アドホックネットワークにおける通信成功履歴を用いたGeocastの効率化

野本明寛[†]　土田　元[†]　石原　進[††]

本稿ではフラッディングベースの Geocast を用いて目的地にデータを要求し，これに対する応答が返されるアプリケーションを想定した Geocast の効率化手法を提案する．フラッディングベースの Geocast は冗長なパケットが多く，端末密度が高い場合頻繁に衝突が発生する可能性がある．本稿では各端末が中継した要求の成功および失敗の記録を用いることにより，複数端末の同時送信を避けつつ遅延を低く抑える Geocast を効率化する手法 Geocasting based on Successful Transmission Results(GSTR) を提案する．さらに GSTR の性能を向上させるために通信成功記録の管理方法，記録保持端末の制限，通信成功記録の利用方法の検討について述べる．

Optimization of geocast based on successful transmission results in ad-hoc network

Akihiro Nomoto,[†] Gen Tuchida[†] and Susumu Ishihara[††]

In this paper we propose an efficient geocasting scheme based on flooding for cases where a source node sends request messages to nodes in the destination area and receives replies from some of them, Geocasting based on Successful Transmission Result (GSTR). Generally geocast protocols based on flooding cause many redundant messages which cause transmission errors. In GSTR, each node records whether each request messages which they have relayed result in a reply from a suitable node. Using these records, each node decides the delay before rebroadcast of geocasting packets. We investigate the management and usage of the records for optimization of GSTR.

1. はじめに

近年，GPS の普及に伴い端末の位置情報を利用したサービスが注目を集めている．例えば ITS システムにおける VICS を用いたカーナビゲーションサービス，携帯端末を用いたナビゲーションおよび周辺情報配信サービスなどがこれに当たる．また，GIS (Graphical Information System) の研究も盛んに行われ，地図情報と特定の位置に依存した情報（位置依存情報）を統合して管理するシステムの構築が国家プロジェクトとして行われている．

こうした背景の下，移動端末のみで構成される一時的なネットワークであるアドホックネットワークによる位置依存情報配信サービスの提供が期待されている．アドホックネットワークはその特性から，インフラに依存せずネットワークを構築可能である．これにより事故情報などの渋滞情報や，街角における特売情報などの情報を移動端末間で交換するようなサービスが，インフラに依存することなく可能になる．

位置依存情報配信サービスの一例として，アドホックネットワークを構築する各端末が各地で位置依存情報を収集し，これを共有するアプリケーションがある．筆者らはこのようなアプリケーションを SOLA (System for Sharing Objects with Location information on Ad hoc networks) と定義し，SOLA において各端末がデータの取得時にデータの複製配布を行うことでデータの可用性を高める研究を行っている[1)2)]．SOLA では，特定の地点の位置依存情報の要求を行う端末は，その地点に向けて要求メッセージを転送し，データを保持する端末から応答を返してもらうことにより情報の共有を行う．本稿ではこのような端末が Geocast で要求を送信し，それに対して応答が返されるようなサービスを対象とし，Geocast の効率化手法を提案する．

アドホックネットワークを構成する端末間の通信に用いられるルーティングプロトコルは MANET WG を中心にさまざまなものが提案されている．これらの多くはアドレスが既知の特定の端末と通信を行うためのプロトコルである．しかし，SOLA の環境では，どのアドレスの端末がどのような位置依存情報を保持しているかは送信側からは分からない．そのため特定の端末と通信を行うプロトコルではなく特定の地域 (Geocast Region) にいる端末に向けて情報を送信する Geocast を用いるのが効率的である．

Geocast はユニキャストベースの手法とフラッディングベースの手法に大別される．ユニキャストベースの Geocast は，hello パケットを用いて近隣端末と互いの位置情報を交換しておき，近隣端末の中で転送する端末を選択し，ユニキャストで Geocast Region までメッセージを転送した後，Geocast Region 内でパケットをフラッディングする．

