

P2P ネットワークを用いた位置情報付き映像 蓄積配信システムの実現

上田 達也^{†1} 鹿野 将典^{†1} 安倍 広多^{†1}
石橋 勇人^{†1} 松浦 敏雄^{†1} 村田 修一郎^{†2}
藤井 裕史^{†2} 坂下 秀^{†2}

我々は、GPS等の位置情報検出機能を備えた携帯型端末からの映像を、リアルタイムに(あるいは一旦蓄積した上で要求に応じて)ストリーミング配信するP2P型システムの開発を行っており、これまでにその基盤技術のいくつかについて発表を行ってきた。本稿では、それらを踏まえて構築したシステム全体について、その実現方法を述べる。本システムは、映像蓄積配信サービスに加えて、撮影時刻や位置によって映像を検索するための位置情報サービスならびに映像の存在する密度によって検索を行うための密度検索サービスから構成される。映像蓄積配信サービスでは、階層化符号を使用した複数ストリームによる配信によって、異なる解像度の映像を受信側で選択可能としている。また、位置情報サービスや密度検索サービスはP2P基盤ソフトウェア *musasabi* の提供する仮想ピアを用いて実現しており、これによって、P2P型システムの持つ高いスケーラビリティという利点を享受しつつ、同時に信頼性も高いシステムを構築している。

Design and Implementation of a Location-aware P2P Video Streaming System

TATSUYA UEDA,^{†1} MASANORI SHIKANO,^{†1} KOTA ABE,^{†1}
HAYATO ISHIBASHI,^{†1} TOSHIO MATSUURA,^{†1}
SHUICHIRO MURATA,^{†1} HIROSHI FUJII^{†2}
and SHIU SAKASHITA^{†2}

This paper describes the design and implementation of a P2P-based location-aware video streaming system. The system provides three major services: video streaming service, location management service, and video density management service. The video streaming service has a capability of multi-resolution video

streaming with hierarchical video encoding. The location management service provides a function to look up video images by locations. The video density management service provides a similar look-up function but by video image density. All those services are constructed on *musasabi*, a platform for highly reliable P2P services.

1. はじめに

近年、携帯端末において、小型化・高性能化、および、利用可能なネットワークの高速化が進み、さらには、GPS(Global Positioning System)やビデオカメラを搭載するものも普及しつつある。これによって移動端末から位置情報を伴ったストリーミング映像の発信が可能になってきた。

著者らは、多数の人々が移動端末を持って自分の興味ある映像を位置情報付きで自由にストリーミング配信し、多数の人々がそれらを視聴できるシステムを構築した。本システムでは、位置情報と時刻情報に基づいて蓄積された(過去の)映像を検索・閲覧できるとともに、ライブ映像を視聴することもできる。さらに、指定したエリアで将来誰かが映像を撮影したらその映像を視聴するといった視聴予約や、指定した時刻に指定した場所をたまたま通りかかった人に、視聴者の見たいものの撮影を依頼するということも可能である。

本システムは多数の参加者(撮影者および視聴者)および多数の映像情報を扱う必要があるため、スケーラビリティの点からPeer-to-Peer(P2P)方式で実現した。P2P方式では、ノードの参加・離脱が頻繁に行われるため、安定的にサービスを提供するのは容易でない。

本システムの開発にあたって、これまでに、P2Pネットワーク上で安定的にサービスを提供するさまざまな手法を検討し、実装をおこなってきた。本稿では、P2Pネットワーク上で安定的かつスケーラブルなサービスを実現する方法について、本システムの実現を通して得られた知見について述べる。また、試作した実験システムについて概説する。

2. システムの概要

本システムでは、多くの撮影者がGPSを備えた携帯端末を用いて、さまざまな場所で撮

^{†1} 大阪市立大学大学院創造都市研究科

Graduate School for Creative Cities, Osaka City University

^{†2} (株)アクタスソフトウェア

Acutus Software, Inc.

