

筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

ローカルな美的基準を考慮した
力指向におけるグラフィ아웃方式

武田 修平

指導教員 三末 和男、志築 文太郎、田中 二郎

2014年2月

概要

グラフィレイアウトの手法の1つである力指向アプローチは、辺の長さを一様にする、ノードの一様分布といった美的基準において優れたレイアウトを行なう。しかし、これらの美的基準はグラフ全体に影響するグローバルなものであり、一部のノードのみを対象にするローカルな美的基準は考慮されていない。そこで本研究では、見えないノードと見えないエッジを導入し、力指向アプローチの力学モデルを変更することで、特定のノードのみを対象とするローカルな制御が可能なレイアウト方式を開発した。これにより、力学系のモデルを用いる力指向アプローチの従来の枠組を継承しつつ、グローバルな美的基準とローカルな美的基準の両方を考慮したグラフのレイアウトが可能となった。

目次

第1章 序論	1
1.1 情報可視化とグラフ描画問題	1
1.2 力指向アプローチと問題点	1
1.3 研究の目的とアプローチ	2
1.4 論文の構成	2
第2章 関連研究	3
2.1 美的基準	3
2.2 グラフレイアウトの手法とグラフの種類	4
2.3 力指向アプローチによるグラフレイアウト	4
2.4 制約解消を行なう研究	5
2.5 見えないノードを用いた研究	5
第3章 考慮する美的基準	6
3.1 グローバルな美的基準	6
3.2 ローカルな美的基準	7
第4章 レイアウトの制御手法	9
4.1 力指向モデルの拡張	9
4.1.1 力学モデルで用いる計算式	10
4.1.2 力の係数の変化による配置の制御	11
4.2 美的基準ごとのモデル構築	12
第5章 評価と考察	16
5.1 評価式	16
5.2 評価の対象とするグラフ	19
5.3 評価結果	20
5.4 考察	21
5.4.1 ローカルな美的基準の評価値	21
5.4.2 グローバルな美的基準の評価値	22
第6章 ユースケース	23
6.1 特定のノードを外側に追い出す	24

6.2	特定のノードを縦に並べる	25
6.3	要素の値に応じて左右に分布	26
第 7 章	議論	27
7.1	考慮する美的基準の条件	27
7.2	評価式の評価	27
7.3	ベースとする力学モデルの変更	28
7.4	特定のエッジに関するモデル構築	28
7.5	レイアウトの自動化	29
第 8 章	結論	30
	謝辞	31
	参考文献	32

図目次

2.1	美的基準の例	3
4.1	エッジとノードの描画例	9
4.2	見えないエッジ e (赤) の $c(e)$ を変化させたときのレイアウト結果	11
4.3	L1 の美的基準を考慮する制御例	12
4.4	L2 の美的基準を考慮する制御例	13
4.5	L4 の美的基準を考慮する制御例	14
4.6	L6 の美的基準を考慮する制御例	15
5.1	ローカルな制御を行わない場合の配置結果	19
5.2	L2 における制御をしないときの特定のノードと見えないノードの位置	21
6.1	ユースケース 1:特定のノードを外側に追い出す	24
6.2	ユースケース 2:特定のノードを縦に並べる	25
6.3	ユースケース 3:要素の値に応じて左右に分布	26

第1章 序論

1.1 情報可視化とグラフ描画問題

情報可視化 (Information Visualization) とは、データや情報を視覚的に表現することによって、人間が直接見ることが困難な現象・事象・関係性を、見ることのできる画像・図などにするものである。情報可視化を含む可視化の研究には、物理ベースの科学的データをインタラクティブかつ視覚的に表現する科学的可視化 (Scientific Visualization) と呼ばれる研究分野がある。この分野では形や空間的な位置などがあらかじめ備わっているようなデータを対象とするが、より抽象的で非物理ベースのデータを対象とする研究分野が情報可視化である。

具体的な情報やシステムの要素の間の関係構造を抽象的に表現する数学的概念として、グラフが存在する。会社の組織図やフローチャートなどは、このグラフを可視化した状態であり、抽象的なデータの関係や構造の把握を支援する。グラフの可視化の有用性はグラフのレイアウトに依存するが、データ量が多くなると人の手だけでレイアウトを行なうことは困難となる。そのため、計算機を用いて人間が理解しやすいようにグラフを自動的に描く手法が求められており、情報可視化の中でも特にグラフ描画 (Graph Drawing) と呼ばれている。本研究は、このグラフ描画問題を対象としている。

1.2 力指向アプローチと問題点

グラフの可視化における中心的課題はレイアウトであり、これまでも様々なレイアウト手法が開発されている。その中でも力指向アプローチは広く用いられているレイアウト手法の1つで、グラフの要素を力学系のモデルに置き換えることでレイアウトを行なう。

グラフのレイアウトは、レイアウトを行なう際の指標である美的基準を考慮することが重要である。力指向アプローチによるレイアウトは“隣接しているノード同士を近くに配置”や“エッジの長さを一様にする”などグラフ全体に影響するグローバルな美的基準を考慮している。しかし、“特定のノードを円形に配置”や“「特定のノードを近接して配置」”など一部の要素に着目したローカルな美的基準は考慮していない。そのため、力指向アプローチを用いた場合、ノードやエッジの持つ意味に合わせたレイアウトを行なうことは容易でない。

1.3 研究の目的とアプローチ

本研究では従来の力指向アプローチにおけるグローバルな美的基準に加えて、ローカルな美的基準も考慮可能にすることを目的とする。この目的のために本研究では描画対象となるグラフに対し、見えない2種類の形状のノードと見えないエッジを追加し、力指向アプローチのモデルを拡張することにより、レイアウトをローカルに制御する方式を開発した。

1.4 論文の構成

本章では、グラフ描画の分野と力指向アプローチにおける問題点を説明し、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章で本研究で考慮する美的基準の設定を行なう。第4章では開発した制御手法の概要を述べ、第5章で制御手法の評価と考察を行なう。第6章では制御手法を用いたユースケースを挙げ、第7章で議論を行ない、第8章で結論を述べる。

第2章 関連研究

2.1 美的基準

本研究の目的を達成するために用いる美的基準は書籍“グラフ自動描画法とその応用”[1]でまとめられている。書籍内において美的基準は描画規約と描画規則を総称した用語であり、これらはグラフの自動描画で大きな役割を持つと述べられている。

人間は描画されたグラフを見た時に、直感的にそのグラフの構造の分かりやすさ、見た目の美しさを判断することができる。しかしグラフを自動で描画するためには“分かりやすさ”や“美しさ”といった判断を行なうための明確な指標が必要である。ここで用いられるものが美的基準であり、グラフの構造に合わせて様々な種類が存在し、その種類に応じたグラフレイアウトの手法が多く提案されている。

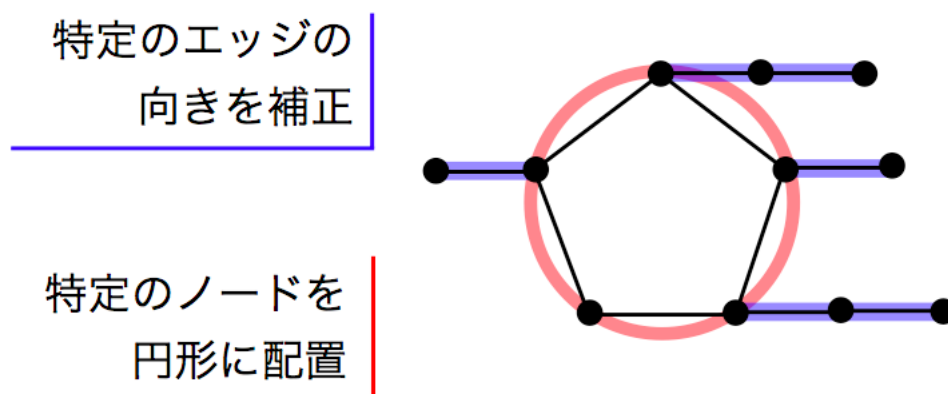


図 2.1: 美的基準の例

美的基準の例を図 2.1 に示す。図 2.1 では“特定のエッジの向きを揃える”と“特定のノードを円形に配置”の2つの美的基準が考慮されている。このように1つのグラフでも複数の美的基準を考慮する場合がほとんどである。その際、多くの場合で美的基準同士が競合してしまうため、優先順位を設定することでレイアウトを行なう。グラフ描画の分野では美的基準は制約とも呼ばれ、美的基準を満たすレイアウトが行われるようにすることを制約解消と呼ぶ。

