

マルチメディア工学 5

仮想 / 拡張 / 複合現実感

モーションキャプチャ

カメラキャリブレーション (校正: Calibration)

佐藤 嘉伸

大阪大学 大学院医学系研究科

医用工学講座 画像解析学

yoshi@image.med.osaka-u.ac.jp

<http://www.image.med.osaka-u.ac.jp/member/yoshi/>

講義ホームページ: 日本語ページ → 授業の資料 → マルチメディア工学

マルチメディア工学: 講義計画

- イントロダクション
- コンピュータグラフィックス (Computer Graphics: CG)
- 仮想 / 拡張 (複合) 現実感 (Virtual/Augmented (Mixed) Reality: VR / AR・MR)
 - モーションキャプチャ、カメラキャリブレーション (カメラ校正)
 - (仮想空間と実空間の) 位置合わせ
- マルチメディアデータの統計解析

複合現実感の典型例

- 手術ナビゲーション



何をしているところか?
そのために何が必要か?

仮想・拡張・複合現実感
(Virtual/Augmented (Mixed)

Reality: VR / AR・MR)

モーションキャプチャ
カメラキャリブレーション (校正)

Computer Graphics (CG)

3次元**仮想**世界モデル → **仮想**画像

実データ + CG (Mixed Reality 複合現実感)

3次元**実**世界データ + リアリスティックな
→ **仮想**画像

3次元**仮想**世界モデル (実 + 仮想) 画像

実データ + CG (Mixed Reality 複合現実感)

実例: PlayStation2: FIFASOCCER



実データ + CG (Mixed Reality 複合現実感)
実例: PlayStation2: FIFASOCCER

光学式モーションキャプチャ

実画像 → 3次元(実)運動モデル

リアルスティックな
仮想画像

3次元(仮想)形状モデル → (実 + 仮想)画像

実データ + CG: 光学式モーションキャプチャ (VICON)
実例: PlayStation2: FIFASOCCER

→ (赤外線反射) マーカ

→ 赤外線発光装置 + 赤外線カメラ

赤外線発光装置

赤外線ビデオカメラ

マーカの3次元運動を複数のカメラで計測する.

光学式モーションキャプチャーの原理
多眼ステレオ法

マーカの3次元運動を複数のカメラで計測する。

3次元データ処理・イントロダクション
 CG (Computer Graphics) CV (Computer Vision)

コンピュータグラフィックス
 (Computer Graphics: CG)
 3次元世界モデル → 画像

画像

光源

カメラ

物体

3次元世界

コンピュータビジョン
 (Computer Vision: CV)
 画像 → 3次元世界モデル

光学式モーションキャプチャーの原理
多眼ステレオ

(実世界を撮影した複数のカメラ画像からの3次元復元)

カメラ2

カメラ1

物体

マーカ

光学式モーションキャプチャーの原理
多眼ステレオ

(実世界を撮影した複数のカメラ画像からの3次元復元)

2つの画像中のマーカ位置から、どのようにして、
 マーカの3次元座標を計算できるか？

カメラ2

カメラ1

物体

マーカ

カメラ1の画像

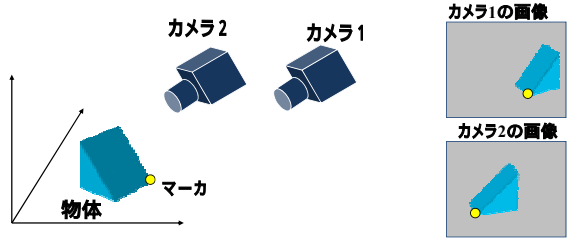
カメラ2の画像

光学式モーションキャプチャの原理

多眼ステレオ

(実世界を撮影した複数のカメラ画像からの3次元復元)

- **カメラキャリブレーション** (校正) : カメラ画像 (画像座標) と3次元世界 (世界座標) の空間関係を記述するパラメータの事前計測
- **3次元位置計測** : 複数の2次元画像から同一3次元物理点に対応する点を決定し、それらの2次元座標から3次元世界座標を計算

