水平合焦面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

Real-Time Depth Estimation with Wide Detectable Range Using Variance of Depth of Field by Horizontal Planes of Sharp Focus

学生会員 池岡 宏[†], 正会員 浜本隆之[†]
Hiroshi Ikeoka[†] and Takayuki Hamamoto[†]

Abstract We have been investigating real-time depth estimation techniques of a wide detectable range. These techniques involve the use of tilted optics imaging to use variance of depth of field on the horizontal planes of sharp focus. They need far fewer multiple focus images than the conventional passive methods do, e.g., the Depth-from-Focus and the Depth-from-Defocus. Hence, our method gets rid of the bottleneck of conventional methods; the motion speed of optical mechanics is significantly slower than that of image processing parts. Therefore, it is suitable for applications that involve estimation of depth and that need a wide detectable range and real-time processing such as automation tasks.

キーワード：距離推定，被写界深度，アオリ撮像，DFD，DFF

1. ま え が き

コンピュータビジョンと呼ばれる視覚認識の技術は、イメージセンサやプロセッサなどのデバイスの発展に伴い、さまざまな分野で実用化が進んでいる。中でも距離推定技術は、物体同士の衝突回避や物体の形状認識など、幅広い分野で利用できることから極めて重要な技術の一つである。

画像情報を使った距離推定方式には、装置側から射出した光の反射をイメージセンサで捉えるアクティブ方式と、太陽や室内灯などの環境光の反射をイメージセンサで捉えるパッシブ方式がある。車載用途などのアプリケーションでは実時間処理が必須であるが、両方式とも比較や演算等に多くの処理量を必要とするため、高速化が課題となる。これまで、スマートイメージセンサやFPGAなどのデバイスを使って、この課題を克服する取組みが行われているが、アクティブ方式を採用することが多かった^{1)~5)}。

一方筆者らは、光を射出する仕組みが不要でシンプルなシステム構成を特徴とするパッシブ方式により、車載用途などに応用し易い距離推定システムの開発を試みている。パッシブ方式には、視差情報などを利用する多眼方式や、多重フォーカス画像を入力とし、合焦位置に応じた画像ぼけに着目するDepth-from-focus (DFF) 方式とDepth-from-defocus (DFD) 方式などがあるが^{6)~9)}、筆者らはDFF方式

によるシステム開発を行ってきた¹⁰⁾。

DFF方式は、画素毎に多重フォーカス画像中で最も先鋭度の高い合焦位置を見つけ、距離推定を行う方式である。したがって、実時間処理では極短時間で多重フォーカス画像を取得する仕組みが必要となるが、撮像可能な画像枚数を多くするのは容易ではなく、推定分解能が大きく低下する。一方、DFD方式は、画像のぼけ量の変化から距離を推定する方式であり、撮像枚数が非常に少なく済むが、一般にぼけ量の解析が可能な範囲が狭く、やはり車載用途など広範囲の検出が必要なアプリケーションでは扱いにくい。

そこで筆者らは、少ない撮像枚数でありながら、広い検出範囲を有する新たな距離推定方式の確立を目指した。一般に、DFFやDFD方式といった画像ぼけを利用する方式では、推定対象までの距離に応じて変化する被写界深度 (DOF: Depth of field) は、推定精度を劣化させる原因の一つになっていた。筆者らは、被写界深度が距離値に依存する物理量であることに注目し、逆にこれを距離推定に活用することを考えた。ただし、一般的な光学系では、従来方式と同様の撮像枚数の厳しい制約が生じる。したがって、筆者らはアオリ撮像により、水平に配置した合焦面 (POF: Plane of sharp focus) を用いることにした。

これまで、水平合焦面で得た画像にエッジ検出フィルタをかけ、撮像面でのエッジ検出位置 (縦位置) で距離推定を行う方式が提案されている¹¹⁾。しかし、縦方向に①テクスチャのコントラストが不変である、②距離値の異なる面が存在しないといった拘束があり、用途が限られる。一方、本論文で提案する方式は、DFFやDFD方式と同様に画像ぼ

2009年8月18日受付，2009年11月5日再受付，2009年12月10日採録

[†] 東京理科大学 大学院 工学研究科

(〒102-0073 千代田区九段北1-14-6, TEL 03-3260-4271)

[†] Graduate School of Engineering, Tokyo University of Science

(1-14-6 Kudankita, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0073, Japan)