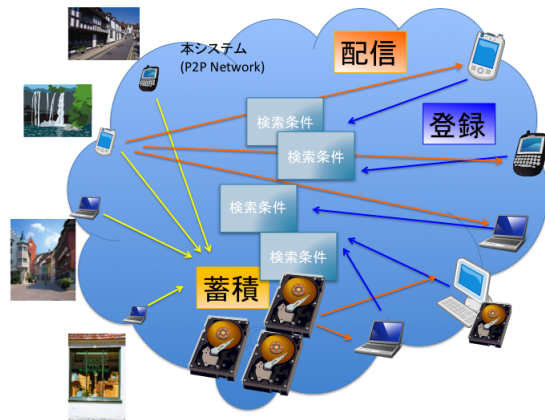


図 1 提案システムの概要

影した映像をストリーミング配信する状況を想定している。視聴者はネットワークを介してこれらのライブ映像もしくは蓄積された映像を受信し視聴する。視聴者が映像を選択するには、見たい位置（範囲）と時刻で映像を検索する。このため映像には GPS から取得した位置情報をメタデータとして付与している。

視聴者はライブ映像と蓄積映像だけではなく、将来撮影される（かもしれない）映像を予約することができる（視聴予約機能）。視聴予約機能とは、視聴者があらかじめ検索条件を指定しておくと、将来その条件に合致する映像を誰かが撮影すると自動的に映像の配信をする機能である。

視聴者側から撮影者に撮影して欲しい対象を積極的に伝える機能（撮影リクエスト機能）も実現した。これは、検索条件で指定した時刻・場所の近くにいる参加者（撮影者）に、撮影を依頼するメッセージを自動的に届ける機能である。例えば災害時などに、自宅を離れている人が家の様子を知りたい場合に、家の場所を指定して撮影リクエストを出しておけば、たまたま通りかかった撮影者にメッセージを通知して撮影を依頼することができる。

さらに検索条件として、位置の範囲を指定するだけでなく、「映像配信中の端末密度（カメラ密度）が高い地域」を指定することもできる。なんらかの重大事件が発生したり、大きなイベントがあるような場所では、多くの参加者が映像を配信している可能性が高いと予想されるので、そのような地域を探して映像を視聴できるようにした。



図 2 システム構成図

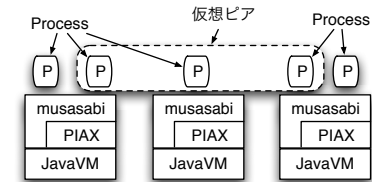


図 3 仮想ピア

3. 基盤技術

本章では、本システムを実現する上で基盤となる技術について述べる。本システムを構成する各ノードは、P2P プラットフォーム PIAX¹⁾ および PIAX をベースとした P2P 基盤ソフトウェア musasabi²⁾ 上に実装した (図 2)。

3.1 Skip graph

本システムは、ノード間でメッセージを送受信するために PIAX が提供する Skip graph 構造化 P2P ネットワーク³⁾ を利用している。ここでは、Skip graph について簡単に説明する。また、今回 Skip graph の耐故障性を高めるために開発した手法についても述べる。

Skip graph は分散データ構造の 1 つであり、ノードはキー（任意の値）を Skip graph に挿入・削除できる。ノードはキーの昇順に並ぶ（この点、キーをハッシュ関数で変換する分散ハッシュテーブル型の構造化 P2P ネットワークと異なる）。Skip graph では、キーの検索は $O(\log n)$ 時間（ただし n はキーの数）実行可能である。また、ノードがキーの順に並んでいることを利用して、指定した 2 つの値の間にキーが含まれるノードへメッセージを配送する **レンジクエリ** や、指定した値より小さい最大のキーを保持するノードへメッセージを配送する (**MaxLessThan クエリ** と呼ぶ) ことが可能である。

Skip graph は、複数の分散双方向連結リストから構成される。Skip graph でキーを挿入（あるいはキーを削除）する場合、内部的には分散双方向連結リストに対してノードを挿入（あるいは削除）することになる。連結リストで挿入・削除するためには、両側の隣接ノードのリンクを書き換える必要がある。P2P システムでは、各ノードは自律的に動作するため、複数のノードが並行して挿入・削除しようとする可能性があるが、リンクの書き換え処理は連結リストの一貫性を保ちつつ行う必要がある。

PIAX の Skip graph 実装では、連結リストの一貫性を維持するために分散排他制御を用

いていた。この方式では、リンクを書き換えたいノードは、リンクを書き換える前にまずロックを管理するノードと通信してロックを獲得し、それからリンクの書き換え処理を行うことで排他制御を行う。しかし、この方式ではロックを管理するノードやロックを獲得したノードが故障した場合の回復が難しい（例えばロックを獲得したノードが故障するとロックが解放されない。タイムアウトによって強制的にロックを解放すると、ロックを誤って（早まって）解放する可能性があり、その状況からの回復手段が必要）。

