

反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジカメラの提案

万波 秀年[†] 佐川 立昌[†] 向川 康博[†] 越後 富夫^{††} 八木 康史[†]

[†] 大阪大学 産業科学研究所 〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

^{††} 大阪電気通信大学 情報通信工学部 情報工学科 〒 572-8530 大阪府寝屋川市初町 18-8

E-mail: †{mannami,sagawa,mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ††echigo@isc.osakac.ac.jp

あらまし 屋外などの明暗の差が激しいシーンの情報を損なわずにカメラで撮影するためには、広いダイナミックレンジが必要である。そこで本研究では、反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジカメラを提案する。本カメラでは、カメラの前方に反射型液晶を配置し、液晶の反射率を制御することで受光量を適応的に調節する。実際に構築したシステムを用いて屋内から窓の外を撮影する実験を行った結果、受光素子ごとに適応的な光量調節の実現を確認した。また、光量調節の情報から元の光量を復元することで適応的ダイナミックレンジカメラが実現できることを確認した。キーワード 反射型液晶、適応的ダイナミックレンジカメラ

Adaptive Dynamic Range Camera with Reflective Liquid Crystal

Hidetoshi MANNAMI[†], Ryusuke SAGAWA[†], Yasuhiro MUKAIGAWA[†], Tomio ECHIGO^{††}, and Yasuhi YAGI[†]

[†] The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan

^{††} Dept. of Engineering Informatics, Faculty of Information and Communication Engineering, Osaka Electro-Communication University, 18-8 Hatsu-cho, Neyagawa, Osaka, 572-8530, Japan

E-mail: †{mannami,sagawa,mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ††echigo@isc.osakac.ac.jp

Abstract Wide Dynamic Range Image (WDRI) is needed for capturing scenes which include drastic lighting changes. This paper presents a method to widen the dynamic range of a camera using a reflective liquid crystal. The system consists of a camera and a reflective liquid crystal plane placed in front of the camera. By controlling the attenuation rate of the liquid crystal, scene radiance of each pixel can be controlled adaptively. We have implemented a prototype system and conducted experiments in the indoor and outdoor scenes. As a result, the radiance of each pixel was controlled independently. After controlling the radiance, the original scene radiance can be derived from the attenuation rate of the liquid crystal and the radiance obtained by the camera. We show WDRI obtained by calculating the original scene radiance from these results.

Key words reflective liquid crystal, adaptive dynamic range camera

1. はじめに

カメラで入力される画像は、入力光の強さを各色成分ごとに 8 bit, 256 段階で表現されることが多い。しかし、シーン中に光量の差が著しく大きい部分がある場合、強い光を受光した受光素子の近傍においてダイナミックレンジが十分に得られないことがある。これは、光を多く受けている受光素子の容量が飽和し、実際の光量を捉えられないからである。そのため、受光量に対するダイナミックレンジを広げ、詳細な画像を得る要求が高まっており、また広ダイナミックレンジ画像の作成に関する研究が行われている。

システムのダイナミックレンジを広げる手法として、古典的には異なる露光により撮影する手法が存在する。露光時間を段階的に変えて撮影する手法 [1], [2], [3] では、一つのシーンに対して数回撮影を行うため動きのあるシーンには適用できないという問題点がある。また、感度の異なる素子を組み合わせることで受光面を構成する手法 [4], [5], [6], [7] では、複数の素子を組み合わせることで面積効率が低下するため空間分解能が低下するという問題点がある。これらの問題を解決する手法として、各素子の感度を可変的に変更する手法がある [8], [9], [10]。これらの手法では、部位ごとに減衰量を制御可能な素子を用いて入射光の強度に合わせて光量を調節することで、擬似的に感度を調節

