

水平合焦面の鮮鋭度の変化を用いた距離推定 Depth Estimation by using Sharpness of Horizontal Planes of Sharp Focus

大畑 雅幸[†] 池岡 宏[†] 浜本 隆之[†]
Masayuki Ohata Hiroshi Ikeoka Takayuki Hamamoto

1. はじめに

距離推定は、物体認識や衝突回避など様々な分野で利用される重要な技術である。我々も、アオリ撮像の被写界深度特性を用いることで、少ない撮像枚数で奥行き方向に広範囲な距離推定が可能な方式を提案してきた[1]。本稿では、本方式による距離推定の高速化について検討する。これにより、広範囲を高速に移動する物体に対しても、リアルタイムで距離推定ができる。

2. 水平合焦面を用いた距離推定方式

図1のように撮像面に対しレンズを傾けることで、合焦面を水平にできる。その際、被写界深度は距離に応じて縦方向に広がるため、物体面上のエッジ検出領域の広がり幅から距離を推定できる。しかし、図2の様な1枚の水平合焦面画像より被写界深度を正確に判定することが難しいため、異なる高さに等間隔に配置した3枚の水平合焦面画像を用いる。具体的には、ラプラシアンベースのHPFで各画素の鮮鋭度を求め、y軸方向の鮮鋭度をガウス曲線で近似する。この鮮鋭度曲線は、ピーク値を d_p 、下段の合焦面位置を y_0 、合焦面間隔を Δy 、標準偏差を σ とすると式(1)で表されるが、この内の y_0 、 Δy 、 σ は距離($depth$)に依存する。

$$d_i = d_p \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y - y_0 + i \cdot \Delta y}{\sigma}\right)^2\right) \quad (i=0, 1, 2) \quad (1)$$

この式から得た三つの鮮鋭度 d_i と画像から求めた三つの鮮鋭度 d'_i で表される式(2)の E 値を最小とする d_p と $depth$ を探索し、その際の $depth$ を正解距離値とする。

$$E = (d_0 - d'_0)^2 + (d_1 - d'_1)^2 + (d_2 - d'_2)^2 \quad (2)$$

しかし、 d_p と $depth$ の組み合わせ数は非常に多く、この最小値探索処理がボトルネックとなる。そこで、本研究では探索処理を高速化することで、本方式の利便性の向上を図った。

3. 実時間処理に向けた高速化手法

3.1 探索範囲の限定

我々は、式(2)の E 値の最小値探索処理にニュートン法を用いることにした。これはある初期点から放物線近似を繰り返すことで、極値を求める手法である。しかし、図3のように正解である極小値の周辺には複数の極値が存在するため、ニュートン法を単純に用いただけでは誤った極値を算出する可能性がある。そこで、我々は予めy座標ごとに推定可能な $depth$ の範囲が限定されることを考慮することで、放物線近似の処理回数を削減しつつ、誤算出を抑制できるようにした。その詳細は以下の通りである。

本実験で採用した光学系では、距離値($depth$)の増加に伴い、画像上で観測される鮮鋭度曲線の標準偏差(σ)及び合焦面間隔(Δy)は小さくなり、合焦面位置(y_0)は上方に向かう。

