

# アドホックネットワークにおける トラストを考慮したセキュアルーティングの検討

牛窪 洋貴<sup>1,a)</sup> 武田 苑子<sup>1,b)</sup> 重野 寛<sup>1,c)</sup>

**概要:** モバイルアドホックネットワーク (MANET) では, リソース温存のためパケットを意図的に破棄する利己的ノードへの対策として, トラストによるセキュアルーティングプロトコル (SRP) が研究されている. トラストとは評価値と呼ばれるユーザの信頼度を表す値を用いてセキュリティを構築する手法である. MANET では評価値はノードが正常にパケットを転送するか否かの信頼度を表す. しかし, 従来の SRP はより安定した経路を探索するためパケットが増加し, オーバーヘッドが増大するという問題がある. そこで, 本論文では評価値を用いて経路構築にかかる制御パケットを削減する手法 TA-AODV を提案する. 提案手法では既存の SRP において余剰なルートリクエスト (RREQ) パケットと経路更新 (RUPD) パケットが転送されている事に着目し, これらの削減を行う. まず, 評価値を RREQ パケットの転送基準としても利用し, 安定したデータ転送経路をより少ない RREQ パケット数で構築する. また, 経路情報の変化量に応じて RUPD パケットを転送する事で効率的に経路の維持を行う. 提案手法の評価はシミュレーションにより行い, 高いデータパケット到着率を達成しつつ, 制御パケット数を削減しているという結果から TA-AODV の有用性を示す.

## Study for An Effective Secure Routing Protocol Considering Trust in Mobile Ad hoc Networks

HIROKI USHIKUBO<sup>1,a)</sup> SONOKO TAKEDA<sup>1,b)</sup> HIROSHI SHIGENO<sup>1,c)</sup>

### 1. はじめに

近年, モバイルアドホックネットワーク (MANET) が様々な場面で注目されている. MANET は特定の基地局などを介さずノード間で協調して構築されるネットワークである. ノードが自由にネットワークに参加し, ノード自体がパケット中継の機能を果たす事でネットワークの柔軟性や拡張性を高めている. しかし, このようなオープンな環境下ではプロトコルに従わない利己的なノードも介入し易いといった問題がある [1]. 利己的ノードは転送されてきたパケットを意図的に破棄し, 正常な通信を阻害する. 一般的に MANET に参加する無線端末はバッテリーで動作する事が想定され, 送受信帯域などの性能にも限りがあるた

め, 利己的ノードは上記のような攻撃をする事で自身のリソースを温存しようとする [2], [3].

MANET におけるセキュリティの一つにセキュアルーティングプロトコル (SRP) がある [4], [5],[6]. SRP ではトラストの手法を取り入れ, パケットを意図的に破棄する利己的ノードを回避した経路を構築する事を目的としている. トラストとはノードの信頼度を数値化した値である評価値を算出し合い, 評価値を用いてノード間で協調してセキュリティを構築する, P2P コンテンツ共有や車々間通信などで用いられているセキュリティ手法の一つである [7]. SRP における評価値は各ノードが正常にパケットを中継するかの信頼度を表す. MANET では特定のインフラの利用を想定していないため, このようにノード間で分散的にセキュリティを構築する仕組みが必要となる.

しかし, SRP では安全な経路を探索するにあたりより多くの RREQ パケットを転送する必要があるため, 最短経路を構築する既存のルーティングと比べオーバーヘッドが

<sup>1</sup> 慶應義塾大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Technology, Keio University

a) ushikubo@mos.ics.keio.ac.jp

b) takeda@mos.ics.keio.ac.jp

c) shigeno@mos.ics.keio.ac.jp

増加する。また、SRP では評価値の変化を通知するため、定期的に更新メッセージである経路更新 (RUPD) パケットをフラッディングする。評価値の変化は一定周期で起こるとは限らず、評価値の更新の通知が必要ない際に余剰な RUPD パケットをフラッディングしてしまう事が考えられる。MANET では各ノードの保持電力や帯域には限りがあるため、このオーバーヘッドをいかに抑えるかが重要となる。

そこで、本論文では評価値を用いて RREQ パケットと RUPD パケットを効率的に削減する事により、経路構築にかかるオーバーヘッドを抑制する手法 TA-AODV を提案する。提案手法では各中継ノードは隣接ノードに対して持つ評価値を参照し、評価値の低いノードへ RREQ パケットの転送停止命令を出す事で選択的にパケットを削減する。また、隣接ノードの評価値の変化量に応じて RUPD パケットの転送頻度を変動させる事により、RUPD パケット数の削減を行いつつ高信頼経路の構築を維持する。

以下本論文では、2章において関連研究について述べる。3章で TA-AODV を提案し、4章でシミュレーション評価によって提案手法の優位性を示す。最後に5章で結論を述べる。

