

動画像スケーラビリティにおける符号化効率特性解析と符号化制御方式の研究

笠井 裕之 早稲田大学国際情報通信研究センター助手

1 研究調査の目的

B-ISDNの発達と呼応する形で、高品質デジタル映像情報を利用したマルチメディアサービスの実用化が進んでいる。これら実用化サービスの原動力は、高能率動画像符号化方式の標準化と、それを取り巻くマルチメディア通信システムの標準化により、高品質デジタル映像情報を簡易に蓄積・伝送・放送することが可能となったことに起因している。動画像符号化方式標準化作業は、H.261に始まりMPEG-1, MPEG-2, H.263, H.323, H.324, MPEG-4等が勧告化され、それら標準符号化映像情を採用したオーディオ・ビジュアル通信システムとしてH.320, H.310, DAVIC1.4が標準化された。これら標準化作業の背景には、並列処理アーキテクチャの進化、メモリ容量の拡大、個体素子、LSI技術の発展と、汎用CPUの著しい発達が存在している。

このように、映像符号化情報を取り巻く環境の発展に伴い、多様化する実用環境に特化した映像符号化方式の整備が進み、利用環境に合わせた映像情報伝送路帯域、デバイスの処理能力、表示デバイスの解像度、情報蓄積能力等のユーザ要求に応じた、映像情報生成/提供の自由度が格段に高まってきている。しかしながら、逆の見方をすれば、ユーザ要求の多様化、差別化により、要求品質を満たす情報への要求は増加する一方であり、情報作成者、編集・加工者、提供者の負担は、今後飛躍的に増加していくものと考えられる。とは言え、情報利用者レベルではどのような映像情報も意識せずにハンドリングできることが要求されるため、既に存在する符号化情報から、情報利用者の要求する品質の符号化情報を取り出すための技術開発が期待される。このような要求品質の情報取得技術の確立は、標準映像符号化情報を利用したビデオライブラリ、テレコンファレンスシステム、ビデオオンデマンドシステムなどのオーディオビジュアルサービスの促進に寄与するだけでなく、デジタル情報機器の普及に多大な影響を及ぼすこととなる。例えば、放送局内、コンテンツ事業者間での素材編集・伝送と、放送網を利用したユーザへの分配配送においては要求品質が異なるが、利用場面に応じた映像情報取得が可能となれば、統一的に情報を扱うことが可能となる。また一方で通信形態に目を向けてみると、今後は従来の1対1通信から多対多への通信形態へ発展すると思われ、同一情報の同報配送を目的としたマルチキャスト通信による、接続帯域の異なる多地点間でのテレコンファレンスシステムやインターネット電話・放送サービスが拡大していく。そのようなサービスにおいて、ネットワーク上に位置するGatewayやルータなどでのQoS(Quality of Service)制御方式として情報取得技術を利用することにより、ネットワーク伝送帯域の不均一性を回避することが可能となる。また、ビデオオンデマンドシステムにおいて、要求品質毎の映像情報データベース化で問題となる蓄積デバイスの大容量化については、要求品質に応じた高品質情報からの変換・取得技術の確立により、蓄積容量の削減、並びに情報の一元化が実現できる。

本研究では、上記アプリケーションに代表される動画像スケーラビリティ機能の実現を目的として、特に、要求品質への情報変換技術である“動画像階層符号化方式”、並びに“動画像符号変換方式”に着目し、各方式に付随する研究課題について“動画像符号化制御方式”の観点から研究する。但し、本研究におけるスケーラブル映像伝送では、異なる画像品質、特に“異なるビットレート”に研究対象を絞る。

