

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656273

研究課題名(和文)動的システム論に基づくオプティカルフロー推定

研究課題名(英文)Dynamical System Approach to Optical Flow Estimation

研究代表者

瀬部 昇 (Sebe, Noboru)

九州工業大学・情報工学研究院・教授

研究者番号：90216549

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：オプティカルフローとは、画像中の物体の移動速度を表すベクトル量のことである。従来のオプティカルフロー推定法は、時間的に連続する2枚の画像から瞬時的に推定するが、近年は動画像を扱うことも多く、時系列データとしての取扱いを行うことで推定精度の向上などが期待できる。

本研究では、推定の数学的基礎となる輝度保存則を微分方程式で表された動的システムと見なし、カルマンフィルタと呼ばれる動的システムの状態推定法を適用することを提案した。提案した方法はオプティカルフローだけでなく、推定の信頼度も同時に与えるという利点を持つ。また、物体の隠れなどによって生じるフロー境界も同時に検出することが可能である。

研究成果の概要(英文)：Optical flow is a vector which represents the motion of objects in images. The ordinary methods estimate optical flow instantaneously from two images. On the other hand, the proposed estimation method considers the intensity preservation law as an equation of time evolution of dynamical system and estimate from time sequence of images. The proposed method provides not only a new strategy for optical flow estimation but also some advantages. The first advantage of the method is that it simultaneously estimates the confidence of estimation, which enable us to evaluate the estimation results without the knowledge of true values. The second advantage of the method is that it detects discontinuity of optical flow, which is a higher level information of object motion.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：オプティカルフロー 非線形カルマンフィルタ コンピュータビジョン

1. 研究開始当初の背景

オプティカルフロー推定法の一つに勾配法と呼ばれる方法がある。これは注目点の輝度が移動後も不変という仮定(輝度保存則)のもとで成立するオプティカルフロー方程式

$$I_x u + I_y v + I_t = 0$$

(ただし (x, y) は画像上の座標, t は時間, I は輝度, (u, v) はオプティカルフローを表す)を用いて推定する方法である。ここで, 決定変数が u, v の 2 つなのに対し, 制約条件はオプティカルフロー方程式 1 つだけで不足する。そこで従来は, 「ある空間領域内で (u, v) は一定」と仮定し, その空間領域に含まれる複数点でのオプティカルフロー方程式を連立させて (u, v) を最小二乗法で求める, あるいは「ある空間領域内の (u, v) の変化を小さくする」オプティカルフローを最適化問題を解いて推定する, などの方法が一般的に用いられてきた。この方法は, 2 枚の画像から特徴点を抽出し, その対応関係を探索してオプティカルフローを求めるブロックマッチング法に比べて計算量が大幅に少なくて済むという利点をもつ。しかし, 回転, 拡大, 変形が生じる場合には輝度保存則の仮定が成立せず, 原理的に推定誤差が含まれる。

これに対して文献[1]において, オプティカルフロー方程式を動的システムの表現と見なし, 時系列観測データを用いた状態推定理論を適用することで, オプティカルフローとその空間勾配を同時に推定する方法を提案した。提案法は画像を時系列データとして扱うおそらく初めてのオプティカルフロー推定法であり, 「ある空間領域においてオプティカルフローは一定」という仮定を必要としない。また, オプティカルフローの空間的滑らかさがどの程度かという事前情報も必要としない。

[1] 瀬部, 延山, 榎田, 動的システム論的アプローチによる動画像中のオプティカルフロー推定法, 第 38 回制御理論シンポジウム, pp.357-362, 2009.

2. 研究の目的

[1] の結果の一般化には二つの方向性がある。一つは動的システムモデルに新たな状態(例えばオプティカルフローの時間変化)を加え, 新たな有用な情報(例えば物体の境界情報)を得るという研究。もう一つは, 画像上の一点ではなく, 空間的な広がりを持つ複数点の状態の一つにまとめた動的システムを考え, 推定精度の向上や時間-空間解像度の関係を明らかにするという研究。本研究では, 後者について理論的な研究を行い, 従来の時間的に連続する 2 枚の画像から推定する瞬時的な推定法に対する優位性を持った推定法を開発する。さらに, 実動画像やオプティカルフローの真値がわかる CG による合成アニメーション画像を用いて提案手法の有効性の検証も行う。