けを扱うことで画素独立に距離推定でき、広範囲・実時間アプリケーションに適用可能な方式となっている。

本稿では、まず一般的な多重フォーカス画像を入力とし、画像ぼけを利用する距離推定方式の問題点について説明する。次に、提案方式で利用する光学系として、アオリ撮像の原理とその被写界深度について説明し、それを利用した距離推定を提案する。最後に提案方式の評価実験について述べ、その有効性について確認する。

2. 画像ぼけを利用した従来方式の実時間利用時の問題点

図1のように、DFFやDFD方式では、イメージセンサに正対する合焦面 (POF) を多数配置し、多重フォーカス画像を取得することで、距離推定を行う。

DFF方式は、画素毎に多重フォーカス画像中で最も先鋭度の高い合焦位置を見つけ、距離推定を行う方式である。単純な加減算および比較処理で済むことから、小規模な回路でハードウェア化が可能で、高速に処理ができる。また撮像位置・枚数の自由度が高い。ただし実時間計測を考えると、センサ前段において極短時間で多重フォーカス画像を取得する光学的仕組みが必要となる。したがって、①高速な機械的動作による方式、②撮像枚数と同数の光学系を利用する分光方式、の何れかで対応することになる。加えて広範囲の計測を要する場合には、非常に多くの合焦面が必要になるので、①、②ともに装置の肥大化や光量低減を招くことになる。そのため、広範囲距離推定と実時間処理の両立は難しい。

一方、DFD方式は、画像のぼけ量の変化から距離を推定する方式であり、DFF方式と比較し撮像枚数が非常に少なく済む。しかし、一般にぼけ量の変化を検出できる範囲は狭いため、物体表面の微細な凹凸等の計測には適しているが、車載用途など広範囲の検出が必要なアプリケーションでは扱いにくい。

そこで、筆者らは光学系や処理に工夫を加えることで、上記のような問題に対処することにした。

3. アオリ撮像と被写界深度を利用した距離推定

3.1 アオリ撮像と傾斜合焦面

本方式ではアオリ撮像を用いる。これは、イメージセンサなどの撮像面とレンズ主平面を非平行に配置し、撮像する手法である。その際の合焦面 (ピント面) 位置は以下のよう求めることができる。

図2のように、まず、 $z=0$ の位置にイメージセンサを設置する。その際、通常はイメージセンサ面に対し平行に配置されるレンズ主平面を、アオリ撮像では θ だけ傾けて設置する。これにより、一般的な光学系とは異なり、イメージセンサに対して傾斜した合焦面が発生する。つまり、手前と奥側に同時に合焦点が生じる。ここで、レンズの焦点距離を f 、レンズ回転中心を (L_y, L_z) とし、またレンズ回転中

図1 従来方式による距離推定 (DFF, DFD)
Conventional methods (DFF, DFD).

図2 傾斜レンズによる合焦面 (POF) の配置
POF position using a tilted lens.

心から第1主点および第2主点までの距離をそれぞれ H, H' とした場合、図2のように各焦点を通る二つの光線および二つの主点を通る光線の交点が合焦点である。具体的には、 $(Y, 0)$ より第2主点に向かう光線と同じ傾きを持ち、第1主点を通して合焦面に向かう光線は、

$$y = \frac{(L_y - Y + H' \sin \theta)z + Y(L_z + H \cos \theta) - (H + H')(L_z \sin \theta + L_y \cos \theta)}{L_z - H' \cos \theta} \quad (1)$$

で表わせる。また、センサ面上の $(Y, 0)$ より第1主平面上に垂直に入る光線は、第1主平面上の点

$$\begin{aligned} &(\cos \theta (L_z \cos \theta - L_y \sin \theta + H) + Y \sin \theta \cos \theta, \\ &-\sin \theta (L_z \cos \theta - L_y \sin \theta + H) + Y \cos^2 \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

と交わり、この点から出る光線は、前側焦点

$$(L_z + (H + f) \cos \theta, L_y - (H + f) \sin \theta) \quad (3)$$

を通り合焦面に向かうが、その光線の式は、

$$\begin{aligned} y = & \frac{1}{\cos \theta (L_z \cos \theta - L_y \sin \theta) - L_z + Y \sin \theta \cos \theta - f \cos \theta} \\ & \times \left[(-\sin \theta (L_z \cos \theta - L_y \sin \theta) - L_y + f \sin \theta + Y \cos^2 \theta)z \right. \\ & + \left\{ (L_z \cos \theta - L_y \sin \theta) (L_z \sin \theta + L_y \cos \theta - Y \cos \theta) \right. \\ & \left. \left. + (L_z \sin \theta + L_y \cos \theta) H - Yf \cos \theta - YH \cos \theta \right\} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