† 静岡大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Shizuoka University
†† 静岡大学工学部
Faculty of Engineering, Shizuoka University

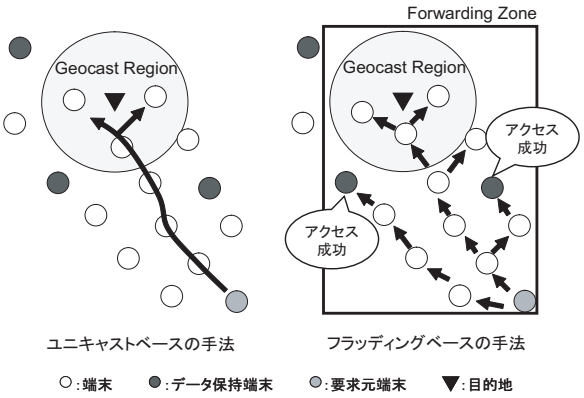

図 1　SOLA における Geocast による位置依存情報の要求

こうして Geocast Region 内のすべての端末にパケットを転送する．一方フラッディングベースの Geocast では，少なくとも送信元と Geocast Region を含む Forwarding zone を定義し，この領域内でフラッディングを行う．しかし，フラッディングベースの手法はその性質上重複パケットが多い．このため端末密度が高い場合，Forwarding zone 内では大量のトラフィックにより，衝突が頻繁に起こり，パケットの到達確率が低下する可能性がある．衝突を避けるためには冗長なトラフィックを抑えることが必要である．

SOLA のような環境下では，要求の宛先となる端末は，特定の地点の位置依存情報を保持した端末であり，現在特定の地点に存在する端末とは限らない．各端末は特定の地点においてデータを取得しても，時間が経つとその場から移動してしまう．この結果，Geocast Region 内にその地点に依存した情報を保持した端末がいなくなってしまう可能性がある．そのためユニキュストベースの Geocast を用いるのではなく，フラッディングベースの Geocast を用いて Geocast Region だけでなくその周辺の端末にも要求メッセージを転送することにより，データを保持している端末へのメッセージの到達確率を高めることが有用と考える（**図 1**）．本稿では，このような環境を対象とし，過去の通信成功記録を用いることにより SOLA 環境でのフラッティングベースの Geocast の効率化を実現するプロトコル Geocasting based on Successful Transmisson Results (GSTR) を提案する．

2.　Geocast に関する既存研究

2.1　ユニキャストベースの Geocast

最も単純なユニキャストベースの手法は Greedy Forwarding である．この手法では，隣接端末のうち，目的地に最も近づいている端末にメッセージを転送することを繰り返し，目的地にメッセージを転送する．しかし Greedy Forwarding では，自分よりも目的地に近い端末が存在しなければ通信が失敗に終わってしまうため，障害物の存在に弱いという問題点がある．この問題に対して GPSR[3] では，自分よりも目的地に近い端末が存在しない場合に右手の法則に従い，迂回経路を探索することでメッセージの到達性を高めている．また，FACE[4] では Gabriel グラフの辺のみを転送経路に用いることにより障害物を迂回する経路を使用する．このようなユニキャストベースの Geocast は冗長なパケットが無く，途中でパケットが失われ，通信が失敗してしまう可能性があるという欠点がある．これらは，通信に必要なトラフィックが少なく，通信の頻度が高い場合には効率的な手法であるといえるが，通信の頻度が少ない場合は Hello パケットに使っているトラフィックが無駄になり，効率的ではない．

2.2　フラッディングベースの Geocast

フラッディングベースの手法として LBM[5] がある．LBM では目的地と Geocast 送信元端末を内包する Forwarding Zone を定義し，その内部においてフラッディングを行うことにより目的地に向けてパケットを転送する．しかし Forwarding Zone 内の端末はフラッディングを行うため，端末密度が高い場合ブロードキャストストームが起こり，衝突が頻繁に起こってしまう．

