

アドホックネットワークを用いた 消防無線通信システムに関する研究

王 康[†] 趙 キョクヒョウ[†] 門倉 博之^{††} 加藤 聰彦[‡] 浦野 義頼[†]

[†]早稲田大学国際情報通信研究科 〒367-0035 埼玉県本庄市西富田大久保山 1011

[‡]電気通信大学 〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1

^{††}東急総合研究所 〒150-0043 東京都渋谷区道玄坂 1-10-7 五島育英会ビル 2階

E-mail: [†]kangwang_waseda@akane.waseda.jp, xb_zhao@hotmail.com, urano@waseda.jp

[‡]kato@net.is.uec.ac.jp ^{††}kadokura@triinc.co.jp

あらまし 消防活動を支援するためのネットワークの IP 化により、通信の多様化に対応することが可能になってきている。現在消防研究所で開発された FiReCOS システムでは、PHS を用いた多対多の音声通信を実現しているが、このシステムは、回線制御装置を用いた集中型のシステムであり、回線制御装置の障害に弱い、動画に対応できないなどの問題がある。そこで、マルチキャスト通信を用いて集中ノードを持たない完全な分散型で、消防活動支援用の多対多マルチキャスト無線通信システムを開発する必要がある。本稿では、消防活動を支援するために、アドホックネットワークを用いた消防無線通信システムの要素技術を検討し、さらに、消防通信システムに新たなネットワーククラスタリングアルゴリズムを提案した。その提案についてシミュレーションを行い、消防通信システムのベースとなるネットワーククラスタリングの性能を評価した。

キーワード 消防無線通信 アドホックネットワーク クラスタリング マルチキャストルーティングプロトコル

Research on Firefighting Wireless Communication System using Adhoc Network

Kang WANG[†] Xibiao ZHAO[†] Hiroyuki KADOKURA^{††}

Toshihiko KATO[‡] Yoshiyori URANO[†]

[†]Graduate School of Global Information and Telecommunication Studies, Waseda University

1011 Okuboyama Nishi-Tomida Honjo-shi Saitama 367-0035 Japan

[‡]Graduate School of Information Systems, University of Electro-Communications

1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

^{††}TOKYU RESEARCH INSTITUTE, INC.

2 Floor, Goshima-Ikuekai Building 1-7-10 Dogenzaka, Shibuya-ku, Tokyo, 150-0043 Japan

E-mail: [†]kangwang_waseda@akane.waseda.jp, xb_zhao@hotmail.com urano@waseda.jp

[‡]kato@net.is.uec.ac.jp ^{††}kadokura@triinc.co.jp

Abstract The IP network brings the diversity of communication methods in firefighting network to the reality. The existing FiReCOS system developed by the Firefighting Research Institute is based on the PHS system and realizes the communication of multi-points to multi-points. However, due to using the central controlling method, this system is very limited to its troubleshooting capabilities for those closed-circuit controlling devices, and cannot deal with some problems such as video as well. Therefore, it is necessary to develop a fully distributed wireless communication system for the firefighting rescue network. Based on the adhoc network methodology, this paper compared and discussed the key technologies to build a wireless communication system for firefighting network, and proposed a new clustering method which is suitable in the firefighting scenario. The result is evaluated by Network Simulator2 shows good improvement in performance.

Keyword Firefighting Wireless Communication Adhoc Network Clustering Multicast Routing Protocol

1. はじめに

阪神淡路大震災発生時に、携帯無線機を用いた消防無線通信システムにおいて、多くの部隊が、限られた周波数の中で同時に共通波を使用したため混信し、通信システムとして機能しなくなった。これを契機として、平成14年より、消防庁からの補助事業である「消防活動が困難な空間における消防活動支援情報システムの開発」プロジェクト[1]が立ち上がった。隊員同士の連絡方法、本部から隊員への命令伝達など、音声を含めた統合的な通信システム「FiReCOS」[2]がシステムの一部として研究開発されている。

