

「納豆ビュー」の対話的な情報視覚化における位置づけ

塩澤 秀和[†] 西山 晴彦[†] 松下 温[†]

「納豆ビュー」は、WWW空間を3次元グラフィックスを用いて視覚化し、「持ち上げ（つまみ上げ）」という対話的な操作によって情報どうしの関連性を多面的に俯瞰できるようにする。ページ（ノード）とリンクは、それぞれ球とそれを結ぶ線で表現され、まず3次元空間内のほぼ平面上に配置される。ユーザは錯綜するリンクの中から注目したいノードを任意に選択し、マウスによってそれを持ち上げることができる。すると、関連する一連のノードがつかれて持ち上がるので、複雑なグラフ構造を好みに応じて解きほぐして調べることができる。納豆ビューは、単なる視覚化を超え、ユーザの興味に応じた対話的な操作が可能であり、レイアウト非依存なので巨大な分散情報空間の逐次的なアクセスにも適する。本論文では、この納豆ビューを紹介し、さらにその有効性を考察するために情報視覚化技術を、関心度、操作体系の一貫性、操作方向への意味づけの3つの相互関係という観点から考察し、その中での納豆ビューの位置づけを試みる。

The Natto View: An Architecture for Interactive Information Visualization

HIDEKAZU SHIOZAWA,[†] HARUHIKO NISHIYAMA[†]
and YUTAKA MATSUSHITA[†]

The Natto View visualizes the WWW space by 3-dimensional graphics, and its interactive "lift-up" operation enables users to view connections and context of information from various interests. Each node, or the Web page, and hyperlink represents respectively ball and wire connecting them, and at first they are placed roughly on a plane in 3-dimensional space. The user can select and focus arbitrary node and lift it up with a mouse. Then the nodes to which the focused node links are lifted up together, thus the complex network is disentangled by the user's interest. The Natto View supports not only visualization but also interactive operations on user's demand, and it is suitable for incremental access to huge distributed information networks because of its independence from the layout of its nodes. In this paper, we describe the Natto View and its evaluation by a classification of information visualizations according to the relationship among degree of interest, consistency of operations and directional semantics of operations.

1. はじめに

WWW (World Wide Web) は、世界規模のハイパメディアネットワークである。関連する情報どうしがハイパリンクによって結合され、巨大な情報空間を形づくっている。ユーザは情報の記述されたページからページへとそこに埋め込まれたリンクをたどっていくことで、自由に情報をブラウズ（閲覧）し、検索することができる。しかしその一方で、WWWはハイパテキストの持つ問題を改めて浮き彫りにした。広大な情報空間の中で、ユーザは情報どうしの関連性がつかめなくなり、欲しい情報がどこにあるのか、自分

がどこにいるのか、更新すべき情報はどこにあったのか、往々にして分からなくなってしまう。特に近年、WWWによる情報提供が一般的になり、管理者がコンテンツの全体像を把握をする手段が求められている。サーチエンジン等のキーワードサーチサービスによって、情報を検索する方法もある。しかし、それによって目的の「ゾーン」に到着した後に、その周辺の文書の関連性を調べながら、もれなく調査したいことも多い。たとえば、製品名のサーチによって到着したページの周囲にある、その取扱説明を読むときなどである。このように、自分の周囲の領域の情報の関連性をつかむための有効な手段として研究されている方法に、ハイパテキスト空間を分かりやすく図示し、情報の関連性の視覚的な理解を促すというものがある。オーバビューダイアグラムなどと呼ばれるこの手法に

[†] 慶應義塾大学理工学部

Faculty of Science and Technology, Keio University

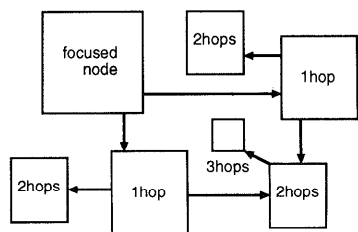


図1 Layout-independent fisheye view のアルゴリズム

Fig.1 The algorithm of LIFVs.

は、錯綜するリンクのために、図が複雑になりすぎるといった問題があったが、近年の情報視覚化に関する研究の発展によって状況は変わりつつある。

情報視覚化あるいは可視化と呼ばれる分野では、大規模な情報空間を分かりやすく表示するための方法が数多く提案されている。その特徴は、Furnas¹⁾によってその概念が明確化された魚眼レンズモデルのように、大域的概略と局所的詳細を同時に表示する (focus+context 技術) というところにある。1つの例である Graphical Fisheye View²⁾ (以下、GFV) では、ユーザの注目している画面領域を拡大し、非常に詳細に表示する。同時にその周囲については遠ざかるにつれてだんだんと拡大率を小さくしていくことで概略的な情報が得られるように配慮する。平面上の拡大率を利用した同様な手法には、Document Lens³⁾、Hyperbolic Tree⁴⁾などがある。Layout-independent Fisheye View⁵⁾ (以下、LIFV) では、空間的近さに関係なく拡大率がリンクを伝搬していく (図1)。D-ABUCTOR⁶⁾では多視点魚眼モデルが利用されている。

また、3次元コンピュータグラフィックスを用いると、遠近法や透視法によって同様の拡大効果を実現できる。さらにグラフ描画における辺交差の軽減や、2次元では不可能な3つの量の同時比較も可能になる。3次元を用いてグラフ構造を表示したものとしては、意味ネットワークを視覚化するための SemNet⁷⁾が草分けであり、透視法に着目したものとしては、Perspective Wall⁸⁾や FSN⁹⁾がある。プロセスモニタのように時間に沿った情報量を扱う場合には、新しく加わった座標軸にこれを割り当てる例が多い。

当然、このような方法を用いて WWW 空間を視覚化しようとする試みもさかんにになっている¹⁰⁾が、それらの方法は既存の視覚化技術を単に WWW に適応したものがほとんどである。本論文で、我々はハイパテキストの視覚化に必要な事項を検討することによって、WWW 空間を3次元CGを用いて視覚化する新しい手法「納豆ビュー」を提案する。納豆ビューでは、ハイパテキストのリンク構造を納豆の豆と糸に見立てた

うえで、対話的な直接操作の体系を実現する。

さらに、我々はこの納豆ビューの有効性を考察する過程で、各種の情報視覚化手法を比較検討し、対話的な環境における操作体系の一貫性、方向への意味づけ、操作における方向の役割といった点からの新しいアプローチを試み、情報視覚化における納豆ビューの位置づけを明らかにする。

2. WWW 視覚化の問題点と必要な条件

まず、WWW 空間を視覚化するうえでの既存の情報視覚化手法の問題点を考察し、どのような条件が必要であるかを述べる。

2.1 WWW 構造を視覚化するうえでの問題点

WWW 構造を視覚化するうえでの問題点は、以下の4観点からの問題に整理できると考えられる。

従来からの情報視覚化の問題点 従来の視覚化技術は、表示に主眼がおかれており、データオブジェクトに対する対話的な操作についての研究は少ない。

インタフェースの操作性の問題点 特に3次元視覚化では、操作体系に対する制約によって、一貫した意味づけを与えて、ユーザの操作をうまく誘導するという視点が欠けている。

ハイパテキストらしさの問題点 実用化されているマップは、履歴表示 (線形パス) か木構造に基づいた表示のものであるが、これらはハイパテキスト本来の非線形性を尊重していない。

