

377.5
K-11
1-104-1

IFS の動画像符号化への応用.



九州工業大学附属図書館



10246759

上 繁 義 史

目次

1 序論	3
2 RIFS の動画像符号化への応用	8
2.1 まえがき	8
2.2 RIFS の概要	8
2.3 RIFS 符号化	10
2.3.1 符号化アルゴリズム	10
2.3.1.1 符号化アルゴリズムの概説	10
2.3.1.2 静止領域, 動領域の識別	11
2.3.1.3 縮小写像の構成	13
2.3.1.4 ドメインプールの設定	15
2.3.1.5 レンジセルの再分割	17
2.3.1.6 復号	18
2.3.2 符号化シミュレーション	19
2.3.2.1 原画像	19
2.3.2.2 ビットレートの計算	21
2.3.2.3 結果および考察	21
2.3.3 本手法の長所と問題点	26
2.4 レンジセルをグループ化した RIFS 符号化	29
2.4.1 符号化法	30

2.4.1.1	符号化の概要	30
2.4.1.2	静止領域, 動領域の分類	32
2.4.1.3	静止領域の符号化	33
2.4.1.4	動領域の符号化におけるドメインセルの抽出	34
2.4.1.5	縮小写像の計算	36
2.4.1.6	レンジセルの再分割	37
2.4.1.7	復号	37
2.4.2	符号化シミュレーション	37
2.4.2.1	符号化条件	39
2.4.2.2	ビットレートの計算	40
2.4.2.3	結果および考察	41
2.5	本章のまとめ	50
3	IFS を用いたフレーム補間	52
3.1	まえがき	52
3.2	IFS によるフレーム補間	52
3.3	符号化および補間のアルゴリズム	53
3.3.1	符号化法	54
3.3.2	IFS 補間法	55
3.4	シミュレーション	56
3.5	本章のまとめ	61
4	結論	65
	謝辞	67
	参考文献	68

第 1 章

序 論

近年、通信網、蓄積媒体等のデジタル化の進展に伴って、様々な情報がデジタルで扱われるようになり、その処理も多様化しつつある。マルチメディアという言葉が広く社会に浸透してきた中、画像はその中核をなしている。画像は視覚に直接訴えるものであり、その重要性は大きいと言えよう。最近では、テレビ会議、テレビ電話、DVD 等が実用化されている。また、インターネットが一般に利用されるようになってきており、その中で、画像伝送が頻繁に行われている。このようにデジタル画像の需要は益々高くなっており、効率的な伝送・蓄積技術が一層求められている。

デジタル画像のもつ情報量は莫大である。例えば NTSC のテレビジョン画像を 1 画素当たり 8bit で量子化した場合、その情報量は約 100Mbit/sec となる。これに対して、ISDN の回線の容量は 64kbit/sec となっており、NTSC のような解像度をもつ動画像を実時間で伝送することは非常に困難である。また、通信容量の大きい回線を用いることにより、伝送することが可能であるが、伝送コストが高くなる。低コストで伝送・蓄積を行うためには、画像圧縮技術が必須となる。画像情報圧縮に関して、これまで様々な研究が行われている。現在、実用化されている符号化は、波形符号化 [1] と呼ばれる技術である。これは画像を波形信号として扱い、フィルタリング理論に基づいて符号化を行う。デジタル画像は画素間の相関性が高いため、適当なフィルタリングの処理を施すことによって、統計的に偏りのある情報源となり、情報圧縮が可能となる。現在実用化されている波形符号化の手法として、予測符号化、変換符号化等が知られている。予測符号化は画素間相関を画

素領域において利用した手法であり、変換符号化は空間周波数領域において画素間相関を利用する。

低ビットレートの符号化において、主に変換符号化が用いられるが、ブロックひずみやモスキートノイズが発生し、画質が劣化することが知られている。また画像を幾何学的に扱っていないため、圧伸、変形などの加工を施すためには、一度復号を行う必要がある。デジタル画像が一般に普及するに伴い、これらの問題は重要性を増していると考えられる。すなわち、高い符号化効率を有し、画像の全体、または一部の領域に対して、何らかの幾何学的な加工・処理を行うことを可能とする符号化技術が必要となっている。以上のことから、現在、様々アプローチで研究が行われているが、この中に波形符号化とは異なるアプローチによる研究があり、その中でも、画像のフラクタル性 [2] を用いる手法が注目されている。

フラクタルとは、ある一部がより大きな部分、もしくは全体と相似であるような図形、確率現象を指す。このような性質を「自己相似性 (self-similarity)」という。フラクタルは自然界には多く存在すると言われている [2]。画像は 3 次元から 2 次元への投影であるから、風景などの自然画像には、フラクタルの性質が保存されていると考えられる。

フラクタル符号化において、画像を自己相似集合として扱い、反復関数系 (IFS; Iterated Function System) [3] を応用した手法が活発に検討されている。IFS は有限個数の縮小写像の集合であり、任意図形に対して反復して適用することにより、容易にフラクタルの図形 (不変集合) を生成することが出来る。この図形は与えられた反復関数系に対して一意となる。また、与えられた画像に対して、最適な反復関数系を求める際、画像間の距離を定義することで、数学的に近似精度が評価できることが示されている。これらの性質に基づいて、IFS を推定して、画像圧縮を行う手法が 1992 年に Jacquin [4] により提案された。これは画像を矩形の小領域 (レンジセル) に分割し、各小領域を近似するような相似である領域 (ドメインセル) と、それに適用する縮小写像を求める手法である。

Jacquin の方法において、低ビットレートでの変換符号化等に比べて、エッジの再現性が良いという特徴をもっている。また、符号は縮小写像と、その定義域の位置に関する情報を含んでおり、それぞれの画素に関する情報を含まない。これにより、復号時に加工・伸

張が容易に可能となる。

Jacquin の方法は次世代の符号化法の一つとして注目を集めており、符号化効率と画質の向上を目指して、研究が行われている [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]。しかし、これらのそのほとんどが静止画像を対象としており、動画への適用はあまり行われていない [12]。動画の需要は今後更に高まると考えられ、動画への適用が期待されている。動画は時間方向のサンプリングであるから、画像の内容が連続的に変化している。また、それぞれのフレーム内における自己相似性を考慮すると、動画においても自己相似モデリングを適用することが可能であると考えられる。

そこで本研究では、動画において自己相似モデリングを適用し、IFS 符号化を行う手法について検討を行う。以下で各章の概要を述べる。

第 2 章において、再帰反復関数系 (Recurrent Iterated Function Systems) [3] を用いた動画符号化法について述べる。

動画の IFS 符号化としては Lazer の 3D-IFS [12] が知られているが、これはレンジセルを空間方向とフレーム方向の 3 次元として、IFS を求める手法である。3D-IFS では、ドメインセルの探索において、フレーム間相関が利用されていない。また、フレーム方向の縮小が考えられているため、フレーム方向にブロック数が増大する可能性がある。これは低ビットレートでの符号化においては障害となることが考えられる。また、この手法において、レンジセルと同様にドメインセルが 3 次元となっているために、その内部に含まれている動きもまた縮小される。したがって、レンジセルの内部に動きの大きい領域を含む場合、ドメインセルとしては、更に大きな動きを含む必要があるため、近似精度が低下することが考えられる。レンジセルが静止領域にある場合、ドメインセルの探索範囲 (ドメインプール) において、動領域を含む場合が考えられ、近似精度の低下が考えられる。

そこで本研究では、IFS を数学的に拡張した概念である RIFS に注目した。RIFS は複数の非連結な平面に対する IFS からなり、これを構成する縮小写像は自分を自身もしくは、別の平面に写す。RIFS は IFS と同様の性質をもつ。本研究では、動画の連続する数フレームをこの複数の非連結な平面として用いる。これにより、フレーム相関が利用でき、また 3D-IFS のように、フレーム方向の縮小を考慮する必要がなくなることから、著者は RIFS

を動画像符号化に適用することができると考えた。

まず、各レンジセルを独立に符号化する手法について検討する [13, 14]. 符号化を行う各フレームにおいて、空間的に同じ位置にあるレンジセルに関して、静止領域、動領域に分類する。フレーム間相関から、符号化対象を動領域に限定する [15]. 符号化対象となったレンジセルに対して、符号化の処理を行う。また、復号において、符号の存在しない領域の補間と、反復回数の削減を行う手法を検討する。その有効性をシミュレーションにより検討し、特長及び問題点について述べる。

次に、各フレームにおいて、空間的に同じ位置にあるブロックをグループとして扱い、レンジセルのグループ毎に符号化を行う手法について検討する [19, 20]. そのグループを静止領域に属するか、動領域の属するかを分類する。それぞれの場合において、縮小写像の探索法を変更する。静止領域において、グループ内のレンジセル間の相関が非常に高いことを利用する。動領域において、レンジセルのグループの内部に含まれる動きと、ドメインセルのグループの内部に含まれる動きを利用する。以上の提案法について、計算機シミュレーションにより有効性を検証する。

第 3 章において、IFS 符号化において、フレーム補間を行う手法について述べる [22, 23, 24, 25].

低ビットレートで動画像を符号化する場合、一般に発生する符号量を抑制するために、駒落としが行われ、再生画像の時間解像度が低下するという問題がある。このような場合、符号化された画像を用いて、フレーム補間を行う必要がある。

波形符号化において、動き補償予測を用いて補間を行う手法が提案されているが [26, 27, 28], 低ビットレート化を目指す IFS 符号化において、この問題はまだ検討されていない。そこで、IFS の補間に関する定理 [3] を応用して、動画像のフレーム補間を行う手法について検討する。

IFS の理論において、2 組の IFS の縮小写像を連続的なパラメータで補間することにより、そのアトラクタも補間されるという定理が証明されている。そこで、滑らかに IFS の補間を行うための符号化法を検討する。また、符号化された、連続する 2 フレームの IFS の縮小写像を連続的に補間することにより、アトラクタ、すなわちフレームの補間を行う手

法について検討する。補間された IFS の復号特性，統計的性質，および符号化された IFS のエントロピーより，その特性，および有効性について議論する。

最後に結論として，本研究で得られた成果について述べる。

第 2 章

RIFS の動画像符号化への応用

2.1 まえがき

本章では動画像の IFS 符号化法について述べる。

本章では IFS の数学的拡張である, RIFS [3] を応用する. RIFS は複数の非連結な平面に対する IFS からなり, これを構成する縮小写像は自分を自身もしくは, 別の平面に写す. 本研究では, 動画像のシーケンスをこの複数の非連結な平面として用いて, RIFS を動画像符号化に適用する方法を提案する [19].

2.2 で RIFS の数学的基礎について概説し, 2.3 において, それぞれのレンジセルを独立に符号化を行う RIFS 符号化法について述べる. 2.4 において, 各フレームにおいて, 同位置にあるレンジセルをグループとして扱い, グループ単位で符号化を行う, RIFS 符号化法について述べる. 2.5 で本章のまとめとする.

2.2 RIFS の概要

RIFS は複数の距離空間 A_1, \dots, A_n に対する IFS から成る. これを構成する縮小写像は, 図 2.1 のように, 自分を自身あるいは別の平面に写す. A_i の空でない部分空間からなる空間を H_i とすると, RIFS は空間 $H = H_1 \times \dots \times H_n$ 上の縮小写像として,

$$W(A) = \left(\bigcup_j W_{1j}(A_j), \dots, \bigcup_j W_{nj}(A_j) \right) \quad (2.1)$$

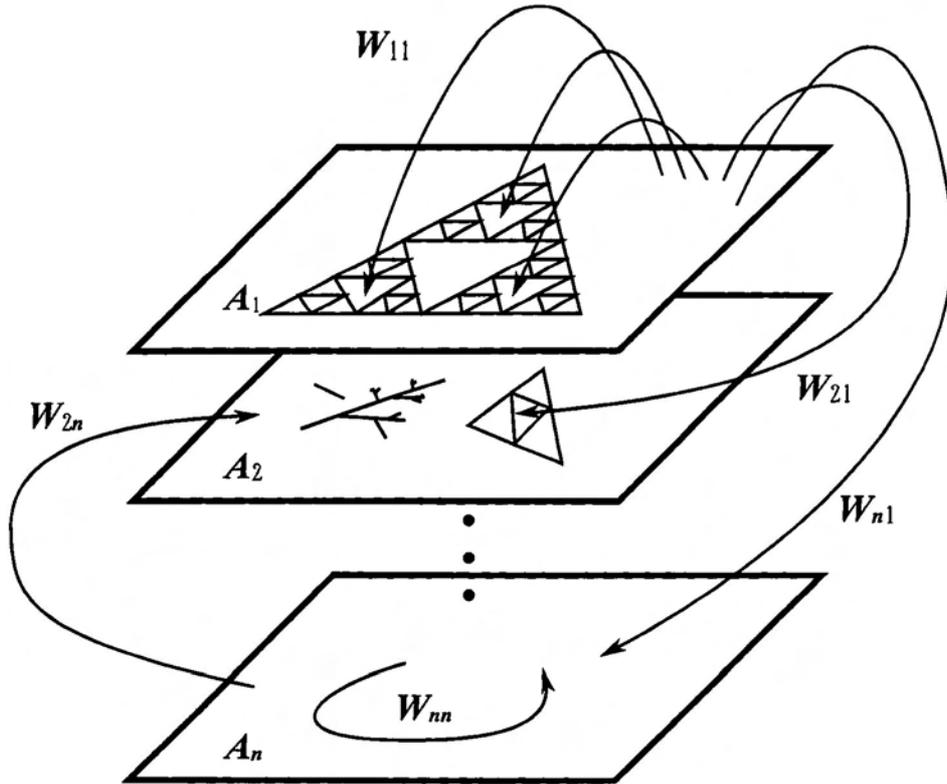


図 2.1: RIFS の説明

と表される. 但し, 式中において $A = (A_1, \dots, A_n) \in H$, であり, $W_{ij} : H_j \rightarrow H_i$ は縮小写像である. (2.1)式は W_{ij} の縮小性により, 拡張された Hausdorff 距離:

$$h(A, B) = \max_i h_i(A_i, B_i) \tag{2.2}$$

のもとで縮小写像となり, 不動点をただ 1 つもつ (不動点定理). (2.2) 式において, $h_i(A_i, B_i)$ は距離空間 A_i, B_i の Hausdorff 距離:

$$h_i(A_i, B_i) = \max\left\{\max_{a \in A_i} \min_{b \in B_i} d_i(a, b), \max_{b \in B_i} \min_{a \in A_i} d_i(a, b)\right\} \tag{2.3}$$

である. 一組の $W : H \rightarrow H$ を, 任意の画像の組に対して, 反復して適用することで, W に対して唯一の不変な画像の組が得られる.

