

H-037

2台の全方位カメラを用いた不可視領域のない空撮全天球HDR画像の生成 Aerial HDR Imaging of Complete Spherical Images Using Two Omnidirectional Cameras

大倉 史生*
Fumio Okura

神原 誠之*
Masayuki Kanbara

横矢 直和*
Naokazu Yokoya

1. はじめに

本研究では、飛行体の上下に取り付けられた2台の全方位カメラを用いた、空撮全天球ハイダイナミックレンジ(HDR)画像の生成手法を提案する。提案手法は、以下特長を有する。

- (1) 不可視領域(全方位カメラの視野外となり撮影できない、もしくは全方位カメラを搭載する移動体により遮蔽される領域)のない空撮全天球画像生成
- (2) シャッタースピードを変化させながら撮影することによるHDR画像生成

一般に、全方位カメラによって撮影・蓄積される画像は、ユーザに没入感の高い遠隔地の情景を提示するテレプレゼンス [1]、イメージベースドレンダリング (IBR) による自由視点画像生成 [2]、拡張テレプレゼンス [3] における実空間の情景提示、イメージベースドライティング (IBL) [4] に用いる光源環境推定等、様々な用途に利用されている。全方位カメラを用いて画像を撮影する際、図1上部の枠で囲んだ領域のように、全方位カメラの視野外となり撮影できない、もしくは全方位カメラを搭載する移動体により遮蔽される領域が存在する場合が多い [5]。本研究では、これらの領域を不可視領域と呼ぶ。従来、全方位カメラ1台で撮影された動画像を対象として、動画像中の他フレームから類似領域を探索することにより地面に存在する不可視領域を補完する研究 [5] や、天空光モデルを利用して空撮動画像に含まれる不可視領域を補完する研究 [3] が行われている。これらの手法では不可視領域の真の輝度値を知ることはできないため、本研究では、飛行船上下に計2台の全方位カメラをそれぞれ上向き、下向きに配置し、カメラの不可視領域を相互に補完することで、図1下部に示すように各不可視領域を排除する。

また、IBLを用いた拡張現実感 (AR) や拡張テレプレゼンスにおける光源環境マップとして全天球画像を用いる場合、輝度値の飽和なしに光源を表現するためのHDR画像が必要となる。本研究では、異なるシャッタースピードを段階的に切り替えながら撮影した複数のローダイナミックレンジ (LDR) 画像群からHDR画像を生成する手法 [6] を用いて、光源環境マップとして利用可能な全天球画像を出力する。

本稿では、全方位カメラを2台搭載した無人飛行船による空撮、LDR画像群を用いたHDR画像生成、および不可視領域のない全天球画像の生成手法について述べる。最後に、実際に空撮された画像群を用いて1枚の全天球HDR画像を生成する実験について述べ、その結果を示す。

*奈良先端科学技術大学院大学

*Nara Institute of Science and Technology (NAIST)

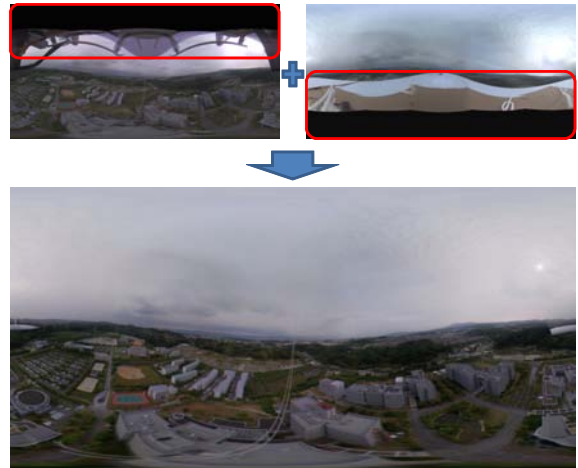


図1: 2枚の全天球画像からの不可視領域のない全天球HDR画像生成(表示輝度値は対数変換によってトーンマッピングされている)

2. 全天球HDR画像の生成

2.1. 手法の概要

本研究では、飛行船上下に取り付けられた2台の全方位カメラで撮影した画像を用いて、それぞれの不可視領域を補完するように合成することで不可視領域のない全天球画像を生成する。また、各全方位カメラのシャッタースピードを段階的に変化させて撮影されたLDR画像群を合成することでHDR画像を生成する。提案手法の流れを以下に示す。

