

## Distributed Video Coding の動向と今後

高村誠之<sup>†</sup>

あらまし Distributed Video Coding (DVC) は、近年主に欧米において研究の高まりをみせている新しいパラダイムの Video 符号化方式である。H.264/AVC 等従来の符号化の枠組みでは、符号化側が冗長性を削減した結果をエントロピ符号化し、情報圧縮を実現しているのに対し、DVC の枠組みでは、従来方式と同じ符号量を伝送しつつ、復号側で動き補償を行い従来方式と同等の復号品質を得ようとする。その理論的裏づけは 1970 年代の Slepian, Wolf および Wyner, Ziv らの研究に端を発する古典的なものであるが、近年の DVC 要素技術の性能向上、ネットワーク環境の変化に伴う DVC 応用先の広がりなどが契機となり、シーズ・ニーズの両面から研究者の注目を集めることとなった。本稿では、DVC の理論、実装方法、研究動向を述べた後、性能改善や符号量制御等の DVC が抱える課題およびそれらの解決策を述べる。

## Distributed Video Coding: Trends and Future

Seishi Takamura<sup>†</sup>

**Abstract:** Distributed Video Coding (DVC), a new video coding paradigm, has recently been attracting researchers' attention, particularly in the West. Opposed to traditional coding frameworks such as of H.264/AVC, in which the encoder reduces the redundancy mainly by motion compensation, the decoder takes care of motion compensation in DVC framework, while maintaining both transmitted bit amount and decoded picture quality the same. The theoretical foundation of DVC dates back to the works of Slepian-Wolf and Wyner-Ziv in early 70s. Encouraged by recent advances of DVC-related technologies and of ubiquitous networking environment, more and more research effort has been devoted to DVC field. In this paper, after describing the theory behind DVC, its practical implementation and research trends, we will discuss its future-work items that deserve further improvement, which includes coding efficiency, rate control and so on.

### 1 はじめに

Distributed Video Coding(以後 DVC) は近年研究者の注目を集めている映像符号化方式である。この理論的基盤は 1970 年代の Slepian と Wolf(以後 SW) や Wyner と Ziv(以後 WZ) の研究にまで遡る古いものであるが、近年、シャノン限界に近づく優れた伝送路符号化方式の発見、ユビキタスな撮影・通信環境の広まりに触発され、これらの理論を Video 符号化に応用しようとする研究が近年盛んとなってきている。

H.264/AVC 等の従来方式と DVC の大きな違いは、動き補償・直交変換・信号源符号化の組み合わせであった従来符号化器から、特に処理の重い「動き補償」を省略する点にある。その代わりに DVC 復号器

が動き補償を担当し「補助情報」を生成し、別途符号化器から送られる「付加的情報」を用い、動き補償画像の画質を改善する(WZ 復号)。WZ 理論により、DVC は特定の条件下で従来方式と同等の符号量-歪み性能を実現できることが示されている。派生として符号化側で動き補償を限定的に用い、処理をできるだけ軽くするアプローチもある。これも復号器では WZ 復号を行うため、DVC とみなすことができる。

従来方式では達成困難であった軽量の符号化を、DVC により、符号量の増大や画質の劣化なしに実現できる可能性があるため、消費電力の限られたモバイル端末からの映像送信等への応用が期待されている。

本稿では、DVC の理論、実装方法、歴史、応用などを述べた後、性能改善や符号量制御その他の DVC が抱えている課題およびそれらに対する現状の方策も併せて述べる。なお本稿でいう DVC は「Distributed Computing(分散計算)を利用した Video Coding」とは全く異なるものであることに注意されたい。

<sup>†</sup> 日本電信電話株式会社 NTT サイバースペース研究所  
〒239-0847 横須賀市光の丘 1-1 Y-517A  
NTT Cyber Space Laboratories, NTT Corporation  
Phone: 046-859-2371, Fax: 046-859-2829  
E-mail: takamura.seishi@lab.ntt.co.jp

