

無線アドホックネットワークを用いた音楽合奏に関する検討

佐藤 善宣† 石原 進†† 峰野 博史‡ 水野 忠則‡

†静岡大学大学院情報学研究科 ††静岡大学工学部 ‡静岡大学情報学部

An Investigation of Playing in Concert of A Mobile Ad-hoc Network

Yoshinori SATOH†, Susumu ISHIHARA††, Hiroshi MINENO‡
and Tadanori MIZUNO‡

†Graduate School of Information, Shizuoka University

††Faculty of Engineering, Shizuoka University

‡Faculty of Information, Shizuoka University

1 はじめに

近年、ノート PC や PDA 等の携帯端末、無線 LAN や Bluetooth 等に代表される短距離無線通信装置が発展・普及してきた。これに伴い、端末同士が基地局を介さずに通信し、特定の場所に集まった携帯端末同士が一時的に構築するネットワークであるモバイルアドホックネットワーク (MANET) に関する研究が活発に行われている。MANET の応用として、災害時における緊急会議や会議場での一時的なネットワーク構築への利用等、MANET の特徴を活かした様々なソフトウェアが考案されている。

また、ADSL や光ファイバ等の高速・広帯域ネットワークの普及により、音声データや動画データを用いたマルチメディア通信が一般的になりつつある。マルチメディア通信では、短時間に大量の音声データや動画データを双方向、さらには多方向に伝送したり、遠隔地とリアルタイムにやりとりすることも可能になってきている。例えば、ビデオ会議、遠隔教育、ネットワークゲーム、テレビ電話、VoIP、ストリーミングサーバ等様々なサービスの実用化が進められている。これらのリアルタイム性が要求されるアプリケーションでは、遅延が小さく、かつ伝送される音声データや動画データが高品質であることが望まれる。特に、合唱や合奏は高い時間制約のなかでのインタラクションを必要とするリアルタイムアプリケーションであり、最も制約の厳しいものの一つである。近年、有線ネットワークにおける遠隔音楽合奏の研究が注目されており、遠隔合奏、演奏システムの実装と実環境における評価が行われている [1][2][5][6] [7]。詳細については 2 章で述べる。

有線ネットワークインフラを使うことで、遠隔地にいる相手とも音楽合奏が可能になる。しかし、このためには有線ネットワークに直接接続できる場所であれば合奏ができない。一方、無線ネットワーク、特に無線端末のみで構成されるアドホックネットワークを用いることで、有線ネットワークインフラに依存しない合奏が可能である。すなわち演奏者が相互に無線通信範囲にいれば、いつでもどこでも実際に音を鳴らさなくても合奏が可能という演奏スタイルが得られる。さらに、演奏者同士が無線の通信範囲にいない場合でも、マルチホップ通信により演奏音を配信できるため、より広い範囲で合奏をすることが可能となり、面識のな

い相手と音楽によるコミュニケーションがとれる世界が実現できると考える。また、自分が演奏ができなくてもネットワークに参加するだけで、身近な人間の生演奏を聞くことが可能となる。このような演奏を聞いている聴衆が、演奏前に演奏者に曲のリクエストを行う、演奏中の手拍子、演奏後の感想等のフィードバックを与えることが可能であれば、MANET において新たなコミュニケーションの形が成立すると考えられる。本稿では、このような MANET 上での音楽合奏の実現可能性について検討する。

