

パーティクルフィルタの工学分野への多様な応用について

生駒 哲一（九州工業大学 工学部）

概要 パーティクルフィルタとは，動的システムの状態推定を，多数の粒子（確率分布の実現値）を用いて行う一連の方法の総称である¹⁾．本稿では，パーティクルフィルタの基本アルゴリズム及び理論の，工学的な応用に対する様々な可能性をいくつかの実例と共に述べる．

1 パーティクルフィルタ

パーティクルフィルタの中でも，最も初期に提案され，アルゴリズムが最も簡潔なものに，モンテカルロフィルタ²⁾ やブートストラップフィルタ³⁾ がある．これらは，適切な初期分布に従う粒子群から開始し，一期先予測分布に従う粒子群を生成した後，観測モデルを使った尤度評価と「リサンプリング」と呼ばれる復元抽出の過程を経て，る波に従う粒子群を得る．時刻を進めながら同様の手続きを適用して，粒子群を時間更新するものである．モンテカルロフィルタのアルゴリズムは Fig.1 の通りである．

Step-0) 初期分布に従う粒子の生成

$$\mathbf{x}_0^{(i)} \sim p_0(\mathbf{x}), \text{ for } i = 1, 2, \dots, M.$$

$k = 1, 2, \dots$ について，以下を順に適用する．

Step-1) 一期先予測推定の分布に従う粒子の生成

$$\tilde{\mathbf{x}}_k^{(i)} \sim f(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}^{(i)}), \text{ for } i = 1, 2, \dots, M.$$

Step-2) 観測モデルを使った尤度評価

$$\omega_k^{(i)} := h(\mathbf{y}_k | \tilde{\mathbf{x}}_k^{(i)}), \text{ for } i = 1, 2, \dots, M.$$

Step-3) リサンプリング（重み値に従う復元抽出）

$$\bar{\omega}_k^{(i)} := \omega_k^{(i)} / \sum_{j=1}^M \omega_k^{(j)}, \text{ for } i = 1, 2, \dots, M.$$

$$\mathbf{x}_k^{(i)} \sim \left\{ \tilde{\mathbf{x}}_k^{(j)} \text{ with prob. } \bar{\omega}_k^{(j)} \mid j = 1, 2, \dots, M \right\}, \\ \text{for } i = 1, 2, \dots, M.$$

Fig. 1: モンテカルロフィルタのアルゴリズム

パーティクルフィルタの具体的な計算には，システムモデルと観測モデルを具体的に定める必要がある．これが状態空間モデルを『立てる』という事であり，モデリングとも呼ばれる．応用課題に即したモデルの立て方をする必要があり，各々の課題にて（一般には）異なるモデルが採用されることになる．また同一の課題においても様々なモデルの立て方があり得るのが一般的で，モデルの立て方が，各課題における性能の良し悪しを左右することになる．

2 多様な工学的応用

2.1 動画像中の移動物体追跡

コンピュータに人や動物と同様な視覚機能を持たせるコンピュータビジョンの研究の中でも，動画像中の移動物体の位置や姿勢の時間的な変遷を推定する課題「動画像追跡」は，今なお挑戦的で活発に研究されていて，パーティクルフィルタを用いた研究も多い．

その最も素朴な方法は，動画像中の移動物体を矩形など簡便な形の領域で近似表現し，その領域の尤度を計算して追跡を行うものである．矩形が画像に平行な場合には，矩形の1端点と幅高さが状態となる．平行

でない場合には，更に角度が状態に加わる．システムモデルとしては，状態量のランダムウォーク（1階差分）がよく用いられる．端点位置については2階差分を用いる場合もある．追跡の対象物に想定される動きが非等方的な場合には，動きの方向を考慮したシステムモデルが用いられる．

尤度の計算方法としては，追跡の対象物が特定色から成る場合は当該色ピクセルの矩形内や周辺での比率が用いられる．特定色ではないが，色のパターンが使える場合は，色の出現頻度をヒストグラムで表し，既取得画像のヒストグラムとのマッチングを Bhattacharyya 距離で評価する方法を用いることができる．

その他にも，追跡対象の形状に着目した CONDENSATION⁴⁾ などがある．ここでは追跡対象の典型形状をテンプレートとして保持しておき，それをアフィン変換して画像にあてはめ，画像エッジの適合度を輝度勾配から評価し尤度とする．その応用として，全方位カメラをつまんだ複数指の追跡を行うものがある⁵⁾．ここでは，複数の指を扱う方法に工夫がなされている．

