

映像情報機器の脆弱性改善のための要素技術 に関する研究

Research on Core Technologies for the Improvement
of Vulnerabilities in Video Systems

2006年2月

大 嶋 光 昭
Mitsuaki Oshima

本論文の構成

本研究は筆者が1980年から1998年まで松下電器産業株式会社において行った映像情報機器の脆弱性のための要素技術に関する研究成果をまとめたものである。

映像情報機器の脆弱性としては3つの課題に着目した。まず、映像を手持ち撮影する時に、撮影装置の保持が弱いため撮影映像の安定性が損なわれる脆弱性があった。脆弱性を改善するため、画像を自動的に安定化させる自動画像安定技術、つまり手振れ補正技術の要素技術の研究を行った。新たな手振れ補正技術とその検出手段である振動帰還音叉型振動ジャイロを考案するとともに量産化に向けた研究を行い世界初の手振れ補正機能搭載の撮影装置の実用化を行った。この要素技術の実現により撮影技量を持たない一般撮影者でも手振れの少ない鮮明な映像を撮ることが可能となった。

次に、デジタル化された映像を記録するDVD等の新しいデジタルメディアにおいて、デジタル映像が不正にコピーされ著作権が侵害されるというセキュリティ上の脆弱性があった。この脆弱性を改善するためROM型と記録型ディスクに、1枚毎に異なり改ざん困難な識別番号を記録するBCAと呼ばれる要素技術を新たに考案するとともに量産に向けた研究を行い事業化した。この要素技術はDVD、HD-DVD、BD等の光ディスク規格に標準化され、一般消費者がデジタルTV放送を光ディスクに1回コピーすることが可能となった。

最後に、デジタルTV放送において電界が弱まり、信号レベルがある閾値を下回ると急激に信号品質が劣化し、映像が全く受信できなくなるという脆弱性があった。この脆弱性を改善するため、受信状況に応じて伝送容量を変更する階層型伝送技術の要素技術の研究を行った。最初に従来のQAMやPSK等の変調方式のデータ列を複数のストリームに分割し、各データの耐性を変えることにより、階層化を実現した階層QAMを考案した。この方式は欧州デジタルTV規格に標準化された。次にVSB変調方式を階層化するために8VSBトレリス変調方式を考案したが、この方式は米国デジタルTV放送規格の変調方式として標準化された。OFDMを階層化した階層OFDMを考案し、発展技術として復調情報を最下位のサブチャンネルで伝送する復調情報伝送方式を考案したが、この両方式ともに日本方式のデジタルTV放送規格であるISDB-T規格に採用され標準化された。本方式により安定したデジタルTV放送の受信が可能となった。

本論文では、第1部で撮影時における画像安定面の脆弱性改善のための要素技術に関する研究を述べ、第2部では光ディスクの情報セキュリティ上の脆弱性改善のためのよそ技術に関する研究を述べ、第3部ではデジタル通信の悪条件における脆弱性改善のための要素技術の研究について述べ、最後に論文の総括と研究業績をまとめる。

目 次

第 1 部 撮影時における画像安定面の脆弱性改善の研究

第 1 章 序論	1
1.1 本研究のカメラの技術史における位置づけ	1
1.2 本研究の画像安定化技術の技術史における位置づけ	4
1.3 本研究の背景	12
第 2 章 手振れ検出方式の可能性の検討	14
2.1 まえがき	14
2.2 手振れの発生周波数の分析	14
2.3 電子検出方式の検討	17
2.4 物理量検出方式の検討	19
2.5 角速度センサーの方式の検討	20
2.6 むすび	21
第 3 章 手振れ補正方式の可能性の検討および提案	22
3.1 まえがき	22
3.2 電子補正方式の提案および可能性の検討	22
3.2.1 最大転送周波数の検討	23
3.2.2 2 段階 C C D 切り出し方式の提案	27
3.3 光学補正方式の分類	30
3.4 ミラー駆動方式の可能性の検討	31
3.5 可変プリズム駆動方式の可能性の検討	32
3.6 鏡筒駆動方式の可能性の検討	35
3.7 内部レンズ駆動方式の可能性の検討	37
3.8 撮像板駆動方式の提案と可能性の検討	39
3.9 手振れ補正方式の比較	42
3.10 むすび	44
第 4 章 手振れ補正技術の実証実験と検討	46
4.1 まえがき	46
4.2 機能実証のための手振れ検出方式の検討	46
4.3 機能実証のための手振れ補正方式の検討と実証実験	48
4.4 1 軸ミラー駆動方式の試作および実証実験 (試作 1 号機)	49

4.5	2軸ミラー駆動方式の試作および実証実験（試作2号機）	50
4.6	むすび	51
第5章 手振れ補正技術の実用化の検討		52
5.1	まえがき	52
5.2	手振れ補正方式の実用化方式の検討	52
5.3	手振れ補正の制御アルゴリズム	54
5.4	手振れ補正システムの課題	56
5.5	手振れ補正特性と操作性の両立	56
5.5.1	意図的なカメラの動きと手振れとの識別方法	56
5.5.2	カメラ運動識別アルゴリズムの動作原理	57
5.5.3	撮影モード間のスムーズな移行制御の検討	58
5.6	手振れの主観評価	61
5.7	従来の制御理論を用いた場合の補正効果	64
5.8	オブザーバ制御理論を用いた場合の補正効果	64
5.9	角速度センサーの性能の向上	68
5.9.1	従来構造の振動ジャイロの課題	68
5.9.2	ゼロ点ドリフトの低減	69
5.10	ハードウェア構成例	80
5.11	電子補正方式の検討	82
5.12	むすび	85
第6章 本研究のその後の展開		86
6.1	まえがき	86
6.2	本研究の延長研究の中で実用化された技術	86
6.3	本研究で提案した技術のその後の実用化状況	91
6.3.1	2段階CCD切り出し方式の実用化	91
6.3.2	撮像板駆動方式の実用化	92
6.3.3	鏡筒補正方式デジタルカメラの実用化	94
6.4	本研究の中で検討のみ行った技術のその後の実用化状況	96
6.4.1	電子検出方式の実用化	96
6.4.2	可変プリズム駆動方式の実用化	97
6.5	手振れ補正技術の進展における本研究の位置づけ	99
6.6	今後の展開	100
6.7	むすび	103
第7章 結論（第1部）		104

第2部 光ディスクの情報セキュリティ上の脆弱性改善の研究

第1章 序論	108
1.1 本研究の光ディスクの技術史上における位置づけ	108
1.2 本研究の背景	112
1.2.1 セキュアな記録領域の必要性	112
1.2.2 セキュアな記録領域に求められる条件と本研究による進展	114
第2章 B C Aのマーク形状と記録フォーマット	117
2.1 はじめに	117
2.2 ディスクへのB C Aマークの記録方法とマークの形状	117
2.3 B C Aの記録フォーマット	120
2.3.1 B C Aの記録位置	120
2.3.2 B C Aの変調方式	122
2.3.3 B C Aのデータ構造	123
2.3.4 B C Aのエラー訂正方式	125
2.3.5 B C Aの同期方式	127
2.3.6 B C Aの信号規程 (D V D規格)	128
2.4 まとめ	128
第3章 Y A Gレーザーを用いたROMディスクへのB C Aの記録方法の検討	129
3.1 はじめに	129
3.2 円形ビームのY A Gレーザーを用いた記録	129
3.2.1 Y A Gレーザーの円形ビームを用いたドット記録方式の検討	129
3.2.2 ドット記録方式の信頼性の検討	131
3.3 楕円ビームのY A Gレーザーを用いた記録	132
3.3.1 楕円ビームを用いたライン記録方式の検討	132
3.3.2 Y A Gレーザーのビームプロファイルと焦点深度	137
3.3.3 Y A GレーザーのパワーとB C Aストライプの検討	139
3.4 高出力レーザーを用いたROMディスクへのB C A記録の原理	140
3.5 B C A記録の信頼性の検討	144
3.5.1 B C A記録による基板への影響	144
3.5.2 B C A記録ディスクの信頼性テスト	145
3.5.3 傷や指紋のB C A再生信号への影響	149
3.6 まとめ	150

第4章 量産用ROM - B C A記録装置の検討	151
4.1 はじめに	151
4.2 YAGレーザーを用いた量産用B C A記録装置の検討	151
4.2.1 量産用B C A記録装置の仕様	151
4.2.2 量産用高速記録方式の検討	153
4.2.3 記録マークの位置精度	156
4.2.4 量産時のB C Aの記録時間	157
4.3 高出力半導体レーザーを用いた記録方式の検討	158
4.3.1 高出力半導体レーザー方式の必要性	158
4.3.2 高出力半導体レーザー方式記録装置の構成	158
4.3.3 半導体レーザー方式で記録したB C Aの再生波形	160
4.3.4 B D (Blu-ray Disc) 規格のB C A信号規格の新規提案の検討	160
4.3.5 銀反射膜のB D - ROMディスクへのB C A記録方式の検討	163
4.4 ROM用B C Aの応用例	167
4.4.1 DVDの電子流通方式(後払い方式DVD)への応用	167
4.4.2 B C Aの海賊版防止方式への応用	168
4.5 まとめ	169
第5章 記録型ディスクへのB C Aの記録	171
5.1 はじめに	171
5.2 記録型ディスクの固有IDに対する要求	171
5.3 要求を満たす記録方式の検討	171
5.3.1 YAGレーザーを用いた記録型ディスクへのB C Aの記録	172
5.3.2 イニシャライズ装置を用いたB C Aの記録	174
5.4 B C AのディスクIDを用いたコピー制限方式	177
5.5 まとめ	179
第6章 結論(第2部)	180

第3部 デジタル通信の悪条件下における脆弱性改善の研究

第1章 序論	185
1.1 無線通信技術の技術史における本研究の位置づけ	185
1.2 デジタルTV放送の技術史における本研究の位置づけ	186
1.2.1 米国方式(ATSC)における本研究の位置づけ	186
1.2.2 欧州方式(DVB-T)における本研究の位置づけ	189
1.2.3 日本方式(ISDB-T)における本研究の位置づけ	190
第2章 階層型デジタル伝送と階層型放送の検討	194
2.1 はじめに	194
2.2 階層型デジタル伝送の必要性	194
2.3 階層型デジタル伝送とは	195
2.4 階層型伝送の技術史における本研究のNU-QAM方式の位置づけ	196
2.5 階層型OFDMの技術史における本研究の位置づけ	197
2.6 まとめ	198
第3章 NU階層化方式の検討	199
3.1 はじめに	199
3.2 NU階層化方式の原理	199
3.3 NU階層化方式の誤り確率の変更方法	202
3.4 NU-QAM方式の誤り確率の算出	204
3.5 NU-PSK方式の誤り確率の算出	209
3.6 まとめ	212
第4章 NU-QAMを用いた階層型放送システムの検討	213
4.1 はじめに	213
4.2 ハイブリッドNU-QAMを用いた階層型放送	213
4.3 ハイブリッドNU-QAMを用いた場合の受信エリアの比較	214
4.4 まとめ	218
第5章 階層伝送の実現に必要な要素技術	219
5.1 はじめに	219
5.2 階層伝送における階層の構成方法	219
5.3 階層伝送実現時に予想される問題点	222
5.4 復調情報伝送方式の検討	222

5.5 階層型OFDMの検討	223
5.6 本技術の展開	225
5.7 まとめ	225
第6章 結論 (第3部)	227
論文の総括	228
謝辞	232
参考文献(第1部、第2部、第3部)	234
研究業績一覧	244

第1部 撮影時における画像安定面の脆弱性改善の研究

第1章 序論

1.1 本研究のカメラの技術史における位置づけ

本研究のカメラの技術史における位置づけを述べる。

写真技術は19世紀前半に発明されたが、現在の形態のカメラに至るまでは、様々な改良がなされた。このカメラの改良は主に画質の向上面の改良技術と使い易さの向上面の改良技術の2つの技術に分類できるが、本稿では後者の使い易さの改良技術に重きをおいて説明する。

1837年にフランスのダゲール¹⁾により銀板写真〔101〕が発明され現像と定着という写真術の2大基礎原理が確立された。19世紀後半の1851年にはイギリスのアーチャー²⁾により化学乳剤を用いた湿式写真〔102〕が発明された。この方式は露出時間を従来の数十分から6秒に大幅に短縮したが、化学乳剤が長期間保存できない性質をもつため、写真を撮る直前にコロディアンを含む液状の化学乳剤をガラス板に塗り、湿っている間に露光させる必要があった。高度な技術を必要とするため一部の専門家しか取り扱うことができなかった。1871年にマドックス³⁾が乳剤をゼラチンと混合してガラス板もしくはフィルムに塗布し乾燥させる乾式方法〔103〕を発明し、長時間保存できるようになった。この乾式写真の発明は1889年にイーストマン⁴⁾の感光フィルムの製造に発展し彼がコダックカメラの製造を始めたことから一般大衆でも写真撮影を取り扱えるようになり民生用カメラの基盤ができあがった。

その後の20世紀前半においては、主に基本性能の向上、例えば感度の向上やカラー化等の改良がなされた。撮影自動化に関する産業用や軍事用の技術は開発されたが、民生用に求められていた使い易さを目的とする技術は開発されなかった。例えば航空写真の画質を高めるため、爆撃機等の航空機搭載用の自動焦点技術が開発されたが、高価で大型であるため軍事用途に限定されていた。

次の20世紀後半になって使い易さの改善、つまり民生用の自動化技術が開発される。様々な自動化技術〔7〕が発明、開発され一般カメラに搭載されたため、民生用カメラの本格的な普及が始まった。

図1に示すように最初に発明されたのは自動露出技術である。この技術は1956年にドイツのAgfa社のDurstにより発明され〔104〕、1959年にAgfa社の

1) ダゲール (Louis Jacques Mandé Daguerre : 1787年 - 1851年) フランス

2) フレドリック・スコット・アーチャー (1813年 - 1857年) イギリス

3) リチャード・マドックス イギリス

4) イーストマン (George Eastman : 1854年 - 1932年) 米国

Optima 1 に搭載された〔105〕。

次に発明されたのは自動焦点技術である。この技術は1973年に米国のHoneywell社のStaufferにより発明され〔106〕、1977年に日本のコニカ社のコンパクトカメラ（商品名：ジャスピンコニカ）に搭載された〔8〕。この製品は市場で大きく普及した。その後、自動露出、自動焦点機能〔5、6〕は一眼レフカメラ〔108〕やコンパクトカメラの民生用カメラに搭載され、カメラの大衆化が一気に進んだ。

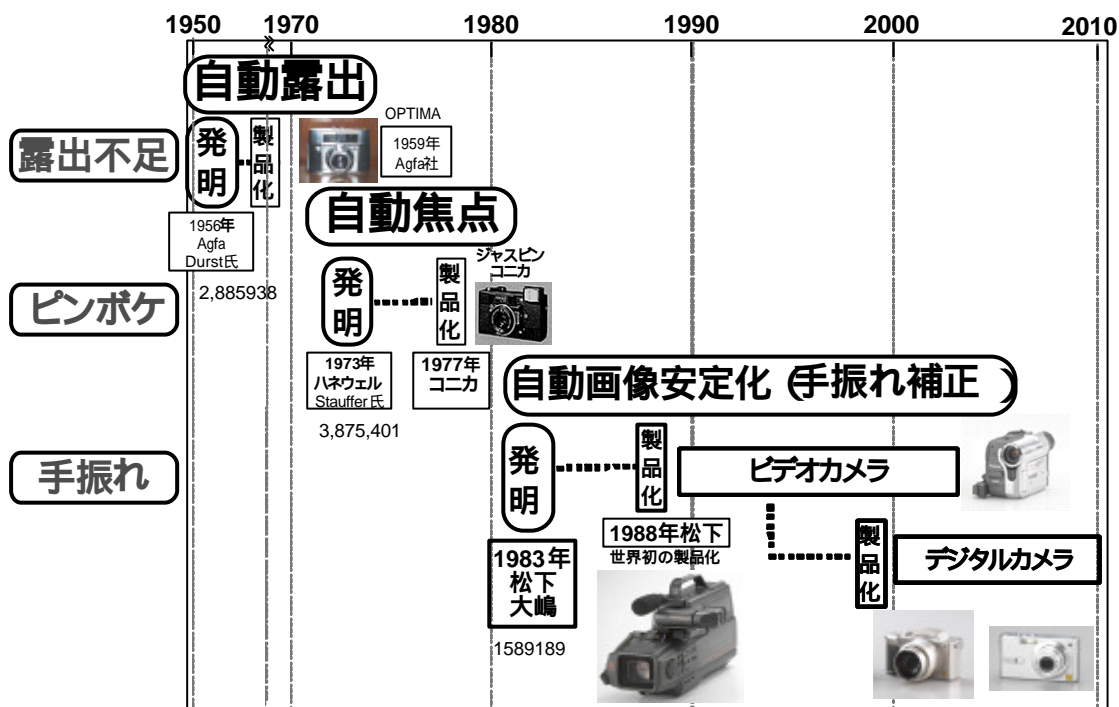


図1 カメラの自動化の技術史

3番目の自動画像安定化技術つまり手振れ補正技術は最後に実用化された技術である。実用化が遅れたのは、カメラ内蔵を実現するための検出手段等を小型で実現する要素技術が完成していなかったためである。この手振れ補正技術の研究としては構成部品であるセンサーの研究が1980年に筆者により着手された。そして8年間の研究の後、筆者らにより1988年6月に世界初の製品化〔75〕がなされた。

手振れ補正技術は、まずビデオカメラに搭載され、その10年後には全世界で生産されるビデオカメラのほぼ全機種に搭載されるまでに急速に普及した〔112〕。

フィルムカメラ用の本格的な手振れ補正は、1994年汎用カメラ〔87〕に搭載され1995年にキヤノンにより一眼レフ用交換レンズに搭載された〔111〕。デジタルカメラにも搭載されたが当初は高級機のみを搭載されたため使用者層が一部のマニア層に限定され大きく普及することはなかった。

2003年に松下電器がコンパクト型デジタルカメラに手振れ補正を搭載したところ市場から高い評価を受け一気に2004年9月には20%の第1位の市場シェアをとるまでに普及した。

デジタルカメラはフィルムカメラに比べて大幅に小型軽量化されたため手振れしやすい。また600～1000万画素の画素数の多い撮像素子が搭載されているため手振れが目立ち易い。このため最終的にはデジタルカメラの全機種に搭載されるものと見込まれている。従来の撮影装置では手持ち撮影時に画像安定性が損なわれるという脆弱性があったが、手振れ補正技術の実用化により、この脆弱性が大きく改善された。

1.2 画像安定化技術の技術史における本研究の位置づけ

画像安定化技術としては、まず大型カメラ用に雲台のカメラ装着部を絶対空間上に安定させ、雲台の支持部を航空機等の移動体に固定させる安定雲台方式がある。次に小型カメラ用に画像を安定化させる補正手段を内蔵させるカメラ内蔵方式がある。この場合、小型カメラは一般的に手持ち撮影されるため手振れが発生する。カメラ内蔵方式は手振れを補正するためカメラ内蔵方式の画像安定化技術を本稿では手振れ補正技術と呼ぶ。

この手振れ補正技術は本研究を端緒とするが、本研究以前には安定雲台方式が実用化されていた。安定雲台方式には重りの慣性とバネを利用する慣性方式、回転ゴマの回転安定力を利用する回転ゴマ方式と、回転ジャイロによりカメラの揺動を検出し雲台の向きを制御する電子制御方式の3つの方式があった。

1965年にダイナサイエンス社により実用化されたダイナレンズは可変プリズム駆動方式〔12〕で、1965年1月のジョンソン大統領の就任式において初めて使用された。可変プリズム駆動方式は図2(a)に示すように撮影レンズの前に2枚の平面ガラスをベローズで接続し、その中に平板ガラスと同じ屈折率の液体を入れた光学ユニットを配置している。図2(b)のようにカメラに固定された撮影レンズが傾くと2枚のガラスを平行位置から角度を変えて屈折させることにより光学軸を適正角度に補正する。補正方式には電気機械方式と機械方式がある。電気機械方式は2軸の回転ジャイロ型角速度センサーにより揺れを検出して可変プリズムをモーターで駆動するが、装置が大型で重くコストが高いため主として大口径レンズ用に用いられていた。消費電力はレンズ径が3.8インチの場合400Wと極めて大きいためビデオカメラに内蔵することは難しかった。

小口径レンズ用には機械方式が実用化されており消費電力は8-10Wであったためカメラ内蔵の可能性があった。これは図3に示すように回転ジャイロを2ヶ持ち、各々の回転するジャイロの自律性に基づく復元トルクにより各々のレバーを介して可変プリズムの前ガラスを駆動し傾斜させる。傾斜させることにより外部揺動を補正するものであった。ジャイロから発生する不要なトルクはジンバル軸ダンパーにより吸収する。機械方式は電気機械式に比べると小さかったが、それでも補正レンズのみでサイズが30×20×10cm、重量は4.5kgであり、サイズと重量面でビデオカメラに内蔵することは困難であった。また液体プリズムの駆動力に限界があるため図4に示すように10Hz付近を境に補正特性が落ちる。このため車にとりつける雲台にはダンパーを入れて高域の揺動をカットする必要がある。後述するように手持ち撮影の揺動補正装置つまり手振れ補正システムには30Hz程度の高域の揺動も抑制することが求められるため回転ジャイロを用いた機械方式可変プリズム駆動方式は手持ち撮影用カメラへ内蔵する用途には適していなかった。

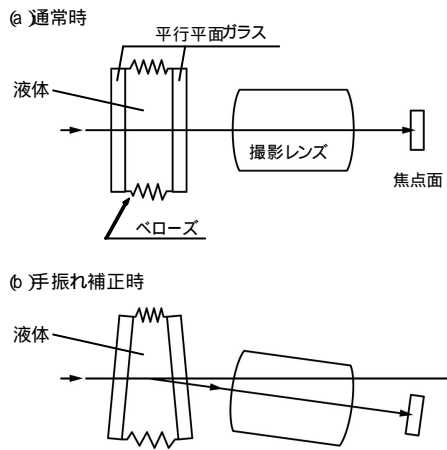


図2 可変プリズム駆動方式の動作原理

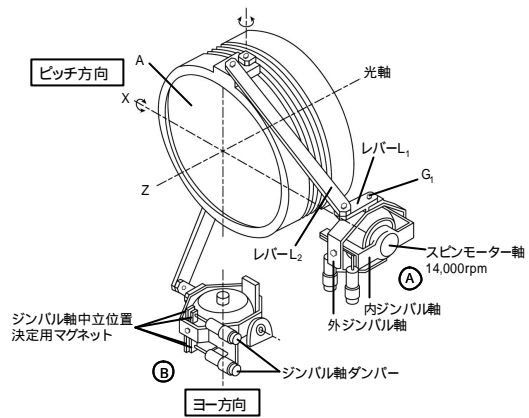


図3 機械型可変プリズム駆動方式の構成

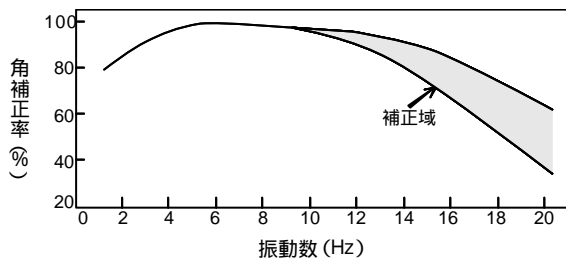


図4 機械式可変プリズム駆動方式の補正特性〔10〕

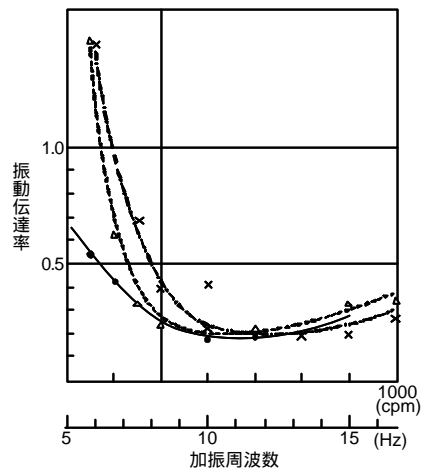


図5 てこ振り式防振機構の振動伝達率〔12〕

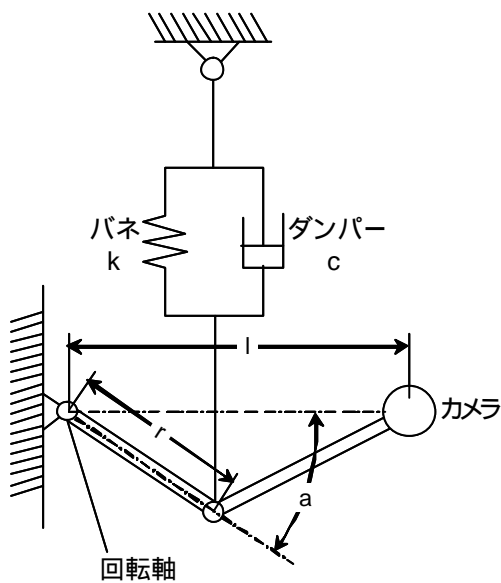


図6 てこ振り式防振機構の動作原理〔12〕

1971年にヘリコプター撮影用として、てこ振子式防振装置が実用化されている〔12〕。この原理は図5、図6に示すように、カメラを2軸可動式アームを介してヘリコプター等の床面に取り付け中間接合部をバネとダンパーで支持し、振動を吸収する構造となっている。ヘリコプターの主振動数は9～11Hzであり図5に示すようにこの帯域の振動がカメラに伝わらないような定数が選ばれている。実際のシステムではウエイトが取り付けられているため重く、大きく、カメラ内蔵用には適していない。

慣性方式としては1974年Garrett Brownにより発明され1976年に実用化されたSteadicamが挙げられる。〔113〕これはハリウッドで映画撮影用に用いられている。Steadicamは従来の三脚撮影では得られない効果が得られた。人間しか入れない狭い通路の移動撮影や走る人間の視点からの撮影が可能となったため映画の撮影可能領域を拡大した。このためBrownはSteadicamの発明と実用化に対して1977年アカデミー賞科学技術業績賞を受賞している。しかし図7、図8に示すようにおもりの慣性とカメラと人体とをバネで結合する構造のため重く大きかった。このため一般消費者には取り扱いが困難である。操作するにはSOA (Steadicam Operators Association) の訓練を受ける必要があった。



図7 慣性方式安定雲台 (Steadicam)

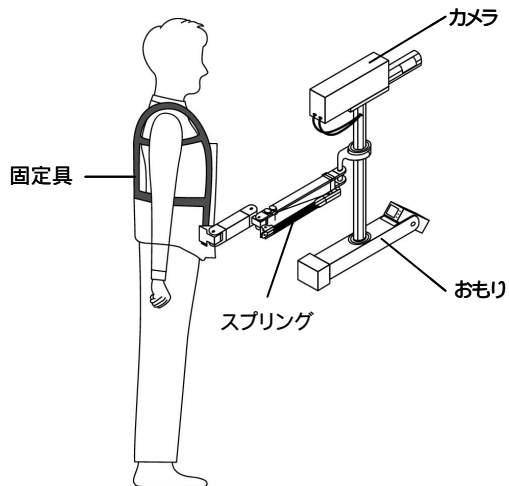


図8 Steadicamの構成

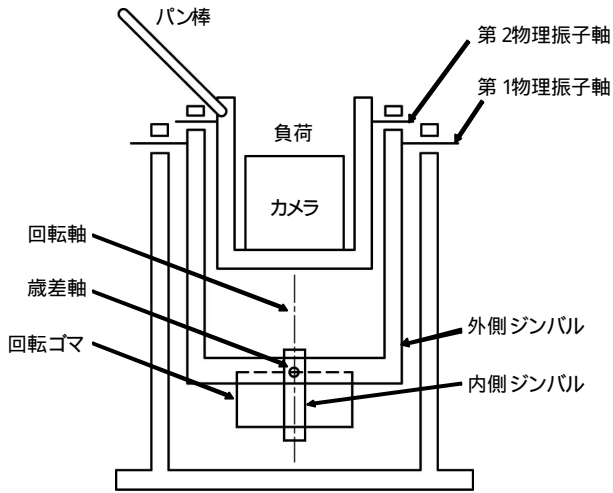


図9
ジャイロ振子式防振機構の構造〔12〕

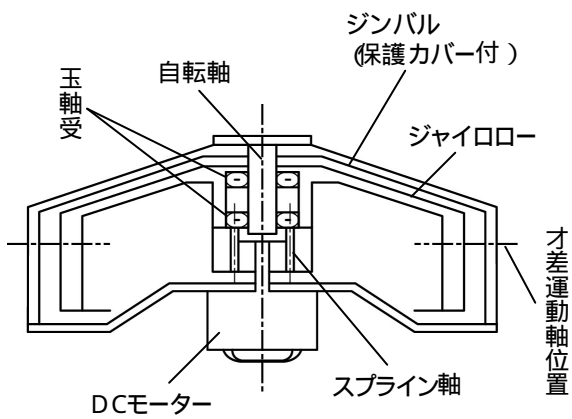


図10
ジャイロスタビライザー回転ジャイロの構造〔10〕

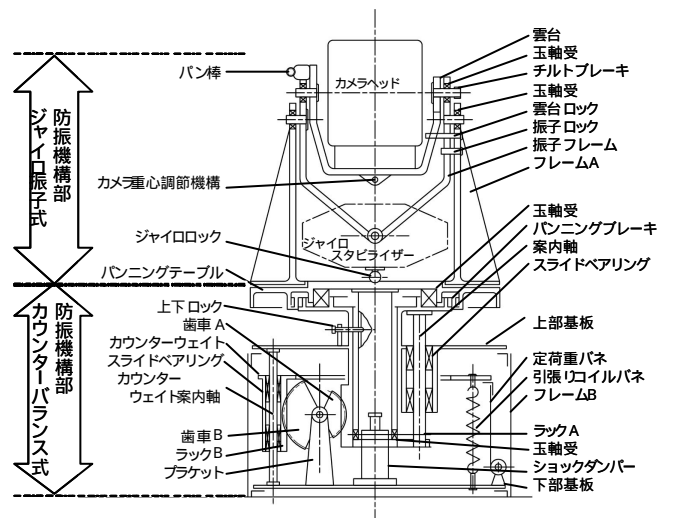


図11
回転ジャイロ型防振装置の構成〔10〕

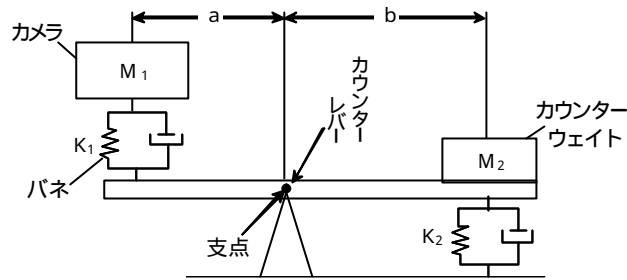


図 1 2 カウンターバランス式防振機構の原理〔 1 0 〕

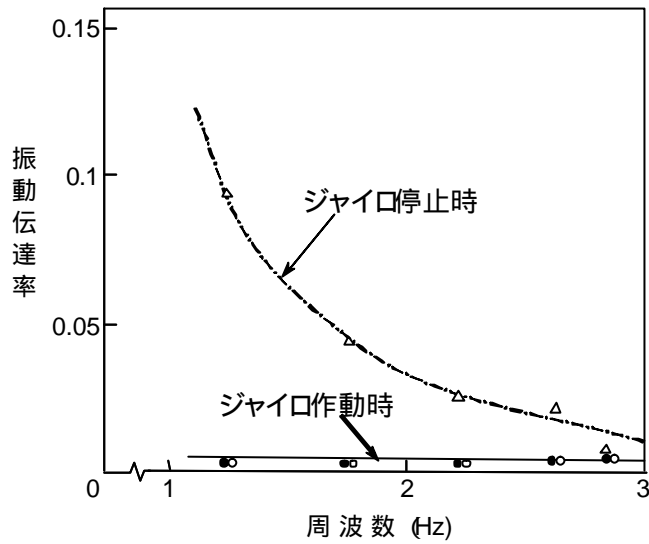


図 1 3 ジャイロ振子式防振機構の振動伝達率〔 1 0 〕

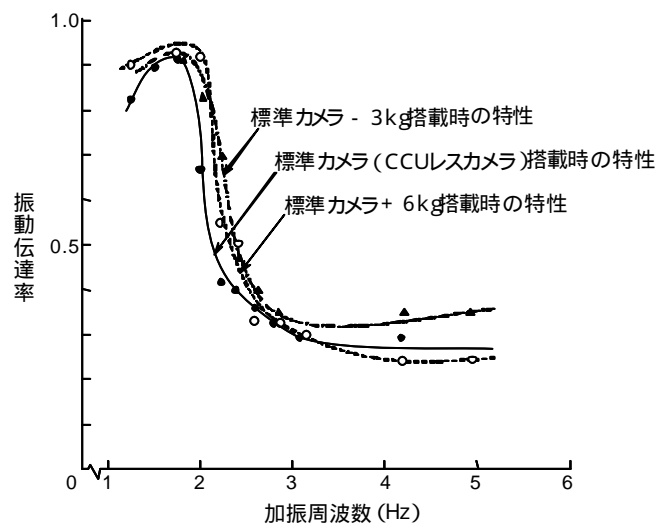


図 1 4 カウンターバランス式防振機構の振動伝達特性〔 1 0 〕

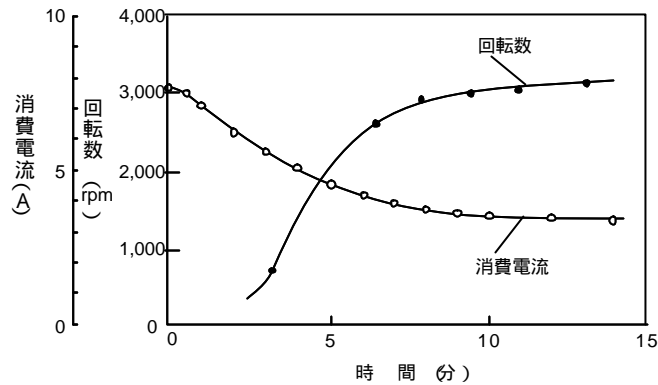


図 1 5 回転ジャイロの回転立ち上がり特性〔10〕

1974年にマラソン中継用に図16に示すようなジャイロ振子式防振装置〔10〕が実用化されている。これは回転ゴマのジャイロ効果を利用してカメラを含めた物理振子の慣性能率を増加させ、カメラを固定する。図9、図10に示すように第1物理振子に回転ジャイロをとりつけカメラの慣性を増加させる。カメラの操作を行うために第2物理振子を組み合わせている。現実のシステムでは図11に示すようにカウンターバランス式防振機構部の上部にとり付けて使用される。図12に示すように天秤の一方にカウンターウエイトM2がついたレバー、もう一方にカメラM1を配し2組のバネ、ダンパーからなりレバーをピボット支持した振動系を形成することにより外部の振動をウエイトとバネ、ダンパーで吸収する。図14に示すように下部の防振機構は3Hz以上の上下動を1/4程度に軽減する。上部のジャイロ振子式防振装置はカメラと重量のある回転ジャイロがジンバルで雲台取り付け部と分離されており、それ自体慣性が大きい図13に示すように回転ジャイロが回転していなくても揺動の抑制効果がある。ジャイロの回転停止状態では高域ほど抑制率が高く低域では抑制効果が低い。回転ジャイロが回転を始めると低域の抑制率が高まり1Hz以上の揺動が抑制される。ジャイロ振子方式は高域部の抑制率をカメラと回転ジャイロの慣性で得るため重量が重くサイズが大きくなるため、そのままカメラ内蔵型には導入することは困難である。さらに回転ジャイロの歳差トルクが発生するためパンニング撮影がしにくい等の操作性が極めて悪いため民生用には適していない。また回転ジャイロを用いるため図15に示すようにフライホイールの回転が立ち上がり安定するまで10分近くかかる。一般の撮影装置に内蔵する場合に許容される立ち上がり時間はせいぜい数秒であるため立ち上がり時間が長いことは民生用に展開するには致命的である。重量と操作性と立ち上がり時間の問題から、ジャイロ振子方式はカメラ内蔵型には適していないと思われる。

図16(b)に示すような3軸機械制御方式安定雲台がWe s c o m社により実用化されている。この方式の画像安定性能はよい。補正手段として3軸制御アクチュエーターを用い絶対空間に完璧に固定させるとともに撮影方向をリモコン装置により変更する方式である。このため検出手段として零点安定性と線形性の面で極めて精度の高い回転ジャイロが必須であった。この種の高精度ジャイロは通常1ヶ数十万円以上のコストを要する。最終的に数千万円もの高いコストになるため民生用途には適していない方式であった。また、全体重量が100キログラムを超えるため手持ち撮影用途に要求される重量にはほど遠かった。以上の点から手持ち撮影カメラの内蔵用に安定雲台方式の技術をそのまま転用することは困難であった。

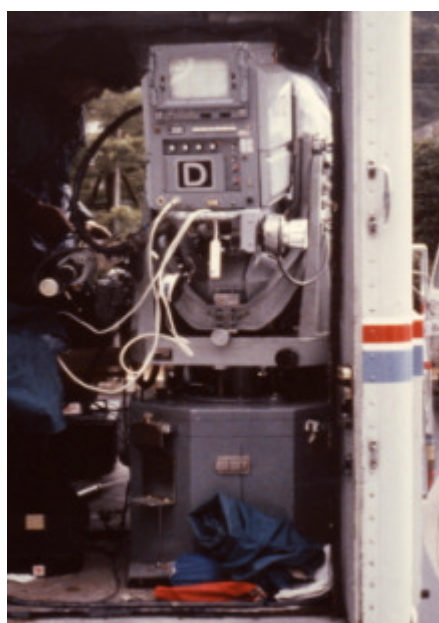


図16(a) ジャイロ振子方式防振装置
(安定雲台)の外観



図16(b) 3軸制御方式安定

1980年に着手された本研究により1988年に手振れ補正型の画像安定化技術が世界で初めて実用化された。この実用化の背景として、1940年代に発明されながら零点の不安定さ等の問題点があるため、永年量産化されていなかった振動ジャイロに着目したことが第一に挙げられる。

まず実験で手振れ補正用の検出手段には高域特性が求められることを明らかにした。次に制御面で手振れ補正用には手持ち撮影が前提であるため低域周波数領域の制御が重要でないことに着目した。このことから零点ドリフトが大きい、つまり零点安定性が悪いという振動ジャイロの最大の欠点が手振れ補正においては大きな障害にはならないことを明らかにした。また低価格型の回転ジャイロの高域特性が良くないため手振れ補正に適していないのに対して、高域特性が良いという振動ジャイロの特徴が手振れ補正に適していることを明らかにした。しかし手振れ補正を安定して行なうには、振

動ジャイロの零点の不安定性を実用域まで改善する必要があった。検討の結果、従来方式は同期検波のための位相基準信号を発振回路から直接取り出しているため、実際の振動子の振動の位相と位相基準信号との間に位相誤差が発生し、同期検波出力に変動が生じ零点が不安定になることを解明した。2つの振動子を連結し音叉構造にし、モニタ電極を追加し、このモニタ電極により直接、振動子の振動を取り出すことにより、位相誤差をなくした。振動帰還型音叉構造の振動ジャイロを新たに考案した。零点安定性を実用域にまで改善することができた。この改良により不安定性を克服し振動ジャイロの世界初の量産化に成功した。こうして手振れ補正に最適の検出手段を実用化することができた。その後、本研究を端緒として振動ジャイロの研究が業界で始まり本研究の振動モードである音叉型振動モード以外の様々な振動モードを持つ振動ジャイロが実用化された。なお現在でも手振れ補正用途の物理量測定センサとして振動ジャイロ以外の手振れ検出手段は登場していない。

補正手段としては光学補正方式と電子補正方式の両方の基本方式を考案し、これらの手振れ補正方式の基本特許を権利化した。この方式は現在の手振れ補正方式の主流技術となっている。当時はCCDの画素数が多くなかったことから、まずは電子補正方式より光学補正方式を優先して研究した。固定撮影のみならず歩行撮影において発生する最大±6度の手振れを補正することを目標としたため補正範囲の大きな手振れ補正が必要であった。補正範囲が大きくとれるミラー駆動方式と鏡筒駆動方式に焦点を絞り研究を進めた。そして量産用として鏡筒駆動方式に絞り込み1988年に世界初の手振れ補正機能搭載カメラを実用化した。

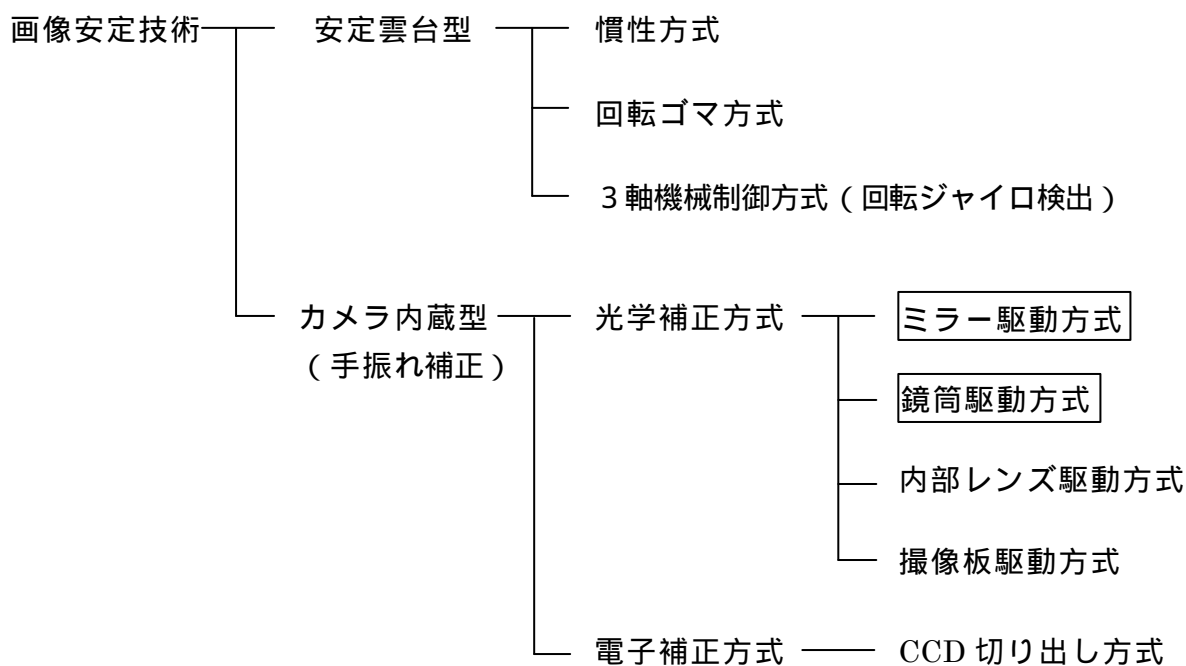


図17 画像安定化技術の分類

1.3 本研究の背景

手振れに対する要求について

本研究に着手した当時は、民生用カメラ分野において手振れ補正に対する要求は必ずしも強いものではなかった。フィルムカメラにおける撮影の3大失敗要因である露出不足、ピンボケ、手振れのうち、露出不足、ピンボケは解決されており手振れが課題として残っていた。しかし手振れに対する認識は低かった。これはフィルムカメラにおいて手振れはフィルムの感度を上げることや三脚の使用により簡単に対処していたからである。例えば、望遠レンズを用いた撮影には手振れ対策として三脚を使うことが撮影テクニック上の常識となっていたし、三脚を使えない条件下ではフィルム感度を上げることが求められていた。手振れの発生するよううす暗いところでは通常のフィルム感度フィルムを使った手持ち撮影は禁止事項とされていた。このため、フィルムカメラにおいて、露出不足、ピンボケに対する自動化技術が進んだのに対し手振れに対する自動化技術は手つかずであった。手振れが問題になるのは、1977年に民生用ビデオカメラが登場してからである。何故なら連続した画像を撮影するビデオカメラでは手振れにより連続画像の各コマの画像が左右上下に揺れる揺動現象が発生する。この揺動画像は視聴者に不快感を与える。フィルムカメラで効果的な感度を高める手法は連続画像の1コマの露光時間を短くするため、1コマの静止画に発生する手振れは少なくなるが、連続画像の各コマの揺動は補正されない。手振れの防止手段として三脚を使う手法も考えられる。フィルムカメラの場合、静止画撮影なので撮影カメラの位置を固定できる。このため三脚を使うことも可能である。しかし、ビデオカメラの撮影においては被写体を追ってカメラの位置を時々刻々変える場合が一般的である。

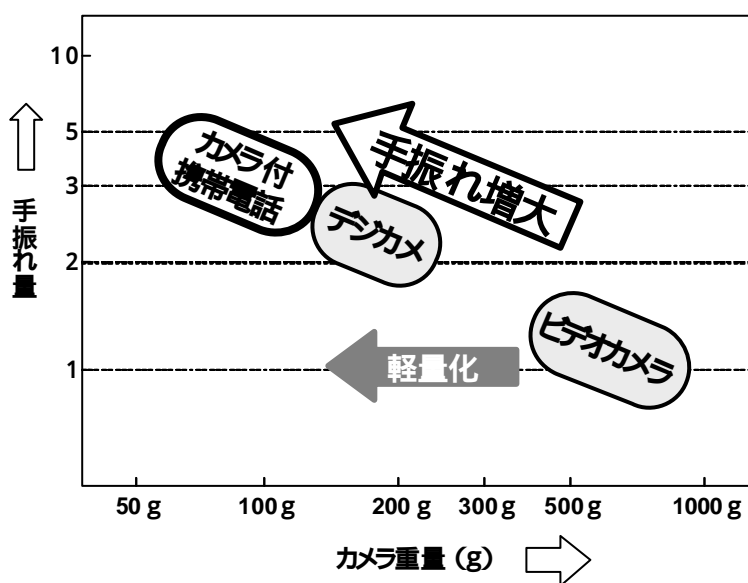


図18 カメラ重量と手振れの関係

撮影位置を固定できないため三脚を使うことは現実的でない。以上からビデオカメラ、特に民生用ビデオカメラにおいては、フィルムカメラにおいて有効であった手振れの対策が使えないため、手振れ補正技術が必須であった。

民生用ビデオカメラの実用化初期段階の1980年当時はビデオカメラの重量が大きかったため手振れの発生が少なかった。手振れは一種の振り子運動であるため、図18に示すように手振れの振巾はカメラ重量が増えると小さくなり、ズーム比が大きくなると大きくなる。当時は平均重量が2キログラム近くあったこととズーム倍率が大きくなかったため手振れは、それほど大きくなかった。

ビデオカメラの場合は撮像素子の高密度化や非球面レンズの実現によるレンズの小型化や電子部品の小型軽量化により、重量とサイズが小さくなることと、光学系の進歩によりズーム倍率が大きくなることは明らかであった。この2つの要因はともに手振れを増巾する。このことから筆者は将来手振れが深刻な問題になることを予見した。そしてこの予見に基づき1980年に手振れ補正の研究に着手した。

研究着手時点においてはビデオカメラとVTRの合計重量は数キログラムと重かった。またズーム倍率も小さかったため手振れは課題であるとは認識されていなかった。しかしその後ビデオカメラの軽量化が進み1kg以下となり、6～12倍の高倍率ズームも一般化した〔18〕。このため、手振れは深刻な問題になり要求が次第に強まっていった。筆者が1988年に手振れ補正技術を世界で初めて実用化することによりこの要求に応えることができた。

第2章 手振れ検出方式の可能性の検討

2.1 まえがき

着手段階においてはカメラ内蔵型画像安定技術である手振れ補正技術は実用化されていなかった。車や航空機にとりつける安定雲台のみが実用化されて研究が行われていた〔10〕。このためカメラを手に持って撮影した時に発生する手振れおよび手振れにより発生する揺動を検討した研究はない。そこで被験者に実際にカメラを持たせて手振れの発生状況を測定する。この測定結果から手振れを検出するためには、どのような検出方法が適しているかを検討する。

手振れを検出する方法としては、撮影画像の揺動状態を分析し手振れを推測する電子検出方式とカメラの揺動の物理量を直接センサにより測定する物理量検出方式の2方式がある。

まず電子的に映像から各対象物の動きベクトルを求めて、手振れ量を推測する電子検出方式を検討する。次にカメラの揺動を物理的に検出する物理検出方式を検討する。そして、この両者を比較する。

2.2 手振れの発生周波数の分析

手振れ補正の量産機を実現するためには、まず手振れによる揺動の発生状況を明らかにする必要がある。当時は手振れを分析した文献がなかったため実際に手振れの振幅と周波数分布を測定する必要があった。そこで被験者にビデオカメラを持たせて静止状態と歩行状態で撮影させたときに発生する手振れの周波数分布を測定した。具体的には、図19に示すようにビデオカメラのボディに、ピッチ方向の角速度を測定する角速度センサーと、ヨー方向の揺動の角度を測定する角速度センサーを取りつけ、このカメラを被験者に持たせ撮影を行なった。撮影中に手振れの揺動により発生する角速度を測定し、この角速度を積分することにより揺動角度を求めた。

こうしたビデオカメラのランダムな動きを測定した。図20に示すように静止撮影時に発生する手振れは最大0.3度であるが、図21に示すように歩行撮影時には最大±6度の大きな手振れが発生する。図22の周波数分布の縦軸は揺動角度から算出した画面上での画振れ率つまり、手振れのために変化した画像のパーセントを表している。手振れは30Hzの高域まで分布していることがわかる。



図 1 9 発生した手振れ量の測定実験

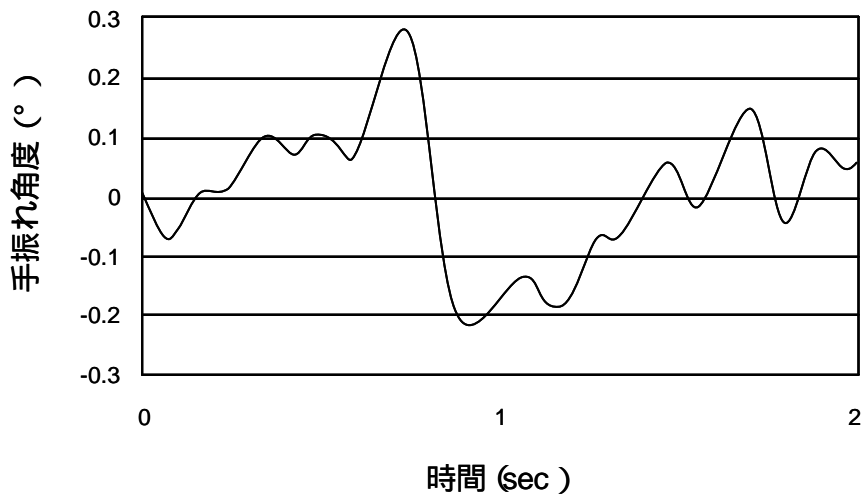


図 2 0 静止撮影時に発生する手振れの大きさ (角度)

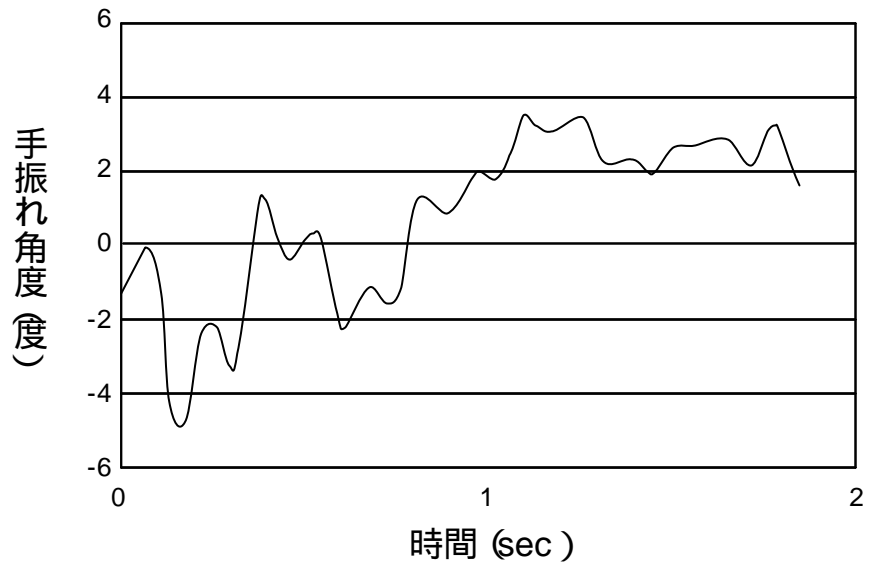


図 2 1 歩行撮影時に発生する手振れの大きさ

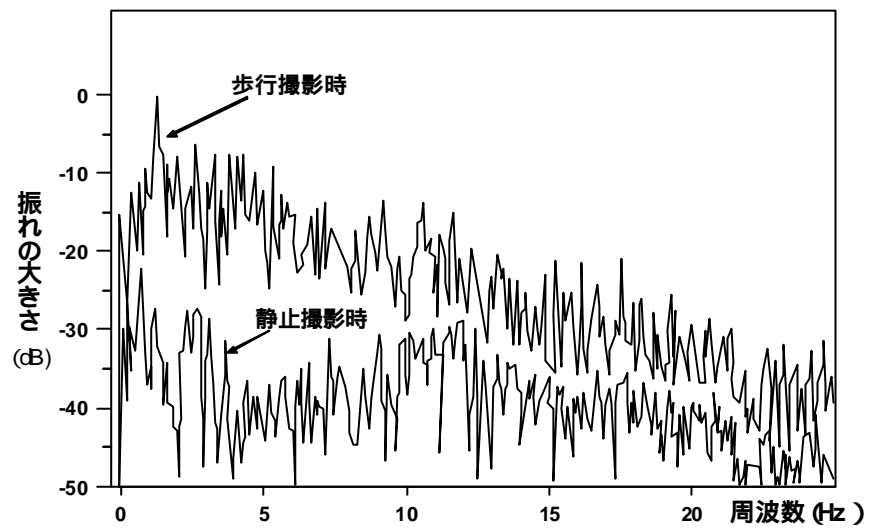


図 2 2 手振れの周波数分布の実測値

2.3 電子検出方式の検討

電子検出方式は、撮影画像の映像の動きから手振れを検出する方式である。この方式は図2.3に示すように、動画の第 n コマ目の画像とそれに続く第 $n+1$ コマ目の画像の代表点を比較し、代表点における映像の動きの変化を演算することにより代表点の動きベクトル(dx 、 dy)を求める。この動きベクトルから手振れ量を推測する。手振れ補正手段により、この手振れ量の分だけ逆方向に補正することにより手振れを補正する。動きベクトルを求める方法としてNHKが1970年より始めたハイビジョン放送のMUSE方式用〔4.4〕として開発された画像の動きベクトル検出技術〔4.3〕が確立されている。そこで、この動きベクトル検出技術を用いた場合の回路規模等の民生機器への導入可能性を富本哲雄氏等と検討した。

図2.4は電子検出手振れ補正方式のブロック図を示す。撮像素子により映像信号となった n コマ目の画像を画像メモリーに蓄える。次に $n+1$ コマ目の画像が入力される。この $n+1$ コマ目の画像と1コマ前の n コマ目の画像を動きベクトル演算部で比較し動きベクトル(dx 、 dy)を求める。この動きベクトルに応じて画像切り出し部において画像を切り出すことにより補正画像が得られる。表1の電子検出方式と物理量検出方式の比較表に示すように電子検出方式は小型軽量化と低コスト化の可能性があるが被写体の動きを手振れと誤検出する可能性がある。このため手振れの全くない状態で被写体が動いた場合、手振れと誤検出し画像が補正され被写体の動きと逆方向に揺動するという大きな課題がある。また、千点以上の代表点の動きベクトル演算が必要でデジタル回路が著しく大規模になり、半導体ICの1チップに格納できないという課題がある。

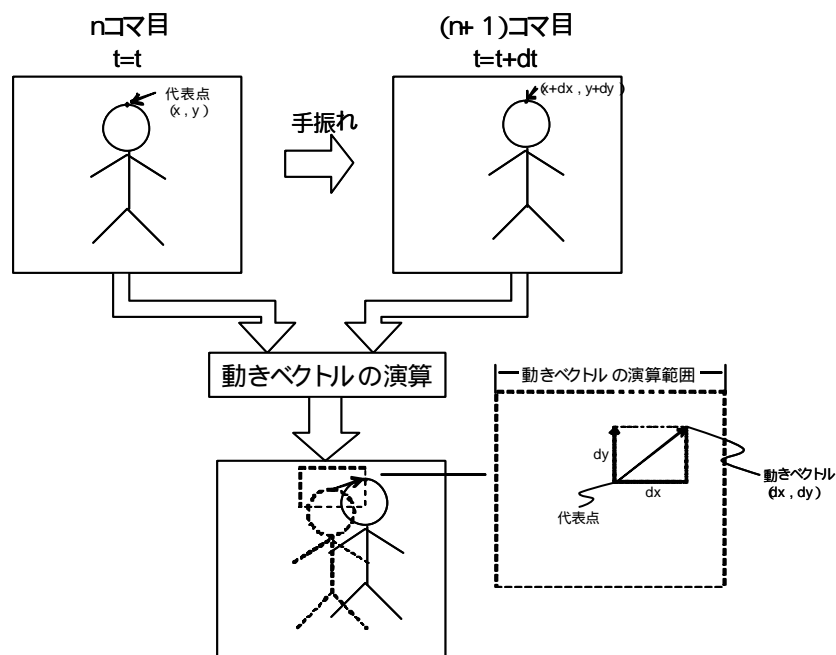


図2.3 動きベクトルの検出原理

検討時点では誤検出、誤動作の課題の解決策は見出せなかった。さらに1982年当時は民生分野において半導体の加工密度が低く大規模なデジタル回路が実現されていなかった。このことから誤検出と回路規模の2つの課題から民生ビデオカメラに搭載することが現実的でないと判断し物理量検出方式を採用することにした。

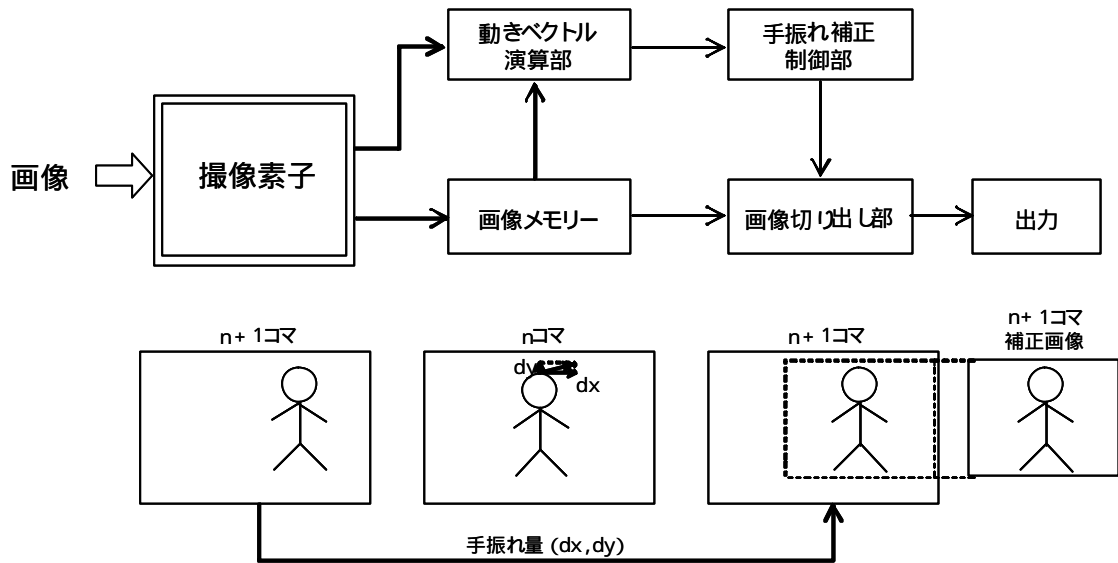


図24 電子検出方式手振れ補正システムの動作原理

表1 手振れの検出方式の比較表

	電子検出方式	物理量検出方式
原理		
	画像の動きベクトルから手振れを推測	カメラボディの動きを物理量センサーにより直接測定
長所	電子回路のため小型で軽量 将来低コスト化の可能性はある	誤検出を完全に防止
課題	被写体の動きと手振れを識別できず誤検出する 極めて大規模のデジタル処理回路が必要	物理センサーの分大きく重くなる 物理量センサーのコストが高い 物理量センサーの雑音により画面が揺れる

2.4 物理量検出方式の検討

手振れの物理量検出方式として、角速度センサーと加速度センサーの2つのセンサーが考えられるが、当時はどちらが有効であるか明確にされていなかった。そこで両者の有効性を知るため比較検討する。被験者に撮影させて得た実験結果によると、通常の撮影者が静止状態で手持ち撮影をした場合、手振れによる筐体の回転方向の動きは通常で ± 0.3 度、最大でも ± 0.5 度程度である。これに対し筐体の上下方向の動きは ± 5 mm程度である。被写体距離10m、望遠レンズの画角 6° の条件で計算してみると筐体の回転に起因する手振れは、画面の12%の大きな振れになるのに対し、上下動成分に起因する振れは0.5%である。図25(a)に示すように回転に起因する手振れが圧倒的であることが明らかになった。このため手振れの物理量検出方法としては筐体の回転の物理量を検出する角速度センサーを用いることにする。

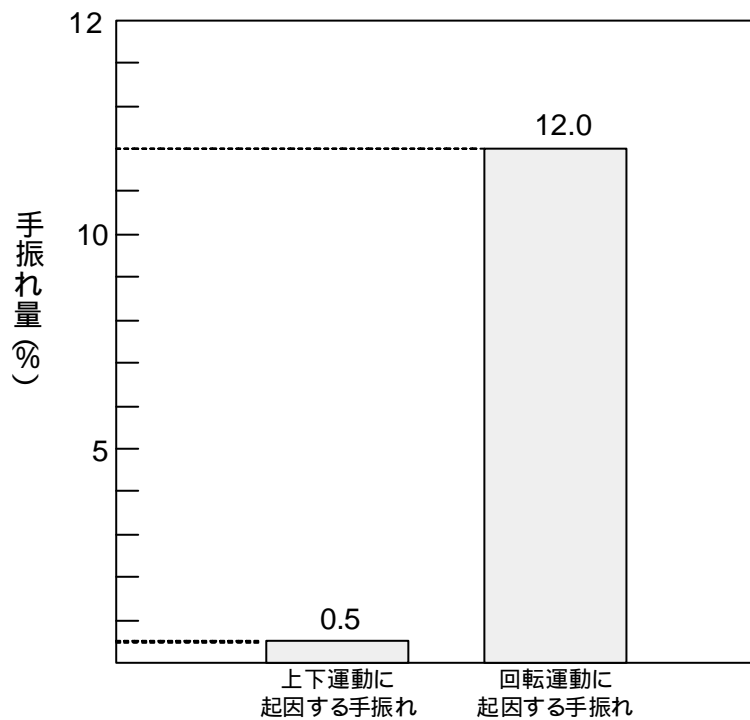


図25(a) 上下運動と回転運動に起因する手振れ量の比較

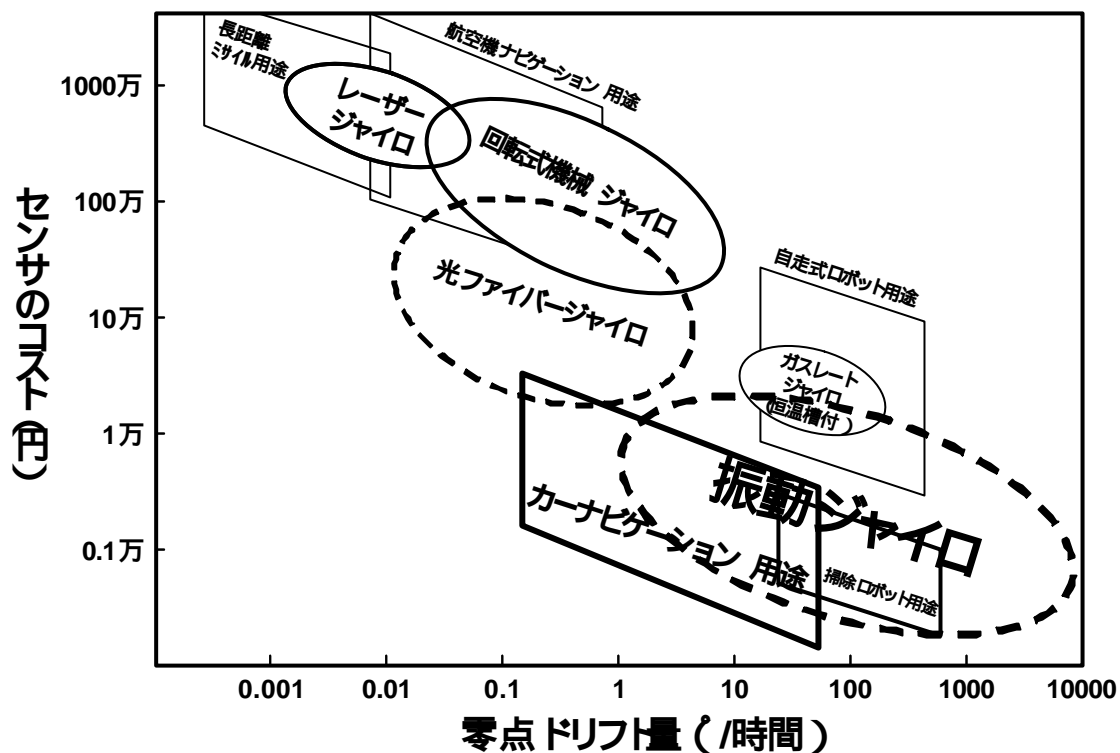


図 2 5 (b) 各種ジャイロのコストと零点ドリフト量の関係

2 . 5 角速度センサーの方式の検討

当時、量産によりコスト低減の可能性があり民生用にも使える角速度センサーとして回転ジャイロが実用化され広く普及していた。回転ジャイロは零点安定性が良く低価格化の可能性があったが高域特性が良くない。図 2 2 の実験結果が示すように撮影時に発生する手振れの周波数は 3 0 ~ 4 0 H z の高域まで分布している。小型低価格の回転ジャイロは手振れの高域部の揺動を検出できないため、手振れの検出には適していないことが明らかになった。一方、筆者らが 1 9 8 0 年より研究していた振動ジャイロは高域特性が非常に良いという特長があった。反面、当時の振動ジャイロは零点安定性つまり直流を含む低域特性が極端に悪いという欠点があった。積分演算により零点の不安性の誤差が蓄積されるため慣性航法用途には致命的であった。このことが戦後の一時期、盛んに研究された振動ジャイロの研究が急速に収束した理由である。慣性航法用途に適していないため量産化も実現していなかった。しかし手持ち撮影用の手振れ補正に用いる場合、センサーの低周波数特性の悪さは影響しないと考えた。なぜなら手持ち撮影の場合に発生する揺動の低周波成分は撮影者の手の操作により制御され自然に吸収されるからである。このため低周波の制御特性は不要であるためセンサーの検出信号の低減成分はカットしても問題ないと考えられた。この仮説を実証するため手振れの実験試作機を制作し実証実験を行った。試作した

振動ジャイロは不安定な零点ドリフト特性をもっていたが手振れ補正機能が正常に動作し補正に悪影響を与えないことを確認した。この検討結果は後で詳しく述べる。

2.6 むすび

手持ち撮影時に生じる手振れの発生状況を測定した。手振れの周波数は30 Hz程度まで広く分布しており高い周波数を測定できる検知手段が必要ながわかった。手振れの補正範囲は、静止撮影時で ± 0.3 度、歩行撮影時で ± 6 度必要なことが明らかになった。手振れの検出方式として電子検出方式と物理量検出方式を比較した。電子検出方式は動きベクトル検出方式を検討したが検出用の代表点が多いため民生用の半導体デジタルICの1チップでは処理できないことと、被写体の動きを手振れと誤認識する可能性があることから将来低コスト化の可能性があるものの実用化は現実的でない判断した。物理量検出方式としては角速度検出方式と、加速度検出方式が考えられるが、加速度に伴うカメラの上下動成分の画像揺動への影響度が角速度成分に比べると圧倒的に少ないことから角速度センサーを手振れ検出に使うことにした。

慣性航法用途の角速度センサとして、振動ジャイロは零点ドリフトの安定性が悪いため量産が実現していなかった。しかし手振れ検出用途の場合、あまり高い零点ドリフト安定特性が要求されない。振動ジャイロは40 Hz以上の高域の感度を持つ。一方手振れは30 Hzまで分布する。振動ジャイロで手振れの発生帯域を検出できるため手振れの検出用に適していることが明らかになった。

第3章 手振れ補正の実現方式の検討

3.1 まえがき

手振れの補正方式としては映像信号を処理することにより電子的に手振れを補正する電子補正方式と機械的に部品を駆動することにより光学像の手振れを補正する光学補正方式が考えられる。まず、両者の比較検討を行う。その後各補正方式の中で手振れ補正の効果等の利点と補正により発生する収差等の短所を検討し、各々の方式の手振れ補正への可能性を検討する。

3.2 電子補正方式の提案および可能性の検討

まず撮像手段として図2.6に示すように撮像管やCCD、MOSのような撮像素子の総画素数が規定画素数（NTSCの場合 480×720 画素）より20～30%余裕のある大きな素子を用いる。次にその全画像から任意の領域を規定画素数の分だけ切り出す切り出し手段を設ける。切り出し手段により切り出す領域を手振れ補正量（ dx 、 dy ）に応じて移動させることにより揺動を補正する電子補正方式を考案した〔17〕。この補正方式を「CCD切り出し方式」と呼ぶ。動作原理を図2.7に示す。

まず振動ジャイロなどによりヨー（水平）方向とピッチ（垂直）方向の手振れ量 dx 、 dy を検出する。次に実際の撮影画像より大きな画素数を持つCCDの垂直転送クロックや水平転送クロックや外部の時間軸補正回路のクロックを手振れ量 dx 、 dy に応じて手振れが発生しない方向に制御することにより、CCDの一部の領域の画像情報を切り出すことにより、手振れを補正する。

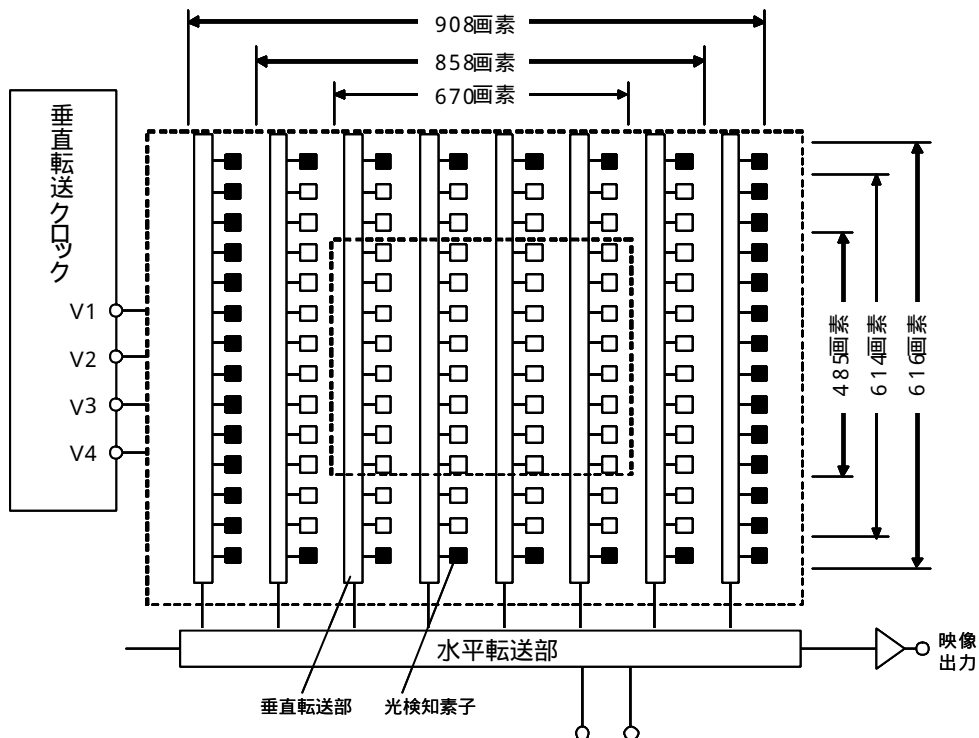


図 2 6 手振れ補正専用 CCD の構成

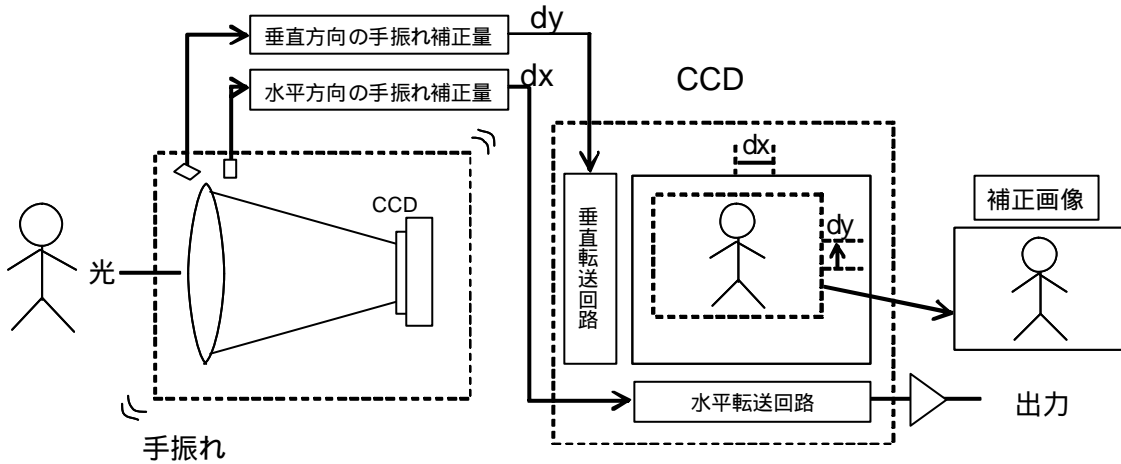


図 2 7 CCD 切り出し方式の動作原理

3.2.1 最大転送周波数の検討

CCD 型撮像素子では電荷転送素子部において電荷転送クロックに基づき転送電圧を印加して電荷を転送しているが、電荷転送クロックの周波数を 400 ~ 500 kHz 以上に上げると図 2 8 [5 5] に示すように電荷転送効率が下がり信号が劣化する

ことが報告されている。このため、転送クロックを一定の周波数以上に上げることはできない。

垂直転送周波数の検討

CCDを撮像素子として用いてCCD撮像素子の内部処理で手振れ補正を行う場合、転送速度が最大転送周波数を超えないことを確認する〔53〕。

CCDの撮影画像から一部の画像を切り出す場合に補正に必要な転送クロックの周波数を検討する。まず垂直方向の補正の際に必要な最大の転送周波数を求める。図29に示すように垂直方向の揺動に対して最大の補正を行う場合、垂直ブランキング期間中に少なくとも129ラインの電荷転送を行う必要がある。図30(a)に示すようにNTSC規格の場合、垂直ブランキング期間は1334.7 μ sである。この1/3の時間を不要電荷の転送に用いるとすると129ラインを転送する場合図30(b)に示すように1ラインの転送に3.44 μ sの補正時間が与えられる。つまり垂直補正時の転送クロックは216kHz必要となる。図28に示すように一般のCCD素子では転送周波数が350kHzまでは電荷転送効率が落ちることはない。このことから垂直方向の手振れ補正はCCD撮像素子の垂直転送クロックを制御することにより実現することがわかる。

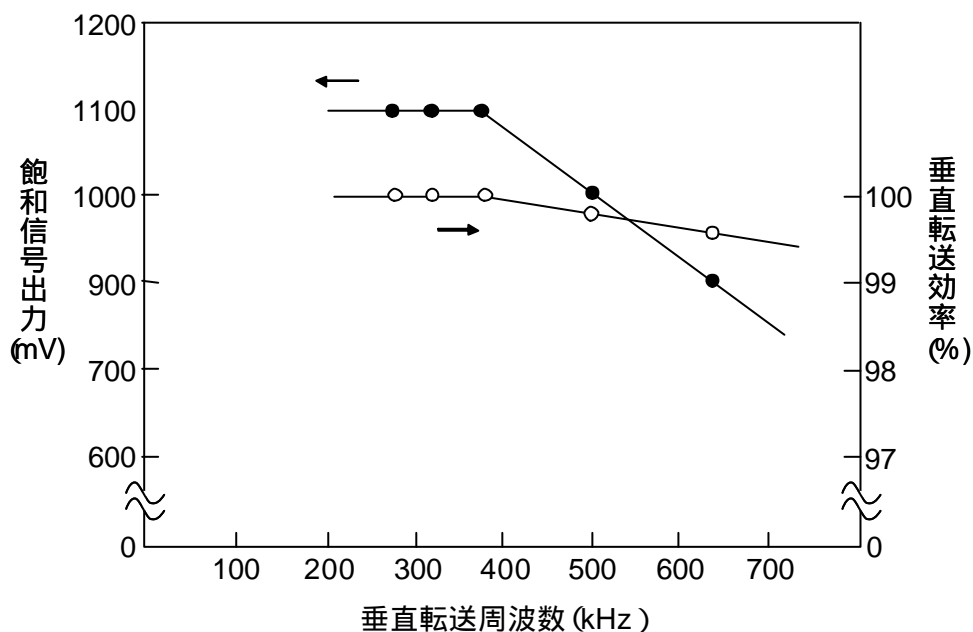


図28 CCDの転送周波数と電荷転送効率の関係〔55〕

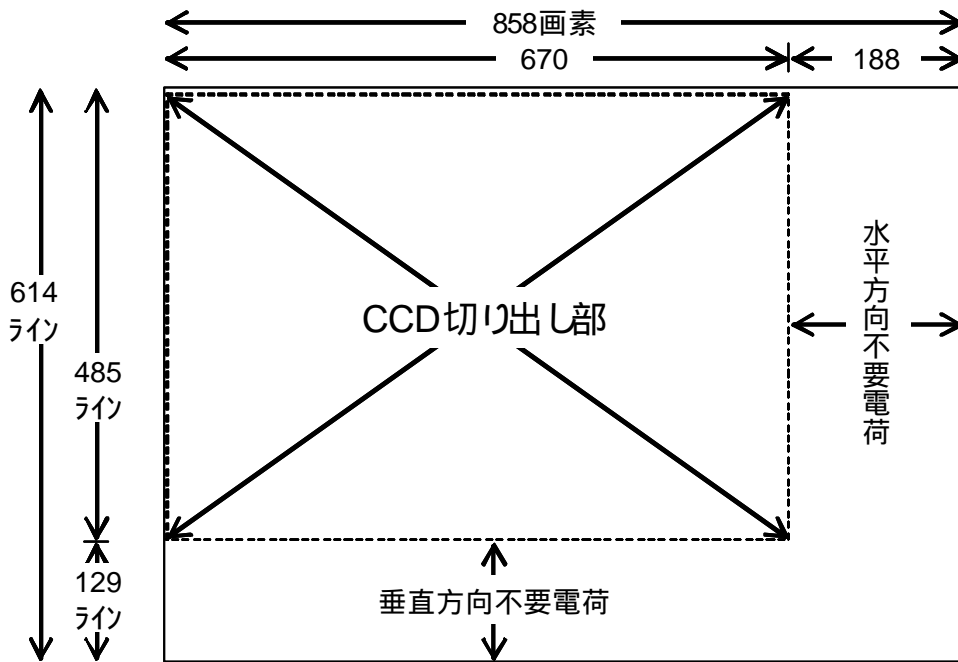


図 2 9 C C D 撮像素子の総画素数と切り出し画素数

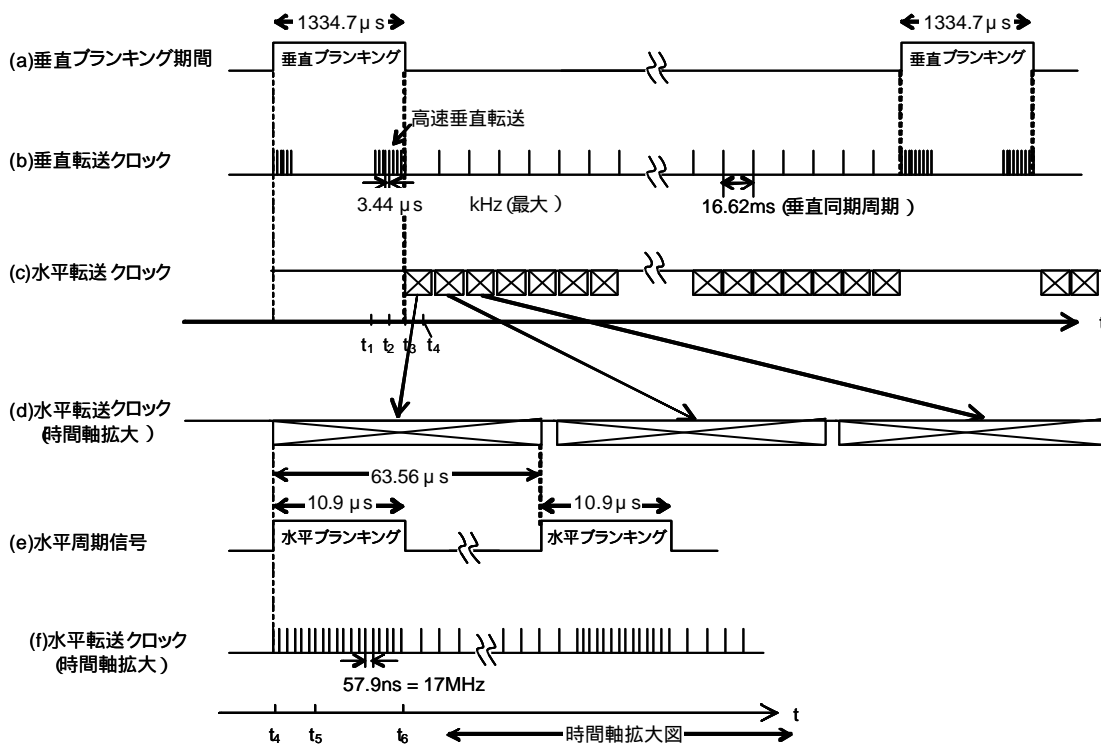


図 3 0 C C D 切り出し方式の駆動パルスタイミング図

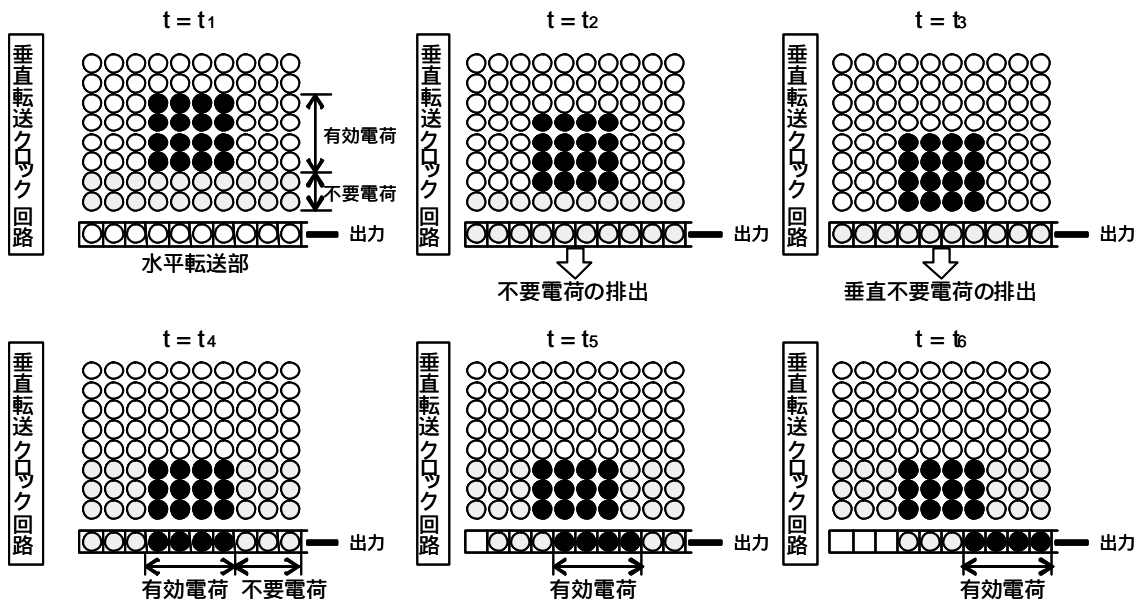


図 3 1 CCDの不要電荷を垂直転送と水平転送により排出する原理

水平転送周波数の検討

次に水平方向の手振れ補正をCCD撮像素子内部の水平方向電荷転送回路のみで処理できるかを確認する。

CCD撮像素子の水平転送回路だけで特定領域の画素を取り出す場合に必要となる転送クロックの最大値を計算する。図30(e)に示すようにNTSC規格の水平ブランキング期間は $10.9 \pm 0.2 \mu s$ であり垂直ブランキング期間に比べると大巾に短い。よって水平方向の補正に与えられる時間は $10.9 \mu s$ となる。図29に示すように水平方向の転送画素数は最大値で188画素であるため1画素を転送するために与えられる時間は図30(f)に示すように最大値で $57.9 ns$ となる。従って必要となる転送クロックの最大値は17MHz以上となる。しかし図28に示すように汎用CCDは転送クロックを400~500kHz以上に上げると電荷転送効率が落ちて画質が大幅に劣化する。超高速の転送速度のCCDは通常の半導体プロセスでは実現できない。このことからCCD内部の水平転送回路を用いて水平転送クロックを制御することだけで水平方向の任意の特定領域の画素を切り出す方式は一般的なCCD素子では実現できないことがわかる。

