

動画像圧縮におけるベクター表現の符号化に関する検討

河村 圭[†] 山本 勇樹[†] 渡辺 裕[†]

[†] 早稲田大学大学院 国際情報通信研究科
〒 367-0035 埼玉県本庄市西富田大久保山 1011

E-mail: †kawamura@suou.waseda.jp, ††yuuki@tom.comm.waseda.ac.jp, ††hiroshi.watanabe@waseda.jp

あらまし アニメーションやテロップなど人工的な画像が混在した動画像に対して、離散コサイン変換を基本とする圧縮を行うとモスキートノイズやエッジ消失などの著しい品質低下が生じる。我々は、人工的な画像に対してベクター表現を利用する符号化を提案してきている。本稿では、H.264 におけるエッジ消失の原因を明らかにすると共に、ベクター表現を組み合わせた動画像符号化を提案する。まず、ベクター表現により最適な記述が可能なエッジ領域モデル化の検討を行う。次に、エッジ領域に対してオーバーサンプリングと平滑化フィルタを用いて、入力画像と低周波成分との差分信号を記述する。提案手法により、エッジに起因する品質低下を抑制することが可能となる。実験により、提案するモデルを利用して精度良くエッジ位置を検出できることを確認する。

キーワード モスキートノイズ, エッジ消失, エッジモデル, ベクター表現, 画像符号化.

A Study on Coding Method of Vector Representation in Video Compression

Kei KAWAMURA[†], Yuki YAMAMOTO[†], and Hiroshi WATANABE[†]

[†] Graduate School of Global Information and Telecommunication Studies, Waseda Univ.,
1011 Okuboyama, Nishi-Tomida, Honjo-shi, Saitama 367-0035, Japan

E-mail: †kawamura@suou.waseda.jp, ††yuuki@tom.comm.waseda.ac.jp, ††hiroshi.watanabe@waseda.jp

Abstract Artificial images include a lot of edges and homogeneous tone areas. Mosquito noise and pseudo tone is occurred by the discrete cosine transform and the quantization for such images. It is in H.264/AVC that losing texture and changing edge directions are occurred. We have proposed a still image coding based on vector representation to provide a solution to the above problems. In this paper, we show the cause of losing texture, and thus, we propose video coding method using vector representation. At first, we examine edge area modeling optimized vector representation. Then, we describe the difference between an input signal and low-frequency-component on edge areas using over-sampling and average filter technique. The proposed method keeps the image quality near edge areas. We confirm the validity of the proposed method through some edge detection experiments.

Key words Mosquito noise, edge disappearance, edge model, vector representation, image coding.

1. まえがき

エッジや均等色領域を多く含む人工的な動画像に、自然画を対象とする符号化を適用すると著しく品質が低下する場合がある。MPEG ではモスキートノイズや偽色が知られているが、H.264/AVC [1] では均等色領域内のテクスチャ損失やエッジ方向の変化などの品質低下が見られる。

我々は以前より人工的な画像に対してベクター表現を

用いる符号化を提案している [2-4]。ベクター変換技術は低解像度画像における性能が向上し、符号化への適用が現実的になりつつある。この背景には計算機の性能向上により、グラフ理論や動的計画法の実装が複雑な画像に対しても現実的になったことが挙げられる。そして、従来のベクター変換の対象画像であったフォントや文書図形と比較して、低解像度で複雑な画像に対してグラフ理論を用いる高品質なベクター表現を生成するアルゴリズムが提案されている [5-7]。

本稿では、上記のイントラ符号化における品質低下の原因を明らかにすると共に、エッジ領域の符号化にベクター表現を利用して品質低下を抑制する手法を検討する。また、人工的な画像においてはアンチエイリアシングの考慮が必須であり、線画や均等色領域の境界（エッジ）を単純にベクトル化するだけでは品質低下を招く。そこで、ベクター表現により最適な記述が可能なエッジ領域モデル化の検討を行う。次に、エッジ領域に対してオーバーサンプリングと平滑化フィルタを用いて、入力画像と低周波成分との差分信号を記述する手法を提案する。エッジを含む画像に対して、提案したエッジモデルを適用する実験により、エッジを抽出可能なことを示し、提案手法をの有効性を確認する。

