

マルチホップ無線網における協調型隣接アクセスポイント評価手法の設計と実装

野林 大起^{†a)} 中村 豊^{††b)} 池永 全志^{†c)} 堀 良彰^{†††d)}
中村 勝一^{††††} 石西 洋^{††††} 貝崎 修治^{†††††}

Design and Implementation of Reputation Mechanism for Multihop Wireless Network

Daiki NOBAYASHI^{†a)}, Yutaka NAKAMURA^{††b)}, Takeshi IKENAGA^{†c)},
Yoshiaki HORI^{†††d)}, Katsuichi NAKAMURA^{††††}, Hiroshi ISHINISHI^{†††††},
and Syuuji KAIZAKI^{†††††}

あらまし 無線 LAN 技術の急速な普及に伴い、低コストで効率の良い無線ネットワークを構成するマルチホップ無線網 (Multihop Wireless Network: MWN) が注目されている。MWN において、ネットワークを構成するアクセスポイント (Access Point, AP) には高い信頼性が求められる。しかし、停電や故障によるハードウェアの不具合、悪意のあるユーザによる攻撃や電波妨害などによって、AP が正常に動作できない状況になり、信頼性が低下する場合が生じる。このような異常に対処するためには、ネットワーク内の各 AP の信頼性を評価するシステムが必要となる。我々はこれまで、MWN において各 AP が周辺に位置する AP と連携することで、隣接 AP の信頼性を評価する機構について提案してきた。提案手法では、隣接 AP の振舞いをその周辺に位置する AP が監視し、その情報を近隣の AP 同士で共有することで、正常に動作しない AP を検出する。本論文では、これまでシミュレーションにより有効性を検証してきたこの隣接 AP の信頼性を評価する機構を実機上に実装し、実際のマルチホップ無線網において有効に動作することを示す。

キーワード マルチホップ無線網, 相互監視, 障害検知, 信頼性評価

1. ま え が き

IEEE802.11 無線 LAN は、利用者の端末をインターネットに接続するためのアクセス技術として、オフィス並びに家庭において広く普及している。これらの無線 LAN では、端末局はインフラストラクチャと呼ばれる既存の基盤ネットワークに接続されたアクセスポイント (Access Point: AP) と無線通信することで LAN を構築する。このような無線 LAN 環境において、ネットワークを提供する AP 間を無線接続することでサービスエリアを容易に拡大できるマルチホップ無線網 (Multihop Wireless Network: MWN) が注目されている。

MWN では、多くの AP が相互接続し網を形成することで広いサービスエリアの提供が期待されている。この MNW の可用性を損なわないためには、ネットワークを構成する AP に高い信頼性が求められる。高

[†] 九州工業大学大学院工学府, 北九州市

Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, 804-8550 Japan

^{††} 九州工業大学情報科学センター, 北九州市

Information Science Center, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, 804-8550 Japan

^{†††} 九州大学大学院システム情報科学研究院, 福岡市

Dept. of Informatics, Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka-shi, 819-0395 Japan

^{††††} (株) ネットワーク応用技術研究所, 福岡市

Network Application Engineering Laboratories, 2-1-22 Momochihama, Sawara-ku, Fukuoka-shi, 814-0001 Japan

^{†††††} 九州電力株式会社, 福岡市

Kyushu Electric Power Co., Inc., 2-1-82 Watanabe-dori, Chuo-ku, Fukuoka-shi, 810-8720 Japan

a) E-mail: nova@net.ecs.kyutech.ac.jp

b) E-mail: yutaka-n@isc.kyutech.ac.jp

c) E-mail: ike@ecs.kyutech.ac.jp

d) E-mail: hori@csce.kyushu-u.ac.jp

い信頼性を持つ AP とは、MWN に参加する AP と協調的に動作することでパケットを正常に中継する役割を果たし、そのネットワークへ貢献する AP を指す。そのため、停電や故障によるハードウェアの不具合、若しくは悪意あるユーザによる攻撃や電波妨害などにより、AP が正常に動作できない状況になると、ネットワークを構成する AP の信頼性は低下する。このような場合に、マルチホップ網の再構成など、網自身が自律的に適切な対処を行うためには、ネットワーク内の各 AP の稼動状況を評価する仕組みが必要となる。

我々は以上の問題を考慮し、MWN において各 AP が周辺の AP と連携することで隣接 AP を評価する機構を提案してきた [1]。この提案手法は、隣接 AP の動作を他の AP が監視し、その監視結果をその隣接 AP に関係する AP と共有することで隣接 AP が正常に動作しているかを判断し、ネットワークを再構成する手法である。我々はこれまで提案手法をシミュレーションにより評価することで、MWN において正常に動作しない AP を検出し、ネットワークの再構成に用いることができることを示した。

本論文では、我々の提案する隣接 AP 評価手法の設計及び試験実装について述べる。提案手法を実装した AP を用いて実際に MWN を構築し、無線環境下においてパケット転送に異常が発生した AP を隣接 AP が自律的に協調し検出することで、その情報を用いてマルチホップ無線ネットワークを自律的に再構成できることを示す。本機能を搭載することで、管理コストを削減し得る高信頼型マルチホップ無線ネットワークの構築に寄与できる。

本論文では以降、2. において MWN における異常ノードの影響とその解決策について述べ、またその問題点について述べる。3. にて我々が提案した隣接 AP 評価手法について詳説する。4. では隣接 AP 評価手法の設計と実装の詳細について述べ、5. にて実機での動作検証の結果を示し、最後に 6. にてまとめる。

2. MWN における異常なノードの影響とその解決策

本章では、まず MWN の通信性能を低下させるノードの振舞いについて概説する。そして、関連研究である隣接ノード評価手法について述べた後、これらの手法が有する問題点について議論する。

