

学位論文

テレビジョンの高画質化・高機能化の研究

2010年11月

影山昌広

要 旨

本論文は、筆者が(株)日立製作所中央研究所において1987年から2002年までに行った、テレビジョン(以下、TVと略記)の高画質化および高機能化に関する研究成果をまとめたものである。

本論文は、全7章から構成される。

1章では、本研究の背景、および本論文の目的と構成について述べる。

国内におけるTV放送の歴史は、米国NTSC(National Television System Committee)によって策定された白黒TV方式の本放送開始(1953年)で幕を開けた。その後、1960年にNTSCカラーTV方式(以下、NTSC方式と略記)の本放送が始まり、現在に至っている。その間に、TVの放送開始直後からは想像できないほど、TVをとりまく「インフラ」「端末」「サービス」が大きな進化を遂げてきた。

筆者は、1987年にTVの高画質化と高機能化の研究に着手した。この中で、(1)フィルムモード映像信号処理技術の確立、(2)ワイドアスペクト化技術の確立、(3)タイムシフト視聴に関する新しいコンセプトの提唱と試作、(4)TV放送とインターネットを融合する先駆的なスキームの提唱、を本論文の目的とする。ここで、上記(1)(2)はインフラ(放送規格)に関わる第2世代EDTV(EDTV-II)の標準化活動を通じて培った技術であり、3章と4章にて各詳細を述べる。上記(3)は端末の高機能化に向けて開発した技術であり、5章にて詳細を述べる。上記(4)は新たなサービス実現に向けて開発した技術であり、6章にて詳細を述べる。

2章では、筆者が本研究に着手した1987年頃のTVの高画質化に関する背景技術について述べる。

まず、水平周波数(μ)、垂直周波数(ν)、時間周波数(f)からなる映像の3次元周波数特性について述べ、NTSCカラーTV信号の3次元周波数スペクトルについて解説する。次に、NTSC方式の問題点であるインタレース走査に伴うフリッカ、および輝度信号(Y)と色差信号(C)のクロストークの発生原因を整理し、これらを改善する動き適応IP(インタレース・プログレッシブ)変換および動き適応YC分離について3次元周波数特性の観点から解説する。続いて、NTSC方式の3次元周波数スペクトルの隙間を利用して水平解像度補強信号を多重する手法について解説する。また、次章への準備として、これらの手法に共通する問題点(静止領域と動領域の画質差)について述べる。

3章では、前述した静動の画質差の問題を解決するフィルムモード映像信号処理について述べる。

1980年代後半に、映画等のフィルム素材(毎秒24コマ)から変換されたTV信号の特徴(2-3プルダウン)に着目したフィルムモードIP変換が、いくつかの機関からほぼ同時に提案された。このIP変換は、毎秒60フィールド(毎秒30フレーム)で伝送されたインタレース信号をもとに、毎秒24コマのフィルムフレームごとに処理が完結するように、受像機側で前後のフィールドを用いてプログレッシブ走査のフレームを生成する。このとき、動領域でも静止領域と同じ処理を行うため、原理的に静動間の画質差は生じない。このIP変換は、情報量(フレーム数)が増えるわけではないため一見簡単に実現できそうだが、ノイズを含んだ伝送信号から、その信号がもともとフィルム素材(2-3プルダウン)であることと、フィルムフレームが完結するフィールド境界(プルダウン位相)を、安定して正しく検出できるようにすることが課題である。従来の提案は、いずれも特許出願のみに留まっており、ハードウェアによる検討や、画質改善効果の定量的な評価結果は報告されていなかった。

そこで筆者は、1990年に世界で初めてフィルムモード IP 変換のハードウェアを試作し、技術の実現性を確認した。2-3 プルダウン検出に、動きの孤立点除去のためのエアフィルタとヒステリシス回路を追加することにより、フィルムモード IP 変換と動き適応 IP 変換(従来技術)が頻繁に切り替わることによる不自然さをなくした。また、従来の動き適応 IP 変換に比べて、7段階品質評価尺度で平均1~1.5ランク程度の画質改善効果があることを実証した。

フィルムモード IP 変換は、現在、各メーカーが発売する多くのデジタル TV や、HDD (Hard Disk Drive)、DVD (Digital Versatile Disc)、BD (Blu-ray Disc)等のプレーヤ・レコーダに搭載され、世界中で利用されている。

4章では、TVのワイドアスペクト化について述べる。

EDTV-IIの標準化活動の中で、画面のアスペクト比(横と縦の長さの比率)を、従来の4:3から16:9に変更するワイドアスペクト化についても検討が進められた。特に、アスペクト比4:3の現行受像機でもワイドの全画面が見える「レターボックス形式」が主に検討された。

レターボックス形式では、ワイドカメラで撮影した有効走査線480本の画像信号を垂直方向に3/4倍(360本)に縮小して主信号とし、現行アスペクト(4:3)の画面中央の主画部に配置して伝送する。現行受像機では、画面上下に生じる無画部も含めた画像が表示される。一方、専用のワイド受像機では、主信号を垂直方向に4/3倍に拡大し、走査線数を480本に戻して再生する。このとき、単純にスケーリング(画像サイズ変換)を行うのではなく、現行受像機上の再生画像を破綻させることなく、無画部を利用して送信側から伝送された解像度補強信号も併せることにより、垂直解像度480本のワイド信号を再生できるようにすることが課題である。

筆者は、送受の走査線数変換の際に、走査線の総数が、カメラから得た原信号(480本)、伝送信号(主信号360本+補強信号120本)、および受信側で逆変換した信号(480本)の間で変化しないことに着目し、走査線間のマトリクス演算を用いた新しい走査線数変換手法を開発した。これにより、原信号と同じ垂直解像度480本のワイド信号を受信側で歪なく完全再構成することを可能にした。

その後、TV放送のデジタル化の流れもあってEDTV-IIは普及しなかったが、現在のデジタルメディアの活用状況を鑑みると、単一の映像コンテンツをさまざまな解像度・画質で再生する「ワンソース・マルチユース」が重要になってきており、これを実現するためのスケーラブル符号化(例えばJPEG2000等)が注目されている。現在のスケーラブル符号化には、一般的な完全再構成フィルタバンクが採用されているが、整数単位(1/N)の画素数変換しか実現できない。

一方、筆者が開発した完全再構成の走査線数変換技術は、用途の制約が少ない非整数倍の画素数変換にそのまま応用できるため、今後、新たなスケーラブル符号化を実現できる可能性がある。

5章では、TVのタイムシフト視聴に関する新しいコンセプトと、その試作について述べる。

1995年頃、民生用ビデオレコーダとしてVHS方式が普及していたが、テープの頭から順番に録画・再生するシーケンシャルアクセスが主体であった。このため録画した番組単位の頭出しが困難であるとともに、誤操作による上書きの危険があり、使い勝手が悪かった。これらの問題を解決するために、ビデオテープに替わる新しい映像記録メディアとして、DVD (Digital Versatile Disc)の開発が各社にて進められていた。

当時のデジタルメディアの課題は、長時間記録の実現であった。第1世代のDVD-RAM(容量2.6GB)では、3 Mbps (bit per second)のストリームを約2時間、第2世代のDVD-RAM(容量4.7GB)でも約3.5時間しか記録できない。また、HDDも2GB程度の容量しかなかったため、約1.5時間しか記録できなかった。

そこで筆者は、DVDの特長であるリムーバビリティを活かし、ディスクチェンジャにより複数のメディアを連続的に使用することによって、長時間記録を実現することを発想した。ここで、DVDとHDDを階層ストレージ構成にして、DVDディスクを交換している間も記録再生動作が途切れないようにした。また、単にVHSテープをDVDに置き換えるだけでなく、録画しながら別の番組を再生する「同時録再」や、同じ番組を録画しながら再生する「追いかけて再生」など、タイムシフトの新しいコンセプトを1997年に提唱するとともに、このコンセプトを具現化するビデオレコーダを試作した。この試作を通じて、ハードウェア実現に必要な諸条件(HDD容量、ディスク交換時間、メディア内アクセス時間、データ転送速度、等の関係式)を明確化した。

その後のHDDの大容量化などによりDVDチェンジャは普及しなかったが、筆者が試作を通じて実証したコンセプト(同時録再や追いかけて再生)は、2000年6月にソニーが発売したHDDレコーダや同年12月に東芝が発売した世界初HDD搭載DVDレコーダの原型であり、現在ではHDD搭載ビデオレコーダの必須機能と言えるほどに普及している。

6章では、TV放送とインターネットを融合する先駆的なスキームについて述べる。

2000年に開始されたBSデジタル放送では、BML(Broadcast Markup Language)によってインターネットへのリンクなどの双方向機能を実現した。しかし、放送局側で予め用意したBMLコンテンツを入り口としているため、提供される情報は限定的であり、視聴者が欲しい情報になかなかアクセスできないという問題があった。

そこで筆者は、①TV視聴者を仲介するサーバを用意することによって放送局側でのコンテンツの事前準備を不要にでき、②TV映像中の被写体をクリックするだけで視聴者がTV映像とインターネットの間に自由にリンクを張ることができる、という先駆的なスキームを提唱した。このスキームでは、視聴者が画面をクリックしたときの、(a)放送チャンネル番号、(b)放送時刻、(c)指定された画面位置および範囲、から成る「クリック情報」をサーバに送信する。サーバでは、多数の端末から送られてきたクリック情報を比較し、前記(a)(b)(c)が一致した端末どうしを動的にグループ化する。これにより、同じ被写体に興味を持つ不特定多数の視聴者を結びつけ、番組連動の視聴者間コミュニケーション(チャット)を実現できる。また、そのチャット内容からキーワードを抽出してTV映像と自動的に関連付けることにより、番組関連情報のインターネット検索を実現できる。

現在、TV映像とインターネット上のコンテンツを直接リンクするサービスは開始されていない。しかしながら、2009年11月には放送中のTV番組にコメントを付けられるサービス「ニコニコ実況」が、同年12月には同じTV番組を見ている人とTwitterのつぶやきを共有できるサービス「ピーチク」がそれぞれ相次いで開始され、また、NHK技研が2009年5月に「ソーシャルテレビサービス」の展示を行うなど、TV視聴者間のコミュニケーションに注目が集まってきている。筆者が提唱した前記スキームもいずれ近いうちに実現するものと思われる。

7章では、以上の内容をまとめて結論を述べるとともに、TVに関する今後の展望を示す。

目 次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本論文の目的	4
1.3	本論文の構成	8
第 2 章	TV の高画質化に関する背景技術	10
2.1	緒言	10
2.2	映像信号の 3 次元周波数解析	10
2.3	NTSC 方式カラーTV 信号	14
2.4	インタレース走査に伴うフリッカの発生原因と動き適応 IP 変換	18
2.5	輝度信号・色信号間クロストークの発生原因と動き適応 YC 分離	22
2.6	ホールを利用した水平解像度補強信号(HH)の多重	25
2.7	まとめ	27
第 3 章	フィルムモード映像信号処理	28
3.1	緒言	28
3.2	フィルム素材から変換された映像信号の特徴	29
3.3	フィルムモード IP 変換	32
3.4	フィルムモード YC 分離	36
3.5	走査線グループ化を用いたフィルムモード信号多重・分離	39
3.6	フィルムモード識別制御信号	46
3.7	まとめ	49
第 4 章	TV のワイドアスペクト化	51
4.1	緒言	51
4.2	レターボックス形式に伴う走査線数変換の解析	53
4.2.1	プログレッシブ走査信号における走査線数変換のふるまい	53
4.2.2	インタレース走査信号における走査線数変換のふるまい	55
4.2.3	走査線数変換に伴う補強信号生成の最適構成	55
4.3	垂直解像度補強信号(VH)	57
4.3.1	一般的なフィルタを用いた垂直解像度補強とその問題点	57
4.3.2	マトリクス法による垂直解像度補強	60
4.3.3	拡張マトリクス法による垂直解像度補強	63
4.4	垂直-時間解像度補強信号(VT)	68
4.4.1	VT 信号の分類	68
4.4.2	VT 信号に対する伝送ノイズの影響	71

4.4.3	伝送ノイズの影響を抑えた VT 信号生成.....	74
4.4.4	コアリングを用いた VT 信号ノイズ低減.....	78
4.5	まとめ.....	80
第 5 章	TV のタイムシフト視聴.....	82
5.1	緒言.....	82
5.2	DVD-RAM の特徴と応用先.....	83
5.3	DVD-RAM を用いたビデオレコーダの試作.....	84
5.3.1	タイムシフト視聴に対するユーザニーズの整理と開発目標.....	84
5.3.2	DVD-RAM と HDD の階層ストレージ構成によるビデオレコーディング.....	85
5.4	DVD-RAM メディアに適したシームレス動作保証.....	90
5.4.1	DVD ビデオレコーディング規格の概要.....	90
5.4.2	従来のシームレス動作保証.....	92
5.4.3	最小記録長制御を用いたシームレス動作保証.....	93
5.5	まとめ.....	97
第 6 章	TV 放送とインターネットの融合.....	99
6.1	緒言.....	99
6.2	TV とインターネットの融合に向けたこれまでのアプローチ.....	99
6.3	TV 放送とインターネットの融合に向けた提案コンセプト.....	101
6.4	TV 視聴者間コミュニケーション.....	103
6.4.1	TV 視聴者マッチング.....	103
6.4.2	サムネイル画像共有.....	106
6.4.3	TV 視聴者間コミュニケーションシステムの試作.....	108
6.5	TV 映像をキーとした情報検索.....	110
6.5.1	TV 映像とインターネット上の関連情報のリンク.....	110
6.5.2	TV 視聴者間コミュニケーションを利用した映像関連キーワード抽出.....	115
6.6	まとめ.....	117
第 7 章	結論.....	118
7.1	本論文のまとめ.....	118
7.2	今後の展望.....	119
謝辞.....		121
参考文献.....		122
関連発表文献.....		129

第1章 序論

1.1 本研究の背景

国内におけるテレビジョン(以下、TV)の放送の歴史は、米国 NTSC (National Television System Committee)によって策定された白黒 TV 方式の本放送開始(1953年)で幕を開けた。その後、1960年に NTSC カラーTV 方式^[1](以下、NTSC 方式と略記)の本放送が始まり、現在に至っている。その間に、TVの放送開始直後からは想像できないほど、TV をとりまく「インフラ」「端末」「サービス」は大きな進化を遂げてきた。視聴者の視点でそれぞれの進化の内容をまとめると、以下のようになる。

(1)インフラの進化

TV 放送を放送局から家庭に伝送するための国内のインフラは、1953年の放送開始時点から現在に至るまで、地上の送信所や中継局を用いた「地上波」が主役である。これに加えて、1989年には BS (Broadcasting Satellite)を用いた衛星放送の本放送が開始され、1991年にアナログハイビジョン方式(MUSE: Multiple Sub-Nyquist Sampling Encoding)^[2]の試験放送が開始された。

これと並行し、1980年代から1990年代にかけて、NTSC 方式と両立性を保ったまま高画質化する EDTV (Enhanced Definition TV)方式^[3]が開発され、1989年から第1世代 EDTV (EDTV-I)^[4]が、1995年から第2世代 EDTV (EDTV-II)^[5;6;7]の放送が開始された。

その後、米国の GI (General Instrument)が1990年に発表したデジタル HDTV (High Definition TV)方式「DigiCipher」^[8]がきっかけとなって、世界中でデジタル TV 放送実現の機運が高まり、アナログハイビジョンの MUSE は2007年に放送終了となった。1998年9月の英国 BBC の地上デジタル放送開始、同年1月の米国20都市42放送局による地上デジタル放送開始などに続き、日本国内においても2000年から BS デジタル放送が、2003年から地上デジタル放送が開始された。この地上デジタル放送を伝送する1チャンネル(13セグメント)のうち、1セグメントを用いて TV 放送を行う「携帯電話・移動体端末向けの1セグメント部分受信サービス」(略称:ワンセグ)^[9]が2006年から始まり、携帯電話や車載端末(カーナビ等)でも鮮明な画像と音声を受信できるようになっている。

この他にも、地上波が届きにくい地域での TV 視聴を可能にする目的で開発された CATV (Community Antenna Television)があり、近年では多チャンネルや電話サービス、高速なインターネット接続サービスなどを併せることにより、都市部でも加入者を増やしている。

また、1989年に日本初の民間の通信衛星(CS: Communication Satellite)である JCSAT-1 やスーパーバード A の打ち上げに成功し、1992年から CS を利用したアナログ TV 放送(各種専門放送)が開始された。1995年にデジタル CS 放送が始まり、2000年には BS と同じ軌道の東経 110° に位置する 110 度 CS デジタル放送が始まった。

本稿執筆時点(2010年)に発売されている TV 受像機には、地上波(アナログ、デジタル)、BS(アナログ、デジタル)、110度 CS デジタル放送の受信機能を利用した備えたものが多いが、2011年7月には地上および BS によるアナログ TV 放送の終了が予定されており、近いうちに「デジタル3波受信」(地上波、BS、110度 CS)に集約されていくものと予想される。

(2) 端末の進化

端末(TV 受像機およびその周辺機器)は、上記インフラに呼応して進化するとともに、各メーカーが独自に開発した機能が多数追加されてきた。

まず、1960年9月のカラー本放送開始に伴い、同年10月に日立製作所が国産初のカラーTVを発売した。当初はモノラルだった音声も、1978年の音声多重放送開始に伴い、2チャンネルステレオや二重音声放送(副音声付放送、二ヶ国語放送、解説放送)の機能が追加された。1985年の文字多重放送開始に伴い、株式市況やニュース・天気予報を表示したり、字幕を表示したりできるようになった。

1980年代にメモリの大容量化・低コスト化が進み、フレームメモリが容易に入手できるようになったことが、TVの高画質化に大きく寄与した。フレームメモリの利用により、従来の水平・垂直方向だけの2次元信号処理から、時間軸方向も含む3次元信号処理が可能になり、動き適応輝度信号・色差信号分離(YC分離)^[10]、動き適応インタレース・プログレッシブ走査変換(Interlace-Progressive変換、以下IP変換と略記)^[10]などの技術が開発され、TV受像機側だけで高画質化処理を行うIDTV(Improved TV)が実現した。

1991年のアナログハイビジョン放送(MUSE方式)の開始に伴い、画面のアスペクト比(横と縦の長さの比)にも人々の関心が集まった。1995年には放送局とTV受像機の両方の技術によってワイドアスペクト化を実現する第2世代EDTV受像機が、1996年にはTV受像機側の信号処理だけで通常のアスペクト比(4:3)の放送を16:9の横長形状に引き伸ばして映すワイドTV受像機が発売された。

1992年に富士通ゼネラルが世界初のプラズマTVを開発し、BSデジタル放送が始まった2000年頃から一般家庭にも薄型TVが普及していった。1984年にエプソンが発売した液晶TVは対角わずか2.1インチだったが、その後年々大型化され、2007年1月にシャープが108インチの液晶TVを米国CES(Consumer Electronics Show)で展示した。現在では、液晶TVがプラズマTVを抜いて大画面薄型TVの主役となっている。

TVに録画機能も追加された。VHS(Video Home System)^[11]ビデオ一体型TVは、1978年に日立製作所が国内で初めて販売し、1993年に松下電器産業(現在のパナソニック)が爆発的ヒットにつなげた。ビデオレコーダ単体を見ると、VHSはS-VHS、W-VHSと進化し、1997年に日本ビクターがデジタル記録可能なD-VHS(Data-VHS)デッキを発売した。1999年に米国のTiVoとReplayTVの両社がそれぞれHDD(Hard Disk Drive)を内蔵したセットトップボックスを米国CESで展示し、電子番組表(EPG:Electronic Program Guide)を活用して自分の好みの番組を自動で検索・録画し、自分の好きな時間にタイムシフトして視聴する新たなTV視聴スタイルを提案した。1999年9月にNECが独自の直径12cm光ディスク(MVDisC:Multimedia Video Disc)を用いた世界初の家庭用ビデオレコーダを発売し、同年12月にパイオニアがDVD(Digital Versatile Disc)を用いた家庭用ビデオレコーダを発売した。2000年6月にソニーが放送中の番組を録画しながら録画済み部分を再生する「追いかけて再生」や録画済みの別番組を再生する機能を備えたHDDレコーダを発売し、同年12月に東芝が世界初HDD搭載DVDレコーダを発売した。現在では、多くのメーカーのTV受像機に、HDDやDVDを用いた録画・再生機能やBD(Blu-ray Disc)の再生機能が搭載されている。

最近の話題として、2010年4月にパナソニックが、左右の目に向けて交互に再生される映像を専用シャッターメガネを通して見る世界初フルハイビジョン3D表示TVを発売した。これを皮切りに、同年6月にソニーが、7月にシャープが3D表示TVを発売し、2010年は「3Dテレビ元年」と呼ばれている。左右2つの画像が記録されたBDメディアの映像信号に対応するほか、一般の2D映像を3Dに変換する機能を備えた製品が多い。

(3)サービスの進化

TV 受像機単体で享受できるサービスの進化(白黒→カラー、モノラル音声→音声多重、文字多重、録画機能、3D表示、等)は前述のとおりである。さらに、外部との通信・ネットワーク機能をTV受像機に備えることにより、新たなサービスが続々と得られるようになってきている。

この代表例として、VOD (Video On Demand)が挙げられる。VODとは、視聴者が観たいときに、VOD事業者が運営するサーバに対して通信回線経由でリクエストを送信することによって、様々な映像コンテンツを視聴することができるサービスである。

VODという用語が使われ始めた1990年代後半は、家庭用のネットワークインフラとして一般に固定電話回線が用いられており、その通信速度はアナログモデムで56kbps以下、ISDN (Integrated Services Digital Network) [12]で64~128kbpsしかなかったため、本格的なVODの実現は困難であった。そこで、模擬的なVODとして、NVOD (Near VOD)やサーバ型放送などのサービスが開始された。

NVODは、CATVやCSデジタル放送の多チャンネル性を利用して、間隔を少しずつずらして次々と同じ番組を複数のチャンネルで送出するサービスである。数十分待てば番組の最初から観ることができて便利であり、技術的にも実現が容易なため、現在でもいくつかの番組で実施されている。

サーバ型放送(蓄積型放送) [13]は、放送や通信回線で伝送された番組コンテンツをHDD等のホームサーバに一旦蓄積しておき、この番組と連動したメタデータを用いることによって、ダイジェスト視聴、マルチシナリオ視聴、番組リクエスト視聴、番組自動録画、課金機能、視聴制御(契約者以外の視聴を防止する限定視聴や、不正コピー防止、CMスキップ禁止など)のような高度な視聴形態を提供するサービスである。1999年10月にARIB(電波産業会)にサーバ型放送方式作業班が設置され、日本国内におけるサーバ型放送に関するサービス要求条件の取りまとめや、TV-Anytime Forum(サーバ型放送実現のための標準化を行う国際的民間団体)における審議内容と日本国内の状況との整合性を取るための作業、標準技術の策定などが行われた。2002年7月に世界で初めて、松下・東芝・日立などが出資するイーピー(ep)がサーバ型放送サービスを開始したが、期待したほどの事業拡大を果たせず、2004年4月に同サービスを終了した。NHKもサーバ型放送への参入を積極的に検討したが、サービス開始は実現できなかった。

TV受像機向けの本格的なVODとして、2007年9月にサービスを開始した「アクトビラ」(acTVila)、2008年3月からサービスを開始した「ひかりTV」(NTTぷららが運営)、2008年6月にサービスを開始した「TSUTAYA TV」、2008年12月にサービスを開始した「NHKオンデマンド」、などがある。インターネットを利用したPC向けVODにまで範囲を広げると、2005年4月にサービスを開始した「GyaO」や、2005年10月にサービスを開始した「第2日本テレビ」を始めとする民放TV各局系のVOD(TBSオンデマンド、フジテレビ On Demand、テレ朝BBほか)、YouTube [14]等の動画配信サービスなど、現在では無数に存在する。

ネットワークを利用した新しいサービスとして、「ソーシャルテレビサービス」 [15]がある。これは、2009年5月にNHK技研公開で展示されたものであり、ネットユーザのテレビへの接触者率の向上を目指して、視聴者と放送局および視聴者同士のつながりをより深め、放送番組に関する話題を共有できるコミュニティ(公共の広場)を提供するサービスである。また、インターネットに接続されたPCを用いてTV視聴者間のコミュニケーションを実現するサービスとして、放送中のTV番組にコメントを付けられるサービス「ニコニコ実況」 [16]が2009年11月に、同じTV番組を見ている人とTwitter [17]のつぶやきを共有できるサービス「ピーチク」 [18]が同年12月に、それぞれ相次いで開始されている。

1.2 本論文の目的

前述のように、TV はこれまで「インフラ」「端末」「サービス」が三位一体となって進化し続けてきた。このような背景のもとで、筆者は 1987 年に TV の高画質化と高機能化の研究に着手した。この中で、(1)映画等のフィルム素材から変換された TV 信号の特徴を利用したフィルムモード映像信号処理技術の確立、(2)ワイドアスペクト化技術の確立、(3)タイムシフト視聴に関する新しいコンセプトの提唱と試作、(4)TV 放送とインターネットを融合する先駆的なスキームの提唱、を本論文の目的とする。ここで、上記(1)(2)はインフラ(放送規格)に関わる第2世代 EDTV の標準化活動を通じて培った技術であり、上記(3)は端末の高機能化に向けて開発した技術であり、上記(4)は新たなサービス実現に向けて開発した技術である。以下、その詳細を述べる。

(1)フィルムモード映像信号処理技術の確立

筆者が本研究に着手した 1980 年代には、フレームメモリを利用して NTSC 信号を高画質化する技術が随所で開発された。その代表が、阿知葉らによって 1984 年頃に開発された動き適応インタレース・プログレッシブ走査変換(IP 変換)^[10]と動き適応輝度信号・色差信号分離(YC 分離)^[10]である。

また 1980 年代から 1990 年代にかけて、受信側だけでなく送信側(放送局側)での信号処理も伴う EDTV (Enhanced Definition TV)方式^[3]が開発された。EDTV は、NTSC 信号の 3 次元周波数の隙間(以下、「ホール」と呼ぶ)を利用した高精細化手法^[3]を 1983 年に吹抜が提案して以来、1985 年より郵政省(当時)のもとで、BTA(放送技術開発協議会、現在は ARIB(電波産業会))で審議が始められた。その後の審議により、EDTV は 2 つの世代に分けて実施されることになった。第 1 世代 EDTV (EDTV-I)^[4]では、伝送信号には大きな変更を加えず、ゴーストキャンセル基準信号の多重、ガンマ補正の補償、暗部のディテール強調の各技術が採用され、1989 年 8 月より愛称「クリアビジョン」として本放送が開始された。これに引き続き、第 2 世代 EDTV (EDTV-II)^[5; 6; 7]では、TV 画面のアスペクト比を 4:3(従来)から 16:9(ワイド)に変換する技術についても BTA で検討された。その結果、レターボックス形式による画面のワイドアスペクト化と、解像度補強信号の多重による高画質化が採用され、1995 年 7 月より愛称「ワイドクリアビジョン」として本放送が開始された。

筆者は、1987 年から EDTV-II の標準化活動に参画し、IP 変換、映像信号の多重分離、ワイドアスペクト化のための走査線数変換、などの技術を開発した。この中で、従来の動き適応 IP 変換や動き適応 YC 分離、ホールを利用した高精細化手法に共通の問題である「静止領域と動領域の画質差」を解決しようとした。

これらの問題は、原理的に解決困難なため、筆者は、一般的な TV カメラで撮影された信号ではなく、映画等のフィルム素材から変換された TV 信号の特徴(2-3 プルダウン)^[19; 20; 21; 22]に着目して、上記問題の解決を図ることにした。なお、映画は各放送局の看板番組が並ぶプライムタイム(19:00~23:00)での放映が 1970 年前後から現在まで継続されており、安定した視聴率が期待できる重要なコンテンツである。

1980 年代後半に、2-3 プルダウンに着目したフィルムモード IP 変換が、いくつかの機関からほぼ同時に提案された^[19; 20; 21; 22]。例えば、加瀬沢は 1987 年にフィルムモード識別信号の伝送とフィルムモード IP 変換に関する特許を出願している^[19]。また、カツネルソンらは 1989 年に、受信側で 2-3 プルダウン信号を識別し、プルダウン位相を検出する技術を提案している^[20]。

このフィルムモード IP 変換は、フィルムフレーム(フィルムの1コマ)ごとに処理が完結するように、受像機側で前後のフィールドを用いてプログレッシブ走査の1フレームを生成する。このとき、動領域でも静止領域と同じ処理を行うため、原理的に静動間の画質差は生じない。この IP 変換は、情報量(フレーム数)が増えるわけではないため一見簡単に実現できそうだが、ノイズを含んだ伝送信号から、その信号がもともとフィルム素材(2-3 プルダウン)であることと、フィルムフレームが完結するフィールド境界(プルダウン位相)を、安定して正しく検出できるようにすることが課題である。従来提案は、いずれも特許出願のみに留まっており、ハードウェアによる検討や、画質改善効果の定量的な評価結果は報告されていなかった。

そこで筆者は、1990年に世界で初めてフィルムモード IP 変換のハードウェアを試作し、技術の実現性を確認した^[23; 24]。2-3 プルダウン検出に、動きの孤立点除去のためのエリアフィルタとヒステリシス回路を追加することにより、フィルムモード IP 変換と動き適応 IP 変換(従来技術)が頻繁に切り替わることによる不自然さをなくした。また、従来の動き適応 IP 変換に比べて、7段階品質評価尺度で平均1~1.5ランク程度の画質改善効果があることを実証した。

その他にも、フィルムモード YC 分離^[23; 25]、信号間のクロストークが原理的に発生しないフィルムモード信号多重・分離^[26; 27; 28]などの技術を開発した。これらの成果がもとになって、EDTV-II用に定義された識別制御信号の中の1ビットがフィルムモード表示を想定して留保され、BTAに専門の技術検討作業班を設置して標準化検討された^[6]。

最終的には、「放送局での安定した運用が困難」などの理由により、フィルムモード識別制御信号はEDTV-II規格に採用されなかったが、受信側だけの処理だけで実現できるフィルムモード IP 変換は、現在、各メーカーが発売する数多くのデジタルTVや、HDD(Hard Disk Drive)、DVD(Digital Versatile Disc)、BD(Blu-ray Disc)等のプレーヤ・レコーダに搭載され、世界中で広く利用されている。

(2)TVのワイドアスペクト化技術の確立

第2世代EDTV(EDTV-II)の標準化活動の中で、画面のアスペクト比(横と縦の長さの比率)を、従来の4:3から16:9に変更するワイドアスペクト化についても検討が進められた。BTAにて、1991年7月にTV技術者と一般視聴者による評価実験を実施するとともに、放送局の現場への技術アンケートも実施した結果、放送局側でワイドカメラの映像信号を垂直方向に圧縮して画面中央(主画部)に配置し、現行受像機で見ると画面の上下に黒味(無画部)が生じる形態で映像信号を伝送する「レターボックス形式」^[6]を前提として検討していくこととなった。

レターボックス形式では、ワイドカメラで撮影した有効走査線480本の映像信号を垂直方向に3/4倍(360本)に縮小して主信号とし、現行アスペクト(4:3)の画面中央の主画部に配置して伝送する。現行受像機では、画面上下に生じる無画部も含めた画像が表示される。一方、専用のワイド受像機では、主信号を垂直方向に4/3倍に拡大し、走査線数を480本に戻して再生する。このとき、単純にスケーリング(画像サイズ変換)を行うのではなく、現行受像機上の再生画像を破綻させることなく、ワイド受像機では無画部を利用して送信側から伝送された解像度補強信号も併せることにより、垂直解像度480本のワイド信号を再生できるようにすることが課題である。

筆者は、送受の走査線数変換の際に、走査線の総数が、カメラから得た原信号(480本)、伝送信号(主信号360本+補強信号120本)、および受信側で逆変換した信号(480本)の間で変化しないことに着目し、走査線間のマトリクス演算を用いた新しい走査線数変換手法を開発した。これにより、原信号と同じ垂直解像度480本のワイド信号を受信側で歪なく完全再構成することを可能にした。

その後、TV放送のデジタル化の流れもあってEDTV-IIは普及しなかったが、現在のデジタルメディアの活用状況を鑑みると、単一の映像コンテンツをさまざまな解像度・画質で再生する「ワンソース・マルチユース」が重要になってきており、これを実現するためのスケーラブル符号化(例えばJPEG2000等)が注目されている。現在のスケーラブル符号化には、一般的な完全再構成フィルタバンク^[29]、30]が採用されているが、整数単位(1/N)の画素数変換しか実現できない。

一方、筆者が開発した完全再構成の走査線数変換技術は、用途の制約が少ない非整数倍の画素数変換にそのまま応用できるため、今後、新たなスケーラブル符号化を実現できる可能性がある。

(3)TVのタイムシフト視聴に関する新しいコンセプトの提唱と試作

筆者は、EDTV-IIの標準化作業が完了した頃(1995年)に、高画質化に続くTVの高付加価値化のポイントは使い勝手の向上であると考えた。当時、民生用ビデオレコーダとしてVHS方式が広く普及していたが、記録メディアがカセットテープであったため、テープの頭から順番に録画・再生するシーケンシャルアクセスが主体であった。このため、録画した番組単位の頭出し(ランダムアクセス)が困難であるとともに、誤操作による上書きの危険があり、使い勝手が悪かった。

この問題を解決するために、ビデオテープに替わる新しい映像記録メディアとして、DVD(Digital Versatile Disc)の開発が各社にて進められ、1996年に再生専用のDVD-ROMが登場した。それと並行して、相変化記録媒体を用いることにより、記録したデータの書換えを可能とするDVD-RAMについても、実用化に向けた検討が盛んに行われていた。

DVDは、DVDフォーラム等にて規格策定された光ディスクメディアであり、CD(Compact Disc)と同じ直径12cmの樹脂製円盤である。1996年に、読み出し専用のDVD-ROM(容量4.7GB)の物理規格と、ファイルシステムを規定する論理規格、映像や音声のデータフォーマットを規定するアプリケーション規格(DVDビデオ規格)が策定され、映画コンテンツなどをデジタル化して2時間以上格納できるようになった。1997年には、容量2.6GBの書き換え型DVD-RAMと容量3.95GBの追記型DVD-Rの物理規格および論理規格が策定された。1999年には、容量4.7GBの書き換え型DVD-RAMおよび書き換え型DVD-DWの物理規格と、映像の録画・再生を実現するアプリケーション規格(DVDビデオレコーディング規格)が策定された。2000年に容量4.7GBの追記型DVD-Rの物理規格が策定されるなどして、今日のDVDプレーヤ、DVDレコーダの発展につながっている。

DVDは、もともとビデオレコーダへの応用を視野に入れて開発されていたが、DVDメディア1枚あたりの録画時間は、標準画質の映像データ(3Mbit/秒と想定)に換算すると、2.6GBの容量で約2時間、4.7GBの容量で約3時間半しか録画できず、従来のビデオテープの録画時間(120分テープに3倍モードで記録すると約6時間)に届かない。また、その当時はHDD(Hard Disk Drive)も2GB程度の容量しかなかったため約1.5時間しか記録できず、デジタルメディアによる長時間記録の実現が課題であった。

そこで筆者は、DVDの特長であるリムーバビリティを活かし、ジュークボックス等に利用されているCD用ディスクチェンジャをDVD用に改造し、複数枚のDVDメディアを連続的に使用することによって長時間記録を実現することを発想した^[31; 32]。この際に、HDDをテンポラリバッファとして使用し、DVDと併せて階層ストレージ構成とすることで、DVDディスクを交換している間も記録再生動作が途切れないようにした。また、単にVHSテープをDVDに置き換えるだけでなく、録画しながら別の番組を再生する「同時録再」や、同じ番組を録画しながら再生する「追いかけて再生」など、タイムシフトの新しいコンセプトを1997年に提唱するとともに、このコンセプトを具現化するビデオレコーダを試作した^[31; 32]。ハードウェア実現に必要な諸条件(HDD容量、ディスク交換時間、メディア内アクセス時間、データ転送速度、等の関係式)を明確化し、複数(合計3本)のビデオストリームを同時に録画・再生したり、1本のビデオストリームを録画しながら後から追いかけて再生したりするなど、従来のビデオテープレコーダでは実現不可能なタイムシフト視聴を実現した。

その後のHDDの大容量化などによりDVDチェンジャは普及しなかったが、筆者が試作を通じて実証したコンセプト(同時録再や追いかけて再生)は、2000年6月にソニーが発売したHDDレコーダや同年12月に東芝が発売した世界初HDD搭載DVDレコーダの原型であり、現在ではHDD搭載ビデオレコーダの必須機能と言えるほどに普及している。

(4)TV放送とインターネットを融合する先駆的なスキームの提唱

2000年に本放送が開始されたBSデジタル放送では、ARIB(電波産業会)にて策定されたデータ放送用記述言語のBML(Broadcast Markup Language)^[33]によって、従来の文字多重放送等とは比べものにならない多彩な画面表示や操作ボタンなどの柔軟なユーザインタフェースを実現するとともに、インターネットへのリンクなどの双方向機能も実現した。しかし、放送局側で予め用意したBMLコンテンツを入り口としているため、提供される情報は限定的であり、視聴者が本当に欲しい情報になかなかアクセスできないという問題があった。

一方、1960年代に米国で産声を上げたインターネットは、1993年にイリノイ大学の学生によってホームページ閲覧ソフト(ブラウザ)「Mozaic」が開発されたことをきっかけにして、民間に爆発的に普及していった。1990年代後半にはYahooやGoogle等によるインターネット検索サービスが充実し、WWW(World Wide Web)の上に存在する無限とも言える多数の情報に対して、瞬時にアクセスできるようになった。

このような状況のもとで、筆者は2001年にTV放送とインターネットの融合に向けた検討^[34; 35]を開始した。この中で、①複数のTV視聴者を仲介するサーバを用意することにより、放送局側でのコンテンツの事前準備を不要にでき、②視聴者がTV映像の中の気になる被写体をクリックするだけの簡単な操作で、視聴者がTV映像とインターネットの間に自由にリンクを張ることができ、③TV映像に関連したキーワードが効率よく得られる、という先駆的なスキームを提唱した。このスキームでは、視聴者が画面をクリックしたときの、(a)放送チャンネル番号、(b)放送時刻、(c)指定された画面位置および範囲、から成る「クリック情報」をサーバに送信する。サーバでは、多数の端末から送られてきたクリック情報を比較し、前記(a)(b)(c)が一致した端末どうしを動的にグループ化する。これにより、同じ被写体に興味を持つ不特定多数の視聴者を結びつけ、番組連動の視聴者間コミュニケーション(チャット)を実現できる。また、そのチャット内容からキーワードを抽出してTV映像と自動的に関連付けることにより、番組関連情報のインターネット検索を可能とする途を拓いた。

本稿執筆時点(2010年)でも、TV映像とインターネット上のコンテンツを直接リンクするサービスは開始されていない。しかしながら、前節で述べたように、2009年11月には放送中のTV番組にコメントを付けられるサービス「ニコニコ実況」^[16]が、同年12月には同じTV番組を見ている人とTwitter^[17]のつぶやきを共有できるサービス「ピーチク」^[18]がそれぞれ相次いで開始されるなど、不特定多数の視聴者どうしでTV番組に連動してコミュニケーションする技術が実用化されている。また、NHK技研が2009年5月に「ソーシャルテレビサービス」^[15]の展示を行うなど、TV視聴者間のコミュニケーションに注目が集まってきており、筆者らが提唱したスキームもいずれ近いうちに実現するものと思われる。

1.3 本論文の構成

本論文は、全7章から構成される。この中で、(1)フィルムモード映像信号処理技術の確立、(2)ワイドアスペクト化技術の確立、(3)タイムシフト視聴に関する新しいコンセプトの提唱と試作、(4)TV放送とインターネットを融合する先駆的なスキームの提唱、について述べる。ここで、上記(1)(2)はインフラ(放送規格)に関わる第2世代EDTV(EDTV-II)の標準化活動を通じて培った技術であり、3章と4章にて各詳細を述べる。上記(3)は端末の高機能化に向けて開発した技術であり、5章にて詳細を述べる。上記(4)は新たなサービス実現に向けて開発した技術であり、6章にて詳細を述べる。

2章では、筆者が本研究に着手した1987年頃のTVの高画質化に関する背景技術について述べる。まず、水平周波数(μ)、垂直周波数(ν)、時間周波数(f)からなる映像の3次元周波数特性について述べ、NTSCカラーTV信号の3次元周波数スペクトルについて解説する。次に、NTSC方式の問題点であるインタレース走査に伴うフリッカ、および輝度信号(Y)と色差信号(C)のクロストークの発生原因を整理し、これらを改善する動き適応IP(インタレース・プログレッシブ)変換および動き適応YC分離について3次元周波数特性の観点から解説する。続いて、NTSC方式の3次元周波数スペクトルの隙間(ホール)を利用して水平解像度補強信号(HH)を多重する手法について解説する。また、次章への準備として、これらの手法に共通する問題点(静止領域と動領域の画質差)について述べる。

3章では、2章で述べた問題点を解決するためのフィルムモード映像信号処理について述べる。まず、映画等で用いられている24コマ/秒のフィルム画像の特徴(2-3プルダウン)について説明する。続いて、受信側での2-3プルダウン検出、フィルムモードIP変換、フィルムモードYC分離、信号間クロストークが原理的に発生しないフィルムモード信号多重・分離、および送信側から伝送することを想定したフィルムモード識別制御信号の最適ビット系列について述べる。

4章では、TVのワイドアスペクト化について述べる。この中で、走査線数変換を伴うレターボックス形式ワイドアスペクト化において、走査形態の違い(プログレッシブ走査とインタレース走査)が走査線数変換結果に与える影響について整理するとともに、送信側の走査線数変換と受信側の逆変換を通じて完全再構成が可能なマトリクス法およびその拡張手法について述べる。また、垂直-時間解像度補強信号(VT)の生成手法の違いによる伝送ノイズの影響を明らかにするとともに、VT信号のノイズ低減手法について述べる。

5章では、TVのタイムシフト視聴に関する新しいコンセプトと、そのプロトタイピングについて述べる。この中で、DVDとHDDを階層ストレージ構成にして、ディスクチェンジャによる長時間録画、複数の映像・音声ストリームの同時録再、録画途中の追いかけて再生を実現した新しいビデオレコーダについて述べる。また、DVD-RAMメディアに特有のゾーン構造に着目したシームレス動作保証について述べる。

6章では、TV放送とインターネットを融合する先駆的なスキームについて述べる。この中で、筆者らが目指すTV放送とインターネットの融合のコンセプトを明らかにし、TV放送を媒介としたインターネット応用コミュニケーションおよびインターネット情報検索を実現するスキームについて述べる。

7章では、以上の内容をまとめて結論を述べるとともに、TVに関する今後の展望を示す。

第2章 TVの高画質化に関する背景技術

2.1 緒言

本章では、筆者が本研究に着手した1987年頃のTVの高画質化に関する背景技術について述べる。まず、水平周波数(μ)、垂直周波数(ν)、時間周波数(f)からなる映像の3次元周波数特性について述べ、NTSCカラーTV信号の3次元周波数スペクトルについて解説する。次に、NTSC方式の問題点であるインタレース走査に伴うフリッカ、および輝度信号(Y)と色差信号(C)の間のクロストークの発生原因を整理し、これらを改善する動き適応インタレース・プログレッシブ走査変換(IP変換)および動き適応輝度・色差信号分離(YC分離)について3次元周波数特性の観点から解説する。続いて、NTSC方式の3次元周波数スペクトルの隙間(ホール)を利用して水平解像度補強信号(HH)を多重する手法について解説する。また、次章への準備として、これらの手法に共通する問題点をまとめて述べる。

2.2 映像信号の3次元周波数解析

映像信号は、「水平(x)、垂直(y)」の2次元方向に「時間(t)」を加えた3次元方向を持っている。この各方向に対して、画像の濃淡を表す「波」の数(すなわち周波数)を定義できるため、映像信号は図2.1に示すような、水平周波数(μ)、垂直周波数(ν)、時間周波数(f)からなる3次元周波数領域を形成する。

映像信号を伝送するために、図2.2に示す走査によって、(時間(t)、垂直(y))の2次元方向で標本化(サンプリング)する。まず一般的な2次元標本化を例に挙げ、その周波数スペクトルについて説明する。

標本化スペクトルを求める手法として、標本点間の基本ベクトルからなる標本化行列の逆行列を用いた手法¹³⁶⁾が知られている。(t, y)の2次元方向において、図2.3(a)に示すようなプログレッシブ走査、すなわち格子状標本点の場合、標本点の基本ベクトルは、 $\xi_1 = (t_0, 0)$ 、 $\xi_2 = (0, y_0)$ で表される。このとき、標本化行列Xは、次のようになる。

$$X = (\xi_1, \xi_2) = \begin{bmatrix} t_0 & 0 \\ 0 & y_0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

周期性行列 $F = (\lambda_1, \lambda_2)$ は、 $F^T * X = E$ 、 $X^T * F = E$ (ただし、T:転置、E:単位行列)の演算により求まる。

$$F = (X^T)^{-1} = \begin{bmatrix} 1/t_0 & 0 \\ 0 & 1/y_0 \end{bmatrix} = (\lambda_1, \lambda_2) \quad (2.2)$$

これにより、標本化周波数の高調波、すなわち基本ベクトル(λ_1, λ_2)における各要素の整数倍にあたる周波数は、(f, ν)で表される2次元周波数領域において、図2.3(b)の黒丸で示されるように、(f_0, ν_0) (ただし、 $f_0 = 1/t_0, \nu_0 = 1/y_0$) ごとに生じることがわかる。このとき、同図の斜線で示すように、($\pm f_0/2, \pm \nu_0/2$)の矩形で囲まれた周波数成分(基本スペクトル)を再生することができる。

次に、1フレームの画像を2フィールドに分けて伝送するインタレース走査(2:1インタレース)における標本化スペクトルを求める。インタレース走査は、(時間(t)、垂直(y))の2次元方向におけるオフセット標本化に相当する。(t, y)の2次元方向において、図2.4(a)に示すようなオフセット標本点の場合、標本点の基本ベクトルは、 $\xi_1 = (2t_0, 0)$ 、 $\xi_2 = (t_0, y_0)$ で表される。このとき、標本化行列Xは、次のようになる。

$$X = (\xi_1, \xi_2) = \begin{bmatrix} 2t_0 & t_0 \\ 0 & y_0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

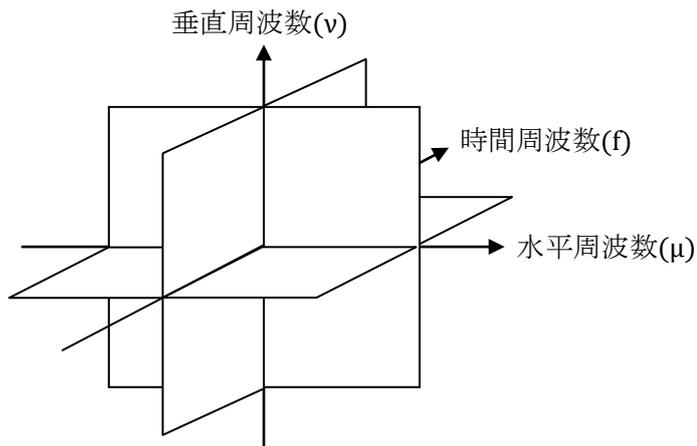


図 2.1 3次元周波数領域

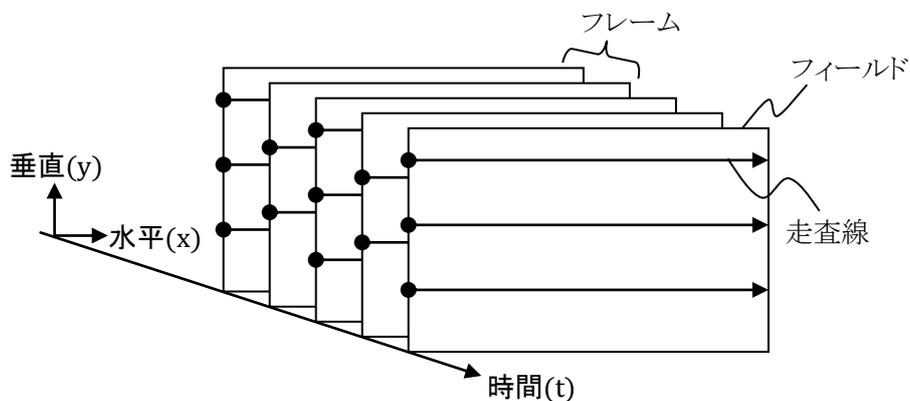


図 2.2 TV信号の走査形態

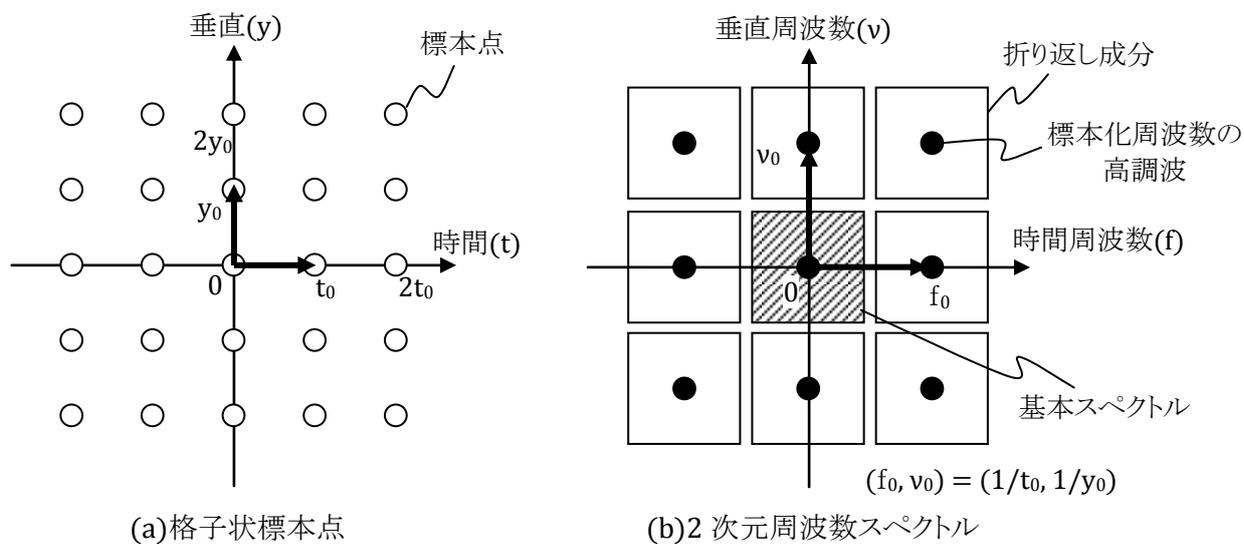


図 2.3 プログレッシブ走査における標本点と周波数スペクトル

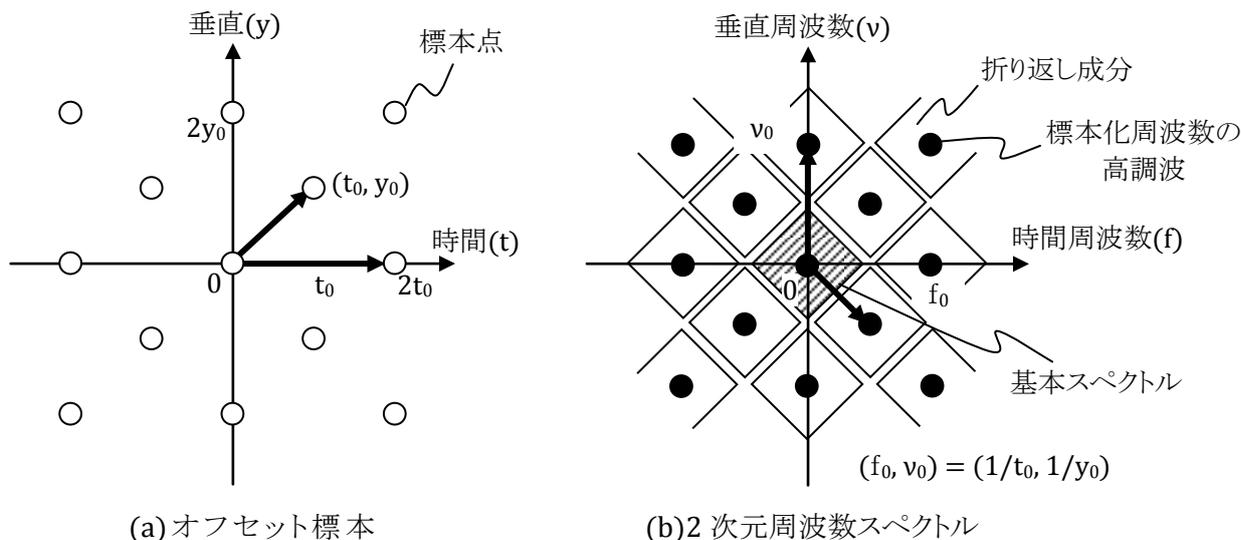


図 2.4 インタレース走査における標本点と周波数スペクトル

先ほどと同様に、逆行列演算により周期性行列 F を求めると、次のようになる。

$$F = (X^T)^{-1} = \begin{bmatrix} 1/(2t_0) & 0 \\ 1/(2y_0) & 1/y_0 \end{bmatrix} = (\lambda_1, \lambda_2) \quad (2.4)$$

これにより、標本化周波数の高調波は、 (f, v) で表される 2 次元周波数領域において、図 2.4(b) の黒丸で示されるように、オフセットの位置に存在することがわかる。このとき、同図の斜線で示すように、 $(\pm f_0/2, \pm v_0/2)$ の菱形で囲まれた周波数成分(基本スペクトル)が再生できる。

このように、映像信号の周波数特性を解析したり評価することは、TV の高画質化にとって重要である。映像信号の 2 次元周波数特性を評価するテストチャートとして、図 2.5 に示す円形ゾーンプレート(CZP: Circular Zone Plate)^[37]がよく知られている。CZP 信号は、位置 (x, y) と $\varphi(x, y)$ を用いて次式で表される。

$$g(x, y) = \cos(2\pi\varphi(x, y)) \quad (2.5)$$

$$\varphi(x, y) = (x^2 + y^2)/2 \quad (2.6)$$

このとき、位置 (x, y) における 2 次元周波数 (μ, ν) は、下記のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \mu &= \partial\varphi(x, y)/\partial x = x \\ \nu &= \partial\varphi(x, y)/\partial y = y \end{aligned} \quad (2.7)$$

すなわち、CZP 信号は、2 次元の位置 (x, y) と周波数 (μ, ν) が一致するという特徴を持つ。このため、CZP 信号を映像処理システムに入力し、その出力をモニターで直視することにより、モニターに映る CZP の縞模様の濃淡(包絡線)によって周波数ごとの振幅(信号強度)を測定したり、モアレ(干渉縞)が発生するモニター上の位置によって折り返し歪の周波数を測定したりすることができる。

CZP の 3 次元への拡張手法は、これまでに多数提案されている。このうち、Weston が提案した手法^[38]と吹抜が提案した手法^[39, 40]について、以下、簡単に解説する。

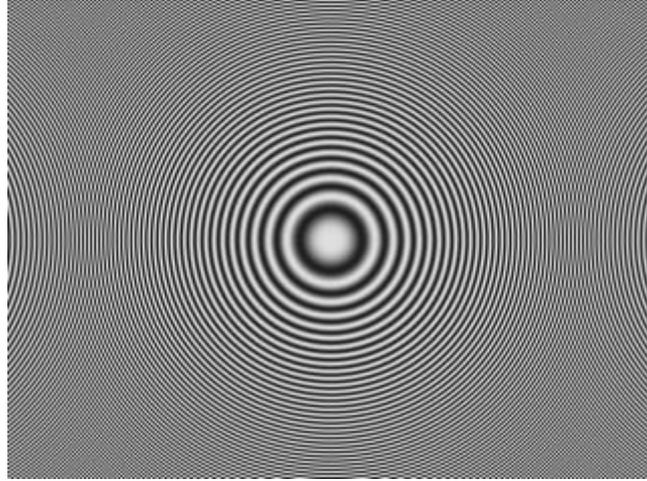


図 2.5 円形ゾーンプレート(CZP)

まず、Weston の手法は、時間を表す要素(t)を式(2.5)に加え、CZP を次のように拡張する。

$$g(x, y, t) = \cos(2\pi\varphi(x, y, t)) \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, t) &= (c_0 + c_x x + c_y y + c_t t)^2 \\ &= k_0 + k_x x + k_y y + k_t t + k_{xt} x t + k_{yt} y t + k_{xy} x y + (k_{xx} x^2 + k_{yy} y^2 + k_{tt} t^2) / 2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

(ただし、 $c_0, c_x \dots$ および、 $k_0, k_x \dots$ は定数)

式(2.9)を x, y, t でそれぞれ偏微分すると、3 次元周波数(μ, ν, f)が次のように得られる。

$$\begin{aligned} \mu &= \partial\varphi(x, y, t) / \partial x = k_x + k_{xt} t + k_{xy} y + k_{xx} x \\ \nu &= \partial\varphi(x, y, t) / \partial y = k_y + k_{yt} t + k_{xy} x + k_{yy} y \\ f &= \partial\varphi(x, y, t) / \partial t = k_t + k_{xt} x + k_{yt} y + k_{tt} t \end{aligned} \quad (2.10)$$

このように、Weston の手法では、パラメータ($k_x, k_{xt} \dots$)を適宜与えて、 (x, y, t) と (μ, ν, f) の関係を設定することにより、任意の 3 次元周波数特性が得られる。ただし、各パラメータが持つ物理的な意味については説明されていない。

一方、吹抜の手法は、CZP を上下左右に動かすことによって 3 次元周波数特性を直視する手法であり、TFZP (To-and-Fro Zone Plate)と呼ばれている。ここで、画像を平行移動したときの 3 次元周波数スペクトルについて説明する。

CZP が一定速度(u, ν)で平行移動する場合、時間 t における CZP 信号は、式(2.8)を用いて次のように表される。

$$g(x, y, t) = \cos(2\pi\varphi(x, y, t)) \quad (2.11)$$

$$\varphi(x, y, t) = ((x+ut)^2 + (y+\nu t)^2) / 2 \quad (2.12)$$

このとき、位置 (x, y, t) における 3 次元周波数(μ, ν, f)は、下記のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \mu &= \partial\varphi(x, y) / \partial x = x + ut \\ \nu &= \partial\varphi(x, y) / \partial y = y + \nu t \\ f &= \partial\varphi(x, y) / \partial t = (u^2 + \nu^2)t + xu + y\nu \end{aligned} \quad (2.13)$$

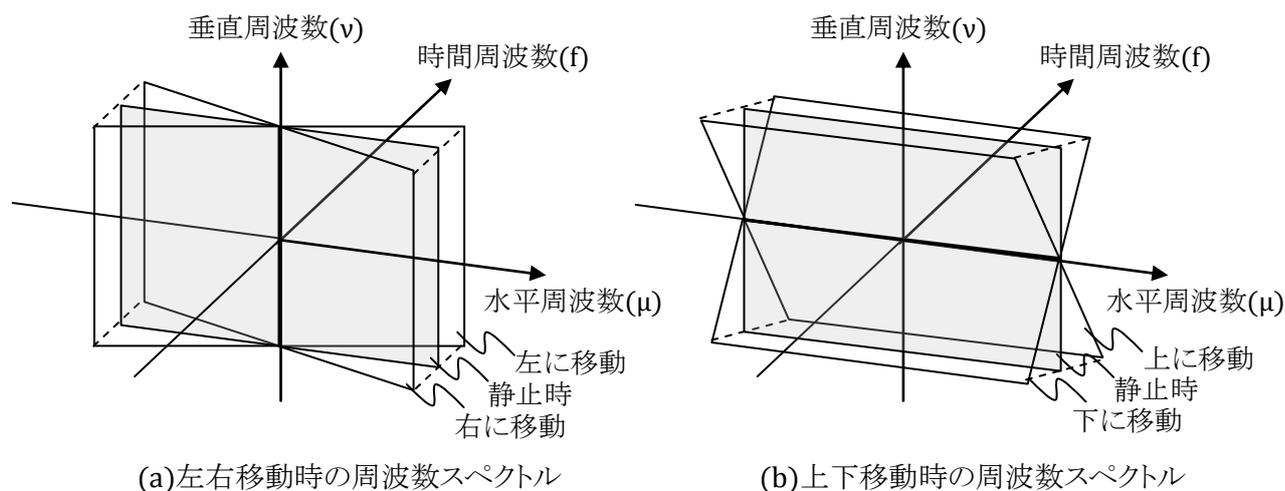


図 2.6 平行移動する画像の3次元周波数スペクトル

CZP が画面の中央に来たとき($t=0$)、式(2.13)は式(2.14)のようになる。

$$\begin{aligned} \mu &= x \\ v &= y \\ f &= xu + yv \end{aligned} \tag{2.14}$$

ここで、CZP が水平方向に移動するとき($v=0$)、 μ と v は静止した CZP と同一のまま $f = xu$ となり、時間周波数(f)は水平周波数(μ)と水平移動速度(u)に比例する。すなわち、図 2.6(a)に示すように、CZP の2次元周波数平面の f 軸を、水平位置(x)と水平移動速度(u)に比例してせり出させた形の3次元周波数スペクトルになる。同様に、CZP が垂直方向に移動するとき($u=0$)、時間周波数(f)は垂直周波数(v)と垂直移動速度(v)に比例する。すなわち、同図(b)に示すように、CZP の2次元周波数平面の f 軸を、垂直位置(y)と垂直移動速度(v)に比例してせり出させた形の3次元周波数スペクトルになる。

このように、吹抜の手法は、CZP の移動速度(u, v)と時間周波数 f との間の物理的な関係が明確である。この移動速度(u, v)をいろいろと変化させることによって、解析したいシステムの3次元周波数特性の「断面」を直視できるようになる。

2.3 NTSC 方式カラーTV 信号

NTSC 方式カラーTV 信号^[4](以下、NTSC 信号)の3次元周波数スペクトルは、Dubois らが明らかにしている^[41]。その内容を、以下、簡単に解説する。

NTSC 方式のフレームレートは 29.97Hz(以下、簡単のため 30Hz と略記)、1 フレームあたりの有効走査線数は 480 本(全走査線数は 525 本)である。NTSC 方式ではインタレース走査が採用されているため、(水平(x)、垂直(y)、時間(t))で表される3次元方向では図 2.7(a)に示すような標本点になり、 $(t_0, y_0) = (1/60$ 秒, $H/480)$ (ただし、 H : 画面高)となる。このとき、 $(f_0, v_0) = (60\text{Hz}, 480\text{cph})$ (cph: cycle per height)となり、時間方向は 30Hz、垂直方向は $480/2\text{cph}$ の菱形で囲まれた周波数成分が再生できる。一方、水平方向には標本化しておらず、水平周波数(μ)は伝送帯域(4.2MHz)で制限されるため、輝度信号(Y)の3次元周波数スペクトルは図 2.7(b)のように表すことができる。

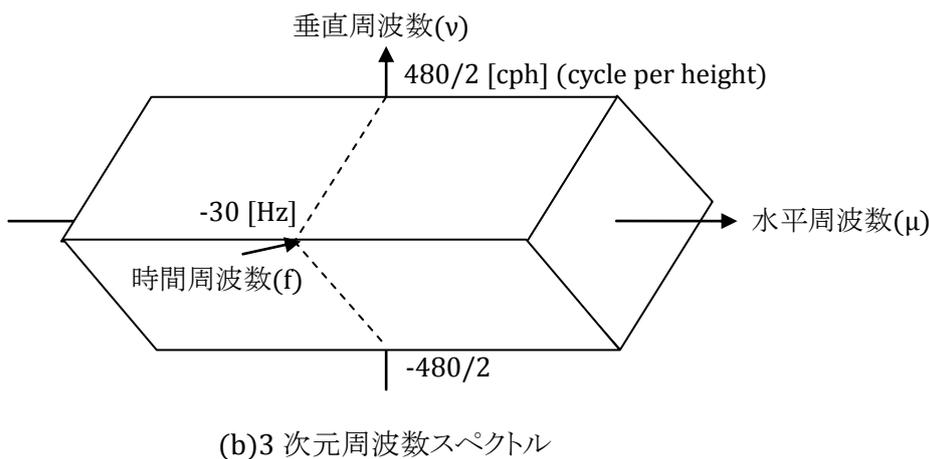
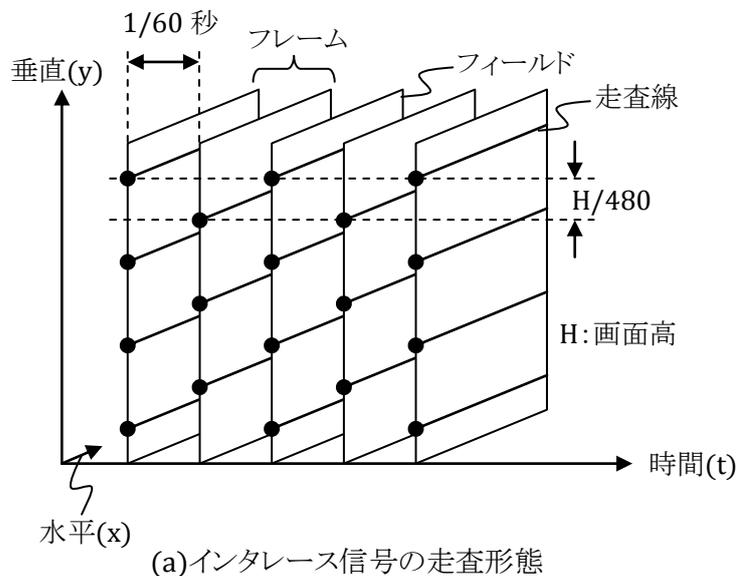