2 研究調査の方法

2.1 動画像階層符号化方式の研究背景 /

前述したように、要求品質の情報取得技術による効果は非常に大きいことから、同一映像情報から異なる映像品質(特にビットレート)で、異なる品質のサービスを利用者が選択的に利用できる機能として、スケーラビリティがMPEG-2の標準化の早い時点から要求事項として挙がっていた。例えば、MPEG-2映像符号化方式を使用する際、10[Mbps]程度の高品質映像情報が必要な場合と、4[Mbps]程度の通常品質映像情報でよい場合があり、両者に同時に同一のビットストリームを供給する方法は重要な技術的課題である。MPEG-2標準化過程において、スケーラビリティをもつプロファイル(特にSNRスケーラビリティ)が検討され採用された理由は、これらの課題に解を与えるものであった。このようにスケーラビリティは、同一のビットストリームから複数の品質を提供することが可能な動画像情報構造を有しており、これらは空間解像度、時

間解像度、符号化歪みなどの観点から画像情報を階層化し符号化する、階層符号化方式により実現される。従来、静止画像符号化では、段階的伝送のために、空間方向に階層構造を持たせ階層間の予測を行う手法が検討されている。そして、これを動画の各フレームに適用し、時間軸方向の予測以外に改階層間の予測を可能とする符号化方式が検討されている。また、量子化誤差に対する階層化を実現することで、異なる符号化歪みの画質選択機能を実現することが可能な符号化方式も検討されている。またMPEG-4においても、VOP毎のスケーラビリティを有する符号化方式が検討され採用されている。

従来、スケーラビリティの研究においては、高機能性に関する検討が中心に進められてきた。しかしながら、スケーラビリティの実現に際しては、(課題 - i)階層化劣化、(課題 - ii)符号化器/復号器での処理量の増大、(課題 - iii)提供品質への制限、柔軟性の欠如、のような問題が存在している。

本節では、まず最初に(課題 - i)について述べ、(課題 - ii, iii)については2.2で述べることにより動画符号変換方式の研究へと議論を進展させていく。

研究項目1 『階層符号量配分率の動的更新制御による動画階層符号化符号量制御方式』

動画階層符号化の符号化特性に関する検討は十分に行われているとは言いがたく、児玉らは、MPEG-2標準化作業で検討された、空間スケーラビリティ、SNRスケーラビリティ、周波数スケーラビリティの3方式を取り上げ、シミュレーション実験から符号化効率について比較検討している。しかしながら、理論的解析に基づく階層符号化特性に関する検討は十分であるとは言えない。特に、スケーラビリティは画像信号を階層化することにより階層化劣化(分割損)が発生し画質劣化が生じ、さらに、階層配分符号量の変化に応じて階層品質特性が変動することが報告されている。以上から、入力信号特性と各階層への配分符号量、各階層画質変動の関係、及び非階層符号化と比較した場合の階層化劣化について、シミュレーション実験、及び定性的・定量的な解析による検討が期待される。

さらに、画質特性に関する検討が十分でないため、階層符号化に適した符号量制御手法に関する検討は十分になされておらず、非階層符号化方式の符号量制御手法を流用しているのが現状である。非階層符号化方式の符号量制御方式に関する検討は盛んに行われているが、階層符号化特有の符号量制御方式の検討はほとんど検討されていない。本課題に関して、MPEG-2空間スケーラビリティを対象とした符号量制御方式が検討されている。Kwonらは、低解像度画像と高解像度画像の符号化歪みが同一となるように、レート歪み特性に基づく符号量制御方式について述べている。またMPEG-2 Multi-View プロファイルにおける視差補償に関する検討では、LRチャンネルが同一品質となるような符号量制御方式が検討されている。一方、MPEG-2 SNRスケーラビリティについてみると、高位階層の変換係数発生頻度を考慮してエントロピー符号化として算術符号を用いる方式が検討されている。しかしながら、上記空間スケーラビリティ、Multi-Viewプロファイルともに、両階層或は両チャンネルとも同一品質にすることが符号量制御の目的となるが、MPEG-2 SNRスケーラビリティのようにサイズ変化がない、符号化歪みのスケーラビリティでは、優先する階層に応じて符号量制御の目標が異なる。よって、MPEG-2 SNRスケーラビリティの符号量制御方式という観点からみた場合、効果的な方式の検討はほとんどなく、従来の符号量制御方式を適用している。しかしながら、従来方式では全てのピクチャにおいて各階層への符号量配分を同一に扱うため、階層化劣化に起因する大幅な画質劣化が引き起こされることが大きな問題となっている。

