

A Lagrangian Particle Dynamics Approach for Crowd Flow Segmentation and Stability Analysis

Ali, S., & Shah, M., 2007. A lagrangian particle dynamics approach for crowd flow segmentation and stability analysis. In 2007 IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 1-6). IEEE.

交通・都市・国土学研究室B4

内谷太亮

Abstract

- ラグランジュ粒子ダイナミクスを高密度の**群集流の分割**や**流れの不安定性の検出**に用いるフレームワークを提案
- 群集の動きにより生成される流れ場から**FTLE (Finite Time Lyapunov Exponent)** 場を構築し、それにより群集流の中に存在する**LCS (Lagrangian Coherent Structure)** を導出
- LCSにより**群集流を異なるダイナミクスを持つ領域ごとに分割**することが可能になり、時間ごとの領域の分割の推移を観測することで流れの不安定化も検出
- Google VideoとNational Geographic documentaryから収集した動画セットを用いて実験

新規性・信頼性・有用性

新規性

- 群集を一つの「大きな流れ」としてモデル化

信頼性

- Web上の実映像を用いて検証
- 数学的・物理的に厳密なフレームワークの構成

有用性

- 高密度な群集のセグメンテーションを可能にしている
- 時間と共に変化する異常な動きを検知可能

1. Introduction

研究の背景

イベントで集まる多くの人々に対する**群集マネジメント**は、危機管理担当者が**重要な課題**に位置付ける問題



- 危機管理担当組織間の**より緊密な連携**
- 人流の**ボトルネック**になりそうな**箇所の改造**

によって悲惨な事故を減らすというのが1つの方策



これらの取り組みが推進されている**近年においても、多くの群集による事故が発生している**



Jamarat Bridge in Mecca
(1994, 2004, 2006)

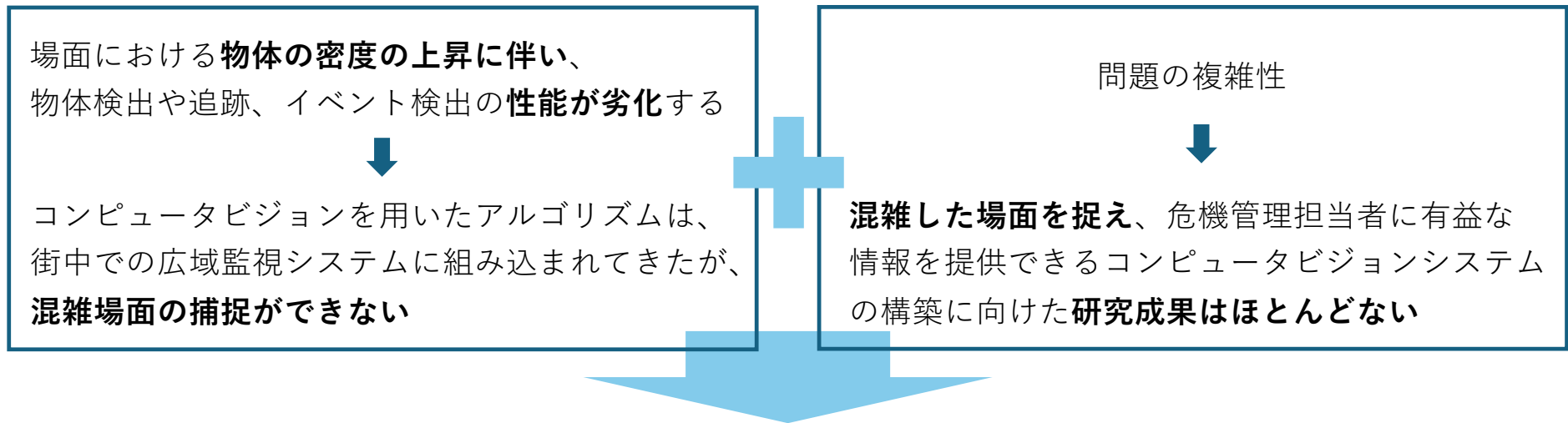


Itaewon in Korea
(2022)

参考資料 : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/78/Jamarat_Bridge_28.JPG/640px-Jamarat_Bridge_28.JPG
参考資料 : <https://i.ytimg.com/vi/N722CK54NtY/maxresdefault.jpg>

研究の背景

近年の動向



本研究を、**高密度の群集を捉えることのできる自動監視システムの構築に向けた第一歩**としたい

その時点における支配的な群集の流れを分割すること、
流れの中で発生する異常を検知することを含む

本研究の目標

目標① 群集の動きを非周期的な動的システムとしてモデル化する

= 時間と共に変化する流れ場（ベクトル場）という形で可視化する

目標② 学習したパターンを用いて、流れのダイナミクスで生じる変化を検出したい

本研究の目標

目標① 時間依存のベクトル場としてモデル化

前提

群集の動きを時間と共に変化する流れ場（ベクトル場）として可視化

そのような流れ場は、実空間と同じように、時空間の相互作用によって生まれる動きのパターンを反映した性質的に異なるダイナミクスを持つ領域で構成される



群集の動きにより生成された流れ場の影響下で、粒子群が混ざり合い、運ばれていく様子を調べることで、流れ場の空間的構造を明らかにする

「フローセグメント」 = ある場面において、力学的及び物理的な意味を持つような現れ出た動きのパターン
フローセグメントを特定するために、ラグランジュ粒子ダイナミクスを下敷きにした方法を使う

