

特集
Special Feature

[より自由でより没入感の高いイマーシブメディア]

3 自由視点テレビ FTV の原理



谷本正幸 | 名古屋大学 / 名古屋産業科学研究所

FTV の意義

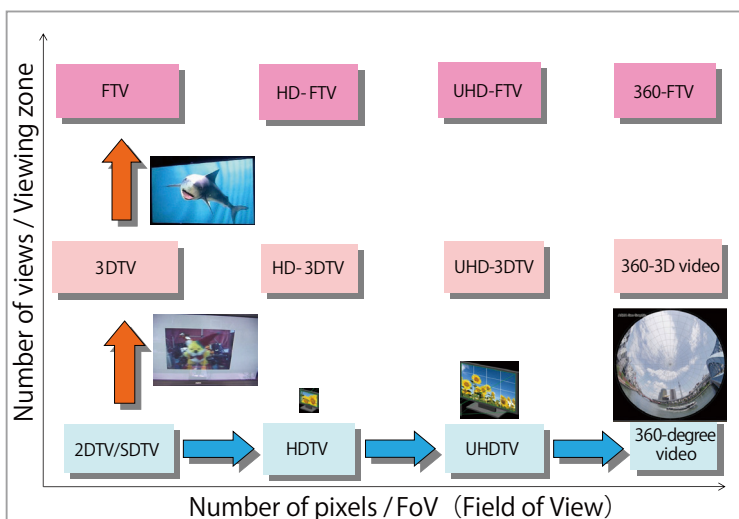
自由視点テレビ FTV (Free-viewpoint Television) は、ユーザがあたかもその場にいるかのように、自由に視点を変えて遠隔地の情景を見ることができる映像メディアである。無限個の視点を持つ FTV はきわめて高いセンシングや映像表現の能力を持ち、産業や生活、社会、学術、教育、文化、スポーツ、アミューズメントなど、数多くの分野で大きな貢献が期待される。さらに、FTV は臨場感の高い没入メディアとして、人と仮想環境をシームレスにつなげるヒューマンインタフェース、革新的なコンテンツ制作ツール、社会の安全性を高める映像情報インフラなどと位置づけられる。このように、FTV は

社会的、文化的に大きな意義を持つ。

2001年に FTV を MPEG (Moving Pictures Experts Group) に提案し、その標準化を推進してきた。これまでに FTV 第1フェーズ MVC (Multiview Video Coding) と第2フェーズ 3DV (3D Video) の標準化を終了し、現在は第3フェーズ MPEG-I (Immersive) の標準化を行っている。

映像メディアの進歩と FTV の位置付けを図-1に示す。横軸は画素数または視野の広さ、縦軸は視点数または視域の広さである。横方向の矢印は標準テレビから 2K テレビ、4K/8K テレビへと進む解像度の向上を示す。これは視野の拡大でもあり、360度映像がそのゴールである。一方、縦方向の矢印は 2D (2次元) テレビから 2眼式のステレオテレビ、多眼式の多視点テレビへと進む視点数の増加を示す。視点数を増やすと視域が広がる。視点数をさらに増やして無限大にしたものが FTV である。リアリティの高い没入メディアには広い視野と視域の両方が必要である。

本稿では、これまでの映像メディアとは異なる仕組みを持つ FTV の原理を解説する。まず、FTV の性能がシーン表現法に強く依存し、代表的なイメージベース法とモデルベース法が相補的な特徴を持つことを述べる。次に、イメージベース法の光線空間法を説明する。そして、すべての方向の光線を再現す



■ 図-1 映像メディアの進歩と FTV の位置付け

特集
Special Feature

る最上位のFTV で用いる4D (4次元) 極座標光線空間の構造を述べ、その構造を利用して光線空間から面情報が検出できることを示す。最後に、光線と面情報を用いるイメージベースとモデルベースの統合方式を説明する。

