

複数の探索窓の相関制約を用いた時系列信号の高速探索手法

A Fast Search Method Based on Correlative Restriction between Multiple Search Windows

大盛 善啓†

Yoshihiro Ohmori

1. まえがき

映像や音声などの大容量データを効率よく視聴するために、自動インデクシングなどの大容量マルチメディアデータ構造化へのニーズが高まっている。映像ならばカット検出、類似シーン検出、顔検出、音声ならば話者交代検出、類似音検出、などの処理が構造化には必要だが、テンプレートマッチングはこれらの処理の基礎となる重要な技術のひとつである。

映像信号のテンプレートマッチングでは、探索すべき映像をテンプレート映像と呼び、テンプレート映像と同じ長さの探索窓を探索対象の映像信号の全区域内で動かして最も類似した部分を探す。類似度にはユークリッド距離、市街地距離、相関係数、ヒストグラム差分などが用いられる。

類似度にユークリッド距離や市街地距離を用いた場合の高速探索手法として、テンプレートが正解から少しでもずれると類似度算出の途中で残差の和が急激に増大することを利用して、残差の和がしきい値を超えると計算を打ち切る残差逐次検定法 (SSDA 法) が知られている [1][2]。SSDA 法はどのような特徴量にも対応できて汎用性が高いがマッチング処理はすべての位置で必要である。

類似度にヒストグラム差分を用いた場合の高速探索手法として、探索窓を少しだけ動かしても類似度は急激には変化しないことを利用して類似度がしきい値を超え得ない区間の探索処理をスキップする時系列アクティブ探索法が知られている [3][4]。オーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法は 2 つの探索窓を用いてスキップ先の類似度を予測することによってさらに高速化した [5]。

本研究では、オーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法と同様に 2 つの探索窓を用いる。2 つの探索窓を同時に考慮すると探索窓の間に相関制約が生じることを利用してさらに高速化できる可能性をこれまでに示した [6]。本稿では相関制約理論の詳しい分析結果と提案手法と従来手法を詳細に比較実験した結果を報告する。

1. 従来手法

2.1 時系列アクティブ探索法

時系列アクティブ探索法は、アクティブ探索法を音声や映像などの時系列信号の探索に適用した [3][4]。

図 1 に時系列アクティブ探索法で映像探索する例を示す。この図は文献 [4] の図 1 を簡略化したものである。図示はしないがテンプレート映像は L 枚のフレーム画像から構成され、1 枚のフレーム画像を n 分割した領域の平均輝度を算出して、総度数が $L \times n$ の輝度ヒストグラムを求める。

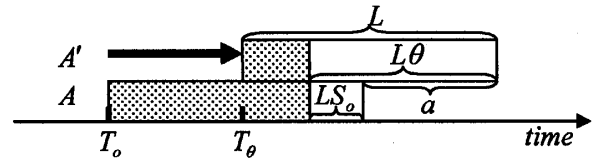


図 1 時系列アクティブ探索法の原理

横軸は時間軸を表す。図中の A は位置 T_0 に配置した探索窓を表し、テンプレート映像と同じ枚数のフレーム画像で構成され、同様に輝度ヒストグラムを算出する。

探索窓 A を移動した場合の類似度の変化を考える。 A' は探索窓 A をフレーム画像 a 枚分進めた状態の探索窓を表す。探索窓 A を時間軸の正の方向に 1 フレーム進めると、これまで探索窓に含まれていなかった信号が探索窓に含まれる。新たなフレーム画像がすべて類似度増加に寄与すると仮定すると、探索窓に新たに加わるすべてのフレーム画像のヒストグラム総度数は $a \times n$ だから、これを総度数 $L \times n$ で割った a/L だけ類似度は増加し得る。ここで探索窓 A とテンプレート映像の間で一致するヒストグラム要素が探索窓 A' にすべて含まれると仮定し、テンプレート映像と探索窓 A との類似度を S_0 ($0 \leq S_0 \leq 1$) とすると、探索窓 A' の類似度は最大でも $S_0 + a/L$ までしか増加しない。この類似度以下では一致の対象外と判定するためのしきい値を θ ($0 \leq \theta \leq 1$) に設定すると、 $S_0 + a/L \leq \theta$ の区間ではしきい値を上回る可能性がないので、位置 T_0 から位置 $T_0 + L\theta$ までの探索処理をスキップできる。