2 ネットワークを介した遠隔音楽合奏

有線ネットワーク上での遠隔音楽合奏、合唱に関する研究がいくつか報告されており、それらについて簡単に紹介する。

[1] では、東京-大阪間にそれぞれ演奏者を配置し、有線ネットワークを使用して遠隔合奏を行い、演奏者による主観評価を行っている。結果として、演奏者がある程度の遅延時間ならば、自分の技巧によって相手の音に自分の音のリズムを合わせることができ、遠隔合奏が可能であると述べられている。また、自分と相手の地点との遅延時間を計測し、自分の音をその遅延時間分遅らせて聞く方法によって、タイミングの同期を行っている。[2] では、音声データの伝送に伴う遅延は、データの送受信の際に発生するネットワーク遅延と音声データのバッファリング等に関する処理遅延の主に 2 つに分類されると述べている。また、東京-米国カリフォルニア間にそれぞれ演奏者を配置し、100Mbps の広帯域国際通信回路を使用して遠隔合奏を行い、ネットワーク遅延と音声処理遅延の測定、演奏者による主観評価を行っている。結果として、音声処理遅延はネットワーク遅延に比べてはるかに大きく、お互いの演奏音を聞くのみの合奏では、違和感が大きすぎて合奏にならなかったと述べている。実験の中で、指揮者の映像を使用して合奏を行うと、違和感なく合奏できたという実験結果も得られている。

2.1 MRAT: Multipurpose Robust Audio Tool

[5] では、多目的な音声伝送システム (MRAT) を開発した。MRAT は、双方向音声会議を目的とした Mbone[3] のツールの

一つである音声伝送システム RAT(Robust Audio Tool)[4] を様々な目的に使用できるよう拡張したものである。RAT はマルチキャストに対応しており、さらにロバスト性も高く悪条件なネットワークでも音声伝送を行うことが可能である。RAT は様々な音声 Codec、サンプリングレート、チャンネル数等の設定が可能である。この RAT にバッファリングサイズを小さくし遅延を少なくしたり、Reed-Solomon 符号を用いた FEC を使用して、ロバスト性を高めたりする機能を追加し、様々な状況での使用を可能としたのが MRAT である。MRAT は、遠隔講演・遠隔講義を利用目的とする Broadcast モード、遠隔会議を利用目的とする Conversation モード、遠隔合唱・遠隔合奏を利用目的とする Chorus モードの 3 つのモードがあり、この中で Chorus モードはバッファリング時間を極力減らし、音声処理にかかる遅延時間を縮小している。この MRAT を使用し、ある一つの地点で伴奏データを送信しつつ、別の 2 つの小学校間で遠隔合唱を行い、MRAT の Chorus モードと伴奏データを使用することで違和感のない合唱が可能であったと述べている。

2.2 遅延を考慮した遠隔音楽合奏

[6] では、ネットワークを用い遠隔合奏をする際に、あらかじめ遅延があることを考慮し、新しい合奏形式を提案し、評価している。その方法として、あらかじめサーバから伴奏の MIDI データをダウンロードしておき、演奏相手には自分の 1 小節遅れのデータが届き、その音データとセッションを行う。この手法を用いて、実装評価を行っている。[7] では、[6] を参考にし、サーバから入手したパラメータを元にアルゴリズム的に伴奏データを生成し、各演奏者の遅延を考慮した時間同期について何も考慮しないことで、より手軽な合奏を提案し、実装している。

これらの研究では、ネットワークを利用した遠隔音楽合奏の際に最も障害となるのは遅延であると考えられている。[1][2] では、ネットワークを介した演奏者間の音声伝達遅延時間が 60msec 以下であれば、演奏者が多少違和感を感じながらも合奏が可能であると結論づけている。また、[2][5] では、相手の音を聞くだけで自分の音を合わせるのではなく、補助的にリズム同期のための信号、例えば伴奏や指揮者の映像を用いて演奏することで、第 3 者の立場で音を聞いた場合に違和感なく演奏音が合っているとの実験結果を得ている。このことは、各演奏者が同期して合奏するためには指揮等の共通のリズム同期信号が大事であることを示している。しかし、リズム同期信号による同期のみによって成立した合奏は、演奏者にとっては合奏というよりは独奏と変わらない。特に少人数での合奏の場合、演奏者は臨場感を持った合奏を楽しみたいものである。そのため、他の演奏者の音がリアルタイムに聞こえるように、各演奏者間のインタラクションを可能とする同期も大事である。

