

オンデマンド型動画同時視聴における 端末間高精度再生同期方式

森安 辰¹ 大島 浩太^{2,a)} 高田 治³ 寺田 松昭²

受付日 2012年4月28日, 採録日 2012年11月2日

概要: インターネット上の動画視聴サービスの一形態に, 複数の視聴者が1つのオンデマンド型動画を視聴シーンまで同期した状態で鑑賞する動画同時視聴サービスが存在する. オンデマンド型動画による動画同時視聴は, リアルタイムストリーミングと異なり, 任意のタイミングで早送り・巻き戻しなどのシーク操作, 一時停止などの再生制御を行える点が特徴である. しかし, 通信遅延や揺らぎの影響から, 再生制御後に視聴シーンがずれるという問題が発生する. 本研究では, 次の特徴を備えたオンデマンド型動画同時視聴システムを実現する. (1) サーバレスでの利用, (2) 参加者間での基準クロック共有, (3) 動画の端末間高精度再生同期と再生制御の応答性の確保, (4) シーンずれの自動再同期. 提案方式を実装したプロトタイプシステムを開発し評価を行った結果, 視聴シーンずれ 120 ms 以下, 応答時間 100 ms 以下を達成し, 端末間高精度再生同期を実現した.

キーワード: 動画再生同期, 多人数同時視聴, VoD, 時刻同期

Group Synchronization Method with Inter-node Clock Sharing for VoD Services

SHIN MORIYASU¹ KOHTA OHSHIMA^{2,a)} OSAMU TAKADA³ MATSUAKI TERADA²

Received: April 28, 2012, Accepted: November 2, 2012

Abstract: In this paper, we propose a group synchronization method for VoD services based on syncing user PC internal clocks. A group synchronization video watching service enables users to simultaneously watch video along with communication functions. This service enables users to communicate with other group members online as if the group members were watching the video in the same room. A number of criteria must be satisfied in order to realize this service in VoD: (1) video synchronization accuracy (less than 120 ms), (2) fast response time of play control (less than 100 ms), (3) a group synchronization technique suitable for a VoD service (play control function). In order to satisfy these criteria, group members synchronize their internal clocks, and play is controlled by the synchronized internal clocks. Play control is considered for the case of an unstable Internet connection (e.g., delay or jitter) and low-processing-power PCs. We implement a prototype system in order to evaluate video synchronization accuracy and client response time in LAN and the Internet environment. As a result, we realized the synchronization accuracy goal, except for the seek command.

Keywords: group synchronization, VoD, time synchronization

¹ 東京農工大学大学院工学府
Tokyo University of Agriculture and Technology, Koganei,
Tokyo 184-8588, Japan

² 東京農工大学大学院工学研究院
Tokyo University of Agriculture and Technology, Koganei,
Tokyo 184-8588, Japan

³ 株式会社日立製作所
Hitachi, Ltd., Yokohama, Kanagawa 244-0817, Japan

a) kxohshima@fw.ipsj.or.jp

1. はじめに

インターネットを用いた動画視聴の普及にともない, 動画の多人数同時視聴サービスが多数登場している. 多人数同時視聴とは, 動画配信サービスにおいて, 複数の視聴者が1つの動画をシーンまで同期した状態で鑑賞することを

意味している。視聴者は、動画の視聴開始時刻を合わせて参加し、同じ動画を鑑賞することになる。動画の多人数同時視聴サービスは、遠隔地にいる人たちの間でも、同じ部屋で同じスクリーンを眺めているような視聴環境を実現する。このような視聴の例としては、一緒に映画を見る、友人の家に集まってTVやビデオを鑑賞するなどがある。しかし、居住地が遠い、時間の都合がつかず短時間しか集まれないなど、複数人が集まることが難しいこともある。インターネットを用いた多人数同時視聴サービスを利用すれば、居住地の距離に関係なく、わずかな時間でも同時視聴が可能となる。

多人数同時視聴における既存サービスとして、リアルタイムストリーミング方式を利用したものが存在する。これらの既存サービスでは、文字によるコミュニケーション機能を提供しているものもある [1], [2]。リアルタイムストリーミング方式を利用した既存サービスでは、ライブ配信型動画とオンデマンド配信動画を視聴することが可能である。しかし、既存サービスには次の3つの問題点がある。(1) 適切な動画再生同期技術を用いなければ視聴シーンがずれる。既存サービスでは、高精度な動画再生同期を行っていないため、受信者の再生バッファ量や通信遅延により、視聴者間の視聴シーンがずれることになる。視聴シーンずれは動画の任意のシーンを基にしたコミュニケーションを行ううえでの障害となる。(2) 多くのシステムがライブ配信動画を対象としており、オンデマンド配信動画には適していない。ライブ配信動画では、基本的に受信した動画データをローカルPCに保存、蓄積できないため、再生制御が行えない。そのため、オンデマンド配信動画では可能な、ユーザによる早送りや巻き戻し、一時停止といった再生制御が不可能である。本論文では、このようなユーザによる動画の再生制御をユーザ操作と呼ぶ。(3) サーバ・回線などのサービス提供コストが高く、利用ユーザ数や動画品質が制限される。リアルタイムストリーミング方式による動画配信は通信量が多く、サーバ・回線などのサービス提供コストが高くなる。既存サービスでは、サービス提供コストを抑えるために、利用ユーザ数や動画品質などに制限がある。これにより、ユーザが利用したいときに利用できない、動画品質に満足できないなどの問題が発生する。

(1)に関連して、動画同期技術の先行研究は多数存在するが、研究ごとに適用環境が異なる [3]。これは各研究がそれぞれ異なる利用環境を想定し、異なる条件下での同期方式を提案しているためである。たとえば、オンデマンド配信動画を対象とした研究 [4] や、オンデマンド型動画の再生同期をサーバからの指示で行う我々の先行研究 [5] や、オンデマンド配信動画とライブ配信動画の両方を対象とした研究 [6] が存在する。また、P2Pのライブ配信プラットフォームを対象とした研究 [7] も存在する。

動画同期を行う方法として、再生開始タイミングをすべ

てのユーザの端末で揃える方法がある。再生開始タイミングを揃える場合、単純に再生開始命令を送出しただけでは、通信遅延により端末の再生開始命令受信時刻が異なり、結果として視聴シーンずれが発生する。また、通信遅延の大きなユーザ端末（高遅延クライアント）が存在する場合には、他のユーザ端末（低遅延クライアント）が高遅延クライアントに命令が届くまでの間待たされることにより、ユーザ操作の応答性が悪化する。ユーザ操作の応答性の悪化は、同時視聴を行ううえでの問題となる。

そこで、本研究では、インターネットの通信遅延変動やパケットロスによる影響に対応可能な、オンデマンド配信動画視聴における端末間高精度再生同期方式を提案する。提案方式は、数名程度の少人数が高精度な再生同期をとまった動画の同時視聴を行う状況において、その視聴グループ内だけで有効な動画の再生同期にのみ利用する同期された時刻指標を用いて、端末間の回線遅延を考慮した高精度な再生同期、ユーザ操作の応答性確保などを行う点が特徴である。本提案により、これまでは遅延時間の大きな端末を基準に再生同期を行っていたのに対し、利用回線の特性を考慮した柔軟な同時視聴を可能とする。具体的に本論文では、各端末の利用回線の遅延や揺らぎに起因する、再生同期で重要な再生タイミングやシーク制御の指示に関する通信が再生同期精度に与える影響と、端末の負荷に起因する動画再生時の視聴シーンずれについて考慮する。オンデマンド配信動画は、動画ダウンロード中の再生を可能とするプログレッシブダウンロード方式と、ISDB-TやMediaFLOのクリップキャスト、KDDIのEZチャンネル、動画のダウンロード販売（PlayStation@Storeなど）のような回線のアイドル時間などに端末に配信・蓄積しておく形態の2種類に大別できる。本提案方式では、前者のケースにおいて同一ビットレートの配信動画のすべてが端末にキャッシュされている場合と、後者のケースにおいて配信動画のすべてが端末に蓄積されている場合を対象としている。ほかにも、個人で撮影した著作権的に問題のない動画を他の参加者に送信し、それを同時視聴の対象にすることも可能である。前者における動画のダウンロード中の再生では、回線品質に応じた動的な動画のビットレート変更制御の発生や、キャッシュされていない箇所に早送りする際に動画取得に時間を要するなど、再生同期制御を複雑化する要因が多い。また、これらの要因を考慮するには、特定のサービスに特化した再生同期方式の開発が必要となり、適用範囲が狭くなる恐れがある。そのため、配信動画のすべてをあらかじめ端末に蓄積されている状況を対象とした再生同期方式の開発を行った。配信動画の蓄積にかかる時間については、本研究では主に少人数が音声会議通話などでコミュニケーション中に特定の動画を同時視聴する状況を想定している点、昨今のブロードバンド回線普及率向上の観点から、特に問題にならないと考えている。

