

## インタラクティブシステム特論 | (5)

梶本裕之  
人間コミュニケーション学科  
kajimoto@hc.uec.ac.jp  
http://kaji-lab.jp

## 三次元画像提示: 使用形態による分類

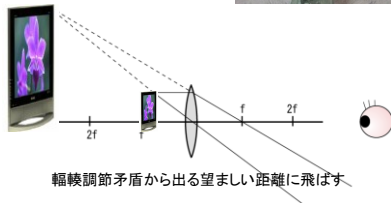
- 装着型
  - 代表: HMD (Head Mounted Display, 頭部搭載ディスプレイ)
- 設置型
  - 代表: 通常のモニタ



インタラクティブ技術特論

## 装着型(HMD)

- ゴーグルから両眼に異なる映像を提示
- 頭の位置姿勢を計測し, 現在位置に応じた画像を出力.
- 頭部計測
  - メカニカルリンク
  - 磁気センサ
  - 画像処理 などなど



インタラクティブ技術特論

## See-Through HMD

- 現実世界とCGを重ねる.
  - Video See-Through: 一度ビデオでとらえて画像で合成
  - Optical See-Through: ハーフミラーで合成



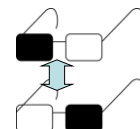
インタラクティブ技術特論

## See-Through HMD



## 設置型

- ディスプレイは空間に固定.
- 何らかのフィルタで両眼に別の映像を提示
- 多数のプロジェクタを用いたIPTシステムで全周囲の環境を再現可能.
  - IPT: Immersive Projection Technology, 包囲型プロジェクション技術  
イリノイ大学 CAVE 1993



インタラクティブ技術特論

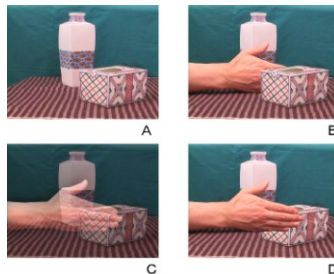
## 現実世界を立体視⇒沢山の問題

- 遮蔽の問題
- 眼間距離と視野角の問題
- 時間遅れの問題
- 焦点調節の問題

インタラクティブ技術特論

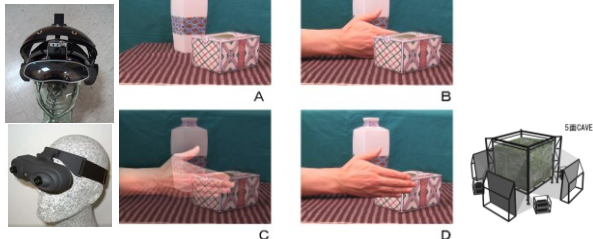
## 遮蔽問題

「遮蔽関係」は作業にとって重要な奥行き手がかり



インタラクティブ技術特論

## 遮蔽問題

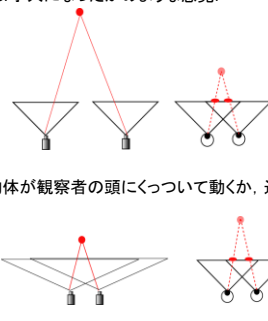


- (A) 通常のHMD. 画像は見えるが自分の手は見えない.  
(遠隔地のロボットハンドが見えるならそれでよい)
- (B)理想的な遮蔽状態
- (C)See-Through HMD. 自分の手が少しだけ見える.
- (D)据え置き型. 手が常に手前に来て、提示映像を隠してしまう

インタラクティブ技術特論

## 眼間距離と視野角の問題

- 眼間距離 (カメラ間距離) の不一致  
両眼立体視を行うと自分が巨人or小人になったかのような感覚.  
(立体視おもちゃの「箱庭感」)



- 視野角の不一致
  - 奥行きがおかしくなる.
  - 頭部回転運動の際、正面の物体が観察者の頭にくっついて動かか、逆方向に流れる
  - 眼鏡をかけたときの違和感

インタラクティブ技術特論

## 時間遅れの問題



- 頭の動きから描画までに**必ず**時間遅れが生じる.  
⇒数フレーム(数十～数百ミリ秒)前の画像
- 首を振ったときに顕著
  - HMD:
    - ディスプレイが頭についているので、画像が**首の回転に付いてくる**
  - 設置型:
    - ディスプレイが設置されているので、画像は付いてこない。しかし**立体視に関しては狂い**、奥行き方向にひずみを生じる。

インタラクティブ技術特論

## 焦点調節の問題

- 特にOptical See-through HMDの問題.
- CG映像の焦点距離と、現実映像の焦点距離が異なる
- Video See-through HMDでは生じない.