2.2 グラフレイアウトの手法とグラフの種類

グラフレイアウトには、グラフの種類と考慮すべき美的基準に合わせて様々な手法が存在する。代表的なグラフの種類として木構造が挙げられる。木構造のグラフを対象としたレイアウトは Walker[2] の手法が代表的である。彼は“エッジを交差させない”や“描画の幅を最少にする”等の6つの美的基準を全て満たしたグラフを描画するアルゴリズムを開発した。近年では Block ら [3] が木構造である“生命の樹”の可視化を行っている。

本研究で対象とする力指向アプローチは、平面上を自由に配置でき、エッジに向きが無く、エッジの交差を許した一般無向グラフを対象としている。

2.3 力指向アプローチによるグラフレイアウト

グラフレイアウトの力指向アプローチは一般無向グラフを対象としたレイアウト手法である。この手法ではグラフをバネや電子等からなる力学系のモデルに置き換え、その系の安定状態を求めることでレイアウトを行なう。

力指向アプローチによるグラフレイアウトを最初に行った Eades[4] は、バネに関するフックの法則をそのまま使うのではなく、仮想的な物理系を仮定している。彼は隣接しているノードに働く力 f_1 と、隣接していないノードに働く力 f_2 を以下のように定めている。

$$f_1 = c_1 \log \left(\frac{d}{c_2} \right) \quad (2.1)$$

$$f_2 = \frac{c_3}{\sqrt{d}} \quad (2.2)$$

ここで c_1 、 c_2 、 c_3 は定数、 d はノード間のユークリッド距離である。

Fruchterman & Reingold[5] はこの力学モデルを変更して、グラフのレイアウトを行っている。彼らは描画領域から算出した理想距離 l とノード間のユークリッド距離 d を用いて、隣接しているノードに働く引力 f_3 と、隣接していないノードに働く斥力 f_4 を以下のように定めている。

$$f_3 = \frac{d^2}{l} \quad (2.3)$$

$$f_4 = -\frac{l^2}{d} \quad (2.4)$$

この力学モデルの式は近年の力指向アプローチの研究でも使われており [6]、本研究でもこのモデルを拡張して制御を行なう。

2.4 制約解消を行なう研究

制約を解消するグラフィレイアウトの研究が行われている。He ら [7] はグラフのレイアウトを行なうための3つのモデルを開発した。この3つのモデルを用いることで制約によってノードの位置を調節することができる。Tamassia[8] は様々な種類のグラフィレイアウトの手法に対し、それらがどのように拡張され、どのような制約を解消しているか、そしてそれぞれの利点と欠点をまとめている。Tamassia は力指向アプローチの制約の拡張が以下のように行われていると述べている。

- 描画領域内の位置の制約
- 固定されたサブグラフの制約
- 力やエネルギーの作用により表現できる制約

本研究は3番目の制約の拡張に最も近いと言える。

Sugiyama ら [9] は力指向アプローチの力学系に磁場を追加することにより、エッジの向きに関する制約を解消する手法を開発した。本研究を含む一般的な力指向アプローチは無向グラフを対象としているが、彼らの手法は有向グラフを対象とし、エッジを磁石に置き換えることによりエッジの向きを考慮することができる。

Ryall ら [10] は既にレイアウトされているグラフに対して、ローカルな美的基準の追加を行なうことができる編集ツールを開発した。Ryall らはローカルな美的基準を考慮するためのレイアウトに力指向アプローチを用いたことで、美的基準の競合が起きた場合でも両方を考慮した配置を行なうことができる。しかし、力指向アプローチを用いたのはグラフの一部分のレイアウトのみであるため、ローカルな美的基準の追加の仕方によっては、全体を調節する必要がある。

2.5 見えないノードを用いた研究

見えないノードを用いている研究はいくつか存在する。Becker ら [11] は代謝経路 (metabolic pathway) のための可視化手法を開発した。彼らはエッジの枝分かれをグラフのエッジとノードで表現するために見えないノードを用いている。そのため、見えないノードによる他のノードの位置の制御を行っているわけではない。

Omote ら [12] は ICMG (Intersecting Compound Mixed Graph) の描画を目的として、力指向アプローチを用いたアルゴリズムを開発した。ICMG はノードがクラスタリングされている複合グラフであり、Omote らは見えないノードと見えないエッジを用いることでクラスタを表現している。このアルゴリズムでは力指向における力を計算するタイミングを細かく管理することにより、クラスタの重なりなどを表現できるレイアウトを作り出すことができる。Omote らはクラスタの表現に特化することにより、目的に対して良いレイアウトを得ることができる。本研究では複合グラフに限らず、多様なローカルな美的基準の導入を目的としている。

第3章 考慮する美的基準

本研究で考慮する美的基準は文献 [1] を元に設定した。開発した制御方式では、これらのグローバルな美的基準を維持しつつ、ローカルな美的基準を考慮した制御を行なうことを目標としている。

3.1 グローバルな美的基準

力指向アプローチで考慮される主な美的基準を以下に示す。

- 隣接している頂点同士を近くに配置する (近接性)
- 頂点は近づけすぎないように配置する (最少分離)
- 辺の長さを一定にする (辺長一定)
- 対称性を顕示する (対称性)
- 与えられた描画枠の中に頂点を一様に分布させる (一様分布)
- 描画枠に合わせる (枠への適合)
- 辺の交差を最少にする (辺交差最少)

本研究では力指向アプローチとして広く利用されている Fruchterman & Reingold (F&R) の手法 [5] を利用した。よって、グローバルな美的基準は F&R で採用されているものを継承し、評価を行なうためにより厳密な美的基準を以下のように設定した。これらは他のモデルでも優先的に考慮されている。

- G1. 隣接しているノードを近接して配置する
- G2. ノード同士は指定した下限よりも近づけないようにする
- G3. エッジの長さを一様にする
- G4. エッジの交差数を最少にする

3.2 ローカルな美的基準

文献 [1] には様々なレイアウト手法で採用された美的基準が整理されている。重要な規則として挙げられているローカルな美的基準と、美的基準ごとの本研究での扱いを以下に示す。

- 特定の頂点の系列を直線上に配置する
ローカルな美的基準として考慮するが、以下のような条件を設定する。
 - 直線の位置は変化するが、傾きは固定する
- 特定の頂点の系列を曲線上に配置する
ローカルな美的基準として考慮するが、以下のような条件を設定する。
 - 曲線を円とし、頂点は円周上に配置する
 - 円の位置は変化するが、大きさは固定する
- 頂点を指定した大きさに描画する
ノードの配置の問題ではないので、ローカルな美的基準として考慮しない。
- 特定の頂点の集合を描画の境界に配置する
ローカルな美的基準として考慮するが、以下のような条件を設定する。
 - 描画領域を長方形とし、4 辺の内の指定した 1 辺に配置する
- 特定の頂点の集合を近接して配置する
ローカルな美的基準として考慮する。
- 特定の頂点の集合を中央付近に配置する
ローカルな美的基準として考慮する。
- 特定の辺の交差数を指定した上限以内で描画する
ローカルな美的基準として考慮するが、以下のような条件を設定する。
 - 交差数を指定した上限以内にするのではなく、交差数を最少にする
- 特定の辺の折れ点数を指定した上限以内で描画する
力指向アプローチではエッジを直線で描画するため、ローカルな美的基準として考慮しない。
- 特定の辺の線長を指定した上限以内に描画する
ローカルな美的基準として考慮する。

