
360度カメラTHETAのビジネス応用とその基盤技術

Business Applications and Fundamental Technologies of the 360-Degree Camera THETA

小田巻 誠*

Makoto ODAMAKI

要 旨

本論文では、リコーが開発した世界初のコンシューマ向け360度カメラ「RICOH THETA」を中心に、360度カメラの技術的進化とビジネスへの応用について論ずる。リコーが開発したTHETAは、コンパクトな筐体に2つの魚眼屈曲光学系を搭載し、高品位な全天球画像を生成可能とした革新的な製品である。THETAの登場により360度カメラ市場が創出され、ビジネス分野、特に不動産や建設分野におけるソリューション応用へとその範囲が拡大してきた。リコーがこれらの分野に提供している360度画像ソリューションを支える技術として、Image Enhancement技術、動画生成、位置推定、ストリーミング技術などを取り上げ、今後のさらなる発展の展望についても言及する。

ABSTRACT

This paper discusses the technological evolution and business applications of 360-degree cameras, focusing on RICOH THETA, the world's first consumer-oriented 360-degree camera developed by Ricoh. THETA, developed by Ricoh, is an innovative product that incorporates two fisheye refractive optical systems into a compact body, enabling the generation of high-quality spherical images. The introduction of THETA has created the 360-degree camera market and expanded the range of business applications, particularly in fields such as real estate and construction. This paper describes the technologies that support Ricoh's 360-degree imaging solutions in these fields, including image enhancement, video generation, self-localization, and streaming technologies, and also discusses prospects for further development in the future.

* デジタル戦略部 ビジネスプラットフォーム開発センター
Business Platform Development Center, RICOH Digital Strategy Group

1. 背景と目的

周囲の映像を全方位的に記録可能な360度カメラがコンシューマ向け市場に登場してから、12年以上が経過している。その利用形態は当初、ソーシャルネットワークサービス（SNS）やバーチャルリアリティ／複合現実（VR/MR）といった純粋なコンシューマ用途に限定されていた。しかし近年では、不動産分野や建築分野をはじめとするビジネス領域においても活用が進展し、その応用範囲は拡大しつつある。

さらに、人工知能（AI）技術の発展に伴い、取得した映像データに対する高度な分析が可能になると見込まれている中で、現場情報を迅速かつ的確に取得・再現するデジタルツイン技術は、現場の困りごと、例えば遠隔臨場や状況把握の自動化を支える中核的基盤技術となり得ると考えられる。

本論文においては、まず360度カメラの技術的特徴を概説し、続いて当該技術を応用したソリューションの事例と支える技術について述べる。

2. 360度カメラの歴史と世界初のコンシューマ360度カメラTHETA

2-1 コンピューターステーションフォトグラフィーの発展と360度カメラの提案

デジタル技術の進展は、フィルムに像を結ぶアナログカメラから、センサーで像を結び画像をデジタルで得るデジタルカメラ技術をもたらした。

デジタルカメラ技術は、コンピュータ技術の進展により、さらにコンピューターステーションフォトグラフィーとして発展した。この技術は、光学系によって得られた画像に対して高度な画像処理、情報処理を施すことによって、従来では得られない画像やデータの提供を実現するものである。

全方位を撮影表現できる360度カメラはパノラマ写真技術の延長線上にある技術と言え、コンピュー

テーショナルフォトグラフィーの代表的な一例と言える。学術的には360度カメラはNayarらによって、反射屈折光学系¹⁾や複数のカメラを用いた全方位撮影可能なカメラ²⁾として提案された。

これら提案は当初、水平方向のみの撮像であったが、範囲を広げ³⁾、魚眼レンズの採用⁴⁾により、全天球の画像を実現した。魚眼レンズを回転することによる手法⁴⁾の提案を経て、2魚眼での全天球画像取得の提案⁵⁾に至った。これが研究分野での360度カメラの提案である。これら研究と並行してLadybugらに代表される業務用360度カメラが開発された。

