

高能率大容量ファイル転送方式とその視覚化手法

住田 智雄^{†1} 土田 賢省^{†2} 伊東 克能^{†2}

本稿では、高能率大容量ファイル転送方式 NBT on XCAST とその視覚化手法を提案する。著者らの NBT on XCAST は、蓄積型大容量ファイルを効率的に配信し、サーバにおけるファイル転送処理の軽減とネットワークの帯域消費量の最小化を目的としている。しかしながら、ただ単に、NBT on XCAST を採用するだけでは、サーバや各ルータの個別の動作状況は別にして、全体の状況は把握しにくい。このことから著者らは、さらにこのプロトコルの視覚化手法を開発し、従来は把握しにくかった全体像、特にデータの流れやサーバ、ルータ、各クライアントの動作状況を把握することを目指す。著者らの提案する視覚化方法においては、クライアントやルータを頂点、通信媒体を辺、帯域幅を辺の重みとするグラフを用いて表現する。また、本稿では、提案する視覚化手法によりどのように効率化されるかについても考察する。

Visualization of Highly Efficient Transport Protocol for Large Capacity Files

TOMOO SUMIDA,^{†1} KENSEI TSUCHIDA^{†2} and KATSUYOSHI ITO^{†2}

We propose a method to visualize the non-ordered block transfer on XCAST (NBT on XCAST) protocol. This protocol efficiently transfers large-capacity files by reducing file transfer processing in the server and minimizing the bandwidth consumption in the network. However, it merely uses the individual operation status of the server and each router, but the status of the whole system is difficult to understand. We developed our visualization method to understand the operation status of the whole structure, especially the data flow, server, router, and each client. In this visualization method, vertices, edges, and weight of edges represent clients and routers, communication lines, and bandwidths, respectively. Moreover, we investigated how to make the protocol more efficient using this method.

1. はじめに

近年、ブロードバンドの普及やバックボーンの整備などともなっており、インターネットを利用するユーザ数も爆発的に増加している。これにより、提供できるサービスも多様化、大容量化してきている。しかし、このように著しい成長をとげるインターネットにも様々な問題が生じていることも事実である。その1つとして、大容量ファイルを配信するために必要となる帯域の増大、データ転送方式の不適合などがあげられる。たとえば、同一の GByte クラスのデータファイルを複数のクライアントが同時に要求すると、現在利用されているユニキャスト方式では、サーバでクライアントの数だけデータを作成し、各クライアントに向けて送信しなければならない。また、クライアントまでの途

中経路が重なる部分においても、同一内容の packets が複数個存在することになる。このように、ユニキャスト方式では、サーバの余分な負荷、帯域の無駄遣いといった問題が生じる。この問題を解決するために、蓄積型大容量ファイル転送を効率的に行う方式として、著者らは、XCAST (Explicit Multi-Unicast)¹⁾ を用いた高能率大容量ファイル転送方式 NBT (Non-ordered Block Transfer) を提案する。NBT on XCAST の一部はすでに実装済みであり、その基本動作を確認している。なお、この結果の内容はワークショップ²⁾ と国際会議³⁾ で一部報告している。

本稿では、さらにこの NBT on XCAST の視覚化手法について提案する。情報視覚化分野では、対象となるオブジェクトを分かりやすく表示するための効率的なアルゴリズム⁴⁾⁻⁷⁾ や視覚化ツール⁸⁾ が開発されている。たとえば、ネットワーク分野では、リンクを有向グラフや木構造で表現する手法を用いて、複雑で大規模なインターネットの構造やインターネット上を流れる大量のトラフィックを視覚化する研究が行われて

^{†1} 東洋大学大学院工学研究科情報工学専攻
Graduate School of Engineering, Toyo University

^{†2} 東洋大学工学部情報工学科
Information and Computer Sciences, Toyo University

いる．Caida⁹⁾では、ネットワークトラフィックやネットワーク構造など、様々なネットワーク情報を視覚化するためのツールを提供している．また、近年では、アドホックネットワークのための視覚化シミュレータも研究されている^{10),11)}．

しかしながら、これらのネットワーク可視化ツールは、ネットワークポロジを描画し、様々な指標を計算することができるが、基本的にある時点でのネットワークポロジを可視化するためのツールである．最近になって、動的なネットワークの可視化を対象とした研究も行われている¹²⁾．これは、シミュレーションによって構築した動的なネットワークをリアルタイムに描画し、全体的な動的な変化を理解しやすくするための機能を提供している．本研究では、さらに、全体像をとらえた後の問題点発生場所、特にインターネットの輻輳状態やデータの送受信状況の視覚化に焦点を絞る．また、視覚対象によって異なる視覚化手法を用いることで、様々な状況に対応できるようにする．このような輻輳状態などの回線状況、データの流れをリアルタイムに視覚的に把握することで、問題解決の糸口を見つけることが容易になると考えられる．

このような視覚化は、NBT on XCAST を利用した大容量データ配信サービスにおいて、サービス提供側、クライアント側の双方に対するメンテナンスのツールとして利用可能である．視覚化においては、クライアントやルータを頂点（ノード）、通信媒体を辺、帯域幅をその辺の重みとしたグラフを用いて表現する．また、本稿では提案する視覚化手法によりどのように効率化されるかについても考察する．

本稿の構成は以下のとおりである．2章では、提案するNBT on XCASTについて述べる．3章では、視覚化パターンを提案する．4章では、3章で述べた視覚化パターンを実現するための描画条件について述べる．また、5章では4章で述べた条件を満たす描画アルゴリズム、6章では本研究で提案する視覚化を用いた適用例について述べる．7章では、従来の描画方法との比較について述べ、最後に、本研究のまとめと今後の課題について述べる．

2. NBT on XCAST

大容量ファイルを効率的に転送することを目的としたNBT on XCASTについて述べる．

2.1 XCAST の概要

XCAST (Explicit Multi-Unicast) は、少人数グループを対象としたマルチキャストモデルとして提案されている¹⁾．その特徴として、

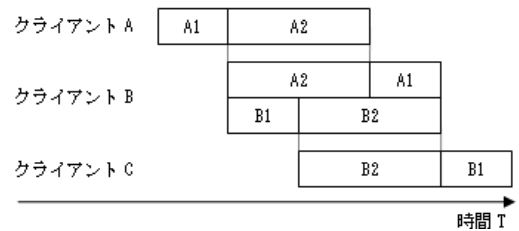


図1 NBT の基本動作
Fig.1 Basic action of NBT.

