

アオリ撮像時の被写界深度の増減を利用した距離計測方式

Depth Estimation using the Depth of Field by Tilted lens imaging

池岡 宏十
Hiroshi Ikeoka

浜本 隆之十
Takayuki Hamamoto

1. まえがき

我々は画像情報を用いた車載用途に適した距離計測システムの構築を目指している。一般に、画像情報を使った距離計測方式には、装置側から光を射出し、その反射をイメージセンサで捉えて距離計測を行うアクティブ方式と、太陽や室内灯などの環境光の物体反射をイメージセンサで捉えて距離計測を行うパッシブ方式の2つがある。

ただ、どちらの方式を採用しても比較・演算等に多くの処理を必要とするため、実時間処理が必須となる車載アプリケーションでは、高速化が課題となる。実際、スマートイメージセンサや FPGA などのハードウェア上に距離計測機能を組み込むことで、この課題を克服する取り組みが行われているが、一般に高速な距離計測はアクティブ方式で実現されているものが多い[1][2][3][4][5]。一方我々は、比較的シンプルなシステム構成で実現可能なパッシブ方式を用いた車載向けの距離計測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、単眼でレンズ・フォーカス位置に応じた画像先鋭度やぼけ量の変化を利用する DFF (Depth From Focus) 方式、DFD (Depth From Defocus) 方式などがある[6][7]。その中でも、我々は単眼方式を採用し、距離計測システムの開発を行っている。

DFF 方式は、合焦判定処理がシンプルであるため、ハードウェア化も比較的容易であり、実時間処理に十分対応可能な処理速度を提供できる[8]。しかし、センサ前段において極短時間の間に合焦位置の異なる画像を取得する光学的仕組みが必要となる。一般に DFF 方式を採用する場合、高速な機械的動作によって解決する方式、または必要とされるフォーカス数と同数の光学系を利用する分光方式を採用することで、この問題に対処することになる。しかし、どちらの方式もその仕組み上、撮像可能な多重フォーカス画像の枚数を多くできず、距離計測分解能が大きく低下してしまう。

一方、DFD 方式では、撮像枚数が非常に少なく済むため、光学系はシンプルな構成となるが、ぼけ量の解析に時間がかかること、また物体表面の微細な凹凸等の狭い範囲の計測には適しているが、車載用途のような広い範囲の計測には向かないこと、などの理由から車載アプリケーションでは扱いにくい。

そこで、我々は単眼でありながら少ない撮像枚数でも広い範囲の距離計測が可能な方式を提案する。一般的に、DFD、DFD 方式といった画像ぼけを利用する方式は、計測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、計測精度を劣化させる原因の一つになっていた。我々は、逆にこれを距離値に依存する物理量で

あることに注目し、距離計測に活用する方式を考案した。ただし、一般的な光学系を用いると、従来方式と同様の撮像枚数の制約問題が生じることから、提案方式ではアオリ撮像により、地面に対し水平配置した合焦面 (POF: Plane of sharp focus) を用いることで対応することにした。これにより、従来方式に比べ光学系および処理系がシンプルとなり、車載用途をはじめとする実時間処理に対応可能なシンプルな距離計測を実現できる。

以下、提案方式で用いる光学系 (水平合焦面およびその被写界深度) について説明し、それを利用した距離計測の手順を述べる。最後に提案方式の実験を行うことで、その有効性を示す。

2. 被写界深度の増減を利用した距離計測

2.1 アオリ撮像と傾斜合焦面

本節では、提案方式で用いるアオリ撮像の光学系について説明する。

図1のように、まず、 $x = 0$ 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、並行に配置されるレンズ主平面を、アオリ撮像ではイメージセンサ面より θ だけ傾けて設置する。これにより、イメージセンサに対して、ピントの合う位置 (合焦面) が正対して設定される一般的な光学系とは異なり、図1のように傾斜した合焦面が発生する。これにより、手前と奥側に同時に合焦点が生じる環境ができる。ここで、レンズの焦点距離を f 、レンズ回転中心を (L_x, L_y) とし、またレンズ回転中心から第一主点および第二主点までの距離それぞれを H, H' とした場合、次の式で表わされる合焦面が得られる。

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

ただし、イメージセンサと計測対象物体の距離が、レンズ主点間隔より十分大きい場合は、薄レンズとして

$$H = H' = 0 \quad (2)$$

とみなすことで、式(1)より、次式が得られる。

$$y = \frac{1}{\sin \theta} \left(\cos \theta - \frac{f}{L_x} \right) x - \frac{L_x \cos \theta - L_y \sin \theta}{\sin \theta} \quad (3)$$

