

# 傾斜焦点面を用いた多重フォーカス画像による距離計測

## Depth Estimation by Multiple Focus Images using Tilted Focal Planes

池岡 宏十  
Hiroshi Ikeoka

浜本 隆之十  
Takayuki Hamamoto

### 1. まえがき

コンピュータビジョンと呼ばれる視覚認識に関する技術は、イメージセンサの高性能化をはじめとした技術進歩に支えられ、研究開発が盛んに行われている。その中でも距離計測技術は、物体同士の衝突回避や物体の形状認識などの広範囲にわたって、基盤技術と位置づけられている。イメージセンサ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つがあるが、両方式とも比較・演算を多量に必要とするため、高速処理の実現が課題となっている。その解決に、イメージセンサ内に画像処理回路を集積したスマート・イメージセンサを利用することで、その課題に対処する試みが行われている。ただし、スマート・イメージセンサを用いた距離計測の多くの研究事例は、アクティブ方式を基礎としたものが中心である[1][2]。そこで我々は、一般的に装置側から光を射出する仕組みを必要としない、よりシンプル構成からなるパッシブ方式を採用した距離計測システムの研究を行っている[3]。

パッシブ方式には、視差情報などを利用する多眼方式や、レンズ・フォーカス位置に応じた画像先鋭度の変化を利用する DFF(Depth From Focus)方式や DFD(Depth From Defocus)方式などがある[4][5][6]。その中でも DFF 方式は、

- i)単純な加減算及び比較処理で構成される
- ii)小規模な処理回路やメモリで並列処理できる
- iii)単眼カメラで利用できる
- iv)距離計測精度が高い

といった特徴を持つため、我々は DFF 方式による距離計測システムの研究を行ってきた[3]。この研究過程で、ピントの合うフォーカス位置を画素毎に算出する合焦判定機能を集積したスマート・イメージセンサの開発や、合焦判定機能が有効でない平坦部領域の距離値補間処理の提案などを、これまでに行っている[3][7]。これらの成果はシステムの距離計測速度の向上に大きく貢献するが、システム初段の光学系がボトルネックとなり、システム全体のパフォーマンスを上げられない問題がある。多重フォーカス画像を得るには、例えば一般的なバリフォーカルレンズを用いる場合、高速動作が可能な“機械的”な仕組みを用いることになるが、その速度を充分なものとするのは容易ではない。そこで、必要とされるフォーカス数と同数の光学系を用意することで機械的な仕組みを排除した分光方式も提案されている。しかし、どちらの方式も分光による光量の低下や装置サイズの肥大化は避けられず、多重フォーカス画像の枚数を極端に増やすのは容易ではない。よって、動物体をリアルタイムに距離計測する場合は、極短時間の間に焦点

距離の異なる多数の画像を撮像する必要があるため、本方式の利用は困難であった。

そこで本稿では、距離計測精度を落とすことなく、従来の DFF 方式に比べ非常に少ない撮像枚数で済むように、光学系及び従来の合焦判定法に工夫を加えることで、上記の問題を解消する仕組みを考案し、検討を行なったので報告する。

### 2. 多重フォーカス画像による距離計測

DFE 方式による距離計測は、対象物の多重フォーカス画像を取得し、画素単位で焦点の合うフォーカス位置の探索を行う合焦判定により、間接的にカメラから物体までの距離を得る方式である。合焦判定は、式(1)に示す  $d$  値を画素毎に算出することで行う。尚、式中の  $I$  は輝度値、 $F$  はフォーカス位置番号、 $x, y$  は画素座標を示す。

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

$d$  値は焦点の合った高周波成分（エッジ部）ほど高い値を示す。そのため、従来の方式では  $d$  値に対して任意の閾値を設ける事で合焦判定可能なエッジ部と、判定不可能な平坦部との切り分けを行い、エッジ部では  $d$  値が最大となるフォーカス位置を合焦位置と判定した。尚、平坦部は距離精度の向上のために、別途距離値の補間処理を行う必要がある。

