

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01463

研究課題名(和文) 動的システム論に基づく動画像中の特徴量推定

研究課題名(英文) Dynamical systems approach to optical flow estimation

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：画像中の物体の移動を表すベクトルをオプティカルフローという。本研究課題では、動的システム論を援用した推定法の推定精度向上が目的である。オプティカルフロー推定における問題点は、画像中で物体が隠された場合に、それまで見えていた(隠れていた)物体の輝度が画像中から消滅する(生成される)ことにある。本研究では、この消滅・生成される輝度も、動画の時系列データから直接的に推定を行う方法の原理的な提案を行った。また、オプティカルフロー推定と深層学習を組み合わせた手法の実システムへの応用も関連研究として実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

オプティカルフローは、画像処理に基づく物体認識に用いられていますが、その応用として動画の圧縮にも用いられています。この推定精度を向上することで、物体認識の精度を向上させることができ、例えば車載カメラによる歩行者の認識精度を向上させることができます。本研究課題は、背景とは違う動きをする物体のオプティカルフローの精度を向上させようとするものであり、このような目的に大きく貢献するものです。

研究成果の概要(英文)：Optical flow is a vector that represents the motion of objects in images and is an important characteristic of video images. One of the significant difficulties in optical flow estimation is occlusion, as occlusion varies the intensity of the image discontinuously. Based on the dynamical systems approach, we have developed a novel estimation method that estimates not only the optical flow but also the intensity variation affected by occlusions. The proposed method improves the estimation accuracy near the region where occlusions occur.

研究分野：制御工学

キーワード：オプティカルフロー 動画像処理 状態推定 非線形オブザーバ 無限次元系

1. 研究開始当初の背景

動画像中の物体の動きを推定する技術は、ステレオビジョン、パターン認識、動きの解析といったコンピュータビジョン分野などの様々な画像処理分野に利用されている。また、この推定技術は様々なカメラや映像を利用したシステムにも活用されている。例えば、車載カメラで撮影された映像から歩行者や車両の動きを推定することで、事故の発生を未然に防ぐことにつながる。そのため、動画像中の物体の動きを推定する技術は社会における様々な技術に応用されており、社会に大きく貢献する技術のひとつと言える。

この技術にはこれまでに様々な手法が提案されており、それらの手法のひとつにオプティカルフロー推定がある。オプティカルフローとは、動画像中の物体の動きをベクトルで表したものである。従来、オプティカルフローの推定法としては、大きく分けてパターンマッチングによる方法と、輝度勾配に基づく方法の二つがある。前者は画像中の特徴点に着目し、次画像において特徴点がどこに移動したかによってオプティカルフローを推定する。この方法の問題点は、特徴点抽出が必要なことと計算量が膨大になりがちなことである。特に前者はグラデーション画像のように特徴点のない画像には適用できず、画像全体のオプティカルフローを推定するには不向きである。一方輝度の勾配に着目する方法は、物体の移動後も輝度が変化しないという輝度保存則と呼ばれる仮定を設け、この仮定を表す数学的な拘束条件からオプティカルフローを推定する方法である。基本的に差分計算が必要なため、予め画像の平滑化が必要なこと、テiler展開に基づくため、物体の移動が大きい場合には難しいなどの欠点はあるものの、非常に簡便に推定が行われることから、実時間性が必要なシステムなどでの数多く用いられている。しかし、いずれの方法も物体相互の位置関係で隠れ(オクルージョンという)が生じると、オプティカルフローの推定が困難になる。パターンマッチングによる方法では特徴点が隠れてしまうと推定はできず、輝度勾配に基づく方法では、理論の前提である輝度保存則が成立しなくなる。このような状況でのオプティカルフロー推定でも画像への正確なセグメンテーションができれば、セグメンテーション内で同一のオプティカルフローを推定することでこの問題は解決できる。しかし、セグメンテーションを行うためにオプティカルフローが用いられることから、正確なセグメンテーションのためには精度の高いフローの推定が必要となる。セグメンテーションとオプティカルフロー推定の高精度化は鶏と卵の関係になっており、両方を同時に高精度に推定する方策はこれまで示されてきていなかった。

