2章 全天周撮影

庄原 誠[†], 佐藤裕之[†], 山本勝也[†]

キーワード：パノラマ写真，全方位画像，正距円筒画像，魚眼レンズ，射影方式，ステッチング

1. 全天周画像とは

全天周画像は水平 360° の広い視野(FOV: Field of View)を有する画像である。ここではプラネタリウムのように概ね半球程度の視野を有する画像を全天周画像と呼び，全方位すなわち全球の視野を有する画像を全方位画像と呼ぶ。全方位画像は全天周画像の一種であり，本章では全天周画像および全方位画像について紹介する。

全天周画像は魚眼レンズなどを用いて撮影することで容易に得ることができる。一方，全方位画像は写真をつなぎ合わせて作成する必要があるため，利用することが難しかった。しかしながら，近年，全方位画像を撮影可能なカメラが発売されており，このようなカメラを用いることで従来に比べて容易に全方位画像を利用することが可能となっている。

全方位画像は $360 \times 180^{\circ}$ ，すなわち水平方向に 360° 垂直方向に対して上端，下端まで 180° の視野を持ち，視野に制限のない画像である。一つの視点からすべての方向の情報を得られるため，撮影地の雰囲気を得る一般用途での利用の他，バーチャルリアリティ(VR)，不動産，各種検査，セキュリティ，医療，自動車，ロボティクス，宇宙など非常に幅広くさまざまな用途での活用が期待されている。

全天周画像は超広角の視野を持つことが特徴であり，その特徴ゆえに通常の画像とは異なる配慮が必要となる。従来の写真が2次元平面で歪みなく表現できるのに対し，全天周画像は球体的な特徴を有するため，2次元平面で表現した画像には歪みが生じる。これは世界地図の表現方法とも類似する課題である。

本章では主に全天周画像および全方位画像を得るための撮影方法とその特徴，活用例について説明する。

2. 撮影方法とデバイス

2.1 全天周撮影方式

全天周画像の撮影方法は，使用するカメラの数と撮影回

* 本稿の著作権は著者に帰属致します。

[†]株式会社リコー リコーICT研究所 フォトニクス研究センター
"Omnidirectional Imaging" by Makoto Shohara, Hiroyuki Satoh and Katsuya Yamamoto (Ricoh, Co. Ltd., Tokyo)

表1 全天周撮影方法

	(A)	(B)	(C)
	魚眼/ミラー撮影	複数回撮影	複数カメラ撮影
カメラ台数	1	1	N
撮影回数	1	N	1
全方位撮影	×	○	○
動体撮影	○	×	○
高解像度撮影	△仕様依存	○	△仕様依存

数に着目すると表1に示す3種類に分けられる。近年，さまざまなスタートアップ企業から方式(A)による全天周カメラや方式(C)による全方位カメラが提案されている。

(A) 単カメラ単撮影方法

方式(A)は1台のカメラで一度だけ撮影する方式であり，全方位画像を撮影できないものの，特殊な光学系を用いて全天周撮影することが可能である。このようなカメラにはKodak社のPIXPRO SP360^{*1}のように光学系に魚眼レンズを用いる方法や，ミラーを用いる方法が一般的である。ミラーを用いる方法は小型，軽量であり，取り扱いやすいがミラー部分やミラーの支柱が死角となるため，厳密には全天周画像を得ることができない。方法(A)では一度の撮影で広視野を撮影するため，同一視点による静止画像の他，動体を記録することも容易である。一方，超広角画像ゆえ単位FOVあたりの画素数が限られているため，通常のカメラに比べて解像力が不足していると感じられる可能性がある。この魚眼レンズを用いた本方式では上述の他，近年360fly社の製品^{*2}やTamaggo社の製品^{*3}が提案されている。

(B) 単カメラ複数撮影方法

方法(B)は1台のカメラを用いて図1に示すように複数回撮影する方式である。代表的なものとしては一眼レフカメラとノーダルポイントと呼ばれる光学中心を固定して撮影する機材(例えば，Bushman社のGobi^{*4}や自動撮影可能なGigapan社のEPIC^{*5})を用いる方法が挙げられる。この他，コンパクトカメラやスマートフォンアプリ(例えば，