図 2.7 インタレース信号の走査形態と 3次元周波数スペクトル

NTSC方式では、白黒TV方式と同じ伝送帯域(4.2MHz)でカラー化を実現している。送信側では、図2.8(a)に示すように、光の3元色信号(R、G、B)を輝度信号(Y)と色差信号(I、Q)に色空間変換したのちに、I信号とQ信号で色副搬送波(カラーサブキャリア)を直交振幅変調して色信号(C)とし、Y信号に多重して、コンポジット信号(NTSC信号)とする。受信側では、同図(b)に示すように、Y信号とC信号を分離したのちに、C信号については直交復調によってI信号とQ信号を分離・再生し、Y信号とともに色空間逆変換してもとの3元色信号(R、G、B)に戻し、ディスプレイ上に表示する。

このとき、NTSC信号の1次元周波数スペクトルは、図2.9に示すようになっている。また、NTSC信号の3次元周波数スペクトルは、以下に述べるように、直交振幅変調後の色信号のスペクトルから求めることができる。

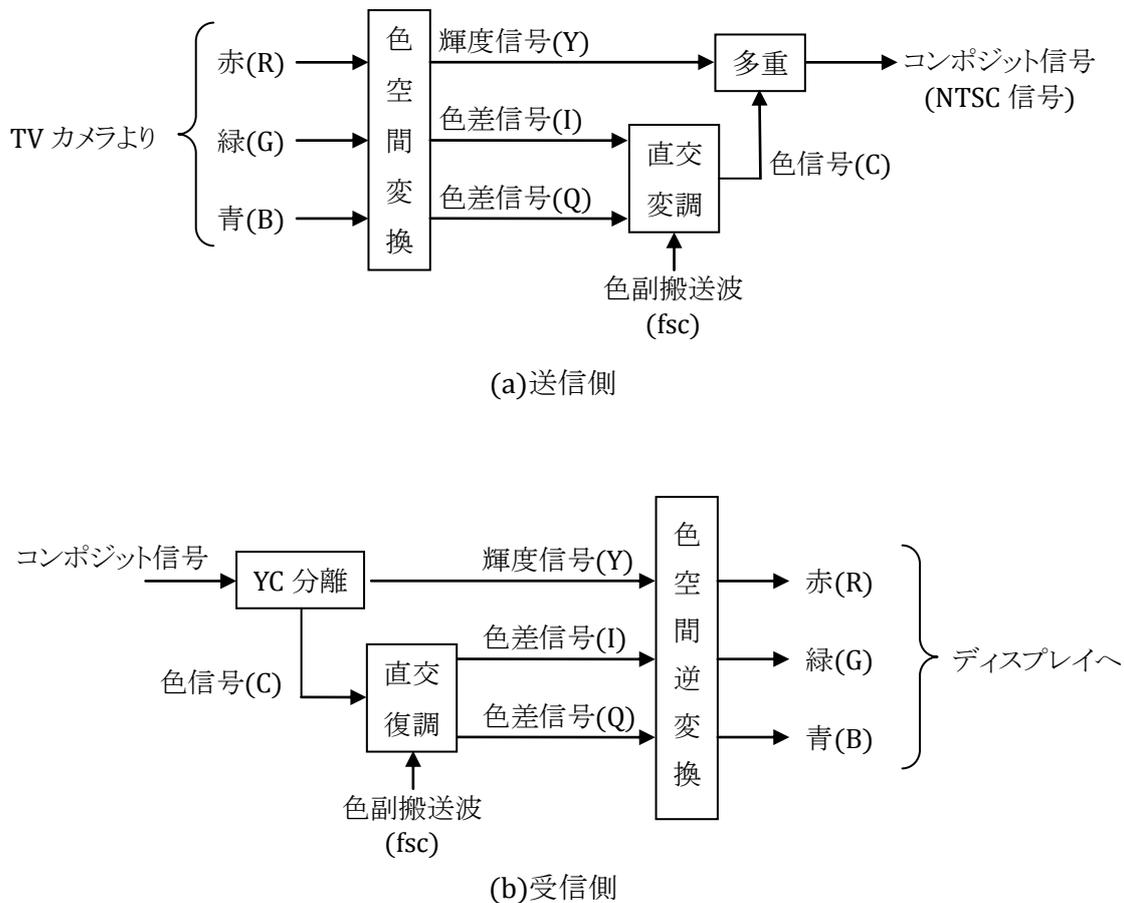


図 2.8 NTSC 方式

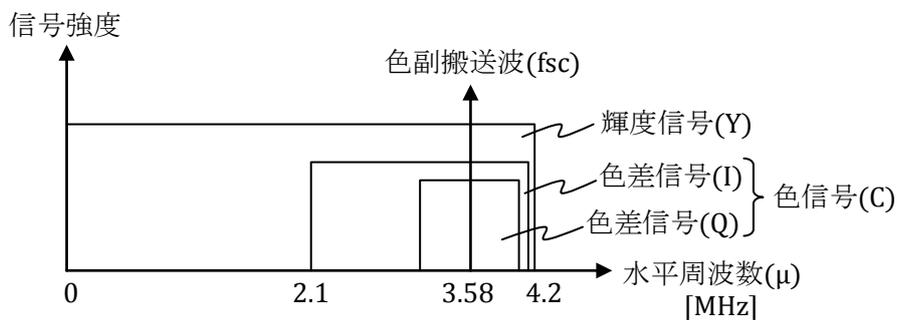


図 2.9 NTSC 信号の 1 次元周波数スペクトル

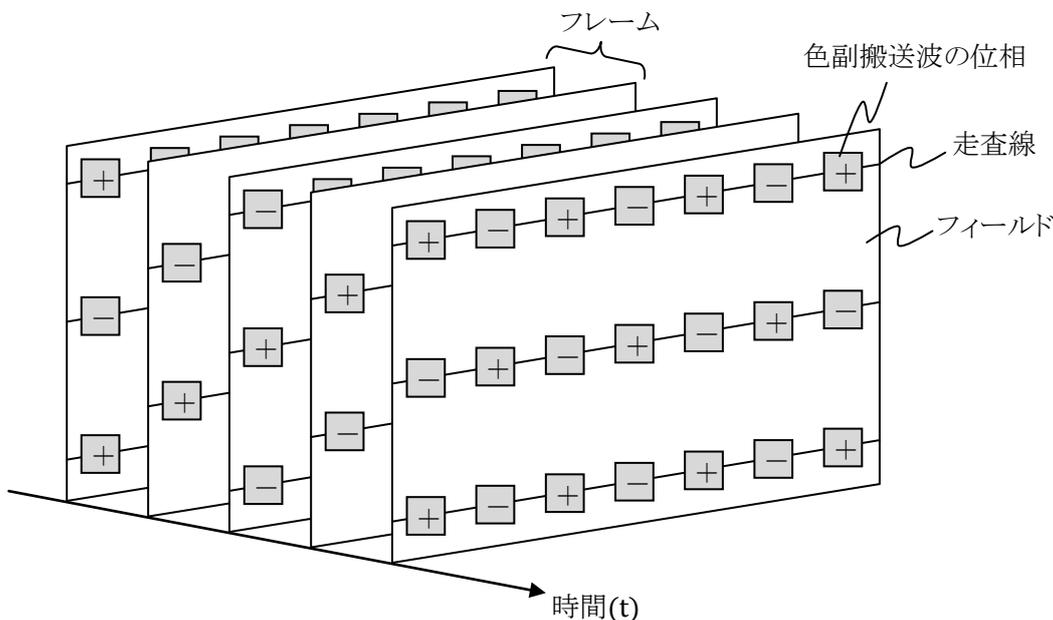


図 2.10 色副搬送波の位相の位置関係

色副搬送波の周波数(f_{sc})は、水平走査周波数(f_h)との関係が $f_{sc} = 455/2 * f_h$ となるように規定されている。このとき、図 2.10 に示すように、フィールド内で走査線ごとに色副搬送波の位相が半波長ずれて極性反転する。これは、白黒 TV で見たときに、色副搬送波によって生じる斑点模様が上下の走査線で平均化されて目立たなくなるように考慮されているためである。また、フレームあたりの全走査線数が 525 本(奇数)であることから、同じ位置の色副搬送波の位相はフレームごとに極性反転する。すなわち、色副搬送波は、同一フレーム内では 4 ラインで 1 周期を構成するため垂直周波数(v)は $480/4(=120)$ cph となり、同一位置では 2 フレームで 1 周期を構成するため時間周波数(f)は $30/2(=15)$ Hz となる。このとき、同図に示すように、(時間(t), 垂直(y))の 2 次元空間で見ると、色副搬送波の同一位相が時間(t)とともに上方向に移動していくことから、(f, v)の 2 次元周波数領域では第 2 象限(15Hz, -120cph)と第 4 象限(-15Hz, 120cph)に位置することになる。また、フレーム周波数(f_0) は 29.97Hz であり、全走査線数は 525 本であることから $f_h = 525 * f_0$ となるため、色副搬送波の水平周波数(μ)は $455/2 * 525 * 29.97$ Hz(=約 3.58MHz)となる。これらを総合すると、色副搬送波の 3 次元周波数(μ, v, f)は、(± 3.58 MHz, -120cph, 15Hz)と(± 3.58 MHz, 120cph, -15Hz)に位置している。

前述したように、色差信号(I, Q)は色副搬送波を直交振幅変調して色信号(C)にしている。振幅変調(時空間領域での乗算)は、周波数領域では畳み込み演算(コンボリューション)で表されるため、色差信号(I, Q)の直流(周波数=0)の位置が色副搬送波の 3 次元周波数の位置に移動する。従って、NTSC 信号の 3 次元周波数スペクトルは、図 2.11 のようになっている。

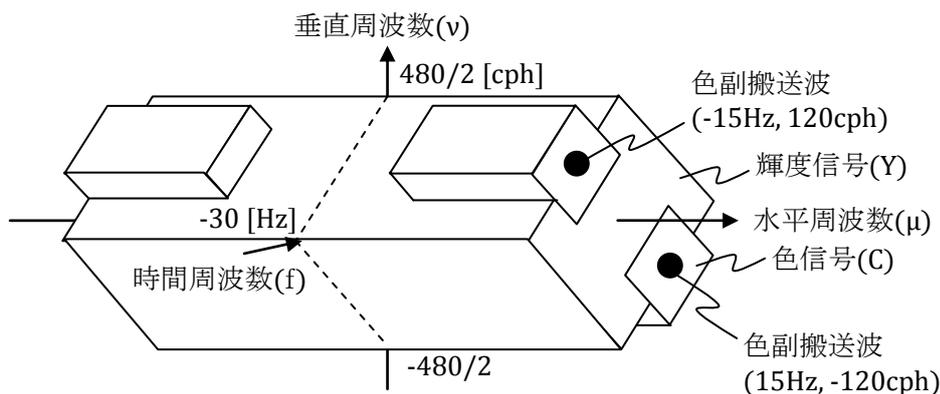


図 2.11 NTSC 信号の 3 次元周波数スペクトル

2.4 インタレース走査に伴うフリッカの発生原因と動き適応 IP 変換

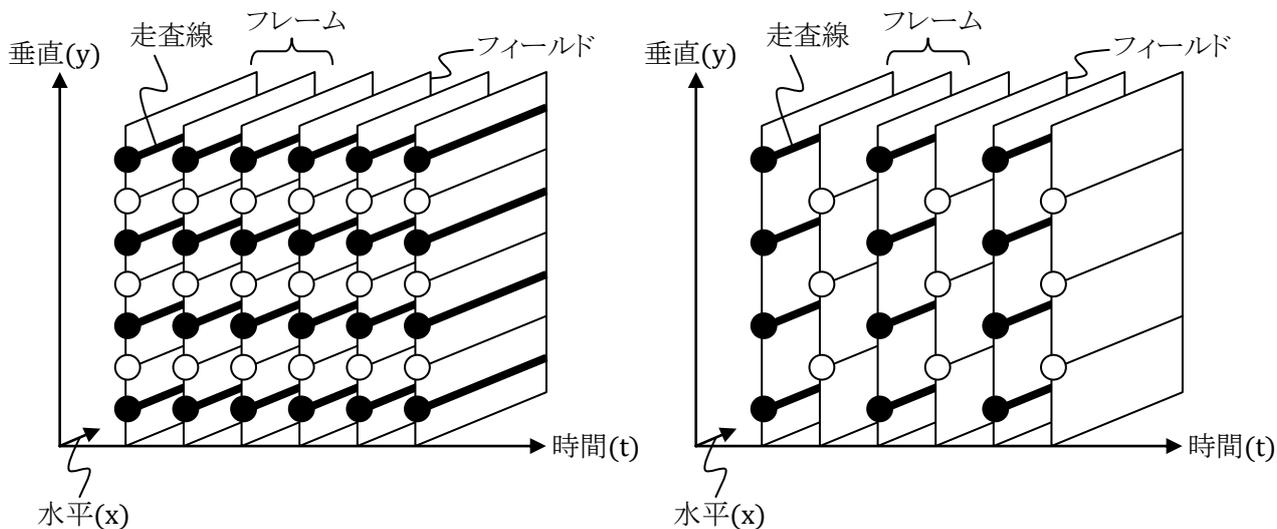
NTSC 方式では、図 2.7(a)に示したインタレース走査が採用されている。インタレース走査は、1 フレームの画像を 1 ラインごとに飛び越して 2 フィールドに分割する手法であり、伝送帯域幅を 1/2 に圧縮できる長所がある。一方、後述のように細かい横縞状の絵柄部分にフリッカ(ちらつき)が発生する短所がある。

例えば、図 2.12(a)に示すように、黒い横縞と白い横縞が交互に繰り返される静止画像があったと仮定する。この画像をインタレース走査した結果は、同図(b)のようになる。このとき、黒い横縞 1 本と白い横縞 1 本を合わせて垂直方向の 1 周期の波を構成するため、画面の有効走査線数を 480 本とすれば、この画像信号の垂直周波数(v)は±240 cph (cycle per height)となる。また、静止しているため、時間周波数(f)は 0 Hz である。この周波数を fv 平面にプロットすると、同図(c)に示す●印の位置になる。

一方、前述したように、インタレース走査では同図(c)に示した×印の位置にサンプリング周波数が存在するため、●印の周波数(f, v) = (0, 240) は、○印の周波数(f, v) = (30, 0)に折り返すことになる。すなわち、時間周波数(f) = 30 Hz のフリッカが発生する。

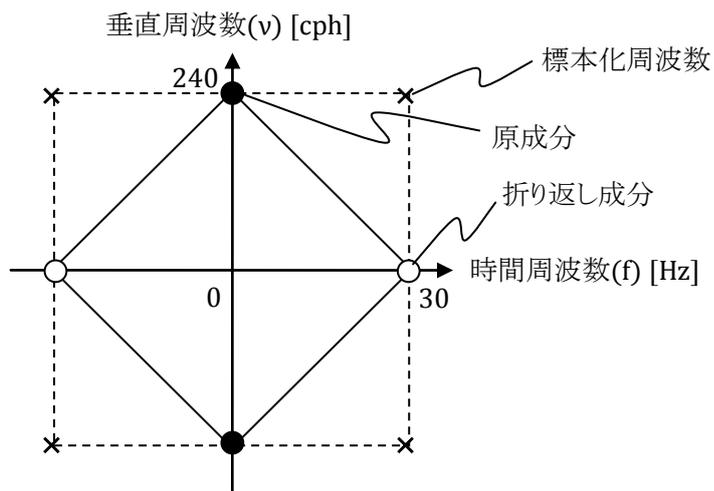
この現象を、画像の例により説明する。もともと図 2.13(a)のように 1/60 秒ごとに黒い画像と白い画像が交互に繰り返される動画像であっても、インタレース走査の結果は同図(b)のようになるため、前述した図 2.12(b)と区別できなくなってしまう、図 2.13(c)に示す 2 次元周波数スペクトルが図 2.12(c)と同一になることに相当する。このように、インタレースに起因する折り返し成分がフリッカの原因である。

このフリッカを抑える手法として、阿知葉らによって動き適応 IP 変換(I:インタレース、P:プログレッシブ)が開発された^[10]。動き適応 IP 変換では、画像の動きの有無をフレーム間の差信号などによって局所ごとに検出し、静止領域では図 2.14(a)のように前後のフィールドを用いて走査線補間する。動領域では、前後のフィールドを用いて走査線補間すると 2 重像になってしまうため、同図(b)のようにフィールド内の上下の走査線を用いて補間する。静止領域と動領域を 2 値的に切り替えると、画像の動き始めや止まる寸前などで不自然な出力画像になってしまうため、図 2.15 に示すように、動き検出結果(k)を多値化して $0 \leq k \leq 1$ (0: 静止領域、1: 動領域)の値を取るようにし、上記両方の走査線補間結果を連続的に混合する。



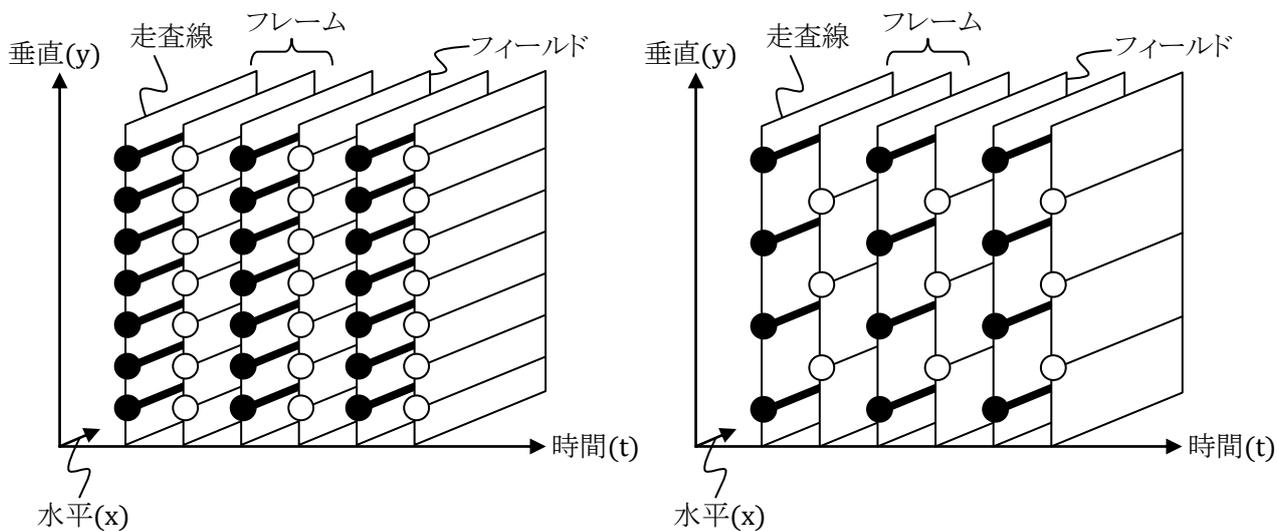
(a) 垂直周波数 $v=240\text{cph}$ の静止画像

(b) インタレース走査の結果



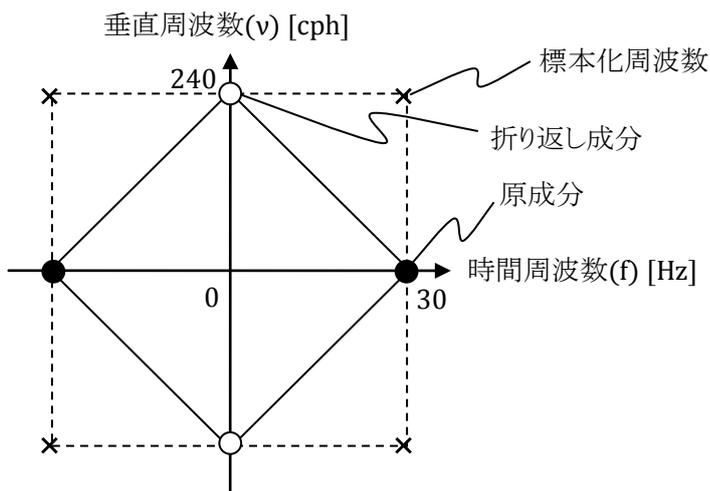
(c) 2次元周波数スペクトル

図 2.12 垂直周波数 $v=240\text{cph}$ の静止画像をインタレース走査したときの2次元周波数スペクトル



(a) 時間周波数 $f=30\text{Hz}$ の動画像

(b) インタレース走査の結果



(c) 2次元周波数スペクトル

図 2.13 時間周波数 $f=30\text{Hz}$ の動画像をインタレース走査したときの2次元周波数スペクトル

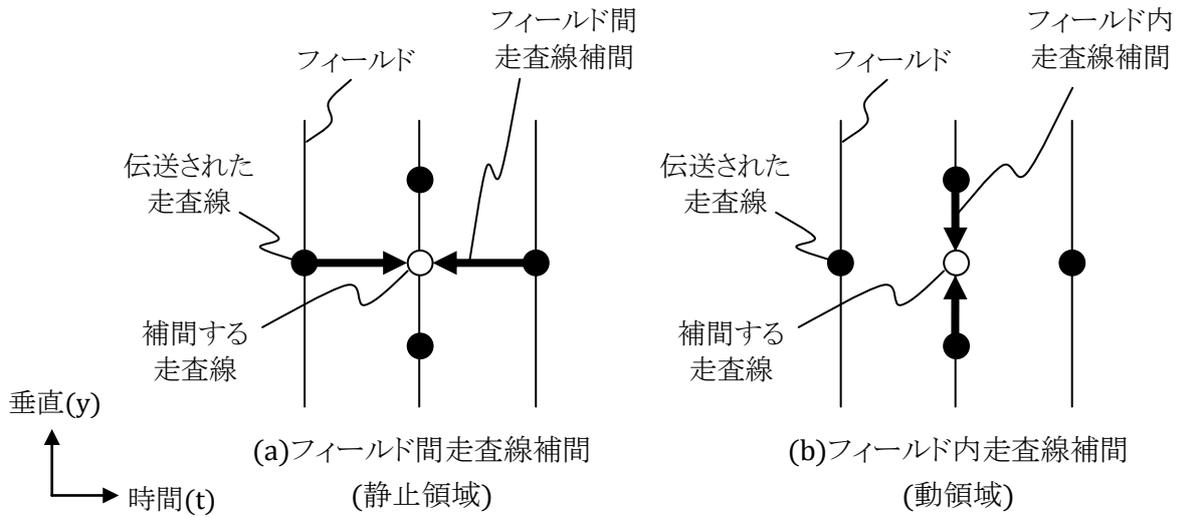


図 2.14 動き適応 IP 変換

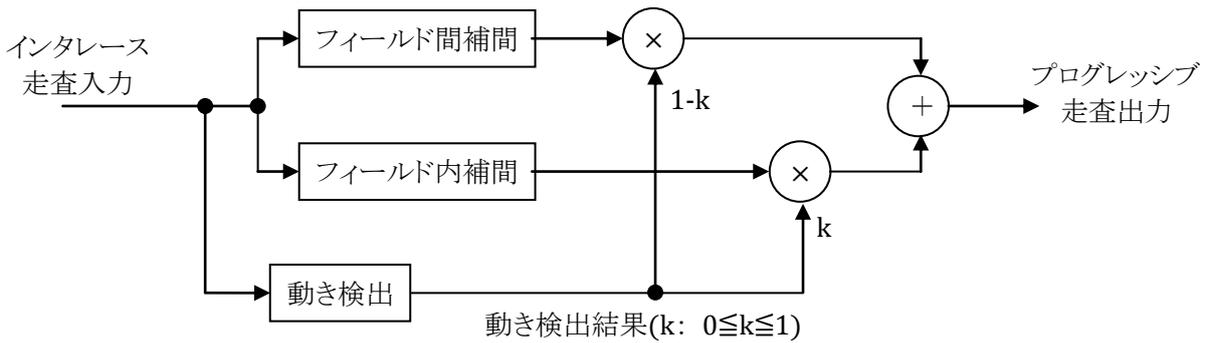


図 2.15 動き適応 IP 変換のブロック構成

この動き適応 IP 変換は、画像が静止しているときには理想的な特性が得られる。一方で、以下のような問題も残っている。

第 1 の問題は、画像の動き検出が本質的に困難なことである。例えば、伝送路で加わったノイズなどにより、本来は静止画像であってもフレーム間の差信号が発生してしまい、動領域と間違える誤動作が発生する場合がある。一方、ノイズの影響を少なくするために、動き検出の感度を下げて静止領域と判定されやすくすると、画像がわずかに動いた場合でも静止領域と判定されてしまい、出力画像が 2 重像になる。また、図 2.12(a)と図 2.13(a)に示した例のように、原理的に動きが検出できない絵柄のパターンが存在する。

第 2 の問題は、動領域の垂直解像度が静止領域の $1/2$ になってしまうことである。この問題は、図 2.14(a)に示すフィールド間走査線補間と、同図(b)に示すフィールド内走査線補間の特性差に起因するものである^[42]。以下、それぞれの周波数特性を解説する。

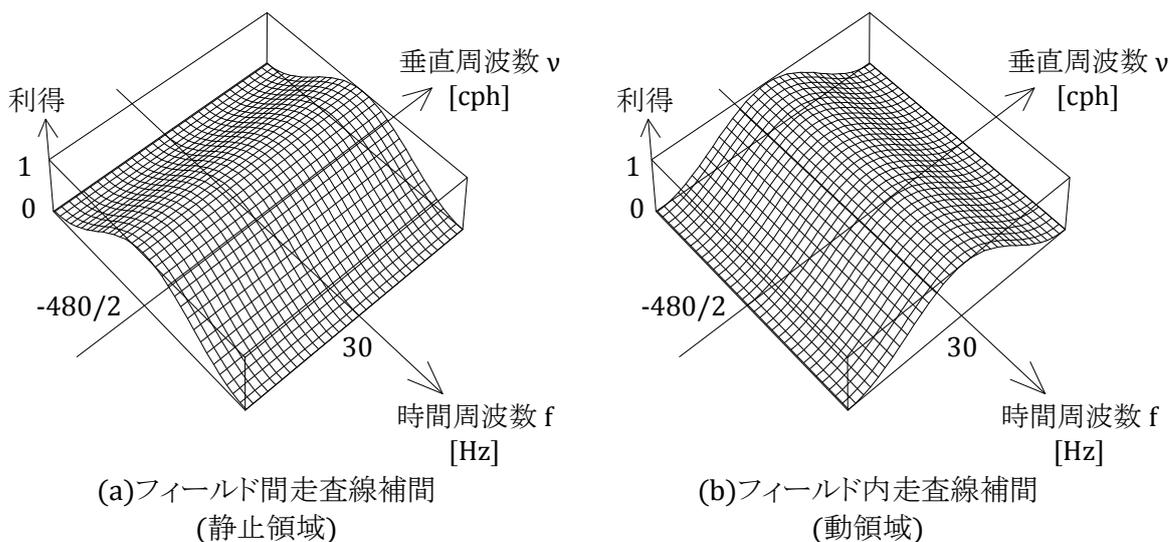


図 2.16 動き適応 IP 変換の[時間(f)-垂直(v)]周波数特性

まず、静止領域で用いられるフィールド間走査線補間は、インタレース走査の入力信号に対して、時間方向に(0.5, 1, 0.5)の係数を畳み込むフィルタ処理(時間ローパスフィルタ)と考えることができる。このとき、垂直方向にはフィルタはかからないので、 fv 平面では図 2.16(a)に示す周波数特性になる。

一方、動領域で用いられるフィールド内走査線補間は、インタレース走査の入力信号に対して、垂直方向に(0.5, 1, 0.5)の係数を畳み込むフィルタ処理(垂直ローパスフィルタ)と考えることができる。このとき、時間方向にはフィルタはかからないので、 fv 平面では図 2.16(b)に示す周波数特性になる。従って、動領域では垂直周波数(v)の通過帯域(垂直解像度)が、静止領域の1/2(= 120cph)になってしまい、静止していた画像が動きだした途端にぼやける、という現象が原理的に発生する。

これらの問題を改善するために、送信側にて疑似動き信号を多重することによって走査線の誤補間を避ける手法^[43]や、被写体の動きを補正して常にフィールド間走査線補間を行う手法^[44]などが開発されたが、現在でも根本的な解決には至っていない。

なお、EDTV-II では、上記 IP 変換の問題を改善するために、送信側でプログレッシブ走査形態のカメラを用い、この信号をインタレース走査形態の主信号と垂直-時間解像度補強信号(VT 信号)に変換して伝送し、受信側でもとのプログレッシブ走査形態の信号を再生する技術が開発された。この技術については、4章で詳しく述べる。

2.5 輝度信号・色信号間クロストークの発生原因と動き適応 YC 分離

NTSC 方式の TV 受像機では、白黒の縞模様のワイシャツなどに虹色のノイズが出たり、色の濃い文字テロップ等の周囲に斑点状のノイズが出たりすることがある。前者のノイズは、輝度信号(Y)が色信号(C)に漏れ込むクロストークに起因するものであり、一般に「クロスカラー」と呼ばれている。後者のノイズは、色信号(C)が輝度信号(Y)に漏れ込むクロストークに起因するものであり、一般に「クロスルミネンス」、あるいは斑点状のノイズが時間とともに上方向に移動していくことから「ドットクロール」と呼ばれている。

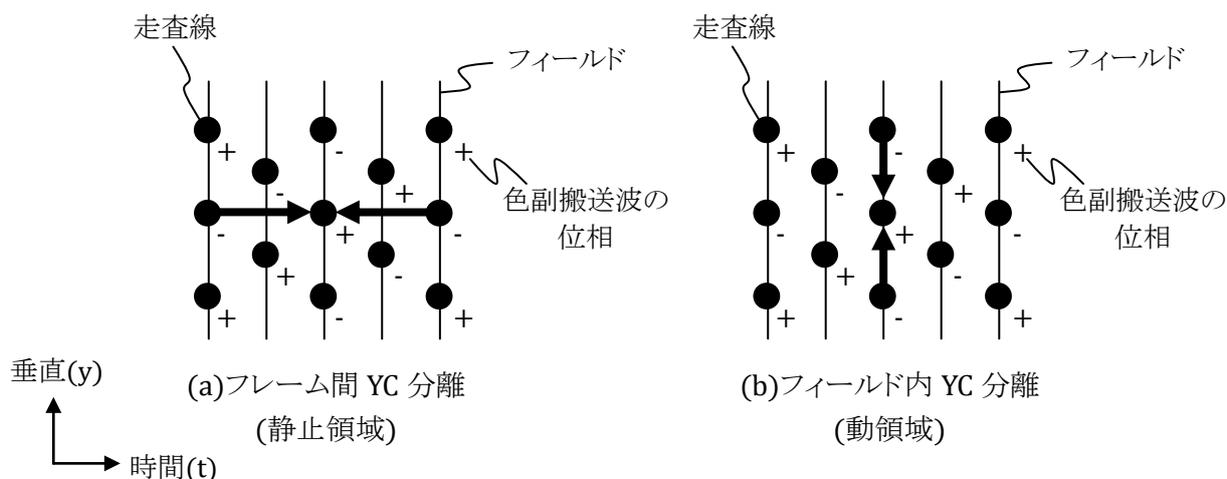


図 2.17 動き適応 YC 分離

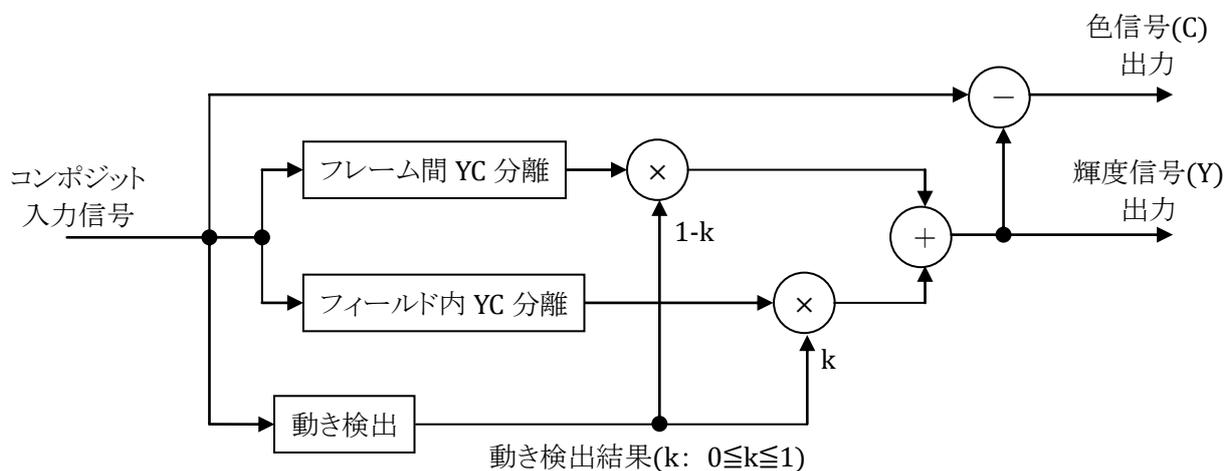


図 2.18 動き適応 YC 分離のブロック構成

NTSC方式で直交振幅変調された色信号(C)の3次元周波数スペクトルは、図2.11に示したように、 $(\mu, \nu, f) = (\pm 3.58\text{MHz}, -120\text{cph}, 15\text{Hz})$ と $(\pm 3.58\text{MHz}, 120\text{cph}, -15\text{Hz})$ を中心に、水平周波数 $\mu = \text{約 } 2 \sim 4.2\text{MHz}$ の範囲に配置されている。水平方向の1次元バンドパスフィルタによって輝度信号(Y)と色信号(C)を分離するだけでは2MHz以上のY信号成分がすべてC信号に漏れてしまう。そこで、阿知葉らが開発した動き適応YC分離^[10]では、静止領域ではフレームメモリを用いたフレーム間YC分離を用い、動領域ではラインメモリを用いたフィールド内YC分離を用いる。

フレーム間YC分離は、図2.17(a)に示すように、フレーム間の前後の走査線間で色副搬送波の位相が極性反転することを利用して、Y信号とC信号を分離する。すなわち、時間方向に $(0.25, *, 0.5, *, 0.25)$ の係数(ただし、*印は飛び越された走査線に対する係数(=0))を畳み込むフィルタ処理により、処理対象のC信号を前後のC信号でキャンセルして、Y信号だけを取り出す。同様に、時間方向に $(-0.25, *, 0.5, *, -0.25)$ の係数を畳み込むフィルタ処理により、処理対象のY信号を上下のY信号でキャンセルして、C信号を取り出す。

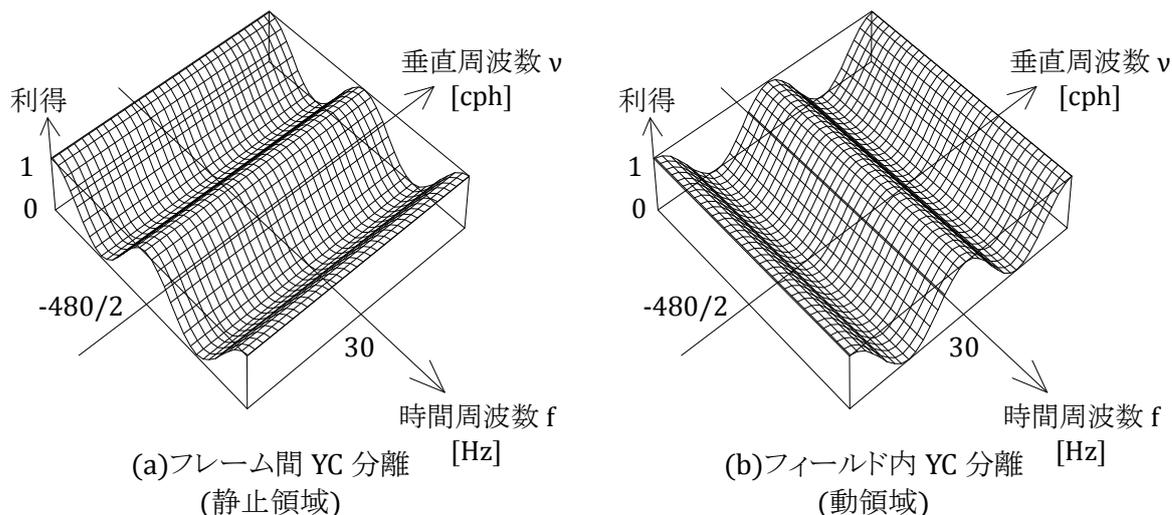


図 2.19 動き適応 YC 分離における輝度信号(Y)の[時間(f)-垂直(v)]周波数特性

一方、フィールド内 YC 分離は、同図(b)に示すように、フィールド内の上下の走査線間で色副搬送波の位相が極性反転することを利用して、Y 信号と C 信号を分離する。すなわち、垂直方向に(0.25, *, 0.5, *, 0.25) の係数を畳み込むフィルタ処理により、処理対象の C 信号を上下の C 信号でキャンセルして、Y 信号だけを取り出す。同様に、垂直方向に(-0.25, *, 0.5, *, -0.25) の係数を畳み込むフィルタ処理により、処理対象の Y 信号を上下の Y 信号でキャンセルして、C 信号を取り出す。

静止領域と動領域を 2 値的に切り替えると、画像の動き始めや止まる寸前などで不自然な出力画像になってしまうため、動き適応 YC 分離では、図 2.18 に示すように、動き検出結果(k)を多値化して $0 \leq k \leq 1$ (0: 静止領域, 1: 動領域)の値を取るようし、上記両方の YC 分離結果を連続的に混合する。

動き適応 YC 分離の特性 [42]を、水平周波数 $\mu = 3.58\text{MHz}$ における時間周波数(f)と垂直周波数(v)の 2 次元周波数領域(fv 平面)で見ると、静止領域では図 2.19(a)に示す特性になる。このとき、静止領域では、Y は時間周波数(f)=0、C は時間周波数(f)= $\pm 15\text{Hz}$ に固定されるため両者のクロストークは発生しないが、動領域で各信号の時間周波数(f)が 7.5Hz を超えると、もう一方の信号の通過域に入ってクロストークとなる。一方、動領域では、同図(b)に示す特性になる。このとき、垂直方向に輝度や色の変化がなければ、Y は垂直周波数(v)=0、C は垂直周波数(v)= $\pm 120\text{cph}$ に固定されるため両者のクロストークは発生しないが、垂直周波数(v)が 60cph を超えると、もう一方の信号の通過域に入ってクロストークとなる。

この動き適応 YC 分離は、画像が静止しているときには理想的な特性が得られる反面、下記のような問題も残っている。

第 1 の問題は、輝度信号(Y)が色副搬送波($f_{sc}=3.58\text{MHz}$)に近い水平周波数(μ)、垂直周波数(v)、時間周波数(f)を持つとき、すなわち、「斜め線が動いたとき」には、フレーム間 YC 分離とライン間 YC 分離のどちらを用いてもクロストークが発生してしまうことである。

第 2 の問題は、動き適応 IP 変換と同様に、静動の画質差が大きいことである。動き適応 YC 分離における静止領域と動領域の各周波数特性(図 2.19(a)(b))を見比べると、静止領域の Y 信号の垂直周波数が 240cph まで再生できるのに対し、動領域では静止領域の 1/4 の 60cph までしか再生できないことがわかる。従って、前述した動き適応 IP 変換のときよりも、さらに静動の画質差が大きくなる。

2.6 ホールを利用した水平解像度補強信号(HH)の多重

図 2.11 に示した NTSC 方式の 3 次元周波数スペクトルにおいて、時間周波数(f)と垂直周波数(v)からなる 2 次元周波数領域(fv 平面)において、第 2 と第 4 象限には C 信号が多重されているが、第 1 と第 3 象限は空いていることを吹抜が指摘した^[3]。これは、図 2.10 に示した色副搬送波の同一位相が、時間とともに下から上に移動するのに対し、上から下に移動する成分がないことに相当する。そこで、空いている第 1 と第 3 象限の「穴」(ホール)に水平解像度補強信号(輝度信号(Y)の 4.2MHz 以上の成分)を多重し、受信側でこの信号を分離・復調すれば、NTSC 方式と両立性を保ったまま高精細化が可能となる^[3]。以下、この水平解像度補強信号多重の概要を解説する。

まず、図 2.20 に示す構成により、水平バンドパスフィルタ(BPF)を用いて 4.2~6.2MHz の範囲の Y 信号成分を抽出して水平解像度補強信号(HH)を得る。次に、この HH 信号によってホール搬送波を変調し、前述したホールの周波数位置に配置する。

ホール搬送波の水平周波数(μ)は、鈴木らの検討^[45]により、図 2.21(a)に示す $16/7f_{sc}$ (=約 8.18MHz)が選択された。これは、電力が比較的少ない HH 信号の高周波側を低周波側に反転することにより、分離・復調機能を持たない現行 NTSC 受像機への妨害が小さくなるように配慮されたためである。また、2.3 節で述べたように、色副搬送波が $(f, v) = (15\text{Hz}, -120\text{cph}), (-15\text{Hz}, 120\text{cph})$ に位置することから、ホール搬送波は $(f, v) = (15\text{Hz}, 120\text{cph}), (-15\text{Hz}, -120\text{cph})$ とされた。これにより、同図(b)に示すように、ホール搬送波の同一位相が、時間とともに上から下に移動する形態となる。これらを総合した HH 信号多重後の信号の 3 次元周波数スペクトルを、同図(c)に示す。

この HH 信号多重手法は、水平解像度が従来の約 1.5 倍(4.2MHz→6.2MHz)に向上して画質改善効果が大い反面、以下に述べるような問題も残っている。

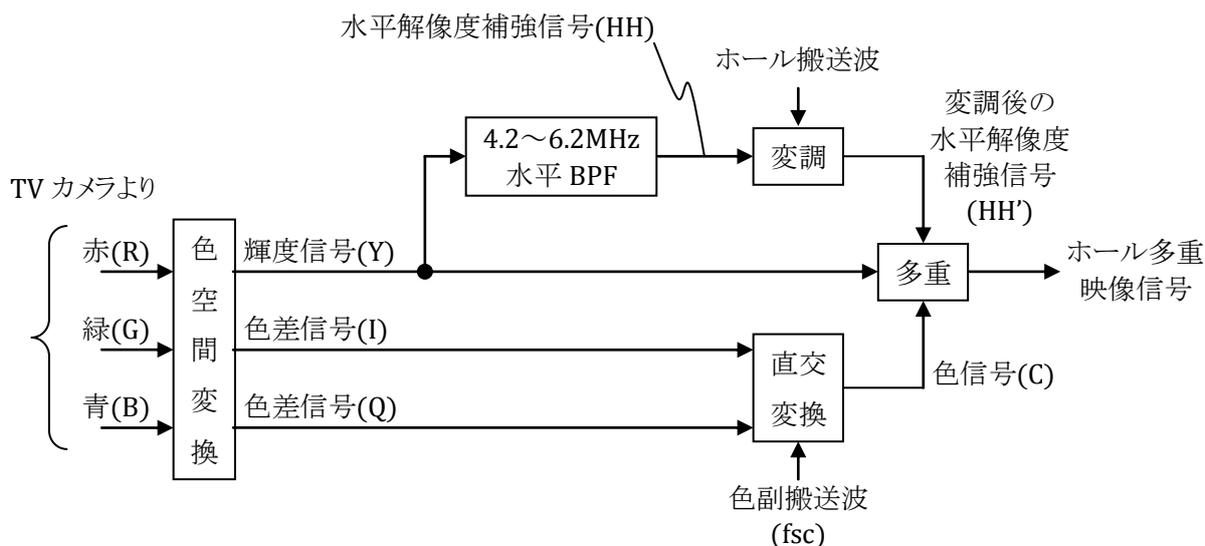
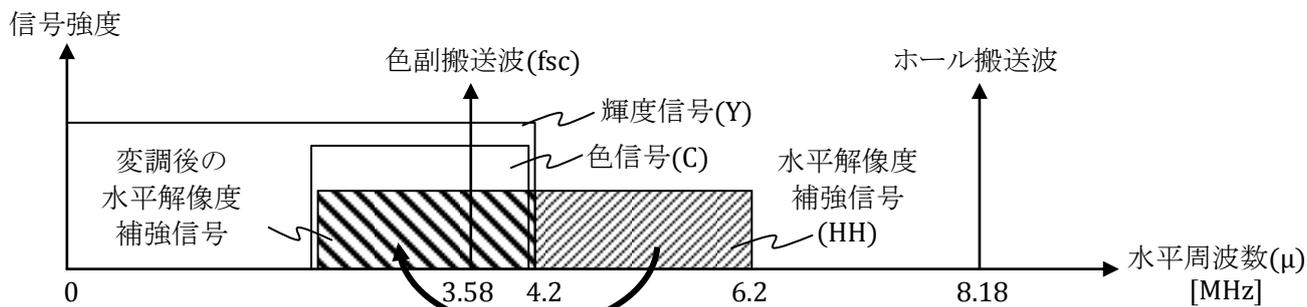
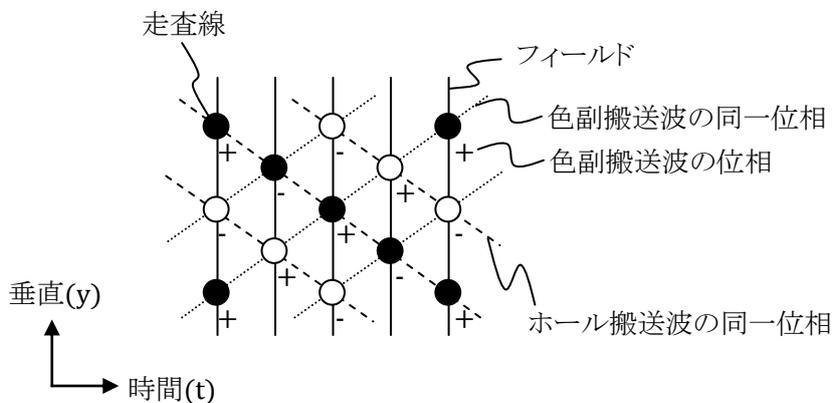


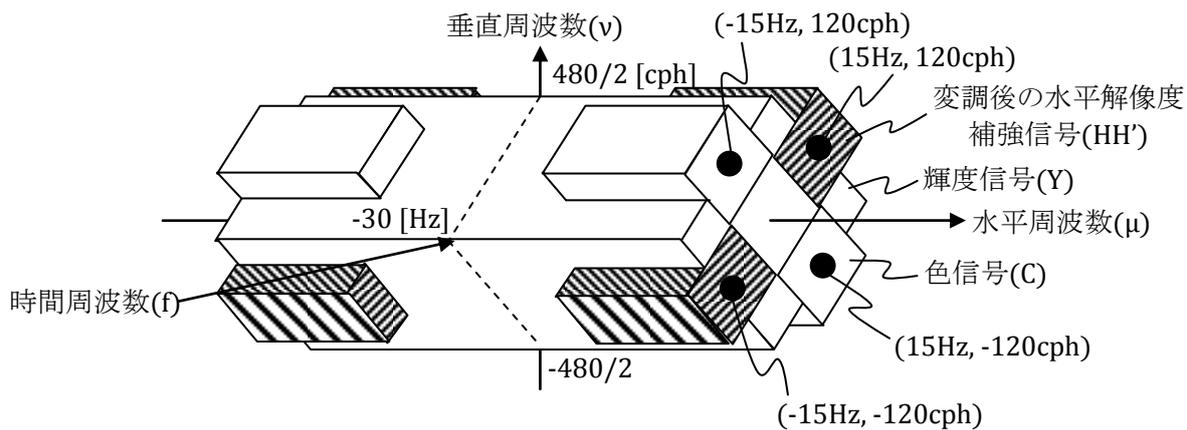
図 2.20 ホール多重映像信号のエンコード方法



(a) 1次元周波数スペクトル



(b) ホール搬送波と色副搬送波の位相関係



(c) 3次元周波数スペクトル

図 2.21 ホール多重映像信号

図 2.21(c)からわかるように、ホールの時間周波数帯域は、最大で $\pm 15\text{Hz}$ である。

一方、2.2 節で図 2.6(a)を用いて説明したように、CZP が水平方向に移動するとき、時間周波数(f)は水平周波数(μ)と水平移動速度(u)に比例する。従って、4.2~6.2MHz の HH 信号は、0~4.2MHz の Y 信号に比べて、少しの動きでも時間周波数(f)が大きく変化することになる。

例えば、色副搬送波の周波数(f_{sc})と水平走査周波数(f_h)の関係は $f_{sc} = 455/2 * f_h$ と定められている [4] ことから、1ライン上に色副搬送波が 455/2 サイクル存在する。仮に、この色副搬送波が水平方向に移動したと想定すると、「15Hz の時間周波数で動く」ということは「1/15 秒で、1 サイクル分、水平に移動する」ということなので、(画面上に映らない帰線期間も含めた)画面の左端から右端までの移動時間は、約 7.6 秒 ($=455/2 * 1/15$)となる。2.2 節で述べたように、「時間周波数(f)は水平周波数(μ)と水平移動速度(u)に比例する」ことから、4.2MHz の信号成分が 15Hz の動きになる移動時間は約 8.9 秒 ($=455/2 * 1/15 * 4.2/3.58$)であるのに対し、6.2MHz の信号成分では、約 13.1 秒 ($=455/2 * 1/15 * 6.2/3.58$)となり、「極めて遅い動き」あるいは「ほぼ静止」になってしまう。

すなわち、画像がほぼ静止している部分では、ホールへの HH 信号多重によって水平周波数(μ)を 6.2MHz まで伸ばすことができるが、少しでも動きがある部分ではホールに HH 信号を多重できず、 $\mu = 4.2\text{MHz}$ のまま、あるいは多重してもクロストークになってしまい受信側で分離できない、という問題がある。

2.7 まとめ

本章では、筆者が本研究に着手した 1987 年頃の TV の高画質化に関する背景技術について述べた。

まず、水平周波数(μ)、垂直周波数(ν)、時間周波数(f)からなる映像の 3 次元周波数特性を解析し、プログレッシブ走査とインタレース走査における標本点と周波数スペクトルの求め方を解説した。また、映像信号の 2 次元周波数特性を評価するテストチャートである CZP (Circular Zone Plate)と、CZP を上下左右に動かすことによって 3 次元周波数特性を評価するテストチャートである TFZP (To-and-Fro Zone Plate)について解説した。

続いて、NTSC 方式カラーTV 信号について、輝度信号(Y)と、色副搬送波を変調した色信号(C)が多重されている 3 次元周波数スペクトルを解説した。これをもとに、NTSC 方式の問題点であるインタレース走査に伴うフリッカ、および YC 信号間のクロストークの発生原因を整理し、従来の改善手法である動き適応 IP 変換および動き適応 YC 分離について 3 次元周波数特性の観点から解説した。また、NTSC 方式の 3 次元周波数スペクトルの隙間(ホール)を利用して、NTSC 方式と両立性を保ったまま水平解像度補強信号(HH)を多重する手法について解説した。これらの従来手法は、いずれも静止領域では理想的な高画質が得られるが、動領域では垂直周波数あるいは水平周波数の通過帯域が狭くなってしまい、静動の画質差が大きくなる問題があることを示した。

次章では、フィルム素材から変換された映像信号の特徴を利用して、静動の画質差の問題を解決する手法について述べる。

第3章 フィルムモード映像信号処理

3.1 緒言

2章で述べたように、NTSC方式には、インタレース走査に起因したフリッカ(ちらつき)や、YC間のクロストークなどの問題があることが古くから知られており、受信側(TV 受像機側)の動き適応 IP 変換や動き適応 YC 分離信号処理によって、画質改善が図られてきた。また、NTSC方式では有効に活用されていない3次元周波数領域の「穴」(ホール)を利用して、水平解像度補強信号(HH)を多重する技術が開発された。

しかしながら、前述した動き適応 IP 変換、動き適応 YC 分離、ホールを利用した HH 信号多重のいずれも、静止領域では理想的な高画質が得られるが、動領域では垂直あるいは水平の周波数帯域が狭くなってしまい、静動の画質差が大きくなる問題があった。

この問題を解決するために、動き適応 IP 変換における走査線補間フィルタや動き適応 YC 分離における分離フィルタの特性を工夫 [46; 47]したり、動き検出を高度化 [48; 49]したり、TV 受像機での動き適応処理の誤動作を防ぐための「擬似動き信号」を放送局側にて多重 [50]したりするなど、いろいろな画質改善手法が検討された。しかし、静止領域と動領域で異なる処理を行う「動き適応処理」を用いる限り、静動の画質差は避けられない問題であり、原理的に解決が困難である。

そこで筆者は発想を転換し、一般的な TV カメラで撮影された映像信号ではなく、映画のようなフィルム素材から変換された映像信号の特徴に着目して、「静動の画質差」の問題解決を図ることにした。

国内の TV 放送局は、1950年代の放送開始当初、編成の多くを放送局以外で製作されたフィルム作品(ニュース映画、短編映画、漫画映画、劇映画)に依存していた [51]。その後、世界初カセット式カラーVTRの「U規格」の登場(1970年3月)や、SMPTE ヘリカルスキャン1インチVTRの「C規格」の登場(1977年12月)などによって、放送局の録画メディアはフィルムからビデオテープに置き換わっていったが、漫画映画(1970年代後半にアニメーションという言葉に変遷)と劇映画では本稿執筆時点(2010年)でもフィルム素材が数多く使用されている。特に劇映画は、表3.1 [52]に示すように、各放送局の看板番組が並ぶプライムタイム(19:00~23:00)での放映が1970年前後から現在まで継続されており、放送局にとって安定した視聴率が期待できる重要なコンテンツとなっている。

1980年代後半に、映画等のフィルム素材(毎秒24コマ)から変換されたTV信号の特徴(2-3プルダウン)に着目したフィルムモードIP変換が、いくつかの機関からほぼ同時に提案された [19; 20; 21; 22]。例えば、加瀬沢は1987年にフィルムモード識別信号の伝送とフィルムモードIP変換に関する特許を出願している [19]。また、カツネルソンらは1989年に、受信側で2-3プルダウン信号を識別し、プルダウン位相(後述)を検出する技術を提案している [20]。

このフィルムモードIP変換は、毎秒60フィールド(毎秒30フレーム)で伝送されたインタレース信号をもとに、毎秒24コマのフィルムフレームごとに処理が完結するように、受像機側で前後のフィールドを用いてプログレッシブ走査のフレームを生成する。このとき、動領域でも静止領域と同じ処理を行うため、原理的に静動間の画質差は生じない。このIP変換は、情報量(フレーム数)が増えるわけではないため一見簡単に実現できそうだが、ノイズを含んだ伝送信号から、その信号がもともとフィルム素材(2-3プルダウン)であることと、フィルムフレームが完結するフィールド境界(プルダウン位相)を、安定して正しく検出できるようにすることが課題である。

表 3.1 TV 放映された主な映画番組 (文献[52]より引用)

放送局	番組名	放送日時	放送期間
日本テレビ	水曜ロードショー	水 21:00-23:00	1972/04/05-1985/09/25
	金曜ロードショー	金 21:00-23:00	1985/10/04- 現在
TBS	金曜ロードショー	金 19:30-21:30	1969/04/04-1969/09/26
	月曜ロードショー	月 21:00-23:00	1969/10/06-1987/09/21
	ザ・ロードショー	火 20:00-22:00	1987/10/06-1988/09/27
	火曜ロードショー	火 20:00-22:00	1988/10/11-1989/03/14
	火曜ビッグシアター	火 20:00-22:00	1989/04/04-1989/09/19
	水曜ロードショー	水 21:00-23:00	1989/10/04-1993/09/29
	水曜プレミア	水 21:00-23:00	2004/04/14-2005/09/14
	月曜ゴールデン	月 21:00-23:00	2006/04/03- 現在
	フジテレビ	ゴールデン洋画劇場	土 21:00-23:00
ゴールデンシアター		土 21:00-23:00	2001/10/06-2003/09/27
プレミアムステージ		土 21:00-23:00	2003/10/04-2006/03/25
土曜プレミアム		土 21:00-23:00	2006/04/01- 現在
テレビ朝日	土曜洋画劇場	土 21:00-23:00	1966/10/01-1967/04/01
	日曜洋画劇場	日 21:00-23:00	1967/04/09- 現在
	土曜映画劇場	土 21:00-22:30	1968/10/05-1977/06/25
テレビ東京	木曜洋画劇場	木 21:00-23:00	1968/02/08-2009/03/26
	水曜シアター9	水 21:00-23:00	2009/04/08- 現在

フィルムモードIP変換に関する従来の提案 [19; 20; 21; 22]は、いずれも特許出願のみに留まっており、ハードウェアによる検討や、画質改善効果の定量的な評価結果は報告されていなかった。

そこで筆者は、2-3プルダウン検出とフィルムモードIP変換を行うハードウェアを世界で初めて試作することにより、実際の動作を確認する [23]とともに、主観評価実験によって画質改善効果を明らかにした [24]。以下、その詳細について述べる。

3.2 フィルム素材から変換された映像信号の特徴

リュミエール兄弟が1895年に発明した世界初の映写機(キネマトグラフ)は、毎秒16コマの像数であった。その後、フィルム両脇の送り穴用に確保されている余白部分(サウンドトラック)に音声を白黒の縞模様として記録するトーキーが1927年に発明され、音質とフィルムコストのバランスから、毎秒24コマが映画の像数の世界標準になっていった [53; 54]。なお、実験的な映画の中には、毎秒60コマなどのものもある [55]。

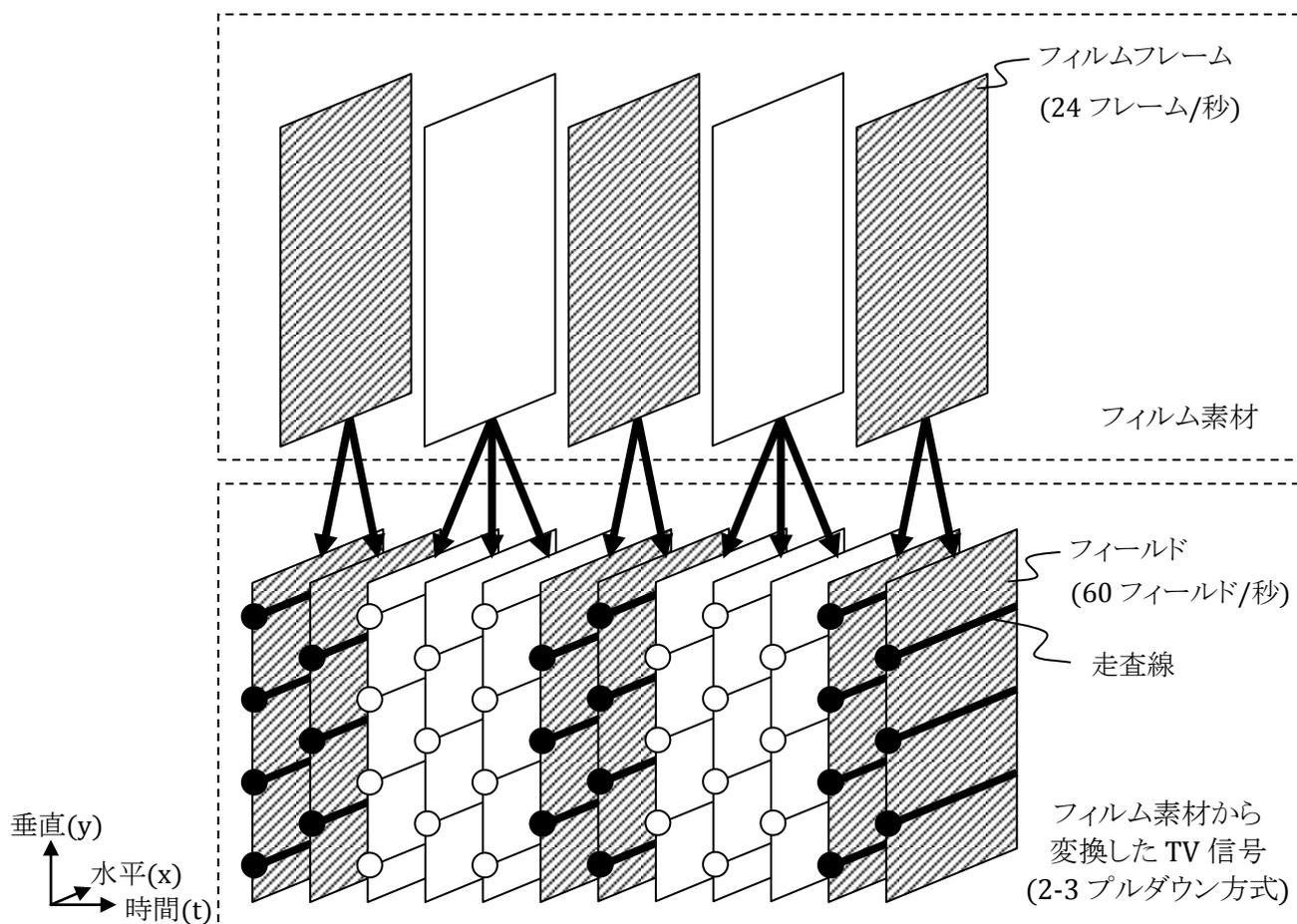


図 3.1 フィルム素材から TV 信号への変換 (2-3 プルダウン方式)

また、アニメーションの分野では、多くの TV 番組がビデオ撮影されるようになってからも長くフィルムが使われており、映画と同様に毎秒 24 コマで撮影される。ただし、実際に描かれる絵(セル画)の枚数は動きのあるシーンであっても 1 秒あたり 8~12 枚であり、1 枚の絵を 2~3 コマ撮影して毎秒 24 コマの像数にするのが一般的である [55]。

一方、NTSC 方式は、2 章で述べたようにインタレース走査により 1 フレームを 2 フィールドに分けて伝送しており、毎秒 30 フレーム(60 フィールド)の像数である。映画と TV のフレームレートの違いを吸収するため、テレシネ装置 [56:57]と呼ばれる映写機を用いて、フィルム素材から TV 用の映像信号を得る。

一般的な毎秒 24 コマの映画フィルム用のテレシネ装置では、図 3.1 に示すように、フィルム 2 コマを TV 信号の 5 フィールドに対応させて、フィルム素材から TV 信号に変換する。すなわち、奇数番目のフィルムについては 2 フィールド(2/60 秒)の TV 信号を生成してから 1 コマ送り、偶数番目のフィルムについては 3 フィールド(3/60 秒)の TV 信号を生成してから 1 コマ送る。同図に示すように、2 フィールドと 3 フィールドから成るシーケンスが繰り返されることから、このコマ送り方式は 2-3 プルダウンと呼ばれている。

図 3.1 からわかるように、2-3 プルダウンにより得られた TV 信号には、フィルム 1 コマ(フィルムフレーム)に相当する 2 ないし 3 フィールドの期間は画像が動かない、という特徴がある。一般的な動画はもちろん、アニメーションのように 1 枚の絵が 2~3 コマ連続する場合も、テレシネ装置がフィルムのコマを送る際の機械的な精度が原因でフィルムがわずかにブレるため、フィルムのコマとコマの間では TV 信号の画像に動きが生じる。

