

3次元ビデオからアクア・ビジョンへ ～実世界対象の3次元形状・運動の計測と可視化～

○ 松山隆司

○ Takashi MATSUYAMA

京都大学大学院情報学研究科, tm@i.kyoto-u.ac.jp

＜要約＞ 我々の研究室では、この10年余りの間、人間を取り囲むように配置されたカメラ群によって撮影した多視点ビデオから、人間の完全な3次元形状および、身体や衣服の複雑な動きを復元し、様々な編集を行った後に自由視点映像として可視化する技術体系として「3次元ビデオ」を開発して来た。最近、この技術を水中生物の3次元形状・体内構造・運動計測が可能となるように拡張し、医学、生物学、水産業など広範な分野での実用化を目指して「アクア・ビジョン」の研究を推進している。本講演では、3次元ビデオの技術体系を概観し、アクア・ビジョンにおける最新の研究成果を紹介する。

＜キーワード＞ 3次元ビデオ, 3次元形状・体内構造・運動復元, 無形文化財, デジタル・アーカイブ, 水中生物, 多視点映像, アクア・ビジョン, Raxelモデル, 反射, 屈折, 透過, 散乱

1. 実世界対象のデジタル化

世の中には多種多様な対象があり、それらの形状、運動、色彩を高精度、高精細なデジタル画像・映像として計測、記録することは、自然科学、人文科学、芸術などの学術分野だけでなく、鉱工業、医療、宇宙・海洋開発、農業、林業、漁業などの産業分野、さらには放送、出版、映画、ゲームなどの教育、娯楽分野といったあらゆる人間の活動分野の進展に大きく貢献するものと言える。

図1は、実世界対象を、大きさ、静止／運動の2軸でタイプ分けしたもので、各タイプに応じて異なったデジタル映像化技術を開発する必要がある。20世紀においては、2次元画像・映像としての計測・記録技術が飛躍的に発展し、21世紀に向けた新たなデジタル映像化技術として3Dコンピュータビジョンに関する研究開発が進められた。

我々の研究室では、2000年頃から、21世紀における新たな映像メディアとして、人間の動作・運動の完全な3次元デジタル映像化を目指して3次元ビデオの研究を始め、2012年に研究成果をまとめた書籍を出版した[1]。数年前からは、魚、クラゲ、微生物・細胞といった水中生物を対象と

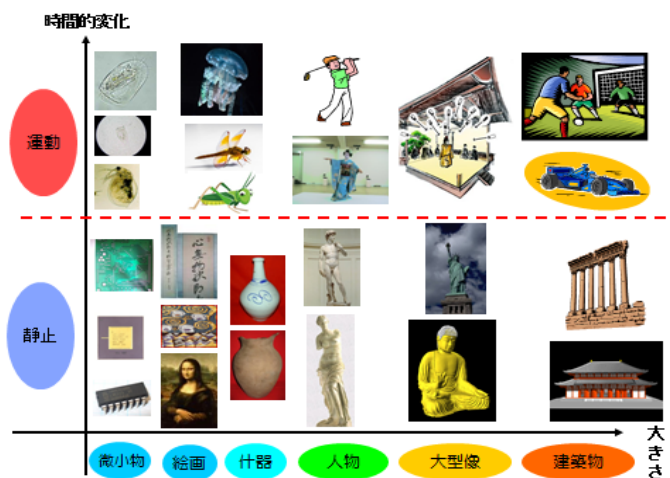


図1 実世界対象のタイプ分け

し、水中世界における3Dデジタル映像化技術(アクア・ビジョン)の研究開発を開始し、多くの成果を挙げて来た。

アクア・ビジョンでは、

1. 従来の3Dコンピュータビジョンにおいて大前提となっていた、対象世界における光の直進性、不透明物体表面における反射モデルに加え、カメラが設置される空気中と対象が存在する水中を隔てる隔壁における光の屈折、

反射，クラゲや細胞といった半透明物体内における光の透過，吸収，散乱を数理的にモデル化する必要がある。

2. 「海は命の母」と言われるように，全ての生物は，水中で活動することが原点となっており（人間の場合も受精～出産までは羊水中で暮らしている），水中生物を対象とした 3D デジタル映像化は，学術，産業，教育，娯楽のあらゆる分野の進展に大きな貢献を果たすことは確実である。

本講演では，3 次元ビデオの技術体系を概観し，アクア・ビジョンにおける最新の研究成果を紹介する。

2. 3 次元ビデオ

2.1 3 次元ビデオとは

3 次元ビデオは，CG による仮想的・人工的な 3 次元アニメーションではなく，ダンスやスポーツをする人間，自然界の動物などの生の姿・形・色の時間的変化を 3 次元的に（裏側も含め）そのまま記録した実写映像であり，単に対象が飛び出して見える 3D テレビとは異なり，その場で視聴者が自由自在に視点を変えて対象を見ることができる。

3 次元ビデオの応用システムとしては以下のようなものがある。

- ・ 人間国宝やオリンピック選手の動作を 3 次元的に完全に記録再現できる身体技能・芸能デジタル・アーカイブ
- ・ 自分の身体動作と先生による手本とを 3 次元的に比較しながらトレーニングができるリハビリ，スポーツ練習システム
- ・ 動物のありのままの生態を多角的に観察できる 3 次元ビデオ DVD 図鑑
- ・ デジタルテレビ放送や広帯域インターネットをインフラとして使った完全な 3 次元テレビ放送
- ・ 遠隔地の雰囲気そのまま伝えることができる高臨場感遠隔会議・講義・実験システム

