

マルチホップ通信を用いた持続可能なリアルタイム情報ネットワーク

田中晶^{1, a)} 丸山充^{2, b)} 漆谷重雄^{3, c)}

概要：大地震や豪雨等の影響により、土砂崩れや洪水などの災害が頻発しており、ネットワークインフラにも甚大な影響を及ぼしている。大きな災害が生じて常にも通信手段が確保され、周囲の情報を自律的に収集して共有し効果的に活用する、持続的な通信環境が望まれている。これまでに、いくつものネットワーク分散処理方式が提案されているが、端末・ノード間の状態把握自体が複雑になり、メッセージベースの情報共有方式では通信が途絶えやすい災害時等ではリアルタイム性に課題がある。一方、我々の日常生活空間や産業現場には、いたる所にスマートフォンやマイコンなど、相応の処理性能を持つ端末が多数存在している。そこで、情報のリアルタイム取得性に優れた分散共有メモリ方式で相互接続された再構成可能デバイス（FPGA）を配置し、スマートフォン、マイコン、ドローン等と組み合わせる事で、小規模マルチホップネットワークを構成する提案を行ってきた。さらにこれらを用いる様々なアプリケーションも設計し、動作確認を重ねてきた。使用ネットワークとしては、WiFi・Bluetooth・可視光・UHF・赤外線を使用し、これらを自律的に選択する仕組みとともにインターネット接続も行える。マルチホップでリンクされた群ドローンで通信範囲の拡張も可能である。FPGAの周辺端末（スマートフォン）のセンサ機能で取得される環境情報がFPGAの分散共有メモリに書きこまれ、ネットワーク領域全体で広く共有されるため、移動可能なリアルタイムの環境データベースとなる。特定のサイトに転送する必要もなく、ネットワークインフラが利用できない災害時であっても防災ネットワークとして活用できる。メモリは、あらゆる端末やネットワーク装置に実装され、更新/入替わり/移動に対しても、さらに、ベンダの違いがあっても構造は共通している。そのため、分散共有メモリと位置情報をリンクすれば、環境情報を基にするサービス等へ、時間の経過に関わらず常に同じ条件で情報提供を継続できる。本稿では、いくつかのアプリケーションとともに、複雑な移動体ルーティング、セキュリティ、端末故障対応などの現実的な課題を効果的に解決する技術と、移動体マルチホップ通信に不可欠な普遍的な端末識別方法について論じる。

1. はじめに

1.1 身近なマルチホップネットワークの拡張

近年は、多くのクラウド型データ共有サービスが提供され、高速ネットワークを用いて様々な事業に利用されている。近年は特に、高速伝送網の拡充とともに、情報発信源や利用拠点は従来からの産業地域にとどまらず家庭も含む全国あらゆる場所に広く分散化してきている。そのような状況の中、従来型の情報共有システムでは、通信設備、電力設備、保守システムなどの障害が起きるとたちまち大きな影響を受ける。大規模災害時であっても被災エリアの多くをカバーできる広範囲のリアルタイムのデータ収集手段とコミュニケーション手段を提供できることが理想的である。

一方で、これまで多くの検討がされてきたマルチホップ通信は、固定的・少ない端末数・単純な接続であればある程度実地導入が可能で、産業用センサやWLANルータの中継機能としても実用化されている。ところで、基地局やアクセスポイント経由の通信と比較すると経路を得る手順が複雑な場合が多い。特に移動端末では送信先端末の探索や安定したルート選択のための制御メッセージ通信が多数発

生するため、公共資源である電波の消費抑制などの課題を解決しつつ[1]発展してきた。小規模で身近な通信手段としての可能性は高く、東京高専情報通信研究室（田中研）では、緊急時の簡易ネットワークや構内通信手段として実験を重ねアプリケーションの開発を続けてきた(図1)[2, 3, 4, 5]。このアプリケーションは、入手容易なマイコン、誰もが持ち歩いているスマートフォン、近年多くの低価格製品がみられるFPGAなどを端末とし、WiFi・Bluetoothなどの通信機能があれば種類を問わない設計にしている。これにより形成される小規模なマルチホップネットワークを自律的に多数接続（融合）し、また、必要に応じて高速伝送網を通して中継することで、広域のネットワークも形成できるよう拡張した。

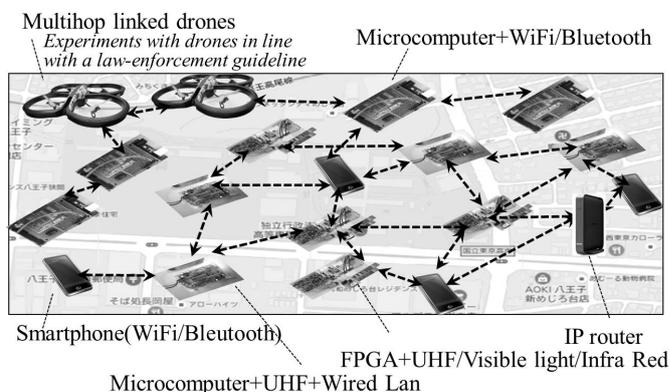


図1 小規模マルチホップネットワーク
Figure 1 Local mobile multihop mesh networks

1 東京工業高等専門学校情報工学科
Department of Computer Science, National Institute of Technology, Tokyo College

