

称号及び氏名 博士（工学） 柿田 将幸

学位授与の日付 平成 27 年 3 月 31 日

論文名 「コンテンツ指向網を形成する網内誘導情報の配布制御方式
に関する研究」

論文審査委員 主査 戸出 英樹
副査 松本 啓之亮
副査 黄瀬 浩一

論文要旨

近年、OS やゲームをはじめとしたソフトウェアのアップデート用データ、映像ファイルなどの大容量コンテンツ配信に起因するサーバ負荷およびネットワークトラフィックの増大が問題となっており、解決策としてサーバ以外のノードにコンテンツのキャッシュをもたせるアプローチが存在する。また、新世代ネットワークにおける枠組みとして、コンテンツ指向ネットワーク (CON: Content Oriented Network) という概念が提案されている。これは、ネットワーク利用の主な目的が従来の 1 対 1 型ホスト間通信に基づく電子メールの送信や遠隔ログイン等に加えて、コンテンツの配信や取得に遷移していることから提案されたものである。このような背景から、「キャッシュ」と「コンテンツ指向」というアイデアを組み合わせた研究が注目されつつある。

インターネット上を流通するコンテンツ数や参加ノード数が莫大な数に上ること、および多くの CON 研究が通信方式の刷新を必要とすることを踏まえて、本研究では、参加ノード数や流通コンテンツ数に関するスケーラビリティ (scalability)、および提案する手法の実現性 (feasibility) を重要なものとして位置付ける。そこで、本研究の目標は、CON と既存の IP ネットワークを融合し、高スケーラビリティと高実現性を備えたアーキテクチャを実現することとした。コンテンツ名に基づくルーティングに関していえば、処理の低負荷化と単純化の観点から受動的なアプローチを基本とすることが望ましいため、Breadcrumbs アーキテクチャを本研究の基盤とする。Breadcrumbs 方式 (以降 BC 方式) では、コンテンツ取得経路となったノード上にコンテンツキャッシュまでの誘導情報が残され、後発のリクエストがその誘導情報を辿ることでキャッシュへの到達を可能にしている。この受動的かつ簡素な構成によって、高スケーラビリティおよび高実現性を備えながら、自律的に CON を構築することが可能である。

BC 方式は、有用な特徴を備えた方式ではあるが、過度なまでの簡素性に起因する種々の問題を内在させている。本研究では、誘導情報制御に焦点を当てて、BC 方式に内包された問題の解決を図る。具体的には、本来受動的かつ静的な制御しか行わない BC 方式に対して、能動的かつ適応的な制御を大きく分けて 3 つの手法として提案する。その結果として、BC 方式の長所を生かしたまま、低伝送遅延、低トラフィック負荷、低オーバーヘッド、ネットワーク全体での負荷分散を実現するためのシステム運用を、自律分散制御を通して行うことができる新たな仕組みを構

築する。以下に各章における要旨を述べる。各章における有効性の確認については、計算機シミュレーションによる性能評価を通して行った。

第 2 章では、BC 方式における誘導情報の無効化制御を改良した **Breadcrumbs+**方式を提案した。

オリジナルの **Breadcrumbs** 方式には、特定状況下でリクエストがループ状に転送され続け、コンテンツ取得を行うことができなくなる問題が存在する。本研究では、この問題の原因が、誘導情報が形成する経路が交差する箇所において、誘導情報の無効化制御が適切に機能しないことであることを明らかにした。その上で、BC 方式に対して以下に挙げる改良を提案した。まず誘導情報のエントリの構成を変更する。次に、リクエストから無効化のための役割を分離して無効化制御用のメッセージを導入する。さらに、そのメッセージを活用することで、誘導情報の無効化制御手法を改良し、適応的に無効化を行うことができるようにする。本提案方式を **Breadcrumbs+**方式とし、コンテンツ探索の効率の向上を実現した。本方式を利用することで、リクエストの無限ループ問題を解決することができた。さらに、新たに導入した無効化用制御メッセージを活用することで、キャッシュミスの発生頻度を下げ、リクエストがコンテンツに到達するまでに要するホップ数を削減することができた。また、実現性を高めるために、ルータではなく、ユーザにキャッシュスペースを配置する環境でも **Breadcrumbs** に基づく方式が動作すること、さらに **Breadcrumbs+**方式では BC 方式に比べて短いホップ数でコンテンツを取得することができることを確認した。