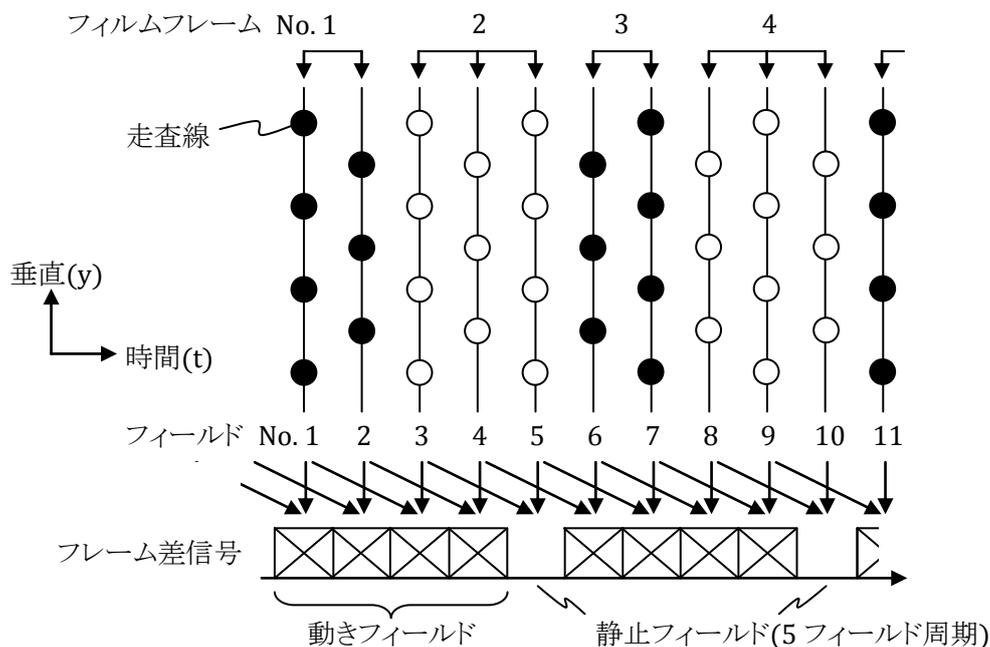


図 3.2 2-3 プルダウン検出の原理

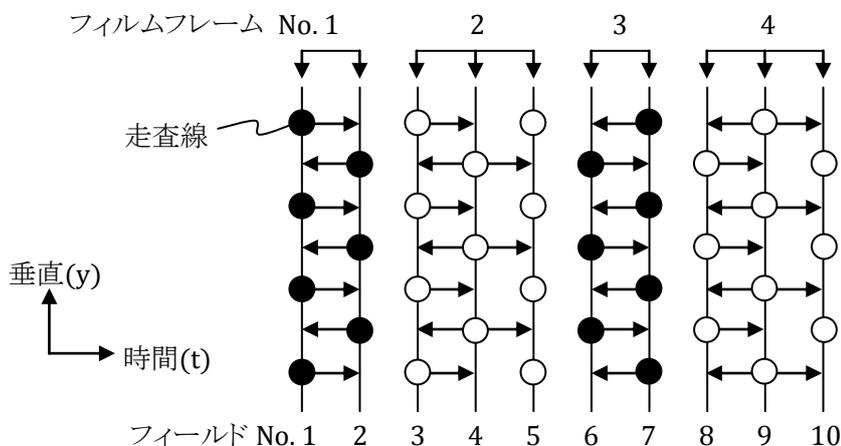


図 3.3 フィルムモード IP 変換

2-3 プルダウン検出の原理 [25: 20]を、図 3.2 に示す。受信側で受信した NTSC 信号のうち、色信号(C)が多重されていない 2MHz 以下の輝度信号(Y)について、フレーム差信号を取る。このフレーム差信号が全画面にわたって「0」(静止)であった場合だけを「静止フィールド」、それ以外を「動きフィールド」とする。このとき、2-3 プルダウンされた信号であれば、同図に示すように、3 フィールドのフィルムフレームのときに必ず静止フィールドが生じる。この静止フィールドは 5 フィールド周期で連続して生じる性質があるため、この周期性を検出して、もともとフィルム素材であったことを判別する。また、静止フィールドの発生位置(位相)から、現在処理中のフィールド番号を識別することができる。

3.3 フィルムモード IP 変換

フィルム素材が持つ2-3プルダウンの特徴を利用したIP変換(以下、フィルムモードIP変換)の原理を、図3.3に示す。この手法では、フィルムフレームごとに処理が完結するような形態で、前後のフィールドを用いてプログレッシブ走査のフレームを生成する。これにより、動領域でも静止領域と同じ処理が可能になるため、静動間の画質差がない理想的なIP変換を実現できる。しかし、前述のように、当時(1990年頃)は、実際のハードウェアによる検討や、画質改善効果の定量的な評価結果は報告されていなかった。

そこで筆者は、このフィルムモードIP変換を行うハードウェアを世界で初めて試作することにより、実際の動作を確認する^[23]とともに、主観評価実験によって画質改善効果を明らかにした^[24]。

試作したハードウェアの全体構成を、図3.4に示す。ここでは、信号源として市販されている映画ソフトのレーザビジョンビデオディスク(以下、LDと略記)を用いた。この信号が2-3プルダウンされていることは、事前にスロー再生により目視確認した。この入力信号に対して、図2.18に示した構成による従来の動き適応YC分離を行ったのち、IP変換を行う。IP変換回路として、IDTV受像機で用いられている従来の動き適応モード(図2.14)と、図3.3に示したフィルムモードを用意し、どちらかを選択して出力する。この出力をプログレッシブ走査モニタに表示して観察する。さらに、動画メモリを用いてフレーム画像をキャプチャして観察し、写真撮影を行った。また、後述の主観評価実験のため、デジタルVTR(D1)を2台同期運転し、プログレッシブ走査形態のR,G,B信号を録画・再生する構成とした。

フィルムモードIP変換回路のブロック図を、図3.5に示す。走査線補間のためのフィールド遅延回路を2つ使い、図3.3に示したフレーム完結の形態になるように倍速回路の入力を選択する。倍速回路では、2つのインタレース走査信号を2倍の速度で読み出して1ラインずつ交互に出力し、プログレッシブ走査に変換して出力する。これらの回路の多くは、動き適応モードIP変換回路と共用できる。また、フィールド遅延回路も動き適応YC分離回路と共用できるため、実際のハードウェアの追加は、2-3プルダウン検出回路(後述)や制御回路などのわずかな部分だけである。

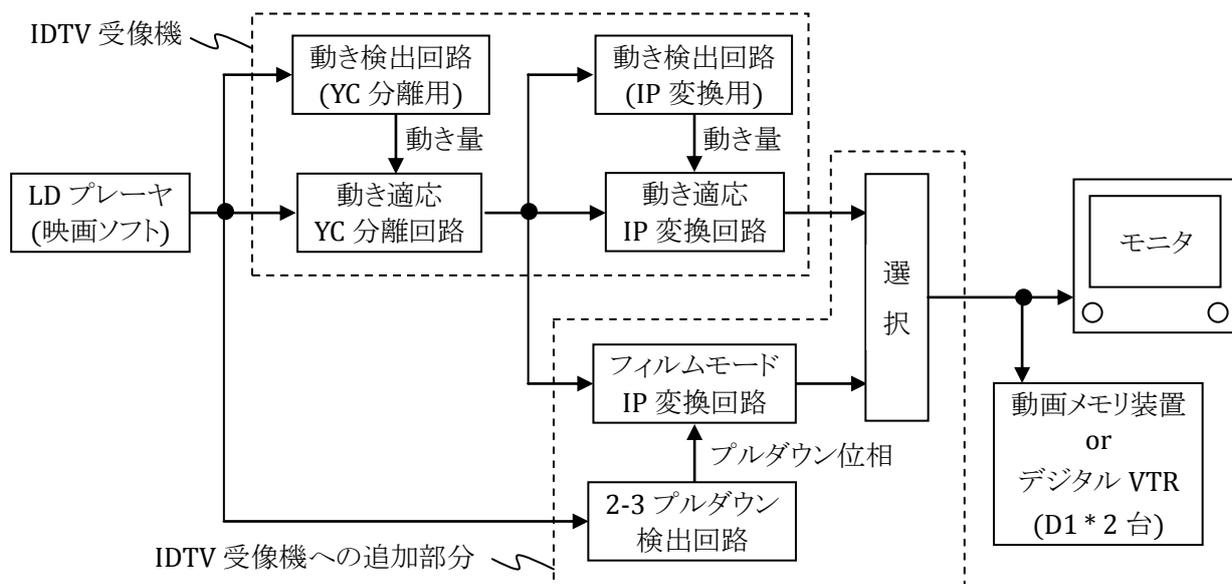


図 3.4 フィルムモード IP 変換に関するハードウェア実験構成

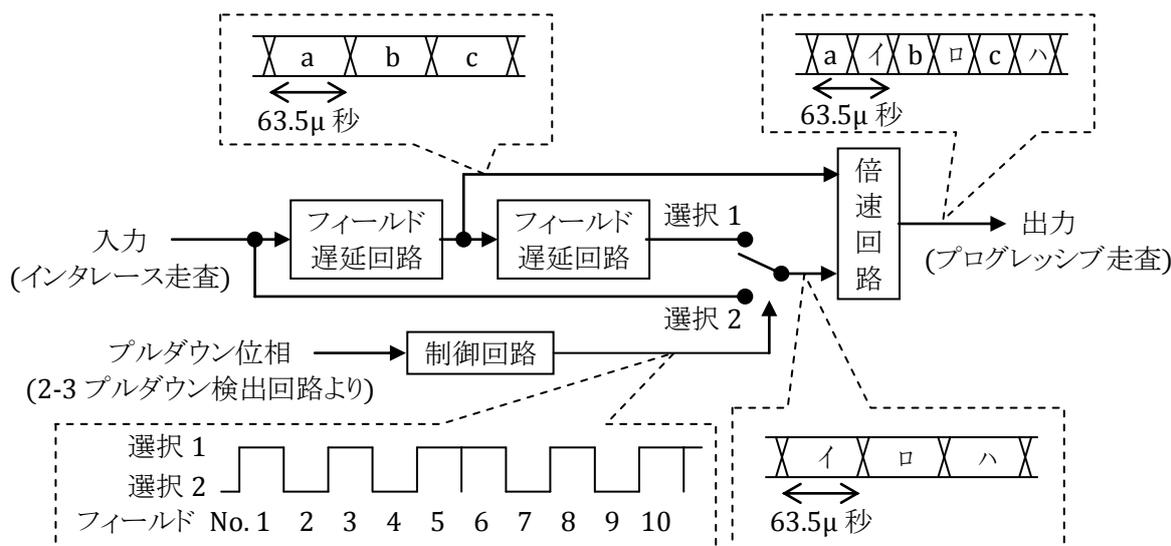


図 3.5 フィルムモード IP 変換回路のブロック図

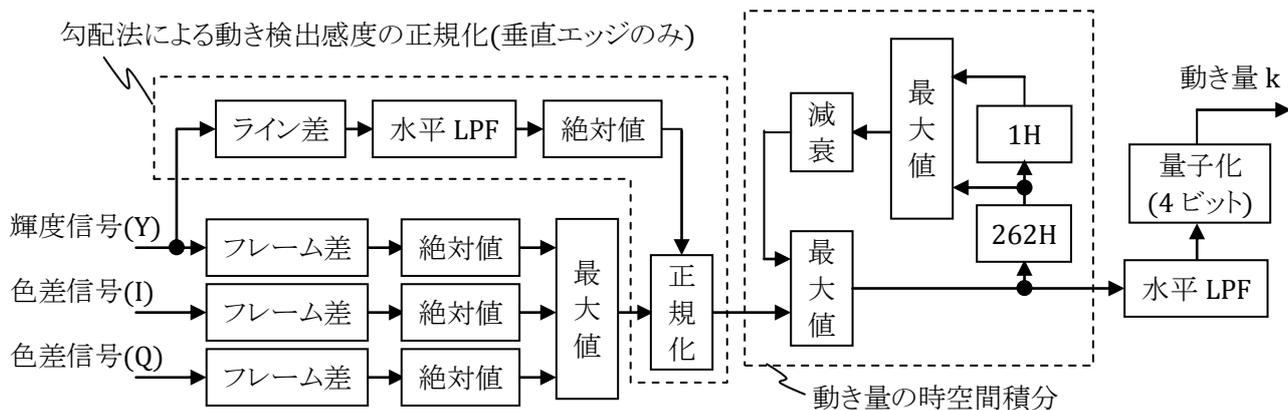


図 3.6 動き検出回路 (IP 変換用)

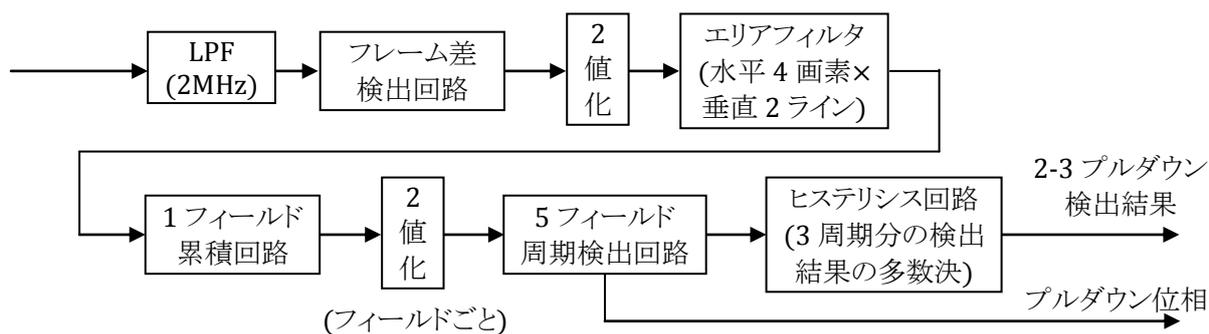


図 3.7 2-3 プルダウン検出回路のブロック図

比較のために用意した動き適応モードでは、動き検出の精度により画質が大きく左右される。参考として、実験に用いた動き検出回路のブロック図を図 3.6 に示す。この回路では、YC 分離・復調後の輝度信号(Y)と色差信号(I, Q)の各フレーム差をもとにして、動き量 k の値を決定する。この際、動きの誤検出(静止領域を動領域と判定する誤動作)や検出漏れ(動領域を静止領域と判定する誤動作)を防ぐために、勾配法による動き検出感度の正規化制御と、動き量の時空間積分を行って、動き検出精度を向上している。

このハードウェアを用いて、次に述べる実験を行った。

まず、予備実験として、2-3プルダウン検出の動作確認実験を行った。手元にあったLDの映画ソフト(10本)、およびNTSC方式で放送された映画番組(2本)について確認したところ、そのすべてについて、前述した5フィールド周期の静止フィールドの発生を観察できた。ただし、LDに多く見られるインパルス性のノイズが原因で、フィルムフレーム内でもフレーム差信号が発生してしまい、「2-3プルダウンではない」と誤判定することがあった。この誤判定を減らすため、図3.7に示すように、2-3プルダウン検出部の中に、動きの孤立点除去のためのエアフィルタとヒステリシス回路を追加した。

エアフィルタでは、エリア内のすべての画素にフレーム差がある場合に限り、フレーム差信号を出力する。エリアのサイズは、孤立的除去効果とフレーム差検出感度のトレードオフの関係になり、今回は予備実験によって水平4画素×垂直2ラインに決定した。

ヒステリシス回路では、5フィールド周期で出力される検出結果を3周期分蓄積し、その多数決をとって新たな検出結果とする。なお、この蓄積は、11ビット(=1ビット/フィールド×(5フィールド/周期×2周期+1フィールド))のシフトレジスタで実現でき、フィールドメモリ等は不要である。

これらの回路の追加により、フィルムモードと動き適応モードが頻繁に切り替わることによる不自然さがなくなり、「2-3プルダウン信号であること」と「2-3プルダウン位相」を安定して検出できるようになった。

続いて、フィルムモード IP 変換の画質改善効果を確認する実験を行った。

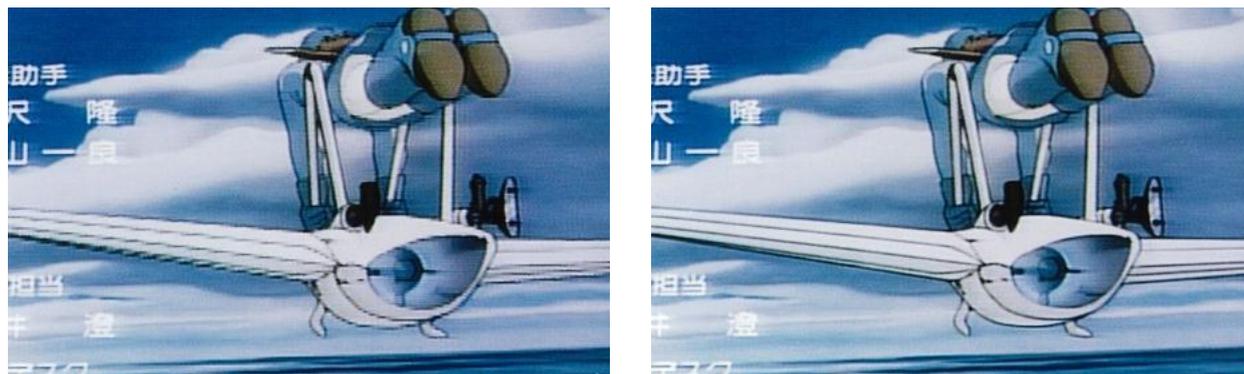
図3.8に、(a)動き適応モードと(b)フィルムモードによる各IP変換結果の一例を示す。(b)フィルムモード IP 変換では、(a)動き適応 IP 変換に比べて、全体に動領域の垂直解像感が向上しており、静動の画質差による不自然さが解消された。特に、細かい横縞が上下動するときにみられるインタレース走査特有のラインフリッカがなくなり、画質改善効果が著しい。同図では、翼の細かい横縞部分に改善が見られる。なお、他の自然画等においても、建物の窓枠や人物の目元などの精細な絵柄部分に同様の改善が見られた。

次に、この画質改善効果を定量的に評価するために、TV研究者10人による主観評価実験を行った。実験には、10種類(自然画5種類、線画5種類)の2-3プルダウン画像を用いた。被験者に対して、基準画像として動き適応モードの再生画像を10秒間提示したのち、1秒間の無画像時間をおき、評価画像としてフィルムモードの再生画像を10秒間提示した。評価には、CCIR(現ITU-R)で規定されている7段階品質評価尺度を用い、基準画像に対する評価画像の相対評価を行った。評価実験条件を、表3.2に示す。

主観評価実験の結果を図3.9に示す。画質改善効果は、当然ながら絵柄に依存する。画面全体に細かい横縞が多く、動きが大きい画像(絵柄3や絵柄5)では、7段階品質評価尺度で2ランク近い改善があった。一方、絵柄6のように動きの少ない画像では改善効果はない。なお、図3.8に示した画像は絵柄7であり、この絵柄では1ランク程度の改善があった。以上により、フィルムモード IP 変換は、動き適応 IP 変換に比べて、7段階品質評価尺度で平均1~1.5ランク程度の画質改善効果があることが確認できた。

その一方で、字幕や臨時ニュース等のテロップがTV画像に挿入(スーパーインポーズ)された際に、以下のような問題が発生することがわかった。問題となる現象を、原因ごとに場合分けして整理する。

- (1)静止テロップの on/off が、3フィールドのフィルムフレーム期間内に行われた場合
- (2)静止テロップの on/off が、2フィールドのフィルムフレーム期間内に行われた場合
- (3)テロップが動く場合



(a)動き適応 IP 変換

(b)フィルムモード IP 変換

図 3.8 IP 変換結果の一例 (「風の谷のナウシカ」より, ©二馬力・徳間書店・博報堂)

表 3.2 評価実験条件

項目	条件
評定者	10名 (TV研究者)
視距離	3H (H:画面高)
室内照度	50 lx
管面輝度(最高輝度)	30 fL = 102.8 cd/m ²
使用モニタ	26インチ シバソク製カラーモニタ CMM 26-11 (プログレッシブ走査対応に改造)

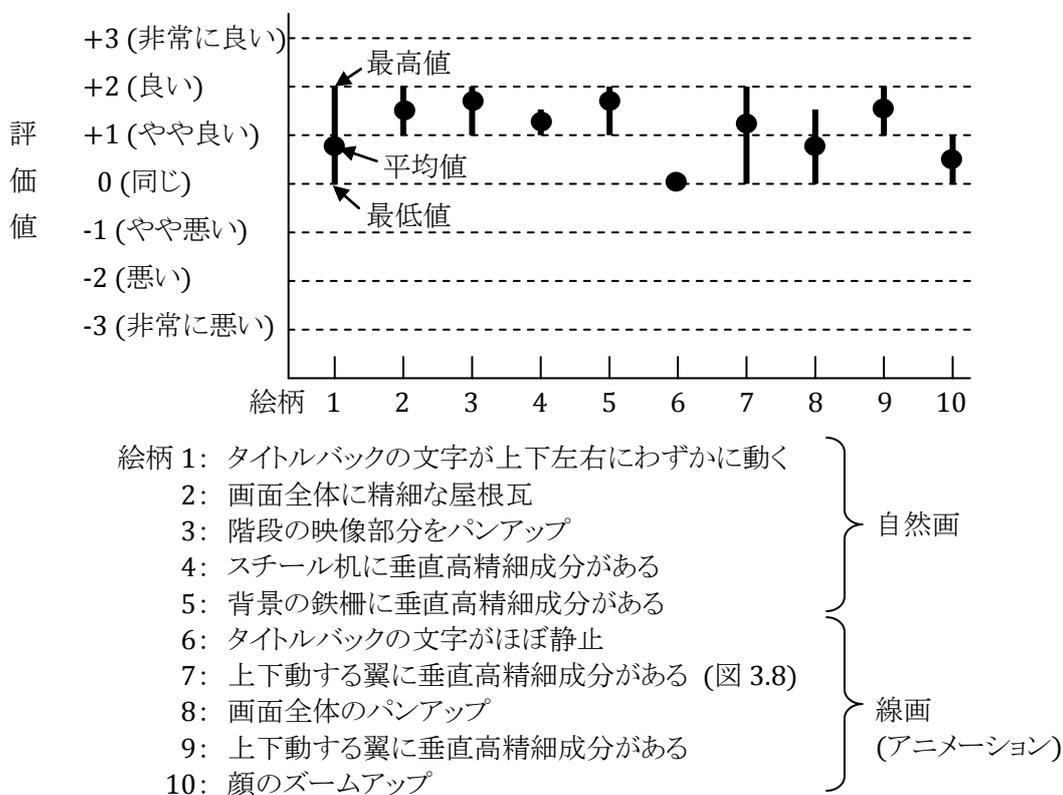


図 3.9 動き適応 IP 変換結果に対するフィルムモード IP 変換結果の主観評価実験結果

まず、上記(1)の場合、本来は 5 フィールド周期となるはずの「静止フィールド」にもフレーム差が発生してしまい、2-3 プルダウンされた信号であることを検出できなくなる問題が発生する。静止テロップの on/off の瞬間が、前述したヒステリシス回路によって 3 周期分(=15 フィールド)の期間に引き延ばされるため、頻繁にフィルムモードから動き適応モードに切り替わってしまい、不自然な出力画像となる。

上記(2)の場合、2-3 プルダウンの周期性は正しく検出されるため、フィルムモードで IP 変換される。しかし、静止テロップの on/off が切り替わる瞬間のフィルムフレームについては、テロップの入ったフィールドと入っていないフィールドを結合して 1 フレームを生成するため、テロップに 1 ラインおきの抜けが生じる。

上記(3)の場合、静止フィールドが全く検出できなくなるため、フィルムモード IP 変換を活かせない。

これらの問題はすべて、テロップが 2-3 プルダウンの周期性と無関係に挿入されることに起因しており、前述した 2-3 プルダウン検出の動作原理だけでは解決できない。そこで、新たな解決案を以下に示す。

[案 1] 画面を多数の小ブロックに分割し、ブロックごとにモード判定して IP 変換の動作を切り替える。

[案 2] 送信側で、2-3 プルダウンの周期性に合わせて、テロップの on/off や移動を行う。

[案 3] 送信側からコマンドを送出し、受信側の処理モードを強制的に切り替える。

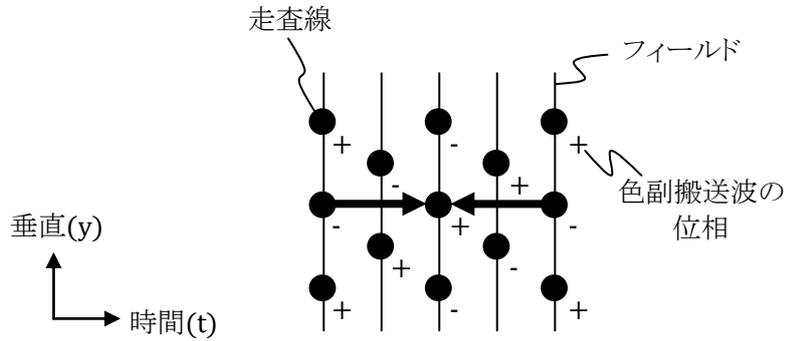
この中で[案 1]は、受信側だけの処理で実現できるが、モード判定が不安定になるリスクがある。[案 2]は、上記問題に対して最も効果的であると思われるが、新たな放送機器の導入や番組制作時のコストが大きくなるため現実的ではない。[案 3]については、3.6 節で詳しく述べる。

3.4 フィルムモード YC 分離

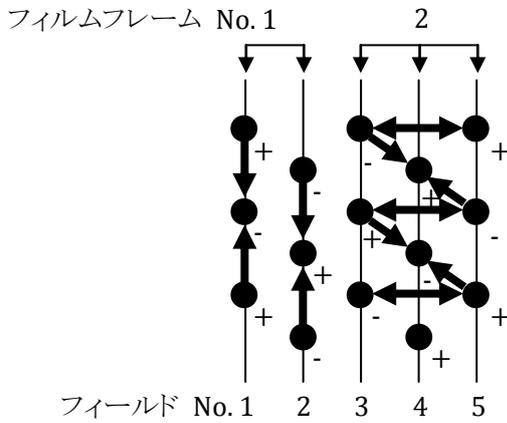
3.2 節で述べたように、2-3 プルダウンにより得られた TV 信号では、フィルム 1 コマ(フィルムフレーム)に相当する 2 ないし 3 フィールドの期間は画像が動かないという特徴がある。そこで、動領域の画質改善を目指し、この 2-3 プルダウンの特徴を利用した YC 分離手法を提案する [23; 25]。

図 3.10 に、提案するフィルムモード YC 分離を示す。まず画素ごとに動き検出を行い、同図(a)に示す静止領域では、フィルムフレームとは無関係に、従来と同様のフレーム間 YC 分離を行う。同図(b)(c)に示す動領域については、フィールド内、フィールド間およびフレーム間の YC 分離を適宜切り替えて使用する。特に、同一のフィルムフレームから生成された第 3 フィールドと第 5 フィールドは「静止」とみなすことができるため、常にフレーム間 YC 分離を用いることによって、クロストークなく Y 信号と C 信号を分離できる。残り(第 1、第 2、第 4)のフィールドの動領域については、同図(b)(c)に示す 2 方式の YC 分離を比較検討した。同図(b)に示す[方式 1]における第 1、第 2 フィールドでは、従来のフィールド内 YC 分離を用いる。同図(c)に示す[方式 2]における第 1、第 2 フィールドでは、フィルムフレームごとに完結するフィールド間 YC 分離を用いる。なお、第 4 フィールドについては、[方式 1][方式 2]ともに、共通のフィールド間 YC 分離を用いる。

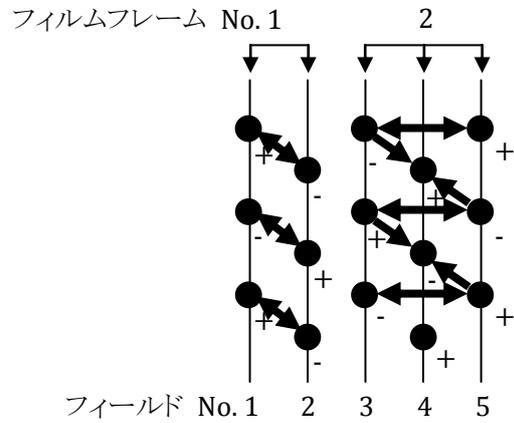
筆者は、図 3.4 に示した[方式 1][方式 2]、および従来の動き適応 YC 分離の計 3 方式が動作するハードウェアを試作し、それぞれの画質を評価した。信号源として、プログレッシブ形態の TV カメラ(有効走査線数 480 本、60 フレーム/秒)を用いた。このカメラ信号に対して、図 3.11 に示すように、24 フレーム/秒になるようにフレームを間引き、2-3 プルダウン信号を模擬してフレーム繰り返しを行ったのちに、インタレース走査形態に変換し、輝度信号(Y)と色差信号(I, Q)を NTSC エンコードして、上記ハードウェアへの入力画像とした。被写体として、YC 間のクロストーク(特にクロスカラー)の発生状況を目視確認できるように、固定した円形ゾーンプレート(紙)の前で揺れる金属製の振り子を用いた。



(a) 静止領域 [方式 1, 2 共通]



(b) 動領域 [方式 1]



(c) 動領域 [方式 2]

図 3.10 フィルムモード YC 分離

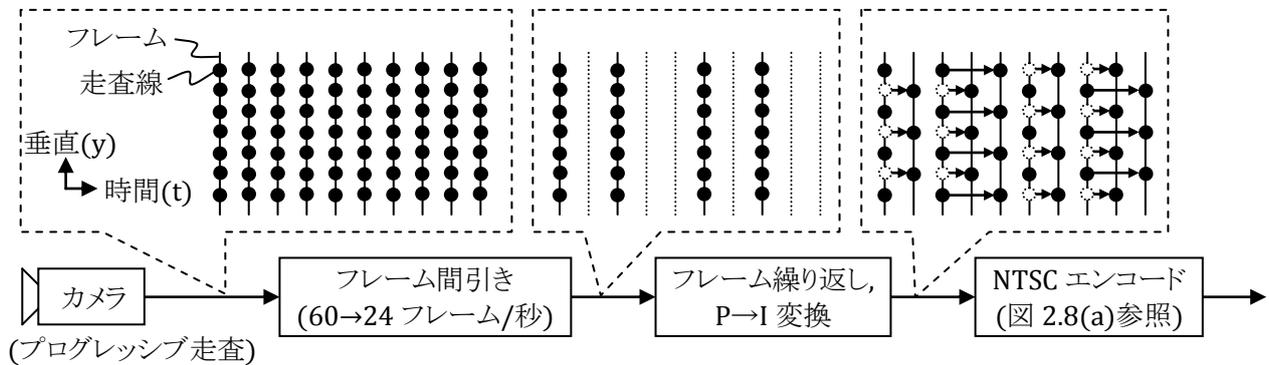


図 3.11 実験に用いた 2-3 プルダウン模擬信号

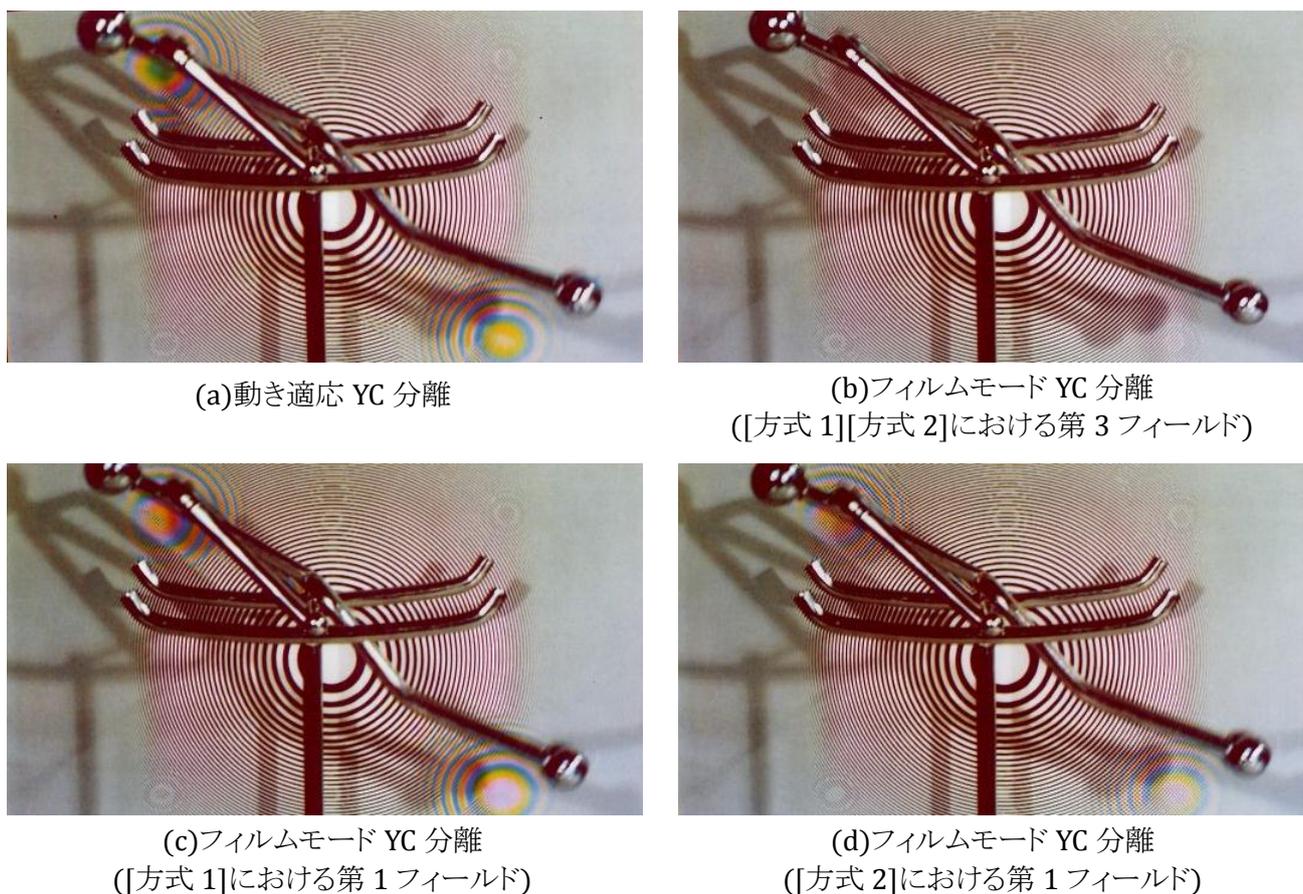


図 3.12 YC 分離結果の一例

図 3.12 に、各方式によって YC 分離したのちに、前述のフィルムモード IP 変換を行った結果を示す。

同図(a)は、従来の動き適応 YC 分離の結果であり、輝度の斜め成分(CZP の斜め縞部分)が再生されず、クロスカラーが発生している。

同図(b)は、フィルムフレームが 3 フィールドから構成される第 3 フィールドに対して、[方式 1][方式 2]共通のフィルムモード YC 分離(フレーム間 YC 分離)を行った結果であり、クロスカラーのない理想的な YC 分離が行われている。

同図(c)は、フィルムフレームが 2 フィールドから構成される第 1 フィールドに対して、[方式 1]のフィルムモード YC 分離を行った結果であり、原理的に同図(a)と同様の結果になる。

同図(d)は、第 1 フィールドに対して、[方式 2]のフィルムモード YC 分離を行った結果である。[方式 1](同図(c))に比べ、CZP の斜め縞部分の解像度が若干向上しているが、同時に市松模様の妨害が発生している。これは、図 3.10 に示した走査線の位置関係からわかるように、[方式 2]の第 1・第 2 フィールドでは、YC 分離後の重心位置が本来の走査線の位置から $1/2$ ラインずれることに起因する。

この再生画像を、連続した動画の状態を目視確認したところ、[方式 1][方式 2]ともに、第 3、第 5 フィールドのフレーム間 YC 分離によって、輝度の斜め解像度が大幅に改善される。一方、残りのフィールドでは、図 3.12(c)(d)のように斜め成分が劣化してクロスカラーになるため、全体を通して見ると、輝度の斜め成分が若干のフリッカとして感じた。

[方式 1]と[方式 2]を比較すると、[方式 2]では、斜め解像度の向上効果よりも前述した市松模様の妨害のほうが気になり、総合的には[方式 1]のほうが自然な印象を受けた。

3.5 走査線グループ化を用いたフィルムモード信号多重・分離

2.5節および2.6節で述べたように、動き適応YC分離やホールを利用した水平解像度補強信号多重では、静止で画質差が大きくなってしまいう問題があった。この問題を改善するために、IsnardiとHurstはそれぞれ、図3.13(a)(b)に示すように複数の走査線をグループ化し、そのグループ内では同一の輝度信号(Y)、色信号(C)、水平解像度補強信号(HH)を用いることによって、クロストークが原理的に発生しない信号多重・分離手法を提案している [58; 59]。以下、この手法について解説する。

図3.13(a)は、Isnardiが提案したYC多重・分離 [58]の原理を示したものである。まず、送信側にて、点線で囲った2ラインからなる走査線グループ内では、もともとの各信号の平均値を用いるなどして、Y信号およびC信号がそれぞれ同一の値となるようにする。このとき、前述したようにC信号は色副搬送波によって時間とともに同一位相が上昇する形態になるため、走査線グループ内ではC信号の極性(正負)が反転することになる。従って、例えば第1および第2フィールドのY₁₁とC₁₁が多重された信号L₁₁およびL₂₂は、式(3.1)に示すマトリクス演算で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{11} \\ C_{11} \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

一方、受信側では、上記式(3.1)の逆マトリクス演算(式(3.2))によって、Y信号とC信号をクロストークなく分離することができる。

$$\begin{bmatrix} Y_{11} \\ C_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & -0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{22} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

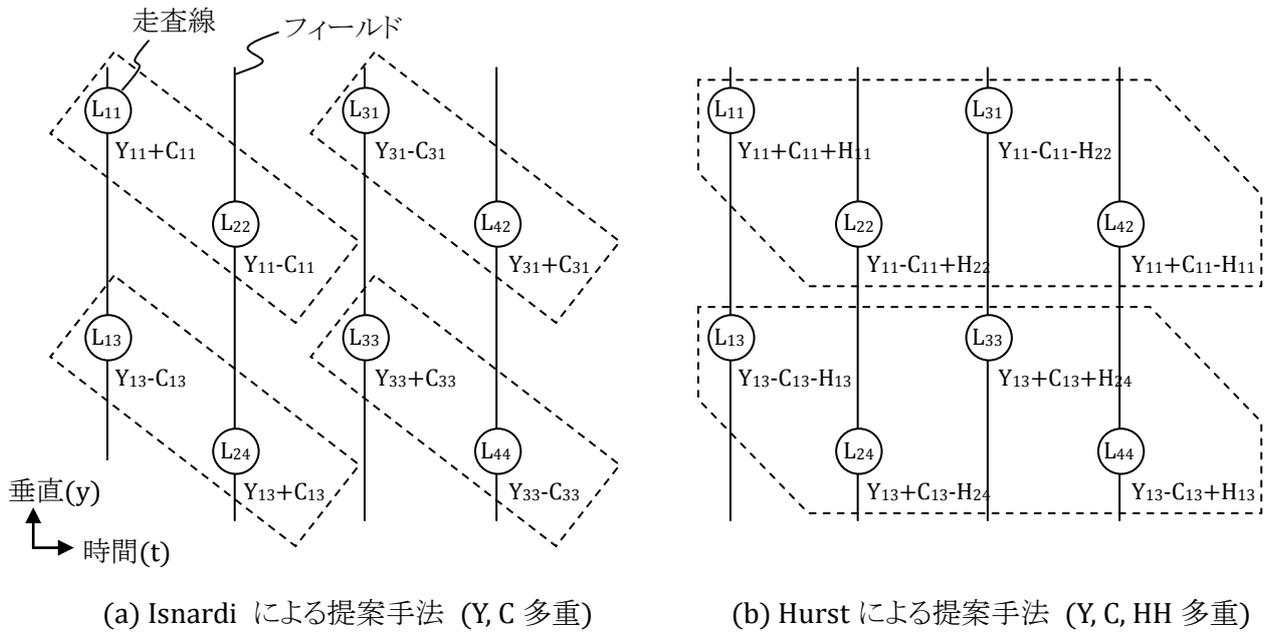


図 3.13 走査線グループ化による信号多重 (従来手法)

Hurst は、上記と同様に、図 3.13(b)に示すような 4 ラインごとに走査線グループを構成し、Y 信号(Y_{11})と、C 信号(C_{11})および 2 つの HH 信号(H_{11} , H_{22})の 4 つを多重・分離する手法を提案した [59]。このとき、輝度信号は奇数フィールドと偶数フィールドでそれぞれ同一の信号とし、C 信号と HH 信号は 4 ラインすべてをそれぞれ同一の信号とする。このとき、HH 信号については、2.6 節で述べたホールに配置されるように、同一位相が時間とともに下降する極性(符号)にすることにより、この信号多重は式(3.3)に示すマトリクス演算となる。

$$\begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{22} \\ L_{31} \\ L_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{11} \\ C_{11} \\ H_{11} \\ H_{22} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

受信側では、走査線グループごとに上記式(3.3)の逆マトリクス演算(式(3.4))を行うことによって、4 つの信号(Y_{11} , C_{11} , H_{11} , H_{22})をクロストークなく分離することができる。

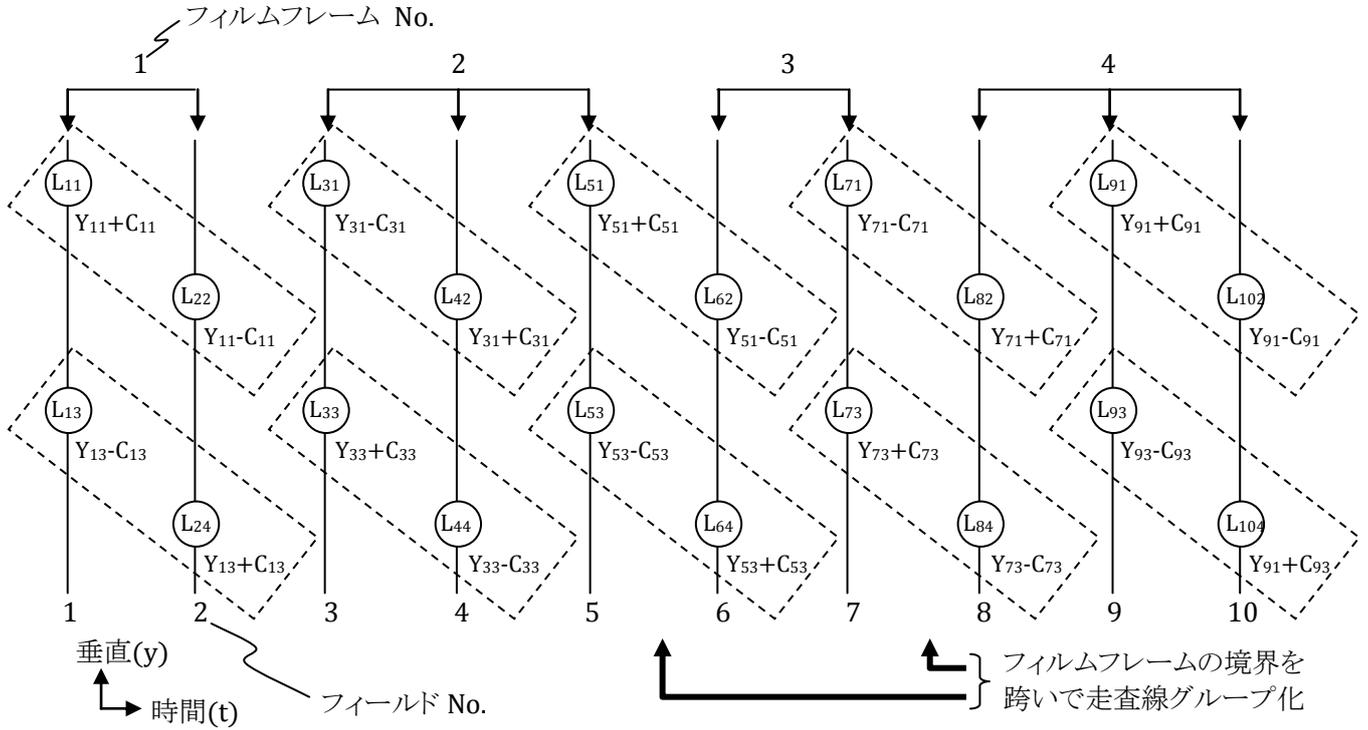
$$\begin{bmatrix} Y_{11} \\ C_{11} \\ H_{11} \\ H_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & -0.25 & -0.25 & 0.25 \\ 0.5 & 0 & 0 & -0.5 \\ 0 & 0.5 & -0.5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{22} \\ L_{31} \\ L_{42} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

前述した Isnardi および Hurst の手法は、画像の静動に関わりなく各信号をクロストークなく分離できる長所がある。その一方で、複数の走査線で同一の信号を使用しなければならない制約があるため、垂直および時間方向の解像度が原理的に低くなってしまいう短所がある。特に、図 3.13(b)に示した Hurst の手法では、4 フィールドを単位として走査線グループを構成するため、ギクシャクした不自然な動き(モーションジャダー)が大きくなってしまいう欠点があった。

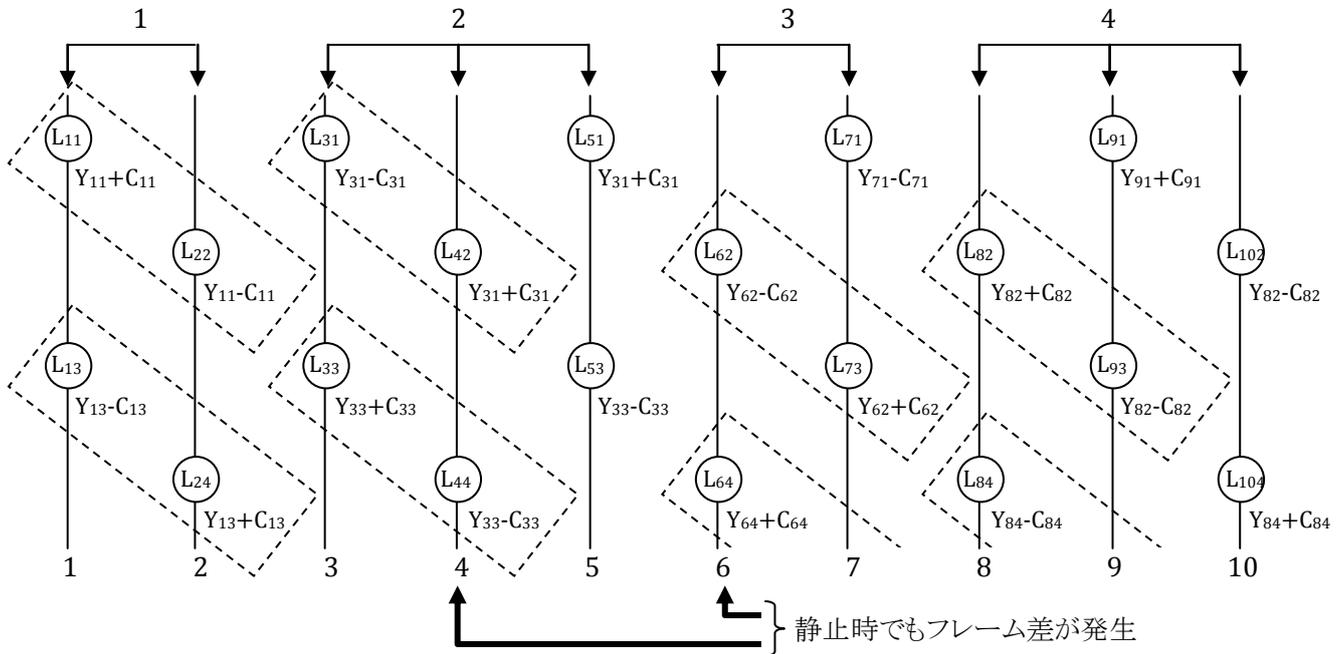
そこで筆者は、毎秒のコマ数をもともと少ない 2-3 プルダウン信号に対して、上記 Isnardi および Hurst の走査線グループ化手法を適用することを提案する [26; 27; 28]。2-3 プルダウン信号では、1 フィルムフレームの期間は画像が静止しているとみなせるため、時間方向の解像度はもとのフィルム素材と同一であり、モーションジャダーは増加しない。フィールド間で同一の信号を用いるため、垂直方向には 1/2 の解像度になってしまうが、2.5 節で述べた従来の動き適応 YC 分離では静止領域に比べて動領域の垂直解像度が 1/4 になってしまうと比較すれば、静動で画質差が生じず、クロストークが発生しない利点がある。

ただし、走査線グループ化を単純に適用した場合には、図 3.14 に示すような問題が生じる。以下、この問題について詳しく説明する。

図 3.14(a)に、2-3 プルダウン信号に Isnardi の手法をそのまま適用した場合の問題を示す。連続する 2 フィールド間で走査線を単純にグループ化すると、第 5 フィールドと第 6 フィールドの間、および第 7 フィールドと第 8 フィールドの間でフィルムフレームを跨ってしまう。この場合、本来はフレーム差が生じないはずの第 3 フィールドと第 5 フィールド、および第 8 フィールドと第 10 フィールドの間にフレーム差が発生してしまい、3.2 節で述べた 2-3 プルダウン検出ができなくなってしまう問題がある。逆に、強制的に 3.3 節で述べたフィルムモード IP 変換を実施した場合は、第 6 フィールドと第 7 フィールドを合成してフレーム画像を生成する際に、第 5 フィールドおよび第 8 フィールドの画像も混じって 3 重像になってしまう可能性がある。



(a) Isnardi による提案手法をそのまま適用した場合



(b) 走査線グループ化の垂直位置を変化させた場合

図 3.14 走査線グループ化を 2-3 プルダウン信号に適用した場合の問題点

一方、図 3.14(b)に示すように、第 3 および第 4 フィルムフレームでは走査線グループの垂直位置を変更することも考えられる。この場合、第 3 フィールドと第 5 フィールド、および第 8 フィールドと第 10 フィールドの間にフレーム差は発生せず、また、フィルムモード IP 変換も正常に動作するため、一見良さそうに思われる。しかし、走査線グループの位置が 5 フィールドごとに上下動するため、仮に被写体が止まっていたとしても 5 フィールドごとにフレーム差が発生してしまい、従来の動き適応 IP 変換を行う一般の受像機では動画モードになってしまう問題がある。

そこで新たに、図 3.15 に示す「2-3-3-2 プルダウン法」を提案する。この手法は、第 6～第 8 の 3 フィールドと、第 9～第 10 の 2 フィールドが、それぞれ 1 つのフィルムフレームとなるように、プルダウン位相を変更するものである。このとき、テレシネ装置に変更を加える必要はなく、フレームメモリを用いて第 6 フィールドの信号を第 8 フィールドのときに繰り返して再生すればよい。この 2-3-3-2 プルダウン法では、同図(a)に示すように、フィルムフレーム境界を跨ぐことなく、2 ラインごとの走査線グループを形成することができる。

なお、同図(a)では、第 5 フィールドの信号は冗長であり、第 3 と第 4 のフィールドの信号(L₃₁, L₄₂)から再生した輝度信号(Y₃₁)と色信号(C₃₁)を、第 5 フィールドでもそのまま使用すればよい。第 6 フィールドについても同様に冗長であり、第 7 と第 8 のフィールドの信号(L₇₁, L₈₂)から再生した輝度信号(Y₇₁)と色信号(C₇₁)を、第 6 フィールドでもそのまま使用すればよい。この冗長性を利用して、水平解像度補強信号(HH)を多重することができる。以下、この手法について説明する。

図 3.15(b)に、5 ラインごとの走査線グループを形成して、Y 信号、C 信号、HH 信号の多重・分離手法を示す。このとき、Y 信号(Y₁₁, Y₃₁)と C 信号(C₁₁, C₃₁)はフィルムフレームごとに独立した信号とし、HH 信号(H₁₁)については 2 つのフィルムフレーム間で同一の信号とする。C 信号は、色副搬送波の変調により時間とともに同一位相が上昇する形態とし、ホールに多重する HH 信号は、時間とともに同一位相が下降する形態とすれば、この信号多重は式(3.5)のように表すことができる。

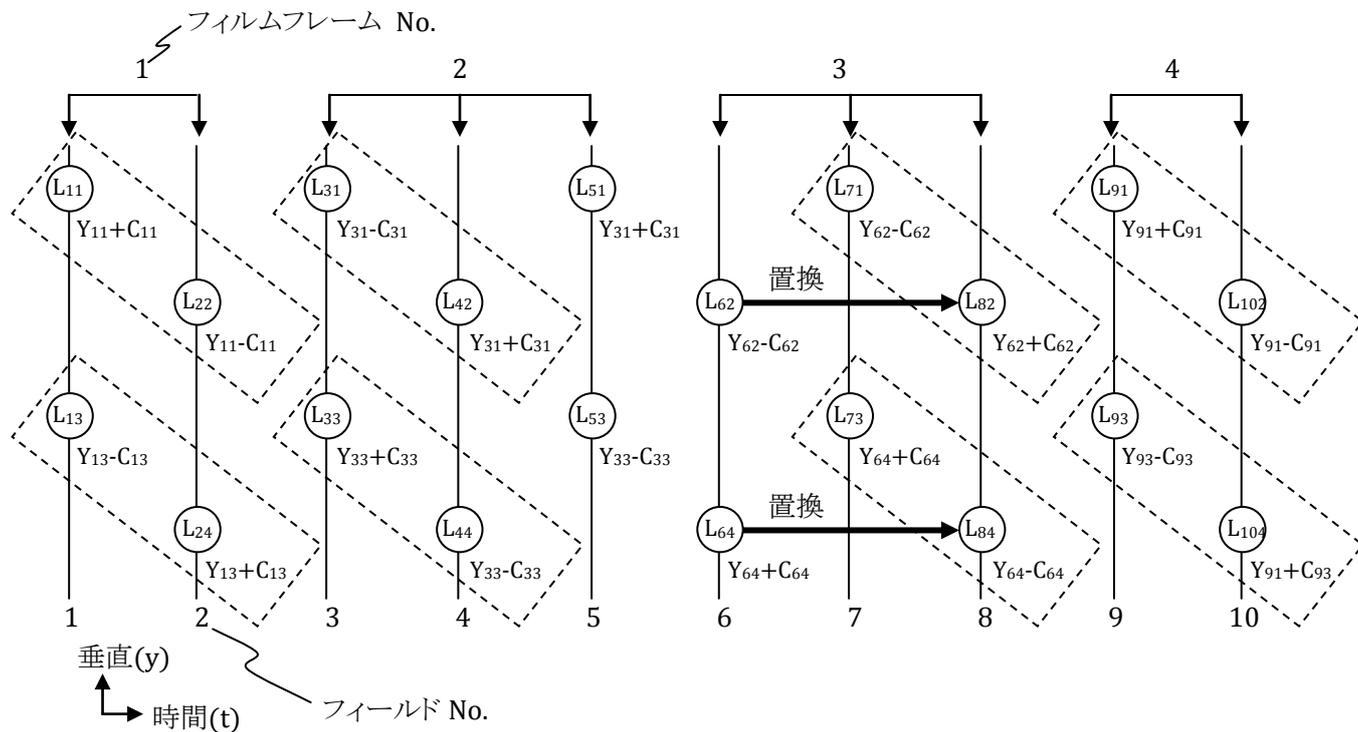
$$\begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{22} \\ L_{31} \\ L_{42} \\ L_{51} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{11} \\ Y_{31} \\ C_{11} \\ C_{31} \\ H_{11} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

受信側では、走査線グループごとに式(3.6)の逆マトリクス演算を行うことによって、5 つの信号(Y₁₁, Y₃₁, C₁₁, C₃₁, H₁₁)をクロストークなく分離することができる。

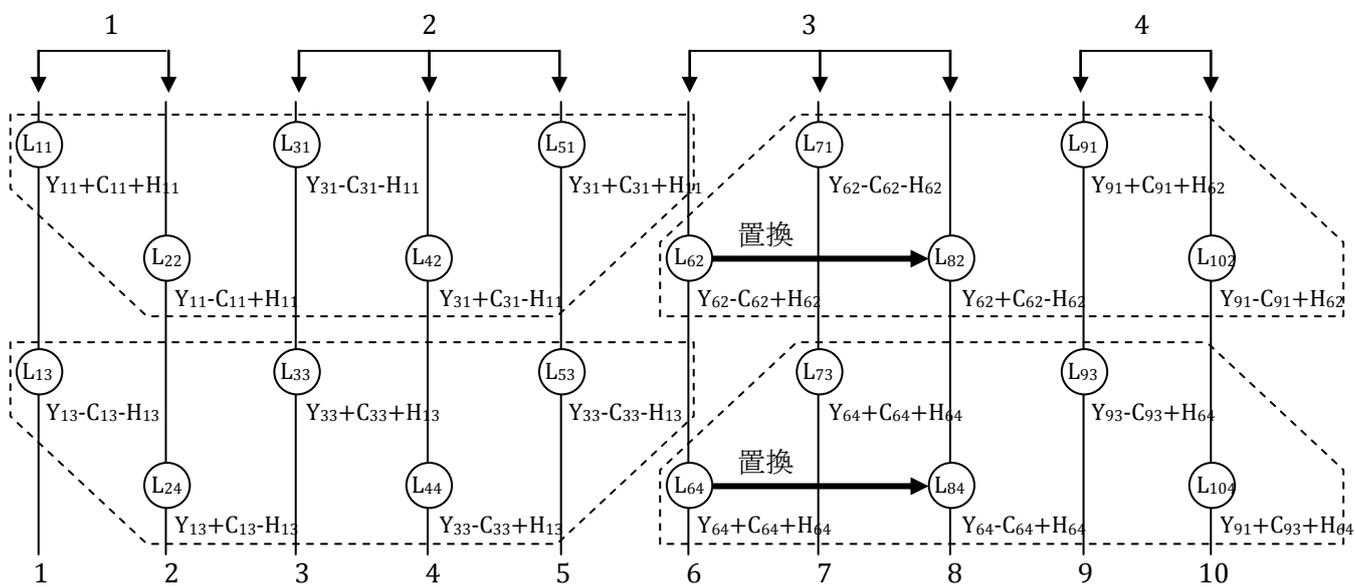
$$\begin{bmatrix} Y_{11} \\ Y_{31} \\ C_{11} \\ C_{31} \\ H_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 & -0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & -0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{22} \\ L_{31} \\ L_{42} \\ L_{51} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

第 6～第 10 フィールドについても同様に、5 ライン間のマトリクス演算によって信号多重を行う。この際、2-3-3-2 プルダウン形式になっているため、式(3.7)に示すマトリクス演算になる。

$$\begin{bmatrix} L_{62} \\ L_{71} \\ L_{82} \\ L_{91} \\ L_{102} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{62} \\ Y_{91} \\ C_{62} \\ C_{91} \\ H_{62} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$



(a)フィルムモード Y, C 多重



(b)フィルムモード Y, C, HH 多重

図 3.15 提案する 2-3-3-2 プルダウン法

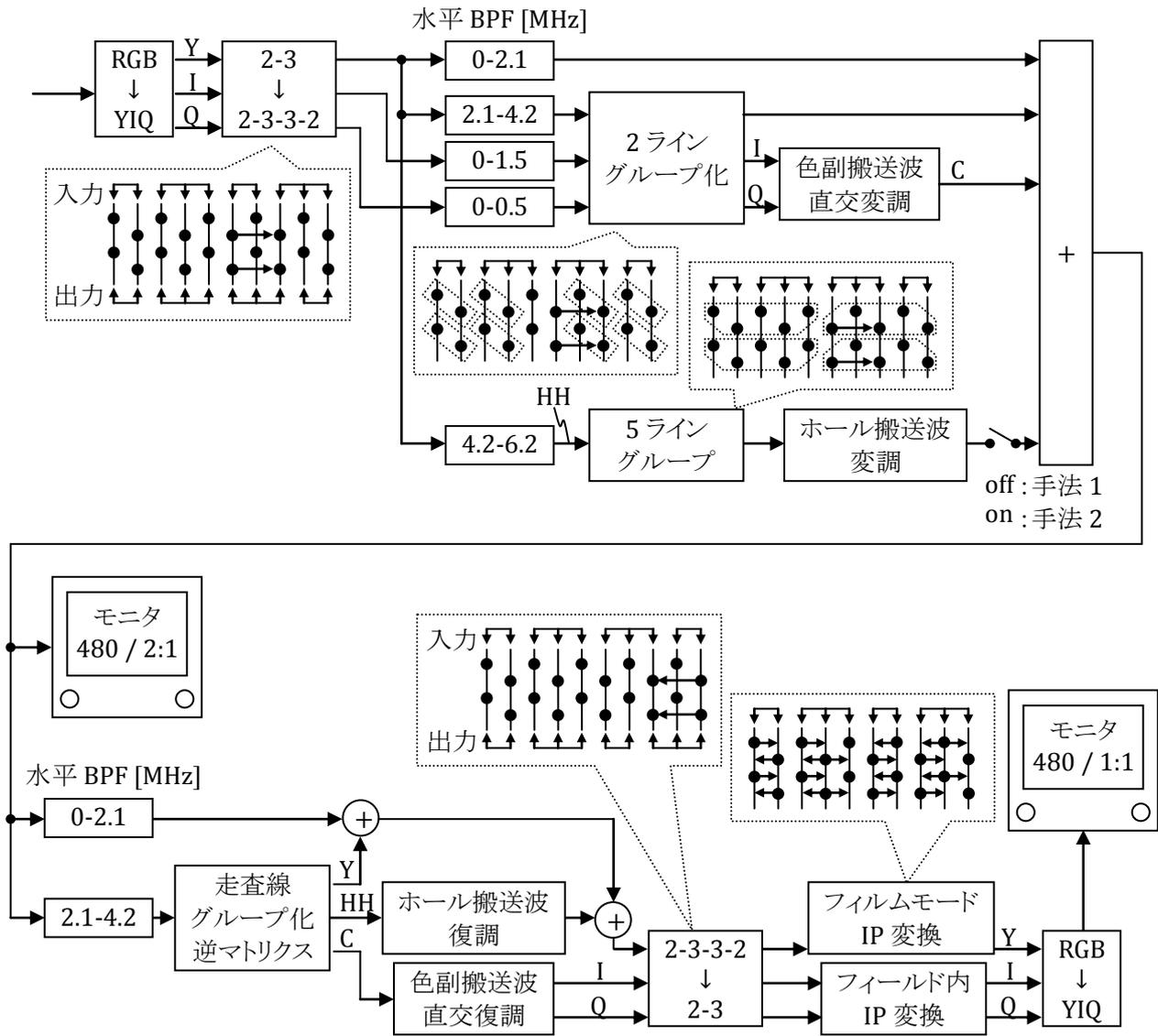


図 3.16 シミュレーション実験構成

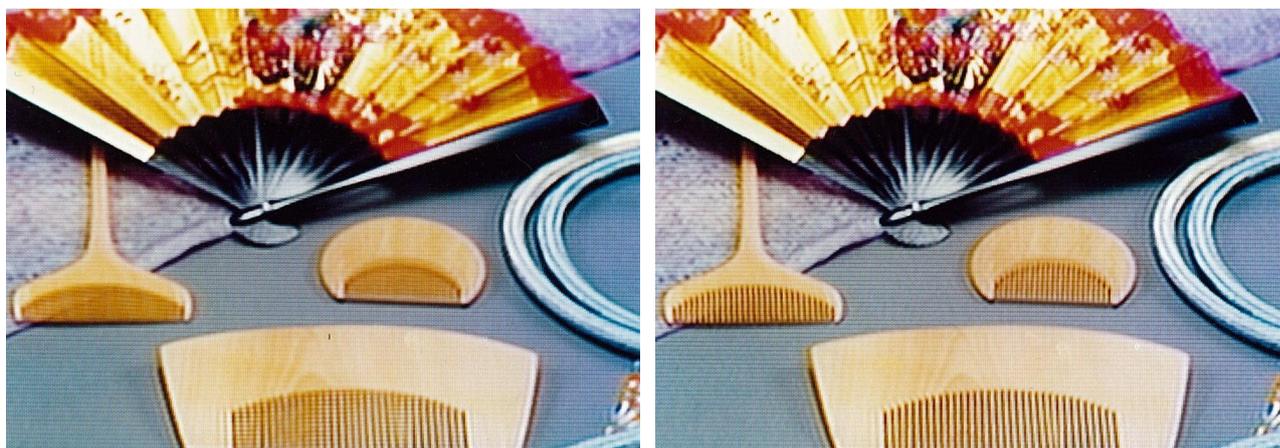
受信側では、走査線グループごとに式(3.8)の逆マトリクス演算を行うことによって、5つの信号(Y_{61} , Y_{81} , C_{61} , C_{81} , HH_{61})をクロストークなく分離することができる。

$$\begin{bmatrix} Y_{61} \\ Y_{81} \\ C_{61} \\ C_{81} \\ H_{61} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0.5 & 0 & -0.5 \\ -0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & -0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & -0.5 \\ 0.5 & -0.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{61} \\ L_{72} \\ L_{81} \\ L_{92} \\ L_{101} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

図 3.15(a)に示した Y, C 多重手法(以下、方式 1)、および同図(b)に示した Y, C, HH 多重・分離手法(以下、方式 2)について、図 3.16 に示す構成により、ソフトウェアシミュレーションによる画質確認実験を行った。なお、実際のテレビ装置が入手できなかったため、プログレッシブ走査カメラからの信号(60 フレーム/秒)を、2-3 プルダウン形式となるようにフレーム間引き・繰り返しを行ったのちに、さらに 2-3-3-2 プルダウン形式に変換し、上記マトリクス演算による信号多重を行った。