2.1 異常ノード：悪意あるノードと利己的なノード

MWN に悪影響を与えるノードは二つに分類するこ

とができる。一つは悪意をもって周辺のノードへ影響を与える悪意あるノードである。この悪意あるノードは意図的にネットワークを構成しているノードを停止させる、またはネットワーク上に流れるパケットの盗聴/改ざんを主な目的としている。例えば、パケットのフラッディングや特定のノードへ過剰なパケットを送信するサービス不能 (Denial of Service : DoS) 攻撃、周囲に改ざんした経路情報を広報し意図的に自分を通る経路を作成し、パケットを改ざん/廃棄するブラックホール攻撃など様々な攻撃が存在する [2]。このような攻撃に対し、フラッディングによる DoS 攻撃にはブラックリストを利用した解決策、ブラックホール攻撃に対しては経路制御メッセージの正当性を検証する解決策等が提案されている [2]。

もう一つの悪影響を与えるノードは貪欲に自分の要求を満たすネットワークの作成を画策する利己的なノードである。利己的なノードはネットワークに対して非常に非協力的で、自らが送信するデータ、若しくは自分の配下に存在するノードのスループットを最大限にすることを目的とする。例えば、自らが生成したパケットは正常に転送し、他のノードから送信されてくるパケットは転送処理を行わない、または MAC 層プロトコルの弱点を利用し周囲にはネットワークへの参加意思を表示し、実際には自らの情報のみを送信するといった活動を行う [3]。これらの利己的なノードに対する手段はモバイルアドホックネットワーク (Mobile Ad Hoc Network : MANET) の分野において研究が進められている。

一般的にユーザの移動端末がネットワークを構成する MANET では、このような悪意をもったノードの存在が考えられるが、MWN ではネットワーク管理者が存在するため、上記のような異常行動するノードの可能性は非常に低く、事故や障害が主な異常の原因になると考えられていた。しかし、近年では管理体制が敷かれている MWN 以下にユーザが独自に無線バックボーンを構成する半管理体制を敷く MWN も報告されており、上記のような異常が無視できなくなっている [3]。

2.2 異常検出のためのノード連携手法

ネットワーク内のノードが自律的に異常ノードを検出する手法は MANET の分野において研究が進められている。これらの手法は、通貨モデルに基づく手法、ゲーム理論に基づく手法、評判に基づく手法の三つに大別できる [3]。

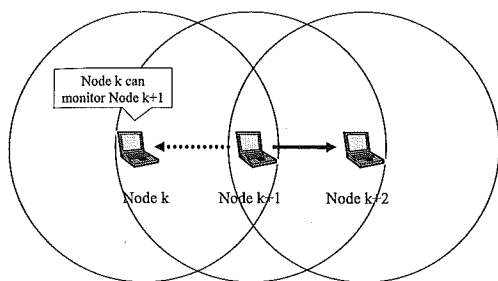


図1 MANETにおける隣接ノード監視手法
Fig.1 Neighbor node monitoring in MANET.

通貨モデルに基づく手法は各ノードに流れるパケットに通貨価値を付加し、ノードの通貨流通量によりそのノードの信頼性を測る手法である。代表的な手法として Nuglets [4] 等がある。この手法において、MANET の場合はノードに移動性があり、全ノードに均一にパケットが流れるため、各ノードに対するパケット流通量の偏りが少ない。しかし、MWN ではネットワークを構築する AP に移動性がないため、全ノードに均一にパケットが流れずに、各ノードにばらつきが生じる可能性がある。

ゲーム理論に基づく手法は各ノードの動作をゲーム理論を用いて解析することで、利己的なノードを検出する手法である。代表的な手法として Generous TIT-FOR-TAT [5] 等が挙げることができる。この手法では複雑な解析が可能であるが、有効性を検証するための前提とそのネットワークモデルが非現実的であるため実際のネットワークにおける適応が難しいと考えられる。

評判に基づく手法は各ノードが隣接するノードを監視し、その監視結果より隣接ノードの評判を作成することで利己的なノードを特定・対処する手法である。代表的な手法として Watchdog [6] や CORE [7], CONFIDANT [8] 等がある。この手法は隣接ノードの評判を監視結果に基づき生成するという単純な手法を用いているため、各ノードは集中管理を行わず分散的に異常ノードの特定が可能である。我々が提案した隣接 AP 評価手法もこの評判に基づく手法に分類される。以降、評判に基づく手法の詳細とその問題点について記述する。

2.3 関連研究

図1に、MANETにおける既存の隣接ノード監視のための基本的な手法を示す。図1において、ノード k がノード $k+1$ を経由してノード $k+2$ へデータを

転送する場合を考える。ノード k は通信可能な範囲にあるノード $k+1$ へデータを転送する。ノード $k+1$ はノード k より受信したデータをノード $k+1$ の線範囲内にあるノード $k+2$ へ転送する。このときノード k はインタフェースを Promiscuous モード動作させることで、ノード $k+1$ のデータ転送状況を知ることができる。そのため、ノード k は自身が送ったデータパケットをノード $k+1$ がノード $k+2$ 正しく転送しているかどうかを確認できる。

前述した手法によって得られる隣接ノードの監視結果から隣接ノードの評価値を作成し、周辺のノード協調してノードの信頼性を評価する手法として COR が提案されている [7]。CORE では、評価値を作成する際に直接的な評価値と間接的な評価値を算出する。直接的な評価値は各ノードが隣接ノードの監視結果より計算され、ネットワーク内の他の全ノードへ通知される。ただし、特定のノードが故意にマイナス評価送信することを防ぐために評価値はプラスであるものが通知される。このように各ノードは他ノードから知された評価値を間接的な評価値として利用する。して各ノードはこの直接的な評価値と間接的な評価より隣接ノードの最終的な評価値を算出する。この値がマイナスになるノードはネットワーク内から外される対象として判断される。

