

DMD を用いたピクセルコーディングカメラの実装

赤司 竜一^{1,a)} 長原 一^{1,b)} 谷口 倫一郎^{1,c)}

概要: 本研究ではイメージセンサの露光時間をピクセル単位でコントロール可能なピクセルコーディングカメラを DMD を用いて作製した。DMD はマイクロミラーが二次元配列状に多数並んだ構造の空間光変調素子であり、高い反射率を持っている。高反射率である DMD を用いることで、高光効率のカメラを実現した。提案するピクセルコーディングカメラは、コンプレッシブセンシングやハイダイナミックレンジ撮影、プライバシー保護のためのマスク撮影など、様々なピクセルコーディング撮影応用に用いることができる。

キーワード: DMD, サンプリングモアレ法, 隠蔽処理

Implementation of Pixel Coding Camera Using DMD

AKASHI RYU-ICHI^{1,a)} NAGAHARA HAJIME^{1,b)} TANIGUCHI RIN-ICHIRO^{1,c)}

Abstract: We constructed pixel coding camera using Digital Micromirror Device(DMD). The camera can control the exposure time of image sensor by each pixel. DMD is the spatial light modulator device and uses micromirrors. Because DMD has high reflectance, the proposed camera realized high light throughput. The proposed camera can be applicable for the various applications using pixel codings, such as compressive sensing, high dynamic range imaging, and privacy masking etc.

Keywords: DMD, Sampling moire

1. はじめに

デジタルカメラの解像度は飛躍的に向上しているが時間分解能はあまり変化しておらず、ビデオカメラのフレームレートは 30~60fps 程度とあまり向上していない。FAST-CAM SA-X [1] のようなハイスピードカメラを使用すると高時間分解能での撮影を行うことができるが、ハイスピードカメラは高価である上、使用するには大きなバンド幅が必要となる。ハイスピードカメラを使用する以外に高時間分解能での撮影を行う方法として、コンプレッシブセンシングの技術を用いる方法が考えられる。コンプレッシブセンシングとは、観測される信号を圧縮して記録し、記録されたデータから元の信号を復元する技術である。カメラの

イメージセンサの露光時間をピクセルごとに変化させることができれば 1 枚の画像に様々な情報を含ませることができるため、高時間分解能での撮影が可能となる。

また、カメラにはダイナミックレンジの不足という問題がある。実シーンにおいては幅広いレンジの明るさが存在するが、撮影された画像が表現できる明るさはカメラのダイナミックレンジによって制限される。カメラのダイナミックレンジが 8 ビットであれば、撮影された画像では 256 段階の明るさしか表現することはできない。例えば、室内と屋外が混在するようなシーンを撮影する場合、室内に合わせて露光時間を長くすると撮影画像中の屋外の部分に入射する光量が多すぎるため、その部分が白とびしてしまう。逆に露光時間を屋外に合わせて短くすると、室内の部分に入射する光量が不足してしまい黒潰れしてしまう。イメージセンサの露光時間を様々に変化させて同じシーンを撮影し、撮影された複数枚の画像を用いてダイナミックレンジを拡張する High Dynamic Range (HDR) の研究が

¹ 九州大学
Kyushu University

a) akashi@limu.ait.kyushu-u.ac.jp

b) nagahara@.ait.kyushu-u.ac.jp

c) rin@.ait.kyushu-u.ac.jp

ある [3]. しかし, これには異なる露光時間で撮影された同じシーンの画像が複数必要であるため, 移動物体がシーン中に存在する場合に適用することは難しい. Nayar ら [4] のようにセンサへと入射する量をピクセル毎に調節する, または Mannami ら [5] のようにピクセル毎に露光時間をコントロールすることができれば, ダイナミックレンジが大きいシーンを撮影することができる.

現在では, Google ストリートビューのような, 情景画像が一般公開されるサービスが普及しているが, 撮影された画像中に人物の顔や車のナンバープレートのようなプライバシーに関わる情報が写ることがプライバシー保護の観点から問題となっている. この問題を解決するために, 人物の顔などのプライバシーに関わる情報を検出し, 画像を公開する際には部分的にぼかすなどの隠蔽処理が行われている. 稲井ら [6] は文字が独特な被隠蔽特性を持つことを利用して, 車のナンバープレートの隠蔽処理を行った. ただし, このように画像処理による隠蔽を行ったとしても, 撮影画像自体は個人情報を含んでいることには変わりはなく, 公共であったとしても撮影されていることに対する一般の抵抗感が高い. また, 撮影画像であっても個人情報を含んだ画像の蓄積は, 本質的な情報漏えいの危険性がある. プライバシーに関わる情報を保持することなく画像の部分的隠蔽を実現するためには, カメラでの撮影の段階で特定の画素を露光させないことで, プライバシーに関わる情報を含まない画像を撮影することが考えられる.

