

## 第3章バーチャルリアリティインタフェース

### 3.1 バーチャルリアリティインタフェースの体系

表) VRインタフェースの基本構造

	ハードウェア	ソフトウェア
入力IF	センサ	認識エンジン
出力IF	ディスプレイ	ディスプレイドライバ

### 3.2 入力インタフェース

#### 3.2.1 物理的特性の計測

- 角度を計測するモーションキャプチャは、一般的に機械式モーションキャプチャと呼ばれている。
- ゴニオメータ(goniometer)を用いるシステムでは、人体に対して外骨格のようなフレームを取り付け、そのフレームの関節部分の角度をゴニオメータによって計測することで、人間の動作を写し取る
  - 容易：センサー位置を固定できるので初期設定
  - 難しい：自然な姿勢や激しい動きの計測が制約される
  - ゴニオメータはロータリエンコーダを利用しているため、角度を高速に安定して読み取ることができ、フレームの関節角度と人体の関節角度が正確には一致しないため、相互の対応関係を求める工夫が必要となる。解決方法は人間の関節構造とセンサの位置関係をモデル化した人体モデル。
- 角度を計測するデバイスとして、回転物体がその状態を維持しようとする性質を利用したジャイロスコープ(gyroscope)を用いる場合には、センサ単体で傾き角度を得ることができるため、人体に取り付けるフレームが不要となる。
  - ジャイロスコープでは、得られた角速度を積分することで角度を求めているため誤差が蓄積しやすい。
  - 静止状態での変動量によるドリフト誤差もある。
- 物体の運動状態を計測する加速度センサ(accelerometer)を用いたシステムでは、得られた加速度を積分することで速度や移動距離を求め、姿勢情報を獲得している。
  - 板バネによって加速度計測、加速度による光ファイバの張力変化を通過する光の波長変化を計測、微少な可動部でのわずかな位置変化を静電容量変化として計測など方法は様々。
  - 小型化が進み、近年ではMEMS技術によって半導体として提供され、センサ自体では数kHz-数十kHzといった高速な計測に対応するものも存在する。
    - ただし、計測誤差が積分処理によって蓄積する。
- 超音波センサ：超音波が計測対象にぶつかって反射して戻ってくるまでの時間や、発信されてから受信装置に到達するまでの時間から、発信源と受信装置との間の距離を計測する。

- これに基づき、位置が既知の発信源または受信装置を複数配置し、**三つ**以上のセンサから得られた距離条件を満たす3次元空間上の位置を求めることで、計測対象の位置情報を得ることができる。得られた位置情報を**人体モデル**に入力することで、各関節の角度へと変換される。
- 磁気式モーションキャプチャと呼ばれるシステムでは、計測したい領域にX軸・Y軸・Z軸それぞれの方角に対応した**交流磁場**を展開する。その計測領域内においてセンサ部となる小型コイルを移動させると、張り巡らされた磁場の磁束変化によって**誘導起電力**が発生する。
  - 計測精度は高く、位置計測誤差が**数mm以下**、角度計測誤差が**1°**以下といったシステムが多く見られる。
  - 応答速度も比較的高く、システム全体として**120Hz**程度の計測が可能である。
  - 磁場を発生させて利用するため、周囲の**金属**からの影響を避けられない。
- カメラ画像から画像処理技術を用いて位置情報を獲得する**光学式**モーションキャプチャも実現されている。
  - マーカーあり
    - デメリットと解決方法：**姿勢によってはマーカが隠れてしまう場合が避けられない。カメラを取り囲むように増やして対処。**
    - **2台以上**のカメラによってマーカを観測する
    - **三角測量**の原理からマーカまでの距離が算出
    - カメラに取り付けられた赤外線照明光を**再帰性反射**素材によって反射する**パッシブ型**
    - 赤外線LEDなどを内蔵することによって自ら発光する**アクティブ型**
      - 計測速度は**100Hz程度と高速**なものも多い。
    - 計測誤差は**数mm**程度であるが、高解像度カメラを用いることで**1mm**以下の誤差を実現するものも存在する。
  - マーカーなし
    - 画像処理によって得られる**特徴量**や、複数カメラから得られた画像を使った**視体積交差法**によって得られる3次元形状情報を利用して、モデル化された人体と実際の人間のマッチングを取る。

表)モーションキャプチャシステムの特徴比較

計測対象	角度	角度	運動	位置	位置	位置	位置	位置
計測デバイス	ゴニオメータ	ジャイロスコープ	加速度センサ	超音波センサ	磁気センサ	カメラ・マーカ ー (パッシブ)	カメラ・マーカ ー (アクティブ)	カメラのみ
初期調整					△	△		△
安定性		△	△					
計測領域	○	○	○	△	○	△	△	△

