

平成 19 年度

筑波大学第三学群情報学類

卒業研究論文

題目 スフィアアンカーマップによる

大規模 2 部グラフの 3D 可視化と閲覧方法

主専攻 知能情報メディア

著者名 伊藤 隆朗

指導教員 田中二郎 三末和男 高橋伸 志築文太郎

要旨

2 部グラフは現実世界の様々な場面で現れ、これらを視覚化することは関係構造の把握を助ける。そのため、効果的な描画手法の研究が盛んに行われており、特に大規模グラフの描画手法の開発が望まれている。アンカーマップは、一部のノードを 2D の円周上に等間隔に配置して固定することで関係構造の把握を助ける描画手法である。しかし、2D のアンカーマップでは、大規模グラフを描画した際に可読性が低くなる問題が生じる。

本研究では、大規模グラフの描画の際に広い空間を確保するため、アンカーマップを 3D 空間に拡張し、一部のノードを球面上に配置する描画手法「スフィアアンカーマップ」を開発した。2 種類のレイアウト方法を考案し美的基準に従った比較を行った。また、3D 空間上にレイアウトしたグラフの閲覧方法として被写界深度を用いた表現を行った。3D 空間へ拡張することにより、大規模 2 部グラフにおいても可読性を維持できると考えられる。

目次

第 1 章 序論.....	1
1.1 情報可視化と Graph Drawing.....	1
1.1.1 2 部グラフ.....	1
1.1.2 2 部グラフの表現手法.....	2
1.3 アンカーマップ.....	3
1.3.1 アンカーマップ表現.....	3
1.4 2D アンカーマップの問題点.....	4
1.5 本研究の目的とアプローチ.....	5
1.6 本論文の構成.....	6
第 2 章 関連研究.....	7
2.1 2 部グラフの可視化手法.....	7
2.2 3D 可視化手法.....	7
2.3 グラフの閲覧手法.....	8
2.4 本研究の位置づけ.....	8
第 3 章 3D 空間へのグラフレイアウト手法.....	9
3.1 アンカーマップの 3D 化.....	9
3.2 美的基準.....	10
3.2.1 2D アンカーマップの美的基準.....	10
3.2.2 スフィアアンカーマップの描画規約.....	10
3.2.3 スフィアアンカーマップの描画規則.....	11
3.3 レイアウト方法.....	13
3.3.1 レイアウト方法の概要.....	13
3.3.2 スプリングモデル.....	13
3.3.3 レイアウト方法 1 力制御法.....	15
3.3.4 レイアウト方法 2 配置探索法.....	18
第 4 章 3D グラフの閲覧方法.....	20
4.1 閲覧方法の必要性.....	20
4.2 表示方法.....	21
4.3 グラフ・カメラの操作.....	21
4.4 被写界深度を用いた閲覧方法.....	22
4.4.1 被写界深度表示.....	22
4.4.2 焦点・被写界深度の操作.....	23
4.5 ラベルの表示.....	23

4.5.1 Circular 表示.....	25
第 5 章 開発した描画ツールの機能.....	27
5.1 ツールの概要.....	27
5.2 機能説明.....	28
5.2.1 データの読み込み・保存	28
5.2.2 自動レイアウト.....	30
5.2.3 閲覧方法	32
第 6 章 評価と考察.....	35
6.1 レイアウト方法の評価と考察.....	35
6.1.1 アンカー分散の評価.....	35
6.1.2 アンカーレイアウトの評価 1 正二十面体	37
6.1.3 アンカーレイアウトの評価 2 実際のデータ	40
6.2 閲覧方法の考察	44
6.2.1 回転・被写界深度表示.....	44
6.2.2 ラベルの表示方法	45
6.3 2D アンカーマップとの比較	46
第 7 章 結論.....	50
謝辞	51
参考文献	52

図目次

図 1	2 部グラフの代表的な表現手法	2
図 2	2D アンカーマップ	3
図 3	アンカーマップの特徴	4
図 4	2D アンカーマップによる大規模 2 部グラフの描画	5
図 5	スフィアアンカーマップ	6
図 6	本研究の位置づけ	8
図 7	スフィアアンカーマップの利点	9
図 8	力の制御	15
図 9	フェーズ 1・2	16
図 10	フェーズ 2・3	17
図 11	3D 空間の配置モデル	21
図 12	被写界深度レンダリング	22
図 13	ラベルの表示方法	24
図 14	Circular 表示	25
図 15	Circular ラベルの表示位置	26
図 16	ツールの概観	27
図 17	GraphML の読み込み	28
図 18	ノード色・ラベルの設定	28
図 20	アクセスログの可視化	29
図 19	DBLP 共著者関係の抽出	29
図 21	GraphML の保存	30
図 22	力制御法による自動レイアウト	30
図 23	配置探索法による自動レイアウト	31
図 24	スフィアアンカーマップの回転	32
図 25	ズームイン・ズームアウト	32
図 26	焦点と被写界深度の調節	33
図 27	焦点の操作	34
図 28	ラベル表示の切り替え	34
図 29	アンカーの分散評価	35
図 30	隣接するアンカー間の距離の標準偏差	36
図 31	隣接するアンカー間の距離 標準偏差/平均	36
図 32	G7 の可視化例	42
図 33	G9 の可視化例	43
図 34	G8 の 2D と 3D との比較	47

図 35	G9 の 2D と 3D との比較	48
図 36	網図形式と 2D アンカーマップの特徴を合わせた表現	49

第1章 序論

1.1 情報可視化と Graph Drawing

情報可視化 (Information Visualization) とは, コンピュータグラフィックスを活用して抽象的なデータを人間が直接見ることができる形で表現し, 人間のデータ理解を支援することを目的とした研究分野である.

コンピュータサイエンスにおける可視化の研究には, 科学技術計算の結果をコンピュータグラフィックスで表現する科学的可視化 (Scientific Visualization) と呼ばれる研究分野がある. この技術を科学技術分野だけではなく, より広い抽象的なデータを対象にした研究分野が情報可視化である.

抽象的なデータの関係や構造を表現するためにグラフがよく使われる. グラフを適切に可視化することにより, 抽象的なデータ関係を人間が理解しやすいように表現することができる. しかしながら, データ量が多くなると人の手だけでレイアウトを行うことは困難となる. そのため, グラフを計算機によって人間が理解しやすいように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問題 (Graph Drawing) と呼ばれている. 本研究は, このグラフ描画問題を研究対象としている.

1.1 2部グラフ

顧客とその顧客の購入した商品, 論文と著者, Web ページとそのページの閲覧者など, 実社会の様々なところで 2 つの集合間の関係が現れる. このような 2 つの集合間の関係構造は 2 部グラフとして表現することができる.

2 部グラフとは, ノードを二つの集合に分割し, 各集合内のノード同士にエッジが無いようにできるグラフのことであり, 以下のように表すことができる.

グラフ: $G = (V, E)$

ノード: $V = A \cup B$ ただし, $A \cap B = \phi$

エッジ: $E \subseteq A \times B$

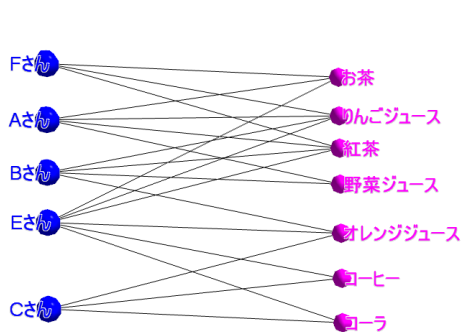
顧客とその顧客の購入した商品を例に挙げると, 顧客をノードの集合 A の要素, 商品をノードの集合 B の要素とし, 顧客とその顧客の購入した商品のノード間にエッジをつなぐことで, 顧客と商品との関係を 2 部グラフとして表現することができる.

1.2 2部グラフの表現手法

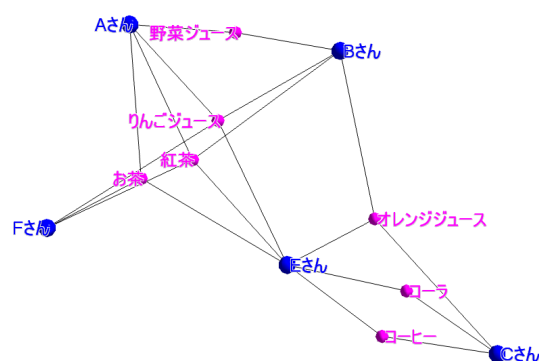
2部グラフの代表的な表現手法を紹介する。図1は商品と購買者の関係を3つの表現方法を用いて表した例である。(a)は行列形式である。購買者が買った商品の欄に購入した数を記入している。売り上げ数など細かな情報を読み取ることができるが、商品間の関係など関係構造の直感的な把握に向いているとは言い難い。次に、(b)のような2層形式で表現したものが挙げられる。2層形式はネットワーク図の表現でよく用いられる網図形式の中でも2部グラフに特化した表現である。片方の列に購買者を、もう片方の列に商品を並べて書き、購入者と買った商品をエッジでつないだものである。商品と購買者の描かれる領域がはっきりと分かれているため、視覚的な区別がしやすいと言える。2部グラフの表現としては最もオーソドックスなものである。(c)はスプリングモデル[1]による網図形式で表現したものである。この表現は関連性の全体的な構造が視覚的に把握しやすい。しかしながら、商品と購買者のノードが混在しているためそれらの区別が明確ではない。

	オレンジ ジュース	紅茶	コーラ	りんご ジュース	お茶	野菜 ジュース	コーヒー
Aさん	0	1	0	1	2	1	0
Bさん	3	2	0	4	0	3	0
Cさん	2	0	11	0	0	0	5
Eさん	4	2	2	1	2	0	1
Fさん	0	2	0	2	3	0	0

(a)行列形式



(b)2層形式



(c)スプリングモデルによる
網図形式

図1 2部グラフの代表的な表現手法

1.3 アンカーマップ

1.3.1 アンカーマップ表現

2 部グラフの効果的な描画手法としてアンカーマップがある[2][3]. アンカーマップとは, グラフ描画スタイルの 1 つで, 一部のノードに対してレイアウトの制約を課し, それ以外のノードは座標系の制約を受けない自由レイアウトを行うものである.

現在提案されているアンカーマップの描画手法は, 2 部グラフの片方の集合のノードをアンカーとして 2D の円周上に等間隔にレイアウトして固定し, もう片方の集合のノードをフリーノードとし, スプリングモデルを利用して隣接するアンカーとの関係において適切な位置にレイアウトするものである. これ以降, 本論文では, アンカーに制約を課した 2 部グラフの描画スタイルを「アンカーマップ」, 2D の円周上にアンカーをレイアウトするアンカーマップを特に「2D アンカーマップ」と呼ぶ. 図 2 は先の商品と購買者の関係を 2D アンカーマップによって表現したものである. 先の 2 部グラフの表現手法と比べると, ノードの区別が明確であり, なおかつ商品同士の関連性など全体的な構造も視覚的に把握しやすい.

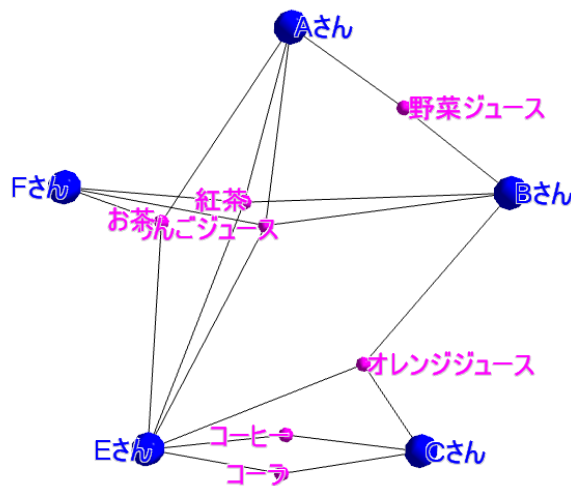


図 2 2D アンカーマップ

2D アンカーマップには以下のような特徴がある.

- アンカーを基準としたフリーノードの位置の把握

フリーノードはスプリングモデルによって関連のあるアンカーの近傍にレイアウトされる. アンカーは等間隔に固定されているため, アンカーを基準としてそのフリーノードがどのあたりに位置するかを視覚的に把握することができる (図 3(a)).

- アンカーとの関係に基づくフリーノードクラスタの把握

アンカーとの接続関係により、フリーノードをクラスタに分けることができる。そのようなクラスタの存在およびそれらがどのアンカーとの接続によって形成されるかを把握することができる（図 3(b)）。

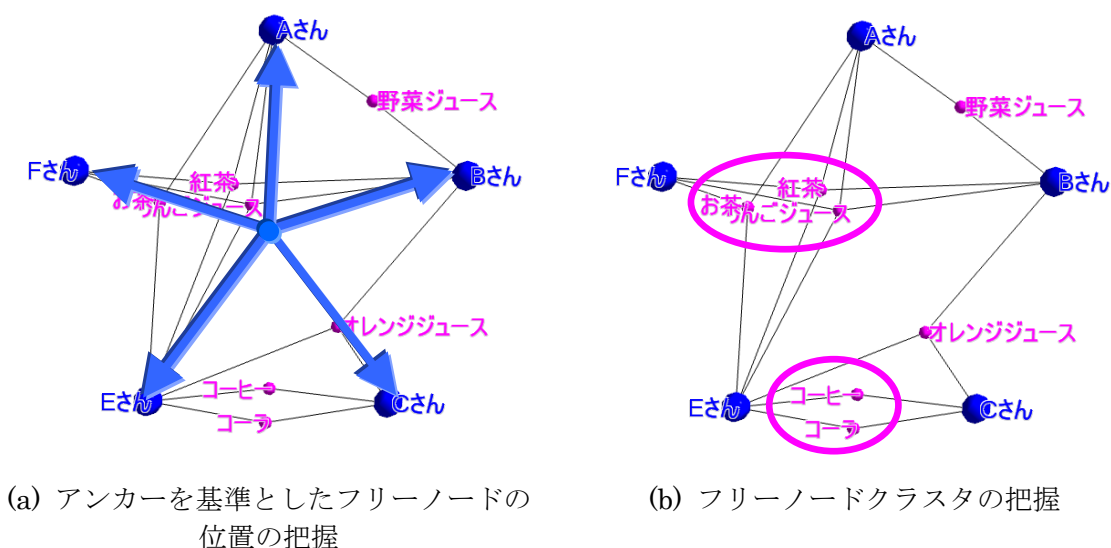
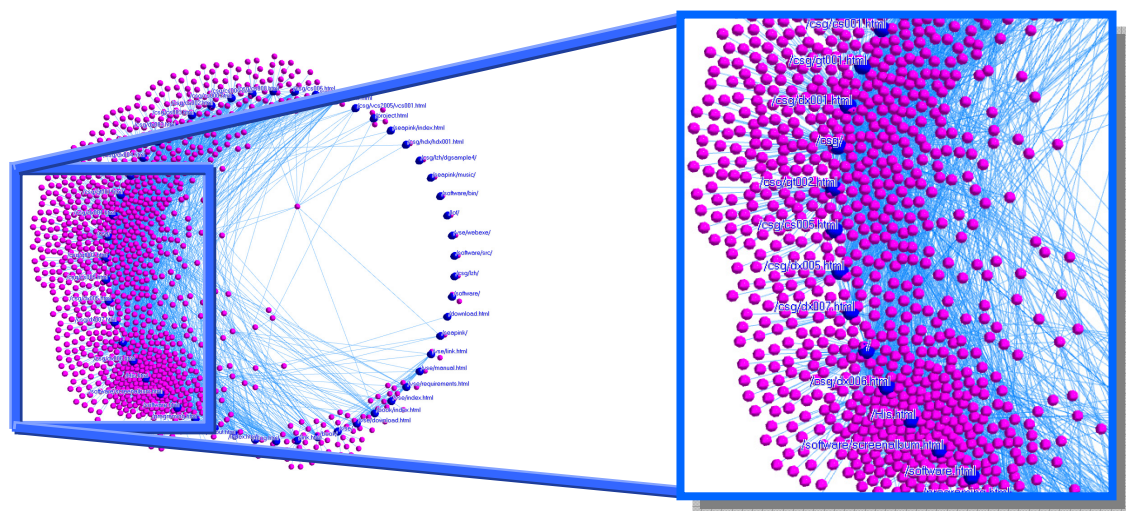


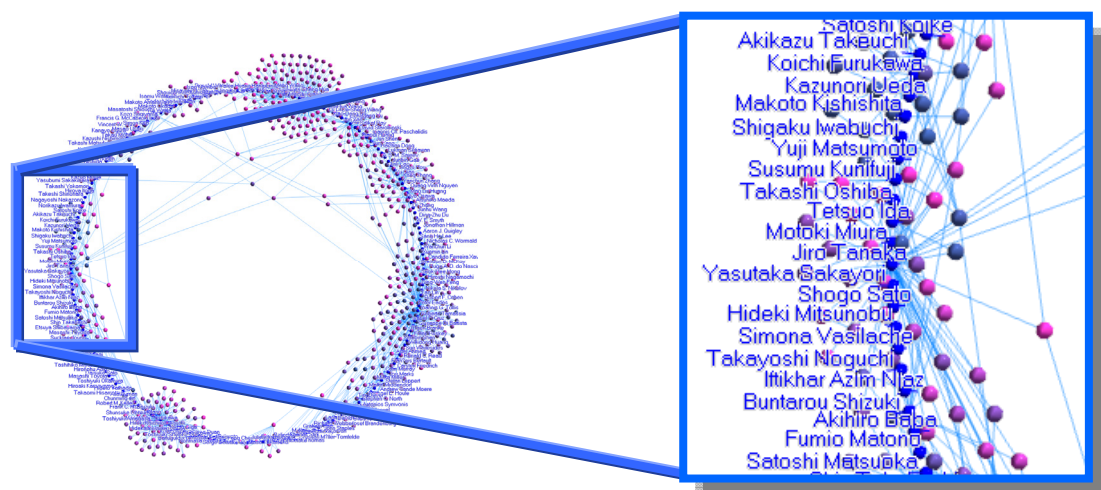
図 3 アンカーマップの特徴

1.4 2D アンカーマップの問題点

図 4(a)は、52 個のアンカーと 1137 個のフリーノードを描いた例であり、図 4(b)は 210 個のアンカーと 697 個のフリーノードを描いた例である。図 4(a)では、フリーノードの分布に偏りがあることはわかるものの、ノードがエッジを覆ってしまうため左側にある大きなフリーノードクラスタがどのアンカーにつながって構成されているかなどの連結関係を見ることが難しい。また、この大きなクラスタは複数の小さなクラスタによって構成されていると考えられるが、それらが混合してしまい視覚的に区別することができない。図 4(b)では、フリーノードが中心に無いということは分かるものの、円周上にはアンカー、アンカーのラベル、フリーノード、エッジが集中して描画されてしまい非常に読みづらい。このように、2D アンカーマップでは大規模グラフを可視化した際に可読性が低下してしまう問題がある。



(a)フリーノードクラスターの混合



(b)アンカー周辺の関係が読み取りづらい

図 4 2D アンカーマップによる大規模 2 部グラフの描画

1.5 本研究の目的とアプローチ

本研究は、大規模な 2 部グラフを描画した際にも可読性を維持し、人間のグラフの関係構造理解を支援することを目的とする。そのために、従来 2D 空間上で描かれていた 2D アンカーマップを 3D 空間に拡張する (図 5)。2D 空間から 3D 空間へと拡張することで広い空間をレイアウトに使うことができ、大規模なグラフの描画に対応できると考えられる。3D 空間へ拡張を行う際、アンカーのレイアウト方法と 3D 構造を読み取るための閲覧方法が必要となる。本研究ではこの 2 つの方法の開発を目標とする。