動画像中の複数の対象を追跡する課題は，現在なお活発に研究されており，そこでは視野への対象物体の出入りがあり対象物の個数が変化する．また対象を画像から検出する際の誤り（未検出，誤検出）があり得る．複数の状態量と画像上の対象物との対応付けの問題が生じ，また対象の相互作用である隠れなどの問題も生じる．これらを統一的に扱う方法論として，ランダム有限集合に基づく状態空間モデルと，確率仮説密度 (PHD: Probability Hypothesis Density) フィルタとその逐次モンテカルロ法による実用的な求解法などがあり，これを動画像に応用した研究^{6) 7)} がある．またやや古い方法として，検出を先に行い対象の座標を取得する方法⁸⁾ がある．また，複数対象物における各種の問題は，実は単一の対象物の場合でも内在されており，例えば追跡対象が画像視野から出入りする場合に，短時間の視野逸脱ならば，効率的な追跡続行が可能となる研究⁹⁾ もある．

2.2 音響信号に基づく移動物体追跡

空間的に離れた場所に配置した複数のマイクロフォンから得られる音響信号に基づき，音源の3次元位置を追跡する方法として，マイク対に音が到達する時間差と音圧の比を用いるものがあり，雑音としてマイク毎に独立なピンクノイズを加えたシミュレーション音声信号にて，その性能が確認されている¹⁰⁾．

2.3 センサ融合による歩行者追跡

複数の異なる種類のセンサからの信号を融合的に用いて，目的とする対象物の位置などを追跡する課題を考える．その一例として，360度全周を撮影可能な全方位カメラと，レーザにより広角度の距離測定を行うレーザレンジファインダとを，複合的に用いた研究がある¹¹⁾．ここでは，2種のセンサを回転軸が同一直

線上になるように配置し、回転軸を地面に対して垂直に立てて設置した状況にて、追跡対象として歩行者を想定し、その概形を円柱としてモデル化を行っている。

2.4 運転者挙動の把握と高付加価値の安全運転支援

自動車運転に関連するシーンは多彩な局面があり、車載の外界センサによる周囲交通の推定や、キャビン内センサでの運転者行動の推定がある。これらを複合的に利用した、高付加価値の安全運転支援も考案されている¹²⁾。ドライビングシミュレータを活用した実験システムにおいて、運転者の挙動のうち、運転時に必要な観察行動を取る頭部の挙動と、運転操作を行う両手や両足の挙動をセンシングし、運転者の挙動を包括的とらえる研究もなされている¹³⁾。

2.4.1 両目位置の検出による顔姿勢の推定

顔を撮影した画像にて、両目の位置が特定できれば、それらの位置と顔の向きとの間に成り立つ関係から、顔の向きを算出することができる。この事実に基づき、顔の姿勢（位置と向き）から画像上の両目の位置を計算し、それらの位置に目が存在する確からしさを尤度として、パーティクルフィルタにより顔姿勢の推定を行う方法が提案されている¹⁴⁾。そこでは、立体的な形状を持つ頭部を、平面の顔として粗く近似している。また、初期的な正視顔画像での両目の位置を算出（推定）しておき、後の追跡処理にてそれを利用している。この方法を、運転席のハンドルの奥に設置したカメラにて、運転者の顔を撮影した動画像に適用することで、運転者の顔の向きを推定することが可能になる。

2.4.2 動画像からの両手位置の推定

ステアリングを操作する両手の挙動を運転時に非接触で得る一つの方法として、シートベルトの上方巻取り位置の上に設置したカメラから得られる画像を射影変換し、ステアリング・ホイールを正面から撮影した画像に変換した後、肌色に着目して両手の位置を追跡する方法が提案されている¹⁵⁾¹⁶⁾。そこでは、ステアリング・ホイールの位置と半径は射影変換にて既知であるので、既知の円上での2つの手位置（角度）の推定が課題となる。現時点では、両手の握り位置が変化しない単純な運転操作では良好な推定結果を得る事ができるが、両手を交差させて隠れが生じた場合や、半袖を着用していて腕部分の肌色がステアリング・ホイール部分に重なった場合などは、モデル構築時に想定していないので、これらの改善が今後必要である。

2.5 並列計算の実装

パーティクルフィルタのアルゴリズムは、並列性の高い箇所が多く、並列計算に向いている。リサンプリングの箇所を除けば、粒子ごとに完全に並列化することも可能である。ヘテロジニアスなマルチコアCPUであるCell/B.E.において、複数の計算コアにて並列的にパーティクルフィルタの計算を行い、それを動画像中の移動物体の追跡に適用した研究として、特定色の物体を動画像にて追跡するもの¹⁷⁾や、複数色の比率（色のヒストグラム）を特徴量として追跡を行うもの¹⁸⁾がある。この他にも、並列計算を行うハードウェアをFPGA技術により例えば、4つのCPUをFPGAチップの中に組み込み、それらの4並列にてパーティクルフィルタの計算を行う研究¹⁹⁾がある。