## 2. 関連研究

本節では SRP における既存研究を挙げ、評価値の算出方法や評価値を用いたルーティングについて述べる。

### 2.1 MANET における SRP

SRP は既存のルーティングプロトコルに評価値を導入し、利己的ノードを回避した安全な経路を構築する事を目的としている。SRP における評価値は大きくリンクトラストとパストラストに分けられる。リンクトラストは隣接ノードが正常にパケットを転送するかの信頼度を表し、隣接ノードへの直接のパケット転送経験を元に算出される。また、パストラストはリンクトラストから算出され、ソースノードから目的ノードまでパケットを正常に転送できるかの信頼度を表す。SRP では経路表と制御パケットにパストラストを保持するフィールドを追加し、中継ノードは RREQ パケット、RREP パケットを転送する中で各ノードのリンクトラストを集約し、パストラストを算出していく。そしてソースノードはパストラストの高い経路を選択しデータパケットを流す事でより安定した通信を実現する。

基本とするルーティングプロトコルにより、SRP も大きくリアクティブ型とプロアクティブ型に分けられる [8]。リアクティブ型のルーティングプロトコルは通信要求があった時のみ経路構築を行うため、リソースを温存する事ができる。そのため MANET などリソースの限られた環境により適していると考えられ、以降我々はリアクティブ型プロトコルに焦点を絞る。リアクティブ型 SRP の代表的な

ものとして、ATDSR[9] と AOTDV[10] がある。ATDSR は DSR[11] をベースとし、AOTDV は AODV[12] をベースとしている。ATDSR ではノードの行動を監視する監視ノードとルーティングを行うルーティングノードの2種類のノードを設け、評価値の収集効率を向上させノードの電力消費の抑制を図っている。また、AOTDV は AODV のルーティングに評価値を取り入れ、パケット到着率の向上を図っている。

## 2.2 MANET における評価値の算出

### 2.2.1 リンクトラストの算出

パケットをフラッディングしたノードはプロミスキャスモードにより隣接ノードが自身の転送したパケットを正常に中継するか確認する。そして、時刻  $t$  においてノード  $i$  が隣接ノード  $j$  に対して持つリンクトラスト  $L_{ij}(t)$  を式 (1) から算出する。

$$L_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{N_C(t) - N_C(t-W)}{N_A(t) - N_A(t-W)} & (t > W) \\ \frac{N_C(t)}{N_A(t)} & (t \leq W) \end{cases}, \quad (1)$$

ここで、 $N_C(t)$  はノード  $j$  がノード  $i$  からパケットを正常に転送した回数、 $N_A(t)$  はノード  $i$  がノード  $j$  へパケットを転送した総数を示す。利己的ノードのように意図的にパケットを破棄する場合に加え、ノードのモビリティ変化や外部環境の変化によりパケットが正常に転送できなかった場合も転送失敗とみなし、リンクトラストが下がる要因となる。 $W$  は一定の評価期間を示すタイムウインドウであり、 $W$  時間毎にリンクトラストが更新される。 $L_{ij}(t)$  は 0 から 1 の値で表され、1 に近い程ノード  $j$  は正常にパケットを中継する可能性が高いと判断できる。一方、 $L_{ij}(t)$  がある閾値以下の場合、各ノードが固有に持つブラックリストにアドレスが追加される。ブラックリストに追加された場合、ある一定期間ノード  $j$  へのパケットの転送や  $j$  からのパケットの中継も行わない。

### 2.2.2 パストラストの算出

パストラスト  $T_P$  とは経路の安定性を数値化したものである。パストラストは経路上に存在するノード間のリンクトラストから算出される。SRP では制御パケットにパストラストを計算するフィールドを保持し、パストラストは制御パケットを転送していく中で算出される。

$$T_P(t) = \prod (\{L_{ij}(t) \mid n_i, n_j \in P \text{ and } n_i \rightarrow n_j \text{ and } n_j \neq N_d\}), \quad (2)$$

ここで、 $n_i, n_j$  はパス  $P$  上に存在するノードであり、 $N_d$  は経路  $P$  の目標ノード、 $n_i \rightarrow n_j$  は  $n_j$  が  $n_i$  の隣接ノードである事を示す。

図 1 を用いてパストラストの算出例を示す。矢印は評価の向きを表す。まず、ソースノード X が RREQ パケットのフラッディングを開始し、3つの経路を辿り目標ノード Y

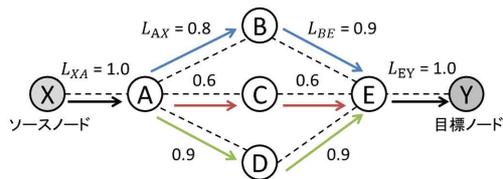


図 1 パストラスト算出例

Fig. 1 Example of calculating path trusts.

