

非低エネルギー領域多段探索法によるMatching Pursuitsの高速化

著者	Imamura Kousuke, Nagami Toshiyasu, Hashimoto Hideo
雑誌名	Kyokai Joho Imeji Zasshi/Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers
巻	61
号	8
ページ	1231-1235
発行年	2007-08-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/9880

非低エネルギー領域多段探索法による Matching Pursuits の高速化

Fast Matching Pursuits Using Multiple-Step Search in Non-Low Signal Energy Regions

今村 幸祐[†], 永見 利康^{††}, 正会員 橋本 秀雄[†]

Kousuke Imamura[†], Toshiyasu Nagami^{††} and Hideo Hashimoto[†]

Abstract A fast atom searching method for matching pursuits in a high-efficiency video coding system is described in this paper. The immense amount of operations is needed for the atom searching in matching pursuits, so speed-up in the searching algorithm is indispensable. We propose an atom searching algorithm that is based on both a correlation between the high signal-energy regions and optimal matching points and the correlation between the highly efficient approximated points, and to improve the computational complexity by reducing the searching points.

キーワード：動画像符号化, Matching Pursuits, アトム探索

1. ま え が き

デジタル動画像メディアの急速な普及にともない、膨大な情報量を持つ動画像に対する符号化技術の重要性が増している。現在の国際標準方式である MPEG や H.26x では、動き補償予測 (MC) と離散コサイン変換 (DCT) を組合せたハイブリッド方式が基本となっている。しかし近年、新たな符号化方式を目指して、動き補償予測を適用した後の予測誤差画像に対し、DCT 以外の符号化法を適用した方式が検討されている。その一つに、Matching Pursuits (MP) を用いた符号化法がある¹⁾²⁾。Matching Pursuits は、波形符号化の一種であり、辞書中の基底ベクトルの線形結合により、信号を近似構成する手法である³⁾。近似効率が高い箇所から順次処理を行うため、低ビットレートにおいて高い符号化効率を達成できる。

Matching Pursuits では、符号化処理で近似効率が最大となる信号ブロックと辞書波形の組合せを得るアトム探索処理において、膨大な計算量が必要となる。この問題は、実

時間処理への応用に障害となるため、Matching Pursuits における高速化の検討が多く行われている。高速化のアプローチの一つとして、辞書構造を工夫することで高速化を行うものがあり、辞書の階層化や⁴⁾、対象信号を帯域分割し、それに適した辞書を用いる手法が提案されている⁵⁾⁶⁾。

これらの提案法においても、対象信号に対して近似効率が最大となる辞書波形を探す処理は必要であるため、探索というアプローチからの高速化も重要と考えられる。探索における従来の高速化手法は、一定画素間隔で均一に探索を行う手法や、信号エネルギーが最大となるブロックを求め、その周辺のみを探索対象とする手法が提案されており、高速化が実現されている¹⁾。しかし、前者においては、木探索の本質的な欠点である最適点の見逃しという問題がある。また信号エネルギーを考慮して探索範囲を決定している後者の手法においても、最適な組合せを逃す場合が多く、高速化の反面、品質の大きな低下は避けられず、未だ改善の余地が残されている。

本論文では、Matching Pursuits を用いた動画像符号化において、予測誤差信号のエネルギーが高い領域にほとんどの最適近似点が含まれるという相関性と最適近似点の近傍は、近似効率が非常に高いという相関性を考慮した高速アトム探索法を提案する。提案法では、近似効率が最大となり得ないブロックを信号エネルギーの大きさにより削除し、残ったブロック単位の領域について、効率的な多段探索を行うことで、品質の低下を最小限に抑えたまま、探索処理の高速化を実現する。

2007年3月14日受付, 2007年5月21日再受付, 2007年6月11日採録

[†]金沢大学 大学院 自然科学研究科

(〒920-1192 石川県金沢市角間町, 076-234-4894)

^{††}NEC システムテクノロジー株式会社

(〒540-8551 大阪府中央区城見 1-4-24 号, NEC 関西ビル, 06-6945-3400)

[†]Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University

(Kakumamati, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-1192, Japan)

^{††}NEC System Technologies, Ltd.