- (1) **飛行船を用いた空撮** 飛行船の上部に上向き、下部に下向きに、計2台の全方位カメラを取り付け空撮を行う。飛行船の上方から撮影されるシーンには太陽や空が大きく含まれ、短いシャッタースピードで撮影を行っても輝度値の飽和が起こるため、上方の全方位カメラには減光フィルタ (NDフィルタ) を取り付ける。ここで、各カメラから撮影された画像には図1上部の枠で囲んだ領域に示すような不可視領域が存在する。
- (2) **複数LDR画像からのHDR画像生成** 様々なシャッタースピードで撮影された画像から上方、下方カメラそれぞれのHDR画像を生成する。
- (3) **上下カメラから撮影された画像の姿勢補正** 2台の全方位カメラから撮影された画像に存在する姿勢のずれを、各カメラから撮影された画像の重複領域から推定し補正する。ここで、上下カメラ間は3.5m程度離れているが、重複領域は水平線に近く遠景が多いため、本研究ではカメラの視差を無視して姿勢のみを補正する。



図 2: 無人飛行船の外観

- (4) ND フィルタによる色調変化の補正 ND フィルタの有無による色調の違いを補正し、上下画像を統合することで1枚の全天球 HDR 画像を生成する。

以下、上述の処理 (1)~(4) について詳述する。

2.2. 飛行船を用いた空撮

本研究では、図 2 に示す全長 12m のラジコン無人飛行船を用いて空撮を行う。飛行船には空撮画像を取得するための全方位マルチカメラシステム Ladybug2 (Point Grey Research 社製) を下向き、および上向きに計 2 台取り付ける。Ladybug2 の仕様を表 1 に示す。2 台の全方位カメラは 1 台の PC に接続され、各撮影画像にタイムスタンプが付与される。本研究では、使用カメラの絞りおよびシャッタースピードを最小に設定し撮影した際も輝度の飽和がみられたため、主に太陽や空を撮影する上向きの全方位カメラには光量を $\frac{1}{100}$ に減衰 (露光係数 $EV = 6.64$) する ND フィルタである ND 2.0 (富士フィルム社製) を取り付ける。なお、ND フィルタは、太陽や空を HDR 撮影する既存研究 [7] で用いられている。飛行船上下の全方位マルチカメラから撮影された画像は、周辺減光の除去および幾何変換 [8] により、それぞれ図 1 上部のようなパノラマ画像に変換される。

また、今後全天球画像データベースとして整備する際に全天球画像の撮影位置・姿勢として用いるため、位置情報取得のために電子基準点網によるネットワーク補正を利用する Differential GPS である P4-GPS (日立造船株式会社製) を、姿勢センサとして光ファイバージャイロ TISS-5-40 (東京計器株式会社製) を搭載する。

表 1: 全方位マルチカメラ Ladybug2 の仕様

項目	詳細
搭載カメラ数	6 台
カメラ解像度	1024×768 (パノラマ展開: 最大 2048×1024)
カバーする視野	球面の 75% 以上
搭載 CDD	Sony ICX204AK
フレームレート	最大 30fps
HDR 撮影	シャッタースピード切り替え (最大 4 種類)
重量	1.1kg (バッテリー除く)

2.3. 複数 LDR 画像からの HDR 画像生成

上下カメラそれぞれから、4 種類ずつ異なるシャッタースピードを連続的に切り替えることで複数の LDR 画像が撮影される。本研究では、HDR 画像生成に多く用いられる Debevec らの手法 [6] を適用し、飛行船上下カメラからの HDR 画像を生成する。飛行船は移動撮影を行っているため厳密には各 LDR 画像の撮影地点が異なるが、フレーム間での移動は微小であるとし、これを無視して HDR 画像生成を行う。

