

## 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<sup>†</sup>

万波 秀年\*・佐川 立昌\*・向川 康博\*  
越後 富夫\*・八木 康史\*

Wide Dynamic Range by Filtering with Transmissive Liquid Crystal

Hidetoshi MANNAMI\*, Ryusuke SAGAWA\*, Yasuhiro MUKAIGAWA\*,  
Tomio ECHIGO\* and Yasushi YAGI\*

To generate a wide dynamic range image (WDRI), a system which consists of a camera and a liquid crystal filter has been proposed. The system can adaptively control scene radiance using the liquid crystal filter placed in front of the camera. Although the masking effect of the filter blurs, the blurring function was not strictly analyzed. In this paper, the blurring function is estimated using an experimental system. We have confirmed that WDRI is clearly generated using the blurring function.

**Key Words:** Wide dynamic range, Liquid-crystal filter, Blurring function

### 1. はじめに

災害地において救助活動などに従事するレスキュー隊員の、二次災害による被害を回避するためには、ロボットによる情報収集が有効な手段である。ロボットに搭載したカメラで撮影を行い、災害状況や要救助者の状況といった情報を収集することができるが、一般的なカメラではダイナミックレンジが狭く、光量の差が大きいシーンを撮影することには向いていないため、瓦礫の下など暗い部分の情報を見逃してしまう可能性がある。そのため、広いダイナミックレンジを持つシステムに対する要求が高まっており、またそれに関する研究が行われている。

システムの広ダイナミックレンジ化手法として、古典的には異なる露光により撮影する手法が存在する。以下に従来法を紹介する。

**時間分割多段階露光手法** 時間分割多段階露光手法は、カメラの広ダイナミックレンジ化手法として最も一般的なものであり、通常のカメラシステムを用いて比較的簡単に実行できる<sup>1) 2) 3)</sup>。この手法では、露光時間を段階的に変えながら同一のシーンを連続的に撮影する。そして、撮影された複数枚の画像から広ダイナミックレンジ画像を作成する。光量が多い部分の情報は短い露光時間で撮影された画像から得られ、光量が少ない部分の情報は長い露光時間

で撮影された画像から得られる。これにより、より広い範囲の光量から情報を得ることができ、カメラのダイナミックレンジが広がる。この手法では同一のシーンを撮影した複数枚の画像が必要になるため、シーンに動きがある場合には適用できないという問題点がある。

**空間分割多段階露光手法** 空間分割多段階露光手法では、感度の異なる複数の素子を組み合わせたものを1単位として画像面を構成する<sup>4) 5) 6) 7)</sup>。例えば、感度の高い素子と低い素子を1単位として構成した場合、光量の少ない部分では感度の高い素子の情報を画像に反映することができ、感度の高い素子が飽和状態になるほど光量の多い部分では、感度の低い素子は飽和せずその情報を画像に反映することが可能である。このように単一の素子で画像面を構成した場合では素子が飽和してしまうようなシーンでも、組み合わせの単位としては飽和状態にならずに画像を撮影できるため、ダイナミックレンジの広い画像を撮影できる。この手法では同一のシーンを複数回撮影する必要がないため、動画にも適用できる。しかし、複数の素子の組み合わせを1単位として画像面を構成するため、単一の素子のみでの構成に比べ空間分解能が低下するという問題点がある。

**光分割撮影手法** 光分割撮影手法では、得られる光をビームスプリッタ等を用いて分割し、分割した光を複数の受光面で撮影する<sup>8) 9)</sup>。それぞれの受光面で得られる情報を空間分割多段階露光手法と同様に扱ってシステムの広ダイナミックレンジ化を実現する。この手法では、空間分割多段階露光手法と同様に、同一のシーンを複数回撮影する必要がないため動画にも適用できる。また、複数の受光面を用意しそれぞれに撮影するので、空間分解能も低下させずに

<sup>†</sup>

\* 大阪大学産業科学研究所 大阪府茨木市美穂が丘 8-1

\* Osaka University, Ibaraki, Osaka

(Received January 1, 1997)

(Revised January 1, 1997)

広ダイナミックレンジ化を実現できる。しかし、分光のために特別な機器、また複数の受光面が必要である。そのため全体のサイズが大きくなってしまい、昨今の小型化に対する要求と反してしまうという問題点がある。

**感度可変手法** 入射光の強度にあわせて、画素もしくは局所領域ごとに感度を適応的に調節し、光量を飽和させずに、最適な感度に保つ。感度を変えるための機構として、透過型液晶フィルタを用いたシステム<sup>15)</sup>や、DLPを用いたシステム<sup>16)</sup>などが提案されている。これらの手法では、それぞれの受光面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、感度は前フレームでの光量に基づいて算出されるため、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。

以上で述べた各手法は、それぞれ一長一短があり、用途に応じて選択すべきである。ここで、前述したような災害地における災害状況の情報収集ロボットへの搭載を考えた場合、動画への適用は必須条件となる。また、要救助者の発見のためには、解像度の低下は避けなければならない。さらに、システムは安価かつ小型であることが望ましい。

これらの条件にもっとも適合するのが、Nayarらが提案した透過型液晶フィルタを用いた感度可変手法<sup>15)</sup>である。このシステムでは、市販されているカメラをそのまま利用でき、レンズや撮像面に何ら加工を加える必要はない。単にレンズの前に液晶フィルタを置くだけで良いため、安価にシステムを構築できるという利点がある。しかし、レンズの結像面に液晶フィルタを配置できない場合には、液晶フィルタによるマスクにぼけが生じる。そのため、撮像面で受光した光量から、実際のシーン中の光量を推定するためには、ぼけを厳密に定める必要がある。しかし、文献<sup>15)</sup>では、ぼけ関数の根拠や妥当性が明確に示されておらず、実際に液晶フィルタで生じるぼけのモデル化の有効性が確認できない。また、入射光量を適応的に変化させた実験結果は示されているものの、実際にダイナミックレンジを広げた結果は示されていない。

