12 : $l^{ex}=150$

領域、インターセクション領域、いずれにもクラスタリングされない頂点の領域)が指定された情報を持っている。頂点の配置成功率は、全頂点数のうち正確に配置されている頂点数の割合とする。

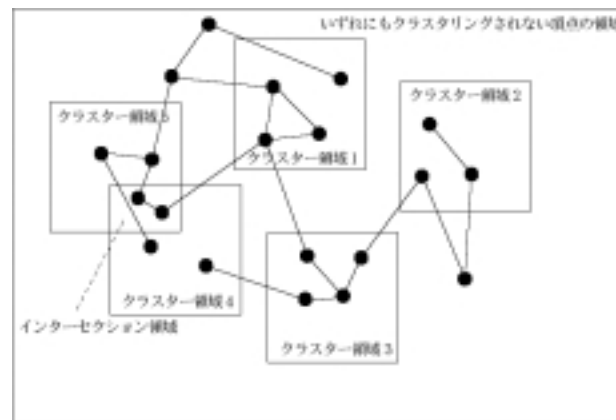


図 5.5 頂点の配置成功率の測定

(図5.5はインターセクションがあるクラスターグラフでクラスター領域が5箇所、インターセクション領域が1箇所ある例である。)

(評価項目2) クラスター同士の重なり率

クラスター同士の重なり率は、様々な条件の下でもクラスターの重なりを回避できるかどうかを評価するために用いる。そのために、インターセクションを形成するため意図的に重なる場合を除いて、それぞれのクラスターが重なり合った箇所数を測定し、クラスター同士の重なり率は、全てのクラスター(インターセクションを形成するクラスターを除く)が重なり合ったときの箇所数のうちクラスターの重なり箇所数の割合とする。

(評価項目3) 頂点同士の重なり率

クラスターに属する頂点は、クラスター領域内に頂点を配置するための力が大きければクラスタリングの性能は大きくなるが、大きすぎると頂点がクラスター領域の中心に集まってしまい、頂点同士が重なり合うことがある。また、いずれのクラスターにも属さない頂点は、クラスター領域との斥力によりクラスター領域外で浮遊状態となり、頂点同士が重なり合うことがある。頂点同士の重なり率は、クーロン力 4 による頂点同士の重なり回避性能を評価するために用いる。そのために、全ての頂点同士の重なり箇所数を測定し、頂点同士の重なり率は全頂点数のうち頂点同士の重なり箇所数の割合とする。

5.1.3

前節で述べた実験方法に基づいて測定を行った。図5.6～5.8に評価項目の測定結果を示す。

(評価項目 1)

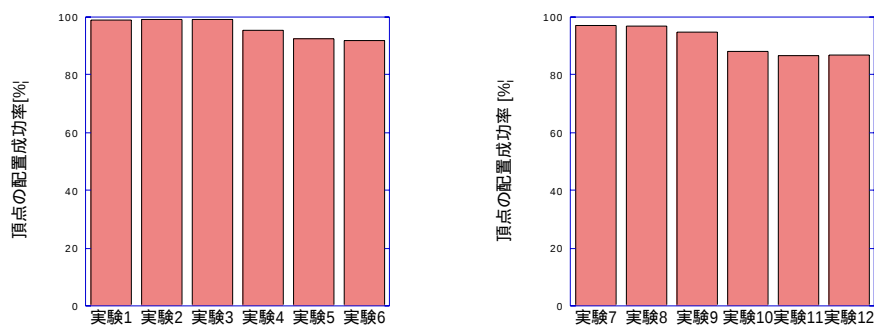


図 5.6 頂点の配置成功率の測定結果

(評価項目 2)

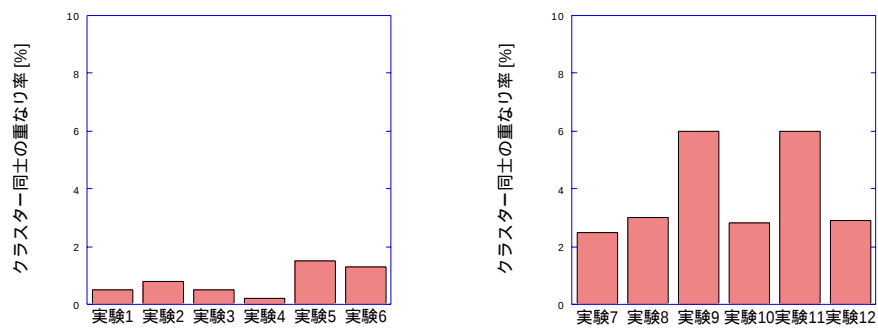


図 5.7 クラスタ同士の重なり率の測定結果

(評価項目 3)