第 3 章では、キャッシュ保持ノード自身が積極的に誘導情報制御に関与する方式を提案した。

基盤とした BC 方式は、受動的かつ簡素な構成であるがゆえに、非効率なコンテンツの流通経路を選択することがあり、特にユーザがキャッシュを保持する環境においては顕著な例が確認された。また、多数のユーザがキャッシュ保持ノードになることが想定される本環境では、各キャッシュ保持ノードが自身にかかる負荷に対して自律的に適切な処理を行う必要性が高い。本研究では、キャッシュ保持ノードが周辺のみに影響を与える特別な誘導情報を配布することにより、キャッシュ保持ノードが、保持するコンテンツの人気度や、自身の状態により誘導情報の配布範囲を適応的に変化させる **Active Breadcrumbs** 方式を提案した。本方式を利用することで、まず、リクエストおよびコンテンツの伝送経路を短縮した。次に、サーバ自身のコンテンツ配信に関する処理負担を軽減させた。さらに、ネットワーク中パケット量を削減した。また、適応的な誘導情報無効化制御によって、各キャッシュ保持ノードによる自律的な負荷分散を実現した。

第 4-6 章では、これまでのあらゆる中継ノードにおける一律な誘導情報制御とは異なる観点からの誘導情報制御を確立した。具体的には、何らかの制約条件を任意の指標により表すことで、誘導情報を作成するか否かを切り替えるフレームワークを提案した。

第 4 章では、同一ドメイン内からのコンテンツ取得を促進することを目的とし、「ネットワークドメイン」を指標として、**BC-Scoping on Domain** 方式を提案した。本方式では、コンテンツ要求ユーザと同一のドメインに所属しているルータのみに誘導情報を記録させる。本方式を利用することで、複数ドメインにまたがる長い誘導経路の発生を防止することに成功し、同一ドメイン内でのコンテンツ取得を促進することができた。それに伴い、コンテンツ取得経路の短縮、ネットワークトラヒックの削減が実現された。

第 5 章では、ネットワーク中に流通するコンテンツ数が膨大であること、名前に基づいたルーチングのメリットが高人気度コンテンツに対するものに限定されることを踏まえ、コンテンツの人気度に基づいてルーチング方式を切り替える手法を確立した。具体的には、コンテンツの人気度を指標として誘導情報の作成対象コンテンツ群を限定し、高い人気度をもつコンテンツに対し

でのみキャッシュや誘導情報を作成する **BC-Scoping on Popularity** 方式を提案した。本方式を利用することで、システムを運用するためのオーバーヘッドが削減された。また、コンテンツ取得経路を短縮した。本方式の利用に伴い、サーバ到達率が上昇した一方で、高人気度コンテンツに対するキャッシュ利用効率は上昇した。また、コンテンツ数を 10 倍に増やした評価も行い、コンテンツ数を増やす以前と同様の傾向の結果が得られることを確認した。さらに、ターゲットとするコンテンツの範囲を変更することで、サーバにかかる負荷とそれ以外の指標の間にあるトレードオフ関係を明らかにした。

第 6 章では、「ネットワークドメイン」と「コンテンツの人気度」という複数の指標を複合させた **BC-Scoping** フレームワーク運用法を確立した。本章では、3 層からなる階層型ネットワークを考えた。そこで、**BC-Scoping on Domain** と **BC-Scoping on Popularity** の 2 つを組み合わせることによって、狭いキャッシュスペースのキャッシュ利用効率を上げながら、コンテンツ取得経路の短縮、ドメイン間トラヒックの削減を目指した。本評価では、まず、第 3 層への **BC-Scoping on Domain** の単純な適用により、各ユーザにとって見かけ上のキャッシュ容量が減少することを確認した。しかし、第 2 層以下への **BC-Scoping on Domain** の適用と **BC-Scoping on Popularity** の適用との複合により、狭いキャッシュスペースを有効に活用することができた。その結果、**BC-Scoping on Popularity** を適用する前と比較して、コンテンツ取得経路、ネットワークトラヒック、オーバーヘッドに関する全ての指標が改善した。本評価を通じて、一定以上のキャッシュスペースを確保するために、他のドメインとの協力関係を築くことが、本提案方式の性能を向上させるための重要なポイントであることが確認できた。

