

WSN 向けコンテンツ指向型データ収集における ユーザの嗜好とキャッシュの類似度に基づいた 経路集約手法

國安 哲郎^{1,a)} 重安 哲也^{2,b)}

概要：近年，WSN (Wireless Sensor Network) にコンテンツ指向型ネットワーク技術である NDN (Named Data Networking) を実装してデータのロケーションを意識させないデータ収集システムの実現が希求されている．これまでに，我々は輻輳が起きている経路を回避して Interest を転送する経路の適応的選択制御手法 (DCF : Dynamic Change Forwarding) について提案を行った．しかし，DCF はボトルネックを検知した場合に他の経路へ切り換えるパッシブな手法であるため，たとえ他の候補にキャッシュをより活用できる経路が存在したとしても，現在選択中の経路にボトルネックが発生しなければより良い経路への切り換えは期待できない．そこで本稿では，より積極的にキャッシュを用いた効率的なデータ収集を実現するために，各ユーザの嗜好と各 CR (Contents Router) のキャッシュの類似度を基にした転送経路選択制御手法 (DCF_{active}) を提案する． DCF_{active} では，嗜好が似ているユーザの Interest 転送経路を集約することで，その経路上のルータ上にユーザの嗜好に沿った有益なキャッシュが蓄積されるようにする．また，計算機シミュレーションによる性能評価によってネットワーク全体のキャッシュ利用率と RTT (Round Trip Time) が向上することを明らかにする．

1. はじめに

IP ネットワーク等の典型的な通信ネットワークでは，送信者と受信者が互いを指定して実施するホストセントリックな通信が主流であり，“誰と通信を行うか” が重視される．しかし，現在のように，コンテンツ流通・配送を目的にネットワークが多用される状況では，ユーザはデータの内容を重視し，データ取得元端末のロケーションにさほど関心を持たない．

このネットワーク利用状況の変遷に応じてコンテンツ指向型ネットワーク (CCN : Contents Centric Networking) の概念と指針が検討され，多くの注目を集めている [1], [2], [3]．これは，従来の IP アドレスを識別子とした End-to-End の通信から，コンテンツ名を識別子に指定して通信を開始できるように変更することで，コンテンツ取得元端末のロケーションに対する依存度を大幅に減少する技術であ

る．CCN において，ユーザからコンテンツが要求された場合，コンテンツのオリジナルを保有するサーバだけではなく，同コンテンツのキャッシュを保持するネットワーク内ノード (CR) の内，より近い場所からコンテンツを返信することで，コンテンツ取得に要する時間を短縮する．さらに，ネットワーク中の CR にコンテンツを分散キャッシングすることで，オリジナルを保持するサーバのみならず，ネットワーク全体のトラフィック負荷を大幅に軽減できる．

さて，近年，IoT (Internet of Things) [4] の推進が加速している．IoT では，あらゆるモノをインターネットに繋ぐことで，コスト削減や効率化を目指した新たなビジネスモデルを創造できる．中でも，センサを備えた無線ノードから構成される WSN [5], [6] が注目されている．WSN は，固定の通信インフラなしに，センサノードによるデータの無線マルチホップ中継により遠隔からデータを収集する．

WSN におけるデータの発見，収集のための代表的な通信プロトコルの 1 つに DD (Directed Diffusion) [7] がある．DD は Sink が要求するデータに対するクエリをフラッディングする．該当するセンサがフラッディングを受信すると，低遅延の経路に沿って一定期間，等間隔でデータを配信する．しかし，DD は特定ノードが計測するデータの

¹ 県立広島大学大学院 総合学術研究科
Graduate School of Comprehensive Scientific Research, Prefectural University of Hiroshima

² 県立広島大学 経営情報学部
Faculty of Management and Information System, Prefectural University of Hiroshima

a) q622006vf@ed.pu-hiroshima.ac.jp

b) sigeyasu@pu-hiroshima.ac.jp

定期的な監視を目的とする連続的なデータの取得には有効であるが、ある目的のための複数の関連するデータの取得であっても不連続なデータを要求する場合は、不要なデータ配信によりトラフィックが増加するため、適用は難しい。

そこで、元々、基幹有線ネットワークでの利用を想定する CCN の 1 つとして提案された NDN[8], [9], [10] を、WSN をはじめとした IoT 向けの無線ネットワークに適用することが提案されている [11], [12], [13], [14]。文献 [11] では、WSN へ NDN を適用する利点として、(1) 大規模な WSN で階層的ネーミングによりロケーションを意識しないデータの検索と取得ができること、(2) ネットワークのスケラビリティが向上することの 2 点をあげている。

さらに、近年、1 つの WSN を複数のアプリケーションに対するデータ供給源として共有化し、多目的に活用する研究 [15], [16] が進められている。これらのネットワークにおいても、NDN によるデータのキャッシュ機能によるデータの再利用が可能となれば、より効率的な配信が実現できる。