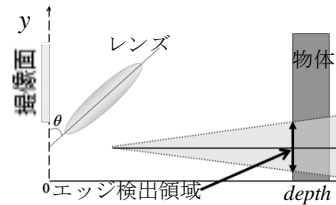


図1 アオリ撮像



図2 水平合焦面画像

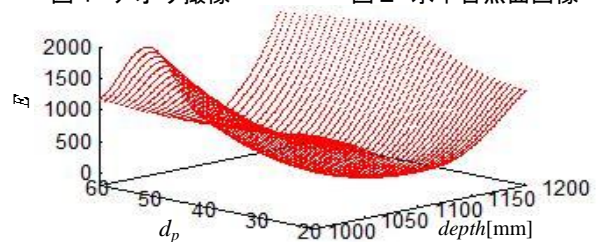


図3 極小値付近の3次元グラフ

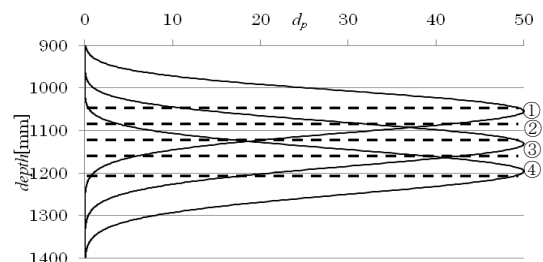


図4 注目y座標の $depth$ と d_p

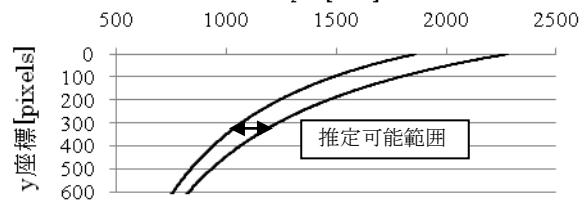


図5 y座標と推定可能距離

式(1)より、あるy座標の三つの鮮鋭度曲線は $depth$ に対し図4のように変化する。その際、ノイズ分離用の閾値以上に三つの鮮鋭度が存在できる範囲が距離値($depth$)に応じて制限され、その範囲は図5の様に、注目画素(y座標)ごとに異なる。

さらに、上で決定した推定範囲を三つの鮮鋭度 d_0, d_1, d_2 の大小関係により、次の様に四つのパターンに分類する(図4)。

- ① $d_0 < d_1 < d_2$
- ② $d_0 < d_2 < d_1$
- ③ $d_2 < d_0 < d_1$
- ④ $d_2 < d_1 < d_0$

①の場合は、 $depth$ において一番手前の範囲を、②の場合は中間より手前の範囲を、③の場合は中間より奥の範囲を、④の場合は一番奥の範囲に分類されるので、探索範囲は4分の1になる。

[†]東京理科大学 工学部電気工学科
Tokyo University of Science

このように、 y 座標と三つの鮮鋭度の大小関係から、鮮鋭度曲線の形状が絞り込まれ、距離値($depth$)の探索範囲を限定できる。

3.2 パラメータの決定方法

前節では $depth$ 及び d_p の範囲の絞り込みができたが、これだけでは、図3の様な複雑な曲面で構成されている E 値への対応は十分ではない。特に、 d_p 固定時の $depth$ の変化に伴う E 値の変化は図6の様に多数の極値を保有しており、単純にニュートン法を用いただけでは誤算出の危険がある。一方、 $depth$ 固定時の d_p の変化に伴う E 値の変化は図7の様に単純であり、最小値となる極値を求めやすい。

よって、図8の様に1次ニュートン法を繰り返すことで、演算回数を最小限にとどめられる。その手順は、まず、仮の d_p を用いて1次ニュートン法を実行し、暫定の最小 E 値が得られる仮の $depth$ を求める。次に、この仮の $depth$ を使い再度1次ニュートン法を実行し、暫定の最小 E 値が得られる最終 d_p を求める。そして、この最終 d_p を使い、最小 E 値が得られる最終 $depth$ を決定する。

もし、先に仮の $depth$ を与えて d_p から求めると、上述の方法よりニュートン法の実行回数が1回増えてしまう。その理由は、図9と図10から d_p を決定する際の $depth$ の変化率に比べ、 $depth$ を決定する際の d_p の変化率が非常に小さいためである。

3.3 提案方式による距離推定の手順

3.1.3.2節の内容を考慮し、以下の手順で $depth$ を決定する。

1)画像から求まる三つの鮮鋭度の最大値を d_p (初期点)とする。

2)注目画素と三つの鮮鋭度の関係から $depth$ の推定範囲を絞り、その内三等分した $depth$ の中で E 値が最小となるときの値を $depth$ (初期点)とする。

3) 1),2)より求まる初期点において、 d_p を固定した1次ニュートン法で仮の $depth$ を決定する。

4) 1)の d_p と3)で求めた仮の $depth$ を用い、 $depth$ を固定した1次ニュートン法で d_p を決定する。

5)4)の d_p と3)の仮 $depth$ を用い、 d_p を固定した1次ニュートン法で $depth$ を決定する。

以上のように、1次ニュートン法を3回繰り返すことで、式(2)が極小となる $d_p, depth$ を確実に決定できる。

4. 実験による検証

4.1 実験環境

距離推定における高速化を実証するために、設定が比較的簡単な机上での実験を行った。本実験では、サイズが $22.8\text{mm} \times 14.8\text{mm}$ のイメージセンサと焦点距離が 90mm で絞りが 5.6 の光学系を用いた。レンズの傾斜角度を 38.0° 、レンズ・センサ間距離を 116.5mm とすることで合焦点を水平にし、高さの異なる三つの合焦点でそれぞれ8ビット白黒画像を撮像した。なお、合焦点は地面から、 10.0mm 、 20.0mm 、 30.0mm の高さに設定したが、合焦点は厳密に水平とならなかった。しかし、今回の環境では推定範囲が狭いため、その影響は考慮しなかった。