しかし、これまでの研究開発では、消防活動における音声通信や映像通信の同報機能の必要性があまり認識されていない。消防活動では、消防車両一台に乗り込む小隊を単位に行動する。小隊内では、隊員の音声通信を他の隊員すべてが受信する必要がある場合が多い。また小隊間・指揮所・本部の間で音声や映像情報などを交換する同報通信も必要となる。このような同報通信をIP ベースで行うためには、消防活動支援ネットワークにおいてマルチキャスト通信を実現する必要がある。

FiReCOSでは、通信チャンネルが多く、通信が途切れないなどの特徴があるが、基本的に用いられる内線モードは集中制御システムであるため、回線制御装置の障害に弱い。また、グループ間の通信が考慮されていない、ユーザー数が制限されていることなどの問題があるため、実用化することが難しいと考えられる。このため、FiReCOS内線通信モードの代わりに、新たな消防無線通信システムを検討する必要がある。

本論文では、アドホックネットワークをベースにして、消防活動支援する無線通信システムを開発するために必要となる技術を検討した。さらに、消防無線通信ネットワークを効率的に構築するために、新しいネットワーククラスタリングアルゴリズムを提案した。シミュレーションを行い、提案したアルゴリズムを評価した。

2. 要素技術

本章ではアドホックネットワークを用いた消防無線通信システムに必要な要素技術について検討した。

2.1 無線 LAN

近年、様々な無線通信技術は活用されている。IEEE802.11[3]は高速並びに遠距離などのメリットがあるので、消防無線音声通信システムに対して最良な技術と判断した。

IEEE802.11 規格の中で、広く使われているのは、802.11a、b、g 規格である。802.11a と 802.11g はどちらも 54Mbps の速度を実現できるが、802.11b 端末と混

在することにより、802.11g の性能は著しく落ちてしまう。そして、802.11g は 3 つのチャンネルしか持たないため、消防通信システムの展開規模にとって問題となる。

一方、802.11a は 8~24 チャンネルを持つため、チャンネルの再利用は問題とならない。より多くのチャンネルを利用できることから、無線 LAN のアーキテクチャをより単純にできるだけなく、干渉を避けることにより高いネットワーク性能を得ることができる。無線 LAN では、それが持つ本質的な特性から、メディアが共有されるため、多くのユーザーが限られた量の帯域幅をめぐって競合することになり、ユーザーが得る通信品質が低下する。このように、802.11a が利用可能チャンネル数が多いことで、端末間の干渉を有効に避けることができると考えられる。

また、802.11a は 5GHz 帯域を利用するため、遠距離での通信は著しく劣化するが、逆に電波範囲が広ければ広いほど、同じ地域内で同時に通話できる数が少なくなる。そのため、802.11a の電波範囲は狭いが、802.11g より、同じ地域で、同時に音声通信処理できる通話量が極めて多い。さらに、5GHz 帯域の屋外の使用は申請する必要があるため、自由に使える 2.4GHz 帯域より、外部からの影響が少ない。

前述した理由で、消防無線通信システムに対して、IEEE802.11a が最良な規格であることと判断した。

2.2 クラスタリング

ネットワークをいくつかのクラスタに分割することをクラスタリングという[4][5]。ノードは隣接ノードと情報を交換し、クラスタ内における役割りを決める。クラスタ内のノードの位置情報や最適経路の選択など調停機能を果たすノードをクラスタヘッドという。クラスタはクラスタヘッドとオーディナリノードから構成される。アドホックネットワークにおいて、クラスタリングは多数の端末を階層的に効率よく管理、また、周波数等の資源を効率良く割り当てるために用いられる。

クラスタリングアルゴリズムはいくつかの方法があるが、主に使われるのは最小 ID 法(LIDCP)[4][5][7]、最大コネクション次数法(HCCP)[5][7]とモバイルクラスタリング法(MCP)[5][7]である。同じ条件では、MCP は最少のノード変化の処理を行うことができ、さらに、ノードが低速に移動する場合には、MCP を使うクラスタの生存時間(survival time)がもっとも長い。そこで、本論文は MCP に基づき、新しい消防クラスタリングアルゴリズムを提案する。