イ

## 「VR酔い」



- 乗り物酔いに似た症状
- 原因1. 時間遅れ
  - 時間遅れに伴う画像の動き⇒視覚情報と前庭感覚情報の不一致
  - 特にHMDで大きい(設置型の利点の一つとされる)
- 原因2. 眼間距離と視野角の不一致
  - 特に視野角の不一致は頭部の運動に対して視覚情報と前庭感覚情報の不一致を引き起こす
- 原因3. 輻輳と調節の矛盾による疲労
  - 注意すべき点:「VR酔い」はVRシステムが必ずもつものではない。
  - むしろ強調された立体感の演出のために生じる部分が多い。

インタラクティブ技術特論

## 立体視ディスプレイは必要か？

- 不要との指摘は多い
  - 臨場感における「広視野, 高精細」の占める割合は高い
  - VR酔いを我慢してまで使うのか？
- しかし
  - VR酔い是对処可能
  - 手作業を伴う場合, 「距離感」を掴む必要
  - 正しい奥行きを実現したときには圧倒的な臨場感(自分がその場に居る感覚)を得ることが出来る。
- 立体感を「強調」してきたようなVRはもはや不要

インタラクティブ技術特論

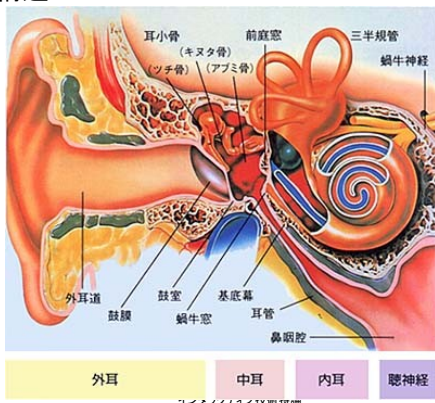
# 聴覚

インタラクティブ技術特論

## 聴覚感覚器(耳)のしくみ

インタラクティブ技術特論

## 耳の構造

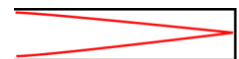


インタラクティブ技術特論

## 外耳



- 耳介
  - 集音や音の方向性の知覚に寄与
  - 眼球と異なり運動は困難
- 外耳道
  - 一端は鼓膜で閉じ他端は開放である共鳴管
  - 1/4波長で共鳴 外耳道長が2.5cm程度であることから3-4kHzの音に共鳴



インタラクティブ技術特論

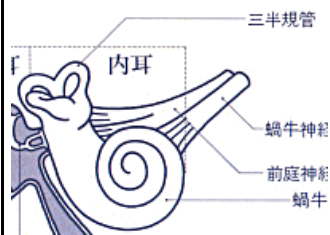
## 中耳



- 鼓膜
  - 外耳と内耳の境界
  - 厚さ0.1mm、直径8-9mm
  - 最小可聴音における振幅 $1.2 \times 10^{-7}$ [mm]
- 耳小骨(つち骨・きぬた骨・あぶみ骨)
  - 鼓膜の振動を内耳に伝える
- 耳管
  - のどにつながり内耳の気圧を保つ

