

[招待講演] アドホックネットワークルーティング技術の研究動向とスケーラブルグループメンバー確認技術の研究開発

角田 良明†

† 広島市立大学情報科学部 〒 731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

E-mail: †kakuda@ce.hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 本稿では、アドホックネットワークにおける代表的なルーティング技術を説明した後、主にこの技術に基づいて推進しているスケーラブルグループメンバー確認技術の研究開発を紹介する。

キーワード アドホックネットワーク, ルーティング

Research Trend on Ad Hoc Network Routing Technologies and Research and Development on Scalable Technologies for Confirming Group Members

Yoshiaki KAKUDA†

† Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University Oozuka-Higashi 3-4-1, Asaminami-ku, Hiroshima, 731-3194 Japan

E-mail: †kakuda@ce.hiroshima-cu.ac.jp

Abstract This paper describes typical routing technologies for ad hoc networks and introduces research and development on scalable technologies for confirming group members mainly based on the routing technologies.

Key words Ad hoc network, Routing

1. ま え が き

アドホックネットワークとは、基地局に依存しない、中継機能を持つノードの集合で構成される自律分散型の無線ネットワークを言う。アドホックネットワークでは、ノード自体が交換機の機能を持っているため、ユーザは自由に移動することが出来る。遠くに離れたユーザと通話するときは、通話相手の途中にいるユーザを経由することにより行われる。

アドホックネットワークはその特性により、有線網に依存した情報交換が困難な状況で使用される。例えば、災害時対応がそれに当たる。有線網や基地局を介するネットワークでは、大規模な震災などがあると、固定装置が故障し、連絡手段が途切れてしまうことが多々ある。しかし、アドホックネットワーク環境があれば、媒体が破壊されることがないので、電波が届く範囲なら通信を行うことが可能になり、被災地などの状況をすぐに判断することが出来る。

将来、ネットワークの無線化や家庭電気製品の IP 付属が進めば、汎用計算機や家庭電気製品もアドホックネットワークの一員となりうる。モバイルネットワークが身近になることで、家庭内やオフィス内での LAN にもアドホックネットワークが

導入される展望もある。

2. 節で代表的なルーティング技術を説明する。3. 節でスケーラブルグループメンバー確認技術の研究開発を紹介する。

2. ルーティング技術

パケットを転送するノード間の経路を決定することをルーティングと呼ぶ。アドホックネットワークにおいて、ルーティングは極めて重要な技術である。ルーティングのためのアルゴリズムを単にルーティングアルゴリズムと呼ぶ。ルーティングアルゴリズムは、経路の生成・維持・消滅によって構成される。ルーティングアルゴリズムには、大きく分けてテーブル駆動型・オンデマンド型・ハイブリッド型の三つが存在する。

2.1 テーブル駆動型

テーブル駆動型は、proactive 型とも呼ばれる。テーブル駆動型の主な特徴は、ネットワーク中の各ノードがルーティングテーブルを持っていることである。図 1 に示すように、送信元 a が送信したデータパケットは、中間ノード (c, e, i) の持つルーティングテーブルに基づいて宛先 k に転送される。ルーティングテーブルには、ネットワーク中の全てのノードごとに、最終的な宛先ノードの ID、そのノードへ送るために次に転送すべ

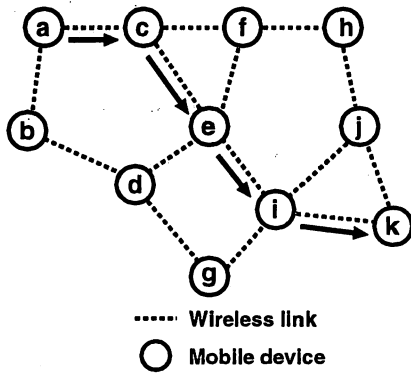


図 1 テーブル駆動型ルーティング

Fig.1 Table driven routing

きノードの ID, 最終的な宛先ノードまでのホップ数などの情報が記入されている。このルーティングテーブルを作成するためには、各ノードは定期的に制御パケットを隣接しているノードと交換する必要がある。ルーティングテーブルを常に保持しているため、パケットの送信要求が発生するとすぐに、その宛先ヘデータパケットを転送することが可能である。

