

空間符号化照明下におけるイベント情報に基づく
流れの可視化

筑波大学

人間総合科学学術院人間総合科学研究群

情報学学位プログラム

2022年03月

蛭子 綾花

空間符号化照明下におけるイベント情報に基づく流れの可視化

Flow Visualization based on Event Data under Spatially Coded Illumination

氏名：蛭子 綾花
Ebisu Ayaka

我々の身の回りには空気や水といった流体が存在し、流れが発生しているが、流れを目で直接見ることはできない。流れは場に存在する物体と相互作用を起こすため、流体のふるまいを理解するための第一歩の手段として可視化が必要とされている。流れの可視化を行うためには、可視化対象空間の各点における流速を計測する必要があり、さまざまな流速計測手法が提案されている。その中でも、カメラを用いた手法は面計測が可能、かつ、非接触で流れに対して影響を与えないという利点があるためよく用いられている。特に、トレーサと呼ばれる微粒子の変位から流速を計算する粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry; PIV) は流れの可視化の代表的な手法として知られており、さまざまな派生手法が提案されている。PIV は単一のカメラとシート状の光という簡易な機器構成で流れを可視化できるが、シート光平面上のトレーサの運動のみを可視化し、シート光平面に対して垂直な方向に運動するトレーサは可視化されないという問題がある。そこで、カメラを複数台に増やすことで三角測量の原理でトレーサの三次元位置を推定し、シート光平面に対して垂直な方向の速度成分も推定可能とする手法が提案されているが、複数カメラの校正やトレーサの対応づけ問題があり、計算コストが高く、簡易な計測手法とはいえない。そのため、単一のカメラでトレーサの速度の三次元成分を計測可能とするために、照明の符号化を行う手法が提案されている。しかし、従来の PIV で用いられてきたカメラは時間分解能が低く、高速な流れの可視化は困難である。一方で、フレームごとに全画素で輝度値を記録する従来型のカメラとは異なり、輝度値の変化 (イベント) を非同期に出力するイベントカメラは $1 \mu\text{s}$ という高い時間分解能を持つ。そこで、本論文では、高速な流れにおけるトレーサの三次元的運動の可視化を目的として、高い時間分解能を特長とするイベントカメラとイベントカメラに特化した照明の符号化の組み合わせによる手法を提案する。本手法は、(1) イベントカメラの高時間分解能という特長を活かし、高速な流れ (トレーサの運動) を捕捉可能、(2) トレーサのみがイベントとして獲得されるためトレーサの検出処理が不要、(3) 照明の空間符号化により単一のイベントカメラでトレーサの三次元運動の計測が可能、という特長を持つ。実験では、提案手法の有効性を確認するため、シミュレーション環境において流れの推定実験を行い、真値との比較を行うことで流れの推定精度を検証する。また、シート光の枚数を変化させた際の推定精度向上の有効性を確認する。

主研究指導教員：三河 正彦
副研究指導教員：青砥 隆仁

目次

第1章	はじめに	1
第2章	関連研究と本研究の位置づけ	6
2.1	粒子画像を用いた流速計測・流れの可視化に関する関連研究	6
2.2	イベントカメラに関する関連研究	8
2.3	本研究の位置づけ	9
第3章	イベントカメラ	10
3.1	概要	10
3.2	イベントカメラの内部構造と処理	10
3.3	物体追跡におけるイベントカメラと従来型カメラの比較	12
第4章	提案手法	16
4.1	流れの運動モデル	16
4.2	空間符号化照明を通過するトレーサに起因するイベント情報	17
4.3	イベント情報に基づくトレーサの加速度と初速度の推定	19
第5章	実験	25
5.1	シミュレーション環境における流れの推定精度の調査	25
5.2	シミュレーション環境におけるシート光の枚数が流れの推定に与える影響の調査	28
第6章	実環境における検討と今後の課題	30
6.1	検証1：空気中における自由落下運動	30
6.2	検証2：水中における回転運動	33
6.3	今後の課題	35
第7章	まとめ	36
	謝辞	37
	参考文献	38

目次

1.1	流速計測・流れの可視化手法	4
1.2	従来手法と提案手法の比較. (a) 一般的な粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry; PIV) のシステムと (b) 提案手法による流速測定システム	5
2.1	使用されるカメラの台数と照明の符号化の有無による PIV の分類	7
3.1	従来型カメラとイベントカメラにおける撮像の違い.(星型の模様が描かれた円盤が点 O を軸に回転する様子を撮影する場合)	11
3.2	従来型カメラとイベントカメラにおける撮像の違い.(円盤の回転速度が, 3.1 より高速な場合)	11
3.3	従来型カメラとイベントカメラにおける撮像の違い.(静止している物体を撮影する場合)	12
3.4	Dynamic Vision Sensor(DVS) の 1 画素における電子回路 (a) と各処理後の電気信号 (b)~(d).(b) 対数増幅された電気信号, (c) 微分された電気信号, (d) 獲得されるイベント列.	14
3.5	従来型カメラとイベントカメラによる物体の運動の撮影の比較. (a) 撮影対象のシーン, (b) 従来型カメラの 1 画素の回路構造, (c) 従来型カメラにおける出力, (d) 従来型カメラの出力から得られる差分画像, (e) イベントカメラの 1 画素の回路構造, (f) イベントカメラにおける出力.	15
4.1	提案手法のイメージ図	16
4.2	三次元空間における流れ. (a) 大局的な表現, (b) 局所的な表現.	17
4.3	イベントカメラと空間符号化照明の幾何. (a) 三次元表示, (b)XZ 平面図	18
4.4	透視投影モデル (レンズ歪なし). (a) 三次元表示, (b)XZ 表示.	20
4.5	トレーサの空間符号化照明通過によって獲得されるイベント情報	21
4.6	観測されたイベントの画像座標から復元される三次元空間座標のトレーサの通過方向による違い.	22
4.7	シート光が 2 枚場合に取りうる変位	23
5.1	シミュレーション環境. (a) 三次元表示, (b)XZ 平面図.	26
5.2	シート光が 2 枚の場合における流れの推定結果. (左上)ZX 平面図, (右上)ZY 平面図, (左下)XY 平面図.	27
5.3	シート光が 3 枚の場合における流れの推定結果. (左上)ZX 平面図, (右上)ZY 平面図, (左下)XY 平面図.	29
6.1	検証 1 の概要図	31
6.2	検証 1 における実験環境	31

6.3	シート光の厚さ 1.5 mm のとき, シート光の数と間隔を変えた場合に観測されたイベントの時刻と画素座標 Y による二次元表示. シート光の数が (上段)2 枚, (下段)3 枚. シート光の間隔が (左列)1.5 mm, (右列)3.0 mm. 緑色の点は正のイベント, 赤色の点は負のイベント.	32
6.4	シート光の間隔 3.0 mm のとき, シート光の数と厚さを変えた場合に観測されたイベントの時刻と画素座標 Y による二次元表示. シート光の数が (上段)2 枚, (下段)3 枚. シート光の厚さが (左列)1.0 mm, (右列)1.5 mm. 緑色の点は正のイベント, 赤色の点は負のイベント.	33
6.5	検証 2 における実験環境	34
6.6	水槽を真上から見たときの空間符号化照明と水流の位置関係.	34
6.7	イベントカメラによって撮影されたイベントデータの画素座標 (X, Y) と時刻 t による三次元プロット. (左図) 撮影データから, 空間符号化照明領域のみを表示, (右図) 左図における 1 つのトレーサが 3 枚のシート光を通過した軌跡の拡大表示.	35

第1章 はじめに

我々の身の回りには空気や水といった流体が存在し、流れが発生しているが、流れを目で直接見ることはできない。流れは場に存在する物体と相互作用を起こすため、流体のふるまいを理解するための第一歩の手段として可視化が必要とされている。例えば、航空機や自動車、船舶などの乗り物、高層ビルや橋梁などの建築物の構造設計では、空気や水の流れから受ける影響を測るために構造物の周りで発生する流れを知ることが重要とされている。また、近年の新型コロナウイルス感染症の大流行に伴って、商業施設や職場の室内環境の評価・改善を目的とした空気の流れの可視化や、くしゃみや咳などの飛沫が拡散する様子の可視化の需要が高まっている。

このような需要を満たす流れの可視化手法として、コンピュータシミュレーションによるものと実環境計測によるものがある。前者はナビエ・ストークス方程式に代表される流体の運動方程式を解くことで流速を求める方法であり、後者と比較して簡易に条件を変更して実験を行うことができるためよく用いられている。しかし、前者は流れを表現するモデルが正しいことを前提として計算しているが、そのモデルの妥当性を検証するためには後者による評価との比較検討が欠かせない。したがって、風洞実験などの実環境計測も必要とされており、実環境計測のためのさまざまな手法が提案されている(図1.1)。

実環境計測のデータを用いて流れの可視化を行うためには、可視化対象空間の各点における流速を調べる必要がある。ピトー管や熱線流速計などの手法は、センサを直接流れに挿入し、流速に伴って変化する物理量を計測することによって流速を算出することができる。簡易に計測が可能であるという利点があるが、一点計測であるため流速の空間分布の計測には工夫が必要、センサの挿入が計測対象である流れに影響を及ぼすという問題がある。一方で、流れに対して影響を与えない手法として、超音波やレーザーによるドップラー現象を利用した手法がある。超音波やレーザーを流れに照射すると、流れ場に存在する気泡や塵などの微粒子で超音波やレーザーが反射する。この反射波は入射波に対して周波数の変化を起こし、この周波数変化は流速に依存するため流速を求めることができる。しかし、センサを挿入する手法と同様に、この手法は一点計測の手法である。したがって、流れの可視化を行うためには同時に計測する箇所を増やす、もしくは、計測点を変えて計測を行う必要がある。前者は装置を多数用意する価格的なコストが高く、物理的に配置可能なセンサの数の制限があり、後者は高速に流れが変化する場合には対応が困難であるという問題がある。

そこで、面計測が可能で、流れに対して影響を与えない非接触な流速計測・流れの可視化手法として、カメラを用いた手法が用いられている。手法によって撮影対象は異なり、光学系によって流体の密度勾配を陰影情報として撮影可能とする手法、レーザー光によって特定の分子が放つ蛍光の分布を撮影する方法、散乱体にレーザーを照射した際に生じるスペckルパターンを撮影する方法などがある。流体の密度勾配を撮影する手法は、撮影対象流体の密度差が大きい必要があり、火炎による気流や衝撃波などの可視化に用いられている。レーザー誘起蛍光を撮影する方法は、レーザー光の波長を適切に選択すれば特定の化学分子を可視化できるため、混合ガスの燃焼における特定の化学物質の瞬時分布や油膜の膜厚分布の可視化に用いられており、画像処理によって流速が求められる。レーザース

ペックルパターンを撮影する方法は、撮影対象がレーザースペックルを生じるほどに高密度で分布する粒子群である必要があり、現在は血流計測に用いられている。

カメラを用いた手法の中でも、特に、粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry; PIV)[1, 2, 3] は流れの可視化の代表的な手法として知られている。PIV は、流れに追従する粒子の運動を画像として撮影し、画像処理によって流速を求める手法である。粒子はトレーサと呼ばれ、流れ中に存在する塵や気泡などを利用する場合や、煙や微小なシャボン玉、ポリスチレンやガラスなどを材料とする微粒子を人工的に加える場合がある。PIV は、図 1.2(a) に示すように、計測対象の流れに対してレーザーシート光を照射し、高感度・高速カメラでトレーサを撮影、撮影された時系列の画像データから、画像処理によってトレーサの変位を計算し、流速を求めることができる。基本的な PIV の機器構成は、照明としてシート光 1 枚、撮像機材として高感度・高速カメラ 1 台であるが、シート光によって可視化されるのはある平面内におけるトレーサの位置であり、得られる流速はシート光平面内の成分しか持たない。そこで、流速の三次元成分を計算可能とするために、カメラを複数台用いる手法や符号化照明を用いる手法などの PIV の派生手法が提案されている。

PIV の派生手法は、使用するカメラの台数と照明の符号化の有無という観点で 4 つに大別できる。単一カメラと非符号化照明を用いる手法は、簡易な機器構成で流れの可視化を行うことができるが、その可視化の範囲はシート光平面上のトレーサの運動であり、シート光平面に対して垂直な方向に運動するトレーサは可視化されないという問題がある。そこで、カメラを複数台に増やし、三角測量の原理でトレーサの三次元位置を推定可能にする。シート光平面に対して垂直な方向の速度成分も推定可能とする手法が提案されている。さらに、複数カメラと符号化照明を用いる手法では、速度の三次元成分を取得できるだけでなく、三次元速度勾配も計算可能となる。しかし、これらの複数カメラを用いる手法では、カメラ同士の位置校正や異なるカメラで撮影された画像中のトレーサを対応させるマッピング問題があり、計算コストが高く、簡易な計測手法とはいえない。そのため、単一のカメラによるトレーサの速度三次元成分計測を目的とした照明の符号化を行う手法が提案されている。

ここまでで、PIV の各手法を機器構成による違いという観点で分類してきた。ここで、PIV で用いられているカメラの時間分解能に着目すると、通常のビデオカメラのフレームレートは約 25~30 fps 程度であり、時間分解能が低いために高速な流れや非定常流れの可視化は困難であるという問題がある。高速度なカメラでは約 20 000 fps (解像度 1000 × 1000 画素程度の場合) のフレームレートを持つものもあるが、価格が高価である。カメラの解像度を犠牲にすれば、さらに時間分解能を高めることができるが、画素数が少ないために十分な粒子像を得られない。

一方で、イベントカメラと呼ばれる高い時間分解能を持つカメラが存在し、近年研究開発が盛んに行われている。イベントカメラは、従来型のカメラとは撮影の仕組みが全く異なったカメラである。従来型のカメラが各フレームごとにすべての画素における輝度値を記録するのに対し、イベントカメラは輝度値の変化 (イベント) が発生したタイミングで、イベントが発生した時刻、画素座標、変化の極性というイベント情報を非同期に出力する。したがって、イベントカメラは従来型のカメラと比較してデータ量が少なくなるため、データの転送速度も向上し、1 μ s という高速な時間分解能を特長として有する。流速計測分野においてもイベントカメラの高時間分解能という特長が着目されつつある [4, 5, 6] が、複数カメラと非符号化照明による手法におけるカメラをイベントカメラに置き換えたにすぎず、位置校正やマッピング問題が存在する。

そこで、本論文では、高速な流れにおけるトレーサの三次元的運動の可視化を目的とし

て、高い時間分解能を特長とするイベントカメラと、イベントカメラに特化した照明の符号化の組み合わせによる手法を提案する(図1.2(b)). 本手法は従来のカメラではなく、輝度値の変化を取得するイベントカメラを用いることで、イベントカメラの高時間分解能という特長を活かし、高速な流れ(トレーサの運動)を捕捉可能とする。さらに、イベントカメラは輝度値の変化が生じた画素の情報のみを記録するという特長を有するため、従来型のカメラによる手法で必要とされたトレーサの検出処理が不要となる。これに加え、イベントカメラに特化した照明の符号化として、厚みや間隔の異なる複数枚のシート光を用いることで、単一のイベントカメラによるトレーサの三次元運動の計測を可能とし、簡易な機器構成での三次元の流れの可視化を可能とする。

本論文の構成は以下の通りである。2章で粒子画像を用いた流速計測・流れの可視化に関する関連研究とイベントカメラに関する関連研究について概観し、これらの関連研究と比較した本研究の位置づけを述べる。3章では、事前知識としてイベントカメラについて説明する。4章では、提案手法における流れのモデル、空間符号化照明を通過するトレーサに起因するイベント情報、イベント情報に基づく流れの推定について詳述する。5章では、シミュレーション環境において流れの推定実験を行うことで、提案手法の有効性を示す。6章では、実環境実験に向けた検討と今後の課題について説明する。7章では、提案手法のまとめと今後の課題について述べる。

