

推薦論文

適応的なリクエストコンテンツ制御を導入した WSN向けコンテンツ指向型データ収集手法

國安 哲郎¹ 重安 哲也²

受付日 2017年4月26日, 採録日 2017年11月7日

概要: 多数の無線センサで様々な場所のセンシングデータを取得・収集する WSN に, データの内容を指定することによりネットワークキャッシュを活用するコンテンツ指向型技術である NDN 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. WSN へ NDN を適用する研究はすでにいくつか行われているが, WSN に NDN をそのまま適用すると2つの問題点が発生する. 1つはコンテンツを要求する Interest に対するコンテンツの返送経路を記録する PIT の冗長な登録によりコンテンツ配送の際に不要なトラフィックが発生することであり, 他方はパケットエラー率が高い無線環境下における下位レイヤでのコンテンツ喪失である. そこで, 本論文では, これらに対処する新たな WSN 用 NDN 転送制御手法を提案し, これにより, コンテンツの取得率が向上することを計算機シミュレーションにより明らかにする.

キーワード: WSN, コンテンツ指向型ネットワーク, NDN

Content Oriented Data Collecting System for WSN with Adaptive Interest Forwarding

TETSURO KUNIYASU¹ TETSUYA SHIGEYASU²

Received: April 26, 2017, Accepted: November 7, 2017

Abstract: It is desired that realization of data collecting without aware the original data location by applying NDN which is content centric technology utilizing network cache by specifying content name, to WSN gathering sensed data by multiple wireless sensors. Although several studies relating to the implementation of NDN to WSN have already been done, two problems will arise if we simply apply the original NDN to WSN. The one is that unnecessary traffic is generated during content request/delivery induced by redundant entry registrations on PIT for the Data return path corresponding Interest. The other one is that higher content loss rate is induced by the wireless environment with high packet error rate. Hence, in this paper, we propose new NDN forwarding control method for WSN to mitigate the effects of these problems. The results of computer simulations confirm that the content acquisition rate and the throughput performance on entire network are improved by our proposals.

Keywords: WSN, Content-Oriented Network, NDN

1. はじめに

IP ネットワークなど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

本論文の内容は 2017 年 1 月の第 169 回マルチメディア通信と分散処理研究会にて報告され, 同研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

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, Hiroshima 734-8558,
Japan

² 県立広島大学経営情報学科
Department of Information Management Systems, Prefec-
tural University of Hiroshima, Hiroshima 734-8558, Japan

れる。たとえば、端末個々の識別子である各 IP アドレスの割当ては端末の物理的な位置に基づく。そのため、ホストセントリックな通信は、IP アドレスに対応する場所を指定していることになり、ロケーションセントリックな通信であるといえ換えることができる。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させる技術である。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: Contents Router) のうち、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だけでなく、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つなぐことで、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。なかでも、センサを備えた無線ノードから構成される WSN (Wireless Sensor Network) [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 は隣接するノード間で互いを識別する必要があること、ならびに、不要なデータ配信によりトラフィックが増加するなどの問題をかかえている。

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 (Named Data Networking) [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], [12], [13] では、IoT デバイスにはリソースや処理能力に制限があることに主に着目し、これを補うための効率的なコンテンツのキャッシング戦略について議論している。一方、文献 [14] では、WSN に

おけるデータ収集手法としてデータセントリックな NDN を適用することを調査し、主に Interest の転送戦略について議論しているが、NDN における Interest の転送手法については多くの改善点が存在する。そこで、本論文では、文献 [14] の改善点を克服する新たな Interest の転送・ルーティング手法について議論する。

文献 [14] では、WSN へ NDN を適用する利点として、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、また、ネットワークのスケラビリティも向上することの 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り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。

しかしながら、文献 [14] は、WSN へ NDN を適用した際の具体的な性能評価を行っているが、オリジナルの NDN を単純に適用した場合のみの考慮にとどまっており、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。そこで本研究では、WSN に NDN を単純に適用した場合に発生する問題点についてまず議論する。その結果、1 点目の問題として、ブロードキャスト時に中間ノード上で冗長な PIT (Pending Interest Table) レコードの登録が行われることにより、コンテンツ配送の際に不要なトラフィックが発生することを述べる。次に 2 点目として、無線環境下のようにパケットエラー率が高い場合には、それを考慮した適切な転送先リンク選択制御機能が必要となることを述べる。

さらに、本論文の後半では、これらの諸問題を解決するための新たな WSN 用 NDN プロトコルを提案し、その有効性を計算機シミュレーションにより明らかにする。

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 2 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 に登録し、次の CR へ Interest を転送する。ここで、PIT にすでに同じコンテンツ名を持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 が返送される。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。

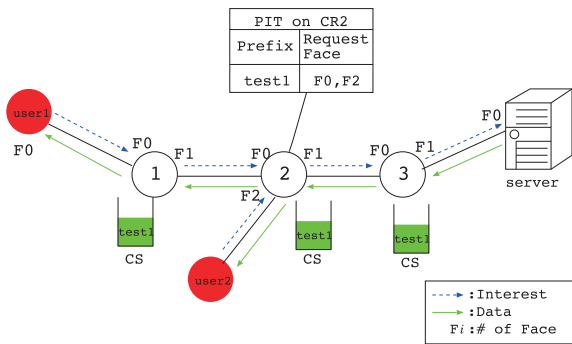


図 1 NDN の動作例

Fig. 1 Example of transmission procedure on NDN.