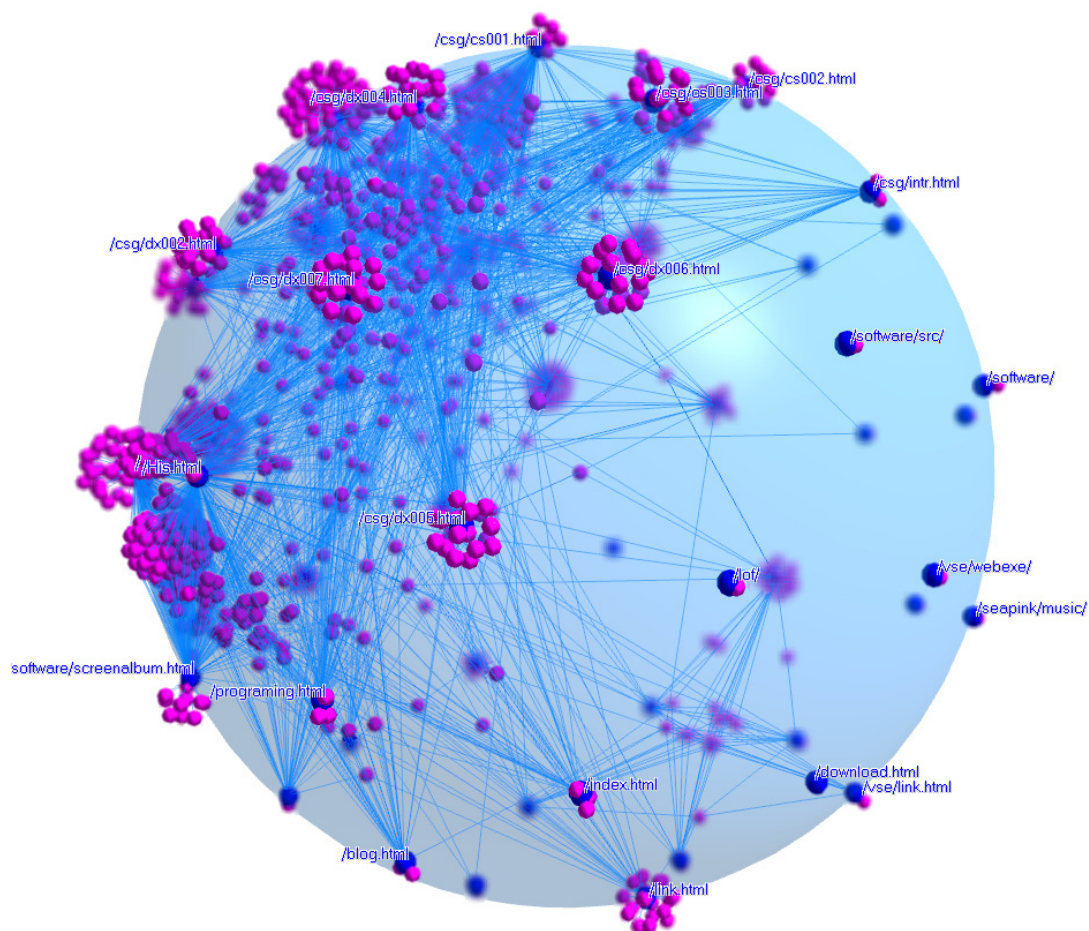


図 5 スフィアアンカーマップ

1.6 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである．本章では，2 部グラフの表現手法と問題点を説明し，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 章では開発した 3D 空間へのグラフレイアウト方法を述べる．第 4 章では，3D 空間にレイアウトしたグラフの閲覧方法を述べ，第 5 章で開発したツールを紹介する．第 6 章で評価と考察を述べ，第 7 章で結論を述べる．

第2章 関連研究

2.1 2部グラフの可視化手法

Fößmeierらは、2部グラフの片方の集合のノードを直線状にレイアウトし、もう片方の集合のノードを直線の上か下に制約を持たせない形でレイアウトするTwo-Sides Freeモデルを提案し、与えられた2部グラフをTwo-Sides Freeモデルでエッジ交差なしにレイアウトすることはNP困難であることを証明した[4]。また、Zhengらは、2部グラフの片方のノード集合を直線状にレイアウトし、もう片方を直線より上の空間にレイアウトするOne-Layer-One-Clusterモデルと2部グラフのそれぞれの集合を重ねない領域にレイアウトするTwo-Clusterモデルを提案し、これらのモデルに関してエッジ交差最小のレイアウトを行うことはNP完全問題であることを証明した[5]。Newtonらは2部グラフの2層表現における直線上でのノードの並び順の決定方法として、エッジ交差の最小化を指標としたヒューリスティックなレイアウトの探索方法を提案した[6]。Giacomoらは、2部グラフを二つの平行な曲線上にエッジが交差しないようにレイアウトする手法を提案した[7]。このように、2部グラフの可視化手法に関する研究の多くが2層形式やそれを拡張したモデルでのエッジ交差最小化についての定理を証明したものや、交差を最小化するようなレイアウトを目指したものである。これに対し本研究は大規模2部グラフにおいて高い可読性を維持するための新たな表現方法を開発するものである。

2.2 3D 可視化手法

Robertson らは、木構造を 3D 空間上にレイアウトすることで大規模グラフ描画時にも可読性を保つことのできる描画手法 Corn Tree を開発した[8]。また、Munzner らは Corn Tree を改良し、3D ハイパボリック空間上に木構造をレイアウトすることで Focus+Context 的な要素を持たせ、さらに大規模なグラフの描画にも対応することができる描画手法 H3 を開発した[9]。Hong らは Sugiyama method を拡張し有向グラフを 3D 空間上の 2 つの平行な平面に分けてレイアウトすることで視覚的な混雑を軽減する描画手法を開発した[10]。本研究はこれらと同様に 3D 空間上にグラフをレイアウトすることにより大規模なグラフ描画に対応しようというものであるが、2部グラフを扱うという点で異なっている。

Dwyer らは 2D 平面に描いたネットワーク図を 3D 空間上に平行に並べることでネットワークの重要性を比較しやすくする描画手法を開発した[11]。Marco らは 2D 平面に描いたグラフを時系列に沿って 3D 空間上に並べることで動的グラフの描画を行う手法を開発した[12]。また、Ho らはクラスタグラフの各クラスタを 2D 平面にレイアウトし、クラスタの親となるグラフを 3D 空間にレイアウト

トすることで可読性を向上する描画手法を開発した[13]. これらは, 複数の 2D グラフを 3D 空間上にレイアウトし情報を付加することで 2D グラフ間の比較することや, 2D グラフでは難しいようなグラフ構造の把握を行いやすくしたものである.

2.3 グラフの閲覧手法

Ahmed らは, 3D 空間上にレイアウトしたグラフを閲覧するためのカメラパスの自動生成方法[14]や 2.5D グラフのナビゲーション方法[15]を提案した. アンカーマップに関する閲覧手法の取り組みとして, 佐藤らは 2 部グラフを類似度情報に基づいてクラスタリングしておき, 縮退表示や等類似度線表示といった表示をインタラクティブに調節することにより, 大規模 2 部グラフ描画時のアンカーマップの可読性向上を行った[16].

2.4 本研究の位置づけ

本研究の位置づけを図 6 に示す. 本研究は, 2.1 で述べた 2 部グラフの可視化研究と 2.2 で述べた 3D 可視化研究のうちの特に大規模グラフの可視化に焦点をおいた研究に属するものである.

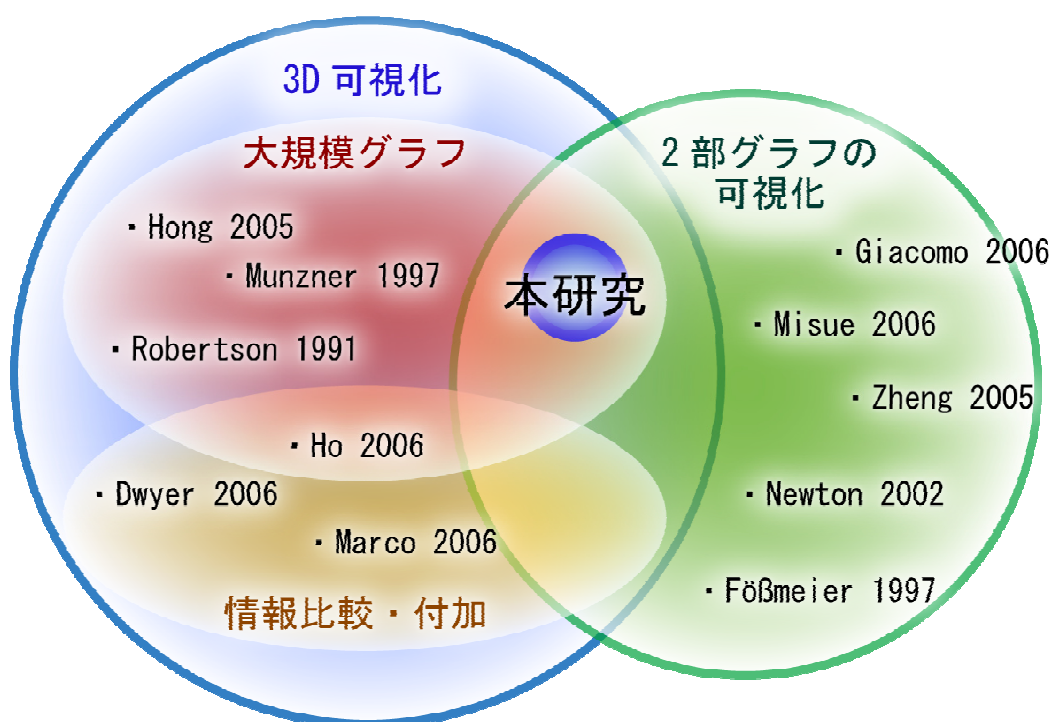


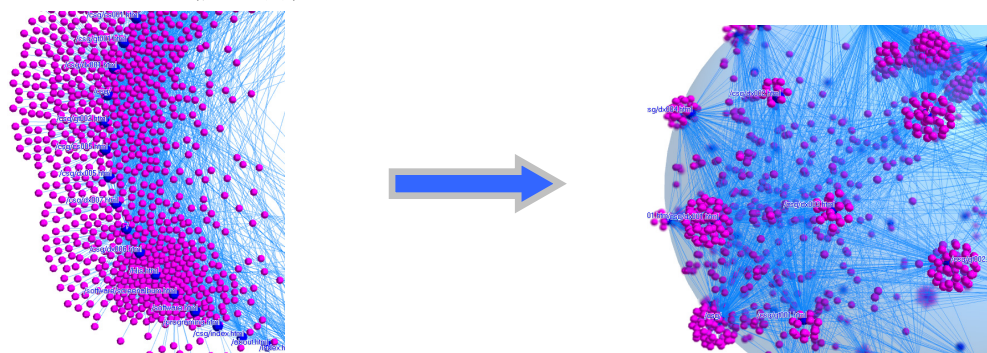
図 6 本研究の位置づけ

第3章 3D 空間へのグラフレイアウト手法

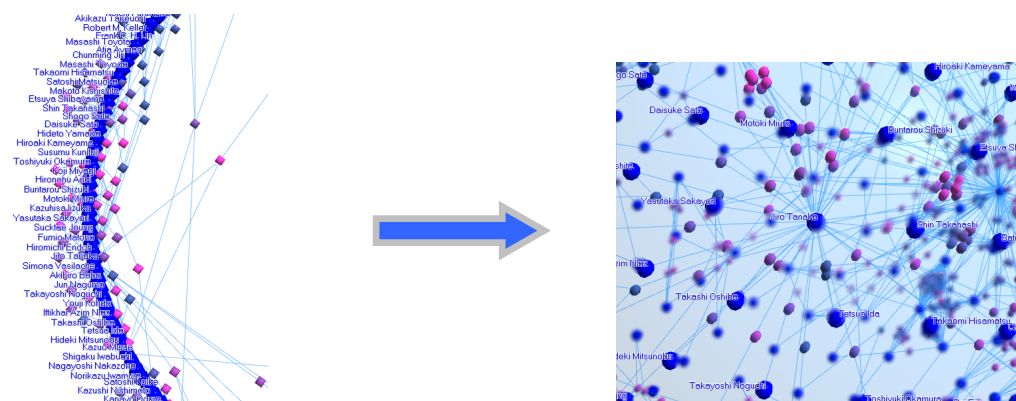
3.1 アンカーマップの3D 化

本研究では2D アンカーマップの特徴を維持したまま、より大規模な2部グラフに対応できるように2Dの円周上という制約を3Dの球面上という制約に変更し、3D空間上にグラフをレイアウトする手法を開発した。球面以外にも、アンカーの制約の仕方にはいろいろなバリエーションが考えられるが、第一の試みとして円から球という拡張を行った。球状のアンカーマップであることから、このような描画手法をスフィアアンカーマップと呼ぶ。

スフィアアンカーマップは2Dアンカーマップと比べてより多くのレイアウトスペースを使用することができる。これによって、2Dアンカーマップの大規模化の際の問題に対処することができると考えられる(図7(a))。アンカーに関しては1Dであったものが2Dに拡張されることによってより多くのアンカーをレイアウトした場合にも可読性を維持することができ、位置関係の表現に広がりを持たせることができる(図7(b))。



(a)フリーノードクラスタ混合の解消



(b)アンカー間の関係表現の広がり

図7 スフィアアンカーマップの利点

3.2 美的基準

スフィアアンカーマップのレイアウト方法を開発するにあたり、美的基準の設定を行った。一般的にグラフ描画問題では美的基準を設定しそれを満たすようなレイアウト方法を開発する。スフィアアンカーマップの美的基準は、2D アンカーマップで用いられている美的基準をもとに、スフィアアンカーマップに適合する形に拡張することによって設定した。

3.2.1 2D アンカーマップの美的基準

まず、スフィアアンカーマップの美的基準のもととなる 2D アンカーマップの美的基準を紹介する。2D アンカーマップの美的基準は以下の通りである。

- (E1) [描画規約] 直線配線：エッジを直線で描く
- (E2) [描画規約] 複合座標系：2 部グラフ $G=(A \cup F, E)$ に対して、 A の要素（アンカー）は円周上に等間隔（正多角形の頂点上）にレイアウトする。 F の要素（フリーノード）は位置の制約を受けない。
- (E3) [描画規則] 隣接ノードの近接化（=エッジ線長の最小化）
- (E4) [描画規則] エッジ交差の最小化
- (E5) [描画規則] 同一のフリーノードを共有するアンカーの近接化
- (E6) [描画規則] 同一クラスタに属するフリーノードの近接化

このうち描画規約とは必ず守るべき制約であり、描画規則とは良い描画の基準となるものである。

3.2.2 スフィアアンカーマップの描画規約

スフィアアンカーマップの描画規約は以下の通りである。

- (C1)直線配線：エッジを直線で描く
- (C2)複合座標系：2 部グラフ $G=(A \cup F, E)$ に対して、 A の要素（アンカー）は球面上にレイアウトする。 F の要素（フリーノード）は位置の制約を受けない。

$p(n)$ をノード n の位置を表す 3 次元ベクトル、 r を球の半径とすると、

$$(式 1) \quad |p(a)| = r \quad (a \in A)$$

スフィアアンカーマップの特徴的な部分は C2 の「アンカーを球面上にレイアウトする」という表

現である．2D アンカーマップでは E2 描画規約に含まれていた「等間隔に」という表現が削られている．2D アンカーマップでは，円周上に等間隔にレイアウトすることは正多角形の頂点のように一意に定めることが出来るため描画規約となっていた．しかし，任意の数の点を球面上に等間隔にレイアウトすることは出来ない．そのため，スフィアアンカーマップではこの「等間隔」という条件を描画規約から外すこととした．

3.2.3 スフィアアンカーマップの描画規則

スフィアアンカーマップの描画規則は以下の通りである．描画規則はスフィアアンカーマップの評価基準やレイアウトの基準として利用するため式の定義を行った．

$p(n)$ はノード n の位置を表す 3 次元ベクトル， $|A| = m$ としたときのアンカーの集合を $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\}$ ， $|F| = t$ としたときのフリーノードの集合を $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_t\}$ ，エッジの集合を E ，ノード n に接続する h 個のノードの集合を $L(n) = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_h\}$ ， r を球の半径とする．

- (R1) 隣接ノードの近接化 (=エッジ線長の最小化)

$$(式 2) \quad \sum_{(a,f) \in E} |p(a) - p(f)| \quad \text{の最小化}$$

- (R2) 同一のフリーノードを共有するアンカーの近接化

$$(式 3) \quad \sum_{f \in F} \left(\sum_{l_i, l_j \in L(f), i < j} \cos^{-1} \left(\frac{p(l_i) \cdot p(l_j)}{r^2} \right) \right) \quad \text{の最小化}$$

- (R3) アンカーを球面上に一様にレイアウト

$$(式 4) \quad \min_{1 \leq i < j \leq m} |a_i - a_j| \quad \text{の最大化}$$

- (R4) 同一クラスタに属するフリーノードの近接化

$$(式 5) \quad \frac{\sum_{1 \leq i < j \leq t} (\text{sim}(f_i, f_j) - s)(d(f_i, f_j) - \bar{d})}{\sqrt{\sum_{1 \leq i < j \leq t} (\text{sim}(f_i, f_j) - s)^2} \sqrt{\sum_{1 \leq i < j \leq t} (d(f_i, f_j) - \bar{d})^2}} \quad \text{の最小化}$$

$$\text{sim}(f, f') = \frac{|L(f) \cap L(f')|}{|L(f) \cup L(f')|}, \quad d(f, f') = |p(f) - p(f')|$$

$$s = \frac{2}{t(t-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq t} \text{sim}(f_i, f_j), \quad \bar{d} = \frac{2}{t(t-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq t} d(f_i, f_j)$$

R1 は、E3 をもとにして設定した基準である．この基準は一般的なグラフ描画でも良く用いられる美的基準であり、スフィアアンカーマップでも採用した．

R2 は、E5 をもとにして設定した基準であり、2D アンカーマップの大きな特徴の一つであるため採用した．R2 の式は、フリーノードに接続するアンカー間の弧の長さの総和を表しており、スフィアアンカーマップ用に新たに定義した．この値が小さいということは同じフリーノードを共有するアンカーが近くにレイアウトされていることを表す．

R3 は、元々 E2 にあったがスフィアアンカーマップでは描画規約から外した「等間隔にレイアウト」を描画規則としたものである．ここで用いた式は、球面を n 個の同じ半径の円が重ならないように敷き詰める問題に使用される指標であり[19]、スフィアアンカーマップの「アンカーを一様にレイアウトする」という条件として適当であると考え採用した．

R4 は E6 をもとにして設定した基準である．R4 の式はフリーノード間の類似度と距離との相関係数を最小化することを示している．つまり、類似度と距離が逆相関になることを基準としている．類似度にはジャカード係数を用いた．

2D アンカーマップの描画規則 E4 はスフィアアンカーマップの描画規則では考慮に入っていない．3D 空間の場合、線分が交差することのほうが稀である．そのため、E4 は基準として適当でないと判断し採用しなかった．

3.3 レイアウト方法

3.3.1 レイアウト方法の概要

スフィアアンカーマップの可読性は主にアンカーのレイアウトで決まる。そのため、描画規則を満足するようなアンカーのレイアウト方法が重要となる。

2D アンカーマップでは、アンカーの順序を入れ替えながら定めた基準の値を小さくするような順序を探索していく方法を用いている。この方法は正多角形の頂点のようにアンカーの配置候補となる位置があらかじめ定まっており、なおかつアンカーの並びという 1D の関係を考えるものである。しかし、スフィアアンカーマップではアンカーの配置候補となる位置が定まっていない上、アンカーは 2D のレイアウトを考える必要があるため、2D アンカーマップで用いている方法を直接利用することはできない。

そこで、本研究では 2 種類のアンカーのレイアウト方法を開発した。ひとつは、スプリングモデルの力の制御を行うことでレイアウトを求める方法である。初期配置としてノードをランダムな位置に配置し、スプリングモデルを用いてレイアウトを行う。その際、働く力を 3 つのフェーズに分けて制御することにより、描画規則を満足するようなアンカーのレイアウトを求めるという方法である。もうひとつは、アンカーをスプリングモデルの力の制御によって球面上に様に分散させて配置候補を決めた後、アンカーの位置を入れ替えながら描画規則の式の値を小さくするようなアンカーのレイアウトを探索していく方法である。