動的な構造の視覚化としての問題点 WWW は広大で構造が動的に変化する。よって、人間の認知およびマップ構築の技術的問題より、レイアウトは、逐次添加的で一貫性が確保されていなければならない。

これらについて、1つ1つ詳しく述べていく。

2.2 データオブジェクトに対する対話的な操作

情報視覚化では、対話性ということが非常に重視される。対話的な操作によって、ユーザは自分の好みの視点から情報にアクセスし、その関係を詳しく調べることができる。しかし、特に3次元視覚化の分野ではユーザの行える操作はそれほど多くなかった。表示された情報空間の中で移動したり、情報の一部を拡大表示させるだけで、データそのものを動かしたり変化させてその関連性を解析するといった、十分な操作はできなかった。

情報視覚化とは呼ばれていないが、2次元の世界ではこのような対話的な操作はかなり一般的である。KJ法やD-ABUCTOR、Info-Plaza¹¹⁾では、平面上のデータオブジェクトを自由に並べかえて、情報を自分なりに整理してとらえなおすことができる。GUIのインタ

フェースビルダでも、マウスによる自由な部品配置が行える。ハイパテキストの視覚化でも、DocSpace¹²⁾のようにノードを動かすような操作のできるシステムが提案されている。

3次元視覚化では、Cone Tree¹³⁾が、このオブジェクトへの操作性をある程度実現した例である。ユーザは望みの情報を円錐の回転操作によって近くに持ってくる事ができる。Chuahら¹⁴⁾は、GFVのような空間に対するものではなく、データオブジェクトに対する操作の重要性について言及し、対話的で試行錯誤的な操作環境であるSDMを提案した。しかし、SDMも地理的に配置できるデータに対象が限られる。

2.3 操作体系に対する一貫した意味づけと制約

SemNet以来の従来の3次元情報視覚化は、ユーザが3次元空間の中で不用意に動きまわり、文字通り方向感覚を失って、本当にどちらを向いているのかが分からなくなってしまうという新たな問題を生んだ。これは、操作体系に統一された意味づけがないのが原因である。ユーザは位置と視線方向の均質な6自由度の区別がつかなくなり、混乱をきたす。これを防ぐためには操作体系にはなんらかの統一的な意味づけを与える、自然で適切な制約を与える必要がある。

操作体系に意味を与えるものとは、いったい何か。Perspective WallやCone Treeなど人間にとって直観的に分かりやすいと思われる視覚化手法では、縦横などの操作方向に対する意味づけが明確である。対話型ではないが2次元のグラフでも、横軸は変化する量、縦軸はさせられる量という明確な意味づけがある。それに対して、SemNetやHyperbolic Treeは、多くの情報を表示することはできるが、上下左右などの方向に対する対称性が高く、個々の方向の個性が乏しいため、ユーザの方向感覚の混乱を招きやすい。我々は、この「方向に対する意味づけ」という点に着目し、視覚化ではこれが非常に重要な概念であると考えた。

2.4 ハイパテキストの非線形性を尊重した表示

ハイパテキストを図示する手法として一般的なのは、それを何らかの方法で階層化するというものである。情報視覚化に関連するものとしては、木構造の枝わかれ式の表示が一般的であり、変わったものとしては、Tree Map¹⁵⁾やHyperbolic Treeを用いた方法がある。階層表示は応用範囲が広いために研究例も多い。

しかし、ハイパテキストの最大の利点と存在価値は普通の文章にない非線形性、非階層性にある。コンピュータによって自動的に計算された階層は、時に不自然であり、様々なユーザに適したものであるともいえない。また、ハイパテキストにおいてよく生ずる循

環的なリンクを表現することもできない。たとえば、Tree Mapによる階層表示では情報どうしのリンクは表示できないため、ハイパテキストとしての重要な特性が欠けてしまっている。表示はこの点を考慮して、ノードとリンクによるグラフ構造によるものとするべきである。さらに、ユーザが必要に応じて自分の好みの階層ビューを構築できることが望ましい。

2.5 逐次添加的な構築と一貫性の確保

階層化と並んで数多く研究されているのが、グラフ描画における最適レイアウトを求めるものである。しかし、一般グラフのレイアウトはきわめて難しい問題である。Battistaら¹⁶⁾は、各種の描画アルゴリズムについての文献のリストをまとめており、現在最も一般的な手法では、グラフの辺をばねに見立てて力学的なシミュレーションを行い、系のエネルギーを最小にする配置を求める。

このような、レイアウト最適化に依存した表示方法の場合、配置に関わるすべてのノードのリンク情報を得ることが必要である。しかし、WWWのような世界的に分散されたハイパテキストの場合、これは現実的でない。よって、ユーザはいくつかの新しいノードにアクセスするたびに、配置の最適化計算の結果を待たなければならない。DocSpaceでは、実際にこの計算時間が大きな問題となっている。これを回避するためには、逐次添加的なマップの構築が必要である。

さらに、レイアウトによる方法では、配置計算のたびにノード位置が大きく移動する可能性がある。そのため、異なるユーザや同じユーザであっても異なる時間でのアクセスではデータ位置の一貫性と連続性が保てない。これでは、個人にとって不都合だけでなく、ユーザの間でアクセス情報を交換する際の支障となり、協調検索¹⁷⁾などの新しい応用分野に適さない。一貫性と連続性を確保するためには、ユーザのアクセス順や乱数に依存しない方法を用いる必要がある。

3. 納豆ビュー

以上のような要件を満たす新たな視覚化の手法として我々が提案するのが「納豆ビュー」(図3)である。

3.1 ノードとリンク

納豆ビューは、個々のHTMLページであるノードとそれを結ぶリンクを、それぞれ球と線分で表示する。ノードの表示には、黄色、薄茶色、オレンジ色の3色を用い、それぞれ、「まだ訪問していない」、「訪問(注目)したことがある」、「現在注目している」という意味である。球の半径は、そのノードに入入りするリンクの総数の対数によって決まり、リンクが多いノード

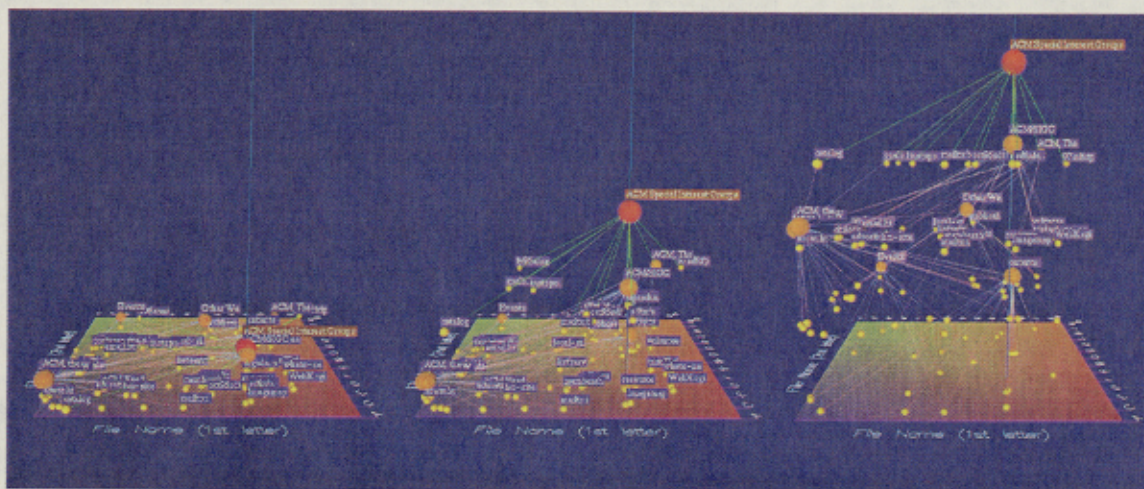


図2 「持ち上げ」操作：複雑なネットワークを解きほぐす

Fig. 2 "Lift-up" operation: A complex network is disentangled.