2.2 3 次元ビデオの生成法

3 次元ビデオの撮影システム，生成過程を図 2，3 に示す。なお，各過程の技術的詳細は書籍[1]を参照して頂きたい。

- (1) 撮影対象を取り囲むように配置された多数のビデオカメラ（図 2）を用いて，対象の多視

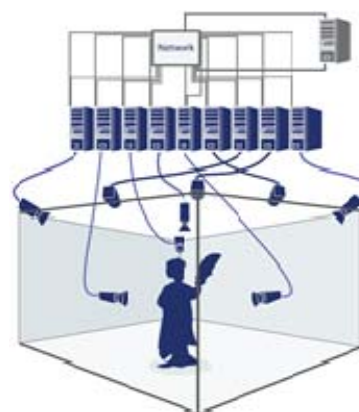


図 2 多視点同期映像撮影システム

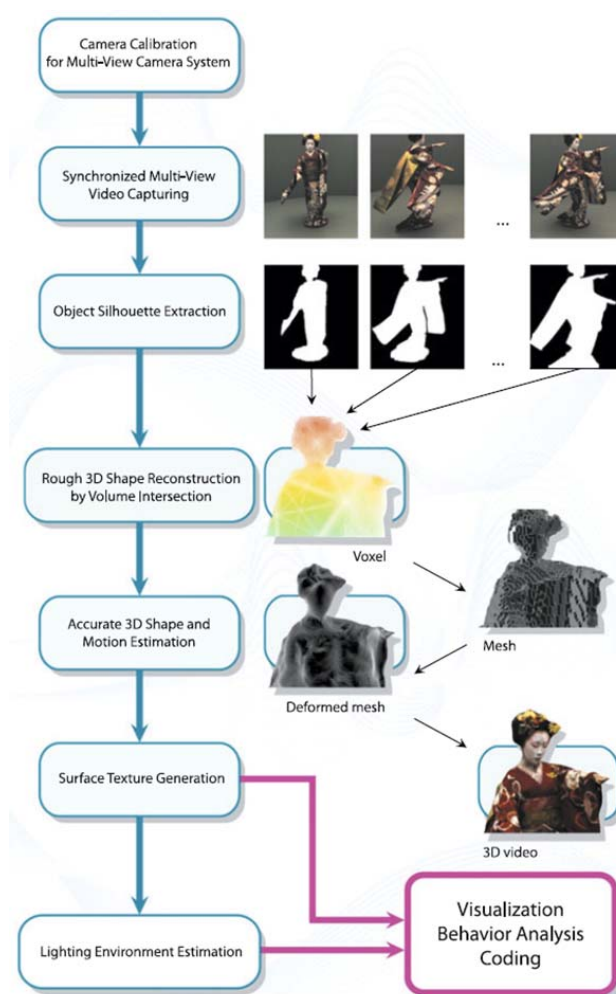


図 3 3 次元ビデオの生成過程

点同期映像を撮影する（図 3 の最上段画像）。この際，ビデオカメラ群の正確な幾何学的・光学的キャリブレーションおよび同期を実現することがシステム開発の中心的な技術課題となる。

- (2) 撮影されたビデオフレーム画像から対象のシルエットを抽出する(図3上から2段目画像). スタジオ撮影では, クロマキーによってシルエットを比較的容易に抽出できるが, 実世界環境におけるシルエット抽出は, 依然としてむずかしい課題となっている.
- (3) 多視点シルエットから, 視体積交差法によって, 対象を3次元的に包含する Visual Hull を計算する. この方法は, Shape from Silhouette と呼ばれ, 対象表面のテクスチャを基に3次元形状を復元するステレオ法と相補的な性質を持ち, シルエットとテクスチャの両特徴を併用することが正確な形状復元の基本的考え方となっている(図3上から3段目).
- (4) 視体積交差法で得られたボクセルデータを, 対象の表面形状を表す3次元メッシュに変換し(図3上から4段目右), シルエットおよびテクスチャ, さらにメッシュの衝突回避を考慮してメッシュの変形を行い, 正確な3次元形状を求める(図3上から5段目).
- (5) 3次元メッシュを構成する3角形パッチ上のテクスチャや色は多数のカメラによって写されているため, それらの情報をうまく統合してパッチのテクスチャ・色を求める(図3上から6段目右).

以上の処理で, 1フレームの3次元ビデオが生成される. 動画を作るには各フレームに対して(2)~(5)の処理を繰り返せばよい.

2.3 3次元ビデオの高精度, 高精細化

前記の手法は, あくまでも基本的なものであり, 高精度, 高精細3次元ビデオの生成に向けて以下のような研究開発を行った.