これら研究課題に対し本研究では、動画階層符号化方式の特性を明らかにすることを目的として、各階層への配分符号量と高位階層の品質変動について、シミュレーション実験から考察し、定性的に階層化特性を明らかにしている。そして、動画階層符号化特性に基づき、階層配分符号量を動的に制御することにより階層化劣化を抑制することが可能な、階層符号化方式符号量制御方式を検討している。

2.2 動画符号変換方式の研究

前述したように、階層符号化方式では階層構造を有する符号化器、復号器を必要とするため、階層分の処理が要求される(課題 - ii)。例えば、最も単純なMPEG-2 SNRスケーラビリティにおいても、基本階層用ビットストリームと高位階層用ビットストリームとの両者を並列的に復号し、並列的に逆量子化し、加算してIDCT変換する複雑な構成を有する、SNRプロファイル復号器を必要とする。このような課題に対し、符号化器と復号器の間の更新処理器により画質選択機能を実現することで、復号処理量を削減することが可能なスケーラビリティが検討されている。一方、スケーラビリティは符号化時に画像構造を決定するため、予め伝送路帯域等の要求条件が分かる場合に限っては、その条件下での利用において本来の能力を発揮するものの、要求条件が符号化時に知り得ない、或は要求条件が時系列で変化する場合においては、符号化構造と要求条件が異なった場合、スケーラブルな映像提供が困難となる(課題 - iii)。本課題に関しては、更新型スケーラビリティで提供される機能においても同様であるといえる。

一方、符号化時に映像品質を決定するのではなく、要求条件、使用場面に応じて、一旦符号化された符号化映像情報を変換することが可能であるならば、階層構造を有することのないビットストリームを扱うことが可能となる。これにより、利用者端末における復号処理を削減することが可能となり、要求品質への柔軟性も高めることが可能となる。このようにスケーラビリティのように符号化前に画像情報に階層構造を導入することでスケーラブルな映像提供を実現するのではなく、符号化後に符号化情報の変換を実現することにより、スケーラブルな映像提供を実現する技術としてビデオトランスコー

ダ(以下、トランスコーダ¹と呼ぶ)の検討が進められている。トランスコーダは、前述した柔軟性に起因して、放送局/ユーザレベルでの動画像編集、ネットワークノードでのビットレート削減、情報フィルタリング、オンデマンド型ビデオ配送サービスにおけるビデオサーバ内でのビットレート削減、ホームサーバ内での情報削減器、等を始めとして、デジタルビデオ流通システムにおける様々な利用用途が想定される。このように、トランスコーダの適用範囲は多様性を有するため、トランスコーダが使用される環境、目的、アプリケーションに応じて、トランスコーダへの「機能要求」は必然的に異なってくるものと考えられる。例えば、放送局内での映像編集においては画質が最も優先されるため「高画質性」が要求され、個人ユーザレベルでは、画質は多少犠牲にしても短時間で処理を行いたいという要求があり「高速性」が優先される場合もある。一方、多地点テレビ会議システムの中継ノードに存在するトランスコーダでは、映像品質は多少損なっても即時性、リアルタイム性が要求され「高速性」及び「低遅延性」が優先される。ところで、トランスコーダが有する「機能」は【A】トランスコーダアーキテクチャ、【B】トランスコーダ制御アルゴリズム2つの要素により決定されるものと考えられる。以上から、【A】、【B】に分けて研究課題を整理する。

【A】トランスコーダアーキテクチャに関する研究課題

Sunらは目的アプリケーション毎の適したアーキテクチャについて考察している。まず、高速性の観点から考えた場合、DCT係数領域内での再量子化処理によるトランスコーダアーキテクチャの有効性であるが、動き補償を行わないため参照画像の不一致によるドリフト誤差が発生することが問題となる。本課題については、以下の『研究項目2』で詳述する。

