

t-Roomのための遠隔合奏支援システムの構築

入江洋介^{†1} 青柳滋己^{†2} 高田敏弘^{†2}
平田圭二^{†2} 梶克彦^{†2}
片桐滋^{†1} 大崎美穂^{†1}

通信に伴う遅延を完全に回避することは困難であり、それに起因して、遠隔地間の同時作業へのネットワーク利用の伸びは鈍い。物理的遅延を避けられない以上、その存在を受け入れた上で遅延対策は採られるべきである。本稿では、こうした観点に立ち、作業者の知覚レベルの遅延に着目し、その制御をすることで作業の質を向上させる手法を提案する。提案法はメトロノーム情報の利用とローカル・ラグ制御によって構成される。同時作業として準備した、2部屋のマルチメディア遠隔協働支援システム「t-Room」に分かれた2名の演奏者による遠隔合奏の実験を通して、提案手法の有効性について報告する。

Development of Assistant System for Ensemble in t-Room

YOSUKE IRIE,^{†1} SHIGEMI AOYAGI,^{†2}
TOSHIHIRO TAKADA,^{†2} KEIJI HIRATA,^{†2}
KATSUHIKO KAJI,^{†2} SHIGERU KATAGIRI^{†1}
and MIHO OHSAKI^{†1}

Because of the importance of synchronization, a synchronized collaborative work can be a good measure for evaluating the utility of a network-based remote collaboration assistant system, such as t-Room, which inevitably suffers from delay in communication. Focusing on this, we study how one can perform synchronized works in t-Room by conducting a remote session for playing musical instruments. In place of conventional devices such as canon, polyrhythm, and troll, we attempt to reduce the adverse effect of delay by using a metronome and the idea of local lag. Through experimental music performances, we clarify the effects of metronome and local lag for reducing the difficulty in remote sessions suffering from delay.



図1 t-Roomの概観

Fig. 1 An example of t-Room installation.

1. はじめに

広帯域ネットワークの普及に後押しされ、テレビ電話やテレビ会議システムなどのマルチメディア通信システムへの関心が高まっている。これらのマルチメディア・システムは、音情報に限られていたコミュニケーション・チャンネルに映像情報を加えることで、遠隔コミュニケーションのあり様に大きな可能性をもたらした。しかし、そこで用いられる音情報も映像情報も、同室におけるコミュニケーションに本来備わっていたメディアの対称性を失い、確かにメディア情報の幅を広げたものの、利用者間に横たわる距離や空間の壁を十分に克服するには至っていない。こうした中で、これらの従来型マルチメディア通信システムが持つ本質的問題点を克服することを目指して、遠隔コラボレーション支援システム「t-Room」が提案され、その研究開発が精力的に進められている(図1)¹⁾。

コラボレーション作業は一般に、音楽アンサンブルのような同時作業と発話者が交代しながら進められる会話のような交互作業に分類される。ネットワークや計算処理に基づく通信遅延をどうしても避けることができない遠隔コラボレーション支援システムにとって、同調性や同時性を厳しく求める同時作業は困難な課題である。しかし、この困難を乗り越えることができない限り、そうした支援システムの適用範囲を交互作業から同時作業に広げることにはできない。ネットワークの利用価値を高め、省エネ型で高い生産性を持つ情報化社会の進展に貢献するために、この困難はぜひ克服されなければならない。

こうした観点に立ち、我々は、通信に伴う遅延の存在を前提とした、t-Roomにおける同

^{†1} 同志社大学大学院 工学研究科

Graduate School of Engineering, Doshisha University

^{†2} 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所

NTT Communication Science Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corporation

時作業のための遅延対策の確立を目指してきた。対策の基本は、利用者の知覚段階における遅延を制御することにある。避け得ない遅延は受け入れた上で、利用者が知覚する遅延を制御することによって、実効的に遅延の悪影響を軽減するアプローチである。具体的には、まず、遅延を伴う視覚的同時作業の支援策として提案されたローカル・ラグ²⁾を利用する。一方の作業員Aの作業結果は、通信過程を経て遅延を伴って作業相手Bに届けられる。この時、ローカル・ラグの利用は、作業員A自身の作業結果に遅延を施し作業員Bが知覚すると同時に作業員Aに呈示させる。ここで両作業員間には原理的な同時性が保たれることになる。また、第2の具体化として、作業員どうしに同時配信されるタイミング情報を導入する。両作業員は、コラボレーション作業相手から届けられるメディア信号ではなく、このタイミング情報を用いて同時性を確保することを試みる。