まで到達したとする。ここで、RREP パケットがノード E、B、A、X の順で返信された場合を例に取る。この時、まず目標ノード Y から RREP パケットを受信したノード E は、RREP パケットのパストラストのフィールド  $T(path)$  に  $L_{EY}=1.0$  を書き込み、ノード B へユニキャストで RREP パケットを返す。更にノード B はパストラストのフィールドを  $T(path)=L_{BE} \times L_{EY}=0.9 \times 1.0=0.9$  に更新してノード A へ RREP パケットを返す。これを繰り返す事でソースノード X が目標ノード Y へのパスに対して持つパストラスト  $T_P(X, A, B, E, Y)$  は 0.72 と計算される。同様にして  $T_P(X, A, C, E, Y)=0.36$ ,  $T_P(X, A, D, E, Y)=0.81$  となり、パストラストを比較する事で経路  $P(X, A, D, E, Y)$  が最も安定した通信経路であると相対的に判断することができる。

### 2.3 評価値を利用したルーティングプロトコル

SRP の最大の目的は、ソースノードから目標ノードまで最短かつ最もパストラストの高い経路を構築する事である。これを達成するため、各ノードはトラストレコードを保持し、経路表にパストラストのフィールドを追加する。トラストレコードとはリンクトラスト算出に関わるデータを格納したものであり、各ノードが隣接ノードに対し固有に保持する。SRP における経路表は表 1 に示すような 6 つのフィールドから成る。表 1 の例では、宛先ノード 5 までパケットを届けるためには次にノード 1 または 2 へパケットを転送すればよい事がわかる。更に SRP ではノード 5 へパケットを届けたいとき、ホップ数がより少ないかつパストラストがより大きいノード 1 を経由する経路を採用する。このようにして目標ノードまで最短経路かつパストラストの高い経路を構築する。その後、ソースノードの要求に従いデータパケットを転送すると、SRP ではプロミスキャスモードにより隣接ノードのパケット転送状況を監視する。もしパケットが正常に中継されなければ利己的ノードが存在する低信頼な経路であるため、経路情報を更新する必要がある。そこで SRP では構築経路のパストラストを更新するため、新たに RUPD パケットを導入している。RUPD パケットは更新ホップ数と更新パストラストのフィールドを持ち、各ノードは RUPD パケットを周期的にフラッディングする事で経路情報の変化を各ノードに通知する。

表 1 SRP のルーティングテーブルの例

Table 1 Example of routing table in SRP.

宛先ノード	宛先 シーケンス #	Route List			
		次ノード	ホップ数	パス トラスト	有効 期間
1	1	3	1	1	5
5	2	1	3	0.8	4
		2	4	0.6	4

### 2.4 SRP の問題点

SRP ではルーティングに要するオーバーヘッドが増加し、結果的にノードのリソースが大きく消耗するといった問題がある。この根本的原因として、

- (1) 高信頼経路構築に伴う余剰な RREQ パケット転送
- (2) 経路情報更新のための RUPD パケット転送

が考えられる。まず、原因 1 について図 1 の例を用いて解説する。図 1 において、ノード E へ順にノード B、C、D から RREQ パケットが転送されてきたとする。一般的なルーティングプロトコルでは最短経路のみを構築するため、後から転送されてきたパケットは経路のホップ数が同等以上であれば破棄する。図 1 の例では、ノード E はノード B からの RREQ のみを転送する。一方、SRP では記載されたパストラストがより高い RREQ パケットを中継する。そのためノード C からの RREQ パケットは破棄し、次に転送されてきたパストラストがより高いノード D からの RREQ パケットを中継する。このように、経路の信頼度が低いと判断されるノード C からの RREQ パケットは結果的に破棄されるため、SRP ではより高信頼な経路を探索する中で余剰な RREQ パケットをフラッディングしている事になる。また、SRP では RUPD パケットを定期的にフラッディングする事で経路情報の変化を通知する。しかし、リンクトラストやパストラストの変化は一定周期とは限らず、変化の少ないような更新通知の必要のない場合には余剰な RUPD パケットをフラッディングしてしまう可能性がある。そのため、RREQ パケットと RREP パケットを効率的に削減し、ルーティングに要するオーバーヘッドを抑制する手法が必要となる。

## 3. TA-AODV の提案

本章では、評価値を用いて SRP における経路構築の際のオーバーヘッドを抑制する手法 TA-AODV (Trust Aware Ad hoc On-demand Distance Vector) を提案する。

### 3.1 TA-AODV の概要

提案手法の目的は経路構築に要する制御パケット数の削減を行いつつ、パケットを破棄する利己的ノードを回避した経路を構築し、高いデータパケット到着率を実現する事である。提案手法では既存の SRP において余剰な RREQ パケット、RUPD パケットがフラッディングされている事に

着目し、これらを評価値を用いて効率的に削減する事で経路構築にかかるオーバーヘッドを抑制する。まず、提案手法ではリンクトラストの低い隣接ノードに対し RREQ パケットの転送停止命令を出す。これにより、パストラストが低いために結果的に破棄される可能性の高い経路の構築を抑制し、データ転送経路構築に要する総 RREQ パケット数を削減する。更に、RUPD パケットの更新をリンクトラストの変化量に応じて行う。具体的には、リンクトラストやそれに伴うパストラストの変化量が大きいと考えられる場合には更新頻度を上げ、変化量が少ない場合には更新頻度を落とす事で、効率的に RUPD パケットをフラッディングする。そのため、リンクトラストの変化量に応じて動的に変化する更新スレッシュホールドを新たに定義し、スレッシュホールドに応じて RUPD パケットをフラッディングする手法を導入する。以下では、RREQ パケット転送停止アルゴリズムや、スレッシュホールドを用いた RUPD パケットの転送方法について述べる。