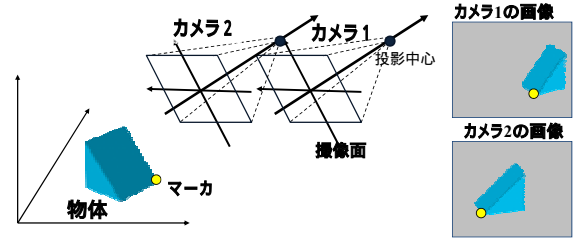


光学式モーションキャプチャの原理

多眼ステレオ

(実世界を撮影した複数のカメラ画像からの3次元復元)

- **カメラキャリブレーション** (校正) : カメラ画像 (画像座標) と3次元世界 (世界座標) の空間関係を記述するパラメータの事前計測
- **3次元位置計測** : 複数の2次元画像から同一3次元物理点に対応する点を決定し、それらの2次元座標から3次元世界座標を計算

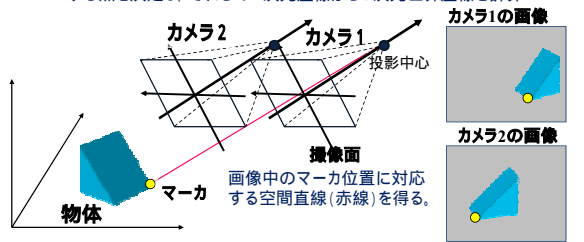


光学式モーションキャプチャの原理

多眼ステレオ

(実世界を撮影した複数のカメラ画像からの3次元復元)

- **カメラキャリブレーション** (校正) : カメラ画像 (画像座標) と3次元世界 (世界座標) の空間関係を記述するパラメータの事前計測
- **3次元位置計測** : 複数の2次元画像から同一3次元物理点に対応する点を決定し、それらの2次元座標から3次元世界座標を計算

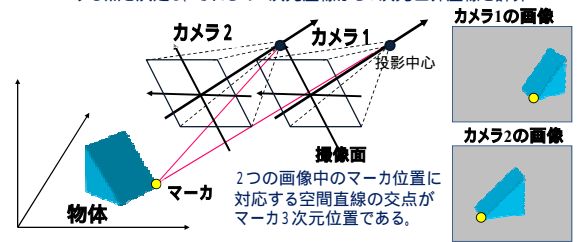


光学式モーションキャプチャの原理

多眼ステレオ

(実世界を撮影した複数のカメラ画像からの3次元復元)

- **カメラキャリブレーション** (校正) : カメラ画像 (画像座標) と3次元世界 (世界座標) の空間関係を記述するパラメータの事前計測
- **3次元位置計測** : 複数の2次元画像から同一3次元物理点に対応する点を決定し、それらの2次元座標から3次元世界座標を計算

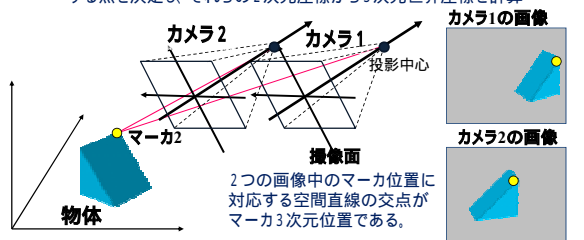


光学式モーションキャプチャの原理

多眼ステレオ

(実世界を撮影した複数のカメラ画像からの3次元復元)

- **カメラキャリブレーション** (校正) : カメラ画像 (画像座標) と3次元世界 (世界座標) の空間関係を記述するパラメータの事前計測
- **3次元位置計測** : 複数の2次元画像から同一3次元物理点に対応する点を決定し、それらの2次元座標から3次元世界座標を計算

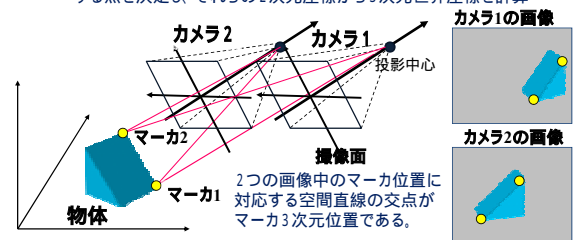


光学式モーションキャプチャの原理

多眼ステレオ

(実世界を撮影した複数のカメラ画像からの3次元復元)