研究の土台となる同時作業として、2部屋の t-Room のそれぞれに分かれて演奏する遠隔アンサンブルを採用する。この時、図2に示すように、別々の t-Room にいる演奏者(1人/部屋)に届く合奏相手の演奏音は、通信遅延に起因して遅れて届く。図中、それぞれの t-Room における時間の経過は2本の縦の時間軸に沿って表現され、演奏者自身が聞く演奏音(例えば図中右側)をローカル・フィードバック音と呼び、通信過程を経由して合奏相手に届けられる遅延を伴う演奏音を遠隔フィードスルー音と呼ぶ。図からわかるように、各演奏者は、その遅れた音に合わせて演奏することを迫られる。その時、例えば遅延が250msを越すような場合、この遅延量はテンポ120bpmの曲における8分音符の長さにはほぼ相当し、リズムの同期をとることはほぼ不可能となる。明らかに、遅延は同時性を著しく阻害する。従来、こうした遅延を伴う合奏を支援するため、カノンやポリリズム、輪唱などの様々な音楽的アプローチに沿った方法が試みられてきた³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾しかし、これらの方法は、合奏者どうしが楽曲の同一箇所を同時に演奏する、真の合奏を行うには適しておらず、なんらかの対策が必要である。望まれる対策は、演奏者どうしが相手の演奏音の遅延を気にせずに楽曲の同一箇所を同時演奏することを助けるものでなければならない。演奏者Aの演奏音を演奏者A自身と遠隔地にいる演奏者Bが同時に聞くことが出来れば、原理的にはそこに同時性が成立する。また、例えば、演奏者Aと演奏者Bとに同時配信されるメトロノーム情報があれば、両者はそれに合わせて演奏することが出来、そこにもやはり同時性が成立する。明らかに、上述のローカル・ラグやメトロノームなどによって具体化されるタイミング情報の利用は、望まれる対策としての要件に沿ったものとなっている。

以下の頁では、まず提案するローカル・ラグを用いる遠隔合奏支援の考え方を紹介し、続いて、その支援法を t-Room 環境に実装した遠隔合奏支援システムの詳細を紹介する。実

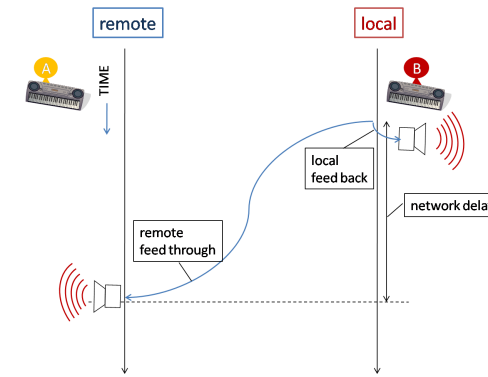


図2 通信遅延を伴うアンサンブル演奏
Fig.2 Ensemble with telecommunication delay.

験は、比較的演奏が簡単な楽曲を用いたピアノ音のキーボード合奏によって行った。実験の詳細とその結果を紹介し、最後に結果の考察を述べる。

2. ローカル・ラグとメトロノームを用いる遠隔合奏支援

本節では、提案するローカル・ラグを用いる遠隔合奏支援手法を紹介する。本手法は、元々ローカル・フィードバック信号に通信遅延と同等の遅延、すなわちラグを追加するものであった²⁾。本研究では、それを拡張して演奏者自身に遅延のないローカル・フィードバック音をも聞かせる拡張ローカル・ラグも導入する。以下では、ローカル・ラグに加え、この拡張ローカル・ラグと、メトロノームの利用法についても詳述する。

2.1 ローカルラグ

図3に、ローカル・ラグの原理を図解する。図に示されているように、ローカル・ラグは、演奏者自身が聴くローカル・フィードバック音に通信遅延と同量の遅延を付加してから再生する手法である。遅延量が等しいため、ローカル・フィードバック音と遠隔フィードスルー音とは同時にそれぞれの演奏者に届けられ、ここに同時性が成立する。以下、本稿では、このラグを付加されたローカル・フィードバック音をローカル・ラグ・フィードバック音と呼ぶ。

2.2 拡張ローカル・ラグ

ローカル・ラグの導入によって、演奏者自身は、自分の打鍵に合わせた演奏音を聴くことは出来ずに、遠隔地にいる合奏相手と同時ではあるものの、遅れた演奏音しか聴くことが

できなくなってしまう。これは、演奏者に新たに負担を強いることになり、演奏をかえって困難にする恐れがある。その対策として、ローカル・ラグが視覚的同時作業において調査された実験²⁾においても試された、ラグのないローカル・フィードバック音とローカル・ラグ・フィードバック音との両方を演奏者自身に呈示する方法を導入する。本稿では、この両フィードバック音を用いる手法を拡張ローカル・ラグ法と呼ぶ。図4に、この拡張ローカル・フィードバックの動作を図解する。

