Vol.2009-CVIM-167 No.27
2009/6/10

プログラマブルアパチャカメラ

渡邉拓也[†1]　長原一[†1]
Changyin Zhou[†2]　Shree K. Nayar[†2]

一般的なカメラはレンズとセンサ素子，そして絞りなどから構成されている．その中で，本研究は絞りの役割に注目する．絞りは大きさを調節することで，撮像画像の光量や被写界深度を変化できるという役割を持つ．この特徴を利用して，可変絞り画像から高ダイナミックレンジ画像の合成やデジタルリフォーカス，距離推定を行う手法が提案されてきた．本研究では，可変絞り画像を効率的に撮像できるプログラマブルアパチャカメラを提案する．提案カメラでは反射型液晶ディスプレイ (LCoS) を絞りとして用いることで，電気信号により絞り形状を能動的に変化できる．実際に試作機で撮影した画像を用いて，高ダイナミックレンジ画像の合成とデジタルリフォーカスを行い，提案手法の有効性を確認した．

Programmable Aperture Camera

Takuya Watanabe,[†1] Hajime Nagahara ,[†1]
Changyin Zhou[†2] and Shree K. Nayar[†2]

A camera consists of a lens, an aperture and an image sensor. We focus on the aperture mechanism. An aperture works for controlling intensity or depth of field on captured image by changing its diameter. There have been a lot of works such as high dynamic imaging, digital refocusing and depth from defocus etc. from various aperture images. In this paper, we propose a Programmable Aperture Camera which we can obtain various aperture size or pattern more effectively. We use a Liquid Crystal on Silicon (LCoS) as an aperture so that we can dynamically change the aperture pattern by computer control. We built a prototype system and confirmed the utility of the proposed camera.

†1 大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻
Graduate School of Engineering Science, Osaka University
†2 Department of Computer Science, Columbia University

1. はじめに

カメラは，一般に映像メディアから監視システム，近年では携帯電話やゲーム機など様々な分野で応用されている．通常カメラはレンズと受光素子，絞り，フィルタなどから構成されており，この基本構造や撮像原理自体はあまり進化していない．一般的なカメラは，絞りの開口やレンズの位置関係を変化させることで，若干の幾何特性や光学特性を変化させることはできる．しかし，それらの特性をフレーム毎など高速には変更できない．そこで，カメラの幾何特性や光学特性を動的に変化させ，より高度な画像センシングを行う方法が近年盛んに研究されている[1),2)]．その中で本研究は絞り制御による特性変化に焦点をあてる．

絞りの特性のひとつに光量変化がある．絞りの開口の大きさを変化させると，センサ素子に入射する光量を調節することができる．絞りの大きさや透過率を変化させることで得られる輝度の異なる複数枚の画像を合成することで，明るいところから暗いところまで表現可能な高ダイナミックレンジ画像を生成できる[3),6)]．

また，絞りの開口を調節すると被写界深度が変化する．この特性により，絞りの開口を変化させると距離に応じて画像のぼけ方に違いが生じるため，被写界深度の異なる複数枚の画像から Depth form Defocus により距離を推定することができる[4)–6)]．

さらに，絞りの形状を変化させると，その開口の位置に応じて視点が移動する[7)]．この特徴を利用することで，ライトフィールドを単一カメラで撮像できるため，得られる視点の異なる複数枚の画像を用いて，任意の箇所にピントを合わせるデジタルリフォーカスを行うことができる[8),9)]．また，コーディッドアパチャと呼ばれる特殊な絞り形状を設定することで，単一画像から距離復元やデジタルリフォーカス[10),11)]，超解像[12)] を実現する手法が提案させている．