4.2 実験結果

図2のように距離推定の対象物体を車の模型とし、これをカメラから距離 1108mm の位置に配して撮像した。図2中の白枠内 (200×200 画素) において各鮮鋭度を求め、 y 座標との関係から探索範囲を限定し、3.3節の手順で距離推定を行った。

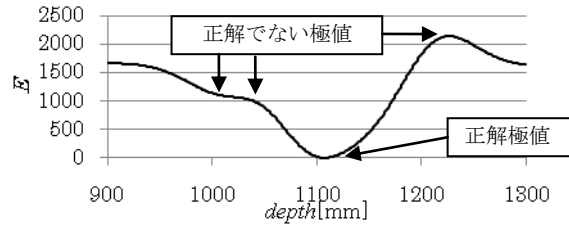


図6 正解 d_p 時の $depth$ と E の関係

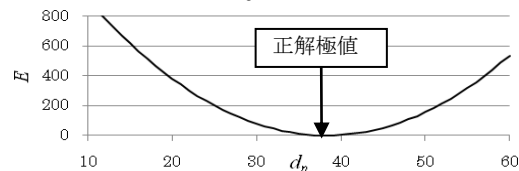


図7 正解 $depth$ 時の $depth$ と E の関係

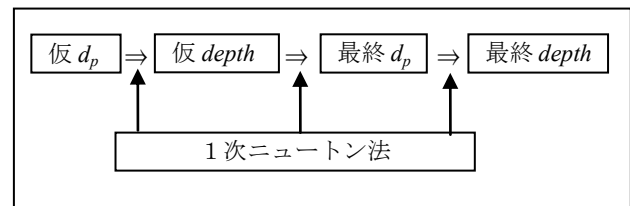


図8 ニュートン法によるパラメータ決定

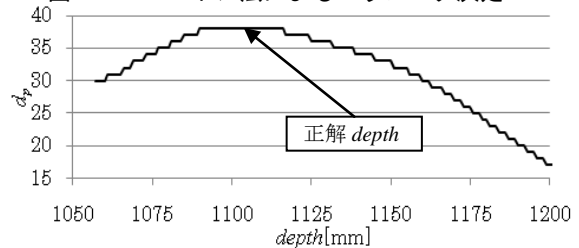


図9 $depth$ を変化させた時の極小 E 値となる d_p

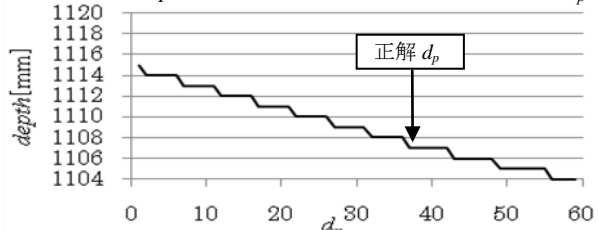


図10 d_p を変化させた時の極小 E 値となる $depth$

その結果、CPU が Core2Duo (2GHz) の PC を用いた場合、1フレーム当りの処理時間が従来方式による全探索で 315秒であったのに対し、本提案方式により 53m 秒まで低減させることができた。また、全探索時に距離推定できた画素は、提案方式でももれなく距離を推定でき、その推定精度は 1m あたり約 1mm の誤差であった。

5. まとめ

水平合焦点を利用した距離推定方式における最小値探索にニュートン法を導入し、その初期値決定アルゴリズムの最適化を図ることで、処理の大幅な高速化に成功した。今後は、鮮鋭度、 y 座標、距離値の関係テーブルをメモリ上にプリロードすることで、さらなる高速化を検討する予定である。

参考文献

[1]池岡宏, 浜本隆之, “水平合焦点の被写界深度の変化を利用した広範囲・実時間距離推定方式”, 映像情報メディア学会誌, Vol.64, No.3, pp.405-412(2010)