2 神奈川工科大学情報学部
Faculty of Information Technology, Kanagawa Institute of Technology

3 国立情報学研究所アーキテクチャ科学研究系
Information Systems Architecture Science Research Division, National Institute of Informatics

a) tanaka@tokyo-ct.ac.jp

b) maruyama@nw.kanagawa-it.ac.jp

c) urushi@nii.ac.jp

1.2 ネットワークを覆う共有メモリ空間

図1に示したマルチホップネットワークでは、UHF無線環境を有するFPGAで設計した端末をCore-terminalとして、ネットワーク全体が一つのメモリとなる分散型のネットワーク共有メモリ(図2の共有メモリ空間)を構成している。高速通信が実証されている分散共有メモリの基本構造[6]を用い、Core-terminalに隣接する端末(図2のAndroid端末及びマイコン端末)がセンシングしたデータをCore-terminalが持つメモリに書き込むだけで、どの端末からもアクセスできてリアルタイムに所望の演算が行える構造としている。災害時にネットワークなどの基幹インフラに障害が発生しても、また、基幹インフラが整備されていない/到達しない領域でも、小規模なマルチホップネットワークが融合してデータを分散配置することで、常に最新のデータ処理が継続できる。データの位置とのリンクが重要な要素となる環境データベース等への適用を前提に、それぞれの小規模マルチホップネットワークが持つ機能を、融合に適した処理に改良し、端末位置/データの位置/メモリアドレスを関係付け、持続的にネットワークを覆う分散共有メモリの全体像を明らかにした。

2章以降では、移動する端末を経由するルーティング、不特定端末を経由するためのセキュリティ、などの課題の最近の成果を述べるとともに、常に変化するネットワークトポロジーに適合するスイッチングや普遍的な端末識別方法を示す。

2. 小規模マルチホップネットワークの高度化

2.1 身近なマルチホップネットワークの拡張

図2に示すように、ネットワーク全体の分散共有メモリを持つCore-terminalは特定小電力無線(UHF)で互いがメッシュ状に接続され、スマートフォンを接続できる。スマートフォンのセンサ情報類をCore-terminalのメモリに書きこむことで全端末が参照できる共有メモリとなり、Core-terminal即ちFPGAに組み込まれた演算機能で処理ができる。マイコン(ArduinoやRaspberry Pi)もメッシュ構造で接続され、校内敷地はカバーできている。インターネットを介したマルチホップクラスタ同士の接続や、Core-terminalクラスタと異種端末クラスタとの接続、群ドローン制御への適用も実証済である。IoT化の進展に伴い日常生活空間や生産現場に多数存在する小型プロセッサや