そこで、本研究では、透過型液晶フィルタを用いたシステムを実際に構築し、追試を行うことで、文献<sup>15)</sup>では明確にされていなかったぼけ関数を推定し、その妥当性を検討することを目的とする。また、推定したぼけ関数から実際の光量を推定し、広ダイナミックレンジ画像を作成する。暗い屋内から明るい屋外を撮影した場合と、逆に明るい屋外から暗い屋内を撮影した場合を想定した実験により、透過型液晶フィルタを用いた感度可変手法を災害状況の情報収集ロボットへ適用した場合の効果を検証する。

我々の作成したシステムの原理は文献<sup>15)</sup>と同じであるが、細かい実装方法は若干異なる。そこで、我々の実装方法について、2章でフィルタによるダイナミックレンジの拡大の原理を、3章でカメラとフィルタの幾何的キャリブレーションを、4章でマスクによる光量への影響を順に説明す

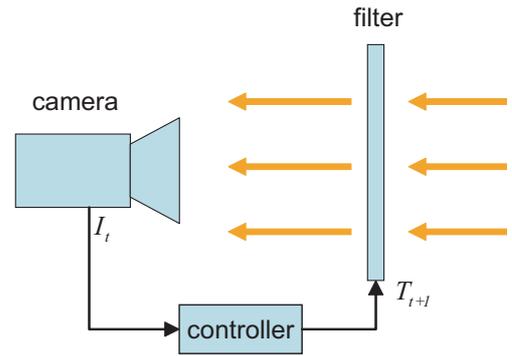


Fig. 1 Model of the system.

る。5章では、我々が実際に作成したシステムを用いて、主にぼけ関数を算出した結果とその妥当性、および、ぼけ関数に基づいてダイナミックレンジを拡大した結果について述べる。

## 2. フィルタによるダイナミックレンジの拡大

本章では、透過型フィルタを用いることでダイナミックレンジを広げる原理について述べる。まず、フィルタを用いた光量の調節法について述べ、次にフィルタにおける透過率と光量の関係について述べる。

### 2.1 フィルタを用いた光量の調節法

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ることによってダイナミックレンジを広げる。そのためにカメラの前方に光の透過率を空間的に調節できるフィルタを配置したシステムを用いる。Fig. 1に本手法で用いるシステムのモデルを示す。フィルタの透過率を低下させると、カメラの前方にフィルタを配置してあるため光量が減少する。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、ダイナミックレンジが広がる。また、フィルタは部位を指定して制御できるため、光量の多い領域に対して適応的に透過率を減少させ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。

また、フィルタの制御を実時間で行うことができればシーンの変化に対応して光量を調節することができるため、動画にも適用できる。

### 2.2 フィルタの透過率と光量の関係

Fig. 1に示したように、本システムではカメラとフィルタを制御部を通じて接続する。システムではフィルタを透過した光をカメラが捉え、カメラが捉えた光を基に制御部を通じてフィルタを調節する。時刻  $t$  でフィルタを透過する光量  $I_t$  はフィルタを透過する前の光量  $L_t$  とフィルタの透過率  $T_t$  を用いて次のように表される。

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

時刻  $t$  においてフィルタを透過する光量を  $I_t$  とすると、

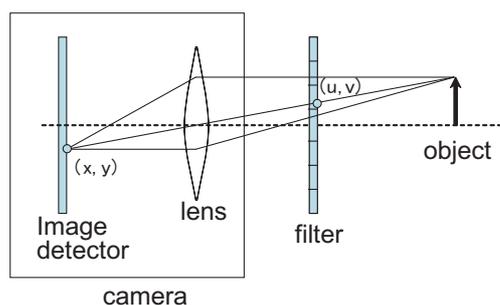


Fig. 2 Geometric model of the system.

$I_t$  は対応する受光素子で感知され、この情報を基にしてフィルタの透過率  $T_{t+1}$  が求められる。そして透過率  $T_{t+1}$  のフィルタを透過する光量は  $I_{t+1}$  となる。光量を調節するための適切な透過率  $T_{t+1}$  は光量  $I_t$  によって変化する。例えば、素子が飽和状態にあるときには素子が得る光量を減少させる必要があるため、透過率  $T_{t+1}$  を現在の透過率  $T_t$  より低下させなければならない。また逆に、光量  $I_t$  が少ない場合は透過率  $T_{t+1}$  をより高くし、素子の得る光量を増加させる必要がある。ここでは、受光素子で受ける光量が  $I_{sat}$  より多い場合に素子が飽和状態であるとし、 $I_{low}$  より少ない場合に光量が少ない状態とする。そして透過率  $T_{t+1}$  は得られる光量に応じて次のように決定する。

$$T_{t+1} = \begin{cases} (1 - \alpha)T_t & (I_t \geq I_{sat}) \\ T_t & (I_{sat} > I_t > I_{low}) \\ (1 + \beta)T_t & (I_{low} \geq I_t) \end{cases} \quad (2)$$

ここで  $\alpha, \beta$  は光量の調節の速度を表し、 $0 < \alpha, \beta < 1$  の値をとる。また、 $\alpha, \beta$  の値が大きいほど調節の速度は速いが、大きすぎると振動、発散する可能性がある。

