

マルチカメラを用いたハイダイナミックレンジ画像の実時間生成

神原 誠之[†] Tobias Höllerer^{††} 横矢 直和[†]

[†] 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

^{††} University of California, Santa Barbara Santa Barbara, CA 93106

E-mail: [†]{kanbara,yokoya}@is.naist.jp, ^{††}holl@cs.ucsb.edu

あらまし 高精細画像生成や環境の光源推定には、広いダイナミックレンジを持ったハイダイナミックレンジ (HDR) 画像が必要である。さらに近年、現実環境の仮想化や拡張現実感の光学的整合性の実現のために、HDR 画像の実時間生成の要求が高まっている。従来、HDR が計測可能な特殊なカメラを利用することで、実時間 HDR 画像の獲得が可能であるが、センサの受光感度の制限から、獲得できるダイナミックレンジには限界があった。また、異なるシャッタースピードで撮影された複数の画像を合成することで HDR 画像を生成する手法も提案されているが、実時間処理は実現されていない。本論文では、異なるシャッタースピードを設定した複数のカメラで現実環境を撮影し、それら撮影画像から撮影環境に応じて合成に利用する画像を適応的に選択することで、HDR 画像の実時間生成を実現する。さらに、カメラと位置関係を固定した鏡面球を撮影し実環境のシーンと光源環境を同時に推定する拡張現実感システムを構築する。実験では、屋外と屋内が同時に観測されるような広いダイナミックレンジが撮影に必要な環境において、HDR 画像の実時間生成および、その HDR 手法を用いた拡張現実感システムの実験結果を示す。

キーワード ハイダイナミックレンジ画像、実時間処理、マルチカメラ、露光時間

Real-time High Dynamic Range Image Generation Using Multiple Cameras

Masayuki KANBARA[†], Tobias HÖLLERER^{††}, and Naokazu YOKOYA[†]

[†] Nara Institute of Science and Technology 8916-5 Takayama, Ikoma, Nara, 630-0192 Japan

^{††} University of California, Santa Barbara Santa Barbara, CA 93106, USA

E-mail: [†]{kanbara,yokoya}@is.naist.jp, ^{††}holl@cs.ucsb.edu

Abstract In this paper, we propose a method for real time generation of high dynamic range images using multiple cameras. For precise estimation of the light environment, an image with a high dynamic range (HDR) is generally required. HDR image generation is also of interest for real-time applications such as augmented reality or augmented virtuality. Recently, an HDR camera with a sensitive sensor element (charge-coupled device) was developed. However, it is difficult to completely record a scene with a wide enough dynamic range using the camera because of the limited sensitivity of the sensor. A method for HDR image generation, which uses multiple images captured with different exposure times, has been proposed. However, using this approach, real-time processing is not possible because of the time required to capture multiple images. This paper proposes a method for real-time HDR image generation using multiple cameras, each of which is set to a different exposure time. These cameras can simultaneously capture multiple images with different exposure times, and these images are used to generate an HDR image in real time. We show results of an HDR image generation experiment by use of the proposed method in an environment where the cameras can observe both an outdoor and an indoor scene at the same time.

Key words high dynamic range image, real time processing, multiple cameras, exposure time

1. はじめに

現実環境を高精細撮影することによる仮想化や、現実環境の光源環境推定では、現実環境をできる限り広いダイナミックレンジで撮影する必要がある。特に屋内と屋

外の双方が混在するような環境や、光源が映り込んでいような環境ではより広いダイナミックレンジで撮影される必要がある。そのため、従来より広いダイナミックレンジを持った画像であるハイダイナミックレンジ (HDR) 画像を生成する研究が盛んにおこなわれている。

さらに近年、現実環境の仮想化や拡張現実感の光学的整合性の実現のために、HDR 画像の実時間生成の要求が高まっている。しかしながら、多くの HDR 生成に関する研究は、そのデータ量や機器的制約のために、実時間処理を想定しているものではない。本研究では、そのような実時間アプリケーションへの HDR 画像の応用を想定した、実時間 HDR 画像生成を目的とする。

以下、2 章に関連研究と本研究の位置付け、3 章にマルチカメラを用いた HDR 画像の実時間生成に関して詳述する。4 章では、撮影に広いダイナミックレンジが要求される環境における HDR 画像の実時間生成実験の結果を示し、最後 5 章で本論文をまとめる。

