

## 第4章バーチャル世界の構成手法

### 4.1 総論

#### 4.1.1 バーチャルリアリティのためのモデリング

- バーチャルリアリティは体験を目的とするため、体験者の感覚特性と体験内容を考慮して必要な情報をモデリングする。

#### 表)ウォークスルーシステムの提示物体が持つ情報例

情報	記述形式例
物体の位置・向き	3次元ベクトルと3次元回転行列
物体の速度・角速度	3次元ベクトル
物体形状	ポリゴンモデル
物体の色	拡散反射率、鏡面反射率、(各3次元ベクトル)
車や人の行動	スクリプト、プログラム

#### 4.1.2 レンダリング、シミュレーションとモデル

- モデリングしたバーチャル世界の情報をディスプレイ・インタフェースの駆動に適した形式に変換して体験者の感覚に提示する必要がある。この変換処理をレンダリングと呼ぶ。
- バーチャルリアリティのためのモデリングは、人間の感覚特性に合わせたモデリングとバーチャル世界の用途に合わせたモデリングという二つの側面から捉えることができる。これは体験者にバーチャル世界を提示するレンダリングと、バーチャル世界に時間経過をもたらし、体験者の行動をバーチャル世界へ反映させるシミュレーションの二つの処理に対応する。

#### 4.1.3 処理量とデータ量のトレードオフ

- 物体の様々な視点からの静止画をモデル、視点に対応する静止画出力をレンダリング
  - レンダリングは簡単、モデルのデータ量は多い。
  - メモリが不足すると記録可能な画像数の不足から視点が減りユーザーの行動（視点の移動）が制限される。
- 物体の3次元形状と色をモデル、視点に対応する静止画を3時点CGでレンダリング
  - レンダリングは計算量が多く、モデルのデータ量は少ない。
  - 処理能力が不足すると品質劣化や視点更新が遅れる。

## 4.2 レンダリング

### 4.2.1 レンダリングのためのモデル

- レンダリングとはモデルを提示情報に変換する処理のことである

## 4.2.2 視覚レンダリングとモデル

- 視覚レンダリングは、**投影**、**陰面消去**および**輝度計算**なる三つの処理からなる。
- 投影処理
  - 3次元空間で定義された図形を**2次元スクリーン**上の図形へ変換する処理
  - **透視投影**では、視点から遠い物体ほど小さく表示され、実際の見え方と一致した結果を得る。
- 陰面消去
  - 陰面消去処理は視点から**見えない面を除去**する。
  - **Zバッファ**が標準的。
  - Zバッファ法は**ハードウェア**化が容易であり、高速な処理が可能。
  - 透視投影で得られるZ値をバッファ→Zバッファを∞に相当する非常に大きな値で初期化=>各ポリゴンを描画する際、各画素のZ値を計算し、その値がZバッファに記憶されている値より**小さければ**、描画処理を行う。そして、描画と同時に、Zバッファの値を計算したZ値で置き換える。
- 輝度計算
  - 物体表面の材質や面の向きによって変化する輝度を計算する処理である「**シェーディング計算**」
    - **環境光成分**は計算点の周囲の物体の反射光などを表し、厳密に求めるためには高度かつ高コストな計算が必要
    - **拡散反射光成分**は、物体表面の**反射率**が視点や光源の入射方向によらず**一定**と仮定した場合の反射光の**強度**
    - **鏡面反射光成分**は、**金属**表面のように、視点や光源の位置によって輝度が増減する指向性のある反射
  - シャドウイング計算はある物体が他の物体に落とす影を計算する処理である「**シェーディング計算**」
    - 点光源や**平行光源**のような単純な光源なら**Zバッファ**法を利用した高速計算が可能

## 4.2.3 聴覚レンダリングとモデル

- **音場再現**モデル：音場全体を実際の音場として再現し、その中にいる聴取者に自然に3次元音空間を知覚させようとするモデル。精度に差はあるが、**立体分割法**や**音場直接合成法**がこのモデルに基づく方法である。
- **両耳伝達関数**モデル：両耳に入力される音信号を正確に定めれば精密な3次元音空間知覚が可能となるという立場から、音源から耳までの音響伝搬特性を伝達関数として表現し、聴取される二つの信号を耳元に再現・合成するモデル。**音像定位伝達関数合成法**が依拠しているモデル
- 音源から聴取点までの直接音をレンダリングする際に、すべての距離についてあらかじめ用意するのは現実的ではない。そのため、距離に応じた**減衰**と**遅延**を加える必要がある。また、高周波数では伝搬の際の**空気吸収**が無視できなくなる。
- 反射波
  - 直接音の後に到来する初期の反射波は時間的に密度が低く、方向も**知覚されやすい**。音波の伝搬を**光線**になぞらえ境界面での反射を**鏡面**反射として取り扱う**幾何音響理論**に基づいて反射波

を計算する方法は...