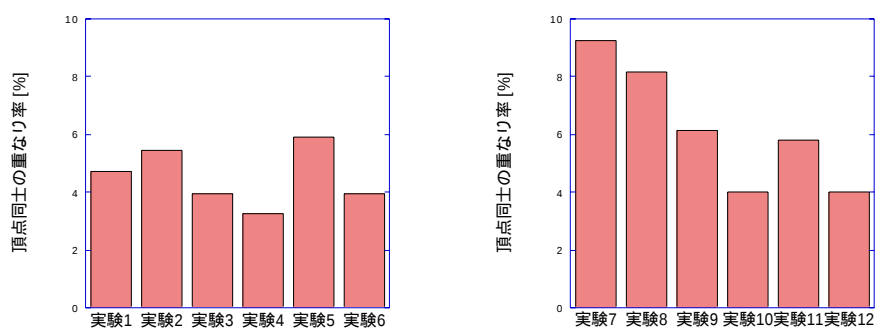


図 5.8 頂点同士の重なり率の測定結果

5.1.4

この節では、評価項目ごとに実験から得られた測定結果を考察する。

（評価項目 1）

頂点の配置成功率の平均は、全てのサンプルグラフの中でクラスター数が 2 個の場合が 97.7%、4 ~ 6 個の場合が 90.2% でありクラスター数が増えると低い結果となった。クラスタリングパターン別にはパターン A、B、C の順に、G が木の場合に 97.2%、95.8%、95.5%、G が一般無向グラフの場合に 92.5%、91.8%、90.9%、全てのサンプルグラフでは 94.9%、93.8%、93.2% を得た。このことから、クラスタリングパターンが上位へ行くに従って、微妙ではあるが結果が低くなることが示唆される。G が木の場合の全てのサンプルの平均は 96.1%、一般無向グラフでは 91.7% である。全てのサンプルグラフの平均をとると 93.9% であり、全体的に高い評価を得ることができた。

（評価項目 2）

クラスター同士の重なり率の平均は、全てのサンプルグラフの中でクラスター数が 2 個の場合が 2.6%、4 ~ 6 個の場合が 2.7% であり、クラスター数に依存しない結果を得た。クラスタリングパターン別にはパターン A、B、C の順に G が木の場合に 0.4%、1.2%、1.0%、一般無向グラフの場合に 3.0%、3.4%、4.8%、全てのサンプルグラフでは 1.7%、2.9%、2.9% を得た。このことから、クラスタリングパターンの変化にも大きく依存しないことが示唆される。G が木の場合の全てのサンプルの平均は 0.9%、一般無向グラフでは 4.1% である。全てのサンプルグラフの平均をとると 2.5% であり、クラスター同士の重なり回避にほとんど成功しているといえる。

（評価項目 3）

頂点同士の重なり箇所率の平均は、全てのサンプルグラフの中でクラスター数が 2

個の場合が6.3%、4～6個の場合が4.5%であり、クラスター数が多い方が頂点の重なり箇所率は小さい結果を得た。クラスタリングパターン別にはパターンA、B、Cの順にGが木の場合に4.0%、5.7%、4.0%、一般無向グラフの場合に6.6%、7.0%、5.1%、全てのサンプルグラフでは5.3%、6.3%、4.5%であり、クラスタリングパターンには依存しない結果を得た。全てのサンプルグラフの中でGが木のサンプルは4.5%、一般無向グラフでは6.2%、全てのサンプルグラフの平均をとると5.4%である。

全体評価として、頂点の配置成功率、クラスター同士の重なり率は、次数が大きいグラフに対して評価が低くなることが示唆される。クラスター数の変化と各項目の関係は、頂点の配置成功率については、クラスター数が多い方が評価が低くなる、クラスター同士の重なり率については依存しない、頂点同士の重なり箇所については、クラスター数が多い方が高い評価を得た。これは、ほとんどの頂点がいずれかのクラスターに入る場合は、頂点の重なり箇所数は少ない結果が得られるといえる。このことから、クラスター内での頂点同士の重なりよりも、いずれにもクラスタリングされない頂点同士による重なりが多いことがわかる。クラスタリングパターンに依存する評価項目は頂点の配置成功率だけであり、クラスター同士の重なり率、頂点同士の重なり箇所は、クラスタリングパターンには依存しないことがわかった。表5.6に評価結果をまとめた。