2. 関連研究

HDR 画像を生成する手法の一つに、高感度の受光センサーを持つ HDR カメラを用いた手法がある。しかしこれらのダイナミックレンジは、一般のカメラより広いダイナミックレンジで撮影できるものの、撮影可能なハイダイナミックレンジには限界があり、十分なダイナミックレンジ計測することは困難である。そこで、ハイダイナミックレンジ画像の撮影を実現するために機械的に改良を加える手法が提案されている [1]。その代表的なものに、感度の異なる素子を組み合わせることで受光面に配置することで、広範囲のダイナミックレンジを確保する手法がある [2]。しかし、限られた受光面に異なる素子を配置するため、結果的に画像解像度が低下するという問題が生じる。また、各画素の感度を動的に変化させることで解像度を低下させることなく、広いダイナミックレンジを計測する手法がある [3]～[5]。これらの手法には、各画素の感度を調節するために、透過型液晶、反射型液晶や DMD などを利用する手法がある。これらは、液晶の偏光や反射ミラーの角度を調節することで、各画素の入射光量をセンサーが適切に受光できる光量に調節することで、適切な感度で撮影することが可能である。これらの手法は、前フレームの光量に基づいて入射光量を調節することで、一般的な動的な環境に適応可能であるが、フレーム間で現実環境の照明環境が劇的に変化する場合、受光量の調節が適切に行えないという問題がある。

撮影画像のダイナミックレンジを広げる他の手法として、異なる露光時間で撮影された複数枚の画像から HDR 画像を生成する手法 [6]～[8] が提案されている。この手法は、一つのカメラで異なる露光時間で複数枚の画像を撮影し、これらの画像を合成することでハイダイナミックレンジ画像を生成する手法である。撮影する画像枚数を増加すればするほどダイナミックレンジは広がりかつより多い階調を密に計測できる [9]。この手法では、ダイナミックレンジの幅は画像枚数に依存するため原理的には制限は無いが、多くの画像を利用すれば撮影時間および合成処理により多くの時間を要する。また、複数のカメラを用いて撮影時間を削減した手法 [10] も提案され

ているが、HDR 画像の実時間生成は実現されていない。そのため、このアプローチでは計測可能なダイナミックレンジの広さ・精度と画像生成の更新レートがトレードオフの関係にあり、一般的に実時間処理を実現することは困難である。

異なる露光時間で撮影された画像群から、ハイダイナミックレンジ画像を生成するアプローチにおいて、生成画像の実時間アプリケーションの応用 [11]～[14] も目的として、生成速度を向上を試みた手法が提案されている [15]。この手法は、現フレームで生成されたハイダイナミックレンジ画像から実環境の光源環境を推定し、次フレームで計測に必要なダイナミックレンジ幅を推定することで、適切な露光時間と撮影枚数を適応的に変更する。これにより、光源環境に応じた撮影が可能となり、撮影時間を最低限に抑えることが可能となる。しかし、この手法も高速化は実現できるものの、一つのカメラで複数回の撮影を行うため、実時間処理は実現できない。

そこで本研究では、複数のカメラを用いたハイダイナミックレンジ画像の実時間生成手法を提案する。近年、計算機・カメラ機器の高性能化により、複数のカメラを 1 台の計算機に同時に取り込むことが可能となってきた。本手法では、複数のカメラに異なる露光時間を設定することで、同時に異なる明るさが撮影されている画像群が取得可能となる。それらを現実環境の光源環境に応じて適応的に利用画像を選択することで、HDR 画像の実時間生成を実現する。

3. 現実環境に応じた HDR 画像の実時間生成

本章では、複数カメラを利用したハイダイナミックレンジの実時間生成手法について説明する。本研究では、HDR 画像生成のアプローチとして、異なる露光時間で撮影された画像群を合成する手法を採用する。その際、実時間生成を実現するために、近年カメラと計算機の高性能化により、複数のカメラで撮影された映像を同時に計算機に取り込むことが可能なマルチカメラユニットを利用を想定する。カメラユニットを構成する各カメラに、異なる露光時間を設定することで、明るさの異なる画像を同時に取得する。これらを合成することで実時間合成を実現する。画像合成する際、現実環境の光源環境に応じて適応的に合成手法変更することで、効率的な画像合成及び、合成処理の高速化を図る。

