

電力制御を利用したアドホックネットワークルーティング

東京電機大学 工学部 情報システム工学科

梅島慎吾 桧垣 博章

E-mail: {shin5,hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

モバイルコンピュータは間の無線通信においては、IEEE802.11 や HIPERLAN などの無線 LAN プロトコルが標準化され、これらが広く普及しつつある。無線通信媒体である電磁波は、送信元からの距離が大きくなるにつれて減衰する。近傍のコンピュータとの通信に必要な送信電力は、遠方のコンピュータとの通信に必要な送信電力に比べて小さい。電磁波を通信媒体とするアドホックネットワークにおいては、近隣コンピュータとの間の距離に応じて送信電力を制御することによって、モバイルコンピュータの稼働時間を延長することができる。送信電力を制御することは、送信信号の到達範囲を制御することでもある。従来のアドホックネットワークルーティング手法は、各モバイルコンピュータの送信信号の到達範囲が一定であることを前提としている。これに対して、送信電力を制御することによって、送信範囲に着目したルーティングが可能となる。一般に、アドホックネットワークでは、送信電力を小さくすると、送信先コンピュータまでの経路のホップ数が増加する。これによって、エンド-エンドの通信遅延が大きくなり、スループットが低下する。しかし、ネットワーク内では、複数のコンピュータ対が同時に通信を行なう。そのため、送信信号の到達範囲を縮小することによって、競合の発生率を低減し、それぞれの通信におけるエンド-エンドの通信遅延を短縮することが可能である。本論文では、送信電力を制御することによって競合による通信遅延の短縮を実現する新しいアドホックルーティングプロトコルを提案する。

PowerControl Based Adhoc Routing Protocol

Shingo Umeshima Hiroaki Higaki

Department of Computers and Systems Engineering

Tokyo Denki University

E-mail: {shin5,hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

A Mobile computer changes its location from time to time. Wireless communication protocols, e.g. IEEE802.11 and HIPERLAN, are widely available in mobile ad-hoc networks. By controlling signal transmission power in a mobile computer, transmission range of the signal is changed. By increasing the signal transmission power, the number of hops for transmitting a message between two mobile computers is reduced. On the other hand, by reducing the signal transmission power, the probability of contention and collision in signal transmission is also reduced. Hence, there is a trade off in controlling the signal transmission power in order to reduce an end-to-end message transmission delay. This paper proposes two algorithms for finding another path by controlling signal transmission power for achieving shorter message transmission delay. These algorithms are invoked locally in each mobile computer on a path, i.e. these are not centralized one in a mobile ad-hoc network.

1 背景と目的

近年、ノート型 PC や PDA、自律移動ロボットなどのモバイルコンピュータが広く利用されるようになってきた。これらのモバイルコンピュータは、移動中においてもアプリケーションを実行し、他のコンピュータとの間で通信を行なう。そのため、基地局の存在に依存せずに、ネットワークアプリケーションの実行が可能でアド

ホックネットワーク [4] への要求が高まっている。アドホックネットワークでは、ネットワーク上のすべてのモバイルコンピュータがメッセージのルーティング機能を持ち、エンド-エンドの通信経路を構築する。モバイルコンピュータ間の通信には、IEEE802.11 [1] や HIPERLAN [2] などの無線 LAN プロトコルが利用さ

れている。無線通信媒体である電磁波には、送信元からの距離が長くなるほど減衰する特性がある。そのため、遠方のモバイルコンピュータとの通信と比較し、近傍のモバイルコンピュータとの通信に必要な送信電力は小さい。論文 [9,10] で提案されている MAC プロトコルを用いることによって、通信に必要な最小送信電力を得ることができ、送信電力を制御した通信が可能となる。

送信電力を制御することは、無線信号の到達範囲を制御することでもある。図 1 のように、モバイルコンピュータの分布が密である場所に複数の経路が構築されている場合、従来のルーティングプロトコル [5,6] では図 1 のように、これらの経路の信号到達範囲が重複するために、競合 (コンテンション) が発生する。この競合による送信待ちによって、エンド-エンドの通信遅延が大きくなる。そこで図 2 のように、モバイルコンピュータの送信信号の到達範囲を縮小することによって、信号到達範囲の重複を解消または削減し、エンド-エンドの通信遅延を短縮することができる。これはネットワークのスループットの向上にもつながる。