### 3.2 RREQ パケット転送停止アルゴリズム

一般的な SRP ではデータ転送経路の探索はソースノードの経路表に信頼できる経路情報がない時に行われ、各ノードは RREQ パケットをフラッディングし、RREP パケットの返信を待つ。ここで、提案手法では転送されてきた全ての RREQ パケットを中継する訳ではなく、リンクトラストが低くパケットを破棄する可能性の高いノードに対しては RREQ パケットの転送停止命令を出す。このようにする事で、パストラストが低く結果的にデータ転送経路として用いられないような経路の構築にかかる余剰な RREQ パケットを削減する。RREQ パケットの転送停止を通知するため、提案手法では RREQ パケットのフィールドに「破棄フィールド」を追加する。破棄フィールドには転送停止命令を出すノードの宛先アドレスが入る。また、どのノードを破棄フィールドに加えるかは新たに設けた転送停止命令を出す確率  $P_{ij}$  に従い決定する。ある中継ノード  $i$  が隣接ノード  $j$  に対して算出する転送停止確率  $P_{ij}$  は以下の式 (3) により算出される。

$$P_{ij} = (1 - L_{ij}(t)) * \alpha, \quad (3)$$

ここで、 $L_{ij}(t)$  は時刻  $t$  においてノード  $i$  がノード  $j$  に対して持つリンクトラストであり、式 (1) によって算出される。また  $\alpha$  は削減定数であり、 $\alpha$  の値を大きくする程より多くの RREQ パケットを削減する事になる。転送停止確率  $P_{ij}$  を用いた RREQ パケットの転送停止アルゴリズムを図 2 に示す。まず、RREQ パケットを受け取った中継ノードは  $P_{ij}$  を算出し、転送停止命令を出す隣接ノードの候補を決定する。もし転送停止命令を出すノード数が削減スレッシュホールド  $D$  以下であれば、そのノードのアドレスを自身の RREQ パケットの破棄フィールドに追加する。ま

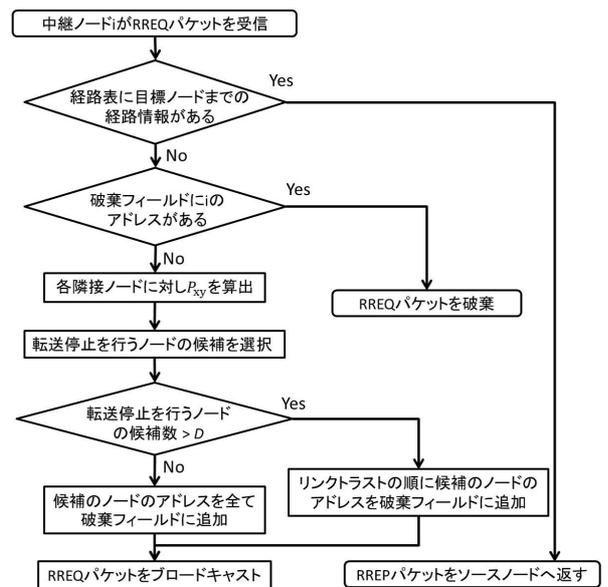


図 2 RREQ パケット転送停止決定アルゴリズム

Fig. 2 The algorithm of selecting nodes to discard RREQ packets.

たノード数が  $D$  より大きい場合、リンクトラストの低いノードから順に  $D$  だけ破棄フィールドに追加する。その後、破棄フィールドを更新した RREQ パケットを隣接ノードへフラッディングする。RREQ パケットを受け取った隣接ノードは破棄フィールドに自身のアドレスが記載されていないか確認し、もしあればその RREQ パケットを破棄し、転送を停止する。このようにして、信頼度の低い経路構築のためにフラッディングされる RREQ パケットのみを削減する事で、パケット数は削減しながらも高信頼経路の構築を維持する事ができ、高いデータパケット到着率を達成する。

### 3.3 RUPD パケットの転送頻度調整

既存の SRP では、RUPD パケットは経路の信頼度の変化を通知し、リンクトラストおよびパストラストを更新するために定期的にフラッディングされる。しかし、評価値は利己的ノードの行動やノードのモビリティで変わるトポロジーに依存するため、その変化は周期的ではないと考えられる。また、一定周期のフラッディングではトポロジー変化などによって経路の信頼度に変化があった際、即座に対応できないといった問題もある。そのため、RUPD パケットの転送頻度は評価値の変化量に応じている方が望ましいと考えられる。即ち、評価値の変化量が大きく、経路の変更が必要だと考えられる場合には RUPD パケットをフラッディングする頻度を上げ、評価値がより早く信頼性の高い値に収束するようにする。一方、評価値の変化が小さく更新通知の必要がないと考えられる場合には、RUPD パケットの転送頻度を下げる事で余剰なパケットのフラッディングを抑制する。