2.3 アドホックネットワークマルチキャストルーティングプロトコル

これまで、様々なアドホックネットワークマルチキ

キャストルーティングプロトコルが提案された。すべてのマルチキャストルーティングプロトコルは、マルチキャスト配送機構によって分類され、フラディング方式、ツリー方式、メッシュ方式のいずれに分類することができる[6][7]。

フラディング方式は頑健で、高いモビリティを持つネットワークによく適合するが、重複したデータが不必要に転送されるため、帯域が非常に浪費される。

ツリー方式は、送信元ベースのマルチキャストツリー方式とコアベースマルチキャストツリー方式と分類される。代表的なプロトコルは DVMRP[8]と AODV[9]である。送信元ベースのマルチキャストツリー方式には、拡張性の問題がある。送信元ノードとグループの数が増えるようにつれ、マルチキャストツリーを作成し維持するための多くのオーバーヘッドが生じるからである。また、トポロジー情報が前もって必要になる。アドホックネットワークにおいて、しばしば生じるトポロジーの変化は、全体的なオーバーヘッドを増加させるもう一つの重大な原因となる。コアベースマルチキャストツリー方式はトラフィックが共有リンクに集中し、その結果共有リンクの輻そうが生じやすくなることである。加えてマルチキャストパケットは共有ツリーに沿って、最適ではない経路で伝送されることになる。さらに、この方式におけるもっともクリティカルなコンポーネントであるコアノードがコアノードマルチキャストツリー方式の急所となってしまう。さらに、ツリー方式では、ノードの移動によりパスが崩れたとき、ツリーを再構築しなければならない。そのため、データはツリーの再構築できるまで一時的に蓄積されなければならないか、捨てられてしまうという問題がある。

メッシュ方式は、テーブル駆動型とオンデマンド型と分類することができる。代表的なプロトコルは CAMP[6][10]と ODMRP[11]である。CAMP は、メッシュ内のすべての冗長な経路に沿って不要なマルチキャストパケットを転送してしまう問題があり、データ伝送のオーバーヘッドを引き起こす。ODMRP では、ノードグループ情報が維持されている。このため、マルチキャストパケット配送のためにツリーリンク、メッシュリンクと言った隣接ノードとの関係を維持する必要がなくなり、各ノードでの処理が簡略化される。受信したすべてのマルチキャストパケットのうち重複していないものを隣接ノードに対して再度ブロードキャストする。そのため、中継ノードが保持すべき状態は少ない。また、冗長な経路があるため、一番のパスが崩れても、データが目的ノードまで届けられる。そして、ODMRP はユニキャストルーティング能力を持っているという特徴もある。

現在開発中の消防隊員位置特定システムがノードの位置情報などをサポートしている。ODMRP はこれらの情報を用い、パスの崩れる時間を予測し、送信ノードのパスが崩れた直前に新しいパスを選択することができることによって、さらにプロトコルを改良することができると考えられる。

前述した各種のアドホックマルチキャストルーティングプロトコルの比較により、ODMRP が適合であろうと考えられる。しかし、ODMRP に採用された FGMP(Forwarding Group Multicast Protocol)[11]では、FG メンバーのみ、データをブロードキャストできるため、FG メンバーの選択と管理がネットワークの性能に大きく影響を与えるので、FG をなるべく小さくしなければならない。

3. ネットワークの構築手法

3.1 消防無線通信システムの要件定義

限られた地域に数多くの消防士が存在し、すべての消防士がグループ(小隊という)単位で行動を行う。各小隊のリーダーが小隊長である[2][12]。火災などの現場ごとに、現地指揮本部もしくは前進指揮所が設置される。

