動き補償フレーム間・フレーム内適応予測と エントロピー符号化

正会員 古 閑 敏 夫[†], 正会員 飯 沼 一 元[†]
飯 島 征 彦[†], 丹 羽 邦 彦[†]

あらまし 動き補償フレーム間予測は、静止画はもちろん動画像に対しても符号化能率が非常に高いが、実用化装置に適用する場合には、動き補償範囲を超える速い動きや画像の内容が大幅に変化するシーンチェンジにも対応できるように工夫が必要である。検討の結果、周辺の符号化済みの画素についての情報をもとに、画素単位で動き補償フレーム間予測とフレーム内予測のいずれか一方を適応的に選択する。この2予測を組合せた時に期待できる最大の符号化能率を実現する適応予測が得られた。また、この適応予測より発生する予測誤差と動ベクトルの能率の良い符号への変換もまた重要であるが、ゼロが連続する時にはその長さ（ラン長）を、ゼロでない時には個々の値を不等長符号にて表現することにより、簡潔であるにもかかわらず理論的限界にほぼ等しい符号変換が可能となった。

1. ま え が き

当初、4M から始まったテレビ信号の符号化方式の研究開発は、集積化技術の進歩とともにまずはDPCM（フレーム内、フレーム間）へ、さらにメモリーの高速化、大容量化が進むにつれ、動画像信号内の動きの速さと方向を用いる動き補償フレーム間予測へと発展してきた¹⁾。

フレーム間あるいはフィールド間予測については、テレビ会議、教育ないし放送用のカラーテレビ信号を6～30 Mb/sで伝送することを当初の目標として実用化装置の開発が進められた^{2)～9)}。フレーム間予測はその原理からして、動きのある部分に対する符号化能率が一般に低下するが、これを克服するために動きの速さ、方向に適応した予測を行う動き補償フレーム間予測が内外の各所で研究された^{10)～17)}。とくに、動きの検出、動き補償フレーム間予測をブロック単位で行う、いわゆるブロックマッチング型の動き補償については、テレビ会議用の実用化装置が試作あるいは製品化されるに至った^{18)～21)}。

また、フレーム間予測の欠点を補う他の方法として、動きに能率が影響されないフレーム内予測を適応的に組合せる手法の検討もまた鋭意進められ、能率の高い方式が開発されてきた^{7)～9)22)～27)}。

動き補償フレーム間予測は、動きの速さが動き補償範囲内であれば非常に符号化能率が高いが、補償範囲を超える速い動きに対しては動き補償の効果が大幅に低下する。したがって、動き補償フレーム間予測とフレーム内予測とをうまく組合せて符号化能率の低下を防止する必要がある。

また、ブロックマッチング型の動き補償を行うと、各ブロックについて1個検出される動きの速さと方向を表す動ベクトルと予測誤差を、できるだけ少ない符号量で表現する符号変換もまた重要である^{27)～32)}。動画像を伝送する回線の速度が低いほど、この符号変換能率の影響が大きい。なお、能率は極めて重要な要素であるが、符号化装置実現の観点から見ると、設計の容易さに直結する方式の簡潔さもまた同様に重要である。

本論文においては、このことを念頭において開発された、主としてテレビ会議画像のように比較的動きの少ない画像を対象とする動き補償を適用した適応予測方式と、これによって大幅に冗長度が低減された信号の符号変換方法について、それぞれ原理と能率の測定

[†] 日本電気株式会社

“Motion-Compensated Adaptive Intra-Interframe Prediction and Entropy Coding” by Toshio Koga, Kazumoto Iinuma, Yukihiko Iijima and Kunihiko Niwa (NEC Corporation, Tokyo)

とがわかった。

すなわち $\tilde{S}_x$ は、

$$\tilde{S}_x = g(S_a, S_b) = S_a \cdot S_b$$

で定めることができる。

このように本方式では、参照画素は符号化済みで、かつ参照テーブル $g(\quad)$ もこの論理式で定義され、送受信側のいずれでも同一の論理演算が可能であるため、この選択信号 $\tilde{S}_x$ を伝送する必要はない。