しかしながら、ノード数の増加に伴ってルーティングテーブルが大きくなってしまふことや、ノードの移動によるネットワークトポロジの頻繁な変化により、ルーティングテーブルを作成・更新するための制御パケットの交換頻度が高くなってしまふので、ノードに非常に大きな負荷を与えてしまふといった問題点がある。

このテーブル駆動型ルーティングとして、OLSR [1] [2], TBRPF [3] などがある。それらの簡単な説明を以下で行う。

(a) **OLSR (Optimized Link State Routing)** OLSR は、周期的にトポロジ情報をネットワーク内の他のノードと交換する。OLSR の特徴は、トポロジ情報をネットワーク内の全ノードに伝えるための「フラッディング (flooding)」を効率良く行うためのプロトコルである MPR (MultiPoint Relays) にある。MPR では、定期的に隣接ノード情報などを含むパケットを送出し、結果、2 ホップ先までのノード情報を知ることが出来る。その情報から、すべての 2 ホップ先のノードにパケットを転送可能な最小数の隣接ノードの集合である、MPR 集合を決定する。この MPR 集合に含まれるノードのみがトポロジ情報を転送することによって、発生するトラフィック量を削減出来る。

(b) **TBRPF (Topology Broadcast based on Reverse Path Forwarding)** TBRPF は隣接ノード探索モジュールとルーティングモジュールの二つから構成される。隣接ノード探索モジュールでは、変更のあった隣接ノード情報のみを報告する差分 HELLO メッセージを周期的に送信する。この HELLO メッセージには複数の種類が用意されており、安定した双方向リンクを選び出す仕組みが備わっている。各ノードはすべての到達可能なノードへの最小ホップ経路を提供する、送

信元木 (source tree) を計算する。隣接ノードへは、その送信元木全体ではなく、その一部のみを隣接通知することでオーバーヘッドを削減している。トポロジ情報は周期的だけでなくリンクの変更があった場合にも送信され、トポロジの変化にすばやく対応する。

2.2 オンデマンド型

オンデマンド型は、reactive 型とも呼ばれる。オンデマンド型の主な特徴は、通信要求が発生すると、送信元ノードと宛先ノード間のルーティングを行うことである。送信元において、通信要求発生時に、ネットワーク中のどこかに存在する宛先を探索し、これらの二点間でのルートを作成した後に、送信元から宛先へパケットを転送する。送信元 a から宛先 k までパケットを転送する手順を、図 2 で説明する。図 2A) で示されるように、まず送信元 a は宛先 k を探索するための要求メッセージをブロードキャストする。k が a からの要求メッセージを受信すると、そのメッセージが転送された経路の逆を辿って応答メッセージを送信する (図 2B))。a は k からの応答メッセージを受信することで、k の存在が確認出来る。a から送信されるデータパケットは、応答メッセージが転送されてきた中間ノードを逆に辿ることで転送される。

オンデマンド型では、通信要求が発生するまでルーティングテーブル作成の制御メッセージ交換を行わないので、テーブル駆動型と比較すると、通信要求が発生していない間の各ノードの負荷は非常に小さい。

しかしながら、通信要求が発生してから経路を作成するので、宛先への経路発見までに時間を費やしてしまう。これは、ネットワークサイズが大きくなるほど、この経路発見のために多くの時間を必要とする可能性がある。

このオンデマンド型ルーティングとして、DSR [4], AODV [5] [6], TORA [7] などがある。それらの簡単な説明を以下で行う。

(a) **DSR (Dynamic Source Routing)** DSR はその名前からも分かるように、ソースルーティング (始点経路制御) が基本方式となっている。ソースルーティングとは、データを送出するノードにおいて宛先までの経路を決定し、中継ノードがその経路にしたがって順次宛先までデータを転送する方式である。DSR は二つのフェーズ、経路探索と経路維持から構成される。宛先への経路が存在しない場合には、経路要求パケットをブロードキャストすることで経路探索を開始する。ルート要求パケットを受信したノードは、宛先へのルートをすでに知っているかを確認する。もし知らないのであれば、自分のアドレスを経路要求パケットに付け加え、パケットを転送する。ただし、受信した経路要求パケットにすでに自分のアドレスが存在する場合は、パケットを破棄する。経路要求パケットが宛先ノード自身、もしくは、宛先への有効な経路を経路キャッシュ内に持つ中間ノードに到達した場合に、経路応答パケットを生成し、経路要求パケットが転送された経路の逆を辿って送信元へ送り返す。通信リンクに致命的な問題が発生した際は、経路エラーパケットが生成され送信元へ返される。