インタラクティブ技術特論

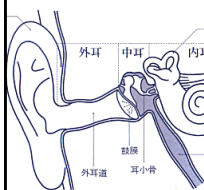
## 内耳



- 三半規管
  - 角加速度センサ
- 前庭
  - 加速度センサ
- 蝸牛
  - 音センサ

インタラクティブ技術特論

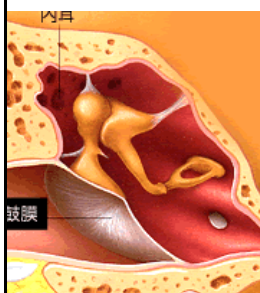
## 音情報の伝播



1. 気体の振動
2. 鼓膜の振動
3. つち骨・きぬた骨・あぶみ骨によるリレー
4. 前庭窓の振動
5. リンパ液(液体)の振動
6. 基底膜の振動

インタラクティブ技術特論

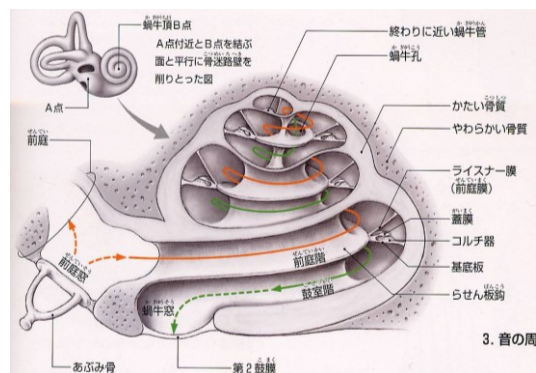
## 中耳におけるインピーダンスマッチング(テコ)



1. 内耳のリンパ液を駆動する必要
2. 空気に比べて4000倍大きなインピーダンス(動かしにくい)
3. 鼓膜とアブミ骨下の面積比による力増幅:17倍
4. つち骨, きぬた骨によるテコ:1.3倍(つち骨がきぬた骨より長い)
5. 計約22倍に力が増幅される

インタラクティブ技術特論

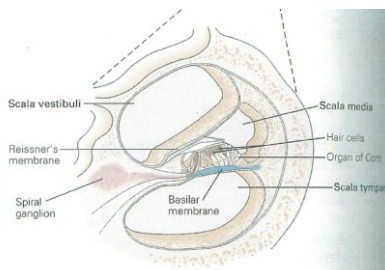
## 内耳の蝸牛管



3. 音の周

インタラクティブ技術特論

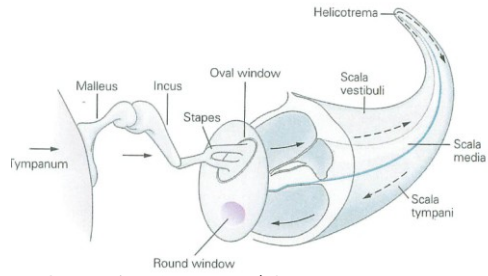
## 蝸牛内の基底膜



- 管を上下に仕切る膜

インタラクティブ技術特論

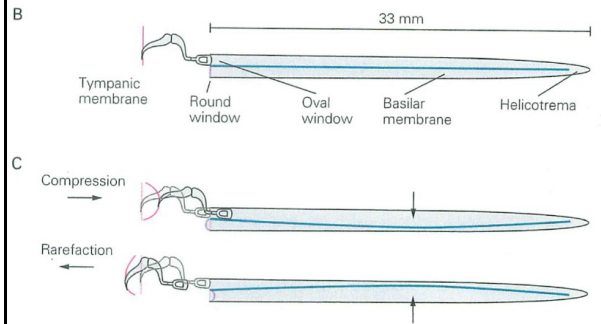
### 蝸牛内の基底膜



- 蝸牛の渦巻きを引き伸ばすと:  
膜で上下に仕切られた一本の管

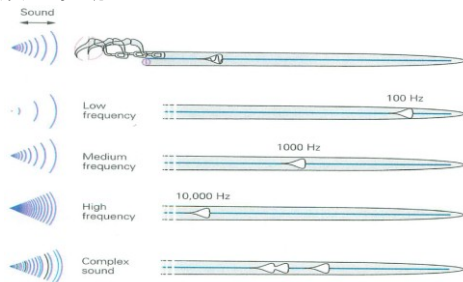
インタラクティブ技術特論

### 基底膜の駆動



インタラクティブ技術特論

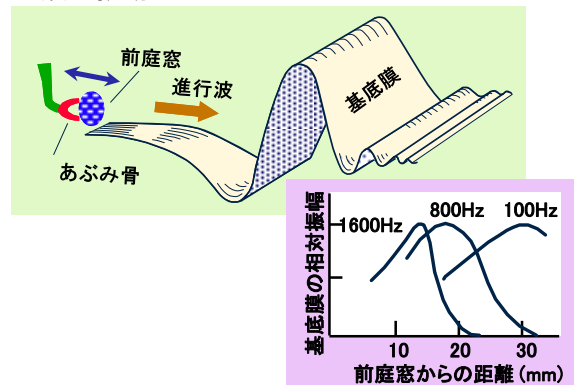
### 基底膜の駆動



- 基底膜上に進行波を形成
- 低周波ほど減衰せずに奥まで到達する(周波数分解)