表 5.6 評価結果

	評価項目 1	評価項目 2	評価項目 3
クラスター数	依存する クラスター数：少 多 評価：高 低	依存しない	依存する クラスター数：少 多 評価：低 高
クラスタリング パターン	依存する パターン：A C 評価：高 低	依存しない	依存しない

5.1.5

図 5.9 ~ 5.17 に、クーロン・スプリングアルゴリズムによるインターセクションがあるクラスターグラフ $C_I = (G, D_I)$ の描画例を示す。

(クラスタリングパターンの変化と頂点の配置成功率)

本章で、本研究で開発したグラフ描画アルゴリズムによるクラスタリングの性能を評価するためにクラスタリングパターンを定義した。クラスタリングパターンを変化させて、インターセクションがあるクラスターグラフを描画し、クラスタリング性能、すなわち頂点の配置成功率を評価した。その結果、クラスタリングパターンが上位に行くに従い微妙に評価が低くなる傾向が示唆されたが、いずれのクラスタリングパターンにおいても90%以上の頂点の配置成功率が得られた。ここでは、実際の描画を例にあげ、本研究で開発したグラフ描画アルゴリズムのクラスタリングの性能を示す。図5.9 ~ 5.11は G が木、図5.12 ~ 5.14は G が一般無向グラフである。それぞれの描画は2000ステップを終了した状態である。

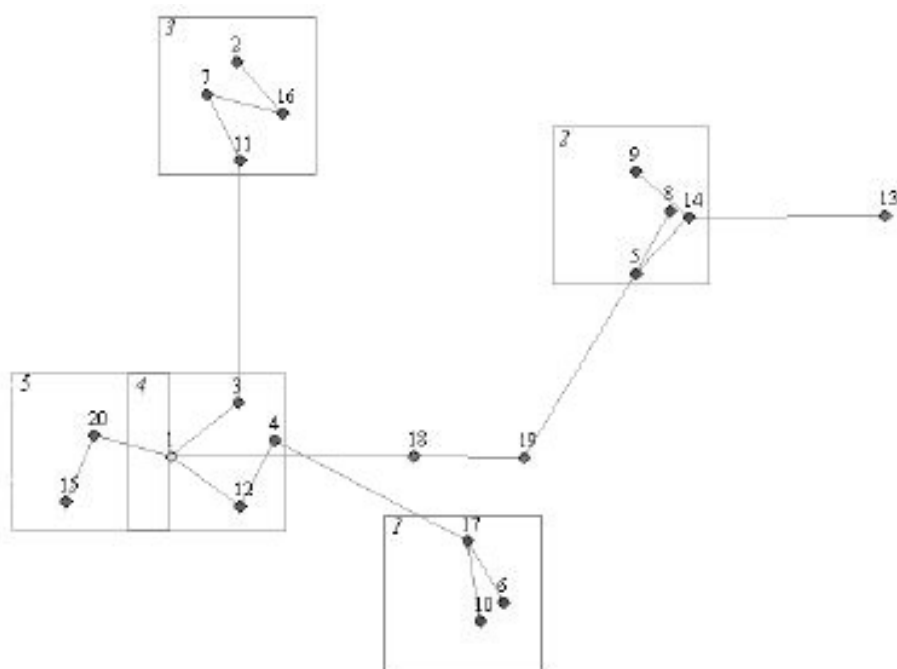


図 5.9 G が木でクラスタリングパターン A の描画例

$\Gamma(1)=\{6,10,13\}$, $\Gamma(2)=\{5,8,9,14\}$, $\Gamma(3)=\{2,7,11,16\}$, $\Gamma(4)=\{1,3,4,12\}$, $\Gamma(5)=\{1,15,20\}$