さて、文献 [11] は、WSN への NDN の適用を提案するとともに計算機シミュレーションを用いた性能評価も行っているが、単純にオリジナルの NDN を適用した場合のみの評価にとどまっており、WSN の特性をふまえた NDN アルゴリズムの最適化については議論されていない。これまでに、我々は無線環境下におけるパケットエラー率の高さに着目し、輻輳が起きている経路を回避して Interest を転送する転送経路の適応的選択制御手法 (DCF) について提案を行ってきた [17]。しかし、本手法は、選択中の Interest 転送経路上のボトルネックを検知した場合のみ、他の経路へ切り換えるパッシブな手法である。このような手法では、極端にキャッシュヒット率の低い経路を回避することはできるが、もし、現在の Interest 転送経路よりも高いキャッシュヒット率が期待できる経路が他に候補として存在したとしても、現在選択中の経路にボトルネックがなければ転送経路の変更は実施されないため、適応的選択制御の効果は期待できない。

そこで、本稿では、適応的転送制御により、積極的なキャッシュの再利用の効果を得るために、ユーザ間の嗜好情報を考慮した Interest の転送経路の集約とそれによるキャッシュヒット率の向上手法について検討する。具体的には、従来の NDN のように直接コンテンツ名を指定した Interest を FIB (Forwarding Information Base) に従ってそのコンテンツをキャッシュする近隣の CR に転送するのではなく、各ユーザの嗜好と各 CR のキャッシュの類似度を基にして、嗜好が似ているユーザの Interest 転送経路と同一経路に転送するように集約する。つまり、嗜好が似ているユーザが同一の Interest/Data 転送経路を共有することで、それ以降は同経路上のルータに嗜好に沿ったコンテンツが多くキャッシュされることが期待できる。その結

果、同手法を用いることにより経路上のルータには、再利用確率の高い有益なキャッシュが蓄積されることになり、ネットワーク全体のキャッシュ利用率と RTT の向上が期待できる。

以降、本稿を次のように構成する。まず、2 章では有線ネットワーク向けに提案された NDN 本来の動作について述べる。3 章では本稿において提案する DCF_{active} の動作とその特徴について述べ、4 章の性能評価によって DCF_{active} の有効性を明らかにする。最後に、5 章において DCF_{active} の提案により得られた成果を総括する。

2. 関連研究

2.1 NDN[8]

NDN では、ユーザは希望するコンテンツを取得するために Interest と Data の二種類のパケットを用いる。ユーザは要求するコンテンツ名を Interest に記載し隣接 CR に送信する。Interest を受信した CR は Interest に記載されているコンテンツ名と Interest が到着したインタフェースの情報を 1 つのエントリとして自身の PIT (Pending Interest Table) に登録し、次の CR へ Interest を転送する。ここで、PIT に既に同じコンテンツ名をもつエントリが存在する場合は、その既存エントリに新たなインタフェース番号のみを追記し、Interest は転送せずに破棄する。これを繰り返した後、コンテンツを保持するサーバが Interest を受信すると、PIT の情報に従って対応する Data が返される。

この際、各中継 CR は Data のキャッシュを一時的に CS (Content Store) に格納する。以降、キャッシュしたコンテンツに対する Interest を受信した際、自身が Data をオリジナルサーバに代って返信することでトラフィックの削減と RTT の短縮を実現する。さて、Data を中継する CR は Data が到着したインタフェースとコンテンツ名を表す Prefix をエントリとして FIB に登録し、以降、同じ Prefix をもつ Interest を受信した際はこの情報に従って効率的に転送する。

NDN の動作例を図 1 に示す。ここで、同図に示す F# は各 CR に接続された有線インタフェースを識別するための Face 番号である。ここでは、user1, user2 の順で送信した同名の Prefix “test1” をもつ Interest が同順で CR2 に到着したとする。この時、CR2 は先に到着した user1 の Interest は転送するが、その後到着した user2 の Interest は PIT に Face 番号のみを登録し、破棄する。server から返信されたコンテンツは Data として各 CR の PIT 情報に従って配送される。また、Data を中継する各 CR は、それを一時的に CS にキャッシュしておくことで、以降の他のユーザからの “test1” の取得要求に対応する。

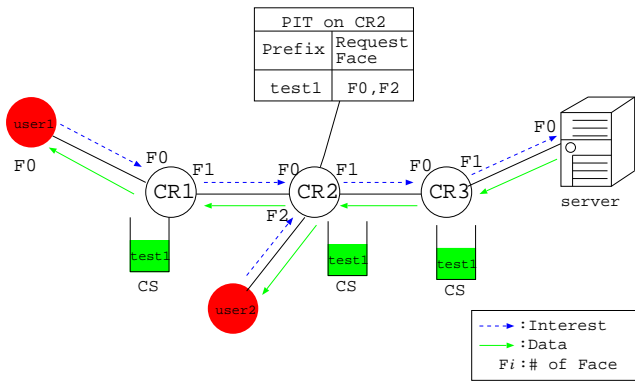


図 1 NDN の動作例

2.2 WSN への NDN 技術の適用

元々、NDN は有線で構成される基幹ネットワークで利用することを目的に開発された。本稿では、WSN に適用する基本的な NDN プロトコルを以下のように定義する。