2.2 予測能率の比較

a, b の 2 画素を参照する本適応予測 (MC-ADPT) の予測能率について、動き補償フレーム間予測 (MC)、動き補償フレーム間予測の予測誤差に対してさらにフレーム内予測を行う動き補償複合差分 (MC-CD)⁵⁾、のよく知られた他の方式と比較する。参考のため、本適応予測における 2 予測のうち、予測誤差が小であった方を常に選ぶ方式を改善限界として示す。ここでは選択情報は除外されている。評価の尺度としては、予測誤差および動ベクトルのそれぞれの分布より計算されるエントロピーの和 (ビット/画素: b/p) を用いる。

動き補償範囲を ± 15 画素/フレーム (水平)、 ± 7 ライン/フレーム (垂直) とした時に、①動きの速さが補償範囲内の典型的なテレビ会議画像、および②この範囲を超える画像、についての結果を図 3(a) に示す。補償範囲内の動き①については、もともと動き補償フレーム間予測で充分であり、4 方式の間に大きな差はないが、細かく見ると本方式が改善限界に最も近い。

この種の画像については動き補償が充分効果的なため、フレーム内予測の不必要な使用による予測能率の

低下を起こさないことがむしろ重要である。

動き補償範囲を超える画像②については、フレーム内予測を利用したことの影響が歴然としている。MC による発生情報量を 100 とする時、MC-CD では 70 で 30% 減、本方式 MC-ADPT では 38% 減であった。この結果は、フレーム内予測を適応的に用いる方が、固定的に用いるよりも良い予測能率が得られることを示している。

テレビ会議でもよくあると思われる動画像と文書の間でのカメラの切り換えを想定したシーンチェンジ③の場合には、図 3(b) に示すように、本方式は MC の約 1/2 であった。MC-CD と本方式の間に約 20% もの能率差が出たのは、この時に使用した文書はほとんど文字からなっており、輪郭部分が多かったためと思われる。

ここで、本適応予測と改善限界とを比較すると、①～③の 3 グループの画像についてのエントロピーの差はそれぞれ 0.066, 0.12, 0.24 b/p であった。改善限界を示した方式においては実際には選択した予測を表す情報を符号化せねばならないが、これを 1 次元ランレングス符号化した時のエントロピーは、それぞれ 0.084, 0.18, 0.25 b/p で、いずれの場合も上述のエントロピー差よりも大きい。この選択情報のより能率の良い表現方法は他にもあるとしても、本適応予測がほとんど限界に近い符号化能率を実現していると考えることができる。

3. 高能率符号化変換—エントロピー符号化

テレビ信号のデータ圧縮では、予測符号化や直交変

図 3 予測能率比較

Efficiency comparison for several predictions.

(a) Motion within or beyond motion compensation range, (b) Scene change pictures.

換符号化などの冗長度低減後に量子化を行うことが多く、これが最も圧縮に貢献する。しかしながら、1 b/p よりもはるかに低い情報量での符号化の際とはくに、ゼロとなった信号の符号変換が非常に重要になる。以下に新しい符号変換方法について提案する。

3.1 予測誤差のエントロピー符号化方式

まず符号変換の対象となる予測誤差の統計的性質を調べ、それに適した符号変換方法の検討を行う。

(1) エントロピー符号化アルゴリズム

図4(a)に動き補償フレーム間・フレーム内適応予測方式を用いた時のテレビ会議信号に対する予測誤差を、微小振幅に対するステップ幅が3/256の6ビットの特性で量子化した時の出力レベル番号とその発生頻度、図4(b)にゼロとなった予測誤差が連続する長さ(ラン長)についての発生頻度をそれぞれ示す。この例では、予測誤差の97%がゼロであり、その平均のラン長は69.90画素で相当長い。予測誤差の発生状態には空間的な相関があるので、通常のテレビ走査に従うよりも、小領域(ブロック)単位に走査を集中して行った方がさらにラン長が長くなると考えられる。すなわち、画面を m 画素 $\times$ n ラインのブロックに区切り、あるブロック内でまず走査を終了したら次のブロックについてまたこれを繰り返す。 $m=n=7$ とした時には平均ラン長は約77、すなわち約10%長くなった。この走査の変更により、ラン分布より計算されたエントロピーは0.106 b/p から0.083 b/p へと21%減少した。この効果は m, n の値にはあまり左右されない。ゼロでない予測誤差すなわち有意画素は統計的には図4(a)の例のように発生頻度は非常に低く、符