以上のことから、確保すべき通信は以下のように分けられる。

- 各小隊内での通信
- 現地指揮本部もしくは前進指揮所と各小隊長との間の通信
- 場合によっては、活動している現場にいる隊員すべてへの通信

3.2 MCP をベースとした消防用クラスタリング(Firefighting Cluster Protocol)の提案

消防活動の際に、消防隊員から構成されたネットワークは、各小隊長を中心とした、通信を支援する。そこで、本提案では、消防隊を小隊長群と隊員群に分け、ネットワークを次のように定義する。

すべてのノードは唯一な ID 番号を指定され、クラスタヘッド(小隊長)群とオーディナリノード(隊員)群に分けられる。それぞれの所属は消防隊の編成により予め決められているため、ある小隊長 ID を N とし、その小隊に属する隊員 ID を $N1, N2, \dots$ とすると、

クラスタヘッド群 $N = \{1, 2, 3, \dots, N\}$

オーディナリノード群 $N_m = \{N1, N2, N3, \dots, N_m\}$

すべてのノードがランダム順番で一回自 ID などの情報をブロードキャストで広告し、隣接ノードの情報を収集する。収集した隣接ノードの ID 番号により、ネットワークのクラスタリングを行う。

- ① ID 番号 i が $i \in N$ である場合は、クラスタヘッドになり、新しいクラスタを宣言する。クラスタ番号を ID 番号 i にする。そうでなければ、②を实

行する。

- ② ID 番号 i が $i \in N_m$ となり、さらに隣接ノードの中に、 $j \in N$ が存在する場合には、その隣接ノードのクラスタに加入する。なお、複数の隣接ノードが N に属する場合は、 i のリーダーであるクラスタヘッドノードが存在する場合は、そのクラスタに加入する。そうでなければ、先に宣言したクラスタに加入する。そうでなければ、③を実行する。
- ③ ID 番号 i の隣接ノードの中に、 $j \in N$ が存在しない、加えて i が一番小さいである場合は新しいクラスタを宣言する。クラスタ番号を ID 番号 i にする。そうでなければ、④を実行する。
- ④ ID 番号 i より小さい隣接ノードが存在する場合は、それらのノードの宣言をまち、そのクラスタに加入する。ただし、より ID 番号が小さいノードは全部他のクラスタに加入することを宣言した場合は、新しいクラスタを宣言する。番号を自分の ID 番号にする。
- ⑤ 複数の隣接ノードが N に属するノードをゲートウェイにする。

消防活動する地域に限られるため、各クラスタの電波範囲は重なることが多いと考えられる。具体的なイメージは図1のようになる。ノード1、2は小隊長であり、ノード11、12、13、14とノード21、22、23、24はそれぞれの隊員となる。

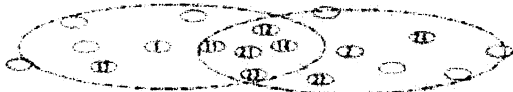


図1. 消防隊員分布イメージ図

そこで、MCPにより、クラスタリングは図2ようになる。先に宣言されたクラスタに加入することにより、同じ小隊に属する隊員が違うクラスタに分けられてしまう。



図2. MCPによりネットワーククラスタリング

しかし、本提案では、同じ小隊に属するノードを同じクラスタに分けるため、より効率的な小隊内同報通信を行うことができると考えられる。FCPにより、クラスタリングのイメージ図は次のようになる。

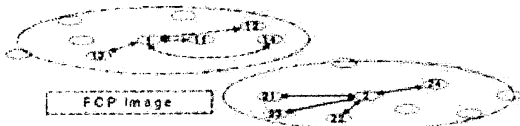


図3. FCPによりネットワーククラスタリング

クラスタの維持と管理

ノードの加入：ノード i がクラスタヘッド群ノードである場合は、ブロードキャストで隣接ノード情報を収集して、新しいクラスタを宣言する。なお、隣接ノードの中に、同じグループのオーディナリノードが存在する場合は、それらのノードがクラスタを変更し、クラスタ i に加入する。でなければ、②、③、④と⑤を実行する。

