

多重フォーカス画像を用いた高速合焦判定スマートイメージセンサ

吉田 崇[†] 柏山 英輝[†] 浜本 隆之[†]

[†] 東京理科大学大学院工学研究科 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3

E-mail: [†] {yoshida,kashi,hamamoto}@isl.ee.kagu.tus.ac.jp

あらまし 本稿では、多重フォーカス画像を用いた高速合焦判定機能を実装したスマートイメージセンサについて報告する。提案方式を用いることで、多重フォーカス画像から合焦判定を行い全域合焦画像を作成することができる。この合焦情報を利用することで、センサとオブジェクト間の距離を推定することが可能である。

提案方式を搭載した試作センサは、64×64 画素の CMOS センサであり、列並列による高速処理を実現している。本稿では、合焦判定手法、PC によるシミュレーション結果、センサ設計および試作センサの TEG 回路の検証結果について述べる。

キーワード スマートイメージセンサ、多重フォーカス、合焦判定、距離計測、全域合焦画像

Smart image sensor for high-speed well-focus judgment using multiple focal images

Takashi YOSHIDA[†] Hideki KASHIYAMA[†] and Takayuki HAMAMOTO[†]

[†] Dept. of Electrical Engineering, Tokyo University of Science 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

E-mail: [†] {yoshida,kashi,hamamoto}@isl.ee.kagu.tus.ac.jp

Abstract: In this paper, we report about the smart image sensor with well-focus judgment. With the algorithm we propose, the smart image sensor can create an all-focused image by detection of well-focused position from multiple focused images. Well-focused information is also useful for the distance estimation from the sensor to objects.

A prototype CMOS sensor with 64x64 pixels has been fabricated. It has circuits for high speed well-focus judgment based on column parallel architecture. We explain the algorithm, computer simulation, sensor fabrication and results of some test circuits.

Keyword Smart image sensor, Multiple focus, Well-focus judgment, Distance estimation, All-focused image.

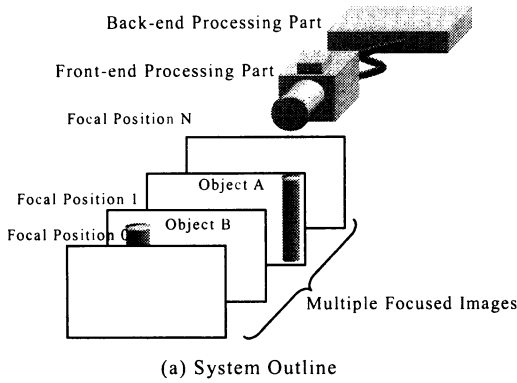
1. はじめに

本稿では、合焦判定機能により得られた焦点距離情報を利用することで、距離計測を可能とする高速合焦判定スマートイメージセンサについて報告する。距離計測機能を持つスマートイメージセンサは、これまでいくつか提案されている[1]-[3]。これらのシステムでは、2 眼に配置したセンサ間の視差情報を利用したり、対象物に投射されたレーザ光等の反射を計測する方式がとられている。

我々が提案するスマートイメージセンサは、可変焦点の光学系から得られた多重フォーカス画像を用いて合焦判定を行い、その焦点距離情報からセンサ-オブジェクト間の距離を得るものである。本稿では、この方式について解説し、コンピュータを用いたシミュレーションの結果を示す。さらに提案方式を実際のセンサに搭載するための設計仕様と試作センサの検証結果について報告する。

2. 合焦判定システムとイメージセンサ

提案する距離計測システムは、合焦判定の結果の焦点距離情報から、間接的に距離情報を得るものである。すなわち、まず焦点距離の異なる複数枚の画像を単眼光学系により取得し、それらの画像から合焦位置を検出する。この合焦位置の情報からすべての位置で合焦している全域合焦画像を作り出すことができる。これにより、焦点距離情報をもとにレンズとオブジェクトとの相対距離の推定を行うことが可能になる。提案するシステムの概念図を Fig.1 に示す。このシステムは、大きくフロントエンド部と、バックエンド部から構成される。フロントエンド部は合焦位置検出を行う部分であり、可変焦点レンズと合焦判定機能を有するスマートイメージセンサおよびセンサ出力変換のための DC コンバータ、センサおよび光学系制御用の FPGA およびアクチュエータからなる。判定処理をすべてイメージセンサ内部で行うことから、従来規格に縛られることない高速処理が期待できる。後段の処理系は主にユーザインターフェイスや平坦部補間等の付加的な