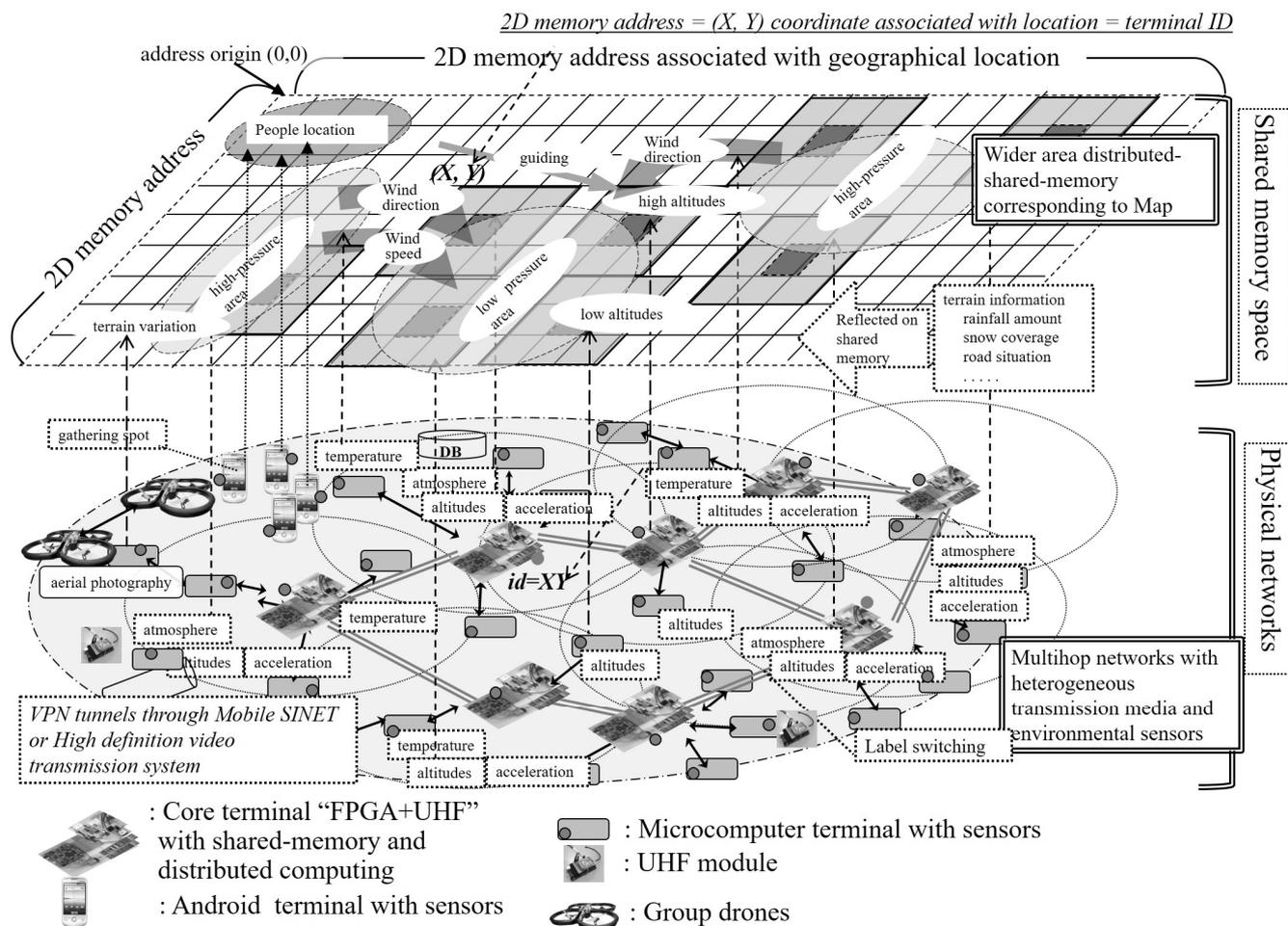


図2 ネットワークを覆う共有メモリと移動体マルチホップネットワーク
Figure 2 Mobile multihop mesh networks constituting network wide shared memory

送信せず、スマートフォン内に SQLite を使って実装したデータベースに蓄積し、データが必要な端末はインデックスからライブラリをオンデマンド参照する。マルチホップネットワーク内に同期をとった分散データベースを持ち、排他制御・同時実行制御も用いることで、常にどのデータベースにアクセスしても最新の状態が保たれている[3, 5].

融合ネットワークで多種類の環境データを収集できるようにインタフェースを改良し、内蔵センサに加えて外付けセンサも利用可能とした。赤外線センサ[7]によって周囲の人の体温を記録できる。予め想定したデータ種以外に利用者自身が外付けセンサを用いるなどして新たな種類のデータを取得するケースもあり、また、防災用途では物資や安否確認など様々な属性の情報を一括して取り扱うため、コンテンツに基づいてテーブルやカラムの追加、削除などのデータベース構造を自動的に修正する機能も備える。ネットワーク内端末による参照だけでなく、NFC タグにスマートフォンをかざすだけでデータベース内の情報がスマートフォンに自動転送され表示され、プッシュ型利用も可能である。

Bluetooth でクラスタを組み、比較的電力消費が大きい WiFi Direct でクラスタ間のクラスタを構成しているが、さらに、近接領域でのチャンネル競合を避け、利用端末数の制約を取り除き、かつ省電力(1/2 以下)で災害時の避難所利用にも適する Bluetooth Low Energy (BLE)も使用できる。

2.4 マルチホップネットワークのセキュリティ

マルチホップネットワークでは多数の不特定端末を経由するため、セキュリティ確保が必要となる。複数ルートを利用した通信も行えて、一部区間に障害があっても通信は確保できるので、この機能を利用して経路分散と仮想プライベートネットワークを実装し、情報漏れを防止している[3]。一方で、経路分散のための分割と再結合はエラー時の再送手段を複雑化する要因となりえる。スマートフォンを端末とする経路分割では経路と端末数が増加すると通信時間が一端末を経由する毎に 0.5~2 秒程度要する場合がある

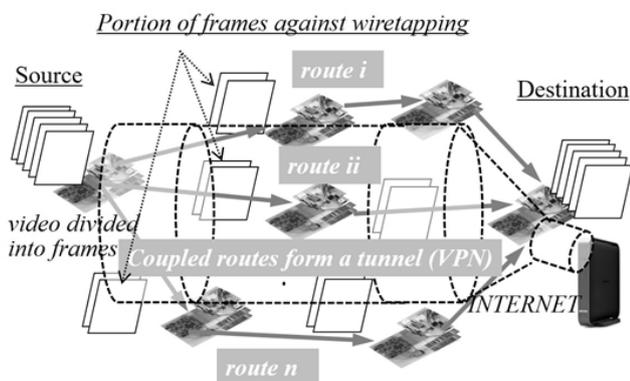


図 5 多重セキュリティをもつマルチホップネットワーク

Figure 5 Intensified security for mobile multihop networks

ため、経路分割は Raspberry Pi で行っている。WiFi を用いた Raspberry Pi でのマルチホップ通信では、大容量動画(マルチメディア)の送信・再生にも十分に適応する。更に暗号化とマルチホップ通信に適した Virtual Private Network (VPN)も用いる。暗号化では RSA で SSH 鍵を生成し SCP で公開鍵を通知する。さらに、多くは WAN~LAN の転送に用いられているポートフォワーディングを使い、送信受信端末間は SSH 化されて中継ルート上の秘匿化を行っている。ネットワーク自体がセキュリティ構造となる経路分割を組み合わせ、より強固な VPN が設定できるため(図 5)、異種のマルチホップネットワークを複数貫いて分散共有メモリ上に生成される経路に適した方式が確立できた。