図 1 (a)のように、本システムでは合焦判定機能を持つイメージセンサに組み付けた、光学系の焦点面（フォーカス位置）を順次移動させ、焦点面の連続的变化に応じた画像群（多重フォーカス画像）を取得する。これにより画素毎に焦点の合うフォーカス位置を検出（合焦判定）し、その情報から画素単位でセンサー物体間の距離情報を取得する。ただし、高速処理を実現するために、合焦判定処理はスマート・イメージセンサ内部にて行われる。さらに、その判定結果は後段処理部に送られ、平坦部の補間処理が実行される。最終的には、後段処理部内のマンマシンインタフェースを通して距離計測結果（距離画像）が出力される[7][8]。

### 3. 傾斜焦点面によるリアルタイム距離計測

図 1 (a)に示すような従来方式は、通常、機械的動力により徐々にフォーカス位置を変化させながら、逐次画像を撮像し多重フォーカス画像を取得するため、イメージセンサと焦点面は常に平行になるような位置関係にある。また、ハーフミラーやプリズムによる分光から一回の撮像で多重フォーカス画像を取得する方法もあるが、この手法でも焦点面の位置関係について変わりはない。したがって、DFE 方式をそのまま採用し、撮像枚数と距離精度が等価である関係を持ち込む限り、十分な距離計測精度を確保できず、動物体を扱うリアルタイム距離計測などは実現できない。