このように，絞りを制御し効率的に画像を取得することは，近年上記の様な応用において注目されており，従来にも様々な方法が提案されてきた．絞りとして，紙片を用いてスライドさせるもの[9)]，プラスチック板を用いてモータで回転させるもの[8)]，液晶配列 LCA (Liquid Crystal Array)[9)]，透過型液晶ディスプレイ LCD（Transmissive Liquid Crystal Display）[13)] を用いる方法が提案されている．しかし紙片やプラスチック板，LCA を用いるものは，一般的なカメラの絞りとは異なり，円形以外の形状に変化させることができるという利点があるが，あらかじめ決められたパターンでしか制御できない，すなわち，任意の形状に制御することができないという欠点がある．また LCD は，駆動回路の遮蔽による入射光の妨げや，回折が生じるという問題がある．

© 2009 Information Processing Society of Japan

そこで本研究は，絞り形状を任意に制御可能なプログラマブルアパチャカメラを提案する．本研究は，可変光学素子の一つである反射型液晶ディスプレイ LCoS（Liquid Crystal on Silicon）絞りとして用いた．また，リレーレンズ系をカメラ光学系に用いるとこで，レンズを分解することなく，LCoS を絞りとして動作させることができるため，シーンに合わせてレンズを取り替え選択できるという実用的な利点をもち幅広い応用が期待できる．

可変光学素子として LCoS を用いた例に万波ら[14] のカメラがある．この研究では高ダイナミックレンジ画像の取得を目的として共役画像面に LCoS を配置することで，各画素ごとの入射輝度を調整するフィルタとして用いていた．本研究では画像面ではなく，絞り位置に LCoS を配置して絞り形状を制御する目的で用いている点がこれとは異なる．

以降，第 2 章で提案システムの構成とそのシミュレーション，実際に構築した試作機，そして LCoS の絞りモデルについて述べる．第 3 章では試作機で撮影した画像を用いて高ダイナミックレンジ画像の合成とデジタルリフォーカスを行い，本研究の有効性についての検証を示す．また，第 4 章では結論と今後の課題について述べる．

2. 提案システム

2.1 提案システムの構成

提案するシステムは LCoS と凸レンズ 2 枚，反射光と透過光の比率が 1 対 1 の偏光ビームスプリッタ，CCD カメラ，そして市販レンズで構成される．提案システムの概念図を図 1 に示す．

本提案システムは反射型の LCoS を用いるため，偏光ビームスプリッタを用いて折り畳んだ構成となっており，凸レンズ 2 枚を用いてリレーレンズ系を構築する．リレーレンズ系とは，レンズにより作成した像を別の位置へ転送する系のことをいう．本研究では，市販レンズを後側テレセントリック光学系と仮定する．現存の CCD 用のレンズの多くは周辺明度低下の抑制や，レンズマウント規格の制限により，後側テレセントリック光学系であるものが多い．また，この仮定により，用いる市販レンズがカメラ光学系の幾何や光学に影響を与えないため，本研究の目指すレンズ交換可能なカメラを実現する上での利点となる．

ここで，市販レンズを第 1 レンズとし，この第 1 レンズが光線を集光した位置を仮想画像平面とする．仮想画像平面に集光した光線は 1 枚目の凸レンズを通過し，偏光ビームスプリッタで偏光，反射され LCoS に入射する．LCoS により偏光方向を制御された反射光は，再び偏光ビームスプリッタをフィルタ通過し，2 枚目の凸レンズによりセンサ素子に集光する．これにより，第 1 レンズが仮想画像平面に作成した像が，センサ素子に転送されることとなる．