号変換の最適化の効果は小さいが、瞬時的あるいは画像の一部のみについては、かなり高い頻度で発生することが考えられる。これに対する符号変換にはハフマン符号化を用いるのが適当であろう。

以上より、空間的相関を利用できるように走査の方法を2次元的にを行い、得られたゼロなる予測誤差のランにはランレングス符号化を、有意画素にはハフマン符号化を適用すればよいと考えられる。

ランレングス符号化とハフマン符号化の組合せの例を示す。図5において画素時刻1~14のうち、3~6, 8, 10~12において予測誤差がゼロであったとする。この時、画素時刻 t における有意画素に対する出力符号 V^t , l (画素)なる長さのランを表す符号を $R(l)$ とすると、図5に示された予測誤差の符号変換結果は、 $V^1, V^2, R(4), V^7, R(1), V^9, R(3), V^{13}, V^{14}$ となる。

この符号変換方法の能率について次に調べる。この方法によるエントロピー(H_B)は、 $R(l)$ と V^t の各分布を連結した分布のエントロピーを計算することにより求められる。比較のため、ゼロを含む予測誤差の振幅分布より計算されるエントロピー(H_A)、および{有意画素の位置を示すのに必要な2次元マルコフエントロピー(7画素参照)}+(有意画素の振巾分布により計算されるエントロピー $\times$ 有意画素の発生確率)で

V: ゼロでない予測誤差の振幅を示す符号
R: ゼロなる予測誤差のランレングス符号

図5 予測誤差の符号変換例

Code conversion example for prediction error.

図4 予測誤差の統計的性質

Prediction error statistics.

(a) Prediction error distribution, (b) Run-length distribution.

図6 エントロピー符号化方式の能率比較

Performance comparison for entropy coding methods.

求められるエントロピー (H_c) も併記する. この H_c は, エントロピー値の下限を与えると考えられる.

前述のテレビ会議画像に対して測定した結果を図 6 に示す. $H_A=0.223$, $H_B=0.166$, $H_C=0.150$ (b/p) で, H_A は下限である H_c よりも 50% 増であるが, 本方式はわずか 10% 増に過ぎず, 簡単な方法の割に非常に能率が良いことがわかる.

(2) 符号割当の例

具体的な符号を求めるには, ラン長 l が,

$$1 \leq l \leq L$$

有意画素に対する量子化レベル番号 i (負振幅に対しては $i < 0$) が,

$$1 \leq |i| \leq M$$

である時, $R(l)$ と V_i の各分布を連結して得られる分布よりハフマン符号を求めればよい³¹⁾. ただし, 実際にはハードウェアの設計を容易にするために, 最大符号長の制限を行う³²⁾. 以下に一例を示す.

57 レベルの量子化 (6 ビット) すなわち $M=28$ の場合に求められた有意画素に対する符号について, その画素当りの長さを図 7(a) の右半分に示す. 最大符号

(a) 予測誤差の符号長

MK 番号	符号長
1	13
2	14
3	14
4~7	15
8~15	16
16~19	16
20~34	18
35~49	19
50~56	19

(Terminating 符号の 6 ビットを含む)

(b) Make-up 符号

(c) ラン長の平均符号長

図 7 予測誤差と符号長

Relationship between prediction error and code length.

(a) Code length for prediction error, (b) Make-up codes, (c) Average code length for runs.

長は 10 ビットに制限されている. ランに対しては 4~12 ビットが割当てられている. 図 7(a) の左半分にラン長が 1~20 の場合の画素あたりの符号長を示す. ラン長が 1 の場合には, 孤立したランに当り発生頻度が少ないため, 比較的長い符号となっている. なお, 64 画素を超えるランについては, ファクシミリ信号の圧縮に用いられているモディファイドハフマン (MH) 符号化にならって, 64 の倍数となるラン長を表す Make-up 符号の考え方をを用いている²⁹⁾. すなわち, 図 7(b) の MK 番号 j ($j=1 \sim 56$) を用いるとラン長 R は,

$$R=64 \times j + Y + 1 \quad (0 \leq Y \leq 63)$$

で与えられる. ここで, Y が 64 未満のランを表す Terminating 符号に相当しており図 7(b) の符号長の中の低位 6 ビットを占めている. なお, 図 7(c) に, この図 7(b) の符号長も含めた時のランの画素あたりの符号長を示す.