2. フレーム内符号化における品質低下

2.1 JPEG, MPEG-1, 2, 4

本節では、自然画像を対象とした画像符号化における品質低下の種類と原因について述べる。また、ベクター表現を用いる画像処理における品質低下についても課題を整理する。

JPEG, MPEG-1, 2, 4のフレーム内符号化では、エッジ領域におけるモスキートノイズと均等色領域やグラデーション領域における偽色による品質低下が知られている。これは、ロッキー符号化に利用されている離散コサイン変換（DCT）と量子化が原因である。

まず、エッジ領域は高周波成分を多く含んでいるが、DCTと量子化により高周波成分の信号がゼロになる。逆変換により高周波成分が除去された画像が復元されるため、ブロック内の輝度値が波打つように変化する。その結果、エッジに隣接した均等色領域においてモスキートノイズが顕著に目立つ。

次に、DC成分の量子化によりブロック内の平均輝度値が変化する。均等色領域ではDCTブロック間で同様に輝度値が変化するため知覚されにくいと考えられる。しかし、同一ブロック内に輝度値の異なる均等色領域が隣接していると、隣接するブロックと異なる輝度値の変化が生じる。その結果、ブロックノイズとして知覚され、さらに隣接する均等色領域における輝度変化が偽色として目立つ。

最後に、人工的な画像は複数の均等色領域とエッジを多く含むため、モスキートノイズや偽色による品質低下が知覚されやすい画像であるといえる。

2.2 H.264/AVC

H.264のフレーム内符号化では、DCTと量子化の前にイントラ予測が導入された。その結果、テクスチャとエッジの消失による品質低下が発生する。なお、JPEG

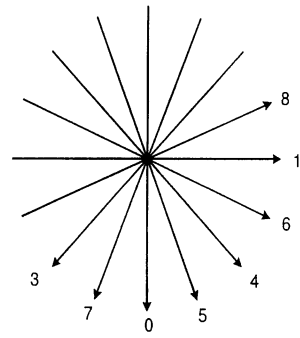


図1 イントラ 4x4 予測モードの方向
Fig. 1 Intra 4x4 prediction mode directions

やMPEGなどにおいてもDC成分やAC成分のフレーム内予測が利用されている。これらはロスレス処理であるため品質には直接影響しない。

H.264で導入されたイントラ予測は、符号化済みの周辺画素を用いて 4×4 または 16×16 ブロック単位で注目ブロックの予測を行う。均等色領域や8つの予測方向（図1）に一致するグラデーション、エッジは非常に高い精度で予測が当たり、ほとんど差分信号が発生しない。

均等色領域やグラデーション領域内のテクスチャは差分信号として扱われ、 4×4 DCTと量子化が行われる。 4×4 DCTは 8×8 DCTに比べて周波数分解能が低く、H.264の粗い量子化により各成分がゼロになりやすい[8]。その結果、テクスチャが消失して、のっぺりした画像となり主観品質が低下する。これはフィルムグレインの消失としても知られている。図2、図3に符号化前後における 4×4 ブロックの行、列方向輝度値を示す。横軸が画素位置、縦軸が輝度値を表す。品質パラメータQPを28から32に変更すると、行方向のテクスチャ（row:1~4）が失われる様子が確認できる。

予測の当たらなかったエッジを含むブロックでは、差分信号にもエッジが含まれる。これらのブロックでは自己相関は低く、高周波成分を多く含むが、DCTと量子化により高周波成分は消失、または増幅される。特にエッジが消失した際には、イントラ予測によって生成されたエッジのみが再現されることになる。その結果、エッジ方向が変化してブロック間でエッジの連続性が失われ、主観品質も低下する。図4にエッジ領域を含む画像の拡大図を示す。テクスチャが失われるだけでなく、エッジの方向が不連続になる様子が確認できる。

