

マルチメディア工学 6

仮想 / 拡張 / 複合現実感
(仮想空間と実空間の)
位置合わせ(Registration)

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
 - (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

仮想・拡張・複合現実感
(Virtual/Augmented(Mixed) Reality:
VR / AR・MR)

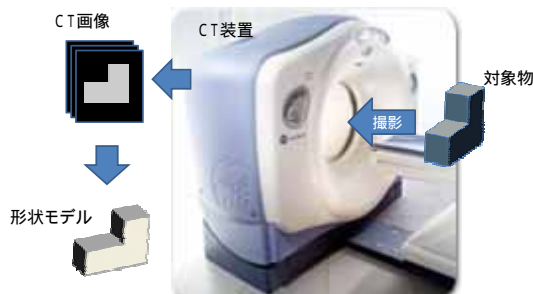
(仮想空間と現実空間の) 位置合わせ
(Registration)

位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理
- 拡張現実感応用における具体的目的
 - 計算機内(仮想世界)に3次元形状モデルがあり、その実物が実空間のどこに、どの向きにあるか求める。

位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



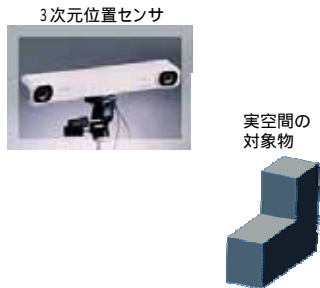
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



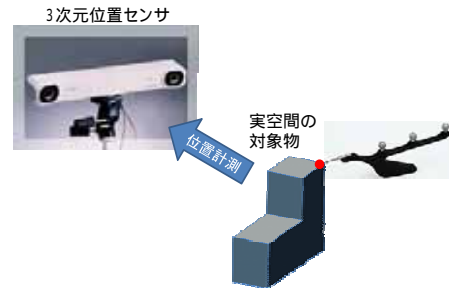
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



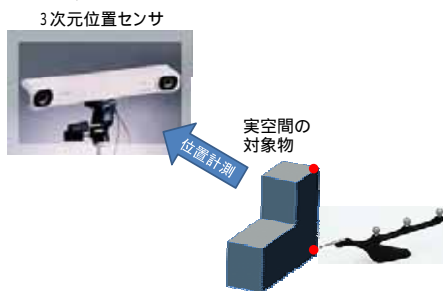
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



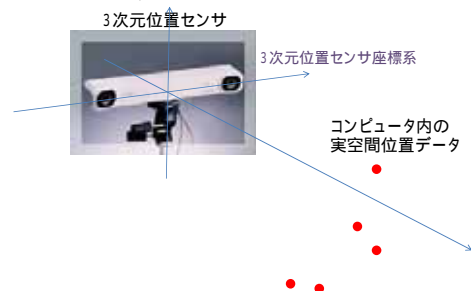
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



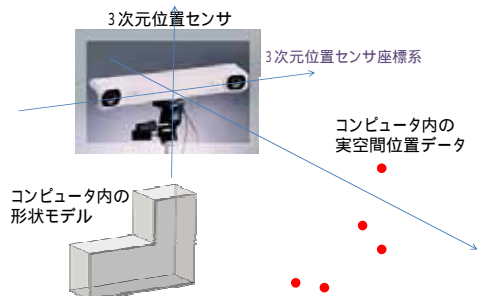
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



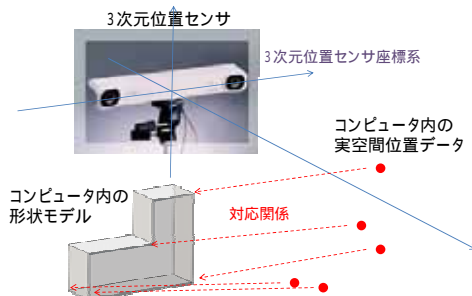
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



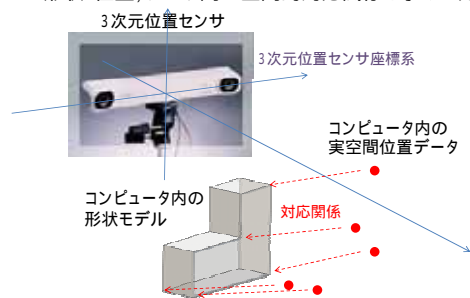
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