参考文献

- 1) P. Del Moral, "Feynman-Kac Formulae, Genealogical and Interacting Particle Systems With Applications", Springer-Verlag, 2004.
- 2) G. Kitagawa, "Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space models", *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5(1), pp.1-25, 1996.
- 3) N.J. Gordon, D.J. Salmond, and A.F.M. Smith, "Novel approach to nonlinear / non-Gaussian Bayesian State Estimation", *IEE Proceedings-F*, 140(2), pp.107-113, 1993.
- 4) M. Isard and A. Blake, "CONDENSATION - Conditional Density Propagation for Visual Tracking", *International Journal of Computer Vision*, 29(1), pp.5-28, 1998.
- 5) N. Ikoma, M. Sakata, and M. Doi, "Mixture tracking of multiple fingers image in omnidirectional camera for human friendly interface", *Proc. of Nonlinear Statistical Signal Processing Workshop 2006 (NSSPW 2006)*, Sep. 13-15, Cambridge, UK, Paper.60, 2006.
- 6) N. Ikoma, "Likelihood adjustment among multiple targets for particle dependent tracking in particle filters", *Proc. of IEEE Workshop on Statistical Signal Processing 2009*, Cardiff, UK, Aug.31-Sep.3, pp.477-480, 2009.
- 7) 生駒 哲一, "ランダム有限集合状態空間モデルと逐次モンテカルロフィルタによる動画像中の複数移動物体追跡", コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, CVIM 2010 年 3 月研究会 (第 171 回), 2010.
- 8) N. Ikoma, R. Yamaguchi, H. Kawano, and H. Maeda, "Tracking of Multiple Moving Objects in Dynamic Image of Omni-directional Camera Using PHD Filter", *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol.12 No.1, pp.16-25, 2008.
- 9) R. Nawata, N. Ikoma, H. Kawano, H. Maeda, "Visual Tracking in Occurrence of Out-of-field-of-view utilizing Background Information by Particle Filter", *Proc. of World Automation Congress 2010 (WAC2010)*, Paper no.656, 2010.
- 10) N. Ikoma, O. Tokunaga, H. Kawano, and H. Maeda, "Tracking of 3D Sound Source Location by Particle Filter with TDOA and Signal Power Ratio", *Proc. of ICROS-SICE Int'l joint Conference 2009*, pp.1374-1377, 2009.
- 11) 生駒 哲一, "レーザ距離計と全方位カメラの融合による歩行者の検出と追跡", 第 20 回インテリジェントシステムシンポジウム (FAN2010), Paper no.142, 2010.
- 12) N. Ikoma, K. Matsuda, K. Akahoshi, K. Kawamoto, H. Kawano, and H. Maeda, "A new concept of drive recording system by estimating human intention using particle filters", *Proc. of 2nd Int'l Conf. on Innovative Computing, Information and Control*, CD-ROM(C11-08.pdf), 2007.
- 13) N. Ikoma, Y. Tanaka, Y. Inokuchi, I. Miyasita, K. Kawamoto, and T. Nishida, "Car Driver's Body Motion Estimation for Safety Driving using Particle Filter", *Proc. of 4th International Symposium on Computational Intelligence and Industrial Applications*, 2010.
- 14) N. Ikoma, Y. Chen, H. Kawano, and H. Maeda, "Real-time Estimation of Face Posture by Eyes detection and tracking with Particle Filter", *Proc. of 4th International Symposium on Computational Intelligence and Industrial Applications*, 2010.
- 15) 生駒 哲一, "ステアリング周辺における運転者両手挙動の動画像追跡について", 第 20 回インテリジェントシステムシンポジウム (FAN2010), Paper no.143, 2010.
- 16) N. Ikoma, "Visual tracking of both hands of car driver by particle filter", *Proc. of 5th Int'l Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems and 11th Int'l Sympo. on advanced Intelligent Systems*, pp.1547-1552, 2010.
- 17) N. Ikoma and A. Asahara, "Real time color object tracking on Cell Broadband Engine using particle filters", *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol.14 No.3, pp.272-280, 2010.
- 18) 生駒 哲一, "パーティクルフィルタの並列実装によるリアルタイム動画像物体追跡", FAIS マルチコアプロセス Workshop 2009, ~マルチコアプロセッサがもたらす技術革新~, <http://www.ksrp.or.jp/fais/sec/cell/research/files/Ikoma.Workshop.2009.pdf>, 2009
- 19) S. Fukuda, N. Ikoma, H. Kawano, and H. Maeda, "On ring structure of particles' transfer and pipelining improvement with non-normalized weight for parallel computation hardware design of particle filter", *Proc. of International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP'08)*, pp.359-362, 2008.