本研究の目標は次の3点である。(a) 動画の端末間高精度再生同期の実現, (b) ユーザ操作の応答性の確保, (c) 同期専用サーバを必要としない低コストなシステムの構築。(a)の再生同期精度の目標値として, 視聴シーンずれ120ms以下とする。これは, 人間が複数のスクリーンに映し出された映像を見たときにずれていると感じない精度である[8]。(b)の応答性の目標値として, 低遅延クライアントのユーザ操作応答時間を100ms以下と設定する。これは, 人間がシステムから反応がなくてもストレスを感じないとされている応答時間である[9]。提案方式を備えたプロトタイプシステムにより, 目標を満たしているかについて評価する。

2. システム概要

提案システムの概要を図1に示す。左は多人数同時視聴のイメージであり, 1つの映像を, 同じ場所で複数人がコミュニケーションしながら一緒に視聴している状態である。右はこれをインターネット経由にしたもので, VoDサーバなどの外部サーバや任意の視聴者が所有する動画データを, それぞれの視聴者は距離的に離れた場所で, シーンが同期された状態で鑑賞している状態である。システムは同時視聴を行うユーザ端末によって構成される。動画同時視聴を行うユーザ端末は, まず同時視聴グループを作成する。同時視聴グループを作成したユーザ端末がホスト端末となり, 他のユーザの端末はクライアント端末としてホスト端末に接続して同時視聴グループに参加する。ユーザは視聴する動画ファイルをWebや自身が所有している動画ファイルから選択する。同時視聴グループ内の他のユーザ端末はホスト端末からの指示により同じ動画ファイルをダウンロードし, 再生可能な状態となるよう準備を行う。その後, すべてのユーザで準備が完了すると再生が可能となる。任意のユーザが再生ボタンを押すと同時に, 自動的に同時視聴グループ内の全ユーザ端末も同じ動画の再生を開始する。再生中は, システムが動画の再生同期制御を行い, グループ内のすべての端末が同じ動画をシーンまで同期して再生している状態になる。この再生同期のために, ホストとクライアントの時刻を同期させ, それを基準クロックとして利用する。また, 再生同期には同期サーバなどを必要とせず, ホストとクライアント間で再生同期処理を完了できるようにする。ホスト端末が作成した同時視聴グループにユーザ端末が参加する必要があることから, グローバルIPアドレスでアクセス可能で, かつNAT越え問題の影響を受けないユーザ端末がホスト端末になる必要がある。また, 端末間の時刻同期精度や, 再生同期制御命令の伝搬遅延が再生同期精度に影響を与えることから, 回線状況の良い端末がホスト端末になることが望ましい。ユーザは動画を鑑賞しながら, テキストチャットや音声通話でリアルタイムコミュニケーションを行うことが可能である。これにより, 動画の盛り上がりを共有することや, 視聴

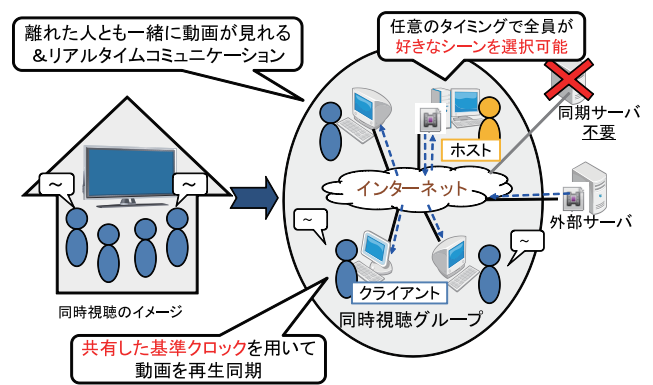


図1 提案システムイメージ
Fig. 1 Image of proposed system.

シーンについて議論を行うことなどができる。音声通話には Skype API [10] を用いることで複数人での会話を可能としている。視聴する動画は, 任意のユーザが所有している動画ファイルを参加者間それぞれが自身の端末にコピーするか, 外部サーバから取得する。すでに動画を所有している場合は, 動画ファイルの取得は行わないため, 無駄な通信は行われない。

提案システムの具体的な利用シーンとしては, 友人間でのスポーツ観戦やお勧めの動画(自作やVoDサービスで公開されているものなど)を見せ合う, 少人数性のオンライン講義においてビデオ教材を複数人で再生同期したり任意のシーンを繰り返し視聴する, 野球やゴルフなどのフォーム検証など, 様々なものが考えられる。

3. 課題

(1) 基準クロックの共有

各ユーザ端末はそれぞれ内部クロックを持つが, それぞれの内部クロックは同じ値とは限らない。本方式では, 導入コストの低減の観点から同期サーバを用いないという方針をとるため, 基準クロックの値によって後述する再生制御命令の実行タイミングを決定する。そのため, 同時視聴グループに参加するすべての端末で共通するクロックである基準クロックを共有する必要がある。インターネット環境は, 通信遅延が安定しないため, ある程度の誤差が生じる。そのため, 通信遅延の変動の影響を少なくし, 動画の再生同期精度である視聴シーンずれ120ms以内を達成するために必要な基準クロック精度として平均値20ms程度をどう維持するかが課題となる。視聴シーンずれは, インターネットにおけるクロック同期誤差(10ms程度), OSのタイマ精度(15ms程度), 動画の1フレームあたりの録画時間と再生開始タイミングとのずれ(最大33ms(30fps時))の3つが主要な要因として考えられる。そのため, 基準クロック精度誤差は, インターネット上で十分に実現可能で, かつ視聴シーンずれの目標値を達成可能な数値として設定した。

(2) 再生制御命令の実行タイミングの同期

円滑な視聴者間コミュニケーションの実現には、つねに高精度な端末間再生同期が必要となる。動画の視聴開始時やシーク命令の実行時、一時停止時など、動画の視聴モデルは様々な条件で変化する。また、再生開始時とシークおよび一時停止時では、その応答性に対するユーザの要求も異なるので、それぞれの操作に応じた同期方式が必要となる。また、ある端末のみ視聴シーンがずれてしまった場合は、該当する端末のみで個別に再生同期を行う必要がある。

(3) ユーザ端末における応答性の確保

再生開始タイミングの同期を行う場合、通信遅延により端末への再生命令が遅延することで、再生制御命令への応答性が悪化する。特に、通信遅延の大きなユーザ端末（高遅延クライアント）が存在する場合、既存手法では高遅延クライアントに合わせて動画の再生同期を行うため、他のユーザ端末の応答性が悪化し、同時視聴を行ううえで遅延時間の差が問題となる。そのため、高遅延クライアント存在下での他のユーザ端末（低遅延クライアント）の応答性の確保が必要となる。

(4) 視聴シーンずれの検知と自動修正

同時視聴を行うユーザ端末は、それぞれ処理性能や通信帯域が異なるため、再生レートが微妙に異なる。また、再生中に大きな負荷がかかると動画が一時的に停止するなど、安定した再生レートを維持できなくなる。これらの原因により、動画の再生中にも視聴シーンずれが発生する可能性がある。このような突発的な視聴シーンずれは同時視聴を行ううえで問題となる。したがって、再生中にも動画の視聴シーンずれを検知し、自動的に修正する必要がある。

4. 提案方式

4.1 SNTP 手法による基準クロックの共有

本方式では、時刻同期プロトコルである SNTP と同様の手法を用いて、ホスト端末を基準として同時視聴グループ内のクライアント端末と時刻情報の同期を行う。基準となるホスト端末の時刻情報を基準クロックと呼び、同時視聴グループ内の各ユーザ端末が、再生同期の際に共通して利用する基準値になる。OS 組み込みの NTP 機能を用いる方式も存在するが、管理者権限が必要などの制限や、同時視聴グループ内で有効な基準クロックがあれば十分であるため、これは用いない。同時視聴グループが形成されている間、定期的に基準クロックの調節を行うことで、動画の同時視聴に必要な基準クロック精度を維持する。

図 2 に、ホスト-クライアント間の時刻のずれ T_d の計測方法を示す。クライアント端末のリクエスト発行時刻 T_1 、ホスト端末のリクエスト受信時刻 T_2 、ホスト端末の応答送信時刻 T_3 、クライアント端末による応答受信時刻 T_4 とすると、ホスト-クライアント間の時刻ずれ T_d は $T_d = ((T_2 - T_1) + (T_3 - T_4))/2$ で表される。基準クロック

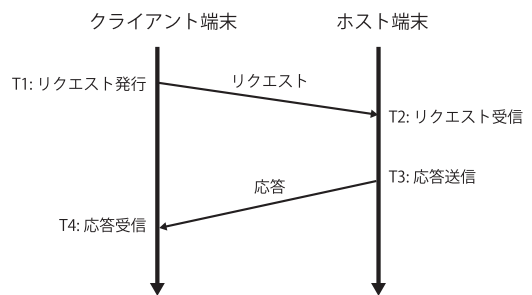


図 2 ホスト-クライアント端末間の時刻同期フロー
Fig. 2 Flow of clock synchronization between host and client.