3 MANET の特徴

本研究で想定している MANET 上での遠隔合奏環境を以下に定義する。全ノードが移動可能な無線端末によって構成されたネットワークとし、演奏を行う演奏者ノードと演奏者ノードから送られた音を聞き、自らは演奏をしない聴衆ノードの 2 種類のノードがあるものとする。さらに、[6][7] のようにはじめから遅延を考慮した遠隔音楽合奏を目指すのではなく、可能な限り遅延の低減を目指し、実世界の合奏と同様の合奏を目指すこととする。実際の利用イメージは図 1 のようになる。

MANET 上での遠隔合奏では、有線ネットワーク上の場合と同じく音声伝送遅延を低く抑えるという制約に加え、MANET

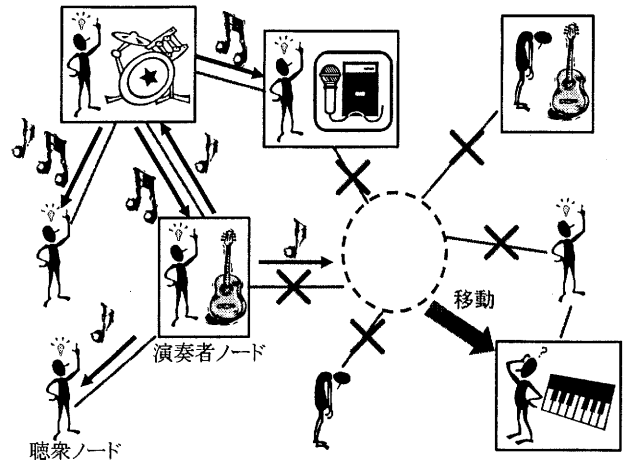


図 1: 利用イメージ

ならではの特徴を考慮する必要がある。以下に、MANET の代表的な特徴を遠隔合奏の観点から述べる。

3.1 遅延の変動

無線通信は有線ネットワークに比べ、他の電波によって干渉する等の問題により、通信品質が悪いため遅延の変動が大きい。さらに、ノードの移動等によりトポロジが頻繁に変化するため、大幅に遅延が変動すると考えられる。遅延の変動に対処するため、MANET 上での遠隔合奏では、有線ネットワークでの遠隔合奏以上にバッファを大きくし、遅延やジッタに対処するという方法も考えられる。しかし、バッファを大きくすると、逆にバッファリング時間が増大し、リアルタイムアプリケーションでは処理を予定した時刻に必要なデータを利用できない状況が生まれてしまう。そのため、MANET の状態に応じて適切にバッファリング時間を変更したり、合奏に支障がない程度に音質を下げる等の制御が考えられる。

3.2 メンバの変動

MANET では有線ネットワークに比べネットワークのメンバーの変動が大きい。ノードの移動によって所属しているネットワークの通信範囲から外れる、または新たなネットワークの通信範囲に入るにより、ネットワークへの参加・離脱が発生する。これは、遠隔合奏ではあるセッション中に演奏者が離脱する、または新たな演奏者が参加する、途中で離脱した演奏者が復帰する可能性があることを示している。MANET 上の遠隔合奏では、セッション中の意図しない演奏者の参加・離脱(復帰)に対する適切な制御が必要である。

3.3 特定ノードへの機能の集約

MANET はネットワークに属するノードの参加、離脱が頻繁に発生するため、特定のノードにアプリケーション実行に必要な機能を集約することができない。そこで、MANET では、特定の機能を動的にノードに割り当てる、分散処理で行う等の方法により制御することが考えられる。

