

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26730096

研究課題名(和文)流体力学による人流解析に基づく混雑環境下人物追跡

研究課題名(英文)Analysis of macroscopic flow field of crowds based on fluid dynamics for tracking individuals

研究代表者

杉村 大輔(SUGIMURA, DAISUKE)

東京理科大学・工学部電気工学科・講師

研究者番号：10712052

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：混雑環境下での人物群の行動解析についてこれまで盛んに研究されている。多くの従来手法における問題は、非常に混雑した環境下では人物の動きは類似するため、個々の人物を区別することが難しいことである。これに対し本研究では、流体力学の考え方に基づき、人物群が形成するマクロな動きの流れを解析し、人物行動解析に応用することを検討した。具体的には、映像からの人物群(流れ場)領域の抽出とその流れ場の解析という二つの課題について取り組んだ。検討の結果、流れ場によるモデリングによる混雑環境下人物行動解析についての知見を得た。また、残された課題について整理した。

研究成果の概要(英文)：We investigated a method for analyzing pedestrian movements under an extremely crowded scene. We consider that analyzing macroscopic flow field composed of pedestrian movements will be helpful for tracking individuals. In this research, we examined ways to analyze macroscopic movements of pedestrians in crowded scenes based on fluid dynamics. Specifically, we conducted two researches: (1) foreground (flow field) region extraction, and (2) flow field analysis based on fluid dynamics. We obtained some findings and remaining problems for macroscopic pedestrian movement analysis.

研究分野：画像認識

キーワード：画像認識 流体力学 数値解析

1. 研究開始当初の背景

朝夕のラッシュ時の駅構内やイベント会場といった、混雑環境下における人物追跡技術の確立に期待が高まっている。このような追跡技術が確立することにより、混雑度(人数)の計測が可能になる。これは、混雑状況解消のための情報源として活用ができる。更には、追跡技術を活用することにより、異常行動を行う人物の検出といった応用が期待される。

人物追跡については、これまで数多くの手法が提案されている。よく知られる代表的な方式の一つに時系列フィルタ(カルマンフィルタ、パーティクルフィルタ等)に基づいた追跡手法が挙げられる。しかしながら、混雑環境では、人物同士の相互遮蔽が頻繁に発生するため、追跡対象である人物を見失ってしまう。そのため、時系列フィルタを用いた既存手法は、混雑環境下ではその追跡精度が低下する。

一方、混雑環境下人物追跡を目的としたものに、映像中の特徴点の軌跡のクラスタリングに基づいた手法が提案されている。同じ人物に属する画像特徴(コーナー特徴など)の動きは類似する、という仮定に基づき、特徴点の動きをクラスタリングすることで人物追跡を実現している。しかしながら、駅のラッシュ時や花火大会等の非常に混雑した環境下では、個々の人物の動きは制限される。言い換えると、いずれの人物も動きが類似する。このため、特徴点軌跡の動きの類似性に基づく既存手法では、個々の人物を区別することが難しい。

2. 研究の目的

これに対し本研究課題では、従来研究のような個々の人物の見えや動きを用いるだけでなく、人物群が形成するマクロな動きの流れに着目する。混雑環境下において、人物は周囲の動きに合わせようとする性質がある。このとき、人物群全体を俯瞰すると、その人物群全体の動きは大きな流れ場を形成していると見なすことができる(図1)。



図1：人物群が形成する流れ

本研究では、このような人物群による動きの流れをモデル化するために、物理学の分野で体系づけられている流体力学の知見を活用することを試みる。人物群の流れを解析できれば、形成される流れによりどのような圧力場が発生しているか推定することができる。これは、人物群における個々の人物の動きを推定するための手掛かりとなると考えられる。このように、流体力学の知見を用いた、“人物”ではなく“人物群”のマクロな視点での行動解析技術確立することを、本研究の目的とする。

3. 研究の方法

観測される映像において、人物群の動きの流れをモデル化する。具体的には、流れ場の運動方程式である Navier-Stokes 方程式(NS方程式)に基づいた解析を行う。画像平面上の二次元速度場を $V = (u, v)$ 、圧力場を p としたとき、NS方程式は次式で表現される：