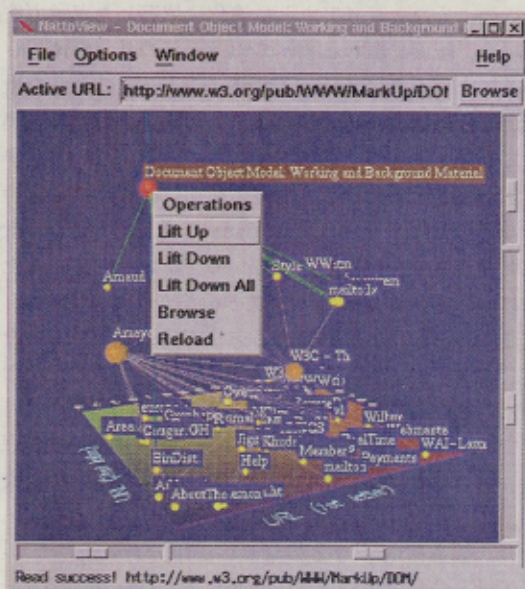


図3 納豆ビュー：メインウィンドウと操作メニュー

Fig. 3 The Natto View: Main window and operation menu.

ほど大きく表示する。プログラム開始時（持ち上げ操作前）には、ノードは初期平面（床面）上に配置される。 xy 座標値の計算方法については後述する。

リンクには半透明色を用いており、現在注目しているノードから出ているものは緑、それ以外のものは白である。半透明色はユーザにとって重要でないリンクが画面上に錯綜し、肝心の情報が隠れてしまう事態を防止する役割を担っている。また、半透明色は重なるとだんだんと濃くなるので、関連性が強く、結び付きが強いリンクほど濃く表示される。

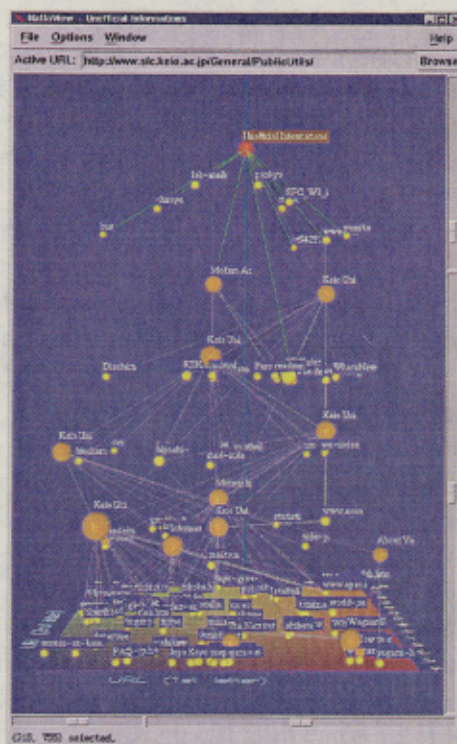


図4 多段階の持ち上げ操作：ユーザは注目量を制御できる

Fig. 4 Multi-level lift-up operations: Users can control quantity of interest.

3.2 関心の座標軸

納豆ビューでは、新しく加わった z 座標（上下方向）にユーザの関心度（DOI: Degree Of Interest）を表すという意味を与えた。つまり、そのノードがユーザにとって興味深いものであればあるほど、それを高い位置に置く。これを我々は「関心の座標軸」と呼ぶ

ている。我々は、このような方向への適切な意味づけとそれに即した操作体系によって、ユーザに理解しやすいモデルが提示できると考える。プログラム開始時には各ノードの高さはほぼ0である。「ほぼ」というのは、ナビゲーションに重要な目次やメニューを目立たせるために、そのノードに含まれるアンカーの数（そのノードから出るリンクの本数）の対数による若干の高さ（バイアス）を持たせているからである。

3.3 「持ち上げ」操作

納豆ビューの最も重要な特長は、この関心の座標軸に沿ってノードを持ち上げたり、下げたりする操作体系である。ユーザは、自分の注目したい任意のノードをマウスで選択して、それを「持ち上げる（つまみ上げる）」ことができる。すると持ち上げたノードのリンク先ノードが、納豆が糸を引くように後につられて持ち上がる。自分の注目したいノードを上上に持ち上げれば、そこから出ているリンクとともにリンク先のノードが次から次へと何段階もずらずと持ち上がっていき、ユーザが注目できるようにする。

実装では、3次元CGの速度的な問題から、持ち上げ操作は段階的（レベル1、レベル2...）に行うようになっている（マウスでドラッグするようにはできなかった）。ユーザが注目するノードを選択すると、図3に示したような操作メニューが開き、ここから「Lift up」を選択することによって、そのノードを1段階持ち上げることができる。ノードをレベル x に引き上げると、そこから直接リンクしたノードはレベル $x-1$ に、レベル $x-1$ に引き上げられたノードからリンクされたノードはレベル $x-2$ に引き上げられる。これをレベル0のノードまで繰り返し、バイアスを加えて表示するという方法をとっている。

この「持ち上げ」操作によって複雑に入り組んだ情報空間を対話的に解さばぐし、その周囲の関係を詳しく眺めることができる。図2は、この持ち上げ操作がいかにか有効であるかを実際の例で示したものである。ユーザは大局的な情報構造を俯瞰しながら、自分の関心のある情報を中心とした、局所的な情報の関連性を動的に階層化して眺めることができる。

このとき、注目ノードを持ち上げる高さによって、その周辺をどの程度詳細に表示するか制御できる。注目ノードの周辺を詳しく知りたい場合には、それを高く持ち上げれば、注目ノードを中心としたノードどうしの関連性を、より遠くのノードまで調べることができる（図4）。これは、魚眼レンズビューにおける拡大率の制御と同様な機能であるといえる。

3.4 ノード位置の一貫性

納豆ビューでは、ノードの xy 座標値の一貫性を保つために、その普遍的な識別子であるURLを用いている。これならば、同じURLのノードの位置は、つねに1つに定まる。実装では、まず x および y 座標をアルファベットと記号を表す27の目盛に区切り、 xy 平面を 27×27 のマス目に分割する。そして、ノードのURLの最後の意味のある語（多くの場合ファイル名）を抽出し、その最初の文字を x 座標、2番目の文字を y 座標として1つのマス目を選択する。次に、そのマス目の中を同じように 27×27 の小さいマス目に区切り、3文字目をその中の x 座標、4文字目を y 座標へ対応させ、以下再帰的に続けていく。

この方法のおかげで、アクセス空間が広がってもノードの再配置のための計算をしなくてよくなり、新しいノードは遅延なく逐次的にビューに加えられていく。このため、認知的に重要な情報のビューの一貫性と連続性を確保することができた。