3. 研究の方法

[1] で提案された方法は, 画像中の 1 点に対して物体の並進運動だけでなく, 回転・拡大も同時推定する方法である。本研究では, 推定領域内のすべての点に関するオプティカルフロー方程式を連立微分方程式とみなし, 一つの動的システムとみなした。その上で, 動的システムの状態推定法の一つである非線形カルマンフィルタを適用することで, 複数点のオプティカルフローを推定する方法を提案した。ここで, 単に連立方程式としてまとめるだけでは状態数が大きく推定計算に時間がかかる。また, 動的システムとしての局所可観測性が成立しないため, 観測量である画像輝度からオプティカルフローが一意に決定できないなどの問題が生じる。これらの問題点を克服するために推定するオプティカルフローの解像度を下げて推定を行う疑似稠密推定法を提案した。これにより, 局所可観測性が確保され, 特殊な状況(画像の輝度勾配とオプティカルフローが特殊な関係となっている場合)以外の推定可能性を保証することが可能となり, 推定に必要な計算量も削減することが可能となった。

具体的な推定のための動的モデルは以下の通りである。時刻 k の各ピクセル (x, y) における輝度, オプティカルフローを

$$q_l(k) = [I(1,1,k) \ I(1,2,k) \ \dots \ I(M,N,k)]^T$$

$$q_u(k) = [u(1,1,k) \ u(1,2,k) \ \dots \ u(M,N,k)]^T$$

$$q_v(k) = [v(1,1,k) \ v(1,2,k) \ \dots \ v(M,N,k)]^T$$

とする。そして推定点の個数が $1/2$ 以下になるように空間的に間引いた点のオプティカルフローを $\sim q_u(k), \sim q_v(k)$ とする。各ピクセルにおけるオプティカルフロー q_u, q_v は補間オペレータ M を用いて, 間引かれたオプティカルフローから

$$q_u = M \sim q_u, \quad q_v = M \sim q_v$$

と復元されるものとする。各点における x 方向, y 方向の偏微分を計算する偏微分オペレータをそれぞれ D_x, D_y とすると

$$q_l(k+1) = q_l(k) - \text{diag}\{D_x q_l(k)\} M \sim q_u(k) - \text{diag}\{D_y q_l(k)\} M \sim q_v(k)$$

$$\sim q_u(k+1) = \sim q_u(k)$$

$$\sim q_v(k+1) = \sim q_v(k)$$

によって輝度とオプティカルフローのダイナミクスをモデル化することができる。(第 1 式がオプティカルフロー方程式に相当する。)このような動的モデルとしてオプティカルフロー方程式を捉えることが, 本研究の本質的な特徴である。この動的システムモデルに対して非線形カルマンフィルタ(本研究では主に拡張カルマンフィルタを用いた)を適用することで, 動的システムの状態であるすべてのピクセルにおける輝度と間引かれた推定点におけるオプティカルフローを逐次的に推定することができる。

4. 研究成果

提案手法は非線形カルマンフィルタを用いた方法であり、カルマンフィルタを用いたことによる主に2つの利点を有する。一つ目の利点は、カルマンフィルタが共分散行列を推定していることに基づく。つまり、オプティカルフローの推定と同時にその信頼度を共分散行列として得られる点にある。従来は画像そのものの輝度の平坦さが信頼度の指標であったが、本手法で得られる推定値の信頼度は、時系列推定としての信頼度を与えている。二つ目の利点は、物体の境界も同時に推定できる点である。推定値の時間更新においてモデルによる予測値と実測値の違いである観測残差を評価できる。物体境界ではそもそも輝度不変のオプティカルフロー方程式が成立せず、観測残差が大きくなることが予想される。この観測残差をもちいることで実際に物体の境界も同時に推定できることを示した。

参考までに、ベンチマーク問題(Middlebury RubberWhale)に適用した結果を示す(Proceedings of SICE Annual Conference 2011 より)。真値(図2)に比べ、推定値(図3)ではほぼ随分できていないことが確認できる。次に、本研究で提案した手法の特徴として、推定の信頼度(図4)、オプティカルフローの境界(図5)が得られている。信頼度は、テクスチャが低いところでは劣化しており、妥当性を示している。また、フロー境界もよく検出できていることが確認できる。

推定したオプティカルフローの信頼度については、従来は画像そのもののテクスチャによる評価法と、真値がわかるという現実にはありえない状況での評価法しかなかった。それに対して、推定誤差共分散という形で陽に信頼度を与えられる方法が提案できた意義は非常に大きく、物体領域の推定といったオプティカルフローを用いた2次的な推定における推定の信頼度も見積もることが可能となる。