イメージセンサの露光時間をピクセル単位でコントロールすることができるようなピクセルコーディングカメラが実現できれば, 前述のような時間分解能の問題, ダイナミックレンジの問題, プライバシーの問題を解決することができる. 残念ながらピクセルごとに露光時間やシャッタースピードをコントロール可能なセンサやカメラは商用としては存在しない. そこで本研究では空間光変調素子を組み合わせ撮像素子に入射する光の強度をピクセル毎に制御することで, 特別なセンサを用いずにピクセルコーディングを実現する. 現在市販されている空間光変調素子には Liquid Crystal Display (LCD), Liquid Crystal on Silicon (LCoS), Digital Micro-mirror Device (DMD) がある.

LCD は図 1 (a) のように液晶素子に光を透過させ, その際に透過する液晶の画素値に応じて光の偏光を回転させる. LCD の両側に偏光フィルタを置くことで, LCD の特定の画素を通過した光だけを得ることができる. Nayar ら [4] は LCD を用いてイメージセンサに入射する光量を調節することで, 高ダイナミックレンジのシーンを撮影可能なカメラを作成した. しかし LCD は液晶素子の間に液晶の駆動回路が存在するため, 素子のフィルファクターが低下してしまう. さらに LCD は偏光を用いて光を制御するため, 素子の光効率が低くなってしまふ.

LCoS は反射型の液晶ディスプレイであり, 図 1 (b) の

表 1 空間光変調器の比較

Table 1 Compare of space light modulation devices

	LCD	LCoS	DMD
Frame Rate	Low	High	Medium
Fill Factor	Low	High	High
Polarization	Yes	Yes	No
Light Throughput	Low	Medium	High

ように偏光を回転させることで光の制御を行う. 反射型の液晶ディスプレイは透過型と異なり駆動回路が液晶素子の裏側に設置されているため素子のフィルファクターを高くすることができ, 光効率を上げることができる. しかし LCoS は光の制御を行う際に偏光の性質を利用しているため, 利用する偏光以外の光をカットしてしまう. そのため光の損失が大きくなり, カメラシステム全体において光効率が低下する.

DMD [7] はマイクロミラーが二次元配列状に並べられた素子で, 各マイクロミラー毎にミラーの角度を ±12 度の 2 種類の状態に変化させることができる. マイクロミラーの駆動回路はミラーの後部に設置されているため, 高フィルファクターである. DMD は LCD や LCoS とは異なり光の制御をする際に偏光ではなく, 図 1 (c) のようにミラーによる反射光の反射角度の違いを利用する. 光の制御に偏光を使わないので光の損失が小さい. そのためカメラシステム全体において高い光効率を実現することができる. LCD, LCoS, DMD の性質を表 1 にまとめる. DMD は高フィルファクターであり偏光の性質を用いないため, 高光効率を実現できることが分かる.

カメラが高光効率であれば, 明るさが不足するような場所であっても撮影を行うことができカメラの応用の可能性が高くなる. そのため本研究では高光効率である DMD を用いてピクセルコーディングカメラの作製を行う.

2. 関連研究

高時間分解能での撮像を行うにはいくつかの方法がある. Gu ら [8] は CMOS イメージセンサでのローリングシャッターによって, 高時間分解能での撮影を行った. 一般にローリングシャッターは画像の上から下へと順にイメージセンサから撮影データを読み込むため画像に歪みが発生する原因となる. 彼らはデータ読み出しのタイムラグを利用することで, 高い時間分解能の画像を撮影した. しかし, CMOS センサの固定された行ごとのタイムラグを受動的に利用していることから, 符号化の自由度が低くシーンへの依存性が高い. Reddy ら [2] は LCoS と 25fps のカメラを用いてピクセルコーディングカメラを実装し, 高フレームレートのビデオを作製した. LCoS を使用することでイメージセンサをピクセル単位でコントロールし, 各ピクセルを異なる時間帯に露光させることを可能にした. この方

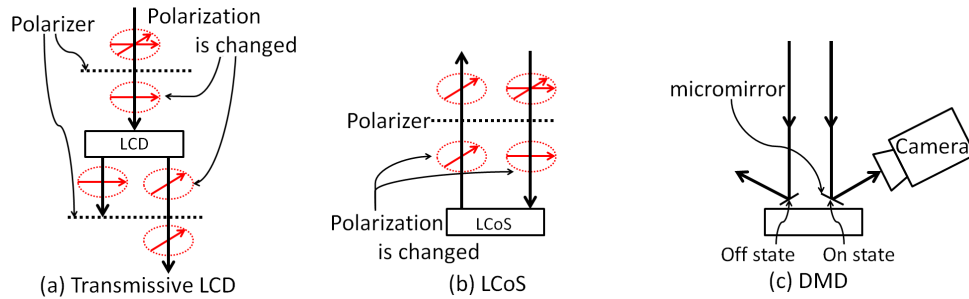


図 1 空間光変調素子の動作

Fig. 1 Behavior of space light modulation device

法によって高時間分解能での撮影を行い、高フレームレートのビデオを生成した。しかし彼らは LCoS を使用し偏光を利用して光の制御を行うため、カットしてしまう光が多くなりカメラの光効率が低下してしまう。光効率が低いことで明るさが不足する原因となり、これは SN 比の低下につながる。