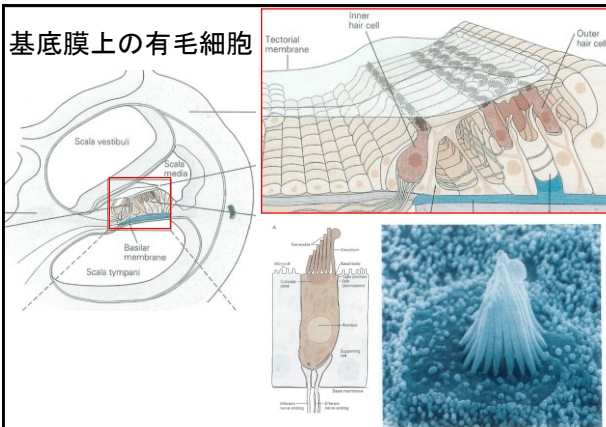
インタラクティブ技術特論

### 基底膜の振動



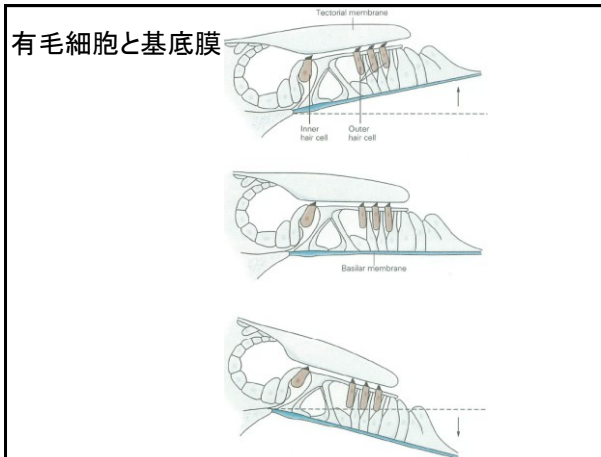
インタラクティブ技術特論

### 基底膜上の有毛細胞

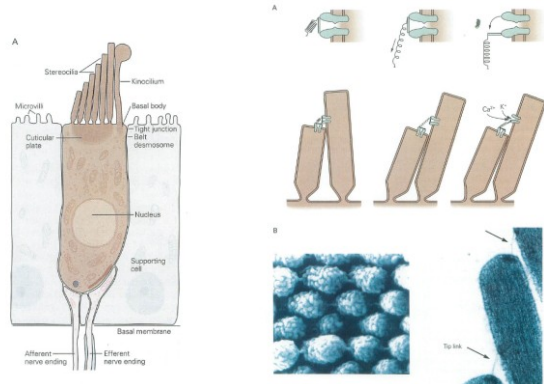


インタラクティブ技術特論

### 有毛細胞と基底膜



## 有毛細胞: マイクロ機械センサと「AM検波」

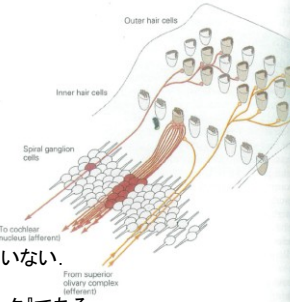


インタラクティブ技術特論

## 内・外有毛細胞

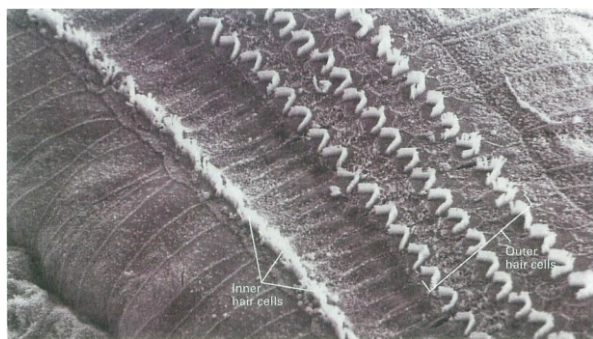
- 内毛細胞: 1列だけ
  - 感覚神経の大半が接続
- 外毛細胞: 3列
  - 遠心性神経も接続.
  - その働きは完全には分かっていない.
- 仮説: 外毛細胞は『アクチュエータ』である.

実際、高周波で振動しており、『耳鳴り』の原因の一つであることが分かっている.