HDR 画像生成のため、各シャッタースピードから相対的な露光係数 EV を計算する必要がある。一般的に、カメラ絞り (F 値) が固定である場合、相対的な EV はシャッタースピード $t[s]$ から以下のように計算される。

$$EV = -\log_2 t \quad (1)$$

しかし、本研究では上カメラには ND フィルタを取り付けているため、ND フィルタの光の減衰量から計算された EV の増加量 EV_{ND} を用いて EV を補正する必要がある。そこで、式 (1) を以下のように書き換える。

$$EV = \begin{cases} -\log_2 t & : ND \text{ フィルタなし} \\ -\log_2 t + EV_{ND} & : ND \text{ フィルタあり} \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) により各シャッタースピードにおける EV を求め、文献 [6] の手法を用いて HDR 画像生成を行う。

2.4. 上下カメラから撮影された画像の姿勢補正

飛行船上下に搭載された全方位カメラは、飛行船の細かな変形や揺れなどのため、相対的な位置関係を完全に固定することは難しい。そこで、各カメラの相対的な姿勢変化を検出することで、全天球画像の姿勢補正を行う。両カメラの搭載位置は飛行船の直径である約 3.5m 程度離れているが、各カメラから撮影された全天球画像の重複部位は水平線に近く遠景が多いため、本研究ではカメラの視差を無視して上カメラから下カメラへの姿勢の変換パラメータ (3 自由度) を以下の流れで求め、上画像を変換することで姿勢補正を行う。

- (1) マスク画像の作成 全方位カメラは飛行船の船体に固定されているため、上カメラから撮影された画像 (上画像)、下カメラから撮影された画像 (下画像) とともにあらかじめ手動で不可視領域を示すマスクを作成しておく。
- (2) 上画像からの特徴点検出 図 3 に示すように、両画像に共通して情景が映り込む領域 (重複領域) を上下カメラのマスクを用いて求める。重複領域において、上画像から Harris オペレータを用いて特徴点を数百点程度検出する。
- (3) 下画像における対応点検出 Lucas-Kanade 法を用い、上画像で検出された各特徴点について下画像における対応点を探索する。ここで、対応点探索範囲は重複領域のみに限定しないが、上画像に含まれる特徴点と下画像に含まれる対応点の画像座標上での最大ユークリッド距離を制限して探索を行う。
- (4) RANSAC を用いた姿勢変換パラメータの推定 (3) で得られた特徴点とその対応点から、上カメラ

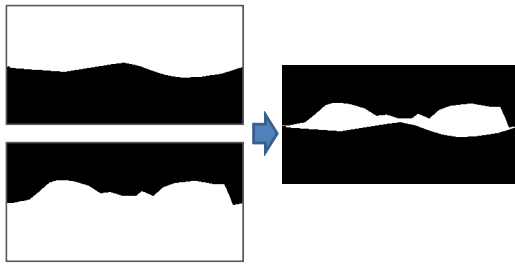


図 3: マスク画像の作成: 不可視領域が黒くマスクされている (左上: 上画像のマスク, 左下: 下画像のマスク, 右: 重複領域を白い領域として示す画像)

から下カメラへの姿勢変化をオイラー角で表す 3 パラメータを推定する. まず, 特徴点および対応点を球面に投影し, 3 次元空間中における各特徴点とその対応点の距離の二乗和としてエネルギーを定義する. 次に, エネルギーが最小となる姿勢の変換パラメータを非線形最小化を行うことにより推定し, 上カメラから下カメラへの姿勢変換パラメータとする. ここで, 誤対応による推定誤差を軽減するため, RANSAC を用いて外れ値を除去する.

2.5. ND フィルタによる色調変化の補正

ND (Neutral Density) フィルタという名称からもわかるように, ND フィルタは一般的に可視光の全波長を均等に透過する減光フィルタとして用いられている. しかし, 厳密には全波長を均等に透過せず, ND フィルタを用いて撮影すると色調が変化する [7]. 本研究で用いる ND フィルタは, 図 4 に示すように赤成分をあまり透過しない. そこで, ND フィルタによる色調の違いを吸収するため, 姿勢補正済み上下画像の重複領域内の輝度値を比較することで, 以下のように RGB の各チャンネルで独立に定義される色調パラメータ $\alpha_r, \alpha_g, \alpha_b$ を, 上画像の重複領域に含まれる画素の輝度値が下画像における対応画素の輝度値に最も近づくように推定することで色調を補正する.