図 3.17 実験に用いた画像(原画)



(a)方式 1 (水平解像度補強信号なし)

(b)方式 2 (水平解像度補強信号あり)

図 3.18 提案手法による再生画像

受信側では、逆マトリクス演算による信号分離ののちに、第 10 フィールドの画像を第 8 フィールドにコピーすることによって 2-3-3-2 プルダウン形式から 2-3 プルダウン形式に逆変換を行い、輝度信号(Y)については 3.3 節で述べたフィルムモード IP 変換を行い、色差信号(I, Q)についてはフィールド内 IP 変換を行って、再生画像とした。

図 3.17 に、実験に用いた画像(原画)を示す。この画像はもともと静止画だが、ソフトウェアシミュレーションにより、2 画素/フィルムフレームの速度で水平方向に移動させることにより動画を模擬した。

図 3.18(a)(b)に、図 3.15(a)に示した Y, C 多重手法(方式 1)、および同図(b)に示した Y, C, HH 多重・分離手法(方式 2)による再生画像をそれぞれ示す。いずれも動作原理のとおりに、信号間のクロストークは発生せず、静止領域と動領域の画質差も生じていない。また、方式 1 では割れて見えなかった櫛の歯部分が、方式 2 では明確に割れて見えるようになっており、HH 信号による水平解像度の改善効果が表れている。

一方、現行受像機では、2-3-3-2 プルダウン形式の画像をそのまま見ることになる。2-3 プルダウン形式では画像の動きが5フィールド周期になるのに対し、2-3-3-2 プルダウン形式では画像の動きが10フィールド周期になるため、画像の動く速度を変化させて、現行受像機で両者の違いを観察した。まず、2画素/フィルムフレーム以下のゆっくりした速度で画像を水平に動かしたときには、2-3 プルダウン形式と2-3-3-2 プルダウン形式の画像の間に、画質差は感じなかった。8画素/フィルムフレーム以上の早い動きでは、双方ともにモーションジャダーが激しく出るため、両者の差はマスクされて、やはり画質差は感じなかった。その中間の速度の動きでは、2-3-3-2 プルダウン形式のほうがモーションジャダーを多く感じられるが、両者の差は「わかるが気にならない」程度であった。

3.6 フィルムモード識別制御信号

3.2節で述べたように、受信側の信号処理によって、2-3 プルダウンの信号であることを識別できる。その一方で、3.3節で述べたように、テロップが2-3 プルダウンの周期性と無関係に挿入された場合などに、受信側の2-3 プルダウン検出だけでは限界があることがわかっている。そこで、本節では、EDTV-IIの標準化作業の過程で検討された「識別制御信号」^[6]、60]の一部として、送信側から「フィルムモード識別制御信号」^[61]、62]、63]、64]を伝送することを想定し、その信号パターン(ビット系列)の最適化について検討する。

フィルムモード識別制御信号として、次の条件を満足する必要がある。

- (1) フィルム画像信号(すなわち、フィルムモード信号処理が有効な信号)なのか否かを識別可能なこと
- (2) 2-3 プルダウン位相を識別可能なこと
- (3) 1フィールドあたり1ビット以下であること
- (4) 2-3 プルダウンの性質が途中で崩れた場合にも、矛盾無く動作すること
- (5) 上記識別のために、大きな遅延を生じないこと
- (6) 「24コマ/秒」の場合も、「30コマ/秒」の場合も、共通で使用できること

条件(3)は、EDTV-IIで検討された識別制御信号の伝送容量の制約によるものである。条件(4)は、番組の開始・終了時や、コマーシャル番組(CM)の挿入などを想定したものである。条件(5)は、識別に要する遅延量に合わせて、画像信号の遅延量が増えるのを防ぐためである。なお、2-3 プルダウン位相とは無関係にテロップ等が挿入された場合には、フィルムモード識別制御信号は「一般の画像」を示すこととする。条件(6)については後述する。

まず、単純に条件(1)だけを考慮すると、フィールドごとの識別制御信号の値を、フィルム画像信号の場合には「1」、一般の画像信号の場合には「0」としたい。しかし、条件(2)(3)により、1フィールドあたり1ビットの識別制御信号だけでプルダウン位相も同時に識別するためには、2-3 プルダウンの1周期(5フィールド)のうち少なくとも1ビットは、他と区別して「0」とする必要がある。

この「0」の位相によっては、フィルムモードIP変換(3.3節)が可能であることを判定するために要する遅延時間が増えてしまう場合がある。例えば、1周期(5フィールド)のビット系列を「1, 1, 1, 0, 1」とした場合について考えてみる。このとき、第1・第2フィールドでは、識別制御信号の値がともに「1」であるため、フィルム画像信号であることが判り、第2フィールドの識別制御信号が伝送された時点で、第1フィールドの走査線補間処理を開始できる。すなわち、遅延時間は、走査線補間のために原理的に必要な1フィールドだけとなる。ところが、次の第3・第4フィールドでは、第4フィールドの識別制御信号が「0」であるため、この時

点では、フィルムモード制御信号なのか、それとも一般の信号に切り替わったのかを識別できず、第5フィールドの識別制御信号が「1」であることを確認するまで第3フィールドの走査線補間処理を開始できない。従って、モード判定に必要な遅延時間は2フィールドになる。

このように、識別制御信号のビット系列によって、モード判定に要する遅延時間が異なる。参考のため、1周期(5フィールド)を表すビット系列のすべてのパターン($2^5=32$ とおり)について、モード判定に必要な遅延フィールド数を同様の方法で求め、表3.3にまとめて示す。これによると、第2・第4フィールドの識別制御信号が「1」の場合に遅延が最小(1フィールド)となる。これは、前述したように、第2・第4フィールドの「1」を確認した時点で、第1・第3フィールドの走査線補間を開始できるためである。

表 3.3 2-3 プルダウン信号を識別するために必要なフィールド数

識別制御信号系列 1 2 3 4 5	遅延する フィールド数	備考
0 0 0 0 0	—	2-3プルダウン信号の識別不可
0 0 0 0 1	4	
0 0 0 1 0	3	
0 0 0 1 1	3	
0 0 1 0 0	5	
0 0 1 0 1	2	
0 0 1 1 0	2	
0 0 1 1 1	2	
0 1 0 0 0	4	第2, 第4ビット = 「1」 第2, 第4ビット = 「1」、推奨案
0 1 0 0 1	2	
0 1 0 1 0	1	
0 1 0 1 1	1	
0 1 1 0 0	4	第2, 第4ビット = 「1」 第2, 第4ビット = 「1」
0 1 1 0 1	2	
0 1 1 1 0	1	
0 1 1 1 1	1	
1 0 0 0 0	5	
1 0 0 0 1	4	
1 0 0 1 0	3	
1 0 0 1 1	3	
1 0 1 0 0	3	
1 0 1 0 1	2	
1 0 1 1 0	2	
1 0 1 1 1	2	
1 1 0 0 0	3	第2, 第4ビット = 「1」 第2, 第4ビット = 「1」
1 1 0 0 1	2	
1 1 0 1 0	1	
1 1 0 1 1	1	
1 1 1 0 0	3	第2, 第4ビット = 「1」 プルダウン位相の識別不可
1 1 1 0 1	2	
1 1 1 1 0	1	
1 1 1 1 1	—	

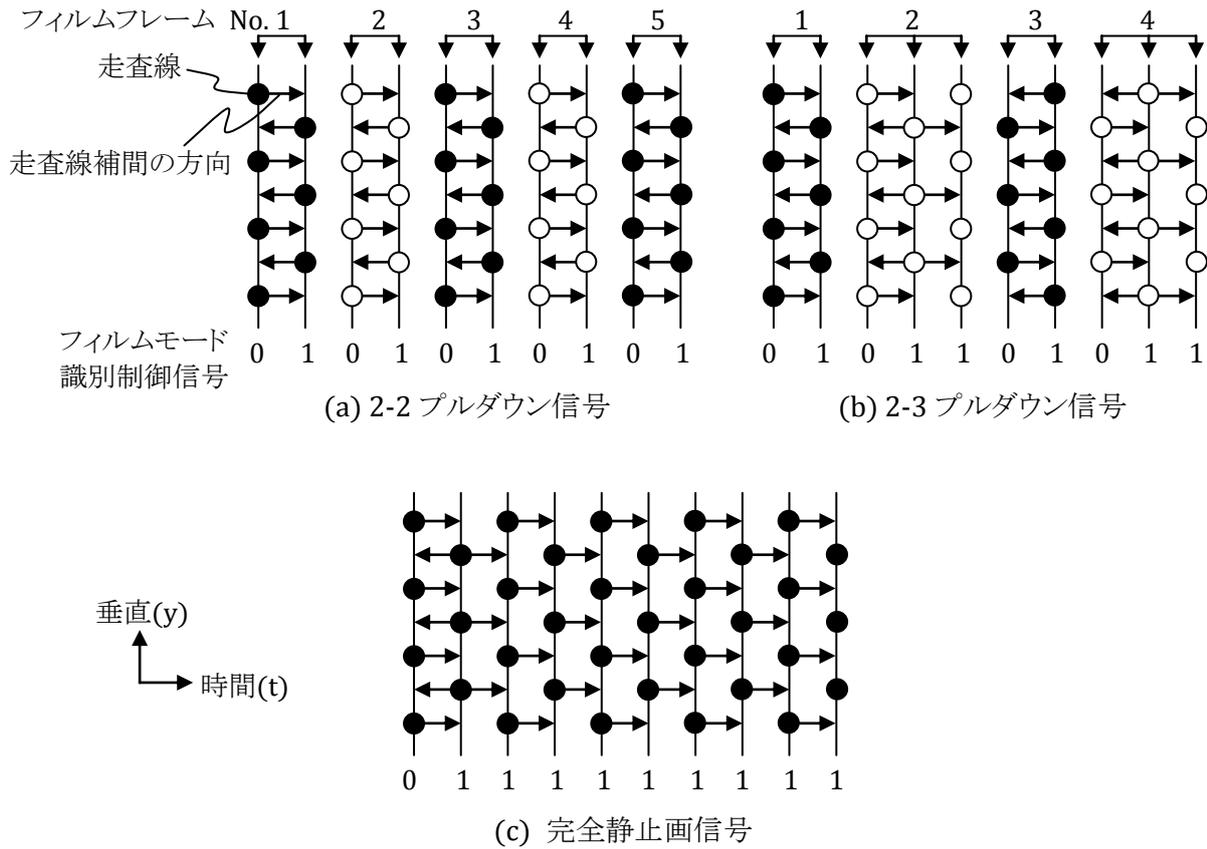


図 3.19 フィルムモード識別制御信号と IP 変換における走査線補間の方向

また、フィルム画像には、前述した映画等で一般に用いられる「24コマ/秒」の素材とともに、最初からTV用に制作されたコマーシャル番組やドラマ番組等に用いられる「30コマ/秒」の素材がある [65]。そこで、フィルムモード識別制御信号には、上記の条件(6)が必要になる。

「30コマ/秒」のフィルム画像では、1周期が2フィールドとなる。前述した条件(1)(2)、および遅延を最小(1フィールド)とするために第2フィールドの識別制御信号を「1」とすると、図 3.19(a)に示すように、1周期(2フィールド)のビット系列は、プルダウン位相に合わせて「0, 1」とするしかない。「30コマ/秒」のフィルム画像に対してフィルムモード IP 変換する際には、識別制御信号が「0」のときは後フィールドから走査線補間し、識別制御信号が「1」のときは前フィールドから走査線補間すればよい。

「24コマ/秒」のフィルム画像の識別制御信号についても、「30コマ/秒」の識別制御信号と整合させながら、前述した条件(1)～(6)を満たすために、同じ画像が前フィールドと連続している場合に識別制御信号を「1」とし、不連続(あるいは、後ろフィールドと同じ画像)の場合に「0」とすればよい。このとき、図 3.19(b)に示すように、1周期(5フィールド)のビット系列は、プルダウン位相に合わせて「0, 1, 0, 1, 1」となる。フィルムモード IP 変換する際には、識別制御信号が「0」のときは後フィールドから走査線補間し、識別制御信号が「1」のときは前フィールドから走査線補間すればよい。

同様に、フリーズ画像や CG (Computer Graphic)などで生成した完全静止画の場合には、図 3.19(c)に示すように、最初のフィールドだけは不連続のため識別制御信号を「0」とし、それ以降の画像が静止している期間は「1」が連続するビット系列とすればよい。

以上述べたように、提案するフィルムモード識別制御信号は、フィールドあたり 1 ビットの情報量で伝送でき、フィルム画像と一般の画像が途中で切り替わっても矛盾なく動作するとともに、識別に必要な遅延時間を小さくできる。また、24 コマ/秒のフィルム画像だけでなく、30 コマ/秒、完全静止画とも整合性がよい。

3.7 まとめ

本章では、映画のような毎秒 24 コマのフィルム素材から変換された映像信号の特徴に着目した画質改善について述べた。

1980 年代後半に、いくつかの機関からほぼ同時に提案されたフィルムモード IP 変換は、動領域でも静止領域と同じ走査線補間処理を行うため原理的に静動間の画質差は生じないが、ノイズを含んだ伝送信号から、その信号がもともとフィルム素材(2-3 プルダウン)であることと、フィルムフレームが完結するフィールド境界(プルダウン位相)を、安定して正しく検出できるようにすることが課題であった。また、フィルムモード IP 変換に関する従来の提案は、いずれも特許出願のみに留まっており、ハードウェアによる検討や、画質改善効果の定量的な評価結果は報告されていなかった。

そこで筆者は、世界で初めてフィルムモード IP 変換のハードウェアを試作し、技術の実現性を確認した。また、フィルムモード YC 分離、信号間のクロストークが原理的に発生しないフィルムモード信号多重・分離などの技術を開発した。以下、これらの結果をまとめて示す。

第 1 に、24 コマ/秒のフィルム画像から変換された TV 信号か否かを受信側で検出する「2-3 プルダウン検出手法」に関して、ハードウェアを試作して動作を確認した。この際に、2-3 プルダウン検出に、動きの孤立点除去のためのエアフィルタとヒステリシス回路を追加することにより、フィルムモード IP 変換と動き適応 IP 変換(従来技術)が頻繁に切り替わることによる不自然さをなくした。その結果、レーザディスク(LD)の映画ソフト(10 本)、および NTSC 方式で放送された映画番組(2 本)について、「2-3 プルダウン信号であること」と「2-3 プルダウン位相」が安定して検出できることを確認した。

第 2 に、元のフィルムの 1 コマ(フィルムフレーム)ごとに処理が完結するような形態で、画像の静動に関わらず常に前後のフィールドを用いてフレームを生成する「フィルムモード IP 変換手法」に関して、ハードウェア試作による動作確認実験と主観評価実験を行った。その結果、従来の動き適応 IP 変換に比べて、7 段階品質評価尺度で平均 1~1.5 ランク程度の画質改善効果があることを確認した。一方、字幕や臨時ニュース等のテロップが 2-3 プルダウンの周期性と無関係に TV 画像に挿入(スーパーインポーズ)されたときに問題が発生することを示し、その対策案も併せて示した。

第 3 に、1 フィルムフレームの期間(2 あるいは 3 フィールドの期間)は画像が動かないという特徴を利用して、フィルムフレームごとに処理が完結する 2 種類の「フィルムフレーム YC 分離手法」を提案し、ハードウェアを試作して画質を確認した。その結果、提案する 2 方式ともに、同一のフィルムフレームから生成された第 3 フィールドと第 5 フィールドについては常にフレーム間 YC 分離を行うため、従来の動き適応 YC 分離よりも輝度の斜め解像度が大幅に改善された。その一方で、残り(第 1、第 2、第 4)のフィールドでは動領域で輝度の斜め成分がクロスカラーになるため、画像が動くとき若干のフリッカが発生することがわかった。また、提案する 2 方式を比較した結果、斜め解像度を向上するよりも、YC 分離後の重心位置が本来の走査線の位置から 1/2 ラインずれることに起因する市松模様の妨害を抑えるほうがよいことがわかり、2 フィールドからなるフィルムフレームについては従来の動き適応 YC 分離を行うのが好ましいことを確認した。

第4に、フィルムフレームの周期に合わせて複数の走査線をグループ化し、そのグループ内では同一の輝度信号(Y)、色信号(C)、水平解像度補強信号(HH)を用いることによって、クロストークを生じることなく各信号を分離可能な「フィルムモード信号多重・分離手法」を提案し、ソフトウェアシミュレーションによって画質を確認した。この中で、撮像された2-3プルダウン信号を「2-3-3-2プルダウン形式」に変換したのちに走査線グループ化して伝送する必要性について述べ、この影響を確認する実験も行った。その結果、走査線を2ラインずつグループ化してY信号とC信号を多重する方式1と、走査線を5ラインずつグループ化してY信号、C信号、HH信号を多重する方式2について、いずれも動作原理のとおり、信号間のクロストークは発生せず、静止領域と動領域の画質差も生じないことを確認した。また、方式2では、HH信号による水平解像度の改善効果(4.2MHz→6.2MHz)があることを確認した。また、現行受像機において2-3プルダウン形式と2-3-3-2プルダウン形式の画像を比較した。その結果、2画素/フィルムフレーム以下のゆっくりした動きと8画素/フィルムフレーム以上の早い動きでは両者の間に画質差は感じず、その中間の速度の動きでは2-3-3-2プルダウン形式のほうがモーションジャダーを多く感じられるが、両者の差は「わかるが気にならない」程度であることを確認した。

第5に、送信側から「フィルムモード識別制御信号」を伝送することを想定し、その信号パターン(ビット系列)の最適化について検討した。その結果、同じ画像(フィルムフレーム)が前フィールドと連続している場合に識別制御信号を「1」とし、不連続(あるいは、後ろフィールドと同じ画像)の場合に「0」とするビット系列が最適であることを示した。また、このフィルムモード識別制御信号は、フィールドあたり1ビットの情報量で伝送でき、フィルム画像と一般の画像が途中で切り替わっても矛盾なく動作し、識別に必要な遅延時間を小さくできるとともに、24コマ/秒のフィルム画像だけでなく、30コマ/秒、完全静止画とも整合性がよいことを示した。

このような研究成果がもとになって、EDTV-II用に定義された識別制御信号の中の1ビットがフィルムモード表示を想定して留保され、BTAに専門の技術検討作業班を設置して標準化検討された^[6]。最終的には、「放送局での安定した運用が困難」などの理由によりEDTV-II規格に採用されなかったが、受信側だけの処理だけで実現できるフィルムモードIP変換は、現在、各メーカーが発売する数多くのデジタルTVや、HDD(Hard Disk Drive)、DVD(Digital Versatile Disc)、BD(Blu-ray Disc)等のプレーヤ・レコーダに搭載され、世界中で広く利用されている。

第4章 TVのワイドアスペクト化

4.1 緒言

1991年のアナログハイビジョン放送(MUSE方式)の開始に伴い、TV画面のアスペクト比(横と縦の長さの比)にも人々の関心が集まった。従来の4:3から16:9にワイドアスペクト化することにより、ワイドTVの所有者が先進的で洗練された商品イメージを体感することができ、また、従来(4:3)のTVの所有者に対して、(TVの電源を切っけていても)、その先進的な商品イメージを明確にアピールできるということもあって、1990年代の中頃には、ワイドTVが一種のステータスシンボルになっていった。

このような背景のもと、第2世代EDTV(EDTV-II)の標準化活動の中でも、TV画面のワイド化について検討が進められた。現行のNTSC方式との両立性を保つ必要のないハイビジョン放送(MUSE方式)の場合と異なり、NTSC方式との両立性を保ったまま高画質化することを主目的としたEDTVの場合は、アスペクト比が4:3の現行受像機とワイドアスペクト(16:9)のEDTV受像機の両方で同じTV放送を受信し、どちらの受像機でも違和感なく番組を視聴できるようにする必要がある。すなわち、現行受像機上の再生画像を破綻させることなく、専用のワイド受像機では現行受像機以上の高画質を得ることが課題である。

ワイド化の手法として、下記(a)~(c)の3形式がBTA(放送技術開発協議会、現在はARIB(電波産業会))に提案された⁶⁾。

- (a) レターボックス形式
- (b) サイドパネル形式
- (c) 中間形式

以下、各形式の概要を説明する。

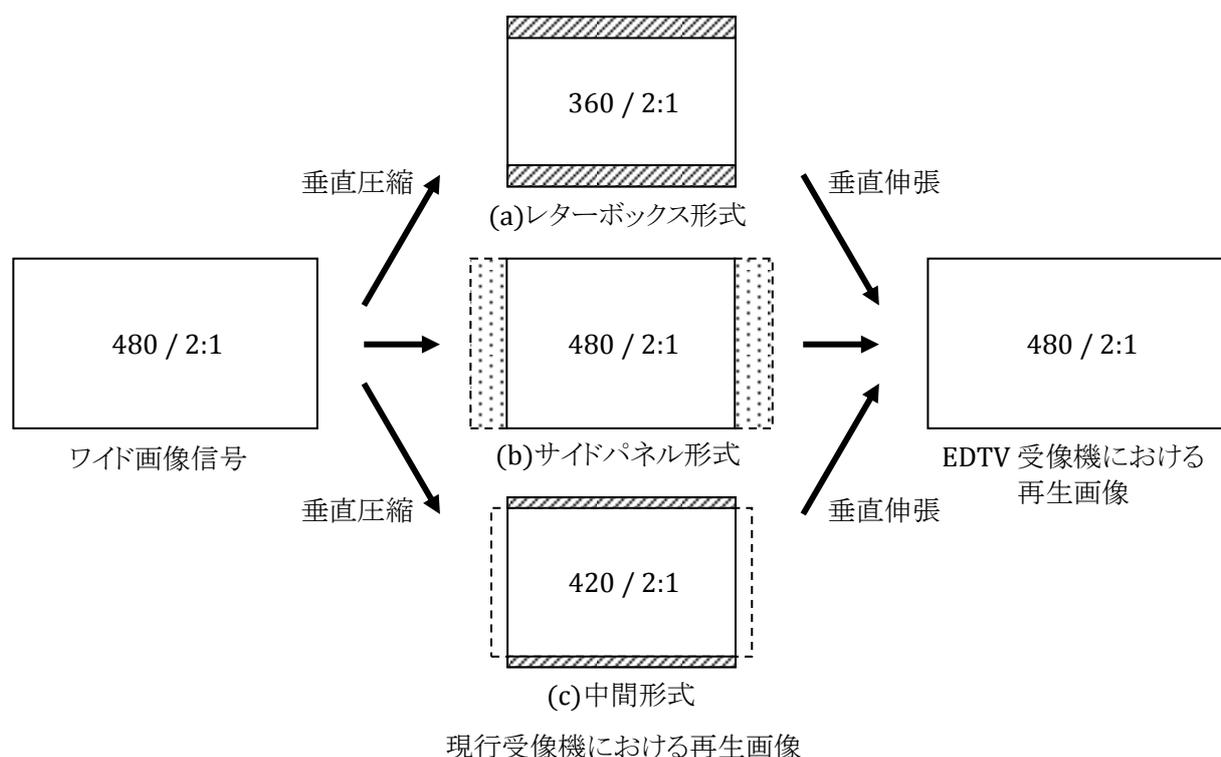


図 4.1 ワイドアスペクト化手法

(a)レターボックス形式は、図 4.1(a)に示すように、ワイド信号を垂直方向に圧縮し、アスペクト比が 4:3 の現行受像機でもワイドの全画面が見えるようにしたものである。このとき、現行受像機では、画面の上下に無画部が生じる。放送局の運用の観点からは、現行モニタで全画面が見えるためカメラ操作が容易であり、現行スタジオ機器、伝送システム、放送番組とも両立性があるという特徴がある。技術的には、上下の無画部に高画質化情報などの新たな信号を多重できる利点がある。このとき、もともと同一位置にあった信号が空間的に異なる無画部に多重されることになるため、画像編集装置等では特別な処理が必要になる。

(b)サイドパネル形式は、図 4.1(b)に示すように、ワイド画像のうちセンター部のみが現行受像機で表示されるように伝送し、サイドパネル部は別途伝送するものである。従来のアスペクト比(4:3)からワイドアスペクト(16:9)に移行する形態としては、視聴者にとって最も自然に受け入れられやすいと考えられる。一方、技術的に見ると、サイドパネル信号の伝送方法をどうするか、センター部とサイドパネル部のつなぎ目をシームレスにできるかなど、解決すべき課題が多い。また、放送局の運用の観点から見ると、サイドパネル信号の多重を送出の直前で行う場合、スタジオ内において、現行アスペクトの信号とワイドアスペクトの信号が混在するといった問題も生じる。

(c)中間形式は、図 4.1(c)に示すように、垂直方向の圧縮率を減らして上下の無画部を小さくすることによって、レターボックス形式の不自然さを軽減する目的で考案された。技術的や運用上の観点からは、上記(1)(2)の中間的な(あるいは両方の)特徴を持つ。

BTA では、これらの 3 形式について、1991 年 7 月に TV 技術者と一般視聴者による評価実験を実施した。これと並行して、放送局の現場への技術アンケートも実施した。その結果、レターボックス形式の優位性が確認され、以後の審議ではレターボックス形式を前提として検討していくこととなった。本稿でも、以下、レターボックス形式について論じる。

本章では、まずレターボックス形式の特徴である走査線数変換について整理し、補強信号生成の最適構成について解説する。次に、垂直解像度補強信号(VH)の生成方法について検討を加え、ポリフェーズフィルタ^[66]と呼ばれる一般的なフィルタを用いた VH 信号生成手法と、その問題点について解説する。

ポリフェーズフィルタは、 M/N 倍(ただし、 M, N は正整数)のような柔軟な画像サイズ変換(拡大、縮小)を実現できるため、一般に広く用いられている。しかし、後述のように、ポリフェーズフィルタを単純に組み合わせただけでは、完全な逆変換特性を実現できず、送信側の走査線数変換(縮小)と受信側の逆変換(拡大)を通じて再構成された画像に歪が残留してしまう問題がある。この問題は、4.3 節で詳しく述べる。

一方、走査線数変換およびその逆変換を通じて歪がまったく発生しないという特性を持つ完全再構成フィルタバンク^[29;30]が数多く検討されている。しかし、そのすべてが $1/N$ 倍(ただし、 N は正整数)などの整数画素単位の間引き・補間を行うものであったため、4.2 節で述べるように $3/4$ 倍および $4/3$ 倍の走査線数変換が必要な今回の用途には使えない。

そこで、4.3 節にて、送信側の走査線数変換と受信側の逆変換を通じて完全再構成の特性を実現でき、なおかつ $3/4$ 倍などの非整数倍の走査線数変換を実現できる新手法を提案する。

4.4 節にて、垂直-時間解像度補強信号(VT)の生成手法を分類し、各種の VT 信号に対する伝送ノイズの影響を理論的に明らかにし、伝送ノイズの影響を抑えた VT 信号生成手法を提案する。これと併せて、コアリングを用いたノイズ低減手法を提案する。なお、VH 信号と VT 信号の多重手法^[67]や、現行受像機への妨害低減手法^[68]については、鈴木、木俣らがそれぞれ詳しく検討しているので、本稿の対象外とする。

4.2 レターボックス形式に伴う走査線数変換の解析

レターボックス形式では、送信側にて、ワイドアスペクト(16:9)のTVカメラで撮影した有効走査線480本の画像信号を垂直方向に3/4倍(360本)に縮小して主信号とし、現行アスペクト(4:3)の画面中央の主画面部に配置して伝送する。現行受像機では無画面も含めて画像再生することになる。一方、ワイド受像機では、主信号を垂直方向に4/3倍に拡大し、走査線数を480本に戻して再生する。

まず、プログレッシブ走査信号とインタレース走査信号のそれぞれについて、走査線数変換で生じる現象¹⁶⁹⁾を解説する。

4.2.1 プログレッシブ走査信号における走査線数変換のふるまい

プログレッシブ走査信号における走査線数変換の動作¹⁶⁹⁾を、図4.2に示す。走査線数を3/4倍に変換(縮小)する場合、一旦3倍の走査線数にアップサンプリングしたのちに、垂直方向のローパスフィルタをかけ、1/4の走査線数にダウンサンプリングする。以下、この処理の内容を、同図にて詳しく説明する。

同図(a)は、実行走査線数480本の原信号を示したものである。

同図(b)は、3倍の走査線数(1440本)にアップサンプリングするために、仮想的な零信号(●印)を挿入したところである。

同図(c)は、垂直方向のローパスフィルタのタップ係数の一例を示している。このフィルタのタップ数とタップ係数を設定することによって、走査線数変換の周波数特性を制御することができる。

同図(d)は、アップサンプリング後の1440本の信号に対して、垂直方向のローパスフィルタをかけた結果を示している。

同図(e)は、1440本の走査線数から、1/4の360本にダウンサンプリングした結果を示している。同図(a)と比較してみると、走査線数が3/4になっていることがわかる。

同図(f)～(j)は、上記の処理を周波数領域で表したものであり、それぞれ同図(a)～(e)と対応する。

同図(f)は、実行走査線480本の原信号の周波数スペクトルを示す。このとき、標本化周波数は480cph (cycle per height)である。

同図(g)は、3倍アップサンプリングにより、標本化周波数が1440cph (=480*3)に移ったことを示している。なお、同図(b)に示したように零信号を挿入しただけなので、信号のスペクトルは変化しない。

同図(h)は、垂直方向のローパスフィルタの周波数特性を示しており、斜線部が通過域である。

同図(i)は、アップサンプリング後の信号に対して、垂直方向のローパスフィルタをかけた結果の周波数スペクトルを示している。

同図(j)は、1/4間引きにより、標本化周波数が360cph (=1440/4)に移ったことを示している。同図(h)に示した垂直方向のローパスフィルタの通過域が180cph以下になるように設定すれば、原信号のスペクトル(0～180cph)と、標本化周波数(360cph)によって折り返されたスペクトル(360～180cph)が重ならず、折り返し歪は発生しないことがわかる。

図4.3(a)に示すプログレッシブ走査信号に対し、前述した手順に従って走査線数を3/4倍に変換した結果を、同図(b)に示す。

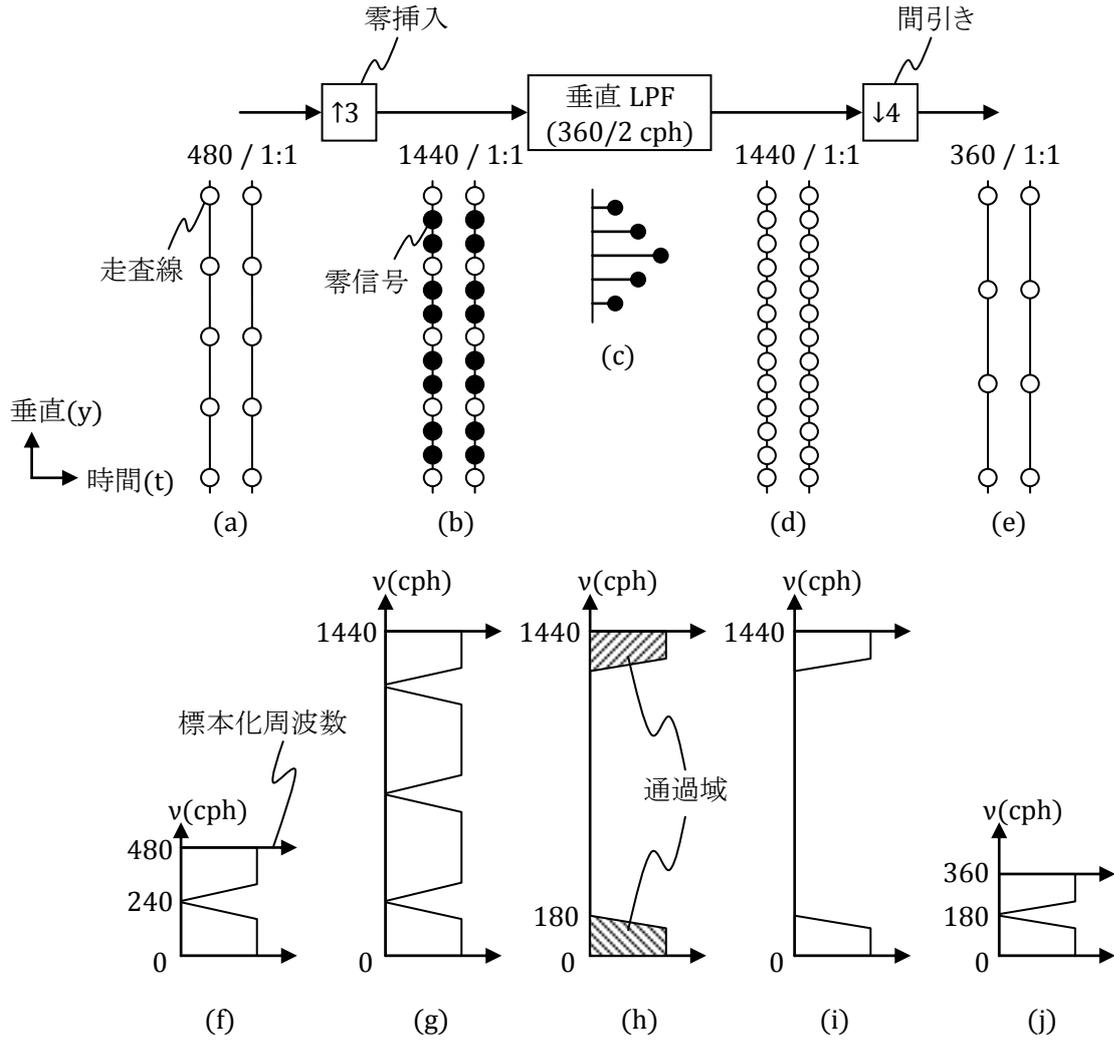
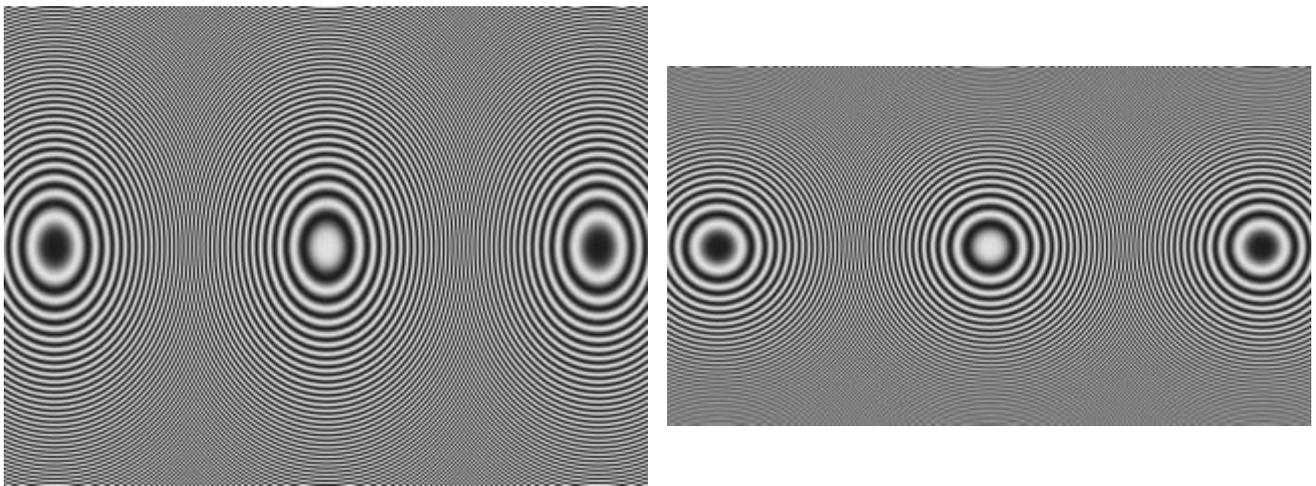


図 4.2 プログレッシブ走査信号における走査線数変換の動作 (垂直 3/4 倍)



(a)入力画像

(b)出力画像

図 4.3 プログレッシブ走査信号における走査線数変換結果の一例 (垂直 3/4 倍)

4.2.2 インタレース走査信号における走査線数変換のふるまい

インタレース走査信号における走査線数変換の動作¹⁶⁹⁾を、図 4.4 に示す。前述したプログレッシブ走査信号の場合とは異なり、フィールドごとに走査線を間引く位置(位相)が異なることがわかる。従って、垂直方向だけでなく、時間方向も含めた 2 次元領域で特性解析する必要がある。以下、この処理の内容を、同図にて詳しく説明する。

同図(a)は、インタレース走査形態で実行走査線数 480 本の原信号を示したものである。このとき、フィールドごとに 240 本の走査線数になっている。

同図(b)は、変換後の信号についてもインタレース形態になるように、垂直方向の位置(位相)に注意して仮想的な零信号(●印)を挿入し、フィールドごとに 6 倍の走査線数(1440 本)にアップサンプリングしたところである。

同図(c)は、垂直方向のローパスフィルタのタップ係数の一例を示している。

同図(d)は、アップサンプリング後の 1440 本の信号に対して、垂直方向のローパスフィルタをかけた結果を示している。

同図(e)は、1440 本の走査線数から、フィールドごとに 1/8 の 180 本にダウンサンプリングした結果を示している。同図(a)と比較してみると、走査線数が $6/8 (=3/4)$ になっていることがわかる。

同図(f)~(j)は、上記の処理を周波数領域で表したものであり、それぞれ同図(a)~(e)と対応する。

同図(f)は、フィールドごとに実行走査線 480 本の原信号の周波数スペクトルを示す。インタレース走査信号のため、(時間周波数 f , 垂直周波数 v) = (30Hz, 240cph)が、標本化周波数である。

同図(g)は、6 倍アップサンプリングにより、標本化周波数が 1440cph (=240*6)に移ったことを示している。なお、同図(b)に示したように零信号を挿入しただけなので、信号のスペクトルは変化しない。

同図(h)は、垂直方向のローパスフィルタの周波数特性を示しており、斜線部が通過域である。

同図(i)は、アップサンプリング後の信号に対して、垂直方向のローパスフィルタをかけた結果の周波数スペクトルを示している。このとき、通過域内に折り返し成分が含まれることになる。

同図(j)は、1/8 間引きにより、標本化周波数が(30Hz, 180cph)に移ったことを示している。このとき、原信号における(f, v) = (0Hz, 240cph)の周波数成分が(0Hz, 180cph)に変換され、歪として残留してしまうことがわかる。

図 4.5(a)に示すインタレース走査信号に対し、前述した手順に従って、走査線数を 3/4 倍に変換した結果を、同図(b)に示す。画面の上下端の垂直周波数成分、すなわち原信号における 240cph の成分が残留するとともに、中間の垂直周波数成分に中抜けが生じてしまっていることがわかる。

4.2.3 走査線数変換に伴う補強信号生成の最適構成

前項で述べたように、走査線数変換は、プログレッシブ走査にて行う必要がある。従って、インタレース走査信号の場合には、一旦プログレッシブ走査信号に変換したのちに、走査線数変換を行うことになる。しかしながら、3 章で述べたような動き検出の不完全さなどにより、インタレース走査信号をプログレッシブ走査信号に誤動作なく変換することは困難なため、プログレッシブ走査カメラを信号源とすることが望ましい。

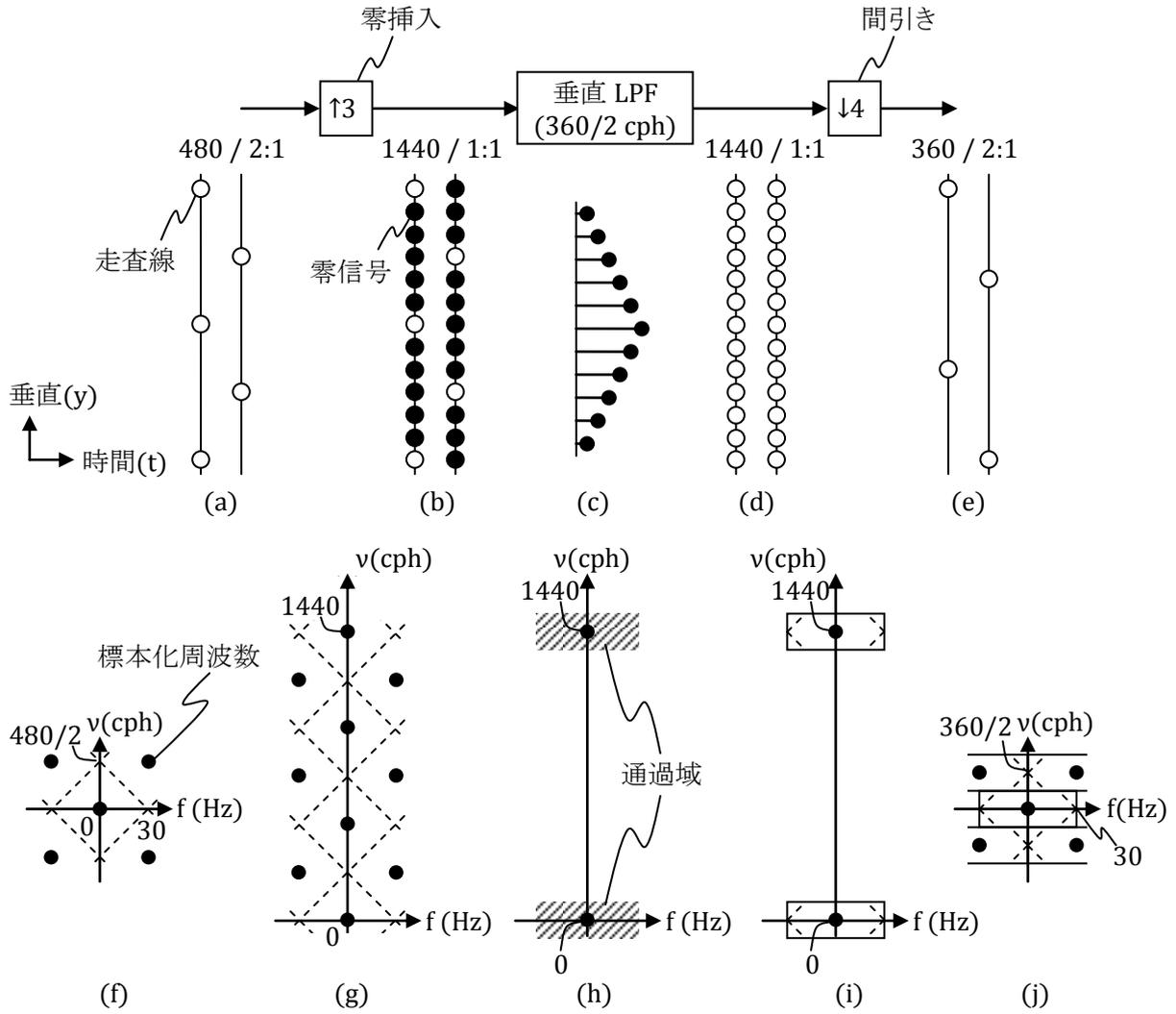
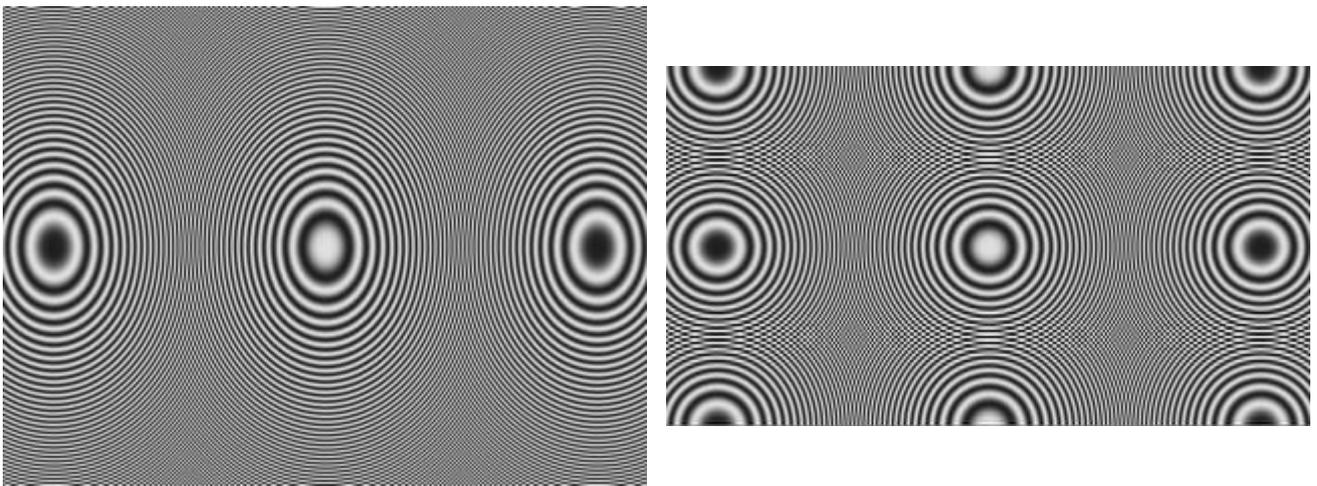


図 4.4 インタレース走査信号における走査線数変換の動作 (垂直 3/4 倍)



(a)入力画像

(b)出力画像

図 4.5 インタレース走査信号における走査線数変換結果の一例 (垂直 3/4 倍)

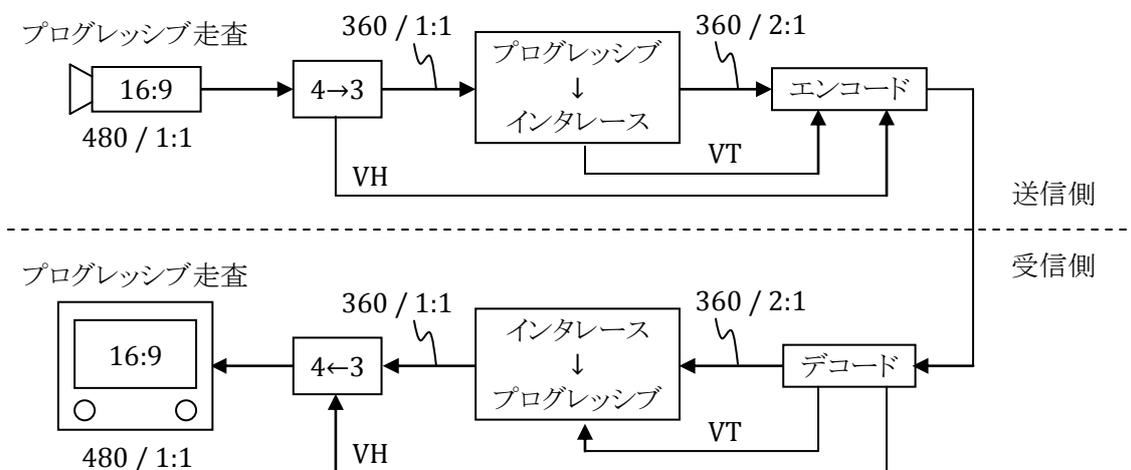


図 4.6 レターボックス形式ワイドアスペクト技術における最適システム構成

図 4.6 に、レターボックス形式ワイドアスペクト化技術における最適構成^[70]を示す。送信側では、プログレッシブ走査カメラからの信号(有効走査線数 480 本)を、垂直方向に 3/4 に縮小し、有効走査線数 360 本とする。この走査線数変換により失われてしまう垂直高域(180~240cph)の成分を、垂直解像度補強信号(VH)として受信側に伝送することにより、ワイド受像機にて元の 480 本の垂直解像度を再現する。この VH 信号の生成手法については、4.3 節にて詳しく述べる。また、3/4 縮小後の有効走査線数 360 本の信号については、プログレッシブ・インタレース走査変換を行い、レターボックス形式の画面中央部に配置して、主信号として伝送する。このとき、飛び越した走査線の信号を捨ててしまわず、垂直-時間解像度補強信号(VT)として受信側に伝送することにより、ワイド受像機にて完全なプログレッシブ走査信号を再現する。この VT 信号の生成手法については、4.4 節にて詳しく述べる。補強信号(VH 信号および VT 信号)は、レターボックス形式の画面上下の無画面部に目立たないように多重^[67; 68]して伝送し、受信側では上記と逆の手順により、走査線数 480 本のプログレッシブ走査信号を再生する。

4.3 垂直解像度補強信号(VH)

4.3.1 一般的なフィルタを用いた垂直解像度補強とその問題点

レターボックス形式では、ワイドカメラで撮影した有効走査線 480 本の画像信号を垂直方向に 3/4 倍(360 本)に縮小して主信号とし、現行アスペクト(4:3)の画面中央の主画部に配置して伝送する。このとき、図 4.2 に示したように、走査線 360 本の主画部を用いて、0~180cph の垂直周波数成分を伝送できる。

ワイド受像機では、主信号を垂直方向に 4/3 倍に拡大し、走査線数を 480 本に戻して再生する。このとき、単純にスケーリング(画像サイズ変換)を行うのではなく、垂直方向の縮小によって失われてしまう垂直高域(180~240cph)の成分を垂直解像度補強信号(VH)とし、現行画面(4:3)の上下の無画面部に配置して伝送することが BTA で検討された^[6]。すなわち、現行受像機上の再生画像を破綻させることなく、垂直解像度 480 本のワイド信号を再生できるようにすることが課題である。以下、VH 信号について検討を加える。

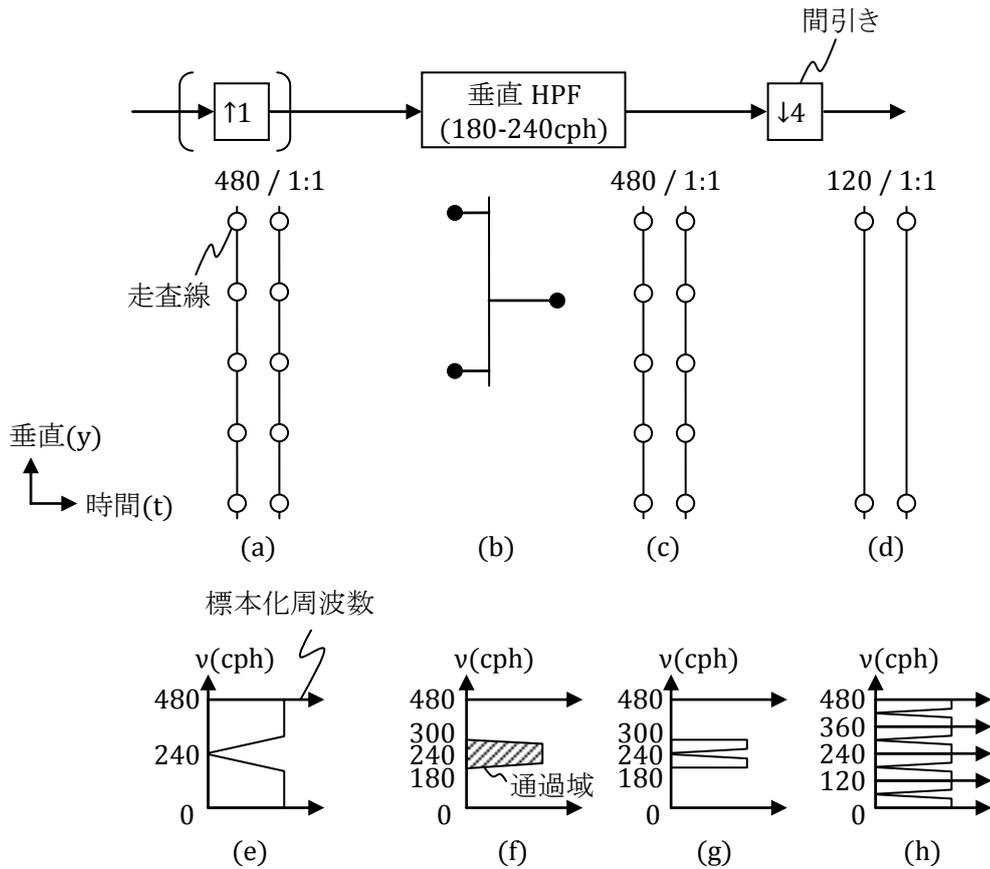


図 4.7 一般的なフィルタを用いた VH 信号生成の動作

一般的なフィルタを用いた VH 信号生成の動作を、図 4.7 に示す。この場合、上下の無画面部(走査線数 120 本)で VH 信号を伝送できるように、走査線数をもとの 1/4 に変換する必要がある。

同図(a)は、実行走査線数 480 本の原信号を示したものである。

同図(b)は、垂直方向のハイパスフィルタのタップ係数の一例を示している。

同図(c)は、垂直方向のハイパスフィルタをかけた結果を示している。

同図(d)は、480 本の走査線数から、1/4 の 120 本にダウンサンプリングした結果を示している。

同図(e)～(h)は、前述した処理を周波数スペクトルで表したものであり、それぞれ同図(a)～(d)と対応している。

同図(e)は、実行走査線 480 本の原信号の周波数スペクトルを示す。480cph (cycle per height)が、標本化周波数である。

同図(f)は、垂直方向のハイパスフィルタの周波数特性を示しており、斜線部が通過域である。

同図(g)は、垂直方向のローパスフィルタをかけた結果の周波数スペクトルを示している。

同図(h)は、1/4 間引きにより、標本化周波数が 120cph に移ったことを示している。ここで、同図(h)に示した垂直方向のローパスフィルタの通過域を 60cph 以下に設定しておけば、折り返し歪を発生させずに周波数変換できる。

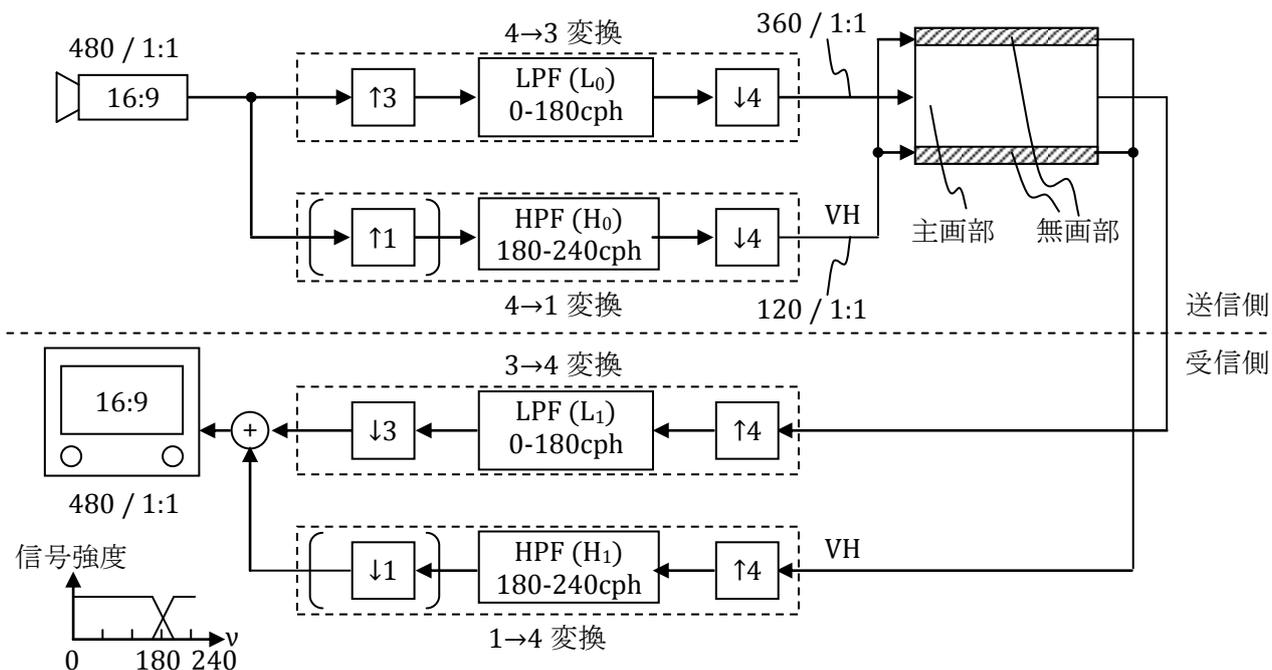
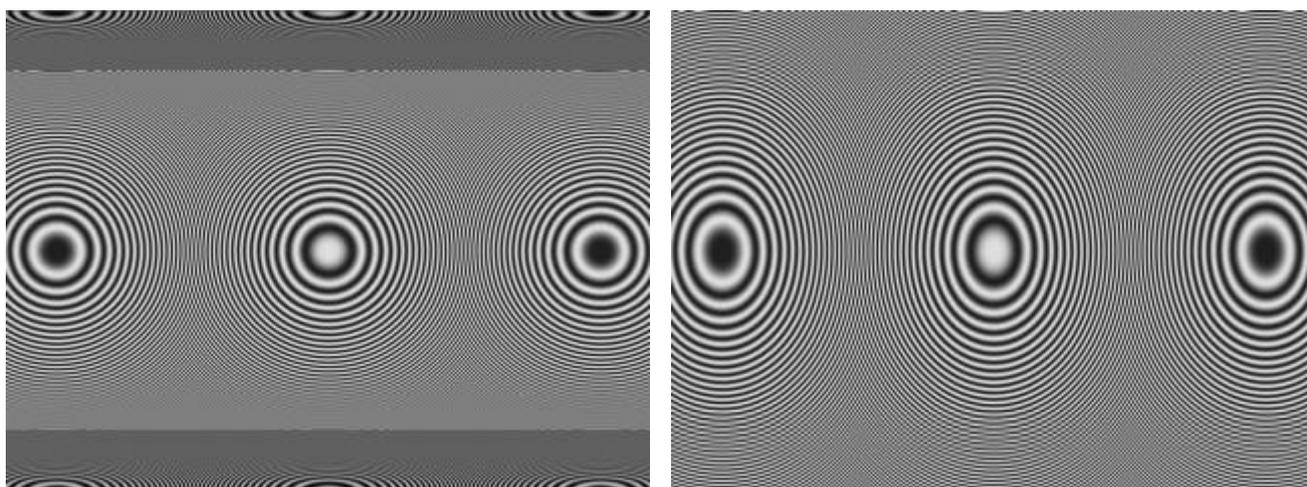


図 4.8 レターボックス形式における送受の走査線数変換処理



(a) 伝送画像 (現行受信機) (b) 再生画像 (EDTV 受信機)

図 4.9 一般的なフィルタによる垂直解像度補強結果の一例

受信側では、上記と逆に、伝送された VH 信号の走査線数を 4 倍に変換する。すなわち、4 倍にアップサンプリング(仮想的な零信号の挿入)したのちに、180~240cph を通過域とする垂直方向のハイパスフィルタをかけて、垂直高域成分を再生する。

レターボックス形式における送受の走査線数変換処理をまとめると、図 4.8 に示す構成となる。ここで、各フィルタ(L₀, H₀, L₁, H₁)が理想的な周波数特性を持った「理想フィルタ」であれば、各周波数成分が不足することなく、かつ標本化による高調波スペクトル(折り返し歪)と重なることなく、各成分を伝送・再生できる。しかし、現実的には「理想フィルタ」を実現できないため、本来通過すべき 180cph 近傍の周波数成分が減衰してしまう。また、180cph を超えた周波数成分を完全に遮断できず、折り返し歪が残留してしまう。

図 4.9 に、一般的なフィルタによる垂直解像度補強結果の一例を示す。同図(a)は、送信側フィルタ(L₀, H₀)と走査線数変換によって生成された主信号と垂直解像度補強信号がレターボックス形式に多重されていることを示している。同図(b)は、同図(a)に示した主信号と垂直解像度補強信号に対し、受信側フィルタ(L₁, H₁)と走査線数変換を行ったのちに、両者を加算した再生信号であり、180cph 近傍に前述した画質劣化(減衰、折り返し歪)が生じている。

このように、一般的なフィルタを用いた走査線数変換手法では、原信号と同じ信号を受信側で再生できないという問題があった^[71]。次項で、その問題解決法を示す。

4.3.2 マトリクス法による垂直解像度補強

筆者は、走査線の総数が、カメラから得た原信号(480 本)、伝送信号(主信号 360 本+補強信号 120 本)、および受信側で逆変換した信号(480 本)の間で変化しないことに着目し、次に述べるようなマトリクス演算によって走査線数変換を行う手法(マトリクス法)^[71; 72]を提案する。

図 4.10 に、マトリクス法による垂直解像度補強手法の原理を示す。同図において、まず、原信号(ワイド画像信号)を垂直方向に 3/4 に縮小して主信号を得るために、4 本の走査線(x₀, x₁, x₂, x₃)を 1 つの単位とし、4×4 マトリクス A を用いて、3 本の主信号(y₀, y₁, y₂)と 1 本の補強信号(h₀)を生成する。マトリクス A の係数を a_{ij}(0≤i≤3, 0≤j≤3)とすると、この演算は式(4.1)と表すことができる。

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ h_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

ワイド受像機では、上記の逆マトリクス A⁻¹を用いることにより、伝送された信号(y₀, y₁, y₂, h₀)から、もとのワイド画像信号(x₀, x₁, x₂, x₃)を歪なく再生できる。

このとき、前述したマトリクス A は、以下に示す 3 つの条件を満たす必要がある。

- (1) 逆マトリクス A⁻¹が存在するように、正則行列でなければならない。
- (2) 現行受像機で伝送信号を再生した際に、主信号(y₀, y₁, y₂)の歪が小さい。
- (3) 現行受像機で伝送信号を再生した際には、補強信号(h₀)が目立たない。

ここで、上記(2)および(3)の条件について考察する。式(4.1)に示したマトリクス演算は、ワイド画像信号(x₀, x₁, x₂, x₃)と係数 a_{ij}の積和をとることによって伝送信号(y₀, y₁, y₂, h₀)に変換しているため、一種のコンボリューション(畳み込み演算)とみなすことができると考えた。すなわち、係数 a_{ij}を適切に選ぶことによって、伝送信号の周波数特性を制御することができる。

4.2 節で述べたように、480 本→360 本の走査線数変換(縮小)の際には、480 本の原信号を一旦 3 倍の走査線数(1440 本)にアップサンプリングしたのちに、垂直方向のローパスフィルタをかけ、1/4 の走査線数(360 本)にダウンサンプリングして、主信号とする。

このとき、ローパスフィルタのタップ数が多いほど理想に近い特性となるが、前述した 4×4 マトリクス A による走査線数変換の場合には、図 4.11 に示すように、4 本の走査線の単位を超えないように「5 タップ」が上限となる。このフィルタのタップ係数を上下対称の(f₂, f₁, f₀, f₁, f₂)とおくと、コンボリューション後の主信号(y₀, y₁, y₂)は、式(4.2)のように書くことができる。