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わって返信することでトラフィックの削減と RTT (Round Trip Time) 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 (Forwarding Information Base) に登録し、以降、同じ Prefix を持つ 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) を持つ Interest が同順で CR2 に到着したとする。このとき、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。

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。本論文では、NDN を 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。

- (I) 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) [17] を用いる。
- (II) Interest 中継時に、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。
- (III) 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。
- (IV) Data は PIT 情報に従ってユニキャストで返送する。
- (V) CR 間でお互いを一意に識別するために、Face 番号に

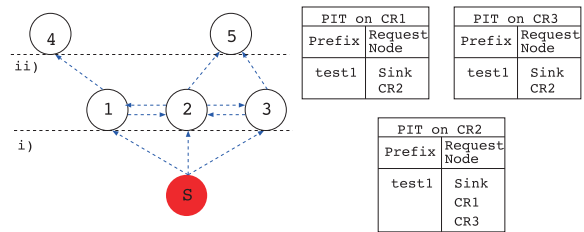


図 2 NDN を適用した WSN における冗長 PIT 登録
Fig. 2 Redundant PIT registrations in WSN.

代えて MAC アドレスを PIT と FIB に登録する*1。

ここで、通信方式として IEEE802.11 に着目した理由は、ネットワークキャッシュをすべての端末が相互利用するために、お互いの通信範囲内に位置する任意の 2 端末は対等な通信を行うことができる分散ネットワークを前提としているためである。ただし、これは 1 つの適用例であり、採用可能な通信方式は相互に対等に通信できればよく、本論文における提案手法が適用可能となるネットワークは IEEE802.11 に限定されないことに注意されたい。

また、識別子として MAC アドレスを用いた理由は、無線環境では電波の到達先端末を指定することが難しいため、受信側で受信実施の有無を判断できるようにするためである。

2.3 WSN への NDN 導入と SPR の問題点

WSN に単純に NDN を適用すれば、FIB にエントリがない Interest はブロードキャストで転送されることになる。図 2 に示すように、受信した Interest をすべて PIT に登録する手法を SPR (Simple PIT Registration) と呼ぶ。SPR では、冗長に登録された PIT エントリに従うと、Data 返送時の転送回数も増加してしまうため、トラフィックの増加が発生する可能性がある。

図 2 に示す例においても、SPR では、CR1, 2 間と CR2, 3 間では、互いの MAC アドレスを PIT に登録することで、Data 返送時に不要なトラフィックが発生することが分かる。

2.4 DDF [14]

文献 [14] では、任意の Prefix が記載された Interest を受信した CR がその受信直後に同名の Interest を他の CR から受信した場合、どちらも出自を同じくする Interest であると判断する。そして、同一 Interest の重複転送を回避するために、自身は 2 番目以降に受信した Interest の転送を中止する (図 3)。文献 [14] では、この手法の具体的なプロトコル名は与えられていないが、本論文では DDF (Discard Duplication Forwarding) と呼ぶ。

*1 これに対応するために、本研究では、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。

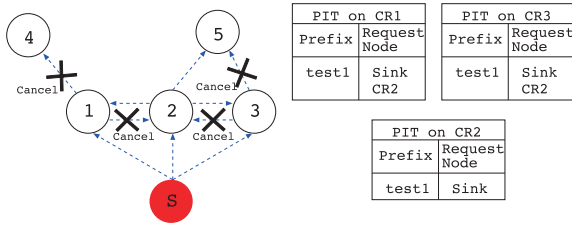


図 3 DDF における Interest 転送
Fig. 3 Interest forwarding on DDF.

さて、DDF では、重複転送を回避できる一方で、Interest の拡散範囲の減少により、キャッシュヒット率の低下を招く可能性がある。図 3 に示すように、CR1, 2, 3 のうち、CR2 が最初に上流側の CR に Interest を転送した場合、DDF では、CR1, 3 が自身の転送をとりやめる。そのため、この例では、CR4 からの Data 返送経路は確立されなくなる。

また、上記に加え、WSN に NDN を適用する場合は、無線環境下のパケットエラーが頻繁に発生する状況を考慮した転送先リンク選択制御機能が必要となる。これは、通信方式として自律分散型のアクセス制御方式である CSMA を想定していることから、トラフィックの増加によるパケットエラー率が高くなるためである。有線ネットワークでは、一般にトラフィック変動によるパケットエラーへの影響は無線ネットワークに比べて非常に小さい。そのため、有線ネットワークにおいてトラフィックが増加したとしても、コンテンツ取得の失敗は起こりにくい。これに対し、無線ネットワークにおけるトラフィック変動はパケットエラーを発生させ、容易にコンテンツ取得失敗の増加を招く。

そこで、次章より、これらの問題を解決するためにリンク品質を考慮した転送制御手法について検討を行う。

3. WSN 用 NDN プロトコル

本章では、WSN における NDN の性能を向上させるために、2 つの転送制御手法を提案する。

3.1 ブロードキャスト転送制御

本節では、FIB 確立前の Interest のブロードキャスト転送において、コンテンツの検索エリアの減少を防ぐ BPF (Best PIT Forwarding) を提案する。前述した DDF における中継経路候補数の減少を回避するために、BPF では、冗長な PIT の登録を回避しつつ、十分なコンテンツ配送経路数を探索する。具体的には、新たに受信した Interest と同じ Prefix の Interest をすでに受信済みであっても、転送を中止するのではなく、転送先の CR でその Interest に対する PIT 登録の必要性を判断する。以下に動作手順を示す。