本研究の目標

目標① 時間依存のベクトル場としてモデル化

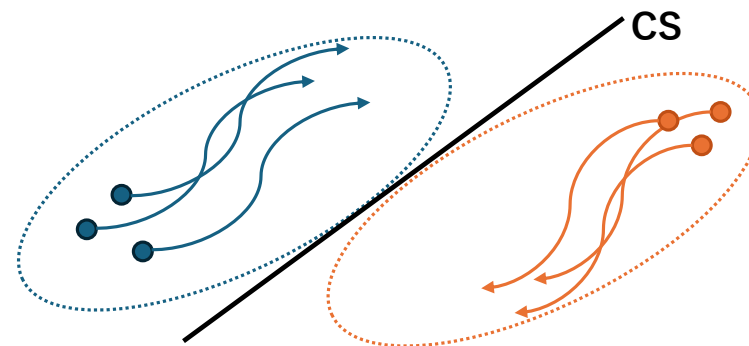
本研究の理論的な中心

Coherent Structure (CS)

CSの中でも、粒子の軌道に基づいて定義されたものを
Lagrangian Coherent Structures と呼ぶ

→LCSの検出のためには、リアプノフ指数の利用が求められる

→その計算結果がFTLE場となる



Haller (2000)において、LCSはFTLE場における局所的な最大化曲線（リッジ）として現れることが示されている



力学的及び物理的に意味を持ったセグメントを特定する問題

→**スカラー場**に対する**正規化カットフレームワーク**によるセグメント化

本研究の目標

目標② 変化の検出

目標①での定式化により、連続した時間ステップにおいて新しくフローセグメントが発生した部分を見つけるだけで流れのダイナミクスの変化を捉えることができる

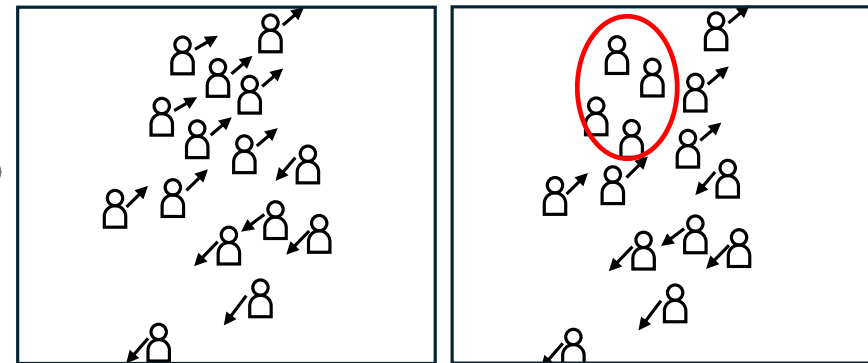
セグメント結果



タイムステップ t

タイムステップ $t+1$

実際の映像



タイムステップ t

タイムステップ $t+1$

2. Related Work

Related Work

コンピュータビジョンの世界では、**群集の中での個人の検出や追跡**に焦点

群集内での個人の検出・追跡

P.Reisman et al (2004)

動画をx-t平面で切り出し、動きの変化を
二次元画像のように表現

T.Zhao et al (2003)

人物の形と色の情報を使って、その人を
識別・追跡する手法

P.Tu et al (2004)

輪郭線を用いて、人を識別・追跡

G.Brostow et al (2006)