【B】トランスコーダ制御アルゴリズムに関する研究課題

従来、符号化時に使用するTM5符号量制御アルゴリズムを採用した場合、GOP構造取得のための遅延が生ずる。低遅延性の観点から考えた場合、低遅延なトランスコーダアーキテクチャを採用した場合においても符号量制御アルゴリズムにより遅延が発生し、バッファによる遅延も同時に発生するため、リアルタイム配送においては問題となる。本課題については、以下の『研究項目3』で詳述する。

研究項目2 : 『ドリフト誤差伝搬を考慮したMPEGビットストリームレートスケール制御方式』

トランスコーダは復号器と符号化器のカスケード結合により実現されるため、単純な結合アーキテクチャでは処理量増大は明白である。よって符号化情報である動きベクトル等の再利用により処理量を削減することが可能となるが、依然としてIDCT、動き補償、DCT処理は処理量が多く、現状のPCレベルではリアルタイムトランスコーディングは困難な状況である。そこで、DCT係数領域内で再量子化処理を行うことのみによりビットレート削減を行うトランスコーダアーキテクチャによる実現がより有効的であると考えられる。Sunらの報告においても、処理の簡略性、フレームメモリの不要さなどの理由から、DCT係数領域内でのトランスコーダアーキテクチャの有効性を述べられている。しかしながら、本トランスコーダアーキテクチャではP,Bピクチャで使用した動き補償参照画像を、トランスコーダにより変換し、且つ、再度動き補償を行わないため、符号化器と復号器において参照画像の不一致が生じ、これに起因して視覚的な劣化が生じることが問題となる。このようにして発生する誤差を一般的に「ドリフト誤差」と呼ぶ。本問題に対して、ドリフト誤差を回避することを目的とし、且つ処理量の増大を抑制する方式として、DCT係数領域内での動き補償処理を実現するトランスコーダが提案されている。Assuncaoらの提案するトランスコーダは、空間画素領域上での動き補償処理演算を、DCT係数領域上での行列演算により近似し処理の高速化を実現している。しかしながら、本トランスコーダの処理量は空間領域上でのトランスコーダ処理量と比較して81%に削減されているものの、依然として大幅な処理量の削減効果は得られていない。以上から、アーキテクチャとしてはDCT係数領域内での再量子化によるトランスコーダを採用したままで、ドリフト誤差の伝搬特性を考慮した符号量制御を行うことで、ドリフト誤差を抑制する方式を開発する必要がある。

この研究課題に対し本研究では、DCT係数領域内再量子化処理によるトランスコーダに着目し、ドリフト誤差発生メカニズムと定量的・定性的解析を行い、ドリフト誤差伝搬を考慮したMPEGトランスコーダ符号量制御方式について検討している。

研究項目3 : 『低遅延MPEG-2ビデオトランスコーダ符号量制御方式』

異種帯域混在型ネットワークへのビデオ配送システムにおいて、ネットワークノードにおけるビットレート削減機能を実現する処理器としてのトランスコーダが提案されている。本トランスコーダにおいては、低遅延性及びリアルタイム性が要求されており、Morrisonにより、H.261を対象とした低遅延トランスコーダの検討が行われている。特に、H.261では、符号化アルゴリズム、符号化画像構造等が簡易であり、各フレーム間の符号量変動も小さくスキップ等も可能なため、低遅延トランスコーダのための符号量制御は比較的簡易に実現できる。しかしながら、MPEG-2はH.261と比較した場合、各ピクチャにおいてピクチャタイプが存在し、それらのピクチャ周期等により画像構造が依存するだけでなく、それら画像構造がシーンチェンジ等によりビットストリーム中で変化するというビットストリーム画像構造可変性を有する。そこで、画像構造情報に非依存な符号量制御の実現を考えた場合、ビットストリームの各フレームを逐次復号することにより得られる

