

[ポスター講演] コンテンツ事業者の利益を最大化する仮想CDN最適設計

上山 憲昭[†] 細川裕太郎[†]

[†] 福岡大学工学部電子情報工学科 〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1

E-mail: †{kamiyama,t1151272}@fukuoka-u.ac.jp

あらまし 近年, Amazon CloudFront などの仮想化 CDN が広く使用されている. 仮想化 CDN ではクラウドデータセンターの仮想マシン上にキャッシュサーバが提供される. 仮想化 CDN を使用することで, コンテンツ事業者はユーザの地理的需要パターンに従ってキャッシュサーバを使用する地域を柔軟に選択することができ, CDN の使用コストの削減が期待できる. しかしキャッシュサーバ配置はユーザの体感品質と総コストに大きな影響を与えるため, キャッシュサーバ配置を慎重に選択する必要がある. 本稿ではコンテンツ事業者の利益を目標とした, 仮想化 CDN のキャッシュサーバの最適配置選択法を提案する. また Amazon CloudFront の価格リストを用いた数値評価により, 提案設計法はコンテンツ事業者の利益を, すべての地域でキャッシュサーバを使用する場合と比較して 40%程度, キャッシュサーバを用いない場合と比較して 120%程度, 増加可能なことを示す.

キーワード 仮想CDN, コンテンツ事業者, 利益

[Poster presentation] Optimally Designing Virtualized CDN Maximizing Profit of Content Providers

Noriaki KAMIYAMA[†] and Yutaro HOSOKAWA[†]

[†] Faculty of Engineering, Fukuoka University 8-19-1, Nanakuma, Jonan-ku Fukuoka, 814-0180 Japan

E-mail: †{kamiyama,t1151272}@fukuoka-u.ac.jp

Abstract Recently, the virtualized CDN such as Amazon CloudFront in which cache servers are provided on virtual machines of cloud datacenters has been widely used. Using the virtualized CDN, content providers are provided their customized CDN, and they can flexibly select the regions of using cache servers according to the geographical pattern of their end users, so content providers can expect to reduce the cost. However, to maximize the profit of content providers, they need to carefully select the locations of cache servers which affect the quality perceived by users as well as the total cost. In this paper, we propose a method of optimally selecting the geographical regions to use cache servers in the virtualized CDN maximizing the profit of the content providers. Through numerical evaluation using the price list of Amazon CloudFront, we confirm that the proposed method can increase the profit of content provider by about 40% and 120% compared with the case using the cache servers at all the location or without using any cache servers, respectively.

Key words virtualized CDN, content provider, profit

1. はじめに

YouTube などのユーザ作成コンテンツ (UGC: user generated content), コンテンツ事業者 (CP: content provider) によって生成される映画やドラマなどのリッチコンテンツ, Web などのコンテンツ配信は, インターネットのトラフィックの 90%以上を占めている [5]. 多数のネットワークに配置されたキャッシュサーバからコンテンツを配信する CDN (content delivery network) は, コンテンツを効率的に配信する技術とし

て広く使用されている [25] [26] [29]. 従来, CDN はアカマイなどの CDN 事業者が運営する [29], Google などの大規模 CP や AT&T などの大手ネットワーク事業者が運営する CDN も増えている [15] [16] [18] [27]. CDN 用いることで, ユーザが体感する遅延を低減し, ネットワーク内で送信されるトラフィック量を削減し, オリジンサーバの処理負荷を低減するなどの効果が期待できる. 従来の CDN は, CDN 事業者が多数のネットワークに多数のキャッシュサーバを配置した形態か [29], CDN 事業者が限られた位置にあるデータセンタにキャッシュサーバ

を配置した形態が用いられる [18].