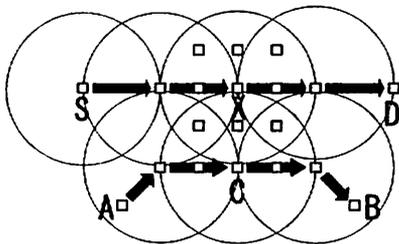


図 1: 隣接経路による競合

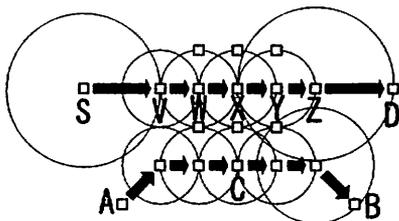


図 2: 電力制御による競合の回避

通信に必要な最小送信電力を求めることができる MAC プロトコルを前提としたルーティング手法としては、経路上にあるノードの消費電力を考慮した [3,8] のルーティングプロトコルがある。ここでは、ノードのバッテリー残量と送信電力をメトリックとして評価し、ネットワーク全体の接続性を高く維持できる経路を選択する。しかし、経路上にあるノードの消費電力を小さくすると、経路上には多数のノードが存在することになり、ホップ数が大きくなることでエンド-エンドの通信遅延が大きくなる。さらに、経路の構築にも長時間を要

する。そこで、ホップ数が大きくなることで通信遅延が大きくなることを防ぐために、[7] では、経路探索は最大電力で到達可能な経路を発見する。経路探索後、リンク状態情報の交換やリンク切れ、片方向リンクの検出などのネットワークトポロジが変化するイベントが発生したならば、リンク切れや片方向リンクとなったノードに対する送信電力を大きくする。また、リンク状態とノードとの距離に基づいて送信電力を必要最小限の電力とする。この手法では、定期的な経路更新が行われなければ、経路は最大電力で探索した状態のままである。一方、経路の更新が頻繁に生じるならば、構築される経路が安定しない。

以上から、本論文では、電力制御を利用した新しいアドホックルーティング手法を提案する。各モバイルコンピュータが、複数の経路の無線信号到達範囲が重複していることを検出し、経路分離アルゴリズム、送信範囲縮小アルゴリズムを局所的に適用する。送信範囲縮小アルゴリズムは、新しいモバイルコンピュータを経路に追加し、モバイルコンピュータ間の距離を短縮することで、送信信号到達範囲を縮小する。また、経路分離アルゴリズムは、複数の経路が同一のモバイルコンピュータを含む状態 (合流) を解消する。これらによって、競合の発生を回避し、エンド-エンドの通信遅延の短縮を実現する。なお、本論文では、データメッセージのルーティングには、DSR [5] や LBSR [11]、C-LBSR [12] 等によって得られたソースルートを用いることとする。

2 送信範囲と通信遅延の関係とその解決手法

アドホックネットワークにおいて、エンド-エンドの通信遅延が大きくなる要因には以下の 2 つがある。

- 複数ノードが行なう送信の競合による待ち時間
- ホップ数の増加によるメッセージ転送処理時間の増加

既存のオンデマンド型ルーティングプロトコル [5,6,11] のように経路要求メッセージを電磁波の最大到達範囲 (固定送信範囲) で送信することによる経路探索を行った場合、構築された経路上でノードの分布が密である場所では、経路に含まれるノードの近隣に、経路に含まれないノードが多数存在する (図 1)。送信信号の到達範囲が一定であることを前提とした場合、経路に含まれるノードの近隣に存在するノードを経路に加えると、ホップ数が増加するばかりでなく、他の経路に含まれるノードとの間で送信の競合が発生する可能性が高くなる。送信信号の到達範囲を制御できる場合、これらのノードを経路に加えることで送信信号の伝達範囲を縮小することができる。これを行えば、他の経路との競合が減少し、エンド-エンドの通信遅延が短縮される可能性がある。また、複数の経路が交差、あるいは合

流することがある(図3)。このとき、交差点付近のノードや合流点であるノードにメッセージが送信されると、CSMA/CAを用いていることから、競合による送信待ちが発生し、エンド-エンド通信遅延が大きくなる。