第 7 章では、現在のインターネットで重要な役割を果たしているコンテンツ配信網と、これまでに提案してきた方式の性能比較を行った。効率的なコンテンツ流通という一面から見ると、**Akamai** を初めとした **Content Delivery Networks (CDN)** が現在のインターネットで最も広く利用されているアプリケーションサービスである。この実用段階にある **CDN** サービスと、研究段階にある **CON** との性能比較を行うことは、**CON** の研究を進める上での重要なステップである。本研究では、コンテンツ配信網と提案方式の設計思想の違いから生まれる差を定量的に評価することを目的とし、**Akamai** が提供する **CDN** サービスをモデル化した **CDN** 方式と、筆者らが提案している **Breadcrumbs** に基づく **CON** 方式とを定量的に比較した。その結果、コンテンツ取得経路の短さという観点からは提案方式と **CDN** 方式が同等程度の性能を示した。また、コンテンツ保持ノードのワークロードの観点からは、提案方式は **CDN** 方式と比べて **1/2500** 程度まで負荷を軽減することができた。さらに、ネットワーク全体のリンク利用の観点からは、提案方式は **CDN** 方式と比べて、ネットワーク全体に負荷をより広範囲に分散させていることが確認できた。特に、ワークロードとリンク利用の指標に関して、**CDN** 方式と比べて提案方式が良い性能を示すのは、集中型と分散型の設計思想の違いから生じる定性的な差の結果である。

第 8 章では、本研究で得られた結果を総括すると共に、今後の課題について議論した。

審査結果の要旨

本論文は、ユーザによる様々な「コンテンツ」の取得経路の履歴をネットワーク内に保存し誘導情報として活用することにより、別のユーザが所望のコンテンツを要求した際に、遠隔地のサーバではなく近隣のキャッシュノードから迅速に取得することを可能とするコンテンツ指向なネットワークシステムを既存の IP (**Internet Protocol**) ネットワーク上に実現するための研究であり、以下の成果を得ている。

- (1) コンテンツ取得経路となったノード上にコンテンツキャッシュまでの誘導情報が残され、後発のリクエストがその誘導情報を辿ることでキャッシュへの到達を可能にする **Breadcrumbs** 方式では、特定状況下でリクエストがループ状に転送され続けるという問題を発見し、その原因を詳細に分析した上で、上記問題を解決するための誘導情報の無効化制御手法を含む **Breadcrumbs+**方式を提案した。さらに **Breadcrumbs+**方式では **Breadcrumbs** 方式に比べて短いホップ数でコンテンツを取得することができることを確認した。
- (2) キャッシュ保持ノードが周辺のみに影響を与える特別な誘導情報を配布し、リクエストを自身に積極的に誘導すると共に、保持するコンテンツの人気度や、自身の状態により誘導情報の配布範囲を適応的に変化させる **Active Breadcrumbs** 方式を提案した。本方式を利用することで、リクエストおよびコンテンツの伝送経路を短縮した。また、サーバ自身のコンテンツ配信に関する処理負担を軽減させ、ネットワーク中の滞留パケット量を削減した。さらに、適応的な誘導情報無効化制御によって、各キャッシュ保持ノードによる自律的な負荷分散を実現した。
- (3) 何らかの制約条件を任意の指標により表すことで、誘導情報を作成するか否かを切り替える **Breadcrumbs Scoping (BC-Scoping)** フレームワークを提案した。具体的な方式として、まず、「ネットワークドメイン」を指標として **BC-Scoping on Domain** 方式を提案した。本方式を利用することで、複数ドメインにまたがる長い誘導経路の発生を防止することに成功し、同一ドメイン内でのコンテンツ取得を促進した。それに伴い、コンテンツ取得経路の短縮、ネットワークトラフィックの削減が実現された。次に、「コンテンツの人気度」を指標として誘導情報の作成対象コンテンツ群を限定し、高い人気度をもつコンテンツに対してのみキャッシュや誘導情報を作成する **BC-Scoping on Popularity** 方式を提案した。本方式を利用することで、システムを運用するためのオーバーヘッドが削減された。また、コンテンツ取得経路を短縮した。さらに、上記の両指標を複合させた **BC-Scoping** フレームワーク運用法を確立した。
- (4) 現在のインターネットで実用段階にある **Akamai** に代表されるコンテンツ配信網 (**CDN : Content Delivery Networks**) をモデル化し、その上で **CDN** と **Breadcrumbs** ベースの提案方式との設計思想の違いから生まれる性能差を定量的に評価した。その結果、コンテンツ取得経路の短さという観点からは提案方式と **CDN** 方式が同等程度の性能を示すこと、さらにはコンテンツ保持ノードのワークロードの観点からは、提案方式は **CDN** 方式と比べて **1/2500** 程度まで負荷を軽減することを明らかにした。

以上の諸成果は、将来のコンテンツ指向ネットワークを現在の **IP** ネットワーク上に構築するための技術に関する重要な知見を与えるとともに、その導入に向けての現状のシステムに対する優位性を定量的に示したものであり、本分野の学術的・産業的な発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。