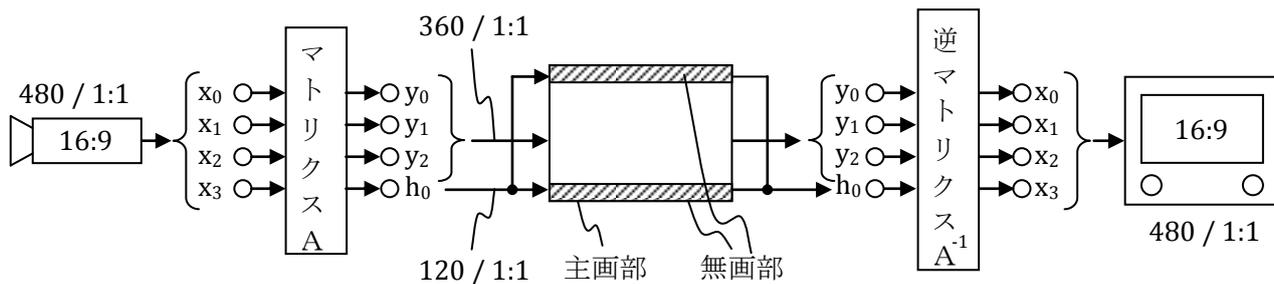


図 4.10 マトリクス法による垂直解像度補強の原理

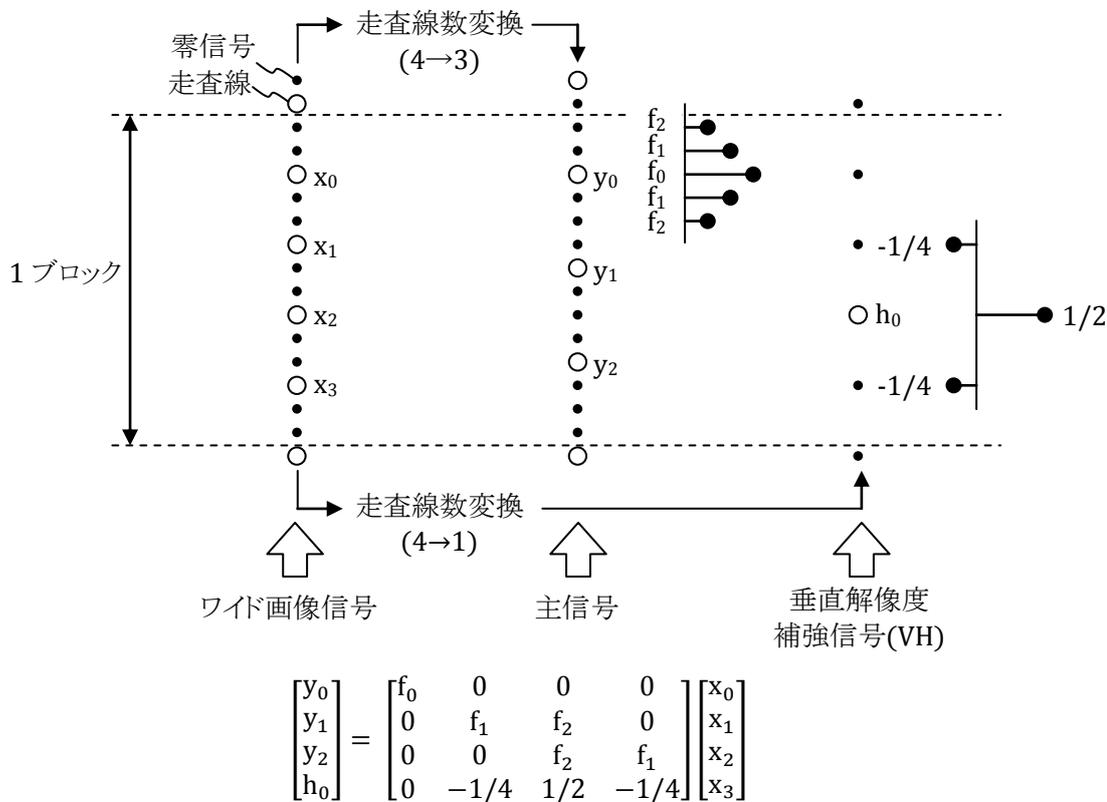


図 4.11 マトリクス法における走査線数変換フィルタ係数とマトリクス係数の関係

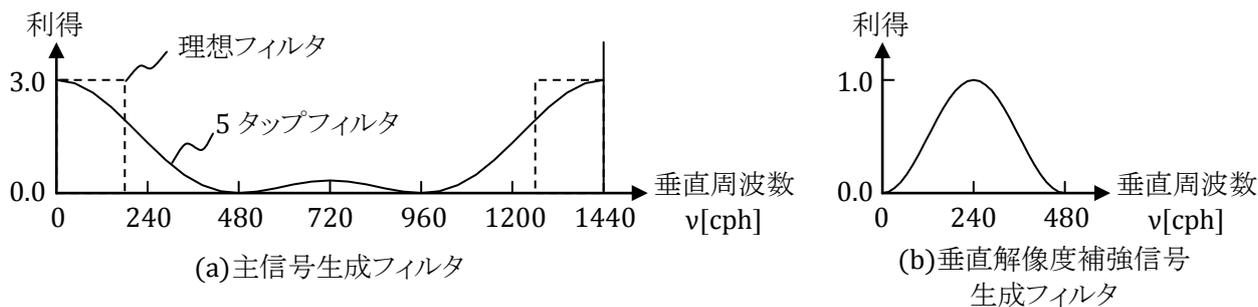


図 4.12 マトリクス法における走査線数変換フィルタの周波数特性

$$\begin{aligned}
 y_0 &= f_0 * x_0 \\
 y_1 &= f_1 * x_1 + f_2 * x_2 \\
 y_2 &= f_2 * x_2 + f_1 * x_3
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

ここで、主信号(y_0, y_1, y_2)のそれぞれの直流利得(すなわち、 $x_0=x_1=x_2=x_3=1$ とおいたときの主信号(y_0, y_1, y_2)の各値)が「1」となるように、式(4.3)のように条件付けする。

$$\begin{aligned}
 1 &= f_0 * 1 \\
 1 &= f_1 * 1 + f_2 * 1 \\
 1 &= f_2 * 1 + f_1 * 1
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

また、各走査線の重心位置が等間隔になる(すなわち、 $x_0=1, x_1=4, x_2=7, x_3=10$ とおいたときに、 $y_0=1, y_1=5, y_2=9$ となる)ように、式(4.4)のように条件付けする。

$$\begin{aligned}
 1 &= f_0 * 1 \\
 5 &= f_1 * 4 + f_2 * 7 \\
 9 &= f_2 * 7 + f_1 * 10
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

式(4.3)と式(4.4)から、フィルタのタップ係数を $f_0=1, f_1=2/3, f_2=1/3$ と求めることができ、このフィルタ(タップ係数= $(1/3, 2/3, 1, 2/3, 1/3)$)の周波数特性は、図 4.12(a)のようになる。

補強信号(h_0)についても、上記と同様に周波数特性を決定できる。このとき、現行受像機で伝送信号を再生した際に補強信号(h)が目立たないようにするために、パワーの小さい垂直高域成分のみを通過するようなフィルタにする。例えば、フィルタを式(4.5)のように置くと、このフィルタ(タップ係数= $(-1/4, 1/2, -1/4)$)の周波数特性は、図 4.12(b)のようになる。

$$h_0 = -1/4 * x_1 + 1/2 * x_2 - 1/4 * x_3
 \tag{4.5}$$

上記のフィルタタップ係数をマトリクス係数 a_{ij} に当てはめると、マトリクス A は式(4.6)のようになる。

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ h_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2/3 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 2/3 \\ 0 & -1/4 & 1/2 & -1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}
 \tag{4.6}$$

また、この逆マトリクス $B(=A^{-1})$ は、式(4.7)のようになる。

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5/4 & -1/4 & -2/3 \\ 0 & 1/2 & 1/2 & 4/3 \\ 0 & -1/4 & 5/4 & -2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ h_0 \end{bmatrix}
 \tag{4.7}$$

図 4.13 に、マトリクス法による垂直解像度補強結果の一例を示す。同図(a)は、送信側マトリクス A によって生成された主信号と垂直解像度補強信号がレターボックス形式に多重されていることを示している。同図(b)は、同図(a)に示した主信号と垂直解像度補強信号に対して受信側マトリクス B ($=A^{-1}$)による逆変換を行った再生画像であり、一般的なフィルタを用いた走査線数変換の結果(図 4.9(b))と比べて、画質劣化(減衰、折り返し歪)が発生しない「完全再構成」の特性を実現できたことがわかる。

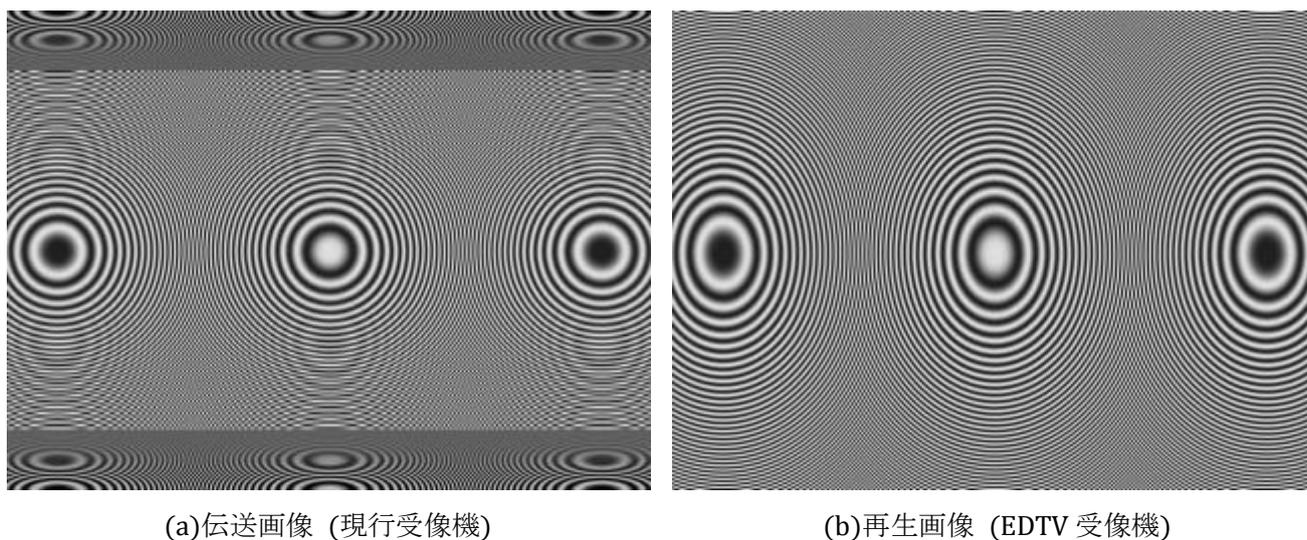


図 4.13 マトリクス法による垂直解像度補強結果の一例

4.3.3 拡張マトリクス法による垂直解像度補強

前項で提案したマトリクス法では、ワイド受信機で画像を再生したときに、図 4.13(b)に示したように減衰やモアレ状の折り返し歪などが発生しない。一方、現行受信機では、図 4.13(a)に示したように、折り返し歪が発生してしまう。これは、図 4.12(a)に示した 5 タップフィルタの周波数特性では、本来阻止すべき帯域(180~1260cph)の減衰量が少ないことに起因する。特に、4→3 変換(3 倍アップサンプリング→5 タップフィルタ→1/4 ダウンサンプリング)によって直流に折り返す前の成分(360cph (=1440*1/4), 720cph (=1440*2/4), 1080cph (=1440*3/4))の残留が多いため、図 4.13(a)では直流成分(同心円の中心の成分)のモアレが多く発生している。

そこで筆者は鈴木らと共に、図 4.11 に示した「1 ブロック(走査線 4 本)の範囲を超えない」という制約を緩和し、さらに多くの走査線を用いてマトリクス演算する手法について検討した [73; 74]。

極端な場合、480×480 マトリクスを用いてワイド画像信号を一度に変換し、その中の 360 本を主信号、残りの 120 本を補強信号とすれば、マトリクス係数から定まるフィルタの周波数特性に多くの自由度を持たせることができる。しかし、480×480 マトリクスは、ハードウェア規模の観点から現実的ではない。

一方、画像コーディングのために開発された直交変調手法として LOT (Lapped Orthogonal Transform) [75; 76]と呼ばれる手法が提案されている。DCT (Discrete Cosine Transform)に代表されるブロック変換では、量子化に起因したブロック状の歪が生じる。LOT では、この歪を軽減するために、隣のブロックと合わせて変換を行う。逆変換においても同様に、隣のブロックと合わせて完全な再生信号を得る。筆者らは、この考え方をマトリクス法に適用して、以下に述べる「拡張マトリクス法」 [73; 74]を提案した。

4.3.2 項で述べたマトリクス法は、画面全体から眺めると、式(4.8)のように書くことができる。ここで、 A は 4×4 マトリクスである。また、 X_i ($i=0 \sim n$)は、入力画像を 4 本の走査線ごとに分割した入力単位ブロックであり、式(4.6)に示した走査線(x_0, x_1, x_2, x_3)に相当する。 Y_i ($i=0 \sim 119$)は、出力単位ブロックであり、式(4.6)に示した伝送信号(y_0, y_1, y_2, h_0)に相当する。

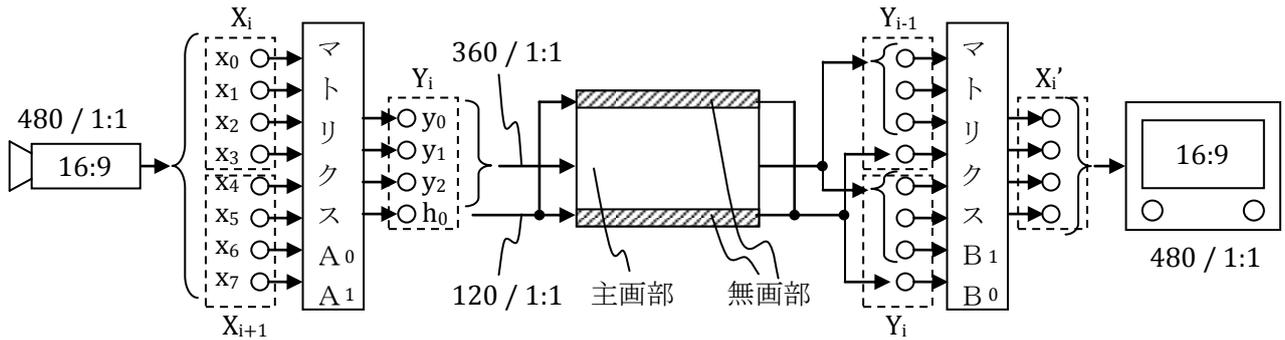


図 4.14 拡張マトリクス法による垂直解像度補強の原理

$$\begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ \vdots \\ Y_{119} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A & 0 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \\ & & & A & 0 \\ 0 & \cdots & & 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_{119} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

この変換式(4.8)では、ブロックごとに独立した演算になっており、隣のブロックの走査線の情報は使用していない。

一方、拡張マトリクス法では、図 4.14 に示すように、2つの入力ブロック(X_i, X_{i+1})から、1つの出力ブロック(Y_i)を作成するようにする。この演算は、式(4.9)のように表すことができる。

$$Y_i = A_0 \cdot X_i + A_1 \cdot X_{i+1} \quad (4.9)$$

これを画面全体から眺めると、式(4.10)のようになる。入力画像(X)と積和をとるマトリクス(A_0, A_1)の係数が増加した分だけ、フィルタ設計の自由度も増える。なお、式(4.10)における最下行(X_{120})はもともとの入力画像(X)には含まれないため、 X_{120} のすべての画素値を0としておく。

$$\begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ \vdots \\ Y_{119} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 & A_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & A_0 & A_1 & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & & \\ & & & A_0 & A_1 & 0 \\ 0 & \cdots & & 0 & A_0 & A_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_{119} \\ X_{120} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

受信側では、マトリクス B_0 および B_1 を用いて、式(4.11)のように演算する。

$$X'_i = B_1 \cdot Y_{i-1} + B_0 \cdot Y_i \quad (4.11)$$

これを画面全体から眺めると、式(4.12)のように書くことができる。なお、式(4.12)における最上行(Y_{-1})はもともとの伝送画像(Y)には含まれないため、 Y_{-1} のすべての画素値を0としておく。

$$\begin{bmatrix} X'_0 \\ X'_1 \\ \vdots \\ X'_{119} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 & B_0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & B_1 & B_0 & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & & \\ & & & B_1 & B_0 & 0 \\ 0 & \cdots & & 0 & B_1 & B_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{-1} \\ Y_0 \\ Y_1 \\ \vdots \\ Y_{119} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

式(4.9)と式(4.11)を用いて X'_i について解くと、式(4.13)のようになる。

$$X'_i = B_1 \cdot Y_{i-1} + B_0 \cdot Y_i = B_1 \cdot A_0 \cdot X_{i-1} + (B_0 \cdot A_0 + B_1 \cdot A_1) \cdot X_i + B_0 \cdot A_1 \cdot X_{i+1} \quad (4.13)$$

この式が $X'_i = X_i$ (すなわち完全再構成)となるためには、次に示す条件式を満たしていればよい。

$$\begin{cases} B_1 \cdot A_0 = 0 & (4.14) \\ B_0 \cdot A_0 + B_1 \cdot A_1 = E & (4.15) \\ B_0 \cdot A_1 = 0 & (\text{ただし、} 0: \text{零行列、} E: \text{単位行列}) \end{cases} \quad (4.16)$$

ここで、 A_1, A_2 が先に定義された場合には、次のように式を変形すれば、 B_1, B_2 を求めることができる。

まず、式(4.14)+式(4.15)+式(4.16)により式(4.17)が得られ、これを変形すると式(4.18)が得られる。

$$B_1 \cdot A_0 + (B_0 \cdot A_0 + B_1 \cdot A_1) + B_0 \cdot A_1 = (B_0 + B_1) \cdot (A_0 + A_1) = E \quad (4.17)$$

$$B_0 + B_1 = (A_0 + A_1)^{-1} \quad (4.18)$$

同様に、-式(4.14)+式(4.15)-式(4.16)により式(4.19)が得られ、これを変形すると式(4.20)が得られる。

$$-B_1 \cdot A_0 + (B_0 \cdot A_0 + B_1 \cdot A_1) - B_0 \cdot A_1 = (B_0 - B_1) \cdot (A_0 - A_1) = E \quad (4.19)$$

$$B_0 - B_1 = (A_0 - A_1)^{-1} \quad (4.20)$$

式(4.18)と式(4.20)より、式(4.21)が得られる。

$$B_0 = ((A_0 + A_1)^{-1} + (A_0 - A_1)^{-1}) / 2$$

$$B_1 = ((A_0 + A_1)^{-1} - (A_0 - A_1)^{-1}) / 2 \quad (4.21)$$

前述した送信側マトリクス(A_0, A_1)の主信号作成係数とフィルタタップ係数の関係を、図 4.15 に示す。3 倍にアップサンプリングした標本化周波数(1440cph)で設計したフィルタのタップ係数を 3 相に分け、それぞれをマトリクスの 1 行に対応させた形態となる。

以下、このフィルタのタップ係数を具体的に求めてみる。4.3.2 項で述べたマトリクス法では、図 4.11 に示すように最大タップ数が 5 タップであった。そこで、簡単のため、上下方向に 1 タップずつ増やした 7 タップのフィルタを設計することにする。

まず、このフィルタのタップ係数を上下対称の($f_3, f_2, f_1, f_0, f_1, f_2, f_3$)とおくと、図 4.15 より、コンボリューション後の主信号(y_0, y_1, y_2)は式(4.22)のように書くことができる。

$$y_0 = f_3 * x_0 + f_0 * x_1 + f_3 * x_2$$

$$y_1 = f_1 * x_2 + f_2 * x_3$$

$$y_2 = f_2 * x_3 + f_1 * x_4 \quad (4.22)$$

ここで、主信号(y_0, y_1, y_2)のそれぞれの直流利得(すなわち、 $x_0 = x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 1$ とおいたときの主信号(y_0, y_1, y_2)の各値)が「1」となるように、式(4.23)のように条件付けする。

$$1 = f_3 * 1 + f_0 * 1 + f_3 * 1$$

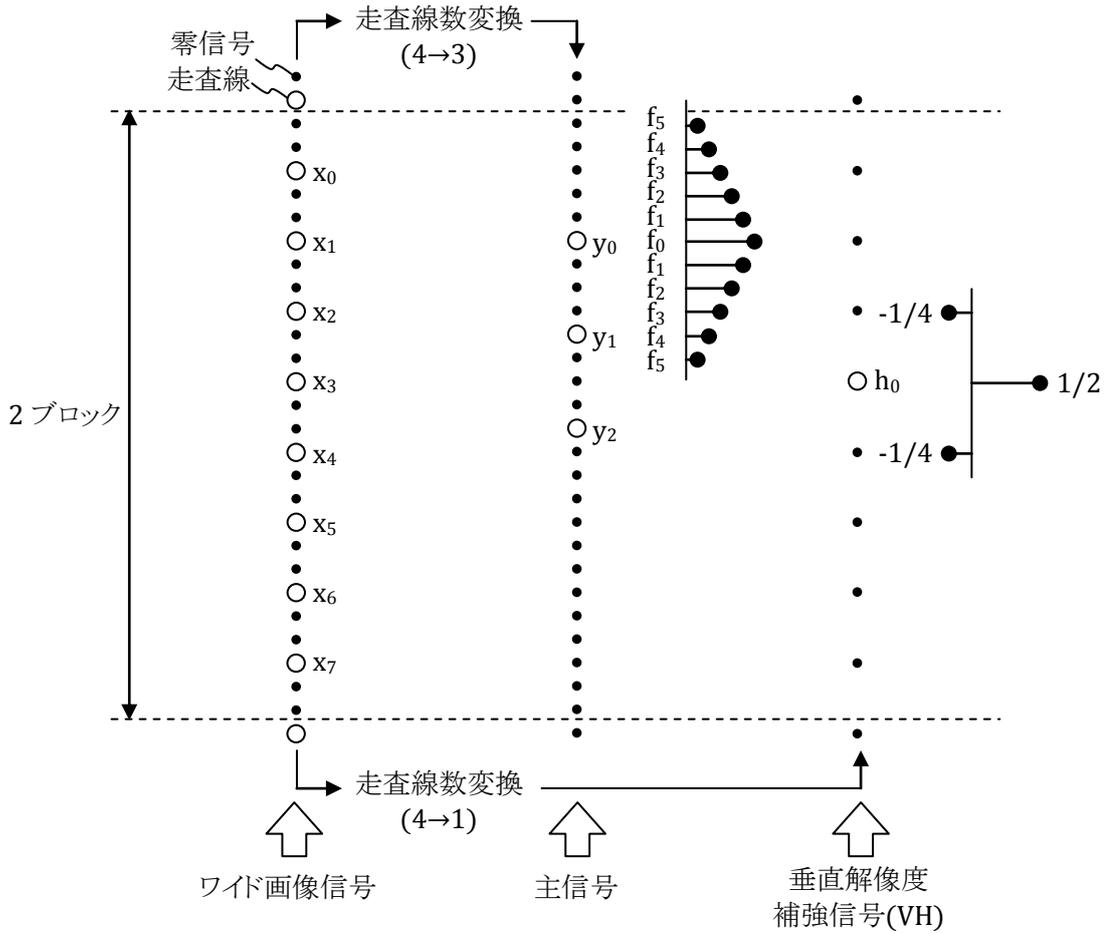
$$1 = f_1 * 1 + f_2 * 1$$

$$1 = f_2 * 1 + f_1 * 1 \quad (4.23)$$

続いて、マトリクス法で課題となっていた「直流に折り返す前の成分」(360cph、720cph、1080cph)が零点になるように、360cph および 1080cph(4 ラインで 1 周期、すなわち 1, 0, -1, 0, 1...)の成分と、720cph(2 ラインで 1 周期、すなわち 1, -1, 1, -1, 1...)の成分を 7 タップフィルタに入力し、その出力が「0」になるように、それぞれ式(4.24)および式(4.25)のように条件付けする。

$$\begin{aligned} f_4 * 1 + f_3 * 0 + f_2 * (-1) + f_1 * 0 + f_0 * 1 + f_1 * 0 + f_2 * (-1) + f_3 * 0 + f_4 * 1 \\ = f_0 - 2 * f_2 + 2 * f_4 = 0 \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} f_4 * 1 + f_3 * (-1) + f_2 * 1 + f_1 * (-1) + f_0 * 1 + f_1 * (-1) + f_2 * 1 + f_3 * (-1) + f_4 * 1 \\ = f_0 - 2 * f_1 + 2 * f_2 - 2 * f_3 + 2 * f_4 = 0 \end{aligned} \quad (4.25)$$



$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ h_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boxed{\begin{matrix} f_3 & f_0 & f_3 & 0 \\ 0 & f_4 & f_1 & f_2 \\ 0 & 0 & f_5 & f_2 \end{matrix}} & \boxed{\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_5 & 0 & 0 & 0 \\ f_1 & f_4 & 0 & 0 \end{matrix}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix}$$

図 4.15 拡張マトリクス法における走査線数変換フィルタ係数とマトリクス係数の関係

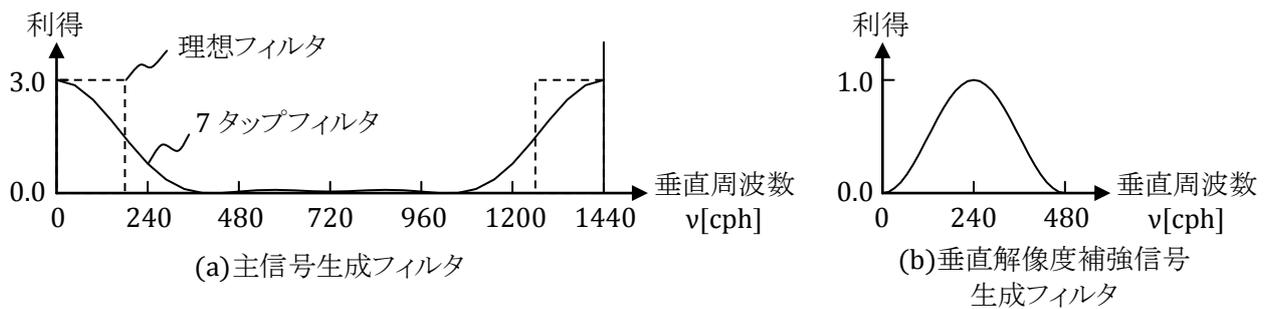


図 4.16 拡張マトリクス法における走査線数変換フィルタの周波数特性

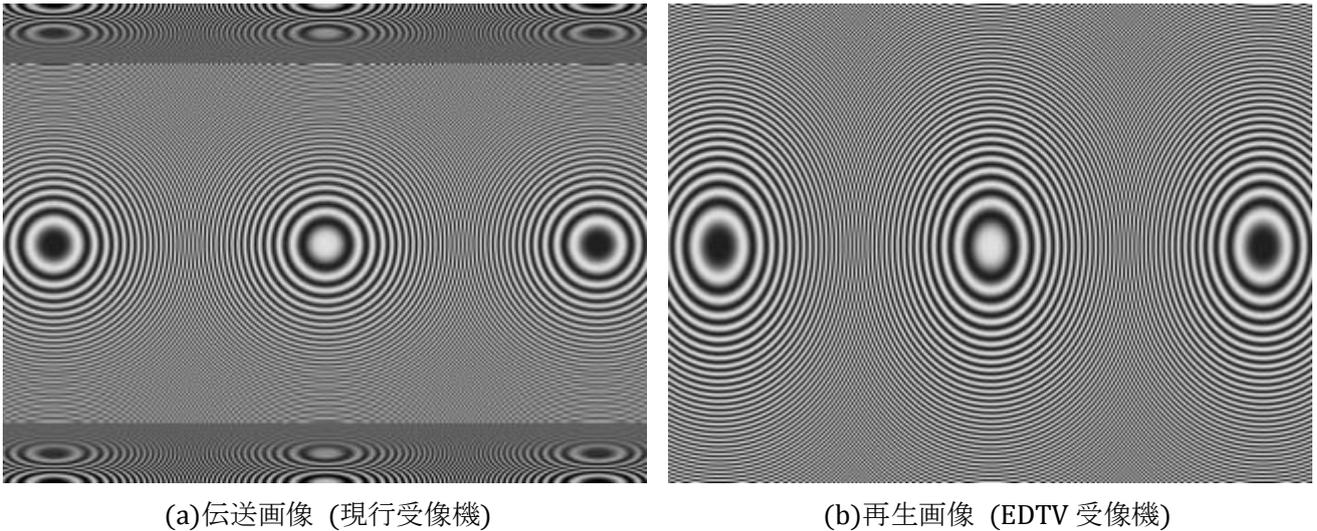


図 4.17 拡張マトリクス法による垂直解像度補強結果の一例

式(4.23)、式(4.24)および式(4.25)から、フィルタのタップ係数を $f_0=3/4$, $f_1=5/8$, $f_2=3/8$, $f_3=1/8$ と求めることができる。このフィルタ(タップ係数= $(1/8, 3/8, 5/8, 3/4, 5/8, 3/8, 1/8)$)の周波数特性は、図 4.16(a)のようになる。

補強信号(h_0)を生成するマトリクス係数(A_0 と A_1 の各最下行)は、式(4.6)に示したマトリクス A における補強信号(h_0)を生成するマトリクス係数(A の最下行)と同一の HPF 特性($-1/4, 1/2, -1/4$)とすると、周波数特性は図 4.16(b)のようになり、送信側マトリクス(A_0, A_1)は図 4.15 より式(4.26)のように書ける。

$$\begin{aligned}
 A_0 &= \begin{bmatrix} 1/8 & 3/4 & 1/8 & 0 \\ 0 & 0 & 5/8 & 3/8 \\ 0 & 0 & 0 & 3/8 \\ 0 & 0 & -1/4 & 1/2 \end{bmatrix} \\
 A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5/8 & 0 & 0 & 0 \\ -1/4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.26}
 \end{aligned}$$

式(4.21)によって受信側マトリクス(B_0, B_1)を求めると、式(4.27)のようになる。

$$\begin{aligned}
 B_0 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4/3 & -13/60 & 1/20 & 1/8 \\ 0 & 13/10 & -3/10 & -3/4 \\ 0 & 1/2 & 1/2 & 5/4 \end{bmatrix} \\
 B_1 &= \begin{bmatrix} 0 & -3/10 & 13/10 & -3/4 \\ 0 & 1/20 & -13/10 & 1/8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.27}
 \end{aligned}$$

なお、これらのマトリクス(A_0, A_1, B_0, B_1)は、前述した式(4.14)～式(4.16)を満たしている。

図 4.17 に、拡張マトリクス法による垂直解像度補強結果の一例を示す。同図(a)は、送信側マトリクス(A_0, A_1)によって生成された主信号と垂直解像度補強信号がレターボックス形式に多重されていることを示している。マトリクス法の主信号(図 4.13(a))と比べ、折り返し歪が減っていることがわかる。特に、4→3 変換にて直流に折り返す前の成分(360cph, 720cph, 1080cph)がすべて零点になるように設定したため、図 4.13(a)と比べてモアレがほとんど目立たなくなった。

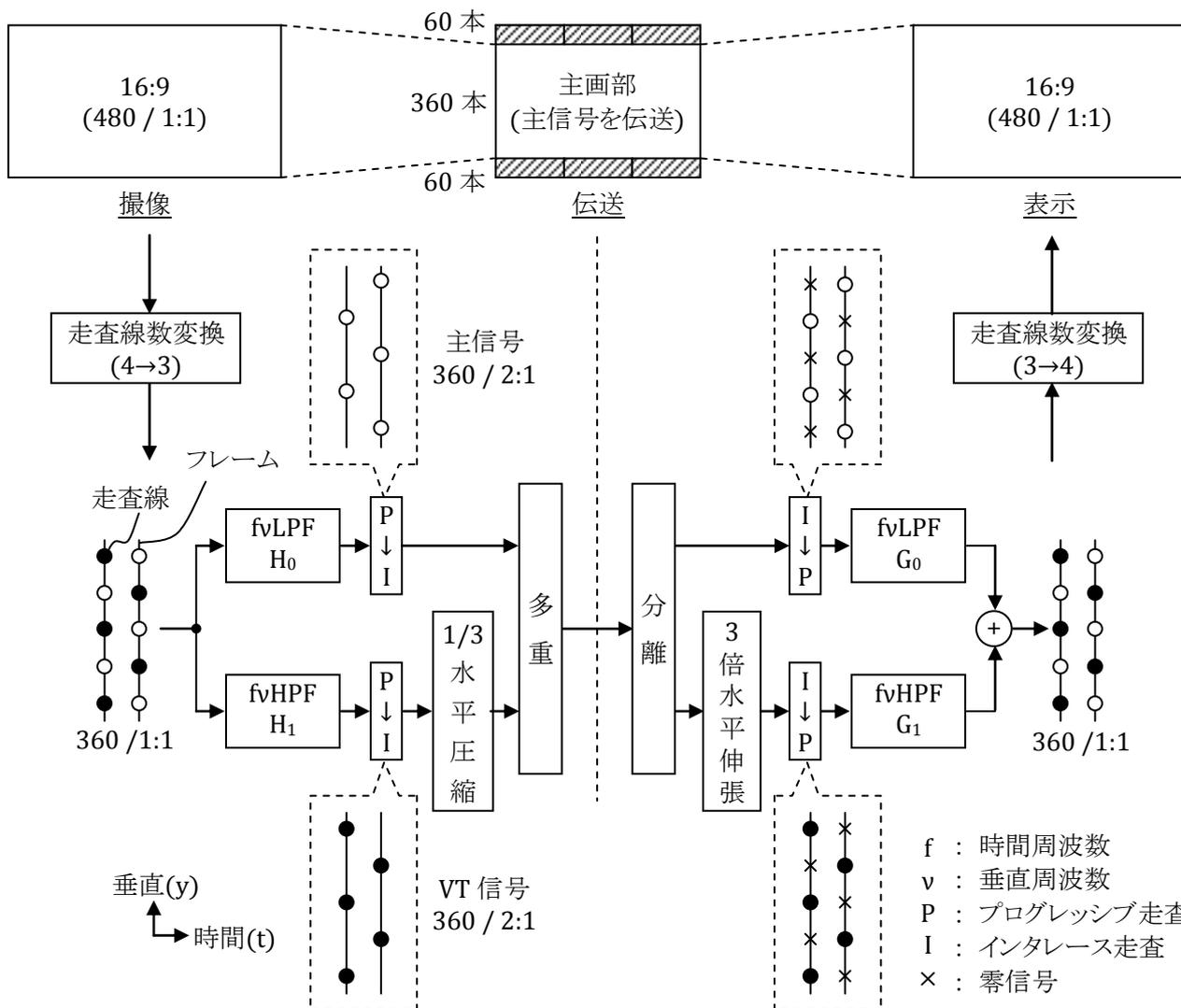


図 4.18 VT 信号処理

図 4.17(b)は、同図(a)に示した主信号と垂直解像度補強信号に対し、受信側マトリクス(B₀, B₁)による逆変換を行った再生画像である。前述したように、拡張マトリクス(A₀, A₁, B₀, B₁)は完全再構成の特性のため、マトリクス法の再生画像(図 4.13(b))と同様に、再生画像に画質劣化(減衰、折り返し歪)は発生しない。

4.4 垂直-時間解像度補強信号(VT)

4.4.1 VT 信号の分類

垂直-時間解像度補強信号(VT) 図は、受信側でのインタレース・プログレッシブ走査変換のための補強信号である。図 4.18 に示すように、送信側にて走査線数変換(4→3 変換)を行ったのちに、プログレッシブ形態の走査線を、インタレース走査形態の主信号(○印)とVT 信号(●印)に分ける。この VT 信号を、画面上下の無画部に多重して伝送することにより、受信側でのインタレース・プログレッシブ走査変換を理想的に行うことができる。ただし、もともと VT 信号は走査線 360 本/フレームであるのに対し、無画部は 120 本/フレームの伝送容量しかないので、水平方向に 1/3 に圧縮して時間軸多重する。従って、ワイド受像機にて再生可能な 3 次元周波数スペクトルは、VH 信号が無い場合には図 4.19 のようになる。

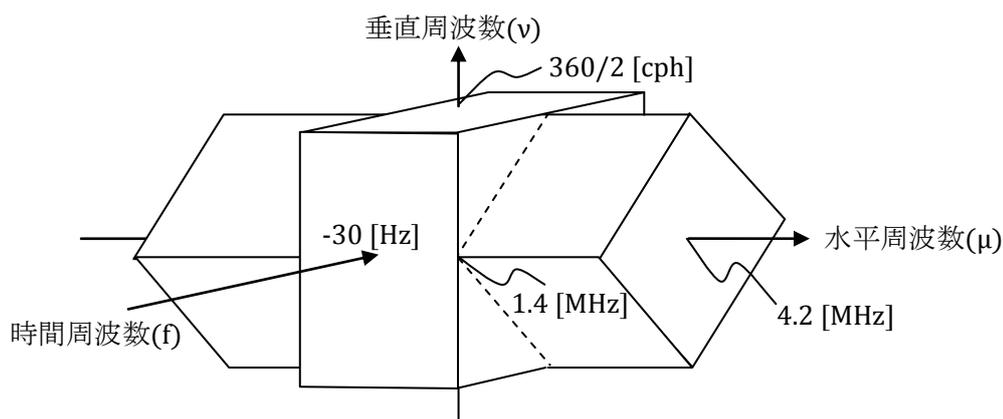


図 4.19 ワイド受像機にて再生可能な3次元周波数スペクトル (VH信号が無い場合)

VT信号は、もとの信号のまま無画部に多重すると、現行受像機にて大きな妨害となるため、近傍の走査線の信号と演算し、妨害を見えにくくして伝送する。この演算方法には多くの提案があり、図4.18に示した送信側フィルタ H_0 および H_1 の構成の違いにより、表4.1のように分類される。以下、各方式について、特徴を簡単に説明する。

LD (Line Difference)方式は、プログレッシブ走査形態における同一フレーム内の走査線間差分演算によりVT信号を生成する方式であり、さらに(a)単純LD方式^[77]と(b)SSKF方式^[78; 79]に分類される。両方式ともにVT信号の生成のためのフィルタ H_1 は同じであるが、主信号生成のためのフィルタ H_0 が異なる。(b)SSKF (Symmetric Short Kernel Filter)方式では、フィルタ H_0 により主信号の垂直360/2cph成分が阻止されるため、現行受像機におけるラインフリッカ妨害低減効果がある^[78]。一方、(a)単純LD方式はフィルタ H_0 がスルーのため、ラインフリッカ低減のための垂直プリフィルタが別途必要になる。

FD (Frame Difference)方式は、プログレッシブ走査形態におけるフレーム間演算によりVT信号を生成する方式であり、さらに(c)逐次FD方式^[80]と、(d)フレーム完結FD方式^[81]に分類される。(c)では、フィルタ H_1 により常に前フレーム(過去)との差分をとってVT信号とする。この方式では、送受ともに既に伝送済みの前フレームと演算するため演算に伴う遅延は発生しないが、送信側でカットチェンジなどの編集が行われた場合には前フレームの走査線信号とVT信号との整合性がなくなるため、送受で対策が必要となる。

一方(d)では、フィルタ H_1 を時変フィルタとし、第1フィールドでは後フレーム(未来)から、第2フィールドでは前フレーム(過去)から差分をとることにより、フレームごとに完結(独立)した処理を行う。この方式では、完結する単位ごとにカットチェンジなどの編集を行うことができるが、送受ともに後フレーム(未来)が来るまで演算できないため、送信側で1/60秒、受信側で1/60秒(合計1/30秒)の遅延が生じる欠点がある。なお、(c)(d)ともに、主信号のフィルタ H_0 はスルーである。

LD/FD方式^[82]は、前述した(a)単純LD方式によるVT信号と、(c)逐次FD方式によるVT信号を混合して出力する方式である。両者の混合比をそれぞれ k および $(1-k)$ としたときに、 k を固定値(例えば、1/2など)とするのが(e)固定混合方式であり、 k の値を画像の動き量に応じて変化させるのが(f)動き適応混合方式である。(f)動き適応混合方式では、 $k=0$ (静止領域)でFDが選択され、 $k=1$ (動き領域)でLDが選択されることから、VT信号の振幅が比較的小さくなり、無画部の妨害が少なくなる利点がある。また、受信側で $X = ((1-k)*A+k*(B+C)/2) + VT$ となることから、動き適応IP変換 $(=(1-k)*A+k*(B+C)/2)$ との整合性が良い。(e)(f)ともに、主信号のフィルタ H_0 はスルーである。

表 4.1 VT 信号の分類

	大分類	小分類	VT 信号		主信号
			生成方法	フィルタ H ₁ の係数	フィルタ H ₀ の係数
方 式	LD 方式 (フレーム内処理)	(a)単純 LD	$X-(B+C)/2$	$-1/4$ $1/2$ $-1/4$	1(スルー)
		(b)SSKF	同上	同上	$-1/4$ $2/4$ $6/4$ $2/4$ $-1/4$
	FD 方式 (フレーム間処理)	(c)逐次 FD	$X-A$	$-1/2$ $1/2$	1(スルー)
		(d)フレーム完結 FD	第1フィールド: $X-D$	$-1/2$ $1/2$	1(スルー)
	第2フィールド: $X-A$				
	LD/FD 方式 (上記の混合)	(e)固定混合	$X-(2A+(B+C))/4$	$-1/4$ $-1/8$ $1/2$ $-1/8$	1(スルー)
(f)動き適応混合		$X-((1+k)*A + k*(B+C))/2$ (ただし、 $0 \leq k \leq 1$, 0:静止, 1:動き)	$-(1-k)/2$ $-k/4$ $1/2$ $-k/4$	1(スルー)	
備 考	放送技術開発協議会(BTA)での呼称に従う分類		走査線の位置関係は右図のとおり		

なお、これらはすべて完全再構成フィルタバンク [83]として表記でき、再生画像に歪が生じないためには、図 4.18 に示した送信側フィルタ H_0, H_1 、および受信側フィルタ G_0, G_1 の間に以下の条件式が成り立つ必要があることが知られている。ただし、表 4.1(d)では時変フィルタとなり、(f)では動き適応フィルタとなる。

$$\begin{cases} G_0(z) = 2H_1(-z) & (4.28) \\ G_1(z) = 2H_0(-z) & (4.29) \\ H_0(-z)H_1(z) + H_0(z)H_1(-z) = z^{-m} & (4.30) \end{cases}$$

(ただし、 z^{-m} は遅延項)

参考のため、式(4.28)～式(4.30)の導出方法を以下に示す。入力信号の z 変換式を $X(z)$ とすると、フィルタ H_0 およびプログレッシブ・インタレース変換(PI変換)後の主信号 $M(z)$ は、式(4.31)のように書ける。

$$M(z) = 1/2(H_0(z)X(z) + H_0(-z)X(-z)) \quad (4.31)$$

同様に、VT信号は式(4.32)のように書ける。

$$VT(z) = 1/2(H_1(z)X(z) - H_1(-z)X(-z)) \quad (4.32)$$

ここで、式(4.31)と式(4.32)の折り返し成分(第2項)の極性(正負)が異なるのは、PI変換の際の走査線位置が相補的となっており、サンプリング位相が π ラジアン(=180度)ずれているためである。

式(4.31)と式(4.32)を用いると、再生信号 $X'(z)$ は式(4.33)のようになる。

$$\begin{aligned} X'(z) &= G_0(z)M(z) + G_1(z)VT(z) \\ &= 1/2(G_0(z)H_0(z) + G_1(z)H_1(z))X(z) \\ &\quad + 1/2(G_0(z)H_0(-z) - G_1(z)H_1(-z))X(-z) \end{aligned} \quad (4.33)$$

従って、完全再構成、すなわち常に $X'(z) = z^{-m}X(z)$ (ただし、 z^{-m} は遅延項)となるためには、以下の2式を満足する必要がある。

$$\begin{cases} G_0(z)H_0(z) + G_1(z)H_1(z) = 2z^{-m} & (4.34) \\ G_0(z)H_0(-z) - G_1(z)H_1(-z) = 0 & (4.35) \end{cases}$$

ここで、式(4.28)および式(4.29)とおけば式(4.35)を満たし、式(4.28)、式(4.29)および式(4.34)から式(4.30)が導出できる。

4.4.2 VT信号に対する伝送ノイズの影響

VT信号は、レターボックス形式における画面上下の無画部を利用して伝送する。VT信号の振幅を大きくすると現行受像機の無画部妨害が増え、逆に振幅を小さくすると伝送ノイズの影響を受けやすくなって再生画像のSN比(以下、S/N)が劣化するという問題がある。

このVT信号とS/Nの関係について、これまでに以下の検討がなされている。守田らは、レターボックス方式全体の評価ノイズ電力を試算し、主信号に比べて、無画部に多重されたVT信号が再生S/Nに大きな影響を及ぼすことを理論的に明らかにした^[81]。また、石倉らは、ハードウェア実験によりVT信号の水平圧縮率を変えてS/Nの比較を行い、1/5圧縮よりも1/3圧縮の方が好ましいことを示した^[84]。

図4.18に示したように、送信側にて、プログレッシブ形態の走査線から、インタレース走査形態の主信号(○印)と、VT信号(●印)を生成する。主信号とVT信号の走査線数はもともと同数(1フレームあたり360本)だが、主信号を配置する主画部の走査線数が1フレームあたり360本であるのに対し、VT信号を配置する無画部の走査線数は1フレームあたり120本しかないことから、図4.20に示すように、VT信号については、水平方向に1/3に圧縮して多重する必要がある。受信側で、伝送されたVT信号を3倍に伸張する際に、VT信号に混入した伝送ノイズが水平低域成分に変換され、視覚的に増加することが指摘されている。高橋らは、このノイズ増加に対して、視覚特性を考慮した評価雑音電力(Weighted Noise Power)の考え方を導入し、水平および垂直周波数領域でのノイズの定量的な検討を行っている^[81]。以下、VT信号における伝送ノイズの視覚的増加のメカニズムについて簡単に解説する。

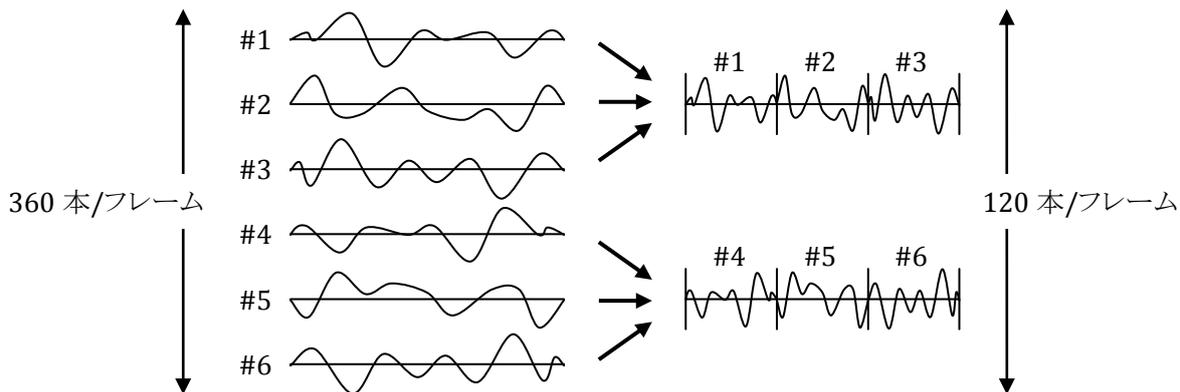


図 4.20 VT 信号の水平圧縮多重

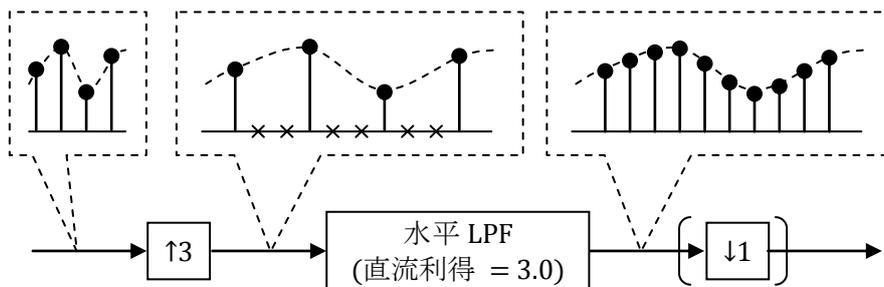


図 4.21 水平 3 倍伸張処理

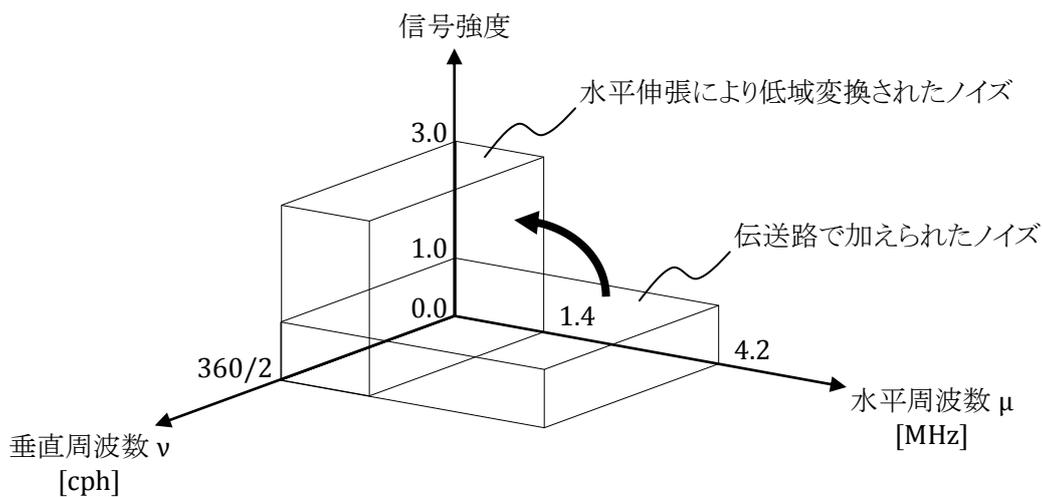


図 4.22 VT 信号のノイズスペクトル

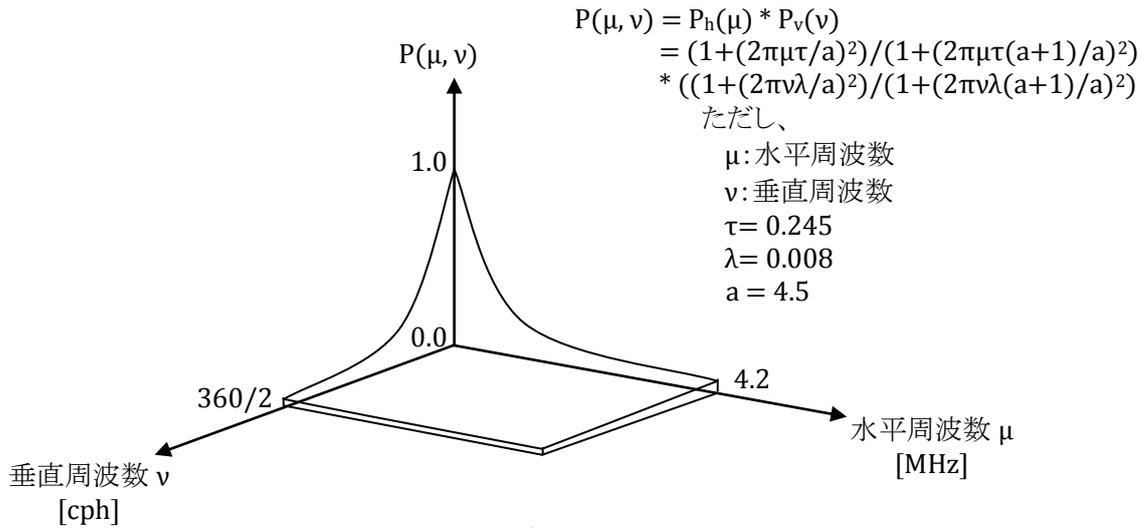


図 4.23 視覚評価特性

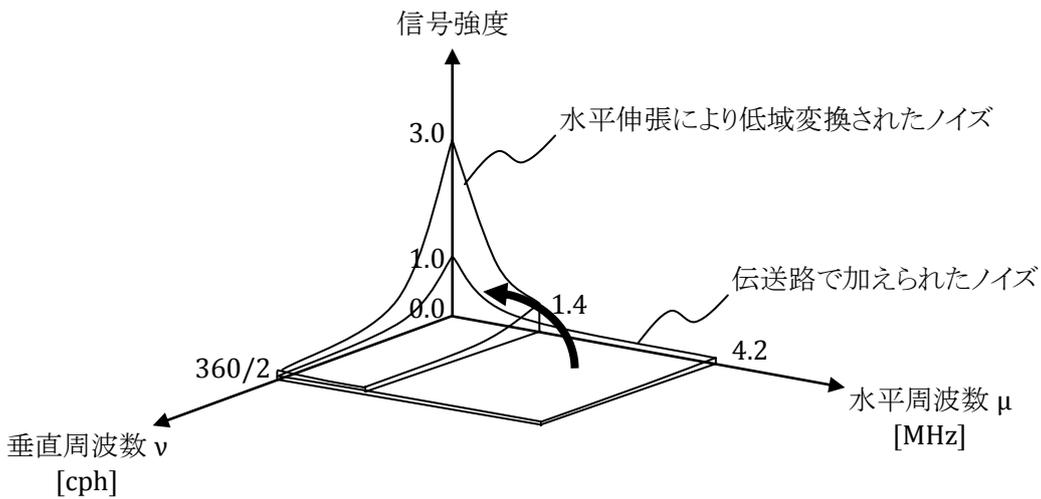


図 4.24 視覚評価特性を考慮した VT 信号のノイズスペクトル

受信側で VT 信号を水平方向に 3 倍に伸張する際に、図 4.21 に示すように、仮想的な零信号(x印)を挿入したのちに、水平ローパスフィルタをかけて画素補間する。このとき、周波数が 1/3 に変換されるとともに、水平ローパスフィルタの直流利得が拡大率と等しく 3 倍になることから、VT 信号に加わった伝送ノイズのスペクトルは図 4.22 のように変化する。すなわち、伝送路では 4.2MHz であったノイズの水平帯域が 1/3 の 1.4MHz になり、ノイズの信号強度は 3 倍になる。ただし、VT 信号のスペクトルも同様に变化するため、物理的な S/N は変化しない。

ところが、同じ信号強度であっても、高域に比べて低域のノイズは知覚されやすい。これは、図 4.23 に示すような視覚評価特性を考慮すると、水平伸張後のノイズは図 4.24 のように増加し、見かけ上の S/N (評価 S/N)は劣化する。

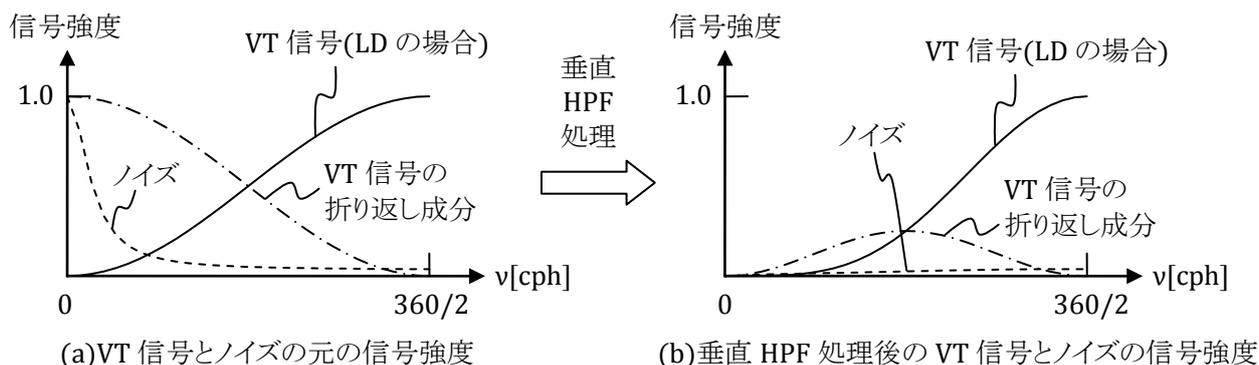


図 4.25 提案する VT 信号ノイズ低減手法の原理

4.4.3 伝送ノイズの影響を抑えた VT 信号生成

ここでは、前述した視覚評価特性を利用した VT 信号のノイズ低減手法^[85;86]を提案する。

図 4.23 に示した視覚評価特性からわかるように、ノイズは水平周波数(μ)と垂直周波数(ν)における低域成分の視感度が高い。しかし、垂直周波数(ν)の低域成分は、主信号として既に伝送されているため、VT 信号としては本来不要な成分である。そこで筆者は、ノイズが目立つにもかかわらず、画質改善にあまり寄与しない VT 信号の ν 低域成分を除去すれば、ノイズだけを効率よく低減できると考えた。

簡単のため、VT 信号を単純 LD 方式(表 4.1(a))とし、 ν 軸だけの 1 次元領域にて上記原理を説明する。図 4.25(a)に示すように、視覚特性を考慮したノイズは ν 低域に集中するのに対し、VT(LD)信号は ν 高域の信号強度が大きい。そこで、垂直 HPF により ν 低域成分を除去すれば、同図(b)に示すように、もとの VT 信号を大きく変化させずに、ノイズを低減できる可能性がある。

ただし、このノイズ低減手法では、「EDTV 受像機上の折り返し歪」に留意する必要がある。ノイズ低減のためプログレッシブ走査形態の VT 信号に対して垂直 HPF 処理した場合、送信側でのプログレッシブ・インタレース変換(PI 変換)により、図 4.25(a)(b)に示すように、VT 信号の折り返し成分は大きく変化する。従って、主信号に含まれる折り返し成分のうち、 ν 直流近傍の成分をキャンセルできなくなり、EDTV 受像機上の再生画像に折り返し歪が残留することになる。例えば、入力したプログレッシブ走査信号が走査線ごとに白黒反転するとき、VT 信号は完全な直流値となる。このとき、垂直 HPF 処理により VT 信号の直流を除去して「0」とすると、再生画像は白(あるいは黒)のみとなり、再生画像の直流値が変動してしまう。

この「EDTV 受像機上の折り返し歪」は、主信号の折り返し成分が ν 直流近傍にまで及ぶことに起因する。従って、予め送信側にて主信号の ν 高域成分を除去したのちにインタレース走査形態に変換すれば対策できる。

この観点で図 4.18 を見直してみると、「送信側での主信号の ν 高域成分除去による折り返し歪対策」が同図のフィルタ H_0 に対応し、「受信側での VT 信号の ν 直流成分除去によるノイズ低減」が同図のフィルタ G_1 に対応することがわかる。

同様に、表 4.1 を見直してみると、同表(a)における単純 LD 方式では、図 4.18 に示したフィルタ H_0 をスルーとし、単純な走査線間引きだけで主信号を生成している。この方式では、前述した式(4.29)の条件から、受信側の VT 信号にかかるフィルタ G_1 もスルーにせざるを得ない。従って、VT 信号に混入した伝送ノイズは、すべて再生信号に現れることになる。同表(c)(d)(e)(f)の方式も、フィルタ H_0 がスルーになっている。



図 4.26 主観評価実験に用いたテストチャート「ヘアーバンドの女性」

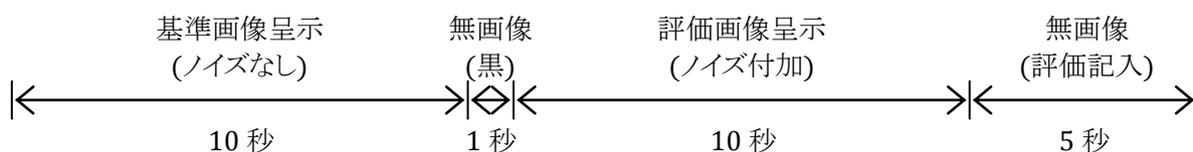


図 4.27 主観評価実験シーケンス

表 4.2 主観評価実験条件

	条 件	
評価者	10名 (TV研究者)	
視距離	4H (H:画面高)	
室内照度	50 lx	
管面輝度 (最高輝度)	30 fL = 102.8cd/m ²	
使用モニタ	26インチ シバソク製カラーモニタ CMM26-11 (プログレッシブ走査表示(480 / 1:1、60Hz)に改造)	
評価尺度	評点	評価基準
	5	(妨害が)わからない
	4	わかるが気にならない
	3	気になるが邪魔にならない
	2	邪魔になる
1	非常に邪魔になる	

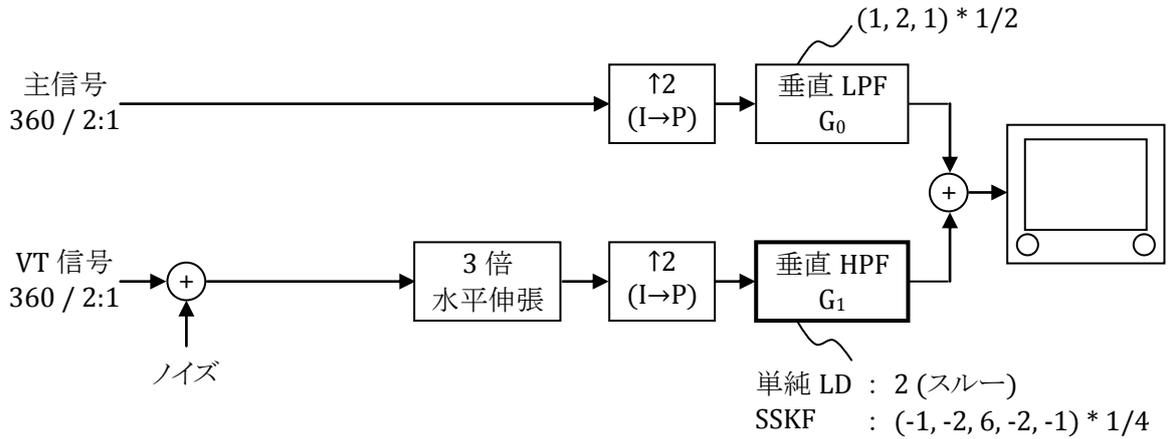


図 4.28 主観評価実験 1 のブロック図 (VT 信号だけにノイズ付加)

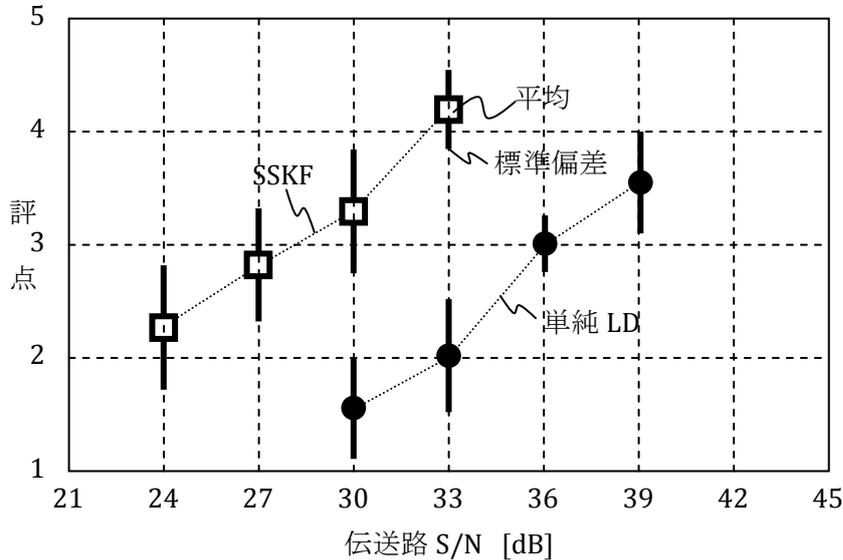


図 4.29 主観評価実験 1 の結果

一方、表 4.1(b)の SSKF 方式では、送信側での主信号のフィルタ H_0 が垂直 LPF (タップ係数 = $-1/4, 2/4, 6/4, 2/4, -1/4$) となっており、式 (4.29) の条件から、受信側での VT 信号のフィルタ G_1 が直流を零点とする垂直 HPF (タップ係数 = $-1/2, -2/2, 6/2, -2/2, -1/2$) になる。これにより、物理的なノイズ電力が減少するとともに、視覚的に目立つ垂直低域のノイズ成分が減衰して、評価 S/N も大きく改善されると予想される。

なお、表 4.1(a)(b)に示すように、送信側の VT 信号のフィルタ H_1 が単純 LD 方式と SSKF 方式で同一なことから、式 (4.28) の条件から、受信側での主信号のフィルタ G_0 も単純 LD 方式と SSKF 方式で同一になる。従って、伝送ノイズが主信号に与える影響は、単純 LD 方式と SSKF 方式で同一(共通)である。

受信側フィルタ G_1 による VT 信号のノイズ低減効果を定量的に確認するため、以下に述べる主観評価実験を行った。伝送ノイズとして、計算機で発生させた正規分布乱数を 4.2MHz に帯域制限したものを用いた。このノイズに対して、シミュレーションによる受信側信号処理を行ったのちに、ITE 標準画像の「ヘアーバンドの女性」(図 4.26)に重ねて呈示し、5 段階妨害評価を行った。基準画像(ノイズなし)と評価画像(ノイズ付加)の呈示方法を図 4.27 に示す。他の実験条件を、表 4.2 にまとめて示す。

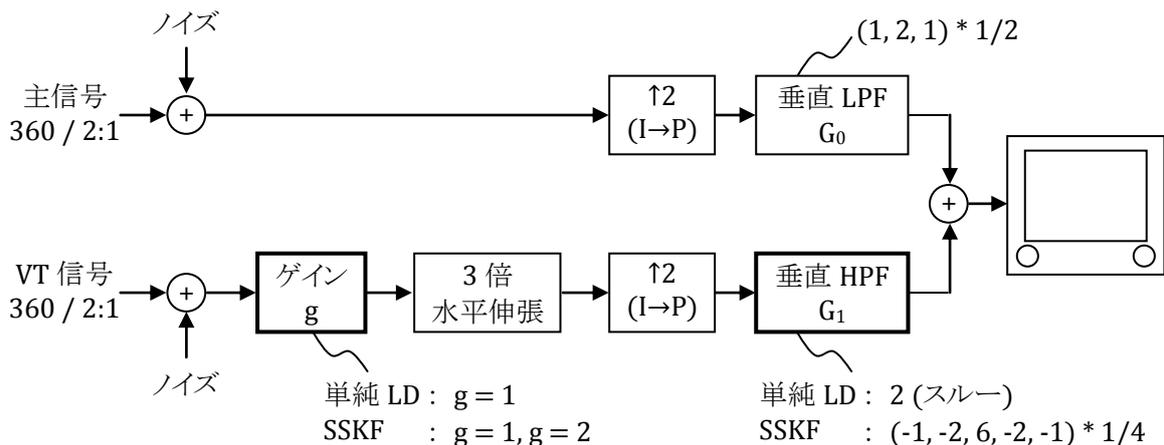


図 4.30 主観評価実験 2 のブロック図 (主信号と VT 信号の両方にノイズ付加)