そこで、評価値の変化の様子を探るためシミュレーションにより予備実験を行った。図3は、AODVをベースにした代表的なSRPであるAOTDVにおいて、リンクトラストの初期値を0.5に設定したときの正常ノード、利己的ノードの各リンクトラストの平均値の推移を表したものである。本シミュレーションは全100ノードの内、30%がデータパケットを全て破棄する利己的ノードである環境で行った。図3より、リンクトラストの変化量は初期値に近い程大きく、時間経過とともに値が収束し変化量が小さくなっている事が見て取れる。これより、初期値との差が小さい時、即ちリンクトラストが収束していないほどRUPDパケットの転送頻度を上げる事で、精度の高いパストラストをより早く算出する事ができると考えられる。また、初期値との差が大きく、リンクトラストの値が収束していると考えられる時にはRUPDパケットの転送頻度を下げ、余剰なRUPDパケットのフラッディングを抑制する。以上を踏まえ、提案手法ではRUPDパケットのフラッディングのタイミングを式(4)で表される更新スレッシュホールド $T_{ij}(t)$ に従い操作する。

$$T_{ij}(t) = \beta * |L_{ij}(t) - L_{ini}|, \quad (4)$$

ここで、 $\beta$ は更新定数、 $L_{ini}$ はリンクトラストの初期値である。更新定数 $\beta$ を大きくする、またはリンクトラスト $L_{ij}$ とその初期値 $L_{ini}$ との差の絶対値が大きくなる事で更新スレッシュホールドの値が大きくなる。提案手法における、更新スレッシュホールド $T_{ij}(t)$ を用いたRUPDパケットの転送アルゴリズムを図4に示す。まず、パケットを転送したノードはプロミスキャスモードにより、隣接ノードが正常にパケットを中継するかを監視し、リンクトラスト $L_{ij}(t)$ を更新する。更新スレッシュホールド $T_{ij}(t)$ はリンクトラストを更新するたびに式(4)により算出される。そして、リンクトラストの変化量 $\Delta L_{ij}$ が更新スレッシュホールド $T_{ij}(t)$ 以上であればRUPDパケットを隣接ノードにフラッディングする。変化量 $\Delta L_{ij}$ は式(5)で算出される。

$$\Delta L_{ij} = |L_{ij}(t) - L_{ij}(t_{prev})|, \quad (5)$$

ここで、 $L_{ij}(t_{prev})$ は前回のRUPDパケットをフラッディングした際に通知したリンクトラストの値である。リンクトラスト $L_{ij}$ とその初期値 $L_{ini}$ との差の絶対値が大きくなる事で更新スレッシュホールド $T_{ij}(t)$ の値が大きくなるため、 $\Delta L_{ij}$ は $T_{ij}(t)$ を超えにくくなり、RUPDパケットのフラッディングが抑えられる。このようにして、リンクトラストが初期値と離れている時、即ちリンクトラストの変化量が小さいと考えられる場合には、更新スレッシュホールドの値を上げ、余剰なRUPDパケットのフラッディングを抑制する。一方、リンクトラストが初期値に近い値の時、即ちリンクトラストの変化量が大きいと考えられる場合には、更新スレッシュホールドの値を下げる事でRUPDパケッ

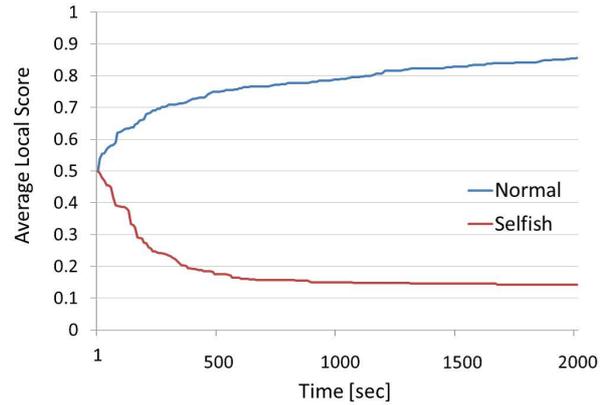


図3 初期値0.5のときのリンクトラストの平均値の推移  
Fig. 3 Variation of link trusts when initial local value is 0.5 in AOTDV.

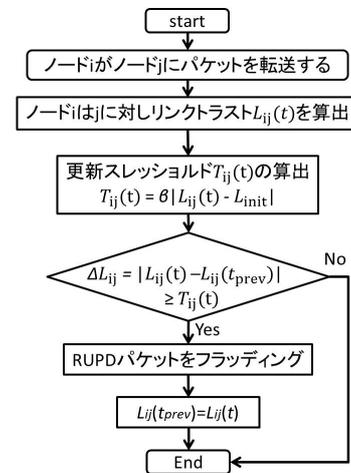


図4 RUPDパケット転送アルゴリズム  
Fig. 4 The algorithm of broadcasting of RUPD packets.