- (1) 送信者はあらかじめすべての受信者を把握している、
- (2) パケットはユニキャスト経路表に基づいて受信者まで配送される、
- (3) 多数のグループやソースが存在可能、
があげられる．

2.2 NBT の概要

ファイルサーバにおいて、ファイルの転送時間内の異なる時刻に複数のクライアントから転送要求が生じた場合に、個別に対処するのではなく、マルチキャストにより経路上のノードにおいてコピーを作成することで、サーバにおけるファイルの転送処理の軽減と、ネットワークの帯域消費量の最小化を図ることが目的である．

図1において、サーバとクライアントAの間でデータファイルを送信中に、クライアントBが、次にクライアントCが同一内容のデータファイルを要求した場合を想定する．データファイルをA1+A2とする．クライアントBに対して、A2の部分はクライアントA宛に送信中のデータファイルA2のコピーを適切なノードで作成し、クライアントBへ送信する．残りのA1に関しては、サーバは同一データを要求しているすべてのクライアントにデータを送信しているため、他のクライアントに送信中のデータファイルの該当部分（この場合A1）のコピーを適切なノードで作成し、クライアントBに送信する．このため、サーバが作成する送信データはつねに1つであり、その負担は従来のユニキャスト方式と比べて軽減されると考えられる．

2.3 システム構成

図2に、想定するNBT on XCASTのシステム構成を示す．

ファイルの最初の要求者であるクライアントの転送要求は、まずNBT on XCASTの制御情報部に接続される．制御情報部では、NBT on XCASTに関する必要な情報を作成し、それをクライアントに送信する．次に、データ転送部では、クライアントが要求したファイルを、制御情報に基づいて送信する．ここで、

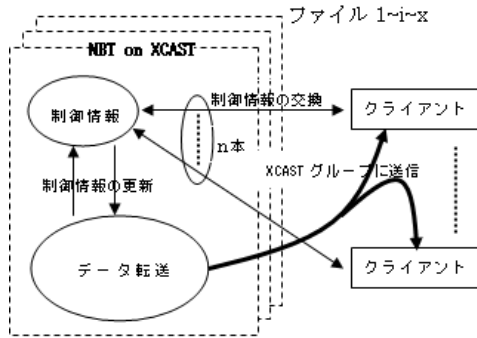


図 2 NBT on XCAST のシステム構成
 Fig. 2 System configuration of NBT on XCAST.

NBT on XCAST に必要な制御情報は刻々と変化するため、制御情報部とデータ転送部はつねに制御情報の更新と交換を行う。以下に、更新する必要がある制御情報を示す。

- ・ クライアント識別番号
- ・ 各クライアントへの送信開始データブロック番号
- ・ 各クライアントへの送信終了データブロック番号
- ・ 現在送信中のデータブロック番号
- ・ 次に送信するデータブロック番号
- ・ 送信済みデータサイズ

2 番目以降のクライアントは、最初のクライアントと同様に制御情報部に接続され、最新の制御情報を取得した後、XCAST グループに参加して、データ転送部から要求したデータの受信を開始する。クライアントごとに異なるデータ受信終了条件は、サーバとクライアント間の制御情報に基づいて決定される。

また、複数のクライアントからの異なるファイルの転送要求に対しては、各クライアントからの要求を、要求受信時に識別することによって対応する。同じコンテンツを要求した複数のクライアントを 1 つの XCAST グループにまとめ、異なる XCAST グループを複数作成することによって、複数の異なるファイル要求に対応する。

2.4 NBT on XCAST とその有効性

NBT on XCAST とは、NBT に対して新しいマルチキャストプロトコルとして提案されている XCAST を採用することで、IP 網への適用とサーバ側主導の制御をできるようにしたプロトコルである。蓄積型大容量データを送信する際に、従来のユニキャスト方式では、同一内容のファイルを要求してきたクライアントに対して、個別に送信するため、中継ネットワーク上に複数の同一内容の packets が存在することになる。また、マルチキャスト方式はその同報性により、ある一定期間だけ待機した後に、その待機中にデータの要

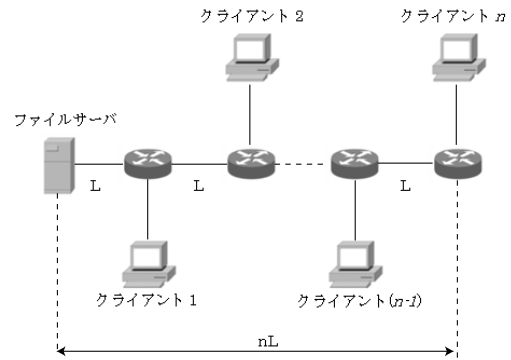


図 3 有効性を検討するための簡易化したネットワークモデル
 Fig. 3 The simplified network model for analyzing the efficiency.

求を行ったクライアントに対していっせいに配信する方式である。このため、マルチキャストクライアントには、自分が要求を行ってから実際にデータが配信されるまでの待ち時間が発生する。提案手法で採用した XCAST では、クライアントが要求を行った時点からデータを配信することが可能であるため、クライアントの待ち時間は発生しない。以上のことから、提案する NBT on XCAST では、複数のクライアントに対して途中までの経路が重なる部分に関しては、マルチキャストの特徴から 1 つの packets が存在するので、帯域消費量は最小におさえられる。また、マルチキャスト方式で発生する待ち時間についても改善することができる。ユニキャスト方式と NBT on XCAST 方式の場合を比較するために、図 3 に示すように、各クライアントにファイルを転送するのに必要な帯域 B 、時間 T 、伝送距離 L の積の和である帯域距離消費量 A をもってネットワーク利用効率を示す指標とする¹³⁾。クライアント数を n とすると、ユニキャスト方式の場合、同一内容のデータを要求してきたクライアントに対してそれぞれ個別にデータを作成・送信する。この場合各クライアントに対して個別の帯域が必要になるため、ユニキャスト方式の帯域距離消費量を A_u とすると、

$$A_u = \sum_{i=1}^n iBTL = BTL \cdot n(n+1)/2$$

で表される。ユニキャストの特徴から、中継ネットワーク上に同一内容の複数の packets が存在してしまうため、サーバの負荷の増大、ネットワーク利用効率の低下の原因となる。上記の式から、ユニキャスト方式の帯域距離消費量 A_u は、クライアント数 n の 2 乗に比例することが分かる。次に、NBT on XCAST 方式