図30の駆動パルスタイミング図の具体的な電荷転送の原理を図31を用いて説明する。図30のタイミング $t = t_1$ においては、図31のCCDの撮像素子の中央部には黒丸で示した有効な映像の有効電荷があり、下部には斜線丸で示す不要電荷が残っている。 $t = t_2$ においては垂直転送が始まり垂直下方向に、全電荷が転送される。 t

t_2 から t_3 の間は不要電荷のみが水平転送部に転送されるので、この電荷は外部に排出される。 $t = t_3$ においては不要電荷の排出が終わり $t = t_4$ においては水平転送部に有効電荷と水平方向の不要電荷が垂直方向に転送され、 $t = t_5$ で水平転送が始まり水平方向の不要電荷が右方向へ転送され始まり排出される。 $t = t_6$ で不要電荷の排出が完了する。

前述のように垂直方向の垂直ブランキング期間中の転送は可能であるが、水平ブランキング期間中に水平方向の不要電荷の排出速度が追いつかないため、全ての不要電荷を排出することはできない水平転送部では、水平方向の不要電荷をそのまま出力せざるを得ない。このため不要電荷を含んだ水平方向の手振れが補正されない画像が出力される。

3.2.2 2段階CCD切り出し方式の提案

このことから1983年に図32のような2つのブロック構成にし、一方に垂直方向の補正、もう一方に水平方向の補正を行う2段階電子補正方式を新たに考案し提案した。この内容は筆者の特許〔17〕の図51等にも示されている。この方法は第1段階ではCCDの垂直転送回路の転送クロックを制御することにより垂直方向の画像の切り出しを行い、第2段階でCCDの外部に接続された時間軸補正回路の時間軸を制御することにより水平方向の画像の切り出しを行う方法である。この方式により図32に示すようにCCD撮像素子により得られる総画素の中から任意の特定領域の映像信号を切り出すことができるようになった。なお、この方式は現在の電子補正方式手振れ補正の主流技術となっている。電子補正方式の手振れ補正機能搭載ビデオカメラはほぼ全て筆者が発明した方式を採用しており筆者の基本特許を使用している。

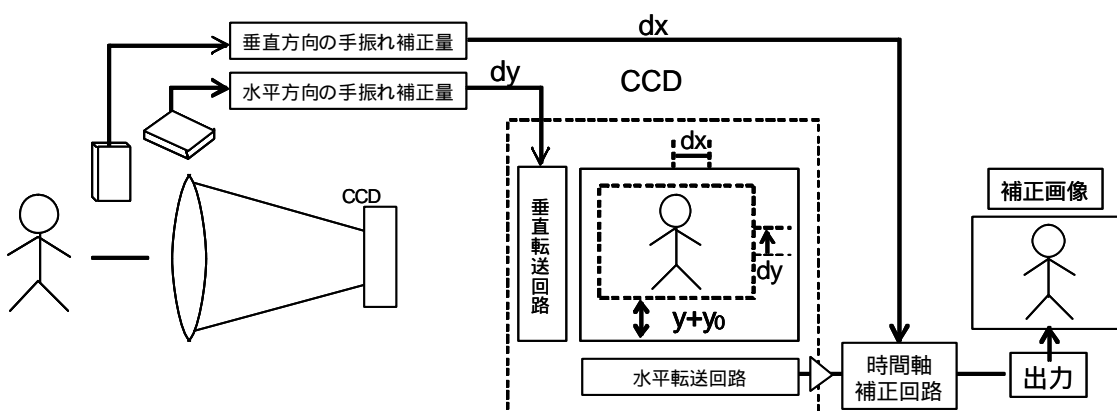


図32 2段階CCD切り出し方式の動作原理図

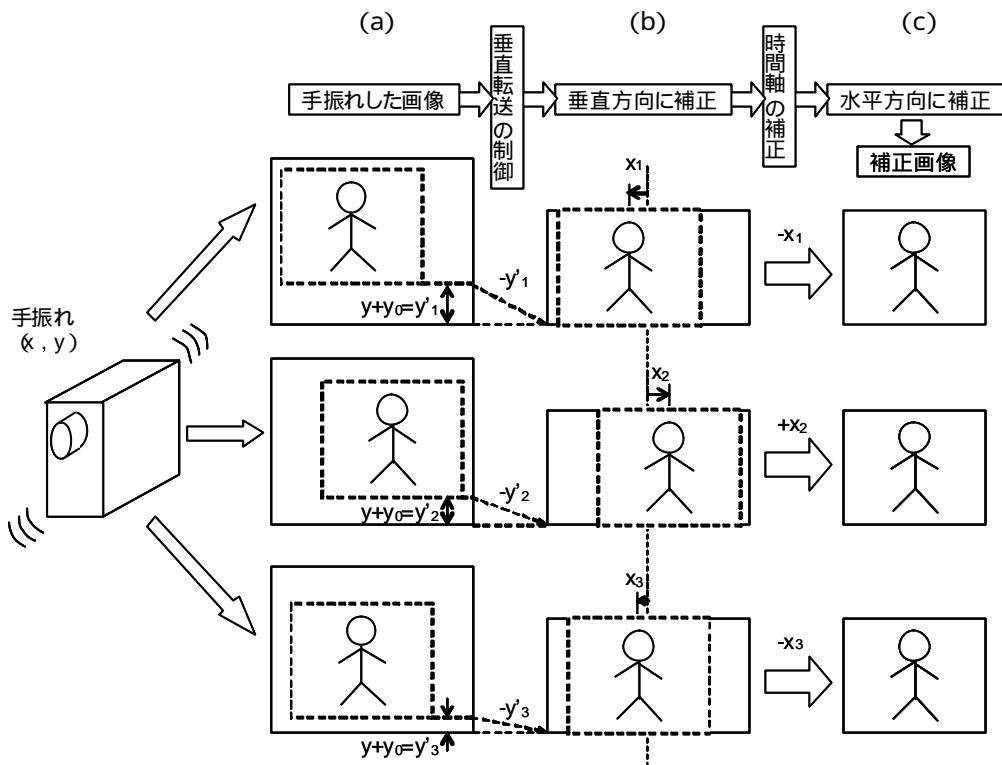


図 3 3 2 段階 C C D 切り出し方式の動作原理

図 3 3 を用いて 2 段階 C C D 切り出し方式の動作原理を説明する。図に示すように手振れによりカメラが揺動するため撮影された光学像は撮像素子の光電変換部の上を手振れ量 (x, y) に応じて、図 3 3 (a) に示すように上下、左右に揺れ動く。この揺動に伴い撮像面で光学情報から電子情報に光電変換された映像信号も揺動する。この揺動を信号処理のみで除去するには、得られた全映像情報から中心位置から x 、 y 分だけシフトした中央部の映像を切り出す。最適補正量に基づき切り出した各々の映像からは、切り出した画面の中央部に補正された被写体の映像が得られるため手振れ補正することができる。具体的に述べると図 3 3 (a) に示すようにまず垂直方向の手振れ量 y の分だけ C C D の垂直転送クロックを制御することにより図 3 3 (b) に示すように垂直方向の手振れを補正する。次に図 3 3 (b) に示すように水平方向の手振れ量 x の分だけ C C D の外部の時間軸補正回路により時間軸を制御することにより図 3 3 (c) に示すように水平方向の手振れを補正した画像が得られる。

この方式は、連続画像の各コマの切り替え期間中に手振れを補正する方法である。従って各コマの一枚の光学像の光電変換の期間中に生じる揺動の補正はできない。つまり 1 コマの撮影期間中の $1 / 60$ 秒の間に発生する手振れは原理上補正できない。

従ってデジタルカメラのような静止画撮影には効果がない。

電子補正方式においてはシャッター速度を高速にすると各コマの静止画のブレが少なくなるため補正画質が高まる。逆にシャッター速度が低速になると各コマの静止画像のブレが多くなるため補正画質が劣化する。これを具体的に述べる。ビデオ撮影を屋外等の明るい条件下で行う場合は、CCD撮像素子の電子シャッタ機能を用いて1コマの露光時間を1/1000~1/10000秒等に短くすることができる。1コマの映像の露出時間中に手振れにより映像が動く量がシャッタ速度に比例して小さくなるため静止画として見た場合の手振れが補正される。連続画像の手振れはCCD切り出し方式により補正される。従って明るい撮影条件下では静止画も動画も両方手振れが補正された安定した映像が得られる。しかし、これが実現するのは明るい撮影条件の場合だけである。夕方や室内のように暗い撮影条件下では、電子シャッター速度を速くすると感度が不足するため1コマの露光時間は長くなる。このため静止画の手振れを補正できず画質が劣化する。以上をまとめると表2のようになる。

表2 電子補正と光学補正の画質の比較

	高照度			低照度		
	動画	静止画	総合	動画	静止画	総合
電子補正					×	
光学補正						

ここで電子補正方式において手振れにより画像が劣化する原理をさらに詳細に述べる。手振れにより撮像面上に結像した光学像の位置が変化するため露光開始時の画像の位置から露光終了時の画像の位置まで、画像の光学像が露光時間中に軌跡を描く。撮像素子の各々の画素において、この軌跡が積分された値が画像情報として変換される。この軌跡の積分値は画像のズレを重ね合わせた映像になるため、輪郭のボケた映像信号が出力される。このように電子補正方式では1コマの中のこのボケ画像を補正することができない。このため各コマのつながりは揺れないで安定するが、手振れが激しい時や暗い撮像条件において各コマの中の画像がボケた映像となり、映像のシャープさがなくなる。

一方、光学補正方式では各コマの中の静止画が補正できるため、このような劣化が発生しない。このように電子補正方式は画質が劣化するという問題がある。しかし回路のみで処理できるため追加部品が不要である。光学補正に比べるとコストの上昇が少ない上にサイズが大きくならないためビデオカメラの普及機用途に適している。

表 3 は電子補正方式と光学補正方式の総合的な比較表である。

表 3 電子補正と光学補正の長所と短所

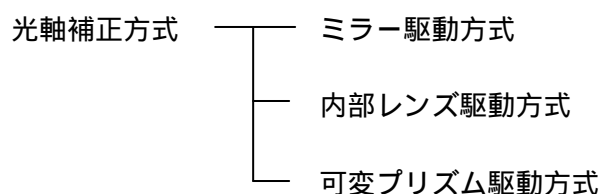
	電子補正		光学補正
	フレームメモリ方式	CCD切り出し方式	
長所	追加部分が不要 コストが安い 小型軽量	解像度劣化が少ない	画像劣化がない 静止画も補正される
短所	解像度が低下する 手振れが早い場合ブレる 静止画の補正ができない	手振れが早い場合ブレる 静止画の補正ができない	補正部分が必要 コスト増加(数%) 大きくなる(数%)

CCD切り出し方式は筆者が考案し提案した2段階CCD切り出し方式が基本技術、基本特許となっている。しかし検討当時は高画素型のCCD撮像板が実用化されていなかったことと、光学補正に比べて画質劣化要因があることから基本構成の検討を完了した時点で実用化研究は見送り、光学補正方式の検討を行う。

3.3 光学補正方式の分類

光学補正方式の中から、光軸を変更することにより手振れを補正する光軸補正方式を検討する。

光軸を変更する方式としてはミラーを駆動することにより光軸を変更するミラー駆動方式とレンズの中の一部のレンズを駆動する内部レンズ駆動方式と変形可能な可変プリズムを駆動するバリプリズムつまり可変プリズム駆動方式がある。



3.4 ミラー駆動方式の可能性の検討

まず光学補正方式の1方式であるミラーにより光軸を変更する方式を検討する。この方式は図3.4に示すように手振れにより生じたカメラの傾きを θ とすると、 $\theta/2$ だけミラーを回転させ補正することにより手振れを補正する。この方式の特長は、まず補正範囲を広くとることができることである。次に従来の光学レンズをそのまま用いることができるため光学レンズの設計を新たに行なう必要がない。また補正による色収差等の収差が発生しない等の利点がある。欠点としては広角レンズを用いる場合、大きなミラーが必要となることである。

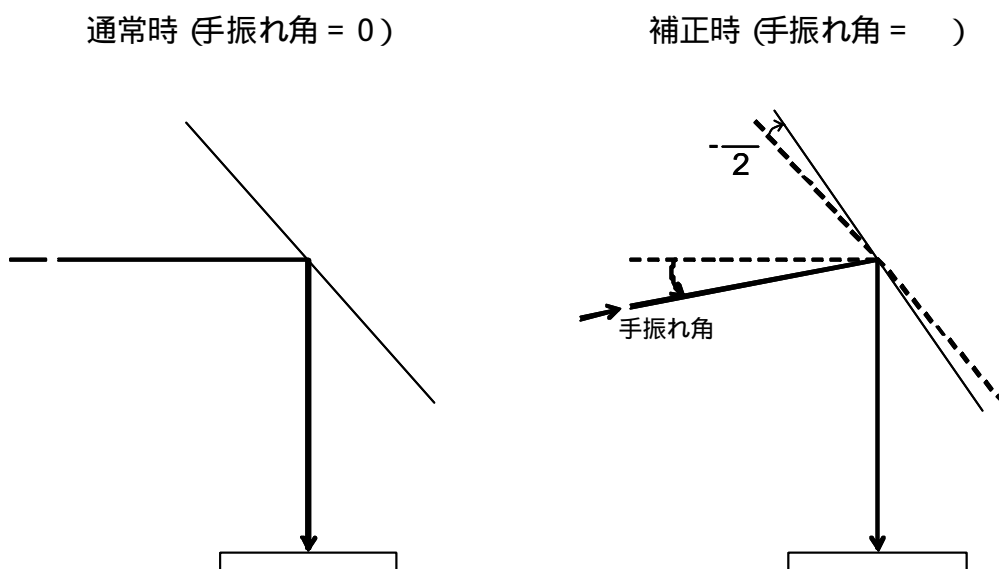


図3.4 ミラー駆動方式の動作原理図

3.5 可変プリズム駆動方式の可能性の検討

変形可能なプリズムを既存のレンズの前につけるのが可変プリズム方式、別名バリプリズム方式である〔10〕。図35に示すように通常時は(a)の可変プリズムを傾けることにより光軸が(b)に示すように曲がる。2枚のガラスの間にガラスと同じ屈折率の液体が封入されている。

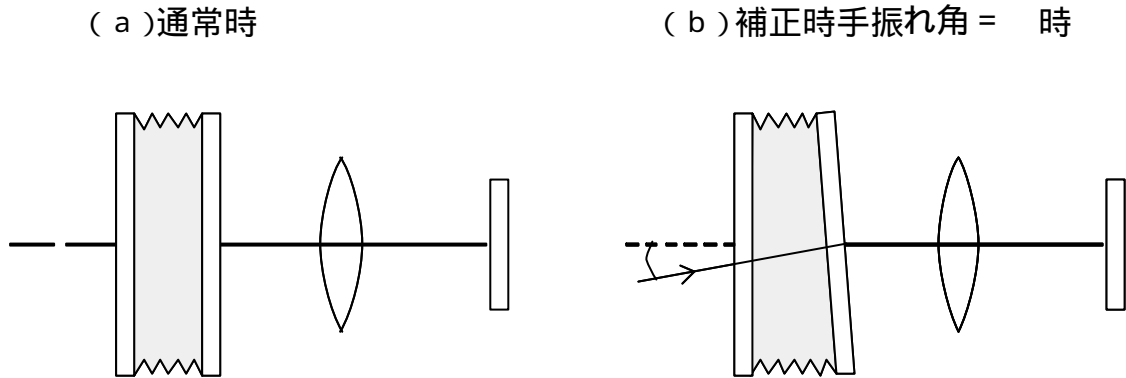


図35 可変プリズム方式の動作原理

図36に示すように可変プリズムを θ_1 傾けたときに出力角が補正角 θ_3 だけ変化する。

スネルの法則を用いて光軸の変更角 θ_3 を求めることができる。

空気の屈折率は $n_s (= 1)$ とし、可変プリズムの媒体および封入ガラスの波長 λ_i 時の屈折率を n_i とすると、

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_s}{n_i} \quad (1)$$

$$\sin \theta_2 = n_i \sin \theta_1 \quad (2)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}(n_i \sin \theta_1) \quad (3)$$

$$\text{光軸の変更角: } \theta_3 = \theta_2 - \theta_1 = \sin^{-1}(n_i \sin \theta_1) - \theta_1 \quad (4)$$

通常の光学レンズでは異なる屈折率のレンズを組み合わせることにより収差を補正する。しかし可変プリズムの場合、封入する液体は単一の屈折率しかもたないため色収差の補正が困難である。従って補正角度を大きくすると収差が発生するため画像が劣化する。発生する収差を確認するため、波長 λ が 400 nm の場合と $\lambda = 650$ nm

mの場合の入力補正角に対する光軸の変更角 θ_3 の違いを計算する。

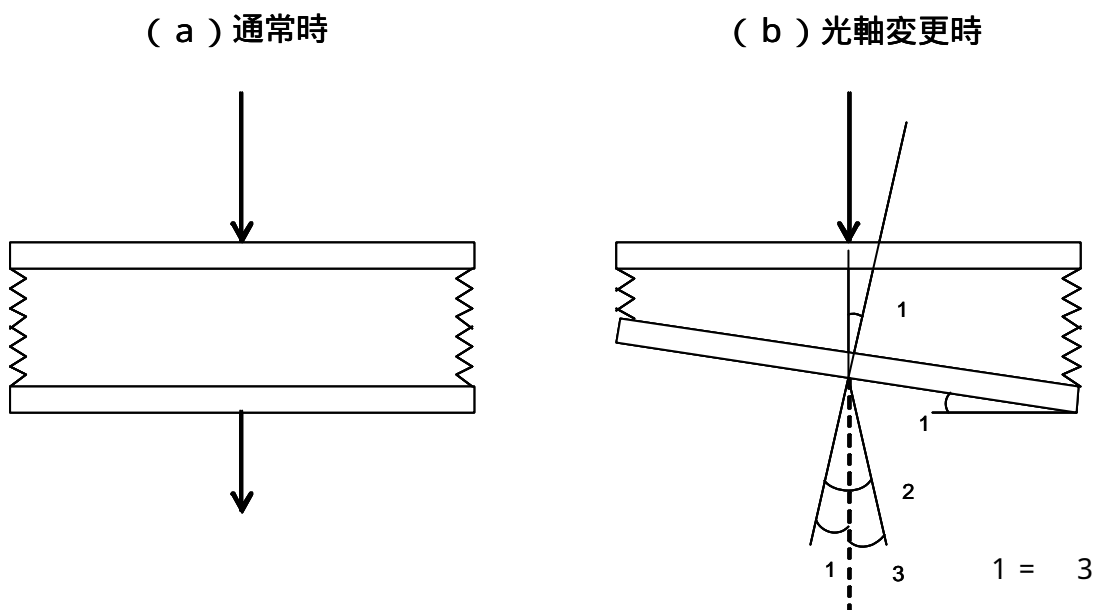


図 3.6 可変プリズム方式における補正角 θ_3

可変プリズム方式の変形角度と補正角度を図3.7と図3.8に示す。図3.7に示すように変形角 θ_1 に対する補正出力角 θ_3 の値が $\lambda = 400 \text{ nm}$ と $\lambda = 650 \text{ nm}$ で大きく異なるため色収差が発生する。図3.8から変形角度 θ_1 が0.7度つまり補正角度が0.3度程度で色収差が撮像素子の1画素分を超える色収差が発生することがわかる。厳しくみると色収差の面から補正角度を0.3度以上とることができない。歩行撮影時に発生する手振れを補正しようとするとき最大補正角度は ± 6 度必要となる。この値を目標値としている。一方、可変プリズム方式は0.3度で色収差が発生するため想定目標値を達成できない。このため民生用途の実用化に適していないと判断できるため本研究では実用化研究を見送る。

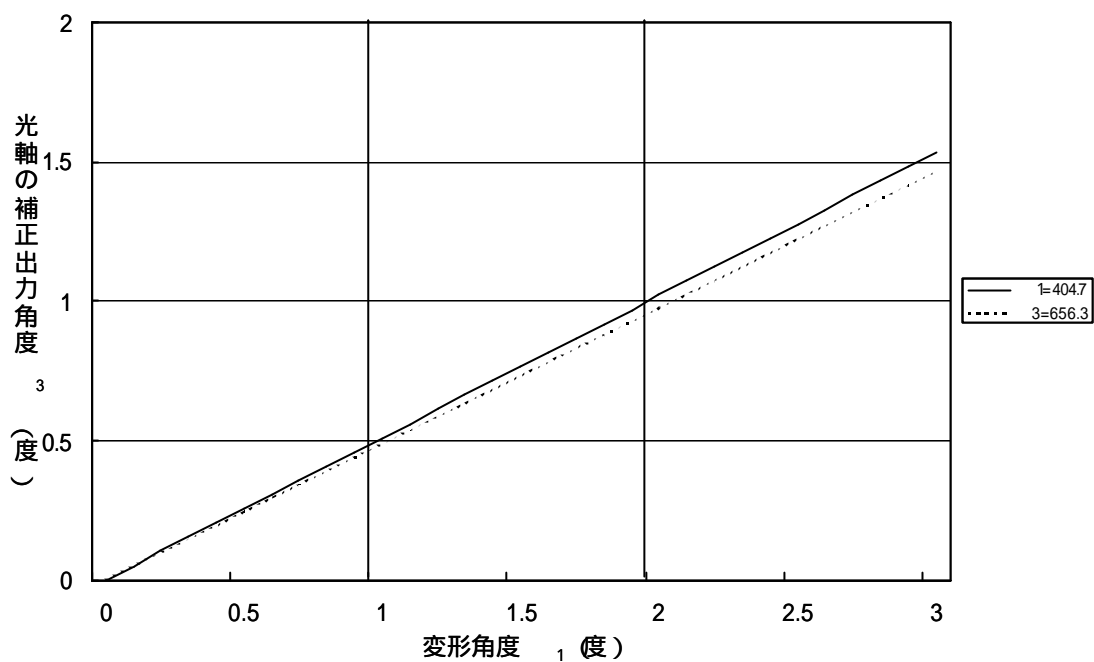


図 3 7 可変プリズムの変形角度 θ_1 と補正角度 θ_3 の関係

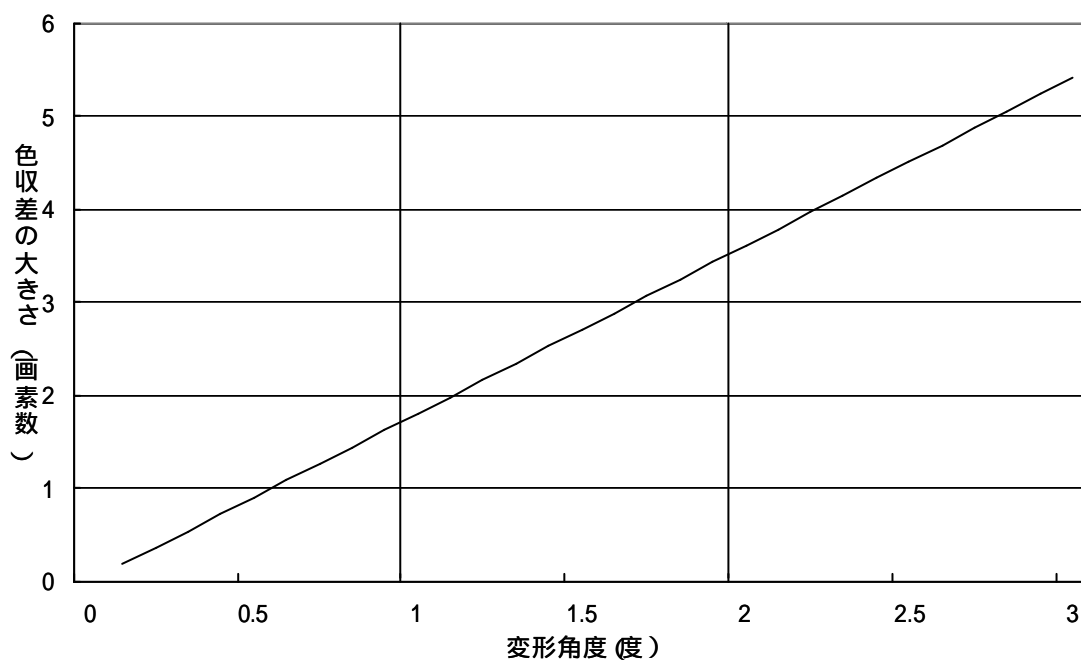


図 3 8 可変プリズムの変形角度と色収差の大きさ

3.6 鏡筒駆動方式の可能性の検討

図39に鏡筒駆動方式の手振れ補正の動作原理を示す。CCDを含む鏡筒部がジンバル機構で支えられており、ジンバルを軸として上下左右に回転できる。手振れが発生すると振動ジャイロがタテ方向のブレとヨコ方向のブレを検知する。この検出量に応じて手振れ角の反対方向に-分モーターを回転する。すると図39(b)に示すように鏡筒が通常時と同じ方向を向くため、図39(c)に示すように画面には手振れが補正された映像が得られる。

鏡筒駆動方式は既存の光学系をそのまま使えるため光学系を変更する必要がない。また色収差や偏心収差が出ないため画質が劣化しない。補正範囲を極めて大きくとることができる、という特長がある。反面、鏡筒が回転するための余裕空間をカメラ筐体の中に設ける必要があるためボディが大きくなるという課題がある。また鏡筒全体を支えるジンバル機構と駆動モーターを追加するため重量がその分重くなる。大型化し重くなるため民生用の小型軽量機に搭載する場合に課題となる。特にズームレンズの場合、ズーミングにより内部レンズが大きく移動するため、ジンバルの軸に対して鏡筒の重心が移動する。この重心の移動に伴い補正時に鏡筒の向きが若干変わる。このためバランスの機構が必要となる。鏡筒には元々慣性があるため、この慣性により鏡筒を元と同じ位置に保とうとする力が働くため元々手振れの抑制効果がある。手振れ補正時に空間上の同じ位置に鏡筒を保持する零メソッドのフィードバック制御だけで良い。フィードフォワード制御の場合は任意の測定値に対して角速度センサが正しい値を出力する必要があるため、センサに線形性が要求される。しかし零メソッドのフィードバック制御では目標値を零点とすると目標値より大きい小さいかを検知すれば良い。このため角速度センサーの線形性があまり求められない。従って線形性のよくないコストの安い角速度センサーが使用できるという利点がある。

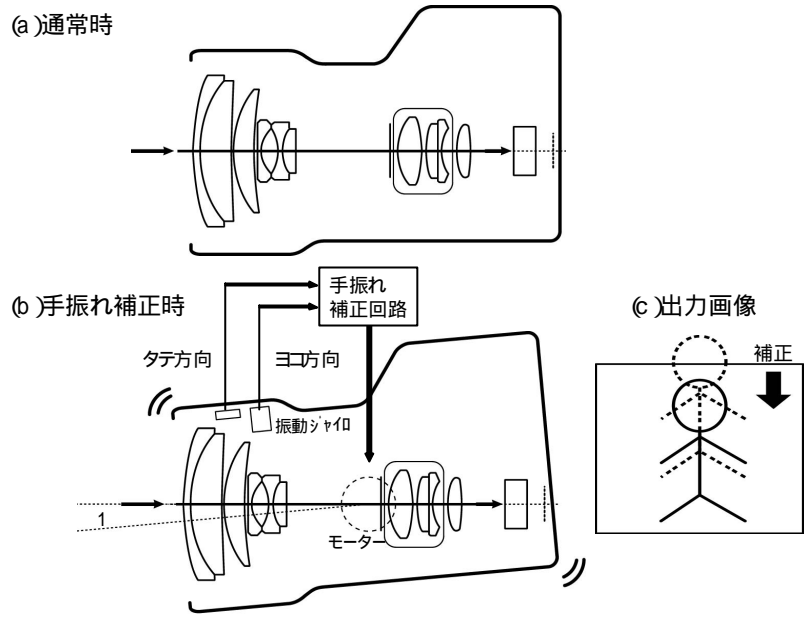


図 3 9 鏡筒駆動方式の動作原理

3.7 内部レンズ駆動方式の可能性の検討

図40に内部レンズ駆動方式の動作原理を示す。図40(a)は通常時の状態を示す。図40(b)のように下方向の手振れが起こった場合手振れとは逆の上方向へ補正レンズを移動させる。すると光軸が補正レンズの移動した上方向に曲げられるため光軸がCCDの中央部に曲げられて手振れが補正される。手振れにより画面下方向にあった光学像は補正により図42(c)に示すよう上方向にシフトされCCD中央部に補正される。

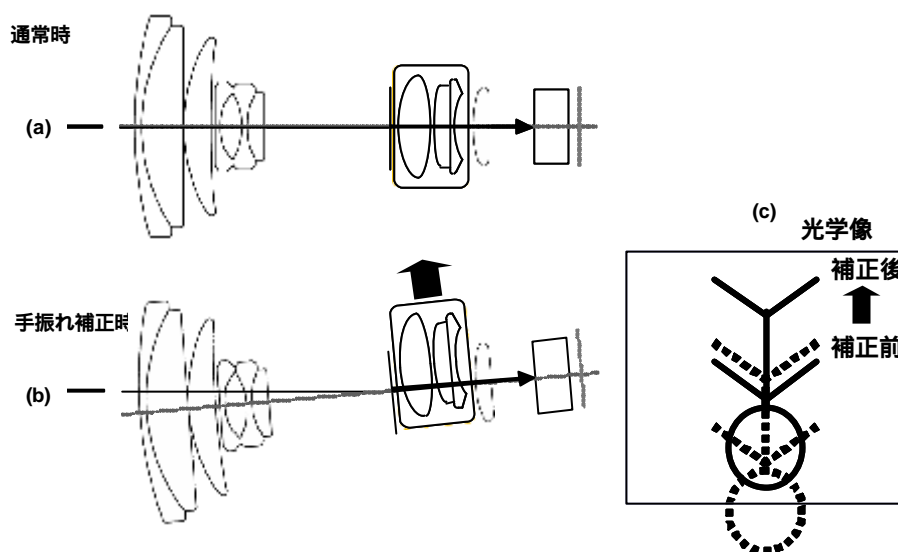


図40 内部レンズ駆動方式の補正原理

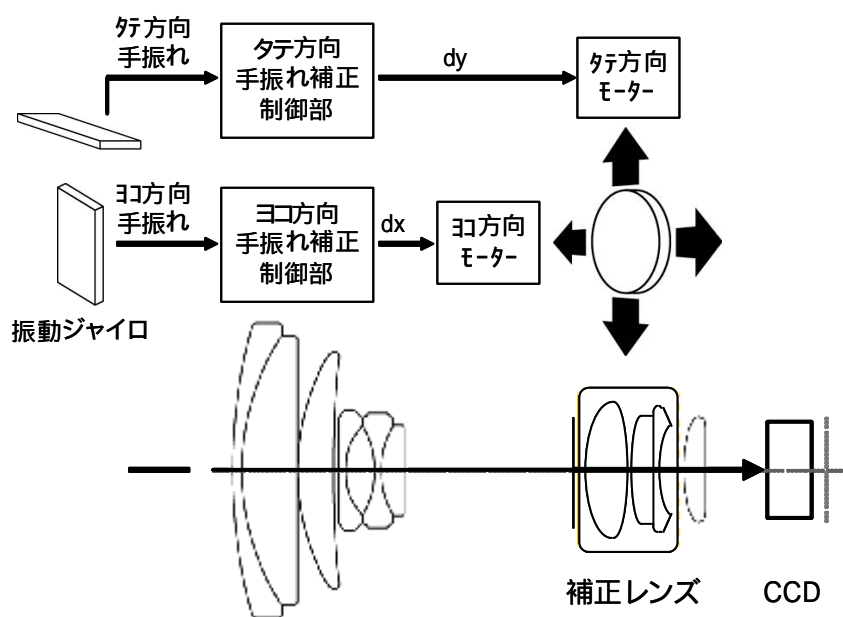


図41 内部レンズ駆動方式の構成図

図41の構成図に示すように、振動ジャイロで検出した手振れ量より手振れ補正量 d_x 、 d_y を求める。この値に応じて、タテ方向モーターとヨコ方向モーターを駆動して補正レンズを上下左右に移動させることにより図40の(b)に示すように手振れを補正する。

内部レンズ駆動方式は可動部が1群(数枚)の補正レンズだけである。モーターの駆動力が小さくてもよいため小型のモーターで駆動できる。この補正レンズは新たに追加する必要はなくレンズ構成の中の一部のレンズを補正レンズとして用いるためレンズの総枚数が増えることはない。振動ジャイロと駆動モーターの追加のみでよいため、小型軽量化できる。レンズ駆動方式は小型化の可能性がある。しかし手振れ補正範囲は1度以下である。一方、本研究は歩行撮影の手振れ補正を目標としたため補正範囲は±6度以上必要である。内部レンズ駆動方式は本研究の要求仕様を満たさないため本研究においては実用化研究の優先度を下げることとする。

レンズ駆動方式の補正量を計算する。

図42においてシフト量をDEC(Decenter)とし、出射角 θ_1 の増分を θ_1 とすると、

$$\frac{DEC}{f} = \tan(\theta_1) \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{DEC}{f}\right) \dots\dots\dots (2)$$

となる。

上式のようにレンズをDECシフトさせると角度 θ_1 の分の手振れを補正できる。

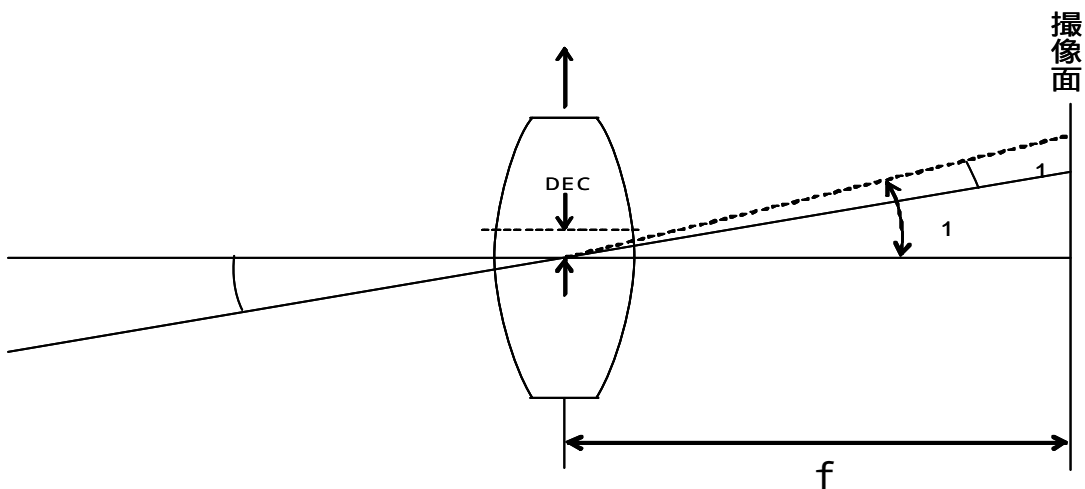


図42 内部レンズ駆動方式の原理

3.8 撮像板駆動方式の提案と可能性の検討

次にアクチュエーターを用いて撮像素子の位置を移動させることにより手振れを補正する方式を新たに考案し、その可能性を検討する。

撮像板駆動方式の考案と提案

フィルムカメラの撮像手段はフィルムである。このフィルムとフィルム巻き取り機構とパトローネの合体部を水平方向と垂直方向に高速かつ高精度に移動させることは難しい。これはフィルム巻き取り機構を含めると可動重量が重く本体重量に占める重量比率も大きくなるため駆動効率が悪くなるためである。これに対してビデオカメラやデジタルカメラの場合は撮像手段としてCCDやMOSの撮像板素子を用いる。この撮像板の重量は軽いためモーターで機械的に上下左右に移動させることは可能である。また本体重量全体に占める重量比率も小さい。1983年にこの点に着目し撮像板駆動手段により撮像素子そのものをx、y方向に平行移動させる「撮像板駆動方式」を新たに考案し検討した。筆者による特許〔17〕の第36図に全体のブロック図、〔17〕の第37図にx yスライダが開示されている。

この方式は図44に示すようにXYスライダーの上にCCD等の撮像板を乗せ、手振れ補正信号に応じてピッチ方向モーターとヨー方向モーターにより駆動することにより手振れを補正するものである。斜視図を図45に示す。図43の(b)に示すように手振れにより光軸が上方向にずれるが、CCDを上方向にシフトさせることにより手振れが補正される。この方式には小型軽量の撮像板と移動精度の高いモーターとXYスライダーが必要となる。

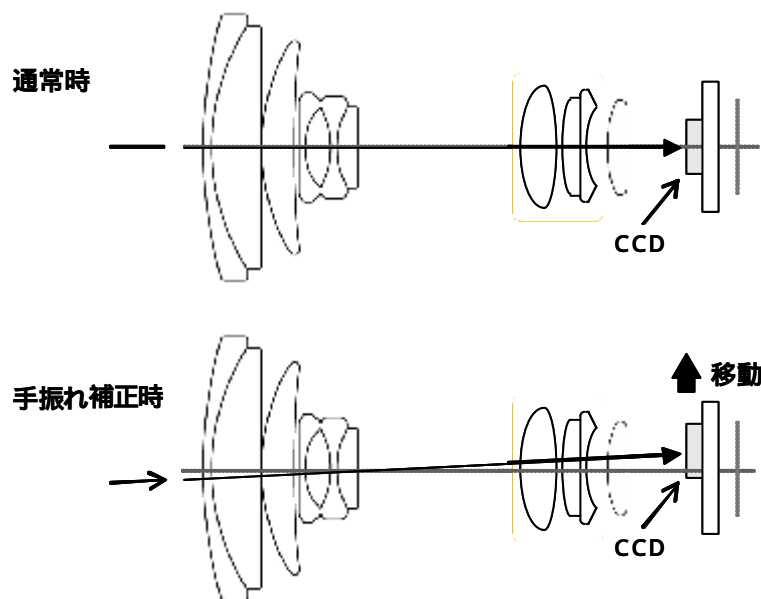


図43 撮像板駆動方式の補正原理

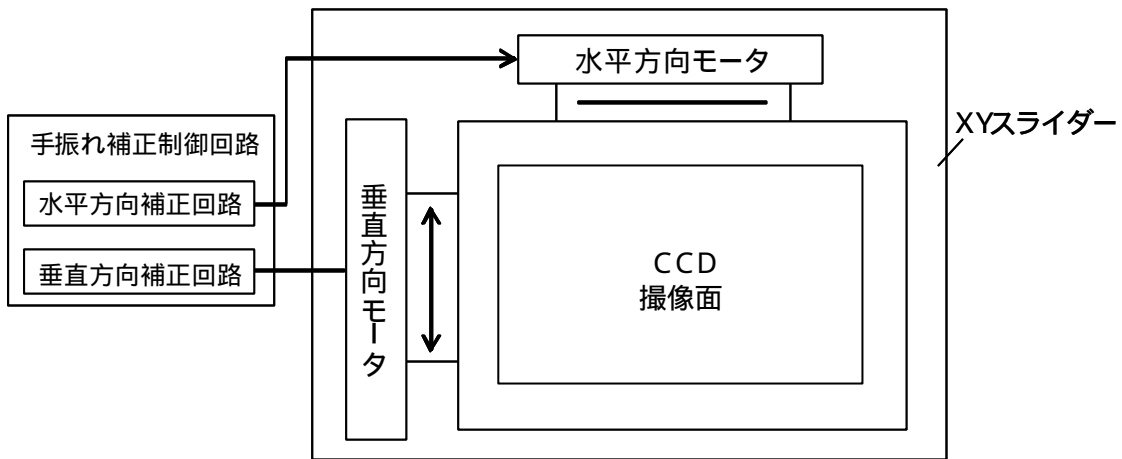


図 4 4 撮像板駆動方式のブロック図

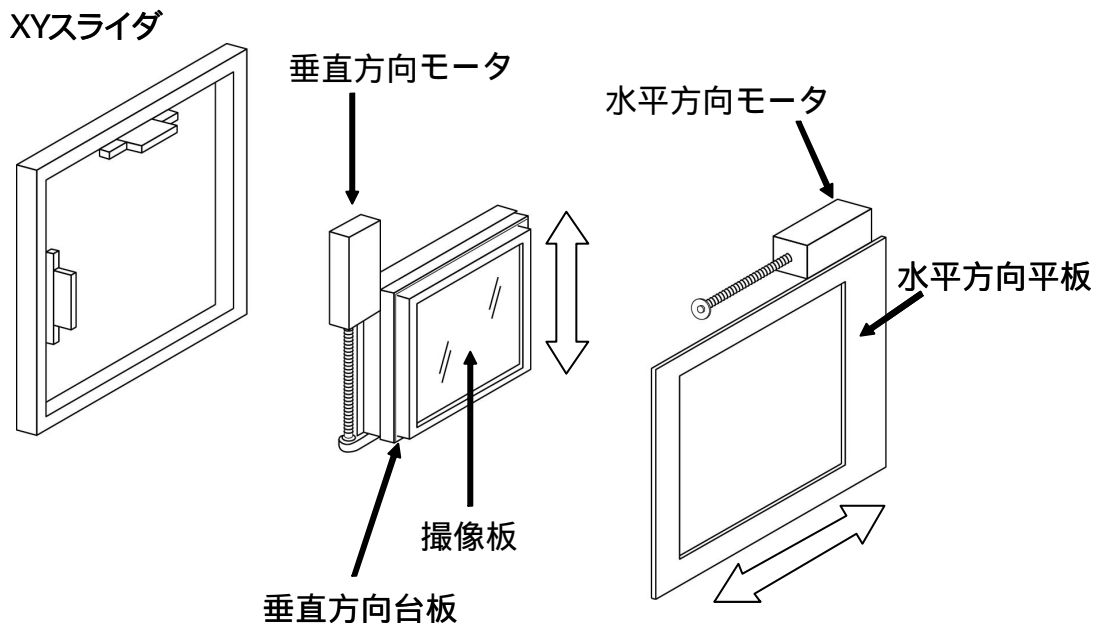


図 4 5 撮像板駆動方式の構成（斜視図）

この撮像板駆動方式と前述の内部レンズ駆動方式は、振動ジャイロで手振れを検出する点と、XYスライダー、タテ方向モーター、ヨコ方向モーターを使う点は全く同じである。違う点はシフトの対象が内部レンズからCCD素子になった点だけである。図46に示すように一方は補正レンズを手振れの下方向と逆の上方向にシフトすることにより光学像をCCDの中心部へシフトさせる。もう一方はCCDを手振れの下方向と同じ下方向にシフトすることによりCCDの中心部を光軸の中心部にシフトさせ

ている。前述のようにCCDより補正レンズの方が重量が軽いので一般的にはレンズ駆動方式の方が小型化できる。しかし一眼レフカメラのようにレンズ交換型カメラでは撮像板駆動方式の方が適している。

撮像板駆動方式の最大の特長はレンズ等の光学系に特殊な設計をしなくてもよい点にある。特にレンズ交換型のカメラシステムにおいては手振れ補正機構が搭載されていない既存のレンズを使えるという利点がある。

レンズ交換型カメラシステムは1台のボディ部と複数の交換レンズ群から構成される。この撮像板駆動方式の場合ボディ部側に手振れ補正機構を搭載する。このため多数の交換レンズを含むカメラシステムに1つの手振れ補正機構を搭載するだけでよい。レンズ側に手振れ補正機構を搭載する方式では交換レンズの数だけ手振れ補正機構が必要となる。全体を1つのシステムとして見た場合の重量とコストが増えるという欠点がある。

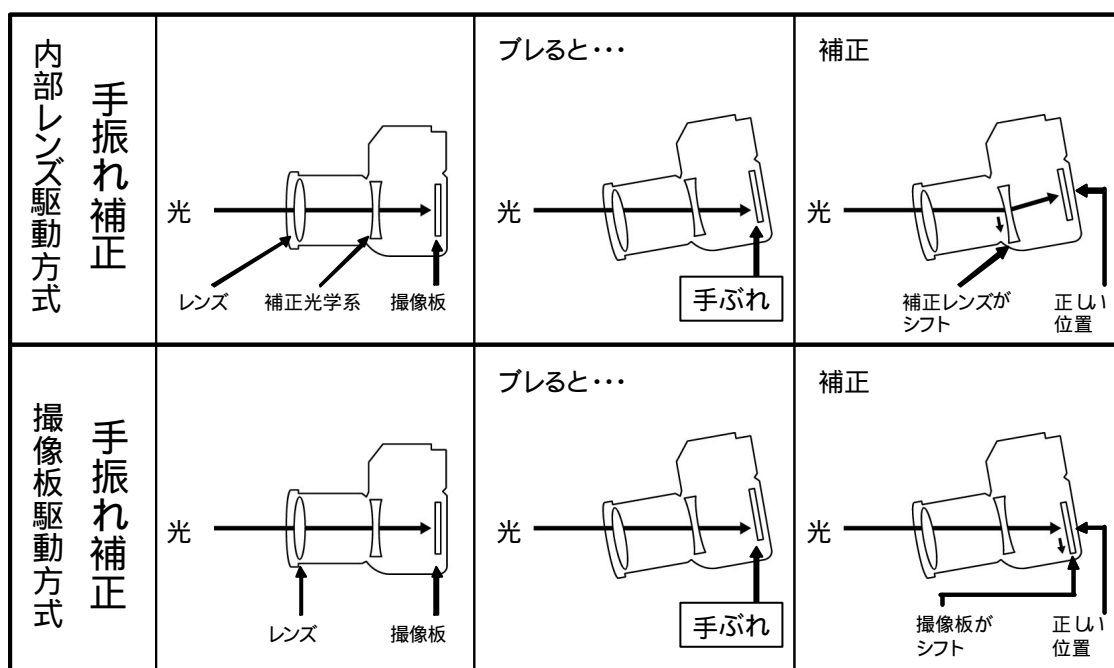


図46 内部レンズ駆動方式と撮像板駆動方式の動作の違い

内部レンズ補正方式の方が手振れ補正機構を小型化できるためレンズ非交換型カメラの場合は撮像板駆動方式のメリットがない。

放送用や業務用のビデオカメラはレンズ交換式が主流であるが画質が求められるため3管式もしくは3板式で構成されている。3板式では入射光はプリズムにより3原色に分離されプリズムには3つの撮像素子が極めて高い精度で配置されている。解像度を高めるため3つの撮像板を画素を微妙にずらして配置してあるためミクロンの組み立て精度が必要である。従って撮像板駆動方式では3つの撮像素子を各々高精度の

位置関係を保ちながら同期させてx y方向にシフトさせる必要がある。同期が少しでもずれると色ズレや解像度低下等の画質劣化がおこる。こうした高精度の機械的な制御を同期させて行うことは技術的に困難であるため放送用3板式カメラには撮像板駆動方式は適していない。

また民生用ビデオカメラの場合は、高倍率ズームが搭載され、交換レンズタイプは実用化されていない。このため撮像板駆動方式はメリットが出ず適していない。

以上のようにビデオカメラにおいては撮像板駆動方式のメリットは出ない。このため基本的な研究を行ったが実用化研究は行わなかった。なお筆者が1983年に提案考案した「撮像板駆動方式」はその後2003年にコニカミノルタ社により実用化されたが、筆者の提案方式が基本技術となり基本特許〔17〕となっている。

3.9 手振れ補正方式の比較

表4に手振れ補正方式の長所、短所をまとめる〔28〕。光学補正方式は画像劣化が少ないため高機能機に適している。補正範囲の小さな方式の中では内部レンズ駆動方式と可変プリズム駆動方式が小型軽量化の可能性がある〔70〕。補正範囲の大きな方式の中ではミラー駆動方式と鏡筒駆動方式が適している。電子補正方式は小型軽量化に最も適しているが、条件によっては画像が劣化するため普及機に適している〔62〕。

図47に示すように各方式により補正範囲の大きさが違う。静止撮影時に発生する手振れは最大で ± 0.3 度の範囲に収まるため、全ての補正方式を用いることができる。これにたいし歩行撮影時に発生する手振れは最大 ± 6 度まで分布する。このため歩行撮影時の手振れまで補正しようとするミラー駆動方式と鏡筒駆動方式が適している。静止撮影のみならず歩行撮影の手振れを補正することが本研究の目標仕様であるため、この2方式を優先して検討を行うことにする。

表4 光軸補正方式の比較

	長所	課題
ミミイ 駆動方式	補正範囲が大きい 画質が全く劣化しない 既存のレンズユニットを使用できる	形状が大きくなる (現在 実用化されていない)
可変プリズム 駆動方式	補正範囲が大きい(± 2度) 解像度の劣化がない 既存のレンズユニットを使用できる	・可変プリズムが高価 ・補正による収差が出る (1992年にビデオカメラ用に実用化されたが、その後実用化されていない)
鏡筒 駆動方式	補正範囲が極めて大きい(± 5～ 10度) 画質が全く劣化しない 既存のレンズユニットを使用できる	・レンズユニットが大きい場合小型軽量化が難しい。 (現在 :デジカメ用として実用化)
内部 レンズ 駆動方式	画質が劣化しない 小型軽量化できる	・補正範囲が狭い(1度以下) ・補正による収差が少し出る ・光学系を変更することが必要 (現在 :デジカメ用、ビデオカメラ用の主流方式として実用化)
CCD 駆動方式	画像劣化が少ない ・レンズ交換式カメラの場合全体コスト重量が下がる	・内部レンズ駆動方式に比べて小型軽量化面で不利 (現在 :デジカメ用として実用化)
CCD 切り出し 方式	画質低下が少ない 小型、軽量化に適している	・暗い場合、手振れの大きい場合、画質が劣化 (現在 :ビデオカメラ用の主流方式として実用化)

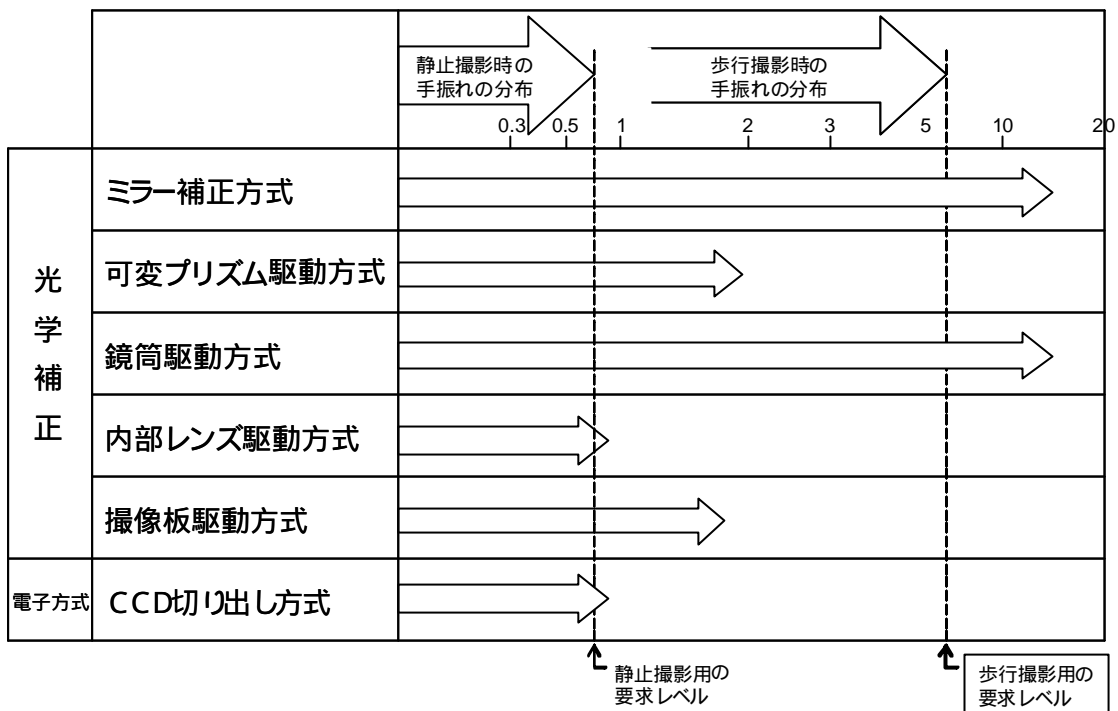


図 4 7 手振れ補正方式の補正範囲の比較

3.10 むすび

まず、電子補正方式として、CCDの撮像素子で撮像した画像情報の一部の領域を手振れに応じて切り出し補正画像を得るCCD切り出し方式を考案し提案する。転送クロックを制御して切り出す時には転送限界周波数の範囲内に収まる。しかし水平転送クロックを制御して切り出す時には転送限界周波数を超える。このことからCCD内の垂直転送回路を用いて垂直方向の手振れの補正を行い、水平方向の補正をCCDの外部に設けた時間軸補正回路により行う2段階CCD切り出し方式を考案し提案した。この方式は実現可能性が高かったが当時は半導体素子の画素数が少なかったことから実用化の優先度は低いと考えた。

次に光学補正方式としては、図47に示すように5つの方式の可能性を検討した。検討する前提として歩行撮影時に発生する手振れを補正するという目標を設けたため ± 6 度以上の補正範囲を目標仕様とした。ミラー補正方式は補正範囲が大きいため本研究の要求を満たす。また既存の光学レンズが使えるという利点がある。可変プリズム駆動方式は小型化には適しているが補正範囲を大きくすると色収差が発生するという問題がある。内部レンズ駆動方式は最も小型化に適しているが、大きな補正範囲をとろうとすると大きくレンズを偏心させるため収差が発生する。このため筆者の目標とする ± 6 度の補正範囲を実現することは困難である。

鏡筒駆動方式はレンズユニットと撮像板の全体を駆動するため、駆動力の大きいモ

ータが必要でありジンバルも大きいため、ミラー方式に比べると小型化できるもののサイズが少し大きくなるという欠点がある。しかし補正範囲を大きくとれるため筆者の目標値を満足した。

CCDやMOS等の撮像板を機械的に駆動する撮像板駆動方式を考案し提案した。サイズが小さくなるが補正範囲の小さな補正方式の他方式である内部レンズ駆動方式に比べて可動部が重くなるため駆動モーターが大きくなるという欠点がある。また補正範囲をあまり大きくできない。しかしレンズ交換式カメラシステムのカメラボディ側に搭載した場合、カメラシステム全体で手振れ補正機構が一つでよいというメリットが出る。このため1眼レフのカメラに搭載される可能性がある。

以上の可能性の検討から筆者の手振れの補正範囲を満たす補正方式はミラー補正方式と鏡筒駆動方式であることが明らかになった。

第4章 手振れ補正技術の実証実験と検討

4.1 まえがき

まず、試作した振動ジャイロで検出した手振れ検出信号を用いて手振れ補正手段を制御することにより、実際に手振れが抑制できるかを実証実験機を試作することにより確認する。

当時は、手振れ補正技術が実現していなかったため、手振れのような1/1000程度の微細な揺動を振動ジャイロで検出できるかという基礎的な知見も確立されていなかった。このため振動ジャイロ検出方式の実現が疑問視されていた。この疑問を払拭するためにはその動作と効果を実証する必要があった。

本章では実証実験時の手振れ検出方式の検討を行い、1軸ミラー駆動方式と2軸ミラー駆動方式の手振れ補正装置を試作し、実証実験を行う。

4.2 機能実証のための手振れ検出方式の検討

様々な形状の振動ジャイロを試作した結果、最終的に図4.8に示す並列型振動ジャイロを手振れ検出方式として用いることにした。この方式は1948年に米国スペリー社のBarnabyにより発明〔122〕され一時ミサイル用に研究された。図4.9の1本の振動子を用いて振動ジャイロの動作と検出原理を説明する。検知素子をその長手方向に速度 u で振り子運動させる。速度 u で左方向に運動している重さ m の検知素子が角速度 ω で回転すると、速度 u の右方向の垂直方向にコリオリ力 f_c が発生し、検知素子は f_c の方向にたわむ。

$$f_c = 2m \times u \times \omega \quad \text{----- (5)}$$

振動子はバイモルフ等の圧電素子から構成されているため、このたわみは電気信号に変換される。この電気信号を適切に処理することにより、角速度 ω を求めることができる。

振動子が右方向に振動する時と左方向に振動する時ではコリオリ力が逆方向に加わるため角速度を速度で変調した交流信号が発生する。この交流信号を同期検波によって復調することにより角速度に比例した検出信号が得られる。

検知素子は上記コリオリの力のみならず自らに作用する全ての力を電気信号にするためこれが誤差信号となる。このためこの誤差信号を抑圧することが重要である。図4.8に示すように並列型は互いに対称に逆方向に振動する。このため図5.0の(1)に示すように外部から振動方向に垂直に外乱加速度が加わった時、この外乱加速度に基づ

き振動子Aにおいて正相の検出信号が発生する。この時、振動子Bは逆相に接続されているため負相の検出信号が発生する。このため振動子Aと振動子Bに発生する信号を加算すると信号は互いにキャンセルされる。このため加速度成分に基づく出力信号は抑圧されて発生しない。

一方振動子Aと振動子Bは対称形に振動しているため、図48に示すようにコリオリ力は各々振動方向に垂直にかつ逆方向に加わる。振動子Aと振動子Bは逆相に接続されているため、コリオリ力により振動子Aと振動子Bに発生した信号は加算されて2倍の信号が出力される。つまり加速度による検出電圧は出力されないのに対し角速度による検出電圧は倍増する。このためSN比が改善される。この方式は米国のBarnaby氏によって1948年に提案された方式である。2次大戦後の1950年前後に振動ジャイロは研究が行われたが、ミサイルの慣性航法用を目的とされていた

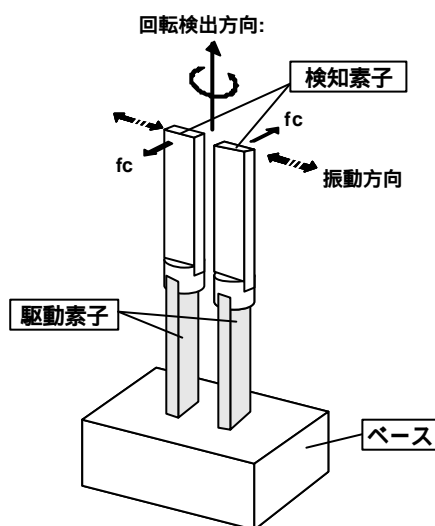


図48 並列振動子型振動ジャイロ(試作品)[22]

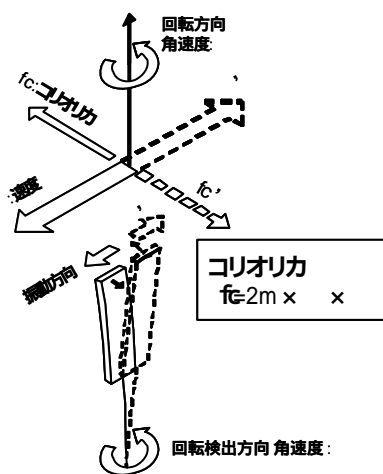


図49 振動ジャイロの動作原理

め高い精度が要求された。当時の技術では、この要求を満たすことができないため研究は中止され、量産はされていなかった。しかし慣性航法用途に比べると手振れ補正用途の方が要求精度が低いため、振動ジャイロが手振れ補正の要求精度を満たす可能性がある。



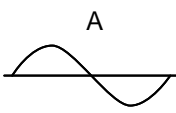
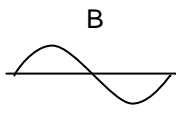
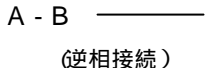
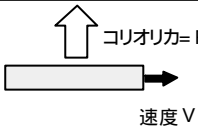
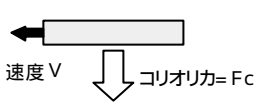
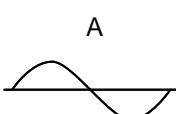
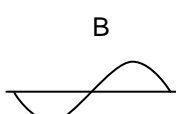
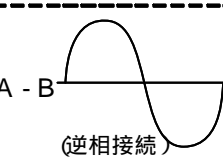
		発生電圧		最終出力電圧
		振動子A	振動子B	
加速度成分	加わる力			
	電圧			A - B  (逆相接続)
角速度成分	加わる力			
	電圧			A - B  (逆相接続)

図 5 0 並列型振動ジャイロの各振動子に加わる力と出力電圧

4 . 3 機能実証のための手振れ補正方式の検討と実証実験

前の章で様々な手振れ補正方式を検討したが、本研究の目標仕様は歩行撮影に発生する手振れを低減させることにある。このためには±6度の補正範囲が必要である。

前章の図4 7に示すように目標仕様を実現する方式は、ミラー補正方式と鏡筒駆動方式の2つである。鏡筒補正方式の場合、レンズユニットを回動可能とする2軸自由度を持つジンバルの開発と2軸回動用のモーターの開発、そしてカメラボディの変更が必要のため、実証モデルの試作に時間を要する。

一方、ミラー補正方式の場合は外付け方式のため、既存のカメラを全く変更しないで用いることができるため、実証モデルの試作が短期間でできる。このため実証実験用としてはミラー駆動方式を採用する。

4.4 1軸ミラー駆動方式の試作および実証実験（試作1号機）

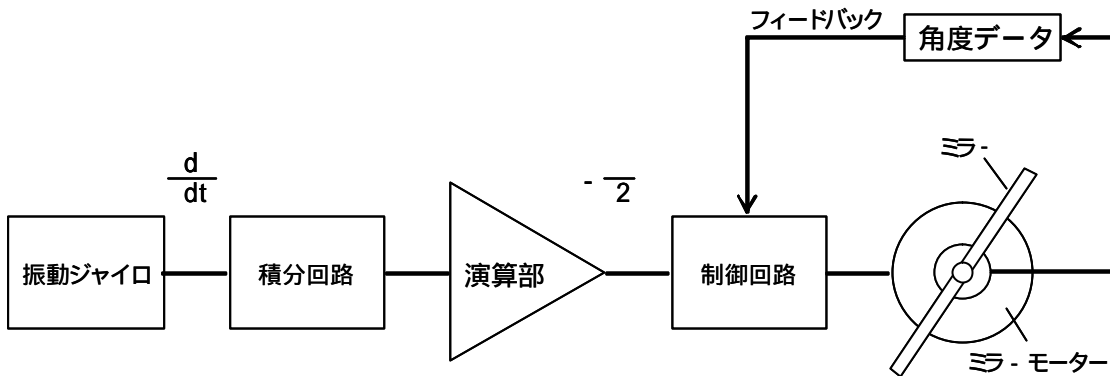


図5.1 ミラー駆動方式手振れ補正システムのブロック図

全体システムは、振動ジャイロから得られた手振れの角速度 d / dt を積分回路で積分し手振れ角 θ を得る。この手振れ角 θ の $1 / 2$ の逆方向、つまり $- \theta / 2$ をミラーモーターの制御回路に与えることにより、ミラーは手振れ角 θ の逆方向に $\theta / 2$ だけ回転する。すると光軸は手振れ角 θ の反対方向に $\theta / 2$ だけ補正されるため手振れは補正される。

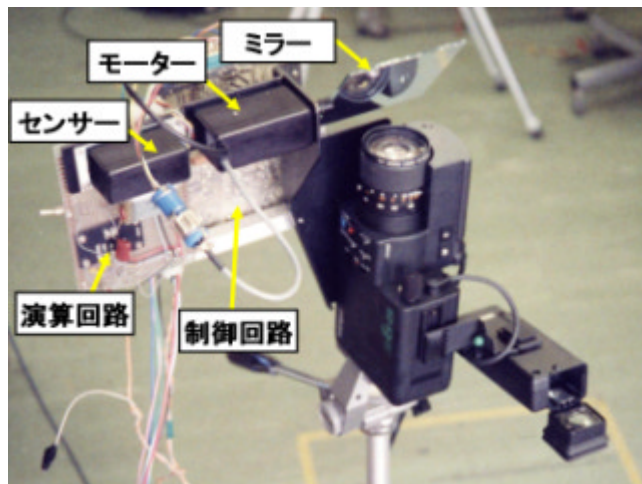


図5.2 手振れ補正の試作機（1号機）

図5.2の写真は実際に試作したジャイロセンサーと、演算回路、制御回路、ミラーモーターの外観を示す。

この試作機に手振れの揺動を与えると、手振れ補正機構により撮影画像に現れる揺動が $1 / 10$ 以下に抑圧されることがわかった。低域から高域の揺動に対しても手振れを補正することができた。この試作機により振動ジャイロにより検出した手振れ検出信号を用いることにより手振れを補正できることを確認した。

4.5 2軸ミラー駆動方式の試作および実証実験（試作2号機）

実証実験機の1号機は1軸制御のためタテ方向の手振れしか補正できない。手振れ補正の実証確認には充分であったがヨコ方向の手振れが残っているため手振れ補正の効果を実際の画像で確認することはできない。そこで2軸ミラー駆動方式の手振れ補正機構を試作する。

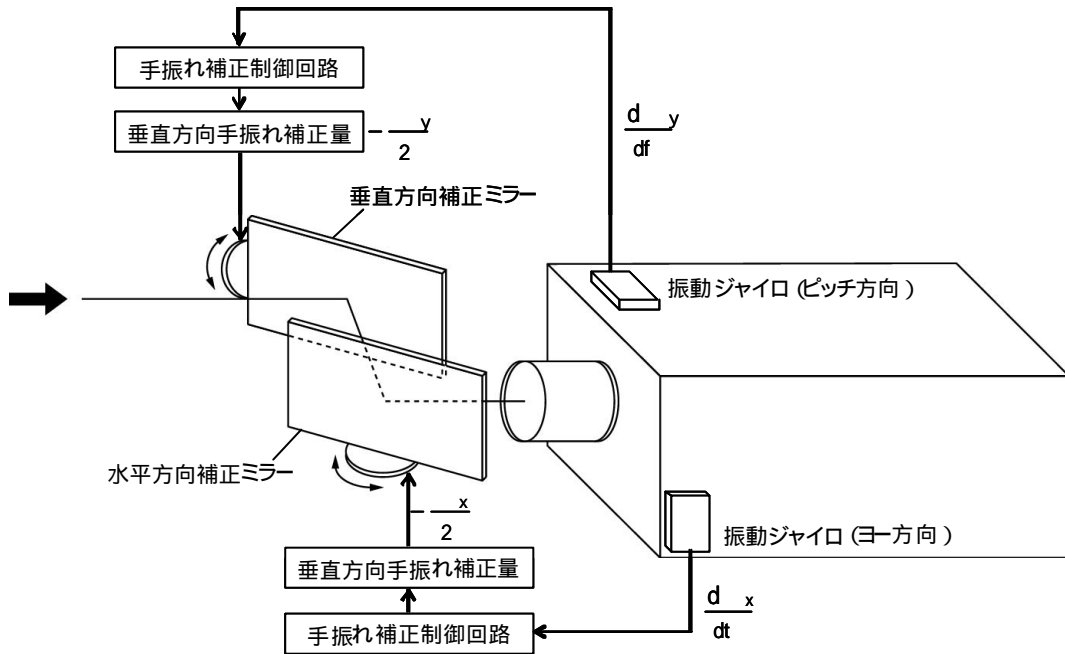


図5.3 2軸ミラー駆動方式の構成（斜視図）



図5.4 2軸ミラー駆動方式搭載ビデオカメラと撮影実験

2軸補正方式は図5-3に示すようにタテ方向（ピッチ）のミラー駆動部とヨコ方向（ヨー）のミラー駆動部の2軸のミラー駆動部から構成される。2軸の補正ができるためロール方向以外の発生する手振れをほぼ完全に補正することができる。図5-4に示すようにこの試作2号機を用いて撮影実験を行った。広角レンズでの撮影が可能ならしめると大きなミラーが2枚必要となるため撮影装置全体が大きく重くなる。重くなるとその分、手振れの発生角が小さくなるため、現実的な重量の撮影装置における手振れ補正効果を観察することが難しい。また、民生用に許される大きさを超えてしまい民生用機器には適用できないことが明らかになった。

4.6 むすび

様々な形状の振動モードが異なる振動ジャイロを試作し、最終的に2本の片梁型の振動子を並列に並べた並列振動子型振動ジャイロを手振れ検出手段として用いた。振動ジャイロは零点安定性が良くないが、手振れ補正に用いる場合は低域成分が実質的に除去されるため影響が少ない。また手振れは高い周波数まで分布するが、振動ジャイロは良好な高域検出特性を持つため手振れの検出に適している。

静止撮影時のみならず歩行撮影時の手振れを補正するには ± 6 度以上の補正範囲が要求される。この要求を満たす方式はミラー駆動方式と鏡筒駆動方式しかない。短期間で製作できることから、ミラー駆動方式を優先して試作することにし、まず1軸ミラー駆動方式の試作を行なった。この方式では手振れ角を振動ジャイロで検出し、 $\pi/2$ だけミラーを回転駆動することにより手振れを補正する。実験を行い撮影時に発生する周波数帯域の手振れを $1/10$ 以下に抑制することができることを確認した。この1軸ミラー駆動方式により振動ジャイロで手振れを検出し補正できることを実証した。引き続き2軸ミラー補正方式を試作しタテ方向とヨコ方向の手振れを補正することにより手振れをほぼ完全に補正することができた。そして目視により良好な補正特性であることを確認した。

しかし、通常の広角を含むズームレンズを装着して補正範囲を確保しようとするミラー駆動方式は全体のサイズが大きくなる。民生用小型ビデオカメラに搭載する用途には適していないことが明らかになった。

第5章 手振れ補正技術の実用化の検討

5.1 まえがき

前章ではミラー駆動方式を試作することにより、手振れ補正の実現可能性を実証した。ミラー駆動方式は補正範囲が広く静止撮影時のみならず歩行撮影時に発生する手振れを補正できる。しかしサイズが大きくなるため民生用機器に搭載するには適していないことが明らかになった。

図47に示したように光学補正方式の中で可変プリズム方式や内部レンズ駆動方式は補正範囲が狭いため筆者の目標仕様である歩行撮影時に発生する手振れを補正することはできない。鏡筒駆動方式は補正範囲が広く小型軽量化の可能性がある。そこで鏡筒駆動方式の手振れ補正システムを試作し実用化の可能性を検討する。民生用の手振れ補正システムを目的とするため操作性の確保と人間の感性を考慮した効果的な手振れ抑制特性を実現するための検討を行う。手振れ補正機能を量産機に搭載する場合、部品の電気特性又は機械特性の変化による抑制率の低下を考慮する必要がある。この特性の変化を吸収するためオブザーバー制御の導入を検討する。また、課題が残っている角速度センサーの特性を改善させ量産を実現する。

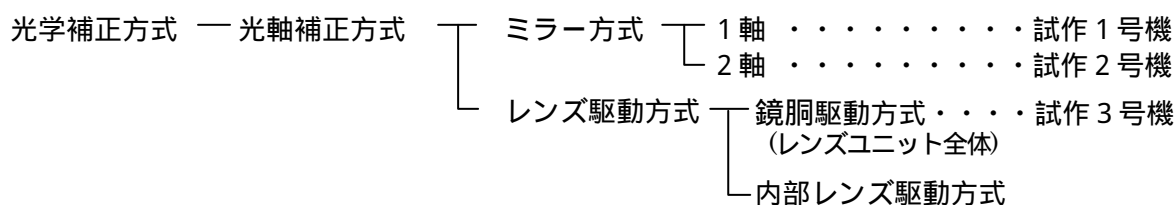


図5.5 光軸補正方式の分類

5.2 手振れ補正方式の実用化方式の検討

光軸補正方式においては内部レンズ駆動方式の方がミラー駆動方式よりも小型化の可能性がある。レンズ駆動方式の中では内部レンズ駆動方式の方が鏡筒駆動方式よりも小型化できる。しかし内部レンズ駆動方式は補正範囲が1度以下で小さいため本研究の補正目標値である ± 6 度を実現することができない。非球面レンズが一般化していなかった80年代前半においては、手振れ補正専用レンズのレンズ設計技術が確立していなかったために内部レンズ駆動方式のレンズ設計が困難である。そこで鏡筒駆動方式の検討を優先する。鏡筒駆動方式は図56に示すようにレンズユニット全体を水平方向と垂直方向の2つのモーターで駆動することにより手振れを補正する。

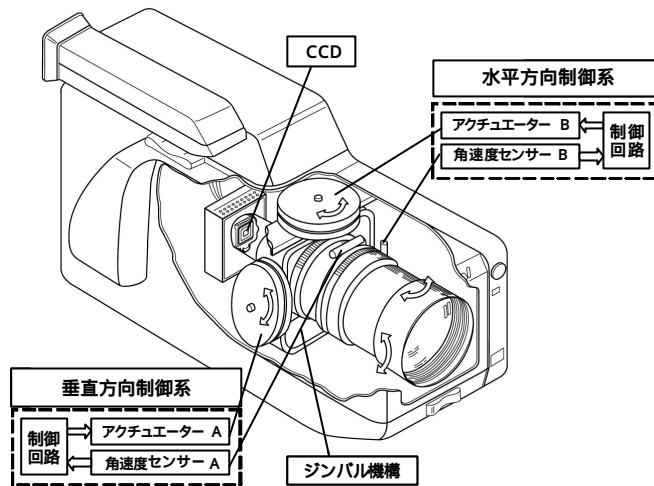


図 5 6 鏡胴補正方式の斜視イラスト



図 5 7 試作 3 号機の外観図

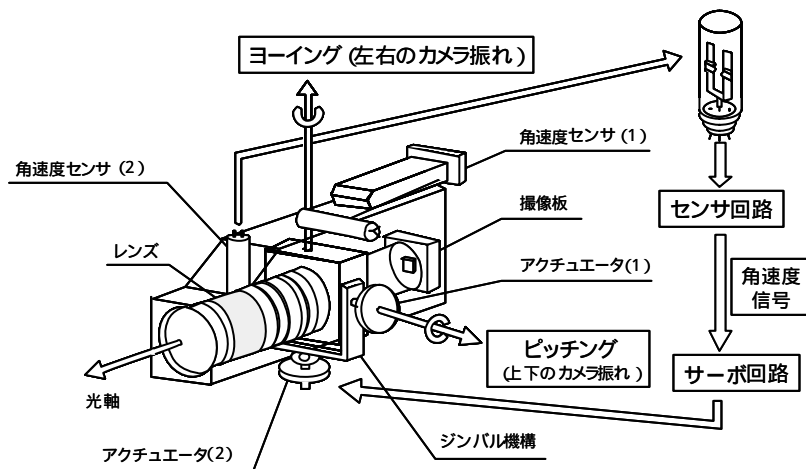


図 5 8 鏡胴駆動方式の構成

図5 8は試作3号機の鏡胴駆動方式手振れ補正機構を持つビデオカメラの構造を示す。ジンバル機構に支えられたレンズユニットは、2つのモーターにより水平(ヨー)方向及び垂直(ピッチ)方向に駆動される。レンズユニットの近くに取り付けられた2つの角速度センサーは、レンズユニットの角速度を検知する。2つのモーターの内部にある2つのホール素子は、レンズユニットのカメラ本体に対する相対的な位置を検知する。モーターは角速度センサーの検知信号に応じて制御回路によって制御され手振れを補正する。

撮影実験を行い試作3号機が、手振れ補正の性能としては十分な補正特性を持つことを確認した。

5.3 手振れ補正の制御アルゴリズム

手振れ補正機能搭載カメラにおいては、カメラボディの方向に対するレンズの方向、つまり撮影方向は異なる。操作時においてはカメラボディの向きに対して撮影方向の向きを追従させる必要があり、この特性を追従性と呼ぶ。民生用カメラの場合、手でカメラボディの方向を変更することにより撮影方向を変更するため、追従性が高い程、操作性がよくなる。図5 9は手振れ補正制御システムのブロック図である。この制御システムには、角速度フィードバック・ループAと位置制御フィードバック・ループBの、2つの制御ループがある。絶対空間におけるレンズユニットの安定性を制御するループAではゲイン K の増加に伴い手振れ抑制率が増加し、その一方で追従性つまり操作性は低下する。他方カメラ本体の中心に対するレンズユニットの相対的位置を制御するループBでは、ゲイン K の増加に伴い追従性つまり操作性が上昇するが手振れ抑制率は低下する。従来の制御理論に基づく手振れ補正システムはカメラの動きに合わせて、これら2つの制御ループの正反対の特性を用いる。そして、2つの制御ループのゲイン K と K を変化させることにより一定の操作性を確保しながら手振れを補正する。

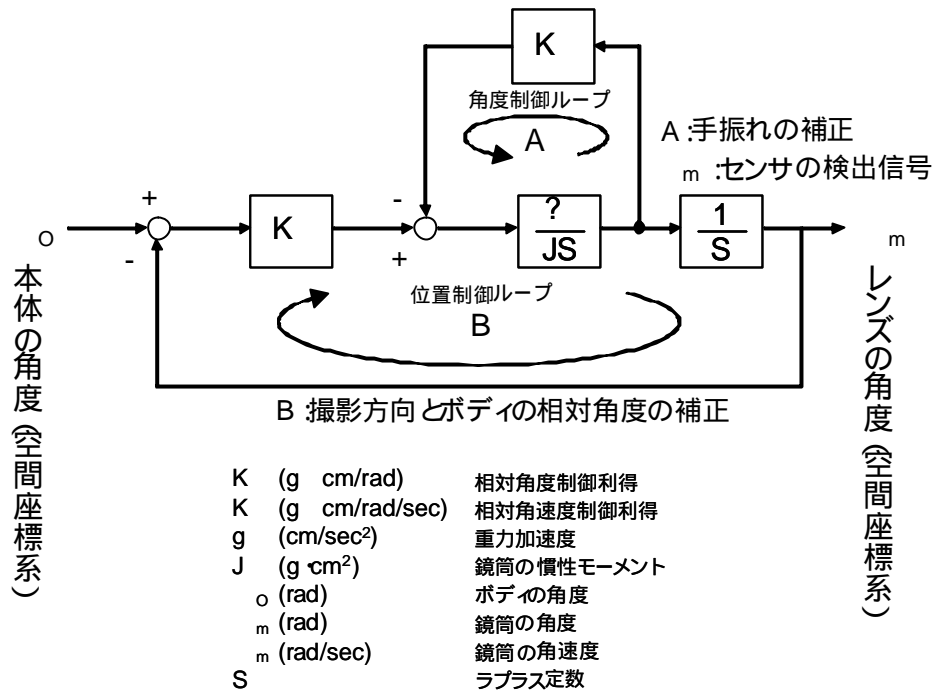


図 5 9 手振れ補正制御系の基本ブロック図

5.4 手振れ補正システムの課題

実際に試作機を用いて撮影してみると様々な課題が明らかになった。その課題は次の2点に絞られる。

課題1．手振れ補正特性と操作性の両立

課題2．手振れに伴う揺動画像に対する人間の感受性に基づく最適な手振れ補正特性

以上の2つの課題に対する対策を以下で検討する。

5.5 手振れ補正特性と操作性の両立

民生用ビデオカメラは三脚を使って撮影される場合はあまりなく、殆どの場合が手持ちで撮影される。手持ち撮影においては撮影者が自分の意図に基づきカメラの向きを手で変えることにより撮影方向を変更する。この時、手でカメラを支えるため手振れが発生し撮影者の意図とは無関係にカメラの撮影方向が変わる。手振れ補正機能を搭載したカメラにおいては、撮影者の意図に基づく撮影方向の変更を手振れと見なし補正しようとする制御力が発生する。この制御力は撮影者の意図とは逆方向に働く。撮影者による撮影方向の変更動作を妨げるため操作性を著しく損ねる。同時に撮影者の意図に反する力が働くため撮影者の手に不快な違和感を与える。従来技術の放送用の安定雲台においても同様の現象が発生する。しかし放送用の場合は撮影者がプロのカメラマンであるため技量によって克服されており特別の対策はとられていなかった。このため従来には手振れ補正の操作性を改善する技術はなかった。

放送用ビデオカメラと異なる点は民生用ビデオカメラにおいては操作性や操作感が最も重要な要素の一つであることである。この操作性と操作感を改善するため手振れ補正を最適化する方式を開発した。まず撮影者の意図に基づく撮影方向を変える動きと手振れによる動きを識別する。そしてこの識別結果に基づいて手振れ補正の手振れ補正制御の利得 K と、カメラの撮影方向をカメラボディの中心部に制御する位置制御の利得 K を変える。こうして手振れ補正と操作性の両立を実現する。

5.5.1 意図的なカメラの動きと手振れとの識別方法

意図的なカメラの動きは絶対空間の固定点に対するカメラ本体の角速度 ω_c を分析することにより識別できる。この ω_c はレンズユニット(鏡筒)の角速度 ω_m とレンズの相対的な位置 r から算出される。

$$\omega_0 = \omega_m + \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

このカメラ本体の角速度 ω_0 には撮影者の意図的な動きと手振れの両方が含まれている。分析の結果、意図的な動きの時定数が長いのに対し、手振れによる揺動の時定数は短いことがわかった。この点に着目し周波数分離手法により上記の2つの成分の識別を行った。まず搭載したマイクロコンピュータによりカメラ本体の角速度 ω_0 の時間領域の統計的分析を行う。次にこの分析結果に基づき撮影者の意図に基づく動きと手振れとを識別するカメラ運動識別アルゴリズムを開発した。

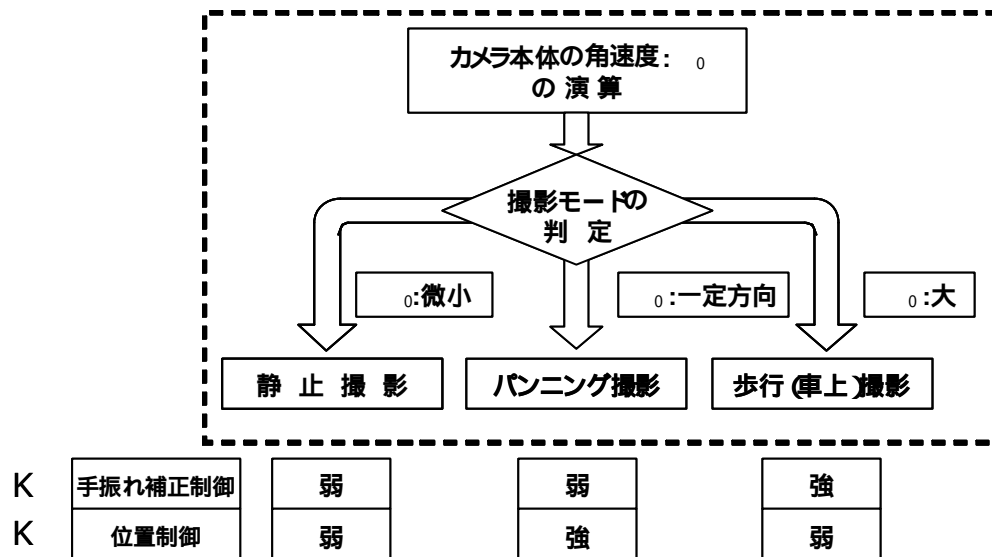


図 6 0 カメラ運動識別アルゴリズム

5 . 5 . 2 カメラ運動識別アルゴリズムの動作原理

式(4)によって得られるカメラ本体の角速度 ω_0 の時定数と大きさを統計的分析を行うことにより意図的なカメラの動きを識別するカメラ運動識別アルゴリズムを図60に示す。このアルゴリズムにおいては、カメラの動きを静止モード、パンチルト撮影モード、歩行車上撮影モードの3種類に分類する。

