

# ステレオ高速度カメラを用いた核融合炉内のダストの3次元測定

大瀧 雄貴<sup>1</sup> 竹内 義則<sup>2</sup> 松本 哲也<sup>1</sup> 工藤 博章<sup>1</sup> 大西 昇<sup>1</sup>

**概要:** 本稿では、核融合炉内に設置されたステレオ高速度カメラによって得られた炭素ダストの像から、ダストの3次元軌跡を測定する手法について述べる。まず、カメラキャリブレーション、ダスト抽出それぞれについて解説する。さらに、ダストの追跡とステレオ対応付けを組み合わせた頑健なステレオ対応付け手法を提案する。提案手法は、ダストの追跡によって得られた軌跡データから対応ダストの座標を予測し、その予測と最も近いダストを対応とする手法である。ダストの追跡にはリラクゼーション法を用いる。テストデータを対象としたステレオ対応付け実験を行ったところ、直前までの正確な軌跡データを事前に与えた提案手法による、ステレオ対応付けの適合率は最大でおよそ0.9となり、エピポーラ拘束を利用したステレオ対応付けよりも優れた性能を示した。また、提案手法を実際にステレオ画像列に適用した結果、合計600フレームから60個の軌跡を測定することが出来た。

## Three-dimensional measurement of dusts in a nuclear fusion reactor using high speed stereo camera

YUKI OTAKI<sup>1</sup> YOSHINORI TAKEUCHI<sup>2</sup> TETSUYA MATSUMOTO<sup>1</sup> HIROAKI KUDO<sup>1</sup> NOBORU OHNISHI<sup>1</sup>

**Abstract:** This paper introduces a method to measure dust trajectories from stereo images taken by a stereo camera on a nuclear fusion reactor. First, a camera calibration method and dust extraction process are introduced. Second, we propose a robust stereo matching method for high density dust using the prediction of the dust trajectory. If we focus on the dust on the left image, the proposed method searches the dust on the other image whose location is the nearest from the prediction obtained by dust tracking method. We use the relaxation method for the dust tracking. In the experiments to evaluate the performance of the stereo matching using synthesized dust test data, the precision of the proposed method which has the precise trajectory data reached approximately 0.9. Moreover, this performance was higher than the stereo matching using epipolar constraint. Finally, the proposed measurement method was applied to the stereo images. As the result, 60 trajectories were obtained by 600 frames in the stereo images.

### 1. はじめに

近年、現在運用されている核分裂炉の代替として、核融合炉に関する研究が広く行われている。核融合炉研究の一環として、国際実験炉“ITER”(International Thermonuclear Experimental Reactor)がフランスに建造され、日本を含む7つの国と地域により運営されている。

ITERは発電のためにトリチウムを使用するが、炉の運

転後に炉内の除去困難な場所にトリチウムが蓄積する現象が起こっている。フランス政府は許容できる放射線量を法律で定めているため、このような意図しない放射性物質の蓄積は、炉の運転期間を短縮化してしまう。また、炉の運転時に炉内の構造物より摩耗物質が生じるが、生じた摩耗物質の炉内でどのように振る舞うのかが判明しておらず、危険性を十分に把握できていないという問題がある。以上のような問題は、炉内に存在する粒子状の物質が炉内においてどのような力を受けているか判明していないために生じている。

炉内における力の作用を理解するために、まずは正確な

<sup>1</sup> 名古屋大学 大学院情報科学研究科  
Graduated School of Information Science Nagoya University  
<sup>2</sup> 大同大学 情報学部  
School of Informatics Daido University

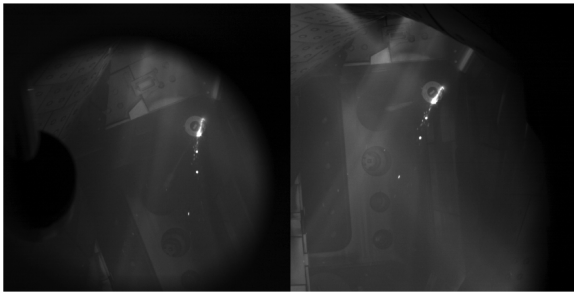


図 1 測定対象のステレオ画像

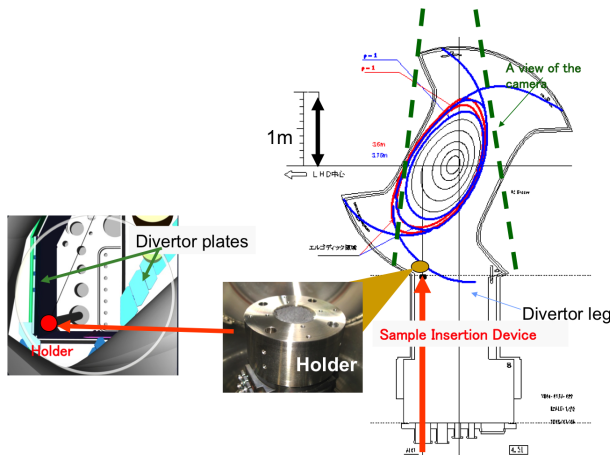


図 2 ダストフォルダとカメラの視線の位置関係

観察を必要としているが、運転時の核融合炉の内部は 1 億近くに達するため、測定の方法は限られている。その中の一つが、保護された炉の測定機器設置用ポートに可視光カメラを設置することである。そこで、実験的に炉内の試料投入用ポートからあらかじめ用意した炭素ダストを投入し、その軌跡を別のポートに設置されたステレオ高速カメラで撮影する実験が行われた。