図 5.9 はクラスターが 6 個で、 G が木でクラスタリングパターン A の描画例である。

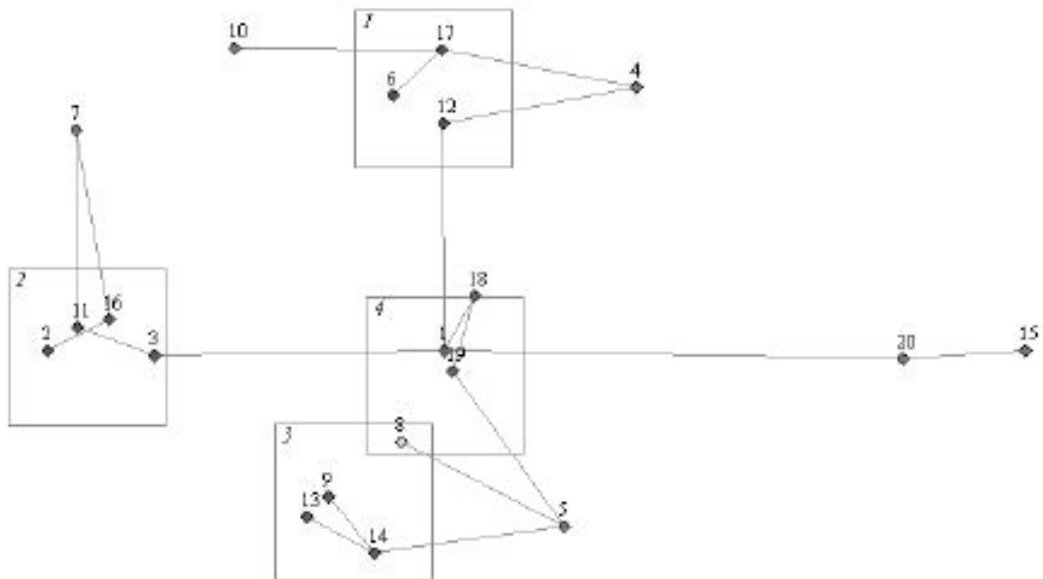


図 5.10 G が木でクラスタリングパターン B の描画例

$\Gamma(1)=\{6,12,17\}$, $\Gamma(2)=\{2,3,11,16\}$, $\Gamma(3)=\{8,9,13,14\}$, $\Gamma(4)=\{1,8,18,19\}$

図5.10はクラスターが4個で、 G が木でクラスタリングパターン B の描画例である。

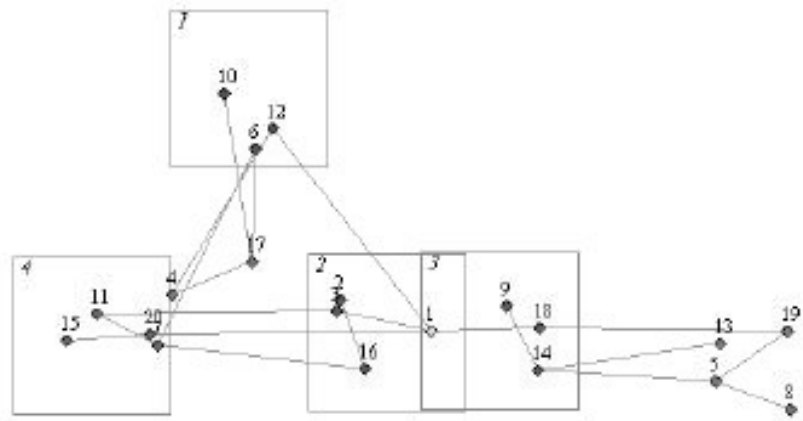


図 5.11 G が木でクラスタリングパターン C の描画例

$\Gamma(1)=\{6,10,12\}$, $\Gamma(2)=\{1,2,3,16\}$, $\Gamma(3)=\{1,9,14,18\}$, $\Gamma(4)=\{7,11,15,20\}$

図5.11はクラスターが4個で、 G が木でクラスタリングパターン C の描画例である。

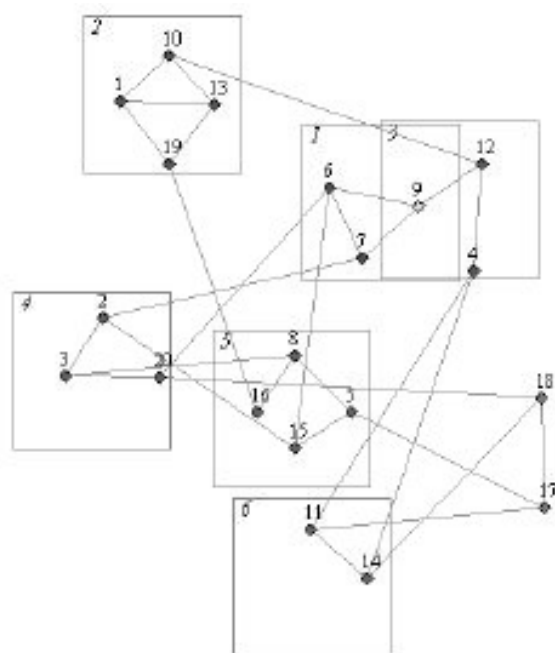


図 5.12 G が一般無向グラフでクラスタリングパターン A の描画例

$\Gamma(1)=\{6,7,9\}$, $\Gamma(2)=\{1,10,13,19\}$, $\Gamma(3)=\{4,9,12\}$, $\Gamma(4)=\{2,3,20\}$, $\Gamma(5)=\{5,8,15,16\}$, $\Gamma(6)=\{11,14\}$