(I) SPR と同様にどの CR も受信した Interest の転送を 1

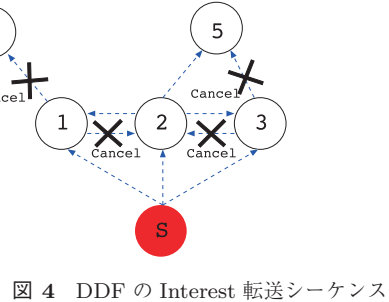
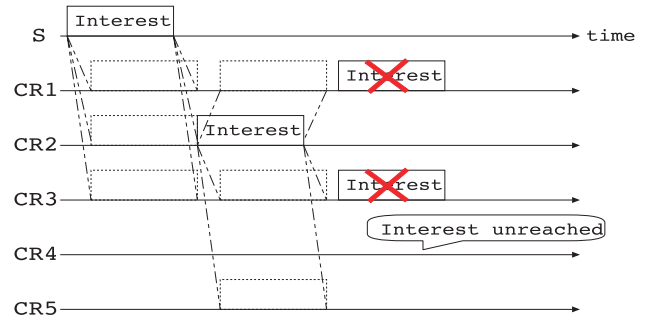


図 4 Comparison of interest forwarding sequence on DDF and BPF.

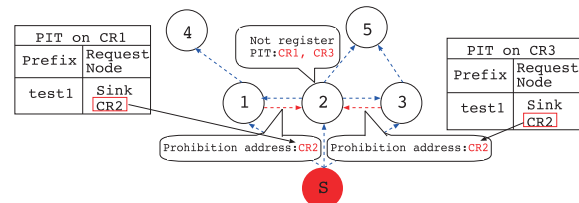
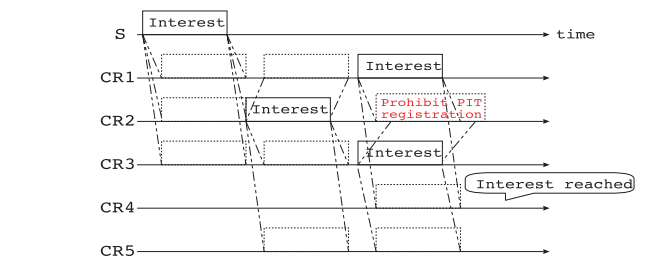


図 5 BPF の Interest 転送シーケンス
Fig. 5 Comparison of interest forwarding sequence on DDF and BPF.

度行う。

- (II) Interest を転送する CR は自身の PIT を参照し、転送を試みる Interest と同名 Prefix のエンTRIES に記録されている MAC アドレスを禁止アドレスとして Interest に記載する。
- (III) Interest を受信した CR は自身の MAC アドレスと記載された禁止アドレスが一致した場合、送信元 MAC アドレスを PIT に登録しない。

図 4, 図 5 に DDF と BPF の Interest 転送シーケンスをそれぞれ示す。図 5 に示すように、CR2 が最初に Interest を転送した場合、CR1, 3 の PIT には CR2 の MAC アドレスが登録される。その後に CR1, 3 が同名 Prefix の Interest を転送する場合は、まず自身の PIT を参照し、同名 Prefix

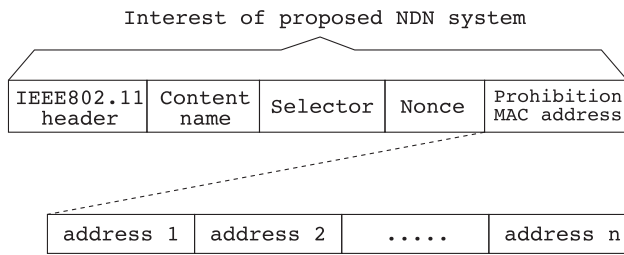


図 6 BPF における Interest 中の禁止アドレス記載フォーマット
Fig. 6 Prohibition address description format of interest in BPF.

のエントリに記録されている MAC アドレスを図 6 に示すように禁止アドレスとして Interest に記載したうえで Interest を転送する。CR2 は CR1 あるいは CR3 から受信した Interest の禁止アドレスフィールドを参照し、もし自身のアドレスが記載されている場合は、その Interest をもとしたエントリ登録は行わずに破棄する。

このようにすることで、BPF では冗長な PIT 登録を防ぎつつ、かつ、コンテンツ探索エリアの減少を回避する。

3.2 1hop 先のリンク状態に基づく適応的経路選択制御

FIB 確立後に転送する Interest の宛先をネットワーク内のトラフィック変動に起因するパケットエラーの発生状況に応じて動的に変更する DCF (Dynamic Change Forwarding) を提案する。本手法では、複数の転送経路を FIB に確保した CR (MPCR: Multi-Path CR) がトラフィック負荷に応じた適応的転送先切替制御を実施する。

本節では大きく 2 種類に分類される以下の 4 つの方式を提案する。前半の方式は Interest 送信に対する L2ACK の返信率で負荷状態を判定し、後半の方式は Interest 送信に対する ACK の返信時間で判定する。ここで、L2ACK とは、レイヤ 2 の MAC (Medium Access Control) 層で用いられる確認応答パケットであり、正常にパケットを受信できた場合のみ送信元へ通知する。以降、L2ACK は ACK と記載する。

DCF_{rate1}

ACK を受信するたびに、直近 N 回の Interest 送信に対する平均 ACK 返信率により転送先を決定する。

DCF_{rate2}

Interest を N 回送信するたびに、直近 N 回の Interest 送信に対する平均 ACK 返信率により転送先を決定する。

DCF_{time1}

ACK を受信するたびに、直近 N 回の Interest 送信に対する平均 ACK 返信時間により転送先を決定する。

DCF_{time2}

ACK を N 回受信するたびに、直近 N 回の Interest 送信に対する平均 ACK 返信時間により転送先を決定する。

これらから分かるように、DCF_{rate1}, DCF_{time1} は ACK を受信するたびに、つまり、Interest を送信するたびに毎回

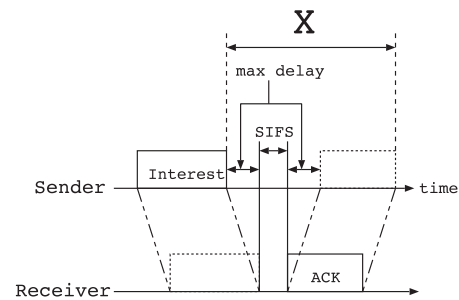


図 7 Interest-ACK の応答時間
Fig. 7 Response time of Interest-ACK.