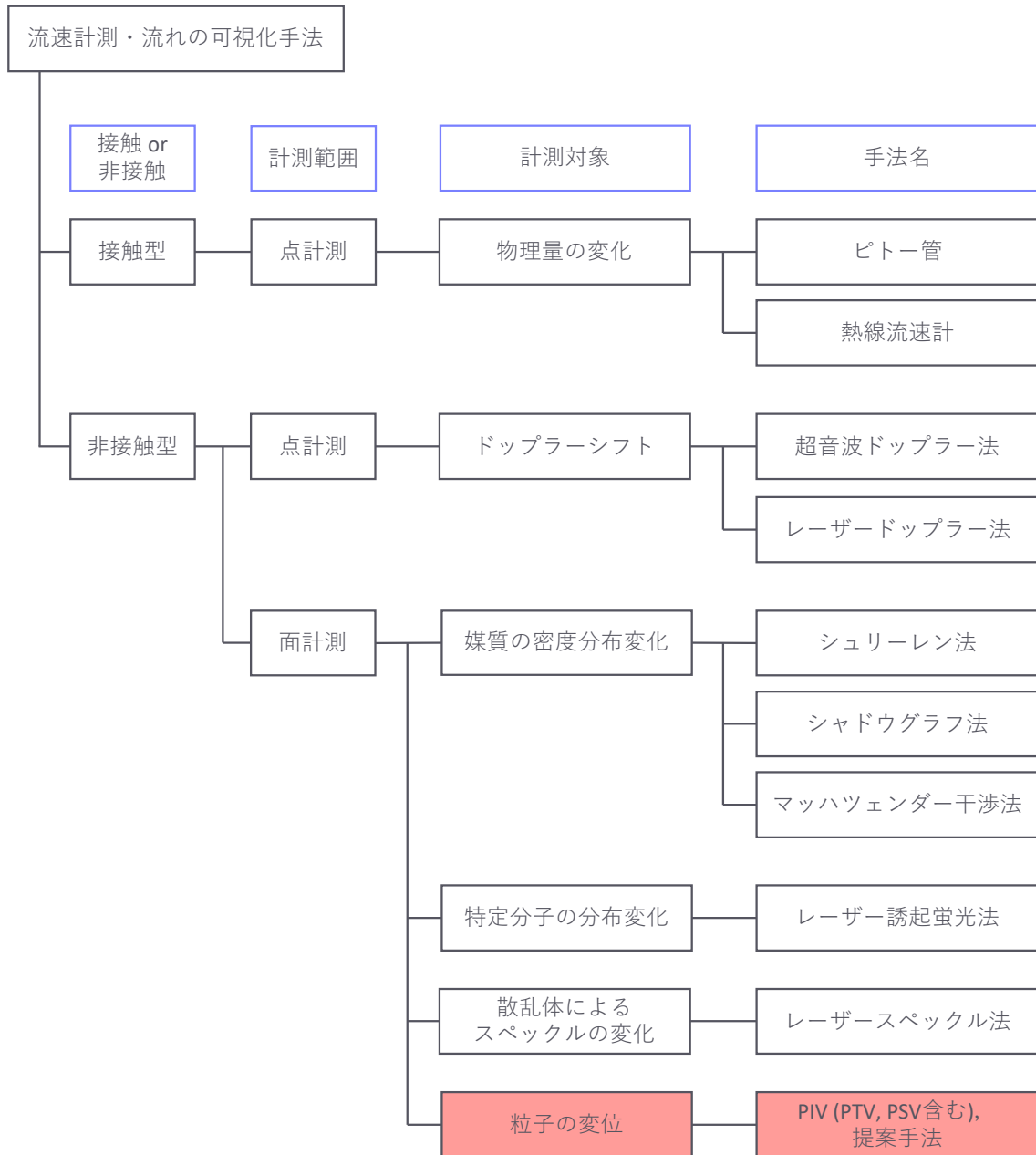


図 1.1: 流速計測・流れの可視化手法

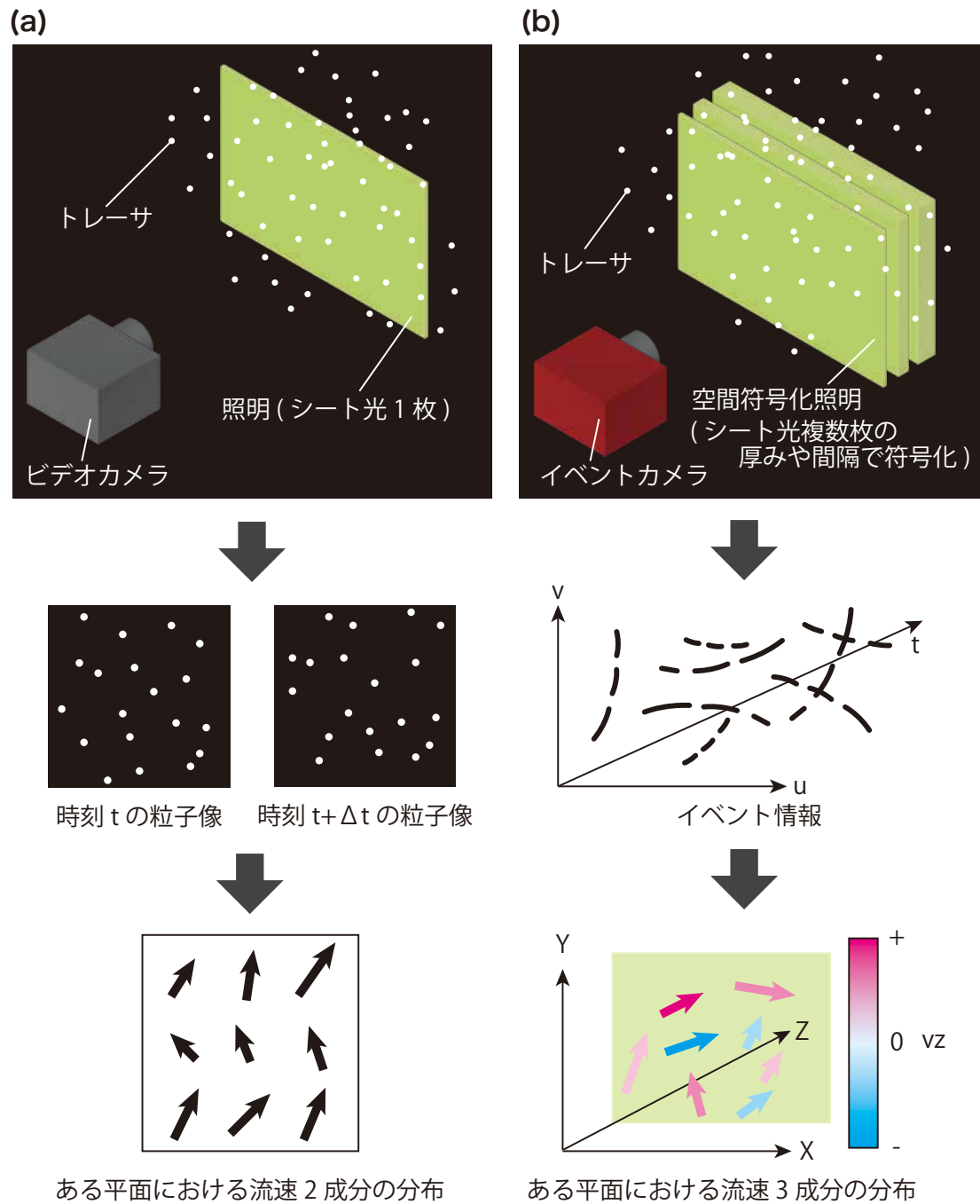


図 1.2: 従来手法と提案手法の比較. (a) 一般的な粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry; PIV) のシステムと (b) 提案手法による流速測定システム

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

本章では、粒子画像を用いた流速計測・流れの可視化に関する関連研究、イベントカメラに関する関連研究、物体の運動推定に関する関連研究について述べる。

2.1 粒子画像を用いた流速計測・流れの可視化に関する関連研究

画像を用いた流速計測・流れの可視化は、計測対象の流れに影響を与えない非接触型、かつ、面での計測が可能である。その中でも、流れ中の微粒子をトレーサとして用い、撮影された微粒子の位置の時間変化から流速を計算する粒子画像を用いた手法として PIV[1, 2, 3] は、流れの可視化の代表的な手法として知られている。PIV は、撮影された粒子画像の時系列データを画像処理することによって流速を計算するが、その画像処理方法によっては粒子追跡法 (Particle Tracking Velocimetry; PTV) と呼ばれることがある。また、1 枚の画像に露光された粒子の移動の軌跡に基づく方法も存在し、粒子軌跡法 (Particle Streak Velocimetry; PSV) と呼ばれている。本論文では、特別使い分ける必要がない限りにおいて、PTV, PSV も含めた粒子画像による流速計測手法を PIV と呼ぶ。PIV は、使用されるカメラの台数と照明の符号化の有無という観点により 4 つに分類できる (図 2.1)。

単一カメラと非符号化照明による手法 単一カメラと非符号化照明による手法は、最も基本的な PIV が該当する。この手法は、測定対象空間に薄いシート状の照明を照射することによって、ある平面内でのトレーサの運動を高感度・高速カメラで撮影し、獲得された時系列データから画像処理によってトレーサの速度を計算する方法である。シート光とカメラ 1 台という簡易な機器構成で流れの可視化が可能であるという利点がある一方で、シート光平面を垂直に通過するトレーサの運動は観測されないため、シート照明平面に対して垂直方向の速度成分は計算できないという問題がある。したがって、流れを上手く可視化するには、流れの方向に対して適切にシート光とカメラを設置する必要がある。一方で、単一カメラと非符号化照明による手法の中で、シート光平面に対して垂直方向の速度成分を算出する方法として、レンズの焦点ボケによるトレーサ粒子像のサイズ変化を手がかりにした方法がある [7]。

複数カメラと非符号化照明による手法 複数台のカメラと非符号化照明による手法の中で、ステレオ PIV と呼ばれる手法 [8] は、カメラを複数台に増設し、三角測量の原理でトレーサの三次元位置を推定することによって、単一カメラと非符号化照明による手法における問題を解決している。しかし、カメラを複数台用いるために、カメラ間のカメラ校正や撮影された画像中の粒子の対応付けを行う必要があり、計測コストが高い。ステレオ PIV では速度の三次元成分を計算することができるが、その範囲はシート光で照らされた平面内に限られる。そのため、速度の三次元空間分布を得るために、ステレオ PIV における機器構成のままシート光を走査させるスキャニング PIV[9] や厚みのあるシート照明と 4~6 台のカメ

		照明の符号化	
		なし	あり
カメラの台数	単一	<p>照明: 緑色の横棒 カメラ: 黒いカメラアイコン 観測: 黒い正方形に3つの白い点</p>	<p>照明: 虹色の横棒 カメラ: 黒いカメラアイコン 観測: 黒い正方形に3つの異なる色の点 (赤, 青, 緑)</p>
	複数	<p>照明: 緑色の横棒 カメラA, B: 黒いカメラアイコン 観測A, B: 黒い正方形に3つの白い点</p>	<p>照明: 緑色の横棒 カメラA, B, C, D: 黒いカメラアイコン 観測A, B, C, D: 黒い正方形に3つの異なる色の点 (赤, 青, 緑)</p>

図 2.1: 使用されるカメラの台数と照明の符号化の有無による PIV の分類

ラを用いて撮影した画像から再構成した3次元の粒子輝度分布を解析するトモグラフィック PIV[10] が提案されている。しかし、スキニング PIV は、照明が測定対象空間を走査するのに時間がかかるため、得られるのは瞬時の速度ではない。また、トモグラフィック PIV は、ステレオ PIV よりもさらにカメラ台数が多いため、設置やカメラ校正のコストがステレオ PIV よりも高い。さらに、三次元情報を扱うため、ステレオ PIV よりも計算コストが高くなるという問題がある。

他にも、マルチピンホールカメラ [11, 12] やライトフィールドカメラ [13, 14, 15, 16, 17, 18] を用いた PIV が提案されている。これらの手法は、使用されるカメラとしては1台であるが、奥行きを計測する原理はステレオ PIV と同じである。マルチピンホールカメラは、カメラのフィルタとして3つのピンホールを用いたカメラである。1つのトレーサが焦点に位置していれば得られる像は1点であるが、焦点位置からずれた場所に位置している場合はトレーサの散乱光が3つのピンホールを通過しそれぞれ異なる位置で結像するため3点の像が得られる。ライトフィールドカメラは光線情報を記録するカメラであり、撮像素子の前にマイクロレンズアレイが配置された内部構造をしている。つまり、複数台のカメラが平面状に並んだカメラアレイと同じ機構を1台のカメラで実現しており、ステレオビジョンのように視差画像を得ることができる。カメラの台数としては1台のため、ステレオ PIV やトモグラフィック PIV と比較してカメラ校正コストは低い。しかし、ライトフィールド PIV はトモグラフィック PIV で用いられるアルゴリズムを用いて、光線情報から三次元の粒子輝度分布の再構成、三次元の相互相関計算を行っているためトモグラフィック PIV と同様に計算コストが高い。また、単一のライトフィールドカメラでは、深度方向の速度の分解能が低いため、複数台のライトフィールドカメラを用いたステレオ PIV に近い手法も提案されている [18]。

複数カメラと符号化照明による手法 複数カメラと符号化照明による手法は、速度の三次元成分を取得できるだけでなく、三次元の速度勾配も計算可能となる。多断面 PIV では、波長が異なる2種類のシート照明を用いた符号化を行っている [19]。それぞれの照明ごとに2台ずつ計4台のカメラを配置し、カメラには撮影対象の照明の波長の光のみを透過するバン

ドパスフィルタを装着することによって撮影対象範囲を区別している。2つの照明の距離は十分に狭く、カメラ校正が行われているため、それぞれの照明とカメラのセットで得られた三次元速度から、三次元速度の空間的変化量、つまり、速度勾配の算出が可能となる。照明の波長以外にも、照明の偏光状態を用いた符号化がなされた研究 [20] もあり、波長を用いた符号化の場合と同じ原理で流れの三次元速度、三次元速度勾配を算出できる。しかし、複数台のカメラを用いるため、カメラ間のカメラ校正が必要、それぞれのカメラで撮影された画像中の粒子の対応付けが必要となる点は、複数台のカメラ、照明の符号化を行っていない手法と同じである。さらに、波長や偏光状態が異なるレーザーを用意する必要があるため、簡易な計測手法であるとはいえない。

単一カメラと符号化照明による手法 一方で、シート光平面に対して垂直な方向の速度成分を推定可能、かつ、複数台のカメラによる手法の問題を解決した手法として、単一カメラと符号化照明による手法が提案されている。たとえば、波長による照明の空間符号化を行った研究 [21, 22, 23, 24, 25, 26] は、奥行き方向に対し波長が変化するように照明を設定しており、撮影された画像中のトレーサの色からトレーサが存在する奥行きの位置を求めることができる。また、照明の強度を空間符号化した手法 [27, 28] も存在し、強度の空間分布が異なる照明パターンを投影し撮影されたトレーサの明るさから奥行きを算出することができる。これらの手法は、単一のカメラでトレーサの速度の三次元成分を計測可能であるため、最も簡易な機器構成で流体の複雑な現象を捉えることができる手法であるといえる。

2.2 イベントカメラに関する関連研究

イベントカメラ [29, 30, 31] は生物の視覚システムを模倣して開発されたカメラであり、一定量以上の輝度変化が起きたことをトリガとして、各画素が非同期にそのタイミングを「イベント」として記録する。固定フレームレートで撮影を行う従来のカメラとは全く異なる仕組みであり、イベントカメラは高時間分解能、低遅延、ハイダイナミックレンジ、低消費電力などの特長を有する。ゆえに、イベントカメラは従来のカメラによる制限を取り払うことができるため、さまざまな分野での応用研究が進められている。コンピュータビジョンやロボティクスの分野においては、高速な移動物体を対象とした物体追跡 [32] や、オプティカルフローの推定 [33] に応用される。高時間分解能の特長に加え、イベントカメラでは、シーン中の物体の動きを「イベント」として、記録することができるため、特徴点抽出などの画像処理を省くことが可能となる。この特長は、高速なカメラの姿勢推定 [34] や、自己位置認識 [35, 36]、自己位置推定と環境地図生成の同時実行 (Simultaneous Localization and Mapping; SLAM) [37] などの応用でも活用されている。イベントカメラは従来のカメラと比較し、飛躍的に高いダイナミックレンジを有するため、例えば、車載画像において頻繁に問題となるトンネルの出入り口のような暗所と明所が混在するシーンにおいても正常な自己位置推定が可能となる。また、イベントカメラによる深度推定の研究も存在し、ステレオビジョンに基づく手法 [38, 39] や、アクティブ方式として、レーザースキャン式の構造化照明による手法 [40] が提案されている。レーザースキャン式では、通常カメラの場合、レーザが照射されている位置を画像から検出する必要があるが、イベントカメラの場合、レーザ照射したタイミングで、その画素位置においてイベントが発生するため、より効率的に構造化照明法を適用することができる。また、時間符号化された2波長光源による手法 [41] では、水中などの媒体における分光吸光度の2波長差分を計測するために、イベントカメラを応用した。

また、流体計測分野においても、イベントカメラが注目を集めつつある。イベントカメラの時間分解能が非常に高いことにより高速な流れの流速計測が可能となるという利点だけでなく、イベントカメラのデータ圧縮性が高いという利点が着目されている。従来の高速度カメラを用いて高時間分解能で撮影を行う場合、時間的に密な撮影を行うため、獲得されるデータ量が多くなり、カメラ内部のメモリ容量が不足するという問題があったが、Drazenら [4] によると、イベントカメラを用いることで高速度カメラの約 100 分の 1 の記録容量と帯域幅を実現、後処理時間も実時間の約 10 倍まで高速化された。しかし、Borer ら [5] や Wang ら [6] の手法はカメラを複数台用いるステレオ PIV におけるカメラをイベントカメラに置き換えたにすぎず、2.1 節で述べたようにカメラ間のカメラ校正が必要、それぞれのカメラで撮影された画像中の粒子の対応付けが必要となる問題はステレオ PIV と同じである。

2.3 本研究の位置づけ

本論文における提案手法は、2.1 節で述べた分類における単一カメラと符号化照明による手法に該当する。そのため、従来手法と同じく、簡易な機器構成で、トレーサの三次元速度の推定を介して、流れの計測が可能であるという特長を有する。さらに、従来型のカメラと比較して非常に高い時間分解能を持つイベントカメラを使用するため、高速な流れの計測や可視化が可能となる。また、イベントカメラの特長より、従来は画像中のトレーサの検出が必要であったが、イベントが発生した画素位置として自然にトレーサの検出が可能となり、演算コストの低下が見込める。