特徴点の軌跡から群集内の個人検出・追跡

群集内の人数推定

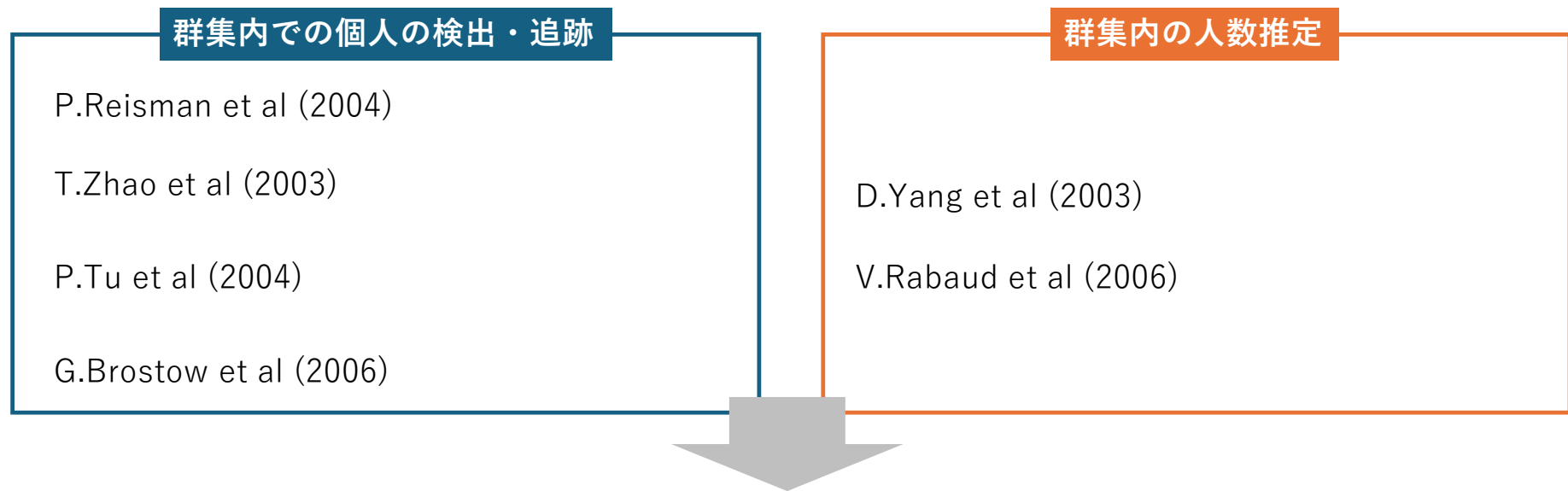
D.Yang et al (2003)

センサーネットワークを用いて人の存在や動き
を検出して、群集内の人数をカウント

V.Rabaud et al (2006)

群集の映像から動いている物体をクラスタ
リングして、人数をカウント

Related Work



上記の研究と本研究との違いは、

個々人を検出・追跡するのではなく、**群集を一つの大きな動的システムとしてモデル化する点**

Related Work

本研究では、**群集**を一つの大きな動的システムとしてモデル化することを試みる

本研究に関連する研究

A. B. Chan et al. (2005)

群集が映った動画を**動的テクスチャベースの表現で分割**する方法を提案

ただ、時間と共に変化する**ピクセルのパターンを確率的にモデル化**している

↔ 本研究では、**オプティカルフローから直接動きを読み取る**ことを目標としている

P. Sand et al. (2006)

粒子ベースのフレームワークで動画中の動きを推定する方法を提案

ただ、画像上の**物体がどう動いたかを推定する**というスケールで考えられている

↔ 本研究では、**粒子**を使って力学的及び物理的に**意味のあるセグメントを抽出**することまで考える

3. Definitions and Notations

Definition and Notation

S. C. Shadden et al. (2005)の記法や重要な概念を使用

対象領域

$$D \subset \mathbb{R}^2$$

平面 $\mathbb{R}^2$ 内の開集合 D を解析対象となる流体の領域とする

粒子の軌跡

流速場 $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{x}, t)$ が D 上に定義され、

空間は C^2 級関数、時間は C^0 級関数を満たす形で与えられた時、

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t; t_0, \boldsymbol{x}_0) = \boldsymbol{v}(\boldsymbol{x}(t; t_0, \boldsymbol{x}_0), t) \\ \boldsymbol{x}(t; t_0, \boldsymbol{x}_0) = \boldsymbol{x}_0 \end{cases} \quad (1)$$

2 式を満たす常微分方程式の解はただ一つ存在して、
粒子の軌道は一意に定まる

$\dot{\boldsymbol{x}}(t; t_0, \boldsymbol{x}_0) :$

粒子の速度 (Lagrange)

$\boldsymbol{v}(\boldsymbol{x}(t; t_0, \boldsymbol{x}_0), t) :$

既知の速度場 (Euler)

Definition and Notation

準備

フローマップ

$$\phi_{t_0}^t : D \rightarrow D : \mathbf{x}_0 \mapsto \phi_{t_0}^t(\mathbf{x}_0) = \mathbf{x}(t; t_0, \mathbf{x}_0) \quad (2)$$

ある時刻 t_0 に出発した粒子 $\mathbf{x}_0$ が時刻 t にどこに移動したかを計算する関数であり、 $\phi_{t_0}^t(\mathbf{x}_0)$ は以下の2つの特性を持つ

$$\phi_{t_0}^{t_0}(\mathbf{x}) = \mathbf{x} \quad (3)$$

初期時刻 t_0 におけるフローマップはどの点もそのまま自分を写す
= 時刻 t_0 の時は、**出発地と到着地が一致**する

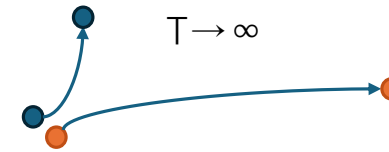
$$\phi_{t_0}^{t+s}(\mathbf{x}) = \phi_s^{t+s}(\phi_{t_0}^s(\mathbf{x})) = \phi_t^{t+s}(\phi_{t_0}^t(\mathbf{x})) \quad (4)$$

どの時刻を経由しても出発地と到着地が一緒であれば最終的な位置は同じ
= 仮に**時間を分割して解析しても全体の動きの解析として扱う**ことができる

3.1 Finite Time Lyapunov Exponent Field

リアプノフ指数 (Lyapunov Exponent)