$$R'_{up}(\mathbf{x}) = \alpha_r R_{up}(\mathbf{x}) \quad (3)$$

$$G'_{up}(\mathbf{x}) = \alpha_g G_{up}(\mathbf{x}) \quad (4)$$

$$B'_{up}(\mathbf{x}) = \alpha_b B_{up}(\mathbf{x}) \quad (5)$$

ここで, \mathbf{x} を注目画素, $R_{up}(\mathbf{x}), G_{up}(\mathbf{x}), B_{up}(\mathbf{x})$ は補正前の上画像における \mathbf{x} の RGB それぞれの輝度値, $R'_{up}(\mathbf{x}), G'_{up}(\mathbf{x}), B'_{up}(\mathbf{x})$ は補正後の上画像における \mathbf{x} の輝度値とする.

$R_{down}(\mathbf{x}), G_{down}(\mathbf{x}), B_{down}(\mathbf{x})$ を下画像に含まれる画素 \mathbf{x} の輝度値, A を重複領域, N_A を重複領域に含まれる画素数としたとき, α_r は以下のように推定される. α_g, α_b についても同様に推定する.

$$\alpha_r = \frac{\sum_{\mathbf{x} \in A} \frac{R_{down}(\mathbf{x})}{R_{up}(\mathbf{x})}}{N_A} \quad (6)$$

推定された色調パラメータを用いて, 上画像全体に対



(a) ND フィルタなし (下画像): 平均輝度値 $(R, G, B) = (111.5, 108.3, 119.7)$
(b) ND フィルタあり (上画像): 平均輝度値 $(R, G, B) = (95.1, 103.5, 111.9)$

図 4: ND フィルタの有無による色調の違いの例: 上下画像の重複領域の一部を拡大した画像

し式 (3), (4), (5) をそれぞれ適用することにより色調変換を行う.

最後に, 色調変換された上画像を下画像と合成することで 1 枚の HDR 画像を生成する. このとき, 重複領域に含まれる画素の輝度値は, 両画像をアルファブレンディングして求める.

3. 飛行船からの空撮画像を用いた実験

実際に飛行船を用いて空撮を行い, 不可視領域のない全天球 HDR 画像を生成した. 各シャッタースピードに対応する EV と, 撮影された画像例を図 5 に示す. 撮影された画像から生成された上下それぞれの HDR 画像を図 6 に示す. また, 姿勢補正および色調補正の結果を図 7 に示す. 最後に, 上画像と下画像の重複領域をアルファブレンディングして, 図 1 下部に示した最終出力画像を生成した. 上下画像の姿勢および色調は違和感なく合成されていることが確認できる. 本実験では, 飛行船が比較的高い高度で直進している際に撮影された, フレーム間の見えの変化が小さい画像群を用いたが, 低空を高速で飛行する場合や, 大きく回転しながら飛行する場合, 連続フレーム間で物体の見えが大きく変化するため, 複数の LDR 画像群から HDR 画像を生成する際に位置および姿勢の補正が必要となる. また, 本実験で用いた画像は薄曇りの天候で撮影されたが, 他の天候においては ND フィルタやシャッタースピードの変更が必要となる可能性がある.

4. まとめと今後の展望

本稿では, IBR 自由視点画像生成をはじめとする様々な応用が可能, 不可視領域のない全天球 HDR 画像生成手法を提案した. 提案手法では全方位カメラ 2 台を取り付けた飛行船を用いて HDR 空撮を行い, 上下カメラから撮影された全天球画像の姿勢補正および色調補正を行うことにより, 1 枚の全天球 HDR 画像を生成する. 実際に空撮画像を用いた実験を行い, 姿勢補正および色調補正が違和感なく行われたことを確認した.

今後の予定として, 現時点では 1 枚の全天球 HDR 画像を生成する実験を行ったが, 提案手法を多くの画像に適用してデータベース化することが挙げられる. このとき, データベースを IBR や拡張テレプレゼンス等に利用するためには, 全天球画像だけでなくその撮影位置・姿勢を登録する必要がある. 本研究では飛行船に GPS および姿勢センサを搭載して空撮を行うため, セ

