

アドホックユビキタス通信環境向きデータ駆動ネットワークングシステム

西川 博昭[†] 富安 洋史[†] 青木 一浩^{††} 水野 修^{†††}
 末田 欣子^{†††} チャウ チーオン^{††††} 宇津 圭祐^{†††††} 石井 啓之^{††††††}

Data-Driven Networking System for Ad Hoc and Ubiquitous Communication Environment

Hiroaki NISHIKAWA[†], Hiroshi TOMIYASU[†], Kazuhiro AOKI^{††}, Osamu MIZUNO^{†††},
 Yoshiko SUEDA^{†††}, CheeOnn CHOW^{††††}, Keisuke UTSU^{†††††}, and Hiroshi ISHII^{††††††}

あらまし 筆者らは、大規模なインフラ設備を必要とせず、いつでもどこでも情報通信サービスにアクセスできる、アドホックユビキタス通信環境の実現を目指して、データ駆動ネットワークングシステムの研究開発プロジェクトを推進している。本論文ではまず、アドホックユビキタス通信環境に対する三つの要求条件を示す。第1の要件として、ユビキタス環境におけるコミュニティ情報を活用した目的ノード発見方式の必要性とその実現法を論じ、問合せパケット数の削減効果を示す。続いて、第2の要件である、アドホックネットワークにおける品質保持型情報転送方式として、マルチポイント・ポイント情報転送方式の提案とその実現法を述べ、品質劣化を抑制できることを明らかにする。更に、第3要件として、VLSI 試作したデータ駆動ネットワークングプロセッサ CUE-v3 について概要を示すとともに、アドホックユビキタス通信環境の各種処理のオフローディング方式を検討し、一次評価のために、上記アドホックユビキタス機能実現に必須な基本機能である UDP/IP をオフロードし、多重処理性により複数パケットの処理を1パケットのヘッダ処理時間に極小化が可能であることを示す。

キーワード データ駆動プロセッサ, マルチプロセッサ, ユビキタス通信, アドホックネットワーク, 情報発見

1. ま え が き

本論文は、無線アドホックネットワークを含む新し

い通信環境を利用しユビキタス性を実現できるアドホックユビキタス通信環境の実現のために、必要な機能として、目的ノード発見機能、安定した情報転送機能を検討し、それらの機能を効率的に実現するためのハードウェアプラットフォームについて述べている。

筆者らは、インフラを必要としない、またはインフラが使用できない場合に有用なアドホックネットワーク環境の活用を前提としている。まず、アドホックネットワーク上で、いつでもどこでも通信・情報リソースにアクセスできるユビキタス性の実現のために、ネットワーク上に存在する情報を発見し、それへのアクセス手段を提供する必要がある。多くのアドホックネットワークは情報を中継するノード（以下、中継ノード）を決定しながら、所望のコンテンツを所持しているノード、または既存ネットワークとのゲートウェイとなるノード（以下、目的ノード）に接続することを前提に提案されている。そして、目的ノード発見についての検討は、始点ノードがあらかじめ目的ノードの

[†] 筑波大学大学院システム情報工学研究科, つくば市

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, Tsukuba-shi, 305-8573 Japan

^{††} (有) 情報基盤研究所, つくば市

Information Infrastructure Laboratory, Inc., Tsukuba-shi, 305-0028 Japan

^{†††} 日本電信電話株式会社 NTT 情報流通プラットフォーム研究所, 武蔵野市

NTT Information Sharing Platform Laboratories, NTT Corporation, Musashino-shi, 180-8585 Japan

^{††††} マラヤ大学工学部電気工学科, マレーシア

Department of Electrical and Telecommunication Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur 50603 Malaysia

^{†††††} 東海大学大学院工学研究科, 平塚市

Graduate School of Engineering, Tokai University, Hiratsuka-shi, 259-1292 Japan

^{††††††} 東海大学専門職大学院組込み技術研究科, 東京都

Professional Graduate School of Embedded Technology, Tokai University, Minato-ku, Tokyo, 108-8619 Japan

アドレスやアイデンティティを知っていることが前提である。しかし、ノードに対して情報の所在があらかじめ確定しないなどで、目的ノードのアドレスが不明である場合については、アドレスを取得するための方法について別の手段が必要となる。

したがって、ユビキタス性実現のためには、目的ノードが発見できる機能を備え、発見時にネットワーク資源浪費を抑制することが要件の一つとなる。次にアドホックネットワークにおいて、情報を転送する場合、ノード移動、電波干渉によるスループットの低下などの多くの転送上の問題を解決する手法が必要である。特に、多くの帯域を必要とし、実時間性の要求されるビデオ情報に代表されるストリームなど広帯域情報の転送について、品質を担保する手法は十分に検討されていない。既に、有線系、無線系の特に損失の多いネットワーク上でのビデオアプリケーションの提供に関する多くの検討がなされ、性能向上策が提案されている。複数記述符号化 (Multi Description Coding: 以下 MDC) はその代表である [1]。一方、ピアツーピア (P2P) ネットワークにおいて実時間ビデオを転送するため、マルチポイント・ポイント通信方式が提案されている [2]。以上の検討はインフラをもたず、頻繁にリンクが切断され、誤りや干渉の多いアドホックネットワークにおいて、そのまま有効であるとはいえない。

ゆえに、アドホック性を勘案して、目的ノードとのコンテンツ送受・中継がより安定して実施できる品質保持型情報転送方式の実現が、二つ目の要件となる。

また、このようなアドホックでユビキタスな環境では、目的ノードの発見、及び安定的コンテンツ授受・中継の動作、加えてその他のノードにおける処理が同時に進行できるよう、高い多重処理性能が要求される。すなわち、アドホックユビキタス通信環境向きのネットワークシステムの実現が三つ目の要件となる。

本論文ではまず、2. において対象とするアドホックユビキタス通信環境の適用シーンを整理し、要求条件について示す。筆者らはノードの所有者が人的なコミュニティを形成している可能性が高いことに着目した。これに基づく目的ノード発見方式について、3. で述べる。

次に、アドホックネットワークにおける効率的情報転送法の提案と評価を行った。目的ノードの探索に用いる経路は、必ずしも安定したコンテンツ送受を保証するものではないため、目的ノード発見とコンテンツ送受経路選択は個別の方式を選択した方がよい。コン

テンツ送受を安定的に実現できる品質保持型情報転送方式 [3] の詳細は 4. に述べる。

更に、ネットワークシステムのデータ駆動型実現法を提案する。現在のプロセッサの多重処理性能は、上述の三つ目の要件に対し十分な解を与えているとはいえない。筆者らは既に、ノイマン型プロセッサの多重処理性能の問題点を明確にし、その解決法としてのデータ駆動プロセッサの提案を行っている [4]。ユビキタス性とアドホック性を同時に満たし、かつ各ノードのその他の処理が同時に進行しても、それがお互いに強く影響しない処理能力をもつノードの実現法として、データ駆動型ネットワークシステムへの機能オフロードを 5. に述べる。