で表される。式 (1) および式 (4) から、この合焦位置の y 座標、 z 座標をそれぞれイメージセンサ上の Y で表すことができ、さらに、この Y を消去することで、次のような合焦面の式が得られる。

$$y = \frac{1}{\sin \theta (L_z - H' \cos \theta)} \left\{ (L_z \cos \theta - f - H' \cos^2 \theta) z - L_z (L_z \cos \theta - L_y \sin \theta + H - H') + f \cos \theta (H + H') - H' \sin \theta (L_z \sin \theta + L_y \cos \theta) + HH' \cos \theta \right\} \quad (5)$$

ただし、イメージセンサと対象物体の距離がレンズ主点間隔より充分大きい場合は、薄レンズとみなして

$$H = H' = 0 \quad (6)$$

とすることで、式 (5) より次式が得られる。

$$y = \frac{1}{\sin \theta} \left(\cos \theta - \frac{f}{L_z} \right) z - \frac{L_z \cos \theta - L_y \sin \theta}{\sin \theta} \quad (7)$$

この時、イメージセンサ面、レンズ主平面、そして式 (7) で得られた合焦面が

$$\left(-\frac{L_z \cos \theta - L_y \sin \theta}{\sin \theta}, 0 \right) \quad (8)$$

の一点で交わることが知られている。これをシャインプルーフの法則という。

なお、今回はレンズを回転させることで、傾斜合焦面を発生させたが、イメージセンサを傾斜させることでも、アオリ撮像は可能である。ただしその場合、イメージセンサに正対している物体さえも歪んでセンサ上に投影される。

3.2 傾斜合焦面の被写界深度

イメージセンサ面とレンズ主平面を並行に配置した通常の光学系の場合、前方被写界深度境界 (Near DOF Limit) と後方被写界深度境界 (Far DOF Limit) は合焦面に並行となる。しかし、合焦面の傾斜するアオリ撮像では、やや様相が異なるため、本節ではその説明を簡単に行う。

まず、以降の記述を簡略化するために式 (5) (または式 (7)) で表した合焦面の地面に対する傾斜角を ϕ とする。つまり、

$$\tan \phi = \frac{L_z \cos \theta - f - H' \cos^2 \theta}{\sin \theta (L_z - H' \cos \theta)} \quad (9)$$

とおく。厳密には、アオリ撮像時のぼけの原因である、センサ面上に生じる錯乱円は楕円形状となり、その大きさも合焦点までの距離に応じて変化する。しかし、それによる焦点深度の変化は僅かであるとして、錯乱円直径と絞り値の積を定数 g で近似することにする。ここで、図3のようにイメージセンサから合焦点 (y, z) へ伸びる光線は、イメージセンサの法線方向に対し角度 ρ を持ち、この光線上に存在する前方被写界深度境界上の点は、

$$(L_y - H \sin \theta + Z_n \sin \rho, L_z + H \cos \theta + Z_n \cos \rho) \quad (10)$$

とおける。ただし、第1主点と式 (10) 間の距離である Z_n (近点距離) は

$$Z_n = \frac{hf^2}{f^2 + (h \cos(\theta + \rho) - f)g} \quad (11)$$

で求められる。同様に、この光線上に存在する後方被写界深度境界上の点は、

$$(L_y - H \sin \theta + Z_f \sin \rho, L_z + H \cos \theta + Z_f \cos \rho) \quad (12)$$

とおける。ただし、第1主点と式 (12) 間の距離である Z_f

図3 傾斜合焦面とその被写界深度 (DOF)
A tilted POF and DOF.

(遠点距離) は、

$$Z_f \approx \begin{cases} \frac{hf^2}{f^2 - (h \cos(\theta + \rho) - f)g} & \text{for } h < \frac{f^2}{g \cos(\theta + \rho)} \\ \infty & \text{for } h \geq \frac{f^2}{g \cos(\theta + \rho)} \end{cases} \quad (13)$$

で求められる。なお、近点距離 Z_n および遠点距離 Z_f の式に含まれる h は第1主点から合焦点 (y, z) までの距離である。ここで、 ρ を消去することで、前方および後方被写界深度境界の傾きが、

$$\begin{aligned} \tan \phi_+ &= \tan \phi + \frac{g}{f} \left(\frac{1}{\tan \theta} + \tan \phi \right) \\ \tan \phi_- &= \tan \phi - \frac{g}{f} \left(\frac{1}{\tan \theta} + \tan \phi \right) \end{aligned} \quad (14)$$