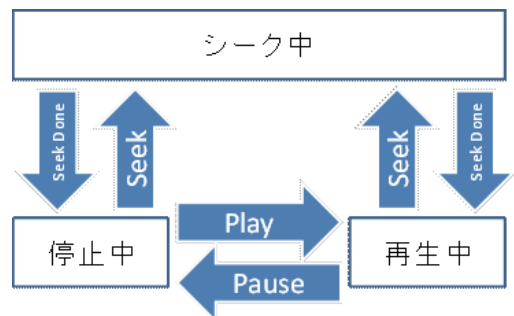


図 3 動画の再生状態モデル
Fig. 3 The model of movie play status.

ク T_s を求めるには、クライアント端末のローカルクロックを T_c として、 $T_s = T_c + T_d$ とする。この T_s が、ずれを計測したクライアントにおける同時視聴グループで利用する基準クロックになる。後述する再生同期制御では、各クライアント端末のローカルクロック値ではなく、基準クロックである T_s の値を利用する。また、各端末の内部クロックは時間の経過とともにずれていく可能性がある。そのため、一定時間ごとに端末間クロック差を再計測することで、このずれを解消する。本システムでは、同時視聴グループに参加しているクライアント端末それぞれについて、30 秒ごとに端末間クロック差の計測を行い、基準クロックのずれを解消することにした。クロック差の計測周期は、各端末の内部クロックの精度差および個体差を考慮して決定した。仮に 1 日に 5 秒ずれる内部クロックであった場合、1 分間で 3.4 ms ずれることになる。このずれが累積した場合、時刻情報を基に再生同期を行う本提案方式の再生同期精度に大きく影響する。そのため、ずれの累積がほとんど生じないと考えられる計測周期として 30 秒に設定した。

4.2 動画再生状態モデル

本提案システムにおける、動画の再生状態モデルを図 3 に示す。本システムでは動画再生状態を次の 3 つにモデル化する。ユーザ操作による動画の再生制御は Play (再生), Pause (一時停止), Seek (シーク) のみとする。

次に、再生状態と視聴シーンの変化の対応を表 1 に示す。実時刻 t , t' ($t < t'$) の場合、現在の視聴シーンを $P(t)$,

表 1 動画再生状態と視聴シーンの変化
Table 1 Play status and scene change.

状態	視聴シーン
停止中	$P(t') = P(t)$
再生中	$P(t') = P(t) + (t' - t)$
シーク中	ユーザ指定

再生制御実行後の視聴シーンを $P(t')$ とする。視聴シーンとは、各ユーザ端末が現在再生している箇所であり、動画の始点からの経過時間で表す。また、 $P(t)$ は動画の始点からの経過時間を ms 単位で表したものである。後述する実装における Seek 処理は、動画の始点からの経過時間を指定して API を実行することで視聴シーンを変更する。しかし、動画はフレーム単位で再生されるので、API が自動的に $P(t)$ を含むフレームの最初から再生する。したがって、これが同期ずれの要因の 1 つである。フレーム単位で動画再生状態をモデル化することも可能であるが、使用するコーデックやフレームレートはサービスにより様々であることからモデルが複雑化するため、本論文では実時刻を基に動画の始点からの経過時間を利用することにした。

停止、再生、シークのそれぞれの状態と、視聴シーンの関係は次のようになる。

(1) 停止中

動画の再生が停止している状態であり、端末上では時間が経過しても視聴シーンが変化せず、ユーザが Play 操作や Seek 操作を行った場合のみ再生状態と視聴シーンが変化する。動画の再生同期のためには、停止中状態では視聴シーン $P(t)$ をすべての端末で揃える必要がある。ただし、停止中状態では視聴シーンが変化しないため、他の状態に変化しない場合は視聴シーン変更タイミングを各端末で揃える必要はない。

(2) 再生中

動画を再生しユーザが視聴している状態であり、再生中は時間の経過とともに視聴シーンが変化する。そのため、時刻 t' における視聴シーン $P(t')$ は時刻 t における視聴シーン $P(t)$ に t' と t の差を加算したものと同一となる。動画の再生同期のためには、すべての端末間で、状態変化前の視聴シーン $P(t)$ と、状態変化のタイミングを揃える必要がある。

(3) シーク中

動画の視聴シーンをユーザからの要求により変更している状態であり、処理が終了すると処理前の状態に戻る。変更後の視聴シーンはユーザが指定した値であるため、シーク処理前の視聴シーンと関連はない。動画の再生同期の際は、シーク処理は端末の性能により処理時間が大きく異なる傾向があるため、再生中状態に戻るタイミングが各端末で異なる可能性が高い。また、処理時間が 100ms を超える可能性も高いため、再生同期では処理時間差による視聴

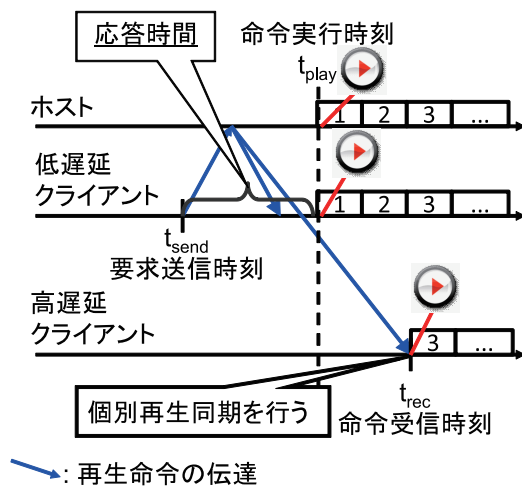


図 4 動画の再生同期方式概要

Fig. 4 Image of play synchronization.

シーンずれの発生や、応答時間の増大に考慮する必要がある。本方式では、まず後述する一斉同期を試し、時間内に処理が終わらない端末が発生した場合に、個別に再生同期を行うことでこの問題に対処する。

4.3 ホスト端末との通信遅延値によるクライアント分類

ホスト端末との通信遅延値によるクライアント分類通信遅延 100ms を基準に低遅延クライアントと高遅延クライアントに分類し、ホストが再生開始タイミングを決定する際に、高遅延クライアントを除外して計算することで、低遅延クライアントの応答性を確保する。100ms は、応答性の目標値から設定した値である。

4.4 基準クロックを用いた再生同期方式

再生同期方式は、同時視聴グループ内で命令実行タイミングをそろえる一斉再生同期と、遅延や視聴シーンずれに対応するための個別再生同期の 2 種類の適切な使い分けにより、高精度な再生同期と応答性の確保を行う。

4.4.1 一斉再生同期

提案する再生同期方式の概要を図 4 に示す。図 4 は、任意のユーザが再生命令を送信し、同時視聴グループ内の再生が開始されるまでの流れを示している。再生命令の送信時刻 t_{send} と、その再生命令が実行される時刻 t_{play} を次式で定義する。

$$t_{play} = t_{send} + ResThreshold \text{ (ms)} \quad (1)$$

ここで、ユーザが再生を要求した時刻 t_{send} と命令実行時刻 t_{play} の差がユーザ操作の応答時間となる。本方式では、ユーザ操作の応答時間が 100ms 以下とすることを目標としているため、命令実行時刻は、ユーザ操作の応答時間が 100ms となるように決定する。そのため、 $ResThreshold \leq 100ms$ となる。ResThreshold は、同時視聴グループ内の低遅延クライアントのうち、ホストと

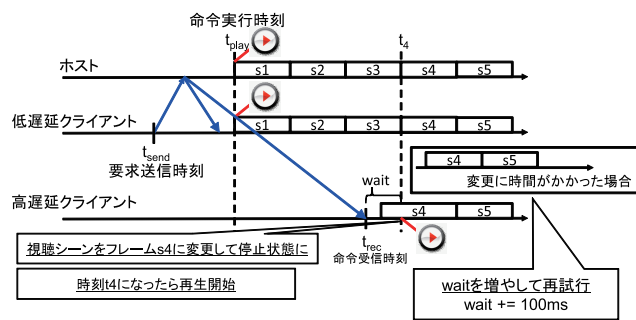


図 5 個別再生同期

Fig. 5 Play synchronization per each client.