以上の様にして光量を適切に調節するためには、フィルタ内の適切な領域で、適切に透過率を変更しなければならない。これには各素子に対応するフィルタ素子の位置、及びフィルタの制御情報に対する透過率の変化を知る必要がある。各素子に対応するフィルタ素子の位置を得るには、カメラとフィルタの幾何的性質が必要であり、フィルタの制御情報に対する透過率の変化を得るには、マスクをかけることによる光への影響を知る必要がある。第 3 章、第 4 章でそれぞれについて述べる。

### 3. カメラとフィルタの幾何的キャリブレーション

光量を適切に調節するために必要な情報として、カメラとフィルタの幾何的関係がある。本章ではまず、システム中のカメラとフィルタ間の幾何的関係について述べ、次にカメラの幾何的関係として、カメラレンズの歪みについて述べる。

#### 3.1 カメラとフィルタ間の幾何的関係

本節ではカメラとフィルタの幾何的関係のうち、カメラとフィルタ間の幾何的関係について述べる。Fig. 2 にカメラとフィルタの幾何的関係に関するモデルを示す。

ここでは、受光素子面とフィルタの対応関係を求めるため両者を平面と仮定する。すると、Fig. 2 のように 2 平面の間には一つのレンズが存在するため、この 2 平面の関係はこのレンズのレンズ中心を射影中心とする透視射影によって表すことができる。そのため、2 平面間の対応関係は、射影関係を表すホモグラフィ行列を求めることで与えられる。

対応する 2 つの平面上の点をそれぞれ  $x(x, y)$ ,  $u(u, v)$  とすると、2 点の関係はホモグラフィ行列  $H$  を用いて次のように表される。

$$s\bar{u} = H\bar{x} \quad (3)$$

なお、 $\bar{x}$  は同次座標を表し、 $\bar{x} = [x, y, 1]^T$  となる。また、 $s$  はスケールを合わせるための変数であり、 $H$  は  $3 \times 3$  の行列である。上記の  $x, u$  は平面上の点であるので、点  $u$  の平面上での座標は、 $x$  の要素とホモグラフィ行列の要素  $h_{ij}$  を用いて次のように表される。

$$u = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}}, \quad v = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad (4)$$

$H$  行列は 2 つの平面間の 4 組以上の対応点から求めることができる<sup>10)</sup>。

#### 3.2 カメラレンズの歪みとその補正

本節ではカメラのレンズ歪みの補正について述べる。前節では受光面とフィルタを平面と仮定して対応を求めたが、実際には受光面への入射光はレンズによって歪んでいる。そのため受光面とフィルタ間の対応を求める際には、この歪みを補正する必要がある。レンズによる歪みはレンズ中心に垂直に入射する光の射影点から離れるほど大きくなる性質を持っている。

レンズによる歪みが存在しないとした場合、観測した点はレンズ中心を通るため透視射影によって求められる。歪みが存在しない場合の画像面への投影座標を  $(x, y)$ 、歪みにより実際に投影される座標を  $(\check{x}, \check{y})$  とすると、レンズの歪みは次式のように表すことができる<sup>11)</sup>。

$$\begin{aligned} \check{x} &= x + (x - x_0)[k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots] \\ \check{y} &= y + (y - y_0)[k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots] \end{aligned} \quad (5)$$

なお上式で  $(x_0, y_0)$  は、レンズ中心に対して垂直に入射する光の射影点の座標であり、 $r$  は  $(x, y)$ ,  $(x_0, y_0)$  間の距離である。

式 (5) において、 $r^{2i}$  にかかる係数  $k_i$  をそれぞれ求めることでレンズ歪みの補正ができる。ここで、式 (5) でのレンズ歪みにおける第 3 項以降を無視すると、式 (5) は次のように書き換えることができる。

$$\begin{bmatrix} (x - x_0)r^2 & (x - x_0)r^4 \\ (y - y_0)r^2 & (y - y_0)r^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \check{x} - x \\ \check{y} - y \end{bmatrix} \quad (6)$$

第 3 項以降による影響はセンサの量子化誤差と比べて十分に小さいため<sup>12) 13)</sup>、この近似による影響は小さい。

十分な数の対応点の組を与えることで、式 (6) に対して最適解  $k_1, k_2$  が求まり、解  $k_1, k_2$  を用いてレンズの歪み

を補正することができる．本研究では Zhang<sup>14)</sup> のキャリブレーション法を用いることでレンズ歪みの係数  $k_1, k_2$  を求めた．

#### 4. マスクによる光量への影響

フィルタを用いた透過率の制御には，マスクによる光量への影響を知る必要がある．本章ではまず，フィルタの制御情報と透過率の変化との関係について述べ，次にマスクのぼけ，そしてぼけ関数の算出について述べる．

##### 4.1 フィルタの制御情報と透過率の変化の関係

本節ではフィルタの制御情報と透過率の変化の関係について述べる．本手法ではフィルタを用いてマスクをかけることで透過率を変化させる．この透過率の変化量は，マスクの強さに影響する．そしてこのマスクの強さはフィルタの制御情報に含まれているため，光量を調節するにはマスクの強さと透過率の変化量の関係，つまりフィルタの制御情報と透過率の対応関係が必要である．また，フィルタ内でも素子ごとにマスクの強さと透過率の変化の対応関係に違いが存在することを考慮しなければならない．したがって，フィルタ全域において制御情報と効果の対応関係を求める必要がある．

対応関係は計測により求めることができる．計測は，制御情報を段階的にマスクの強さを変更したときに受光素子が得る光量の変化の割合を測定することで行う．本研究で用いたフィルタの効果についての計測結果は 5.2 節で述べる．

##### 4.2 マスクのぼけ

本節ではマスクのぼけについて述べる．前章で述べたようにフィルタと受光面は透視射影の関係にある (Fig. 2)．使用するカメラをピンホールカメラと仮定すると，受光面へはレンズ中心を通過する光のみが入射する．したがって受光素子へ入射する光量は，式 (1) により対応するフィルタ素子を透過する光量  $I_t$  として表される．