計測対象	角度	角度	運動	位置	位置	位置	位置	位置
動作								
制約	△					○		◎

- 物理計測の対象として、姿勢と同様に重要なのが顔である。物理計測ができない心理的な変化が現れる部位であり、コミュニケーションにおいて重要な感性情報を多く含んでいることが知られている。
- 眼球の姿勢である視線方向に関しては、表情という感性情報だけではなく、人間の注目点を得たり、インタフェースとして利用したりする目的でも計測対象となる。
  - 角膜（黒目）と強膜（白目）の反射率の違いを利用した強膜反射法
  - 角膜の曲率中心と眼球の回転中心が異なることを利用した角膜反射法
  - コイルを埋め込んだコンタクトレンズの位置を計測するサーチコイル法
  - 角膜と眼球部の電位差を計測するEOG法
  - 高速度カメラを用いることで、サッカーなどの眼球特有の高速な動きの計測に対応するシステムも近年利用されている

### 3.2.2 生理的特性の計測

- 代表的なものは心電図(ECG:Electrocardiogram)、精神性発汗（皮膚電流反射GSR: Galvanic Skin Reflex：皮膚電気活動(EDA: Electrodermal Activity)）など
  - 心電図のR波の感覚を調べることで心拍数を計算できる。
- 筋肉の電気的な活動を計測したものが筋電図(EMG：Electromyogram)
  - 表面筋電図は、2個の電極により計測した信号を差動増幅することで得られる
- 唾液のアミラーゼの活性がストレスに応じて増加することから唾液アミラーゼ活性を調べることでストレスの強度を推定
- MEG
  - 神経の電気的な活動によって生じる磁場を計測する
  - 超伝導量子干渉計(SQUID)を用いて磁場を計測するが、背景磁場の影響を受けるため、シールドされた部屋で計測を行う必要がある
    - 空間分解能は数cm程度
    - 時間分解能は数十ms単位
- fMRI
  - 脳活動に伴い血流量が増加し、酸素を消費することから、血液中の酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの濃度が変化し、磁気共鳴信号が変化する。この変化を捉えることで、脳のどの部位が活動しているかを推定する。
    - 血流量の増加に伴って脳の局所の酸素濃度が変化する信号をBlood Oxygenation Level Dependent Contrast：BOLD 信号
    - 空間分解能は数mm程度
    - 時間分解能は数十～数百ms単位

- NIRS
  - 脳活動に伴う血流量（酸化ヘモグロビンと脱酸化ヘモグロビンの濃度）の変化を近赤外光の波長に対する吸収率の違いを用いて計測するもの
  - fMRIと異なり、深部の脳活動の計測はできない
  - 被験者の姿勢の自由度が比較的高い
    - 空間分解能は数cm程度
    - 時間分解能は数十ms単位
- PET
  - 体内に放射性同位元素でラベル付けされたトレーサと呼ばれる物質を投与し、脳内の神経活動の増加に伴い変化する代謝量や血流量をトレーサを用いて計測
    - 空間分解能は数cm程度
    - 時間分解能は数秒単位
- EGG
  - 脳の神経活動である電気信号を計測する
  - 頭蓋骨などを通して神経活動を計測しているため空間分解能が低い
  - ノイズの影響を強く受ける
  - 瞬きをするだけで眼筋の筋電図が混入

#### 表)非侵略脳計測

-	PET	fMRI	NIRS	MEG	EGG
空間分解能	△	○	△	△	×
時間分解能	×	△	△	◎	◎
携帯性能	×	×	○	△	◎
安全性	×	○	◎	◎	◎

### 3.2.3 心理的特性の計測

- VRにおいては心理状態の計測手法は、意思をシステムに伝える入カインタフェースとして用いられ、この技術をBMI(Brain-Machine Interface)呼ぶ。
- 侵襲計測では、解剖学的、あるいは神経科学の知見により、どの部位がどのような行動、感覚に関係しているかがわかっているため、その部位の神経活動を計測。
  - 運動は運動出力部位の最終部位である一次運動野の活動から運動の方向、筋肉の活動を推定。
  - 何を見ているのかは視覚野。線分の向きや画像を見ているときの脳活動との関係を学習して推定。
- 脳波を使ったBMIでは、アルファ波(8-13 Hz)と同じ周波数帯域で運動に関連した信号が検出できるミュー/μ波を用いて、カーソルを動かす方法が提案されている。
- 感覚刺激に応答して300ms程度の時間潜時の後に見られる神経活動

- P300スペラーは、画面上の文字がランダムに点滅し、目的の文字が点灯した回数を数えるなど注意を向けると、P300の信号が計測でき、対応する文字を入力できる。
  - 1回の試行だけでは無理。数回から数十回加算して判断。