## 2 理論的背景

### 2.1 SW 理論、可逆 SW 符号化

ごく単純な例として、二個の温度計で空間的に近い 2 地点の気温測定を行う場合を考える。各測定値  $A, B$  は整数であり、互いに相関があり、先験的に「 $A$  と  $B$  の差は 5 を越えず一様分布する」ことがわかっているものとする。それぞれの伝送符号量を  $R_A, R_B$  とする。符号化器が  $A, B$  両方を知りうる場合は、双方の相関を考慮した符号量

$$R_A + R_B = H(A, B) = H(A) + H(B) - I(A; B) \quad (1)$$

を伝送することで誤りなく復号できる。

翻って  $A, B$  それぞれを独立に符号化する場合、両者の相関を除くことができないため直感的には両情報量の和  $H(A) + H(B) (> H(A, B))$  が必要であるように思えるが、実は上記と同じ符号量でよい。なぜなら、 $A$  は  $H(A)$  の符号量で伝送、 $B$  については  $B \bmod 9$  を求めてそれを伝送すれば復号側で両者を特定できるからである。例えば復号器が  $A = 20, B \bmod 9 = 5$  を得ると、 $B$  の値として、9 による剰余が 5 となる数 ( $\dots, 5, 14, 23, 32, \dots$ ) のうち  $A (= 20)$  との差が 5 を越えないもの、つまり  $B = 23$  と特定できる。ここで  $B$  の符号化において、「 $A$  の値を全く知らずに (但し  $B$  がどの程度差をもっているかという統計的情報は既知として) 符号化している」ことに注意されたい。

ここで  $A$  を「補助情報」、 $B \bmod 9$  を「付加的情報」と呼ぶことにする。

この場合、符号量は  $A$  については  $H(A)$ 、 $B$  については

$$H(B|A) = H(B) - I(A; B) \quad (2)$$

であるので、和は

$$R_A + R_B = H(A) + H(B) - I(A; B) = H(A, B) \quad (3)$$

となり、符号化器が  $A, B$  両方を知りうる場合 (式 (1)) と変わらない。上記の例では  $R_B = H(B|A) = H(B) - I(A; B) = \log_2 9$  (bit/symbol) である。

ここでは単純な例を述べたが、Slepian と Wolf は「 $A$  が与えられた場合の  $B$  の分布」(上述の例では  $[A - 4, A + 4]$  の一様分布とした) が既知であれば、 $A, B$  独立に符号化しても十分長い系列では  $R_A + R_B$  が  $H(A, B)$  にいくらかでも近づくことを示した [1]。これを実現するような符号化を SW 符号化と呼ぶ。

### 2.2 WZ 理論、非可逆 WZ 符号化

SW 理論の非可逆符号化におけるアナロジーは、Wyner と Ziv が最初の結果を得た [2]。適当な測度における誤差  $D$  を許した場合達成しうる最小の符号量を  $R_{B|A}^{WZ}(D)$  とすると、二乗誤差測度および無記憶ガウス信号源の場合には

$$R_{B|A}^{WZ}(D) = R_{B|A}(D)$$

が成り立つことを示した。これを実現するような符号化を WZ 符号化と呼び、量子化・逆量子化が SW 符号化の前後にそれぞれ加わったものとして実装される [3]。

### 2.3 伝送路符号化との双対性

SW 符号化において、復号側で補助情報  $A$  を用いて付加的情報から  $B$  を求めるという処理は、伝送路符号化と完全な対応がとれている。

すなわち、 $B$  が原信号、 $A$  が  $B$  に誤りが重畳した信号、「付加的情報」は誤り訂正に必要な符号 (Systematic 符号ではパリティ、LDPC 符号等ではシンドローム、いずれも等価) となる。また  $B$  と  $A$  の相関により付加的情報符号量  $p$  は増減するが、相関は誤りをもつ伝送路の容量  $C$  に対応し、 $p$  は  $p/k \geq 1/C - 1$  を満たす ( $k$  は原信号長)。