本稿では、以上の実験により撮影されたステレオ画像列から、ダストの 3 次元的な軌跡を測定するための一連の手法、カメラキャリブレーション法やダストの時間追跡手法について説明する。また、高密度なダストを対象とした新しいステレオマッチング手法を提案し、その性能を実験により示す。

## 2. ダストの測定法

### 2.1 対象のステレオ画像列

本稿で測定の対象にしているステレオ画像列（図 1）について述べる。ダストの投入口であるダストフォルダとカメラの視線の位置関係を図 2 に示す。また、ステレオ画像列は表 1 のような条件で撮影された。実験に使用されたダストは東海カーボン製の球体炭素ダスト 3 であり、120 ミクロンである。測定のために、実際に発生する炉内の摩耗物質（10 ミクロン以下）よりも大きいものを使用している。

表 1 Conditions of image acquisition

Model	PHOTORON FASTCAM MC2.1-10K
Resolution	512*512 [pixels]
Frame Rate	2000 [fps]
Shutter Speed	1/4000 [s]
Bit Depth	8 [bits]
Channels	1 [ch]
Total Frames	8188 [frames]
Lens	Fujinon TV LENS HF25HA-1B (1:1.4/25mm)

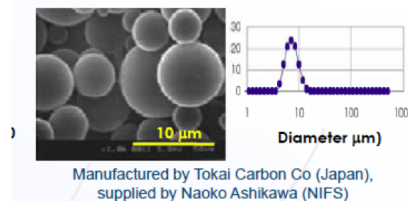


図 3 ダストの SEM 像

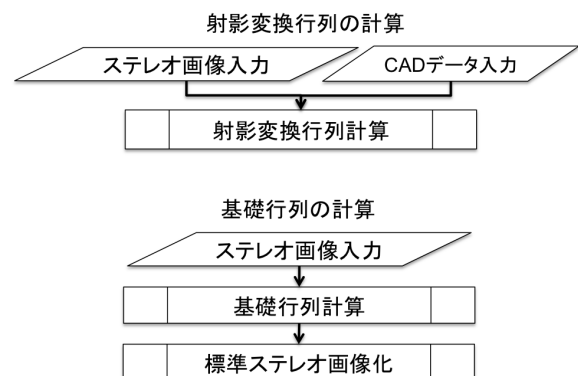


図 4 カメラキャリブレーション処理の流れ

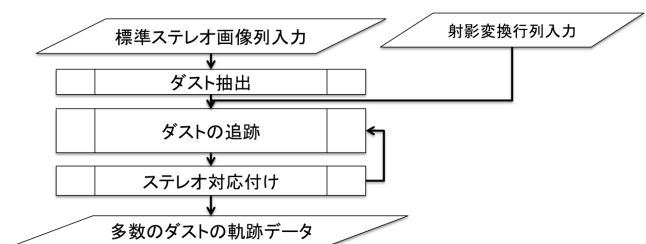


図 5 ダストの軌跡測定の流れ

### 2.2 概要

ステレオ画像列からダストの軌跡を測定するために、測定対象のステレオ画像列に対し、大きく分けて 2 種類の処理を行う。まず始めにカメラキャリブレーション処理を行い、その後ダストの軌跡測定を行う。それぞれの処理の流れを図 4、図 5 に示す。

### 2.3 カメラキャリブレーション手法

実験で使用されたカメラは事前のキャリブレーションが行われていない。以下では、ステレオ画像と核融合炉内の

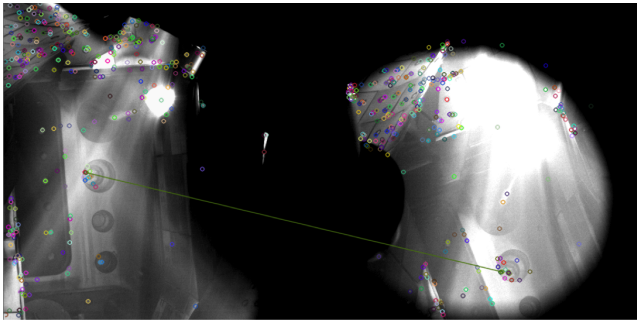


図 6 SIFT 特徴量とある対応

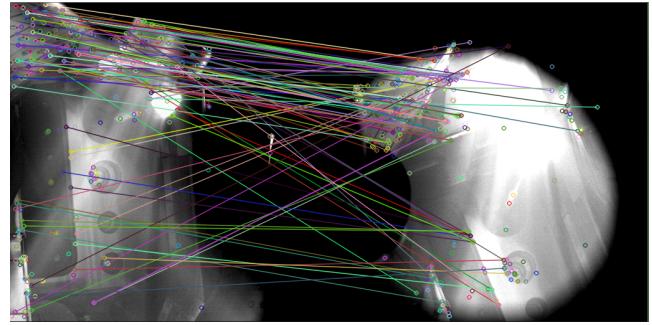


図 7 SIFT 特徴量の対応付け

実座標データ (CAD データ) を用いて、キャリブレーションを行う。

### 2.3.1 カメラの射影変換行列の計算

ステレオカメラそれぞれのカメラの射影変換行列の計算は、CAD データに含まれている実座標と画像の座標との対応を取ることで行った。ステレオ画像に写る核融合炉の構造物には、実座標データが存在する特徴点がほぼ存在しないため、CAD データと画像の対応付けは目視で行った。