文献 6) ではフラッディングによるブロードキャストストームに関する問題を解決手法として，以下の 5 つの手法，i) メッセージ受信時に確率的に転送を行うことにより冗長パケットの削減を行う手法，ii) メッセージ受信時に転送待ち時間を設け，待ち時間中に受信したメッセージ数により転送を中止し，冗長パケットを削減する手法，iii) 転送待ち時間中に受信したメッセージの送信元端末のうち最も近い端末からの距離に応じて転送を中止し，冗長パケットを削減する手法，iv) 転送待ち時間中に受信したメッセージの送信元端末の位置から予想される再転送による新規メッセージ受信端末に応じて転送を中止し，冗長パケットを削減する手法，v) hello パケットを用いて隣接端末を確認し，複数のクラスタにまたがる端末のみが転送を行うことで冗長トラフィックを削減する手法が提案されている．文献 7) では前転送端末からなるべく離れた端末がメッセージを転送するように，各端末がパケット転送前の待ち時間を調整する手法を提案している．

また，プロアクティブ型の MANET 向けルーティングプロトコルである OLSR[8] では，パケットの再送信を責任を持って行なうノードの集合である MPR 集合を定義し，あらかじめフラッディングを行う端末を指定することにより経路情報配信時の冗長パケットを削減している．

3.　GSTR の基本設計

GSTR はフラッディングベースの Geocast である LBM において Geocast メッセージ転送時にランダムな時間を設けることで複数端末の同時送信を避け，待ち時間中に前ホップが受信したメッセージと同じメッセージを受信

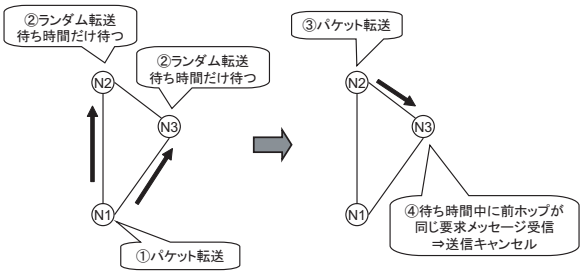

図 2　転送待ち時間を用いた LBM の応用

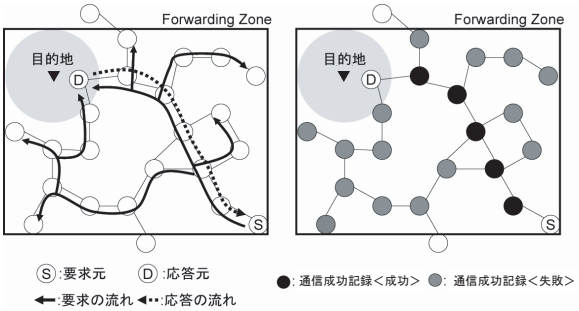

図 3　基本的な通信成功記録の設定方法

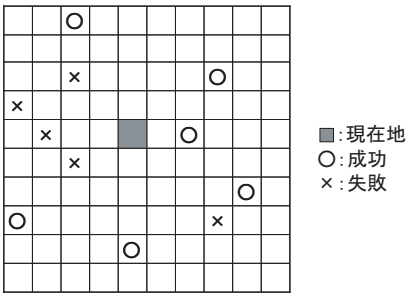

図 4　通信成功記録の管理

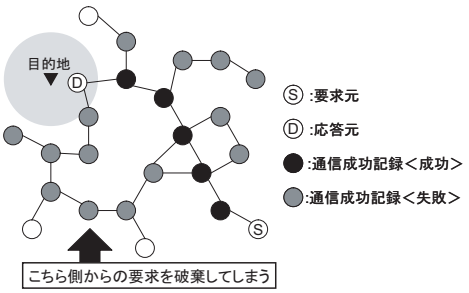

図 5　通信成功記録を用いた手法の問題点

した場合に，転送をキャンセルすることで冗長パケットの発生を防ぐ手法（**図 2**）を基本としている．この手法の機能に加えて，転送の成功記録を利用することにより Geocast の効率化を行う．本手法のようにフラッディングベースの Geocast による要求メッセージに対して応答が返されるサービスを対象とし，要求の成否を用いてフラッディングの効率化を行う手法は，筆者らの知る限りまだ無い．