実際、PIAX の Skip graph 実装でもノード障害から回復できない場合があったため、分散双方向連結リストのためのアルゴリズム DDLL を開発した⁴⁾。DDLL アルゴリズムでは分散排他制御を用いないが、複数の挿入・削除操作が並行して行われても連結リストの一貫性を常に維持できるという特徴がある。このため、故障からの回復が容易である。PIAX の Skip graph を DDLL アルゴリズムを用いたものに変更することで、ノード障害時にも安定して動作するようになった。

3.2 仮想ピア

P2P ネットワーク上の各ピアは、勝手なタイミングで参加、離脱する。このため、P2P システムで安定したサービスを提供することは容易ではない。著者らはこのような環境で容易に安定したサービスを提供するために、1つのプロセスを複数のピア上で一貫性を保ちながら並行して実行することで冗長系を構成する方式（**仮想ピア方式**）を提案し、P2P 基盤ソフトウェア musasabi 上に実装している^{2),5)}。本システムでもこれを活用しているため、ここで簡単に解説する。

3.2.1 仮想ピアの実現方式

仮想ピアでは、以下の方法で複数のプロセスを一貫性を保ちながら動作させる。

- (1) 各プロセスは外部からのメッセージによってのみ内部状態を変更する。
 - (2) 各プロセスは同一メッセージに対しては同一の処理をおこなう。
 - (3) 各プロセスは同一のメッセージ系列を受信する。
- (3)を実現するためには、Paxos 合意アルゴリズム^{6),7)}を用いる。仮想ピアを構成するすべてのピア（メンバピアと呼ぶ）が Paxos アルゴリズムによって入力メッセージを合意しながら動作することで、各プロセスが受信するメッセージ系列が同一になることを保証する。

musasabi は、実行中のプロセス^{*1}の複製を他のピアに移送する（**fork**）機能を持つ。仮想ピアは、故障などの理由でメンバピアが離脱した場合に、残りのメンバピアから、P2P

ネットワーク上からランダムに選んだピアにプロセスを fork させることで、メンバピア数を一定に保つ。このため、メンバピアの過半数のピアが一度に離脱しない限り、仮想ピアは動作を継続できる。

仮想ピアは、自身を複製して新たな仮想ピアを構成する機能（**vfork** 機能）も持つ。例えば仮想ピアの負荷があらかじめ定めた限界値を超えた場合に、仮想ピアを複製し、動作させることで負荷分散を実現できる。

3.2.2 仮想ピアにおける通信方式

仮想ピアを構成するメンバピアは固定されていないため、仮想ピアがメッセージを受信する場合、メンバピアにメッセージを配送する方法が問題となる。この問題は、Skip graph のレンジクエリ機能を用いて解決した。ある仮想ピアを構成するすべてのメンバピアが、上位桁が共通な固有の値^{*2}を Skip graph に登録することによって、上位桁の範囲で Skip graph をレンジクエリすれば、その仮想ピアのすべてのメンバピアにメッセージを送信できる⁸⁾。

4. 仮想ピア上に実装したサービス

本章では、本システムを構成するいくつかのサービスのうち、位置情報サービス（4.1）および密度検索サービス（4.2）について述べる。これらは仮想ピアを用いて実装しているため、ノード障害が発生しても安定して稼働する。

4.1 位置情報サービス

位置情報サービスは、主に緯度と経度で表される位置情報を登録、検索する機能を提供する。また、視聴予約機能、撮影リクエスト機能にも対応する。位置情報サービスは、位置情報のエントリ数に対してスケールするように設計した。以下、概要を述べる（詳細は文献 9)を参照）。

本システムでは、位置情報を効率よく検索するために空間充填曲線の一種である Z 曲線と Skip graph を用いた。

Z 曲線を用いると、2次元上の座標は Z 値と呼ばれる 1次元の値に変換できる。本方式では、緯度と経度で表された位置情報を Z 値に変換する。1つの仮想ピアは、Z 値のある範囲 [minZ, maxZ] に含まれる全ての位置情報を保持する（minZ, maxZ は各仮想ピアが保持する変数）。