2. アドホックユビキタス通信環境の適用シーンと要求条件

2.1 アドホックユビキタス通信環境の適用シーン

無線アドホックネットワークは、基地局や中継網などインフラストラクチャを必要としないため、いつでも通信ノードを配備するだけで簡単にネットワークを形成できることが一般的な特長である。このことから、主に以下の用途への適用が提案されている。

- (1) センサネットワークなど、固定的に設置されたノードからの情報収集手段
- (2) 車車間ネットワークなど、セル方式網を補完する通信手段
- (3) 緩やかに移動するユビキタスノード間の情報伝達手段

この論文では、(3) のネットワークを対象とする。このようなネットワークの利用シーンとしては、イベントなどの人が大勢集合する場所での情報伝達、山間部における要人警護や遭難者捜索、災害時の情報伝達などが考えられる。しかし、これらについても多くの場合は、衛星通信、放送網、移動体網の活用や臨時的な無線 LAN 基地局の設置などの代替手段が存在する。そこで、無線アドホックネットワークを有効に活用できる利用シーンとして「代替手段が存在しないほどの甚災害時において、罹災エリア内における被災者への情報伝達」を設定する。

2.2 アドホックユビキタス通信環境の構成と要求条件

2.2.1 アドホックユビキタス通信環境の構成

本研究では、2.1 で示した利用シーンにおいてより確実に安定した通信の実現を目標とする。この状況で

は以下の点が懸念される。

- 確実な通信の実現を阻害する要因として、状況に応じて所望する情報が変わることが考えられる。ここでいう情報とは、例えば、重大な被災個所の状況や、救護方法のコンテンツであり、音声、ビデオも含まれていると想定する。特に、災害時に最も必要とされる情報はビデオ情報である。本論文では、“ビデオ”は、映画のようなあらかじめ制作された情報に限定せず、被災状況などを一時的に録画したものも含む。このような状況では、ビデオ情報の名称や内容も刻々と変化することも想定される。また、目的ノードが複数あっても、始点ノードがコンテンツを発信し得るノードをあらかじめ認識することが難しく、また特定のサーバで集中管理する状況も考えにくい。また、複数のノードが目的ノードとなり得ると仮定した場合、重大な状況下であることを勘案すると、ユーザがより信頼できる相手と通信すべきである。

- 安定した通信を阻害する要因として、ノードの移動、各ノードの電源状況などにより通信状況が変化することが考えられる。また、処理を効率化することでノードの資源を浪費しないようにする必要がある。このため、常に通信の状況を監視することと、目的ノードの候補を用意しておき、状況の変化に対応する必要がある。

これらを踏まえ、(1) 置かれている状況下において目的ノードを探索する目的ノード発見機能、(2) 安定した情報転送を実現する品質保持型情報転送機能、(3) オフロードされたネットワーク処理を高効率に実時間多重処理するデータ駆動ネットワークングプロセッサから構成されるデータ駆動ネットワークングシステム(図1(a))を提案する。目的ノード発見機能と品質保持型情報転送機能は、データ駆動ネットワークングプロセッサ上で並列に動作する。

- 目的ノード発見機能は、始点ノードから目的ノードの探索を行い、複数の候補を得る。
- 品質保持型情報転送機能は、目的ノード発見機能が得た目的ノードの情報をもとに、始点ノードへの通信路を設定する。同時に目的ノード発見機能は別の目的ノード探索を実行する。
- 通信路の状況が不安定になった場合、まず品質保持型情報転送機能が品質保持を行うが、それでも状況が改善しない場合には、並行して探索されている目的ノードへ向けて通信路設定を行う。

この動作の概要を図1(b)に示す。このような処理

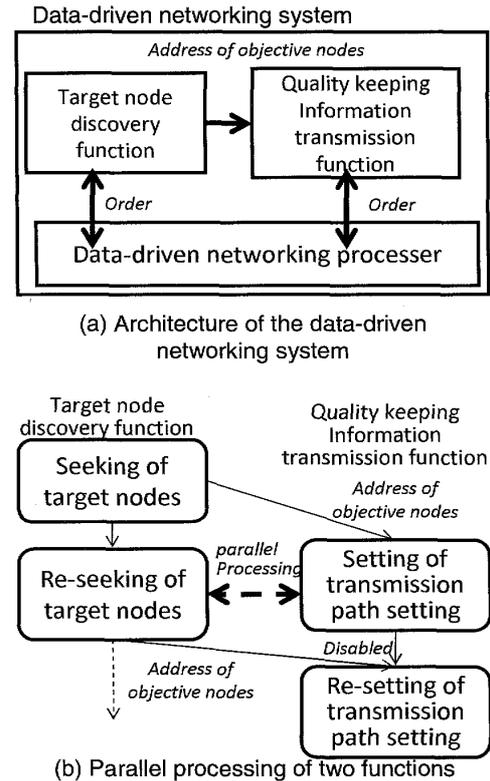


図1 データ駆動ネットワークングシステムの概要
Fig.1 Overview of the data-driven networking system.

は、データ駆動ネットワークングプロセッサにおいて複数の並列処理が実現できると、より効率良く上記のプロセスが実現できるものと考えられる。次章以降で、目的ノード発見機能を実現するコミュニティ活用型目的ノード発見方式、品質保持型情報転送機能を実現する品質保持型情報転送方式、そして、データ駆動ネットワークングプロセッサによるプロトコルオフローディング実現方式について論ずる。

2.2.2 アドホックユビキタス通信環境を構成する機能への要求提案

各方式に求められる条件は以下のとおりである。

(1) コミュニティ活用型目的ノード発見方式

各ノードにおいては、

- (前提条件1) 通信ノードを保有するユーザ同士は通常時において、コミュニティ関係を形成している。
(前提条件2) 目的ノードのアドレスや、アドレスを知るためのディレクトリはあらかじめ知らされていない。

前提条件1は、ユーザが災害の発生したエリアにいる人たちであると考え、平時の社会活動においても知人、友人としてのコミュニティを形成していると考えることが自然であるためである。前提条件2は、

アドホックネットワークを通じて得たい情報が状況に応じて変化し、また始点ノードからマルチホップで取得するノードも状況に応じて変化すると考えられるためである。これらを踏まえ、フラッディングなどにより資源を浪費することなく、信頼できる目的ノードを発見できる必要がある。また、目的ノード発見が、次に示す情報転送の前段階のプロセスと考えると、ノードの移動が無視できるくらいに短時間に目的ノード発見を終了する必要がある。このとき、下位プラットフォームに対しては、リンクの転送速度以上のパケット処理・転送能力を期待するとともに、情報転送方式やその他のアプリケーションとの並列処理がスムーズに行えることを要求する。