コンテンツを作成またはライセンスもつ Netflix などの CP は、CDN を使用することでエンドユーザに良好なサービス品質の提供を図り、高品質なストリーミングサービスを通じて収益を生み出す。また YouTube などの CP は広告配信を通じて収益を確保する。各 CP は提供コンテンツに対する地理的需要パターンに応じて、CDN を適切に設計する必要がある。例えば CP A のコンテンツの需要の大部分が北米および南米のユーザから生じる場合、CP A は北米および南米でキャッシュサーバを用いることが望ましい。一方、CP B のコンテンツの需要の大部分がヨーロッパや日本のユーザから生じる場合、CP B はヨーロッパと日本でキャッシュサーバを用いることが望ましい。しかし既存の多くの CDN 事業者は、キャッシュサーバから配信されるトラフィック量に基づき CP を課金しており、キャッシュサーバの場所とは無関係に同一の料金を課している。しかし本来、地理的な場所によって配信サーバの構築・運営コストは大きく異なる [23]。さらに CDN 事業者は、キャッシュサーバ内にコンテンツアイテムを挿入したり削除したりする際に CP を区別しない。すなわち、すべての CP のコンテンツに同一のキャッシュ挿入およびキャッシュ置換ポリシーを適用する。そのため CP は CDN 事業者に支払われるコストを削減するために、コンテンツがキャッシュされる場所を限定することができない。すなわち CDN 提供者は、CP ごとにカスタマイズされた CDN サービスを、個別の要求を満たすよう柔軟に提供することが困難である。

一方、Amazon EC2 など、ユーザがネットワークを介して計算資源を使用できるパブリッククラウドサービスが広く使用されている。クラウドシステムでは、インフラ事業者 (InP: infrastructure provider) は複数のデータセンタとユーザを接続するネットワークと、仮想マシン (VM: virtual machine) を起動する多数の物理マシン (PM: physical machine) を運用するデータセンタを構築し管理する。InP から VM を使用する権利を購入することで、サービス事業者 (SP: service provider) はエンドユーザにさまざまなサービスを提供する [1] [2] [17]。したがってパブリッククラウド上の VM によってキャッシュサーバが提供される仮想化 CDN、すなわちクラウドベースの CDN が広く注目を集めており [11] [14]、Amazon CloudFront などの商用の仮想化 CDN サービスが既に提供されている [6]。仮想化 CDN では CP は InP と直接契約し、各 CP は自身にカスタマイズされた独自の CDN を柔軟に構築することができる。言い換えれば、各 CP は自身のコンテンツだけを提供する CDN 事業者になることができる。

仮想化 CDN の使用を開始する前に、CP はその CDN を最適に設計するという問題に直面する。すなわち、キャッシュサーバを使用する地域を選択する。Amazon CloudFront では、CP は地域に応じた単価の使用料が課金される [7]。仮想化 CDN サービスを使用して、CP はユーザ需要の地理的パターンに従ってキャッシュサーバが提供される地域を柔軟に選択することができ、キャッシュサーバを使用する地域を制限することで CDN の使用コストを最小限に抑えることが期待できる。ただ

しキャッシュサーバのない地域のエンドユーザに対しては、コンテンツを他の地域に設置されたキャッシュサーバまたはオリジンサーバから配信する必要がある。そのためキャッシュサーバを設置しない地域の、ユーザ遅延やビデオ再生のスムーズさといった体感品質が低下する。サービス品質が低下するとユーザの視聴回数が減少し、CP の利益も減少する。したがって CP の利益を最大化するには、CP は InP への支払い料金とユーザの体感品質の両方を考慮して、キャッシュサーバの使用地域を慎重に選択する必要がある。しかしこれまで、CP の利益を最大化する仮想 CDN の最適設計問題は検討されていない。

本稿では地理的需要分布が与えられたときに、ユーザの体感品質とキャッシュサーバの使用コストの両方を考慮して、CP の利益を最大化する仮想 CDN の最適設計法を提案する。本稿の貢献を以下にまとめる。

- 仮想化 CDN の使用コストとユーザの需要関数を考慮して CP の利益を定式化する。そして CP の利益を最大化する、仮想化 CDN のキャッシュサーバの使用地域の最適選択問題を定式化する。
- Amazon CloudFront の実際の価格データを使用して、提案設計方式の CP の平均利益を、すべての地域でキャッシュサーバを使用するときと、すべての地域でキャッシュサーバを使用しないときの、2つの場合と比較することで、提案設計方式の有効性を評価する。

2. 節では関連研究について述べ、3. 節で想定条件とモデルを述べる。4. 節では仮想 CDN の提案設計方法を説明し、5. 節で数値結果を示す。最後に 6. 節でまとめを述べる。