(NEC Kansai Bldg., 4-24, Shiromi 1-Chome, Chuo-ku, Osaka-shi, Osaka 540-8551, Japan)

$\vec{\alpha}, \vec{\beta}$	s	ξ	ϕ
0	2	0	0
1	3	0	0
2	4	0	0
3	5	0	0
4	6	0	0
5	8	0	0
6	10	0	0
7	11	0	0
8	1	1	$\pi/2$
9	5	1	$\pi/2$
10	11	2	$\pi/2$
11	10	3	0
12	8	2	0
13	4	2	0
14	4	2	$\pi/4$
15	6	4	$\pi/4$

図 1 Matching Pursuits 基本辞書 (N=16)
Basic Dictionary for Matching Pursuits (N=16).

2. Matching Pursuits

2.1 Matching Pursuits の基本原理

Matching Pursuits は、非直交で overcomplete な基底ベクトル $g_\gamma(t)$ によって構成される辞書 \mathcal{D} 内の波形の線形結合により、符号化対象信号 $f(t)$ を近似構成するものである。

Matching Pursuits による近似信号 $\hat{f}(t)$ は式 (1) で表される。

$$\hat{f}(t) = \sum_{k=1}^m p_k \cdot g_{\gamma_k}(t - \tau_k) \quad (1)$$

ここで τ_k, γ_k, p_k はそれぞれ基底ベクトルの位置、種類、スケールを表し、これらの3種類のパラメータの組 (τ_k, γ_k, p_k) によって決定する波形をアトム (atom) と呼ぶ。 m は信号を構成するアトムの数を表す。

まず、信号 $f(t)$ をある基底ベクトル $g_{\gamma_1}(t - \tau_1)$ へ射影することにより信号 $f(t)$ は

$$f(t) = p_1 \cdot g_{\gamma_1}(t - \tau_1) + Rf(t) \quad (2)$$

$$p_1 = \langle f(t), g_{\gamma_1}(t - \tau_1) \rangle \quad (3)$$

と表せる。ここで p_1 は信号と基底ベクトルの内積値であり、 $Rf(t)$ は基底ベクトル $g_{\gamma_1}(t - \tau_1)$ へ射影した場合の残差信号である。また基底ベクトル $g_\gamma(t)$ のノルムが1に正規化されているものとする、式 (2) において $Rf(t)$ と $g_{\gamma_1}(t - \tau_1)$ は互いに直交していることから、以下の関係式が成立する。

$$\|f(t)\|^2 = p_1^2 + \|Rf(t)\|^2 \quad (4)$$

すなわち内積値 p の絶対値を最大とするパラメータを求めることにより、反復の各段階において残差信号のエネルギー減少量 $\Delta e = \|f(t)\|^2 - \|Rf(t)\|^2$ を最大とするアトムを決定することができる。

同様に残差信号 $Rf(t)$ を展開すると

$$Rf(t) = p_2 \cdot g_{\gamma_2}(t - \tau_2) + R^2f(t) \quad (5)$$

となる。上記の処理を繰り返し行うことにより、 m 個のア

トムにより展開された信号 $f(t)$ は

$$f(t) = \sum_{k=1}^m p_k \cdot g_{\gamma_k}(t - \tau_k) + R^m f(t) \quad (6)$$

となる。したがって、 m 個のアトムにより信号 $f(t)$ を近似的に再構成することができる。

2.2 Matching Pursuits の辞書

Matching Pursuits では、内積演算量の削減を目的として、式 (7) に示す Gabor 関数の直積により作成される2次元可分型辞書が一般的に用いられる。