(b) **AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector routing)** AODV は、DSR とは異なり、ホップバイホップ経

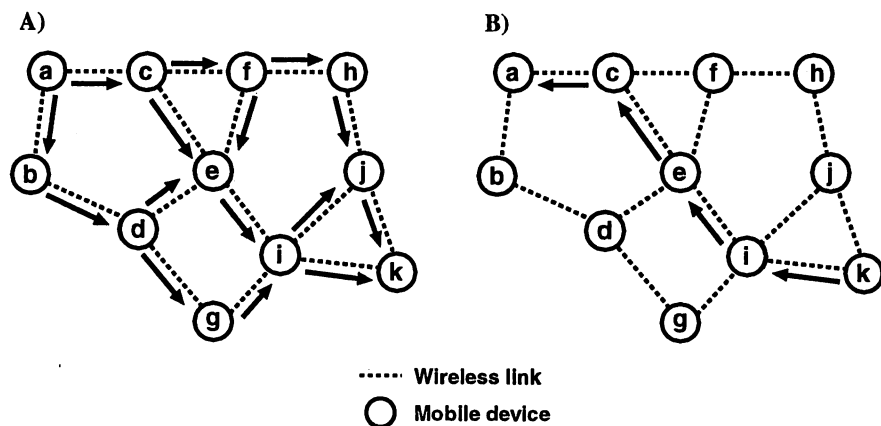


図 2 オンデマンド型ルーティング

Fig. 2 On demand routing

路制御手法を用いており、各ノードにおいて直接通信可能な次の転送先の経路を決定する。新しい宛先への経路が必要になった場合に、送信元からルート要求メッセージ (RREQ) が送信され、RREQを受信したノードは、その送信者である隣接ノードのアドレスをルーティングテーブルに記録して逆経路を形成する。そして、宛先ノード自身、もしくは、宛先ノードへの経路を保持するノードが受信するまでメッセージを転送する。次にそれらのノードは、経路応答メッセージ (RREP) を送信元へと送信する。RREPはRREQによって作成された経路をさかのぼって転送され、その際にRREPを受信したノードは正方向の経路を作成する。リンクの切断を検知したノードは、送信元ノードへ経路エラーメッセージ (RERR) を送出し、それによって各ノードが経路の無効を知ることが出来る。

2.3 ハイブリッド型

ハイブリッド型とは、テーブル駆動型とオンデマンド型の二つの要素を併せ持った方式である。ZRP [8] [9] などがこれに当たる。ノードは、自分自身の近くにいるノードについてはそれらへのルーティングテーブルを持ち、テーブル駆動型でルーティングを行う。一方、遠くにいるノードについてはオンデマンド型でルーティングを行う。

図 3 A) を使って説明する。ノードは、自分自身からのホップ数が定数 i 以下のノードまでを、近くにいるノードとして認識しているとする。ノード b から見て、ノード a と d は b の近くのノードである。b が f へのルーティングを行うときに、b の全ての i ホップ先のノード a, d に対して要求メッセージを送信する。次に、a から見て i ホップ先のノードである c, e に対してメッセージを送信する。c は、f が存在することをルーティングテーブルにより知っているため、c と c から i ホップ以内に存在する周辺のノードのルーティングテーブルに基づいて、f までメッセージを転送する。要求メッセージを受信した f は、b からの要求メッセージの逆を辿って応答メッセージを転送する (図 3 B))。転送後は、オンデマンド型と同じ方式で b と f の間のルーティングが行われる。