2. 関連研究

これまでに、CDN 事業者のコストを最小化するよう各コンテンツのキャッシュ位置を最適化する方式が検討されている。例えば Marchetta らは CDN 事業者が InP に支払うコストが最小限するよう、各コンテンツのキャッシュ場所を最適化する方式を提案している [21]。また Dodout らは仮想化 CDN 上で各 CP のコンテンツのキャッシュ場所を設計するアーキテクチャを提案している [9]。さらに Hu らは仮想キャッシュサーバの記憶容量と、配信サーバとユーザ間の最大距離の制約を考慮し、CDN 事業者の総コストを最小化するようキャッシュコピー位置を周期的に最適化する方法を提案している [12]。また Chen らはユーザ QoS の要件に関する制約下で仮想 CDN 事業者のコストを最小化にするよう、キャッシュコピーの位置と配信経路の両方を最適設計する方法を提案している [3]。さらに Llorca らはコンテンツの位置と、配信サーバとユーザ間の経路を、CDN 事業者の総コストを最小化するよう同時に設計する方法を提案している [19]。しかし各コンテンツをキャッシュする場所を最適に割り当てるには計算負荷が大きく、多数のコンテンツが提供された場合でのスケール性が問題となる。さらに Amazon CloudFront といった商用仮想 CDN サービスでは、CP にコンテンツの単位でキャッシュ位置を自由に制御する機能は提供されていない。

一方、キャッシュサーバにおけるコンテンツの扱いを CP 別

に区別することが検討されている。例えば Gourdin らは各 CP へのキャッシュサーバの記憶容量の割り当て方法が CDN 事業者の利益に与える影響を評価している [10]。また Chu らは CP のキャッシュヒット率の関数で与えられる効用の総和が最大化するよう、各 CP にキャッシュ記憶容量を割り当てることを提案している [4]。Dehghan らや Neglia らは効用の総和を最大化するよう、異なる CP のコンテンツに異なるキャッシュ置換ポリシーを適用することを提案している [8][24]。さらに Yala らは CDN 事業者のコストとサービス可用性を同時に最適化して物理マシン上に仮想キャッシュサーバを割り当てる方法を提案している [30]。しかしこれらの方式では仮想 CDN 上でキャッシュサーバの使用地域を選択する問題は考慮されていない。

3. 前提条件

3.1 仮想 CDN サービス

1つの InP によって1つの仮想 CDN サービスが提供されており、CP は N 個の地域に提供された仮想化キャッシュサーバを使用できるものとする。仮想化 CDN サービスとして、北アメリカ、ヨーロッパ、南アフリカ、アジア、インド、オーストラリア、南アメリカの7つの地域にキャッシュサーバを提供する Amazon CloudFront を想定する [7]。各地域のキャッシュ容量は無限とすると CP は互いに影響しないことから、単一の CP だけを考慮する。 R_n を地域 n とし、 C_n を R_n で提供されるキャッシュサーバと定義する。Amazon CloudFront では、(i) キャッシュサーバからユーザへのコンテンツ配信、(ii) コンテンツをオリジンサーバにアップロード、(iii) InP の名前解決サービスを使用、の各々に対して課金される [7]。しかし大部分のコストはキャッシュサーバからユーザにコンテンツを配信する料金であることが想定されるため、本稿ではユーザへの配信コストのみを考慮する。

キャッシュサーバからユーザにコンテンツを配信する単価は、キャッシュサーバの地域と1か月以内にキャッシュサーバから送信されたデータの総量の両方に依存する。 C_n から送信されたデータの総量 v に対し、 C_n からユーザにコンテンツを配信するときの単価 $p_n(v)$ を定義する。CP のコンテンツのオリジナルを格納するオリジンサーバも InP によって管理され、CP は InP のオリジンサーバにコンテンツをアップロードするだけで CDN サービスを使用できる。