3.1　GSTR の概要

SOLA の環境下で Geocast による要求が行われ，これに対する応答が返された場合，要求元端末から目的地までの通信経路が存在していることになる．したがって大きくトポロジが変わらない限り，次に同じ地点への要求が行われた場合には，以前要求に成功した経路を利用することにより目的地に到達することが期待できる．一方，要求メッセージを転送したものの，それに対する応答メッセージを中継しなかった端末は，自分からの要求メッセージが目的地まで届かなかった可能性が高い．したがって，この端末を通る経路を使用しても目的地に到達することはあまり期待できない．

GSTR では上記の観点から通信の効率化を行う．GPSR では Geocast による要求に対する応答経路となった端末はその目的地に対する通信成功記録＜成功＞を保持し，要求メッセージを転送したものの応答メッセージが得られなかった端末は，その目的地に対する通信成功記録＜失敗＞を保持する（**図 3**）．通信成功記録には記録の種類＜成功・失敗＞，要求発生地点，要求発生時刻，目的地，記録の寿命，およびこの記録登録時点での端末の位置が格納される（**図 4**）．同じ目的地に対する新しい記録ができた場合，新しい方のみを残す．端末が記録登録時の位置を大きく離れた場合には，該当する記録を削除する．また端末の移動に伴うトポロジの変動を考慮し，各記録に寿命を設け，古い記録を消去する．

各端末は，要求メッセージ受信時に，要求メッセージと同じ目的地に対する過去の通信成功記録を端末が保持しているかどうかによって以下の異なる処理を行う．

- 通信成功記録＜成功＞を保持している場合
  即座に要求メッセージを転送する，もしくは短いランダム時間 t_s　$(0 < t_s < T_s)$ だけ待ち合わせを行った後に，メッセージを転送する．
- 通信成功記録＜失敗＞を保持している場合
  待ち時間を設定せずメッセージを破棄する，もしくは長いランダム時間 t_f　$(0 < t_f < T_f, T_s < T_f)$ だけ待ち合わせを行った後に，要求メッセージを転送する．
- 通信成功記録をいずれも保持していない場合
  ランダム時間 t_n　$(0 < t_n < T_f, T_s < T_n < T_f)$ の待ち合わせを行った後に，再転送を行う．

3.2　GSTR の利点・欠点

本手法の利点は，通信成功記録に基づいて設定される転送の待ち時間を用いて複数端末の同時送信を避けることで，応答の期待できる経路への通信を優先しつつ，複数端末によるチャネル競合に伴う遅延を抑えることが可能になる点ある．

一方，欠点としては，目的地に到達が可能であるにもかかわらず要求転送の失敗を記録してしまい，転送中止または長時間の転送延期を行う端末が発生し，目的地への到達性を著しく下げてしまう可能性がある点が挙げら