- 通信方式に代表的な無線 LAN 規格である IEEE802.11 の CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) [18] を用いる。
- Interest 転送時に、FIB に該当するエントリがない場合は隣接する複数 CR に Interest をブロードキャストする。
- FIB に該当するエントリがある Interest はそれによってユニキャストで転送する。
- Data は PIT 情報に従ってユニキャストで返送する。
- CR 間でお互いを一意に識別するために、Face 番号に代えて MAC アドレスを PIT と FIB に登録する*1。

3. ユーザの嗜好とキャッシュの類似度に基づく経路選択制御

従来の DCF[17] は、現在選択している Interest 転送経路上の各リンクの Interest 転送時の L2ACK の返信率を基準としてその経路の輻輳発生を検知し、転送経路を切り換える。つまり、同手法はボトルネックを検知した場合のみ、他の経路へ切り替えるパッシブな手法といえる。そのため、現在選択中の経路の ACK 返信率が閾値以上である限り、たとえ他により良い Interest 転送経路が存在したとしても、その経路への切り換えは実施されない。

本章では、より積極的なキャッシュ利用を用いた高効率なデータ収集を実現するために、自ら最適な経路を検索し選択するアクティブな手法である DCF_{active} を提案する。図 2 に DCF_{active} のイメージ図を示す。同手法は、各ユーザの嗜好情報を記載した Interest を各 CR のキャッシュの類似度と比較することによって転送先を決定し、嗜好が似ているユーザ同士の転送経路を集約する。集約された経路には、ユーザの送信した Interest に対応するコンテンツが

*1 これに対応するために、Interest/Data パケットのヘッダに MAC アドレスを記録するための新たなフィールドを追加する。

キャッシュされるようになるため、時間の経過とともに経路を利用するユーザにとってより有益なコンテンツのキャッシュが蓄積することになる。

ここで、類似度はコンテンツのカテゴリ数を z としたときの z 次元空間のユークリッド距離によって算出する。類似度の算出式を式 (1) に示す。これはユーザ p の嗜好と CR_q (q は CR 番号に該当する) のキャッシュのカテゴリの割合をそれぞれ z 次元ベクトル $\mathbf{R}_p, \mathbf{R}_{cq}$ としたときの類似度 $d(p, CR_q)$ を算出する式であり、 $0 \leq d \leq 1$ で表される。また、 $\mathbf{R}_p = \{R_{p1}, R_{p2}, \dots, R_{pz}\}$, $\mathbf{R}_{cq} = \{R_{cq1}, R_{cq2}, \dots, R_{cqz}\}$ ($0 \leq R_{pi}, R_{cqi} \leq 1, i \leq z$) とする。また、式 (2), (3) に示すように、それぞれの合計値は 1 である。

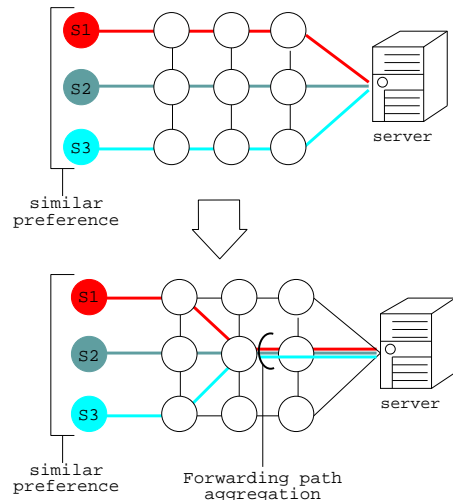


図 2 経路集約例

$$d(p, CR_q) = \frac{1}{1 + \sqrt{\sum_{i=1}^z (R_{pi} - R_{cqi})^2}} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^z R_{pi} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^z R_{cqi} = 1 \quad (3)$$

以下に、図 3 を例に DCF_{active} の動作手順を示す。同図の例は $z=3$ とし、さらに k は各カテゴリごとのコンテンツを識別するためのシリアル番号 ($1 \leq k \leq N$) である。また、 S_1 と S_2 の上に示す値はそのユーザの嗜好であり、過去の一定時間内に要求したコンテンツのカテゴリの割合を、 $CR_1 \sim CR_4$ の上に示す値は自身のキャッシュ内のカテゴリの割合をそれぞれ表す。

各カテゴリの割合の算出式を式 (4) に示す。ここで、 n はユーザ名または CR 番号に該当し、 R_{ni} はカテゴリ i の割合を、 S_{nj} はユーザであれば過去の一定時間内のカテゴリ j の要求総数を、CR であれば現在キャッシュに保持し