なお、映像情報におけるラグなしのローカル・フィードバックとラグ付きのローカル・フィードバックとの組み合わせと異なり、音情報の場合は、この組み合わせには若干の注意が必要である。それは、ラグ付きのローカル・ラグ・フィードバック音がラグなしのローカル・フィードバック音を直接音とした場合の初期反射音のように作用する可能性があるためである⁹⁾。場合によっては、この両フィードバック音が響きのある1音に聞こえる可能性もある。実験においては、この点を考慮に入れながら、拡張ローカル・フィードバックの効果調べる必要がある。

2.3 メトロノームの利用

ローカル・ラグの利用は、演奏者間の演奏結果には原理的な同時性をもたらすことが期待できるが、その一方で演奏者自身には自分の演奏音を実時間で聴くことができないという同時性の崩壊をもたらす。拡張ローカル・ラグを用いる場合は、演奏音の実時間確認と演奏音の同時性との双方の実現を原理的には期待できるものの、今度は演奏者は1度の打鍵で2音を聴く新たな環境に置かれることになる。これらのローカル・ラグを用いるアプローチと別に、合奏者に時間軸上で共通の位置にある参照情報を提供する手法も考えられる。例え

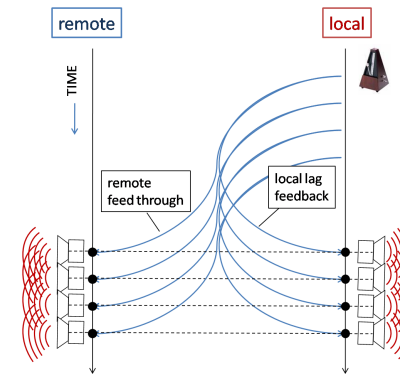


図5 ローカル・ラグを用いたメトロノーム音の同時配信

Fig. 5 Synchronized transmission of metronome sound by using local lag.

ば、通信を用いない元来の演奏スタイルにおいても、ドラム音などは同期信号として機能することがあり、またクラシック演奏などにおいては指揮者の動作がこの同期信号として働いている。これらを参考にすると、ローカルラグ制御によって同期を保ったメトロノーム音を合奏支援に用いることは自然なように考えられる。図5に、このメトロノーム音をローカル・ラグによって遠隔地間の同期を保ちながら同時配信する動作を図解する。図中右側にメトロノームは配置され、その音は通信を経て遠隔地に伝えられる。この通信に伴う遅延と同量の遅延を付加されたローカル・ラグ・フィードバック音としてメトロノームが置かれたローカル側でも再生される。結果的に、遠隔地にいる合奏者は同時に再生されるメトロノーム音を演奏の基準音として得ることができる。

3. 遠隔合奏支援システム

3.1 システムの構成

図6に、前述したローカル・ラグ及びメトロノームを用いた遠隔合奏支援技術を実装した支援システムの全体構成を示す。全体を制御するアプリケーションソフトウェアはFedora Core 8をOSとする1台のPC上で実行され、このPCを音響サーバと呼ぶ。音響サーバは、t-Room 毎に1台ずつ準備され、各 t-Room において、1台の演奏用キーボードから信号を得て、4台のスピーカに演奏音を再生呈示できる。また、この音響サーバどうしは、LANあるいはWANを経由して接続され、それぞれのサイトで得た演奏音を相手サイトに転送しあう。このネットワーク経由の通信方法については、次小節で詳述する。

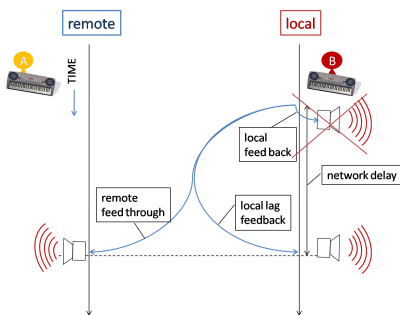


図3 ローカル・ラグの原理

Fig. 3 Schematic diagram of local lag.

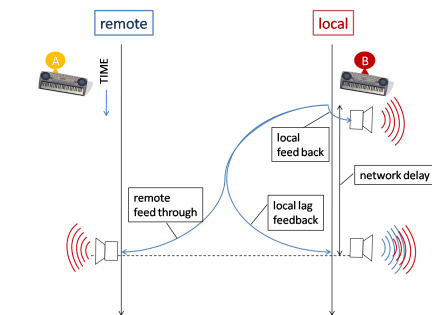


図4 拡張ローカル・ラグの原理

Fig. 4 Schematic diagram of extended local lag.

