

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文審査報告書

## 論 文 題 目

### Studies on Performance Improvement of Content Delivery over the Internet

インターネット上のコンテンツ配信方式の特性改善に  
関する研究

申 請 者

蘇 洲

SU Zhou

電子・情報通信学専攻 画像情報研究 安田靖彦教授

2003 年 7 月

近年、インターネットの利用が日常化し、その上のコンテンツは文字情報や静止画像から音声や動画等のストリーミング情報へと大容量化しつつある。こうしたコンテンツの大容量化によって、ノードや伝送路等のネットワーク資源には大きな負荷がかかるようになってきた。これを軽減すると同時に、ユーザが要求を出してから所望の情報を得るまでの時間、すなわちレスポンスタイムを縮減するために、Web コンテンツをそのオリジナルサーバからエンドユーザに効率的に配信する手法が各所で研究されており、インターネットの利用において非常に重要な課題の一つとなっている。本論文はインターネット上におけるコンテンツ配信に関して、従来から用いられているクライアント側におけるプロキシキャッシング、近年盛んに研究の行われている Content Distribution Networks (CDN) のパフォーマンス改善に関する研究を取りまとめたものであって、全6章から構成されている。

第1章 "Introduction" は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章は "Overview of Content Distribution" (コンテンツ配信概観) と題し、現在の Web コンテンツ配信技術である World Wide Web とプロキシキャッシングに加え、新しいコンテンツ配信パラダイムである CDN と Peer-to-Peer Content Distribution について述べている。また、これらの分野における標準化活動、グループについても紹介している。

第3章は "Distribution of Hierarchically Encoded Image" (階層符号化された画像の配信) と題し、従来から知られているグレースフル画像キャッシングアルゴリズムにプリフェッチングを付加した新たな効率的な画像の配信手法を提案し、詳細な検討を加えている。

Web において、ネットワークトラフィックの60%以上を占めている画像の効率的な配信手法は最も重要な問題の一つである。現在、一般的に利用されているプロキシキャッシングにおいては画像のデータサイズにかかわらず、キャッシュされるか否かの二者択一しかないハード・キャッシング戦略が用いられている。画像の階層的な符号化に基づくグレースフルキャッシング (ソフト・キャッシング) 手法は、従来手法と比較して優れたパフォーマンスを示すことが分かっている。本章においては、グレースフルキャッシングの Web アクセスに関する理論的な解析にもとづき、プリフェッチングとリプレースメント、すなわち次にアクセスされる確率の高い情報の先読みと置き換え手法とを統合したキャッシングアルゴリズムについて提案している。この提案アルゴリズムはプロキシサーバから容易に得られる情報にもとづき、キャッシュ内におけるドキュメントのヒット率、ユーザからの要求のパターンといった特性から、パラメータを柔軟に適応させることが可能である。提案方式について、関連するパラメータを変更したときの定量的評価を行ったところ、一般的に用いられている LRU

(Least Recently Used) と比較してヒット率について 26% の向上が達成されており、その効果は評価できる。

第 4 章は "Distribution of Segmented Streaming Media" (セグメントベースのストリーミングメディア配信) と題し、セグメントベースキャッシングと階層配信プロキシによるコンテンツ配信について提案を行っている。

高速ネットワークの利用の拡大に伴いインターネット上で配信されるストリーミングメディアが増加している。このような音声、動画像メディアは、HTML ファイルや静止画像を代表とする一般的な Web オブジェクトと比較し、統計的性質、アクセスパターンが異なるため、従来のキャッシング手法を適用するのは効率性の観点から望ましくない。そのため、本章ではセグメントベースキャッシングと階層配信プロキシによるストリーミングメディアの統合キャッシングを提案している。

まず、ストリーム全体を単一のプロキシでキャッシュすることは非効率であるため、Last Watch, Average Watch, Judging の三つのセグメントベースキャッシングアルゴリズムを提案し、比較検討している。また、ストリームにはそれぞれが異なった人気度があり、またセグメントごとにおいても異なったアクセスパターンを持っているため、それに適応するキャッシュ置き換えアルゴリズムについて Popularity Policy と Balance Policy の二つを提案し、比較検討している。従来の置き換えアルゴリズムでは、一つのストリーム全体に対して単一の人気度が割り当てられていたのに対し、提案手法ではセグメントに対して二つの優先度を設ける。一つはアクセス特性を反映し、他方はストリーム内の位置を表す。また、一般的な Web オブジェクトのキャッシング手法と親和性を持つ、EWMA (Exponential Weighted Moving Average) Estimator を用いたセグメントベースストリーミングキャッシングの拡張についても検討している。シミュレーションにより、提案手法が従来の手法と比較して優れたパフォーマンスを持つことを示している。また、キャッシングアルゴリズムについては、Judge 方式が最も優れていることを示している。一方、置き換えアルゴリズムについては、Popularity Policy がネットワークの輻輳に適応的であり、Balance Policy はレスポンス時間を短縮するのに有用であることを明らかにした。これらのキャッシングアルゴリズムと置き換えアルゴリズムを併用することにより、セグメントヒット率はセグメントベースでないキャッシング手法と比較し 49% の向上を示しており、提案方式は高く評価できる。

第 5 章は "Replication Algorithms for Hierarchical Streaming Media in CDN" (CDN における階層化ストリーミングメディアの複製アルゴリズム) と題し、システムに必要とされるリソースとレスポンス時間の抑制を目的として、階層化ストリーミングを用いた複製手法を検討している。

現在の CDN における複製の戦略はオリジナルオブジェクトと全く同一の複製を多

くのコンテンツサーバに配置する。コンテンツサーバは必ずしも常にクライアントからの要求を受けるわけではないので、この方式では保存領域が浪費される可能性がある。最近では階層化ストリーミングメディアが、その柔軟性と機能性よりインターネットに適していることが知られている。本章ではまず、複製の保存コスト、容量制限、階層化ストリーミングのアクセス分布に関する理論的な解析にもとづき、人気度だけでなくネットワークポロジを考慮した複製アルゴリズムについて提案している。すなわち、ストリームに対して複製を行うコンテンツサーバ数、コンテンツサーバの一つのストリームに対して複製するレイヤ数およびコンテンツサーバにおける複製の優先度を考慮して、AS (Autonomous System) ホップ数を削減する複製戦略を導出している。提案アルゴリズムと従来の複製戦略をシミュレーションにより比較検討し、提案手法は従来手法と比較して AS (Autonomous System) ホップ数が 50% 削減されることを示している。しかもこの改善はアクセスパターンの変化に対して安定的であって、この提案手法がいかなる状況の変化にも対応可能であることを明らかにしており、評価できる。

第 6 章 "Conclusion" は結論であって、本研究によって得られた主要な結果を要約している。

以上これを要するに、本論文はインターネットにおけるコンテンツ配信方式において、ネットワーク資源の効率的な使用とクライアントのレスポンス削減の観点から多角的に検討を加え、階層符号化方式を用いた画像配信手法、セグメントベースキャッシングと階層配信プロキシによるコンテンツ配信、CDN におけるストリーミングメディアの複製手法等、有用な成果を挙げコンテンツ配信方式の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。

2003年7月

#### 審査員

主査	早稲田大学教授	工学博士 (東京大学)	安田 靖彦
	早稲田大学教授	工学博士 (早稲田大学)	高畑 文雄
	早稲田大学教授	工学博士 (早稲田大学)	小松 尚久
	早稲田大学助教授	工学博士 (東京大学)	甲藤 二郎