しかし，実際のシステムではカメラとシーンの距離がカメラとフィルタ間の距離に比べ非常に大きいため，シーンを撮影するためにカメラのフォーカスをフィルタに合わせることはできず，そのためあるフィルタ素子を透過する光は対応する受光素子以外にも入射する．結果として，マスクによる効果は広がりを持ち，実際に受光素子に及ぼす影響も広がりをもつ．ここで中心から  $(m, n)$  移動した点に影響を及ぼすぼけ関数を  $b(m, n)$  とすると，あるフィルタ素子  $(u, v)$  の周辺素子  $(x, y)$  において透過率を  $T(x, y)$  としたときに  $(u, v)$  の透過率に及ぼす影響  $\hat{T}(u, v)$  は次のように表される．

$$\hat{T}(u, v) = b(u - x, v - y) * T(x, y) \quad (7)$$

なお，本論文では  $*$  は畳み込み演算を表す．

また上式より，マスクのぼけを考慮するとフィルタを透過する光量を表す式 (1) は次のように表される．

$$\hat{I}_t = L_t \cdot \hat{T}_t \quad (8)$$

上記によりマスクによる効果は広がりをもつため，あるフィルタ素子に対応する受光素子が得る光量を調節するには対

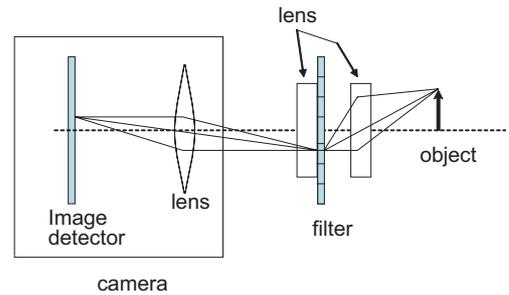


Fig. 3 An example of improved system using two additional lenses.

応するフィルタ素子の周辺でも透過率を調節しなければならない．ぼけ関数  $b$  が既知であるとして，式 (7) より  $\hat{T}$  は  $b$  と  $T$  の畳み込みであるため，光量の調節に求められる透過率  $\hat{T}$  を実現するフィルタの透過率  $T$  は畳み込みの逆演算を用いて次式で求めることが出来る．

$$T = \hat{T} *^{-1} b \quad (9)$$

なお，本論文では  $*^{-1}$  は畳み込みの逆演算を表す．

しかし実際に式 (9) より畳み込みの逆演算で結果として得られる透過率  $T$  は，負の値など実現できない数値をもつことがある．本手法の実装の際ではこのことを考慮して，受光素子に対応するフィルタ素子と同様に，その周囲にあるフィルタ素子の透過率も同様に調節する方法を選択する．また飽和状態にあるフィルタ素子への光量の調節に重きを置くため，周囲のフィルタ素子中で最低の透過率に揃える．この選択により，フィルタ素子  $(u, v)$  の透過率  $T(u, v)$  は次の式で決定される<sup>15)</sup>．

$$T(u, v) = \min_{-N \leq i, j \leq N} \hat{T}(u + i, v + j) \quad (10)$$

なお，ここで  $N$  は最小値を選択するフィルタの大きさである．また以上の理由から画像素子単位での光量の調節は困難になってしまう．

この問題はレンズのフォーカスがフィルタ上にないために生じる．この問題は Fig. 3 のようにフィルタの両側にレンズを設置したシステムを用いることで原理的には解決できる．Fig. 3 ではフィルタの両側に設置する 2 枚のレンズにより，入射光がフィルム上の 1 点を透過し，再びカメラ中で結像される．これにより，受光素子単位での透過率の調整が可能になる．

##### 4.3 ぼけ関数の算出方法

本節では前節で用いたぼけ関数  $b$  の算出について述べる．ぼけ関数が求められると，フィルタを透過した光量からシーンに存在する光量を求めることが可能である．本手法ではフィルタにより適応的にカメラのダイナミックレンジを変更しているため，シーンの光量を求めることで 1 章で述べた他の手法と同様に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．なお，フィルタを透過する前の光量  $L$  は，ぼけ関数とフィルタの透過率を用いて次式により表される．



Fig. 4 Side view of the system .



Fig. 5 Front view of the system .

$$L = \frac{\hat{I}}{b * T} \quad (11)$$

式 (7) より, フィルタ素子の透過率  $T$  が既知であれば, ぼけ関数は実際の透過率  $\hat{T}$  を用いて次式で求められる.

$$b = \hat{T} *^{-1} T$$

上式は式 (1), (8) を用いて次のように書き直すことができる.

$$b = \frac{\hat{I}}{L} *^{-1} \frac{I}{L} = \hat{I} *^{-1} I \quad (12)$$

この式により, 広がりが存在しないと仮定したときにフィルタを透過する光量と実際に透過する光量からも, 同様にぼけ関数を求めることができる.

## 5. システムの追試とぼけ関数の算出

本章では, Nayar ら<sup>15)</sup> が提案した透過型液晶フィルタを用いた方式と同等のシステム構築し, その追試を行うとともに, Nayar らが明示していなかったぼけ関数を算出した結果を示す.