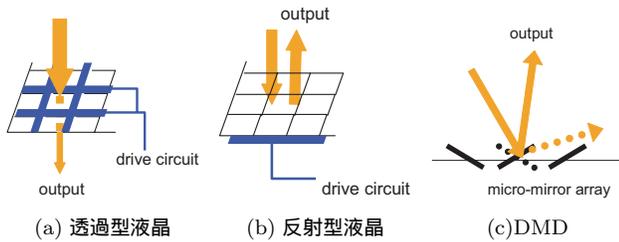


図 1 光量調節に用いる素子のモデル

し、最適な感度で撮影を行う。通常のカメラを用いて受光素子ごとに感度を変えるだけであるため空間分解能は低下しない。また、前フレームでの光量に基づいて感度を調節するため激しいシーン変化には追従できないという制限はあるものの、通常のシーンであれば動画であっても適用が可能である。これらのことから、感度を可変的に変更する手法は様々な場面への応用が考えられる。

光量を調節する素子として、[8], [9] では透過型液晶、[10] では DMD が用いられていた。しかし、透過型液晶を用いた場合には、液晶素子間に存在する駆動回路のために受光素子ごとの光量調節が難しい。また DMD を用いた場合には、DMD が時分割で動作するため、シャッタースピードの速いカメラと組み合わせた場合に性能を発揮できないという問題がある。

そこで本研究では、光量を調節する素子として反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジカメラを提案する。実際に反射型液晶を用いたシステムを構築し、シーンに応じて光量調節をする。また、元の光量を求めることで広ダイナミックレンジカメラを実現する。

以降 2 章で光量調節によるダイナミックレンジの拡大について、3 章で反射型液晶を用いたシステムを、4 章で実際に構築したシステムを用いた実験結果を順に説明する。

2. 光量調節による広ダイナミックレンジ化

本手法では、部位ごとに減衰量を制御できる素子を用いて受光素子に入射する光量を調節し、そこから元の光量を算出することでカメラのダイナミックレンジを広げる。まず、光量調節に用いる素子について述べ、次に光量調節による広ダイナミックレンジ化の原理について述べる。

2.1 光量調節に用いる素子

本節では、光量調節に用いる素子の違いについて述べる。部位ごとに感度を変えるための素子として、透過型液晶、反射型液晶、DMD がある。以下にそれぞれについて説明する。

透過型液晶 液晶では偏光状態を調節することで明暗の差を生じさせる。透過型液晶のモデルを図 1(a) に示す。図にあるように、光を透過させることで偏光状態を調節し、階調性を実現する。そのため、駆動回路を液晶素子間に配置する必要がある。この駆動回路のために開口率が低下し、他の素子に比べコントラスト比が劣る。

反射型液晶 反射型液晶とは、半導体チップとガラス基板の間に液晶をはさんだ素子であり、LCoS(Liquid Crystal on Silicon)ともよばれる。反射型液晶のモデルを図 1(b) に示す。透過型

表 1 用いる素子によるシステムの分類

	画素ごとの光量調整	カメラとの組み合わせ
透過型液晶	X	O
反射型液晶	O	O
DMD	O	X

液晶と同様に、液晶により偏光状態を調節することで階調性を実現するが、入射光を反射させるため光路は異なる。また、反射面の裏に駆動回路を配置する事が可能なため、より高いコントラスト比を実現できる。

DMD DMD はマイクロサイズの鏡を敷き詰めた素子である。DMD のモデルを図 1(c) に示す。図のように、ミラーを on/off の 2 状態で制御することで光の反射方向を調節し、明暗の差を生じさせることができる。各ミラーの状態を高速に切り替えることにより時分割で階調性を実現している。