(2) 品質保持型情報転送方式

災害情報などをできるだけ可視情報として提供することが災害時の要求条件にかなうものと考えられる。しかも不安定なアドホックネットワーク上を転送せざるを得ないとき、情報発信源で得られた情報を何らかの方法にて網内で分散した送信点に分散し、そこから転送することで品質を保持できると考えられる。まず前提として情報が何らかの形で網内に分散格納されていると考える。情報を必要とするノードは、目的ノード発見方式によりそれらの送信点（目的ノード）を見つけ、それらの中から複数を選択し、それらから部分情報を送信させ、それをまとめてもとの情報を再現する。できるだけ情報の再現確率が高くなるように転送方式を工夫する必要があることがこの方式への要求条件である。このとき、下位プラットフォームに対しては、リンクの転送速度以上のパケット処理・転送能力を期待するとともに、上記目的ノード発見方式やその他のアプリケーションとの並列処理がスムーズに行えることを要求する。

(3) プロトコルオフローディングのデータ駆動型実現方式

上記の要求を満足するために、本実現法ではプロトコル処理をデータ駆動型ネットワークングプロセッサ上にオフロードすることによって、ネットワーク処理の実時間多重処理能力の向上とアプリケーション処理のリソース強化を同時に実現する。すなわち本環境では、プロトコル処理において例外処理発生時を除き、実時間性を常に維持することが要求される。本実現法では、データ駆動型ネットワークングプロセッサの並列処理性を活用し、可能な限りプロトコル処理を並列化してクリティカルパスを最短にするとともに、ヘッ

ダ処理若しくはデータ長によって決まるターンアラウンドタイムを多重処理時でも維持可能にする。

3. コミュニティ活用型目的ノード発見方式

3.1 アドホックユビキタス通信環境での目的ノード発見

センタサーバを排した目的ノードの発見方法としては、経路作成や経路維持の方式の適用、P2Pなどで用いられる分散ハッシュテーブル、メタデータなどを用いてそのアドレスをもつノードを発見する方法などが検討されている。

経路作成、経路維持方式については、プロアクティブ型、リアクティブ型に分類でき、前者の代表例としてOLSR (Optimized Link State Routing) [5]、後者の代表例としてDSR (Dynamic Source Routing) [6]といった具体的なプロトコルも既に実装されている。これらの経路選択方式においても、通信相手のIPアドレスをもとにして経路が設定される。したがって、通信相手のアドレスが未知であることを前提とすると、既存のプロアクティブ型、リアクティブ型のいずれの方式でも、目的ノードの発見方法に適用することが難しいと考えられる。また、これらの方式を応用したサービス発見方式もいくつか検討されている。基本的には始点ノードからブロードキャストパケットを送るため、フラッディングによるノードの資源浪費が懸念される。これらを改善する提案として、フラッディングを効率良く行う方式[7]、途中のノードでメッセージのキャッシュを行う方式[8]、あるサービスを提供するノードをグルーピングする方式[9]などがある。これらは、ブロードキャストパケットの送出数を減らすことができるため、ネットワーク資源浪費の抑制には極めて有効であると考えられる。しかしながら、これらの方式では通信中の位置の変化やグルーピングの変動に新たなトラフィックが必要となる。他のネットワークモデルで用いられるサービス発見方式として、センサネットワークで用いられる方式[10]、P2Pで用いられる分散ハッシュテーブルやタグを用いる方式[11]、[12]が提案されている。前者はノード全体のアドレスを管理するセンタサーバを用いている。後者は、コンテンツの名前や内容からあらかじめハッシュ値を計算するなどして、ノードに配布する必要がある。しかし、2.2で示したような、コンテンツの所在を集中管理せず、またコンテンツの名称等が変化する状況では適用が難しいと考えられる。

これらのことから、通信相手やコンテンツの名称等が予測できない状況下において、フラッディングなどによるネットワーク資源浪費を抑えた目的ノード発見手法が求められる。

2.1.1 で設定したような、特定エリア内で実現されるアドホックネットワークでは、中継ノードや目的ノードを所有するユーザには、何らかの人的つながり（以下、コミュニティ）が存在すると仮定できる。これは、被災時においてはその地域の住人がノード所有者の多数を占めることが想定できるためである。また、2.2 で述べたように、ユーザがより信頼できる相手からの通信を所望すると考えられる。実社会において、目的の相手が直接に知らない相手の場合、自身の所属するコミュニティの人物からの紹介を受け、それを手掛りに面会する行為は一般的に行われている。そこで、目的ノード発見の手法として、自分の属するコミュニティ情報を用いる方式を提案する。具体的には、ユーザが自分の所属しているコミュニティで信頼する相手を、『バディリスト』としてもち、できる限りバディリストに記載されている相手を頼って目的ノードを発見する方法を提案する。

3.2 コミュニティ活用型目的ノード発見方式

本提案手法は以下の処理によって、始点ノードから送られたリクエストパケットを伝達することで目的ノードの発見を行い、経路作成を行う。

- リクエストパケット送信先の選択
- リクエストパケットの伝達と経路作成

3.2.1 リクエストパケット送信先の選択

本提案手法ではフラッディングを行わない代わりに、コミュニティ情報を用いてノードを選択し、選択したノードに対してユニキャストでリクエストパケットを送信する。リクエストパケットを受信したノードのみ、通信可能範囲内に目的ノードが存在するかどうかをブロードキャストで問い合わせる。問い合わせを行うノードを限定することでネットワーク上にパケットがあふれることを軽減している。リクエストパケットを送信するノードを選択する際に利用するコミュニティ情報は、ノート PC, PDA, 携帯電話等のノード所有者同士の関係を示す『バディリスト』であり、これをもとに目的ノード探索を行う。

バディリストは、ユーザが属するコミュニティを構成するメンバーから、目的のコンテンツを保有しているか保有しているノードを知っていることに関し、信頼できるノードのリストである。通常、このようなメ

ンバの登録は個々のユーザが平時に行うことが可能であると考えられるため、本論文ではバディリストがあらかじめユーザによって登録されていると仮定する。システムのユーザビリティの検証を含めた、バディリストの作成方法及び作成過程については、今後の課題とする。

3.2.2 リクエストパケットの伝達と経路作成

リクエストパケットの経路選択手順の骨子を以下に示す。

- (1) 始点ノードの通信可能範囲内のノードに対してブロードキャストで問合せを行い、所望のコンテンツをもつ目的ノードが存在するかを問い合わせる。
- (2) 問い合わせノードが目的ノードである場合であれば、(5)へ移る。
- (3) 通信可能な近隣ノードの中に目的ノードが存在しない場合はリクエストパケットを近隣ノード内の一つのノードに対して送信する。リクエストパケットの送信先として、先に述べたバディリストを用いる。
- (4) リクエストパケットを受信したノードは1~3の手順を行う。
- (5) リクエストパケットをノード間で中継し、目的ノードがリクエストパケットを受信すると、そこから、始点ノードに対して目的ノードのアドレスを送信する。この後、情報転送方式を用いてコンテンツを転送する通信経路を設定する。

このアルゴリズムの概要を図2に示す。(5)においては、目的ノードを発見したときの経路で伝達することも可能であるが、より安定した通信のために既存の経路作成手法を用いることも可能である。また、後述

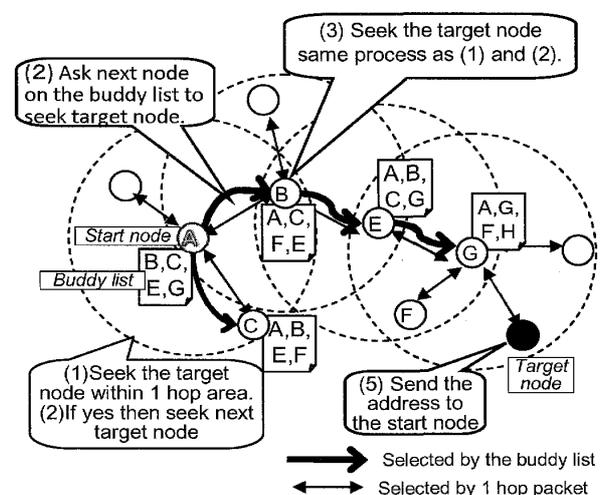


図2 目的発見アルゴリズムの概要
Fig. 2 Overview of the target node seeking algorithm.