### 5.1 評価のために構築したシステム

評価のために構築したシステムを Figs. 4, 5 に示す. 構築したシステムは, ビデオカメラとフィルタ, 及び制御用の計算機から構成される. ビデオカメラとして SONY DCR-VX2000 を用いた. そして, 本手法でのフィルタ素子として液晶素子を用いるため, ノート PC のディスプレイ部分を利用した. 用いたディスプレイは XGA (1024 × 768) の解

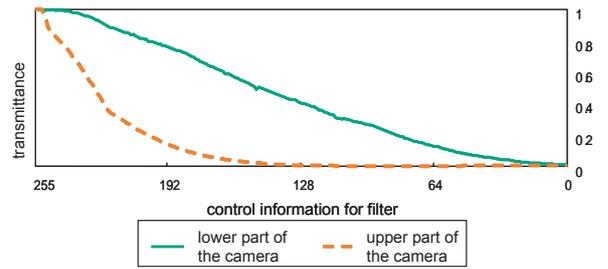


Fig. 6 Attenuation effect of the filter control .

像度をもち, 8 bit の情報で制御している.

Fig. 5 のように, ノート PC のディスプレイ部分のカバーを分解している. こうすることで液晶フィルタを透過した光がカメラに入射することを可能としている. なお, ディスプレイ中でおおよそ 300 × 200 ピクセルの領域を視覚センサが捉えている.

なお 2.2 節, 式 (2) で述べた光量の調節の速度は, 処理計算の単純化のため  $(1 - a) = 1/(1 + b) = 0.75$  としている. また, 3 章で述べた幾何的キャリブレーション結果は次のとおりである.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1.12 \times 10^{-3} & 1.616 \times 10^{-5} & 0.882 \\ -1.555 \times 10^{-5} & 1.29 \times 10^{-3} & 0.471 \\ -9.160 \times 10^{-8} & 6.132 \times 10^{-8} & 2.85 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$(k_1, k_2) = (-0.207, 0.112)$$

### 5.2 フィルタの制御による透過率の変化

本節ではフィルタを制御した際の透過率の変化についての計測結果について述べる. 計測結果を Fig. 6 に示す. 図中で下に位置するグラフはカメラ上部が撮影するフィルタの制御情報と透過率の変化の関係を表し, 上に位置するグラフはカメラ下部が撮影するフィルタの透過率と変化の関係を表している. グラフの横軸はフィルタの制御情報を表し, 本システムではフィルタを 8 bit の情報で制御しているため 256 段階になっている. グラフの縦軸はフィルタの透過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透過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.

Fig. 6 からわかるように, フィルタ中での位置により制御情報に対する透過率の変化に違いがある. システムではこの結果を基にしてフィルタの制御を行う.

### 5.3 ぼけ関数の算出

本節では 4.3 節で述べた, 本システムのぼけ関数の算出結果及び, 実データから算出されるぼけ関数の正確さについて述べる.

#### 5.3.1 ぼけ関数の算出結果

ぼけ関数の算出は式 (12) により行った. マスクの広がりがなくと仮定した場合に得られる効果を Fig. 7 に, フィルタの透過率を  $T$  にしてマスクをかけた場合に実際に得られ

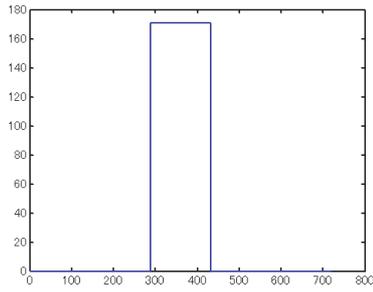


Fig. 7 Ideal effect of filtering without blur.

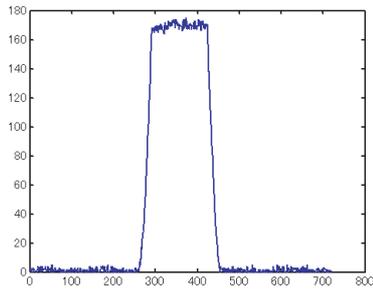


Fig. 8 Observed effect of filtering.

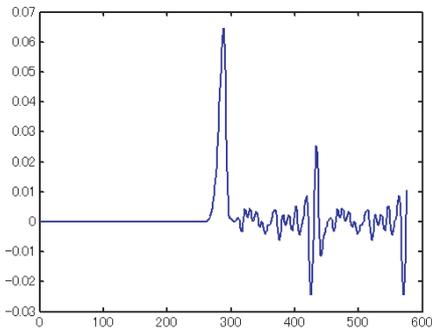


Fig. 9 Computed blurring function.

る効果を Fig. 8 に、それぞれ示す。図中で横軸はカメラ中での座標、縦軸は光量の変化を表している。

式 (12) により算出されたぼけ関数の断面図を Fig. 9 に示す。式 (12) の計算は除算と減算を左側から行うため、計算の後半 (図中右側) では累積誤差により値が振動してしまう。そのため誤差の影響が少ない範囲、最も左に位置するピークまでを推定結果として採用し、これをもとにぼけ関数の全体像を推定した。Fig. 9 から誤差を取り除いたぼけ関数を Figs. 10, 11 に示す。Fig. 11 は、ぼけ関数を 3 次元的に表現したものを拡大したものである。Figs. 10, 11 から、液晶フィルタ上の 1 素子でマスクをかけた場合にカメラ側の約 40 ピクセルに影響を及ぼし、その影響はマスクをかけた点との距離が大きくなるにつれて小さくなること分かる。

また、算出したぼけ関数を評価するためマスクによる影

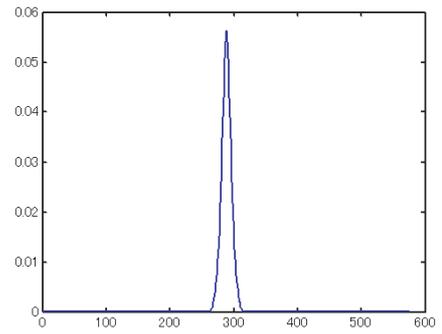


Fig. 10 Sectional view of approximated blurring function.

