

# ユーザクラスタリング機構を用いた コンテンツ自動配信システムの構築

池田 康 西野 卓秀 松井 優詞 胡 天成 中沢 実 服部 進実

金沢工業大学工学部 情報工学科

〒921-8501 石川郡野々市町扇が丘 7-1

E-mail : { ikeda, nishino, matsui, tchu, nakazawa, hattori } @ infor.kanazawa-it.ac.jp

現在 CDN ( Content Distribution/Delivery Network ) をインフラとする様々なコンテンツ配信サービスが行われている。しかし、広域なネットワーク上で CDN を用いるためにはコストが高いという課題があり、CDN プラットフォームのコスト最適化が必要である。そこで、コンテンツ配信にかかるコスト削減を目的としたポリシーを既存 CDN に導入した P-CDN ( Policy based CDN ) を提案する。本論文では P-CDN の機能概要および組込んだポリシー、試作機によって行った実験結果を報告する。本実験では、試作機がポリシーに基づいて動作することを確認し、本システムの有効性を示す。

## Implementation of Automated Content Distribution System using User Clustering Mechanism

Yasushi Ikeda Takahide Nishino Yuji Matsui Tensei Ko  
Minoru Nakazawa Shimmi Hattori

Department of Information Engineering, Kanazawa Institute of Technology  
7-1 Ogigaoka, Nonoichimachi, Isikawagun 921-8501

E-mail : { ikeda, nishino, matsui, tchu, nakazawa, hattori } @ infor.kanazawa-it.ac.jp

Recently, CDN (Content Distribution/Delivery Network) is used as an infrastructure of various contents distribution services. However, CDN has a problem that cost is high on a wide area network. Therefore, optimization of cost is required. Then, P-CDN (Policy based CDN) is proposed in this paper. It reports its technologies, policy, and the experiment result by the prototype system. By experiment, it has been proven that prototype can realize intended operation.

### 1 . はじめに

現在 CDN ( Content Distribution/Delivery Network ) をインフラとする様々なコンテンツ配信サービスが行われており、アクセスネットワークのブロードバンド化に伴って CDN 市場は成長し続けるという予想である [1] 。しか

し、広域なネットワーク上で CDN を用いるためにはコストが高いという課題があり、CDN プラットフォームのコスト最適化が必要である。そこで、コンテンツ配信にかかるコスト削減を目的としたポリシーを既存 CDN に組み込んだ P-CDN ( Policy based CDN ) を提案する。

CDN 事業者には、Akamai [2] などのようにキャッシュ

サーバを用いたものと、IJ [3]などのように自前のバックボーンネットワークを活用しエンドユーザまでコンテンツを配信するものがあるが、P-CDN の対象とするのは前者である。ネットワーク上に配置されたキャッシュサーバ（以下 CS）をポリシーに基づいて自律的に協調させることによって、コンテンツ配信に関わるコストを削減する。

本論文では、2章でP-CDN のシステム概要、3章でポリシーについて述べる。4章では本提案方式のプロトタイプシステムについて説明し、5章では本プロトタイプシステムを用いた実験とその評価、最後に6章で本論文のまとめを行う。

## 2 . P-CDN

P-CDN とは、アプリケーションから多様なポリシーが選択可能な CDN であり、既存 CDN に戦略性を持たせることができる。ポリシーとは具体的にキャッシュサーバ（CS）間におけるコンテンツ配置アルゴリズムのことであり、本システムはポリシーに基づいて CS 間でコンテンツの複製を行う。P-CDN の特徴は以下の4つである。

- (1) ポリシーに基づくコンテンツ配置
- (2) ポリシーの内容は条件内で自由
- (3) 複数のポリシーを組み合わせ可能
- (4) ポリシーの選択は自由

多様なポリシーを利用可能とするためには、ポリシーの実装は柔軟でなければならない。そこで、ポリシーと複製を実行するモジュールとを分離した。ポリシーに基づき複製の指令を出すモジュールを解析モジュール、複製を実行するモジュールを複製モジュールと呼ぶことにする。