(a) System Outline

(b) Front-end Processing Part

Fig.1 System architecture

処理を行う。

3. 合焦判定方式

合焦判定は焦点距離を変化させながら撮像した複数枚の画像から行う。Fig.2 には、その例として焦点距離の異なる画像を示す。全ての判定処理をイメージセンサ内で行うため、合焦判定は画素毎に、着目画素とその近傍の画素値をもとに行う。評価値として“d”をラプラシアンベースの式(1)のように定義する。

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

(I:輝度値 F:フォーカス位置 x,y:画素座標)

焦点距離を変化させた場合、ある着目画素における“d”値の変化を示したものが Fig.3 である。横軸は焦点距離に対応する焦点位置の番号であり、焦点距離の

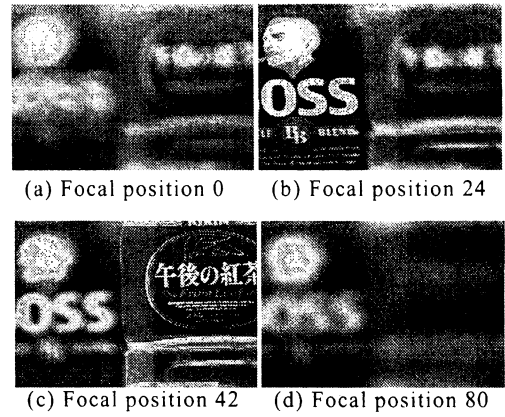


Fig.2 Example of multiple focused images

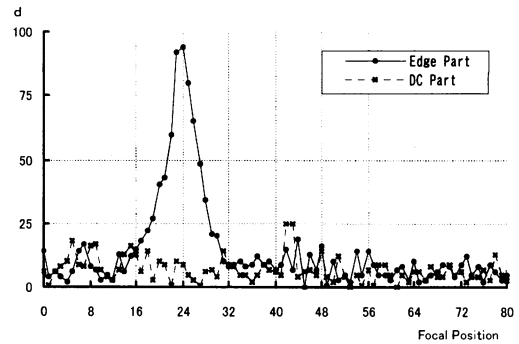


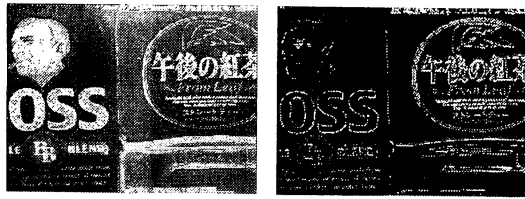
Fig.3 Example of d value versus focal position

変化に比例している。Fig.3 では着目画素をエッジ部分と平坦部とした場合の結果が示されており、この例における合焦位置は焦点位置 24 のときである。エッジ部付近の着目画素に対しては、合焦位置では評価値“d”が顕著に増大する。これにより、合焦位置の検出およびエッジ部と平坦部の切り分けが可能となる。

4. 評価実験

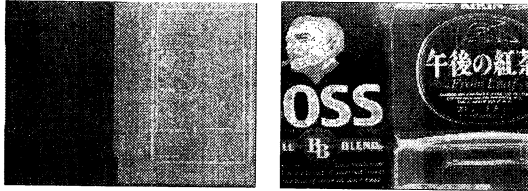
式(1)にて判定した焦点距離情報を基に全域合焦画像を作成し、その画質を比較評価することで合焦判定の精度を評価する。評価に用いた多重フォーカス画像は Fig.2 に示したものであり、2つの距離の異なるオブジェクトに対して、焦点距離を変化させて撮像された合計 81 枚の画像組からなる。この画像について、遠方の焦点位置の画像から順にフォーカル番号を 0 から 80 として定義している。

リファレンス画像は可変ブロックサイズ FFT 判定によって既知となっている合焦フォーカス位置を元に人為合成した画像であり、定量評価には PSNR を用いた。Fig.4 には式(1)にて判定したフォーカス位置情報を元に生成した全域合焦画像を示す。ここで評価値“d”に対する閾値“d_{th}”を Fig.4(a)では 0、Fig.4(b)では 65 としており、全フォーカス位置にて“d”が閾値“d_{th}”以下で