CORE と同様に隣接ノードの監視結果から隣接ノードを評価する手法として CONFIDANT が提案されている [8]。CONFIDANT の監視機構では隣接ノードにおけるデータパケットの転送、及びルーティングプロコルの動作を監視し直接的な評価値を作成する。その結果、隣接ノードが正常でない悪意ある振る舞いをたことを検知した場合には、その正常でないノード外のノードへアラームを送信する機能を有している。各ノードは、直接的な評価値と周囲のノードから通された評価値を総合して最終的な評価値を算出する。

2.4 マルチインタフェース・マルチラジオにおける問題点

前述した MANET における隣接ノード監視手法は、始点ノードの情報を隣接ノードが更に別のノードへ転送する際に、始点ノードが隣接ノードの転送情を検出・受信できることが前提条件である。しかし MWN では同一の無線チャネルの干渉による通信質の劣化を防ぐため、各ノードに対し複数のインタフェースを保持するよう検討が進められており、このように AP がマルチインタフェース・マルチラジオ

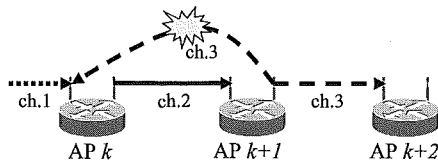


図 2 MWNN におけるノード監視の問題点 (複数インタフェース)

Fig. 2 Difficulty of node monitoring in MWNN.

利用する場合には各 AP が隣接 AP の動作を監視することが困難な場合が発生する。

MWNN における AP 監視の困難性を図 2 に示す。AP k が AP $k+1$ を経由して AP $k+2$ へデータを転送する場合を考える。このとき、各 AP は二つのインタフェースを保持し、受信インタフェースと送信インタフェースで異なるチャネルを利用すると仮定する。図 2 に示すように各 AP の受信インタフェースは AP k はチャネル 1、AP $k+1$ はチャネル 2、AP $k+2$ はチャネル 3 に設定されている。AP k が AP $k+1$ へデータをチャネル 2 で送信し、そのデータを AP $k+1$ は AP $k+2$ へチャネル 3 で転送する。このとき、AP k の受信インタフェースはチャネル 1 に設定されているため、AP $k+1$ がチャネル 3 で送信した情報を AP k は受信できない。このように AP が複数インタフェースをもち、複数の無線を使用する場合には、AP は隣接 AP のデータ転送状況を監視できないため、既存の MANET における隣接ノード評価手法を利用することは困難である。そこで、本研究ではこのようなマルチインタフェース・マルチラジオ環境における隣接 AP 評価手法を提案し、上記の問題を解決する。

3. マルチインタフェース・マルチラジオを考慮した隣接 AP 評価手法

我々が提案し本論文において設計・実装した、複数インタフェースを有する AP で構成されたマルチホップ無線ネットワークにおける協調型隣接 AP 評価手法について詳説する。

3.1 隣接 AP の動作監視手法

各 AP が隣接 AP を評価する手法について詳述する。隣接 AP を評価する AP (AP s) は評価対象 AP (AP t) に隣接する AP (2 Hop Neighbor Access Point: 2HN-AP) と連携することで AP t を評価する。本提案手法では、マルチインタフェース・マルチラジオにおける隣接 AP の監視問題を考慮し、各 AP は 2HN-AP と連携することで間接的に隣接 AP を監視することが可

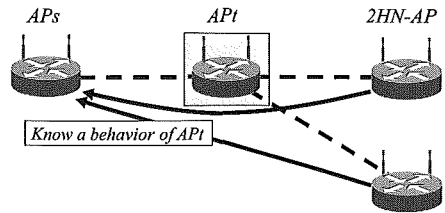


図 3 隣接 AP の監視方法の概念図

Fig. 3 Overview of proposed neighbor AP monitoring scheme.

能になる。また、提案手法では信頼性向上のために隣接 AP からの直接的な報告には信頼をおかず、複数の直接隣接していない 2HN-AP と連携し、隣接 AP に対する多数の情報を収集することで隣接 AP の動作を評価する。ここで、各 AP 間における認証・暗号化に関しては本研究の範囲外である。よって各 AP 間に流れる情報は盗聴・改ざんされないことを前提とする。

図 3 に監視方法の概要を示す。提案手法における各 AP の評価値は、AP s から評価対象である AP t を通り 2HN-AP へ到達したパケットの転送率より求める。このパケット転送率は (1) 実際に経路に流れるデータ、(2) AP が転送率を計測するために送信するプローブパケットより求める。2HN-AP は AP s から送信される、上記のデータのパケット数を計測する。各 AP s は、AP t を経由し 2HN-AP へ送信される全パケット数を、2HN-AP ごとに計測し保持する。もし、2HN-AP と AP s 間の経路に一定時間データが流れていない場合、AP s はプローブパケットを 2HN-AP へ送信することで、その経路のパケット転送数を計測する。そして、2HN-AP は計測結果である受信パケット数を定期的に AP s へ報告する。AP s は 2HN-AP から報告される受信数と、自らが送信したパケット数をもとにパケット転送率を求める。このとき、2HN-AP も AP t を評価する AP の一つであり、AP s と同様に AP t の評価値を算出している。ここで、AP t に隣接する各 AP は算出した AP t に対する評価値を互いに共有する。そして、各 AP は自らが算出した AP t の評価値と、2HN-AP から受信した AP t の評価値を用いて、より信頼性の高い AP t の評価値を算出する。

以上のように、本提案手法では各 AP が算出する隣接 AP の評価値は各 AP 自身で独自に算出し管理される。以降の節で、AP t に隣接する AP s と 2HN-AP の AP t に対する評価値算出法について詳説する。