ピクセルコーディングカメラを用いると高いダイナミックレンジでの撮影が可能になる。Nayar ら [4] は LCD をレンズの前方に設置して高いダイナミックレンジを持つカメラを作成した。彼らはイメージセンサの各ピクセルにおいて観測される明るさを元に LCD を制御し、画像の明るすぎる領域に対して入射する光の量を制限した。これにより、露光時間が長すぎるために画像の一部が白とびしてしまうようなシーンにおいても鮮明な画像を撮影することを可能にした。しかし彼らの手法には 3 つの問題点がある。まず 1 つ目は LCD には駆動回路があるため液晶素子のフィルファクターを上げることが難しい点である。そのため LCD を用いた場合カメラシステム全体の光効率が低下してしまう。2 つ目は駆動回路が存在することによって液晶素子上において回折が起こってしまう点である。この回折によって撮影される画像にはボケが発生する。3 つ目は、LCD が光の制御に偏光を利用するため入射光の制限を行わない場合でも少なくとも 50 % の光をカットしてしまう点である。これはカメラシステム全体での光効率を低下させてしまい、入射光が少ない場所でのカメラの使用を困難にする。Mannami ら [5] は反射型液晶素子を用いて、高ダイナミックレンジのシーンに対応したカメラの作製を行った。彼らは透過型ではなく反射型の液晶素子を使用することで、LCD で問題となっていた低フィルファクターである点と光の回折によってボケが発生する点を解決した。しかし反射型の液晶を使用しても光の制御に偏光を利用するので、光の損失が大きいという問題は解決できていない。

カメラの性能を向上させる研究以外にも、カメラによって撮影された画像の隠蔽についての研究が行われている。堀ら [9] は屋内環境において、パノラマビューのための死角画像の修復と写りこむ人物のプライバシー保護を行った。彼らは地下街などの人通りの多い屋内において全方位カメラ

によって撮影を行い、撮影された画像から通行人などの移動物体の除去し、背景のみの抽出を試みた。固定カメラによって撮影された動画像から背景を抽出し、抽出することができなかった背景の欠損領域に対しては画像中の類似領域を用いて欠損領域の修復を行った。しかし移動物体の数が多い場合には、背景の抽出をするために撮影時間を長くしなければ背景を抽出することができない。稲井ら [6] は画像中から車のナンバープレートを自動で検出し、プレートに書かれた文字の隠蔽を行った。彼らは文字が独特の被隠蔽特性を持つことを利用して文字だけを選択的に隠蔽した。文字独特の被隠蔽特性を用いて隠蔽を行うことで、ナンバープレート検出の際に誤検出されて隠蔽処理が行われた文字以外の部分への影響を低減した。この手法は文字の独特の性質を利用しているため文字以外の画像の隠蔽へと応用することは難しい。さらにいずれの場合でも隠蔽処理前の元画像を保持する必要があるため、隠蔽処理前の画像が人目に触れないよう注意を払わなければならない。

3. DMD を用いたピクセルコーディングカメラ

3.1 カメラ光学系

本研究ではピクセルコーディングカメラの作製に DMD を用い、DMD によってイメージセンサのピクセル単位での制御を実現する。具体的には DMD のマイクロミラーのうち +12 度に傾いたミラーを“オン状態”、-12 度に傾いたミラーを“オフ状態”とすると、マイクロミラーのオン、オフを切り替えることによってイメージセンサの露光時間をピクセル単位で制御する。そのため DMD の各マイクロミラーとイメージセンサの各ピクセルを図 2 のように対応付ける必要がある。DMD 上の像をイメージセンサ上に結像させるレンズをレンズ 1 とする。DMD からレンズ 1 までの距離を a 、イメージセンサからレンズ 1 までの距離を b 、レンズ 1 の焦点距離を f とするとガウスのレンズ則より