するように、4. で提案する情報転送方式においては、複数目的ノードを検出する必要がある。この場合は(3)において、バディリストの中で異なる相手を選ぶことで発見が可能となる。

提案方法では、各ノードが自律的に目的ノードを探すため、経路がループ状になる可能性がある。このようなケースは、始点ノードからその時点までにかかわるノードのリストをもって、次ノードに依頼すれば検出は可能であるが、検出時の対処方法が必要である。この方法として以下の2パターンが考えられる。

[パターン1] ループを検出した最後のノードの一つ前から検索する。

[パターン2] ループとなるもととなるノードから検索をやりなおす。

パターン1は網羅的な検索を行う場合には有効であると考えられるが、既にループのもとに近いところがあるので、次のノードを選んでループになる可能性が高いことも懸念される。パターン2は違うルートを意図的に探す効用があると考えられるため、パターン2を優先的に選択することとする。

3.3 提案方式の有効性評価

ノード所有者によって作成されたバディリストを用いて、始点ノードから送信されたリクエストパケットが目的ノードまでに到達するまでにかかったホップ数を、バディリストを用いないランダム方式とシミュレーションにより比較し、本提案方式の有効性を検証する。

3.3.1 シミュレーション方法

提案方式で用いるバディリストは、2.1 で述べたようにノード所有者間の関係を表すコミュニティ情報である。このように、人間関係に基づくバディリストの登録数分布は、スケールフリー性をもつことが知られている[13]。シミュレーションに対する信頼性を向上させるために、実際の間人関係に基づくデータとして、SNS (Social Networking Service) である mixi のリンク数の分布[14]を参考にし、リスト間の対称性も保持している。ネットワークシミュレータの OPNET [15] を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションのパラメータを表1に示す。

50のノードをランダムに配置する。その配置パターンごとに提案方式とランダム方式の両方のシミュレーションを10回行い、ホップ数の平均を求めた。また、配置パターンは15通り用意し、それぞれのパターンにおいて平均を求めた。今回の検討では、2.2 で示し

表1 シミュレーションの条件
Table 1 Condition of simulation.

設定項目	パラメータ
シミュレーションエリア	1500 × 1000 m
通信可能範囲	250 m
ノード数	50
始点ノード	1 ノード
目的ノード	5 ノード
ノードの移動	しない

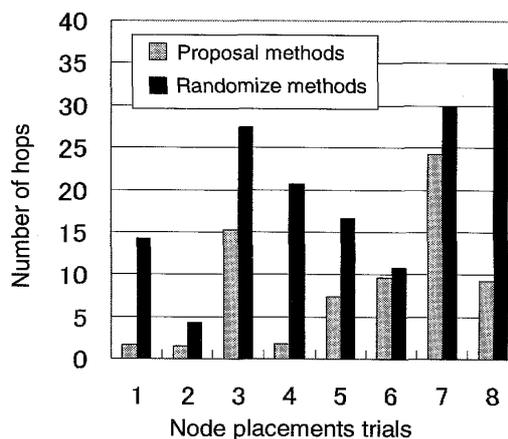


図3 目的ノード発見のシミュレーション結果
Fig. 3 Simulation of objective node finding.

たように、目的ノード発見のために行われる通信はノードの移動に対し十分に短くノード間の通信状況が要求条件であるため、リクエストパケットの伝達に着目し、ノードは移動しないものとし、シミュレーションを行った。

3.3.2 結果と考察

50のノードをランダムに配置し、ランダム方式と提案方式のそれぞれの方式で、始点ノードから目的ノードまでにかかったホップ数を図3に示す。

縦軸はホップ数で、横軸はランダムな配置パターンを表している。目的ノード発見にかかる総ホップ数を評価するために、目的ノード発見時にループが発生した場合についても、ホップ数を累計している。

各配置パターンの結果にばらつきがあるのは、ランダムに配置しているために、始点ノードと目的ノードの最短ホップ数の変化や、経路になり得るノードの位置によって生じるものである。また、配置パターンの中には、50ノードのうち複数のノードがシミュレーションエリアの一部に集まってしまい、その集団と他のノードが通信不可能という状況があった。この通信不可能な集団の中に始点ノードがいる状況ではどのノードを中継しても、始点ノードから目的ノードまでリクエストパケットを到達させることができない。そ

うした状況でもリクエストパケットを到達可能にするためには別の方法を用いて解決する必要がある。また、ノードを配置した時点で始点ノードの通信可能範囲に目的ノードが存在している場合も、結果のグラフから除外している。図3から、提案方式とランダム方式を比較するとホップ数が20%から80%少なく伝達できていることが分かる。提案方式とランダム方式の差の大小には幅がある。これは、提案方式で「信頼度が同値の場合、リクエストパケットの送信先をランダムに選択する」という処理を行っているため、信頼度に差がないならばランダム方式に近づくことによるものだと考えられる。

3.3.1で仮定した、ノードの移動について考察する。4.で後述するシミュレーションの条件と同様に、ノードの移動速度を最大10 km/hとし、目的ノードを3個発見するとする。この条件で、1ホップの処理が約10 msとすると、1ホップの処理時間に移動する距離は、2.7 cmとなる。信頼度が有効に動作するケースでは、目的ノード発見までに移動する距離は10 cm以内であるとみなすことができる。25ホップかかるケースでも、移動距離は1発見当り67.5 cmであり、3個発見しても想定した電波の到達距離250 mの1/100程度である。このことから、提案方式においては、ノードの移動は無視できると考えられる。

4. アドホックネットワークにおける品質保持型情報転送方式

3.に述べた、アドホックネットワークにおいてユビキタス性を確保するための必要な情報を有するノードの発見方式を受け、その情報を効率的に転送するための手法について述べる。既に述べたように、アドホックネットワークは、電波状態の変化やノードの移動によるトポロジーの変化を伴うため、通信品質の確保が困難である。品質の確保の観点から、多くの帯域を必要とし、実時間性の要求されるビデオ情報に代表されるストリームなど広帯域情報の転送について、その品質保持型情報転送方式について述べる。本論文では、災害時に最も必要とされる情報であるビデオ情報をアプリケーションとして取り上げ、アドホックネットワーク上に送信点を複数設けることによりサーバ分散と経路分散を実現できるマルチポイント・ポイント転送方式を品質保持型情報転送方式として提案する。各経路上にMDC符号化[1]した独立な記述を転送することにより、ベストエフォート情報転送を前提にして、

