

ユーザ選好に基づく分散コンテンツキャッシュポリシー

中塚 康介 八槇 博史

Abstract.

To deliver multimedia contents efficiently, a content delivery network (CDN) is used in the Internet. CDN has caches in points-of-presence of internet service providers and stores multimedia contents actively. In CDN, it is important to choose contents to cache, because the caching policy is important to effectiveness.

In this paper, we formulate the preference of end-users and describe the mechanism for helping constructing caching policy. Our approach is based on market mechanism where producer agents and consumer agents negotiate and trade resource. We believe that it not only reaches effective resource allocation but also matches with business model for CDN.

1 はじめに

現在, web が普及し, その上でマルチメディアコンテンツが流通しているが, 音声や動画などのマルチメディアコンテンツは, 帯域幅などのネットワーク資源を多く使用し, ネットワークや web サーバに大きな負荷をもたらすことが問題となっている. この問題の解決のために, インターネットサービスプロバイダ

構内にキャッシュを設置し, コンテンツのキャッシュを行うことによって, ネットワークや web サーバへの負荷を減少させるコンテンツデリバリネットワーク (Content Delivery Network; CDN) が利用されている.

コンテンツデリバリネットワークでは, 各キャッシュにどのようなコンテンツをキャッシュするかは, コンテンツ配信者の決定に委ねられている. 現在コンテンツデリバリネットワークは大規模なコンサートのライブ中継や, 社内教育などの一定の利用が見込まれるコンテンツに対して適用されており効果を上げているが, キャッシュコンテンツの選択にユーザの個別の選好が集約できず, エンドユーザの要求に応じてキャッシュするコンテンツを選択・配信し, コストを回収するモデルが求められている.

本稿では, この問題に対して, エンドユーザの潜在的な選好 (preference) のモデルを構築し, 収集したエンドユーザの選好を反映しながらコンテンツ配信に対する無駄のないネットワーク資源の利用, 及び, ネットワーク事業者, コンテンツ配信者, エンドユーザのコストの配分への応用を考えたキャッシュポリシーを提案する. これにより, 効率的なネットワーク資源の利用をはかるとともに, コンテンツ配信におけるビジネスモデルへの応用が考えられコンテンツ配信に貢献するものであると考えている.

本稿で提案するモデルは, これまで研究・開発が行われている分散キャッシュ技術により構築されたコンテンツデリバリネットワークの中で, ネットワーク事業者, コンテンツ配信者, 及び, エンドユーザの各

Kosuke NAKATSUKA, 京都大学 大学院 情報学研究科 社会情報学専攻, Department of Social Informatics, Kyoto University

Hirofumi YAMAKI, 京都大学 大学院 情報学研究科 社会情報学専攻, Department of Social Informatics, Kyoto University

主体のコスト負担，特にエンドユーザに対する課金を含めて，キャッシュの置くコンテンツの選択を支援することを目標としており，従来のキャッシュ技術と共に，コンテンツデリバリネットワークの効率的，かつ，持続的な運用を図るものである．

2 コンテンツデリバリネットワーク

コンテンツデリバリネットワークは，図 1 を一例とする構造を持つ仮想的なネットワークである．

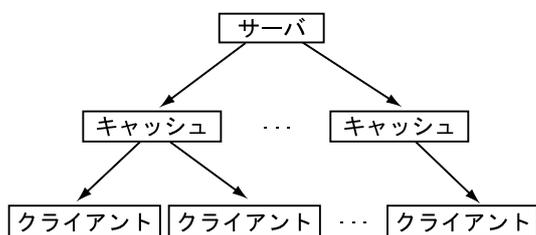


図 1 CDN のアーキテクチャ

図 1 において，サーバはテキスト文書，画像，音声，動画などのコンテンツが保存されるホストであり，クライアントは，コンテンツを利用するエンドユーザを表している．

従来のクライアント/サーバモデルでは，サーバにクライアントが直接要求を出してデータを入手するものであり，サーバの負荷が高くなる，また，ネットワークにより大きな帯域幅を要するなどの問題があった．

これに対して，CDN では，サーバとクライアントの間にキャッシュを導入することにより，負荷をサーバとキャッシュで分散し，必要な帯域幅を減少させている．CDN は，以下のように動作する．