それぞれの条件を元に、独自に設定したローカルな美的基準を以下に示す。

- L1. 特定のノードを傾きの固定された直線上に配置する
- L2. 特定のノードを半径の固定された円周上に配置する
- L3. 特定のノードを描画の境界のうち指定された1辺に配置する
- L4. 特定のノードを近接して配置する
- L5. 特定のノードを中央付近に配置する
- L6. 特定のエッジの交差数を最少にする
- L7. 特定のエッジの線長を指定した上限よりも大きくならないようにする

第4章 レイアウトの制御手法

本制御手法では、ローカルな美的基準を考慮する制御を行なうために、見えないノードと見えないエッジによる力指向モデルの拡張を行った。

4.1 力指向モデルの拡張

本制御方式で用いる力指向モデルは、F&R のモデルを拡張したものである。主な拡張を以下に示す。

- 見えないノードと見えないエッジの導入
- エッジ毎に理想距離と力の係数を設定

見えないノードと見えないエッジは力指向で用いる力学系の構成要素であるが、描画領域には描かれない。見えないノードの形状は点だけでなく直線も存在するものとし、見えないノードは描画空間に固定できるものとする。

F&R の力指向モデルでは隣接する全てのノード間の理想距離は同じであり、力の係数は存在しない。本制御方式ではエッジ毎に異なる理想距離を設定できるようにし、エッジ毎に力の係数を設定することにより力の強さを調節できるようにした。

論文内の図では、描画対象のノードとエッジを黒の点と線、見えないノードと見えないエッジを赤の点と線、線状の見えないノードは赤い点線とする (図 4.1 参照)。

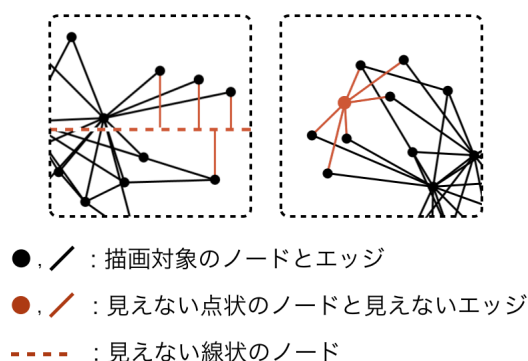


図 4.1: エッジとノードの描画例

4.1.1 力学モデルで用いる計算式

力指向モデルの説明をするにあたり、描画対象のグラフを $G = (V, E)$ 、ノードの集合を V 、エッジの集合を E とする。本制御方式ではさらに、グラフ全体を $G' = (V', E')$ とし、見えないノードを含むノードの集合を V' 、見えないエッジを含むエッジの集合を E' とする。

F&R のモデルでは全てのノード間に斥力が、隣接するノード間に引力が設定されている。本制御方式で採用した力はノード間の引力 f_a と斥力 f_b 、さらに隣接していないノード間の斥力 f_c で、次のように定めた。

$$f_a = c(e) \cdot d^2 / l(e) \quad (4.1)$$

$$f_b = -c(e) \cdot l(e)^2 / d \quad (4.2)$$

$$f_c = -l_0^2 / d \quad (4.3)$$

ここで、エッジ e に対して、 $l(e)$ は隣接するノード間の理想距離、 d はノード間のユークリッド距離、 $c(e)$ は力の強さを調節するための係数を表す。また、 l_0 は隣接していないノード間の理想距離を表す。描画対象のエッジは全て $l(e) = l_0$ 、 $c(e) = 1$ にするのに対し、見えないエッジの $l(e)$ と $c(e)$ は考慮する美的基準毎に異なる値を設定する。なお、線状のノードの傾きは変化しないものとし、線状のノードと点状のノードの間の引力と斥力はそれらの間の最短距離に基づいて計算する。

4.1.2 力の係数の変化による配置の制御

本制御方式では見えないノードと見えないエッジを追加し、 $c(e)$ と $l(e)$ を適切に設定することで、ローカルな制御を行なう。エッジ毎に設定する理想距離 $l(e)$ は、エッジの理想的な長さである。力の係数 $c(e)$ は、エッジで接続されるノードに作用する力の大きさを決めるため、この値を調節することで、そのエッジの長さをどの程度理想距離に近づけるかを調節できる。

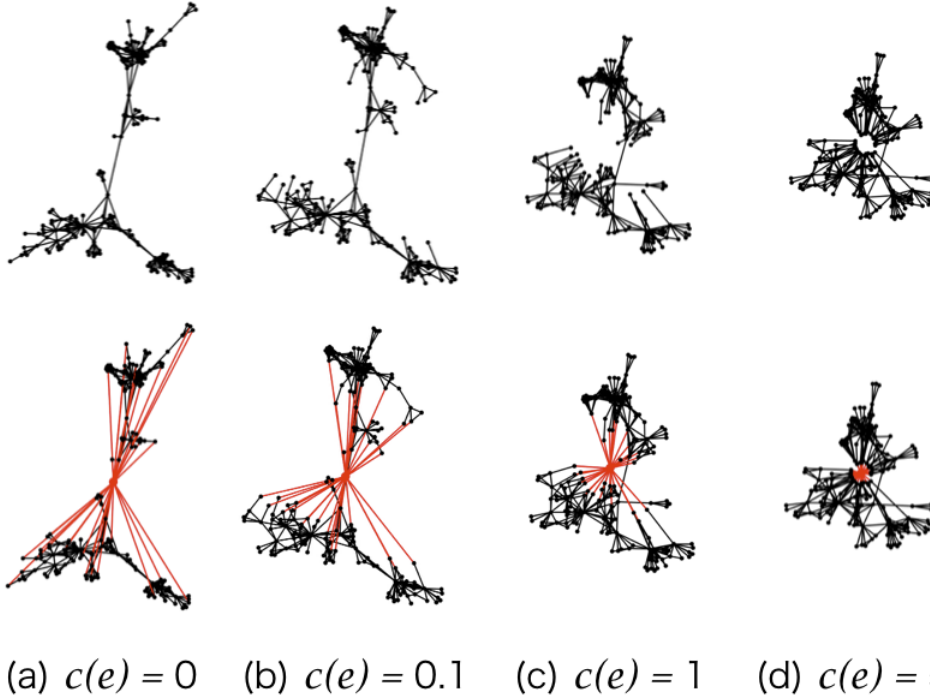


図 4.2: 見えないエッジ e (赤) の $c(e)$ を変化させたときのレイアウト結果

図 4.2 における (a) から (d) のグラフは全て同じ構造のグラフであり、 $l(e) = l_0$ に設定した見えないエッジを使って、描画対象のノードの一部と 1 つの見えないノードを接続している。(a) から (d) のグラフの違いは、見えないエッジに異なる $c(e)$ の値が設定されている点である。図内の上が G のみを、下が G' 全体を描画したグラフである。