3.2 評価値の作成

隣接 AP_t の評価値 (GlobalValue:GV) は各 AP が実際の転送率から求める評価値 (DirectValue:DV) と各 AP が 2HN-AP から得る AP_t に対する評価値 (IndirectValue:IV) の二つの値から求める。

3.2.1 DirectValue

DV は, AP_s が 2HN-AP から収集したパケット転送率である DirectRatio (DR) をもとに作成する。 AP_s は 2HN-AP から報告された数と自らが送信したデータパケット (実データとプローブパケット) の数を比較し, 2HN-AP ごとのパケット転送率を求める。そして各 2HN-AP ごとの転送率を用い, 更に過去 1 回分の評価を用いた式 (1) に示す加重移動平均より 2HN-AP ごとの転送率からの評価値である DR を求める。なお, これ以降の数式において, AP_s を a , AP_t を b , そして AP_s の AP_t に隣接する 2HN-AP を c, d, e, \dots, n と表す。

$$DR_{ab-c}(t) = \frac{1}{\alpha} DR_{ab-c}(t-1) + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) R(t) \quad (1)$$

$DR_{ab-c}(t)$ は時間 t における APa が APc からのレポートより算出する APb に対する DR を示し, $R(t)$ は時間 t におけるパケット転送率, α は加重平均の重みを表す。最後に, 複数の 2HN-AP に対する DR を求めた後, AP_s はこれらの最小値より AP_t のローカルな評価値である DV を求める (式 (2))。

$$DV_{ab}(t) = \min\{DR_{ab-c}(t), DR_{ab-d}(t), \dots, DR_{ab-n}(t)\} \quad (2)$$

$DV_{ab}(t)$ は時間 t における APa の APb に対する DV を表す。

3.2.2 IndirectValue

IV は AP 自身が求めた値ではなく, AP_t の隣接 AP が求めた AP_t に対する評価値のことを指す。すべての AP は各隣接 AP に対して DV を作成している。各 AP は隣接 AP に対する DV を 2HN-AP へ送信する。受信側では, 複数の AP から送信されてくる隣接 AP の評価値を IV として隣接 AP_t の評価に用いる。つまり, 評価対象となる AP_t に隣接する AP は自らが算出した DV を互いに共有し AP_t の IV として利用している。

また, 各 AP が GV を算出する際, 各 AP は基本的に各 2HN-AP からの IV 受信後に GV を計算する

が, 途中の経路の状態によっては IV が遅延, 若しくは損失してしまう可能性が考えられる。このような場合, 各 AP は一つ前に受信した IV の値を用いて GV を算出する。IV が一定期間以上受信できない場合は, 各 AP は隣接 AP に対する IV の値を 0 (完全パケットロス) として設定し利用する。

3.2.3 隣接 AP の評価の作成

各 AP は隣接 AP ごとに DV と 2HP-AP の数の I を保持している。各 AP は隣接 AP の評価値である GV をこれらの DV と IV の最小値から求める。

$$GV_{ab}(t) = \min\{DV_{ab}(t), IV_{ab-c}(t), IV_{ab-d}, \dots, IV_{ab-n}\} \quad (3)$$

$GV_{ab}(t)$ は APa の時間 t における APb に対する評価値, $IV_{ab-c}(t)$ は時間 t における APa が APc より得た APb に対する IV を示す。そして $n \in 2HN-A$ とする。

先述したが, 本提案手法では各 AP が隣接 AP に対する評価値を算出し管理するため, 評価値の結果が 2HN-AP と異なる可能性も考えられる。しかし本手法では各 AP が DV を算出した後にその情報を 2HN-AP と共有し, それらの値から隣接 AP の評価値を算出するため, 各 AP は 2HN-AP と同様の評価結果を共有することが可能となる。

以上により, 各 AP はパケット転送率より得た隣接 AP_t の評価値である GV を隣接 AP の信頼性の指標として利用する。

3.3 有効性の検証

この章で詳説した協調型隣接 AP 評価手法の一連の動作はシミュレーションによりその有効性を検証しており, 提案手法が隣接 AP において発生した異常ノードを自律的に検出できることを示した [1]。

4. 提案手法の設計と実装

我々の提案手法の動作はシミュレーションによりその有効性を確認している。MWN において提案手法が実際のネットワークにおいて有効的に動作することを確認するために, 設計及び実装を行った。本章では提案手法の設計, 実装の詳細について記述する。

4.1 設計概要

提案手法の設計概要を図 4 に示す。提案手法の実装には, 経路制御手法として OLSR [9] を利用した。これは OLSR が現在 MWN において主要な経路制御手法であるとともに, 実装の際に各モジュールをプラグ

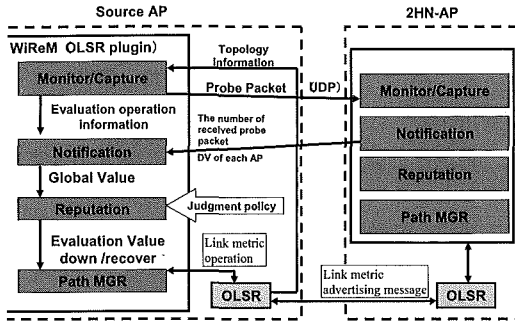


図4 提案手法の設計概要

Fig. 4 Design of proposed mechanism.