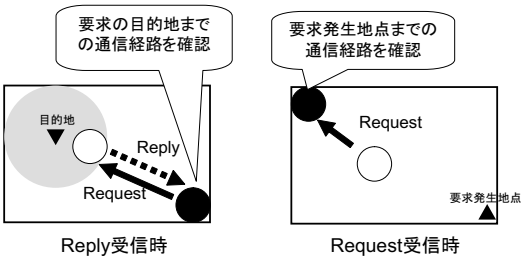

図 6　通信経路の存在を確認可能な状況

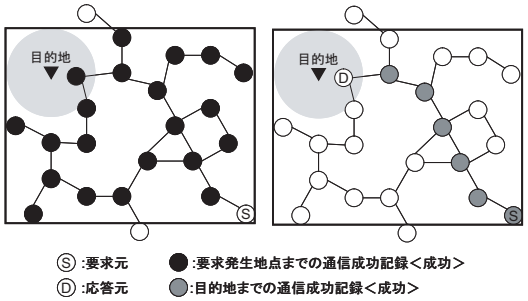

図 7　要求受信時に取得可能な情報と応答受信時に獲得可能な情報

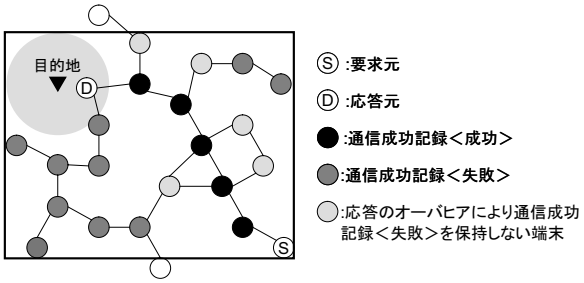

図 8　応答経路周辺端末への通信成功記録＜失敗＞保持の制限

れる．**図 5** に Geocast による要求が行われ，応答が返された際の通信成功記録を保持する端末の配置例を示す．同図において Geocast Region の周辺は，通信成功記録＜失敗＞を保持した端末に囲まれてしまっている．このような状況では目的地へのアクセスが可能であるにも関わらず，通信成功記録＜失敗＞を保持した端末が要求メッセージを破棄または大きな遅延を発生させてしまう．この結果，かえって目的地への到達性が損なわれるあるいは応答遅延が増大する可能性がある．

4.　GSTR の詳細設計

Geocast の性能は通信成功記録の管理，記録保持条件およびその利用方法に大きく影響を受けると考えられる．本章ではこれらの観点から 3.2 で述べた問題を解決し，GSTR の性能を向上させる手法を検討する．

4.1　通信成功記録の管理方法

GSTR は端末の持つ通信成功記録の有無により再転送の処理が異なり，通信成功記録の管理方法に性能が大きく左右される．ここでは端末の持つ通信成功記録の管理方法の工夫により GSTR の性能を向上させる手法について検討する．

4.1.1　通信成功記録の寿命の設定

各端末が取得した通信成功記録が有効なのは，通信経路が確認されてからトポロジが変動するまでの間である．そこで，各端末において，隣接端末との接続が途切れると予想される時間を元に，通信成功記録の寿命を設定する．ここで端末の速度を v，通信可能半径を r とすると，通信成功記録の寿命 T_{TTL} は $r/\bar{v}$ を最大値として，以下のように設定される．ここで k は調整用の係数であり，$0 < k_r < 1$ である．また，$\bar{v}$ は端末の平均速度である．

$$T_{\mathrm{TTL}} = \min(k_r r/v, r/\bar{v}) \qquad (1)$$

4.1.2　要求元との位置関係を考慮した通信成功記録管理

SOLA の環境において，端末が通信経路を確認できる機会は応答受信時だけではない．要求受信時には各端末から要求発生地点への通信経路の存在が確認できる（**図 6**）．こうして得られる情報を通信成功記録の管理に利用することを考える．ここでは，要求メッセージ受信時に受け取った要求の発生地点に対する i) 通信成功記録＜成功＞を保存する手法，ii) 通信成功記録＜失敗＞を消去する手法の 2 つについて検討する．

要求受信時に確認される通信経路存在情報と応答受信時に確認される通信経路存在情報には，その希少性に大きな差がある（**図 7**）．要求受信時に獲得可能な要求発生地点への経路存在情報は，要求がフラッディングで送信されるため，要求発生地点から目的地の間に存在する多くの端末において知ることが可能である．一方，応答時に得られる要求の目的地への通信経路は，要求を転送した端末のうち，応答経路となるごく一部の端末にのみにしか知ることができない．

i) の手法を用いると要求受信端末の全てが要求発生地点への通信成功記録＜成功＞を持つため，次の要求受信に，全ての端末が短い待ち時間で転送を行ってしまう．この結果ランダムな長い転送待ち時間よって得られるチャネル競合の緩和効果が薄れてしまい，衝突が頻繁に発生する可能性がある．