*1 <http://kodakcamera.pixpro-sp360.com/>

*2 <https://360fly.com/>

*3 <http://www.tamaggo.com/>

*4 <http://www.bushman-panoramic.com/>

*5 <http://gigapan.com/>

2. 全天周撮影

図1 ノーダルポイント

Microsoft 社の Photosynth アプリ^{*6}や Google 社の Photo Sphere アプリ^{*7} のパノラマ撮影機能を利用し、特別な機材を用いることなく向きを変えて撮影を繰り返すことで全天周画像を得ることが可能である。しかしながら、このように1台のカメラで複数回撮影する方法では撮影に時間がかかるほか、時間変化のある動体を撮影できない。

(C) 複数カメラ単撮影方法

方法 (C) は複数のカメラで同時に撮影する方法であり、全方位画像を撮影可能であるとともに、動体撮影も可能である。製品によって構成するカメラの台数が異なっており、その特性も台数に依存する。最小構成は RICOH THETA^{*8} (図2) のように2台の魚眼レンズ付カメラを用いる方法である。得られる画像の解像度に関しては多眼構成の方が有利であり、Panono GmbH 社では36台のカメラを用いて1億画素の全天周画像を得ることができるカメラ^{*9}を開発している。カメラ台数が十分に多ければ、魚眼レンズを用いなくても全天を網羅する画像を得ることができる。ただし製品構成として考えると、カメラ台数が多くなるほど画像の取り扱いやキャリブレーション、カメラ毎のばらつきなど設計時、製造時の課題が多くなると考えられる。上述の他にこの方式では、近年、3台構成の Giroptic 社の 360cam^{*10} や4台構成の Bublcam 社の製品^{*11}が提案されている。類似した方式として、独立したカメラを複数台組み付ける方式も利用されている。Elmo 社の4台のカメラを組み付ける製品^{*12}や GoPro 社の製品^{*13}を6台組み付けられるマウント^{*14}^{*15}等が提案されている。

*6 <https://photosynth.net/>*7 <https://www.google.co.jp/intl/ja/maps/about/contribute/photosphere/>*8 <https://theta360.com/>*9 <http://www.panono.com/>*10 <http://www.giroptic.com/>*11 <http://www.bublcam.com/>*12 <http://www.elmoqbic.com/panorama/>*13 <http://jp.gopro.com/>*14 <http://www.360heros.com/>*15 <http://freedom360.us/>

図2 RICOH THETA

2.2 全天周カメラの光学系

全天周の画像を撮影するための光学系としては上記記載の通り大きく分けての三つに分類できる。多くの場合、魚眼レンズが利用されるため、ここでは魚眼レンズの光学系について述べる。

(1) 魚眼レンズの歪み

魚眼レンズによって撮影された全天周画像は歪んだ画像として記録される。魚眼レンズの歪みは入射光の方向と撮像素子への射影位置の関係を表すレンズモデル (射影関数) として表現される。図3のように (θ, φ) 方向から入射した光は、極座標表現した図4の $(r(\theta), \varphi)$ に射影される。ここで $r(\theta)$ は魚眼レンズの射影関数であり、魚眼レンズの射影方式を特徴づける。射影関数 $r(\theta)$ はレンズの内部パラメー

図3 全天周画像の撮影

図4 魚眼レンズによる全天周画像の座標系

図6 画角に対する像倍率

図5 各射影方式による像高変化

タの一つであり、画像の中心と周辺での像倍率、いわゆる歪みを左右する。

(2) 魚眼レンズの射影方式

魚眼レンズの典型的な射影方式として、中心射影 ($r = f \tan(\theta)$)、等距離射影 ($r = f\theta$)、正射影 ($r = f \sin(\theta)$)、立体射影 ($r = 2f \tan(\theta/2)$)、等立体角射影 ($r = 2f \sin(\theta/2)$) がある。通常の光学系では中心射影が用いられるが広角レンズの場合は目的に応じて異なる射影方式が用いられる。魚眼光学系の場合は、周辺の解像度を考慮し立体射影方式や等距離射影方式を選定するのが一般的である。図5に各射影方式における像高変化量を示す。横軸はレンズへの入射角(半画角)、縦軸は撮像素子上での像高変化量(像中心からの距離)を表す。

(3) 魚眼レンズの解像特性

実際の画質はセンササイズ、画素数、光学性能等が関わる。中心射影方式で光学設計を行った場合、画面全体の画質(情報量)は中心より周辺が高く(多く)なる。等距離射影方式で設計されたレンズの場合は中心周辺共に同じ解像