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 V + \frac{\nu}{3} \nabla (\nabla \cdot V) \quad (1)$$

(1)式左辺第一項は局所加速度を、第二項は対流加速度を表す。また右辺第一項は圧力場の空間勾配(ただし ρ は密度)、第二、第三項は粘性散逸項であり、 ν は動粘性係数である。

流れ場を解析するという事は、観測シーンにおいてどのような速度場が発生しているか、どのような圧力場が発生しているか、という二つの物理量を推定することである。本研究課題では、速度場は、画像認識分野でよく知られるオプティカルフローと呼ばれるアルゴリズムを用いて計算する。このようにして映像特徴より推定される速度場を用いることで、(1)式を圧力場について解くことができる。これにより、観測シーンにおける圧力場を得ることができる。

数値計算に基づき(1)式を圧力場について解く。(1)式は偏微分方程式であるため、数値的に解くためには観測シーンの境界条件を設定する必要がある。境界条件とは、解析対象である人物群領域(流れ場)とそれ以外の領域(建物や障害物等)の境界における、数値計算を行うための拘束条件である。このような境界条件を定めるために、観測映像から流れ場領域とその他の領域を識別することが必要となる。すなわち、(1)流れ場領域の推定、(2)流れ場の解析、という二つの課題がある。本研究では、これら二つの課題に取り組んだ。

(1) 流れ場領域の推定に関する検討

本課題の目的は、観測映像から人物群領域のみを抽出することである。これは、背景差分の問題として捉えることができる。背景差分とは、入力映像において背景領域を推定し、

差分を計算することで、前景領域のみを抽出する技術である。

背景差分法について、近年では深層学習に基づいた手法が数多く提案されている。しかしながら、観測される人物群は見えや動きが多様であるため、学習データが不足することが考えられる。これはすなわち、機械学習に基づいたアプローチでは領域抽出性能が不十分になる可能性があることを示唆している。

そこで本課題では、機械学習を用いない教師無し手法の検討を試みる。具体的には、計算される映像中の速度場における境界情報を手掛かりとした、グラフカットと呼ばれるアルゴリズムに基づいた前景領域抽出を実現する。グラフカットとは、エネルギー最小化の枠組みに基づき前景と背景に領域分割する手法である。

しかしながら、グラフカットは、大域的最適解を得ることが計算量的に困難であることが知られている。このような問題を緩和するために、事前に前景、背景の一部の領域(このような領域のことを「シード」と呼ぶ)を与える。これにより、グラフカット問題における最適解を得ることが可能となることが報告されている。

そこで本手法では、速度場における境界情報を活用し、グラフカットのためのシードの自動推定を行う。前景領域と背景領域は、異なる動き情報を持つと考えられる。このことから、速度場境界は、前景領域とその他の領域を区別するための有効な手掛かりとなる。速度場境界を手掛かりに推定されたシードを用いてグラフカットを適用することで、高精度な前景領域(流れ場領域)の推定を実現する。

A. 前景・背景シードの推定を伴う流れ場における前景候補領域の抽出

最初に、計算された速度場内でエッジ検出を行う。検出されたエッジに包含される内側領域は前景領域でありやすいという仮定に基づき、速度場領域においてグラフ構造を作る。具体的な手順は次のとおりである。最初に、エッジ領域(速度場境界領域)と判定された画素集合により内包される領域における中心位置を求める。各エッジの画素位置とその中心位置をノードとし、各エッジの画素と中心画素の関係を記述する、すなわち、グラフ構造を構築する(図2)。速度場におけるグラフ上の画素値(速度と向き)を、グラフカットのための前景シードとする。背景シードを得るために、最初に前景シードを囲うような矩形領域を推定する。この矩形領域上の画素の値(速度と向き)を背景シードとして設定する(図2-(b))。