確かに、このような配置アルゴリズムはリンク表示を錯綜させてしまうことは事実であるが、我々は、一貫性と連続性はそれにもまして重要なことであると判断した。また、納豆ビューは持ち上げ操作に代表されるオブジェクトそのものに対する対話的な操作を実現しているため、錯綜したリンクを解きほぐしたり、見やすい角度に回転することができる。よって、この問題は軽減されていると考えられる。

3.5 その他の機能

納豆ビューでは、その他いろいろな操作が行えるようになっている。ユーザはメニューを選択することによって、注目しているノードをNetscapeで閲覧することができる。拡大、回転、平行移動といった3次元操作も可能である。さらに、特定のノードにマークを付けておき、マークされたノードをマークの説明とともに緑色で表示することもできる。

納豆ビューの最初のバージョンは、SunのSparc-StationのX-Window Systemの上に実装された。3次元ライブラリとしては、Mesa（OpenGLライクなライブラリ）、GLUTを用い、データベースサーバのためにperlスクリプトを利用した。ただし、本稿の執筆時点では、納豆ビューは再インプリメントの最中にあり、これとは若干異なった環境で動作する。

ユーザがあるノードに注目すると、納豆ビューのクライアントはデータベースサーバにそのノードからのリンク情報を問い合わせる。データベースサーバはキャッシュを検索し、注目ノードに関するリンク情報がある場合には、それをクライアントに返す。ない場

合には、独自に WWW にアクセスしてキャッシュにそのリンク情報を格納した後、クライアントにリンク情報を応答する。クライアントはこのリンク情報から納豆ビューを構成する。

このように、ユーザが納豆ビュー上のまだアクセスしていないノードを選択していくにつれて、納豆ビュー上にそのノードからつながるノードが次々と現れ、ビューが構成されていく。なお、納豆ビューの実装などさらに詳しいことに関しては、文献 18) を参照していただきたい。

さらに、納豆ビューでは、従来の手法との比較のために、ばねモデルによるノード配置が実装されている。これは、通常のばねモデルに加えて、ノードが正の電荷を持ち、クーロン力によって反発する。ばね定数や(理想の)ばねの長さなどの定数は、すべてのばねで同一であり試行錯誤で決定した。エネルギー最小化には最急降下法を用いたが、対話性を高めるために、ある程度の局所最適解で満足することにした。

4. 納豆ビューの視覚化における位置づけ

納豆ビューの有効性について考察するため、その情報視覚化における位置づけについて考えたい。

4.1 対話的な操作の役割

情報視覚化は、広い意味での「図」であると考えられる。納豆ビューでは、表示されるデータオブジェクトとしてノードとリンクがあるが、これらは Beritin¹⁹⁾のいうところの「図素」である。図素とはプロット点のように図上に置くデータ単位であり、この図素それぞれに「視覚変数」による情報を与えたものの集合が図である。視覚変数には、(1) 位置、(2) 大きさ、(3) 濃淡、(4) きめ、(5) 色、(6) 向き、(7) 形、がある。納豆ビューでは、ノードに位置、大きさ、色を、リンクに濃淡、色をそれぞれ用いている。

対話的な情報視覚化では、ユーザが「操作」によって、図素の視覚変数を変化させることができる。よく用いられるのは、図 5 と以下に示す方向をとった操作であり、濃淡や色の変更も一般的である。

移動/視点移動 図素の位置変数に関する操作。「上下」、「左右」、「遠近」方向の移動がある。納豆ビューでは上下にノードを移動できる。視点移動は、図全体というレベルでの位置変数に関する操作である。

拡大/包含 図素の大きさ変数に関する操作。「内外」の方向性。拡大は個々の図素への操作、包含はそれによる同位置の複数の図素の関係である。

回転 図素の向き変数に関する操作。それほど用いられない。図素およびその集合に対するものがある。

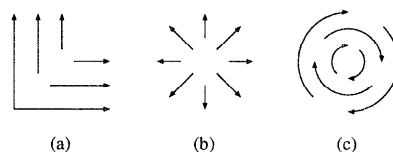


図 5 方向性のある操作: (a) 移動, (b) 拡大/包含, (c) 回転
Fig. 5 Directional operations: (a) motion, (b) magnification/inclusion, (c) rotation.

操作の目的は、ユーザに過不足のない情報を提示するための表示情報量の制御である。静的な図(グラフやチャート)でも、作者の意図で配置を変えたり、表示をゆがめたりすることはよくある。たとえば、地図の形を保ったまま各国の大きさを数値に応じて変化させることがある。操作によって、こういったことがユーザが自分の好みに応じてできるようになる。

納豆ビューの基本操作は、ノードの位置を変化させる上下方向への持ち上げ(移動)である。

4.2 操作と DOI (関心度)

小池²⁰⁾は、表示情報量の制御方法を、データベースの支援を受けて意味関係を解析する「セマンティックアプローチ」と、ノードの連結関係などのデータ構造に基づく「シンタクティックアプローチ」に分類している。2つのアプローチの違いは、変形のための関心度(DOI: Degree Of Interest)あるいはそれに類する値の計算方法である。情報視覚化における、変形は DOI に基づいて行われる。

さらに、基本的な図の外観が構成された後、その表示情報量を制御する操作方法には、大きく分けて以下の2つが考えられる。

空間指向 座標値による図的な近接度によるもの。GFV, FSN など。データの位置関係が反映されるので視覚的に分かりやすいが、空間的な情報選択しきかでないので分析に限界がある。

データ指向 座標値ではなくデータの関連性によるもの。LIFV, Fractal View²¹⁾など。納豆ビューでもリンクのホップ数を用いてこれを実現している。操作体系は、データオブジェクトに対するものとなり、情報の分析に適する。ただし表示位置と直接関係ないので、分かりやすく表示することが難しい。

4.3 操作方法への意味づけ

出原ら²²⁾によれば、図の意味作用は、人間が視覚変数を社会的な慣習である「規約の意味」に従って解釈することで行われる。代表的なものには配置関係があり、人間は図素の位置から上下、近接、包含などの規約の意味を読み取る。

よって、尺度を表すためには、それを適切な規約的

表1 納豆ビューとLIFVおよびGFVの比較

Table 1 Comparisons of the Natto View with LIFV and GFV.

