2. 多機能化するカメラ

2-3. CMOSイメージセンサを用いた複眼カメラとその応用

(正会員) 豊田 孝†

キーワード ● CMOSイメージセンサ, 複眼, 動き検出, ローリングシャッター, 距離画像

1. ま え が き

近年, 携帯電話, 自動車等へ搭載されるカメラは, イメージセンサの製造プロセスの微細化, および, 光学系を含むカメラモジュールの実装組立技術の進歩により, 小型・軽量化が進められてきた。しかしながら, 従来から用いられているような単眼光学系を搭載した構造では, イメージセンサの画素の微細化が進んだとしても, イメージセンサの感度と微細画素に対応した光学系への高い性能要求のため, カメラモジュール全体の小型・薄型化には明らかに限界が存在する。そこで, この限界を打破する手段として, 昆虫などの視覚系に見られる複眼光学系を利用した薄型画像入力モジュールが提案され, 研究されている¹⁾。

今回われわれが開発した複眼カメラは, 短焦点レンズを2次元アレイ状に配置することにより, カメラ全体の薄型化を実現している。本稿では, 3×3 の複眼光学系を搭載した複眼カメラを用いたいくつかの応用例について報告する。

2. 複眼カメラの構造

図1に今回試作した 3×3 複眼カメラの構造を示す。フレキシブル基板上にカラーCMOSイメージセンサが実装され, 10ビットのデジタル信号が出力される。CMOSイメージセンサは, 次節で述べる1フレーム内動き検出機能を実現するために, ローリングシャッター方式の読出し方法のものを採用した。また, 個々のレンズで構成されるユニット(個眼)は, レンズとイメージセンサの間の隔壁部材で仕切られるが, ユニットの画像(個眼画像)間のクロストークを抑えるために隔壁部材は, イメージセンサ表面にできるだけ近づける必要がある。そのため, 今回使用したイメージセンサは, センサ表面にカバーガラス(約0.4mm厚)が密着したCSP(Chip Size Package)構造のものを採用している。

絞り, レンズホルダ, 隔壁, センサベースは $50 \mu\text{m}$ ある

図1 複眼カメラの構造

表1 複眼カメラのスペック

解像度	
ユニット(個眼)数	3×3
ユニット画素数	360×300
画素ピッチ	$3.18 \mu\text{m}$
光学系	
焦点距離	1mm
材質・形状	平凸球面ガラスレンズ
アレイピッチ	$1.25\text{mm} \times 1.05\text{mm}$
水平画角	50°

いは $100 \mu\text{m}$ 厚の金属薄板をエッチングによって作製し, その表面を反射防止のため黒化処理している。この金属薄板を積層することにより, 狭ピッチでアスペクト比の高い隔壁構造を実現している。さらに, 金属薄板の積層枚数を調整することにより, レンズのバックフォーカスを調整することができる。今回試作した 3×3 複眼カメラのスペックを表1に示す。

さらに, カラー画像の色再現性を考慮して, 積層隔壁の間には, 厚み $90 \mu\text{m}$ 程度の高分子材料から成る近赤外光カットフィルタ(IRCF)が挿入されている。本フィルタは,

* 本稿の著作権は, 著者に帰属致します。

† 船井電機株式会社 開発技術本部

"Compound-eye Camera Using a CMOS Image Sensor and its Applications" by Takashi Toyoda (R&D Engineering Department, Funai Electric Co., Ltd., Osaka)

図2 3×3複眼カメラの外観写真
(9.6mm(W)×9.0mm(D)×3.4mm(H))

図3 3×3複眼画像撮像例(口絵カラー参照)

ガラス蒸着タイプのIRCFと同等の透過特性を有し、かつ薄型で加工性に優れ、割れないという特長を有するため、複眼カメラの構造に適している。3×3複眼カメラの外観を図2に示す。また、その複眼カメラによる撮像例を図3に示す。

3. 1フレーム内時間差分情報の利用

3.1 原理

ローリングシャッタ方式の読出し方法のCMOSイメージセンサでは、各行を順次露光し読出すため、通常の単眼レンズを搭載したカメラモジュールでは、図4(a)に示すように、読出し開始行と最終行で、全行を読出すために必要な時間だけずれた画像となり、動体を撮影すると大きく歪んだ画像となる。

これに対して複眼光学系を用いると、図4(b)に示す3×3の複眼カメラの場合のように、一つの個眼画像を取得するのに必要な時間は単眼レンズを使用した場合の約1/3であり、そのため動体の歪みは小さくなる。このとき各段の個眼画像は時間差を持つ画像となっている。例えば、全行読出しに120ms必要な場合、1段目と2段目の個眼画像は40msの時間差をもつ画像となり、1段目と3段目の個眼画像は

図4 動体撮像イメージ図(口絵カラー参照)