- ・ **首振りズームカメラ群を用いた人物の追跡ズーム撮影**(Chap3 in [1]): 通常の3次元ビデオ撮影スタジオは, 図2のように視野を共有する固定カメラ群で構成されており, 対象の移動可能範囲は数mに限られる. 我々は, 首振りズームカメラを用いた自動追跡ズーム撮影によって, 広範囲, たとえばアイススケートリンク, を移動する人物の多視点同期ビデオ撮影システムを開発した. システム実現の最大の課題は, 広域を自由に移動する対象をリアルタイムに追跡ズーム撮影する首振りズームカメラ群の幾何学的キャリブレ

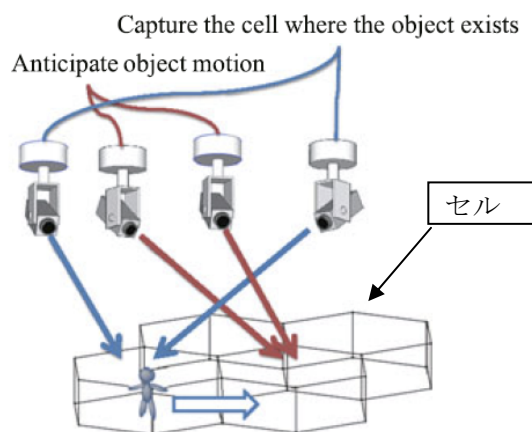


図4 首振りズームカメラ群を用いた広域移動対象の多視点高精細映像撮影方式(セル方式)



図5 左: 単純法 右: Harmonized Texture Mapping

ーションとリアルタイム制御をいかに高精度に行うかということにある. この問題を解決するため, 対象の移動空間をセルと呼ばれる部分空間に分割し, キャリブレーションおよび対象の追跡・ズーム制御をセル単位で行う方式を提案し, 実機およびシミュレーションでその有効性を実証した.

- ・ **視点依存型テクスチャマッピング**(Chap5 in [1]): 前述の生成過程(5)のテクスチャマッピングでは, 複数の撮影画像から3角形パッチのテクスチャを合成することになるが, キャリブレーションや3次元形状復元における誤差によって, 3角形パッチを撮影画像に投影して得られる部分画像の間には様々なずれ・変形が生じ, 単純な画像平均法や3角形パッチの法線と画像平面の法線のなす角度に基づいた画像選択法では, 高精細なテクス

チャは生成できない (図 5 左). この問題を解決するため, 我々は, 3 次元ビデオを見る際の視点情報を利用して, その視点から見た場合に最も自然かつ高精細なテクスチャとなるように複数の撮影画像を合成する **Harmonized Texture Mapping** 法を考案し, 視聴者の視点移動に応じてリアルタイムに高精細 3 次元ビデオを生成するシステムを開発した (図 5 右).

- **視点依存型 3 次元形状復元[2]**: 前述の生成過程(4)では, 全周囲 3 次元形状を求める方法として大域的な最適化が行われるため, 誤差が大域的に分布し (図 6 左), (5)のテクスチャマッピングの精度低下を招いている. そこで, 視聴者が与えた視点情報を利用し, その視点から観測できる 3 次元形状の部分のみを対象とした最適化を行えば, 多視点映像と整合性の取れる高精度な 3 次元形状が復元でき (図 6 右), 単純なテクスチャマッピングでも高精細な 3 次元ビデオが生成できる.
- **照明環境の推定(Chap6 in [1])**: そもそも映像は, 光源から出た光が対象表面で反射され, カメラで記録されたものであり, 映像には撮影時の光源に関する情報が含まれている. 我々は **Dual Skeleton Cube** (図 7) と名付けた参照物体を撮影した多視点映像中の影, 陰影情報から, 3 次元的に分布し動的に位置・輝度に変化する点光源集合 (図 7 中央の色付き点群) を復元する手法を考案し, ゆらめく蠟燭の光といった動的 3 次元光源を精度よく再現できることを示した. 復元された動的 3 次元光源情報を使えば, 3 次元ビデオ, 3D アニメーションに自然な息遣いや風情を与えることができる.

2.4 3 次元ビデオの解析, 編集, 符号化

得られた 3 ビデオを基に, 以下のような運動解析, 編集, 符号化に関する研究開発を行った.

- **人体の骨格構造・運動の推定**: 3 次元形状を表現する主な方法には, 視体積交差法で得られるボクセル表現, 3 次元ビデオのようなメッシュ表現のほかに, 人体の構造・運動を表すための骨格表現がある. スポーツやリハビリ, 舞踊における運動解析を行ったり, 3D アニメーションのように運動を編集するには, 骨格表現が適している. そこで, 本研究

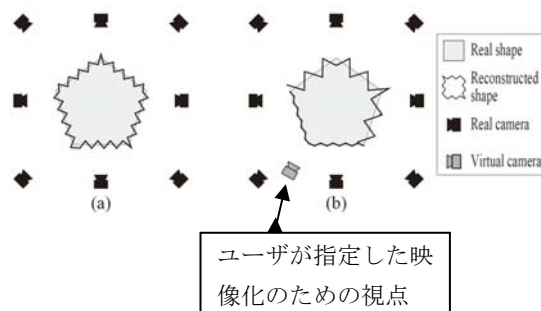


図 6 3 次元形状の大域的最適化 (左) と視点依存局所的最適化 (右)



図 7 左: 蠟燭で照らされた Dual Skeleton Cube
右: 推定された 3 次元点光源群
(図中央の色付き点群. 色は光源輝度を表す.)



図 8 人体骨格モデルの当てはめによる
3 次元ビデオからの姿勢・運動推定



図 9 3 次元ビデオからの骨格構造の推定

では, 3 次元ビデオから対象の骨格構造・運動を推定する手法として, ①人体の骨格モデルを 3 次元ビデオに当てはめ骨格運動を求める方法(Chap9 in [1]) ②3 次元ビデオから対象の骨格構造を推定する手法[3]を開発した. ①では, ヨガのように四肢が複雑に絡まりあうような運動の場合でも, かなり正確に骨格

運動を推定することができ (図 8), ②では, 人間だけでなく多様な動物の骨格構造が推定できる (図 9).