の通信遅延が最大のものを適用する。

ホストから命令実行時刻を含む再生命令を受信した端末は、基準クロック T_s を参照し、命令実行時刻 t_{play} になるまで待機し、 t_{play} になると再生を開始する。これにより、同時視聴グループ内の各端末において再生同期を実現する。

しかし、ホスト・クライアント間の通信遅延は、各クライアント端末で異なるため、ホストからの再生命令を受信する命令受信時刻 t_{rec} が命令実行時刻 t_{play} を過ぎる場合もある。そこで、命令受信時刻 t_{rec} が命令実行時刻 t_{play} を過ぎていた場合には、そのクライアントは個別に再生同期を行うことで同時視聴グループ内での再生同期を実現する。

4.4.2 個別再生同期

個別再生同期は一斉再生同期とは異なり、他の端末に悪影響を与えずに再生同期を実現する必要がある。図 5 に個別再生同期方式を示す。図 5 では高遅延クライアントにおける個別再生同期を示しているが、低遅延クライアントでも同様の処理を行う。まず、個別再生同期を行う端末は、現在の基準クロック値 t_{now} をもとに、シーク後の予想視聴シーン $P(t_{est})$ とした場合のシーク後予想時刻 t_{est} を $t_{est} = t_{now} + wait$ (wait 初期値=100 ms) として決定し、視聴シーンを $P(t_{est})$ に変更する。視聴シーンの変更は処理時間がかかるため、処理完了後には t_{est} を超えている可能性もある。超過していた場合は $wait += 100ms$ として $wait$ を増加させ、再度 t_{est} の決定と視聴シーンの変更を行う。シーク後予想時刻 t_{est} より前に視聴シーンの変更が完了した場合、シーク後予想時刻 t_{est} になるまで待機し、シーク後予想時刻 t_{est} に再生を開始する。これにより、余計な通信を行わず、個別再生同期を行う端末のみで再生同期を行える。

4.5 通信遅延値による動的な同期方式の切替え

各クライアント端末をホストとの通信遅延値によって動的に分類し、異なる再生同期方式を適用する。通信遅延値が 100 ms 未満のものを低遅延クライアント、100 ms 以上のものを高遅延クライアントと定義する。低遅延クライアントでは命令実行時刻 t_{play} に命令を実行する。高遅延クライアントは、受信時刻 t_{rec} における視聴シーン $P(t_{rec})$

を式 (2) より計算し、個別再生同期を行うことで再生同期を実現する。

$$P(t_{rec}) = P(t_{play}) + (t_{rec} - t_{play}) \quad (2)$$

動的に変化するネットワーク環境へ対応するために、クライアント分類は適宜行う。そのため、そのときの通信遅延値により低遅延クライアントに分類された端末が、後に高遅延クライアントに分類される可能性も存在するが、どちらの場合でも再生同期は実現される。

高遅延クライアントは、個別再生同期によって、視聴シーンを先回りすることで他の端末と同じ視聴シーンに変更するため、ユーザが視聴できるシーンに欠落が生じる。この問題を解決するには、すべてのユーザ端末が再生命令を受信したことを確認してから再生を開始する必要がある。しかし、この方式ではユーザ操作の応答性が、通信遅延値の大きい端末に合わせて悪化する。つまり、この問題はユーザ操作の応答性と、高遅延クライアントにおける視聴シーンの欠落のトレードオフとなっている。しかし、視聴シーンの欠落は高遅延クライアントのみで発生する問題であるため、低遅延クライアントには影響しない。一方、すべての端末の命令受信を確認する方式では、すべてのユーザが通信遅延値が最大である高遅延クライアントの応答待ちによる、ユーザ操作の応答性の悪化という影響を受ける。そこで、本方式では、ユーザ操作の応答性を優先し、高遅延クライアントは、自身の通信遅延値のみの影響を受けるという方式とする。日本国内の往復伝搬遅延は 100 ms 以下といわれており、インターネット環境で利用する場合は低遅延クライアントに分類される端末が参加端末の大部分を占めると考えられる。そのため、高遅延に分類される端末は輻輳などの影響で突発的にホストとの遅延時間が増大した端末が該当すると考えられる。参加端末に遅延時間の長い端末 (国外に存在する端末など) が含まれる場合は、定常的に高遅延に分類されることになる。この場合はシーク操作のたびに視聴できるシーンの欠落は、ホストとの遅延時間が 100~200 ms の場合、30 fps の動画で 3~6 フレームになる。本研究でのシーク制御は、ユーザが GUI を手動操作により実施することを想定しているため、数フレーム程度の精度が要求されるとは考えにくく、高遅延端末でのシーン欠落は問題にならないと考えている。

4.6 視聴シーンずれの検知と自動修正

視聴シーンずれは、端末の処理落ち、再バッファリングなどの原因により発生する。これらは予測が困難であるため、一時的な視聴シーンずれは不可避である。そこで、視聴シーンずれを検知し、個別に再生同期を行う必要がある。

最後に受信した再生制御命令の受信時刻 t_{play} と、そのときの視聴シーン $P(t_{play})$ 、現在時刻 t_{now} 、現在の視聴シーン $P(t_{now})$ とすると、視聴シーンずれ D は式 (3) のように

表 2 システム実装環境

Table 2 Specifications of developed system.

項目	環境
OS	Windows 7 / Fedora13
開発言語	C++
フレームワーク・ライブラリ	Qt 4.7.3 libvlc (VLC player 1.0.5) Skype API (Skype4COM)
コンパイラ	gcc 4.4.0

なる。

$$D = |P(t_{play}) + (t_{now} - t_{play}) - P(t_{now})| \quad (3)$$

各端末は、一定周期で上記式から視聴シーンずれの検知を行い、視聴シーンずれが閾値 120 ms 以上であるときに個別再生同期を行い、視聴シーンずれの補正を行う。

実装上の問題として、現在の視聴シーン $P(t_{now})$ の値を取得する API の更新頻度が実装依存であるため、API の更新タイミングが端末ごとに異なり、またシステムから更新タイミングを変更することができない。そこで、本方式では視聴シーンずれの検知タイミングを同時視聴グループ内の各端末において独立とすることで、視聴シーンずれの検知タイミングをすべての端末で揃える必要性をなくしている。これにより、予測困難な視聴シーンずれは一定周期ごとに修正され、かつ該当端末においても個別再生同期による視聴中断を起こさずに、同時視聴を実現する。

5. 実装

前述の提案方式を用いたプロトタイプシステムを開発した。実装環境を表 2 に示す。Qt フレームワーク [11] を UDP ソケット, GUI, タイマ処理などに利用した。そのため、OS は Windows と Linux の 2 種類に対応しているが、Linux では Windows 専用である Skype API は利用できないため音声通話は行えないという制限がある。

次に、プロトタイプシステムのユーザインタフェース例を図 6 に示す。左上が動画の表示エリアで、右の同時視聴ユーザリストに表示されているユーザたちで同期されたシーンの動画が表示される。左下はチャットの表示と入力エリアで、テキストによるコミュニケーションを可能としている。上部のメニューからは、ホストとして同時視聴グループを作成する機能、作成された同時視聴グループに参加する機能、Skype の会議通話機能による複数人での音声通話を行う機能にアクセスできるようになっている。鑑賞する動画は、ホストユーザが所有する動画もしくは VoD サービスで提供されている動画ファイルを、同時視聴を行う前にユーザの PC にダウンロードしておく。同時視聴グループに参加し、ホストが動画を指定すると、その情報が各参加者のソフトウェアに送信され自動的に動画のダウンロードを行う。各参加者が完全な動画データを入手した段

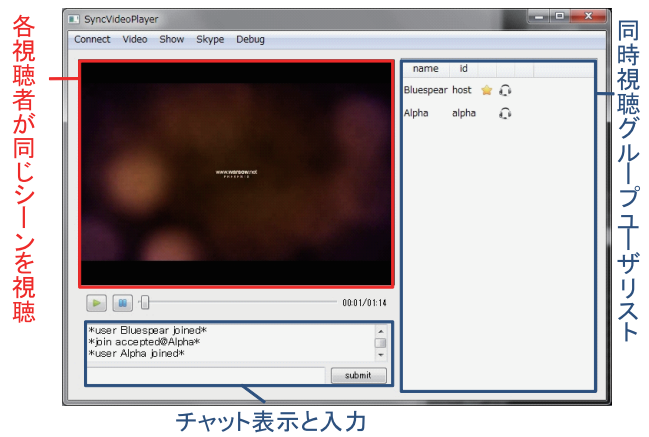


図 6 ユーザインタフェース
Fig. 6 User interface of developed prototype software.