3.4 ルーティングアルゴリズム

MANET ではルーティングを各ノードが行わなければならない。そのため、遠隔合奏に適したルーティングを考える必要がある。最も簡単なルーティングとしてフラディングがある。これはブロードキャストを繰り返して、データを全ノードに配信する詳細であるが、冗長なデータが多く流れてしまうため、効率が悪い。特に遠隔音楽合奏では、演奏者ノードが常に音データを送信するため、データの送信頻度が高く、ネットワーク中のトラフィックを抑えなければ遅延の増大やパケットロスの増大により、音声データの同期のずれ、音質の低下が発生し合奏が困難になってしまう。遠隔音楽合奏では、ある演奏者から他の演奏者へ、可能な限り遅延が少なく、必要のないノードへはデータを送らずにネットワーク中のトラフィック量を抑えるルーティングをする必要がある。

現在、MANET のルーティングプロトコルは大きくプロアクティブ型とリアクティブ型の2種類に分類される。プロアクティブ型は、データ送信に関わらず常に各ノード間でルーティングテーブルの構築、維持を行う。プロアクティブ型のルーティングプロトコルは経路発見のための時間が短い利点がある。しかし、トポロジ変化に対してオーバーヘッドが大きい欠点を持っている。また、ルーティング情報維持のためにコストがかかり、ネットワーク中のトラフィックが増大する。このため、比較的トポロジ変化が少ない MANET ではプロアクティブ型のルーティングプロトコルが適している。リアクティブ型のルーティングプロトコルはデータ送信時等、必要になった際にはじめて経路の探索を行う。このため経路発見に時間がかかる場合がある。一方で、リアクティブ型のプロトコルではトポロジ変化の際のオーバーヘッドが少ない。このため、リアクティブ型のルーティングプロトコルが頻繁にトポロジが変化するような MANET では適している。

MANET 上での遠隔音楽合奏では、プロアクティブ型のルーティングプロトコルが適していると考えられる。これは、無線端末を人間が持ち運びしている想定であり、移動速度が比較的低速であり、トポロジ変化が少ないからである。しかし、プロアクティブ型のルーティングテーブル構築・維持のために常時ルーティング情報のやりとりする必要があり、場合によっては多大なコストがかかる。また、音声データを頻繁に送信するので、経路発見に時間がかかるリアクティブ型のルーティングプロトコルでは、データ送信の際にルーティング情報がネットワーク中に増加し、音声データ送信の妨げになると考えられるからである。

4 MANET 上での合奏支援機能

遠隔合奏を実現するためには、単に演奏者間の音声データの転送のみならず、複数の演奏者の演奏をまとめて音楽となり、その演奏を維持するための支援機構が不可欠である。基本的な機構として、演奏者間の演奏タイミングの同期、演奏者の発した音のミキシングの機構が必要である。前節で述べたように MANET ではノードの移動によって遅延、合奏メンバ、経路の変動が頻発し、特定ノードへの機能割り付けが困難という特徴がある。MANET で上記の演奏支援機構を実現するために MANET の特徴を考慮した実現手法が必要である。以下、それぞれについて検討する。

4.1 タイミングの同期

遠隔合奏に関わらず、通常の合奏においても演奏者はただ直感的にリズムを取り演奏をしているのではなく、なんらかのリズムの指標となるものにしたがって、テンポを合わせ演奏してい

る。例えば、オーケストラの場合その役割は指揮者であり、バンドの場合ドラムやベースの音であり、合唱では伴奏である。有線ネットワークでの遠隔合奏においても指揮者の映像や伴奏を用意することで、遠隔合奏が成立するという報告がされており、遠隔合奏でも演奏者間のタイミングの同期が重要であるといえる。

具体的な実現方法として、指揮者の映像や、ドラムの音等(以降タイミングデータと呼ぶ)を使用する方法が考えられる。このとき、演奏者側でタイミングデータを再生させるための手順として以下3つの方法が考えられる。