手振れ補正制御ループのゲインK と位置制御ループのゲインK は識別されたカメラの運動モードに従って図60のように変更される。 ω_0 に統計処理を行い ω_0 が非常に小さい場合は静止撮影モードと判断し、手振れ補正制御ゲインK と位置制御ゲインK を標準的な値にする。水平方向の ω_0 が一定の方向に変化する場合は、パンニング

1) すなわちビデオカメラを一定の方向に回転させながら撮影しようとしているパンチルト撮影モードであると判別できる。水平方向の手振れ補正ゲイン K を小さくしパンニングを容易にする。同時に水平方向の位置制御ゲイン K を大きくすることにより撮影方向がカメラボディの方向に追従する。これにより撮影者が変えたい方向にパンニングされる。チルティングモードの場合は垂直方向の K を小さくし垂直方向の K を大きくする。

ω_0 が大きい時は歩行撮影もしくは車上撮影していると判別される。この場合は手振れ補正ゲイン K を大きくし大きな手振れを補正する。同時に位置制御ゲイン K を小さくすることによりカメラボディの揺動がレンズユニットへ伝わらなくなる。手振れがレンズの撮影方向に影響を与えにくくなるため補正機能が高まる。歩行車上撮影モードの場合に最大の手振れ補正効果が得られる。

5.5.3 撮影モード間のスムーズな移行制御の検討

撮影モードの切り替えを行う場合、1つの制御モードから別の制御モードに移行する。この時レンズユニットが突然不連続に動く現象が発生する。このような動きを避けるためにモード間のスムーズな移行を行う制御方法を検討する。

パンチルトモードから別のモードへ移行する時に不連続な動きをする傾向がある。不連続な動きが大きな映像の揺動として出力されビデオテープに記録されてしまうため、映像品質を大きく劣化させる。この不連続な動きを軽減させるため特別な制御を行う。

静止撮影モードからパンチルト撮影モードへの移行時には、レンズユニットの角速度は最初は徐々に増加するように制御される。そして図6-1(b)に示す時定数 T_p の経過後にレンズユニットの中心軸がカメラ本体の中心軸と一直線になった時に、レンズユニットの角速度がカメラ本体の角速度と一致するように制御される。こうして撮影モード間のスムーズな移行が実現する。図6-1(a)はパンチルト制御モードのブロック図を示す。図5-9の基本ブロック図と比べると安定状態の偏差をゼロとするための積分要素 T_1 とスムーズな撮影モード移行を実現するための角速度指令 ω_c が追加されている。

1) パンニング (Pan) チルティング (Tilt): カメラの撮影方向を水平方向 (パン) もしくは垂直方向 (チルト) 方向に一定の角速度で変更しながら撮影するカメラの撮影技法。風景撮影の時等に用いられる。

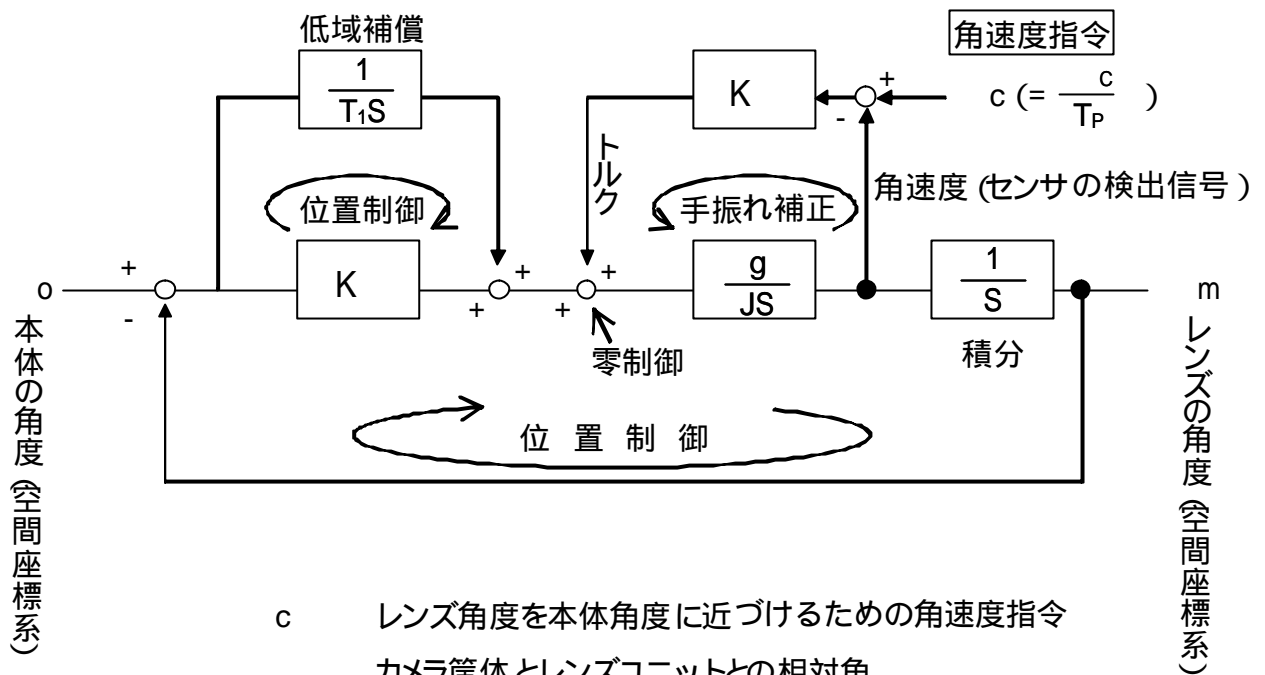


図 6 1 (a) パンチルト制御モード時のブロック図

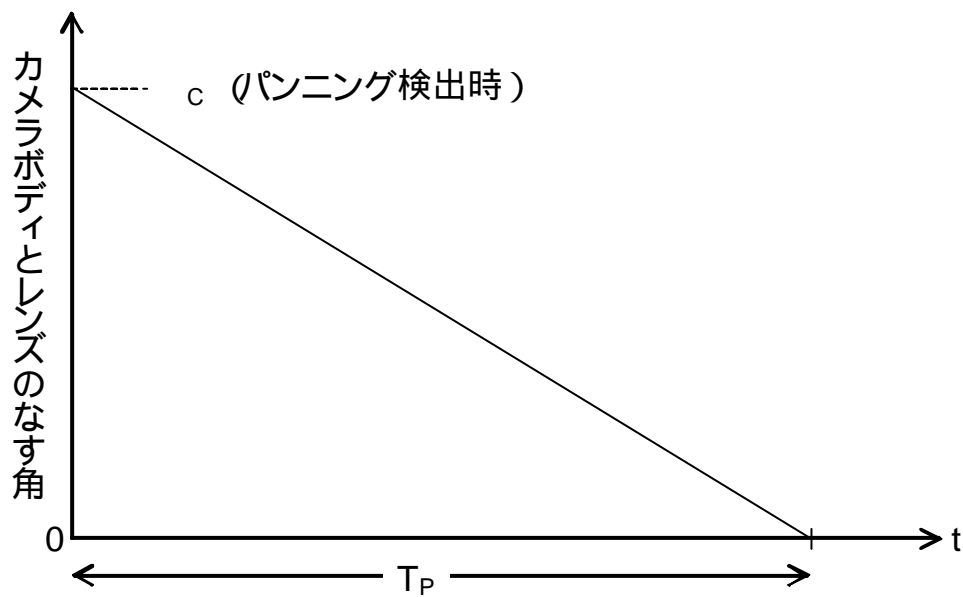


図 6 1 (b) パンニング検出時の時定数

角速度指令 c は図 6 1 (b) から次の式で算出される。

$$c = \frac{c}{T_p} \quad (4)$$

c : パンニング検出時のカメラ本体レンズユニットとの相対角度
 T_p : 時定数

図 6 2 (a) は絶対座標系におけるカメラ筐体とレンズユニット間の角度 θ の特性を示している。 θ_0 はカメラ筐体が向く角度を表し、 θ_m は制御後のレンズの向き、つまり撮影方向の角度を表す。図 6 2 (a) に示すようにパンニング開始つまりカメラ筐体の回転開始に少し遅れてレンズユニットのパンニングつまり撮影方向の回転が開始される。

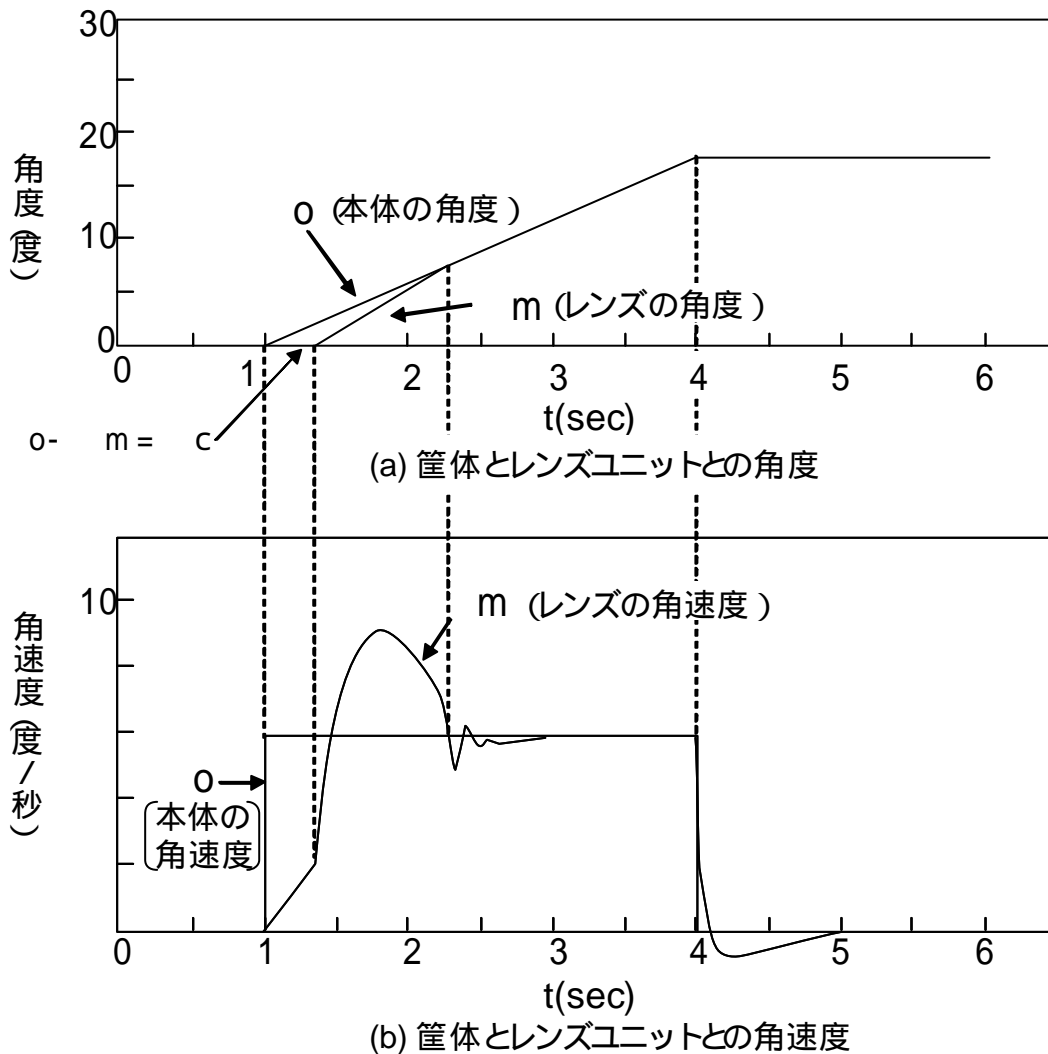


図 6 2 パンチルト撮影モード時のカメラ本体とレンズユニットとの角度、角速

図6 2 (b) はパンチルト撮影モード時のカメラ本体とレンズユニットの角速度特性を示す。パンニング撮影時の撮影方向を変更する角速度が6度/秒の場合を示す。図6 2 (b) に示すように制御された角速度は、少し遅れながらパンニングされる。このため静止撮影モードからパンニング撮影モードへスムーズに移行する。

5 . 6 手振れの主観評価

複数の被験者に試作機を用いて撮影実験を行ったところ手振れの抑制効果に関する評価が被験者により異なることが明らかになった。本研究の目的は量産化である。量産機の場合、不特定多数の消費者に抑制効果を満足してもらう必要がある。このためには手振れに対する人間の感度を定量化することが求められる。このため手振れの主観評価を行う。図6 3 に示すように任意の周波数と振巾の揺動を発生できる手振れ発生装置を試作した。

この手振れ発生装置の上にビデオカメラを置き手振れ発生装置の周波数と振巾を変えて揺動を発生させる。特定の被写体を撮影することにより任意の揺動周波数と任意の揺れ振巾の揺動画像を発生させた。

図6 4 に示すように無作為に選んだ数十名の被験者に、この揺動画像を見せ、チェックシート〔59〕に各被験者が揺動画像を見て感じた評価結果を記入させる。まず被験者が揺動に気づいたかどうかによって感知できる限界の揺動値を測定した。次に揺動の振巾をさらに大きくしてゆき、被験者が許容できる限界の揺動値を測定した。こうして手振れを検知する限界値、手振れを許容できる限界値のデータを集め手振れの周波数と振巾毎に統計処理を行った。これにより図6 5 に示すように手振れに対する人間の検知限界と許容限界の定量化を行った。

このデータと手振れの発生状況から人間の揺動に対する不快感をなくすには1 Hzで15 dBの手振れ抑圧特性が必要であることが明らかになった。この定量化データを用いて図7 0 に示すような万人向けの手振れ補正特性を目標とし、試作機で同様の補正特性を得た。図6 6、図6 7、図6 8、図6 9は1984年から1985年にかけて実証実験に用いた3号機から7号機までの試作実験機の外観を示す。



図 6 3 手振れ発生装置

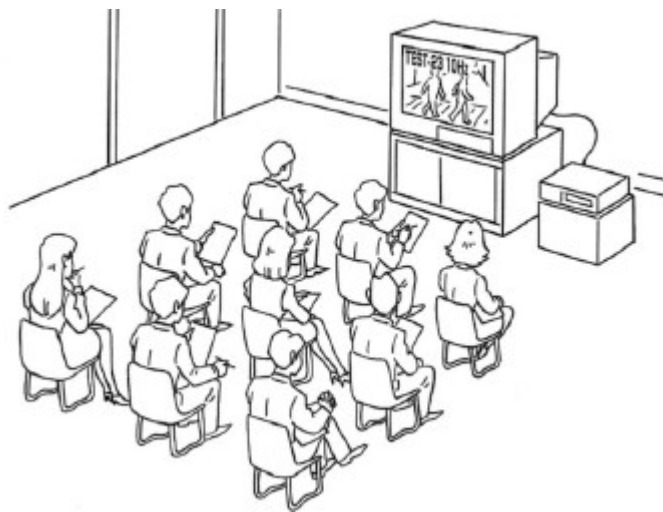


図 6 4 主観評価の実験方

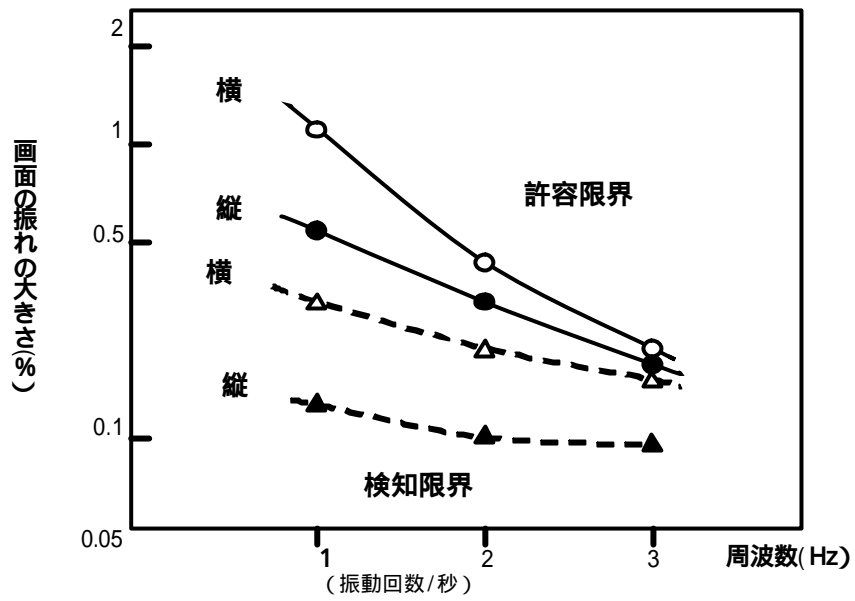


図 6 5 人間の手振れの検知限界と許容限界



図 6 6 試作4号機 (1984年)



図 6 7 試作5号機
(1984年3月: 小型化モデル)



図 6 8 試作6号機
(1984年8月: 撮影モード識別アルゴリズム)



図 6 9 試作7号機
(1985年12月: 量産用プロトモデル: 量産中止)

5.7 従来の制御理論を用いた場合の手振れ補正効果

算出した手振れ補正システムの制御周波数特性を図70に示す。手振れ制御率とは、手振れ量をどれだけ抑圧したかを示す。実際の手振れ補正制御システムの手振れ制御率は図70の計算値よりも低い。この違いはベアリング損失やワイヤー素材のバネ定数などの外乱負荷の影響によるものである。

手振れ補正の目標値を達成するために角速度帰還ループのゲイン K をこの状態で増加させると、メカニズムが共振し制御が不安定になる。この共振を避けるためにコンピュータシミュレーションを行いメカニズムの剛性を高くした。しかし目標としている抑制率は得られなかった。初期のベアリング損失やワイヤーのバネ定数値の変動のために量産時には複雑な調整が必要となることが予想された。そのため従来の制御方式を用いた図59に示す制御システムでは手振れ補正の目標値を実現することが難しいことが明らかになった。

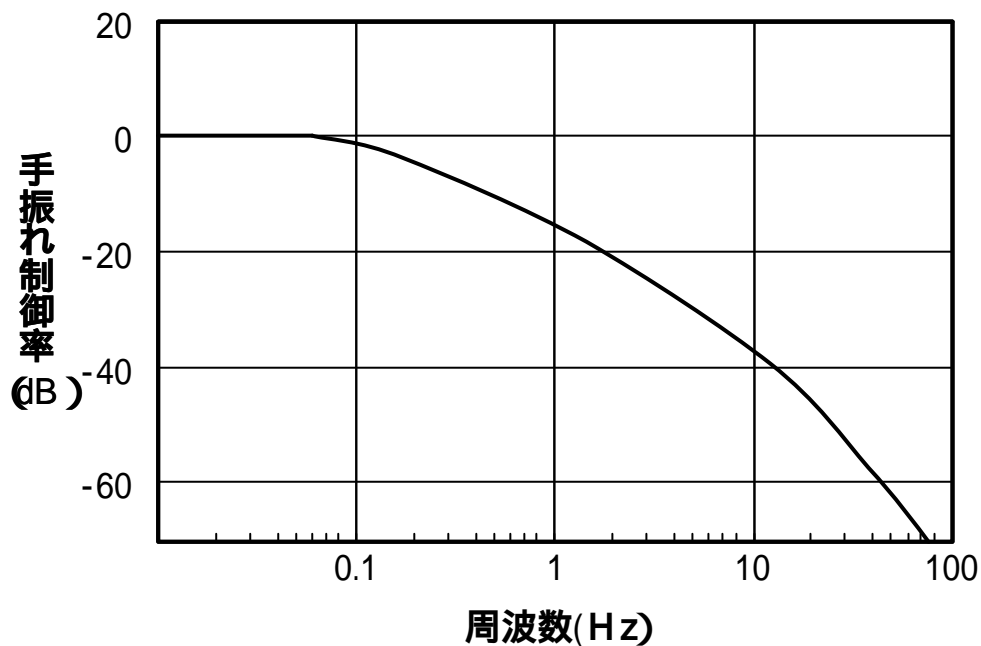


図70 手振れ補正特性（計算値）

5.8 オブザーバ制御理論を用いた場合の補正効果

外乱負荷の影響を最小限にする方法のひとつがオブザーバ制御理論である。様々な応用についてオブザーバの研究が行われている。しかし制御対象の周波数範囲が一般に広く、外乱負荷の推定には一般に大量の計算を要する。そのため高速のプロセッサが必要となる。結果としてオブザーバ理論の応用は主に産業用機器に限られていた。

しかし手振れ補正制御の場合は制御対象の周波数範囲が30 Hz程度と極めて狭く推定対象の外乱負荷が少ないことから低速のマイクロプロセッサの能力の範囲内でオブザーバ制御を実現できる点に着目し導入を検討した。

図7-1は、外乱推定オブザーバを用いた手振れ補正制御システムの概略図である。この図にあるように、 $\hat{\omega}$ は制御されるレンズユニット慣性体システムの理想的な数値モデルの角速度出力である。一方 ω は実際に制御されるシステムの出力角速度である。オブザーバは、 $\hat{\omega}$ と ω の差を検知し検知された出力の差は外乱によるものだと仮定に基づいて外乱負荷の推定を行う。制御対象システムの動きの式は次の通りである：

$$\frac{J}{g} \cdot \frac{d}{dt} \omega = u + T_L \dots \dots \dots (1)$$

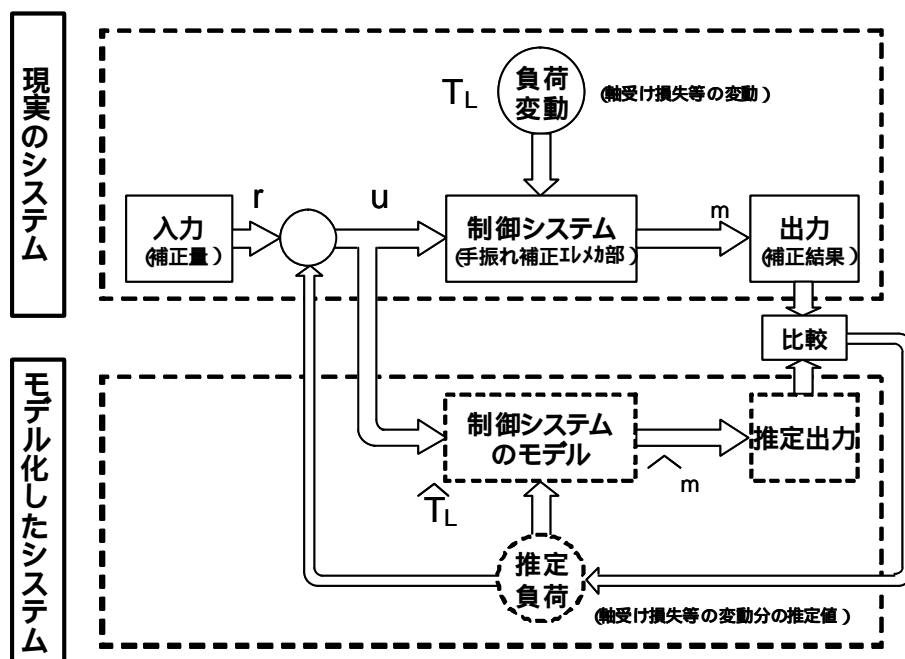


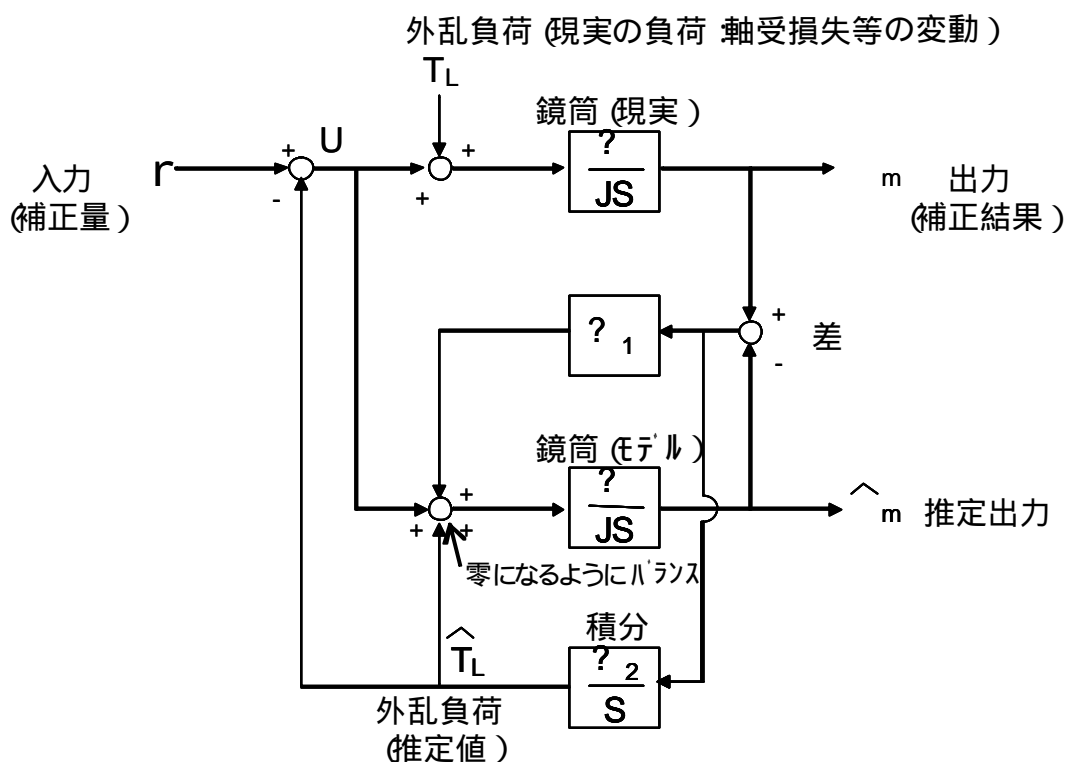
図7-1 オブザーバ制御の原理

オブザーバは次のように表すことができる：

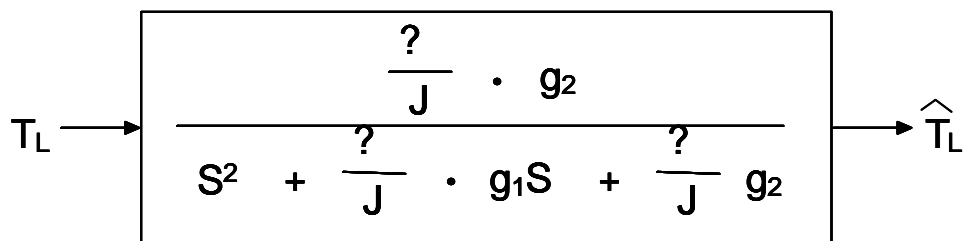
$$\frac{J}{g} \cdot \frac{d}{dt} \hat{\omega} = u + \hat{T}_L + g_1 (\omega - \hat{\omega}) \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{d\hat{T}_L}{dt} = g_2 \times (m - \hat{m}) \text{ ----- (3)}$$

図7 2 (a) は、外乱推定オブザーバの構造を示すブロック図である。このブロック図は、実際の負荷トルク T_L から推定負荷トルク \hat{T}_L への転換を示す図7 2 (b) のように書き直すことができる。



(a) 外乱の推定を行うオブザーバのブロック図



(b) 外乱の推定を行うオブザーバの伝達関数

図7 2 外乱の推定を行うオブザーバ

オブザーバが二次遅延システムであることは明らかである。観察者のゲイン g_1 及び g_2 は、制御システム全体の安定性を考慮して、問題となる範囲の直流分から約 5 Hz までの周波数成分が打ち消されるように決定される。

図 7 3 は、外乱のダイナミクスについてスプリングのモデルを用いたオブザーバ制御の、コンピュータシミュレーション結果を示している。図 7 3 (a) は、手振れの入力波形を示し、図 7 3 (b) は、レンズユニットに何も外乱負荷が無い場合の、手振れ抑制後の出力波形を示している。1 Hz で 15 dB の抑制率が得られている。図 7 3 (c) は、スプリングのダイナミクスによる外乱負荷が存在する場合の、同じ出力波形を示している。最悪の場合では抑制効果はこの図にあるように 3 dB にまで小さくなっている。図 7 3 (d) は、外乱負荷が観察者制御によって補正された場合の、同じ出力波形である。図 7 3 (c) と同じ外乱負荷を用いても、15 dB の抑制率が達成されている。ベアリング損失についても、同様の抑制率が達成可能である。

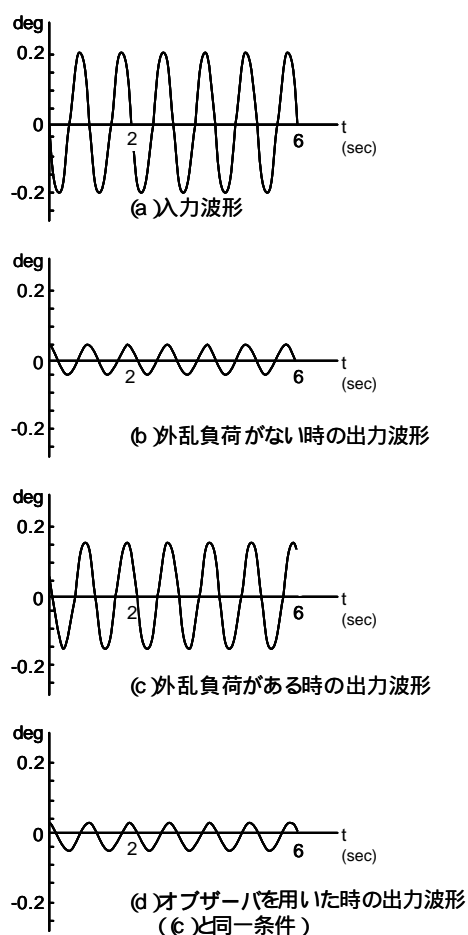


図 7 3 出力波形の比較

5.9 角速度センサーの性能の向上

従来構造の並列振動子型振動ジャイロには零点ドリフトの発生や外部への振動放出等の問題があり、手振れ検出に用いるには大幅な改善をする必要がある。このため原因を究明し性能の改善をはかる。

5.9.1 従来構造の振動ジャイロの課題

図75(a)に示す従来技術〔122〕を踏襲した並列振動子型振動ジャイロは安定性は悪いが高域特性が良い。図74の周波数特性に示すように、40Hzまで検出感度は一定であり、50Hzになると基準信号レベルより-3dB落ち、100Hzでは-20dBに落ちる。手振れの補正に必要な検出信号は30Hzまでであるため手振れの検出用センサとしての要求特性を充分満たしている。

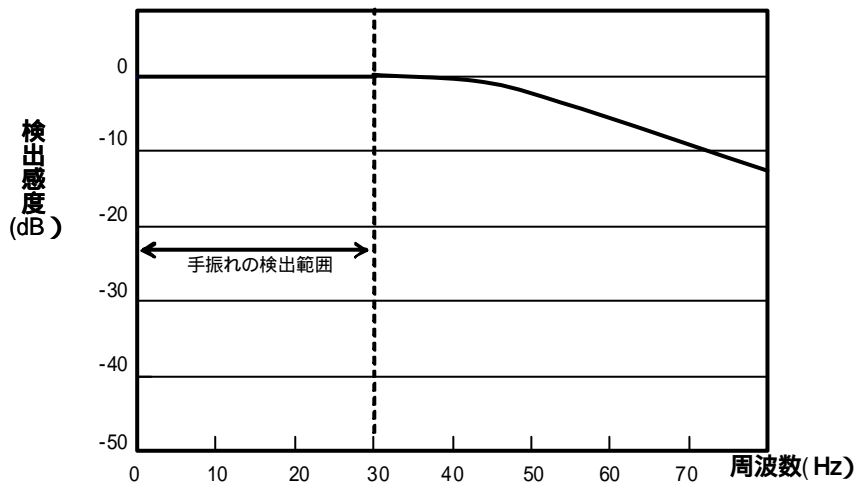


図74 振動ジャイロの周波数特性

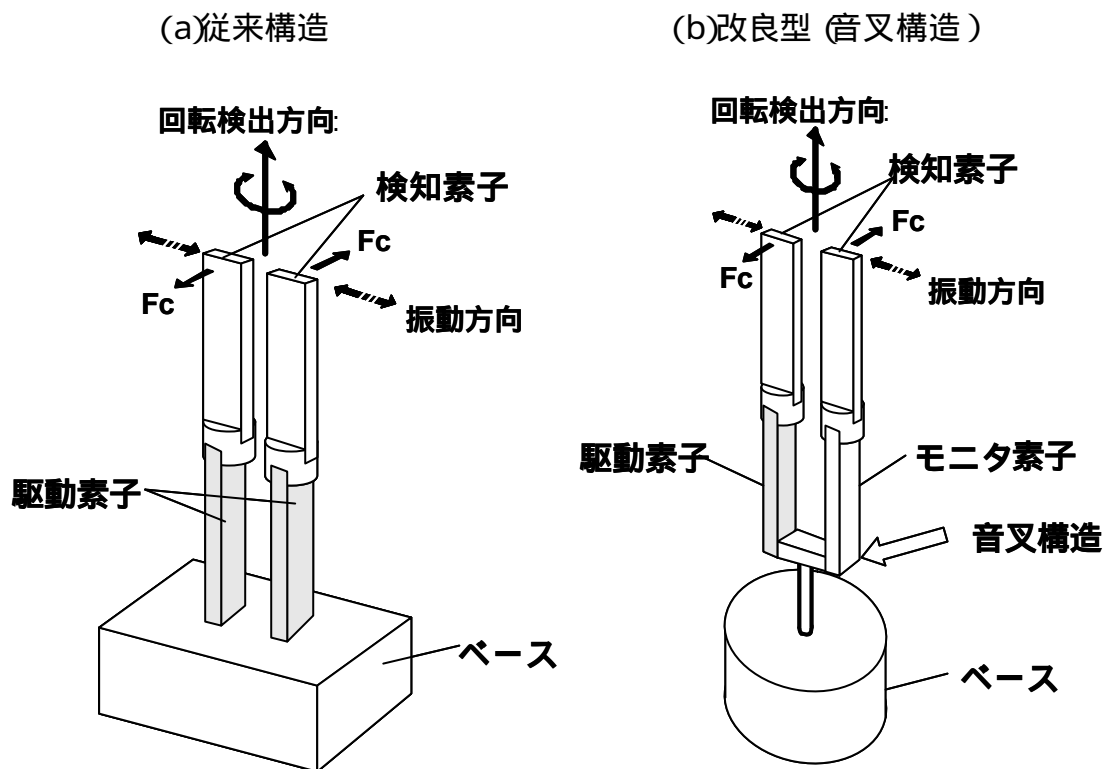


図 7.5 従来構造と新構造の振動ジャイロ

しかし従来構造の振動ジャイロは角速度が作用していない状態でもオフセット信号を発生し、これが周囲温度や経過時間とともに変化するという課題がある。この現象はゼロ点ドリフトと呼ばれ、手振れ補正システムにこの振動ジャイロを導入した場合、手振れがない静止状態で撮影した場合でも誤差信号が発生し、制御に支障をきたすという問題が発生した。このため、民生用手振れ補正システムに導入するにはまずゼロ点ドリフトを大きく低減させる必要がある。

5.9.2 ゼロ点ドリフトの低減

まず振動ジャイロの動作メカニズムを説明し、ついでオフセット信号およびそのゼロドリフトの発生原因について考察する。

図 7.6 は従来型振動ジャイロの駆動検出回路〔83〕のブロック図を示す。発振器からの信号は駆動回路により増巾され駆動素子に与えられる。駆動素子は駆動電圧に応じて曲がり互いに反対方向に振り子運動を行う。検出素子は振り子運動の垂直方向にしか検出感度をもたない。このため振動ジャイロが回転していない場合は図 7.7 の (a) の (2) に示すように検出信号は出力されない。次に振動ジャイロが絶対空間に対して角速度 ω で回転すると $f_c = 2m \times \omega \times r$ なるコリオリ力〔81〕が検出素

子に加わるため検出素子は図76の f_c の示す方向に曲がる。検出素子は圧電素子から構成されているため図77(b)の(2)に示すようにそのたわみに応じて正弦波状の交流の電荷が発生する。この発生電荷をチャージアンプによって検出、増幅した後同期検波回路により図77(b)の(3)に示すように検波し、更に低域通過フィルタにより平滑化して図77(b)(4)に示すような直流の角速度検出信号として出力する。

同期検波には交番的に作用するコリオリの力に同期した正確な位相信号が必要になる。この位相がずれると正確な角速度検出が出来ないだけでなくオフセット信号の発生とそのドリフトの原因になる。以下、そのメカニズムを説明する。

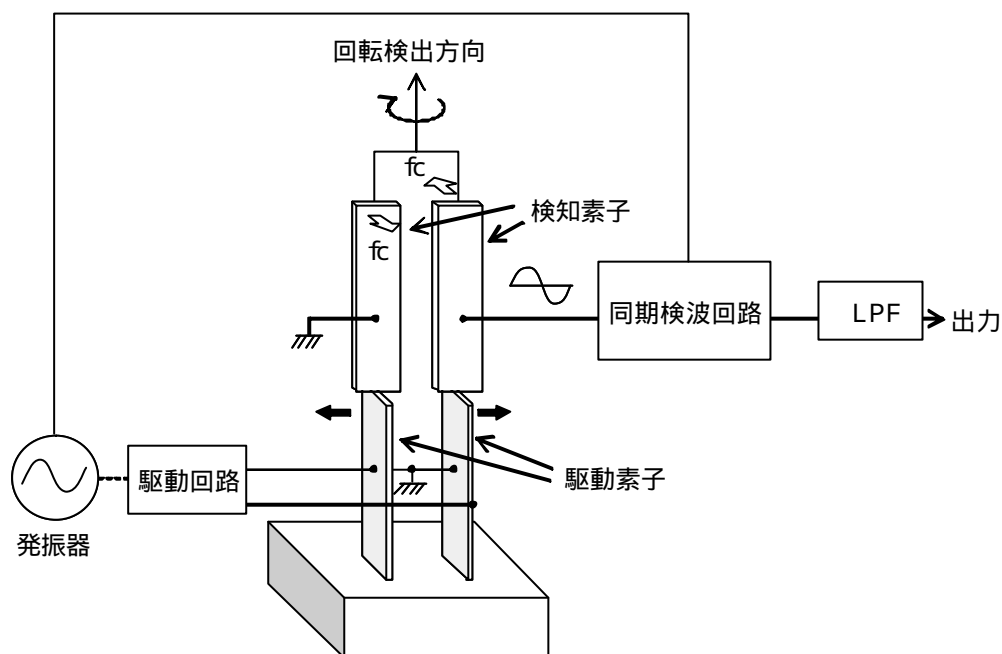


図76 従来の振動ジャイロの駆動検出回路

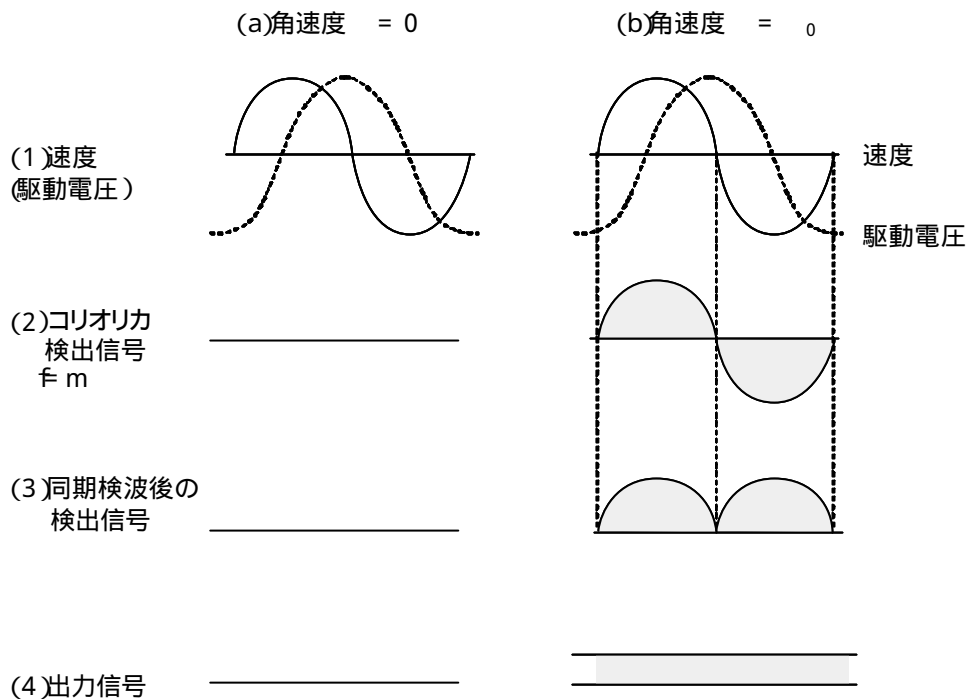


図 7.7 振動ジャイロの角速度検出信号の検出原理

ここで、ジャイロ素子全体が回転する角速度を ω とし、振動子の振動速度を v とする。検知素子を振動させることにより $v = v_0 \cdot \sin(\omega t)$ という速度を与え、角速度 ω が作用したときに $F_c = 2m \cdot v \cdot \omega$ というコリオリの力を作用させ、これを検出する。従って得られる信号は角速度 ω を駆動速度 v で変調した変調信号であり、これを検波するには駆動速度と同期した位相信号が必要になる。

一方検知素子に上記のような振動を与えると検知素子には駆動慣性力 F_i が作用する。それは駆動加速度に質量 m を掛け合わせたものであり、

$$F_i = m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot v_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \dots \dots (1)$$

これと 4.2 節の式 (5) の変形

$$F_c = 2m \cdot v \cdot \omega = 2m \cdot v_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \dots \dots (2)$$

を比べると分かるように、この駆動慣性力に匹敵するコリオリの力を作用させるために必要な角速度 $\omega = \omega_0 / 2$ となる。

例えば駆動周波数 ω_0 を $1 \text{ KHz} = 360000^\circ / \text{sec}$ とすれば ω_0 の値は $180000^\circ / \text{sec}$ の角速度に匹敵する。この値は角速度センサーとして必要とされる最小分解能 $0.1^\circ / \text{sec}$ の実に 180 万倍である。即ち、この駆動慣性力によるノイズを 180 万分の 1 に抑制する必要がある。

抑制するために駆動慣性力とコリオリの力の空間的直交性と時間的直交性を利用し

て慣性力成分を排除する。

空間直交性：空間的直交性とはコリオリの力が作用する方向が駆動速度と直角であり、駆動加速度が作用する方向が駆動速度に平行であることを指す。つまり、駆動速度と直角の方向にのみ反応する検知素子を用いれば駆動慣性力成分を排除できる。図76に示した検知素子は幅方向には極めて撓みにくく、厚み方向にのみ撓むので完全に幅方向に駆動すれば駆動慣性力によって撓むことが無い。それは駆動素子と検知素子を完全に直交して接合することによって実現できる。

しかしながら「完全な」直交を実現するのは不可能であり必ず角度誤差が発生する。すると誤差に依りて $\sin(\theta)$ に比例する検知素子の厚み方向成分が発生してこれが電気信号化される。その振幅は $\omega \cdot \sin(\theta) / 2$ の角速度によって発生する信号振幅に匹敵する。

時間直交性：この大きな振幅の誤差信号を時間的直交性を利用して排除するのが同期検波である。式(1)と式(2)を比べるとコリオリの力 F_c が速度 $v = v_0 \cdot \sin(\omega t)$ に同期して $\sin(\omega t)$ に比例して発生するのに対して駆動慣性力 F_i は $\cos(\omega t)$ に比例して発生する。すなわち互いに 90° の位相差を有している。これが時間的直交性である。従って駆動速度と同期した同期検波を施すことによって駆動慣性力成分を排除できる。

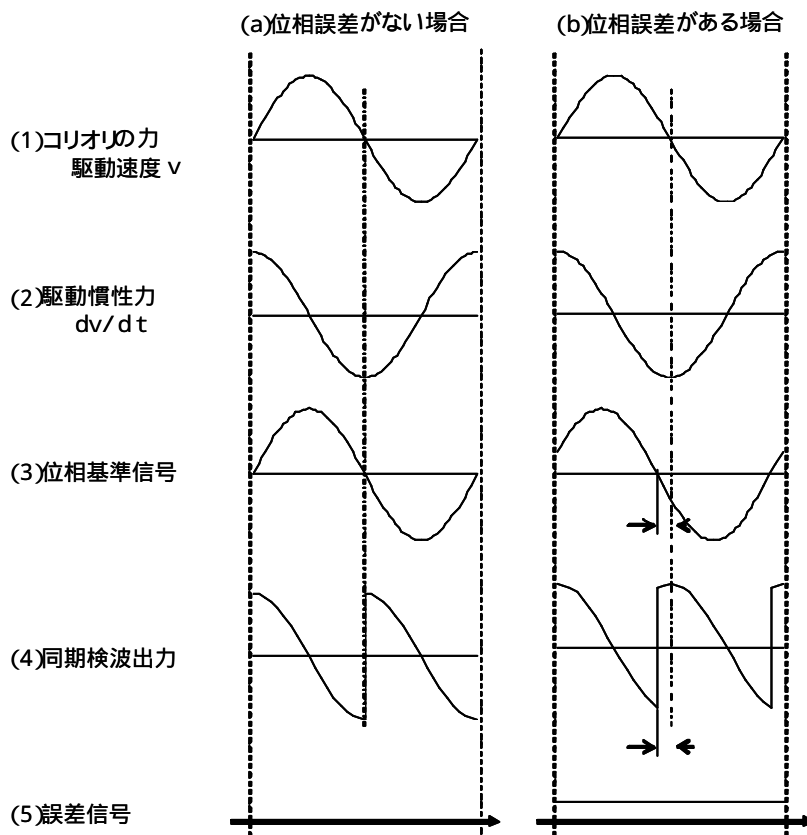


図78 位相誤差による誤差信号の発生

また外乱により振動子の振巾が変化することにより、検出信号のレベルが変わることも検出信号のノイズや誤差信号の原因となっている。

その模様を図78(a)に示す。駆動信号に完全に同期した信号により通過、反転処理を行うとそれと位相が90°ずれた信号は正・負が完全にキャンセルされ直流成分を生じない。

ところが同期検波の位相基準信号が駆動速度に完全に同期せず位相誤差が存在すると図78(b)に示すようにsin()に比例した直流成分を発生しこれがオフセットとなる。

従来の振動ジャイロでは2つの駆動素子を並列駆動し、その駆動電圧信号から位相基準信号を作っていた。

駆動素子はレジスタンス成分R、キャパシタ成分Cおよびインダクタ成分Lの直列よりなる共振部分とそれと並列な浮遊容量Ccからなる等価回路で表現できる。

駆動素子の撓み、即ち検知素子の位置 $P = P_0 \cdot \cos(\omega t)$ に比例して共振部分のCに電荷 $Q = Q_0 \cdot \cos(\omega t)$ が発生する。検知素子の駆動速度vは位置Pの時間微分であるから

$$v = dP / dt = P_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \dots \dots (3)$$

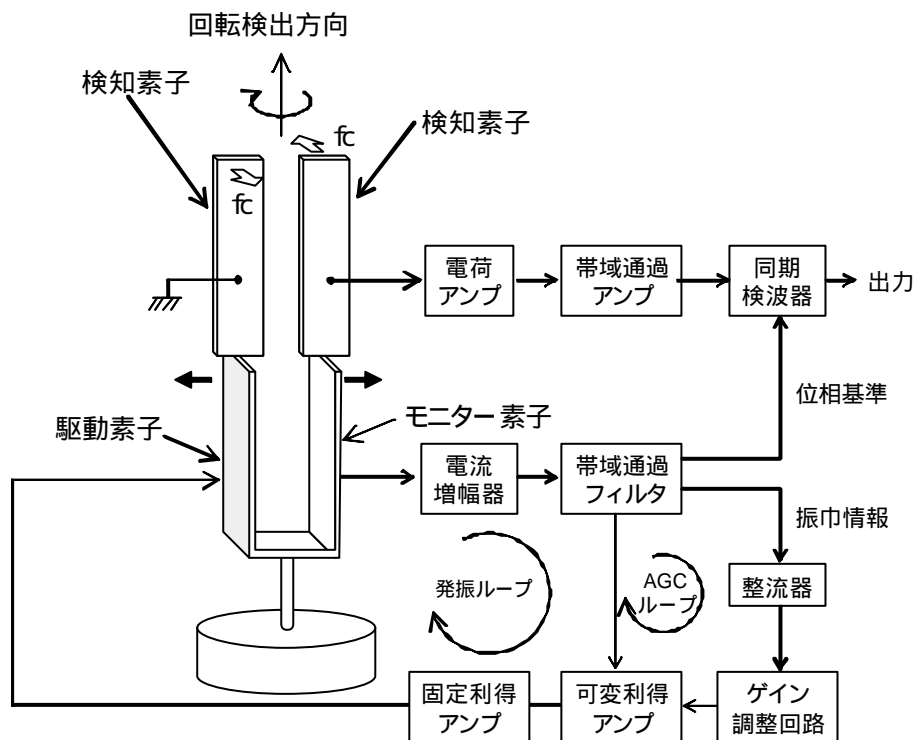


図79 新構造の振動ジャイロ駆動検出回路のブロック

一方、共振部分を流れる電流 I_d は

$$I_d = dQ / dt = Q_0 \cdot \sin(\omega t) \cdot \dots \quad (4)$$

であり共振部分に流れる電流 I_d に比例した信号を得れば正確な位相基準信号を得ることが出来る。従来の振動ジャイロでは特殊なブリッジ回路により浮遊容量の影響などを抑圧して近似的に I_d に比例した信号を得ていたが完全ではなく誤差を生じていた。その誤差が一定で有れば直流補正信号によりキャンセルできるが、温度や湿度などにより浮遊容量 C_c やレジスタンス R が変化してゼロ点が大きく変動し、これがゼロ点ドリフトとして問題になった。

解決策として図 7 9 に示すような新たな素子構成および回路構成を開発した。

1 対のエレメントにより音叉状の素子を構成し一方のエレメントのみに電圧を印加し他方からは短絡電流に比例した信号を取り出してループを形成し発信回路を構成する。そしてこの短絡電流に比例した信号振幅を一定に保つように A G C 制御するとともに、この短絡電流に比例した信号を位相基準とする。この電流は位置に比例した電荷を微分した信号であるから完全に駆動速度 v に比例している。

この様に、一方のエレメントのみに電圧を印加し他方のエレメントは振動状態をモニターする作用をしているので前者を駆動素子、後者をモニター素子と呼び、この駆動、検出方式をモニター方式と呼ぶ。

上記構成により極めて安定な位相基準を得ることが可能になり、ゼロ点の発生とそのドリフトを飛躍的に低減し手ぶれ補正に実用可能なレベルとすることができた。

上記のように一方の支持エレメントのみを駆動するだけで 2 つの検知素子を対称駆動することが出来たのは図 7 9 に示す音叉構造を採用したことによる。従来構造は並列片持梁構造であるがこの構造自体に問題があったと考えられる。従来構造はベースを介してわずかの機械伝達があるとしても、ほぼ独立した 2 つの片持梁の共振系が近接しているといえる。

図 8 0 は従来構造の 2 本の駆動素子をそれぞれ A、B と定義し、単独で駆動した場合のアドミタンス特性を示している。縦軸はアドミタンス絶対値 ($0 \text{ dB} = 0.1 \text{ m}^{-1}$) と位相である。図 8 0 では A と B でその共振周波数は異なり両者が独立した共振系を形成していることを示す。このように 2 つの共振系を用いて 1 つの周波数の発振系を形成する場合 Q の高い材料を用いると図 8 1 (a) に示すようにアドミタンス特性はすどいピークを 2 つ持つ。ごく近傍に 2 つの発振可能な周波数が存在することにより動作が不安定になるとともに機械的には 1 方の振動子が振動している時は他方は停止しているという状態が交互に表れることになる。これを避けるためには Q を下げざるを得ない。

Q を下げると図 8 1 (b) に示すように 2 つの振動子の振動のピークは緩和されるため、並列に配置しても単一の周波数で安定して発振させることができる。しかし低い Q の材料を用いると所定の機械的駆動レベルを得るために駆動素子に印加する電圧を高くする必要がある。このため従来型の振動ジャイロの駆動素子に加える駆動電圧

はピーク - ピーク値で 40 V にも達している。民生用ビデオカメラのバッテリー電圧は 5 V から 12 V であるため直接のバッテリー駆動ができなくなる。駆動電圧レベルを下げるには、より Q の高い共振インピーダンスの低い材料を使えばよいが単に材料を替えるだけでは発振が不安定になり正常に動作しない。

従来型の振動ジャイロは 2 つの振動子を並列に対称駆動している。これはその対称運動によって両者の運動に伴う反作用を相殺して外部に振動を放射しないためである。しかし実際には 2 つの振動子の共振周波数、共振インピーダンスには数 % 程度の不整合が発生する。このような不整合があると実際の運動状態は必ずしも対称ではなくなり、外部に振動を放射する。この振動は、それ自体が問題であるとともに手振れ補正用途のようにピッチ方向とヨー方向の 2 つの振動ジャイロをカメラボディに取り付ける時に相互干渉を起し、動作が不安定になるという問題を引き起こす。また 2 つの振動子の振動が対称でない状態では位相基準との位相誤差が大きくなるため図 7 8 (b) の (4) と同じ状態になり不要信号が除去できず誤差信号が発生し検出信号の

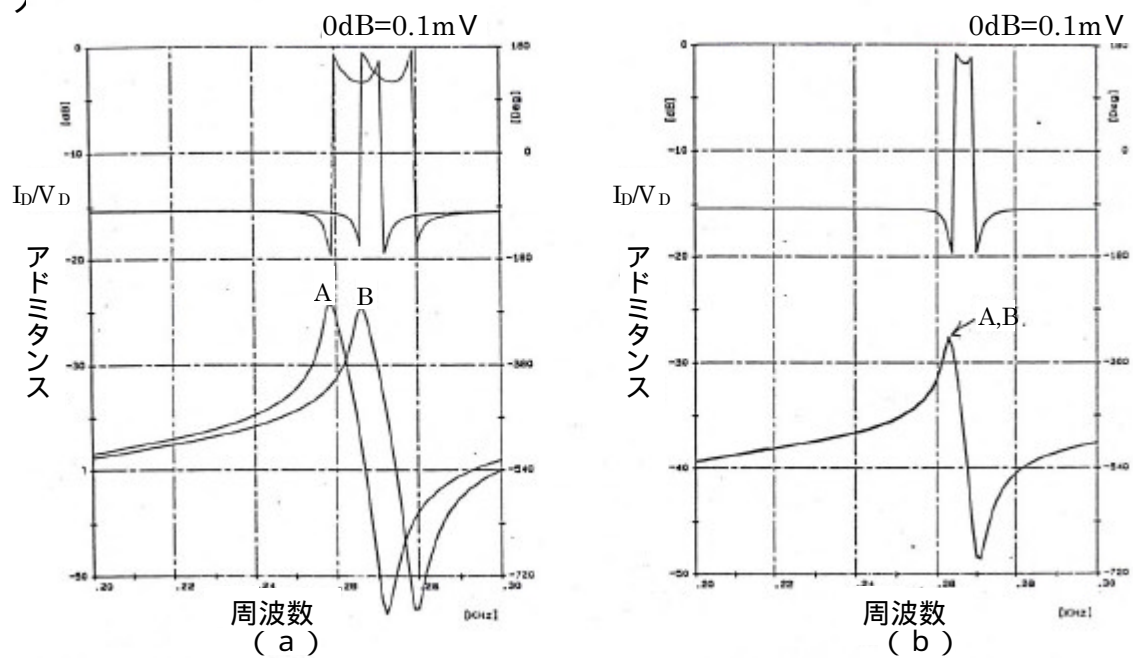


図 8 0 駆動用素子のアドミタンス特性

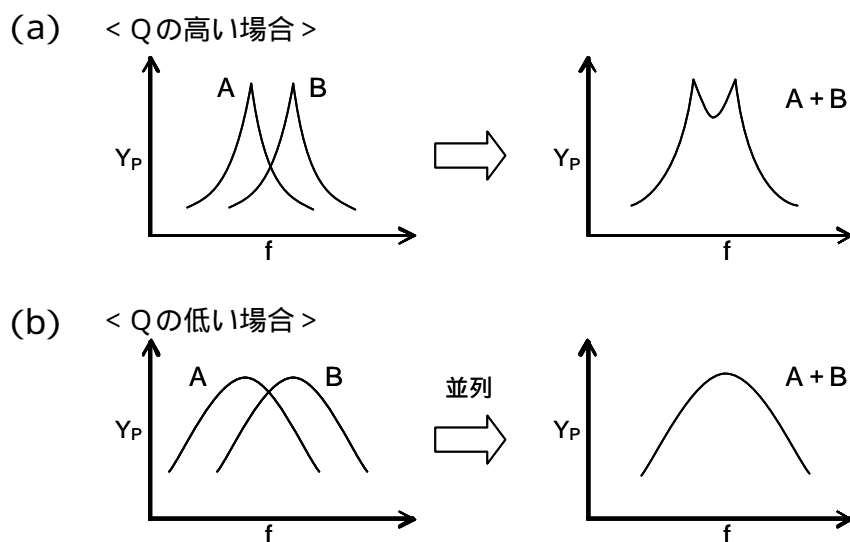


図 8 1 Qの大きさと共振周波数の関係

Qの高い材料を使うためには、2つの振動子を単一の発振モードで発振させることが考えられる。一つの方法が図75(b)に示す音叉構造〔14〕である。音叉構造にし片方の振動子を駆動素子とすると、図80(b)に示すように振動子AとBの共振特性は完全に一致する。両者が強く機械結合し一つの共振系を形成していることがわかる。従来型の左右の振動子の片側に駆動電圧を与えると駆動していない方の振動子が駆動した振動子の1/20程度の機械振動しかしない。このように従来型は2つの振動子の各々に駆動電圧を与える必要があり、その結果AとBが独立に振動し振動の対称性を損ねていた。

一方、音叉構造はAとBの振動子が強く機械結合しているため、片方の振動子に駆動電圧を与えるだけで、もう片方の振動子も対称に振動する。このため単一の振動モードで振動し共振周波数も単一となる。この構造では従来構造で見られた不整合は存在せず振動の放射もなく、AとBの振動の位相誤差も発生しないため、これに起因する誤差信号も発生しない。

AとBの共振周波数が同一となることによりQの高い材料の使用が可能となった。従来型に使用していたQの低い材料(松下製PCM5)からQの高い材料(松下製PCM88)に変更した。これに伴い共振インピーダンスを350kから30kへと大巾に低下させることができた。従来型と等しい機械的駆動を維持しながらその駆動電圧レベルをP-P値で40Vから2Vへと低下させた。これにより駆動電圧の制

約がなくなりバッテリー駆動が可能となり、民生用ビデオカメラの中の通常電源を使用することができるようになった。

図75(a)と(b)に示す従来型ジャイロと新構造の音叉型ジャイロは殆ど同じように見える。これは両者に共通する基本動作に由来する。しかし両者には本質的な違いがある。従来型はベースを介したわずかな機械結合があるにしても、ほぼ独立した2つの共振系が近接しているに過ぎないのに対し、音叉型は共振部をベースから遊離させることにより両者に強固な機械結合を与え1つの共振系を形成している点である。音叉型は強い機械結合のため、駆動方式と位相基準信号のとり方が従来型とは異なる。

従来型では2本の振動子に駆動電流を給電する必要があるが音叉型では機械結合が強いため片方の振動子に給電するだけで、左右対称の機械振動を行うことができる。この時、図79のジャイロの右側の振動子は左側の振動子と完全に対称の振動を行うため、この振動子をモニター素子として用い振動の位相と振幅をモニターすることができる。この方式では、振動の位相基準信号をモニター素子より取り出すため、図78(a)の(4)(5)に示すように位相基準信号との誤差は零となるため基準位相の取り出しに起因する誤差信号によるオフセットやドリフトの発生を防止することができる。

こうして零点ドリフトや外部振動によるノイズを大巾に安定させることができた。残る課題は検知素子そのものが加速度センサーであるため、外部振動による加速度を検知してノイズとなる点である。2つの素子を対称駆動して加速度成分を相殺するためノイズを大巾に低減している。また残留加速度成分は帯域通過フィルタを介して同期検波しているためさらに低減している。さらに残る課題としては、

課題1．図82に示すように、駆動周波数の近傍の周波数の外乱に関しては出力誤差を生じてしまう。

(対策法)手振れ補正に用いる時は、駆動周波数の近傍の周波数成分に対して減衰効果のある防振ゴムで支持することにより外部振動によるノイズを回避する。

課題2．また、手振れ補正に用いる時はピッチ、ヨーの2方向のセンサが必要となり、図82に示すように複数のセンサ間の相互干渉が起こる。

(対策法)2つのセンサーの駆動周波数を制御帯域の分だけ離すことにより相互干渉が避ける。このことは実験で確認した。

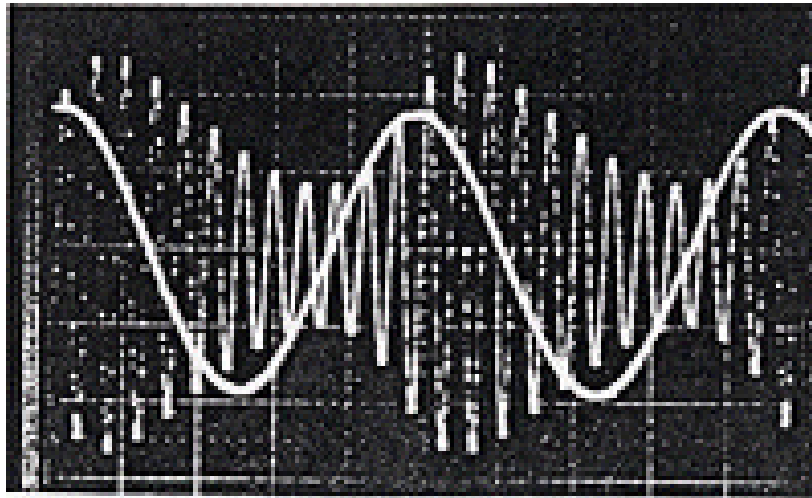


図 8 2 相互干渉による駆動レベルの変動

以上の2つの対策により、本振動ジャイロを手振れ補正用途に用いる場合に発生する課題をほぼ全て克服することができた。この結果、振動ジャイロの世界初の量産を実現した〔14〕。

この方式の1)小型軽量性、2)低消費電力、3)低電圧駆動(バッテリー駆動が可能)、4)低コスト、等の特長は手振れ補正以外の応用も可能になると思われる。図8-3は1987年に量産を開始した振幅帰還音叉型振動ジャイロのセラミック製の量産品(左)と、2003年に量産した水晶製の量産品(右)の外観を示す。図8-4はパッケージに入れた場合の外観を示す。

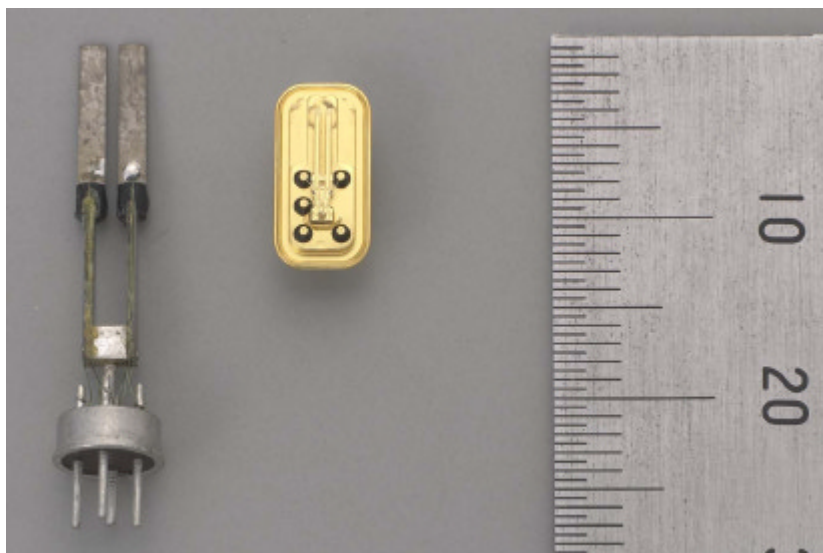


図 8 3 振動帰還音叉型振動ジャイロの外観 (左: 1987年、右: 2003年)



図 8 4 振動帰還音叉型振動ジャイロの斜視図（左：1987年、右：2003年）

表 5 音叉型角速度センサの特性

使用温度範囲	0～50
使用湿度範囲	30～90%RH
保存温度範囲	-20～70
使用電圧、電流	DC \pm 4.5 \pm 0.1V 10mA (typ)
感 度	15mV/°/s \pm 10以下
出力リップル	15mAp-p
DCドリフト	\pm 1.5V以下(0～50)
(単位時間あたり)	5mV/10s以下(起動5分後20)
分 解 能	0.02°/s以下
ダイナミックレンジ	\pm 100°/s以上
直 線 性	2%以下
帯 域 幅	DC-50Hz

表5にこの振動ジャイロの特性を示す。このジャイロを用いて手振れ補正カメラを構成したところ、外部振動を加えても出力画像が揺れることがなくなり、手振れ補正技術への量産化への大きな課題を克服した。なお、本研究による振動帰還音叉型振動ジャイロの量産の4年後の1991年、三角柱型振動ジャイロL20-23が開発され、手振れ補正用途〔25〕に用いられた。その後、様々な形状の振動ジャイロ〔24〕が実用化され、マイクロマシニング〔84〕を用いて製作されている。しかしカーナビゲーション用途では現在でも本研究により実用化した振動帰還音叉型振動ジャイロが主流であり、この製品（松下製）が世界市場の8割以上を占めている。

5.10 ハードウェアの構成例

振動帰還音叉型ジャイロの量産品を手振れ補正制御システムに導入することにより図85(a)の構成図に示すような手振れ補正システムを搭載したビデオカメラの量産モデルを製作し1988年6月米国市場へ投入した。このモデルは世界で初めて実用化した手振れ補正技術を搭載したビデオカメラということで大きな反響を集めた。図85(b)は外観図であり、表6はその仕様を示す。仕様にあるようにこのビデオカメラは望遠時に画面の50%つまり ± 6 度以上の手振れも補正できるため歩行撮影時や車上撮影時に発生するような大きな手振れも抑圧することができた。図86は鏡筒を含む手振れ補正ユニットの外観を示す。

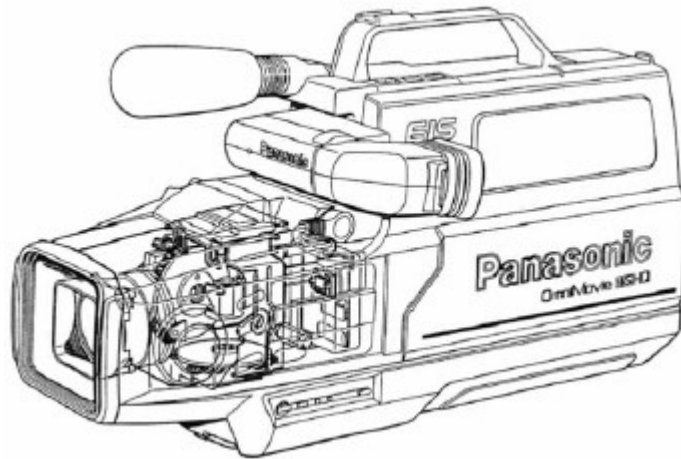


図85(a) ビデオカメラの内部構造図



図85(b) ビデオカメラの外観図

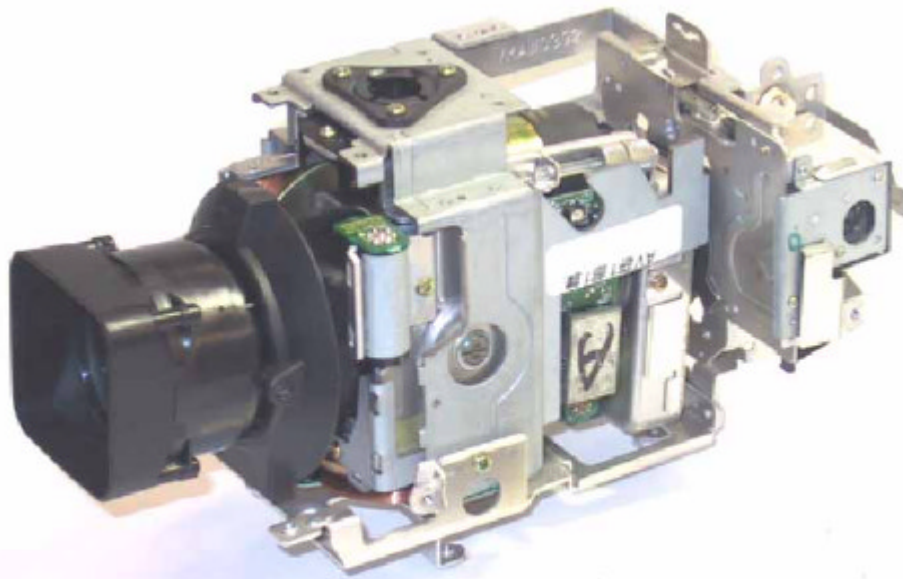


図 8 6 鏡筒を含む手振れ補正ユニットの外観

表 6 手振れ補正部の仕様

項 目	性 能
抑圧比	- 18dB (1Hz) - 38dB (10Hz)
補正範囲	± 140% (画面比) (10倍ズーム時)
消費電力	1W
供給電圧	12V

5.1.1 電子補正方式の検討

電子補正方式の必要性和その試作

1988年に製品化した鏡筒補正方式の手振れ補正機能を搭載したビデオカメラは、サイズが大きかったにもかかわらず、米国市場で好評を得た。これは米国市場ではフルサイズのVHSカセットテープを用いた大型のビデオカメラが主流であったからである。

しかし、日本市場においては8ミリ規格の小さいサイズのカセットやVHSカセットを小型化したC-VHS規格の小さいサイズのカセットを用いた小型ビデオカメラが主流であった。当時のCCDや光学レンズは大きかったため、鏡筒補正方式をこのような小型ビデオカメラに内蔵することは、当時の技術では難しいことが明らかであった。

本研究では当初の目標として歩行撮影の手振れまで補正しようとしたため補正範囲の目標値を ± 6 度に設定した。このため、鏡筒補正方式とミラー補正方式に研究対象の方式を絞り込んだ。しかし手振れ補正技術を実用化し市場に出したところ、通常撮影時に発生する手振れを補正することに対するニーズが強いことが明らかになった。通常、撮影者は静止して撮影する。この静止撮影時に発生する手振れを補正することだけに機能を限定すれば ± 0.6 度の補正範囲で良い。この場合、図47に示した様々な補正方式の採用が可能となる。

1988年時点では可変プリズム駆動方式は色収差の問題と実用化するための要素技術がなかったため採用を見送った。筆者が基本特許を権利化している方式である撮像板駆動方式はCCDが大型であったことから、まだ時期が尚早であると判断した。光学系の一部のレンズを駆動する内部レンズ駆動方式はカメラ会社の特許動向等から、技術が進んでいることは明らかであったが、実現する要素技術がまだ整備されていなかった。電子補正方式は回路を開発するだけでよいため、最も実用化の可能性が高かった。

以上から、振動ジャイロを用いて手振れを検出し、手振れを電子的に補正する電子補正方式を井阪治夫氏、榊原祥雄氏等が主体となり筆者と共同で検討を行った。

図87に電子補正方式のブロック図を示す。本研究で実現した振動帰還音叉型振動ジャイロを用いてタテ方向（ピッチ方向）とヨコ方向（ヨー方向）の手振れを検出する。手振れ補正制御回路ではズームエンコーダからのズーム比に応じて手振れ検出信号を演算しタテ方向とヨコ方向の手振れ補正量を演算する。タテ方向の手振れ補正量に応じて垂直方向の転送クロックを制御し、垂直方向にCCDの映像信号を切り出すと、まず垂直方向の手振れが補正された映像信号が得られる。この状態ではヨコ方向の手振れがまだ残っている。そこでヨコ方向の手振れ補正信号に応じて時間軸補正回

路を制御し、画像の水平方向の手振れを補正する。以上のように筆者の基本特許のCCD切り出し方式（参照：図32）の電子補正方式を用いた。

この試作機は625本の垂直方向の走査線数をもつPAL用のCCDを用いて、一部の画像を切り出し、走査線数525本のNTSCの画像を得ている。垂直方向の走査線が減少しないため画質が劣化しない。図87のブロック図に示す構成の試作機を製作し良好な手振れ補正特性が得られた。なお実際の試作機では補間処理を行い手振れ補正の分解能を上げている。

電子検出方式と振動ジャイロ検出方式

この時、筆者とは別のグループが振動ジャイロ検出方式に代わる方式として電子検出方式（参照6.4.1）の検討を既に開始していた。この方式は画像の動きベクトルを検出することにより手振れを検出するもので、民生用半導体ICの中に格納できる点では1990年当時、画期的な技術であった。振動ジャイロ検出方式と電子検出方式の是非は本研究の検討後も手振れ補正の技術分野で議論がなされた。

表7〔25、26〕の比較表に示すように、電子検出方式は電子回路のみで構成できる。当初は画像メモリーを必要としたためコストは振動ジャイロ方式と変らなかった。しかし年々半導体は高密度化による価格低下が進んでいた。また画像メモリーをなくす電子検出方式の検討〔57〕も進んでいた。このため、将来コストが大幅に安くなることが予想された。欠点としては映像の動きから手振れを予測するため、画面内を大面積の被写体が動いた時に、手振れと誤って判断し補正し誤動作する場合があった。そしてズーム時には映像が大きく変化するため画像から手振れを検出することが困難であった。また、映像のサンプル周波数が最大60Hzであるため、高域の手振れ成分が検出できなかった。そして画像メモリーを使う方式では検出が1フィールド遅れた。このためリアルタイム検出が要求される光学補正方式に用いることはできなかった。

一方、振動ジャイロ検出方式は、カメラボディの動きを直接検出するため真の手振れ成分が得られ、画像依存性が全くないためどんなに動き、明るさ、大きさの被写体であっても誤動作することはない。また検出に時間遅れがなく、リアルタイム検出のため電子補正方式のみならず精度の要求される光学補正方式にも適用できた。ただし当時は1987年に量産用振動ジャイロが実用化されたばかりで生産量が少なく、コストが高いことが量産時において問題となった。またPAL用CCDも画素数が多いためコストが高かった。

1990年まで様々な議論が行われたが、初の電子補正方式ビデオカメラには、電子検出方式が採用された〔40〕。本研究による振動ジャイロ検出型の電子補正方式は採用されなかったが、筆者による基本特許は権利化することができた。なお、その後、本研究の中

で考案された振動ジャイロ検出方式を用いたジャイロ検出型電子補正方式手振れ補正技術は誤動作がない等の理由で、1992年頃からビデオカメラに広く採用された〔25、26〕。また本研究の中で考案されたCCD切り出し方式の電子補正方式は画質が劣化しないことから1993年に電子検出型電子補正方式のビデオカメラにも採用された〔33、55〕。

表7 電子検出方式とジャイロ検出方式の比較〔25、26〕

	電子検出方式 (動きベクトル)	ジャイロ検出方式 (振動ジャイロ)
利点	<ul style="list-style-type: none"> 電子回路だけで構成できる。 将来コストダウンの可能性がある。 サイズが小さい(工のみ) 	<ul style="list-style-type: none"> 真の手振れ成分のみを検出できる。 被写体の動きや明るさの影響を受けない。 検出に時間遅れがない。(リアルタイム)
欠点	<ul style="list-style-type: none"> 被写体の動きや明るさによる誤動作がある。 検出に時間遅れがある。 	<ul style="list-style-type: none"> 高精度のセンサを必要とする。 センサのコストが高い。

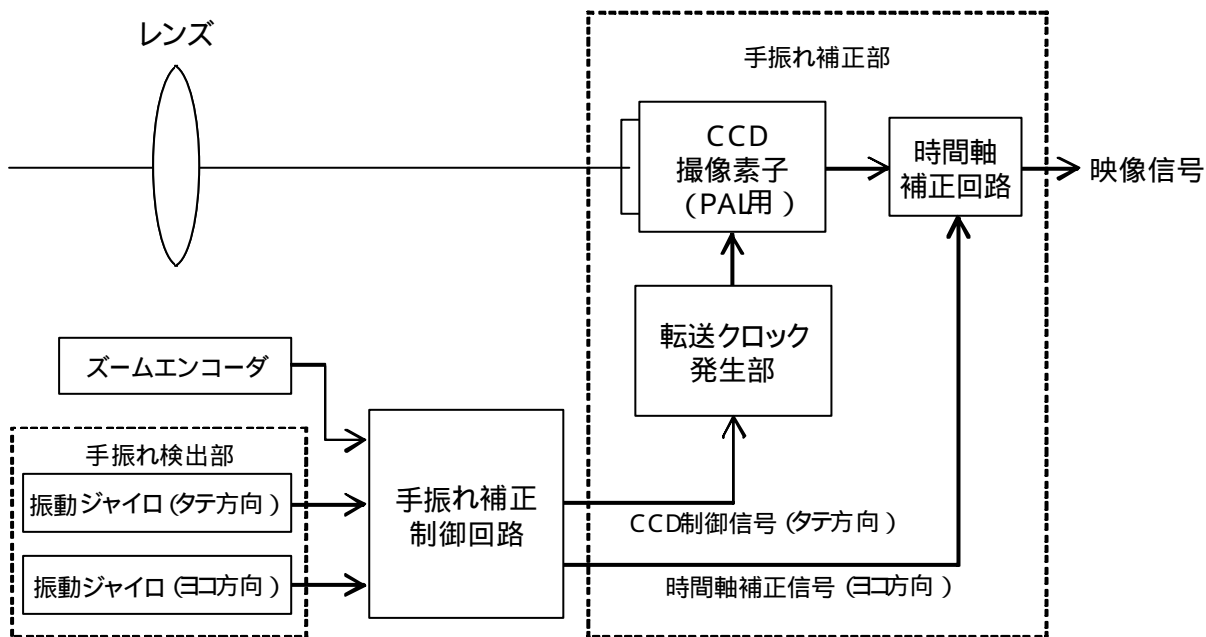


図87 振動ジャイロ検出型電子補正方式の試作機のブロック図

5.12 むすび

鏡筒駆動方式の実用化方式を検討しミラー駆動方式に比べると大巾に小型軽量化することができた。試作機を製作し被験者に撮影させることにより実用化上の問題点を検討した。

(1) 手振れ補正を搭載したカメラで撮影した場合、撮影者がカメラの撮影方向を変えようとするときの意図的なカメラの動きと手振れによるカメラの動きを区別できない。従って意図的な動きを手振れと見なして補正しようとする制御力が働く。この制御力は意図的なカメラの動きと反対方向に働くためカメラ操作を妨害するだけでなく違和感を撮影者に与える。

そこでカメラの撮影モード識別アルゴリズムを考案した。これはカメラのボディの角速度とカメラの撮影方向の角度の時間的な変化を統計処理することにより、カメラのボディの動きが撮影者の意図に基づく動きか手振れによる動きかを判別する。カメラの動きが撮影者の意図に基づく場合は手振れ補正制御の動作を弱めることにより操作性と操作感を大巾に向上させることができた。

(2) 量産時の部品のバラツキや温度による特性のため性能が目標特性の1/10しか出ないという問題が発生したが、部品の特性変化を吸収するためオブザーバ制御を導入し所定の手振れ補正の抑制特性を実現した。

(3) 角速度センサーには零点の不安定性の課題があった。しかし、2つの振動子を結合し音叉構造とし、一方の振動子にモニタ電極を設け位相基準信号を取り出すことにより同期検波時の位相誤差をなくすことができた。こうして零点の不安定性を大幅に改善、振動ジャイロの世界初の量産を実現した。

第6章 本研究のその後の展開

6.1 まえがき

8年間に及ぶ本研究により1988年世界初の手振れ補正機能を搭載したビデオカメラPV-460を実用化することができた。本研究では静止撮影だけではなく歩行撮影における手振れを補正することを目標仕様とした。このため補正範囲の目標値を ± 6 度以上と設定したため補正範囲が大きくとれる鏡筒補正方式を採用した。

補正範囲の小さな方式も新たに考案したが実用化しなかった。しかし本研究による世界初の実用化後の手振れ補正の普及に従い補正範囲を小さくし静止撮影した時に発生する手振れを補正することに機能を限定する方向に進んだ。機能限定することにより補正範囲は ± 0.3 度でよくなり補正範囲の小さな手振れ補正方式がその後実用化された。以下、本研究の延長研究で実用化した内部レンズ駆動方式、本研究で提案したCCD切り出し方式と撮像板駆動方式の実用化状況について述べる。そして全手振れ補正技術の実用化における本研究の位置付けを述べる。

6.2 本研究の延長研究の中で実用化された技術

内部レンズ駆動方式への展開

鏡筒駆動方式は補正範囲が ± 6 度あったため歩行撮影時に発生する大きな振巾の手振れも補正することができた。しかし、補正範囲が大きい反面、大きく重いことが民生用に展開する際の課題となった。1988年に初めて実用化した数年後、様々な手振れ補正方式が登場したが、補正範囲の大きさはまちまちであった。どの手振れ補正方式を採用しても補正範囲を大きくとろうとすると大型化するか収差が大きくなる。筆者にとって意外であったのは補正範囲の小さな補正方式でも市場に受け容れられたことである。このため、民生分野用途では補正範囲を狭くする方向に開発が進んだ。そして撮影者が静止撮影した時の手振れを補正するという目標に収束した。静止撮影時に発生する手振れは最大でもタテ、ヨコ各々 ± 0.3 度程度である。従って手振れの補正範囲も最大でタテ、ヨコ各々 ± 0.3 度でよい。1990年代前半には補正範囲は ± 0.3 度という現実的な目標が主流となってきた。 ± 0.3 度の補正範囲であれば内部レンズ駆動方式で実現可能であるため研究が進められた。1994年には内部レンズ駆動方式の手振れ補正システムを搭載したフィルムカメラ〔87〕が実用化された。また1995年にはフィルムタイプの1眼レフカメラの交換レンズ〔94〕に搭載された。

民生用ビデオカメラの場合は一般的に図88に示すようなズームレンズが装着されている。第2群と第4群はズーミングとフォーカシングに伴い前後に動くのに対し第

1群と第3群は固定されている。そして第1群より第3群が小さいためモーターの大きさと消費電力の面でレンズ駆動に適している。このため第3群を光軸に対して垂直方向に駆動することにより手振れを補正する方式を採用した。特にズームレンズでは一般的に各レンズ群毎に収差が最小になるように設計されている。このため1つのレンズ群全体を駆動し手振れ補正を行っても収差も少ないという利点がある〔68〕。

内部レンズ駆動補正は補正レンズを光軸に垂直方向に移動させるためレンズを偏心させることになる。従って偏心により収差が発生するとともに解像度が劣化する。図89は手振れ補正に伴う偏心により発生する空間周波数の低下を示している。補正レンズを上シフトした場合、結像面上の光学像の下端の解像度が低下する。補正範囲は ± 0.3 度であるため空間周波数の低下は最大 $1/2$ の範囲内に収まっている。手振れ抑制特性は7Hz付近で最大となる〔86〕ように設定されている。これは手振れが2~3Hz以下の低周波の振れが多いことと10Hz付近の手振れがもっとも不快に感じることからくる。