*1 musasabi は通常の JavaVM 上で動作し、musasabi 上のプロセスは Java プログラムである。

*2 上位桁には仮想ピアを識別するための Id を、下位桁は仮想ピア内でメンバピアに個別に割り振られた番号を用いている。

初期状態では唯一の仮想ピアが全ての位置情報を管理している。仮想ピアが保持する位置情報のエントリ数が、格納できる最大エントリ数を越えると、vfork (3.2) によって新たな仮想ピアを構成し、担当する Z 値の範囲を分割する。このようにして負荷分散を行うことでスケラビリティを確保する。

位置情報を登録あるいは検索する場合、当該座標を管理する仮想ピアにメッセージを送信する必要がある。このために、位置情報サービスの仮想ピアは、自身の minZ をキーとして Skip graph に登録する。これにより、登録あるいは検索したい座標の Z 値をキーとして Skip graph で MaxLessThan クエリ (3.1) を発行することで、目的の仮想ピアにメッセージを送信できる。

図 4 に例を示す。図は、平面が Z 曲線によって 1 次元化され、またその平面が 3 つの領域に分割されて、それぞれ個別の仮想ピアが担当している様子をあらわす。右側の直線は Z 曲線による平面の直線化である。領域 A, B, C を担当する仮想ピアは、それぞれの minZ の値である 0, 16, 24 を Skip graph にキーとして登録している。例えば、座標 $p = (6, 1)$ を担当する仮想ピアへメッセージを送信する場合、 p を Z 値に変換した 41 をキーとして Skip graph 上で MaxLessThan クエリを発行する。このクエリはキー 24 に到達するため、領域 C を担当している仮想ピアへメッセージを送信できる。

この方式で、矩形領域を指定してメッセージのルーティングをおこなうこともできる。まず、検索条件として指定された矩形領域 (検索範囲) の左下頂点の座標に対して、上述の手順で、その座標を担当する仮想ピアメッセージをルーティングすることができる。メッセージを受け取った仮想ピアは次に、Z 値がより大きな座標に向けてメッセージを転送する。検索範囲の右上頂点の座標を管理する仮想ピアに到達するまでこれを繰り返せば、検索範囲を担当するすべての仮想ピアにメッセージを転送することができる。ただし方式では検索範囲とは関係の無い領域を管理する仮想ピアにもメッセージがルーティングされるため、効率が悪い。このため、なるべく効率よくメッセージをルーティングする工夫も行った (詳細は文献 9))。

4.1.1 視聴予約機能

視聴予約機能は、視聴者があらかじめ設定した地域と時刻でライブ映像の配信が開始されると自動的に視聴者に映像を配信する機能である。視聴予約機能は位置情報サービスの一部として実装した。

本システムでは、視聴者用アプリケーション (5.5) も musasabi 上に実装されており、視聴者用アプリケーションは起動時に固有の Id (PeerId) を生成し、キーとして Skip graph

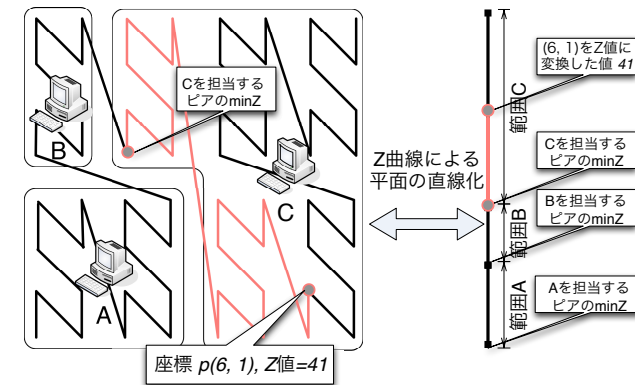


図 4 位置情報管理方式の概略

に登録している。視聴者用アプリケーションは映像を取得したい位置 (範囲) と時刻を指定して、位置情報サービスに自身の PeerId とともに予約情報を登録しておく。撮影者用アプリケーション (5.4) が撮影を開始すると、撮影者の位置情報が位置情報サービスに登録されるため、位置情報サービスは、登録された位置情報にマッチする予約情報があれば、登録された PeerId をキーとして Skip graph 上で検索 (メッセージをルーティング) することで、視聴者用アプリケーションに撮影が開始されたことを通知する

4.1.2 撮影リクエスト機能

撮影リクエスト機能は、視聴者があらかじめ設定した地域と時刻に存在する撮影者 (撮影中でなくても構わない) にメッセージを送って撮影を促す機能である。撮影リクエスト機能も位置情報サービスの一部として実装した。条件が一致した場合の通知先が撮影者用アプリケーションである点が異なるほかは、視聴予約機能と同様の方法で実装している。