3.3.2 スプリングモデル

アンカーのレイアウト方法を述べる前に、スフィアアンカーマップのレイアウトに使用されるスプリングモデルについて述べる。スプリングモデルは力指向アルゴリズムの一種である。グラフをスプリングや電磁力の働くような力学モデルと考え、シミュレーションを行うことによりモデルの安定状態を求めレイアウトを決定するものである。

スフィアアンカーマップ中では、2 部グラフ $G=(A \cup F, E)$ に対してノード同士の斥力とスプリングの収縮力が働く。 n, n' ($n \neq n'$) をノード、 $p(n)$ をノード n の位置を表す 3 次元ベクトル、 $k1$ を斥力係数、 $k2$ をスプリング力係数とすると、スフィアアンカーマップ中で働く力を以下のように表すことができる。

- 斥力

$$(式 6) \quad rep(n, n', k1) = k1 \frac{p(n) - p(n')}{|p(n) - p(n')|^3}$$

- スプリングの収縮力

$$(式 7) \quad spr(n, n', k2) = k2(p(n) - p(n'))$$

斥力は同じ電荷を持った荷電粒子が反発する際の振る舞いを表している。また、スプリングの収縮力では描画規則 R1 からスプリングの自然長を 0 としている。スフィアアンカーマップでは、アンカー、フリーノード間の斥力はレイアウトへの影響の少なさと計算コストの理由から無いものとしている。

各ノードに対してこれらの力の合力を計算し、そのノードを合力の方向に大きさに比例した微小な距離だけ移動を行う。スフィアアンカーマップではアンカー、フリーノードに別の力の係数を用いて計算を行う。ノード n の接続するノードの集合を $L(n)$ 、 ε を微小係数、 ra, sa, rf, sf を力の係数とするとき、アンカー、フリーノードの移動量は以下のように表すことができる。

- ノード n の移動量

$$(式 8) \quad dis(n) = \begin{cases} \varepsilon \left(\sum_{a' \in A, a' \neq n} rep(n, a', ra) + \sum_{f \in L(n)} spr(n, f, sa) \right) & n \in A \text{ のとき} \\ \varepsilon \left(\sum_{f' \in F, f' \neq n} rep(n, f', rf) + \sum_{a \in L(n)} spr(n, a, sf) \right) & n \in F \text{ のとき} \end{cases}$$

以上の移動量を元に各ノードの位置を更新する。球の半径を r とするとき、ノード n の新しい位置 $p'(n)$ は以下のように表すことができる。

- ノード n の更新位置

$$(式 9) \quad p'(n) = \begin{cases} r \frac{p(n) + dis(n)}{|p(n) + dis(n)|} & n \in A \text{ のとき} \\ p(n) + dis(n) & n \in F \text{ のとき} \end{cases}$$

アンカーは常に半径 r の球面上に位置される。このプロセスを繰り返し、安定状態を求めることでスフィアアンカーマップのレイアウトを求める。

3.3.3 レイアウト方法 1 力制御法

まず試みたのは、ノードの安定状態を見ながら力の係数 ra, rf, sa, sf を段階に応じて制御することにより、描画規則を満足するようなレイアウトを求める方法である。この方法を「力制御法」と呼ぶ。

初期配置としてアンカーは球面のランダムな位置に、フリーノードは球内部のランダムな位置に配置する。その後、スプリングモデルと力の制御によってレイアウトを求める。力の制御は、主に 3 つのフェーズに分けて行う。フェーズ 1,2 では主にアンカーのレイアウトを求め、フェーズ 3 で最終的なフリーノードの位置を決定する。フェーズの移行は、ノードの安定状態を見ながら行う。各フェーズの力の制御は図 8 に示すように行われる。

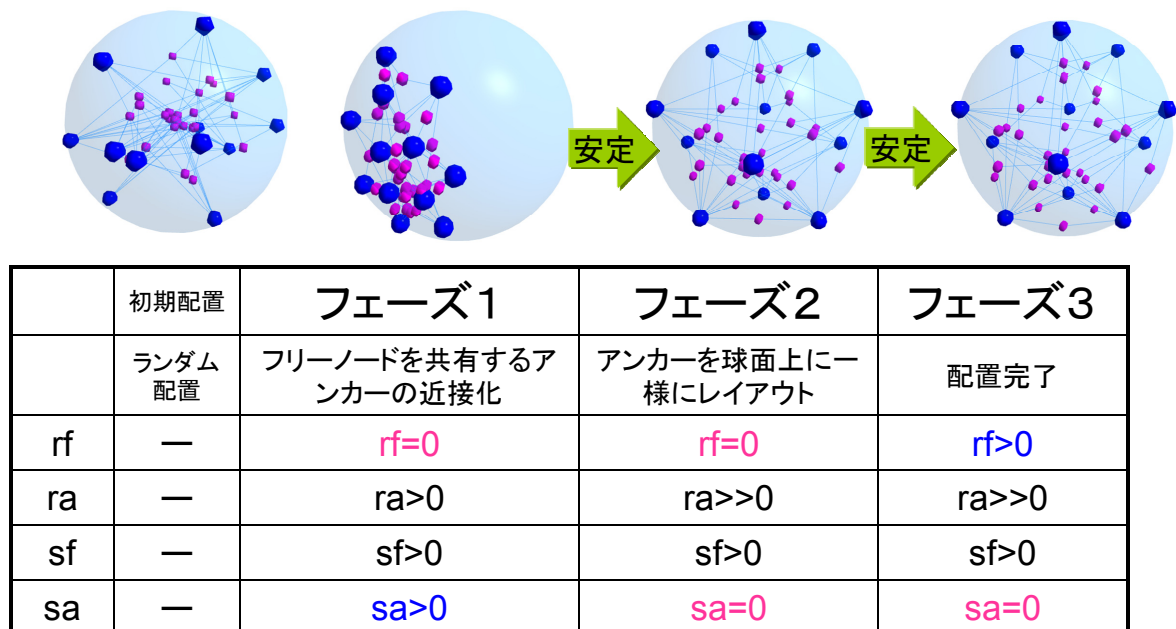


図 8 力の制御

フェーズ 1 は R1 の「エッジ線長の最小化」と R2 の「同一のフリーノードを共有するアンカーの近接化」を満たすようなアンカー同士の位置関係を求めるフェーズであり、フェーズ 2 は R3 の「アンカーを球面上に一様に配置」を満たすようなレイアウトを求めるフェーズである。

フェーズ 1 は、 ra の値が小さく、 $sa>0$ の状態である。このとき、アンカーはスプリングの力の影響を強く受けるため、同一のフリーノードを共有するアンカーが近くに配置されることとなる。また、スプリングは収縮しようとするためエッジ長の短い位置関係に配置される (図 9 上段)。

フェーズ 2 では、 ra の値が大きく、 $sa=0$ の状態である。ここでは、アンカーにはスプリングの影

響が無く、互いに反発するだけの状態となる．球面上への頂点分散のひとつとして頂点を荷電粒子として各粒子のエネルギーを最小化するという指標があり[19]，フェーズ 2 の状態はこの球面上の荷電粒子の振る舞いのシミュレーションに相当する．そのため，このフェーズでは球面上にアンカーが一樣に分散していくこととなる（図 9 下段）．

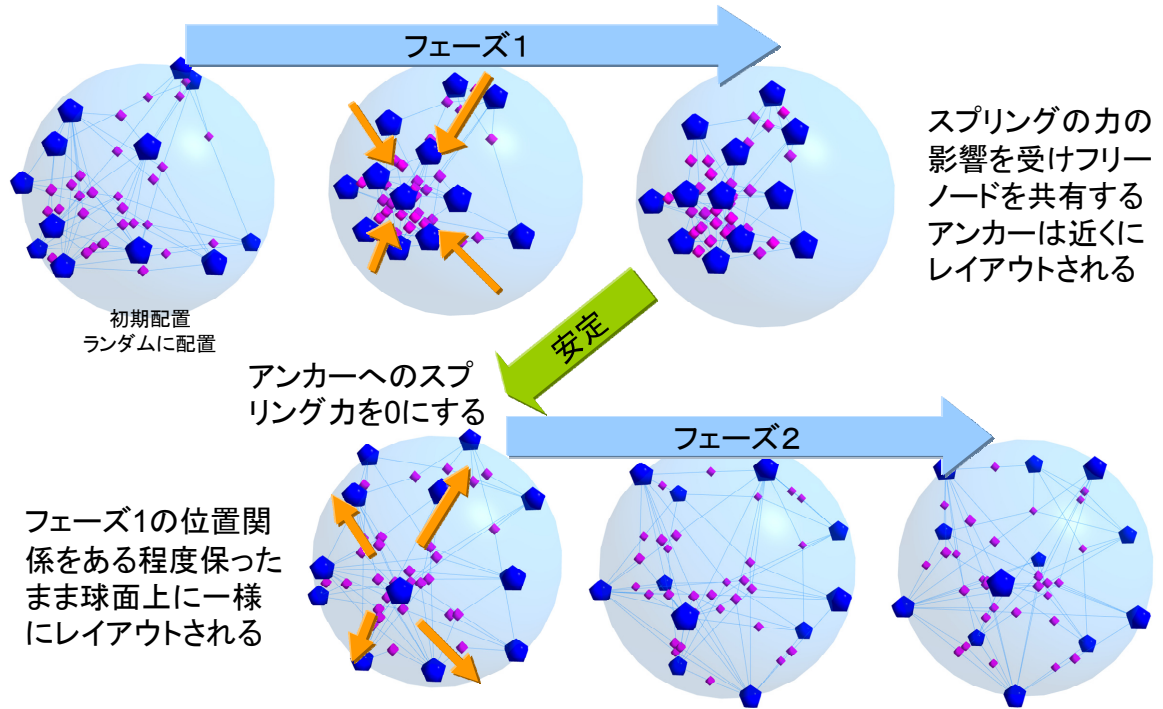


図 9 フェーズ 1・2

フェーズ 1 から 2 への移行は，フェーズ 1 がある程度安定状態になったときに行う．安定状態の判定には様々な方法が考えられるが，本研究ではアンカーの総移動距離が閾値 ps より小さくなったときに行うこととした． ps はアンカー数に比例する．

- フェーズ 1 の安定状態の判定

$$(式 10) \quad \sum_{a \in A} \text{dis}(a) < ps$$

- フェーズ 1 の閾値 ps

$$(式 11) \quad ps = c|A| \quad (c \text{ は } 0 \text{ 以上の定数})$$

フェーズ 2 は $sa=0$ であるため，アンカーへのフリーノードの影響は無い．つまり，フリーノードからみた場合にアンカーは固定されたものとなる．そのため，フェーズ 2 ではアンカーが球面上に分散していくに従って，フリーノードはアンカーに引っ張られる．フェーズ 3 では $rf>0$ として，フ

リーノード同士を反発させて重なりをなくし、フリーノードクラスタを視覚的に確認できる形にレイアウトする (図 10)。

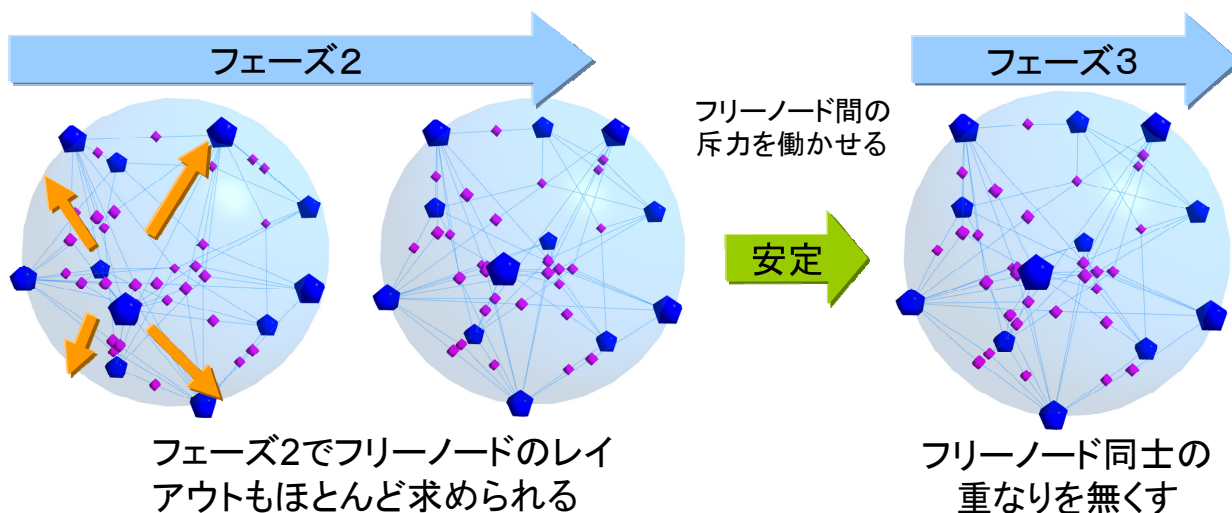


図 10 フェーズ 2・3

フェーズ 2 から 3 への移行も、フェーズ 2 がある程度安定状態になったときに行う。ただし、フェーズ 1 から 2 への移行とは異なり、アンカーとフリーノードの両方の総移動距離が閾値 ps' より小さくなったときに行うこととした。 ps' はスフィアアンカーマップ中のノード数に比例する。

- フェーズ 2 の安定状態の判定

$$(式 12) \quad \sum_{n \in A \cup F} dis(n) < ps'$$

- フェーズ 2 の閾値 ps'

$$(式 13) \quad ps' = c' |A \cup F| \quad (c' \text{ は } 0 \text{ 以上の定数})$$

フェーズ 1 と 2 でフリーノード間の斥力を 0 にしているのは、計算量を抑えるためである。この 2 つのフェーズの目的はアンカーのレイアウトを求めることであるため、できる限り早く安定状態になることが望まれる。そこで、フリーノード間の斥力の計算を行わず高速に安定状態が求まるよう工夫した。

力制御法は、実装が容易であり、アンカーを球面上にレイアウトする場合だけではなく、半球や円柱といった他の形状に制約を課した場合にも容易に応用が可能であると考えられる。しかしながら、完全に自動的にレイアウトを行う場合にはスプリングモデル特有のノード振動によって安定状態にならないことや、力の係数や安定状態判定の定数の決定が難しいといった問題がある。

3.3.4 レイアウト方法 2 配置探索法

次に試みたのは、2D アンカーマップで用いられているアルゴリズムをスフィアアンカーマップ用に拡張した方法である。まず、スプリングモデルの係数を常に $sa=0$ としてアンカーを分散させ、アンカーの配置候補となる位置を求める。アンカーがある程度安定状態になったら、配置探索アルゴリズムを実行し、美的基準を満足するような（描画規則で定義した式の値を最小化するような）アンカーのレイアウトを探索する。この方法を「配置探索法」と呼ぶ。

アンカーの配置候補を決定したとしても、アンカーの配置パターンはアンカー数の階乗通りある。また、アンカーの配置候補となる位置には球面上で歪みが生じているため、円順列のように回転などを考慮してパターンを減らすことができない。アンカーの数が多い場合、全てのアンカーの並びを評価することは膨大な計算量を要する。そこで、2D アンカーマップで用いられている配置探索アルゴリズムを拡張しアンカーの配置の中から美的基準に関する準最適配置を探索する方法を考案した。

配置探索アルゴリズムでは、アンカーを適当な順番で探索していき、あるアンカーとそのアンカーから最も遠いアンカー（ d 番目に近いアンカー）の位置を入れ替え、ペナルティと呼ばれる基準を計算し、アンカーを入れ替える前よりも小さくなっていた場合にその配置を採用する。全アンカーを探索しても、このペナルティが減少しなくなった場合、 d を半分にし、あるアンカーとそのアンカーから d 番目に近いアンカーを入れ替え、ペナルティを計算し小さくなった場合にその配置を採用する。このような処理を $d=0$ となるまで繰り返す。 $d=0$ となるまでの処理を 1 ステップとし、さらにペナルティが減少しなくなるまでこのステップを繰り返す。Algorithm 1 を以下に示す。

ペナルティには描画規則の $R1$, $R2$, $R4$ を用いる 3 つのパターンが考えられる（ $R3$ はアンカー分散の基準であるためペナルティとしては不適である）。 $R2$ はアンカーの位置のみに依存した評価式であるため、アンカーを入れ替えた際にもすぐに計算することができる。しかし、 $R2$, $R4$ はアンカー入れ替え後のフリーノードの位置にも依存する。そこで、アンカーを入れ替えた際のフリーノードの位置は、そのフリーノードがつながっているアンカーの座標の重心とした。これは、スフィアアンカーマップのスプリングは全て同じ強さであり自然長が 0 であるため、フリーノード間の斥力がない場合は接続するアンカーの重心にレイアウトされるためである。

この方法は、実装が多少複雑になる一方、力制御法で問題となった係数の設定やノードの振動による安定判定の難しさといった問題を回避できるという利点がある。

Algorithm 1(C#2.0)

```
double p0 = penaltyFunction();
double oldPenalty = double.MaxValue;

while (p0 < oldPenalty)
{
    int d = AnchorList.Count - 1;
    oldPenalty = p0;

    while (d > 0)
    {
        //入れ替え対象のノードを設定
        AnchorList.ForEach(delegate(GraphNode anchor)
        {
            //近い順にソート
            anchorNodes.Sort(delegate(GraphNode gn1, GraphNode gn2)
            {
                return (int)Math.Sign((gn1.Position - anchor.Position).Length
                    - (gn2.Position - anchor.Position).Length);
            });
            anchor.SwapNode = anchorNodes[d];
        });

        bool c = false;
        do
        {
            c = false;
            for (int i = 0; i < AnchorList.Count; i++)
            {
                GraphNode targetAnchor = AnchorList[i];
                GraphNode swapAnchor = targetAnchor.SwapNode;
                SwapPosition(ref targetAnchor, ref swapAnchor);
                double p1 = penaltyFunction();
                if (p1 < p0)
                {
                    p0 = p1;
                    c = true;
                }
                else
                {
                    SwapPosition(ref targetAnchor, ref swapAnchor);
                }
            }
        } while (c);
        d = d / 2;
    }
}
```

第4章 3D グラフの閲覧方法

4.1 閲覧方法の必要性

2D 空間から3D 空間へと拡張することで広い空間をレイアウトに使用できるようにし、より大規模なグラフの描画に対応できるようにした。また、一般的にグラフレイアウトにおいて問題となるエッジの交差もほぼ無くすることができる。そのため、複雑なグラフの関係を見抜きやすいという利点もある。

しかし、3D空間上に効果的なグラフレイアウトが行えたとしても、人間に対しては最終的に2Dで表示する必要がある。2Dで表示することで、手前のオブジェクトによって奥のオブジェクトが遮られて見えないことや、オブジェクトの前後関係（奥行き情報）がわかりづらくなってしまうことがある。単に3D空間にグラフをレイアウトしただけでは人間に対してレイアウトしたグラフの情報を完全に伝えることはできない。そのため、レイアウトしたグラフの構造を人間が読み取るための閲覧方法が必要となる。

C. Wareらは「動き」や「立体視」は閲覧者の奥行き情報の読み取りを支援し、3D空間にレイアウトしたグラフの構造を把握しやすくできることを実験によって示した [17]。そこで、レイアウトしたスフィアアンカーマップを回転させることや被写界深度を用いた表現を行い、焦点や被写界深度を調節することでレイアウトしたグラフの構造の読み取りを支援する閲覧方法を開発した。

4.2 表示方法

レイアウトしたスフィアアンカーマップを 3D 空間に配置し、標準的な 3D グラフィックスを用いて 2D で表示を行う。図 11 にレイアウトしたスフィアアンカーマップとそれを撮影するカメラのモデルを示す。スフィアアンカーマップの球の中心は 3D 空間の原点(0,0,0)に配置する。カメラはカメラの位置ベクトル、上方向ベクトル、向きベクトルの 3 つのベクトルを制御することで行う。