ンとして組み込ませることが容易であるためである。提案手法の各モジュールはプローブの送受信を行う Monitor/Capture 部、自 AP で生成した DV を周囲に広告する Notification 部、DV と IV から GV を生じ評価決定ポリシーに従い AP を評価する Reputation 部、そして OLSR のリンク管理機構と連携を行う Path MGR (Manager) 部の四つから構成されている。以降、これらの各モジュールについて概説する。

4.2 Monitor/Capture 部

Monitor 部では、OLSR が管理しているトポロジ情報から提案手法が評価すべき隣接 AP 及び協調して値を実施する 2HN-AP を検出する。Monitor 部は、一周期で OLSR が保持する LSDB (Link State Database) を参照し、この評価対象隣接 AP と 2HN-AP 情報をペアで管理している。更に、Monitor 部では専計測プローブパケットを作成し、上記ペア情報をもに、あて先に 2HN-AP 情報を設定する。本プローブパケットは評価対象の隣接 AP を必ず経由しなければならない。しかし、OLSR が管理するデフォルト経路表を利用してプローブ送信を実施すると、評価されない隣接 AP が発生する。これを解決するために、フォルト経路表とは別に隣接 AP とその 2HN-AP とにプローブ専用経路表を保持させるようにし、デフォルト経路表だけでは経由できない隣接 AP に対してもプローブを送信できるようにしている。

Capture 部では、2HN-AP から送信されてくるプローブパケットを受信し、その受信数、損失数、重複をプローブ送信元 AP ごとに管理する。プローブの重複とは、MAC 層における ACK フレームの破損原因によるプローブ再送が行われた場合のフレーム受信側における同一プローブの重複受信数である。このようなプローブ重複受信が発生した場合、送信側の

プローブ送信数に対して受信側のプローブ受信数が上回り、正常な転送率を算出できなくなる。そのため、プローブパケットにシーケンス番号を付加することで同じプローブが二つ以上届いた場合は重複数を計測するように実装している。

4.3 Notification 部

Notification 部では、Capture 部が管理しておいたプローブの受信数、損失数、重複数と隣接 AP の評価値 DV を定期的にプローブ送信 AP へ送信する。また、2HN-AP の Notification 部から情報を受信した場合、AP はプローブの受信結果と 2HN-AP における評価対象 AP の間接的な評価値 IV を受信する。そして、各 AP は受信したプローブの情報をを用いて式 (1) より 2HN-AP ごとに隣接 AP の転送率 DR を算出する。

4.4 Reputation 部

Reputation 部では、まず Notification 部が算出した 2HN-AP ごとに算出した隣接 AP における DR を用いて式 (2) より DV を算出する。そしてここで算出した DV と 2HN-AP より取得した IV を用いて式 (3) より総合的な評価値 GV を算出する。

4.5 Path MGR

Path MGR 部は、Reputation 部の評価結果より、監視対象である隣接 AP をネットワーク的に除外/復帰させる機能を提供する。本機能は、リンクメトリック操作機能、通知機能、管理機能、そしてリンクメトリックを反映した経路計算機能によって構成される。

リンクメトリック操作機能とは、各 AP において評価値がしきい値より低くなった隣接 AP 向けの OLSR インタフェースのリンクメトリック値を意図的に高く設定する機能である。このリンクメトリック値操作により、間接的に OLSR が経路の再計算を実施し、対象隣接 AP をネットワーク的に除外する。なお、評価値がしきい値より回復した場合は、意図的に高く設定しておいたリンクメトリック値をもとに戻すことで、対象 AP をネットワーク的に復帰させることが可能となる。

リンクメトリック通知及び管理機能とは、対象隣接 AP 向けの OLSR インタフェースのリンクメトリック値を変更したことを OLSR ネットワーク全体へ広告 (MPR フラッディング) し、広告されたリンクメトリック値変更メッセージを受信する機能である。この機能により、全 AP の OLSR における LSDB を同期させることが可能となり、経路表の整合性を保つことができる。なお、現 OLSR 実装では、リンクメ

リンク値を広告する仕組みが存在しないため、これを MSG タイプ 210 番 (UDP) として追加した。このリンクメトリック通知メッセージは、リンクメトリック変更時に MPR フラッディングされるが、UDP メッセージの損失を考慮し、一定周期で広告する機能も併せて提供している。本メッセージを受信した OLSR は、通知メッセージ内に格納してあるリンクメトリック値を自身が保持する LSDB へ反映させ、変更があった場合に限り経路の再計算を実施させる。この経路計算に関して、OLSR ではダイクストラアルゴリズムによる最短パスを採用しており、ホップ数が最小のパスが選択されるようになっている。これを拡張し、リンクごとのメトリック値を反映させた経路計算を実施する。これにより、評価劣化した AP を経由するパスが最短パスでも、リンクメトリック値を考慮した計算をすることで、最適経路として選択されないようにしている。

以上の操作を実施することにより、各 AP は 2HN-AP と連携して算出した評価値の低下に伴い隣接 AP のリンクメトリックを意図的に高くし、そのリンクメトリックを全ノードで共有することで、異常が発生していると検知された AP を自律的に経路から除外することが可能となる。また、隣接 AP の評価値が正常値に回復した場合も、同様にリンクメトリック値を操作し広告することで隣接 AP をネットワークに復帰させることが可能となる。

4.6 GUI 機能

本提案手法の実装では各 AP が隣接 AP を評価し、どのようなネットワークポロジを構成しているかをモニタリングするための GUI 機能を付加している。GUI ではネットワークを構成する AP の数とポロジの詳細、そして各 AP の評価値をリアルタイムに表示することが可能である。この GUI 表示には専用のサーバを必要とせず、各 AP 上にて表示することが可能である。

4.7 提案手法の実装

提案手法を OLSR のプラグインとして実装する際に、開発環境の OS には FedoraCore 6 を利用した。また、OLSR は olsr.org の olsrd バージョン 0.5.5 を利用し、実装言語は C 言語である。GUI 機能では、GUI サーバとして JDK 1.5.0 と Tomcat 5.5.23 を利用し、GUI クライアントには Adobe 社の Adobe Flash を利用した。