大容量の動画送信は動画をフレーム単位に分割し、フレームを複数の経路に振り分けて送信する。OpenCV を用いて動画を読み込み 30fps に分割、受信端末での復元時に使用するためファイル名を連番にして付与して画像ファイルとして連続送信している。動画は環境情報などとリンクさせて、転送速度が比較的遅いスマートフォン上のデータベースや Core-terminal の FPGA で構成される共有メモリ上に保持して利用するため、この分割送信方式は経路の負荷分散による通信品質確保にも効果が得られる。受信端末も OpenCV で複数枚の画像を読み込み結合し 30fps の動画に復元する。経路分割されてフレーム到着時刻に揺らぎが生じてもファイル数をチェックしフレーム抜けを防いでいる。

2.5 自動追尾群ドローンによる領域拡張

災害時、或いは日常でも携帯、WiFi, GPS が直接届かない領域等に持続的に差異なくネットワークを拡張し、将来のロボット間/自動車間の直接通信にも応用できるよう、マルチホップ通信を群ドローン制御に応用してきた[3, 4, 5]。複数ドローンを中継機としても使用して遠方の先頭ドローンの映像を見ながら制御するシステムも設計済である。先頭ドローンを後続ドローンが数珠つなぎのように自動追尾するため、先頭ドローンは入り組んだ箇所や遠方まで飛行できてマルチホップネットワークのカバー域を拡張できる。入手容易な市販ドローンを使用するため、マルチホップでリンクされた Raspberry Pi をドローンに付着させ、各ドローンは Raspberry Pi を介して制御信号を受け取る。専用機材は不要で災害時等でもすぐに誰でも操縦可能である。追尾方法(図 6)として、これまで、a)オペレータから群ドローンを介して先頭ドローンに送られる操縦コマンドを後続ドローンが再生し、先頭ドローンと同じ経路を飛行、b)ドローン間のリンクが途絶えたら双方が停止、後続ドローンは前方ドローンの信号強度を探索してその方向に飛行、c)後続ドローンが前方ドローンを画像認識して移動方向に追尾、d)内蔵位置センサの情報を交換して協調動作、を設計・動作確認し、さらに、e) (1)項のネットワーク仮想制御と連携した受信信号強度 Received Signal Strength Indicator (RSSI) から取得される相対速度による制御、を設計してお