で近似され、厚レンズ利用時の前方・後方被写界深度の各境界線が、以下のように求まる。

$$\begin{aligned} y &= \tan \phi_+ \cdot z - \frac{f}{\tan \theta} - (L_z + H \cos \theta) \tan \phi_+ \\ &\quad + (L_y - H \sin \theta) \\ y &= \tan \phi_- \cdot z - \frac{f}{\tan \theta} - (L_z + H \cos \theta) \tan \phi_- \\ &\quad + (L_y - H \sin \theta) \end{aligned} \quad (15)$$

したがって図3のように、アオリ撮像の被写界深度境界は直線近似でき、かつ遠方に向かうに従い被写界深度は広がる。もちろん、薄レンズを仮定するならば式 (6) を式 (15) に代入すればよい。なお、4章で述べる提案方式では、合焦面を水平 ($\phi = 0^\circ$) としたため、合焦面と被写界深度境界の傾きは、

$$\begin{aligned} \tan \phi &= 0 \\ \tan \phi_+ &= \frac{g}{f \tan \theta} \\ \tan \phi_- &= -\frac{g}{f \tan \theta} \end{aligned} \quad (16)$$

となっている。

3.3 被写界深度と距離推定

一般的なDFFやDFD方式では、被写界深度の変化は距離推定精度の悪化をもたらす一因である。筆者らは、被写界

深度の変化が距離値に依存する物理量であることに注目し、それを積極的に利用することを考えた。前節で見たように、アオリ撮像の場合、式(15)の2式で囲まれる被写界深度の深さ(つまり高さ)は距離に依存し、遠方にいくにしたがって広がっている。したがって、計測対象の物体と被写界深度の高さ方向の広がりを観察することで、対象物体までの距離を知ることができる。

ただし、実際には、撮像面へ投影される被写界深度の広がり、レンズ画角の影響により抑制されることになる。つまり、光学系によって決定される式(16)の被写界深度境界の傾きと画角の相対量により、撮像面上における被写界深度は、距離の長短に応じて拡大または縮小することになる。また、被写界深度境界上のぼけ量は徐々に変化するものであり、さらに物体表面上ではさまざまなコントラストのテクスチャが混在するため、画像より被写界深度を正確に判定するのは難しい。そこで、3枚の水平合焦面を設置し、それらを用いて注目画素のエッジ強度で構成する先鋭度曲線を推定することで、距離推定を行うことにした。

4. 水平合焦面の被写界深度を用いた距離推定方式の提案

4.1 水平合焦面における先鋭度曲線の様子

イメージセンサに正対するように配置したコントラスト一定のホワイトノイズ状のテクスチャを持つ平面を、異なる高さで等間隔に配置された三つの水平合焦面(上段、中段、下段)で撮像する場面を想定してみる。図4(a)はその内の中段に位置する水平合焦面より得られた画像である。これに対し、エッジの方向には依存せずにその強度のみを評価可能な、ラプラシアンベースの式(17)の評価値(以降、 d 値と呼ぶ)をもって、各画素の先鋭度を求めてみた。

$$d = \left| l_{i(x+1,y)} + l_{i(x-1,y)} - 2l_{i(x,y)} \right| + \left| l_{i(x,y+1)} + l_{i(x,y-1)} - 2l_{i(x,y)} \right| \quad (17)$$

なお、式中の注目画素の座標を x および y 、その輝度値を l 、合焦面位置を i で表す。図4(b)はその d 値データのうち、各3枚の画像の同一場所の縦1ライン分を抜き出しグラフ化したもので、それぞれの合焦位置を中心として、高さに応じて d 値が変化する様子がわかる。この波形からオフセット分を削除し、さらにローパスフィルタ(LPF)をかけたものが図4(c)である。なお、 d 値のヒストグラムにおいて、最大・最小 d 値間を4等分に分け、その内一番小さい d 値区分で発生した最頻値をオフセット分とした。

この三つの先鋭度曲線を同一形状のガウス曲線で近似したものが、図4(d)である。筆者らはこの近似ガウス曲線の推定を、ぼけの広がりを示す被写界深度の推定と置き換え、距離推定を行うことにするが、その妥当性については次節で述べる。

4.2 ガウス曲線による先鋭度曲線の近似

先鋭度曲線のガウス近似の妥当性を調べるために、空間

(a) ホワイトノイズ状の模様を水平合焦面(中央)で撮像した画像例

(b) (a)中の縦1ライン分の d 値データの変化

(c) オフセット除去後、ローパスフィルタをかけた d 値

(d) 推定されるガウス曲線

図4 水平合焦面における先鋭度の変化の様子
Variance of sharpness on horizontal planes of sharp focus.