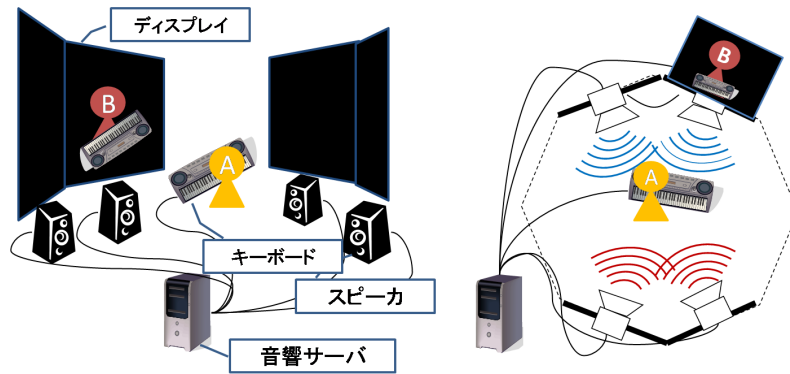


図 6 システム構成図 (左:側面, 右:上図)

Fig. 6 Overview of proposed ensemble assistant system.

図中に概念的にディスプレイが図解されているが、本システムは t-Room 上に実装され、演奏者は t-Room のディスプレイを通して映像的に相手を確認し、コミュニケーションをとることができる。

以下に、特に音響信号の取り扱いを中心としたシステムの諸元をまとめる。

- CPU : Intel(R) Core(TM) 2 CPU 2.66 GHz
- メモリ : 3GB
- OS : Fedora Core 8
- サウンドカード : M-AUDIO Delta 1010LT
- 符号化方式 : Linear-16 (無圧縮)
- 標準化周波数 : 44.1 kHz
- チャンネル数 : 2 (ステレオ)

関連研究では音源に MIDI を使用しているものが多い。しかし、本システムではより一般的なアンサンブル演奏も行えるようにすることに配慮し、楽器の生音を使用することとした。CD 並みの音質を得るため、諸元にもあるように標準化周波数は 44.1 kHz とした。

3.2 遅延計測機能と通信方式

通信に伴う遅延をローカル・ラグとして用いることで演奏の同時性を確立しようとする本システムでは、通信に伴う遅延を正確に計測する必要がある。そのため、音響サーバどうしの通信を開始する際、まず初めにネットワークの遅延量を計測する。

コンピュータ通信における代表的なプロトコルとしては TCP と UDP が用いられている

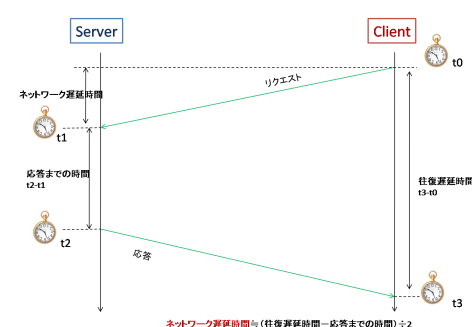


図 7 遅延計測機能の概念

Fig. 7 Schematic diagram of network delay measurement.

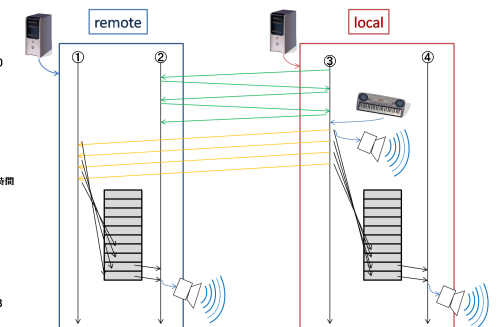


図 8 ローカル・ラグを実現するデータ・フローの概念
Fig. 8 Schematic diagram of data flow controlled by local lag.

が、本システムにおいては、その両者の特性を活かして以下のように使い分けた。即ち、通信開始時の遅延量の計測には、高い信頼性を持つ TCP を用い、高速性を要求される演奏データの転送時には UDP を採用した。

以下に、2 台の音響サーバ間、言い換えれば 2 部屋の t-Room 間の転送時間の測定手順を示す。その動作は図 7 に図解する。

- まず、送信側が時刻 t_0 に TCP 上でパケットを送る。
- 受信側はパケットを受け取った時刻 t_1 を記録する。
- 受信側は、自サイトにおける応答処理を終えて応答パケットを返す時刻 t_2 に、そこで要した処理時間 ($t_2 - t_1$) を応答パケットに入れて返す。
- 送信側は時刻 t_3 に応答パケットを受け取る。
- 送信側でパケット送信から応答パケットの受信までにかかった往復遅延時間 $t_3 - t_0$ から、応答パケットに入られていた受信側処理時間 $t_2 - t_1$ を引き、それを 2 で割ることによってネットワーク遅延時間が求められる。

音響サーバ間の時刻情報の同期がとれている場合にはもっと単純な計測も可能ではあるが、サーバ間の時刻同期は常に十分にとれているとは限らない。本計測手法は、そうした時刻情報にずれがある場合でも、それに影響されずに計測が可能である利点を持っている。