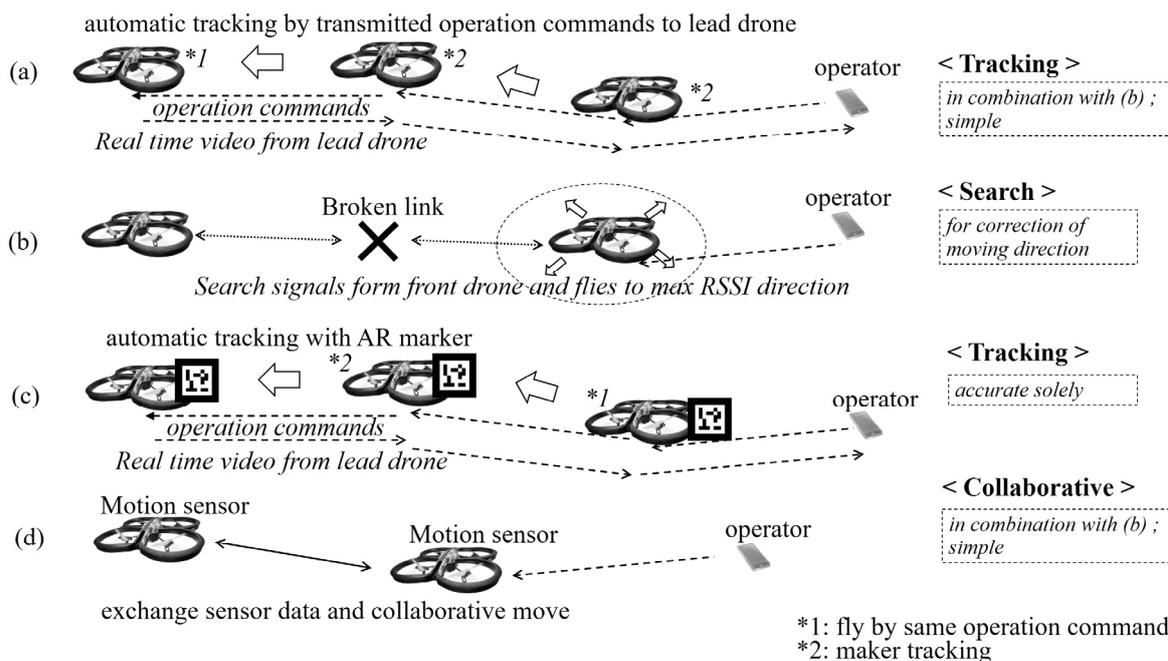


図 6 ネットワーク領域を拡張する群ドローンの自動追尾方式

Figure 6 Autonomous group-drone tracking system for network extension

り、状況に合わせて使用することができる。

a)や d)方式は b)と組合せて精度を補正するが、c)や e)方式は各々単独で後続ドローンが経路を逸脱せず効率よく追尾できる。OpenCV のリアルタイム画像認識のモジュール AR 用ライブラリ ArUco を使用しており、各ドローンの後部に貼り付けた AR マーカを後続ドローンが検出し追尾する。ロドリゲス公式[8]を使用するため cv2.Rodrigues を用いている。ドローン本体の識別よりも処理量が抑制されタイムラグなく前方ドローンを認識でき、距離、向き/傾き、相対位置、個体識別番号が検出され、一定の距離を保ち追尾できる。モーションセンサは市販ドローンの多くに搭載されているので、改造など不要である。

3. 共有メモリを組み込んだマルチホップネットワーク

3.1 コア端末 (Core-terminal) 群が形成する共有メモリ

2章で述べた、マイコン/スマートフォン/ドローンを用いたマルチホップネットワークからのデータは、スマートフォンを介して Core-terminal 群のマルチホップネットワーク上の共有メモリに展開される[2, 3, 4, 5]。端末が移動したり入れ替わっても影響を受けずに共有メモリが維持されるよう、端末の隣接リンク情報のみでルーティングが持続されるラベルスイッチング[9][10]の基本部分を実装しており、普遍的な ID をメモリアドレスと端末識別に適用している。図 7 は設計し[2]実験で使用している Core-terminal の一部である。

3.2 障害・輻輳に対するルーティングの評価

共有メモリを構成する Core-terminal は容易に設置できる

よう安価な小型端末を想定しているため、移動だけでなく故障対処が必要である。自律的に故障端末を迂回[2, 3, 4, 5, 11]した場合について IP ベースルーティング[11]と比較しその傾向をシミュレーションで示した (図 8)。ラベルスイッチングの迂回処理の準備にあたるルート更新は終了した時点の定常状態での比較を示している。IP ベースの更新処理はルーティングと一体で行われる。通常は両者に差はないが迂回時はラベルスイッチングが広帯域を占有する高精度画像伝送トラヒック等による輻輳に影響されにくいことがわかる。小規模ネットワークを融合するとそれぞれのトラヒック状況が異なるため、迂回が必要な端末故障相当ではなく輻輳による遅延の程度 (レイテンシの低下の程度) を比較も行った (図 9)。端末は領域内に様に分布、経路再設定前後とも最短路が選択される、ラベルスイッチングは予め 2 回線 (ルート) だけ用い互いが最も離れるように設定、IP ベースルーティングは全ての最短路からランダムに選択、の前提で、輻輳がラベルスイッチングの一つの回線近辺の場合とそうでない場合それぞれで、IP ベース

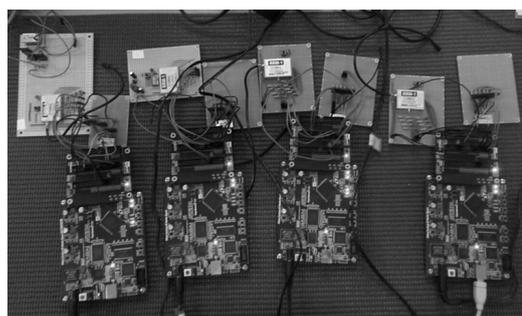


図 7 FPGA+UHF 端末 (Core-terminal)

Figure 7 Core-terminals with FPGA and UHF

Network internal processing time in static state

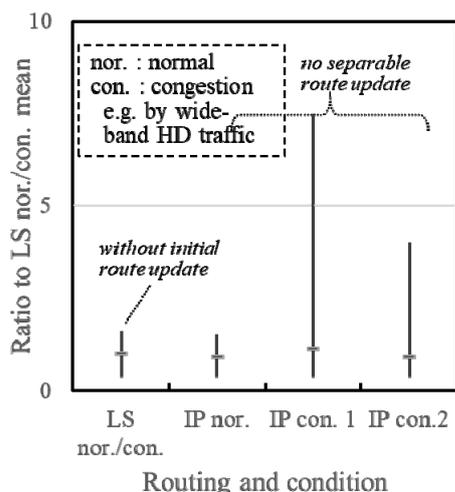


図8 輻輳時の迂回時間

Figure 8 Detour routing during congestion

ルーティングと比較している。回線容量を最大に使用するケースでなければラベルスイッチングが良い傾向を示す。

3.3 隣接リンク情報によるラベルスイッチングの適用

端末は常に移動するため、既存のルーティングテーブルを更新しながら接続ルートを選択することは不可能である。advertise 型端末探索は幾度も修正が必要になる。そこで各端末の隣接範囲のみに有意となるラベルをリンクに付与してラベルの並びでルートを指定するルーティングを採用した。端末が入れ替わってもラベルを引き継ぐためルーティングは持続的に使用でき、他の端末に通知したりラベル再配信する必要もない。これにより融合された小規模ネットワークでもそのまま引き継げるようになった。さらに、安全性の確保と他マルチホップネットワークと接続した際のエンドエンド経路を維持するため VPN も実装している。