- **カメラキャリブレーション** (校正) : カメラ画像 (画像座標) と3次元世界 (世界座標) の空間関係を記述するパラメータの事前計測
- **3次元位置計測** : 複数の2次元画像から同一3次元物理点に対応する点を決定し、それらの2次元座標から3次元世界座標を計算



光学式モーションキャプチャの原理

多眼ステレオ

(実世界を撮影した複数のカメラ画像からの3次元復元)

— カメラキャリブレーション (校正) : カメラ画像 (画像座標) と3次元世界 (世界座標) の空間関係を記述するパラメータの事前計測

物体 マーカ
世界座標系
カメラ座標系
投影中心
撮像面
カメラの画像

カメラキャリブレーション (校正)

カメラキャリブレーション (カメラ位置、方向、焦点距離の推定)

カメラ座標系 (x', y', z')
投影面の位置・方向 x'
焦点距離 f
投影中心
画像座標系 (u, v)
既知であることが必要
 R : カメラ回転行列
 t : カメラ平行移動
 f : 焦点距離

世界座標系 (x, y, z)
カメラ座標から世界座標へ
 $x' = Rx + t \Rightarrow x = R^{-1}(x' - t)$

カメラキャリブレーション (校正)

カメラキャリブレーション (カメラ位置、方向、焦点距離の推定)

カメラ座標系 (x', y', z')
投影面の位置・方向 x'
焦点距離 f
投影中心
画像座標系 (u, v)
既知であることが必要
 R : カメラ回転行列
 t : カメラ平行移動
 f : 焦点距離

世界座標系 (x, y, z)
既知のマーカ3次元座標 x とその2次元画像座標 u から、これらの情報の拘束条件を得ることができる。

カメラキャリブレーション (校正)

カメラキャリブレーション (カメラ位置、方向、焦点距離の推定)

カメラ座標系 (x', y', z')
投影面の位置・方向 x'
焦点距離 f
投影中心
画像座標系 (u, v)
既知のマーカ3次元座標 $x = (x, y, z)$ とその2次元画像座標 $u = (u, v)$ から、カメラ回転行列 R 、カメラ平行移動 t 、焦点距離 f に関する拘束条件の導出

世界座標系 (x, y, z)
カメラ座標に変換
 $x' = Rx + t \Rightarrow \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + t \Rightarrow \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{f}{f - z'} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}$
 x', y', z' の式を右式に代入

カメラキャリブレーション (校正)

カメラキャリブレーション (カメラ位置、方向、焦点距離の推定)

カメラ座標系 (x', y', z')
投影面の位置・方向 x'
焦点距離 f
投影中心
画像座標系 (u, v)
既知情報
 x_i : マーカ i の世界座標
 u_i : マーカ i の投影の画像座標
未知数
 R : カメラ回転行列 (3自由度)
 t : カメラ平行移動 (3自由度)
 f : 焦点距離 (1自由度)

世界座標系 (x, y, z)
拘束条件 (方程式) $f(x_i, u_i; R, t, f) = 0$
 $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{f}{f - z'} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} - \frac{f}{f - z'} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = 0$

カメラキャリブレーション (校正)

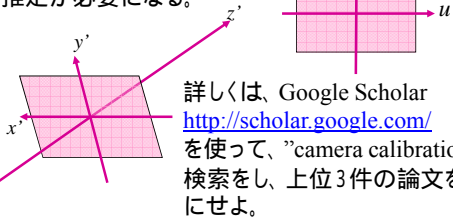
カメラキャリブレーション (カメラ位置、方向、焦点距離の推定)

未知数	既知情報
R : カメラ回転行列 (3自由度)	$x_i = (x, y, z)$: マーカ i の3次元世界座標
t : カメラ平行移動 (3自由度)	$u_i = (u, v)$: マーカ i の投影の2次元画像座標
f : 焦点距離 (1自由度)	