受信点におけるビデオ可視確率を向上する検討をシミュレーションにより行った[2]。また、従来十分に行われていない、実機テストベッドを用いた検証も行った[16]。ここでは、方式の概要を述べ、下位のハードウェアに対する要求条件の明確化を図っている。

4.1 基本方式

ビデオを受信したいノードは、3.で述べた目的ノード発見機能によって目的のビデオ情報を有するノードを複数発見し、それらのノードに対して、ビデオ転送を依頼する。図4において、S1からSNは送信点であり、VREQは情報転送要求、VREPはそれにタイする肯定応答である。VREPの到着時間から、情報要求点Rは各送信点までの往復時間を知り、それをもとに、情報転送開始要求VSELの時間をずらし、送ることで簡易な同期が可能となる。

依頼を受けた送信ノードは、保有する原ビデオをMDCによって複数記述に符号化する(図5)。ここでは分割する記述数は2とする。また、ビデオの同期や遅延制御などは積極的に行わず、ベストエフォート転送を基本とする。受信側においては、ネットワーク内を転送されたパケットの受信可否によって記述を再構成できるかが決まる。すべての記述のパケットが受信できた場合、良好な(good)ビデオフレームが生成

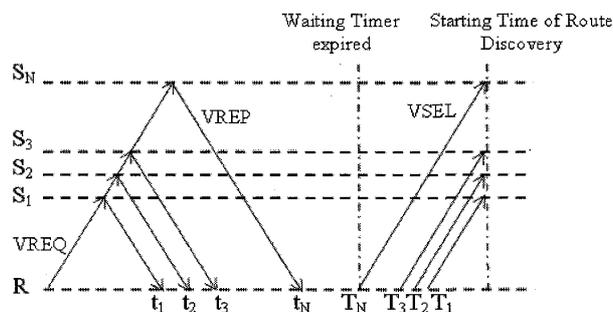


図4 簡易同期方式
Fig. 4 Simplified synchronization mechanism.

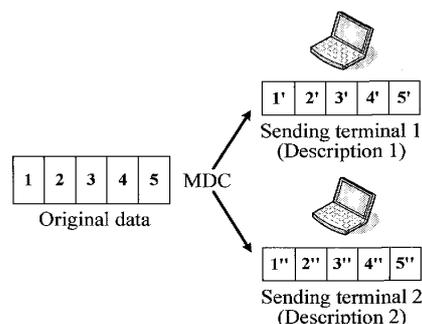


図5 MDCの概念
Fig. 5 Concepts of MDC.

され、いくつかの記述のみ受信できた場合、受入れ可 (acceptable) フレームが生成される。ここで、受入れ可とは、原情報に比べて品質劣化のある再生ビデオになるが、視聴は可能であるということを示す。そして、いずれの記述も受信できなかった場合、不良 (bad) フレームが生成される (図 6)。なお、受信ノードにおける受信処理は、上記の簡易同期方式により関連フレームも到着時刻をおおまかに合わせ、更に一定時間以内受信パケットを蓄積して、複数記述の同期を取る play-out バッファを設ける。一定時間内に到着しなかったパケットは廃棄されるベストエフォート再生を行うものとする。play-out バッファサイズは、最大ホップ数と最小ホップ数の差異に 1 ホップ当りの平均転送時間をかけ、ルート作成要求、ルート作成応答、ビデオ転送の 3 往復を更に掛け算することにより概算できる。最大 10 ホップ程度で 1 ホップ当り 50ms を仮定すると 1.5s 程度の時間差となる。リンク速度 (実効値は最大でも数百 kbit/s) を勘案すると、多くても数 Mbit/s 程度の大きさで十分と考えられる。

4.2 シミュレーションにおける評価

ネットワークシミュレータ ns-2 [17] を用い、表 2 の条件で提案方式の評価を行った。ただし簡単のため、現実のビデオデータではなく、単なるビット列を用いる。また、MDC により符号化を行っても、データ量が増えることはないと仮定する。また、背景トラヒックに

は、送信点と受信ノードを除いたノードから五つの対を無作為に選択して、それらの間に 8.2 [kbit/s] のトラヒックを導入する。単一記述の PP 転送 (PP), MDC 利用 PP 転送 (PP+MDC), 本提案である MDC 利用 MP2P 転送 (MP2P+MDC) の場合における可視フレーム率を評価する。PP+MDC と MP2P+MDC は二つの記述を用い、各記述の符号化フレーム長は PP の 2 分の 1 である。すなわち、PP においては 1024 バイト、MP2P においては 512 バイトのフレーム長を採用する。したがって、PP+MDC と MP2P+MDC で転送されるパケット数は PP の 2 倍となる。MP2P+MDC では、二つのノードそれぞれが単一の記述のみを送出する。全体で 10000 個の原フレームを送信し、フレーム間隔は 64 [ms] とする。シミュレーション時間は 900 [s] であり、転送を終了するに十分な時間である。

受信側において、受信フレームの品質は、2 記述とも受信「良好 (Good)」, 1 記述のみ受信「受入れ可 (Acceptable)」, いずれも受信できず「不良 (Bad)」の 3 値で評価する。なお、PP での受信フレーム品質は良好か不良かの 2 値である。性能評価は受信フレーム品質割合により行う。

各ケースの受信フレームのもつ品質の割合の比較を図 7 に示す。PP では、記述は単一であるため、フレームは Good か Bad かのいずれかである。PP+MDC と MP2P+MDC は、受信した記述数によって、フレームは Good, Acceptable, Bad のいずれかとなる。図 7 より MP2P+MDC は不良フレーム数が最小であることが分かる。また、PP+MDC のように単に MDC を用いるだけでは、不良フレーム数を減少することができないことも分かる。不良フレームの最小化、すなわち、可視フレーム率 (Acceptable と Good の和) が最も大きいものが望ましいと考え、本提案アルゴリズムである MP2P+MDC が最も優れている。

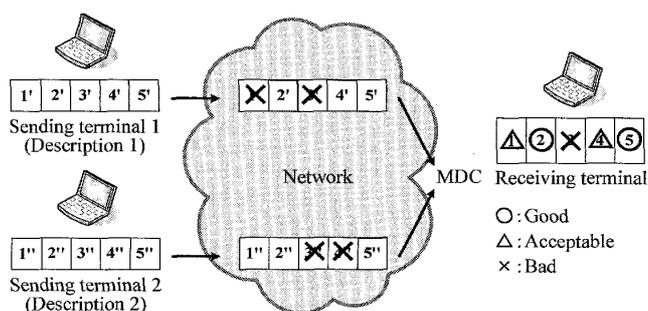


図 6 MP2P 転送の概念
Fig. 6 Concepts of MP2P transmission.

表 2 シミュレーションの条件
Table 2 Condition of simulation.