階で動画の再生待ち状態になる。ホスト端末や VoD サーバからのプログレッシブダウンロードでは、伝搬遅延や輻輳などが動画の同期精度や応答性に与える影響が大きいと判断し、プロトタイプシステムでは事前にダウンロードを完了しておく方針をとった。

6. 評価

6.1 評価項目の定義

プロトタイプシステムを用いて、視聴シーンの変化、視聴シーンずれの変化、ユーザ操作応答性について評価を行った。視聴シーンの変化からは低遅延/高遅延クライアント分類に基づいた再生開始タイミングの指示による再生同期方式と個別再生同期の効果について、視聴シーンずれの変化は再生制御命令（再生、一時停止、シーク）が視聴シーンずれに与える影響と個別再生同期による補正効果、および視聴シーンずれの検知と自動修正効果について、ユーザ操作応答性については、再生制御命令が発行されてからその命令が実際に処理されるまでの時間に関する評価を目的としている。視聴シーンずれの変化とユーザ操作応答性の概要を図 7 に示す。図 7 左は視聴シーンずれの定義であり、ホスト端末におけるシーン s_1 の視聴開始時刻 t_h 、クライアント端末における視聴開始時刻 t_c のとき、視聴シーンずれ D は、 $D = t_c - t_h$ と定義した。 D が正の値ならクライアントの視聴シーンがホストより遅れており、 D が負ならクライアントの視聴シーンの方がホストより早いことを示す。図 7 右は、ユーザ操作の応答性の定義であり、ユーザが GUI の再生ボタンや一時停止ボタン、シークバーをクリックして、ホスト端末への要求メッセージを送信した時刻を t_{send} 、ホストからの実行メッセージを受信し、実際に処理が実行された時刻を t_{play} とする。このときのユーザ操作応答時間 Res は、 $Res = t_{send} - t_{play}$ と定義した。

6.2 評価項目の理論式

視聴シーンずれは式 (3) でモデル化しているが、実際の

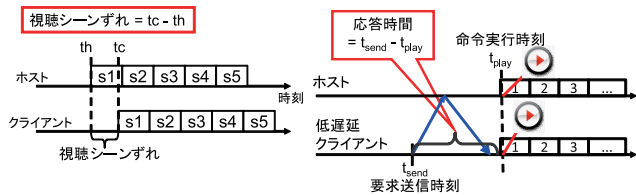


図 7 評価における視聴シーンずれと応答時間の定義

Fig. 7 Evaluating definition.

システム上では、基準クロックの誤差や、動画ファイルのデコード、OSのタイマの精度の影響により、理論どおりの時刻に命令を実行できない可能性がある。そのため、評価実験における視聴シーンずれDの理論式は、基準クロック誤差 ClockDiff、動画ファイルのデコードなどによる再生開始遅延時間 ProcDelay、OSタイマ精度 TimerRes とすると次式で定義する。

$$D = ClockDiff + ProcDelay + TimerRes \quad (4)$$

ユーザ操作の応答時間は前述のとおり、要求メッセージを送信した時刻と、ホストが決定した命令実行時刻によって決定される。命令実行時刻は、100msを上限として、同時視聴グループ内の各クライアント端末とホスト間の通信遅延値のうち最大のものによって決定される。そのため、ホスト端末とクライアントiの通信遅延値をLiとすると、クライアント端末がn台存在するとき、低遅延クライアントにおける最大の通信遅延値Lmaxは次式で定義する。

$$Lmax = \max\{Li | 0 \leq i < n, Li \leq 100\text{ms}\} \quad (5)$$

また、各端末が実際に処理を開始するタイミングはOSのタイマ精度 TimerResにも影響される。以上から、ユーザ操作応答時間 ResTimeは次式で表される。

$$ResTime = Lmax + TimerRes \quad (6)$$

6.3 LAN環境における評価

LAN環境における評価環境を図8に示す。3台の端末で構成しており、それぞれホスト、低遅延クライアント、高遅延クライアントになっている。本研究の応用として考えている、数名程度の参加者が各自の端末にダウンロードされている動画ファイルを対象に同時視聴を行う場合では、動画の配信による回線容量の圧迫を受けないため、再生制御命令に関する通信遅延と揺らぎが同期精度に影響を与えることになる。再生制御命令のデータサイズは動画に比べてはるかに小さいため、クライアント端末数が同期精度に与える影響は十分に小さいと考えられる。そのため、LAN環境における評価は3台構成とした。評価では、IEEE1588 PTPv2による時刻同期網を利用して、OSの時刻をナノ秒レベルの高精度に同期した環境を用いる。これにより、4章で述べた方式の本システムによる基準クロック共有の精度、視聴シーンずれ、ユーザ操作応答時間を正確に比較する

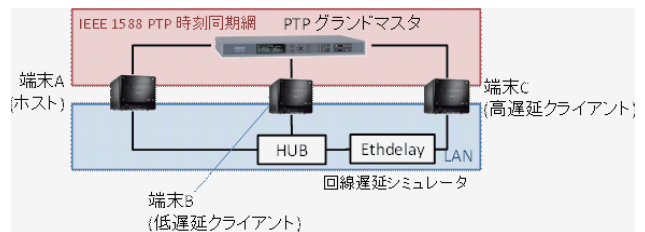


図 8 IEEE1588を用いたLAN環境での評価環境

Fig. 8 Evaluating structure in LAN environment.

表 3 LAN環境における評価システム環境

Table 3 Specifications of LAN evaluation.

項目	環境
CPU	Intel Core2Duo E6750
メモリ	1 GB
OS	Fedora 13
IEEE1588 PTP カード	MEINBERG PTP270PEX

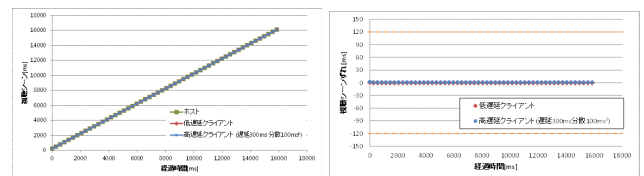


図 9 視聴シーン (左) と視聴シーンずれ (右) の変化 (再生のみ)

Fig. 9 The basic change of play scene and scene gap.

ことができる。高遅延クライアントを模擬するために回線遅延シミュレータ Etherdelay [12] を使用する。Etherdelayをホスト端末と高遅延クライアント端末の間に設置することで、その間を通過するパケットに遅延をかける。遅延設定は正規分布に基づくランダム分布が設定可能であり、実際のインターネット環境に近い回線状況をシミュレートできる。評価に利用した端末 A, B, C はすべて同一構成である。端末 A, B, C の仕様を表 3 に示す。PTP グランドマスターは LANTIME M600 (MEINBERG 社) を使用した。

再生同期の精度を調査するため、視聴シーンずれの測定を行った。また、低遅延クライアントにおいてユーザ操作を行い、そのユーザ操作応答時間の測定を行った。実験は回線遅延シミュレータ Etherdelay の設定値を変更し複数回行った。遅延設定は正規分布とした。設定値は往復遅延値で示している。また、本システムにおける基準クロックの同期精度の調査も実施した。

まず、単純に再生のみを行った際の視聴シーンの変化を図 9 左、視聴シーンずれの変化を図 9 右に示す。このときの Etherdelay の遅延設定は平均 300ms 分散値 100ms² の正規分布である。図 9 左から、低遅延と高遅延の両方のクライアントが存在する場合でも、視聴シーン P(t) は経過時間に比例して安定的に推移していること、クライアント間での再生同期誤差がきわめて小さいことが分かる。そのため、再生同期が高精度に行えていることを意味している。

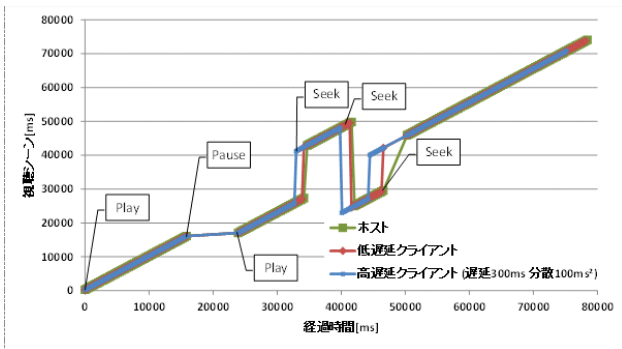


図 10 遅延設定 300 ms 分散 100 ms² での視聴シーンの変化
 Fig. 10 The change of play scene (delay: 300 ms, variance: 100).