図5.12はクラスターが6個で、 G が一般無向グラフでクラスタリングパターンAの描画例である。

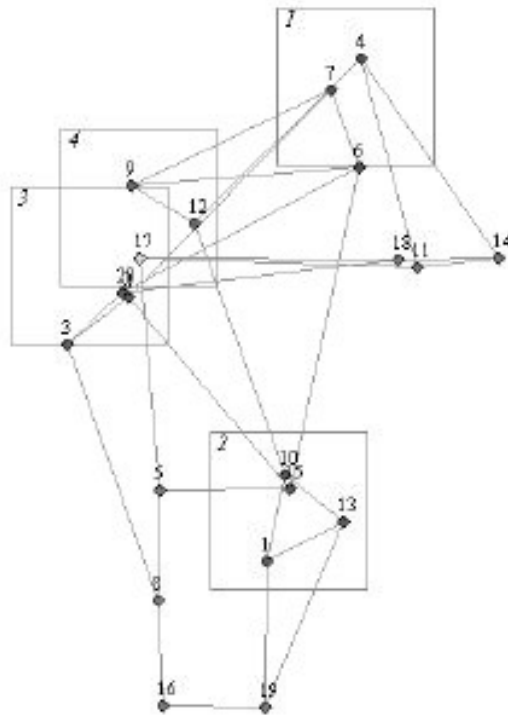


図 5.14 G が一般無向グラフでクラスタリングパターン C の描画例

$\Gamma(1)=\{4,6,7\}$, $\Gamma(2)=\{1,10,13,15\}$, $\Gamma(3)=\{2,3,17,20\}$, $\Gamma(4)=\{9,12,17\}$

図5.14はクラスターが4個で、 G が一般無向グラフでクラスタリングパターン C の描画例である。

(クラスター同士の重なり回避過程)

クラスター同士の重なり箇所率を求めた結果、全てのサンプルグラフの平均は2.5%となり、クラスターの重なりをほとんど回避することに成功した。ここでは、頂点とクラスター領域の逐次的な移動によりクラスターの重なりが回避されていく過程を実際の描画を例にあげて示した。図5.15は2 4 5 ステップ、図5.16は1 0 2 9 ステップ、図5.17は2 0 0 0 ステップにおける描画である。例はGが一般無向グラフでクラスターリングパターン A である。

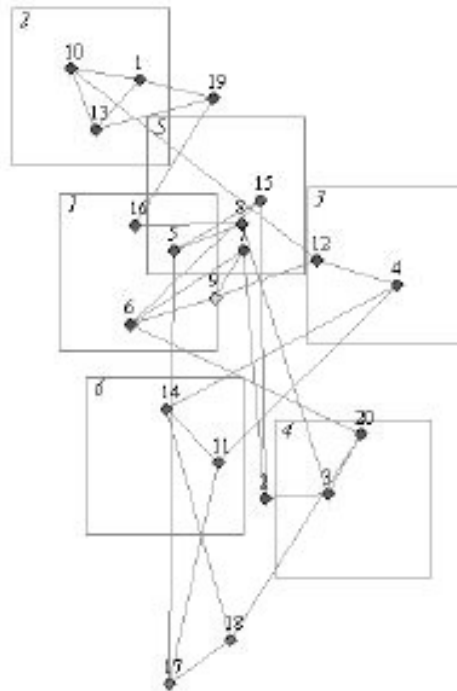


図 5.15 クラスター同士の重なり回避過程の例 1 (2 4 5 ステップ)