このランレングス符号を用いて実際のランを符号化すると, ラン長分布から計算したエントロピー値より情報量は 7% 増加しただけであった.

(3) 等長-不等長符号変換

有意画素を表すのに, 図 7(a) に示したように 2~10 ビットの符号が用いられるが, 大振幅誤差が多量に発生する場合には, 長い符号が頻繁に使用されることになる. 6 ビットの量子化が適用されている場合には, 6 ビットを超える不等長符号が使用されると符号化能率のうえからは無駄をしていることになる. この時には当然 6 ビットの等長符号を用いた方が効率が良い. すなわち適応的に等長符号と不等長符号を使い

(a) 発生符号例

(b) 等長-不等長 符号変換例

図 8 等長-不等長符号変換

Fixed-variable word-length codes substitution example.

(a) Generated codes, (b) Code substitution.

図9 等長-不等長切換による符号減少
Information rate reduction by the code substitution.

図10 等長-不等長変換適用時のハフマン符号(図7)の符号化能率
Coding performance for Huffman codes (Fig. 7) in conjunction with the code substitution.

分けるとよい。図8に等長-不等長符号の切換論理を示す。図8(a)には予測誤差をすべて不等長符号($V_2 \sim V_{10}$: 添字は符号長を示す)で表現した例を示す。図8(b)には切換閾値を8ビットとし、8ビット以上の不等長符号に相当する誤差が発生すると次の画素時刻では等長符号Fが、逆に8ビット未満であれば次は不等長符号が用いられる場合の例を示す。この等長-不等長の遷移は、必ず前画素の符号化に用いられた符号長を用いて実行されるため、とくに遷移情報を送る必要はない。

図9に激しい動きを含む画像に対して等長-不等長符号変換を適用した時の符号化効率改善の測定結果を示す。横軸にはゼロ、非ゼロをいっしょにした予測誤差分布から求めたエントロピー(H_A)をとっているが、大体動きの大きさあるいは激しさに対応すると考えてもよい。3~4 b/pのように多量の情報が発生している場合には、長い符号が使用される頻度が高いため、等長-不等長の切換えの効果は非常に大きく、最大で約10%の改善となった。動きが少ない時などのように、情報量の発生が少ない時には当然長い符号の使用頻度は低く、等長-不等長の切換えの効果は期待

図11 エントロピー符号化における遷移
Code transition in the entropy coding.

できない。1.5 b/p 近傍ではその兆候が見える。

図7(a)に示した不等長符号に対しての等長-不等長変換を適用した時の効率を図10に示す。この変換を行った結果、エントロピー(H_A)と比較して大体5%増以内に抑えられており、効果が大きいことがわかる。また切換原理から明らかなように、この等長-不等長切換を用いると最悪ケースでも2画素時間に10+6=16ビットの符号しか発生せず、ハードウェアの簡易化に役立つ。

(4) 符号化手順

以上の検討を総合すると、有意画素に対する不等長符号化および等長-不等長符号変換、ゼロなる予測誤差に対するランレングス符号化を結合した符号変換方法が適当と考えられる。その符号化における遷移図を図11に示す。

図11において、 V_i , F_i はそれぞれ*i*番目の量子化出力(図7(a)参照)に対する不等長・等長符号を表す。また、等長-不等長の遷移が起る閾値を低めに選ぶと遷移が頻繁になり、必要以上に等長符号の使用頻度が増加することになり効率の低下をきたす。実験によれば、この遷移は8ビットくらいで起るのが効率のうえから好ましいので、図8に例示したように8ビットを遷移のための閾値とする。したがって、等長-不等長の遷移は V_4 あるいは F_4 を超えるか否かで定まる。予測誤差がゼロの時にはランレングス符号化に遷移するが、ランが終了すると不等長符号化に戻る。

動き補償が効果的に働いて予測がよく当たっている時には、有意画素は比較的少ないので不等長符号化とランレングス符号化との間の遷移が主となる。反対に、動き補償があまり当たらない場合には予測誤差振幅も大きく、かつ集中して発生するようになり、等長-不等長の遷移が多くなる。

テレビ会議画像の符号化では、もともと動きが比較的少なく、発生情報量が少ないので、通常は等長-不等長変換の効果は小さい。しかし、動き補償があまり効果的でない場合などに、前述の動き補償フレーム間・フレーム内適応予測とともにその効果が現れることが期待される。

図 12 差分ベクトルの統計的性質
Differential motion vector statistics.
(a) Differential vector distribution, (b) Run-length distribution for zero differential vectors.