CP が C_n を使用する場合に1をとり、 C_n を使用しない場合に0を取る2値変数を x_n とする。また \mathbf{X} を $x_n = 1$ の R_n の集合と定義する。すなわち \mathbf{X} は CP がキャッシュサーバを使用する地域の集合である。オリジンサーバは唯一の地域 R_o に提供され、オリジンサーバから R_o のユーザにコンテンツを配信できるので CP は C_o を使用しない。 $x_n = 1$ のとき、仮想キャッシュサーバの記憶容量は十分に提供され、 C_n が配信サーバとして選択される場合、コンテンツは常に C_n から要求ユーザに配信される。一方 $x_o = 0$ のときは、 \mathbf{X} か R_o の中で平均 RTT が最小の地域からコンテンツが配信される。

3.2 ユーザ需要

CP の各ユーザは、CP のビデオストリーミングサービスの

品質に完全に満足していれば、1ヶ月に平均して W 回のコンテンツ視聴を行うと仮定する。ビデオのフリーズまたはノイズ発生頻度が増加し、ビデオストリーミングの品質が低下するとユーザの視聴数の減少が予想される。一方、ビデオストリーミングの品質はユーザと配信サーバとの間の RTT が増加するにつれて低下する。したがって遅延の単調減少関数であるユーザ需要モデル [20] を用いて、RTT が d のときの各ユーザの平均視聴回数 $w(d)$ を次式で表す。

$$w(d) = We^{-\alpha d} \quad (1)$$

ただし α は遅延に対するユーザの感度パラメータである。 $w(d)$ は d がゼロのとき最大値 $w(d) = W$ となり、 d の増加に伴い指数関数的に減少する。また α が大きな場合ほど、 $w(d)$ は d の増加に対し急激に減少する。 $d_{i,j}$ を R_i と R_j との間の平均 RTT とすると、コンテンツが R_y から R_n のユーザに配信されるとき R_n の各ユーザの平均視聴回数 w_n は $w_n = W \exp(-\alpha d_{n,y})$ で与えられる。

3.3 CP の収益

ビデオストリーミングサービスには、主に Netflix などの SVOD (subscription video on demand) と、YouTube などの AVOD (advertising video on demand) の2つのビジネスモデルがある。SVOD の場合、CP はエンドユーザにビデオストリーミングを有料サービスとして提供し、定額課金と PPV (pay per view) の2種類に分類される。定額課金モデルでは、ユーザは CP への固定月額料金を支払うことによって、ビデオコンテンツを望むだけ多く視聴することができるが、PPV はユーザの各視聴について CP に料金を支払う。一方 AVOD の場合には、CP はエンドユーザに直接課金しないで、ビデオコンテンツに付随して広告を表示することで広告主から収益を得る。どのビジネスモデルにおいても、CP はユーザの各視聴に対して収入 r を得ると仮定できる。定額課金の SVOD の場合、毎月の課金料金をユーザあたりの最大平均視聴数 W で割ることで r を計算できる。

4. 仮想 CDN の最適設計法

3.1 節で述べたように、 R_u のユーザからの要求に対し $\mathbf{X} \cup R_o$ の候補地域の中で最小の平均 RTT を与える地域からコンテンツが R_u に配信される。すなわち R_u のユーザに対するコンテンツの配信元となる地域 z_u は、

$$z_u = \arg \min_{z \in \mathbf{X} \cup R_o} d_{z,u} \quad (2)$$

で与えられる。ただし B をコンテンツの平均サイズとし、 q_n を R_n における CP の加入者数とする。式 (1) より、 $x_i = 1$ の C_i から1ヶ月間で CP のユーザに送信される平均データ量 v_i は、

$$v_i = \sum_{u \in \mathbf{X} \cap \{u; z_u = i\}} q_u W e^{-\alpha d_{i,u}} B \quad (3)$$

となる。CP によって InP に支払われた総料金は、 $\sum_{i \in \mathbf{X}} p_i(v_i)v_i$ となる。

3.3節で述べたように、CPは各コンテンツ配信のためにユーザから収益 r を得る。したがって与えられた \mathbf{X} に対する1ヶ月間のCPの平均利益 $P(\mathbf{X})$ は、

$$P(\mathbf{X}) = \sum_{u=1}^N q_u r W e^{-\alpha d_{i,u}} - \sum_{i \in \mathbf{X}} p_i(v_i) v_i \quad (4)$$