時系列アクティブ探索法によるスキップ幅の上限を w_1 とすると、 $S_0 + a/L \leq \theta$ を式展開して $w_1 \leq L(\theta - S_0)$ を導ける。 w_1 は 1 以上の整数だから floor を小数点以下を切り捨てる関数とすると式 (1) を導ける。

$$w_1 = \begin{cases} \text{floor}(L(\theta - S_0)) + 1 & \text{if } S_0 < \theta \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 オーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法

オーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法は、時系列アクティブ探索法をさらに高速化した [5]。

図 2 にオーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法の原理を示す。この図は文献 [5] の図 1 から抜粋し、補足を付け加えたものである。横軸は探索窓の位置、縦軸は類似度を表し、図 1 の場合と同じテンプレート映像と探索窓を用いた場合を示す。探索窓 A の位置を T_0 とすると、探索窓が 1 フレーム進むと最大で n 度数のヒストグラムが類似度増加に寄与し得るから、類似度の上限は直線 (1) に示す傾き $1/L$ の直線で表せる。直線 (1) の類似度が θ

†株式会社東芝研究開発センター, Toshiba Corporate Research & Development Center

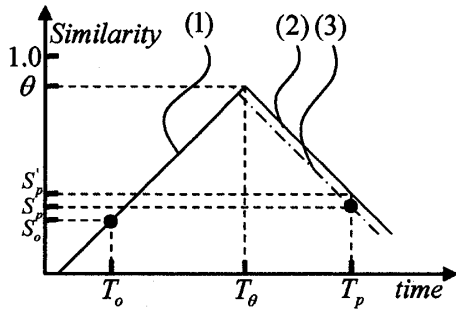


図2 オーバースキッピングによる
時系列アクティブ探索法の原理

の場合が時系列アクティブ探索法の移動の上限, すなわち時系列アクティブ探索法のスキップ幅の上限であり, この位置を T_θ とする. 点 (T_θ, θ) から類似度が最も急峻に下がる場合は, 直線(2)に示す傾き $-1/L$ の直線で表せる.

位置 T_p の類似度について考える. 位置 T_p での直線(2)の類似度を S_p' , 実際の類似度 S_p とすると, $S_p' > S_p$ の場合は類似度の上限は実際には直線(3)となる. 直線(1)と直線(3)の交点の類似度はしきい値 θ を超えないから, 位置 T_o から位置 T_p までの間で類似度がしきい値 θ を超えることはあり得ない. よってこの区間の探索処理をスキップできる. 位置 T_p は最大のスキップ幅となるように, これまでの類似度の経過から予測する.

時系列アクティブ探索法によるスキップ幅はオーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法のスキップ幅より広いため高速化が期待できる. ただし, $S_p' \leq S_p$ の場合は探索窓 A を戻して類似度を再計算する必要がある, この処理をバックトラックと言う. 位置 T_p はバックトラックができるだけ発生しないように決める必要がある.

オーバースキッピングによるアクティブ探索法によるスキップ幅の上限を w_2 とすると $w_2 \leq (T_p - T_\theta) + (T_\theta - T_o)$ である. $T_p - T_\theta = (\theta - S_p')/L$, $T_\theta - T_o = (\theta - S_o)/L$ を代入すると $w_2 \leq L(2\theta - S_p' - S_o)$ となる. floor を少数以下を切り捨てる関数とすると w_2 は 1 以上の整数だから式(2)を導ける.

$$w_2 = \text{floor}(L(2\theta - S_o - S_p')) + 1 \quad \text{if } (S_o < \theta) \text{ and } (S_p' < \theta) \quad (2)$$

3. 従来手法の問題

図3に, オーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法の原理を図1と同様の方法で書き直した説明図を示す. この図は文献[5]にはない.