メッシュで接続しており、簡易に広範囲の宛先端末を発見でき、2.2 項記載のブロードキャストで最短応答経路の特定を行う。中継路上の端末障害に伴うルート修正はラベル再配信を伴わない限定的な範囲の修正で対応できる。現在は下記(a)(b)で最適な方法を選択する。

a) 隣接する端末間での優先度付けされた迂回路を予め保持し、ルート上の端末障害や移動により信号が途絶えたことを検出し自律的に迂回路に切り替える。b) ルート設定の際のブロードキャストにより周辺の端末にも宛先端末へのルートは記録されているため、ルート上の端末からの信号が途絶えたことを検出した端末は隣接端末宛てにデータを転送し、隣接端末からの宛先端末へのルートに自律的に修正する。

3.4 共有メモリを用いたネットワーク分散処理と端末識別

それぞれの Core-terminal 周囲の端末から送信されたデータはネットワーク領域に広がる共有メモリ上に格納され、

Latency comparison of label switching based routing and IP based routing

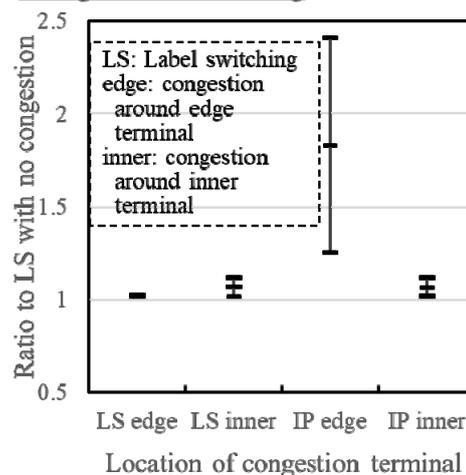


図9 自律迂回ルートのレイテンシ

Figure 9 Latency of autonomous routing

Core-terminal が演算処理を行う[3, 5]。そこで、移動もする端末の位置、端末が一部となる共有メモリのアドレス、端末の識別[12]、を一意に実行する方式が必要となる。

(1) 格子状の端末配置

配布などにより領域内に十分な数の“FPGA+UHF 端末” (Core-terminal の候補) が存在すれば、図 10 に示すように、基点となる端末から信号到達距離付近にある 2 台の端末で、互いの信号到達範囲にある最も遠い端末を検出し、正三角形の位置にある 3 台を得る (Step 1)。この手順を隣接する端末に次々と広げて、六角形の各頂点にある端末を見出すと 60° の座標系が得られるので、直交座標系に変換すれば (Step 2)、格子点上 (或いは直近) に端末が配置された状態として扱える。これら格子点上の端末を Core-terminal として使用する。可視化の際の逆変換により実際の Core-terminal の位置と一致し、格子点上に Core-terminal が存在する状態で、相対的な位置と共有メモリの二次元のアドレスとを 1 : 1 に対応付けられる[12]。建物の階の上下のように端末が上方下方にも置かれる場合は、共有メモリは三次元アドレスも割り当てられる。移動で端末位置が変わったり故障で入れ替わっても ID を付与/更新する必要はなく、環境情報のように位置に付随するデータを持続的に保持するネットワーク構造ができるようになった。

(2) 自律平準化ルーティング

格子点上に存在する端末が Core-terminal となり、2 次元配置では図 11 に示すようにメモリアドレスの差分の比に従って所定順に或いはランダムに次端末 ID を増やしながらかリンク選択を行う。ルートを予め決めるルーティングテーブルやラベル配信は不要で、各 Core-terminal は直近のリンク状態だけを用いて送信先までのルートが確立できる。また、各リンクの使用率は均等になり輻輳や過負荷を抑制した平準なルーティングとなる。

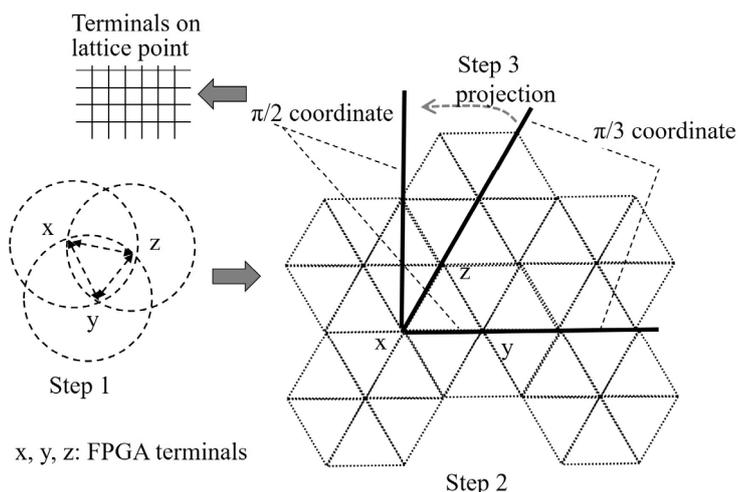


図 10 格子点上の Core-terminal を選択するための端末探索
Figure 10 Core-terminal search for identifying lattice point