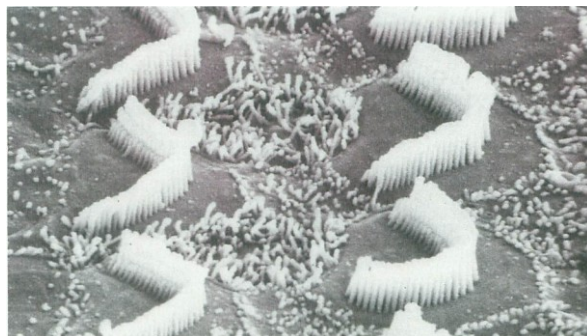
インタラクティブ技術特論

## 内・外有毛細胞



インタラクティブ技術特論

## 内・外有毛細胞



インタラクティブ技術特論

## インタラクティブシステムと聴覚

インタラクティブ技術特論

## インタラクティブシステムと聴覚

- 人間の聴覚
- 取得, 提示デバイス
- 音と福祉工学

インタラクティブ技術特論

## 人間の聴覚

- 周波数範囲: 20Hz~20kHz  
年齢と共に高周波領域を知覚しにくくなる
  - “蚊の着信音”: 大人には聞こえないが子供には聞こえる
  - 若者撃退装置
- (参考) 超音波の心地よさとは?
  - 『超音波まで再生できる(サンプリング周波数が高い)機器の心地よさ』とは?
  - 現在のところ恐らく体表への圧覚刺激, つまり触覚

インタラクティブ技術特論

## 音源位置の手がかり

- 両耳に到達する音の

- 時間差
- 強度差



から, 音の来る『左右の』方向を把握する

- しかしこれだけでは, 位置は一意に定まらない

- 耳介(耳たぶ)による周波数フィルタリングにより上下, 前後を把握

前からの音:  $f_1 \rightarrow 0.9$ 倍,  $f_2 \rightarrow 0.6$ 倍,  $f_3 \rightarrow 0.5$ 倍, ...  
後からの音:  $f_1 \rightarrow 0.7$ 倍,  $f_2 \rightarrow 0.9$ 倍,  $f_3 \rightarrow 0.6$ 倍, ...  
上からの音:  $f_1 \rightarrow 0.5$ 倍,  $f_2 \rightarrow 0.5$ 倍,  $f_3 \rightarrow 0.3$ 倍, ...

- (よって, 『純音』は非常に定位しにくい. また日常的に経験しない音は定位しにくい)

インタラクティブ技術特論

## 頭部伝達関数

- HRTF  
Head-Related Transfer Function

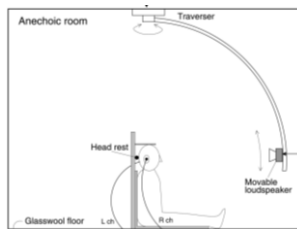
- 音波が耳に入るとき、

- 頭部による反射・回り込み
- 耳介内での反射

などにより生じる音の変化。

人はこの現象を利用し音源の方向を知る情報源とする

- 音の方向( $\theta, \psi$ )と周波数 $f$ の3変数関数となる



インタラクティブ技術特論

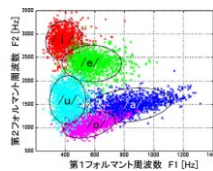
## ダミーヘッド



- 頭部伝達関数を極力人間に似せた頭部人形
- 精巧なものは
  - 形状だけでなく表面やかさも再現
  - 個人用に作成
- 耳にマイクを内蔵
- 人間と同じように音をとらえることが出来る

インタラクティブ技術特論

## 音声認識の手がかり: フォルマント



- 母音は主な周波数(第一フォルマント約500~1000Hz)と, 次に多い周波数(第二フォルマント約1500~3000Hz)で認識
  - (比率? 内耳基底膜上でLog表現されているなら距離)
- 関連話題
  - フォルマント合成による合成音声
  - 音声のピッチ変換時のフォルマント補正

インタラクティブ技術特論

## インタラクティブシステムと聴覚

- 人間の聴覚
- 取得, 提示デバイス
- 音と福祉工学

## 聴覚の取得と再生

- 取得デバイス
  - ボイスコイル
  - コンデンサマイク
  - 圧電素子
  - 光変換
- 提示デバイス
  - ボイスコイル
  - コンデンサスピーカ
  - 圧電素子
  - 温度変換

インタラクティブ技術特論

## ボイスコイル

- 最も多くスピーカに用いられる
  - スピーカ: 電磁誘導による駆動. モータと同じ.
  - マイク: 電磁誘導による発電.
- 通常は磁石を固定, コイルを振動させる
- コイルは非常に軽く, 高周波駆動が可能



