

## 論文の内容の要旨

論文題目	動画配信サービスのための軽量分散協調キャッシュ基盤の研究
学 位 申 請 者	中島 拓真

本研究の目的は、オンデマンド動画配信サービスの普及に伴って増大するインターネット通信量を削減するため、通信量削減効果の高いキャッシュ基盤を実現することである。具体的には、ユーザのアクセス傾向が変化しても高いキャッシュヒット率を維持可能なハイブリッド・キャッシュと、色タグ情報を用いた分散協調キャッシュの軽量制御アルゴリズムを提案し、動画配信ネットワークの通信量削減効果を実験的に明らかにする。

はじめに、時刻に関係なく動画を視聴できるオンデマンド動画配信 (Video-on-Demand; VoD) サービスの普及に伴い、インターネット通信量が急激に増大していることを述べ、その通信量削減が重要であることを述べる。増大する通信量はネットワークの増強でも対応できるが、その場合には莫大なコストを要する。一方、キャッシュサーバを活用した通信量削減が試みられているが、既存のキャッシュの仕組みでは、動画容量の増大や、アクセス傾向の急激な変化に追従することが難しく、十分な通信量削減が困難であることを説明する。

本論文では、動画通信を効率よく削減すべく、動画通信の特徴に着目して軽量分散協調キャッシュ基盤を提案している。具体的には、(1) アクセス傾向が急激に変化しても高いヒット率を維持できること、(2) 複数のキャッシュサーバを組み合わせて大容量キャッシュを構成できること、(3) 軽量の計算で制御が可能であること、の3つの課題を設定し、それぞれ解決することで、動画通信を効率よく削減する分散協調キャッシュ基盤を実現する。これら(1)(2)(3)に合致するキャッシュアルゴリズムを提案し、組み合わせることで問題を解決する。

まず、上記(1)と(3)に着目し、動画アクセス傾向が急激に変化した場合にも、高いヒット率を維持できる、ハイブリッドキャッシュアルゴリズムを提案する。ハイブリッドキャッシュは、VoDサービスのアクセス傾向を効率よくキャッシュする2種類のキャッシュ制御アルゴリズムを組み合わせて利用することで通信量の削減を図る。具体的には、アクセス頻度の高いコンテンツを優先的に保持するLeast Frequently Used (LFU) アルゴリズムと、急激なアクセス傾向の変化に追従可能なLeast Recently Used (LRU) アルゴリズムを組み合わせることで、高いヒット率を維持する。LFUアルゴリズムはコンテンツのアクセス頻度をもとにキャッシュ可否を決定するアルゴリズムであるが、アクセスログの解析結果を一定期間利用することで、頻繁な計算オーバーヘッドの発生を回避する。LRUとLFUのキャッシュアルゴリズムで動作するキャッシュサーバをそれぞれ組み合わせる方法と、1台のキャッシュサーバで2種類のアルゴリズムを混合して利用する方法をそれぞれ評価し、急激に変化する動画アクセスに追従してキャッシュ可能であることを示す。また、LFUで保持するキャッシュのリストの構成方法を工夫することで、複数のキャッシュサーバを協調させて大容量キャッシュを実現するための技術を示す。

次に、上記(2)と(3)に着目し、複数のキャッシュサーバを組み合わせることでキャッシュ容量を大容量化する、軽量な分散協調キャッシュを提案する。具体的には、色タグ情報を用いた分散協調キャッシュ制御手法を提案し、キャッシュネットワーク中のコンテンツ配置を効率よく制御できることを示す。提案手法は、コンテンツとキャッシュサーバの両方に色タグを設定し、色がマッチする場合にキャッシュするよう制御することで、コンテンツを分散配置し、実効キャッシュ容量を拡大する。このため、先に述べたハイブリッドキャッシュのLFU領域に色タグを設定して大容量な分散協調領域として利用するとともに、小容量なLRU領域ではタグ情報にかかわらずコンテンツをキャッシュすることで、動画アクセス傾向の変化に追従する。アクセス頻度の高いコンテンツほど多数の色を割り当てることでユーザからのホップ数を短縮し、コンテンツ配信サーバだけでなくISPネットワーク内部の通信量も効率よく削減する。色タグ情報の軽量管理手法と、色タグ情報を活用する経路制御アルゴリズムも合わせて提案し、軽量な計算オーバーヘッドで高い通信量削減効果があることを示す。

最後に、以上の取り組みを通して得られた知見をまとめるとともに、提案した2つのキャッシュ制御手法を組み合わせたキャッシュ基盤が、動画通信量を効率よく削減できることを述べる。また、今後取り組むべき研究課題についての方針を示す。