- **人体表面の運動・変形ダイナミクスモデル化[4]**: 和装で踊る人物, 喜怒哀楽を表す顔表情, さらにクラゲといった軟体動物の運動を解析するには, 対象の表面の動的な 3 次元変形を求め, 局所的に異なる剛性特徴を推定することが必要となる. 本研究では, 時系列に並んだ 3 次元メッシュ間の対応付けによるメッシュ変形, 剛性特徴の推定を行い, 対象表面の各局所部分の持つダイナミクスを求める手法を提案した (図 10). この手法を心臓などの臓器の運動・変形の分析に応用すれば, 異常部位の特定に役立つのではないかとと思われる.
- **3 次元視線運動の抽出(Chap7 in [1])**: 人間の動作を撮った 3 次元ビデオを解析し, 動作中の視線の 3 次元的变化を求めることができれば, 動作をする本人の視点から見た 3 次元ビデオが生成でき, 舞踊や体操, ジャグリングなどの練習に役立つ. 本研究では, 3 次元ビデオから顔部分を抽出し, 顔の 3 次元対称性を利用した超解像顔画像の生成によってかなりの精度で 3 次元視線運動が計測できることを示した (図 11).
- **複数の 3 次元ビデオからのアクションシーンの合成[5]**: 殺陣など複数の人物が行うアクションシーンでは, 一方の人物が他方の人物によって隠蔽され, うまく 3 次元ビデオが撮影できない. そこで, まず各人のアクションを独立して撮影し, それらを編集することによってアクションシーンの 3 次元ビデオを生成することが考えられる. 本研究では, 時間的, 空間的にずれがある 2 本の個人アクション 3 次元ビデオから 1 本のアクションシーン 3 次元ビデオを編集する手法を開発し, 殺陣, 格闘シーンがうまく生成できることを示した (図 12).
- **3 次元ビデオデータの符号化(Chap10 in [1])**: 通常, 3 次元ビデオは, テクスチャ情報が付加された 3 次元メッシュ時系列データとして表現される. こうしたデータを効率的かつ実用的な方法で符号化する手法として, **Skin-off** と名付けた方法を開発した. 図 13 は, その基本アイデアを示したもので, 3 次

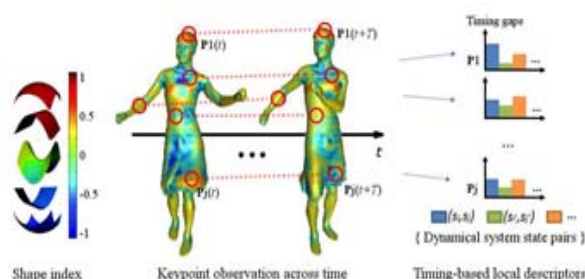


図 10 部分表面の変形ダイナミクス: 色 (図左) は, 部分表面の 3 次元形状を表し, フレーム毎に形状変化のダイナミクスを分析する.



図 11 左: 推定された 3 次元視線
右: 舞妓の目から見た 3 次元ビデオ



図 12 3 次元ビデオの時間的・空間的編集: (a)~(d) 再生時間のみを調節した場合. (e)~(h) 本手法により適切な動作タイミング・位置となるように編集した場合.

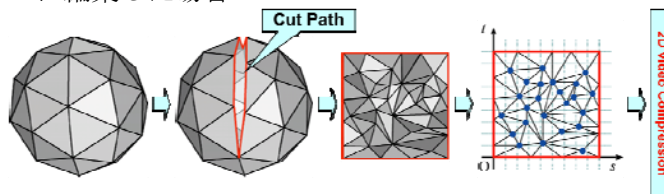


図 13 Skin-off による 3 次元ビデオの 2 次元画像への変換過程

元メッシュをある線によって切り開き, 2 次元画像平面上に貼りつける. 次に, 各画素に, 画像平面上の 3 次元メッシュ頂点から補間された 3 次元座標や色情報を記録する. この処理によって得られた 2 次元画像に, 通常のビ

デオ符号化を適用すれば圧縮，記録，伝送が容易に行える．我々は，3次元メッシュの運動，動的構造変化に関わらず安定してメッシュの切り開き線を求めるアルゴリズムを考案し，2次元画像上でのデータ変化を滑らかにすることによって，圧縮効率が向上できることを示した．

以上述べたように，3次元ビデオに関する研究は，この十数年に渡るアイデア，技術要素の考案，システム開発によって，人物の3次元形状・運動・テクスチャを5mm以下の精度で計測・復元することが可能となった．ただ，TV放送や高精細デジタル・アーカイブのためには，更なる高精度化，高精細化が必要であり，スタジオではない実世界環境での撮影などの課題も解決する必要がある．

3. アクア・ビジョン

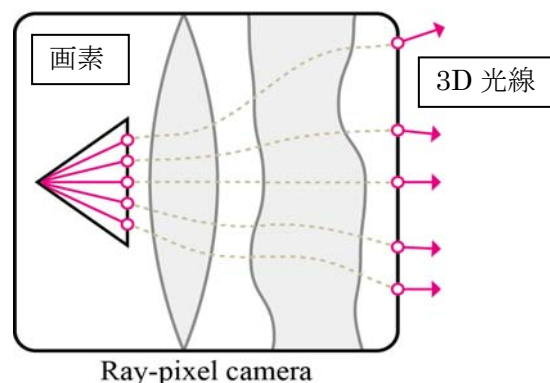
我々の研究室では，3次元ビデオ研究の総括として[1]の書籍を執筆しつつ，今後のコンピュータビジョンの学術的展開，新規応用分野の開拓に関する議論を深め，数年前から水中生物を対象としたアクア・ビジョンの研究開発に着手した．