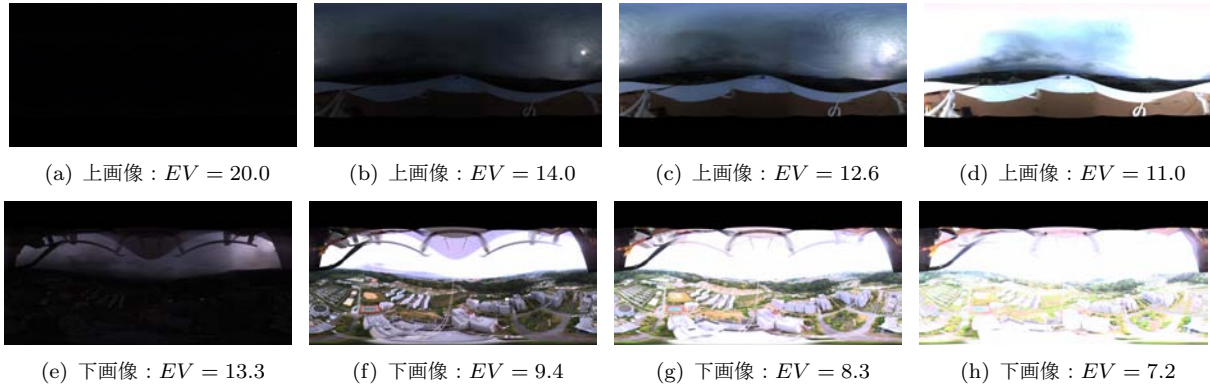


図 5: 撮影時の EV と得られた画像



(a) 上画像

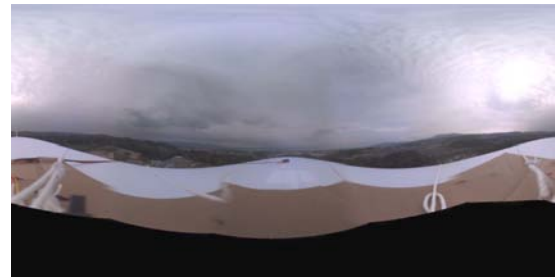


(b) 下画像

図 6: 上下それぞれの HDR 画像



(a) 姿勢補正された上画像



(b) 色調補正された上画像

図 7: 上画像の姿勢補正および色調補正

ンサによって各画像の撮影位置・姿勢を得ることができ
る。さらに、Structure-from-motion を用いた手法 [9]
等を併用し精度の高い撮影位置・姿勢を推定するこ
とが考えられる。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省特別経費「アンビエ
ント環境知能研究創出事業」および日本学術振興会科
学研究費補助金(基盤研究(A), No.23240024)による。

参考文献

- [1] J. Steuer. Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. *J. of Communication*, Vol. 42, No. 4, pp. 73–93, 1992.
- [2] M. Levoy and P. Hanrahan. Light field rendering. In *Proc. ACM SIGGRAPH '96*, pp. 31–42, 1996.
- [3] 大倉史生, 神原誠之, 横矢直和. 無人飛行船からの空撮全方位動画画像を用いた蓄積再生型拡張テレプレゼンス. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 16, No. 2, 2011.
- [4] P. Debevec. Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography. In *Proc. ACM SIGGRAPH '98*, pp. 189–198, 1998.
- [5] N. Kawai, K. Machikita, T. Sato, and N. Yokoya. Video completion for generating omnidirectional video without invisible areas. *IPSJ Trans. on Computer Vision and Applications*, Vol. 2, pp. 200–213, 2010.
- [6] P. Debevec and J. Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In *Proc. ACM SIGGRAPH '97*, pp. 369–378, 1997.
- [7] J. Stumpfel, C. Tchou, A. Jones, T. Hawkins, A. Wenger, and P. Debevec. Direct HDR capture of the sun and sky. In *Proc. third Int. Conf. on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa (AFRIGRAPH '04)*, pp. 145–149, 2004.
- [8] S. Ikeda, T. Sato, and N. Yokoya. High-resolution panoramic movie generation from video streams acquired by an omnidirectional multi-camera system. In *Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent System (MFI2003)*, pp. 155–160, 2003.
- [9] Y. Yokochi, S. Ikeda, T. Sato, and N. Yokoya. Extrinsic camera parameter estimation based on feature tracking and GPS data. In *Proc. Seventh Asian Conf. on Computer Vision (ACCV2006)*, Vol. 1, pp. 369–378, 2006.