この場合、一般にシャインプルーフの法則として、イメージセンサ面、レンズ主平面、そして式(3)で得られた合焦面が

$$\left(0, -\frac{L_x \cos \theta - L_y \sin \theta}{\sin \theta} \right) \quad (4)$$

の一点で交わることが知られている。

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、同

†東京理科大学

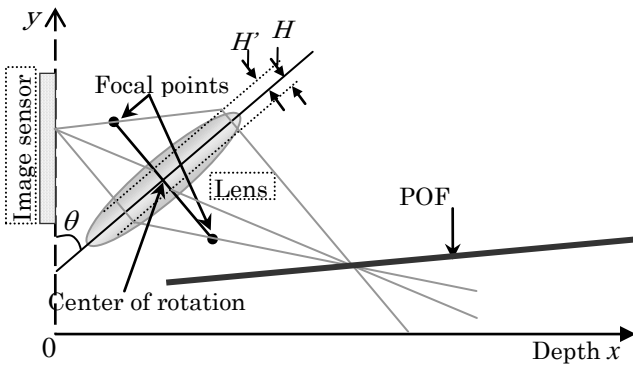


図1 傾斜レンズによる合焦点(POF)の配置

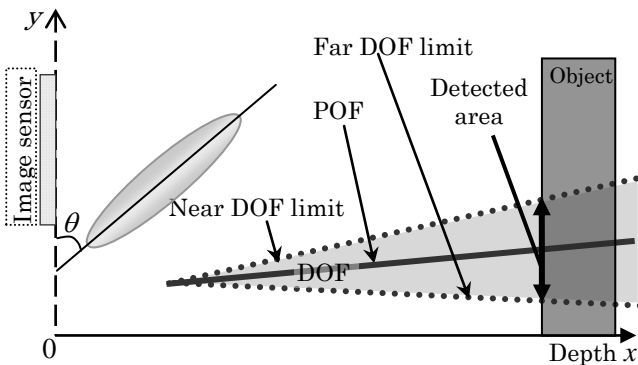


図2 傾斜合焦点面とその被写界深度(DOF)

様の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ことになり、距離画像生成などを最終目的とする場合には適さない。

2.2 傾斜合焦点面の被写界深度

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) の位置も、やはり合焦点面に並行となる。しかし、合焦点面を傾斜させたアオリ撮像の場合、やや様相が異なってくるため、本節ではその説明を行う。

図2のように、通常の光学系と同様に被写界深度の両境界の形状ほぼ直線となり、一次式で近似できる。以降の記述を簡略化するために式(1) (または(4)) で表わされる合焦点面の地面に対する傾斜角を φ とする。つまり、

$$\tan \varphi = \frac{L_x \cos \theta - f - H' \cos^2 \theta}{\sin \theta (L_x - H' \cos \theta)} \quad (5)$$

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が、その際の焦点深度の変化は僅かであるので、これを定数 g で近似することにする。そのとき前方被写界深度境界および後方被写界深度境界は、それぞれ以下のような傾きになる。

$$\begin{aligned} \tan \varphi_+ &= \tan \varphi + \frac{g}{f} \left(\frac{1}{\tan \theta} + \tan \varphi \right) \\ \tan \varphi_- &= \tan \varphi - \frac{g}{f} \left(\frac{1}{\tan \theta} + \tan \varphi \right) \end{aligned} \quad (6)$$

これを使って、厚レンズ利用時の前方被写界深度および後方被写界深度の境界線は、以下のように書ける。

$$\begin{aligned} y &= \tan \varphi_+ \cdot x - \frac{f}{\tan \theta} - (L_x + H \cos \theta) \tan \varphi_+ + (L_y - H \sin \theta) \\ y &= \tan \varphi_- \cdot x - \frac{f}{\tan \theta} - (L_x + H \cos \theta) \tan \varphi_- + (L_y - H \sin \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

もちろん、薄レンズを仮定するならば式(2)を式(7)に代入すればよい。よって、式(7)の二式の差分を見ることで、イメージセンサからある距離 (x) だけ離れた位置に存在する物体面上の高さ方向の被写界深度の広がりを知ることができる。