	Natto View	LIFV	GFV
データ構造	グラフ	入れ子グラフ	グラフ
レイアウト依存性	非依存	非依存	依存
表示次元	3次元	2次元	2次元
操作方法	持ち上げ	拡大	拡大
操作対象	データ	空間	空間
DOIの表現	高さ	大きさ	大きさ
DOIの方向	上下	なし	内外

意味を持つ視覚変数を割り当てる必要がある。たとえば、石油の埋蔵量を色で表すのは難しいが、大きさで表すのは容易であるし分かりやすい。これが、図に対する現実の「意味づけ」である。

DOIは大小比較のできる尺度なので、順序の表現できる視覚変数を割り当てる必要がある。文献19)および22)によれば、これが可能なのは位置、大きさ、濃淡である。位置と大きさは、距離および拡大率という形で量(比率)も表現できるので、それぞれの操作である移動/視点移動と拡大/包含ではDOIを定量的に反映できる。なお、操作の中で回転があまり用いられないのは、向きが順序を表せないからであろう。

多くの情報視覚化ではDOIの表現に拡大率を利用しているが、納豆ビューでは位置であるz座標を利用している。拡大率に相当するのは、注目ノードを持ち上げる高さになる。

4.4 納豆ビューと他の手法の比較

納豆ビューはデータ指向であり、ハイパテキストに欠かせないリンク関係を視覚的に確認できる。操作体系もそれに基づいており、空間的に拡大するのではなく、注目データを持ち上げると周囲のデータがついてくる。このため、レイアウト最適化など空間指向の方法や、キーワードベクトルによるクラスタリングなどでは困難な、逐次的な構築も可能である。このような長所は、従来の3次元視覚化にはない。

しかし、以上の長所は2次元視覚化であるLIFVにもある。そこで、納豆ビューをLIFVおよびGFVと比較したのが表1である。LIFVの大きな長所は、全情報を平面的に一覧できることである。しかし、LIFVはGFVと異なりDOIが図的な配置関係と連動しないので、リンクによる関係の深さまでは直観的に表現できない。

これに対して、納豆ビューでは、ノードどうしの関連性は、持ち上げ操作によって、上下方向の空間的接近度にもただちに反映される。関連性が近いものを、空間的にも近くに表示することができる。また、持ち

表2 納豆ビューと3次元視覚化の比較

Table 2 Comparisons of the Natto View with other 3D visualizations.

	Natto View	SemNet	Cone Tree	Perspec. Wall
データ構造	グラフ	グラフ	木	表
操作方法	持ち上げ	視点移動	回転	移動
操作対象	データ	空間	データ	空間
操作の制約	上下	なし	回転	左右
DOIの表現	高さ	遠近法	遠近法	遠近法

上げたノードは錯綜するリンクの中から浮き上がり、その周辺の関連性を視覚的に容易に理解できる。これらはLIFVにはない大きな長所である。

また、一般に3次元表示の方が2次元表示よりも多くのノードを表示できることも納豆ビューの長所である。以上より、納豆ビューは特にWWWのような大きなグラフ構造において、LIFVよりも優れた視覚化であると考えられる。

表2では各種の3次元視覚化を納豆ビューと比較した。Cone TreeやPerspective Wallが、意味づけと制約のためにデータ構造を限定しているのに対し、納豆ビューはグラフ構造の視覚化でありながら、z軸に関心の座標軸という意味づけを与え、ノードの移動方向を持ち上げという自然な形で制約している。これは、SemNetのような一般のグラフ表示にはなかった大きな長所である。従来、特定方向への意味づけがあるのは空間指向の視覚化ばかりであった。

3次元視覚化では、注目を支援するために遠近法を用いるのが一般的である。しかし、2次元表示の拡大率とは異なり、遠近法では情報の表示量を自由に制御することが難しい。なぜなら、情報に近寄ると、表示される情報空間の範囲も狭くなるからである。納豆ビューでは、DOIを反映させるのに高さという位置変数を用いているので、ノードを持ち上げる高さを調節すれば、その周囲をどのくらい詳しく見るかを、ある程度定量的に制御できる。これは他の3次元視覚化にはない長所といえる。

以上より、木や表などに関しては、すでに優れた3次元視覚化があるが、一般のグラフ構造に関しては、納豆ビューは新規性のある優れた方法であるといえる。特に納豆ビューは、WWWのようなネットワーク上の大規模なハイパテキストの視覚化に必要な条件を十分に備えていると思われる。

5. アンケートによる評価

これまでに述べたような納豆ビューの効果が、実際に実現されているか評価するため、実験とそれによる

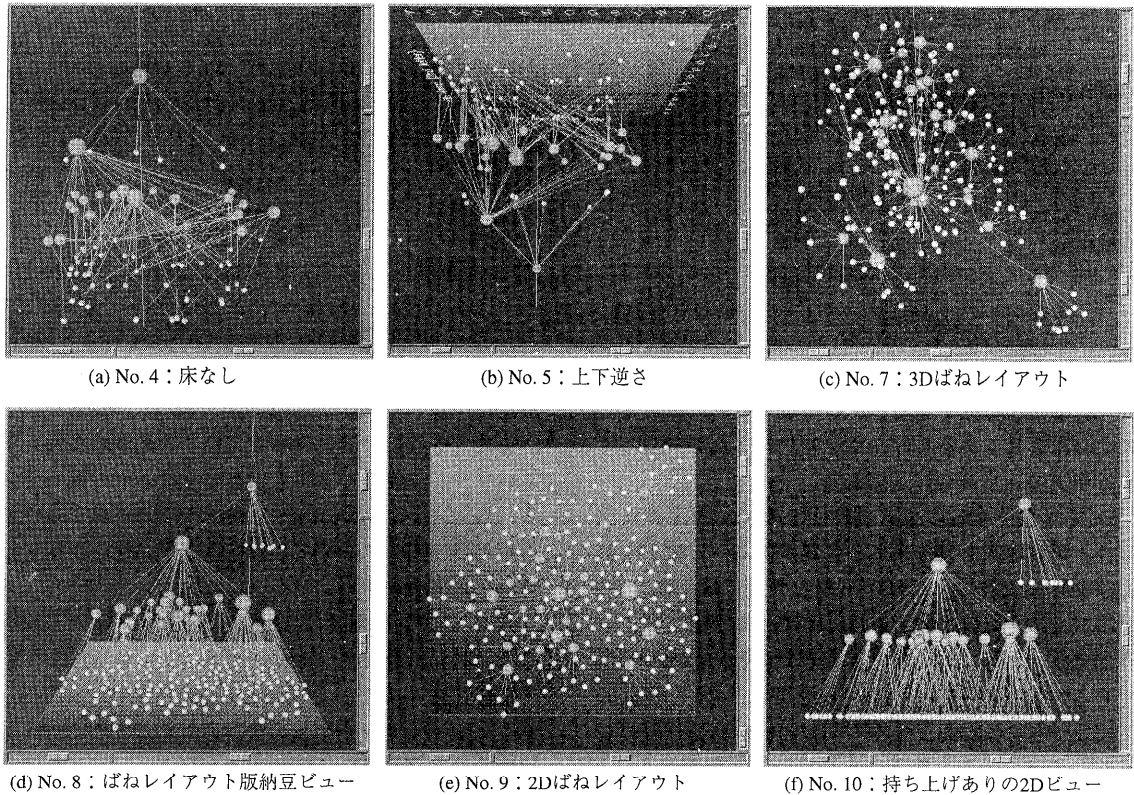


図6 アンケート A 中の代表的な表示方法

Fig. 6 Some visualizations out of the questionnaire A.