第3章 イベントカメラ

本章では、本論文の提案手法で用いられるイベントカメラについて述べる。3.1節では、イベントカメラの概要として、獲得されるデータが従来型カメラのデータと比較してどのように異なるのかについて説明する。3.2節では、イベントカメラの回路を示し、各画素で行われている処理について説明する。3.3節では、コンピュータビジョン分野においてよく行われている物体追跡処理におけるイベントカメラと従来型カメラの違いについて述べる。

3.1 概要

イベントカメラは生物の視覚システムを模倣して開発されたカメラである。フレームベースで撮影を行う従来型のカメラとは異なり、各画素における一定量の輝度値の変化を非同期に記録することができる。そのため、イベントカメラは従来型カメラと比較して、高時間分解能、低遅延、低消費電力、ハイダイナミックレンジなどの特長を有する。従来型カメラとイベントカメラで出力されるデータの違いを説明する。

星型の模様が描かれた円盤が点 O を軸に回転する様子を撮影する場合(図3.1)では、従来型のカメラは星型の模様を含めた円盤全体が写った画像を一定時間ごとに出力する。一方で、イベントカメラは星型の模様の回転の軌跡を出力する。なぜなら、点 O を軸に回転する円盤において、星型の模様がない部分は輝度値の変化が生じず、星型の模様の箇所のみが回転によって輝度値の変化を発生させるからである。また、イベントカメラは従来型カメラのように一定時間ごとにデータを出力するのではなく、輝度値の変化が発生したタイミングでイベント情報を出力するため、図3.1のようなシーンでは、時間的に連続なイベント情報を出力する。また、図3.2のように、円盤の回転速度が上昇した場合においても、それぞれのカメラが出力するデータは同じである。ただし、回転速度が従来型カメラのフレームレートより高速な場合、撮影された画像にはモーションブラーが発生する。イベントカメラは従来型カメラより高い時間分解能を持つため、出力データにモーションブラーは発生しない。一方で、図3.3のように円盤が静止している場合では、従来型カメラはフレームごとに円盤全体の画像を出力するが、イベントカメラは何もイベント情報を出力しない。なぜなら、円盤が回転せず静止している場合には、輝度値の時間変化が発生しないためである。

3.2 イベントカメラの内部構造と処理

イベントカメラは従来型のカメラとは異なり、各画素が独立して一定量の輝度値の変化を記録することができる。イベントカメラによって獲得されるイベント情報は、イベントが発生した画素座標、時刻、イベントの極性で構成されるデータ列である。ここで、イベントの極性とは、輝度値が増加したのか減少したのかを表すものであり、それぞれの場合におけるイベントは正のイベントと負のイベントと呼ばれる。正負のイベントの検出は、イベントカメラ内部のDynamic Vision Sensor(DVS)によって実現されている。

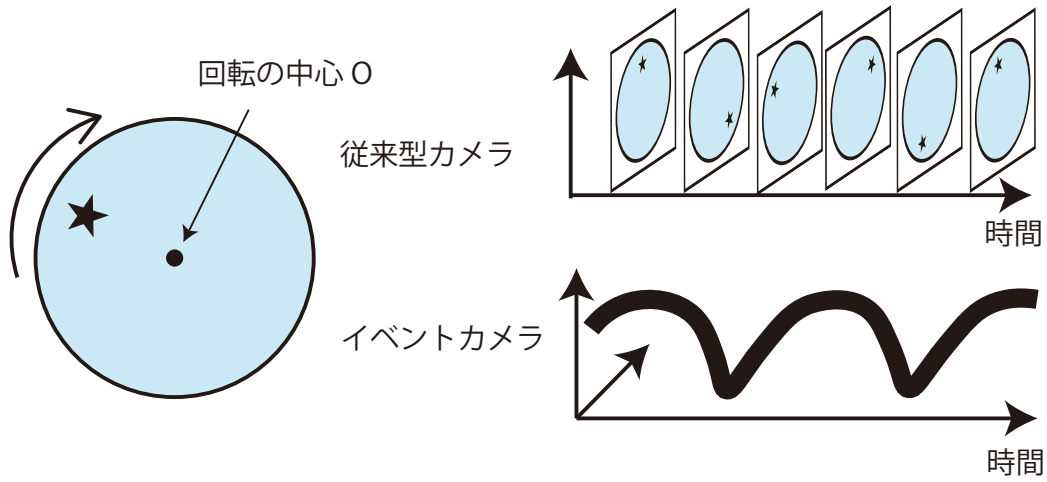


図 3.1: 従来型カメラとイベントカメラにおける撮像の違い。(星型の模様が描かれた円盤が点 O を軸に回転する様子を撮影する場合)

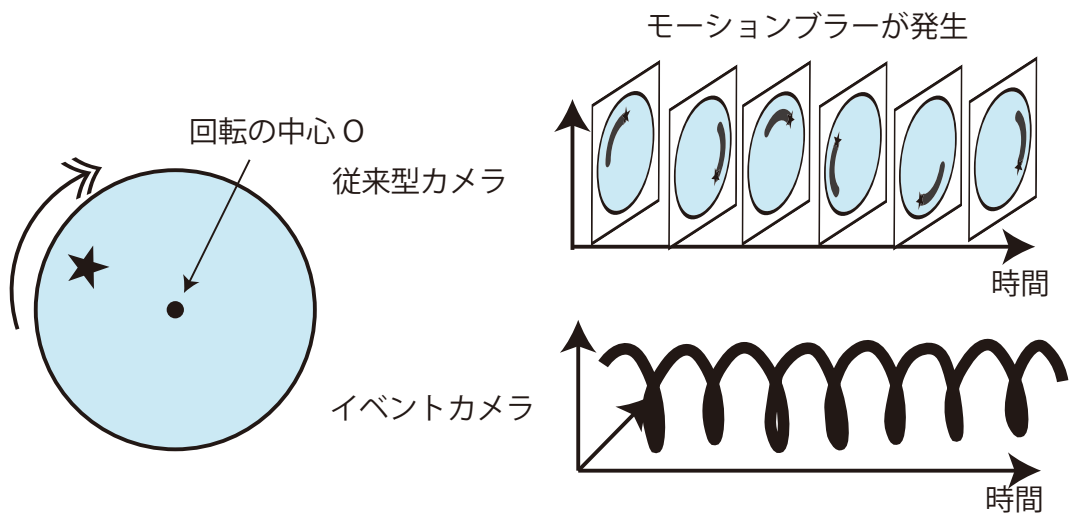


図 3.2: 従来型カメラとイベントカメラにおける撮像の違い。(円盤の回転速度が、3.1 より高速な場合)

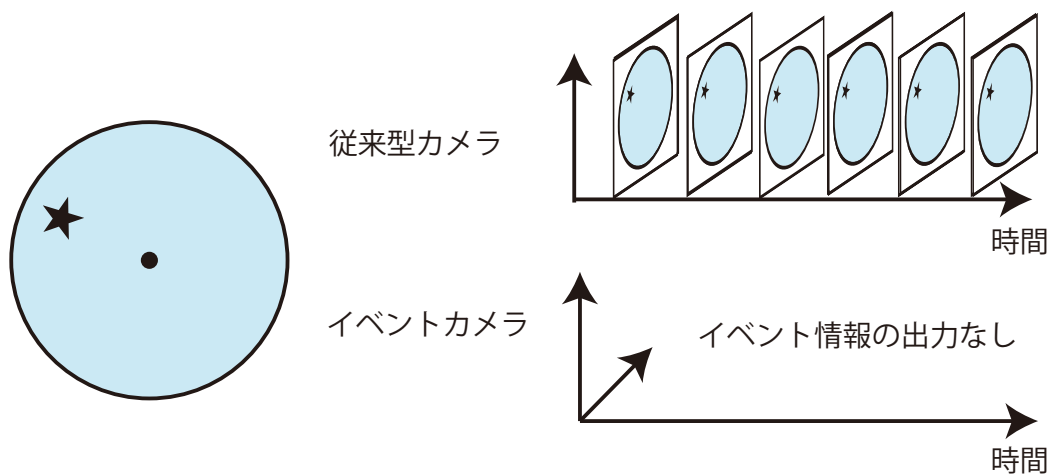


図 3.3: 従来型カメラとイベントカメラにおける撮像の違い.(静止している物体を撮影する場合)

DVS の 1 画素の電子回路は図 3.4(a) に示すように、フォトダイオード、対数増幅器、微分器、比較器によって構成されている。フォトダイオードで受光された光は、光電変換によって電気信号に変換された後、対数増幅器によって増幅される (図 3.4(b))。この対数増幅器は従来型カメラには搭載されておらず、イベントカメラ特有のものである。そのため、従来型カメラのダイナミックレンジが 60 dB であるのに対し、イベントカメラは 120 dB 以上のダイナミックレンジを持つ。次に、対数増幅器で増幅された電気信号は微分器で微分される (図 3.4(c))。微分後の電圧 V_{diff} は閾値を超えるまで上昇、または、低下し続ける。そして、 V_{diff} が閾値に達したかどうかは比較器によって判断され、閾値を超えたときにイベントを発生させる。イベントが発生した際に微分器のスイッチを接続させる信号を送ることで V_{diff} の電圧状態がリセットされ、電圧の閾値超過を再び検出することができる仕組みになっている。

このイベントカメラの検出が各画素で独立して行われているために、イベントカメラは高時間分解能、低遅延、低消費電力という特長を有する。各画素が独立して処理を行うということは、イベントが発生しない時刻、画素においてデータの記録は行われず、電力を消費せずに済む。また、従来型カメラは各フレームごとに全画素で輝度値の記録を行うため、時間変化がないシーンほど記録されたデータの冗長性が高いのに対し、イベントカメラは変化が起きた時刻、画素でのみ情報を記録するため、扱うデータ量が小さくなる。データ量が小さくなると、転送速度が向上し、高い時間分解能でイベント情報を記録できる。

3.3 物体追跡におけるイベントカメラと従来型カメラの比較

イベントカメラと従来型カメラでは獲得されるデータの形式が異なるため、コンピュータビジョンにおけるアプリケーションに適用する際に行うべき処理が異なる。本節では、アプリケーションの一例として物体追跡を取り上げ、イベントカメラと従来型カメラにおける処理の違いについて述べる。具体例として、図 3.5(a) のように、背景画の前を運動する球体を従来型カメラとイベントカメラで撮影する場合を考える。

従来型カメラの各画素では、受光部で獲得された光がフォトダイオードで電気信号に変

換され、増幅器によって増幅された電気信号の電圧レベルを輝度値としている(図 3.5(b)). イメージセンサの全ての画素でこの処理が行われており、一定の速度(フレームレート)で処理が繰り返されるため、従来型のカメラは決まった時間間隔(Δt)の画像を出力する(図 3.5(c)). 獲得された画像群から球の運動情報を求めるには、まず画像間の差分を計算する必要がある. 差分画像を得ることで、静止している背景画のテクスチャ情報は消去され、移動している球のエッジが強調される(図 3.5(d)). さらに、時間的に密な球の運動情報を獲得するには、球の抽出と間の運動の補間が必要となる(図 3.5(d) から (f)).

一方で、イベントカメラで同一のシーンを撮影する場合、イベントカメラは図 3.5(f) のデータを直接出力することができる. なぜなら、イベントカメラの内部では変化の検出処理が電子回路上で実装されているからである. イベントカメラの 1 画素の電子回路は 3.2 節で説明したように、フォトダイオード、対数増幅器、微分器、比較器で構成されている(図 3.5(e)). フォトダイオードでの受光、光電変換後の電気信号は、対数増幅器によって増幅された後、微分器によって微分計算がなされる. 最後に、比較器では微分された結果の閾値超過を検出しており、超過している場合にイベントを出力する. イベントの出力は、従来型カメラのように一定時間ごとに実行されるわけではなく、差分が閾値を超えた場合にのみ起こる. したがって、図 3.5(a) のシーンは、背景画が静止しており変化がないため、背景の部分でイベントは発生せず、運動している球の部分でのみイベントが発生する. また、一定時間ごとにイベントが獲得されるのではなく、球が運動する間はイベントが発生し続ける. ゆえに、従来型のカメラの場合では図 3.5(f) の獲得に複数の画像処理が必要であったが、イベントカメラでは図 3.5(f) の球の運動情報を直接獲得でき、高い時間分解能を特長とするため時間的に密な情報を獲得できるため、高速な物体の運動推定や、より正確な物体の運動推定に適したカメラであるといえる.

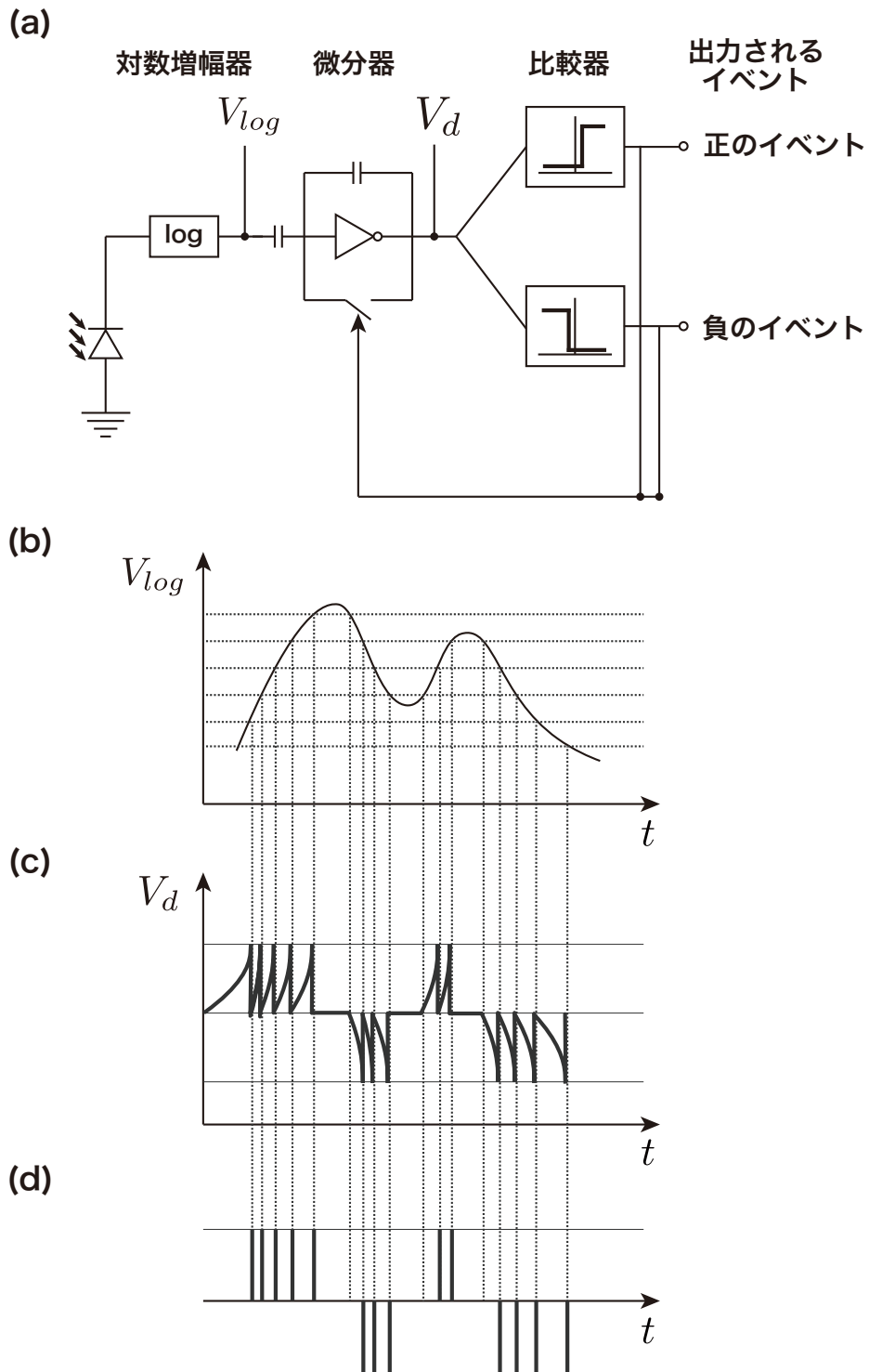


図 3.4: Dynamic Vision Sensor(DVS) の 1 画素における電子回路 (a) と各処理後の電気信号 (b)～(d). (b) 対数増幅された電気信号, (c) 微分された電気信号, (d) 獲得されるイベント列.