### 2.3.2 標準ステレオ画像化

計算機によるステレオ対応付けを容易にするために、標準ステレオ画像化を行う。標準ステレオ画像化には、チェッカーボードを用いる方法 [5] が容易であるが、今回は事前にそのような処理を行っていない。そのため、画像に写る対応点から基礎行列を計算し、標準ステレオ画像化を行う。処理の手順は以下の通りである。

- (1) 各画像について SIFT 特徴量 [8] を計算する (図 6)
- (2) SIFT 特徴量のステレオ対応付けを最近傍法で行う (図 7)
- (3) 正対応と思われる 7 点を目視で選ぶ。この際、対応点が画像の広い範囲に分布するように考慮する (図 8)

このようにして得られた対応点を用い、7 点アルゴリズム [9] を用いて基礎行列を計算する。計算された基礎行列を用いて、エピポールを求め、以下の手順で標準ステレオ画像化 [6] を行う。

- (1) ステレオ画像それぞれのエピポールを計算する
- (2) それぞれのエピポールを  $x$  軸上に移動するように画像を回転する
- (3) エピポールが無限遠に投影するように、画像を変換する
- (4) 対応点のエピポーラ線同士が同一  $y$  座標になるよう、それぞれの画像を変換する

以上の手順で行った標準ステレオ画像化の例を図 9 に示す。

## 2.4 ダストの測定手法

### 2.4.1 ダストの抽出

ステレオ画像列からダストの軌跡を測定するためには、

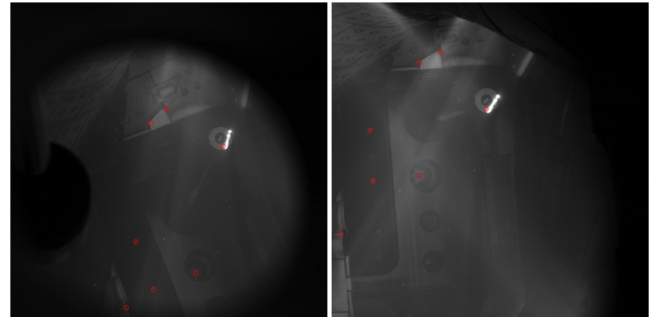


図 8 得られた対応点 (赤円)



図 9 標準ステレオ画像化結果

画像からダストの像のみを抽出しておくことが必要である。以下のその手法を示す。

ダストの像は画像中において 10 ピクセル前後で構成されており、細かい粉末がダストフォルダから拡散してゆくように見える。このような輝度変化パターンに着目し、Difference of Gaussian (DoG) を用いてダストの像のみを抽出する。画像処理において DoG は、それぞれ異なるガウス関数に従うガウシアンフィルタによって平滑化された画像の差分によって実現され、周波数領域においてはバンドパスフィルタを適用することと同様の働きをもつ。これにより低周波数成分である背景と高周波数成分であるノイズ成分を取り除き、ダストの像のみを取り出すことが出来る。

ダスト抽出処理は以下の手順で行う。

- (1) DoG をステレオ画像に適用する
- (2) 画素値が 10 未満の画素の画素値を 0 にする
- (3) ダストフォルダの像を構成する画素の画素値を 0 にする

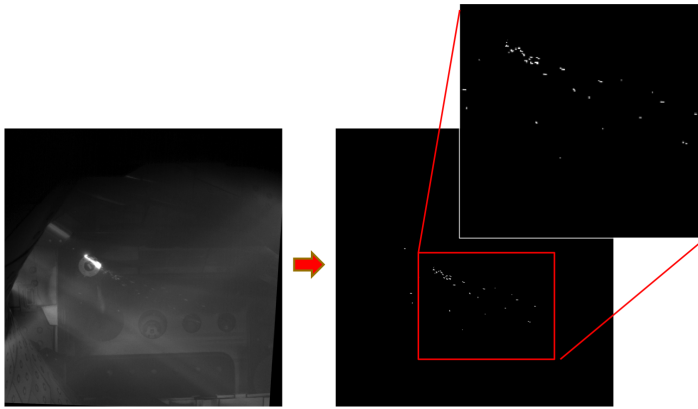


図 10 ダスト抽出処理の結果

DoG の 2 つのガウシアンフィルタのウィンドウサイズはそれぞれ  $11 \times 11$ ,  $3 \times 3$  とし,  $\sigma$  の値はそれぞれの値は 2.0, 0.8 とした. DoG を適用後に閾値処理をしているのは, ダストの周波数帯以外の周波数成分の影響を完全に除去するためである. また, DoG 適用後はダストの像のみならずダストフォルダの像もはっきりと残ってしまうため, ダストフォルダの像をマスク処理により取り除く. ダスト抽出の結果の例を, 図 10 に示す.

ダストの像を抽出後, ラベリング処理を行う. そしてそれぞれの領域の重心をダストの座標として扱う.