感となるが、実際のレンズでは周辺のMTFが劣化しやすい。そのため、全天周カメラのように画像の中心部と周辺部まで均一な画質を要求する場合、魚眼レンズは立体射影と等距離射影の間の射影関数が選定される。図6は現実的なMTFを考慮した場合の像倍率を示し、横軸がレンズへの入射角(半画角)、縦軸が中心に対する像倍率に相当する値を示す。中心に対する像倍率が半画角に依らず一定(1.0)であれば中心、周辺で同等の解像感が得られることを示す。画像中心に対する画角毎の倍率変化を示したものを実線、周辺に向かうにつれてMTFが劣化するような条件を仮想的に積算したグラフを破線で示している。

(4) 魚眼レンズの画角

単眼光学系で魚眼レンズを使用して全天周画像を生成する場合、設計条件と光の周辺光量との兼ね合いから、世の中に出ている光学系のFOVは 300° が限界であると考えられる。量産性やコスト、サイズの観点を考慮すると単眼光学系での全天周カメラは撮影する光学系としては条件が厳しい。現実的なFOVとしては 220° 程度が限界値であると考えられる。

2.3 全天周カメラの画像処理

全天周カメラの画像処理に関する手続きは大きく3種類に分けられる。すなわち、(1)画像の歪み補正、(2)複数画像をつなぎ合わせるステッチング処理、および(3)キャリブレーションに関する処理である。これらの処理は全方位カメラ本体や表示ソフト、パノラマ合成ソフト等で実装されており、活用することができる。

(1) 歪み補正

全天周画像を活用する際、画像処理として歪み補正が利用されることが多い。歪み補正は全天周画像処理のさまざまな個所で目的に応じて利用され、ワープ処理とも呼ばれる基本的な画像処理である。PCではOpenGL等を介して処理されることが多い。レンズの歪み補正の他、全天周画像の表示、ステッチング等の前処理で利用される。全天周画像は曲面のある球面画像であることから歪み補正が不可欠である。

図7 正距円筒画像

撮影時のレンズ特性による歪みの影響がない、標準化した画像投影方式として正距円筒法があり、全方位画像標準的な画像表現形式となっている。正距円筒画像は図7のように入射光の方向 (φ, θ) がそのまま画像の (x, y) 座標として表現される。正距円筒画像を用いることによって、光学系や撮影方法に依存することなく全天周画像を扱うことができる。歪み補正は魚眼画像などのカメラ出力画像から正距円筒画像への変換にも利用される。

(2) スティッチング

撮影方法 (B), (C) のように複数の画像から全天周画像を作成する場合、スティッチングと呼ばれる処理が必要となる。スティッチングはレジストレーション処理と画像合成処理に大別できる。

レジストレーション処理は複数画像の重なり合う部分の位置を合わせる処理である。特徴点を用いる方法の他、画像のテクスチャを用いるピクセルベースの方法がある。特徴点を用いる方法は Scale Invariant Feature Transform (SIFT)¹⁾ 等で得られる画像特徴同士の位置を合わせる方法であり、複数画像の重なり合う程度がわからない場合に特に有効である。画像のテクスチャを用いる方法は、ある程度画像の重なりがわかっている場合に実用的であり、高精度に位置合わせすることができる。ピクセルベースの方法では画像の違いを定量化し、違いが最小となる位置を探索する。画像の違いを定量化するために差分二乗和や正規化相互相関などを用いることができ²⁾、手法によって性能・シーン耐性が異なる。

画像合成処理は画像の繋ぎ目がわからないように、ホワイトバランスやレンズのフレアによって色や明るさの異なる画像を補正する処理である。単純に画像を重み平均する方法の他、より継ぎ目の目立ちにくい勾配ベースの合成方法³⁾ などが、手法によって性能が異なる。

(3) キャリブレーション

キャリブレーション処理は予め定義したカメラモデルのパラメータを決定することをいう。撮影方法 (B), (C) のように複数の撮影を行う場合はカメラの位置関係を考慮したモデルが必要となる。単体のカメラモデルに関するパラ

メータ (射影式、画素ピッチ、中心座標など) を内部パラメータと呼び、カメラの位置関係を示すモデルのパラメータ (光学中心の位置と光軸方向、画像回転方向) を外部パラメータと呼ぶ。撮影方式 (B) でノーダルポイントが固定されていない場合、外部パラメータが撮影毎に変化するため、カメラの移動モデルを考慮するなど外部パラメータを決定する際の複雑さが増加する。一方、撮影方式 (C) では基本的にカメラ間の位置関係が固定されることが多く、製造時やセットアップ時に外部パラメータが決定される。キャリブレーション方法にはチャートを撮影し、チャートの撮像位置からパラメータを算出する方法⁴⁾ などがある。