2.3 距離計測

一般的な距離計測方式である DFF 方式や DFD 方式では、距離値に対応した被写界深度の変化は、計測精度の悪化をもたらす。しかし、我々はこの被写界深度が距離値と相関が高いことに注目し、この被写界深度の変化を積極的に利用した距離計測を行うことを考えた。

まず、2.1 節で述べた式(1)に従い、合焦点面を地面と水平 ($\varphi = 0^\circ$) になるように、レンズを配置する。つまり、

$$\tan \varphi = 0 \quad (8)$$

であるから、近点側および遠点側それぞれの被写界深度の境界の傾きは、式(6)より

$$\begin{aligned} \tan \varphi_+ &= \frac{g}{f \tan \theta} \\ \tan \varphi_- &= -\frac{g}{f \tan \theta} \end{aligned} \quad (9)$$

と簡単になる。これを式(7)に代入することで、水平な合焦点面を利用した際の距離値 x における被写界深度の各境界位置がわかる。ここで、水平合焦点面を使用した時、イメージセンサに射影される被写界深度境界間の長さや距離値の対応例を図3に示す。図3が示すように、画角の影響により、遠方における被写界深度の広がりや、抑制されることになる。つまり計測感が劣化する。

直接被写界深度の境界間を利用した計測では、被写界深度の発生位置は第一主点 (H) 以降になることから、実際に望まれる計測範囲が遠方にある場合や、比較的高さの低い物体を計測対象とする場合、計測感が落ちることになる。そこで、別途合焦点面を新たに追加し、二つある被写界深度の重複量を見ることで計測位置を遠方にシフトすることにする (図4)。これにより、被写界深度境界の傾斜角を調整することで、計測範囲及び計測対象の高さなどを考慮した、最適な計測位置を設定できる。図5は約 600mm 以降に計測範囲を設定した場合の例である。今回はこの重複量を計測する方式を利用することにする。

具体的な手順を以下に述べる。

まず、イメージセンサに正対する計測領域内の対象物体を2つの合焦点面で撮像し、2枚の画像を得る。さらにラプリアンベースの次式を用いて、エッジ検出を行う。

$$d = |I_{F(x+1,y)} + I_{F(x-1,y)} - 2I_{F(x,y)}| + |I_{F(x,y+1)} + I_{F(x,y-1)} - 2I_{F(x,y)}| \quad (10)$$

次に、得られた二つのエッジ検出画像をある閾値で2値化し、その AND 演算を行うことで、被写界深度の重複量を

求める。最後に縦方向のエッジ分布幅を調べ、それをあらかじめ式(6)及び式(7)をもとに作成しておいたテーブルを参照し、距離値を求める。

尚、今回は被写界深度の重複量だけを使って距離値を求めたが、実際のアプリケーションでは、それぞれの合焦点単体で得られる被写界深度からも距離値を求め、それらも複合的に利用すれば、精度向上や計測範囲の広範囲化が可能である。また、合焦点の一方を地面に合わせた理由は、地面に十分なテクスチャがあり、浮遊する物体を計測対象としないような車載アプリケーションでは、比較的被写界深度の狭い手前において物体の有無の検出が容易であるのが理由でだが、その詳細についてはここで述べない。

3. 実験

今回はまず本方式の有効性を確認するため、車載用途の実スケールよりも規模を小さくし、机上にて確認実験をおこなった。尚、距離計測対象には 2mm 四方の市松模様からなるイメージセンサに正対した平面を使い、これを図6の撮影システムで取得した 8 ビットグレースケール画像を使って実験を行った。

レンズ傾斜角を、 $\theta=38.0^\circ, 42.5^\circ$ とし、またそれに対応するイメージセンサとレンズ回転中心の距離を、 $L_x=118.5\text{mm}, 126.2\text{mm}$ として水平合焦点を 2 枚設定した。2 枚の水平合焦点間隔は 10.3mm とした。尚、下側に位置する合焦点は実験台の高さ (707.3mm) に合わせてある。また、厚レンズとして扱うため $H=23.9\text{mm}, H'=5.5\text{mm}$ を与えている。尚、その他の実験用撮像装置の詳細仕様は表 1 の通りである。

図 7 のような計測対象の市松模様の板を、カメラからの距離が 750mm, 800mm, 850mm, 900mm となる位置に置き、それぞれ 2 枚の水平合焦点面で撮像し、全部で 8 枚の画像を取得した。これらの画像に対して、式(10)を適用すると、それぞれの画像に対応したエッジ検出画像 (図 8) が得られる。この上下 2 枚 1 組の画像をある閾値で 2 値化し、AND 演算を行う。これにより、上下に分布した画素量と、物体までの距離値を算出した。その結果、(距離値[mm], 画素数[pixel]) = (750, 126), (800, 532), (850, 676), (900, 784) の関係が得られた。