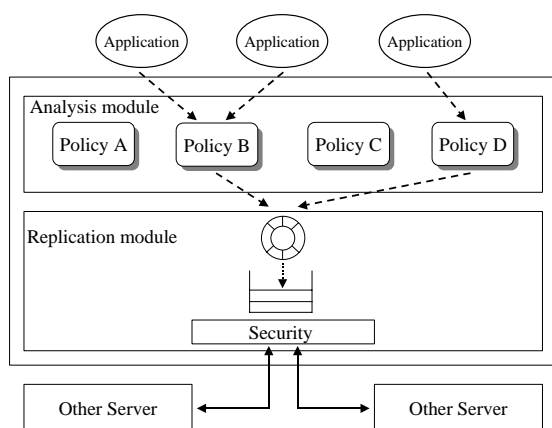


図 1 P-CDN の概念図

### 2.1 解析モジュール

解析モジュールの役割は 2 つある。1 つはアプリケーション

に対してポリシーの選択性を提供することである。もう 1 つは、ポリシーに対してシステムが組み込まれている CS やネットワークの状態を提供する役割である。ポリシーに提供される項目を以下に示す。

- (1) CPU 使用率
- (2) メモリ使用率
- (3) コネクション数
- (4) データ転送量
- (5) ユーザからのリクエストのログ
- (6) 外部との通信用のメッセージ通信機能

### 2.2 複製モジュール

複製モジュールはポリシーからの指令を受け、それに基づいて実際にコンテンツを複製するモジュールである。ポリシーから複製モジュールになされる指令は、以下に示す 2 つの要素から構成される。

- (1) コンテンツの名前 (URL)
- (2) 複製先サーバ名 (IP アドレス)

また、このモジュールは他の CS、つまり外部と通信するものなので安全性が確保されなければならない。複製するコンテンツの暗号化、複製相手の認証および許可が必要になるが、現在これらは実装されてはならず、今後の課題とする。

解析モジュールと複製モジュールとの分離によって様々なポリシーの開発および実装を簡単化でき、ポリシーの開発だけに専念できる環境が生まれると考える。

## 3 . ポリシー

ポリシーは複製モジュールとのインタフェースに従いさえすればどのようなものでもよく、様々なアルゴリズムが適用可能である。現在本システム上には 1 つポリシーを組込んでおり、次にその説明をする。

### 3.1 提案ポリシー

1章で述べた問題を解決するために今回提案するポリシーは「コンテンツ配信におけるコストを削減」というものである。既存の CDN の目的が単純に「利益の最大化」というものであるのに対して、本提案ポリシーはコストの無駄を省くということが目的となる。ここでいう利益とは、エンドユーザから CS へ行われるリクエスト数のことである。コンテンツ配信においては、より多くのリクエストに対応できるということが利益といえる。提案ポリシーを実現するために必要な条件を 3 つ以下に示す。

- (1) 利益を多く生む場所 (地域) の把握
  - (2) 利益の高いコンテンツの抽出
  - (3) 最適なサーバにコンテンツを複製
- この 3 つを満足するために、3 つのアルゴリズムを使用す

る。(1)にはユーザクラスタリング、(2)には選択的コンテンツ抽出、(3)には独自の最適サーバ探索を用いる。3.2節で(1)の説明をし、3.3節で(2)、3.4節で(3)について述べる。

### 3.2 ユーザクラスタリング

ユーザクラスタリングとは、ユーザのグループ化のことである。グループ化による利点を以下に2つ挙げる。

- (1) リクエスト傾向の把握がしやすい
- (2) 複製を効率的に行える

まず、(1)について説明する。ユーザ1人毎にリクエスト傾向を把握するよりもグループ単位で行う方が処理負荷を軽減することができ、把握しやすいものとなる。グループが類似した嗜好や特徴を持つユーザの集合だとすれば、グループ内のユーザは類似したコンテンツをリクエストする事が期待できるため、グループ単位のリクエスト傾向はユーザ単位のものと同様に考えることができる。つまり、グループ化によってユーザ単位でリクエスト傾向を把握する必要はなくなり、ユーザ単位では難しい傾向の把握をしやすいことを意味する。

(2)はユーザ単位でコンテンツの複製を行うのではなくグループ単位で行うため、複製1回に対する効果を高めることができる。例えば、リクエスト傾向の異なる2つのグループがあった場合、リクエストの少ないグループに対してコンテンツの複製を行うよりも、リクエストの多いグループに対して行う方が提案したポリシーに基づいて効率的である。既存CDNがリクエストの有無によってコンテンツの複製を行うかどうかの判断をしてきたのに対し、リクエスト数の多いか少ないかによって複製の判断を行うという本提案ポリシーにおいては、グループ化が非常に有効である。