## 3.3 出カインタフェース

### 3.3.1 視覚ディスプレイ

- 視覚ディスプレイは、バーチャル空間の奥行きとその広がり、個々の物体の色や形、材質感を映像として。
- 奥行き知覚のための手がかりである立体視は、両眼視差（左右の目での見えの違い）、運動視差（頭部の運動に伴う見えの変化）、輻輳作用（眼球の向き）、調節作用（ピント調節）によって行われている。
- 左右の目に別々の映像を提示する方法
  - 一つのスクリーンを用いて時分割でスクリーンに映し出す左右の映像を交互に切り替えると同時に、切り替えに同期した液晶シャッターメガネによって左右の目に入る映像を分離する方式
  - あらかじめ直交した偏光をかけた視差映像をシルバースクリーンあるいは偏光フィルタ付きディスプレイに投影し、偏光メガネで左右の映像を分離する方式
  - スクリーンあるいはモニタの前に設置したパララックスバリアと呼ばれるスリットによって左右それぞれの目から見えるスクリーンの領域を分離する方法
- HMD
  - よく知られた光学式の他に...ピンホールによる絞り付プロジェクタを眼球と共役な位置にハーフミラーとともに配置し、再帰性反射機能を持たせたスクリーンに映像を投影することで、それぞれの目に対応する映像を提示する方式もある。
    - 特殊な光学系が不要
    - 映像同士のクロストークが発生しない
    - 手の形の画像認識など行わなくても画像とその手前の物体との遮蔽関係を自然に見せることが可能
- 3次元空間に表示する方法
  - VR物体を点の集合体として表現する体積走査型ディスプレイ
  - LEDアレイを高速で走査する方式
  - 高速回転するスクリーンにプロジェクタで映像を投影する方式
  - レーザ光で特定の場所の空気中の酸素や窒素をプラズマ発光させる方式など
- 大型スクリーンを用いた視覚ディスプレイを没入ディスプレイ
  - 2眼式の立体視方式により立体視は可能である。
  - 複数人もOK。厳密に正しいのは1カ所だけ。
  - 多面体スクリーン（たとえば、CAVE、CABIN）では、映像をレンダリングする際の視点と、実際のユーザの視点が一致していないと、スクリーンとスクリーンの継ぎ目で直線が不連続に折れ曲がって見えるため、違和感につながりやすい。
  - 曲面スクリーンでは、映像をレンダリングする際に、OpenGLなどの平面スクリーン用のライブラリによるレンダリング出力をそのまま出力すると、映像がひずんで見える。

- **テクスチャマッピング**によって正しい映像に見えるようにひずみ補正

### 3.3.2 聴覚ディスプレイ

- **音像定位伝達関数合成法（以下：両耳型）**は、両耳の位置でのみ正しく音が聞こえることを目的とした方式
  - 音源から両耳までの**すべての物理現象**を伝達関数としてとらえ、両耳それぞれの位置に届く音を提示。
  - 通常のヘッドホンによる両耳型提示を**バイノーラル再生**
  - 室内に置いた複数のスピーカにより目的の音を合成する**トランスオーラル再生**。
    - **クロストーク**をキャンセルする必要あり。
    - 聴取位置や音源位置までの室内の反射や**回折**などを反映した**室伝達関数**
    - 頭部**近傍**の音現象を表現した**頭部伝達関数（Head-Related Transfer Function：HRTF）**
      - 個人毎
      - 聴取者の頭部運動を位置センサによって計測し、音場における耳の位置と音源との**相対位置関係**に基づいて伝達関数を切り替えることで、**前後誤り**や**頭内定位**が大幅に改善
        - 時間的・空間的補間が必要
- **音場直接合成法**
  - ある境界内のすべての場所で正しく音が聞こえる3次元音空間を作ることを目的
  - ある音場における音源を含まない任意の領域を囲む閉曲面境界上の音圧と空気の粒子速度を一致させることで同一の音場を再現できるという**キルヒホッフの積分公式(Kirchhoff-Helmholz積分方程式)**に基づいて、スピーカを境界面上に並べることで実現する（**波面合成法**）
    - これでは無数のスピーカが必要となるため、**境界音場制御法**という、有限個のスピーカを境界の外側に配置して境界面上で上記条件を満たすように振動させる方式も。
  - **高周波数**まで理論的に厳密な合成を行うには、密に境界を制御する必要があり、非現実的なスピーカ数となる。厳密性と実現性の間のトレードオフを鑑みてスピーカ数を決定。