- **音線法**：音源から放射された**音線**を追跡し、**聴取者近傍**のある領域をある時間範囲内に通過する音線を計算する方法。
      - 反射音の回数によらず**計算量**が一定。
      - **ある時刻、ある点**における反射音を陽に求めることができない。
    - **虚像法**：鏡（反射面）の向こうの位置に**虚像**を仮定し、そこからの直線伝搬をあらかじめ反射の**回数**を決めて計算する方法。
      - 反射の**回数**に対して**指数関数的に計算量**が増加する。
  - 幾何音響理論では音の**波動性**は考慮していないため、主に**低周波数**の精度は低い。
- 後部残響音
  - 室内における音波は、反射や拡散を繰り返し時間の経過に伴い反射波の**密度が上昇**するため、聴取者に到来する波面は徐々に**方向性**が弱まっていく。
    - 初期反射と後部残響音は、聴覚上違和感がないように接続する必要がある。
- 回折
  - 解析解を使って**伝達関数**を求め、物体の**端線**ごとに信号処理を行うのが一般的である。
  - 回折は主に**低周波数**で起こる現象であり、**低域通過型**の現象。

#### 4.2.4 カ触覚レンダリングとモデル

- 典型的なカ触覚レンダリングでは、動特性など必要な情報がモデリングされた物体とのインタラクションにおいて以下が周期的に実行される。
  - 指先や手先など接触点（以下、**カ覚ポイント**）の位置と**方向**の検出
  - **カ覚ポイント**とバーチャル物体との**接触検出**
  - **反力**計算および物体変形
  - **カおよびトルク**の提示
- 安定してカ触覚提示ができるカ計算周期は**1kHz**以上必要。
  - テクスチャ判別には**5-10 kHz**。
- 干渉計算とモデル
  - 侵入距離に応じて押し戻す力を操作者に返す、**位置入力力出力のインピーダンス**提示型
    - 安価
  - 操作者が加える力に応じて位置を動かす、**力入力位置出力のアドミタンス**提示型
    - 広範囲で大きな力
  - 指先と物体形状との干渉計算では、与えられたカ覚ポイントから物体に侵入しないという拘束条件を満たしながら手に近い場所に移動し続ける物体表面上の**ポイント**(God-objectやproxy pointとも呼ばれる)を定義し、両者から侵入距離を算出する。
- 表面情報のレンダリング
  - 表面情報は凹凸などの**表面形状**、表面の**摩擦・粘性**特性の組み合わせで表現。
    - **クーロン摩擦**をシミュレートすることで、侵入距離に応じて操作者に返る力を基に、なぞり方向と反対方向に働く摩擦力を作ることができる。

- **静止摩擦と動摩擦**をシミュレートすることでスティックスリップ現象を感じさせることも可能。

## 4.3 シミュレーション

### 4.3.1 シミュレーションのためのモデル

#### 表) 剛体がもつ情報

情報	記述形式例
剛体の位置・向き	3次元ベクトルと3次元回転行列
物体の速度・角速度	3次元ベクトル
物体形状	ポリゴンモデルや球や円筒などの組み合わせ

### 4.3.2 空間のシミュレーション

- 座標・移動モデル
  - 姿勢は**ロール、ピッチ、ヨーのオイラー角**で表現。
  - カメラの姿勢の実装には**クォータニオン**と呼ばれるテクニックが用いられることが多い。
- リアルタイム性の維持のために
  - **Level of Detail (LOD)** : 視点からの距離に応じてモデルの精細さを切り替えていく方法
  - scenegraph : 3次元の空間を構成する各種オブジェクトを**階層的なツリー構造**などで表現した**データセット**。

### 4.3.3 物体/剛体/変形/流体のシミュレーション

- 物体の運動 : 物体に働く力とその作用点がわかれば、剛体の**運動方程式**を**差分**化した運動量、角運動量の更新式を計算することで物体の位置、姿勢、速度を更新できる。
- 重力、バネによる力、**動摩擦力**など、場の力や物体の位置・速度によって決まる力は簡単な計算で求まる。
- **抗力**や**静止摩擦力**など複数物体の位置関係を部分的に**拘束する力 (拘束力)**は、その値ではなく、**拘束の条件を満たすような力**として与えられ、簡単には求まらない。
- ペナルティ法 : 拘束力を直接計算せずに拘束条件を**違反すると違反の量 (ペナルティ)**に応じた力を求め、これを拘束力の代わりに物体に加える方法
  - 物体間に働く**抗力**を求めるためには、2物体の接触点の間に**バネダンパモデル**を考え、**バネダンパモデル**が発生する力を**抗力**として加える。
  - **拘束力**は**バネダンパモデル**の状態からすぐに求まるため計算量はと少ない。
  - **運動方程式**と無関係に拘束力が求まるため、力覚ポイントのような質量や慣性モーメントなどの**動力学特性**が不明なものと物体モデルの間に働く拘束力も計算できる。
  - 条件違反が解消する (と思われる) 力であり、**ペナルティ量**や**ペナルティ力**が収束する保証はない。