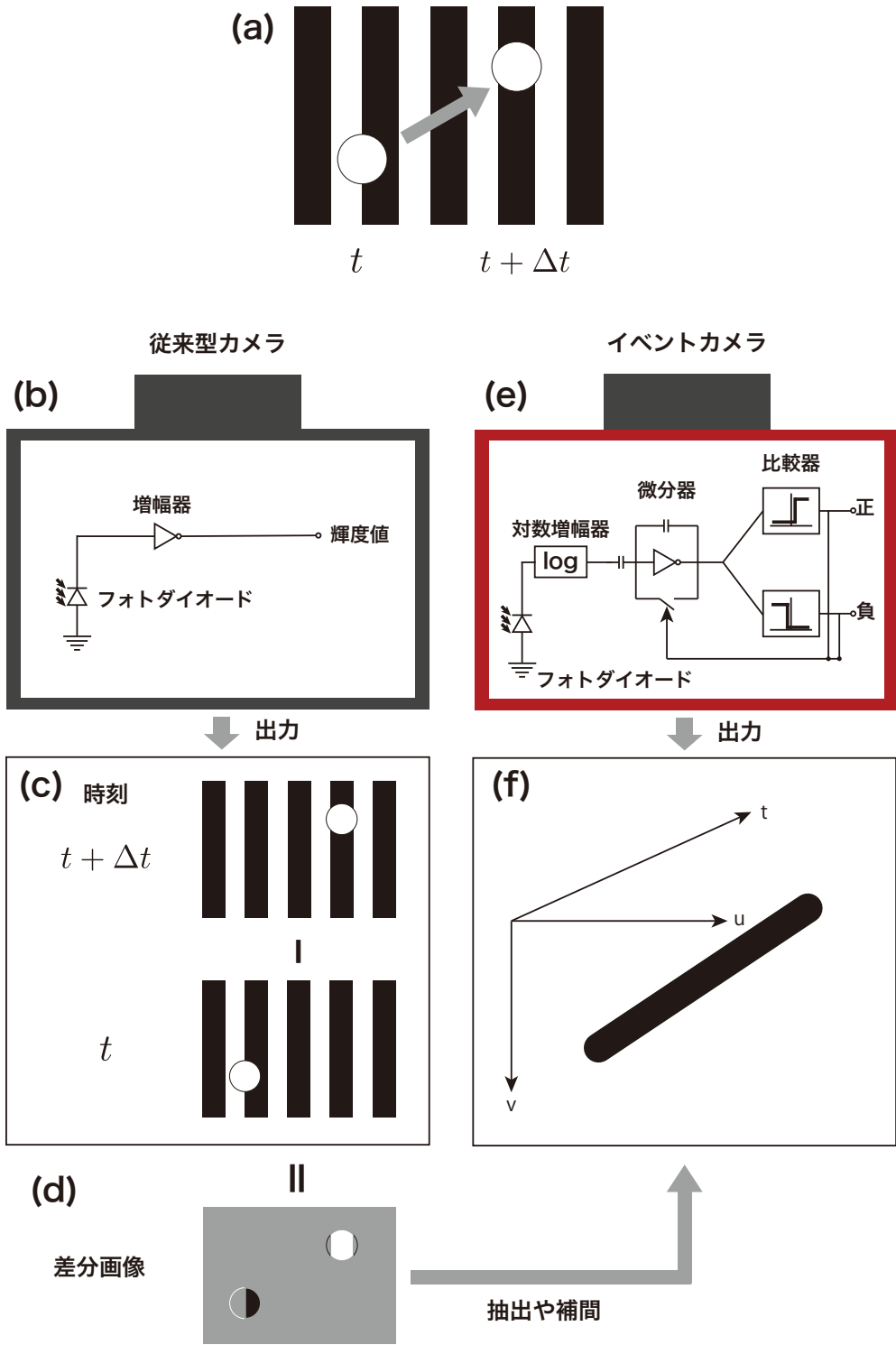


図 3.5: 従来型カメラとイベントカメラによる物体の運動の撮影の比較. (a) 撮影対象のシーン, (b) 従来型カメラの1画素の回路構造, (c) 従来型カメラにおける出力, (d) 従来型カメラの出力から得られる差分画像, (e) イベントカメラの1画素の回路構造, (f) イベントカメラにおける出力.

第4章 提案手法

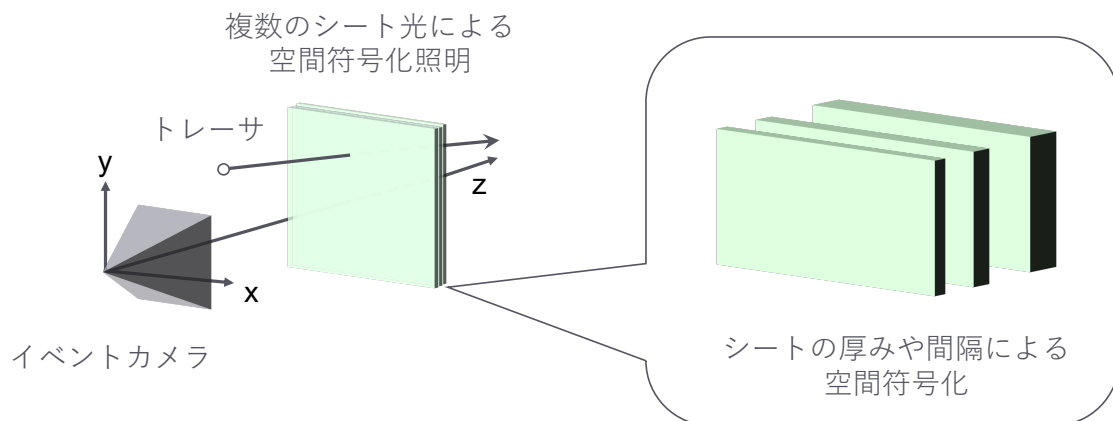


図 4.1: 提案手法のイメージ図

本論文における提案手法は、高い時間分解能を有するイベントカメラと空間符号化照明の組合せによって、ある平面における流速の三次元成分の推定を可能にする。図 4.1 に示すように、空間符号化照明は厚み方向に並べられた複数のシート光によって構成される照明であり、各シート光の厚みやシート間の間隔で空間符号化されている。1 枚のシート光を照明としている従来の PIV システムとは異なり、提案手法では複数枚のシート光を用いることにより、シート光の平面に対して垂直な方向の速度成分の推定を可能にする。

提案手法を説明するにあたり、まずはじめに 4.1 節で、計測の対象である流れのモデルについて述べる。続いて、4.2 節では、イベントカメラと空間符号化照明の幾何設定を述べ、トレーサの空間符号化照明通過によって獲得されるイベント情報について説明する。最後に、4.3 節で、観測されたイベントに基づくトレーサの三次元位置の復元、および、加速度と初速度の推定について述べる。

4.1 流れの運動モデル

流れとは、水や空気などの流体の運動のことであり、その運動の速度を流速という。流速は空間的に変化していることが一般的である。たとえば、エアコンなどの空調機器がある部屋の流れは、空調機器の送風口近くでは、流速の大きさが大きく、送風口から遠い場所の流速の大きさは小さくなる。また、家具や柱などの遮蔽物があると流れが分岐し、遮蔽物の後ろで渦が発生する。したがって、本研究の目的である流れの可視化を達成するには、三次元空間上の各点における流速を計測し、流速分布を表示する必要がある。多くの場合、流体の運動をそのままカメラで捉えることは難しいため、流れに追従する微粒子をトレーサとして付加することで、トレーサの運動として流体の運動を計測可能とする。

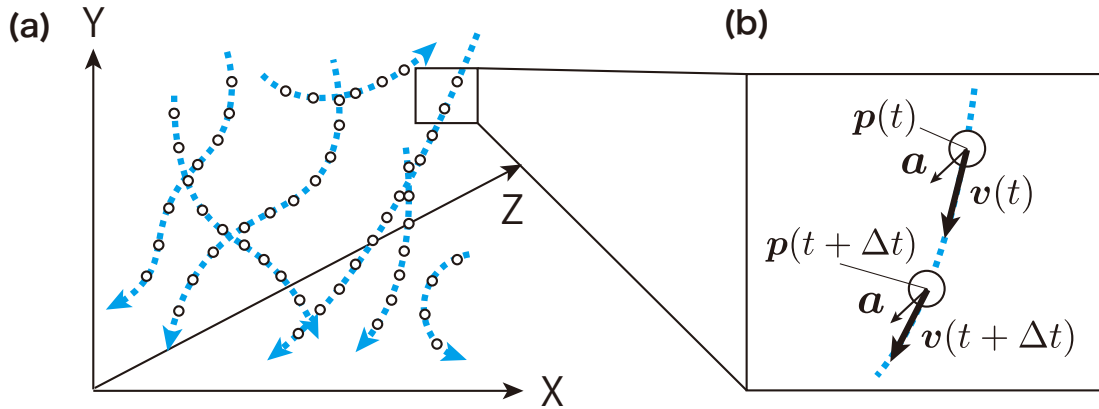


図 4.2: 三次元空間における流れ. (a) 大局的な表現, (b) 局所的な表現.

大局的に見ると、流れに追従するトレーサの運動は複雑であり、モデル化は容易ではない。なぜなら、トレーサは重力、浮力、揚力や抗力などといった外力を受けているからである。そこで、1つのトレーサに着目し、そのトレーサの局所的な運動について考える。図 4.2(b) は、あるトレーサの局所的な運動を表した模式図である。局所的に見ると、トレーサの運動は比較的単純になり、トレーサが受ける力は一定であると仮定できる。したがって、本研究では微小時間 Δt におけるトレーサの運動を等加速度運動と仮定する。つまり、ある時刻 t におけるトレーサの位置 $\mathbf{p}(t)$ は以下のように表せる。

$$\mathbf{p}(t) = \frac{\mathbf{a}}{2}t^2 + \mathbf{v}_0t + \mathbf{p}_0 \quad (4.1)$$

ここで、 \mathbf{a} は微小時間 Δt における加速度であり、 \mathbf{v}_0 と \mathbf{p}_0 はそれぞれ初速度と初期位置である。また、ある時刻 t における速度 $\mathbf{v}(t)$ は、加速度 \mathbf{a} と初速度 \mathbf{v}_0 を用い、

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{a}t + \mathbf{v}_0 \quad (4.2)$$

のように表せる。

4.2 空間符号化照明を通過するトレーサに起因するイベント情報

空間符号化照明は、厚み方向に並べられた複数のシート光によって構成される照明であり、各シート光の厚みやシート間の間隔で空間符号化されている。空間符号化照明を構成するシート光の数を n 、各シート光をそれぞれ L_1, L_2, \dots, L_n とする。シート光 L_1, L_2, \dots, L_n の厚みをそれぞれ l_1, l_2, \dots, l_n と表す。また、 i 番目と $i+1$ 番目のシート光 L_i, L_{i+1} の間隔を d_i とする。したがって、 n 枚のシート光からなる空間符号化照明全体の厚さ l は

$$l = l_1 + d_1 + l_2 + d_2 + \dots + l_{n-1} + d_{n-1} + l_n \quad (4.3)$$

となる。ただし、 l は、その区間におけるトレーサの運動を等加速度運動とみなせる程度に十分に小さいものとする。

イベントカメラと空間符号化照明の幾何関係を図 4.3 に示す。本提案手法では、以下の制約を満たすと仮定する。

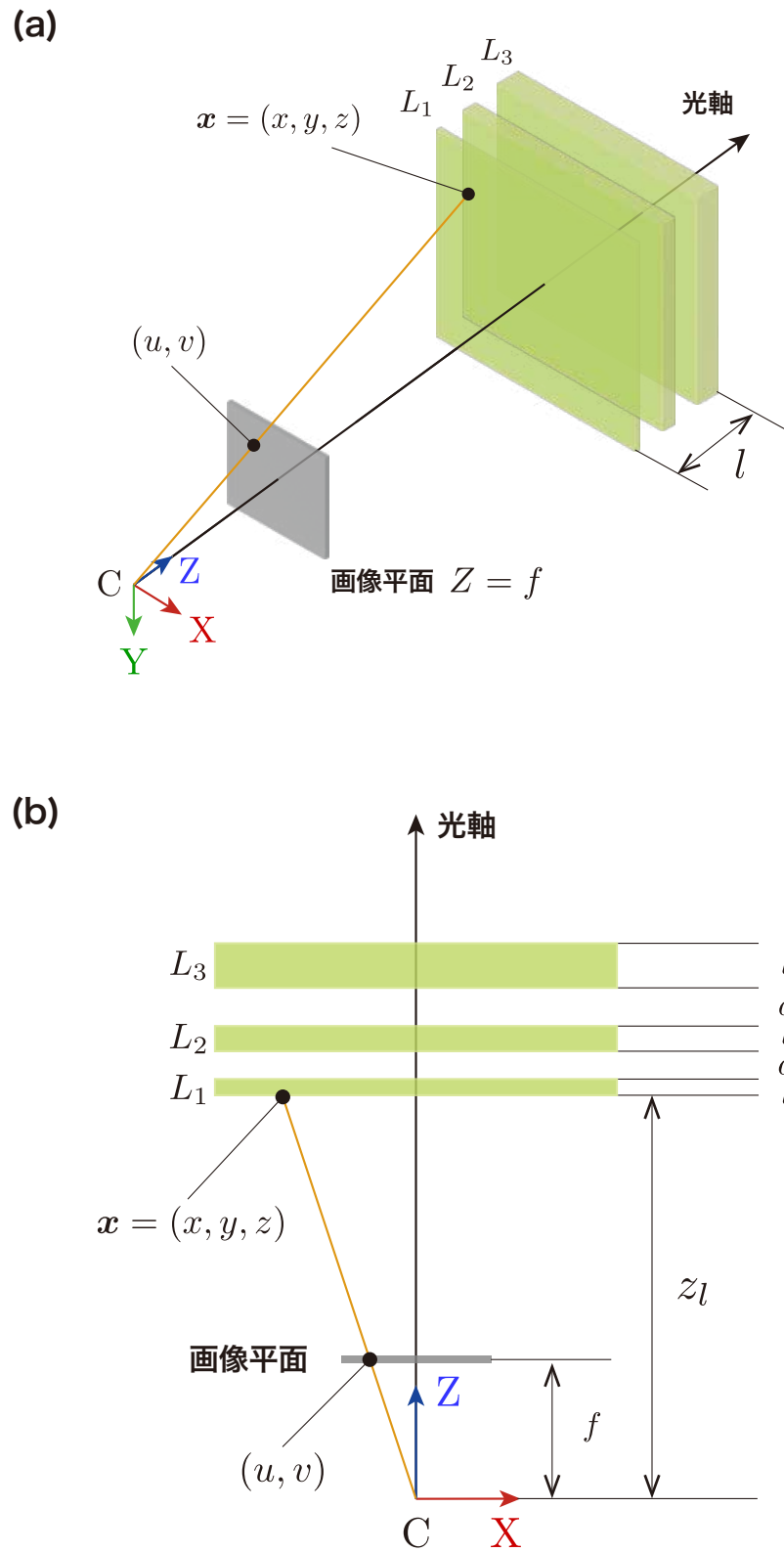


図 4.3: イベントカメラと空間符号化照明の幾何. (a) 三次元表示, (b) XZ 平面図

- イベントカメラの画像平面とシート光平面が平行になるように空間符号化照明を配置する
- トレーサは空間符号化照明を構成するシート光すべてを通過する
- トレーサはイベントカメラの観測において1画素に収まるサイズである

イベントカメラの投影モデルは、焦点距離を f とした透視投影モデルとする。ただし、レンズ歪はなしとする。このとき、三次元空間上の点 $\mathbf{x} = (x, y, z)$ はイベントカメラの画像平面上の点 (u, v) に投影され (図 4.4)、この透視投影変換は以下のように表せる。

$$\begin{cases} u = \frac{f}{z}x \\ v = \frac{f}{z}y \end{cases} \quad (4.4)$$

つまり、シート光を通過するトレーサの三次元空間における位置 \mathbf{x} は、式 (4.4) によって、イベントカメラの画像座標 (u, v) に投影される。投影された画像座標 (u, v) において輝度値の時間変化が観測されたとき、時刻 t 、画像座標 (u, v) 、変化の極性 p の情報を持ったイベントとして記録される。トレーサの位置は、トレーサがシート光内に存在するときのみ散乱光を発生しイベントカメラで観測される。そのため、図 4.5 に示すように、トレーサがシート光に入る場合は、トレーサの散乱光によって輝度値が増加するため、正のイベントが発生する。対して、トレーサがシート光を出る場合は、輝度値が減少するため、負のイベントが発生する。そして、シート光はトレーサの径と比較すれば厚みを持っているため、トレーサがシート光内を運動している間にもイベントが観測される場合がある。シート光内のトレーサの画像座標が変化するときには、移動先の画像座標では正のイベントが、移動前の画像座標では負のイベントが観測される。シート光内のトレーサの画像座標が変化しない場合では、輝度値の変化が生じないため、イベントも観測されない。