設定項目	パラメータ
ネットワークサイズ	1000 [m] × 600 [m]
ノード数	20
MAC レイヤ	IEEE802.11 (リンク容量 2 [Mbit/s])
ルーティングプロトコル	DSR [2]
ノードの移動モデル	ランダムウェイポイントモデル (Random Waypoint Model) [3]
符号化フレーム長	PP: 1024 [Byte], MP2P: 512 [Byte]
転送速度	128 [kbit/s]

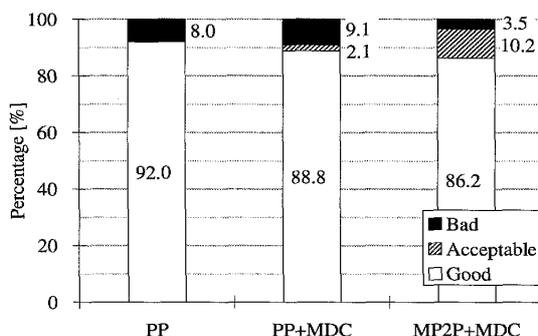


図 7 シミュレーション結果
Fig. 7 Simulation result.

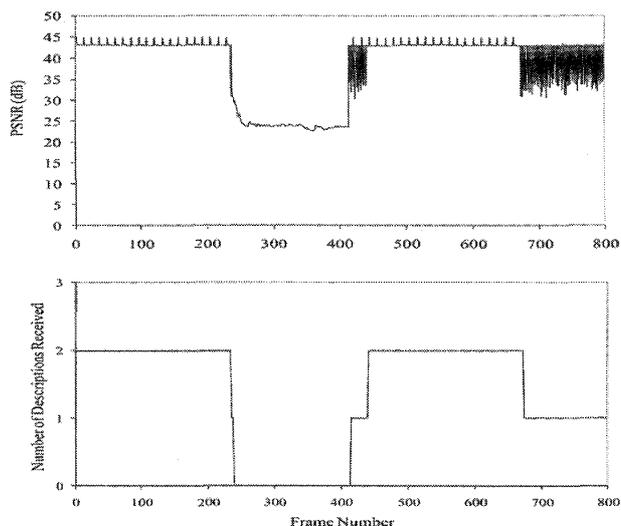


図8 PSNR 分布
Fig. 8 PSNR distribution.

この結果は、簡易な実機テストベッドにおいても追試を行い、シミュレーション結果を裏づけた[16]。

また、実機テストベッドにおいて、実際のビデオ転送を行い、ピーク信号雑音比 (PSNR) を測定した結果を図8に示す。2記述とも失われた場合 25 dB まで落ちるが、どちらか一方の記述が受信された場合は、フレーム補償により、最低でも 30 dB 程度への劣化に収まっており、本方式の有効性を示している。

以上の結果から、下位プラットフォームにおいては、512 バイトのビデオパケット (フレーム) ストリームが効率的に転送できる転送基盤の実現を手始めに要求する。転送機能として、経路選択更に上位の相手発見にかかわるバースト的な制御パケットの転送も必要である。これらの機能が相互に影響を与えることなく並列に処理できることも下位プラットフォームへの要求条件となる。

5. プロトコルオフローディングのデータ駆動型実現法

5.1 アドホックユビキタス環境におけるネットワーク処理の実現法

これまで述べた発見方式、転送方式は、情報源ノードにおける原情報の符号化及びパケット化・送信処理、転送ノードにおける転送処理、受信ノードにおける受信バッファ処理、復号化処理、全ノードにおける経路制御の同時処理が必要となる。ハードウェアが、これらの処理を同時に行える多重処理性を有することが必要である。この一般的要求条件に適合するのはデータ

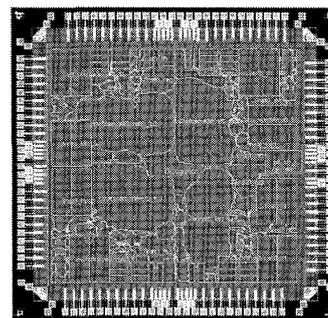


図9 データ駆動ネットワークングプロセッサ CUE-v3
Fig. 9 Data-driven networking processor CUE-v3.

駆動プロセッサである。筆者らは既に並列処理特性によるデータ駆動プロセッサの優位性を示しており[8]、本システムでもそれを生かしてシステム構築を行っている。

同時に、昨今のコンテンツの多様化を考慮すると、アプリケーションのマルチメディア化、多機能化、並びにユーザインタフェースの高度化が進むことが考えられる。特に高精細な動画や動画を用いた認識処理など、通信されるコンテンツのもつ時間制約は厳しくなる傾向にある。これらの時間制約を満たすためには、圧縮技術の発展と同時に、ネットワーク処理能力の向上が必須である。これらより、積極的に既存プラットフォーム上の機能をデータ駆動プロセッサ上に移植 (オフロード) していくことがシステム構築上重要である。

これまでに筆者らはプロトコル処理のデータ駆動型実現法の検討を通じて、データ駆動プロセッサによるプロトコルの実時間多重処理を実証してきた[18],[19]。また、データ駆動プロセッサとスーパスカラプロセッサの特徴を併せ持つデータ駆動ネットワークングプロセッサ CUE-v2 を VLSI 試作し、データ駆動プロセッサのもつ多重処理性と、逐次実行の高速性を兼ね備えるプロセッサアーキテクチャを実現している[20]。更にデータ駆動プロセッサのマルチプロセッサへの高い適用性を生かし、図9に示すように、チップマルチプロセッサのプロトタイプ CUE-v3 の VLSI 試作を進めている。これらの検討結果を基礎に、一度にすべての機能をオフロードする前に、本論文ではまず、4. の画像情報の転送について必要となる、ネットワーク転送機能 (IP 機能) と機能の少ない UDP のオフロードを実現することとし、データ駆動ネットワークプロトコルオフローダを提案し、予備的評価を行った。

5.2 データ駆動プロトコルオフローダの実現法 ネットワークプロトコルオフローダの実現における

要点は二つある。一つはプロトコル処理（ネットワーク処理）に適したプロセッサを用いることである。このプロセッサへの要求条件は、4.2 並びに前節で述べたように並列・多重処理能力になるため、筆者らがプロトコルの多重処理に対する有効性を実証してきた、データ駆動ネットワークングプロセッサを用いてオフロードを実現することを検討する。もう一つはオフロードのためのオーバーヘッドを極小化することである。実験的検討の段階においても、オフロードのためのオーバーヘッドが大きいと正確な比較ができないので、十分な転送能力をもったデータ転送方式を用いる必要がある。データ駆動プロセッサによるネットワークプロトコルオフロードの実現に向けて、筆者らはまず図 10 に示すデータ駆動ネットワークングボードを設計・開発した。本ボードには、データ駆動ネットワークングプロセッサ CUE-v2/CUE-v3 を搭載することができる。また、オフロードとしての検討のために、PC 等とのデータ通信に USB ポートを実装した。USB を選択した理由としては、純粋なソフトウェアによるプロトコルが介在しないためオーバーヘッドが小さくできること、USB High Speed (USB 2.0) であれば通信能力も十分有すること、及び仕様が公開されているため、実験的検討の面からも適していることが挙げられる。オフロードする処理については、手始めに図 10 に示すように、通信環境における基本機能である UDP/IP を対象とする。今後、TCP や、アドホックルーティングプロトコル、更に発見方式までのオフロード化を行っていく。