アンケートを行った。

5.1 評価実験と結果

5.1.1 アンケート A

まず、納豆ビューのオプションを選択することによって、以下の 10 通りの表示方法を試用してもらった。実験に非常に手間がかかることもあり、被験者は 20 人であり、全員納豆ビューをすでに知っている。

- (1) xy 座標を URL によってレイアウトしたもの (納豆ビュー)。
- (2) ノード持ち上げを 1 段階までに制限したもの。
- (3) ノード持ち上げを 3 段階までに制限したもの。
- (4) 床面を表示しないもの (図 6(a))。
- (5) 上下を逆さにしたもの。持ち上げは「持ち下げ」になる (図 6(b))。
- (6) リンク表示を半透明にしないもの。
- (7) 従来型 3D グラフ表示。床面は非表示で、3D ばねモデルによるレイアウト。持ち上げ操作はできない (図 6(c))。
- (8) xy 座標をばねモデルを用いてレイアウトしたもの。3D 表示で持ち上げ操作は可能 (図 6(d))。
- (9) 従来型の 2D 表示。真上から見た 2D 表示で、

ばねモデルによるレイアウト (図 6(e))。

- (10) 真横から見た、持ち上げ操作のできる 2D 表示。

ばねモデルによるレイアウト (図 6(f))。

そして、図 7 の A1 から A12 までの 12 個の質問について、すべての表示方法を 3 段階に評価してもらった。基準は、○は「合致する」、△は「どちらでもない」、×は「逆効果である」である。そして、さらにその各段階の中で、評価に大きな違いがあると思った場合には、好ましいシステムから順に順位づけをしてもらった。解答は、たとえば「○ (1 > 2 > 3 = 4) △ (5 = 6 > 7) × (8 > 9 > 10)」のようになる。

結果のグラフの見方を説明すると、横軸が平均順位、縦軸が 3 段階評価の平均値、である。つまり、横軸は、任意の 2 つ以上のシステムを比較してどちらが使いやすいかを見るためのものであり、縦軸からは、任意の 1 つのシステムの絶対評価が分かる。

5.1.2 アンケート B

次に、納豆ビューに関して図 8 の B1 から B10 の質問に、7 段階評価で答えてもらった。基準は、

- +3: 非常に、有効である。
- +2: 実用的に十分に、有効である。

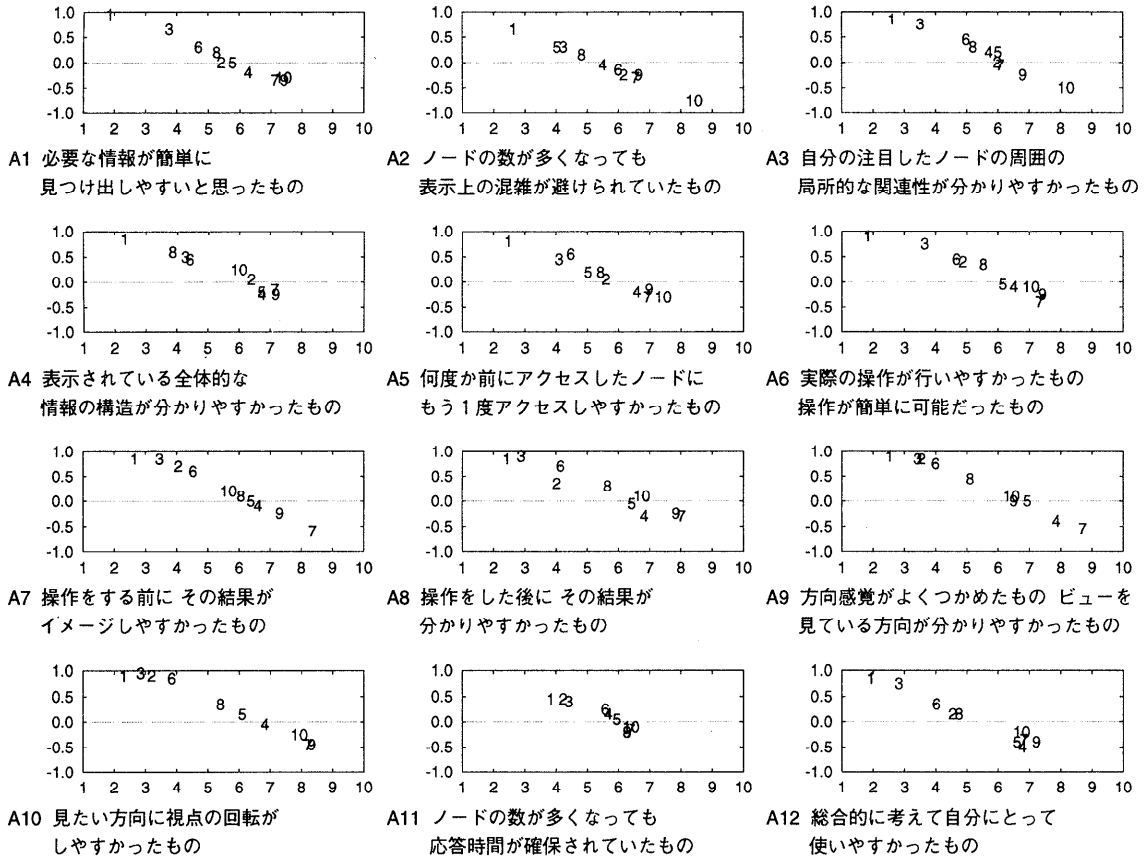


図7 アンケート A の質問と結果：横軸は順位評価の平均、縦軸は点数評価の平均
 Fig. 7 Questions and results of the questionnaire A: the horizontal axes for averages of relative orders, the vertical axes for averages of points.

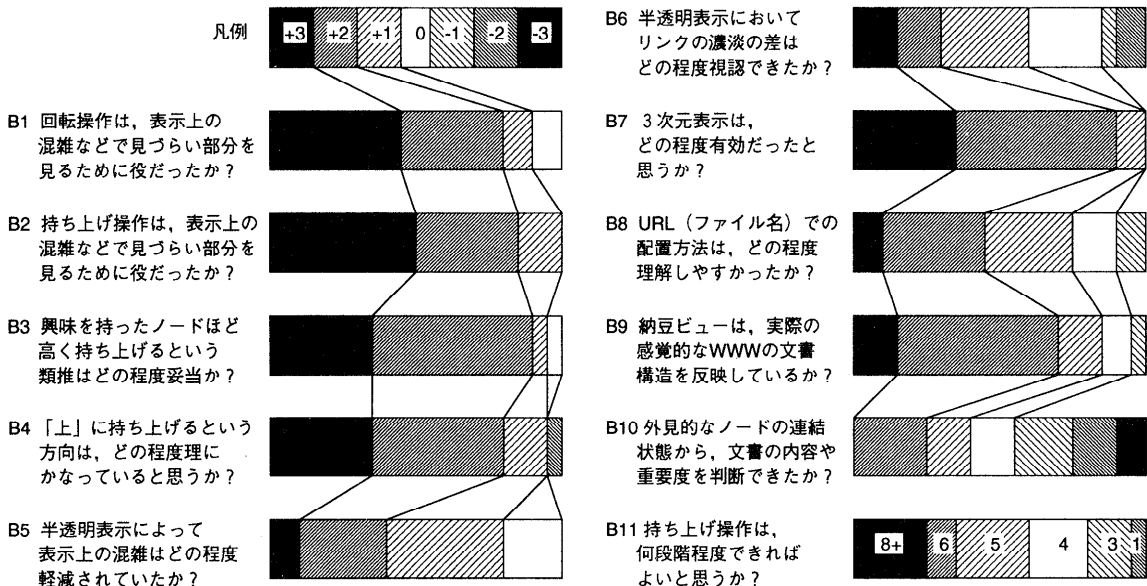


図8 アンケート B の質問と結果
 Fig. 8 Questions and results of the questionnaire B.

- +1: どちらかといえば, 有効である.
- 0: どちらともいえない.
- -1: どちらかといえば, 有効でない.
- -2: 実用的に使うには, 有効でない.
- -3: 非常に, 有効でない.