また、コラージュ定理：

$$h(A, W^m(B)) \leq \frac{1}{1-s} h(A, W(A)) + s^m h(A, B) \quad (2.4)$$

が成立する。式中の s は、 W の縮小率である。この定理は、与えられた画像の組 A に対して、これを良好に近似し、なおかつ縮小率が小さい W を求めることができれば、 W の不動点は A を良好に近似した画像の組となることを示している。

そこで本研究では、 A として、動画像の連続する n フレームをグループとして用いることにより、画像符号化への応用を行う。以下で、 W を求める符号化法について検討する。なお、以下ではこのグループをフレームのグループと呼ぶ。

2.3 RIFS 符号化

本節では、RIFS を応用した動画像符号化について述べる。提案法において、フレームのグループを重なりのないレンジセルに分割し、それぞれのレンジセルを独立に符号化を行う [15]。2.3.1 において、提案法について述べ、2.3.2 で計算機シミュレーションにより、その有効性を検討する。2.3.3 で、本節で得られた知見について述べる。

2.3.1 符号化アルゴリズム

2.3.1.1 符号化アルゴリズムの概説

動画像は一般に高いフレーム間相関をもつことから、波形符号化を用いた動画像符号化において、フレーム間予測を行うことにより、圧縮を行っている [16]。一方、3D-IFS において、フレーム相関を利用していない。そこで、本論文では、最初に符号化されるフレーム以降のフレームにおいて、静止領域の符号化は行わずに動領域のブロックのみを符号化することとした。これにより、全領域を符号化する場合に比べて、情報量が削減できるものと考えられる。

符号化対象であるレンジセルの符号化において、フレームのグループ全体を近似する縮小写像と、そのドメインセルを探索する。符号化を行う n フレームのグループをブロック

サイズ $B \times B$ の重なり合わないレンジセルに分割する。ドメインプールはレンジセルの近傍とする [13, 14]。これはフレーム内の IFS 符号化において、ドメインセルの位置がレンジセルの近傍である確率が高いことが知られているためである [18]。また、着目しているレンジセルの前後のフレームにおいて、同じ位置にある領域についてもドメインプールとする。

復号については初期画像が任意であることを利用する。初期画像として、すでに復号されたフレームのグループの最後のフレームを用いる。これにより符号の存在しない領域を補間すると同時に、SNR が収束するまでの反復回数を削減することができるものと考えられる。

以下ではアルゴリズムの詳細について説明する。

2.3.1.2 静止領域、動領域の識別

各レンジセルを符号化ブロック、非符号化ブロックに分類する。この分類は以下の手順でおこなわれる。グループ内の各フレームにおいて空間的に同位置にある n 個のレンジセルに対して、動領域、静止領域の分類を行う。これらのレンジセルのうち、少なくとも 1 個のレンジセルが動領域と分類された場合、 n 個全てのレンジセルを符号化対象とする。この処理により 1 つのフレームのグループに対して 1 つの符号化対象のレンジセルの配置図を作成することができる。これは符号として伝送される。

ブロック単位に輝度の大きな動領域を検出する方法を以下に示す。この検出法は文献 [17] の方法をフレーム間に適用することによって行われる。すなわち、輝度の変化が視覚的に目立つと考えられる領域を動領域として検出し、それ以外の領域を静止領域とする。検出は以下のように行われる。

(1) フレーム間差分をとり、両フレームの画素の平均値で規格化する：

$$d_{inter} = \frac{2(r_{i,j,k} - r_{i,j,k-1})}{r_{i,j,k} + r_{i,j,k-1}}. \quad (2.5)$$

式中の $r_{i,j,k}$ は第 k フレームのレンジセルの i 行 j 列の輝度を表す。(2.5) 式において、2 画素の平均輝度が小さい場合、すなわち暗い場合、分子における差が小さい場

合でも, $|d_{inter}|$ は大きい値をとり得る. また, 2 画素の平均輝度が大きい場合, すなわち明るい場合, 上とは逆に, 分子の変化が大きい場合でも, $|d_{inter}|$ は小さい値をとる.

- (2) d_{inter} の値をしきい値と比較して, 輝度の変化の大きい画素か否かを分類する. 分類結果を行列 G_{inter} に下式のように代入する;

$$G_{inter}(i, j) = \begin{cases} 1 & |d_{inter}| > T_{inter} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, B$$

- (3) これをブロック内の全画素に適用する. ただし, しきい値は以下のように設定する.

$$T_{thr} = \begin{cases} \frac{8}{d_{av}} & d_{av} < 30 \\ 0.17 & 30 \leq d_{av} \leq 225 \\ 0.14 & d_{av} > 225 \end{cases} \quad (2.7)$$

式中の d_{av} はフレーム間の画素の輝度の平均値を表す. このしきい値の内, 下の 2 つについては実験的に求めた.

- (4) 次に $G_{inter}(i, j) = 1$ となる点で, 以下の条件を満たすものの個数をカウントする.

- 孤立点の個数 $n_{isolate}$.
- 周囲の 8 画素のいずれかに連結している点の個数 n_{joint} .

また, n_{total} を $G_{inter}(i, j) = 1$ となる点の個数とすると, $n_{total} = n_{isolate} + n_{joint}$ となる.

- (5) $n_{isolate}, n_{joint}, n_{total}$ の値から輝度の変化の大きな動領域かどうかを識別する.

$n_{total} < \frac{2}{3}B \cdot 1$ の場合: この場合は, 有意と考えられる線状, あるいは群集した成分が見られないと考えられる. そこで, 全ての輝度の変化をランダムノイズと考え, 静止領域とみなす.

$\frac{2}{3}B \cdot 1 \leq n_{total} \leq \frac{1}{3}B^2$ の場合: $n_{joint} > \frac{1}{2}n_{total}$ ならば, 有意な変化が線状, あるいは群集した成分が存在すると考えられる. したがって, 動領域とみなす. $n_{isolate} > \frac{1}{2}n_{total}$ ならば, $n_{total} < \frac{2}{3}B \cdot 1$ の場合と同様の状態であると考えて, 静止領域とみなす.

$n_{total} > \frac{1}{3}B^2$ の場合: ブロック内に有意な変化が多く見られると考えられるため, 動領域と判定する.

$n_{isolate}, n_{joint}, n_{total}$ のしきい値についても, 実験的に求めた.

2.3.1.3 縮小写像の構成

符号化対象の各レンジセルは Jacquin の方法 [4] で符号化される. すなわち, レンジセルをブロック内で輝度の変化がほとんどないブロック (シェード), 輝度の変化が緩やかなブロック (ミッドレンジ), ブロック内にエッジや, 輝度の変化の多いテクスチャを含むブロック (エッジ) のいずれかに分類する [17]. レンジセルの分類により, 以下のように符号化を行う.

シェード: レンジセルの輝度の平均値で全画素を置き換える. この縮小写像を θ とすると,

$$\theta(r_{i,j,k}) = \frac{\sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^B r_{i,j,k}}{B^2}. \quad (2.8)$$

ミッドレンジ:

- (1) ドメインプールを設定する. (ドメインプールの取り方については後述)
- (2) ドメインプールから大きさが $2B \times 2B$ のドメインセルを取り出す.
- (3) ドメインセルを $B \times B$ のブロックに縮小する. 縮小はドメインセルの重なりのない 2×2 のブロックの画素を平均することにより行われる. :

$$d'_{i,j,k} = \frac{d_{2i,2j,k} + d_{2i+1,2j,k} + d_{2i,2j+1,k} + d_{2i+1,2j+1,k}}{4} \quad (2.9)$$

但し、上式中の $d_{i,j,k}, d'_{i,j,k}$ は、それぞれ第 k フレームにおける、ドメインセルと縮小されたドメインセルの i 行 j 列の輝度を表す。

- (4) 縮小されたドメインセルに輝度値方向のスケーリング、シフトを行う。この縮小写像を τ とすると、

$$\tau(d'_{i,j,k}) = s \cdot d'_{i,j,k} + \Delta g. \quad (2.10)$$

なお、輝度値方向のスケーリングの係数 s 、及びシフト値 Δg は下式で与えられる [18].

$$s = \frac{B^2 \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^B d'_{i,j,k} r_{i,j,k} - \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^B d'_{i,j,k} \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^B r_{i,j,k}}{B^2 \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^B d'^2_{i,j,k} - \left(\sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^B d'_{i,j,k} \right)^2}, \quad (2.11)$$

$$\Delta g = \frac{1}{B^2} \left[\sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^B r_{i,j,k} - s \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^B d'_{i,j,k} \right]. \quad (2.12)$$

- (5) 上の (2)-(4) の処理をドメインプール内の全てのドメインセルに対しておこない、レンジセルと縮小されたドメインセル（コラージュ）の平均自乗誤差が最小となるドメインセルの位置と、その縮小写像のパラメータ $s, \Delta g$ を求める。

エッジ：ミッドレンジの縮小写像に加えて、以下の8種類の回転、反転を行う。この変換を ι_1, \dots, ι_8 とすれば、

- 恒等変換：

$$\iota_1(d'_{i,j,k}) = d'_{i,j,k}. \quad (2.13)$$

- 垂直軸に関する対称変換：

$$\iota_2(d'_{i,j,k}) = d'_{B-1-i,j,k}. \quad (2.14)$$

- 水平軸に関する対称変換：

$$\iota_3(d'_{i,j,k}) = d'_{i,B-1-j,k}. \quad (2.15)$$

- 直線 $y = x$ に平行な対角線に関する対称変換 :

$$\iota_4(d'_{i,j,k}) = d'_{j,i,k}. \quad (2.16)$$

- 直線 $y = -x$ に平行な対角線に関する対称変換 :

$$\iota_5(d'_{i,j,k}) = d'_{B-1-j,B-1-i,k}. \quad (2.17)$$

- 90° 回転 :

$$\iota_6(d'_{i,j,k}) = d'_{j,B-1-i,k}. \quad (2.18)$$

- 180° 回転 :

$$\iota_7(d'_{i,j,k}) = d'_{B-1-i,B-1-j,k}. \quad (2.19)$$

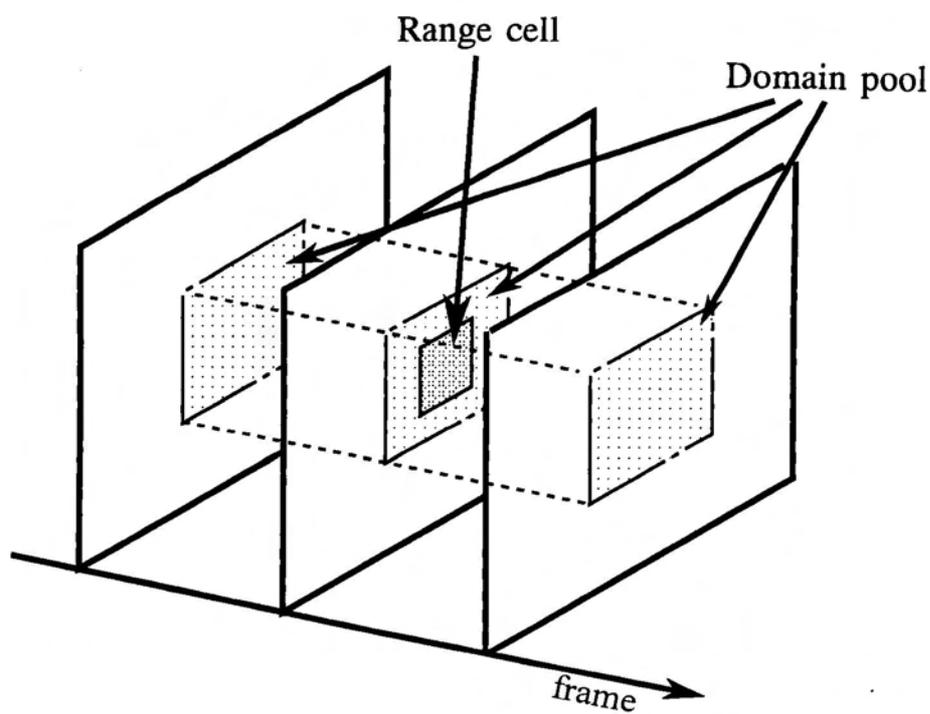
- 270° 回転 :

$$\iota_8(d'_{i,j,k}) = d'_{B-1-i,j,k}. \quad (2.20)$$

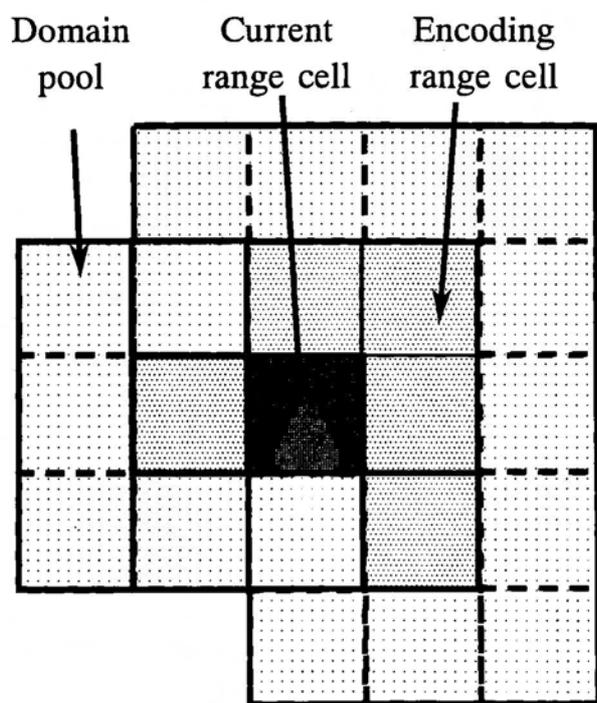
エッジブロックにおいて、伝送するパラメータは、ドメインセルの位置、縮小写像のパラメータ $s, \Delta g$ 、および回転・反転のインデックスとなる。

2.3.1.4 ドメインプールの設定

本手法において、ドメインセルの探索を 2 段階で行う。第 1 段階において、着目しているレンジセルの画素を含むドメインセル、および、その前後のフレームにおいて同じ位置にあるドメインセルについて探索を行う。第 2 段階において、更に周囲のドメインセルについて探索を行う。これは以下の理由による。あるレンジセルに対するドメインセルの内部に、符号化された領域を含まない場合、復号において、補間された画素から縮小の計算を行うことになる。一般にドメインセルの内部には、レンジセルの境界を含むと考えられるため、ブロックひずみの影響が生じて、画質が低下すると考えられる。逆に、符号化された領域においては、復号時に輝度が変化するため、ドメインセルの内部にレンジセルの境界が存在しても、その影響は小さいと考えられる。



(a)



(b)

図 2.2: ドメインプールの領域 (a) フレーム間にわたるドメインプール, (b) 動領域におけるフレーム内のドメインプール

そこで、ドメインプールを図 2.2 のように設定する。ドメインセルの探索を図 (a) のように、フレーム間にわたって探索を行う。上で述べた、それぞれの段階においてドメインプールを設定する。第 1 段階において、図 (b) のように、着目しているレンジセルの周囲 8 個のレンジセルのうち、符号化対象となっているレンジセルと、それを取り囲むブロックをドメインプールとする。また、他のフレームにおいて同位置にある領域もドメインプールとする。探索の順序は、着目しているレンジセルを含むフレーム、それ以外のフレームの順とする。現在のドメインプールにおいて探索を行って、レンジセルとそのコラージュの平均自乗誤差 d_{res} がしきい値 d_{th} に対して、 $d_{res} > d_{th}$ となった場合、第 2 段階の探索を行う。このとき、ドメインプールを、図 (a) において、第 1 段階で探索した領域以外の領域とする。

最初に符号化されるグループに関しては、全てのレンジセルが符号化されるので、ドメインプールを図 (a) のように設定する。

2.3.1.5 レンジセルの再分割

2.3.1.3で符号化を行った結果 $d_{res} > d_{th}$ となる場合、近似精度を向上させるために、以下の処理を行い、最適な分割による符号化を行う。

- (1) レンジセルを左右に 2 分割して符号化を行う。
- (2) レンジセルを上下に 2 分割して符号化を行う。
- (3) (1), (2) の符号化結果により以下の処理のうち的一方を選択する。
 - (i) (1), (2) の分割のうち、しきい値を満たすブロック数の多い方の分割を選択する。但し、同数の場合は最小の d_{res} をもつ分割を選択する。選択された分割で、しきい値を満たしていないブロックがある場合には、そのブロックを更に分割して推定を行う。この場合、(1) が選択されたときには (2) , (2) が選択された場合には (1) の方法で行う。

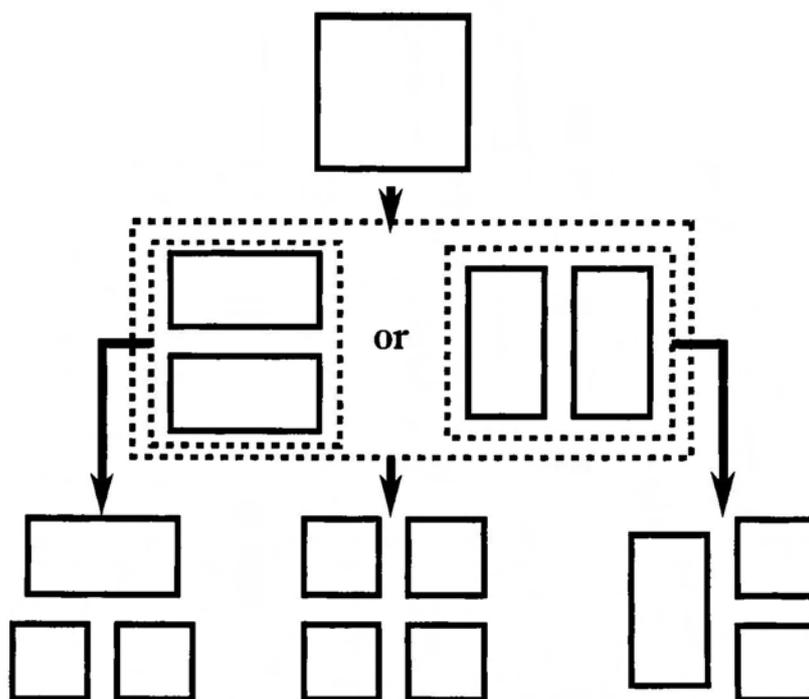


図 2.3: レンジセルの再分割

- (ii) (1), (2) の両方でしきい値を満たすブロックが存在しない場合、レンジセルを 4 分割して符号化を行う。

2.3.1.6 復号

復号において、初期画像が任意であることを利用する。初期画像として、直前に復号されたフレームのグループにおける、最後のフレームを用いる。すなわち、既に復号されたフレームのグループを $A_{i-1} = (A_{i-1,1}, \dots, A_{i-1,n})$ とすると、復号を行うフレームのグループ A_i の初期画像は、

$$A_{i,j} = A_{i-1,n}, \quad (j = 1, \dots, n) \tag{2.21}$$

表 2.1: RIFS パラメータを符号化するのに要するビット数

Block type	RIFS parameters	Number of bits
Shade	Average of pels in range cell	5
Midrange	Luminance scaling coefficient	5
	Contrast shift	5
	Deviation from range cell	Variable
	Frame number of domain cell	$\lceil \log_2 n \rceil$
Edge	Luminance scaling coefficient	5
	Contrast shift	5
	Deviation from range cell	Variable
	Isometries	3
	Frame number of domain cell	$\lceil \log_2 n \rceil$