以下、2.2 に使用機器とカメラ設定、2.3 に前処理、2.4 に HDR 画像の生成手法を詳述する。

3.1 使用機器とカメラの露光時間設定

本研究では、複数のカメラで撮影された画像を実時間で計算機に取り込むことが可能なカメラユニットとして、ProFusion(Viewplus 社製)を利用する。このカメラユニットは、VGA(640×480 画素)のカラー画像が撮影可能な CCD カメラが、5×5 の格子状に 25 台配置され

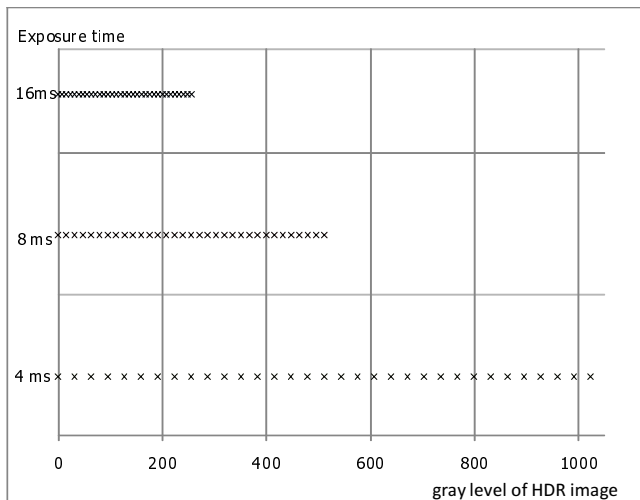


図 1 露光時間と撮影可能なダイナミックレンジの関係.

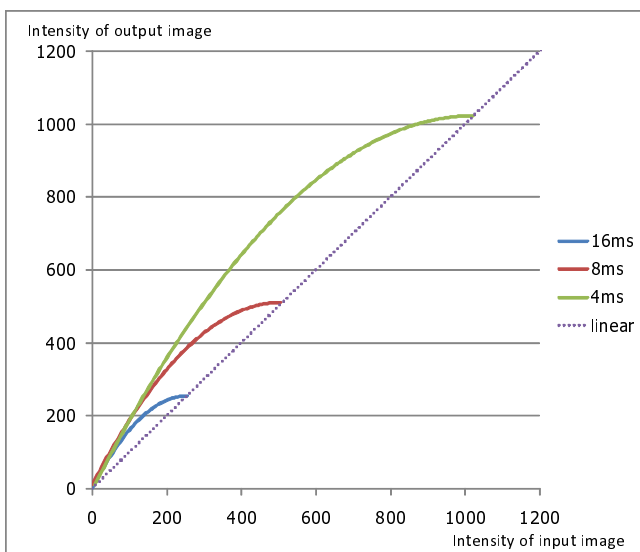


図 2 ガンマ変換と照度値の関係

ており、計算機には PCI-Express インタフェースで接続される。このカメラユニットは、25 眼カメラで撮影された映像を実時間で計算機に取り込むことが可能である。また、小型カメラを密集して配置することで、カメラ間が近く、ベースラインが短いため、通常画像合成において問題になるカメラ間の視差の影響を最低限に抑えることが可能である。具体的には、解像度、焦点距離、ベースラインから、カメラからの距離が 5.2m 以上離れれば視差が 1 画素以内になり、視差による合成時の誤差は影響がなくなる。

カメラの設定に関しては、露光時間（シャッタースピード）とガンマ値を設定の対象とし、その他のパラメータは固定した。また、カメラ機器の特性から、カメラのパラメータ（露光時間・ガンマ値）の変更処理には、一定の時間が必要となるため、本手法では、実時間処理を実現するために、初期設定時に各カメラに露光時間とガンマ変換値を設定し、途中のパラメータ変更は行わないこととした。