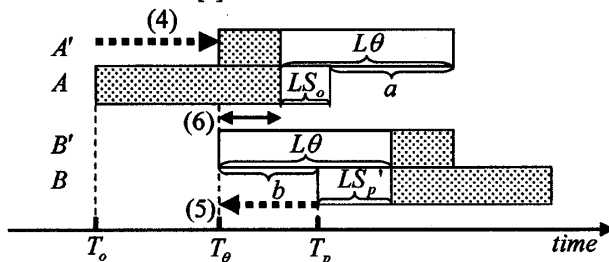


図3 従来手法の問題の説明図

探索窓 A と A' は図1と同じものであり, 矢印(4)の幅だけスキップできる. ここで位置 T_p の類似度を S_p' と予測し, この位置に探索窓 B を設定する場合を考える. 時系列アクティブ探索法では, 探索窓を負の方向に移動しても同じ原理でスキップ幅を算出できるから, 矢印(5)の幅だけ負の方向にスキップできる. 矢印(4)と矢印(5)が重なれば位置 T_o から T_p の全区間で探索処理をスキップできる.

式で説明すると, 矢印(4)の幅を a , 矢印(5)の幅を b とすると, $a = (\theta - S_o)$, $b = (\theta - S_p')$ だから, $a + b = (2\theta - S_o - S_p')$ となる. 位置 T_o と T_p の間隔が $a + b$ よりも狭い場合のスキップ幅の上限は, $w_2 = T_p - T_o$ とすると $w_2 = L(2\theta - S_o - S_p')$ となり, 式2と同じ式を導ける.

図2と図3は以上に示したように同じ原理を説明している. しかし, 図2は類似度の変化にのみ着目しており, 図3に含まれる探索窓の配置の関係が欠落している. 探索窓 A と探索窓 B が同時に移動した場合を考える. 図3の説明で探索窓 B は矢印(5)の幅だけ負の方向にスキップできるとしたが, 探索窓 A が矢印(4)の幅だけスキップした後は, 矢印(6)の区間ではすべてのヒストグラム要素は類似度増加に寄与し得ない. したがって, 探索窓 A' と探索窓 B' が同時に図3に示した状態になることは実際にはない.

このようにオーバースキッピングによる時系列アクティブ探索では, 2つの探索窓のスキップ幅を独立に算出したために, 両方の探索窓を同時に考慮すれば類似度増加に寄与するはずがない区間でも類似度増加に寄与するとしたので無駄があった.

4. 提案手法の原理

本章では, 2つの探索窓を同時に考慮すると, 探索窓の配置による制約が類似度に生じ, これを利用するとスキップ幅を広げられることを示す.

図4に提案手法の原理を示す. 図の上部は探索窓の配置, 図の下部は探索窓の類似度の上限を表し, 横軸の時間軸は図の上部と下部で共通である. 図のように2つの探索窓の間にすき間がある場合を考える. 類似度 S_o の探索窓 A を位置 T_o に, 類似度 S_p' の探索窓 B を位置 T_p に配置し, 探索窓の幅を L , 探索窓のすき間の幅を d とする. $d > 0$ のとき $S_o + S_p' < \theta$ である.

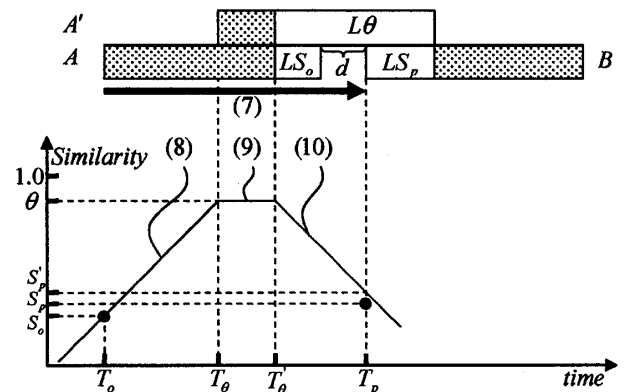


図4 提案手法の原理

探索窓 A を A' の位置に移動したとき、すき間 d の信号列すべてが類似度増加に寄与したと仮定すると類似度の上限は $S_o + d/L + S_p$ と表され、この上限がしきい値 θ 以下の場合には、すき間 d の周辺では類似度がしきい値 θ を超えることはあり得ず、矢印(7)の区間の処理をスキップできる。