初期配置から 2 4 5 ステップでは、クラスター 2 と 5 の重なりが 1 箇所確認でき、全体的にクラスター同士が近接している。

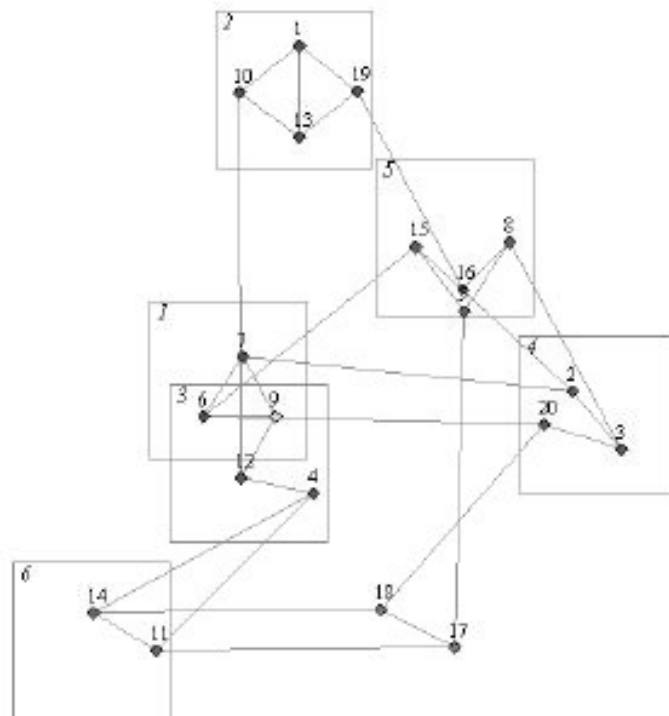


図 5.16 クラスター同士の重なり回避過程の例 2 (1 0 2 9 ステップ)

1 0 2 9 ステップでは、全てのクラスターの重なりの回避に成功しているが、クラスター 2 と 5 が近接している。

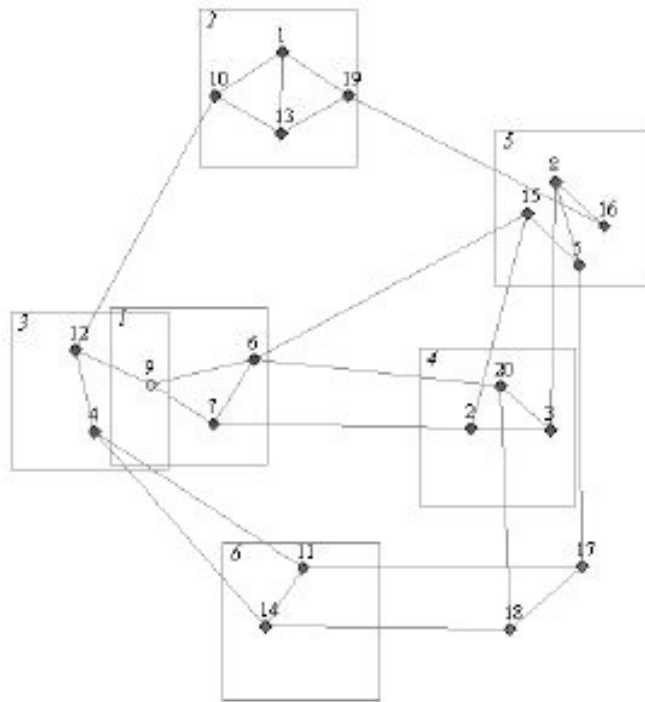


図 5.17 クラスタ同士の重なり回避過程の例 3 (2 0 0 0 ステップ)

2 0 0 0 ステップでは、全てのクラスタが近接せず適度な距離を保って配置されている。

5.2

この節では、クーロン・スプリングアルゴリズムの計算時間に対する評価を行う。クーロン・スプリングアルゴリズムは隣接頂点間に働く力、頂点をクラスタリングする力、インターセクション領域の形成のための力、クラスター同士の重なりを回避する力、頂点同士の重なりを回避する力、いずれのクラスターにも属さない頂点がクラスター領域に入り込みことを回避する力に分けられる。アルゴリズムは、それぞれの力を入力データに基づいて計算される。ここで、インターセクションがあるクラスターグラフの頂点数を $|V|$ 、クラスターに属する頂点数を $|V_C|$ 、インターセクションに属する頂点数を $|V_I|$ 、いずれのクラスターにも属さない頂点数を $|V_N|$ 、クラスター数を $|C|$ 、インターセクション数を $|I|$ 、辺数を $|E|$ とし、それぞれの力の計算を詳しくみる。1回の基本操作に所要する時間は c 単位時間とするとそれぞれの力の計算には以下の時間を要する。

スプリング力 1 ~ 4 : 隣接頂点間に働く力の計算は辺数だけ繰り返し実行されるので、計算時間は $c|E|$ である。

スプリング力 5 : クラスターに属する頂点をクラスタリングするための力の計算はクラスターに属する頂点数だけ繰り返し実行されるので、計算時間は $c|V_C|$ である。

スプリング力 6 : インターセクション領域を形成するための力の計算はインターセクション数だけ繰り返し実行されるので、計算時間は $c|I|$ である。

クーロン力 1 : インターセクションに属する頂点をクラスタリングするための力の計算はインターセクションに属する頂点数だけ繰り返し実行されるので、計算時間は $c|V_I|$ である。