しかしながら、これらは大型かつ高価な設置型カメラであり、モバイル用途のコンシューマ用途に向かなかつた。これを小型化したのがリコーTHETAである。

2-2 世界初のコンシューマ向け360度カメラTHETA(シータ)とマーケットの成長

リコーは2013年、世界初のコンシューマ向け360度カメラTHETAを開発した。本カメラは2魚眼屈曲光学系によりコンパクトな筐体を実現している。THETAは360度カメラの市場を創出し、2015年頃からカメラメーカー各社Nikon, Samsung, LG, Konica, Arashi Visionから類似の360度カメラが発売された。2020年度以降は360度カメラマーケットが用途別に分化され、アクションカメラ用途にArashi VisionのInsta360とGoProが台頭してきており、リコーTHETAはビジネス用途としてそれぞれの発展を遂げている。THETAならびに360度カメラマーケット発展の年表をFig. 1に示した。



Fig. 1 History of THETA series and 360-degree camera market.

2-3 360度カメラTHETA(シータ)の基本技術

360度カメラTHETAの基本原理を以下に示す。

THETA以前の研究用・業務用360度カメラでは、光路長とセンサーが体積を占めるため小型化が課題であった。2013年に発売されたTHETAでは屈曲光学系を用いることで、携帯可能なサイズの筐体を実現した。Fig. 2に360度カメラTHETAの外観と2魚眼屈曲光学系の模式図を示す。THETAシリーズにおいては、向かい合わせになった魚眼レンズの光路をプリズムで屈曲させ、イメージセンサーに結像させることにより、2つの魚眼レンズ間の視差を小さくしている。

さらに、本カメラは筐体内にて、画像の投影方式変換とステッチングを行うことにより、Fig. 3に示したような正距円筒図法の静止画および動画を生成することができる。

また、重力方向を検知し、360度画像を単位球と想定し、重力方向が下方となるように画像変換を行うことにより、カメラの姿勢にかかわらず正立した画像を得ることができる。

360度カメラはその画角の広さから、多くの情報を得ることができるため、物体検知、位置推定、構造推定の効果を高めることができる。特にTHETAでは前述の屈曲光学系により、レンズ間の視差を小さくすることができるため、カメラ中心を点としてみなすことができ、位置推定、構造推定などの3次

元復元技術において演算を単純化することができ、アルゴリズム処理の観点から有利である。

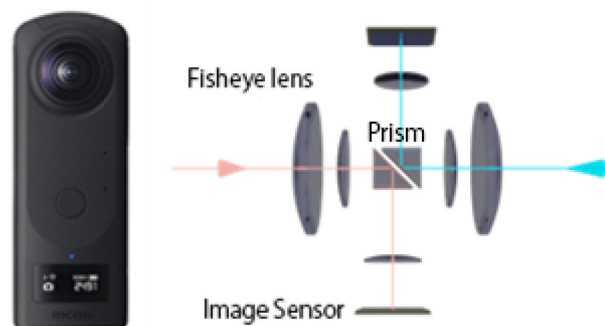


Fig. 2 Appearance of 360-Degree Camera THETA and Schematic Diagram of Dual-Fisheye Refractive Optical System.



Fig. 3 Equirectangular projection captured by 360-degree camera.

3. 360度カメラの応用事例

360度カメラの活用例として、コンシューマ用途、オンライン地図サービス、遠隔ストリーミング、不動産、建築業界での活用事例について紹介する。本項の事例は一般的な360度カメラ全般に対するもので、リコーTHETAに限ったものではない。

3-1 コンシューマ用途

360度カメラは、まずコンシューマ市場においてカメラ製品として受容された。周囲全体を記録し、その情報を共有することにより、従来の静止画・動画を超越する臨場感を提供し得る点がソーシャルネットワークサービス（SNS）において注目を集めたのである。複数の主要プラットフォームが360度画像に対応しており、その一部は画像形式を自動判別し、専用ビューアーを通じたインタラクティブな閲覧を可能としている。この場合、ユーザーはフリック操作による視点移動に加え、端末の傾きに応じた表示制御によって没入的な体験を享受できる。