4.3 イベント情報に基づくトレーサの加速度と初速度の推定

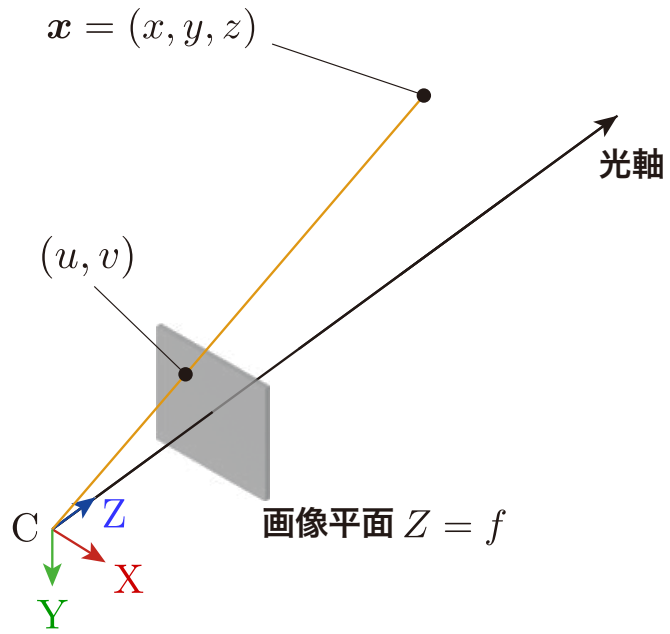
推定するパラメータは式 (4.1) における加速度 \mathbf{a} と時刻 $t = 0$ における速度 \mathbf{v}_0 であるため、時刻 t におけるトレーサの三次元位置 $\mathbf{p}(t)$ が必要となる。しかし、イベントカメラで獲得されるイベント情報に含まれるのは二次元の画像座標であり、 Z 座標の情報が失われているため、トレーサの三次元位置は観測から直接得られない。したがって、イベント情報における画素座標と時刻からトレーサの三次元位置を復元する必要がある。4.2 節で述べたイベントカメラと空間符号化照明の幾何を設定するとき、イベントカメラの焦点距離 f と空間符号化照明のうちイベントカメラに最も近いシート光表面までの距離 z_l は既知であると仮定する。したがって、図 4.5 に示すとおり、シート光 L_i の表面と裏面までの距離をそれぞれ z_{if}, z_{ir} と定義すると、 z_l に加え、シート光の厚さ l_1, l_2, \dots と間隔 d_1, d_2, \dots を用いて、以下のように表せる。

$$z_{1f} = z_l \quad (4.5)$$

$$z_{ir} = z_{if} + l_i \quad \text{ただし, } i \geq 1 \quad (4.6)$$

$$z_{jf} = z_{(j-1)r} + d_{(j-1)} \quad \text{ただし, } j \geq 2 \quad (4.7)$$

(a)



(b)

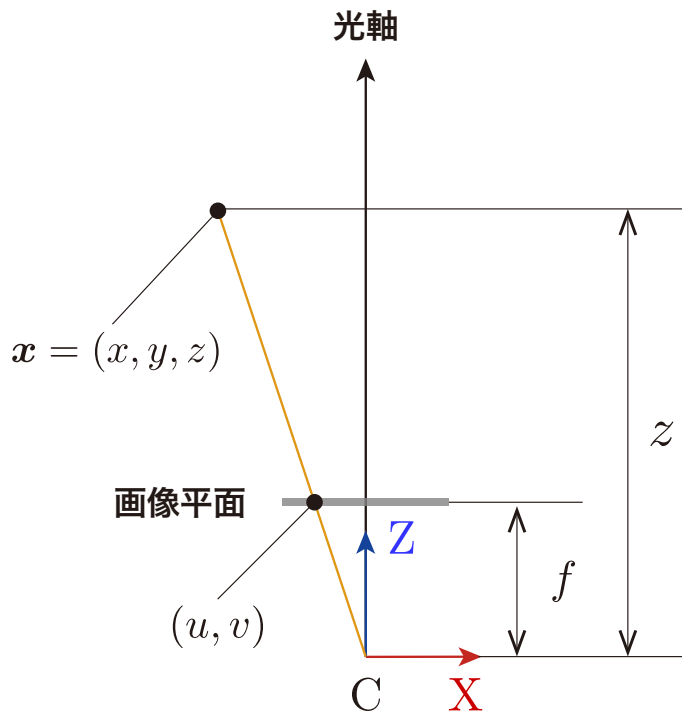


図 4.4: 透視投影モデル (レンズ歪なし). (a) 三次元表示, (b) XZ 表示.

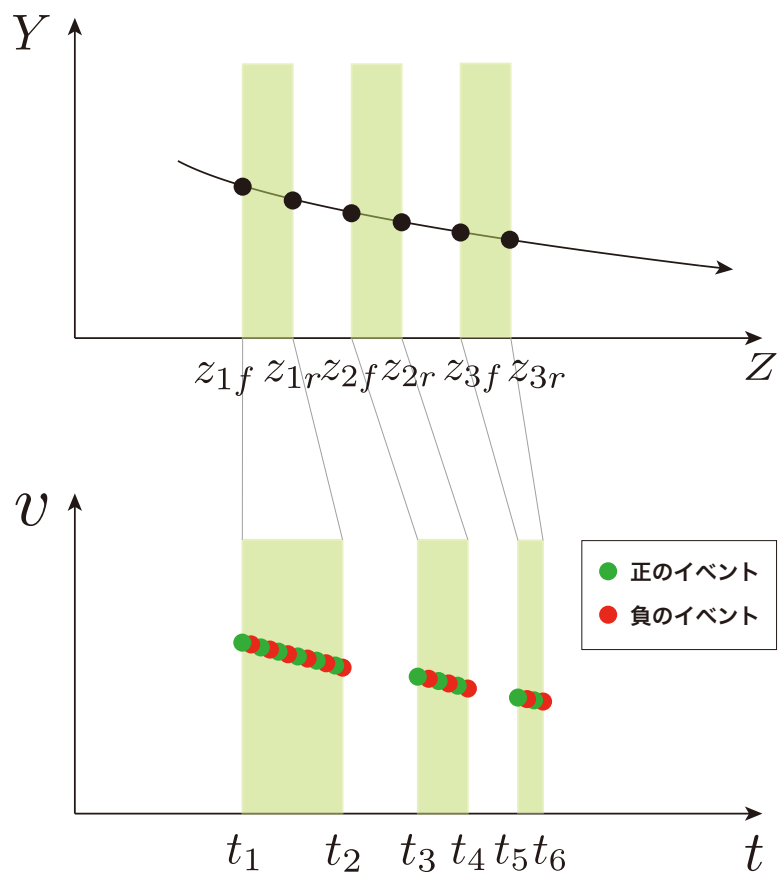


図 4.5: トレーサの空間符号化照明通過によって獲得されるイベント情報

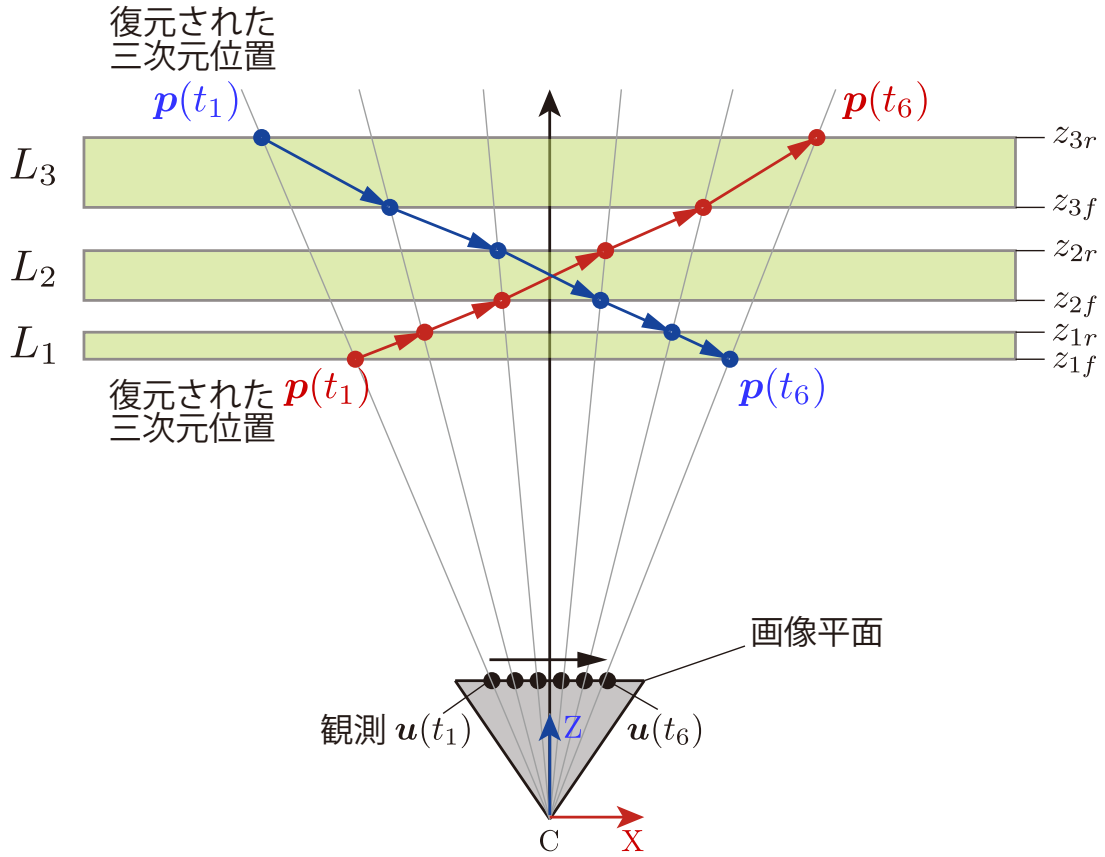


図 4.6: 観測されたイベントの画像座標から復元される三次元空間座標のトレーサの通過方向による違い.

ここで、あるシート光の表面もしくは裏面までの距離を z_b とおく. z_b は、式 (4.5)-(4.7) によって計算可能であるため、既知である. このとき、時刻 t におけるトレーサの三次元位置 $\mathbf{p}(t) = (x, y, z)$ は、時刻 t に発生したイベントの画像座標 $\mathbf{u}(t) = (u, v)$ から、

$$\begin{cases} x = \frac{z_b}{f}u \\ y = \frac{z_b}{f}v \\ z = z_b \end{cases} \quad (4.8)$$

で求まる.

ただし、図 4.6 に示すようにトレーサが空間符号化照明を通過する方向はカメラから見て手前から奥に進む方向と手前から奥に進む方向の 2 つ存在するため、式 (4.8) で既知としている z_b も 2 つ存在する. トレーサがカメラから見て手前から奥に進む方向では、トレーサは空間符号化照明をシート光 L_1, L_2, L_3 の順で通過するため、時刻 t とシート光境界の Z 座標 z_b の組合せは、 $(t_1, z_{1f}), (t_2, z_{1r}), \dots, (t_6, z_{3r})$ になる. 一方で、トレーサがカメラから見て奥から手前へ進む方向では、トレーサは空間符号化照明をシート光 L_3, L_2, L_1 の順で通過す

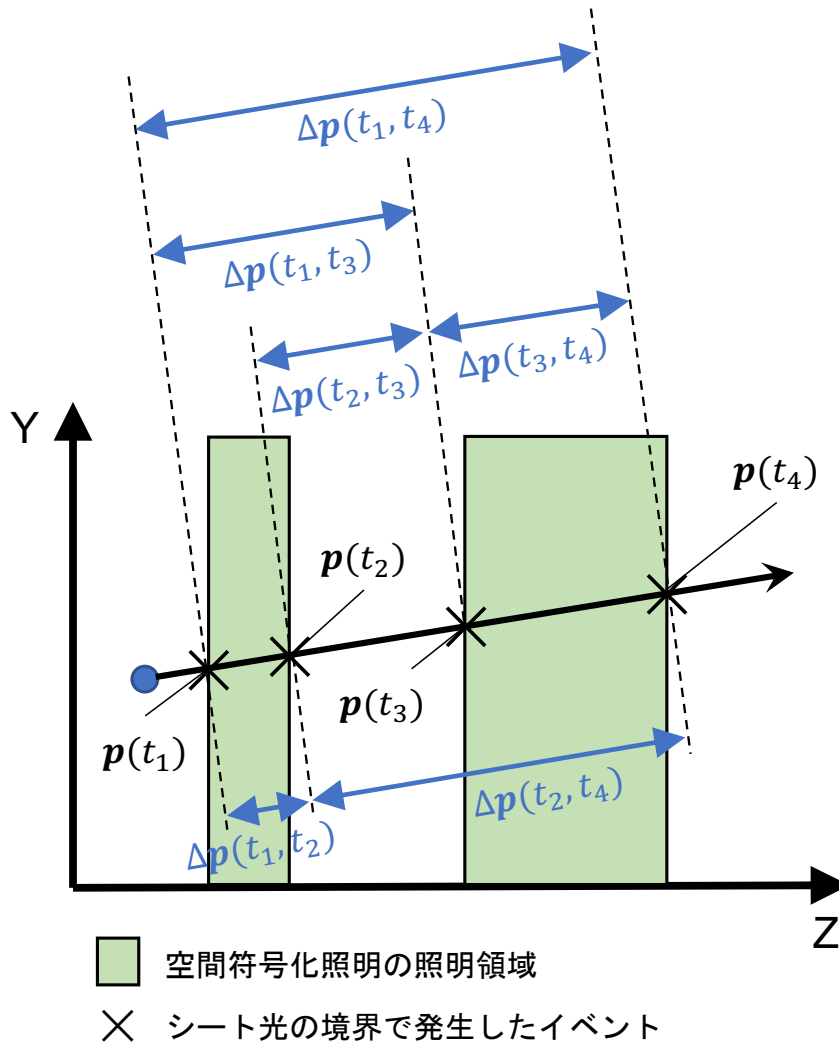


図 4.7: シート光が 2 枚場合に取りうる変位

るため、時刻 t とシート光境界の Z 座標 z_b の組合せは、 $(t_1, z_{3r}), (t_2, z_{3f}), \dots, (t_6, z_{1f})$ になる。しかし、イベントカメラの観測は透視投影によって Z 座標の情報が失われているため、実際にトレーサが通過した方向は不明である。したがって、両方向でそれぞれ三次元位置の復元を行い、以降の加速度と初速度の推定を行う。その後、両方の場合で推定した加速度と初速度を用いてトレーサの三次元位置を計算し、観測された三次元位置との誤差をもってトレーサの移動方向を決定する。

推定するパラメータは、式 (4.1) における加速度 \mathbf{a} と時刻 $t = 0$ における速度 \mathbf{v}_0 である。式 (4.1) において、イベントカメラの観測から得られるトレーサの三次元位置 $\mathbf{p}(t)$ と時刻 t は既知であるが、時刻 $t = 0$ におけるトレーサの三次元位置 \mathbf{p}_0 は未知である。したがって、時刻 $t_i, t_j (i \neq j, 1 \leq i, j \leq 2n)$ をそれぞれ式 (4.1) に代入し、変位 $\Delta \mathbf{p}(t_i, t_j)$ を計算し \mathbf{p}_0 を消去することで、未知数を加速度 \mathbf{a} と時刻 $t = 0$ における速度 \mathbf{v}_0 のみにする。したがって、変位 $\Delta \mathbf{p}(t_i, t_j)$ は、

$$\Delta \mathbf{p}(t_i, t_j) = \mathbf{p}(t_i) - \mathbf{p}(t_j) = \frac{t_i^2 - t_j^2}{2} \mathbf{a} + (t_i - t_j) \mathbf{v}_0 \quad (4.9)$$

と表される．たとえば，シート光の枚数が2枚のときに取りうる変位は $\Delta\mathbf{p}(t_1, t_2)$, $\Delta\mathbf{p}(t_1, t_3)$, $\Delta\mathbf{p}(t_1, t_4)$, $\Delta\mathbf{p}(t_2, t_3)$, $\Delta\mathbf{p}(t_2, t_4)$, $\Delta\mathbf{p}(t_3, t_4)$ の6通りである (図 4.7)．

複数の変位から得られる連立一次方程式を解くことで加速度 \mathbf{a} と時刻 $t = 0$ における速度 \mathbf{v}_0 を推定できる．この連立一次方程式は， \mathbf{I} を 3×3 の単位行列として以下のように表される．

$$\begin{bmatrix} \Delta\mathbf{p}(t_1, t_2) \\ \Delta\mathbf{p}(t_1, t_3) \\ \vdots \\ \Delta\mathbf{p}(t_{2n-1}, t_{2n}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{t_1^2 - t_2^2}{2} \mathbf{I} & (t_1 - t_2) \mathbf{I} \\ \frac{t_1^2 - t_3^2}{2} \mathbf{I} & (t_1 - t_3) \mathbf{I} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{t_{2n-1}^2 - t_{2n}^2}{2} \mathbf{I} & (t_{2n-1} - t_{2n}) \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{v}_0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{T} \mathbf{e} \quad (4.11)$$

ここで， \mathbf{q} , \mathbf{T} , \mathbf{e} は，

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{p}(t_1, t_2) \\ \Delta\mathbf{p}(t_1, t_3) \\ \vdots \\ \Delta\mathbf{p}(t_{2n-1}, t_{2n}) \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \frac{t_1^2 - t_2^2}{2} \mathbf{I} & (t_1 - t_2) \mathbf{I} \\ \frac{t_1^2 - t_3^2}{2} \mathbf{I} & (t_1 - t_3) \mathbf{I} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{t_{2n-1}^2 - t_{2n}^2}{2} \mathbf{I} & (t_{2n-1} - t_{2n}) \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{v}_0 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

