

## 論文の内容の要旨

論文題目 「複素荷重積分原理に基づくオプティカルフローの厳密解法に関する研究」

氏名 魏 大比

本論文は時間相関イメージセンサーを利用し、対象の速度計測を行った。また、それを運動によりぼやけた画像の復元や特定したターゲットへのトラッキングに応用した。

動画像から対象の動きのパラメータを推定する方法の研究は、既に1970年代から始められている。その応用は、対象や撮像系の動きの検出と追跡、対象の背景や他物体からの分離と三次元運動の決定、流体の流れ場の計測など多岐にわたり、その方法は、フレーム間のパターン整合、画像の時空間勾配の利用、時空間周波数フィルタリング、これらの大域的最適化による高精度化、多重解像度分解による高速化など、これも多種多様な方法が研究されてきた。

パターンの速度を計測する手法の一つに空間フィルター法は一様並進するパターンの速度を計測する工学的な一手法であり、平行スリットを像面に重ねて空間積分して得られた時系列信号に周期構造が見出され、それがスリットに垂直な速度成分を反映している。並進パターンの時空間周波数領域での分布を考慮することで空間フィルター法はより一般的に定式化されている。この方法はいくつかの問題点が知られている。1) パターンに空間フィルターに応答する空間周波数成分が含まれない場合、この方法を適用できない。2) フーリエ変換とする積分範囲が広く、その範囲内で対象の速度は一様でなければいけない。すなわち、速度ベクトルは時間的にも空間的にも一様と仮定する必要がある。したがって、対象速度の空間的な分布を測定するには適用できない。これらの問題は後述の時間相関イメージセンサーを利用し、時間軸と空間軸を交換することで解決される。

また、時空間微分から推定する方法では、像点の明るさの移動不変性を記述する時空間微分方程式であるオプティカルフロー制約式を利用する。ただし、オプティカルフローとは、3次元中の運動物体が2次元平面に結像して生じる明暗の動きを指す。しかし、2個の未知数に対して1本の式しかありませんので情報として十分ではない。よって、速度ベクトル決定に要する自由度を補うために滑らかさなどの拘束条件を導入する。また、精度と速度測定レンジを向上するための座標変換や多重解像度化、時間的連続性の活用など、多くの関連研究がある。しかし、偏微分を求めるには離散的な差分演算で近似する必要があり、その中で特に時間差分の計算には連続2フレーム以上の画像を必要し、連続フレーム間で移動量が大きい場合、その近似が破綻するなど悪影響が甚大となります。本論文はそれらの問題に踏みたまえ、解決策を提案した。

特殊なセンサーの開発と応用もこの分野で重要であり、多くの試みがなされている。アナログ電子網膜、スマートピクセル、ビジョンチップやそれらの応用などである。我々も、多種多様な2次元センシングと映像化に活用可能な汎用の撮像デバイスとして三相時間相関イメージセンサー(3PCIS)を開発してきた。3PCISでは、時間変化する入射光と任意の2自由度の外部参照信号との

1フレームにわたる時間相関が全画素上で形成される。その特徴を生かし、実時間測光ステレオ、三次元計測、2次元エリプソメトリ、磁気光学映像法など、さまざまな分野にこのデバイスを適用してきた。

本研究の目的は、3PCISによって取得される新たな画像情報をオプティカルフロー検出に活用することにある。これまで試みられてきた3PCISの応用は、移動格子投影や回転照明、交流励磁など、測定対象に特定の入力を与えて応答を相関検出するものであった。これに対してオプティカルフロー検出は受動的であり、対象への働きかけはできない。そこで我々は参照信号を与えたときに相関画像が捉える新たな情報に着目する。この結果、複素正弦波参照信号に対して、従来の時空間微分方程式を拡張する有益な関係式(オプティカルフロー恒等式)が見いだされる。この関係が時間を含まずに厳密に成立することから、これまでのオプティカルフロー検出法の欠点であった時間軸方向の差分を必要とせず単一フレームのみでピクセルごとに対象の速度ベクトルを復元でき、フレーム間差分近似の精度に由来する対象速度の制限も取り除かれる。実験的にも時間相関イメージセンサーを用いることで、従来のOFC方法の適用速度範囲より大幅に超えた速度場でも、単一フレーム画素近傍ごとでの対象のオプティカルフローを復元可能なことを示した。また、その結果は従来のOFC手法より安定性を増し、精度も大幅に向上可能である。さらに、オプティカルフロー推定の方程式は2本あり、連続な積分形式の観測ゆえ、開口問題においても従来法のOFCを用いる局所最小2乗法より速度場を決定できる可能性が高まることが示された。

さらに、この方法の拡張を考え、有限区間に時空間フィルターによりオプティカルフローの厳密解法を導いた。これは区間空間フィルター法の拡張でもある。本論法では、時空間微分での三つの中、必要に応じ、任意のいくつかを消すことができ、いままで、オプティカルフロー推定の誤差要因のひとつに差分近似は必要としない。また、それらの精度に由来する対象の速度制限が除かれる。

オプティカルフロー推定の応用例として、ぼやけた画像の復元アルゴリズムを提案した。動きによりぼやけた画像の復元に関しては、ウインナーフィルターなど、様々な研究が行われており、大きな成果が挙げられている。近年では、モーションブラーが発生しにくい毎秒何千フレームに至る高速ビジョンセンサーが開発されている。しかし、高速であるためにビジョンセンサーから出力される情報量は膨大なものになってしまう。一方で、われわれは時間相関イメージセンサーを用いた変調撮像法により、強度画像と相関画像を利用し、対象のフレーム開始時刻と終端時刻の瞬時画像を復元する手法を提案する。さらに、この手法では、画像復元と同時に、オプティカルフローを再構成することが可能である。これによって、2枚の静止画像の点の対応付けは出来ることに意味する。実際、実験では、静止画像とオプティカルフローを同時に得ることを示した。さらに対象の運動速度に影響されないことも示され、これらのことから実系列静止画像を取得する可能性があることになった。

オプティカルフロー推定のもう一つの応用例として、特定ターゲットへのトラッキングシステムを提案した。室内環境では、我々は時間相関イメージセンサーに高い周波数の参照信号を用いたが、同じ周波数で点滅するLED以外の対象は時間相関イメージセンサーの相関画像に写らないことになる。その性質を利用し、ターゲットにLEDをつけ、LEDをトラッキングすることにした。しかし、室外では、特定

のLEDを取るのは困難であるため、時間相関イメージセンサーで推定したオプティカルフローを利用し、トラッキングを行った。実験結果では、室内と室外環境で全フレームにおいて共にリアルタイムで追跡できた。また、実験的にも理論的にも、室外環境では日射による明暗変化や対象の運動速度に影響されないことを示した。