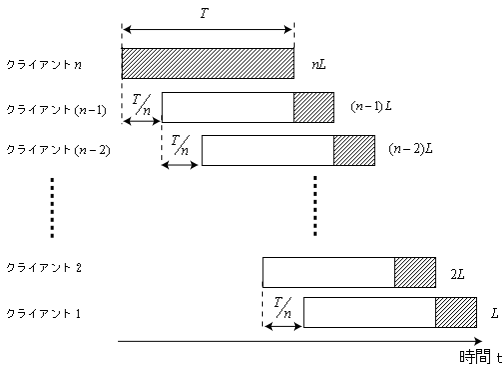


図 4 NBT on XCAST の有効性 (遠いクライアントから送信)
Fig. 4 Efficiency of NBT on XCAST.

の場合は、複数のクライアントに対して途中までの経路が重なる部分に関しては、同一の packets を伝送し、経路が分かれるルータにおいて、パケットのコピー・転送を行う。NBT on XCAST の帯域距離消費量 A_n は、以下のように求められる。まず、クライアント n から送信を始める場合について述べる。簡単化のため、クライアント n からクライアント 1 に向かって順番に間隔 T/n をおいて送信を開始すると仮定する (図 4)。

$$\begin{aligned}
 A_n &= BT \cdot nL + B \cdot T(n-1)L/n \\
 &\quad + B \cdot T(n-2)L/n + \dots + B \cdot TL/n \\
 &= nBTL + (BTL)/2 \sum_{i=1}^{n-1} i \\
 &= BTL \cdot (n + (n-1)/2) \\
 &= BTL \cdot (3n-1)/2
 \end{aligned}$$

図の斜線部分が、そのクライアントがサーバから最も遠い位置となる時間帯である。この時間帯とクライアントが接続されるルータまでの距離の積を加算すると上記の式が得られる。クライアント 1 から送信を始める場合も同様に求めることができる。このことから、NBT on XCAST を用いた場合の帯域距離消費量 A_n は、クライアント数 n に比例することが分かる。

以上のことから、従来のユニキャスト方式と比べて、NBT on XCAST の有効性が期待できる。

2.5 NBT on XCAST の転送能力

本節では、NBT on XCAST の転送能力について述べる。

ファイルサイズ G 、帯域幅 B とすると、ファイルの転送時間 T は次の式で与えられる。

$$T = G/B$$

そのファイルの転送を同時に要求するクライアント数を n 、サーバが同時に m 個のファイル処理可能とすると、単位時間あたりの総転送数 N_h は次の式で

与えられる。

$$N_h = mn/T = mnB/G$$

$m = 1, n = 64$ (XCAST グループの上限メンバー数¹⁾), $B = 1 \text{ Gbit/s}, G = 5 \text{ GB}$ とすると、1 日あたりに処理できるクライアント数 N は、

$$N = 1.4 \times 10^5$$

となる。これは、1 Gbit/s のアクセス網が利用可能という条件下ではあるが、実用性がある数字であると考えられる。

3. ネットワークの視覚化

3.1 視覚化対象

本研究では、NBT on XCAST 方式によるネットワークの動作を視覚化する。これを、グラフ理論的手法を用いて視覚化することで、データの流れやサーバ、ルータの状況などを即座に把握することが可能になると考えられる。頂点はサーバやルータ、クライアントを、辺は頂点間のリンク関係を表すものとする (今回の描画では対象としていないが、必要であれば辺の重みは帯域幅を表すなどの拡張も考える)。x 座標は左から右に、y 座標は下から上にその座標値が大きくなるようにとるものとする。本稿では、いくつかの 2 次元の視覚化手法を提案する。各々異なる利用目的を意図しており、これらを組み合わせることで、より多角的見地から大容量ファイル転送の問題解決に効果を発揮できると思われる。

3.2 視覚化パターン

いくつかの視覚化パターンを提案する (図中の記号はそれぞれ、S:サーバ、:ルータ、:クライアントを表す)。

(1) 視覚化パターン I

サーバを中心として全体のネットワークをとらえることと、各クライアントがサーバからどれだけ離れているかを見るための視覚化手法である。図 5 は、サーバを原点に配置し、サーバからのホップ数の順に原点の近くから同心円状にルータやクライアントを配置したものである。実際のネットワークのイメージに近く、以下に示すツリー型よりも全体的な特徴が直感的にとらえやすく、即座にサーバからのホップ数を把握できる。また、描画スペースも効率が良い。

(2) 視覚化パターン II

サーバからのあるホップ数だけ離れたノード全体 (どのようなものがあるか該当するノードのすべて) を知るための視覚化手法である。図 6 は、サーバからのホップ数を階層として y 座標に頂点を割り当てた視覚化である。サーバを原点に配置し、サーバからの

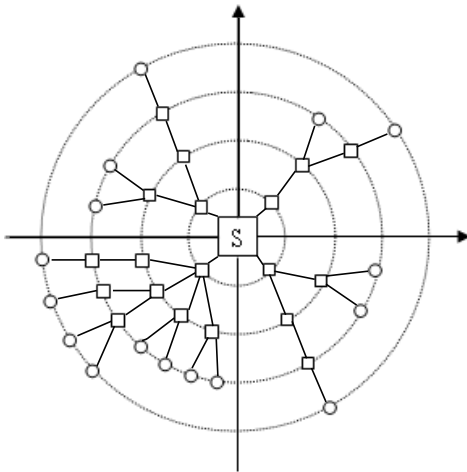


図 5 視覚化パターン I (同心円)
Fig. 5 Visualization Pattern I.