中に点光源があるものと仮定する。点光源の光が傾斜したレンズを通して、センサ面に作ったぼけが、合焦面・点光源間距離に応じてどのように変化するかを調べた。

まず、合焦面・点光源間距離を与えると、カメラ・点光源間の距離値(1,000mmに固定)より、錯乱円のサイズ(mm)が求まる。その際、レンズ焦点距離は90mm、レンズ傾斜角は 38° 、センサ・レンズ中心間距離は117.5mmと

した．次に，縦センササイズ14.9mm，縦画素数3168pixelsの関係から錯乱円のサイズ (mm) を画素数 (pixels) に換算する．なお，以上の条件は，次章の実験時のものと同じにしている．

ここで，点広がり関数 (PSF) を仮定する必要があるが，その際，一般のDFD方式を含めてぼけを扱う多くの方式で採用されている積分値1で規格化されたガウス関数を用いることにする⁹⁾．続いて，錯乱円の中心を注目画素の中心とみなし，錯乱円の半径をPSFの標準偏差の3倍とした (全光量の99.7%が錯乱円内に投影されとする)．なお，注目画素の中心位置を0とすると，注目画素の定積分範囲を $-0.5 \sim 0.5$ ，近傍画素の定積分範囲を $-1.5 \sim -0.5$ (または $0.5 \sim 1.5$) として，画素単位の入射光量を算出し，さらに， d 値 $=|2 \times$ 近傍画素の積分値 $-2 \times$ 注目画素の積分値 $|$ を計算する．その結果，光源・合焦点間距離 (d 値が0.01以上となる範囲を1mm単位) をパラメータとして算出した近似ガウス関数との誤差は8.1%であった．したがって，底辺部の比較的小さな d 値を除けば，ガウス曲線に近い形状を示していることから，本稿ではガウス曲線を先鋭度曲線近似のモデルに採用し議論を進める．

また，後で比較対象とするDFD方式についても，レンズ傾斜角を 0° する以外は同様の条件で，ガウス近似を行った際の誤差を計算したところ4.1%であった．

なお，誤差率は，各光源・合焦点間距離における d 値の近似誤差の和を，近似ガウス関数で得られた近似値の総和で割って求めた．

4.3 三つの水平合焦点とその先鋭度曲線

近似ガウス曲線の推定について図5を使って説明する．図5の上図の各線は，同一形状のガウス曲線で近似できるという仮定の下では，ピーク位置のみ異なり，ピーク量 d_p および標準偏差 σ が同じ三つのガウス曲線 (以後，先鋭度曲線とも呼ぶ) となり，

$$d_i = d_p \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{y - \bar{y}_i}{\sigma} \right)^2 \right) \quad (i = 0, 1, 2) \quad (18)$$

と書ける． i は合焦点の番号を示し，0:下段，1:中段，2:上段のそれぞれに対応する．

合焦点間隔を $\Delta y (>0)$ とすると，図5の上図のように上段および中段に位置する合焦点上の y 座標上の d 値をそれぞれ $-\Delta y$ ， $-2\Delta y$ だけシフトすれば，実際は別々の曲線上にある点も，図5の下図のように同一ガウス曲線を構成する点となる．つまり

$$y_0 = |y - \bar{y}_0| \quad (19)$$

とすると，

$$\begin{aligned} y_1 &= |y - \bar{y}_0 - \Delta y| \\ y_2 &= |y - \bar{y}_0 - 2 \cdot \Delta y| \end{aligned} \quad (20)$$

であり，中心を $\bar{y}_0$ とする先鋭度曲線は，

図5 3枚の合焦点を使った先鋭度曲線の推定
Presumption of sharpness curve from three planes of sharp focus.

$$d_i = d_p \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{y_i}{\sigma} \right)^2 \right) \quad (i = 0, 1, 2) \quad (21)$$

と表わせる．この式は，

$$d_i = d_p \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{y - y_0 - i \cdot \Delta y}{\sigma} \right)^2 \right) \quad (i = 0, 1, 2) \quad (22)$$

