

論文の内容の要旨

論文題目 高速光軸制御を用いた画像計測の研究

氏名 末石 智大

画像計測は対象の情報を時空間的に把握するための重要な基盤技術である。一方で画像計測技術はそれ単体で完結せずに、ロボットやコンピュータグラフィクス、ジェスチャー操作など何らかの応用へと結びつけるものである。画像計測技術には構造化照明法やマイクロレンズアレイなど、光学系などに工夫が施されたものが多く提案されている。しかし動的対象の画像計測において、レンズなどが静止した固定撮像系では画角と解像度、速度と光量、被写界深度と光量のトレードオフが存在してしまう。対象の向きにカメラの光軸を向け続ける光軸制御が一つの解決策であり、近年では駆動鏡面を用いた非常に高速な光軸制御系が実現されている。この高速光軸制御系によって、高速な運動対象であっても、十分に対象が画像認識できれば継続的かつ高解像度な画像計測が可能となる。

駆動鏡面を利用した高速光軸制御系では、ビームスプリッタを利用して同一光軸に他の光学装置が容易に導入可能であり、様々な応用が開発・実現されている。一方で高速光軸制御系における画像計測には大きな課題が二点存在する。一点目は、この系を利用した三次元計測を行う際に、光軸制御によって変化する動的なカメラ外部パラメータが必要となるが、その算出のための校正処理が電動雲台式などで用いられる手法では困難な点である。二点目は、プロジェクタなどによって光投影操作を行う際に、スクリーンとなる対象と投影コンテンツを区別したり、暗環境で対象を識別したりすることが困難である点である。十分に対象が画像認識できない場合、光軸が振動してしまい不安定な高速トラッキングによって投影情報や高解像度撮影情報の低解像度化を招いてしまう。

本論文は、この空間精度低下・光投影操作時のS/N比低下の問題に対し、高速光軸制御系に再帰照明系を組み合わせる解決策を提案するものである。第2章において、高速光軸制御技術のシステム構成、応用システムとその課題を詳細に説明した後、第3～5章でそれぞれの課題を解決できる提案手法、ならびにその応用を示した。

第3章では、高速光軸制御系を用いた運動物体の継続的高解像度三次元計測に向けて、高速光軸制御系の高精度な校正手法を提案した。ここでは、対象を高解像度に撮影する

ための望遠なレンズ系における浅い被写界深度, 二枚の駆動鏡面によって引き起こされる光学中心位置の大きな変動を含めたPan/Tiltの機械的構造が校正における課題となることを指摘した. 先行研究として, カメラ校正手法の一つである平面パターンを利用した手法を紹介し, 特徴点のブラーが校正精度に影響することを紹介した. また, 電動雲台式のPan/Tiltカメラ校正として, 回転中心・光学中心一致の仮定や自由な二つの回転軸によるモデルを紹介した. これらの先行研究を踏まえて前述の二つの課題に対し, 再帰性反射校正器具と同軸落射照明による再帰照明系を導入することで極めて小さな絞りでも校正パターンを観測可能とする被写界深度増大手法, 鏡像変換に基づくPan/Tiltモデルの定式化と単眼におけるバンドル調整手法を提案した. 広い校正利用可能範囲を生み出す被写界深度の増大を評価し, 単眼システムでの高い校正精度, ならびにステレオ系での高い三次元計測精度を実験により示した.

第4章では, 光投影操作時における高いS/N比の画像計測に向けて, 再帰照明系を利用した照明条件に頑健な高速トラッキング手法を提案し, その応用としてのダイナミックプロジェクションマッピングを示した. まず既存の投影型拡張現実感システムにおける, プロジェクタ・カメラ系の大きなレイテンシに起因した動的対象への幾何学的不整合を紹介し, レイテンシの小さなプロジェクタ・カメラ系と対比しつつ, 解決方針の一つである高速光軸制御系を用いた「るみぺん」システムの有用性を述べた. そして画像計測における課題を指摘しつつ, 再帰性反射背景を導入して対象のシルエットを認識する高速トラッキング手法を提案した. 同軸落射照明や投影コンテンツの設定方法, ならびにトラッキング対象以外を追従しないようにするための背景差分処理・適応的ウィンドウ法も同時に提案した. 再帰照明系における様々な条件での見え方の違いを予備実験で調べ, 照明条件や遮蔽に対する高いトラッキング性能を示した. 高速トラッキング中に対象の姿勢推定を含めた場合の投影像の遅れを含んだ見え方も示し, 低レイテンシかつ低速なプロジェクタの有用性を示唆した. 最後に, ボールや紙をスクリーンとし, 卓上なども利用したダイナミックプロジェクションマッピングの応用例を示した.

第5章では, 第4章のシルエット認識を利用した高速トラッキング手法の応用として, 高速光軸制御系を利用した高速飛翔体の衝撃波画像計測手法を提案し, 衝撃波の非定常状態を観測した. 音速などの高速で飛翔する物体の挙動の詳細な理解は犯罪現場における鑑定捜査などに有用であり, 特に実飛翔体周囲の衝撃波の挙動を長時間かつ高解像度に画像計測できることが望ましい. しかし, 既存の平行光を利用したシュリーレン法などの光学的可視化手法では計測時間・解像度の両立が困難であった. そこで, Background Oriented Schlieren (BOS) 法と呼ばれる背景テクスチャを利用した光学的可視化手法としての縞状背景を含む再帰照明系と, 高速光軸制御系による対象の高速トラッキング手法を組み合わせたトラッキングBOS法を提案した. 飛翔体軌道に合わせてミラーを高速に回転させる予測軌道指令と, 高速飛翔体のビジュアルフィードバックに基づく操作量の加算変調によって, 高速飛翔体とその周囲の衝撃波を含んだ縞を, 継続的かつ高解

像度に撮像する手法であり、ミラーの応答を向上させる予測軌道指令補償器、画像中に背景縞を含んだ状況でのシルエット認識画像処理を先行研究より改良している。さらに同一光軸の記録用高速高解像度カメラによる計測画像において、衝撃波による揺らぎを含む背景の縞のみからBOS法を実行するための参照画像生成処理も提案することで、単一計測画像のみから衝撃波を可視化することを可能とした。固定撮像系と比較してモーションブレンダーにして5倍程度、計測時間にして10倍以上の衝撃波画像計測を可能とし、衝撃波の非定常状態とみられる揺らぎの観測に成功した。

本論文の主張のまとめとしては、高速光軸制御の画像計測における空間精度・S/N比という新たな課題に対し、再帰照明系を利用した基盤技術ならびにその応用を示した。基盤技術として、高精度な校正手法による高速光軸制御系を用いた広範囲での高い三次元計測精度の達成、そして照明変動に頑健な高速トラッキング手法を示した。応用展開として、その高速トラッキング手法に基づくダイナミックプロジェクションマッピングと高速飛翔体の衝撃波画像計測を示した。