3. 全天周画像の撮影・活用

全天周画像、特に全方位画像は、撮影地点を基準に上下左右すべての方向の映像が得られることから、さまざまな活用方法が考えられる。ここでは活用事例や撮影方法の例を記す。全方位画像は上述のように一部に歪みが生じているため、閲覧の際、全方位画像用のビューアもしくはブラウザ経由で閲覧することが好ましい。以下の全方位画像には URL を併記する。

3.1 RICOH THETA を用いた全方位画像撮影

全方位画像撮影に必要な画像処理をカメラ内部で実施し、正距円筒画像として出力できるカメラとして RICOH THETA がある。全方位静止画像、全方位動画をワンショットで撮影できるという特徴を持っている。このようなカメラは、旅行先で気軽に撮影することができ、後に映像を視聴した際にその場の記憶をより鮮明に甦らせることができる。全方位画像はその場に居なかった人にその場の雰囲気伝える映像としても効果的である。このような画像データは、屋外・屋内の区別なく、図8のようにロケーションハンティングの記録としても有効である。RICOH THETA の場合、小型で画角の考慮が不要なため、直接見ることが難しい装置の内部など狭い空間の映像を得ることも容易である。アイデア次第でさまざまな活用方法が考えられる。

3.2 パノラマ雲台を用いた全方位画像撮影

RICOH THETA は容易に全方位画像を得るには非常に有効なカメラであるが、解像度や暗所性能においては従来から利用されている一般的なレンズ交換式カメラとパノラマ雲台を用いて撮影する全方位画像のほうが優れている。ここではレンズ交換式カメラを用いた全方位写真の撮影方法の一例を紹介する。レンズ交換式カメラを用いた全方位撮影はノウハウが多くあり、以下では容易な方法について説明する。これらのことから、RICOH THETA のような専用機を用いるといかに容易に全方位画像を取得できるかわかる。

(1) 星景写真

ここでは星空と景色を共に写した全方位画像 (図9) を例

図8 ロケーションハンティング例
(<https://theta360.com/s/3OAMXVLppSi6G3zSpYwOVhZl4>)

図9 夏の天の川を写した例
(<https://theta360.com/s/n0Et1VPClxf1ILXiwlbt83nA>)

表2 使用機材一覧

	機材種類	メーカー・製品名
1	レンズ	SIGMA 8 mm F3.5 EX DG CIRCULAR FISHEYE (Nikon Fマウント用)
2	マウントアダプタ	近代インタナショナル Rayqual NFG-S α E
3	カメラボディ	SONY α 7S
4	ケーブルリリース	Nikon MC-36改 (接点改造)
5	パノラマ雲台	Easypano JTS-Rotator
6	三脚	Manfrotto 055CXPRO3
7	合成ソフト	New House Internet Services B.V. PTgui Pro
8	レタッチソフト	Adobe Photoshop CC

に、全方位画像の撮影手順を紹介する。天の川が見えるような非常に暗い環境のため、特殊な例であるが、現時点でレンズ交換式カメラが必要な例の一つである。

(2) 撮影機材と画像処理ソフト

今回の作例作成に使用した撮影機材、および、画像処理ソフトを表2に示し、以降にそれらの解説を記す。

単カメラ複数枚撮影による全方位画像の作成において、継ぎ目を減らし、撮影回数を減らすため、魚眼レンズが用いられることが多い。ここでは高感度性能の高さと小型軽量(雲台に掛かる負荷が減り、可搬性が良い)という点から

カメラボディはSONY社のα7Sを使用し、レンズはマウントアダプタを介して接続した。パノラマ雲台にはさまざまな物があり、工作精度や価格に違いがある。三脚は雲台を含めた機材の重さを支えるだけの能力があれば充分であるが、星景写真の場合は、撮影者自身の頭上より高くレンズが配置できると、円周魚眼レンズを用いた際、天頂撮影中に撮影者や他の人物が入り込まない。

撮影後、複数方向を撮影した画像を繋ぎ合わせる合成ソフトには今回使用したPTgui^{*16}のほか、Kolor社のAutopano Giga^{*17}等がある。雲台や三脚の写り込みは、撮影枚数を増やし上手く合成することで大半が消せるが、僅かに残ってしまう場合がある。撮影地点の地面が単調なパターン(芝生、小石、土、など)の場合、レタッチソフト(スタンプツールや不要物を消す機能)を用いて画像を修正できる。図9の例では、三脚消し用の下方画像は撮影せず、レタッチソフトのスタンプツールで不要な映り込みを消した。