¹一般的にトランスコーダとは広義では符号化体系変換器を指すが、本研究ではビデオ情報のビットレート削減器を指す。

復号符号量情報に基づき符号量制御を実現することが可能となるが、符号量情報取得のための復号処理遅延が生じてしまうという問題がある。しかしながら、ネットワーク中に位置するトランスコーダにおける遅延は、ネットワーク伝送遅延となるため、低遅延なトランスコーダ符号量制御方式が要求される。このようなMPEG-2ビットストリームの低遅延トランスコーダ実現に向けて、Tudorらは、ビットストリーム中に画像構造をはじめとした符号化情報を記述しておくことにより低遅延レート制御を実現しているが、本方式は限定されたビットストリームのみしか対応できない点で問題が存在する。このように、ネットワークノードにおけるトランスコーダでは、入力ビットストリームの画像構造に非依存な低遅延符号量制御方式の開発が期待されている。

この研究課題に対し本研究では、低遅延MPEG-2トランスコーダを実現することが可能な符号量制御方式への要求条件を整理し、低遅延トランスコーダ符号量制御方式について検討する。特に、バッファ遅延と、入力ビットストリームGOP構造非依存性について検討している。

3 結果

本研究調査では、動画像スケーラビリティの符号化制御方式の確立を目的として、動画像階層符号化方式の符号量制御方式、及び動画像符号変換方式の符号量制御方式について提案した。以下、各研究項目で得られた結論をまとめる。

研究項目1では、動画像階層符号化方式の特性を明らかにすることを目的として、各階層への配分符号量と高位階層の品質変動について、シミュレーション実験から考察した。そして、動画像階層符号化特性に基づき、階層符号化方式符号量制御方式を提案した。主な結果は以下の通りである。

1. 動画像階層符号化方式としてMPEG-2標準で規定されているSNRスケーラビリティを採用し、各階層への配分符号量の変動に伴う高位階層品質の変動特性について検討した。
2. 基本階層、高位階層の総符号量が一定の下で、階層符号量配分率の変化に伴って高位階層品質が変動することを示し、特に中間符号量配分率において最も階層劣化が大きいことを明らかにした。
3. SNRスケーラビリティの構成法であるDouble Loop構成法及びSingle Loop構成法の両構成法について特性を整理した。
4. ピクチャタイプ毎に階層符号量配分率を動的に制御することで、階層劣化の発生を回避する制御方式を提案した。
5. 階層劣化関数を定義をすることで、各ピクチャタイプにおける近似特性関数を導出し、GOP内総劣化度を示す評価関数として性能特性関数を導出した。
6. (i)ピクチャタイプ目標符号量の算出、(ii)更新ピクチャタイプの選択制御、(iii)最適符号量更新配分率の算出、(iv)階層目標符号量の算出、の4つのStageから構成される符号量制御方式を提案した。
7. (ii)の符号量配分率の更新制御を行うピクチャタイプの適応的選択制御と、(iii)の各ピクチャにおける最適符号量更新配分率の算出制御については、更新による階層劣化の発生を禁止するための符号量更新配分率の変域条件を設け、GOP単位での符号量配分率が一定という拘束条件の下で性能特性関数の最大化問題を解くことで実現した。
8. シミュレーション実験から、従来方式と比較して、提案方式における符号量配分率の変動はピクチャ毎に大きく変動していることを示した。
9. 非階層符号化方式と比較した場合の高位階層画質の劣化度が、従来方式の場合と比較して大きく抑制されていることを示し、さらに基本階層の画質も向上することを示した。

研究項目2では、DCT係数領域内での再量子化方法によるMPEGトランスコーダに着目し、ドリフト誤差伝搬を考慮したMPEGトランスコーダ符号量制御方式を提案した。主な結果は以下の通りである。