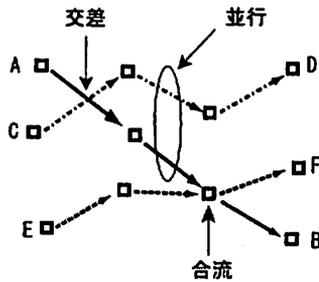


図3: 経路の合流と交差

エンド-エンド通信遅延を縮小するためには、以下を検出し、競合の発生率を低下させる手法が必要である。

- 周辺ノードの分布密度
- 並行する経路
- 合流する経路
- 交差する経路

ノードの分布密度は、各ノードが持つ近隣ノードリストから得ることができる。また、無線LANプロトコルでは、メッセージがブロードキャストされる。そこで、ある経路に含まれているノードが自身を送信先としない他のノードを送信先とするメッセージを受信することによって、並行する経路の存在を検出することが可能である。また、自身を送信先とするメッセージを受信することによって、2つの経路に属していること、すなわち合流する経路の存在を検出することが可能である。しかし、経路が交差していることを検出するためには各ノードの位置を示す座標情報が必要となる。そこで、この問題は、本論文では議論の対象としないこととする。

3 提案手法

送信電力制御MACプロトコルを用いることで、必要最小送信電力から最大送信電力の間で送信電力を制御できる。各モバイルコンピュータ(以下ノードと記述)は、最大送信電力を用いて通信を開始する。ノードの分布が密であり、多数のノードが通信を行なっている領域では競合が発生する。そこで、経路分離アルゴリズムと送信範囲縮小アルゴリズムを局所的に適用し、競合を減少させる。これによって、エンド-エンドの通信遅延を短縮する。

3.1 経路分離アルゴリズム

図4左図のように、複数の経路が同一のノードを含んでいる状態を合流という。合流は競合を発生させるた

め、通信遅延を大きくする。そこで図4右図のように、このノードを含まない経路へ切り替えることで経路を分離し、合流を解消する。

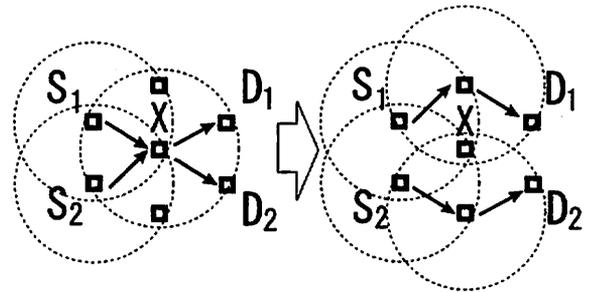


図4: 経路分離アルゴリズム

[経路分離アルゴリズム]

1. 2つの経路 R_i と R_j の合流点であるノード X が合流を検出する。
2. 上流ノード $S_i \in R_i$ へ合流の検出を通知する経路変更提案メッセージ $PUPROP(R_i)$ をユニキャストで送信する。
3. $PUPROP(R_i)$ を受信した S_i は経路変更要求メッセージ $PUREQ(R_i)$ を最大送信電力 P_{max} を用いてブロードキャストする(図5)。

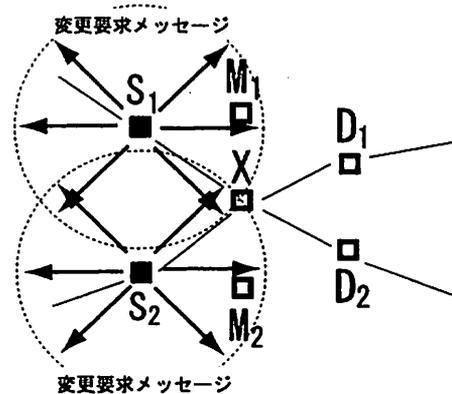


図5: 経路変更要求メッセージ

4. $PUREQ(R_i)$ を受信したノード M_i は、 M_i を R_i に含むことの可否を決定し、変更応答メッセージを S_i へユニキャストで送信する(図6)。
 - 4-1. M_i が R_i 以外の経路に含まれている場合は、 M_i を R_i に含むことを拒否するために経路変更否定応答メッセージ $PUNACK(R_i)$ を S_i にユニキャストする。ここで、 R_i 以外の経路とは、エンド-エンドの異なる経路のことである。
 - 4-2. M_i が R_i 以外の経路に含まれていない場合は、 $m_i \in R_i$ かつ $m_i \in Range(M_i, P_{max})$ で

S_i よりも送信先ノードに近いノード m_i が存在するかを確認する。ただし、 $Range(n, p)$ とは、ノード n の送信電力 p による無線信号到達範囲である。