(3) カメラ姿勢と撮影回数

星空に継ぎ目のない全方位画像を得るため、パノラマ雲台を用いて上下方向に180°回転して、2回撮影する方法が

*16 <http://www.ptgui.com/>

*17 <http://www.kolor.com/autopano/>

2. 全天周撮影

図10 円周魚眼上下撮影の最小回数

図11 三脚を消す画像を得るための撮影姿勢

最小撮影回数での撮影となる。しかしながら、下方撮影ではパノラマ雲台の垂直に伸びるアームが写り込んでしまう。そのため、図10のように下方撮影ではアームの位置を水平方向に回転させた2回の撮影を行う。したがって上下方向の撮影を行う場合には、最小で3回の撮影が必要となる。

こうして撮影した画像を合成して得られる全方位画像下方には雲台と三脚が写りこむ。前述のように地面が単調な場合にはレタッチソフトでリカバリすればよいが、地面が複雑な場合には、パノラマ雲台を図11のように設置して撮影した画像も合成に使用する。

(4) パノラマ合成とレタッチ

パノラマ合成ソフトを用いて撮影した複数画像を合成し正距円筒画像に変換する。雲台や三脚の映り込みをレタッチソフトで消す際には、正距円筒画像の上方と下方は横方向に大きく引き伸ばされているため注意が必要である。合成前画像をレタッチするか、消す対象部分を正距円筒画像の中央に配置してからレタッチし、その後配置を変更する方法が自然に仕上げることができる。

4. 今後と未来

全天周画像はプラネタリウム等で用いられているが、今後はヘッドマウントディスプレイ等での活用が広がり、より広いFOVを持った全方位画像が普及していくと考えている。バーチャルリアリティ (VR) 分野では全方位画像の利用が広がっており、今後さらに活用されるものと期待し

ている。全方位画像を撮影できるカメラの開発はまだ黎明期であり、解像度をはじめ画質向上の余地がある。一方で共感を伝えることができる新しいメディアとして全方位動画とVRを活用する試みも行われている^{*18}。8Kなどの次世代動画技術を活用して全方位動画を伝送できるようになれば、より高い臨場感を得ることができ、コミュニケーションのあり方が変わる可能性を秘めている。

5. むすび

全天周・全方位画像を撮影する方法を整理し、特徴的な光学系、画像処理についての概要を説明した。また、全天周画像の撮影事例を示し、従来のパノラマ雲台を用いた星景撮影事例および全方位画像撮影専用機であるRICOH THETAを用いた事例を示した。全天周画像や全方位画像を撮影できる専用機の開発はまだ黎明期にあり、一部性能では一般的なレンズ交換式カメラに及ばないものの、近年、さまざまな企業から新しいデバイスが提案されている。全方位画像はすでにVRなど多くの分野で活用されているが、今後、性能向上とともにさらに多様な用途で活用されていくものと期待している。

(2015年5月23日受付)

【文 献】

- 1) D.G. Lowe: "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints", Int.J. Comput. Vis., 60, 2, pp.91-110 (2004)
- 2) R. Szeliski: "Image Alignment and Stitching: A Tutorial", Microsoft Res., MSR-TR-2004-92 (2004)
- 3) A. Levin, A. Zomet, S. Peleg and Y. Weiss: "Seamless Image Stitching in the Gradient Domain", in Computer Vision - ECCV 2004, 3024, pp.377-389 (2004)
- 4) Z. Zhang: "A flexible new technique for camera calibration", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 22, 11, pp.1330-1334 (2000)

*18 https://www.ted.com/talks/chris_milk_how_virtual_reality_can_create_the_ultimate_empathy_machine

庄原 誠 (しょうはら まこと) 1999年、東京理科大学大学院理学研究科物理学専攻修了。その後、ソフトウェア開発、デジタルカメラ開発、医療機器開発各社を経て、現在、(株)リコーにて、RICOH THETAの開発に従事。博士(情報科学)。

佐藤 裕之 (さとう ひろゆき) 精密機器会社にて、FAカメラ、コンパクトデジタルカメラの光学系の開発を経て、2011年より、(株)リコーにて、RICOH THETAの光学系の開発に従事。

山本 勝也 (やまもと かつや) 元リコーブランドデジタルカメラの鏡胴制御を担当。星景写真撮影の趣味が高じ、比較明合成による星景写真撮影機能(インターバル合成機能)を提案。以後、公式作例撮影・雑誌記事執筆・CP+ワークショップ講師等も務める。フォトマスターEX。