(a) Threshold "d_{th}"= 0

(b) Threshold "d_{th}"= 65



(c)"d_{th}"= 65+interpolation (d)"d_{th}"= 65+interpolation

Distance Image

All-focused Image

Fig.4 Result of the computer simulation

Table1 PSNR of the all-focused images

	PSNR[dB]
Threshold "d _{th} "=0 (Fig.4(a))	25.4
Threshold "d _{th} "=65 (Fig.4(d))	31.6

あり、合焦判定不能と判定された画素は輝度値 0 として出力されている。

Fig.4(c)は Fig.4(b)の結果を元に補間処理を行った際のフォーカス位置を画像化した距離画像である。この距離画像はフォーカス番号をグレースケールに変換して表示しており、手前のオブジェクトほど明るくなる。また、Fig.4(d)は Fig.4(c)の距離情報から作成された全域合焦画像である。全域合焦画像の精度評価結果を Table1 に示す。エッジ部と平坦部の切り分け処理によって、判定精度が向上していることが判る。このように、提案方式は平坦部における判定ミスを除去し、有用な情報のみを出力可能である。実際のシステムにおいては、補間処理は後段処理系で必要に応じて行われるが、エッジ部と平坦部の閾値による切り分けはイメージセンサ内で行われる。したがって、平坦部の不要なデータを後段処理系に転送することを抑止できる。

5. センサ LSI の設計と特性評価

5.1 スマートイメージセンサの概要

Fig.5 に今回設計した合焦判定機能を組み込んだスマートイメージセンサのプロトタイプチップを示す。本チップは 2-poly 3-metal 0.6μm CMOS プロセスで作成し、画素数 64 × 64、開口率 24%、ゲート数は約 20 万である。センサの諸元を Table2 に示し、センサ内のアーキテクチャの概略図を、Fig.6 に示す。このセンサは、処理回路を列数分だけ搭載し、列並列による判定処理が可能である。また、X、Y 方向のアドレ

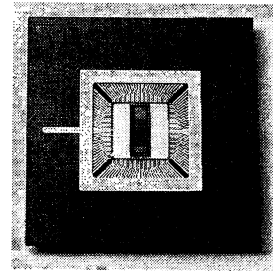


Fig.5 Prototype chip

Table2 Specification of the prototype

number of pixels	64 x 64
chip size [mm ²]	2.78 x 7.49
element size [μm ²]	
transducer	25.0 x 25.0
preparatory memory	62.3 x 25.0
ALU	99.8 x 25.0
analog comparator	90.5 x 25.0
digital comparator	106.9 x 25.0
d memory	18.5 x 25.0
f memory	41.6 x 25.0
i memory	12.6 x 25.0
number of transistors	
transducer [trs./pixel]	6
preparatory memory [trs./line]	18
ALU [trs./line]	57
analog comparator [trs./line]	12
digital comparator [trs./line]	73
d memory [trs./pixel]	6
f memory [trs./pixel]	24
i memory [trs./pixel]	5
fill factor [%]	24.06

スデコードにより、任意の画素に対してランダムアクセスが可能である。コマンドデコードは、外部から入力される 4bit のコマンドにより、センサの動作を変更するために搭載されている。Table3 は、Fig.6 に示したセンサ概略図の I/O のリストである。

5.2 TEG 回路特性評価

特性評価用の TEG 回路を用いて検証を行った。本センサには、機能毎に TEG 回路が搭載されているが、ここでは、PD 部における光電変換特性および ALU の部分についての結果を示す。

5.2.1 PD 光電変換部の入出力特性

PD 光電変換回路の入出力特性を検証した。試作チップの PD は、入力光に対して Fig.7 に示すような出力特性を示す。検証時の動作速度は 960Hz である。

