

尤度分布の観測と分割に基づく物体追跡

An Object Tracking Method based on Observation and Split of the Likelihood Distribution

林 豊洋*

Toyohiro Hayashi

榎田 修一†

Shuichi Enokida

江島 俊朗‡

Toshiaki Ejima

1 はじめに

本論文では、移動カメラが撮った動画像中の対象物体追跡を実現するため、色ヒストグラムを用いた Particle Filter[1] による追跡手法について検討を行う。追跡を安定に継続するためには、参照更新と、追跡対象と背景領域の分離を明確に行うことが重要である。色ヒストグラム特徴に基づく Particle Filter を利用した物体追跡法は、Nummiaro[2] や Pérez[3] らによって提案されており、参照の更新の枠組は考慮されているものの、追跡対象と背景領域の分離に関しては考慮されていない。

この問題に対し本論文では、(1) Particle の空間分布形状 (尤度分布) を用いて、背景と対象の明確な分離を行い、(2) 類似度演算に対象領域の周辺付近のヒストグラム特徴 (周辺特徴) を加える枠組を採り入れた追跡手法を提案し、追跡の安定化を行う。

上記の提案手法は安定した追跡性能を示すものの、複数の類似色領域が画像空間内に出現した場合の考慮は行われていない。本論文では、類似色領域が出現した場合に尤度分布の凸形状が複数個出現することに注目し、尤度分布に対する k -means クラスタリングを行い、類似色の領域が出現した場合へ対応する。提案手法を様々な撮影環境において適用した結果、対象追跡の安定化が高まり、その有効性が確認された。

2 尤度分布法の概要

筆者らが提案する物体追跡法である尤度分布法の概要について述べる。尤度分布法では、画像空間内の選択された領域と対象物体との類似性、すなわち尤度が必要となる。

領域の選択に関しては Particle Filter を利用し、Particle の尤度は色ヒストグラムの類似度を利用して計測する。

2.1 追跡対象の状態ベクトル

尤度演算を行う領域を Particle Filter によって推定する。サンプルの状態ベクトル s_t は画像内の位置を示す 2 次元とする。

$$s_t = (x_t, y_t)^T \quad (1)$$

Particle 数 N は予備実験により、追跡精度と処理速度とのバランスが良好となる、 $N = 500$ とする。

2.2 Particle の遷移モデル

本論文にて対象とする追跡物体は、人物の頭部等の移動速度が低速な物体である。したがって、追跡対象の遷移はランダム運動として仮定する。

$$s_t = s_{t-1} + \epsilon_t \quad (2)$$

ここで、 s_{t-1} は前時刻の状態ベクトルであり、 ϵ_t は位置に対するガウス分布に基づくランダムノイズ $\epsilon_t \sim N(0, \Sigma_\epsilon)$ である。

2.3 Particle の尤度計算

Particle の尤度 π_t の計算には物体のエッジ情報や色情報など、様々な特徴量が利用される。

尤度分布法では、対象物体の回転や歪み、照明変動に頑健な追跡処理を行うため照明変動に頑健な r_g 色空間 [6] によって構成される色ヒストグラムを用いる。

Particle と対象物体との色ヒストグラム $H_1(r, g), H_2(r, g)$ の類似度 S_c を式 (3) により定義する。

$$S_c(H_1, H_2) = \sum_{r=1}^{rmax} \sum_{g=1}^{gmax} \min(H_1(r, g), H_2(r, g)) \quad (3)$$

なお、 H_1 および H_2 は $\sum_r \sum_g H(r, g) = 1.0$ に正規化を行い、 S_c の値は 0 から 1 の範囲をとる。 i 個目の Particle の尤度 $\pi_t^{(i)}$ は、時刻 t における参照色ヒストグラム H_t^R と、Particle の状態 $s_t^{(i)}$ を重心とした、幅と高さが w_t, h_t の矩

*九州工業大学情報科学センター

†九州工業大学情報工学部

‡九州工業大学情報工学部

形領域の色ヒストグラム $H_t(s_t^{(i)}, w_t, h_t)$ とのヒストグラム類似度により定義する.

$$\pi_t^{(i)} \propto S_c(H_t^R, H_t(s_t^{(i)}, w_t, h_t)) \quad (4)$$

2.4 参照更新の中心位置推定

Particle Filter を用いた物体追跡法を継続するためには、手掛かりとなる参照 (色ヒストグラム) を各時刻において適切に更新することが必要である.

Particle Filter を用いた追跡法では、参照更新の中心位置推定に関して、Particle の尤度 π_t が最大であった位置や、尤度の加重平均を用いる手法が多く存在する. これらの方法は一見合理的に見えるが、更新の候補となる領域は、対象物体内の中心付近とは限らないため、追跡時に問題となる drifting (追跡を続けるうちに対象物体の推定位置が徐々に追跡対象から離れていく現象) を引き起こす可能性がある.