3.3 データ・フロー制御の実装

ローカル・ラグを実現するためには、演奏者サイトの音響サーバ上で演奏データを必要遅

延時間分バッファリングをしておく必要がある。演奏音の再生は、このバッファリングされた演奏音データを再生する。また、この一方で、演奏音は相手サイトに演奏と同時に転送されなければならない。この時間差を持った2つの同時処理を実現するため、演奏音データの処理は、タイムスタンプを用いたバケットの時間管理とマルチスレッドの利用によって行った。遅延計測によって取得した遅延時間量をタイムスタンプに組み込み、その遅延量に基づく時刻になるまでバケットをローカル（演奏者側の）音響サーバ内でバッファリングする。

以下に、2つのスレッドを用いて実装した、音データのフロー制御の手順をまとめる。その動作は、図8に図解する。

- 図8に示すように、音データを読み込む読み込みスレッドと音データを書き込む書き込みスレッドを並列に走らせ、その間をキュー構造のバッファでつなぐ。
- 読み込みスレッドは、音データを読み込み、それを送信可能時刻（読み込み時刻に遅延時間を加算した時刻）タグと共にキューの最後尾に入れる。
- 書き込みスレッドは、キューの先頭を見て、送信可能時刻になった時にそのデータをキューから取り出し送る。

このようなマルチ・スレッド環境では大域変数に不測の変化を生じてしまう恐れがある。この問題を回避するため、確実にキューにチェーンするまで読み込みスレッドから書き込みスレッドに制御が移らないようにクリティカル・セクションで保護する措置をとっている¹⁰⁾。

なお図9には、ローカル・ラグ・フィードバック音を生成する際の時刻合わせの手順を詳しく図解している。

3.4 拡張ローカル・ラグの実装

拡張ローカル・ラグの実現は、ローカル・ラグ・フィードバック音を作るために用いたキューに加えて新たに別なキューを用意し、これらのそれぞれに異なる送信可能時刻を持つ演奏データ、即ちローカル・ラグ・フィードバック音とローカル・フィードバック音を保存することによって行った。それぞれのキューから取り出された演奏音データは、図10に示すように重ねあわされて合成され、サウンドカードに出力される。なお、図10の音信号は、このローカル・ラグ・フィードバック音とローカル・フィードバック音、さらにこれらを合成した出力音の実例である。

4. 評価実験

4.1 実験環境

実験における遅延の制御を的確に行うために、音響サーバを含む t-Room は WAN 接続

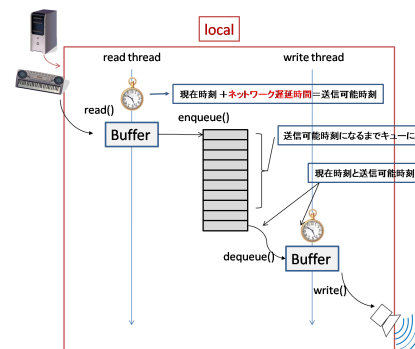


図9 ローカルラグの動作

Fig.9 Schematic diagram of local lag control.

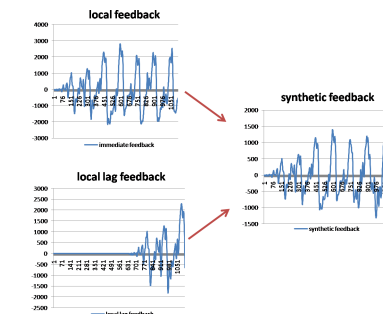


図10 拡張ローカルラグで用いられるフィードバック音
Fig.10 An example sound of local lag feedback.

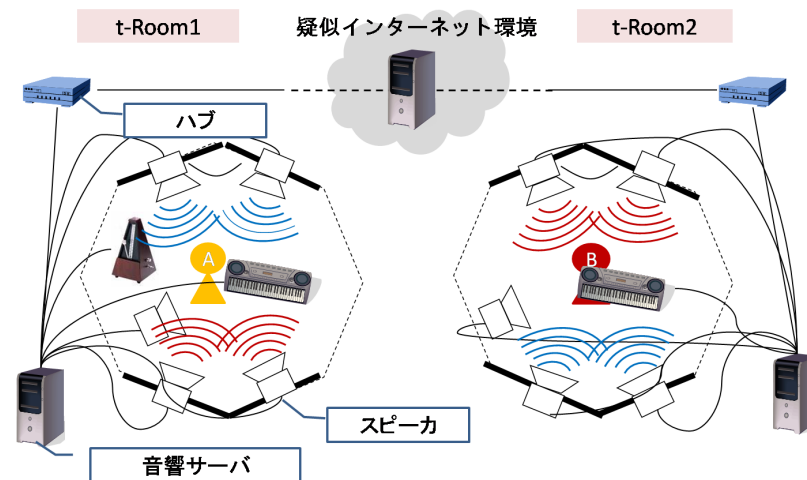


図11 遠隔合奏の実験環境

Fig.11 Experimental settings of remote ensemble.