ノードの移動によるクラスタの変更：クラスタヘッドと同じ小隊のノードが加入したクラスタの電波範囲から離れた場合のみ、②、③、④、⑤を実行する。でなければ、隣接ノードの情報を収集し、同じ小隊の小隊長ノードが存在する場合は、クラスタを変更する。

3.3 多チャンネルを利用したクラスタ間の通信

クラスタ内でノードが同じチャンネルを使い、それぞれのクラスタが異なるチャンネルを使うため、隣接クラスタ間の通信にはゲートウェイが必要となる。クラスタ間の通信が発生したとき、ゲートウェイは隣接ノードが属するクラスタのチャンネルを使って、データの中継する。しかし、ほとんどのノードが一つの受信機しかを持たないため、ゲートウェイとなるノードが同時に複数のチャンネルを監視することができない。IGC プロトコル[13]はこの問題を解決することができる。IGC プロトコルでは、ゲートウェイがあるチャンネルで待機するとき、このチャンネルでの受信という制御メッセージを送信する。そして、このチャンネルから離れたときも、離れるという制御メッセージを送信する。これで各のチャンネルからきたデータが失うことを避けることができる。次に、IGC プロトコルを簡単に説明する。

二つのクラスタの間に、多数のノードがゲートウェイとして存在するものとする。たとえばノード m と n をゲートウェイとする。図4のように、ノード m がクラスタ1から5までのデータの中継する。ノード n がクラスタ5から1までのデータの中継する。さらに、重要なのは、ノード m がクラスタ5のチャンネルで待機することになると、ノード n がすぐにクラスタ1のチャンネルへ切り替えることである。なぜなら、たとえば、クラスタ1のノードはゲートウェイ m がチャンネルを切り替えたことを知らなくても、ノード n がクラスタ1のチャンネルへ切り替えることにより、クラスタ5にデータを送ることができる。

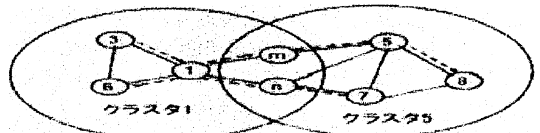


図4.IGCプロトコル

3.3 消防用クラスタリングにより ODMRP の実現

ODMRP はフラッディングに基づいた、アドホックネットワーク向けのマルチキャストルーティングプロトコルである。純粋なフラッディング方式と異なり、ODMRP はネットワーク全体にデータをフラッディングさせることはしない。その代わりに、転送グループ内のみデータをフラッディングし、その後定期的制御メッセージをフラッディングさせて維持している。転送グループは FGMP[11]を導入し、特定のマルチキャストグループにトラフィックを転送するためのアドホックのノードによってマルチキャスト送信ノードから全受信ノードへの経路を少なくとも一つは供給されることが保証される。

しかし、FGMP には、ブロードキャストで送信データを転送するため、FG のノード数により、ネットワークの性能に大きく影響を与える。また、送信ノードから受信ノードまでのホップ数もネットワークスループットに影響を与えるので、送受信ノード間のホップ数もなるべく短くしなければならない。

しかし、すべての隊員が限られた地域に集まり、消防活動を行うため、主に小隊長をクラスタヘッドとして構成されたネットワークでは、クラスタ範囲が重なることが多いと考えられる。前述したクラスタリングアルゴリズムは、なるべく同じ小隊の隊員を同じクラスタに配属するため、小隊内の通信をクラスタ内に抑えることができると考えられる。その結果、ある程度 FG を小さくすることができるため、より帯域を効率的に利用することができる。

4. シミュレーション

4.1 NS-2(Network Simulator 2)

シミュレーションには、NS-2[14][15]を用いる。NS-2 はネットワークの研究を目的としたシミュレーションソフトである。NS-2 は TCP,UDP プロトコルを実装している。また、無線 LAN(IEEE802.11)もサポートしている。本研究に使用したバージョンは ns2.26[15]である。