このようにして推定されたシードを手掛かりに、グラフカットを適用することで、速度場領域における前景候補領域を抽出する。

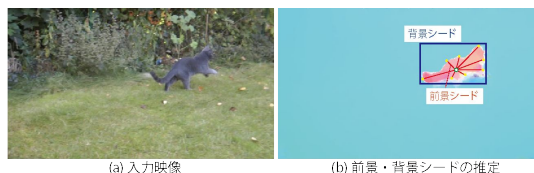


図 2: 速度場領域における前景・背景シードの推定: (a) 入力映像, (b) 速度場での前景シード(赤)と背景シード(青)の推定。

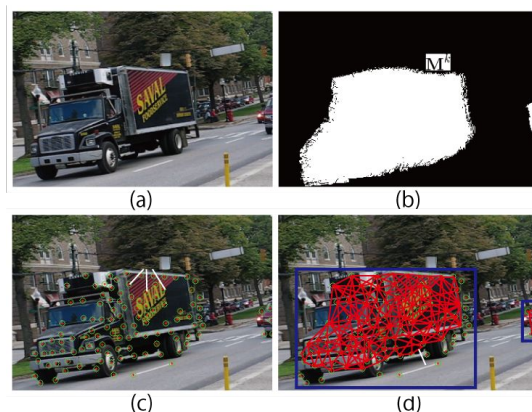


図 3: カラー画像上での前景・背景シードの推定: (a) 入力映像, (b) 前景候補領域, (c) 特徴点検出結果, (d) 前景シード(赤)と背景シード(青)の推定。

B. 前景領域の抽出

速度場内で抽出された前景候補領域に対し、実画像の画素値を利用して、再度グラフカットを行う。

前節での処理により得られた前景候補領域内(図3(b))において、グラフ構造を作成する。まず、Good features to Trackと呼ばれるアルゴリズムにより、特徴点を抽出する(図3(c))。抽出された特徴点をノードとし、すべてのノードを連結する完全グラフを構築する。このグラフ上の画素値(RGB値)を、前景シードとして利用する。背景シードの推定は、A節で述べた処理と同様に、最初に前景シードを囲うような最小の矩形領域を推定する。そして、その矩形領域の線上の画素値を背景シードとして利用する(図3(d))。

実画像から得られた前景・背景シードを用いて、前景候補領域に対してグラフカットを適用する。これにより、最終的な前景領域を得る。

(2) 映像中の流れ場の解析に関する検討

推定される流れ場領域に対し、NS方程式を圧力場について数値的に解くことで、流れ場

の解析を行う。

A. 流れ場領域の推定

(1)節で詳述した手法を用い、入力映像中の各フレームにおいて前景領域を推定する。しかしながら、前景（人物群）領域の位置はフレームによって異なる。そこで、推定された前景領域を時間方向に積分する。これにより、人物群が存在する領域、すなわち解析対象である流れ場領域を得る。

B. 流れ場の格子表現

NS 方程式を数値的に解くための一手法として、有限要素解析が知られている。本課題では、MAC 法と呼ばれる数値解法に基づき解析を行う。

最初に、対象領域を小領域に分割し、格子表現する。ここでは、スタッガード格子表現を用いる。これは、速度場と圧力場を自然に表現できる格子表現手法として広く用いられている。流れ場は、対流加速度の効果(1)式第二項)により、局所的な小領域内では同様の性質を持つと近似することができる。この仮定に基づき、前景領域に対しスーパーピクセルと呼ばれる小領域分割手法を適用する。得られるスーパーピクセル集合を解析対象とみなし、それぞれスタッガード格子表現を行う。

前述したように、圧力場に対する偏微分方程式を数値的に解く必要があるため、境界条件を設定する必要がある。そこで、抽出されたスーパーピクセル集合のうち背景領域と隣接するものを、流れ場との境界領域とし、境界条件をそれぞれ設定する。

C. 圧力場の計算

NS 方程式を無次元化した後、MAC 法に基づき、方程式を離散化する。そして、圧力について(1)式を整理すると、(1)式は以下のようなポアソン方程式に帰着する：

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) p^{n+1} = \frac{D^n}{\Delta t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial(u^2)^n}{\partial x} + \frac{\partial(uv)^n}{\partial y}\right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial(uv)^n}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)^n}{\partial y}\right) + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 D^n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 D^n}{\partial y^2}\right) \quad (2)$$