限りなく近接した粒子が、無限に長い時間をかけてどの程度
指数関数的に離れていくのかを測るための漸近量



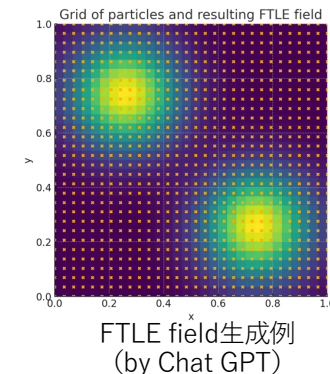
➡ 流体力学の世界では、**有限時間リアプノフ指数 (FTLE)** を用いるのが一般的

特徴

- 初期位置 x_0 と積分時間 T に依存
- 粒子の軌跡を有限の時間区分 T だけ追跡した時の**流れの局所的な特性を明らかにする**



有限時間リアプノフ指数解析を**粒子からなる格子上で行う時**、
有限時間リアプノフ指数フィールド (FTLE field) が生成される



3.1 Finite Time Lyapunov Exponent Field

FTLE fieldの定式化

FLTE field $\sigma_{T_0}(\mathbf{x}_0, t_0)$ は、フローマップ $\phi_{t_0}^{t+T}$ を用いて以下のステップで計算される

Step 1. x の摂動点 y を設定して、積分時間 T 後の摂動を導出

Step 2. 摂動を線形近似

Step 3. Cauchy-Green変形テンソルの定義

Step 4. 最大の変形を捉える

Step 5. FLTE Fieldの定義

積分時間 T 後の
 x と摂動点 y のズレ
= FLTE fieldにおいて
粒子の周りがどれだけ
伸びたか

3.1 Finite Time Lyapunov Exponent Field

Step 1.

Step 1. x の摂動点 y を設定して、積分時間 T 後の摂動を導出

Step 2.

摂動点 y は次式で定義できる。

$$y = x + \delta x(0)$$

任意の方向を向いた微小な摂動ベクトル

Step 3.

Step 4.

この時、積分時間 T 後の粒子 x と y のズレの大きさは次式で定義できる。

Step 5.

$$\delta x(T) = \phi_{t_0}^{t_0+T}(y) - \phi_{t_0}^{t_0+T}(x)$$

Step 2. 摂動を線形近似

1 次のテイラー展開により非線形な粒子の変位を線形に近似

$$\delta x(T) = \frac{d\phi_{t_0}^{t_0+T}(x)}{dx} \delta x(0) + \cancel{O(\|\delta x(0)\|^2)}$$

フロームップの
空間勾配テンソル

摂動が無限小でない限り
無視できない高次項 (無視)

3.1 Finite Time Lyapunov Exponent Field

Step 1.

Step 2.

Step 3.

Step 4.

Step 5.

Step 3. Cauchy-Green変形テンソルの定義

$\delta x(T)$ から摂動の大きさを求めて、

$$\|\delta x(T)\| = \sqrt{\left\langle \delta x(0), \frac{d\phi_{t_0}^{t_0+T}(x)}{dx} \frac{d\phi_{t_0}^{t_0+T}(x)}{dx} \delta x(0) \right\rangle}$$

以下全て * は転置演算子を表す

この時、Cauchy-Green変形テンソル Δ は、

$$\Delta = \frac{d\phi_{t_0}^{t_0+T}(x)}{dx}^* \cdot \frac{d\phi_{t_0}^{t_0+T}(x)}{dx}$$

3.1 Finite Time Lyapunov Exponent Field

Step 1.

Step 2.

Step 3.

Step 4.

Step 5.

Step 4. 最大の変形を捉える

Δ の最大固有値となるような固有ベクトルと一致するような $\delta x(0)$ が選ばれる時、無限小に近接する粒子が最も引き離される

$\lambda_{max}(\Delta)$ を Δ の最大固有値とすると、

$$\max_{\delta x(0)} \|\delta x(T)\| = \sqrt{\lambda_{max}(\Delta)} \|\delta x(0)\|$$

$\lambda_{max}(\Delta)$ に対応する固有ベクトル

また、摂動 $\delta x(0)$ は指数関数的に増加することが多いので、 $\max_{\delta x(0)} \|\delta x(T)\|$ は、

$$\max_{\delta x(0)} \|\delta x(T)\| = e^{\sigma_{t_0}^T(x)|T|} \|\delta x(0)\|$$

とも書ける

3.1 Finite Time Lyapunov Exponent Field

Step 1.

Step 2.

Step 3.

Step 4.

Step 5.