2.3 二層構造によるアニメーション画像符号化

人工的な画像の特性に着目した画像符号化の検討がなされている[2]。本手法は均等色領域と線画から構成され、ベクター表現により記述される基本層と、テクスチャな

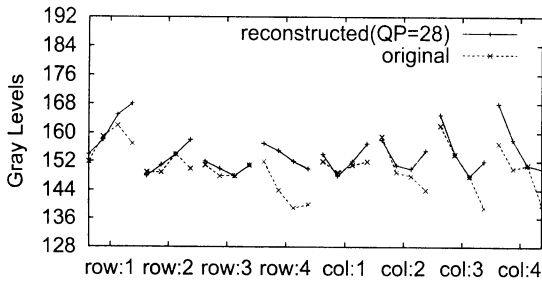


図2 4x4 ブロック内の輝度値 (qp = 28)
Fig. 2 Gray levels of 4x4 block at qp = 28.

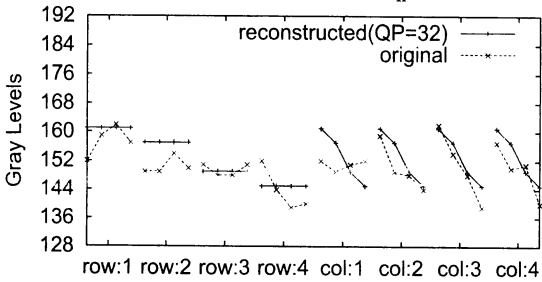


図3 4x4 ブロック内の輝度値 (qp = 32)
Fig. 3 Gray levels of 4x4 block at qp = 32.

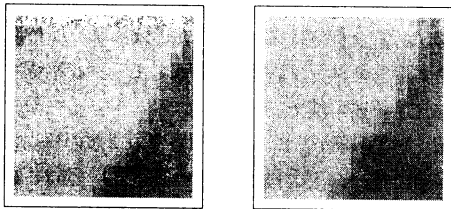


図4 エッジ領域 (入力画像, 復号画像 (qp = 32))
Fig. 4 Edge region [Original, Reconstructed at qp = 32]

どに相当し、原画像と基本階層の差分として定義される付加層に分離して符号化を行う。

線画の抽出には微分フィルタを利用しているが、アンチエイリアシングを十分考慮していないために、線画の幅が整数精度に丸められる。また、均等色領域が隣接する領域ではギャップが生じる。これらのギャップはロッシェン符号化を伴う付加層によって補償されるために、境界領域の品質が低下する。また、線画と均等色領域の境界線をベクター表現に変換して符号化を行うが、再構築時にもアンチエイリアシングが考慮されていないために、主観品質が低下している。

人工的な画像においてはアンチエイリアシングの考慮が必須であり、線画や均等色領域の境界(エッジ)を単純にベクトル化するだけでは品質低下を招く。

2.4 疑似ベクトル化

自然画像を非常に大きく拡大する時や、スキャナ等から取り込んだ線画をベクトル化する手法として疑似ベク

トル化が挙げられる [9]。本手法は階調を等間隔で量子化(ポストリゼーション)し、それぞれの階調ごとに領域を特定して境界線をベクトル化する。

ポストリゼーションによって階調が失われるため、自然画像では品質低下を必ず伴う。また、線画や均等色領域など画像の特性を考慮していないため、符号化の観点から見ると効率が悪い。階調を損なうことなく、適当な領域に分割してベクトル化を適用することが求められる。

3. エッジ領域における周波数モデルの問題点

3.1 周期性を有する連続信号によるモデル化

本節では、アンチエイリアシングの影響を考慮してエッジを抽出するために、フーリエ解析によるエッジのモデル化を検討する [10]。具体的には、ベクター表現と組み合わせる任意解像度実現するために、エッジ領域または高周波成分の輝度値を座標の連続関数として記述することを試みる。さらに、このモデルはリングングが発生するために不適当であることを明らかにする。