$x' = Rx + t \Rightarrow \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + t \Rightarrow \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{f}{f - z'} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}$
世界座標からカメラ座標へ
3次元カメラ座標 x', y', z' の式を右式に代入
既知の3次元座標 x_i と画像座標 u_i から、未知パラメータ R, t, f に関する方程式を得る
 $f(x_i, u_i; R, t, f) = 0$
 x_i, u_i の組を多数集めて、未知数以上の方程式に基づき最小2乗当てはめを行なう。
 $\sum_i \{f(x_i, u_i; R, t, f)\}^2 \rightarrow \min$

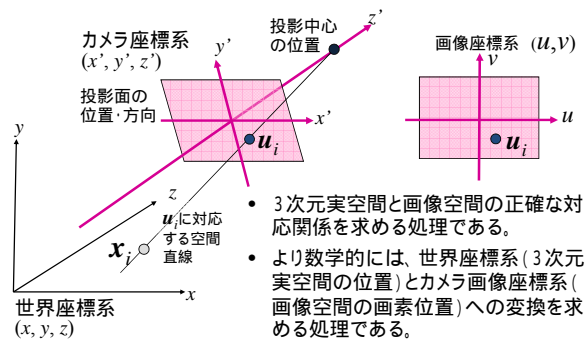
カメラキャリブレーション(校正)

- カメラ内部パラメータについては、焦点距離以外にも、
 - 撮像素子の位置ずれ (z軸が、画像配列の中心を通るとは限らない)
 - 画素サイズの縦横比 (正確に1:1とは限らない)
 - レンズ歪み
 などの推定が必要になる。



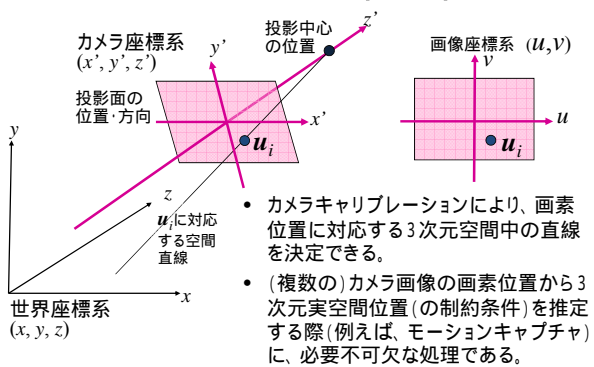
詳しくは、Google Scholar <http://scholar.google.com/> を使って、"camera calibration"で検索をし、上位3件の論文を参考にせよ。

カメラキャリブレーション(校正) : まとめ



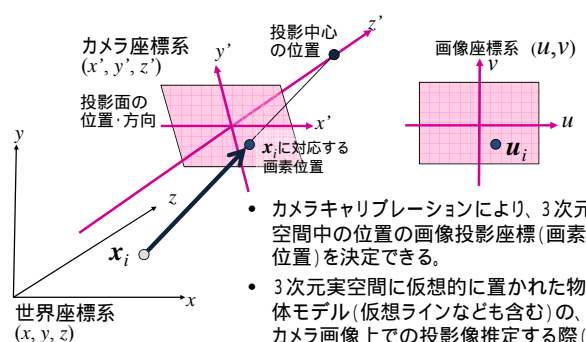
- 3次元実空間と画像空間の正確な対応関係を求める処理である。
- より数学的には、世界座標系(3次元実空間の位置)とカメラ画像座標系(画像空間の画素位置)への変換を求める処理である。

カメラキャリブレーション(校正) : まとめ



- カメラキャリブレーションにより、画素位置に対応する3次元空間中の直線を決定できる。
- (複数の)カメラ画像の画素位置から3次元実空間位置(の制約条件)を推定する際(例えば、モーションキャプチャ)に、必要不可欠な処理である。

カメラキャリブレーション(校正) : まとめ



- カメラキャリブレーションにより、3次元空間中の位置の画像投影座標(画素位置)を決定できる。
- 3次元実空間に仮想的に置かれた物体モデル(仮想ラインなども含む)の、カメラ画像上での投影像推定する際(すなわち、拡張現実感)に、必要不可欠な処理である。

光学式モーションキャプチャ(VICON)