Step 5. FTLE Fieldの定義

Step 4.における 2 式は左辺共通なので、

$$\sqrt{\lambda_{\max}(\Delta)} \|\overline{\delta x}(0)\| = e^{\sigma_{t_0}^T(x)|T|} \|\overline{\delta x}(0)\|$$

とできて、これより両辺整理して、

$$\sigma_{t_0}^T(x) = \frac{1}{|T|} \ln \sqrt{\lambda_{\max}(\Delta)} \quad (6)$$



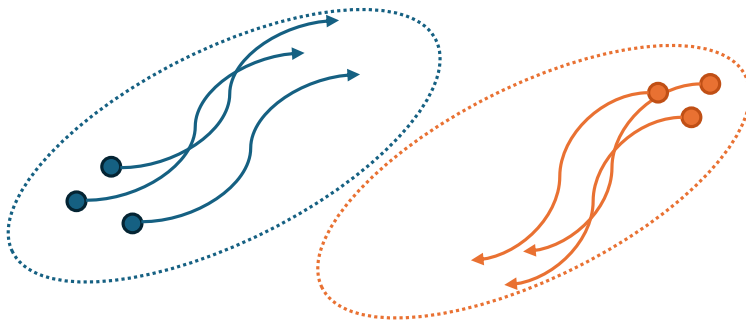
FTLE Field $\sigma_{t_0}^T(x)$ がフローマップ $\phi_{t_0}^{t+T}$ から導出できた

3.2 Lagrangian Coherent Structures

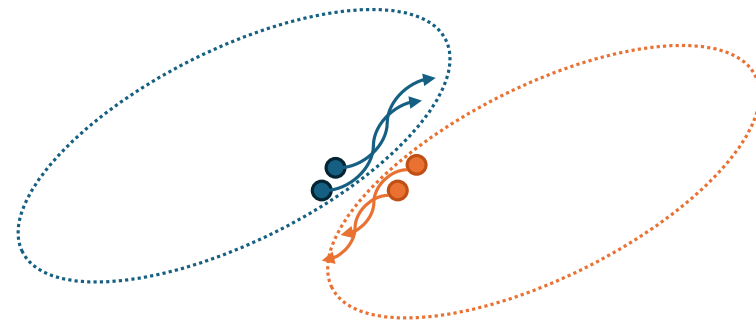
非周期速度場において、

Lagrange Coherent Structure (LCS) は、**FLTE場のリッジ**とみなすことが出来る

FLTE場のリッジとLCSの関係



周りの粒子と一体的な動き
→ Δ の固有値は 1 に近づく



境界付近では粒子がバラバラに動く
→ より高い固有値
→ FLTE場における**顕著なリッジ**に

4. Implementation

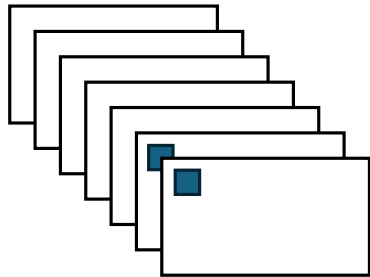
4.1 Flow Field Calculation

この節では、動画から流速場を推定する作業を行う

Step 1.

動画の連続フレーム間で、
ブロック単位の**フーリエ領域での相関法**実施

連続フレーム間で
ブロックがどれだけ
ずれたか

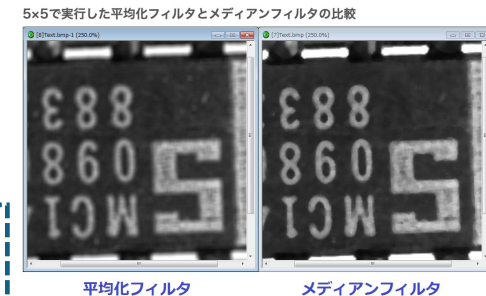


与えられたフレームで取りうるブロック全てで実施

Step 2.

局所的な外れ値を適応型局所メディアンフィルタを用いて置換

- 画像のノイズを除去することで滑らかなベクトル場を入手可能
- 平均化フィルタよりも輪郭部分をぼやかさずにノイズを取り除ける



参考資料：<https://www.mitani-visual.jp/mivlog/imageprocessing/medf368.php>

4.1 Flow Field Calculation

この節では、動画から流速場を推定する作業を行う

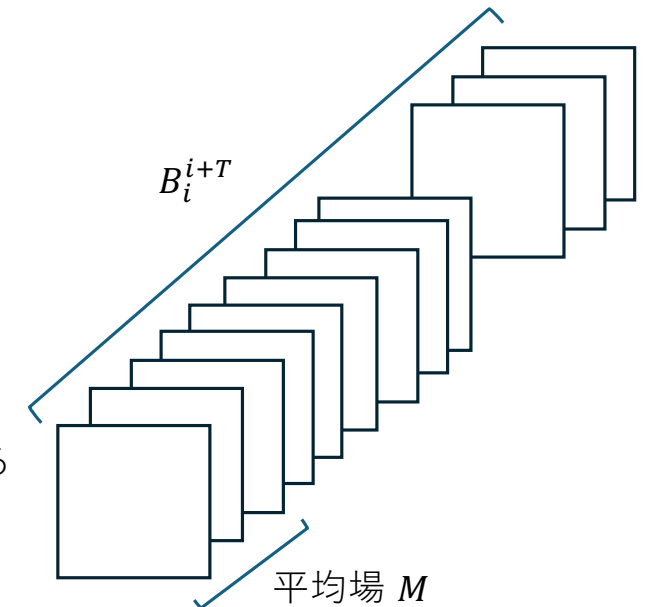
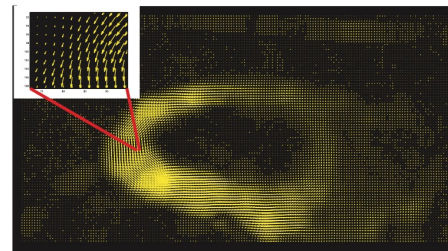
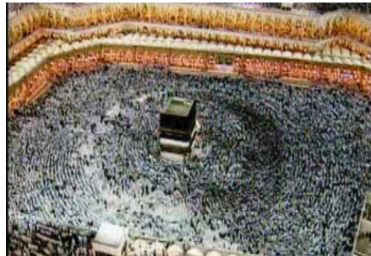
Step 3.