提案手法の原理を下図のグラフでも説明する。探索窓 A で時間軸の正側にヒストグラム的一致要素がすべて集まったと仮定した境界を位置 T_θ 、探索窓 B で時間軸の負側における同様の境界を位置 T_θ' とする。探索窓 A が移動すると図 2 と同様に直線(8)に示すように始めは類似度が増加し、位置 T_θ を超えると直線(9)に示すように類似度の増加が止まり、位置 T_θ' を超えると直線(10)に示すように類似度が低下する。位置 T_p での類似度の上限について考える。位置 T_p での直線(10)の類似度を S_p' 、実際の類似度 S_p とすると、直線(10)は類似度の上限を表すから $S_p' > S_p$ の場合は位置 T_θ から位置 T_p までの間で類似度がしきい値 θ を超えることはあり得ず、矢印(7)の区間の処理をスキップできる。提案手法もオーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法と同様に、スキップ先の類似度を予測するためバックトラックが発生する。

提案手法によるスキップ幅の上限を w_3 とすると $w_3 \leq T_p - T_\theta$ である。すき間 d は $L(\theta - S_o - S_p)$ と表せるから、 $T_p - T_\theta = L + L(\theta - S_o - S_p) = L(1 + \theta - S_o - S_p)$ を代入すると、 $w_3 \leq L(1 + \theta - S_o - S_p)$ となる。floor を少数以下を切り捨てる関数とすると w_3 は 1 以上の整数だから式(3)を導ける。

$$w_3 = \text{floor}(L(1 + \theta - S_o - S_p)) + 1 \quad (3)$$

$$\text{if}(S_o < \theta) \text{and}(S_p < \theta) \text{and}(S_o + S_p \leq \theta)$$

表 1 に手法別のスキップ幅の上限を示す。TAS は時系列アクティブ探索法、OTAS はオーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法、CTAS は提案手法を表す。前提条件を満たすとき、 $w_2 - w_1 = \theta - S_p > 0$ だから $w_1 < w_2$ 、 $w_3 - w_2 = 1 - \theta > 0$ だから $w_2 < w_3$ であり、 $w_1 < w_2 < w_3$ となり提案手法が最もスキップ幅が広く高速化が期待できる。

時系列アクティブ探索法ではスキップ幅が保障されるのに対して、オーバースキッピングによるアクティブ探索法と提案手法では、スキップ幅を予測して設定しなければならず、最大のスキップ幅を常に設定できるとは限らないためロスが発生する。また、予測に失敗した場合にはバックトラックのための余分な処理が発生する。そのため、予測の精度が悪いと時系列アクティブ探索法より探索速度が低下することもあり得る。

表 1 手法とスキップ幅

手法	スキップ幅	バックトラック
TAS	$w_1 = L(\theta - S_o) + 1$	なし
OTAS	$w_2 = L(2\theta - S_o - S_p) + 1$	あり
CTAS	$w_3 = L(1 + \theta - S_o - S_p) + 1$	あり

5. 実験

5.1 実験方法

映像を探索する実験によって提案手法を従来手法と比較する。この実験では 50 分の映像から 8 秒のテンプレート映像を探索し、全探索、時系列アクティブ探索法、オーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法、提案手法を同一条件で用いた場合のマッチング回数とバックトラック回数を調べる。

実験に用いる映像は 0.5 秒ごとに I-Picture を含む MPEG2 映像である。探索対象は 50 分の映像から抽出した 6000 枚の I-Picture 画像列とし、テンプレート映像は別の映像から探索対象の映像にも含まれる 8 秒の映像を手動で選択し、その映像から抽出した 16 枚の I-Picture 画像列とする。テンプレート映像は番組のコーナー検出を想定してコーナータイトル映像を選択する。特徴量は 1 枚のフレーム画像を 16 分割した領域ごとに平均輝度値を算出し、探索窓に含まれる平均輝度値を 24 次元のベクトル量子化をした輝度ヒストグラムを算出する。候補位置類似度は単純に現在位置類似度と等しいと予測する。オーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法と提案手法では、スキップ幅を上限と危険率 ζ ($0 \leq \zeta \leq 1$) の積を用いる。バックトラックの際には、算出したスキップ幅の半分まで戻り、それでもバックトラックが必要な場合はさらにスキップ幅を半分、というように再帰的に戻す。