3. グループメンバー確認技術

総務省情報通信研究開発推進制度地域情報通信技術振興型 (SCOPE-C) 研究開発として「モバイルアドホックネットワークにおけるスケーラブルグループメンバー確認技術の研究開発」を平成 17 年度～平成 19 年度の予定で推進している。本研究開発には、広島市立大学、独立行政法人産業技術総合研究所情報技術研究部門、KDDI (株)、中国電力 (株) エネルギー総合研究所、中電技術コンサルタント (株) が参加している。

本研究開発の概要は次の通りである。グループ活動においてグループメンバーの安否等の行動状況や状態を確認することはグループ活動を保証するために基本的かつ重要な機能である。しかしながら、メンバーが動き回るほど、また、メンバー総数が多くなるほど、それを実現することは困難になっていく。本研究開発では、まず、スケーラビリティがあり、移動速度の変化に適応する、リアルタイム通信、ルーティング、サービス発見等のモバイルアドホックネットワーク技術ならびにグループメンバー確認技術を開拓する。次に、地域性を考慮して、これらの技術を応用して、非常時における携帯電話に依存しない通信手段、学校登下校時の子どもの見守り、新広島市民球場 IT 化等を実現するグループメンバー確認システムを開発し、安心安全な地域社会の確立および文化経済の振興に貢献する。

以下に、平成 17 年度の要素技術の幾つかの研究成果について紹介する。また、今後の目標・計画について述べる。詳しくは、<http://www.pe.ce.hiroshima-cu.ac.jp/SCOPE-C> をご覧下さい。

3.1 アドホックネットワークテストベッドフレームワークの開発

スケーラビリティがあり、移動速度の変化に適応するルーティングとして、自律分散クラスタリング [10] に基づく (ユニキャスト/マルチキャスト) 階層ルーティング [11] [12] を考案し、ns-2 シミュレータを用いたシミュレーション実験により、その有効性を検証した。また、実環境におけるフィールド実

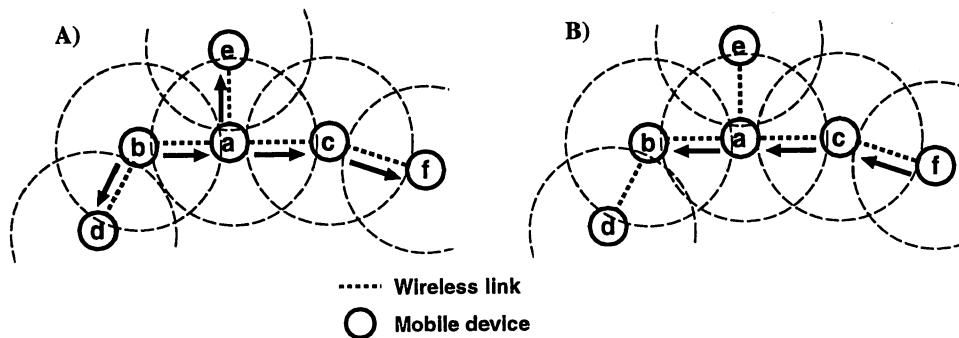


図3 ハイブリッド型

Fig.3 Hybrid routing

験を行うため、アドホックネットワークテストベッドフレームワークを開発し、代表的なルーティング AODV 等を実装した。また、アドホックネットワークソフトウェアの試験環境システムも開発した。現在、自律分散クラスタリングならびにこれに基づく階層ルーティングプロトコルを実装中である。以上により、スケーラビリティがあり、移動速度の変化に適応する基本的ルーティング技術は得られている。

(1) AdHocEngine フレームワーク

AdHocEngine は、アプリケーションにアドホックネットワーク上でのマルチホップ通信を提供している。また、これは DLL(Dynamic Link Library) として実装している。この AdHocEngine を使用することで、他のノードとの通信、及びノード間通信の際のバケットの中継が可能となる。AdHocEngine は図 4 に示すようなフレームワークで実装している。AdHocEngine の主なレイヤの説明を以下に記す。