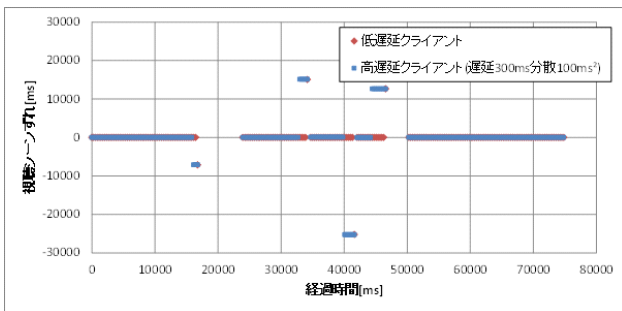


図 11 遅延設定 300 ms 分散 100 ms² での視聴シーンずれの変化
 Fig. 11 The change of play scene gap (delay: 300 ms, variance: 100).

図 9 右の破線は視聴シーンずれの目標値である 120 ms を示している。図 9 右からは視聴シーンずれは認められず、また視聴シーンずれの目標値も十分に満たしていることが分かる。

次に、再生、一時停止、シーク時の評価結果を、Etherdelay の遅延設定ごとに示す。Etherdelay の遅延設定 300 ms 分散値 100 ms² の際の視聴シーンの変化を図 10 に、視聴シーンずれの変化を図 11 に示す。飛び値により目標値周辺の数値が確認しにくい図 12 に視聴シーンずれ -150~150 ms の範囲のデータを示す。視聴シーンが急激に変化している箇所は図 10 に示す場所で、ユーザ操作によりシークが発生した箇所である。また、図 10 からは低遅延/高遅延クライアント混在環境での高精度な再生同期と、シーク時に視聴シーンずれが発生した際に個別再生同期機能による視聴シーンの修正による、高精度な再生同期が行われていることが分かる。

図 11 より、遅延設定 300 ms 分散 100 ms² での実験において、高遅延端末の視聴シーンずれが非常に大きい場面が 3 カ所ほどあることが分かる。これは、図 10 と比較すると、シーク操作が行われた場面であることが分かる。高遅延端末はシーク命令の受信が 300 ms 程度遅れるため、ホスト端末と比べシーク操作が遅れ瞬間的に非常に大きな視聴シーンずれが発生する。しかし、シーク命令受信後に個

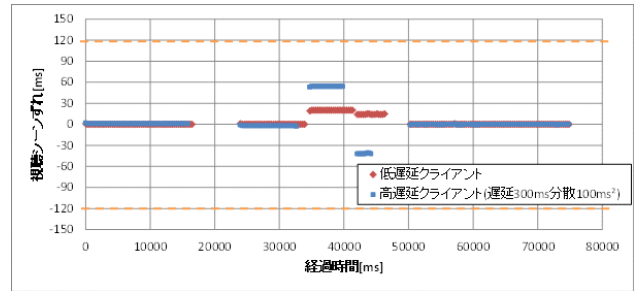


図 12 遅延設定 300 ms 分散 100 ms² での視聴シーンずれの変化 (目標値周辺)

Fig. 12 The detailed change of play scene gap (delay: 300 ms, variance: 100).

別再生同期を行うため、すぐに視聴シーンずれは小さな値となることが図 12 から分かる。このシーク命令に起因する視聴シーンずれ以外の場面では、低遅延クライアントで最大 20 ms、高遅延クライアントで最大 59 ms である。したがって視聴シーンずれの目標値 120 ms 以下を実現している。

図 11 において、部分的に低遅延クライアントとの視聴シーンずれも一瞬非常に大きな値になっているが、これは一時停止・シーク前の視聴シーンと一時停止・シーク後の視聴シーンを比較した数値をグラフ上にプロットしているためである。したがって、図 11 の短時間の大きなずれは無視してもかまわないと考えられる。対して、高遅延クライアントにおいて、視聴シーンずれが 10,000 ms 以上で 1,000 ms 程度継続している経過時間 43,000 ms 付近については、理論上は遅延時間 300 ms と個別再生同期の検出・実行周期である約 300 ms (動画再生 API の実装や使用する機器により変動) の合計が最大継続時間になることが予想される。しかし、実測値ではこれ以上の数値になっており、一時停止時には発生していなかったことから、端末内でのシーク処理に時間がかかったものと考えられる。

次に、Etherdelay の遅延設定を 30 ms 分散 10 ms² に設定して実験を実施した。これは、日本におけるインターネット接続環境で利用した場合を想定した数値である。結果、このような安定した通信環境では、前述した高遅延端末の視聴シーンずれのような大きな視聴シーンずれが発生していないことが分かった。最大の視聴シーンずれは端末 B で 23 ms、端末 C で -13 ms であり、この実験においても視聴シーンずれの目標値 120 ms を実現している。

これらの実験において、視聴シーンずれの変化はシーク処理後に発生していることが分かる。これはシーク処理が動画データのデコード処理をとる非常に重い処理であり、同等の処理性能を持つ端末でも、処理にかかる時間が異なる。逆に、再生中に視聴シーンずれが大きく変化することはなく、再生開始タイミングさえ揃えば十分な同期精度が得られることが分かった。しかし、映画のように 2 時間やそれ以上の長時間続くような動画の場合は、再生中に

表 4 LAN 環境における応答時間と再生制御命令の実行時間の合計

Table 4 The summary of user response time.

遅延設定 (ms)	分散 (ms ²)	再生最大 (ms)	再生平均 (ms)	一時停止最大 (ms)	一時停止平均 (ms)	シーク最大 (ms)	シーク平均 (ms)
30	10	100	99	1	1	8	7
300	100	22	21	1	1	6	4.33
300	200	25	23.33	3	2	7	6
300	1000	23	23	1	1	1	1

においても各端末の視聴シーンがずれていく可能性がある。この問題に対しては、視聴シーンずれの検知と個別同期により視聴シーンずれが 120 ms 以上になる前に視聴シーンずれが補正されると考えられる。そのため、定期的な基準クロックの調整および視聴シーンの監視と補正は、インターネットのような遅延特性を持つ回線における動画の再生同期には効果的であるといえる。

次に、低遅延クライアントにおけるユーザ操作応答時間を表 4 に示す。遅延設定は 30 ms 分散 10 ms², 300 ms 分散 100 ms², 300 ms 分散 200 ms², 300 ms 分散 1,000 ms² の 4 種類の条件で実験を行い、再生、一時停止、シークの各操作において、その最大値と平均値を求めた。表 4 の数値は、再生制御に関する API が実行されてから、その API から制御が戻るまでの時間を示している。

表 4 より、4 種類の実験において、高遅延端末が存在する環境での低遅延端末のユーザ操作応答時間について、すべて目標値 100 ms 以下を実現していることが分かる。すべての実験において、再生命令が一時停止命令やシーク命令と比べて、応答時間が長くなっている。これは、一時停止命令は即座に一時停止状態にするために必要な処理が非常に少ないためである。また、シーク命令が短い点については、シーク処理を行う API を実行すると動画が一時停止と同じ状態になり、この時点で API から制御が戻ることになる。この状態でユーザは、シーク処理が開始されたことを認識可能である。しかし、視聴シーンを変更する処理は完了していないため、視聴の開始までには時間がかかる。シーク命令が実際に完了するまでの時間は、前述した高遅延クライアントにおける個別再生同期の評価でみられたように 3 秒近くかかる可能性がある。しかしこれは端末性能に依存するため、本方式では問題としない。

遅延設定 30 ms 分散 10 ms² の実験における再生命令の応答時間が、他の実験に比べて大きいのは、高遅延クライアントが存在しない代わりに低遅延クライアント内の最大通信遅延値 L_{max} が他の実験と比べて大きいためである。このときの最大通信遅延 L_{max} は 59 ms であった。遅延設定 300 ms の実験では再生命令の実行には 25 ms 程度かかっていることから、再生命令の応答時間は 84 ms 程度になると予想される。しかし実際には 100 ms になっている。この予想値とのずれ 16 ms は、OS のデーモンプロセスなどに

表 5 基準クロック誤差のまとめ

Table 5 The summary of synchronized internal clock gap.