#### 2.4.2 ダストの追跡手法

ステレオ画像列から抽出されたダストは, 時間軸上に離散的に存在している. したがって, ダストの軌跡を測定するためには, 異なる時間に測定された同一のダストを対応づける必要がある. 本稿では, 流体測定で用いられる PTV (Particle Tracking Velocimetry) 手法の一つであるリラクゼーション法 [2], [3] を用いる. 以下, [3] に基づいて手法について説明する.

ある時間フレーム間において, ある注目ダストの周りに存在しているダストも注目ダストと似た移動をしていることを仮定して, 最もふさわしい注目ダストの移動先の対応ダストを探索する手法である. 確率の反復計算を行うことにより, 正しい対応ダストへのつながりの確率が高くなり, そうでないダストへのつながりは確率が低くなる.

まず, 最初のフレームのダスト  $x_i$  について, 式 (2.4.2) を満たす次のフレームの粒子への  $N_p$  個の対応候補が存在しているとすると,

$$\|y_j - x_i\| < R_s \quad (1)$$

$y_j$  は対応候補のダストであり,  $R_s$  は探索範囲 (maximum velocity) である. この時, ダスト  $x_i$  には式 (2) を満たす  $N_n$  個の近隣ダストが存在している.

$$\|x_i - x_k\| < R_n \quad (2)$$

$R_n$  は, 近隣半径 (neighbourhood radius) である.

類似制約をダスト  $x_i$  の近隣のダスト  $x_k$  に適用する. ここで, 式 (2.4.2) と式 (2) を満たす範囲で, 最初のフレームから次のフレームへの移動ベクトル  $d_{i,j} = y_j - x_i$  と, 近隣ダスト  $x_k$  から次のフレームの対応候補点  $y_l$  への移動ベクトル  $d_{k,l} = y_l - x_k$  を定義する. また, 近隣のリンクが近隣制約条件 (式 (3)) を満たしているかを表す重み  $Q_{(i,j,k,l)}$  を定義する.

$$Q_{(i,j,k,l)} = \begin{cases} 1 & (\|d_{i,j} - d_{k,l}\| < R_q) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

$R_q$  は類似制約の許容半径 (quasi-rigidity radius) で, 通常は  $R_s$  の 20% 程度に設定される. もし事前に得た流れの速度ベクトルを追跡に用いる場合は, 追加の重み  $F_{i,j}$  を式 (4) のように定義する. 式 (4) において,  $u_{c,i}$  はダスト  $x_i$  の位置における流れの速度ベクトルであり,  $\Delta t$  は 2 フレーム間の経過時間を表している.

$$F_{(i,j)} = \begin{cases} 1 & (\|d_{i,j} - u_{c,i} \cdot \Delta t\| < R_q) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

一般的に, 最初のフレームのダスト  $x_i$  と次のフレームのダスト  $y_j$  が対応している確率  $P_{i,j}$  は, それぞれの反復計算の最後に式 (5) を満たす. ただし,  $P_i^*$  を, ダスト  $x_i$  に対応するダストが存在していない確率とする.

$$\sum_{j=0}^{N_p-1} P_{i,j} + P_i^* = 1 \quad (5)$$

$N_p$  はダスト  $x_i$  と式 (1) を満たす次のフレームへの対応の数を表す. ここで, 反復回数を  $n$  とする.  $P_{i,j}$  と  $P_i^*$  の初期値は式 (6) によって与えられる.

$$P_{i,j}^{(0)} = P_i^{*(0)} = \frac{1}{N_p + 1} \quad (6)$$

対応確率  $P_{i,j}$  を式 (7) に基づき更新する. ただし,  $N_{p,k}$  は, ダスト  $p$  における近隣ダスト  $y_k$  の数を表している.

$$\tilde{P}_{i,j}^{(n)} = P_{i,j}^{(n-1)} \cdot \left[ A + B \cdot \left( \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{l=1}^{N_{p,k}} P_{k,l}^{(n-1)} \cdot Q_{(i,j,k,l)} \right) + C \cdot F_{i,j} \right] \quad (7)$$

係数  $A, B$  はそれぞれ,  $A = 0.3, B = 3.0$  に設定し, 定数  $C$  は実験的に  $C = 1.0$  とすることがよいとされている [4].

更新された確率  $\tilde{P}_{i,j}^{(n)}$  は, 1 回の反復の最後に式 5 を満たすように正規化される. この計算には対応なしの確率  $P_i^{(n)}$  も用いる.

$$P_{i,j}^{(n)} = \frac{\tilde{P}_{i,j}^{(n)}}{\sum_{j=1}^{N_n} \tilde{P}_{i,j}^{(n)} + \tilde{P}_i^{*(n-1)}} \quad (8)$$

同様に, 対応なし確率も以下の式のように更新される.



$$P_i^{*(n)} = \frac{\tilde{P}_i^{*(n-1)}}{\sum_{j=1}^{N_n} \tilde{P}_{i,j}^{*(n)} + \tilde{P}_i^{*(n-1)}} \quad (9)$$

以上の手順の  $N_i$  回の反復の後、正しい対応の確率は高くなり、そうでない対応の確率は低くなる。従って最も高い確率を持つ対応が、もっとも正解の確率が高い対応  $l_{i,j}$  となる。

$C$  は 2 つの理由で採用されている。1 つめはダストの移動は流れの方向に移動している可能性が高いためである。2 つめは注目ダストに近隣ダストが存在していない場合でも、対応確率が 0 にならないようにするためである。