トの転送頻度を上げ、より早くパストラストが経路の信頼性を表した値に収束するようにする。以上により、評価値算出の精度を維持しつつ、RUPDパケットを効率的に削減する事ができる。

#### 4. シミュレーション評価

提案手法TA-AODVの有用性を示すため、シミュレーションにより評価を行った。

##### 4.1 シミュレーションモデル

シミュレーションのパラメータを表2に示す。750 m × 750 mのエリアに100ノードが存在し、各ノードは最大移動速度以内のランダムな速度で移動するものとする。移動する中で各ノードはエリア内において一定周期ごとに無作為に選択したノードへ経路構築を行い、データ通信を開始する。また、エリア内には正常ノードと利己的ノードが混在している。利己的ノードの振る舞いはデータパケットのみを全て破棄するものとする。これは、データパケットは

表 2 シミュレーションパラメータ  
Table 2 Basic simulation parameters.

ネットワークシミュレータ	Qualnet5.0.2
評価時間 $t$	2000 秒
シミュレーションエリア	750 m × 750 m
全ノード数 $N$	100
無線通信方式	IEEE 802.11b
無線通信範囲	250 m
トラフィックタイプ	CBR (UDP)
ペイロードサイズ	512 byte
パケットレート	4 pkts/s
モビリティモデル	ランダム
最大移動速度	2 m/s
利己的ノードの割合 $\gamma$	10% ~ 40%
リンクトラストの初期値: $L_{ini}$	0.5
ブラックリストスレッシュホルド: $T_{blacklist}$	0.5
削減定数: $\alpha$	0.5
最大停止命令対象ノード数: $D$	20
更新定数: $\beta$	1.0

制御パケットに比べデータ量が大きく転送コストがかかるのに加え、制御パケットを含め全てのパケットを破棄した場合ブラックリストに追加され、自身のデータ通信が行えなくなってしまうためである。

提案手法が制御パケットを削減しつつも安定した経路の構築を維持できている事を示ため、以下の2つの項目により提案手法の性能を評価する。

- 制御パケット数

提案手法の制御パケット削減効果について確認する。特に RREQ パケット数, RUPD パケット数について評価を行う。

- データパケット到着率 PDR

データパケット到着率はソースノードから目標ノードへデータパケットが届く割合であり、信頼性の高い経路を構築できたかを表す指標である。

比較対象は AODV と、AODV をベースとした SRP である AOTDV である。

#### 4.2 制御パケット数

利己的ノードが 30% 存在する環境下において、シミュレーション終了時の全ノードが転送した制御パケット数の合計の比較とその内訳を図 5 に示す。また、利己的ノード数の割合を変化させた時の総 RREQ パケット数, 総 RUPD パケット数の変化をそれぞれ図 6, 図 7 に示す。ここで、AODV ではパストラスト更新のための RUPD パケットは用いられないため、図 7 において AODV の RUPD パケット数は記載していない。

図 5 より、提案手法の制御パケット数が最も少ない事が見て取れ、AOTDV に対し 48%、AODV に対し 33% 削減した。また、RREQ パケット数に関しては図 6 より、

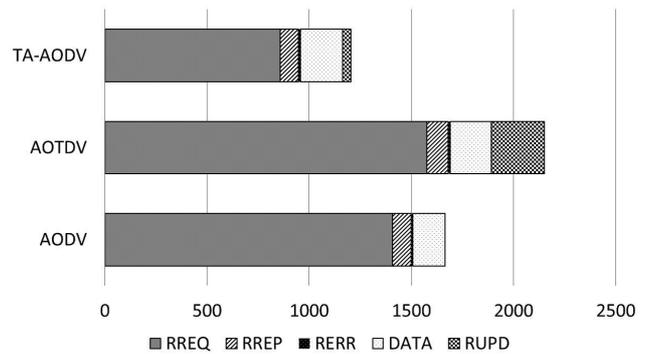


図 5  $\gamma=30\%$  の場合の全転送パケット数とその内訳  
Fig. 5 The number of packets and the breakdown.

AOTDV に対し 43% 削減し、RUPD パケット数に関しては図 7 より、AOTDV に対し 78% 削減した事を確認した。全てのルーティング手法において利己的ノードの増加により RREQ パケット数が減少しているのは、パケットの転送を拒むノードをブラックリストに登録し、登録されたノードに対しては RREQ パケットを転送しないようにしているためである。

RREQ パケット数, RUPD パケット数の削減結果について以下で考察する。まず、既存の AODV, AOTDV では各中継ノードは転送されてきた RREQ パケットを全てフラディングしていた。しかし、SRP では経路を構築したとしても、パストラストが低い経路の場合は破棄される可能性が高いため、最終的にデータ転送に用いられない無駄な経路を構築してしまっていた。これに対し、提案手法ではリンクトラストの低い低信頼なノードの RREQ パケット転送を停止させる。これにより、ネットワーク全体での RREQ パケット数を削減しつつ、信頼性の高い経路のみを

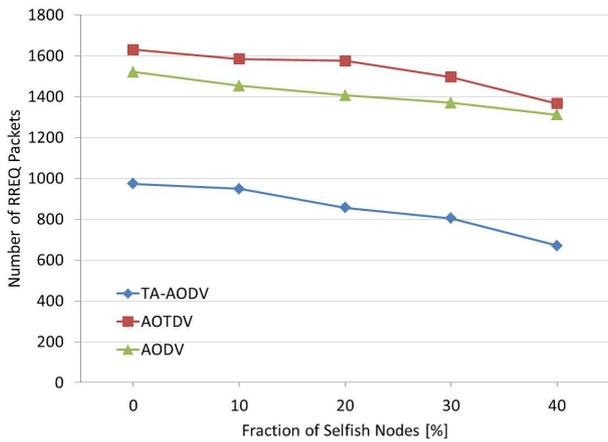


図 6 利己的ノードの割合と RREQ パケット数

Fig. 6 The number of RREQ packets with varying fraction of selfish nodes.