3.2 前処理：カメラキャリブレーション

本手法では、前処理としてカメラのキャリブレーションを行う必要がある。具体的にはレンズ歪みを含む内部パラメータと、カメラの外部パラメータの推定を行う。本手法では、カメラパラメータ手法[16]を利用し、外部パラメータと内部パラメータを同時に推定する。マルチカメラユニットは製造の過程で、カメラの平面上に配置され、カメラ間隔は 24mm、各カメラの光軸はカメラ配置平面と垂直となるよう設計されているが、厳密には多少の誤差が含まれる。そのため、カメラ内部パラメータのみではなく、カメラの 3 次元位置関係を表すカメラ外部も同時に推定する。カメラの外部パラメータは、マルチカメラユニットにカメラすべてから撮影可能な位置にチェックボードを配置することで、同一座標系におけるカメラの外部パラメータを推定する。実際にカメラの光軸に最大 2 °程度の誤差が含まれており、これらは合成時に画像位置ずれの原因となる。合成時には、各カメラで推定された光軸の角度誤差を考慮して画像生成される。また、カメラの位置関係に関しても推定されているが、本手法では、カメラから近い位置には物体が存在せず、物体の視差の影響はないと仮定しているため考慮しない。言い換えれば、すべてのカメラの投影中心は一致していると仮定している。

3.3 HDR 画像の実時間生成

3.3.1 合成処理の概要

各カメラに異なる露光時間設定された校正済みのマルチカメラで撮影された画像群から HDR 画像を生成するために、各画素に対して以下の処理を行う。

- (1) 計測された照度値の推定
- (2) ガンマ変換の補正
- (3) 画像合成に利用する画像の選択

3.3.2 計測された照度値の推定

異なる露光時間が設定されたカメラと、撮影可能なダイナミックレンジの関係を示した図を 1 に示す。ここで、露光時間が 4ms、8ms、および 16ms に設定されたカメラでそれぞれ撮影された画像が計測可能な照度範囲の例を挙げる。露光時間が 1/2 倍になった場合、画素値のサチレーションを抑えることができるため、正常な画素値で表現できるダイナミックレンジの広さは倍の広さになる。しかし、その範囲をそれぞれ通常 8 ビット（カラーの場合 8bit × 3）の階調で量子化されて表現されるため、4ms で撮影された映像は 8ms で撮影された映像よりもダイナミックレンジは広いものの、階調の精度は低くなる。そのため、合成にはできる限り長い露光時間で撮影された画像を利用することが望ましい。ここで、カメラで設定可能な露光時間の最小値と最大値をそれぞれ t_{min} 、 t_{max} とした場合、座標 (x, y) において、ある露光時間 t で撮影された画像 $I_t(x, y)$ の HDR 画像での画素値 $I_{HDR}(x, y)$ は以下の式で表現できる。

$$I_{HDR}(x, y) = \frac{t_{max} \times t}{t_{min}} I_t(x, y), \quad (1)$$

3.3.3 ガンマ変換の補正

また、図 2 に、ガンマ変換された画像の輝度値と照度の関係を示す。本研究では、ガンマ変換とは、通常のディスプレイ表示などで利用される変換と同様に、CCD で受光された値を、そのまま量子化して出力するのではなく、図 2 に示すように暗い部分の値を引き上げる変換を意味する。一般に、入力画像の座標 (x, y) の画素値 $I_{in}(x, y)$ とガンマ補正後の画素値 $I_{out}(x, y)$ の関係は以下の式で定義される。

$$I_{out}(x, y) = I_{max} \left(\frac{I_t(x, y)}{I_{max}} \right)^{\left(\frac{1}{\gamma}\right)}, \quad (2)$$

このとき、 I_{max} は画像の階調であり、 γ は補正パラメータで大きければ大きいほど、暗い部分が引き上げられ強調される変換となる。これは一般的に、現実環境の照度は明るい部分は非常に大きな値になるため、ガンマ変換のような対数表現されることが多い。通常の単眼カメラでガンマ変換を行うことは、人間に目の特製に合わせて、暗い分を引き上げる代わりに、明るい部分を犠牲にするという問題がある。しかし本研究では、複数のカメラを利用することで、このカメラのガンマ変換機能を利用して、暗い部分をより密に計測を行い、明るい部分に関しては、より短い露光時間で撮影された画像を利用して計測することが可能となる。具体的には、最も露光時間が長いカメラが、ガンマ補正されている場合、もっとも効率的に画素値に変換されている部分を利用し、それ以外の部分は、次に長い露光時間で撮影された画像を利用する。