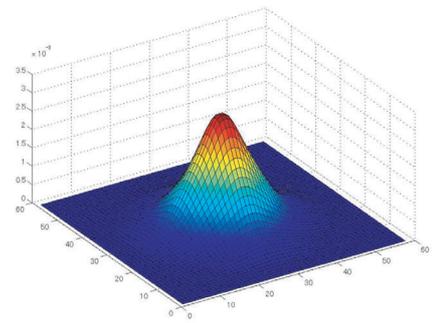


Fig. 11 Approximated blurring function.

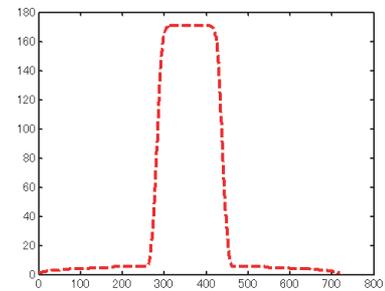


Fig. 12 Estimated effect of filtering.

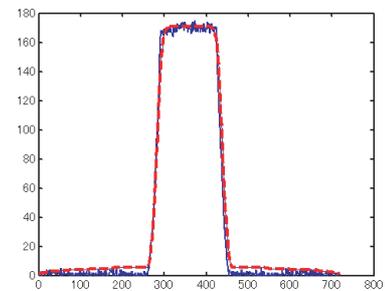


Fig. 13 Overlay of observed effect with estimated effect.

響を求めたぼけ関数を用いて復元した。ぼけ関数を用いて復元した影響を Fig. 12 に示す。また両者の類似度を確認す

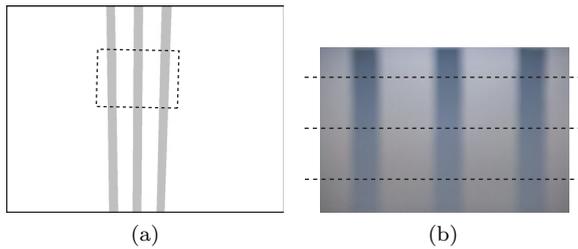


Fig. 14 Artificially generated mask image for the evaluation. (a) mask image. (b) captured image through the mask.

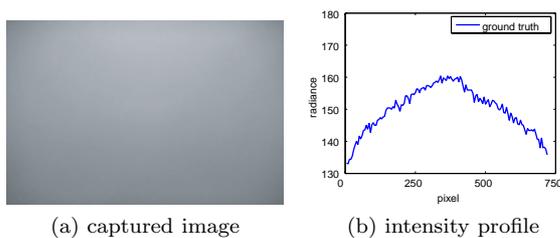


Fig. 15 Ground truth without masking.

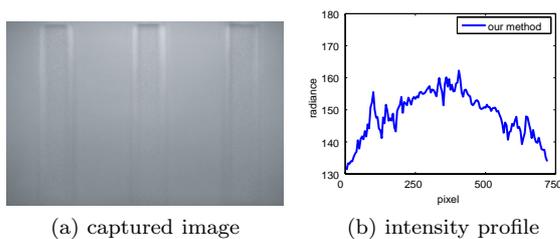


Fig. 16 Restored radiance by calculated blurring function.

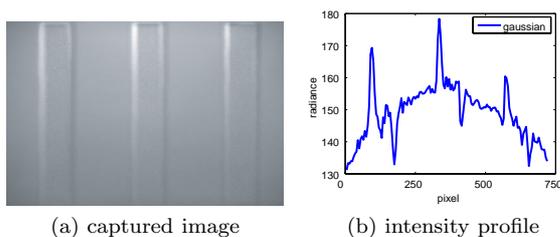


Fig. 17 Restored radiance by Gaussian blurring function.

るため、Figs. 8, 12 を同時に表示した図を Fig. 13 に示す。Fig. 13 から、実際に観測した値と算出されたぼけ関数により復元された値の類似度が高いことがわかり、ぼけ関数の算出が妥当であったことがわかる。

### 5.3.2 算出によるぼけ関数の精度評価

前節の実験結果より、本手法によって算出されたぼけ関数の妥当性は示されたが、ぼけ関数は一般的にガウス分布によって近似されることが多い。そこで本節では、実データから算出したぼけ関数と、ガウス分布により近似されたぼけ関数の精度を比較する。すなわち、それぞれのぼけ関数に

よって元の光量を推定し、真値と比較することで精度を評価する。

実験として、Fig. 14(a) のフィルタを用いて部分的にマスクをかけて撮影した画像から、元の光量を推定して真値との誤差を計算した。なお、構築したシステムにおいてはフィルタの一部を視覚センサが捉えているため、Fig. 14(a) の破線領域を透過して Fig. 14(b) の画像が得られている。Fig. 16(a), Fig. 17(a) はそれぞれ、実データから算出されたぼけ関数、ガウス分布により近似されたぼけ関数を用いて光量を推定した結果である。それぞれの精度を比較するため、真値としてマスクをかけずに撮影した画像 ( Fig. 15(a) ) を用いる。Fig. 15(b), Fig. 16(b), Fig. 17(b) はそれぞれ、Fig. 14(b) 中央の破線線上における輝度断面であり、グラフの横軸はカメラ中の  $x$  座標、縦軸は光量を表している。これらの図、グラフからマスクの強度が極端に変わるような領域では、本手法においても誤差はあるものの、ガウス分布の近似により推定された光量は大きく外れた値をとることがわかる。

また、Fig. 14(b) 中の 3 本の破線上で、それぞれのぼけ関数を誤差によって比較した。なお、誤差としては平均二乗誤差 (RMS) と標準偏差を求めた。実験により求められた誤差を Table 1 に示す。Table 1 から、誤差を計算した 3 本の

Table 1 Comparison of blurring functions.