クーロン力 2 : 頂点同士の重なりを回避するための力の計算は全ての頂点間に対して繰り返し実行されるので、計算時間は $c \frac{|V|(|V|-1)}{2}$ である。

クーロン力 3 : クラスター同士の重なりを回避するための力の計算はインターセク

ション領域を形成するクラスター間を除く全てのクラスター間に対して繰り返し実行されるので、計算時間は $c \frac{|C|(|C|-1)}{2} - |I|$ である。

クーロン力 4 : いずれのクラスターにも属さない頂点がクラスター領域に入り込むことを回避するための力の計算はいずれのクラスターにも属さない頂点に対してクラスター数繰り返し実行されるので、計算時間は $c|C||V_N|$ である。

クーロン・スプリングアルゴリズムは 10 種類の力の計算を同時に実行する。したがって、クーロン・スプリングアルゴリズムによってインターセクションがあるクラスターグラフを描画する際の最悪計算時間は $c|V|^2$ であり、計算時間は $O(|V|^2)$ である。図 5.18 はクーロン・スプリングアルゴリズムを実行したときの計算時間を測定し、指標を頂点数としてプロットしたものである。計算は 1000 ステップ実行した。

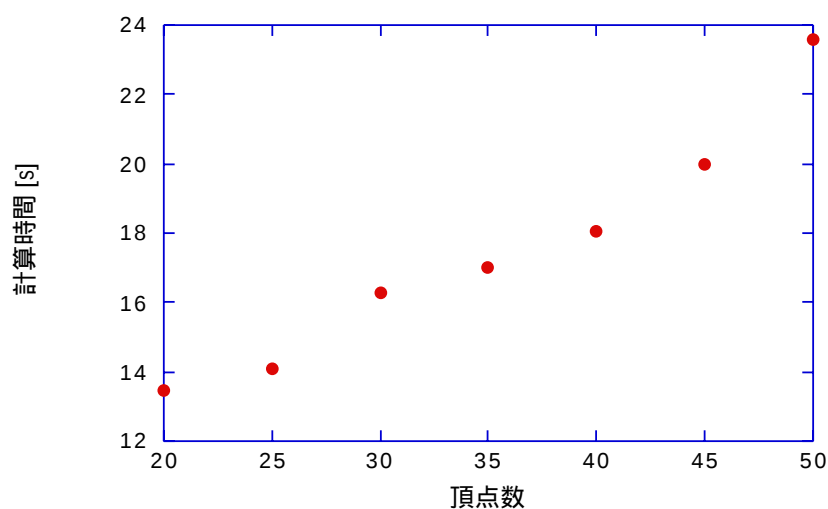


図 5.18 計算時間

(使用マシン : FUJITSU FMV-PRO 8450T1、CPU : Pentium II XEON 450MHz × 2 Dual CPU、メインメモリ : 1024MByte)

この章では、本論文の締めくくりとして本論文のまとめと展望について述べる。

6.1

本論文では、インターセクションがあるクラスターグラフの力指向による自動描画法について論じた。

第1章では、本研究の背景、目的、応用について述べるとともに、各章で議論する内容について概観した。

第2章では、クラスターグラフを拡張し、インターセクションを許すクラスターをもつことができるインターセクションがあるクラスターグラフを定義した。また、グラフの見やすさを考慮した事項として美的基準について述べた。

第3章では、インターセクションがあるクラスターグラフを力指向による方法で描画するための仮想物理モデルについて述べた。ここでは、改良したスプリングモデルとクーロンモデルによるクーロン・スプリングモデルを提案した。

第4章では、第3章で述べた仮想物理モデルをグラフ描画アルゴリズムとして実装するために、計算のための仮想頂点の配置、それぞれの力の計算方法について述べた。

第5章では、実装したアルゴリズムを用いてインターセクションがあるクラスターグラフを描画した。また、描画結果を評価するための評価実験の方法、その実験結果

と考察について述べた。本研究で開発した方法を用いて描画を行った結果、頂点の配置成功率については全サンプルグラフの平均が 93.9% と高い評価が得られ、クラスター同士の重なり率は2.5%とほとんど回避することに成功した。クラスターを重ね合わせたインターセクションの形成は 100% 確実に行うことが可能である結果を得た。

6.2

インターセクションがあるクラスターグラフが、多くの場で使用されるためには、以下を実現することが考えられる。

1. クラスター間の包含関係の扱い
2. 3 個以上のクラスターから形成されるインターセクションの扱い
3. 有向辺と無向辺がある混在グラフの扱い

1.を可能にするためには、各クラスター領域を伸縮自在なものにする必要がある。クラスター領域を伸縮自在にするためには、Luders et al.[12]の方法を用いるか、改良あるいは新たな方法を開発しなければいけない。クラスター内へクラスターを配置したクラスター間の包含関係の扱いは、本研究で扱った頂点をクラスター領域に配置する方法で可能だと考えられる。