$$g_{\vec{\gamma}}(n) = K_{\vec{\gamma}} g \left(\frac{n - \frac{N}{2} + 1}{s} \right) \cos \left(\frac{2\pi\xi(n - \frac{N}{2} + 1)}{N} + \phi \right) \quad (7)$$

$$n \in \{0, 1, \dots, N-1\}$$

ここで、 K は正規化係数であり、 N は基底関数長を示す。また、 $g(\cdot)$ はガウシアンウィンドウを示す。図 1 に、本論文で使用するパラメータセット $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$ と式 (7) から作成される辞書を示す²⁾。 $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$ はそれぞれ辞書における水平および垂直方向の基底ベクトルを決定するパラメータセットである。

2.3 Matching Pursuits におけるアトム探索

Matching Pursuits では、最大の近似効率を得られる信号と辞書波形の組合せを求める処理をアトム探索と呼ぶ。すべての辞書内波形と画面内すべての画素点を中心とする信号ブロックについて、内積評価を行なうことにより、最良の組合せが得られるが、その計算量は膨大なものとなる。そのため、探索においては、効率よく評価点を削減することで高速化を行う手法が一般的である。また、一度探索を行った場所については、得られる評価値とアトムパラメータをメモリーに記憶することにより、その位置の信号の更新が行なわれるまで再評価を行なう必要がないため、メモリー記憶の手法も合わせて用いられる。従来の高速化手法を次に示す。

(1) n 画素間隔探索

符号化対象画面全体について n 画素間隔の位置で、近似効率を評価する手法である。処理は単純で計算量を大きく削減することができるが、最大効率を得られる位置を評価しない可能性が高く、品質も大きく低下する。また、明らかに探索の必要がないようなブロックも評価するため、効率的とは言えない。

(2) 最大エネルギーブロック周辺探索¹⁾

符号化対象画像をブロックに分割し、画像中で信号エネルギーが最も高いブロックをまず求める。そのブロックを中心とした一定範囲内のみを評価対象とする探索法である。信号エネルギーが最大となる場所の近辺に最適探索点が存在する可能性が高いことに着目した手法であり、ブロック内信号エネルギーの計算がオーバヘッドとなるが、探索点の削減による計算量の減少と比べて非常に小さいため、全体として計算量の削減が可能となる。

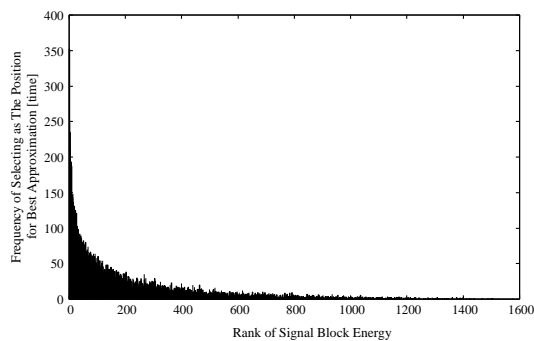


図 2 ブロック内の信号エネルギーと最適探索点の関係 (carphone)
Correlation between signal block energy and optimal searching points (carphone).

図 2 に、符号化対象信号の各ブロックにおける信号エネルギーの順位とそのブロック内で最大近似効率が得られた頻度を示す。図 2 より、ブロック内信号エネルギーの大きさと最適近似位置に相関があることが確認できる。しかし、信号エネルギーが最大となる位置のみで見ると、最大近似効率が得られる頻度は、わずか数%である。また、基礎実験により、最大信号エネルギー周辺探索における探索範囲とその中に最適探索点が含まれる頻度を調査したところ、 ± 8 画素の範囲について探索を行ったとしても、その頻度は 20%以下に過ぎないという結果が得られた。そのため、最大エネルギーブロック周辺探索においても、再生画像品質の大きな低下は避けられない。

3. 非低エネルギー領域多段探索

本論文で提案する予測誤差信号エネルギーが大きい領域と最適近似位置の空間的な相関性を考慮したアトム探索法について述べる。提案法では、まず、近似効率が最大となる信号となり得ない領域を、ブロック単位でその信号エネルギーの大きさにより削除し、残ったブロック単位の領域について、効率的な多段探索を行う。以下で各処理の詳細を述べる。