これに対し，ii) の手法は通信成功記録＜失敗＞を消去するにとどまるため，過去には応答経路とはならなかったが目的地まで到達可能な経路を用いる際に要する遅延の削減，および通信経路の確保が可能になる．

以上の検討により i) の手法が効果的であると考える．

4.2　通信成功記録＜失敗＞保持の制限方法

4.2.1　応答経路周辺端末での制限

要求を転送した端末のうち，それに対する応答メッセージを転送した端末以外の全ての端末が通信成功記録＜失敗＞を保持してしまうようにすると，トポロジの変動により通信成功記録＜成功＞を保持していた端末による経路が途絶えてしまった場合，応答経路周辺の通信成功記録

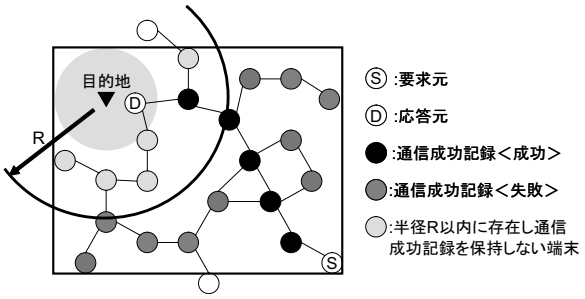

図 9　目的地周辺端末への通信成功記録＜失敗＞の保持制限

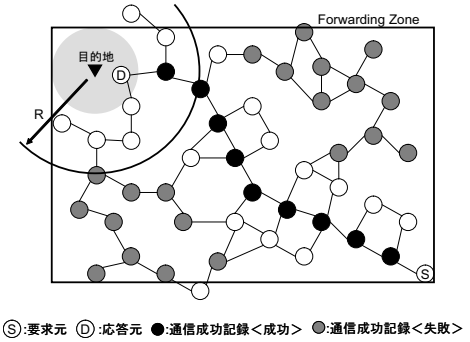

図 10　目的地および応答経路周辺における通信成功記録＜失敗＞保持の制限

＜失敗＞を保持した端末が代わりに目的地まで要求メッセージを転送することになってしまう．この結果，要求遅延の増大，到達失敗の可能性の増加をまねいてしまう．この観点から，要求転送経路を逆にたどって応答が返送される時に，応答経路の近隣端末がこの応答をオーバヒアした場合，これを受け取った端末は通信成功記録＜失敗＞の保持を制限するようにする (**図 8**)．これにより通信成功記録＜成功＞を保持した端末が移動したとしても，通信成功記録＜成功＞，＜失敗＞のいずれもを持たない周辺端末が代わりにパケットを転送し，転送遅延の増加を低く抑えることが可能になる．つまり本手法によりトポロジの変動への耐性が高まる．

4.2.2　目的地の周辺端末での制限

目的地の周辺に存在する端末は，目的地に対する要求を頻繁に受信する．そのため，目的地周辺の端末の持つ通信成功記録は，それが成功・失敗のいずれであったとしても，頻繁に使用される可能性が高い．また，それらの端末からは，目的地へ到達可能である可能性は一般に高い．このことから目的地周辺の端末は通信成功記録＜失敗＞を保持するべきではないといえる．そこで，通信経路保護半径 R_p を設定し，目的地から半径 R_p 以内の端末は通信成功記録＜失敗＞の保持を制限するようにする．これにより目的地への到達確率の向上，要求遅延の削減の効果が期待される (図 8).