FTV の構成

FTV の構成を図-2 に示す。まず、多数のカメラ (多視点カメラ) でシーンを撮影する。カメラ配置は、シーンを一方向から見る場合には図-3 (a) の平行型、さまざまな方向からのぞき込む場合には同図 (b) の収束型、さまざまな方向を見回す場合には同図 (c) の発散型とする。撮影データは伝送や画像生成に適したシーン表現形式に変換される。このシーン表現データから自由視点画像を生成するため、FTV の性能はシーン表現法に強く依存する。

代表的なシーン表現法として、光線を用いるイメージベース法と物体の3Dモデルを用いるモデルベース法がある。イメージベースFTVとモデルベースFTVの特徴を表-1に示す。イメージベース法は写実性に優れているが、視域が狭い。一方、モデルベース法は写実性に劣るが、視域が広い。このような相補関係は、静止画表現法のラスタ形式 (画素ベース) とベクトル形式 (図形ベース) においても見られる一般的な関係である。

光線情報から3Dモデルを生成できれば、写実性と広視域性を併せ持つイメージベース法とモデルベース法の統合方式が実現できる。次章では、光線情報を記述する光線空間法について説明する。

光線空間法の概要

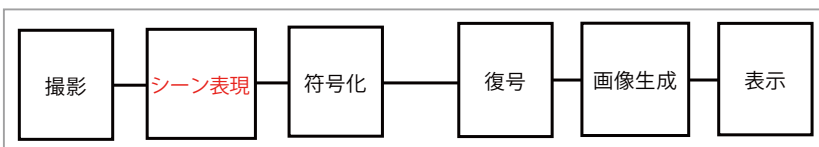
直交光線空間と極座標光線空間

光線空間法では、3D実空間の光線を、その位置と方向を表すパラメータを座標とする空間の1点で表す。すなわち、3D空間内の位置 (x, y, z) において方向 (θ, ϕ) を持つ光線を (x, y, z, θ, ϕ) と表す。この5D (5次元) パラメータ空間 (x, y, z, θ, ϕ) が光線空間である。

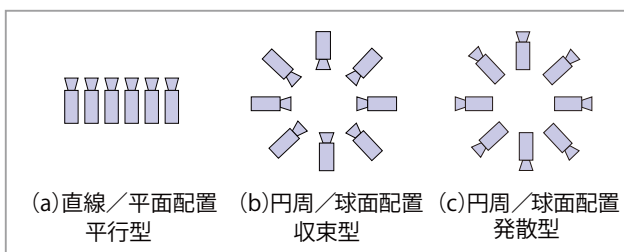
光線は直進するので、光線の減衰を無視できる範囲では直線上の光線はすべて同一である。このため、実空間内に基準面を置き、これを通過する光線で直線上の光線を表せば、光線空間の次元数を下げることができる。これが4D光線空間 (x, y, z, θ, ϕ) である。

4D光線空間として直交光線空間と極座標光線空間が定義されている。直交光線空間は図-3 (a) のカメラ配置、極座標光線空間は同図 (b), (c) のカメラ配置のFTVに用いられる。

4D直交光線空間 (x, y, z, θ, ϕ) の定義を図-4に示す。ここで、 (x, y) は基準面上の光線の位置、 (θ, ϕ) は光線方向を表す。 θ は水平方向の角度、 ϕ は垂直



■図-2 FTVの構成



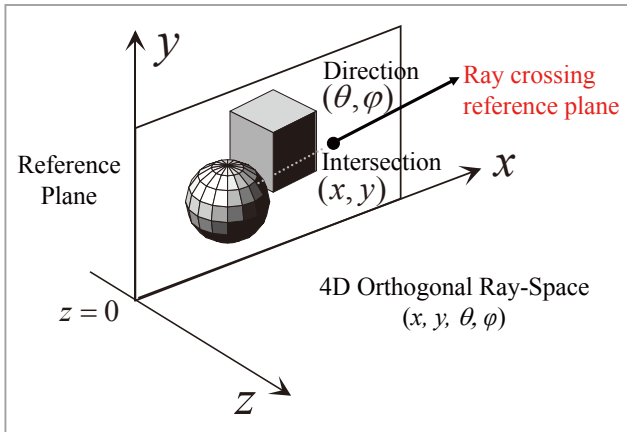
■図-3 シーンを撮影する多視点カメラの配置

■表-1 イメージベースFTVとモデルベースFTVの特徴 (○長所, ×短所)