尤度分布法では参照の更新を行うために、個々の Particle の尤度に注目するのではなく、尤度の空間分布形状に注目する. すなわち、対象物体領域付近において、Particle の分布形状が釣鐘形状になることに着目し、釣鐘形状の高台の領域を抜き出し、その領域の重心を参照の更新に用いる.

尤度分布とは、時刻 t における Particle の尤度 π_t に関する分布である (図 1(a)). 図 1(a) の左図は、ある時刻における参照画像の矩形領域と入力画像を示しており、入力画像の矩形領域は推定される対象の位置を示している (矩形領域の中心 $(\hat{s})_t$ 、幅 w_t および高さ h_t は、尤度分布のパラメタである分散に基づき決定を行ったものである). 図 1(a) の縦軸は、参照ヒストグラムを用いて、各 Particle に対する尤度を式 (4) によって計算した値を示している.

画像内に対象と類似した物体が存在しない場合、尤度分布は釣鐘形状となる. 釣鐘形状の中心を通り x 軸に平行で y 軸とは垂直な面で切った断面が図 1(b) である. 台形の上辺を構成する点を重心とする領域 (Particle が台形の上辺の点に該当する領域) は対象物体領域の内部 (物体領域) である可能性が高く、それらを集めた領域の集合は対象物体領域を覆う. 対して、それ以外の領域は物体周辺の背景領域であると定義できる.

したがって、尤度分布に対して閾値処理を行い、物体領域と背景領域を分離する処理が重要となる. 尤度分布法では、判別基準 (大津の 2 値化基準 [7]) を適用し、背景領域と物体領域を分離し、対象物体領域を決定する (図 2).

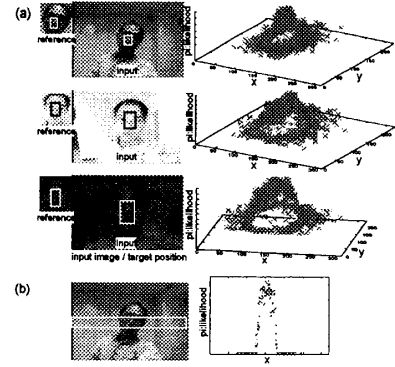


図 1: 尤度分布

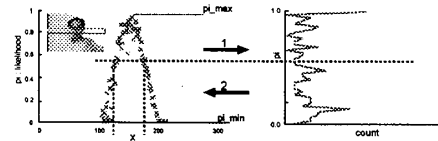


図 2: 背景クラスと物体クラスの分離

3 周辺特徴の導入

物体追跡では、追跡対象である前景領域と、それ以外の背景領域を明確に分離することが望ましく、前景と背景の分離能力を高めることが重要となる. 本章では、追跡の安定性を評価する分離指標および分離性能の向上手法について検討を行う.

3.1 尤度分布の安定性評価基準

尤度分布を導出する際に、二つの領域の尤度に大きな差が認められないときや、対象物体領域と判断される領域サイズが大きい場合は分類が難しくなる. このような場合に尤度分布の分類情報としての適性を示す指標があれば、より適切な対応が可能になると考える. いま、尤度分布の特徴量として、 $l = \pi_t^{(\max)} - \pi_t^{(\min)}$ 、 $\sigma = (\sigma^2_t)$ の二つの量を考える. ここで、 l は尤度の最大値と最小値の差を示し、 σ は対象領域の大きさを示している. 尤度分布の高さが高く、その広がりが小さい場合は、分類が容易であり、逆の場合は分類が難しいと考えられる. 本論文では上記の状態を示す指標として、式 (5) で定義する S 値を用いる.

$$S = l/\sigma \quad (5)$$

S 値を観測することにより、現時刻における追跡処理の安定性を観測することが可能になる. S 値が低い場合は安定性が低いと判断できるため、本論文では S 値が 0.5 以下

に低下した場合に、位置推定および参照の更新処理を停止する。

3.2 周辺特徴による分布の鮮鋭化

追跡対象である前景領域と、それ以外の背景領域を明確に分離することが重要であることを前述したが、これは S 値の感度を高めることが重要であることを意味する。本論文では S 値の感度を高める手段として、尤度分布の分散を抑える手法を検討する。尤度分布の分散は、Particle が入力画像内に広く分布した状況において大きな値となる。Particle の尤度は色ヒストグラムの類似度に基づいて算出されるため、類似度演算に用いる色ヒストグラム特徴を改良することにより、尤度分布の分散を抑えることが可能となる。