(a) AdHocCtrl: データグラム型の通信機能、バケット中継機能などを、AdHocProtocol, AdHocDevice を管理しながら行う。バケットの送信では、AdHocRouting からの情報を元に次ホップノードを選択し、送信する。

(b) AdHocTransport: アプリケーションに対して、データ通信のインタフェースを提供する。AdHocCtrl に対して複数のプロトコルを設定することが可能である。

(c) AdHocRouting: AdHocCtrl にルーティング情報を提供する。抽象クラスとして定義されているため、このクラスを継承することにより、様々なルーティングアルゴリズムが実装できる。

(d) AdHocDevice: 無線 LAN(IEEE802.11b) インタフェースを提供し、隣接するノード同士のデータの送受信を実装しているクラス。今回は Winsock(UDP / IP) を用いる。

(2) 自律分散クラスタリングに基づく階層ルーティングの実装

自律分散クラスタリングを行うためのクラスとして Hierarchy クラスを実装する。この Hierarchy クラスはルーティングプロトコルの為のスーパークラスである AdHocRouting クラスを

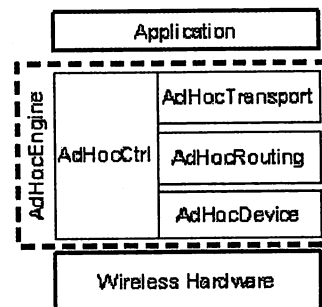


図4 AdHocEngine フレームワーク

Fig.4 AdHocEngine framework

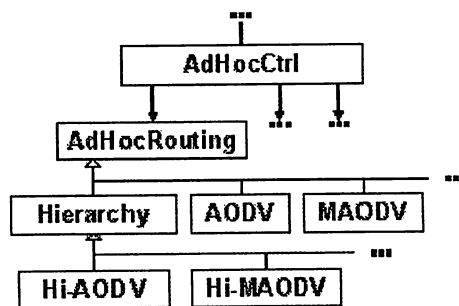


図5 AdHocRouting 周辺のクラス図

Fig.5 Class diagrams on AdHocRouting

継承することにより実装される(図5)。現在は、この Hierarchy クラスのコーディングと動作確認を行っている。

3.2 携帯電話アドホックネットワーク

階層型のアドホックネットワークルーティング技術(Hi-AODV)の携帯電話への実装方法を検討するとともに、Hi-AODVの有効性の評価を行うシステム開発を実施した。詳細な比較検討実験は、次年度早々に実施する予定である。携帯電話へのアドホックネットワークの実装は、図6のような構成で

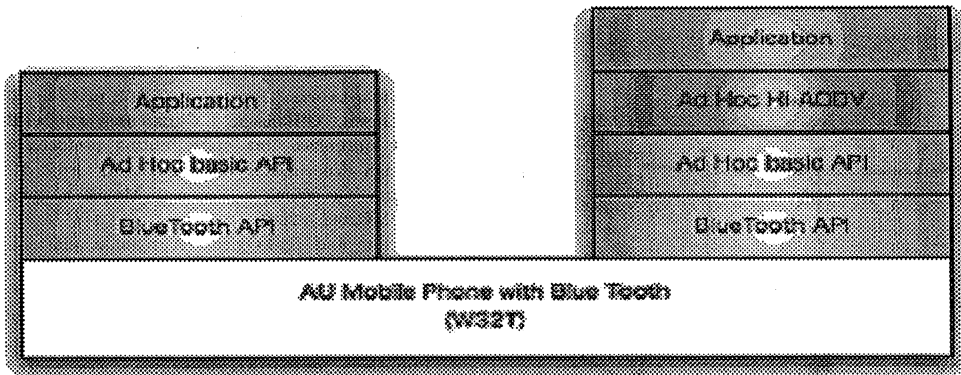


図 6 携帯電話におけるアドホックネットワークの実装構成

Fig. 6 Ad hoc network consisting of mobile phones

行っている。

この上で、(1) 携帯電話数のカウント、(2) 対戦オセロゲーム、(3) 写真情報検索を実装し、階層型アドホックネットワークの有効性を、アプリケーションの動作の観点から評価している。