ここで x, y はそれぞれ画像の水平・垂直方向の座標を表し、上付添字 n は、 n 番目の時間ステップの処理であることを意味する。また(2)式における D は速度場の発散、すなわち、 $D = \text{div } V$ であり、 Re はレイノルズ数と呼ばれる無次元数を意味する。

上記ポアソン方程式は、Successive Over-Relaxation(SOR)法と呼ばれる反復的解法を利用して解く。

以上のような処理により、映像中の人物群の流れを圧力場により表現することが可能となる。

MAC 法は、圧力場と速度場について交互に NS 方程式を解くことで、流れ場の時間発展を表現する。本課題では、画像特徴に基づき計算されるオプティカルフローを速度場として利用する。すなわち、圧力場のみについて方程式を解けばよい。観測される画像から速度場を計算するため、数値計算に起因する計算誤差の影響を低減できることが期待される。

4. 研究成果

本章では、本研究課題で取り組んだ二つの課題、(1) 前景領域の推定、(2) 流れ場の解析、それぞれについて、実験結果を示す。そして、実験結果について考察を行う。

(1) 前景領域の推定に関する検証

3章で述べたように、本課題では解析対象である流れ場領域は背景差分により推定される前景領域を用いることで取得する。そこで、最初に、前景領域の推定に関する性能検証を行った。

本手法の性能を定量的に評価するために、Complex Background dataset と呼ばれる公開されているデータセットを用いた。評価尺度には、再現率と適合率に基づいた総合尺度である F 値を用いた。

表 1 に既存手法との比較結果を示す。これらの結果より、検討した前景領域推定手法は、比較手法に比べ高精度に領域抽出を実現できていることがわかる。また、前景領域の抽出結果の例を図 4 に示す。このように、高精度な前景領域の抽出が実現できていることが見て取れる。

表 1: 前景領域抽出性能の比較

Method	F-measure
Ours	0.769
比較手法 1	0.741
比較手法 2	0.375
比較手法 3	0.330
比較手法 4	0.330
比較手法 5	0.622
比較手法 6	0.456

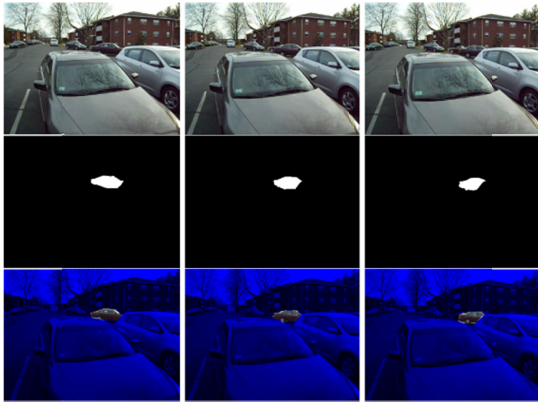


図 4: 前景領域抽出結果．一行目の画像列は異なるフレームにおける入力画像を，二行目の画像列は前景領域の正解データを，三行目は本手法による前景領域抽出結果を表す（青い領域が背景と判定された領域であることを意味する）．

(2) 流れ場の解析に関する検証

人物群映像を用いて流れ場解析に関する検証を行った．本検証では，公開されている VSPETS データセットを用いた．

図 5 に，(a) 入力映像，(b) 計算された速度場，(c) 流れ場領域の推定結果（黄色い領域が解析対象であり，青い領域が境界領域であることを意味）をそれぞれ示す．流れ場領域とその境界領域が良好に推定されていることがわかる．

推定された境界領域に対し，それぞれ境界条件を設定する．本検討では，流れ場の傾向に基づき，ノイマン条件とディリクレ条件を設定した．

A. 従来の MAC 法による圧力場推定

最初に，速度場と圧力場を交互に推定する従来の MAC 法を用いて解析を試みた．データセットに用意されているいくつかのシーケンスにおいて検証したが，定性的に正しいと考えられるような結果を得ることができなかった．これは，実際の人物群の動きは，設定した境界条件に沿うような動き方をしなかったためであると考えられる．