と展開できることから， y_0 ， Δy ， σ ， d_p が与えられれば， d_i を決定できる．この内 y_0 ， Δy ， σ は，光学系設計時に決定される，距離値に依存する値である．したがって，同一画素位置の三つの d 値 (d_i) より先鋭度曲線を推定できれば，距離推定ができる．なお，遠方に行くにしたがって被写界深度は広がるが，イメージセンサ面上での先鋭度の広がり，画角が 0° でない光学系では，狭められる方向に変化する．したがって，画角から求まる σ が遠方に行くにしたがって広がるか狭まるかは，光学系の設計で決まり，どちらであっても距離値に依存することになる．

4.4 提案方式の処理手順

ある適当な距離値を与えれば，あらかじめ求まっている関係から， y_0 ， Δy ， σ が得られるので，距離値および d_p が

決まれば式 (22) より理論値 d_i' が求まる．この理論値 d_i' と観測値 d_i が最も近い時，先に与えた距離値を正解とする．本方式では以下の評価式を用いて， E が最小となる理論値 d_i' を見つけることにする．

$$E = (d_0 - d_0')^2 + (d_1 - d_1')^2 + (d_2 - d_2')^2 \quad (23)$$

なお，図4 (a) のように，テクスチャのコントラストが一定であれば，各画素の先鋭度 (d 値) を並べると，ほぼガウス曲線に重なるが，一般にはさまざまなコントラストが混じった画像を扱う．つまり，ぼけ量 (σ に相当) は同じでも，コントラスト (d 値のピーク値 (d_p) に相当) が異なることが前提である．ただし，撮像画像が1枚では，画素単体ではガウス関数を推定できない．したがって，撮像画像を複数用意し，1画素ごとにガウス関数を推定できるようにしている．これにより，ガウス関数上の三つの値およびその位置を知ることができ，ガウス関数の各パラメータ (d_p , σ など) を決定できる．したがって，本方式は画素独立に距離推定を行える．

また，観測値 d_i の中に比較的小さな値が含まれる場合，雑音の影響のため先鋭度曲線の推定精度が低い．したがって，ある閾値を設定し，観測値 d_i がその閾値以上になる画素に関してのみ距離を求めることにする．

以下に，ガウス曲線の推定から距離推定を行う手順についてまとめておく．

- (1) 3枚の入力画像に対し，雑音対策のLPFをかけ，輝度ピークを255に揃える．
- (2) 式 (17) より，最外周を除く全画素の d 値を求め，オフセット分を差し引いた3枚の d 値画像を生成する．
- (3) (4) ～ (10) の処理を，全画素分について行う．
- (4) 注目画素 (x, y) について，各 d 値画像より d_i を得る．ただし，雑音対策のため， d_i のいずれかがある閾値未満ならば，距離値は未定とし，次画素の処理に移る．
- (5) 距離値 $Depth = (\text{推定範囲の最近点}) \sim (\text{推定範囲の最遠点})$ の範囲で，(6) ～ (9) を繰り返す．
- (6) $Depth$ に応じた三つのパラメータ y_0 , Δy , σ を，光学系設定時にあらかじめ作成した参照テーブルより得る．
- (7) $d_p = 0 \sim 1,020$ (最大 d 値) の範囲で (8), (9) を繰り返す．
- (8) y_0 , Δy , σ および d_p を式 (22) に代入し， d_i' を求める．
- (9) (4) および (8) の結果を式 (23) に代入し， E を求める．
- (10) E が最小時の $Depth$ を (x, y) の距離値とする．ただし， E がある閾値以上の場合，距離値は未定とする．

4.5 提案方式とDFD方式

本方式は，3枚の画像よりガウス曲線を推定するという点では，DFD方式の考え方に似ている．ただし図6のように，DFD方式では垂直な合焦面を用いて，各画素に現れるぼけ量の変化から，ガウス曲線のピーク位置を推定し距離推定を行うのに対し，本提案方式では各画素の合焦位置ではなく，距離に応じた被写界深度相当の広がり注目する

図6 先鋭度曲線 (ガウス曲線) による距離推定の模式図
The aspect of Gaussian curves with each depth estimation method.

図7 実験用撮像装置
Camera system used in our experiment.