4.2.3　Forwarding Zone 全体における制限

これまでに述べた通信成功記録＜失敗＞の保持条件の制限手法は，特定の領域において通信成功記録＜失敗＞の保持を制限することで目的地への通信経路を確保する手法であった．これらの手法では通信成功記録＜失敗＞の保持を制限した特定の地域においては通信成功記録＜失敗＞は保持されず通信経路が確保されやすくなる．しかし，それ以外の領域では実際には目的地に到達可能であるにもかかわらず，通信成功記録＜失敗＞を保持してしまう端末が密集して存在してしまう可能がある（**図 10**）．

通信成功記録＜失敗＞を保持した端末が密集した地点において要求が発生した場合，目的地もしくは通信成功記録＜成功＞にたどり着くまでに多大な転送待ち時間が発生する．あるいは要求が破棄されてしまう．したがって，特定の領域だけで通信成功記録＜失敗＞の保持を制限するのではなく，全ての領域において通信成功記録＜失敗＞の保持を制限する必要がある．

制御手法の一つとして，各端末が獲得可能な情報を基に通信成功記録＜失敗＞を確率的に保持させることにより，まばらに通信成功記録＜失敗＞を保持させ，チャネル競合を避けつつ，目的地への通信経路を素早く確保する手法が考えられる．通信成功記録＜失敗＞を保持させるための確率を決定するための指標としては，以下のものが考えられる．

■端末密度

端末密度が高いほど積極的に通信成功記録＜失敗＞を保持する．これは端末密度が高いほど冗長な経路が多いと考えられるためである．また，端末密度が低い場合ほど，各端末が目的地への到達経路に影響を及ぼすクリティカルなノードである可能性が高いため，通信成功記録＜失敗＞はあまり持つべきではない．

各端末において近隣端末の密度を知る方法は，i)Hello パケット，ii) 前転送端末との距離，iii) 受信メッセージ量等が考えられる．i) は最も一般的な手法であるが，トラフィックの増大を招いてしまう．ii) は前送信端末 1 台のみと比較を行うため，iii) は要求の発生頻度，通信成功記録の存在に大きく影響を受けるため，正しい端末密度を示す値とは限らない．しかし ii)，iii) の手法では情報の獲得に新たなパケットを発生させる必要がないという利点がある．

■移動速度

移動速度が遅い端末ほど積極的に通信成功記録＜失敗＞を保持する．端末の移動速度が速い場合，端末周辺のトポロジはすぐに変動する．したがって，移動速度の速い端末はあまり通信成功記録＜成功＞を持つべきではない．なお 4.1.1 で述べた手法にしたがって通信成功記録の寿命を持たせる場合，移動速度が速いと記録を保持させたとしてもすぐに消えてしまう．

■バッテリ残量

バッテリ残量の少ない端末ほど積極的に通信成功記録

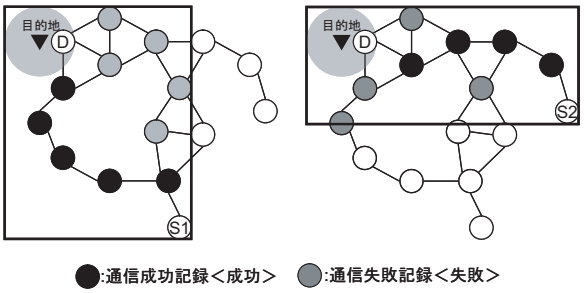

図 11　要求発生地点による通信成功記録を保持する端末の違い

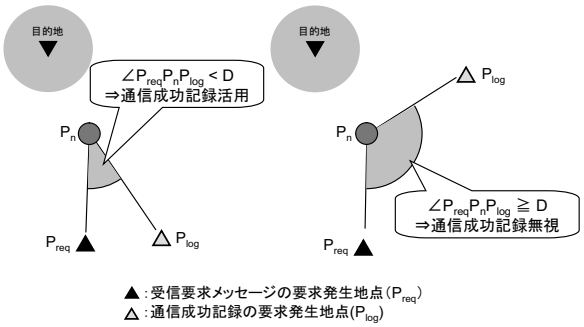

図 12　要求発生位置を考慮した通信成功記録利用方法

＜失敗＞を保持させる．GSTR において通信成功記録＜成功＞を保持する端末に比べ，通信成功記録＜失敗＞を保持する端末は比較的送信トラフィックが少ない．したがって，本手法を用いると，特定の端末にトラフィックが集中し，その端末の稼働時間が短くなってしまうことを防ぐことが可能になる．