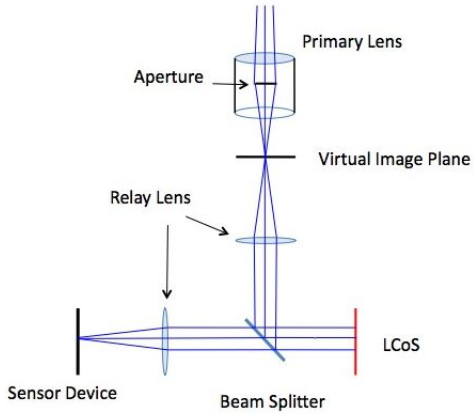

図 1 提案システム概念図
Fig. 1 Concept Figure of Proposed System

分かりやすく説明するために，偏光ビームスプリッタによる反射を展開した等価光学系を図 2 に示す．第 1 レンズを後側テレセントリック光学系と仮定しているので，第 1 レンズより出た各主光線は光軸と平行となる．レンズの特性により平行に入射した光線は焦点距離で集光する．ここで，2 枚の凸レンズは LCoS から焦点距離の位置に配置されるため，各主光線が LCoS 上で交差する．このとき仮想画像平面とセンサ素子は共役関係であり，見かけ上，仮想画像平面の位置にセンサ素子があるとみなすことができる．また，LCoS と第 1 レンズの絞りは共役関係であり，LCoS が見かけ上第 1 レンズの絞り位置にあるとみなすことができる．この構成により，仮想画像平面に集光するようフランジバックを考慮すれば，第 1 レンズは C マウントや F マウントなど，任意の市販レンズと付け替えることが可能である．

2.2 実機の試作

2.2.1 シミュレーション

提案手法に基づいて，LCoS を絞りとして使用する撮像系を設計した．設計するにあたって，光学設計ソフト「ZEMAX」（ZEMAX Development Co.）を用いた．等価光学系におけるシミュレーション結果を図 3 に示す．仮想画像平面より入射した光の主光線が LCoS 上で交差しており，また，LCoS で反射した光線が再びセンサ素子上で集光していることが確

© 2009 Information Processing Society of Japan

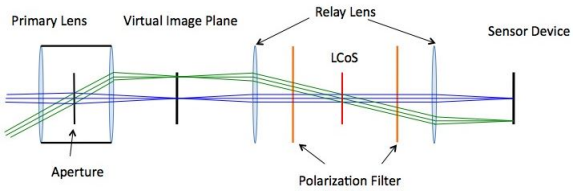

図 2 提案システム概念図　等価光学系
Fig. 2　Equivalent System of Proposed System

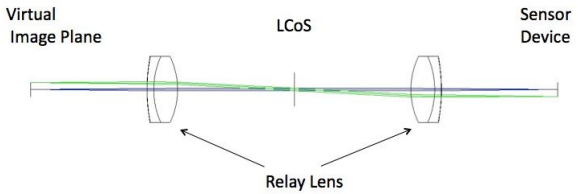

図 3 シミュレーション結果
Fig. 3　Simulation

認できた．

次に，光の集光位置と RMS スポット半径の関係を図 4 に示す．横軸がセンサ素子の中心からの距離を表し，縦軸が RMS スポット半径を表す．今回試作機のカメラに用いた Point Grey 社の Flea2 FL2G-13S2C-C の CCD は対角で 5.33[mm] で，ピクセルサイズは 3.75 × 3.75[μm] である．図 4 より，センサ素子上で集光した光は，すべて許容範囲内に収まると見込むことができる．

2.2.2　試作機の構築

シミュレーションに基づいて試作機を構築した．構築した試作機を図 5 に示す．試作機には，第 1 レンズに FUJINON 社の HF12.5HA-1B(C マウント焦点距離 12.5mm) または Nikon 社の Nikkor 20mm F2.8(Nikon F マウント焦点距離 20mm) を用いた．カメラには Point Grey 社の Flea2 FL2G-13S2C-C を使用した．最大解像度は 1296 × 964[pixels]，最大フレームレートは 30[fps]，ピクセルサイズは 3.75 × 3.75[μm] である．また，LCoS には Brillian Z86D-3 を使用した．この LCoS は素子サイズが 9.6 × 7.2[mm]，解像度は 800 × 600[pixels]，ピクセルサイズは 12 × 12[μm] である．円形絞りに限定すると，LCoS に表示できる最大絞り半径は 3.6[mm] であり，これが市販レンズの絞りの大きさに対応する．レンズ

