

## 学 位 論 文 題 名

不整地移動体のためのカメラ振動を考慮した高信頼性  
ステレオ計測

## 学位論文内容の要旨

実フィールドシステムにおいて、周辺環境より多様な情報を取得するために視覚センサが担う役割は大きい。しかし、実フィールドではセンサに対して加わる様々な外乱によって、正確な情報収集に支障をきたす場合が多い。従来の画像計測に関わる研究では対象物の隠れや変形、照明変動などの外乱に対する計測のロバスト性を高め、計測精度を向上させる多くの手法が開発されてきた。

本研究では、具体的なシステムと外乱として、ステレオシステムとカメラ振動を扱う。カメラに比較的大きな振動が加わり、対象物の撮像状態が悪化する際に、モーションステレオシステムにより得られる計測値のばらつきをモデル化し、計測値の信頼性を向上するための指標を得ることを目的としている。これまでに、カメラ振動による計測誤差およびその低減手法に関する研究がなされている。カメラ振動に起因する移動ボケに対して画像修復処理を施してステレオ対応性能を確保するアプローチがその一例である。移動ボケ関数に関する十分な事前知識がある場合や一様運動などの単純な場合には適用も検討可能と思われるが、実際に観測されるカメラ振動は単純な振動ではなく、上記のようなアプローチの適用が困難である場合も多い。また、これらの手法で画像修復が可能であるとしても、その計算コストは高く、リアルタイム処理に向かないことが予想される。そのほかにハードウェア的な対応案として、ダンパなどを用いて振動を抑制する方法もある。しかし、振幅の大きな振動や高周波の振動の場合、完全には除去することができない。それらにも対応できる高性能なダンパは存在するがコスト面に問題がある。これら従来手法の共通点は、計測誤差を除去することによりロバスト性を高めようとしている点である。

我々は、カメラ振動により生じる計測誤差要因をハードウェア的またはソフトウェア的に除去するのではなく、振動環境下において得られる計測値の信頼度を考慮し、カメラ振動に伴う計測誤差による影響が最小化されるように、システムパラメータを調整するモーションステレオシステムの構築を目指している。

本研究では、振動により生じる誤差の解析を行うために、振動試験機を用いて実験を行った。ランドマークを任意の位置に置き、計測を行っているため、真値の計測ができない。したがって、振動がない条件での計測結果を仮の真値として誤差解析を行った。計測誤差は確率分布の形で扱い、確率分布の平均値および標準偏差をパラメータとして用いる。我々はこれらパラメータを推定するモデルを構築するために、実験を行った。結果、水平方向および垂直方向の計測誤差の分布は一様分布に近似できることが確認できた。また、ステレオペアの左右画像に生じた振動が同様であり同期が取れている場合は視差誤差が生じないことが確認できた。また、振動により水平方向および垂直方向の計測誤差の平均値には影響がないことが確認された。また、標準偏差については、振動の振幅と正の相関、周波数を負の相関が得られた。この結果について、画像ブレに注目してモデルの構築を行った。具体的には、画像ブレにより生じる画像内におけるランドマークの変形を推定し、その変形による重心

位置ズレをシミュレーションにより再現, シミュレーション結果から計測誤差分布の標準偏差を推定するモデル式を構築した。

固定ステレオの場合は視差誤差は生じなかったが, モーションステレオのようにステレオペアの2枚の画像に生じる移動ボケが異なる場合は視差誤差が生じる。この場合の視差誤差の分布は実験により三角分布に近似できることが確認できた。また, 水平および垂直方向の計測誤差と同様に平均値にカメラ振動により変化しないことが確認できた。したがって, 標準偏差のみモデル化を行えば良いことがわかる。視差誤差は左右画像内における計測誤差の差分で求められること, 計測誤差は確率分布で定義されていること, 確率分布の一次結合の理論から, 視差誤差を推定するモデル式が導出できる。このモデル式について実験結果と比較・検討を行うと, 十分な推定精度を持つことを確認した。

ここで定義した計測誤差の推定モデルは画像内における誤差であるため, 3次元位置の誤差に換算する必要がある。そこで, 誤差を考慮したステレオ計算から真値を推定する式を導出する。パラメータは既知であるカメラパラメータおよび計測誤差モデルから推定される画像内の誤差パラメータとなる。したがって, この推定式から推定される3次元位置も確率分布の形で求められる。このようにして得られる3次元位置を対象物位置の存在確率と定義する。対象物位置の存在確率は対象物が存在するであろう範囲を確率分布で示すことができるため, 障害物回避などに応用することができる。また, 存在確率は範囲を指定して累積を求めることにより, その範囲に対象物が存在する具体的な確率を数値で求めることが可能となる。この数値を対象物位置の信頼度と定義する。対象物位置の信頼度は複数のランドマークが存在する場合に信頼度の高いデータのみを用いるなど情報の取捨選択に用いることができる。また, ステレオペアを選択する際に, 信頼度が最も高くなるように選択することにより, 最も信頼度の高い測定を行うことが可能となる。信頼度の有用性について, 実験データを用いて検証を行う。