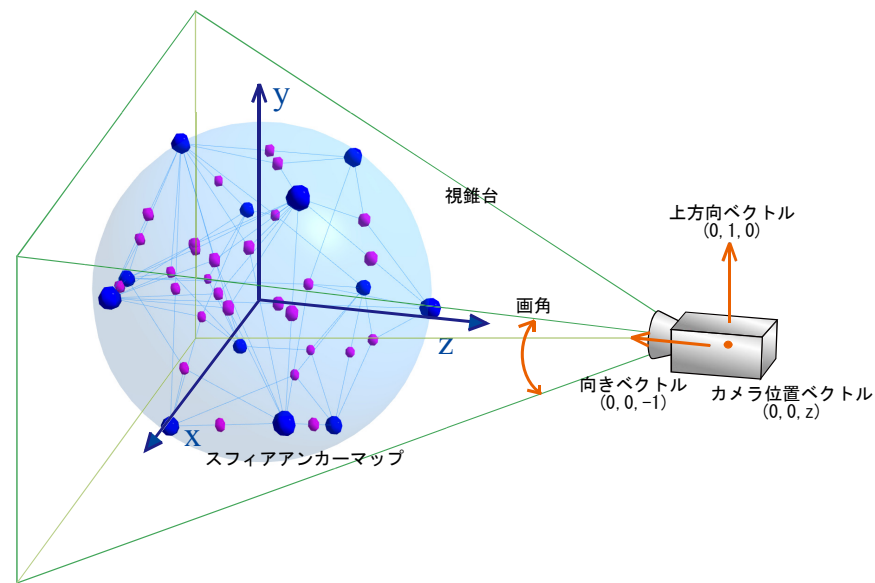


図 11 3D 空間の配置モデル

4.3 グラフ・カメラの操作

閲覧者は、レイアウトしたグラフの回転とズームイン、ズームアウトを行うことができる。ある角度では他のノードに隠れて見ることができないノードや圧縮されてしまった奥行情報も、別の角度から眺めることによって確認することができる。さらに、回転のアニメーションによって 3D 構造を把握する効果もある。また、ズームイン・ズームアウトによって全体を眺めることや、細かな構造を見ることが出来る。

閲覧者はマウスドラッグによってレイアウトしたグラフを回転させることができる。スフィアアンカーマップの球の中心を回転の中心にしてドラッグの量に比例した量だけ回転を行う。

ズームイン、ズームアウトはカメラをスフィアアンカーマップの中心へと近づける（遠ざける）こと（図 11 の z の値を調節すること）によって行う。一般的に、ズームイン・ズームアウトはカメラの画角を調節することで行われることが多いが、本研究では、カメラの位置を変更することによってズームイン・ズームアウトを行うようにした。これは、球の内部からもレイアウトしたグラフを眺め

られるようにするためである。

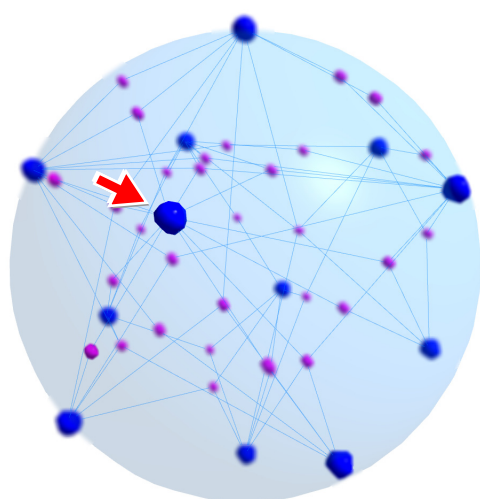
回転やズーム以外にも、カメラの向きの変更やレイアウトしたグラフの平行移動などの操作も考えられるが、これらの操作と回転を同時に行うには複雑な操作体系が必要と考えられる。球の内部と周辺にすべてのノードがレイアウトされるスフィアアンカーマップでは回転とズームで十分に構造を把握できると考え、操作が複雑にならないよう他の操作は採用しなかった。そのため、カメラの上方向ベクトル、向きベクトルは固定している。

4.4 被写界深度を用いた閲覧方法

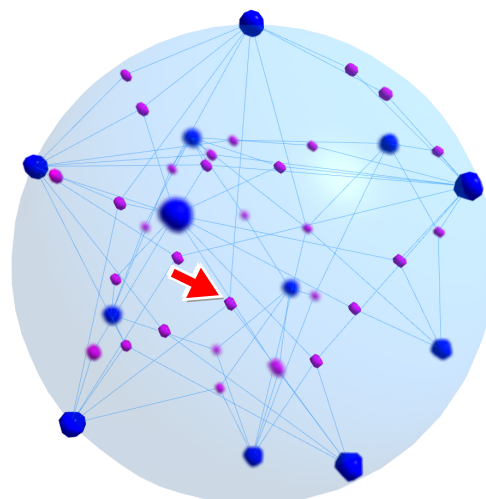
4.4.1 被写界深度表示

C. Ware らの実験では特殊な装置を用いて立体視を行うことで、閲覧者の 3D 構造の把握を支援することを示した。しかし、本研究では立体視のような特殊な機材を使用せず一般的な 2D モニタを用いて表示することを想定している。そこで、立体視の代替手段として被写界深度を用いたレンダリング[18]を行った。被写界深度とはカメラのピントの合う範囲のことである。被写界深度を用いたレンダリングは最近のコンピュータグラフィックスではよく用いられている表現の一つであり、焦点の合っているものをはっきりと描画し、それ以外のものをぼかして描画する（図 12）。これを用いることで焦点の合う範囲を強調して表示するような表現を行うことができる。

被写界深度を用いたレンダリングは、立体視の概念とは異なるものであるが、奥行き関係の情報表示として自然な表現であると考え採用した。奥行きによって色を変えろといった他の表現方法も考えられたが、そういった情報を付加するような表現は人間にとって不自然なものであると考え採用しなかった。



焦点を手前のノードに合わせた例



焦点を中心付近のノードに合わせた例

図 12 被写界深度レンダリング

4.4.2 焦点・被写界深度の操作

閲覧者は、焦点距離と被写界深度を調節することにより、ピントの合う範囲の調節が可能である。全体を見渡したい場合は被写界深度を深く、細かな部分を見たい場合は被写界深度を浅くするよう調節ができる。また、焦点を手前に固定すれば手前のノードを、奥に固定すれば奥のノードをはっきりと見ることができる。焦点の合わせ方はカメラから一定の距離に固定する方法と、常に指定したノードに焦点を固定しておく方法を用意した。これらの焦点・被写界深度の調節方法については 5.2.3 で詳しく述べる。

4.5 ラベルの表示

閲覧者がレイアウトしたグラフから情報を読み取るには、グラフのノードが何を意味するかを知る必要がある。そのため、ラベルを表示してノードの意味を示す必要がある。しかし、グラフが大規模になると大量のラベルが表示されることとなり、ラベルがグラフの読み取りを邪魔してしまう。これは 3D グラフ特有の問題ではないが、球の内部に大半のノードが密集して表示されるスフィアアンカーマップではラベルの表示方法に工夫が必要となる。

そこで、図 13 のようにラベルの表示方法を切り替えられるようにし、閲覧者が好みの表示方法を選択できるようにした。アンカーとフリーノードとで別の表示方法が選択できる。

- アンカー
All / Hover / NearSide / Circular の 4 種類
- フリーノード
All / Hover / Circular の 3 種類

All 表示はすべてのノードのラベルを表示する方法である。

Hover 表示はマウスカーソルがあるノードのみラベルを表示する方法である。各ノードの 2D での描画座標を計算し、その座標とマウスカーソル座標との距離が一定値以下である場合にラベルを表示するようにした。表示されるラベル数が少ないため、ノードの内容を細かく見ていく際に役立つと考えられる。

NearSide 表示はカメラとスフィアアンカーマップの球の中心との距離よりも、カメラとの距離の近いノードのラベルを表示する方法である。All と比べて視覚的な混雑が少なく見通しが良くなると考えられる。

Circular 表示はラベルを円周上に並べて配置し、対応するノードと直線で結んで表示する方法である。Circular 表示の詳細は 4.5.1 で述べる。

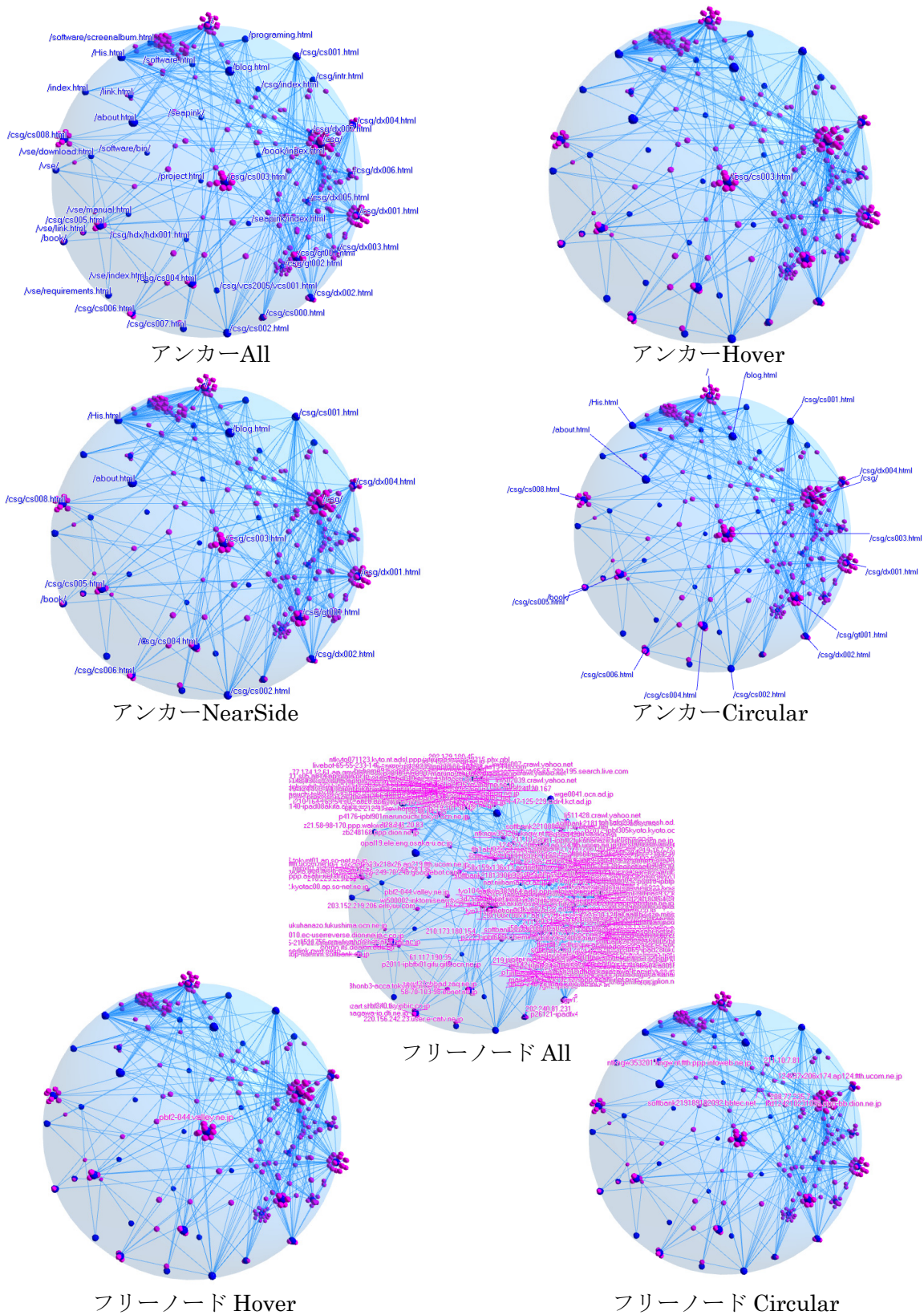


図 13 ラベルの表示方法

4.5.1 Circular 表示

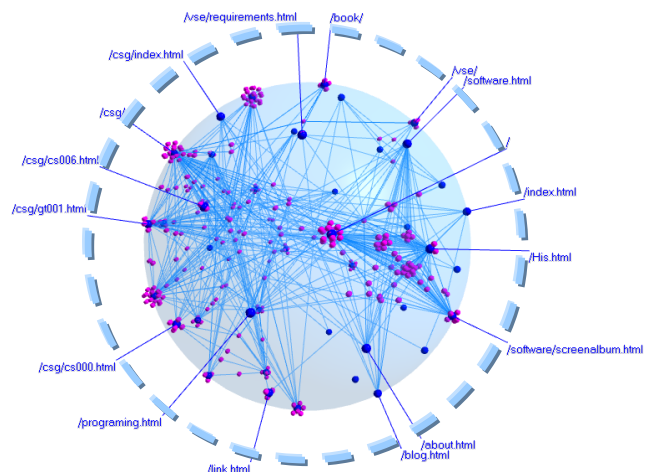
ラベルを円周上に並べて表示し、対応するノードと直線で結んで表示する方法である。表示方法やラベルを表示するノードの条件はアンカーとフリーノードで別のものを使用した。

- アンカー

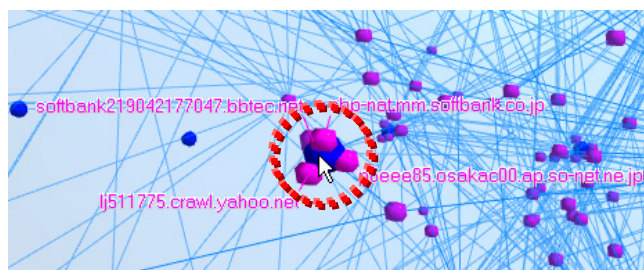
カメラとスフィアアンカーマップの球の中心との距離よりもカメラとの距離の近いノードで、かつ表示領域に応じた円の内部に表示されているノードのラベルを表示する。ラベルは円の円周上に表示する (図 14(a))。

- フリーノード

マウスカーソルの座標を中心とした小さな円の内部に表示されているノード (2D での描画座標とマウスカーソル座標との距離が一定値以下のノード) のラベルを表示する。ラベルは円の円周上に表示する (図 14(b))。



(a)アンカーは表示領域に応じた大きな円周上に表示



(b)フリーノードはマウスカーソル周辺の小さな円周上に表示

図 14 Circular 表示

アンカーはフリーノード位置把握の基準となるノードのため、ラベルもできるだけ常に表示されていることが好ましい。しかし、表示しているグラフと重なる位置に描画するとグラフ構造の読み取りを阻害する恐れがある。そこで、表示領域の端に並べて表示するアンカー用の **Circular** 表示を用意した。

フリーノードはクラスタを形成する特徴を持つ。クラスタ間は近い距離にレイアウトされるためノードの表示されている位置にラベルを表示するとラベル同士が重なることが多くなる。また、クラスタを形成するフリーノードのラベルを一度に見たいこともある。そこで、ある程度まとまった範囲のフリーノードをラベルが多少離れた状態に表示できるようなフリーノード用の **Circular** 表示を用意した。

ラベルの表示位置は、円の中心とノードの表示位置を結び、円との交点をラベルの表示位置としている（図 15）。

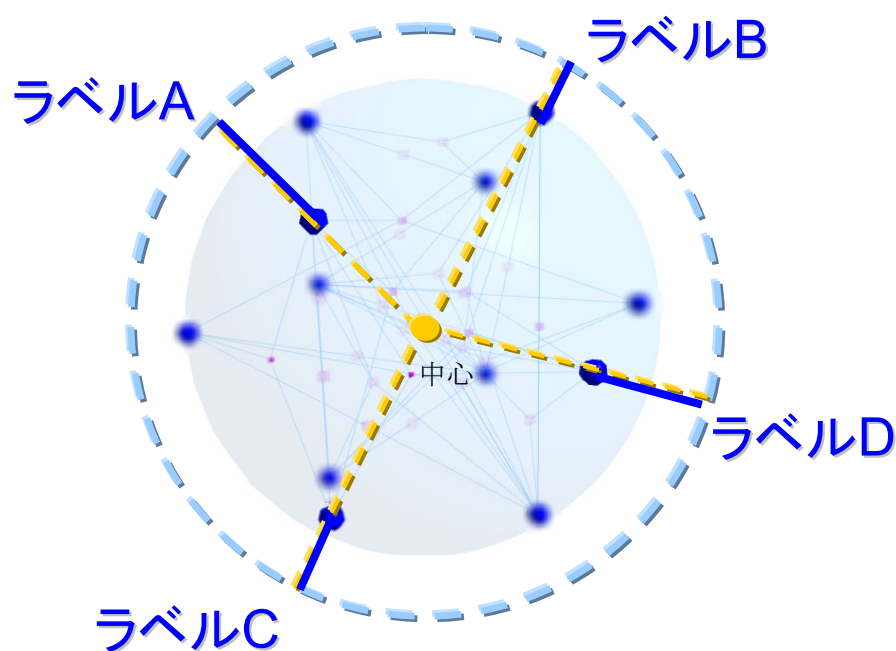


図 15 **Circular** ラベルの表示位置

ラベル文字列の表示位置の基準点は円の中心との関係で変更する。ラベル表示位置が円の中心よりも左上であれば文字列の右下を（ラベル A）、右上であれば左下を（ラベル B）、左下であれば右上を（ラベル C）、右下であれば左上を（ラベル D）を基準として文字列を描画する。これにより、ラベルは円周の外部に表示される。この表示方法は **Circular** 以外のラベル表示方法でも用いており、その際はアンカーはスフィアアンカーマップの球の中心を、フリーノードはマウスカーソルの座標を中心として文字列表示の基準点を変更している。

第5章 開発した描画ツールの機能

5.1 ツールの概要

第3章，第4章で述べたスフィアアンカーマップのレイアウトアルゴリズムおよび閲覧方法の実装を行った（図16）。本ツールは，C#2.0とMicrosoft Managed DirectX1.1を用いて実装を行った。特徴のひとつである被写界深度を用いたレンダリングにはDirectX9.0以上に対応したグラフィックアクセラレータを使用する必要がある。また，動作にはMicrosoft Windows XP以上のオペレーティングシステムに，Microsoft .NET Framework2.0，Managed DirectX1.1とDirectX9.0 December 2006以降のコンポーネントがインストールされている必要がある。