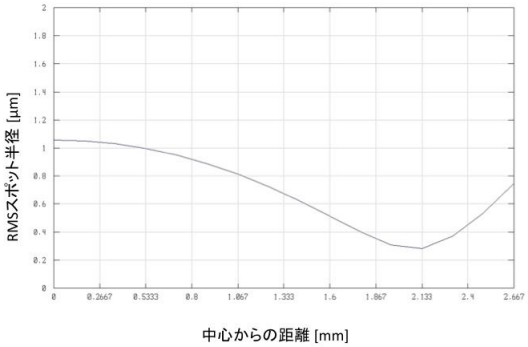

図 4 集光位置と RMS スポット半径の関係
Fig. 4　Relationship between the position of light concentration and RMS spot radius

表 1 試作機スペック
Table 1　Prototype parameter

解像度	1296×964[pixels]
最大フレームレート	30[fps]
絞りサイズ	9.6×7.2[mm]
絞り解像度	800×600[pixels]
F 値	F1.74～(Funjinon 12.5mm)，F2.78～(Nikkor 20mm)

の F 値は焦点距離と絞り半径から計算されるため，使用するレンズによりカメラの最大 F 値は異なる．今回用いた FUJINON HF12.5HA-1B の場合，最大 F 値は F=12.5/7.2=1.74 となる．同様に，Nikon 社の Nikkor 20mm F2.8 を用いた場合の最大 F 値は F=20/7.2=2.78 となる．試作機のスペックを表 1 にまとめて示す．また，画像撮影ソフトは Point Grey 社の Fly Capture SDK，画像処理には MATLAB を使用した．

2.2.3　絞りモデル

LCoS のコントラスト比は白対黒で 1 対 0 となっていないため，絞りの開口に応じてシーンの輝度値を推定するにあたって，白の透過率と黒の透過率を推定する必要がある．LCoS に表示させるパターンを円形絞りを例として図 6 に示す．

シーンの輝度値を I_S，LCoS 全体に白を表示させたときの透過率を M_W とすると，この

© 2009 Information Processing Society of Japan

Vol.2009-CVIM-167 No.27
2009/6/10

図 5 試作機
Fig. 5 Prototype

ときの観測輝度値 I_W は次式で表すことができる．

$$I_W = M_W I_S \tag{1}$$

同様に，LCoS 全体に黒を表示させたときの透過率を M_B とすると，このときの観測輝度値 I_B は次式で表すことができる．

$$I_B = M_B I_S \tag{2}$$

白を表示させたときの透過率を $M_W = 1$ とすると，$I_S = I_W$ となる．よって，黒を表示したときの透過率 M_B は次のように推定できる．

$$M_B = \frac{I_B}{I_W} \tag{3}$$

観測輝度値は LCoS 上の M_W と M_B の面積比で表すことができる．円形絞りの場合，開口 r のときの観測輝度値は次式で求めることができる．

$$\begin{aligned} I_r &= M_W \frac{\pi r^2}{nm} I_S + M_B (1 - \frac{\pi r^2}{nm}) I_S \\ &= (M_W - M_B) \frac{\pi r^2}{nm} I_S + M_B I_S \end{aligned} \tag{4}$$