これまで述べたとおり、グループ化によってもたらされる効果は高いのだが、ここで重要なのはグループ化が何に基づいて行われて、その精度がどの程度であるかということである。今回はコンテンツ配信における最適化ということを重視し、ネットワークポロジに基づいてユーザのグループ化を行うNetwork-Aware Clustering [4]を簡略化したものを用いることにする。

Network-Aware Clusteringとは、BGP (Border Gateway Protocol) ルーティングテーブルのスナップショットとユーザのIPアドレスを使用してグループ化以下、クラスタリング)を行うものである。[4]では90%以上のユーザを実際のネットワークポロジに基づいてクラスタリングが行えることが示されており、高精度のクラスタリングアルゴリズムといえる。しかし、このアルゴリズムには下の2つの問題点を挙げる事ができる。

- (1) CSにかかる計算負荷が高い

- (2) スケーラビリティに欠ける

ネットワークの変動に対応するためにスナップショットを定期的にダウンロードしてクラスタリングを行う必要があるのだが、この処理は高負荷なもので、CS本来の処理に影響を及ぼしかねない。そこではさらなる高精度化のためにクラスタリング後、幾つかの補完処理が行われているが、本システムにおいてはアルゴリズムの簡略化を行うことによって処理負荷を軽くすることにする。(図2参照)

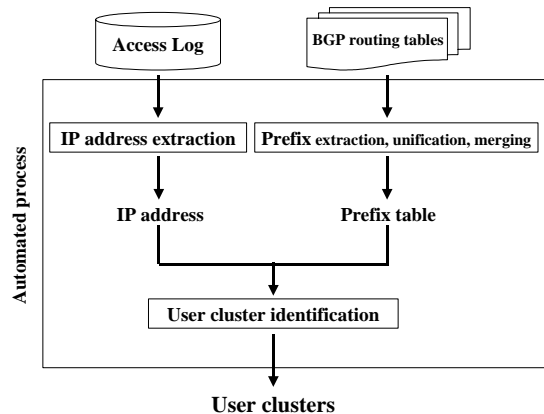


図2 ユーザクラスタリングアルゴリズム

また、Network-Aware Clusteringの精度を高めるためには、より多地域のBGPルーティングテーブルのスナップショットが必要であるが、全てのゲートウェイのスナップショットが公開されているわけではないので、スナップショットが取得できない地域のクラスタリングは低精度となる。さらに、そもそもスナップショットを取得できる環境でなければこのアルゴリズムを使用することができないので、スケーラビリティに欠けているといえる。しかし、この問題については今後の課題とする。

### 3.3 選択的コンテンツ抽出

コンテンツを選択的に抽出するのは、最小限のコストで利益を上げるコスト最適化のためである。先に述べたように、利益とはリクエスト数のことであり、リクエストの多いコンテンツのみを複製対象とすることで、リクエストの少ない(利益の少ない)コンテンツに関するコストを削減することができる。しかし、リクエストの多いコンテンツをリクエストされる以前に把握する必要がある。

これはユーザのリクエストを予測することであり、非常に難しい問題であるが、プロキシサーバのアクセスログを解析することによって得たコンテンツ抽出法を提案する。

本提案ポリシーにおいてはグループ単位でリクエスト傾向を把握すると前述したが、グループのリクエスト傾向を知る手段としてプロキシサーバのアクセスログを解析する

ことが有効である。プロキシサーバは学校や企業などの組織の出入り口に位置し、ユーザのリクエストを代行する役割を持つ。リクエストの履歴はアクセスログとして蓄積されるので、ログを解析すれば組織単位でのリクエスト傾向がわかる。今回解析したログは金沢工業大学服部研究室、情報工学科、本学学生約 3000 人が加入している ISP のプロキシサーバの 3 つである。それぞれのログの詳細については表 1 に示す。ただし、不正アクセスや正規のリクエストではないものを除いた。また、ログの解析においてユーザのプライバシーが守られなければならないことは言うまでもない。