従ってシャノン以来の誤り訂正符号に関する豊富な知見が DVC にも適用できることになる。近年、Turbo 符号や LDPC 符号などの、シャノン限界に近づく優れた誤り訂正方式が開発されたことも、WZ 以来約 30 年が経過した現在 DVC の実装が盛んとなった要因の一つである。

## 3 DVC の歴史や実装、応用

### 3.1 歴史

SW 符号化に関しては、SW 理論 (1973) の直後に Hellman らが Convolutional source coding (1975)、Ancheta らが Syndrome source coding (1976) を発明した。ただし SW 符号化が実用的となるためには、誤り訂正符号のブレイクスルーである 1993 年の Turbo 符号発明、1996 年の LDPC 符号の再発見 (元々 1963 年に発明されていた) を待たなければならなかった。

これらを経て、DVC の原型を完成させる最初の研究が、米国西海岸においてほぼ同時期に、UC Berkeley の Ramchandran ら (PRISM 方式、2002.10) [4] および Stanford 大の Girod ら (2002.11) [5] の研究グループにより発表された。以後この 2 グループが DVC 研究を牽引し、欧米での DVC 研究が盛んとなっていった。最近ではヨーロッパで 2005 年 9 月より 2 年間の DVC 時限プロジェクト Discover [6] も始まっている。

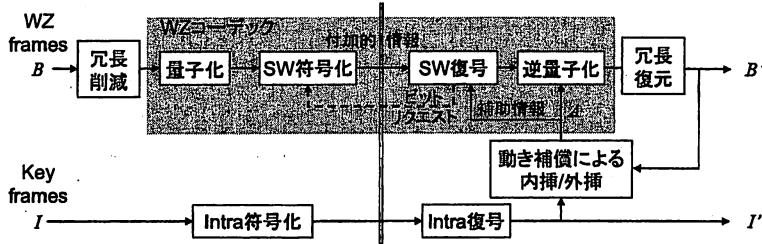


図1 DVC符号化・復号器ブロック図

日本でも、Tehrani ら [7] の多視点画像符号化や、Tonomura ら [8]、Kaneko [9] による DVC 研究がある。

### 3.2 実装

図1に一般的な DVC 符号化・復号のブロック図を示す。符号化側は、入力映像を数フレーム間隔で (JPEG 等の従来方式により) intra 符号化する。これらを key frames と呼ぶ。その間のフレーム (B) は (DCT 等で冗長性除去し) 量子化後、SW 符号化器により付加的情報 (パリティ・シンドローム) を生成し伝送する (WZ frames)。

SW 復号器は、まず key frame ストリームを lossy 復号後、それらの動き対応を探索し、中間のフレームを内挿補間する (別途 feature 情報がある場合 (第 4.2.1 節) は外挿も可)。それを補助情報 A とし、SW 復号器において付加的情報を用い誤り訂正を行う。SW 復号器自体で誤り訂正成功・失敗を判定できるので、もし失敗した場合は符号化器に「ヒットリクエスト」をフィードバックし、より長い付加的情報を要求する。復号された信号は逆量子化され、逆 DCT 等で冗長性を復元し、出力される。

### 3.3 特長

本方式の利点 (および従来と最も異なる点) は、符号化が高速に行えるという点である。従来符号化器が行うのが当然であった動き補償は、DVC 符号化器では全く行わないか、限定された形でしか行わない (cf. 第 4.2.3 節)。

DVC 復号器は符号化器の代わりに動き補償を行い、できるだけ正確な補助情報を生成し誤り訂正を施す。動き補償に加え、誤り訂正はエントロピ復号よりも計算負荷が高いこともあり、DVC 復号器の処理量は従来方式のそれより一般に増大する。この点については、例えば中央サーバーにて DVC 復号後、H.264/AVC 等の従来符号化方式のストリームに再符号化し配信することで、end to end ではともに軽量の符号化と復号が実現できる。