5.3 オフローディング方式の評価

評価のために、比較対象として既存の PC における UDP/IP 送信処理時間の測定を行った。用いた PC の仕様は、以下のとおりである。

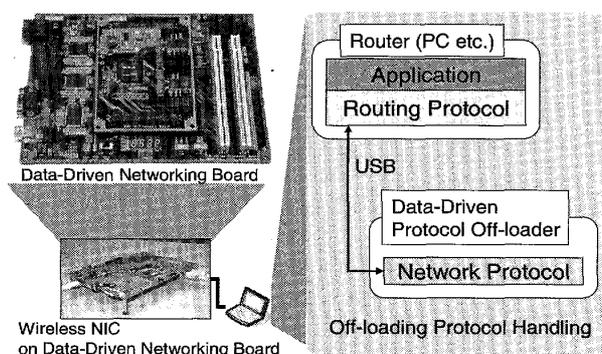


図 10 データ駆動プロトコルオフロードの実現法
Fig. 10 Implementation of data-driven protocol off-loader.

CPU : AMD Athlon64 X2 5200+ (2.7 GHz)

RAM : 2.0 GByte

OS : WindowsXP Professional SP2

UDP/IP 送信処理の純粋な処理時間を測定するために、ループバックを用い、かつバッファサイズは送信データサイズに対して十分な量 (5 倍程度) を設定した。測定結果は表 3 の PC の項に示す。

これまでの検討において、筆者らはデータ駆動プロセッサ上に UDP/IP 処理をヘッダ処理とデータ処理を同時並行に処理できる構造で実装し、評価した。その結果、UDP/IP 送信処理の実行時間は約 250 バイト以下のデータグラムに対して、ヘッダの処理時間内で処理可能であることが明らかにしている [18]。この長さは動画像や音声のストリーミングには十分な長さである。また、データ駆動プロセッサがコンテキストスイッチによる実行時のオーバーヘッドをもたない特長を活用し、オーバーロードにならない限り、複数のデータグラムを多重処理してもこの時間が維持されることも実証した。

更に、512 バイトの長さのデータを、CUE-v3 用に実装した UDP/IP 送信処理で送信した場合の実行時間を見積もった。結果を表 3 の CUE-v3 の項に示す。このデータ長は 4.2 の MP2P+MDC のシミュレーション評価におけるデータ長である。このデータ長では、処理時間はデータ処理の実行時間に依存するが、同じデータ長であれば、多重処理においてこの処理時間を維持することが可能である。

また、チップマルチプロセッサである CUE-v3 において処理の分散化が最適化できれば、より長いデータグラムもヘッダの処理時間で多重処理が可能であると考えられる。これらより、アドホックユビキタス通信環境向きのネットワークシステムの実現法として、CUE-v3 による UDP/IP のオフロードは優位性があると考えられる。

今回はビデオというストリーム系を扱っているがバースト系を多重しても処理性能に何ら影響を与えないことも実証済み [8] であり、既に述べたように、データ駆動プロセッサの並列処理における優位性を生かす

表 3 UDP/IP 送信処理時間の比較
Table 3 Comparison of UDP/IP sending process.

	UDP/IP 送信時間
PC	160 μ s
CUE-v3 (250 Byte)	50 μ s
CUE-v3 (512 Byte)	98 μ s

ことにより、今後、ルーチング処理、発見処理などを本システムに追加していけばより高いオフロード効果が得られると思われる。

6. む す び

本論文は、アドホックユビキタス通信環境向きデータ駆動ネットワークシステムの研究開発状況について述べた。

通信環境の実用に際しての要求条件に対応して、ユビキタス性を実現できる効率的な目的ノード発見方式、アドホックネットワークにおける品質保持型情報転送方式、及びそれらの機能の同時多重処理を可能とするデータ駆動ネットワークプロセッサを用いた既存プラットフォームの補完方法であるオフローディング方式について提案し、機能概要と性能評価、それらの機能間の相互関係とシステム化の状況についてまとめた。

想定する適用シーンにおける要件に対し、

- 目的ノードのアドレスや位置、流通する情報の名称や内容も刻々と変化することを想定しても、目的ノード発見方式により、ランダムに検索するよりも20~80%ホップ数を削減できることで、ネットワーク資源を浪費せず、またノードの移動に対し高速に発見できること。

- 品質保持型情報転送方式は、ビデオ情報に代表されるストリームなど広帯域情報の転送について、MDC符号化とMP2P転送方式の組合せにより、単純なパス分散やMDCに比べて品質の劣化を防ぎ情報転送できること、

- データ駆動ネットワークプロセッサによるプロトコルオフローディングの実時間多重処理型実現法を提案し、有効性を示すための一次評価の結果、多重度にかかわらず、各プロトコルの実行時間を一定に維持でき、目的ノード発見機能、品質保持型情報転送機能が求める条件をクリアできること、という結果が得られた。

これらにより、より確実で、より安定した通信を実現するための、アドホックユビキタス通信環境を実現できる見通しが得られた。このように、アプリケーション寄りの機能、ネットワーク機能、及びそれらを支えるハードウェアまでを一貫した検討によって明確化を図ることにより、今後のアドホックユビキタス時代における重要なプラットフォームの一つを提供し得るものと考えている。