図5 個眼画像間の差分による動き検出結果(口絵カラー参照)

80msの時間差をもつ画像となる。

このように、ローリングシャッタ方式の読出し方法と複眼光学系を組合せた複眼カメラの上下段の個眼画像間の差分処理を行うことによって、1フレーム内での動き検出を実現することができる。

3.2 動き検出

図5に、3×3複眼カメラを用いた動き検出結果を示す。個眼画像Aと個眼画像Bの時間差は約80msであり、被写体の動きのある部分に動きベクトルが検出されている。動き検出アルゴリズムは、オプティカルフロー推定法の一つである勾配法を用いた^{2) 3)}。勾配法の基本拘束式は、近傍領域ではオプティカルフローは一定、と仮定する空間局所最適化法によって計算を行った。実際には、前処理として、

バンドパスフィルタによるノイズ除去およびシェーディング補正を行っている。また、上下段の個眼画像には微小ながら視差があり、近距離の被写体に対しては、この視差量が大きくなり、動き検出に悪影響を及ぼすようになる。これを解決する方法として、上下左右の個眼画像を利用した視差除去方法を提案している⁴⁾。

3.3 光源の時間分割発光制御による瞳、皮膚検出

人の網膜、皮膚、髪の毛などの波長による反射率の違いを利用して、人物の瞳位置を検出する方法⁵⁾や人の顔などの皮膚領域のみを抽出する方法⁶⁾が提案されている。これらはいずれも単眼カメラと近赤外領域の2波長の光源を利用している。

複眼カメラは、3.1節の時間差分情報利用の原理で説明したように、1フレームで異なったタイミングの画像を取得することができる。さらに、イメージセンサの撮像タイミング出力信号を用いることによって、複眼画像の各段の撮像に同期して、2種類の近赤外LEDの発光を制御することが可能である。この方法を用いて、瞳検出および皮膚検出が検証されている⁷⁾。

4. 広 角 撮 影

現在、車載カメラやセキュリティカメラでは、魚眼レンズや双曲面ミラーを用いた超広角カメラや全方位カメラが用いられている。また、複眼光学系を用いたものとしては、バンドルファイバによって広角画像を取得するシステムが提案されている⁸⁾。しかしながら、これらのシステムでは装置の小型化や画像の後処理が課題として残る。

われわれは、小型で後処理負荷の小さい広角画像を取得できる複眼カメラを提案する。複眼カメラを構成する2次元状に配置された複数の個眼レンズにプリズムを搭載して光軸を曲げ、それぞれ異なる視野を撮像することで、広角パノラマ画像を生成する。本方式は、複数のカメラを使用したパノラマ撮影や1台のカメラをパン駆動させるシステムに比べ小型であり、また、魚眼レンズや全方位カメラを使用した広角画像に比較して、画像の歪みが小さいという利点がある。

図6に、水平画角150°の広角複眼カメラの構造を示す。3×3複眼カメラの二つの個眼レンズの前に、45°直角プリズムをある角度で搭載した構造になっている。これにより、左右と中央(プリズムなし)の異なる三つの視野を撮像でき、それら3枚の画像をつなげることで、個眼水平画角50°の3倍の水平画角150°の広角画像の生成が可能となる。

3枚の個眼画像のうち、プリズムを通した左右2枚の画像はミラー反転しているため、ミラー反転を戻す処理が必要となる。実際のパノラマ撮像例を図7に示す。個々の個眼画像に歪みが少ないため、パノラマ画像全体としても歪みが小さいものとなっている。

上記150°広角複眼カメラでは、プリズム2個による左右

図6 150°広角複眼カメラの構造(口絵カラー参照)

図7 150°広角画像例(口絵カラー参照)

図8 180°超広角複眼カメラの撮像例(口絵カラー参照)

画像と正面画像をつなぎ合わせて広角画像を生成していたが、3×3の個眼のうち4隅の個眼の前に10°、-10°、26°、-26°程度傾けた45°直角プリズムを搭載することによって左右4方向の画像を取得し、それらと正面画像をつなぎ合わせることで、さらに広角画像を合成することができる。プリズム4個を搭載した180°超広角複眼カメラの撮像例を図8に示す。

5. 広角動き検出カメラ

3.2節、4章で複眼カメラを用いた動き検出機能およびプリズムを利用した広角撮影について述べた。本章では、これら二つの機能を組合せることで、広い視野の中で1フレーム内の動き検出が可能な広角動き検出カメラについて説明する。

3×3複眼カメラの1段目と3段目の個眼画像間で差分をとることで動き検出を行う。そのとき、それぞれの段の左右の個眼は、図6のように、プリズムによって光軸が曲げられ、左右の視野を撮像している。広角画像は1段目あるいは3段目のどちらかで生成し、1段目と3段目の差分処理によって得られた動きベクトルを広角画像に重ねることによ