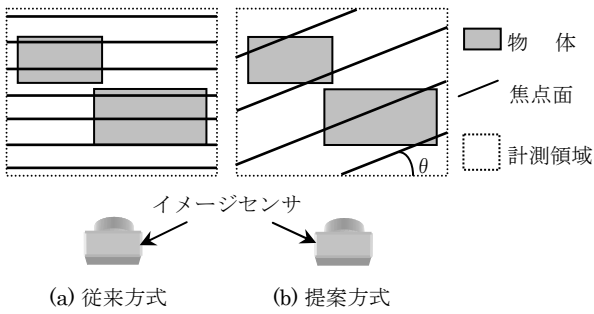


図1 焦点面の配置方法

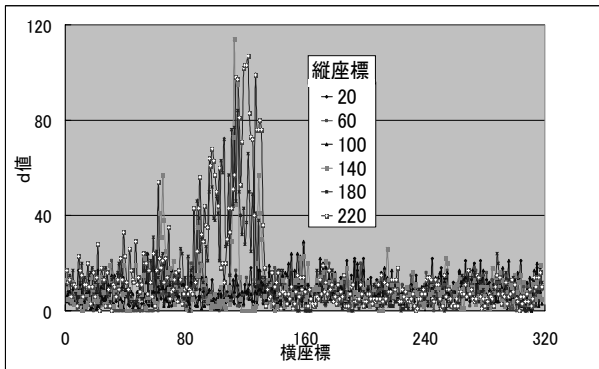


図2 d値の変化

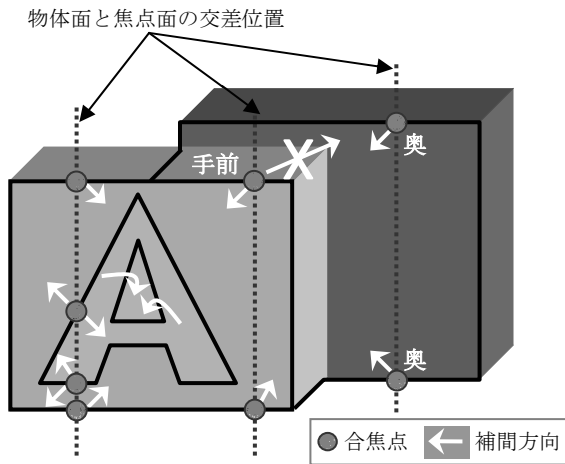


図3 距離値の割り当て

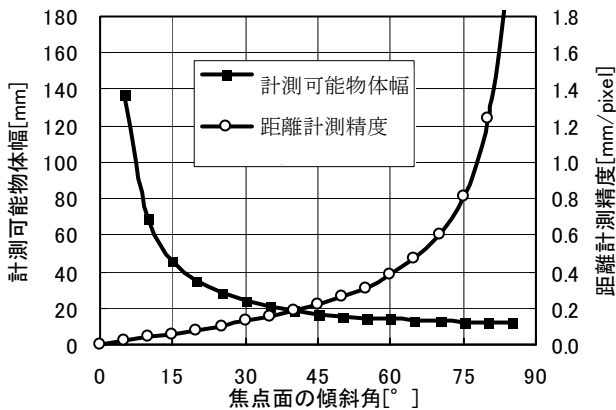


図4 焦点面の傾斜角と計測性能

そこで、今回この問題を解決するにあたって、計測対象となる物体は、イメージセンサに対して正対しているという仮定のもと、以下のような方式を考案した。

まず図1(b)のように各焦点面間の距離は等間隔のまま、傾斜角 $\theta$ だけ傾けた配置に変更する。これはイメージセンサ前に設置する光学系の主平面を傾けることで、イメージセンサ面とレンズ主平面の交点を通るように、焦点面が発生するというシャイン・プールの法則を利用して実現する。このとき、各焦点面間の距離を $L[m]$ としたとき、イメージセンサで観察されるオブジェクトのサイズ $W[m]$ は、

$$W \geq L / \sin \theta \quad (2)$$

を満足すれば、各物体と焦点面が必ず交差し、合焦点が発生する。図2は1つの物体面と1つ焦点面が交差した際の $d$ 値の変化の様子を表したものである。画像の横方向に対し $d$ 値が変化中、ある位置(図2では横座標が120pixel付近)で $d$ 値が極大となることがわかる。このように焦点面と物体面が交差する際は突出して大きな $d$ 値が現れることから、ある閾値以上の $d$ 値の中から極大値を見つけ合焦点とする。焦点面の配置状態は既知であるから、その合焦点の位置における距離値を算出できる。続いて、全 $d$ 値画像の平均画像より領域分割を行い、図3のように奥の領域から順次、エッジ部で発生した合焦点の距離値を使って、各領域の距離値補間を行う。

尚、イメージセンサの1画素あたりの距離計測領域内の横方向の長さを $m[m/pixel]$ とし、奥行き解像度を $r[m/pixel]$ とすると、次の式(3)が得られる。

$$r = m \cdot \tan \theta \quad [pixel/m] \quad (3)$$

よって、非常に多くの多重フォーカス画像を用意しないと計測精度が低下する従来方式と比べ、少ない撮像枚数でも傾斜焦点面を用いることで、充分かつ容易に精度の高い距離値を得ることができる。ちなみに焦点面間距離 $L$ を12mm、イメージセンサにおける解像度 $m$ を $320 / 70 \text{ pixel/mm}$ として、式(2)および(3)をグラフ化すると図4のようになる。この図からわかる通り、この2式から求める計測可能物体の幅と距離計測精度の間にはトレードオフの関係があり、アプリケーションによって傾斜角を最適化する必要がある。