である. また, 質問 B11 は, 具体的な数値で答えてもらった.

結果は, 各点数の人数比を帯グラフによって表した.

5.2 実験結果の考察

アンケート A では, 納豆ビュー (1) の結果が飛び抜けてよいが, これは全員が納豆ビューを知っていることも大きい. よってここでは, なるべくそれ以外の表示方法を比較するようにしたい.

3次元表示の有効性 質問 B7 では 20 人全員が有効性を認めており, +3 と +2 の採点をした人数を合わせると 75% になる. これは, 質問 B1 と B2 の結果から分かるように, 回転および持ち上げ操作が有効に機能しているからである. さらに, 質問 A12 の総合評価では, 9 よりも 10 の方が使いやすいと答えた人数が多く, 10 と 8 を比べた場合には, 質問 A2, A3 から分かるようにノードの重なりが少ない 8 の方が評価が高い. その結果, 9 よりも 8 の評価が高い. このことから, 持ち上げ操作という第 3 の次元にふさわしい操作を導入し 3 次元を有効に活用すれば, 3 次元表示は非常に有効であるといえる. その反面 7 の従来の 3 次元表示は, 回転などの操作のイメージがつかみにくいので (質問 A6, A7, A8), 非常に使いにくく, 情報の構造も分かりにくい (質問 A4).

対話的な操作の重要性 質問 A12 の総合評価では, 9 と 10 の 2 つの 2 次元表示を比べた場合に 10 の方が使いやすくと答えた人数が 10 人, 9 の方が使いやすくと答えた人数が 7 人で, わずかであるが 10 の方が多かった. 質問 A2, A3 など, 視認性では 10 は 9 よりきわめて悪い評価であるのに, このような結果になるのは, 対話的な操作によってノードを解きほぐせることが, システムが適当な配置をする以上に必要であることを示している. アンケート A の多くの質問では, 1, 2, 3 を比べた場合に, どの質問でも使いやすさは 1, 3, 2 の順になっている. また, 操作のできない 7 と 9 はどの質問でも, 3 段階評価の平均が 0 を超えていない. 特に, 従来の 3 次元視覚化である 7 の評価はきわめて低い. これらのことから対話的操作の重要性が分かる. 質問 B1, B2 では, 納豆ビューにおいて対話的操作が, 有効であることが示された.

空間方向に対する意味づけ 操作方法に関する質問 A1, A5, A6, A7, A10, A12 を見ると, 上下を逆に

した 5 は機能的には 1 と変わらないにもかかわらず, 評価は非常に (2, 3, 8 よりも) 低い. また, 床をなくした 4 も非常に違和感があるという意見であり, 機能的には変わりがないのに評価が低い. この 4 と 5 の方法は, 方向感覚が通常の人間の感覚と異なるので, 操作イメージをつかみにくいことが分かる. 以上と質問 B4 と合わせて, 「上」に持ち上げるという方向性が有効であったと考えられる.

ハイパテキスト構造の表示 質問 A4 では, 8 および 10 の得点が高く, 情報の構造を把握するためには 2 次元表示が有効であるという結果になった. しかし, 十分な対話的操作のある 1, 3, 6 は, それらとほぼ同じかそれ以上の評価を受けており, 質問 12 の総合評価では逆転している. よって, 3 次元表示による構造把握のしにくさは, 対話的操作によってカバーできている. また, 質問 B9 では, 納豆ビューは WWW の構造をおおむね反映しているとの評価を得た. ただし, これらは, 非線形文書としてのハイパテキストの連結構造を把握できたということであって, 質問 B10 の結果からも分かるように文書の内容までは判断できるものではない. この事実は, 逆にいえば, 実際の WWW が文書の内容に関して適切なリンク構造を持っていないということを示している.

逐次添加的な構築と一貫性 質問 A5, A6, A7, A8 からばねモデルによる 7, 9 が, 表示空間の拡大をとまなうようなノードのアクセスに適していないことが分かる. 情報の表示位置が自動的に大きく変化するために, ユーザは操作の意味をつかみにくいのである. また, 質問 A11 でも, ばねモデルのものの方が評価が低く, 応答時間が余計にかかっていることが分かる. この実験で用いたばねモデルは, 局所最適解で満足するようにしたが, 実際に最適解を求めた場合には, ほとんど使用不可能なほど対話性が減少する.

持ち上げ操作による注目支援 質問 B3 から, ユーザがおおむね高さによって DOI を制御しているということが分かる. 質問 A3, A4 からは持ち上げ操作が focus+context 技術の一種として位置づけられることが分かる. 我々の観察によれば, ユーザは, あるノードに着目すると, それをほとんど必ず持ち上げる. よって, 持ち上げ操作は非常に頻繁である. いくつかのノードを持ち上げた状態で, その中のノードを選択してさらに持ち上げるという行為も見られた. つまり, 興味を持ったノードの中からさらに興味を持ったものを持ち上げるわけである. また, 質問 B11 で持ち上げの段階数を質問したが, 回答は 8 以上 (主に無限) と, 5 段階程度に大別できる. 無限段階と答えた人た

ちは、1段階の高さも自由にして連続的に持ち上げられることを要求している。

半透明表示の有効性 アンケート A において 1 が、6 よりも高い評価であることと、質問 B5 の結果によって半透明表示が表示上の混雑を軽減するのに役立っているといえる。しかし、質問 B6 から分かるようにリンクの濃淡の差が確認できたと答えた人は、20 人中 12 人であり +3 と +2 の評価を合わせると 6 人である。これは、濃淡の差は大きくないと視認できないということである。ただし、半透明の濃度をスライドバーなどによって調節できるようにすれば、ある程度この問題を解決できるという意見もいただいた。

ナビゲーションの補助 この納豆ビューをどのような場面で使いたいかわりに自由回答してもらったところ、「あるまとまった文書セットを読むときにその関連性をつかみたいときに使う」、「キーワードサーチの結果、得られた複数の情報どうしの関連性を見る時に使う」、「自分で作ったページの構造を見てみたい」、などという回答が得られた。つまり、納豆ビューはサーチエンジン等のグローバルな検索システムにとってかわるものではない。むしろ、そのような検索システムで得られた複数の情報の関連性や、情報のあるサイトの様子を調べるために使うべきものである。

ノード名による配置 納豆ビューでは、ノード名(ファイル名)による配置を行っているが、これは、同じファイル名の文書が重なるという問題がある。しかし、ユーザにとっては、ノードの重なりがあっても、対話的な操作によってそれを解きほぐせることと、操作に対して素早い応答が確保されていること、の方が重要なのである。これは、アンケート A で、9 よりも 10 の方が評価が高く、8 よりも 1 の方が評価が高いことから分かる。ただし、このままの配置方法では、500 以上のノードを表示することは現実的でない。

その他 納豆ビューに関して自由な意見を求めたところ、「不要な情報を簡単に消せるようにしてほしい」という意見が圧倒的であった。また、「ノードが増えると(200 以上) 応答が遅くなる」、「文書の概要を知れるようにしたい」などという意見もあった。