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

が成り立つ。イメージセンサのサイズと DMD のサイズからレンズ 1 の倍率 $\frac{b}{a}$ が決まり、レンズ 1 の焦点距離 f が

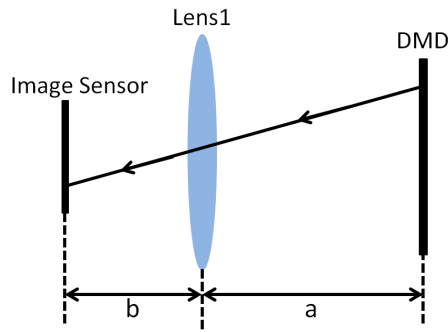


図 2 イメージセンサピクセルとマイクロミラーの対応
Fig. 2 Correspondence of image sensor to DMD

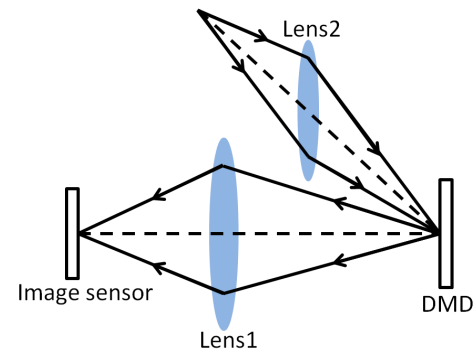


図 4 試作機の光学系
Fig. 4 Optical system of prototype camera

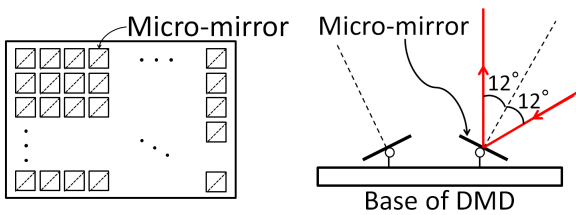


図 3 DMD の構造
Fig. 3 Structure of DMD

定数であることから、距離 a , b , つまりイメージセンサと DMD およびレンズ 1 の位置関係が一意に決定されることがわかる。

DMD にはマイクロミラーが並んでおり、各マイクロミラーは図 3 (a) の点線を軸として +12 度もしくは -12 度に傾いた状態をとる。そのため DMD 上に像を結像させるためには図 3 (b) のように、DMD に対して 24 度の角度から光を入射させる必要がある。このことからオブジェクトより入射した光を DMD 上に集光させるレンズは、DMD の基盤に垂直な軸に対して 24 度ずれた位置に配置しなければならない。DMD 上に光を集光するレンズをレンズ 2 とする。

これらの DMD の性質を考慮してイメージセンサ, DMD, レンズ 1, レンズ 2 を配置すると図 4 のようになる。オブジェクトから入射した光はレンズ 2 によって DMD 上に集光する。DMD へと入射した光の内、“オン状態”のミラーによって反射された反射光だけがレンズ 1 を通ってイメージセンサへと入射する。レンズ 2 から“オフ状態”のミラーへと入射した光は、レンズ 1 とは異なる方向へと反射されイメージセンサでは観測されない。DMD の各マイクロミラーのオン、オフを切り替えることによって、イメージセンサによって観測される光をコントロールする。図 4 に、本研究において作成したピクセルコーディングカメラの光学系を示す。

3.2 カメラの実装

本研究で作成した試作機はイメージセンサ, DMD, DMD

からの光をイメージセンサ上に集光するレンズ (レンズ 1), オブジェクトからの光を DMD 上に集光するレンズ (レンズ 2) の計 4 つの要素から構成される。試作機にはイメージセンサとして Point Gray Research の FL2G-13S2C-C を、DMD として Texas Instruments の DLP 0.55 XGA Series 450 DMD をそれぞれ用いた。今回用いたイメージセンサのピクセルと DMD のマイクロミラーのピッチはそれぞれ $3.75 \mu\text{m}$, $10.8 \mu\text{m}$ であるためレンズ 1 の倍率は 1:2.88 と決定される。イメージセンサのサイズと DMD のサイズは決まっているため、レンズ 1 を決定すると式 (1) より、イメージセンサと DMD 及びレンズ 1 の位置関係の比が定まる。

試作機に用いるレンズ 1 とレンズ 2 には幾つかの満たすべき条件が存在する。DMD は光の制御をマイクロミラーの反射角度の違いによって行うため、レンズ 1 と DMD との距離が近すぎるとレンズ 2 から DMD への入射光を図 5 のようにレンズ 1 が遮ってしまう。同様に、レンズ 2 と DMD との距離が近すぎると DMD からレンズ 1 への反射光を図 6 のようにレンズ 2 が遮ってしまう。この問題を回避するため、レンズ 1 は DMD からある程度離れた位置で必要な倍率 1:2.88 を保つ必要があり、レンズ 2 はフランジバックがある程度大きくなければならない。フランジバックとはレンズ後部の接続部分からレンズからの入射光が集光する平面までの長さのことであり、本システムにおいてはレンズ 2 の接続部分が属する平面と DMD が属する平面の距離のことである。さらにレンズの口径が大きすぎても入射光や反射光を遮ってしまうという問題が生じる。このような問題を回避できることをレンズの条件として選定を行い、レンズ 1 には EBC フジノン EX 105mm 1:5.6 をレンズ 2 には Carl Zeiss の Macro Planar T* ZF を採用した。図 7 に本研究で作成したカメラの試作機を示す。

3.3 システムの概要

本試作機は PC によって全体を制御しており、コントローラーボードを通して DMD の操作を行った。試作機のシステム全体図を図 8 に示す。イメージセンサの操作に