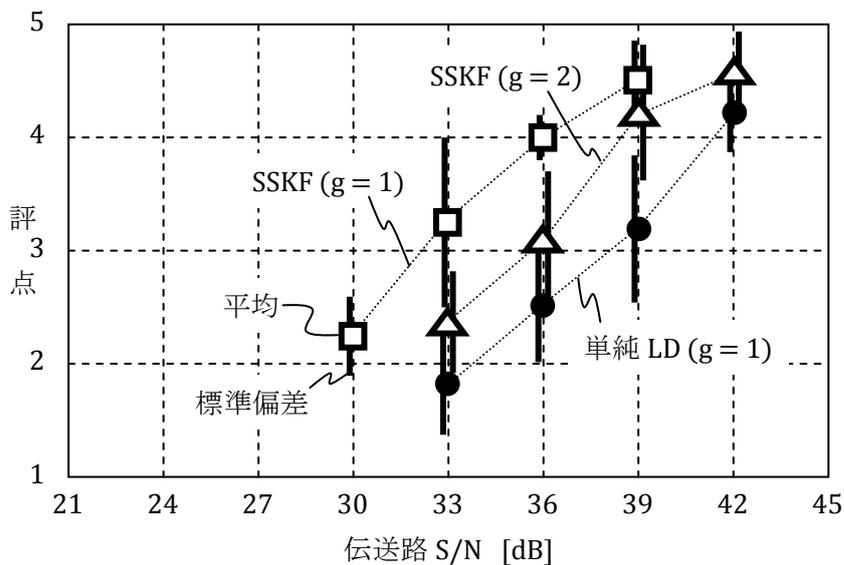


図 4.31 主観評価実験 2 の結果

まず、フィルタ G_1 によるノイズ低減効果を確認するため、「実験 1」として、図 4.28 に示す実験構成により、VT 信号だけにノイズを加えて評価した。なお、前述したように、「フィルタ G_1 なし」(スルー)は単純 LD 方式に対応し、「フィルタ G_1 あり」は SSKF 方式に対応する。

図 4.29 に、実験 1 の結果を示す。図の横軸はノイズ量を S/N で表したものであり、左に行くほどノイズが増えることを表す。縦軸は、5 段階妨害評価の評点である。

フィルタ G_1 の有無によらない共通の傾向として、ノイズが 9dB 増えると評点が約 2 ランク下がること挙げられる。

同じノイズ量では、「フィルタ G_1 あり」(SSKF 方式)の方が、「フィルタ G_1 なし」(単純 LD 方式)よりも、評点が約 2 ランク高い。逆に言えば、SSKF 方式のノイズ量が 6~8dB 多くても、単純 LD 方式とほぼ同じ評点が得られており、フィルタ G_1 によるノイズ低減効果は 6~8dB であることが確認された。

続いて、条件をより実際に近づけるため、「実験 2」として、図 4.30 に示す実験構成により、VT 信号と主信号の両方にノイズを加えて評価した。なお、フィルタ G_1 の有無に加えて、送信側にて VT 信号に乗じる係数(g)もパラメータとした。これは、受信側で元の信号振幅に戻すため、VT 信号に係数(g)を乗じることを意味する。

図 4.31 に、実験 2 の結果を示す。フィルタ G_1 の有無によらず、ノイズ量が 9dB 増えると、評点が約 2.5 ランク下がっており、実験 1 よりも伝送ノイズの影響が若干大きくなっている。

$g = 1$ とした場合、同じノイズ量では、「フィルタ G_1 あり」(SSKF 方式)の方が、「フィルタ G_1 なし」(単純 LD 方式)よりも評点が約 1.5 ランク高い。逆に、SSKF 方式のノイズ量が 4~6dB 多くても、単純 LD 方式とほぼ同じ評点が得られており、フィルタ G_1 によるノイズ低減効果は 4~6dB であることが確認された。実験 1 よりも効果が小さくなっているのは、主信号のノイズによってフィルタ G_1 によるノイズ低減効果がマスクされたためと考えられる。

また、「フィルタ G_1 あり」(SSKF 方式)にて $g = 1/2$ としても、「フィルタ G_1 なし」(単純 LD 方式)で $g = 1$ としたとき以上の評点が得られた。この結果は、SSKF 方式で VT 信号の伝送振幅を $1/2$ にしても、単純 LD 方式と同程度以上の評価 S/N が得られることを示しており、現行受信機への妨害低減に有効であることがわかった。

以上の検討から、下記結論を得た。

- (1)受信側で VT 信号に掛かる垂直 HPF が各 VT 信号生成手法間で異なり、その特性が再生画像の S/N に大きな影響を与える。
- (2)VT 信号生成手法のひとつである SSKF 方式は、同 HPF によるノイズ低減効果が 4~6dB あり、SSKF 方式で VT 信号の伝送振幅を $1/2$ にしても、単純 LD 方式と同程度以上の評価 S/N になる。

4.4.4 コアリングを用いた VT 信号ノイズ低減

前述したように、VT 信号は受信側の水平伸張処理に伴う S/N の劣化が大きいことから、ノイズ低減技術の実現が望まれている。簡単かつ効果の大きいノイズ低減手法として、コアリング(小振幅成分の強制カット)が知られている。しかし、プログレッシブ走査形態におけるフレーム内処理で信号生成する単純 LD 信号(表 4.1(a))や SSKF 信号(表 4.1(b))に対して、コアリングは適用できないと考えられていた¹⁸²⁾。この理由を、以下、単純 LD 信号と逐次 FD 信号(表 4.1(c))を比較しながら説明する。

図 4.18 に示すように、主信号と VT 信号は、それぞれプログレッシブ走査信号から走査線間引きにより生成する。単純 LD 信号は、間引いた走査線信号と上下の走査線平均値との差分($LD=X-(B+C)/2$)として生成する。また、逐次 FD 信号は、間引いた走査線信号と前フレーム信号との差分($FD=X-A$)として生成する。受信側では、それぞれの逆演算により、元のプログレッシブ走査信号(X')を再生する。すなわち、単純 LD 信号の場合には $X' = LD+(B+C)/2$ とし、逐次 FD 信号の場合には $X' = FD+A$ とする。

従来は、VT 信号のノイズ低減のため、図 4.32 のように VT 信号に直接コアリングを行っていた。この場合、コアリングにより $FD \rightarrow 0$ としても補間信号は $X' = A$ となるため前フレームとの差は生じないが、 $LD \rightarrow 0$ とすると $X' = (B+C)/2$ となるため、静止領域でも前フレームの信号値(A)との差が生じてフリッカ妨害となる。

そこで筆者は、単純 LD 信号や SSKF 信号にも適用可能な新しいコアリング手法¹⁸⁷⁾を提案する。以下、その動作原理を説明する。

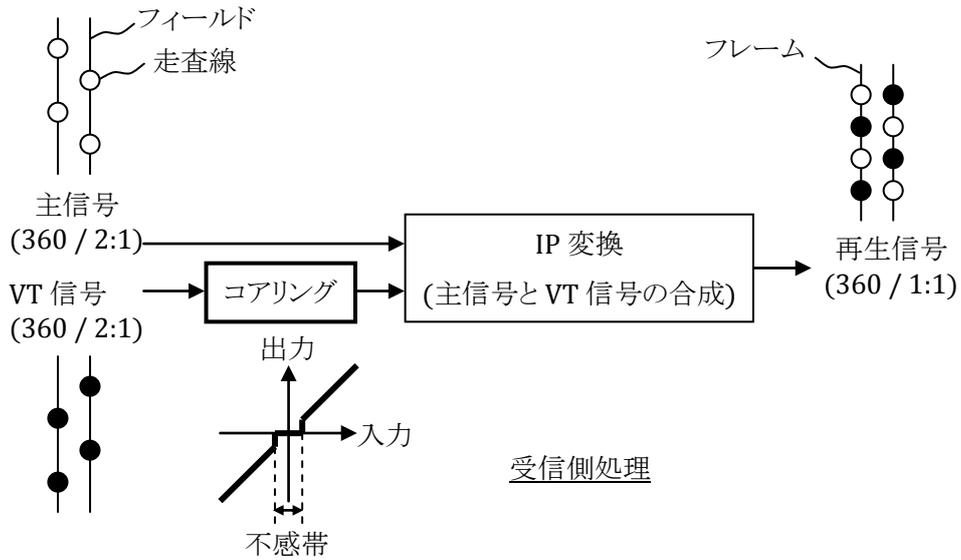


図 4.32 従来のコアリング手法

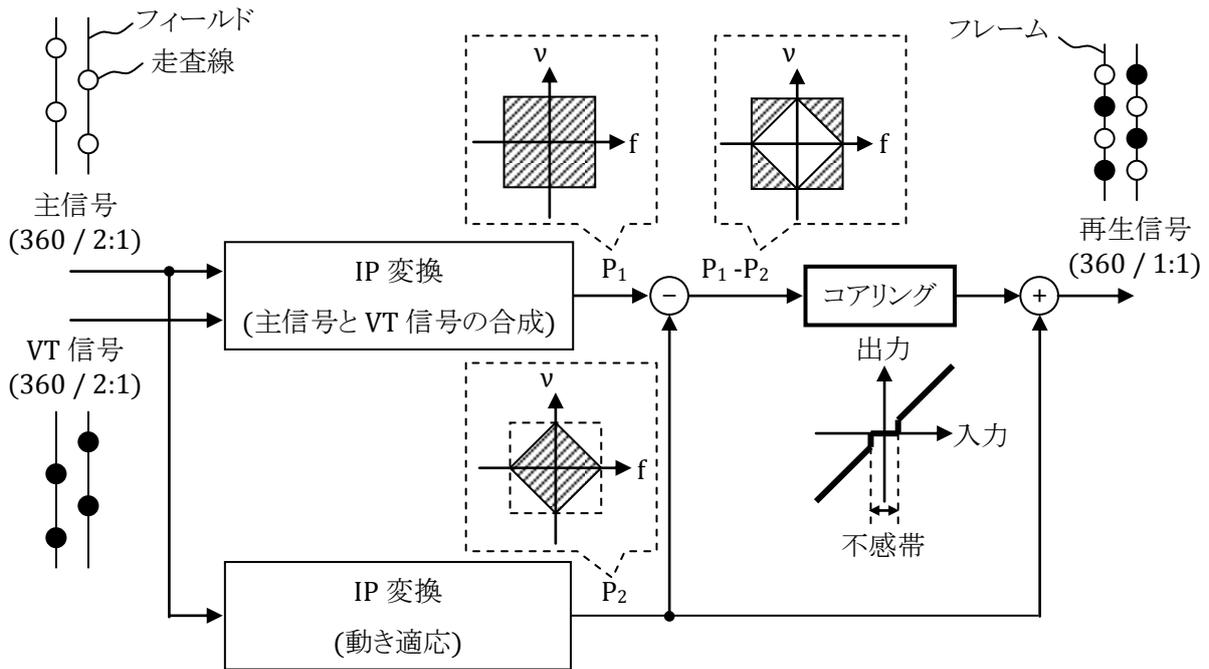


図 4.33 提案するコアリング手法

提案するコアリング手法では、図 4.33 に示すように、主信号と VT 信号を合成して IP 変換したプログレッシブ走査信号 P_1 と、主信号だけから動き適応 IP 変換により再生したプログレッシブ走査信号 P_2 の差分 ($P_1 - P_2$) をコアリング処理し、信号 P_2 に加える。すなわち、「動き適応処理では再生できない垂直-時間周波数の高域成分」だけに対してコアリングを行う。このとき、コアリングする前の信号 ($P_1 - P_2$) は、LD/FD 動き適応混合方式(表 4.1(f))によって生成した VT 信号と同じになる。従って、静止領域では前フレームの信号値 (A) との差が生じず、フリッカ妨害の発生を防ぐことができる。

ここで、動き適応 IP 変換における動き検出の精度は、フリッカ妨害の量とは無関係であり、コアリング量(すなわち、再生信号のノイズ量)が変化することになる。極端な場合、動き適応 IP 変換の代わりに固定のフィールド間 IP 変換としてもよい。このとき、コアリングする前の信号(P_1-P_2)は逐次 FD 信号と同じになり、上記と同様に、静止領域でフリッカ妨害は発生しない。

以上のように、提案手法では静止領域で前フレームの信号値(A)との差が生じないため、フリッカ妨害は発生しない。この手法は、単純 LD 方式や SSKF 方式を含むすべての VT 信号に対して適用可能である。

4.5 まとめ

本章では、NTSC 方式と両立性を保ったワイドアスペクト化手法について検討を加え、特にレターボックス形式における走査線数変換技術とノイズ低減技術について述べた。

レターボックス形式では、ワイドカメラで撮影した有効走査線 480 本の画像信号を垂直方向に 3/4 倍(360 本)に縮小して主信号とし、現行アスペクト(4:3)の画面中央の主画部に配置して伝送する。現行受像機では、画面上下に生じる無画部も含めた画像が表示される。一方、専用のワイド受像機では、主信号を垂直方向に 4/3 倍に拡大し、走査線数を 480 本に戻して再生する。このとき、単純にスケーリング(画像サイズ変換)を行うのではなく、現行受像機上の再生画像を破綻させることなく、無画部を利用して送信側から伝送された解像度補強信号も併せることにより、垂直解像度 480 本のワイド信号を再生できるようにすることが課題であった。

まず、走査形態の違い(プログレッシブ走査とインタレース走査)が走査線数変換結果に与える影響について整理し、プログレッシブ走査の形態で走査線数変換する必要性について解説した。また、送信側で走査線数変換(480 本→360 本)を行う際に失われてしまう垂直高域成分を補強する「垂直解像度補強信号(VH)」と、送信側でのプログレッシブ・インタレース走査変換(360p→360i)の際に失われてしまう垂直-時間周波数成分を補強する「垂直-時間解像度補強信号(VT)」について検討を加え、提案手法の画質を確認するソフトウェアシミュレーション実験を行った。以下、その結果をまとめて示す。

第 1 に、垂直解像度補強信号(VH)の生成手法に関し、走査線の総数が、カメラから得た原信号(480 本)、伝送信号(主信号 360 本+補強信号 120 本)、および受信側で逆変換した信号(480 本)の間で変化しないことに着目し、4 本ずつの走査線を処理単位とする 4×4 マトリクス演算によって走査線数変換を行う手法(マトリクス法)を開発した。受信側では、この逆マトリクス演算を行うことにより完全再構成の特性が得られることを理論的に示すとともに、従来一般的なフィルタによる走査線数変換で生じてしまう画質劣化(減衰、折り返し歪)がマトリクス法では生じないことを、シミュレーション実験によって確認した。その一方で、現行受像機にてマトリクス法による伝送信号を再生すると、垂直直流成分への折り返し歪が多く発生することがわかった。これは、送信側で走査線数を 4→3 変換する際に、直流に折り返す前の垂直周波数成分(360cph (=1440*1/4), 720cph (=1440*2/4), 1080cph (=1440*3/4))の残留が多いためと考察した。

第 2 に、上記マトリクス法の課題(現行受像機における折り返し歪)を改善するために、8 本ずつの走査線を処理単位とする 8×4 マトリクス演算によって走査線数変換を行う手法(拡張マトリクス法)を開発した。受信側では、送信側マトリクスと一定の関係にある 8×4 マトリクス演算によって走査線数逆変換を行うことにより、完全再構成の特性が得られることを理論的に示すとともに、再生画像に画質劣化(減衰、折り返し歪)が生じないことをシミュレーション実験によって確認した。また、この拡張マトリクス法では、前述した直流に

折り返す前の垂直周波数成分(360cph, 720cph, 1080cph)をすべて零点にできるため、現行受像機上のモアレについてもほとんど目立たなくできることを確認した。

第3に、垂直-時間解像度補強信号(VT)の生成手法に関し、BTA(放送技術開発協議会、現在はARIB(電波産業会))にて議論された6方式(単純LD方式、SSKF方式、逐次FD方式、フレーム完結FD方式、LD/FD固定混合方式、LD/FD動き適応混合方式)の中で、SSKF方式だけにVT信号に混入する伝送ノイズの低減効果があることを理論的に示した。これは、受信側でVT信号に掛かる垂直HPFが各VT信号生成手法間で異なり、その特性が再生画像のS/Nに大きな影響を与えるためであると考察した。また、このノイズ低減効果を確認するシミュレーション実験を行い、同HPFによるノイズ低減効果が4~6dBであり、SSKF方式でVT信号の伝送振幅を1/2にしても、単純LD方式と同程度以上の評価S/Nになることを明らかにした。

第4に、コアリングを用いたVT信号ノイズ低減手法に着目し、プログレッシブ走査変換後に「動き適応IP変換処理では再生できない垂直-時間周波数の高域成分だけに対してコアリングする手法」を開発した。従来の一般的なコアリング手法では、単純LD方式やSSKF方式で静止領域にフリッカ妨害が発生してしまう問題があったが、筆者が開発した手法では、単純LD方式やSSKF方式でもフリッカ妨害が原理的に発生しないことを示した。

なお、BTAにおけるEDTV-II規格策定の過程で、垂直解像度補強信号(VH)と垂直-時間解像度補強信号(VT)を周波数多重^[67]して無画部で伝送することになった。4.4節で述べたように、VTは送信側で1/3水平圧縮する必要があるため、VHも同様に1/3水平圧縮することになり、無画部の走査線数(120本)を実効的に360本として扱えるようになった。これによって走査線数変換における垂直フィルタ設計の自由度が広がったこともあり、筆者らが提案する完全再構成が可能な走査線数変換(マトリクス法・拡張マトリクス法)ではなく、一般的な垂直フィルタによる走査線数変換手法がEDTV-II規格に採用された。

その後、EDTV-IIは1995年7月に本放送が開始されたが、1990年にGI(General Instrument)が発表したデジタルHDTV方式(DigiCipher)がきっかけとなって、世界中でデジタルTV放送実現の機運が高まり、EDTV-II自体も自然消滅する形となった。

現在のデジタルメディアの活用状況を鑑みると、単一の映像コンテンツをさまざまな解像度・画質で再生する「ワンソース・マルチユース」が重要となってきており、これを実現するためのスケーラブル符号化(例えばJPEG2000等)が注目されている。現在のスケーラブル符号化には、一般的な完全再構成フィルタバンク^[29;30]が採用されているが、整数単位(1/N)の画素数変換しか実現できない。

一方、筆者が開発した完全再構成の走査線数変換技術は、3/4倍などのような非整数画素単位の間引き・補間を行うことが可能であり、用途の制約が少ない非整数倍の画素数変換にそのまま応用できるため、今後、新たなスケーラブル符号化を実現できる可能性がある。

第5章 TVのタイムシフト視聴

5.1 緒言

EDTV-IIの標準化と製品化が完了した頃(1996年)、筆者は、高画質化に続くTVの高付加価値化のポイントは使い勝手の向上、特に録画機能の改善が重要であると考えた。

1996年には、地上波とBS(Broadcasting Satellite)によるアナログTV放送に加え、国内初となるCS(Communication Satellite)によるデジタルTV放送が始まり、一般の家庭においても数百チャンネルのTV番組が視聴可能な環境になろうとしていた。一方、人口(世帯数)や個人のTV視聴可能時間は、今後も大きな増加は望めない。その結果、各放送局は限られたパイをめぐるさらなる視聴率獲得競争に向かい、高視聴率が期待できるゴールデンタイム(午後7時～10時)に、面白い番組(視聴者が見たいと思う番組)を集中させることが予想された。あるいは、競争の少ない深夜早朝に視聴時間を分散させるために、日本との時差がある国際スポーツ中継などのコンテンツが増加していくことが予想された。その結果、TV番組を一旦録画して、視聴者の都合のよい時間に再生する「タイムシフト視聴」のニーズが高まるものと考えた。

その当時、タイムシフト視聴を実現するための民生用ビデオレコーダとして、VHS方式のVTR(Video Tape Recorder)が広く普及していた。しかし、VTRには以下に述べるような課題があり、使い勝手がよいとは言いがたい。まず、VTRでは一度に1つの映像・音声ストリームしか扱えないため、録画と再生を同時に行うことができない。すなわち、録画中の番組を巻き戻して最初から再生したくても、途中で録画をあきらめるか、録画が終了するまで再生を待つ必要がある。逆に、再生中は録画できないので、今後の録画予約状況を常に意識しながら再生する必要がある。さらに、録画したい番組がたくさんあっても複数番組を同時に録画することができない。また、VTRはハンドリングが面倒である。例えば、録画予約の際には空のビデオカセットを探してセットする必要があり、再生時には録画済みビデオカセットを探してセットし直す必要がある。テープメディアのため、頭出しに時間がかかるとともに、上書きによって誤消去してしまう危険性もある。

これらの課題を解決するために、ビデオテープに替わる新しい映像記録メディアとして、DVD(Digital Versatile Disc)の開発が各社にて進められ^[88;89]、1996年に再生専用のDVD-ROMが登場した。それと並行して、相変化記録媒体を用いることにより、記録したデータの書換えを可能とするDVD-RAM^[90]についても、実用化に向けた検討が盛んに行われていた。

一方、当時のデジタルメディアの課題は、長時間記録の実現であった。第1世代のDVD-RAM(容量2.6GB)では、3Mbps(bit per second)のストリームを約2時間、第2世代のDVD-RAM(容量4.7GB)でも約3.5時間しか記録できない。また、HDDも2GB程度の容量しかなかったため、約1.5時間しか記録できなかった。

そこで筆者は、DVDの特長であるリムーバビリティを活かし、ディスクチェンジャにより複数のメディアを連続的に使用することによって、長時間記録を実現することを発想した。また、単にVHSテープをDVDに置き換えるだけでなく、録画しながら別の番組を再生する「同時録再」や、同じ番組を録画しながら再生する「追いかけ再生」など、タイムシフトの新しいコンセプトを1997年に提唱するとともに、このコンセプトを具現化するビデオレコーダを試作した。この中で、DVDとHDDを階層ストレージ構成^[91]にして、DVDディスクを交換している間も記録再生動作が途切れないようにした。以下、その詳細について述べる。

本章ではまず、その当時に利用可能であった映像記録メディアの特徴を比較検討し、DVD-RAMの応用先としてビデオレコーダが適していることを示す。続いて、DVD-RAMを用いたタイムシフト視聴について検討を加え、DVDとHDDの階層ストレージ構成による長時間記録について述べる。また、DVD-RAMメディアに採用されたZCLV (Zoned Constant Linear Velocity)方式¹⁹⁰⁾に焦点を当て、従来は無駄になっていた空き領域を有効活用できるようにする。

5.2 DVD-RAMの特徴と応用先

1997年にDVDフォーラムにて標準化された第1世代のDVD-RAM¹⁹²⁾は、CD (Compact Disc)と同じ直径12cmのディスクに、片面あたり2.6GBのデータを1.4MB/s (11Mbps)の転送速度で記録再生する。画像、音声、データ等を区別することなく、同一のセクタ管理方法により記録再生できるため、用途を問わない多目的な記録媒体として利用できる。

一方、DVD-RAMと競合する書き換え可能な記録メディアは、その当時に多数存在した。例えば、PC用の記録メディアとして、光磁気ディスク(MO: Magneto-Optical disk)、HDD (Hard Disk Drive)、Removable HDD等のディスクメディアや、DLT (Digital Linear Tape)等のテープメディアがあった。また、TV用の記録メディアとして、(S-)VHS、ベータ、8mm等のようなアナログ記録のテープメディア、D-VHSやDVC (Digital Video Cassette)等のようなデジタル記録のテープメディアがあった。再生専用のディスクメディアとして、アナログ記録のLD (Laser Disk)やデジタル記録のVideo-CD等があったが、書き換え可能な動画用ディスクメディアはDVD-RAMが初めての実用化であった。このうち代表的な記録メディアの諸元を、表5.1に示す。

まず、DVD-RAMの長所として、DVD-RAMドライブ装置がCD-DA(一般の音楽用CD)、CD-ROM、DVD-Video、DVD-ROM等のメディアを再生できる点が挙げられる。すなわち、DVD-RAMドライブが、「記録も可能な高速CDドライブ」や「録画でき、映画DVDも再生可能な音楽CDプレーヤ」として、従来機器を代替する形態で普及することが期待できる。また、ディスクメディアの中では記録容量が比較的大きく、メディアのビットコストが安くなる。さらにメディアのリムーバビリティを活かし、大量のディスクを入れ替えながら使用することにより、他のメディアよりもコストメリットを出すことができる。

逆に、DVD-RAMには短所も多数ある。まず、DVD-RAMメディアをテープメディアと比較した場合、容量やビットコストはもちろん、転送速度の点でも圧倒的に不利である。すなわち、テープの方がデータのバックアップが短時間で済み、録画なども低コストかつ高画質で実現できるため、これらの用途への単純な置き換えには適さない。ディスクの優位性を出すには、テープでは適用困難な用途、例えばインタラクティブ操作(短時間の検索、頭出し等)が必要な用途等に用いる必要がある。

表 5.1 代表的な記録メディアの諸元 (1996年当時)

	記録容量 [MB]	転送速度 [Mbps]	シーク時間 [ms]
DVD-RAM (光ディスク)	2600	11	180
MO (光磁気ディスク)	640	15 ~ 30	30
HDD (磁気ディスク)	2000	30 ~ 60	10
DVC (磁気テープ)	≧ 12 GB	25	数分

DVD-RAMを他のディスクメディアと比較した場合、転送速度とシーク時間は、HDDが突出して高速であり、次いでMO、DVD-RAMの順に遅くなる。特にDVD-RAMのシーク時間はHDDより1桁遅く、テキスト等の細切れデータにランダムアクセスするような一般のオフィス用途や、複数のユーザや複数の処理タスクが同時に1台のDVD-RAMドライブにアクセスするような用途には不向きである。なお、DVD-RAMのシークが遅い理由は、磁気ヘッドに比べて光学系ヘッドが大きく(重く)慣性が大きいためと、DVD-RAMがZCLV(Zoned Constant Line Velocity)方式を採用しており、ZCAV(Zoned Constant Angular Velocity)方式のMOやHDDに比べてモータの回転速度制御などのオーバヘッドが原理的に生じるためである。逆に、ZCLV方式は常に一定の転送速度でデータを記録再生する用途に向いている。

ZCLV: ディスク上の区分(ゾーン)ごとに回転速度が異なり、記録周波数がほぼ一定の記録方式

ZCAV: 区分(ゾーン)ごとに記録周波数が異なり、回転速度一定の記録方式

また、容量の面でも、DVD-RAMは当時の民生用ディスクメディアの中では大容量であったが、HDDの容量が年々増加していることを考慮すると、リムーバビリティを必要としない用途では大きな優位性はない。

このように、DVD-RAMには突出した長所はないが、各項目で平均点以上の特性を持っている。長短をまとめると、以下の条件を総合的に満たす用途に適している。

- (1)CD-DA、CD-ROM、DVD-Video (DVD-ROM)等のディスクの再生互換性が必要な用途
- (2)DVD-RAMメディアのリムーバビリティを活かして、メディアを大量に使用する用途
- (3)数秒程度のオーダでインタラクティブに頭出し等を行う用途
- (4)アクセス後は、連続するデータをシーケンシャルに長時間記録再生する用途

上記(2)(3)(4)から、DVD-RAMは動画の記録再生に適しており、特に、複数のコンテンツからひとつを選択して再生するような検索機能付きビデオ録再用途に向いていることがわかる。この用途には、(1)のDVD-Video再生互換は重要であり、高品質なオーディオ回路も含まれることからCD-DAとの相性もよい。

以上の検討から、筆者は、DVD-RAMの応用先として、VTRに替わる家庭用ビデオレコーダが適しているという結論に至った。

5.3 DVD-RAMを用いたビデオレコーダの試作

5.3.1 タイムシフト視聴に対するユーザニーズの整理と開発目標

DVD-RAMを用いたビデオレコーダを開発するにあたり、まず筆者は、タイムシフト視聴に対して、以下のようなユーザニーズがあると考えた。

- (1)深夜早朝(平日)の番組を、暇な時間や休日にシフトして見たい。(単純なタイムシフト)
- (2)同時に放送されている複数の番組を、時間的にずらして見たい。(複数同時記録)
- (3)録画途中に、録画は続けながら、同時に最初(録画開始点)から見たい。(記録途中再生)
- (4)今のシーンをプレイバックして、もう一度見たい。(TVの特殊再生)
- (5)高速再生しながら、あらすじ(結末)だけを知りたい。(視聴時間の節約)
- (6)見たいものを見たいときに見たい。(Video on Demandの実現、整理・検索の容易化)
- (7)映画番組等を残しておきたい。(保存・整理・検索の容易化)
- (8)後で見ないかもしれないが、念のため録画したい。(割り込み対策、放送時間変更対策)

従来のVTR(1台)では、上記(1)(2)は1チャンネルだけに制限されるとともに、(3)は原理的に不可能である。また、(4)は(3)の一部であり、再生中は同時に録画できない。(5)(6)(7)は所望の番組(シーン)の検索、頭出しの待ち時間、テープの入れ替えが面倒などの問題がある。(8)は、例えば突然の電話等による割り込みへの対策(保険)としてリアルタイムの視聴と同時に録画したり、野球中継延長により見たい番組の放送時間が重なった場合に備えて1時間程度余分に録画したりする場合に相当する。この場合、録画時にはテープ残量、上書きの可否、裏番組の録画時間(VTR装置の占有時間)等を予め確認する必要があるなど、使い勝手の面で課題がある。

そこで筆者は、DVD-RAMのランダムアクセス性、およびリムーバブル性を活かして上記制約を無くし、柔軟なタイムシフト視聴を実現可能なビデオレコーダを提案する^{[31] [32]}。特に、DVD-RAM応用ビデオレコーダのコンセプトを、「見たいものを見たいときに簡単なハンドリングにより見ることができる柔軟なタイムシフト視聴」とし、以下のような2つの開発目標を挙げた。

第1の開発目標は、録画したい映像・音声ストリームと再生したい映像・音声ストリームを同時に独立して扱うことができるようにし、視聴時間の制約からユーザを開放することである。これにより、例えば録画を続けながらその番組の最初に戻って再生したり、以前録画した番組を見たりする「同時録再」が可能になる。また、放送中の番組についても、「一時停止」「巻き戻し」「ライブに追いつくまでの早送り(追いかけて再生)」等のトリックプレイが可能となる。視聴中の番組のトリックプレイを行いながら、さらに裏番組を録画する使用形態を想定し、再生1ストリームと記録2ストリームの合計3ストリーム(すなわち、視聴中の番組の記録と再生のために1ストリームずつ、裏番組のために記録1ストリーム)を独立して確保することにした。また、1996年当時は困難であったデジタル長時間録画の実現に向け、異なる記録メディアを組み合わせる階層ストレージ構成^[9]を採用し、そのハードウェア化に必要な諸条件を明確化することも開発目標とした。

第2の開発目標は、ハンドリング(保存、整理、検索等)を容易にすることである。これはディスクが本来もっている性質により容易に実現できそうである。そこで、第1の開発目標の実現について以下説明する。

5.3.2 DVD-RAMとHDDの階層ストレージ構成によるビデオレコーディング

デジタル符号化した映像のビットレートの上限は、DVD-RAMの転送ビットレート、および同時に扱うストリーム数と記録時間から決定される。一方、下限は画質から決定される。これまでの経験から、3Mbps程度あれば従来のVTR(VHS方式)と同等以上の画質を確保できることがわかっている。このビットレートであれば、3ストリームを同時に扱ってもDVD-RAMの転送ビットレートである約11Mbps以内に抑えることができる。

録画時間の確保は重要な課題である。筆者らがこのDVDレコーダを開発した1996年の時点では、一般に入手できるHDDの記録容量は最大でも2GB程度しかなかったため、3Mbpsのストリームを約1.5時間(=2*1000*8/(3*60*60))しか記録できなかった。同様に、第1世代のDVD-RAM(容量2.6GB)では約2時間(=2.6*1000*8/(3*60*60))、第2世代のDVD-RAM(容量4.7GB)でも約3.5時間しか記録できない。そこで筆者は、DVD-RAMの特長であるリムーバビリティを活かし、ジュークボックス等に利用されているCD用ディスクチェンジャをDVD用に改造して複数のDVDメディアを連続的に使用することによって、長時間記録を実現することを発想した。DVD-RAMメディアはCDと同一形状なので、チェンジャのメカ構造は安価に実現できる。また、ディスク交換を自動化し、空き領域の管理などを自動化することにより、5.3.1項で述べた第2の開発目標(ハンドリングの容易化)も同時に実現できることになる。

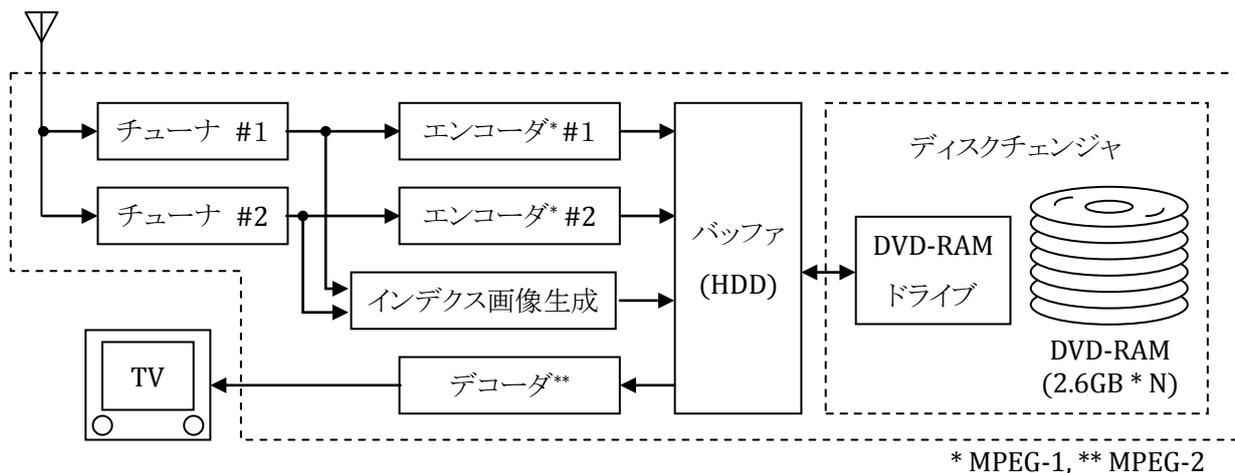


図 5.1 提案する DVD レコーダのブロック図

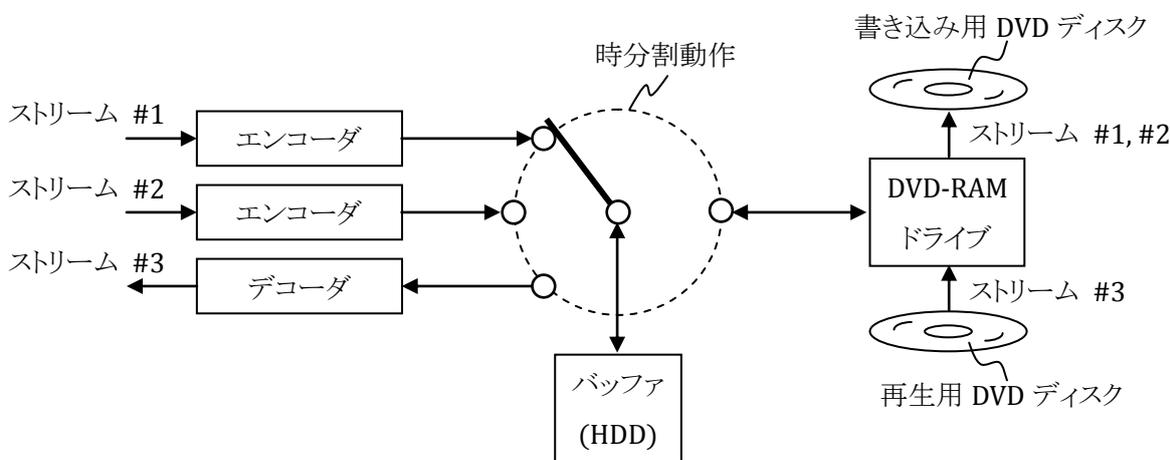


図 5.2 階層ストレージ構成

このビデオレコーダに必要な DVD-RAM ディスクの枚数は、各ユーザの使い方によって個人差があると思われるが、平日に録画したものを週末に見るような使い方を仮定すると、1 週間分のテレビ視聴時間の合計をひとつの目安にできる。日本人の 1 日の平均テレビ視聴時間は約 3.5 時間との調査報告があり、1 週間では合計約 24 時間となる。このとき DVD-RAM ディスクの枚数は、第 1 世代 DVD-RAM (2.6GB/枚) で約 13 枚 ($=3 \times 60 \times 60 \times 24 / (2.6 \times 8 \times 1000)$)、第 2 世代 DVD-RAM (4.7GB/枚) で約 7 枚 ($=3 \times 60 \times 60 \times 24 / (4.7 \times 8 \times 1000)$) となる。製品化の際には、低コスト化のために出荷時はごく少数(例えば 1 枚)のディスクだけを実装し、ユーザが徐々に枚数を増やしていく、等の導入方法も考えられる。

図 5.1 に、提案する DVD レコーダのブロック図を示す。前述したように、ディスクチェンジャ機構付き DVD-RAM ドライブを用いる。なお、1996 年の時点では、DVD-RAM ドライブそのものが開発途上であり入手不可能だったため、後述する試作実験では、DVD-RAM の動作を HDD により模擬した。

TV 信号を 3 ストリーム分扱うために、地上 TV 用チューナ 2 式、リアルタイム動作する MPEG-1 方式のエンコーダ 2 式と MPEG-2 方式のデコーダ 1 式を使用した。なお、コーデック(エンコーダおよびデコーダ)のコストが下がった現在では、MPEG-2 方式、あるいは、より圧縮効率が高い H.264 方式を用いればよい。

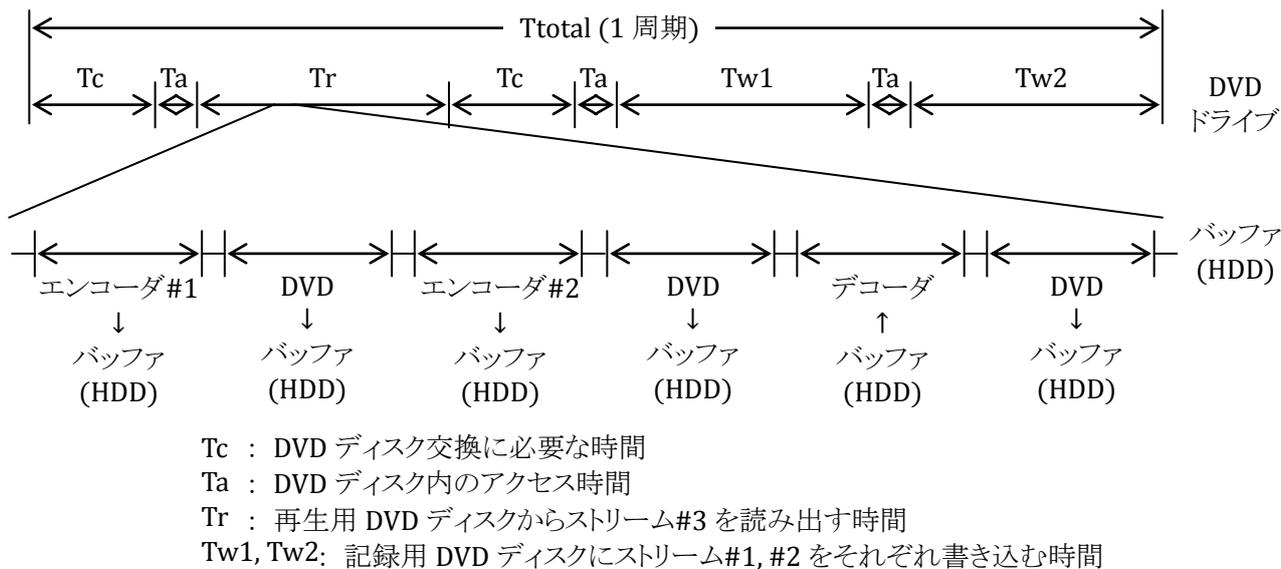


図 5.3 DVD ドライブとバッファ(HDD)の動作シーケンス

複数のストリームを同時に扱い、ディスク交換中も記録再生動作が途切れないようにするためには、データを一時的に保持するバッファが必要となる。このバッファの動作について以下検討を加える。

1台の DVD ドライブで同時に複数のストリームを扱うためには、読み出しと書き込みの時間間隔を小刻みに切り替えて、見かけ上同時に動作しているように制御する必要がある。すなわち、2つのエンコーダからのストリーム#1 および#2 とデコーダへのストリーム#3 を短いタイムスロットで切り替えて、DVD ディスク上の異なる領域から入出力する必要がある。しかし、前述したように、DVD はヘッドのシーク速度が比較的遅いため、このような高速アクセス動作には適さない。従って、高速動作するバッファと大容量の DVD(+ディスクチェンジャ)を組み合わせ、図 5.2 に示すような階層ストレージ構成にした。

また、ディスクチェンジャで DVD ディスクを交換している期間は、DVD への読み書きができないため、その間に発生する映像・音声ストリームを一時的にバッファリングする必要がある。最悪の場合、空き領域のない DVD ディスクに記録された番組を再生しながら、同時に裏番組を他の空き領域のある DVD ディスクに記録することもありうる。このとき再生用ディスクをドライブにマウントしている間は記録用データをバッファリングする必要があり、逆に記録用ディスクをマウントしている間は再生用データをバッファリングする必要がある。このときのバッファ容量が少ないと、一度にまとめて読み書きするデータ量が少なくなり、頻繁にディスク交換が生じて DVD への実効的な転送速度が極端に遅くなってしまふ。

以上の理由から、高速なデータアクセスが可能で、かつ大容量のバッファが必要になる。以下、動作に必要なバッファ容量に着目して検討を加え、このバッファとして HDD が適していることを示す。

まず、DVD とバッファの動作について説明する。最も過酷な動作条件として、空き領域のない DVD ディスクに記録された番組を再生しながら、同時に裏番組を他の空き領域のある DVD ディスクに記録することを考える。このとき、2枚のディスクを交互にマウントしながら動作させる必要がある。例えば、図 5.3 に示すようなシーケンスで、DVD ディスク交換、DVD ディスク内アクセス、再生用 DVD ディスクからの 1 ストリーム読み出し、記録用 DVD ディスクへの 2 ストリーム書き込みを行う。

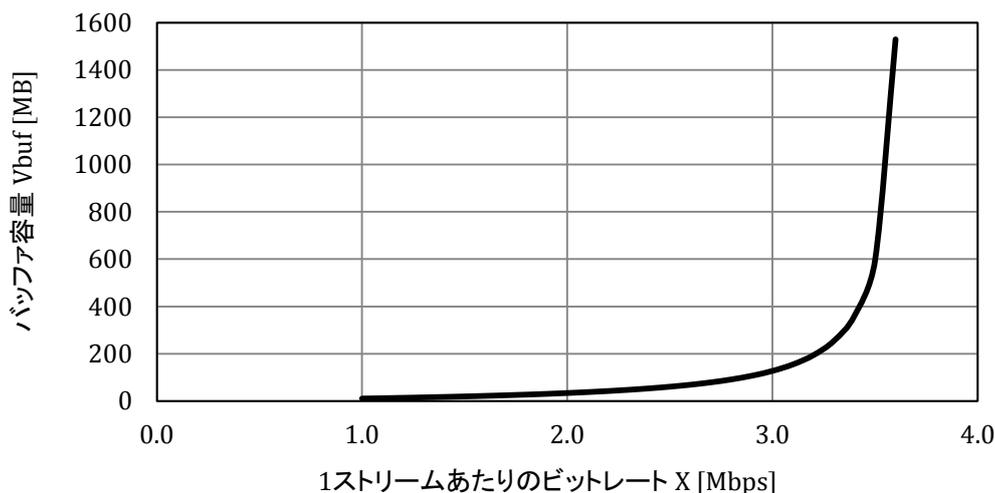


図 5.4 1 ストリームあたりのビットレートとバッファ容量の関係

ここで、DVD ディスク交換に必要な時間を T_c [s]、DVD ディスク内のアクセス時間(=シーク時間+回転待ち時間)を T_a [s]、実際に DVD ディスクから読み出す時間を T_r [s]、2 ストリームを DVD ディスクに書き込む時間をそれぞれ T_{w1} [s] および T_{w2} [s] とすると、1シーケンスの時間(T_{total})あたりに実際に読み書きする時間($T_r + T_{w1} + T_{w2}$)の割合が、このシステムの実効転送速度になる。これを高く保つためには、読み書きできない時間(T_c , T_a)が占める割合をできるだけ小さくするために、読み書きの時間(T_r , T_{w1} , T_{w2})を数分程度の長時間にする必要がある。すなわち、DVD からストリーム#3 を読み込み、デコーダに出力している間にも、エンコーダからのストリーム#1 および#2 を一時的にバッファに蓄える必要がある。このため、図 5.3 のようにバッファのシーケンスを 6 分割し、各ストリームをバッファに入出力すればよい。

DVD とバッファ間のデータ転送回数が他の 3 倍になっている理由は、エンコーダ・デコーダのデータレートが約 3 Mbps であるのに対し、DVD のデータレートが約 11Mbps (ほぼ 3 倍)だからである。

図 5.3 より、1 周期の合計時間 T_{total} [s] は、式(5.1)のように表せる。

$$T_{total} = (T_c + T_a) + T_r + (T_c + T_a) + T_{w1} + T_a + T_{w2} \quad (5.1)$$

ここで、エンコーダからの記録用データとデコーダへの再生用データのビットレートが等しく x [Mbps] であると仮定すると $T_r = T_{w1} = T_{w2}$ の関係になり、これを T_{rw} [s] と置いて整理すると、式(5.1)は式(5.2)のように変形できる。

$$T_{total} = 3T_{rw} + 2T_c + 3T_a \quad (5.2)$$

一方、エンコーダで 1 周期の間に発生するデータ量は $x \cdot T_{total}$ [Mbit] であり、これを T_{rw} (= $T_{w1} = T_{w2}$) の期間で DVD-RAM (11Mbps) に書き込むと考えると、式(5.3)が成り立つ。

$$x \cdot T_{total} = 11T_{rw} \quad (5.3)$$

デコーダについても同様に式(5.3)が成り立つため、エンコーダ(2 式)とデコーダ(1 式)のために必要なバッファ容量の合計 V_{buf} [Mbit] は、式(5.4)のように表せる。

$$V_{buf} = 3x \cdot T_{total} \quad (5.4)$$

式(5.2)、式(5.3)、式(5.4)から T_{total} を消去すると式(5.5)が得られる。

$$V_{buf} = 33x(2T_c + 3T_a) / (11 - 3x) \quad (5.5)$$



図 5.5 プロトタイプの外観(写真左)とメニュー画面の一例(写真右)

表 5.2 プロトタイプの仕様

項目	内容
信号源	地上アナログ放送
独立して扱うストリーム数	3 ストリーム (録画:2 ストリーム、再生:1 ストリーム)
コーデック	MPEG-1 エンコーダ (2 式)、MPEG-2 デコーダ (1 式)
ビットレート	3.4 Mbps
DVD-RAM	容量:2.6 GB * N 枚、データ転送速度:11 Mbps (HDD にて模擬)
HDD	容量: 2 GB (インデクス画像を含む)、データ転送速度: 35~50 Mbps
検索機能	静止縮小画像(サムネール画像)のインデクス情報による
ユーザインタフェース	赤外線リモートコントローラ
全体制御	SH-1 マイコン

式(5.5)において、一例として、ディスク交換に必要な時間 T_c を 10 [s]、ディスク内のアクセス時間 T_a を 0.2 [s]と仮定して試算した場合のデータビットレート x [Mbps]とバッファ容量 V_{buf} [MB]の関係を、図 5.4 に示す。画質の点からデータのビットレートをできるだけ大きくしたいが、同図より、3.5 Mbps を越えたあたりからバッファ容量が急激に増加し、3.7 Mbps ($=11/3$)で無限大に発散することがわかる。従って、ビットレートを 3.0~3.4 Mbps に設定するのが好ましい。このとき必要なバッファ容量(V_{buf})は数百 MB~数 GB となる。この容量を確保できるデバイスとして、HDD を用いるのがコストパフォーマンスの点で最適と思われる。

以上のコンセプトに基づいて、図 5.5 に示すプロトタイプを開発した。その仕様を、表 5.2 にまとめる。このプロトタイプを用いて、以下の基本動作が正常に行われることを確認した。

- (a) 放送中の TV 番組のトリックプレイ(一時停止、逆再生、高速再生)
- (b) 上記トリックプレイと並行した裏番組録画
- (c) 録画済み番組再生と放送中の番組録画の同時動作

なお、高速再生(早送り)などのトリックプレイ時には、DVD から読み出す映像・音声ストリームのビットレートが一時的に上がって図 5.3 に示したシーケンスの定常状態から外れ、長時間トリックプレイを連続すると HDD がオーバーフロー/アンダフローすることになる。これを避けるため、今回のプロトタイプでは、オーバーフロー/アンダフローする直前に通常再生モードに自動復帰するように対策した。この対策方法については、使い勝手も含めて今後の課題とする。

また、前述したように、1996 年の時点では DVD-RAM ドライブそのものが開発途上であり入手不可能だったため、今回のプロトタイプでは、タイマにより HDD を断続的に動作させることにより実効転送速度を約 11 Mbps に抑え、DVD の動作を模擬した。実際の DVD は、ZCLV (Zoned Constant Linear Velocity) 方式のため、ゾーン間を跨るときに転送速度が若干小さくなる可能性がある。また、媒体欠陥対策(ディフェクトマネジメント)やリトライ動作などのように、今回想定しなかった動作が入る可能性がある。さらに、DVD ドライブにライトバックキャッシュ機能が無い場合には DVD 上のデータ配置が断片的になる可能性があるため、DVD の実効転送速度が下がる可能性がある。これらの動作確認および対策も、今後の課題とする。

5.4 DVD-RAM メディアに適したシームレス動作保証

1996 年に再生専用の DVD-ROM が登場し、DVD 時代の幕が開いた。DVD-ROM 用のアプリケーション規格として策定された DVD ビデオ規格は、現在では映画などのパッケージコンテンツ向けデータフォーマットとして広く普及している。このフォーマットは、コンテンツ製作者がプリアーサリング作業を通してストーリーなどを綿密に作り込むことにより、ユーザが再生時にカメラアングルを変更したり、複数の言語の中から音声や字幕を選択したり、ユーザの操作により次々とストーリー展開が変わっていくなど、多彩な再生形態を実現できる仕様になっている。その一方で、DVD ビデオ規格は、コンテンツをリアルタイムで記録したり、記録済みのコンテンツに対して編集や消去したりすることには適していない。

そこで、DVD-RAM などの書換え可能なメディア向けアプリケーション規格として、家庭用のビデオレコーダやビデオカメラへの応用を主なターゲットとする DVD ビデオレコーディング規格の標準化作業が 1997 年から開始され、1999 年 9 月に同規格(バージョン 1.0)^[92]が策定された。

筆者は、1997 年から DVD ビデオレコーディング規格の標準化作業に参画し、多数の技術提案を行った。その中のいくつかの技術が規格に採用されており、現在でも各社の機器で使用されている。本節では、提案技術のひとつであるシームレス動作保証手法について述べる。

5.4.1 DVD ビデオレコーディング規格の概要

DVD の規格は、図 5.6 に示すように、メディアごとに定められた物理規格、メディア内に記録されたユーザデータをファイルとして管理するためのファイルシステム規格、アプリケーション毎に必要なファイルのデータ内容を規定するアプリケーション規格から構成される。

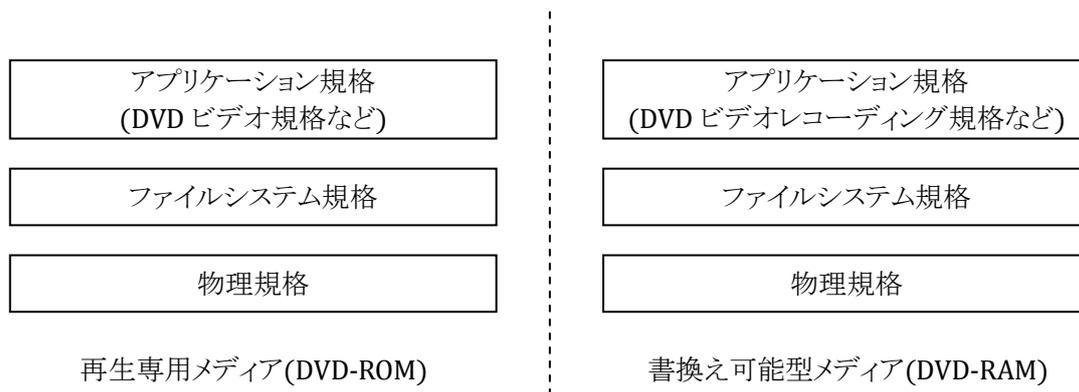


図 5.6 DVD 規格の構成 (抜粋)

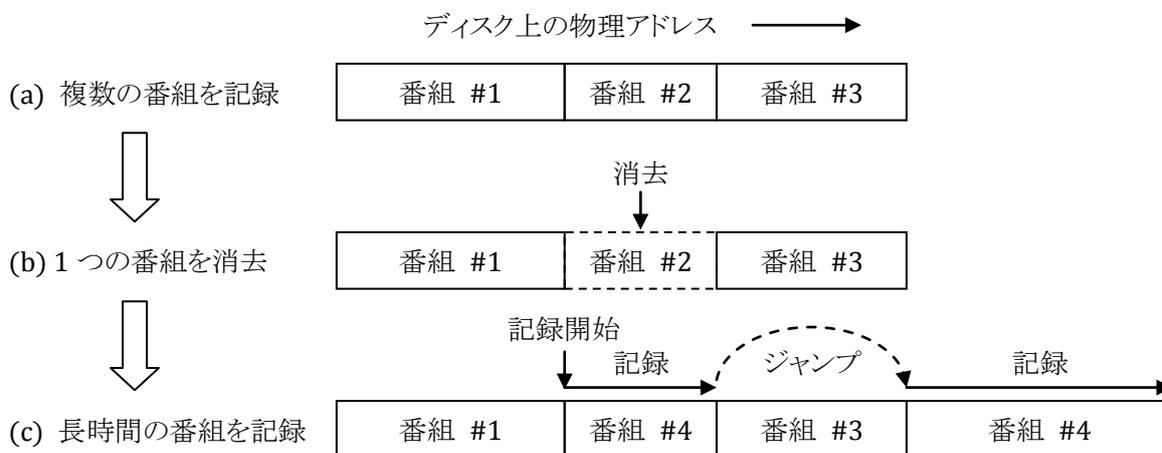


図 5.7 空き領域の有効利用 (分散記録の一例)

DVD ビデオレコーディング規格は、書換え可能なメディア向けのアプリケーション規格であり、家庭用のビデオレコーダやビデオカメラへの応用を主なターゲットとし、記録・再生・編集・消去といった既存の VTR (Video Tape Recorder) の機能を包含したうえで、さらにディスクの高速アクセス性などの特長を活かした仕様になっている。以下、基本的な動作に関する仕様について簡単に解説する [93]。

記録については、時間的に連続して入力されるビデオとオーディオのデータを、途切れることなくリアルタイムで記録できることが要求仕様とされた。シーケンシャルアクセスを前提とした従来の VTR では当り前に実現している仕様であるが、ランダムアクセスが可能なディスクメディアの場合には、ディスク上に存在する空き領域(データを記録しても良い領域)を極力有効に利用するために、物理的に不連続な領域に対してもデータを分散的に記録できるようにする必要がある。この分散記録を前提とした基準プレーヤモデル(後述)を規定することにより、例えば図 5.7 に示すように、(a)複数の番組を記録したのちに、(b)1 つの番組を消去して空き領域を増やし、(c)続いて長時間の番組を新規に記録開始した場合でも、データの流れが途切れることなく連続的(シームレス)に記録/再生できるようになる。以下、このシームレス動作を保証する手法について述べる。

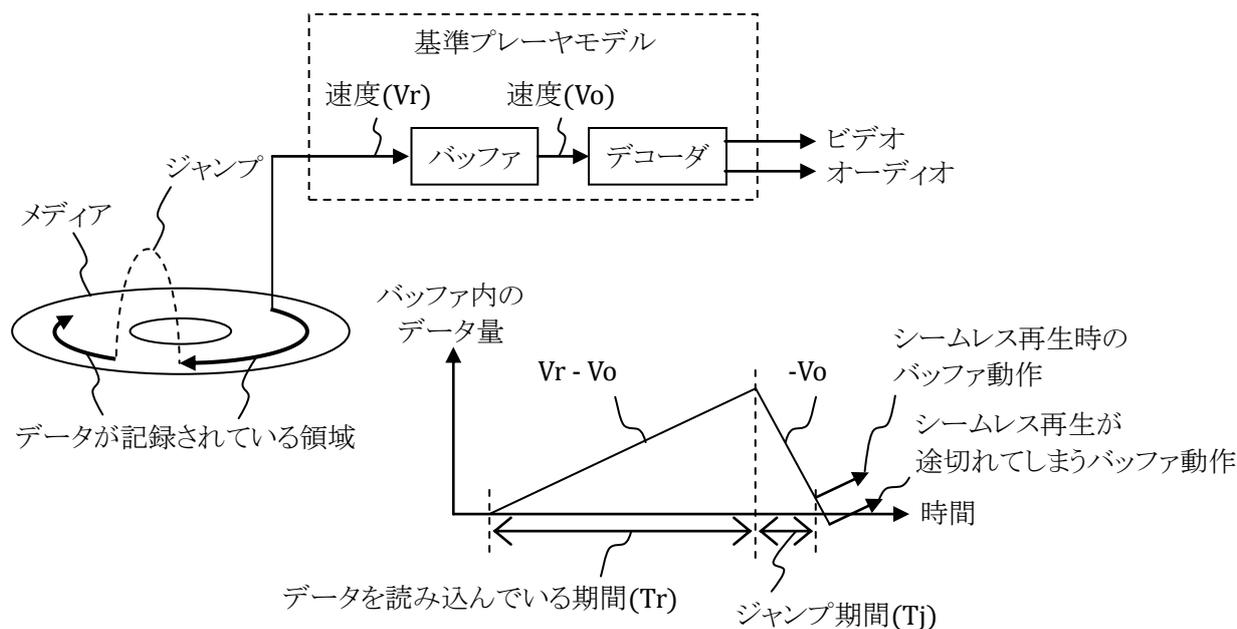


図 5.8 シームレス動作の原理

5.4.2 従来のシームレス動作保証

図 5.8 に、シームレス動作^{[94]、[95]}の原理を示す。まず、同図に示すような仮想的な基準プレーヤモデルを定義する。基準プレーヤモデルは、ディスクから読み出したプレゼンテーションデータ(ビデオおよびオーディオのデジタルデータ)を一時的に蓄えておくバッファと、バッファ内のデータを読み出してビデオとオーディオを再生するデコーダから構成される。

ディスクからバッファに入力する際のデータ速度を V_r とし、バッファからデコーダに出力する際のデータ速度を V_o としたとき、同図に示すように、データを読み込んでいる間は、 $(V_r - V_o)$ の速度でバッファ内のデータ量が増えていく。一方、光ヘッドのシーク動作などでデータを読み出せない状態(ジャンプ)が生じた場合、ジャンプしている間はバッファ内のデータ量が $(-V_o)$ の速度で減っていく。バッファ内のデータ量が 0 になる前にデータの読み込みを再開できればバッファからデコーダへのデータ供給が途絶えないため、シームレス動作となる。すなわち、ディスクから読出すデータ速度(V_r)、デコーダへのデータ転送速度の最大値(V_o)、ディスクからのデータ読出し時間(T_r)、ジャンプ時間(T_j)の間に式(5.6)の関係があればシームレス動作を実現できる。

$$(V_r - V_o) * T_r - V_o * T_j \geq 0 \tag{5.6}$$

規格^[92]では、基準プレーヤモデルに対して、データ速度(V_r , V_o)やジャンプ性能などに関する最悪値条件を規定している。実際のプレーヤは、このモデル以上の性能となるように設計されなければならない。

一方、実際のレコーダにおいても、上記基準プレーヤモデルと同等の性能(最悪性能)のプレーヤで再生した場合でも連続再生が可能ないように、ディスク上のプレゼンテーションデータの配置を考慮して記録しなければならない。具体的には、以下のようにプレゼンテーションデータを配置する必要がある。

データを速度(V_r)で時間(T_r)中に連続して読出し続けるためには、($V_r * T_r$)以上のデータ列をディスク上の連続したアドレスに予め書込んでおく必要がある。このデータ長を最小記録長(MCDL: Minimum Contiguous Data Length)と呼び、式(5.6)から式(5.7)を得る。

$$\text{MCDL} \geq V_r * T_r \geq (V_r * V_o / (V_r - V_o)) * T_j \quad (5.7)$$

例えば、 $V_r = 11 \text{ Mbps}$ (DVD-RAMドライブの標準データ転送速度)、 $V_o = 10 \text{ Mbps}$ (可変ビットレート符号化における最大データ速度の一例)、 $T_j = 1.5 \text{ 秒}$ (最内周から再外周までジャンプしたときの最大時間の一例)と仮定すると、 $\text{MCDL} \geq \text{約 } 20.6 \text{ MB}$ ($= (11 * 10 / (11 - 10)) * 1.5 / 8$)となる。

この従来手法では、最小記録長(20.6 MB)未満の空き領域はシームレス動作を保証できないため使用できない。使用できない容量(20.6 MB)は、DVD-RAMの記録容量(第1世代は2.6GB、第2世代は4.7GB)の大きさに対して無視できず、記録と消去の繰返しにより小さな空き領域が増えた場合には、ディスク利用効率が大幅に低下してしまうことになる。従って、最小記録長を極力小さくする方法が求められていた。

そこで、DVD-RAMの特徴を利用し、以下に述べるようにシームレス動作を保証しながら最小記録長を小さくして、ディスク利用効率を向上させる。

5.4.3 最小記録長制御を用いたシームレス動作保証

最小記録長(MCDL)を小さくするためには、式(5.7)からわかるように、ジャンプ時間(T_j)とデータ速度(V_o)を小さくすればよい。そこで、(1)ジャンプの種類に応じた最小記録長制御^[96]と、(2)データ速度に応じた最小記録長制御^[96]を行うことにする。以下、その詳細について述べる。

(1)ジャンプの種類に応じた最小記録長制御

DVD-RAMは、データ記録の際にレーザ光を当て、温度上昇によって結晶構造を一旦崩す。その後、ゆっくり冷やすと結晶に戻り、急冷するとアモルファスになる「相変化」を利用して書き込むデータを区別し、結晶とアモルファスで光反射率が変化する特性を利用してデータを再生する。従って、良好な記録再生特性を得るために、結晶化速度に対応した最適な線速度でデータ記録するのが望ましい。しかし、ディスク上の半径の異なる記録トラック間をアクセスする際に、線速度を一定に保つために回転数を変化させるのには時間がかかる。そこで、DVD-RAMにはZCLV (Zoned Constant Linear Velocity)方式が採用された^[90]。

ZCLV方式は、図5.9に示すように、ディスクの半径方向に同心円状の複数のゾーンに区切り、ゾーン内では回転数を一定とし、別のゾーンにアクセスしなければならないときだけ回転数を調整して、ディスクの内外周ともにはほぼ一定の線速度でデータを記録再生する方式である。第1世代DVD-RAMのゾーン数は24と規定されている。トラック1周あたりのセクタ(2KB単位のデータ記録領域)の数は、17(最内周:ゾーン#0)~40(最外周:ゾーン#23)であり、ゾーンが1つ外側になるごとに1セクタずつ増加する。このZCVL方式では、同一ゾーン内のデータにアクセスする場合には回転数が一定であり、かつヘッドのシーク幅が小さいため、データアクセス時間が短い。一方、他のゾーンにあるデータにアクセスする場合には、ゾーンごとに回転数調整の時間が必要であるとともに、ヘッドのシーク幅が大きくなるため、データアクセス時間が比較的大きくなる性質がある。

筆者は、この性質に着目し、データを記録した直後のジャンプがゾーン内ジャンプかゾーン間ジャンプかに応じて、最小記録長を制御する手法を開発した。以下、その詳細を説明する。

