

氏名(本籍)	中野 学			
学位の種類	博士(工学)			
学位記番号	博甲第 9818 号			
学位授与年月日	令和 3 年 3 月 25 日			
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当			
審査研究科	システム情報工学研究科			
学位論文題目	Perspective-n-Point 問題とその派生問題に対する安定かつ高速な解法に関する研究			
主査	筑波大学 教授	博士(工学)	北原 格	
副査	筑波大学 教授	工学博士	坪内 孝司	
副査	筑波大学 教授	博士(工学)	亀田 能成	
副査	国立情報学研究所 教授	博士(工学)	杉本 晃宏	
副査	産業技術総合研究所 主任研究員	博士(情報科学)	櫻田 健	

## 論文の要旨

本論文では、 $n$  点の 3 次元座標とそれらの画像平面上での観測点座標から回転行列と並進ベクトルといったピンホールカメラの外部パラメータを推定する Perspective-n-Point (PnP) 問題の解法について論じている。さらに、内部パラメータの焦点距離を推定する PnP<sub>f</sub> 問題、レンズ歪みを推定する PnP<sub>f<sub>r</sub></sub> 問題へと議論を拡張的に展開している。最少情報量である 3 組の対応から外部パラメータを推定する P3P 問題が代数的変数変換を用いることで高速かつ安定に解けること、特異値分解を介する従来手法と比べ簡潔な導出が可能という利点を有することを述べている。対応点数を一般化した PnP 問題の解法では、回転行列の表現に依存しない最適性条件を導くことで、従来不安定とされていた Cayley 変換による回転行列表現を高速かつ安定な計算を可能にする手法を考案している。グレンナー基底を用いて全ての局所解を列挙するため、3 次元点の点数や分布に依存せず大域的な最適解が得られることが保証される。誤差関数を二つの近似部分問題に分割することにより PnP、PnP<sub>f</sub>、PnP<sub>f<sub>r</sub></sub> の三つの問題を同一アプローチで高速に解く手法を考案している。グレンナー基底を用いることで、3 次元点の分布への一般性を有しつつ従来手法と同等の安定性を実現している。さらに、3 次元点の分布を平面と非平面に場合分けすることで、高速性を安定性を維持しつつ向上させる手法について述べている。

序論となる第 1 章で、本論文の主題である PnP 問題およびその派生問題について述べた後、第 2 章では、PnP 問題の応用事例と解法に要求される課題を整理し、それらの課題に対する従来手法と PnP<sub>f</sub>、PnP<sub>f<sub>r</sub></sub> 問題への拡張的発展までの経緯を俯瞰的に解説している。第 3 章では、本論文で提案する PnP 問題解法と関連が深い研究について紹介している。第 4 章では、本論文を読み進める上で必要となる、ピンホールカメラモデルに基づく射影幾何、および、回転行列の表現方法や誤差関数の定義といった数理的知解について解説している。

第 5 章では、最少情報量である 3 組の対応から外部パラメータを推定する P3P 問題について、特異値分解を要しない新たな直接法を提案し、シミュレーション実験を通じて提案手法が数値的安定性と

処理速度について優れたバランスを実現していることを実証している。

第6章では、代数的誤差に基づく PnP 問題を非線形最適化問題として定式化し、代表的な従来手法の導出と特徴について紹介した後、グレブナー基底を用いて PnP 問題の大域的最適解を算出する手法を提案している。シミュレーションデータを用いた比較評価実験により、従来手法と同程度の安定性を4倍以上高速に求められることを示している。

第7章では、PnP、PnPf、PnPfr 問題を同一のアプローチで解く手法を二通り提案している。一つ目ではグレブナー基底を二つ目では DLT 法を用いて PnPfr 問題の部分問題を解く手法を解説し、シミュレーション実験の結果により三つの問題が同一アプローチで解けることを実証している。

最後に第8章にて、結論として論文全体のまとめと今後検討すべき課題に関して考察している。

## 審 査 の 要 旨

### 【批評】

$n$  点の3次元座標とそれらの画像平面上での観測点の座標の対応からピンホールカメラの外部パラメータを推定する PnP 問題、さらに内部パラメータも推定する PnPf、PnPfr 問題は、Visual SALM、Augmented Reality (AR)、3次元形状復元といった画像座標系と世界座標系間の射影変換に基づく様々なコンピュータビジョンアプリケーションの根幹をなす重要な問題である。本論文では、3次元点の数や分布の仕方（平面か非平面）が刻々と変化する実用的な状況下において、PnP 問題を代数学的変数変換に基づく非線形最適化問題として安定かつ高速に解く手法を提案し、緻密なシミュレーション実験と考察によって提案手法の有効性を実証する優れた成果をあげている。さらに、PnPfr 問題を二つの部分問題に分割することによって、PnP、PnPf、PnPfr の三つの問題を同一アプローチで解く手法を提案することにより、実用時には同時かつ複合的に生じるパラメータ変化への対応に成功している。PnP 問題の安定性の理論的評価、代数的誤差に由来する解の偏差解析、誤差分布特性の影響や頑健性の検証など、実用化に向けてはさらなる議論が必要な点もあるが、本論文は博士論文として相応しいものであると認められる。

### 【最終試験の結果】

令和 3年 2月 8日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

### 【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。