3.2 動ベクトルのエントロピー符号化方式

伝送される情報量のうち、動ベクトル情報が占める割合は大幅に変動し、伝送速度が 1.5 Mb/s の場合でも 40% 程度に達することもある。したがって、動ベクトルの効率良い符号化もまた重要である。

(1) 動ベクトルのエントロピー符号化方式

カメラのパンニングあるいはクローズアップされた比較的平坦な画柄の被写体が一方向に動く場合には、画面内の広い範囲にわたって同じ動ベクトルが発生している。したがって、隣接する動ベクトル間で差分をとった結果 (差分ベクトル) に対して符号化を行うと、有利となる。直前のブロック、真上のブロック、前フィールド内のブロックなどの動ベクトルのいずれと差をとってもほとんど違いがないため、直前のブロックの動ベクトルとの差を符号化するのが最も簡単である。これは動ベクトルの前値 DPCM に相当する。この差分ベクトルの統計的性質を図 12(a)(b) に示す。図 12(a) は差分ベクトルの絶対値について頻度分布を示している。差分がゼロの確率が 83.1% となっているが、それ以外については明らかに不等長符号化に適した分布をしている。図 12(b) は、この 83.1% を占めるゼロとなった差分ベクトルの連続する長さ (ラン長) の分布を示すが、この分布でもランは比較적으로長く (平均的ラン長 = 13.3 ブロック)、ランレングス符号化に適している。

この結果より、差分ベクトルに対して予測誤差の場合と同じエントロピー符号化方式を適用するのが有利と考えられる。

(2) 符号割当の例

(a) ゼロでない差分ベクトルの符号長

(b) ゼロなる差分ベクトルのラン長と符号長

図 13 差分ベクトルの符号長
Code length for differential vectors.

(a) Code-length for non-zero differential vectors, (b) Code length for run-length coded zero differential vectors.

図 12(a) に示されているように、差分ベクトルの絶対値が大きくなるにつれ、その発生頻度は指数関数的に減少している。したがって、この絶対値の大きさと不等長符号の長さを対応づける。差分ベクトルの x , y 各成分 (ΔV_x , ΔV_y) について対応する符号長の例を図 13(a) に示す。 $\Delta V_x \geq 0$, $\Delta V_y \geq 0$ についてのみ示しているが、各々負の場合も各符号の最後の 2 ビットを x , y 各成分の正負の区別に用いるので、それ以外の符号部分は同一である。

ゼロなる差分ベクトルについては、図 13(b) に示す符号長によるランレングス符号化を適用する。ただし、この差分ベクトルは各ブロックに 1 個しか発生しないことと、この最大ラン長を画面内の水平方向でのブロック数に制限しているため、ブロックをよほど小さくとらない限り、予測誤差の符号化の時のように長いランにはならず、Make-up 符号は必要でない。

3.3 その他の付加情報の符号変換

低ビットレートで動画像を伝送する場合には、画像内容による情報の発生とは別に、同期信号や符号化制御に関するパラメータで受信側に伝える必要があるものなど、固定的符号量でもって符号化される情報 (固定情報) も無視できない。 N ライン毎に水平同期信号、符号化モード制御情報はそれぞれ 2 バイト、1 バイト程度で符号変換されることが多く、この場合の符

号量 I は 525 本/60 Hz 系ではフレーム当り、

$$I = \frac{525}{N} \times 3 \times 8 \text{ (ビット/フレーム)}$$

となる。 $N=8$ 、すなわち 8 ライン単位の符号化モード制御を仮定すると、 $I=1575$ ビット/フレームで、1 秒当りでは 47.25 kb/s にもなり、圧縮された音声 (32~64 kb/s) とほぼ同等の情報量である。この情報は必要不可欠なものであるが、同一状態が繰り返して出現する場合には、繰り返し回数を符号化すれば逐一符号化する必要はない。この状態は、たとえばフィールド繰り返しや符号化停止 (ストップモード) の場合には必ず出現する。また、静止画像入力に対しても起こり得る。