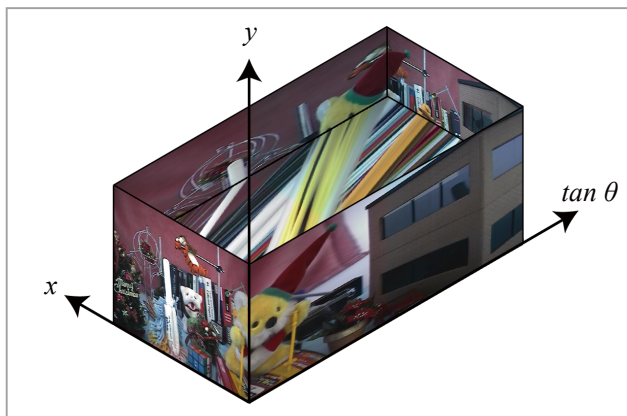
	イメージベースFTV	モデルベースFTV
原理	光線/画素	数式で表された3Dモデル
特徴	○自然シーン	×モデル化されたシーン
	○写実性が高い	×写実性が低い
	×視域が狭い	○視域が広い
	×操作ができない	○操作が可能

特集
Special Feature

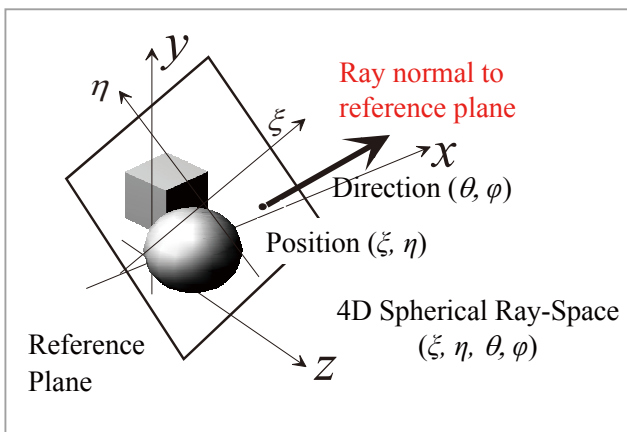
方向の角度である。水平視差のみを実現する場合には $\phi=0$ として、3D 直交光線空間 (x, y, θ) が得られる。3D 直交光線空間は図-5 のようになり、その水平断面は直線構造を持つ。直交光線空間は基準面に平行な光線を表現できない。