で与えられる。以下に $P(\mathbf{X})$ を最大化する最適化問題を定義する。

$$\max P(\mathbf{X}) \quad (5)$$

$$s.t. \quad x_n = \{0, 1\}, 1 \leq n \leq N \quad (6)$$

$$x_o = 0 \quad (7)$$

5. 数値評価

5.1 評価条件

Netflixなどの定額課金方式のSVOD型ビデオストリーミングサービスを提供するCPを想定する。Netflixの平均伝送ビットレートが4.4Mbpsであり[22]、コンテンツの平均長を100分と仮定すると、コンテンツの平均サイズ B は3Gバイトとなる。地域 i と地域 j との間の $d_{i,j}$ の設定値を得るために、Amazon EC2の各地域の仮想マシン上でpingコマンドを用いて平均RTTを測定した。3.1節で述べたようにAmazon CloudFrontは7つの地域にキャッシュサーバを提供しているが、Amazon EC2でアフリカの仮想マシンを設定することはできないため、北米、ヨーロッパ、北アジア、シンガポール、インド、オーストラリア、南米の7つの地域を用いた。サーバとユーザが同じ地域に存在する場合、遅延はゼロと仮定する。すなわち任意の n に対して $d_{n,n} = 0$ とする。

1Gバイトあたりのトラフィック量に対し、最初の10TB、次の40TB、次の100TB、次の350TB、次の524TB、次の4PB、および5PB以上の7つの容量区分の単価を提供するAmazon CloudFrontの単価[7]に従い $p_n(v)$ を設定した。たとえば北米のキャッシュサーバからコンテンツを配信する場合、 $p_n(v)$ は各容量区分で1GB当たり、0.085, 0.08, 0.06, 0.04, 0.03, 0.025, 0.02ドルに設定した。 v が増加するにつれ $p_n(v)$ はボリューム割引により減少する。北米と欧州の単価は最も低く、南米では最も高く、他の地域では中程度であった。Netflixのユーザの加入率は約0.03であることから[28]、 q_i を各地域の総人口[13]に0.03を乗じて設定した。1ヶ月以内の各ユーザの最大平均視聴回数 W を15に設定し、各コンテンツ配信で得られるCPの収益 r を、Netflixの月額定額料金である10ドルを W で除した0.6ドルに設定した。

5.2 キャッシュサーバを使用する最適地域数

表1に、 α を0から10の範囲の値に設定したときの[20]、提案方式でキャッシュサーバを用いることを選択した($x_n = 1$)地域の数 X^* を示す。ただしオリジンサーバを7つの地域の1つに各々設置したときの結果を示す。 α が増加するほど遅延に対するユーザの感度が増加するため X^* は増加する。 α が0に近い場合、キャッシュサーバを用いるメリットは小さく、CPの利益が最大となる最適な状態はキャッシュサーバを全く使用

しない状態(No Cacheと表記)に近い状態となる。一方 α が10に近い場合、キャッシュサーバを用いるメリットが大きいため、最適な状態は R_o を除いた全ての地域でキャッシュサーバを利用した状態(All Cacheと表記)に近い状態となる。

表1 Optimum region count selected to use cache servers

Region placing origin servers	α										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
North America	0	1	2	2	3	4	4	4	6	6	6
Europe	0	2	2	2	3	4	4	4	6	6	6
North Asia	0	1	2	3	3	4	4	4	6	6	6
Singapore	0	1	2	2	3	4	4	4	6	6	6
India	0	1	3	3	4	4	4	5	6	6	6
Australia	0	2	3	3	3	4	4	4	6	6	6
South America	0	2	3	3	4	5	5	5	6	6	6

5.3 CPの月額利益

提案設計法におけるCPの平均月額利益をNo CacheとAll Cacheの2つの場合と比較する。図1にオリジンサーバを北米に置いた場合の、 α に対する3つの方式のCPの平均利益をプロットする。オリジンサーバを他のエリアに配置した場合も、以下に述べる傾向と同様の傾向が観察された。All cacheの場合、コンテンツは要求元のユーザと同じ地域にあるキャッシュサーバまたはオリジンサーバから常に配信されるため遅延は常にゼロであり、CPの利益は α とは無関係となる。No cacheの場合、コンテンツは常にオリジンサーバから配信され、3つの方式の中では遅延が最も大きく、 α の増加に伴いCPの利益は急速に減少する。そのため α が小さいときのAll cacheにおけるCPの利益と、 α が大きいときのNo cacheにおけるCPの利益は、他の方式と比較して低下する。