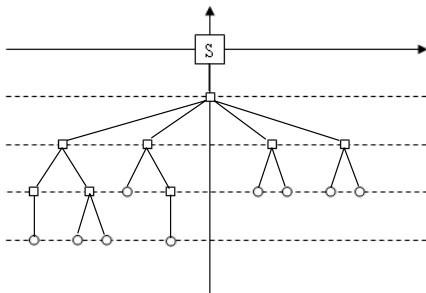


図 6 視覚化パターン II (木)
Fig. 6 Visualization Pattern II.

ホップ数の小さい順にルータやクライアントを配置する。これにより、サーバからルータやクライアントまでの部分的な特徴の把握と、サーバからクライアントに至るまでの経路の理解が可能になる。また、任意の2つのクライアントのサーバからのホップ数を比較する場合、視覚化パターン I による場合（たとえば、比較対象のノードが第 1 と第 3 象限にあるときなど）より、このような水平座標を用いたほうが分かりやすい。

(3) 視覚化パターン IIIa

各ノードのレベルとそこに至るまでのパス、クライアントがデータを要求した時間順序を知るための視覚化手法である。図 7 は、図 6 と同様にサーバからのホップ数を階層として y 座標に頂点を割り当てた視覚化である。ただし、クライアントを表す頂点の配置は、クライアントが大容量データを要求した順とする。これにより、 x 座標を時間軸に該当させると、どの時間帯にクライアントが大容量データを要求しているのかが分かる。

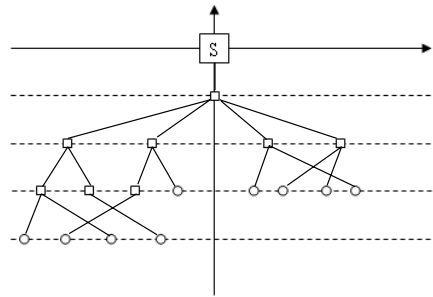


図 7 視覚化パターン IIIa (木)
Fig. 7 Visualization Pattern IIIa.

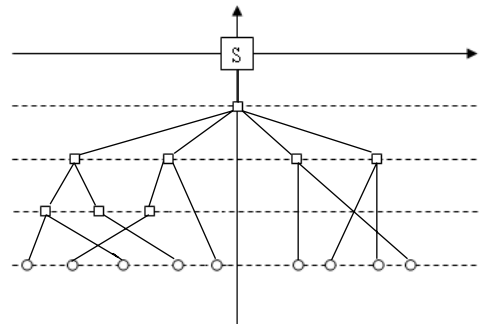


図 8 視覚化パターン IIIb (木)
Fig. 8 Visualization Pattern IIIb.

(4) 視覚化パターン IIIb

クライアントがデータを要求した時間順序を最優先し、かつサーバからクライアントへのパスもとらえやすいようにするための視覚化手法である。図 8 は、図 7 を改良したものである。図 7 では、葉ノードのレベルが多岐にわたる場合や極端な差がある場合に時間順序を視覚的にとらえ難くなるので、クライアントを同じレベルに並べ替えたものである。

上記のように、視覚化のパターンを構成することで、多角的な視点から関係を把握できるようになる。上記 4 組のパターンは例としてあげたものであり、組合せによって他の視覚化パターンの提案も可能である。

4. 描画条件

本章では、提案した視覚化に関する条件を定める。本研究での視覚化の対象をノードにラベルの付いた特別な DAG (Directed Acyclic Graph) とする。そして、そのラベル付き DAG は、サーバを表す唯一のノードを持ち（そのノードラベルを S とする）、その他のノードは、ルータを表すノード（ラベルを R ）とクライアントを表すノード（ラベルを C ）からなるものとする。

4.1 視覚化パターン I の条件

図 5 に示したような同心円上に描画するための制約条件について述べる．図 5 はサーバを中心とし、その子供であるルータを表す頂点を同心円上に配置する視覚化手法である．この視覚化のためのいくつかの基本条件を導入する．

- [条件 I-1] サーバを表すノード S は原点に配置する．
- [条件 I-2] サーバを表すノード S からのホップ数 k (k は整数) のノードは、原点を中心とした半径 $k\lambda$ の円周上に位置する．ここで、 λ は定数とする．
- [条件 I-3] ノードはすべて異なる位置に配置する．
- [条件 I-4] 辺と辺は交差しない．
- [条件 I-5] 辺とノードは交差しない．
- [条件 I-6] 同じ円周上にある 2 つのノードがあり、原点とノードを結ぶ x 軸との角度が小さい方を p 、大きい方を q とする．このとき、 p の子供と q の子供で角度が逆転するものがない．

以上の基本条件を組み合わせて、次のように視覚化パターン I のための描画条件を定義する．

[表記 1] 視覚化パターン I の描画条件 CI .

$$CI = I - 1 \wedge I - 2 \wedge I - 3 \wedge I - 4 \wedge I - 5 \wedge I - 6$$

4.2 視覚化パターン II, III の条件

図 6, 図 7 に示したように木構造に描画するための制約条件について述べる．図 6, 図 7 はサーバを根ノードとしてルータ、クライアントを子ノードとした木描画である．ここでは、対象の DAG を美的に描画するための制約を導入する．視覚化パターン II, III では、本質的に対象を木構造としてとらえ、その階層構造などを分かりやすく描画するための条件であるので、DAG に対応する木を考え、その木の描画に対する描画条件を導入する．DAG には子ノードに順番に左から番号が付けられていると仮定する．DAG と木の対応は、親が 2 つ以上あるときは、グラフの深さ優先順 (子供に付けられた順番を基にする) で最も小さい順位の親との辺だけを残し、あとは削除して考える．こうして得られた木に対する描画をここでは考える．ただし、DAG を描画するときには、木の各ノードの位置座標が決定したあと、削除した辺を加えて元の DAG と同じ構造に戻す．本研究では、文献 14)–16) での木の描画のための用語と美的条件を採用する．以下、本研究で用いる定義と美的条件を記す．