1. インターネットサービスプロバイダの POP^{†1} にキャッシュを設置する．
2. キャッシュは，サーバからデータをコピーし，クライアントからの要求に備える．どのデータをコピーするかは，管理者が設定として与える．
3. クライアントからの要求はサーバに対して行わ

†1 Point-of-Presence，サービスプロバイダへのアクセスポイントを意味する

れるが，実際にはその要求は，経路上に存在するキャッシュが途中で横取り (intercept) する．要求を横取りしたキャッシュは，“どこからのアクセスか”，“何を要求しているか”を調べ，ユーザから近く負荷の低いサーバへの要求振り分けや，データがキャッシュされている場合は，サーバにかわり，そのデータの送信を行う．

クライアントからの要求は経路上で横取りされるため，web ブラウザなどを変更する必要はなく，透過的に CDN を用いることができる．

従来 CDN に類似する技術としてプロキシ型のキャッシュサーバが用いられてきたが，ユーザからの要求によってキャッシュがはじめて行われ，キャッシュを行うポリシーをサービス提供者が設定することができないという問題や，

- 要求は多くのコンテンツに対して行われ，一部の人気のあるコンテンツのみをキャッシュすることは，ある程度有効ではあるが，十分ではない
- web ページのアクセス頻度とページサイズには弱い相関しかない
- web ページのアクセス頻度と更新頻度には弱い相関しかない

といった問題[1] から，ポリシー設定が困難であり，また，有効性にも限界がある．これに対して，コンテンツデリバリネットワークでは，サーバとクライアントの間にキャッシュを導入し，このキャッシュにサーバから特定のコンテンツを前もってコピーしておき，クライアントからの要求に備えることで，負荷を分散し，配信に必要な資源を減少させている．

2.1 CDN の利点

CDN は，インターネットサービスプロバイダによる配信など，コンテンツ配信者が明らかであり，コンテンツ利用者が限られている，あるいは，コンテンツ利用が十分に見込まれる場合のように，単一のポリシーが定義できる場合の負荷分散・高速配信に有効である．このような条件を満たすものとして，各地に支社のある企業での企業内教育や，コンサートのライブ配信など，特定のイベントにおけるストリーミング配信などがあり，負荷分散が実現されている．

2.2 CDN における問題

CDN では、どのコンテンツをどのキャッシュにコピーするかを決定する必要がある。現在の CDN では、キャッシュ技術については、[2] にあげられるようなキャッシュアルゴリズムが適用され、効果を上げている。一方で、こういったコンテンツをコピーするかのポリシーについては、CDN プロバイダがコンテンツプロバイダと契約し、その契約に基づいてコンテンツを優先的にキャッシュするようになっており、各エンドユーザの要求に応じてコンテンツを配信し、配信についてのコンテンツやネットワークのコストを回収するモデルとはなっていない。このため、

- コンテンツプロバイダにとっては、コンテンツプロバイダが提供するコンテンツに対し、エンドユーザの利用を見通して、CDN を運用する必要があること、
- CDN プロバイダにとっては、ネットワークや計算機等の性能の向上に対して配信設備を維持し、継続して事業を行う必要があること、
- エンドユーザにとっては、高速なコンテンツ配信が望ましい

といった各主体の要求を満たすようなビジネスモデルの構築とそれに対応したキャッシュポリシーが必要となっている。この問題に対し、エンドユーザの嗜好を集約し

- エンドユーザ、コンテンツプロバイダ、ネットワークプロバイダの各主体にとって効率的なコンテンツ選択
- 各主体に対するコスト負担の決定

の 2 点が可能なポリシーの構築を目標として、市場機構による最適化手法を適用したキャッシュコンテンツ決定手法を提案する。

3 キャッシュコンテンツ決定プロトコル

キャッシュポリシーは、エンドユーザとキャッシュ間で効用情報をやりとりするプロトコル、及び、得られた効用情報をもとに適切なコンテンツを決定するアルゴリズムからなる。本章では、キャッシュポリシーを運用するためのエンドユーザとキャッシュの間のプロトコル記述する。

エンドユーザは、図 2 に示すように最寄りのインターネットサービスプロバイダの POP に設置されたキャッシュに対して接続されており、サーバに対する要求は、このキャッシュを経由するものとする。