となる。

これにより符号の存在しない領域を補間することができる。また、初期画像が復号する画像とフレーム間相関をもつことから SNR が収束するまでの反復回数を削減できるものと考えられる。

2.3.2 符号化シミュレーション

2.3.2.1 原画像

原画像として動画像 “Foreman” の 101-124 フレーム、および “Susie” の 1-24 フレームを用いる。両画像とも画像のサイズは 176×144 画素で、1 画素あたり 8 bit で量子化されている。前者は動きの大きな画像の例として、後者は比較的動きの少ない画像の例として用いた。原画像のうちの 1 フレームを図 2.4 に示す。



(a)



(b)

図 2.4: 原画像 (a) Foreman 101 フレーム, (b) Susie 1 フレーム

2.3.2.2 ビットレートの計算

符号となる RIFS パラメータおよび、そのビット数は下表のようになる。また、符号の存在か否かを示すビット列を、フレーム内のレンジセルの数; $(1 \text{ フレームの画素数}) / (B \times B)$ だけ伝送する。

ドメインセルの探索は、2.3.1.4 で述べたドメインプール内を全探索する。符号化条件としては、 $n = 2, d_{th} = 100, B = 8, dp = 5B$ とした。

2.3.2.3 結果および考察

図 2.5, 図 2.6 に復号画像を示す。それぞれの図において、(a) は、7 回反復した画像であり、(b), (c) においては、それぞれ反復回数は 2 回である。この図から、画像 “Susie” において、フレームを追う毎に画質の劣化が見られる。特に、女性の鼻、唇等、比較的コントラストの低い動領域でその傾向は顕著であると考えられる。また画像 “Foreman” において、人物の顔の領域では良好な画質が得られていると考えられる。しかし、人物の眉の部分、ヘルメットと背景の境界等で劣化が見られる。



(a)



(b)

図 2.5: 復号画像 (Foreman) (a) 101 フレーム (SNR 32.70 [dB]), (b) 105 フレーム (SNR 31.82 [dB])



(c)

図 2.5: 復号画像 (Foreman) (c) 110 フレーム (SNR 30.67 [dB])



(a)



(b)

図 2.6: 復号画像 (Susie) (a) 1 フレーム (SNR 38.54 [dB]), (b) 5 フレーム (SNR 35.66 [dB]),



(c)

図 2.6: 復号画像 (Susie) (c) 10 フレーム (SNR 34.19 [dB])

また、SNR は図 2.7，図 2.8 のようになり、ビットレートは図 2.9，図 2.10 のようになった。比較のために 3D-IFS による符号化結果を合わせて示している。復号の反復計算の回数は、最初のグループのフレームは 7 回、それ以降は 2 回となっている。3D-IFS においては、全てのフレームにおいて、反復回数は 7 回である。

図 2.7，図 2.8 から SNR において、画像 “Susie” では、総じて 3D-IFS の方が高いが、画像 “Foreman” については提案法の方が高くなっている。これは提案法において、静止領域の符号化を行っていないため、フレーム毎に誤差が蓄積したと考えられる。また、図において、反復回数は提案法の方が少ない。これは、3D-IFS において、復号の際、初期画像として一様に輝度値が 0 の画像を用いたことが原因と考えられる。このことから提案法が復号の高速化に有効であることが分かった。

また、図 2.9 から、画像 “Foreman” において、2 フレームを除き、フレームで提案法が 3D-IFS に比べて高いビットレートとなったことが分かる。これは画像 “Foreman” は動領域が多いため、符号化対象となった領域が増大したことと、画像全体にエッジを多く含むため、レンジセルの分割が行われたことが考えられる。一方、図 2.10 から、画像 “Susie” において、最初に符号化されるグループは 3D-IFS の方がビットレートが低くなっているものの、それ以降のグループについては、提案法において、低いビットレートで符号化されていることがわかる。これは、画像の動きが小さく、符号化を行ったレンジセルの数が少なかったことが考えられる。また、画像 “Foreman” と比べて、符号化されたレンジセルにおいて、エッジブロックが少なく、レンジセルの分割の回数が少なかったためと考えられる。

2.3.3 本手法の長所と問題点

シミュレーションの結果、提案法において、SNR 28.41 dB – 38.54 dB で、ビットレート 0.011 bit/pel – 1.119 bit/pel で符号化することができた。画像 “Susie” のように動きの小さい画像においては、従来法と比較してビットレートの削減できたが、画像 “Foreman” のように、動きの大きい画像においては、逆に符号量が増大した。これはブロック単位に独立に符号化を行ったことに起因すると考えられる。

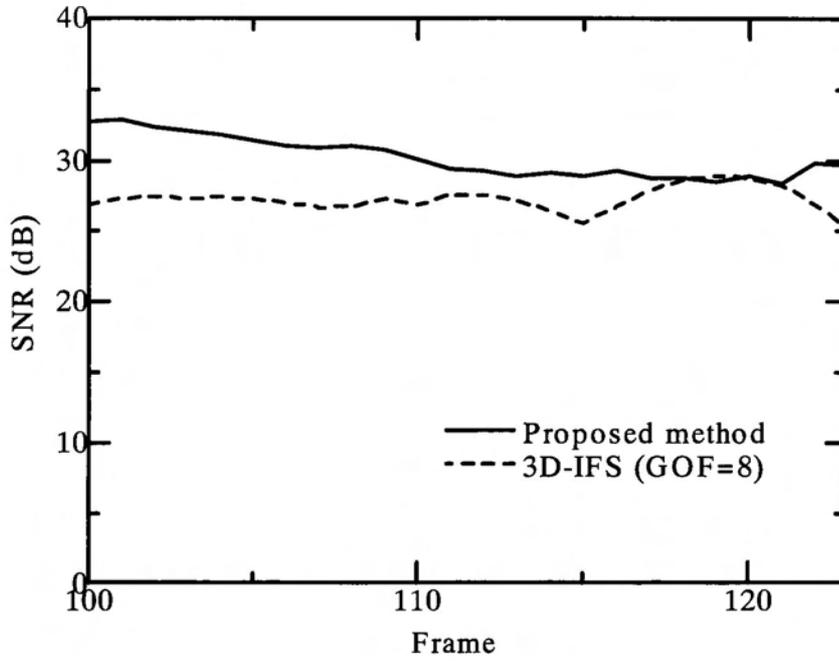


図 2.7: 動画像 “Foreman ” についての SNR

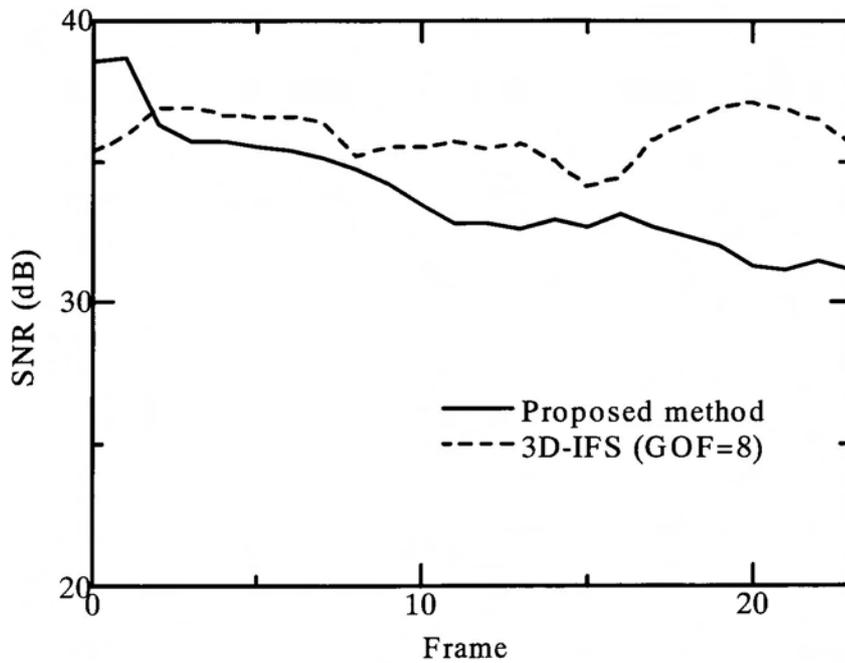


図 2.8: 動画像 “Susie ” についての SNR

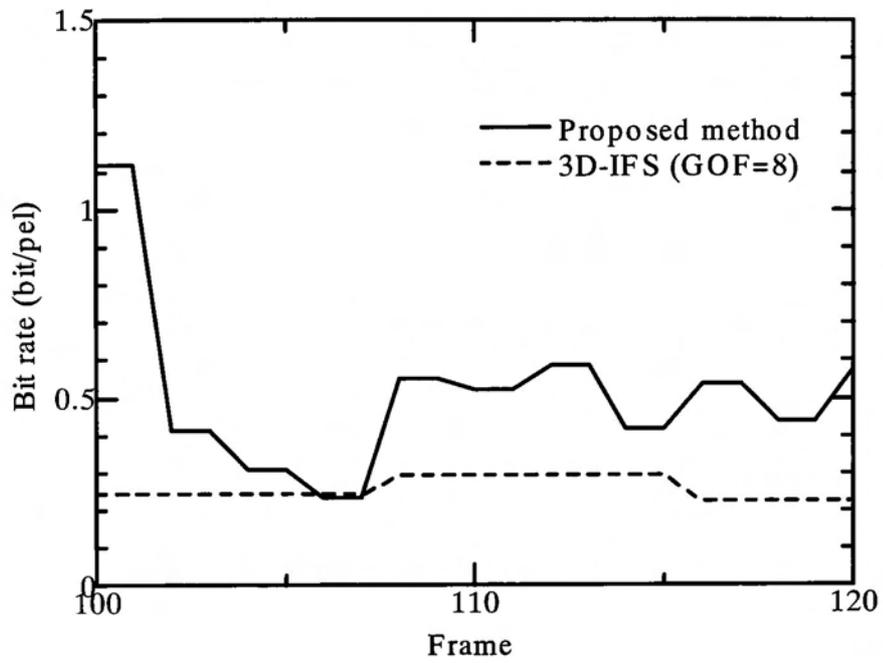


図 2.9: 動画像 “Foreman ” についてのビットレート

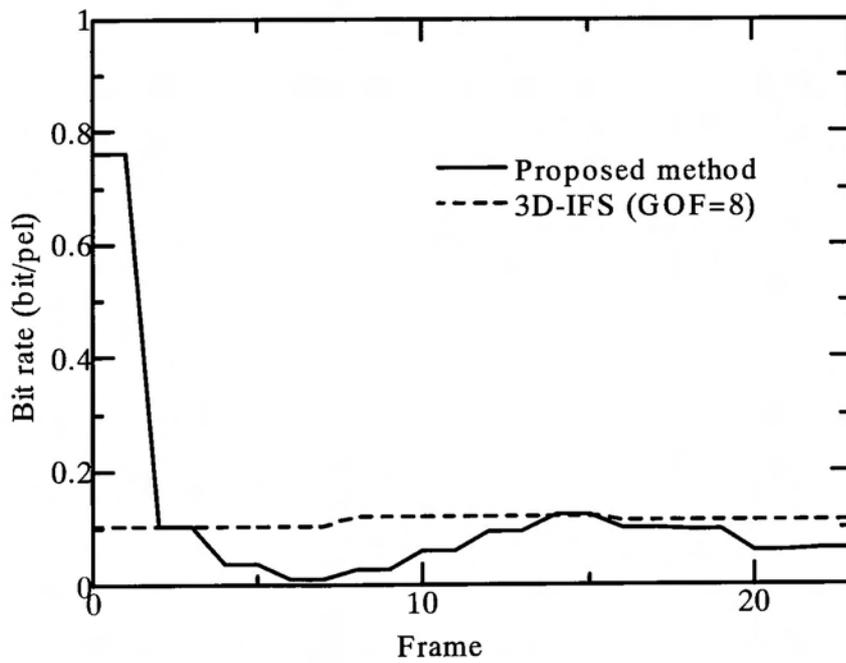


図 2.10: 動画像 “Susie ” についてのビットレート

視覚的には、復号画像において、目立つひずみが検知される領域が存在することが分かった。これは動領域の検出において、コントラストの低い動領域を中心として、動きに十分に追従できなかったためと考えられる。

また、復号時の反復回数を 7 回から 2 回程度に削減することができた。

課題としては、RIFS の構造を更に利用した符号化法の考案、動領域の検出アルゴリズムの改善などがあげられる。次節では、以上のことを考慮した符号化アルゴリズムについて述べる。

2.4 レンジセルをグループ化した RIFS 符号化

前節で述べた手法は、動きの小さい画像において、ビットレートを削減することができた。しかし、数フレーム符号化を行うと、目立つひずみが現れるようになった。この原因として、動領域、静止領域を分類するアルゴリズムにおいて誤判定が発生したと考えられる。

Lazer の 3D-IFS [12] において、探索においてフレーム間相関を利用していないことは 2.3.1 で述べた。また、レンジセルは空間方向とフレーム方向の 3 次元であり、フレーム方向の縮小が考えられている。そのためフレーム方向にブロック数が増大する可能性があり、低ビットレートでの符号化においては障害となりうる。また、前節では、各レンジセルを独立に符号化したために、動きの大きい画像で符号量が増大した。

以上のことから、本節において、レンジセルを平面とし、フレーム方向に複数個とり、これをグループとして符号化を行う。レンジセルのグループを静止領域に属するか、動領域に属するか分類し、それにより探索法を適応的に切り替える手法を提案する。この手法の狙いは、

- 静止領域においてブロック間相関の高さを利用し、探索すべきレンジセルを 1 つに限ることで、探索領域中の動きの状態によらずに探索を行うことと、
- 動領域においてレンジセルとドメインセルの動き情報を参照することによって、レンジセルのグループとドメインセルのグループのそれぞれに含まれるオブジェクトの動きを近づけることである。

これにより探索における近似精度を向上させることができると考えた。この結果として、符号化ブロックの総数の増加を抑制することができ、符号化効率が向上すると考えられる。レンジセルのグループの符号化アルゴリズムの流れ図を図 2.11 に示す。

2.4.1 符号化法

2.4.1.1 符号化の概要

n フレームのグループをブロックサイズ $B \times B$ の重なり合わないレンジセルに分割し、各フレームにおいて空間的に同位置にある n 個のレンジセルをグループとして符号化を行う。

- (1) レンジセルのグループを静止領域、動領域に分類する。
- (2) 静止領域の場合、グループの最初のレンジセルについてのみ、探索を行う。動領域ならば、グループのすべてのレンジセルについて探索を行う。すなわち、探索を行うレンジセルの個数を n_s とすると、

$$n_s = \begin{cases} 1 & \text{静止領域} \\ n & \text{動領域.} \end{cases}$$

- (3) レンジセルのブロックサイズが $B_h \times B_v$ で、グループのレンジセルの個数が n_s のとき、ドメインセルのグループの探索領域（ドメインプール）は、レンジセルのグループを中心として、空間方向に $\pm dp$ 画素の範囲、すなわち $(B_h + 2dp) \times (B_v + 2dp)$ 画素、フレーム方向に n_s フレームとする。ただし、 $n_s = 1$ の場合、探索するレンジセルの後の 1 フレームもドメインプールに加える。
- (4) ドメインプールからブロックサイズ $2B_h \times 2B_v$ 画素のドメインセルをフレーム方向に n_s 個取り出す。
- (5) $n_s > 1$ 、すなわち動領域ならば、レンジセルのグループとドメインセルのグループの動きベクトルの平均値から摂動ベクトルを求める。これがゼロベクトルでなければ、図 2.13 のようにしてドメインセルのグループを取り直す。