一方、提案方式は利用者の要求の地理的なパターンや、遅延に対するユーザの感度に応じて、キャッシュサーバを使用する地域を最適に選択することができ、提案方式におけるCPの平均月額利益は α の全範囲で3つの方式の中で最大となる。例えば α が0の場合、提案方式はAll Cacheと比較してCPの利益を約40%増加させる。また α が10の場合、提案方式はNo Cacheと比較してCPの利益を約120%増加させる。

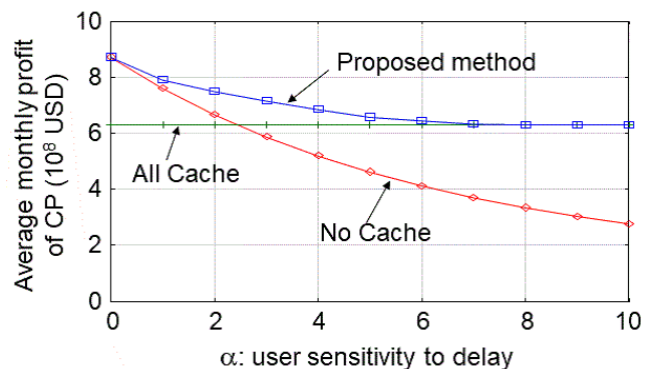


図1 Average monthly profit of CP against α when placing origin servers in North America

6. 結論

仮想化CDNを用いることで、CPは需要パターンやキャッ

シュサーバ使用コストに応じてキャッシュサーバを使用する地域を柔軟に選択することができ、CPはCDNのコストを削減できる。しかし利益を最大化するために、CPはユーザの体感品質と各地域のキャッシュサーバを使用するコストの両方を考慮して、キャッシュ地域を慎重に選択する必要がある。そこで本稿では、キャッシュサーバから配信した場合の支払い料金の単価、ユーザの需要、遅延に対するユーザの感度関数が与えられた場合に、CPの利益を最大化するようキャッシュサーバを用いる地域を最適に選択する設計法を提案した。Netflix型のCPを想定した数値評価により、提案方式は全地域でキャッシュサーバを使用する場合と、キャッシュサーバを全く使用しない場合と比較して、CPの利益を各々約40%または120%程度、増加させることを確認した。今回はキャッシュサーバの容量がCPのコンテンツを収容するのに十分な容量を有することを想定したが、今後は容量が十分でなくキャッシュミスが生じることを想定した場合の最適仮想CDN設計法を検討する予定である。