2. 研究の目的

背景で説明したように、オクルージョンはオプティカルフローの推定に大きな影響を与える。これまで、非線形平滑化などの方法も提案されているが根本的な解決には至っていない。本研究課題の目的は、オクルージョンが起こる状況下においても、推定精度の高いオプティカルフローの推定法の原理的な提案を行い、オプティカルフローの推定精度を向上させることである。

さらに、近年注目を集めている深層学習であるが、オプティカルフロー推定においても深層学習を用いた推定法も提案されている。深層学習を用いた方法では、内部的な処理の理論構造はわからないものの結果的にセグメンテーションとオプティカルフロー推定を両立した推定結果を与える。画像輝度勾配に基づく数理的な推定手法と、深層学習に基づく方法の特性の差異を比較検討し、オプティカルフロー推定の実システムへの応用も検討する。

3. 研究の方法

研究の第1段階は、オクルージョンに対応した輝度保存則の修正である。オプティカルフロー推定とセグメンテーションに有用な構造をもつ数理モデルを検討し提案する。ただし、第1段階では、推定可能性などのモデルの持つ数理的な特性の解析が行えるように、画像上のある1点における推定を行う単純なモデルについて検討を行う。

研究の第2段階は、推定モデルの面的な領域のすべての点におけるオプティカルフローを推定するためのモデルを提案する。基本的には偏微分方程式を時空間差分近似したモデルの提案となる。

第2段階と並行して深層学習を用いたオプティカルフロー推定について検討を行う。ただし、オプティカルフロー単体の推定についての検討を行うだけでなく、オプティカルフローを情報として用いた他の最終目的のための深層学習についても検討を行う。

4. 研究成果

研究代表者らは、物体の輝度が移動後も変わらないという輝度保存則を動的システムと見なすという従来にはなかった全く新しい発想で、動的システム論を援用したオプティカルフローの推定法を既に提案していた。この方法の特徴は、従来の静止画ベースの画像処理とは異なり、動

画像を文字通り時系列データとして扱うことを念頭においた推定法であることである。特に、面的な領域の推定を行った場合、輝度の予測推定値と観測量の差が大きくなることを用いてオクルージョンが発生しているピクセルを推定することが可能という長所がある。従来法に比べて特徴的な長所をもつ方法であるが、オクルージョンの位置は特定できるものの、乱された推定の修正方法が確立できておらず、従来法と同様にフロー境界におけるオプティカルフロー推定の精度を上げることができていなかった。

これに対して本研究課題では、推定の前提となってきた移動後も輝度が不変という輝度保存則を修正することにより、高精度推定を実現する。輝度保存則は流体で言えば質量保存則に相当する。ところが画像の場合、オクルージョンが生じると輝度が生成・消滅する。そのため、オクルージョンが発生した付近では輝度保存則が成立しないことを考慮した推定モデルが必要である。そこで、オクルージョンが生じた際に輝度は消滅したり発生したりするのではなく、画像平面に対して垂直方向にも輝度が流入（流出）するとし（図2）、この輝度の流入（流出）量を新たに輝度保存則では説明がつかない輝度の補正量としてオプティカルフロー方程式に導入したモデルを提案した。このモデルに対して動的システム論に基づく状態推定を適用することで、オプティカルフローの高精度推定を実現した。