を行わずに、LAN上で接続し、通信遅延は遅延発生器である Dummynet を用いて実現した¹¹⁾。この遅延の制御機構を導入した実験環境を図11に図解する。実験環境のネットワークは、音響サーバが動作するPCと、スイッチング・ハブ、Dummynetが動作するPCから構成された。なお、この図では t-Room 全体を構成する他のサーバ PC の記載を省略し

ている。また、ネットワーク上の機器は全て 100BASE-TX で接続した。

通常のネットワークは、その通信遅延にある程度の変動を持っている。しかし、本実験においては、通信遅延に基づくローカル・ラグの影響を調べることを目的としていることを考慮し、この変動、即ちジッタは入れない設定とした。

なお、演奏者どうしが相手の映像を確認できるように用いた t-Room の映像には、Dumynet による遅延は入れなかった。結果的に、LAN 上で接続されている t-Room の映像は、サーバ上の計算処理に伴う若干の遅延を伴うものの、実験で導入される制御された遅延を含まなかった。

4.2 実験方法・実験手順

演奏は 1 対 1 で行い、どちらの演奏者もキーボードを使用した。演奏に用いた楽曲は「かえるのうた」¹²⁾ で、演奏者はそれぞれメロディ・パートと伴奏パートに分かれて 8 小節分を演奏した。この 8 小節の演奏を 1 試行とする。

実験に参加した演奏者は 5 年以上の音楽経験（ピアノ教室などにおける訓練）を持つ 4 名とそうした音楽経験を持たない未経験者 4 名との、合計 8 名であった。2 名から成る合奏のペアは、それぞれ経験者どうし、あるいは未経験者どうしで構成した。

各ペアは、通信遅延のない（厳密にはサーバ上の計算に伴う遅延はあるが、Dumynet で追加されるネットワーク遅延がないという意味）試行から初め、順次、遅延を 10ms ずつ増やし、0ms, 10ms, ..., 90ms, 100ms までの合計 11 の遅延条件における演奏を繰り返した。この 11 条件の演奏全体を 1 セッションと数える。また、この遅延に加えて、各ペアには、ラグ制御をなにもしない状態（課題 1）と、ローカル・ラグ・フィードバック音を用いた状態（課題 2）、拡張ローカル・ラグ・フィードバック音を用いた状態（課題 3）の 3 課題のそれぞれに対応する 3 セッションを遂行することが課された。従って、各ペアは合計 33 回の演奏を行った。演奏者は、1 試行終了毎に、演奏のしやすさを 5 段階で評価するオピニオン評価と感想等の自由表記から成るアンケート回答を行った。

また、演奏の質を定量的に評価するため、全ての演奏は録音した。

演奏は、まず伴奏パートが初めの 1 小節を弾くことによって、その開始タイミングをとった。また、演奏者には、合奏相手と合わせることも、メトロノームに合わせて演奏するように指示を与えた。

4.3 実験結果

各実験条件に対する演奏者の印象を最も直接的に反映しているものと考えられるアンケート項目「演奏のしやすさ」に関するオピニオン評価結果の平均値を図 12 と図 13 に示す。前

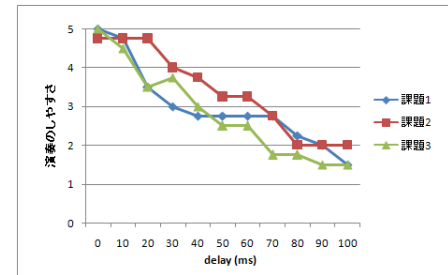


図 12 伴奏パートに関する演奏のしやすさの評定結果
Fig. 12 Average opinion scores for accompaniment part.

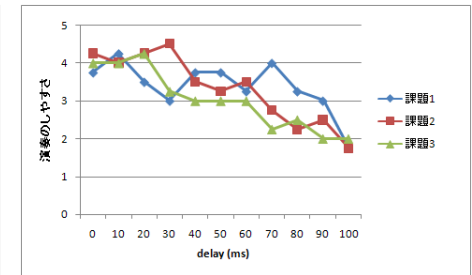


図 13 メロディパートに関する演奏のしやすさの評定結果
Fig. 13 Average opinion scores for melody part.