表 1 アクセスログの詳細

|                   | 研究室                 | 情報工学科               | ISP                 |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ログ採取期間            | 2001/09/01 から 2 ヶ月間 | 2001/09/01 から 2 ヶ月間 | 2001/12/25 から 1 ヶ月間 |
| IP アドレス数          | 44                  | 497                 | 933                 |
| 総リクエスト数           | 177841              | 8711447             | 2447261             |
| 総 URL 数           | 55946               | 1896813             | 935410              |
| 1URL に対する最大リクエスト数 | 3128                | 66481               | 21191               |

表 2 解析結果概要

|                | リクエスト数多い | リクエスト数少ない |
|----------------|----------|-----------|
| コンテンツ数         | 少ない      | 多い        |
| その後リクエストされる可能性 | 高い       | 低い        |

3 つのプロキシサーバのログ解析結果より、表 2 に示すことがわかった。リクエスト数が多いコンテンツは少量しかないことがわかった。これによって、リクエストの多いコンテンツだけを抽出することによって、ディスクスペースや管理コスト、複製に関する処理などを削減することができる。リクエストの多いという判断は定性的に行ったものであり、特に定義があるわけではない。一般的にこのような傾向があるということである。

次に、リクエスト回数が増加するとその後リクエストされる確率が高くなることがわかった。図 3 は 10 回以上リクエストされる確率を表したものである。図 3 はリクエスト回数が増えるとその後リクエストされる確率が高くなるという傾向を示しており、リクエスト数が多いものを抽出

するとそのあと利益を生むといえる。

では実際にリクエスト回数がどの程度になればコンテンツ抽出を行うべきなのかを説明する。上で述べた確率がいくら高くても、その後リクエストされる回数が少なければ、本当に利益を生んだとはいえない。そこで、その後リクエストされる確率と、その後獲得できる利益(リクエスト数)との積を求め、これを期待値とし、最も期待値の高いリクエスト回数をコンテンツ抽出閾値とする。

期待値を求めたものを図 4 に示す。図 4 より、あるリクエスト回数で期待値が極大値を取ることで、どのプロキシサーバかによって極大値をとるリクエスト回数が異なることがわかる。それぞれのプロキシサーバによる違いは、グループ毎のリクエスト傾向の違いを表している。極大値をグループ毎に求め、これをコンテンツ抽出閾値とする。

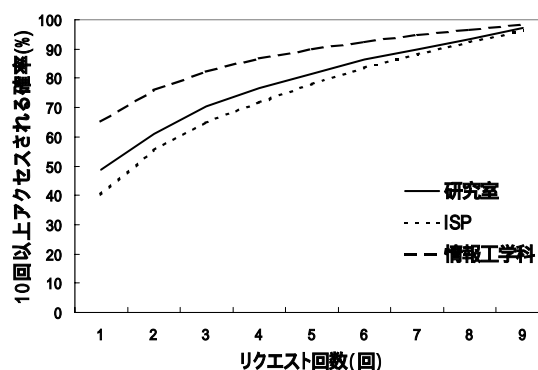


図 3 10 回以上リクエストされる確率

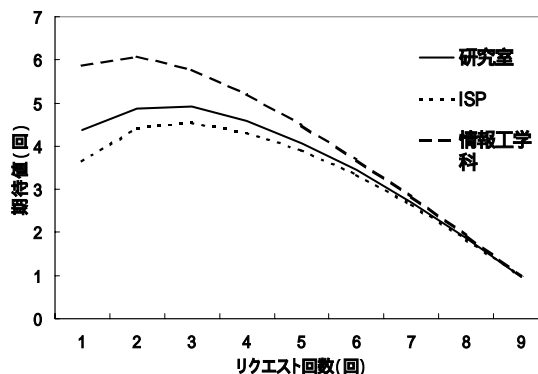


図 4 期待値

図 4 と同じように、{20、30、40、...、100} 回以上リクエストされる確率に対して期待値を求め、それぞれ極大値をとるリクエスト回数を縦軸に取ったものが図 5 である。

横軸であるリクエスト回数は、何回リクエストされたものを利益が高いとするかによって決まる。例えば、100回以上リクエストされるコンテンツを利益が高いとすると、情報工学科ならばリクエスト数13回でコンテンツを抽出すればよいことがわかる。また、この直線の傾きはグループのリクエスト幅の大きさを表している。傾きが小さいグループほどリクエストが偏っており、抽出しきい値は小さくなる。逆に傾きが大きいグループほどリクエストが幅広く、しきい値は大きくなる。