図 2 の信号エネルギーの小さいブロック群に注目すると、最大の近似効率が得られるブロックが、ほとんど存在していないことが確認できる。これに基づき、エネルギーの小さなブロックは評価対象から除外し、残った領域のみを探索対象とする。このとき、探索領域となるブロックの選択は以下の手順で行う。

まず予測誤差画像をブロックに分割し、ブロック毎に信号エネルギーを計算する。信号エネルギーが低いものから順に、次の二つの判定終了条件のどちらかを満たすまで、探索対象から除外していく。

● 除外信号エネルギーの総計による判定

探索領域から除外したブロックの信号エネルギーの総計が予測誤差画像全体の一定以上の割合を占めた場合、探索領域除外判定を終了する。このときの閾値は対象画像エネルギー全体の 7%とする。これは複数のテスト画像を用いた基

表 1 多段探索における 2 段階探索範囲と PSNR (200 アトム, 2 段階探索, 初期探索間隔 4 画素)

Search area of 2nd step in multiple-step search and PSNR (200 atoms, 2-step search, initial step = 4).

画像	2 段階探索範囲				
	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5
akiyo	37.98	38.55	38.67	38.71	38.68
mother	35.86	36.09	36.18	36.20	36.21
carphone	33.29	33.58	33.66	33.69	33.72
foreman	30.82	31.04	31.11	31.13	31.15

礎実験において、除外領域の割合が全体の 40~50%となった値であり、この割合を越えた場合に再生画像の PSNR が大きく低下するという結果に基づいて定めた閾値である。

● ブロック毎の信号エネルギーによる判定

判定対象ブロック単一の信号エネルギーが、予測画像全体のエネルギーの一定量を越えた場合、探索領域除外判定を終了する。影響の大きい単一で高信号エネルギーのブロックが、信号エネルギーの総計による判定によって、探索対象から除かれるのを防ぐための処理である。このときの閾値は、対象画像エネルギー全体の 0.02% とする。この値は、単一信号ブロックのエネルギーとその位置から最大近似効率が得られる頻度、および実際に符号化処理を行った場合の再生画質の変化を求める実験から得られた経験的な値である。

これらの処理によって有効な探索領域を選択するが、この領域を全探索するのでは、まだ多くの計算量が必要となる。そこで、さらに選択領域について高い近似効率が得られる位置の分布に基づいた探索を行う。

一般的な予測誤差画像においては、信号エネルギーが高い部分で、高い近似効率が得られることが多い。また、高い近似効率を示す画素点は、局所領域でみると空間相関性が高い。さらに、高い近似効率が得られる高信号エネルギー部は、画像内に広く分布しており、多峰性を有する。

提案法では、まず多峰性を考慮し、選択した探索領域のみを 4 画素間隔で評価を行い、その中で近似効率が最大となる画素点を求める。次に、近似効率の高い位置の局所空間相関性を考慮し、その周辺 ± 3 画素の範囲について評価を行う多段探索を用いて、最適な近似位置を求める。

多段探索における探索範囲設定の根拠として、表 1 にアトム探索時に画面全体を 2 段階探索した場合の 2 段階探索範囲とそれに対する再生画像の PSNR の比較を示す。このとき初期探索間隔は 4 画素に設定している。表 1 より、2 段階探索間隔を広げることで、PSNR が比較的大きく改善するのは $\pm 3 \sim 4$ 画素までである。このことから、近似効率が高い点が集中する範囲も同程度と推定できる。また演算量も考慮して、本提案法における 2 段階探索範囲は ± 3 画素に設定する。

4. シミュレーション実験

テスト用の動画像 akiyo, mother&daughter(略記: mother), carphone, foreman (QCIF, Y 信号, 50 フレー

表 2 PSNR と処理時間の比較 (200 アトム)
Comparison of PSNR and ratio of processing time (200 atoms).