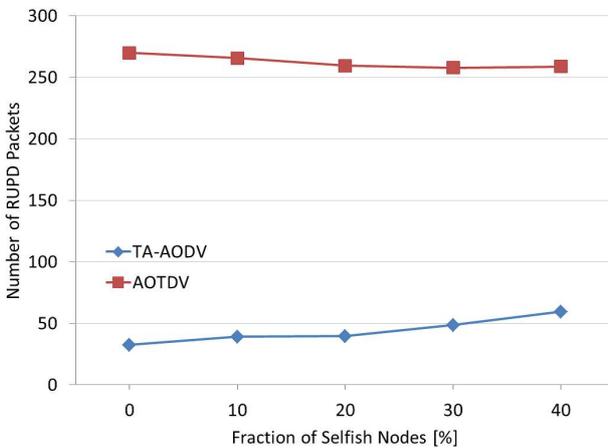


図 7 利己的ノードの割合と RUPD パケット数

Fig. 7 The number of RUPD packets with varying fraction of selfish nodes.

効率的に構築する事ができる。また、RUPD パケットに関しては AOTDV では定期的にフラッディングしていたのに対し、提案手法ではリンクトラストの変化に応じて RUPD パケットの転送頻度を変動させる。これにより、リンクトラストの変化が小さい場合には更新頻度が下がり、経路情報の更新通知の必要ない場合にもフラッディングされていた余剰な RUPD パケット転送が抑制されたため、結果的にネットワーク全体での RUPD パケットの削減を達成する事が出来たと考えられる。

#### 4.3 データパケット到着率

図 8 に利己的ノードの割合を変えた場合のデータパケット到着率の変化を示す。

図 8 より、提案手法は他のルーティング手法と比較し高い到着率を維持している事が確認でき、利己的ノードの割合が 40% のとき AOTDV と比較し 5%、AODV と比較し 24% 改善している。この結果は、提案手法ではリンク

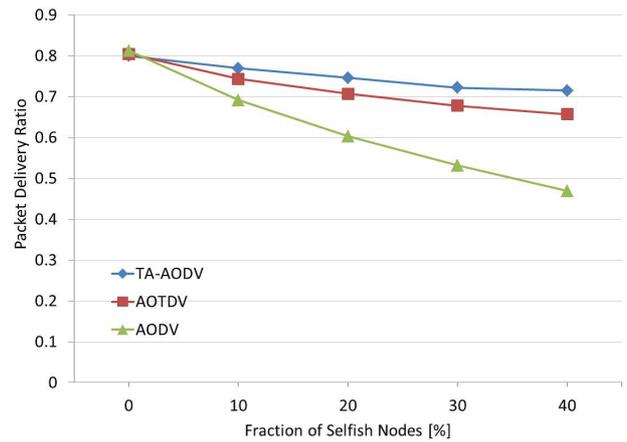


図 8 利己的ノードとパケット到着率

Fig. 8 Packet delivery ratio with varying number of selfish nodes.

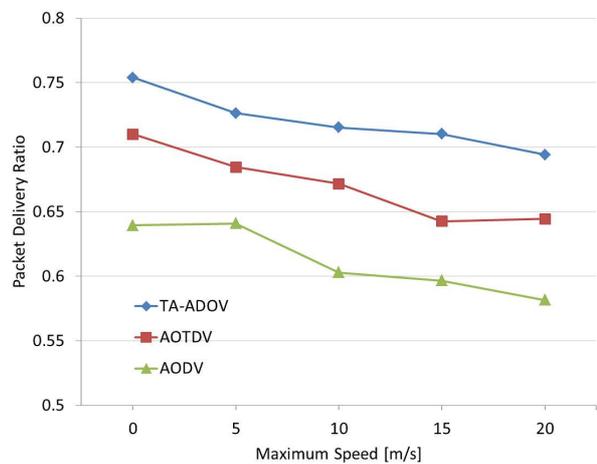


図 9 ノードのモビリティとパケット到着率

Fig. 9 Packet delivery ratio with varying maximum speed.