さらに、360度カメラはVirtual Reality（VR）との親和性が高い。ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を用いた360度画像の閲覧においては、利用者が頭部を回転させることにより視点を任意の方向へ移動できるという特徴を有する。ただし、この場合に可能となるのは視点方向の変化に限定され、運動自由度は3DoF（Degrees of Freedom）に制約される。

2020年以降には、360度カメラの利用はアクションカメラ分野において急速に拡大した。これは、360度動画を撮影し、後段の動画編集過程において動的なカメラワークを生成する手法によるものであり、特にInsta360を展開するArashi Visionが代表的なアプリケーションとして市場導入を推進している。

このように、一度360度で記録した映像を後に任意の視点で再編集できるというワークフローの簡便性は、個人による動画制作需要と合致し、結果として市場拡大に資する重要な要因となっている。

3-2 オンラインマップ用途

360度カメラのビジネス利用例において、最初に勃興したのがオンラインマップ用途であり、ストリートビューとしても活用されている。オンライン地図のストリートビューでは専用の機材を装備した自動車で行うが、個人が360度カメラで撮影を行い、アップロードすることも可能である。

Googleは自社サービスStreet viewのためにPhoto Sphere XMPメタデータを策定⁴⁾し、Android端末ならびに多くの360度カメラがこれに対応した。このメタデータは360度画像特有の中心方向の記述やデータを開いた際の初期視点や画角のデータを包含している。これらの仕様の一部は国際標準であるJPEG 360 (ISO/IEC 19566-6) にも適用されている。またGoogleは、多量の360度画像の撮影の自動化、省力化のために360度カメラを制御するためのOpen Spherical Camera APIを策定した。

3-3 不動産向けバーチャルツアー

360度カメラのビジネス利用に関しては、不動産分野における活用が初期段階から確認されている。不動産の入居希望者や購入希望者が物件を閲覧・確認する際に広く利用されており、近年では不動産賃貸・売買においてオンライン不動産サービスや不動産ポータルサイトの利用が一般化している。これらのオンラインサービスにおいて、360度画像は重要な機能として広く採用されている。

例えば、マンションの一室を売り出す場合には、各部屋を360度画像で撮影し、それらを間取り図上のリンクとして配置することで、仮想的なツアー（バーチャルツアー）を構築することが可能である。このようなツアーは従来の静止画とは異なり、利用者が関心のある箇所を自ら選択して閲覧できる点に特徴があり、より高い臨場感を提供する。また、利用者が自由に視点を移動できることから、物件情報の信頼性や透明性を高める効果も期待される。さらに、360度画像上にアノテーション等を付与することで、追加的な情報を提示し、顧客への情報提供を拡充することが可能となる。

加えて、遠隔地から現地確認が可能となるという特性は、COVID-19感染症流行期において特に注目を集め、不動産業界における導入を促進する要因の1つとなった。

3-4 建設現場での活用

近年、建築・土木業界での360度カメラの活用も広がっている。建築の進捗管理、記録などで通常のデジタルカメラ画像は広く使われているが、建築・土木での対象は非常に広い範囲であり、対象も多いため、通常のカメラだけでは、撮影・整理が煩雑になる。例えば一般的な広角レンズを35mmと仮定した場合、360度カメラの画角は立体角換算で20倍であり、高い効率を実現する。また、現場の実際の撮影においては、経験が浅い職人が撮影しても必要な箇所を撮影できないという課題がある。これに対し、360度カメラでは、経験の多寡にかかわらず、抜け漏れなく記録することができ、大きなメリットとなっている。

このように撮影された建築現場での記録は、様々な工程に係る作業員、管理者が閲覧でき、移動工数の手戻りの削減に寄与し、建築工費の適正化を実現することができる⁹⁾。

建設市場での利用法は総じて、閲覧者への単純な画像共有を行うだけの不動産向けより、高度な運用であると言える。記録、保管、情報との紐付け、画像によるコミュニケーションなど、より発展的な使い方が多く見られる。360度カメラ活用事例を建設業務プロセスに即して整理すると、以下のような利用形態に区分することができる。