4.2 密度検索サービス

密度検索サービスは、地域ごとの映像情報数 (映像密度) を検索する機能である。映像密度が高い地域ではなんらかのイベントが発生していると予想できるため、不特定のイベント発生を検知し、映像を視聴するために利用できる。

密度検索サービスは、利用者が指定した矩形範囲に含まれる映像数を位置情報サービスに問い合わせる。ただし利用者が指定した矩形範囲をそのまま用いるのではなく、位置情報

サービスでの検索効率が高くなるべくよくなるように、Z 曲線の形状と一致するように範囲を調整し、そこに含まれる映像数を返している。

5. 映像蓄積配信システムの実現

本章では、移動端末を含む P2P ネットワーク上でのストリーミング映像の蓄積配信システムについて概要を述べる。詳細については文献 10) を参照されたい。

5.1 端末の能力に応じた映像変換方式

本システムが想定する P2P ネットワーク上には、能力の低い携帯端末を含むさまざまな能力を持つノードが混在すると考えられる。そのため、ノードの処理能力に応じて使用する解像度を選択できるよう、階層化符号化により同一映像の複数解像度化機能を備えた映像圧縮方式を開発した。

本方式では映像圧縮をフレーム内のみで行う Motion JPEG を採用し、1 フレーム分の映像データは、オリジナル映像を縮小したもの（プライマリ映像データ）と、プライマリ映像データとオリジナル映像と差分（セカンダリ映像データ）で構成した。能力の低い端末ではプライマリ映像データのみを使用して低解像度で再生し、高解像度で再生する場合はプライマリ映像データとセカンダリ映像データをそれぞれ展開して合成する。

5.2 ツリー型配信による分割された映像データのストリーミング

撮影された映像はまず、**配信ルートノード**と呼ばれるプログラムに送信される。配信ルートノードは起動時に自分自身の位置情報を Skip graph に登録するので、撮影者は GPS で自らの位置を取得し、PIAX 上の位置情報オーバーレイ LL-Net(Location-based Logical Network)¹¹⁾ を利用して撮影地点に近い配信ルートノードを選択する。

映像を受信した配信ルートノードは、同一の映像を視聴する各視聴者用アプリケーション(5.5) に対し、ツリー型の配信ネットワークを構成し、映像データのストリーミングを行う。また配信ルートノードでは映像の蓄積も行う。

次に配信ルートノードは、5.1 で述べた階層化符号により分割された 2 種類の映像データに音声データを加えた計 3 本のデータストリームを組み合わせて配信ツリーを構成する。視聴者用アプリケーションは必要なデータを流すツリーに加わる^{*1}ことで、能力に応じた映像の再生が可能となる。

5.3 品質の悪い経路でのエラー訂正手法

品質の悪い経路での映像配信のために、RFC2733¹²⁾ 方式をベースに、ツリー型配信システムに適合するエラー訂正方式を開発した。本方式では、プライマリ映像データ、セカンダリ映像データ、音声データをそれぞれ RTP¹³⁾ パケットに分解し、各ストリームの種別が重複しないようなセットを単位としてパリティパケットを生成する。

生成したパリティパケットは映像データのストリームとは別のストリーム（パリティストリーム）で配信する。各視聴ノードは必要な映像・音声データストリームに加え、受信する映像データの種類に応じたパリティストリームを受信することで、エラー訂正をおこなうことができる。

パリティストリームの生成はかならずしも配信ルートノードではおこなわない。必要に応じて、配信ツリー中の視聴者用アプリケーションで行う場合もある。

5.4 撮影者用アプリケーション

撮影者用アプリケーションは、ライブ映像を撮影しつつ、配信をおこなうアプリケーションである。

撮影者用アプリケーションは、GPS から得た位置情報をもとに、撮影した映像を配信ルートノードに送信する(5.2)。映像を受け取った配信ルートノードは、5.1 で述べた方法でトランスコードを行ったのち、位置情報サービス(4.1) に映像の位置情報と時刻情報を登録する。この情報は映像の検索や、視聴予約機能で利用される。

撮影者用アプリケーションはまた、自身の現在位置を位置情報サービスに登録する。自身の現在位置は撮影リクエスト機能に利用される。

位置情報を登録するために撮影者用アプリケーションおよび配信ルートノードは、位置情報の Z 値を MaxLessThan クエリ(3.2.2) で位置情報サービスに送信する。これによって撮影者用アプリケーションおよび配信ルートノードはその位置情報を担当する仮想ピアの情報を知らなくても位置情報を登録することができる。