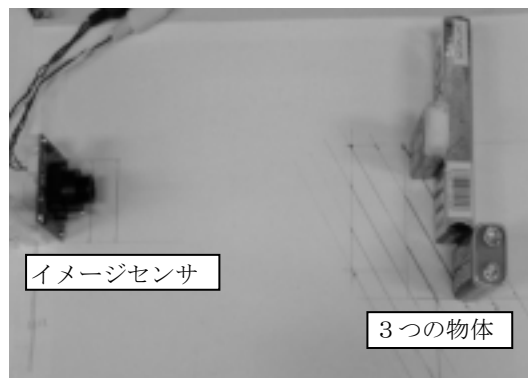


図5 評価実験の様子

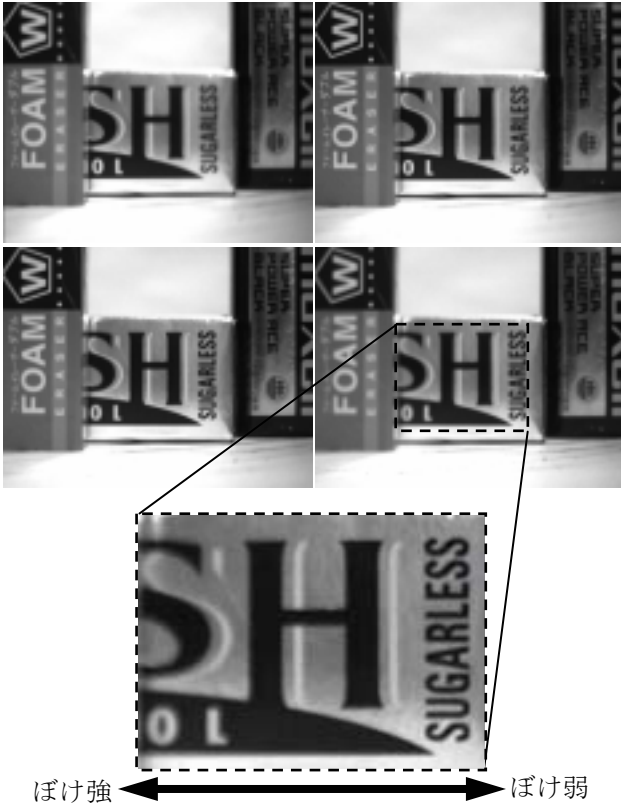


図6 多重フォーカス画像

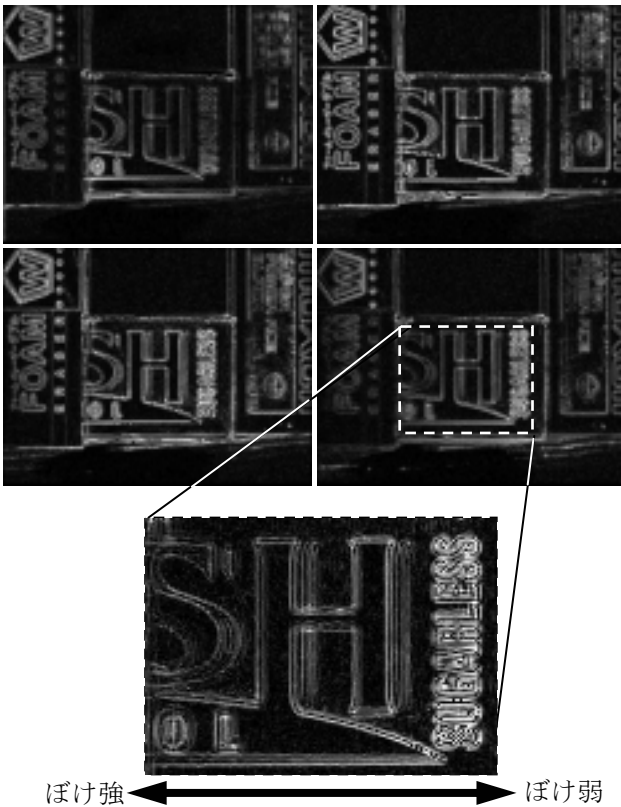


図7 d値画像 (図6の各画像に対応)