4.3　通信成功記録の利用方法

通信成功記録の保存される端末はトポロジだけでなく要求の発生地点により大きく異なる．**図 11** に示す例では，同じトポロジで同じ目的地に向けて要求が行われているにもかかわらず，端末 S1 からの要求受信時には通信成功記録＜成功＞を保持するが，S2 からの要求受信時には通信成功記録＜失敗＞を保持してしまっている端末が存在する．一般に，要求発生地点が異なれば目的地への通信経路も異なる．そのため要求発生地点が大きく異なる場合，目的地が同じであっても通信成功記録を利用するべきではない．そこで受信した要求メッセージの発生地点と通信成功記録上の要求メッセージの発生地点の位置関係が類似した場合にのみ，通信成功記録に基づいた処理を行うようにする．

これらの類似性を測る指標として，要求受信端末の現在位置 P_n，受信した要求メッセージの発生地点 P_{req}，および保持した通信成功記録上の要求発生地点 $P_{\log}$ の 3 点の角度を考える．これらの 3 地点から求められる角度 $\angle P_{\mathrm{req}}P_nP_{\log}$ が閾値 D よりも小さい場合，要求発生源の類似度が高いと判断し，保持している記録をに基づいて要求メッセージの即時転送，転送延期，破棄の処理を行う (**図 12**)．これにより，応答遅延削減および目的地への到達性が向上すると予想される．

5. ま と め

本稿では，過去の通信の記録をルーティングに活用することによりフラッディングベースの Geocast の効率化をする Geocasting based on Successful Transmission Result(GSTR) を提案した．さらに GSTR の性能を向上させるために通信成功記録の管理方法，通信成功記録の保持の制限方法，通信成功記録活用方法について検討した．

今後の課題としては，提案手法の実装および評価が挙げられる．

謝　　辞

本研究の一部は，日本学術振興会科学研究費補助金若手研究（A）（16680002）によるものである．ここに記して謝意を示す．

参 考 文 献

1) 土田元, 沖野智幸, 田森正紘, 渡辺尚, 水野忠則, 石原進, “無線アドホックネットワークにおける位置依存情報複製配布手法”, 電子情報通信学会和文論文誌 B, Vol.J88-B, No.11, pp.2214-2227 (2005).
2) 石原進, 佐仲貴幸, 土田元, 水野忠則, “無線アドホックネットワークにおける位置依存情報複製配布方式のトラフィック削減手法”, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.12, pp.2834-2847 (2005).
3) B. Karp, H. T. Kung, “GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks ”, *in proc. of ACM/IEEE MOBICOM’2000*, pp. 243-254, (2000).
4) P. Bose, P. Morin, I Stojmenovi, J Urrutia, “Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks”, *Wireless Networks* , pp. 609-616, (2001).
5) Y. B. Ko, N. H. Vaidya, “Flooding-based geocasting protocols for mobile ad hoc networks”, *Mobile Networks and Applications*, pp. 471-480, (2002).
6) S. Ni, Y. Chen, J. Sheu, “the broadcast storm problem in a mobile ad hoc network”, *in proc. of ACM/IEEE MOBICOM’99*, pp. 153-167, (1999).
7) E. Fasolo, R. Furiato, A Zanella, “Smart Broadcast algorithm for inter-vehicular communication”, *in proc. of WPMC2005*, pp.1583-1587, (2005).
8) T. Clausen, P. Jacquet, “Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)”, *RFC 3626*, (2003).