ここで，nm は LCoS の面積，πr^2 は絞りの開口部分の面積を表す．このとき，シーンの

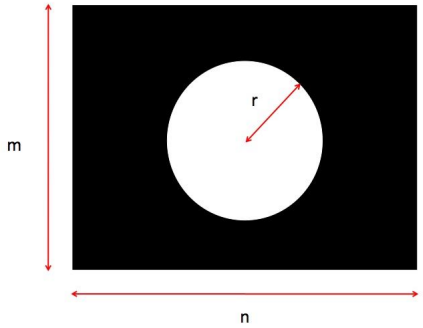

図 6 LCoS 表示パターン
Fig. 6 LCoS Aperture Pattern

輝度値は上式を変形した次式により計算できる．

$$I_S = \frac{1}{(M_W - M_B)\frac{\pi r^2}{nm} + M_B} I_r \tag{5}$$

3. 実　　験

3.1 絞りモデルの検証

LCoS が正しく絞りの役割を果たすことを確認するため，カメラの前に白い紙を置き，画面全体が一様に白い画像を撮影した．第 1 レンズは FUJINON 社の HF12.5HA-1B を使用した．この状態で LCoS の表示パターンを変え，絞りの開口を変化させて撮影し，輝度値の変化を確認した．絞りの大きさは，r=0(全閉)，1/4R(F6.96)，1/3R(F5.22)，1/2R(F3.48)，R(F1.74) の 5 段階に変化させて撮影した．ここで，R=3.6[mm] とする．このときの，絞りの開口面積と輝度値の関係のグラフを図 7 に示す．横軸が絞りの開口面積を表し，縦軸がそのときの輝度値を表す．観測輝度値をプロットし，最小 2 乗法により直線フィッティングした．グラフより，コントラスト比が 1 対 0 でないため，r=0 でも値を持っているが，輝度値が絞りの開口面積に比例しており，LCoS が正しく絞りの役割を果たしていることが確認できた．

輝度値の推定

カメラの前に白い紙を置き，LCoS に白を表示して撮影した画像の輝度値の平均は

© 2009 Information Processing Society of Japan

Vol.2009-CVIM-167 No.27
2009/6/10

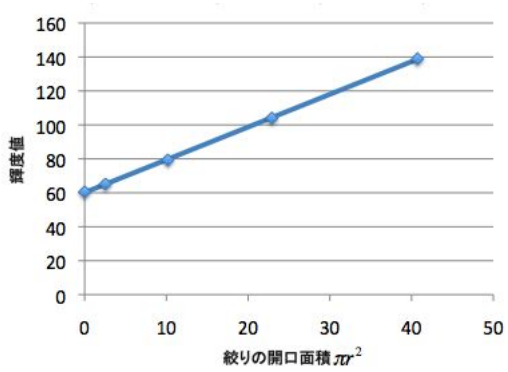

図 7 絞りの開口面積と輝度値の関係
Fig. 7 Aperture Pattern and Intensity

$I_W = 191.87$，同様に，黒を表示したときの輝度値の平均は $I_B = 60.525$ であったので，式 (3) より黒を表示したときの透過率は

$$M_B = \frac{60.525}{191.87} = 0.3154 \tag{6}$$

と推定できる．

この透過率を用いて，観測輝度値を計算する．LCoS に白を表示したときの輝度値を I_S と仮定するので，

$$I_S = I_W = 191.84 \tag{7}$$

とする．ここで，絞りの開口 r=3.6 のときの観測輝度値 I_1 は，式 (4) より

$$I_1 = 137.87 \tag{8}$$

となる．同様に，r=1.8 のときの観測輝度値 I_2 は

$$I_2 = 79.85 \tag{9}$$

となり，I_1，I_2 ともに，実際の観測輝度値とほぼ一致する．よって透過率の推定式 (6) が正しいといえる．また，これを用いた式 (4) が正しいことが示された．これにより，観測輝度値からのシーンの輝度値の推定は，式 (5) により計算が可能であるといえる．

3.2 高ダイナミックレンジ画像

高ダイナミックレンジ画像を生成するため，絞りの開口調節して同一シーンを撮影した．第 1 レンズは FUJINON 社の HF12.5HA-1B を使用した．絞りは，LCoS に黒を表示した全閉，F6.96，F3.48，F1.74，LCoS に白を表示した全開の 5 段階に調節した．このとき，全閉を基準とした相対 EV 値は 0，0.28，0.89，2.18，2.92 である．撮影した画像を図 8-12 に示す．これらの図から絞りの開口に応じて光量の異なる画像が得られることが分かる．全閉 (EV=0) の図 8 では，遠くの建物や，空の様子がはっきり見えるが，手前の建物や木が黒くつぶれてしまっている．逆に，全開 (EV=2.92) の図 12 では，手前の建物や木が見えるかわりに，遠くの建物は白くとんでしまっている．図 8-12 を見てわかるように，各画像のダイナミックレンジは狭く，表現できる明るさの範囲には限界がある．