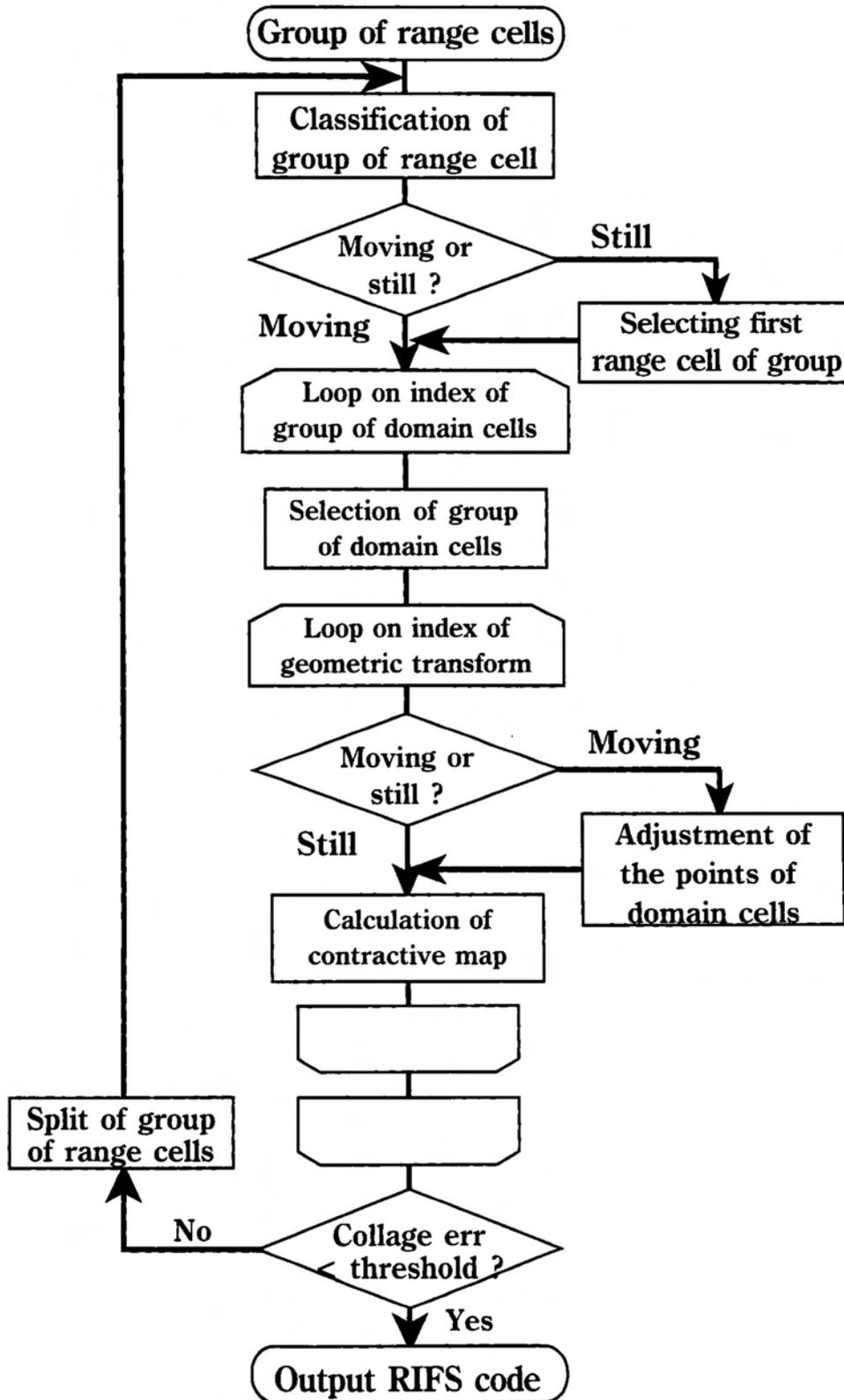


図 2.11: 符号化アルゴリズムの流れ図

- (6) 縮小写像を計算する.
- (7) (4)-(6) の操作を, ドメインプールに属する, すべてのドメインセルのグループに対しておこない, 誤差が最小となる縮小写像, およびドメインセルのグループを求める.
- (8) 誤差が許容値以下ならば, 得られた縮小写像とドメインセルのグループを RIFS コードとして出力する. 逆に, 誤差が許容値を超える場合にはレンジセルのグループを分割し, それぞれのサブグループについて, (1) から処理を行う.

2.4.1.2 静止領域, 動領域の分類

ここでは, レンジセルのグループを静止領域, 動領域に分類する手法について説明する. 判定はレンジセルのグループにおける最初のブロックと, それ以外のブロックを参照して行う. レンジセルが動領域と判定された場合が少なくとも 1 つあれば, そのレンジセルのグループ全体が動領域にあるものと判定する. 判定は 2 つのブロック間差分の統計量を基に行い, 判定が困難な場合には差分値を評価することにより行う.

2 つのブロック間で差分 d_{inter} を取る. $|d_{inter}|$ の平均値 $Ex(|d_{inter}|)$ を求め, これがしきい値 th_{ex} より大きければ, 輝度が平均的に大きく変動していると考えられることから, 動領域と判定する. これにより, ブロック全体にわたる動きの有無が判定できると考えられる. そうでない場合は, d_{inter} の分散 $Var(d_{inter})$ を求める. これがしきい値 th_{va} より大きい場合には, 複数のオブジェクトによる動きがあるものと考えられるため, 動領域と判断する.

上の判定で動領域と判定されなかった場合は, それぞれの $|d_{inter}|$ をしきい値 th_{inter} と比較する. $|d_{inter}| > th_{inter}$ となる点で, 以下の条件を満たすものの個数をカウントする.

- 孤立点の個数 $n_{isolate}$.
- 8-近傍において連結している点の個数 n_{joint} .
- 上の二つの個数の合計 n_{total} .

これらの 3 つの値により動領域かどうかを判定する.

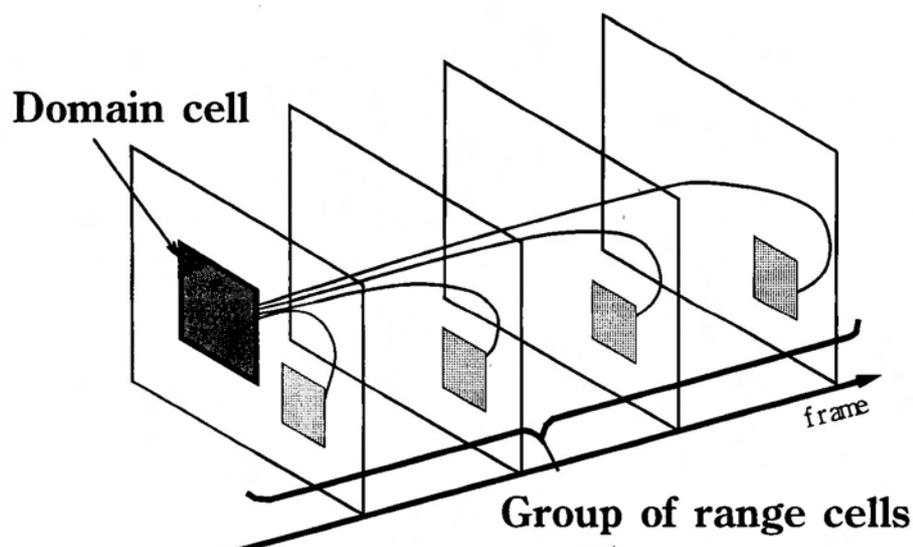


図 2.12: 静止領域における符号化

$n_{total} < \frac{1}{3}(B_h + B_v) \cdot 1$ の場合：すべての輝度の変化をランダムノイズと考え、静止領域とみなす。

$\frac{1}{3}(B_h + B_v) \cdot 1 \leq n_{total} \leq \frac{1}{3}B_h \cdot B_v$ の場合： $n_{joint} > \frac{1}{2}n_{total}$ ならば、有意なフレーム間差分値がブロック内に線状、あるいは群集して存在するものと考えられる。よって、この場合は動領域と判定する。逆に、 $n_{joint} \leq \frac{1}{2}n_{total}$ ならば、 $n_{total} < \frac{1}{3}(B_h + B_v) \cdot 1$ の場合に準じる状態と考え、静止領域とみなす。

$n_{total} > \frac{1}{3}B_h \cdot B_v$ の場合：ブロック内の多くの領域に有意な輝度の変化が見られるので、動領域とみなす。

これらのしきい値については、視覚実験により、実験的に求めた。

この分類に関する情報はレンジセルのグループの情報として伝送される。

2.4.1.3 静止領域の符号化

静止領域と判定されたグループにおいて、それぞれのレンジセルは、非常に高いブロック間相関をもつ。そこで、最初のレンジセルのみを符号化する。この符号は他のレンジセルの符号としても用いる。この手法により自分を自身に写す写像と、他に写す写像、すなわち RIFS の縮小写像を構成することができる。(図 2.12 参照) また、全てのレンジセルについて、同時に探索を行わないため、ドメインプールの内部に含まれる動きによらず、高い精度で近似できるものと考えられる。

但し、レンジセルのグループが最初のフレームのグループに含まれるときのみ符号化を行う。2 番目以降のフレームのグループにおいて、動領域のレンジセルのグループが分割されたとき、サブグループが静止領域と判定されることがある。この場合には、そのサブグループのレンジセルが、フレームのグループにおける最初のフレームに含まれていれば、符号化は行わない。

2.4.1.4 動領域の符号化におけるドメインセルの抽出

動領域にあるレンジセルのグループにおいて、符号化を行うとき、各フレームにおいて同位置にあるドメインセルによりグループを構成すると、後述する縮小写像により、その内部に含まれる動きも同様に縮小される。したがって、動きの大きいレンジセルのグループにおいて、近似精度の低下が考えられる。そこで本論文において、レンジセルのグループの内部の動きに追従するように、ドメインセルのグループを取り出す手法を提案する。図 2.13 に示すように、フレームを追う毎に、ドメインセルを、徐々に位置をずらしながら取り出す。変位のベクトルの成分は、レンジセルの動きベクトルと、ドメインプール内の動きベクトルを用いて決定する。これにより、レンジセルのグループに動きが含まれる場合において、近似精度を維持できるものと考えられる。

レンジセルのグループ内の n 個のレンジセルのうちの、最初の $n-1$ 個のレンジセルのそれぞれに対して、前方向の動き補償予測を行い、動きベクトルの平均ベクトル \overline{mv}_r を求める。但し、レンジセルの領域の範囲外となる動きベクトルについては、平均を取る際には除外する。ドメインセルについても上と同様に動きベクトルの平均値を求め、ベクトルを画像平面方向の縮小率によって縮小する。これを \overline{mv}_d とする。

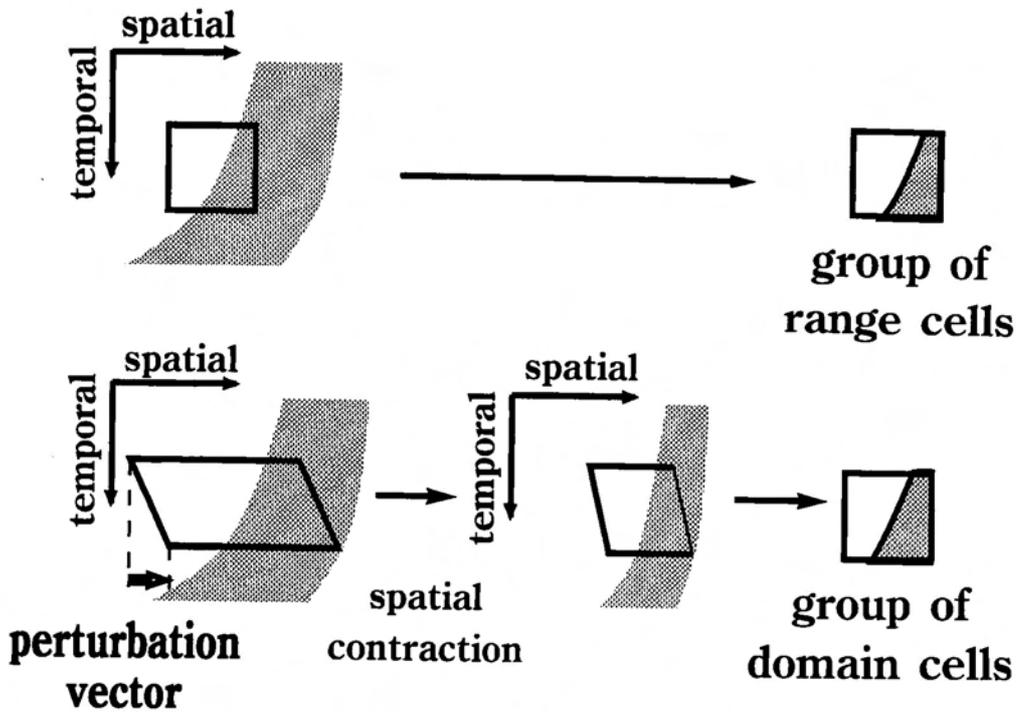


図 2.13: 動領域におけるドメインセルのグループの探索

次にドメインセルの回転, 反転に合わせて \overline{mv}_d を回転, 反転させる.

回転, 反転を行った, ドメインセルの平均の動きベクトル $\overline{mv}_{d_{rot}}$ と \overline{mv}_r の差分ベクトル:

$$shift = \overline{mv}_{d_{rot}} - \overline{mv}_r \quad (2.22)$$

を求め, 先とは逆方向に回転, 反転させる. これを $shift_{irot}$ とする. これが摂動ベクトルとなる. 各フレームにおいて, 直前のフレームの位置から $shift_{irot}$ だけずらしながら, ドメインセルを取り出す. 但し, シフトして元のドメインセルの領域を含まない場合には, そのフレームはシフトを行わず, その次のフレームから再びシフトを行う.

2.4.1.5 縮小写像の計算

縮小写像は以下のようにして計算される.

(1) 各ドメインセルを $B_h \times B_v$ のブロックに縮小する. 縮小は(2.9)式により行われる.

(2) 縮小されたドメインセルに輝度値方向のスケーリング, シフトを(2.10)式により行う.

なお, 輝度値方向のスケーリングの係数 s , およびシフト値 Δg は下式で与えられる.

$$s = \frac{\sum_{k=1}^n \left[mn \sum_{i=1}^{B_h} \sum_{j=1}^{B_v} d'_{i,j,k} r_{i,j,k} - \sum_{i=1}^{B_h} \sum_{j=1}^{B_v} d'_{i,j,k} \sum_{i=1}^{B_h} \sum_{j=1}^{B_v} r_{i,j,k} \right]}{mn \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^{B_h} \sum_{j=1}^{B_v} d'^2_{i,j,k} - \left(\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^{B_h} \sum_{j=1}^{B_v} d'_{i,j,k} \right)^2} \quad (2.23)$$

$$\Delta g = \frac{1}{mn} \sum_{k=1}^n \left[\sum_{i=1}^{B_h} \sum_{j=1}^{B_v} r_{i,j,k} - s \sum_{i=1}^{B_h} \sum_{j=1}^{B_v} d'_{i,j,k} \right] \quad (2.24)$$

但し, $m = B_h \times B_v$ である. この 2 つのパラメータはこの段階で量子化を行う.

(3) ドメインセルのグループに, (2.13)式- (2.20)式の画像平面方向の回転, 反転, および 2 種類のフレーム方向の変換 ι_{t_1}, ι_{t_2} :

- 恒等変換 :

$$\iota_{t_1}(d'_{i,j,k}) = d'_{i,j,k}. \quad (2.25)$$

- フレーム方向の反転 :

$$\iota_{t_2}(d'_{i,j,k}) = d'_{i,j,n_s-1-k}. \quad (2.26)$$

を行う.

但し, 量子化された輝度値方向のスケーリング係数が 0 となった場合, 2.3.1.3 における, シェードブロックに相当するため, 輝度値方向のシフト値のみ伝送し, レンジセルとドメインセルの相対座標および, 上で述べた 10 種類の幾何学的変換のインデックスは伝送しない.