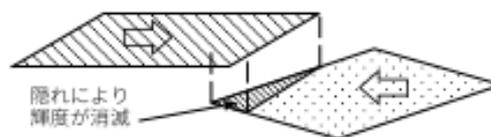


図 1. 従来の推定モデル

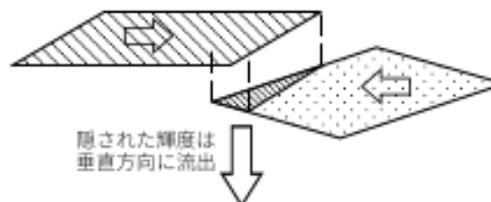


図 2. 提案した推定モデル

さらに一つのピクセルではなく面的な領域のすべてでオプティカルフローを推定する場合に提案モデルを拡張した。画像中の物体の境界は画像の一部にしか存在しない。つまり、提案した補正量はすべてのピクセルに必要なわけではない。そこで、提案したモデルの補正量にスパース性を仮定する。補正量がスパース性をもつという制約をカルマンフィルタの最適化問題に付加することで、より適切な補正量の推定が期待できる。このような、スパース性に基づき対象のデータを推定・復元する技術は圧縮センシングと呼ばれ、近年非常に大きな注目を集めている。スパース性は ℓ_0 ノルム制約を付加した最適化問題を解くことで与えることができる。しかし、 ℓ_0 ノルム最適化問題は組み合わせ最適化問題となるため、NP 困難であり、計算量の観点から実用に用いることは困難である。一方、 ℓ_0 ノルムを ℓ_1 ノルムに置き換えた緩和問題を解くことが一般的に用いられ、その有効性が広く知られている。動的システムにおいて状態推定値にスパース性を用いる手法は、直接には観測できない ℓ_1 ノルム値をあたかも観測しているかのような信号を人為的に生成する擬似観測アプローチが既に提案されており、その手法を採用することにより補正量へのスパース制約を導入した。これにより拡張カルマンフィルタに適用することで、補正量のスパース性を要請しながらオプティカルフローの推定も可能となった。数値実験でその有効性も示した。

また、近年注目されている深層学習についても検討を行った。実システムへの応用では、オプティカルフローの推定が最終目的となることは少なく、推定値を活用して周辺環境の認識、対称物の検出・認識、表情などのさらに高次の認識に用いられる。深層学習を用いた場合、画像から直接認識などを行うことも考えられるが、オプティカルフローを特徴量として陽に学習させることで認識率の向上が可能となる可能性がある。オプティカルフロー推定そのものに加えて、深層学習との融合による実システムへの応用についても検討を行い、有効性が示された事例について成果発表を行った。具体的には、車載カメラ映像による2輪車の飛び出し予測に注目した危険予測システムを開発した。当該予測システムでは、深層学習への入力について、カラー画像に加えて、画像処理により得られる情報を追加したネットワーク構造の性能を確認した。オプティカルフローをはじめとし、効果を比較するために、深度画像（距離画像）、意味的領域分割（Semantic Segmentation）画像を追加する比較実験を実施した。結果、オプティカルフローを追加したネットワークが、他の2つのネットワークと比較して危険予測の精度、危険予測の発報から危険事象の発生までの猶予時間の両面で最も良い結果を示した。これは、オプティカルフローが移動物体と静止物体が判別可能であることはもちろん、フロー推定処理はステレオビジョンに相当するため奥行情報の推定がなされることの効果と考えられる。以上から、時系列情報や空間情報を含むオプティカルフローを高精度に推定することの重要性が確認された。

最後に、本研究課題の成果と、近年活発に研究される深層学習によるオプティカルフロー推定法との技術的な位置付けを試みる。動的システム論の援用や圧縮センシングの活用など、設計者の知見に基づく数理モデルによりトップダウン的に得られた推定モデルと、多くのオプティカルフロー発生事例に基づき、深層学習によりボトムアップ的に得られる推定モデルとは、競合する