本手法において、これらの素子をカメラと組み合わせ、光量調節に用いる事を考えると次の性質が要求される。

- 画素ごとに光量調節が可能
- カメラと組み合わせに適当

透過型液晶を光量調節に用いた場合には、フィルタのように用いることが可能なため扱いが簡易であるという利点があるものの、液晶の駆動回路の大きさが画素に比べ無視できないほど大きいので、液晶面上にフォーカスを合わせた場合に大量の光が遮断されてしまう。そのため液晶面上にフォーカスを合わせることができず、画素ごとの光量調節ができない [9], [8]。それに加え、液晶を透過することにより回折現象を生じ、カメラで撮影した際にぼけが生じるという問題がある。また DMD を用いた場合には、画素ごとの光量調節が可能であるものの、時分割により明暗の差を生じさせているため短い時間では十分な性能を発揮することはできない。そのため、本手法のようにカメラとの組み合わせで用いる素子としては適しておらず、特に、速いシャッタースピードが求められるシーンにおいては問題が顕著に現れる。また、DMD のスイッチングとカメラのシャッターの同期を取る必要があるため処理が煩雑になってしまう。反射型液晶を用いた場合には、駆動回路を液晶面の裏側に配置できるため液晶面にフォーカスを合わせた場合にも問題はなく、光を反射させることで明暗の差を生じさせるため回折現象も起こらない。また、時分割で動作せず偏光状態により明暗を調節するため、カメラと組み合わせて用いた場合にも性能を発揮できる。

以上をまとめたものを表 1 に示す。表から、本手法において用いる素子としては反射型液晶が最も適切であると言える。

2.2 広ダイナミックレンジ化の原理

本手法では著しく光量の多い領域からの光量を減少させ、そこから元の光量を算出することでシステムのダイナミックレンジを広げる。そのため、入射光と出射光の割合、つまり出射効率を部位ごとに調節可能な素子をカメラの受光素子の前方に配置したシステムを用いる。図 2 に本手法による光量調節のモデルを示す。受光素子の前方に素子を配置しているため、調節素子の出射効率を制御し減衰量を増加させることで受光量が減少

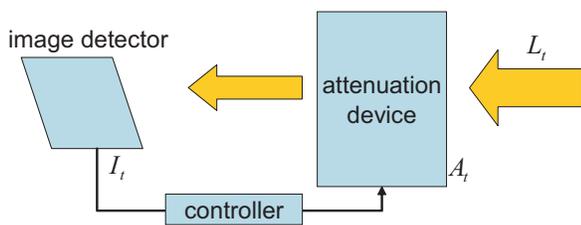


図2 素子による光量調節のモデル

する．受光量の減少により光量の多い領域においても受光素子が飽和しなくなるため、カメラが捉えることのできる光量が広がり、結果としてダイナミックレンジが広がる．また、部位ごとに射出効率を制御できるため、シーン中で光量の多い領域に対して適応的にマスクをかけることができる．これは絞りを調整するなどカメラの性質を変える場合と異なり、光量が相対的に少ない領域に対して作用しない．なお、時刻 t で受光素子に届く光量 I_t は、システムに入射する光量 L_t と調節素子の射出効率 A_t を用いて次のように表される．

$$I_t = L_t \cdot A_t \quad (1)$$

ここで、素子の制御を実時間で行うことができれば、シーンの変化にも対応できるため動画にも適用できる．

また、カメラが捉えた減衰後の光量、及び調節素子の射出効率からシーンの光量を計算することが可能である．シーンの光量を求めることで広ダイナミックレンジ画像を作成することが可能である．調節素子により減衰される前の光量 L_t は式 (1) より次式で表される．

$$L_t = I_t / A_t \quad (2)$$

なお、本手法ではより精細な光量情報を得るために、シーン中の光量に応じて射出効率 A_t を制御する必要がある．射出効率の制御については 3.4 節で述べる．

3. 反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジカメラ

本章では反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジカメラについて述べる．まず、反射型液晶の動作原理について述べ、次にシステム構成、反射型液晶による光量調節の方法、そして、本システムにおける適応的ダイナミックレンジについて順に述べる．

3.1 反射型液晶の動作原理

まず反射型液晶の動作原理について述べる．2.1 節で述べたように、反射型液晶では液晶面で光を反射させ、偏光状態を調節することで階調性を実現する．反射型液晶による階調表示のメカニズムを図3に示す．反射型液晶では階調性を実現するために、図3のように入射光を反射面に対して垂直に入射する必要がある．そのため、反射光を分光するためにビームスプリッタが必要となる．なお、偏光を扱うために偏光板を用いるのではなく、ビームスプリッタに偏光板と同じ特性を付加した偏光ビームスプリッタを用いることで明暗の差を生じさせることも可能である．