2.4.1.6 レンジセルの再分割

符号化を行って、誤差 d_{res} がしきい値 d_{th} に対して、 $d_{res} > d_{th}$ となる場合、[12] の方法により、レンジセルのグループを画像平面方向に分割するか、フレーム方向に分割するかを決定する。

画像平面方向の場合には、縦方向、もしくは横方向に 2 等分される。分割する方向はブロック内の輝度の変化が大きい方向とする。これは、フラクタル符号化において、誤差が大きくなりやすい領域は、エッジや細かなテクスチャなど、輝度の変化の大きい領域であることが知られているからである [18]。レンジセルのグループ内の各ブロックにおいて

$$h_j = \frac{\min(j, M - j - 1)}{M - 1} \left(\sum_i r_{i,j} - \sum_i r_{i,j+1} \right) \quad (2.27)$$

$$v_i = \frac{\min(i, N - i - 1)}{N - 1} \left(\sum_j r_{i,j} - \sum_j r_{i+1,j} \right) \quad (2.28)$$

を計算する。(2.27), (2.28) の絶対値の平均値 $\overline{|h_j|}$, $\overline{|v_i|}$ を求め、値の大きい方向に分割する。

また、フレーム方向の分割に関しては、グループのセルの個数を 2 等分することにより行われる。

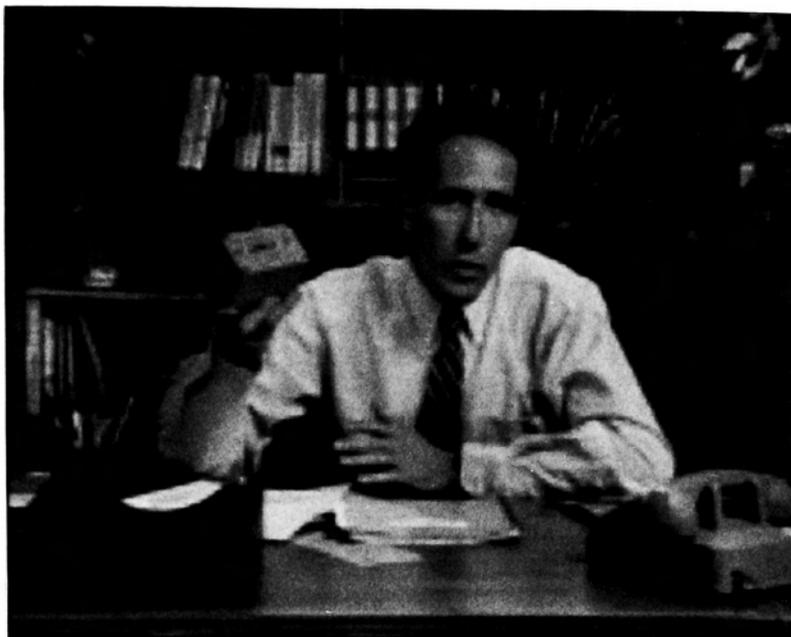
但し、レンジセルのグループが静止領域の場合、フレーム方向の分割は行わず、空間方向の分割のみとする。

2.4.1.7 復号

復号については 2.3.1.6 で述べた手法が前節において、有効性が確認されたため、本節でも用いる。

2.4.2 符号化シミュレーション

原画像として QCIF の動画像 “Salesman”，および “Susie” の 1-32 フレームを用いて、提案法の有効性を検証する。



(a)



(b)

図 2.14: 原画像 (a) Salesman 1 フレーム, (b) Susie 1 フレーム

表 2.2: 符号化パラメータ

	Test1	Test2
Number of frames n	8	4
Block size B	8	8
Threshold for splitting d_{th}	128	128
Range of searching dp	10	10
Step of searching $step$	2	2
Maximum number of spatial split	2	2
Maximum number of temporal split	3	2

表 2.3: 摂動ベクトルの変動の範囲

Range of mean MC error	Range of change of perturbation vector
≤ 1	0
$1 <, \leq 4$	$-1.0 \leq, \leq 1.0$
$4 <$	$-2.0 \leq, \leq 2.0$

2.4.2.1 符号化条件

符号化条件を表 2.2 に示す。ブロックサイズの初期値は文献 [4, 9, 10, 11, 12, 19] と同様に 8 とした。探索は画像平面方向に $step$ 画素だけずらしながら行う。フレーム方向の探索を行う場合は、そのステップは 1 とした。探索における近似誤差 d_{res} は平均 2 乗誤差により求める。

摂動ベクトルの算出には平行移動動き補償予測を用いる。但し予測精度が低い場合、摂動ベクトルの精度も低下する。そこで、求められた摂動ベクトルをある範囲内で変動させてドメインセルを取り直す。変動の範囲は動き補償予測誤差の平均値によって切り替える。

表 2.4: RIFS パラメータを符号化するのに要するビット数

RIFS parameters	Number of bits
Luminance scaling coefficient	2 (One)
Contrast shift	5 (Non-one)
Deviation from group of range cells	5
Component of perturbation vector	Variable
Isometries(spatial)	Variable
Isometries(temporal)	3
Frame number of domain cell	1
	$\lceil \log_2 n \rceil$

動き補償予測誤差の平均の値の範囲と、対応する変動の範囲を表 2.3 に示す。なお、変動のステップは 0.5 とした。

2.4.2.2 ビットレートの計算

符号となる RIFS パラメータおよび、そのビット数は表 2.4 のように定めた。また、符号が存在するか否かを示すマップのビット列を、レンジセルのグループの数; (1 フレームの画素数) / ($B \times B$) だけ伝送する。パラメータのうち、輝度値のスケーリング係数は ± 1.0 の範囲とし、0 に不感帯をもつように等長量子化する。スケーリング係数の分布は、 ± 1.0 においてピークをもち、その他の値では比較的平坦となるため、 ± 1.0 の場合と、それ以外の場合のそれぞれにおいて、固定長符号を割り当てた。また輝度値のシフトは非線形量子化した。量子化表は、予備実験にて複数の動画について RIFS コードを求め、これを学習系列として、LBG アルゴリズム [21] を 1 次元で用いて求めた。ドメインセルのレンジセルからの変位と、摂動ベクトルは、予備実験により、0 近傍に平均をもつ対称分布となることが分かったため、ハフマン符号で可変長符号化する。

2.4.2.3 結果および考察

画像 “Susie” において Test1 の符号から、最初のフレームのグループについて、反復回数を変化させて SNR を求めたところ、図 2.15 のようになった。図 2.15 から 10 回で SNR が収束していることが分かる。それ以降のフレームのグループについても同様の計算を行ったところ、図 2.16 のようになった。但し、最初のフレームのグループについては 10 回反復した。図 2.16 から 5 回で SNR が収束しており、最初のフレームのグループの場合よりも回数が少ない。これは、2.4.1.7 における主張の妥当性を示すものと考えられる。これは Test2 においても同様であった。この結果から、以下では復号の計算において、最初のフレームのグループについては 10 回、それ以降は 5 回反復する。

次に静止領域、動領域における探索法の効果を調べるために、それぞれの領域について SNR の変化を求めたところ、図 2.17、図 2.4.2.3 のようになった。図において、画像 “Susie” の Test1 における結果を示す。比較のために、図 2.17 においては、グループのすべてのレンジセルを符号化した場合の SNR を、また図 2.4.2.3 においては、2.4.1.1 (5) の処理を省略して、摂動ベクトルを用いない場合の SNR をあわせて図示した。図 2.17 から、提案法の復号画像がすべてのレンジセルを符号化した場合に比べて、平均で約 0.5dB 上回っている。これは探索を行うレンジセルが 1 個となったことにより、探索においてドメインセルのフレーム間相関に影響されないためであると考えられる。また、図 2.4.2.3 から摂動ベクトルを使用したときの方が、使用しないときに比べて、平均で約 0.1dB 上回っている。これはドメインセルのグループの候補を、動きを考慮して増やしたことにより、探索における近似精度が向上したためと考えられる。これらのことから提案した探索法の有効性が示された。

図 2.19、図 2.20 に Test1 による復号画像を示す。図 2.19、図 2.20 (b) においては動領域のみを符号化したにもかかわらず、画像 “Susie” においては (a) に比べて視覚的にほぼ同程度の画質を維持しているように思われる。しかし、画像 “Salesman” においては、男性の右腕など、大きく動いた領域にブロック歪みが目立つ。これは画像 “Salesman” の動領域がフレーム全体に対して狭いため、符号化された領域が少なくなり、復号において、十

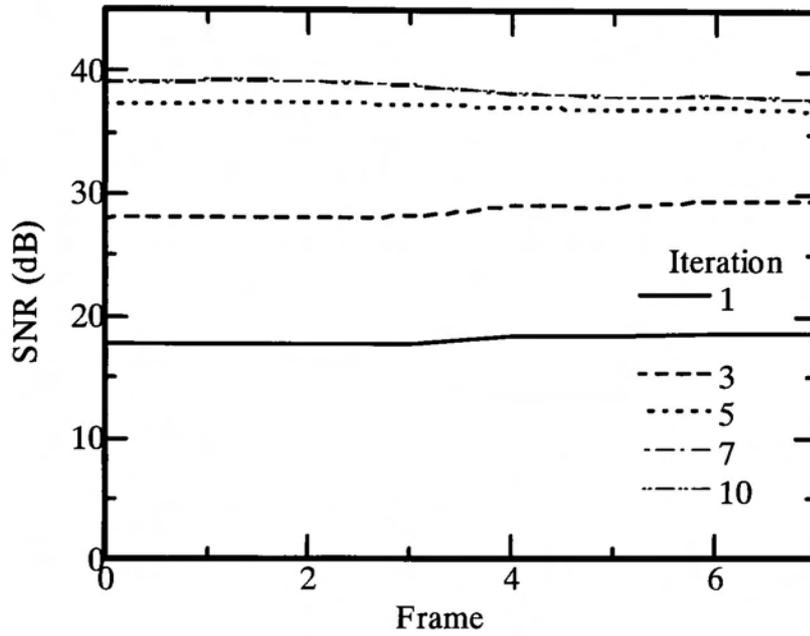


図 2.15: 最初のフレームのグループにおける反復回数に対する SNR の変化

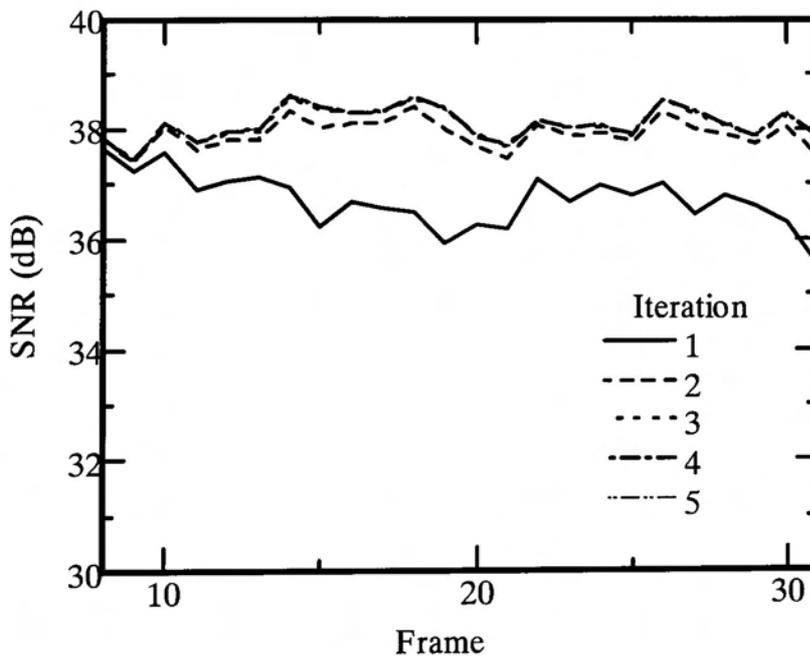


図 2.16: 2 番目以降のフレームのグループにおける反復回数に対する SNR の変化

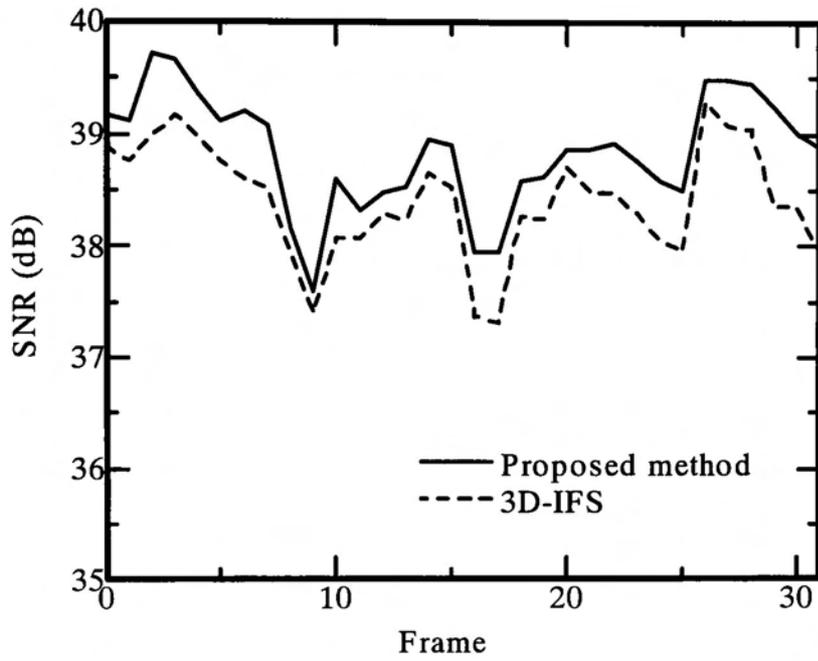


図 2.17: 静止領域における提案法の効果

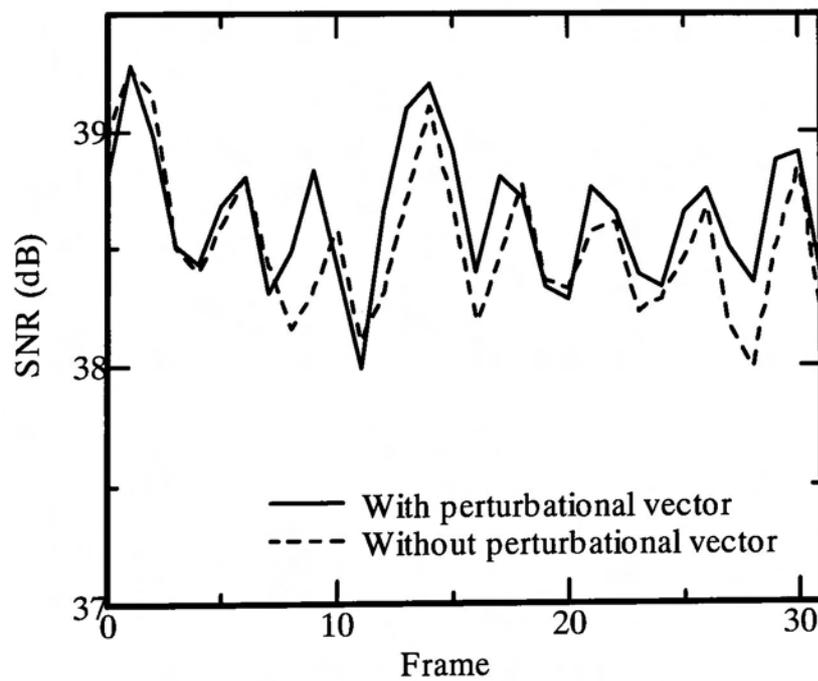
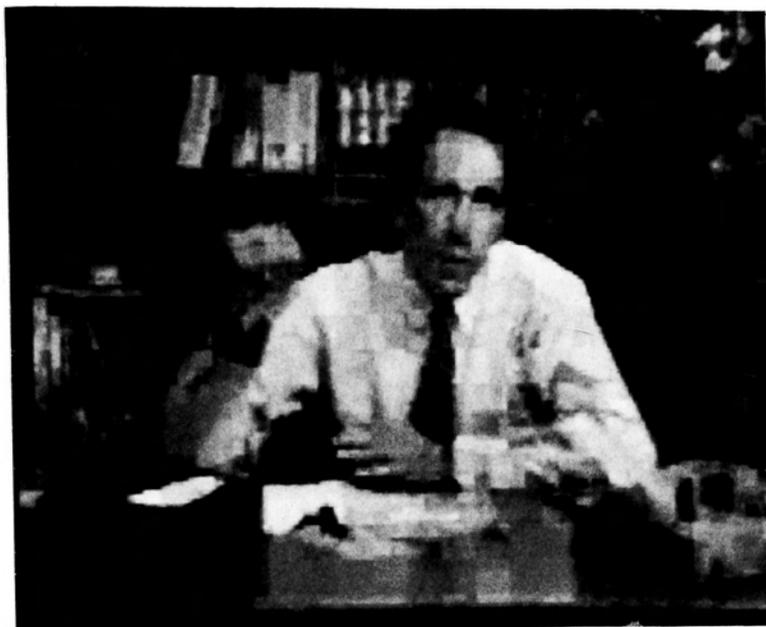
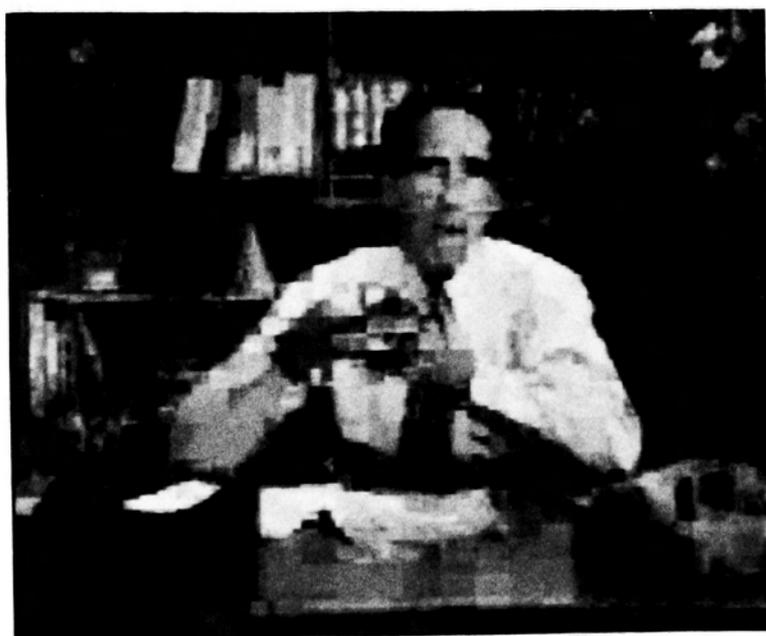