1. DCT係数領域上での再量子化方式の誤差発生メカニズムを理論的に導出した。
2. ドリフト誤差伝搬特性について、参照領域オーバーラップパラメータ、動き補償画素精度パラメータ、参照方向パラメータ、の3つのパラメータから考察し、理論的解析及びシミュレーション実験から、動きベクトル追跡に基づくドリフト誤差伝搬率の算出方法を示した。
3. ドリフト誤差伝搬率に基づき、ドリフト誤差の発生を抑制することが可能な符号量制御方式を提案した。
4. Stage 1では、GOP内総歪み量である再量子化誤差とドリフト誤差の和が最小となるようなピクチャ間符号量割当制御を実現した。特にGOP内総歪み量の導出にあたっては、ピクチャタイプ毎のレート歪み関数を考慮し、ピクチャタイプ間の符号量変換を行うことで仮想的なGOP内総歪みを導出し、総歪みの最小化問題を解くことで実現した。
5. Stage 2では、仮想バッファに基づく参照量子化パラメータ算出処理について述べ、特に各ピクチャ先頭でのバッファ更新制御方式について示した。
6. Stage 3では、各MBにおけるドリフト誤差伝搬率に基づいて、Stage 2で得られた参照量子化パラメータの更新制御方式について述べ、ドリフト誤差伝搬率が小さいMBについては、後続ピクチャへの影響が小さいものとして量子化パラメータを大きくし、ドリフト誤差伝搬率が大きいMBについては、後続ピクチャへの影響が大きいものとして量子化パラメータを小さくする制御を提案した。
7. シミュレーション実験から、処理量及び要求バッファ量については、DCT係数領域内トランスコーダに従来の符号量

制御方式を適用した場合と比較して若干の増加があるものの、空間画素領域上のトランスコーダに従来の符号量制御方式を適用した場合と比較して十分少ないことを明らかにした。

8. 画質変動については、GOP末尾での極端な画質劣化を抑制し、GOP全体を通して画質変動の比較的小さい符号量制御を実現可能であることを示した。
9. シーンチェンジ等のビットストリーム内の変化にも対応することで、柔軟な符号量制御を実現可能であることを示した。研究項目3では、ネットワーク中継ノードにおけるビットレート削減器としてのトランスコーダに着目し、低遅延MPEG-2トランスコーダ符号量制御方式を提案した。主な結果は以下の通りである。
 1. 低遅延MPEG-2トランスコーダ符号量制御方式への要件について検討し、(i)入力ビットストリームのGOP構造に依存しない、(ii)入力符号量の測定を行わない、(iii)バッファ滞留を抑制する、(iv) mbv_delay 値の増大を抑制することが要求されることを示した。
 2. 低遅延性、GOP構造非依存性を実現するMPEG-2トランスコーダ符号量制御方式を提案し、(i)入出力ビットレート比率更新制御、(ii)入出力バッファ管理による量子化パラメータ算出、の2つのStepから構成されることを述べた。
 3. Step 1では、(a)ユニットタイム方式、(b)スラディングウィンドウ方式、の2方式を取り上げ、GOP構造に依存せずピクチャ間符号量割当制御を行うことのない符号量制御方式を提案した。
 4. Step 2では、Step 1で得られた入力ビットレート比率に基づいて入力バッファを換算することで、入出力バッファの差分バッファ量をフィードバックすることにより量子化パラメータを算出する手法を提案した。
 5. トランスコーダの送受信バッファに着目し、受信側及び送信側でのバッファ遅延について解析し、特に送信側では、ビットストリームの連続性を確保する拘束条件から総遅延量を導出した。
 6. シミュレーション実験から、画質変動については、入出力ビットレート比率が1に近い場合には、従来方式より提案方式の画質が向上しており、一方で入出力ビットレート比率が小さい場合には、従来方式より劣化していることが明らかとなった。しかしながらピクチャタイプ毎に入出力ビットレート比率に重みをつけることで従来方式よりも性能向上することを示した。
 7. 遅延量については従来方式と比較して十分小さいことを示し、さらに vbv_delay 値の増加を抑制可能であることを示した。
 8. リアクションパラメータを制御することで、若干の画質低下が伴うものの、バッファ遅延量を制御することが可能であることを示した。
 9. GOP構造非依存性については、GOP構造が異なる複数の入力ビットストリーム、及びシーンチェンジによりGOP構造が可変である入力ビットストリームを使用して実験を行い、スラディングウィンドウ方式が、設定パラメータに依存せず低遅延でトランスコード処理可能であることを示した。