- バネダンパモデルが収束するようなモデルのパラメータ（バネ係数、ダンパ係数）の範囲は、シミュレーションの更新周期に反比例して狭くなる。
  - 硬いバネダンパモデルを用いて大きなペナルティ力を加えれば、拘束違反量を小さく抑えることができるが、収束させるために更新周期を十分小さくしなければならなくなる。結果として計算量が多くなる。
- 解析法
  - 拘束力の条件を式で表し、運動方程式と連立させて、条件を満たすような拘束力を求める方法
  - 運動方程式と条件式を連立させるため、拘束力に関与している剛体が増えるとそれにつれて、連立させる式の数が増えていく。また、抗力のように条件式が不等式になるものや、摩擦力のように他の拘束力に条件式が依存するものもあるため、計算はあまり簡単ではない。
  - 多くのシミュレータは繰り返し計算による近似解法を用いて拘束力を解いている。
  - 更新周期によらず、拘束条件を満たす拘束力が計算できるので、更新周期を大きく取り、一定時間のシミュレーションに必要な計算回数を少なく抑えることができる
- 球や直方体のような接触検出処理が容易な簡単な形状(bounding volume)。
- 領域を区切って関係ない物体を除外 -> bounding volume同士の検出 => 物体形状同士の検出。
- 変形
  - 外力により物体表面や内部に移動、つまり変位(displacement)が生じる状態をいう。一般に、変位が微小であれば、物体は弾性変形を示す。弾性(elasticity)とは、作用する外力を取り去ると元に戻る性質をいう。
    - ひずみが微小であれば、応力とひずみには線形の関係がある。
- 変形モデル
  - バネ質点モデル
    - 物体を質点と質点間を結ぶバネで表現し、バネに生じる弾性力から各質点の運動を解いて物体変形を表現
  - 有限要素モデル
    - 物体を3角形要素などの集合として表現し、各要素に成り立つ支配方程式の重ね合わせにより得られる連立方程式を解いて、弾性論(theory of elasticity)に基づいた物体変形を表現
      - 弾性論におけるパラメータ（弾性率、ポアソン比）に基づく高精度の変形を可能とする一方、実装が複雑であり計算量が多い。
- 変形シミュレーション
  - 各要素の位置や弾性パラメータを事前に設定する必要がある。たとえば、バネ質点モデルでは、各質点の位置や質量、各バネの弾性係数、質点とバネの接続関係などを設定する必要がある。
  - 弾性パラメータの計測法には、引張試験、超音波エラストグラフィ、MRE(Magnetic Resonance Elastography)などがあり、侵襲性や空間分解能などが異なる。
- 流体のシミュレーション
  - 非圧縮性流体を仮定し、非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を用いることが多い。

- 。非圧縮性流体の場合、微小体積に流入する流体の量と流出する量が等しくならなければならない。
- 速度ベクトルおよび圧力を未知変数として、その時間変化を計算することで流体の動きを求めることができる。

#### 4.3.4 人物のシミュレーション

- 計算量も現実的で、人物の大まかな運動を表現できることから、通常は関節で接続された複数の剛体からなる剛体リンク系(articulated rigid bodies)が使われる。
  - 肘、膝などは通常1自由度。他が3自由度。
  - 大幅に簡略化していることに注意
    - 肩関節は正確に同じ点の回りで回転するわけではなく、回転とともに回転中心が移動する。また、実際の膝関節ではほぼ円形の断面を持つ二つの骨が転がり接触をしながら回転するので、やはり回転中心は移動する。
- 逆運動学とはあるリンクの絶対空間中の位置・姿勢を与えられた値にする関節角を計算する問題
  - 物を掴む動作など手・足の軌道により記述できる運動の生成、光学式モーションキャプチャにおけるマーカ位置データから関節角データへの変換などに用いる。
  - 解析的手法：リンクの位置を関節角の関数として表し、その逆関数を求めることでその機構に対する一般的な逆運動学計算式を得る方法。
    - 腕や脚のように2個の球面関節の間に1個の回転関節を持つ機構では比較的容易に導出できるが逆関数を求めるのは困難。
  - 数値的手法：リンク位置の関節角に関するヤコビ行列を使い、位置誤差の2乗を評価関数とする最適化問題を最急勾配法を用いて解くか、ニュートン法を用いて関節角を未知数とする方程式の解を求める方法。
    - 汎用性が高く複雑な問題にも応用できる。
  - 解が無数に存在する場合があることが特徴。
    - 人間の腕では手の位置・姿勢を変えることなく肘の位置を円弧上の任意の点に変更できる。
- 運動生成
  - 力学シミュレーション
    - 関節制御：各関節で、関節角・速度の誤差を用いて関節トルクを計算。
    - 最もよく使われるのがPID (Proportional-Integral-Derivative) 制御
    - バランス制御：さまざまな方法があるが、重心位置のフィードバックを用いるのが簡単。
    - 外力に対する反応などの運動を生成できるため、ダイナミックな環境での運動生成に適している。
    - 人間らしい運動を生成するのは難しい。
    - 転倒など望ましくない運動が生成される可能性がある
  - モーションキャプチャ
    - 転倒などの問題がないという利点がある
    - 動作のはじめと終わりに基準姿勢を取るクリップを複数用意し、状況に応じて再生する方法=>一般化した方法としてモーショングラフ。
      - かけ離れたポーズは生成できない。