ものではなく、むしろ、協調することが望ましいと考える。協調の例をいくつか挙げる。深層学習によるオプティカルフローの教師データは、CG 技術の発展から高精度なものを大量に生成することが可能となったが、どの程度の映像を生成すれば教師データとしての網羅性を保証できるかの定量化が難しい。実際に、実世界での遭遇可能性や、オプティカルフロー推定問題の困難さ等の面で、生成した教師データで多様性が十分に保証されているかの検証が必要となる。遭遇可能性はアプリケーション依存で議論できるが、推定問題の難度については、大量のデータに対して定量的に判断する測量法が必要となる。本研究課題で開発した推定手法では、輝度保存則が成り立たない箇所に対する補正量が観測できるため、補正量が発生する領域の面積や補正量の時間変化をもとに、処理対象の映像についてのオプティカルフロー推定問題の難度を定量化できる可能性が有る。また、トップダウン型の推定モデルとボトムアップ型の推定モデルの結果を比較し、差異の大きな事例に注目することで、それぞれのモデルの長所短所、つまり各モデルの改善すべき事項が効率的に明らかになるため技術発展の加速が期待される。さらに、それぞれのモデルの推定結果を結び付け、推定精度のさらなる高精度化を目指す深層学習モデルを開発する等の新たな技術開発も期待される。以上からも、当該技術分野のさらなる発展のため、設計者により導かれた数理モデルに基づく推定手法と、深層学習に基づく推定手法の両面で継続的に研究されることは重要であると言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 中村翔太, 瀬部昇, 延山英沢, 榎田修一 |
| 2. 発表標題 拡大・回転が推定可能なオプティカルフロー推定モデルへの逐次最小二乗法の適用 |
| 3. 学会等名 第38回計測自動制御学会九州支部学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 中村祐哉, 齊藤剛史, 伊藤和幸 |
| 2. 発表標題 神経難病患者の口形認識に関する研究 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会2019年10月福祉情報工学研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takuma Oiwane, Priscilla Indira Osa, Shuichi Enokida |
| 2. 発表標題 Research on Feature descriptors for vehicle detection by LIDAR |
| 3. 学会等名 5th International Conference on Machine Vision and Machine Learning (MVML 2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 丸山健太, 藤尾光彦, 榎田修一 |
| 2. 発表標題 並列処理を用いたサイズ分布による 歩行者3次元点群の特徴記述 |
| 3. 学会等名 第22回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2019) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大谷駿介, 榎田修一 |
| 2. 発表標題 LIDARによる歩行者検出のためのk-means++ 法を用いた歩行者群分割 |
| 3. 学会等名 第25回画像センシングシンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大谷駿介, 榎田修一 |
| 2. 発表標題 x-means法を用いた三次元点群に対する歩行者群自動分割 |
| 3. 学会等名 動的画像処理実利用化ワークショップ2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大岩根拓馬, 榎田修一 |
| 2. 発表標題 Real AdaBoostを用いた特徴選択に基づく車載LIDARによる車両検出の高精度化に関する研究 |
| 3. 学会等名 動的画像処理実利用化ワークショップ2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuta Akiyoshi, Noboru Sebe, Shuichi Enokida and Eitaku Nobuyama |
| 2. 発表標題 Improving the Accuracy of Dynamical System Based Optical Flow Estimation by Central Difference Discretization of Time Derivative |
| 3. 学会等名 4th International Conference on Machine Vision and Machine Learning (MVML'18) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takeshi Saitoh and Michiko Kubokawa |
| 2. 発表標題 SSSD: Speech Scene Database by Smart Device for Visual Speech Recognition |
| 3. 学会等名 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Rinko Komiya, Takeshi Saitoh, and Kazutaka Shimada |
| 2. 発表標題 Image-based Attention Level Estimation of Interaction Scene by Head Pose and Gaze Information |
| 3. 学会等名 17th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science (ICIS2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 齋藤剛史, 窪川美智子 |
| 2. 発表標題 再帰型ニューラルネットワークを用いた動き特徴量による単語読唇システムの開発 |
| 3. 学会等名 ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2018) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 窪川美智子, 齋藤剛史 |
| 2. 発表標題 SSSDを用いた深層学習による読唇精度に関する検討 |
| 3. 学会等名 第21回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2018) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 甲斐夕登, 榎田修一, 本村太一 |
| 2. 発表標題 再帰型深層学習を用いたドライブレコーダ記録映像の自動解析 |
| 3. 学会等名 自動車技術会学術講演会2018秋季大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|-------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 齊藤 剛史 (Saitoh Takeshi) (10379654) | 九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授 (17104) | |
| 研究分担者 | 榎田 修一 (Enokida Shuichi) (40346862) | 九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授 (17104) | |
| 研究分担者 | 延山 英沢 (Nobuyama Eitaku) (50205291) | 九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授 (17104) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|