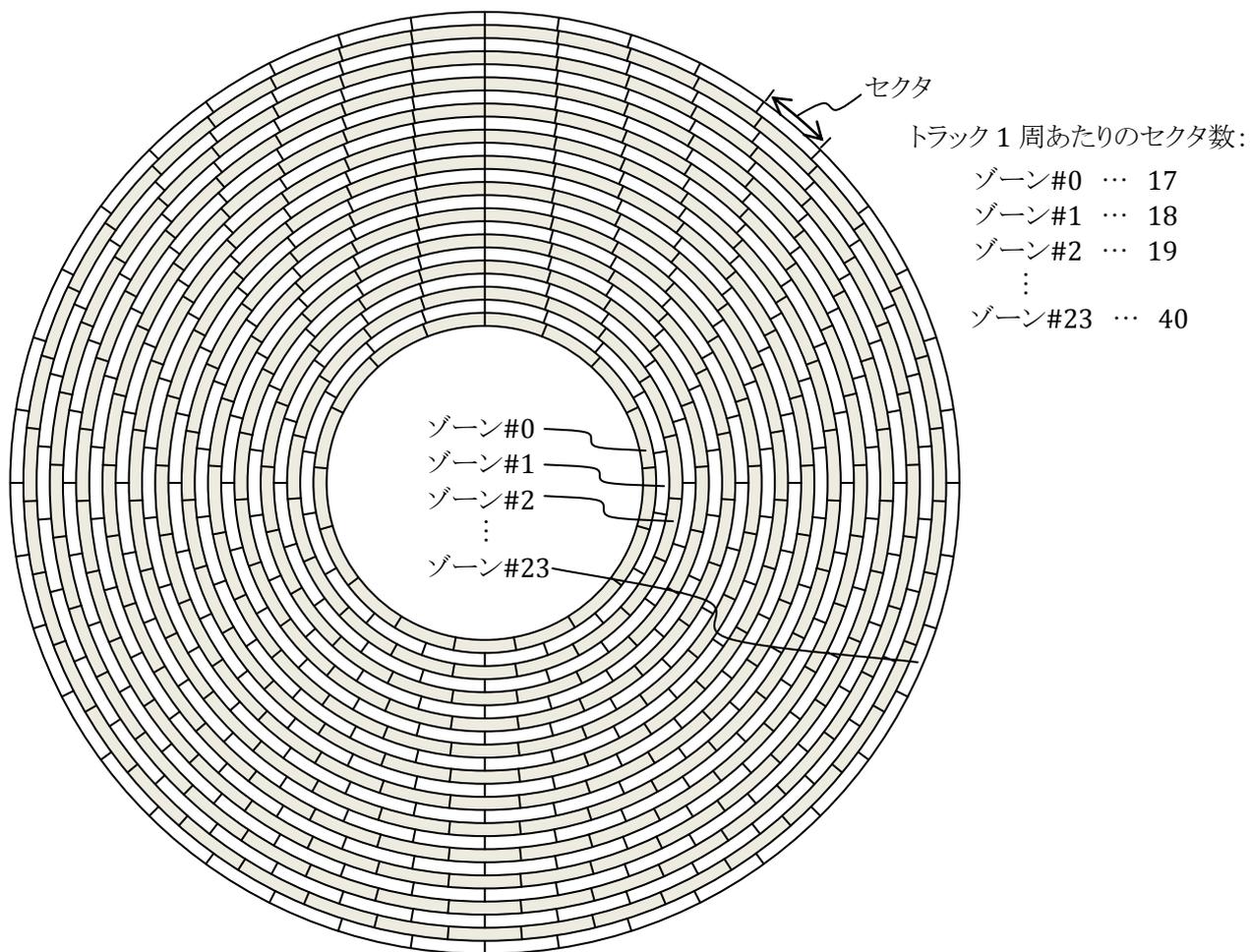
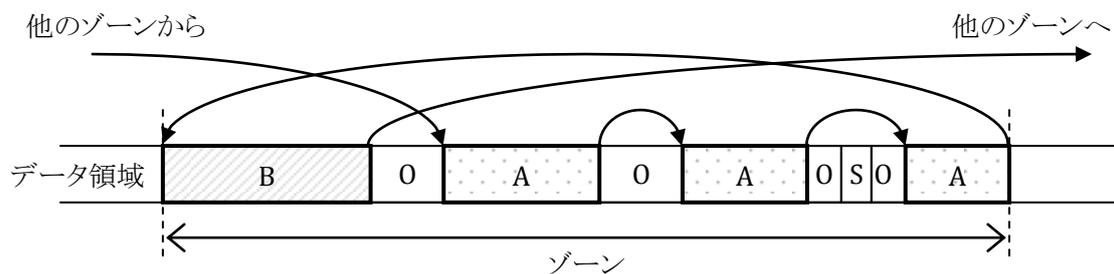


図 5.9 DVD-RAM ディスクのゾーン構造 (第 1 世代 DVD-RAM の場合)



- D1: ゾーン内ジャンプ時間の最大値(0.4 秒)に対応した最小記録長
- D2: ゾーン間ジャンプ時間の最大値(1.5 秒)に対応した最小記録長
- 領域 A: D1 以上、D2 未満の空き領域
- 領域 B: D2 以上の空き領域
- 領域 S: D1 未満の空き領域
- 領域 O: 他のデータが使用中の領域

図 5.10 ジャンプの種類に応じた最小記録長制御の動作例

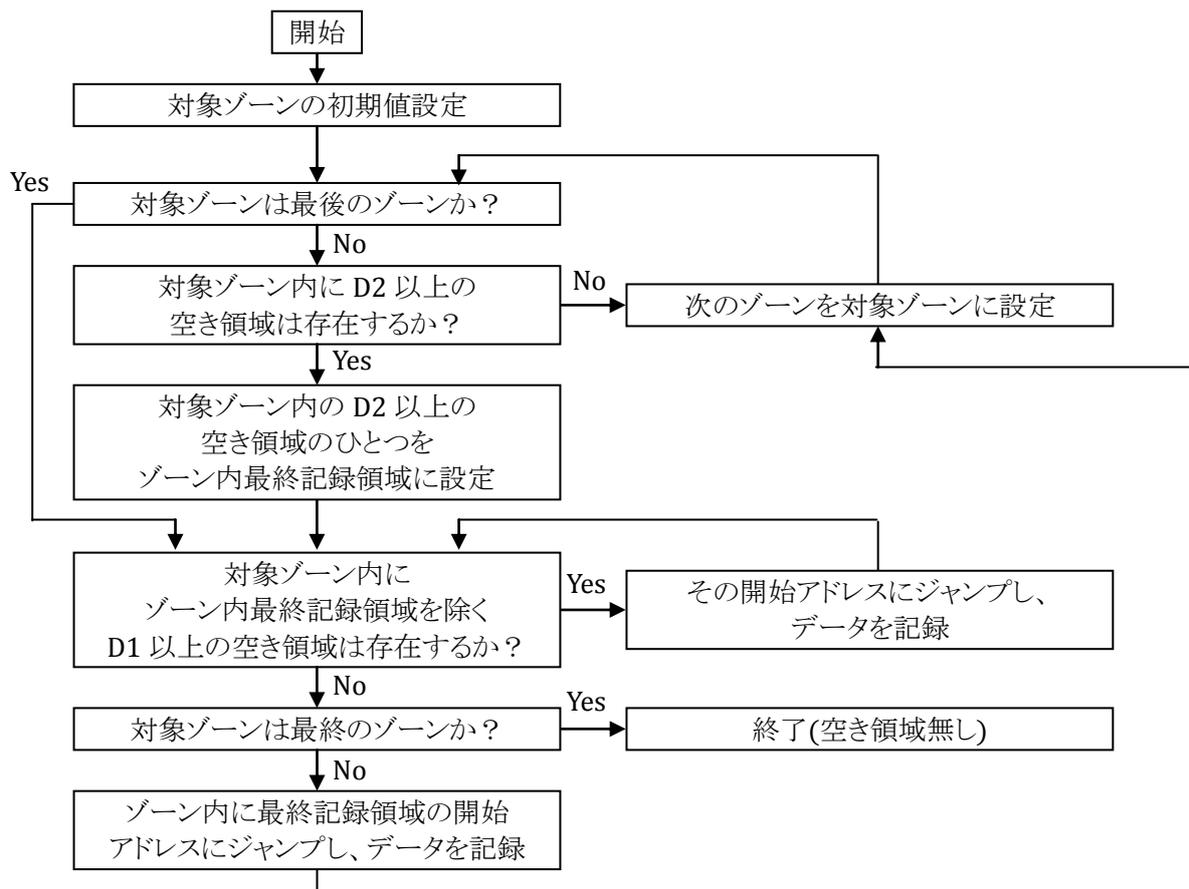


図 5.11 ジャンプの種類に応じた最小記録長制御のフローチャート例

ジャンプの種類に応じた最小記録長制御の動作例を図 5.10 に、そのフローチャートを図 5.11 に示す。

まず、式(5.7)から、ゾーン内ジャンプの最大時間($T_j = \text{約 } 0.4 \text{ 秒}$)に対応した最小記録長($D1 = \text{約 } 5.5 \text{ MB} (= (11 \cdot 10 / (11 - 10) \cdot 0.4 / 8))$)と、ゾーン間ジャンプの最大時間($T_j = \text{約 } 1.5 \text{ 秒}$)に対応した最小記録長($D2 = \text{約 } 20.6 \text{ MB} (= (11 \cdot 10 / (11 - 10) \cdot 1.5 / 8))$)を求める。データを記録しようとする対象ゾーンにおいて、さらに次のゾーンへジャンプする直前には $D2$ 以上の空き領域(図 5.10 の領域 B)にデータを書き込む必要がある。従って、この領域 B を「ゾーン内最終記録領域」に設定し、これ以外の空き領域から先に記録を開始する。なお、領域 B がゾーン内に複数ある場合には、そのうちひとつを任意に選択してゾーン内最終記録領域とすればよい。また、ゾーン内に領域 B が無い場合には、シームレスで次のゾーンにジャンプできないためこのゾーンへの記録をあきらめ、他のゾーンを対象ゾーンとして処理を続行する。

一方、ゾーン内ジャンプの直前は、 $D1$ 以上の空き領域(図 5.10 の領域 A)に記録すればシームレス動作を保証できる。このとき、ゾーン内最終記録領域以外の領域 B に記録してもよいことは明らかである。また、領域 A および領域 B の記録順序は任意である。

領域 A および領域 B をすべて使い切ったのちに、ゾーン内最終記録領域(領域 B のひとつ)にデータを記録して次のゾーンへジャンプすることにより、結果的に、他のゾーンへジャンプする直前には、必ず $D2$ 以上の空き領域への記録が行われるように制御できる。

なお、 $D1$ に満たない空き領域(図 5.10 の領域 S)は、シームレス動作を保証できないため使用しない。また、他のデータが使用中の領域(図 5.10 の領域 O)も当然ながら使用できない。

なお、対象ゾーンの初期値は任意であり、例えば記録媒体の最内周に位置するゾーンを対象ゾーンとして設定すればよい。また、再内周のゾーンから外周側に向かって順にサーチする場合には、ひとつ外周のゾーンが次の対象ゾーンとなり、再外周のゾーンが最後のゾーンになる。

以上のような記録制御を行うことにより、再生時に、ゾーン内のジャンプの直前には D1 以上のデータが、また他ゾーンへのジャンプの直前には D2 以上のデータが、必ずバッファに連続して読出されるため、シームレス動作を保証することができる。従来手法では、シームレス動作を保証するため、約 20.6 MB 未満の容量の空き領域は利用できなかったのに対し、提案手法では約 5.5MB 以上の容量を持つ空き領域がすべて利用可能となった。

(2)データ速度に応じた最小記録長制御

DVD フォーラムでは、画質と記録時間のトレードオフによって記録時のモードを複数定義し、例えば(a)高画質モード、(b)標準モード、(c)長時間モードとすることが提案された。画像データの符号化方式として、画像の精細さや動きの大きさなどに応じてデータ速度を可変とする可変ビットレート符号化方式(VBR)の採用が予定されていたため、どのモードにおいてもデータ速度の最大値は一定とし、各モードでデータ速度の平均値を規定する方向で議論が進んだ。

一方、前述した式(5.7)より、データ速度の最大値(V_0)に応じて最小記録長が大きく変化することがわかる。そこで、上記各モードの記録時のデータ速度の最大値(再生時のデータ速度 V_0 と同じ)を、例えば(a)10Mbps、(b)7Mbps、(c)3Mbpsと規定することにより、シームレス動作保証のために従来(a)は 20.6 MB 未満の容量の空き領域は利用できなかったのに対し、本方法では(b)3.6MB($= (11 \cdot 7 / (11 - 7)) \cdot 1.5 / 8$)、(c)0.8MB($= (11 \cdot 3 / (11 - 3)) \cdot 1.5 / 8$)以上の容量を持つ空き領域がすべて利用可能となる。

前述の提案手法(1)(2)における最小記録長の一例を、表 5.3 にまとめて示す。前述したように、ゾーン内ジャンプの最大時間を 0.4 秒、ゾーン間ジャンプの最大時間を 1.5 秒と設定し、データ速度の最大値を高画質モードでは 10 Mbps、標準モードでは 7 Mbps、長時間モードでは 3 Mbps と設定し、ディスクから読出すデータ速度(V_r)を 11 Mbps とし、式(5.7)から試算した。なお、従来はゾーン間ジャンプと高画質モードの設定のみである。表 5.3 より、シームレス動作の保証のために、従来は 20.6 MB 以上の物理的に連続する空き領域が必要であったのに対し、ジャンプの種類に応じて制御する方法により 5.5 MB、さらにデータ速度の最大値を設定することにより 0.2 MB 以上(長時間モード)の連続する空き領域があれば利用できるようになることがわかる。

DVD-RAM は、PC とのディスク共用が目標のひとつであり、静止画(ビットマップファイルや JPEG ファイル等)やそれを貼り込んだ文書データの記録・編集・消去等が今後一般的となっていくと思われる。また、ユーザによるコマーシャル番組(CM)の削除などのように、数秒程度の不要なビデオクリップの削除が頻繁に行われる可能性がある。提案手法によって新たに利用可能になる数 MB 単位の空き領域は、ちょうどこれらのデータを消去したときに生じる空き領域のサイズと一致するため、ディスク利用効率の向上に有効である。

なお、実際にディスク利用効率がどの程度向上するかは、そのディスクの使用履歴に大きく依存するため、実際の使用環境での評価を行う必要がある。この評価は、今後の課題とする。

表 5.3 提案手法における最小記録長の一例

次のジャンプ モード	ゾーン内ジャンプ (例: $T_j \leq 0.4$ 秒)	ゾーン間ジャンプ (例: $T_j \leq 1.5$ 秒)
高画質モード (例: $V_o \leq 10$ Mbps)	5.5 MB	20.6 MB (従来手法)
標準モード (例: $V_o \leq 7$ Mbps)	1.0 MB	3.6 MB
長時間記録モード (例: $V_o \leq 3$ Mbps)	0.2 MB	0.8 MB

5.5 まとめ

本章では、TVのタイムシフト視聴に関する新しいコンセプトと、その試作について述べた。

1995年頃に普及していたVHS方式のビデオテープレコーダは、録画した番組単位の頭出しが困難であるとともに、誤操作による上書きの危険があり、使い勝手が悪かった。この問題を解決するために、ビデオテープに替わる新しい映像記録メディアとして、DVD (Digital Versatile Disc)の開発が各社にて進められていた。一方、当時のデジタルメディアの課題は、長時間記録の実現であった。例えば、第1世代のDVD-RAM (容量2.6GB)では、3 Mbps (bit per second)のストリームを約2時間、第2世代のDVD-RAM (容量4.7GB)でも約3.5時間しか記録できなかった。また、HDDも2GB程度の容量しかなかったため、約1.5時間しか記録できなかった。

そこで筆者は、種々の映像記録メディアの特徴を比較検討し、DVD-RAMに適した応用先を示した。この中で、DVDの特長であるリムーバビリティを活かし、ディスクチェンジャにより複数のメディアを連続的に使用することによって、長時間記録を実現することを発想した。また、単にVHSテープをDVDに置き換えるだけでなく、録画しながら別の番組を再生する「同時録再」や、同じ番組を録画しながら再生する「追いかけ再生」など、タイムシフトの新しいコンセプトを提唱するとともに、このコンセプトを具現化するビデオレコーダを試作した。以下、その結果をまとめて示す。

第1に、DVD-RAMのシーク時間はHDDより1桁遅く、テキスト等の細切れデータにランダムアクセスするような一般のオフィス用途や、複数のユーザや複数の処理タスクが同時に1台のDVD-RAMドライブにアクセスするような用途には不向きであることを示した。一方、DVD-RAMには、CDやDVD-Video (DVD-ROM)との再生互換性、リムーバビリティ、数秒オーダのインタラクティブ性、などの特長があるため動画の記録再生に適しており、特に、複数のコンテンツからひとつを選択して再生するような検索機能付きビデオ録再用途に向いていることがわかった。これらの理由から、DVD-RAMの応用先として、VTRに替わる家庭用ビデオレコーダが適しているという結論に至った。

第2に、DVD-RAMを用いたビデオレコーダの開発目標を、(1)視聴時間の制約からの開放、(2)ハンドリング(保存、整理、検索等)の容易化、の2項目に設定し、「長時間録画」、「複数の映像・音声ストリームの同時録再」、「録画途中の追いかけて再生」の実現が重要であることを示した。また、この実現のため、ディスクチェンジャの利用によって複数のDVDメディアを連続的に使用し、長時間記録を実現するコンセプトを提案した。さらに、DVDとHDDを階層ストレージ構成にすることにより、複数のストリームを同時に扱い、ディスク交換中も記録再生動作が途切れないようにできることを示し、ハードウェア実現に必要な諸条件(HDD容量、ディスク交換時間、メディア内アクセス時間、データ転送速度、等の関係式)を明確化した。この諸条件を満たすハードウェアを試作し、(a)放送中のテレビ番組のトリックプレイ(一時停止、逆再生、高速再生)、(b)上記トリックプレイと並行した裏番組録画、(c)録画済み番組再生と放送中の番組録画の同時動作、の各動作が正常に行われることを確認した。なお、今回の試作では、DVD-RAMドライブが入手できなかったため、タイマによる断続的なHDD動作によりDVD-RAMドライブの動作を模擬した。

第3に、DVD-RAMのシームレス動作を保証しながら最小記録長を小さくして、ディスク利用効率を向上させた。この中で、DVD-RAMに採用されたZCLV (Zoned Constant Linear Velocity)方式のゾーン構造に着目し、データを記録した直後のジャンプがゾーン内ジャンプかゾーン間ジャンプかに応じて、最小記録長を制御した。これと併せて、画質と記録時間のトレードオフによって記録時のモードを複数定義し、各モードのデータ速度の最大値に応じて最小記録長を制御した。その結果、ゾーン内ジャンプの最大時間を0.4秒、ゾーン間ジャンプの最大時間を1.5秒、データ速度の最大値を高画質モードでは10 Mbps、標準モードでは7 Mbps、長時間モードでは3 Mbps、ディスクから読出すデータ速度を11 Mbpsとしたとき、シームレス動作の保証のために、従来手法(ゾーン間ジャンプと高画質モードの設定のみ)では20.6 MB以上の物理的に連続する空き領域が必要であったのに対し、提案手法では、ジャンプの種類に応じて制御する方法により5.5 MB、さらにデータ速度の最大値を設定することにより0.2 MB以上(長時間モード)の空き領域を利用できるようになった。

なお、その後のHDDの大容量化などの理由によりDVDチェンジャは普及しなかったが、筆者らが1997年に提唱し、試作を通じて実証したコンセプト(同時録再や追いかけて再生)は、2000年6月にソニーが発売したHDDレコーダや同年12月に東芝が発売した世界初HDD搭載DVDレコーダの原型であり、現在ではHDD搭載ビデオレコーダの必須機能と言えるほどに普及している。

第6章 TV放送とインターネットの融合

6.1 緒言

国内では、1950年代後半から1970年代前半の高度経済成長とともにTV受像機がほぼ全世帯の家庭に普及し、今ではTV広告費が年間2兆円を越える巨大産業に成長した¹⁹⁷⁾。その間、TVは高画質化だけでなく、高機能化の面でも大きく進展してきた。特に、2000年に本放送が開始されたBSデジタル放送では、ARIB(電波産業会)にて策定されたデータ放送用記述言語のBML(Broadcast Markup Language)¹³³⁾によって、従来の文字多重放送等とは比べものにならない多彩な画面表示や操作ボタンなどの柔軟なユーザインタフェースを実現するとともに、インターネットへのリンクなどの双方向機能も実現された。しかし、放送局側で予め用意したBMLコンテンツを入り口としているため、提供される情報は限定的であり、視聴者が欲しい情報になかなかアクセスできないという問題があった。

これと並行して、PC(Personal Computer)の普及に伴い、1990年代後半からインターネットを利用した一般家庭向けビジネスが急拡大してきた。特に、低料金化と広帯域化(ブロードバンド化)が進展し始めた2000年にはインターネット広告費は590億円となり、前年(241億円)の2倍を超える規模となった¹⁹⁷⁾。また、1999年から携帯電話を利用したインターネットサービスも開始された。

インターネットでは、世界中のユーザ間で様々な情報が交換され、共有されている。ネットワークサーバ上に公開されている情報は、HTML(Hyper Text Markup Language)と呼ばれる記述言語によって、テキスト、音声、映像などの情報が関連付け(リンク)され、ホームページと呼ばれるひとつの情報単位を構成している。さらにホームページどうしが互いにリンクされ、WWW(World Wide Web)と呼ばれる巨大な情報データベースを構成している。また、BBS(Bulletin Board System:電子掲示板システム)と呼ばれるシステムが運営されており、ユーザは、インターネットに接続されたPC端末を用いてサーバに接続し、電子掲示板にテーマ別に情報を書き込むなどして情報交換を行っている。また、遠隔地に離れた複数のPCユーザどうしが文字による会話(チャット)を行い、リアルタイムで情報を交換することも可能となっている。

このような状況のもとで、筆者は2001年から、TV放送とインターネットの融合技術の開発に着手した。次節で述べるように、それ以前にも、受動的な視聴を特徴とするTV文化と、能動的な情報収集を特徴とするインターネット文化を融合して新たなビジネスを創生しようとする試みが多くの企業や機関から発表され^{198; 99; 100; 101; 102)}、いくつかは事業化された。しかし、そのいずれもが、TV放送事業者の協力やネットワークインフラの成熟などを待たねばならず、爆発的な普及には至っていなかった。

本章では、TVとインターネットの融合に向けたこれまでのアプローチを整理したのちに、筆者らが目指すTV放送とインターネットの融合のコンセプトを明らかにし、TV放送を媒介としたインターネット応用コミュニケーションおよびインターネット情報検索を実現するスキームについて述べる。

6.2 TVとインターネットの融合に向けたこれまでのアプローチ

一般家庭向けのインターネットサービスとして、WWW(World Wide Web)、電子メール、チャット(キーボード入力によるオンライン会話)などがある。この中でWWWは、企業や個人がネット上に公開するホームページ(文字列、静止画、動画、音声などを含む情報ページ)に対して、不特定多数のユーザが自由に閲覧することが可能なサービスであり、インターネットサービスの代表として広く普及している。

TVとインターネット(特にWWW)の融合に向けたアプローチは、以下の5種類に大別できる。

- (1) インターネットブラウザ(閲覧)機能を備えたTV受像機(あるいはセットトップボックス形態の端末)を開発・販売する、ネット端末販売型アプローチ。
- (2) TV放送にホームページ情報やリンク情報(URL:Uniform Resource Locator)を多重し、TV受像機からインターネットへのアクセスを補助する、TVデータ放送型アプローチ。
- (3) 動画画像サーバをネット上に構築し、ストリーミング技術などを用いてインターネット経由でTV番組を配信する、コンテンツ配信型アプローチ。
- (4) 既存のTV放送事業者などが、TV番組と関連した内容のホームページを立ち上げ、TV番組の視聴率向上や番組関連商品の販売などを期待する、TV番組連動型アプローチ。
- (5) TV番組の登場人物や関連商品などをインターネット上で検索するサービスを立ち上げ、バナー広告(旗(バナー)のような形状でホームページ上に表示される広告)などによる収入獲得を目的とする、検索サービス型アプローチ。

上記(1)は、家庭用TVとリモコン等を用いて簡単にインターネットに接続できる端末を開発して販売するアプローチであり、1997年にソニーが発売した“WebTV”や、2000年にNTT-MEが発売した“わくわくステーション”などがこれにあたる。PCを持っていない家庭やPCの操作を困難と感じるユーザを主な顧客ターゲットとして開発された製品であるが、PC低価格化の流れや、端末の機能不足(電子メールに添付ファイルを付けられない、インターネットからデータやプログラムをダウンロードできない等)が原因で、売上げ実績は予測を大幅に下回った。

上記(2)は、BSデジタル放送(2000年12月放送開始)や、110度CSデジタル放送(BS衛星と同じ軌道に打ち上げられたCS衛星を用いた放送であり2002年3月放送開始)におけるデータ放送^[33; 103]の枠組みを用いる方法が一般的であり、そのTV受像機や外付けチューナ(IRD: Integrated Receiver Decoder、あるいはSTB: Set Top Box)には電話回線接続用のモデムを標準装備しているため、もともとインターネットへの接続が可能なハードウェア構成になっている。しかし、上記データ放送ではBML (Broadcast Markup Language)と呼ばれる記述言語が用いられており、インターネット上のWWWで一般的に用いられているHTML (Hyper Text Markup Language)と親和性が低いため、WWWも閲覧するためには、受像機の機能を拡張しなければならない^[104]。また、ユーザ(視聴者)の囲い込みと安全性の確保を理由に、放送事業者がインターネットとの融合に消極的という報道^[105]もあった。

上記(3)は、既存のTV事業者がTV放送を補完する番組をネット経由で配信するケースと、全くの異業種からネット放送に参入するケースがある。前者の一例として、2000年9月にCSデジタル放送(SKY PerfectTV!)の“食”専門放送局が“食チャンドットコム”という名前のサイト^[106]をWWWに立ち上げ、料理のレシピやレストラン情報などを流した。また、後者の一例として、パルコの出資会社“パルコ・ドット・ティーヴィー”のサイト^[107]で2001年1月から動画番組を配信し、服飾や化粧品の紹介を通じてパルコ店舗への集客を期待した。いずれのケースも、魅力的で日々新しいコンテンツをいかに安価に製作(あるいは入手)することが重要である。また、現在のTV放送と同等以上の画質・音質でネット放送するためには、ネットワークの広帯域化(ブロードバンド化)と低価格化を待たねばならず、当時は事業的にも技術的にも課題が多かったように思われる。

表 6.1 TVとインターネットの融合に向けたこれまでのアプローチとその課題

アプローチ	内容	課題
(1)ネット端末販売型	インターネットブラウザ(閲覧)機能を備えた端末を開発・販売	安価 PC との差別化、使い勝手と機能の向上
(2)TV データ放送型	TV 信号にホームページへのリンク情報(URL)を多重	放送事業者の協力、放送枠の買取り、方式によっては法律改正が必要
(3)コンテンツ配信型	インターネット経由で TV 番組を配信	良質で安価なコンテンツ入手、ネットワーク広帯域化/低価格化
(4)TV 番組連動型	TV 番組と関連したショッピングなどのホームページ立ち上げ	TV 放送事業者(あるいはその提携企業)以外の参入
(5)検索サービス型	TV 番組の登場人物や関連商品などをインターネット上で検索	TV 映像(被写体)の直接指定による検索技術の開発

上記(4)は、上記(3)と重複する場合もあるが、特に動画の配信は行わず、文字と静止画で構成された一般的なホームページの内容を、放送中の TV 番組とリアルタイムで連動させることにより、既存の TV 放送ビジネスの拡張を狙うものである。一例として、東京放送(TBS)は、2000年10月からオンライン・ショッピング・サイト「ishop」^[108]と TV 番組の連動サービスを開始した。このサービスの中で、TV 番組を同サイトへのポータル(玄関)と位置付け、視聴者が TV 番組を見て欲しいと思った商品を、欲しいと思った時間にだけホームページに載せることにより、サイト内で迷子になることを防いだ^[102]。ネットを利用したショッピングビジネスは拡大方向であり、TV 番組をポータルとするこのアプローチは非常に有力と思われるが、TV 放送事業者(あるいはその提携企業)以外の参入は困難である。

上記(5)は、Google^[109]や Yahoo^[110]などの一般的な検索サイトにて、検索のためのキーワードを入力したユーザに対し、その関連商品をバナー広告等により宣伝するものである。このサービスを TV に限定する必要はないが、上記(4)のように今後 TV がインターネットへのポータル(玄関)として利用される方向であれば、TV に特化した情報検索サービスが大きなビジネスに発展する可能性がある。

以上の内容を表 1 にまとめる。上記課題を踏まえ、(a)既に普及しているプラットフォーム(ハードウェア)をそのまま利用でき、(b)TV データ放送の枠組みを使用せず、(c)コンテンツそのものを配信せず、(d)TV 放送事業者との提携を必要とせず、(e)TV をポータルとした検索サービスを実現可能、という条件を満たした技術が求められる、と筆者は予想した。以下、筆者らが提案する新たなコンセプトについて述べる。

6.3 TV 放送とインターネットの融合に向けた提案コンセプト

TV 番組を視聴しているときに、例えば、番組の登場人物が身に付けている衣装等に興味を持ち、それに関する詳細な情報を知りたくなることがある。このとき、インターネットに接続された PC が手元があれば、サーチエンジンにアクセスして、適当なキーワードを入力して情報検索^[111]するのが一般的である。しかしながら、情報検索に必要な正しいキーワード、例えば商品名やメーカー名などがわからないことが多い。

このような場合には、前述した BBS やチャットを利用し、誰かに問いかけて必要な情報を得ることもできるが、この話題について話し合われている場を自分で探さなければならない。

そこで筆者は、TV 画面上の被写体をマウスなどのポインティングデバイスで選択(クリック)すると、その被写体に関連した商品名、メーカー名、価格などの情報が TV 画面上に表示されるような機能があれば便利になると考えた^[34]。

しかし、この機能の実現には、以下に述べる課題の解決が必要である。

第 1 の課題は、TV 映像とインターネット上の関連情報とのリンク(関連付け)手法の開発である。前述したように、従来のインターネット検索サービスでは、キーワード入力をもとにテキストサーチを実行する。このとき、関連情報を検索するためには被写体の映像からキーワードへの変換が必要になるが、キーワードとなるべき商品の名称やメーカー名などを映像から取得することは困難な場合が多い。従って、映像と関連情報を直接関連付けできる新しいリンク手法が必要である。

第 2 の課題は、関連情報へのリンク情報の生成と伝送に伴うコストの削減である。BS (Broadcast Satellite)や地上波による国内のデジタル TV 放送システムでは、BML (Broadcast Makeup Language)と呼ばれるスクリプト言語を映像と同時に伝送することにより、TV に映っている被写体からインターネット上の URL (Uniform Resource Locator)にリンクを張ることができる。しかしながら、映像に含まれるすべての被写体に対して、関連情報へのリンク情報を予め埋め込んでおくのは現実的ではない。また、リンク情報を追加した TV 番組をインターネットで再送信したりすると、番組制作費や放送枠の購入、権利処理等に多大なコストがかかることが予想される。従って、これらのコストを大幅に削減可能なリンク情報生成および伝送手法が必要である。

そこで筆者は、図 6.1 に示すシステムのコンセプトを提案する^[35; 112; 113]。このシステムでは、TV 映像に関連した情報を提供したい視聴者と、提供された関連情報を閲覧したい視聴者とを仲介するサーバを設け、視聴者が TV 番組を見ながら、TV 映像とそれに関連したインターネット上の情報とを動的にリンクする。これにより、他の TV 視聴者が、映像中の被写体(知りたい対象)をクリックするだけの簡単操作で関連情報を得られるようになる。この手法では、TV 映像にはリンク情報を埋め込まず、情報提供者と情報閲覧者の間を仲介するためだけに TV 映像を利用する。

また、この手法では、TV 視聴者からの記事投稿を利用するとともに、TV 放送とインターネット等の既存インフラを活用することにより、リンク情報の生成と伝送に伴うコストを削減する。これにより、一般の TV 視聴者やインターネット通信販売業者等が、TV 番組の関連情報を自由に登録/閲覧できるようになり、TV 視聴者間のチャット(文字入力によるコミュニケーション)や情報検索、ショッピング(通信販売)等が可能になる。

まず 6.4 節にて、TV に表示された同じ被写体に興味を持つ視聴者の間で情報交換が簡単に実現できるように新しいコミュニケーションのスキームを提案し、PC をベースとした実験システムの試作結果について述べる。このスキームにより、視聴者による TV 関連情報の投稿を促すことが期待できる。

続いて 6.5 節にて、TV 映像をキーとした情報検索のスキームを提案する。この中で、TV 映像とインターネット上の関連情報のリンク手法について述べたのちに、前述した TV 視聴者間コミュニケーションを利用した TV 映像関連キーワード抽出手法について述べる。

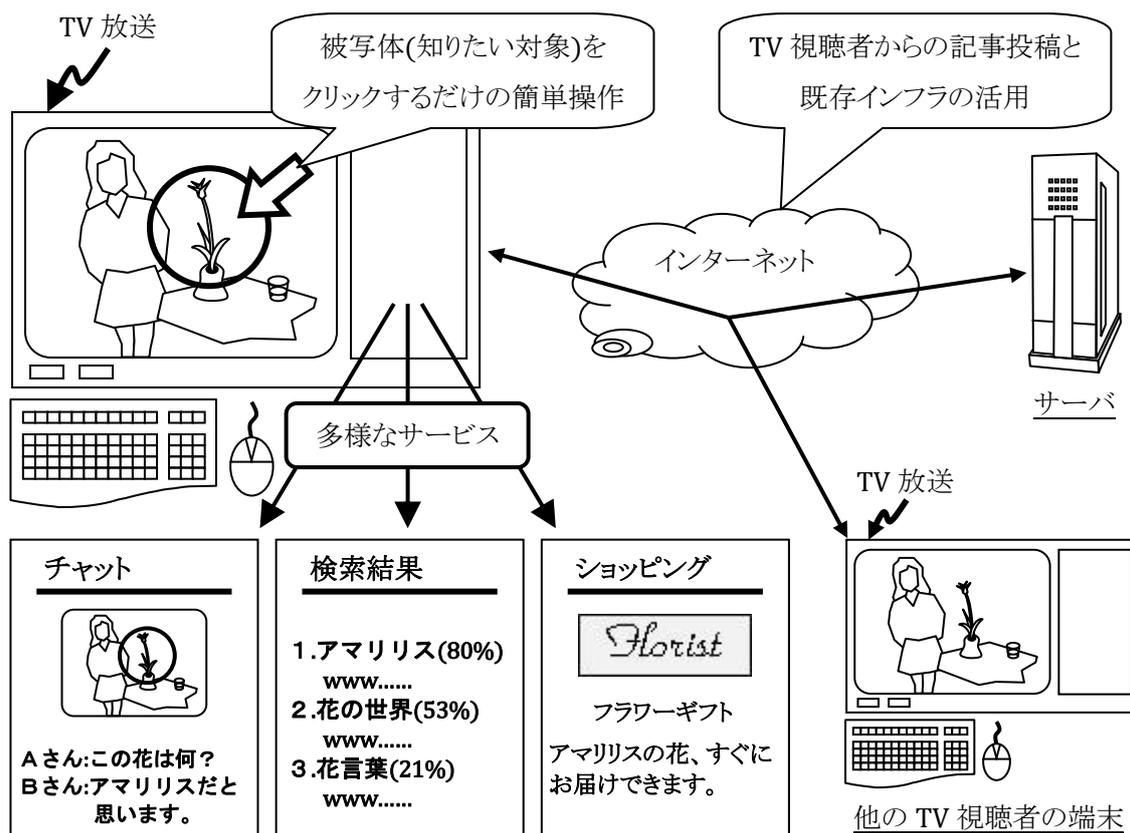


図 6.1 提案システムのコンセプト

6.4 TV 視聴者間コミュニケーション

筆者は、TV に表示された同じ被写体に興味を持つ視聴者の間で、情報交換(チャット)が簡単に実現できるコミュニケーションのスキームを考案した [112; 113; 35]。以下、この詳細について説明する。

まず 6.4.1 項にて、TV に表示されている同じ被写体に興味を持つ TV 視聴者どうしをまとめてグループ化するマッチング手法について述べる。続いて 6.4.2 項にて、画像そのものを伝送することなく、複数の視聴者間でサムネール画像を共有する手法について述べる。6.4.3 項にて、これらの使い勝手を検証するために試作した実験システムについて述べる。

6.4.1 TV 視聴者マッチング

図 6.2 に、本手法の概念図を示す。各端末に、TV 表示機能、画面上の位置を指し示すポインティングデバイス(マウス)とチャットのための文字入力装置(キーボード)を備え、インターネットを介してサーバに接続している。ここで、同図に示されている各ユーザは、同じ TV 番組を見ていると仮定する。

端末 A を操作するユーザが再生されている映像の対象に興味を持ったときに、ユーザは端末 A のマウスにより画面上の位置と範囲を指定する。図 6.2 の例では、画面に表示された花瓶の花の部分を選択してクリックし、画面の位置と範囲を指定していることを示している。このとき端末 A は、ユーザが画面をクリックしたときの、(a)放送チャンネル番号、(b)放送時刻、(c)指定された画面位置および範囲を示す情報(範囲指定情報:例えば円の中心座標と半径など)、から成る「クリック情報」を取得する。端末 A は、インターネットを通して、このクリック情報をサーバに送信する。

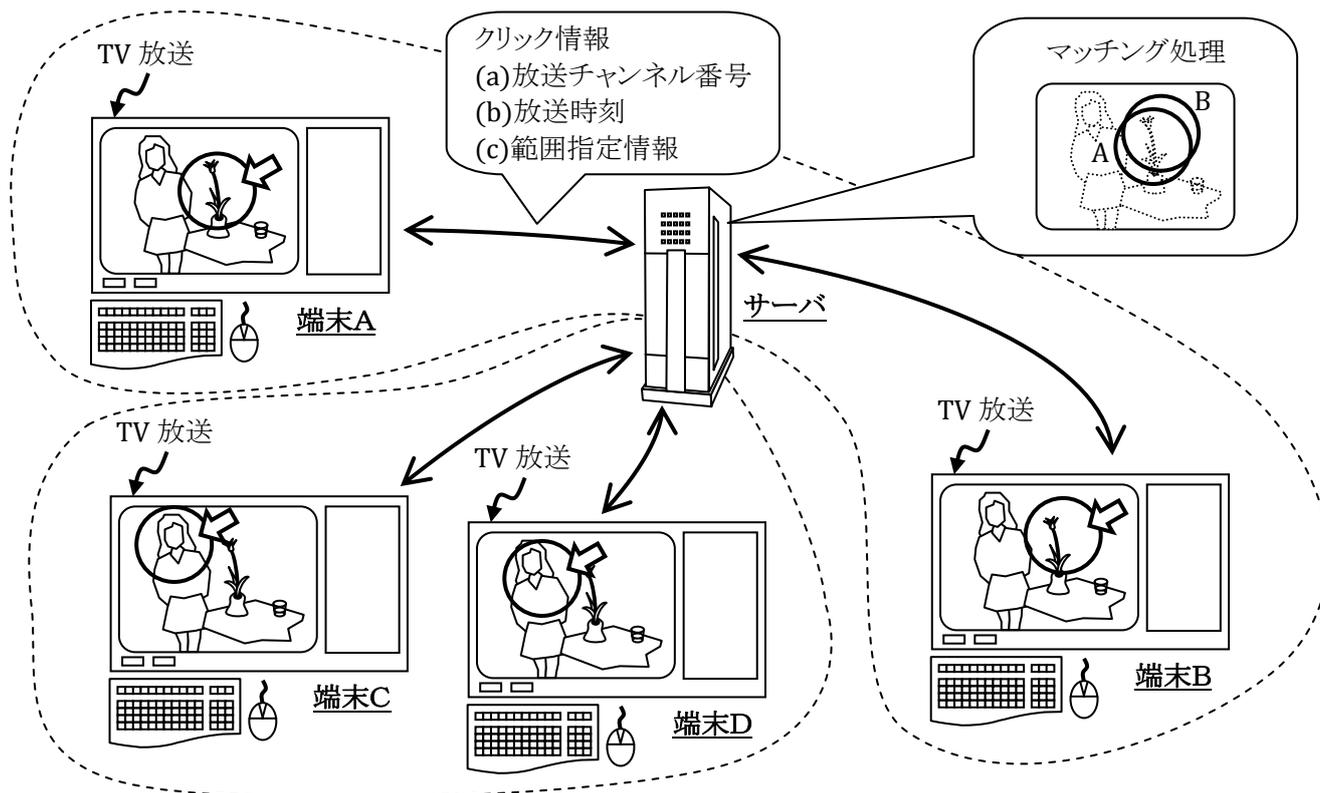


図 6.2 TV 視聴者マッチング手法の概念図

同様に、端末 B を操作するユーザが、同時に偶然同じ対象に興味を持って映像をクリックすれば、端末 B も上記と同様のクリック情報をサーバに送信する。

サーバでは、両者のクリック情報を比較して、端末 A と端末 B をひとつのグループとしてまとめるかどうかを判定する。具体的には、端末 A と端末 B が同じ放送チャンネルの番組を同時刻に見ていて、画面上の近い位置(図 6.2 の例では、同じ花の映像を含む範囲)をクリックしたと仮定する。この場合、サーバは、端末 A と端末 B が同じ対象を選択したと判定して、これらの端末どうしまとめたグループを形成する。この判定方法(時空間オーバーラップ判定)については、後述する。

同様に、図 6.2 に示す端末 C、D も、それぞれのクリック情報をサーバに送信したと仮定する。このとき、これらのユーザは、花ではなく出演者に興味を持って画面をクリックしたので、サーバは、端末 A、B とは別のグループを形成することになる。

時空間オーバーラップ判定について、図 6.3 を用いて詳しく説明する。例えば、端末 A、B、C、D の4つの端末があり、TV 放送の同じ番組、すなわち同じ地域で同じチャンネルを見ていたと仮定する。ここで、同図に示すように、端末 A、B、C、D がそれぞれ、フレーム#1、フレーム#2、フレーム#3、フレーム#N を示す時刻で各画面範囲を指定してクリックしたとする。ここで予めタイムスロットを設定しておき、このタイムスロットの期間内にクリックした端末を、グループ化の可能性がある端末としてピックアップする。この例では、端末 D はタイムスロットの外側なので、グループの候補から除外する。次に、ピックアップした端末が指し示す画面範囲を時間方向に合成したのちに、空間方向でのオーバーラップ判定を行う。ここで、端末 A と端末 B にて指定した画面範囲は重なっているが、端末 C の指定した画面範囲は重なっていないので、端末 C を除外する。最終的に、同図の例では、端末 A、B を同一グループとして判定し、端末 C、D は除外することになる。

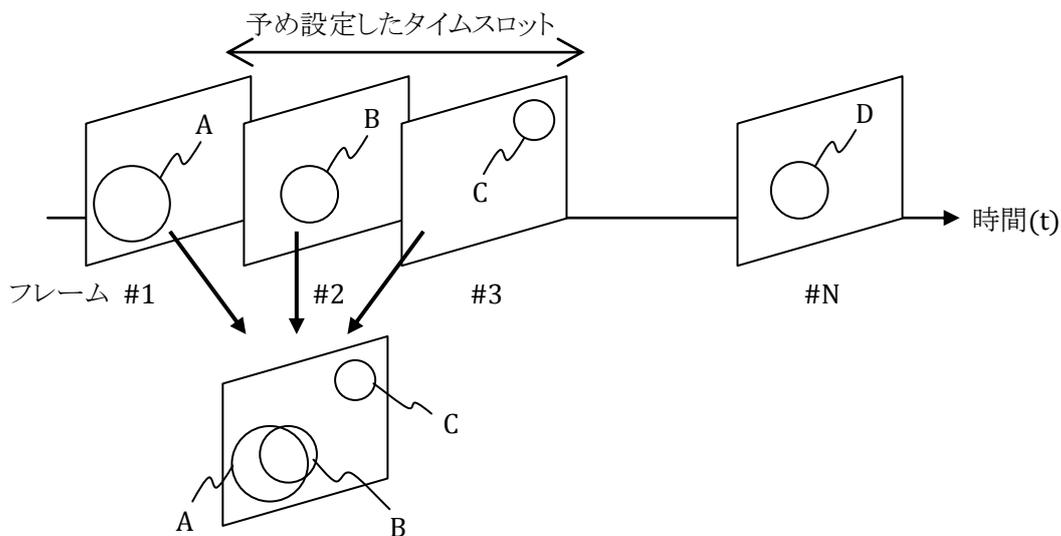
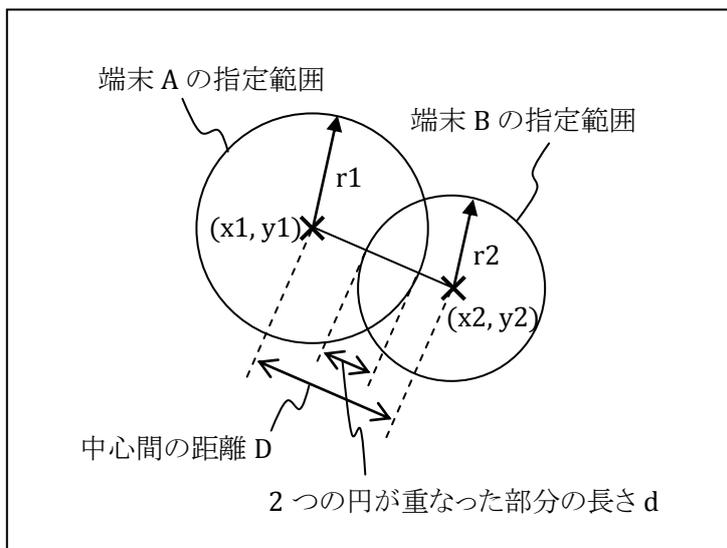


図 6.3 時空間オーバーラップ判定



一方の円が他方に内包される場合 ($0 \leq D \leq (\max(r1, r2) - \min(r1, r2))$)	$P = 2 * \min(r1, r2) / (r1 + r2)$
2 つの円の一部分が重なっている場合 ($(\max(r1, r2) - \min(r1, r2)) \leq D \leq (r1 + r2)$)	$P = (r1 + r2 - D) / (r1 + r2)$
2 つの円が重ならない場合 ($(r1 + r2) \leq D$)	$P = 0$

図 6.4 画面範囲のオーバーラップ度合いの算出手法の一例

画面範囲のオーバーラップ度合いの算出手法として、図 6.4 に示す手法が考えられる。同図において、端末 A の指定範囲は中心座標(x1, y1)と半径 r1 によって特定される円とし、端末 B の指定範囲は中心座標(x2, y2)と半径 r2 によって特定される円とすると、両者のオーバーラップ度合い(P)は、2つの円が重なった部分の長さ d から求めることができる。ここで、max(a, b)は a と b のうち小さくないほうを示し、min(a, b)は a と b のうち大きくないほうを示すと定義したとき、一方の円が他方に内包される場合(すなわち、各円の中心間の距離 D が、 $0 \leq D \leq (\max(r1, r2) - \min(r1, r2))$ の関係を満たすとき)には、 $d = 2 * \min(r1, r2)$ (すなわち、小さくないほうの円の直径)となる。また、2つの円の一部が重なっている場合(すなわち、 $(\max(r1, r2) - \min(r1, r2)) \leq D \leq (r1 + r2)$ の関係を満たすとき)には、 $d = (r1 + r2 - D)$ となる。また、2つの円が重ならない場合(すなわち、 $(r1 + r2) \leq D$ のとき)には、 $d = 0$ となる。さらに、 $P = d / (r1 + r2)$ と定義すると、 $0 \leq P \leq 1$ の範囲に正規化でき。正規化後の P の値を用いることにより、他の端末との P の値と比較して、オーバーラップの度合いが大きい順にソート(並べ替え)できるようになる。

また、サーバにて時空間オーバーラップ判定におけるタイムスロットとオーバーラップ度合いを制御することによって、1つのグループに属する端末(ユーザ)の数を適正に保つこともできる。すなわち、オーバーラップと判定されやすくすることによって1つのグループ内の人数を増やしたり、逆にオーバーラップと判定されにくくすることによって多人数のグループをいくつかの少人数のグループに分割したりすることによって、チャットが最も活発になるような人数のグループを意図的に形成できる。

以上述べたように、提案手法では、キーワードサーチ等の検索手段などを用いることなく、映像中の同じ被写体に興味を持った TV 視聴者どうしのグループを形成することができる。

6.4.2 サムネール画像共有

複数の端末間で各ユーザがチャットする際に、どの被写体に関して会話をしているのかを示すサムネール画像(「親指の爪」(サムネール)くらいのサイズで表示される縮小画像)を両ユーザの画面上に表示すると便利である。しかし、TV番組の中から得た画像は、著作者に無断で再配信できない。

そこで、画像そのものを伝送することなく、サムネール画像を共有する手法を提案する。図 6.5 に、その概念図を示す。同図において、端末 A と B は、同じ TV 番組を表示しながら、インターネット上でチャットを行っていると仮定する。また、それぞれの端末では、視聴している動画ストリームを、同図(1)のように端末内に用意された HDD (Hard Disk Drive)に連続的に録画しているものとする。それと並行して、図 6.6 に示すように、放送チャンネル番号と「時刻-アドレス」対応マップを含む管理情報を HDD に記録しておく。

図 6.5 において、同図(2)のように端末 A のユーザが画面上の被写体をクリックしたとき、同図(3)のように端末 A は動画ストリームからサムネール画像を生成して、自端末の画面上に表示する。同時に、同図(4)のように、端末 A はインターネットを介して前述した「クリック情報」、すなわち(a)TVの放送チャンネル番号、(b)クリックした時刻、(c)指定された画面位置および範囲を示す情報(範囲指定情報:例えば円の中心座標と半径など)、を端末 B に伝送する。

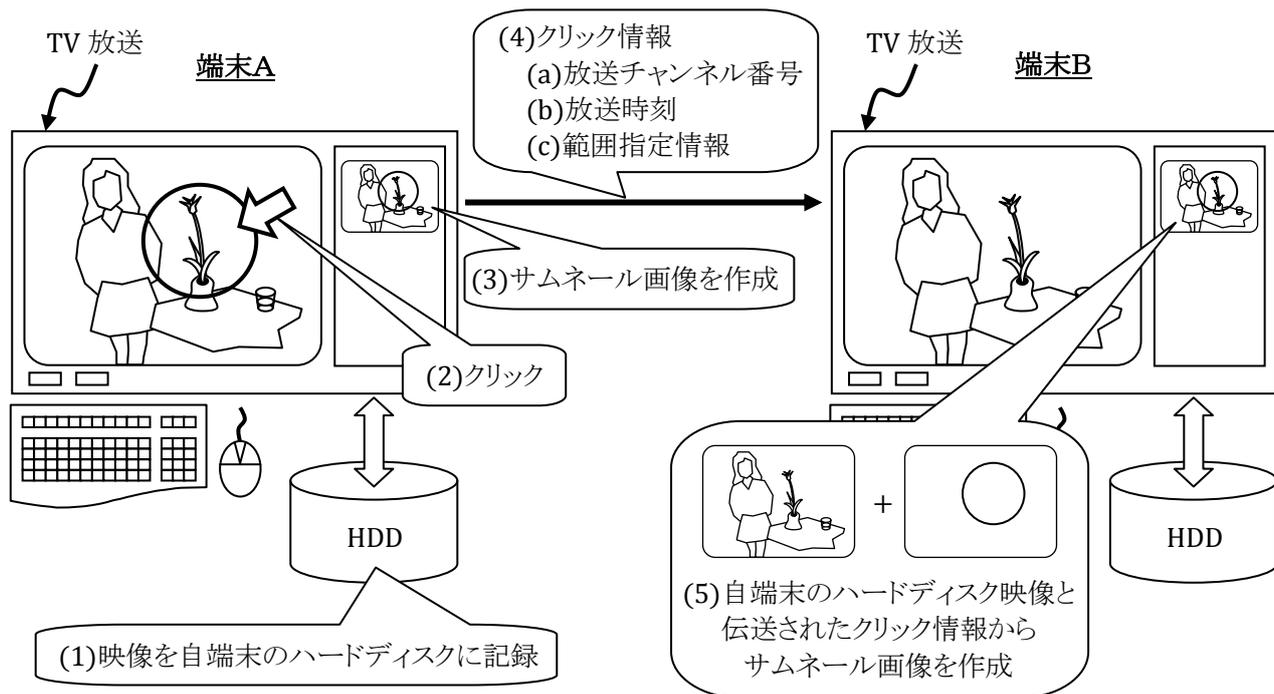


図 6.5 サムネール画像共有

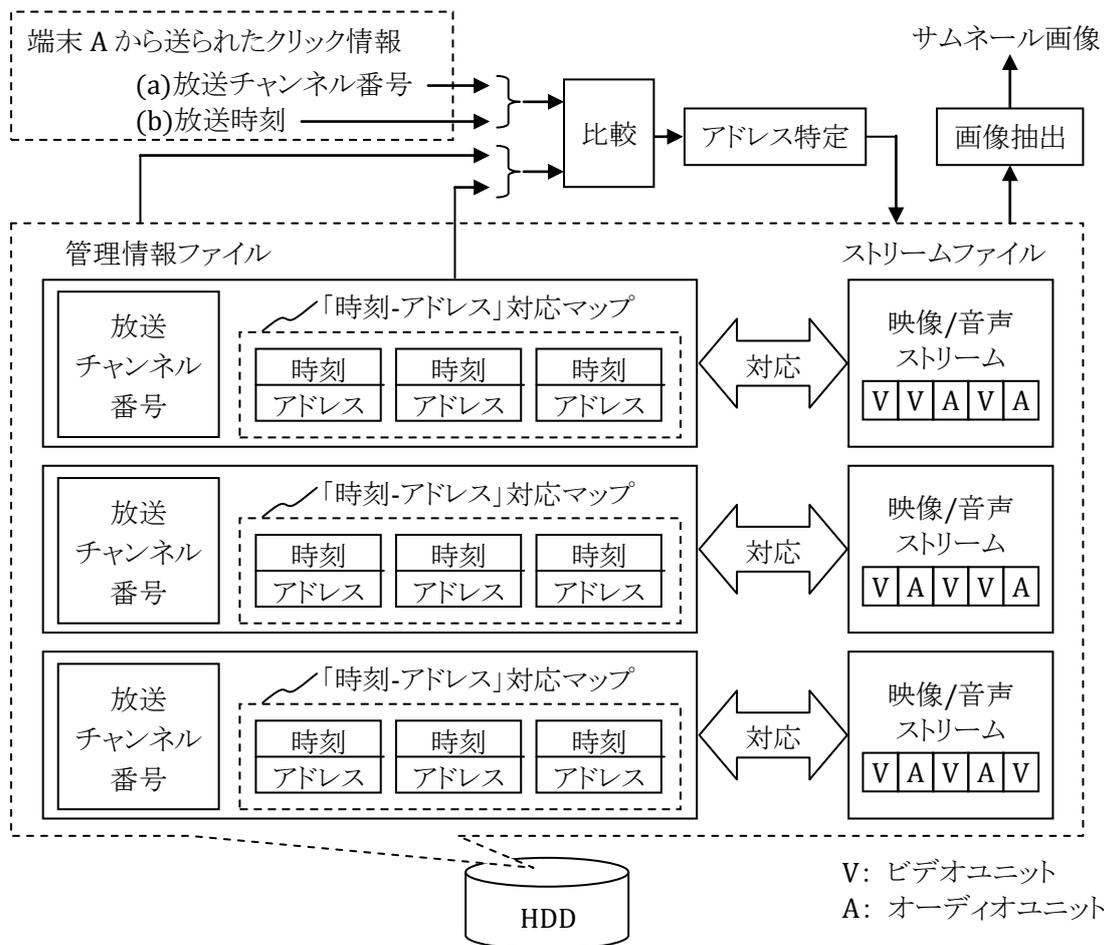


図 6.6 サムネール画像生成部

端末 B では、端末 A から送られたクリック情報から「放送時刻」、すなわちユーザ A が画面をクリックした瞬間の時刻を抽出する。このとき、図 6.6 に示すように、端末 B の HDD 内に記録した管理情報の「時刻-アドレス」対応マップから動画ストリームのアドレスを特定することにより、端末 B の HDD 内に記録された動画ストリームから「端末 A で作成されたサムネール画像」と同一のサムネール画像を独自に生成することができるようになる。さらに、端末 A から送られたクリック情報から「ユーザ A が指定した画面位置および範囲」を示す情報を抽出し、図 6.5(5)に示すように、生成したサムネール画像上の同じ位置に同じ形のカーソルを重ねて表示すれば、ユーザ A がクリックした興味対象を端末 B の画面上に示すことができる。

以上の手法により、画像そのものを伝送することなく、複数の端末間でサムネール画像を共有することができるようになる。

6.4.3 TV 視聴者間コミュニケーションシステムの試作

筆者は、前述した TV 視聴者間コミュニケーションの使用感を評価するために、PC をベースとした実験システムを試作した。この実験システムは、端末 A、B を模擬した 2 台のクライアント PC と、1 台のサーバ PC から構成される。PC 間でデータをやりとりするためのインタフェース言語として、HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) を用いた。また、サーバ PC では、クライアント PC から送信されたチャットメッセージとクリック情報をデータベース化して登録するために、SQL (Structured Query Language) を用いた。

各端末(クライアント PC)は、TV 放送を受信して再生する機能、HDD レコーディング機能^[14]、およびインターネットに接続するネットワーク機能を備えている。これらの機能は、地上アナログ TV 放送を受信するチューナボードと、MPEG-2 の I ピクチャ(フレーム内符号化画像)のみを生成する簡易コーデックソフトウェア、LAN (Local Area Network) ボード、および全体の動作を制御するソフトウェアによって実装した。また、各端末がサーバに最初に接続する際に、NTP (Network Time Protocol) によって端末の内部時計の時刻をサーバの内部時計の時刻と一致するようにキャリブレーション(更正)するようにした。

図 6.7 に、端末 A、B およびサーバの処理の流れを示す。同図中のステップ 1 は TV 視聴者マッチング(6.4.1 項)の手順に対応し、ステップ 2 はチャットメッセージ交換とサムネール画像共有(6.4.2 項)の手順に対応している。この手順により、2 人のユーザがそれぞれの端末で同じ被写体をほぼ同時にクリックすると、サーバが 2 つの端末をまとめてグループ化し、ユーザどうしてチャットメッセージを交換できるようになる。

図 6.8 に、端末のユーザインタフェースを示す。この例では、ユーザ A と B が、白鳥についてチャットしており、画面の右側にサムネール画像とチャットメッセージが表示されている。ユーザは、円形のマウスカーソルを用いて、情報交換したい被写体(白鳥)を指定している。このとき、マウスに付属しているホイールを回転させて、マウスカーソルの円の大きさを大きくしたり小さくしたりできる。また、マウスカーソルとチャットメッセージの表示色は、例えば、「端末 A が赤で、端末 B が緑」などのように、端末ごとにユニークとなるように設定しており、どのユーザが指定した被写体なのかを区別できるようになっている。さらに、サムネール画像をクリックすると、そのサムネール画像に対応した動画シーンが TV 表示エリア(画面左側)で再生される。

試作した実験システムでは、各端末のマウスカーソルの位置情報がリアルタイムに互いの端末に伝送されるようにした。このため、端末 A においてユーザがマウスを動かせば、それが端末 B の上で端末 A のマウスカーソルが動いて表示される。これにより、あたかも 2 人のユーザが同じ部屋にいて、同じ TV 番組を見ているかのような一体感を得ることができた。

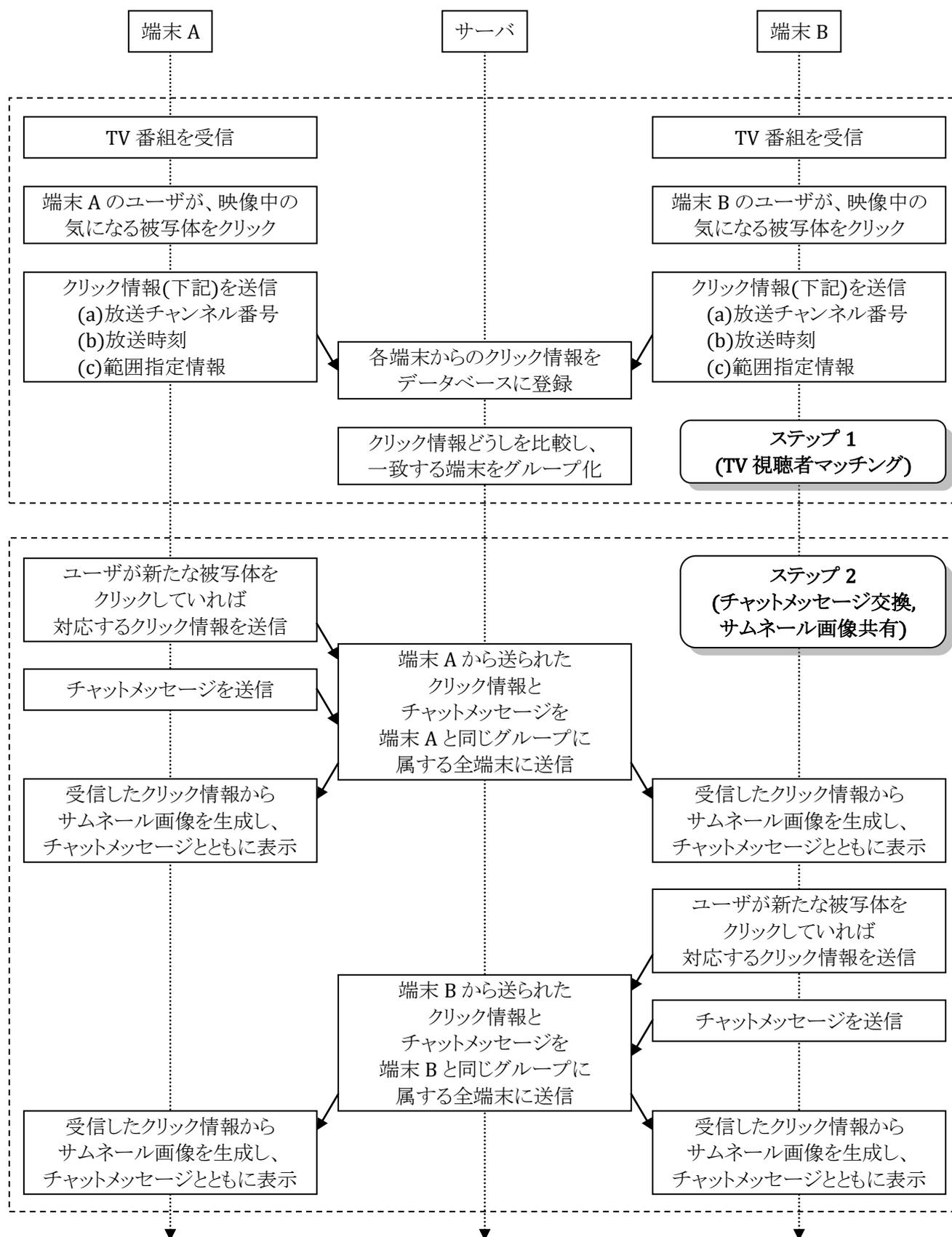


図 6.7 端末 A、B およびサーバの処理の流れ



図 6.8 端末のユーザインタフェース

なお、前述した提案手法は、今回の実験で用いたアナログ TV 放送だけでなく、デジタル TV 放送やインターネットによるストリーミング放送などにも応用することができる。また、放送されるコンテンツに新たな情報の追加が必要ないため、従来の放送システムへのシームレスな導入が可能である。

6.5 TV 映像をキーとした情報検索

筆者は、以下に述べるように、TV に表示された被写体をクリックするだけで、その被写体に関連するキーワードを知らなくても、関連情報をインターネットで検索できるようになるスキームを考案した。

まず 6.5.1 項にて、TV 映像とインターネット上の関連情報をリンクする手法 [34] について述べる。続いて 6.5.2 項にて、6.4 節で述べた TV 視聴者間コミュニケーションにおけるチャットの会話内容を利用して、TV に表示された被写体に関連したキーワードを抽出する手法 [112] について述べる。

6.5.1 TV 映像とインターネット上の関連情報のリンク

図 6.9 に、本手法の概念図を示す。TV 映像に関連した情報を提供したい TV 視聴者の端末(以下、エディタ端末)と、提供された関連情報を閲覧したい TV 視聴者の端末(以下、ブラウザ端末)では、共通の TV 映像が表示されているものと仮定して、以下、動作を説明する。なお、エディタ端末とブラウザ端末として、TV 受信機能が付いた一般的な家庭用 PC のような端末を想定している。