6. おわりに

ここまでの考察から分かるように、納豆ビューは WWW の視覚化として有効であると考えられる。以下にその長所をまとめた。

- 対話的な「持ち上げ」操作によって、ユーザが注目するノードの周囲の関連性を直観的に理解できる。
- 注目の大きさに応じて、ノードを持ち上げる高さ

を変えることで、周囲のノードの関連性をどこまで詳しく見るか制御できる。

- レイアウト非依存で、逐次的な構築が可能である。
 - それまでにアクセスしたノードも一定範囲内に表示され、注目点以外の大局的概観も把握できる。
- また、以下のような課題も明らかになった。
- 3次元によって多くのノードが表示できるとはいうものの限界はある。さらに多く表示するには、階層化と組み合わせる必要があるだろう。
 - ユーザの視点位置や視線方向の制御にさらに良いインタフェースを提供すべきである。
 - ノードの外見から情報の内容が判別できるように、同じ色の球による表現を見直すべきである。
 - URL だけを用いたノード位置の決定は、ユーザにとって分かりやすいとはいえないので、一貫性を考慮しつつ他の要素も考えるべきである。
 - リンクの濃淡だけでは、重複連結に大きな差がないと視認できない。彩度などを利用してより分かりやすくすべきである。

今後は、協調検索、コンテンツ管理への応用、視点制御、 x 軸や y 軸に対する意味づけの再検討などを通して納豆ビューを発展させていきたい。また、WWW 以外への納豆ビューの応用や、各種の情報視覚化の利害得失についても研究を進めていきたい。

謝辞 ご指導をいただいた岡田謙一助教授と、納豆ビューの開発を手伝ってくれた相馬隆宏氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Furnas, G.W.: Generalized fisheye views, *Proc. ACM CHI'86*, pp.16-23 (1986).
- 2) Sarkar, M. and Brown, M.H.: Graphical Fish-eye Views, *Comm. ACM*, Vol.37, No.12, pp.73-84 (1994).
- 3) Robertson, G.G. and Mackinlay, J.D.: The Document Lens, *Proc. ACM UIST'93* (1993).
- 4) Lamping, J., Rao, R. and Pirolli, P.: A focus+context technique based on hyperbolic geometry for visualizing large hierarchies, *Proc. ACM CHI'95* (1995).
- 5) Noik, E.G.: Layout-independent Fisheye Views of Nested Graphs, *Proc. IEEE VL'93*, pp.336-341 (1993).
- 6) 三木和夫, 松山公造: 図的発想システム D-ABUCTOR の開発について, *情報処理学会論文誌*, Vol.35, No.9, pp.1739-1749 (1994).
- 7) Fairchild, K.M., Poltrock, S.E. and Furnas, G.W.: SemNet: Three-dimensional graphic representations of large knowledge bases, *Cogni-*

- tive Science and its Applications for Human-Computer Interaction*, Guindon, R. (Ed.), pp.201-233, Lawrence Erlbaum Associates (1988).
- 8) Mackinlay, J.D., Robertson, G.G. and Card, S.K.: The perspective wall: Detail and context smoothly integrated, *Proc. ACM CHI'91*, pp.173-179 (1991).
- 9) Silcion Graphics Inc.: FSN: File System Navigator, ftp://ftp.sgi.com/cgi/fsn/fsn.tar.Z (1992).
- 10) Gershon, N.: Moving Happily through the World Wide Web, *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp.72-75 (1996).
- 11) 平岩真一, 神田陽治: Info-Plaza: 進化的クラスタリング機能を備えた WWW マルチブラウザ, 情報処理学会研究報告, 95-GW-11, pp.55-60 (1995).
- 12) 館村純一: DocSpace: 文献空間のインタラクティブ視覚化, インタラクティブシステムとソフトウェア IV, 田中二郎(編), 近代科学社, pp.11-20 (1996).
- 13) Robertson, G.G., Card, S.K. and Mackinlay, J.D.: Cone Trees: Animated 3-D visualization of hierarchical information, *Proc. ACM CHI'91* (1991).
- 14) Chuah, M.C., Roth, S.F., Mattis, J. and Kolojchick, J.: SDM: Selective Dynamic Manipulation of Visualizations, *Proc. ACM UIST'95*, pp.61-70 (1995).
- 15) Rivlin, E., Botafogo, R. and Shneiderman, B.: Navigating in hyperspace: Designing a structure-based toolbox, *Comm. ACM*, Vol.37, No.2, pp.87-96 (1994).
- 16) Battista, G.D., Eades, P., Tamassia, R. and Tollis, I.G.: Algorithms for Drawing Graphs: an Annotated Bibliography, ftp://wilma.cs.brown.edu/pub/papers/compegeo/gdbiblio.tex.Z (1994).
- 17) 塩澤秀和, 西山晴彦, 松下 温: 協調検索型ハイパーメディアの WWW による実現, 情報処理学会研究報告, 95-GW-13, pp.13-18 (1995).
- 18) 塩澤秀和, 西山晴彦, 相馬隆宏, 松下 温: 情報の関連性と多人数アクセスに着目した WWW 空間の視覚化, 情報処理学会研究報告, 96-GW-18, pp.61-66 (1996).
- 19) Bertin, J.: *La graphique et le Traitement graphique de l'information*, Flammarion (1977). 森田 喬(訳): 図の記号学—視覚言語による情報の処理と伝達, 平凡社 (1982).
- 20) 小池英樹: インラクティブ 3次元情報視覚化,

コンピュータソフトウェア, Vol.11, No.6, pp.20-31 (1994).

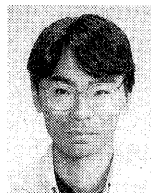
- 21) 小池英樹, 吉原大敬: 対話型システムにおける大規模階層構造視覚化へのフラクタルの応用, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.12, pp.2703-2711 (1994).

- 22) 出原栄一, 吉田武夫, 渥美浩章: 図の体系, 日科技連出版社 (1986).

(平成 8 年 9 月 10 日受付)

(平成 9 年 9 月 10 日採録)

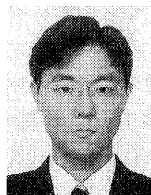
塩澤 秀和 (学生会員)



1971 年生. 1994 年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業. 1996 年同大学大学院理工学研究科計測工学専攻修士課程修了. 現在, 同専攻後期博士課程に在学中. 情報視覚化, ハ

イパテキスト, ヒューマンインタフェース, グループウェアなどの研究に従事.

西山 晴彦 (学生会員)



1969 年生. 1992 年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業. 1994 年同大学大学院理工学研究科計測工学専攻修士課程修了. 現在, 同専攻後期博士課程に在学中. マルチメディア

データベース, 感性情報処理, ヒューマンインタフェースなどの研究に従事. 電子情報通信学会会員.

松下 温 (正会員)



1939 年生. 1963 年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業. 1968 年イリノイ大学大学院コンピュータサイエンス学科修了. 1989 年慶應義塾

大学理工学部計測工学科教授. 1996 年より兼情報工学科教授. 工学博士. マルチメディア通信・処理に関するコンピュータネットワーク, 分散処理などの研究に従事. 本会学会誌編集担当理事, マルチメディア通信と分散処理研究会主査, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会委員長, VR 学会仮想都市研究会委員長など歴任. 『やさしい LAN の知識』(オーム社) など著書多数. 1993 年度ベストオサー賞, 1995 年度論文賞. 電子情報通信学会, 人工知能学会, ファジィ学会, IEEE, ACM 各会員.