3-4-1 現地調査・見積もり

新築工事における周辺環境や、リフォーム現場内部の現況を包括的に記録することで、調査内容の漏れを防止し、見積もりの精度を向上させることが可能となる。また、現場に直接赴くことができない関係者に対しても、空間情報を共有する手段として機能する。

3-4-2 工程管理・安全管理

工事の進捗状況を、職長会議などの意思決定の場において迅速に確認できる点は、工程管理の効率化に資する。さらに、施工不良や不安全状態の早期発見においても有効であり、熟練施工管理者の経験やBIMとの併用によって、重大な問題へと発展する前にリスクを低減できる。

BIMとはBuilding Information Modelingの略であり、3次元の建物のデジタルモデルに、管理情報などの属性データを追加したデータベースを、建設の全工程で活用するソリューションを指す。デジタルデータと施工の現実の状況を照らし合わせる必要があり、これに360度カメラが広く使われている。

通常のカメラでは画角が限られ、BIMデータとの比較が困難だが、360度カメラでは後述の位置推定などの技術も併せ、BIMデータと連携することが容易である。

3-4-3 隠蔽部の施工記録

建設工程において後に壁や床により隠蔽される部分について、施工結果を映像として保存しておくことで、後日確認が必要となった際に、業者への問い合わせや破壊検査を行うことなく、非破壊的に記録を参照できる。この点は、トレーサビリティ確保の観点からも重要である。

また、天井・床全体の撮影は通常のカメラによっては画角の制限によりなし得ない。360度カメラの利点が出るユースケースと言える。また、隠蔽後の天井裏、床下に360度カメラを差し込んで撮影することも通常のカメラではなし得ないユースケースである。

3-4-4 教育・技術伝承

360度カメラの高度な使い方として教育用途が挙げられる。新人技術者が現場に対して抱くイメージと実際との乖離を低減する手段として有用であり、現場状況を擬似的に体験することによって理解を深めることができる。また、熟練技術者の知見や施工

ノウハウを映像資料として体系的に蓄積することで、技術伝承の基盤を形成する。

3-4-5 広域現場での活用事例

広大な建設現場においては、360度カメラの活用機会が増大する。しかしながら、その際には膨大な数の画像データを取り扱う必要が生じ、従来の手作業によるマッピング処理では実務上困難な水準に達する。

これら技術の一例については4-3の位置推定技術にて詳しく述べる。これら技術は3次元コンピュータビジョン技術の発展とともにNeRF、Gaussian Splattingなどの活用により、3次元情報を簡易に得ることができ、さらに活用を広げることが期待されている。

4. 360度ソリューションにおけるリコーの独自技術

本項ではリコーの360度カメラに関する技術を述べる。3.に示したように、360度カメラが活用されている市場として、不動産市場と建設市場がある。これら市場に向け、リコーはTHETA360.biz、RICOH360 Tours、RICOH360 Projects、RICOH360 platform、RICOH Remote Fieldというサービスを展開してきた。

これらサービスを支えるリコーの技術、不動産市場向けのImage Enhancement技術および動画生成、建設市場向けの位置推定技術およびストリーミング技術について本項で述べる。これら技術は一般的な360度カメラに対しても有効であるが、サービスとしてはTHETAで撮影された画像に限定して提供している。

4-1 Image Enhancement

リコーにおける360度画像に関する応用技術の一例として、本節では画質改善技術（Image Enhancement）について述べる。

一般に、2眼魚眼方式の360度カメラは画質が低いという課題を抱えている。その理由は、各魚眼レンズが180度以上の画角をカバーする必要があること、さらに魚眼レンズが円形のイメージサークルを形成するため、矩形のイメージセンサーを十分に活用できない点にある。結果として、単位画角あたりの有効画素数が少なくなり、低解像度となる。これは物理的・光学的制約に基づくものであり、原理的に不可避な課題とされるが、その解決に向けた期待は極めて大きい。