4-2-1. 存在しない場合は、 M_i を R_i に含むことを拒否する PUNACK(R_i) を S_i へユニキャストで送信する。

4-2-2. 存在する場合は、 M_i を R_i に含むことを許可する経路変更肯定応答メッセージ PUACK(R'_i) を S_i へユニキャストで送信する。ここで R'_i は M_i を含むように更新した経路情報である。

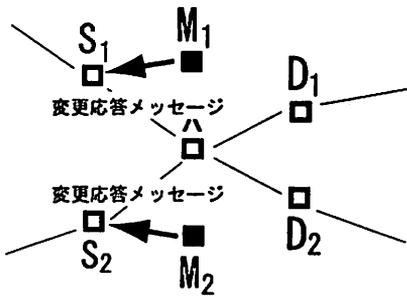


図 6: 経路変更応答メッセージ

5. S_i は受信した経路情報 R'_i を送信元ノードへ通知する。□

3.2 送信範囲縮小アルゴリズム

図 7 左図のように、無線信号到達範囲が重複すると競合が発生し、通信遅延が大きくなる。そこで図 7 右図のように、経路に新しいノードを追加し、ノード間の距離を短縮し、送信電力を低減することによって、それぞれのノードの無線信号到達範囲を縮小する。これによって、競合を抑制する。

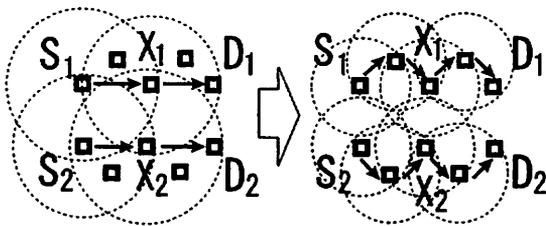


図 7: 送信範囲縮小アルゴリズム

[送信範囲縮小アルゴリズム]

1. $X_i \in R_i$ が、 $R \not\ni X_i$ である R へ配送されるメッセージを受信することによって、無線信号到達範囲の重複を検出する。
2. X_i は、送信範囲縮小提案メッセージ PSPROP(R_i) を S_i に対する最小送信電力 $P(S_i)$ を用いてブロード

キャストする (図 8)。

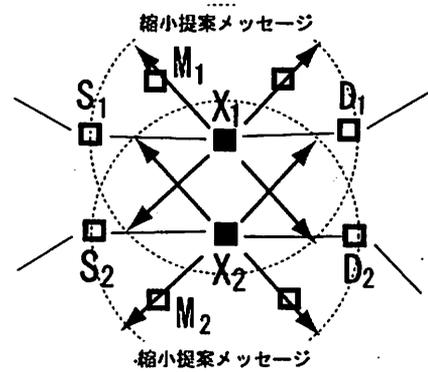


図 8: 送信範囲縮小提案メッセージ

3. PSPROP(R_i) を受信した S_i は、送信範囲縮小要求メッセージ PSREQ(R_i) を送信したかを確認する。送信していないのならば、 $P(X_i)$ を用いて PSREQ(R_i) をブロードキャストする (図 9)。

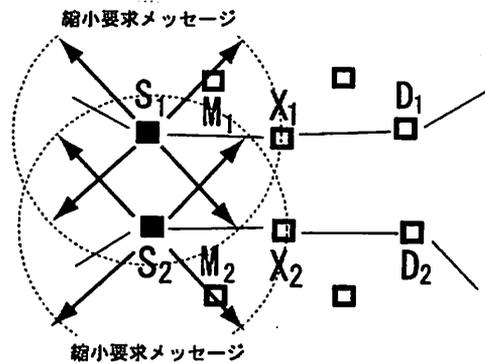


図 9: 送信範囲縮小要求メッセージ

4. PSPROP(R_i) と PSREQ(R_i) の両方を受信したノード M_i は、以下の手順によって R_i に加わることの可否を決定し、縮小応答メッセージを S_i へユニキャストで送信する (図 10)。

- 4-1. M_i が R_i 以外の経路に含まれているかを確認する。含まれている場合は、 M_i を経路に含むことを拒否するために送信範囲縮小否定応答メッセージ PSNACK(R_i) を S_i へユニキャストする。
- 4-2. M_i が R_i 以外の経路に含まれていない場合は、 M_i を含むことを許可する送信範囲縮小肯定応答メッセージ PSACK($R'_i, P(m_i)$) を S_i へユニキャストする。ここで、 R'_i は M_i を含むように更新した経路情報である。また、 $P(m_i)$ は、 $m_i \notin R_i$ かつ $P(m_i)$ が最小である $P(m_i)$ である。