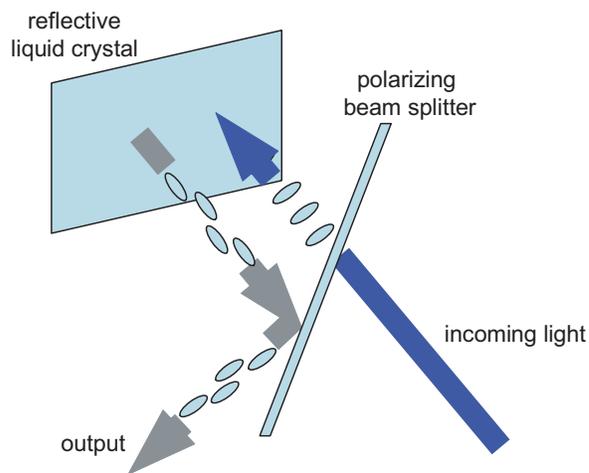


図3 反射型液晶の動作原理

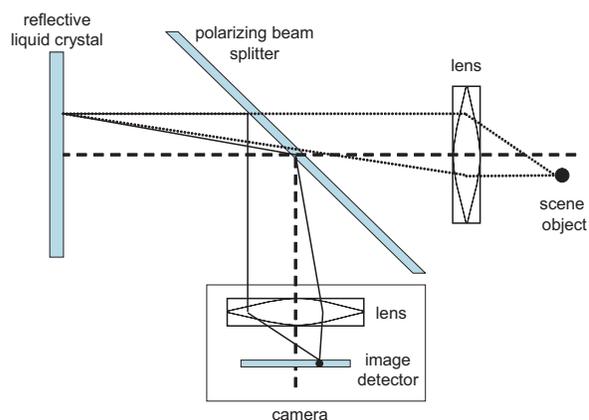


図4 反射型液晶を用いたシステムのモデル

3.2 システムの構成

本節では反射型液晶を用いたシステムの構成について述べる．反射型液晶を用いたシステムのモデルを図4に示す．上図のようにレンズを配置することで液晶面上にフォーカスを合わせることができ、受光素子ごとの光量調節が可能としている．これは液晶面の前に配置されたレンズにより入射光が液晶面で像を結び、そして液晶面を経た光がカメラのレンズを通して受光面で再び結像するためである．このシステムでは反射型液晶により光を反射することで光の減衰を行う．このときの液晶の射出効率と光量の関係は式 (1) によって表すことができる．

上記のモデルではレンズと液晶面の間にビームスプリッタが存在するため、各レンズはビームスプリッタの大きさ以上の焦点距離をもつ必要がある．しかし、実用を考えた場合、撮影するシーンなど用途に応じて容易にレンズを取り替えたいという要求があるため、特に対物側に配置するレンズには、上記のような制限は好ましくない．そこで、原理としてはまったく同じであるが、図5のようにリレーレンズを組み込んだシステムを本手法に用いる．リレーレンズとは光学系内のある点から他の点に、実像を伝達するレンズ系である．またこの際に像の大きさを変更することもできる．図5のモデルでは2枚のレンズを組み合わせリレーレンズを構成し、左右のレンズ、及び左方のレンズと下方のレンズをそれぞれ組み込んでいる．図中右端に