それぞれのレイアウトの結果を見てみると、見えないエッジの $c(e)$ の値が大きくなるにつれてグラフ全体が中央に寄って行くことがわかる。これは見えないエッジの $l(e)$ を l_0 に設定することにより、 $c(e)$ が大きくなるに従い、見えないエッジの長さが描画対象のエッジの長さの理想距離に近づくためだと考えられる。図 4.2(d) では $c(e) = 50$ としているため、全ての見えないエッジの長さが理想距離とほぼ等しくなり、見えないエッジで接続される描画対象のノードが円周上に並ぶように配置することができる。ここで $c(e) = 50$ としたのは、見えないエッジから作用する力を他の力よりも十分に大きくするためであり、 $c(e)$ の値はグラフの規模と構造に依存する。

4.2 美的基準ごとのモデル構築

特定のノードの集合 $V_S \subset V$ あるいはエッジの集合 $E_S \subset E$ が与えられたとき、ローカルな美的基準毎の $G' = (V', E')$ は次のように作成する。以下の説明において ϵ は十分に小さい値、 m は十分に大きい値とする。

- **L1. 特定のノードを傾きの固定された直線上に配置する**

傾きの固定された線状の見えないノード v_l を追加し、 V_S の各要素と見えないエッジで接続する。つまり、

$$E_1 = \{(v_l, v) | v \in V_S\}$$

$$V' = V \cup \{v_l\}$$

$$E' = E \cup E_1$$

とする。さらに

$$\begin{aligned} l(e) &= \epsilon \\ c(e) &= m \end{aligned} \quad \text{for } \forall e \in E_1$$

とする。このように $l(e)$ と $c(e)$ を設定することで、図 4.3 のグラフの見えないエッジの長さは短くなり、特定のノードの集合は全て直線上に限りなく近づく。

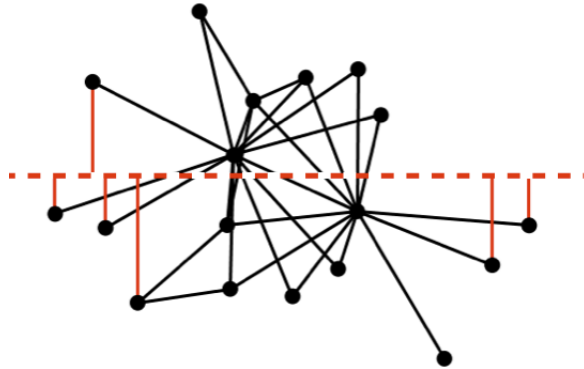


図 4.3: L1 の美的基準を考慮する制御例

- **L2. 特定のノードを半径の固定された円周上に配置する**

点状の見えないノード v_p を追加し、 V_S の各要素と見えないエッジで接続する。つまり、

$$E_2 = \{(v_p, v) | v \in V_S\}$$

$$V' = V \cup \{v_p\}$$

$$E' = E \cup E_2$$

とする。さらに

$$\begin{aligned} l(e) &= r & \text{for } \forall e \in E_2 \\ c(e) &= m \end{aligned}$$

とする。ここで r は円の半径とする。 $c(e) = m$ とすることで見えないエッジの長さは r とほぼ等しくなり図 4.4 のように特定のノードは円周上に限りなく近づく。

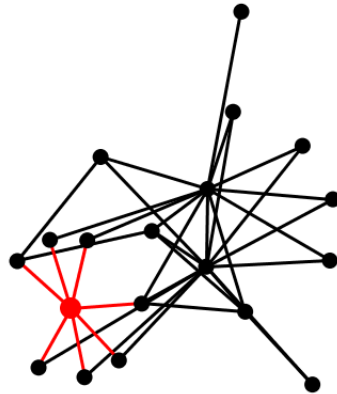


図 4.4: L2 の美的基準を考慮する制御例

- **L3. 特定のノードを描画の境界のうち指定された 1 辺に配置する**

境界の位置に固定された線状の見えない頂点 v_l を追加し、L1 と同様に接続する。L1 の v_l は固定されていなかったため、特定のノードの位置に合わせて直線の位置が変化した。L3 では描画領域内の特定の位置に特定のノードを近づけることができる。

- **L4. 特定のノードを近接して配置する**

L2 と同様に接続するが、

$$\begin{aligned} l(e) &= \epsilon \\ c(e) &= c_0 \end{aligned} \quad \text{for } \forall e \in E_2$$

とする。ここで c_0 はエッジ $e \in E$ の $c(e)$ よりも小さい値とし、実験的に見出される。L2 との違いは $c(e)$ の値であり、L2 のように大きい値を設定しないことで図 4.5 のように、見えないエッジの長さにばらつきを持たせて見えないノードに近づけることができ、制御を行わない場合の配置を維持することができる。

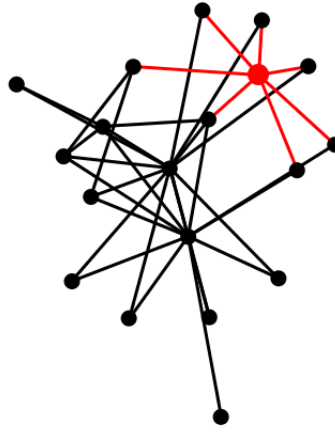


図 4.5: L4 の美的基準を考慮する制御例

- **L5. 特定のノードを中央付近に配置する**

描画領域の中央に固定された点状の見えないノード v_p を追加し、L4 と同様に接続する。

- **L6. 特定のエッジの交差数を最少にする**

E_S の各要素と 1 対 1 で対応する点状の見えないノードの集合 V_6 を追加し、 E_S の各要素で接続されるノードと見えないエッジで接続する。つまり、

$$\begin{aligned} V_6 &= \{v_1, v_2, \dots, v_n\} (n = |E_S|) \\ E_6 &= \{(a, b) \mid a \in V_6, b \in S(a)\} \\ V' &= V \cup V_6 \\ E' &= E \cup E_6 \end{aligned}$$

とする。さらに

$$\begin{aligned} l(e) &= \frac{l_0}{2} \\ c(e) &= m \end{aligned} \quad \text{for } \forall e \in E_6$$

とする。ここで $S(a)$ は、ノード a に対応する E_S の要素で接続されるノードの集合とする。描画対象のエッジは全て $l(e) = l_0$ と設定されているため、図 4.6 のように見えないノードは配置される。見えないノードは接続されていないノードに対し斥力のみを与えるため、制御しない場合よりも接続されていないノードが遠ざかり交差数も減ると考えられる。

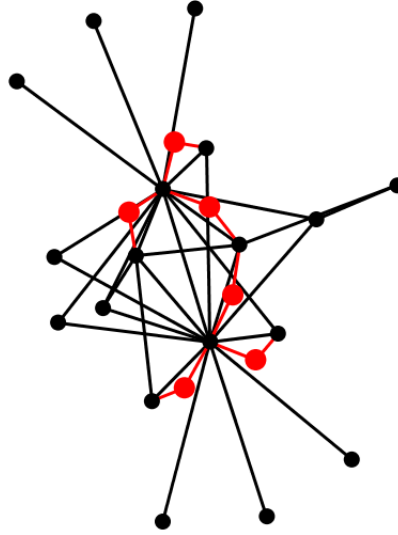


図 4.6: L6 の美的基準を考慮する制御例

- **L7. 特定のエッジの線長を指定した上限よりも大きくならないようにする**
L6 と同様に接続するが、

$$\begin{aligned} l(e) &= d_0/2 \\ c(e) &= m \end{aligned} \quad \text{for } \forall e \in E_7$$

とする。ここで d_0 は指定された線長とする。

L6 との違いは $l(e)$ の値であり、 $c(e)$ を大きくすることで、特定のエッジの長さを制御している。

第5章 評価と考察

本制御方式の評価は、美的基準毎に定めた評価式を用いて、理想との差を数値化することにより行なう。数値化は何も制御しないレイアウトとローカルな美的基準毎に制御をしたレイアウトに対して行い、グローバルな美的基準とローカルな美的基準の両方を比較する。