本システムはそれ自身インフラレスであり、エネル

ギー消費は抑えられているが、今後は、更なる低消費電力化を進め、時代の要請に応えたい。

謝辞 本研究の一部は、総務省SCOPE-R, JST CREST, 及び日本学術振興会科研費の支援を受けて行ったものである。

文 献

- [1] Y. Wang, A.R. Reibman, and S. Lin, "Multiple description coding for video delivery," Proc. IEEE, vol.93, no.1, pp.57-70, Jan. 2005.
- [2] H. Hsieh and R. Sivakumar, "Accelerating peer-to-peer networks for video streaming using multipoint-to-point communication," IEEE Commun. Mag., vol.42, no.8, pp.111-119, Aug. 2004.
- [3] C.O. Chow and H. Ishii, "A novel approach on supporting multipoint-to-point video transmission over wireless ad hoc networks," IEICE Trans. Commun., vol.E90-B, no.8, pp.2046-2055, Aug. 2007.
- [4] 石井啓之, 西川博昭, 小林秀承, 井上友二, "TINA 型高品質マルチメディアネットワークの実現法の検討," 信学論 (B-I), vol.J80-B-I, no.6, pp.457-464, June 1997.
- [5] "Optimized link state routing protocol (OLSR)," RFC3626, Oct. 2003.
- [6] "Dynamic source routing protocol (DSR)," RFC2026, April 2003.
- [7] 小出俊夫, 渡辺 和, "マルチホップ無線ネットワークにおける地域情報の配信アルゴリズム MCMS," 信学技報, CAS2001-69, Nov. 2001.
- [8] 茂木信二, 吉原貴仁, 堀内浩規, 小花貞夫, "アドホックネットワークにおけるサービス発見方式の提案," 情処学論, vol.43, no.12, pp.3970-3981, Dec. 2002.
- [9] 白 雪峰, 大田知行, 角田良明, 伊藤 篤, "モバイルアドホックネットワークのための動的サービス提供グループに基づくサービス発見プロトコル," 信学論 (B), vol.J89-B, no.6, pp.849-858, June 2006.
- [10] 中川智尋, 吉川 貴, 太田 賢, 倉掛正治, "大規模な分散環境におけるユビキタス情報発見サービス (ネットワークプロトコル)," 情処学論, vol.46, no.4, pp.1061-1069, April 2005.
- [11] 金 玲, 亀山 渉, "DHT を用いたモバイルアドホックネットワークにおける情報発見手法," 信学技報, MoMuC200584, Feb. 2006.
- [12] 金 玲, 亀山 渉, "メタデータを用いたモバイルアドホックネットワークにおける情報発見・交換手法に関する検討," 信学技報, IN2002-119, Nov. 2002.
- [13] 湯田聰夫, 小野直亮, 藤原義久, "ソーシャル・ネットワーク・サービスにおける人的ネットワークの構造," 情処学論, vol.47, no.3, pp.865-874, March 2006.
- [14] 松尾 豊, 安田 雪, "SNS における関係形成原理—mixi のデータ分析," 人工知能誌, vol.22, no.5, pp.531-541, July 2007.
- [15] OPNET <http://www.opnet.com/>
- [16] 宇津圭祐, チャウ チョオン, 石井啓之, "アドホックネットワークにおける MDC を用いた MP2P 動画転送による動画品質向上に関する検討," 電学論 (C), vol.128, no.9,

pp.1431-1437, Sept. 2008.

- [17] "The Network Simulator (ns-2)," <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [18] 青木一浩, 工藤慎也, 西川博昭, "ボトルネックのないレイヤ 2/3 間インタフェースのデータ駆動型実現法とその実験的検討," 信学論 (D-I), vol.J87-D-I, no.5, pp.591-598, May 2004.
- [19] K. Aoki, H. Ishii, O. Mizuno, M. Iwata, and H. Nishikawa, "Data-driven protocol -loading for ad hoc networking environment," Proc. 2008 Int'l Conf. on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, pp.662-668, Las Vegas, USA, July 2008.
- [20] H. Nishikawa, "Design philosophy of a networking-oriented data-driven processor-CUE," IEICE Trans. Electron., vol.E89-C, no.3, pp.221-229, March 2006.
(平成 20 年 11 月 7 日受付, 21 年 2 月 25 日再受付)



西川 博昭 (正員)

昭 51 阪大・工・電子卒。昭 59 同大大学院工学研究科博士課程了。工博。日本学術振興会奨励研究員, 阪大助手, 講師, 筑波大助教授を経て, 現在, 筑波大学大学院システム情報工学研究科教授。平 6 年 7 月~7 年 8 月, 平 9 年 11 月~12 月, 平 10 年 4 月~5 月 MIT 招聘研究員, 平 10 年 3 月~4 月 USC 招聘教授。データ駆動型超分散システムとその仕様記述環境等の研究に従事。平 15 IASTED Best Paper Award in the area of Processor Architecture, 平 19 PDPTA'07 Best Paper Award 各受賞。情報処理学会会員, IEEE シニア会員。



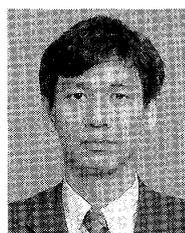
富安 洋史

平元九大・工・電気卒。平 3 同大大学院総合理工学研究科修士課程了。博士(工学)。九大助手を経て, 現在, 筑波大学大学院システム情報工学研究科講師。並列計算機アーキテクチャの研究に従事。平 15 IASTED Best Paper Award in the area of Processor Architecture 受賞。情報処理学会, IEEE 各会員。



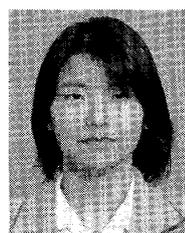
青木 一浩

平 9 筑波大・第三学群・情報学類卒。平 14 同大大学院博士課程工学研究科了。博士(工学)。現在, (有)情報基盤研究所。データ駆動プロセッサアーキテクチャの研究に従事。



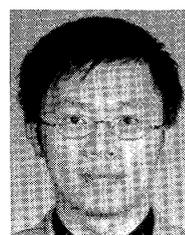
水野 修 (正員)

昭 58 東工大・工・電気・電子卒。昭 60 同大大学院総合理工学研究科修士課程了。同年日本電信電話(株)入社。以来, 通信サービス開発支援技術, 高度 IN システム, IP サービスシステム, アイデンティティサービス技術の研究開発に従事。現在, NTT 情報流通プラットフォーム研究所主幹研究員, 電気通信大学客員准教授。博士(国際情報通信学)。情報処理学会, IEEE 各会員。



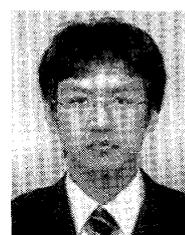
末田 欣子 (正員)

平 5 東京電機大・工・電子卒。平 7 同大大学院修士課程了。同年日本電信電話(株)入社。以来, 高度 IN におけるサービスカスタマイズ方式, コンテキストウェアネス技術, アイデンティティサービス技術の研究開発に従事。現在, NTT 情報流通プラットフォーム研究所研究主任。博士(工学)。



チャウ チーオン

平 11 マラヤ大(マレーシア)・工・電気卒。平 13 同大大学院修士課程了。同年同大助手。平 20 東海大学連合大学院理工学研究科博士後期課程了。博士(工学)。同年マラヤ大講師, 現在に至る。主に無線アドホックネットワークに関する研究に従事。平 19 PDPTA'07 Ten Best Student Papers Award。IEEE 会員。



宇津 圭祐 (学生員)

平 19 東海大・電子情報・コミュニケーション工卒。平 21 同大大学院工学研究科修士課程了。修士(工学)。同年同大学院総合理工学研究科博士課程入学, 現在に至る。主に無線アドホックネットワークに関する研究に従事。電気学会, IEEE 各学生員。



石井 啓之 (正員)

昭 52 阪大・工・通信卒。昭 54 同大大学院博士前期課程了。同年日本電信電話公社入社。以来, CCITT(現 ITU-T)における ISDN ユーザ・網インタフェースプロトコル標準化, TINA-C 及び OMG での分散処理型ネットワークアーキテクチャの標準化, ATM 交換システム, IP ネットワーキング制御システムの研究開発に従事。平 15 東海大教授, 現在同大専門職大学院教授。通信情報ネットワーク工学の研究に従事。博士(工学)。平 15 本会情報ネットワーク研究賞。平 19 PDPTA'07 Ten Best Papers Award。分担執筆「B-ISDN の基盤技術」。情報処理学会, 電気学会各会員。IEEE シニア会員。