まず、任意位置のエッジをモデル化するために周期性を有する1次元の連続信号を考える。ただし、画像信号であることから鏡像関係による周期性を仮定する。1周期内にただ一つのエッジを含む場合には、図5(a)に示すように方形波として表現できる。また、これをフーリエ級数展開すると、係数は図5(b)に示すように sinc 関数を適当な間隔でサンプリングして得られる。

次に、アンチエイリアシングを導入する。一般に帯域制限せずにサンプリングを行うとエイリアスが発生し、品質が低下する。帯域制限を行う手法としては、オーバーサンプリングにより画素内の平均輝度を求める手法や、サンプリング後に適当な平滑化フィルタをかける手法がある。いずれの場合もローパスフィルタの適用に相当する。図5(c), (d)に理想的なローパスフィルタを時間領域と周波数領域で示す。ただし、カットオフ周波数を ω_L とする。

そして、入力画像からエッジを抽出する微分処理や、低周波成分を符号化した場合の入力画像との差を得る処理を導入する。これらはいずれもハイパスフィルタの適用に相当する。図5(e), (f)に理想的なハイパスフィルタを時間領域と周波数領域で示す。ただし、カットオフ周波数を ω_H とし、 $\omega_L > \omega_H$ とする。

以上の検討から、周波数領域における乗算によりエッジを構成するフーリエ級数の係数が計算でき、時間領域に変換することで高周波成分の輝度値が位置の連続関数として記述できる。図5(g), (h)に結果を示す。理想的な解析結果において、輝度値は cos 関数の集合として表

現されるが、これは適当な間隔で再サンプリングすると輝度値が波打つ現象（リングング）が観測されることを意味する。さらに、拡大してもアンチエイリアシングにより失われた高周波成分は復元されない。また、それぞれの理想フィルタを実現することは出来ないが、非理想フィルタではリングングの発生も抑制できる。そのため、理想的な解析結果を直接利用することはできない。非理想フィルタは何らかの拘束条件を導入しないと一意に決定されないので、今回は対象外とする。

3.2 周期性を有する離散信号によるモデル化

離散信号によるモデル化を検討する。任意の位置にエッジを仮定し、適当な間隔でサンプリングを行う。サンプリング後にアンチエイリアス処理と低周波成分の除去を行うと、連続信号と同様に時間領域における輝度値を関数として記述できる。しかし、図6に示すように、連続関数と見なして輝度値を計算しても、 \cos 関数で構成されているため値が一定値にならない。

以上のことより、エッジ領域または高周波成分の輝度値を解析的に求めて、時間領域における連続関数として記述してモデル化するのは不相当であることが明らかとなった。ただし、適当な近似関数を導入すれば、連続関数により記述可能である。

4. 提案手法

4.1 ベクター表現の導入

本節では、フレーム内符号化における品質低下を解決する手法について述べる。さらに、アンチエイリアシングを考慮する、ベクター表現に最適なエッジモデルを提案する。

テクスチャの消失に対しては、Fidelity Range Extensions (FRExt) において 8×8 DCT 及び重み付き量子化が導入され、低減が図られている。ただし、 8×8 変換にはモスキートノイズの発生が伴う。

エッジ方向の変化に対しては、イントラ予測に起因するので予測方向を多様化する手法が考えられる。しかし、参照可能画素が無い場合には予測画像生成が不可能であり、さらにブロック内に異なる方向のエッジが内包される場合への拡張が困難である。そこで、エッジの位置をベクター表現に変換し、画素値を分離する手法を提案する。本手法は、モスキートノイズの低減も可能であるため、 8×8 DCT 導入に対する問題も解決可能である。

エッジはその垂直方向の自己相関が低いため、離散コサイン変換やアダマール変換などブロック内の高い自己相関を仮定した変換は効率が悪い。また、エッジに沿って領域を分割する手法が考えられる。しかし、アンチエイリアシング処理により、正確な領域を定義することは