木 T のノード p のレベル (level) は、 p と根ノードとの間の辺の最小の個数で定義される．便宜上、次のような関数 $Index$ を準備しておく．

$$Index(p) = \begin{cases} 0 : p \text{ が根の場合} \\ i : p \text{ が (左から) } i \text{ 番目の子の場合} \end{cases}$$

この関数 $Index$ を用いて、 T_i が木 T の i 番目の部分木であるとは、「 $Index(T_i \text{ の根}) = i$ かつ T_i の根が T の根の子」と定義される．これは、システムで付けられる番号と仮定する

木の同型は次のように再帰的に定義される．

[定義 1] 木 T_1 と T_2 が同型であるとは次の (1) または (2) を満たすときである．

- (1) T_1 と T_2 はともに空である．
- (2) T_1 も T_2 も空ではなく、かつ、それらの相対する i 番目の部分木がそれぞれ同型である．

以下は、木の描画に関する定義である．

[定義 2] 木 T に対する配置とは、

$$\pi : T \text{ のノード} \rightarrow Z \times Z \text{ (整数座標)}$$

なる写像 π のことである． T のノード p に対して、 π によって p が写された点の座標を $\pi(p) = (x, y)$ で表す．さらに、 $\pi_x(p)$ と $\pi_y(p)$ により、それぞれ $\pi(p)$ の x 座標と y 座標を表す．

[定義 3] 木 T の描画とは、 T における各辺 (p, q) に対して、点 $\pi(p)$ と $\pi(q)$ を結ぶ線分を描くことである．

[定義 4] 描画された木 T の幅は、配置 $\pi(T)$ が与えられたとき、 $\pi(T)$ の幅 $width(\pi(T))$ として次式で定義される．

$$width(\pi(T)) = \max\{|\pi_x(p) - \pi_x(q)|\} \\ ; p \text{ と } q \text{ は } T \text{ のノード}$$

次に、木の美的条件をあげる (数学的な定義については文献 14) を参照) .

(条件 B1) 同じレベルのノードは同じ等高線上 (y 座標) に位置する .

(条件 B2) 親は中心の子供の真上に位置する*1 .

(条件 B3) 兄弟は年長者順に左から右へとそれぞれ 1 以上の間隔で並ぶ .

(条件 B4) 描画の際に辺が交わらない .

(条件 B5) 同じ構造を持つ部分木はまったく同じ形に写される .

(条件 B6) 各ノードは x 軸 (水平) 方向に 1 以上離れて位置する .

(条件 B7) 隣り合う部分木は互いにその中のノードが相手の中心 (根) を越えることがない .

(条件 B#) 兄弟は等間隔に配置される .

(条件 B8(k)) 各部分木のノードは、自分以外の部分

*1 本稿の図では、実際には B2 の代わりに親の x 座標 = 「(最左端の子の x 座標 + 最右端の子の x 座標) / 2」となっている．しかし、本質的に議論に影響はない．

木のノードとは x 軸で見たときただか k 個の座標しか重ならない。

以上の条件は、一般的な木構造で用いられる美的条件であるが、本研究では視覚化パターン II のための基本条件として採用する。

次のように、視覚化パターン II のために、これらの基本的な美的条件を組み合わせた描画条件を定義する。
[表記 2] 視覚化パターン II の描画条件 CII, C#II, CII(k), CII(0)。

$$CII = B1 \wedge B2 \wedge B3 \wedge B4 \wedge B5 \wedge B6$$

$$CII \# = B1 \wedge B2 \wedge B3 \wedge B4 \wedge B5 \wedge B6 \wedge B\#$$

$$CII(k) = B1 \wedge B2 \wedge B3 \wedge B4 \wedge B5 \wedge B6 \wedge B7 \wedge B8(k)$$

$$CII(0) = B1 \wedge B2 \wedge B3 \wedge B4 \wedge B5 \wedge B6 \wedge B7 \wedge B8(0)$$

視覚化パターン III は、特に本研究の中心である蓄積型大容量データを効率的に配信する NBT on XCAST のために、著者らが今回提案する新たな視覚化手法である。

視覚化パターン III は、従来一般に用いられている木構造の描画条件では実現できないので、以下の 4 つの基本条件 $B1'$, 基本条件 $B3'$, 基本条件 $B4'$, 基本条件 $B6'$ を新たに導入する。

[条件 $B1'$] 葉ノード以外のレベル i のノード p に対しては、

$$\pi_y(p) = i.$$

葉ノード p に対しては、

$$\pi_y(p) = \text{木の高さ}.$$

[条件 $B3'$] ノード p が k 個の子供 p_1, p_2, \dots, p_k を持ち、それらが葉でないとき、 $\pi_x(p_{i+1}) > \pi_x(p_i)$ 。

ここで、各 i ($1 \leq i \leq k-1$) に対して、

$$Index(p_i) = i.$$

木のすべての葉ノード $\{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ に対して、葉ノード間に全順序が定義されており、この順番が v_1, v_2, \dots, v_k であるとき、

$$\pi_x(v_1) < \pi_x(v_2) < \dots < \pi_x(v_k)$$

[条件 $B4'$] ノード p, q を同じレベルで p が k 個の葉ノードでない子供 p_1, p_2, \dots, p_k を、 q が n 個の葉ノードでない子供 q_1, q_1, \dots, q_n を持ち、さらに $\pi_x(p) < \pi_x(q)$ ならば、

$$\pi_x(p_k) < \pi_x(q_1).$$

ここで、各 i ($1 \leq i \leq k$), j ($1 \leq j \leq n$) に対して、

$$Index(p_i) = i, Index(q_j) = j.$$

[条件 $B6'$] ノード p, q が葉ノードでなく同じレベルならば

$$|\pi_x(p) - \pi_x(q)| \geq 1.$$

以上のように、新たに導入した基本条件を用いて、

視覚化パターン IIIa と IIIb のための描画条件を定義する。

[表記 3] 視覚化パターン IIIa, IIIb のための描画条件 CIIIa, CIIIb

$$CIIIa = B1 \wedge B3' \wedge B4' \wedge B6'$$

$$CIIIb = B1' \wedge B3' \wedge B4' \wedge B6'$$

ここで、[表記 2] の各描画条件では、文献 14)–16) において、ノードとエッジが交差しないことが証明されているが、描画条件 CIIIa や CIIIb の下では、ノードとエッジが交差することが起こりうる。