直観的に言うと，アクア・ビジョンでは，

- ・ 従来の3次元ビデオでは扱われていなかった，光の屈折，透過，散乱現象の数理的モデル化を通じて，クラゲや細胞など水中で活動する半透明物体の3次元形状・運動復元，さらには物体内部の3次元構造の推定を行う．
- ・ 3次元ビデオでは，主な撮影対象を人間とし，舞踊やスポーツの3次元映像記録による文化，教育，娯楽分野での応用を目指していたが，アクア・ビジョンでは，医学，生物学で扱われている対象，試料の3次元形状・運動・組織分析を通じて，医療，漁業，水族館などの分野での応用を目指す．

を目的としている．

一方，情報学的観点から言うと，アクア・ビジョンでは，従来の3Dコンピュータビジョンの基礎を与える2D-3D点間の透視投影モデルや対象表面での反射モデルと言った数理モデルとは異なった情報表現，計算法の考案が不可欠となり，視覚情報処理研究に新たな理論展開を促すものと言える．



3D ray	l_1	l_2	...	...	l_n
Pixel	(i_1, j_1)	(i_2, j_2)	...	...	(i_n, j_n)

図 14 カメラ対象空間境界における複雑な屈折・反射を表現する Ray-Pixel モデル

3.1 Raxel (Ray-Pixel)モデル

従来の3Dコンピュータビジョンでは，

- ・ カメラが設置された空間と対象が活動する空間が一樣かつ連続であり，光線は両空間を結ぶ1つの直線としてモデル化される．
- ・ 3次元対象表面上の3D点で反射された光がカメラの投影中心に向かって直進し，画像平面との交点画素にその光強度，色が記録される．

という透視投影モデルを基礎としていた．

しかし，アクア・ビジョンでは，図14上段に示すように，カメラ周辺空間と対象活動空間の間には複雑な屈折・反射現象（屈折率が異なる物質境界では，屈折に加え反射が生じることもあり，さらにカメラの視野拡大のために曲面・複合鏡などを用いると複雑な反射が生じる）をもたらす境界空間が存在し，光線の直進性は成り立たない．物理実験など精密な機器，材料，空間設計が可能な場合には，光（電磁波）の伝播方程式に基づいて計算を行うことが可能であるが，実世界においては未知あるいは設定不可能な要素が多く，物理モデルをそのまま適用することは困難である．

こうした光線の直進性が成り立たない世界における視覚情報処理のための基本モデルとしてRaxelモデルが提案されている[6]．このモデルは，

- ・ 対象活動空間内では光線は直進すると仮定し
- ・ 撮影された画素と対象活動空間内の3D光線の対応付けを求める．

という Ray-Pixel 対応を情報表現，計算の基本とする（図 14 下段）もので，当初は複雑な曲面・複合鏡を用いた撮像系のモデルとして提案されたが，未知の屈折境界を介した撮像系においても利用することができる。

3.2 アクア・ビジョンにおける研究課題

アクア・ビジョンでは，Raxel モデルを基本情報表現として以下の研究を行う。

1. **Raxel モデルキャリブレーション**：精密に設計された曲面・複合鏡を用いて撮像系を構築した場合は，設計情報に基づいて，Ray-Pixel の対応付けを予め計算することが可能であるが，アクア・ビジョンでは，未知の屈折・反射境界を隔てて撮影された画像を基に，Ray-Pixel 対応表を求める手法を考案する必要がある。
2. **水中不透明物体の 3 次元形状復元**：Raxel モデルが得られた場合，各 Pixel に対応する 3D 光線の情報を得る逆投影計算は直ちに行えるが，対象を構成する 3D 点がどの Pixel に投影されるのかを計算する順投影を行うのは容易ではない。つまり，従来の 3D コンピュータビジョンでは，

$$\lambda \begin{pmatrix} i \\ j \\ 1 \end{pmatrix} = [P] \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

といった画素 (i, j) と 3D 点 (x, y, z) 間の代数変換を用いて，順投影・逆投影の計算モデルが明確に与えられていた。つまり，3 次元形状復元の基本手法であるステレオ視では画素 (i, j) の逆投影によって Epipolar 線を求め，それを他方の画像上に順投影して得られる線上を探索することによって画素 (i, j) が表す 3D 点 (x, y, z) を計算することができた。

これに対して Raxel モデルでは，3D 点が明示的に表現されておらず，3D 点 (x, y, z) を順投影し，対応する画素 (i, j) を求めるには，Ray-Pixel 対応表から (x, y, z) を通る Ray を探索する必要がある。このとき，画素の位置は離散化されており，それと対応する Ray が (x, y, z) を通過する保証はなく，何らかの近似，推定処理が必要となるうえ，反射がある場合には， (x, y, z) を通る Ray，つまり (x, y, z) を順投影した画素が複数存在する。さらに，高精度 3 次