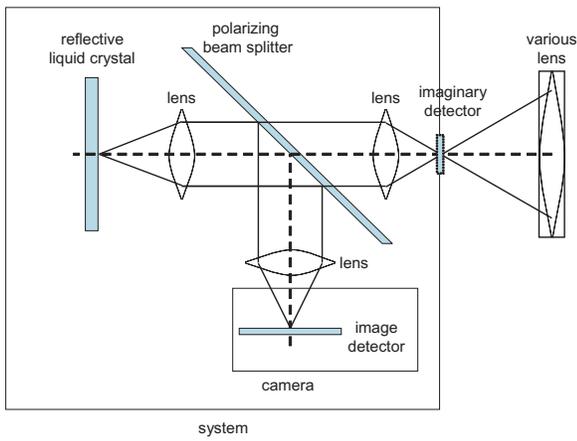


図 5 反射型液晶，リレーレンズを用いたシステムのモデル

配置したレンズにより結ばれる像を，2組のリレーレンズを用いて液晶面，受光面へと伝達することで，液晶により減衰された光が受光素子に入射する．

ここで，図中右端に配置したレンズ以外を一つのシステム，一つのカメラと考えると，システム外にあるレンズで集光された光が，液晶により適応的に光量を調節され受光面で結像する，適応的ダイナミックレンジカメラが実現されるといえる．またここで，システムの外に配置するレンズとしては，結像面までの距離さえ同じであれば様々なレンズが利用でき，魚眼レンズや望遠レンズなど用途に合わせて自由に変更できる．このことは先程述べたシステムの汎用性を考えたときに重要である．

なお，本システムの実装の際にはシステムのキャリブレーションを行う必要がある．キャリブレーションの内容として，受光素子と液晶の対応関係，液晶の制御と出射効率の関係がある．本手法においては [9] と同様に，ホモグラフィから受光素子と液晶の対応関係を，実測により液晶の制御と出射効率の関係を求める．

3.3 適応的ダイナミックレンジ

本節では，本システムにおけるダイナミックレンジについて述べる．本手法では，液晶の制御により光量を調節し，液晶の出射効率と受光量からシーンの光量を算出する．本手法における光量調節の際のシーンの光量と液晶の出射効率，カメラの受光量との関係を模式的に表したものを図 6 に示す．液晶の出射効率を一律に制御 ($A_1 = A_2 = A_3$) して光量 L_1, L_2, L_3 を撮影した場合，図上部のように， L_1, L_2 は観測できるものの， L_3 に対応する素子は飽和してしまい，シーンを撮影できない．そのため，このとき得られた受光量から広ダイナミックレンジ画像を作成した場合には正しく光量を復元できない．そこで，シーンの光量に応じて液晶の出射効率を部位ごとに制御することで，図下部のように素子の飽和も起こらずシーンが撮影される．また L_1 に対応する素子においても，出射効率を A'_1 に制御することで出射効率を A_1 として撮影した場合よりも量子化誤差が抑えられる．このように，液晶を部位ごとに制御することでより正確に光量を計測することができる．そのためシーンの光量をより正確に復元でき，より精度の高い広ダイナミックレンジ画像を作成することができる．

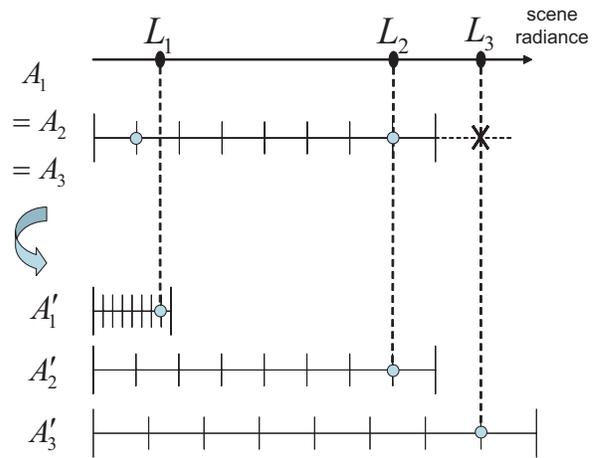


図 6 光量と出射効率の関係

これは複数の受光面を用いて撮影する場合とは異なる．本手法では各受光素子ごとに感度を調節可能であるが，複数の受光面で撮影する場合には受光面ごとにしか感度を調節できない．そのため，各受光素子において量子化誤差が大きくなり，作成する広ダイナミックレンジ画像の精度が低下する．