この結果を図 5 と比較すると画素数 (グラフ上の縦軸) は理論値に比較して 3 倍程度のずれがみられるが、これは理論値計算時における許容錯乱円の設定の仕方 (式(6)中の g に内包)、エッジ検出及び 2 値化時の閾値などの設定により大きく変化するものである。実際、実験結果をプロットした図 9 は、理論値の図 5 とほぼ同様の様相を示している。よって、実際のアプリケーション製作時には、予め計測対象・利用環境を限定できるため、前実験による参照テーブルの作成をもって対応することになる。

4. まとめと今後の課題

本稿では、パッシブ方式を用いた車載向け実時間距離計測システムの実現のための、被写界深度が合焦点距離に依存する性質を利用した距離計測方式について検討した。その際、アオリ撮像によって水平に配置した合焦点を用いることで、従来の方式には必須であった光学系における合焦点位置が変化するような特別な仕組みを不要とした。

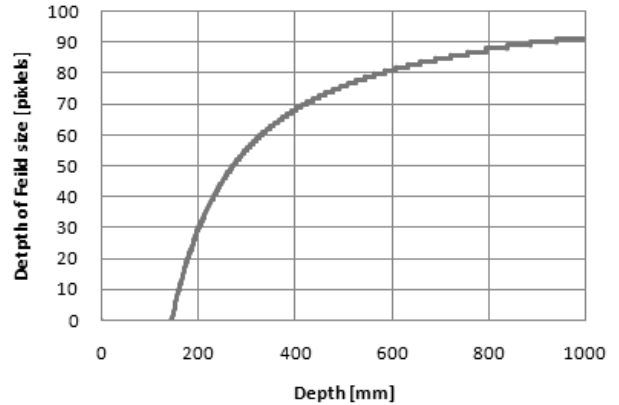


図 3 被写界深度の距離の関係

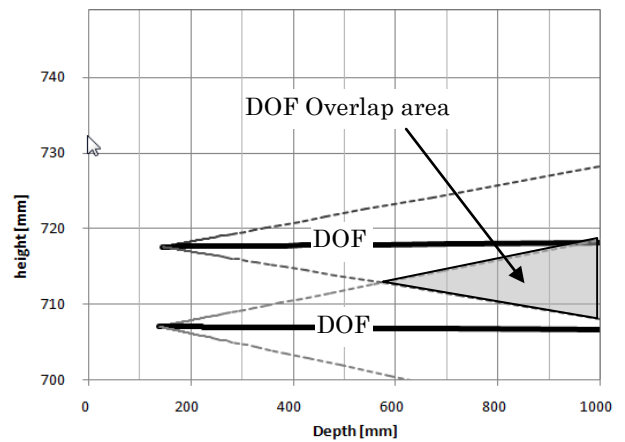


図 4 2つの合焦点の配置とその被写界深度

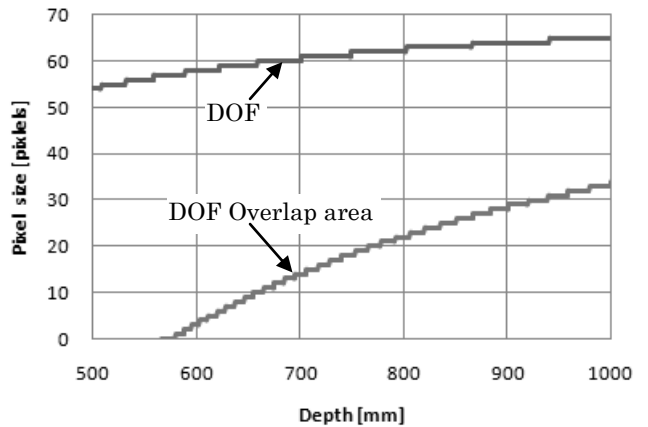


図 5 被写界深度及びその重複量の距離計測精度



図 6 実験用撮像装置

また、利便性の向上を図るため、2枚の合焦面を設置し、被写界深度の重複量を検出することで距離計測を行なう方法を考案した。最後に、提案方式による距離計測実験を行い、その実現性について確認を行った。