図 2.18: 摂動ベクトルの効果



(a)



(b)

図 2.19: 復号画像 (提案法, Test1) (Salesman) (a) 1 フレーム (SNR 34.98 [dB]), (b) 20 フレーム (SNR 34.08 [dB])

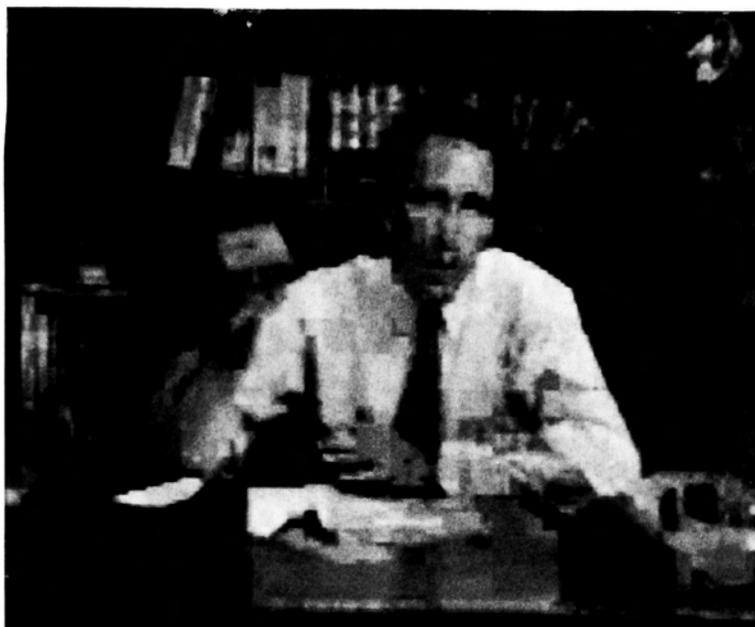


(a)

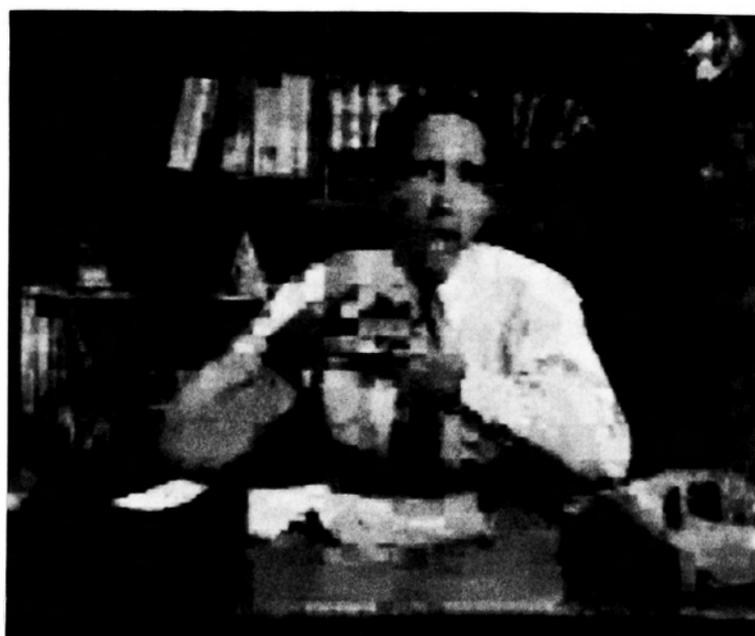


(b)

図 2.20: 復号画像 (提案法, Test1) (Susie) (a) 1 フレーム (SNR 37.18 [dB]), (b) 20 フレーム (SNR 37.73 [dB])



(a)



(b)

図 2.21: 復号画像 (3D-IFS, Test1) (Salesman) (a) 1 フレーム (SNR 35.05 [dB]), (b) 20 フレーム (SNR 35.23 [dB])



(a)



(b)

図 2.22: 復号画像 (3D-IFS, Test1) (Susie) (a) 1 フレーム (SNR 37.32 [dB]), (b) 20 フレーム (SNR 38.18 [dB])

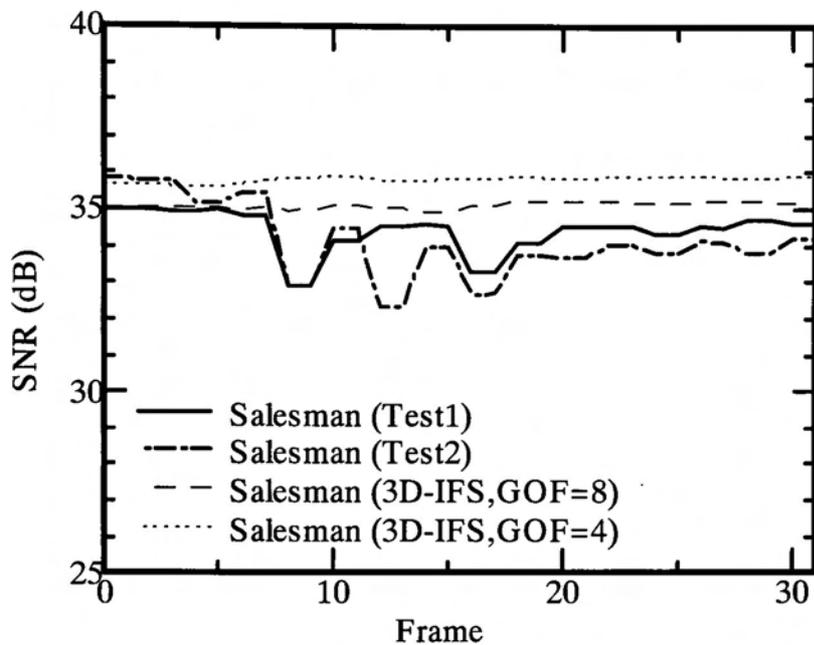


図 2.23: 動画像 “Salesman ” についての SNR

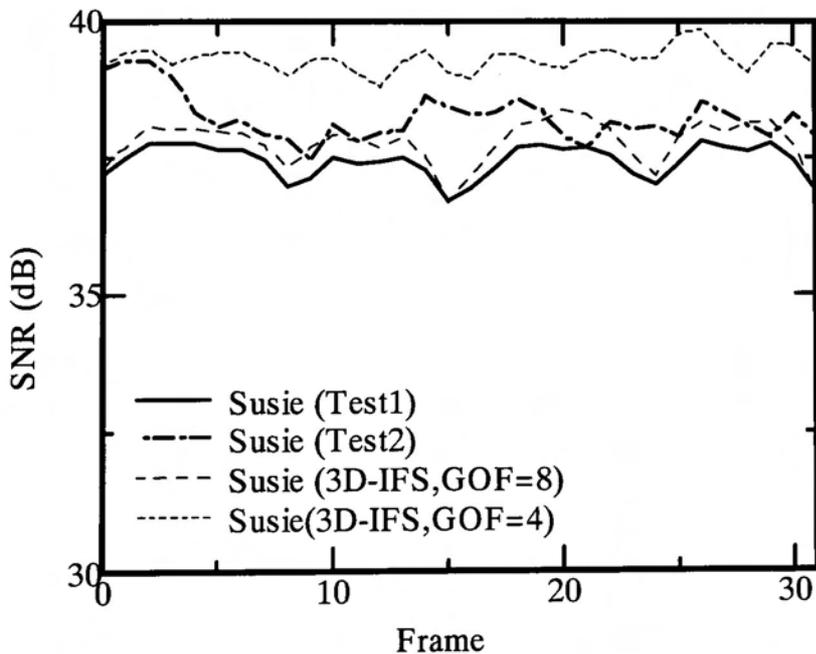


図 2.24: 動画像 “Susie ” についての SNR

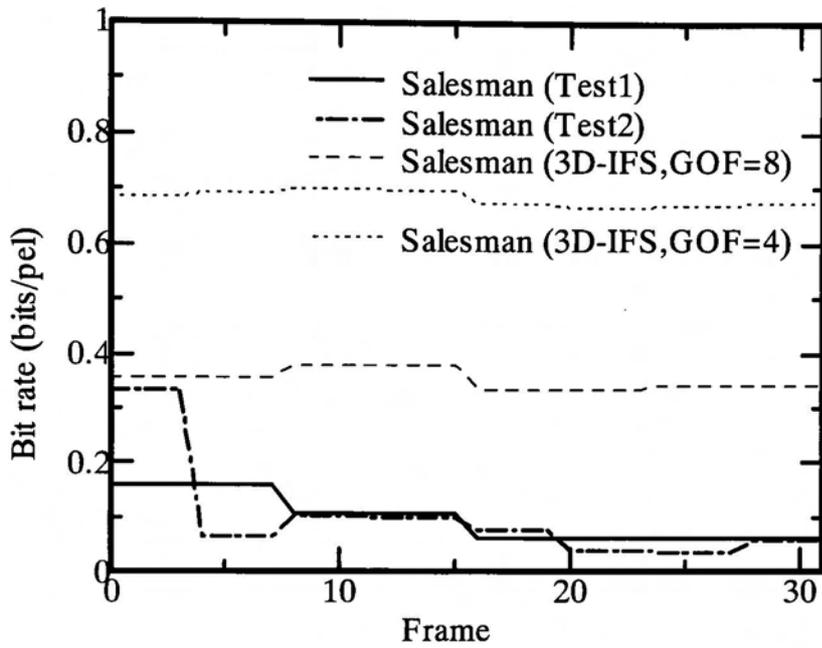


図 2.25: 動画像 “Salesman ” についてのビットレート

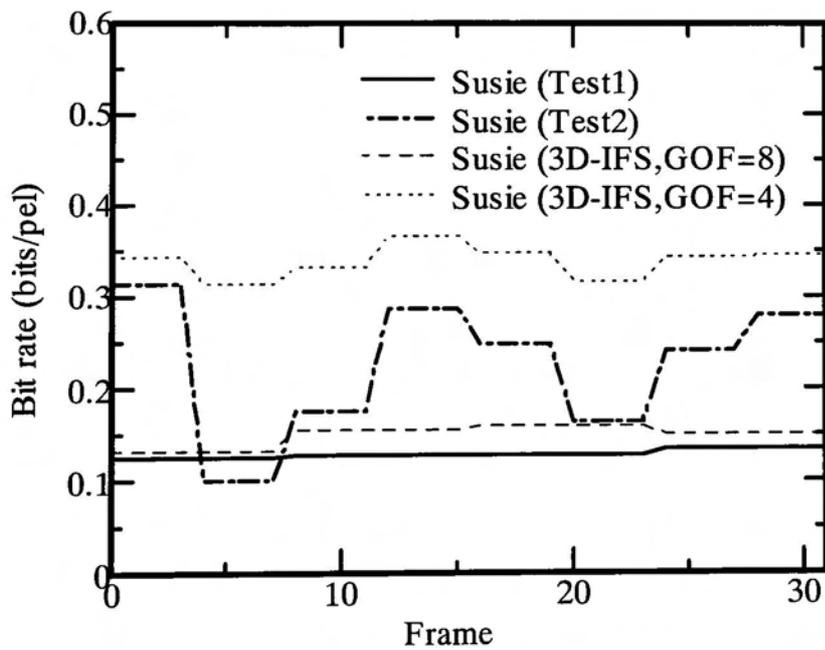


図 2.26: 動画像 “Susie ” についてのビットレート

分な画質を得る前に飽和したものと考えられる。このことから RIFS の縮小写像はある程度の個数が必要であると考えられる。

提案法との比較のため、図 2.21, 図 2.22 に文献 [12] の手法を用いて、符号化条件 Test1 で符号化したときの復号画像を示す。図 2.19, 図 2.20 と図 2.21, 図 2.22 をそれぞれ視覚的に比較して、提案法による復号画像は文献 [12] の結果とほぼ同程度の画質をもつと思われる。

また、SNR, ビットレートは図 2.23, 図 2.24, 図 2.25, 図 2.26 のようになった。比較のために文献 [12] の方法において、符号化条件 Test1, Test2 により符号化した結果を合わせて図示している。ただし、符号はフレームのグループに対して割り当てられるため、各フレームのビットレートはグループ内の 1 フレームあたりの平均符号量を示している。図 2.23, 図 2.24 から SNR については総じて 3D-IFS の方が高い値を示しているが、図 2.25, 図 2.26 から符号量は 3D-IFS に対して、6.5% - 94.5% 削減されていることが分かる。これは本手法では動領域のみを符号化したのに対し、3D-IFS ではすべての領域を符号化したことと、本手法において 3D-IFS と比べて過剰なブロックの分割が抑制されたためであると考えられる。以上のことから、本手法は動領域がフレームのある一部分に限られている動画像において、低いビットレートで符号化されていることがわかる。

2.5 本章のまとめ

本章では、フラクタル符号化を動画像に拡張する試みとして、RIFS を応用した手法を提案した。

各ブロックを静止領域、動領域に分類し、最初のフレームは全ての領域を、それ以降のフレームでは、動領域のみ符号化対象とした。符号化ブロックをその構造に基づいて分類し、縮小写像を求め、符号化を行った。また、復号において、初期画像として、直前に復号されたフレームを用いることにより、反復回数の削減を行った。その結果、0.011 bit/pel - 1.119 bit/pel のビットレートで符号化することができた。動きの小さい画像においては、従来法と比較してビットレートの削減できたが、動きの大きい画像においては、逆に符号

量が増大した。これはブロック単位に独立に符号化を行ったことに起因すると考えられる。また数フレーム符号化を行うと、視覚的に目立つひずみが発生することが分かった。これは、それぞれのレンジセルを独立に符号化したことと、動領域、静止領域の分類において、コントラストの小さい動領域の検出ができなかったことが原因であることが分かった。復号において、反復回数を 7 回から 2 回に削減することができた。

以上のことから、この手法を発展させた、RIFS 符号化法について検討した。ここではグループに属する各フレームにおいて、空間的に同じ位置にあるブロックをグループとして扱った。そのグループを静止領域に属するか、動領域の属するかを分類し、それぞれの場合において、縮小写像の探索法を変更する手法を提案した。静止領域においては、グループの最初のレンジセルのみを符号化し、他のレンジセルについては、求めた縮小写像と同一の写像を用いることとした。また、動領域において、グループ内のオブジェクトの動きに対応するため、ドメインセルのグループを取り出す際、補正ベクトルを導入した。また、静止領域、動領域の分類法の改良を行った。復号に関しては上の手法を用いた。符号化シミュレーションを行った結果、静止領域において、すべてのレンジセルを符号化した場合に比べて平均で約 0.5dB 程度 SNR が向上した。また、動領域においても撮動ベクトルを用いない場合と比べて、ほぼ同程度の画質が得られた。総合して SNR 32.88 – 39.27 dB で、ビットレートは 0.037 – 0.33 bit/pel で符号化できた。また復号において、反復回数を 10 回から 5 回に削減できた。3D-IFS と比較して、SNR において若干の低下が見られるものの、視覚的にはほぼ同程度の画質であった。またビットレートにおいて 6.5% – 94.5% 削減することができた。これにより本手法が低ビットレートにおける画像符号化に有効であることが示せた。

第 3 章

IFS を用いたフレーム補間

3.1 まえがき

本章では、動画像符号化への応用を前提として、IFS の補間によるフレーム補間を試みる [22, 23, 24, 25]. 符号化された 2 フレームの IFS において、縮小写像の係数を連続的なパラメータを用いて補間することすることにより、もとの 2 フレーム間をフレーム補間する手法について検討を行った. 計算機シミュレーションを行い、復号特性、エントロピーおよび統計的性質から、提案法の特長、および有効性について論じる.