ラストを用いる事によって信頼度の低い経路構築に要する RREQ パケットのみを削減している一方、高信頼経路の構築も維持できた事を示す。更に、AOTDV では経路のパストラストの更新は一定周期であったが、提案手法ではリンクトラストの変化の大きい初期値付近で頻繁に行うようにしているため、AOTDV と比べより早くリンクトラストが信頼性の高い値に収束し、正常なノードを選択し易くなるため、到着率が向上したと考えられる。

次に、図 9 にノードの最大移動速度を変化させた時のデータパケット到着率を示す。図 9 より、どのルーティング手法においてもノードの移動速度が増加するに従い、データパケット到着率が低下している事が見て取れる。これは、ノードが移動する事でノード間のリンク切れが頻繁に起こるためである。更に、移動速度が上がるとノードの移動範囲が広がるため、パケット転送経験のない、即ちリンクトラストを算出した経験のない新たな利己的ノードに遭遇する機会が増え、データパケット到着率が低下し

てしまうと考えられる。提案手法ではリンクトラストの変化の大きい初期値付近で頻繁に RUPD パケットのブロードキャストを行うようにしているため、他の手法と比較しより早くリンクトラストが信頼性の高い値に収束し、高いデータパケット到着率を維持していると考えられる。一方、AODV では RUPD パケットを一定周期でブロードキャストしているため、経路情報の変化に即座に対応することができず、提案手法に比べ低いデータパケット到着率となっている。

以上より、提案手法 TA-AODV は評価値を用いて効率的に制御パケットを削減しつつ、高いデータパケット到着率を達成する手法である事が示された。

## 5. おわりに

本論文では、評価値を用いて余剰な RREQ パケット、RUPD パケットのフラッディングを削減する事で、高信頼経路構築にかかるオーバーヘッドの増加を抑制するセキュアルーティング手法 TA-AODV を提案した。

提案手法ではパケットを正常に転送しない信頼度の低いノードに対して、RREQ パケットの転送停止命令を出す事で、低信頼経路構築に要する RREQ パケットのみを削減する。また、新たにスレッショルドを定義し、経路情報更新メッセージである RUPD パケットの転送を評価値の変化に応じて行う。このようにする事で、評価値をより早く信頼度の高い値に収束させる事ができ、また、評価値の更新の通知が必要ない際には余剰な RUPD パケットのフラッディングを削減する事ができる。提案手法をシミュレーションにより比較評価し、既存の AODV と比較し制御パケット数を 48% 削減しつつ、データパケット到着率は最大で 5% 改善している事を確認した。また、ノードのモビリティを変化させた際にも高いデータパケット到着率を維持し、トポロジーに変化がある際にも高信頼経路の構築を維持できる事を確認した。

以上より、提案手法は効率的に高信頼な経路を構築できるという有用性を示した。

**謝辞** 本研究の一部は、JSPS 科研費 (B) 課題番号 25280032 (2013 年) の助成により行われました。

## 参考文献

- [1] Santhanam, L., Xie, Bin. and Agrawal, D.P: Selfishness in mesh networks : wired multihop MANETs, *Wireless Communications, IEEE* vol.15, no.4, pp. 16–23 (2008).
- [2] Jin-Hee Cho., Swami, A. and Ing-Ray Chen.: A survey on trust management for mobile ad hoc networks, *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* vol.13, no.4, pp. 562–583 (2011).
- [3] Bala, A., Kumari, R. and Singh, J.: Investigation of blackhole attack on AODV in MANET, *Journal of Emerging Technologies in Web Intelligence* vol.2, no.2, pp. 96–100 (2010).

- [4] Poonam., Garg, K. and Misra, M.: Trust based multi path DSR protocol, *ARES 2010*, pp. 204–209 (2010).
- [5] Marchang, N. and Datta, R.: Light-weight trust-based routing protocol for mobile ad hoc networks, *Information Security, IET 2012*, vol.6, no.2, pp. 77–83 (2012).
- [6] Velloso, P.B., Laufer, R.P., Duarte, O.C.M.B. and Pujolle, G.: Trust management in mobile ad hoc networks using a scalable maturity based model, *Network and Service Management, IEEE Trans*, vol.7, no.3, pp. 172–185 (2010).
- [7] Huaizhi, L. and Mukesh, K.: Trust Management in Distributed Systems, *Computer, IEEE*, vol.40, no.2, pp. 45–53 (2007).
- [8] Pirzada, A.A., McDonald, C. and Datta, A.: Performance comparison of trust-based reactive routing protocols, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol.5, no.6, pp. 695–710 (2006).
- [9] Halim, I.T.A., Fahmy, H.M.A., Bahaa El-Din, A.M. and El-Shafey, M.H.: Agent-Based Trusted On-Demand Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks, *NSS, 2010*, pp. 255–262 (2010).
- [10] Li, X., Jia, Z., Zhang, P., Zhang, R. and Wang, H.: Trust-based on-demand multipath routing in mobile ad hoc networks, *Information Security, IET*, vol.4, no.4, pp. 212–232 (2010).
- [11] Johnson, D.B. and Maltz, D.A.: Dynamic source routing in ad hoc wireless networks, *Mobile computing*, pp. 153–181 (1996).
- [12] Perkins, C.E. and Royer, E.M.: Ad-hoc on-demand distance vector routing, *WMCSA, IEEE*, pp. 90–100 (1999).