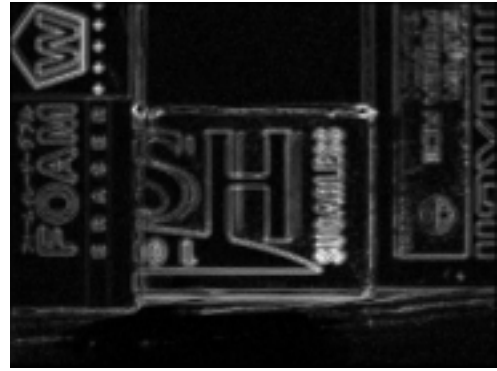


図8 d値平均画像

#### 4. 提案方式の評価実験

図5のような小規模かつシンプルな実験環境を用意し、距離画像の生成を試みた。その詳細は以下の通りである。

- i) 傾斜角  $\theta = 35^\circ$
- ii) 焦点面間距離  $L = 12\text{mm}$
- iii) 焦点面数 (多重フォーカス画像の撮像枚数) 4枚
- iv) 1画像の構成画素数  $320 \times 240$  pixels
- v) カメラ・物体間の距離 約  $130\text{mm}$

図6が、本実験環境で撮像した多重フォーカス画像である。図6下に示した多重フォーカス画像の一部拡大図を見ると、各物体面はイメージセンサに対して正対しているにもかかわらず、同物体面におけるぼけ量が徐々に変化していることがわかる (左から右に向かってぼけが弱くなっている)。図7は、図6の各画像に式(1)を適用し、各画素のぼけ量を輝度値で表現したd値画像である。これら4枚の画像より合焦点の探索およびその距離値の取得を行う。さらに、これら4枚のd値画像より、領域分割に利用するd値平均画像を生成すると図8が得られる。

図9が本実験の最終結果であり、色の濃淡で距離を表した画像 (距離画像) である。明るい領域は近くを、暗い領域は遠くを表す。この画像中で領域(b), (c), (d)がカメラから各計測対象である物体までの距離値を示しており、その値は実際の物体の空間配置状況とほぼ一致する。尚、領域(a)は無限遠であり、また領域(e)は床面に位置するため、カメラに正対した面ではなく計測対象ではない。領域(b)と(e)の間、(c)と(e)の間に、床面の影の影響が現れているが、これも今回の距離計測とは関係ない。

ただし、領域(b)と(c)の間に生じたノイズは、計測対象である物体面上に位置しているが、正しい距離値を示していない。その理由を、図10を使って以下に説明する。図10中の丸印で示す合焦点では、正しい距離値の取得が可能である。よって、領域(b)および(c)における距離値を決定することはできる。しかし、その両領域に挟まれた中央の小領域は、合焦点を持たないため、周囲の距離値をもとに補間する必要がある。ただし、距離値の違う2つの領域に挟まれており、その小領域が領域(b)と領域(c)のどちらの距離値で補間されるのが正しいかを決定できない。このように現時点では、合焦点を持たず、かつ異なる距離値を持つ領域で囲まれた領域には、正しい距離値を割り当てられないという課題を有している。

なお、図11に示す理想距離画像 (例えば、十分な数の焦点面を使って、従来のDFF方式によって得られるような

画像)を用意し、提案方式より作成した距離画像との平均絶対誤差(MAE)を算出したところ、5.3であった(計測対象外を示す白色領域は含まない)。輝度値1の差は、約1.1mmのずれを表すため、平均で約1.7mmだけの誤差が生じたことになる。また、3つの物体の奥行きサイズの合計は約40mmほどであるので、従来方式で同様の計測範囲および精度を要求した場合、約23枚の多重フォーカス画像が必要となることから、今回の実験環境では撮像枚数を5分の1以下に抑制できたことになる。

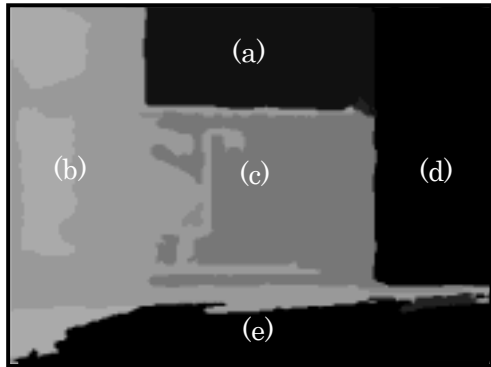


図9 距離画像(実験結果)