図90は内部レンズ駆動方式の手振れ補正を搭載したビデオカメラの外観図を示す。内部レンズの駆動巾は ± 0.25 mmであり手振れ補正範囲は ± 0.3 度である〔71〕。手振れ補正部を含むレンズユニットは体積65cc重量51g(CCD除く)という大幅な小型化を実現した〔78〕。また2001年には3CCD方式のビデオカメラ〔69、72〕に、この手振れ補正部を搭載した。

図91と図92は1988年に実用化した鏡筒駆動方式の手振れ補正機構を含むレンズユニットの外観と2003年に実用化した内部レンズ駆動方式の手振れ補正機構を含むレンズユニットの外観を示す。15年の間にレンズと光学補正方式が大巾に小型化されていることがわかる。

デジタルカメラへの展開

この内部レンズ駆動方式は図93に示すデジタルカメラに2000年に搭載され、2003年には図94に示すようなコンパクト型デジタルカメラ(DMC-FX5)に搭載された。図95の右端に示すさらに小型化した手振れ補正機構を搭載したデジタルカメラ(FX-7)は市場で高い評価を得て製品別国内シェアで1年間1位であった。

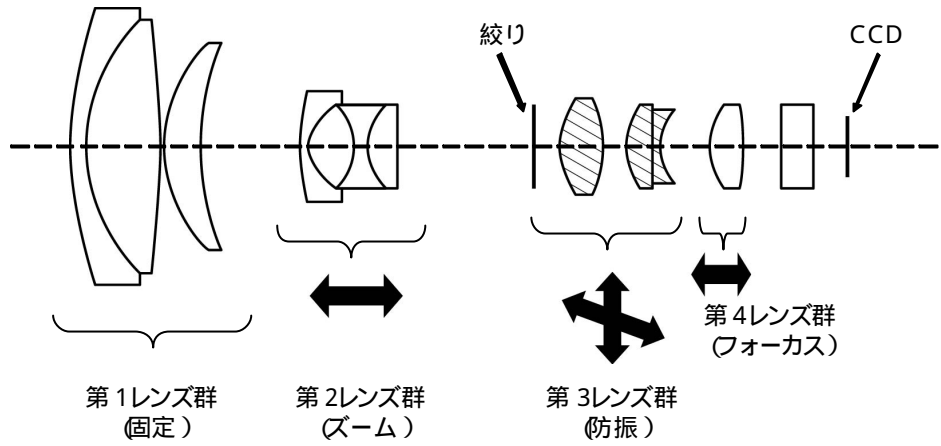


図 8 8 内部レンズ駆動方式のレンズ構成〔 6 8 〕

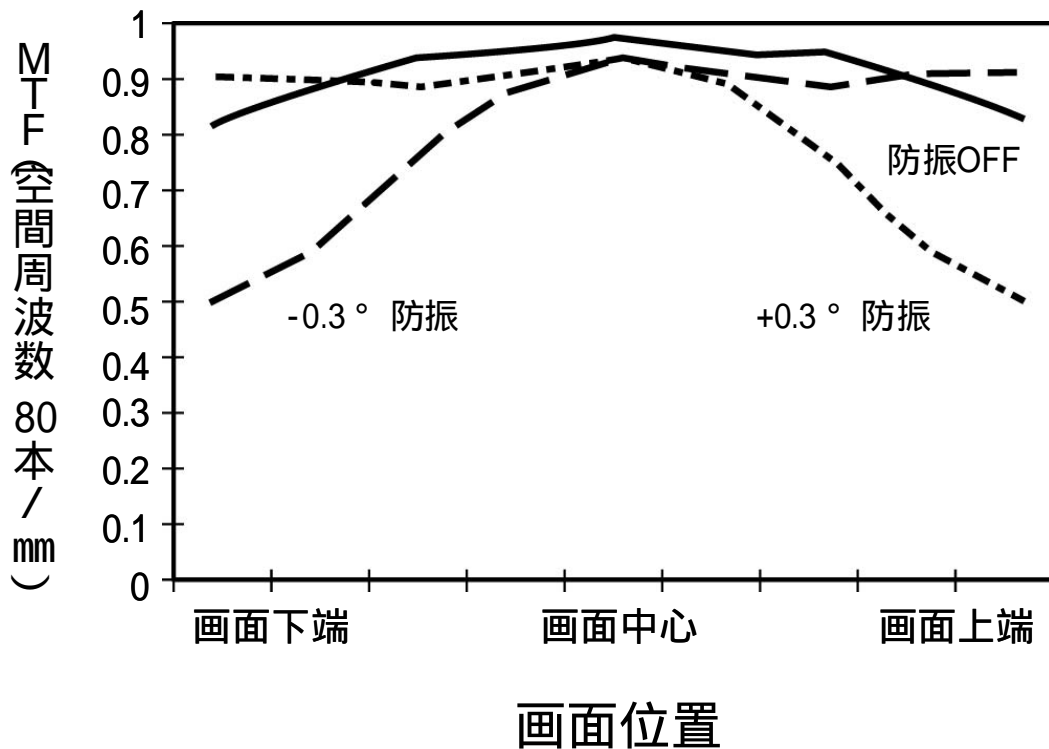


図 8 9 手振れ補正時の偏心に伴う空間周波数特性〔 6 8 〕



図 9 0 内部レンズ駆動方式を搭載したビデオカメラ
(NV-DS9 : 1999年 松下電器)

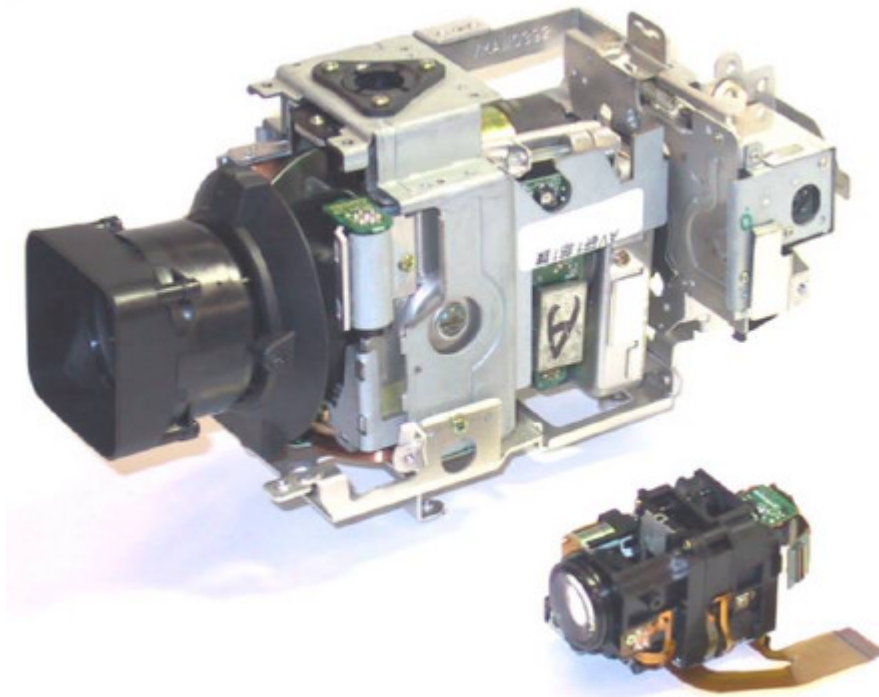


図 9 1 鏡筒駆動方式(1988年)と内部レンズ駆動方式(2002年)の
手振れ補正機構内蔵レンズユニットの比較図

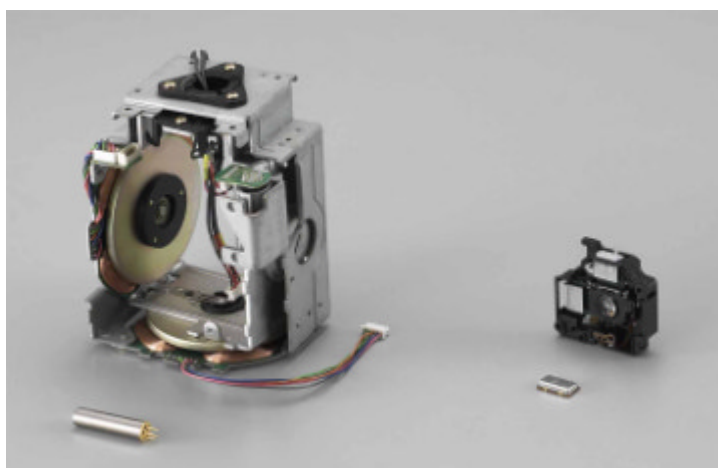


図 9 2 駆動モーターの比較：鏡筒駆動方式（1988年）と
内部レンズ駆動方式（2002年）



図 9 3
内部レンズ駆動方式を搭載したデジタルカメラ
(DMC - FZ1 : 2002年 松下電器)



図 9 4
世界初の手振れ補正搭載コンパクト型デジタルカメラ
(DMC - FX5 : 2003年 松下電器)



図 9 5 最新の手振れ補正搭載コンパクト型デジタルカメラ
(DMC - FZ20、DMC - FZ5、DMC - L32、DMC - FX8 :
2005年 松下電器)

6.3 本研究で提案した技術のその後の実用化状況

6.3.1 2段階CCD切り出し方式の実用化

本研究においてCCDからタテ方向とヨコ方向の2段階で画像を切り出す2段階切り出し方式を提案した。この提案の8年後の1991年に2段階CCD切り出し方式の手振れ補正機能搭載のビデオカメラ〔25〕が実用化された。そして1993年に図96に示すように2段階CCD切り出し方式に用いる手振れ補正専用のCCD撮像素子〔54、55〕が実用化された。この実用化されたCCD撮像素子の総画素数は 908×616 画素である。このCCD撮像素子は外部に時間軸補正回路を接続することにより総画素の中から任意の 670×485 画素を切り出すことができる。このCCD撮像素子の場合、水平方向に切り出し画面の $\pm 13.1\%$ 、垂直方向に切り出し画面の $\pm 13.5\%$ の手振れ補正が可能となる。

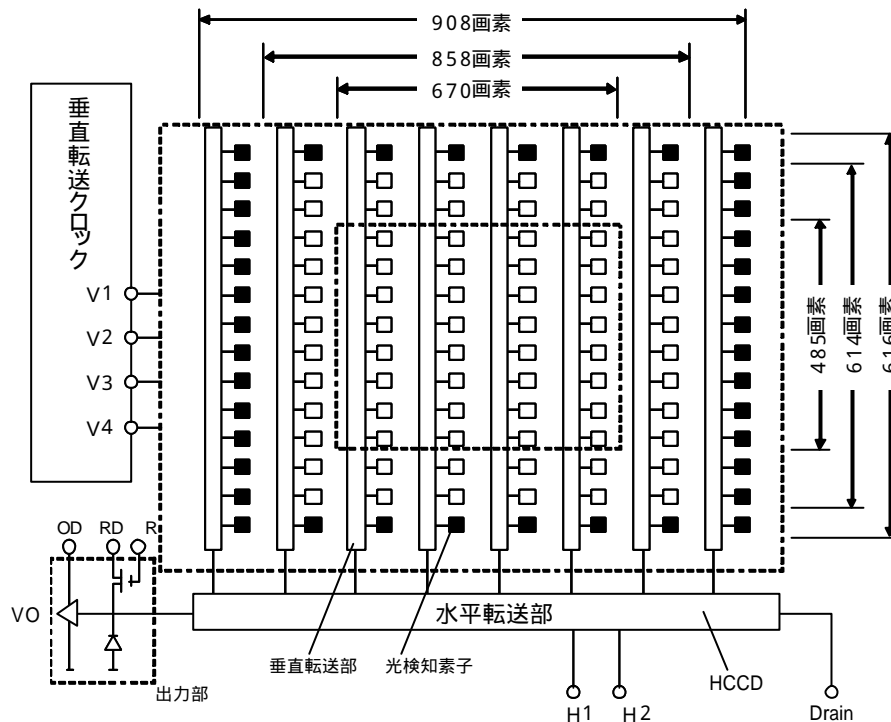


図96 手振れ補正専用CCDの構成



図 9 7 C C D 切り出し方式手振れ補正機能搭載ビデオカメラ
(N V - S 5 8)

図 9 7 にこの C C D 撮像素子を用いたビデオカメラ〔 3 1、3 3、3 4 〕の外観を示す。このビデオカメラは「 C C D 切り出し方式」を採用しているため解像度が劣化しない。前述のように通常の照度の撮影条件で、かつ手振れ量が多くない撮影条件の場合は解像度と画質が劣化することなく手振れを補正することが可能となった。この C C D の実用化の背景には、まず、半導体加工密度が上がり C C D の画素数が増加したことがある。次に 1 9 9 0 年代初期に手振れの必要性が認識されたことがある。現在の電子補正方式のほぼ全てに筆者が考案し提案した 2 段階 C C D 切り出し方式¹⁾が採用され、この提案、考案が基本技術、基本特許となっている。

6 . 3 . 2 撮像板駆動方式の実用化

筆者の提案から 2 0 年後の 2 0 0 3 年に撮像板駆動方式はコニカミノルタ社によりデジカメ用として実用化された²⁾。当初はレンズ固定式カメラに搭載されたためメリットが出なかった。しかし 2 0 0 4 年に交換レンズタイプの一眼レフデジタルカメラのボディ部に手振れ補正が搭載され撮像板駆動方式のメリットが認められるようになった。図 9 8 に示すこのカメラはボディ部に手振れ補正を搭載している。このため手振れ補正の搭載されていない一般の交換レンズを装着しても手振れが補正される。手

1) 〔 1 7 〕 の第 2 5 図参照

2) 2 0 0 3 年末に筆者の基本特許の一部が満了したため業界で実用化研究が始まる。

振れ補正機構が搭載された特殊な交換レンズを入手する必要がなく、既存のレンズが使用できるため市場で高い評価を得ている。



図 9 8 撮像板駆動方式手振れ補正搭載 1 眼レフデジタルカメラ
(7 Digital コニカミノルタ社)

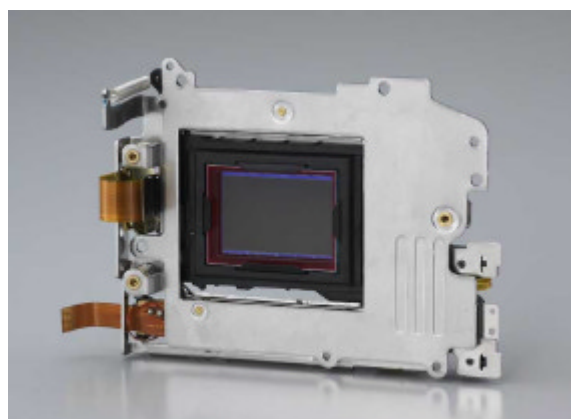


図 9 9 撮像板駆動部の外観 (正面)



図 1 0 0 撮像板駆動部の外観 (裏面)

撮像板駆動方式が実用化されなかったのは、搭載されるべき交換レンズ型デジタルカメラがなかったという市場面の課題と、小型のX Y駆動装置がなかったという技術面の課題があったからである。しかし、まず撮像素子の性能が向上し、2000年に登場したデジタル1眼レフカメラが大きく普及し、市場面の課題が解決された。次にピエゾ素子を駆動源として用いた超小型のX Y駆動装置が実用化され技術面の課題が解決された。以上の2つの課題解決により撮像板駆動方式が実用化された。現在撮像板駆動方式は筆者の提案した方式が全てに採用されており筆者の提案、考案した方式が基本技術、基本特許¹⁾となっている。

6.3.3 鏡筒補正方式のデジタルカメラの実用化

本研究の中で鏡筒補正方式の実用化を行った後、本研究の延長研究として内部レンズ駆動方式を実用化した。本研究による鏡筒補正方式の実用化は1988年であるが、その17年後の2005年8月にコンパクト型デジタルカメラにこの方式を搭載したモデルが実用化された。図101に示すように屈曲光学系を用いて薄型化をはかっている。CCDとレンズを含めた光学系を水平と垂直に回動可能なジンバルで支え手振れに応じて水平方向と垂直方向に駆動する鏡筒補正方式を採用している。800万画素と画素数が多いCCDが搭載されているが、鏡筒駆動方式では手振れ補正に伴う収差や周辺部のレンズの空間周波数の低下が存在しないため良好な画像が得られる。本研究当時はCCDやレンズユニットが大きかったし、補正範囲も大きく設定されていたため鏡筒補正式は大きかった。しかし、最近では技術が進みCCDとレンズユニットが大幅に小型軽量化されたため、小型軽量のモーターでもレンズユニット部を駆動できるようになった。また補正範囲も本研究当時の1/10程度に小さくなった。これにともない鏡筒補正式もコンパクトに収めることができるようになったと考えられ、レンズユニットのサイズが小さくなればなる程有利になるため、カメラ付携帯電話のカメラ部に装着されることも今後期待される。

¹⁾ [17] の図20、図21参照

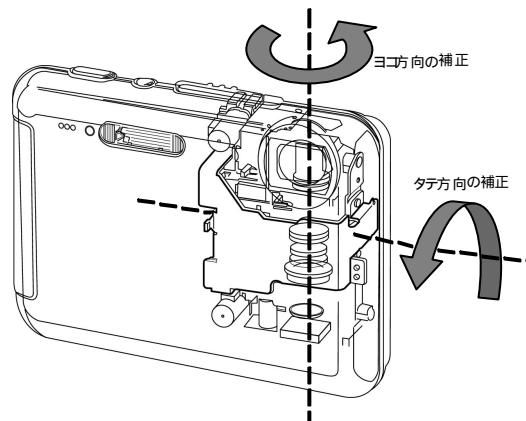


図 1 0 1 鏡筒補正方式手振れ補正搭載デジタルカメラの構造
(DiMAGE X1 : 2005年 コニカミノルタ社)

6.4 本研究の中で検討のみ行った技術のその後の実用化状況

6.4.1 電子検出方式の実用化

本研究において電子検出方式の可能性を検討した。この時は動きベクトルの検出手法はMUSE技術等により確立していたが、動きベクトル検出時に被写体の動きと手振れとを識別するのが困難であると判断した。またデジタル映像処理回路が実現していないため千点を超える代表点の動きの演算を処理する大規模な動きベクトル演算回路を1チップの民生用半導体ICに収めることが困難であると結論づけた。しかしこの検討の5年後の1987年に放送用途で画面揺れの電子検出方式〔13〕が実用化された。これは放送画面に発生する画振れを動きベクトルで検出し動きを補正するものである。そして本研究の8年後の1990年に電子検出方式の手振れ補正機能〔51〕を搭載したビデオカメラが松下電器により実用化されている。この電子検出方式のビデオカメラNV-S1〔19〕の写真を図102に示す。電子検出方式が実用化した背景には、まず帯域抽出代表点(BERP)マッチング法〔32、35-42〕の開発により帯域制限〔40〕を行うことにより図103に示すように1/100程度的大幅に少ない代表点数で正確な動きベクトルが得られるようになったことがある。このため小規模の民生用LSIで手振れの動きベクトル演算が可能になった。次にファジィ理論〔45-50〕により被写体の動きと手振れの識別がある程度可能になったからである。このように2つの大きな技術課題が克服できたため実用化された〔52〕。映像信号から画面の動きを検出する場合、入力映像に対し動きベクトルの検出は1フィールド期間遅延する。この遅延補償のためフィールドメモリが必要であった。その後、予測フィルタにより過去の手振れの情報から1フィールド先の画像の動きを予測し、動きベクトルを求めるメモリーレス方式〔57、58〕が開発されフィールドメモリの削減が可能となった。この方式はコストが安くなるため、低価格帯のビデオカメラに搭載されている。



図102 電子検出方式手振れ補正機能搭載ビデオカメラ
(NV-S1:1990年 松下電器)

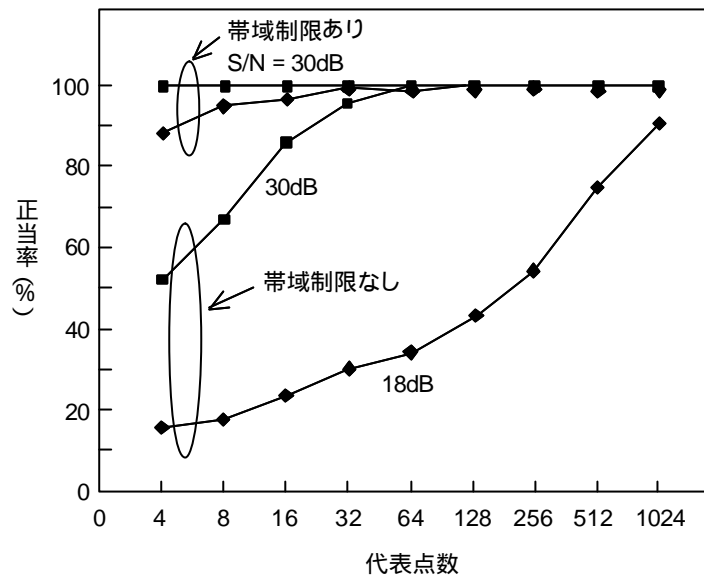


図 1 0 3 動きベクトル検出時の正答率〔40〕

6 . 4 . 2 可変プリズム駆動方式の実用化

本研究では可変プリズム駆動方式が補正範囲が広い場合、収差が発生するため実用化には適していないと判断した。しかし、本研究の後の1992年可変プリズム駆動方式手振れ補正機構〔27〕が実用化され、図104に示すようにビデオカメラに搭載された。本研究の時点では歩行撮影時に発生する手振れを抑圧するため補正範囲が ± 6 度以上必要であると考えた。しかし1990年代になり静止撮影時に発生する手振れ補正だけに機能を限定する方向に仕様は縮小された。このため要求される補正範囲が狭くなった。この補正方式の場合、プリズムの傾角は最大 ± 3 度なので補正範囲は ± 1.5 度〔76、77〕である。対象とする手振れの周波数は $0.5 \sim 15$ Hz〔27〕である。撮影モード判別アルゴリズム〔26〕が導入されているため操作性は良好である。補正範囲の両端側では、わずかの色収差が発生するが民生用として問題のないレベルに収められている。



図104 可変プリズム駆動方式手振れ補正搭載ビデオカメラ
(TR-900 1992年 ソニー)

6.5 手振れ補正技術の進展における本研究の位置づけ

本研究および本研究による実用化を端緒として手振れ補正技術の研究が本格的に始まり、多くの方式が登場した。

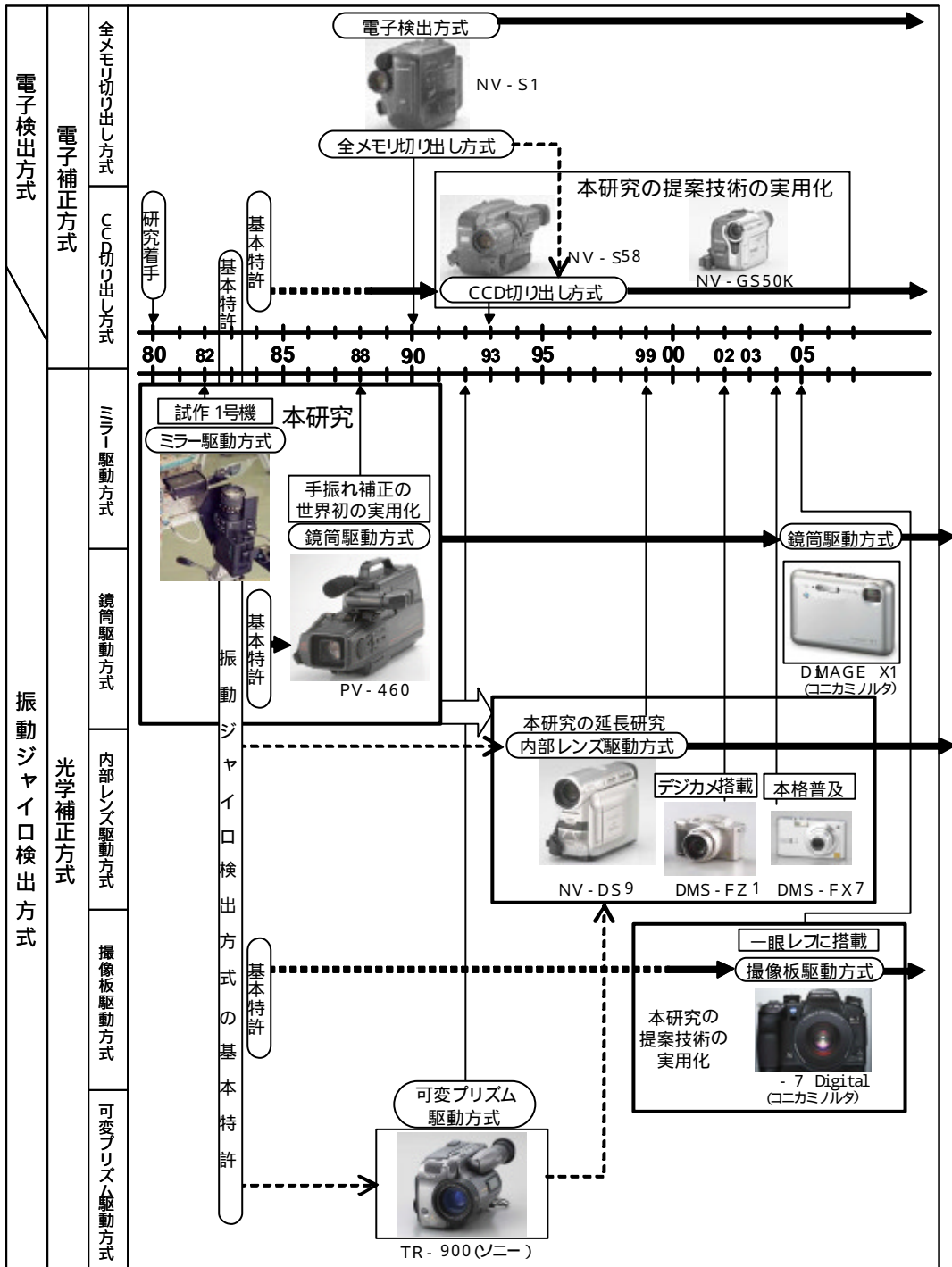


図105 手振れ補正技術の進展における本研究の位置づけ
注：製造会社名のない分は松下電器製

6.6 今後の展開

筆者が研究を始めて23年経つが、現在の手振れの補正技術には解決すべき課題がある。図106に示すようにビデオカメラの場合、光学補正を行っても補正後の残渣が残る。デジタルスチルカメラの場合でも図107(a)に示すように、手振れ抑制率は10~15dBである。手振れ量が大きくて例えば144画素あった場合でも図107(b)に示すように10画素程度の補正残渣が残る。この手振れを除去するには後段にソフト補正を組み合わせた2段階手振れ補正方式により解決できる。

図108(a)は10画素垂直方向に手振れが発生した時の画像である。この画像をソフト補正することにより図108(b)のように補正される。精細に見ると直線部分に変換ノイズが残っているが、一般消費者用としては差し支えない範囲に収まっている。

図107に示すように光学補正を前段に、ソフト補正を後段に配置した2段階手振れ補正により、手振れを大巾に軽減できる可能性がある。この2段階補正方式はソフト補正方式を実現した研究者である西澤真人等と共同で検討する中で筆者により考案された方式である〔123〕。

光学補正方式は100画素以上の手振れでも補正できるが、10画素以下の補正残渣が残る場合があり、このためにデジタルカメラの画像がぼやけてしまう。一方ソフト補正方式は10画素以下の手振れ補正を行う場合は、補正歪によるノイズが目立たないが、10画素以上の手振れ補正を行うと補正歪によるノイズが目立つ。そこで、10画素以上の手振れの補正を光学補正で行い、補正後に残った補正残渣をソフト補正により除去することにより、ほぼ完全な手振れの補正が実現する。

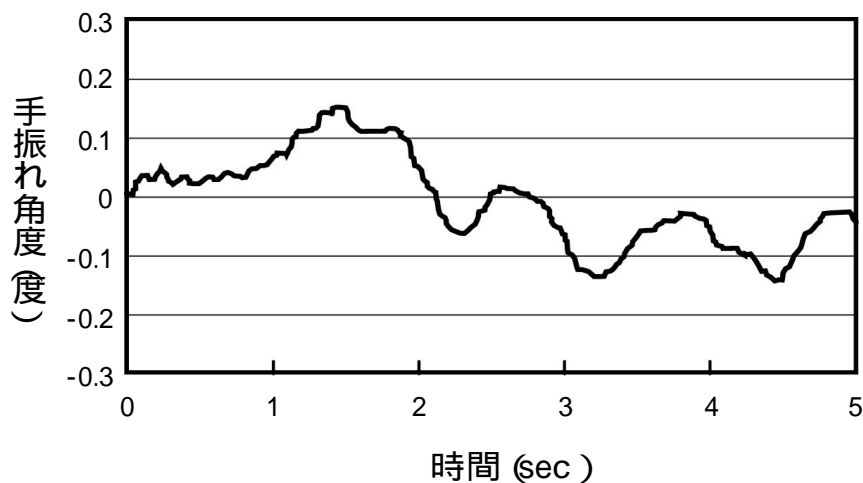


図106 光学補正後の残留手振れの発生状況〔124〕

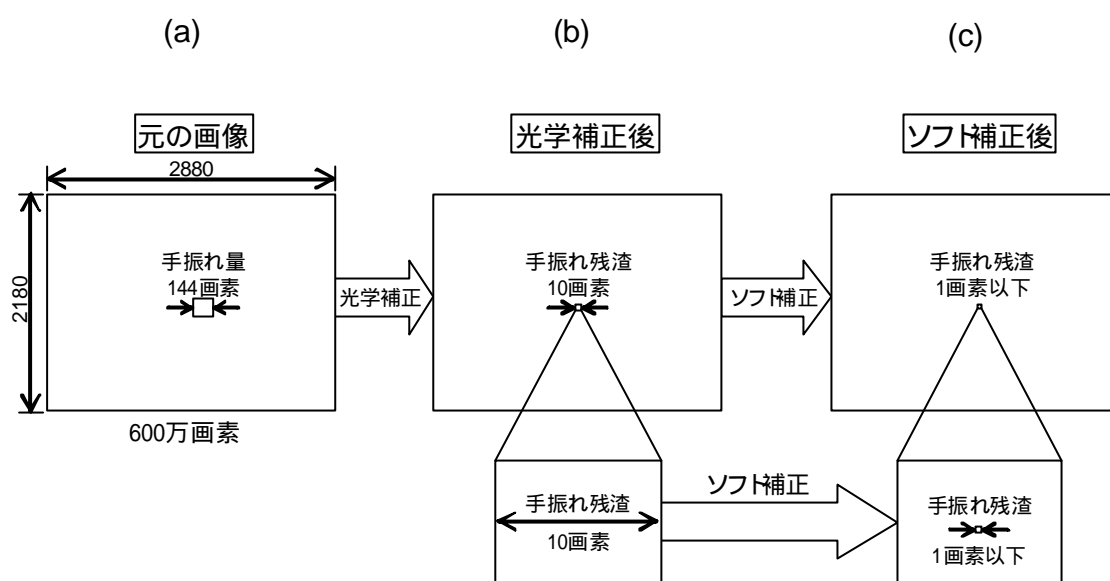


図 1 0 7 2 段階手振れ補正の原理



(a) ソフト補正前の画像* (1 0 画素分の手振れ)



(b) ソフト補正後の画像*

図 1 0 8 ソフト補正方式手振れ補正の効果 (シミュレーション : * 西澤眞人氏提供)

手振れの補正は、ビデオカメラやデジタルカメラの民生用のみならず産業用や車載用に応用されると思われる。特に自動車搭載用としての可能性が高い。近い将来、自動車には多くの小型カメラが取り付けられるといわれ、自動車メーカーで研究が積極的に行われている。このカメラで前方を撮影し、車線検出〔90〕や前方の物体の検出〔91〕やナンバー検出〔92〕を行う研究が進んでいる。カメラはITS (Intelligent Transport Systems) において最も重要なセンサである。車載用カメラにおいては自動車が走行するため、必ず振動が加わり、画振れが発生する。画振れが発生した画像と画振れが発生しない画像の方が画像から対象の認識を行う場合、認識率が高いことは当然である。

今後、車載カメラ用の画振れ補正技術の研究が必要になるとと思われる。車載用カメラは手持ちカメラと異なり、車体に固定されるため、物体認識用途には画振れの補正範囲は ± 10 度以上要求される。このため新たな補正手段が必要となるとと思われる。

また近年提唱されているウェアラブルコンピュータ〔93〕においてはカメラが必須のデバイスになり手振れ補正が必要となる。ウェアラブルコンピュータ用途においては現在、研究が行われている携帯電話用カメラと同じ方式の手振れ補正技術が流用

できるものと思われる。

以上のように、今後手振れ（画振れ）補正技術が民生用カメラ用途以外に展開される可能性が高い。

6.7 むすび

本研究では、固定撮影に加え歩行撮影や車上撮影で発生する手振れを補正することを目指した。この場合、補正範囲の目標値は ± 6 度以上となる。このため補正範囲の大きな鏡筒補正方式を実用化した。その後、静止撮影時の手振れ補正に機能を絞った補正範囲の小さな補正方式が登場し主流となった。

(1) 本研究の延長研究として内部レンズ駆動方式が検討され1999年にビデオカメラに搭載した。補正範囲は ± 0.3 度で内部レンズ駆動に伴い発生する色収差は色補正レンズにより補正した。偏心に伴うMTFは最大で50%であり、実用化に問題のない範囲に収められている。

(2) 本研究で提案したCCD切り出し方式は1991年に実用化された。この方式では手振れ補正に伴う解像度低下がないため電子補正方式の主流技術となり電子補正方式のほぼ全数に使われている。これらは全て筆者の考案、提案した基本技術、基本特許を使用している。

(3) 本研究で提案した撮像板駆動方式は2003年に実用化され、2005年に1眼レフデジタルカメラに搭載された。ボディ側に手振れ補正機構を搭載する方式のためレンズ交換タイプのカメラの場合、総合的な軽量化、低コスト化の利点がある。この方式は筆者の提案した基本技術を用い、筆者の考案した基本特許を使用している。

第7章 結論（第1部）

本研究の第一の目的は、カメラ内蔵可能な画像自動安定化装置つまり手振れ補正技術の実用化を阻害していた諸課題を解決し、性能、すなわち、人間の視覚特性に対応した手振れ抑圧特性、補正範囲、操作性を実現するとともに、サイズ、重量、コストの面で一般カメラに搭載可能な手振れ補正機能を実用化することである。第二の目的は将来の技術革新に伴い実現可能となる新しい手振れ補正方式を提案することである。本研究の中で以下の結果を得た。

〔1〕手振れ検出手段の課題の解決

課題：

従来の安定雲台装置は一般カメラに内蔵するには重量、サイズ、コストが著しく大きいという課題が存在した。また回転ジャイロで手振れを検出する方法もあったが、小型カメラの手振れ補正に用いる低コスト小型の回転ジャイロは高域特性が充分でないという課題があった。一方で従来方式の振動ジャイロは小型であったが零点ドリフト、外乱ノイズ、高電圧駆動等の課題が残っており量産化されていなかった。

解決策：

手振れ補正用途には良好な高域特性とサイズ、コストの面で振動ジャイロが適していることと、慣性航法用途で致命的な問題となった零点ドリフトや外乱によるノイズは手振れ補正用途では致命的ではなく改善により使用できる範囲にあることを明らかにした。零点ドリフトや外乱ノイズ、高電圧駆動の原因が同期検波時の位相基準の誤差を生じている点と2つの振動子の共振周波数が異なる点、Qの低い材料を用いている点にあることを解明した。2つの振動子の機械的結合を強固にし1つの音叉構造にすることにより、単一の共振周波数で対称振動するようにした。こうして外部への振動の放散を減らすことによりヨー方向とピッチ方向のジャイロ同士の相互干渉を低減した。一方の振動子を駆動素子に他方の振動子をモニタ素子とし、モニタ素子からの振巾情報をフィードバックすることにより、安定で外乱に強い発振を実現し外乱ノイズを低減した。モニタ素子から位相基準信号を取り出すことにより基準信号と実際の振動との位相誤差がなくなった。このため同期検波時に位相誤差により発生していた零点ドリフトが大幅に減少した。

また単一の共振周波数しか存在しないためQの高い材料の使用が可能となり、駆動電圧を40Vから2Vに大幅に下げた。こうして手振れ補正用途で許容される範囲内に零点ドリフト、外乱ノイズ等を収めるとともに低電圧化により電池駆動が可能となった。手振れ補正用途の仕様の振動ジャイロの量産化技術を確立し、1987年世界

初の振動ジャイロの量産を実現した。

〔 2 〕手振れ補正技術の実用化

検知手段の課題を解決し、振動ジャイロに適した手振れ補正方式の提案と検討を行った。

補正方式の決定

手振れを抑制する場合の補正範囲の目標値を設定する際に筆者は静止撮影時の手振れと歩行もしくは車上撮影時の手振れを補正することが必要であると考えた。実験を行い歩行撮影時の手振れは最大で±6度であったので±6度以上の補正範囲を目標値とした。補正方式の中で小型化の可能性があり6度以上の補正範囲を確保できる方式としては鏡筒駆動方式が最も適しているため、この方式で実用化を行った。

課題：

- 1．手振れ補正制御を行うと民生用途で求められる操作性と操作感を損なう。
- 2．実際の量産品では使用する部品の物理特性にバラツキがある。温度変化を含めた部品バラツキの最悪の組み合わせ条件下では - 15 dB あった手振れ補正特性が - 3 dB と 1 / 10 以下になり手振れの抑制特性が殆ど出ない。
- 3．手振れ補正の抑制効果について人によって評価が分かれ最終仕様が定まらない。

解決策：

- 1．カメラボディの方向の時間的な変化を観察することによりカメラの動きが撮影者の意図による動きか手振れかを判別する撮影モード判別アルゴリズムを考案した。撮影者の意図による動きであるパンニング等の場合は手振れ補正を弱くして撮影者の意図による動きを妨害しないことにより操作性と手振れ補正との両立を実現した。
- 2．手振れ補正特性が部品のバラツキにより悪くなる理由が補正部の線材やジンのバネ定数や摩擦損などの機械定数が異なることと温度により変化することを解明した。現代制御理論のオブザーバ制御を導入し、鏡筒に加わる負荷変動を推定し、制御系にフィードフォワードすることにより負荷変動の影響をキャンセルするようにした。こうして部品がバラついていても 1 Hz で - 18 dB、10 Hz で - 38 dB の抑制率の目標値を実現した。
- 3．様々な振巾と周波数の手振れを発生させて撮影した映像を複数の被験者に見せ、特定の周波数の特定の振巾の揺動が検知できる限界値と許容できる限界値とを調べ、この結果を統計処理することにより、人間の手振れに対する感度を定量化した。この結果 1 Hz で 15 dB の抑制率が好ましい等の特性目標値を数値化することができた。この目標を満たす手振れ補正抑制特性を実現することにより、過剰な手振れ補正によ

る操作性の悪化を防ぐことができた。

〔 3 〕 振動帰還音叉型振動ジャイロと鏡筒駆動型の手振れ補正手段と撮影モード判別アルゴリズムを搭載した手振れ補正機構を搭載したビデオカメラを世界で初めて実用化した。補正範囲は $\pm 140\%$ （10倍ズーム時）と広く手振れ抑制率も1Hzで-18dB、10Hzで-38dBと大きいため、歩行撮影や車上撮影時に発生する大きな手振れも補正できた。このモデルは市場で高い評価を受け、この実用化を端緒として手振れ補正搭載ビデオカメラの実用化が相次ぎ、手振れ補正に関する研究も大きく進展した。

〔 4 〕 本研究の補正範囲の目標値は ± 6 度であり、現実的なサイズでこの目標値を満たすのは鏡筒駆動方式のみである。しかし本研究の中では補正範囲が狭い用途に適した補正方式を考案し提案した。

1．CCD 2 段階切り出し方式の考案と提案

CCDの垂直転送部を手振れ制御信号に応じて制御することにより画面の一部を切り出すことによりタテ方向の手振れを補正し、外部に接続した時間軸補正部により画面の一部を切り出すことによりヨコ方向の手振れを補正する併用方式を考案した。この方式であると解像度の劣化がないため手振れ補正による画質低下を防止できる。この方式は1991年に実用化され現在では電子手振れ補正技術のほぼ全数に採用されている。これの全てが筆者が考案、提案した基本技術、基本特許を使用している。

2．撮像板駆動方式の考案と提案

XYスライダとモータを用いてCCDやMOSの撮像板全体を手振れ補正信号に応じて機械的に移動させることにより手振れを補正する撮像板駆動方式を考案し、検討を行った。この方式は、ボディ側に手振れ補正部を設ける。このためレンズ交換式のカメラシステムに導入した場合、交換レンズ群を含めたトータルシステムの手振れ補正部が1個で済み総重量、総コストが削減できる。この方式は2003年に実用化され現在では1眼レフデジタルカメラに搭載され市場で好評を得ている。この方式は全て筆者の考案した基本技術、基本特許を使用している。

以上、カメラの手振れ補正方式の振動ジャイロ検出方式を考案し、提案と検討を行った。手振れ補正の実現を阻んでいた検出方式として新しい構造の振動ジャイロを考案し、世界初の量産化を実現し、検出方式の課題を克服した。現在、振動ジャイロ検出方式は光学補正方式の全てと電子補正方式の一部に採用される基幹技術であり、全て筆者の基本特許を使用している。また6度以上の手振れの補正範囲の大きな用途向けに鏡筒駆動方式を実用化し、世界初の手振れ補正機能を実現した。実用化した撮影モード検出アルゴリズムは現在でも手振れ補正技術に採用されている主流技術である。

本研究当時は歩行撮影の手振れ補正を目標としていたため、1度以下の補正範囲の小さな補正方式に関しては提案しただけで実用化の研究は行わなかった。しかし、その後の手振れ補正の普及によりサイズとコストの面から補正範囲の小さな補正方式が現実的であることがわかってきた。本研究はその後にも研究が継続され補正範囲の小さな方式として内部レンズ駆動方式が実用化された。この方式はビデオカメラに搭載された後デジタルカメラに搭載され市場で好評を得た。今後、デジタルカメラへの搭載がさらに進むことが期待できる。

また本研究で考案され提案されたCCD切り出し方式は、現在電子補正方式の主流技術となっている。また撮像板駆動方式は、ごく最近1眼レフ型デジタルカメラのボディ部に搭載され始めたばかりであるが、内部レンズ駆動方式の搭載困難なカメラ付携帯電話に今後搭載されることが考えられる。光学補正方式は機械的に駆動するため手振れの残留成分が残ってしまう。しかし最近登場した演算処理補正方式により残留成分を補正することができる。このためデジタルカメラの演算処理能力が高くなれば演算処理補正方式との併用方式が登場し実質的な手振れ抑制率が高まることが期待できる。

最後に手振れ補正機能搭載カメラを筆者が世界で初めて実用化してから18年経つ。この実用化を端緒としてビデオカメラのみならずフィルムカメラ、デジタルカメラに手振れ補正機能が搭載され世に普及した。これらのほぼ全数が筆者が考案し提案した基本技術、基本特許を採用していることは、本分野に携わる研究者として、また発明家として望外の喜びである。

第2部 光ディスクの情報セキュリティ上の脆弱性改善の研究

第1章 序論

1.1 本研究のディスク型記録媒体の技術史上における位置づけ

紀元前3000年に文字が発明され、その後パピルスが発明され、人類初の記録媒体が実現した。その後4000年間は文字を何らかの記録媒体に手書きで記録する必要があったため、製作数が少なく書物は一部の学者もしくは宗教者のものであった。

書物が大衆化するのには印刷技術が発明されてからである。1440年ごろ、グーテンベルグ¹⁾が活版技術を発明した。この方式は金属活字からなる活版を1組製造し、活版にインキを塗り紙に転写するもので、出版物を大量に製造することが可能となった。この発明により聖書が大衆のものとなり宗教改革運動にも大きな影響を及ぼしたとされている。

文字の書物の大衆化を実現したのはグーテンベルグであるが、音楽の大衆化を実現したのはエジソンである。1877年にトーマス・エジソン²⁾がレコードを発明〔208〕し、音楽をアナログレコードに記録できるようになった。エジソンが実用化した当初のレコードは錫箔を巻いた円筒形であったが、彼は円盤式レコードも発明し特許明細書に記載している〔228〕。この方式は音声の強弱を針の振動の強弱に変え錫箔に溝を記録するアナログ振巾変調方式であった。1887年にエミール・ベルリナー³⁾が実用化した円盤式レコードへと改良された。円盤型レコードは音楽信号の強さに応じて、円盤形状の原盤の記録面に溝を刻むことにより原盤を作成する。この原盤をマスター型として樹脂を成形することにより数千枚から数万枚のレコードを大量生産することが可能となった。この発明はグーテンベルクによる活版技術の発明と同様に大量の音楽の普及に貢献した。円盤形は収納しやすく、複製が容易なことから円筒形レコードに変わって一般消費者へ普及した。これはSPレコード（毎分78回転、材料：シュラック）に発展した。その後SPレコードは収録時間が短いことから1948年に合成樹脂からなり記録容量の大きなLPレコードが登場し、本格的に普及する。アナログ方式では、S/N比は60dB、分離比は30dBが限界であった。

図201に示すように1960年にHe-Neレーザー〔204〕が発明され1960年12月にジャバン⁴⁾が発振に成功した。レーザーは様々な技術に応用され新しい技術を生み出したが、ディスク記録技術にも応用され記録容量が飛躍的に向上した。このHe-

1) グーテンベルグ (Johannes Gensfleisch zur Laden zum Gutenberg : 1390年代 - 1468年) ドイツ

2) トーマス エジソン (Thomas Alva Edison : 1847年 - 1931年) 米国

3) エミール ベルリナー (Emil Berliner : 1851年 - 1929年) 米国

4) ジャバン (A. Javan)

Ne レーザーを用いて円盤上に記録されたピットを光学的に読み取る方式のビデオディスクがフィリップスにおいて発明され、1972年9月に提案〔206〕され1976年に完成〔205〕し、1978年に発売〔207〕された。この方式は再生光の波長をとすると反射膜に $\lambda/4$ の凹みのピットを形成し円周上に配置することにより、情報を記録する革新的な技術であった。レーザーをレンズにより反射板上に収束し、反射膜からの反射光を受光することにより、記録情報を再生する。その後、この記録技術を用いて音声をPCM変調したデジタル信号を記録するCD〔203〕が1979年にフィリップス社から発表され、1982年発売された。デジタル化に伴いSN比90dB、分離比90dBが実現した。

このCDは波長780nmを用い直径120mmのディスクに記録する方式で記録容量は780MBであった。1996年に発売されたDVDは同じ直径のディスクを用いるが、レーザー波長が789nmから650nmと0.83倍になったためビームサイズが面積比で0.39倍になった。対物レンズのNAが0.45から0.6に1.33倍になった。変調方式やエラー訂正方式を改良されたこともあり、記録容量がCDの7倍の4.7GBに拡大された。その後波長が短い青色レーザーの実現に伴い、2004年にはBD (Blu-ray Disc) 規格が規格化され記録容量が27GBに拡大されDVDの5倍の記録容量が実現した。

アナログディスクにおいては、基板材料の改良により容量が拡大した。これに対して光ディスクにおいては、レーザーの短波長化により容量が拡大した。再生専用のROMディスク型記録媒体¹⁾の歴史は、記憶容量の拡大であるといえる。容量の拡大に注目されがちであるがCDからDVDへの進化に伴いそれまでにない新しい機能が追加されている。

論理構造的に見ると従来のROMディスクには情報セキュリティの面で脆弱性があった。ROMディスク型記録媒体は低コストで大量生産が可能のため大量のソフトの流通をもたらした映像・音楽文化の大衆への普及を可能とする一方で、複製の容易さから海賊盤の大量生産も可能となった。1979年に発表されたCDにおいては情報セキュリティへの対策が全くされていなかったため、1980年代から1990年代にかけ不法コピーや海賊版が横行し、著作権が侵害された。このため著作権者側から1995年に登場する新しいメディアであるDVD規格に対して情報セキュリティの脆弱性を改善させる要望が出された。脆弱性を改善させる方法として、各々のディスクに識別情報を記録する方式が一つの有効な方法であった。しかしROMディスクに記録できなかった。

物理構造的に見ると、レコードを含めたROMディスクは登場してから100年以上、再生専用であり、データを記録することができなかった。しかし1995年に筆者により表面張力記録が発明されこの記録原理を用いてROMディスクに記録するBCA (Burst

¹⁾ ROMディスク: Read Only Memory の略で再生専用のため記録することはできない。型をつくり樹脂を成形することにより量産。信頼性を上げるため反射率の高いアルミ等の金属により反射膜を形成。

cutting Area) と呼ばれる記録フォーマットが1996年に規格化および実用化されてからDVD規格やBD規格やHD-DVD規格のROMディスクにデータを記録し、通常の光ヘッドで再生することが可能となった。

さて、著作権者側からの要望に応えるためDVD規格では2つの新しい技術が採用されている。一つは館林誠等によって発明されたCSS (Contents Scrambling System) である。これはROMディスクの記録情報であるコンテンツに暗号をかけて、コンテンツを保護するものである。このためDVDのデータをそのままコピーしても映像を再生することはできない。

もう一つはBCAである。これは筆者により1995年に発明〔206〕された表面張力記録方式により記録される領域で主情報記録領域とは全く異なるピット形状、変調方式、エラー訂正方式で記録された副記録領域である。BCAは188バイトと記録容量は小さいが、ROMディスクにも記録でき、記録されたデータが改ざんできないことに加えて一般のディスクドライブでは記録できないため情報セキュリティが高いという特徴がある。このため、コピー制限用の情報であるディスク毎に異なる個別識別情報の記録等に使用されている。BCAはDVDの記録型のRAMディスクと再生専用型のROMディスクの両方に同一のフォーマットで定義されておりRAMディスクでは著作権保護規格であるCPRM(Content Protection for Recordable Media)規格とBCAを用いて、デジタルコンテンツの「1回きりのコピー制限」が実現した。またROMディスクにおいては物理識別情報をBCAに記録することにより海賊版の防止が可能となった。BCAによりディスクメディアとしては世界で初めて情報セキュリティ機能が備わることになった。こうして情報セキュリティの脆弱性を大幅に改善することができた。本研究では、BCAの記録フォーマット、記録方法、応用を述べるとともに、BCAの記録原理である表面張力記録について考察する。

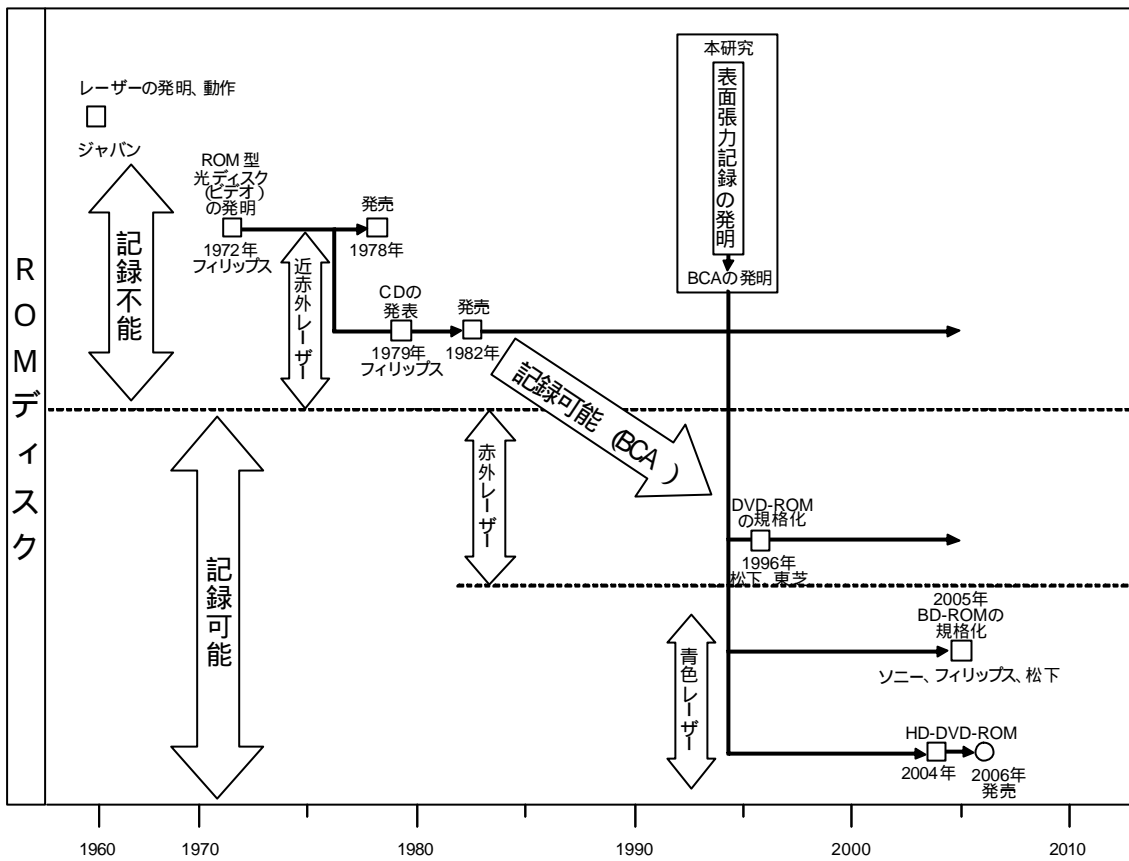


図 2 0 1 光ディスクの技術史における本研究の位置づけ

1.2 本研究の背景

1.2.1 セキュアな記録領域の必要性

アナログの映像音響データを複製する場合は複製に伴い品質の劣化がある。従って複製回数が増えると品質が劣化し複製品の価値が低下するため、自動的に複製に一定の歯止めがかかる。これに対し、デジタルの映像データや音声データを複製する場合は複製を行っても品質は全く劣化しない。このため元のコンテンツと全く品質の変わらない大量の複製品が世に出回ることになり、著作権が侵害されてしまう。従って1995年当時、次世代のディスクであったDVDには複製を禁止するもしくは特定の回数だけに制限する新たな仕組みを設けることが著作権団体¹⁾から求められた。

まず複製を禁止する方法としては、ROMディスクに導入されたのはCSSである。これは図202に示すようにディスクに記録する映像情報に暗号をかける方法である。暗号としては共通鍵方式を使っており、再生機のICの中に入っている秘密鍵(共通鍵)を用いて暗号を復号することにより映像信号を再生できる。ディスクの中のデータをそのままパソコンに複写しても暗号がかかっているため再生できない。またDVD-RAM、DVD-R等の記録型ディスクにコピーしても映像信号を再生することはできない。こうして共通鍵が破られない限り不正コピーが防止される。しかしこの方式は一般消費者の持っている光ディスク記録装置を用いて複製されるCasual Copyを防ぐ機能しかない。工場用の原盤作成装置を用いて元のディスクと全く同じデジタル信号を原盤レベルで複製された場合、海賊盤が製作されてしまう。このようなセキュリティ上の脆弱性があった。

この脆弱性を克服するためBCAを用いて海賊盤ディスクの作動を防止する方式を考案した。この方式はまず2度と同じマークを作成できないような物理的なマークを無作為かつ意図的につける。次にこの意図的なマークの物理的特徴を工場で測定する。そして主記録領域とは位置や変調方式の異なる副記録領域であるBCAにこの物理的特徴を暗号化して記録する。このディスクを再生装置で再生する時、意図的なマークの物理的位置等の物理特徴情報を測定し、正規物理特徴情報と照合し、一致しているか確認することにより海賊盤を排除する。この場合マークの物理的特徴は1枚毎に無作為に設けられるため、同じ物理的特徴のマークを複製することはできない。この特異なマークの物理的特徴が副記録領域であるBCAに記録されている。正規ディスクの場合、両者が一致するため正常に再生される。海賊版ディスクの場合、元のマークと全く同一のマークを生成することができない。このため複製したマークの物理的特徴情報と照合用の物理特徴情報が一致しないため再生は防止される。このような物理マーク方式の海賊版防止方式が筆者等により提案され実用化されている。

¹⁾ 著作権団体：映像の場合は全米映画協会(MPAA: Motion Picture Association of America)、音楽の場合は全米レコード工業会(RIAA: Recording Industry Association of America)

著作権保護機能としてDVD-RAMのような記録型ディスクに導入されたのは一代目にコピーを制限する“Copy Once”(デジタル1 Copy)機能である。これは映像情報であるデジタルコンテンツをDVD-R、DVD-RAM等の記録型ディスクに記録する場合、事前に記録型ディスクに固有のIDを記録しておきこの固有IDから生成される固有ID独自の暗号鍵を用いて、デジタルコンテンツを暗号化した暗号を記録型ディスクに記録する。

再生機側では、この記録型ディスクの固有IDを読み取り、この固有IDから固有ID独自の復号鍵を生成し、この復号鍵により記録ディスクの中の暗号化されたコンテンツを復号することにより映像信号を再生する。もし記録型ディスクの固有IDが例えば「001番」で、映像コンテンツが同じ固有ID「001番」で暗号化されていた場合は、両者の固有IDが同じであるため正常に再生される。しかし、この一旦記録された第1のディスクの暗号化された映像データを他の媒体である第2の記録型ディスクにそのままコピーすることは技術的に可能である。この場合は、第1のディスクの固有ID「001番」と第2のディスクの固有ID例えば「002番」が異なることになる。第2のディスクを再生しようとする、再生機側では第2のディスクの固有IDである「002番」から復号鍵を生成し、この復号鍵で暗号化された映像コンテンツの暗号を解こうとするが、この暗号は第1のディスクの固有IDである「001番」から生成された鍵で暗号化されているため、鍵が一致せず、復号することはできない。こうして第2のディスクに不正にコピーされた映像は再生できないため不正コピーが防止される。

コンテンツに“Copy Once”の識別子が入っている場合、1枚のディスクにしかコピーされないため、著作権が保護される。このCopy Onceが実現するには2つの条件がある。1つは暗号生成用の暗号鍵が破られないこと。もう一つは各々のディスクの固有IDが改ざんされないことである。固有IDがユーザー側で改ざん可能であると、第2のディスクの固有ID「002番」が「001番」に変更されてしまう。すると2世代目のコピーをされた第2のディスクの暗号を複製し映像データを再生することができる。固有ID003番のディスクも同様にコピーできるため、事実上無限の2世代コピーが可能となり、大規模の著作権侵害を許すことになる。

従って改ざんされないセキュリティの高い固有IDの記録方法が記録ディスクに求められた。この固有IDのようなセキュリティの高い情報を記録するためのセキュアな副情報記録領域が求められた。

ROM型ディスクにおいては工場設備でアルミ等の金属反射膜に記録可能な副記録領域が求められており、記録型(RAM)光ディスクにおいては改ざんされにくい副記録領域が求められた。そしてこの2つの副記録領域はともにDVD規格であるため、ROM規格もRAM規格も全く同一の記録フォーマットである必要があった。

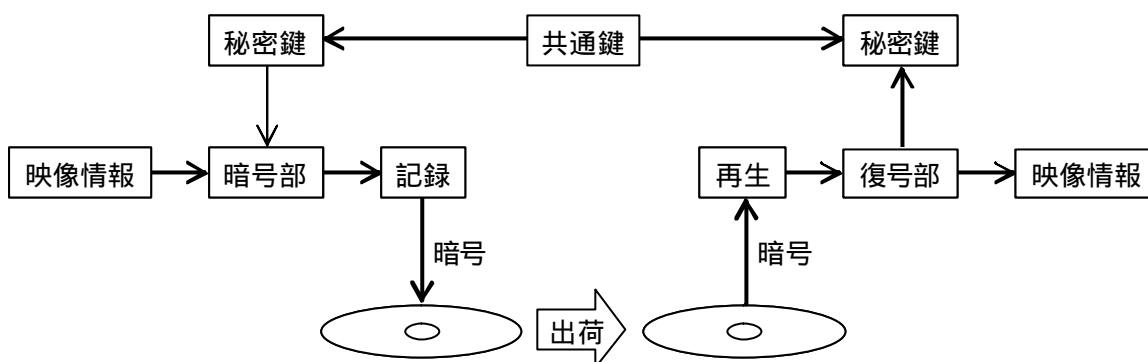


図 2 0 2 CSS (Contents Scrambling System) の動作原理

1 . 2 . 2 セキュアな記録領域に求められる条件と本研究による進展

この副情報記録領域がセキュアであるには、

(1) 一般消費者向けの DVD - R、DVD - RAM の記録装置で記録改ざんできないこと。

(2) 一般消費者向けの記録装置を簡単に改造した装置で記録又は改ざんできないこと。が重要である。

ディスクの量産を実現するには、

(3) 記録容量は最低数十バイト。公開鍵暗号化を考えると 1 2 8 バイト以上あること。

(4) 安価に記録できること。

(5) 工場で高速 (追加時間 4 秒 / 枚) に記録できること。

(6) データの信頼性が高いこと。

が重要である。

再生装置を低コストで実現するには、

(7) 通常の光ヘッドで再生できること。

(8) 記録ディスクと ROM ディスクとも同じ記録フォーマットであること。

(9) 新たな再生回路が不要なこと。

が求められる。

以上の要求を全て満たす副記録領域を実現する技術は従来なかった。

例えば内周部に磁気記録領域を設けて、副記録領域とする方式も提案されたが磁気記録の場合、書き替えができるため改ざんが容易であり条件 (2) を満たさなかった。また再生には磁気ヘッドが余分に必要なため、条件 (7) を満たさなかった。記録ディスクの内周部に特別な記録領域を設けて、特殊な変調で副情報を記録する方法もあったが、ROM ディスクで同じフォーマットで実現できないため、条件 (8) を満たさなかった。従来技術で 9 つの条件全てを満たす方式は提案されていなかったため、光ディスクのセキュリテ

イ面の脆弱性の改善は進んでいなかった。この脆弱性を改善する要素技術としてBCA (Burst Cutting Area) を1994年に筆者が考案し、DVDフォーラムに1995年に提案した。

この方式の最大の特徴は、筆者により考案された“表面張力記録”によりROMディスクの記録再生領域にデータを記録することが可能になった。光ディスクの技術史においてROMディスクにデータを記録するのは本方式が最初である。この方式の考案により条件の(8)のROMディスクとRAMディスクの共通フォーマットが実現した。

このBCAは1996年1月にDVDの規格作成団体であるDVD Forum¹⁾に提案され1996年8月にDVD規格に認定され、DVD規格書 Ver 1.0 [2 1 5] に記載された。

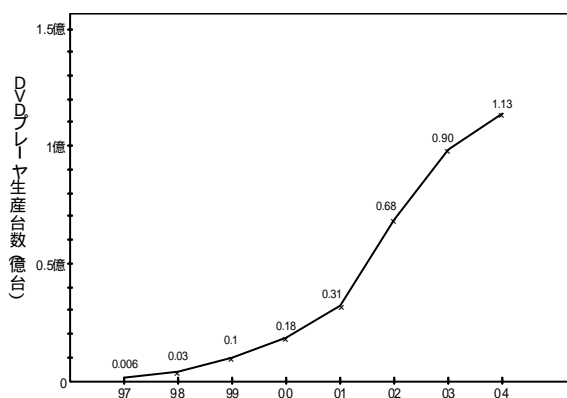


図203 DVD プレーヤの生産台数 (BCA再生機能搭載)

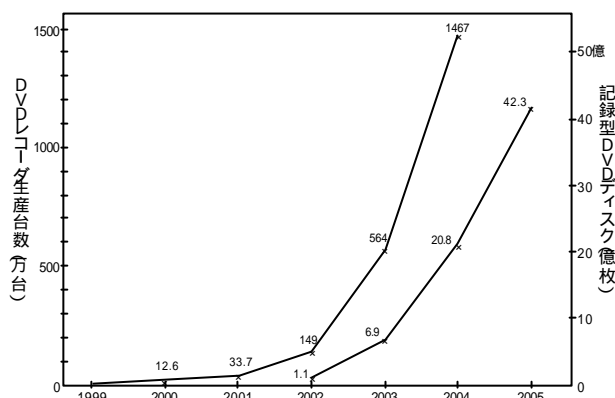


図204 DVD レコーダとディスクの生産台数

その後DVD-RAM規格、DVD-RW規格、DVD-R規格に規格化され、光磁気規格であるASMO規格、青色レーザー用光ディスク規格であるBD (Blu-ray Disk) 規格、HD-DVD規格にも採用された。つまりBCAは1996年以降に規格化された主要な光ディスク規格には全て採用されている。

BCAの発明と実用化により、まず記録型DVDを用いたデジタル映像データの記録時における“Copy Once”つまり“1回コピー”が実現した。このCPRMと呼ばれる“Copy Once”機能は米国映画業界を含む著作権保持団体に効果を認められ、“1回のデジタルコピー”が正式に承認された。これにより、デジタルTV放送を記録型ディスクに1回だけ、合法的に一般消費者が記録できるようになった。これにより日本において、2003年12月より始まった地上波デジタル放送のデジタル録画が可能となり、図204に示すようにDVDレコーダと記録型DVDディスクの普及に貢献した。この“1回コピー”した記

1) 1994年に設立されたDVDの規格作成団体、オランダのフィリップス社とフランスのトムソン社、米国のWarner社、日本の松下、ソニー、東芝、日立、パイオニア、ビクター、三菱電機の10社から構成される。(1995年時点)

録DVDを再生するためにDVDプレーヤにもBCA再生機能が搭載された。DVDプレーヤは図203に示すように急速に普及している。

またROM型DVDディスクにおいて、YAGレーザーでランダムに不特定領域に微小なマークを設けると再度同じ位置にサブミクロン精度で同じマークを形成つまり複製することが困難になる。このことに着目し、このマークを海賊版マークとした海賊版防止方式を考案した。この海賊版防止方式を採用したDVD-ROMディスクが出荷された。生産開始から5年近く経ち1億枚以上のディスクがされているが、海賊盤ディスクはまだ登場しておらず情報セキュリティは保たれている。

このようにBCAによって記録型光ディスクとROM型光ディスクの情報セキュリティの脆弱性を大幅に改善することができた。このBCAは、青色レーザーを用いた記録再生ディスク規格であるBD規格とHD-DVD規格にも採用され、より広い範囲で著作権保護に用いられようとしている。

第2章 B C Aのマーク形状と記録フォーマット

2.1 はじめに

配置、形状、変調方式、エラー訂正方式等のB C Aの記録フォーマットはROMディスクと記録型ディスクでは全く同じである。しかし両者の記録方式は全く異なる。ROMディスクの場合は、Y A Gレーザーもしくは高出力の半導体レーザーで反射層に欠落部を形成する「表面張力記録」を用いて記録する。RAMディスクの場合はアモルファス状態の相変化材料からなる記録層を結晶化つまり初期化する工程において、初期化しない領域に比べると初期化した領域の反射率が高くなる。これを利用して、B C Aマークの領域だけ初期化しないことにより反射率を相対的に低くしB C Aマークを形成する。

まず、この章ではB C Aの記録フォーマットについて述べる。

2.2 ディスクへのBCAマークの記録方法とマークの形状

表面張力記録の記録時には記録時の光ビームは光ディスクに比べて格段に大きいため、光ディスク上のトラッキング情報を読み取りながら記録することができない。

レーザービームが太いこともあり、記録時の位置精度は30～50 μm である。最盛時にトラッキングできないこともあり、半径方向に数百 μm 程度の再生マージンが必要である。そこで半径方向に長いストライプのマークを採用した。ストライプの半径方向の巾を大きくすると反射膜の残渣が残ることから最も細く記録できる巾である5 μm ～15 μm としたため、マークはバーコード状のストライプとなった。

B C Aでは、2枚の基板を貼り合わせたDVDディスクの内側に形成されているアルミ等の反射膜を半径方向に細長く除去したストライプを、記録情報に応じて最内周の円周に沿って配列し、図206と図207に示すようにバーコード状に記録する。アルミ反射膜を除去したストライプは、2枚の基板を貼り合わせて完成したDVDディスクに収束されたY A G等の高出力レーザーを照射することによって形成される。B C A領域のストライプ記録部では入射光が透過する。このため光ヘッドを用いてB C A領域を再生すると、図208のようにストライプ部でゼロレベル近くまで反射光量が落ち、通常のピットを再生した信号に比べて振幅が大きく周期が長い信号波形が再生される。この信号をローパスフィルタに通すことによって、B C A信号をDVDのピット信号から容易に弁別することができる。

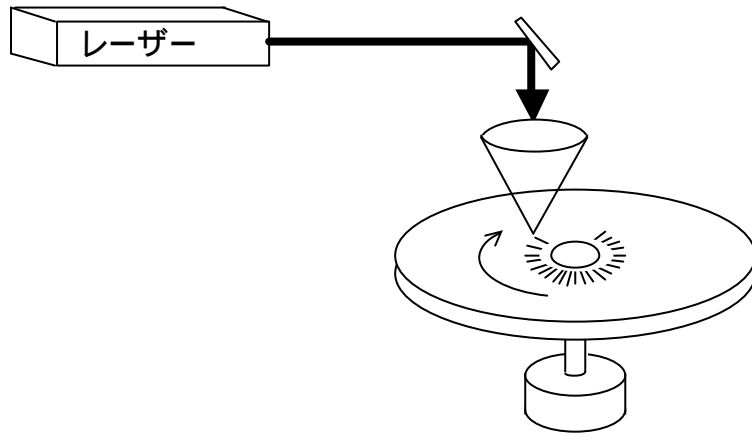


図 2 0 5 B C A の記録方法

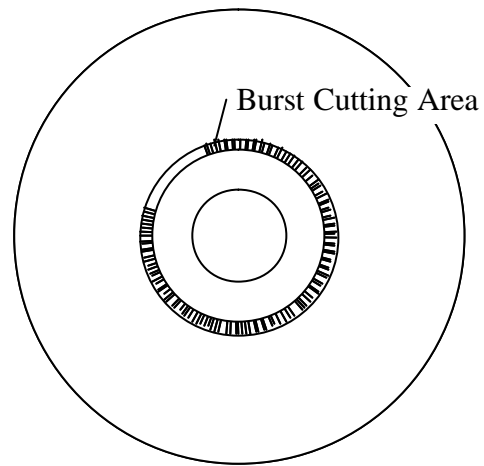


図 2 0 6 B C A の外観図 (1 8 8 バイトの場合)

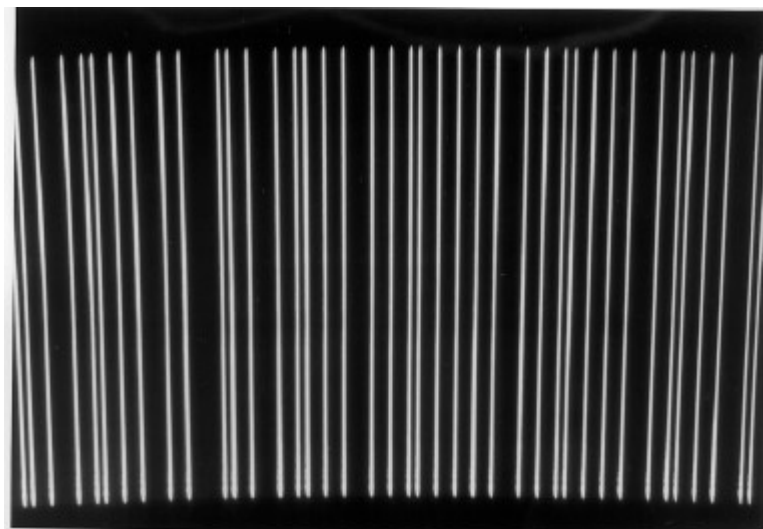


図 2 0 7 B C A ストライプの形状 (顕微鏡写真 : 5 0 倍)

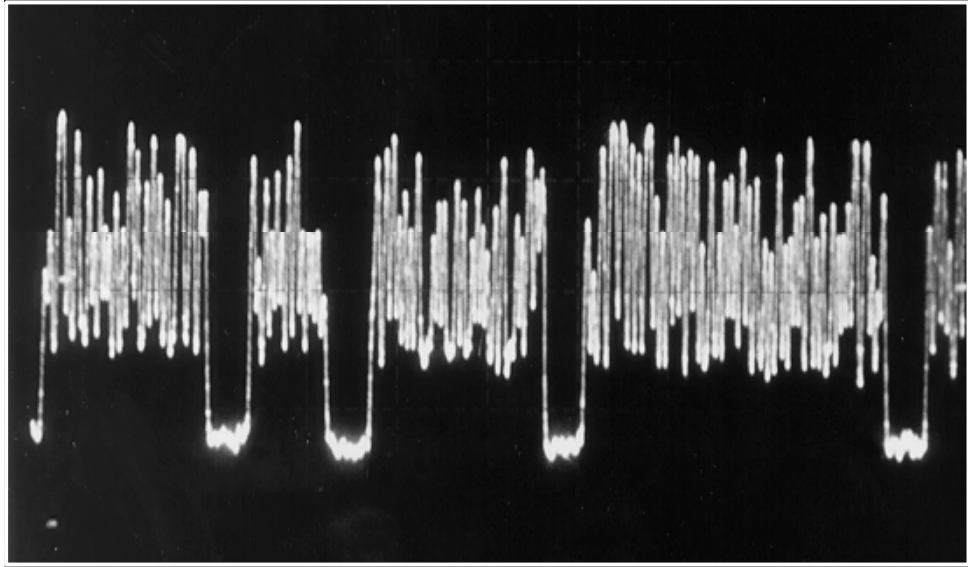


図 2 0 8 B C A の再生波形

2.3 B C Aの記録フォーマット

2.3.1 B C Aの記録位置

D V D規格では最も内周で光ディスクの半径22.3 mmの記録領域上を光ピックアップからのレーザー光がアクセスできるため半径22.3 mm以上の記録領域上のデータの再生が可能である。図209に示すように半径23.9 mmより外周部にはデータが記録されているデータ領域がある。従って22.3 mmから23.9 mmの領域には有意のデータが記録されていないため、この領域にB C Aの記録領域を設けた。この領域に記録すれば、通常の光ヘッドで再生できるため、1.2.2節の要望の(5)を満たす。

B C Aは、図209に示すように半径22.3 mmから23.5 mmの間にダミーデータを記録したピットに重ねて記録される。これは、B C A領域をアクセスした時にピット信号がないと再生装置が誤動作するおそれがあるからである。この配置により、B C Aに許容範囲内の位置誤差があっても、半径23.9 mmから外周側に記録されているコントロールデータ¹⁾領域から最悪条件においても150 μm以上の距離が保たれることになる。これによって、コントロールデータの信号がB C A記録によって劣化することが防止される。また、B C A領域では、アドレスが読めないので、コントロールデータをアクセスしようとしたときに、オーバーランしてB C A領域に突入し、位置がわからなくなるという事態も考えられる。しかしB C Aとデータ領域の間にガードバンドが150 μm以上ある。このガードバンド領域内に光ヘッドがオーバーランしアクセスしてもガードバンド領域にはアドレスが記録されているため、光ヘッドの位置がわからなくなるという事態を避けることができる。

図210に示すように、B C Aの各々のストライプは、半径方向の長さが最小1.15 mmから最大1.65 mmで、円周方向の幅が5 μmから15 μmの長方形の反射膜が除去された部分で、信号再生時は低反射部に対応する。このストライプが最大で約2000本、円周方向にバーコード状に記録されている。前述の図206に示したように、188バイトの場合は、バーコードが円周方向に最大300度の角度分記録される。

B C Aの記録領域にピットのない鏡面部が存在すると反射率が大きくなりB C Aの再生レベルが変動する。これを避けるため、B C Aを記録するように設計されているディスクの原盤は、ピットの記録を直径44.5 mmの位置より開始することがD V D規格で定められている。こうしてB C A領域内の半径22.3 mmから23.45 mmの1.15 mmの範囲には、原盤ピットとB C Aの双方が必ず存在することになるため、光ヘッドのフォーカシングが安定する。

¹⁾ コントロールデータ：半径23.9 mmから半径24.0 mmまでに記録される。その光ディスクに関する物理属性データ、例えばディスクサイズやディスクの移動等のディスクを再生する際に必要な情報が記録されている。

Address	Definition	Radius
2F000h	BCA (Burst Cutting Area)	22.3 (+0,-0.4)
	Blank Area (00h = dummy data)	23.5 (± 0.05)
30000h	Data Recorded Area	23.9 (+0,-0.2)
	Control Data	24.00 (+0,-0.2)
	Contents	

図 2 0 9 B C A のディスク上の配置

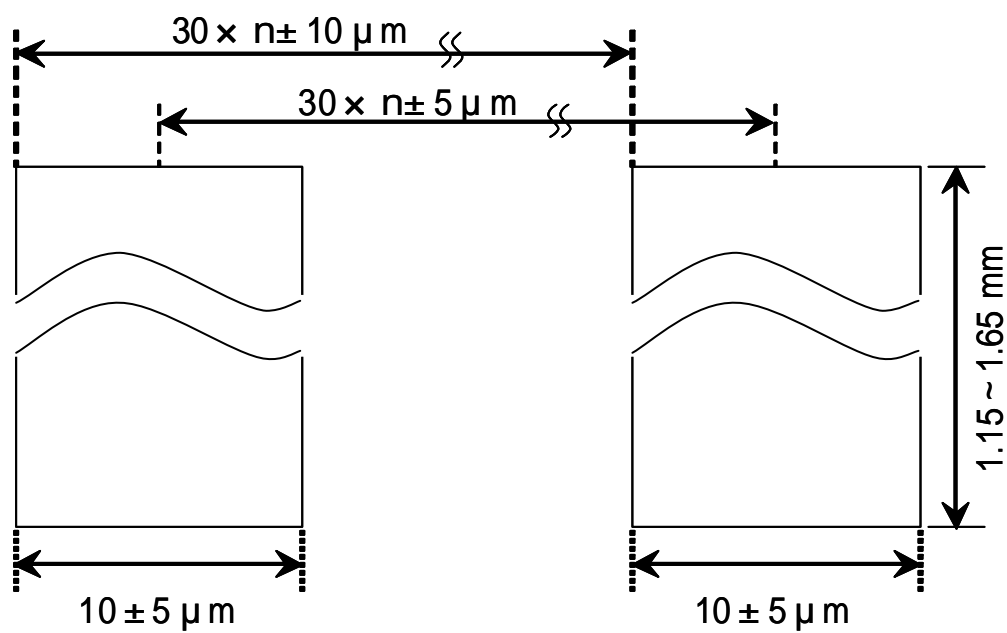


図 2 1 0 B C A ストライプの形状

2.3.2 B C Aの変調方式

D V Dの光復調回路は8 / 1 6 変調を復調することしかできない。一方セキュアな副情報記録領域に対する1 番目の要望である通常の記録装置でB C Aを記録できないようにするには8 / 1 6 変調以外の変調方式で記録すればよい。変調を変えた場合、少なくともP L L機能は使えない。そこでP L Lを用いることなく読みとれるように、変調はフェーズエンコーディング (P E) を用い、これをR Z記録する方法を考案した。すなわち図2 1 1 に示すようにデータビット“ 0 ”はチャンネルビット“ 1 0 ”に、データビット“ 1 ”はチャンネルビット“ 0 1 ”に変換し、このチャンネルビットの“ 1 ”に対応してストライプが形成される。R Z記録のパルスデューティ比、すなわちチャンネルビット幅に対するストライプの幅の比は5 0 %以下にしている。データビットの0と1の比率は5 0 %ずつであるので、B C Aを読み取るときの反射光量の時間平均の低下は4分の1以下となり、フォーカス制御は安定に動作する。

第2 1 1 図に、記録形態の1 例を示す。なお1 Tのディスク上の長さは3 0 μ mである。

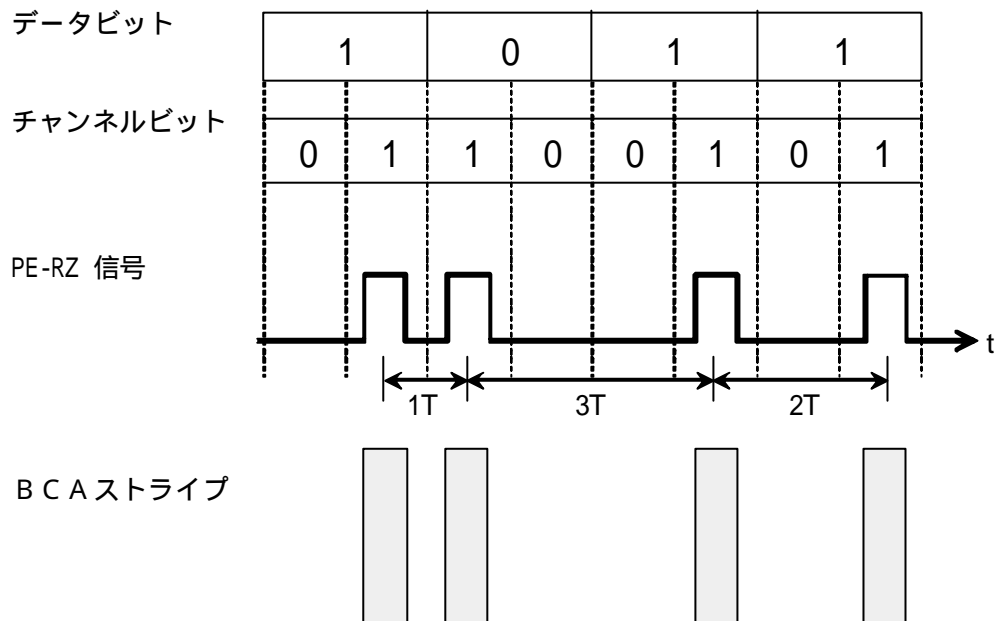


図2 1 1 B C AのP E 変調のR Z記録信号

2.3.3 BCAのデータ構造

BCAのデータ構造はプリアンブルフィールドとデータフィールドとポストアンブルフィールドの3つから構成される。このプリアンブルとポストアンブルをデータの前後に設けることによりデータの再生がより確実になった。

BCAのプリアンブルフィールド

BCAのプリアンブルフィールドは、BCA-Synkバイト(S_{BCA})に続く4バイトの(00h)で構成されている。

BCAデータ・フィールド

BCAデータ・フィールドには n を12以下の正の整数とすると 16_{n-4} バイトの情報データ($l_0, l_1, \dots, l_{16n-5}$)、4バイトのエラー検出符号(D_0, D_1, D_2, D_3)及び16バイトのエラー訂正符号($C_{00}, \dots, C_{03}, \dots, C_{10}, \dots, C_{13}, \dots, C_{30}, \dots, C_{33}$)が、この順に記述されている。このフィールドの最初から終わりまで、各4バイトの前にBCA-Resync($R_{S_{BCA}}$)が挿入される。BCAデータ・フィールドの1列目の4バイト(l_0, l_1, l_2, l_3)は将来的な使用のために予約されている。

BCAポストアンブル・フィールド

BCAポストアンブル・フィールドはBCA-Resync($R_{S_{BCA}}$)に前後をはさまれた4バイトの(55h)で構成されている。

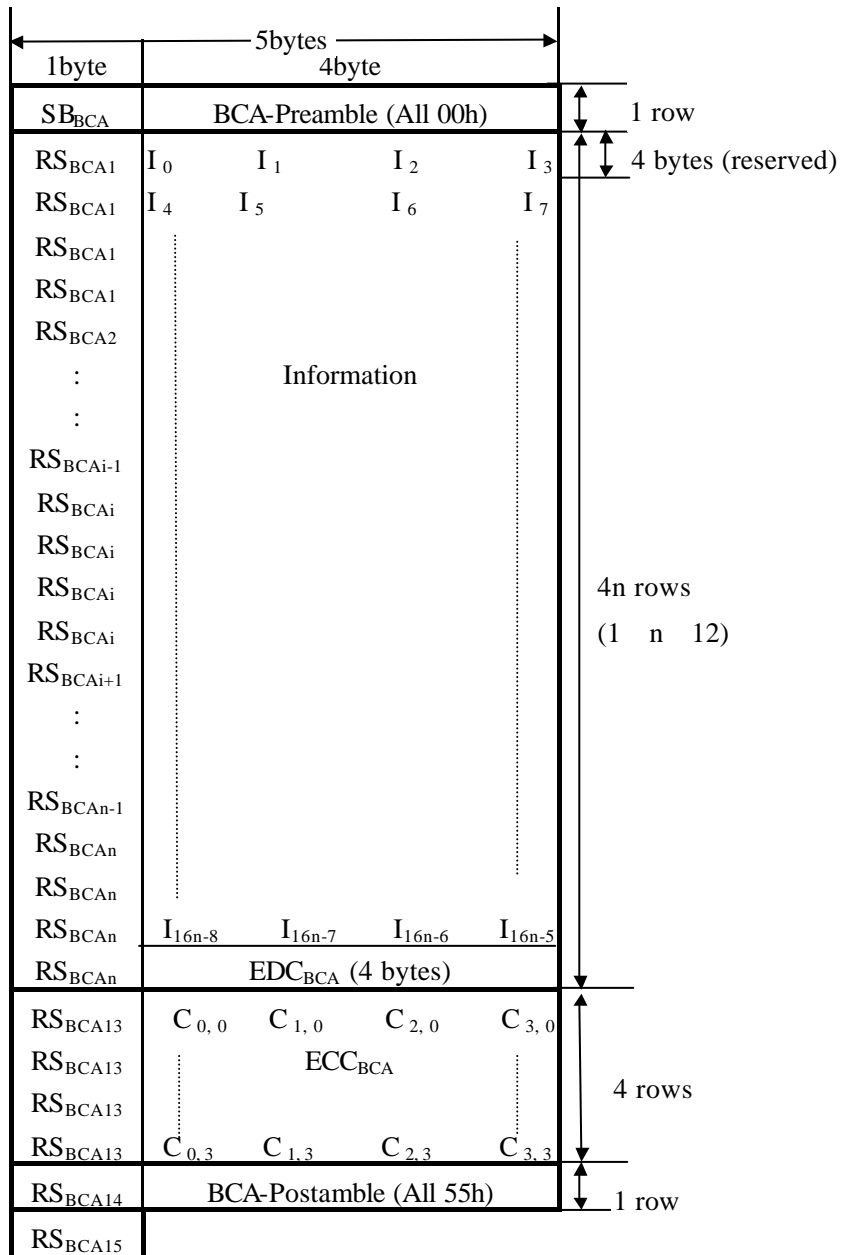


図 2 1 2 B C A のデータ構造

2.3.4 B C Aのエラー訂正方式

条件の(1)を満たすにはエラー訂正方式を主記録領域の信号のエラー訂正方式とは異なるエラー訂正方式を採用する必要がある。また条件の(9)を満たすには光ディスクドライブの再生部の1チップマイコンのソフトウェアで処理できる処理量のエラー訂正方式である必要がある。

B C Aのエラー訂正符号は、インタリーブ長4のリードソロモン符号RS(52, 48)とした。ただし、データ量が少ない場合には、残りのデータをすべて“0”とみなして、記録を省略することができるようにした。したがって、実データ量が少ないときには、演算の符号長は52シンボルであるが、実際に記録する長さは短くすることができる。

B C Aの再生信号は、再生装置に用いられている1チップマイコンのソフトウェアで、P E復調とエラー訂正の2つの処理が可能である。

B C Aエラー検出符号(EDC_{BCA})

情報データ($l_0 \cdot l_1 \dots l_{16n-5}$)には、4バイトのエラー訂正符号($D_0 \cdot D_1 \cdot D_2 \cdot D_3$)を添付しなければならない。多項式 $EDC_{BCA}(X)$ 及び $I_{BCA}(X)$ は、次のように定義する。

$$EDC_{BCA}(X) = \sum_{i=0}^{31} b_i \cdot X^i,$$

$$I_{BCA}(X) = \sum_{i=32}^{128n-1} b_i \cdot X^i,$$

ここで“ i ”は、最初を0とし、情報データの最後のバイトのLSBから最初のバイトのMSBに向かって数えたビット番号で、 b_i は i 番目のビットの値を表す。

多項式 $EDC_{BCA}(X)$ は次のように計算を行う。

$$EDC_{BCA}(X) = I_{BCA}(X) \bmod G(X),$$

$$\text{ここで、 } G(X) = X^{32} + X^{31} + X^4 + 1.$$

B C Aエラー訂正符号(ECC_{BCA})

情報データ及びB C Aエラー検出符号については、4-way インターリーブを用いたリード・ソロモン型式のECCを採用する。多項式 $R_{BCAJ}(X)$ 及び $l_{BCAJ}(X)$ を次のように定義する。

$$R_{BCAj}(X) = \sum_{i=0}^3 C_{j,i} \cdot X^{3-i} \quad ,$$

$$I_{BCAj}(X) = \sum_{i=0}^{4n-2} I_{j+4i} \cdot X^{51-i} + D_j \cdot X^{52-4n} \quad ,$$

ここで “ i_m ” は m 番目の情報データ・バイトの値を表し、 D_k は k 番目の $E D C_{BCA}$ バイトの値を表す。

多項式 $R_{BCAj}(X)$ は、次のように計算を行う。

$$R_{BCAj}(X) = I_{BCAj}(X) \bmod G_{pBCA}(X) \quad ,$$

$$G_{pBCA}(X) = \prod_{k=0}^3 (X + \alpha^k) \quad ,$$

ここで α は多項式 $G_p(x)$ の原ゼ口根を表し、

$$G_p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1 \quad .$$

である。

2.3.5 B C Aの同期方式

BCA-Sync-Byte ($S B_{BCA}$) と BCA-Resync ($R S_{BCA}$)

BCA-Sync バイト ($S B_{BCA}$) は、BCA プリアンプルの前に置かれる。BCA-Resync ($R S_{BCA}$) は、情報バイトの各4バイトの前、 $E D C_{BCA}$ の前、 $E C C_{BCA}$ の前、及びBCAポストアンプルの前後に挿入しなければならない。

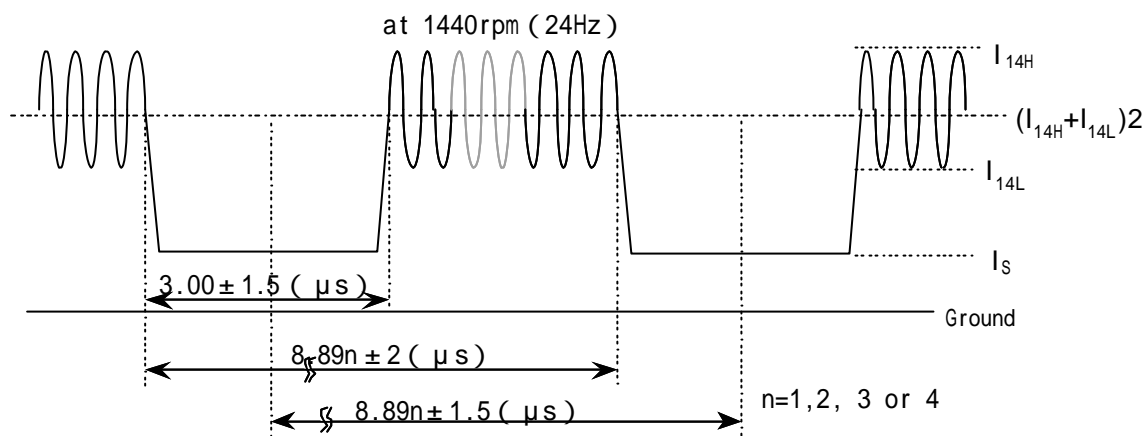
BCA-Sync バイト及び BCA-Resync は、図 2 1 3 に示すようなパターンをもつこととする。

Sync Byte / Resync	Bit Pattern											
	Fixed Pattern								Sync Code			
	(Channel bit)								(Data bit)			
	C_{15}	C_{14}	C_{13}	C_{12}	C_{11}	C_{10}	C_9	C_8	b_3	b_2	b_1	b_0
SB	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
RS_1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
RS_2	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
⋮					⋮						⋮	
RS_i	0	1	0	0	0	1	1	0				i
⋮					⋮						⋮	
RS_{15}	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
	Recorded in RZ mod.								Recorded in PE-RZ mod.			