### 3.4 応用

ビデオ以外の以下のような用途にも DVC は応用されている。

■可逆画像符号化 多バンド画像の符号化において、復号済みのバンドを補助情報として、関連のある別のバンドを符号化するのに SW 符号化を利用するという提案もあり、CALIC に比べレート上昇は 0.05bit/pel に抑えられている [10]。

■多視点画像・多視点映像符号化 複数カメラで同一物体を撮影した画像・映像は互いに相関があり、DVC の枠組みで符号化できる [7]。しかしながら、

- ◇ カメラ同士が近接している場合→カメラ間的高速通信も容易→従来方式が適用可能
- ◇ カメラ同士が近接していない場合→映像同士の相関が低い→独立に符号化しても性能は落ちないという悩ましいジレンマもある。

■ステレオグラムの符号化 多視点映像を簡略化したモデルとして、ランダムドットステレオグラムを LDPC 符号で直接符号化し、復号側では視差補償を行いながら belief propagation 復号するという提案もなされている [11]。

## 4 DVC の抱える課題、研究動向

本章では、DVC が抱える数多くの課題の一端を紹介し、それに対する方策としての研究動向を述べる。

### 4.1 理論と現実の乖離

DVC の実装においては、WZ 符号化理論との乖離はまだ大きい。誤差測度が二乗和であるのは措くとしても、以下の前提

- ◇ 信号がガウス性であり十分長い
- ◇ 無記憶である
- ◇ 信号源  $B|A$  の統計的性質が既知である

は必ずしも DVC 実装では成り立っていない。より一般的な場合の WZ 理論の研究は現在も進められているところであり、今後の進展にも大いに期待したい。

## 4.2 符号化効率改善に向けて

DVC の最大の課題は符号化効率の改善である。現状の DVC の符号量-歪み性能は、従来方式 (H.264/AVC 等) に比べ 3-4 dB ほど劣っており、このギャップ低減に向け、盛んな検討がなされている。

### 4.2.1 よりよい補助情報の生成

■画像 feature の利用 DVC 復号器が動き補償を行う際、符号化器からの動き情報がない条件下で果たして正しい動き補償が行われているという保証はない。動き情報を求めずに復号器に何らかの指標を与えるため、符号化器において、WZ フレームに対応する原画像の、ブロック毎 feature を送る、という方法が提案されている。

ここでは feature は画像のロバスト特徴量を指し、

- 1) 似た画像同士は同一 feature に写像される
- 2) 異なる画像は一般に異なる feature に写像される
- 3) 重畳雑音には敏感すぎない
- 4) 生成するための処理量はわずか (e.g. 動き推定を伴うものは不適)
- 5) 記述長が短い

等の性質を満たすことが要求される。

DVC 復号器は、符号化器から得た feature を満たすような動き補償画像を生成することで、何も指標のない場合よりも良い補助情報を生成しうることが期待される。また、従来の P ビクチャ符号化のような外挿予測も可能となる。

feature として、量子化 DCT 係数の一部を利用したもの、CRC を利用したものなどが提案されている。この洗練化も今後の課題である。

■複数の補助情報の利用 B ビクチャ符号化のアナロジーで、DVC 復号器が 2 枚 (またはそれ以上) のフレームを参照し補助情報を生成する場合、2 つの補助情報の差 [13] あるいは平均を新たな補助情報とみなせば通常の WZ 復号となるが、多端子情報論 [14] を積極的に利用し、補助情報は複数のまま復号を行うというアプローチも考えられる。ただし本理論は WZ 符号化に比べ理論上も未成熟であるため、実用まではまだ時間を要するものと思われる。

### 4.2.2 ベースレイヤに関する考察・課題

DVC は、ベースレイヤと誤り訂正符号を組み合わせた「階層符号化」とみなすこともできる。したがってシングルレイヤ符号化の性能を越えることは、一部特殊な場合を除いて不可能である。