■ 図-4 4D 直交光線空間の定義



■ 図-5 3D 直交光線空間の構造

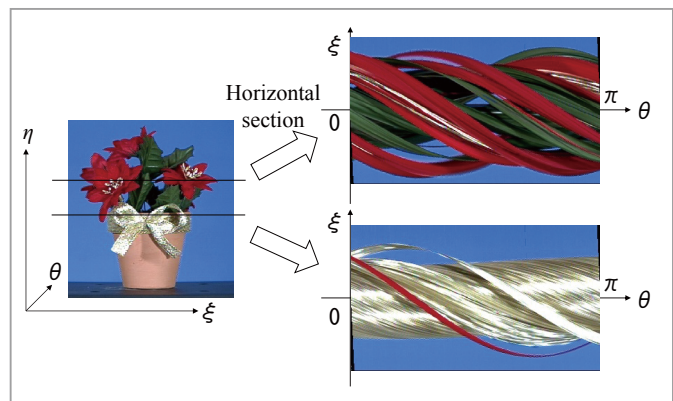


■ 図-6 4D 極座標光線空間の定義

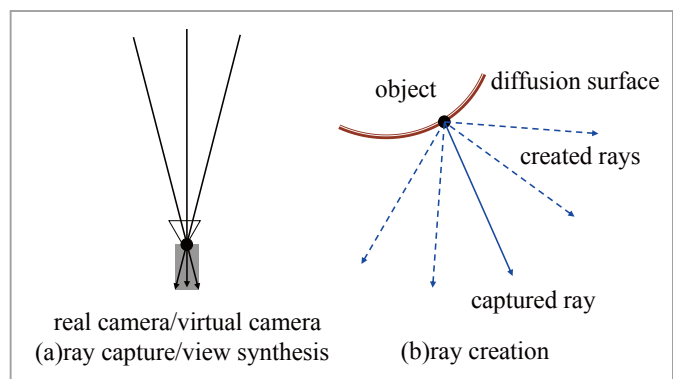
4D 極座標光線空間 $(\xi, \eta, \theta, \phi)$ の定義を図-6 に示す。極座標光線空間では、光線を光線方向 (θ, ϕ) と光線に垂直な基準面上の位置 (ξ, η) によって表す。極座標光線空間は基準面が光線方向ごとに異なるため、すべての光線を表現できる。水平視差のみを実現する場合には $\phi=0$ として、3D 極座標光線空間 (ξ, η, θ) が得られる。3D 極座標光線空間の水平断面は図-7 に示すように正弦波構造を持つ。

「1点を通る光線群」の概念

光線を取得・生成するとき、「1点を通る光線群」の概念を用いる。図-8 (a) は1点を通る光線群を実カメラで取得できること、また1点を通る光線群を集めるとその位置のカメラ画像が生成できることを示す。同図 (b) は拡散面上の1点から放射される光線の強度は同じであることから、ある方向の光線が既知であれば、その他の方向の光線を生成できることを示す。



■ 図-7 3D 極座標光線空間の水平断面



■ 図-8 「1点を通る光線群」の利用

特集
Special Feature

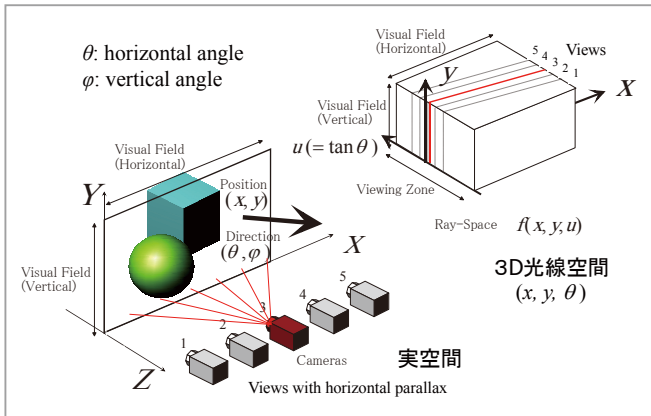
光線空間の取得と自由視点画像生成

3D 光線空間の取得方法を図-9 に示す。多視点カメラでシーンを撮影し、撮影した画像を衝立状に配列すると、カルタを重ねたような立体ができる。これが 3D 光線空間である。

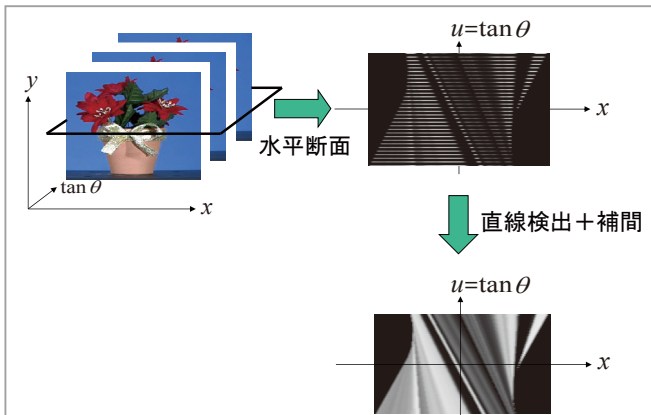
衝立状に配列された画像の間にはデータがない。カメラ間隔が広いと衝立の間隔が広がり、光線空間が疎になる。このような場合には、光線空間を補間して密な光線空間を得る。図-10 は直交光線空間の補間で、水平断面の直線構造を利用する。極座標光線空間の補間には正弦波構造を利用する。