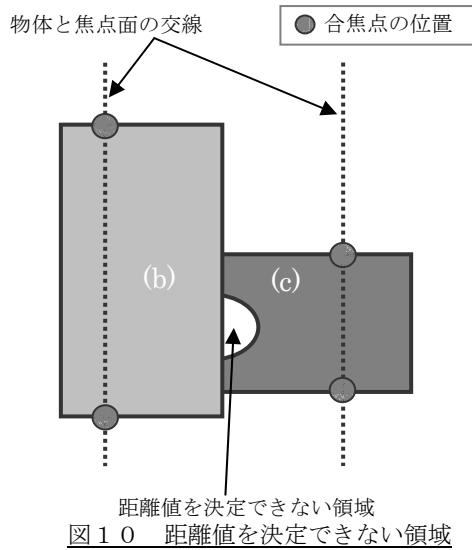


図10 距離値を決定できない領域

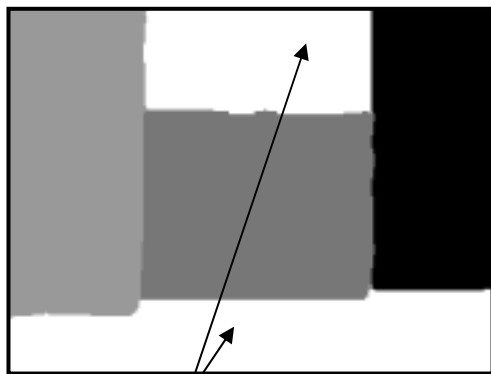


図11 理想の距離画像

## 5. まとめ

本稿では、従来の DFF による距離計測方式が、リアルタイム距離計測などの高速処理に適さない根本的な理由として、光学系がボトルネックとなっていること、および撮像枚数と計測精度が等価であることを指摘した。さらに、その問題を解決する手段として傾斜焦点面を利用した多重フォーカス画像を利用することにより、距離計測精度を保ったまま撮像枚数を大幅に減らせる新たな方式を提案した。また、本提案方式を用いて距離画像を生成する実験を行うことで、その有用性を示した。

今後の課題としては、異なる距離値を持つ領域に挟まれ、合焦点を持たない領域の距離値割り当てに関するアルゴリズムを再考することである。また焦点面の配置方法に関して、今回利用した配置とは異なるものについても検討し、より距離計測に適した方式に改良していく予定である。

## 参考文献

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] H.Kashiyama, T.Yoshida, T.Hamamoto, "Smart Image Sensor for Detection of Well-focused Position using Multiple Focused Images", ISPACS, D2-6, pp.282-285 (2003-12)
- [4] E.Krotkov, "Focusing", International Journal of Computer Vision, Vol.1, No.3, pp.223-237 (1987)
- [5] S.K.Nayar, Y.Nakagawa, "Shape from Focus", IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, vol.16. no.8, pp.824-831 (1994-8)
- [6] M.Subbarao and G.Surya, "Depth from Defocus: A spatial domain approach", International Journal of Computer Vision, vol.13, no.3, pp.271-294(1994)
- [7] A.Yokota, T.Yoshida, H.Kashiyama, T.Hamamoto, "High-speed Sensing System for Depth Estimation Basend on Depth-From-Focus by Using Smart Imager", IEEE Int. Symposium on Circuits and Systems, CD-ROM, 4pages (2005-5)
- [8] S.Beucher, "Geodesic Reconstruction, Saddle Zones & Hierarchical Segmentation", Image Anal Stereol 20, pp.137-141 (2001)