(3) 端末位置を用いた移動体ネットワークにおける端末識別方式

Core-terminal の識別子 (ID) は格子点の座標としている。このため、送信端末/受信端末/中継端末、いずれも、その位置を端末の ID として通信を行うことができ、ある地域の環境情報を得るには、ルート検索や端末探索は全く不要で ID を指定すれば十分となる。各 Core-terminal は隣接 Core-terminal とリンクを維持しており、別の Core-terminal に入れ替わったとしても入れ替わった Core-terminal は自身の位置を特定できて、自律的に自端末 ID を設定できる。Core-terminal のメモリが共有メモリを構成するため、メモリアドレスも格子状の座標である ID と一致する (図 2 の XY)。即ち、各 Core-terminal は近隣 Core-terminal との RSSI だけを用いて、格子点上にある Core-terminal を選んでメッシュ状のネットワークを構成でき、端末が移動し入れ替わるネットワークに対して全くオーバーヘッドを生じさせない効果的な ID 付与方式である。そのため端末の地理的位置だけに基づいてルーティングも共有メモリデータを用いた処理も行える[4]。

(4) リアルタイム環境マップへの適用

Core-terminal に接続されたスマートフォン等がセンサーデータ類を収集しその端末のメモリに記録する、あるいは、格子点をなす Core-terminal に送信して共有メモリに書き込むと図 2 の風速・風向/気圧/高度/人の位置/気温等で示すようにセンサーデータが取得された位置を反映したメモリアドレスに書き込まれることになる。3.4(1)で述べたように端末 ID・メモリアドレス・実際の端末の場所は等価であり、ネットワーク分散共有メモリ自体がセンサーデータによる端末周囲の地域環境を反映したマップになる。被災地域のリアルタイム環境観測、インフラネットワークが未整

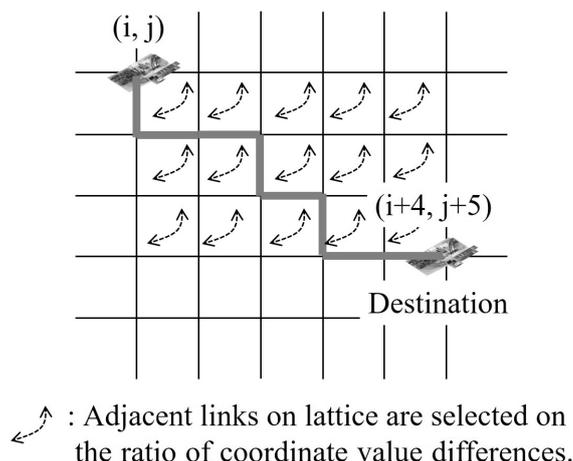


図 11 周辺リンク状態のみに基づく自律平準化ルーティング

Figure 11 Equalized autonomous rooting for lattice point terminals based on surrounding link status

備領域の地域情報のリアルタイム状況データベースなどへの適用が考えられる。アプリケーション例として、気圧を取得し共有メモリに記録しておく、隣接メモリ領域の気圧差が加速度に比例するため防災に有効な風速が求められる[13]。コリオリ力も含むのが適当[14]だがメモリの簡易な動作確認用のため、式 1 の風速風向シミュレータにより環境情報収集の実効性を検証する。

$$\alpha = \rho^{-1} \cdot dp/dx \quad (1)$$

α : 加速度, ρ : 密度, p : 気圧, x : 距離

(5) 共有メモリに対する演算システム

Core-terminal は、ネットワーク内の全ての共有メモリ上のデータを対象に演算を行え、結果を共有メモリ上に書き込める。複数の Core-terminal の演算用レジスタを連結すれば、大量の環境情報を処理する演算規模に適応した拡張が可能である。任意の端末上のデータを対象に演算し、任意の端末に結果を保持できる、すなわち、共有メモリ上の任意のアドレスに対して行った演算を任意のアドレスに格納でき、それぞれを結合した大規模演算も可能にした。どの端末からも共有メモリへのアクセスで所望データを読み取れる。全体がメモリ素子である FPGA は、ネットワークを覆う広域の共有メモリを構成する際に効果的である。アドレス変換やルーティングテーブル参照も全く不要で、高速に FPGA 内のデコーダだけで共有メモリ内のアクセス先を得るため、ネットワークが大規模になった場合でもメモリアクセスはリアルタイムに行える。