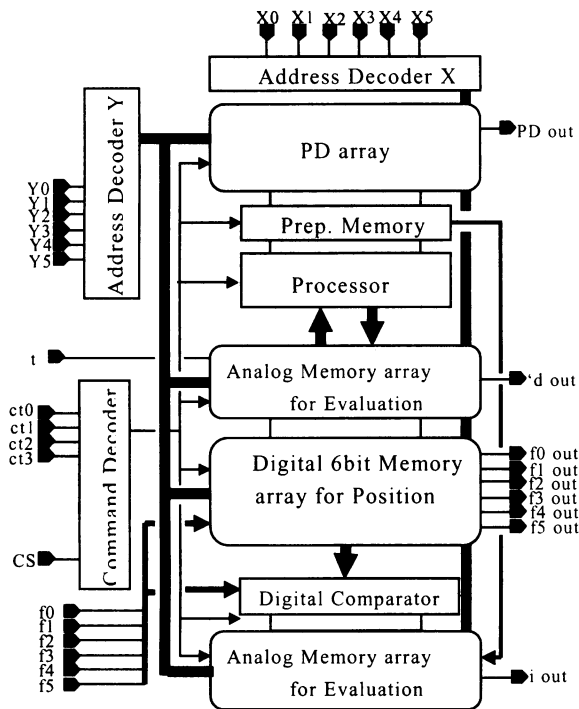


Fig.6 Block diagram of the prototype chip

Table3 I/O of the prototype

I/O	Name	Value or Signals
In	t in	Threshold for DC part cutting
In	ct[0:3]	Control command signals for operation
In	CS	Command issue for operation
In	f[0:5] in	Focal position information signals
Out	d out	Evaluation value for monitor
Out	PD out	Raw pixel value for monitor
Out	i out	Intensity for all-focused image
Out	f[0:5] out	information

5.2.2 ‘d’評価用 ALU 回路特性

ALU は評価値 “d” を算出するための回路であり、着目画素と 4 近傍画素の値を入力し、式 (1) の演算を行う部分である。Fig.8 は、着目画素の入力電圧を 2.7, 3.3, 3.8V にそれぞれ固定したときの、4 近傍画素に対する入力電圧と “d” 値の変化を表したものである。4 近傍画素の入力値はすべて同じ値としている。原理的には着目画素とその近傍画素の入力電圧の差が最小になるときに “d” 値が最小になり、その点を中心に横軸に対して線対称になる。Fig.8 からはこの特性を観測できる。したがって、ALU は設計段階の性能で動作していることが分かる。また、4 近傍画素の値を個々に変化させた場合でも適切な出力が得られていることが確認された。

同様の TEG 回路の検証結果において、バッファアンプ、アナログ比較器についても、正常な動作が確認さ

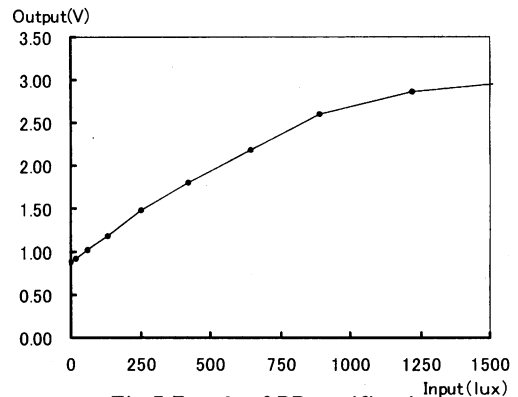


Fig.7 Result of PD verification

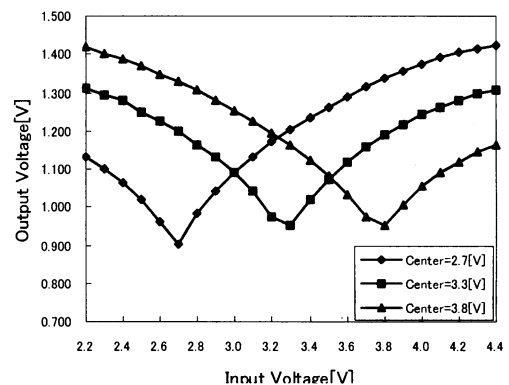


Fig.8 Result of ALU verification

れている。プロトタイプチップの検証は現在も継続中である。

6 まとめ

本稿では、多重フォーカス画像を用いて合焦判定を行うことにより、全域合焦画像の作成や、距離推定を行うシステムを検討した。スマートイメージセンサに実装するために適した判定方式を提案し、そのシミュレーションを行った。さらに、この方式を実際に組み込んだプロトタイプチップを作成した。今後はプロトタイプチップの検証を進めるとともに、後段の処理系も含めたシステム全体の構築を行っていく予定である。

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,” *Proc. of ESSCIRC*, pp.208-211, 1998.
- [3] Y. Oike, et al., “Smart Sensor Architecture for Real-Time High-Resolution 3-D Measurement and Its Implementation,” *ITE Technical Report* Vol.26, No.41, pp.37-40, 2002.