このような固定情報の低減化は、たとえば数 100 kb/s などの、動画像通信用としては非常に低い伝送速度が使用される場合に、特にその効果が現れる。

4. む す び

テレビ信号に対し、動き補償フレーム間予測とフレーム内予測を画素単位で適応的に選択する適応予測方式と、これより出力される動ベクトル、予測誤差のエントロピー符号化方式について提案し、その能率について評価した。その結果、本適応予測は、この 2 種予測を組合せて得られる最高の能率を達成できる方式であることを確認した。

また、動ベクトル、予測誤差の符号変換方式として、時系列に沿って逐次変換する簡潔なアルゴリズムに基づく新しいエントロピー符号化を適用した。すなわち、予測誤差の符号変換について、有意画素に対しては不等長符号化、その位置情報に対しては 2 次元マルコフ過程に基づく符号化、の限界と考えられる能率を与える組合せと比較しても、ほぼ同等の高い符号化能率を実現した。ややもすれば複雑になりがちな予測誤差や動ベクトルの符号変換を簡潔にしたことは、符号化装置実現の面から見て、高い符号化能率の実現と比較しても同等程度の重要な意味を持っている。

本適応予測方式では、動き補償の効果が低下した時には実効的に前値予測が適用される。前値予測は簡単ではあるが、フレーム内相関の最大限利用という観点から見るとまだ充分とはいえない。

動き補償がその効果を充分発揮できないような画像に対しては、フレーム内相関を用いて符号化せざるを得ないが、このフレーム内相関の最大限利用が現在残された最も重要な課題であると思われる。今後更なる研究の推進が必要である。

本研究の遂行にあたり、方式のコンピュータシミュ

レーションに多大な尽力をいただいた当社研究開発技術本部 平野昭氏に深謝する。また、日頃御指導いただく伝送・端末グループ 金子取締役、C & C システム研究所 加藤所長、研究開発技術本部 石黒本部長代理、伝送通信事業部第二開発部 日高部長に深謝する。

(昭和 60 年 3 月 20 日受付、昭和 60 年 4 月 22 日再受付)

【参 考 文 献】

- 1) テレビジョン学会編：“デジタル伝送”，テレビジョン画像工学ハンドブック，オーム社，pp. 300-312 (1980)
- 2) H. Kaneko and T. Ishiguro: “Digital Television Transmission Using Bandwidth Compression Techniques”, IEEE Commun. Mag., pp. 14-22 (July, 1980)
- 3) T. Ishiguro, et al.: “NETEC System: Interframe Encoder for NTSC Color Television Signals”, Proc. 3rd Int. Conf. Digital Satellite Commun. (Kyoto), pp. 309-314 (Nov., 1975)
- 4) K. Iinuma, et al.: “Interframe Coding of 4-MHz Color Television Signals”, IEEE Trans., COM-23, 12, pp. 1461-1466 (Dec., 1975)
- 5) H. Yasuda, et al.: “Transmitting 4-MHz TV Signals by Combinational Difference Coding”, IEEE Trans., COM-25, 5 (May, 1977)
- 6) T. Ishiguro, et al.: “Composite Interframe Coding of NTSC Color Television Signals”, Proc. Nat. Telecommun. Conf. (Dallas, TX), pp. 6.4.1-6.4.5 (Nov., 1976)
- 7) Y. Hatori, H. Murakami and H. Yamamoto: “30 Mbits/s Codec for NTSC-CTV by Interfield and Intrafield Adaptive Prediction”, Proc. Int. Conf. Commun. (Boston, MA), pp. 23.6.1-23.6.5 (June, 1979)
- 8) T. Koga, Y. Iijima, K. Iinuma and T. Ishiguro: “Statistical Analysis of NETEC-22 H System Performance”, Proc. Int. Conf. Commun. (Boston, MA), pp. 23.7.1-23.7.5 (June, 1979)
- 9) T. Koga, Y. Iijima, K. Iinuma and T. Ishiguro: “Statistical Performance Analysis of an Interframe Encoder for Broadcast Television Signals”, IEEE Trans., COM-29, 12, pp. 1868-1876 (Dec., 1981)
- 10) T. Ishiguro and K. Iinuma: “Television Bandwidth Compression Transmission by Motion-compensated Interframe Coding”, IEEE Commun. Mag., p. 24-30 (Nov., 1982)
- 11) 瀧, 羽鳥, 田中: “動きに追従するフレーム間符号化”, 昭 49 信学大全, p. 1263 (1973)
- 12) A. N. Netravali and J. D. Robbins: “Motion Compensated Television Coding: Part-I”, Bell Syst. Tech. J., 58, pp. 629-668 (Mar., 1979)
- 13) 二宮: “フレーム間符号化における動き補正”, 信学技報, IE 78-6 (May, 1978)
- 14) 古閑, 平野, 大木, 飯沼: “会議テレビ信号の動き補償フレーム間符号化”, 信学技報, IE 81-54 (July, 1981)
- 15) T. Koga, et al.: “Motion-compensated Interframe Coding for Videoconferencing”, Proc. Nat. Telecommun. Conf. (New Orleans, LA), pp. G5.3.1-G5.3.5 (Nov., 1981)
- 16) 古閑, 平野: “動き補償フレーム間符号化における最適予測関数の検出”, テレビ大全, pp. 151-152 (1982)
- 17) 平野, 古閑: “会議テレビ信号の動き補償フレーム間符号化方式の基本設計”, 信学技報, IE 82-47, pp. 55-61 (July, 1982)
- 18) T. Koga, et al.: “A 1.5 Mb/s Interframe Codec with Motion Compensation”, Proc. Int. Conf. Commun. (Boston, MA), pp. D8.7.1-D8.7.5 (June, 1983)