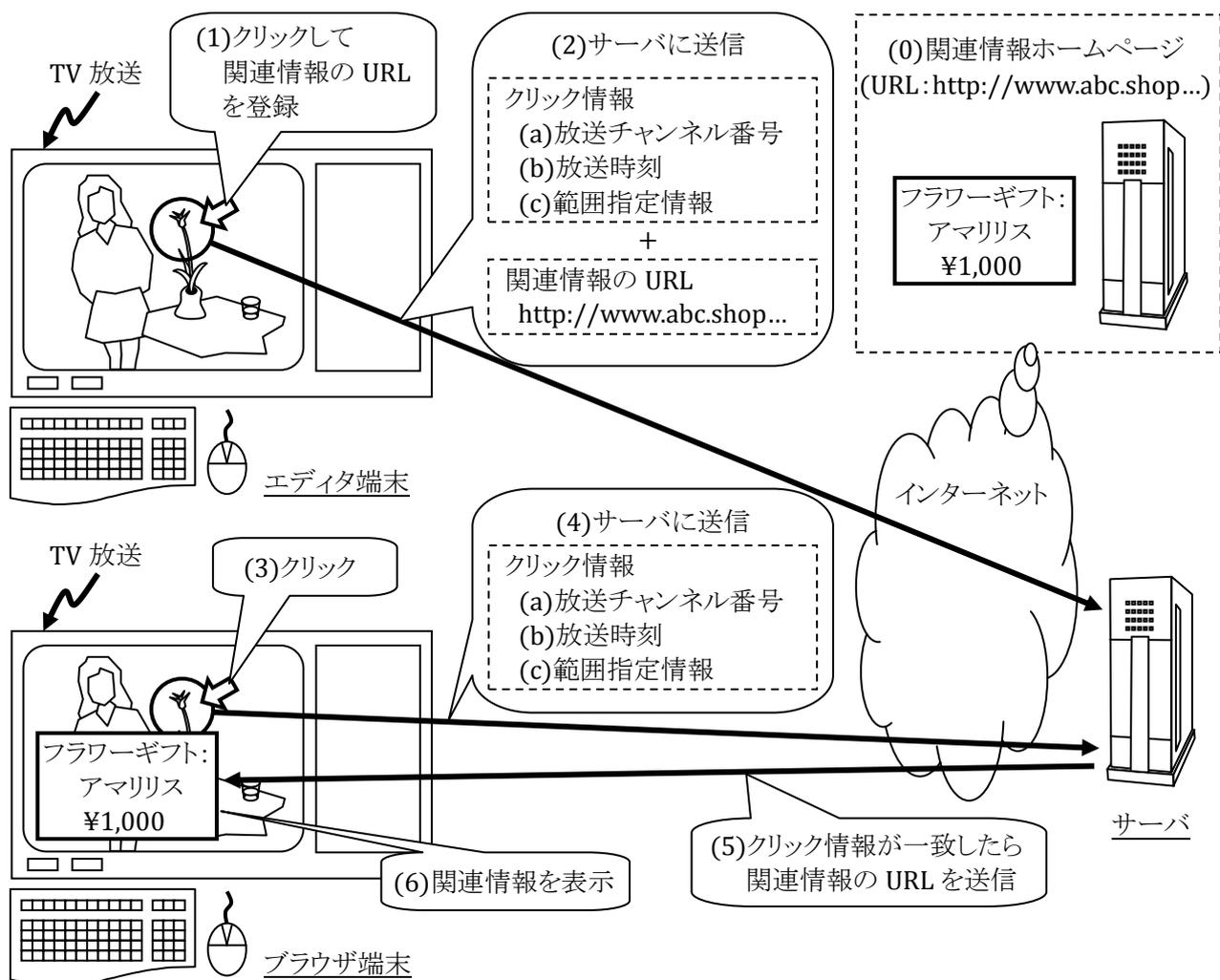


図 6.9 TV 映像とインターネット上の関連情報のリンクの概念図

視聴者が TV 番組を見ていて、その映像に関連した情報を、他の TV 視聴者に提供したいと思ったとする。これは、視聴者(花の通信販売業者)が、たまたま TV に表示された花(アマリス)を商品として扱っていることに気づき、画面に表示された花の映像と、同図(0)に示すような自分が運営する通信販売のホームページ(関連情報)をリンクしたいときなどに相当する。この視聴者は、同図(1)に示すように、エディタ端末に付属しているマウスなどのポインティングデバイスを用い、TV 映像の表示画面上で花の部分をクリックするとともに、キーボードなどを用いて関連情報を指すホームページアドレス(URL:Uniform Resource Locator)を登録する。このとき、同図(2)のように、6.4 節で述べたクリック情報((a)放送チャンネル番号、(b)放送時刻、(c)範囲指定情報)と、関連情報の URL を、インターネット経由でサーバ(後述)に送信する。

別の視聴者が、たまたま同じ TV 番組を見ていて、その映像に関連した情報を閲覧したいと思ったときに、同図(3)に示すように、ブラウザ端末に付属しているマウスを用いて、関連情報を得たい TV 映像領域を指定してクリックする。このとき、同図(4)のように、上記と同様のクリック情報((a)放送チャンネル番号、(b)放送時刻、(c)範囲指定情報)をインターネット経由でサーバに送信し、検索結果を待つ。

サーバでは、エディタ端末から送信されたクリック情報とブラウザ端末から送信されたクリック情報を比較し、両者が一致したら、同図(5)に示すように、エディタ端末から送信された関連情報の URL をインターネット経由でブラウザ端末に送信する。

その後、ブラウザ端末にて、同図(6)に示すように、サーバから送信された関連情報の URL をもとにホームページの内容を表示すれば、TV映像から関連情報(ホームページ)へのリンクが実現できたことになる。

なお、エディタ端末やブラウザ端末に HDD(Hard Disk Drive)レコーダなどによるタイムシフト機能を備え、映像を何度もプレビューしながら、映像の位置や範囲を指定し直したり関連情報の URL を登録し直したりすると使い勝手がよい。以下、各端末にタイムシフト機能があるものとして、それぞれの動作を説明する。

図 6.10 に、前述した各端末とサーバの処理の流れを、時間経過に沿って示す。まず、同一の TV 映像がエディタ端末とブラウザ端末に表示されていると仮定する。さらに、各端末のユーザが、ある瞬間の映像に対してほぼ同時刻に関連情報の登録および閲覧のためのクリック動作を行ったと仮定する。このとき、関連情報の登録および閲覧には有限の処理時間が必要である。特に、前述したようにタイムシフト機能を用いて TV 映像を一旦録画し、後で再生した場合などには、この処理時間が数日以上と極めて大きくなる場合がある。従って、登録に必要な時間と、閲覧までの遅延時間を考慮する必要がある。

同図(a)は、関連情報の登録作業が閲覧要求よりも先に完了している場合の動作を示している。この場合には、ブラウザ端末から送信されたクリック情報と、サーバのデータベースに格納されているクリック情報を照合し、両者の条件(値)が一致した関連情報だけをブラウザ端末に送信する。

同図(b)は、関連情報の登録作業が閲覧要求よりも先に完了していない場合の動作を示している。このとき、サーバは、図 6.11 に示すような「未登録通知」をブラウザ端末に送信し、再検索の要否を確認する。この未登録通知は、検索しようとしているデータがまだ登録されていないことを示すメッセージと、今後登録されたときにどのような通知が欲しいかを設定する通知条件から成る。この通知条件として、例えば、(a)今後登録されても通知不要、(b)登録されたい通知する、(c)XX 日あるいは YY 時間ごとに照合結果を通知する、の中から選択し、回答欄を経由してサーバに送信できるようにする。この回答欄の値を通知条件として、図 6.10(b)に示すように、再びサーバにて照合を行う。

通知条件にて「(b)登録されたい通知する」と設定された場合には、エディタ端末からサーバに登録動作が実行されるごとに上記照合を行い、条件が一致するデータが登録された時点で関連情報をブラウザ端末に送信する。このとき、電子メール等を用いて上記関連情報が登録された旨を連絡すると同時に、関連情報を上記電子メールに添付して送信してもよい。

また、通知条件にて「(c)定期的に照合結果を通知する」と設定された場合には、定期的にデータベースの内容と照合し、まだ一致するデータが見つからない場合には、再び未登録通知をブラウザ端末に送信する。この処理は、条件が一致する情報が登録されるか、「(a)今後登録されても通知不要」をユーザが選択するまで、必要回数だけ繰り返す。

クリック情報が一致する関連情報が登録されれば、関連情報の URL をブラウザ端末に返信する。関連情報が複数登録されている場合には、例えば図 6.12 に示すように関連情報をリスト化し、ブラウザ端末に表示する。この際、リストの先頭付近に表示したほうが、関連情報(ホームページ)を実際に閲覧する機会が増えると思われる。これを利用し、情報登録料は任意の金額(無料でもよい)とし、高額な情報登録料が支払われた URL ほど上位に表示されるようにサーバで制御してもよい。その後の関連情報(ホームページ)の閲覧動作は、一般のブラウザソフトウェアと同様である。

以上のような動作により、TV 放送のコンテンツには一切手を加えず、番組関連ホームページの登録・検索・閲覧を、一般的な家庭用 PC(TV 受信機能付き)とインターネット環境で実現できるようになる。

メッセージ

あなたが検索しようとしているデータは、
現在までに、まだ登録されていません。

今後、登録された場合、どうしますか？

通知条件

(a) 今後登録されても、通知は不要。
(b) 登録されしだい、通知する。
(c) XX日(or YY時間)ごとに、照合結果を通知する。

(a)~(c)の中から選択してください。

未登録通知

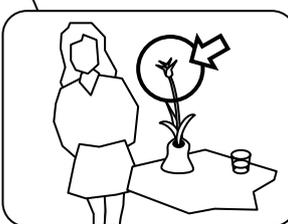
回答欄

図 6.11 未登録通知の一例

クリック情報の再確認

関連情報リスト

放送日 : YY年 MM月 DD日
時刻 : HH時 MM分 SS秒
チャンネル : ○○ch



フラワーギフト (<http://www.abc.shop...>)

このドラマの感想 (<http://www.....>)

このチャンネルの番組表 (<http://www.....>)

タイムシフト制御

関連情報(1)

関連情報(2)

関連情報(3)

図 6.12 ブラウザ端末における関連情報表示の一例

- 114 -

6.5.2 TV 視聴者間コミュニケーションを利用した映像関連キーワード抽出

前項で述べた手法を用いることにより、TV 映像をクリックするだけで、映像に関連した情報をサーバに登録したり、検索のためのキーワードを入力しなくても関連情報を検索したりできるようになる。しかし、関連情報を積極的にサーバに登録してくれる視聴者がいなければ、ブラウザ端末にて映像をクリックしても関連情報の検索結果が返ってこない欠点がある。

そこで、6.4 節で述べた TV 視聴者間コミュニケーションにおけるチャットの会話内容から TV 映像関連キーワードを抽出し、そのキーワードを検索結果として別のブラウザ端末に返す手法を着想した。以下、その動作原理を説明する。

図 6.13 に、本手法の概念図を示す。同図の一部は、6.4 節で述べた TV 視聴者間コミュニケーションのスキームと同一であり、同図(1)に示す TV 視聴者マッチングによって 2 台の端末(A、B)がグループ化され、共通に視聴している TV 映像に関して、同図(2)に示すようなチャットメッセージが交わされている様子を示している。このとき、2 台の端末(A、B)はそれぞれ前述した「クリック情報」((a)放送チャンネル番号、(b)放送時刻、(c)範囲指定情報)をサーバに送信し、これらが一致した端末どうしがグループ化されている。

続いてサーバは、テキストマイニング技術^[15]を利用してチャットメッセージの中からキーワードを抽出し、各端末のクリック情報と関連付けてデータベースに格納する。この例では、同図(3)に示すように、端末 A のキーワード情報は「名前」「きれい」「値段」「<http://www...>」であり、端末 B のキーワード情報は「花」「アマリリス」「1000 円」である。

このデータベースを用いて、別の端末から検索を実行することができる。ここで、検索を行おうとする端末 C では、端末 A と B にて表示している番組と同じ番組を視聴しているものとする。このとき、端末 C を操作するユーザが、再生されている映像の対象に関する情報を検索したいと思ったときに、同図(4)に示すように、その対象が映った部分をクリックし、同図(5)に示すように上記と同様のクリック情報((a)放送チャンネル番号、(b)放送時刻、(c)範囲指定情報)をサーバに送信する。

サーバでは、同図(6)に示すように端末 C から送られたクリック情報と他のクリック情報を照合し、一致したクリック情報があれば、同図(7)に示すように、そのクリック情報に関連付けられたキーワードを検索結果として端末 C に返信する。その結果、端末 C のユーザが花の映像部分をクリックすると、「名前」「きれい」「値段」「<http://www...>」「花」「アマリリス」「1000 円」などのキーワードが、端末 C に返信されることになる。

ひとつの映像対象に対して複数のグループによるチャットメッセージが存在する場合には、さらに検索の精度を上げることが可能になる。一例として、図 6.14 に示すように、端末 C に表示されている検索対象(同図では花が映っている部分)に対して、例えば端末 A、B のグループで行われるチャットと、端末 D、E、F のグループで行われるチャットが存在する場合、端末 C の指定範囲と、端末 A、B の指定範囲、および端末 D、E、F の指定範囲のそれぞれの一部が重なっている。この場合、端末 A、B 間で交わされるチャットメッセージと、端末 D、E、F 間で交わされるチャットメッセージの両方からキーワード抽出を行って検索結果とし、端末 C に返信する。このとき、検索対象(花が映っている部分)と関連づけられた各キーワードの出現頻度が高い順に重要度が高いと判定する。例えば、同図の場合には、「アマリリス」というキーワードが 3 回出現しており、他のキーワードよりも回数が多いので、検索結果の上位に表示されるようにする。これにより、映像と直接関係ないキーワードが上位に表示されなくなり、結果的に検索精度を上げることが可能になる。

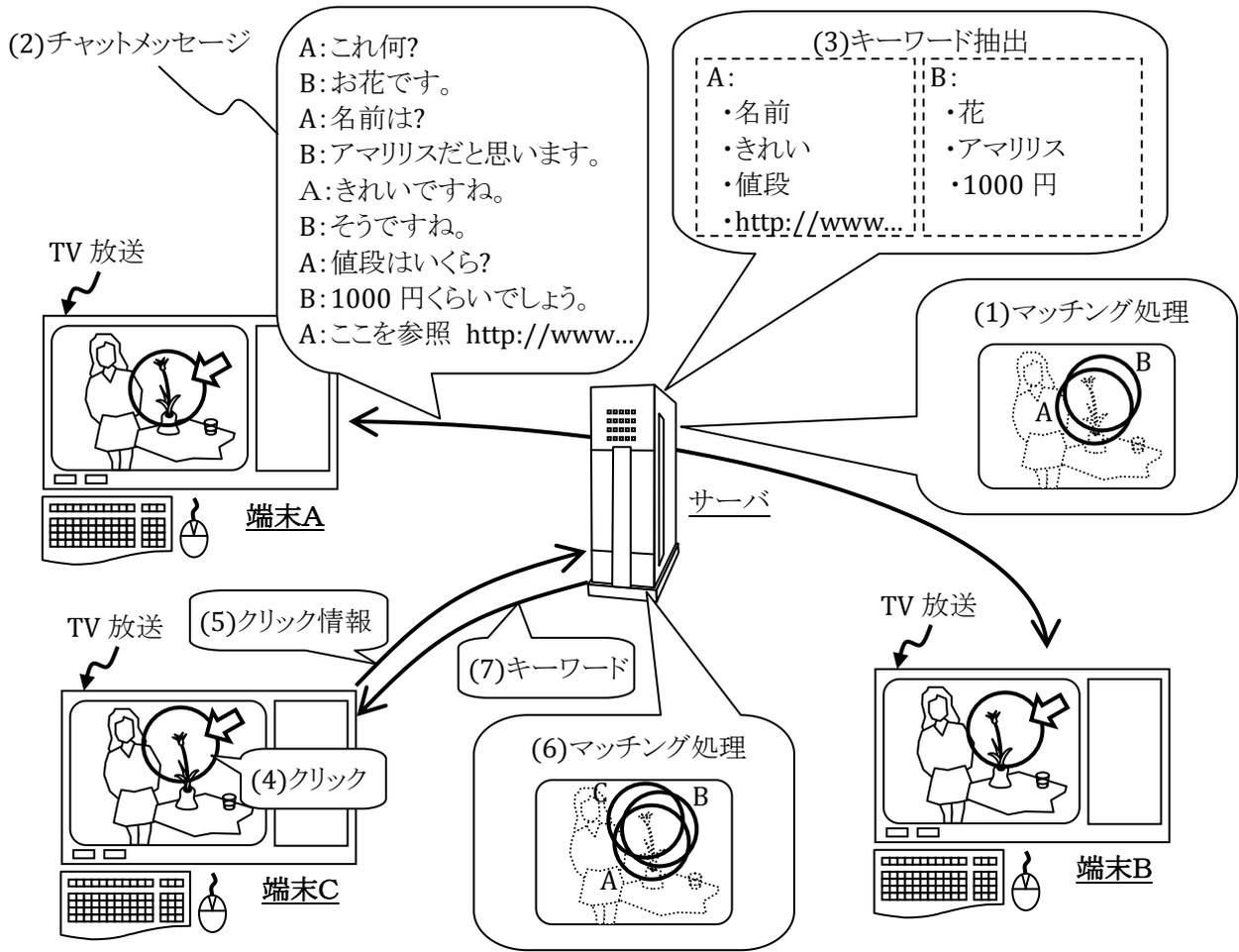


図 6.13 TV視聴者間コミュニケーションを利用したTV映像関連キーワード抽出手法の概念図

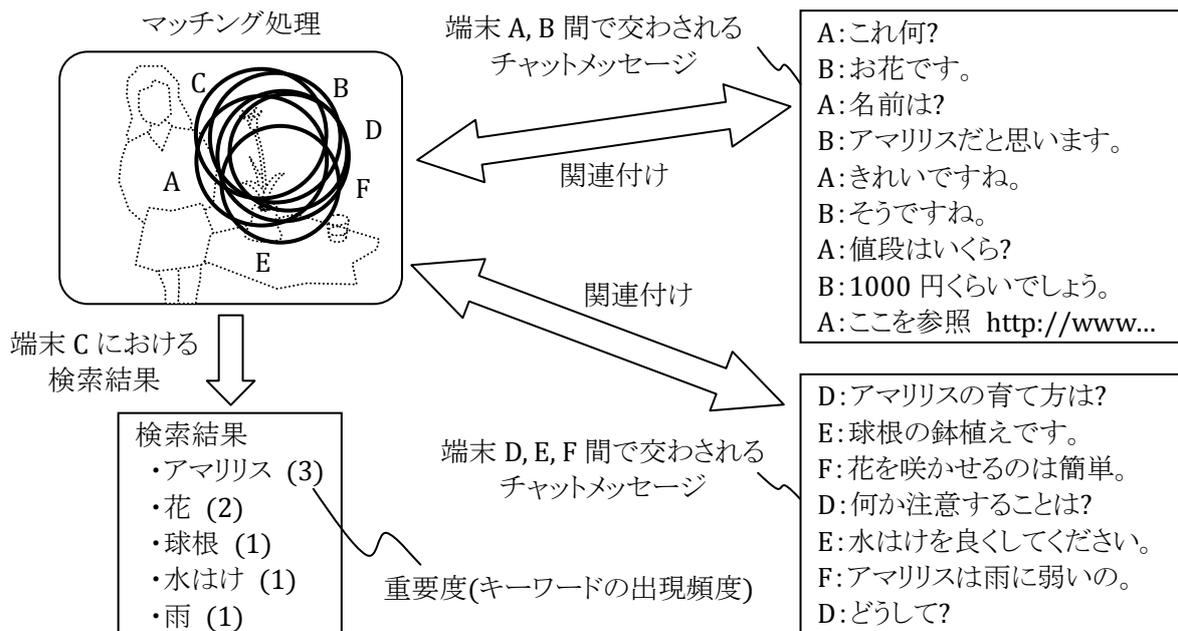


図 6.14 複数のグループのチャットメッセージを利用した検索精度向上

6.6 まとめ

本章では、TV放送とインターネットの融合について述べた。この中で、TV画面上の被写体をマウスなどで選択(クリック)するとその被写体に関連した情報がTV画面上に表示される機能を想定し、それを実現するために解決すべき課題を整理するとともに、その課題解決に向けたコンセプトを提案した。さらに、そのコンセプトを具現化するために、TV放送を媒介としたインターネット応用コミュニケーションのスキームを考案してPCをベースとした実験システムを試作した。また、TV放送を媒介としたインターネット情報検索のスキームを考案した。以下、その結果をまとめて示す。

第1に、上記の「解決すべき課題」は、(1)TV映像とインターネット上の関連情報とのリンク(関連付け)手法の開発、(2)関連情報へのリンク情報の生成と伝送に伴うコストの削減、の2点であると考察した。ここで(1)は、キーワード入力によるテキストサーチを不要とし、被写体の映像と関連情報を直接関連付けするためである。(2)は、映像に含まれるすべての被写体に対して、関連情報へのリンク情報を予め埋め込んでおくのは現実的ではないためである。これらの課題を解決するために、TV映像に関連した情報を提供したい視聴者と、提供された関連情報を閲覧したい視聴者とを仲介するサーバを設け、視聴者がTV番組を見ながら、TV映像とそれに関連したインターネット上の情報とを動的にリンクするコンセプトを提唱した。

第2に、TVに表示されている同じ被写体に興味を持つTV視聴者どうしをまとめてグループ化するマッチング手法を開発した。この手法では、視聴者が画面をクリックしたときの、(a)放送チャンネル番号、(b)放送時刻、(c)指定された画面位置および範囲を示す情報(範囲指定情報:例えば円の中心座標と半径など)、から成る「クリック情報」をサーバに送信し、クリック情報が一致する端末どうしまとめたグループを形成するものである。これにより、キーワードサーチ等の検索手段などを用いることなく、映像中の同じ被写体に興味を持ったTV視聴者どうしのグループを形成することができるようになった。

第3に、画像そのものを伝送することなく、複数の視聴者間でサムネイル画像を共有する手法を開発した。この手法により、視聴者間で上記「クリック情報」のみを相互に伝送するだけで、相手から送られたクリック情報と自端末に記録された動画ストリームから、相手がクリックした画像と同じサムネイル画像を独自に生成することができるようになった。

第4に、TVに表示された同じ被写体に興味を持つ視聴者の間で情報交換を簡単に実現できるコミュニケーションのスキームを考案し、PCをベースとした実験システムを試作した。この実験システムでは、前述したTV視聴者マッチング手法とサムネイル画像共有手法を実装しており、サーバを介して端末間で実際にチャットできる。これにより、あたかも2人のユーザが同じ部屋にいて、同じTV番組を見ているかのような一体感を得ることができた。この手法により、視聴者によるTV関連情報の投稿を促すことが期待できる。

第5に、TV映像からインターネット上の関連情報へのリンクするスキームを考案した。このスキームにより、TV番組を見ている、その映像に関連した情報を他の視聴者に提供したいと思う視聴者と、その映像に関連した情報を閲覧したいと思う別の視聴者の間に、共通のサーバを介してリンクを張ることができるようになった。ただし、この手法では、関連情報を積極的にサーバに登録してくれる視聴者がいなければ、ブラウザ端末にて映像をクリックしても関連情報の検索結果が返ってこない欠点がある。

第6に、前述したTV視聴者間コミュニケーションにおけるチャット内容からキーワードを抽出し、そのキーワードとTVに表示された被写体とをリンクするスキームを考案した。これにより、関連情報を積極的にサーバに登録してくれる視聴者がいなくても、映像とキーワードを直接リンクすることができるようになった。

第7章 結論

7.1 本論文のまとめ

本論文は、TV の高画質化と高機能化に関する研究内容についてまとめたものである。この中で、(1)映画等のフィルム素材から変換された TV 信号の特徴を利用したフィルムモード映像信号処理、(2)TV 画面のアスペクト比を 4:3 から 16:9 に変換するワイドアスペクト化、(3)TV のタイムシフト視聴に関する新しいコンセプトの提唱と試作、(4)TV 放送とインターネットを融合する先駆的なスキーム、について述べた。以下、その主たる成果をまとめる。

第 1 に、映画等のフィルム素材(毎秒 24 コマ)から変換された TV 信号の特徴(2-3 プルダウン)を利用して、画像の静止に関わらず常に前後のフィールドを用いてインタレース走査形態からプログレッシブ走査形態に変換する「フィルムモード IP 変換」について、1990 年に世界で初めてハードウェアを試作して、技術の実現性を確認するとともに、従来の動き適応 IP 変換に比べて、7 段階品質評価尺度で平均 1~1.5 ランク程度の画質改善効果があることを確認した [23; 24]。一方、字幕や臨時ニュース等のテロップが 2-3 プルダウンの周期性と無関係に TV 画像に挿入(スーパーインポーズ)されたときに問題が発生することを示し、その対策案も併せて示した。

インタレース走査は、NTSC 方式のアナログ TV 放送だけでなく、現在のデジタル放送における HDTV (High Definition TV)でも採用されている。TV 放送が開始されて以来、ディスプレイとして長らく CRT (Cathode Ray Tube)が使用されてきたが、2000 年を過ぎた頃から PDP (Plasma Display Panel)や LCD (Liquid Crystal Display)などの薄型ディスプレイが普及し始め、現在では 30 インチを超える中大型 LCD を用いた TV 受像機が主流となっている。これらの薄型ディスプレイは、画素ごとに独立して固定された微小セル構造となっていることから、フィールドごとに走査線の垂直位置が変化するインタレース走査よりも、位置が変化しないプログレッシブ走査のほうが本質的に適している。従って、インタレース走査の伝送信号をプログレッシブ走査の薄型ディスプレイに合わせる IP 変換が今日では必須技術となっている。

ワイドアスペクト(16:9)のデジタル TV と映画コンテンツの相性の良さもあり、フィルムモード IP 変換は、各メーカーが発売する数多くのデジタル TV や、HDD (Hard Disk Drive)、DVD (Digital Versatile Disc)、BD (Blu-ray Disc)等の記録メディアを用いたプレーヤ・レコーダに搭載され、世界中で広く用いられている。

第 2 に、第 2 世代 EDTV の標準化活動に参画する中で、走査線数変換を伴うレターボックス形式ワイドアスペクト化について検討を加え、走査線間のマトリクス演算を用いた新しい走査線数変換を開発した。この手法により、ワイドカメラから得た原信号(走査線数 480 本)を、送信側で伝送信号(主信号 360 本+垂直解像度補強信号(VH)120 本)に変換し、受信側で原信号と同じ信号(走査線数 480 本)を歪なく完全再構成することが可能となった。また、垂直-時間解像度補強信号(VT)に関するノイズ低減技術を開発した。

その後、TV 放送のデジタル化の流れもあって EDTV-II は普及しなかったが、現在のデジタルメディアの活用状況を鑑みると、単一の映像コンテンツをさまざまな解像度・画質で再生する「ワンソース・マルチユース」が重要になってきており、これを実現するためのスケーラブル符号化(例えば JPEG2000 等)が注目されている。現在のスケーラブル符号化には、一般的な完全再構成フィルタバンク [29; 30]が採用されているが、整数単位(1/N)の画素数変換しか実現できない。

一方、筆者が開発した完全再構成の走査線数変換技術は、 $3/4$ 倍などのような非整数画素単位の間引き・補間を行うことが可能であり、用途の制約が少ない非整数倍の画素数変換にそのまま応用できるため、今後、新たなスケーラブル符号化を実現できる可能性がある。

第3に、複数の映像・音声ストリームを同時に録画・再生したり、1本の映像・音声ストリームを録画しながら後から追いかけて再生したりするなど、従来のビデオテープレコーダでは実現不可能なタイムシフト視聴のコンセプトを提唱し、DVDとHDDおよびDVDチェンジャを使用して録画・再生のシームレス動作を保証する条件を明確化して、ハードウェア試作した^{[31]、[32]}。この試作機を用いて、(a)放送中のテレビ番組のトリックプレイ(一時停止、逆再生、高速再生)、(b)上記トリックプレイと並行した裏番組録画、(c)録画済み番組再生と放送中の番組録画の同時動作、の各動作が正常に行われることを確認した。

その後のHDDの大容量化などの理由によりDVDチェンジャは普及しなかったが、筆者らが1997年に提唱し、プロタイピングを行って実証した上記コンセプト(同時録再や追いかけて再生)は、2000年6月にソニーが発売したHDDレコーダや同年12月に東芝が発売した世界初HDD搭載DVDレコーダの原型であり、現在ではHDD搭載ビデオレコーダの必須機能と言えるほどに普及している。

第4に、TV放送とインターネットの融合に向け、①複数のTV視聴者を仲介するサーバを用意することにより、放送局側でのコンテンツの事前準備を不要にでき、②視聴者がTV映像の中の気になる被写体をクリックするだけの簡単な操作で、視聴者がTV映像とインターネットの間に自由にリンクを張ることができ、③TV映像に関連したキーワードが効率よく得られる、という先駆的なスキームを提唱した^[35]。併せて、TVに表示されている同じ被写体に興味を持つTV視聴者どうしをまとめてグループ化するマッチング手法、画像そのものを伝送することなく複数の視聴者間でサムネイル画像を共有する手法を開発し、TVに表示された同じ被写体に興味を持つ視聴者の間で簡単にコミュニケーションできる実験システムを試作した。これにより、不特定多数の視聴者どうしによる番組連動のコミュニケーションや、インターネット上の番組関連情報の検索を可能とする途を拓いた。

現在、TV映像とインターネット上のコンテンツを直接リンクするサービスは開始されていない。しかしながら、2009年11月には放送中のTV番組にコメントを付けられるサービス「ニコニコ実況」が、同年12月には同じTV番組を見ている人とTwitterのつぶやきを共有できるサービス「ピーチク」がそれぞれ相次いで開始されるなど、不特定多数の視聴者どうしでTV番組に連動してコミュニケーションする技術が実用化されている。また、NHK技研が2009年5月に「ソーシャルテレビサービス」^[15]の展示を行うなど、TV視聴者間のコミュニケーションに注目が集まってきており、筆者らが提唱したコンセプトもいずれ近いうちに実現するものと思われる。

7.2 今後の展望

筆者が本研究に着手した時点(1987年)と、本稿執筆時点(2010年)を比べると、TVを取り巻く環境が大きく変化していることに驚かされる。

国内で1953年に開始された地上アナログTV放送は、2011年7月に終了することが予定されており、その後は地上波もBSもデジタルTV放送に完全移行する予定である。国内の地上デジタルTV放送(ISDB-T: Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial)^[116]では、1チャンネルの伝送帯域幅(6MHz)を13のセグメントに分割し、セグメント単位で伝送パラメータを設定できる特長を活かして、HDTV

(High Definition TV)の映像・音声サービスと、携帯端末向け映像・音声サービス(ワンセグ放送)^[117; 118]のサイマルキャストが実現された。現在では、ワンセグ放送に対応した携帯電話^[119]が広く普及し、電車やバスでの移動中にもノイズのないクリアなTV視聴が可能になるなど、TVの視聴スタイルも変化してきている。

記録メディアも大きく進展した。1996年当時の民生用HDDの記録容量は最大2GB程度であったが、2010年現在では1TBを超える記録容量を持ったHDDが民生用ビデオレコーダに内蔵され、TV受像機本体へのHDD内蔵も一般的になった。パッケージメディアやリムーバブル録画メディアについても、DVDが一般家庭に広く普及し、青色レーザーを用いたBD(Blu-ray Disc)も市場の急速な立ち上がりを見せている。

インターネットの世界も急速な発展を遂げ、一般家庭にも定額料金制の常時接続型サービスが広がった。これに伴い、大容量の画像データのアップロード・ダウンロードが自由に行えるようになり、YouTube^[14]に代表される動画投稿・ストリーミングサービスが爆発的に普及しつつある。

今後、TVを大きく発展させるために、以下に述べる3つの方向性^[120]があるように思われる。

第1は、究極の高画質化技術の開発である。例えば、7680(水平)×4320(垂直)×60フレーム/秒(プログレッシブ走査)の画素数を持つスーパーハイビジョン^[121; 122]などが、これに該当する。一般家庭用途としては一見オーバースペックのように思われるが、高画質な画像を一度体験してしまうと、元には戻れない魅力がある。伝送メディアや蓄積メディアの大容量化、ディスプレイパネルの微細加工や省エネルギー化なども含め、実用化に向けた今後の技術の進展に期待したい。

第2は、これまでに体験したことがないような高機能化技術の開発である。国内の各TVメーカーは激しい売価ダウンの波にさらされており、魅力的な新機能の実現が望まれている。例えば、「見たいコンテンツを見たいときに見たい」というニーズを満足するVideo On Demandサービスは、ネットワーク技術やデータストレージ技術の進展とともに現実のものになりつつある。また、専用の眼鏡を使用するタイプの2眼式3次元(3D)映像システム^[123]も、既に実用化されている。さらに、無限の眼数を持ち、時空間での自由な移動を可能とする「自由視点TV」^[124; 125]などの先駆的な研究も進められている。

第3は、徹底的な低コスト化技術の開発である。これは、単に各技術を実現する際のコストを低減するだけでなく、新しい技術を導入するために必要なコストの低減も含む。例えば、前述したような革新的な技術も一足飛びに普及するわけではなく、これまでと同様に「インフラ」「端末」「サービス」が三位一体となって徐々に普及していくものと考えられる。従って、従来のインフラを効率良く利用して大画面映像を伝送・蓄積するための高圧縮・高能率符号化技術や、現行TV放送の2次元(2D)映像から3次元(3D)映像に変換する技術^[126]、撮影時よりも高い解像度の画像を信号処理で作り出す超解像技術^[127; 128; 129; 130]など、現在から将来までを連続的につなぐ技術の開発が、ますます重要になっていくと考えられる。

最後に、TV技術の大いなる飛躍と関連業界のさらなる発展を祈りつつ、本論文の筆を置くことにする。

謝辞

本研究に関し、下記のような多くの方々からの御指導、御協力を頂きました。

本論文をまとめるにあたり、名古屋大学大学院工学研究科 谷本正幸教授およびメヒルダド パナヒプル テヘラニ講師、名古屋大学大学院情報科学研究科 大西昇教授、名古屋大学エコトピア科学研究所 片山正昭教授には、懇切丁寧なる御指導と御助言を賜りました。

本研究は、(株)日立製作所中央研究所にて行われたものであり、中央研究所所長 小島啓二氏、グリーンIT基盤研究センタ長 中川八穂子氏、組込みシステム研究部長 藤井由紀夫氏には、本論文執筆の機会を与えて頂くとともに、暖かい御指導と御鞭撻を賜りました。

第3章におけるフィルムモード映像信号処理、および第4章におけるTVのワイドアスペクト化の検討にあたり、EDTVを社内外でリードして来られました吹抜敬彦氏(当時技師長)には、直に御指導を頂きました。また、中村道治氏(当時中央研究所所長)、丸山優徳氏(当時センタ長)には、研究推進に御尽力頂きました。阿知葉征彦氏(当時主任研究員)、吉木宏氏(当時主任技師)、平野裕弘氏(当時主任研究員)、石倉和夫氏(当時主任技師、故人)、大西誠氏(当時主任技師)、重左秀彦氏(当時技師)、鈴木教洋氏(当時研究員)には、日頃から御指導、御議論、御助言を頂きました。

第5章におけるTVのタイムシフト視聴の検討にあたり、中村道治氏(当時中央研究所所長)、前澤裕行氏(当時部長)、木下泰三氏(当時主任研究員)、吉木宏氏(当時主任研究員)、禰寝義人氏(当時主任研究員)には研究開発の推進に御尽力頂きました。また、大場秋彦氏(当時研究員)、松下亨氏(当時企画員)には、日頃から御指導、御議論、御助言を頂きました。鈴木達人氏(当時技師)、田邊尚男氏(当時技師)、熊谷幸夫氏(当時技師)には、プロトタイプ開発に御尽力頂きました。

第6章におけるTV放送とインターネットの融合に関する検討にあたり、武田英次氏(当時中央研究所所長)、木下泰三氏(当時部長)、鈴木教洋氏(当時主任研究員)、木村淳一氏(当時主任研究員)には研究開発の推進に御尽力頂きました。また、村上智一氏(当時研究員)、田邊尚男氏(当時技師)には、研究開発を共に進めながら、貴重な御助言を頂きました。

また、本論文の執筆にあたり、我が両親と家族(影山久美(妻)、菜摘(中1)、幹太(小4))には、起稿から脱稿まで献身的に支えて頂くとともに、暖かく見守って頂きました。

本論文を完成することができたのは、上記の方々の御指導、御助力、御協力の賜物であり、心からの謝意を表する次第であります。

参考文献

【第1章】

- [1] 日本放送協会編：“カラーテレビジョン”，日本放送協会発行（1961）
- [2] 二宮，大塚，和泉：“高品位テレビの衛星1チャンネル伝送方式(MUSE)：動き補正多重サブサンプル伝送方式”，テレビ学技報，Vol. 7, No. 44, pp. 37-42, (Mar. 1984)
- [3] 吹抜，平野：“完全交信性を有する高精細 TV 方式の提案”，信学技報 IE83-45, テレビ学技報，ICS62-7, (July, 1983)
- [4] 新津：“ハイビジョン・クリアビジョン最新技術特集”，電子技術，Vol. 31, No. 5, pp. 81-87 (Apr. 1989)
- [5] (社)電波産業会編：“ワイドクリアビジョン・ハンドブック”，兼六館出版（1995）
- [6] 放送技術開発協議会：“第2世代 EDTV 方式検討報告書” (Dec. 1994)
- [7] 官報(号外第124号) (July 4, 1995)
- [8] W. Paik：“世界に衝撃を与えた DigiCipher--ディジタル放送方式の開発(1)”，日経エレクトロニクス No. 670, pp.147-149, (Sep. 1996)
- [9] 加藤，兄部，田中：“NHK 公共放送としての役割を果たしながら、新しい視聴形態を開拓していく (特集 春始まるワンセグサービス)”，New media, Vol. 24, No. 2, pp. 12-14 (Feb. 2006)
- [10] M. Achiha, K. Ishikura and T. Fukinuki：“A Motion-Adaptive High-Definition Converter for NTSC Color TV Signals”，SMPTE J. Vol. 93, No. 5, pp. 470-476 (May, 1984)
- [11] 白石：“VHS 方式とは (ホームビデオのすべて) -- (録画再生の原理)”，電子技術，Vol. 19, No. 5, pp. 8-9 (May, 1977)
- [12] 井上：“81-62 ISDN に向けた展開のための戦略 A.Roche : Development Strategies for an Integrated Services Digital Network, Telecommunication Journal, Vol.47, No.10, Oct., (1980), 624-634”，テレビ誌，Vol. 35, No. 4, p. 349, (Apr, 1981)
- [13] 栗岡：“解説 サーバー型放送関連規格と開発技術 (特集 1 映像配信ビジネスとデジタル STB の新展開)”，電子技術 Vol. 43, No. 10, pp. 7-15, (Aug. 2001)
- [14] <http://www.youtube.com/>
- [15] <http://www.nhk.or.jp/str1/vision/jp/r2-2-6.html>
- [16] <http://jk.nicovideo.jp/>
- [17] <http://twitter.com/>
- [18] <http://ptic.jp/>
- [19] 加瀬沢，伊藤：“テレビジョン信号伝送方式”，特開昭 64-49388 号 (Aug. 1987)
- [20] L. D. カッツネルソン，E. A. クローズ：“フィルムから得たビデオフィールドの順次位置の決定システム”，特開平 2-199970 号 (Oct. 1989)
- [21] Y. C. Faroudja：“Film-to-Video Converter with Scan Line Doubling”，米国特許 4,876,596 号 (Oct. 1988)
- [22] P. Monta and J. S. Lim：“Source-Adaptive Processing for ATV System Design”，presented at the 132nd SMPTE Tech. Conf. New York (Oct. 1990)

- [23] 影山, 吉木:“テレシネ画像の高画質化 IDTV 信号処理方式”, テレビ学技報, Vol. 14, No. 53, pp. 71-76, BCS90-44 (Sep. 1990)
- [24] 影山:“テレシネ信号に適した IDTV 順次走査化方式のハードウェア実験”, テレビ誌, Vol. 46, No. 5, pp. 632-638 (May, 1992)
- [25] 影山, 吉木:“テレシネ画像に適した ID・EDTV 信号処理の一検討”, 1990 年テレビ年次大, 20-5 (July, 1990)
- [26] M. Kageyama, H. Yoshigi, Y. Hirano and T. Fukinuki:“New Multiplex/Seperation Schemes for Telecine Images”, ICCE '91, FAM 17.2 (June, 1991)
- [27] 影山, 吉木:“テレシネ専用 EDTV 方式による画質改善”, 1991 年テレビ年次大 13-4 (July, 1991)
- [28] M. Kageyama, H. Yoshigi and T. Fukinuki:“New Multiplex/Separation Schemes for Telecine Images,” IEEE Trans. on Consumer Electronics, Vol. 37, No. 3, pp. 291-295 (Aug. 1991)
- [29] T. Q. Nguyen and P. P. Vaidyanathan:“Two channel PR FIR QMF structures which yield linear-phase analysis and synthesis filters”, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. 37, pp. 676-690 (May 1989)
- [30] M. Vetterli and D. Le Gall:“Perfect-reconstruction filter banks: Some properties and factorizations”, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. 37, pp. 1057-1071 (July 1989)
- [31] 影山, 大場, 松下, 鈴木, 吉木, 木下:“タイムフリー視聴ビデオレコーダの試作”, 映情学技報, VIR '97-53 (Sep. 1997)
- [32] M. Kageyama, A. Ohba, T. Matsushita, T. Suzuki, H. Tanabe, Y. Kumagai, H. Yoshigi and T. Kinoshita:“A Free Time-Shift DVD Video Recorder”, IEEE Trans. on Consumer Electronics, Vol. 43, No. 3, pp. 469-474 (Aug. 1997)
- [33] 電波産業会:“デジタル放送におけるデータ放送符号化方式と伝送方式”, ARIB-STD-B24 (1999)
- [34] 影山, 村上, 田邊:“テレビジョン放送とインターネット環境の融合を目指した TV 関連情報検索技術の提案”, 2001 映情学年次大, 16-4, pp. 231-232 (Aug. 2001)
- [35] M. Kageyama, T. Murakami and H. Tanabe:“New Communication Style using Television Broadcasting and the Internet”, IEEE Trans on Consumer Electronics, Vol. 48, No. 3, pp. 579-583 (Aug. 2002)

【第 2 章】

- [36] E. Dubois:“The sampling and reconstruction of time-varying imagery with application in video systems”, Proc. IEEE, Vol. 73, No. 4, pp. 502-522 (Apr. 1985)
- [37] J. O. Drewery:“The Zone Plate as a Television Test Pattern”, SMPTE J. Vol. 88, No. 11, pp. 763-770 (Nov. 1979)
- [38] M. A. Weston:“A Set of Time Varying Television Test Chart”, BBC Research Department Report, No.1980/9 (1980)
- [39] 吹抜, 平野:“ゾーンプレートによる 3 次元周波数特性の直視”, 昭 59 信学全大, 849 (Oct. 1984)

- [40] 吹抜：“テレビ技術の発展に対応し、動く円形ゾーンプレートによって 3 次元周波数処理の特性を評価する”，日経エレクトロニクス, pp. 195-218 (July 1, 1985)
- [41] E. Dubois, M. S. Sabri and J. Y. Quellet: “Three dimensional spectrum and processing of digital NTSC color signals”, SMPTE J. Vol. 91, No. 4, pp. 372-378 (Apr. 1982)
- [42] T. Fukinuki and N. Suzuki: “Multidimensional Signal Processing for NTSC TV Signals”, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E75-A, No.7, pp. 767-775 (July, 1992)
- [43] 鈴木, 平野, 吉木, 吹抜: “EDTV における送信側での動き情報の多重”, 昭 63 信学春季全大, D-176 (Mar. 1988)
- [44] 栗田: “動き補償を用いたインタレス画像の順次走査変換法の検討とその装置”, 信学技報, Vol. 93, No. 85 (1993)
- [45] 鈴木, 平野, 吉木, 吹抜: “EDTV における高精細情報の帯域反転多重方式について”, 1987 年テレビ全大, 13-10 (July, 1987)

【第 3 章】

- [46] 石倉, 阿智葉: “順次走査変換のための動き適応走査線補間の一検討”, 昭 59 信学全大, 887 (Sep. 1984)
- [47] 阿智葉, 石倉: “高精細化カラーTV 信号変換方式の検討”, 昭 60 信学全大, 1239 (Mar. 1985)
- [48] 吹抜, 平野, 吉木: “速度検出による高精細 TV の動き適応処理”, 1986 年テレビ全大, 13-10 (Aug. 1986)
- [49] 阿智葉, 石倉, 工藤, 杉山, 勝又: “複合カラーテレビ信号の動き検出”, テレビ学技報, Vol. 12, No. 17, pp. 19-24, TEBS '8-11 (May, 1988)
- [50] 鈴木, 平野, 吉木, 吹抜: “受像機側動き適応処理特性改善のための送信側擬似動き信号の多重”, テレビ学技報, Vol. 12, No. 17, pp. 31-36, TEBS '8-13 (May, 1988)
- [51] 古田: “テレビジョン放送における「映画」の変遷”, 成城文藝 No. 196, pp. 266-213 (Sep. 2006)
- [52] <http://homepage1.nifty.com/wsk/voice/histv.htm>
- [53] <http://ammo.jp/weekly/neg/0612/neg061213.html>
- [54] <http://www.ffortune.net/social/seso/nihon-mej/talkie.htm>
- [55] [http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%9E_\(%E6%98%A0%E7%94%BB%E3%83%BB%E6%BC%AB%E7%94%BB\)](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%9E_(%E6%98%A0%E7%94%BB%E3%83%BB%E6%BC%AB%E7%94%BB))
- [56] 岩瀬: “ビデオ用語辞典”, 写真工業出版社 (Oct. 1989)
- [57] テレビジョン学会編: “テレビジョン工学ハンドブック”, オーム社 (Oct. 1969)
- [58] M. A. Isnardi, et al: “Encoding for Compatiblity and Recoverability in the ACTV System”, IEEE Trans. Broadcasting, Vol. BC-33, No. 4, pp. 116-123 (Dec. 1987)
- [59] N. Hurst: “Quadraplexing: An NTSC-Compatible Encoding Technique that assures Crosstalk-Free Transmission of Luminance, Chrominance and Two New Signals”, ICCE '89, pp. 192-193 (June, 1989)

- [60] 吹抜, 松崎:“EDTV-II 識別制御信号の検討”, テレビ学技報, Vol. 17, No. 65, pp. 43-48, BCS '93-46 (Oct. 1993)
- [61] 影山, 吹抜, 吉木:“テレシネ画像と EDTV-II の適合性に関する検討”, テレビ学技報, Vol. 17, No. 65, pp. 7-11, BCS '93-40 (Oct. 1993)
- [62] 影山, 吹抜, 吉木:“第 2 世代 EDTV におけるフィルムモード導入に関する検討”, テレビ誌, Vol. 48, No. 5, pp. 608-612 (May, 1994)
- [63] 影山, 吹抜, 吉木, 石田:“EDTV-II における静止画/フィルムモードコマンドに関する検討”, テレビ学技報, Vol. 19, No. 17, pp. 49-53, BCS '95-22 (Mar. 1995)
- [64] 影山, 吉木, 吹抜:“EDTV-II フィルムモード信号処理と画質評価実験”, 映情学誌, Vol. 51, No. 1, pp. 105-112 (Jan. 1997)
- [65] <http://ammo.jp/weekly/neg/0702/neg070207.html>

【第 4 章】

- [66] M. G. Bellanger: “Digital Filtering by Polyphase Network; Application to Sample-Rate Alteration and Filter Banks”, IEEE Trans. Acoust., Speech & Signal Process. ASSP-24, 2, pp. 109-114 (1976)
- [67] 鈴木, 吹抜, 影山, 石倉, 平野:“EDTV-II 補強信号の無画部多重方式の検討”, テレビ学技報, Vol. 17, No. 65, BCS '93-44, pp.31-36 (Oct. 1993)
- [68] 木俣, 鈴木, 影山, 石倉, 吹抜:“EDTV-II における補強信号無画部多重方式の提案”, テレビ誌, Vol. 48, No. 7, pp. 891-898 (July, 1994)
- [69] 鈴木, 石倉, 影山:“走査線変換に関する一考察”, テレビ誌, Vol. 44, No. 6, pp. 774-778 (June, 1990)
- [70] 鈴木, 平野, 吉木, 吹抜:“レターボックスワイド TV のシステム構成に関する一検討”, 1990 年テレビ全大, 21-7 (July, 1990)
- [71] 影山, 石倉, 吉木, 吹抜:“走査線間マトリクス演算を用いた上下マスク式ワイド TV の一検討”, 1989 年テレビ全大, 13-13 (July, 1989)
- [72] 影山, 石倉, 吉木, 吹抜:“レターボックス方式における垂直周波数特性向上の一手法”, テレビ学技報, BCS '89-7 (Sep. 1989)
- [73] 影山, 鈴木, 石倉, 吹抜:“レターボックス方式ワイド TV における走査線変換に関する一検討”, テレビ学技報, BCS '90-6 (Jan. 1990)
- [74] N. Suzuki, M. Kageyama, Y.Hirano, H. Yoshigi and T. Fukinuki: “Matrix Conversion for Improvement of Vertical-Temporal Resolution in Letterbox Wide-Aspect TV”, SMPTE J. Vol. 100, No. 2, pp. 104-110 (Feb. 1991)
- [75] P. Cassereau: “A New Class of Optimal Unitary Transforms for Image Processing”, S. M. thesis, Dep. Elec. Eng. Comput. Sci. Massachusetts Inst. Technol. Cambridge (May, 1985)
- [76] H. S. Malvar: “Optimal Pre- and Post-Filtering in Noisy Sampled Data Systems”, Ph.D. dissertation, Dep. Elec. Eng. Comput. Sci. Massachusetts Inst. Technol. Cambridge (Aug. 1986)

- [77] Tsingberg: "ENTSC Two-Channel Compatible HDTV System", IEEE Trans. on Consumer Electronics, CE-33, 3, pp. 146-153 (1987)
- [78] 芦部, 矢野: "2次元完全再構成フィルタバンクを用いた走査変換方式", 1991年テレビ年次大, 13-6 (July, 1991)
- [79] D. L. Gall and A. Tabatabai: "Sub-band Coding of Digital Images Using Symmetric Short Kernel Filters and Arithmetic Coding Techniques", ICASSP '89, 2, M2.3, pp. 761-764 (1989)
- [80] M. A. Isnardi, J. S. Fuhrer, T. R. Smith, J. L. Koslov, B. J. Roder and W. F. Wedam: "A Single Channel NTSC Compatible Wide Screen EDTV System", 3rd HDTV Colloquim, Ottawa (Oct. 1987)
- [81] 守田, 高橋: "レターボックス方式の評価雑音", テレビ学技報, Vol. 16, No. 7, BCS '92-5, pp. 25-32 (Jan. 1992)
- [82] 吹抜, 鈴木: "EDTVにおける動き適応 V-T 補強信号の提案", テレビ学技報, Vol. 17, No. 21, BCS '93-11, pp. 13-18 (Mar. 1993)
- [83] Z. Doganata: "General Synthesis Procedures for FIR Lossless Transfer Matrices, for Perfect- Reconstruction Multirate Filter Bank Applications", IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing, Vol. 36, No. 10, pp. 1561-1574 (1988)
- [84] 石倉, 鈴木, 影山: "レターボックス式ワイド EDTVにおける垂直時間補強信号の周波数帯域と画質に関する考察", テレビ学技報, Vol. 16, No. 7, pp. 33-38 (Jan. 1992)
- [85] 影山, 吉木, 吹抜: "レターボックス式 EDTVにおける垂直時間補強信号のノイズ低減方式", テレビ学技報, BCS '92-44 (Oct. 1992),
- [86] 影山, 吉木: "レターボックス式 EDTVにおける VT 補強信号の雑音低減に関する実験的検討", テレビ学技報, BCS '93-10 (Mar. 1993)
- [87] 影山: "あらゆる VT 補強信号に適用可能な EDTV コアリング方式", 1993年テレビ年次大, 13-7 (July, 1993)

【第5章】

- [88] H. Yamada: "DVD Overview", ICCE '96, FAM 20.1 (June, 1996)
- [89] Y. Tsunoda, R. Imura, M. Takahashi and T. Arai: "Present and Future of DVD Technology", ICCE '96, FAM 20.6 (June, 1996)
- [90] 田中, 重松 (監修): "DVD-RAM 技術", トリケップス (Nov. 2000)
- [91] 栗岡, 南, 奥田, 沼澤, 柳町, 大島: "番組冷蔵庫サービスに向けた階層的記録方式の検討", 映情学技報, Vol. 21, No. 31, pp. 33-38 (May, 1997)
- [92] DVD Forum: "DVD Specifications for Rewritable/Re-recordable Discs Part 3 VIDEO RECORDING Version 1.0", (Sep. 1999)
- [93] 影山: "DVD-RAM 技術 第2章第3節ビデオレコーディング規格", トリケップス, pp.47-57(Nov. 2000)
- [94] 三村: "DVD ビデオ/ビデオレコーディング", OPTRONICS No.9 (Sep. 1999)
- [95] 村瀬, 中村, 都賀: "光ディスクの標準化動向", 映情学誌, Vol. 53, No. 10, pp. 1355-1359 (Oct. 1999)

[96] 影山, 伊藤, 長谷川, 伊達:“DVD-RAM ビデオ記録に適したシームレス動作制御方法”, 1998 映情学
年次大, 8-5 (July, 1998)

【第 6 章】

[97] “テレビ広告費が全体を牽引”, 映像新聞, p.31 (Mar. 19, 2001)

[98] 宮奥:“映像付加情報の利用に適した情報配信方法の提案”, 信学ソ大, B-28, p. 210 (2000)

[99] “日本テレビ 生番組連動データ放送実現”, 映像新聞, p.3, (Apr. 2, 2001)

[100] “双方向放送のサービス環境提案”, 映像新聞, p.3, (Mar. 19, 2001)

[101] “BS フジ I ネットとの連動番組 ドラマを見ながら関連情報”, 映像新聞, p.3, (Mar. 19, 2001)

[102] “番組連動で TV 視聴者を囲い込む 2 段構えの負荷分散で安定性確保”, 日経コミュニケーション,
pp.126-131 (Dec. 4, 2000)

[103] 電波産業会:“デジタル放送に使用する番組配列情報”, ARIB-STD-B10 (1999)

[104] “蓄積データ放送機能追加”, 映像新聞, pp.2 (Apr. 2, 2001)

[105] <http://www.zdnet.co.jp/news/0104/10/iptv2.html>

[106] <http://www.shoku-chan.com/>

[107] <http://www.parco.tv/>

[108] <http://www.tbs.co.jp/ishop/>

[109] <http://www.google.com/>

[110] <http://www.yahoo.com/>

[111] 佐藤, 梶浦, 多田, 池野, 森口:“WWW における情報検索技術の動向”, 信学誌, Vol. 82, No. 12,
pp. 1237-1242 (Dec. 1999)

[112] 影山, 村上, 田邊, 山田, 柴田:“情報関連付け方法、端末装置、サーバ装置、プログラム”, 特開
2003-157288 号 (Nov. 2001)

[113] 村上, 影山, 田邊:“テレビジョン放送とインターネット環境の融合を目指した TV 関連情報共有シス
テム”, 信学技報, CS2001-108, IE2001-135, pp. 43-48 (Dec. 2001)

[114] 長坂, 宮武:“情報家電に向けた知的映像ハンドリングアーキテクチャ”, 第 6 回知能情報メディアシ
ンポジウム(IIM 2000), pp. 63-68 (Dec. 2000)

[115] M. Rajman:“Text Mining: Natural Language techniques and Text Mining applications”, Proceed-
ings of the 7th IFIP 2.6 Working Conference on Database Semantics (DS-7) (1997)

【第 7 章】

[116] 上原:“地上デジタル放送(チュートリアル)”, 映情学技報, Vol. 23, No. 65, pp. 25-30 (Oct. 1999)

[117] 廣野, 木村, 山田:“地上デジタル TV 放送による HDTV/MPEG4 階層化放送実験”, 映情学技報,
Vol. 25, No. 20, pp. 7-12 (Feb. 2001)

[118] 塚田, 長井:“1 セグ放送の概要と期待されるサービス”, 信学技報, MoMuC, Vol. 105, No. 264,
pp.61-66 (Sep. 2005)

- [119] 影山, 長谷川, 尾崎, 高木:“地上デジタルテレビ放送に対応した携帯電話端末プロトタイプ”, 日立評論, Vol.86, No.11, pp. 43-46 (Nov. 2004)
- [120] 尾関, 杉山, 影山, 橋本:“スペックだけでは語れない感動映像の追求 -日立グループの高品位映像技術への取り組み-”, 日立評論, Vol. 88, No. 10, pp. 10-12 (Oct. 2006)
- [121] 正岡, 江本, 菅原:“スーパーハイビジョン映像の臨場感(スーパーハイビジョンの最新動向,<特集>高臨場感映像・音響システム)”, 映情学誌, Vol. 61, No. 5, pp. 599-602 (May, 2007)
- [122] 野尻:“超高精細映像スーパーハイビジョン”, 電気誌, Vol. 129, No. 8, pp. 530-533 (Aug. 2009)
- [123] “技術フロンティア 3次元(3D)映画(ドリームワークス、アイマックス、ドルビー、パナソニック、ソニー)左右違う映像で脳を惑わす”, 日経ビジネス, No. 1501, pp. 96-98 (July 27, 2009)
- [124] 谷本:“自由視点テレビ”, 3次元映像フォーラム, Vol.15, No. 3, pp. 17-22 (Sep. 2001)
- [125] 谷本:“招待講演:FTVの技術開発と展望”, 信学技報, Vol. 108, No. 485, pp. 29-34 (Mar. 2009)
- [126] 山田:“ハイビジョン対応リアルタイム2D/3D変換装置”, 映情学技報, Vol. 30, No. 52, pp. 1-4 (Oct. 2006)
- [127] D. C. Youla and H. Hung:“Image Restoration by the method convex projections: Part-I Theory”, IEEE Trans. on Media Imaging, Vol. MI-1, No. 2, pp. 81-84 (1982)
- [128] R. Tsai, and T. Hung:“Multiframe Image Restoration and Registration”, In Advances in Computer Vision and Image Processing, Vol. 1, pp. 317-339, JAI Press (1984)
- [129] M. Irani and S. Peleg:“Super Resolution from Image Sequences”, In Proceedings of the 10th ICPR, Vol. 2, pp. 115-120 (1990)
- [130] M. Kageyama, K. Hamada and K. Yoneji:“Enhancement of Various Image Types by Super-resolution Technology Using Optimum Enlargement Based on Resolution”, HITACHI TECHNOLOGY 2009-2010, p. 77 (Aug. 2009)

関連発表文献

【発表論文】

論文

- [1] M. Kageyama, H. Yoshigi and T. Fukinuki: "New Multiplex/Separation Schemes for Telecine Images", IEEE Trans. on Consumer Electronics, Vol. 37, No. 3, pp. 291-295 (Aug. 1991)
 - [2] 影山: "テレシネ信号に適した IDTV 順次走査化方式のハードウェア実験", テレビ誌, Vol. 46, No. 5, pp. 632-638 (May, 1992)
 - [3] 影山, 吉木, 吹抜: "EDTV-II フィルムモード信号処理と画質評価実験", 映情学誌, Vol. 51, No. 1, pp. 105-112 (Jan. 1997)
 - [4] M. Kageyama, A. Ohba, T. Matsushita, T. Suzuki, H. Tanabe, Y. Kumagai, H. Yoshigi and T. Kinoshita: "A Free Time-Shift DVD Video Recorder", IEEE Trans. on Consumer Electronics, Vol. 43, No. 3, pp. 469-474 (Aug. 1997)
 - [5] M. Kageyama, T. Murakami and H. Tanabe: "New Communication Style using Television Broadcasting and the Internet", IEEE Trans on Consumer Electronics, Vol. 48, No. 3, pp. 579-583 (Aug. 2002)
- これすぽんでんす
- [6] 影山, 吹抜, 吉木: "第2世代 EDTV におけるフィルムモード導入に関する検討", テレビ誌, Vol. 48, No. 5, pp. 608-612 (May, 1994)
 - [7] 影山, 吉木: "第2世代 EDTV における垂直時間補強信号の生成方法と伝送雑音特性に関する一検討", テレビ誌, Vol. 48, No. 12, pp. 1612-1615 (Dec. 1994)

【国際学会】

- [1] M. Kageyama, H. Yoshigi, Y. Hirano and T. Fukinuki: "New Multiplex/Separation Schemes for Telecine Images", Proceedings of the International Conference on Consumer Electronics 1991, FAM 17.2, pp. 244-245 (June, 1991)
- [2] M. Kageyama, A. Ohba, T. Matsushita, T. Suzuki, H. Tanabe, Y. Kumagai, H. Yoshigi and T. Kinoshita: "A Free Time-Shift DVD Video Recorder", Proceedings of the International Conference on Consumer Electronics 1997, WPM 8.2, pp. 116-117 (June, 1997)
- [3] M. Kageyama, T. Murakami and H. Tanabe: "New Communication Style using Television Broadcasting and the Internet", Proceedings of the International Conference on Consumer Electronics 2002, WAM 12.7, pp. 174-175 (June, 2002)

【研究会】

- [1] 影山, 石倉, 吉木, 吹抜: "レターボックス方式における垂直周波数特性向上の一手法", テレビ学技報, BCS '89-7 (Sep. 1989)
- [2] 影山, 鈴木, 石倉, 吹抜: "レターボックス方式ワイド TV における走査線変換に関する一検討", テレビ学技報, BCS '90-6 (Jan. 1990)

- [3] 影山, 吉木:“テレシネ画像の高画質化 IDTV 信号処理方式”, テレビ学技報, BCS '90-44 (Sep. 1990)
- [4] 影山, 吉木, 吹抜:“レターボックス式 EDTV における垂直時間補強信号のノイズ低減方式”, テレビ学技報, BCS '92-44 (Oct. 1992)
- [5] 影山, 吉木:“レターボックス式 EDTV における VT 補強信号の雑音低減に関する実験的検討”, テレビ学技報, BCS '93-10 (Mar. 1993)
- [6] 影山, 吹抜, 吉木:“テレシネ画像と EDTV-II の適合性に関する検討”, テレビ学技報, BCS '93-40 (Oct. 1993)
- [7] 影山, 吹抜, 吉木, 石田:“EDTV-II における静止画/フィルムモードコマンドに関する検討”, テレビ学技報, BCS '95-22 (Mar. 1995)
- [8] 影山, 大場, 松下, 鈴木, 吉木, 木下:“タイムフリー視聴ビデオレコーダの試作”, 映情学技報, VIR '97-53 (Sep. 1997)

【大会】

- [1] 影山, 石倉, 吉木, 吹抜:“走査線間マトリクス演算を用いた上下マスク式ワイド TV の一検討”, 1989 年テレビ全大, 13-13 (July, 1989)
- [2] 影山, 吉木:“テレシネ画像に適した ID・EDTV 信号処理の一検討”, 1990 年テレビ年次大, 20-5 (July, 1990)
- [3] 影山, 吉木:“テレシネ専用 EDTV 方式による画質改善”, 1991 年テレビ年次大, 13-4 (July, 1991)
- [4] 影山:“あらゆる VT 補強信号に適用可能な EDTV コアリング方式”, 1993 年テレビ年次大, 13-7 (July, 1993)
- [5] 影山:“仮想平面への写像を用いた 3 次元周波数特性の直視”, 1994 年テレビ年次大, 23-6 (July, 1994)
- [6] 影山, 吉木, 吹抜:“EDTV-II フィルムモード導入による VT 補強信号の S/N 改善”, 1995 年テレビ年次大, 20-1 (July, 1995)
- [7] 影山, 大場, 松下, 鈴木, 吉木, 木下:“タイムフリー視聴 DVD ビデオレコーダ”, 平 9 信学総全大, D-11-107 (Mar. 1997)
- [8] 影山, 伊藤, 長谷川, 伊達:“DVD-RAM ビデオ記録に適したシームレス動作制御方法”, 1998 年映情学年次大, 8-5 (July, 1998)
- [9] 影山, 村上, 田邊:“テレビジョン放送とインターネット環境の融合を目指した TV 関連情報検索技術の提案”, 2001 年映情学年次大, 16-4 (Aug. 2001)

【技術論文誌】

- [1] 影山, 長谷川, 尾崎, 高木:“地上デジタルテレビ放送に対応した携帯電話端末プロトタイプ”, 日立評論, Vol.86, No.11, pp. 43-46 (Nov. 2004)
- [2] M. Kageyama, K. Hamada and K. Yoneji:“Enhancement of Various Image Types by Super-resolution Technology Using Optimum Enlargement Based on Resolution”, HITACHI TECHNOLOGY 2009-2010, p. 77 (Aug. 2009)