インタラクティブ技術特論

## コンデンサマイク・スピーカ

- コンデンサマイク
  - 2枚の電極板距離の変化による静電容量変化を検出
- コンデンサスピーカ
  - 2枚の電極板に加える電圧の変化による電極板距離の変化により空気を駆動
  - 平面全体を駆動可能なため, 平面型スピーカなどに用いられる

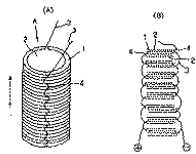


KSM32/SL

インタラクティブ技術特論

## 圧電素子

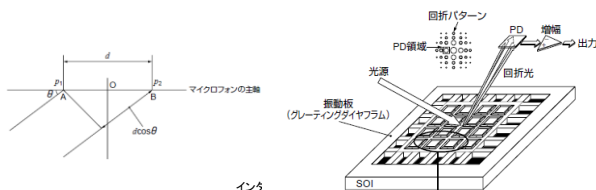
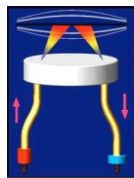
- 圧電素子:
  - 電圧を加えると微小に伸縮する素子. 電歪素子とも.
  - 安価軽量のマイク, スピーカとして用いられる (参考: 磁歪素子)
- 積層圧電素子:
  - 微小な伸縮を拡大するため層状に重ねたもの
  - 強力, 高速. 駆動には高電圧が必要
- バイモルフ:
  - 微小な伸縮を拡大するため上下歪みを「反り」に変換したもの. フザーなど



インタラクティブ技術特論

## 光マイク(研究)

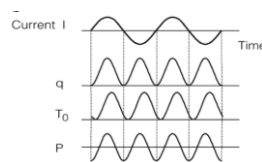
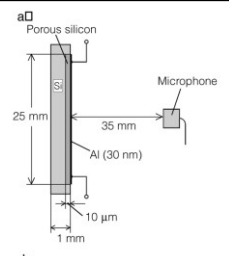
- ダイアフラムの振動を光の反射によって検出
  - 一例ではダイアフラムがマトリクス構造
- 構造的に強く, 性能の良いマイクが作れる
- 高い指向性を実現可能



インタ

## 温度スピーカ(研究)

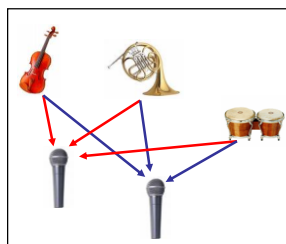
- 微小世界では温度も高速
- 電流によりジュール熱を生じさせ, 熱による膨張で音を発生させる.
- シリコンプロセスにより超小型のスピーカ群を作成可能



インタラクティブ技術特論



### 通常の録音と再生



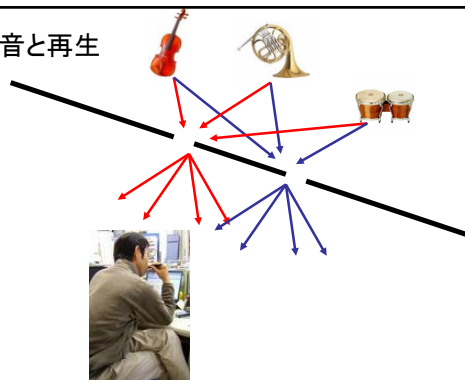
録音:2台のマイク



再生:2台のスピーカ

インタラクティブ技術特論

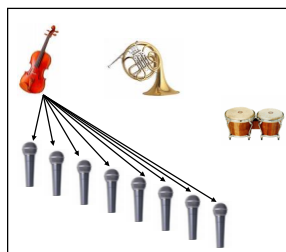
### 通常の録音と再生



- 音響吸収壁に空いた穴から音を聞いているのと等価.
- ある程度自然.(簡易的な音場再現)

インタラクティブ技術特論

### 波面再構成による音場再生



録音:N台のマイク



再生:N台のスピーカ

インタラクティブ技術特論

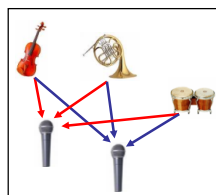
### 波面再構成の録音と再生



- 音響吸収壁に空いた穴が増えていく.
- 自然な音場再現

インタラクティブ技術特論

### ヘッドフォンを使うと?



録音:2台のマイク



再生:ヘッドフォン

- 音源位置を特定する情報の多くが欠落し、音源定位が出来なくなる.
- 時には頭の中に定位する(頭内定位)