本論文では、境界付近のヒストグラム特徴を用いる。参照に対象以外の領域を用いることは、和田らの追跡手法 [8] において効果が示されている。本論文では、尤度分布の中心 $\hat{s}_{t+1}$ からのマハラノビス距離 $D(\hat{s}_{t+1}, \sigma^2_t) = D_1$ となる円周上に中心座標を持ち、幅と高さを参照更新に用いた幅 w_t^R 、高さ h_t^R と設定した局所領域の色ヒストグラム特徴を周辺特徴と定義する。ここで、 D_1 は 2.5 とする。式 (6) に周辺特徴を加えた尤度の計算式を示す。

$$\pi_t^{(i)} \propto S_c(H_t^R, H_t(s_t^{(i)})) - S_c(H_t^{AR}, H_t(s_t^{(i)})) \quad (6)$$

ここで、 H_t^R は現時刻の参照色ヒストグラム特徴であり、 H_t^{AR} は周辺特徴を示す。式 (6) は、周辺領域に類似した Particle の尤度を急激に下げる尤度関数であることを示している。

4 類似色領域への対応

尤度分布法は色ヒストグラムの尤度からなる単峰性の分布形状に基づく位置推定手法である [9]。したがって、追跡対象と類似色の物体が入力画像内に出現した場合、分布の分散が増大する現象や、分布の単峰性が崩れる現象が生じる。

図 3(a) に類似色の物体が出現した場合の追跡結果を示す。これは、人物顔に類似した色分布を持つ、人物の手が画像内に出現した例である。図 3(a) より、類似色が出現した状態では、Particle が追跡対象の領域と類似色の領域の双方に集中していることが観測できる。したがって、前時刻において追跡対象が存在した領域の尤度を高く設定することにより、誤追跡を防ぐことが可能となる。本論文では、前時刻の尤度分布のクラスタリングを行い、追跡対象付近の領域 (クラスター) に対して、尤度を高く設定する。ク

ラスタリング手法には、 k -means クラスタリングを利用する。本論文におけるクラスタリング手法は、(1) 尤度分布を獲得した後、分布に対する k -means クラスタリングを行う (2) 前時刻における物体位置 $\hat{s}_{t-1}$ からの距離が D_2 以下のクラスター中心を持つクラスターを統合 (3) 統合されたクラスターは、追跡対象の存在領域 R と定義 (図 3(c))、の 3 段階で構成される。

なお、 k -means クラスタリングの初期クラスター数は $k = 10$ 、クラスター統合の閾値は $D_2 = 2.0$ とする。追跡対象の存在するクラスターを考慮した尤度の計算式は式 (7)(8) となる。

$$\pi_t^{(i)} \leftarrow \delta_R \times \pi_t^{(i)} \quad (7)$$

$$\delta_R = \begin{cases} 1, & s_t^{(i)} \in R \\ 0, & \text{other cluster} \end{cases} \quad (8)$$

図 3(b) に尤度分布のクラスタリングを行い、類似色の領域が存在する画像における Particle の分布状況を示す。クラスタリングを行わない手法と比較し、Particle が追跡対象付近に集中していることが確認できる。

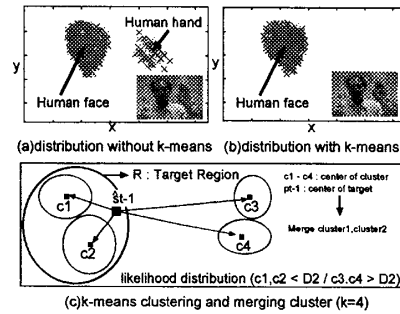


図 3: k -means 法による尤度分布のクラスタリング

5 追跡実験と性能評価

5.1 実験の概要

提案手法を動画に適用し、その性能を評価する。実験動画には、動画 (a) から (f) までの 6 種類を用いる (表 1)。全ての動画は QVGA 解像度で計算機に入力し、追跡初期の矩形窓の幅と高さは 15 ピクセルである。また、物体のランダム運動を定義するガウス分布の共分散は、 $\Sigma_c(\sigma_{cx}, \sigma_{cy}) = \{20, 20\}$ と設定する。

5.2 性能評価と考察

提案手法の追跡性能を、二つの基準によって評価する。適用手法は、Particle Filter による追跡 (尤度分布全体の重心を位置推定に利用) (M1)、尤度分布法 (M2)、尤度分布

表 1: 実験動画の環境設定

sequence	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
non-rigid	N	N	N	N	N	Y
move(cam)	Y	Y	Y	N	Y	N
move(target)	Y	Y	Y	Y	Y	Y
lighting	S	B	D	S	B	S
multiple	N	N	N	H	P	N
#of frames	580	508	510	224	200	330

Y: yes N: no S: a little change B: big change

D: drastic change H: hand P: other person

表 2: [左] 追跡性能 / [右] S 値 (平均)