者は伴奏パート演奏者の結果であり、後者はメロディ・パート演奏者の結果である。ここで、縦軸はオピニオン・スコアの平均値で、横軸は制御に用いた遅延量である。図から、パートを問わず、遅延が大きくなるにつれて、演奏者は演奏が困難であると感じている様子を読み取ることができる。またさらに、図 12 は、伴奏者が幅広い遅延量に対して安定的にローカル・ラグの効果を感じていることを示し、図 13 は、メロディ・パート演奏者がローカル・ラグの導入の効果をあまり感じていない様子を示している。一方、いずれの図からも、拡張ローカル・ラグ方式は、パートに関わらず演奏者にはあまりプラスに機能していない様子を見てとることができる。

図 14 と図 15 には、録音した演奏データから計測した、メロディ演奏音と伴奏音の間の同期のずれを示している。図 14 は 1 組の音楽経験者どうしによる演奏から得た結果であり、図 15 は 1 組の音楽未経験者どうしの演奏から得た結果である。同期のずれは、楽曲の第 2 小節の第 1 及び第 2 拍目の音と第 3 小節の第 1 及び第 2 拍目の音に着目して、録音された音波形の時間的なずれとして計測した。図中、縦軸はこの 4 箇所における計測値の平均値を、横軸は遅延量を示している。同期のずれがない場合、図中のずれの値は 0 となる。正のずれの値は伴奏音がメロディ音に後続している状況を、負のずれの値は伴奏音がメロディ音に先行している状況を表すことになる。また、図中には、計測された平均的ずれの大きさの変化を回帰直線で近似した結果も重ねて示している。

4.4 実験結果の考察

図 12 と図 13 は、演奏パートによってローカル・ラグの効果の現れ方に違いがあることを示唆していた。ローカル・ラグは、伴奏パート演奏者にとっては比較的機能し、メロディ・

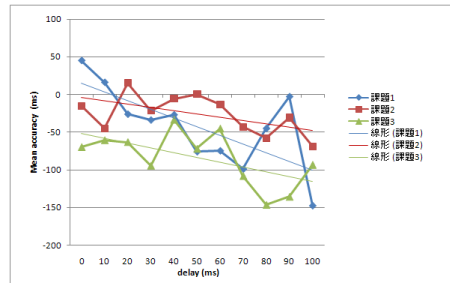


図 14 経験者同士の演奏音における同期の平均的なずれ
 Fig. 14 Average misalignment for trained players.

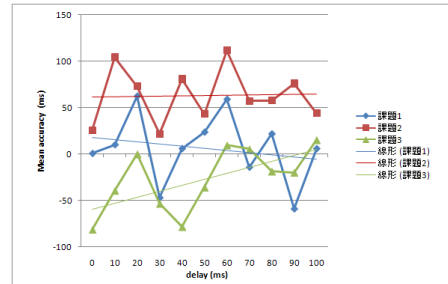


図 15 未経験者同士の演奏音における同期の平均的なずれ
 Fig. 15 Average misalignment for untrained players.

パート演奏者にはそれほど機能していないように思われる。

アンケートの自由表記質問「どのタスクが一番弾きやすかったか？」に対する回答からも、この差異を支持する結果が得られた。即ち、4人の伴奏パート演奏者の内の3人がローカル・ラグを用いる課題2を最も弾きやすい課題条件として選択し、その一方で4人のメロディ・パート演奏者の内の3人がローカル・ラグを用いない課題1を最良条件として選択した。

この差異には演奏パートの役割意識の違いが影響しているように考えられる。メロディ・パート演奏者は自らがメイン演奏者である意識を持って弾く傾向があり、その結果、アンケートの「演奏しやすかったか？」という質問に対して、合奏として合わせるのではなく自分自身のメロディ演奏について回答している可能性がある。実験ではメトロノームに合わせて弾くように指示されており、ローカル・ラグによる打鍵と発音との間の遅延がない状態である課題1では、メロディ・パート演奏者は打鍵と同時に発音される自分の演奏音をメトロノームに同期しながら弾くことができ、それが課題1を選択した原因ではないかと推察される。これに対し、伴奏者は、メロディ・パート演奏者の支援者としての意識を持つ傾向があるように考えられる。即ち、伴奏者はメロディ音に合わせることを演奏の目標にすることが予想される。結果的に、ローカル・ラグの利用によって両者の演奏音の同期がより正確にとれるようになった課題2を最良の結果として選択したのではないかと推察される。

図12から図15のいずれからでも、拡張ローカル・ラグの効果を支持する結果は得られなかった。また、アンケート結果から、課題3の演奏者が、遅延が40msや50msを越える付

近から自分の演奏音が2音に分かれて聞こえるようになったことがわかった。いずれの演奏者も、この2音への分離に気づいている状況においては演奏のしやすさに対して厳しい評価を行った。拡張ローカル・ラグはローカル・フィードバック音とローカル・ラグ・フィードバック音の両フィードバック音が残響を伴う1音として聞こえる範囲内で効果を発揮することを期待して導入したが、これまでの実験からはその効果を確認することはできなかった。