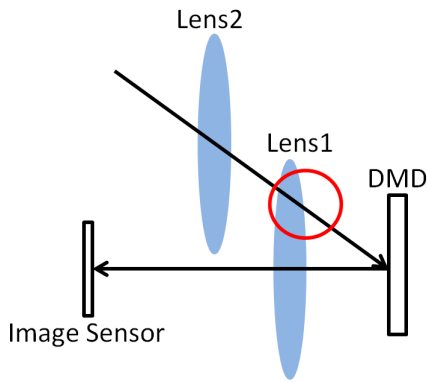


図 5 レンズ1が近すぎる場合
Fig. 5 Lens1 is close

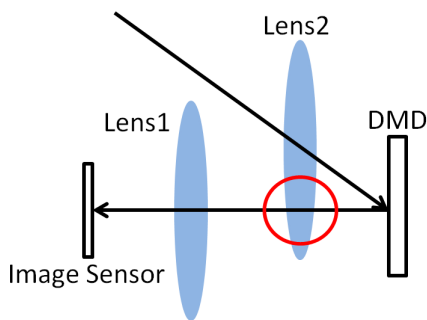


図 6 レンズ2が近すぎる場合
Fig. 6 Lens2 is close

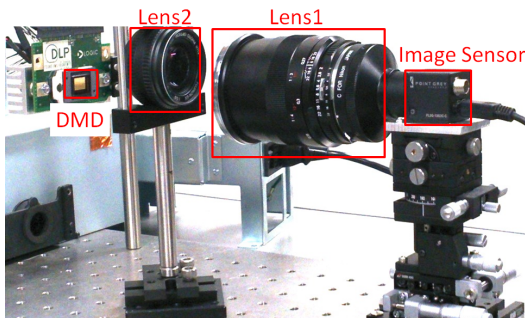


図 7 作製した試作機
Fig. 7 Prototype camera

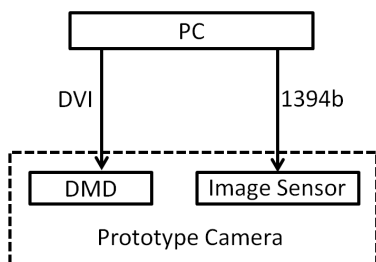


図 8 システムの全体図
Fig. 8 Whole system

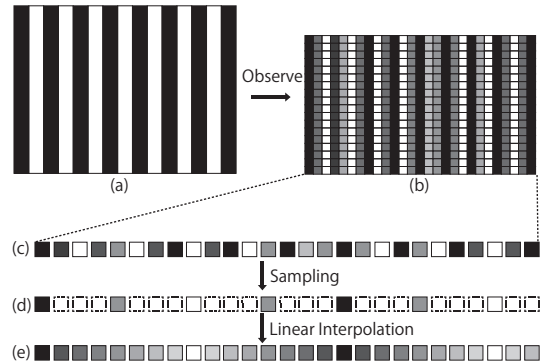


図 9 サンプリングモアレ法
Fig. 9 Sampling moire method

は PGR FlyCapture を用いた。DMD の動作制御は DLP LightCommander Control Software によって行った。DLP LightCommander Control Software では構造化光モードとビデオモードの2種類のモードで DMD をコントロールする。構造化光モードでは、DMD に表示する画像を一度イメージバッファに保存し、バッファから画像を読みだして DMD への表示を行う。入力画像は 2 諧調または 256 諧調のモノクロ画像である必要があり、高フレームレートで DMD を動作させることが可能である。ビデオモードでは、入力される画像をリアルタイムで DMD に表示することができる。ビデオモードでの DMD のフレームレートは、DMD へと入力される信号と等しくなる。

3.4 モアレを用いた DMD と CCD の位置合わせ

試作機に用いた DMD とイメージセンサの解像度はともに 1024×768 であるからイメージセンサに入射する光をピクセル単位でコントロールするためには、DMD のマイクロミラーとイメージセンサのピクセルを 1 対 1 に対応させる必要がある。しかし、マイクロミラーとイメージセンサのピクセルは非常に小さいので、肉眼で DMD とイメージセンサの位置を合わせることは困難である。そこでサンプリングモアレ法 [10] を用いて DMD のマイクロミラーとイメージセンサのピクセルの対応付けを行う。サンプリングモアレ法とは、縞模様を撮影した際に縞模様の空間周波数とイメージセンサの空間周波数の差から生じるモアレを解析する手法である。

サンプリングモアレ法について説明する。図 9 (a) に示すような縞模様をイメージセンサで撮影すると、縞模様とイメージセンサの位置がきちんとあっていない場合、図 9 (b) のような画像が撮影される。縞模様の空間周波数を f_A 、イメージセンサのピクセルの空間周波数を f_B とすると、図 9 (b) には図 9 (a) とイメージセンサのピクセルの空間周波数の差 $|f_A - f_B|$ を空間周波数とするモアレが発生する。撮影された画像の画素の内の 1 行を図 9 (c) に示す。撮影された画像を図 9 (a) の周期でサンプリングすると、図 9 (d) が得られ、サンプリングされた間のピクセル

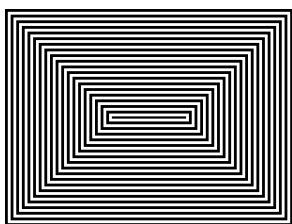


図 10 縞模様

Fig. 10 Striped pattern

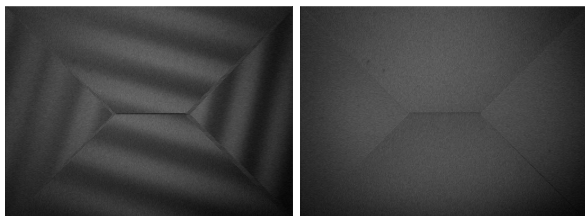


図 11 ずれが生じているとき 図 12 ずれがなくなったとき
 Fig. 11 Not corresponding Fig. 12 corresponding

の輝度値を線形に補間すると図 9 (d) の画像ができる。得られた画像 (d) は、撮影された画像 (c) から縞模様 (a) の成分を除き、縞模様とイメージセンサのピクセルの空間周波数の差によって生じるモアレを抽出したものとなっている。このサンプリング処理によってモアレだけを抽出することができる。