図 2 1 3 B C Aの同期パターン

2.3.6 B C Aの信号規格 (D V D規格)

図 2 1 4 に示すように D V D 規格の信号規格を DVD Forum に提案し、 D V D 規格 V e r . 1 . 0 [2 1 5] に採用された。



Specification of Signal Level; $I_s / I_{14H} = 0.2$

図 2 1 4 D V D 規格における B C A の信号規定

2.4 まとめ

B C A のマーク形状として円周方向に比べて半径方向の長さが 1 0 0 倍長いストライブを採用した。B C A ストライブの半径方向の位置はリードイン領域の開始位置より始まり 1 2 0 0 μm 外周のデータが実質的に記録されていない位置で終わる。この配置により既存の光ヘッドでトラッキング制御することなしに安定してアクセスできデータを再生可能となった。新たな P E - R Z 変調方式によりデータ記録効率を高めた。またコンパクトなエラー訂正方式により、光ディスク再生装置内のマイクロコンピュータで信号を処理可能となった。このため光ディスク再生装置のコストは殆ど増加しなかった。コストが増えないことからドライブメーカーの賛同を得られた。また半径 2 2 . 3 mm から半径 2 3 . 5 mm の領域に B C A を記録しても既存のデータ記録領域に影響を与えないことが確認できたためディスク製造会社からも賛同を得られた。この結果 1 9 9 6 年 8 月に B C A は D V D 規格 V e r . 1 . 0 [2 1 5] に正式に採用された。

第3章 YAGレーザーを用いたROMディスクへのBCAの記録方法の検討

3.1 はじめに

ROMディスクは Read Only Memory の略で文字通り再生専用で記録できない。1887年に発明されたアナログディスクも1979年に発表されたCDもROMディスクである。版を作成し、この版を用いて樹脂等の材料を成形してディスクを製造するため1日に数十万枚の大量生産が可能である。しかし、記録する機能はなかった。円盤形ディスクは登場して以来100年以上経つが、記録できないことが常識であった。しかし、この常識は1995年に筆者によりBCAが考案され、その後、実用化されたことにより覆された。

DVDディスクの副記録領域の記録技術であるBCAが規格化されるに伴い、量産工場で安定かつ高速にBCAのマークを記録できるBCA記録装置への要望が強くなった。ROMディスク用のBCA記録装置としては高出力レーザーとしてYAGレーザーを用いる大量生産に適した方式と高出力の半導体レーザーを使う少量生産に適した方式が考えられる。本章ではまずYAGレーザーを用いる記録装置を検討する。

3.2 円形ビームのYAGレーザーを用いた記録

3.2.1 YAGレーザーの円形ビームを用いたドット記録方式の検討

まず、既存の円形ビームの光学系とYAGレーザーを用いてドット状のマークを記録する試作1号機を製作した。図215に示すようにYAGレーザーをパルス発振させ円形のビームをディスク上に照射すると円形の半径10 μ mの穴(ドット)が一定の間隔をおいてディスクの反射膜上に形成される。レーザーのパルス照射を継続させながら、まず回転モーターを止めて、ミラーモーターを回転させレーザービームを半径方向に走査させるとディスク上には半径方向に長い1本のストライプが図216のように形成される。

1本のストライプの記録が終わるとミラーモーターの回転を止め、回転モーターを矢印方向に回す。1T、2T又は3Tの分だけ回転すると、回転モーターを止め、ミラーモーターを回転させてレーザービームを半径方向に走査してストライプを記録する。こうして図216に示すようにジグザグ形状のBCAマークが光ディスク上に形成される。

図217はDVD規格のBCAストライプを記録した場合のBCAの透過光で観察した拡大図である。このドット記録方式の問題は記録時間がかかることである。1つのドット形状の穴を記録することにより、ストライプを形成するため1本のBCAストライプの記録に数百個のドットが必要となる。1秒間に数百個のパルス発振をさせると1本のストライプの記録に1秒必要となり全てのストライプの記録に2000秒つまり30分以上かかる。従って量産性の面でドット記録方式は適していない。

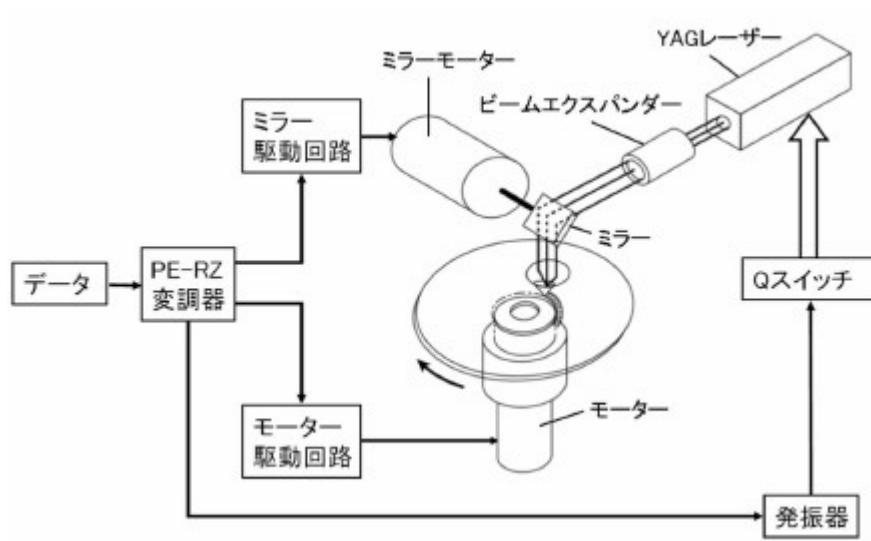


図 2 1 5 ドット記録方式 B C A 記録装置 (試作 1 号機) の構成

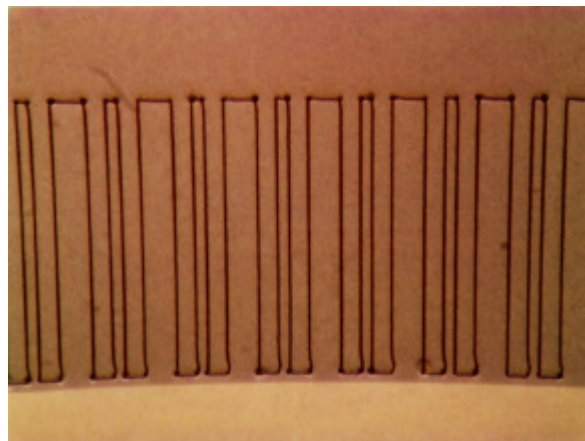


図 2 1 6 ドット記録方式の B C A 形状

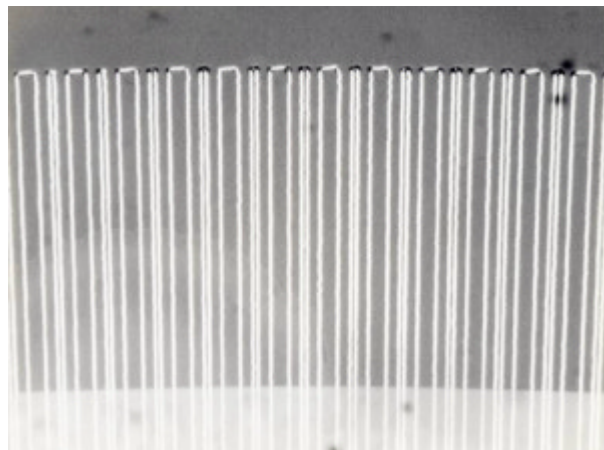


図 2 1 7 ドット記録方式の B C A パターン (透過光照明時)

3.2.2 ドット記録方式の信頼性の検討

また、信頼性を確認するため、記録したディスクに96時間、湿度95%、温度70%のライフテストの環境で信頼性試験を行ったところ、図218のように反射膜の小規模な剥離が見られた。また別のディスクでは図219に示すように反射膜の大規模の剥離も見られた。

以上、工程時間が長いことに加え信頼性が悪いことからドット記録方式は量産工程用BCA記録装置には適してないことが明らかになった。

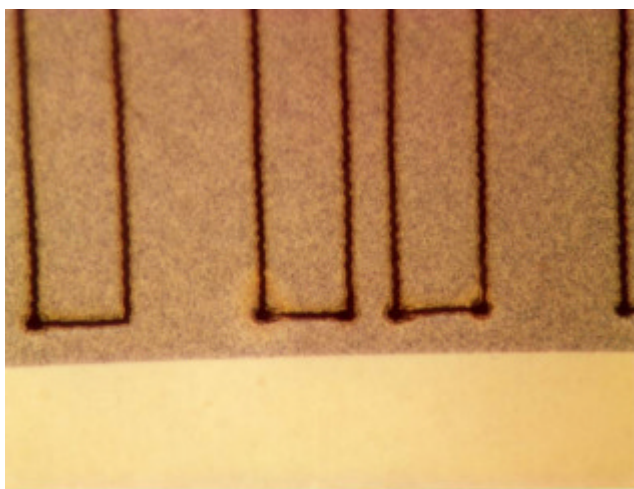


図218 ライフテスト後に発生した小規模の剥離

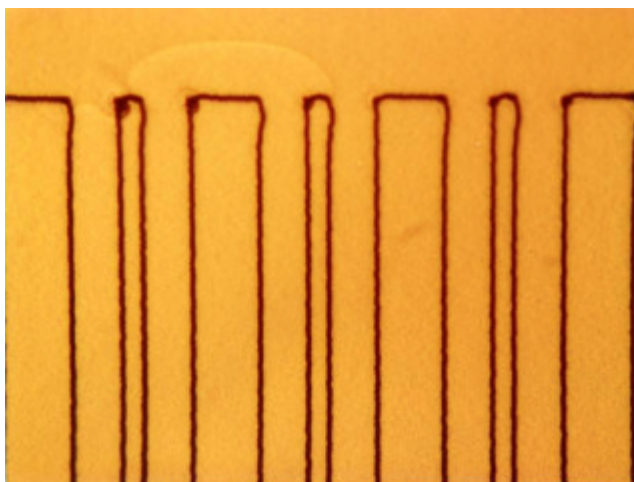


図219 ライフテスト後に発生した大規模の剥離

3.3 線状ビームのYAGレーザーを用いた記録

3.3.1 線状ビームを用いたライン記録方式の検討

ディスク工場の生産ラインではディスク1枚あたりの生産時間(タクト)はディスクの搬送時間を含めて通常4秒である。長さ1.2mmの1本のBCAストライプを記録するのに円形ビーム方式では図2.20に示すようにレーザーパルスを600回照射する必要があり、1本の記録に0.3秒必要である。これに対し線状ビーム方式は1本のストライプを記録するのに1回のパルスを照射するだけであるため、0.5msでよい。従って1パルスで1ストライプを記録する方法が好ましい。

表1.1に示すようにYAGレーザーのパルス周波数を2kHzとすると円形ビーム方式の場合、全てのBCAを記録するのに20分かかる。これに対して線状ビーム方式の場合、1.5秒間で約2000本のBCAストライプを記録することができる。1.5秒間でBCAを記録できれば、ディスク交換時間を含めても目標の4秒間の工程時間内に収まる可能性がある。

この方式を実現するには、円形のビームをシリンドリカル形(かまぼこ形)レンズにより1方向に収束させて、線状のビームに整形させる必要がある。この線状のストライプは巾が10 μ m、長さは最低でも1150 μ m必要であるため、アスペクト比は約120:1となる。図2.21と図2.22が示すようなビームエキスパンダーとシリンドリカルレンズを用いることにより、このアスペクト比を実現することができる。実際の記録マークはBCAの端部が矢じりの形状をしているが、巾はほぼ均一に記録されているため規格内に収まっている。BCA記録部のTEM観察時の巾方向の断面図(2万倍)を図2.24に示す。図に示すようにBCAストライプ領域のアルミ反射膜は除去され、表面張力により両側に凝縮されていることがわかる。

図2.25は試作したBCA記録装置の線状ビーム方式の試作2号機の外観写真を示す。図2.26は光ディスクへの記録部を示す。図2.27は光学ヘッドでディスク面を拡大する顕微鏡カメラが付加されている。試作2号機により記録したBCAストライプをライフテストにかけたところ記録による記録層と保護層の剥離もなく信頼性面での問題がないことが明らかになった。

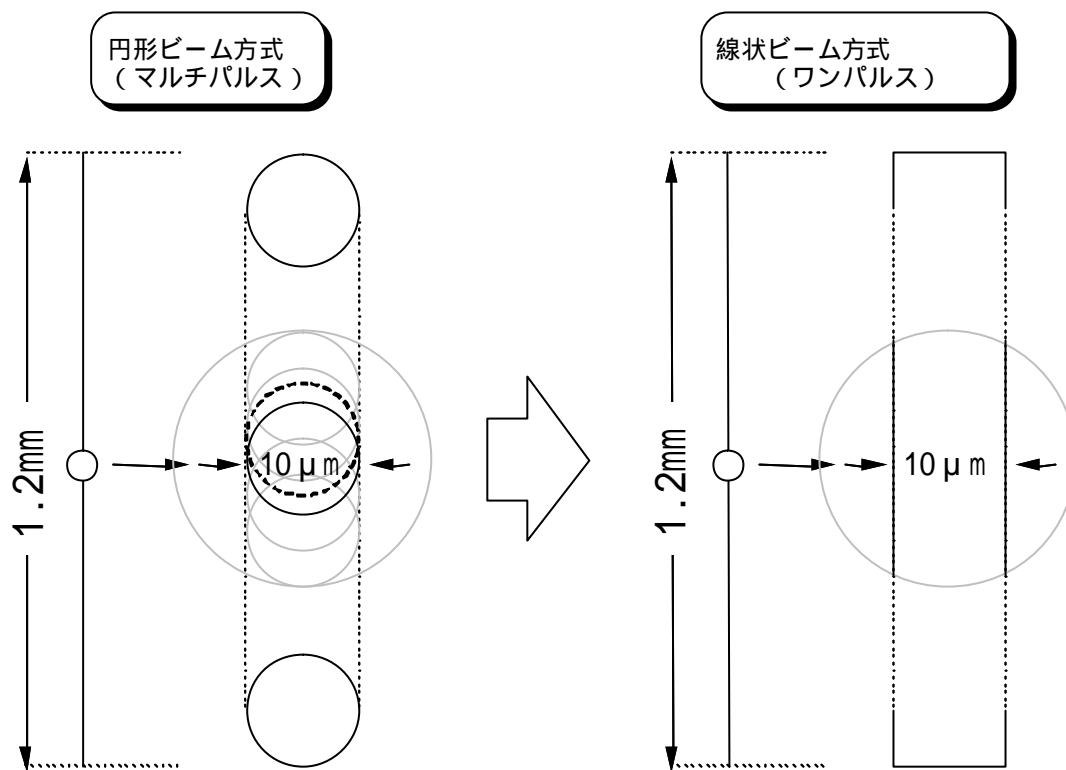


図 2 2 0 円形ビーム方式と線状ビーム方式の記録パターン

表 1 1 円形ビーム方式と線状ビーム方式の比較

	円形ビーム方式	線状ビーム方式
スポット形状	10 μm	10 μm × 1200 μm
パルス数	600パルス / 本 (Duty=20%時)	1パルス / 本
加工時間 (2kHzレーザー)	20分 (効率50%)	1.5秒
ジッター	10 ~ 15%	1 ~ 3%

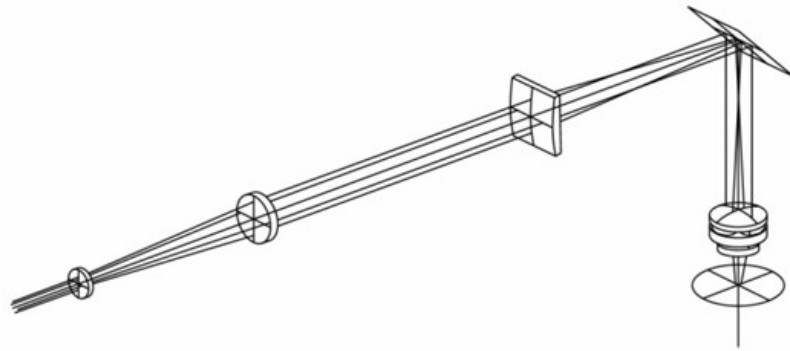


図 2 2 1 線状ビーム方式の光学系（斜視図）



図 2 2 2 線状ビーム方式の光学系（横断面図）

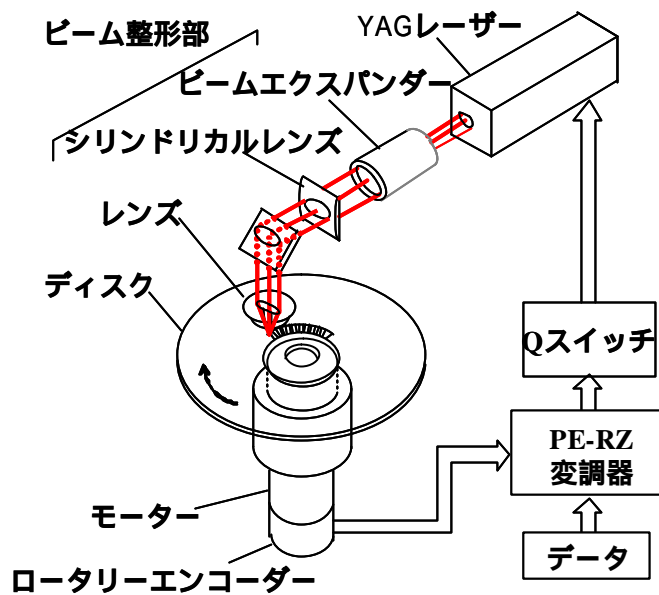


図 2 2 3 線状ビーム方式 BCA 記録装置 (試作 2 号機) の構成

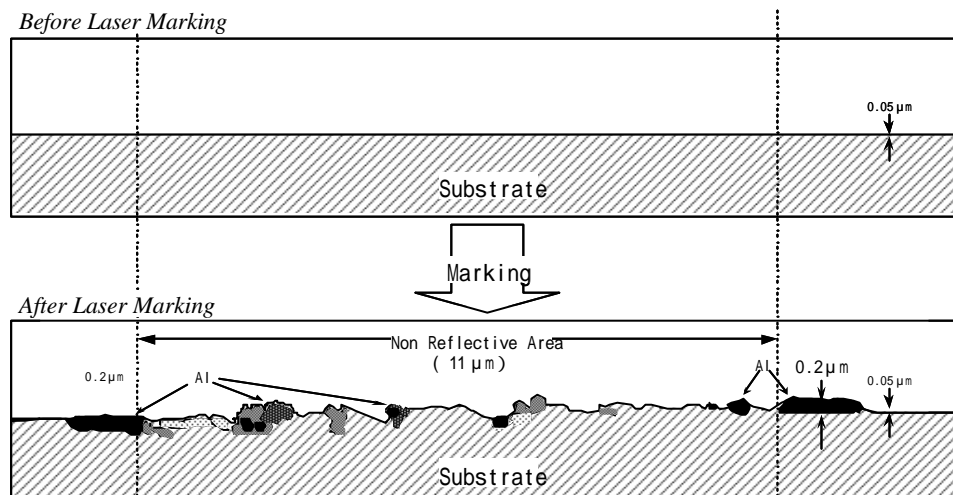


図 2 2 4 BCA 記録部の横断面の T E M 観察図 (2 万倍)

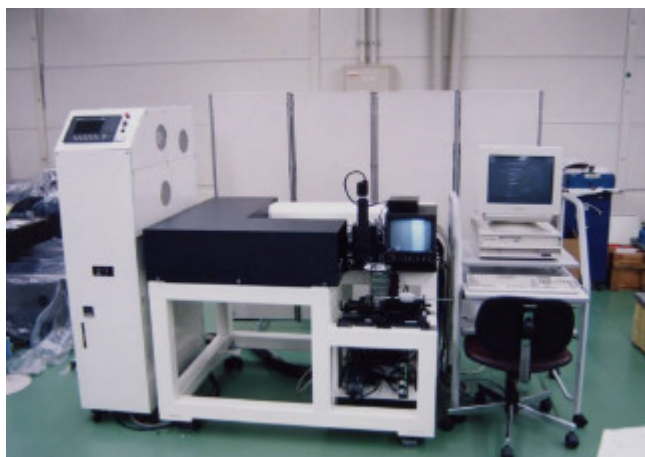


図 2 2 5 線状ビーム方式 B C A 記録装置 (試作 2 号機)

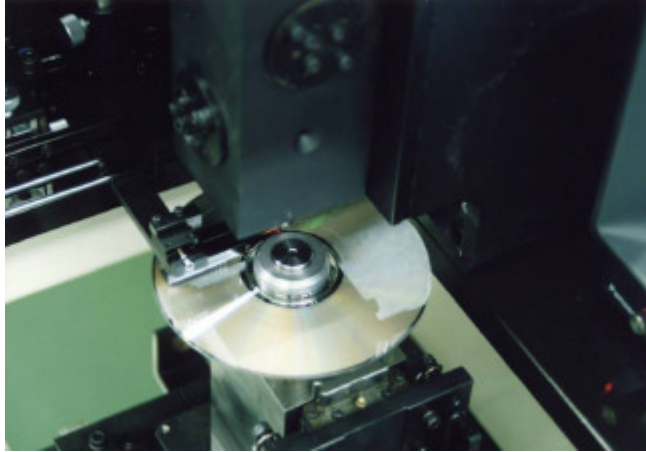


図 2 2 6 光ディスクの記録部



図 2 2 7 B C A 記録装置の光ヘッド部

3.3.2 YAGレーザーのビームプロファイルと焦点深度

BCAストライプを規格値通りに記録するにはYAGレーザーのビームプロファイルを整える必要がある。BCAストライプの大きさは $10\mu\text{m} \times 1200\mu\text{m}$ の長方形である。図228に光ディスクの記録層に結像したレーザービームのBCAストライプの長手方向の強度分布を示す。図に示すように両端の強度がやや強いが 1.2mm の長さにビームがほぼ均一に分布している。BCAストライプの外側に不要なビームが存在するが、このビームをスリットにより除去することができるため、記録されることはない。図229(a)~(k)はレーザービームのストライプの幅方向の強度分布を示す。図229(f)に示すように幅方向の強度分布の半値巾をみるとビームの幅は $5\mu\text{m}$ である。実際の工程では記録パワー不足による、かすれを防ぐため強度を強くした条件で記録するため、記録されるストライプの幅は $5\mu\text{m}$ 以上になる。BCAの幅に関するDVDの規格値は、約 $5\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$ であるためBCAの幅は余裕をもって規格値内に収めることができる。図229(f)は光ビームの焦点が合った状態を示す。図229(a)~(e)は光ヘッド側に各々 $-60\mu\text{m}$ 、 $-50\mu\text{m}$ 、 $-40\mu\text{m}$ 、 $-30\mu\text{m}$ 、 $-20\mu\text{m}$ 焦点をずらした場合のビームの強度分布を示し、図229(g)~(k)は各々 $+10\mu\text{m}$ 、 $+20\mu\text{m}$ 、 $+30\mu\text{m}$ 、 $+40\mu\text{m}$ 、 $+50\mu\text{m}$ 光ヘッド側に焦点をずらした場合の記録層上に結像するレーザーの強度分布を示す。この図から $-40\mu\text{m} \sim +40\mu\text{m}$ の範囲内であれば、レーザービームの記録膜上の強度分布が乱れないため安定して記録できることがわかる。焦点調節のマーヅンつまり焦点深度は $-40 \sim +40\mu\text{m}$ の $80\mu\text{m}$ あることがわかる。ディスクの1周分の面ブレが $\pm 40\mu\text{m}$ 以内であれば自動焦点機能なしでもBCAを記録できる。このため、実験記録装置(試作2号機)では自動焦点機能を省略することができた。

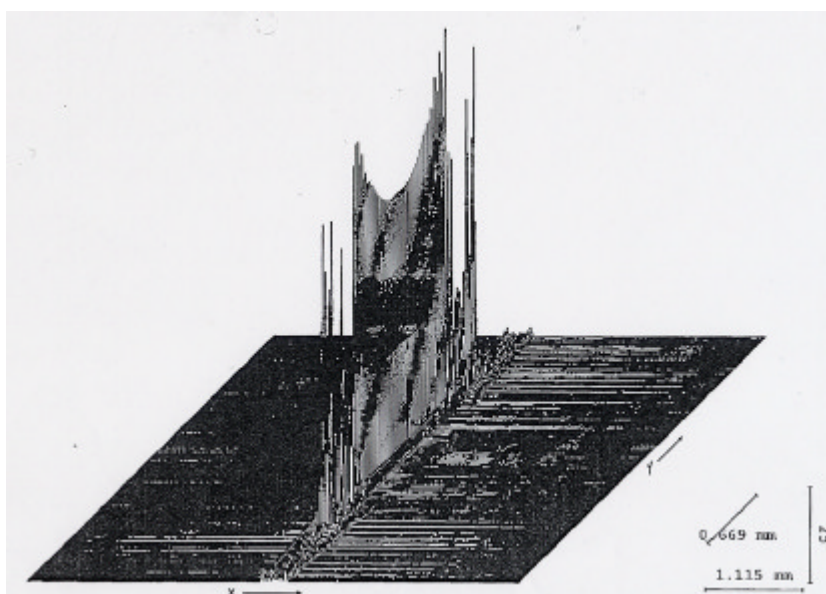


図228 楕円ビームの長手方向の強度分布

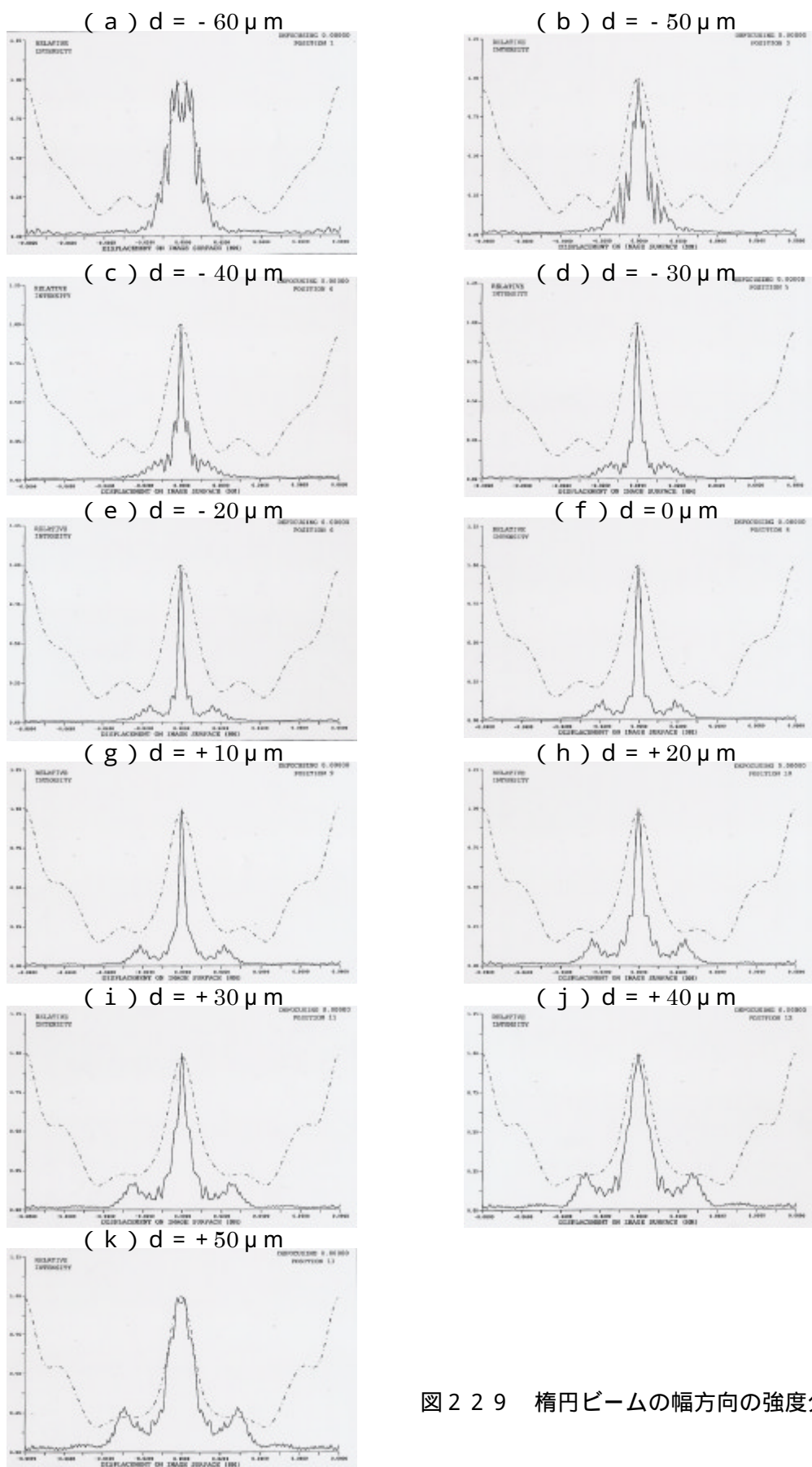


図 2 2 9 楕円ビームの幅方向の強度分布

3.3.3 YAGレーザーのパワーとBCAストライプ巾の検討

図230に示すようにレーザーパワーを下げるとBCAストライプの線幅がレーザービームの幅である $5\mu\text{m}$ に近づき、レーザーパワーを上げるとBCAストライプの線巾が増える。DVD規格ではBCAの線幅はおよそ $5\mu\text{m}$ から $15\mu\text{m}$ の範囲に入るように規定されている。図230に示すように一層ディスクにBCAを記録する場合、レーザー電流を 1.6A から 2.15A の間に設定することによりBCAの幅がDVDの規格値内に収めることができる。2層ディスクに記録する場合は1層目の記録層によりレーザー光が吸収されるため一層ディスクに比べると 1A ~ 2A 大きいレーザーを投入する必要がある。2層ディスクにBCAを記録する場合はレーザー電流を 1.8A から 2.3A の範囲に設定することによりBCAの幅をDVDの規格値内に収めることができる。以上から、BCAを記録する場合のレーザーのパワーマージンが大きいといえ、生産時の幅寸法の不良率が低いことが予想される。

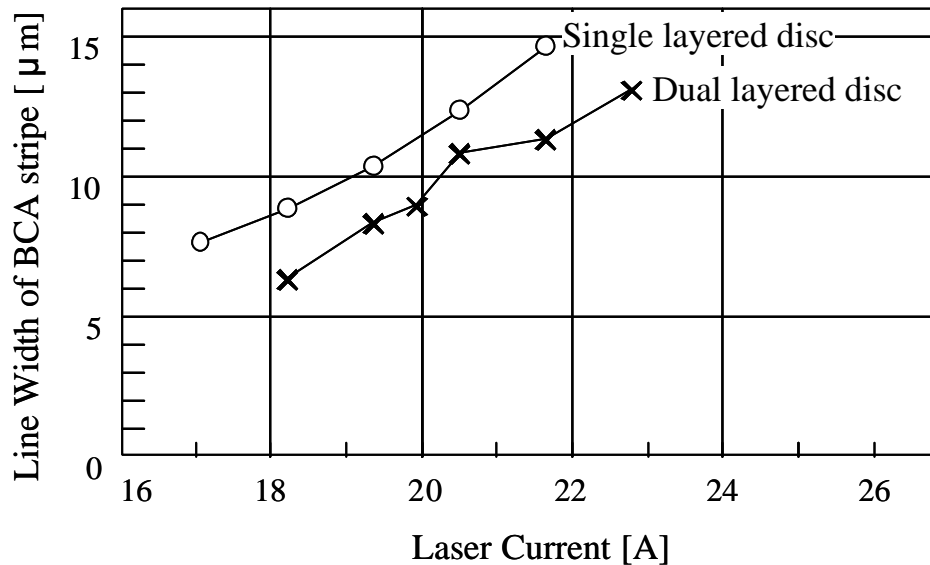


図230 レーザー電流とBCAストライプの幅の関係

3.4 高出力レーザーを用いたROMディスクへのBCA記録の原理

短い工程時間が要求される場合はYAGレーザーを用いて高速記録の方が費用効率が良い。一方長い工程時間でよい場合は高出力の半導体レーザーを用いて低速記録の方が費用効率が良い。まず高速記録の場合を説明すると、完成したDVDディスクの読み取り側の面からYAGレーザー(波長1064nm)をアルミ反射膜に収束すると、反射膜を部分的に除去することができる。これは、波長1064nmのYAGレーザー光に対して、基板はほとんど透明であるために、投入エネルギーのほとんどが反射膜上に集中し、アルミ反射膜がこれを吸収して溶融するからである。

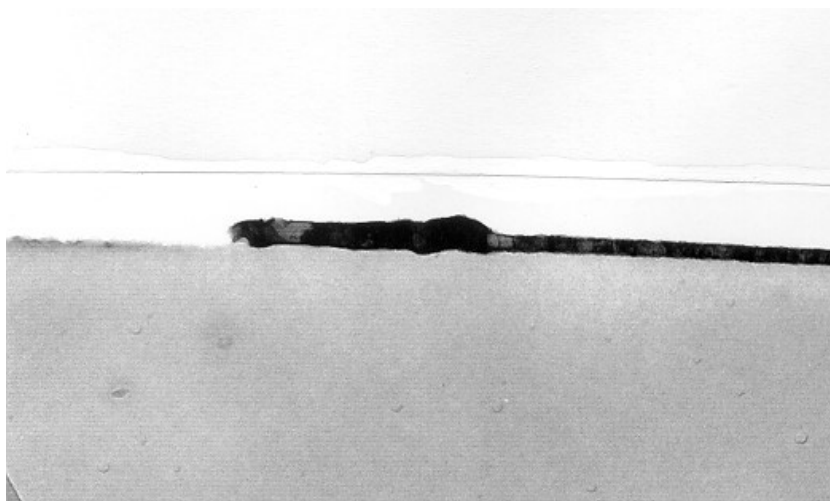
電子顕微鏡を用いて、BCA記録部の状況を観察した。図231(a)(b)(c)は、BCAストライプの凝集部の円周方向の断面の透過型電子顕微鏡(TEM)観察像である。図232は、図231(b)に対応して各部を模式的に示したものである。点線枠内が図231(a)と同じ領域を示す。

約500nmの膜厚の反射膜が、10μmの幅でほぼ完全に除去されている。ストライプ部の周辺部には1500~2000nmの厚さで数μm幅にわたって、アルミニウムが凝集している。TEM観察結果より、各部の体積を計算したところ、ストライプ形成部分から除去されたアルミニウムの体積とこの凝集部で増加したアルミニウムの体積はほぼ同じであることがわかった。

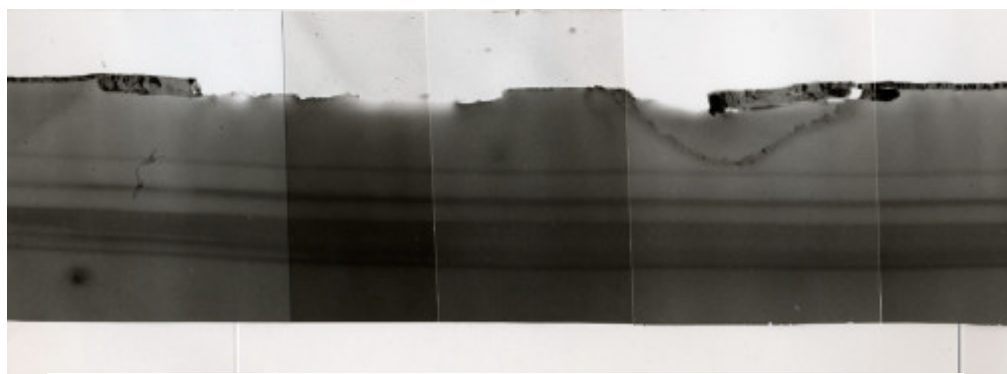
この結果から、アルミ反射膜の除去部生成される原理を述べる。図233の(a)のように、まずレーザーを照射し、次に(b)に示すように照射した部分の金属反射膜が融点まで温度上昇し溶融する。(c)に示すように液相状態になった金属が表面張力で両側に移動して盛り上がる。(d)に示すように照射が終わると溶融部分が冷却され両側が土手のように盛り上がったまま金属が固まる。こうして中央部の金属反射膜が除去され反射膜がストライプ状に除去され、マークの記録が行われると考えられる。図235(a)に示すようにDVDのような2枚貼りあわせディスクにBCAを記録した場合、反射膜が完全に除去され、BCAのストライプが形成される。しかしCDのような単板ディスクでは反射膜が分散するだけで、形状の良いBCAストライプは形成されない。従ってBCAは2枚貼り合わせたディスクでのみ起こる現象であることがわかる。DVDが登場するまでは単板ディスクであったため表面張力記録の現象が発見されなかったと思われる。その結果1995年に筆者により世界で初めて表面張力記録が発見された。2枚貼り合わせディスクの場合は上下2枚の基板で記録部が囲まれるため実質的に密閉容器が形成される。この密閉容器の中で金属が融解するため移動が制限され周囲に飛び散らないで液相状態で残ると考えられる。このため境界がはっきりした表面張力記録が起こると考えられる。金属もしくは接着層の溶融時もしくは昇華時に発声する内圧により、上下の基板もしくは接着層が変形し密閉容器の体積が増える。体積が増えるため、両側の土手のような盛り上がり部が形成されると考えられる。記録後も密閉容器の中にBCAは残るため、外部環境から隔離される。

外部の湿度等の影響を受けないためライフテストを行っても高い信頼性が得られると思われる。

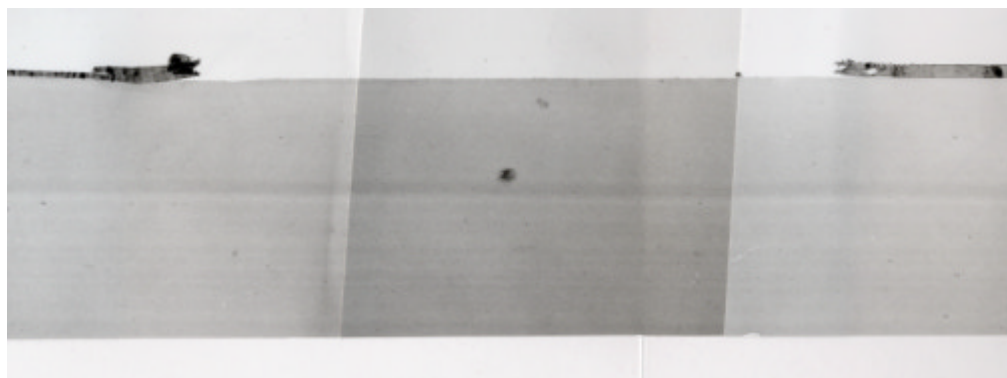
レーザー光で、この領域を読みとるとこの欠落部は反射率が低いために図234に示すようにマークの箇所のみ間欠的に反射光が落ち込んだ波形が観測できる。波形図から明らかのように、このマークを通常の光ヘッドと再生回路でデジタル信号に変換することは容易である。



(a) B C Aの凝集部



(b) 通常記録時



(c) パワーを弱くした場合

図231 B C A記録部の断面の透過電子顕微鏡写真(2万倍)

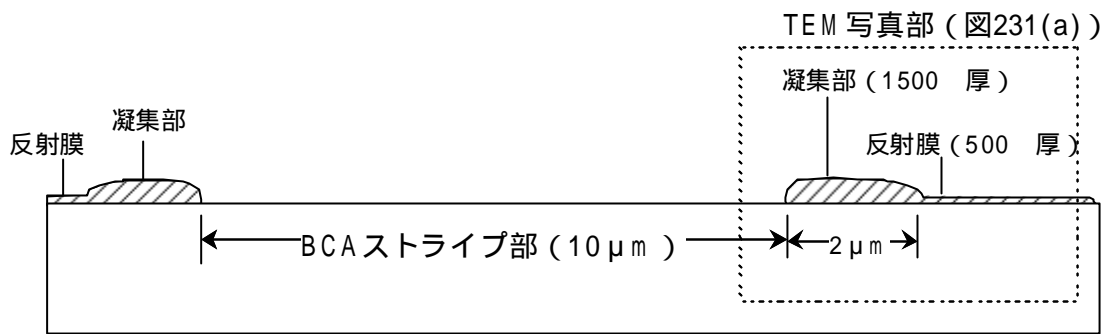


図 2 3 2 B C A の円周方向の断面の概略図

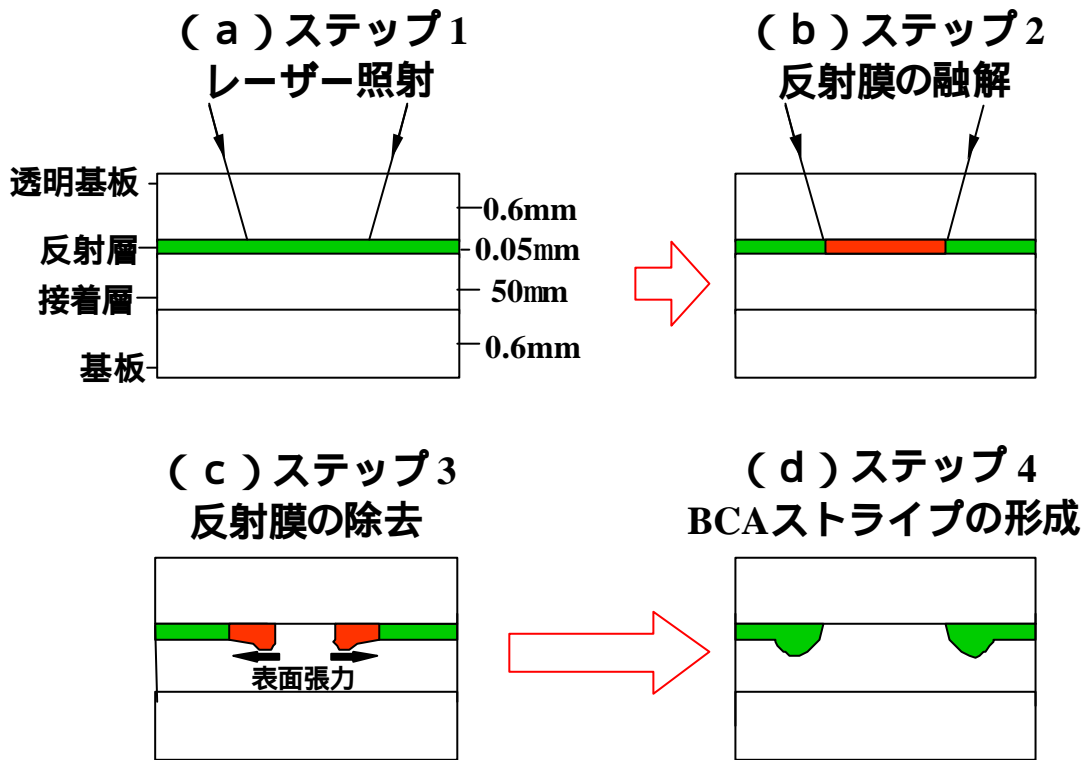


図 2 3 3 表面張力記録の記録原理

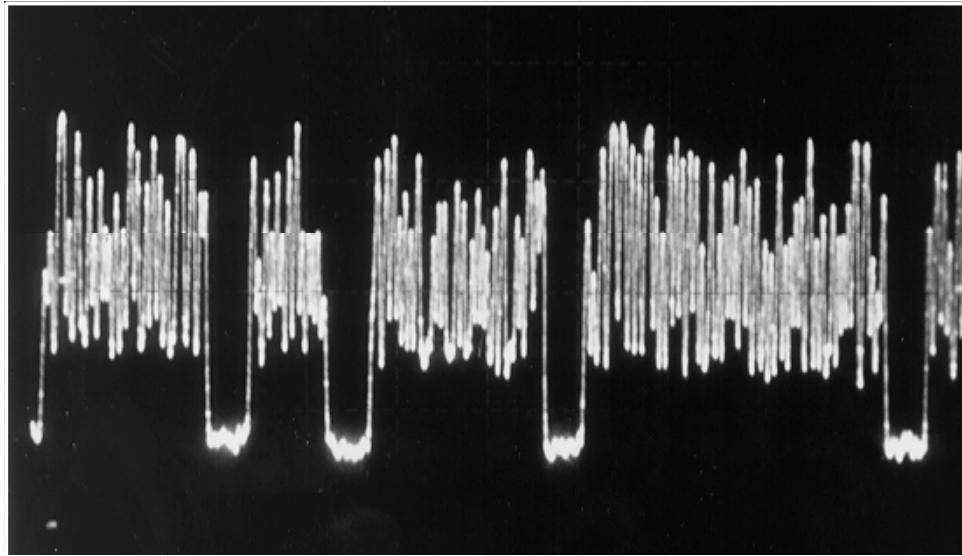


図 2 3 4 B C A の再生波形

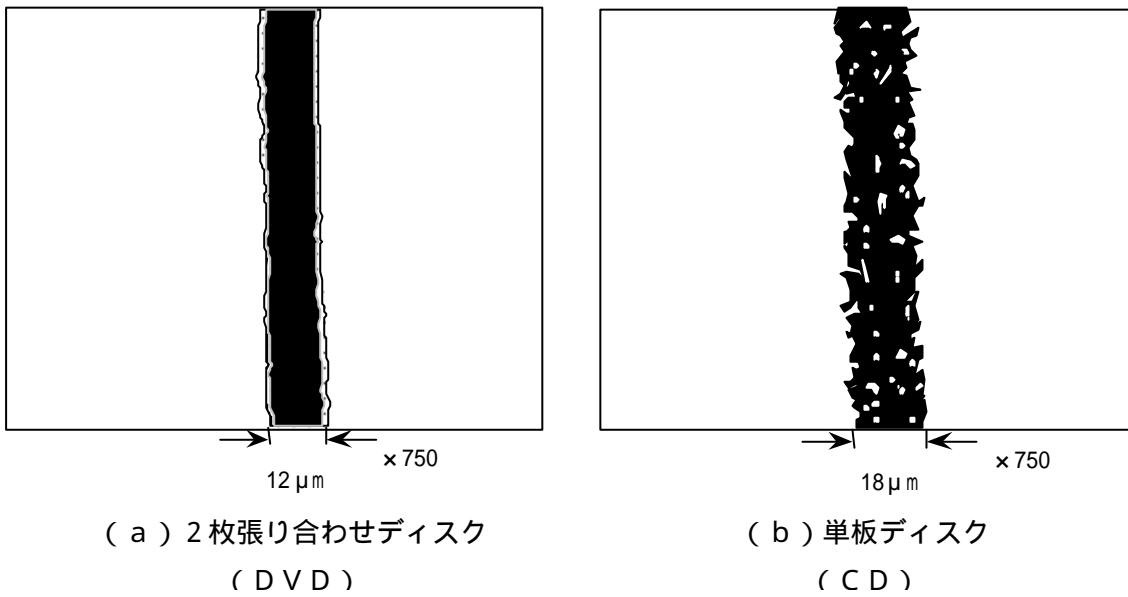


図 2 3 5 DVD と CD に B C A を記録した場合の B C A ストライプ

3.5 BCA記録ディスクの信頼性の検討

3.5.1 BCA記録による基板への影響

BCAの表面張力記録では金属の融点まで温度が上がる。このため基板と保護接着層への熱の影響がないことを確認しておく必要がある。

TEMによりBCA記録部を観察したところ、ポリカーボネート基板部のBCA記録による変形もしくは損傷はほとんどみられない。これは反射膜の記録時の熱により、PC基板が変形や損傷することを避けるため、記録光源としてCW-Qスイッチ型YAGレーザを用いて、短時間の出力の高いパルスレーザ光を照射しているからである。100ns以下の短いパルス幅のYAGレーザの照射では、熱が基板を破壊する前に表面張力記録が完了するものと思われる。また、アルミ反射膜の保護層となる接着層への損傷の発生は、図236にみられるように、光学顕微鏡で見える限りほとんどみられない。しかしながら、CD-ROM等の単板型のROMディスクに同様にBCA記録を試みたところ、記録に伴い反射層の外側に形成された保護層が記録により部分的に損傷を受けた。DVDにおいては、2枚の基板を貼り合わせたサンドイッチ構造の中に保護接着層が形成されている。つまり、ポリカーボネート製の密閉容器の中でアルミニウム等の反射膜の溶融が起これ、熱記録に伴う機械的変形が2枚の基板により制限されるため、大きな損傷が発生しないと考えられる。

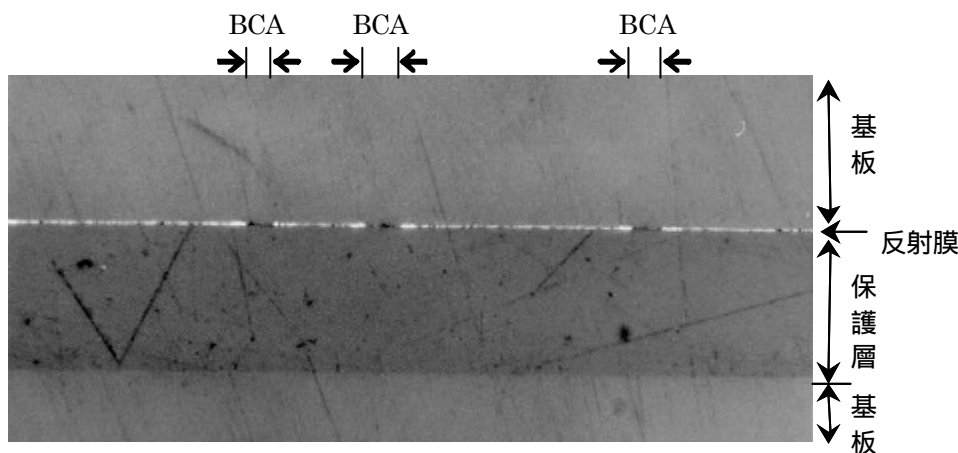


図236 BCA記録部の断面

3.5.2 B C A記録ディスクの信頼性テスト

信頼性を確認するため、B C A記録後のディスクの96時間のライフテストの環境試験を行った。96時間の環境試験の前に、B C A記録ディスクと未記録ディスクの、ディスクのそり、ディスクの複屈折等のディスクの基板特性と、再生信号品質（ジッタ）を測定した。これらのディスクを70%、95%、96時間の環境試験を施した後、再び同じ項目のデータを測定した。その後、このディスクを破壊し、錆等の変質を調べるため、B C A断面部を走査型電子顕微鏡と透過型電子顕微鏡による観察と電子線回折の測定を行った。

96時間環境テストの結果を表12に示す。図237にライフテスト後のB C A記録ディスク通常ディスクの半径方向のチルト角の変化を測定したが、B C Aの記録による影響はなかった。またB C Aに伴うディスクのそりや複屈折の増加といった、ディスクの基板に対する影響はほとんどみられなかった。また、図238と図239に示すようにB C A記録部より100 μm 離れた位置のジッタ増加分は、環境試験の前も後もB C A非記録部と比べて0.05%多いただけであった。B C A記録部のアルミ反射膜の錆の発生を調べるため、環境テストの後、破壊テストを行った。T E M観察や電子線回折の測定を行い、B C A記録端面部のアルミの酸化物がないことを確認した。図240の原理図に示すように、20万Vの電子ビームを試料に照射すると金属結晶の格子と干渉して回折電子が反射され写真上に回折パターンが記録される。電子回折パターンの半径 r はカメラ長を L 、結晶面の間隔を d 、電子線の波長を λ とすると、 $L = r d$ となる。図241は、96時間ライフテスト後の光ディスクの反射膜から採取した金属アルミの電子線回折パターンを示す。図241(a)ではアルミの(111)面と(200)面と(220)面の回折像が得られている。図241(b)ではアルミの(111)面と(200)面の回折像が得られているが、格子の角度が異なるため(220)面の回折像は現れていない。図241(c)では(111)面と(220)面、図241(d)では(200)面と(220)面の回折像が得られている。これらはアルミ金属そのものの回折像であり、アルミの酸化物の回折パターンは現れなかったためアルミ酸化物は存在していないと考えられる。このことによりアルミ反射膜にB C Aを記録したディスクに96時間加速ライフ試験を行っても、B C A記録部のアルミ反射膜は酸化されないことが明らかになりB C A記録部の信頼性が高いことが明らかになった。また、走査型電子顕微鏡による観察の結果、B C A記録部の保護層の変化も認められなかった。

以上の結果、DVD規格の完成ディスクへの、今回開発したB C A記録方式の適用は、DVDディスクの信頼性を満たすものであることが実証された。これは、DVD規格ディスクが2枚の基盤を貼り合わせた密閉構造の中にB C Aが記録されることと、B C A記録が短いパルス幅のY A Gレーザによる反射膜の溶融記録であるためダメージが少ないことによると考えられる。

表 1 2 信頼性試験の結果の比較

	BCA記録ディスク	BCA未記録ディスク
チルト角の変化	+ 0.085度	+ 0.078度
リターデーション変化	- 4.23nm	- 6.65nm
反射層の変化	なし	なし
環境条件	96時間、95%、70	

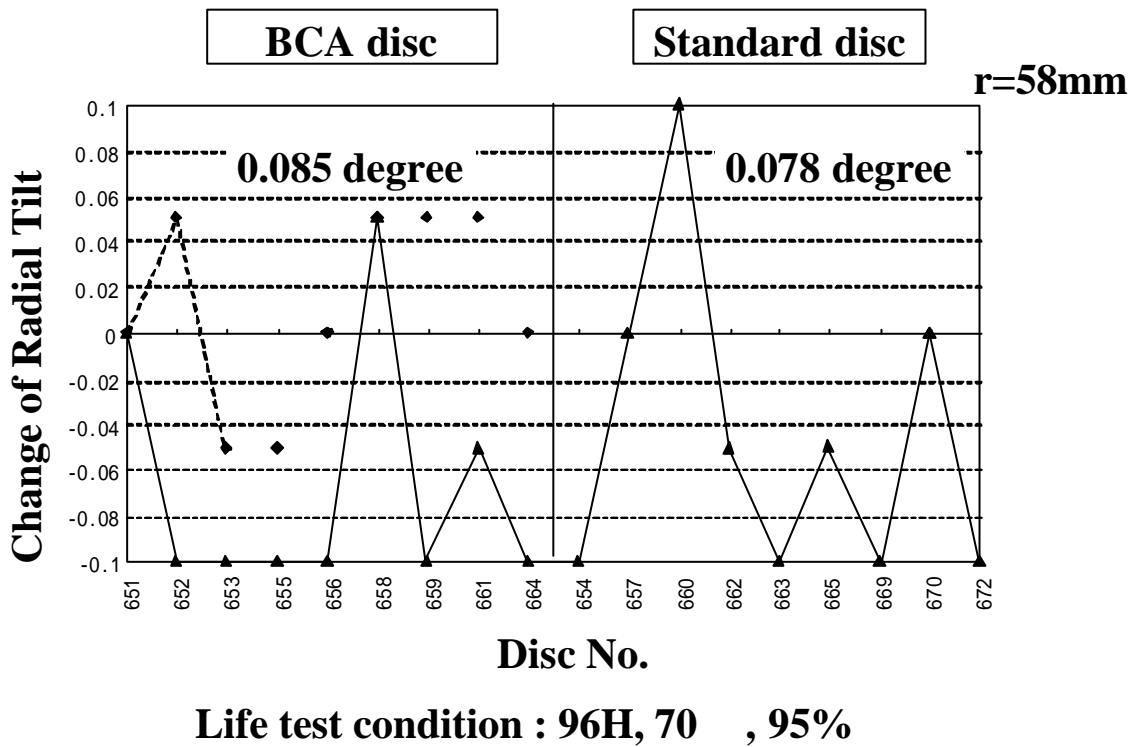


図 2 3 7

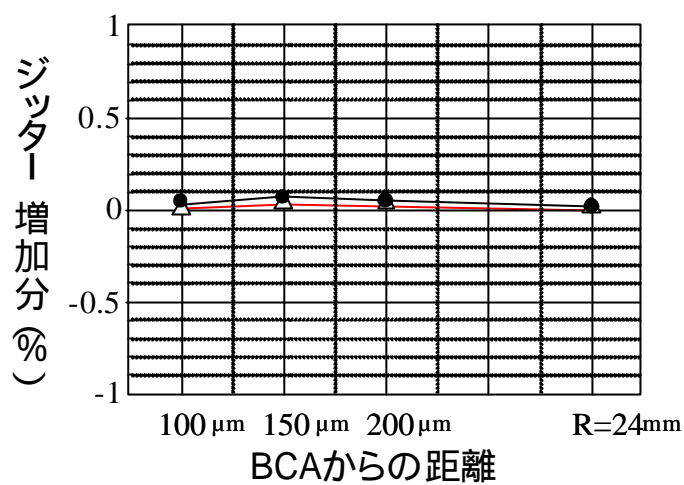


図 2 3 8 B C A 非記録領域の B C A 記録によるジッター増加分 (ライフテスト前)

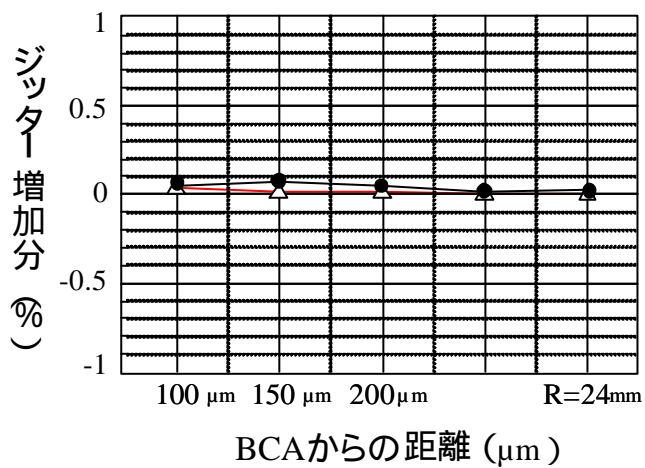


図 2 3 9 ライフテスト後のジッター増加分

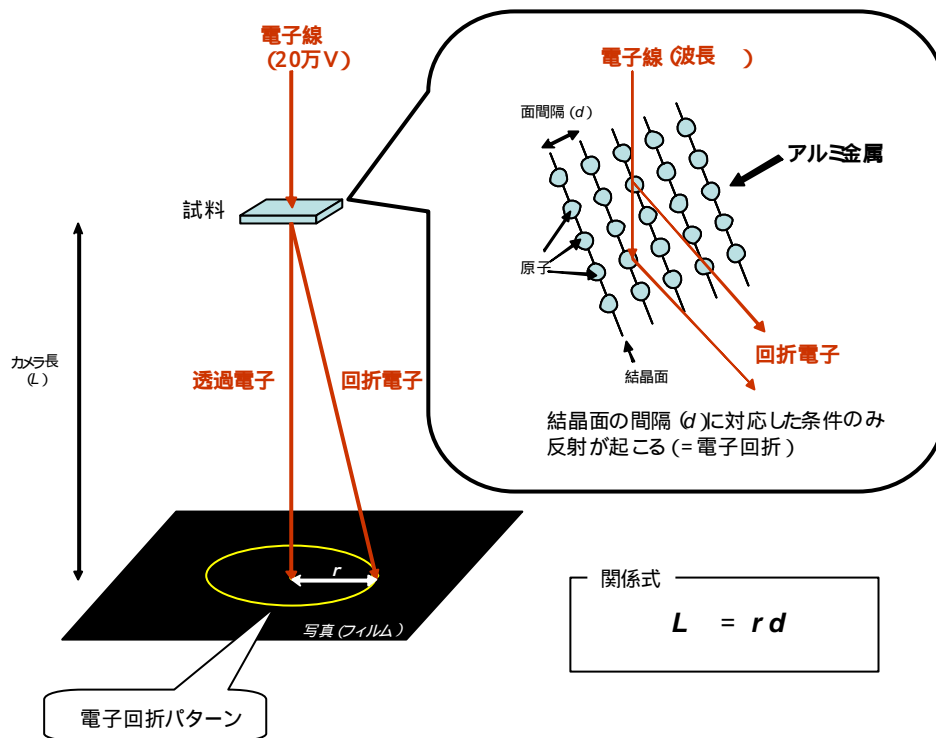


図 2 4 0 電子回折写真の原理

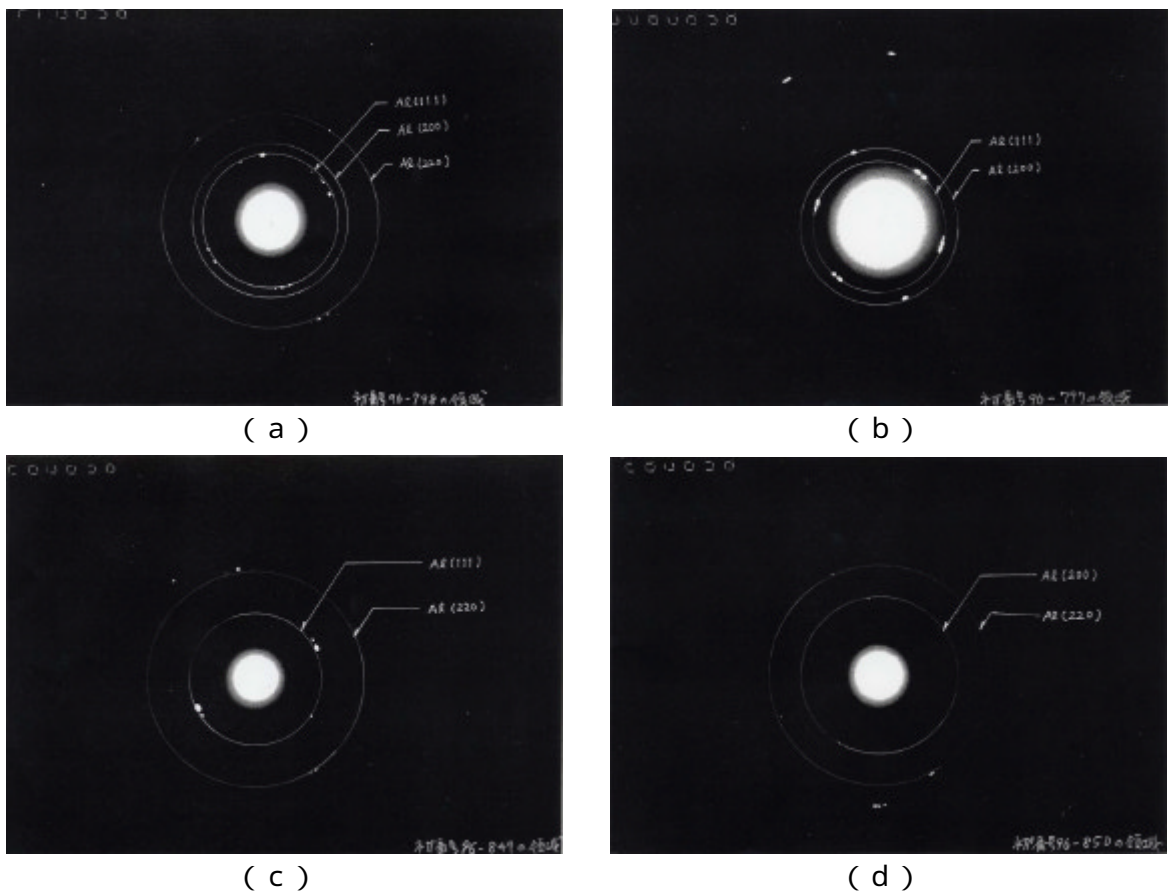
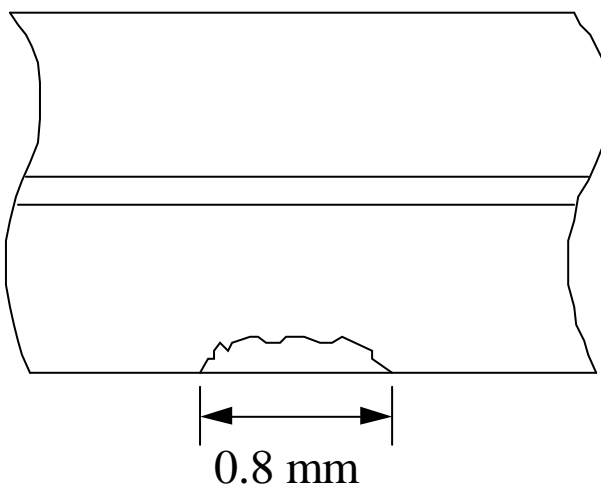


図 2 4 1 ライフテスト後の反射膜の電子回折パターン

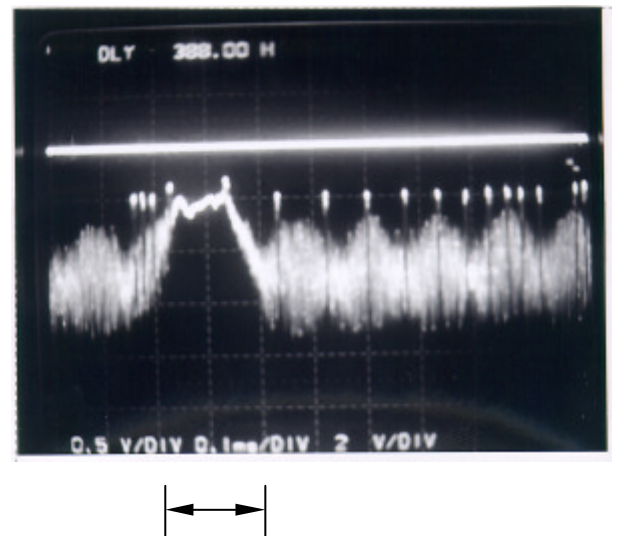
3.5.3 傷と指紋のBCA再生信号の影響

図2.4.2(a)に示す大きな傷をつけた場合、図2.4.2(b)に示すように2本のBCAストライプの再生信号に影響が出た。しかし、このような欠落はエラー訂正により修正される。

次に図2.4.3(a)の再生信号波形に示すような指紋がないディスクに指紋をつけた。指紋部のBCA再生信号は図2.4.3(b)に示すように低域通過フィルタを通したような波形になり、指紋の影響は全くないことがわかった。

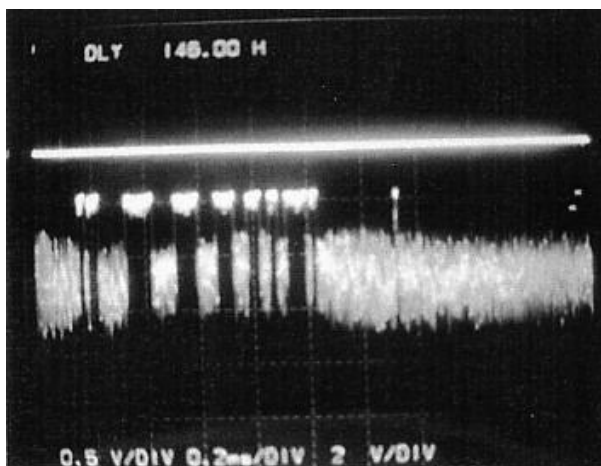


(a) ディスク基板上の傷の大きさ

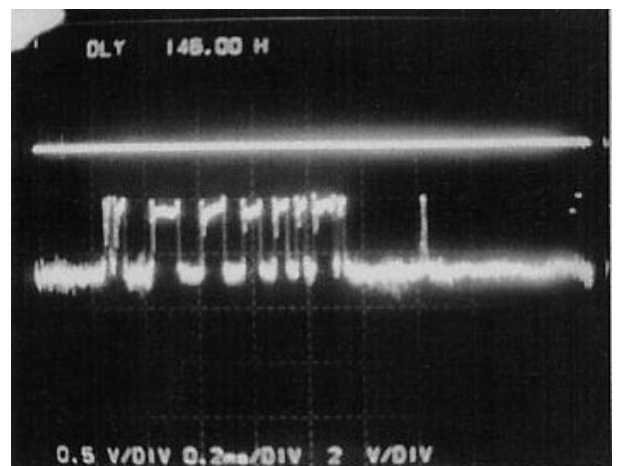


(b) 傷部を再生した時の信号

図2.4.2 傷によるBCA再生信号への影響



(a) 指紋がない時の再生波形



(b) 指紋がある時の再生波形

図2.4.3 指紋をつけた場合のBCA再生信号

3.6 まとめ

まず円形ビームのYAGレーザーを搭載した実験機（試作1号機）を用いてBCAデータをROM型光ディスクに書き込むことに成功した。本研究により世界で始めて、ROMディスクにデータを記録することが確認された。次に円形ビームを線状ビームに変えることによりBCAの記録時間が20分から1.5秒へと大幅に短縮された。透過電子顕微鏡の観察により、記録原理を明らかにするとともに基板の損傷がないことを確認した。各社のディスクにBCAを記録したテストディスクにライフテストを行いディスクの信頼性が低下しないことを確認した。次の実験機（試作2号機）により焦点深度や記録パワーにマージンがあることが明らかになり、量産生産用の基礎技術が確立できた。

第4章 量産用ROM - B C A記録装置の検討

4.1 はじめに

DVDディスクの個別情報記録技術であるB C Aの規格化に合わせて、安定かつ高速にバーコードを追記できる高速記録装置の実用化研究を行なう。

B C A記録装置には、次の機能を満たすことが求められている。

- (1) DVD規格のB C Aフォーマットを安定して記録できること。
- (2) DVDディスク製造工場の製造タクト時間(4秒)以内の高速処理ができること。
- (3) シリアル番号を記録したときに失敗によるシリアル番号の欠番を最小限にすること。
- (4) 誤ったディスクにB C Aを記録することを回避できること。

以上の要求を満たす量産用B C A高速記録装置の実用化を検討する。光源としてはY A Gレーザーと高出力半導体レーザーを用いた2つの方式を検討する。

4.2 Y A Gレーザーを用いた量産用B C A記録装置の検討

まず光源としてY A Gレーザーを用いた方式を検討する。Y A Gレーザーは光源の出力が大きいため1台で総工程時間4秒以下を実現する可能性がある。

4.2.1 量産用B C A記録装置の仕様

線状ビームのY A Gレーザーを用いてB C Aを高速に記録する実験用記録装置(試作2号機)は、表13の左項に示すように1枚のディスクにB C Aを記録するのに5~10秒要する。総工程時間であるタクト4秒を実現するには記録時間を1枚2秒以下に短縮する必要があるため要求仕様を満たしていない。DVDのディスク工程の1枚あたりの工程時間すなわちタクトは図244に示すように4秒である。

また、試作2号機にはオートフォーカス機能が付いていなかった。実験段階では、ディスクを変える毎に毎回焦点調整を行なうことと、面ブレの少ないディスクを選んで記録することで対応していた。しかし量産段階で登場する面ブレの大きいディスクに記録することができなかった。またディスクの交換を手で行なうため速いタクトでB C Aを記録することができなかった。

以上の点を改善するため、まず光学系を改善して光の利用効率を向上させるとともにY A Gレーザーの出力を上げた。この改善により2kHzの発振を行ない表13の右項に示すように2秒以下でB C Aを記録することが可能となった。次に焦点検出光学系を新たに設けるとともに、ターンテーブル台の昇降装置を追加することにより、自動的に焦点調節

が可能となった。そして、ロボットハンドをつけることにより自動的にディスクの搬入、搬出が可能となり1枚あたりの生産時間を4秒以下に短縮することができた。表14に詳しい最終仕様を示す。最終仕様では記録されたBCAデータを検査する光検出ヘッドと、検査して不良ディスクと判明したディスクを排出する排出機構を追加した。

表13 実験用記録装置と量産用記録装置の仕様の比較

	実験用記録装置 (試作2号機)	量産用記録装置 (試作3号機)
レーザー	CW-QスイッチYAG (= 1.06 μ m)	CW-QスイッチYAG (= 1.06 μ m)
BCA記録時間	5~10秒	1.5秒~2秒
総工程時間/枚		4秒以下(搬送を含む)
ディスク枚数	手動	自動
BCAの位置(外周側)	23.5 \pm 50 μ m	23.5 \pm 50 μ m
焦点深度	\pm 30~40 μ m	\pm 30~40 μ m
自動焦点	なし	あり
BCAデータの入力方法	フロッピーディスク	通信又はフロッピーディスク
サイズ	D900 \times W1200 \times H1200	D900 \times W1200 \times H1200

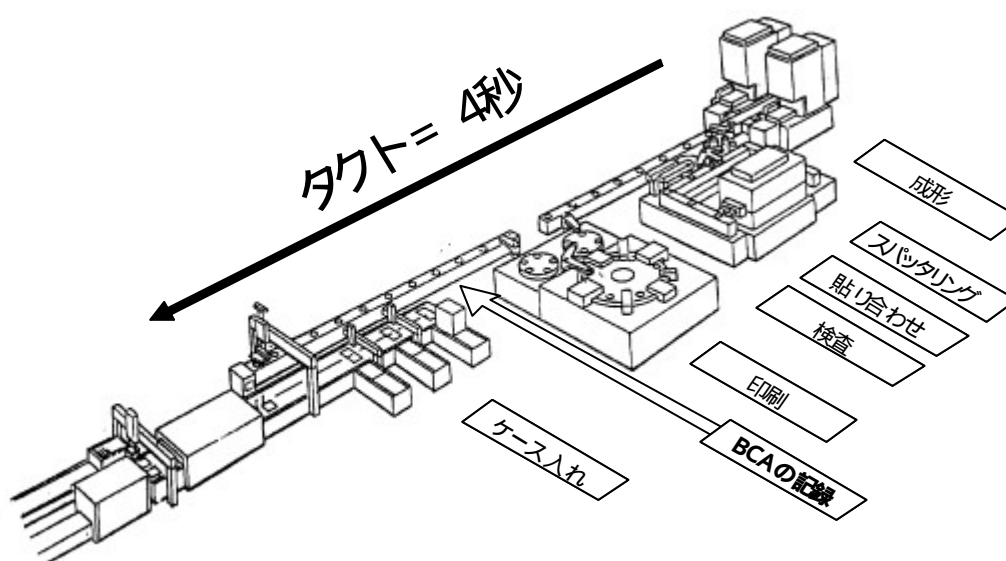


図244 DVDのディスク製造工程におけるBCA記録工程

表 1 4 量産用記録装置の最終仕様

項目	仕様
対象ディスク	片面式DVD-ROMディスク (1層、2層)
レーザ光源	CW-QスイッチYAG (= 1.06 μ m)
タクト時間	4秒 / 枚 (搬送 2秒 + 記録 2秒)
加工精度	半径方向 外周側 23.5 \pm 0.05mm :内周側 22.1 \pm 0.2mm
	線幅 : 10 \pm 5 μ m
	ピッチ : 線幅中心間 30 \times n \pm 5 μ m エッジ間 30 \times n \pm 6.7 μ m (n = 1、2、3、4)
サイズ (mm)	本体 :W 1200 \times D900 \times H1200mm 電源 :W 350 \times D750 \times H1450mm
検査機能	BCA記録前 :原盤番号読取り照合 BCA記録後 :BCAデータ読取り照合 不良ディスク取出機能付

4 . 2 . 2 量産用高速記録方式の検討

BCAの量産記録用装置(試作3号機)では、表14に示したようにCW-Qスイッチ型YAGレーザを用いて短時間に出力の高いパルスレーザ光を照射することにより記録する。半径方向の長さ1.3mm、円周方向の線幅10 μ mのBCAストライプを、規格に定められたパターン(間隔:1T、2T、3T、4Tの組み合わせ)に従って記録する。図245に示すように、レーザ発振器から出たレーザ光をラインビーム成形光学系でライン状に成形し、1パルスのレーザ照射で1本のBCAストライプを形成する。バーコードのパターンは、ロータリエンコーダで検出されるディスクの回転角度信号と、BCAパターンジェネレータで作成したパターンデータを基に、レーザパルスコントローラでレーザ発振器のパルス(Qスイッチ)を外変調することにより作成する。図246に量産用記録装置(試作3号機)の外観を、図247に実際に記録したBCAの拡大写真を示す。

レーザ光源には松下電器製のランプ励起式CW-Qスイッチ型YAGレーザを用いた。

記録方式は前述のとおりで、装置内のディスク搬送は回転板式搬送機構を用い、タクト時間4秒(記録2秒+搬送2秒)/枚を実現した。記録精度はBCAの規格を満足する

もので、ディスクの厚みやばらつきやそり、うねりの影響を抑え、記録精度を確保するため、レーザフォーカス式変位計の信号を基に昇降モータによりディスクターンテーブルとモータを上下させるリアルタイムオートフォーカス機能を搭載した。