探索法	画像	PSNR [dB]	処理時間比
全探索	akiyo	38.84	1.000
	mother	36.32	1.000
	carphone	33.84	1.000
	foreman	31.20	1.000
n 画素 間隔探索 (n=4)	akiyo	36.60	0.080
	mother	35.18	0.080
	carphone	32.50	0.080
	foreman	30.15	0.080
最大 エネルギー ブロック 周辺探索	akiyo	37.48	0.242
	mother	35.68	0.242
	carphone	32.65	0.242
	foreman	30.42	0.242
全画面 多段探索	akiyo	38.67	0.122
	mother	36.18	0.122
	carphone	33.66	0.122
	foreman	31.11	0.122
非低 エネルギー 多段探索	akiyo	38.61	0.101
	mother	36.15	0.101
	carphone	33.61	0.093
	foreman	31.11	0.096

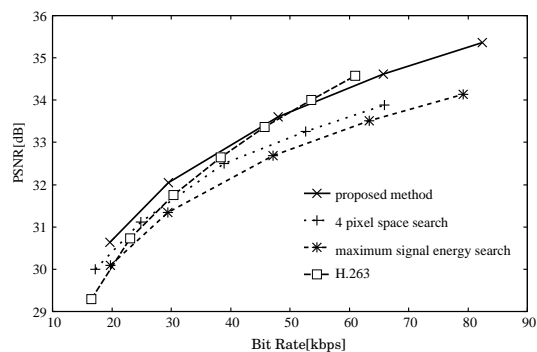
ム, 10 fps) を用いてシミュレーション実験を行い, 提案法の効果を検証する. 辞書は図 1 に示す基本辞書を用いる.

表 2 に, 各テスト画像における PSNR の平均値と全探索を 1 とした場合の処理時間比を示す. 比較のために, 全探索, n 画素間隔探索, 最大エネルギーブロック周辺探索および全画面多段探索における結果も示す. n 画素間隔探索における探索間隔 n は 4, 最大エネルギーブロック周辺探索における, エネルギーブロックのサイズを 4×4 画素, 探索範囲を ±8 画素として測定を行った. また提案法における探索領域判定のためのエネルギーブロックサイズは, 最大エネルギー周辺探索と同じ 4×4 画素のブロックを用いた. 表 2 より, 信号エネルギーにより選択した区域のみ多段探索を行うことで, 全探索と比較して, PSNR の低下を 0.2 dB 程度に抑えつつ, 処理時間を約 90%削減した. 従来法である n 画素間隔探索や最大エネルギーブロック周辺探索と比較すると, 最大エネルギー探索に対しては, PSNR, 処理時間共に改善されている. n 画素間隔探索に対しては, 処理時間で劣っているが, 20%程度の処理時間の増加で, PSNR が 1 dB 前後向上しており, 大きな品質向上が得られている. また, 提案法と全画面多段探索の比較により, 提案法において, 非低エネルギー領域探索が処理時間の削減に寄与し, 多段探索が品質の維持に寄与していることが確認できる.

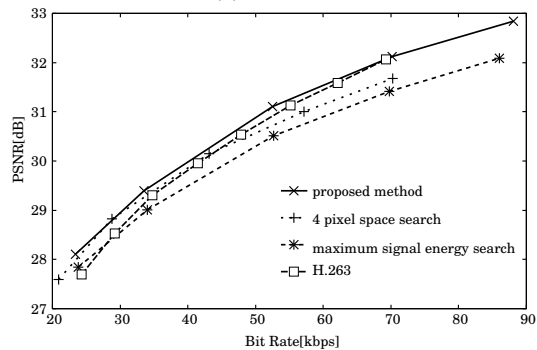
図 3 に提案法を用いた, 動画像符号化の符号化特性および 4 画素間隔探索と最大エネルギー探索を行った際の符号化特性を示す. また, 同程度のビットレートを対象とした標準符号化法である H.263 の符号化特性も合わせて示す. 図 3 より, 提案法を用いることで, 再生画像の品質が向上し, 従来の探索法を用いた際の符号化特性を改善することができた. また, 基本的な辞書のみを用いた符号化にも関わらず, 低ビットレートで H.263 を上回る特性が得られた.