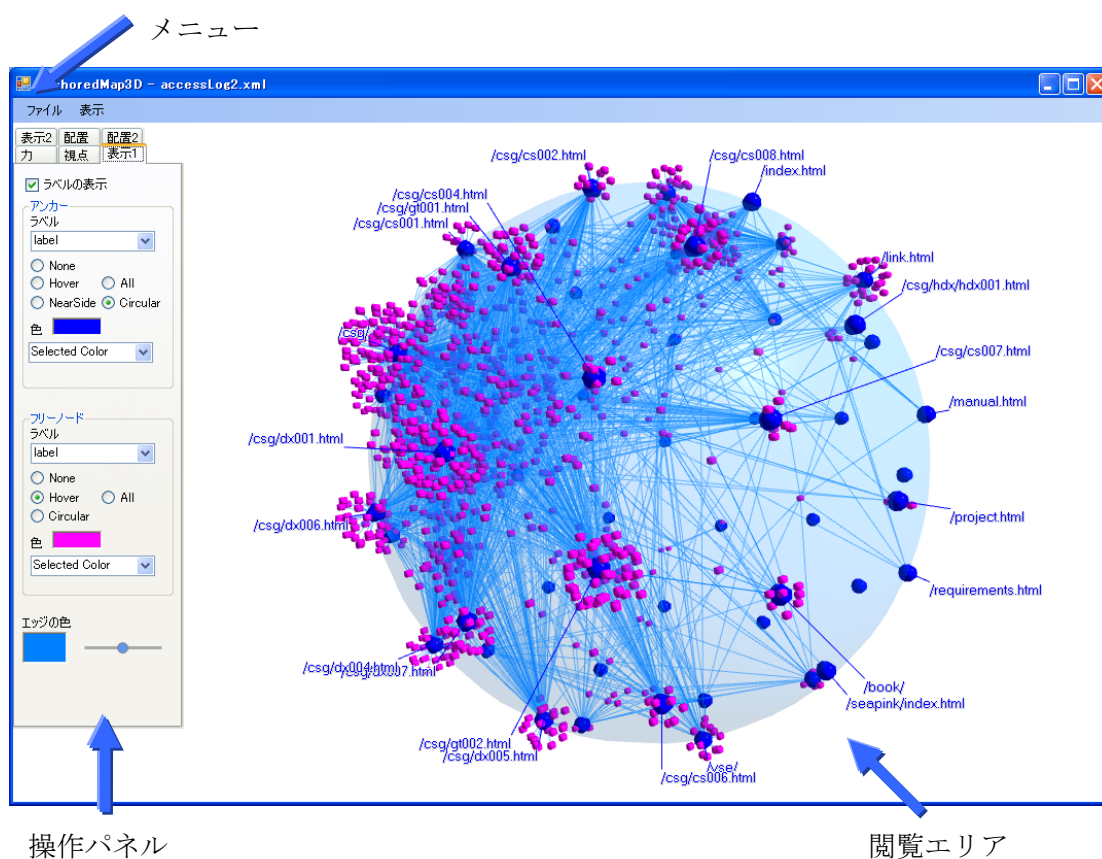


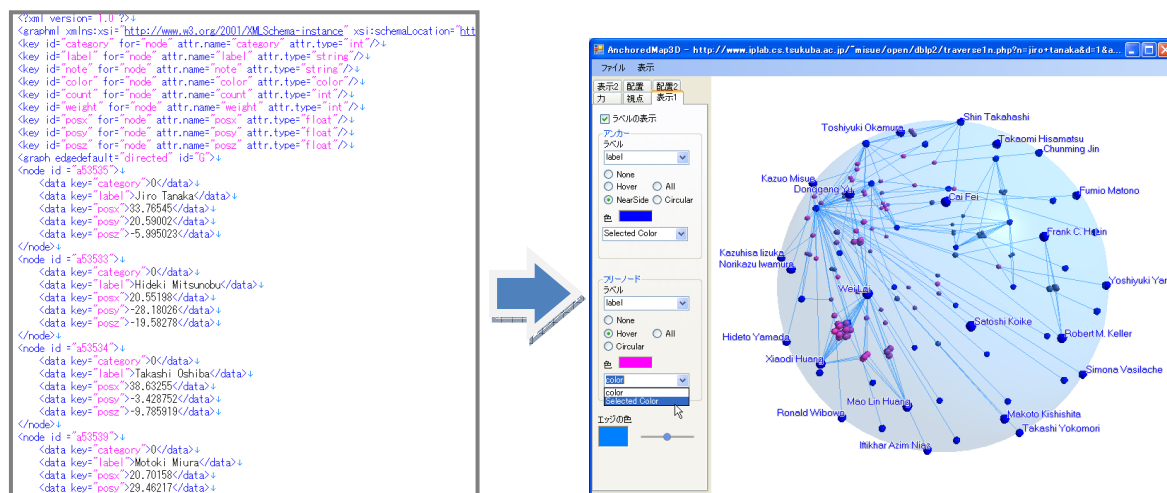
図 16 ツールの概観

ツールは主に画面上部の「メニュー」、画面左側の「操作パネル」、グラフを表示する「閲覧エリア」で構成される。データの読み込み・保存などは「メニュー」から，グラフの配置や表示の設定などは「操作パネル」で行うことができる。

5.2 機能説明

5.2.1 データの読み込み・保存

本ツールでは、GraphMLで記述された2部グラフのグラフ構造を読み込み、可視化を行うことができる(図17)。ノードの種類の区別は各ノードのcategory属性を指定する(0か1)ことで行う。



GraphML データ

図 17 GraphML の読み込み

GraphML 内にノードのラベルや色の情報を記述しておけば、ツール内でその情報を使用することができる。string 型の属性をラベルとして表示可能であり、color 型の属性をノードの色として利用可能である。図 18(a)はフリーノードのラベルとして「label」と「note」という二つの string 型の属性を持ったデータを読み込んだ例である。操作パネルの「表示 1」タブ内のドロップダウンボックスによって表示するラベルを設定できる。図 18(b)は color 型の属性を持ったデータを読み込んだ例であり、ツールで選択した色を使用する「Selected Color」の他に、GraphML 内でノードに設定した「color」をノードの色として設定できる。

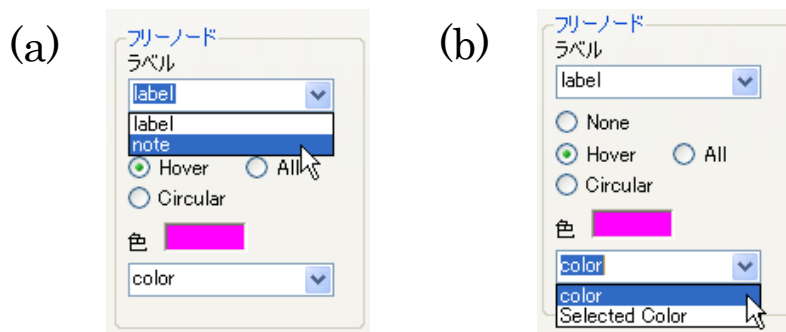


図 18 ノード色・ラベルの設定

GraphML を生成する Web サービスにアクセスしてデータを取得する機能を持つ。ツールには、「メニュー」から「ファイル」―「データから読み込む」―「DBLP 共著者関係」を選択すると、DBLP から著者と論文の 2 部グラフの関係を抽出し、GraphML を生成するサービスⁱⁱにアクセスしデータを可視化できる (図 19)。

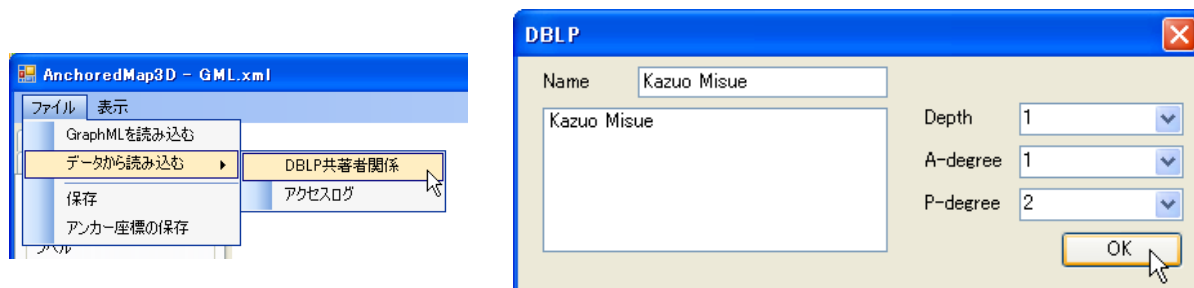
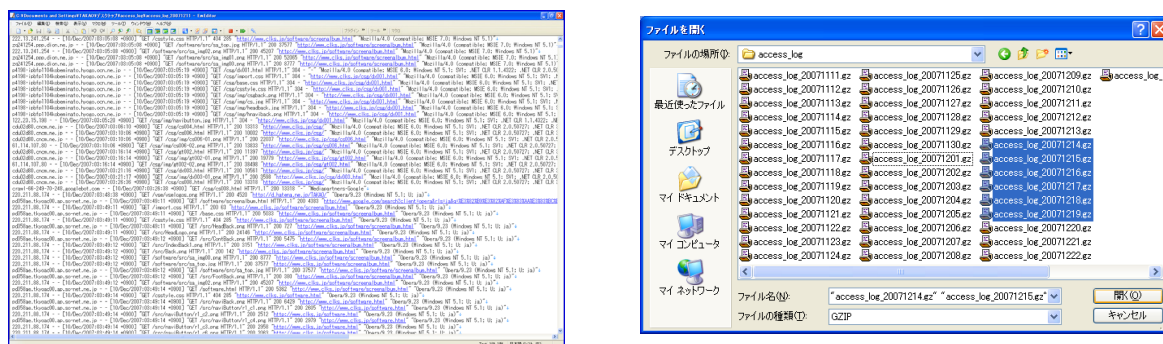


図 19 DBLP 共著者関係の抽出

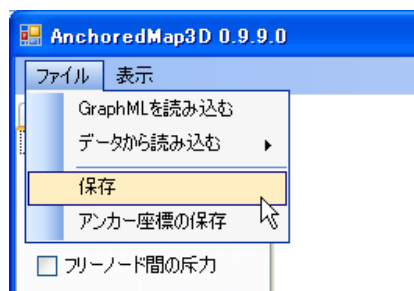
「ファイル」―「データから読み込む」―「アクセスログ」を選択すると、Web サーバソフトウェア Apacheⁱⁱⁱの生成するアクセスログファイルを解析し、Web ページとそのページの訪問者の関係を可視化することも可能である。アクセスログは GZIP で圧縮されて保管されることが多いため、GZIP に圧縮されたアクセスログのファイルを直接読み込み可視化できる (図 20)。



GZIP 圧縮ファイルの
アクセスログデータ
読み込みも可能

図 20 アクセスログの可視化

「メニュー」の「ファイル」―「保存」を選択することでデータをレイアウトした座標とともに GraphML に保存することができる (図 21)。ノードの座標はノード属性の posx, posy, posz に記録される。



```
<graphml xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xsi:schemaLoc
<key id="category" for="node" attr.name="category" attr.type="int"/>
<key id="label" for="node" attr.name="label" attr.type="string"/>
<key id="count" for="node" attr.name="count" attr.type="int"/>
<key id="posx" for="node" attr.name="posx" attr.type="float"/>
<key id="posy" for="node" attr.name="posy" attr.type="float"/>
<key id="posz" for="node" attr.name="posz" attr.type="float"/>
<graph edgedefault="directed" id="G">
  <node id="n0">
    <data key="category">1</data>
    <data key="label">ntoska244079.oska.nt.ftth4.ppp.infoweb.ne.jp</data>
    <data key="posx">8.921302</data>
    <data key="posy">88.5295</data>
    <data key="posz">17.6879</data>
  </node>
  <node id="n1">
    <data key="category">0</data>
    <data key="label">/cse</data>
    <data key="posx">3.140752</data>
    <data key="posy">35.65063</data>
    <data key="posz">17.86511</data>
  </node>
  <node id="n2">
    <data key="category">1</data>

```

図 21 GraphML の保存

5.2.2 自動レイアウト

データを読み込んだ直後はランダムにレイアウトされている．そこから，第 3 章 で述べたアンカーの自動レイアウトを行うことができる．力制御法を用いた自動レイアウトは操作パネルの「力」タブを操作することで行える（図 22）．

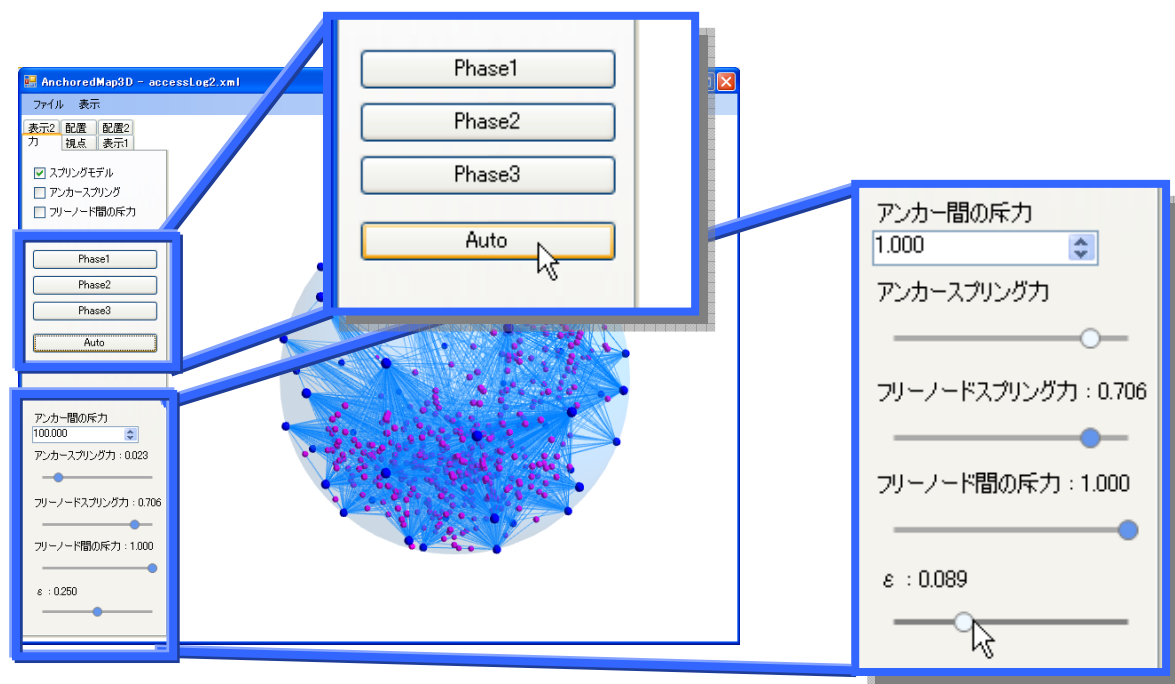


図 22 力制御法による自動レイアウト

「力」タブの「Auto」ボタンをクリックすると 3.3.3 で述べた力制御法によるアンカーの自動レイアウトが行われる．また，力の係数 ra , rf , sa , sf 及び微小係数 ε をスライダバーによって調

節することができる。ノードが振動してしまった場合には ε の値を調節することで振動を抑えることができる。

配置探索法による自動レイアウトは操作パネルの「配置 2」タブを操作することで行える（図 23）。

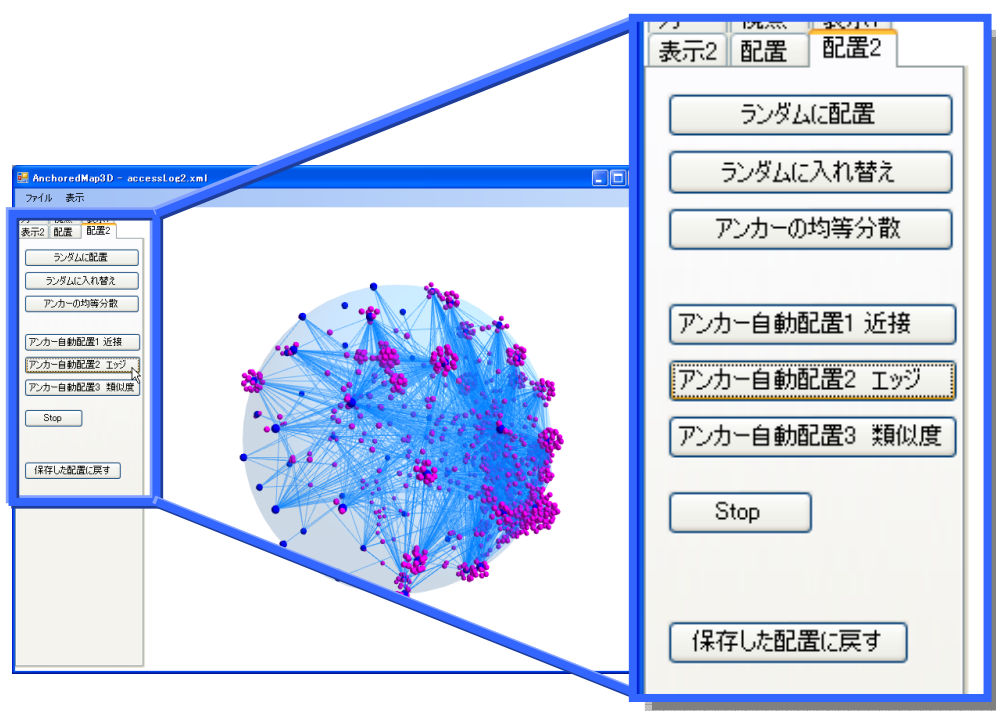


図 23 配置探索法による自動レイアウト

「ランダムに配置」ボタンをクリックするとノードをランダムに配置し、「アンカーの均等分散」ボタンをクリックすると、 $sa=0$ の状態となりアンカーが球面上に一様に分散していく。「アンカーの自動配置」ボタンをクリックするとスプリングモデルのレイアウトが一旦停止し、配置探索アルゴリズムが実行される。「アンカーの自動配置 1 近接」ボタンが R2 を、「アンカーの自動配置 2 エッジ」ボタンが R1 を、「アンカーの自動配置 3 類似度」ボタンが R4 をペナルティとして使用しアルゴリズムを実行する。アルゴリズムが完了すると再びスプリングモデルが開始され、フリーノード間の斥力が有効 ($rf>0$) となりスフィアアンカーマップ全体のレイアウトが完了する。

「保存した配置に戻す」ボタンをクリックすると、読み込んだ GraphML 内にノード位置が保存されている場合、その位置にノードを戻す。

5.2.3 閲覧方法

ツールの閲覧エリアを右ドラッグすることでレイアウトしたグラフを自由に回転させることができる (図 24). マウスを右から左へドラッグすることで右方向に, 上から下にドラッグすることで下方向に回転させることができる (逆も同様).

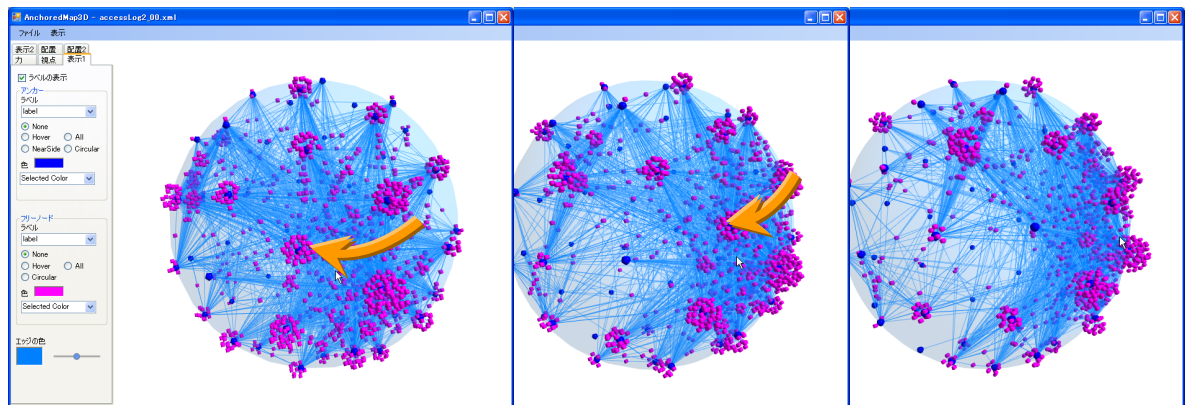
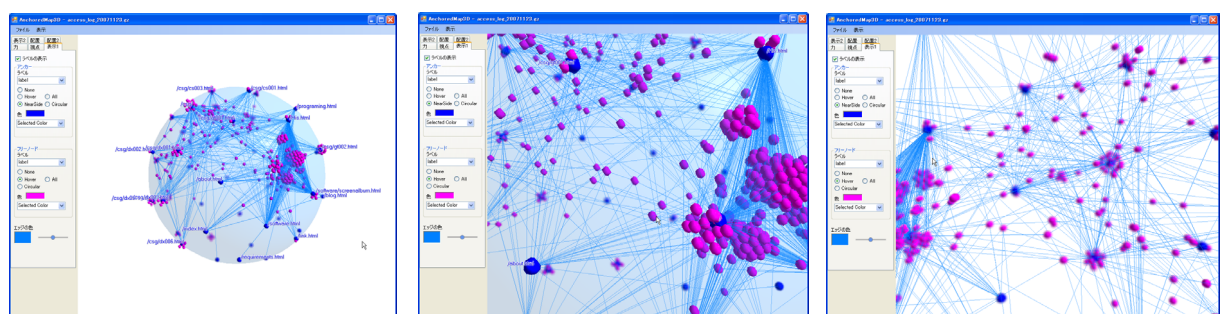


図 24 スフィアアンカーマップの回転

ズームイン・ズームアウトはマウスホイールを操作することで行える (図 25). ズームレベルを上げていくことで, スフィアアンカーマップの内部から眺めることも可能である.