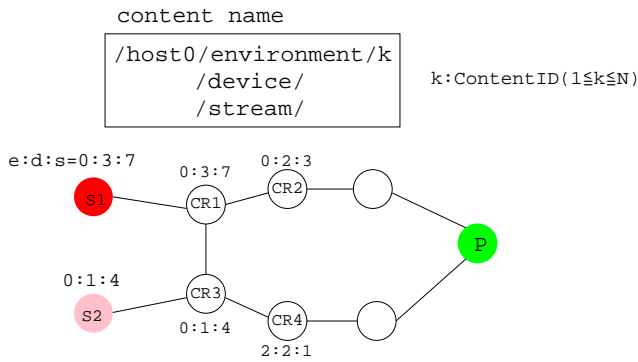


図3 ユーザの嗜好とCRのキャッシュの例

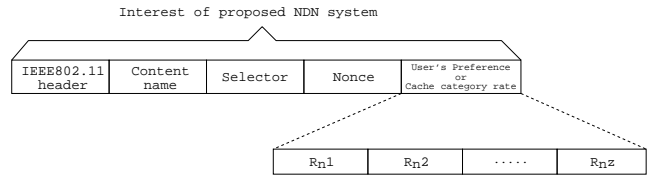


図4 Interest中のカテゴリの割合の記載フォーマット

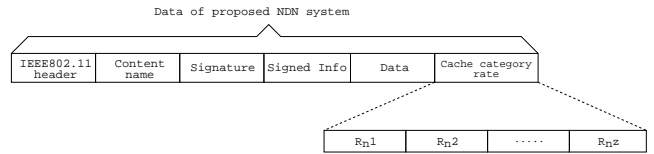


図5 Data中のカテゴリの割合の記載フォーマット

ているカテゴリ j の総数をそれぞれ表す.

$$Rn_i = \frac{Sn_i}{\sum_{j=1}^z Sn_j} \quad (4)$$

- (I) 一定時間 T ごとに各ユーザ ($S1, S2$) は自身の過去 T 時間内に要求したデータのカテゴリの割合 $RS1, RS2$ を算出し、それを自身の嗜好とする. また、各CRも同様に、一定時間 T ごとに自身のキャッシュのカテゴリの割合 Rcq (q は $1 \sim 4$ のCR番号に該当する) を隣接CRに通知することで、各CRは自身のすべての隣接CRのキャッシュのカテゴリの割合 Rcq を把握する*2. 図6に示すように、CR3に注目すると、 T 時間ごとにCR1, CR4と互いのキャッシュ情報を通知する.
- (II) 図4に示すフォーマットで、各ユーザは自身の嗜好をInterestに記載し送信する.
- (III) 図6に示すように、 $S2$ からInterestを受信したCR3は、 $S2$ の嗜好とCR1, CR4の類似度を算出する. その結果、CR1へInterestを転送する.
- (IV) 図3において、 $S1$ からInterestを受信したCR1は、 $S1$ の嗜好とCR2, CR3の類似度を算出する. その結果、 $d(S1, CR2) = d(S1, CR3) = 0.876$ となり、ともに同値であるため、それまで選択していたCR2へそのまま転送する.

さて、複数の類似度を比較した場合にそれらの間に大きな差がない場合を考える. 類似度の差が小さい場合の経路変更を許可すると、Interestの発生状況の多少の変化で頻繁な経路変更が生じることになる. 頻繁な経路変更は経路上のルータの継続的なキャッシュ蓄積において悪影響を及ぼすことが考えられるため、ここでは、類似度の差が新たに導入する閾値 S を上回る場合のみ経路変更を実施することとする.

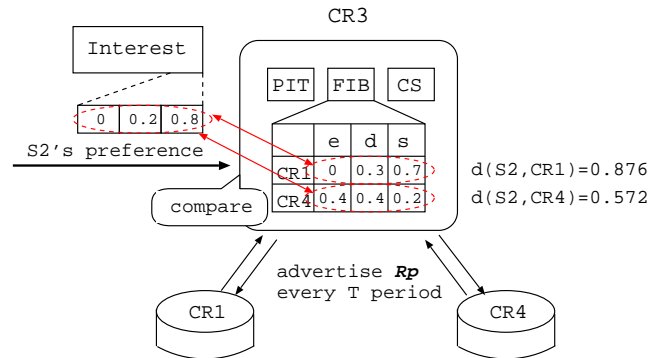


図6 CR間でのキャッシュ情報の通知と類似性判定

4. 性能評価

4.1 シミュレーションモデル

本章では、 DCF_{active} を性能評価した結果について述べる. 表1に評価に用いたシミュレーション諸元を示す.