### 2.4.3 軌跡データを用いたダストのステレオ対応付け手法

ダストの 3 次元座標を求めるためには、ダストのステレオ対応付けを行う必要がある。ダストは非常に小さな領域で構成されている。また、それぞれのカメラが離れた位置に設置されていたため、ステレオ画像の両画像のダストの像が大きく異なる場合もある。したがってステレオ対応付けは領域同士の対応付けではなく、抽出されたダストの座標同士の点と点の対応付けを行う。

ステレオ画像において、片方の画像のある注目点に対応するもう片方の画像上の点は、エピポーラ線上に存在している。画像上に球に存在している特徴点の対応付けは、エピポーラ拘束から一意に対応点が決定できる場合が多いが、ダストのように密に存在している場合は、エピポーラ線上に多数の対応候補が存在しており、一意に対応を決定できない場合が多い。

そのような場合においても正しい対応を見つけるために、ダストの軌跡データから得た座標予測を、対応付けの判定基準に用いることを提案する。

ダストの軌跡データを用いたステレオ対応付けの手順を図 11、図 12 に示す。

ダストの軌跡データとは、直前の時間フレームまでのダストの座標の組みの時間列を意味している (図 13)。

ここで、ステレオ画像の左の画像のあるダストに注目して、右の画像の対応ダストを探索しているとする。まず、注目ダストと軌跡データの対応付けを行う。この対応付けは、前述したリラクゼーション法を用いる。対応する軌跡データが存在する場合、軌跡に含まれている座標から、右画像における注目ダストの対応点の座標を予測する。また、3 次元復元結果の予測も同様に行う。その後、注目ダストの対応候補全てに対し、予測した座標との距離を計算し、エピポーラ線との距離も併せ合計し、評価値とし、最も評価値が小さいダストを注目ダストの対応点とする。

対応する軌跡データがないダストは、対応する軌跡データが存在するダストの対応付けを全て終えた後に、エピポーラ線との距離が最も小さい右画像のダストを対応ダストとする。

軌跡の予測は図 14 のように、注目ダストに対応する軌

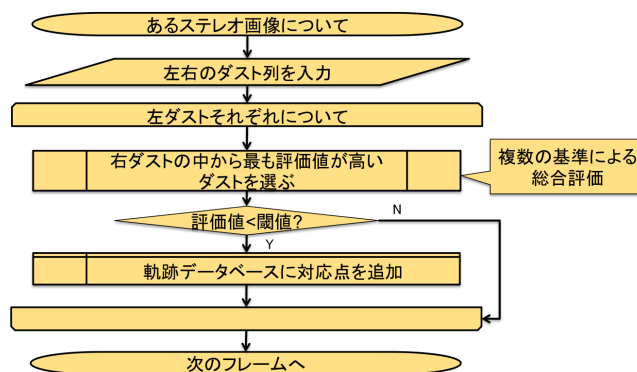


図 11 ダストのステレオ対応付けの手順

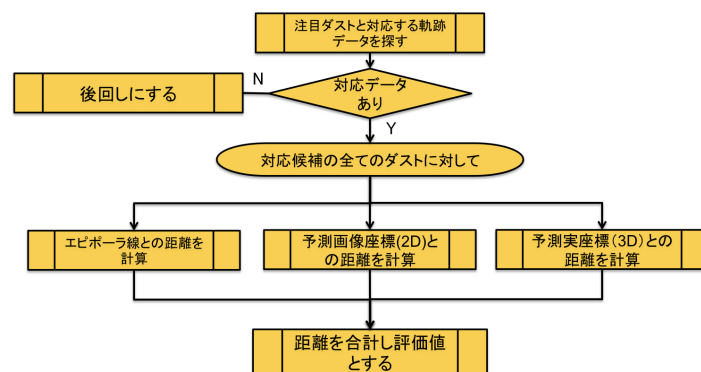


図 12 対応付け評価の流れ

跡データの長さによって変化させる。3 次元座標の予測も 14 と同様に行う。軌跡データに含まれるダストが 1 つである場合、過去の右画像のダストの座標と速度ベクトルを用いて式 (10) から、注目フレームにおける対応ダストの座標の予測を行う [1], [7]。

$$V_i = (u_i, v_i) \quad (10)$$

where

$$u_i(x_i, y_i) = \sum_{j=1}^N a_j \sqrt{1 + (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

$$v_i(x_i, y_i) = \sum_{j=1}^N b_j \sqrt{1 + (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