さらに階層符号化においては、ベースレイヤが従来の符号化方式よりも劣る場合、トータルの符号量-歪み性能はエンハンスレイヤを如何に高効率にして

も、ベースレイヤの損失を補填することはできず、シングルレイヤ符号化には劣ってしまう。

また、どのようなベース-エンハンス符号量割当が最適であるかも未解決である。

### 4.2.3 従来方式との折衷案

DVC 符号化器では動き補償を行わないのが元来の実装であったが、「軽く符号化し WZ 復号する」という意味に解釈を広げることも可能である。その場合符号化側で動き補償を行うことになるが、通常の時間解像度で行ったのでは全く意味がない。そこでベースレイヤ・符号化のバラエティとして、既に述べた「時間解像度を下げ、それぞれイントラ符号化する」以外にも

- 1) 動きベクトルの探索を真裏のみに制限したベースレイヤを生成する [15]
- 2) 時間解像度を下げ、動き補償符号化する
- 3) 空間解像度を下げ、動き補償符号化する
- 4) 上記の組み合わせ

などが考えられる。しかしながら (1 以外では時間解像度を復元後の) RD 性能は、一般にシングルレイヤ符号化よりも低下する。この軽減・解消策も課題である。

### 4.2.4 誤り訂正能力の改善

■誤りの空間相関の積極的利用 通常の LDPC 符号、Turbo 符号などの伝送路符号化において、(誤り訂正を施される) 入力信号源の分布は i.i.d. を想定しているが、現実の DVC においては空間的な相関が残存する場合がある。この相関を積極的に利用したものとして、LDPC を二値画像の圧縮に応用した例 [16] や、ディスク媒体表面の傷・汚れ等がもたらす 2 次元バースト誤りの領域と誤り率を復号時に推定しながら訂正することで LDPC 復号の効率を改善する例 [17] などが提案されている。映像フレームも二次元信号であり、誤差分布には空間相関が存在するため、これらの方式を適用することも有望と考えられる。

■多値 LDPC の利用 通常 LDPC 符号といえば二値 (オーダ 2 の Galois 体 GF(2) 上での演算) のものを指すが、多値 LDPC 符号の方が、よりシャノン限界に近い誤り訂正能力を達成するとされている [18]。多値 LDPC 符号は GF( $m > 2$ ) 上で演算され、オーダ  $m$  は通常 2 の冪である。パリティ検査行列の要素値も  $0 \cdots m-1$  となる。Belief propagation は確率の畳み込みを含むが、 $m$  が 2 の冪の場合は数論的変換 (NTT, Number-Theoretic Transform) を用いることで、この演算が劇的に高速化できる [19](FFT による畳み込み

演算の高速化と等価である)\*1。なお  $m$  が素数の場合は、通常の整数四則演算後、 $m$  による剰余計算を施せばよい。

但し筆者の実験では、NTT 高速化後であっても  $GF(2^p)$  の LDPC 復号は  $GF(2)$  の LDPC (通常の二値 LDPC) 復号より  $p$  倍以上遅くなることから、 $GF(2^p)$  の多値 LDPC 符号化 (復号) を一回行うよりも、二値 LDPC 符号化 (復号) を  $p$  回行う方が速度的には有利である。また、性能のよい多値パリティ検査行列の生成方法も二値のものほどには研究・整備されておらず、今後の研究の進展が望まれる。

#### 4.2.5 再符号化に起因する性能劣化

DVC 復号器の処理の重さを対症療法的に解決するために中央サーバで再符号化する方法は、処理自体が符号化効率の低下を伴う。この改善に関する考察もなされておらず、将来の課題の一つである。

#### 4.3 符号量制御

DVC が抱える別の大きな課題が符号量制御である。誤り訂正は乱数的な性質を持つため「どれだけの冗長性 (付加符号量) を与えれば誤りが訂正できるか」は雑音の統計的性質 (誤り分布や誤り確率等) でなく、誤り信号そのものに依存する。例えば必ず一定個数 (e.g. 10 ビット) が誤っている固定長二値信号系列を、特定のパリティ検査行列によりシンドロームを生成し、LDPC 復号により誤り訂正しようとしても、誤りパターンにより訂正できたりできなかったり、ということが実際におきうる。この原因は