表1 シミュレーション諸元

Parameter	Value
Data Rate	5.5Mbps
Communication Range	75m
SIFS	10μsec
DIFS	50μsec
Slot	20μsec
Contention Window Size	Min:31, Max:1023
MAC Header	Interest/Data:24, ACK:10(Bytes)
Frame Check Sequence	4Bytes
PLCP Header and Preamble	192μsec
Interest Payload	72Byte
Data Payload	250Byte
Simulation Time	10sec
Cache Algorithm	LRU
Arrival Process	Poisson Arrival
Advertise Interval T	1.0
Similarity Threshold S	0.05

図7にシミュレーショントポロジを示す. 図中の $S1, S2, S3$ をユーザとし、各ユーザは3つのカテゴリから図中

*2 図4, 図5に示すように、各CRは自身が送信するInterestまたはDataに自身のキャッシュ情報を記載し、その隣接CRはそれを傍受または受信することで把握する.

に示す割合でデータを要求する．また，図 3 と同様に， k は各カテゴリごとのデータを識別するためのシリアル番号 ($1 \leq k \leq N$) である．

ここで，各ユーザは Zipf の法則 [19] に従ってデータ ID を指定し，要求することとする．Zipf の法則とは，ネットワーク内で参照される一般的なコンテンツの人気度が従うとされる確率分布である．Zipf の法則において，データ総数 N のうち k 番目のデータが要求される確率 $P_N(k)$ の算出式を式 (5) に示す．式 (5) において，各ユーザはデータ ID が小さいほど高確率で要求する．

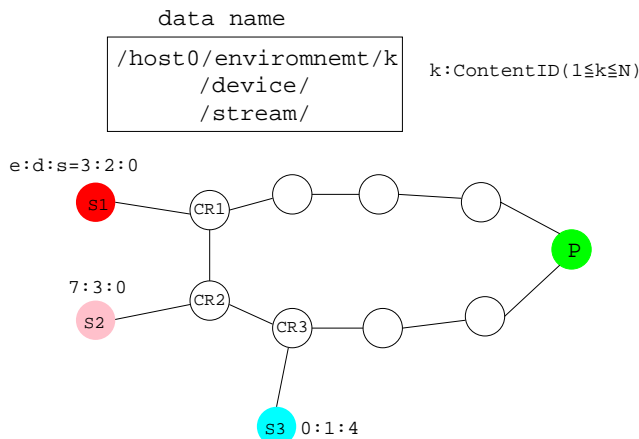


図 7 シミュレーショントポロジ

$$P_N(k) = \frac{\frac{1}{k^\alpha}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{n^\alpha}} \quad (5)$$

上式の α は人気度分布の偏りを決める係数であり， α が大きいほど人気度分布の偏りも大きくなる．現実的な人気度の偏りは，文献 [20] において $\alpha = 0.7$ で近似できるとされている． $N = 100$ ， $\alpha = 0.7$ の条件下において，Zipf の法則に従うデータ要求を 10,000 回実施したときのデータ毎の要求回数の例を図 8 に示す．

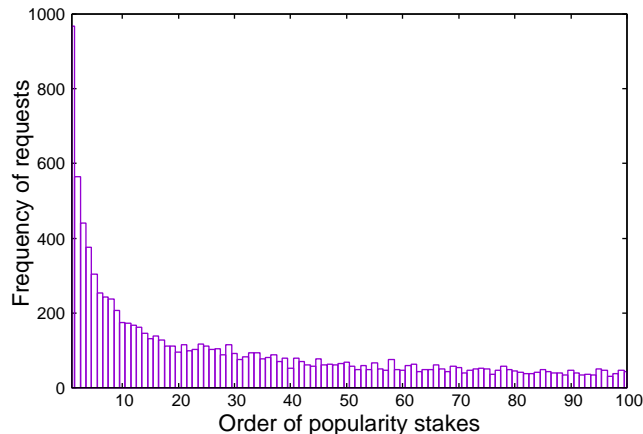


図 8 Zipf の法則 ($\alpha = 0.7$)

4.2 係数 α の変化に対する評価

図 9, 図 10 にユーザの Interest 生成レートを 100[pkt/sec]，キャッシュサイズを 50， N を 100 とした場合の係数 α に対するキャッシュヒット率，RTT をそれぞれ示す．ここで，キャッシュヒット率は各ユーザが取得した総データ数のうち中継 CR のキャッシュから返信されたデータの割合である．また，同図に示す fixed path は Interest 転送経路として常に最短ホップの経路を固定的に選択する方式である．