判定を行う。これに対し、DCF_{rate2}, DCF_{time2} は N 回 Interest を送信するたびに判定を行う。つまり、DCF_{rate2}, DCF_{time2} は DCF_{rate1}, DCF_{time1} より転送先切替の判定頻度が少ない方式となっている。

DCF_{rate1}, DCF_{rate2} の判定式を式 (1) に、DCF_{time1}, DCF_{time2} の判定式を式 (2) にそれぞれ示す。

$$\alpha > \frac{R}{N} \tag{1}$$

ここで、 R は ACK 受信数、 N , α はオペレータによって指定される値とする。

$$\beta < \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N} \tag{2}$$

ここで、 T_i は i 番目の Interest 送信に対する ACK の応答時間、 β は式 (3) で算出される値とする。式 (3) に示す γ は平均再送回数を考慮してオペレータによって指定される値とする。

$$\beta = X \times \gamma \tag{3}$$

また、 β のイメージを図 7 に示す。ここで、同図に示す SIFS は、CSMA/CA において定義されているパケット送信間隔における最短の待機時間である。

3.3 複数 hop 先のリンク状態に基づく適応的経路選択制御

前節で提案した 4 つの手法は、1hop 先のトラフィック負荷のみで転送先切替判定を行う。しかし、候補とする転送経路の長さが長い場合には、正しい経路の状態は把握できない。そこで、本節では、現在選択している転送経路のうち、2hop 先までの CR のトラフィック負荷を考慮する DCF_{2hop}, 経路中のすべての CR のトラフィックを考慮する DCF_{path} の 2 方式をさらに提案する。

DCF_{2hop} および DCF_{path} は、DCF_{rate1,2} と同様に、Interest 送信に対する L2ACK の返信率で負荷状態を判定する。以下に動作手順を示す。

3.3.1 DCF_{2hop}

(I) MPCR に隣接する CR (以下、CR_{neighbor}) は、一定間隔ごとに直近 N 回の Interest 送信に対する平均 ACK

返信率 R を算出する.

(II) $CR_{neighbor}$ は MPCR に返送する Data に上記 (I) で算出した R を記載する.

(III) MPCR は受信した Data に記載された R を参照し、閾値 α を下回る場合、他の経路に転送先を変更する.

3.3.2 DCF_{path}

本手法では、経路中のすべての CR のトラフィックを参照するために、検査専用パケット (CP: Check Packet) を使用する. CP は Interest に 1 ビットのチェックフラグを立てたパケットであり、Data の要求は行わず、経路中の各 CR の平均 ACK 返信率の参照のみのために用いる. また、ペイロード部のサイズは 0 とする.

(I) シンクは一定時間ごとに現在選択している経路に CP を送信する.

(II) 自身より下流の CR から CP を受信した CR は、直近 N 回の Interest 送信に対する平均 ACK 返信率 R を算出する. もし、自身が最上流 CR であれば、その CP を破棄する.

(III) R が閾値 α を上回る場合、その CP の PIT 登録を行い、優先的に上流 CR へ転送する. そうでなければ、その CP を優先的に下流 CR へ返送する.

(IV) 自身より上流の CR から CP を受信した CR は、自身が MPCR である場合、他の候補に転送先を変更し、その CP は破棄する. そうでなければ、PIT 情報に従って下流へ転送する.

4. 性能評価

本章では、BPF と DCF をシミュレーションにより性能評価した結果について述べる. 本評価では、C++ を用いて開発したイベントドリブン型のシミュレータを使用した. 同シミュレータにおいては、文献 [18] と同様に、無線チャネルにおけるフェージングおよび雑音に起因する送受信の失敗は発生しないと仮定し、パケットの送受信の失敗はパケットどうしの衝突によってのみ発生するものとした.

4.1 BPF の評価

本節では、表 1 に示す SPR, DDF, BPF の 3 方式の性能を評価する. また、表 2 に評価に用いたシミュレーション諸元を示す. これは、IEEE802.11b を想定して設定した.

ここで、表 2 に示す DIFS は、CSMA/CA において定義されており、無線チャネルがビジー状態からアイドル状態に移行したと判断するまでの待機時間である. また、Slot はパケット衝突を回避するためのランダムなパケット送信待機時間であるバックオフを決めるための 1 単位時間である. また、PLCP は IEEE802.11 のフレームフォーマットで定義されており、本シミュレーションでは IEEE802.11b を想定しているため、 $192 \mu\text{sec}$ の固定長となっている. こ

表 1 SPR, DDF, BPF の概要

Table 1 Overviews of SPF, DDF and BPF.

方式	概要
SPR	単純な Interest 転送と PIT 登録
DDF [14]	冗長な Interest 転送を回避
BPF	冗長な PIT 登録を回避

表 2 シミュレーション諸元

Table 2 Simulation parameters.