- パリティ検査行列の性質 (多対 1 の写像) と原信号、誤りパターンとの相性にばらつきがあること
- Belief propagation 繰り返し処理で求まるのはあくまで推定であること (パリティ検査行列の Tanner グラフがループを含む通常の場合)

などと考えられる。

誤りビット数上限が定まっている場合は、例えば Hamming 符号や Reed-Solomon 符号を用いれば訂正可能性を担保できる (が、誤り訂正能力は LDPC 符号や Turbo 符号よりも劣る)。しかしながら、通常の伝送路や映像符号化の誤りは確率的におきうるので、誤り確率が確定していたとしても、必ず発生誤りが  $n$  ビット以下であるなどという担保はない (例えば極めて低い確率だが全ビットが誤る可能性もある)。そこで、付加的情報が誤りを保護するのに十分長いかどうかは、一旦復号しないとわからない。必要最小限

の長さの特定に至ってはより多くの SW 符号化復号の繰り返しが必要となる。

「復号器が用いる推定画像」は符号化器は知りえないため、誤り信号そのものはもとより、統計的に「どの程度の雑音電力があるか」を推定することも大変困難な問題であることを考えると [20]、符号量制御の難しさが理解できる。

これらの問題があり、現状の符号化復号ブロック図においては、復号器から符号化器へのフィードバック「ビットリクエスト」が存在するのが普通である。現状では復号器からのフィードバックがなければ高効率符号化はできない。従って符号化は高速には行えない。

#### 4.4 その他の課題

##### 4.4.1 補助信号重畳雑音の推定

符号化器の処理は軽いままで、このフィードバック回数を削減するという目的で、復号器において補助情報がどの程度の誤りを含んでいるかをより正確に推定する、という提案もある [20]。現状、この推定はフレーム単位であり、より詳細な雑音推定 (e.g. 画素単位) は今後の課題である。

##### 4.4.2 誤り訂正符号

LDPC 符号、Turbo 符号が今のところ有望視されているが、シャノン限界に近づくのは例えば  $10^7$  ビットといった長い符号長においてであり、短い符号長においてもより誤り訂正能力が高くより復号が高速な方式が強く望まれる。

##### 4.4.3 Rate-Adaptivity

符号量制御において付加的情報量を変化させる際、SW 符号化器・復号器で共通に多量のパリティ検査行列を用意しておき、これを差し替えシンドロームを生成し直す、という方法よりも、メモリ量・処理時間的には

- 一旦生成された付加的情報を、規則的な処理により短縮でき (puncture と呼ぶ)、
- かつこれにより誤り訂正能力が最適性を失わない方が好ましい。この性質を rate-adaptivity と呼ぶ。従来、この点において LDPC 符号は Turbo 符号よりも大きく劣るとされてきたが、それを緩和する研究も始まっている [21]。

##### 4.4.4 復号器の計算負荷

誤り訂正は belief propagation 繰り返しを伴い、かつ付加的情報量が最小限に近いほど、その繰り返しが多回数必要になる。つまり、符号化効率を上げれば上げるほど復号器は重くなる。そこで効率をわずかに低下させる代わりに復号を軽くするという提案

\*1 この博士論文 [19] の 26 頁第 1 行目の " $R_{mn}^a$  is the  $a$ 'th coordinate" は、" $R_{mn}^a$  is the  $(z_m - H_{mn}a)$ 'th coordinate" の誤りである。

もなされている [12]。

## 5 おわりに

以上、本稿では DVC に関する背景・現状・問題点を述べた。画像・映像符号化に限らず、データ圧縮一般において、従来は符号化側が冗長性を削減するという枠組みを基本とした検討がなされていたが、DVC はそれと異なる概念であり、符号化における新しいパラダイムといえる。文中で述べたように、現状の技術には改良の余地が多々残されているが、研究はまだ始まったばかりであり、産学界の注目度も考えると今後の進展が大いに期待できる分野であるといえる。