•頭内定位は通常悪とされる。しかし人の感性は時代と共に変わる。例えば真にリアルな音よりも低音が強調された音の方を良しとする傾向があるように、同様に頭内定位も、(ヘッドフォンが普及して十分な時間を経たために)むしろ好ましいと感じる層も増えている。「リアル原理主義」を要請してはいけない。

インタラクティブ技術特論

### バイノーラルシステム



ダミーヘッド



ヘッドフォン

- 音源定位能力を決める3要素,
  - 両耳間の音量差
  - 両耳間の時間差
  - 周波数特性の変化
- の全てが再現され、完全な音源定位となる。

インタラクティブ技術特論

### 逆もまたダメ



インタラクティブ技術特論

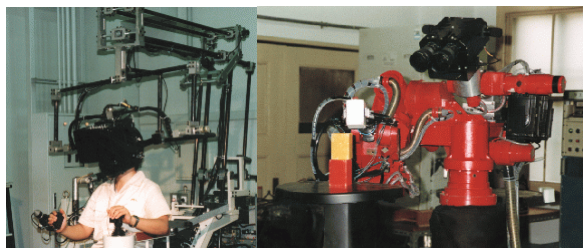
### どこかで聞いたような...

- ヘッドフォン=装着型ディスプレイ(HMD)による立体視
- スピーカ群=設置型ディスプレイによる立体視



インタラクティブ技術特論

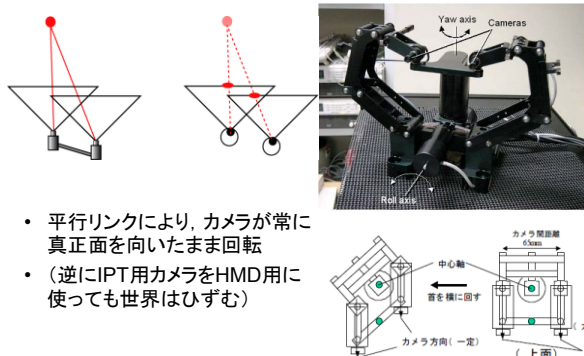
### (復習)HMD用カメラ



- HMDと全く同じ配置のカメラを用意すればよい
- →**ダミーヘッド**と同じこと！！

インタラクティブ技術特論

### (復習)設置型ディスプレイ用カメラ

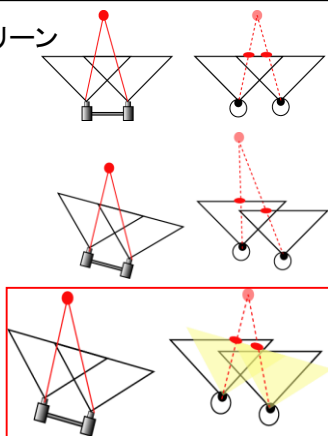


- 平行リンクにより、カメラが常に真正面を向いたまま回転
- (逆にIPT用カメラをHMD用に使っても世界はひずむ)

インタラクティブ技術特論

### (復習)バーチャルスクリーン

- 「投影面」をコンピュータ世界上の板とする
- その板の上にテクスチャを貼ることにより
  - HMD用カメラをIPTに使える
  - IPT用カメラをHMDに使える
- 任意形状のスクリーンを利用可能となる
- 「動画取り込み」⇒「テクスチャ貼り」がリアルタイムに出来る  
現在では当前の手法



インタラクティブ技術特論

### 聴覚でも...

- 視覚:『バーチャルスクリーン』, すなわちCG空間でのシミュレーションを介在させることにより, 装着型ディスプレイ/カメラ, 据え置き型ディスプレイ/カメラの間の垣根を越えた.
- 聴覚:『伝達関数』, すなわち音の伝わり方のシミュレーションを介在させることにより, マイク/スピーカ, ダミーヘッド/ヘッドフォンの間の垣根を越えることができる.
  - 会社ごとに違う名称(覚える必要は全く無い, 皆同じ)
    - バイフォニック技術(Victor: ダミーヘッド→スピーカ)
    - バーチャルフォンテクノロジー(Sony: マイク→ヘッドフォン)