図9 150° 広角動き検出カメラの撮像例 (口絵カラー参照)

図10 3次元情報取得結果 (提供：大阪大学大学院 谷田研究室)
(口絵カラー参照)

り、広角画像中の被写体の動きを表示することができる。実際に被写体の動き検出を行った広角撮像例を図9に示す。

6. 3次元情報取得

複眼カメラの各個眼間の視差を用いて、距離情報を取得する方法を提案する⁹⁾。複眼画像のすべての個眼画像を用いて画素再配置法¹⁰⁾により再構成画像を生成し、それと各個眼画像の逆投影画像との偏差量の総和を評価値として、対象物体までの距離を推定する。図10に、距離の異なる複数の被写体の3次元情報取得を行った結果を示す。被写体までの距離に応じて、濃淡色で色分けされた距離画像が得られており、また、それぞれの被写体までの距離情報をもとに、フォーカスした全焦点画像が生成されている⁹⁾。

上記手法では基線長が短いために、距離画像の精度に課題があったが、最近の研究では、レンズを不規則配置することによって、遠方物体に対して仮想的な視差を与えるとともに、距離推定過程に超解像処理を導入することで、測距精度、再構成画像の解像度を改善することができている¹¹⁾。

7. む す び

汎用イメージセンサと複眼光学系を組合せた小型・薄型複眼カメラを開発した。イメージセンサとして、ローリングシャッタ方式の読み出し方法を有するCMOSイメージセンサを用いることによって、複眼画像に内在する時間軸情報の応用が実現できた。上下段の個眼画像間差分による動き検出、さらに、2種類の近赤外LEDを上下段の個眼画像に同期させて点灯することによって、1フレーム内での瞳検出、皮膚検出が可能となった。

また、複眼カメラのマルチカメラ的応用として、プリズムを組合せることによって、広角パノラマ撮影を可能にした。さらに、動き検出を合わせることで、広角動き検出カメラを実現した。

最後に、複眼カメラの視差情報を用いた物体の3次元情報取得方法を提案し、その有用性を示した。今後はさらに測定可能距離を伸ばす手法を検討していく予定である。

(2008年11月26日受付)

〔文 献〕

- 1) J.Tanida, T. Kumagai, K. Yamada, S. Miyatake, K. Ishida, T. Morimoto, N. Kondou, D. Miyazaki, and Y.Ichioka: "Thin Observation Module by Bound Optics (TOMBO), Concept and Experimental Verification", Appl. Opt., **40**, 10, pp.1806-1813 (2001)
- 2) B.K.P. Horn and B.G. Schunck: "Determining Optical Flow", Artificial Intelligence, **17**, pp.185-203 (1981)
- 3) 布施孝志, 清水英範, 堤盛人: "オブティカルフロー推定における光学勾配法の比較分析", 応用測量論文集, **11**, pp.45-52 (2000)
- 4) 久後耕一, 中尾良純, 豊田孝, 政木康生: "複眼光学系とCMOSイメージセンサを利用した動き検出", 2006年映情学冬季大, 1-3 (2006)
- 5) 中島彰, 塗壁悠治, 海老澤嘉伸: "2波長光源による瞳孔検出", 2006年映情学冬季大, 20-4 (2006)
- 6) 渡辺泰斗, 山本和彦, 加藤邦人, 小島真一, 中西悟: "近接した近赤外光源による肌検出手法の研究", 第13回画像センシングシンポジウム予稿集, IN1-18 (2007)
- 7) 中尾良純, 久後耕一, 豊田孝, 政木康生: "複眼光学系を用いた瞳検出", 2006年映情学冬季大, 4-2 (2006)
- 8) R. Hornsey, et al.: "Electronic Compound-eye Image Sensor Construction and Calibration", SPIE, **5301**, A, p.5, San Jose, CA (2004)
- 9) R. Horisaki, S. Irie, Y. Ogura and J. Tanida: "Three-Dimensional Information Acquisition Using a Compound Imaging System", Optical Review, **14**, 5, pp.347-350 (2007)
- 10) J.Tanida, et al.: "Compact Image Capturing System Based on Compound Imaging and Digital Reconstruction", Micro- and Nano-optics for Optical Interconnection and Information Processing, 4455 of Proc. SPIE, pp.34-41 (2001)
- 11) 堀崎遼一, 中尾良純, 豊田孝, 香川景一郎, 政木康生, 谷田純: "単一撮像素子を用いた小型複眼カメラにおける画質と測距精度の向上", 映情学技報, **32**, 44, pp.25-28 (Oct. 2008)

とよだ 孝 1990年、京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、三菱電機(株)中央研究所に入社。2003年、(株)ルネサステクノロジへ転籍。2005年より、船井電機(株)開発技術本部にて、複眼光学系を搭載した小型カメラモジュールの研究開発に従事。正会員。