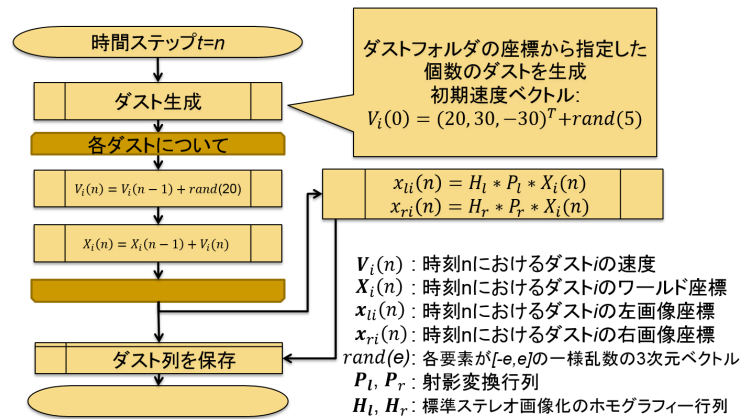
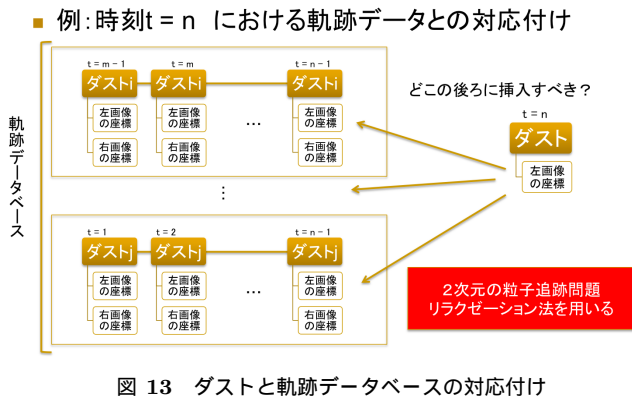
$V_i$  は座標  $(x_i, y_i)$  における速度ベクトルであり、 $N$  は過去の速度ベクトルの数であり、 $a_j, b_j$  は事前に過去の速度ベクトルから求まる定数である。

## 3. 実験

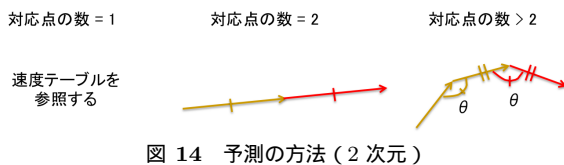
### 3.1 リラクゼーション法によるダスト追跡の性能評価

#### 3.1.1 目的

リラクゼーション法は、分布が一様に近い場合、高密度の粒子の追跡においても高い適合率を保つが、測定対象のダストのように 1 力所から散布されるダストの追跡性能は不明である。そこで、測定対象のダストの分布に対し、リラクゼーション法の性能を調査する。また、リラクゼーション法のパラメータと性能の関係を調査する。



軌跡データに含まれる対応点の数によって方法を変える  
黄: 軌跡データ 赤: 予測



### 3.1.2 方法

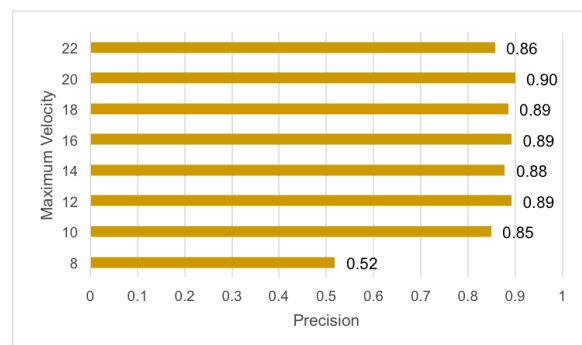
あらかじめ用意したダストのテストデータを使用し、ダストの密度、パラメータを変化させながら適合率を評価する。テストデータの作成手順を図 15 に示す。時間ステップごとに新たなダストを生成し、それぞれのダストの速度と座標を更新する。ダスト生成時の初期位置は、実際のダストフォルダの位置と同じ  $(2970.3506, -1713.1016, -1354.0000)$  とした。また、ダストの初期速度はいくつかのダストの観測結果を基に定めた。ダストの密度を変化させるために、図 15 におけるダスト生成毎の個数を 1 個から 2 個に変化させる。1 個の場合はトラッキングパラメータ  $\Phi$  はおよそ 1 となり、2 個の場合は  $\Phi \approx 0.58$  となる。ここで、トラッキングパラメータ  $\Phi$  は、追跡の難しさを示す指標であり、式 (11) で計算される。式 (11) において、 $d_0$  は、最近傍のダストとの距離の平均値、 $x_{max}$  はダストの移動ベクトルの中で大きさが最大のものを示して。一般的に、 $\Phi$  が 1 よりも小さい場合、その追跡は難しいとされている。

maximum velocity は 8 から 22 まで変化させる。テストデータにおける実際の最大移動距離は、各時間ステップ間でおよそ 11 ピクセルであり、それぞれの時間ステップで大きく変化はしない。他のパラメータ、neighbourhood radius と quasi-rigidity radius は、[3] に倣いそれぞれ maximum velocity の 1 倍、0.2 倍に設定した。

$$\Phi = \frac{d_0}{|x_{max}|} \quad (11)$$

### 3.1.3 結果と考察

$\Phi \approx 1$  の場合の結果を図 16 に示す。maximum velocity



の多くの値で、およそ適合率 0.9 に達している。テストデータの最大移動距離よりも maximum velocity が小さい場合、適合率が小さくなっている。

次に  $\Phi \approx 0.58$  の場合の結果を図 17 に示す。適合率は maximum velocity が 12 の場合が最も高く、0.72 であり、maximum velocity が 12 から離れるほど、適合率が下がる。maximum velocity が大きくなると適合率が下がるのは、注目しているダストから離れたダスト、つまり速度ベクトルの差が大きいダストの影響を受けやすくなるためであると考えられる。