5. む す び

本論文では, Matching Pursuits を用いた動画像符号化処理において, アトム探索というアプローチからの高速化



(a) carphone



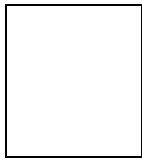
(b) foreman

図 3 符号化特性
Coding performance.

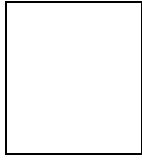
手法を提案した. 提案法では, 予測誤差画像の高信号エネルギー領域と最適近似点および高近似効率点間の空間的相関性に基づき, 非低エネルギー領域のみを多段探索する手法を提案した. シミュレーション実験により, 提案法を用いることで, 全探索の場合と比較して, PSNR の低下を 0.2 dB 程度に抑えたまま, 処理時間を約 90%削減することが可能となることを示した. 今後は, 階層構造を持つ辞書などの他の高速化手法に対して, 提案法を適用した場合についても検証を行う予定である.

【文 献】

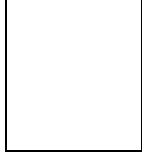
- 1) R. Neff, A. Zakhor: "Very Low Bit-Rate Video Coding Based on Matching Pursuits", IEEE Trans. Circuits & Syst. Video Technol., **7**, 1, pp.158-171, (1997)
- 2) R. Banham, C. Brailean: "A Selective Update Approach to Matching Pursuits Video Coding", IEEE Trans. Circuits & Syst. Video Technol., **7**, 1, pp.119-129, (1997)
- 3) S. Mallat, Z. Zhang: "Matching Pursuits With Time-Frequency Dictionaries", IEEE Trans. Signal Process., **41**, 12, pp.3397-3415, (1993)
- 4) R. Neff, A. Zakhor: "Matching Pursuits Video Coding. I. Dictionary Approximation", IEEE Trans. Circuits & Syst. Video Technol., **12**, 1, pp.13-26, (2002)
- 5) C.De. Vleeschouwer, B. Macq: "Subband Dictionaries for Low-Cost Matching Pursuits of Video Residues", IEEE Trans. Circuits & Syst. Video Technol., **9**, 7, pp.984-993, (1999)
- 6) 今村 幸祐, 小場 由雅, 橋本 秀雄: "動画像符号化におけるサブバンド分割を用いた高速 Matching Pursuits アルゴリズム", 映像学誌, **60**, 7, pp 1059-1067, (2006)
- 7) ITU-T Study Group 15, "Draft Recommendation H.263", (1995)



いまむら こうすけ
今村 幸祐 1995 年，長崎大学工学部電気情報工
 学科卒業，1997 年，同大学院工学研究科修了，2000
 年，同大学大学院海洋生産科学研究科修了，同年，金沢
 大学工学部情報システム工学科助手，2005 年より，同大
 大学院自然科学研究科講師，博士（工学），主として画像
 符号化に関する研究に従事，



ながみ としやす
永見 利康 2005 年，金沢大学工学部情報システ
 ム工学科卒業，2007 年，金沢大学大学院自然科学研究科
 博士前期課程修了，現在，NEC システムテクノロジー
 株式会社に勤務，



はしもと ひでお
橋本 秀雄 1968 年，大阪大学工学部卒業，1970
 年，同大学院修士課程修了，1975 年，同大学院博士
 課程修了，同年，電電公社（現 NTT）電気通信研究所入
 所，以来，画像符号化方式，画像通信方式の研究開発に
 従事，現在，金沢大学大学院自然科学研究科教授，工学
 博士，正会員，