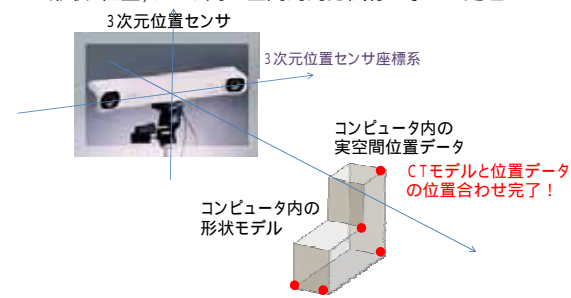
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



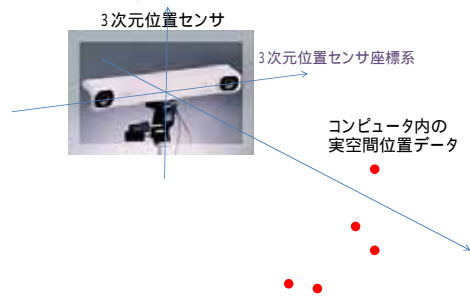
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



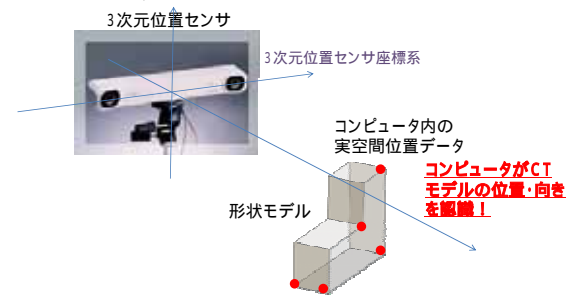
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



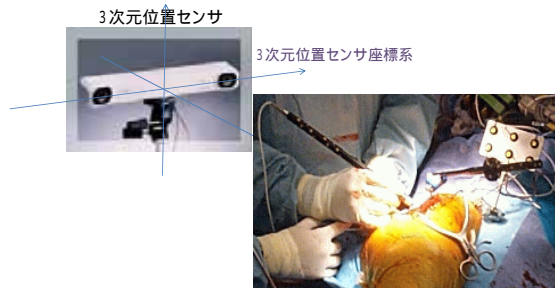
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



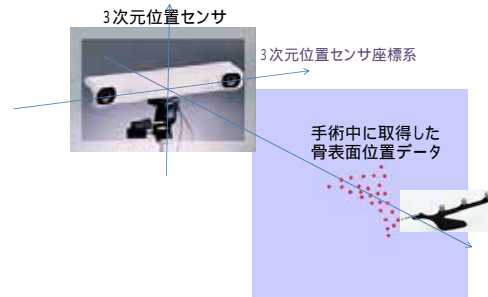
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



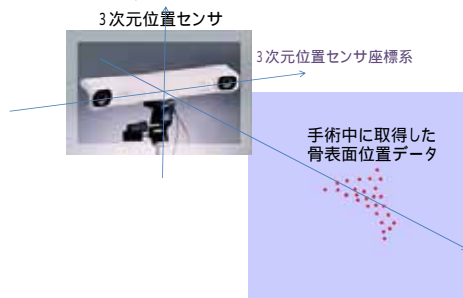
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



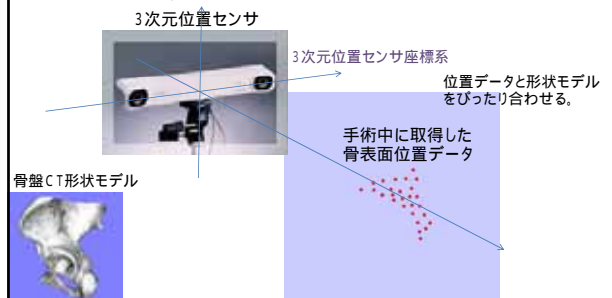
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