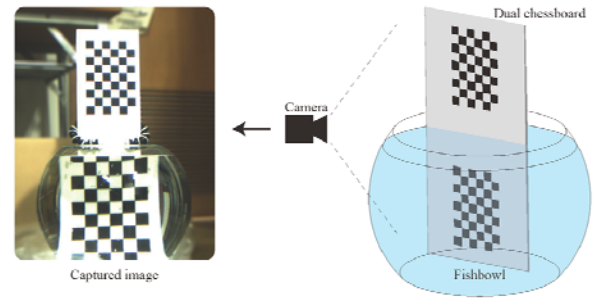


図 15 水中・空中同時キャリブレーション法

元形状復元を行うには，与えられた 3D 点 (x, y, z) を順投影した画像上の 2D 点の位置をサブピクセル精度で求めることが必要となり，より高度な順投影計算法の開発が必要となる。

3. **水中半透明物体の 3 次元形状復元**：クラゲや細胞などの半透明物体では，物体内部への光の透過，物体を構成する器官での吸収，散乱と言った Photometric な現象を表現する計算モデルが必要となる。このモデルの例としては，CT の原理を与える Radon 変換が考えられるが，それを利用するには，細いビーム状の光源で対象を照らすことが必要となり，一般的な拡散光源の下で半透明物体の 3 次元形状，体内構造を復元するための手法の開発が必要となる。

以下では，我々の研究室において，これらの研究課題の解決に向けて行った研究成果の概要を紹介する。

3.3 Raxel モデルキャリブレーション

撮影画像中の画素と未知の屈折空間で隔てられた水中空間における 3D 光線との対応付けを求めるキャリブレーション法として，以下の 3 手法を考案した。

1. **水中・空中同時キャリブレーション法[7]**：図 15 に示すように，1 枚の平面を上半分は空中，下半分は水中となるように設置し，空中部分のチェスパターンを使ってカメラ設置（空气中）空間における平面の 3 次元位置・姿勢を求める。これによって，水中部分のチェスパターンのカメラ設置空間における 3 次元位置・姿勢も同時に求められる。一方，水中部分のチェスパターンを撮影した画像から各画素に対応する平面上の位置を求める。次に平面を回転・移動させて同様の処理を行うことによって，同一画素に写された 2 平面上の 3D 点の組のカメラ設置空間における座標が得られ，それらを結ぶ直線がそ

の画素と対応する 3D 水中光線となる。

2. **交差 3 平面法[8]**: 上記の方法では, カメラが設置されている 3D 空間での平面の位置・姿勢が求められることが不可欠であり, 金魚鉢など小さな水槽の中で泳ぐ魚の 3 次元形状・運動復元は可能である[7]が, 広いプール, 海中などでは利用できない. そこで, より一般的な Ray-Pixel 対応付けを求める方法として, 互いに交差するように配置 (移動) した 3 平面を利用する手法を考案した (図 16). 各水中平面上の点と画素との対応付けは, 平面としてディスプレイを用いグレイコードなどの位置特定用のパターンを描くことによって実現できる. この操作を, ディスプレイ平面を回転・移動させて繰り返すことによって, 各画素に対応する 3 平面上の 3 点が分かる. これらの 3 点は, 1 本の水中光線上に存在することになり, 3 点の共直線性, 3 平面の交差線を制約として利用することによって各画素に対応する水中光線を計算することができる.

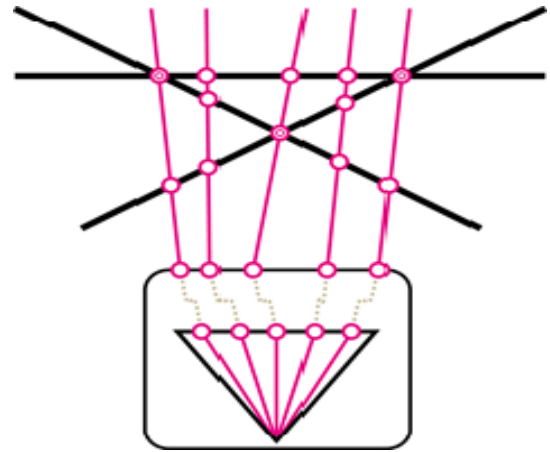


図 16 交差 3 平面法

3. **画素依存型バリフォーカルカメラモデル[9]**: 図 17 上段のように, カメラが, 厚みが既知の平面状のハウジングで水中と隔てられていると仮定する. このとき, ハウジングー水中境界面にチェスパターンを置いて, 画素ー境界面上の点の対応付けを求めれば解析的に Ray-Pixel 対応付けが計算できる[10]. 次に, 各画素に対応する水中光線がハウジングで屈折せず直進すると考え, それと光軸との交点をその画素に対する投影中心と見なす (図 17 下段). こうした画素依存型バリフォーカルカメラモデルを用いると, 3D 点 (x, y, z) に対応する画素を組織的かつサブピクセル精度で計算すること (高精度順投影計算) ができ, 従来の 3D コンピュータビジョンにおけるアクティブ・ステレオ法などによる高精度・リアルタイム 3 次元形状・運動復元が可能となる (後述).