ディスクの製造工程におけるBCA記録は、ディスクが完成した後、つまり印刷工程の後の工程になる。BCAはDVD規格のオプション規格であるため、BCA記録装置はスタンドアロン型とし、前後の工程とはスタックボール単位で作業者がディスクをやりとりする形態とした。

すでに述べたように、BCAはDVDディスクへの個別情報記録であり、データの誤り、例えばシリアル番号の重複等は致命的である。このため記録装置には検査機能を設け記録位置と同一半径上に光検出ヘッドを配し、記録したBCAデータに誤りがないかをリアルタイムで照合する機能をもたせている。BCAデータが誤っている場合は排除し、同じデータを次のディスクに記録するので、シリアル番号の欠番は避けられる。また、間違ったロットをセットしたときに全数不良になることをさけるため、BCA記録の前段階で、ディスク中央部にあらかじめマーキングされた原盤番号を画像認識により読み取り、照合する機能も備えている。これらの検査機能により不良と判別されたディスクは不良専用のスタックボールに蓄えられる。

この量産用BCA記録装置はディスク製造会社に応じて仕様を変えて量産工場に納入され、国内外の工場でディスクの量産に用いられている。

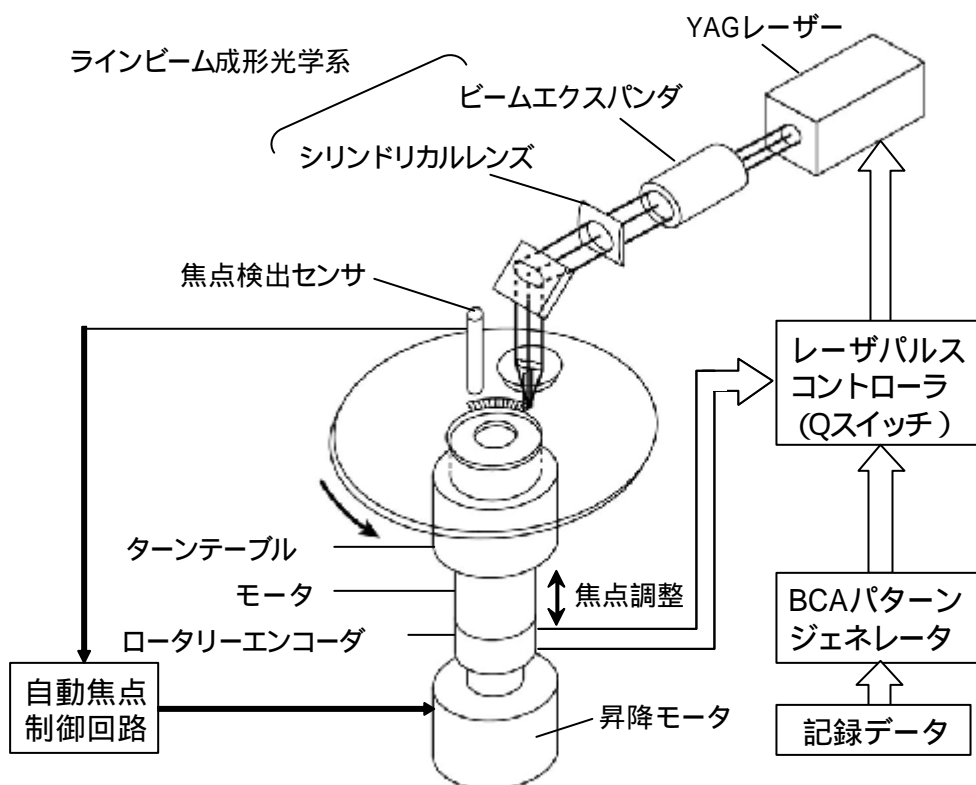


図 2 4 5 量産用記録実装装置の構成

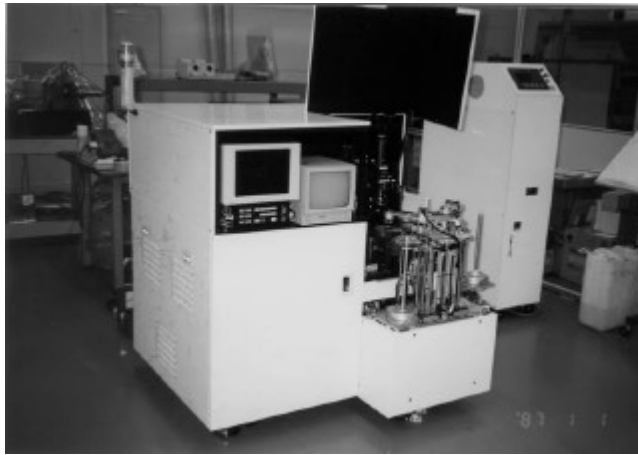


図 2 4 6 量産用 B C A 記録装置 (試作 3 号機) の外観

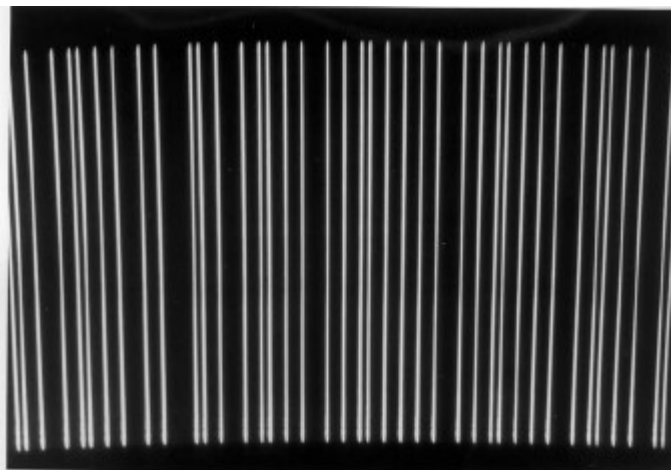


図 2 4 7 B C A ストライプ部の拡大写真 5 0 倍

4.2.3 記録マークの位置精度

DVD規格ではディスクの互換性を保つためBCAの位置精度が規定されている。この規定の許容範囲を超えると不良ディスクとなり工程の歩留まりを低下させるため、BCA記録装置には厳しい記録位置の精度が求められる。

BCA記録装置の記録精度に関して、半径方向の位置精度、円周方向のピッチ精度の2項目に分けて評価を行った。

図248は半径方向の位置精度の測定結果で、光学顕微鏡を用い、バーコード外側のエッジをディスク1枚について10ヶ所、10枚分測定した。半径の基準となる点はディスクの中心穴の周上3点の座標を測定し計算で求めた。測定結果はDVD規格で規定されている仕様値 23.5 ± 0.05 mmを満足している。

BCAの円周方向の位置精度であるジッタの測定結果は、最大間隔4Tで3%以下であった。図249に示すようにこの値はピッチ $120 \mu\text{m}$ で $3.6 \mu\text{m}$ 以下の誤差に相当し、エッジ間のピッチ誤差のDVD規格の仕様値 $\pm 6.7 \mu\text{m}$ 以下を満足している。なお、DVD-ROMドライブの各メーカーにおいて、SFF-8090¹⁾で定義されたBCA再生コマンドを用いて、この装置で記録したBCA評価ディスクの再生互換試験を行い、問題なく再生できることを確認した。

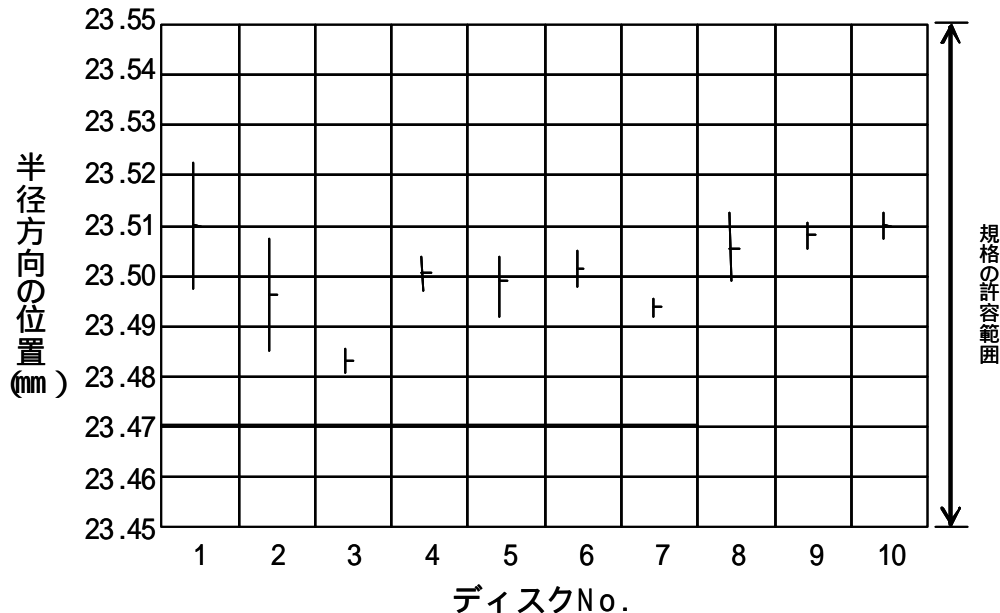


図248 BCAドライブ外端部の半径方向の位置精度

¹⁾ SFF-8090 光ディスクドライブのコンピュータのCPUの間のインターフェースを決めた規格でATAPIコマンド等が定義される。

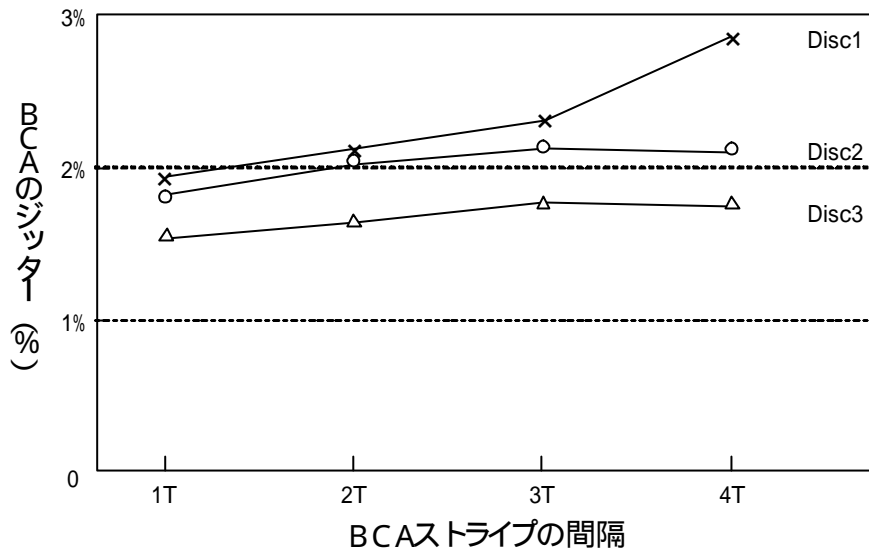


図 2 4 9 B C A の円周方向の記録精度 (ジッター) の測定結果

4 . 2 . 4 量産時の B C A の記録時間

B C A の容量は最小値が 1 2 バイトで最大値は 1 8 8 バイトである。容量が大きいほど B C A ストライプの本数が増えるため記録時間が長くなる。また Y A G レーザーのパルス周波数が高い程、単位時間あたりに記録できる B C A ストライプの記録本数が増えるため記録時間が短くなる。図 2 5 0 にパルス周波数毎の B C A 容量と記録時間の関係を示す。図からパルス周波数が 2 k H z の場合、1 8 8 バイトの B C A ストライプを 2 秒で記録できることがわかる。

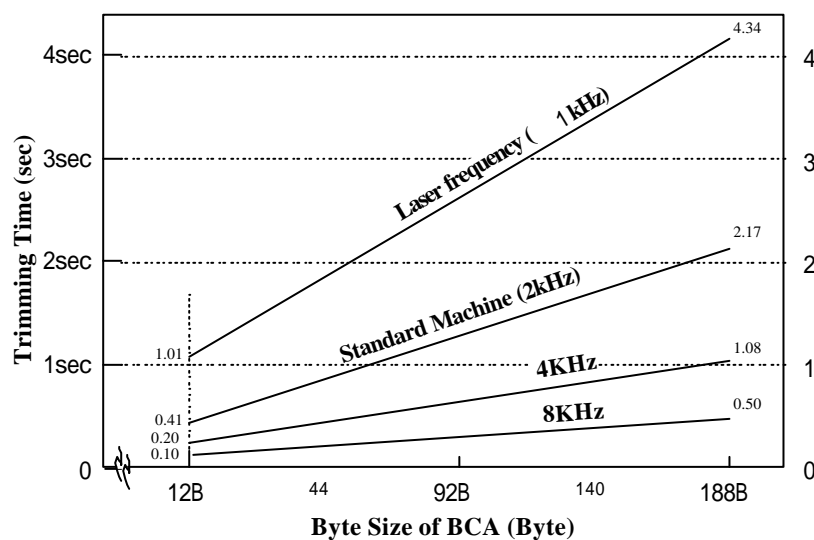


図 2 5 0 B C A 記録に要する時間

4.3 高出力半導体レーザーを用いた記録方式の検討

YAGレーザー方式BCA記録装置は1997年に量産用として実用化され、大量生産に用いられた。BCAの用途の拡大に伴い高出力半導体レーザー方式BCA記録装置が登場し、少量から中規模の生産に用いられる。

4.3.1 高出力半導体レーザー方式の必要性

YAGレーザーを用いてDVD等のROMディスクに記録する方式は1枚あたり2秒間で記録できディスク工場の工程時間4秒で記録できるとともに、ディスクのロットNoが識別できるため誤ったタイトルのディスクへのBCAの記録を防止できる。またBCAを再生して正しい値をチェックする検査モリアルタイムでできるため、不良品は外部に搬出されない。このように完成された装置であったが、YAGレーザーのコストが高い上に付加機能が含まれていたため1台のコストが40～50万ドルであり、大量生産には適していたが初期投資が大きいため、少量生産用には適していなかった。

ROM用のBCAはHD-DVD規格では必須規格であったが、DVD規格、BD(Blu-ray Disc)規格ではオプション規格であった。オプション規格のため生産の立ち上がり時の生産枚数は多くなく、YAGレーザー方式BCA記録装置では移動率が低いため、1枚あたりの記録コストが高かった。そこで少量生産に適した高出力の半導体レーザー方式記録装置への要望が強くなった。

4.3.2 高出力半導体レーザー方式記録装置の構成

DVD-RAMディスクではDVD-RAMディスクの初期化(イニシャライズ)を行うため出力5Wの波長680nmのラインビームの赤色半導体レーザーが用いられている。この装置のレーザーを収束させ、ディスク面上で長手方向の長さが40μm程度のラインビームをアルミ反射膜上に照射しながらディスクを回転すると、ROM用BCAの小ストライプを間欠的に記録することができる。同じ半径角度上にこの小ストライプを記録しながら光ヘッドを外周方向に移動させると図256(b)に示すように小片が順次連結されていき、最終的に長さ1200μm、幅10μmのBCAストライプが記録される。図251に光学系の構成を示す。

図252の(a)(b)が各々YAGレーザー方式と半導体レーザー方式の記録装置の外観であり、(c)(d)はYAGレーザーと半導体レーザーの外観図を示す。図から明らかのように、半導体レーザーに変更することにより1枚あたりの記録時間は長くなるが大幅に小型化することができる。

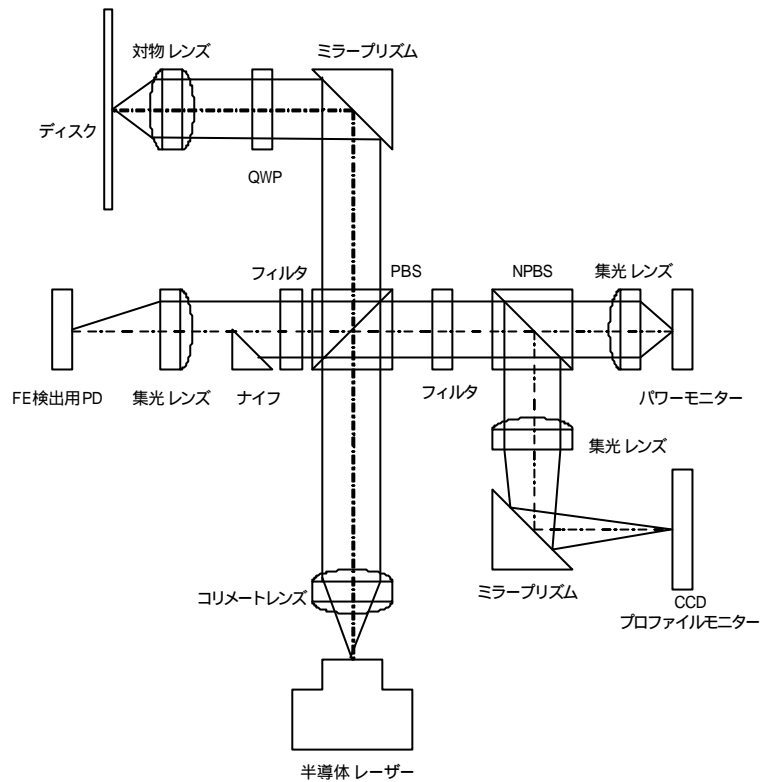


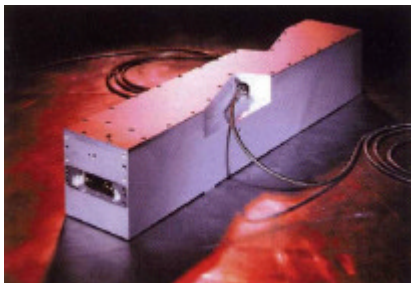
図 2 5 1 半導体レーザー方式記録装置の光学部の構成



(a) Y A Gレーザー方式記録装置



(b) 半導体レーザー方式記録装置



(c) Y A Gレーザー (8万ドル)



(b) 高出力半導体レーザー (5000 ドル)

図 2 5 2 Y A Gレーザー方式と半導体レーザー方式の記録装置の比較

4.3.3 半導体レーザー方式で記録したBCAの再生波形

図253はYAGレーザー、半導体レーザーを用いてBD規格のROMディスクにBCAの記録した時のBCAの再生波形を示し、(a)と(b)が生々の再生波形、(c)と(d)が500kHzのLPFを通過した後の再生波形を示す。図253(a)をみるように再生波形の底部の波形の中で最大のピーク値を I_s とする。そして再生波形の最大値を I_{SH} とすると、

$$\frac{I_{SH}}{5} > I_s \text{----- (1)}$$

が、DVD規格の信号規定である。(a)のYAGレーザーで記録した場合の再生波形はDVD規格の信号規定を満足する。しかし(b)の半導体レーザーで記録した場合の再生波形は図で見ると2本のスパイク信号が発生するため I_s は大きくなり波形は、

$$\frac{I_{SH}}{5} < I_s$$

となり、DVD規格の信号規定を満たさない。この理由はYAGレーザーに比べて半導体レーザーの方が単位時間に投入されるレーザーパワーが圧倒的に小さく、照射時間が長い。このためBCAの表面張力記録時に、部分的に溶融しない部分ができるためスパイク信号が発生すると思われる。BD規格のROMディスクにおいてはDVDディスクにおいては見られなかった小さなスパイク信号が発生する。この背景にはDVD規格では680nmの赤色のレーザーを用いて再生するのに対しBD規格では青色の410nmの青色のレーザーを用いて再生することがあると考えられる。赤色レーザーで再生した場合に再生できなかったような細かいマークが、青色レーザーで再生すると再生の分解能が高いため再生されるものと考えられる。当初のBD規格のBCAの信号規定はDVD規格のBCAの信号規定をそのまま流用した。しかしBD規格のROMディスクに半導体レーザー方式でBCAを記録したところスパイク信号が発生し、当初のBD規格のBCAの信号規定を満たさないことが明らかになった。

4.3.4 BD (Blu-ray Disk) 規格のBCA信号規定の新規提案の検討

半導体レーザーで記録したBCAが当初のBD規格のBCA信号規定を満たさない事が明らかになったため、ROMディスクにYAGレーザーと半導体レーザーのいずれのレーザーでBCAを記録しても、同一の再生回路で再生できるようにBD規格の信号規定を新たに規定する必要があった。そこで新しい信号規定を検討した。スパイク信号を除去する

には低域通過フィルタ（LPF）が有効である。そこで250kHz、500kHz、1MHz、1.5MHzのカットオフ周波数をもつ2次フィルタを準備した、各社のBD規格のROMディスクのBCA部の再生信号を、このLPFを通過させ、どのフィルタが最も適しているかを実験した。実験の結果、500kHzの2次Besselローパスフィルタが適していることが明らかになった。

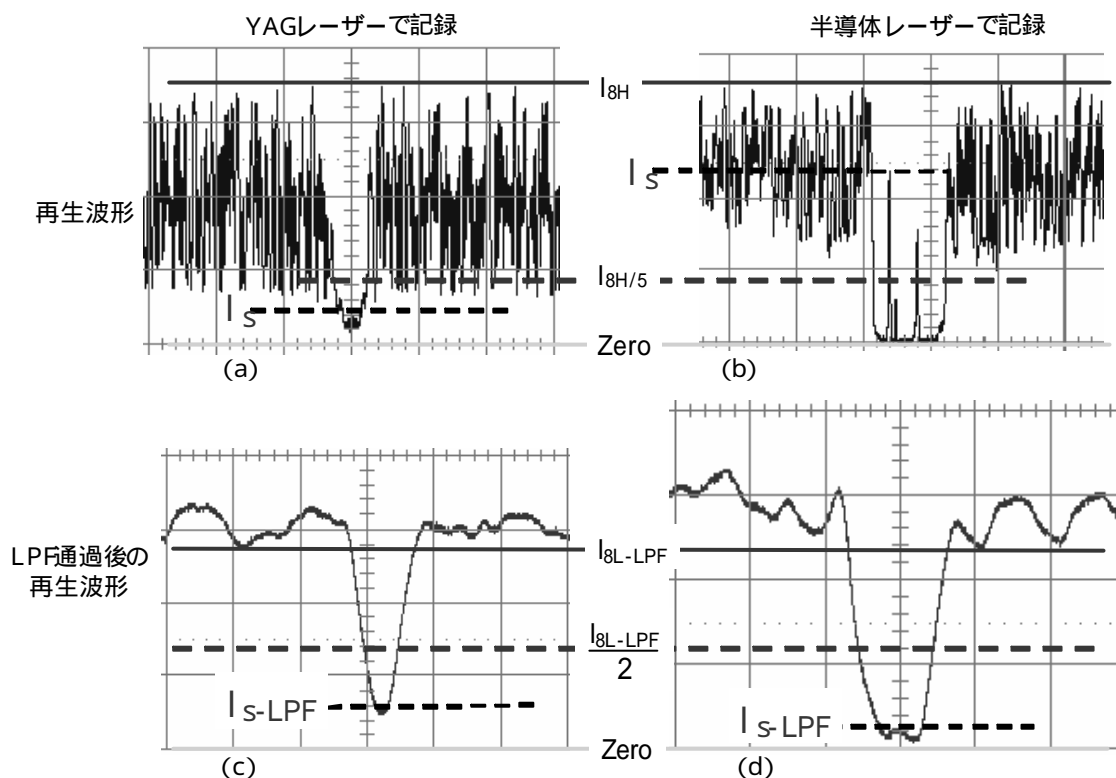


図 2 5 3 YAGレーザーと半導体レーザーの再生波形の違い

LPF通過後の波形で、 I_{8L-LPF} を非BCA領域の最小値とし、 I_{S-LPF} をBCA領域の最大値とすると、

$$I_{S-LPF} < \frac{I_{8L-LPF}}{2} \dots\dots\dots (2)$$

を満足させる再生信号なら容易に二値信号に復元することができるため、これをBDのROMディスクのBD規格のBCAの信号規定案とした。

$$I_R \text{ 比} = \frac{I_{S-LPF}}{I_{8L-LPF}} < 0.5 \text{ ---- (3)}$$

実際のBD規格のROMディスクがBCAの新しい信号規定案を満たすかを確認するため各社からBD-ROMディスクの提供を受け実際に高出力レーザーを用いてBCAを記録した。そして記録したBCAの再生信号を再生し、 I_R 比を測定した。図254に示すようにYAGレーザーで記録した場合はスパイク信号が発生しないため I_R 比は0.5以下であり新规定案を満たす。また半導体レーザーでアルミの反射膜のディスクにBCAを記録する場合もスパイク信号は発生するが発生頻度が少ないため I_R 比は0.5以下であり新规定案を満たした。しかし半導体レーザーで銀の反射膜にBCAを記録する場合は反射膜を充分除去できないためスパイク信号の発生頻度が多い。このためBCA再生の1000回の軌跡をとった信号波形は図255のようになった。この図から I_R 値は0.75程度となり新规定案を満たさないことが明らかになった。図255に示す信号波形ではウィンドウが充分開かないため2値信号に変換することができないため、BCA信号のデータは再生できなくなる。

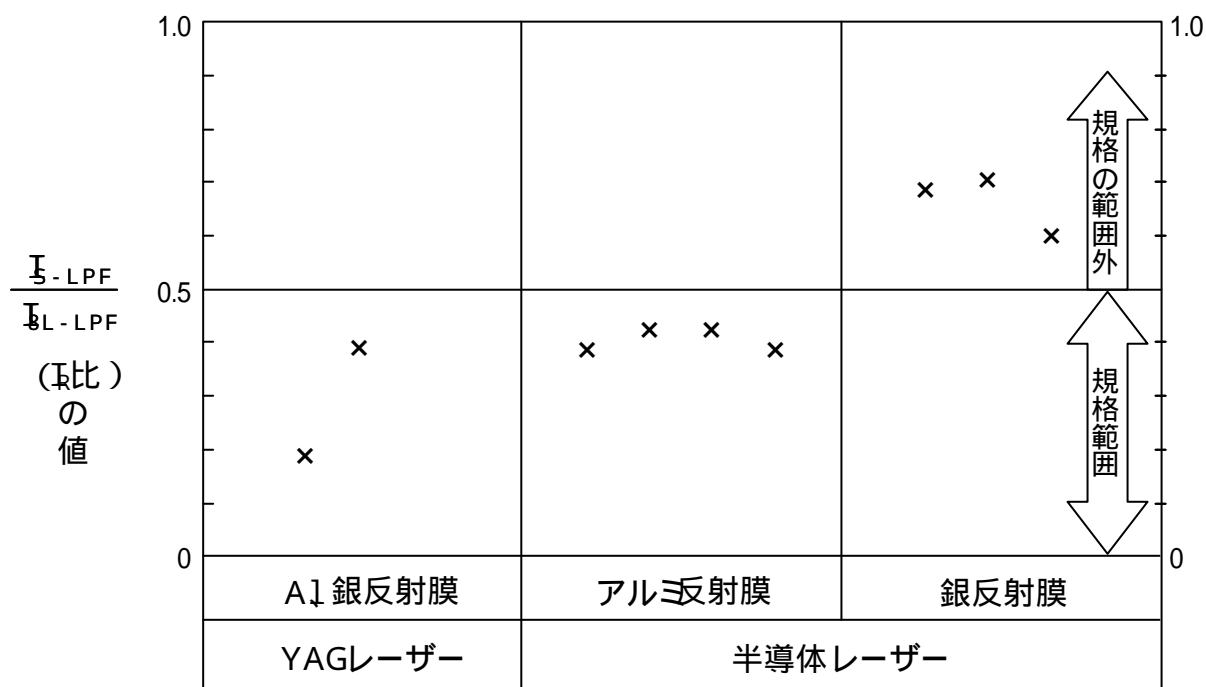


図254 BCA再生信号の I_R 比

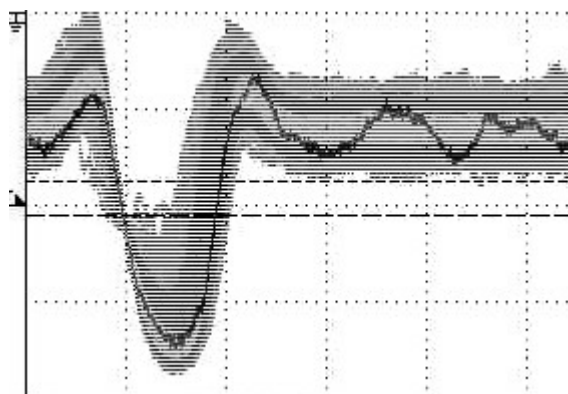


図 2 5 5 通常の半導体レーザーで B C A 記録時の再生信号 (1000 回再生時の軌跡)

4 . 3 . 5 銀反射膜の B D - R O M ディスクへの B C A 記録方式の検討

図 2 5 6 (b) に示すように半導体レーザー方式の場合は巾 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ で、長さ $30 \mu\text{m}$ のディスクの半径方向に長いストライプ形ビームを 1 回転につき $20 \mu\text{m}$ のピッチで半径方向に送りながら走査することにより、B C A を分割して記録する。

銀反射膜に記録した場合の B C A ストライプの顕微鏡拡大図を図 2 5 6 (a) に示す。図 2 5 8 に示すように n 回目の記録で膜厚増大部に残渣が残り、この残渣は膜厚が厚いため $n + 1$ 回目の記録時のレーザー照射のエネルギーでは溶融せず残渣が消えないで残る。

表 1 5 アルミと銀の物理定数の違い

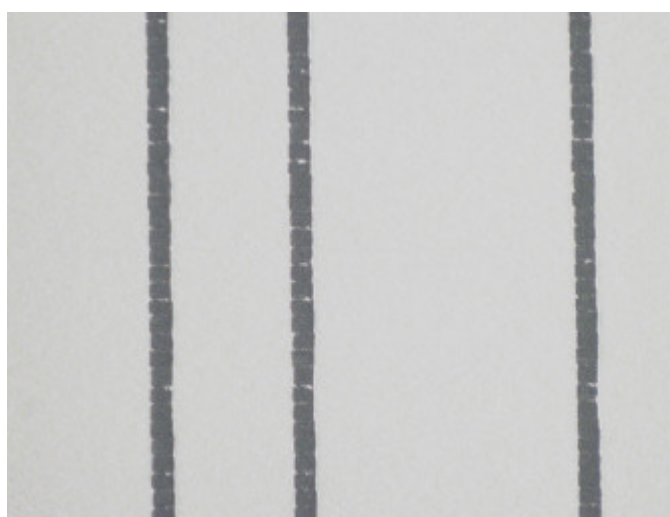
	融点 (t)	比重	沸点	表面張力()	d /dt
				mN/m	mN/m ·K
アルミ	660.0	2.7	2500	$\sigma_0 = 914$ (t)	0.16
銀	960.7	10	2200	$\sigma_0 = 930$ (t)	0.35

注 : $\sigma = \sigma_0 + (t) (d / dt)$

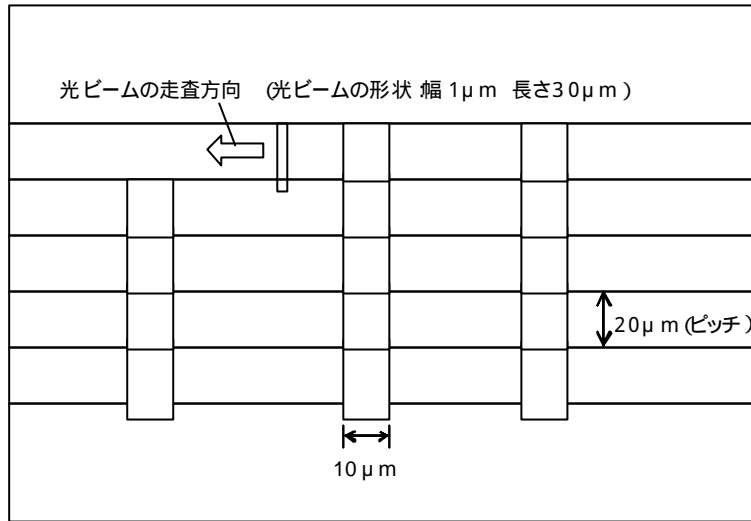
このため $n + 1$ 回の記録では図 2 5 8 の中央部に示すように 2 つの反射膜除去部の間の連結部残渣部に残渣が残る。再生した場合、この残渣により再生光が反射するためスパイク信号が局所的に発生し、図 2 5 5 のような波形が再生されると考えられる。YAG レーザー方式の場合は 1 本のストライプを一発のパルスで記録するためこの連結部残渣部が原理的に発生しない。半導体レーザー方式でもアルミ反射膜ではこの残渣が現れないが銀反射膜の場合は残渣が残る。青色レーザーを使う HD - DVD 規格 ROM ディスクは反射膜にアルミを使うため問題ないが、BD 規格の場合、反射膜に銀を使う場合が多いため、大きな問題となった。

そこで半導体レーザーを用いて銀反射膜に記録した場合に表面張力記録により、反射膜が充分除去できない原因を察する。表 1 5 に示すように銀の融点が 9 5 0 とアルミより 3 0 0 近く高く、銀の方が比重が 3 倍以上重い。しかし両者の表面張力があまり変わらない。銀の方が融点が 3 0 0 高いため銀が融解しにくく、融けても短時間で固まる。そして銀の方が重量が 3 倍重いため同じ表面張力でも一旦融けた銀を実質的に引張る加速度がアルミに比べて $1 / 3$ になり小さい。このことから表面張力で除去する作業が完了する前に銀が固まってしまい残渣が残り易くなると考えられる。

残渣を残さないためには、図 2 5 8 の (a) に示す膜厚増大部のうち斜線で示す連結部の膜厚増大部を減らすような新しい記録方式が必要である。このような記録方式を実現するため、ビームプロファイルを変えて記録実験を行った。光ヘッドの構成を変え、半径方向に異方性をもつビームプロファイルのレーザーを照射することにより、連結部の残渣部を消すことができた。



(a) 半導体レーザーで記録した場合の連結部の残渣



(b) 半導体レーザー方式の分割記録方法

図 2 5 6 半導体レーザー方式の記録方法と記録パターン

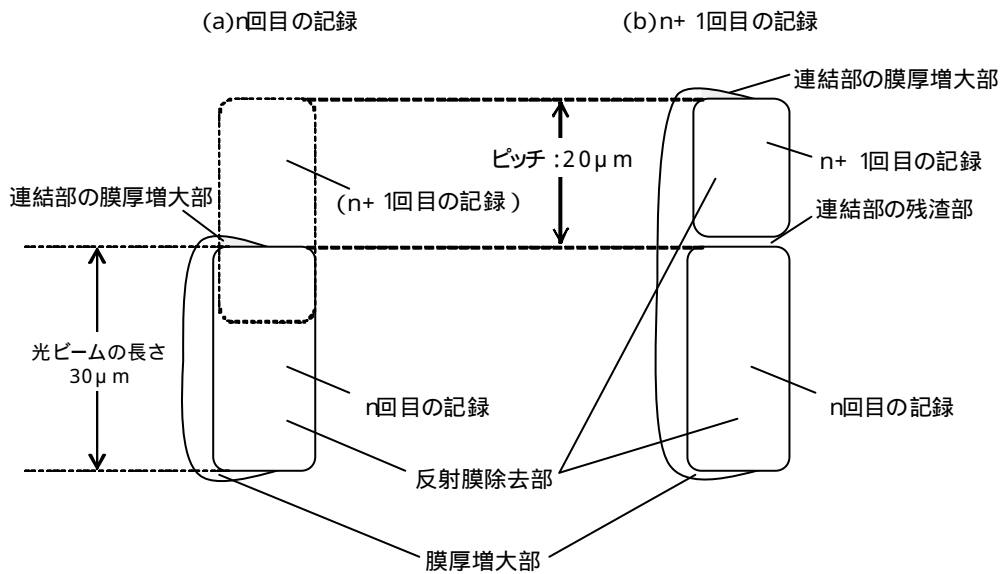


図 2 5 8 半導体レーザー方式において連結部に残渣が発生する原理

こうして図 2 5 9 の波形写真に示すように銀反射膜における I_R 比を 0.5 以下に下げることができる半導体レーザー方式 B C A 記録方式が、筆者とパルスタック工業との共同研究の中で考案された〔2 2 1〕。その後、この技術を用いた B C A 記録装置が実用化された。この装置の外観を図 2 6 0 に、仕様を表 1 6 に示す。この記録装置のパルスタック工業による実用化により B D 規格のアルミ反射膜と銀反射膜の R O M ディスクに B D 規格用の新しい信号規定値の範囲内で B C A 記録ができるようになった。この筆者らによる実験

結果と規格変更案を2005年春、BD規格策定会議に提案した。その後、BD策定会議の中で実験を行い確認した後、筆者の提案したBD規格の変更案は了承されBD規格書に記載された。筆者の考案した新記録方式により全ての反射膜のBD-ROMディスクにBCAが安定して記録可能となり、BDディスクの情報セキュリティの脆弱性を大きく改善することができた。

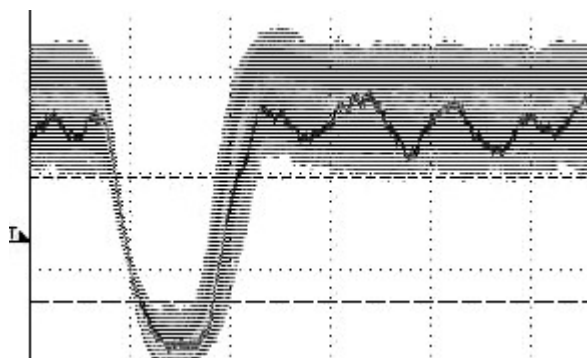


図259 新しい記録方式で記録した時のBCA再生信号(1000回再生時の軌跡)

表16 BCA記録装置の仕様(暫定)

項目	仕様
レーザー波長	805nm ± 10nm
NA	0.62
出力レーザーパワー	4800mW
レーザーの形	40 μm × 1 μm
レンズとディスクとの距離	1.56mm
回転速度	300 ~ 3000rpm
回転ジッター	± 0.0003%
回転起動時間	100 ± 30ms @ 600rpm
大きさ	W :300 H :600 D : 500mm
重さ	30kg



(a) 正面図



(b) 背面図

図 2 6 0 B D 規格用半導体レーザー方式 B C A 記録装置 (パルステック工業製)

4 . 4 ROM 用 B C A の応用

4 . 4 . 1 DVD の電子流通方式への応用

B C A の DVD 規格の採用と B C A の量産用記録装置の実用化により ROM 型 DVD ディスクに B C A を記録した応用ビジネスの検討が開始された。最初に B C A が応用されたのは米国の D i v x 社による映画用 DVD [2 0 2] である。

これは図 2 6 1 に示すように映画ソフトに暗号をかけて ROM 型 DVD ディスクに記録して安価に消費者に配布する。消費者が映画を観たいと思った時は専用 DVD プレーヤーにディスクをセットし要求ボタンを押す。DVD ディスクの B C A のシリアル番号 (図の場合はディスク I D は 2 番) が読み出され暗号鍵センターに送られる。暗号鍵センターは 2 番のディスク専用の一定期間、例えば 3 日間有効な暗号鍵を再生プレーヤーに送るとともに料金 (3 ドル程度) を消費者に課金する。再生プレーヤーでは暗号鍵とディスク I D を照合し一致していれば、映画ソフトの暗号を解除する。この暗号鍵は一定期間、例えば 3 日間有効であるため、消費者は 3 日間映画ソフトを楽しむことができる。この消費者 A がこの暗号鍵を同じソフトのディスクを持つ別の消費者 B に渡した場合は、その消費者 B の持つディスクの B C A のディスク I D が例えば 1 番であり、元のディスクのディスク I D の 2 番とは異なる。従って暗号鍵とディスク I D が一致しないため暗号は復号されない。従って、正規に暗号鍵を買った消費者のディスク 1 枚のみにおいて映画ソフトを再生することができる。このシステムは米国で実用化され、数億枚のディスクが出荷され、一時期普及したが、その後 DVD の ROM ディスクのレンタル価格が下がったため商業的に成り立たなくなり、現在では終息しつつある。このシステムも現在のように DVD の ROM

ディスクの製造コストが1枚、50セント以下の時代にビジネスを始めていれば大きなビジネスに育った可能性がある。なお、この電子流通方式の基本特許は筆者により考案されている。

4.4.2 B C Aの海賊版防止方式への応用

筆者によりB C Aを用いた海賊版防止技術が考案され、筆者によりソフトメーカーに提案された。そのソフトメーカーから依頼を受け、図262(a)に示す海賊版防止ディスクと図261(b)に示す海賊版防止再生装置を2000年に実用化した。発売から5年経過し、数億枚の海賊版防止ディスクを全世界に出荷したが、現在のところ海賊版ディスクはどの国においても発生していない。このことはB C Aの海賊版防止技術によりROM型光ディスクの情報セキュリティの脆弱性が顕著に改善されたことを実証している。

How to use Serial Number in BCA

A single password enables the decryption of encrypted contents of DVD-ROM disc of a Serial Number

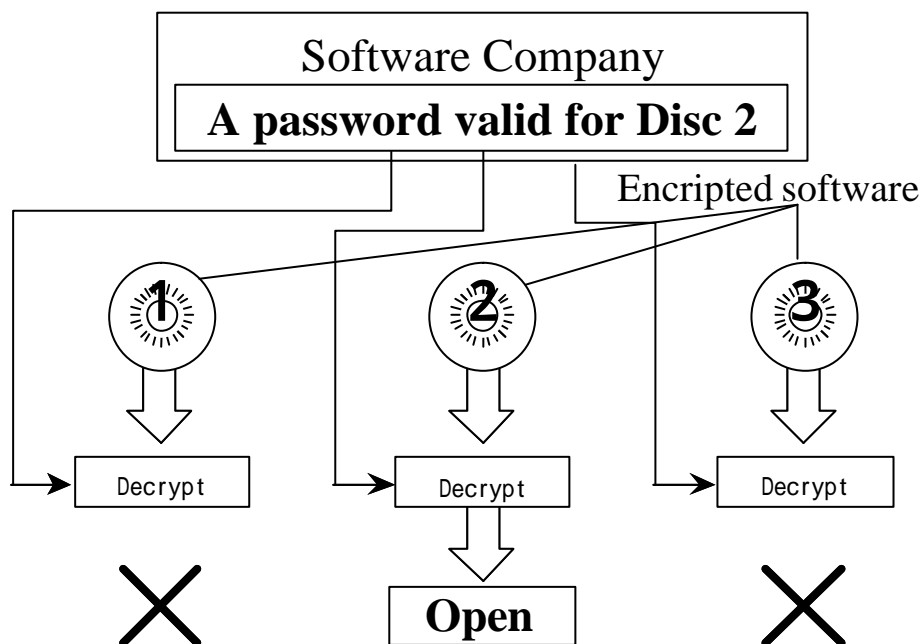


図261 B C Aを応用した電子流通方式

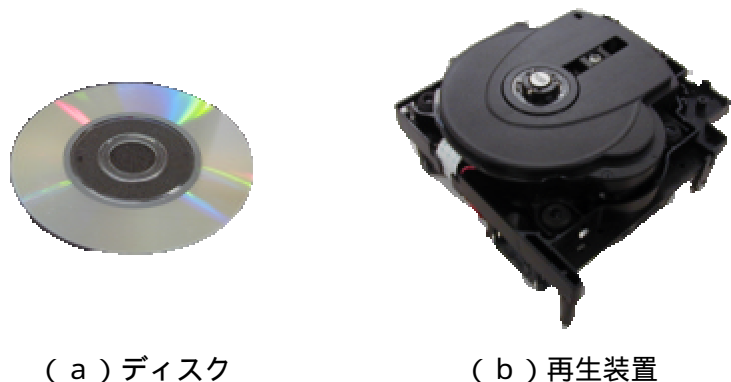


図 2 6 2 B C A を応用した海賊版防止方式

4 . 5 まとめ

D V D 規格において B C A 規格が正式に採用されたことを受けて、B C A の量産記録装置(試作 3 号機)を検討した。まず Y A G レーザーを用いる方式として記録時間 2 秒以下、ロボットハンドによる搬送時間 2 秒を実現したため、ディスク工場の工程時間 4 秒以下の要望に応えることができた。半径方向の加工精度は規格値 $\pm 50 \mu\text{m}$ 、円周方向の加工精度であるジッターは 3 % 以下になり、ともに規格の許容範囲内に収めることができた。

次に半導体レーザー方式を検討した。D V D - R A M の初期化装置に用いられている 5 W の半導体レーザーを用いて記録装置を検討した。1 枚あたり 1 0 秒の工程時間となった。このため実際のディスク工場の 4 秒の工程時間内に記録するには 3 台必要となる。この記録装置を用いて B D 規格の R O M ディスクに B C A を記録する場合に、スパイク信号が発生する。B D 規格の各社のディスクを用いて B C A の記録実験を行った場合、5 0 0 k H z の 2 次のローパスフィルタを通過させることにより、スパイク信号を取り除くことが明らかになった。そこで B D 規格の B C A の信号規定に 5 0 0 k H z のローパスフィルタを追加する提案を行い、2 0 0 5 年春に B D 規格が変更された。

また銀の反射膜を用いた R O M ディスクに B C A を記録すると、マークの連結部に反射膜の残渣が残るため再生信号が劣化しデータが再生できなくなるという深刻な問題が発生した。しかし新しい記録方法を筆者が考案したため、連結部に残渣が残らなくなり、B D 規格の R O M ディスクに用いられる銀の反射膜にも B C A の記録が可能となった。

B C A の応用として R O M 型 D V D ディスクを用いた情報セキュリティの高い暗号鍵電子流通システムが実用化された。また B C A を用いた海賊版防止ディスクが実用化された。

実用化後、5年経っても海賊版ディスクは登場していない。ROM型ディスクのもつ情報セキュリティの脆弱性がBCAにより確実に改善されたといえる。

第5章 記録型ディスクへのBCAの記録

5.1 はじめに

BCAは本研究により実用化されたが、当初はROMディスク用に検討され実用化された。その後、策定された記録型DVDのディスク規格であるDVD-RAM規格には、改ざん困難なシリアル番号の記録が求められ、その記録方式としてBCAが採用された。この章ではシリアル番号の必要性和要求仕様を述べ、YAGレーザーによるBCA記録と初期化装置（イニシャライザ）によるBCA記録方式の検討を行う。

5.2 記録型ディスクの固有IDに対する要求

BCAは1996年にDVDのROMディスクの規格[215]に採用された。その後、策定されたDVD-RAM規格ではデジタルTV放送のデジタルコンテンツを記録する時にコピー回数を制限する機能が著作権側から求められた。コピー制限を実現するには各々のディスクに1枚ごとに異なるシリアル番号を記録することが必須である。しかも、このシリアル番号は、

- (1) 一般消費者向け光記録装置で記憶、消去および改ざんされないことが著作権側から求められた。そして、その記録容量は16バイト以上が求められた。
- (2) ディスク製造業者からは低コストで短時間で記録できることが求められた。またライフテストにかけても記録データの品質が劣化しないことも求められた。
- (3) ドライブ製造者側からは既存の再生回路に追加する回路と追加コストが少ないことが求められた。データを高い信頼性で、短時間で安定して再生できることが求められた。

5.3 要求を満たす記録方式の検討

以上の要求を満たす記録方式としていくつかの方式が提案され、筆者も1998年にBCA方式をDVD Forumに提案した。各方式が検討されたが最終的にDVDのROM規格で既に規格化されていたBCA方式が採用された、BCA方式が採用された理由は、

- (1) 工場の生産設備のみで記録可能で、一般消費者用光記録装置では記録や改ざんができない。記録できない理由はBCAが通常のデータ記録領域とは異なる変調方式とエラー訂正方式と異なる記録マーク形状を採用しており、消費者用の光ディスク記録装置がこれらの機能を持っていないからである。
- (2) 工場設備を用いて低コスト、短時間で記録できる。特に初期化（イニシャライズ）装置を用いて記録する場合、追加コストが殆ど不要で追加工程時間も必要ないという優れた特長を持っている。BCA記録データは実績もあり信頼性が高い。

(3) B C AはDVDのROMディスク規格の中に1996年に規格化されている。このため光ディスクドライブの再生回路のICにはB C Aの再生回路は既に入っている。従ってB C AをRAM規格に追加してもドライブのコストは増えない。B C Aデータの再生時間が短く、実用上問題がなかった。またB C A再生時の信頼性もROMドライブで既に確立されていた。

以上の点からB C Aが最適であると判断され、正式にシリアル番号を記録するための副記録領域として1999年DVD-RAM規格に採用されDVD-RAM規格書〔213〕に記載された。B C Aはその後DVD-RW規格、DVD-R規格、MOディスクのASMO規格、BD (Blu-ray Disc) - RAM規格、HD-DVD-RAM規格に次々と採用された。

5.3.1 YAGレーザーを用いた記録型ディスクへのB C Aの記録

DVD-RAMやDVD-RWのような記録型ディスクにYAGレーザーを用いてB C Aを記録したところ図263のような大きなスパイク電圧が発生した。この理由はYAGレーザーの照射部において、領域Aでは記録層が除去されても深部にある反射層が残るため反射層によりレーザー光が70%近く反射されるため、大きなスパイク電圧が発生する。領域Cでは記録層と反射層の両方が除去されるため反射光は殆ど戻ってこない(反射率:5~10%)。領域Bでは記録膜も反射膜も残っているため通常の反射が起こる(反射率:20~30%)。スパイク電圧を除去するためB C Aの再生信号をLPF(低域通過フィルタ)を通過させた出力信号を用いたが、充分除去することはできなかった。またYAGレーザーのパワーを上げて記録してみたが、一定以上に上げると記録膜が破壊されるため、それ以上、パワーを上げることはできなかった。そして、この投入可能なパワーの範囲内ではB C Aストライプ部の反射膜を全て除去することはできなかった。反射膜を全て除去できなかったのは反射膜の金属の融点が高いため表面張力による除去ができなかったためと考えられる。次に信号レベルより高いスパイク信号が出ない範囲にパワーを下げて記録したところ、図264に示すようにB C Aのマークの中に小振幅のスパイクが発生した。500kHzのフィルタを通して図265に示すように小振幅のスパイク信号の存在によりB C Aの底部が充分下がらないため、規格の信号規定を満たすことはできなかった。スパイクが少なくなるパワーの範囲も見つかったが、その範囲は極めて狭く殆ど記録マージンをとれなかった。このためYAGレーザーによる記録型ディスクへのB C A記録は量産工程には導入できないと考えられる。

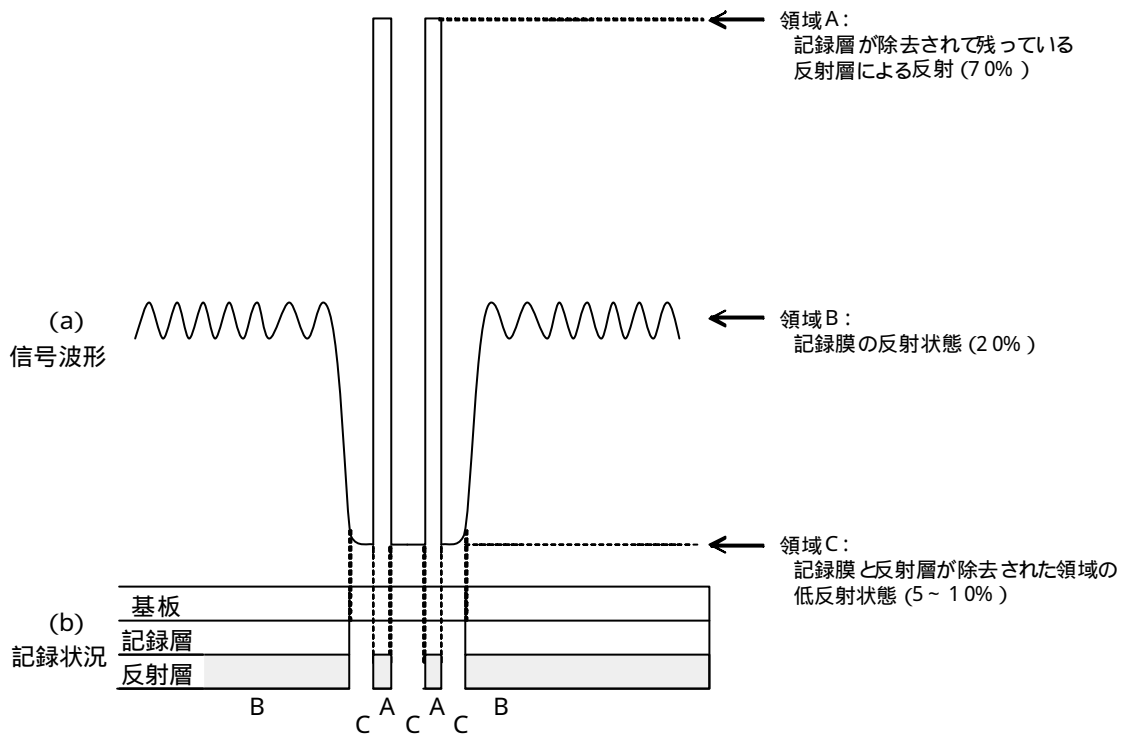


図 2 6 3 YAGレーザーで記録した時にスパイク信号が発生する原理

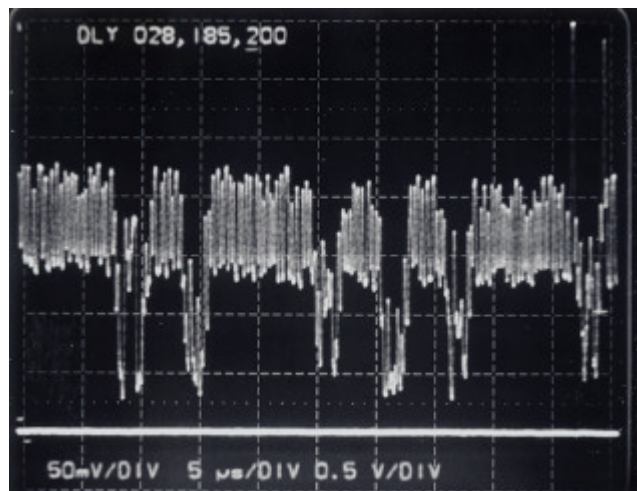


図 2 6 4 YAGレーザーでDVD-RAMディスクに記録した場合の信号波形

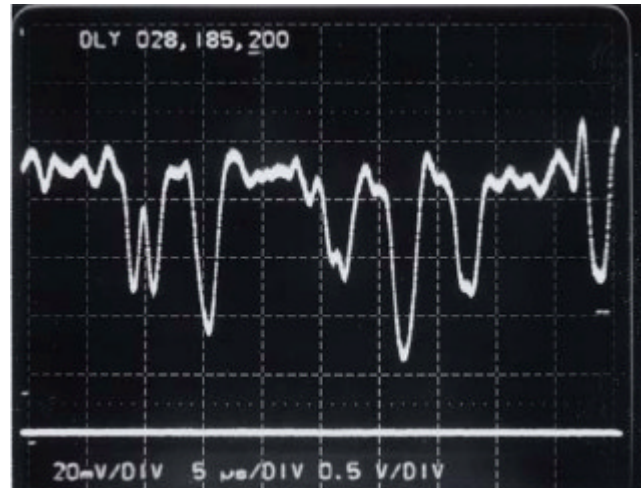


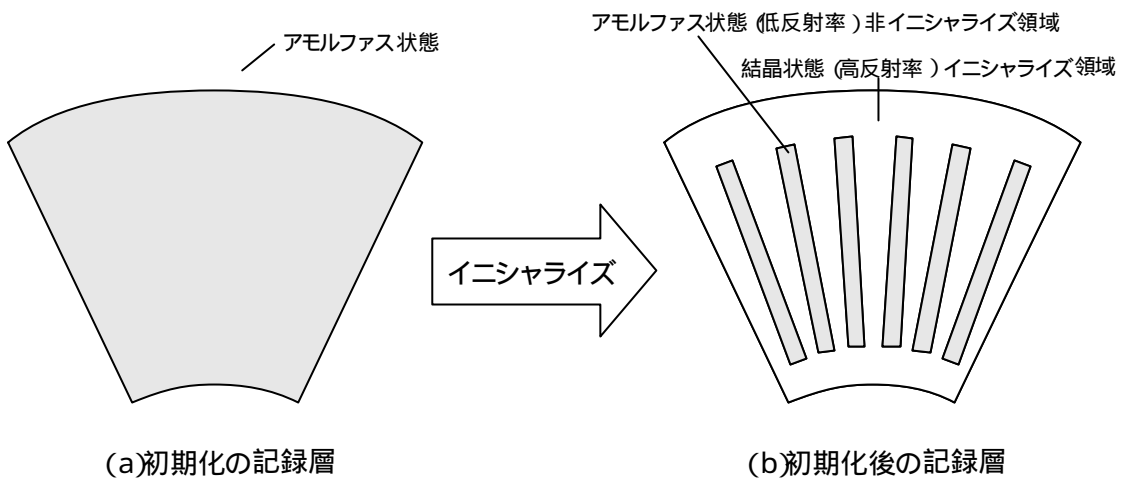
図 2 6 5 フィルタ通過後の B C A 再生信号の波形

5 . 3 . 2 イニシャライズ装置を用いた B C A の記録

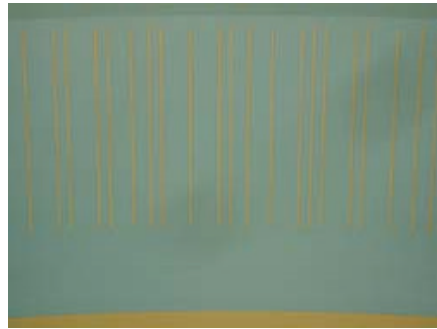
D V D や B D 規格の記録型ディスクは記録材料としてアモルファス材料を用いているため、工場で最終成膜工程においてはアモルファス状態であり反射率が低い。工場ではレーザーを照射することにより記録膜をアモルファス状態から結晶状態に変えるイニシャライズ工程を行う。結晶状態では高い反射率（20～30%）で、アモルファス状態では低い反射率（0～5%）であることを利用してイニシャライズ工程において B C A マークを記録する方式が筆者らにより考案された〔211〕。

図 2 6 7 (a) (c) に示すように B D - R A M ディスクのイニシャライズ前の記録層の反射率は低い。図 2 6 7 の (b) (d) に示すように B C A マークの領域のみイニシャライズをしなければ、B C A マーク部はアモルファス状態のまま、つまり反射率が低い状態となる。B C A のマーク以外はイニシャライズされるため反射率は高くなる。従って図 2 6 8 (a) に示すように B C A マーク部の反射率は低くなり、B C A マーク部以外の反射率は高くなる。この領域を光ヘッドで再生すると図 2 6 8 (b) のような信号波形が得られる。この方形波は容易にデジタル信号に変換できる。イニシャライズ工程は記録ディスク製造において必須工程である。このイニシャライズ記録方式はイニシャライズ工程の中で処理できる。このため B C A の記録工程による工程時間と工程コストの増加は零である。

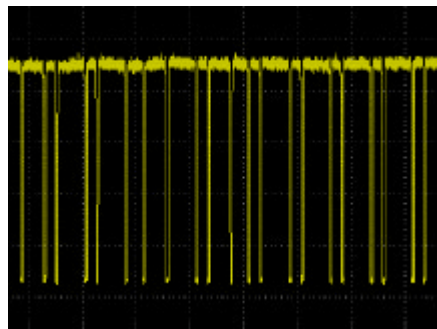
またイニシャライズ装置の追加も不要であるため、B C A 記録による設備コストの追加とディスクの工程時間の増加が殆どない。このため、ほぼ全てのディスク工場に急速に採用された。



(c) 初期化前の拡大写真



(d) 初期化後の拡大写真



(e) 再生信号の波形

図 2 6 7 イニシャルイズ方式の B C A の記録原理

(a) B C A の拡大写真



(b) B C A の再生信号波形

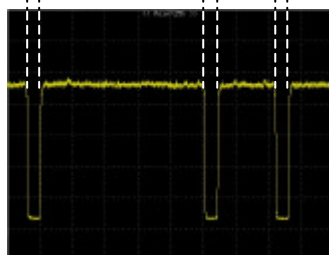


図 2 6 8 初期化方式で記録した B C A の再生信号の波形

5 . 4 B C A のディスク I D を用いたコピー制限方式

B C A に記録されたディスク I D を用いてデジタルコンテンツのコピーを 1 回に制限することが筆者らにより考案され〔 2 1 4 〕、C P R M¹⁾規格に採用され 1 9 9 9 年実用化され、D V D レコーダーに搭載された。

図 2 6 9 に C P R M の概略を示す。C P R M では記録型ディスクの B C A にディスク固有のディスク I D が工場で予め記録されている。記録する場合は B C A からディスク I D、例えば 1 を再生し、このディスク I D から暗号タイトル鍵を生成しこの鍵から暗号鍵を生成し、この暗号鍵を用いてデジタル放送で受信したデジタル映像信号を暗号化する。こ

¹⁾ C P R M (Content protection for Recordable Media) D V D 規格で採用されている著作権保護技術。メディアに記録された I D 番号 (ディスクの場合は B C A に記録) を仕様し様々なコピー制御を実現できる。

の暗号化データを 1 のディスクに記録する。

これは1回目のコピーであるから正規コピーといえ、コピー制限はかからない。このディスクを再生する場合、まず BCA 領域からディスク ID を再生し、記録時と同様の手続きでディスク ID を用いて暗号鍵を生成する。ディスク ID は 1 であるから 1 に関連づけられた暗号鍵となっている。この場合、データ領域の暗号データの暗号鍵も 1 に関連づけられたものであるため2つの暗号鍵が一致するため復号され元の映像信号が出力される。

しかし、2枚目のディスク(ディスク ID = 2)を用いて1枚目のディスク(ディスク ID = 1)のデジタルデータを Bit by bit コピーすることは物理的に可能である。この2枚目ディスクを再生した場合、BCA 領域を再生するとディスク ID = 2 が再生される。しかしデータ領域から再生された暗号化データはディスク ID (1) に関連づけられた暗号鍵によって暗号化されている。このデータを復号しようとしても二つの暗号鍵は 1 と 2 であり一致しない。このため暗号化データは復号されない。こうして違法のコピーである2回目のコピーを行ったディスク 2 から映像信号が再生されないため、著作権は保護され、1回目のコピーを行ったディスクのみが実質的に出回ることになる。

「1回コピー」機能がBCAとCPRMの筆者らによる発明により実現した。このため著作権側からDVDレコーダのデジタル録画機能の情報セキュリティが高いことが認められ、DVDレコーダの出荷が可能となり1999年に出荷された。この記録装置側の「1回コピー」の実現は2000年から始まるデジタルTV放送に対応したものである。2000年12月と2003年12月に本放送が放送開始されたBSデジタル放送とデジタル地上波放送では放送番組毎に「コピーフリー」の識別子もしくは、「1回コピー」の識別子もしくは「コピー禁止」の識別子が付与されている。実際には殆ど全ての番組に「1回コピー」識別子が付与されており、番組内容には「デジタル1 Copy」と表示されている。デジタル放送を1回しかDVDディスクやBDディスクに記録できないため消費者にとっては利便性が悪くなる。しかし「1回しか記録できない」という情報セキュリティ面の安全性が保たれている。このため著作権側から映画等の画質の優れたデジタルコンテンツの提供が可能となるとともに安全性の高い分デジタルコンテンツのコストが下がる。従って総合的に見た場合消費者にとってメリットがあると考えられる。

“1回コピー”という名称で呼ばれているが、技術的には“N回コピー”を可能とする技術で、著作権側からN=1の場合しか許可されていないためN=1となっている。2005年夏には総務省によりNの値を2以上に増やす提案がなされており、時代に応じてNの値は変わっていくものと思われる。Nがいずれの値になるにせよ、デジタルコンテンツの時代においてはコピーしても映像音響品質が全く劣化しないため、デジタルコピーには一定に歯止めをかける必要があると考えられる。筆者が考案、実用化したBCAや筆者らにより考案されたCPRMのような情報セキュリティを強化する技術の重要性は今後も高まると思われる。

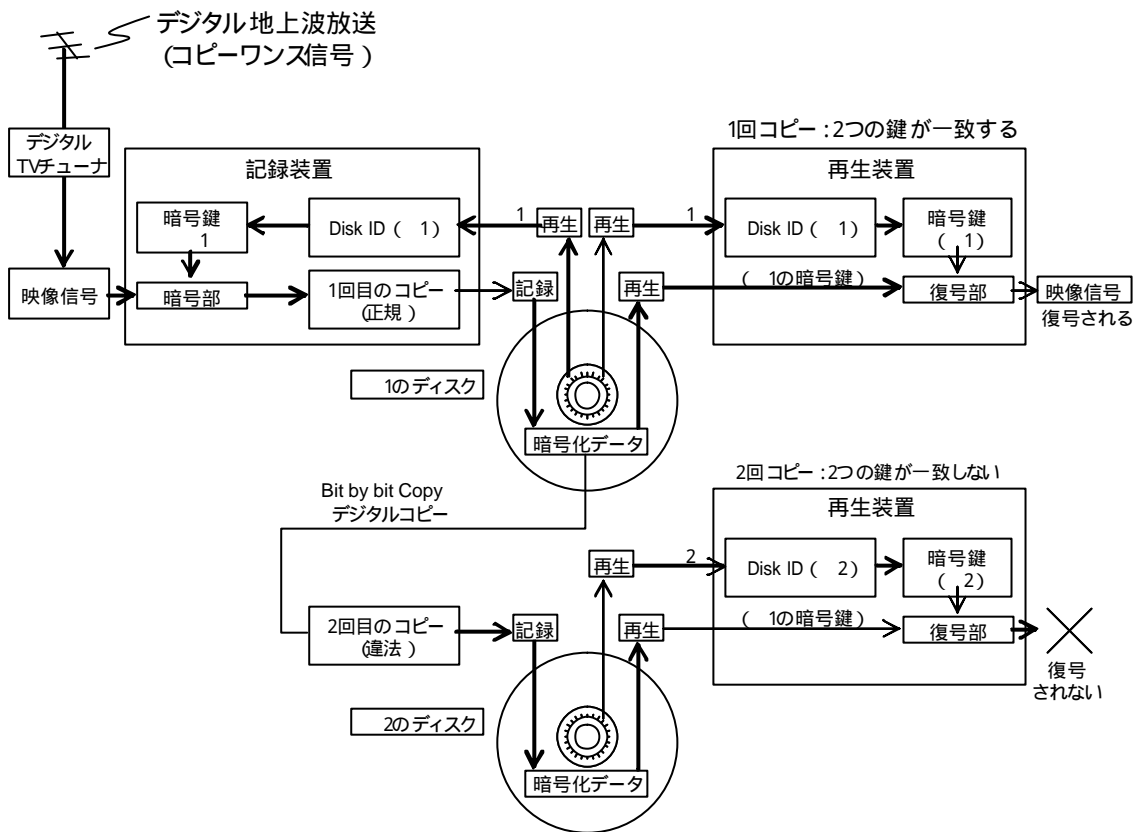


図269 BCAを用いたCPRM方式(1回コピー)の動作原理



図270 CPRM機能を搭載したDVDレコーダ(松下電器製)

5.5 まとめ

BCAは1996年DVDのROM規格〔215〕に導入された。その後、規格化されたDVD-RAMディスクに固有IDの記録方式が求められたため、1998年にDVD-RAM規格〔213〕への提案を筆者が行った。当初はROMディスクのBCA記録で用いられているYAGレーザー方式の記録装置で記録を行ったが、BCA再生信号に大きなスパイク信号が発生するため量産工程に導入できないことが明らかになった。そこでDVD-RAMの記録膜が初期化前の反射率が低く、初期化後に高くなることに着目し、BCAストライプの領域のみ初期化しないことによりBCAを記録する方式を考案した。この方式によりディスクの追加コスト、追加工程時間が殆どなくなり、DVD-RAMディスクの全ディスクにBCAが採用されることになった。BCAによる固有IDの全数付与によりCPRM規格を用いた「1回コピー」制限が実現し一般消費者がデジタルTV放送を1回コピーすることが可能となった。BCAが改ざんできないため不正コピーが防止され、記録型ディスクの情報セキュリティの脆弱性がBCAにより大きく改善された。

第6章 結論（第2部）

エジソンおよびベルリナーによりレコードつまりROMディスク型記録メディアが発明されて100年間「ROMディスクにはデータを記録することができない」というのが技術の常識であった。

しかし1995年、ROM型ディスクにデータを記録する“表面張力記録”が筆者により発見・発明され記録できるようになった。“表面張力記録”によってROMディスクに記録するフォーマットを考案しBCA（Burst Cutting Area）と名づけた。1996年1月、DVDの標準化組織であるDVD Forumに提案し、同年10月、ROMディスクのDVD規格〔215〕に採用された。

記録型ディスク用のBCAとしてはBCAマークの低反射領域をアモルファス状態にして記録する方式を筆者らが考案・提案し、DVD-RAM〔213〕、DVD-RW、DVD-R、BD-RAM、BD-ROM、HD-DVD-ROM規格に採用された。筆者のBCAの発明により、改ざんできない副記録領域が実現し、従来の光ディスクの持っていた情報セキュリティの脆弱性が大きく改善された。達成された主な項目を以下に述べる。

（1）BCAの記録フォーマットの考案、提案、規格化

表面張力記録に用いるレーザービームの大きさは、光ディスクの記録ピットと比べると50倍から1万倍大きいため、トラッキング情報を読み取りながら記録することができない。このためマークの位置精度が良くない。そこで円周方向に比べて半径方向の長さが100倍長いストライブをバーコード状に円周方向に配列する方式を考案した。この配列により既存の光ヘッドでトラッキング制御することなしに、またPLLをかけることもなく安定してBCAを再生できるようになった。新たなPE-RZ変調方式の考案によりデータ記録効率を高めるとともに、コンパクトなエラー訂正方式の採用により装置内のマイクロコンピュータで再生信号を処理できるようになった。光ディスク再生装置側のコストが増えないことからドライブメーカーの賛同を得られた。またBCAを記録しても既存のデータ記録領域に影響を与えないことが確認されたため、ディスク製造会社からも賛同を得られた。標準化活動を行った結果1996年夏にBCAはDVD規格 Ver.1.0〔215〕に正式に採用された。

（2）BCAの記録方式の検討

まず円形ビームのYAGレーザーを搭載した実験機（試作1号機）を用いて世界で始め

てROMディスクにデータを記録することに成功した¹⁾。円形ビームを楕円ビームに変えた実験記録装置（試作2号機）を用いてBCAの記録時間を20分から1.5秒へと大幅に短縮した。透過電子顕微鏡観察により、記録原理を明らかにするとともに基板に損傷を与えないことを確認した。各社のディスクにBCAを記録したテストディスクをライフテストにかけ、ディスクの信頼性が保たれることを実証した。シリンドリカルレンズを用いた場合に焦点深度や記録パワーに余裕が充分あることを明らかにし、量産記録用の基礎技術を確立した。

（3）ROM型ディスクへの量産用記録方式の確立

DVD規格においてBCA規格が採用されたことを受けて、BCAの量産記録装置（試作3号機）を検討した。

まずYAGレーザーを用いる方式として記録時間2秒以下、ロボットハンドによる搬送時間2秒を実現したため、ディスク工場の工程時間4秒以下の要望に応えることができた。半径方向の加工精度は規格値 $\pm 25\ \mu\text{m}$ 以内、円周方向の加工精度であるジッターは3%以下になり、ともに規格の許容範囲に余裕をもって収めることができた。

次に半導体レーザー記録方式を検討した。出力5Wの半導体レーザーを用いて記録装置を検討した結果、1枚あたり10秒の工程時間となった。実際のディスク工場の4秒の工程時間内に記録する場合には3台必要となる。この記録装置を用いてBD²⁾規格のROMディスクにBCAを記録するとスパイク信号が発生する。各社のディスクを用いてBCAの記録実験を行い、再生信号を500kHzの2次のローパスフィルタを通すことによりスパイク信号を取り除くことができることを確認した。BD規格のBCAの信号規定に500kHzのローパスフィルタを追加する提案を行い、2005年春にBD規格が変更された。

またBD規格のディスクでは主流となっている銀の反射膜のROMディスクに半導体レーザーでBCAを記録した場合、マークの連結部に反射膜の残渣が残り再生信号が劣化しデータが再生できなくなるという深刻な問題が発生した。しかしビームプロファイルを変更した新しい記録方法を筆者が考案した。この記録方法により連結部に残渣が残らなくなりBD規格のディスクに用いられる銀の反射膜にもBCAが記録できるようになった。

BCAの応用としてROM型DVDディスクを用いた情報セキュリティの高い暗号鍵電子流通システムが米国で実用化された。またBCAを用いた海賊版防止ディスクを筆者が考案しソフト会社に提案し2000年に実用化した。数億枚のディスクを全世界に出荷したが、5年経っても海賊版ディスクは登場していない。ROM型ディスクのもつ情報セキ

1) 既存の光ヘッドで再生可能なデータをROMディスクに記録したのは本研究が世界初である。

2) BD (Blu-ray Disc): 青色レーザー ($\lambda = 410\ \text{nm}$) を用いた光ディスク規格。

セキュリティの脆弱性をBCAにより顕著に改善できることが実証された。

(4) 記録型ディスクへの量産用記録方式の確立

BCAは1996年DVDのROM規格に導入されたがDVD-RAMディスクには固有IDの記録方式が求められた。そこで1998年にDVD-RAM規格〔213〕へ筆者がBCAを提案した。当初はYAGレーザーを用いて記録を試みたが、BCA再生信号に大きなスパイク信号が発生するため量産工程に導入できないことが明らかになった。

そこでDVD-RAMディスクの記録膜が初期化工程前の反射率が低く初期化工程後に高くなることに着目した。BCAストライプの領域だけを初期化しないことにより低反射率のストライプを形成し、BCAを記録する方式を筆者らが考案した。この方式によりBCA記録時の追加コスト、追加工程時間が殆ど必要なくなり、記録型DVDディスクのほぼ全ディスクにBCAが採用されることになった。

BCAによる固有IDの全数付与によりCPRM¹⁾規格を用いた「1回コピー」制限が実現し一般消費者がデジタルTV放送を1回コピーすることが可能となった。BCAのデータが改ざんできないため不正コピーが防止され、記録型ディスクの情報セキュリティの脆弱性がBCAにより大きく改善された。

以上、“表面張力記録”を発見・発明した。そして表面張力記録に適した記録フォーマットであるBCAを考案し、光ディスク規格に提案した。図271に示すように1996年以降にDVD、DVD-RAM、DVD-RW、DVD-R、ASMO等の規格に、2004年以降にHD-DVD、BD(Blu-ray Disc)等の青色レーザーを用いる光ディスク規格にBCAは採用された。

現在の記録型ディスクにおいては、ほぼ全数にBCAが記録されている。ROM型ディスクにおいてはBCAがオプション規格であるため、一部のディスクに記録されているだけである。一部のクローズドな世界において、ディスクを用いた電子流通や海賊版防止に用いられている。狭い世界で用いた方がセキュリティを保ち易いためセキュリティが破られにくいともいえる。しかし、BDやHD-DVDのような次世代のディスクでは情報セキュリティがより高いことと、インターネット接続機器が増えたため、BCAの活用場が広がっている。BCAを用いた電子流通方式や海賊版防止方式の採用が今後増えていくものと予想される。

最後に表面張力記録とその記録フォーマットであるBCAを筆者が発見・発明し、世界で初めてROMディスクへの記録を実用化してから10年経つ。この実用化を端

¹⁾ CPRM: Copy Protection for Recordable Media BCAに記録されたディスク1枚毎に異なる「ディスクID」とMedia Key Brockの「メディア鍵」を用いて暗号鍵を生成し、コンテンツを暗号化して記録型ディスクに記録する。筆者は発明者の一人である。

緒として、1996年以降登場した光ディスク規格のほぼ全てにBCAが採用された。現在BCAを記録したディスクが年間に数億枚生産され、光ディスクの情報セキュリティの脆弱性を大幅に改善した。これらの全数が筆者が考案し標準化・実用化した基本技術と基本特許を採用していることは、本分野に携わる研究者として、また発明家として望外の喜びである。

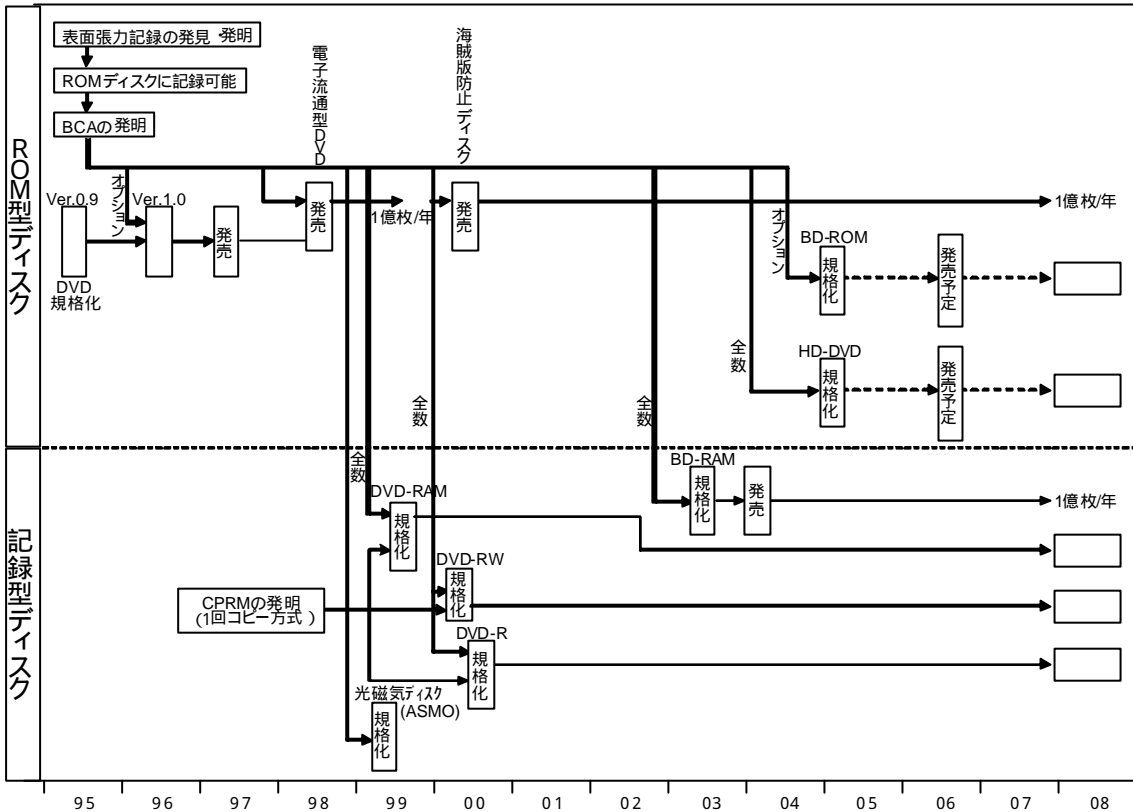


図 2 7 1 光ディスクの規格化における本研究の位置づけ

表 1 7 副記録領域に対する要望と B C A の性能

要望者	要望		BCAの性能		
	ROM型ディスク	記録型ディスク	ROM用 BCA	RAM用 BCA	備考
著作権側	市販の光ディスク記録装置もしくは消費者が簡単に改造した記録装置で記録もしくは改ざんできない。		製造装置でも改ざん不可	製造装置では改ざん可能	
	海賊版ディスクを防止できる		(オプション)		
		2回以上のコピーを禁止できる		(CPRM規格)	
	16バイト以上の記録容量		1円以下	コスト= 0	188バイト
ディスクメーカー	工場で安価に記録できる		2秒以下	追加時間なし	
	工場で高速に記録できる				
	記録データの信頼性が高く再生による劣化がない				
ドライブメーカー	通常の光ヘッドで再生できる				
	新規の再生回路のコストが低い				ファームウェアで再生可
	読みとりに時間を要しない				1秒以下
	読みとり時のデータ誤りが少ない				

第3部 デジタル通信の悪条件下における脆弱性改善の研究

第1章 序論

1.1 無線通信技術の技術史における本研究の位置づけ

1888年ヘルツが電磁波を発見し実証した。1895年に、この実用的な利用方法を発明し実験に成功したのがマルコーニ¹⁾である。彼は今日的な接地アンテナを発明し1896年に3kmの通信に成功した。当時の無線通信は電信であり広義のデジタル無線通信であったといえる。1906年にド・フォレスト²⁾により三極管が発明され無線通信技術が飛躍的に発展し、同年にはニューヨークでラジオ放送の実験が成功する。アームストロングは1920年にスーパーヘテロダイン回路を発明し、1935年には周波数変調方式(FM)を発明した。1937年にはリーヴィス³⁾がパルス変調方式(PCM)を発明しデジタル通信の時代へ突入していく。1948年にはシャノン⁴⁾が情報理論を発表する。1954年にはアメリカのNBCがNTSC方式のカラーTV放送を開始した。この後アナログTV放送が急速に全世界に普及した。1965年にはベル電話研究所でOFDM⁵⁾が発明された。

1991年にはデジタルTV放送の検討が米国で始まり、1994年、米国方式デジタルTV規格(ATSC)⁶⁾が規格化された。最終的に8VSB⁷⁾トレリス方式が規格に採用された。8VSB方式と8VSBトレリス方式は本研究の中で1991年と1992年に考案されたもので、筆者の基本特許〔313〕〔314〕が権利化されている。

欧州では1995年、OFDM方式の欧州規格であるDVB-T⁸⁾規格が規格化された。DVB-T規格には階層型変調方式であるNU-QAM(Non Uniform QAM)〔320〕と階層型OFDM方式〔321〕と階層型復調情報伝送方式であるTPS⁹⁾〔319〕の筆者が考案した3つの方式が採用されている。1999年より英国を最初として、欧州各国でDVB-T規格の放送が開始されている。欧州方式では階層伝

1) マルコーニ(Guglielmo Marconi : 1874-1937)イタリア。「無線の父」と呼ばれている。

2) ド・フォレスト(Lee de Forest : 1873-1961)米国。

3) リーヴィス(A.H. Reeves)英国。

4) シャノン(Claude Elwood Shannon : 1916-2001)米国。「情報理論の父」と呼ばれている。

5) OFDM:Orthogonal Frequency Division Multiplexing

6) ATSC : Advanced Television System Committee デジタルTV規格制定のための国際的組織

7) VSB : Vestigial Side Band

8) DVB-T : Digital Video Broadcasting Terrestrial

9) TPS : Transmission Parameter Signaling data system

送方式が部分的に採用されているが、欧州方式の後に検討が開始された日本方式（ISDB-T）においては全面的に階層伝送方式が採用されており、日本方式の最大の特徴となっている。このうち、階層型OFDMと階層型復調情報伝送方式であるTMCC〔322〕と階層型ガードタイム〔323〕と階層型放送方式〔324〕の筆者が考案した4つの方式が採用され、日本方式の階層伝送の基本的な部分を構成している。日本では2004年12月に都市圏から放送が開始されている。

このように3つのデジタル放送規格の基本的な変復調方式（チャンネルコーディング）に本研究で筆者により考案された技術が採用されるとともに、その後筆者の特許が米国方式と欧州方式の規格必須特許に認定されている。

1.2 デジタルTV放送の技術史における本研究の位置づけ

全世界で規格化されている地上波デジタルTV放送規格は図301に示すように米国方式、欧州方式、日本方式の3方式である。この3方式における本研究の位置づけを詳しく述べる。