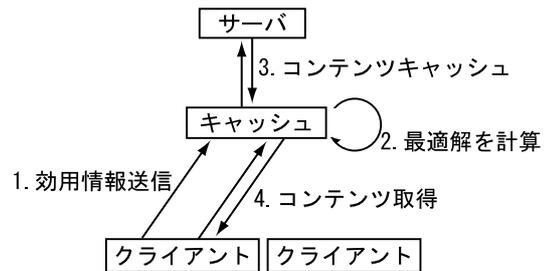


図 2 エンドユーザ・キャッシュ間プロトコル

以下、キャッシュコンテンツ決定のプロトコルを記述する。

1. エンドユーザはどのコンテンツがどの程度望ましいのかを表す効用情報を効用関数として送信する。効用関数はコンテンツに対して十分小さく、コンテンツ配信そのものに影響を与えないと考えられる。
2. キャッシュは、キャッシュの CPU 能力・ストレージ・ネットワークの帯域幅などの制約条件の中で集められた効用関数を最大化するようなコンテンツ集合を計算する。
3. キャッシュは得られたコンテンツ集合のコンテンツをキャッシュプロトコルに従い取得する。
4. エンドユーザはコンテンツに対する要求を行いコンテンツを取得する。

以上のプロトコルにより、クライアントの効用情報が収集され、最適なコンテンツ集合が決定される。

4 キャッシュ・エンドユーザ間のキャッシュ決定アルゴリズム

前節のように集められた効用情報は、映画よりも音楽が望ましいといったコンテンツ種別毎の嗜好が記述されているが、ストレージや帯域幅など資源に制約がある中で、このような嗜好を反映した資源割当てが可能な手法に経済学の知見を応用した市場機構による

資源割当てがある [3]。市場機構による資源割当ては、ストレージや帯域幅など資源が限られた状況でも、利用者間の要求の衝突を調停しながら利用者の選好に応じた資源の分配を可能にする最適化手法であり、ネットワークの QoS 制御などに適用されている [4]。

コンテンツデリバリネットワークでは、ネットワーク事業者、コンテンツ提供者、エンドユーザの各主体が存在し、どの主体がどのように運用コストを負担するのも問題となるが、配信ポリシーに価格機構を用いた市場機構による資源割当てを応用することにより、コストの問題を系に含めて最適化問題として記述することができ、また、流通するコンテンツの価値を考えた応用も可能であると考えられる。

以下、市場機構分散資源割当てに基づいて、エンドユーザの効用関数の記述、および、コンテンツ決定アルゴリズムについて記述する。

4.1 市場モデル

消費者エージェント・生産者エージェントと消費者エージェントの支払う対価、生産者エージェントの生産するキャッシュサービスとの関係を図 3 に示す。

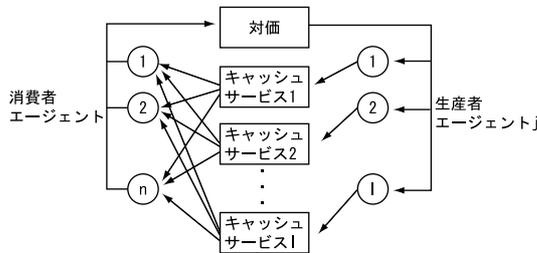


図 3 CDN における市場モデル

図 3 において、左側の円は消費者エージェントを示し、右側の円は生産者エージェントを示す。また、図中の長方形は各エージェント間で流通する財を表す。

流通するコンテンツは、直接提供されるのではなく、ネットワークやストレージなどを含めて、コンテンツキャッシュサービスとしてエンドユーザに提供される。消費者エージェントは、対応するエンドユーザの選好情報をエンドユーザから取得し、キャッシュサービスに対する需要を決定する。生産者エージェン

トは、複数あるキャッシュのうちの 1 つであり、このキャッシュが、エンドユーザの対価を用いてストレージやネットワークなどキャッシュの各資源からコンテンツキャッシュサービスを生成する。