## 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名	中島 拓真
審査委員主査	吉永 努
委員	加藤 聰彦
委員	大坐 昌 智
委員	田野 俊一
委員	本多 弘樹
委員	
委員	

本論文は、VoDサービスの普及に伴って増大するインターネット通信量の削減を目的として、動画アクセス傾向に着目した軽量で効率の良い分散協調キャッシュ基盤技術を提案し、その有効性を示している。具体的には、短時間で大きく変化する動画アクセスに対してヒット率を維持するハイブリッドキャッシュと、複数のキャッシュサーバを組み合わせて大容量キャッシュを構成する分散協調キャッシュを提案し、それらを組み合わせて利用することで、VoD通信量を効率よく削減できることを示している。本論文は下記の5章で構成されている。

第1章では、現在のインターネット通信量と今後の増大予測、および現状とられているキャッシュサーバの利用方法についてまとめている。高い通信量削減効果を実現するためには、ユーザに近い通信事業者 (ISP) のネットワークにキャッシュサーバを配置することが重要であることを記した上で、現在のキャッシュサーバはコンテンツ配信事業者によって管理・運用されているため、ISPが意図しない混雑や有料リンクの過剰利用が懸念されることを説明している。その後、ISPが管理する複数キャッシュサーバを組み合わせた新しい分散協調キャッシュ技術の必要性を述べている。また、通信量の効率的な削減に必要な分散協調キャッシュの要件を整理し、取り組むべき方針を明らかにしている。

第2章では、対象とするネットワーク構造を明らかにした上で、動画配信サービスのアクセス傾向、キャッシュアルゴリズム、分散協調キャッシュ制御手法および経路制御方法についてそれぞれ議論している。動画配信サービスのアクセス傾向に着目すると、既存のキャッシュ制御手法では (1) 急激な動画アクセス変動に追従できずヒット率が下落してしまう、(2) 複数キャッシュサーバを利用できず、キャッシュ容量が不足して通信量が増大してしまう、(3) キャッシュ効率制御のための計算時間が長く実現性に欠ける、という問題があることを示し、これら3つの課題を解決する新しい分散協調キャッシュ基盤の必要性を明らかにしている。

第3章では、上記(1)と(3)に焦点を当てて、急激に変化する動画アクセス傾向に追従してヒット率を維持できるハイブリッドキャッシュアルゴリズムを提案している。まず、アクセス傾向が一定の場合に高いヒット率を示すLeast Frequently Used (LFU)アルゴリズムと、アクセス傾向が変化しても一定のヒット率を維持するLeast Recently Used (LRU)アルゴリズムを説明した後、それらを組み合わせることで安定して高いヒット率が維持できることを示している。さらに、(a)階層ネットワークを想定して複数のキャッシュサーバを多段接続し、それぞれ異なるアルゴリズムを利用する方法、及び(b) LFU/LRU割合を調整可能にするため、単一のキャッシュサーバの領域を2つの異なるアルゴリズムで分割して制御する方法、をそれぞれ提案している。評価では、ある時刻にアクセス傾向が急激に変化した場合にも高いヒット率を維持できることを示している。また、複数キャッシュサーバを組み合わせた分散協調キャッシュを構成する場合も、LFUの制御アルゴリズムを工夫することで拡張できることを示している。

第4章では、上記(2)と(3)に焦点を当てて、複数のキャッシュサーバをまとめて分散協調キャッシュを構成し、それらを効率よく制御するアルゴリズムを提案している。まず、遺伝的アルゴリズムで準最適なキャッシュ配置を計算してその傾向を分析し、コンテンツの分散配置と重複配置の組み合わせが重要であることを考察している。その上で、キャッシュサーバとコンテンツをあらかじめ複数のグループを割り当ておき、グループがマッチする場合にのみキャッシュするキャッシュ制御と、軽量のグループ制御アルゴリズムを提案している。グループの自動割当方法、階層ネットワークにおける応用方法、ハイブリッドキャッシュとの組み合わせ方法、効率的な経路制御方法についても合わせて提案している。これらを組み合わせることで、数秒程度の計算時間で準最適に近い通信量削減効果を達成できることを示し、動画アクセス傾向の急激な変動時にも高いヒット率を効率よく維持できることを示している。

第5章では、本論文を通して得られた結果と知見をまとめ、第3章と第4章で提案したキャッシュ制御方法を組み合わせることで、軽量で効率の良い分散協調キャッシュ基盤が実現できることを示すとともに、今後の研究課題の方針について言及している。

以上、動画のアクセス傾向に基づいた効率の良い通信量削減は、今後のインターネット通信量増大を抑制するとともに、ネットワーク基盤への少額の投資で大きな改善効果が期待できる。軽量の分散協調キャッシュ制御アルゴリズムは、実運用の観点からも利点大きい。本論文はこれらの点において学術型研究としての貢献があり、博士(工学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。