点が異なる．

DFD方式の場合，先鋭度曲線は距離軸に沿って急激に変化するため，物体表面の検査等，距離推定範囲が狭い場合，精度が良い．一方，本方式は水平合焦面を用いており，先鋭度曲線は距離軸に対して緩やかに変化するため，距離推定範囲の広いアプリケーションで利用し易い．

5. 実験と検証

5.1 実験環境

本来，本方式は車載用途などを目的としたものだが，今回は本方式の有効性を確認するため，実スケールよりも規模を小さくし，机上にて実験を行った．その際，図7に示す撮像装置で取得した8ビット白黒画像を入力値とした．撮像装置の各設定値は，式 (16) の条件のもと式 (5)，式 (9) を利用して以下のように決めた．まずレンズ傾斜角を $\theta = 38.0^\circ$ ，イメージセンサとレンズ回転中心の距離を $L_z = 117.0\text{mm}$ と設定した．この時，合焦面の角度は厳密には -1.53° となるが，スケールの小さな机上実験のため今回はこれで水平とみなすことにする．また，三つの水平合焦面の地面からの高さ $\bar{y}_0$, $\bar{y}_1$, $\bar{y}_2$ を，それぞれ 35.0mm , 45.0mm , 55.0mm となるように，撮像装置を y 軸方向に動

表1 主な実験装置の仕様
Primary specifications of items used.

Device	Manufacturer & Model of product	Specifications
Camera	Canon EOS 50D -Image sensor size -Effective pixels	22.3×14.9 mm approx. 15.1 Mpixels (4752×3168 pixels)
Optical bench	Horseman LD -Minimum flange back -Monorail length -Raise, fall, shift length -Swing, tilt angle	approx. 70 mm 400 mm 30 mm 360°
Lens module	FUJIFILM Fujinon SWD -Focal length -Aperture ratio -Minimum diaphragm	90 mm 5.6 64

かした。ただし、本来はレンズのみを動かし、センサ面は動かす必要はないが、今回は装置の設置作業を簡便化するために撮像装置全体を動かし、その際にずれる画像間のマッチングは手動で行った。さらに、 $H=23.9\text{mm}$ 、 $H'=5.5\text{mm}$ として、光学系を厚レンズとして扱った。その他の撮像装置の詳細仕様は表1の通りである。

5.2 距離値—先鋭度曲線(被写界深度)の関係

まず、本撮像装置における被写界深度と距離値の関係を調べ、距離値に依存する三つのパラメータ y_0 、 Δy 、 σ の参照テーブルをあらかじめ作成した。今回は、 y_0 は150mmごとに、 Δy および σ は500mmごとにそれぞれ5段階の距離において一様に散ったノイズ画像を使って計測を行った。その結果、距離と y_0 、 Δy 、 σ それぞれの関係は図8 (a)～図8 (c)となった。これより得られた近似曲線の値を参照テーブルに保持することで距離推定に利用する。

5.3 距離推定実験

距離推定対象として車の模型を使い、評価実験を行った。車の模型を、カメラから780mm離れた位置に置き、撮像した。その結果、図9 (a)、図9 (c)、図9 (e)に示す3枚の画像を取得した。これらの画像に対して、式 (17) を適用し、それぞれの画像に対応した d 値出力画像(図9 (b)、図9 (d)、図9 (f))を得た。この情報をもとに、図9 (e)に示した白枠内(170画素×60画素)で囲まれる領域について、距離値を1mm単位で算出する。閾値2以上の d 値をもつ画素を推定対象とした。白枠中で距離推定ができた画素数は1,030画素であった。図9 (g)に得られた距離値の分布を、図9 (h)に正解値に近い距離が得られた5画素についてDepthに応じた評価値 E の変化の様子(ただし、 d_p は各画素の最終推定値で固定)を示した。図9 (g)の距離値分布では、物体面の位置する780mm付近(灰色矢印)で、多くの画素が分布している。カメラ・物体間距離の平均距離は785.4mm、平均絶対誤差は22.7mmであった。なお、計算時間は、CPUにIntel Core i7 2.66GHzを用いて、9.79分であった。ただし今回は方式確認に主眼を置いたため、評価値 E の最小値探索アルゴリズムは単純な総当たりの比較で済ませており、勾配法等の最適化手法の導入による計算量低減が可能であ

(a) 下段合焦面位置 y_0 と距離値 z の関係

(b) 合焦面間距離 Δy と距離値 z の関係

(c) 標準偏差 σ と距離値 z の関係

図8 距離値に依存するパラメータ

The parameters depending on depth value.