なお、実際の検証では $l_0 = 20$ 、 $c_0 = 1$ 、 $\epsilon = 1$ 、 $m = 10$ 、L4 と L5 の $c(e)$ を 0.1 とした。ノードの初期配置は全てランダムとし、ローカルな美的基準毎に 10 回の検証を行った。

5.1 評価式

評価式で算出される値は、それぞれの美的基準における理想の状態からどれだけ離れているかを示す。本研究では理想の状態の値を 0 とし、全ての評価式を定めているため、評価式による評価値は全て 0 に近いほど良い結果である。

評価式の説明では、特定のノードの集合 $V_S \subset V$ あるいはエッジの集合 $E_S \subset E$ は与えられるものとし、ノード v_1, v_2 の位置を $p(v_1)$ と $p(v_2)$ 、距離を $d(v_1, v_2)$ で表す。ただし、 v_1 と v_2 が共に点状のノードのとき、 $d(v_1, v_2)$ は $p(v_1)$ と $p(v_2)$ の距離、 v_1 が線状のノードのとき、 $d(v_1, v_2)$ は v_1 で描かれる直線と $p(v_2)$ の最短距離として定義する。また、距離は全て 2 次元平面上のユークリッド距離とする。

• G1. 隣接しているノードを近接して配置する

隣接しているノード間の距離の平均 a_1 と、隣接していないノード間の距離の平均 a_2 の比を用いる。

a_1 をエッジ $e = (v_1, v_2)$ の長さの平均として考え、ノード v と隣接していないノードの集合を $N_1(v)$ で表すと、 a_1 と a_2 は

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{|E|} \sum_{e \in E} d(v_1, v_2) \\ a_2 &= \frac{\sum_{v_1 \in V} \sum_{v_2 \in N_1(v_1)} d(v_1, v_2)}{\sum_{v_1 \in V} |N_1(v_1)|} \end{aligned}$$

であり、評価式は

$$\frac{a_1}{a_2} \tag{5.1}$$

とする。

- **G2. ノード同士は指定した下限よりも近づけないようにする**

指定した下限よりノード間の距離が小さくなったときの、指定した下限から距離を引いた差の和を用いる。

最低限離す距離を l_0 とし、評価式は

$$\sum_{v_1, v_2 \in V} \max(0, l_0 - d(v_1, v_2)) \quad (5.2)$$

とする。

- **G3. エッジの長さを一様にする**

エッジの長さの標準偏差を用いる。

エッジ $e = (v_1, v_2)$ とし、G1 で算出した平均 a_1 を用いて、評価式は

$$\sqrt{\frac{1}{|E|} \sum_{e \in E} (d(v_1, v_2) - a_1)^2} \quad (5.3)$$

とする。

- **G4. エッジの交差数を最少にする**

エッジの交差数の平均を用いる。

エッジ e_1 と e_2 が交差している場合は 1 を、交差していない場合は 0 を返す関数を $i(e_1, e_2)$ とし、評価式は

$$\frac{1}{|E|} \sum_{e_1, e_2 \in E} i(e_1, e_2) \quad (5.4)$$

とする。

- **L1. 特定のノードを傾きの固定された直線上に配置する**

追加した線状の見えないノードと特定のノードの距離の平均を用いる。

追加した見えないノードを v_l とし、評価式は

$$\frac{1}{|V_S|} \sum_{v \in V_S} d(v_l, v) \quad (5.5)$$

とする。

- **L2. 特定のノードを半径の固定された円周上に配置する**

追加した点状の見えないノードと特定のノードの距離から、近づけたい円の半径を引いた差の平均を用いる。

追加した見えないノードを v_p 、半径を r とし、評価式は

$$\frac{1}{|V_S|} \sum_{v \in V_S} |d(v_p, v) - r| \quad (5.6)$$

とする。

- **L3. 特定のノードを描画の境界のうち指定された 1 辺に配置する**

L1 と同様な計算を行なう。

評価式は

$$\frac{1}{|V_S|} \sum_{v \in V_S} d(v_l, v) \quad (5.7)$$

とする。

- **L4. 特定のノードを近接して配置する**

共に V_S に含まれるノード間の距離の平均 a_3 と、どちらかが V_S に含まれないノード間の距離の平均 a_4 の比を用いる。

a_3 と a_4 は

$$a_3 = \frac{\sum_{v_1, v_2 \in V_S} d(v_1, v_2)}{|V_S|^2}$$

$$a_4 = \frac{\sum_{v_1, v_2 \in V} d(v_1, v_2) - \sum_{v_1, v_2 \in V_S} d(v_1, v_2)}{|V|^2 - |V_S|^2}$$

であり、評価式は

$$\frac{a_3}{a_4} \quad (5.8)$$

とする。

- **L5. 特定のノードを中央付近に配置する**

追加した点状の見えないノードと特定のノードの距離の平均を用いる。

追加した見えないノードを v_p とし、評価式は

$$\frac{1}{|V_S|} \sum_{v \in V_S} d(v_p, v) \quad (5.9)$$

とする。

- **L6. 特定のエッジの交差数を最少にする**

特定のエッジの交差数の平均を用いる。

G4 と同様に $i(e_1, e_2)$ を用いて、評価式は

$$\frac{1}{|E_S|} \sum_{e_1 \in E_s} \sum_{e_2 \in E} i(e_1, e_2) \quad (5.10)$$

とする。

- **L7. 特定のエッジの線長を指定した上限よりも大きくならないようにする**

指定した上限よりエッジが長くなったときの、長さから指定した上限を引いた差の和を用いる。

指定した線長を d_0 、エッジ $e = (v_1, v_2)$ とし、評価式は

$$\sum_{e \in V_s} \max(0, d(v_1, v_2) - d_0) \quad (5.11)$$

とする。

5.2 評価の対象とするグラフ

評価に用いるグラフとして2種類のデータを使用した。

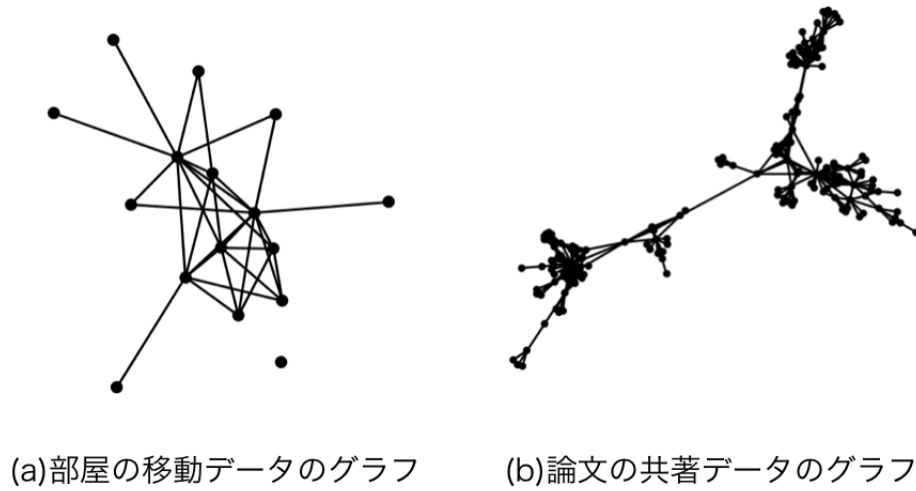


図 5.1: ローカルな制御を行わない場合の配置結果

1つ目のデータは部屋の移動を表すデータである。このデータはノードが部屋、エッジが移動の有無を示しており、ノードの数が13、エッジの本数が31となっている。 V_s は部屋の利用数が20以上、 E_s は部屋の移動数が10以上の要素とし、 $|V_s| = 7$ 、 $|E_s| = 3$ である。ローカルな美的基準を考慮せずに力指向アプローチによるレイアウトを行ったグラフが5.1(a)である。