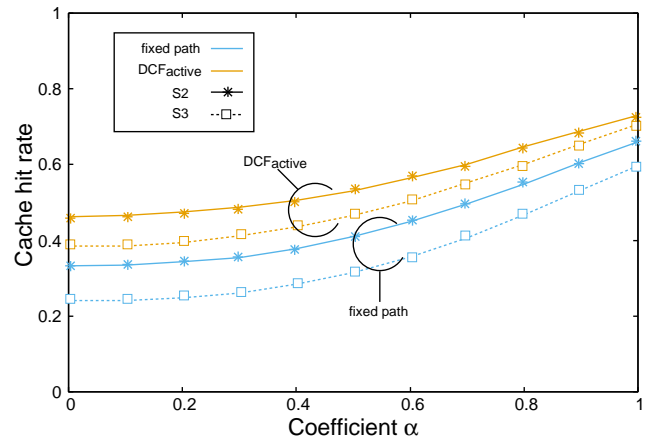


図 9 α に対するキャッシュヒット率の変化

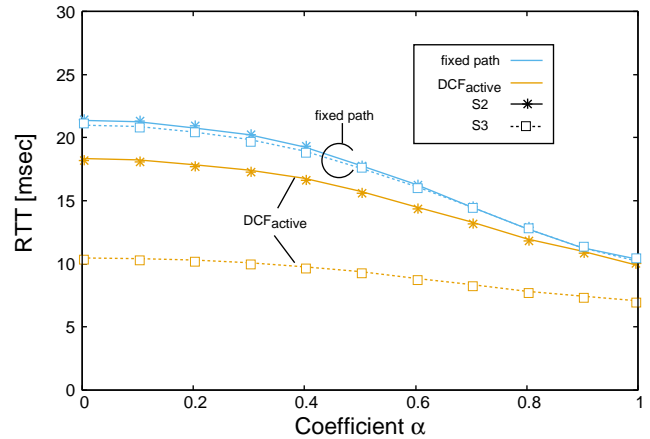


図 10 α に対する RTT の変化

これらの図から， DCF_{active} は S2, S3 とともに α の値に関わらず，キャッシュヒット率，RTT とともに fixed path より高い性能を実現していることがわかる． DCF_{active} ではシミュレーション開始から T 時間後に類似性判定が実施可能になると，Interest 転送経路として当初 CR3 を選択していた CR2 が，S2 の嗜好とキャッシュされているデータの類似度が高い CR1 へ Interest 転送先を変更する．その結果，嗜好が似ている S1 と S2 で Interest 転送経路が集約され，嗜好に沿ってキャッシュに蓄積されたコンテンツを多く利用できるためである．

また、類似性判定の結果、S2 から Interest を受信する CR2 が Interest 転送先を CR3 から CR1 へ変更したことにより、S3 の Interest 転送経路上に S3 の嗜好に沿ったコンテンツのみが多くキャッシュされることも S3 の性能向上に寄与している。これは、嗜好とキャッシュの類似度が高い経路に集約されることによって、転送経路を変更しないユーザにおいても、Interest 転送経路上で自身が利用可能なキャッシュ容量が増加するという DCF_{active} の副次的効果であるといえる。

4.3 データ総数 N の変化に対する評価

図 11, 図 12 にユーザの Interest 生成レートを 100[pkt/sec], キャッシュサイズを 100, 係数 α を 0.7 とした場合の N に対するキャッシュヒット率, RTT をそれぞれ示す。

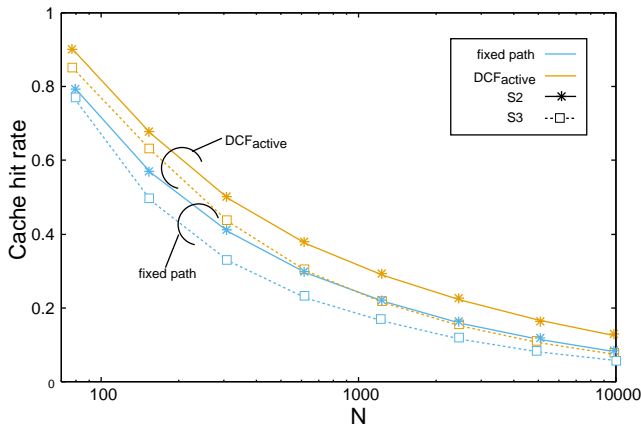


図 11 N に対するキャッシュヒット率の変化

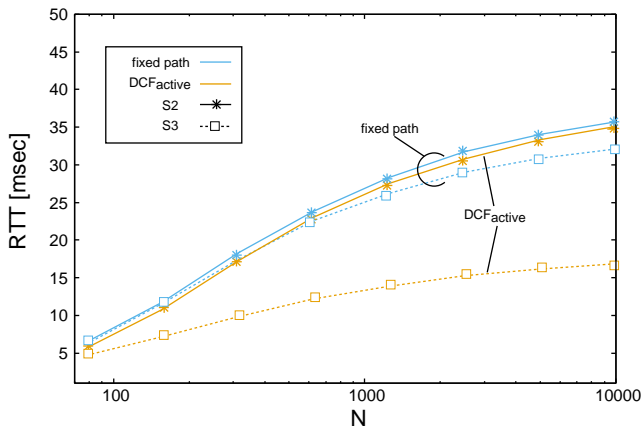


図 12 N に対する RTT の変化

これらの図より、前節と同様に N の値に関わらず、 DCF_{active} は fixed path より高い性能を実現していることがわかる。また、S3 の RTT は N の値が大きくなれば特に高い性能を示すことがわかる。これは、S3 は経路集約によって単独で 1 つの経路を利用するようになったため、