と定義する．

ここで，連立一次方程式の式の数 m とする．推定パラメータの数は加速度 \mathbf{a} と初速度 \mathbf{v}_0 の2つであるから， $m < 2$ のときは，未知数に対して方程式の数が少ないため，不良設定問題となる．そのため，推定を行うには $m \geq 2$ である必要がある．シート光の枚数が n のとき，シート光境界で発生したイベント情報の数は $2n$ であるから，変位 $\Delta\mathbf{p}(t_i, t_j)$ を計算する2時刻 (t_i, t_j) の組合せは $\binom{2n}{2}$ 通りある．したがって， $m \geq 2$ を満たすシート光の枚数の条件は $n \geq 2$ となる．

ここで，一見するとシート光の数は2で良いように思われるが，実際の計測では，さまざまな要因で観測誤差が発生する．そこで，一般的には観測に冗長性をもたせて最小二乗法の枠組みで推定することが多い．本手法でも，シート光の数を増やすことによって，推定の安定化をはかるため，最小二乗法を用いて加速度と初速度を以下のように推定する．

$$\arg \min_{\mathbf{e}} \|\mathbf{q} - \mathbf{T} \mathbf{e}\|^2 \quad (4.15)$$

解の安定性を高めるためには，行列 \mathbf{T} の条件数を小さくすることが重要であり，これはシート光の厚さや間隔によって決まる．

第5章 実験

本章では、提案手法の有効性を示すために、シミュレーション環境において流れの推定実験を行い、真値との比較を行うことで流れの推定精度を検証する。また、シート光の枚数を変化させた際の推定精度向上の有効性を確認する。

5.1 シミュレーション環境における流れの推定精度の調査

4章で述べた通り、提案手法は、トレーサーがシート光の前面から背面に通過したのか、シート光の背面から前面に通過したのかを直接的には判断することは困難である。そこで本節ではまず、観測されたイベント情報から提案手法を用い、流れの推定が可能であるかを検証する。図5.1に示すように、カメラをシミュレーション空間内の点 $(0, 0, -50)$ に設置し、カメラから 50mm 離れた地点 $(0, 0, 0)$ にシート光の最前面が重なるようにシート光の1枚目を設置した。空間符号化照明は、1枚目のシート光の厚さを 1mm とし、1枚目から 2mm の間隔を空けて、厚さ 4mm のシート光を2枚目として配置した。このような環境において、単一のトレーサーに対し、加速度 $[1, 1, 10]$ 初速度 $[1, 1, 1]$ を与えイベントカメラにより撮影される画像をレンダリングし、水平画角 60 度、垂直画角 45 度のイベントカメラを想定し、カメラの解像度を 1024×768 ピクセル、カメラのレンズ歪みはないものとし、実験を行った。本実験では、トレーサーの動きをシート光の前面から背面に通過した場合および、シート光の背面から前面に通過した場合の両パターンにおける流れの推定を行い、観測されたイベント情報と推定された流れの結果からトレーサーの動きをレンダリングし、観測された三次元位置と推定結果の加速度と初速度から再構成された三次元位置の距離が小さい方を真の流れであるとした。

図5.2にシート光が2枚の場合における流れの推定結果を示す。なお、図中の赤色はトレーサーがシート光を通過する方向が真値と同じ場合を示し、青色はトレーサーが真値と逆の向きにシート光を通過する場合の再構成結果を示している。図5.2より、トレーサーの運動方向が真値と同じ場合は、真値と逆の場合と比較し、観測された三次元位置と推定値を用いて再構成された三次元位置の誤差がより小さくなっていることが確認できる(図5.2左下)。これは、提案手法が仮定している流れのモデルの表現力が低く、真値と運動方向が異なる場合においてこの誤差を一定以上小さくできないためであると考えられる。そのため、推定された流れのパラメータにおいても、真値と同じ方向を仮定した場合は加速度 $[0.99760069, 1.00819822, 10.]$ 、初速度 $[1.00292541, 0.99559622, 1.]$ と真値との推定誤差は数パーセント程度となっているが、真値と逆の方向を仮定した場合は観測位置と推定値を用いて再構成された三次元位置の誤差が小さくなるように推定されるため、加速度 $[5.39037697, 0.3410019, 12.26257094]$ 、初速度 $[-13.63467783, 1.17005523, -13.06097162]$ と真値と大きく異なる結果となっている。

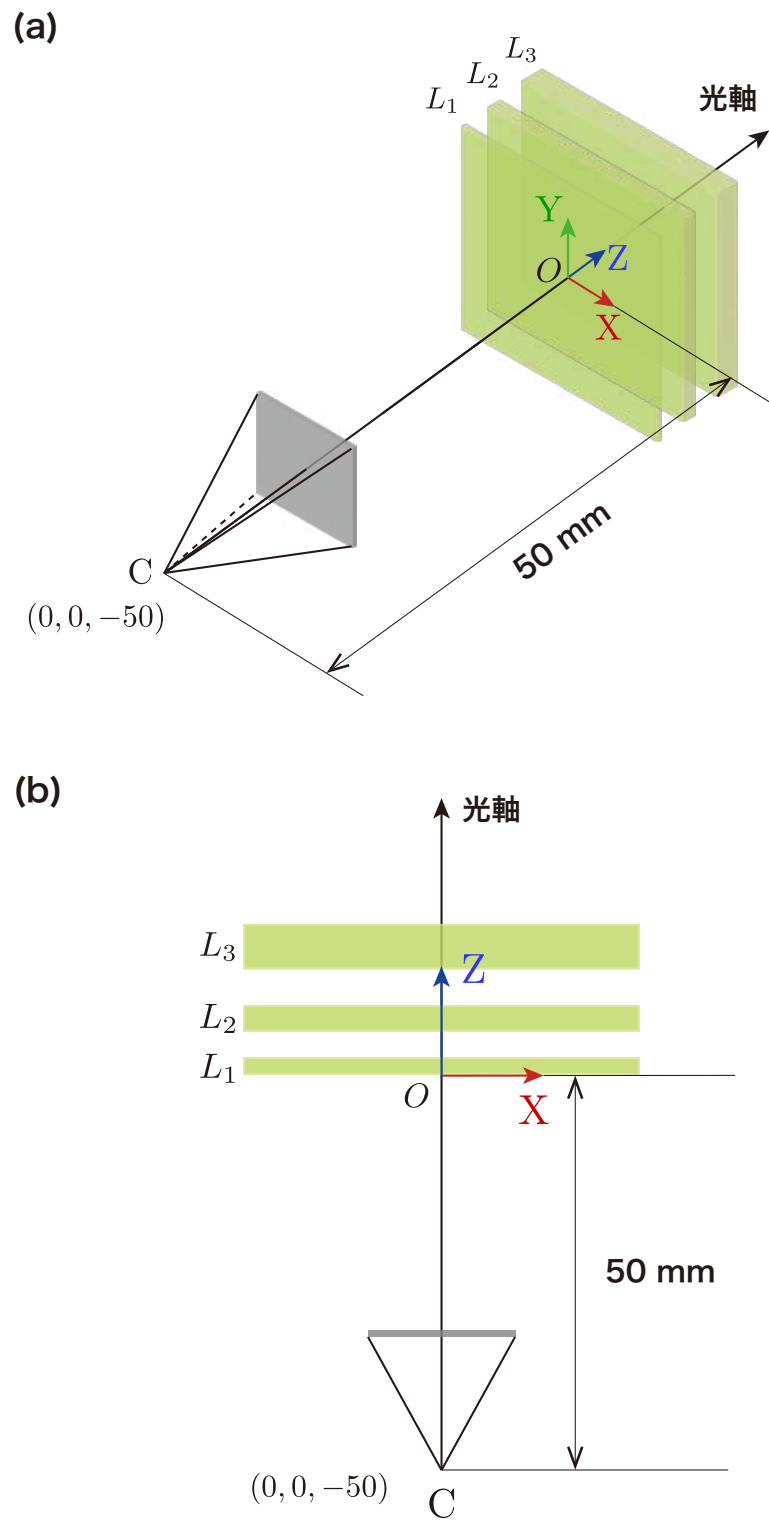


図 5.1: シミュレーション環境. (a) 三次元表示, (b)XZ 平面図.

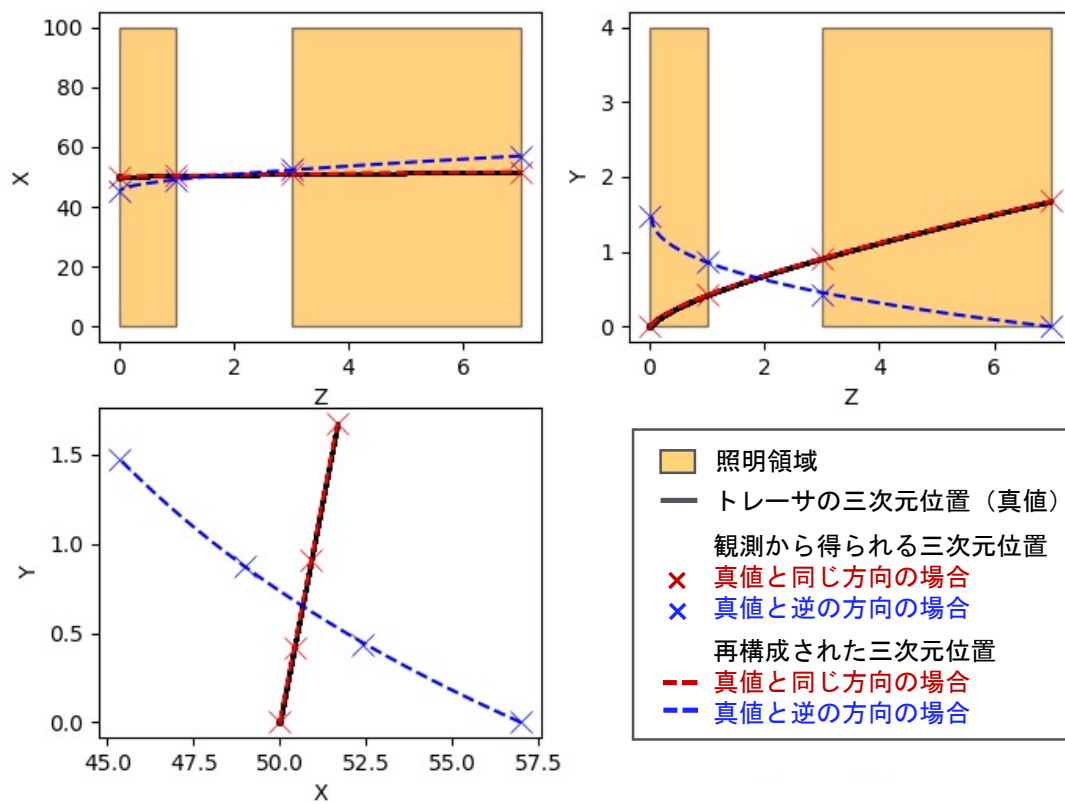


図 5.2: シート光が 2 枚の場合における流れの推定結果. (左上)ZX 平面図, (右上)ZY 平面図, (左下)XY 平面図.

5.2 シミュレーション環境におけるシート光の枚数が流れの推定に与える影響の調査

本節では、シート光の枚数が流れの推定の精度に与える影響について述べる。図 5.3 にシート光の枚数を 2 枚から 3 枚に変化させた際の実験結果について示す。空間符号化照明は、シート光 2 枚目までは前節における空間符号化照明と同じであり、2 枚目から 5 mm の間隔を空けて、厚さ 7 mm のシート光を 3 枚目として配置した。また、与えられた加速度と初速度は 2 枚のときと同一である。このような環境において流れの推定実験を行った。実験の結果、シート光の枚数を 2 枚から 3 枚に増やした結果、トレーサの運動方向を真値と同じ方向を仮定した場合、推定された加速度は $[0.99676024, 1.00300875, 10.]$, $[1.00313499, 0.99802654, 1.]$ と推定誤差が半分以下となった。一方、トレーサの運動方向を真値と逆の方向を仮定した場合は、加速度 $[7.71684179, -0.09012645, 11.95704852]$, 初速度 $[-23.46152112, 1.48518932, -21.18570789]$ と真値からより大きく異なる結果となった。また、図 5.3 より、推定結果から再構成された三次元位置は、真値と同じ方向を仮定した場合は真値とほぼ同じ位置をトレーサが通過しているのに対し、真値と逆の方向を仮定した場合は、シート光の枚数が増えることで観測位置と推定値を用いて再構成された三次元位置の誤差も増加していることが視覚的に確認できる。これはモデルの表現力が十分でなく、提案手法は最小二乗法の意味において誤差が最小化されるため、シート光の枚数が増加することで、真値と同じ動きを仮定した場合は、推定誤差が減少したと考えられる。そのため、入力された画像上のイベント情報の離散化誤差の分布程度まではシート光の枚数を増やせば増やすほど推定誤差が減少すると考えられる。

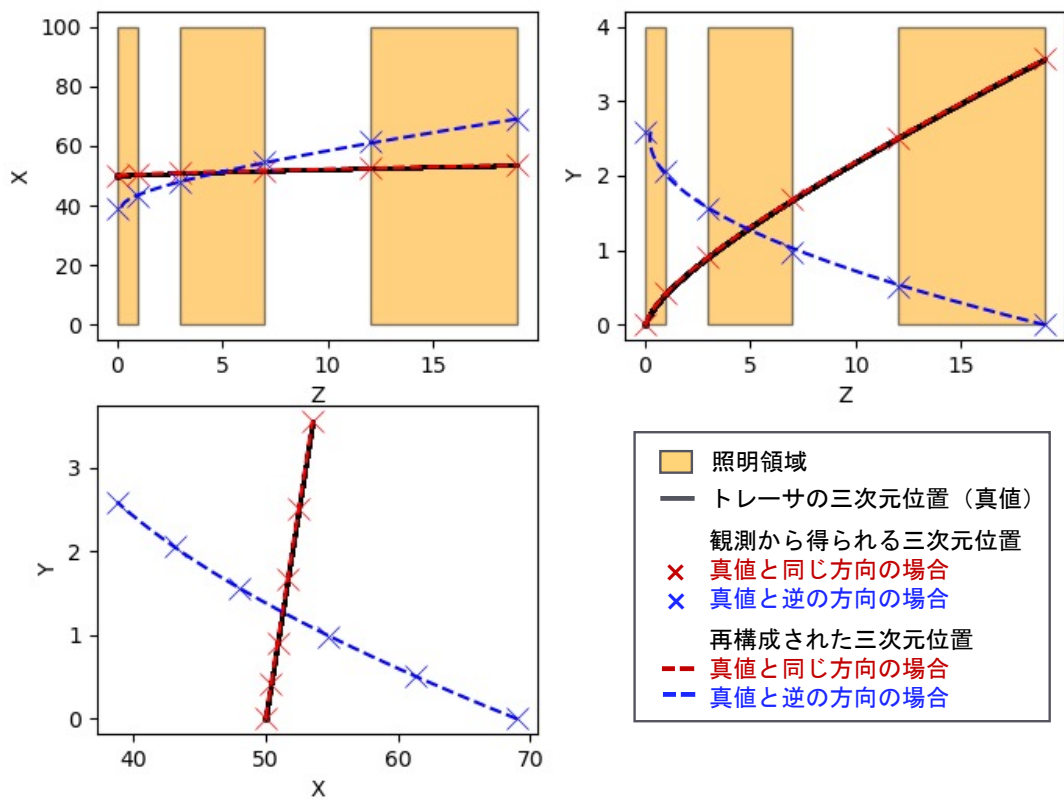


図 5.3: シート光が 3 枚の場合における流れの推定結果. (左上)ZX 平面図, (右上)ZY 平面図, (左下)XY 平面図.