5. 描画アルゴリズム

視覚化パターン II の描画アルゴリズムについては、既存の研究の様々なアルゴリズムが利用可能である^{4),14),16)}。ここでは、視覚化パターン I と視覚化パターン IIIb のためのアルゴリズム描画について説明する。

5.1 視覚化パターン I のアルゴリズム

グラフを同心円上に配置するアルゴリズムはすでに多くの研究がなされ、その応用も報告されている^{5),6)}。ここでは、視覚化パターン I に対する著者らのシンプルなアルゴリズムを紹介する。以下に視覚化パターン I についてのアルゴリズムを示す。

<アルゴリズム 1 >

[入力] DAG D , ただし、 D の各ノードが子供を持つとき、子供の間順番が付けられている。

[出力] 配置 $\pi(T)$ 。

[パラメータ]

$$\alpha(p), \beta(p) : \text{ノード } p \text{ に付与された角度の範囲} \\ (\alpha(p) \sim \beta(p)). \\ (0 \leq \alpha(p) < \beta(p) \leq 360^\circ).$$

[方法]

1. 原点にサーバ(ノードラベル S) を配置。
2. ラベル S のノードに配置済みのマークを付ける。
3. カレントノード p をラベル S のサーバノードとする。
4. $\alpha(p) = 0^\circ, \beta(p) = 360^\circ$ とする。
5. カレントノード p の子供で配置済みのマークの付いていない子供の順番の若い順に q_1, q_2, \dots, q_k とする。
6. $\theta = (\beta(p) - \alpha(p))/k$ とする。
7. 各 q_i について次のように $\alpha(q_i)$ と $\beta(q_i)$ を付随させる。

$$\begin{aligned} \alpha(q_1) &= \alpha(p) & \beta(q_1) &= \alpha(p) + \theta \\ \alpha(q_2) &= \alpha(p) + \theta & \beta(q_2) &= \alpha(p) + 2\theta \\ & \vdots & & \vdots \\ \alpha(q_i) &= \alpha(p) + (i-1)\theta & \beta(q_i) &= \alpha(p) + i\theta \\ & \vdots & & \vdots \\ \alpha(q_k) &= \alpha(p) + (k-1)\theta & \beta(q_k) &= \alpha(p) + k\theta \end{aligned}$$

8. 各 q_i について原点を中心とした半径が各 q_i のホップ数 (すべて同じ) の円周上で, 角度が $(\alpha(q_i) + \beta(q_i)/2)$ の位置に配置.

9. 各 q_i についてカレントノードを q_i として 5~8 を 5 のカレントノードの子供で配置済みのマークの付いていない子供がなくなるまで再帰的に繰り返す. □

このアルゴリズム 1 で描画されたものは, 条件 CI を満たすことは容易に確かめられる. さらに, このアルゴリズムの計算量は, 上記のアルゴリズム 1 の構成により, 各ノードに対してちょうど 1 回 α, β を付随させ位置決定するようにしているので, $O(n)$ である. ただし, n はノードの個数である.

次に視覚化パターン CIIIb のためのアルゴリズムを提案する.

<アルゴリズム 2 >

[入力] DAG に対応した木 T で, 葉ノードには兄弟の順序と別にさらに時間の順序が与えられている (作成時刻の順序).

[出力] 条件 IIIb を満たす配置 $\pi(T)$.

[方法]

1. T の葉の部分を除いた木を T' とする.
2. T' に対して視覚化パターン II に対するものと同じ文献 14) の $O(n)$ のアルゴリズムでグラフ描画アルゴリズム配置する.
3. T' の配置で最も左に位置するノードの x 座標を min_x , 最も右に位置するノードの x 座標を max_x とする.
4. T 中のすべての葉ノードをその時間に関する順序に並べたものを C_1, C_2, \dots, C_m とする. まず, y 座標はすべて同じで, $\pi_y(C_1) = \pi_y(C_2) = \dots = \pi_y(C_m) = T$ の高さとする.

$$\pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil}) = (\lceil min_x + max_x \rceil) / 2$$

ここで, g は正の整数であり, 間隔 (gap) を表すとする. たとえば, $g = 1$ である. 各ノードの x 座標は次のようにする.

$$\pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil}) = (\lceil min_x + max_x \rceil) / 2$$

$m = 2$ のときは,

$$\pi_x(C_2) = \pi_x(C_1) + g$$

$m \geq 3$ のときは,

$$\pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil + 1}) = \pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil}) + g$$

$m = 1$ のときは,

$$\pi_x(C_1) = (\lceil min_x + max_x \rceil) / 2$$

$m = 2$ のときは,

$$\pi_x(C_1) = (\lceil min_x + max_x \rceil) / 2$$

$$\pi_x(C_2) = \pi_x(C_1) + g$$

$m \geq 3$ のときは,

$$\pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil}) = (\lceil min_x + max_x \rceil) / 2$$

$$\pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil + 1}) = \pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil}) + g$$

$$\pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil + 2}) = \pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil}) + 2g$$

\vdots

$$\pi_x(C_m) = \pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil}) + rg$$

(ただし $\lceil m/2 \rceil + r = m$)

$$\pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil - 1}) = \pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil}) - g$$

\vdots

$$\pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil - l}) = \pi_x(C_{\lceil m/2 \rceil}) - lg$$

(ただし $\lceil m/2 \rceil - l = 1$) □

アルゴリズム 2 は木 T に対して葉ノードを除いた T' に対して, 既存の木の描画アルゴリズム, すなわち文献 14) の $O(n)$ のアルゴリズムを施し, 葉に対しては最もレベルの大きいノードに合わせて同一水平線上に等間隔で真ん中の葉がちょうど T' の木の中心に位置するように配置する単純なものである. よって, このアルゴリズム 2 で描画されたものは, 条件 CIIIb を満たすことは容易に確かめられる. また, このアルゴリズム 2 で T' の木の描画で $O(n)$ のアルゴリズムを採用しているため, アルゴリズム全体も $O(n)$ となる. ただし, n はノードの個数である.