図14と図15のローカル・ラグを用いない課題1における結果は、遅延が大きくなるにつれて伴奏音がメロディ音よりも先行する傾向が強まる様子を示している（回帰直線が右下がりになっている）。これは、自らの演奏音と合奏相手の演奏音との間の大きなずれがメロディ・パート演奏者の心理に影響し、メトロノームに合わせて打鍵するように指示されていたにもかかわらず、無意識のうちに伴奏音に合わせようと打鍵を遅くしてしまった結果ではないかと推察される。これに対し、ローカル・ラグを用いた課題2においては、遅延が大きくなってローカル・ラグの効果で合奏音の同期がとれており、メロディ・パート演奏者は指示通りにメトロノームに合わせて打鍵し続けることができたのではないかと推察される。

図14と図15において、遅延量の変動に関わらず正確な同期を保つことができれば、図中の回帰直線はずれの値が0の横軸に乗ることになる。図中の結果を見ると、いずれの図においてもローカル・ラグを用いた場合の直線が最も傾きが小さい（横軸に平行）。これは、ローカル・ラグの利用が、演奏における遅延の影響を軽減し、同期のとれた合奏を実現することに貢献していることを示している。なお、図15の音楽未経験者の結果では、ローカル・ラグを用いた場合の結果が全体として正のずれの方向にシフトしている。これはメロディ・パート演奏者が常に伴奏者をリードした合奏のスタイルをとった結果であろうと考えられる。

5. おわりに

遠隔合奏に不可避免的に伴う通信遅延の影響を軽減することを目指し、演奏者自身の演奏音を通信遅延と同じ時間分遅らせて再生させるローカル・ラグとその拡張版である拡張ローカル・ラグの手法を導入し、遠隔合奏支援システムの構築を行った。また、このシステムには、演奏者どうしの同期の指標としてメトロノーム音を配信する機能もつけた。

本システムを用い、比較的単純な楽曲の合奏を行い、導入したローカル・ラグ法などの合奏の質などへの効果を調査した。その結果、ローカル・ラグ法が演奏者、特に伴奏者に心理的な好影響を与え、実際、遅延が大きくなって合奏音のずれを小さなままで保つことができるとい、一定の効果をもたらすことが確認できた。但し、本実験で用いたデータはまだ

少なく、この効果についてはデータを増やした上での追加的調査が必要である。

本実験では、ローカル・ラグとメトロノームとの2つの支援策を同時に試した。しかし、メトロノームに合わせる演奏は、演奏者に合奏相手との合奏ではなくメトロノームとの合奏を強いることになり、演奏者に不自然な負担を与えてしまったおそれがある。今後、この点を改めて精査する必要もあると考えている。

謝辞 本研究を進めるにあたり、実験の実施とデータの解析に大きなご協力を頂いた同志社大学工学部インテリジェント情報工学科4年生の前田佳奈さんに深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 平田圭二, 未来の電話を考える 遠隔コミュニケーションシステム t-Room, NTT 技術ジャーナル, Vol.19, No.6 (2007年6月号), pp.10-12(2007)
- 2) Dane Stuckel and Carl Gutwin; The Effects of local lag on Tightly-Coupled Interaction in Distributed Groupware: Computer Supported Cooperative Work, pp.447-456(2008).
- 3) 後藤 真孝, 根山 亮: 不特定多数による遅延を考慮した遠隔セッションシステム: 情報処理学会研究報告 Vol98, No.74, 情報処理学会, pp.95-102(1997).
- 4) 後藤 真孝, 根山 亮: OpenRemoteGIG: 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, Vol43, No.2, pp.299-309(2002).
- 5) 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: 情報処理学会研究報告 Vol2002, No.63, pp.61-66, (2002).
- 6) 柏崎 紘一, 山本 欧: 演奏者に独自のコード進行とテンポを許すセッションシステム: 情報処理学会研究報告 Vol2002, No.123, 情報処理学会, pp.23-28(2002).
- 7) 大部 由香, 吉田 雅弘, 米倉 達広: 楽音間で同期の取れない音場における演奏者間プロトコル, 電子情報通信学会 2003年06月MVE共催研究会, 10/13(2003).
- 8) 大部 由香, 他: テンポ変化を考慮した楽音間で同期の取れない音場における演奏者間プロトコル: 情報処理学会研究報告 Vol2003, No.127, 情報処理学会, pp.43-48(2003).
- 9) Tom Stafford・Matt Web: MINDHACKS, pp.175-176(2008).
- 10) 波多 浩昭: いまどきのソケットプログラミング, pp.125-144(2004).
- 11) L. Rizzo. Dummynet: a simple approach to the evaluation of network protocols. ACM Computer Communication Review, Vol.27, No.1, pp.31-41(1997).
- 12) 岡本 敏明作詞: かえるのうた, ジャパン・ミュージックワークス.