3.4 適切な光量の調節法

本節では，本手法で用いる光量調節のアルゴリズムについて述べる．本手法ではシーンに適応的に反射型液晶の出射効率を制御することで光量を調節する．そして，液晶により光量を調節された画像と液晶の出射効率から元の光量を復元し広ダイナミックレンジ画像を作成する．ここで，液晶を用いて光量を減衰させることによりカメラに入射する光量は減少するため，前節で述べたように，量子化により細かな光量情報は失われてしまう．そのため，より細かな光量情報を得るためには液晶の出射効率を可能な限り高くする必要がある．つまり，システムとしてのダイナミックレンジを最大限に発揮するためには，カメラのもつダイナミックレンジを最大限に利用する必要がある．ここで，受光素子が飽和を起こさない最大の光量となるように光量を調節すれば，カメラのダイナミックレンジを最大化できる．しかし，光量が最大となるように調節した場合には，わずかな光量の増加により素子が飽和してしまうため，シーンの光量を正しく復元することができなくなってしまう．そのため，光量変化に対して余裕をもつように光量を調節しなければならない．そこで本手法において適切な光量 I_{opt} を定義し，光量を I_{opt} に調節する方針をとる．

本手法では，カメラで撮影された光量を基に液晶の出射効率を制御する．時刻 t において受光素子に届く光量を I_t とすると，この情報を基にして次フレームでの素子の出射効率 A_{t+1} が求められる．次フレームでシステムに入射する光 L_{t+1} は液晶により出射効率 A_{t+1} だけ減衰され，受光素子に入射する光量は I_{t+1} となる．ここで，光量を調節するための適切な出射効率 A_{t+1} は光量 I_t によって変化する．例えば受光量が多い場合には出射効率 A_{t+1} を低下させ，逆に受光量が少ない場合には出射効率 A_{t+1} を向上させ，素子が得る光量が適切な値 I_{opt} となるように調節する．時刻 $t+1$ において得られる光量

を I_{opt} に調節したとすると、式 (1) より次式が成り立つ。

$$I_{opt} = L_{t+1} \cdot A_{t+1} \quad (3)$$

ここで、シーン中の光量 L_t の変化が微小な時刻変化において小さいと仮定すると、上式と式 (1) より、射出効率 A_{t+1} は得られる光量に応じて次式により決定する。

$$A_{t+1} = \min\left(\frac{I_{opt}}{I_t + \varepsilon} A_t, 1\right) \quad (4)$$

A は射出効率であるため $0 \leq A \leq 1$ である。なお、 ε は式の値を不定にしないための極めて小さな数である。

なお、本手法の実装の際にはカメラのダイナミックレンジの中央値を適切な光量とした。そのため I_{opt} は次式で表される。

$$I_{opt} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} \quad (5)$$

ここで I_{max}, I_{min} はそれぞれ、カメラが撮影できる明暗の最大値と最小値を表している。

4. 評価実験

本章では反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジカメラの実装、及び実験結果について述べる。まず実装したシステムについて述べ、次にシーンに適応的な光量の調節、及び光量の復元による広ダイナミックレンジ化の結果について述べる。

4.1 試作システム

実装したシステムを図7, 8に示す。なお、ここでは3.2節のモデルのうち図5で述べたリレーレンズを用いたシステムを試作した。構築したシステムではカメラとして PointGreyResearch Flea を用い、反射型液晶として Brilliant Z86D-3 を利用している。また本システムでは、偏光特性のないビームスプリッタを偏光フィルタと組み合わせて用いている。使用した反射型液晶は 800×600 の解像度を持ち、そのうちおよそ 500×400 ピクセルの領域を解像度 XGA(1024×768) のカメラで撮影している。なお、実際の撮影の際には図のシステム全体を覆い、外乱光が入射しないようにする。

また、システムのキャリブレーションの結果として、液晶を制御した際の射出効率の変化についての計測結果を図9に示す。グラフ中ではカメラ上部とカメラ下部で計測した液晶の制御情報と射出効率の変化の関係を表している。グラフの横軸は液晶の制御情報を表し、本システムでは液晶を 8 bit の情報で制御しているため 256 段階になっている。グラフの縦軸は液晶の射出効率の割合を表している。それぞれのグラフ中で左端の点は射出効率を最大にする制御情報に対応しているため、グラフの値は 1 となっている。図9からわかるように、液晶の制御による射出効率の変化は液晶中における位置により変わらない。ここで液晶の射出効率と制御の関係が素子全体と同様であるとすると処理の高速化が見込める。システムではこの結果を基にして液晶の制御を行う。