2つ目のデータは論文の共著関係を表すデータである。このデータはノードが著者、エッジが共著関係の有無を示しており、ノードの数が165、エッジの本数が402となっている。 V_s は論文の著数が10以上、 E_s は共著数が3以上の要素とし、 $|V_s| = 16$ 、 $|E_s| = 18$ である。ローカルな美的基準を考慮せずに力指向アプローチによるレイアウトを行ったグラフが5.1(b)である。

5.3 評価結果

それぞれデータの検証結果の平均を表 5.1 と表 5.2 に示す。

表 5.1: 部屋の移動データに対しローカルな制御を行った場合の評価結果

	G1	G2	G3	G4	Ln	通常時の Ln
通常時	0.449	0.2772	8.4	1.41		
L1	0.433	0.6895	11.6	2.13	2.26	27.06
L2	0.427	0.4015	10.2	1.67	0.97	2.16
L3	0.287	0.6256	11.3	2.06	2.70	365.70
L4	0.423	0.3845	9.5	1.49	0.37	0.44
L5	0.440	0.3502	9.6	1.41	15.49	32.99
L6	0.562	0.1934	9.9	1.81	0.77	1.17
L7	0.558	0.1645	9.4	1.50	1.92	2.64

表 5.2: 論文の共著データに対しローカルな制御を行った場合の評価結果

	G1	G2	G3	G4	Ln	通常時の Ln
通常時	0.080	0.0545	30.9	4.20		
L1	0.087	0.0595	30.8	8.18	4.76	257.06
L2	0.166	0.0632	26.5	4.37	32.67	347.90
L3	0.104	0.0803	31.4	12.00	4.93	403.97
L4	0.200	0.0550	32.6	7.77	0.77	0.94
L5	0.154	0.0614	26.0	5.08	95.91	401.87
L6	0.097	0.0402	32.7	3.42	3.19	4.22
L7	0.097	0.0397	32.7	3.65	1.36	1.70

表 5.1 と表 5.2 は行が制御内容、列が評価内容を表している。Ln はローカルな制御毎に、制御内容に対応したローカルな美的基準の評価値を表す。通常時とはローカルな制御を何も行わない状態の結果を表している。通常時の Ln は、描画対象のノードが見えないノードから影響を受けないようにした状態の数値である。

5.4 考察

5.4.1 ローカルな美的基準の評価値

ローカルな美的基準の評価値に注目してみると次のような点が読み取れる。

1. 両方のグラフの全ての制御で通常時よりも理想に近づいている。
2. 部屋の移動データ (表 5.1) では L2 が L1 よりも理想に近づいているのに対し、論文の共著データ (表 5.2) では理想から遠い。
3. L5 は他のローカルな美的基準と比べると、両方のデータで理想から遠い。

それぞれについて考察する。

まず、1 の結果について考察する。この結果より本制御手法を用いることで、ローカルな美的基準を考慮できるようになったことがわかる。特に L1 と L3 では両方のグラフで理想の値に大きく近づいており、線状の見えないノードでレイアウトの制御することの有用性を示している。

次に、2 の結果について考察する。この結果の原因として、グラフの構造が考えられる。それぞれの表の L_n を見てみると、表 5.1 は通常時から $L_n = 2.16$ となっていて、理想の値である 0 にかなり近づいている。それに対して表 5.2 では、通常時は $L_n = 347.67$ となっている。これは描画対象のエッジの理想距離が 20 であることを考慮すると、理想の値からかなり遠いと言える。また、評価した 2 つのグラフは構造も大きく異なり、部屋の移動データは特定のノードがそれぞれ隣接しているのに対し、論文の共著データは特定のノードがほぼ隣接していない (図 5.2 参照)。力指向アプローチでは隣接しているノード同士を近くに、隣接していないノード同士を遠くに配置しやすいにも関わらず、L2 の制御では無理やり近くに配置しているため、理想値から離れた値になったとも考えられる。

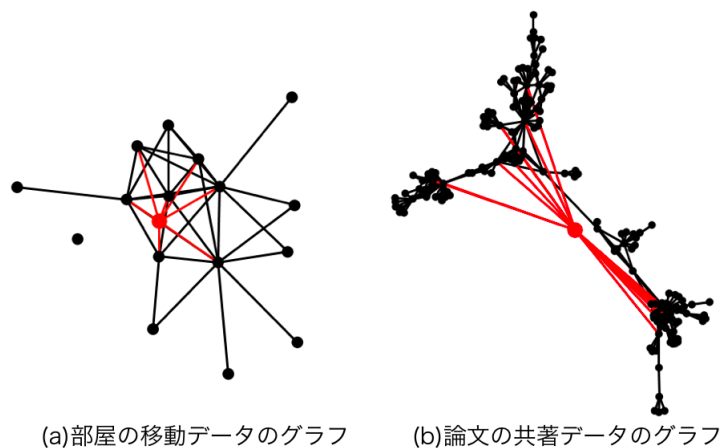


図 5.2: L2 における制御をしないときの特定のノードと見えないノードの位置

最後に、3の結果について考察する。これはL5の評価式に問題があると考えられる。L5の美的基準は“特定のノードを中央付近に配置する”であり、評価式は描画領域の中央からの距離を用いている。評価式の値は理想との差を表すので、特定のノードが中央に近ければ近いほど理想的な配置だという結果になる。しかし美的基準は“中央付近”に配置であり、中央に近ければ近いほど良いわけではなく、制御内容も中央との距離を0にすることを目的としていない。この点を考慮せずにL5の評価式を定めてしまったため、3.のような結果になってしまったと考えられる。

5.4.2 グローバルな美的基準の評価値

グローバルな美的基準の評価値に注目してみると次のような点が読み取れる。

1. 論文の共著データ(表 5.2)のG1が大きく増加するときがある。
2. G3は他のグローバルな美的基準と比べると、両方のデータで値が大きく変化していない。
3. L3に注目してみると部屋の移動データ(表 5.1)ではG1が、論文の共著データ(表 5.2)ではG4が他の制御と大きく異なっている。

それぞれについて考察する。

まず、1の結果について考察する。G1の美的基準は“隣接しているノードを近接して配置する”であり、G1の評価値が特に増加しているローカルな美的基準はL2、L4、L5である。これらのローカルな制御における共通点は、特定のノードの制御を1つの見えない点状のノードで行っている点である。この見えない点状のノードにより特定のノードは全て1点に集められる。G1の評価方法は隣接しているノード間と隣接していないノード間のユークリッド距離の平均の比を用いているため、グラフ全体が1点に集まってしまう制御内容のときに、評価値が増加してしまったと考えられる。

次に、2の結果について考察する。G3の美的基準は“エッジの長さを一様にする”である。G3以外のグローバルな美的基準は、評価値が2倍以上になってしまう制御が1つはあるのに対し、G3は変化が $-0.15 \sim +1.4$ の間に収まっている。この結果は本制御方式が特定のノードに影響を与えたとしても、グラフ全体のエッジの長さにはあまり影響を与えないことを示している。

最後に、3の結果について考察する。L3の美的基準は“特定のノードを描画の境界のうち指定された1辺に配置する”である。この美的基準は見えない線状のノードを用いて制御を行っており、L1の制御内容との違いは見えない線状のノードを固定するかどうかである。しかし結果を比較してみると、G3以外のグローバルな美的基準の評価値が大きく異なっているため、見えないノードを固定する場合としない場合での評価値の変化を、今後検証する必要がある。