Parameter	Value
Data Rate	5.5 Mbps
Communication Range	75 m
SIFS	$10 \mu\text{sec}$
DIFS	$50 \mu\text{sec}$
Slot	$20 \mu\text{sec}$
Contention Window Size	Min: 31, Max: 1023
MAC Header	Interest/Data: 24, ACK: 10 (Bytes)
Frame Check Sequence	4 Bytes
PLCP Header and Preamble	$192 \mu\text{sec}$
Interest Payload	72 Byte
Data Payload	250 Byte
Simulation Time	10 sec
Buffer Size	10
Cache Algorithm	LRU
Arrival Process	Poisson Arrival
Number of Nodes	81
Simulation Field	$400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$
N	20
α	0.3
γ	5

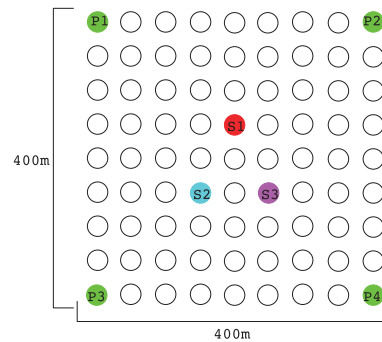


図 8 グリッドネットワークモデル

Fig. 8 Grid network model.

れは、同期信号や伝送速度、パケット長などの情報を含んでいる [19].

図 8 にシミュレーショントポロジを示す. これは、文献 [14] の性能評価で用いられているシミュレーショントポロジと同様のものである. 各 CR は 50 m ごとの等間隔に配置し、図中の S1, S2, S3 をシンクとする. また、四隅の 4 つに配置された P1~P4 はそれぞれ異なる Prefix を持つオリジナルコンテンツのデータを保持するサーバ (以下、プロバイダ) とする. 各シンクは 4 つの Prefix からランダムに選択したコンテンツを要求する Interest を送信する.

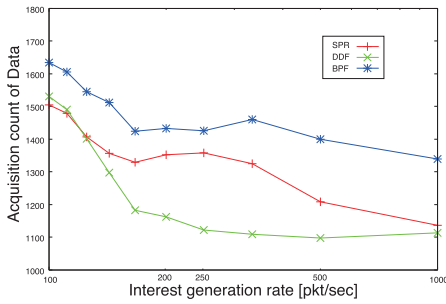


図 9 データ取得数

Fig. 9 Acquisition count of data.

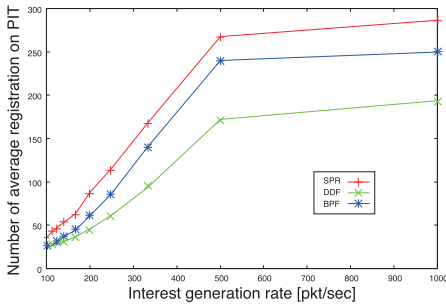


図 10 各 CR の平均 PIT 登録数

Fig. 10 Number of average registration on PIT.

4.1.1 Interest 生成レートに対するデータ取得数の変化

図 9 に各シンクにおける Interest 生成レートに対するデータ取得数を示す。本評価では、複数の宛先が FIB 上に登録された場合は、その中から最短経路となる CR を転送先として選択することとした。これを実現するために、プロバイダからシンクまで Data を返送する際に、Data のヘッダにホップ数を記録させることで対応した。

同図より、どの生成レートにおいても、本論文で提案する BPF は他の 2 つの手法より多くの Data を取得できていることが確認できる。これは、SPR では、冗長な PIT の登録により、不要なトラフィックが生じたためであり、DDF においては、Interest 転送中止制御により、最短経路が確立されなかったためであると考えられる。

また、図 10 に Interest 生成レートを変化させた場合の各 CR の平均 PIT 登録数を示す。同図より、BPF は SPR より冗長な PIT 登録を削減できること、ならびに DDF より多くの経路を FIB に登録できていることから図 9 に示した結果とあわせてデータ取得数の向上につながっていることがそれぞれ確認できる。

4.1.2 時間あたりのデータ取得数の推移

図 11 に Interest 生成レートを 1,000 [pkt/sec] とした場合のシミュレーション経過 1 秒間あたりのデータ取得数の推移を示す。ここでは、 $i-1$ 秒～ i 秒間のデータ取得数を i 秒のデータ取得数として横軸にプロットしている。

同図より、1 秒～3 秒間のデータ取得数は DDF が最も多いことが分かる。これは、他の 2 方式と比較して、Interest 転送中止で干渉トラフィックが減少し、パケット衝突が減

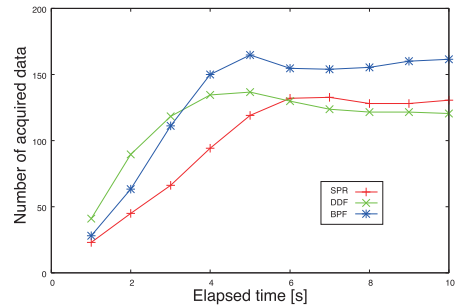


図 11 1 秒あたりのデータ取得数

Fig. 11 Acquisition count of data on each second.

表 3 DCF の 4 方式と Fixed の概要

Table 3 Overviews of 4 DCF methods and Fixed.