以下、エンドユーザを代表する消費者エージェントと、キャッシュを代表する生産者エージェントの行動について記述する。

4.2 消費者エージェント

エンドユーザの効用関数の例として、CES 型の効用関数をあげる。ユーザ数を n とし、エンドユーザ k ($1 \leq k \leq n$) に対応して消費者エージェント k がエンドユーザの効用情報を持つとする。消費者エージェント k の CES 効用関数 u_k は以下のように表される。

$$u_k(x_{1k}, \dots, x_{lk}, e_k) = \left(\sum_{i=1}^l a_{ik} x_{ik}^{\frac{\rho}{\rho-1}} + a_{ek} e_k^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \quad (1)$$

式 (1) において、 x_{ik} は、消費者エージェント k に割り当てられる資源 i の量、 l は資源の種類の数、 e_k はキャッシュサービス利用のために用いる対価としての初期財を表す。

すなわち、ネットワーク上には映画や音楽などの l 種のコンテンツがあり、その各コンテンツの中で、エンドユーザが x_{ik} だけの個別のコンテンツを要求すると理解できる。 a_{ik} は資源 i が消費者エージェント k にとってどの程度価値があるのかを示し、 ρ はある一つの資源が他の資源をどの程度代替するかを示す。

消費者エージェントは、消費者エージェントが初期に持つ予算を制約条件としてこのような効用関数を最大化するように行動する。すなわち、 p_i を資源 i に付けられた価格^{†2}とすると、

$$\begin{aligned} \max u_k(x_{1k}, \dots, x_{lk}, e_k) \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^l p_i x_{ik} \leq e_k \end{aligned} \quad (2)$$

の最大化問題の解としてエンドユーザの選好を得ることができる。

式 (2) のためのエンドユーザの効用情報の取得は、キャッシュコンテンツ決定のプロセスを行う前に、ブラウザやマルチメディアプレイヤー上のカテゴリ選択などで行うことが可能であると考えている。

^{†2} 提供されるキャッシュサービスの価格にあたる

4.3 生産者エージェント

エンドユーザの選好を効用関数で表わし、前述のプロトコルによってキャッシュに集められると、キャッシュはこれらの効用関数の総和として表記されるような社会的効用を最大化する。

キャッシュを代表する生産者エージェントは、生産関数であらわされる技術内でキャッシュの資源からコンテンツキャッシュを生産する。各コンテンツ i に対しては、 $\sum_{k=1}^n x_{ik}$ だけの需要があり、 $\sum_{k=1}^n p_i x_{ik}$ だけの財が割当てられる。キャッシュは、 $\sum_{i=1}^l p_i \sum_{k=1}^n x_{ik}$ を用いて、キャッシュコンテンツとストレージを購入し、キャッシュサービスを構築する。キャッシュサービスは、各コンテンツ種別 i 毎に $\sum_{k=1}^n x_{ik}$ だけの需要がなされ、この範囲内で、個別のコンテンツを購入し、キャッシュに置く。

各コンテンツ i に対するキャッシュ j の行動は、コンテンツ価格を p_i^c 、ストレージ価格を p^s 、コンテンツの購入量、ストレージの購入量、そこから生産されるキャッシュサービスをそれぞれ、 c_{ij} 、 s_{ij} 、 y_{ij} とし、式 (3) の最大化問題の解として与えられる。

$$\max \sum_{i=1}^l (p_i y_{ij} - (p_i^c c_{ij} + p^s s_{ij})) \quad (3)$$

$$y_{ij} = f_j(c_{ij}, s_{ij})$$

ここで、 $f(c_{ij}, s_{ij})$ は、コンテンツとそれを提供するためのストレージ等の資源からキャッシュサービスを生産する生産関数となっている。

式 (3) の均衡解を y_{ij}^* とする。 y_{ij}^* を与える 2 財 c_{ij} 、 s_{ij} の組みを (c_{ij}^*, s_{ij}^*) で表わすと、 c_{ij}^* 、 s_{ij}^* は、式 (4) を満たす。

$$\begin{cases} \frac{p_i^s}{p_i} = \frac{\partial}{\partial s_{ij}} f(c_{ij}^*, s_{ij}^*) \\ \frac{p_i^c}{p_i} = \frac{\partial}{\partial c_{ij}} f(c_{ij}^*, s_{ij}^*) \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) を満たす解 (c_{ij}^*, s_{ij}^*) が得られても、キャッシュは必ずしもサービスを提供するとは限らない。価格の調整が終了し、最終的な均衡 (c_{ij}^*, s_{ij}^*) が得られた時、式 (5) を満たしている必要がある。

$$\sum_{i=1}^l (p_i^c c_{ij} + p^s s_{ij}) \leq \sum_{i=1}^l p_i \sum_{k=1}^n x_{ik} \quad (5)$$