一つの平均場 M を n フレーム分のオプティカルフロー場を平均化して得る
ピクセル単位での動きのベクトル

フレームごとに推定すると局所的な外れ値等でノイズが発生するため、
平均化してベクトル場を滑らかに

Step 4.

B_i^{i+T} を T 個の平均場を一つのまとまりとして扱い、それを B_i^{i+T} と定義する



4.2 Particle Advection

この節では、時間 T の間で、流れ場 B_i^{i+T} の影響下で粒子の移流を実行する

Step 1. B_i^{i+T} における最初の平均場 M_i に等間隔の粒子を配置

Step 2. 次の式によって、各時間ステップにおける速度成分を定義

$$\frac{dx}{dt} = u(x, y, t)$$

$$\frac{dy}{dt} = v(x, y, t)$$

$$\text{s.t. } [x(0), y(0)] = (x_0, y_0)$$

粒子 (x_0, y_0) に対応する
ラグランジアン軌跡は
 $[x(t+T; t, x_0, y_0), y(t+T; t, x_0, y_0)]$
で表される

4.2 Particle Advection

この節では、時間 T の間で、流れ場 B_i^{i+T} の影響下で粒子の移流を実行する

Step 3. 三次補間を行いながら、Runge-Kutta-Fehlberg法を用いて上の微分方程式を解く

速度成分 u, v はピクセル単位でしか定義されない（離散的）

→補間を行うことで**速度成分を滑らかに**する

Step 4. それぞれのブロック B_i^{i+T} について Step 1.～ 3.を繰り返す



全ての粒子のラグランジアン軌道が得られる

4.3 Flow Maps and FTLE Field

この節では、フローマップとFTLE場を導出する

Step 1. 2種類のフローマップを用意する

ϕ_x : 粒子の x 方向の移動履歴

ϕ_y : 粒子の y 方向の移動履歴

Step 2. 各粒子をフレームの各ピクセルに設置

Step 3. 4.2節で述べた方法で各粒子を動かし、積分時間 T 分の各粒子の軌跡を更新していく



フローマップ ϕ_x, ϕ_y が記録完了

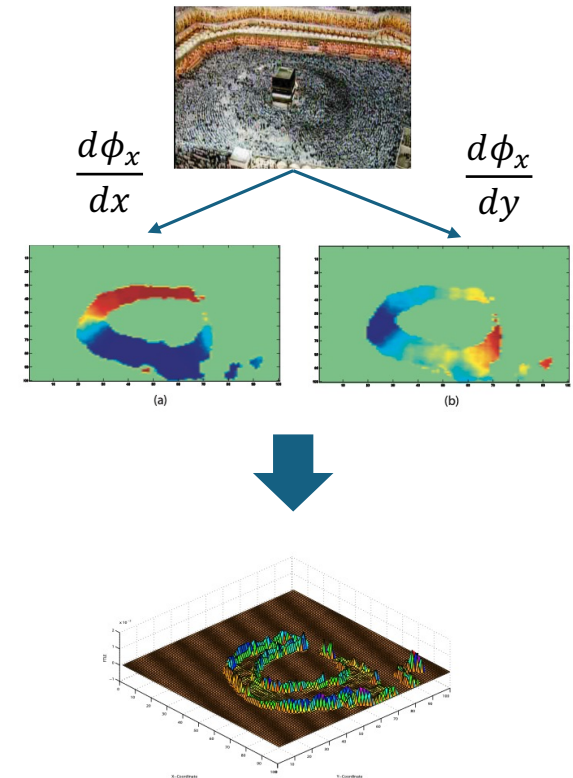
4.3 Flow Maps and FTLE Field

この節では、フローマップとFTLE場を導出する

- Step 4. Step 3.までに記録したフローマップの空間勾配を有限差分法でとる
- Step 5. コーシーグリーン変形テンソルを作る
- Step 6. 式 (6) を使ってFLTEの計算