以上の傾向から、いずれのダスト密度においても、maximum velocity は実際の最大移動距離よりもわずかに大きい値が最適であると考えられる。

## 3.2 ステレオ対応付け手法の性能評価実験

### 3.2.1 目的

密度の異なるダストデータのステレオ対応付けを行い、手手法の性能評価を行う。

### 3.2.2 方法

実験に用いるダストのデータは 3.1 節と同様のものを用いる。軌跡データからの予測を用いたステレオ対応付けの性能を純に評価するため、ステレオ対応付けを行う前に、正確な軌跡データを 8 フレーム分 (8 時間ステップ分) シ

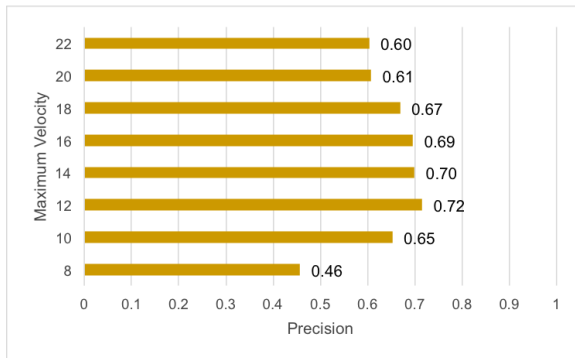


図 17 パラメータと適合率の関係： $\Phi \approx 0.58$

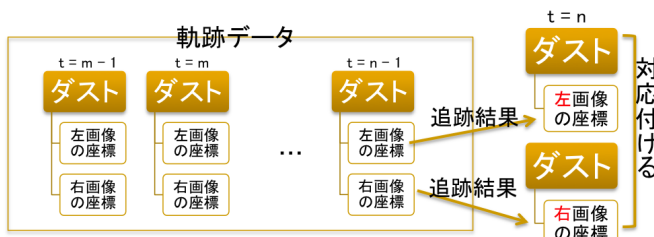


図 18 追跡を利用したステレオ対応付け例

ステムに与える．そして軌跡データベース更新の影響を調査するため，正確な軌跡データを与えた後の7フレームそれぞれのステレオ対応付けの適合率を評価する．

比較のため，単純なステレオ対応付け手法 (Simple matching method) と，追跡を利用したステレオ対応付け手法 (Tracking matching method) を提案し，提案手法と適合率を比較する．

単純なステレオ対応付け手法は，ステレオ画像において，最もエポポーラ拘束を満たすダストの組を，対応とする手法である．つまり，ステレオ標準化されたステレオ画像においては， $y$  座標が最も近いダスト同士が対応とされる．理論上，標準ステレオ画像においては対応するダスト同士の  $y$  座標は一致するため，最も有効な手法と思われるが，実用上は，カメラキャリブレーションやダスト抽出の誤差の影響で， $y$  座標が一致することは多くなく，ダストの密度が高い場合，誤対応が生じると考えられる．

追跡を利用したステレオ対応付け手法は，評価方法以外は提案手法と同様であるが，評価基準は図 12 のようではなく，図 18 のように行う．つまり，軌跡データから対応点の座標を予測するのではなく，直前の対応点の追跡の結果をそのまま対応点とする手法である．なお，リラクゼーション法の maximum velocity は発見的に 12 ピクセルに設定した．

### 3.2.3 結果と考察

$\Phi \approx 1$  の場合の結果を図 19 に示す．このとき，各フレームで，およそ 28 個のダストと 28 個のダストのステレオ対応付けが行われた．提案手法は，4 フレーム目までは 0.9 以上の適合率となり，他の手法よりも高い数値となった．