### 3.3.3 前庭感覚ディスプレイ

- アクチュエータの使い方を工夫して**加速度を持続的**にユーザに提示し、同時にそれに伴う移動を何らかの機構で打ち消す仕組みが必要。
- **モーションプラットフォーム**：ユーザを動かすためシートをアクチュエータで並進、あるいは回転させる機構を持つ
  - **加速度**提示による前庭感覚だけでなく、体がシートに押しつけられて発生する**体性感覚**も発生
  - アクチュエータの可動範囲が有限なため、加速度を過渡的な成分と定常的な成分に分け、過渡的な部分を**アクチュエータ**によって提示し、定常的な成分は**ユーザの体を傾けて**、重力の分力成分を利用して**合成加速度**として提示。
- アクチュエータの動作限界を超えないような減速動作を**ウォッシュアウト**。
- アクチュエータをユーザーに悟られないようホームポジションに戻す動作を**ウォッシュバック**。



- 前庭感覚器官がある耳のまわりに電極を張り付け、左右の耳の間で微弱な電流を流すことで、ユーザに知覚される重力の方向が電流に応じて陽極側へシフトして感じられる

### 3.3.4 味覚ディスプレイ

- ストローなどを介して外部から味物質を口内に運ぶ方法

### 3.3.5 嗅覚ディスプレイ

- 嗅細胞は350種類以上存在していて、基本的な匂いと言うのも見つかっていない。
- 拡散と排気と空気砲。

### 3.3.6 体性感覚ディスプレイ

- バーチャルな物体に触った時の表面の**感触**や**硬さ**、**重さ**などを提示。
- 物理刺激を提示するディスプレイは**ハプティックインタフェース(haptic interface)**とも呼ばれ、皮膚感覚を刺激するものは**皮膚感覚提示装置**、深部感覚を刺激するものは**力覚提示装置**と呼ばれる。
- **皮膚感覚**提示装置を開発する際には空間分解能の目安として使われる指標である**2点弁別閾**に基づいて、刺激装置の密度を決める
  - 刺激する方法としては、**振動子**や**空気圧**、**電気刺激**を用いたものなど
  - 2点弁別閾が数mmの小さい場所では、**ピエゾ素子**の振動をてこを使って拡大することでピンアレイのピンを駆動する方式や、空気圧ノズルアレイを用いて刺激を行うことが行われている。特に空気圧アレイでは、皮膚の圧覚が**応力の向きではなくひずみの大きさに比例**する性質を利用して、ノズルの直径が小さい場合は**圧迫**ではなく**吸引**によっても圧覚提示が可能で、そのノズルの直径によっても刺激される**感覚受容器を選択的に刺激**できる。
- 力覚提示装置は物体に触ったときに物体から返ってくる**反力**を提示
  - 厳密には皮膚感覚を含んだ**深部感覚**の提示
  - 地面あるいは人体の一部と力覚提示装置との間での相互作用によって反力を提示する**接地型**と、地面とは接地せずに力覚を提示する**非接地型**に分けることができる
  - **接地型**
    - 人体に多関節マニピュレータを装着する「**装着型**」、ペンやボールを握るようにして用いる「**把持型**」、バーチャルな物体を実世界にそのまま出現させる「**対象型**」
    - 装着型と把持型では、大半のディスプレイが**力センサ**を用いていない。小型で多軸力センサがあまりないから。
- 近似的な曲面を生成する方法としては**アクチュエータ**アレイによってゴムなどでできた膜を変形させる方式と、平面や円筒など曲面の**プリミティブ**を組み合わせた立体をVR物体の上 に沿って動く陰のように**マニピュレータ**によって人体の動きに追従させて曲面を表現する**遭遇型**。
- 非接触型
  - 高速回転するロータをブレーキなどで急激に減速させることで生じる撃力を利用したり、回転ロータを傾けたときに発生する**ジャイロモーメント**を用いる。

### 3.3.7 他の感覚との複合

- 感覚モダリティごとに許容される空間的・時間的な余裕（たとえば歯ごたえが起こってから音が聞こえるまでに数msの遅れがあっても人間には同時に発生したように感じられる）があり、この余裕の中で感覚提示を行えば、相乗効果が現れる。逆にこの制約が守られないと違和感につながりひどいときにはVR酔いなどの悪影響が生じる。

### 3.3.8 神経系への直接刺激

- 半永久的に使用できる実用化された装置の例として聴覚障害者用医療器具である人工内耳
- 皮膚に電極を貼り付ける方法
  - 電極の大きさと刺激強度にトレードオフがある。
- 長期利用によって神経系が変質する可能性もあり、利用に関しては未知の部分が多い。
- 神経を直接刺激する方法は、物理的な刺激の種類を問わず、原理的にはすべての感覚を電気刺激で生起できる可能性を持っている。

## 3.4 入力と出力のループ

- 人間は10Hz以上で更新される画像を動画として認識するので、すべての処理を1/10s以内に行わなければならない。
- 力覚情報を与えるハプティックインタフェースの場合には、視覚よりもさらに高速な処理が要求され、その更新速度は1000Hz以上が望ましい。
- 人間が刺激を受けてから行動を起こすまでの時間が0.2s。