B. オプティカルフローを速度場として用いた場合の圧力場推定

MAC 法における速度場と圧力場の計算のうち，映像から推定されるオプティカルフローを速度場として用いた場合の解析を行った．検証の結果，計算誤差の影響は軽減されたことが見受けられたものの，流れ場の時間発

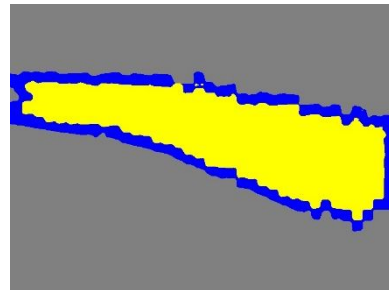
展に伴い，計算結果が発散してしまう結果が得られた．いくつかの実映像で検証を行ったが，上述した現象が同様に観測された．これは，前節での考察と同様に，境界条件の設定が不適切であることが原因として考えられる．



(a)



(b)



(c)

図 5: 流れ場領域の抽出結果: (a) 入力映像，(b) 推定された速度場，(c) 抽出された流れ場領域（黄色い領域が解析対象であり，青い領域が境界領域であることを意味する）．

C. 考察

上述したように，実映像では人物群の動きを表現した圧力場の計算を行うことができなかった．本節では，その理由について考察を行う．

正しく計算されなかった要因として，設定した境界条件が，実際の人物集団映像の動きに即したものではなかったためであると考えられる．流れ場領域抽出により得られた実映像中の境界領域（図 4(c)）は，形状が複雑であることが見て取れる．そのため，ノイマン

条件やディリクレ条件といった単純な条件の設定は、人物群映像の解析に不適切であったと考えられる。

このような問題に対処するためには、観測映像に応じた適切な境界条件の設定法やその更新法の検討、もしくは境界条件変動に頑健な数値計算手法の検討が必要となると考えられる。

これに加え、前景領域抽出手法の性能向上も課題として挙げられる。入力映像によっては、正しく前景領域が抽出されないことがあった。このような前景領域の抽出性能の低下は、流れ場の数値計算精度の低下に繋がる。そのため、より頑健な前景領域抽出手法を検討する必要がある。

D. まとめと今後の展望

本研究課題では、混雑環境下における人物群の行動の解析を目的とし、人物群のマクロな動きの流れの解析に基づいた手法の確立を目指した。この目的を達成するために、人物群により形成される流れ場の領域推定、流れ場領域に対する流体力学に基づいた圧力場の解析という二つの課題について検討した。

一つ目の課題は、対象領域の抽出を背景差分法による問題と捉え、頑健な前景領域抽出手法を検討した。具体的には、画像認識分野でよく知られる技術であるオプティカルフロー推定により得られた画像全体の速度場を活用した。速度場の境界情報を手掛かりとし、グラフカットを用いた領域分割を適用することで、前景領域(流れ場領域)の抽出を実現した。

二つ目の課題では、抽出された流れ場領域に対し、流れ場の運動方程式である NS 方程式に基づいた圧力場の計算により、人物群の動きの解析を試みた。数値計算において、その計算誤差を抑制するために、画像から計算されたオプティカルフローを数値解析の速度場として活用した。しかしながら、所望の結果を得ることができなかった。この理由は、境界条件の設定が不適切であることに起因すると考えられる。

本研究課題で得られた知見を活かし、今後は残された問題について引き続き取り組む予定である。

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 1 件)

Daisuke Sugimura, Fumihito Teshima and Takayuki Hamamoto, "Online Background Subtraction with Freely Moving Cameras using Different Motion Boundaries", *Image and Vision Computing*, 2018 (in print).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉村 大輔 (SUGIMURA DAISUKE)

東京理科大学・工学部・講師

研究者番号：10712052