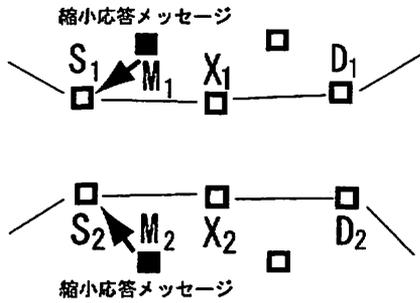


図 10: 縮小応答メッセージ

5. X_i は $PSACK(R'_i, P(m_i))$ に含まれる経路情報を送信元ノードへ通知する。複数の $PSACK$ を受信したならば、 $P(m_i)$ がもっとも大きい R'_i を選択する。□

4 シミュレーション

DSR に対し、経路分離アルゴリズム、送信範囲縮小アルゴリズムを適用し、シミュレーションによる評価を行なった。評価環境を表 1 に示す。

表 1: 評価環境

| | |
|--------|-----------------|
| 空間の大きさ | 200(m) × 200(m) |
| ノード数 | 150 |
| 最大送信範囲 | 30(m) |

表 1 に示された環境において、2 組の通信を行なう状況を想定した。2 組の経路の送信範囲が重複し、競合が発生しているならば、経路分離アルゴリズム、送信範囲縮小アルゴリズムによって、競合が減少することとなる。

構築された経路を図 11 に示す。図 11 ではノード 15 から 21 への通信 (細線) とノード 04 から 28 への通信 (太線) が行われている。図 11 上図は DSR によって得られた経路、図 11 下図は DSR の経路に対して経路分離アルゴリズムと送信範囲アルゴリズムを適用して得られた経路である。

図 11 下図をみると、提案したアルゴリズムでは交差を発生させている。ノード 04 から 28 への経路では交差によってループが発生している。

合流によって発生するループと異なり、交差によるループでは転送順序に矛盾は生じないが、明らかに無駄な経路である。そこで、このようなループを発生させない手法が必要である。ループ部分を観察すると、ノード 81 が、ノード 125 に直接送信することでループを解消できる。そこで、経路分離アルゴリズム、送信範囲縮小アルゴリズムによって構築された経路情報から、直接送

信できる部分を求めることができればよい。しかし、直接送信できる部分を、すべて直接送信するのでは縮小処理が無駄となる。よって、直接送信すべき部分を求めることが必要である。

5 まとめと今後の課題

本論文では、送信電力制御により送信信号の到達範囲を縮小することで、競合の発生を回避し、通信遅延を短縮する手法を提案した。また、シミュレーションによって、提案手法を評価した。シミュレーション結果から、提案手法には交差によるループを発生させる問題点があることが明らかとなった。そこで、今後はループを発生させない手法を検討する。

参考文献

- [1] "Wireless LAN Medium Access control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications," Standard IEEE 802.11 (1997).
- [2] "Radio Equipment and Systems(RES); HIPERLAN," ETSI Functional Specifications (1995).
- [3] Chang, J.-H., Tassiulas, L., "Energy Conserving Routing in Wireless Ad-hoc Networks," Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000, pp. 22-31 (2000).
- [4] Corson, M.S., Macker, J., "Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations," RFC 2501 (1999).
- [5] David, B., David, A., Hu, Y.-C., Jetcheva, J.G., "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-04.txt (2000).
- [6] Perkins, C.E., Royer, E.M., "Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing," Proceedings of the IEEE 2nd Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp. 90-100 (1999).
- [7] Ramanathan, R., Rosales-Hain, R., "Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment," Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000, pp. 404-413 (2000).
- [8] Stojmenovic, I., Lin, X., "Power aware localized routing in wireless networks," Proceedings of IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, pp. 371-376 (2000).
- [9] Tseng, Y.C., Wu, S.L., Lin, C.Y., Sheu, J.P., "A Multi-Channel MAC Protocol with Power Control for Multi-Hop Mobile Ad Hoc Networks," Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, pp. 419-424 (2001).
- [10] Singh, S., Raghavendra, C.S., "PAMAS - Power Aware Multi-Access protocol with Signalling for Ad Hoc Networks," ACM Computer Communication Review, Vol. 28, No. 3, pp. 5-26 (1998).
- [11] 佐川, 神林, 桧垣, "アドホックネットワークにおけるループ型ルーティングプロトコル," 第9回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 157-162 (2001).
- [12] 佐川, 桧垣, "ループ経路接合によるアドホックルーティングプロトコル (C-LBSR)," 情報処理学会第64回全国大会 (2001).