- 19) 古閑, 飯沼, 飯島, 津金, 大木, 西脇: “動き補償を用いたテレビ会議用符号化装置——NETEC-X 1 MC”, テレビ学技報, ICS 66-3 (Apr., 1984)
- 20) 黒田, 武川: “テレビ会議用フレーム間符号化装置”, テレビ学技報, ICS 66-4 (Apr., 1984)
- 21) K. Iinuma, T. Koga, Y. Iijima and A. Tomozawa: “A 1.5 Mb/s Full Motion Videoconference System”, Proc. 6th Int. Conf. Digital Satellite Commun. (Phoenix, AZ), pp. VII-A-25~VII-A-30 (Sept., 1983)
- 22) T. Koga, A. Hirano, and K. Iinuma: “Entropy Measurements for an Adaptive Interframe Coding of Composite NTSC Color TV Signals”, Proc. Picture Coding Symp., pp. 133-134 (Aug., 1977)
- 23) 古閑, 飯沼: “テレビ信号のフレーム間・フレーム内適応予測符号化の解析”, 信学技報, CS 79-175 (Nov., 1979)
- 24) 古閑, 飯沼: “テレビ信号のフレーム間・フレーム内適応予測符号化の検討”, 信学技報, IE 80-58 (July, 1980)
- 25) N. Suzuki, K. Iinuma and T. Ishiguro: “Information Preserving Coding for Broadcast Television Signals”, Proc. Global Telecommun. Conf., pp. B 6.7.1-B 6.7.5 (Nov., 1982)
- 26) T. Koga, A. Hirano, Y. Iijima and K. Iinuma: “Motion-compensated Adaptive Intra-Interframe Predictive Coding Algorithm”, Proc. Int. Conf. Acous., Speech and Signal Processing (Mar., 1985)
- 27) T. Koga, et al.: “Sub T1 Rate Motion Video Codec for Teleconference”, Proc. Int. Conf. Commun. (Chicago, IL), pp. 2.4.1-2.4.5 (June, 1985)
- 28) 古閑, 飯島, 石黒: “テレビ信号のフレーム差ブロック符号化方式”, 昭50信学全大, p. 993 (1975)
- 29) 古閑, 平野, 飯沼: “NTSC信号の直接フレーム間符号化方式における有意画素のブロック符号化”, 昭51信学通信全大, p. 513 (1976)
- 30) テレビジョン学会編: “ディジタル伝送”, テレビジョン画像工学ハンドブック, オーム社, pp. 1108-1110 (1980)
- 31) D. A. Huffman: “A Method for the Construction of Minimum Redundancy Codes”, Proc. IRE, **40**, p. 1098 (Sept., 1952)
- 32) H. Murakami, S. Matsumoto and H. Yamamoto: “Algorithm for Construction of Variable Length Code with Limited Maximum Word Length”, IEEE Trans., **COM-32**, 10, pp. 1157-1159 (Oct., 1984)