3.3.4 画像合成に利用する画像の選択

前述の議論より、HDR 画像の生成のために、各画素の画素値を以下の手順で処理を行う。

(1) 最も露光時間が長い画像の画素値が以下の閾値以下なら次へガンマ補正された画像の画素値で密に画素値が表現されているのは、ガンマ補正関数は凸系形状の単純増加関数であるため、傾きが 1 以上の部分である。そのため、効率的に撮影されている部分の閾値は以下の式で表される。

$$1 \leq \frac{I_{max}}{\gamma \times (I_{max})^{\frac{1}{\gamma}}} I_t(x, y)^{\left(\frac{1}{\gamma}-1\right)} \quad (3)$$

(2) HDR 画像での画素値の計算画像合成に適した画像と判断された場合、ガンマ変換値と露光時間を考慮し、HDI 画像での画素値を以下の式により計算する。

$$I'_{HDR}(x, y) = \frac{I_{max} \times t_{max}}{t} \left(\frac{I_t(x, y)}{I_{max}} \right)^{\gamma} \quad (4)$$

実際の処理では、 I_{max} 、 γ は定数であるため、式 4 の画素値変換は、事前にテーブルを作成することで高速化を図る。

以上の処理をすべての画素に対し行うことで、HDR 画像を生成する。

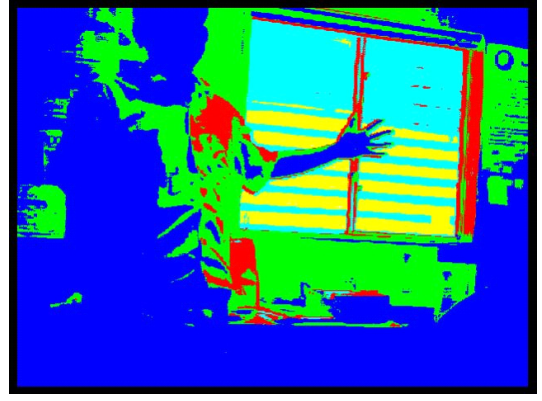


図 5 画素と選択された画像の関係 (輝度値が画像が入力画像番号を示す)

4. HDR 画像の実時間生成実験

実際に提案手法を用いて、マルチカメラユニットを利用し、HDR 画像の実時間生成実験を行った。本実験では、マルチカメラユニットの 25 眼のカメラ内、 3×3 の 9 眼のカメラを利用して生成実験を行った。使用したカメラの露光時間の可能範囲は、1~33ms の間であるため、各カメラの露光時間はそれぞれ、33, 29, 25, 21, 17, 13, 9, 5, 1ms に、 $\gamma = 2.0$ に設定した。

図 3 に、9 眼のカメラで撮影された入力画像を示す。撮影環境は、屋内にカメラを設置し、窓の外が同時に撮影されている環境である。

露光時間が長いカメラでは、暗い部分が撮影可能であるが、明るい部分はサチレーションが起こり白飛びしてしまっていることが分かる。逆に、露光時間が短い画像では、暗い部分は画素値が低くほとんど情報がないが、窓の外のような明るい部分でも正確に撮影されていることが確認できる。図 4 に、生成した HDR 画像を、表示可能な階調を超える階調を持った画像を表示可能な階調に変換を行うトーンマッピング [17] を用いて、表示した例を示す。結果より、暗い部分と明るい部分が同時に計測され、表現が可能になっていることが確認できる。

図 5 は、あるフレームにおける各画素の値がどこから選択されたかを示す。この図は、輝度値がカメラ番号を表しており、同じ輝度値の画素は同じ入力画像を用いて照度が推定されており、この図から、各画素の明るさに応じて、適した画像から画素値が選択されていることが分かる。

図 6 に、他の環境で撮影された入力画像を示す。撮影環境は、同様に屋外と屋内が同時に撮影されている。図 7 に、同様に生成した HDR 画像をトーンマッピングを用いて、表示した例を示す。結果より、暗い部分と明るい部分が同時に計測され、表現が可能になっていることが確認できる。この実験では、各画像の生成レートは、約 10 フレームであり、実時間で生成可能であることを確認した。