画質改善の分野においては、従来よりデジタル画像処理技術に基づく超解像（Super-Resolution）やその他の画像強調技術（Image Enhancement）が提案されてきた。近年では、従来型の画像処理手法に加え、深層ニューラルネットワーク（DNN）を用いた手法も研究され、急速な進展を遂げている。しかしながら、既存の超解像技術は必ずしもカメラで撮影された画像に有効とは限らない。その理由は、多くの手法が「高解像度画像を縮小したものを入力とし、元画像を正解として復元する」という理想的な劣化モデルを前提としているためである。対照的に、現実のカメラは異なる劣化モデルを持つ、例えば、360度カメラであれば、光学系、イメージセンサー、ISP処理を経た後、さらに幾何的な湾曲補正およびステッチング処理を経て生成される。この一連の流れが現実の劣化モデルであり、幾何的な縮小アルゴリズムすなわち理想的な劣化モデルとは大きく異なる。これが既知の超解像アルゴリズムをそのまま適用しても十分な改善効果が得られない原因である。

また、近年の生成AI（Generative AI）の発展により、低解像度な入力であっても、詳細を補間するような技術も登場しているが、本来、写っていない映像を生成してしまう課題があり、業務用に真正性を確保するという用途には採用できない。

リコーでは真正性を保った上での画質改善を実現するために、360度画像と高画質画像のペアから構成されるデータセットとそれを用いた学習方法を提案した⁷⁾。

この研究では、Residual-in-Residual Dense Block (RRDB) および畳み込み層を用い、高周波成分と低周波成分の特徴を同時に抽出可能な多周波構造を組み込んだGAN (Generative Adversarial Network) アーキテクチャを設計し、学習を行った。その結果、360度画像の高速かつ高精度な画質強調を実現することが可能となった。



Fig. 4 Result of Image Enhancement.

加えて、Fig. 4に示すように、本手法はテキストの精細化やエッジの鮮鋭化に寄与するだけでなく、色収差や光学的欠陥に起因するノイズの除去にも有効であることが確認された。したがって、本アーキテクチャは360度画像に特化した画質改善技術として有用であると位置付けられる。

4-2 動画生成

本節ではリコーにおける360度画像に関する応用技術の一例として、360度静止画像からの動画生成について述べる。

3-3で示したように、バーチャルツアーは不動産向けのインタラクティブなサービスとしてすでに受容されている手法ではあるが、閲覧者視点では、閲覧に手間がかかる、直感的でないなどの課題がある。

リコーでは、バーチャルツアーの活用の方法をより拡大するため、バーチャルツアーを構成する360

度静止画像から自動的に透視投影の動画を生成する技術を開発した⁸⁾。

この技術は3つのステップから構成される。

1. 重要領域推定
2. キー構図抽出
3. 仮想カメラワーク生成

これにより全天球画像から重要領域を含む動画を生成することが可能である。これにより様々なデバイスでインタラクションなしに物件の情報を動画として得ることができる。

リコーでは重要領域を抽出する技術についても開発した。この手法は、全天球画像に付与された注目構図から機械学習を行うことにより、人間が直感的に注意する箇所を推測することができる技術である。

4-3 位置推定・3次元復元

建設現場における360度カメラの活用において、位置情報の取得は極めて重要である。特に現場が広大な場合には、多数の360度画像を図面に対応付ける必要があり、これを手作業で実施することは大きな人的コストを伴う。この課題に対処する方法として、360度カメラによる動画撮影から得られる画像データを用いて位置を推定し、図面上に自動的にマッピングする手法が提案されており、一般にReality Captureと称される。

位置推定には、Visual SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)、Visual Odometry、Structure from Motion (SfM) などの技術が用いられる。例えば、VSLAMにおける処理フローは以下の通りである。まず全方位画像を取得し、特徴点の抽出とフレーム間マッチングを通じてカメラの相対姿勢を推定する。次に、推定された姿勢に基づき特徴点を3次元空間に投影し、逐次的に環境マップを生成する。さらに、過去に訪れた地点との再認識によってループ閉じ込みを行い、最適化手法を適用することで累積誤差を低減する。このような位置推定技術は、死角が少ないという点において360度カメラと高い親和性を有する。