この方法の本研究への具体的な適用方法を説明する。まず DMD 上に図 10 のような縦縞と横縞が含まれる縞模様を表示し、この状態の DMD をレンズ 1 を通してイメージセンサで撮影する。ただし図 10 の白いピクセルは傾き +12 度のマイクロミラーを、黒いピクセルは傾き -12 度のマイクロミラーを表すものとする。撮影された画像を、縦縞の部分は横方向に、横縞の部分は縦方向に DMD 上に表示した縞模様の周期でサンプリング処理を行う。サンプリングされた間のピクセルの輝度値を線形に補完すると図 11 のような画像が得られ、この画像には DMD のマイクロミラーの空間周波数とイメージセンサの空間周波数の差によって生じたモアレが抽出されている。イメージセンサの位置を変化させると発生するモアレの形状と干渉縞の本数が変化する。DMD とイメージセンサのずれが小さくなるほど空間周波数の差が小さくなるので、発生するモアレ縞の本数が少なくなる。モアレ縞の本数を減らすようにイメージセンサの位置を調節し、図 12 のようにモアレ縞が発生しなくなったとき、DMD のマイクロミラーとイメージセンサのピクセルが一致したことになる。なお位置合わせを行う際には、イメージセンサもしくは DMD の位置や角度について微細な調節が必要となる。本研究では xyz 軸及び α β θ 軸の調節が可能である 6 軸手動ステージを使用した。

4. 提案システムの評価

本研究で実装したピクセルコーディングカメラ試作機の

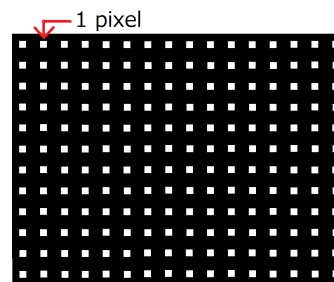


図 13 位置合わせ検証パターンのイメージ
 Fig. 13 Image of test pattern

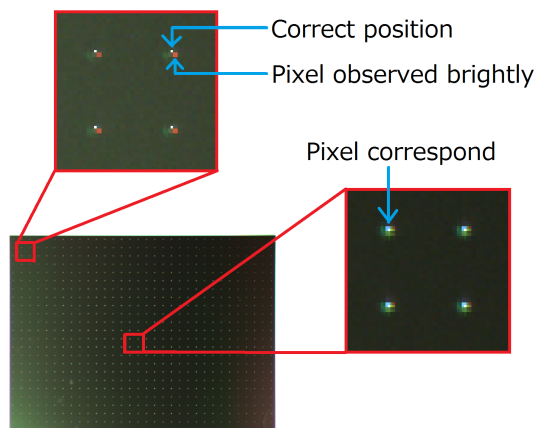


図 14 ピクセルのずれ具合
 Fig. 14 The gap of pixels

光学的な性能について評価を行った。

4.1 位置合わせの精度

提案システムは DMD のマイクロミラーとイメージセンサのピクセルを一致させるためにサンプリングモアレ法を用いた。サンプリングモアレ法による位置合わせがどの程度の精度で達成されているのか検証を行った。検証方法について説明する。まず図 13 のような、1 ピクセルの白い点が多数並んでいるパターンを DMD 上に表示する。画像の白いピクセルにあたるミラーは +12 度に傾いた状態であり、この状態のミラーからの反射光のみがイメージセンサに入射する。図 13 を DMD に表示した状態で撮影を行うと、DMD の +12 度の状態のミラーに対応したイメージセンサのピクセルだけが明るく撮影される。撮影された画像中で明るく表示されたピクセルの座標と DMD 上に表示したパターンにおいて白であったピクセルの座標を比較することで、ピクセル対応のずれがどの程度生じているのかを調べる。図 14 の明るく撮影されている部分が DMD の制御によって光が入射したピクセルであり、赤く示されている点が DMD とイメージセンサのずれがまったくない場合に露光すべきピクセルである。提案システムにおいて、サンプリングモアレ法を用いて位置合わせを行ったのちに上記の方法で DMD とイメージセンサのずれを調べると、図 14 のように画像の中央部分ではピクセルのずれはなかつ

たが画像の隅のあたりでは最大3ピクセル程度のずれがあることが確認された。この検証によって、ピクセル対応のずれがどのように生じているのかわかる。画像処理を用いてこのずれを補正することでマイクロミラーとイメージセンサのピクセルの1対1の対応をとることができる。

4.2 光効率

実装したピクセルコーディングカメラは高い光効率を得ることを目的とし、ピクセル単位でのコントロールを可能にするデバイスとしてDMDを採用した。DMDのマイクロミラーの反射率は88%、マイクロミラーでの回折効果による減衰が86%、DMDのカバーガラスの透過率は97%であるから、提案システムの光効率の理論値は

$$67.5\% = 88\%(Reflectivity) * 86\%(Diffraction) * 97\%(WindowTransmission) * 92\%(FillFactor) \quad (2)$$