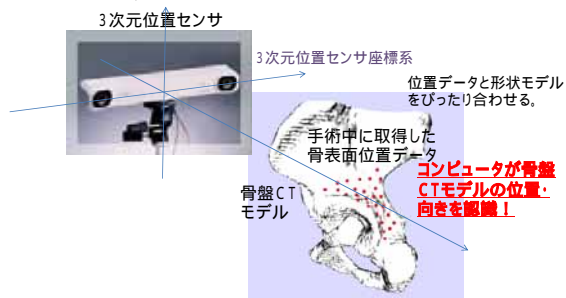
位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



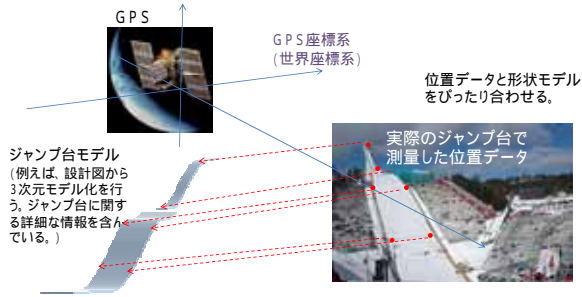
手術ナビゲーションシステム

基本機能: CTモデル上に術具位置を表示する。



位置合わせ (Registration) とは？

- 定義
 - 異なる装置・時刻(座標系)で取得された同一対象物の(画像・形状・位置)データ間の空間的対応関係を求める処理



スポーツ中継でのAR(拡張現実感)

- AR (Augmented Reality)



位置合わせの対象による分類

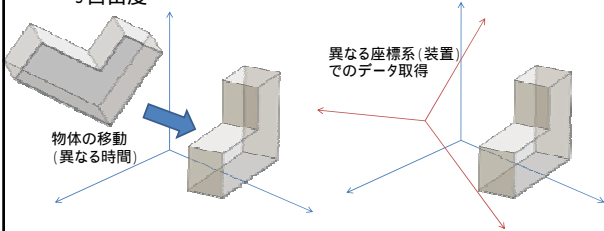
- 対象が変形しない(と仮定できる)場合
 - 剛体位置合わせ (Rigid registration)
 - 体内の骨とそのCT画像から再構成した3次元骨形状モデル
 - 設計図どおり作られた建造物と設計図から作った建造物の3次元モデル
- 対象が変形する場合
 - 非剛体位置合わせ (Nonrigid registration)
 - 体内の肝臓、肺や心臓とそのCT画像から再構成した形状モデル
 - 顔の形状モデルと、同一人物の異なる表情の顔

位置合わせの対象による分類

- 対象が変形しない(と仮定できる)場合
 - 剛体位置合わせ (Rigid registration)
 - 体内の骨とそのCT画像から再構成した3次元骨形状モデル
 - 設計図どおり作られた建造物と設計図から作った建造物の3次元モデル
- 対象が変形する場合
 - 非剛体位置合わせ (Nonrigid registration)
 - 体内の肝臓、肺や心臓とそのCT画像から再構成した形状モデル
 - 顔の形状モデルと、同一人物の異なる表情の顔

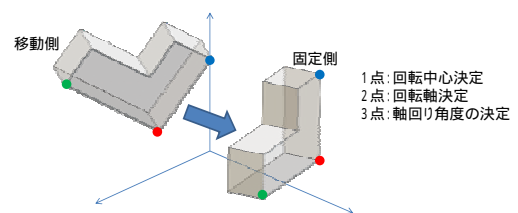
剛体位置合わせ

- 剛体位置合わせとは？
 - 対象が剛体(変形しない物体)であることを仮定して、同一対象に対する異なる2つのデータセットがぴったり重なり合うような座標変換を求める問題
 - 3次元の場合、位置変化 x, y, z 3自由度・姿勢変化 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 3自由度