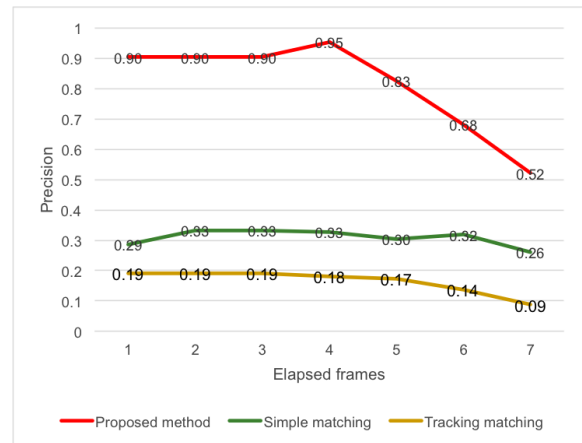


図 19 ステレオ対応付けの適合率： $\Phi \approx 1$

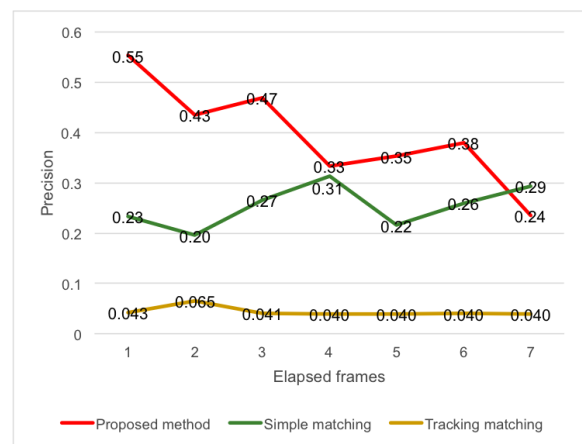


図 20 ステレオ対応付けの適合率： $\Phi \approx 0.58$

5 フレーム目から適合率が低下していくが，これはダストと軌跡データの誤対応が起こる影響で，正しい予測が出来なくなったためと考えられる．

次に  $\Phi \approx 0.58$  の場合の結果を図 20 に示す．このとき，各フレームで，およそ 50 個のダストと 50 個のダストのステレオ対応付けが行われた．正確な軌跡データを与えた直後の適合率は 0.55 であり，これは他の手法を大きく引き離しているが， $\Phi \approx 1$  の場合と同様にフレームごとに適合率が低下していき，最終的にシンプルな手法の適合率を下回る．この密度の場合，リラクゼーション法の性能は 0.7 程度であり， $\Phi \approx 1$  の場合よりも低い．そのため，適合率の劣化が  $\Phi \approx 1$  の場合よりも早まっていると考えられる．つまり，提案手法の性能は，追跡の性能に大きく依存していると考えられる．

### 3.2.4 実データからの軌跡測定実験

本稿で分析の対象としているステレオ画像列から，提案手法を用いてダストの 3 次元的な軌跡測定を行った．その結果を図 21 に示す．合計 600 フレームから合計 60 の軌跡を測定できた．しかしながら，軌跡の中にはジグザグ上のような明らかに不自然な軌跡が存在するため，これらを取り除く手法を今後考案する必要がある．

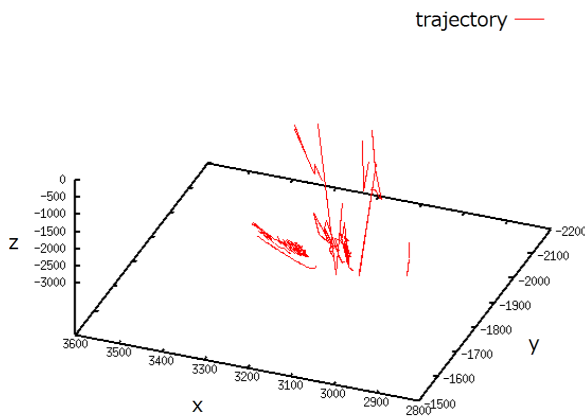


図 21 測定されたダストの軌跡 (3 次元)

#### 4. まとめ

核融合炉内に設置されたステレオ高速度カメラを用いて撮影されたダストの像から、その 3 次元的な軌跡の測定を行った。始めに、ステレオ画像と核融合炉の CAD データから、カメラキャリブレーションを行い、その後カメラの射影変換行列の計算と標準ステレオ画像化を行った。また、画像からダストの像のみを抽出し、最後にダストのステレオ対応付け手法を提案し、実験により性能を評価した。

実験では、測定対象のダストを模したのテストデータを用いて、ダスト対応付け手法のリラクゼーション法の性能評価と、提案したダストのステレオ対応付け手法の評価を行った。リラクゼーション法は  $\Phi \simeq 1$  の際にはおよそ適合率 0.9、 $\Phi \simeq 0.58$  の場合は適合率 0.7 程度となった。同じテストデータを用いたステレオ対応付け実験では、提案手法は正確な軌跡データを与えられた場合、適合率はおよそ 0.9 となり、提案手法の有効性が確認された。最後に、実データのステレオ画像列に一連の提案手法を適用したところ、600 フレームから 3 つ以上のダストから成る軌跡を合計 60 得ることができた。

今後の課題としては、以下の 3 点が挙げられる。1 点目は、提案したステレオ対応付け手法の性能評価のため、さらに条件を細かく変化させてを行う必要があることである。2 点目は、提案したステレオ対応付け手法の性能向上のため、ダストの追跡手法の性能を改善することである。3 点目は、測定したダストの軌跡に含まれる正しくないダストデータを除去する仕組みの考案である。

謝辞

本研究の一部は、核融合科学研究所の共同研究プログラム (NIFS13KLPF030) のご支援による。

#### 参考文献

[1] Hassan Y. A., Canaan R. E., "Full-field bubbly flow velocity measurements using a multi-frame particle tracking technique," *Exp Fluids*, 12, pp.49-60, 1991

[2] Baek S. J. and Lee S. J., "A new two-frame particle tracking algorithm using match probability," *Exp. Fluids*, 22, pp.23-32, 1996

[3] Pereira F., Stuer H., Graff E. C. and Gharib M., "Two-frame 3D particle tracking," *Meas. Sci. Technol*, 17, pp.1680-1692, 2006

[4] Barnard S. T. and Thompson W. B., "Disparity analysis of images," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell*, 2, pp.333-340, 1980

[5] Zhang Z., "A Flexible New Technique for Camera Calibration," *Technical Report of Microsoft Research*, 1998

[6] Zhang Z., "Computing Rectifying Homographies for Stereo Vision," *Technical Report of Microsoft Research*, 1999

[7] Hardy R. L., "Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces," *J. Geophysics Res*, 76, 1905, 1971

[8] Hujiyoshi H., "Gradient-Based Feature Extraction : SIFT and HOG," *IEICE Technical Report. Pattern Recognition and Media Understanding*, 107(206), 211-224, 2007(Japanese)

[9] Fitzgibbon, A.W., "Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion," *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on 2001 vol.1*, pp125-132, 2001