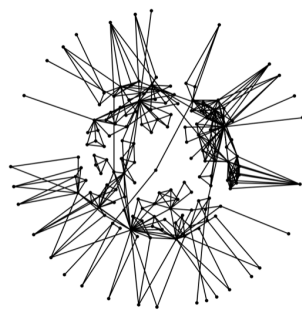
第6章 ユースケース

ユースケースとして使用するグラフは、評価で用いた論文の共著関係のデータから成るグラフである。それぞれのユースケースは L1 から L7 の美的基準と、ローカルな美的基準の応用を組み合わせることによりレイアウトを行っている。

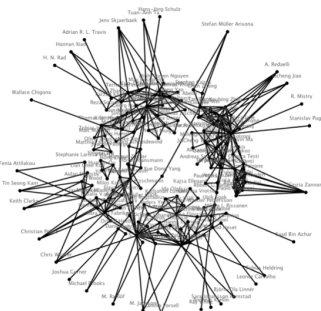
6.1 特定のノードを外側に追い出す

このユースケースでは論文の執筆数が少ない著者と、その著者と共著をしている著者に注目することを目的としている。考慮する美的基準と、美的基準の対象を以下に示す。

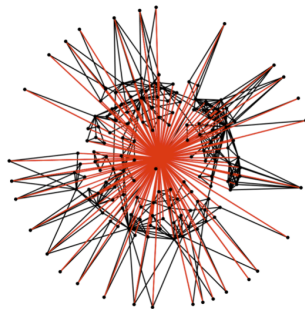
- 執筆数が1の著者を対象に、
“L2. 特定のノードを半径の固定された円周上に配置する”の美的基準
- 執筆数が2以上の著者を対象に、
“L5. 特定のノードを中央付近に配置する”の美的基準



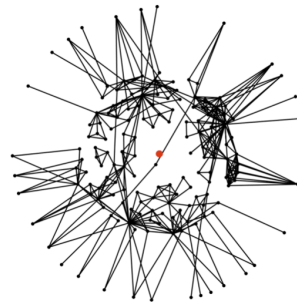
(a) 描画対象のノードとエッジのみ描画



(b) (a)に加え、ノードのラベルを表示



(a) 全てのノードとエッジを描画



(b) (a)に加え、見えないノードを表示

図 6.1: ユースケース 1: 特定のノードを外側に追い出す

図 6.1 が実際に制御を行ったグラフである。グラフを見てみると一部のノードのみが大きな円周上に並び、それ以外が中央に寄っているのがわかる。この円周上に並んでいるノードが執筆数1の著者である。また、これらのノードに接続されているエッジを辿ることで、執筆数が1の著者と共著している著者を探すこともできる。

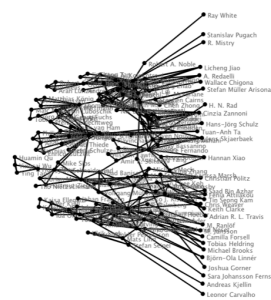
6.2 特定のノードを縦に並べる

このユースケースでは特定のノードのラベルを重なることなく表示することを目的としている。考慮する美的基準と、美的基準の対象を以下に示す。

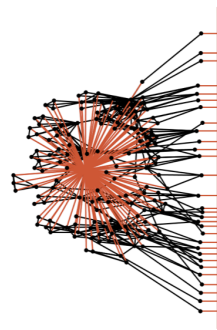
- 執筆数が1の著者を対象に、
“特定のノードを位置と傾きの固定された直線上に配置する”の美的基準
- 執筆数が2以上の著者を対象に、
“L5. 特定のノードを中央付近に配置する”の美的基準



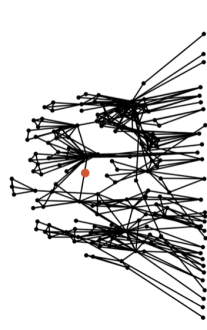
(a) 描画対象のノードとエッジのみ描画



(b) (a)に加え、ノードのラベルを表示



(c) (a)に加え、見えないノードを描画



(d) 全てのノードとエッジを描画

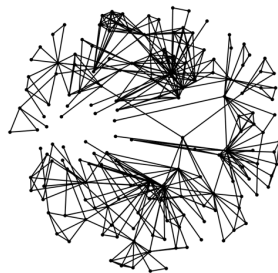
図 6.2: ユースケース 2: 特定のノードを縦に並べる

図 6.2 が実際に制御を行ったグラフである。グラフを見てみると一部のノードのみが右側に直線で並び、それ以外が中央に寄っているのがわかる。このように縦に並べることによって、執筆数1の著者のラベルを重ねることなく表示している。また、このユースケースでは特定の著者を外側に配置するために、見えない線状のノードを右側に固定している。

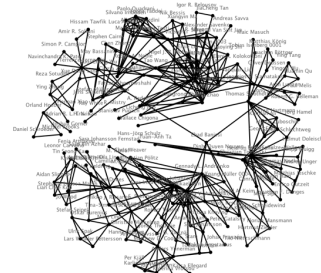
6.3 要素の値に応じて左右に分布

このユースケースでは執筆数に応じて配置する位置を変えることを目的としている。考慮する美的基準と、美的基準の対象を以下に示す。

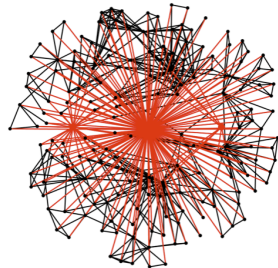
- 執筆数が1の著者を対象に、
“特定のノードを描画領域の左付近に配置する”の美的基準
- 執筆数が20以上の著者を対象に、
“特定のノードを描画領域の右付近に配置する”の美的基準
- 全ての著者を対象に、
“L5. 特定のノードを中央付近に配置する”の美的基準



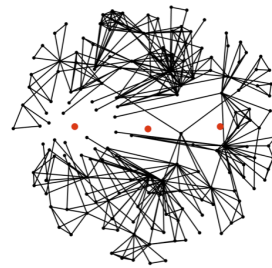
(a) 描画対象のノードとエッジのみ描画



(b) (a)に加え、ノードのラベルを表示



(d) 全てのノードとエッジを描画



(c) (a)に加え、見えないノードを描画

図 6.3: ユースケース 3:要素の値に応じて左右に分布

図 6.3 が実際に制御を行ったグラフである。このグラフでは執筆数が少ない著者を左側に固定されたノード、執筆数が多い著者を右側に固定されたノード、全てのノードを中央に固定されたノードで制御している。これらの制御により、右側に行くほど執筆数が多い著者、または執筆数が多い著者と共著している著者といった配置を行なうことができる。

第7章 議論

7.1 考慮する美的基準の条件

本論文では考慮すべき美的基準をグローバルなものとローカルなものの2種類に分けて設定した。そして、それぞれの美的基準に合わせた制御を行ない、美的基準を考慮したレイアウトが可能となった。しかし、美的基準を設定する際に非常に多くの条件を設けてしまった。

L1の美的基準では条件として以下のものがある。

- 直線の位置は変化するが、傾きは固定する
- 直線上に配置する順番は指定しない

これらの条件で制御を行っても、ユースケースの様なグラフの意味に合わせたローカルな制御は行なうことができるが、より柔軟に多くのグラフに対応することができなくなってしまう。

例えば1つ目の条件について考える。もしグラフに対しL1のみを考慮する場合であれば、グラフ全体が回転するため、L1で使用する線状のノードの傾きが固定だとしても問題は無いと言える。しかし、もしグラフに対して複数の美的基準も考慮しようとした場合、線状のノードの傾きは固定ではなく、他の美的基準による制御に合わせて変化した方がL1の適応できる場面を広げることができる。