困難である。

そこで、エッジが持つ高い周波数成分を画素領域で分離し、エッジを含むブロックの自己相関を高める。一方分離された高周波成分は、エッジと平行方向の高い相関を利用して、ベクター表現によるエッジ位置とアンチエイリアシングに利用するフィルタのタップ数により記述する。

4.2 ベクター表現に適したエッジモデル

ベクトル化の逆処理であるラスタライズにおいて、アンチエイリアシングの簡易手法として、オーバーサンプリングとその平均値を採用するアルゴリズムがある。これは、画素内の複数の位置で輝度値を計算し、それらの平均を注目画素の輝度値とする手法である。

まず、 n 倍のオーバーサンプリングを行い、アンチエイリアス処理として m タップの平均値フィルタを導入する。ダウンサンプリングにより目標のサンプリング結果を得る。これらの操作はマルチレート信号処理として体系化されている [11]。次に、低周波成分は DCT を適用することを考慮し、DCT によるハイパスフィルタを導入する [12]。これを図7(a)~(d)に示す。図中では $n = 4, m = 4$ とし、左から3画素（14サンプル目）にエッジがあると仮定する。本モデルは、エッジ位置と平均値フィルタのタップ数 m によってエッジを構成する高周波成分を記述可能である。

一方、入力画像からエッジ位置とタップ数の算出には以下の手順に従う。入力画像に対してモデルと同じハイパスフィルタを適用して高周波成分を得る（図7(e), (f)）。エッジの位置やタップ数を変えたモデルと入力画像の高周波成分について相関を取り、エッジの位置とタップ数を決定する。なお、モデルでは複数のタップ数を考慮しているが、予備実験により n 倍のオーバーサンプリング時には、 $m = n$ タップの平均値フィルタのみを用いてエッジの位置を得られることが確かめられている。同時に、タップ数を長くするとエッジ位置の不確実性が高くなるため、後段のベクトル化における誤差が大きく許容されることになる。

本モデルは、エッジ位置をベクター表現に変換するとともに、アンチエイリアシングの量をタップ数により調整できる。従って、拡大時にはタップ数を短くしてエイリアシングの量を減らし、主観品質を向上可能である。

5. 実験と考察

提案したエッジモデルが、入力画像に対して適切に選択されるか確認する実験を行う。本実験では、 8×8 DCT を利用し、4倍でオーバーサンプリングするモデルを利用した。また、計算量を抑えるために8画素内に含まれ