3.2 IFS によるフレーム補間

IFS 理論において、次の定理が証明されている [3] :

定理 1 (Δ, d_Δ) はコンパクトな距離空間, (X, d) は完備な距離空間とする. $n = 1, \dots, N$ に対して $w_n : \Delta \times X \mapsto X$ は連続とする. 写像 $W : \Delta \times \mathcal{H}(X) \mapsto \mathcal{H}(X)$ を次のように定義する :

$$W(\delta, B) = \bigcup_{n=0}^N w_n(\delta, B), \delta \in \Delta, B \in \mathcal{H}(X). \quad (3.1)$$

任意の δ に対して、写像 W が縮小率 s の縮小写像ならば、 W のアトラクタ $A(\delta) \in \mathcal{H}(X)$ は δ について連続である.

この定理から IFS がパラメータによって連続であるならば、そのアトラクタもまた連続となることがわかる. したがって 2 つの IFS の縮小写像の係数を連続的なパラメータにより

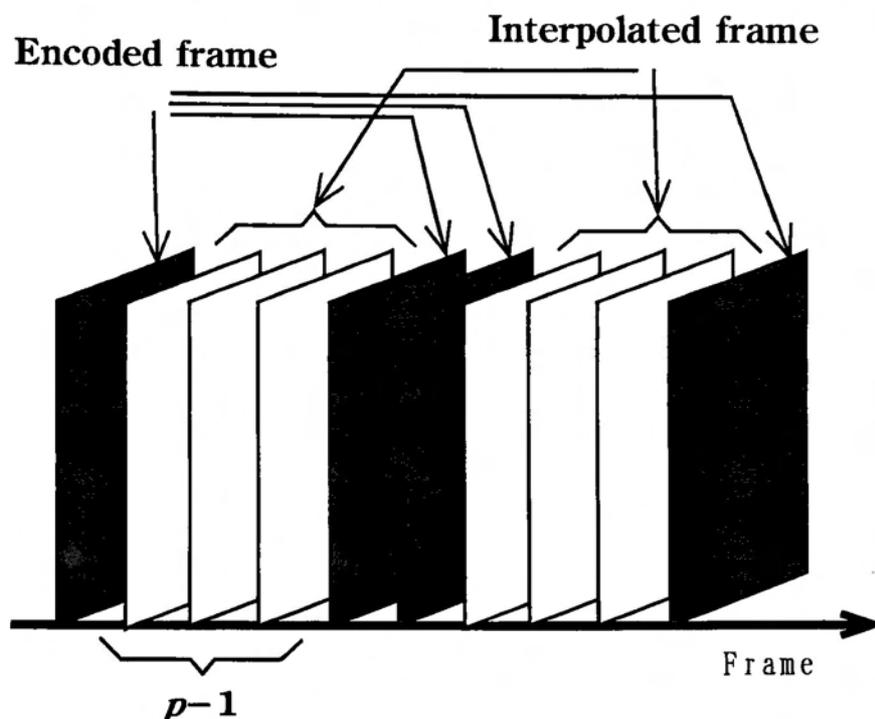


図 3.1: 符号化フレームと補間フレーム

連結して、もとの IFS を補間する IFS を構成することにより、そのアトラクタを補間するアトラクタが得られると考えられる。

一方、動画はシーンチェンジや新たなオブジェクトの発生などの場合を除いて、連続的に変化する。このことから本論文では IFS のアトラクタの連続性を動画のシーケンスの近似に応用できるものと考えて、検討を行った。

3.3 符号化および補間のアルゴリズム

IFS 符号化は画像のもつ部分自己相似性を削減する手法であり、符号化ブロック（レンジセル）を近似するドメインセルと、その縮小写像の組を符号化する [4]。スムーズな補間を行うためには、2 フレームにおいて空間的に同じ位置にあるレンジセルに対して、共通

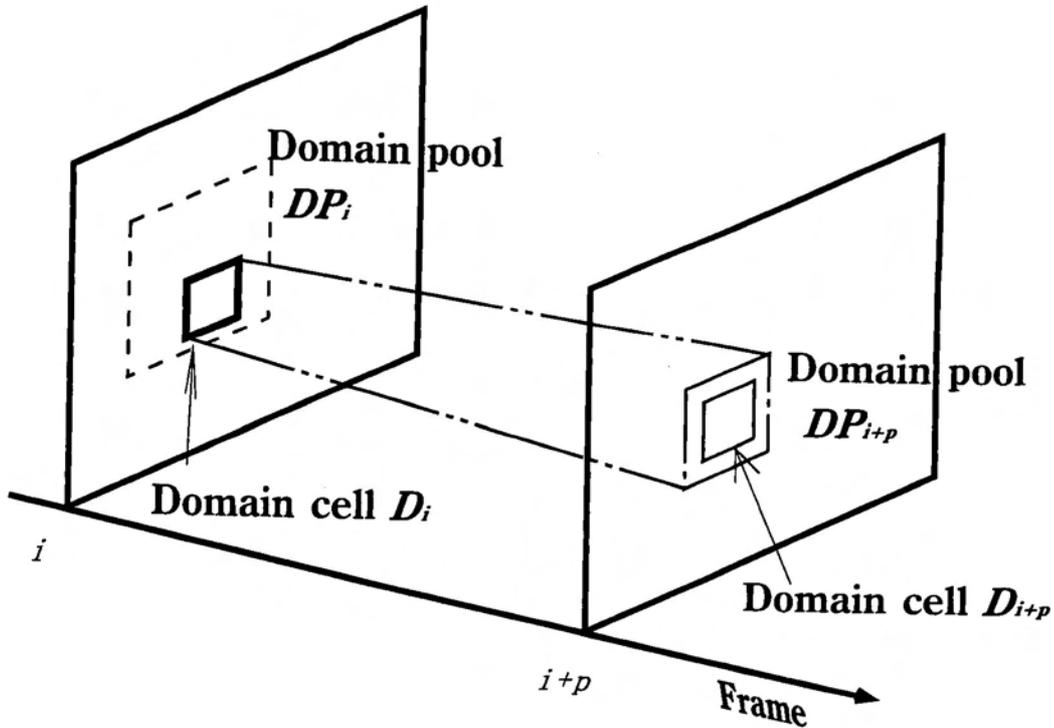


図 3.2: ドメインセルの探索

のオブジェクトを含むドメインセルにより近似する必要がある。そこで、 $i, i+p$ フレームにおいて、空間的に同じ位置にあるレンジセル R_i, R_{i+p} を同時に符号化する。

ただし本研究では、図 3.1 のようにフレームピッチを設定する。すなわち同時に符号化を行うフレームのピッチを p とし、それ以外の場合は 1 とする。

3.3.1 符号化法

- (1) レンジセルのブロックサイズを $B \times B$ 画素とする。ドメインセルの探索領域（ドメインプール） DP_i は、 R_i の領域を中心として、水平、垂直方向にそれぞれ $\pm dp_1$ 画素の範囲とする。
- (2) DP_i からブロックサイズ $2B \times 2B$ 画素のドメインセル D_i を取り出す。

- (3) $i+p$ フレームにおいて、上で取り出した D_i と空間的に同じ領域を中心として、水平、垂直方向にそれぞれ $\pm dp_2$ 画素の範囲とする。(図 3.2 参照)
- (4) DP_{i+p} からブロックサイズ $2B \times 2B$ 画素のドメインセル D_{i+p} を取り出す。
- (5) それぞれのドメインセルに関して、縮小写像を計算し、レンジセルとの近似誤差を計算する。縮小写像は、(2.9) 式、(2.10) 式を用いる。回転・反転については、 $\pi/4$ を単位とし、回転 8 通り、反転後回転 8 通りの合計 16 通りとする。

探索において、 D_i に関して、上の 16 種類の回転・反転をおこない、 D_{i+p} については D_i と同じ回転角と、それにもっとも近い 2 種類のインデックスの回転角について計算を行う。

但し、回転・反転の処理において、変換後の座標が整数とならない場合、その座標における輝度値は、その周囲の 4 画素の輝度値を用いて補間する [29]。変換後の非整数座標を (x, y) とする。これに最も近い、4 個の整数値の座標のうち、原点に近い方の座標を (i_P, j_P) とし、その座標における輝度値を I_{i_P, j_P} とすると、座標 (x, y) における輝度値 $d_{x, y}$ は、

$$d_{x, y} = \delta_x \delta_y I_{i_P, j_P} + (1 - \delta_x) \delta_y I_{i_P+1, j_P} + \delta_x (1 - \delta_y) I_{i_P, j_P+1} + (1 - \delta_x)(1 - \delta_y) I_{i_P+1, j_P+1} \quad (3.2)$$

$$\delta_x = 1.0 - (x - i_P) \quad (3.3)$$

$$\delta_y = 1.0 - (y - j_P) \quad (3.4)$$

となる。(3.3) 式、(3.4) 式は輝度値 I_{i_P, j_P} に対する重みを表す。

- (6) (2)–(5) の操作を、ドメインプール DP_i に属する、すべてのドメインセルに対しておこない、近似誤差が最小となる縮小写像、およびドメインセルを求める。

3.3.2 IFS 補間法

IFS の補間については、簡単のため、線形補間により行う。 i フレームの IFS を $\{w_{i, j} : j = 1, \dots, n\}$ とし、 $i, i+p$ フレーム間の補間を行うものとする。補間された縮小写像 $w_{i+p, j}$

は

$$w_{i+q,j} = \delta_q w_{i,j} + (1 - \delta_q) w_{i+p,j} \quad (3.5)$$

により求めることができる。ただし、式中の δ_q は重みのパラメータで、 $\delta_q = 1.0 - (p - q)/p$, ($1 \leq q \leq p - 1$) である。符号化された IFS のパラメータのそれぞれに対して、上式を適用する。

3.4 シミュレーション

原画像として、QCIF の動画像 “Susie”, “Foreman” の 1-20 フレームを用いる。これらのシーケンスの第 1 フレームを図 3.3 に示す。これらのシーケンスに対して符号化および補間を行う。符号化パラメータは $B = 4, p = 4, dp_1 = 3B, dp_2 = 2B$ とした。なお、本稿では補間された IFS の基本特性に関して検討を行うため、IFS のパラメータの量子化は行わない。

符号化および補間された IFS の復号特性を図 3.4 に示す。比較のために、全フレームを独立に符号化した IFS による復号特性も併せて図示している。図 3.4 から、全フレームを独立に符号化した場合と比較して、補間による復号画像の SNR が低いことが分かる。理由としては、本手法において、2 個のレンジセルを同時に符号化したことにより、近似精度が低下したことが考えられる。また、動きの大きい領域などで、補間された縮小写像が最適ではなかったことが考えられる。

復号画像を図 3.5, 図 3.6 に示す。図 3.5 (a), (b) はそれぞれ、画像 “Susie” の第 6 フレーム (符号化フレーム), 第 8 フレーム (補間フレーム) を示している。また、図 3.6 において、(a), (b) はそれぞれ、画像 “Foreman” の第 1 フレーム (符号化フレーム), 第 3 フレーム (補間フレーム) を示している。視覚的には符号化フレーム、および動きの小さい補間フレームにおいて良好であった。しかしながら、動きが大きい補間フレームにおいてぼやけた感じとなっており、十分とはいえなかった。特に画像 “Foreman” の 1 フレーム - 5 フレームにおいて、符号化フレームの直後にこのような著しい画質の劣化が見られた。理由としては、符号化された 2 フレーム間のレンジセルで動きが大きかったために、



(a)



(b)

図 3.3: 原画像 (a) Susie 1 フレーム, (b) Foreman 1 フレーム

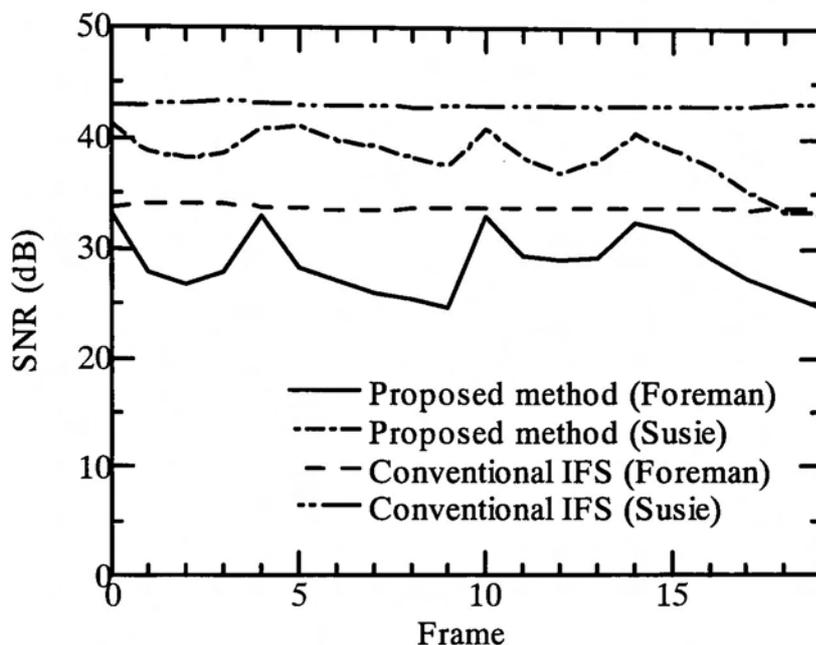


図 3.4: 復号特性

レンジセル間で共通のオブジェクトを含んでおらず、 $i+p$ フレームにおけるドメインプールが十分なドメインセルの候補を含んでいなかったことが考えられる。

提案法と全フレームを独立に符号化した場合のエントロピーを図 3.7 に示す。1 画素あたりのエントロピーは、符号化を行ったフレームにおいて、ドメインセルのレンジセルからの変位、スケーリング係数、輝度値シフト、回転のインデックスのエントロピーの総和を求め、それを 1 ブロック当たりの画素数で除した値とした。ただし、提案法において、一括して符号化を行った 2 フレームのうち、後のフレームの IFS コードについては、前のフレームのそれとの差分値のエントロピーを求めた。図 3.7 において、全体のエントロピーは 64.8% - 65.5% 削減されている。また符号化されたフレームにおいて、提案法の方がエントロピーが低くなっている。これは、ドメインセルの探索において、ドメインセルの位置と回転・反転のインデックスに関して、制限を設けたためと考えられる。以上のことから、本手法は情報圧縮に効果があると考えられる。



(a)



(b)

図 3.5: 復号画像 (Susie) (a) 第 6 フレーム (符号化フレーム, SNR 41.06 dB), (b) 第 8 フレーム (補間フレーム, SNR 38.33 dB)



(a)



(b)

図 3.6: 復号画像 (Foreman) (a) 第 1 フレーム (符号化フレーム, SNR 33.19 dB), (b) 第 3 フレーム (補間フレーム, SNR 26.76 dB)