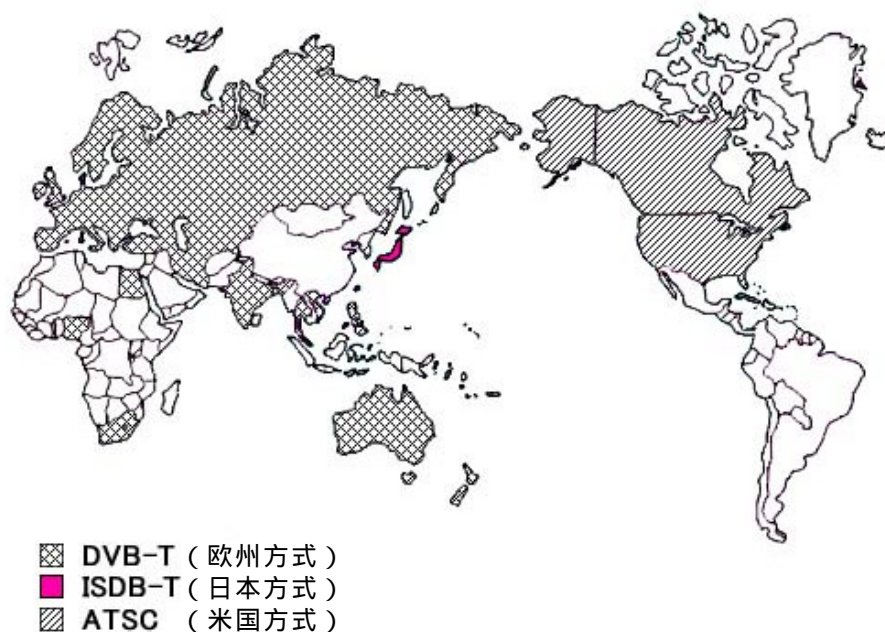


図301 世界の地上波デジタルTV放送規格

1.2.1 米国方式（ATSC）における本研究の位置づけ

1990年にはMPEG等のデジタル映像圧縮技術が姿を現した。映像圧縮技術を用いるとデジタル映像データを数十分の1に圧縮できるため、地上波TV放送の1チャンネルの周波数帯域でハイビジョン放送が可能となった。そこで1991年にアメ

リカでATSCが設立されデジタル地上波TV放送の検討が開始された。ATSCではQAM変調と4値VSBの2つの変調方式が1991年春から検討された。この2つの変調方式を用いた4つの方式が提案され、検討が開始された。検討が開始される前の1991年3月に本研究の中で筆者が8値のVSB方式を考案〔303〕したが、同時期にZenith社のCitta¹⁾が4値のVSBを発明しATSCに提案している。1992年春には8VSBを発展させた図303、図304に示すような8VSBトレリス変調方式を筆者が考案〔314〕している。4つの提案の中でQAM方式が当初は優勢であった。しかしQAM方式よりも4値VSB方式の方が構成が簡単であるため、より現実的であると判断され4VSB方式が一時期優位に立った。しかし詳細な検討の結果、4VSB方式は伝送容量が低く符号化したHDTVデータを送ることが困難であることが明らかになった。そこで1995年9月、筆者の考案した8VSBトレリス方式〔314〕が米国のデジタル地上波放送規格〔305〕の最終方式として採用〔307〕され、1998年11月に米国で本放送が開始された。FCC²⁾によると、2005年にはATSC受信可能世帯は99.8%に達し、図302に示すように全米の95%の世帯でHD放送を無料視聴できる。

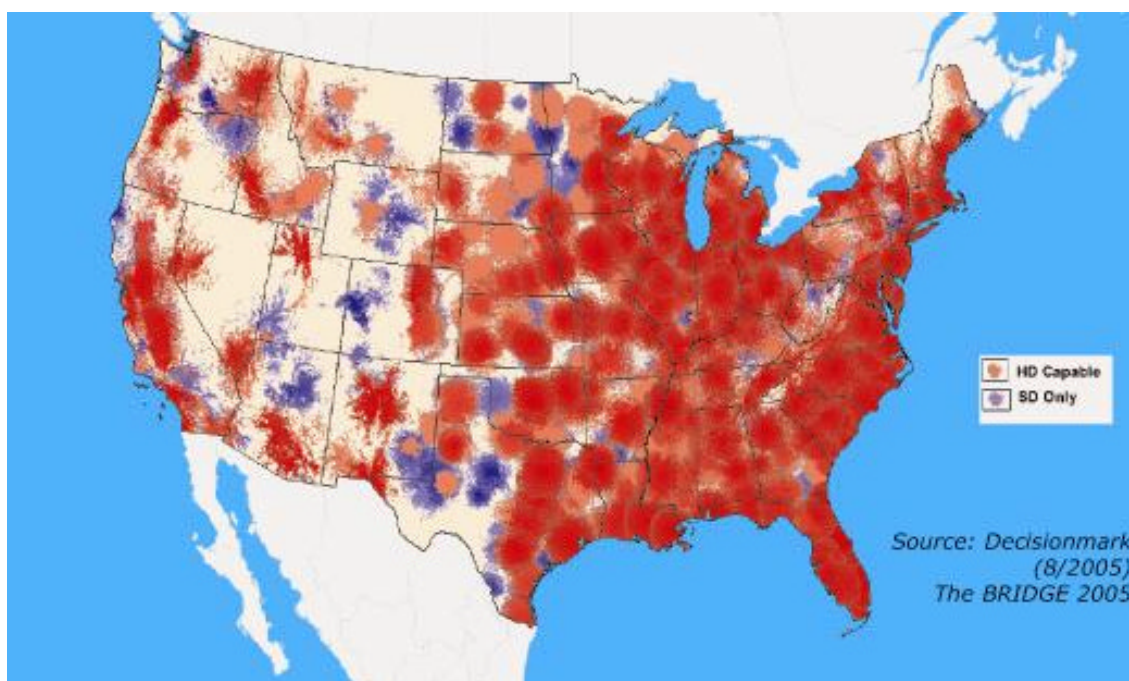


図302 米国における地上波デジタル放送受信可能エリア

1) Richard Citta : Zenith 社の技術者、米国では8VSBトレリス方式の発明者とされている。しかし筆者が2年早く特許出願しているため彼は真の発明者ではない。

2) FCC : Federal Communication Committee

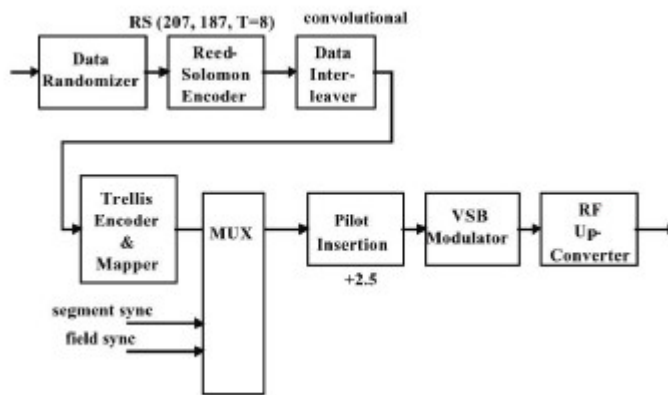
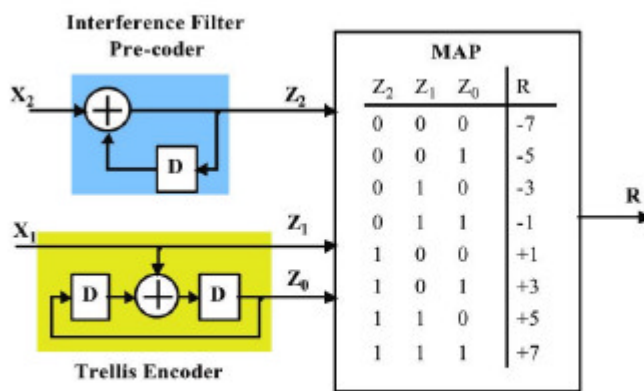


図 3 0 3 8 V S B トレリス方式の送信機のブロック図



$207 \text{ (bytes)} \times 8 \times 3/2 \times 1/3 = 828 \text{ symbols}$

図 3 0 4 トレリスエンコーダーとマッパー

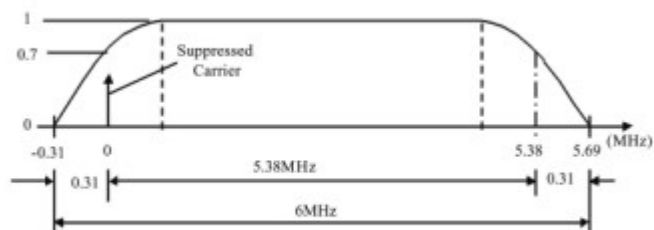


図 3 0 5 8 V S B トレリス方式の周波数帯

1.2.2 欧州方式 (DVB-T) における本研究の位置づけ

欧州でも地上波デジタルTV放送規格 (DVB-T) の検討が1993年頃より始まった。欧州では多くの国が隣接しているため、相互干渉対策が重要であった。また欧州では音声放送規格であるDAB (Digital Audio Broadcasting) 規格でOFDM¹⁾方式が採用され既に実績があった。これらのことからOFDM方式が採用された。

欧州方式では2種類の階層化方式が採用されている。1つ目の階層化方式はNU (Non Uniform) - QAMである。1991年に筆者が、その後MITのSchreiber教授がQAMを階層化したNU-QAMを考案した。この方式は筆者とSchreiber教授が提案している〔312〕。このNU-QAMは欧州TV放送方式であるDVB-T²⁾規格〔318〕〔324〕の基本変調方式に採用された。

2つ目の階層化方式は階層型OFDMである。OFDMではシンボル長や、変調方式等の数多くの伝送パラメータがあり数百の組み合わせが考えられる。このパラメータがわからないと全く復調できないため、この復調パラメータの確実な送信方法が必要となった。そこでOFDMに階層伝送方式が導入された。この方式はOFDMの伝送路を複数のサブチャンネルに分割して、変調方式やエラーコードゲイン等を変えることにより各々のサブチャンネルの耐性の強さを変える。そして最も耐性の強いサブチャンネルで復調パラメータ等の復調情報を送る手法である。この復調情報送信方式は欧州方式ではTPS (Transmission Parameter Signaling data system)、日本方式ではTMCC (Transmission Multiplexing Configuration Control) と呼ばれている。TPSやTMCCの採用により安定した受信が可能となった。このTPSやTMCCの手法は筆者により1991年に考案〔319〕されたもので、1994年に欧州規格、1996年に日本規格に採用された。

1) OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

2) DVB-T : Digital Video Broadcasting Terrestrial

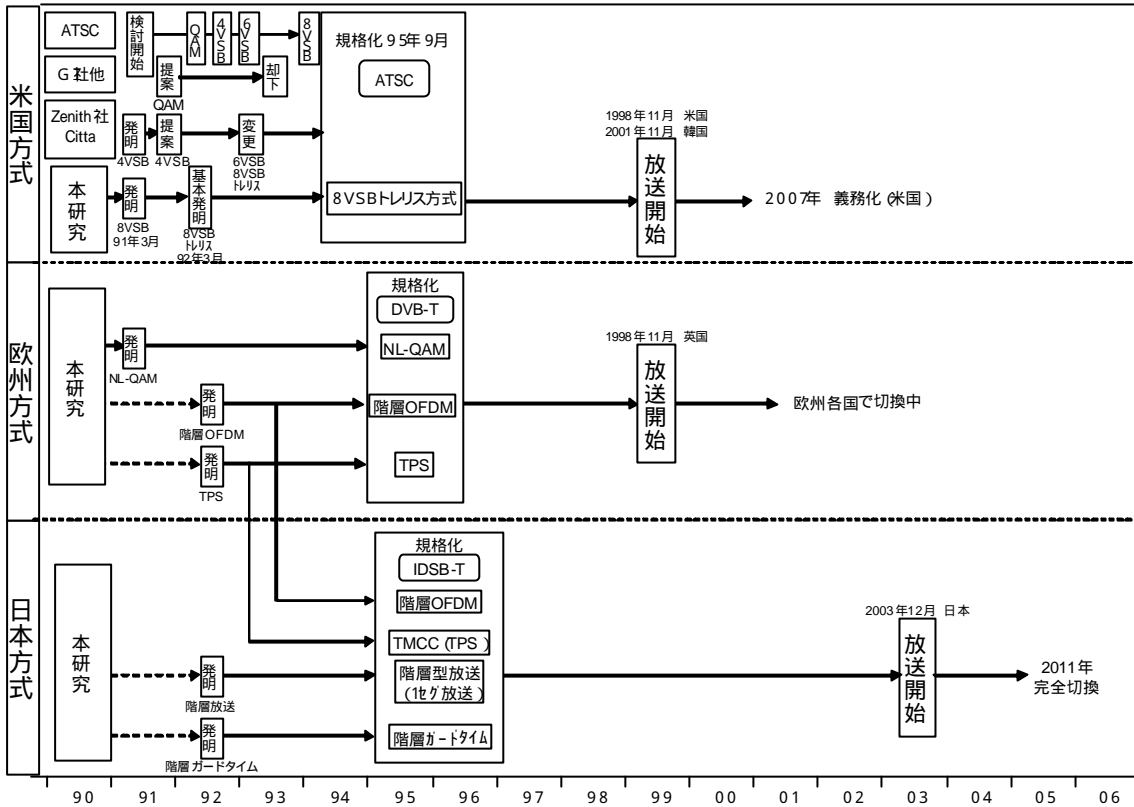


図 3 0 6 地上波デジタルTV放送規格化における本研究の位置づけ

1. 2. 3 日本方式 (I S D B - T) における本研究の位置づけ

日本方式においては欧州規格で採用されたOFDM方式が検討された。日本方式では基本的な部分は欧州方式のOFDM方式を踏襲しているが、階層伝送が最大の特長になっている。筆者が考案した復調情報送信方式であるTPSはTMCC¹⁾という名称で採用されている。しかし欧州方式のもう一つの階層化方式であるNU-QAMは採用されていない。日本独自の方式として周波数分割方式の階層型伝送が加わっている。この方式は日本におけるTV放送の1チャンネル枠の帯域である6MHzを429kHz幅で13分割して13セグメントとする。これを最大3階層に分割し階層毎に変調方式を変え、耐性や伝送量を変えることができる。

実際のサービスとしては「1セグ放送」と一般的に呼ばれている階層型放送が2006年より開始された。これは図307(a)に示すように通常の耐性を持つ12セグメントのサブチャンネルを用いて解像度の高いHDTVの1番組もしくはSDTV

1) TMCC : Transmission and Multiplexing Configuration Control 変調方式のパラメータ

の3番組を送り、耐性を強めた1セグメントのサブチャンネルでQVGA等の低解像度のTV信号を送る。従って映像信号も含めて階層化した階層型放送が初めて実現するといえる。この階層型放送の概念は1991年に筆者により考案され提案された方法で基本特許が権利化〔311〕されている。また3セグメントのサブチャンネルを用いてデジタルラジオ放送を行う規格も盛り込まれている。図307(b)は携帯電話で1セグ放送を受信している状態を示す。図307(c)に示すように日本方式の地上波デジタル放送方式であるISDB-T¹⁾は2003年12月に日本の3大都市圏から放送が開始され、2011年にはアナログ放送は完全に廃止される計画となっている。

一方、2000年12月に放送開始された衛星デジタル放送においても筆者の発明したTMCCを用いている。TC8-PSKとQPSK/BPSKを時間分割多重して伝送することにより階調変調方式を実現しており、降雨減衰時には耐性の強いQPSK又はBPSKのサブチャンネルが受信できる。このサブチャンネルを用いて低解像度の映像信号が送られている。このため降雨減衰時に高解像度の映像信号は受信できなくなるが、低解像度の映像信号を受信できるので番組が完全に途切れることが防止される。本研究では1992年にこのPSK方式の階層化方式を筆者が考案し、基本特許〔312〕を権利化している。

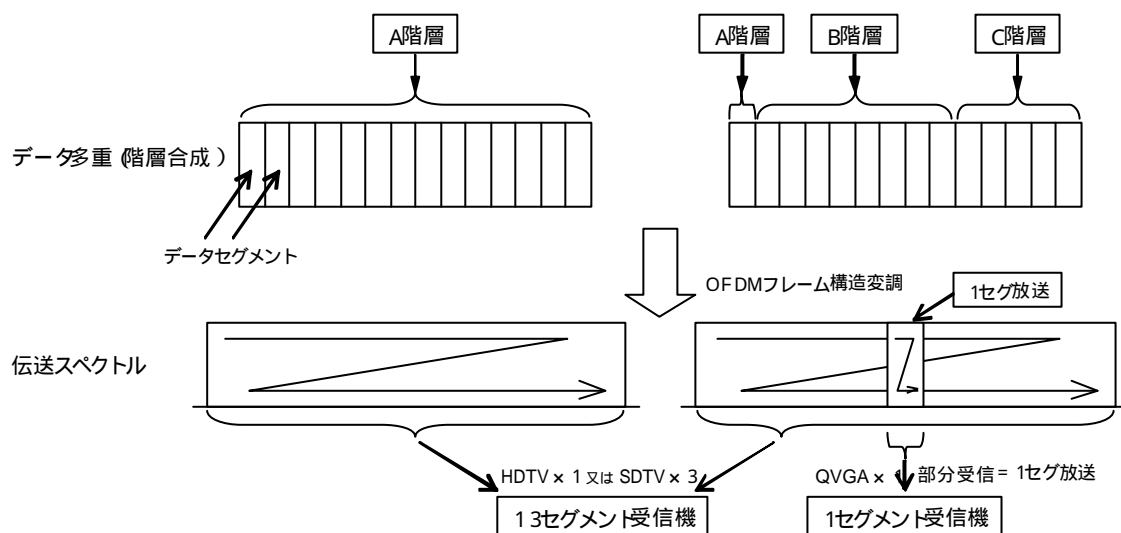


図307(a) 日本方式地上波デジタルTV放送の階層伝送および部分受信

¹⁾ ISDB-T: Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial の略で日本のARIBが作成。



図 3 0 7 (b) 携帯電話で 1 セグ放送を受信した場合の画面

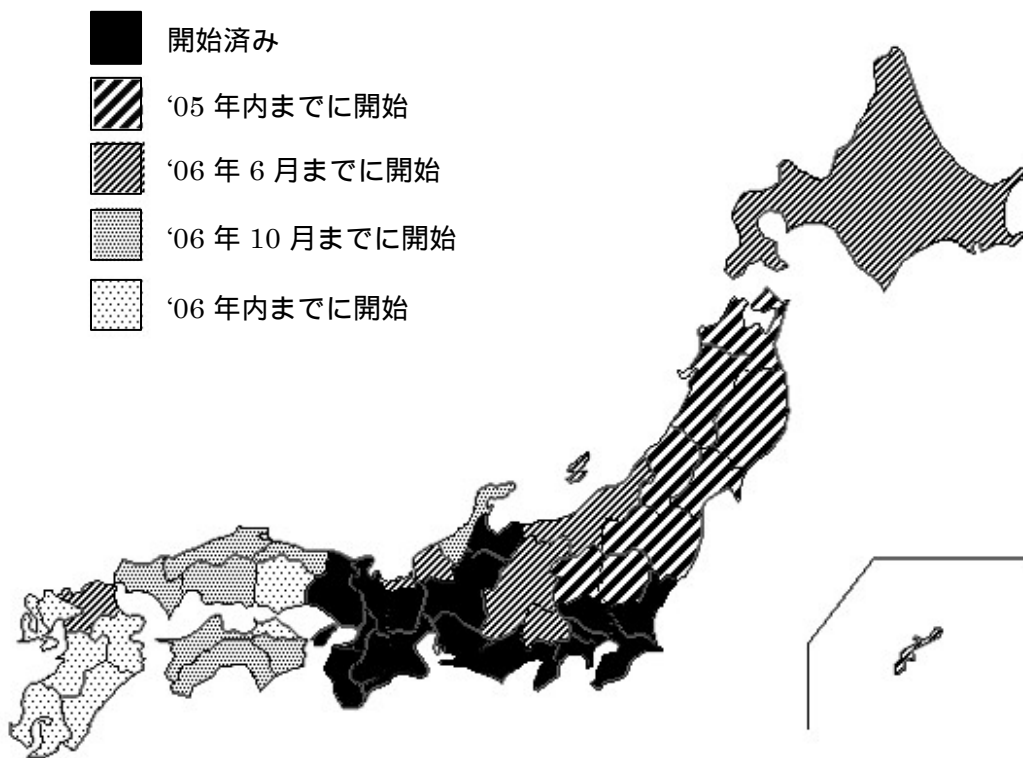


図 3 0 7 (c) 日本方式地上波デジタルTV放送の放送開始時期

表 2 1 地上波デジタルTV放送規格の3方式の比較表

方式	変調方式	エラー訂正	伝送帯域	伝送容量	特長	階層化方式
米国方式	8VSB	トレリス符号 + RS (207, 187)	6MHz	19.39Mbps	NTSC局からの 干渉除去	なし
欧州方式	階層 (NL) QAM / 16QAM / 64QAM OFDM (2k 8k)	RS + conv.code	6~ 8MHz	5~ 32Mbps	マルチパスに強い移動受信 SFN	・階層変調 (オプション) ・TPSを最下位の階層で送る
日本方式	QPSK / 16QAM / 64QAM OFDM (2k 4k 8k)	RS + conv.code	6MHz	3.6~ 23.2Mbps	時間インターリーブ	・帯域を13セグメントに分割 セグメント毎に変調方式選択化 (階層化) ・TMCCを最下位の階層で送る

第2章 階層型デジタル伝送と階層型放送の検討

2.1 はじめに

従来のデジタル通信用途においては階層型伝送の必要度は高くなかった。しかしデジタルTV放送用途においては多数の受信機に最適の受信条件で受信させるために階層型伝送が必要となった。このためデジタルTV放送規格に階層型伝送が積極的に採用されている。最初に提案された階層化方式はNU-QAMである。第2章では階層伝送の必要性と概要を述べ、NU-QAMの技術史における本研究の位置づけを述べる。

2.2 階層型デジタル伝送の必要性

通信と放送の融合が進んでおり政策面からみると両者間の垣根は取り払われつつある。技術面から見ると1990年が通信技術が放送技術と融合する一つの転機になっている。1990年にはMPEG等の映像圧縮技術の実用化によりデジタル映像データが数十分の1に圧縮できるようになりTV放送の1チャンネルの枠内でデジタルHDTV放送が放送可能となった。そこで従来、通信分野で用いられていたデジタル通信技術を放送分野に用いることが検討された。当時は米国でMUSEと呼ばれるアナログ放送方式が検討されていたが、1990年に方向が急転回し、デジタルTV放送の本格的な検討が始まった。

前述のように4つの方式の提案があったが、変調方式からみるとQAM方式と4値のVSBつまり4値のASKの2つに集約できる。これらは基本的に既存のデジタル通信分野で用いられ確立している技術をそのまま用いた。従って従来のデジタル変調方式の長所と同時に短所も引き継ぐことになった。短所の最たるものは“Cliff effect”というものである。これは信号レベルがある閾値を下回ると急激に信号品質が劣化し、信号を全く受信できなくなる現象のことである。

1937年のデジタル通信の発明以来、デジタル通信技術は主に通信分野に使われてきた。通信用途の場合、通信者はPoint to Pointつまり1対1であり両者間の伝送路は1つの条件しか存在しない。このため、1つの伝送路の特性に最適な通信条件を1つ設計すればよい。伝送品質が悪くなった場合は送受信の信号レベルの閾値より高い送信電力で送るか、変調方式を変えて閾値自体を下げることにより容易に対応できる。双方向通信であるから受信側での受信レベルが低ければ送信側に通知することにより送信側は閾値を下げるか、送信電力を上げれば通信状態を回復することも可能である。このように一般的な通信はPoint to Pointの双方向の通信が主流であったが、放送はPoint to Multiの一方方向の通信である。都市圏での放送は1ヶ所の送信局から

百万台以上の受信機に向けて電波が発せられる。この時は受信局の数と同じ百万個以上の伝送路が存在する。地上波TV放送の場合は、大きな屋外アンテナで受信する固定受信局から、小型の室内アンテナで受信する半固定受局、携帯TVの超小型アンテナで受信する移動受信局に至るまで様々な受信条件が存在する。

アナログTV放送の場合は、アンテナの大きさが小さくなるに従い信号レベルが劣化しても、それなりの画質で見ることができた。しかし、デジタルTV放送の場合には閾値以上の信号レベルでないと全く受信できない。小型の室内アンテナもしくは携帯TVの超小型アンテナでの受信レベルが閾値以下の場合、これらのアンテナでは全く受信できないケースも存在する。階層型伝送が実現すればこのような事態は回避される。この点に鑑み1990年に筆者やMITのSchreiber教授により階層型伝送の本格的な研究が始まった。

2.3 階層型デジタル伝送とは

通常型のデジタル伝送では伝送時の閾値は一つしか存在しない。しかし階層型デジタル伝送では伝送チャンネルが複数個存在し、各々のチャンネル毎に異なる閾値を設定できる。閾値を低くすればするほど信号劣化に対する耐性は強くなるが、伝送効率が下がるため伝送容量は小さくなる。階層型デジタル伝送を用いて耐性の強いチャンネルで低解像度、例えばQVGA¹⁾(320×240画素)を送り、耐性の弱いチャンネルでSDTV(720×480画素)やHDTV(1920×1080画素)を送れば階層型放送が実現する。階層型放送を屋外の大型アンテナで受信するとHDTVが受信でき、携帯TVの超小型アンテナで受信するとQVGAの映像が受信できる。日本では“1セグ放送”といわれ2006年に本放送が始まった。

屋外アンテナのような固定受信の場合は、アンテナの指向性を送信局の方向と一致させることができるため受信条件が良い。しかし携帯TVの場合は屋内や電車の中で受信されるため元々受信条件が悪い。利用者の移動に伴い携帯TVの方向も変わるため送信局の方向に受信アンテナの指向性を変えることは難しい。従って屋外固定アンテナでの受信時に比べると携帯TV受信時は圧倒的に受信信号レベルが低く不安定である。階層型伝送では最も耐性の強いチャンネルの閾値が携帯TVの受信信号レベル以下になるように設計することにより様々な大きさのアンテナで安定した放送受信が可能となる。

¹⁾ QVGA : Quarter VGA の略。VGA (640×480) の1/4の画素数(320×240)

2.4 階層型伝送の技術史における本研究のNU-QAM方式の位置づけ

デジタルHDTVを実現する場合、様々な要求条件があるが、それらを大まかに分類すると、既存の放送システムとの共存、ソースコーディングと様々な解像度で表示を行う受信機との互換性、ならびに将来的な要求に応じられる拡張性ということになる。既存の放送システムとの共存に関しては、デジタルHDTV放送と既存のTV放送との混信を、できる限り少なくすることが重要である。そのためには第一に、送信電力をできる限り低くしなくてはならない。第二に、混信を避けるために、放送信号の周波数スペクトルを変えなくてはならない。その結果どうしても受信エリアが狭くなってしまふ[301]。また周辺エリアでは、HDTVの番組を受信できない地域が出てくる可能性がある。これは閾値効果、つまりデジタル画像送信システムにおいてCNRが一定の閾値以下となったときに、急激に信号劣化が起きることによる[302]。互換性に関しては、様々な解像度の表示装置に対するソースコーディングの互換性を実現する方法は、数多くの論文に記述されている[303]。これらの方法によれば、ソースコーディングによって様々な解像度の信号に分けられたHDTV信号は、時分割多重(TDM)によりISDNを介して送信される。この場合、このソースコーディングの階層化はTV放送にも使用できるがチャンネルコーディングはそのままでは階層化にならない。

閾値効果を緩和するための、いくつかの方法が提案されている。その中にSchreiber教授が提案したSS-QAMと呼ばれる方式があるが、この方式では32-QAMの信号が、周波数分割多重(FDM)によって2つのサブチャンネルに分割される。低画質のTV信号は、既存のTV放送と混信する可能性が低い方の周波数のサブチャンネルにより高出力で送信され、他の信号は他方のサブチャンネルによって低出力で送信される[304]。このようにして、このシステムでは2つの閾値と、解像度の異なる2種類のTV受像器との互換性を実現している。しかし、周波数範囲が限られているため、FDMを使用するのでは、このシステムには拡張性がない。

以上の点に鑑み、信号点のコードワードをサブチャンネルに分割して、チャンネルコーディングの拡張可能な多重化方式を実現する方法を示す。各サブチャンネルの誤り率は信号点、即ちコードワードの間隔を変更することによって変えることができる。このようにして、各サブチャンネルは異なる閾値を有する。この方式をノンユニフォーム(NU)方式と呼び、NU階層化方式によって階層化されたQAMをNU-QAMと呼ぶ。NU階層化方式は1991年3月に筆者が考案した方式で基本特許[320]を権利化している。NU階層化方式は独立に時間分割多重(TDM)または周波数分割多重(FDM)と組み合わせることが可能である。そうすることで、閾値の数を更に増やすことができる。そのようなシステムを“ハイブリッドNU-QAM”と本論文では呼ぶ。最初に述べた3つの要求条件を満たすデジタルHDTVは、NU階層化方

式によるチャンネルコーディングを、複数解像度のソースコーディングと組み合わせることによって実現できる。

NU-QAMについて述べている文献を以下に示す。Schreiber はレベルが一定でないQAMを1991年10月に提案し[305]、筆者が1991年3月に考案した256-NU-QAMと同じコンステレーションを持つ4つのサブチャンネルの256-QAMについて記述している。Uz は、2種類の解像度のソース符号化と、2つのサブチャンネルを用いる64-SRQAMと同じ方法を用いた伝送路符号化[306]との組合せを応用することにより、地上波HDTV放送の2階層の受信エリアを大まかに算出している。これらの論文を変調の観点から見ると、NU-QAMのコンステレーション、あるいは大まかに算出された受信エリアが部分的に示されているが、多重符号化の原理、結果を導くプロセス、実際の受信エリアのシミュレーション、更には我々が実際のNUシステムの実現の際に学んだ、搬送波復元の問題などの、その他の重要な問題については述べられていない。

本研究では、原理、多重化の観点からの符号化の方法、ならびにプロセスを明らかにし、ハイブリッドNU-QAMの受信エリアと、提案されている標準QAMシステムの受信エリアを比較し、それらの問題点を指摘する。NU方式におけるサブチャンネルのチャンネルコーディングの原理を、まず最初にNU-QAMのモデルを用いて説明する。サブチャンネル- i のコンステレーション・コードワード間の間隔は、シフト係数 $S_i \sim S_{i-1}$ によって一律に定義される。次に16-NU-QAMと36-NU-QAMのサブチャンネル-1及び-2の誤り確率を算出し、実際の計算結果を示す。ハイブリッドNU-QAMを用いた階層型放送システムのブロック図も示す。最後に、ハイブリッド36-NU-QAM(NU方式とTDMとの組合せ)を用いた地上波放送の受信エリアを算出し、16-QAM及び32-QAMの受信エリアと比較を行う。

2.5 階層型OFDMの技術史における本研究の位置づけ

階層型OFDM方式には2つの方式がある。1つはNU-QAM等の階層変調方式を組み合わせるものである。この方式ではOFDM自体は階層化されていないため、本稿では階層型OFDMには加えないこととする。本来の階層型OFDMとしては周波数帯域別に変調方式を変える手法が日本方式デジタルTV放送規格(ISDB-T)において1995年に採用されている。前述のように6MHzの帯域を13セグメントに分けて、1セグメントで耐性の強い変調方式例えばQPSKで伝送する階層型OFDMが規格化されている。耐性の弱い伝送方式と耐性の強い伝送方式で階層OFDMを実現する方式は復調情報伝送方式と組み合わせられて本研究の中で筆者が1993年に考案している。また、日本方式ではエラー訂正のコードゲインを変えることにより、第1階層チャンネルと、第2階層チャンネルを形成する階層OFDMが含まれ

ているが、この方式は復調情報伝送方式と組み合わせられて1993年に筆者により考案されている。

2.6 まとめ

デジタルTV放送において閾値効果を緩和するために階層型デジタル伝送が必要となることを明らかにし、階層型デジタル伝送の概要を述べた。提案されている階層型デジタル伝送であるSS-QAMの問題点を明らかにした。本研究の中で考案されたNU-QAMに関して、他の研究者により既に提案されている内容を述べ、本研究の中で検討すべき課題を明らかにした。

第3章 NU階層化方式の検討

3.1 はじめに

階層化伝送方式の中で最も早く発明されたのがNU-QAMである。NU-QAMは1991年3月に筆者によって考案〔320〕され、その後MITのSchreiber教授により世に提案された方式である。NU-QAMは欧州方式の地上波デジタルTV放送方式であるDVB-T規格に採用され標準化された。本章ではNU-QAMの原理を述べ、階層化した場合の各サブチャンネルの誤り確率を計算する。

3.2 NU階層化方式の原理

NU階層化方式はQAM、PSK、ASKまたはFSKに応用が可能である。この項では、QAMのモデルを用いて、NU-QAMの原理とサブチャンネルの符号化の方法を順を追って述べる。図308はNU-QAM方式の概念を示している。256-QAMのコンステレーションが4層に分割され、第1、2、3及び4層はそれぞれ4、16、64及び256のセグメントを持つ。そして256-QAMの8ビットのコードワードは2ビットのコードワードで4つの層に分割されている。第1、2、3及び4層では、これら2ビットのコードワードが、それぞれ4、16、64及び256のセグメントに割り当てられる。このようにして、4つの2ビット・サブチャンネルを持つ256-NU-QAMが、実現されている。次にNU方式によって多重化された16-NU-QAMのモデルを用いて、サブチャンネルの符号化を詳細に説明する。図309は、NU-QAMのコンステレーションを示している。この図では、点線の円で標準の16-NU-QAMの信号点を表し、実線の円で16-NU-QAMの信号点を表している。このように、16-NU-QAMでは2ビットのサブチャンネル-1及びサブチャンネル-2を介して、2つのサブチャンネルの4ビットのコードワードを送信する。図310(a)に示すように、16の信号点が、各象限に配置された四角の信号グループに分類され、サブチャンネル-1の2ビットのコードワードが、その4つの四角を形成する各グループに割り当てられている。このとき、図310(b)に示すように、サブチャンネル-2の2ビットのコードワードは、信号グループ内の4つの信号点に割り当てられている。以上のステップを繰り返すことにより、図310(c)(d)のように、サブチャンネル-3及び-4も符号化することができる。これらの符号化された信号点または信号点グループを、“コンステレーション・コードワード”と呼ぶ。

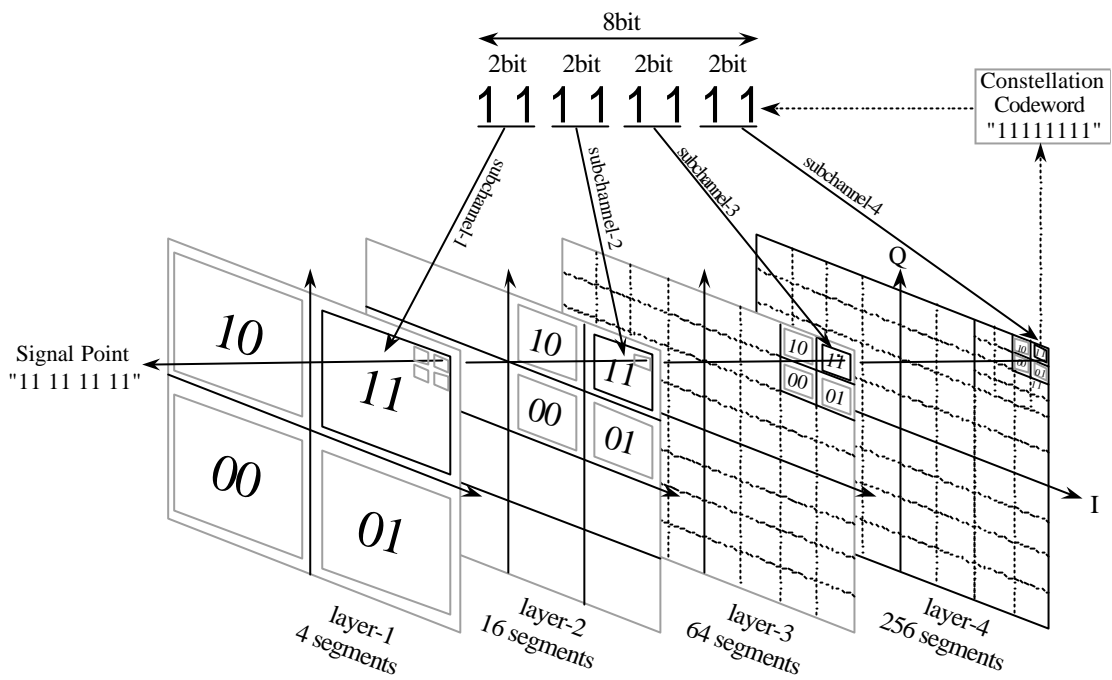


図 3 0 8 NU-QAM方式の概念：256-QAM モデル

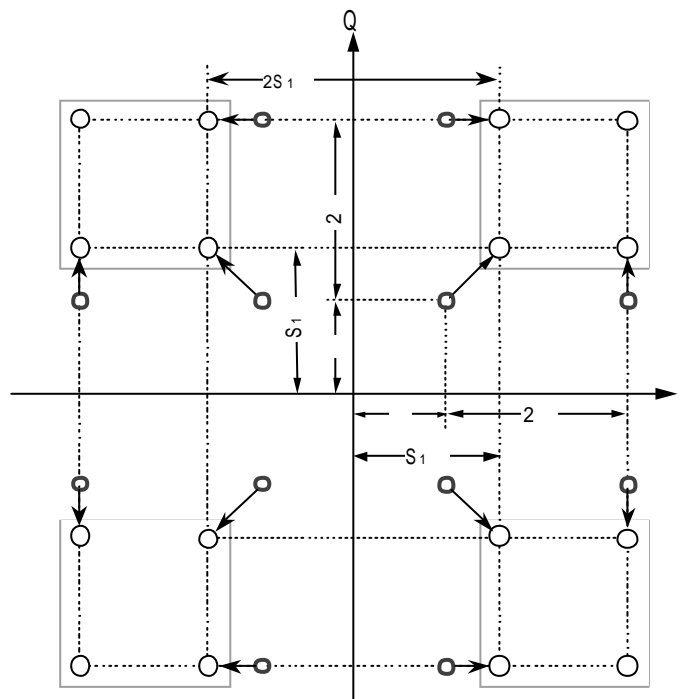


図 3 0 9 16-NU-QAMのコンステレーション

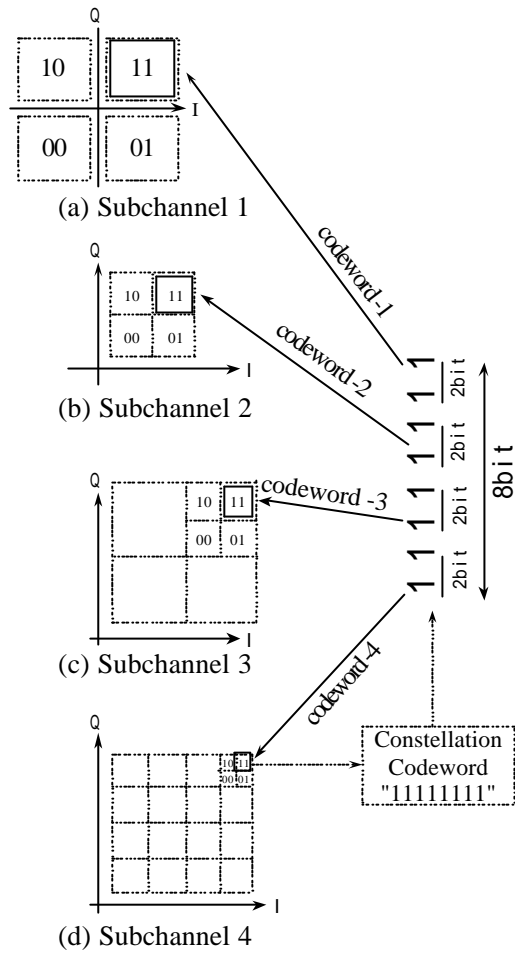


図 3 1 0 NU-QAMのサブチャンネルコーディング

3.3 NU階層化方式の誤り確率の変更方法

NU階層化方式の誤り確率は、サブチャンネル- i の符号化された信号点または信号点グループであるコンステレーション・コードワード間の距離が、シフト係数 S_{i-1} によって決定される。図309に示すように、標準の16-QAMでは等距離2にある信号点が、点線で示された矩形を形成する領域にシフトされ、信号点グループ間の距離が拡大される。この場合、シフト係数 S_1 を用いることにより、シフト後の信号点グループ間の距離を S_1 と定義することができる。このとき $S_1 > 1$ ならば、信号点グループの分離性が向上し、サブチャンネル-1の誤り確率を小さくすることができる。一方、図309に点線で示すように、各象限の信号点グループの中の4つの信号点間の距離は、2から $(3 - S_i)$ に減少している。従って、サブチャンネル-2の誤り確率は増加している。図312に示す通り、3つのサブチャンネルの64-NU-QAMのコンステレーションは、シフト係数 S_1 と S_2 によって表される。同様に、36-QAM拡張のNU-QAMは、図313のように定義される。サブチャンネル-2のコードワードを9個の信号点に割り当てると、図314に示すように、3ビットと1/8ビットが得られる。従って、36-QAM拡張のNU-QAMの場合、コンステレーション・コードワード間の距離は、シフト係数 S_1 だけで決定される。このように、サブチャンネル- i のコンステレーション・コードワード間の距離は、シフト係数 $S_1 \sim S_{i-1}$ によって決定される。

シフト係数 $S_1 \sim S_{i-1}$ を変更することによって、サブチャンネル- i のコンステレーション・コードワード間の距離、言い換えるとサブチャンネル- i の閾値を変えることができる。このようにして、図310に示されている階層構造が実現されている。図310の実線は、SRQAMのサブチャンネルによる階層構造を表している。サブチャンネル- i によって送信されるデータを、 D_i と呼ぶ。

図311に示すように、ノンユニフォーム多重化とTDMやFDMのような他の多重化方式を組み合わせることにより、閾値の数を増やすことができる。この図の点線は、NU方式とTDMまたはFDMを組み合わせた階層構造を示している。本稿ではこれを“ハイブリッドNU-QAM”と呼ぶ。サブ・サブチャンネル $i-j$ は、サブチャンネル- i が時分割または周波数分割されたものである。ここでは、各サブ・サブチャンネル $i-j$ 、 D_{i-j} について、符号化ゲインの異なる誤り訂正方法が用いられている。

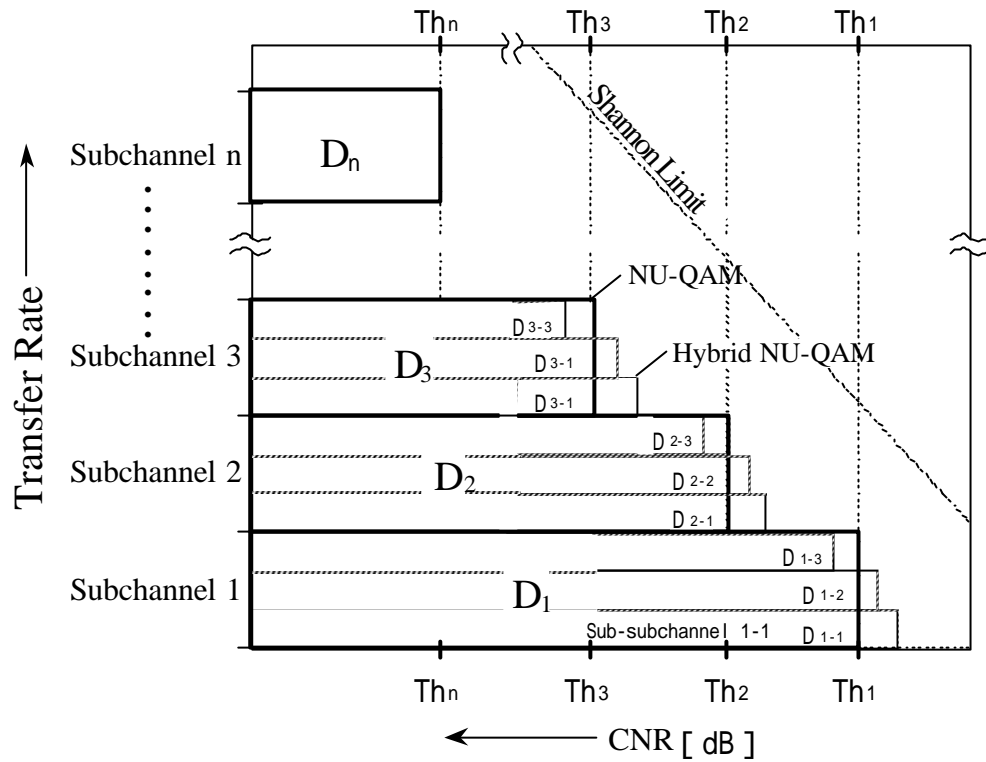


図 3 1 1 ハイブリッドNU-QAMの階層構造

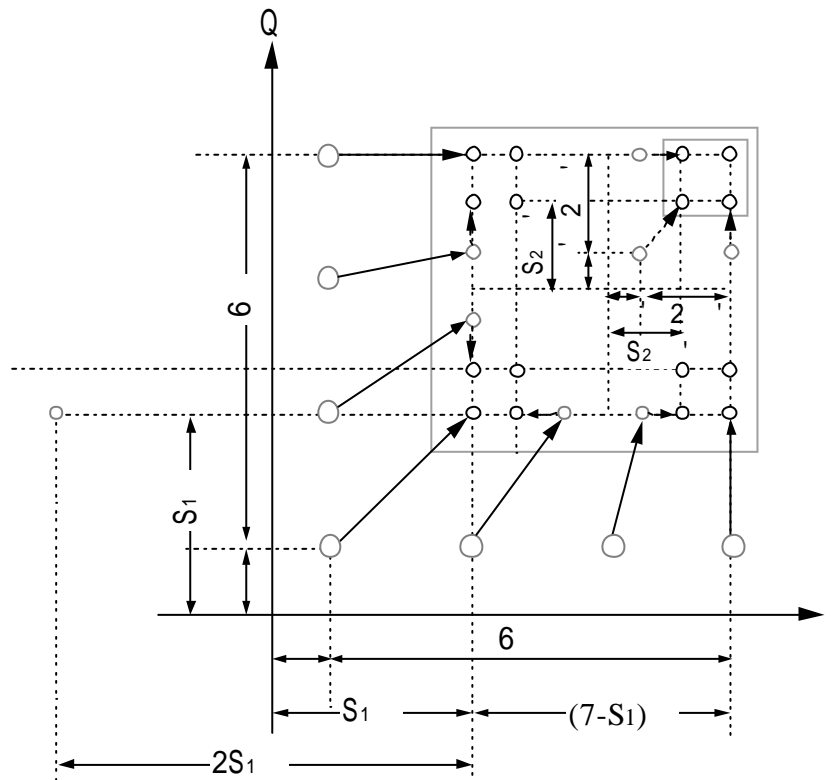


図 3 1 2 64-NU-QAMのコンステレーション (シフト係数 S_1 、 S_2)

3.4 NU-QAMの誤り確率の算出

最初に、16NU-QAMの誤り確率を算定する。図309のように、標準の16-QAMの信号点間の距離を2とすると、シフト後の信号点グループ間の距離は、 $2S_1$ と表すことができる。従って、サブチャンネル-1の誤り確率(P_{e1})は、16-NU-QAMの P_{e1} の式から算出される：

$$P_{e1-16} = \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(\frac{S_1 d}{\sqrt{2d}}\right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(\frac{3d}{\sqrt{2s}}\right) \quad (1)$$

サブチャンネル-2の誤り確率も同様に、

$$P_{e2-16} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\frac{3-S_1}{2} d}{\sqrt{2d}}\right) \quad (2)$$

となる。

振幅は $\sqrt{2}$ であるから、平均出力Cは、次のように定義できる。

$$C = \frac{9+S_1^2}{2} d^2 \quad (3)$$

これより次式が導かれる。

$$\frac{8}{s} = \sqrt{\frac{2}{9+S_1^2}} \sqrt{r} \quad (4)$$

ここで、 $r = C/N$ である。

式(4)を式(1)と(2)に当てはめると、サブチャンネル-1の誤り確率 P_{e1-16} は、次の通りとなる。

$$P_{e1-16} = \frac{1}{8} \operatorname{erfc}\left(\frac{S_1}{\sqrt{S_1^2+9}} \sqrt{r}\right) \quad (5)$$

また、サブチャンネル-2の誤り確率 P_{e2-16} は次の通り

$$P_{e2-16} = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{3-S_1}{2\sqrt{S_1^2+9}} \sqrt{r} \right) \quad (6)$$

となる。

図315の曲線は、16-NU-QAMの誤り確率に対するCNRの計算結果を表している。同様に、2つのサブチャンネルを持つ36-QAMの誤り率は、下記によって得られる：

サブチャンネル-1の誤り率 P_{e1-36} は、

$$P_{e1-36} = \frac{1}{6} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{6r}{5}} + \frac{S_1}{\sqrt{S_1^2+2S_1+25}} \right) \quad (7)$$

となり、サブチャンネル-2の誤り率 P_{e2-36} は、

$$P_{e2-36} = \frac{2}{3} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3r}{40}} + \frac{5-S_1}{\sqrt{S_1^2+2S_1+25}} \right) \quad (8)$$

となる。3つのサブチャンネルを用いる64-NU-QAMの場合は、誤り確率は図312に示す通り、 S_1 、 S_2 を用いて表される。

$$d = \frac{7-S_1}{6} \quad (9)$$

この場合、誤り率も同様に決定される。例えば、サブチャンネル-3の誤り確率 P_{e3-64} は次の通りとなる。

$$P_{e3-64} = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{(S_1-7)(S_2-3)d}{12\sqrt{2s}} \right) \quad (10)$$

図316の曲線は、36-NU-QAMの P_e に対するCNRの計算結果を表している。図315の変形である図317は、CNRと S_1 の関係を示している。 S_1 を変化させ

ることにより、各サブチャンネルのCNRの閾値を、特定の範囲内の任意の値に設定することができる。従って、NU-QAMを放送システムまたは放送以外のシステムに応用することにより、送信機と複数の受信機間の送信条件に応じて、転送レートを変えることができる。

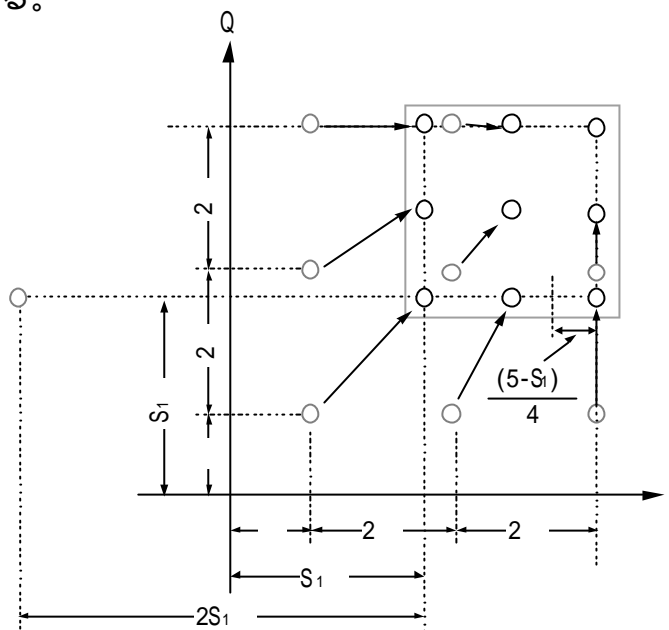


図 3 1 3 36-NU-QAM のコンステレーション

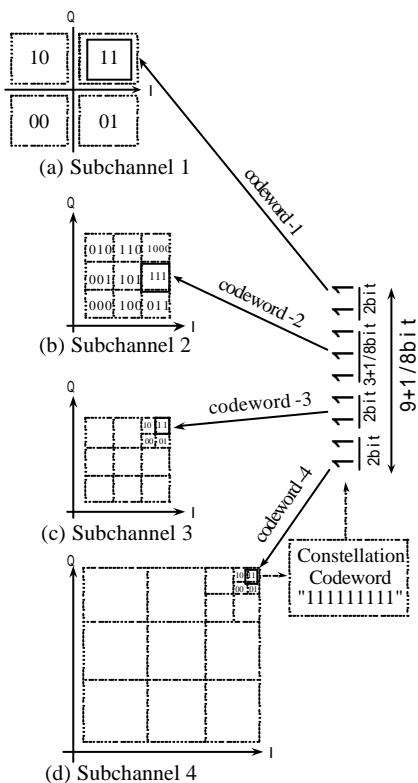


図 3 1 4 NU-QAMのサブチャンネル符号化(36-QAM 拡張)

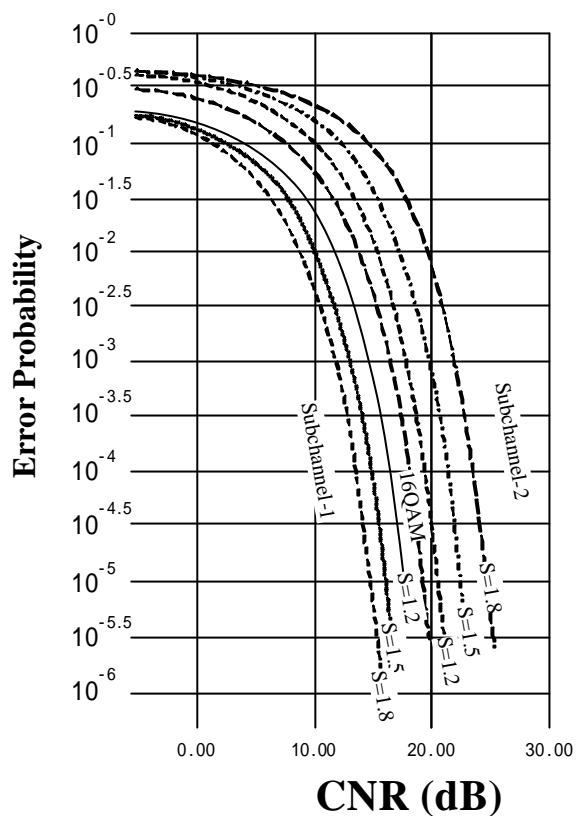


図 3 1 5 16-NU-QAM の誤り確率に対する CNR の関

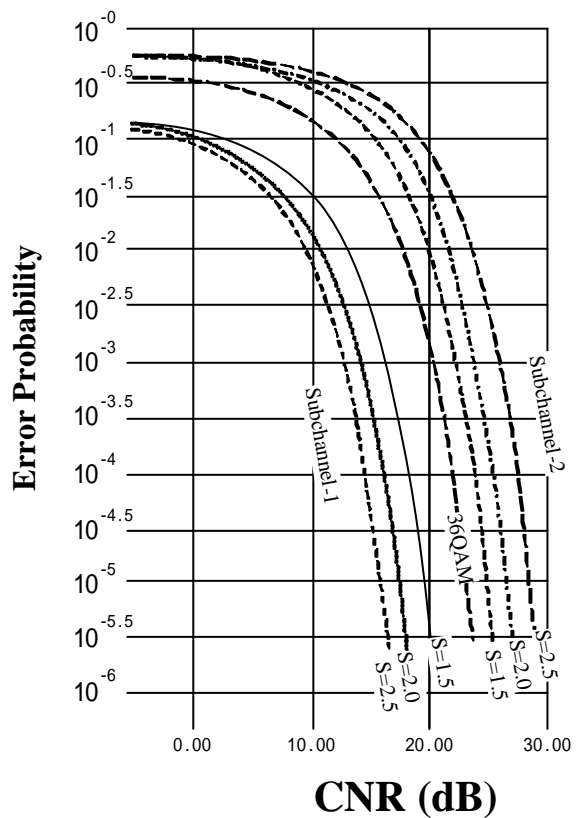


図 3 1 6 36-NU-QAM の誤り確率に対する CNR の関係

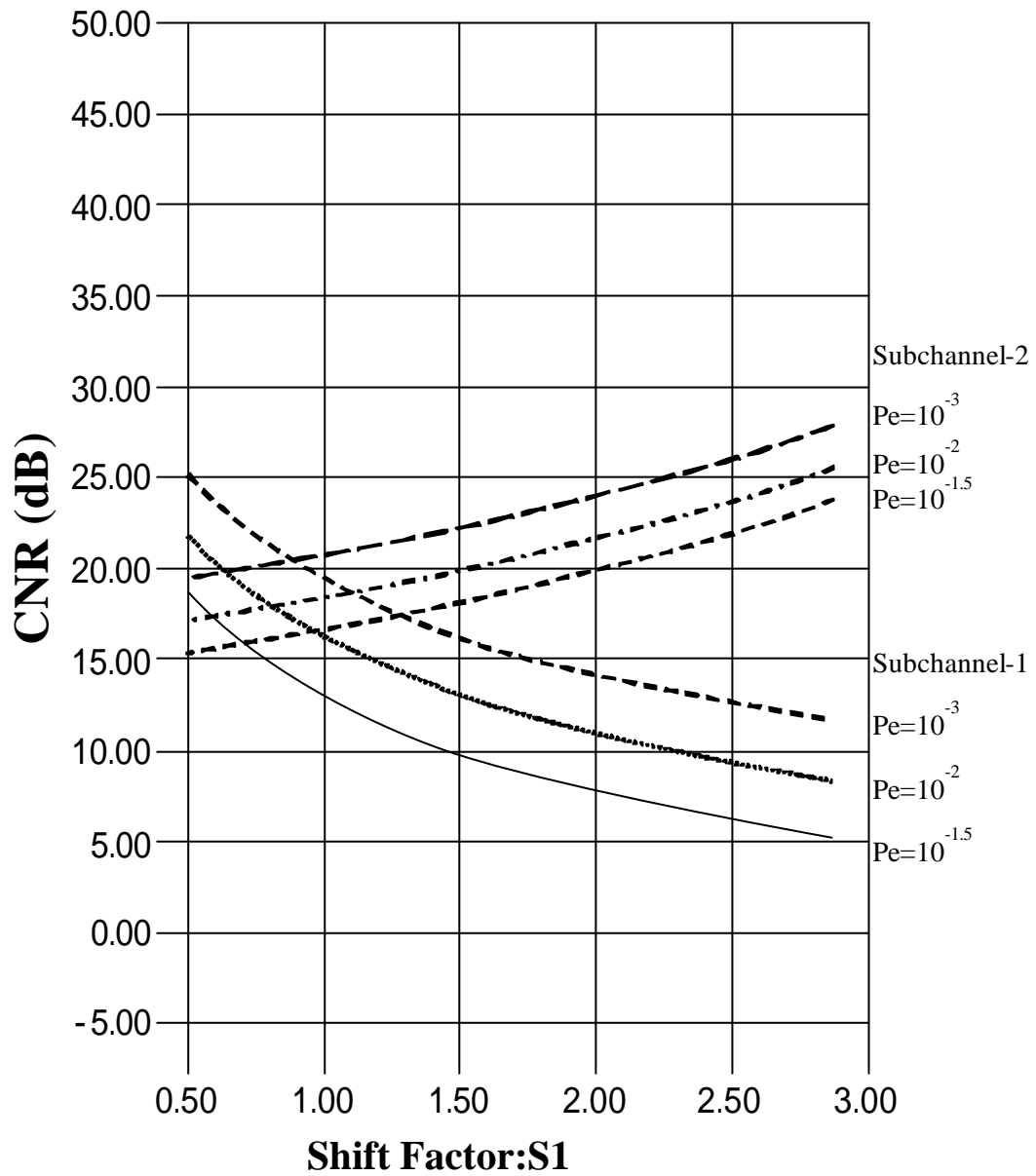


図3 1 7 36-NU-QAMのCNRに対するシフト係数S1の関係

3.5 NU-PSK方式の誤り確率の算出

図3.18に示されているように、無理数方向で調整されたPSKまたは円APSKコンステレーションを、NU-PSKまたはNU-APSKと呼ぶ。このNU-PSKやNU-APSKでは、極座標方向にシフトされた信号点が追加される。図3.18に示されているように、変動係数 S_1 およびQPSK信号点 (r_0, θ) を用いると、8SP-APSKの信号点間の距離を、 $S_1 r_0$ に定義できる。8NU-APSKには、2ビットのサブチャンネル1と1ビットのサブチャンネル2がある。

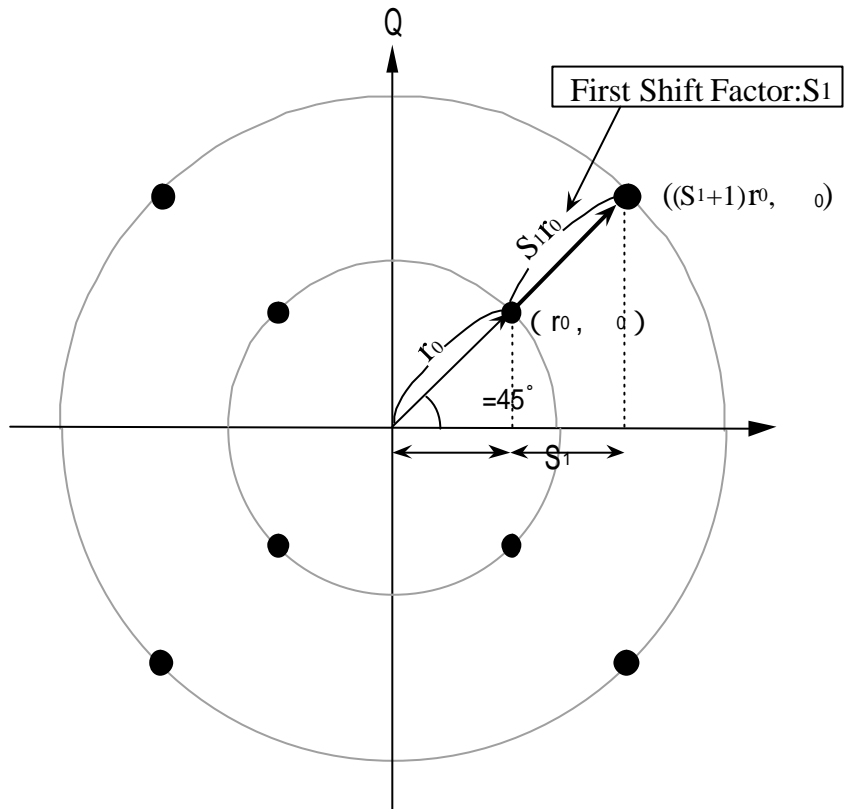


図3.18 8NU-APSKのコンステレーション

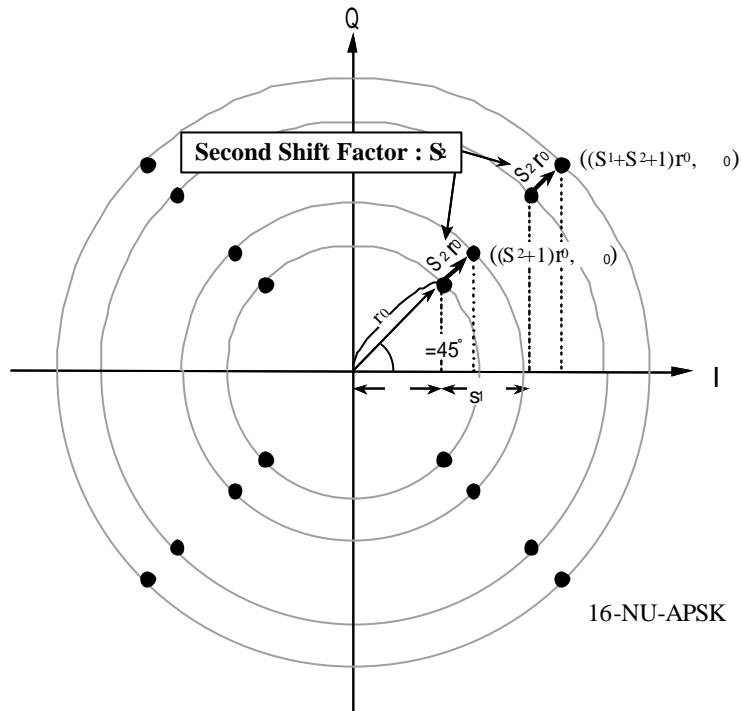


図 3 1 9 1 6 N U - A P S K の コ ン ス テ レ ー シ ョ ン

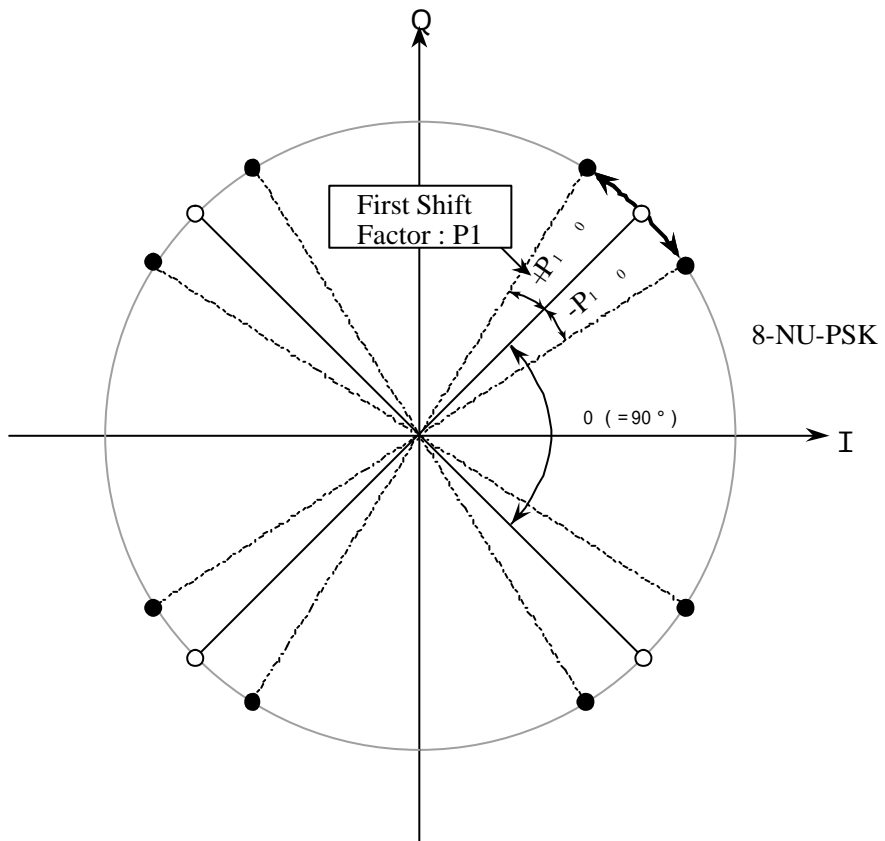


図 3 2 0 8 N U - P S K の コ ン ス テ レ ー シ ョ ン

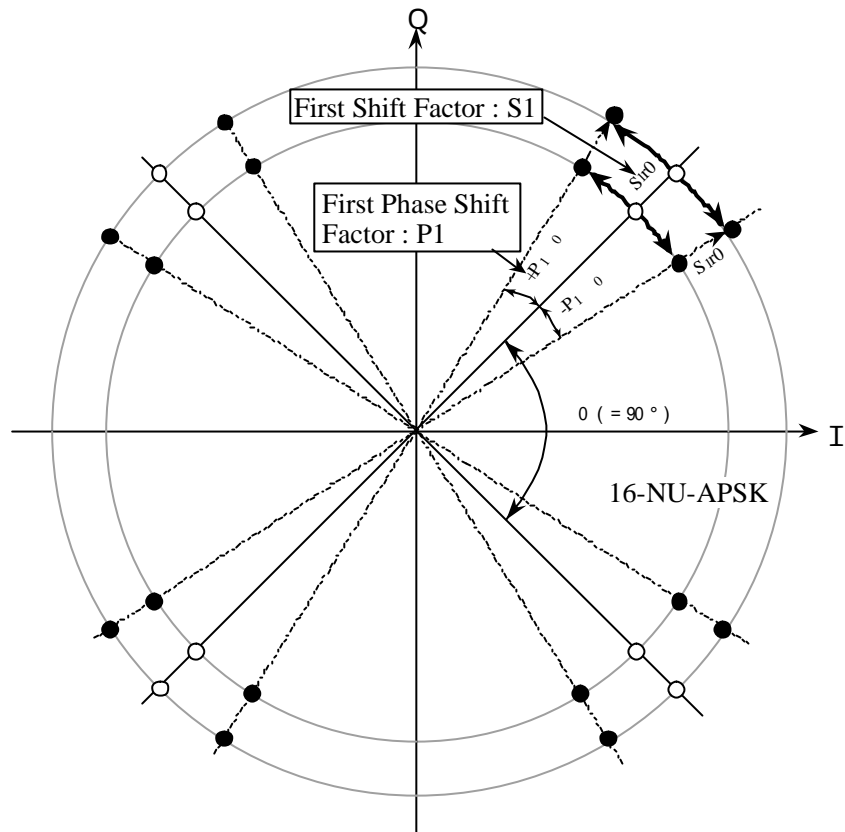


図 3 2 1 16 NU-APSK のコンステレーション

サブチャンネル 1 の誤り率 Pe_{1-8} は、

$$Pe_{1-8} = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{d}{\sqrt{2s}} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{(S_1+1)d}{\sqrt{2s}} \right) \quad (3)$$

サブチャンネルの誤り率 Pe_{2-8} は、

$$Pe_{2-8} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{S_1 d}{2s} \right) \quad (4)$$

次に、図 3 1 9 に示されているように、無理数方向 (r_0, θ_0) および $(r_0 + S_1 \cdot r_0, \theta_0)$ に変動済みの信号点 $S_2 r_0$ を追加すると、新しい $(r_0 + S_2 r_0, \theta_0)$ および $(r_0 + S_1 r_0 + S_2 r_0, \theta_0)$ の 1 ビットセグメント信号点を追加できるだけでなく、3 つのサブチャンネルも形成できる。これを 16-NU-APSK と呼ぶ。この 16-NU-APSK には、16-NU-APSK の誤り率に関する 2 ビットのサブチャンネル 1、1 ビットのサブチャンネル 2、1 ビットのサブチャンネル 3 がある。

サブチャンネル 1 の Pe は、

$$\begin{aligned}
& P_{e_{1-16}} \\
&= \frac{1}{8} \operatorname{erfc}\left(\frac{\mathbf{d}}{\sqrt{2\mathbf{s}}}\right) + \frac{1}{8} \operatorname{erfc}\left(\frac{(S_2+1)\mathbf{d}}{\sqrt{2\mathbf{s}}}\right) + \frac{1}{8} \operatorname{erfc}\left(\frac{(S_1+1)\mathbf{d}}{\sqrt{2\mathbf{s}}}\right) + \frac{1}{8} \operatorname{erfc}\left(\frac{(S_1+S_2+1)\mathbf{d}}{\sqrt{2\mathbf{s}}}\right) \\
& \quad (5)
\end{aligned}$$

サブチャンネル 2 の P_e は、

$$P_{e_{2-16}} = \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(\frac{S_1\mathbf{d}}{2\mathbf{s}}\right) + \frac{1}{8} \operatorname{erfc}\left(\frac{(S_1+S_2)\mathbf{d}}{2\mathbf{s}}\right) + \frac{1}{8} \operatorname{erfc}\left(\frac{(S_1+S_2)\mathbf{d}}{2\mathbf{s}}\right) \quad (6)$$

サブチャンネル 3 の P_e は、

$$P_{e_{3-16}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{S_2\mathbf{d}}{2\mathbf{s}}\right) \quad (7)$$

図 3 2 0 および図 3 2 1 では、QPSK または 8-NU-PSK の信号点間における極座標の角度の違いは、 θ_0 となっており、第 1 段階の変動係数は P_1 となっている。それぞれの位置が $\pm P_1 \cdot \theta_0$ に変動すると、信号点は 2 倍に増加する。したがって、1 ビットのサブチャンネルが追加される。我々はこれを $P=P_1$ の 8-NU-PSK および $P=P_1$ 、 $S=S_1$ の 16-NU-PSK と呼んでいる。

3.6 まとめ

NU 階層化方式として NU-QAM と NU-PSK を 1991 年 3 月に筆者が初めて考案し、基本特許〔322〕を権利化した。NU 階層化の基本構成として、信号点を符号に割り当てる方法と信号点間隔を変えるシフトファクター S を定義し、各サブチャンネルの誤り確率を計算した。具体的に 16-NU-QAM と 36-NU-QAM のサブチャンネルの誤り確率を計算し、シフトファクター S を変化させた場合の各サブチャンネルの誤り確率の変化を計算した。また 16-NU-PSK と 16-NU-APSK の各サブチャンネルの誤り確率の計算式を明らかにした。

第4章 NU-QAMを用いた階層型放送システムの検討

4.1 はじめに

本章では、コンステレーションの信号点コードワードをサブチャンネルに分割し、コンステレーション・ダイアグラムにおける信号点コードワード間の距離を変化させることによって、サブチャンネルの誤り確率を変えることができるノンリニア(NU)方式について記述する。NU方式によって階層化されたQAMを、NU-QAMと呼ぶ。NU-QAMは、一連の地上波デジタルHDTV放送受信エリアに対して、複数の誤り確率の階層を提供するものである。誤り確率を計算することによって、受信エリアを疑似し、提案されている32QAMで得られるエリアと比較する。

4.2 ハイブリッドNU-QAMを用いた階層型放送

図3.2.2は、NU方式によって得られた2つのチャンネルと、TDMによって得られた1つのサブ・サブチャンネルを持つハイブリッドNU-QAMを用いたTV放送の送受信システム全体を表すブロック図である。

まず最初に、HDTV信号が解像度の異なるD1-1、D1-2、D2の信号に分離される[3]。ハイブリッドNU-QAMでは、サブ・サブチャンネル1-1のエラー訂正ゲインは、サブ・サブチャンネル1-2よりも大きい。HDTV受信機では、送信状態に応じて、HDTV、EDTV及び低画質のSDTVの3種類の映像が受信可能である。図3.2.3に示すように、36-QAMの送信容量は16-QAMよりも25%大きい。この利点を活用することによって、ひとつのHDTV番組の代わりに、様々なSDTV番組を送ることもできる。

図3.2.2に点線で示すような簡単な回路を追加することによって、同じ番組をアナログTVで受信することができる。但し、SDTV受信機の実現には、搬送波復元の問題など、いくつかの問題がある。TV受信機またはマルチメディア規格(MPEG4[7])に適合したパソコンの場合は、デコーダーの共有が可能である。将来的には、標準のデジタルHDTV受信機との互換性を保ちながら、35または45MbpsのビットレートのスーパーHDTV放送が実現できる。

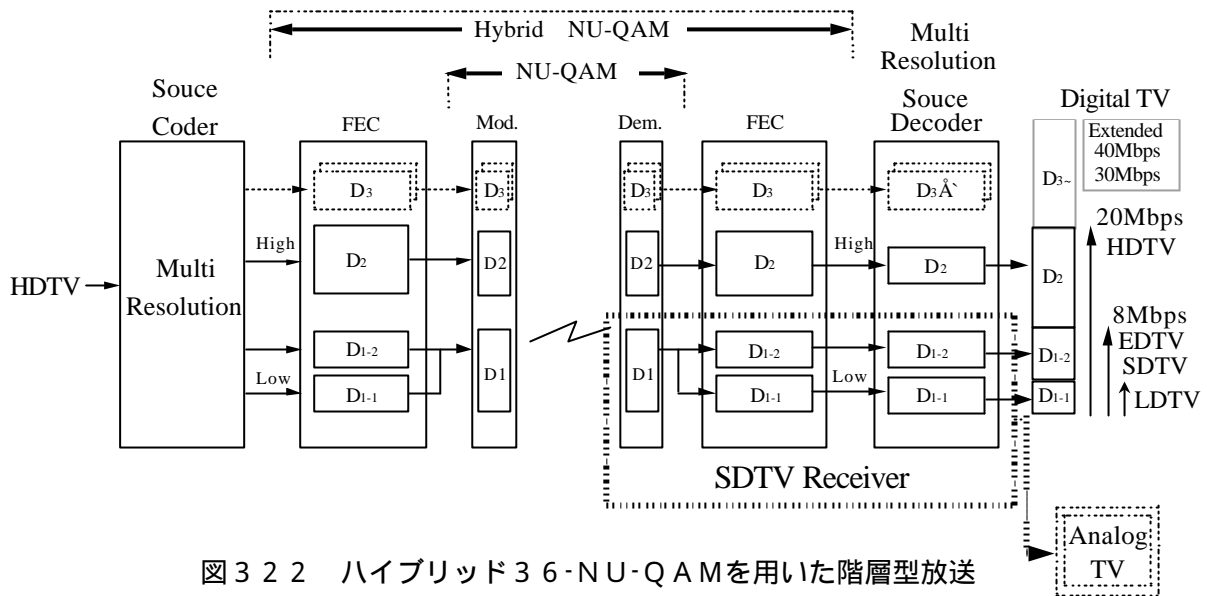


図 3 2 2 ハイブリッド 3 6 - N U - Q A M を用いた階層型放送

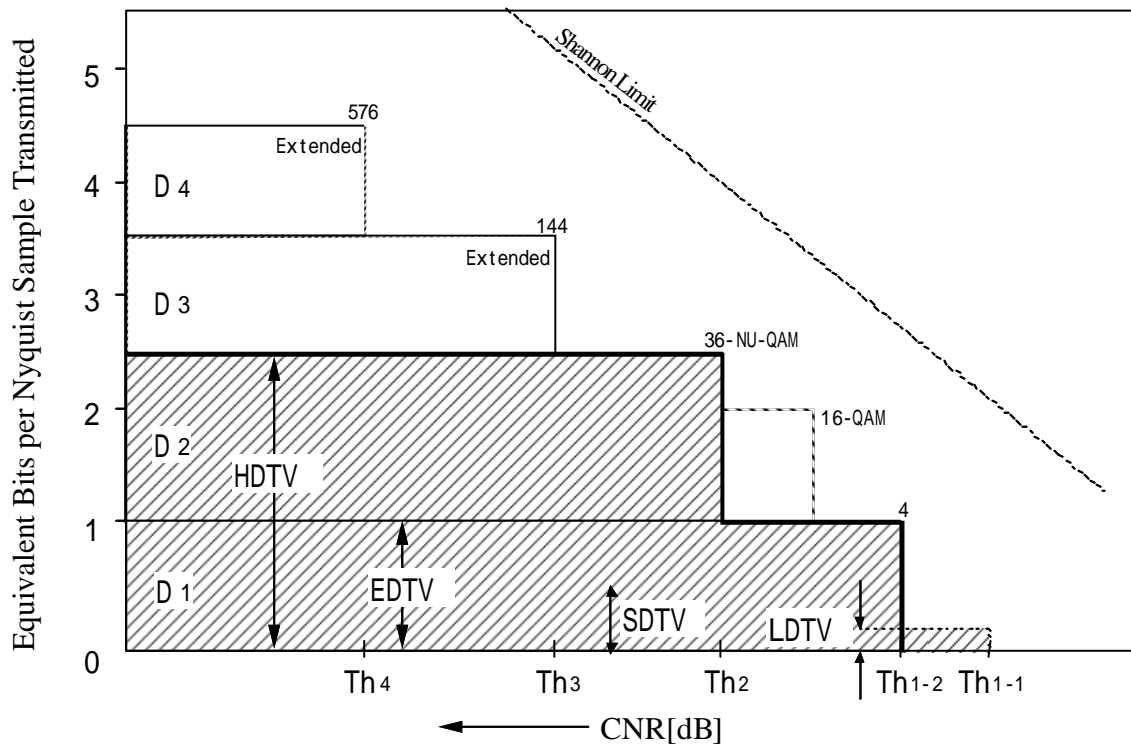


図 3 2 3 ハイブリッド N U - Q A M の特性

4 . 3 ハイブリッド N U - Q A M を用いた場合の受信エリアの比較

NU-QAMの受信エリアについて論述する。図 3 2 4 のグラフは、高さ 3 6 0 m の送信アンテナからの距離と、電界の強さとの関係を示している [8]。上述の 1 6 - Q A M [9]、3 2 - Q A M [1 0] を用いた H D T V 放送システムの受信エリアと、我々

の提案の受信エリアとの比較を行う。図3 2 5に示すように、提案されている16-QAMまたは32-QAMのシステムの受信エリアは、それぞれ半径が5.2マイルと5.6マイルである[10]。SRQAMの受信エリアは、ビットレートが20MbpsのHDTVのエリアと、ビットレートが8MbpsのEDTVのエリアの2つの階層を含んでいる。またハイブリッドSRQAMは、更にビットレートが1.15Mbpsの低画質SDTVのエリアを加えた、3つの階層を含んでいる。NU-QAMの受信エリアを[10]に記述されているシステムの受信エリアと比較するために、NU-QAMに必要な誤り率のスレッシュホールドを、 $10^{-1.7}$ に設定する。まず、シフト係数の S_1 が1.8であると仮定すると、サブチャンネル-1とサブチャンネル-2のCNR閾値は図3 1 5から決定される。その結果、HDTVとEDTVの受信エリア半径は、それぞれ47.8マイルと59.8マイルとなる。 $P_e = 10^{-1.7}$ でのサブ・サブチャンネル-1-1の誤り訂正符号化ゲインを5dBに設定すると、低画質SDTVの受信エリア半径は、図3 2 5の通り、65.8マイルとなる。図3 2 6では、 $S_1 = 2.5$ を採用している。

このように、図3 2 7に示す通り、36-NU-QAMを用いることによって、HDTVの受信エリアは、36-QAM(16-QAM)に比べて15.4%(29.0%)小さくなっているが、EDTVの受信エリアは32.2%(10.8%)拡大している。アナログTV放送の干渉を受ける周辺エリアでは、従来の方法に比べてEDTVエリアが大きくなっている。ハイブリッドNU-QAMを用いると、低画質のSDTV(LDTV)のエリアは、60.1%(34.2%)大きくなっている。このようにNU-QAMでは、シフト係数 S_1 の値を状況に応じて選択することができ、HDTV及びEDTVの放送エリアを設定することができる。NU方式をSS-QAM[4]などのFDM方式と組み合わせて用いるハイブリッドNU-QAMは、受信エリアを更に拡大できる。また、新しい低画質SDTVサービスは、TV付携帯電話、ポケットTVあるいはマルチメディアPCへの応用が可能である。

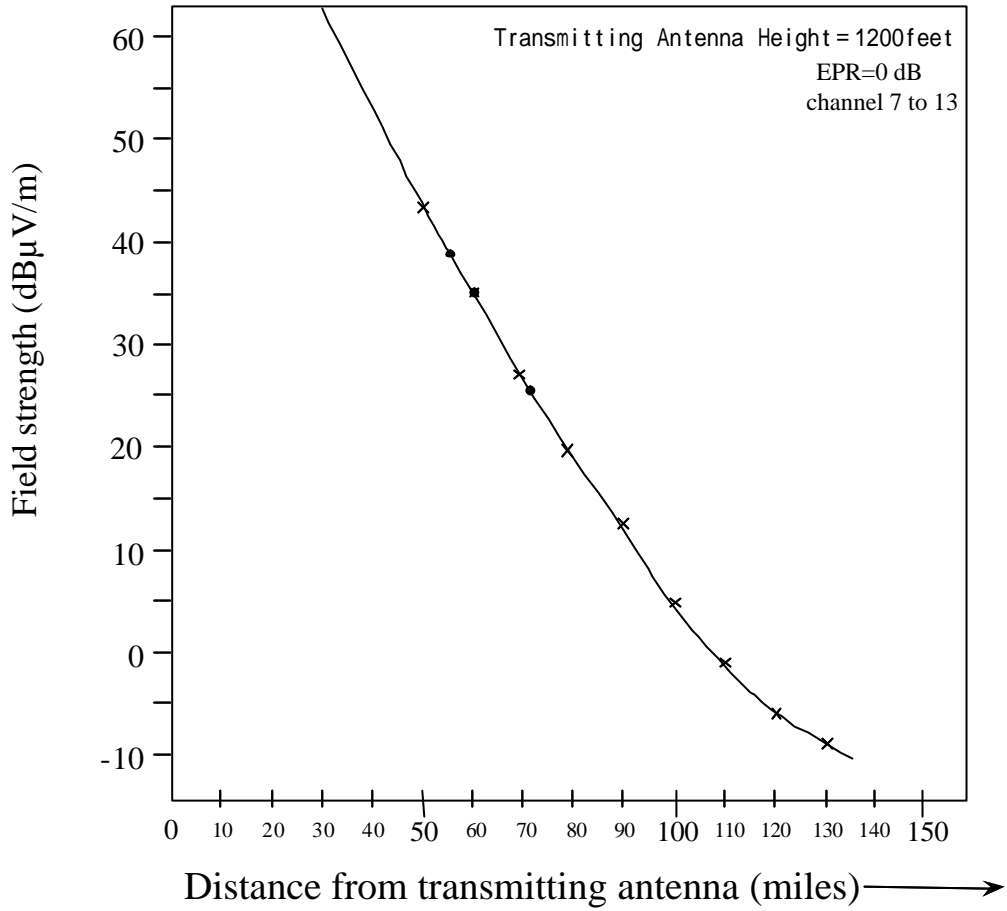


図 3 2 4 電界強度曲線 (dBμV/m)