6. 適用例

NBT on XCAST の視覚化を行った場合の適用例について述べる. 様々な応用が考えられるが, 本章では例にあげた図を用いて説明する.

まず図 8 について考える. クライアントがデータを要求した順に左から並べられているとする. サーバや通信経路, 帯域幅に問題がなければ, クライアントはデータを要求した順番にデータの受信を終了する. しかし, 何らかの問題が発生し, 順番どおりに終了しなかった場合を想定する (図 9). この場合, サービス提供者は残っているクライアントの経路などを調べ, 対策を講じる必要がある. たとえば, 部分的な経路を確認する必要があるれば, 図 10 を参照することができる. また, 問題のあるクライアントの全体的な位置を

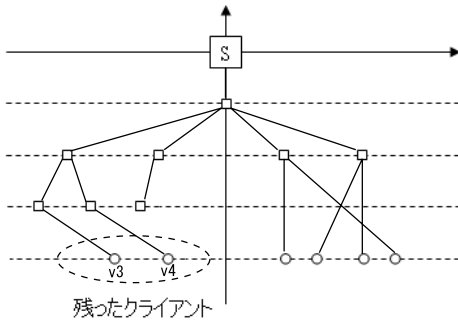


図 9 視覚化パターン IIIb の適用例
Fig.9 Application of Pattern IIIb.

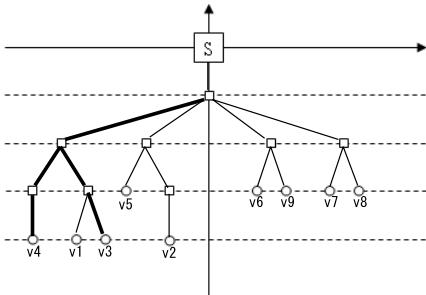


図 10 適用例 1
Fig.10 Application of Pattern 1.

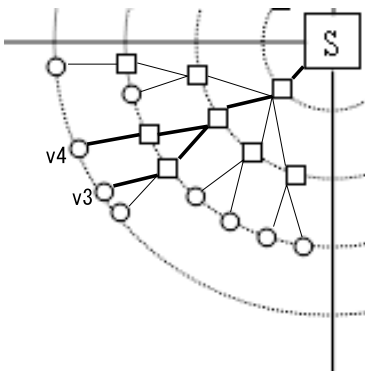


図 11 適用例 2
Fig.11 Application of Pattern 2.

把握したい場合は、図 5 を参照することで、そのクライアントのネットワーク全体における位置情報を把握できる(図 11)。ここで、同じデータを要求している他のクライアントに影響が出ないように、問題のクライアントのマルチキャストグループ(本研究では XCAST グループ)を別々にするなどの処置を施すことができる。

このように、本研究で提案する視覚化を用いることで、NBT on XCAST の利用効率を高めることが可能になると考えられる。

7. 既存手法との比較および評価

7.1 既存手法との比較

ネットワークに関しては、これまでもグラフ描画による視覚化の研究が行われてきた^{12),17)}。それらのグラフ描画は、ネットワークの全体構造や動的な変化を一目で把握できるようにすることを主な目的としている。そのため、ノードはすべて同一に扱われ、座標系に基づく意味的制約などをつける必要があまりなく、スプリング手法などの力学モデルによる描画方法が採用されることが多い。たとえば、最近では、松林らは、階層的な手法で効率化を図る大規模ネットワークの可視化を提案している¹⁷⁾。しかし、著者らの研究では、ネットワーク構造を把握したうえで、障害発生箇所など部分的な監視を行うことを目的としている。そのため、サーバやクライアントなどのノードのタイプ分け、ホップ数に対応したノード配置、時系列を把握するための葉ノードの同レベル配置など、座標系に基づく意味的制約を取り入れることにした。これらの制約などを基にして、使用目的に応じたグラフ描画を行うことで、提案するプロトコルの動作状況や障害発生場所の監視などが行いやすくなると考えた。

さらに、意味的制約についても、従来の一般の木描画などの手法を単にそのまま採用するのではなく、本研究の目的を達成するために、描画条件を一部改良した。たとえば、一般の木の描画では、辺は交差させない(辺交差最小)描画規則を最優先する場合が多い⁶⁾。しかし、本研究では、図 7 や図 8 に示すように、時系列の把握を優先するために、辺の交差を許すこととした。

7.2 評価

現在、提案した NBT on XCAST プロトコルのシミュレーションを行うために、本稿で提案したアルゴリズムを実装中である。今後、次のような項目について、評価実験を行う予定である。

- NBT on XCAST 方式の本描画機能を備えた場合に障害の部分を見つけ、転送効率の向上がどの程度可能になるかを定量的に測定する。どのような場合に、本手法が有効になるかの様々なケースを調べることで、特定したい。
- サーバやクライアントなどのノード数を小規模なものから大規模なものまで変化させることで、NBT on XCAST で実際に起こりうる障害などについて詳しく検討する。また、その解決策についても検討を行う。
- 他の描画方式との見やすさ、輻輳状態など障害発

生場所の見つけやすさなどの比較を行う。様々な障害発生条件のテストデータを作成し、他の描画方式と本描画方式の有効性の比較を行う。

8. む す び

蓄積型大容量データを効率的に配信するプロトコル NBT on XCAST とその視覚化手法について提案した。また、視覚化パターンの一例について述べた。視覚化の重要性の1つは、時間の前後で何がどのように変化しているか、ということを観察者に理解しやすいように表示することである。そのため、様々な視覚化パターンを用意することで、必要な場面に応じた視覚化を行えるようになる。また、先に提案したプロトコルの視覚化を行うことで、蓄積型大容量データを対象とした配信サービスの保守、運用などの面で効率的なサービスが行えるようになると思われる。