3.3 歩行者ITS

今回開発するアドホックネットワークを歩行者ITSへ適用し、実用化することについて研究する。

- 歩行者ITSのシステム構成の検討
- 歩行者ITS用基地局、受信機の仕様検討

2.4GHz帯の電波を用いて歩行者を誘導する歩行者ITSのシステム構成を検討した上で、歩行者ITS用基地局RF部、受信機RF部の仕様を検討し、仕様書として取りまとめた。(目標達成)そして、当該仕様書をもとに歩行者ITS用基地局RF部、受信機RF部の設計(設計図面作成は当社では対応できないため外注した)を行った。また、本システムに使用するZigBeeモジュールについて、Chipcon、NEC製のものを購入し、その性能を確認した。

3.4 リアルタイム通信

有線のイーサネットでのリアルタイム通信方式を考案して、Linux2.4カーネルのネットワークスタックに小規模な修正を行い、データリンク層でのフロー制御機能とパケットの優先度制御機能を実装し評価を行った。その結果、準ロスレスのパケット伝送、優先度に従った良好な帯域制御性、及び高優先度パケットの遅延低減を実現する事が出来た。現在、無線イーサネットでの実現プロトコルを開発中である。有線では全二重通信が行えるが、無線では半二重通信であり、これに対応できる優先度制御が必要となる。このため、データフレームによる優先度伝達の他、RTS、CTS、ACKなどのフレームを拡張し、その時点で通信が許可される優先度を随時知らせる方式の検討を行っている。この優先度の伝達手段が確立すれば、無線通信での優先度制御のみならず、同一の方式で優先度制御が可能な無線と有線が実現できるため、シームレスな制御が可能となる。無線イーサネットへの実装はこれからであるが、イーサネットの上

位層の開発は完了している。

3.5 今後の目標・計画

モバイルアドホックネットワーク技術においては、実環境へ適用させるために進めている各種要素技術、例えば、消費電力等を考慮した実用的なリアルタイム通信技術、ルーティング技術等を開拓するとともに、これらの技術に基づいて携帯電話アドホックネットワーク、歩行者ITSを構築する。また、モバイルアドホックネットワーク技術ならびにグループメンバー確認技術の応用として子どもの見守り、新広島市民球場のIT化のためのプロトタイプシステムを開発し、地域社会における安心安全の確立と文化経済の振興に貢献する。

広島市では、昨年11月に矢野西小学校の児童が下校途中に殺害されるという大変痛ましい事件が起こっており、このような痛ましい事件が二度と起こらないよう、不退転の決意で子どもの安全確保に努めると広島市長は表明している。この流れのなかで、広島市助役および広島市産業振興センター幹部から研究代表者に相談がなされた。その結果、本研究開発において登下校時における子どもの見守りシステムの開発に協力することになった。人通りの少ない通学路に沿って通学する場合、通学路を逸れてしまう場合、それぞれに適用できる子どもの見守りシステムのプロトタイプを開発する(図7)。前者には歩行者ITS用基地局と受信機、後者には携帯電話アドホックネットワークを適用することを考えている。これにより、本研究開発で推進しているグループメンバー確認技術が子どもの見守りに応用することができる。

また、新広島市民球場が2008年度の完成を目指して設計が進められている。昨年11月に募集された新球場の意見募集に対して研究代表者が市民として意見を応募するとともに、今年1月13日に開催された電波利用促進フォーラム'06.01の講演において新広島市民球場のIT化にモバイルアドホックネットワーク技術ならびにグループメンバー確認技術が活用できることを示している。本研究開発では、入場者数の自動確認、非常時のグループ化しての避難誘導等を行うプロトタイプシステム