キャリアセンスやバックオフによるオーバーヘッドが大きく減少したためである。また、S1 と S2 は同じ転送経路を共有しているが、互いの嗜好が似ており、同じデータを要求する確率が高いため、Interest 転送数が減少し、fixed path と比較して DCF_{active} の S2 についても高い性能を得ることができたと考えられる。

4.4 データのキャッシュ平均参照回数

表 2 にユーザの Interest 生成レートを 100[pkt/sec], 係数 α を 0.7, N を 100 とした場合のキャッシュサイズに対するネットワーク全体のキャッシュ平均参照回数を示す。また、図 13, 図 14, 図 15 に示すグラフは、横軸はサーバ P からのホップ数、縦軸はそのホップ数に位置する CR におけるキャッシュ平均参照回数を表す。キャッシュ平均参照回数とは、各 CR において、ある任意のデータがキャッシュでどれだけ利用されたかを示す指標である。

表 2 に示す値から、 DCF_{active} では、キャッシュされたコンテンツの再利用回数が多く、インターネットキャッシュがより有効に機能していることが確認できる。

方式名	キャッシュサイズ	キャッシュ平均参照回数
fixed path	50	0.311
fixed path	100	0.936
fixed path	150	3.56
DCF_{active}	50	0.408
DCF_{active}	100	1.14
DCF_{active}	150	4.35

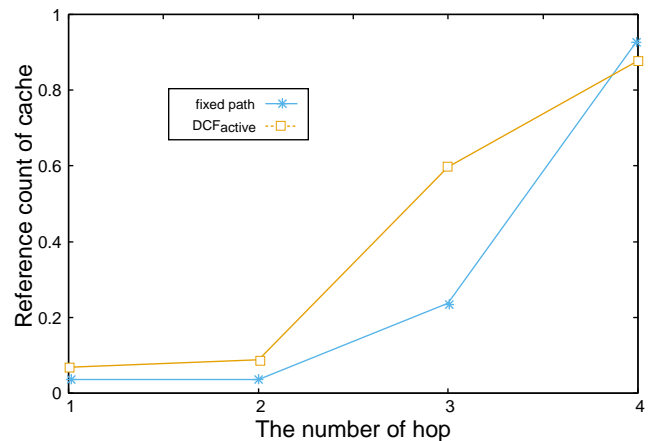


図 13 CR ごとのキャッシュ平均参照回数 (キャッシュサイズ 50)

これらの図に示す結果からは、両手法ともよりユーザに近い CR のキャッシュが多く参照されていることがわかる。また、サーバ P から 3 ホップにおける値は DCF_{active} が fixed path を大きく上回っている。この理由は次の通りである。 DCF_{active} では CR2 が CR1 へ Interest を転送することにより、S1 と S2 の Interest 転送経路が集約され

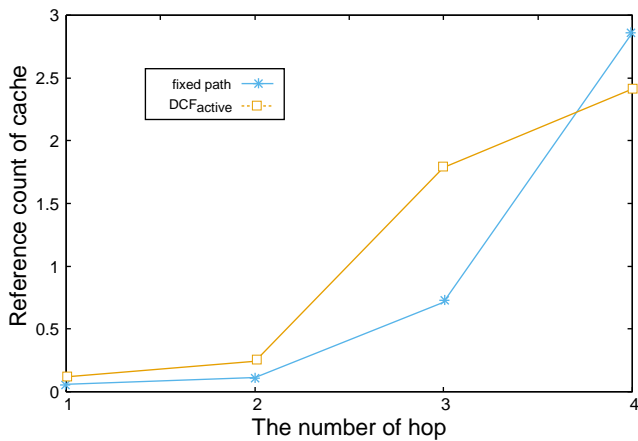


図 14 CR ごとのキャッシュ平均参照回数 (キャッシュサイズ 100)

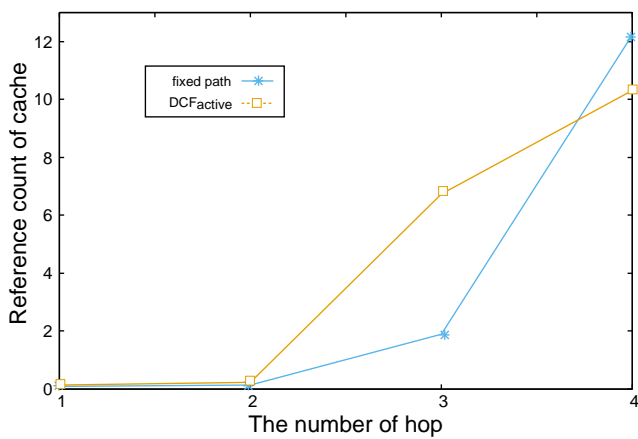


図 15 CR ごとのキャッシュ平均参照回数 (キャッシュサイズ 150)

る．そのため，S3 の Interest 転送経路上では S3 のみの嗜好に沿ったコンテンツが多くキャッシュされることにより，CR3 における S3 からの要求によるキャッシュ参照回数が増加したと考えられる．