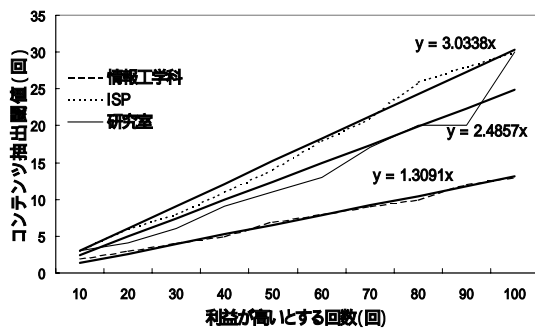


図5 抽出閾値導出式

このコンテンツ抽出しきい値導出手法により、グループのリクエスト傾向を反映させたしきい値の設定が可能になり、これらはCSのログを解析することによって求める。

### 3.4 最適サーバ探索

ユーザクラスタリングによって求めたクラスター毎に選択的コンテンツ抽出を行い、複製するコンテンツと複製先の目標となる場所(クラスター)を導出することができた。

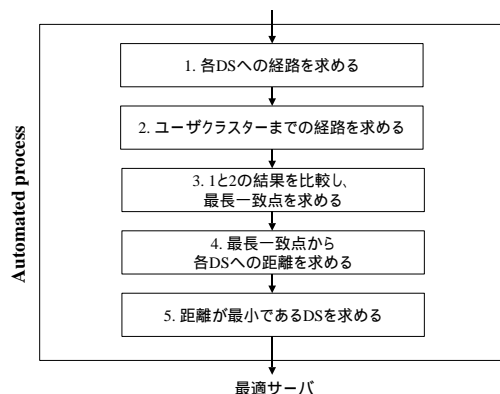


図6 最適サーバ探索手順

しかし、複製を行うためには複製目標のクラスターに対

して最適である複製先CSを発見しなければならない。そこで、最適サーバ探索が必要となる。ただし、本論文においては最適サーバを目標クラスターから最も近いサーバとし、単純にラウンドトリップタイム(以下、RTT)の小さいものを近いとする。

最適サーバ探索に関連する他研究には様々なものがあるが、それらほとんどがDNSやレイヤ7スイッチを基盤としたものであり、ユーザの遠隔から最適サーバを探索するものはまだない。本研究においてもまだ有効なアルゴリズムを提案できる段階にないため、今回はツリー状または直線的なネットワークポロジーに限定して適用できるアルゴリズムを提案し、図6に手順を示す。

## 4. プロトタイプシステム

P-CDNのプロトタイプシステムを実装した。プロトタイプシステムはPC/AT互換機のFreeBSD上に実装した。システムはキャッシュサーバソフトウェアであるSquid [5]を基にして作成した。Squidにはコンテンツのキャッシュ機能やキャッシュサーバ間通信機能があるので、コーディング作業を大幅に減らすことができる。システム構成を図7に示す。

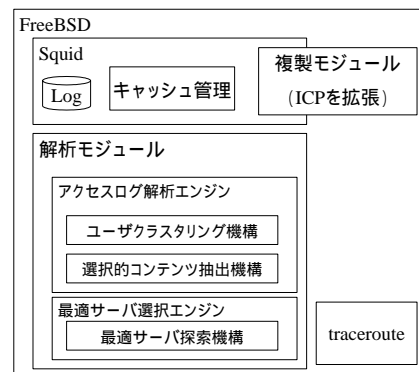


図7 システム構成

## 5. 実験と評価

プロトタイプシステムを図8のネットワーク構成において動作させ評価を行った。評価項目は以下の3つである。

- (1) 閾値によって複製が行えるか
- (2) (1)がクラスター毎に行えるか
- (3) 最適サーバが探索されているか

### 5.1 実験詳細

クライアント が試作機 A に対してリクエストを行う。

今回ログの蓄積を行っていないため、各試作機の抽出閾値は10回固定に設定してある。また、試作機Aと試作機Bとを差別化するため、試作機AのNIC(Network Interface Card)は意図的に性能の低いものにしてある。