対応点照合による剛体位置合わせ

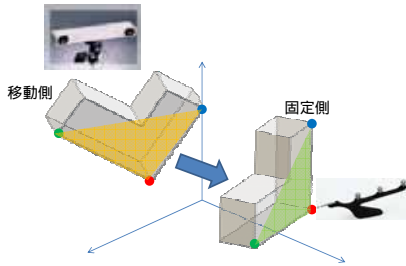
- 対応点の条件
 - 一直線上にない3点、あるいは、それ以上の点
- 対応点照合の例
 - 対象の形状モデル上の3点
 - 3次元位置センサで計測した実対象上の物理的同一点の3点



対応点照合による剛体位置合わせ

照合基準

- 対応する点間の距離の2乗和を最小にする = もっともびったり重なる。
(各対応点は、完全には一致しない、三角形は完全に合同ではない。)



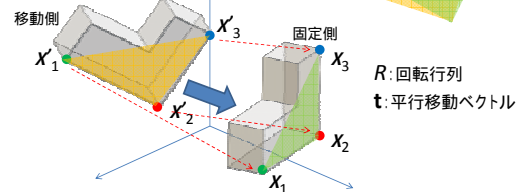
対応点照合による剛体位置合わせ

照合基準

- 対応する点間の距離の2乗和を最小にする = もっともびったり重なる。
(各対応点は、完全には一致しない、三角形は完全に合同ではない。)

$$f(R, t) = \sum_{i=1}^3 |x_i - (Rx'_i + t)|^2 \rightarrow \min$$

対応点間の距離の2乗和 $f(R, t)$ を最小にする R, t が、求めようとする剛体変換である。



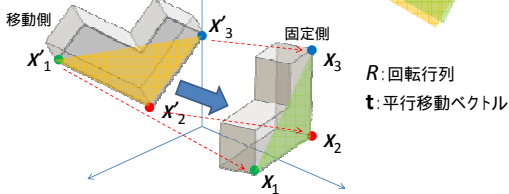
対応点照合による剛体位置合わせ

照合基準

- 対応する点間の距離の2乗和を最小にする = もっともびったり重なる。
(各対応点は、完全には一致しない、三角形は完全に合同ではない。)

$$f(R, t) = \sum_{i=1}^3 |x_i - (Rx'_i + t)|^2 \rightarrow \min$$

対応点間の距離の2乗和 $f(R, t)$ を最小にする R, t が、求めようとする剛体変換である。



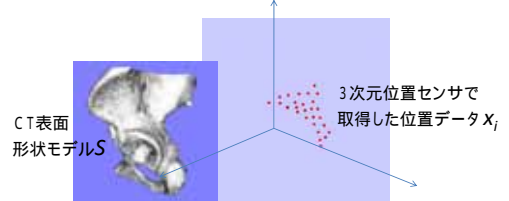
表面形状照合による剛体位置合わせ 対応点未知の場合

照合基準

- 表面と3次元点群データの照合
 - 各3次元点と表面の距離の2乗和を最小にする。

表面形状照合の例

- CT表面形状モデル S
- 3次元位置センサで取得した位置データ x_i



表面形状照合による剛体位置合わせ 対応点未知の場合

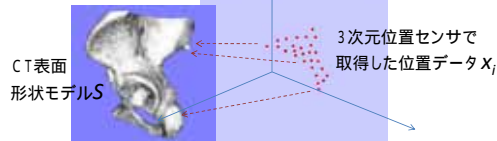
照合基準

- 表面と3次元点群データの照合
 - 各3次元点と表面の距離の2乗和を最小にする。

$$f(R, t) = \sum_{i=1}^N |x_i - (Rx'_i + t)|^2 \rightarrow \min$$

ただし、 x'_i は x_i からの S 上の最近点

R : S の回転行列
 t : S の平行移動ベクトル



表面形状照合による剛体位置合わせ 対応点未知の場合

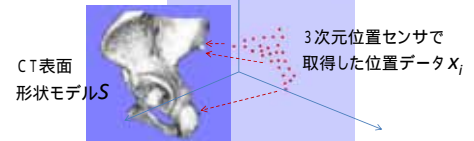
照合基準

- 表面と3次元点群データの照合
 - 各3次元点と表面の距離の2乗和を最小にする。

$$f(R, t) = \sum_{i=1}^N |x_i - (Rx'_i + t)|^2 \rightarrow \min$$

ただし、 x'_i は x_i からの S 上の最近点

R : S の回転行列
 t : S の平行移動ベクトル



この最小二乗法による処理を収束するまで繰り返す。

表面形状照合による剛体位置合わせ 対応点未知の場合

- 照合基準
 - 表面と3次元点群データの照合
 - 各3次元点と表面の距離の2乗和を最小にする。

$$f(R, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{x}_i - (R\mathbf{x}'_i + \mathbf{t})\|^2 \rightarrow \min$$