また、オプティカルフローの境界の推定可能性を示した意義も非常に大きい。一般的にはオプティカルフロー推定に基づき物体の境界を推定する。しかし、高精度な推定のためには、物体境界の情報が必要とされ、オプティカルフロー推定と物体境界の推定は相互依存の関係にあり、両者を高精度に推定するには(特に1次推定量であるオプティカルフロー推定の高精度化には)本質的な難しさがあつた。本研究における提案手法は、オプティカルフローと物体境界の同時推定に道を拓くものであり、この問題に対する本質的な解決策への道筋を与えていると考えられる。



図1 推定原画像

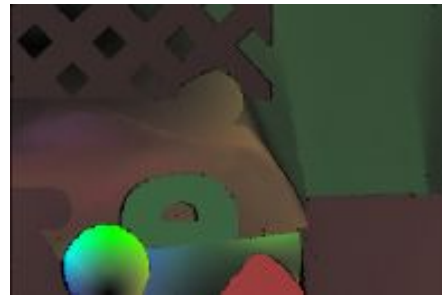


図2 フローの真値

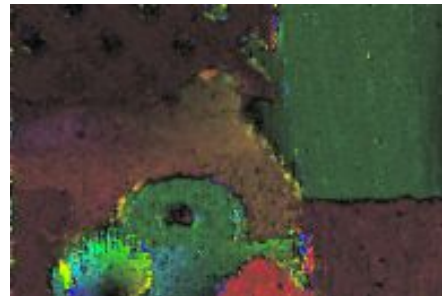


図3 フローの推定値

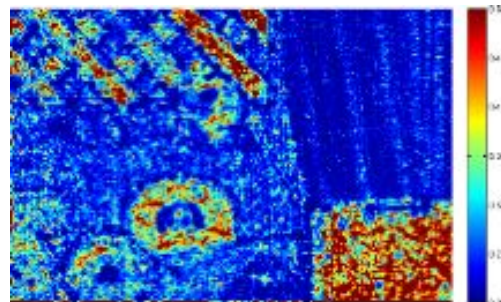


図4 推定の信頼度
(推定誤差共分散行列の対角要素)

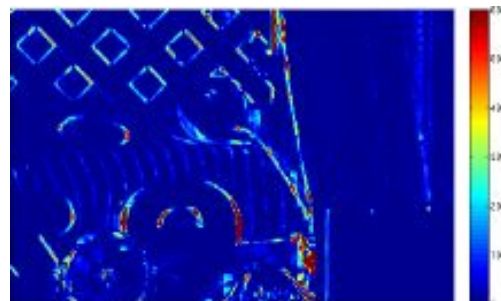


図5 観測残差による物体境界の検出

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計4件)

笹川卓哉, 瀬部昇, 榎田修一, 延山英沢, 深見友也, フロー境界の同時推定による
オプティカルフロー推定の精度向上, 第
32 回計測自動制御学会九州支部学術講
演会, 査読無, 2013 年 11 月 30 日,
pp.151-154, 長崎

笹川卓哉, 深見友也, 榎田修一, 瀬部昇,
延山英沢, カルマンフィルタを用いたオ
プティカルフロー推定, 第 13 回計測自
動制御学会 制御部門大会, 査読無, 2013
年 3 月 6 日, 福岡

白石岳, 瀬部昇, 延山英沢, 深見友也,
榎田修一, 固定ラグスムージングを用い
たオプティカルフロー推定, 第 30 回計
測自動制御学会九州支部学術講演会,
査読無, 2011 年 12 月 3 日, pp.163-166,
大分

T. Fukami, S. Enokida, N. Sebe, E. Nobuyama, Quasi-Dense Optical Flow
Estimation Based on Dynamical
System Models, Proceedings of SICE
Annual Conference 2011, 査読有,
September 14, 2011, pp.802-811, Tokyo

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 物体運動推定装置, 物体運動推定方法
及びプログラム

発明者: 瀬部昇, 延山英沢, 榎田修一, 深見
友也

権利者: 九州工業大学

種類: 特許

番号: 特許願 2011-196460

出願年月日: 23 年 9 月 8 日

国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.donald.ai.kyutech.ac.jp/~sebe/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

瀬部 昇 (SEBE, Noboru)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教
授

研究者番号: 90216549

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

延山 英沢 (NOBUYAMA, Eitaku)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教
授

研究者番号: 50205291

榎田 修一 (ENOKIDA, Shuichi)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准
教授

研究者番号: 40346862