ズームアウト

ズームイン

内部から閲覧

図 25 ズームイン・ズームアウト

被写界深度と焦点の調節は、操作パネルの「視点」タブを操作することで行える（図 26）。被写界深度の深さはスライダーバーの操作によって調節することができる。焦点距離は二つの方法を用いて変更することができる。一つは特殊なスライダーバーにより調節する方法である（図 27）。この方法では、スフィアアンカーマップの球のどの位置に焦点を合わせるかを設定することができ、常に手前や中心に焦点を合わせておきその位置のノードを観察するときなどに役立つ。もう一つは、指定したノードに焦点を固定する方法である。ノードを左クリックするとそのノードに焦点が固定される。これは、指定したノードを中心にその周りの状況を確認したい場合に役立つ。

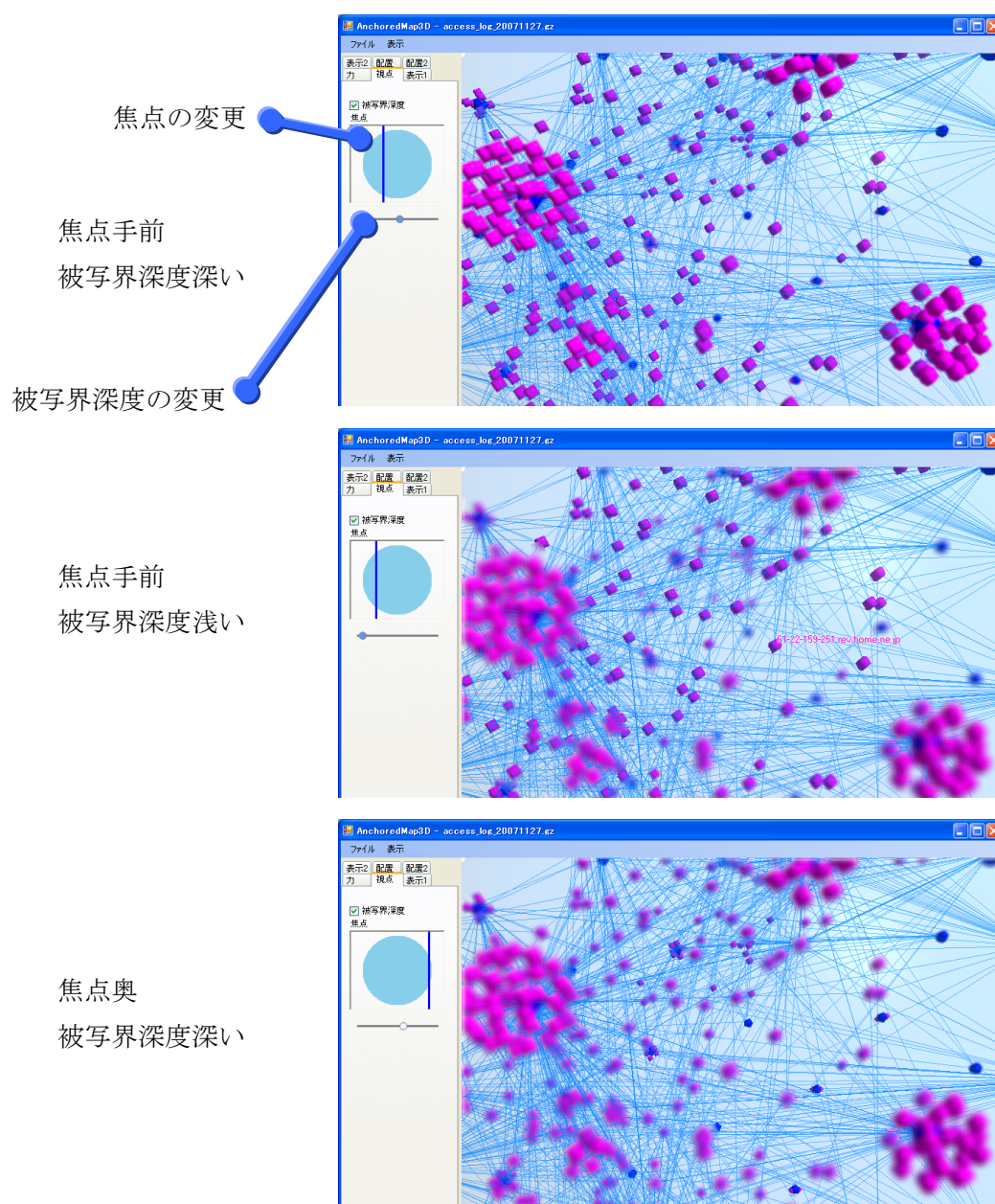


図 26 焦点と被写界深度の調節

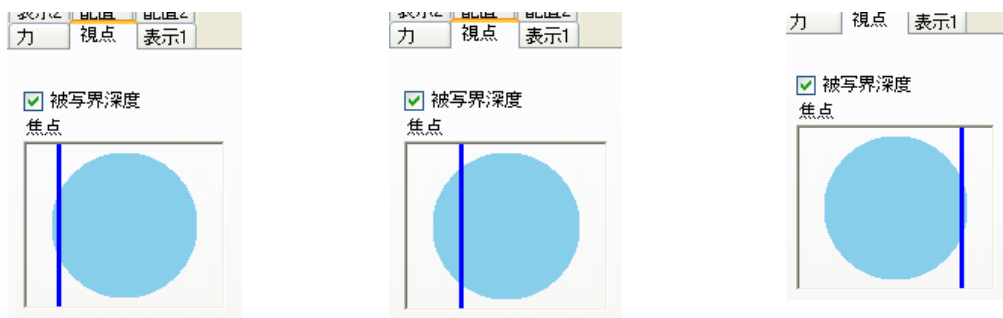


図 27 焦点の操作

操作パネルの「表示 1」タブ内のラジオボタンを操作することでラベルの表示方法を切り替えることができる (図 28)。アンカー、フリーノードで別のラベル表示方法を選択できる。

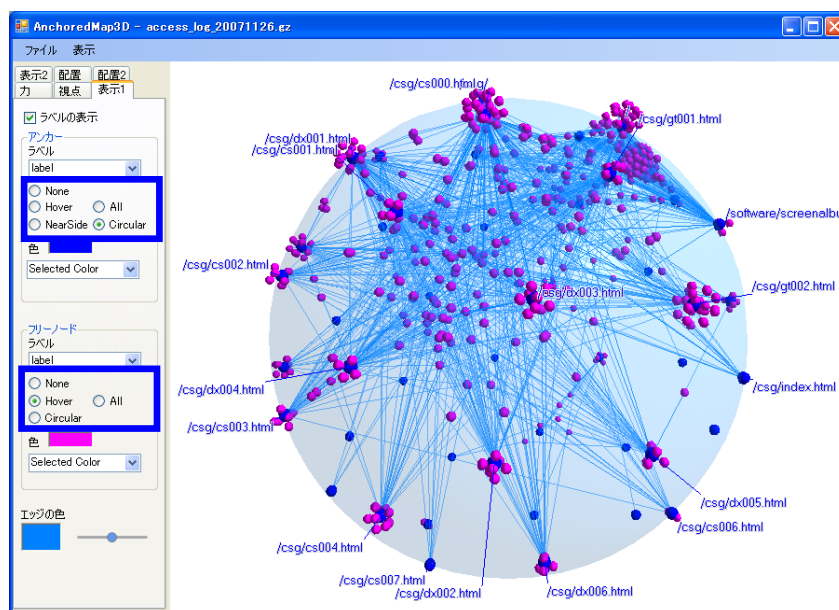


図 28 ラベル表示の切り替え

第6章 評価と考察

6.1 レイアウト方法の評価と考察

開発したアンカーのレイアウト方法がスフィアアンカーマップの描画規則をどの程度満たしているか評価を行った。

6.1.1 アンカー分散の評価

R3 の値はアンカー数を N ，球の半径 $r=1$ ，定数 $C>0$ としたとき，

$$(式 14) \quad \left(\frac{8\pi}{\sqrt{3}}\right)^{\frac{1}{2}} N^{-\frac{1}{2}} - CN^{-\frac{2}{3}} < R3 < \left(\frac{8\pi}{\sqrt{3}}\right)^{\frac{1}{2}} N^{-\frac{1}{2}}$$

のように漸近解に収まることが知られている[19]．そこで，球の半径を 1 として力を利用した方法でアンカーを分散させ，R3 の値を計算し実際に(式 14)のように収まるかを調べた．

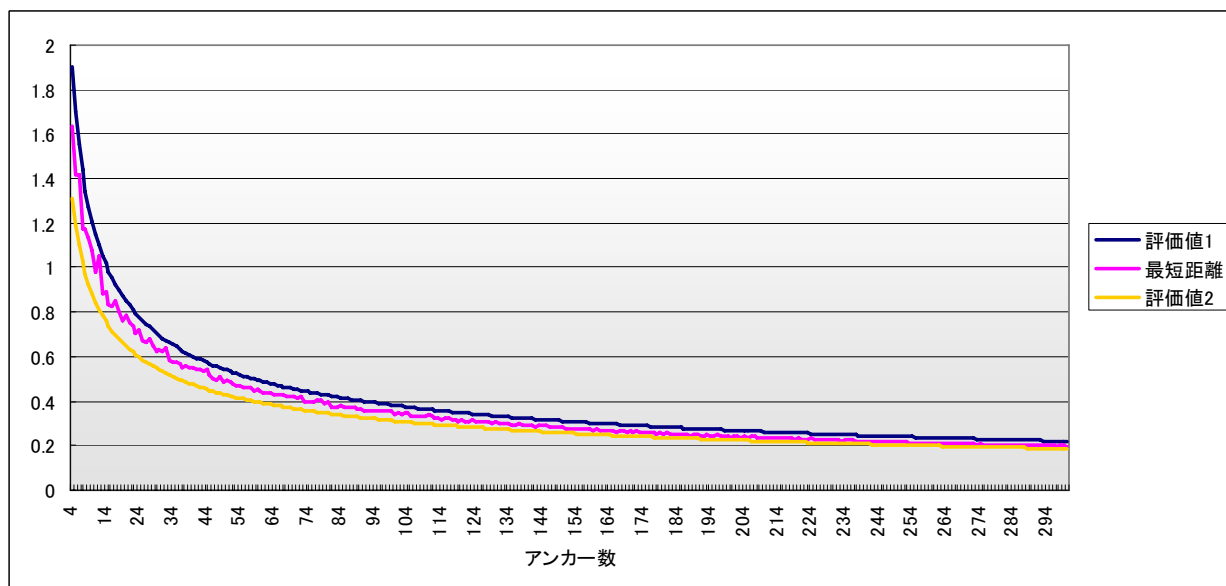


図 29 アンカーの分散評価

図 29 は，4～300 までのアンカー数で R3 (最短距離)， $\left(\frac{8\pi}{\sqrt{3}}\right)^{\frac{1}{2}} N^{-\frac{1}{2}}$ (評価値 1)， $\left(\frac{8\pi}{\sqrt{3}}\right)^{\frac{1}{2}} N^{-\frac{1}{2}} - CN^{-\frac{2}{3}}$ (評価値 2) の値を示したものである．ここでは C を 1.5 としている．力を利用して分散させた場合の R3 の値が概ね(式 14)に収まっており，力を利用したアンカーの分散は描画規約 R3 を満足する方

法といえる。

また、あるアンカーから最も近くにあるアンカーを隣接しているアンカーとし、隣接するアンカー間の距離の標準偏差を測定した。図 30 は、アンカー数毎の標準偏差を示したものである。分散が 0 に近いということはアンカーが一様に分散していることの一つの指標となる。図 30 からアンカー数が多くなると標準偏差は 0.005 程度となることが分かる。図 31 は標準偏差を平均で割った値を示したものである。この図から、隣接するアンカー間の距離のばらつきは平均距離の 2% 程度であり、アンカーは比較的一様に配置されているといえる。しかし、図 31 のアンカー数 100 以降を見ると値が上昇傾向にあるのが見て取れる。この原因のひとつとして、用いた分散の収束条件(式 11) ではアンカー数が多くなるにつれて判定が甘くなっていっていることが考えられる。

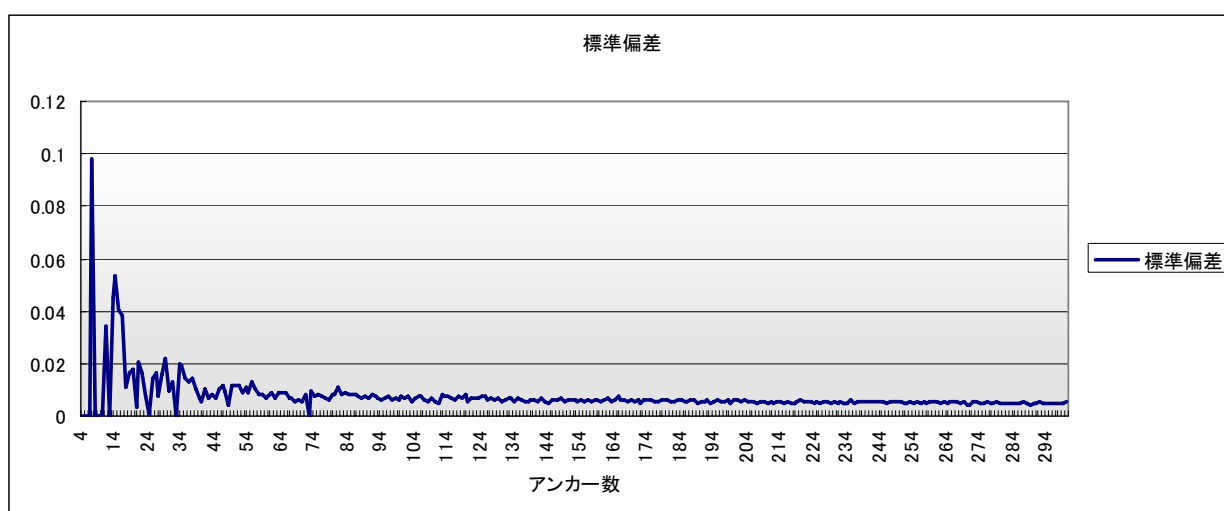


図 30 隣接するアンカー間の距離の標準偏差

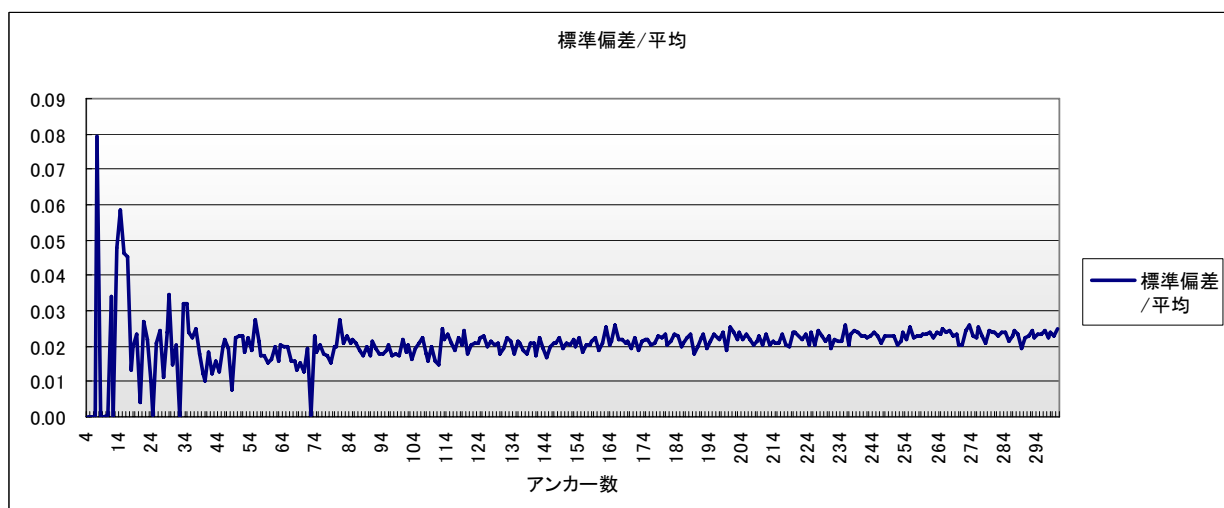


図 31 隣接するアンカー間の距離 標準偏差/平均

6.1.2 アンカーレイアウトの評価 1 正二十面体

アンカーのレイアウトに関して 2 つの実験を行った。実験 1 では、アンカー数を 12 とし、開発したアンカーのレイアウト方法がどの程度描画規則を満たしているかを調べた。アンカー数を 12 としたのは正二十面体と均等な形状にレイアウトできる数であり、配置パターンも 11!/5 通りと比較的計算量が少ないためである。実験ではアンカーを正二十面体の頂点に配置し、11!/5 通りのパターンについて R1, R2, R4 の値を計算し、開発したアンカーのレイアウト手法でレイアウトしたアンカーの配置が何位に位置するかを調べた。ただし、フリーノードの位置は接続するアンカーの重心として近似している。

評価に用いたグラフを表 1 に示す。フリーノード数を約 30, 60, 90 とし、フリーノードの次数が正規分布となるようランダムにアンカーと接続した。G1, G3, G5 のフリーノードの次数は平均 2, 分散 1.3 の正規分布となっており、残りのグラフは平均 4, 分散 1.3 の正規分布としている。平均が高々 4 である理由は、フリーノードの次数が高い場合、多くのノードが球の中心付近に配置される傾向があり、このようなグラフはスフィアアンカーマップでは可読性の向上が期待できないからである。また、表 2 に用いたグラフの各評価基準間の相関係数を示す。表では R2 を「アンカー近接」、R1 を「エッジ長」、R4 を「類似度」と表記している。用いたグラフでは各評価基準に非常に相関があることが分かる。

表 1 正二十面体の評価に用いたグラフ

	フリーノード数	エッジ数
G1	31	84
G2	30	120
G3	59	156
G4	59	239
G5	90	240
G6	89	359

表 2 各評価基準間の相関係数 1

	アンカー近接・エッジ長	アンカー近接・類似度	エッジ長・類似度
G1	0.909	0.837	0.886
G2	0.932	0.751	0.832
G3	0.913	0.883	0.917
G4	0.941	0.764	0.828
G5	0.916	0.856	0.905
G6	0.917	0.714	0.837

表 3 実験 1 評価結果

		順位			上位%		
		アンカー 近接	エッジ長	類似度	アンカー 近接	エッジ長	類似度
G1	力制御	702	6958	5950	0.009	0.087	0.075
	P1	122	5078	5094	0.002	0.064	0.064
	P2	2827	331	784	0.035	0.004	0.010
	P3	14990	630	273	0.188	0.008	0.003
G2	力制御	26126	42962	182712	0.327	0.538	2.289
	P1	673	7247	189790	0.008	0.090	2.377
	P2	12064	1248	3264	0.151	0.016	0.041
	P3	288	592	62	0.004	0.007	0.001
G3	力制御	42836	115372	281208	0.537	1.445	3.522
	P1	1044	1068	2171	0.013	0.013	0.027
	P2	634	72	275	0.008	0.001	0.003
	P3	3126	1769	793	0.039	0.022	0.010
G4	力制御	451753	198894	648126	5.659	2.491	8.118
	P1	68	158	1549	0.001	0.002	0.019
	P2	1176	87	263	0.015	0.001	0.003
	P3	28798	12560	196	0.361	0.157	0.002
G5	力制御	296410	195425	299760	3.713	2.448	3.755
	P1	128	2558	17152	0.002	0.032	0.215
	P2	21288	1668	1468	0.267	0.021	0.018
	P3	15442	14085	5534	0.193	0.176	0.069
G6	力の制御	1270706	1246515	2107089	15.917	15.614	26.394
	P1	298	2660	44520	0.004	0.033	0.558
	P2	324	144	1725	0.004	0.002	0.022
	P3	67456	4204	665	0.845	0.053	0.008