第6章 実環境における検討と今後の課題

シミュレーション実験では、合成したデータを用いて検証することで、提案手法の評価を行った。結果として、提案手法を用いることによって、ある平面における流れの三次元速度を推定可能であることが示せた。しかし、シミュレーション実験では、イベントカメラや空間符号化照明、トレーサが理想的な設定になっているが、実環境ではこれらの要素は理想的にはなっていない。そのため、本章では実環境において提案手法を適用するための検討を行った。6.1節では、空気中における自由落下運動を対象とした検討について、6.2節では、水中における回転運動を対象とした検証について説明する。これらの検討では提案手法の定量的な評価には至っていないため、6.3節では今後の課題について述べる。

6.1 検証1：空気中における自由落下運動

実環境における加速度と初速度の推定を行うために、空間符号化照明によるイベントデータの確認を目的とした実験を行った。流れの加速度や初速度の真値は不明であるため、微小物体の自由落下運動を撮影対象とした。微小物体として直径1mm程度の大きさの発泡ビーズを用い、自由落下させた発泡ビーズが複数枚のシート光を通過するように空間符号化照明とイベントカメラを配置する(図6.1)。空間符号化照明は、波長520nmのレーザー光源に対し、スリットを配置することで作製した。スリットは、透明フィルムに遮光部分を印刷したものをを用いた。実験に使用したイベントカメラ(Prophesee社製)の性能は、時間分解能1 μ s、解像度1280 \times 720画素、ダイナミックレンジ $>$ 124dB、最大イベントレート1066MEPSである。実際に行った実験環境は図6.2に示した通りである。

発泡ビーズが空間符号化照明を通過するとき、各シート光の境界で輝度値の変化が起こりイベントを発生させるため、シート光の間隔を変化させると、負のイベントの発生から正のイベントの発生までの時間が変化すると予想される。また、シート光の厚みを変化させると、正のイベントの発生から負のイベントの発生までの時間が変化すると予想される。そこで、シート光の間隔を変化させる場合とシート光の厚さを変化させる場合の2つの条件で実験を行い、獲得されるイベントデータの確認を行った。

シート光の間隔を変化させる場合の条件を以下に示す。

- シート光の厚さ：1.5mm
- シート光の間隔：1.5mm, または, 3.0mm
- シート光の数：2, または, 3

また、シート光の厚さを変化させる場合の条件を以下に示す。

- シート光の厚さ：1.0mm, または, 1.5mm
- シート光の間隔：3.0mm

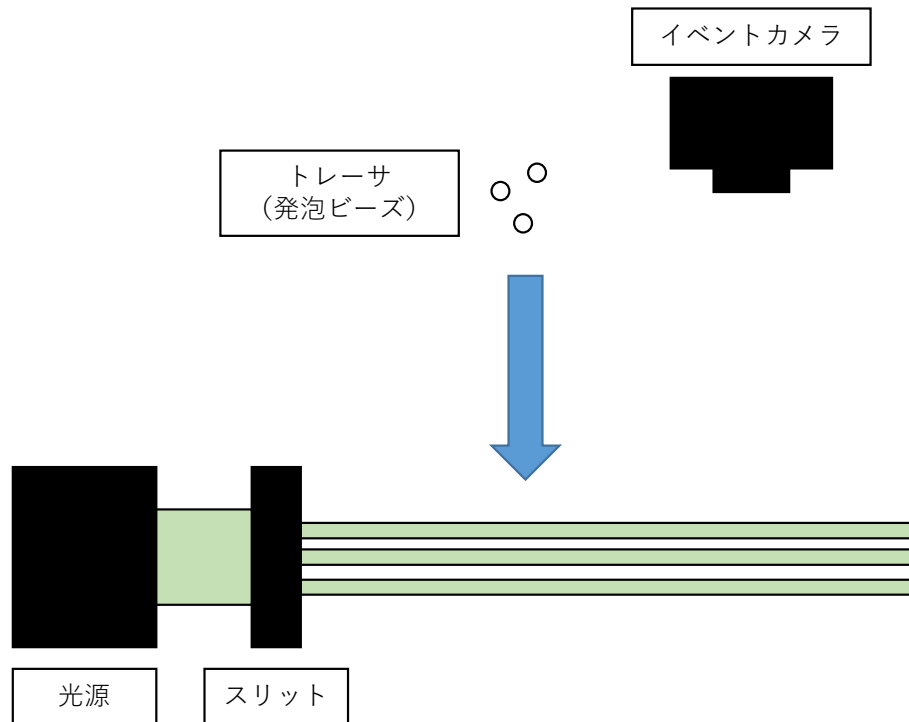


図 6.1: 検証 1 の概要図

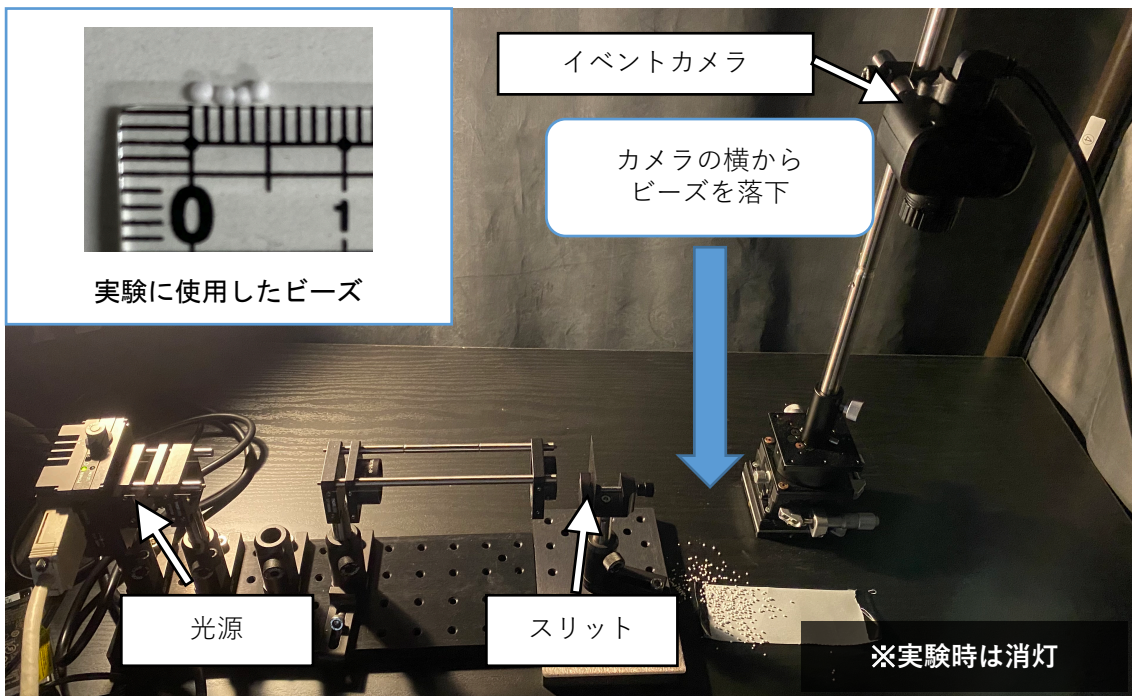


図 6.2: 検証 1 における実験環境

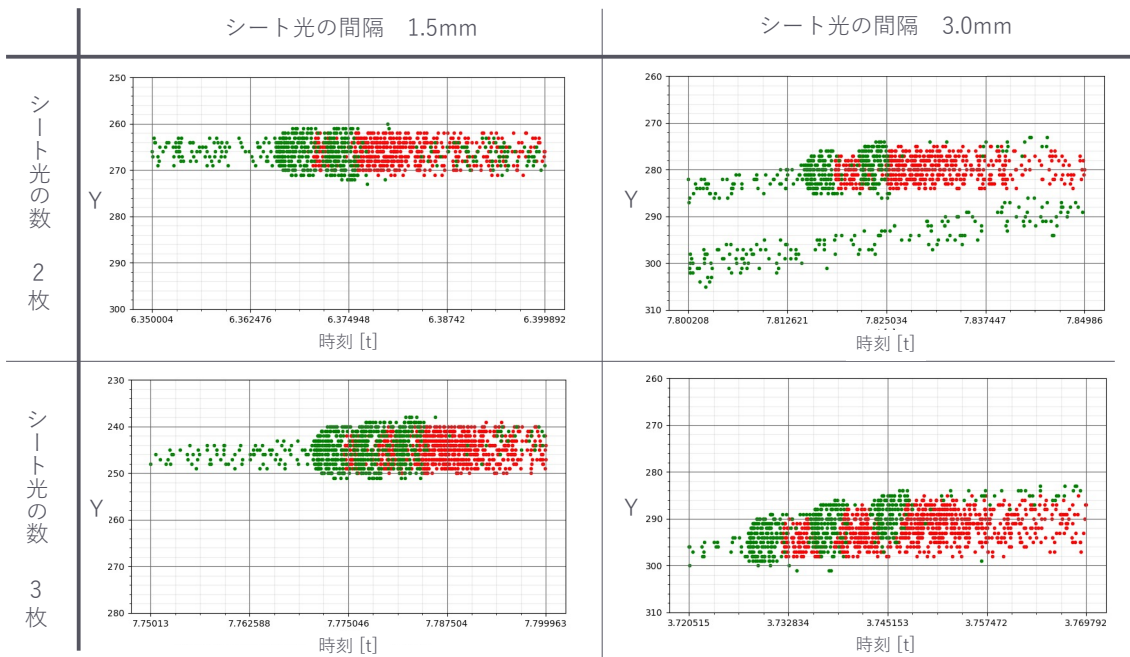


図 6.3: シート光の厚さ 1.5 mm のとき、シート光の数と間隔を変えた場合に観測されたイベントの時刻と画素座標 Y による二次元表示. シート光の数が (上段)2 枚, (下段)3 枚. シート光の間隔が (左列)1.5 mm, (右列)3.0 mm. 緑色の点は正のイベント, 赤色の点は負のイベント.

- シート光の数: 2, または, 3

図 6.3 は、シート光の厚さを固定し、シート光の数とシート光の間隔を変数としたときに獲得されたイベントデータを横軸を時刻、縦軸を画素座標 Y として二次元表示したものである。グラフにおける緑色の点は正のイベントで、赤色の点は負のイベントを表している。正のイベントと負のイベントがそれぞれ点群として観測され、その点群がシート光の数だけ正負交互に発生している。また、シート光の間隔が 3.0 mm の条件では、シート光の間隔が 1.5 mm の条件と比較して、負のイベントが発生してから次の正のイベントが発生するまでの時間が長くなっており、この結果は予想と一致する。

シート光の間隔を固定し、シート光の数とシート光の厚さを変数としたときに獲得されたイベントデータを横軸を時刻、縦軸を画素座標 Y として二次元表示したものを図 6.4 に示す。シートの厚さを固定した場合と同じで、正のイベントと負のイベントがそれぞれ点群として観測され、その点群がシート光の数だけ正負交互に発生している。シート光の厚さが 1.5 mm の条件では、シート光の厚さが 1.0 mm の条件と比較して、正のイベントが発生してから負のイベントが発生するまでの時間が長くなるという予想であったが、得られた観測からはその傾向がみられなかった。

さらに、本実験で得られたイベントデータはトレーサ 1 粒子が複数の画素でイベントを発生させており、イベントカメラでの観測におけるトレーサの粒子径は 1 画素内に収まるという仮定を満たしていない。この問題を解決するためには、より粒子径が小さいトレーサを用いる必要がある。また、空間符号化照明を通過後にも負のイベントが長時間出ており、これも仮定と反している。これは、イベント発生時の閾値の設定 (バイアス設定) が不適切であった可能性がある。

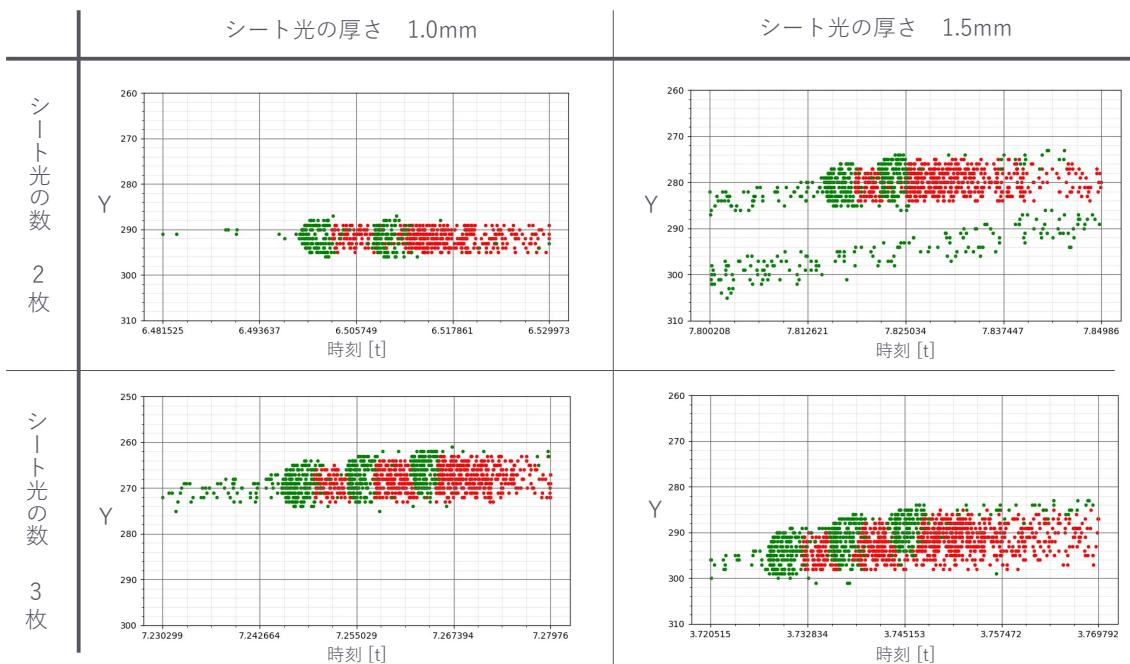


図 6.4: シート光の間隔 3.0 mm のとき、シート光の数と厚さを変えた場合に観測されたイベントの時刻と画素座標 Y による二次元表示. シート光の数が (上段)2 枚, (下段)3 枚. シート光の厚さが (左列)1.0 mm, (右列)1.5 mm. 緑色の点は正のイベント, 赤色の点は負のイベント.

6.2 検証 2：水中における回転運動

6.1 節の実験結果を踏まえ、トレーサの大きさに問題があったため、径が小さいトレーサを使用して実験を行った。トレーサの粒子径が小さくなると質量も小さくなるため、自由落下せずに外乱に影響を受けやすくなるため制御が難しい。そこで、空気より制御が容易である水の流れの可視化の実験を行った。水流の制御は、攪拌機と回転子によって行い、回転子の回転数を設定することで、流れの再現性を保つ。実験環境を図 6.5 に示す。一辺 100 mm の立方体形状の水槽中に水と回転子を入れ、回転子を攪拌機により回転数 120 rpm で回転させ、水渦を発生させた。6.1 節で使用したトレーサの径は 1 mm であったが、本実験では直径 90 μm のポリスチレン製粒子をトレーサとして用いる。図 6.6 に示すように、水槽を横切るように空間符号化照明を配置する。複数枚のシート光からなる空間符号化照明は、波長 520 nm のレーザー光源に対し、スリットを配置することで作製した。スリットは光を透過しない黒色のアクリル板をレーザーカッターで加工し作製したものである。本実験では、3 枚のシート光になるよう、幅 2 mm、高さ 20 mm の長方形を 1 mm 間隔で 3 つ配置し、全ての長方形を切り取ったスリットを使用した (図 6.5 の左下部)。シート光平面に正対するようにイベントカメラ (Prophesee 社製, 時間分解能 1 μs , 解像度 1280 \times 720 画素, ダイナミックレンジ > 124 dB, 最大イベントレート 1066 MEPS) を配置し、水流を撮影した。

撮影されたイベントデータを画素座標 (X, Y) と時刻 t の三次元プロットで可視化したものを図 6.7 に示す。左図は、撮影データから空間符号化照明領域のみを表示した図であり、点群が 3 つ並んだ軌跡が複数確認できる。これは、1 つのトレーサが 3 枚のシート光を通過したことによって発生したイベントである。1 つの軌跡に着目し、拡大表示したものが図 6.7 の右図である。4.2 節の実験結果と比較して、負のイベントの発生期間が短くなっている。

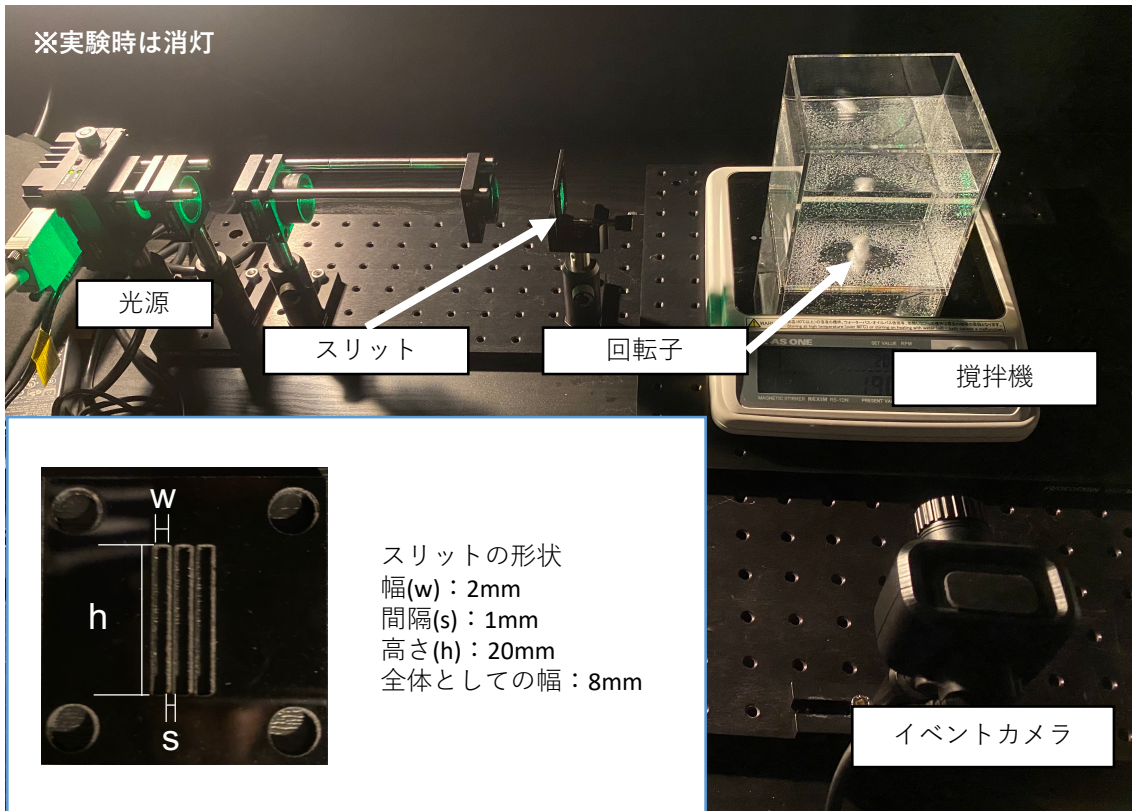


図 6.5: 検証 2 における実験環境

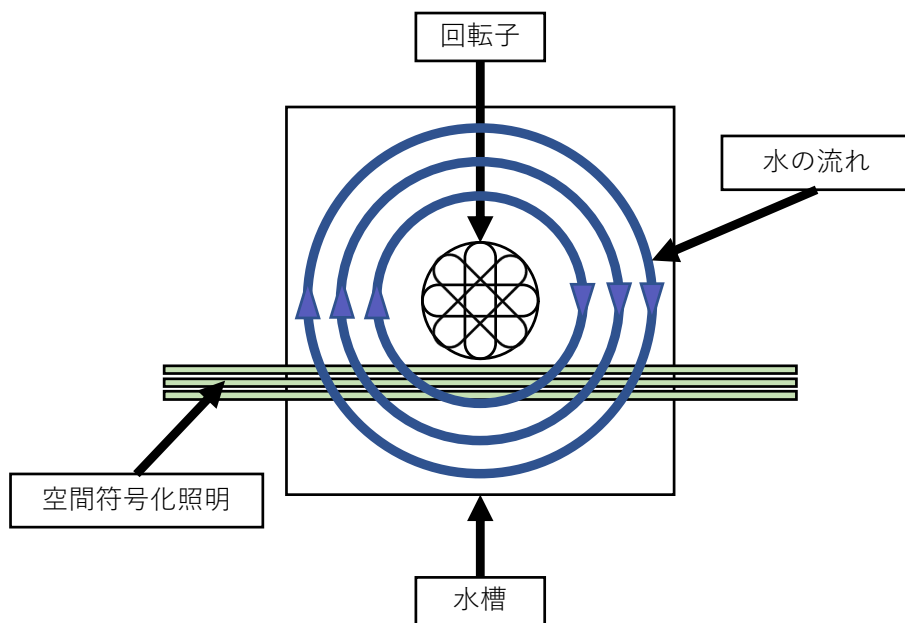


図 6.6: 水槽を真上から見たときの空間符号化照明と水流の位置関係.