本研究は、今後益々発展していきだろうと予測されるスケーラブル映像伝送実現に向けての各課題を整理し、その解決要素技術として、ビデオスケーラビリティ及びビデオトランスコーダに着目し、各技術課題について統合的に検討を行った。本研究の目指すところは、B-ISDNやインターネット等の伝送環境、使用環境等に柔軟に対応することが可能な映像生成技術及び変換技術の確立、さらにはその伝送技術を含めた統合的オーディオビジュアル通信の確立であり、今後のマルチメディア流通に大きく影響を与えるものと考えられる。

< 発 表 資 料 >

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
低遅延MPEG-2ビデオトランスコーダ符号量制御方式	信学論誌 B, Vol.J83-B, No.2, pp.151-164	2000年2月
ドリフト誤差伝搬を考慮したMPEGビットストリームレートスケージング符号量制御方式	信学論誌 D-II, Vol.J83-D-II, No.2, pp.509-524	2000年2月
階層符号量配分率の動的更新制御による動画階層符号化符号量制御方式	信学論誌 B, Vol.J82-B, No.8, pp1475-1488	1999年8月
動画符号化およびトランスコーディングにおける量子化マトリクス動的更新制御の検討	信学技報, IE99	1999年11月
再量子化特性を考慮したMPEG-2トランスコーダ量子化制御方式の検討	信学技報, IE99	1999年11月
低遅延MPEG-2ビデオトランスコーダレート制御方式の検討	情処研報,AVM-26, No.26-8, pp.45-50	1999年10月
量子化マトリクス変更処理による動画の符号化符号量制御方式の検討	PCSJ 99, P-3.14, pp.63-64	1999年9月
ドリフト誤差伝搬特性を利用したMPEGトランスコーダ符号量制御方式の検討	PCSJ 99, P-3.05, pp.47-48	1999年9月
低遅延MPEG-2リアルタイムビデオトランスコーダ符号量制御方式の検討	PCSJ 99, P-1.07, pp.15-16	1999年9月
低遅延MPEG-2ビデオトランスコーダ符号量制御方式の検討	信学技報, IE99-12, OFS99-35, IE99-44, pp.47-54	1999年9月
動きベクトル追跡に基づくドリフト誤差伝搬率導出に関する考察	信学秋ソ大, No.D-11-38, p.124	1999年9月
ドリフト誤差を考慮したMPEGビットストリームレートスケージングレート制御方式の検討	信学秋ソ大, No.D-11-21, p.107	1999年9月
低遅延MPEG-2トランスコーダレート制御方式の検討	信学秋ソ大, No.D-11-20, p.106	1999年9月
ドリフト誤差推定に基づくMPEGトランスコーダレート制御方式の検討	映メ技報, Vol.23, No.50, MIP99-63, NIM99-89, pp.19-24	1999年8月
ドリフト誤差伝搬を考慮したMPEG-2ビットストリームレートスケージング符号量制御方式の検討	信学技報, IE99-12, pp.41-48	1999年6月
動きベクトル追跡に基づくドリフト誤差伝搬率導出に関する考察	信学技報, IE99-111, pp.33-40	1999年6月
リアルタイムMPEG-2ビデオトランスコーダソフトウェアの開発	移動体通信産学官交流シンポジウム	1999年6月
リアルタイムMPEG-2ビデオトランスコーダソフトウェアの開発	情処研報,AVM-25, No.25-5, pp.25-30	1999年6月
フレーム間予測関係に着目したMPEG-2ビットレートスケージング制御方式の検討	信学春季全大, No.D-11-48, p.48	1999年3月