➡ 全ての初期位置に対してFLTEを計算すると、FLTE場を導出できる

ここで導き出されるリッジは、異なるダイナミクスを持つ流れを分割するために使われる



4.4 FTLE Field Segmentation

FLTE場は映像中の群集の流れを含んだ**スカラー場**として定義されている

→ Shi et al. (2000)が初めて提案した、**正規化カットアルゴリズム**を用いて**セグメント化**

本研究では**以下の2ステップ**でセグメント化を実施

Step 1. FTLE場において**過剰に**セグメント化を実施

Step 2. リアプノフ指数の値から粒子群が**同じような振る舞い**をしていると判断できる**セグメントを統合**

なぜ2ステップなのか

グラフベースのセグメントアルゴリズムは、**前もって**いくつのセグメントで分割するのかを**特定しておく必要がある**



ただ、現実の環境で群集のセグメント数を**予め設定するのは極めて厳しい条件**

→最初から細かくセグメント化することで、この条件を**緩和**

4.4 FTLE Field Segmentation

Step 1. FTLE場において過剰にセグメント化を実施

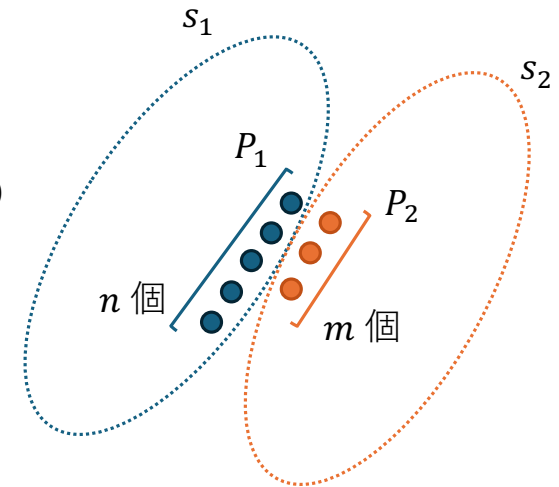
FLTE場から計算されたノード間の重み $w(i,j)$ を使って**正規化カットアルゴリズム**を実施

Step 2. セグメントの統合

過剰にセグメントされた場 S には k 個のセグメントが存在する

- ① 隣接セグメントのペアを選ぶ
- ② **粒子群間**のLyapunov指数を計算 ($d(0)$: 2つの粒子群の初期距離)

$$\chi(t) = \frac{1}{t} \ln \frac{d(t)}{d(0)}$$



4.4 FTLE Field Segmentation

Step 2. セグメントの統合

③ セグメント全体としての発散度（Lyapunov divergence）を計算

$$lypdiv(s_1, s_2) = \underbrace{\frac{1}{nm}}_{\text{標準化}} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{1}{t} \ln \frac{d_{i,j}(t)}{d_{i,j}(0)}$$

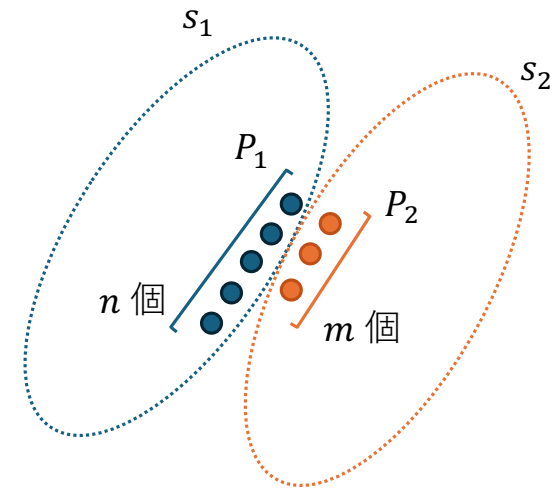
粒子群 i, j のユークリッド距離



閾値以下であれば、

セグメント s_1 と s_2 は統合される

※ 但し、流れの速度が**ゼロの部分**は“vacuum segment”として**無視**



5. Flow Instability

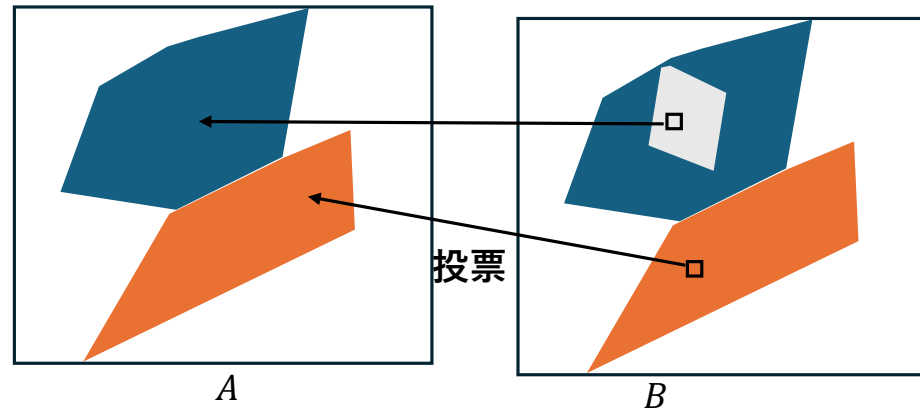
Flow Instability

- 異なるダイナミクスを持つ**フローセグメントの境界**は、FTLE場における**LCS**である
- フローの**動的な振る舞いに変化**があると、その場所に**新たなLCS**が現れる
- 新しいLCS**は、これまで存在していなかった**新しいセグメントを生み出す**