## 参考文献

- [1] J. D. Slepian and J. K. Wolf: "Noiseless coding of correlated information sources," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 19, no. 4, pp.471-480, July 1973
- [2] A. Wyner and J. Ziv: "The rate-distortion function for source coding with side information at the decoder," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 22, no. 1, pp. 1-10, Jan. 1976
- [3] B. Girod, A. M. Aaron, S. Rane and D. Rebollo-Monedero: "Distributed video coding," *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 1, pp. 71-83, Jan. 2005
- [4] R. Puri and K. Ramchandran: "PRISM: a new robust video coding architecture based on distributed compression principles," *Proc. of Allerton Conf. Commun., Ctrl, Computing, Urbana-Champaign, IL*, Oct. 2002
- [5] A. Aaron, R. Zhang and B. Girod, "Wyner-Ziv coding of motion video," *Proc. Asilomar Conference on Signals and Systems, Pacific Grove, Nov. 2002*
- [6] Discover Project, <http://www.discoverdvc.org>
- [7] M. P. Tehrani, T. Fujii and M. Tanimoto: "Distributed source coding of multi-view images," *Proc. Picture Coding Symposium of Japan 2003*, P-4.2, Nov. 2003
- [8] Y. Tonomura and T. Nakachi: "A new framework for distributed video coding based on JPEG 2000," *Proc. ICIP 2006*, Sep. 2006
- [9] H. Kaneko: "Low encoding complexity video compression based on low-density parity check codes," *IEICE Trans. Fundam.*, vol. E89-A, no. 1, pp. 340-347, Jan. 2006
- [10] A. Nonnis, M. Grangetto, E. Magli, G. Olmo and M. Barni: "Improved low-complexity intraband lossless compression of hyperspectral images by means of Slepian-Wolf coding," *Proc. ICIP 2005*, Sep. 2006
- [11] D. Varodayan, A. Mavlankar, M. Flierl and B. Girod: "Distributed coding of random dot stereograms with unsupervised learning of disparity," *Proc. MMSP 2006, Victoria, Canada, Oct. 2006* (to appear)
- [12] Z. M. Belkoura and T. Sikora: "Towards rate-decoder complexity optimisation in turbo-coder based distributed video coding," *Proc. Picture Coding Symposium, P1-20, Beijing, Apr. 2006*
- [13] A. Aaron, D. Varodayan and B. Girod: "Wyner-Ziv residual coding of video," *Proc. Picture Coding Symposium 2006, O8-2, Beijing, April 2006*
- [14] 大濱靖匡: "多端子情報理論とセンサネットワーク," *信学誌* vol. 89, no. 5, pp. 367-373, May 2006
- [15] M. Wu, A. Vetro; J. Yedidia, H. Sun, C. W. Chen, "A study of encoding and decoding techniques for syndrome-based video coding", *Proc. ISCAS 2005*, vol. 4, pp. 3427-3530, May 2005
- [16] D. Varodayan, A. Aaron and B. Girod: "Exploiting spatial correlation in pixel-domain distributed image compression," *Proc. Picture Coding Symposium, P1-22, Beijing, Apr. 2006*
- [17] 和田山正: "バースト誤り通信路に適した反復復号法," *信学論 D-II*, vol. J88-D-II, no. 2, pp. 170-187, Feb. 2005
- [18] M. C. Davey and D. MacKay: "Low-density parity check codes over  $GF(q)$ ," *IEEE Commun. Letters*, vol. 2, no. 6, June 1998
- [19] M. C. Davey: "Error-correction using low-density parity-check codes", PhD Thesis, University of Cambridge, 1999.
- [20] C. Brites, J. Ascenso and F. Pereira: "Modeling correlation noise statistics at decoder for pixel based Wyner-Ziv video coding," *Proc. Picture Coding Symposium 2006, O8-4, Beijing, Apr. 2006*
- [21] D. Varodayan, A. Aaron and B. Girod: "Rate-adaptive distributed source coding using low-density parity-check codes," *Proc. Asilomar Conference on Signals and Systems, Pacific Grove, Nov. 2005*