5. 動作検証

本章では、提案手法の実装の動作を検証するため実際に MWN を構成し実験を行った。まず、2HN- i との連携による隣接 AP 評価機構について検証を行った後、その評価結果を利用した異常 AP の除外・回復機構について検証を行う。

5.1 検証環境

提案手法の実装の動作を検証するために、複数の線 I/F を有する PC を利用して AP を作成した。 i のきょう体には AOpen 社の小型 PC である MP90D を利用し、CPU は Core2Duo 2.2 GHz、メモリ 1 GByte 搭載した。各 AP に対して Lenovo 社の IEL 802.11a/b/g 対応の無線カードを利用し、マルチインタフェース・マルチラジオをサポートした。また、OS は CentOS 5.1 を利用した。各 AP 間は IEEE 802.1 のアドホックモードで接続し、各リンクごとに 1 イタフェースを利用し無線チャネルは互いが極力干渉しないよう設定した。しかし、端末内に格納した各無カードの距離は約 5 cm で、これらの間に無線干渉は利用していないため、端末内においての干渉は生ずる。本論文では、インターネット層でのパケットロスに伴う異常 AP の検知を目的としており、物理 MAC 層での無線干渉による通信性能の低下については考慮しない。そのため、今回の検証における端末における無線干渉は無視する。

また、ネットワークを構成する AP において図 5 示す GUI を利用し、評価値の変動とそのときのネットワークポロジをリアルタイムで監視できるように定した。図 5 の GUI では、画面下部がネットワー

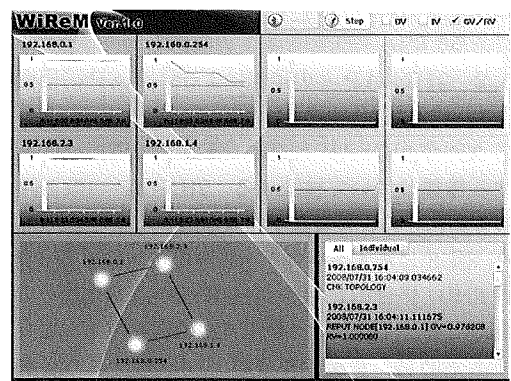


図 5 GUI スクリーンショット

Fig. 5 GUI screenshot.

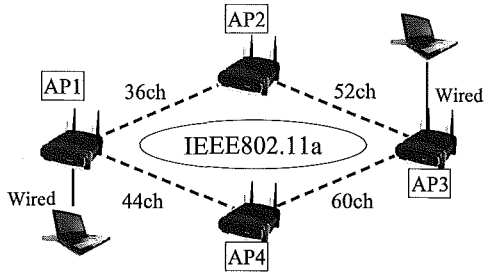


図 6 実験トポロジー：2HN-AP が 1 台
Fig. 6 Experiment topology: one 2HN-AP.

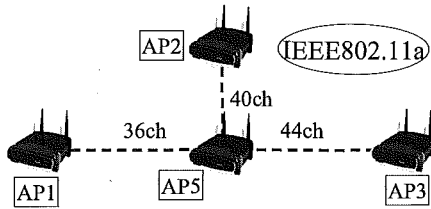


図 7 実験トポロジー：2HN-AP が 2 台
Fig. 7 Experiment topology: two 2HN-APs.

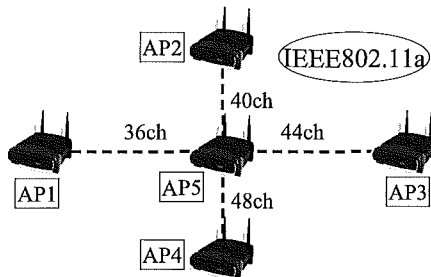


図 8 実験トポロジー：2HN-AP が 3 台
Fig. 8 Experiment topology: three 2HN-APs.

ポロジを示しており、画面上部はそのトポロジーにおける各 AP の DV, IV, GV を表示することが可である。

5.2 2HN-AP との連携による隣接 AP 評価機構の検証

各 AP が 2HN-AP と連携することで隣接 AP を評価する機構について検証する。2HN-AP の数と評価の変動にどのような差が出るか調査するため、図 6, 7, 図 8 に示すトポロジーにおいて検証を行った。各トポロジーでは AP を互いに 50 cm 程度離して設した。また、擬似的に異常 AP の発生をエミュレートするために、意図的なプローブパケットの廃棄を行った。このプローブパケットの廃棄は、2HN-AP が 1 台のトポロジーでは AP4 において、2HN-AP が 2

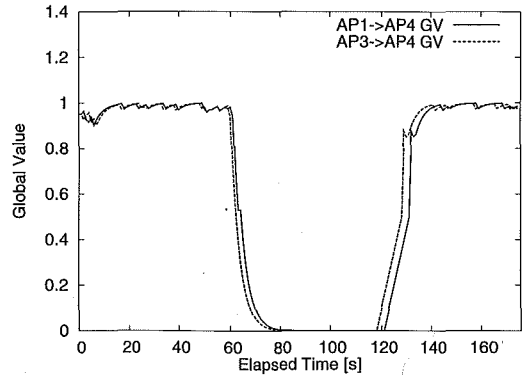


図 9 評価結果：2HN-AP が 1 台
Fig. 9 Result of GV: one 2HN-AP.

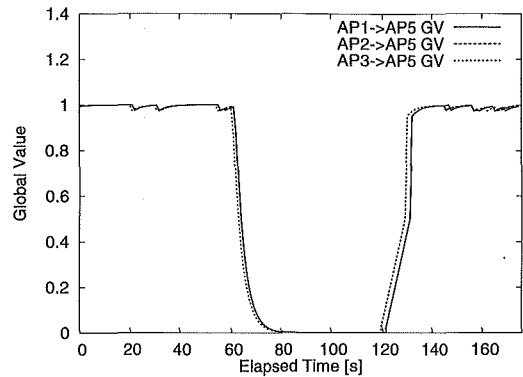


図 10 評価結果：2HN-AP が 2 台
Fig. 10 Result of GV: two 2HN-APs.