以上より, カメラ振動パラメータである振動の振幅および周波数から画像内における計測誤差分布の標準偏差を推定するモデルを構築した。モデルの構築では画像ブレに注目をし, 画像内におけるランドマーク変形による重心位置ズレを推定することにより構築を行った。また, 平均値に関してはカメラ振動の影響を受けないことを確認した。

次に計測誤差を推定するモデルおよび誤差を考慮した真値を推定するステレオ式から, 3次元位置を確率分布の形で推定する式を導出した。これにより, 対象物位置を確率分布の形で得ることができ, 障害物回避などに利用することができる。また, 確率分布の範囲を指定し, 累積することによりその範囲に対象物が存在する確率を具体的な数値で得ることができるようになった。これを対象物位置の信頼度定義し, 信頼度を用いることにより, より信頼性の高い計測が可能となった。

# 学位論文審査の要旨

主 査 准教授 田 中 孝 之  
副 査 教 授 金 子 俊 一  
副 査 教 授 五十嵐 一

## 学 位 論 文 題 名

### 不整地移動体のためのカメラ振動を考慮した高信頼性 ステレオ計測

実フィールドシステムにおいて、周辺環境より多様な情報を取得するために視覚センサが担う役割は大きい。しかし、実フィールドではセンサに対して加わる様々な外乱によって、正確な情報収集に支障をきたす場合が多い。従来の画像計測に関わる研究では対象物の隠れや変形、照明変動などの外乱に対する計測のロバスト性を高め、計測精度を向上させる多くの手法が開発されてきた。本論文では、具体的なシステムと外乱として、ステレオシステムとカメラ振動を扱う。従来手法では、画像処理技術を用いた移動ボケの補正やダンパを用いた振動抑制などの手法が取られてきた。しかし、本論文では、カメラに比較的大きな振動が加わり、対象物の撮像状態が悪化する際に、モーションステレオシステムにより得られる計測値のばらつきをモデル化し、計測値の信頼性を向上するための指標を得る手法について論じている。

まず、本論文では、振動により生じる誤差の解析を行うために、振動試験機を用いて振動実験を行っている。ランドマークを任意の位置に置き、振動がない条件での計測結果を仮の真値として誤差解析を行っている。計測誤差は確率分布の形で扱い、確率分布の平均値および標準偏差をパラメータとして用いており、分布の変動について実験的に調べている。結果、水平方向および垂直方向の計測誤差の分布は一樣分布に近似できることを確認している。また、ステレオペアの左右画像に生じた振動が同様であり同期が取れている場合は視差誤差が生じないことを確認している。さらに、確率分布のパラメータについては、振動により水平方向および垂直方向の計測誤差の平均値には影響がなく、また、標準偏差については、振動の振幅と正の相関、周波数を負の相関が得られている。この結果について、画像ブレにより生じる画像内におけるランドマークの変形を推定し、その変形による重心位置ズレをシミュレーションにより再現し、シミュレーション結果から計測誤差分布の標準偏差を推定するモデル式を構築している。

次に、モーションステレオシステムに注目し、固定ステレオの場合には生じなかった視差誤差がステレオペアの左右画像に生じる振動が異なる場合には生じることを実験的に確認している。この場合の視差誤差の分布は実験により三角分布に近似できること、水平および垂直方向の計測誤差と同様に平均値はカメラ振動により変化しないことを確認している。視差誤差の標準偏差の推定には、視差誤差は左右画像内における計測誤差の差分で求められること、計測誤差は確率分布で定義されていること、確率分布の一次結合の理論から、推定モデル式を導出している。このモデル式について実験結果と比較・検討を行い、十分な推定精度を持つことを確認している。

上述したモデル式を用いて、対象物の3次元位置を推定する式を導出している。導出された3次元位置も計測誤差と同様、確率分布の形で表現している。このようにして得られる3次元位置を対象物位置の存在確率と定義しており、対象物位置の存在確率は対象物が存在するであろう範囲を確率分布で示すことができるため、障害物回避などに応用することができる。また、存在確率は範囲を指定して累積を求めることにより、その範囲に対象物が存在する具体的な確率を数値で求めることが可能となることを利用し、このようにして得られる数値を対象物位置の信頼度と定義している。

最後に、本論文では、実験データを用いて対象物位置の信頼度の有効性について検証している。ステレオペアで選択された左右画像それぞれのカメラ振動が同様である場合は、ベースラインが最も長いとき、最大の信頼度が得られることを確認している。また、各カメラ位置において振動が異なる場合は、必ずしもベースラインが最も長いとき、最大の信頼度が得られるとは限らず、カメラ振動も考慮しなくてはならないことを確認しており、信頼度の有効性を確認している。

以上を要するに、著者は、カメラ振動を考慮した高信頼性なステレオ計測の手法を提案し、実験およびシミュレーション的にその有効性を明らかにしている。従来手法は計測誤差を除去することによりロバスト性を高めようとしているが、本手法は発生した誤差はそのまま扱い、信頼性の高い計測を目指すという新規性の高い手法である。よって、著者は北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格があるものと認める。