ただし、 \mathbf{x}'_i は \mathbf{x}_i からの S 上の最近点

この最小二乗法による処理を収束するまで繰り返す。

R : S の回転行列
 \mathbf{t} : S の平行移動ベクトル

CT表面形状モデル S

3次元位置センサで取得した位置データ \mathbf{x}_i

表面形状照合による剛体位置合わせ 対応点未知の場合

- 照合基準
 - 表面と3次元点群データの照合
 - 各3次元点と表面の距離の2乗和を最小にする。

$$f(R, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{x}_i - (R\mathbf{x}'_i + \mathbf{t})\|^2 \rightarrow \min$$

ただし、 \mathbf{x}'_i は \mathbf{x}_i からの S 上の最近点

この最小二乗法による処理を収束するまで繰り返す。

繰返し最近点位置合わせ法
Iterative Closest Point (ICP)
registration algorithm

CT表面形状モデル S

3次元位置センサで取得した位置データ \mathbf{x}_i

表面形状照合による剛体位置合わせ

- 局所解 (極小解, Local minimum) の問題
 - 局所解とは?
 - 各3次元点と表面の距離の2乗和を最小にする (最もぴったりと合う) 解を求めたいが、非線形最小2乗問題であるので、極小にする解しか求めることができない。

線形最小2乗 (必ず1つの極小値)
 $y = (2x+1)^2$

非線形最小2乗 (複数の極小値)
 $y = (\text{複雑な式})^2$

初期値

本当の解

位置・姿勢パラメータ (6次元)

表面形状照合による剛体位置合わせ

- 局所解 (極小解, Local minimum) の問題
 - なぜ表面形状照合では局所解が問題となるか?
 - 対応点照合も非線形最小2乗であるが、捕捉域が広い。

曖昧さ小

曖昧さ大

捕捉域が広い

捕捉域が狭い

局所解

本当の解

位置・姿勢パラメータ (6次元)

表面形状照合による剛体位置合わせ

- 局所解 (極小解, Local minimum) の回避
 - 対応点照合 (粗照合) 表面形状照合 (精密化)

術前プリセット

術中取得

CT表面形状モデル

3次元位置センサデータ

曖昧さ小 位置合わせ誤差大

曖昧さ大 位置合わせ誤差小

捕捉域が広い

捕捉域が狭い

本当の解

位置・姿勢パラメータ (6次元)

位置合わせの誤差

- 誤差の定義 (古くからある誤差理論)
 - 偏り (Bias)、系統誤差 (Systematic Error)
 - ばらつき、偶然誤差 (Random Error)

偏り小 ばらつき小

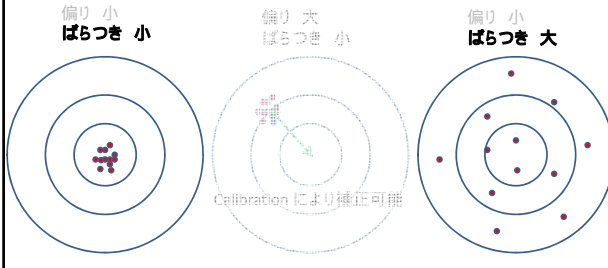
偏り大 ばらつき小

偏り小 ばらつき大

Calibration により補正可能

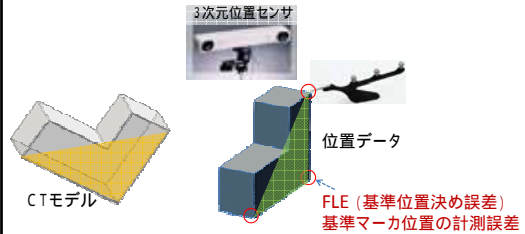
位置合わせの誤差

- 誤差の定義 (古くからある誤差理論)
 - 偏り (Bias)、系統誤差 (Systematic Error)
 - **ばらつき、偶然誤差 (Random Error)**