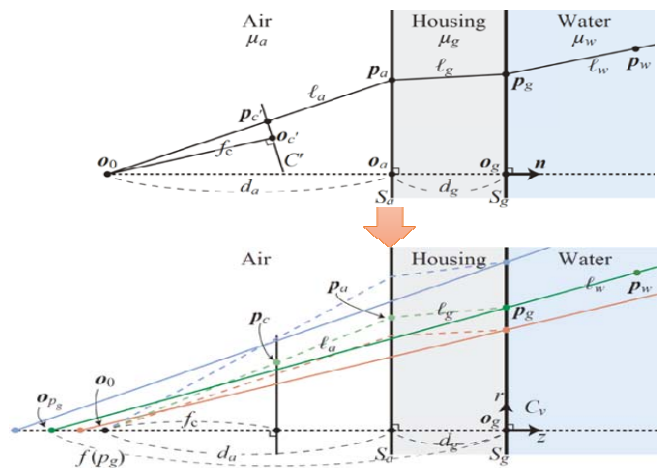


図 17 画素依存型バリフォーカルカメラモデル

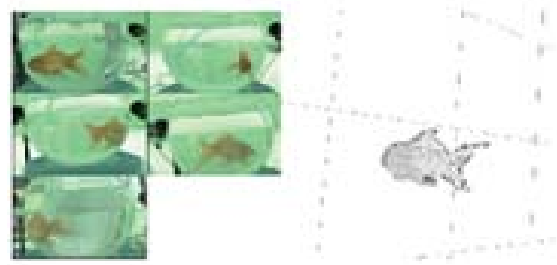
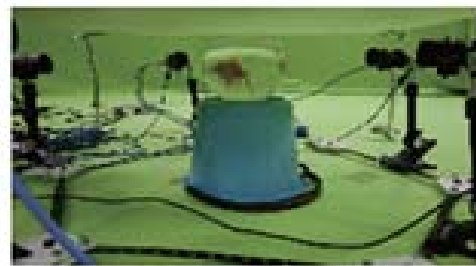


図 18 水槽中の魚の 3 次元形状・運動復元

3.4 水中不透明物体の 3 次元形状復元

前述のように純粋な Raxel モデルでは, 逆投影は可能であるが, 正確な順投影を行うことはむずかしい. その結果, 図 18 上段のように水槽を取り囲むように多数のカメラを配置し, 上記の水中・空中同時キャリブレーション法あるいは交差 3 平面法を用いて複数のカメラがキャリブレーションできたとしても, 水中不透明対象の 3 次元形状復元のためには,

視体積交差法のような逆投影計算のみを用いる方法しか用いることができず、高精度な3次元形状復元を実現するのは困難である(図18下段右)。

一方、画素依存型バリフォーカルカメラモデルは、図18の金魚鉢のように空中ー水中の境界屈折面が複雑な場合では利用できないが、図19のように水槽壁面が多面体の場合は、カメラ+プロジェクタを用いたアクティブ・ステレオ法による正確な(順・逆投影を利用した)3次元形状復元がリアルタイムに行える[11]。

3.5 水中半透明物体の3次元形状復元

クラゲや細胞のような半透明物体の3次元形状復元では、外形だけでなく対象内部での光の透過・吸収、散乱特性の3D分布も計算することが必要となる。我々の研究室では図20に示すように、カメラ一拡散光源を対向配置した組を複数水槽の周囲に配置し、水槽内の半透明物体(図21上段)の3次元形状復元、内部構造推定を行った。撮影は、1つの光源のみで対象を照らし、対向カメラで透過光、他のカメラで散乱光を観測するという撮影を、光源ーカメラの組を順に変化させながら行い、多視点透過光・散乱光画像を求める。次に、水中ボクセルを要素とした有限要素法によって、各ボクセルの透過率を計算する。図21下段は、この方法によって復元された水中ポリマー物体(図21上段)の形状、透過率分布を示したもので、対象内部の空隙部分がうまく復元できている[12]。

4. おわりに

20世紀後半における情報通信技術・システムの目覚ましい発展と社会への浸透により情報社会が実現された今、従来の研究開発路線の継承、性能向上を粛々とするのではなく、21世紀にふさわしい新たな研究領域の開拓と斬新なアイデアの創出が望まれている。

こうした観点から、本講演では、この十数年における我々の研究成果である3次元ビデオおよび今後の新たな研究領域として数年前から研究を開始したアクア・ビジョンに関する最新の研究成果の概要を紹介した。アクア・ビジョンあるいは Underwater Vision については、徐々にではあるが国内外での研究活動が広がりつつあり、本講演を機会に多くの方々が互いに切磋琢磨して新理論、技術、応用システムの研究開発に取り組んで頂くようになれば幸い