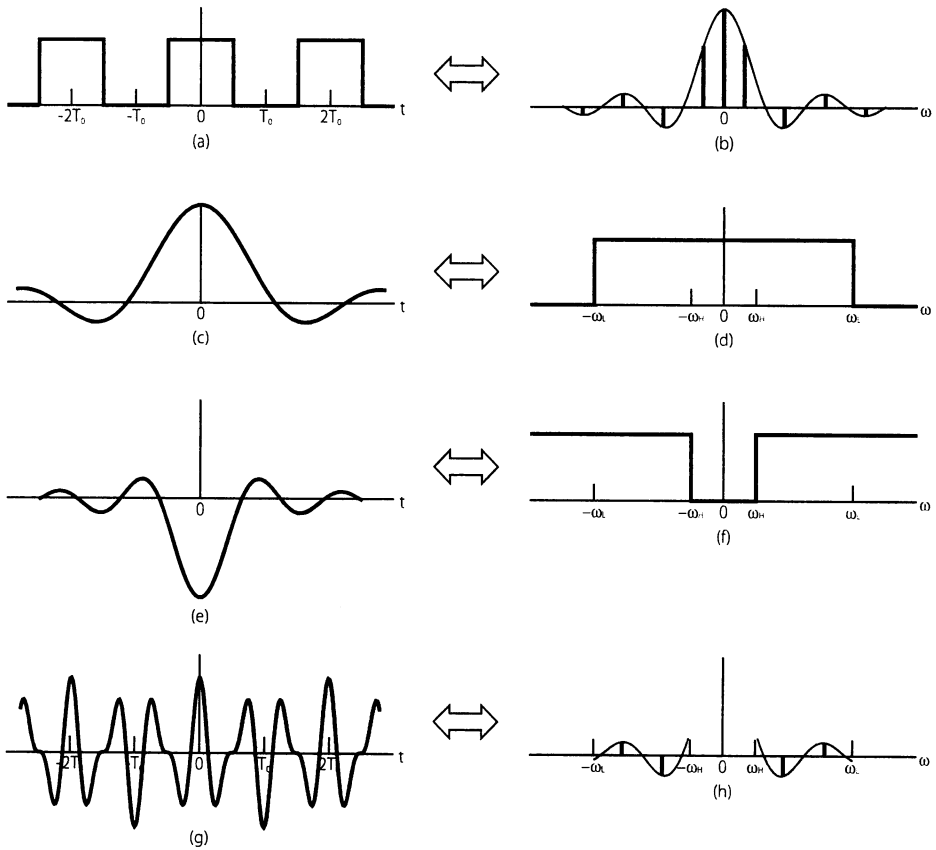


図5 周期性を有する連続信号によるエッジのモデル化

Fig. 5 Edge modeling using continuous signal with periodicity.

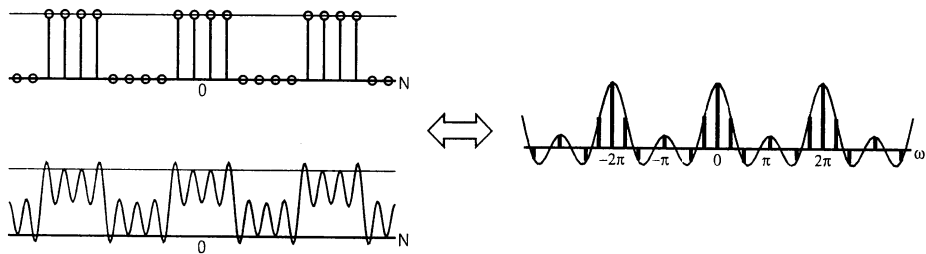


図6 周期性を有する離散信号によるエッジのモデル化

Fig. 6 Edge modeling using discrete signal with periodicity.

るエッジの本数は2本までと仮定した。

モデルは1次元のまま用い、画像に対して行、列それぞれに対してエッジ位置の推定を行った。入力した画像と、エッジモデルを適用して得られたエッジ位置を図8に示す。相関係数の絶対値が0.85以上の時有意であるとしてエッジの位置を記述した。4倍でオーバーサンプリングして計算したため、1/4画素精度で位置が推定されていることが確認できる。

1画素程度の線画がアンチエイリアシングによりぼや

けていても、エッジの位置を正確に推定している。また、均等色領域が隣接しているところでも、アンチエイリアシングを考慮したエッジの位置が得られている。ブロック内で向きが変わるようなエッジについても正確に推定できることが確認できる。

しかし、視覚的には存在しないエッジがいくつか検出されている。これは、ノイズをエッジと誤判定しているためであり、相関係数以外にエッジの大きさによる信頼度を考慮する必要がある。

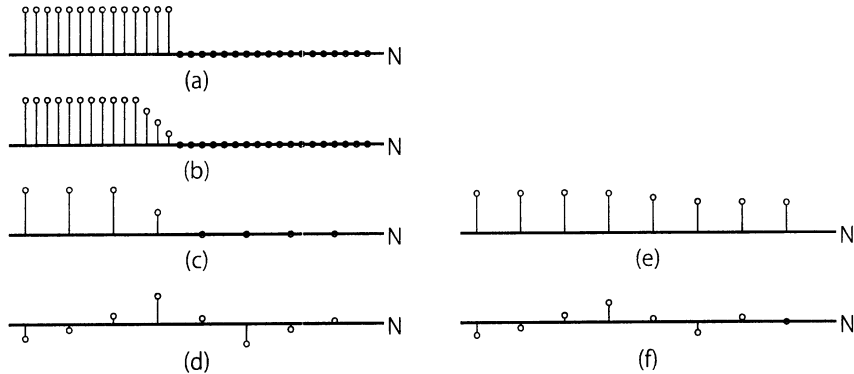


図7 提案するエッジモデル (左) と入力画像に対する高周波成分抽出 (右)
 Fig. 7 Proposed edge model and high-frequency-component of an input image.