4.2 適応的な光量の調節

光量の調節に関する実験は日中に室内から窓の外を撮影することで行った。図10(a)に液晶による光量の調節をしていない

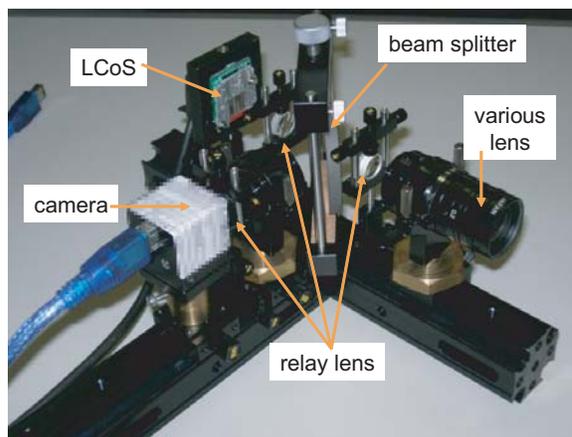


図7 反射型液晶を用いたシステムの概観

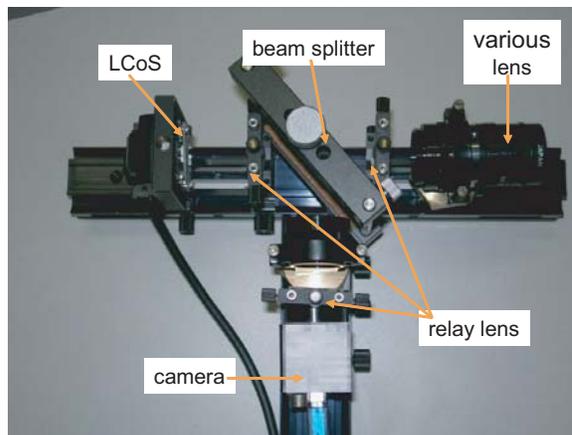


図8 反射型液晶を用いたシステムの概観 (鳥瞰)

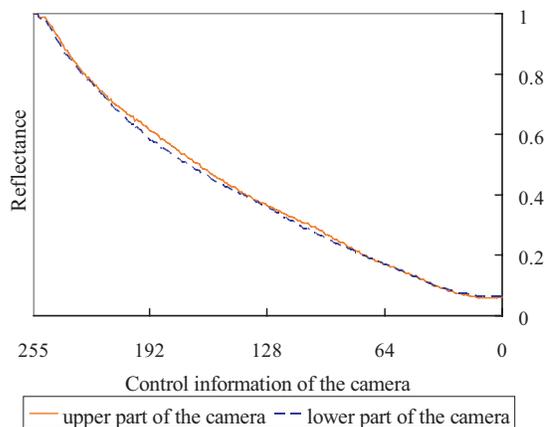
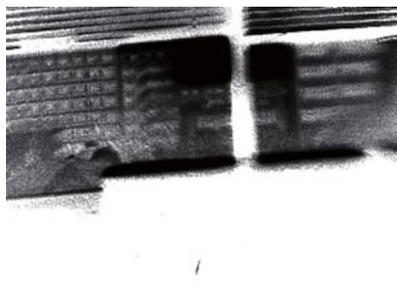


図9 反射型液晶の制御と射出効率の関係

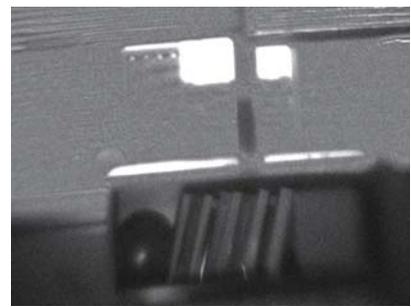
状態で撮影した画像を示す。窓の外などにおいて、太陽光の影響により感光素子が飽和状態にあることがわかる。次に、シーンの光量の調節に用いたマスク画像を図10(b)に、カメラが捉える光量を液晶により調節して撮影した画像を図10(c)に示す。本手法に従いフィルタの射出効率を変更することで、屋外の中でも特に光量の多い空、及び日光の反射が強い棚の上部を除き、感光素子が飽和しないよう光量が調節されていることが確認できる。また光量の調節に用いたマスクにおいて、光量の多い窓の外の様子も確認できる。したがって液晶の制御により光量を