7.2 評価式の評価

本制御方式の有用性の評価のために、本論文では美的基準ごとに評価式を定めた。定めた評価式から算出した値は本制御方式が有用であるということを示したが、本論文では評価式が果たして本当に適した式かどうかの評価は行っていない。

特にL5では美的基準の内容が“特定のノードを中央付近に配置する”にも関わらず、中央からの距離で評価値を算出している。L5はユースケースで多用しているように、使う場面の多い美的基準であるが、実際に制御したグラフから評価値を算出してみると、理想とは遠い値となってしまった。今後の研究では、理想とするレイアウトの配置結果を元に、評価式を慎重に定める必要がある。

7.3 ベースとする力学モデルの変更

本制御方式ではF&Rの力学モデルをベースとして、多くの力学モデルの拡張を行ったが、いくつか問題点が発生した。

1つ目は、ローカルな美的基準の中にエッジの長さを0にすることを目標としているものがある点である。F&Rのモデルでは式(2.3)の分母に理想距離が存在しており、理想距離 $l(e) = 0$ に対応していない。本制御方式ではこの点を回避するために $l(e)$ を十分に小さく取るとしているが、モデルをさらに拡張すべきである。

2つ目は、エッジごとに理想距離と力の係数を設定している点である。F&Rのモデルは本来、斥力と引力をそれぞれ同じ定数と変数から成る式で算出し、力指向アプローチによる配置を行なう。定数である理想距離は描画領域から算出し、力の係数というものは存在しない。本制御方式ではこの式にいくつかの変更を加え斥力と引力の力の大きさも調節できるようにしたため、F&R特有のシンプルなモデルを破壊してしまったと言える。

このように元々のモデルを変更し、さらに拡張を行なう必要があるため、他の力学モデルに変更することも視野にいれるべきである。

7.4 特定のエッジに関するモデル構築

本論文では美的基準ごとにモデル構築の説明を行った。その中で特定のエッジに関する美的基準も扱ってきたが、これらのモデルの妥当性について議論が必要である。

“L6. 特定のエッジの交差数を最少にする”では、見えない点状のノードによる斥力を用いて制御を行っている。他の美的基準では、力の強さを調節することでその美的基準をどの程度考慮するかを調節することができる。しかし、このL6に関しては調節することができない。また、L6の元となる美的基準は“特定の辺の交差数を指定した上限以内で描画する”であり、L6の条件を減らそうとした場合、現在の制御内容では対応できないと言える。

“L7. 特定のエッジの線長を指定した上限よりも大きくならないようにする”では、力の係数を調節することで上限に収めるようにしている。本論文では美的基準を緩め“大きくならないようにする”としているが、本来は上限以内に収めなければ考慮しているとは言えない。力の係数を調節するにしても、どの程度大きくすればよいかはグラフの構造に大きく依存し、係数を一意に定めることは困難である。また、本制御方式ではこの美的基準を考慮するために、見えないノードと見えないエッジを追加しているが、特定のエッジ自体の理想距離と力の係数を調節することでも考慮は可能である。この点も議論していく必要がある。

7.5 レイアウトの自動化

一般的にグラフのレイアウト手法はグラフを与えることで自動でレイアウトが行われるが、本制御方式では現在のレイアウトの状況から力の係数を調節する必要がある場合がある。例えばL7の美的基準では、上限に収まるように力の係数を設定するようにしており、それは人間が設定することになる。

このように半自動となっている現在の制御方式を、全て自動で行なうようにすることが今後の課題である。もし人間による入力があったとしても、その入力は上限の設定やどの程度美的基準を考慮するかといった調節のみであるべきである。

第8章 結論

本研究では、力指向アプローチに見えないノードとエッジを導入することで、特定のノードとエッジをローカルに制御する方式を開発した。

開発した制御方式は、従来の力指向アプローチで考慮していたグローバルな美的基準を継承しつつ、グラフ内の特定の要素のみに影響するローカルな美的基準を考慮したレイアウトを可能としている。本論文では4種類のグローバルな美的基準と7種類のローカルな美的基準について考慮し、制御方式の有用性の検証のために美的基準毎に評価を行った。結果はグローバルな美的基準を大きく犠牲にすることなく、全てのローカルな美的基準を考慮できていることを示した。また、評価したローカルな美的基準を元に、本制御方式を用いたレイアウトの制御方法をユースケースとして示した。

本制御手法は、力指向アプローチによるグラフのレイアウトを、グラフの要素の意味に合わせて制御することを可能にした。これにより、グラフの描画時の位置を要素の意味に対応させるなど、力指向アプローチの用いることのできる場面が広がったと言える。今後の課題として、より多くのローカルな美的基準に対応することで、さらに多くの場面で力指向アプローチを利用することを考えている。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、指導教員である三末和男先生、副指導教員である田中二郎先生をはじめ、志築文太郎先生、高橋伸先生、Simona Vasilache 先生には研究方法から研究内容、論文執筆に至るまで丁寧なご指導と適切なご助言をいただき、心より感謝致します。インタラクティブプログラミング研究室の皆様にはゼミなどを通じて貴重なご意見を数多くいただきました。特に、NAIS チームの皆様にはチームミーティングでのご意見のみならず、研究生生活全体にわたって多くのご意見とご指摘をいただきました。ここに深く感謝致します。最後に、様々な面で力になってくれた家族や多くの友人、大学生活でお世話になったすべての方々に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] 杉山 公造. グラフ自動描画法とその応用. **計測自動制御学会**,1993.
- [2] J. Q. Walker II, A node-positioning algorithm for general trees, *Software-Practice and Experience*, Vol.20, Issue 7, pp.685-705, 1990.
- [3] F. Block, M. S. Horn, B. C. Phillips, J. Diamond, E. M. Evans, and C. Shen, The DeepTree Exhibit: Visualizing the Tree of Life to Facilitate Informal Learning, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.18, Issue 12, pp.2789-2798, 2012.
- [4] P. Eades, A heuristic for graph drawing, *Congressus Numerantium* 42, pp.149-160, 1984.
- [5] T. M. J. Fruchterman and E. M. Reingold, Graph Drawing by Force-directed Placement, *Software: Practice and Experience*, Vol.21, pp.1129-1164, 1991.
- [6] X. Yuan, Member, IEEE, L. Che, Y. Hu, and X. Zhang, Intelligent Graph Layout Using Many Users' Input, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.18, Issue 12, pp.2699-2708, 2012.
- [7] W. He and K. Marriott, Constrained Graph Layout, *Graph Drawing Lecture Notes in Computer Science*, Vol.1190, pp.217-232, 1997.
- [8] R. Tamassia, Constraints in Graph Drawing Algorithms, *Constraints*, Vol.3, Issue 1, pp 87-120, 1998.
- [9] K. Sugiyama, and K. Misue, Graph Drawing by the Magnetic Spring Model, *Journal of Visual Languages & Computing*, Vol.6, Issue 3, pp.217-231, 1995.
- [10] K. Ryall, J. Marks, and S. Shieber, An Interactive Constraint-Based System for Drawing Graphs, *Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST ' 97)*, pp.97-104, 1997.
- [11] M. Y. Becker and I. Rojas, A graph layout algorithm for drawing metabolic pathways, *BIOINFORMATICS*, Vol.17, No.5, pp.461-467, 2001.
- [12] H. Omote and K. Sugiyama, Method for Visualizing Complicated Structures Based on Unified Simplification Strategy, *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol.E90-D, No.10, pp.1649-1656, 2007.

- [13] A. Frick, A. Ludwig, and H. Mehldau, A Fast Adaptive Layout Algorithm for Undirected Graphs, *Graph Drawing Lecture Notes in Computer Science*, Vol.894, pp 388-403, 1995.