今後の課題として、提案した視覚化手法を用いたシミュレーションソフトの開発があげられる。現在、多種多様な視覚化ソフトが開発されているが、時間の経過とともにノードやエッジの増減を表す構造や関係性の強さを表す属性が変化するネットワークである動的ネットワークを対象としたシミュレーションソフトは少ない^{(18), (19)}。この動的ネットワークを視覚化するためには、従来の静的ネットワークの視覚化手法を改良し、それぞれの時点でのネットワークを視覚化したネットワーク描画を作成し、時系列の順に並べていく、あるいは、アニメーションのように提示することで実現できる。このような視覚化を用いて、複雑ネットワーク^{(20)–(23)}の分野で研究されている実ネットワークに近い特徴を持ったネットワークトポロジを作成したうえで、本研究で提案した NBT on XCAST を対象としたシミュレーションソフトを開発することで、その他の動的ネットワークを対象とした視覚化シミュレーションソフトの開発への転用も可能になると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Boivie, R., Imai, Y., Livens, W., Ooms, D. and Paradaens, O.: Explicit Multi-unicast (Xcast), Internet Draft, draft-ooms-xcast-basic-spec-11.txt
- 2) 住田智雄, 伊東克能: XCAST を用いる高エネルギー大容量ファイル転送方式, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp.7–12 (2004).
- 3) Sumida, T. and Ito, K.: A highly Efficient Transport Protocol for Large Capacity

Data Files: Non-ordered Block Transfer on XCAST, *Proc. 7th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems*, Vol.1, pp.495–501 (2005).

- 4) 林 邦彦, 増田澄男, 田中榮一: 木構造図の描画アルゴリズムの効率化, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-A, No.3, pp.669–679 (1996).
- 5) 宮寺庸造, 田地 晶, 及部佳代子, 横山節雄, 近谷英昭, 夜久竹夫: 学術論文関係情報のグラフ描画に基づく視覚化手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-D-I, No.3, pp.398–415 (2004).
- 6) 杉山公造: グラフ自動描画法とその応用—ビジュアルヒューマンインタフェース, コロナ社 (1993).
- 7) Eades, P. and Tamassia, R.: Algorithms for Drawing Graphs: An Annotated Bibliography, Tech. Rep. CS-89-09, Dept. of Computer Science, Brown Univ. (1989).
- 8) 小池英樹: ビジュアルライゼーション, ビジュアルインタフェース—ポスト GUI を目指して, bit 別冊, pp.24–44, 共立出版 (1996).
- 9) <http://www.caida.org/>
- 10) 篠原晶子, 林 秀樹, 原 隆浩, 神崎映光, 西尾章治郎: アドホックネットワークのための視覚的シミュレータについて, 情報処理学会シンポジウムシリーズマルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2003) 論文集, Vol.2003, No.9, pp.597–600 (2003).
- 11) 篠原晶子, 林 秀樹, 原 隆浩, 神崎映光, 西尾章治郎: 視覚化機能をもつアドホックネットワーク・シミュレータのための再実行機構の実現, 情報処理学会シンポジウムシリーズマルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2004) 論文集, Vol.2004, No.7, pp.473–476 (2004).
- 12) 鈴木祐太, 古川園智樹, 青山 希, 井庭 崇: 動的ネットワークの可視化ツールの構築, 情報処理学会数理モデル化と問題解決研究報告, Vol.2006, No.29, pp.81–84 (2006).
- 13) 住田智雄, 伊東克能: XCAST を用いる高エネルギー大容量ファイル転送方式の有効性, 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会講演論文集, B-7-3 (2003).
- 14) 土田賢省: 木の描画問題に対する $O(n)$ と $O(n^2)$ 時間アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol.J76-D-I, No.6, pp.237–246 (1993).
- 15) Tsuchida, K.: The Complexity of Drawing Tree-Structured Diagrams, *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol.E78-D, No.7, pp.901–908 (1995).
- 16) 土田賢省: The Complexity of Tidy Drawings of Trees, *Topology and Computer Science*, pp.487–520 (1987).
- 17) 松林達史, 山田武士: 大規模ネットワークにおける可視化について, 情報処理学会ネットワーク

生態学シンポジウム (2006).

- 18) 鈴木祐太, 古川園智樹, 青山 希, 井庭 崇: 動的ネットワークの可視化ツールの構築, 情報処理学会ネットワーク生態学シンポジウム (2006).
- 19) Moody, J., McFarland, D. and Bender-deMoll, S.: Dynamic Network Visualization, *American Journal of Sociology*, Vol.110, pp.1206-1241 (2005).
- 20) 増田直紀, 今野紀雄: 複雑ネットワークの科学, 産業図書 (2005).
- 21) ダンカン・ワッツ (著), 栗原 聡, 佐藤進也, 福田健介 (訳): スモールワールド—ネットワークの構造とダイナミクス, 東京電機大学出版局 (2006).
- 22) Albert, R. and Barabási, A.-L.: Statistical mechanics of complex networks, *Review of Modern Physics* (2002).
- 23) Newman, M.E.J.: The structure and function of complex networks, *SIAM Review* (2003).

(平成 19 年 5 月 18 日受付)

(平成 19 年 11 月 6 日採録)



住田 智雄 (正会員)

2002 年東洋大学工学部情報工学科卒業. 2004 年同大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了. 現在, 同大学院博士後期課程在学中. ネットワーク, グラフ理論, 情報可視化, 複雑ネットワークの研究に従事. 電子情報通信学会会員.



土田 賢省 (正会員)

1982 年早稲田大学理工学部数学科卒業. 1984 年同大学院修士課程修了. 同年 (株) 日本電気入社. 1995 年神奈川大学助手 (工学部工業経営学科). 1997 年東洋大学講師 (工学部情報工学科). 現在, 同大学教授. AI 応用, アルゴリズム論に興味を持つ. 電子情報通信学会, 人工知能学会, ソフトウェア科学会, 教育システム情報学会, IEEE 各会員.



伊東 克能 (正会員)

1962 年東京大学工学部電気工学科卒業. 同年三菱電機 (株) 入社. 1998 年東洋大学工学部情報工学科教授. レーザデータ, 赤外線画像装置, 公衆通信用光システム, 光 LAN, コンピュータネットワークの研究に従事. 電子情報通信学会, 情報理論とその応用学会, IEEE 各会員.