➡ 流れの不安定性を特定する問題→**フローセグメントの数の変化の検出**として定義できる

連続する二つのビデオブロックから生成されるセグメントの対応関係を確立

セグメントの形状は、
そのセグメントに属する
ピクセルの空間座標に
基づく**ガウス確率分布**
により表現



投票の結果、
どこにも対応しないものを
新しいセグメントとみなす

6. Experiments and Discussion

実験概要

使用した動画セット

動画セット①：高密度の群集や交通

動画セット②：‘Inside Mecca’というタイトルのNational Geographicの動画

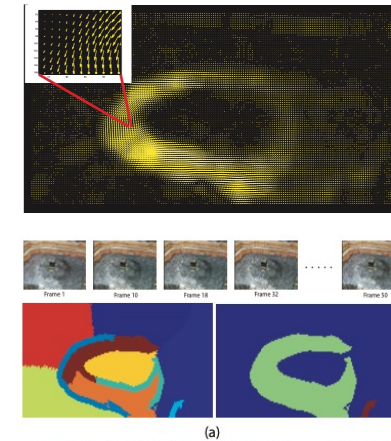
処理方法

- 各動画の流れ場は4.1節の方法で推定
- 移流の際には、ピクセルと同じ数の粒子をグリッド状に配置
- フローマップのコーシーグリーン変形テンソルから、式（6）を使ってFTLE場を定義
- セグメント化する際は、12-20セグメントで設定
- セグメントの統合は式（8）のリアプノフ発散指数を用いて実施

流れの分割結果

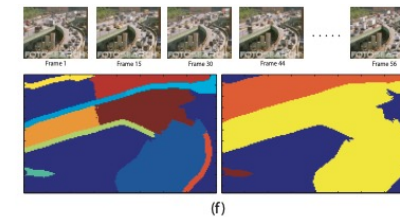
結果① メッカ巡礼の映像

- 人々がカーバ神殿の周囲を反時計回りに動いている
- ベクトル場では、**方向がバラバラ**になってしまっている
- しかし提案手法では、ダイナミクスが同じという点で、**1つのまとまりのセグメント**として検出できた



結果② 高密度の交通

- 高速道路では車が双方向に走っていて、手前からランプで合流
- **合流する車と同じ方向の本線の流れは同じセグメント**として分類
- 一貫したダイナミクスの流れが、同じグループに分けられている



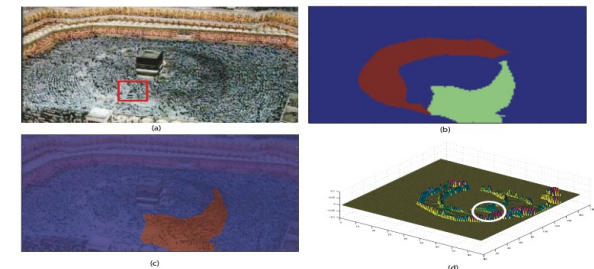
流れの不安定さの検出結果

異常の生成方法

映像中にバウンディングボックスを置き、流れの向きを強制的に変えることで生成

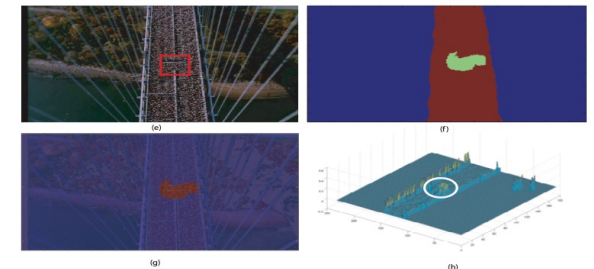
実験① メッカ巡礼の映像に異常を挿入

- 流れの中にバリア構造ができ、セグメントが2つに分裂
- 分裂した部分が「新たに現れたセグメント」として検出され、**不安定領域としてフラグ**
- FTLE場にも新たなLCSが出ており、理論と一致



実験② マラソン映像に異常を挿入

- 提案手法では、異常が挿入された箇所が潜在的に問題のある領域だとして**フラグを立てられた**



7. Conclusion

結論

- ラグランジュ粒子ダイナミクスに基づく群集流のセグメンテーションと流れの不安定性検出に関する数学的に厳密なフレームワークを提案
- Webから収集した実映像を使用して検証
- 不安定性検出のさらなる精度向上が今後の課題
 - 個々の粒子の特性を考慮に入れたセグメント表現を導入したい

所感

- flow fieldやFTLE fieldなど、さまざまな場が出てきて、最初の方はうまく整理できずにこんがらがった
- 普段アクティビティモデルなどを考えていると個々の選択の総体として全体を考えるという思考になりがちなので、マクロな現象をマクロなまま捉えるというものの見方が面白かった
- 結論に書いてあった将来の展望で、「個々の粒子の特性を考慮に入れたセグメント表現を導入したい」とあったが、どうやってマクロに捉える性質を残しつつ個々の特性を考えるのかイメージがつかなかった

Appendix