自由視点画像は、図-11 に示すように直交光線空間を垂直に切って生成する。多眼式 3D ディスプレイに表示するには、平行する平面で同時に眼数分の切断面を作る。

極座標光線空間の場合には、図-12 に示すように



■ 図-9 多視点カメラによる 3D 光線空間の取得



■ 図-10 直交光線空間の補間

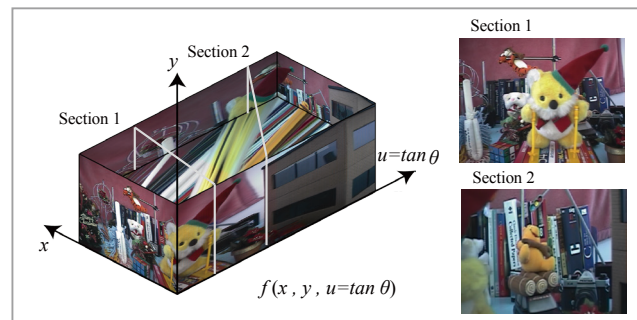
正弦波曲面で切断する。

4D 極座標光線空間の構造

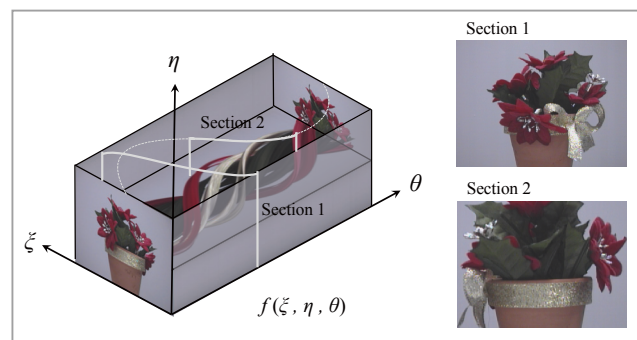
すべての方向の光線を再現する最上位の FTV では、4D 極座標光線空間を用いる。前述のように、自由視点画像は光線空間の構造を利用して生成される。ここでは、面情報を自由視点画像生成に利用するため、あらゆる方向の面を持つ方位球を定義する。方位球を用いて 4D 極座標光線空間を可視化し、構造を解析する。この結果を用いて光線空間から面を検出する。光線と面情報の両者を用いれば、最後に述べるイメージベース法とモデルベース法の統合が実現できる。

4D 極座標光線空間の可視化

4D 極座標光線空間 $(\xi, \eta, \theta, \phi)$ の (θ, ϕ) は方向パラメータ、 (ξ, η) は (θ, ϕ) 方向から見た正投影画像であるから、あらゆる方向から見た (ξ, η) 画像を呈示することによって、4D 極座標光線空間を可視