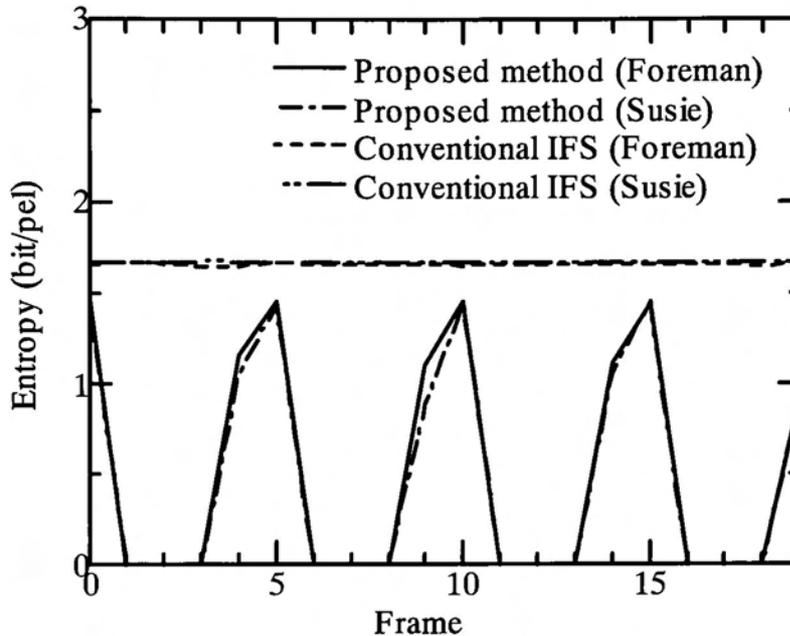
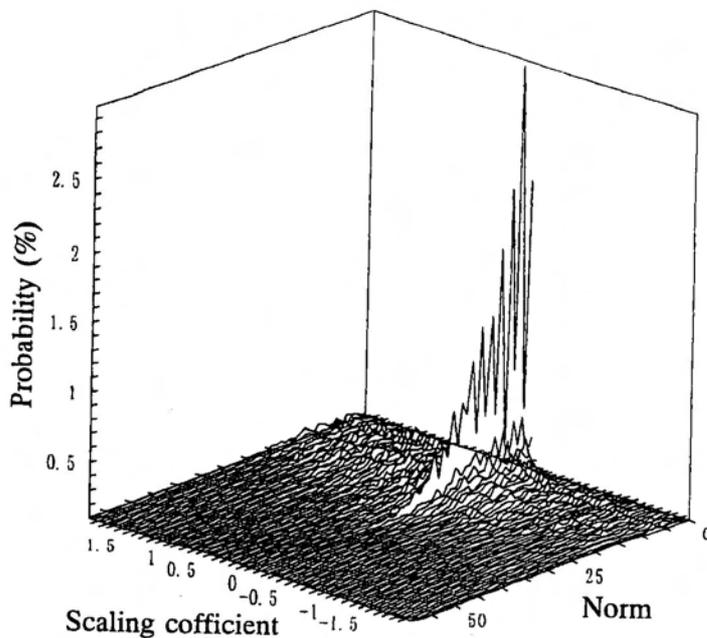


図 3.7: 符号化されたフレームのエントロピー

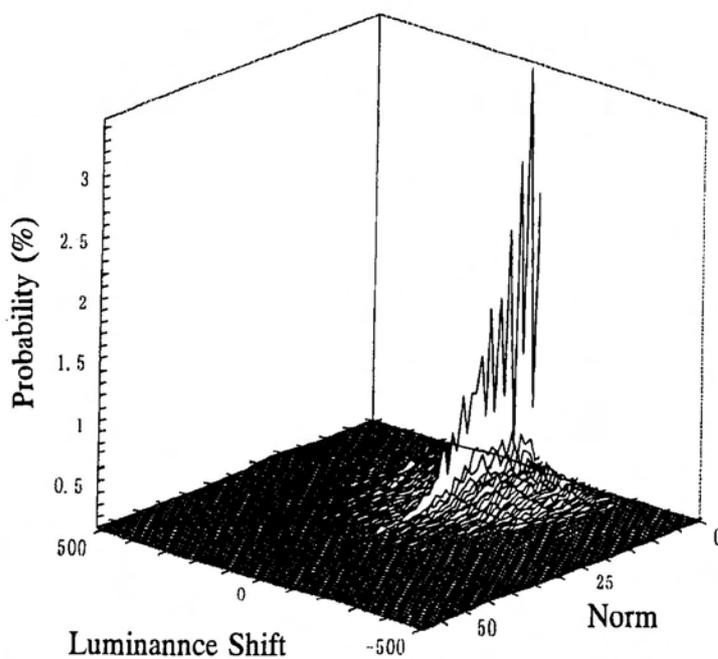
補間された IFS と全フレームを独立に符号化した IFS のパラメータの差について分布を求めたところ、図 3.8 のようになった。図は画像 “Susie” について示している。図 3.8 (a), (b) において、ノルムが増加するとピーク値は減少しているが、スケーリング係数の差、および輝度値シフトの差は 0 近傍に平均をもつ対称分布となっていることが分かる。また図 3.8 (c) において、スケーリング係数、輝度値シフトがともに 0 に近い領域でピークをもつことが分かる。このことから、補間された IFS と独立に符号化された IFS とで、ドメインセルの位置が異なっている場合でも、それぞれのドメインセルの曲面形状は近いものとなっていると考えられる。なお、画像 “Foreman” についても同様の傾向が見られた。

3.5 本章のまとめ

本章では、Barnsley が証明した、IFS の補間に関する定理を応用して、動画像のフレーム補間について検討を行った。連続する 2 フレームにおいて、空間的に同じ位置にあるレ

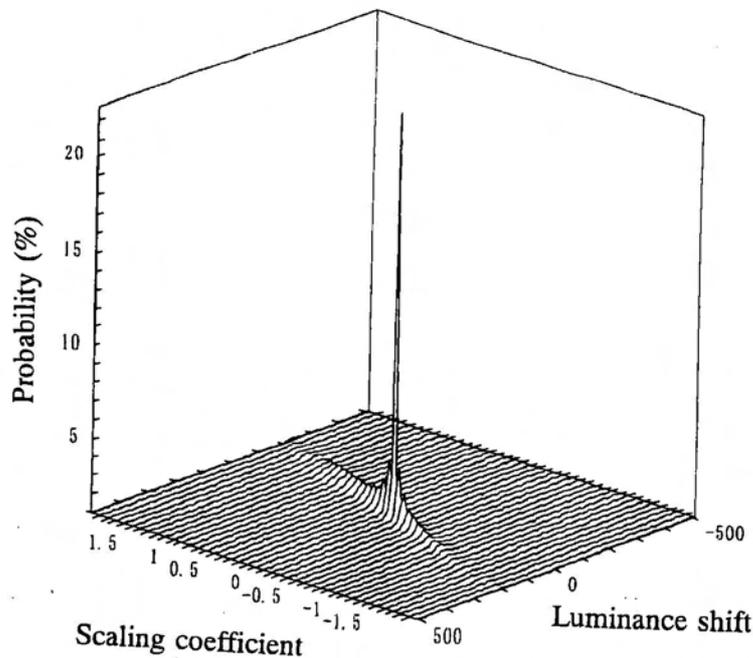


(a)



(b)

図 3.8: 統計的性質 (a) レンジセルからのドメインセルの変位の差のノルムとスケーリング係数の差, (b) レンジセルからのドメインセルの変位の差のノルムと輝度のシフトの差



(c)

図 3.8: 統計的性質 (c) スケーリング係数の差と輝度のシフトの差

レンジセルを一括して符号化した。IFS の補間を行うために、それぞれのレンジセルにおいて、ドメインセルが同一のオブジェクトを含む必要があった。そこで1 フレーム目において取り出したドメインセルの候補に対して、2 フレーム目のドメインプールを設定することにより、最適なドメインセルの組み合わせを探索する手法を提案した。符号化された2 フレームの IFS の縮小写像のパラメータを用いて、連続的に IFS を補間することにより、アトラクタの補間を行った。補間された IFS の復号特性、統計的性質、および符号化された IFS のエントロピーについて検討を行った。その結果、動きの小さい画像については、十分な画質をもっていることが分かった。動きの大きい画像については視覚的に大きく劣化しており、このような領域での符号化法の改良が必要であることが分かった。提案法と各フレームを独立に符号化した場合とを比較したところ、IFS コードのエントロピーが全体で、64.8% - 65.5% 削減されることが分かった。復号画像の SNR については、提案法

の方が若干低下していることが分かった。したがって本手法が、動画像の符号化において、符号量の低減に有効であると期待される。また統計的性質についても同様の比較を行ったところ、レンジセルからのドメインセルの変位に違いが見られたが、その他のパラメータについては大きな差はないことが分かった。

第 4 章

結 論

本研究において、IFS 符号化に注目し、動画像への適用を行った。IFS 符号化は、画像を自己相似集合とみなし、与えられた画像を近似する縮小写像と、その定義域の組の集合、すなわち IFS を求める手法である。その特徴としては、エッジなどの再現性がよいことと、再生時に任意の解像度で復号できることが挙げられる。IFS 符号化は、これまで静止画像に適用されてきたが、本研究では、この手法を動画像符号化に適用する手法について検討を行った。

第 2 章において、再帰反復関数系 (RIFS) を用いた動画像符号化法について検討を行った。まず、全てのレンジセルを独立に符号化する方法を提案した。各レンジセルを静止領域、動領域に分類し、最初のフレームは全ての領域を、それ以降のフレームでは、動領域のみ符号化対象とした。符号化を行うレンジセルをその構造に基づいて分類し、縮小写像を求め、符号化を行った。また、復号において、直前に復号されたフレームを用いることにより、反復回数の削減を行った。その結果、動きの小さい画像については最初のフレームのグループ以外を除いて、低ビットレートで符号化できた。しかし、動きの大きい画像については、3D-IFS に比べて、SNR が高かったが、ビットレートが上昇した。また数フレーム符号化を行うと、視覚的に目立つひずみが発生することが分かった。これは、それぞれのレンジセルを独立に符号化したことと、動領域、静止領域の分類において、コントラストの小さい動領域の検出ができなかったことが原因であることが分かった。復号において、反復回数を 7 回から 2 回に削減することができ、その有効性が確かめられた。

以上のことから、この手法を発展させ、画質の向上を目的とした RIFS 符号化法について検討した。ここではグループに属する各フレームにおいて、空間的に同じ位置にあるブロックをグループとして扱った。そのグループを静止領域に属するか、動領域の属するかを分類し、それぞれの場合において、縮小写像の探索法を変更する手法を提案した。また、静止領域、動領域の分類法も改良を行い、復号に関しては上の手法を用いた。その結果、上の手法において見られたひずみは検知されなくなった。また、3D-IFS により符号化した場合と比較して、視覚的に同程度の品質を維持しつつ、更にビットレートを削減することが出来ることを確認した。

第3章において、Barnsley が証明した、IFS の補間に関する定理を応用して、動画像のフレーム補間について検討を行った。滑らかに補間を行うために、連続する2フレームにおいて、空間的に同じ位置にあるレンジセルを一括して符号化した。符号化された2フレームの IFS の縮小写像のパラメータを用いて、連続的に IFS を補間することにより、アトラクタの補間を行った。補間された IFS の復号特性、統計的性質、および符号化された IFS のエントロピーについて検討を行った。その結果、各フレームを独立に符号化した場合と比較して、動きが小さい画像において、視覚的に大きな劣化を伴うことなく補間することができた。また、符号化フレームにおけるエントロピーが低減できた。統計的性質から、提案法により求めたドメインセルと、独立に符号化した場合のドメインセルは近い形状をもっていることが分かった。

今後の課題としては、第2章において、符号化ブロック数が大きく減少したときの画質の低下を防ぐ手法や、セルのグループ内の動きに対する追従性を向上させる手法の検討などがあげられる。また、第3章において、符号化アルゴリズム、および補間アルゴリズムの改良を行うとともに、得られた知見に基づいた符号化法について検討を行う必要がある。

IFS 符号化は、画像の新しいモデリングに基づいた符号化法であり、次世代符号化の候補の一つとして注目されている。現段階では、波形符号化と比較して、まだ発達の途上であり、様々な検討の余地があると考えられるが、本研究により得られた知見により、フラクタル符号化の低ビットレート化に寄与したものと、著者は考えている。

謝 辞

本研究を行うにあたり，終止熱心な御指導を賜りました九州工業大学工学部電気工学科太田諦二教授に心から感謝いたします。

また，本論文をまとめるにあたり，貴重なる御教示と御討論をいただいた九州工業大学工学部電気工学科 河口英二教授，九州工業大学工学部機械知能工学科 湯 晋一教授，九州工業大学工学部電気工学科 下村輝夫教授，西垣 敏教授に深謝いたします。

本研究において，シミュレーションに用いた動画像を御提供いただいた，早稲田大学理工学部の富永英義教授に感謝いたします。

参考文献

- [1] 相澤清晴, “講座：画像情報圧縮の手ほどき, (第12回) 新しい画像符号化”, テレビ誌, 44, 5, pp. 625–632, 1990.
- [2] B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman, 1982.
- [3] M. F. Barnsley, *Fractals Everywhere second edition*, Academic Press, 1993.
- [4] A. E. Jaquin, “Image Coding based on a Fractal Theory of Iterated Contractive Image Transformations”, *IEEE Trans. Image Process.* 1, pp.18-30, Jan. 1992.
- [5] K. U. Barthel, J. Schüttemeyer, T. Voyé, P. Noll, “A New Image Coding Technique unifying Fractal and Transform Coding”, *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, pp.112–116, Nov. 1994.
- [6] M. Monro, F. Dudbridge, “Fractal approximation of image blocks”, *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 3, pp. 485–488, Mar. 1992.
- [7] A. Bogdan, H. E. Meadows, “Kohonen neural network for image coding based on iteration transformation theory”, *Proceedings of SPIE Neural and Stochastic Methods in Image and Signal Processing*, 1766, pp. 425–436, Nov. 1994.
- [8] B. E. Mohlberg, G. de Jager. “Fast image domain fractal compression by DCT domain block matching”, 31, pp. 869–870, 1995.

- [9] 井田孝, 駄竹健志, “反復変換符号化による画像圧縮”, 第5回回路とシステム軽井沢ワークショップ, 21-22, pp. 137-142, 1992.
- [10] 中野勝彦, 中川匡弘, “ガウシアンピラミッドを利用した階層的 IFS 画像符号化”, 信学論 (A), **J78-A**, 7, pp. 856-863, Jul. 1995.
- [11] 川又政征, 長久真樹, 樋口龍雄, “多重解像度木探索による反復変換理論符号化の高速符号化アルゴリズム”, 信学論 (A), **J78-A**, 2, pp. 253-260, Feb. 1995.
- [12] M. S. Lazer and L. T. Bruton, “Fractal block coding of digital video”, IEEE Trans. Circuits Syst. for video technology, 4, pp. 297-308, Jun. 1994.
- [13] 上繁義史, 太田諦二, “Recurrent IFS による動画像符号化に関する一検討”, 平5九州連大, 821, Sep. 1995.
- [14] 上繁義史, 太田諦二, “Recurrent IFS による動画像符号化に関する研究”, PCSJ95 4-2, Oct. 1995.
- [15] Y. Ueshige and T. Ohta, “A coding using recurrent iterated function systems for moving pictures”, Proceedings of International Workshop on Coding Techniques for Very Low Bit-rate Video, pp.53 - 56, Nov. 1995.
- [16] 原島博, “講座: 画像情報圧縮の手ほどき, (第1回) 画像情報圧縮の考え方”, テレビ誌, 43, 6, pp. 603-612, 1989.
- [17] B. Ramamuruthi and A. Gersho, “Classified vector quantization images,” IEEE Trans. Commun. , 34, pp. 1105-1115, Nov. 1986.
- [18] Y. Fisher, Fractal Image Compression, Springer-Verlag, New York, 1994.
- [19] 上繁義史, 太田諦二, “Recurrent IFS を応用した動画像符号化”, PCSJ96, P-1.5, Oct. 1996.

- [20] 上繁義史, 太田諦二, “Recurrent IFS の動画像符号化への応用”, 信学論 (B-I), **J81-B-I**, 1, pp. 10–18, Jan. 1998.
- [21] Y. Linde, A. Buzo and R. Gray, “An algorithm for vector quantizer design”, IEEE Trans. Commun. **28**, 1, pp. 84–95, Jan. 1980.
- [22] 上繁義史, 太田諦二, “IFS を用いたフレーム補間に関する一検討”, 信学技報, IE97-35, pp. 75–79, Jul. 1997.
- [23] 上繁義史, 太田諦二, “IFS による動画像のフレーム補間に関する一検討”, 1997 信学ソ大, D11-35, p. 127, Sep. 1997.
- [24] 上繁義史, 太田諦二, “IFS に基づくフレーム補間に関する研究”, PCSJ97, P-3.1, Oct. 1997.
- [25] 上繁義史, 太田諦二, “IFS を用いたフレーム補間”, 信学論 (D-II) で印刷中.
- [26] T. G. Campbell, M. Ohta, “Video coding at 8 kb/s using multi-resolution warping prediction”, PCSJ94, 5-5, pp. 79–80, Oct. 1994.
- [27] 青野友子, 堅田裕之, 草尾寛, “超低ビットレート画像符号化における駒落とし画像の画質改善の一検討”, PCSJ94, 7-1, pp. 119–120, Oct. 1994.
- [28] 宮本義弘, 太田睦, “Warping 予測を用いた低遅延なフレーム外挿補間方式”, 1995 信学総大, D-320, p.46, Mar. 1995.
- [29] 如澤裕尚, “アフィン変換を用いた動き補償に関する研究”, 信学技報, IE94-36, pp. 1–8, Jul. 1994.