実験 1 では、しきい値を変化させた場合のマッチング回数を従来手法と比較する。実験 2 では、危険率を変化させた場合のバックトラック回数を調べる。実験 3 では、バックトラック処理を 1 回のマッチング処理と換算して、しきい値を変化させた場合のマッチング回数とバックトラック回数の合計を調べ、バックトラックが処理量に与える影響を調べる。

5.2 実験結果

図 5 に実験 1 でしきい値を変化させた場合のマッチング回数を手法別に示す。横軸はしきい値 θ 、縦軸はマッチング回数を表し、凡例の TAS は時系列アクティブ探索法、OTAS はオーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法、CTAS は提案手法を表す。しきい値が 0.9 を超えると正解が得られなかったため図示していない。このグラフでは危険率は 1.0 とした。

しきい値の全域にわたって、時系列アクティブ探索法、オーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法、提案手法、の順にマッチング回数が少なかった。しきい値が 0.0 から 0.3 の範囲ではどの手法でも高速化の効果がなかったが、ほとんどすべてのデータが類似度の分布範囲外のためにスキップできなかったためと考えられる。しきい値が 0.4 以上ではどの手法でも反比例曲線に似た曲線を描いた。マッチング回数はスキップ幅の逆数だから、表 1 に示した各手法のスキップ幅の逆数を考えると反比例曲線の式となるはずであり、実験結果と合致した。しきい値が 0.4 から 0.8 の範囲では、提案手法が従来手法と比較してマッチング回数の差が大きかった。しきい値が 0.9 では提案手法とオーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法との差がほとんどなかった。 $w_3 < w_2 = 1 - \theta$ だから、しきい値 θ が 1 に近づくと w_3 と w_2 はほとんど等しくなるはずであり、実験結果と合致した。

図6に実験2で危険率が1.0, 0.95, 0.9の場合のバックトラック回数を示す。横軸はしきい値を表し、縦軸はバックトラック回数を表す。凡例で手法名の後の数字は危険率を表し、例えばCTAS-0.95は提案手法で危険度0.95を表す。実線のグラフは提案手法を表し、破線のグラフはオーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法を示す。

同じ手法では危険率が1.0, 0.95, 0.9の順にバックトラック回数が多かった。同じ危険率ならば、バックトラック回数は提案手法の方が多かった。スキップ幅が広いとバックトラックのリスクが高くなるはずであり、実験結果はこの原理と合致した。