4.1.1 特定ノードが演奏中に配信する方法

あらかじめ特定のノードと各演奏者間のネットワーク遅延を測定しておき、特定のノードからタイミングデータを送信し、各々のノード間の遅延時間を加味し、再生するタイミングを同期させる方法である。これは、事前の準備が簡単であり、さらに新たに合奏に参加する場合にもすぐに参加できる利点を持っている。ただし、このタイミングデータの提供は特定の固定ノードに依存しない方法で行う必要があり、ネットワークのトポロジ変化に対応した工夫が必要である。

4.1.2 演奏開始以前に演奏者側に準備する方法

各演奏者は合奏前に、演奏ノード側にタイミングデータを用意しておき、各演奏者間で時間同期させておき、再生する方法である。この方法は、特定ノードから配信する方法に比べ、あらかじめタイミングデータを演奏者ノードに用意しなければならないという手間がかかる。このため、合奏の途中参加は困難である。しかし、演奏中にタイミングデータを送信しないため、ネットワーク中のトラフィックを抑えられるという利点がある。

4.1.3 特定ノードから配られたパラメータによって生成する方法

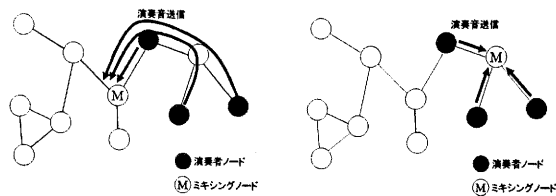
この方法は、[7]で考案されている方法を利用したもので、特定ノードが合奏中に演奏者ノードにあるパラメータを配布し、演奏者ノード側でそのパラメータに従ってアルゴリズム的にタイミングデータを生成する方法である。特定ノードを用いるため、ネットワークから離脱した場合に機能が使用できなくなるという問題が発生する。しかし、パラメータさえ受け取れば、即座に演奏を開始できる便利さが利点である。MANET では一度遅延時間を測定し、それを基に各演奏者ノードでのタイミング同期を計ったとしても、トポロジの変化等によって遅延時間は頻繁に変動するので、同期をしづらい。しかし、演奏中に動的に同期信号の再生タイミングを変更すると演奏者は混乱してしまうので問題である。

4.2 ミキシングの機構

以下に、MANET 上の合奏における音声ミキシング手法として考えられる基本的な3つの手法を示す。ここで、MANET は演奏を行い、合奏音を聞く演奏者ノードと、演奏をせず合奏音を聞くのみの聴衆ノードの2種類のノードによって構成され、固定のネットワークインフラとは相互に接続されていないことを前提とする。

4.2.1 特定の単一のノードがミキシングする方法

ネットワークのトポロジの中心のノードがミキシングを行えば、全ノードとの通信遅延を均一にすることが可能なので演奏者間の演奏のずれの少ないミキシングが可能となる(図2(a))。こ



(a) ネットワークの中心に位置するノード (b) 全演奏者ノードから中心に位置するノード

図 2: 単一ノードがミキシング

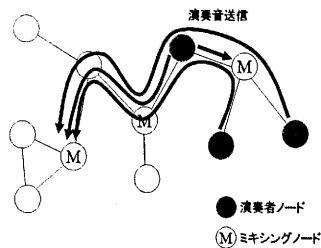


図 3: ネットワーク中の複数のノードがミキシング

の方法では、ミキシングノードと各々の演奏者ノード間の遅延時間を測定し、送信されてきた音データを遅延時間にしがたってミキシングする。

トポロジによっては、演奏者がネットワークの端に偏ってしまう場合もありうる。その場合に、ネットワークの中心に位置するノードがミキシングを行った場合、演奏者からの距離が遠いため効率が悪くなる。そこで、あらかじめ演奏者全体の位置を把握しておき、ネットワークの演奏者全員を包含する部分ネットワークのトポロジの中心にいるノードがミキシングを行う方法もある(図 2(b))。