3台のカメラはカメラキャリブレーション済である。



- (赤外線反射) マーカ
- 赤外線発光装置 + 赤外線カメラ



マーカの3次元運動を複数のカメラで計測する。

モーションキャプチャ 市販品・方式の違いによる比較

- 光学式(複数台カメラのマーカ撮影に基づく)
 - 利点: カメラからマーカが見える限り、精度・安定性は高い。
 - 欠点: マーカが他の物体に遮蔽されカメラに写らない場合に、計測不能になる。
- 磁気式
 - 利点: 位置計測部(磁気レシーバ)は、遮蔽の影響を受けない。
 - 欠点: 磁場に影響を与える、金属、電磁機器の影響で計測精度が劣化する。

モーションキャプチャ

光学方式: **高精度** 死角が問題

Optotrak 超高精度

精度 0.1 mm,
視野 $1.2 \times 1.2 \times 1.2m^3$,
重量 60kg, 価格 約1000万円

Polaris ポータブル&ワイアレスタイプ

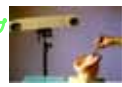
精度 0.35mm,
重量 2kg, 価格 約300万円

磁場方式: **死角なし** 金属の影響が問題

Fastrak 精度 0.8 mm, 価格 約150万円.

Aurora **超小型** (体内挿入型柔軟医療器具計測)

精度 1-2 mm, 価格 約700万円.

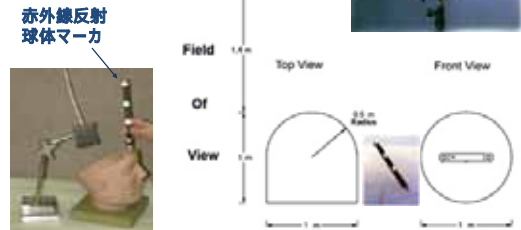


モーションキャプチャ

高精度実時間3次元センサ(モーションキャプチャ)

Polaris (光学方式)

ポータブル&ワイアレスタイプ,
精度 0.35mm、重量 2kg、価格 300万円

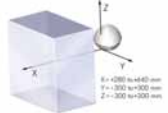
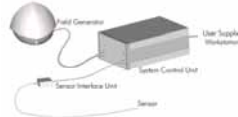


モーションキャプチャ

磁場方式: **死角なし** 金属の影響が問題

Aurora **超小型** (体内挿入型柔軟医療器具の先端位置計測)

精度 1-2 mm, 価格 約700万円.



内視鏡用軟性超音波
プローブの位置計測



複合現実感の典型例

• 手術ナビゲーション



何をしているところか?

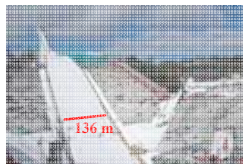
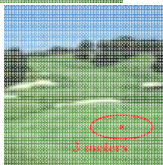
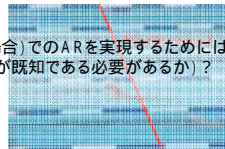
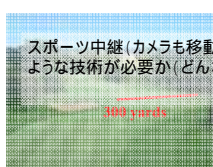
そのために何が必要か?

実時間運動計測(モーションキャプチャ)
(実物体と計算機内形状モデルの)位置合わせ

スポーツ中継でのAR(拡張現実感)

• AR (Augmented Reality)

スポーツ中継(カメラも移動する場合)でのARを実現するためには、どのような技術が必要か(どんな情報が既知である必要があるか)?



スポーツ中継でのAR(拡張現実感)

• AR (Augmented Reality)

スポーツ中継(カメラも移動する場合)でのARを実現するためには、どのような技術が必要か(どんな情報が既知である必要があるか)?

- テレビカメラは、カメラキャリブレーション済(カメラ位置・向き、焦点距離などが既知)。
- カメラ角度移動量、ズーム量は実時間出力(それらの変換に対応するカメラキャリブレーションが必要)
- ゴルフコース・プール・ジャンプ台など対象建造物の位置・向き・形などが既知。
- 描画対象(選手の像には描画せず、水面、芝生面、雪面上のみに描画するため)の画像領域が既知。