line	calculated		Gaussian	
	RMS	standard deviation	RMS	standard deviation
upper	6.63	4.89	12.7	10.6
middle	4.33	2.87	6.60	4.92
lower	3.65	2.25	4.37	2.88

破線上すべてにおいて、実データから算出したぼけ関数が、ガウス分布により近似したぼけ関数よりも誤差が小さいことがわかる。

以上より、提案手法によって算出したぼけ関数が、より高い精度で元の光量を推定できることが確かめられた。マスクの強さが急激に変化する境界部分においては、ぼけ関数がシステムのぼけをどの程度正確に表現しているかによって推定される光量が大きく変わるため、ぼけ関数の精度は重要である。本手法では実データから直接ぼけ関数を算出しているため、より高い精度でぼけを表現できたと考えられる。

Nayar ら<sup>15)</sup> は、ガウシアンによって畳み込まれたピルボックス関数によってぼけ関数を表現しているが、その根拠や有効性は明確ではなかった。それに対し、われわれは実際に構築したシステムにおけるぼけ関数を実データから算出し、その妥当性と有効性を確認した。

### 5.4 評価実験

本節では、実装したシステムを用いた評価実験の結果について述べる。まず、15) の追試としてフィルタの制御により光量を適切に調節できること、及び、ぼけ関数に基づいて広ダイナミックレンジを実現できることを確かめる。

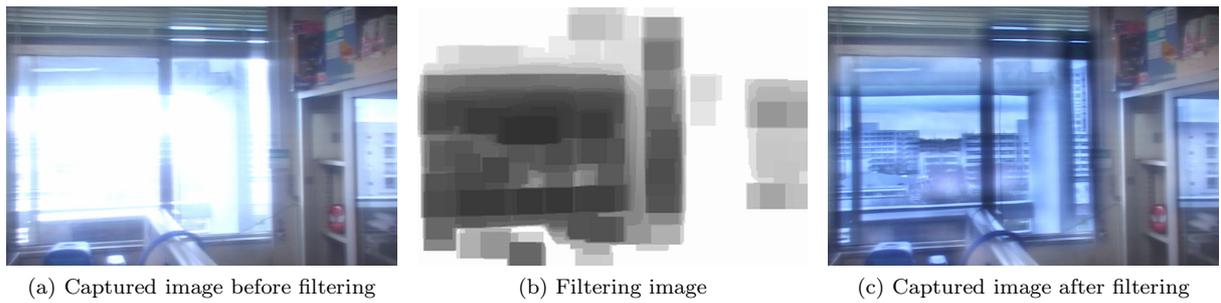


Fig. 18 Filtering the scene : from indoor to outdoor.

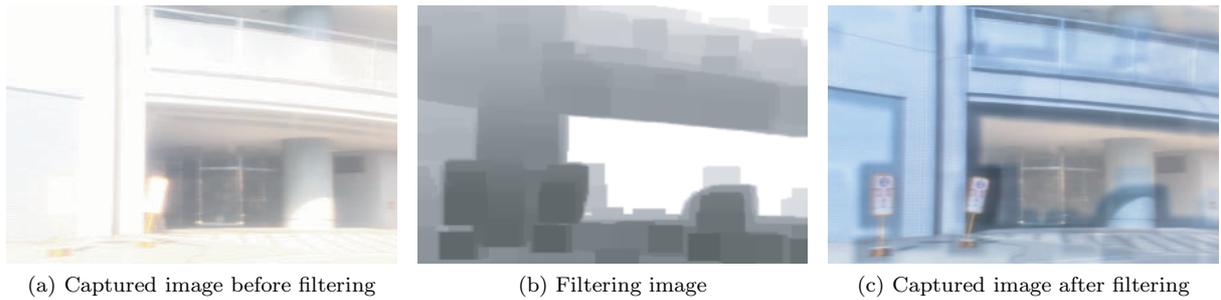


Fig. 19 Filtering the scene : from outdoor to indoor.

#### 5.4.1 フィルタの制御による光量の調節

まずフィルタの制御による光量の調節に関する実験について述べる．実験は日中に行い，屋内からの屋外の撮影と，屋外からの屋内の撮影の2パターンを行った．

Figs. 18, 19 に撮影結果を示す．Fig. 18 が屋内からの撮影の例として，室内から窓の外を撮影した結果であり，逆に Fig. 19 が屋外からの撮影の例として，屋外から建物の入り口を撮影した結果である．それぞれ左から (a) フィルタにより光量を調節する前の画像，(b) 光量を調節するためのマスク画像，(c) フィルタにより光量を調節した後の画像である．それぞれ図中 (a) では，日中であることから屋外を撮影している部分が太陽光の影響により受光素子が飽和状態にあるが，本手法に従いフィルタの透過率を変更することで，受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．また調節の結果，Fig. 18 では窓の外の風景，Fig. 19 では建物の模様や屋外に置いてある標識といった光量の多い部分の情報も見逃すことなく撮影できている．したがってフィルタの制御により適切に光量を調節することができたといえる．

#### 5.4.2 シーンの光量の計算

次に撮影したシーンの光量について述べる．シーンの光量は光量の調節後の画像と調節に用いたフィルタ画像から，式 (11) により計算できる．

ここでは Fig. 18 における調節後の画像とフィルタ画像からシーンの光量を計算した．その結果，シーンの光量の最大値は 1674 となり，システムとして少なくとも 11 bit の情報を持つことが明らかになった．11 bit の広ダイナミックレンジ画像を紙面で表現するため，得られたシーンの光量が



Fig. 20 Expression of light intensity computed by the implemented system.