さて，サーバ P から 4 ホップにおける値は DCF_{active} が fixed path を若干下回っていることがわかる．これは， DCF_{active} では S1 と S2 の Interest 転送経路を集約するが，S1 と S2 の嗜好は似てはいるがまったく同じではないため，S1 が単独で転送経路を利用する fixed path の方が DCF_{active} と比較して CR1 のみのキャッシュ参照回数は多くなったと考えられる．つまり，これは本質的にキャッシュ平均参照回数が減少したわけではなく，CR1 の参照回数にのみ起こった現象であることに注意されたい．

5. おわりに

本稿では，嗜好が似ているユーザの Interest 転送経路を集約する手法である DCF_{active} を提案した．性能評価結果より，集約した Interest 転送経路上のルータのキャッシュにユーザの嗜好に沿ったものが多く蓄積されることにより，ネットワーク全体のキャッシュ利用率と RTT が向上することを明らかにした．今後は，より規模の大きい実環境に近いシミュレーショントポロジにおいても，Interest

転送経路集約による性能向上を実現することを目指して，スケーラビリティを向上させるための新たな機能について検討し，その有効性について調査していく予定である．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17K00132 の助成を受けたものです．

参考文献

- [1] V. Jacobson, D. Smetters, J. Thornton, M. Plass, N. Briggs and R. Braynard: Networking named content, Proc. of ACM CoNEXT 2009, pp. 1–12, (2009).
- [2] C. Dannewitz, C. Imbrenda, D. Kutscher and B. Ohlman: A survey of information-centric networking, IEEE Communication Magazine, Vol. 50, No. 7, pp. 26–30, (2012).
- [3] 山本幹: [特別招待講演] コンテンツオリエンテッドネットワークの研究動向, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 114, No.18, pp. 35–40, (2014).
- [4] 松井俊浩, 関根久, 林秀樹, 大窪宏明, 砂口洋毅, 松尾直之, 佐藤義竜: [特別講演]IoT 社会を支える重要技術の動向, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 116, No. 53, pp. 77–82, (2016).
- [5] 戸辺義人: 無線センサネットワークの技術動向, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J90–B, No.8, pp. 711–719, (2007).
- [6] K. Begum and S. Dixit: Industrial WSN using IoT: A survey, Proc. of 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT 2016), Chennai, India, pp. 499–504, (2016).
- [7] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann and F. Silva: Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking, IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol. 11, No.1, pp. 2–16, (2003).
- [8] Named Data Networking (NDN) – A Future Internet Architecture (online), available from <https://named-data.net> (accessed 2017–05).
- [9] M. Soniya and K. Kumar: A survey on named data networking, Proc. of 2015 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS 2015), Coimbatore, pp. 1515–1519, (2015).
- [10] Q. Chen, R. Xie, F. Yu, J. Liu, T. Huang and Y. Liu: Transport Control Strategies in Named Data Networking: A Survey, in IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 18, No. 3, pp. 2052–2083, (2016).
- [11] M. Amadeo, C. Campolo, A. Molinaro and N. Mitton: Named Data Networking: a Natural Design for Data Collection in Wireless Sensor Networks, Wireless Days (WD), 2013 IFIP, Valencia, pp. 1–6, (2013).
- [12] M. Hail, M. Amadeo, A. Molinaro and S. Fischer: Caching in Named Data Networking for the Wireless Internet of Things, Proc. of 2015 International Conference on Recent Advances in Internet of Things (RIoT), Singapore, pp. 1–6, (2015).
- [13] M. Amadeo, C. Campolo, A. Iera and A. Molinaro: Named data networking for IoT: An architectural perspective, Proc. of 2014 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Bologna, pp. 1–5, (2014).
- [14] Z. Zhang, H. Ma and L. Liu: Cache-Aware Named-Data Forwarding in Internet of Things, Proc. of 2015 IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2015), San Diego, CA, pp. 1–6, (2015).

- [15] 鈴木誠, 森川博之: Choco: 無線センサネットワーク向け多目的プラットフォーム, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 114, No. 160, pp. 45–50, (2014).
- [16] M. Suzuki, Y. Yamashita and H. Morikawa: Low-Power, End-to-End Reliable Collection Using Glossy for Wireless Sensor Networks, Proc. of 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC 2013 Spring), Dresden, pp. 1-5, (2013).
- [17] T. Kuniyasu and T. Shigeyasu: A Study on Implementation of NDN to WSN, Proc. of The 31-st IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (IEEE AINA-2017), Taipei, Taiwan, pp.392–398, (2017).
- [18] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE Std.802.11, (1999).
- [19] L. Breslan, P. Cao, L. Fan, G. Phillips and S. Shenker: Web Caching and Zipf-like Distributions: Evidence and Implications, Proc. of 18th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE INFOCOM 1999), Vol. 1, pp. 126–134, (1999).
- [20] A. Afanasyev, I. Moiseenko and L. Zhang: ndnSIM: NDN simulator for NS-3, Technical report, NDN (2012).