■ 図-11 直交光線空間からの自由視点画像生成



■ 図-12 極座標光線空間からの自由視点画像生成

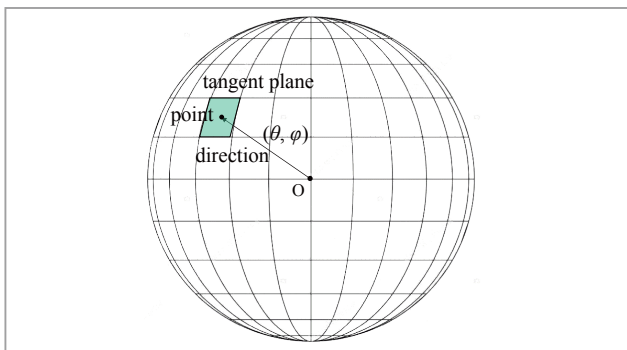
特集
Special Feature

化できる。

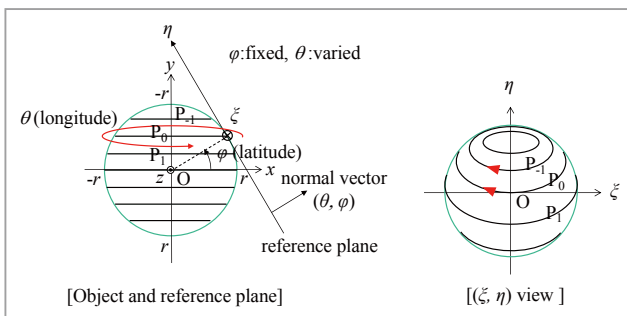
異なる法線ベクトル (θ, ϕ) を持つすべての面を可視化するため、**図-13** に示す方位球を定義した。方位球は、方向ベクトル (θ, ϕ) の終点に (θ, ϕ) を法線ベクトルとする面を配置したものであり、あらゆる方向の面を表示できる。方位球において、 (θ, ϕ) は原点からの方向、球面上の点、およびその点の接平面を表す。

方位球を用いて 4D 極座標光線空間 $(\xi, \eta, \theta, \phi)$ の構造を解析した。**図-14** に示すように、 θ と ϕ が変化すると基準面が方位球に沿って回転する。これは基準面が固定で、方位球が逆方向に回転することと等価である。方位球が回転すると球上の点は円を描く。これを (ξ, η) 画像で見ると、楕円運動として観測される。 (ξ, η) 画像の楕円運動は、 ξ 軸と η 軸上では正弦波運動となる。このため、4D 極座標光線空間は θ と ϕ の変化に対して正弦波構造を持つことになる。

物体の位置と (ξ, η) 画像の関係を**図-15** に示す。物



■ 図-13 異なる法線ベクトル (θ, ϕ) を持つすべての面を表示する方位球



■ 図-14 基準面の回転が (ξ, η) 画像に楕円運動を生じる (図は y 軸の回りに回転する場合)

体が原点にない場合には正弦波チューブ構造が現れる。

図-16 に示すように、正弦波チューブ構造は物体が原点にある場合の直線チューブと正弦波の和に分解できる。直線チューブから物体の形状情報、正弦波から物体の位置情報が得られる。正弦波の振幅が距離を表し、位相が方向を表す。

面の検出

正投影画像からの面の検出

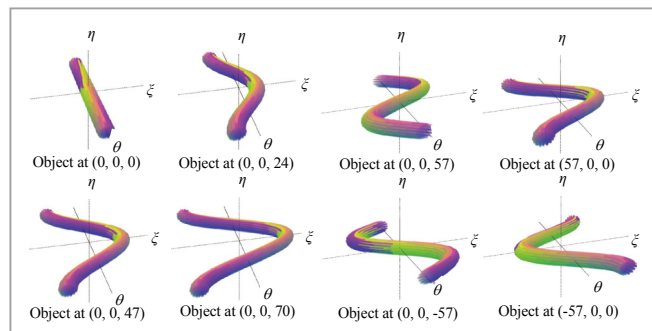
面を正面から見るとその形状が分かる。しかし、4D 光線空間の構造を利用すれば、面を正面から見なくてもその方向と形状を求めることができる。方向が (θ_0, ϕ_0) で面積が $S(\theta_0, \phi_0)$ の面を (θ, ϕ) 方向から見るとき、面の面積 S は

$$S(\theta, \phi) = S(\theta_0, \phi_0)(\cos(\theta - \theta_0)\cos\phi\cos\phi_0 + \sin\phi\sin\phi_0) \quad (1)$$

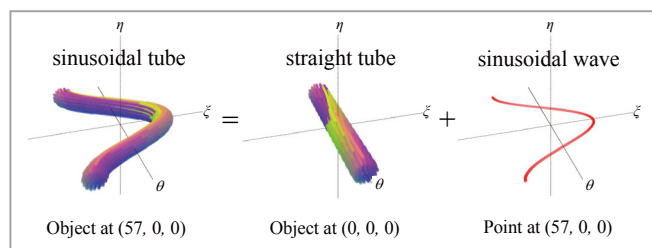
となる。異なる 3 方向から見た面の面積 S を与えると、(1) 式を θ_0 と ϕ_0 について解くことができる。面の方向 (θ_0, ϕ_0) が分かると、射影変換によって**図-17** に示すようにどの方向の画像からでも面の形状を生成できる。