式 (5) は、キャッシュがキャッシュサービスを提供

することにより、利益が得られることを示しており、この式が満たされない場合、キャッシュサービスのみを独立して運用することは、損失が生じることから不可能であると言える。

また、ストレージやネットワーク等のリソースにおいて大容量なものを用意することが困難であるなどの収穫逓減の性質を示すのに対し、コンテンツは従量課金あるいは固定の料金体系となりうるため、生産関数が不連続、あるいは、収穫不変となりうる。

図 4 に、 x 、 y 軸をキャッシュサービスを生産するために必要なストレージなどのリソース、及び、コンテンツをとり、 z 軸に生産されるキャッシュサービスをとり、このような狭義凸関数とならない生産関数を例示する。

図 4(a) は、コンテンツの費用が定数で、一定額支払えば制限なくコンテンツを利用できる場合であり、図 4(b) は、コンテンツの費用は従量制で、利用するコンテンツ量に対して線型にコストが増加する場合を示している。このようなコンテンツに特有の性質により、式 (4) より得られる均衡解は、大域的な最適解ではなく局所的な最適解に留まる、あるいは、利潤に上限がなくなり式 (3) を満たす解が存在しない可能性がある。

以上のように、生産者エージェントは、

1. キャッシュサービスを提供して正の利潤を得るための条件
 2. 最適なコンテンツ集合が得られるための条件
- を考えて実装する必要があり、今後この条件を明らかにしていく予定である。

4.4 価格調整機構

各生産者エージェント・消費者エージェントは対応する財について最大化問題を解き、その解を競売人エージェントに入札する。競売人エージェントは、生産者エージェントと同じくキャッシュシステム内のソフトウェアエージェントであり、各資源・コンテンツの需給がつりあうように価格を調整する。

競売人エージェントは、 $\sum_{k=1}^n x_{ik}$ と、あるキャッシュ j での y_{ij} が表明された場合に、関数 θ_i を単調増加な関数として、新しい価格を式 (6) に従い変更し、

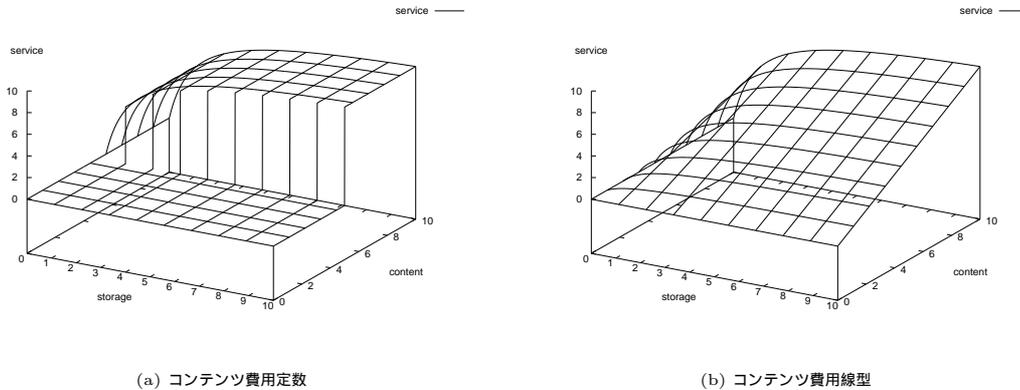


図 4 収穫逓減でない生産関数

キャッシュ j において $\sum_{k=1}^n x_{ik} - y_{ij} = 0$ となる均衡解 $p^* = (p_1^*, \dots, p_i^*)$ を探す。この時の y_{ij} が、コンテンツ種別 i に対するキャッシュサービスの最適供給量となる。

$$\forall i, \frac{dp_i}{dt} = \theta_i \left(\sum_{k=1}^n x_{ik} - y_{ij} \right) \quad (6)$$