図 8-12 を用いて，高ダイナミックレンジ画像を合成した．生成した画像を図 13 に示す．図 8 で黒くつぶれていた手前の建物が見えるようになっており，図 12 での遠くの建物や空のサチュレーションが抑えられており，他の 5 枚の画像に比べて広い範囲の明るさが表現できていることが確認できる．

各画像の輝度値の分布を図 14-19 に示す．各分布図は横軸が輝度値，縦軸が画素数を表す．全閉の分布図 14 では，黒くつぶれた部分の輝度値 0 が極端に大きくなっている．逆に，全開の分布図 18 では，白くとんだ部分の輝度値 255 が極端に大きくなっている．しかし，それらを合成した高ダイナミックレンジ画像の分布図 19 ではそれらが抑えられ，明るいところも暗いところも表現できていることが確認できた．これにより，本提案システムが高ダイナミックレンジ画像の合成に対して有効であることが示された．

3.3 デジタルリフォーカス

デジタルリフォーカス画像を生成するため，絞りの形状を変化させ，同一シーンで視点の異なる撮影した．第 1 レンズは Nikon 社の Nikkor 20mm F2.8 を使用した．撮影した画像を図 20 に示す．また，撮影時に LCoS に表示させたパターンを，図 20 の位置と対応させて図 21 に示す．絞りの形状に応じて，視点が移動できていることが確認できた．

試作機に利用した LCoS はコントラストが低いため，絞りを絞っても物理的絞りの様なシャープな PSF は得られない．そこでデジタルリフォーカスでは，各絞りパターンにおける PSF を事前に求めておき，Lucy-Richardson アルゴリズムを用いて，デコンボリューションを行い入力画像とした．デコンボリューション後の画像を図 22 に示す．これら 4 つの画像の特徴点の対応をとり，各対応点が重なり合うように位置をずらしてデジタルリフォーカス画像を生成した．手前の麻雀牌にピントを合わせて生成した画像を図 23 に示す．さらに比較として，図 22 の左上の画像とリフォーカス画像を拡大した図を図 24 に示す．上段が入力画像，下段が麻雀にピントを合わせたリフォーカス画像である．比較して見ると，リフォーカス画像では麻雀牌に比べて後ろのコップがぼかされており，麻雀牌にピントを合わ

© 2009 Information Processing Society of Japan

Vol.2009-CVIM-167 No.27
2009/6/10

図 8 全閉 (EV=0) 時の撮影画像
Fig. 8 Image of aperture full closed(EV=0)

図 9 F6.96(EV=0.28) 時の撮影画像
Fig. 9 Image of F6.96(EV=0.28)

図 10 F3.48(EV=0.89) 時の撮影画像
Fig. 10 Image of F3.48(EV=0.89)

図 11 F1.74(EV=2.18) 時の撮影画像
Fig. 11 Image of F1.74(EV=2.18)

図 12 全開 (EV=2.92) 時の撮影画像
Fig. 12 Image of aperture full opened(EV=2.92)

図 13 高ダイナミックレンジ画像
Fig. 13 High Dynamic Range Image

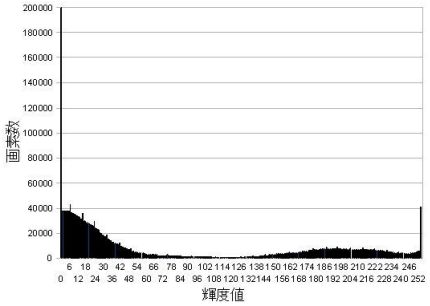

図 14 全閉 (EV=0) 時の輝度値の分布
Fig. 14 Distribution of Light Intensity(E=0)

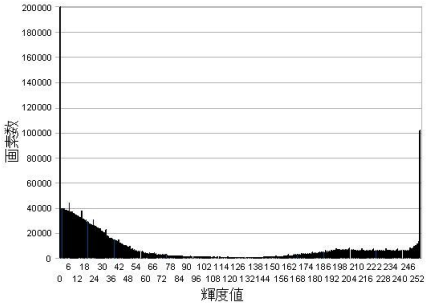

図 15 F6.96(EV=0.28) 時の輝度値の分布
Fig. 15 Distribution of Light Intensity(EV=0.28)