透視投影画像からの面の検出

カメラが遠方にあるときには、カメラ画像を正投



■ 図-15 物体の位置と (ξ, η) 画像の関係



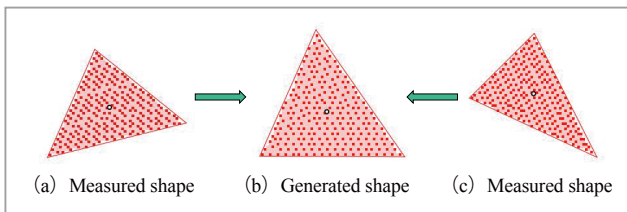
■ 図-16 (ξ, η) 画像の分割

特集
Special Feature

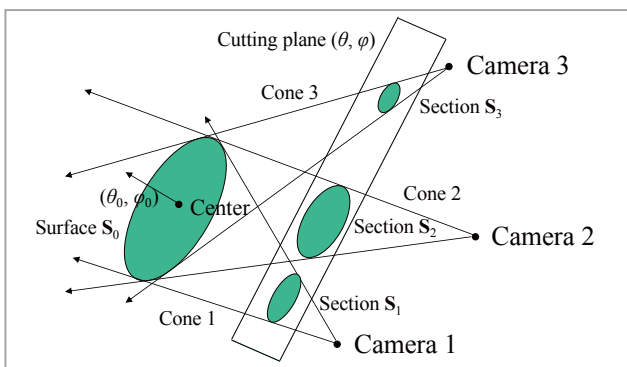
影画像と見なすことができる。しかし、カメラが物体に近い場合には、透視投影画像となる。

透視投影画像の場合、カメラから面を見込む錐を作り、これを2枚の平行平面で切断すると、どこで切断しても2つの切断面は相似形になる。このため、**図-18**のカメラ配置において共通の面 S_0 を見込む錐を平面で切断するとき、切断面の方向 (θ, ϕ) が面の方向 (θ_0, ϕ_0) と一致すれば、各錐の切断面 S_1, S_2, S_3 が相似形となる。そこで面積で規格化した各錐の切断面が同一形状になるように、反復法で (θ_0, ϕ_0) を求めることができる。

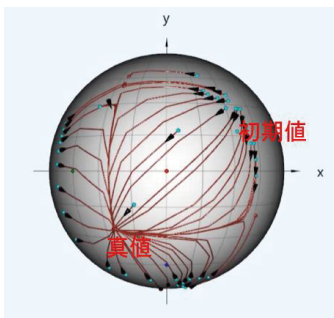
図-19に示すように、本手法によりさまざまな初期値から数回の反復で面の方向 (θ_0, ϕ_0) が得られる。