6. むすび

本稿では、H.264におけるエッジ消失について原因を明らかにするとともに、これを解決するベクター表現による動画画像符号化を提案した。エッジモデルについて詳細に検討し、オーバーサンプリングと平均フィルタによる記述する手法を提案した。実験により、ベクター表現に適したエッジを精度良く抽出していることを確認した。

文 献

- [1] ITU-T Recommendation H.264 IS, "Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services," 2003.
- [2] O. Nakagami, T. Miyazawa, H. Watanabe, H. Tom-inaga, "A Study on two-layer coding for animation images," IEEE International Conference on Multimedia Expo (ICME) 2002, WedAmPO3: Compression II, Aug. 2002.
- [3] 河村, 渡辺, 富永, "マンガの超高圧縮符号化に関する検討", 情処研報 2003-AVM-42, no.2, pp.7-16, Oct. 2003.
- [4] 河村, 山本, 渡辺, "イントラ符号化にベクター表現を用いた動画画像圧縮に関する検討", 画像符号化シンポジウム資料 20th, pp. 37-38, P-2.15, Nov. 2005.
- [5] "potrace," <http://potrace.sourceforge.net/>
- [6] 河村, 渡辺, "ベクター変換における曲線最適化アルゴリズムの一検討", FIT2004 第3回情報科学技術フォーラム, 3S-2, Sep. 2004.
- [7] 河村, 山本, 渡辺, "ベクター表現における階層の変換手法の検討", 2005 信学総大, D-11-6, Mar. 2005.
- [8] M. Wien, "Variable block-size transforms for H.264/AVC," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol.13, No.7, pp.604-613, Jul. 2003.
- [9] Illustrator, <http://www.adobe.co.jp/>.
- [10] 高畑, "信号表現の基礎", 電子情報通信学会, 1998.
- [11] 貴家, "マルチレート信号処理", 昭晃堂, 1995.
- [12] K.R. Rao, P. Yip, 安田, 藤原, "画像符号化技術—DCTとその国際標準", オーム社, 1992.

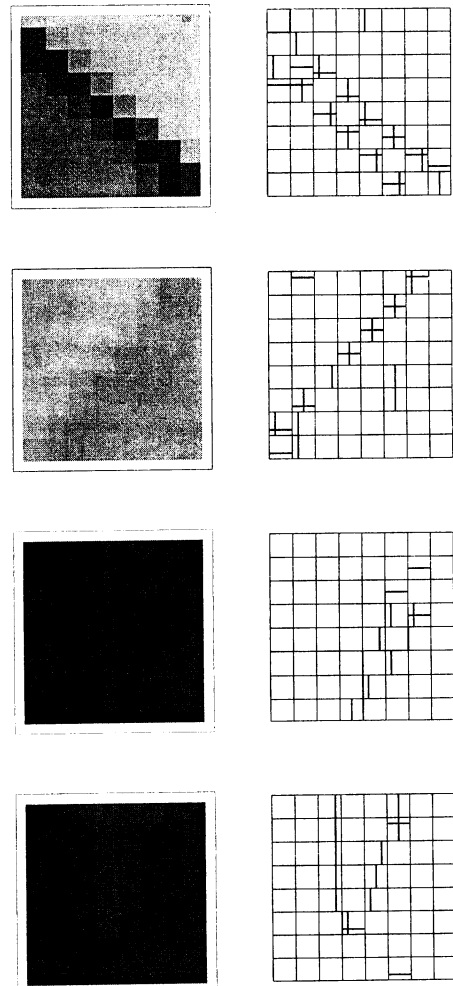


図8 エッジの検出例 (入力画像と検出されたエッジ位置)
 Fig. 8 Experimental results (input images and detected edges).