遅延設定 (ms)	分散 (ms ²)	最大 (ms)	最小 (ms)	平均 (ms)
30	5	22	8	12.9
300	100	23	12	18.2
300	200	30	4	16.3
300	1,000	13	-2	5

よりタスクスイッチが発生していた可能性が考えられる。各実験における基準クロック誤差を表 5 に示す。基準クロック誤差は、本システムによる基準クロックと、PTP により同期されている時刻情報を比較することで求めた。表 5 より、通信遅延値の変動による基準クロック誤差が最大でも 30 ms、平均で 18 ms 程度であることが分かる。したがって、インターネットを介した評価では、基準クロック誤差を 18 ms から 30 ms 発生しているものとして考える必要がある。また、前述したとおり基準クロック誤差が 30 ms 以内であれば、再生同期には十分である。しかし、この結果は正規分布に基づく通信遅延シミュレートの結果であるため、実際のインターネット環境でも同様に基準クロック精度が維持できることは保証されないが、一般的なユーザ環境における基準クロック精度としては妥当であると考えられる。

6.4 インターネット環境での評価

インターネットを利用した際の動作実験を実施した。実験に利用した端末の環境を表 6 に示す。

インターネットを介した評価での、視聴シーンの変化を図 13 に示す。視聴シーンずれの変化を図 14 に示す。ユーザ操作応答時間を表 7 に示す。ユーザ操作応答時間は、表 4 と同様に再生制御命令が発行されてから、再生制御で利用する API から制御が戻るまでの時間である。

図 13, 図 14 から、LAN 環境での評価実験と同様に、シーク処理を行った場面において視聴シーンずれが発生していることが確認できる。User B 端末においてシーク処理以外の場面で視聴シーンずれが 143 ms になっている場面（経過時間 67,729 ms 地点）が存在するが、直後に視聴シーンずれ 35 ms になっている。これは User B 端末において視聴シーンずれが検知され、システムが自動的に個別再生同期を実行し、結果として視聴シーンずれが解消したためである。これより、端末における視聴シーンずれの検

表 6 インターネットを介した評価での利用端末
Table 6 Specifications of Internet evaluation.

役割	id	CPU	OS	回線 (ISP-家屋/家屋-端末)
ホスト	host	Intel Core i5 2500 K	Windows 7	光回線 / 有線
クライアント A	User A	Intel Core i5 2500 K	Windows 7	光回線 / 有線
クライアント B	User B	Intel Core i7 875 K	Windows 7	ADSL / 無線
クライアント C	User C	Intel Celeron 743	Windows 7	専用線 / 有線

表 7 インターネット環境における応答時間と再生制御命令の実行時間の合計
Table 7 The summary of user response time in the Internet environment.

再生最大 (ms)	再生平均 (ms)	一時停止最大 (ms)	一時停止平均 (ms)	シーク最大 (ms)	シーク平均 (ms)
48.0	45.5	4.0	4.0	3.0	3.0

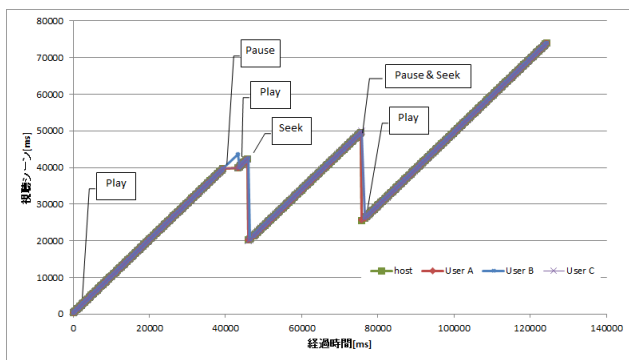


図 13 インターネットを介した評価での視聴シーンの変化
Fig. 13 The change of play scene in the Internet environment.

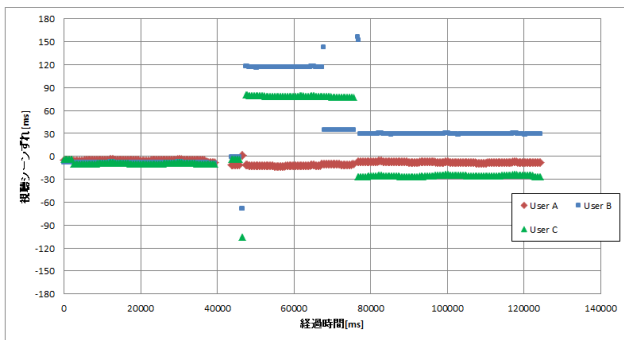


図 14 インターネットを介した評価での視聴シーンずれの変化
Fig. 14 The change of play scene gap in the Internet environment.

知と個別再生同期が有効に機能しているといえる。個別再生同期により 120 ms 以上の視聴シーンずれが解消された場面以外での、視聴シーンずれの最大値は、User A 端末で 13 ms, User B 端末で 117 ms, User C 端末で 106 ms である。これより、視聴シーンずれの目標値 120 ms 以下を実現し、十分な再生同期精度を実現したといえる。

User A 端末は実験全体にわたって視聴シーンずれの変動が少ないが、User C 端末と User B 端末はシーク処理の際に大きなずれが発生している。User C 端末はホスト

端末と同一 LAN 内に存在するため、他の端末に比べ回線状態は安定している。しかし、他の端末と比べ処理性能は劣っている。そのため、端末性能の差が視聴シーンずれに影響すると考えられる。また、その影響による視聴シーンずれは本方式により 120 ms 以内に抑えることができている。User B 端末は、家屋までは ADSL、ルータと端末間は無線により接続されている。そのため、他の端末に比べ通信遅延が大きくその揺らぎも大きいと考えられる。そのため、通信遅延の大きさや揺らぎが視聴シーンずれに影響すると考えられる。そのような環境においても、本提案の遅延時間を考慮した再生同期制御と個別再生同期は有効に機能しているといえる。

表 7 より、ユーザ操作応答時間はすべてにおいて目標値 100 ms 以下を達成している。LAN 環境での評価と同様に、再生命令の応答時間が一番大きくなっている。このときの Lmax の平均値は 37.7 ms であるため、10 ms 程度の OS タイマ精度 TimerRes が存在すると考えられる。Windows OS においては、ハードにより 1~10 ms 程度、タイマ精度に差があるため、ユーザ操作応答時間はおおむね理論値どおりと考えられる。

一時停止とシークに関しては 3~4 ms と良好な応答時間となっている。これにより、ユーザは自分の操作がシステムに反映されたことをすぐに確認でき、ストレスなく動画の同時視聴を楽しむことができると考えられる。

7. 関連研究

動画の再生同期を対象とした研究が実施されている。まず、Boronat らの研究 [3] により、動画の再生同期は、ストリーム内同期 (再生レートの維持)、ストリーム間同期 (映像と音声の同期)、グループ内同期 (視聴者間の視聴シーン同期) の 3 種類に分類されている。本研究は、視聴者間の視聴シーンを同期させるため、グループ内同期に相当する。動画の再生同期は、同期の基準にできる統一的な時刻情報が必要となる。これまでに我々は、同期サーバの内部

クロックという基準からの指示により動画の再生同期を行う、クライアント/サーバ型のシステムを開発している [5]. 本研究では、想定する利用シーンは同じであるが、同期サーバ不要でクライアントのみで動画の同期視聴を実現している点、時刻情報を用いて動画の再生同期を行っている点が異なっている. 同期サーバを不要にすることで、ホスト端末にグローバル IP アドレスでアクセス可能で、かつ NAT 越え問題に対応できる設定が求められるが、サーバの維持管理コストやサーバ負荷によるサービス品質への影響から解放される.

Boronat らの研究 [6] は、RTCP [13] パケットによる再生位置通知を利用した動画同期技術を提案している. この動画同期技術は、オンデマンド配信型とライブストリーミング配信型のどちらでも利用は可能であるが、RTCP プロトコルを拡張して使用しているため、動画の配信と動画同期を同時に行う方式になっている. そのため、オンデマンド配信型におけるプログレッシブダウンロードは対象としていない. 同期制御には同期サーバによる各クライアントの再生状況を監視する方式をとっており、また NTP による端末間時刻同期を前提としている. 本研究は、同期サーバを必要とせず、また個人所有の動画ファイルの参加者間での共有や、プログレッシブダウンロード方式を用いて動画全体のキャッシュを行ってから同期する点が異なっている.