■ 図-17 異なる方向の画像から生成した面の形状



■ 図-18 透視投影画像からの面の検出



■ 図-19 方位球上で面の方向がさまざまな初期値（青丸）から真値 (θ_0, ϕ_0) へ収束する様子

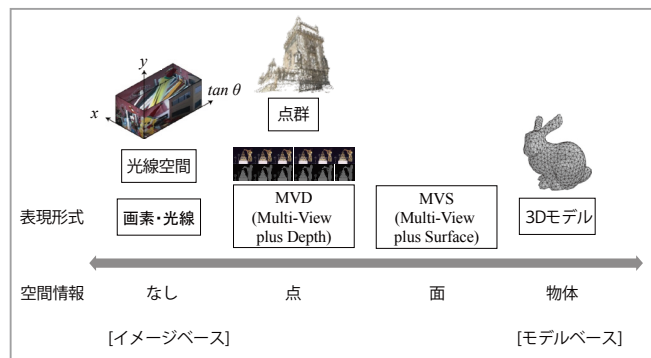
イメージベース法とモデルベース法の統合

FTVのシーン表現法

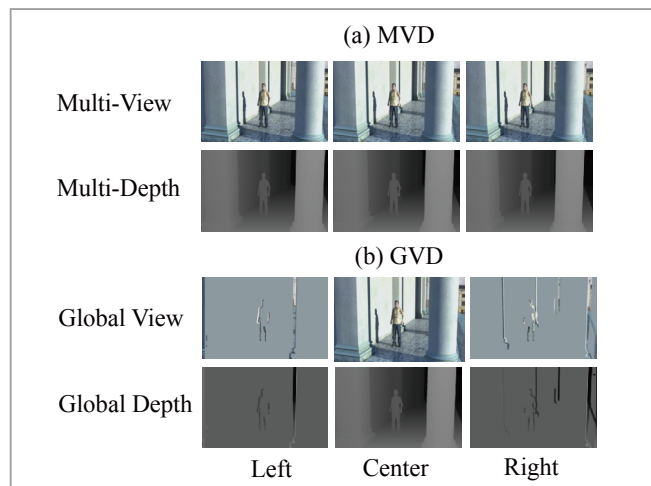
FTVのシーン表現法を**図-20**に示す。イメージベース法は光線や画素でシーンを表現し、空間情報は持っていない。一方、モデルベース法はシーンをモデル化し、物体の3Dモデルを空間情報として持つ。空間情報を持つ手法として、点情報を持つ Point Cloud や MVD (Multi-View plus Depth), 面情報を持つ MVS (Multi-View plus Surface) などがある。

点によるシーン表現

MVDは多数の view と depth でシーンを表現する。**図-21** (a) に示すように MVD はカメラ間で非



■ 図-20 FTVのシーン表現法

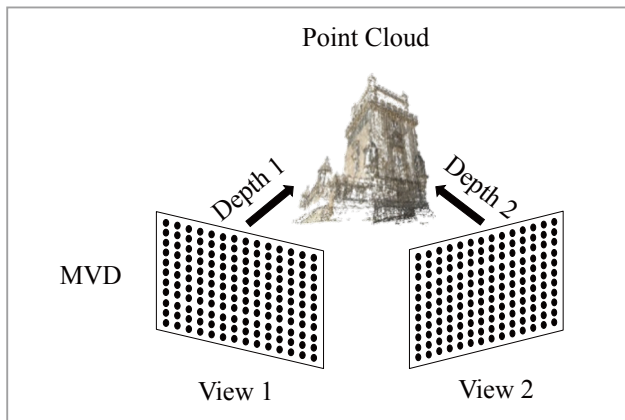


■ 図-21 MVDとGVD

特集 Special Feature

常に冗長である。この冗長性を取り除いた方式が同図 (b) に示す GVD (Global View plus Depth) である。MVD と GVD は MPEG の 3DV (3D Video) 標準化で採用された。MVD と GVD を 360 度映像に拡張したものが、MPEG-I 標準化の MIV (MPEG Immersive Video) にも採用されている。

view の各画素は光線の入射方向を示すので、光線を depth の距離だけ遡ると、画素と depth の 1 組から光源の 1 点が得られる。図-22 に示すように、



■図-22 MVD と点群はシーンを点で表現

これをすべての画素について行くと MVD から点群 (Point Cloud) が得られる。MVD と点群は光線と点情報の両方を持つイメージベースとモデルベースの中間方式であるが、各点が別個に求められているので物体の面としてのまとまりがない。

面によるシーン表現

MVS 方式では、前述の方法で光線空間から物体の面と位置を検出するため、面情報を空間情報として持つ。光線と面の情報を持つ MVS はイメージベース法とモデルベース法の統合方式である。これによってイメージベースの写実性とモデルベースの広視域性を併せ持つ新しい FTV が実現できることとなる。

(2021 年 2 月 12 日受付)

■谷本正幸 tanimoto@nagoya-u.jp

1976 年東京大学大学院電子工学博士課程修了。工学博士。1991 年名古屋大学工学部教授。2012 年同定年退職。名古屋大学名誉教授。名古屋産業科学研究所上席研究員。映像情報メディア学会会長・名誉会員、IEEE Life Fellow、電子情報通信学会フェロー。