緑色は各グラフの各評価基準中で最も良い順位を示す。青色は上位 0.5%に入っていない順位を示す。

評価結果を表 3 に示す。表中の「力制御」は力制御法を用いたレイアウト、「P1」は R2 の値をペナルティとして配置探索法を用いたレイアウト、「P2」は R1 の値をペナルティとして配置探索法を用いたレイアウト、「P3」は R4 の値をペナルティとして配置探索法を用いたレイアウトを示している。開発したレイアウト方法はあくまでも準最適なレイアウトを求めるものであるため、初期のラン

ダム配置に依存する．そのため，各方法について 3 回ずつレイアウトを求めその順位の平均を示した．「上位%」とは，求められた順位を $11!/500$ で割った値である．この値が 1 以下であるということは正二十面体の全配置パターン中で上位 1%以内に入っていることを示す．

配置探索法でのレイアウトはその大半が 3 つの評価基準について上位 0.5%以内，力制御法では G1, G2 では上位 1%以内，G3～G5 ではアンカーの近接化とエッジ長で上位 5%以内に入っており，開発した 2 つのレイアウト方法は概ね美的基準を満足しているといえる．

しかし，配置探索法でのアンカーレイアウトは全グラフにおいて上位 1%以内とよい成績であるが，力制御法では G3 以降での成績が極端に下がる．また，全体的に見て力制御法よりも配置探索法によるレイアウトのほうが良い成績である．この原因としては，力制御法ではフェーズ 2 でアンカーを分散させる際にフェーズ 1 で求めた位置関係が多少失われてしまうことが考えられる．特に G3 以降で成績が下がる理由は，この実験で用いたグラフ生成方法ではフリーノード数やエッジ数を増やすことでグラフの偏りが減っていくことが原因と考えられる．G3～G6 のようなグラフはアンカーをどのようにレイアウトしても評価指標には大した差が表れなくなる．そのため，フェーズ 2 で失われる位置関係が順位に大きく影響を与えていると考えられる．これらの対策としてはフェーズ 2 に移行する際にアンカーへのスプリング力を無くすのではなく，徐々に減らしていくなどより細かな力の制御を行うことが考えられる．

力制御法では，フェーズ 1 で求めたようにアンカーの近接化とエッジ長最小化の基準の成績が良い傾向がある．しかし，G1～G3 ではアンカーの近接化の成績の方が良いのに対して G4～G6 ではエッジ線長の成績が良い．この結果はグラフの構造に関係すると考えられるが，詳しい原因は不明であり更なる調査が必要である．

配置探索法を用いた場合，P1 はアンカー近接において，P2 はエッジ長において，P3 は類似度において最もよい成績を残すはずである．しかし，G3 の P2 は P1, P3 と比べても全指標で最もよい成績である．先に述べたように配置探索法はペナルティにおいて準最適なレイアウトを求めるものである．G3 の P2 の結果は偶然非常に良いエッジ長最小のレイアウトが求まり，表 2 のとおり実験で用いたグラフでは各評価基準間には高い相関があるため偶然良い成績を残したと考えられる．逆に言えば，この実験のグラフのように各評価基準間の相関が高い場合，P1～P3 の中で最も計算量が少ないペナルティ（この場合は P2）を用いてレイアウトを行うのが効果的であるといえる．

6.1.3 アンカーレイアウトの評価 2 実際のデータ

実験 2 は，実際の 2 部グラフのデータを用いて開発したレイアウト方法がどの程度描画規則を満たしているかを調べたものである．表 4 に用いたグラフの内容とその規模を示す．

G7 は購入者と商品との関係を表す 2 部グラフである．データは研究室内で運営している買い物システムの 2007 年 4 月 1 日から 2007 年 12 月 31 日までの履歴である．G8 は Web ページと訪問者を表すものであり，著者の Web ページ^{iv}の 11/25～11/29 までの 5 日間分のアクセスログを開発したツールによって解析したものである．G9 は論文と著者の関係を表すものであり，DBLP のデータ抽出サービスより取得したデータである．表 5 は用いたグラフの各評価基準間の相関係数を示す．

表 4 評価に用いたグラフの規模

		アンカー	フリー ノード	アンカー 数	フリー ノード数	エッジ数
G7	購入者と商品	購入者	商品	29	432	1717
G8	Web ページと訪問者	Web ページ	訪問者	52	1137	4564
G9	論文と著者	著者	論文	210	697	1767

表 5 各評価基準間の相関係数 2

	アンカー近接・エッジ長	アンカー近接・類似度	エッジ長・類似度
G7	0.970	0.334	0.403
G8	0.867	0.458	0.641
G9	0.957	0.800	0.741

この実験ではアンカー数が多いため全配置パターンの計算を行うのは難しい．そこで，アンカーを力の制御により分散させてアンカーの候補位置を決定したのち，100 万回ランダムにアンカーのレイアウトを行って各評価基準の値を計算した．そして，開発したレイアウト方法を使ったレイアウトがランダムで配置した 100 万回＋各グラフのレイアウト方法 4 つ×3 回の全 1000012 回中で何位に位置するかを調べた．ここでも，フリーノードの位置は接続するアンカーの重心として近似した．

表 6 実験 2 評価結果

		順位			順位の平均		
		アンカー近接	エッジ長	類似度	アンカー近接	エッジ長	類似度
G7	力制御	3	3	271	4	4	912
		9	9	2460			
		1	1	4			
	P1	5	5	239	6	7	591
		8	8	622			
		6	7	912			
	P2	2	2	7	4	4	35
		7	6	16			
		4	4	83			
	P3	64186	34757	2	79030	42631	2
		123248	75137	3			
		49657	17999	1			
G8	力制御	2	3	77035	4	5	42582
		7	7	16221			
		3	5	34490			
	P1	1	1	40029	4	5	21789
		4	8	21049			
		6	6	4289			
	P2	9	9	276624	7	5	108219
		5	2	40454			
		8	4	7579			
	P3	70	26	3	50	16	2
		12	10	1			
		67	12	2			
G9	力制御	3	3	10	2	2	9
		1	1	9			
		2	2	8			
	P1	9	9	11	6	6	7
		5	5	4			
		4	4	7			
	P2	8	8	12	7	7	8
		6	6	5			
		7	7	6			
	P3	12	12	3	11	11	2
		10	10	1			
		11	11	2			

は 13 位以下の順位を示す。

評価結果を表 6 に示す。表記は表 3 とほぼ同様である。表 3 では 3 回のレイアウトの順位の平均を示したが、この実験では開発したレイアウト方法による 12 個のレイアウトが同時に順位付けされるため個別の順位と、レイアウト方法ごとに順位の平均の両方を示した。平均の順位が 2 位となっているレイアウトはその評価基準において上位 3 位を独占していることを表す。

G7・G8 については、力制御法、P1, P2 でレイアウトを行った場合の類似度は非常に成績が悪い。逆に P3 で行った場合、類似度の成績は良いものの、そのほかの指標の成績は悪い。これは、アンカー近接・類似度、エッジ近接・類似度間の相関が弱いことにも現れている。このようなグラフでは配置探索法で異なるペナルティを用いた場合に視覚的にも大きく異なったレイアウトが得られる (図 32)。P1 によるレイアウトではフリーノードの集まりの偏りが見て取れる。一方、P3 ではフリーノードが球内部に分散してしまっている。アンカーマップの利用目的からすると P1 によるレイアウトのほうが適していると考えられる。

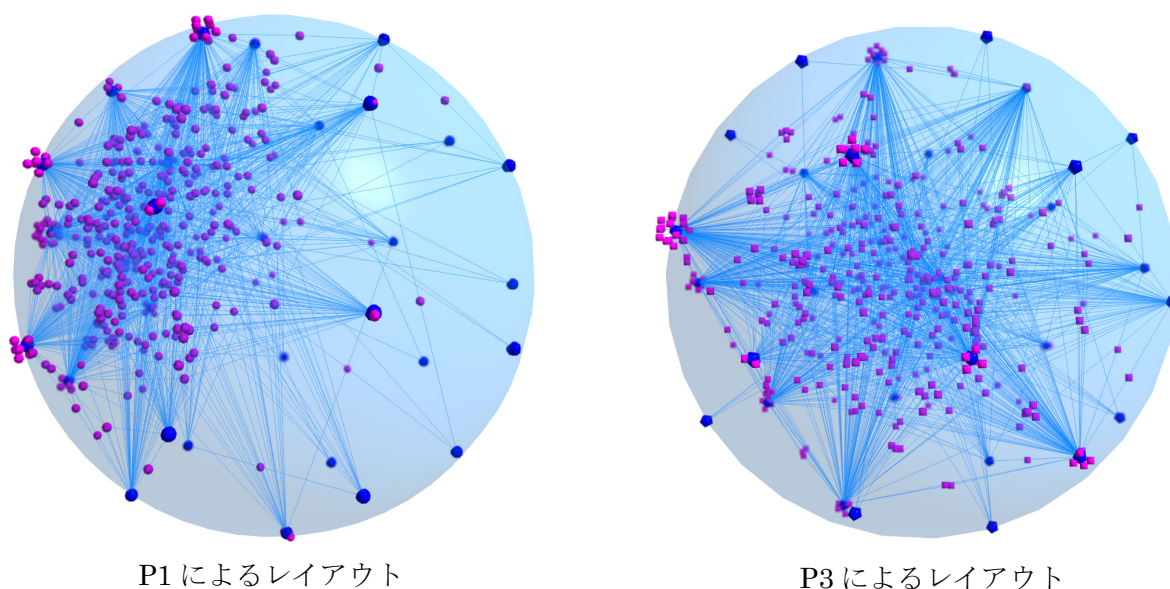
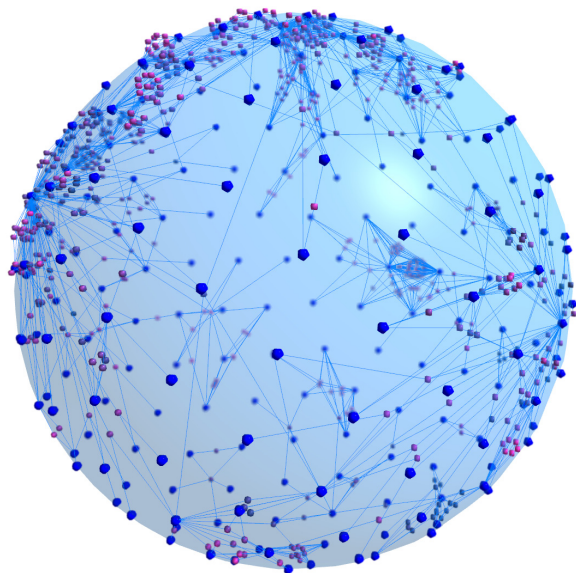


図 32 G7 の可視化例

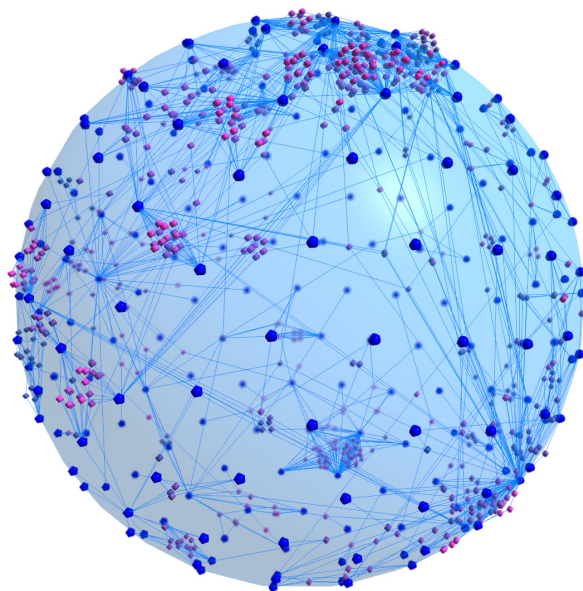
G9 は、フリーノードが球の表面に集まる傾向のあるグラフである。このようなグラフはアンカー近接・類似度、エッジ近接・類似度間にもある程度の相関があり、全ての順位が 12 位以内、つまりランダムに行ったよりもよい成績である。配置探索法でどのペナルティを用いてレイアウトを行っても視覚的には同じようなレイアウトが求められる。

実験 1 では、力制御法は配置探索法による P1~P3 の結果よりも順位が高いことはほとんどなかったが、この実験では力制御法の方が良い成績を残す場合がある。特に、G9 ではアンカー近接・エッジ長ともに P1・P2 よりも良い成績であり、視覚的にも混雑がないレイアウトが得られた (図 33)。これには 2 つの理由が考えられる。一つ目は、実験 1 のようなランダムなグラフとは違い実際のデータには偏りがあるため、力制御法も有効に働いたことが考えられる。二つ目は、アンカー数が増え

たことで配置探索法の精度が落ちたことが考えられる。配置探索法では高速化のため入れ替えるアンカーの数を減らしている。アンカー数が増えれば入れ替えが施行されないアンカーの数も増えるため、精度が落ちてしまい、G9のようにアンカー数が200を超える場合は力制御法を用いた方が良い結果になったと考えられる。



力の制御によるレイアウト



P1 によるレイアウト

図 33 G9 の可視化例

6.2 閲覧方法の考察

アンカーマップに関する知識を持っている者4名に開発したツールを使ってデータを閲覧してもらい、インタビューを行った。閲覧に用いたデータは表4のG8（Webページと訪問者）とG9（論文と著者）である。閲覧用のデータにG8とG9を用いた理由は、ともに2Dアンカーマップでは可読性が低下してしまうような大規模なグラフであり、G8とG9ではデータの傾向が異なるためである。G8はスフィアアンカーマップで可視化するとフリーノードが一部に偏るグラフであり、G9はフリーノードが球の表面付近に集まるグラフである。

ツールの使い方を説明した後、G8について5分間程度自由に閲覧してもらい、その後閲覧を行いながら「操作方法」、「被写界深度表示」、「ラベルの表示方法」についての質問を行った。G9についても同様に自由に閲覧後、質問を行った。

6.2.1 回転・被写界深度表示

操作方法、被写界深度表示に関して以下のような質問を行った。

- 被写界深度表示なし、グラフを回転させない状態でのノードの把握
- 被写界深度表示なし、グラフを回転させない状態でのエッジの把握
- 被写界深度表示なし、グラフを回転させている状態でのノードの把握
- 被写界深度表示なし、グラフを回転させている状態でのエッジの把握
- 被写界深度表示あり、グラフを回転させない状態でのノードの把握
- 被写界深度表示あり、グラフを回転させている状態でのノードの把握

被写界深度表示ありの状態では、焦点距離や被写界深度を調節しながら閲覧してもらった。ツールではエッジに対して被写界深度表示を行っていないため、被写界深度表示ありの状態ではエッジに関する質問は行わなかった。

被写界深度表示なし回転させない状態では、フリーノードのかたまりは分かるものの、奥行き関係を直感的に把握するのは難しいという意見が多かった。ノードのサイズによってある程度の奥行きは分かるが、目が追いつかないといった意見や、回転させていない状態ではほとんど情報が読み取れないという意見があった。また、回転していない状態ではアンカーが球面上にあるという情報が視覚的に得られないため、観点が分散してしまい見づらいという意見があった。エッジの把握に関しては、エッジの密集している部分は分かるものの、どのノード同士をつないでいるかを把握できないとの意見が多かった。

被写界深度表示なし回転させている状態では、回転させた瞬間に奥行き関係（立体構造）が把握できるようになったという意見が多かった。特にG9では回転させないと全く状態が理解できないとい

う意見が多かった。また、回転させると「ごちゃごちゃしていない印象を受けた」や「空間が広がった」という意見もあり、可読性の向上につながっていると考えられる。回転中はスフィアカーマップの一部分に注目しており、回転を止めた場合も注目していた部分の奥行き関係は把握できたという意見が多かった。逆に、注目していた部分以外の立体構造は把握できず、いったん目を離すと回転させないときと同様に奥行き関係が分からなくなるという意見もあった。エッジの把握に関しては、回転させないときよりはノード同士のつながりが分かるという意見や、エッジの広がり方の形状が分かり情報が把握しやすくなるといった意見があった。

閲覧の最中、ズーム機能はあまり使われず、多くの人がスフィアアンカーマップ全体を見渡せる位置に合わせたまま回転によって閲覧していた。また、ズームしていくことで球の内部から情報を見渡すことができるが、内部に入ると非常に分かりづらいという意見が多かった。

被写界深度表示あり回転させない状態では、焦点や被写界深度を調節することで奥行き方向に輪切りにしていくような感覚で閲覧できるという意見があった。G9 では被写界深度が表示を行うことで初めて球の中心付近にフリーノードが無いことを把握できたという意見や、中心付近に無いことを確認できたという意見があり、回転とは違った奥行き構造の読み取り方ができたと考えられる。しかし、焦点を球の中心に合わせた場合どのノードが手前にあり、どのノードが奥にあるかが分からないといった問題もある。

被写界深度表示あり回転させる状態では、注目したい部分をより強調できるという意見が多かった。また、被写界深度表示なしの状態でも回転させていて回転を止めたとき、今まで見ていた部分を見失うことがあったが、被写界深度表示がある場合それが無くなったという意見もあり、回転させている場合は奥行き情報の把握支援というよりも、注目支援につながっていると考えられる。

インタビューの結果、グラフの回転は 3D 構造の把握の支援につながっているといえる。また、被写界深度表示は回転とは違った奥行き関係の把握や、注目部分の強調に役立つといえる。

6.2.2 ラベルの表示方法

ラベルの表示方法に関しては、G8, G9 それぞれについて好みの表示方法と、その理由について質問した。G8 と G9 で好みの表示方法が分かれた。

G8 のアンカーでは全員が Circular 表示が良いと答えた。理由としては「グラフを回転させているときにラベルが邪魔にならない」や「カッコいいので使っていて心地よい」といった意見があった。しかし、画面中心付近のノードとラベルの表示位置が離れるためノードとラベルの対応位置が取りづらく、回転させていないときは NearSide 表示が良いという意見もあった。

G8 のフリーノードでは Circular 表示と Hover 表示に好みが分かれた。Circular 表示を選んだ理由には円形に表示されるためラベル同士の距離が離れて文字を読みやすいといった意見や、範囲内の

ラベルを見ることができるため便利といった意見があった。一方、範囲内のノードのラベル全てが表示されてしまい見づらいという意見もあった。Hover 表示を選んだ理由には、ラベルの表示数が少なく読みやすいということが多かった。中には、Hover 表示の表示数で Circular 表示を行って欲しいという意見もあった。

G9 のアンカーでは 3 名が NearSide 表示が良いと答え、1 名が All 表示が良いと答えた。主な理由は、G9 のグラフでは著者（アンカー）からたどってグラフを見ることが多く、その際にアンカーのすぐ近くにラベルが表示されていたほうが良いという意見が多かった。

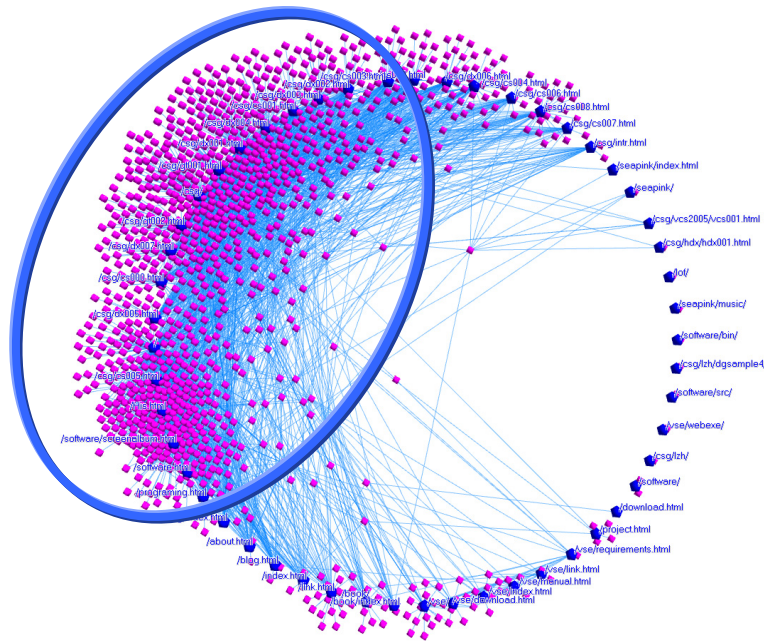
G9 のフリーノードでは全員が Hover 表示が良いと答えた。これは G8 で Hover を選んだのと同様にラベルの表示数が少なく読みやすいといったことが理由であった。G9 のフリーノードラベルは論文名を表示するため非常に長い。そのため、表示数の少ない Hover 表示が好まれたと考えられる。