大西らの研究 [4] は、オンデマンド型動画を対象としたリアルタイムコミュニケーションのための動画同時視聴技術を提案している. このシステムでは、HTTP を利用し動画配信サーバから動画を取得する. クライアントは動画配信サーバの時刻同期機能との間で時刻同期を実施し、動画の再生や一時停止などの再生制御を絶対時間で指定する. 全クライアントと通信遅延を測定し、最も大きいラウンドトリップタイムをもとに再生開始時刻を決定することで、通信遅延に影響されない再生同期を実現する. また、クライアントのバッファ量によって配信する動画データのビットレートをクライアントごとに決定することで、利用可能帯域に合わせた動画配信を行う. 本研究は、同期サーバを必要とせず、クライアント端末のみで利用できる点が異なっている. また、クライアントの通信遅延に着目し、遅いクライアントに応答性が影響を受けないよう制御している点も異なっている.

SyncStream [7] では、P2P リアルタイムストリーミングシステムである GoalBit を拡張し、再生同期機能を適用している. 各クライアントの再生位置情報を Tracker で収集し、一番再生位置が進んでいるものを次の再生位置としてすべてのクライアントに通知する. クライアントは受信した再生位置に変更することで、再生同期を実現する. SyncStream の再生同期方式では、再生同期サーバと各クライアントの通信遅延の差を考慮していないため、通信遅延の差だけ視聴シーンずれが発生する可能性がある. 本研

究では、基準クロックを用いた動画再生同期制御を行っており、参加端末どうしがつねに再生位置を交換することはない. 定期的に参加者間で同期する基準クロックと現在の再生位置から視聴シーンずれをそれぞれの端末で独立して検知し、個別再生同期方式による自己補正を行うことにより、再生位置通知の遅延時間が視聴シーンずれに与える影響をなくしている点が SyncStream と異なっている.

8. まとめ

本論文では、オンデマンド型動画を対象として、ユーザが他のユーザとともに動画を視聴しながらリアルタイムなコミュニケーションが可能となるシステムの実現を目的として、端末間で高精度な再生同期を行う方式を提案した. 提案方式では、視聴する動画のすべてを全端末が事前にダウンロードもしくはキャッシュしておくことで動画配信のトラヒックが動画の再生同期に関する通信に影響を与えない構成を想定し、同時視聴グループ内で動画の再生同期の指標となる基準クロックを定期的に同期し、その指標を用いて動画の再生制御命令の実行開始時刻を全端末で同期させることによる、動画の再生同期制御方式を実現した. 再生制御命令を送信するホスト端末と各クライアント端末間の遅延時間の違いに着目し、高遅延端末が視聴シーンずれやユーザ操作の応答時間に影響を与えないよう制御している点が特徴である. また、端末の負荷や動画再生機能の実装を要因とする動画の視聴シーンずれに対して、基準クロックを指標とした視聴シーンずれの定期的な確認と検知を行い、視聴シーンがずれている際に端末が独立して視聴シーンのずれを補正可能とした. 提案方式を実装したプロトタイプシステムにより性能評価を行い、インターネットのような通信遅延と揺らぎのある環境で、視聴シーンずれ 120 ms 以下、ユーザ操作の応答時間 100 ms 以下を達成した. 評価には高精度に端末間の時刻を同期可能な IEEE1588 を使い、正確な視聴シーンずれと応答性を計測した. また、実際にインターネットを使った動作実験を行い、実用上問題ない性能を達成できていることを示した. しかしながら、本提案方式は、利用する通信回線の遅延特性を考慮した再生制御命令の実行開始時刻の同期は実現しているものの、使用する端末の性能差や特性、コーデックの特性などにより、再生制御命令の実行タイミングとユーザが実際に視聴するシーンの同期が必ずしも一致していないという課題がある. これらは使用する機器への依存度が高いため正確なモデル化が困難であり、本提案方式ではこのような特定機器に依存する要因は考慮せず、視聴シーンずれは発生するものとして、発生の検知と補正を行う方針をとっている. また、本提案方式は、動画のすべてを全端末が事前にダウンロードもしくはキャッシュしておく状況を想定して方式提案と評価を実施した. 動画のダウンロード中の視聴を可能とするプログレッシブダウンロードに適

用する場合、シーク処理時の応答性の確保が課題となる。我々の先行研究 [5] では、プログレッシブダウンロードに対してクライアント/サーバ型の動画再生同期を実現しているが、シーク対象の動画データがキャッシュされていない際に各端末の性能や回線状況により一意に定まらないバッファリング処理時間が必要になる。そのため、シーク処理時の応答性能が非常に悪化することが確認されている。

今後は、端末固有の性能要因を考慮したより高精度な再生同期方式、プログレッシブダウンロードにおいて本研究と従来研究から得られた成果を活用した高い応答性を実現可能な再生同期方式、インターネットを用いたより詳細な同期性能およびスケラビリティの検証を予定している。

参考文献

- [1] Ustream, Inc.: USTREAM, You're On. Free LIVE VIDEO Streaming, Online Broadcasts. Create webcasts, live stream videos on the Internet. Live streaming videos, TV shows (online), available from <http://www.ustream.tv/> (accessed 2012-04-20).
- [2] niwango, inc.: ニコニコ生放送 (オンライン), 入手先 <http://live.nicovideo.jp/> (参照 2012-04-20).
- [3] Boronat, F., Lloret, J. and Garcia, M.: Multimedia group and inter-stream synchronization techniques: A comparative study, *Information Systems*, Vol.34, No.1, pp.108-131 (2009).
- [4] 大西健夫, 城島貴弘, 中島一彰: コミュニケーション中の動画同期視聴を可能とする再生タイミング制御方式, 情報処理学会第 72 回全国大会, pp.5-6 (2010).
- [5] 高野祐太郎, 大島浩太, 田島孝治, 高田 治, 寺田松昭: 投稿型動画視聴におけるユーザ間リアルタイムコミュニケーション支援システム, 電子情報通信学会論文誌 D, No.10, pp.2302-2316 (2010).
- [6] Boronat, F., Guerri, J. and Lloret, J.: An RTP/RTCP based approach for multimedia group and inter-stream synchronization, *Multimedia Tools and Applications Journal*, Vol.40, No.2, pp.285-319 (2008).
- [7] Seo, D., Kim, S. and Song, G.: SyncStream: Synchronized Media Streaming System in a Peer-to-Peer Environment, *2010 3rd International Conference on Human-Centric Computing*, pp.1-5 (2010).
- [8] Steinmetz, R.: Human Perception of Jitter and Media Synchronization, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.14, No.1, pp.61-72 (1996).
- [9] Nielsen, J.: *Usability Engineering*, Morgan Kaufmann, San Francisco (1994).
- [10] Skype: オンラインで無料の Skype インスタント通話と固定電話への格安通話 - Skype (オンライン), 入手先 <http://www.skype.com/intl/ja/> (参照 2012-04-20).
- [11] Nokia Corporation: Qt - Cross-platform application and UI framework (online), available from <http://qt.nokia.com/> (accessed 2012-04-20).
- [12] Nippon C.A.D Co., Ltd.: Ethdelay (オンライン), 入手先 <http://www.ncad.co.jp/contents/products/it/Ethdelay/index.html> (参照 2012-04-20).
- [13] Schulzrinne, H., Casner, S., Frederick, R. and Jacobson, V.: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications, RFC3550 (2003), available from <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3550.txt>



森安 辰

2010 年東京農工大学工学部情報工学科卒業。2012 年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。在学中、動画の同期再生の研究に従事。



大島 浩太 (正会員)

2003 年東京農工大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士前期課程修了。2006 年同大学院工学教育部電子情報工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。現在、東京農工大学大学院工学研究院助教。無線センサネットワーク、異種ネットワーク連携、オーバレイネットワーク等の研究に従事。電子情報通信学会会員。



高田 治 (正会員)

1979 年北海道大学大学院工学研究科情報工学専攻(修士)修了, 同年日立製作所に入社, 横浜研究所に所属し現在に至る。ATM リングをコアとした LAN 間ブリッジ接続システム, 映像トランスコーディングを備えたルータによるアクティブネットワーク, および ITS 応用の研究開発に従事。



寺田 松昭 (正会員)

1970 年岡山大学工学部電気工学科卒業。同年(株)日立製作所入社。同社システム開発研究所において, 制御用分散処理システム, LAN, プロトコル高速処理, VoIP, 次世代インターネットの研究に従事。工学博士。著書『制御用計算機におけるリアルタイム技術』(共著, コロナ社), 『デジタルサービス革命』(共著, 日刊工業新聞社)。1999 年 4 月より東京農工大学工学部情報コミュニケーション工学科教授。位置情報応用システム, MANET, スマートフォン応用サービス, 新世代ネットワーク等に興味を持つ。同大学総合情報メディアセンター長を兼務(2003 年 4 月~2007 年 7 月), 現在, 同大学大学院工学研究院教授(工学部情報工学科, CIO 補佐を兼務)。IEEE, ACM, 電子情報通信学会各会員。