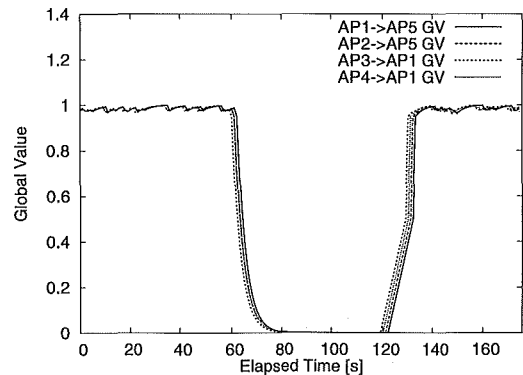


図 11 評価結果：2HN-AP が 3 台
Fig. 11 Result of GV: three 2HN-APs.

台若しくは 3 台のトポロジーでは AP5 において、計測開始時刻から 60 秒後から 60 秒間発生する。図 9, 図 10, 図 11 にそれぞれ 2HN-AP の数を変化させた場合の異常 AP に隣接する AP が保持する異常 AP に

対する評価値を示す。図はそれぞれ横軸に経過時間、縦軸に GV の値を示しており、グラフの判例である「APa->APb GV」は APa が保持する APb の GV を意味している。

図 9, 図 10, 図 11 の結果より, 異常 AP に隣接している AP は異常の発生とともに異常 AP の評価値を低下させ始め, 低下から約 20 秒程度で評価値が 0 になっていることが確認できる。更に異常 AP においてパケット廃棄が終了した後は徐々に評価値が回復し, 評価値が経路から除外するためのしきい値 (任意に設定可能, ここでは 0.5 に設定) を上回るまでは線形増加し, しきい値を上回ってからは DV と IV の最低値をとることを確認することができた。

これらの検証結果より, 2HN-AP の数が変動した場合でも安定して異常 AP を検出できることが確認できた。一方で, 各図の評価値において異常 AP に隣接する AP によって評価値の検出の遅延が約 1~3 秒観測された。実験の際には各端末の時計は NTP サーバを利用して時刻同期を行っているため, AP 間の時刻差は 0.1 秒程度であると考えられる。そのため, この遅延は純粋に 2HN-AP からの IV 取得から評価値計算の過程における遅延であると考えられる。

5.3 評価値低下に伴う自律的な経路再構築機構の検証

評価値低下に伴う自律的な経路再構築機構の動作について検証する。実験には図 6 のトポロジーを用いる。AP1 と AP3 にはそれぞれ端末を有線で接続し, これらの端末間において TCP トラフィックを流す。更に, olsrd において経路の優先度を設定し, 通常では AP4 を経由する経路が優先されるように設定した。この状態から, AP4 がプローブパケットを廃棄することにより各 AP が自律的に隣接 AP を評価し, AP4 から AP2 を通る経路に切り換わることを検証する。

TCP トラフィックは iperf を用いて AP1 側から AP3 側へ, 計測開始から 5 秒後に 1 本のフローを送信する。経路が切り変わった際のトラフィックの流れを確認するため, AP3 においてそれぞれの無線インタフェースに流入するトラフィック量, つまり AP2 を経由したトラフィック量と AP4 を経由したトラフィック量を計測した。パケットロスは計測開始時刻から約 60 秒後に AP4 が約 60 秒間発生する。

図 12 にトラフィック量の計測結果を示す。このグラフにおいて, 横軸は経過時間, 縦軸はトラフィック量を示している。この結果より, まず AP4 が正常に動作

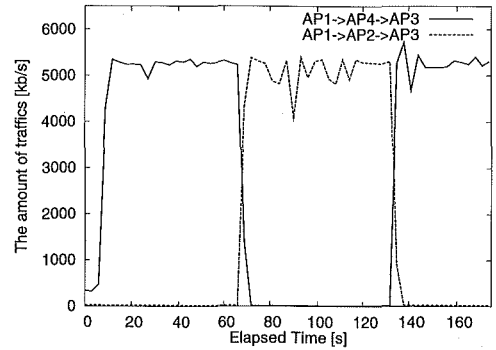


図 12 トラフィック量の変化
Fig. 12 The amount of traffics on AP3.

している 0 秒から 60 秒の間は AP1 から AP4 を経し AP3 へ流入するトラフィック量が約 5 [Mbit/s] であることがグラフの実線より確認できる。しかし, A のパケットロス発生に伴い AP1 と AP3 の AP4 に対する評価値は低下する。そして, 評価値が設定したしきい値である 0.5 を下回った場合, AP1 と AP3 は律的に AP4 に対するリンクメトリックの値を増加させる。更に, このリンクメトリック値の変更を各 AP で共有した後, AP1 は AP2 を通る経路を作成し, AP3 も AP2 を通る経路をそれぞれ作成する。この変更には約 4 秒程度の時間を要している。その結果, 図 12 よりネットワークに流れるトラフィックは AP4 から AP2 を通る経路に切り換わっていることが確認できる。更に, 計測開始から 120 秒後にパケットロス終了した後は, AP1 と AP3 において AP4 に対する評価値が徐々に回復する。そして, 評価値がしきい値を上回った場合に AP1 と AP3 はそれぞれリンクメトリック値を低下させ, AP4 を利用する経路を再構築している。図 12 よりパケットロス終了後から約 12 秒にネットワークを流れるトラフィックは AP2 から AP3 を通る経路に切り換わっていることが確認できる。