本シミュレーションは1小隊を5名(うち小隊長1名)とする。10小隊50名でシミュレーションを行う。すべてのメンバーの通信範囲は50mとする。

空間：200m X 200m

ノードの移動速度：最大 2m/s

第二層プロトコル：IEEE802.11

シミュレーション時間：200s

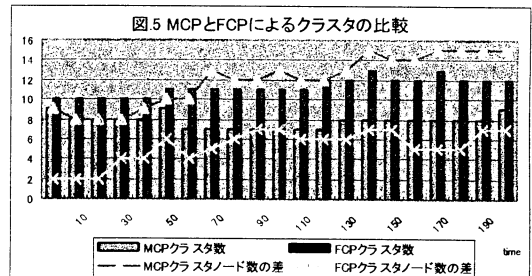
消防隊には、すべての隊員は各小隊長を中心として移動するので、端末の移動は次のように行う。小隊長となるクラスタヘッド群がランダムで200X200の空間に配置される。それぞれの小隊に属するオーディナリノードが小隊長の電波範囲(50X50)にランダムで配置

される。各小隊長ノードの移動先をランダムで決定し、各小隊隊員ノードが、移動先を小隊長移動先の電波範囲内にランダムで決め、同じ速度で、最大2m/sの速度で目的地に移動する。

測定するデータは、クラスタリングの評価に使われるクラスタ数、クラスタの生存率、クラスタの生存時間である。10秒の間隔でデータを取った。今回のシミュレーションでは、本提案による ODMRP 性能の測定までに至っていないが、ODMRP 性能に大きく影響する各 FG 内の送受信ノード間のホップ数を測定した。

5. シミュレーションの結果と考察

図5はMCPとFCPを用いたクラスタ数の比較図である。図5に示したように、各測定時点のクラスタ数は、FCPの方がクラスタ数が多いため、より効率な無線チャンネルの帯域幅の空間再利用ができると考えられる。また、FCPを用いたクラスタノード数の差(最大クラスタノード数と最小クラスタノード数の差)は、MCPより少ない。その結果、よりクラスタノード数を平均化することができ、クラスタヘッドの負荷を分散できる。MCPでは、クラスタノード数は一定の数を超えれば、いくつかのクラスタに分けられるが、頻繁なクラスタの再構成により、オーバヘッドが起ってしまうことになる。



クラスタの生存率とは、タイム $t+s$ のときに、まだ生きているクラスタ数とタイム t のときに生きていたクラスタ数の比率である。クラスタ数の生存率が高ければ高いほど、クラスタの再構成が少なくなる。今回のシミュレーションでは、10秒ごとでデータを取ったため、 s を 10 にした。図6はほとんどの時間に FCP クラスタ生存率が MCP より高いことを示した。さらに、FCP の場合は、クラスタヘッドが事前に指定されるので、すべてのクラスタヘッドの電波範囲から離れたノードのみ、クラスタの再構成を行うため、MCP よりクラスタの再構成が少ない。また、FCP ではクラスタヘッド群が指定されたため、MCP より多くのクラスタが長く生存時間を維持することができる。

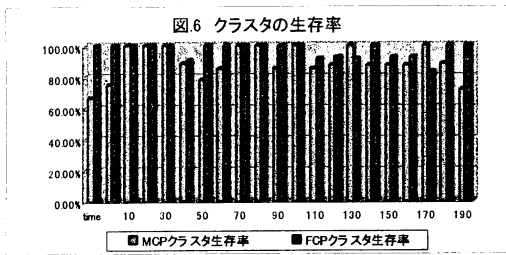
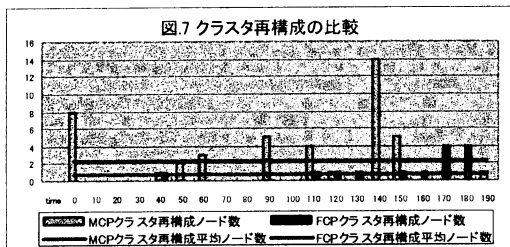
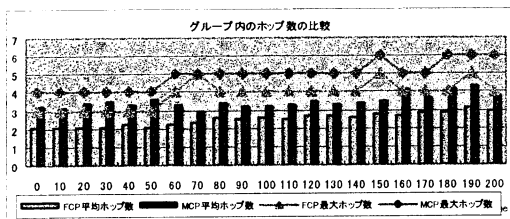