る。また、計算量が多いものの、式自体は比較的簡易なものが多く、ハードウェア化しやすいことから、実システム構築時には相当な高速化が可能と思われる。

ガウス曲線の標準偏差は、ぼけ量に相当する値であるが、図8 (c)に示したように、数千mmにわたって緩やかに変化するため、広範囲の距離推定が可能であることがわかる。一方、同じレンズでDFD方式を用いる場合、(被写界深度は測定位置に依存するが)例えば、1,000mm付近では、400mm程度が測定限界範囲となる。実際のアプリケーションでは、推定位置、推定精度、レンズのイメージサークル、雑音の影響等の他の要因も考慮する必要がある。したがって、一概に性能限界を述べるのは難しいが、提案方式ではDFD方式より充分広い推定範囲を設定できる。

6. む す び

本稿では、画像ぼけを用いた広範囲・実時間距離推定システムの実現を目指し、被写界深度が合焦距離に依存する性質を利用した距離推定方式を提案した。その際、アオリ撮像による水平合焦面を3枚用い、被写界深度の広がり

(h) $Depth$ に応じた評価値 E の変化の様子 (d_p は最終推定値で固定)

図9 実験時の入力, 途中経過, 結果の各画像
Images of input, d-value and result in our experience.

ガウス曲線で近似・推定する方式を採用した。これにより、撮像枚数の低減による実時間距離推定と広範囲距離推定を両立させることができる。最後に、提案方式による実験を行い、その実現性について確認を行った。

なお、今回の実験は水平合焦面で生じる被写界深度を利用した距離推定の可能性を判断することを目的としたため、評価値の最小値探索の高速化など、改良すべき点がある。また、隣接するコントラストの近い画素同士では、画素単位ではなく、領域毎に距離推定を行うなどの、さらなる精度向上の余地がある。よって今後は、車載用途を考慮した実環境・実スケールにて本方式の高速化、精度向上を図り、具体的な物体検出・衝突回避などを目的とした車載用距離推定システムの開発に取組む予定である。

〔文 献〕

- 1) A. Makynen, et al.: "A Binary Photodetector Array for Position Sensing", *Sensors and Actuators A*, 65, pp.45-53 (1998)
- 2) S. Kawahito, I.A. Halin, T. Ushinaga, T. Sawada, M. Homma, Y. Maeda: "A CMOS Time-of-Flight Range Image Sensor with Gates-on-Field-Oxide Structure", *IEEE Sensors Journal*, 7, 12, pp.1578-1586 (2007)
- 3) S. Yoshimura, T. Sugiyama, K. Yonemoto, K. Ueda: "A 48kframe/s CMOS Image Sensor for Real-time 3-D Sensing and Motion Detection", *ISSCC Digest of Technical Papers*, pp.94-95 (2001)
- 4) Y. Oike, M. Ikeda, K. Asada: "A 375 365 High-Speed 3-D Range-Finding Image Sensor Using Row-Parallel Search Architecture and Multisampling Technique", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 40, 2, pp.444-453 (2005)
- 5) A. Kimachi, T. Kurihara, M. Takamoto and S. Ando: "A novel range finding system using correlation image sensor", *Trans. IEEJ*, 121-E, 7, pp.367-375 (2001)
- 6) E. Krotkov: "Focusing", *International Journal of Computer Vision*, 1, 3, pp.223-237 (1987)
- 7) 森吉, 英保, 関口: "単眼カメラ画像系列からの距離計測", システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 41, pp.659-660 (1997)
- 8) S.K. Nayar, Y. Nakagawa: "Shape from Focus", *IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16, 8, pp.824-831 (1994)
- 9) A.P.Pentland: "A New Sense for Depth of Field", *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, Pami-9, 4, pp.523-531 (1987)
- 10) H. Ikeoka, H. Kashiya, T. Hamamoto, K. Kodama: "Depth Estimation by Smart Imager Sensor using Multiple Focus Images", *The Institute of Image Information and Television Engineers*, 62, 3, pp.384-391 (2008)
- 11) U. Cilingiroglu, S. Chen, E. Cilingiroglu: "Range Sensing with a Scheimpflug Camera and a CMOS Sensor/Processor Chip", *IEEE Sensors Journal*, 4, pp.36-44 (2004)

いげおか ひろし
池岡 宏 現在、東京理科大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程在学中。距離計測システムの研究に従事。学生会員。

ほまもと たかゆき
浜本 隆之 1992年、東京理科大学工学部電気工学科卒業。1997年、東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。現在、東京理科大学工学部電気工学科准教授。画像情報処理、コンピュータシミュレーション等の研究に従事。工学博士。正会員。