リコーでは独自のロバスト性と処理速度を特徴とした位置推定技術を開発した。ロバスト性を高めるために、慣性計測ユニット（IMU: Inertial Measurement Unit）を併用するハイブリッドな方式を採用し、画像による特徴量をロストしたケースでも位置推定処理が途切れない利点がある。360度カメラには天地方向の補正を目的としてIMUが標準的に搭載されているため、IMUとの統合は360度カメラにおいて有効なアプローチであると言える。

4-4 遠隔でのストリーミング

遠隔地の情報共有として動画による双方向通話が広く知られている。これを360度動画によって行うことでより臨場感あふれる遠隔共有を行うことが可能となる。スティッチング後の360度の正距円筒図法による画像データは一般的な動画データと同様に矩形であるため、通常の通信手段、例えばWebRTCのような手段によって、遠隔地に転送、閲覧することが可能である。360度ストリーミングにおいては、カメラの画角や方向を気にすることなく、現地の状況が確認できるため、遠隔地での監視や検査確認に用いられている。土木工事の現場管理の手法として遠隔地とのインタラクティブな双方向360度画像コミュニケーションの提案がある。

Fig. 5は360度カメラを用いた配信サービスRICOH Remote Fieldの概念図である。このサービスは、RICOH THETAによる360度高解像度映像と低遅延配信を特徴とする遠隔現場支援システムである。特に閲覧者が任意の点を見ることができ点が最大のメリットである。閲覧に際しては、専用アプリ不要でブラウザからアクセス可能であり、発注者・受注者間の立ち会いや安全パトロール、リモート点検など多様な業務に応用される。これにより移動時間やコストの削減、危険現場での安全性向上に寄与する。



Fig. 5 Overview of Remote Field.

5. 今後の展開

360度カメラは、空間全体を記録できる優れた情報共有手段であり、近年では多様なビジネス領域での活用が拡大している。このような活用の広がりにより、すでに莫大な空間データが蓄積され、今後も広がり続ける。さらに、これらの空間データに位置情報や3次元情報を付加することで、現場の空間そのものをデジタル化することが可能となる。

リコーでは、これらの空間情報と、近年急速に発展しているLLM（大規模言語モデル）やVLM（ビジョン言語モデル）などの技術を組み合わせ、高度なAIソリューションの構築を進めていく。人間が膨大なデータをすべて確認することは困難だが、AIを活用することで、撮影されたデータを網羅的にチェックし、見落としを防ぐことが可能となる。また、高度な専門知識をAIに学習させることで、検査や確認作業の自動化・効率化を実現し、現場の負担軽減にもつなげることができる。

さらに、これらのデータ取得を支えるため、効率的な現場データの収集や、クラウド・AIとの親和性を重視したデバイスの開発も進めていく。

参考文献

- 1) S. K. Nayar: Catadioptric Omnidirectional Camera, *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 482-488, IEEE (1997).
- 2) R. Swaminathan, S. K. Nayar: Nonmetric Calibration of Wide-Angle Lenses and Polycameras, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 10, pp. 1172-1178 (2000).
- 3) S. K. Nayar, A. D. Karmarkar: 360 x 360 Mosaics: Regular and Stereoscopic, *Panoramic Vision*, pp. 291-307, Springer-Verlag (2001).
- 4) H. Bakstein, T. Pajdla: Panoramic Mosaicing With a 180° Field of View Lens, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision 2002 (in conjunction with ECCV'02)*, IEEE (2002).
- 5) S. Li: Full-View Spherical Image Camera, *Proc. 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR '06)*, Vol. 4, pp. 386-390, IEEE (2006).
- 6) 横地和彦, 清水将之: 工事記録映像の活用に関する研究, *JICE Report: Report of Japan Institute of Construction Engineering*, Vol. 31, pp. 30-33 (2017).
- 7) Y. Zhang et al.: Toward Real-World Panoramic Image Enhancement, *Proc. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 628-629 (2020).
- 8) 原崇之ほか: 全天球画像の重要領域推定と仮想カメラワークによる動画生成, 画像電子学会第50回年次大会予稿集, 一般社団法人画像電子学会 (2022).

注1) AndroidはGoogle LLCの商標または登録商標です。