5.5 視聴者用アプリケーション

視聴者用アプリケーションは、ライブ映像あるいは蓄積された映像を視聴するためのアプリケーションである(図 5)。映像を視聴するとともに、配信ツリーを構成するノードのひとつとなる。また映像の検索、視聴予約機能、撮影リクエスト機能、密度検索サービスを利用するためのユーザインタフェースを提供する。

映像を検索、視聴予約機能(4.1.1) または撮影リクエスト機能(4.1.2) を利用するには、利用者は地図上で矩形範囲を選択する。視聴者用アプリケーションは 4.1 で述べた方法で、

*1 配信ツリーへの参加・離脱の方式については文献 10) を参照されたい



図5 視聴者用アプリケーション

選択された範囲を担当する仮想ピアを見つけてメッセージを転送することができる。

密度検索サービスを利用する場合も利用者は地図上で矩形範囲を選択する。視聴者用アプリケーションは指定された矩形範囲をその広さに応じて適当な数の小区画に分割し、密度検索サービスに小区画ごとに映像数を問い合わせる。

映像を視聴するには、検索あるいは視聴予約することで位置情報サービスから取得した映像リストの中から映像をひとつ選択する（視聴予約の場合は通知された映像が自動選択される）。すると撮影者用アプリケーションは選択された映像を配信しているルートノードが形成する配信ツリー（5.2）に参加し、映像ストリームの配信を受ける。

6. おわりに

本稿では、P2P ネットワークを用いた位置情報付き映像蓄積配信システムの実現について述べた。今後、システムとしての評価を行っていくことが課題である。

謝辞 本研究において、機知に富んだ示唆と多くの助言を頂いた（株）ビービーアールの吉田 幹氏、貫定 秀典氏に心より感謝いたします。本研究の一部は独立行政法人情報通信機構「高度通信・放送研究開発委託研究」の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 吉田 幹ほか：マルチオーバーレイと分散エージェントの機構を統合した P2P プラットフォーム PIAX(モバイルコンピューティング), 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.1, pp.402 - 413 (2008).
- 2) 安倍広多：P2P システム上での安定したサービス提供基盤 musasabi, 情報処理学会研究報告 2009-IOT-4 (2009).
- 3) Aspnes, J. et al.: Skip graphs, *ACM Trans. on Algorithms*, Vol.3, No.4, pp.1-25 (2007).
- 4) 安倍広多ほか：構造化オーバーレイネットワークに適した分散双方向連結リスト DDLL, 情報処理学会研究報告 2010-DPS-144 (2010).
- 5) Abe, K. et al.: Toward Fault-tolerant P2P Systems: Constructing a Stable Virtual Peer from Multiple Unstable Peers, *Proc. of Intl. Conf. on Advances in P2P Systems (AP2PS 2009)*, pp.104-110 (2009).
- 6) Lamport, L. et al.: The part-time parliament, *ACM Trans. on Computer Systems*, Vol.16, pp.133-169 (1998).
- 7) Roberto De Prisco et al.: Revisiting the Paxos algorithm, *Proc. of 11th Int. Workshop on Distributed Algorithms (WDAG 97)*, Springer-Verlag, pp.111-125 (1997).
- 8) 鹿野将典ほか：P2P 基盤ソフトウェア musasabi の仮想ピアにおける通信方式, 情報処理学会研究報告 2009-DPS-139 (2009).
- 9) 秋山大輔ほか：Z 曲線を用いた効率的な 2 次元位置情報の分散管理手法の提案とその評価, 情報処理学会研究報告 2009-IOT-8 (2009).
- 10) 村田修一郎ほか：P2P ネットワークにおけるストリーミング映像配信システムの実装, 情報処理学会研究報告 2010-IOT-10 (2010).
- 11) 金子 雄ほか：ユビキタス環境における端末の位置情報に基づく P2P ネットワーク, 情報処理学会論文誌. データベース, Vol.46, No.18, pp.1-15 (2005-12-15).
- 12) Rosenberg, J. et al.: An RTP Payload Format for Generic Forward Error Correction, RFC 2733 (Proposed Standard) (1999).
- 13) Schulzrinne, H. et al.: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications, RFC 3550 (Standard) (2003). Updated by RFCs 5506, 5761, 6051.