- [1] P.Jacquet, P.Muhlethaler, T.Clausen, A.Laouiti, A.Qayyum and L.Viennot, "Optimized link state routing protocol for ad hoc networks," Proc. INMIC2001, pp.62-68, 2001.
- [2] T.Clausen, G.Hansen, L.Christensen and G.Behrmann, "The optimized link state routing protocol, evaluation through experiments and simulation," Proc. IEEE Symposium on Wireless Personal Mobile Communications (WPMC2001), 2001.
- [3] B.Bellur and R.G.Ogier, "A reliable, efficient topology broadcast protocol for dynamic networks," Proc. IEEE INFOCOM1999, pp.178-186, 1999.
- [4] D.Johnson and D.A.Maltz, "Dynamic source routing in ad hoc wireless network," Mobile Computing, Kluwer Academic Publishers, pp.153-181, 1996.
- [5] C.E.Perkins and E.M.Royer, "Ad hoc on-demand distance vector routing," Proc. 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp.90-100, 1999.
- [6] E.M.Royer and C.E.Perkins, "An implementation study of the aodv routing protocol," Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp.1003-1008, 2000.
- [7] V.D.Park and M.S.Corson, "A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks," Proc. IEEE INFOCOM'97, pp.1405-1413, 1997.
- [8] Z.J.Haas and M.R.Pearlman, "The performance of query control schemes for the zone routing protocol," ACM/IEEE Transactions on Networking, Vol.9, No.4, pp.427-438, 2000.
- [9] M.R.Pearlman and Z.J.Haas, "Determining the optimal configuration for the zone routing protocol," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.17, No.8, pp.1395-1414, 1999.
- [10] T.Ohta, S.Inoue, Y.Kakuda and K.Ishida, "An adaptive multihop clustering scheme for ad hoc networks with high mobility," IEICE Transactions on Fundamentals, Vol.E86-A, No.7, pp.1689-1697, 2003.
- [11] T.Ohta, M.Fujimoto, R.Oda and Y.Kakuda, "A class of hierarchical routing protocols based on autonomous clustering for large mobile ad hoc networks," IEICE Transactions on Communications, Vol.E87-B, No.9, 2004.
- [12] T.Ohta, Y.Kubo and Y.Kakuda, "Hi-MAODV: A hierarchical multicast routing protocol for large mobile ad hoc networks," Proc. First International Workshop on Network Architecture and Service Models (NASM2005), pp.100-105, 2005.

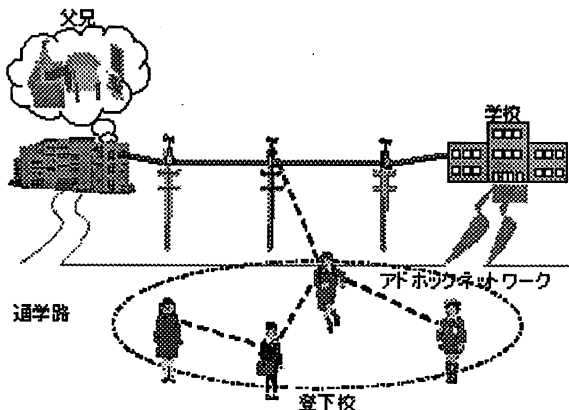


図 7 子どもの見守り

Fig. 7 Care for children

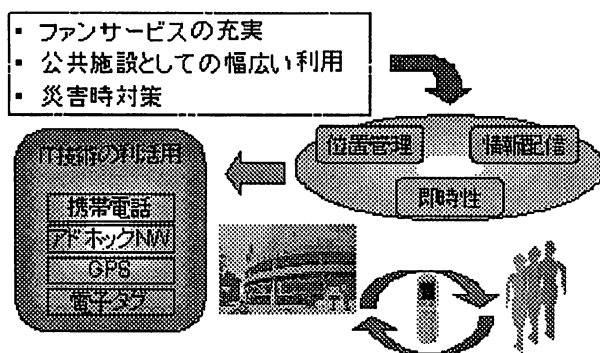


図 8 新広島市民球場の IT 化

Fig. 8 IT in new Hiroshima Baseball Stadium

の開発も行いたいと考えている (図 8)。広島市民球場は広島のシンボルであり、新球場の IT 化は地域の文化経済を振興するために重要な役割を果たすことが期待できる。

4. ま と め

本稿では、アドホックネットワークの代表的なルーティング技術の研究動向と主にその技術に基づいたスケーラブルグループメンバー確認技術の研究開発を紹介した。今後、本研究開発を地域の安心安全の確立と文化経済の振興に役立てていきたいと考えている。