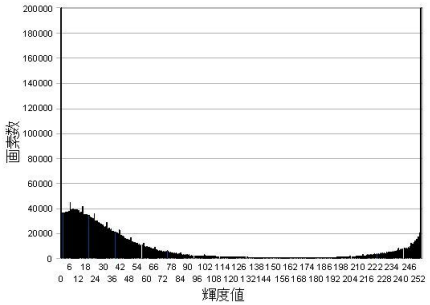

図 16 F3.48(EV=0.89) 時の輝度値の分布
Fig. 16 Distribution of Light Intensity(EV=0.89)

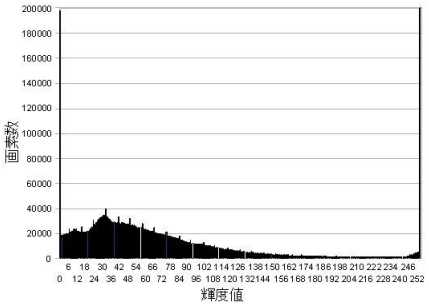

図 17 F1.79(EV=2.18) 時の輝度値の分布
Fig. 17 Distribution of Light Intensity(EV=2.18)

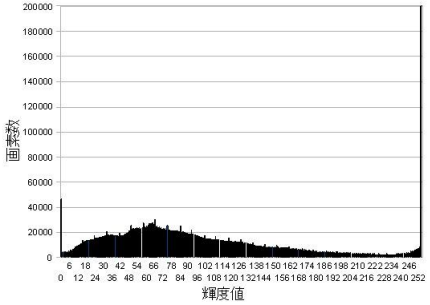

図 18 全開 (EV=2.92) 時の輝度値の分布
Fig. 18 Distribution of Light Intensity(EV=2.92)

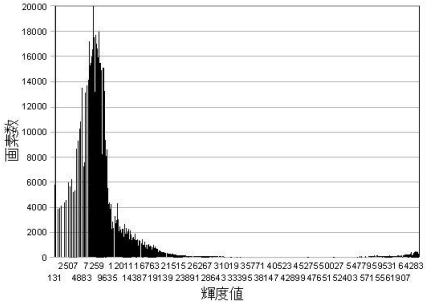

図 19 高ダイナミックレンジ画像の輝度値の分布
Fig. 19 Distribution of Light Intensity(HDR)

© 2009 Information Processing Society of Japan

Vol.2009-CVIM-167 No.27
2009/6/10

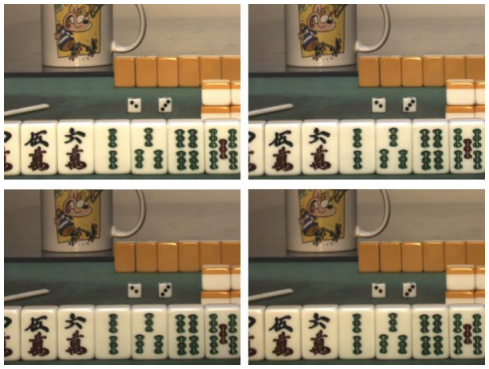

図 20 視点移動撮像画像
Fig. 20 Different view point images

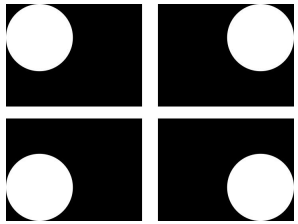

図 21 LCoS 表示パターン
Fig. 21 LCoS Aperture patterns

せて撮影したような画像が生成できていることが確認できる．これにより，本提案システムがデジタルリフォーカスに対しても有効であることが示された．

4. おわりに

本論文では，可変絞り画像を効率的に撮像できるプログラマブルアパチャカメラを提案した．本提案システムは，LCoS を使用することで，任意の絞り形状に制御可能であり，また，リレーレンズ系を用いることで，任意の市販レンズを利用可能である．構築した試作機での画像撮影により，LCoS が正しく絞りの役割を果たしていることを確かめ，さらに従来の画像処理への応用が可能であることを確認した．これにより，本提案システムの有効性を示した．