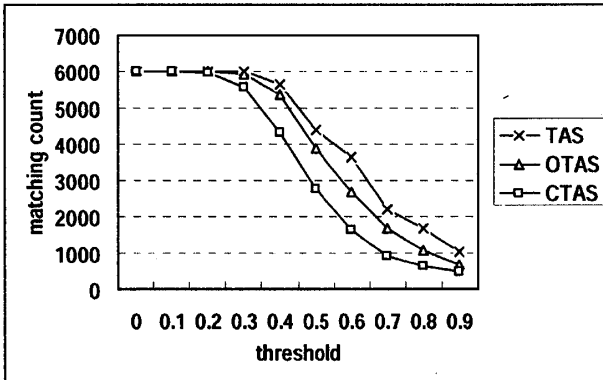


図5 手法別のマッチング回数の比較

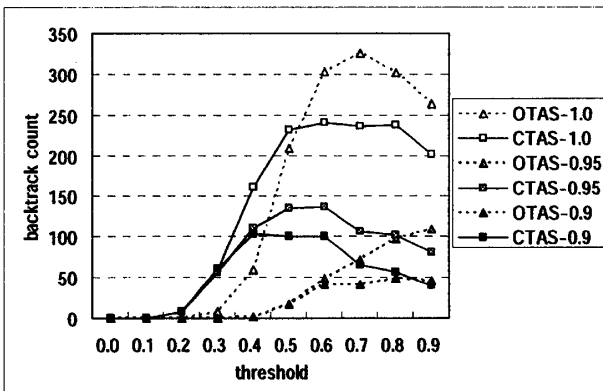


図6 危険率別のバックトラック回数の比較

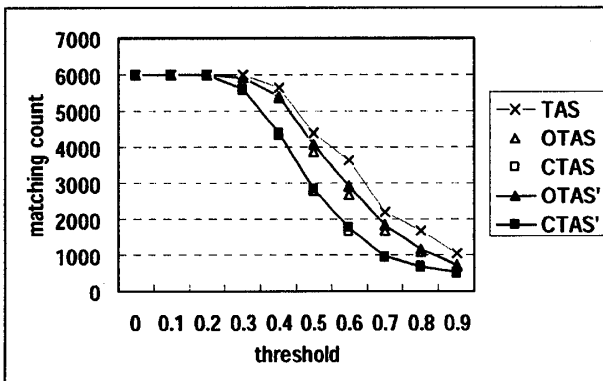


図7 バックトラックを考慮したマッチング回数の比較

手法別にグラフが立ち上がるしきい値に注目すると、オーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法ではしきい値が0.3から0.4、提案手法ではしきい値が0.2付近からバックトラック回数が急増した。これらの危険率以下ではスキップ幅が狭すぎて、ほとんどスキップできなかったためと考えられる。また、どのグラフも上に凸な曲線となった。しきい値が1に近づいてマッチング回数そのものが減少した影響と考えられる。

図7に実験3でしきい値を変化させた場合のマッチング回数とバックトラック回数の合計数を示す。横軸はしきい値、縦軸はマッチング回数とバックトラック回数の合計数を表し、凡例のOTAS', CTAS'は合計数を表す。実験1と比較するために図5に示したOTAS, CTAS, TASも図示した。OTASとCTASはプロットのみ示し、TASは折れ線で結んで示した。危険率は実験1と同じく1.0とした。

提案手法でもオーバースキッピングによる時系列アクティブ探索でもバックトラックによって処理量は増加したが、その影響は軽微だった。実験3では危険率を1.0としたが、マッチング回数とバックトラック回数には相関があるため、その他の危険率でもマッチング回数とバックトラック回数の合計を調べたところ、しきい値によって最適な危険率が変わり、しきい値が低いと危険率が0%, しきい値が高いと危険率が10%から15%が最適だったが、その差は全体の処理量と比較すると僅かだった。

6. 結論

2つの探索窓の配置によって生じる類似度の制約を利用した、時系列アクティブ探索法の高速化手法を提案した。数式によって従来手法よりもスキップ幅が広いことを証明し、映像探索の実験によって提案手法は従来手法よりもマッチング回数を低減できることを示した。バックトラック回数は従来手法より増えるが、マッチング回数と比較すると微小であり高速化にほとんど影響しなかった。

今後は、提案手法を音声信号、文字列、DNA塩基配列などの映像以外の信号列の探索に適用したり、高速性を生かしたアプリケーションに応用することが期待される。

参考文献

- [1] “新編画像解析ハンドブック”, 高木 幹雄, 下田 陽久 (監), pp.1669-1682, 東京大学出版会, 2004.
- [2] “デジタル画像処理”, デジタル画像処理編集委員会(監), pp.202-207, CG-ARTS 協会, 東京, 2004.
- [3] 村瀬 洋, V.V.Vinod, “局所色情報を用いた高速物体検出—アクティブ探索法”, “信学論(D-II), vol.J81-D-II, no.9, pp.2035-2042, Sept, 1998.
- [4] 柏野 邦夫, ガビン スミス, 村瀬 洋, “ヒストグラム特徴を用いた音響信号の高速探索方法”, “信学論(D-II), vol.J82-D-II, no.9, pp.1365-1373, Sept. 1999.
- [5] 柏野 邦夫, 村瀬 洋, “オーバースキッピングによる時系列アクティブ探索法の高速化”, “日本音響学会講演論文集, pp.445-446, Sept. 1999.
- [6] 大盛 善啓, “複数の探索窓の相関制約を利用した時系列アクティブ探索法の高速化”, “信学技報 IE2005-320, pp.15-20, March, 2006.