単一のノードがミキシングを行うようにすれば、ミキシングの機構が簡単になり、かつ演奏者間の演奏のずれを最小限にすることができる。しかし、トポロジが変化した際やミキシングノードがネットワークから離脱してしまった場合に、適当なノードに機能を移す必要がある。さらに、ミキシングノードの交代に時間がかかれば合奏に支障をきたすので、速やかな交代が必要である。中心のノードといっても、通信状態が悪い場合や、各演奏者ノードからの遅延時間に大きな格差がある場合もある。帯域、エラー率など各リンクの状態、ノード間の遅延、ノードの負荷などを考慮して移動先を速やかに決定する必要がある。

4.2.2 ネットワーク中の複数のノードがミキシングする方法

特定の機能をあらかじめ複数のノードが持っていれば、あるノードがネットワークから離脱した場合にも支障が少ない(図 3)。この方法を行うにあたっては、どのノードがミキシングノードになるか、どのノードがどのミキシングノードからの音声を聞くのかのルールを決める必要がある。また、効率よくミキシングノードに演奏者の音データを届けなければ、ネットワーク中に無駄なトラフィックが増加してしまう欠点を持っている。

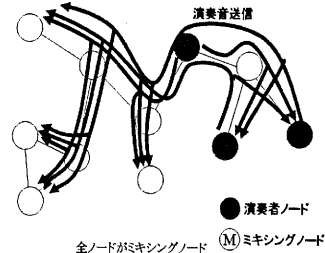


図 4: 全てのノードがミキシング

4.2.3 全ての受信ノードがミキシングする方法

この方法では、各演奏者は単純にフラッディングを行うだけであるので、実現は簡単である。しかし、トラフィックが膨大に増加してしまうことが問題である。また、各ノードから各演奏者ノードへの遅延時間はそれぞれ違うため、遅延時間をあらかじめ測定し、それに合わせて各演奏者の音の再生タイミングを変えることは、ノード数が多い場合には困難である(図 4)。

5 まとめ

無線アドホックネットワークを用いた音楽合奏に関して、ネットワークを用いた遠隔合奏の要件をあげ、MANET ならではの特徴、MANET 上での遠隔支援機能について検討した。また、MANET には、遅延やメンバの変動、特定ノードに機能を集中するのが困難等の特徴があり、有線ネットワークでの音楽合奏とは違う機能が必要であることを示した。文献において、60ms 以内の遅延時間内ならば遠隔合奏可能との報告があるので、今後実験により、現在利用可能な MANET の環境でこの要件を満たすことが可能か検証する。

参考文献

- [1] 松原慶祐: “超高速通信網を用いた遠隔バンドビジョン”, <http://www.jaist.ac.jp/ksuke-m/research/subtheme.html>
- [2] 茂木俊一, 一岡義宏, 田中健二, 西岡望, 勝本道哲: “広帯域ネットワークを用いた遠隔同時音楽演奏の実験とその考察”, 情報処理学会技術研究報告 マルチメディア通信と分散処理 No.108-009, pp.49-54, 2002
- [3] Thomas Maufer, “Deploying IP multicast in the enterprise”, Prentice Hall PTR, pp.147-153, 1998
- [4] “Robust Audio Tool”, <http://www-mice.cs.ucl.ac.uk/multimedia/software/rat/index.html>
- [5] 岸田崇志, 河野英太郎, 前田香織, 天野橋太郎: “多目的な音声伝送システム的设计”, 情報処理学会技術研究報告 分散システム/インターネット運用技術 No.26-003, pp.13-18, 2002
- [6] 後藤真孝, 根山亮: “Open RemoteGIG: 遅延を考慮した不特定多数による遠隔セッションシステム”, 情報処理学会論文誌 Vol.43 No.2, pp.299-309, 2002
- [7] 長嶋洋一: “GDS (global delayed session) Music: ネットワーク遅延を伴う音楽セッション・モデル”, <http://nagasm.suac.net/ASL/GDSM/index.html>