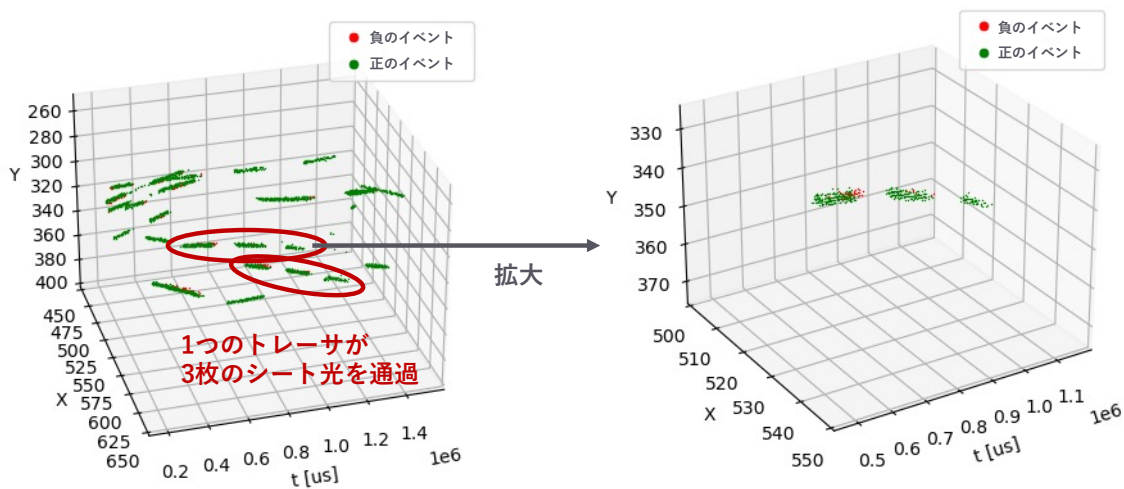


図 6.7: イベントカメラによって撮影されたイベントデータの画素座標 (X, Y) と時刻 t による三次元プロット. (左図) 撮影データから、空間符号化照明領域のみを表示、(右図) 左図における 1 つのトレーサが 3 枚のシート光を通過した軌跡の拡大表示.

これは、シートの厚さや間隔に対して粒子径が小さくなったことにより、想定しているイベントの発生モデルと近くなったことが理由だと考えられる. しかし、4.2 節の実験結果と同じく、本実験で得られたトレーサの粒子径は 1 画素に収まらず、複数画素でイベントが発生しているため仮定と反する問題は依然として存在する.

6.3 今後の課題

ここまでの実環境実験において得られたイベントデータは、イベントカメラでの観測における粒子径が 1 画素に収まるという仮定に反しているという問題があった. この問題を解決する方法として、2 つの方法が考えられる.

1 つ目は、さらに粒子径が小さいトレーサを使用する方法である. 6.2 節での実験に使用したトレーサの粒子径は $90 \mu\text{m}$ であったが、文献 [2] によれば、粒子径が $1 \mu\text{m}$ のトレーサも存在する. ただし、粒子径が小さくなると散乱光の強度も下がるため、高出力なレーザー光源を照明として用いる必要がある.

2 つ目は、粒子が複数画素で観測されることを前提とした処理を行う方法である. 提案手法は、シート光の境界で発生したイベントから三次元位置の復元を行い、加速度や初速度の推定を行うため、シート光の境界で発生したイベントを決定する必要がある. そのため、まずクラスタリングによって 1 つの粒子によって発生したイベントをグループ化する. 次に、クラスタリングされたイベント群から、重心の推定を行い、トレーサ粒子の中心を求めることでシート光の境界で発生したイベントを決定する. この処理によって決定されたイベントを用いて、4.3 節で説明した三次元位置の復元と加速度や初速度の推定を行い、実環境における提案手法の有効性を評価することが今後の課題である.

第7章 まとめ

本論文では、高速な流れにおけるトレーサの三次元的運動の可視化を目的として、高い時間分解能を特長とするイベントカメラとイベントカメラに特化した照明の符号化の組み合わせによる手法を提案した。本手法は、(1) イベントカメラの高時間分解能という特長によって高速な流れを捕捉可能、(2) トレーサのみがイベントとして獲得されるためトレーサの検出処理が不要、(3) 照明の空間符号化により単一のイベントカメラでトレーサの三次元運動の計測が可能、という特長を持つ。

実験では、シミュレーション環境において提案手法を用いた流れの推定実験を行い、提案手法を用いて流れの推定が可能であることを確認した。また、観測された三次元位置と推定結果から再構成された三次元位置の誤差を比較することで、光シートに対する進行方向を正しく選択可能であることを確認した。

また、実環境において提案手法を適用するための検討として、空気中におけるトレーサの自由落下運動と水中におけるトレーサの回転運動を撮影し、空間符号化照明によるイベントデータの確認を行った。その結果、得られたイベントデータにおけるトレーサの径が大きく、トレーサが1画素未満に収まるという仮定に一致しないことがわかった。実環境における提案手法の適用へ向けた今後の課題として、使用するトレーサの粒径を含めた実験環境の検討が必要である。また、トレーサが複数画素で観測された場合において推定に用いるイベントを決定するために、クラスタリングや重心推定処理が必要だと考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、暖かく御助言、御鞭撻を賜りました筑波大学図書館情報メディア系 三河正彦 准教授に深く感謝申し上げます。また、本研究の遂行にあたり、多大なる御助言、御鞭撻頂いた筑波大学システム情報系 青砥隆仁 助教に厚く御礼申し上げます。特に、青砥隆仁 助教には本研究の着想およびテーマ設定から研究の遂行、論文執筆、発表練習その他公私にわたるさまざまな御指導を頂きました。さらに、本研究を進めるにあたり貴重な御助言を頂いた東京大学次世代知能科学研究センター 鄭銀強 准教授に深く感謝致します。また、本研究の遂行にあたり的確な御助言を頂いた筑波大学図書館情報メディア系 藤澤誠 准教授に深く感謝致します。また、本研究を進めるにあたり、細やかな御助言、御鞭撻を頂いた筑波大学システム情報系 高谷剛志 助教に心より御礼申し上げます。そして、研究活動において大変お世話になりました研究ソーシャルロボット研究室ならびに物理ベースコンピュータグラフィックス研究室の皆様にも心より感謝致します。最後に、研究活動および学生生活を見守ってくれた家族、大学院生活を共に過ごした友人たちに感謝致します。

参考文献

- [1] R. J. Adrian. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 23, No. 1, pp. 261–304, 1991.
- [2] 可視化情報学会（編）. PIV ハンドブック (第2版). 森北出版, 2018.
- [3] J. Westerweel, G. E. Elsinga, and R. J. Adrian. Particle image velocimetry for complex and turbulent flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 45, No. 1, pp. 409–436, 2013.
- [4] D. Drazen, P. Lichtsteiner, P. Häfliger, T. Delbrück, and A. Jensen. Toward real-time particle tracking using an event-based dynamic vision sensor. *Experiments in Fluids*, Vol. 51, No. 5, pp. 1465–1469, 2011.
- [5] D. Borer, T. Delbruck, and T. Rösgen. Three-dimensional particle tracking velocimetry using dynamic vision sensors. *Experiments in Fluids*, Vol. 58, No. 12, pp. 1–7, 2017.
- [6] Y. Wang, R. Idoughi, and W. Heidrich. Stereo Event-Based Particle Tracking Velocimetry for 3D Fluid Flow Reconstruction. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, pp. 36–53, 2020.
- [7] W. Stolz and J. Köhler. In-plane determination of 3D-velocity vectors using particle tracking anemometry (PTA). *Experiments in Fluids*, Vol. 17, No. 1, pp. 105–109, 1994.
- [8] A. K. Prasad. Stereoscopic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, Vol. 29, No. 2, pp. 103–116, 2000.
- [9] T. Hori and J. Sakakibara. High-speed scanning stereoscopic PIV for 3D vorticity measurement in liquids. *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, No. 6, pp. 1067–1078, 2004.
- [10] G. E. Elsinga, F. Scarano, B. Wieneke, and B. W. van Oudheusden. Tomographic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, Vol. 41, No. 6, pp. 933–947, 2006.
- [11] C. E. Willert and M. Gharib. Three-dimensional particle imaging with a single camera. *Experiments in Fluids*, Vol. 12, No. 6, pp. 353–358, 1992.
- [12] S. Y. Yoon and K. C. Kim. 3D particle position and 3D velocity field measurement in a microvolume via the defocusing concept. *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, No. 11, pp. 2897–2905, 2006.
- [13] J. Belden, T. T. Truscott, M. C. Axiak, and A. H. Techet. Three-dimensional synthetic aperture particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, Vol. 21, No. 12, p. 125403, 2010.

- [14] K. Lynch, T. Fahringer, and B. Thurow. Three-dimensional particle image velocimetry using a plenoptic camera. In *Proceeding of the AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, pp. 1–14, 2012.
- [15] C. Skupsch and C. Brücker. Multiple-plane particle image velocimetry using a light-field camera. *Optics Express*, Vol. 21, No. 2, pp. 1726–1740, 2013.
- [16] S. Shi, J. Ding, T. H. New, and J. Soria. Light-field camera-based 3D volumetric particle image velocimetry with dense ray tracing reconstruction technique. *Experiments in Fluids*, Vol. 58, No. 7, pp. 1–16, 2017.
- [17] S. Shi, J. Ding, C. Atkinson, J. Soria, and T. H. New. A detailed comparison of single-camera light-field piv and tomographic piv. *Experiments in Fluids*, Vol. 59, No. 3, pp. 1–13, 2018.
- [18] D. Mei, J. Ding, S. Shi, T. H. New, and J. Soria. High resolution volumetric dual-camera light-field PIV. *Experiments in Fluids*, Vol. 60, No. 8, pp. 1–21, 2019.
- [19] J. A. Mullin and W. J. A. Dahm. Direct experimental measurements of velocity gradient fields in turbulent flows via high-resolution frequency-based dual-plane stereo PIV (DSPIV). In *Proceedings of the International Symposium on Applications of Laser techniques to Fluids Mechanics*, pp. 1–13, 2004.
- [20] C. J. Kähler and J. Kompenhans. Fundamentals of multiple plane stereo particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, Vol. 29, No. 1, pp. S070–S077, 2000.
- [21] 木村一郎, 河野吉晴, 小笠原朝隆, 高森年. 色スペクトルを用いた流れ場の 3 次元速度ベクトル計測. 計測自動制御学会論文集, Vol. 27, No. 7, pp. 755–761, 1991.
- [22] T. Watamura, Y. Tasaka, and Y. Murai. LCD-projector-based 3D color PTV. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 47, pp. 68–80, 2013.
- [23] J. Xiong, R. Idoughi, A. A. Aguirre-Pablo, Abdulrahman B. Aljedaani, X. Dun, Q. Fu, S. T. Thoroddsen, and W. Heidrich. Rainbow particle imaging velocimetry for dense 3D fluid velocity imaging. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 36, No. 4, pp. 1–14, 2017.
- [24] J. Xiong, Q. Fu, R. Idoughi, and W. Heidrich. Reconfigurable rainbow PIV for 3D flow measurement. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computational Photography*, pp. 1–9, 2018.
- [25] J. Xiong, A. A. Aguirre-Pablo, R. Idoughi, S. T. Thoroddsen, and W. Heidrich. RainbowPIV with improved depth resolution—design and comparative study with TomoPIV. *Measurement Science and Technology*, Vol. 32, No. 2, pp. 1–11, 2020.
- [26] D. Noto, Y. Tasaka, and Y. Murai. In situ color-to-depth calibration: toward practical three-dimensional color particle tracking velocimetry. *Experiments in Fluids*, Vol. 62, No. 6, pp. 1–13, 2021.

- [27] F. Dinkelacker, M. Schäfer, W. Ketterle, J. Wolfrum, W. Stolz, and J. Köhler. Determination of the third velocity component with PTA using an intensity graded light sheet. *Experiments in Fluids*, Vol. 13, No. 5, pp. 357–359, 1992.
- [28] A. A. Aguirre-Pablo, A. B. Aljedaani, J. Xiong, R. Idoughi, W. Heidrich, and S. T. Thoroddsen. Single-camera 3D PTV using particle intensities and structured light. *Experiments in Fluids*, Vol. 60, No. 2, pp. 1–13, 2019.
- [29] M. Litzenberger, A. N. Belbachir, N. Donath, G. Gritsch, H. Garn, B. Kohn, C. Posch, and S. Schraml. Estimation of vehicle speed based on asynchronous data from a silicon retina optical sensor. In *Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 653–658, 2006.
- [30] C. Posch, T. Serrano-Gotarredona, B. Linares-Barranco, and T. Delbrück. Retinomorph event-based vision sensors: Bioinspired cameras with spiking output. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 102, No. 10, pp. 1470–1484, 2014.
- [31] G. Gallego, T. Delbrück, G. Orchard, C. Bartolozzi, B. Taba, A. Censi, S. Leutenegger, A. Davison, J. Conradt, K. Daniilidis, and D. Scaramuzza. Event-based vision: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 44, No. 1, pp. 154–180, 2022.
- [32] A. Mitrokhin, C. Fermuller, C. Parameshwara, and Y. Aloimonos. Event-Based Moving Object Detection and Tracking. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1–9, 2018.
- [33] P. Bardow, A. J. Davison, and S. Leutenegger. Simultaneous optical flow and intensity estimation from an event camera. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 884–892, 2016.
- [34] G. Gallego, J. E. A. Lund, E. Mueggler, H. Rebecq, Tobi Delbruck, and D. Scaramuzza. Event-Based, 6-DOF Camera Tracking from Photometric Depth Maps. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 40, No. 10, pp. 2402–2412, 2018.
- [35] A. Z. Zhu, N. Atanasov, and K. Daniilidis. Event-based visual inertial odometry. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 5391–5399, 2017.
- [36] Y. Zhou, G. Gallego, and S. Shen. Event-based stereo visual odometry. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 37, No. 5, pp. 1433–1450, 2021.
- [37] H. Kim, S. Leutenegger, and A. J. Davison. Real-time 3D reconstruction and 6-DoF tracking with an event camera. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, pp. 349–364, 2016.
- [38] Y. Zhou, G. Gallego, H. Rebecq, L. Kneip, H. Li, and D. Scaramuzza. Semi-dense 3D Reconstruction with a Stereo Event Camera. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, pp. 235–251, 2018.

- [39] H. Rebecq, G. Gallego, E. Mueggler, and D. Scaramuzza. EMVS: Event-Based Multi-View Stereo—3D Reconstruction with an Event Camera in Real-Time. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 126, No. 12, pp. 1394–1414, 2018.
- [40] N. Matsuda, O. Cossairt, and M. Gupta. MC3D: Motion Contrast 3D Scanning. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computational Photography*, pp. 1–10, 2015.
- [41] T. Takatani, Y. Ito, A. Ebisu, Y. Zheng, and T. Aoto. Event-Based Bispectral Photometry Using Temporally Modulated Illumination. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 15638–15647, 2021.