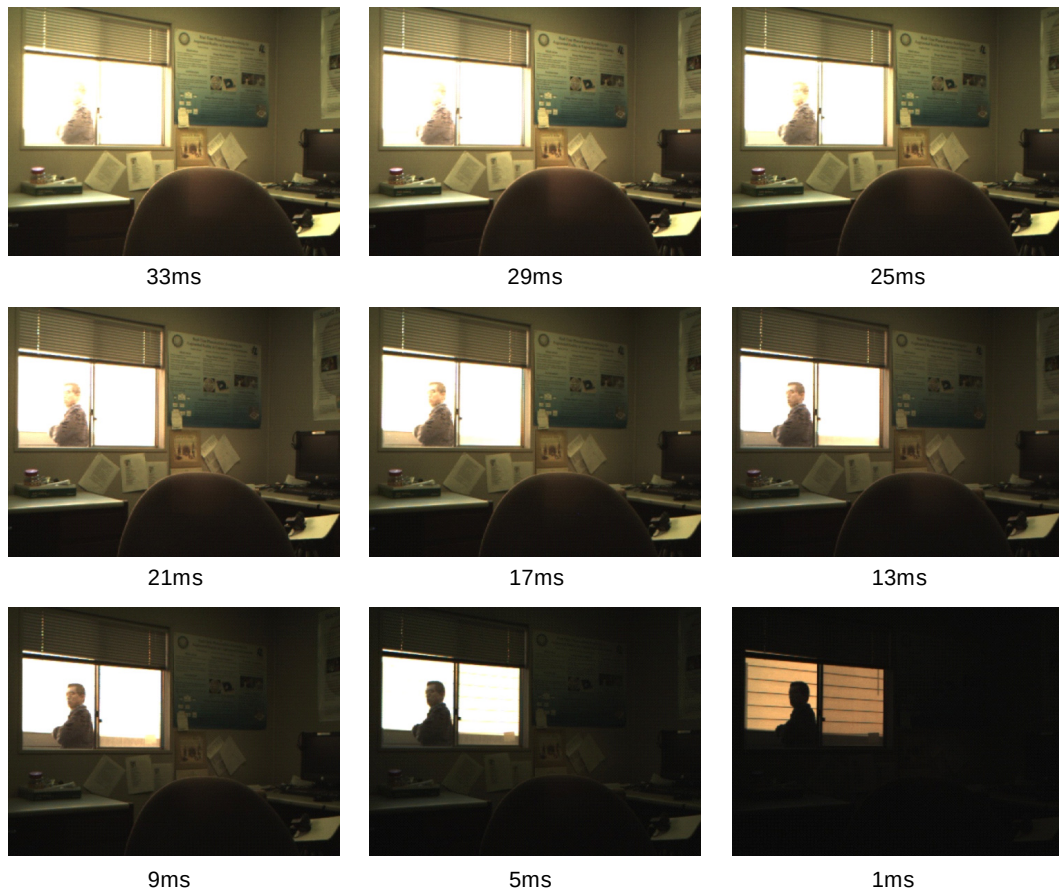


図3 入力画像（窓のある室内の例）

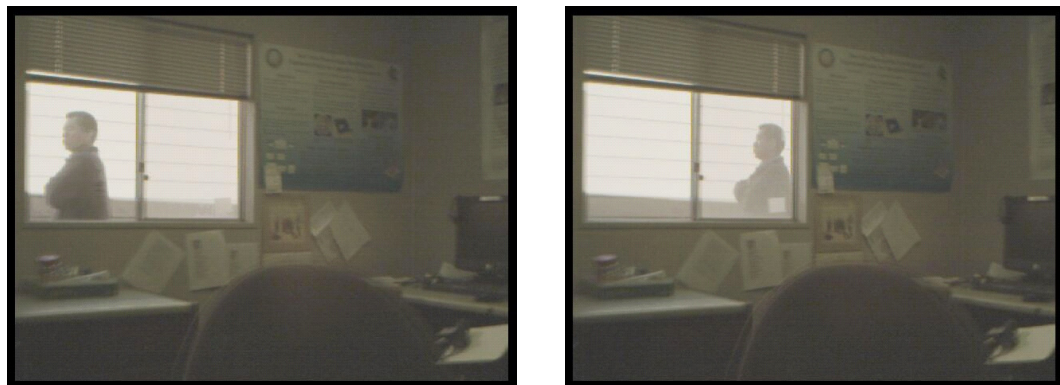


図4 合成された HDR 画像（窓のある室内の例）

5. ま と め

本論文は、異なる露光時間が設定された複数のカメラを用いた HDR 画像の実時間生成手法を提案した。提案手法は、撮影された画像群から現実環境の光源環境に応じて、合成に用いるための適した画像を適応的に決定することで、効率的に HDR 画像の合成を可能にした。撮影された画像から各フレームにおいて適宜適した画像を選択するため、これまでの HDR が画像生成手法で問題となっていた、計算時間や劇的な光源環境の変化にも対応可能であるという利点を持つ。さらに実験では、HDI 画像の実時間生成を行い、合成画像結果および 10 フレーム毎秒で合成処理可能であること示し、本手法の有効性

を示した。

今後の課題として、本論文では扱わなかったカメラに近い物体が存在した場合の視差の影響を考慮した合成手法の開発が挙げられる。

謝辞 本研究の一部は、JST 戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「デジタルメディア作品の制作を支援する基盤技術」プログラムの支援による

文 献

- [1] M. Aggarwal and N. Ahuja: "Split aperture imaging for high dynamic range", Proc. of International Conference on Computer Vision, **Vol. 2**, pp. 10-17 (2001).
- [2] S. Nayar and T. Mitsunaga: "High dynamic range



図 6 入力画像（外の見える廊下の例）



図 7 合成された HDR 画像（外の見える廊下の例）

- imaging: Spatially varying pixel exposures”, Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 472–479 (2000).
- [3] H. Mannami, R. Sagawa, Y. Mukaigawa, T. Echigo and Y. Yagi: “High dynamic range camera using reflective liquid crystal”, Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (2007).
 - [4] S. K. Nayar and V. Branzoi: “Adaptive dynamic range imaging: Optical control of pixel exposures over space and time”, Proc. of International Conference on Computer Vision, **Vol. 2**, pp. 1168–1175 (2003).
 - [5] S. K. Nayar, V. Branzoi and T. Branzoi: “Programmable imaging using a digital micromirror array”, Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition, **Vol. 1**, pp. 436–443 (2004).
 - [6] P. E. Debevec and J. Malik: “Recovering high dynamic range radiance maps from photographs”, Proc. of SIGGRAPH '97, pp. 369–378 (1997).
 - [7] M. Niskanen: “View dependent enhancement of the dynamic range of video”, Proc. of International Conference on Pattern Recognition, **Vol. 1**, pp. 984–987 (2006).