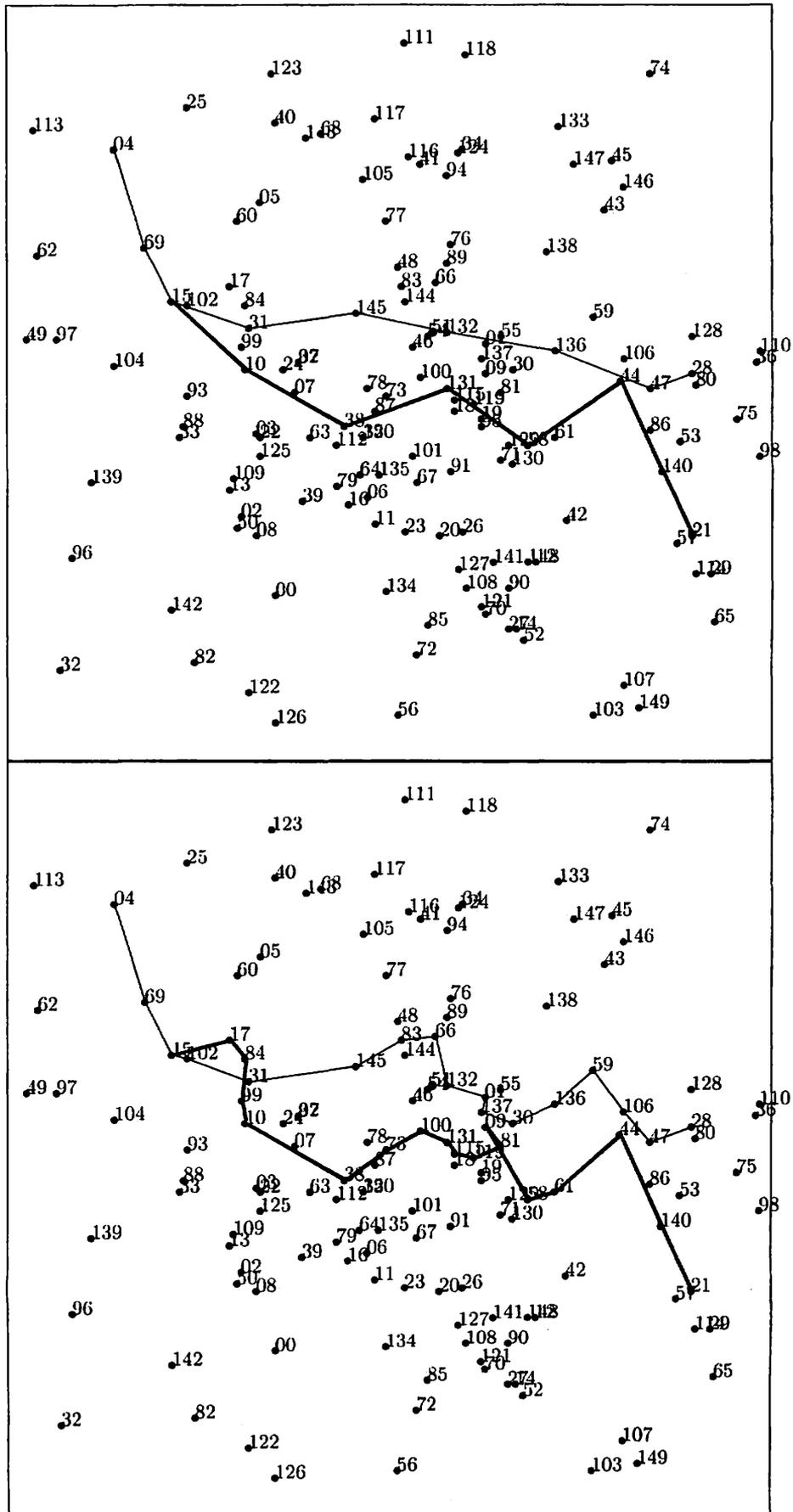


図 11: シミュレーション結果 (上: DSR, 下: 提案手法)