(a) 光量調節前の画像



(b) 光量を調節するマスク



(c) 光量調節後の画像

図 10 提案システムを用いた光量の調節



(a) 暗い部分の情報



(b) 明るい部分の情報



(c) log スケールでの表示

図 11 提案システムによる広ダイナミックレンジ画像

調節することができたといえる。

4.3 広ダイナミックレンジ画像の作成

次に元の光量を計算することで広ダイナミックレンジ画像を作成した。元のシーンの光量は、光量を調節して撮影した画像(図10(c))とそのときの液晶の反射率(図10(b))から式(2)により算出した。

作成した広ダイナミックレンジ画像のうち、光量の少ない部分の情報、多い部分の情報をそれぞれ図11(a), (b)に示す。これらの画像は異なる露光により同じシーンを撮影した画像と同等の情報をもっていることがわかる。図11(a)では、露光時間を長くして撮影した画像と同等の情報をもっているため、光量の少ない領域、例えば画像中で下側に位置する棚の内部の情報として本の冊数を確認できる。また、図11(b)の画像では露光時間を短くして撮影した画像と同等の情報を持っているため、光量の多い領域、屋外の建物の窓などを確認できる。また、得られたシーンの光量を一枚の画像で表現する方法として、logスケールで表現したものを図11(c)に示す。図では窓の外、部屋の中の情報を同時に確認できるため、システムで表現できる明暗の範囲が広がっているといえる。また、シーンの光量を計算した結果、光量の最大値は4335となり、適応的ダイナミックレンジカメラが実現できていることがわかる。

5. おわりに

本論文では、反射型液晶を用いて各受光素子ごとに感度を変えることのできる適応的ダイナミックレンジカメラを提案した。実際に構築したシステムを用いた実験により、シーンに適応的な光量の調整、及び元の光量の計算による画像の広ダイナミックレンジ化が実現できることを確認した。今後の課題とし

ては、システムの小型が考えられる。図5で示したようにシステムを一つのカメラとしてとらえた場合、構成が複雑なため通常のカメラに比べてサイズが大きくなってしまふ。そのため、FOP(Fiber Optic Plate)を用いるなど、効率的な光学設計によりシステム全体の小型化を目指す。

文 献

- [1] B. C. Madden: "Extended intensity range imaging", Technical Report MS-CIS-93-96, University of Pennsylvania (1993).
- [2] P. E. Debevec and J. Malik: "Recovering high dynamic range radiance maps from photographs", Proc. of SIGGRAPH, pp. 369-378 (1997).
- [3] T. Mitsunaga and S. K. Nayar: "Radiometric self calibration", CVPR, Vol. 1, pp. 374-380 (1999).
- [4] R. J. Handy: "High dynamic range ccd detector/imager", US patent (1986). 4623928.
- [5] M. Konishi, M. Tsugita, M. Inuiya and K. Masukane: "Video camera, imaging method using video camera, method of operating video camera, image processing apparatus and method, and solid-state electronic imaging device", US patent (1995). 5420635.
- [6] S. K. Nayar and T. Mitsunaga: "High dynamic range imaging: Spatially varying pixel exposures", CVPR, Vol. 1, pp. 472-479 (2000).
- [7] 光永: "SVE方式広ダイナミックレンジ撮影技術", 情報処理学会研究報告 CVIM, No. 147, pp. 155-162 (2005).
- [8] S. K. Nayar and V. Branzoi: "Adaptive dynamic range imaging: Optical control of pixel exposures over space and time", ICCV, Vol. 2, pp. 1168-1175 (2003).
- [9] 万波, 佐川, 向川, 越後, 八木: "透過型液晶フィルタリング方式によるカメラの広ダイナミックレンジ化", MIRU, pp. 1208-1215 (2005).
- [10] S. K. Nayar, V. Branzoi and T. Boult: "Programmable Imaging using a Digital Micromirror Array", CVPR, Vol. 1, pp. 436-443 (2004).