図7はクラスタの再構成により、再構成されたノード数の比較図である。若干FCPの数が多い場合があるが、平均的に、MCPの再構成されたノード数が多い。シミュレーション時間内に、MCPにより再構成されたノードの平均数は2.2であるが、FCPの平均ノード数が0.7であり、より安定なネットワークを構築することができることを示した。



今回のシミュレーションでは、本提案におけるODMRPの性能評価まで至っていないが、ODMRPに大きく影響を与えるFG送受信ノード間のホップ数を測定した。測定した結果(図.7)より、同じ小隊に属する隊員をなるべく小隊長と同じクラスタに配属することにより、小隊内送受信ノード間のホップ数を減らすことができた。



6. まとめ

本論文では、アドホックネットワークをベースにして、消防活動を支援する無線通信システムを開発するために必要となる技術を検討した。さらに、新しいネットワーククラスタリングアルゴリズムを提案して、シミュレーションを行った。シミュレーションの結果により提案したアルゴリズムがより効率かつ安定なネ

ットワークを構築することができることを示した。今後、本提案をベースとなるODMRPの性能評価を行い、適切なルーティングプロトコルの改善案を提案していく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、適切なご指導とご助言を賜りました早稲田大学 GITS 中里秀則教授に深く感謝いたします。また、有益な御討論、並びに、ご助言を頂きました消防研究所の高梨健一さん、GITSの陳湛さん、劉軍さんに感謝いたします。

文献

- [1] 総務省消防庁消防活動が困難な空間における消防活動支援情報システムの開発検討会 消防活動が困難な空間における消防活動支援情報システムの開発報告書 平成16年3月
- [2] 咽喉マイクによる無線通信システムについて http://www.fdma.go.jp/html/new/pdf/150513_hou/si_001.pdf
- [3] 無線LANの規格について http://www.dion.ne.jp/service/bb/musenlan/whats_wl/standard.html
- [4] 石川 英智 アドホックネットワーククラスタリングアルゴリズムに関する研究 北陸先端科学技術大学院大学 修士論文 2003年
- [5] 刘 凯 李 建东 李 维英 移动分布式无线网络中的自适应分群协议 西安电子科技大学学报 pp.311-314 2001年
- [6] C-K.Toh 著,構造計画研究所訳,アドホックモバイルワイヤレスネットワークプロトコルとシステム,共立出版社 2003年5月
- [7] 郑相权 无线自组网技术实用教程 清华大学出版社 2004年6月
- [8] Distance Vector Multicast Routing Protocol(DVMRP) <http://www.networksorcery.com/enp/protocol/dvmrp.htm>
- [9] Ad hoc On Demand Distance Vector routing Protocol (AODV) <http://moment.cs.ucsb.edu/AODV/aodv.htm>
- [10] Core-Assisted Mesh Protocol (CAMP) <http://dl.comsoc.org/cocoon/comsoc/servlets/GetPublication.jsessionid=DF635099CD1BE506482F581F8FBFF0DE?id=139254>
- [11] ODMRP インターネットドラフト日本語訳 <http://www.mizunotomoaki.com/odmrp/001.html>
- [12] 高梨 健一 消防研究所 消防出動に関する調査及び想定
- [13] Chiang C C. Routing in Clustered Multihop, Mobile Wireless Networks With Fading Channel Proc IEEE SICON 97[C],IEEE, pp.197-2111997 New York
- [14] the Network Simulator ns-2 <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [15] NS2 教学手冊 <http://140.116.72.80/~smallko/ns2/ns2.htm>