以上の結果より, 各 AP が隣接 AP の評価値低下に伴い, 自律的に経路再構成できていることを検証することができた。

5.4 有効性の検証

動作検証を行った結果より, 今回実装した提案手によって各 AP が自律的に隣接 AP を監視・評価することで, 異常が発生した AP を検出できることを確認した。更に, この異常が発生した AP に対し各 AP 適切に対処できることを確認した。そして, 異常が発生した AP がネットワークから除外されている間も

常にその AP の監視を続け、その AP が正常な状態に戻った場合には AP をネットワークに参加させることで、各 AP が自律的にネットワークを再構築することを確認できた。

6. む す び

本論文では、我々がこれまでに提案した MWN における 2HN-AP との連携による隣接 AP 評価手法を実際の AP に実装し動作検証を行った。実装では WMN における既存の経路制御手法である OLSR へ提案手法の機能を組み込むことで、より効果的・効率的に隣接 AP を評価できるよう検討を進めた。小型 PC で構成した AP を利用した検証実験の結果より、正常なパケット転送を行わない AP を検出できることを確認し、更に異常と判断された AP をネットワークから除外する機能、そして異常から回復した AP をネットワークに再参加させる機能について動作を検証した。以上の検証結果より我々の提案した隣接 AP 評価手法が実際の MWN において適切に動作し、網の信頼性を高めるために有効であることを確認した。

謝辞 本研究の一部は、総務省による戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE)、並びに日本学術振興会における科学研究費補助金若手研究 (B) (課題番号 19700069) の支援を受けている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] D. Nobayashi, Y. Nakamura, T. Ikenaga, Y. Hori, K. Nakamura, H. Ishinishi, and S. Kaizaki, "Access point evaluation with packet transfer ratio in multi-hop wireless network," Proc. International Conference on Information Networking (ICOIN) 2009, Jan. 2009.
- [2] B. Kannhavong, H. Nakayama, Y. Nemoto, N. Kato, and A. Jamalipour, "A survey of routing attacks in mobile ad hoc networks," IEEE Wireless Commun. Mag., vol.14, no.5, pp.85-91, Oct. 2007.
- [3] L. Santhanam, B. Xie, and D. Agrawal, "Selfishness in mesh networks: Wired multihop MANETs," IEEE Wireless Commun. Mag., vol.15, no.4, pp.16-23, Aug. 2008.
- [4] L. Buttyan and J.P. Hubaux, "Nuglets: A virtual currency to stimulate cooperation in self-organized ad hoc networks," Technical Report DSC/2001/001, Swiss Federal Institute of Technology, 2001.
- [5] V. Srinivasan, P. Nuggehalli, C.F. Chiasserini, and R.R. Rao, "Cooperation in wireless ad hoc network," Proc. IEEE INFOCOM, 2003.
- [6] S. Marti, T.J. Giuli, K. Lai, and M. Baker, "Mitigat-

ing routing misbehavior in mobile ad hoc networks," Proc. Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom) 2000, Aug. 2000.

- [7] P. Michiardi and R. Molva, "CORE: Collaborative reputation mechanism to enforce node cooperation in mobile ad hoc networks," Proc. 6th IFIP Communication and Multimedia Security, Sept. 2002.
- [8] S. Buchegger and J.-Y. Le Boudec, "Performance analysis of the CONFIDANT protocol," Proc. ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, June 2002.
- [9] Optimized Link State Routing protocol (OLSR), <http://www.olsr.org>
(平成 20 年 11 月 7 日受付, 21 年 2 月 25 日再受付)



野林 大起 (学生会員)

平 18 九工大・工・電気卒。平 20 同大学院・工・修士課程了。現在、同大学院工学府博士後期課程在学中。主として情報ネットワークに関する研究に従事。



中村 豊 (正員)

平 8 京都工繊大・繊維・高分子卒。平 13 奈良先端大・情報・博士課程了。同年阪大大学院・基礎工・リサーチアソシエイト。平 14 奈良先端大・情報科学センター・助手。平 17 九工大・情報科学センター・助教授、現在に至る。博士 (工学)。WWW 技術、サーバ管理手法、インターネット計測技術、ネットワーク運用技術に関する研究に従事。WIDE プロジェクトメンバー、Internet Society 各会員。



池永 全志 (正員)

平 4 九工大・情報工・電子情報工卒。平 6 同大学院・情報工・修士課程了。同年日本電気 (株) 入社。平 8 長崎大・総合情報処理センター・助手。平 11 九工大・情報工・電子情報・助手。平 16 九工大・工・電気・助教授、現在に至る。博士 (情報工学)。インターネットにおける経路制御、通信品質制御に関する研究に従事。IEEE 会員。



堀 良彰 (正員)

平 4 九工大・情報工・電子情報工卒。平 6 同大大学院・情報工・修士課程了。同年九州芸工大助手。平 16 九州大院・システム情報科学研究所・助教授。博士(情報工学)。情報ネットワーク及び情報セキュリティに関する研究に従事。ACM, IEEE 会員。



中村 勝一 (正員)

平 3 山口大・工・電子卒。同年富士通九州通信システム入社。平 15 ネットワーク応用技術研究所に転社。九州工業大学大学院情報工学研究科博士後期課程在学中。主としてネットワークシステムに関する研究に従事。



石西 洋

平 7 熊本大・工・電子情報工卒。同年日立超 LSI エンジニアリング入社。平 9 富士通九州ネットワークテクノロジーズに転社。平 19 ネットワーク応用技術研究所に転社。主としてネットワークシステムに関する研究に従事。



貝崎 修治

平 14 同志社大・工・電子卒。同年九州電力(株)入社。主として光搬送、ネットワークに関する研究に従事。