2.はクーロンモデルのさらなる改良が必要である。3 個のクラスターから形成されるインターセクションは 4 箇所、さらにインターセクション形成のためのクラスターを増やした場合、インターセクションも増える。したがって、クーロン力の重ね合わせの計算をより厳密にする必要がある。また、この方法により力指向によるベン図の自動描画の実現が考えられる。

3.はマグネティックスプリングモデル[15]を組み合わせることで可能になると考えられる。

以上の実装により、例えばKJ法で許されている図の生成パターンはほとんど網羅できる。これによって、より複雑な知識構造の表現が可能になると考えられる。

本研究を進めるにあたり、マグネティック・スプリングモデルに興味を抱いたもののグラフ自動描画法の分野について右も左もわからない私に終始貴重な御助言、御指導をいただいた北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科知識システム基礎学専攻知識構造論講座の杉山公造教授に心から感謝致します。

また、講義をはじめ様々な面で御指導をいただいた同講座の下嶋篤助教授、副テーマにおいて熱心な御指導をいただいた知識社会システム学専攻創造性開発システム論講座の藤波努助教授、本論文の審査において貴重なアドバイスをいただいた知識社会システム学専攻創造性開発システム論の國藤進教授、知識システム基礎学専攻知識創造論講座の石崎雅人助教授に心から感謝致します。本研究がまだ本格的に立ち上がっていない時期に、私が考案中のアルゴリズムの案を聞いていただき、アドバイスをいただいたUniversity of NewcastleのProf. Peter Eades、スプリングモデルを用いたクラスターグラフの描画を扱った論文に対して電子メールで質問した際に御返答をいただいた University of Newcastle の Dr. Mao Lin Huang に Thank you very much.

- [1] Stroustrup, B.: The C++ Programming Language Third Edition, Addison Wesley (1997)
- [2] Eades, P: A Heuristic for Graph Drawing, CONGRESSUS NUMERANTIIUM, 42 , pp.149-160 (1984)
- [3] Eades, P., Q. Feng and X. Lin: Straight-Line Drawing Algorithms for Hierarchical Graphs and Clustered Graphs, LNCS 1027 GD '95 Graph Drawing, pp.113-128, Springer-Verlag (1996)
- [4] Feynman, R., R. Leighton, M. Sands: 宮島龍興訳 ファインマン物理学 電磁気学 , 岩波書店 (1969)
- [5] Fruchterman, T. and E. Reingold: Graph Drawing by Force-directed Placement, SOFTWARE-PRACTICE AND EXPERIENCE, 21- 11, pp.1129-1164 (1991)
- [6] Harel, D.: On Visual Formalisms, Communications of the ACM, 31 -5, pp.514-531 (1988)
- [7] 出原栄一 , 吉田武夫 , 渥美浩章: 図の体系－図的思考とその表現 , 日科技連 (1986)
- [8] Kamada, T. and S. Kawai: An Algorithm for Drawing General Undirected Graphs, Information Processing Letters, 31 -1, pp.7-15 (1989)
- [9] 川喜田二郎: KJ 法 , 中央公論社 (1986)
- [10] 小出昭一郎: 物理学 (改訂版) , 裳華房 (1984)
- [11] Lin, M.: Online Information Visualization of Huge Data Spaces, A thesis submitted to The Department of Computer Science and Software Engineering The University of Newcastle for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY, July, 1999

- [12] Luders, P., R. Ernst and S. Stille: An Approach to Automatic Display Layout Using Combinatorial Optimization Algorithms, SOFTWARE-PRACTICE AND EXPERIENCE, 25 -11, pp.1183-1202 (1995)
- [13] Sugiyama, K. and K. Misue: Visualization of Structural Information: Automatic Drawing of Compound Digraphs, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, SMC-21 -4, pp.876-892 (1991)
- [14] 杉山公造: グラフ自動描画法とその応用, 社団法人計測自動制御学会編 (1993)
- [15] Sugiyama, K. and K. Misue: Graph Drawing by the Magnetic Spring Model, Journal of Visual Languages and Computing, 6, pp.217-231 (1995)
- [16] 鈴木和彦, 鎌田富久: グラフ構造理解のための単純無向グラフの自動描画アルゴリズム, 第35回プログラミングシンポジウム 1994. 1