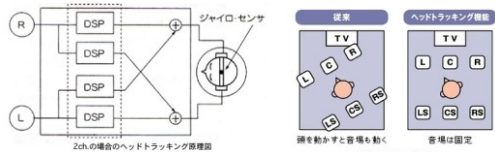
インタラクティブ技術特論

## ヘッドトラッキング

- マスタの頭の動きに合わせてスレーブも動く: 音場が空間に固定される。



- ヘッドホンシステムの場合に必要な、既に録音した音に対してはフィルタ処理で対応(製品として既に普及)。



- 音場再生型の音響システムでは不要。

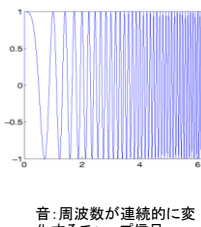
インタラクティブ技術特論

## 音場の再現

- HRTFと同様に、ホールなどの「響き具合」、すなわち伝達関数を計測



12面体無指向性スピーカ: ステージに置く



音: 周波数が連続的に変化するチャープ信号、インパルス信号など。



無指向性マイク: 客席に置く

インタラクティブ技術特論

## 音場の再現



無響室での録音



ホールの伝達関数をかけた結果

インタラクティブ技術特論

## インタラクティブシステムと聴覚

- 人間の聴覚
- 取得, 提示デバイス
- 音と福祉工学

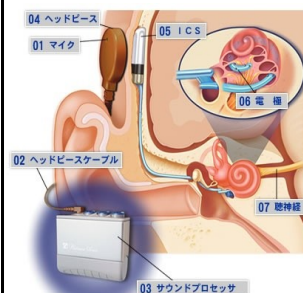
インタラクティブ技術特論

## 音と福祉工学

- 聾啞者のサポート
  - 人工内耳
  - 人工咽頭
- 盲人のサポート
  - 感覚代行: モワットセンサとソニックガイド
  - 盲人の障害物知覚(気配とは何か)
- 高齢者のサポート
  - 補聴器
  - 骨伝導スピーカ
  - 再生音速度の低減(ビデオの早送りにも使われるように、これをリアルタイムに使う)

インタラクティブ技術特論

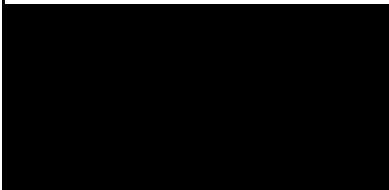
## 人工内耳



- 体外部: 耳掛けマイク, スピーチプロセッサ, 送信コイル
- 体内部: 受信コイル, 受信器, 電極
- 電極は8対. 蝸牛に挿入され, 感覚神経を電気刺激. 脳に伝わり音として感じる.

インタラクティブ技術特論

## 人工咽頭



- 咽頭ガン等で咽頭の摘出→声の元となる振動を作れない
- 人工咽頭: 振動により声の元を作る.

インタラクティブ技術特論

## 感覚代行

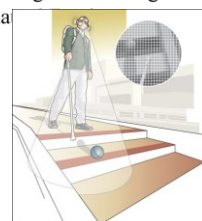
- 視覚障害者の感覚代行
- 視覚→聴覚への変換



Sonic Guide



Left-Right Scan using Bina



インタラクティブ技術特論

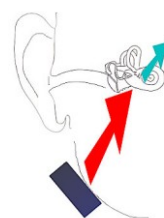
## 盲人の障害物知覚(気配とは何か)

- 気配: 周囲の伝達関数の変化を, 周囲からの雑音の変化で知ること.
- つまり, 気配=音の情報である.
- ただし, 音そのものではなく, 音の伝わり方の変化である.
- より簡単には『音響的影』(Acoustic Shadow)

インタラクティブ技術特論

## 高齢者のサポート: 補聴器と骨伝導

- 骨を振動させて音を伝える
- 特に外耳, 中耳に問題がある難聴で威力を発揮



インタラクティブ技術特論

## 高齢者のサポート: 速度の低減

早口のせりふをゆっくりと聞きたい

テレビ:

音声信号を遅らせる(ただし信号の周波数は変えない).  
このとき映像と音声はずれる. 無音部分で追いつかせる.

携帯電話: 同様に音声信号を遅らせる. 無音部分で追いつかせる.

ビデオデッキの『早送り』に装備. PC上の再生ソフトでは普通の機能となっている.

インタラクティブ技術特論

## 次回

触覚

インタラクティブ技術特論