と計算できる。しかし実際にはレンズなどにおいて更なる光の損失が起こる。そこで次に記す方法で試作機の光効率を計測した。まず試作機で均一白色平面を撮影し、撮影された画像の平均輝度値を計算する。次にピクセルコーディングの機構を除き、試作機で用いたイメージセンサと同一のイメージセンサとレンズのみを使って均一白色平面を撮影し、平均輝度値を計算する。このとき使用するレンズのF値は、試作機のレンズ1のF値と一致させた。撮影された2枚の画像の平均輝度値を比較した結果、平均輝度値の比は48:77であり試作カメラの実際の光効率は62.3%と計算された。比較として、LCoSを使用した場合の光効率の理論値は

$$30\% = 50\%(Polarization) * 60\%(Reflectivity) \quad (3)$$

である。[11]つまりLCoSを用いてピクセルコーディングカメラを作成した場合、最大でも30%程度の光効率しか実現できないということである。このことから、LCoSよりもDMDを用いてピクセルコーディングカメラの実装を行う方が高い光効率を実現できるということが分かる。

4.3 画角

一般的なカメラのようにレンズがイメージセンサの正面に設置されている場合には、画角(Field of View)は

$$(FOV) = 2\arctan\frac{d}{2f} \quad (4)$$

によって計算される。ただし、 d はイメージセンサの対角の長さ、 f はレンズの焦点距離である。しかし本試作機ではレンズがイメージセンサの正面からずれているため、この式から画角を求めることはできない。試作機はレンズ2によって画角が決定されるため、各要素の幾何的な関

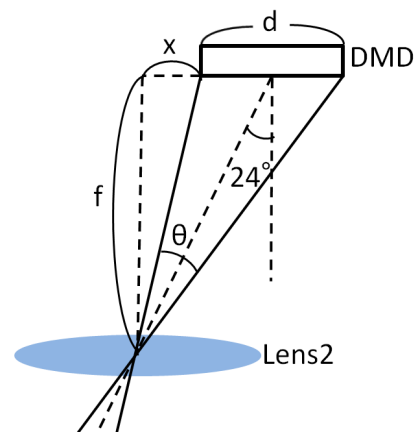


図 15 レンズ2とDMDの位置関係

Fig. 15 Positional relation between lens2 and DMD

係によって試作機の画角を計算した。図15にレンズ2とDMDの位置関係を示す。この図より、試作機の画角は

$$(FOV) = \arctan\frac{d+x}{f} - \arctan\frac{x}{f} \quad (5)$$

によって計算される。ただし、 d はDMDの対角の長さ、 f はレンズ2の焦点距離、 x はレンズ2の中心軸とイメージセンサのずれを表す。試作機では $d=13.8[\text{mm}]$ 、 $f=105[\text{mm}]$ 、 $x=39.84[\text{mm}]$ であるから、試作機の画角は 6.28° と計算された。

4.4 レンズによる歪み

作製した試作機において入射光は2枚のレンズを通過してイメージセンサに入射するため、撮影される画像には通常のカメラ以上のレンズによる歪みが発生する。この歪みをCamera Calibration ToolBox for Matlab [12]を用いて測定する。このツールでは、様々な角度からチェッカーボードを撮影した画像を入力することでカメラの内部パラメータを計算し画像の歪みを計算することができる。観測された歪みの様子を図16に示す。歪みは画像の左上を中心として放射状に発生しており、画像の右下の部分において最大16ピクセル程度の歪みがあることが分かった。この歪みの検証により、歪み方を知ることができるため画像処理によってこの歪みを補正することが可能である。

4.5 マスキング

本研究の試作機は、特定のピクセルを露光させないようにすることによってマスキングされた画像を撮影する。このマスキング撮影がうまく機能するかどうかの確認を行った。確認方法は、マウスカーソルの位置座標を検出しその座標付近をマスキングするマスクパターンを生成するというものである。DMDへ入力するマスクパターンを図17(a)に、試作カメラによって撮影された画像を図17(b)に示す。ただしDMDへ入力するマスクパターンにおいて白いピクセルが $+12$ 度に傾いたミラーを、黒いピクセルが -12