持つ情報を複数の画像に分けて表現する．それぞれの画像では光量にある倍率をかけ，その値がしきい値を超えた場合はしきい値に抑えて表現する．

Fig. 20 に，Fig. 18(b), (c) から計算した光量を，倍率の値を数段階に変更して表現した画像群を示す．なお，Fig. 20 で左上に位置する画像の倍率ももっとも高く，右下に位置する画像の倍率ももっとも低い．

Fig. 20 にあるように，この画像は様々な露光により同じ

シーンを撮影した複数枚の画像と同等の情報をもっていることがわかる。Fig. 20 の上段の画像では、露光時間を長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少ない領域、画像中で右側に位置する棚の内部などを確認することができる。また下段の画像では、露光時間の短い画像と同等の情報を持っているため、光量の多い窓の外の風景が確認できる。結果として撮影できる明暗の範囲が広がっているため、システムの広ダイナミックレンジ化が実現できているといえる。

## 6. おわりに

本稿では、Nayar らが提案した、透過型液晶フィルタを用いて各受光面の感度を適応的に変化させるシステムを実際に構築し、ダイナミックレンジを広げる効果について検証した。文献 15) では、仮定したぼけ関数について、その根拠や有効性は明確にされていなかったが、我々は実際に構築したシステムを用いてぼけ関数を算出し、その妥当性を確認した。単に、入射光量が飽和しないように適応的にフィルタリングするだけであれば、厳密なぼけ関数は不要である。しかし、実際の光量を正確に推定し、広ダイナミックレンジ画像を作成する際には、用いたシステムに応じてぼけ関数を正確に定義する必要がある。我々は、実データに基づいてぼけ関数を算出することで、鮮明な広ダイナミックレンジ画像が作成できることを確認した。これにより、本システムが、災害地における情報収集ロボットが、明暗の差が激しい屋外でも、瓦礫の下にいる要救助者などの情報を見逃すことが減少すると期待できる。

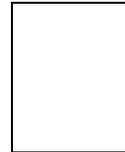
今後の課題としては、ぼけの減少が挙げられる。本手法ではフィルタでの透過率の変化が広がりをもってしまうため、素子単位での光量の調節は難しかった。ぼけを正確にモデル化することで、その悪影響を軽減させることは可能であるが、光学的な工夫による、ぼけが生じない設計が望ましい。Fig. 3 に示したように、フィルタの両側にレンズを追加したシステムだけでなく、ファイバオプティクプレート (FOP) をカメラとフィルタの間に配置したシステムなども検討し、システムを小型化することも目指す。

## 参考文献

- 1) B. Madsen: "Extended Intensity Range Imaging", Technical Report, MS-CIS-93-96, Grasp Laboratory, University of Pennsylvania, 1993.
- 2) P. Debevec and J. Malik: "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs", Proc. of SIGGRAPH97, pp.369-378, 1997.
- 3) T. Mitsunaga and S. K. Nayar: "Radiometric Self Calibration", Proc. of CVPR99, vol.1, pp.374-380, 1999.
- 4) R. J. Handy: "High dynamic range CCD detector/imager", U. S. Patent 4623928, 1986.
- 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" U. S. Patent 5420635, 1995.
- 6) S. K. Nayar and T. Mitsunaga: "High dynamic range imaging: Spatially varying pixel exposures", Proc. CVPR00, vol.1, pp.472-479, 2000.
- 7) 光永知生: "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-147, pp.155-162, 2005
- 8) 土井, 原, 見坊, 芝: "イメージセンサ", 特開平 8-223491, 1996.
- 9) M. Aggarwal, N. Ahuja: "Split Aperture Imaging for High Dynamic Range", IJCV, vol.58, no.1, pp.7-17, 2004.
- 10) 清水慶行, 太田直哉, 金谷健一: "信頼性評価を備えた最適射影変換の計算プログラム", 情報処理学会研究報告 CVIM-111-5, pp.33-40, 1998.
- 11) D. C. Brown: "Close-range camera calibration", Photogrammetric Engineering, no.8, pp.855-866, 1971.
- 12) R. Y. Tsai: "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses", IEEE Journal of Robotics and Automation, no.4, pp.51-58, 1987.
- 13) G. Wei and S. Ma: "Implicit and explicit camera calibration: Theory and experiments", IEEE Trans. PAMI, no.5, pp.469-480, 1994.
- 14) Z. Y. Zhang: "A Flexible New Technique for Camera Calibration", IEEE Trans. PAMI, no.11, pp.1330-1334, 2000.
- 15) S. K. Nayar, V. Branzoi: "Adaptive Dynamic Range Imaging: Optical Control of Pixel Exposures Over Space and Time", Proc. ICCV, pp.1168-1175, 2003.
- 16) Shree K. Nayar, Vlad Branzoi, Terry E. Boult, "Programmable Imaging using a Digital Micromirror Array", Proc. CVPR, vol.1, pp.436-443, 2004.

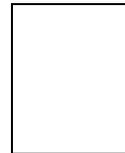
## [著者紹介]

### 万波 秀年



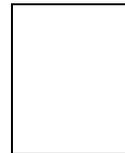
2005年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。現在、大阪大学情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程在籍中。

### 佐川 立昌



1998年京都大学工学部情報工学科卒業。2000年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻修士課程修了。2003年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了。現在、大阪大学産業科学研究所助手。実時間視覚処理と物体のモデリングの研究に従事。博士(工学)日本ロボット学会、電子情報通信学会、情報処理学会、IEEE各会員。

### 向川 康博



1997年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了。同年～2002年岡山大学助手。2003年～2004年10月筑波大学講師。2004年11月より大阪大学助教授。コンピュータビジョン、複合現実感の研究に従事。博士(工学)。情報処理学会、電子情報通信学会、日本バーチャルリアリティ学会、IEEE各会員。