競売人エージェントは決定された新しい価格を各消費者エージェント・生産者エージェントに通知する。

4.5 計算手順

消費者エージェント・生産者エージェントはその時点の価格における最大化問題の解を計算し、競売人エージェントにその解を伝える。競売人エージェントは、キャッシュサービスの最適供給量を得られる均衡価格を計算し、消費者エージェント・生産者エージェントに伝える。この過程を収束するまで繰り返し、得られたキャッシュ集合に対応するように各コンテンツをキャッシュする。図 5 にこのアルゴリズムを示す。

市場が適切な性質を持つ場合、上述のプロセスは収束し、需要・供給量は均衡することが知られている。また、均衡点での需要・供給量は実際に割り当てが可能である、すなわち、実行可能な解であり、パレート最適性を示すことが知られている。

パレート最適性は、あるエージェントがそれより有利な資源配分を得る時は、必ず他のエージェントが不利になる性質であり、パレート最適な割り当ては無駄

の無い割り当てがなされていることを表している。

5 おわりに

本稿では、コンテンツデリバリネットワークにおけるコンテンツのキャッシュポリシーについて記述した。

マルチメディアコンテンツが容易に作成され公開されるようになり、サーバの負荷、また、ネットワークトラフィックが増大している現在、コンテンツデリバリネットワークはこの問題に対して有効な解決策と言える。より多くのコンテンツに対してコンテンツデリバリネットワークを適用しエンドユーザにより速いサービスを提供するためには、どのコンテンツをキャッシュするのかの指針を定めることが必要となると考えられる。

本稿で取り上げた手法により、ユーザの要求に適合し、経済機構を背景としたコストモデルを持つキャッシュの指針が与えられ、コンテンツデリバリネットワークに貢献するものであると考えている。今後、

1. 式 (3) において、収穫逓減でない性質の市場における最適性の検討
2. 本稿のモデルに対応したシミュレーションによる評価
3. ネットワーク事業者、コンテンツ配信者、及び、エンドユーザの各主体へのコスト負担を含めて、ビジネスモデルを考慮したモデルへの改善

の 3 点を行い、モデルの有効性を確認していく予定である。

```

begin Auctioneer Agent
  begin loop
    for each Producer Agent, Consumer Agent
      send Price Vector
    end of for
    for each Producer Agent
      receive Production matrix
    end of for
    for each Consumer Agent
      receive Demand matrix
    end of for
    if balance ( Production matrix, Demand matrix) exit
    Price Vector =  $\theta$ ( Price Vector, Demand matrix, Production matrix)
  end of loop
end of Auctioneer Agent

begin Producer Agent
  begin loop
    receive Price Vector from Auctioneer Agent
    Production matrix = Calculate production ( Price Vector )
    send Production matrix to Auctioneer Agent
  end of loop
end of Producer Agent

begin Consumer Agent
  begin loop
    receive Price Vector from Auctioneer Agent
    Demand matrix = Calculate demand ( Price Vector )
    send Demand matrix to Auctioneer Agent
  end of loop
end of Consumer Agent

```

図 5 各エージェントのアルゴリズム

謝辞

本研究の機会を与えて下さり、また、的確な御指導を賜りました京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻の石田 亨 教授、NEC USA の原 良憲 様、京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻の亀田 弘行 教授に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Breslau, L., Cao, P., Fan, L., Phillips, G., and Shenker, S.: Web Caching and Zipf-like Distributions: Evidence and Implications, 1998.
- [2] Karger, D. R., Lehman, E., Leighton, F. T., Panigrahy, R., Levine, M. S., and Lewin, D.: Consistent Hashing and Random Trees: Distributed Caching Protocols for Relieving Hot Spots on the World Wide Web, *ACM Symposium on Theory of Computing*, 1997, pp. 654-663.
- [3] Wellman, M.: A Market-Oriented Programming Environment and its Application to Distributed Multicommodity Flow Problems, *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol. 1(1993), pp. 1-23.
- [4] Yamaki, H., Wellman, M. P., and Ishida, T.: A market-based approach to allocating QoS for multimedia applications, *Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems*(Lesser, V.(ed.)), MIT Press, 1995.