方式	概要
Fixed	FIB に最初に登録した最短経路をつねに選択
DCF_{rate1}	ACK を受信するたびに ACK 返信率を基にリンク状態を参照
DCF_{rate2}	Interest を N 回送信するたびに ACK 返信率を基にリンク状態を参照
DCF_{time1}	ACK を受信するたびに ACK 返信時間を基にリンク状態を参照
DCF_{time2}	Interest を N 回送信するたびに ACK 返信時間を基にリンク状態を参照

少したためである。しかし、FIB 確立後のユニキャスト転送フェーズに移行したあとは、DDF は最短経路で中継している 2 方式と比較して、データ取得数が下回ることが分かる。

4.2 単一ホップの状態のみで転送先を切り替える DCF 手法の評価

表 3 に示すように、3.2 節で提案した 1hop 先のリンク状態に基づく DCF4 方式の性能を評価する。以下の評価では、表 2 と同じシミュレーション諸元を評価に用いる。

4.2.1 10 端末での性能評価

図 12 にネットワークポロジを示す。ここで、図上部の三角の 2 端末はシミュレーション開始後 1 秒～5.5 秒の間 CR2 に対して干渉トラフィックを発生させる。同様に下部の 2 端末は 5.5 秒～10 秒の間 CR3 に対して干渉を与えるものとする。なお、同図において、2 重円で示される CR は MPCR である。

図 13 にデータ取得率を示す。データ取得率とは、シンクが送信した Interest のうち、実際に Data を取得できた割合である。また、横軸は 1 干渉端末あたりの干渉パケットの生成レートである。ここで、干渉パケット生成レートを 1,000 [pkt/sec] まで変化させたのは、干渉パケットのみでチャンネル容量を埋め尽くすトラフィック負荷が発生する環境を想定した評価を行うためである。また、シンクの Interest 生成レートは 100 [pkt/sec] とする。さて、MPCR

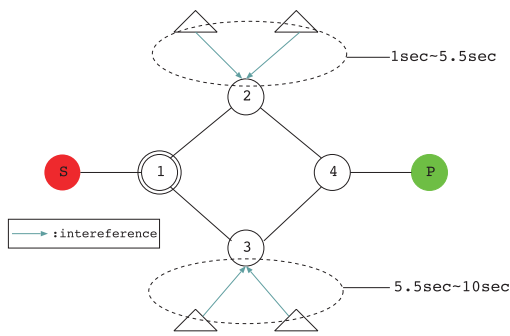


図 12 ネットワークトポロジ (10 端末モデル)

Fig. 12 Network topology (10 nodes model).

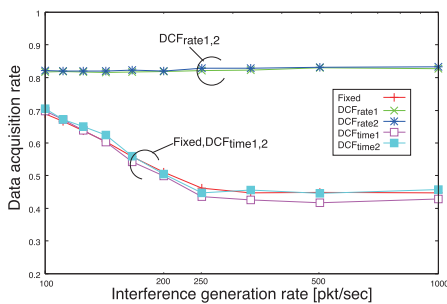


図 13 データ取得率

Fig. 13 Data acquisition rate.

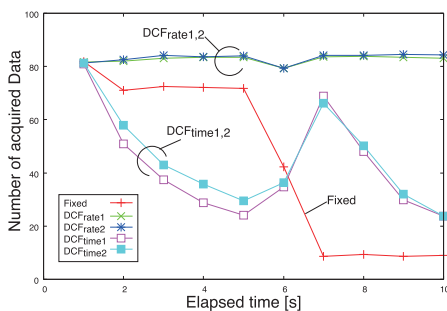


図 14 1 秒あたりのデータ取得数

Fig. 14 Acquisition count of Data on each second.

である CR1 には、CR3 と CR2 が FIB に登録されているが、初期状態では CR3 を転送先を選択していることとした。ここで、図 13 および図 14 に示す *Fixed* は、初期状態である CR3 を転送先としてつねに選択する方式である。

図 13 に示す結果から、 DCF_{rate1} 、 DCF_{rate2} がともに高い取得率を達成していることが分かる。これは、5.5 秒以降に発生した干渉の検出と、宛先変更が機能しているためである。

一方、 DCF_{time1} 、 DCF_{time2} は、応答時間をもとに判定を行うが、これには CSMA/CA のバックオフ時間というランダムに決まる時間が判定対象に含まれているため、リスク状態の判定が高精度で行えなかったと考えられる。

図 14 に干渉パケットの生成レートが 1,000 [pkt/sec] である場合の 1 秒間あたりのデータ取得数の推移を示す。

同図において、 DCF_{rate1} 、 DCF_{rate2} は 5.5 秒以降に転

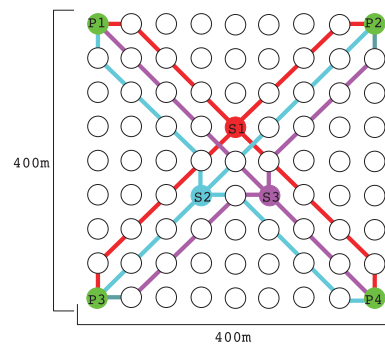


図 15 *Fixed* の使用経路

Fig. 15 Forwarding routes on *Fixed*.

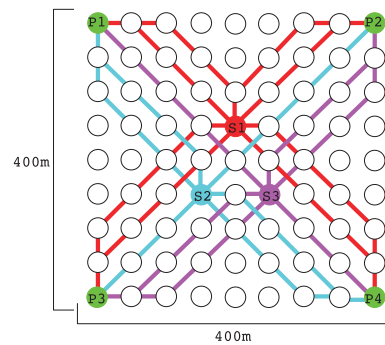


図 16 DCF の使用経路

Fig. 16 Candidates of forwarding route on DCF.