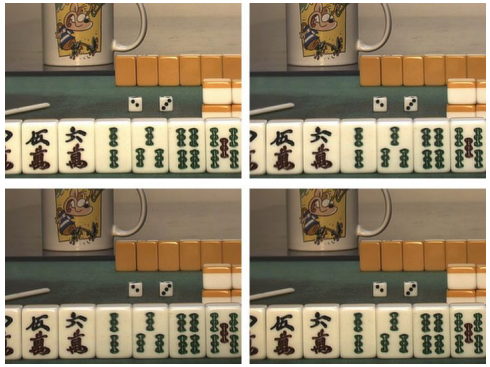

図 22 デコンボリューション画像
Fig. 22 Deconvolved images

図 23 リフォーカス画像（麻雀牌）
Fig. 23 Refocus Image(mah-jong tile)

© 2009 Information Processing Society of Japan

図 24 リフォーカス画像の比較 (上：入力，下：リフォーカス)
Fig. 24 Comparison between original image and refocus image(Upper: original, Lower: refrcued)

今後は，LCoS の液晶部以外での反射や，あおりの補正といった構成の改善を行い，画質の向上を図る．また，現在のカメラの問題である LCoS 絞りのコントラストのハードウェア的な改善や，絞りを閉じた（黒を表示した）箇所でも光線が反射される LCoS 固有の PSF を推定し，距離推定などの他の画像処理への応用の実現可能性を検証する．

参 考 文 献

1) Special issue on Computational Photography, *IEEE Computer*, Vol. 39, No. 8, pp. 28-55, 2006.
2) 日浦慎作: “コンピュテーショナルフォトグラフィ”, 映像メディア学会誌, Vol. 63, No.3, pp. 274-278, 2009.
3) Y. Y. Schechner and S. K. Nayar: “Uncontrolled Modulation Imaging,” *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, vol.2, pp.197-204, 2004.
4) G. Surya, M. Subbarao: “Depth from Defocus by Changing Camera Aperture: A Spatial Domain Approach”, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.61-67, 1993.
5) S. W. Hasinoff, K. N. Kutalakos, “Confical Stereo”, *Proc. European Conf. Computer Vision*, pp. 620-634, 2006.
6) S. W. Hasinoff, K. N. Kutulakos: “A Layer-Based Restoration Framework for variable-Aperture Photography,” *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision*, 2007.
7) A. Zomet and S. K. Nayar: “Lensless imaging with a controllable aperture”, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 339-346, 2006.
8) C. K. Liang, G. Liu and H. H. Chen: “Light Field Aquisition using Programmable Aperture Camera,” *Proc. Int. Conf. Image Processing*, 2007.
9) C. K. Liang, T. Lin, B. Wong, C. Liu, H. H. Chen: “Programmable Aperture Photography: Multiplexed Light Field Acquisition,” *Proc. ACM SIGGRAPH*, 2008.
10) A. Veerarahavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Hohan and J Tumbin: “Dappled Photography: Mask Enhancement Camera for Heterodyned Light Field and Coded Aperture Refocusing”, *Proc. ACM SIGGRAPH*, 2007.
11) A.Levin, R. Fergus, F. Durand, W. T. Freeman: “Image and Depth from a Conventional Camera with a Coded Aperture,”, *Proc. ACM SIGGRAPH*, 2008.
12) R. F. Marcia and R. M. Willett:“Compressive coded aperture superresolution image reconstruction,” *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speeach and Signal Processing*, 2008.
13) C. Gao, N. Ahuja and H.Hua : “Active aperture control and sensor modulation for flexible imaging,” *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007.
14) 万波 秀年, 佐川 立昌, 向川 康博, 越後 富夫, 八木康史, “反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジカメラ”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. 90, No. 8, pp. 1921-1929, Aug., 2007.

© 2009 Information Processing Society of Japan