このように、閲覧者や閲覧するデータによって表示方法の好みが分かれることを考えると表示方法を切り替えられるようにしたことは情報の読み取り支援につながっているといえる。表示するグラフや見たい情報にもよるが、アンカーのラベルは閲覧を阻害しない程度に多く表示されていた方が好まれ、フリーノードは見たい部分のラベルを読みやすく表示する方が好まれると考えられる。また、開発した Circular 表示はノードとラベルの対応は多少取りづらいもののグラフ構造の読み取りの邪魔にならず比較的良い表示方法であると考えられる。

6.3 2D アンカーマップとの比較

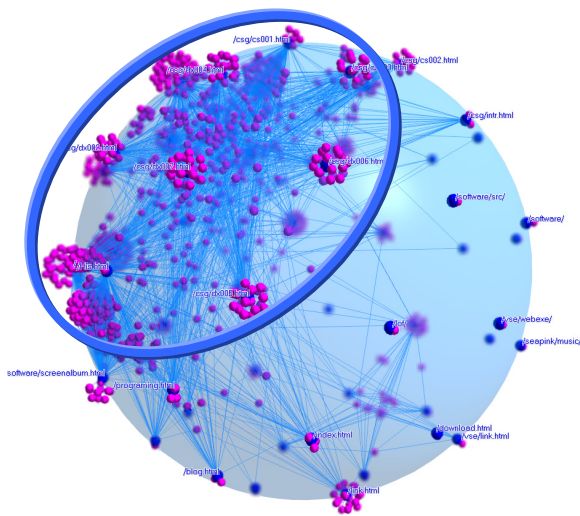
図 34 は G8 の 2D アンカーマップの可視化例とスフィアアンカーマップの可視化例を比較をしたものである。図 34(a)ではアクセスするページに偏りがあることはわかるものの、フリーノードクラスタが混合してしまい、クラスタ内の細かな構造を読み取ることはできない。図 34(b)と(c)はスフィアアンカーマップによってレイアウトしたグラフを 2 つの角度から表示した例である。図 34(b)の角度では図 34(a)と同様にアクセスするページに偏りがあることが分かる。また、図 34(c)では図 34(a)のようなクラスタの混合が解消され、複数のフリーノードクラスタが視覚的に確認できる。開発したツールを用いれば図 34(b)と(c)のように別の角度の表示を見比べるのではなく、回転によって 3D 構造を把握することができるため図で示すよりも直感的に情報を把握できる。

図 35 は G9 の 2D アンカーマップの可視化例とスフィアアンカーマップの可視化例を比較をしたものである。図 35(a)では、中心付近にフリーノードがほとんど無いことが分かるものの、円周辺（アンカー周辺）のフリーノードの関係はほとんど分からない。また、アンカー間の距離が詰まってしまいラベルの描画領域も狭いため非常に混雑してしまっている。一方、図 35(b)ではフリーノードが球の表面近くにあることは一瞬ではわからないものの、あるアンカー（著者）を中心に広がりを持っているといった 2D アンカーマップでは読み取りづらい情報も読み取ることができる。また、図 35(c)のように焦点を球の中央に当てて眺めることで球の中心付近にはフリーノードがほとんど無いことを確認できる。



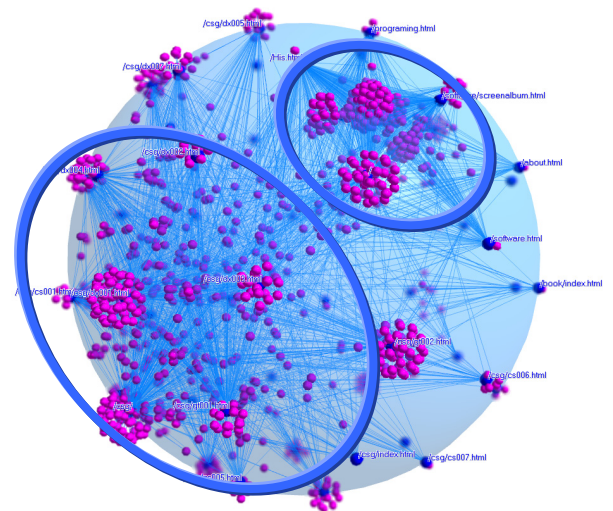
(a) 2D アンカーマップ

アクセスするページに偏りがあることはわかるが、フリーノードクラスが混合してしまい一つのかたまりに見えてしまう。



(b) スフィアアンカーマップ(角度 1)

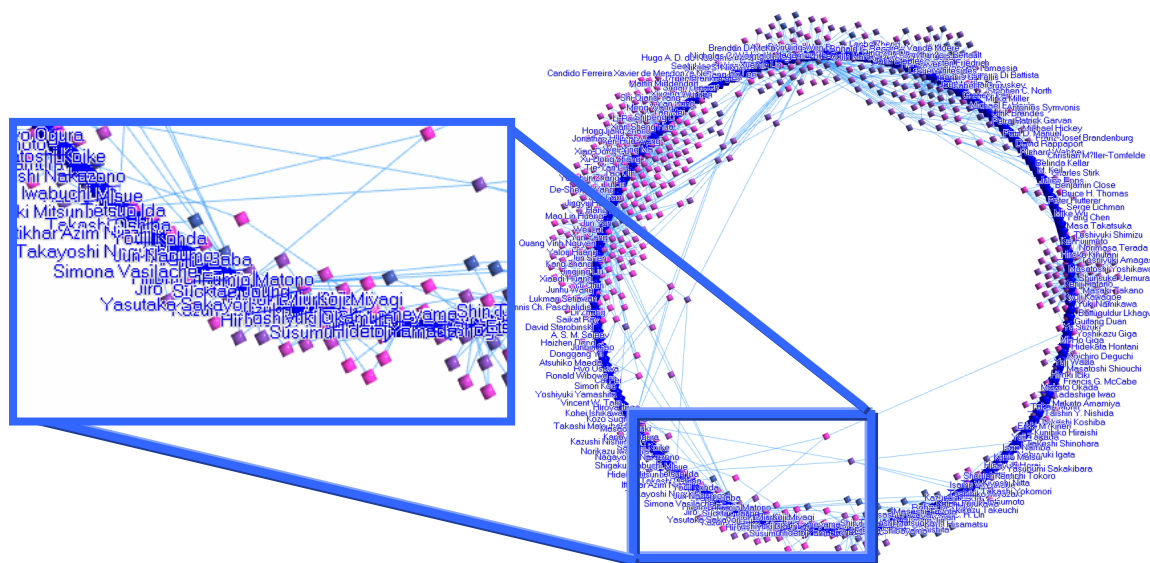
2D アンカーマップと同様にアクセスするページに偏りがあることが分かる。



(c) スフィアアンカーマップ(角度 2)

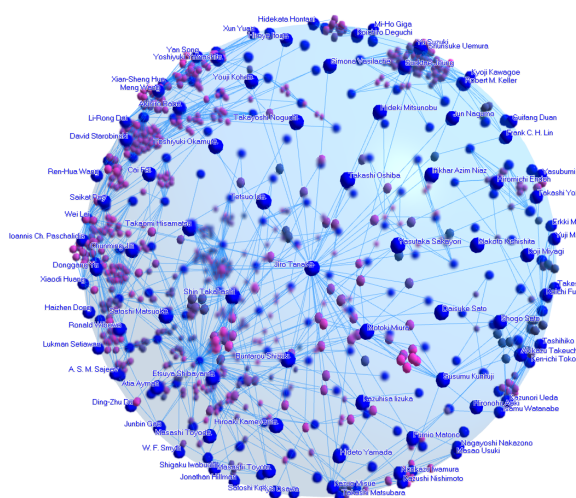
2D アンカーマップでは一つのクラスターに見えていたが、スフィアアンカーマップでは複数のクラスターで構成されていることが分かる

図 34 G8 の 2D と 3D との比較



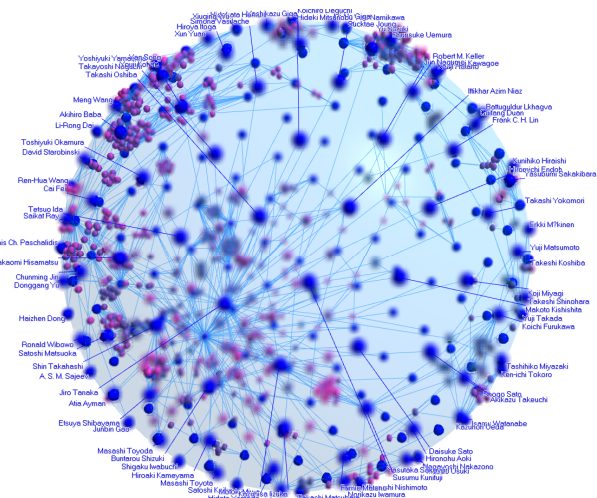
(a) 2D アンカーマップ

中心付近にフリーノードがほとんど無いことが分かるものの、円周辺の関係はほとんど分からない。また、ラベルも重なってしまう。



(b) スフィアアンカーマップ

2D アンカーマップでは混雑していたアンカー周辺の情報も読み取ることができる。また、領域が広いのでラベルを表示しても重ならない。

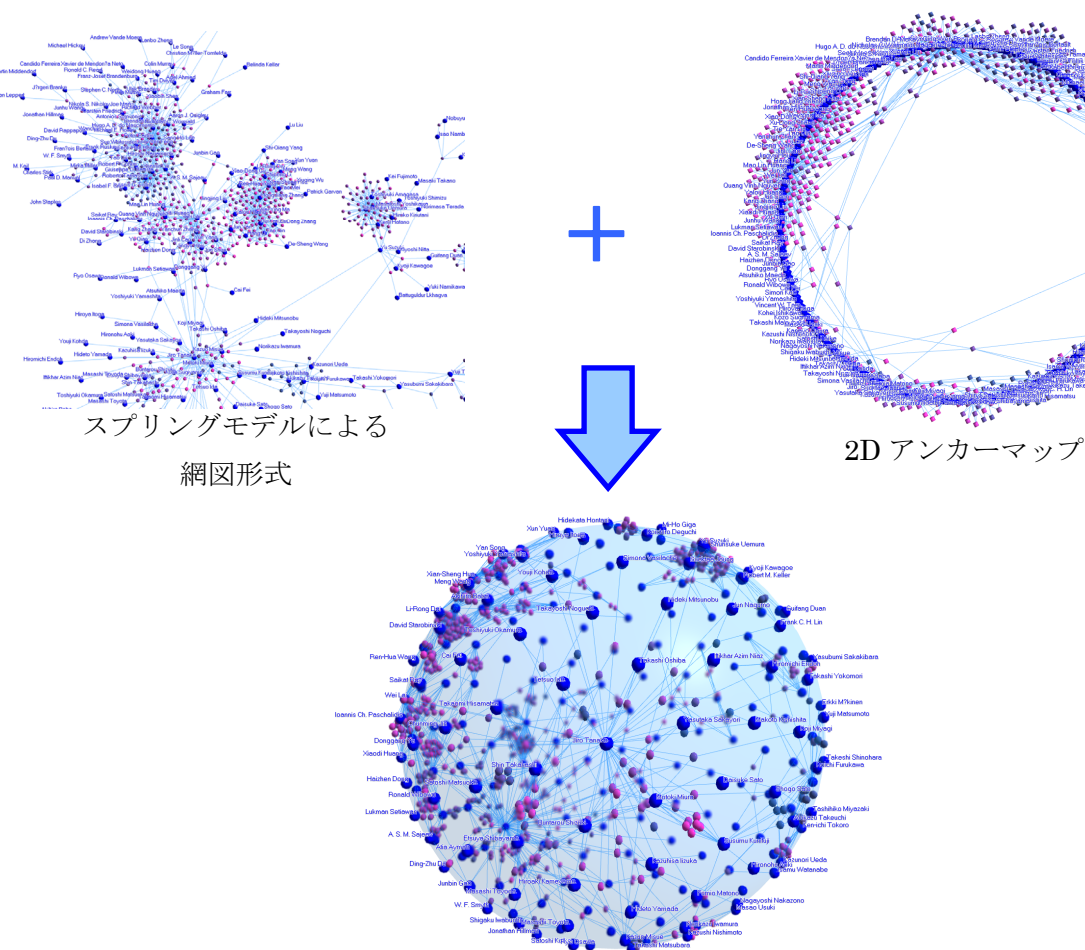


(c) スフィアアンカーマップ(焦点中央)

中心に焦点を合わせて閲覧することで、中心にノードがないことを確認できる。

図 35 G9の2Dと3Dとの比較

スフィアアンカーマップは、2D アンカーマップで見ることができるフリーノードクラスタの把握だけでなく、スプリングモデルによる 2D の網図で見ることができるようネットワーク構造の把握も行うことができると考えられる(図 36)。このように、スフィアアンカーマップは単にレイアウトスペースを増やしただけではなく、網図形式と 2D アンカーマップの両方の特徴を持った可視化手法である。



フリーノードのクラスタ把握だけでなく、
網図形式で表現されるようなネットワーク構造も把握できる

図 36 ネットワーク形式と 2D アンカーマップの特徴を合わせた表現

第7章 結論

本研究では、従来の 2D アンカーマップを 3D 空間へと拡張し、2 部グラフの一部のノード（アンカー）を球面上へとレイアウトし固定する可視化手法「スフィアアンカーマップ」を開発した。

スフィアアンカーマップのレイアウト方法として「力制御法」と「配置探索法」の 2 つのレイアウト方法を開発し、美的基準を評価基準とした評価を行った。評価の結果、アンカー数が少なく偏りの少ないグラフにおいては「配置探索法」が良い結果を示し、逆にアンカー数が多く偏りのあるような実際のグラフでは両方法とも同等か「力制御法」の方が良い結果を示すことがわかった。

スフィアアンカーマップの閲覧方法として「回転」「焦点・被写界深度調整」を行えるようにし、インタビューによる評価を行った。その結果、回転によって 3D 構造を把握できるようになること、被写界深度・焦点調節によって奥行き方向に輪切りしていくように閲覧できるようになることが分かり、3D 構造理解の支援につながっていることが分かった。また、ラベルの表示方法にも工夫を加え、グラフを閲覧する際に視界をさえぎらない Circular 表示を開発した。

スフィアアンカーマップでは、2D アンカーマップで問題であった大規模グラフ描画時のフリーノードクラスタの混合やアンカー周辺の視覚的混雑を抑えることができた。また、一般的な網図形式と 2D アンカーマップの両方の特徴を持った表現を行うことができた。

3D 化により十分なレイアウトスペースが確保でき、従来の 2D アンカーマップには無いような表現を行えることがわかった。今後は大規模 2 部グラフへの対応だけではなく、3D 化によって確保できる十分な描画スペースに別の情報を付加するような描画手法の開発を考えている。また、この研究を通して 3D 空間上にレイアウトしたグラフのラベル表示方法の重要性を感じた。今後はこの課題にも取り組んでいきたいと考えている。

謝辞

本論文を執筆するにあたり，指導教員である田中二郎先生，三末和男先生をはじめ，志築文太郎先生，高橋伸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ました．心より感謝致します．また，田中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意見のみならず研究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．また，研究に従事することを承諾していただき，日頃より私を支えてくださいました株式会社ニューフォレスターの皆様，助言を頂きましたソフトイーサ株式会社の皆様に心より感謝いたします．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致します．

参考文献

- [1] Peter Eades. A heuristic for graph drawing. *Congressus Numerantium*, Vol.42, pp. 149–160, 1984.
- [2] Kazuo Misue. Drawing Bipartite Graphs as Anchored Maps. In *Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Information Visualization (APVIS2006)*, pp. 169–177, 2006
- [3] Kazuo Misue. Anchored Maps: Visualization Techniques for Drawing Bipartite Graphs, 12th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2007), pp. 106–114, 2007.
- [4] Ulrich Fößmeier, Michael Kaufmann. Nice Drawings for Planar Bipartite Graphs. In *Proceedings of the 3th Italian Conference on Algorithms and Complexity*, pp. 122–134, 1997.
- [5] Lanbo Zheng, Le Song, Peter Eades. Crossing Minimisation Problems of Drawing Bipartite Graphs in Two Clusters. In *Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Information Visualization (APVIS 2005)*, pp. 33–38, 2005.
- [6] Mathhew Newton, Ondrej Sykora, Imrich Vrto. Two New Heuristics for Two-Sided Bipartite Graph Drawing. In *Proceedings of Symposium on Graph Drawing (GD 2002)*, LNCS 2528, pp. 312–319, 2002.
- [7] Emilio Di Giacomo, Luca Grilli, Giuseppe Liotta. Drawing Bipartite Graphs on Two Curves. In *Proceedings of Symposium on Graph Drawing (GD 2006)*, LNCS 4372, pp. 380–385, 2007.
- [8] G. G. Robertson, J. D. Mackinlay, S. K. Card. Cone Trees: Animated 3D visualizations of hierarchical information. In *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'91)*, pp. 189–194, 1991.
- [9] Tamara Munzner. H3: Laying out large directed graphs in 3d hyperbolic space. In *Proceedings of the 1997 IEEE Symposium on Information Visualization*, pp. 2–10, 1997.
- [10] Seok-Hee Hong, Nikola S. Nikolov. Layered drawings of directed graphs in three dimensions. In *Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Information Visualization (APVIS 2005)*, pp.69 – 74, 2005.
- [11] Tim Dwyer, Seok-Hee Hong, Dirk Koschützki, Falk Schreiber, Kai Xu. Visual Analysis of Network Centralities. In *Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Information Visualization (APVIS2006)*, pp.189 – 197, 2006.

- [12] Gaertler Marco, Wagner Dorothea A Hybrid Model for Drawing Dynamic and Evolving Graphs. In Proceedings of Symposium on Graph Drawing (GD 2005), LNCS 3843, pp.189-200, 2006.
- [13] Joshua Ho, Seok-Hee Hong. Drawing Clustered Graphs in Three Dimensions. In Proceedings of Symposium on Graph Drawing (GD 2005), LNCS 3843, pp. 492-502, 2006.
- [14] Adel Ahmed , Peter Eades. Automatic Camera Path Generation for Graph Navigation in 3D. In Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Information Visualization (APVIS 2005), pp. 27 – 32, 2005.
- [15] Adel Ahmed , Hong Seok-Hee. Navigation Techniques for 2.5D Graph Layout. In Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Information Visualization (APVIS2007). pp. 81-84, 2007
- [16] 佐藤修治,三末和男,田中二郎 大規模 2 部グラフの可読性向上のためのクラスタ構造の動的描画, 第 15 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2007), pp.19-24, 2007.
- [17] C. Ware, G. Franck. Evaluating Stereo and Motion Cues for Visualizing Information Nets in Three Dimensions. In ACM Transactions on Graphics, pp. 121–140, 1996
- [18] Guennadi Riguer, Natalya Tatarchuk, John Isidoro. Real-Time Depth of Field Simulation. ShaderX2: Shader Programming Tips and Tricks with DirectX 9.0. pp.529–556, 2003.
- [19] E. B. Saff , A. B. J. Kuijlaars. Distributing many points on the sphere. Mathematical Intelligencer 19,1, pp. 5–11, 1997.

ⁱ <http://graphml.graphdrawing.org/>

ⁱⁱ <http://www.iplab.cs.tsukuba.ac.jp/~misue/open/dblp2/>

ⁱⁱⁱ <http://httpd.apache.org/>

^{iv} <http://www.clks.jp/>