	M1	M2	M3	M4	M2	M3	M4
(a)	580	580	580	580	1.90	2.31	2.31
(b)	389	508	508	508	1.47	2.67	2.66
(c)	154	371	510	510	-	1.84	1.79
(d)	17	24	224	224	-	1.28	1.49
(e)	13	63	51	200	-	-	2.18
(f)	330	330	330	330	0.36	1.41	2.63

法に周辺特徴による尤度を加えた手法 (M3) 尤度分布法に周辺特徴と分布のクラスタリングに基づく尤度を加えた手法 (M4) の4手法である。

第一の基準は、実験動画に適用し対象物体追跡の可否である。手法 M1 から M4 の4手法に対する物体追跡の結果を表2に示す。表2には、対象物体の追跡に成功した最終フレームのフレームナンバーが記載されている。各実験において、一度追跡に失敗した時点で、その追跡は終了するように設定している。本実験では、推定位置を決める矩形窓領域の半分以上が対象物体の外にあるとき、その時点で追跡失敗と判断する。

尤度分布を作成しない、Particle Filter による手法 M1 は、照明条件が安定な動画 (a)、非剛体を対象とした動画 (f) のみで追跡に成功している。尤度分布のみを利用する手法 M2 は、輝度値の低い動画 (c)、複数の類似色が出現する動画 (d)(e) では、途中で追跡に失敗する。手法 M3 では、動画 (c) における追跡に成功する。これは、周辺特徴を用いることにより、輝度の低い画像内においても、追跡対象付近が高い尤度を示すことが理由となる。また、手領域の出現する動画 (d) における追跡にも成功する。しかし、複数人物が出現する動画 (e) では、Particle が画像全体に分布し、追跡に失敗している。

尤度分布の k -means クラスタリングを行う手法 M4 では、全動画について追跡が可能であり、対象物体領域と背景領域への分離が良好に行えることを示している。

第二の基準は、尤度分布に対する S 値であるが、尤度分布のみを用いる手法 M2 と比較し、手法 M3, M4 が高い S 値を示す結果となった。これは、周辺特徴を用いることにより、尤度分布の分散を抑えた結果である。また、類似色の物体が出現する動画 (e) においては、クラスタリン

グを含む M4 が効果的である結果となった。

以上の結果より、尤度分布を用いた物体追跡法は高い S 値を維持した追跡が可能であることが示された。また、尤度分布法はクラスタリング手法との相性が良く、 k -means 法による簡単な拡張を施すことにより類似色領域の影響を抑えた追跡が可能であるといえる。

6 まとめ

本論文では、Particle の尤度分布形状に基づく位置追跡および参照の更新法と、位置追跡の安定化について検討した。提案手法は、尤度分布によって背景領域と対象領域との分離を行い、安定した追跡処理を行うものである。

加えて本論文では、追跡対象と類似した色分布を持つ領域の出現に対応するため、尤度分布の k -means クラスタリングを行い、対象領域付近の Particle の尤度を高める手法を検討した。クラスタリングを行うことにより、類似色が出現した場合の尤度分布に関しても単峰性を示し、安定した位置追跡が可能であった。結果として、尤度分布と周辺特徴および分布のクラスタリングを組み合わせた手法は、実験のために用意したすべての動画において位置追跡に成功した。

提案手法の活用例であるが、移動ロボットが自動的に対象を追跡し、対象に関する情報を収集するようなロボットの視覚機能としての応用が期待できる。

参考文献

- [1] M.Isard, A.Blake, "Condensation-conditional density propagation for visual tracking", IJCV, Vol.29, No.1, pp.5-28, (1998).
- [2] K.Nummiaro et al., "An Adaptive Color-Based Particle Filter", Image and Vision Computing, (2002).
- [3] P.Pérez et al., "Color-Based Probabilistic Tracking", ECCV, pp.661-675, (2002).
- [4] Iain matthers, Takahiro Ishikawa, Simon Baker, "The Template Update Problem", IEEE Trans. on PAMI, Vol.26 No.6, pp.810-815, (2004).
- [5] Randal Douc et al., "Comparison of Resampling Schemes for Particle Filtering", ISPA 2005, pp.64-69, (2005).
- [6] Jean-Christophe Terrillon, Arnaud Pilpre, "異なるカメラシステムによる多数色空間で観察された肌色の特性", SSII2002, pp.457-462, (2002).
- [7] 大津, "判別および最小2乗基準に基づく自動しきい値選定法", 信学論, Vol.J63-D, No.4, pp.349-356, (1980).
- [8] 和田, 濱塚, 加藤, "k-means トラッキング: 背景混入に対して頑健な対象追跡法", MIRU2004, Vol.2, pp.7-12, (2004).
- [9] 林, 榎田, 江島, "尤度分布の形状を用いた物体追跡の安定化", 画像電子学会誌, Vol.35, No.5, pp.582-587, (2006).