送先を初期設定の CR3 から CR2 に変更することで、最も多い受信数を達成している。これに対し、*Fixed* では、転送先が変更されないため、5.5 秒以降に急激に受信数が減少している。また、 DCF_{time1} 、 DCF_{time2} は、前述のように判定精度が高くないため、 DCF_{rate1} 、 DCF_{rate2} を下回る結果となっている。

これらの結果から、ACK の返信率を判定基準とする手法が Interest 転送先判断に有効であることが分かる。

4.2.2 グリッドネットワークでの性能評価

図 8 のトポロジを用いて、 DCF_{rate1} 、 DCF_{rate2} 、*Fixed* の 3 方式を評価する。前項の性能評価より、 $DCF_{time1,2}$ と比べて $DCF_{rate1,2}$ が優れた性能を達成することが明らかとなったため、本項の評価では、 DCF_{rate1} および DCF_{rate2} のみを評価対象とした。

Fixed が使用した転送経路を図 15 に示す。また、 DCF_{rate1} と DCF_{rate2} が使用した転送経路を図 16 に示す。

図 17 にデータ取得率を示す。同図から、DCF の 2 方式が若干 *Fixed* よりも高い性能を達成していることが確認できる。

次に、図 18、図 19 に Interest の総送信回数、総データ取得数をそれぞれ示す。これらの図から、 DCF_{rate1} と DCF_{rate2} は、*Fixed* より多くの Interest 転送と Data 返送を実現していることが分かる。また、 DCF_{rate1} と DCF_{rate2} の間に性能差はほとんどないことが分かる。こ

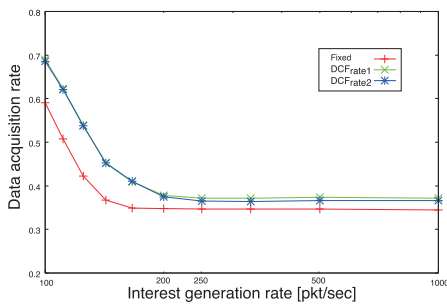


図 17 データ取得率

Fig. 17 Data acquisition rate.

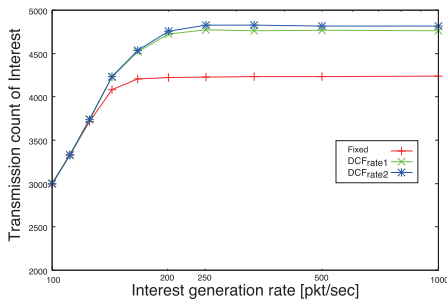


図 18 Interest 総送信回数

Fig. 18 Transmission count of interest.

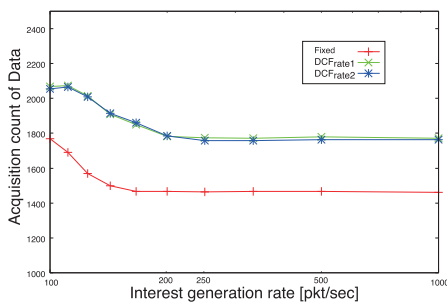


図 19 総データ取得数

Fig. 19 Acquisition count of data.

れより、転送先切替の判定頻度が少なく、制御負荷を抑えられる DCF_{rate2} がスケラビリティの高さが求められる IoT 用途に適していると考えられる。

4.3 複数ホップ先の状態を基に転送先を切り替える DCF 手法の評価

表 4 に示すように、3.3 節で提案した複数 hop 先のリンク状態に基づく DCF_{2hop} , DCF_{path} の性能を評価する。前節の性能評価をもとに、スケラビリティならびにデータ取得数の双方に優れた DCF_{rate2} のみを本節の比較対象として用いることとした。

評価では、図 20 に示すように、中継経路における MPCR からプロバイダ間の中継 CR 数を変化させた。なお、それぞれの経路には、複数経路が合流する直前の a, b の 2 つの CR に対して干渉を発生するノードを 2 端末ずつ配置した。

図 21 に干渉パケット生成レートを 1,000 [pkt/sec] とし

表 4 DCF_{2hop} と DCF_{path} の比較表

Table 4 Overviews of DCF_{2hop} and DCF_{path} .

方式	概要
DCF_{2hop}	2hop 先までのリンクの ACK 返信率を参照
DCF_{path}	CP を用いて経路中のすべてのリンクの ACK 返信率を参照

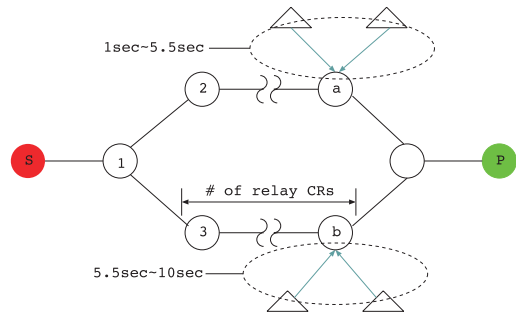


図 20 ネットワークトポロジ (中継 CR 数の変化)

Fig. 20 Network topology (Change of relay CRs).

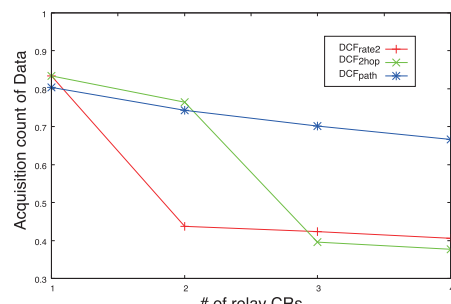


図 21 中継 CR 数に対するデータ取得率

Fig. 21 Data acquisition rate on each # of relay CRs.