4. まとめ

これまでに開発してきた小規模なマルチホップネットワークの幾つかの技術をもとに、場所や状況を問わず通信が維持されて持続可能な広域データ共有システムを設計し

た。小規模ネットワークにおいては、遠隔でも実環境を再現して制御可能な仮想制御，ネットワーク構造を利用したセキュリティ，インターネットやコア端末である FPGA で設計された端末群を介した相互接続，群ドローンによる領域拡張等の高度化を行った。さらに，FPGA のメモリをネットワーク全体で分散共有メモリ化し，端末分布領域の環境情報を反映するリアルタイムのデータベースを設計している。マイコン，スマートフォン，Core-terminal，ドローンを用いて数台～十台程度の端末から構成されるメッシュネットワーク，動作実証及びアプリケーション実装を行い，端末状態や負荷・電源・無線環境などに適したルーティング，異種伝送媒体（WiFi・Bluetooth・UHF・赤外線・可視光）最適選択，端末保持者やデータ発信位置を示すマップの自動生成，セキュリティ（ランダム経路分割送信，ラベルスイッチング+VPN），インターネットを介したクラスタ間接続，群ドローン制御，端末間データ同期制御，ネットワークトポロジー変更機能，分散共有メモリの生成・共有メモリ上の演算，通信環境を遠隔で再現する実端末による3次元エミュレータ，等が開発済である。共有メモリをもとに小規模ネットワークを融合するにあたり，必要な機能を抽出し，リアルタイムな広域メモリ形成に最適な連携となる改良を行った。

端末の位置，端末の ID，及び分散共有メモリ内のアドレスが等価となるため，移動体端末にも拘らず周辺の情報情報，ルーティングとメモリアクセスを一元的に処理可能である。身近に存在する安価な IoT 装置を端末としているため災害時でも直ちにくまなくネットワーク張りめぐらすことができ，小規模マルチホップネットワークのメモリを結合した，端末位置に基づく広域の共有メモリは，環境情報や人々の移動状況などのリアルタイム統計処理に応用できる。

端末個々の発信データは小規模のため，今後は，神奈川工大の高精細映像伝送システム[15]に埋め込み，NII の mobile SINET [16, 17]経由で長距離接続した広域化を検討している。

参考文献

- [1] Tanaka, A., "Biologically inspired multi-route reconstruction in multihop wireless environment," *Wireless Personal Communications*, Vol. 60, No. 4, pp. 809-825, Springer, Oct. 2011. (*Wireless Personal Communications Online First*, <http://www.springerlink.com/content/j780wr1r65t506tr/fulltext.pdf>, Apr. 2010.)
- [2] Tanaka, A., "Locally exploitable heterogeneous multihop communications applied to cooperative robots," *Proc.5th Int'l Conf. on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN 2013)*, 7A-5, pp. 321-326, Da Nang, Vietnam, July 2013.
- [3] 田中晶ほか, "拡張アダプティブモバイルマルチホップネットワーク," *東京高専研究報告書*, Vol 52, Mar.(Aug.公開) 2021.
- [4] 田中晶, 丸山充, 漆谷重雄, "自律拡張共有メモリによるリア

- ルタイム情報ネットワーク - 防災への応用を目指して-,
信学技報, Vol. 120, No. 413, NS2020-173, pp.229-304, Mar. 2021.
- [5] 田中晶ほか, "リアルタイムビッグデータのための拡張モバイルマルチホップネットワークの一検討," *東京高専研究報告書*, Vol 51, Mar. 2020.
 - [6] 田中晶, 山田茂樹, 田中聡, "ネットワーク分散処理ノードアーキテクチャ MESCAR のメモリ間複製機構の設計と評価," *信学論 B*, vol.J86-B, no.2, pp. 148-161, Feb. 2003.
 - [7] "FLIR One SDK," <https://developer.flir.com/>, (参照 2020-12-05).
 - [8] https://docs.opencv.org/3.0-beta/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html?highlight=rodrigues#cv2.Rodrigues (参照 2021-7-5)
 - [9] 山中直明. *インターネットバックボーンネットワーク*. オーム社, 2014.
 - [10] Davie, B. S. and Farrel, A., *MPLS: Next Steps*. Morgan Kaufmann, 2008.
 - [11] 田中晶, 丸山充, 漆谷重雄, "小規模無線メッシュネットワークと VPN による perceptual IoT 設計の一検討," *信学技報*, Vol. 117, No. 459, NS2017-232, Mar. 2018.
 - [12] 田中晶, "マルチホップ無線通信におけるノード識別方式の一検討," 2011 年信学ソ大, B-5-87, p466, Sep. 2011.
 - [13] 田中晶, "マルチホップネットワークに基づく共有メモリアクセス," 2020 年信学総大, B-5-91, p379, Mar. 2020.
 - [14] 二宮洗三, *気象がわかる数と式*, オーム社, 東京, 2000.
 - [15] 丸山充, 青木弘太, 君山博之, 河合栄治, 大槻英樹, 藤井竜也, 林丈樹, 瀬戸山勝義, "リアルタイム性に優れた高精度ネットワークモニタ技術," *信学技報*, Vol. 117, No. 385, NS2017-166, pp.129-134, Jan. 2018.
 - [16] "SINET5 の運用状況," 平 28 年度 SINET・学術情報基盤サービス説明会, 国立情報学研究所, Nov. 2016.
 - [17] "SINET update," 国立情報学研究所, https://www.nii.ac.jp/openforum/upload/c1_setsumeikai2019_sinet_1_20191216.pdf (参照 2021-2-7)