 - [8] B. C. Madden: “Extended intensity range imaging”, Technical Report MS-CIS-93-96 (1993).
 - [9] P. E. Debevec: “Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography”, Proc. of SIGGRAPH '98, pp. 189–198 (1998).
 - [10] B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, E. Talvala, E. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Horowitz and M. Levoy: “High performance imaging using large camera arrays”, ACM Transactions on Graphics, **Vol. 24**, No. 3, pp. 765–776 (2006).

- [11] K. Agusanto, L. Li, Z. Chuangui and N. W. Sing: "Photorealistic rendering for augmented reality using environment illumination", Proc. of IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 208–216 (2003).
- [12] P. Supan, I. Stuppacher and M. Haller: "Image based shadowing in real-time augmented reality", International Journal of Virtual Reality, **Vol. 5, No. 3**, pp. 1–7 (2006).
- [13] I. Sato, Y. Sato and K. Ikeuchi: "Illumination from shadows", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **Vol. 25, No. 3**, pp. 290–300 (2003).
- [14] T. Kakuta, T. Oishi and K. Ikeuchi: "Virtual kawaradera: Fast shadow texture for augmented reality", Proc. of International Society on Virtual Systems and Multimedia, pp. 141–150 (2004).
- [15] Y. Nishina, B. Okumura, M. Kanbara and N. Yokoya: "Photometric registration by adaptive high dynamic range image generation for augmented reality", Proc. of Int. Sympo. on Mixed Augmented Reality, pp. 53–56 (2008).
- [16] Z. Zhang: "A flexible new technique for camera calibration", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **Vol. 22, No. 11**, pp. 1330–1334 (2002).
- [17] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley and J. Ferwerda: "Photographic tone reproduction for digital images", ACM Transactions on Graphics, pp. 267–276 (2002).