た場合の上記の設定によって得られた評価結果を示す。干渉パケット生成レートは 1,000 [pkt/sec] とする。同図に示すように、MPCR に隣接する CR が中継経路候補のボトルネックとなる場合 (# of relay CRs が 1) はどの手法も大きな差はないものの、ボトルネック CR と MPCR 間の距離が離れるに従って、 DCF_{rate2} , DCF_{2hop} はその性能が低下することが確認できる。しかしながら、中継経路候補に属するすべての CR の状態を調査する DCF_{path} はその影響を受けにくく、他の方式よりも高い性能を実現できていることが確認できる。

一方、従来の DCF_{rate} , DCF_{2hop} でもリンク状態を調査できる短い経路長では、 DCF_{path} の性能は他の 2 方式と比べて若干下回っていることが確認できる。これは、CP パケットのオーバーヘッドによるものであり、その大きさは CP パケットの送信インターバルに依存すると考えられる。

4.4 考察

本章では、本論文で提案を行った 6 つの DCF 手法について評価を行った。4.2 節では、ACK 返信時間を基にリンク状態を参照する $DCF_{time1,2}$ より ACK 返信率を基にリンク状態を参照する $DCF_{rate1,2}$ が優れていることを明ら

かにした。これに加えて、スケーラビリティの高さが求められる IoT 分野での使用を想定する場合、転送先切替の判定頻度が少なく、制御負荷を抑えられる DCF_{rate2} が適していることについて述べた。

次に、4.3 節では、 DCF_{path} の性能は DCF_{rate} , DCF_{2hop} でもリンク状態を調査できる短い経路長では、CP パケットのオーバーヘッドにより DCF_{rate} , DCF_{2hop} と比較して若干下回るものの、総じて高い性能を実現できることが明らかになった。

5. おわりに

本論文では、WSN に NDN を単純に適用した場合の問題に対処するための新たな WSN 用 NDN 転送制御手法として、BPF と DCF を提案した。シミュレーション結果より、BPF は、PIT の冗長な登録を回避し、かつ、コンテンツの検索エリアの減少を防ぐことを明らかにした。また、1hop あるいは 2hop 先という近隣端末のみのリンク状態を参照する DCF および DCF_{2hop} と比較して、経路すべてのリンク状態を参照する DCF_{path} は経路が伸長した場合も経路状態を正しく把握できることを明らかにした。

さて、CP パケットのオーバーヘッドを必要最小限にとどめることで DCF_{path} の性能のさらなる向上が期待できるが、そのための CP パケットの最適送信スケジューリング手法については稿を改めて議論したい。

参考文献

- [1] Jacobson, V., Smetters, D., Thornton, J., Plass, M., Briggs, N. and Braynard, R.: Networking named content, *Proc. ACM CoNEXT 2009*, pp.1–12 (2009).
- [2] Dannewitz, C., Imbrenda, C., Kutscher, D. and Ohlman, B.: 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] Begum, K. and Dixit, S.: Industrial WSN using IoT: A survey, *Proc. 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT 2016)*, Chennai, India, pp.499–504 (2016).
- [7] Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Estrin, D., Heidemann, J. and Silva, F.: Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking, *IEEE/ACM Trans. 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 2017-03).
- [9] Soniya, M.M.S. and Kumar, K.: A survey on named data networking, *Proc. 2015 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS 2015)*, Coimbatore, pp.1515–1519 (2015).
- [10] Chen, Q., Xie, R., Yu, F.R., Liu, J., Huang, T. and Liu, Y.: Transport Control Strategies in Named Data Networking: A Survey, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol.18, No.3, pp.2052–2083 (2016).
- [11] Hail, M., Amadeo, M., Molinaro, A. and Fischer, S.: Caching in Named Data Networking for the Wireless Internet of Things, *Proc. 2015 International Conference on Recent Advances in Internet of Things (RIoT)*, Singapore, pp.1–6 (2015).
- [12] Amadeo, M., Campolo, C., Iera, A. and Molinaro, A.: Named data networking for IoT: An architectural perspective, *Proc. 2014 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, Bologna, pp.1–5 (2014).
- [13] Zhang, Z., Ma, H. and Liu, L.: Cache-Aware Named-Data Forwarding in Internet of Things, *Proc. 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, CA, pp.1–6 (2015).
- [14] Amadeo, M., Campolo, C., Molinaro, A. and Mitton, N.: Named Data Networking: a Natural Design for Data Collection in Wireless Sensor Networks, *Wireless Days (WD), 2013 IFIP*, Valencia, pp.1–6 (2013).
- [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] Suzuki, M., Yamashita, Y. and Morikawa, H.: Low-Power, End-to-End Reliable Collection Using Glossy for Wireless Sensor Networks, *Proc. 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Dresden, pp.1–5 (2013).
- [17] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std.802.11 (1999).
- [18] 宇都宮依子，萬代雅希，笹瀬 巖：無線アドホックネットワークにおいて NACK 及び指向性アンテナによるブロードキャストデータ再送信を用いた MAC プロトコル，電子情報通信学会論文誌，Vol.J87-B, No.2, pp.144–158 (2004).
- [19] Mike, L. and Matt, H. (Eds.): *802.11 Wireless Networks*, Matthew, S.G.: O'Reilly & Associates (2002).

推薦文

データ取得先のロケーションを指定するのではなく、コンテンツの名前を識別子として指定し通信を行うことで効率的なデータ収集を可能とする「コンテンツ指向型ネットワーク」を Wireless Sensor Network (WSN) 上に実現するための新たなプロトコルを提案している。コンテンツ指向型ネットワークは将来ネットワークの新たなパラダイムとして注目を集めており、WSN 上の効率的な実現方法を示す本研究は、高い新規性・有用性を有しているといえる。よって本論文を情報処理学会論文誌に推薦する。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 重野 寛)



國安 哲郎 (学生会員)

平成 28 年 3 月県立広島大学経営情報学科卒業。現在，同大学大学院総合学術研究科情報マネジメント専攻在学中。無線ネットワークに関する研究に従事。



重安 哲也 (正会員)

大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。現在，県立広島大学経営情報学部准教授。主に，無線通信プロトコルに関する研究に従事。平成 20 年度山下記念研究賞，平成 28 年度論文賞各受賞。IEEE，電子情報

通信学会各会員，本会シニア会員。