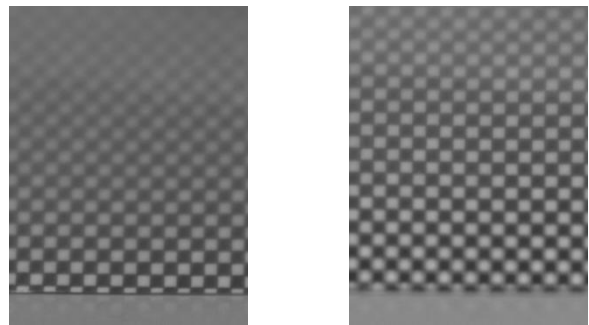
今後は、実環境・実スケールにおける本方式の有用性を確認し、また他の方式との併用によりさらなる精度向上を図ることで、具体的な車載用距離計測システムの開発に取り組む予定である。

文献

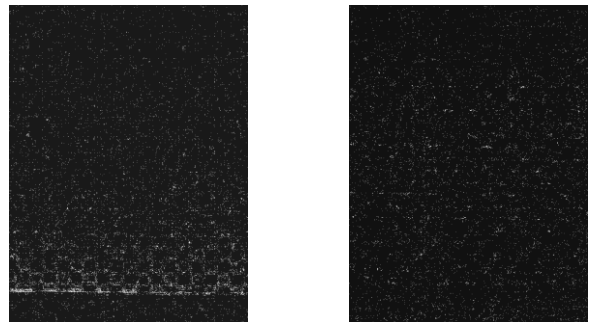
- [1] A. Makynen, et al., "A binary photodetector array for position sensing," Sensors and Actuators A, Vol.65, pp.45-53 (1998)
- [2] M. de Bakker, et al., "A Smart Range Image Sensor," in Proc. of ESSCIRC, pp.208-211(1998)
- [3] S.Yoshimura, T.Sugiyama, K.Yonemoto, K.Ueda," A 48kframe/s CMOS Image Sensor for Real-time 3-D. Sensing and Motion Detection", ISSCC 2001.6.4 (2001)
- [4] Y.Oike,M.Ikeda,K.Asada, "A CMOS Image Sensor for High-Speed Active Range Finding Using Column-Parallel Time-Domain ADC and Position Encoder", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, Vol.50, No 1, pp.152-158 (2003)
- [5] A. Kimachi, T. Kurihara, M. Takamoto, and S. Ando, "A novel range finding system using correlation image sensor", Trans. IEEJ, Vol.121-E, No.7, pp.367-375(2001)
- [6] E.Krotkov, "Focusing", International Journal of Computer Vision, Vol.1, No.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, VOL.41, PP.659-660 (1997)
- [8] H.Ikeoka, H.Kashiyama, T.Hamamoto, K.Kodama, "Depth Estimation by Smart Imager Sensor using Multiple Focus Images," The Institute of Image Information and Television Engineers, Vol.62, No.3, PP.384-391 (2008)

表 1 実験用撮像装置のスペック

Device	Manufacturer & Model of product	Specifications
Camera	Canon EOS Kiss X2 -Image sensor size -Effective pixels -Total pixels	22.2 × 14.8 mm approx. 1220 Mpixels approx. 1240 Mpixels
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



(a) $y=0\text{mm}$ における合焦面 (b) $y=10.3\text{mm}$ における合焦面
図 7 入力画像の一部拡大像 ($x=750\text{mm}$)



(a) $y=0\text{mm}$ における合焦面 (b) $y=10.3\text{mm}$ における合焦面
図 8 エッジ検出画像の一部拡大図 ($x=750\text{mm}$)

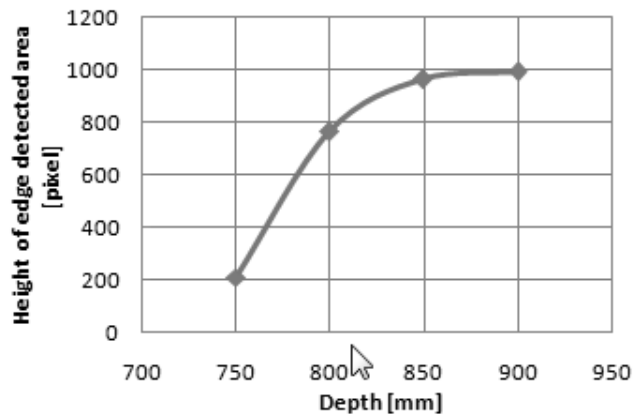


図 9 実験結果