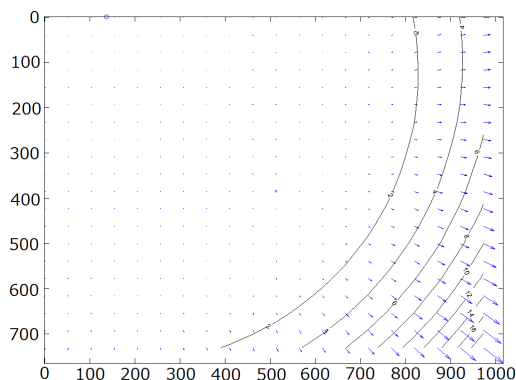
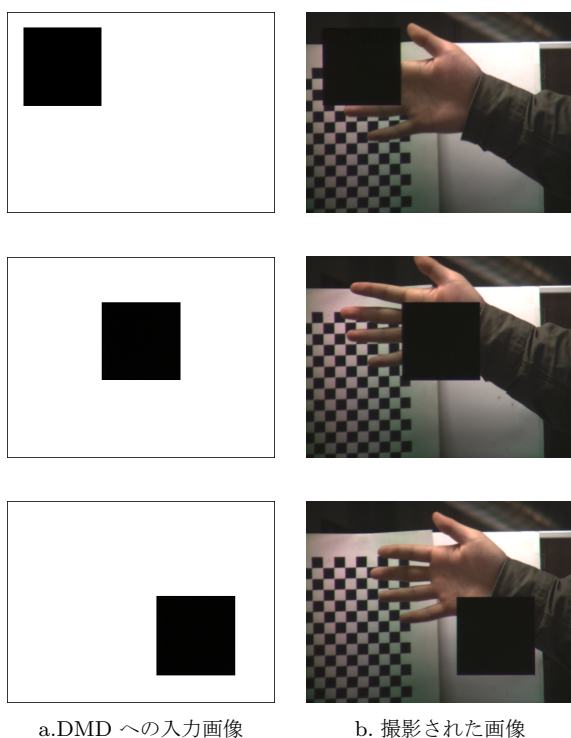


図 16 観測された歪み

Fig. 16 Observed distortion



a. DMD への入力画像

b. 撮影された画像

図 17 マスキングされた画像の撮影

Fig. 17 Masked images

度に傾いたミラーを表しており、+12度の状態のミラーからの反射光のみがイメージセンサに入射するものとする。マウスカーソルを移動させると DMD への入力画像の黒い部分が移動し、撮影される画像中のマスキングされる部分が移動する。DMD への入力パターンと撮影された画像を比較すると、入力パターンの黒い部分がきちんとマスキングされた状態で撮影できていることがわかる。

最後に、試作機のスペックを表 2 に示す。この表より、この試作機が高解像度、高光効率を実現できていることが分かる。

5. まとめ

本研究では DMD を用いてピクセルコーディングカメラ

表 2 試作機のスペック

Table 2 Spec of prototype camera

Resolution	1024 × 768 pixel
Frame Rate	30 fps
Light Throughput	62.3 %
Field of View	6.28°

の試作機を実装し、その性能の評価を行った。光の損失が少ない DMD を使用することで、高光効率であるピクセルコーディングカメラを作成することができた。この試作カメラを使用することで高ダイナミックレンジなシーンにおける撮影、高時間分解能での撮影を行うことができる。また特定領域のピクセルについて露光させないようにすることで、あらかじめ部分的にマスキングされた画像の撮影が可能である。高光効率であることにより明るさが不十分な場所においても撮影を行うことができ、広い範囲での応用が期待できる。今後は、人物の顔の部分のマスキングして撮影するなどのプライバシーに配慮したカメラなど、本試作カメラを使用したアプリケーションの開発を目指す。

参考文献

- [1] www.photron.com.
- [2] Dikpal Reddy, Ashok Veeraraghavan, and Rama Chellappa. “P2C2: Programmable pixel copressive camera for high speed imaging”, CVPR, pp.329-336, 2011.
- [3] Sing Bing Kang, Matthew Uyttendaele, Simon Winder, and Richard Szeliski. “High dynamic range video”, ACM Transactions on Graphics, Vol.22, pp.319-325, 2003.
- [4] Shree K. Nayar and Vlad Branzoi. “Adaptive dynamic range imaging: Optical control of pixel exposures over space and time”, ICCV, Vol.2, pp.1168-1175, 2003.
- [5] Hidetoshi Mannami, Ryusuke Sagawa, Yasuhiro Mukaigawa, Tomio Echigo, and Yasushi Yagi. “High dynamic range camera using reflective liquid crystal”, ICCV, pp.1-8, 2007.
- [6] 稲井浩平, 中本千尋, 大場慎平, フォンヤオカイ, 内田誠一. “Image Inpainting を用いた文字の選択的隠蔽”, MIRU, pp.1-7, 2012.
- [7] Larry J. Hornbeck. “Digital light processing: A new mems-based display technology”.
- [8] Jinwei Gu, Yasunobu Hitomi, Tomoo Mitsunaga, and Shree Nayar. “Coded rolling shutter photography: Flexible space-time sampling”, ICCP, pp.1-8, 2010.
- [9] 堀磨伊也, 河合紀彦, 神原誠之, 新井イスマイル, 西尾信彦, 横矢直和. “パノラマビューシステムのための死角領域修復とプライバシー保護を行った全地球画像生成”, MIRU, 2011.
- [10] Ri Shien, Fujigaki Motoharu, Morimoto Yoshiharu, and Matsui Tooru. “Pixel-to-pixel correspondence adjustment method using moire pattern for dmd reflection-type ccd camera”, Journal of the JSEM, pp.67-75, 2005.
- [11] Hajime Nagahara, Changyin Zhou, Takuya Watanabe, Hiroshi Ishiguro, and Shree K. Nayar. “Programmable aperture camera using LCoS”, ECCV, Vol.6316, pp.287-294, 2010.
- [12] www.vision.caltech.edu/bouguetj