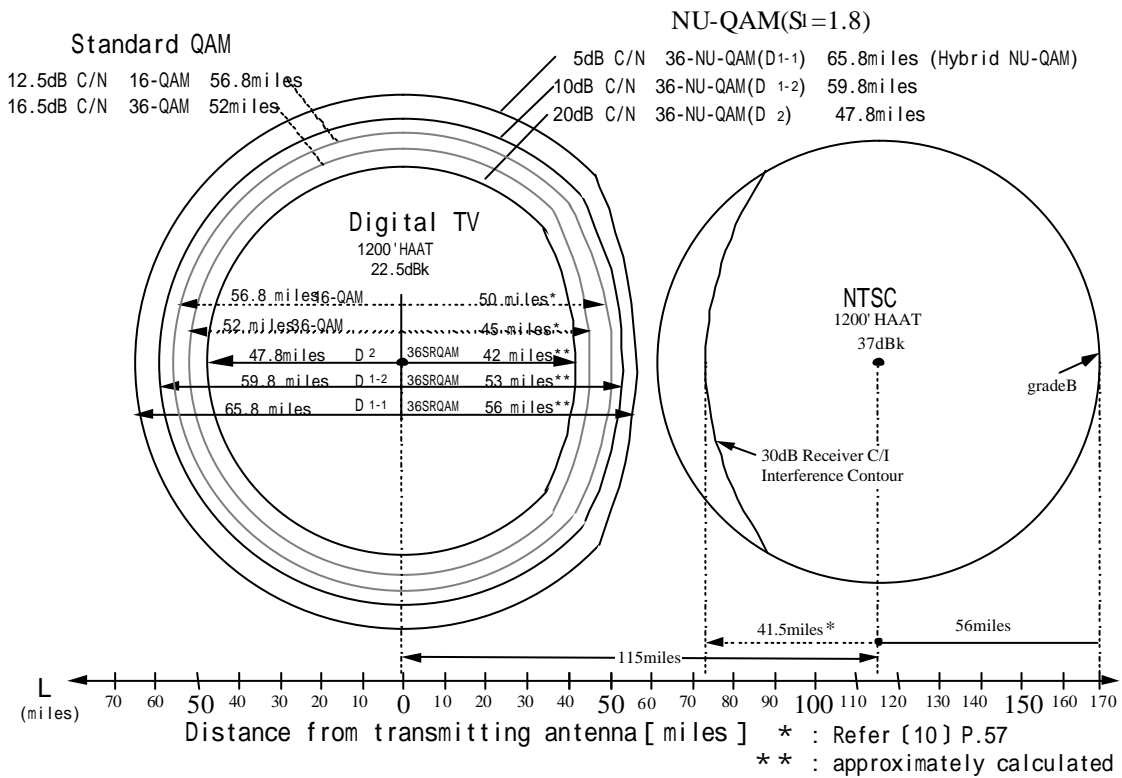


図 3 2 5 標準QAMとハイブリッドNU-QAMの受信エリアの比較 (S1 = 1.8)

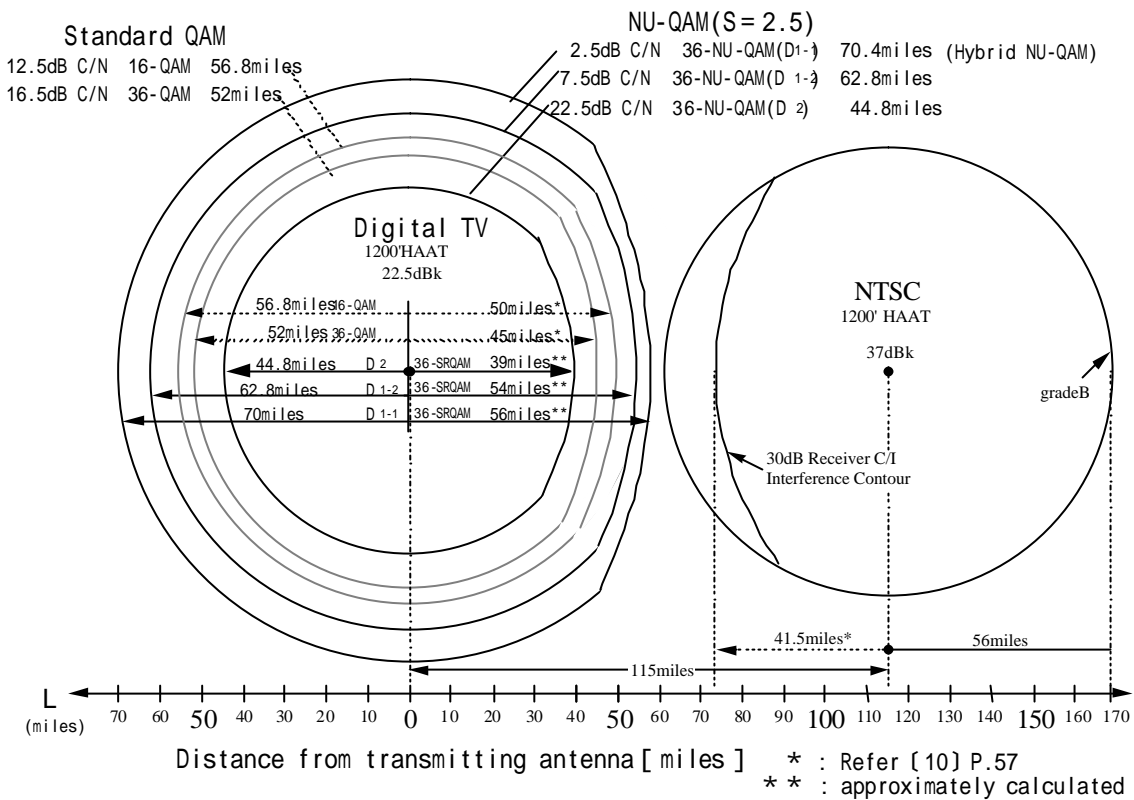


図 3 2 6 標準 Q A M とハイブリッド N U - Q A M の受信エリアの比較 (S 1 = 2.5)

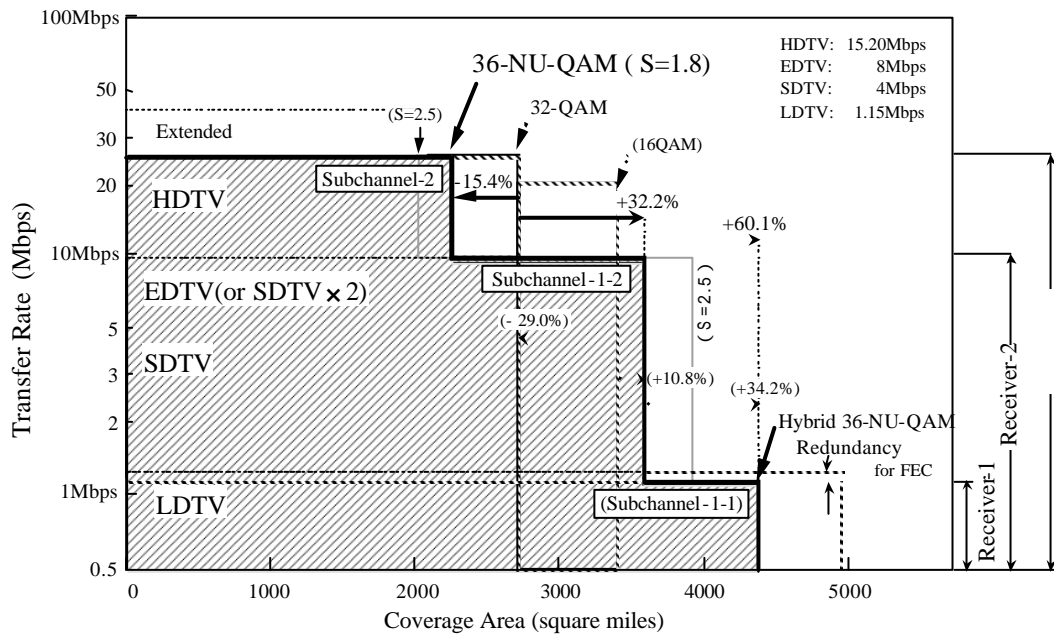


図 3 2 7 ハイブリッド N U - Q A M の受信エリアに対する転送レート: S 1 = 1.8(2.5)

4.4 まとめ

NU-QAMの提案によって、複数の閾値を持つチャンネルコーディングが可能となった。またNU-QAMをTDMまたはFDMと組み合わせた結果、NU-QAMによって得られた2つのチャンネルと、TDMと標準QAMによって得られた1つのサブ・サブチャンネルを持つ、ハイブリッド36-NU-QAMの地上波放送受信エリアをシミュレーションすることができた。[310]に記述されたシステムとの比較で、EDTVのエリアは32.2%(10.8%)拡大した。一方、HDTVのエリアは、15.4%(29.0%)小さくなっている。NU-QAMをTDMと組み合わせることで、低画質SDTVのエリアは、60.1%(34.2%)大きくなっている。ハイブリッドNU-QAMは、地上波放送の実用受信エリアを拡大し、様々な解像度の表示装置を持つ潜在的視聴者に、番組を提供することができる。

第5章 階層伝送実現に必要な要素技術

5.1 はじめに

階層伝送とは「伝送チャンネルを複数のサブチャンネルに分割し、各々のサブチャンネルの伝送時の耐性を変える伝送方式」と定義できる。

伝送路を複数のサブチャンネルに分割する方法としては周波数方向に分割する方法と時間軸方向に分割する方法がある。分割されたサブチャンネルに耐性の違いを持たせることにより、階層伝送が実現する。本章では階層化伝送の実現方法を述べ、階層化伝送の中で重要な役割を果たす要素技術の一つである復調情報伝送方式と階層型OFDMについて述べる。

5.2 階層伝送における階層の構成方法

階層伝送の階層の構成方法としては、周波数分割方式と時間分割方式等の多重化方式が考えられる。

サブチャンネルに分割するには図3.28(a)に示すように一つのチャンネル(伝送路)を周波数方向に分割するか、図3.28(b)に示すように時間軸方向に分割することにより、複数のサブチャンネルを生成する。また図3.08に示すように信号点のマッピングによりサブチャンネルを形成する方式が筆者らにより提案されている。図3.29(a)に示すように各サブチャンネルの耐性を変えることにより階層伝送を実現できる。サブチャンネル毎の耐性を変える方法には、まず図3.29(b)のように送信パワーを変えて閾値までのマージンを拡げる方法がある。次に図3.29(c)のようにサブチャンネルの閾値を変える方法がある。閾値を変える方法としては図3.30(a)のように信号点数を変えることにより閾値を変えることができる。信号点数を変えると図3.31、図3.32に示すように閾値が大きく変わる。均一マッピングの場合は信号点間隔を変えることと信号点数を変えることは等価である。しかし図3.30(b)に示すように筆者が考案したNU方式つまり非均一マッピングの場合は非均一性を上げるに従い特定の信号点に対応した符号の閾値が下がり、特定の信号点に対応した符号の閾値が上がるという階層化効果の一つの変調方式の中で実現できる。

図3.30(c)のようにエラー訂正時の符号化ゲインを変えることにより閾値をある程度変えることができる。OFDM方式では図3.30(d)に示すようにガードバンドタイムの長さを変えることによりマルチパスに対する耐性を変える方式も筆者により提案されている。

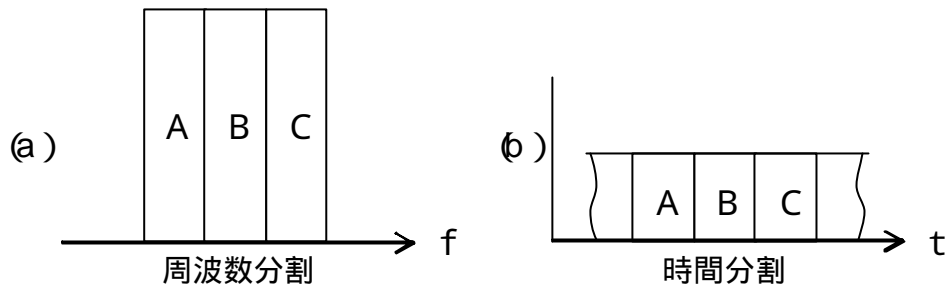


図 3 2 8 階層サブチャンネルの分割方式

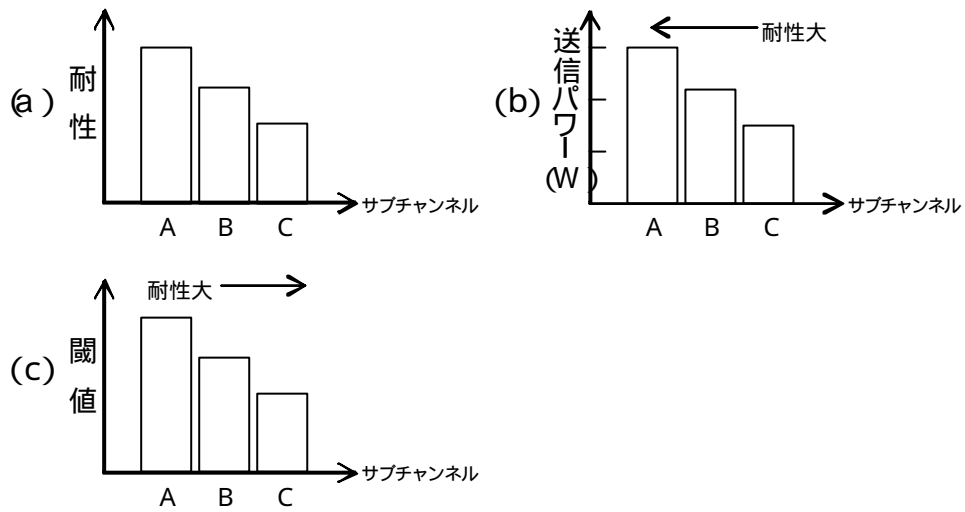


図 3 2 9 耐性を変える方法

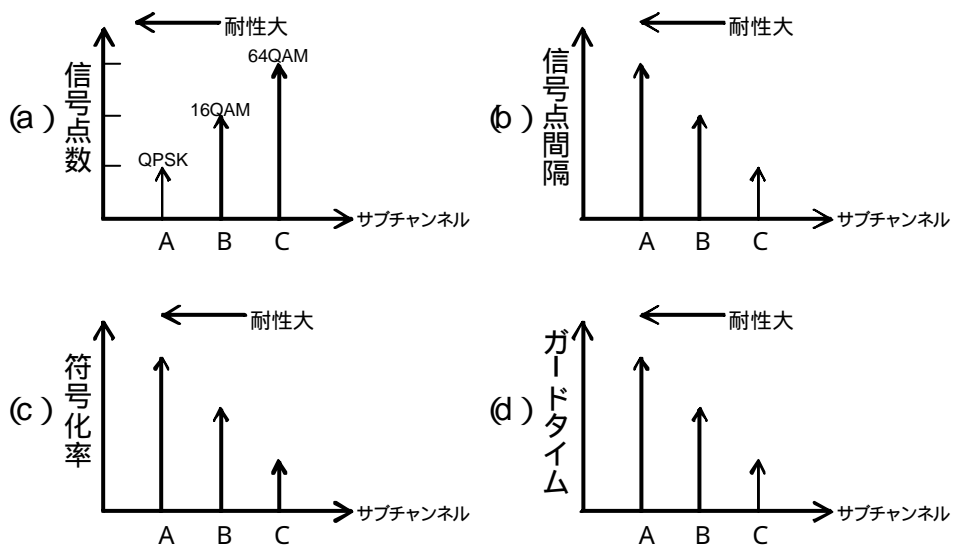


図 3 3 0 耐性を変える実現方法

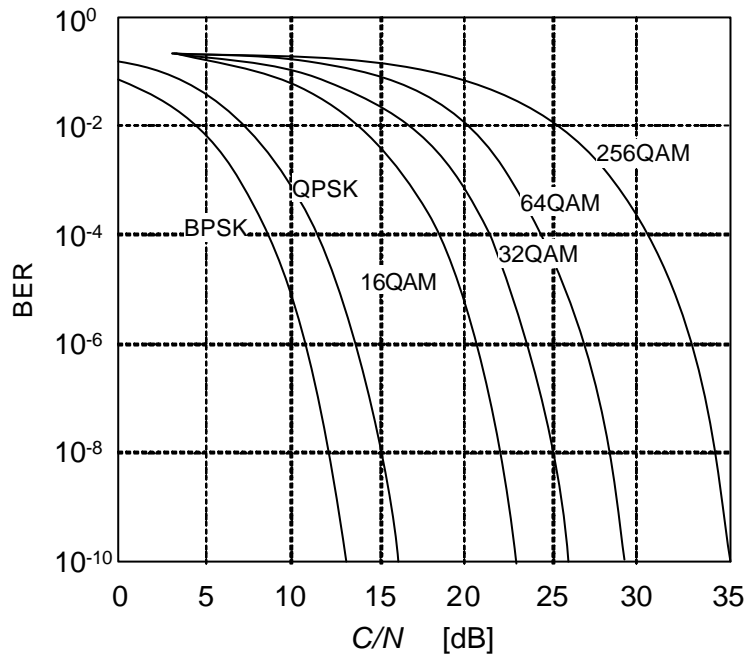


図 3 3 1 代表的な変調方式の BER 特性

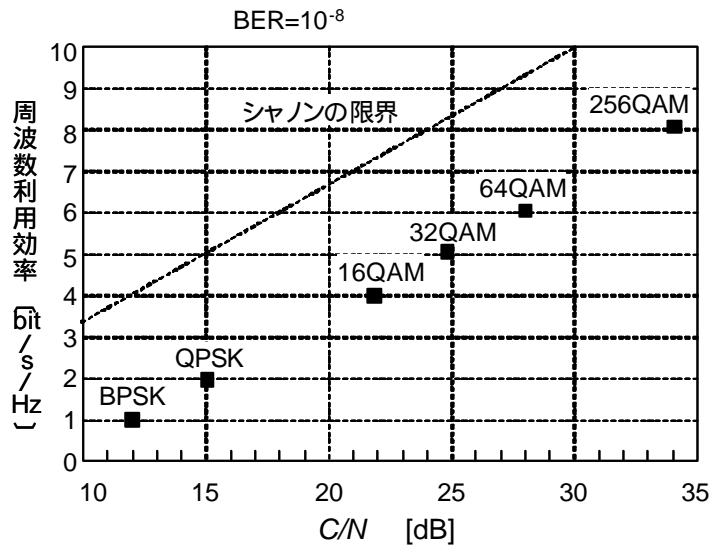


図 3 3 2 代表的な変調方式の閾値

5.3 階層伝送実現時に予想される問題点

階層伝送では、1つの伝送路を複数のサブチャンネルに分割し変調方式等を変更して耐性を変えて伝送される。例えば、BPSK、QPSK、16QAM、64QAMを多重化して伝送する。階層伝送ではある時間帯においては第1階層でBPSK、第2階層ではQPSK、第3階層では64QAMを時分割多重や周波数分割多重で送り、別の時間帯においては第1階層でQPSK、第2階層で32QAM、第3階層で64QAMを送ることも可能である。各階層の符号化率を変えることもできる。この場合、受信側では現在どの変調方式での符号化率で、送られているかわからないと復調できないという問題点が生ずる。例えば、日本方式の規格では伝送パラメータとして様々な変調方式、符号化率が任意に設定できるため伝送路に合った最適の伝送方式を選択することができる。しかし、これらの組み合わせパターンは1000以上になる。従来方式のように1つずつ伝送パターンを試していく方法であると、特定のチャンネルを選択した後、復調できるまで時間がかかり過ぎるため、TV受信機としては視聴者に受け容れられないと思われる。

5.4 復調情報

この問題を解決するため、図3.3.3に示すような復調情報伝送方式を検討した。階層伝送路が3つのサブチャンネルに分かれている場合、各サブチャンネルの耐性は異なり、最下位のサブチャンネルである第1階層の耐性が高く伝送容量は小さい。最上位のサブチャンネルは耐性が低い伝送容量は大きい。このためデジタルTV放送においては、最上位の第3階層で高解像度の映像信号が送られる。外乱が入った時は第2、第3階層は伝送できなくなる可能性がある。しかし、第1階層は外乱が入っても伝送可能なように耐性が強めてある。また第1階層は伝送効率が悪いので、最小限の伝送容量にする必要がある。

第1階層で伝送路の各階層の復調に必要な変調方式、符号化率、時間インターリーブ長等の伝送パラメータつまり復調情報を送ることにより、第2、第3階層が、受信できない期間中も絶えず復調情報を受信できるため、伝送路の伝送条件が回復した場合、瞬時に第2、第3階層を復調できるため無伝送時間を最小限にできる。この復調情報送信方式は日本方式ではTMC、欧州方式ではTPSと呼ばれるが、この復調情報送信方式の概念は1991年に本研究の中で筆者により考案されたもので、基本特許〔322〕が権利化されている。この復調情報伝送方式により、チャンネルを変えた時や外乱が入った後に瞬時にチャンネルを復調できることが可能となった。

この復調情報伝送システムは、階層型伝送を実現する上で、最も重要な要素技術の一つで、デジタルTV規格だけでなくIEEE 80211a、80211g等の無線LAN規格

や家庭用LAN規格や第3.5世代、第4世代の携帯電話規格等の主要なデジタル通信規格に採用されている。

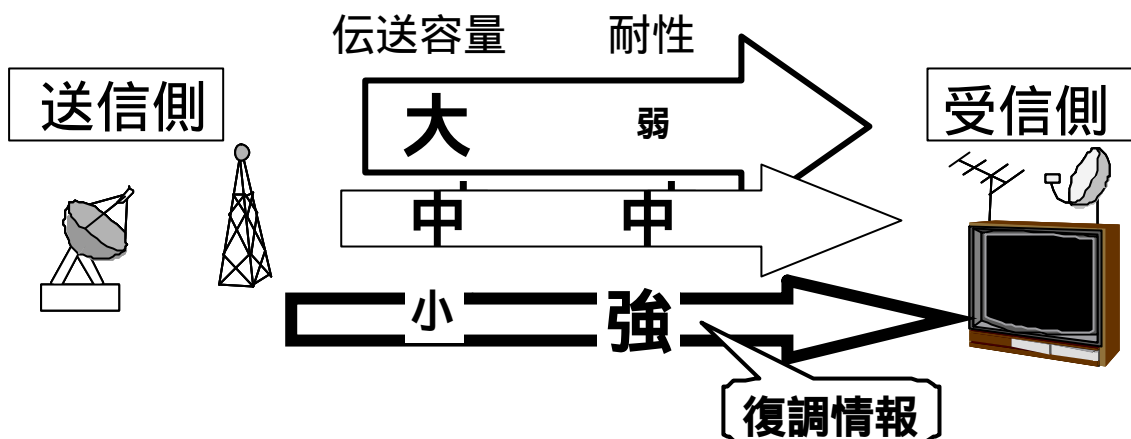


図3.3.3 階層型伝送路

5.5 階層型OFDMの検討

図3.3.4の基本構成に示すようにOFDM方式はマルチキャリア型の伝送方式である。従って図3.3.5の周波数領域の原理図に示すように各々のキャリアがサブチャンネルであるといえる。特定のキャリア群を第1階層とし、別の特定のキャリア群に第2階層、第3階層を割り当てることによる階層型OFDMが実現する。日本方式では前述した復調情報(TMCC)は最も耐性が強い変調方式であるBPSKで送られるため、外乱が多い場合や受信レベルが低い場合でも復調情報は復調できる。これにより常に復調情報が得られるため、安定して各階層を復調できる。日本方式では既に図3.0.7に示したように最大3階層まで階層構造をとることが許される。実質的に周波数分割型の階層構造となっており、QPSK、16QAM、64QAMが各階層毎に設定できる。ただし実際は周波数インターリーブがかけられているため周波数順にキャリアが配列されていない。OFDM方式で周波数分割型の階層伝送を行う方式は、復調情報伝送方式と組み合わせられて筆者が1993年に考案している。

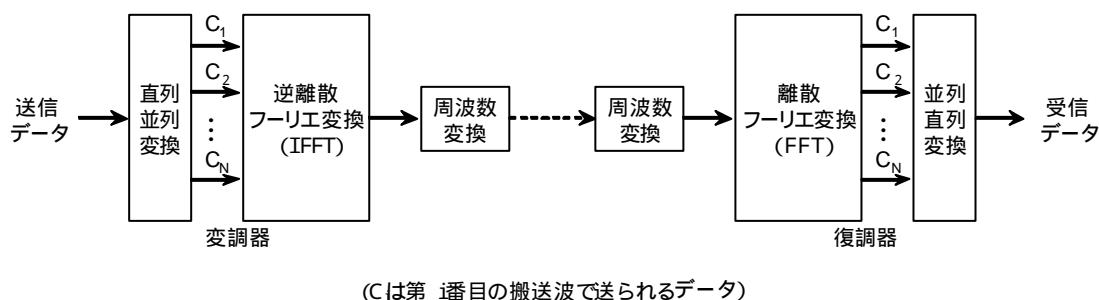


図3.3.4 OFDM変復調器の基本構成

本研究で考案された階層 OFDM 方式の日本方式 ISDB-T 規格のデジタル地上波放送の受信回路を搭載したテレビの製品化例を図 3 3 6 に示す。

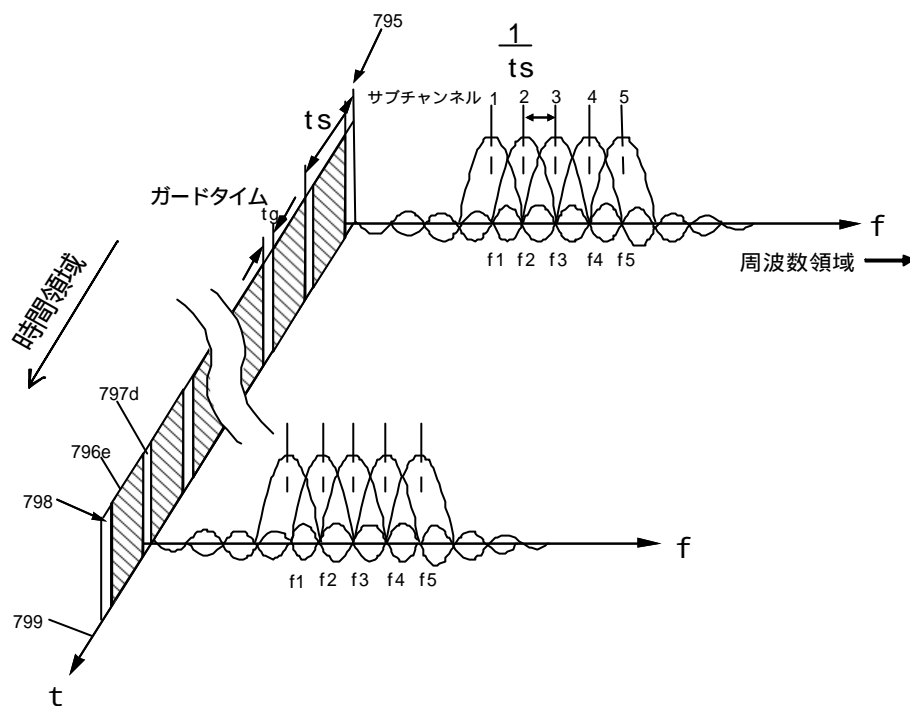


図 3 3 5 OFDM方式の伝送原理



図 3 3 6 本研究の階層 OFDM 復調回路を搭載した地上波デジタル TV 受信機

5.6 本技術の展開

本研究で確立した階層型OFDMの映像機器分野以外への展開について述べる。OFDM変調方式は無線LAN規格や第3.5世代や第4世代の携帯電話等に広く応用されようとしている。まず、現在広く普及している無線LAN規格であるIEEE 802.11a規格とIEEE 802.11g規格には階層型OFDM方式が採用されている。この規格では、QPSKや16QAM等が使われておりこの変調方式の識別用に一番下の階層で変調方式の識別子が送られている。ここでデジタル階層型OFDMの必須技術である本研究の復調情報伝送方式が使われている。

また次の携帯電話の規格である第3.5世代や第4世代では階層OFDMが検討されている。この場合は本研究による復調情報伝送方式はじめ階層型OFDMの重要技術が採用されようとしている。

本研究の階層型OFDMの研究においては携帯電話の送受信において伝送品質に応じて最適の変調方式を変える適応変調方式を考案し検討を行った。図3.3.7は適応変調の原理を示す。まず基地局から携帯電話端末に電波を送る。携帯電話側ではC/N値やBER等の伝送品質を測定し、この測定値を基地局に送る。基地局側では伝送品質に応じて変調方式やエラーコードゲインを最適な値に設定して送信する。このため伝送条件で得られうる最大の伝送レートで送信することができるため、実質的な伝送量を増大させることができる。適応変調は近年、研究が急速に進み次世代携帯電話規格の重要技術になっている。この適応変調の基本特許は筆者が有している。

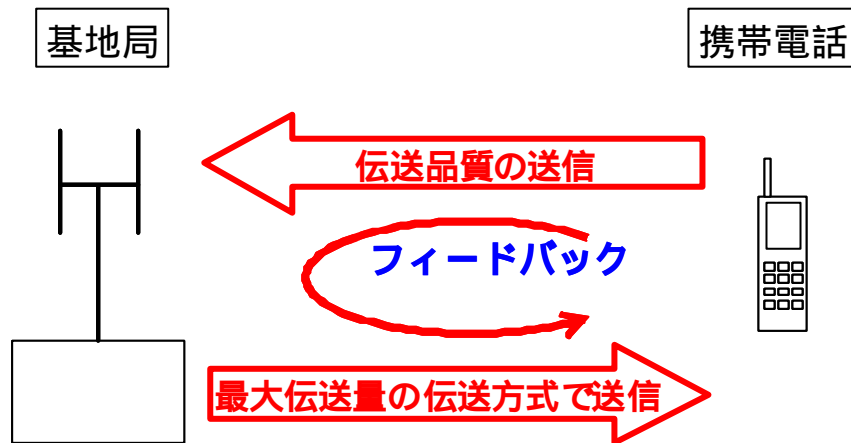


図 3.3.7 適応変調の原理 (筆者の考案方式)

5.7 まとめ

階層伝送の階層を実現する方法として、周波数分割によりサブチャンネルを生成する方法と時間分割によりサブチャンネルを生成する方法を示した。

各サブチャンネルの耐性を変える方法として信号点数、信号点間隔、符号化率、ガ

ードタイムを変える方式を検討した。OFDM方式のような伝送パラメータが多数の組み合わせを持つ伝送方式においては、従来のような総あたり方式で変調パラメータを探し出そうとするとパラメータの検出に多くの時間を要するため、操作性を悪化させるという問題点を予見した。この問題点を解決するため、最も耐性の強いチャンネルで伝送パラメータを含む復調情報を送るという復調情報伝送方式を筆者が1993年に考案した。この要素技術により、チャンネル切替時や外乱信号発生時の復調開始時間が大巾に短縮され、操作性が大きく改善された。この復調情報伝送方式は欧州規格ではTPS、日本規格ではTMCCという名称で標準化された。階層化OFDM方式として、復調情報伝送方式と組み合わせて周波数分離方式で階層チャンネルを生成し、変調方式を変えることにより、階層の耐性の強さを変える階層伝送方式を筆者が考案した。この方式は欧州規格と日本規格で採用された。

第6章 結論（第3部）

本研究では米国、欧州、日本の地上波デジタルTV放送方式の標準化に際し、デジタルTV放送分野に従来のデジタル通信分野で用いられていた通信方式を導入した場合、閾値効果により特定の受信条件の受信者が放送を突然受信できなくなるという脆弱性が生ずることが懸念された。この脆弱性を改善するためには階層化伝送が重要な解決策であると考えた。そこで階層化の観点から再構築したVSB、QAM、OFDMを用いた新たな変調方式を考案し、いくつかの考案と提案を行った。まずVSB方式に関しては1991年3月に階層化のため多値化8VSB方式の考案と検討を行い、1992年3月には8VSBトレリス方式を先駆け考案し、基本特許を権利化した。一方米国における標準化は当初QAM変調方式が優勢であった。しかし途中で回路構成が簡単なためZenith社が提案した4VSB方式が優位に立った。そして最終的に筆者が考案した8VSBトレリス方式がATSC規格として標準化された。VSBを階層化した階層型VSBを考案したが、米国方式には採用されなかった。

筆者はQAMに関してはQAM変調を階層化したNU-QAMを1991年3月に考案し提案を行った。NU-QAMは信号点をグループ化し、各信号点グループ間の距離をシフトファクタ S を変えた場合の各サブチャンネルの誤り確率 P_e を求めた。サブチャンネル1で低解像度(SD)の映像信号、サブチャンネルで高解像度(HD)の映像信号を放送するモデルを想定し、実際に地上波放送を行った時のサービスエリアの大きさをシミュレーションしたところ、普通のQAMに比べて、HDTVの受信エリアは15%縮小するが、SDTVの受信エリアが32%拡大することがわかった。

このNU-QAMはOFDMと組み合わせて欧州方式に採用され、1995年にDVB-T規格として標準化された。

OFDM方式の階層化を検討した結果、OFDMの階層化を行うと多くの伝送パラメータの組み合わせが考えられるため従来の総あたり方式であると復調時に多大な時間を要し、操作性が悪くなるという課題を予見した。この課題を解決するためには上位の階層の伝送パラメータを最下位のサブチャンネルで送る復調情報伝送方式を筆者が考案し、基本特許を権利化した。この方式は欧州方式にTPSという名称で、日本方式ではTMCCという名称で採用され、標準化された。この方式によりOFDMを用いた放送では悪条件下においても常に復調情報が受信できるため、安定な受信と迅速な選局が可能となった。また筆者が考案した階層型放送も、日本の衛星放送規格ISDB-Sと日本の地上波放送の“1セグ放送”でサービスが開始される。

以上の筆者の考案した方式の標準化により、デジタルTV放送の悪条件下での受信時の脆弱性が大きく改善された。

論文の総括

映像情報機器の脆弱性として3つの課題に着目し研究を行った。まず、撮影装置においては、映像を手持ち撮影する時に撮影装置の保持が弱いため撮影映像の安定性が損なわれるという脆弱性があった。次に、光ディスクにおいては、セキュリティ機能が全くなかったために、著作権が侵害されるという情報セキュリティ面の脆弱性があった。また、デジタルTV放送においては、信号レベルがある閾値を下回ると急激に信号品質が劣化し、映像が全く受信できなくなるという脆弱性があった。

以上の脆弱性を改善する要素技術として撮影装置の手振れ補正技術と光ディスクの個別情報記録技術とデジタルTV放送の階層放送方式の研究をおこなった。

(1) 手持ち撮影時の画像安定性の脆弱性を改善するには画像安定化の要素技術を確立する必要がある。1982年の研究着手時点では手振れ補正技術を具体的に研究した文献や基礎データが殆どなかったため、手振れの基礎研究から着手した。まず手振れの周波数分布と振幅を実測し、歩行撮影時や車上撮影時に発生する手振れを補正するには ± 6 度の補正範囲が必要であることを明らかにした。

手振れの補正方式として、光学像を補正する光学補正方式と、撮像素子からの電気信号を補正する電子補正方式の両方式を考案し検討した。検討の結果、 ± 6 度の補正範囲を実現するには電子補正方式や内部レンズ補正方式では補正範囲が狭かったため、光学補正方式のミラー駆動方式と鏡筒駆動方式の2方式に絞り1号機から6号機の試作機を開発し、量産実用化に向けた研究を行った。被験者に実際の手振れした映像を見せることにより、主観評価法により手振れの人間に対する感受性を定量化した。この定量化データから手振れ補正の抑圧制御特性の目標仕様を明らかにした。

手振れ補正力は撮影者の意図的なカメラの動きを時として妨害する。このため操作性が悪くなる。そこで撮影者の意図に基づくカメラの動きと、手振れを識別する「カメラの動き識別アルゴリズム」を考案することにより手振れ補正機能と操作性を両立させた。検出手段である振動ジャイロは1940年代に発明されたが、中立点の不安定さを解決できず量産化されていなかった。研究を進めた結果、位相基準信号に位相誤差が発生することにより、同期検波した検出出力が変動するため不安定になることを解明した。この位相誤差をなくすため振動子を音叉構造にするとともにモニタ電極を追加しフィードバック制御を行う方式を考案した。これにより中立点の不安定さを大幅に低減することができた。この振動帰還音叉型振動ジャイロの実用化により世界初の振動ジャイロの量産を実現した。

量産用ビデオカメラにこの手振れ補正機構を搭載したところ、温度変化を含めた部品のバラツキ等の外乱負荷の変動により最悪条件では、研究段階で得られた手振れ補正特性の1/10の性能しか出ないことが明らかになった。ここで変動する外乱負荷を推定するオ

ブザーバ制御を民生用機器に初めて導入することにより所定の手振れ補正特性が得られ、1988年、世界初の手振れ補正機能搭載カメラの量産実用化を実現した。この実用化を端緒として、手振れ補正技術の研究が進み、現在ではビデオカメラのほぼ全数と、スチルカメラ、デジタルカメラの主力機種に、手振れ補正機能が搭載され、この全数が筆者が考案した手振れ補正技術の基本特許を使用している。

(2) 光ディスクの情報セキュリティの脆弱性を改善するには、1枚毎に異なる個別情報の記録が極めて有効であった。

ROM型光ディスクには記録できないというのが1995年当時の常識であった。しかし、この常識は筆者による「表面張力記録」の発見と発明により破られる。「表面張力記録」に適したバーコード状の記録マークを用いた記録フォーマットを筆者が考案しDVD Forumに提案した。半年後、この方式はBCAと名付けられDVD規格に採用され国際規格として標準化された。短期間で全く新しい方式が標準化されたのは、1番目の理由として、1枚当たりの記録時間を2秒以下に短縮できたことと、記録原理を解明し信頼性確認実験によりディスクの信頼性が劣化しないことを実証したため、ディスク製造業者の賛同を得られたことが挙げられる。記録時間を短縮するためにCW-Qスイッチ型のYAGレーザー光をシリンダリカルレンズにより線状ビームに整形し、記録層にダメージを与えることなく、1パルスで1本のバーコードマークを数十ミクロンの位置精度で記録する要素技術を確認した。この高速記録型のYAGレーザー方式に加えて小規模生産用の半導体レーザー方式量産用記録装置を実現した。標準化された2番目の理由として、既存の光ヘッドで再生可能で、再生装置内のCPUで復調とエラー訂正が可能な記録フォーマットを新たに考案したため、装置製造業者の賛同を得られたことが挙げられる。再生装置内のCPUチップで全ての信号処理をさせるためにPE-RZ変調方式を考案し、スケーラブルなエラー訂正方式を考案した。ROMディスク用BCAにより情報セキュリティの脆弱性が大幅に改善され、これにより海賊版防止ディスクや後払い方式DVDディスクが事業化された。

記録型DVDにおける「一回コピー」を実現するには、改ざんできないディスクIDの記録技術が求められた。BCAは市販のドライブでは改ざんできないため、筆頭候補であったが、量産工程のBCA記録コストを下げるという課題があった。記録型DVDの場合は製造時の製膜工程でできる低反射率のアモルファス状態の記録膜にレーザーを照射し高反射率の結晶状態に変化させる初期化工程がある。この初期化工程においてBCAマークのバーコード領域を残して間欠的に初期化することによりBCAマークを形成する新しい記録方法を筆者らが考案することによりBCAの製造コストと製造時間の増加をほぼ零にすることに成功した。改ざんできないBCAと筆者らが考案したCPRM規格を組み合わせることにより実現した「一回コピー」のセキュリティが著作権側に認められ一般消費者がデジタルTV放送をディスクにコピーすることが可能となった。BCAはDVD規格の

みならず、青色レーザーを用いるBD、HD-DVD規格等の9つの光ディスク国際規格に標準化された。以上のようにBCAにより、ROM型と記録型のDVDディスクの情報セキュリティの脆弱性を大きく改善することができた。

(3) デジタルTV放送方式の伝送時の脆弱性を改善するには、階層伝送技術が最も重要な要素技術であると考えた。そこで階層化の観点からVSB、QAM、OFDMを再構築した新たな変調方式を考案し提案した。まずVSB方式に関しては、1991年に、階層構造の8VSB方式を考案し検討した。1992年3月には階層化を実現するために多値化とトレリスを組み合わせた「8VSBトレリス方式」を考案し基本特許を権利化した。一方、米国における標準化は当初QAM変調方式が主流であったがZenith社が提案した4VSB方式が一時優勢に立った。しかし最終的に筆者が考案した「8VSBトレリス方式」がATSC規格として標準化された。ただVSBを階層化した階層型VSBは、米国方式に採用されなかった。QAMに関してはQAM変調を階層化した階層QAMを1991年3月に考案し提案を行った。階層QAMは信号点をグループ化し、各信号点グループ間の距離をシフトファクタ - に応じて変えることにより、信号点到割り当てられたサブチャンネルの耐性を変える方式である。シフトファクタ - を変えた場合の各サブチャンネルの誤り確率を求めた。サブチャンネル1で低解像度(SD)の映像信号、サブチャンネル2で高解像度(HD)の映像信号を放送するモデルを想定し、実際に地上波放送を行った時のサービスエリアの大きさをシミュレーションした。この階層QAMはOFDMと組み合わせて欧州方式TV規格に採用され、1996年にDVB-T規格として標準化された。

OFDM方式単独の階層化を検討した結果、階層化を行うと多くの伝送パラメータの組み合わせが考えられる。このため従来の総あたり方式を用いると復調時に伝送パラメータの検出に多大な時間を要し、操作性が悪くなるという課題を予見した。この課題を解決するためには上位の階層の伝送パラメータを最下位の階層で送る復調情報伝送方式を筆者が考案し基本特許を権利化した。この方式は欧州方式にTPSという名称で、日本方式ではTMCという名称で採用され、標準化された。この方式によりOFDMを用いた放送では悪条件下においても常に復調情報が受信できるため安定した受信と迅速な選局が可能となった。また筆者が考案した階層型放送も、日本の衛星放送規格ISDB-Sと日本の地上波放送の1セグ放送でサービスが開始される。筆者の考案した伝送方式の国際規格の標準化により、デジタルTV放送の悪条件受信時の脆弱性が大きく改善された。また筆者の考案した階層OFDMは無線LAN規格にも採用されているが、「適応変調」という名称で第3.5世代と第4世代の携帯電話伝送規格の基本変復調方式に採用されている。本研究の手振れ補正技術、個別情報記録技術、階層型伝送技術により、撮影装置、光ディスク、デジタル放送の持つ脆弱性を大きく改善することができた。

現在、デジタルカメラ、DVDレコーダ、薄型デジタルTVが、家電の「新3種の神器」として日本経済を活気づけている。このうち、デジタルカメラにおいては筆者が本研究の

中で考案、実用化した手振れ補正を搭載したデジタルカメラがトップシェアを挙げ市場を牽引している。DVDレコーダにおいては筆者が本研究の中で考案、事業化したBCAによりデジタル放送が光ディスクに記録可能となり、消費者が画像劣化のないデジタル映像を光ディスクに記録して楽しむことが可能となった。薄型デジタルTVにおいては筆者が本研究の中で考案した階層OFDMと8VSBが日米欧のTV規格に標準化され安定したTV受信が出来るようになった。

筆者が考案し研究した3つの要素技術が全世界で広く使用されていることに加えて、本研究の最初の研究に対して恩賜発明賞と紫綬褒章が下賜されたことは望外の喜びである。

謝 辞

本研究を進める過程においてご指導とご鞭撻を賜りました数多くの方々にごことより感謝申し上げます。特に、懇切丁寧なご指導とご鞭撻と格別のご配慮を賜りました早稲田大学大学院理工学研究科ナノ理工学専攻 大泊 巖 教授に謹んで深謝の意を捧げます。大泊先生には平成16年11月に当時初対面であった私に本研究をまとめる機会を与えて頂き、今日に至るまで様々なご指導を賜りました。もし先生にお会いすることがなければ、本研究をこのようなかたちでまとめる上げることは難しかったと思います。重ねて感謝申し上げます。

また、本論文をまとめるにあたり、ご指導いただきました早稲田大学大学院理工学研究科ナノ理工学専攻 小松尚久 教授、宇高勝之 教授、内田健康 教授に感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、深いご理解を頂き、本研究の全般にわたり御指導を頂き本研究の全般にわたり資金と人材の両面から御支援を頂いた松下電器産業株式会社 中島昌也 元取締役、松下寿電子工業株式会社 岡本司 元副社長、松下電器産業株式会社 元取締役 長澤雅浩博士、三木弼一元専務取締役、松下電器産業株式会社 梶野二郎 元上席理事に深く感謝致します。

本論文をまとめるに当たり、松下電器産業株式会社 専務取締役 古池進博士、津賀一宏役員には、その機会を与えていただきました。ここに感謝の意を表します。

撮影時における画像安定面の脆弱性改善の研究、すなわち手振れ補正技術の研究においては23年間この研究を継続され、筆者の永年のパートナーであった松下電器産業株式会社 パナソニックAVCネットワークス社 林孝行主幹技師に感謝致します。光学補正方式手振れ補正技術の研究においては、松下電器産業株式会社 五十嵐祥晃 元部長、伊崎正高主事、藤岡総一郎主幹技師、稲治利夫主幹技師、パナソニックAVCネットワークス社 三谷浩主任技師、主任技師 日下博也博士、パナソニック四国エレクトロニクス株式会社の池田耕二参事、薦田賢二主任技師に、振動ジャイロの研究においては、松下電器産業株式会社 山口博史主幹技師、木村涼主幹技師に、ソフト補正方式の研究においては、パナソニック半導体デバイスソリューションズ株式会社 西澤真人グループマネージャーに多大のご援助、ご支援、御討論を頂きました。厚くお礼申し上げます。

光ディスクの情報セキュリティ上の脆弱性改善の研究、すなわち光ディスクの個別識別情報記録(BCA)の研究においては、光ディスクのBCAの基本方式の研究と国際標準化活動においては、松下電器産業株式会社 田中伸一技監に、YAGレーザーを用いた記録方式の研究においては、生産革新本部 楠本正治主幹技師に、BCAの透過型電子顕微鏡を用いた解析研究においては、(株)松下テクノロジーの神前隆チームリーダーに、半導体レーザー型BCAの記録方式の研究においては、パルステック工業株式会社技術本部の熊谷正史氏に、多大のご援助、ご支援、御討論を頂きました。厚くお礼申し上げます。

デジタル通信の悪条件下における脆弱性改善の研究、すなわち階層型伝送方式の研究に

において、松下電器産業株式会社 海外R & D推進センター 所長 安本吉雄博士、ネットワーク開発センター 主幹技師 小川晃一博士には、方式の解析および実験に関して多大のご援助、ご支援、御討論を頂きました。厚くお礼申し上げます。

また、手振れ手振れ補正搭載ビデオカメラの事業化に当っては旧松下寿電子工業株式会社の天野茂 元副社長に多大のご援助を頂きました。BCA技術を用いたDVD ディスクとDVDドライブの事業化に当たってはパナソニックAVC社の久野健二郎副社長に多大の御援助を賜りました。階層伝送技術を用いた地上波デジタルテレビ受信機の事業化に当たっては、パナソニックAVC社の上田勉上席副社長に多大の御援助を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

第1部

- [1] 赤澤堅造：“生体情報工学”、東京電機大学出版局（2001）。
- [2] 鵜飼和彦：“生体の眼 - 人眼の調節の機能的解析”、第19回微小光学研究会講演論文、pp.9-12（1986）。
- [3] 竹村裕夫：“CCDカメラ技術入門”、コロナ社（1997）。
- [4] 石田順一、藤村安志：“山登りサーボ方式によるテレビカメラの自動焦点調節”、NHK技術研究、Vol.17、No.1、pp.21-37（1965）。
- [5] 岡部隆一、法田嘉明：“オートフォーカス”、シャープ技報、Vol.29、pp.121-124（1984）。
- [6] H.Toyoda, S.Nishikawa, Y.Kitamura and M.Onishi：“New Automatic Focusing System for Video Cameras”、IEEE Trans. Consum. Electron., Vol.32, No.3, pp.312-319（1986）。
- [7] 山西一啓、井手達樹、福田親：“家庭用AV機器における多機能化技術”、テレビジョン学会誌、Vol.43、No.6、pp.561-570（1989）。
- [8] 当山正道：“カメラの自動機能とその知能化”、日本機械学会誌、Vol.96、No.900、pp.10-13（1993）。
- [9] 中山正明、芦田和孝：“カラー一体型VTR”、テレビジョン学会誌、Vol.45、No.9、pp.1080-1088（1991）。
- [10] 彦坂清太郎、折出?、笠間英彦、加納武彦：“移動撮像車用テレビカメラ防振装置”、NHK技研月報、Vol.17、No.4、pp.19-24（1974）。
- [11] 関口卓司、詫間衛：“サーボ式カメラ防振装置”、NHK技研月報、Vol.27、No.11、pp.23-28（1984）。
- [12] 笠間英彦、福島宏、加納武彦：“ヘリコプター・カラーカメラ用防振台”、NHK技術研究、Vol.23、No.2、pp.66-82（1971）。
- [13] 加井謙二郎、氏原茂、門條由男、千葉勝範、川村好英、阿部稔：“画面ゆれ補正装置について”、テレビジョン学会技術報告、Vol.11、No.3、pp.43-48（1987）。
- [14] S.Kimura, H.Yamaguchi：“Angular Velocity Sensor”、US Patent 4671112。
- [15] 竹中寛：“角速度センサ”、センサ技術、Vol.10、No.9、pp.56-59（1990）。
- [16] 稲治利夫、藤岡総一郎、林孝行、梶野二郎：“ビデオカメラの画振れ防止技術の開発”、テレビジョン学会技術報告、Vol.11、No.28、pp.19-24（1987）。
- [17] 大嶋光昭、伊崎正高、梶野二郎、五十嵐祥晃、三谷浩：“撮像装置”、特許登録番号1589189号。

- [18] 日経 BP 社：“ 600 g 台に入るカメラ一体型 V T R 構造系の小型・軽量化が効く ”、日経メカニカル、1990 年 9 月 3 日号、pp.50-58 (1990) .
- [19] 中山正明、森村淳：“ ビデオムービー Panasonic「ブレンビー」(N V - S 1) ”、電子写真、Vol.30、No.1、pp.73-81 (1991) .
- [20] 中村武：“ 正三角柱振動子を使う圧電振動ジャイロ、小型、低価格で身近な応用ねらう ”、日経エレクトロニクス、No.514、pp183-191 (1990) .
- [21] 栗原哲郎：“ 圧電振動ジャイロのテクニック ”、エレクトロニクス、Vol.39、No.7、pp.35-37 (1994) .
- [22] 阿部洋：“ 圧電振動ジャイロのテクニック ”、エレクトロニクス、Vol.39、No.7、pp.38-40 (1994) .
- [23] 株式会社村田製作所製 圧電振動ジャイロ E N C - 05 S カタログ (1992) .
- [24] 近藤正、菅原澄夫、工藤すばる：“ 圧電形振動ジャイロスコープ角速度センサ ”、電子情報通信学会論文誌、Vol.J78-C、No.11、pp.547-556 (1995) .
- [25] 古賀良男、美濃部正、仲雅文、渡辺幸雄：“ カメラ一体型 V T R の手振れ補正機能、圧電振動ジャイロを使って誤動作を減らす ”、日経エレクトロニクス、No.541、pp217-226 (1991) .
- [26] 石塚茂樹：“ ハンディカムのテクニック ”、エレクトロニクス、Vol.39、No.7、pp.22-25 (;1994) .
- [27] 石塚茂樹、佐藤弘一、佐藤満：“ カメラ一体型 V T R、プリズムと角度センサで手ブレを補正 ”、日経エレクトロニクス、No.558、pp203-211 (1992) .
- [28] 日下博也：“ 各種機能の現状 3-1 手振れ補正 ”、テレビジョン学会誌、Vol49、No.2、pp131-134 (1995) .
- [29] 日下博也：“ ビデオムービーの手振れ補正 ”、日本光学会光設計研究グループ機関紙、Vol.11、pp.36-41 (1997) .
- [30] 小倉敏布：“ 写真レンズの基礎と発展 ”、朝日ソノラマ (1995) .
- [31] 日下博也、中山正明、猪熊一行、井手達樹：“ 高画質手ぶれ補正システムの開発 ”、テレビジョン学会技術報告、Vol.18、No.8、pp.7-12 (1994) .
- [32] 日下博也：“ ブレンビーのテクニック ”、エレクトロニクス、Vol.39、No.7、pp.26-30 (1994) .
- [33] 日下博也、泉澤邦生、猪熊一行：“ 手振れ補正機能の高画質化技術 ”、National Technical Report、Vol.41、No.2、pp.249-254 (1995) .
- [34] 日下博也、岸靖典：“ 高解像度純電子式手振れ補正システム ”、映像情報メディア学会誌、Vol.56、No.10、pp.127-132 (2002) .
- [35] 魚森謙也、森村淳、石井浩史：“ ビデオカメラの自動電子手ゆれ補正方式 ”、第 20 回画像工学コンファレンス予稿集、pp.177-180 (1989) .

- [36] 石井浩史、森村淳：“画像の動きベクトル検出方式 - レベル変動のある画像に対する検出方法の一検討 - ”、テレビジョン学会全国大会予稿集、pp.461-462(1989) .
- [37] 石井浩史、森村淳：“画像の動きベクトル検出方式 - 代表点の削減と誤検出確率の低減 - ”、電子情報通信学会春季全国大会予稿集、pp.69 (1989) .
- [38] 石井浩史、森村淳：“画像の動きベクトル検出方式 - 検出精度の向上と演算量の低減 - ”、電子情報通信学会春季全国大会予稿集 (1989) .
- [39] K. Uomori, A Morimura, H. Ishii, T. Sakaguchi and Y. Kitamura : ”Automatic image stabilizing system by full-digital signal processing.”, IEEE Trans. Consum. Electron., Vol.36, No.3, pp.510-519 (1990).
- [40] 森村淳、魚森謙也、石井浩史、赤堀裕志、北村好徳、坂口隆：“純電子式画像揺れ補正技術”、National Technical Report、Vol.37、No.3、pp.48-54 (1991) .
- [41] 森村淳、魚森謙也、石井浩史、坂口隆、北村好徳：“純電子式画像揺れ補正システム”、テレビジョン学会技術報告、Vol.15、No.7、pp.43-48 (1991) .
- [42] 坂口隆、森村淳、赤堀裕志、岸靖典：“動き検出の高性能化”、テレビジョン学会技術報告、Vol.16、No.6、pp.31-36 (1992) .
- [43] 二宮佑一、嵩比呂志、杉山文夫：“MUSE用動きベクトル検出装置”、テレビジョン学会技術報告、TEBS 103-5、pp.25-30 (1985) .
- [44] 二宮佑一：“高品位テレビの新しい伝送方式 ~ MUSE ~ ”、NHK技研月報、Vol.27、No.7、pp.19-30 (1984) .
- [45] 菊池健一、春木俊宣、辻野和廣、北野哲、藤田耕作：“カメラシステムへのファジィ推論の応用 - 8mm ビデオカメラ < VM-ES800 > における AF、AE、AWB - ”、SANYO TECHNICAL REVIEW、Vol.23、No.2、pp.8-20 (1991) .
- [46] 佐藤毅則、野村正幸：“ファジィ推論を応用したオートホワイトバランスの開発”、テレビジョン学会報告、Vol.16、No.6、pp.19-24 (1992) .
- [47] 江草洋、森勉、五島雪絵、藤本眞：“逆光・過順光度合の導出にファジィ理論を用いた露光制御方式の検討”、テレビジョン学会技術報告、Vol.16、No.30、pp.19-24 (1992) .
- [48] 春木俊宣：“ファジィ理論を用いたオートアイリスシステム”、テレビジョン学会技術報告、Vol.14、No.5、pp.25-30 (1990) .
- [49] 春木俊宣、菊池健一：“ファジィ理論を用いたオートアイリスシステム”、SANYO TECHNICAL REVIEW、Vol.22、No.2、pp.3-12 (1990) .
- [50] 永田俊之、岡本敏一、谷口晋一：“画質制御にファジィ AI 技法を用いたテレビ”、SANYO TECHNICAL REVIEW、Vol.23、No.2、pp.21-27 (1991) .
- [51] 中山正明、赤堀裕志：“シングルハンドムービー「ブレンビー」(NV - S1) ”、日本ファジィ学会誌、Vol.3、No.1、pp.51-55 (1991) .

- [52] Y. Egusa, H. Akahori, A. Morimura, N. Wakami : "An Application of Fuzzy Set Theory for an Electronic Video Camera Image Stabilizer.", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.3, No.3. pp.351-356 (1995).
- [53] 鈴木茂夫 : " C C D と応用技術 ", 工学図書 (1997).
- [54] 大前昌軌、田代信一、山口琢己、栗山俊寛、児玉宏達、浅海政司、今西勉、佐野義和、広島義光 : " 1 / 4 インチ E I S 高画素 C C D 撮像素子 ", テレビジョン学会技術報告、Vol.18、No.16、pp.31-36 (1994).
- [55] 大前昌軌、田代信一、山口琢己、栗山俊寛、児玉宏達、浅海政司、今西勉、佐野義和、広島義光 : " 1 / 4 インチ高解像度手振れ補正機能付き C C D 撮像素子 ", テレビジョン学会技術報告、Vol.49、No.2、pp.182-187 (1995).
- [56] 日下博也、坂口隆、中山正明 : " 補間機能付き撮像装置 ", 特許登録番号 3374431 号 .
- [57] 日下博也、坂上茂生、中山正明、岸靖典 : " メモリレス純電子式手振れ補正システム ", 1995 年テレビジョン学会年次大会予稿集、pp.5-6 (1995).
- [58] 日下博也、岸靖典 : " 視覚特性を利用した手振れ補正機能の合理化方式の検討 ", 画像電子学会誌、Vol.32、No.1、pp.79-86 (2003).
- [59] 成田長人 : " C C I R 勧告 500-5 画質評価法 ", テレビジョン学会誌、Vol.47、No.7、pp.979-982 (1993).
- [60] S. Haykin (武部幹 訳) : " 適応フィルタ入門 ", 現代工学社 (1987).
- [61] 辻井重男、久保田一、古川利博、趙晋輝 : " 適応信号処理 ", 昭晃堂 (1995).
- [62] 池谷章、中山正明、重里達郎 : " デジタルビデオカメラの最新技術 ", 情報処理、Vol.39、No.8、pp.763-768 (1998).
- [63] 映像情報メディア学会編 : " テレビジョンカメラの設計技術 ", コロナ社 (1999).
- [64] 坂口隆 : " 各種機能の現状 3-2 画像メモリー応用 ", テレビジョン学会誌、Vol.49、No.2、pp.134-137 (1995).
- [65] 久我龍一郎、山根洋介、福島保、石黒敬三、米山匡幸、平尾良昭、小野周佑 : " 高速・高精度オートフォーカスレンズシステムの開発 ", テレビジョン学会技術報告、Vol.14、No.53、pp.35-40 (1990).
- [66] 山根洋介、豊村浩一、中山正明、北村学 : " ビデオカメラ用超高速 & 低電力ズームレンズ駆動システムの開発 ", 計測自動制御学会関西支部シンポジウム講演論文集、pp.34-37 (2000).
- [67] 山田克、小野周佑、林孝行、弓木直人、日下博也、春原正明 : " 3 C C D 光学防振レンズ ", 日本光学会光設計研究グループ機関誌、Vol.23、pp.31-37 (2001).
- [68] 林孝行、山田克、日下博也 : " 3 板ビデオカメラ用防振レンズの開発 ", 映像情報メディア学会誌、Vol.56、No.3、pp.417-423 (2002).

- [69] T. Hayashi, K. Yamada and H. Kusaka : "Optical Image Stabilizing Lens System", SMPTE Motion Imaging Journal, Vol.111, No.11, pp.554-561 (2002).
- [70] 日下博也、土田幸孝、下畠剛 : " 光学式手振れ補正のための制御システム開発 "、映像情報メディア学会誌、Vol.56、No.3、pp.411-416 (2002) .
- [71] H.Kusaka, Y.Tsuchida and T. Shimohata : "Control Technology for Optical Image Stabilization", SMPTE Motion Imaging Journal, Vol.111, No.12, pp.609-615 (2002).
- [72] 浜崎岳史、豊村浩一、矢野修志、中山正明、浅井祥光 : " 150万画素静止画対応 3CCDカメラシステム "、映像情報メディア学会技術報告、Vol.25、No.28、pp.61-66 (2001) .
- [73] 安藤隆男、菰淵寛仁、" 固体撮像素子の基礎 "、日本理工出版会 (1999) .
- [74] 藤岡総一郎、稲治利夫、林孝行、梶野二郎 : " ビデオカメラの画振れ防止技術 "、National Technical Report、Vol.34、No.6、pp.662-668 (1988) .
- [75] M. Oshima, T. Hayashi, S.Fujioka ,T. Inaji, H. Mitani, J. Kajino, K. Ikeda and K. Komoda : "VHS Camcorder with Electronic Image Stabilizer", IEEE Trans. Consum. Electron., Vol.35, No.4, pp.749-758 (1989) .
- [76] 佐藤満、石塚茂樹、二神章、佐藤弘一 : " 光学式手振れ補正システム "、テレビジョン学会技術報告、Vol.17、No.5、pp.15-20 (1993) .
- [77] K. Sato, S. Ishizuka, A. Nikami and M. Sato : "Control Techniques For Optical Image Stabilizing System.", IEEE Trans. Consum. Electron., Vol.39, No.3, pp.461-466 (1993).
- [78] 日経 BP 社 : " 松下電器、ビデオカメラ用の新型レンズ機構を開発 "、日経メカニカル、No.536、pp.56-57 (1999) .
- [79] 福島弘毅 : " 制御工学基礎論 "、丸善株式会社 (1973) .
- [80] 美多勉、原辰次、近藤良 : " 基礎デジタル制御 "、コロナ社 (1988) .
- [81] 中村武 : " 小型ジャイロとその応用 "、日本機械学会誌、Vol.96、No.900、pp.14-17 (1993) .
- [82] 稲治利夫、藤岡総一郎、三谷浩 : " 撮像装置 "、特許登録番号 2001064 号 .
- [83] K. Tanaka, Y. Mochida, M. Sugimoto, K. Moriya, T. Hasegawa, K. Atsuchi, K. Ohwada : "A micromachined vibrating gyroscope", Sensors and Actuators, A50, pp.111-115 (1995).
- [84] 日経 BP 社 : " マイクロマシーニング・センサ、自動車での実用化が始まる "、日経エレクトロニクス、1996年9月2日号、pp.169-178 (1990) .
- [85] 細谷克己、大場正利 : " 静電容量型加速度センサ シリコンマイクロマシニング技術による小型高精度の静電容量型加速度センサの開発について "、OMRON TECHNICS、Vol.36、No.2、pp.130-133 (1996) .

- [86] 日下博也：“手振れ補正機能の高解像度化・高性能化”、画像電子学会誌、Vol.31、No.6、pp.1183-1191 (2002) .
- [87] 大石末之：“アマチュアカメラにも搭載されてきた”、エレクトロニクス、Vol.39、No.7、pp.31-34 (1994) .
- [88] 青木正幸、白井一利：“手ぶれ補正光学系と制御システム”、日本光学会光設計研究グループ機関誌、Vol.23、pp.13-18 (2001)
- [89] NEC トーキン株式会社製セラミックジャイロCG - 16D、CG - L 43 カタログ
http://www.nec-tokin.net/now/product/pdf_dl/sensor.pdf
- [90] 白土良太：“画像処理による道路形状・車両挙動の推定”、自動車技術、Vol.56、No.4、pp.44-48 (2002)
- [91] 十川能之、埴圭二：“ステレオ画像認識による車両前方監視システム”、自動車技術、Vol.56、No.4、pp.34-39 (2002)
- [92] 内藤貴志、塚田敏彦、山田啓一、小塚一宏、山本新：“屋外環境下における走行中の車両のナンバープレート認識”、映像情報メディア学会誌、Vol.53、No.5、pp.730-737 (1999) .
- [93] 塚本昌彦：“モバイルコンピューティング(岩波科学ライブラリー77)”、岩波書店 (2000) .
- [94] 金田直也：“シフト式光学手ぶれ補正技術の特徴”、電子技術、Vol.41、No.6、pp.21-24 (1999)
- [95] 多摩川精機 (株) 編：“ジャイロ活用技術入門”、工業調査会 (2002)
- [101] 田中雅夫：“ダゲレオタイプの完成” 写真130年史、pp.30-34 (1970)
- [102] 田中雅夫：“コロディオ” 写真130年史、pp.40、41 (1970)
- [103] 田中雅夫：“乾板からフィルムへ” 写真130年史、pp.70-72 (1970)
- [104] Julius Durst : ”Disenagageable Automatic Exposure Device for a PhotographicShutter”, USP 2,885,938 (1956)
- [106] Norman L. Stauffer : ”Focus Defecting Apparatus”, USP 3,875,401 (1973) .
- [108] 佐原正義：“ミノルタ システムの電子化技術” テレビジョン学会技術報告、Vol.9、No.35、pp.23-28 (1985)
- [111] “手ブレ写真を防ぎます” 日刊工業新聞 1995 年 8 月 4 日、pp.13 (1995) .
- [112] “デジカメ市場のシェア争いに異変”、PC fan、No.12.1、pp.23 (2004)
- [113] Garrett Brown:”Equipment for Use with Hand held motion Picture Cameras”, USP 4,017,068 (1974)
- [116] 森村淳：“純電子式画像揺れ補正システム”、テレビジョン学会技術報告、Vol.15、No.7 (1991)

- [117] Y. Ninomiya and Y. Ohtsuka : "A Motion compensated Interframe Coding Scheme for Television Pictures", IEEE Trans., Vol. COM-30, No.1, pp201 (1982)
- [118] 二宮佑一 : " 高品位テレビの伝送方式 ", テレビ学会技術報告、Vol.7、No.、TEBS91-5(1983)
- [122] R.Barnaby and E.Remhardt, U.S. Patent No.2544646 (June 1948)
- [123] 大嶋光昭 : " 撮影装置 ", PCT 特許公開番号 WO2005/064921 (2004)
- [124] 日下博也 : " 民生用撮像装置における手振れ補正機能に関する研究 " 博士論文 pp.102 (2003) .

第 2 部

- [201] Tim Frost "Burst Cutting Area rewrites the rules of replication", One to One, July, 1998, pp55-57 (1998).
- [202] Tom O'Reilly "Divx Unveiled", Tape Disc Business Feb., 1998, pp18-25 (1998).
- [203] M.G.Crasso, J.B.H.Peek, J.P.Sinjou, "Compact Disc Digital audio System", Philips Technical Review Vol. 40, No.6, pp151-155.
- [204] 霜田光一 " 歴史を変えた物理実験 " pp192-199 (1996)
- [205] H.C.Haverkorn van Rijsewijk, P.E.J.Legierse, G.E. Thomas "Manufacture of Laser Vision video discs by a photopolymization process," Philips Technical Review, Vol.40 No10, pp.287-207 (1982)
- [206] K.Compaan, P.Kramer "Philips 'VLP' system" Philips Technical Review Vol.22, no.3 pp178-180 (1973)
- [207] D. Fisher, "Prospector video discs" Electronic Technology Vol.16 pp.168-171 (1982)
- [208] Thomas Alva Edison "Phonograph or Speaking Machine" US Patent No. 200521, Patented Feb. 19, 1878 (1878)
- [209] 金丸斉 : " 光学式ビデオ・ディスク技術の変遷 " テレビジョン学会誌 Vol.27 No.2 pp.201-207 (1982)
- [210] 石田禎宣 : " デジタルオーディオディスク (DAD) " エレクトロニクス Vol.36 No.3 pp.194-200 (1982)
- [211] 入江宏明、大嶋光昭、西内健一 : " 光記録媒体およびその製造方法 " 日本登録特許 3 2 7 1 9 6 5 号 (1 9 9 9 年 7 月 1 5 日 出 願)
- [212] 入江宏明、大嶋光昭、西内健一 : " 光記録媒体の記録方法 " 日本登録特許 3 2 2 4 3 8 0 号 (1 9 9 9 年 7 月 1 5 日 出 願)
- [213] ISO/IEC 規格 17592(2004) , DVD Forum, " Burst Cutting Area Code (BCA-Code) " , DVD Specifications for Rewritable Disc, Physical Specifications Version 2.0 Annex V, pp.PHX-V1-PHX-V8 (September 1999)

- [214] 大嶋光昭、後藤芳稔、田中伸一、小石健二：“記録装置、再生装置、記録方法および再生方法”、日本特許 3144422 号（出願日：1995 年 10 月）（注：CPRM 規格）
- [215] ISO/IEC 規格 16448 (1999) , DVD Forum, “Burst Cutting Area Code (BCA-Code)”, DVD Specifications for Read-Only Disc, Physical Specifications Version 1.0 Annex V, pp.PHX-V1-PHX-V8 (August 1996)
- [216] ISO/IEC 規格 17342(2004) , DVD Forum, “NBCA-Code” , DVD Specifications for Re-recordable Disc, Physical Specifications Version 1.0 Annex X(Normative), pp.X-1-PHX-X6 (November 1999)
- [217] DVD Forum, “NBCA-Code” , DVD Specifications for Recordable Disc for General(DVD-R for General, Physical Specifications Version 2.0 Annex W(Normative), pp.PHX-W1-PHX-W7 (May 2000)
- [218] Blu-ray Disc Association, "Format and characteristic of the BCA", System Description Blu-ray Disc Read-Only Format Basic Format Specifications Version 1.1pp.89-96 (January 2005)
- [219] Blu-ray Disc Association, "Format and characteristic of the BCA", System Description Blu-ray Disc Rewritable Format Basic Format Specifications Version 2.0 (February 2005)
- [220] Blu-ray Disc Association, "Format and characteristic of the BCA", System Description Blu-ray Disc Recordable Format Basic Format Specifications Version 1.0 Draft2 (January 2005)
- [221] 大嶋光昭、熊谷正史 “光ディスクのための識別情報記録装置および識別情報記録方法” 日本特許出願番号 2005-212530(2005)
- [222] 4 Entity, LLC “CPRM for the Video Recording Format” , Contents Protection for Recordable Media Specification-DVD Book Revision 0.96 pp.5.1-5.7 (January 2003)
- [223] 大嶋光昭、田中伸一、小西信一、楠本正治、田中誠嗣、清野正樹：“DVD の ROM ディスクへの個別情報記録技術 BCA(Burst Cutting Area)”, National Technical Report Vol.43, No.3 pp.70-77 (1997 年 6 月)
- [224] Mitsuaki Oshima, Shinichi Tanaka and Shoji Kusumoto, “Burst Cutting Area (BCA) Technology, A Recording Method for Disc Unique ID on ROM type DVD Disc” , Journal of Magnetics Society of Japan, Vol.25, No.3-2, pp.441-444, (2001)
- [225] 大嶋光昭、後藤芳稔、田中伸一：「光ディスク、光ディスク記録装置及び光ディスク再生装置」 日本特許 3089599 号（出願日：1995 年 10 月）（注：BCA の基本特許）
- [226] 大嶋光昭、後藤芳稔、田中伸一、小石健二：“記録装置、再生装置、記録方法および再生方法”、日本特許 3144422 号（出願日：1995 年 10 月）
（注：光ディスクの“1 回コピー”方式（CPRM 規格）の規格重要特許）
- [227] 富所茂、長岡忠、関谷哲夫：“家庭用デジタルオーディオ機器”、電気学会誌 Vol.102、No.10 pp.901-908 (1982)
- [228] (株)ステレオサウンド編“エジソンのフォノグラフの発明と円筒型レコードの改良”、蓄音器物語 pp.34-35 (1977)

第 3 部

- [301] R.K.Jurgen, "Technology 1991, Consumer Electronics", IEEE Spectrum, vol.28, No.1, pp.65-68, Jan.1991.
- [302] T.M.Cover, "Broadcast Channels" IEEE Trans. Info. Theo. vol.IT-18, No.1, pp.2-14, Jan.1972.
- [303] M.Vetterli and D.Anastassiou, "A Multiresolution Approach for All-Digital HDTV," Conf.Rec.IEEE Int. Conf. Commun. vol.3, pp.881-885, 1990.
- [304] Advanced Television Research Consortium: "Advanced Digital Television system Description," submitted to FCC Advisory Committee on Advanced Television Services, Jan. 1992.
- [305] W.F.Schreiber, "Spread Spectrum Television Broadcasting," presented at 33rd SMPTE Tech. Conf. pp.1-15, Oct. 1991.
- [306] K.M.Uz, K.Ramchandran, M.Vetterli, "Multi resolution Source and Channel Coding for Digital Broadcast of HDTV," presented at Fourth International Workshop on HDTV and Beyond, Italy, Sep. 1991.
- [307] ISO/IEC JTC/SC2 WE11:MPEG CD 11172-2, 1992.
- [308] FCC Rules and Regulations 73.699.
- [309] Woo Paik, "DigiCipher-All Digital, Channel Compatible, HDTV Broadcast System," IEEE Trans. Broadcast., BC-36, No.4 pp.245-254, Dec.1990.
- [310] General Instrument Corporation Videocipher Division: "DigiCipher HDTV System Description," submitted to FCC Advisory Committee on Advanced Television Services, Aug.1991.
- [312] Mitsuaki Oshima, "Constellation-Code Division Multiplex for Digital HDTV", Conference Record of IEEE Global Telecommunications Conference 1992, Orlando USA, Vol.2, pp.1086-1092 (December 1992)
- [313] Mitsuaki Oshima "Communication System" USP. 5,999,569 (出願日: March 1993)
- [314] Mitsuaki Oshima "Communication System" US.RE38513 (出願日: March 1992)
- [315] Advanced Television Systems Committee (ATSC), "4 Transmission Characteristics for Terrestrial Broadcast", ATSC standard: Digital Television Standard, Revision B Annex D, pp.50-64 (August 2001)
- [316] "The harris VSB Exciter for Digital ATV" by Robert Davis and Edwin Twitchell. NAB 1996 Engineering Conference. April 15-18, 1996

- [317] “ ATSC transmission System: 8-VSB Tutorial ” by Richard Citta and Gary Sgrignoli. ITVS 1997 Montreux Symposium. July 12-17, 1997.
- [318] European standard (Telecommunications series) “ Signal Constellations and mapping ”, Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, ETS1 EN 300744 V1.5, pp.21-25 (November 2004)
- [320] Mitsuaki Oshima “ Signal transmission system ” EPC 0506400 (出願 March 1992)
(注：階層 QAM の基本特許)
- [321] Mitsuaki Oshima “ Signal transmission system ” EPC1039682 (出願 March 1993)
(注：階層 OFDM X TPS の基本特許)
- [322] 大嶋光昭：“送信装置、受信装置、伝送装置、送信方法、受信方法”日本特許 3008651号(出願日：1991年3月)(注：TMCC の基本特許)
- [323] 大嶋光昭：“送信装置、受信装置、伝送装置、送信方法、受信方法”日本特許 3154709号(出願日：1993年9月)注：階層型ガードタイムの基本特許)
- [324] ETSC (European Telecommunication Standardization Institute)
” The Terrestrial Digital Television Broadcast Standard ” document ETS 300744
- [325] 大嶋光昭：“送信装置、受信装置、伝送装置、送信方法、受信方法”日本特許 3109552号(出願日：1993年3月)(注：階層 OFDM x TMCC の基本特許)
- [326] 大嶋光昭：“送信装置、受信装置、伝送装置、送信方法、受信方法”日本特許 3154706号(出願日：1993年9月)注：階層型エラー訂正符号化率の基本特許)

研 究 業 績 一 覧

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 著者
論文	<p>Mitsuaki Oshima, Shinichi Tanaka and Shoji Kusumoto, "Burst Cutting Area (BCA) Technology, A Recording Method for Disc Unique ID on ROM type DVD Disc", Journal of Magnetics Society of Japan, Vol.25, No.3-2, pp.441-444, (2001)</p> <p>Mitsuaki Oshima, Takayuki Hayashi, Soichiro Fujioka, Jiro Kajino, Koji Ikeda and Kenji Komoda "VHS Camcorder with Electronic image Stabilizer", Selected Papers on Precision Stabilization and Tracking Systems for Acquisition, Pointing, and Control Applications (Editor: Michael K. Masten, Larry A Stockum), SPIE(International Society for Optical Engineering) Milestone Series, Vol. MS 123, pp424-432 (June 1996) (注: 本人の論文が SPIE 学会の Milestone 論文をまとめた単行本の中に再掲載された分)</p> <p>Mitsuaki Oshima, "Hierarchical HDTV Broadcasting by Constellation-Code Division Multiplex", Symposium Record of 18th International Television Symposium-Montreux Switzerland, Cable sessions pp.544-554 (June 1993) (注: 査読付、国際シンポジウム(スイス)で発表分)</p> <p>Mitsuaki Oshima, "Constellation-Code Division Multiplex for Digital HDTV", Conference Record of IEEE Global Telecommunications Conference 1992, Orlando USA, Vol.2, pp.1086-1092 (December 1992) (注: 査読付、国際会議(米国)で発表分)</p> <p>Mitsuaki Oshima, Takayuki Hayashi, Soichiro Fujioka, Jiro Kajino, Koji Ikeda and Kenji Komoda "VHS Camcorder with Electronic image Stabilizer", IEEE Transaction on Consumer Electronics, Vol.35, No.4, pp.749-758 (November 1989)</p>
総説	<p>大嶋光昭、田中伸一、小西信一、楠本正治、田中誠嗣、清野正樹: "DVD の ROM ディスクへの個別情報記録技術 BCA (Burst Cutting Area)", National Technical Report Vol.43, No.3 pp.70-77 (1997 年 6 月)</p> <p>大嶋光昭: "民生用ビデオカメラの画振れ防止技術", 応用物理学会 光学 Vol.18, No.11, pp.616-617 (1989 年 11 月)</p>
講演	<p>大嶋光昭、林孝行、三谷浩: "手振れ補正の着想とその事業化", 16 年度第 3 回研究会「起業工学一般」(東京)映像情報メディア学会技術報告, Vol.29, No.7, pp.33-43 (2005 年 1 月)</p> <p>Mitsuaki Oshima, Shinichi Tanaka and Shoji Kusumoto "Disc Unique ID Recording Method on ROM type DVD Disc, BCA (Burst Cutting Area)", Technical Digest of Joint Conference MORIS / APDSC 2000 (Nagoya) pp.176-177 (November 2000)</p> <p>大嶋光昭: "信号点符号分割多重方式(C-CDM)の階層型デジタル HDTV 放送への応用" 電子情報通信学会 1993 年春季大会講演論文集(名古屋大学) Vol.1993, No.Shunki Pt3; pp3.321 (1993 年 3 月)</p>

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 著者
その他 (特許)	<p>Mitsuaki Oshima, Takayuki Hayashi, Soichiro Fujioka, Jiro Kajino, Koji Ikeda and Kenji Komoda “ VHS Camcorder with Electronic image Stabilizer ”, Digest of Technical Papers of International Conference on Consumer Electronics 1989, (Rosemont USA) Vol.8 pp.114-115 (June 1989)</p> <p>重要基本特許 (本研究に直接関係する分)</p> <p>大嶋光昭、伊崎正高、梶野二郎、五十嵐祥晃、三谷浩 : 「撮影装置」 日本特許 登録番号 1589189 号 (出願日 : 1983 年 12 月) (注 : 手振れ補正技術の基本特許。2003 年恩賜発明賞受賞、2004 年紫綬褒章受章)</p> <p>国際規格認定特許と規格重要特許 (本研究の直接関係分 : は規格書記載頁を示す)</p> <p>(注 : 本研究に直接関係する本人の登録規格特許は外国特許を含めると 300 件あり、デジタル TV 規格特許が 200 件、DVD 規格特許は 100 件ある。これらの多くが MPEG.LA 等の国際ライセンス機関により規格必須特許に認定され規格準拠の全製品に使用されている。)</p> <p>大嶋光昭、後藤芳稔、田中伸一 : 「光ディスク、光ディスク記録装置及び光ディスク再生装置」 日本特許 3089599 号 (出願日 : 1995 年 10 月) (注 : DVD 規格、BD 規格の BCA の規格必須特許に認定、本人の DVD 規格認定特許 : 68 件)</p> <p>ISO/IEC 規格 16448 (1999), 17592(2004), 17342(2004), DVD Forum, “ Burst Cutting Area Code (BCA-Code) ”, DVD Specifications for Read-Only Disc, Physical Specifications Version 1.0 Annex V, pp.PHX-V1-PHX-V8 (August 1996) (注 : 考案した BCA を DVD 規格に提案、本人が標準化、該当頁を執筆)</p> <p>Blu-ray Disc Association, “ Format and characteristic of the BCA ” System Description Blu-ray Disc Read-Only Format Part1 Basic Format Specifications Version1.1, pp.89-96 (January 2005) (注 : 考案した BCA が青色レーザー用光ディスク規格 (BD) に採用。)</p> <p>大嶋光昭、後藤芳稔、田中伸一、小石健二 : “ 記録装置、再生装置、記録方法および再生方法 ”, 日本特許 3144422 号 (出願日 : 1995 年 10 月) (注 : 光ディスクの “ 1 回コピー ” 方式 (CPRM 規格) の規格重要特許、規格特許 : 15 件)</p> <p>4 Entity, LLC “ CPRM for the Video Recording Format ”, Contents Protection for Recordable Media Specification-DVD Book Revision 0.96 pp.5.1-5.7 (January 2003)</p> <p>Mitsuaki Oshima “ Communication System ” USP6,256,357 (出願日 : 1992 年 3 月) (注 : DVB-T 規格の階層 OFDM の規格必須特許に MPEG.LA により認定分)</p> <p>European standard (Telecommunications series) “ Transmission Parameter Signaling (TPS) ”, Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, ETS1 EN 300744 V1.5, pp.29-34 (November 2004)</p>

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 著者
その他 (業界紙)	<p>Mitsuaki Oshima “Communication System” US.RE38513 (出願日:1992年3月) (注:米国方式デジタルTV放送規格(ATSC)の規格必須特許にMPEG.LAにより認定)</p> <p>Advanced Television Systems Committee(ATSC), “4 Transmission Characteristics for Terrestrial Broadcast”, ATSC standard: Digital Television Standard, Revision B Annex D, pp.50-64 (August 2001) (注:本人考案の8VSB-Trellis Coding 変復調方式が米国TV放送規格の基本方式に採用。)</p> <p>Mitsuaki Oshima “Signal transmission system” (出願日:1991年3月) (注:欧州方式デジタルTV放送規格DVB-Tの階層QAM 変復調方式の規格必須特許にMPEG.LAにより認定。本人の規格認定特許:16件)</p> <p>European standard (Telecommunications series) “Signal Constellations and mapping”, Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, ETS1 EN 300744 V1.5, pp.21-25 (November 2004) (注:本人が考案した階層QAM 変復調方式が欧州TV規格に採用。)</p> <p>大嶋光昭:“送信装置、受信装置、伝送装置、送信方法、受信方法”日本特許3008651号(出願日:1991年3月) (注:日本方式デジタルTV放送規格(ISDB-T)の基本特許、本人のISDB-T規格重要特許:35件)</p> <p>Association of Radio Industries and Businesses (ARIB) Standard, “3.15.6 TMCC information”, Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcasting, ARIB STD-B31 Version1.5, pp.55-62 (July 2003) (注:本人考案の復調情報伝送システム(TMCC)やエラー階層化、ガードタイム階層化等が日本方式放送規格(ISDB-T)の基本部分に採用)</p> <p>Mitsuaki Oshima, Takayuki Hayashi, Yosuke Yamane, “Panasonic Calms Shaky Photos with Image-Stabilizing Methods” Journal of the Electronics Industry Vol.52, No.09, pp.27 (September 2005)</p>