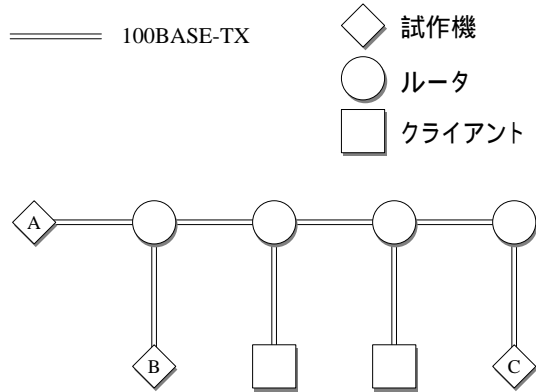


図 8 実験環境

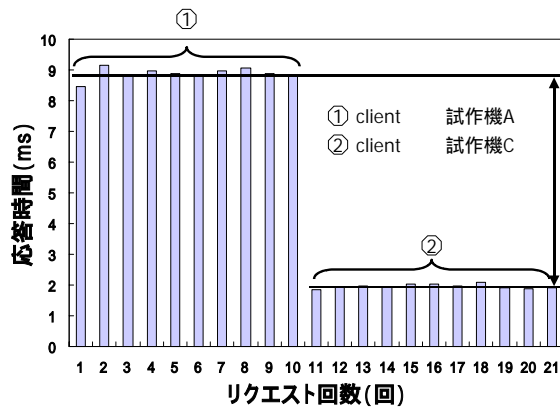


図 9 クライアント に対する応答速度 (1)

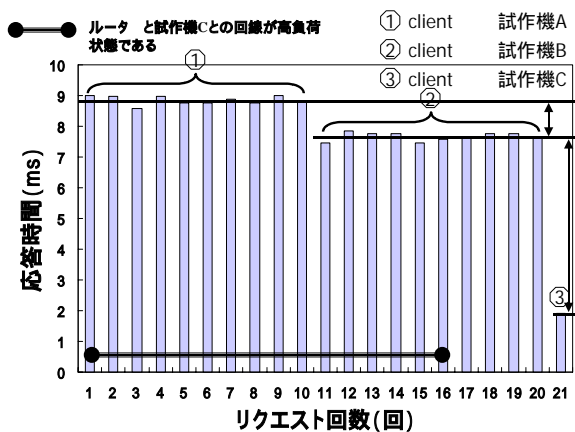


図 10 クライアント に対する応答速度 (2)

図 9 より、閾値による複製によってクライアント に対する応答速度が向上しているのがわかる。これは、閾値を境にクライアント に最も近い試作機Cにコンテンツが複製され、クライアント のリクエストが試作機Cに対して行われるようになるからである。これで評価項目(1)と(2)が満足された。

図 10 では、ルータ と試作機Cを一定時間高負荷状態にした時のクライアント に対する応答速度の変化を表したものである。試作機Cが高負荷状態であるために、まず試作機Bにコンテンツが複製され、その後試作機Cに複製されているのがわかる。この実験によって評価項目(3)も満足された。

## 6. まとめ

本論文では、既存 CDN における課題を明らかにし、解決手法として P-CDN を提案した。また、本機構のプロトタイプシステムを実装し評価を行い、提案ポリシーに基づいてシステムが動作することを確認した。よって、このシステムは本論文で挙げた要求事項を満足していることを示せた。

今後の課題としては、インターネット上での実験や、通信のセキュア化、最適サーバ探索アルゴリズムの改良、柔軟なリクエストルーティングシステムの実装などを挙げることができる。また、選択的コンテンツ抽出の精度を高めるためにも、ログを採取する期間についても検討が必要である。

**謝辞** 本研究は、通信・放送機構の地域提案型研究開発制度の支援を受けて実施された。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] <http://www.net.intap.or.jp/INTAP/information/2001/pwr20011018/pwr-20011018.pdf>
- [2] Akamai Technologies, Inc., <http://www.akamai.com/>
- [3] Internet Initiative Japan <http://www.ij.ad.jp/>
- [4] Balachander Krishnamurthy and Jia Wang. On Network-Aware Clustering of Web Clients. In Proceedings of ACM SIGCOMM, August 2000.
- [5] Squid Web Proxy Cache <http://www.squid-cache.org/>