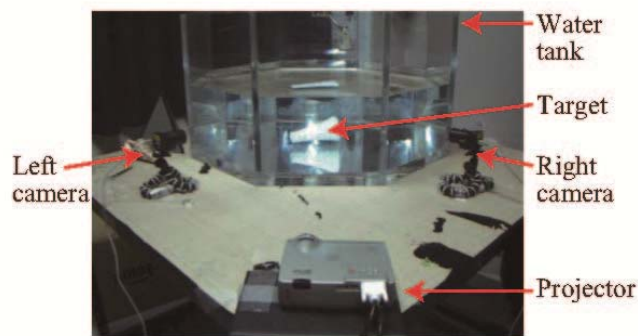


図19 水中物体のリアルタイム3次元形状・運動復元のための多視点アクティブステレオシステム

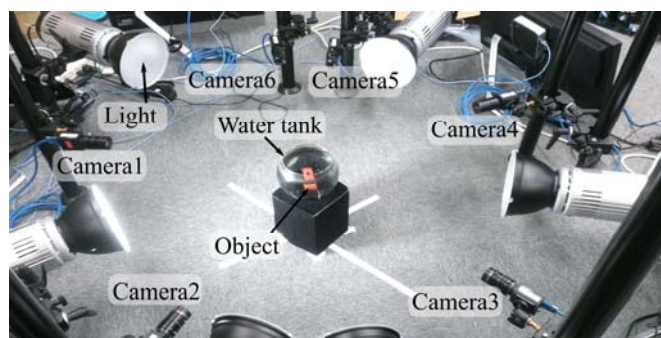


図20 水中半透明物体の3次元形状、内部構造復元システム

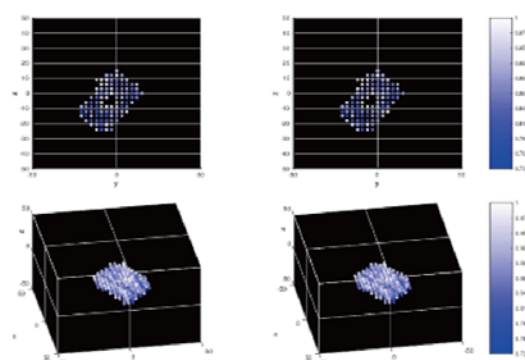


図21 上：中空部分を持つ半透明ポリマー物体
下：復元された物体の透明度分布

である。

なお、今回の講演では紹介できなかったが、我々の研究室では、

- ・ 視覚・聴覚・触覚・味覚・嗅覚といった5感と「直交する」第6感として、人間の持つ「間合い、タイミングの感覚」、すなわちインタラクション・ダイナミクスモデル化、分析を中心とした、ヒューマンコミュニケーション研究 [13][14]
- ・ 太陽光発電、燃料電池、蓄電池といった小規模分散型発電・蓄電装置が普及しつつある現在、従来は単に電力を消費するだけの需要家であった市民が、プロシューマ（コンシューマ＋プロデューサ）として自律的にエネルギーマネジメントを行うことを目指した「エネルギーの情報化」 [15][16]

に関する研究開発も行っており、ご興味をお持ちの方は文献を参照して頂きたい。

参考文献

- [1] T. Matsuyama, S. Nobuhara, T. Takai, and T. Tung: 3D Video and Its Applications, Springer (2012)
- [2] S. Nobuhara, W. Ning, and T. Matsuyama: A Real-time View Dependent Shape Optimization for High Quality Free-Viewpoint Rendering of 3D Video, International Conference on 3D Vision (3DV2014) (2014)
- [3] Tomoyuki Mukasa, Shohei Nobuhara, Tony Tung and Takashi Matsuyama: Tree-structured Mesoscopic Surface Characterization for Kinematic Structure Estimation from 3D Video, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol. 6, pp. 12-24 (2014)
- [4] T. Tung and T. Matsuyama: Timing-Based Local Descriptor for Dynamic Surfaces, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'14) (2014)
- [5] Q. Shi, S. Nobuhara, and T. Matsuyama: Augmented Motion History Volume for Spatiotemporal Editing of 3-D Video in Multiparty Interaction Scenes, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol.25, no.1, pp.63-76 (2015)
- [6] Grossberg and Nayar: The Raxel Imaging Model and Ray-Based Calibration, IJCV, vol. 61, no. 2, pp. 119-137 (2005)
- [7] T. Yano, S. Nobuhara, T. Matsuyama: 3D Shape from Silhouettes in Water for Online Novel-View Synthesis, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol. 5, pp. 65-69 (2013)
- [8] M. Nishimura: A Linear Ray-Pixel Camera Calibration from Three Intersecting Reference Planes, 京都大学大学院情報学研究科修士論文 (2015)
- [9] R. Kawahara, S. Nobuhara, and T. Matsuyama: A Pixel-wise Varifocal Camera Model for Efficient Forward Projection and Linear Extrinsic Calibration of Underwater Cameras with Flat Housings, ICCV 2013 Workshop on Underwater Vision, pp. 819-824 (2013)
- [10] A. Agrawal, S. Ramalingam, Y. Taguchi and V. Chari: A theory of multi-layer flat refractive geometry, CVPR, pp.3346-3353 (2012).
- [11] R. Kawahara: Pixel-wise Varifocal Camera Model for Underwater Active Stereo, 京都大学大学院情報学研究科修士論文 (2015)
- [12] 矢野智彦: 多視点画像を用いた半透明水中物体の3次元形状・透過率分布推定, 京都大学大学院情報学研究科修士論文 (2015)
- [13] 松山隆司, 川嶋宏彰, 平山高嗣: 時間と時間感覚に対する感性の情報処理ー豊かなヒューマンコミュニケーションの実現を目指してー, 電子情報通信学会誌, Vol.92, No.11, pp.952-954 (2009)
- [14] 川嶋宏彰, 松山隆司: ハイブリッドダイナミカルシステムによる動的現象のモデル化と認識, システム/制御/情報, Vol.54, No.1, pp.28-33, 2010
- [15] 松山隆司: エネルギーの情報化とはー背景, 目的, 基本アイデア, 実現手法ー, 情報処理学会誌, vol.51 No.8, pp.926-933 (2010)
- [16] T. Matsuyama: i-Energy: Smart Demand-Side Energy Management, Chapter 7, Smart Grid Applications and Developments, Springer (2014)