謝辞 本研究成果は、JSPS 科研費 18K11283 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] D. Ardagna, B. Panicucci, and M. Passacantando, A Game Theoretic Formulation of the Service Provisioning Problem in Cloud Systems, WWW 2011.
- [2] M. Armbrust, A. Fox, R. Griffith, A. D. Joseph, R. Katz, A. Konwinski, G. Lee, F. Patterson, A. Rabkin, I. Stoica, and M. Zaharia, A View of Cloud Computing, Communications of The ACM, Vol. 53, No. 4, pp. 50-58, Apr. 2010.
- [3] F. Chen, K. Guo, J. Lin, and T. K. Porta, Intra-cloud Lightning: Building CDNs in the Cloud, IEEE INFOCOM 2012.
- [4] W. Chu, M. Dehghan, D. Towsley, and Z. L. Zhang, On Allocating Cache Resources to Content Providers, ACM ICN 2016.
- [5] Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016-2021.
- [6] Amazon CloudFront, <https://aws.amazon.com/cloudfront/>
- [7] Amazon CloudFront Pricing, On-Demand Pricing, <https://aws.amazon.com/cloudfront/pricing/>
- [8] M. Dehghan, L. Massoulie, D. Towsley, D. Menasche, and Y. C. Tay, A Utility Optimization Approach to Network Cache Design, IEEE INFOCOM 2016.
- [9] F. Dudout, P. Harsh, S. Ruiz, A. Gomes, T. M. Bohnert, A Case for CDN-as-a-Service in the Cloud: A Mobile Cloud Networking Argument, ICACCI 2014.
- [10] E. Gourdin, P. Maille, G. Simon, and B. Tuffin, The Economics of CDNs and Their Impact on Service Fairness, IEEE Transactions on Network and Service Management, Vol.14, No.1, pp.22-33, Mar. 2017.
- [11] N. Herbaut, D. Negru, Y. Chen, P. A. Frangoudis, and A. Ksentini, Content Delivery Networks as a Virtual Network Function: a Win-Win ISP-CDN Collaboration, GLOBECOM 2016.
- [12] M. Hu, J. Luo, Y. Wang, and B. Veeravalli, Practical Resource Provisioning and Caching with Dynamic Resilience for Cloud-Based Content Distribution Networks, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol.25, No.8, pp.2169-2179, Aug. 2014.
- [13] Internet World Stats, <https://www.internetworldstats.com/stats.htm>
- [14] Y. Jin, Y. Wen, G. Shi, G. Wang, and A. V. Vasilakos, CoDaaS: An Experimental Cloud-Centric Content Delivery Platform for User-Generated Contents, ICNC 2012.
- [15] N. Kamiyama, T. Mori, R. Kawahara, and H. Hasegawa, Optimally Designing ISP-Operated CDN, IEICE Trans. on Commun., Vol.E96-B, No.3, pp.790-801, Mar. 2013.
- [16] C. Labovitz, S. Iekel-Johnson, J. Oberheide, and F. Jahanian, Internet Inter-Domain Traffic, ACM SIGCOMM 2010.
- [17] W. Li, P. Svard, J. Tordsson, and E. Elmroth, A General Approach to Service Deployment in Cloud Environments, CGC 2012.
- [18] Z. Li, et al., In a Telco-CDN, Pushing Content Makes Sense, IEEE Transactions on Network and Service Management, Vol. 10, No. 3, pp. 300-311, Sep. 2013.
- [19] J. Llorca, C. Sterle, A. M. Tulino, N. Choi, A. Sforza, and A. E. Amideo, Joint Content-Resource Allocation in Software Defined Virtual CDNs, CCSNA 2015.
- [20] R. Ma, J. Wang, and D. M. Chiu, Paid Prioritization and Its Impact on Net Neutrality, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 35, No. 2, pp. 367-379, Feb. 2017.
- [21] P. Marchetta, J. Llorca, A. M. Tulino, and A. Pescape, MC3: A Cloud Caching Strategy for Next Generation Virtual Content Distribution Networks, IFIP Networking 2016.
- [22] J. Martin, Y. Fu, N. Wourms, and T. Shaw, Characterizing Netflix bandwidth consumption, IEEE CCNC 2013.
- [23] M. K. Mukerjee, I. N. Bozkurt, D. Ray, B. M. Maggs, S. Seshan, and H. Zhang, Redesigning CDN-Broker Interactions for Improved Content Delivery, ACM CoNEXT 2017.
- [24] G. Neglia, D. Carra, and P. Michiardi, Cache Policies for Linear Utility Maximization, IEEE INFOCOM 2017.
- [25] E. Nygren, R. Sitaraman, and J. Sun, The Akamai Network: A Platform for High-Performance Internet Applications, ACM SIGOPS 2010.
- [26] J. Ott, M. Sanchez, J. Rula, and F. Bustamante, Content Delivery and the Natural Evolution of DNS, ACM IMC 2012.
- [27] A. Sharma, A. Venkataramani, and R. Sitaraman, Distributing Content Simplifies ISP Traffic Engineering, ACM SIGMETRICS 2013.
- [28] Statista, the statistics portal, <https://www.statista.com/topics/842/netflix/>
- [29] A. Su, D. Choffnes, A. Kuzmanovic, and F. Bustamante, Drafting Behind Akamai: Inferring Network Conditions Based on CDN Redirections, ACM Trans. Networking, Vol. 17, No. 6, pp. 1752-1765, Dec. 2009.
- [30] L. Yala, P. A. Frangoudis, G. Lucarelli, and A. Ksentini, Balancing between cost and availability for CDNaas resource placement, IEEE GLOBECOM 2017.