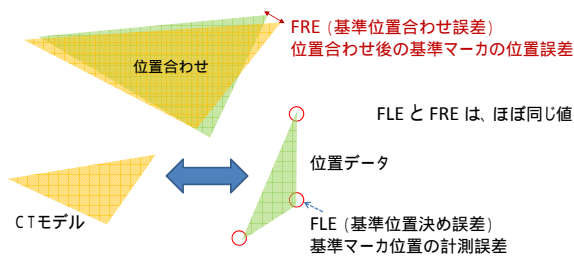
対応点照合に基づく位置合わせ誤差

- 位置合わせ誤差の定義 (Fitzpatrick et al. IEEE-TMI 1998)
 - FLE (Fiducial Localization Error) 基準位置決め誤差



対応点照合に基づく位置合わせ誤差

- 位置合わせ誤差の定義 (Fitzpatrick et al. IEEE-TMI 1998)
 - FLE (Fiducial Localization Error) 基準位置決め誤差
 - FRE (Fiducial Registration Error) 基準位置合わせ誤差

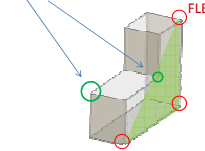


対応点照合に基づく位置合わせ誤差

- 位置合わせ誤差の定義 (Fitzpatrick et al. IEEE-TMI 1998)
 - FLE (Fiducial Localization Error) 基準位置決め誤差
 - FRE (Fiducial Registration Error) 基準位置合わせ誤差
 - **TRE (Target Registration Error) 標的位置合わせ誤差**

TRE (標的位置合わせ誤差)
位置合わせ後の標的(ナビゲーション対象)の位置誤差

TREは標的の位置に依存する。

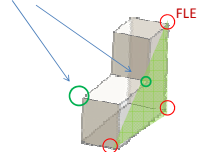


対応点照合に基づく位置合わせ誤差

- 位置合わせ誤差の定義 (Fitzpatrick et al. IEEE-TMI 1998)
 - FLE (Fiducial Localization Error) 基準位置決め誤差
 - FRE (Fiducial Registration Error) 基準位置合わせ誤差
 - **TRE (Target Registration Error) 標的位置合わせ誤差**

TRE (標的位置合わせ誤差)
位置合わせ後の標的(ナビゲーション対象)の位置誤差

TREは標的の位置に依存する。

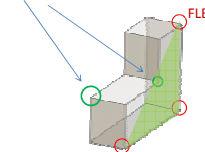


対応点照合に基づく位置合わせ誤差

- 位置合わせ誤差の定義 (Fitzpatrick et al. IEEE-TMI 1998)
 - FLE (Fiducial Localization Error) 基準位置決め誤差
 - FRE (Fiducial Registration Error) 基準位置合わせ誤差
 - **TRE (Target Registration Error) 標的位置合わせ誤差**

TRE (標的位置合わせ誤差)
位置合わせ後の標的(ナビゲーション対象)の位置誤差

TREは標的の位置に依存する。

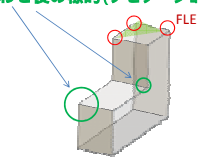


対応点照合に基づく位置合わせ誤差

- 位置合わせ誤差の定義 (Fitzpatrick et al. IEEE-TMI 1998)
 - FLE (Fiducial Localization Error) 基準位置決め誤差
 - FRE (Fiducial Registration Error) 基準位置合わせ誤差
 - TRE (Target Registration Error) 標的的位置合わせ誤差

TRE (標的的位置合わせ誤差)

位置合わせ後の標的(ナビゲーション対象)の位置誤差



TREは位置合わせの基準マーカ配置に依存する。

TREが小さくなる条件

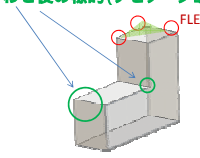
- 各マーカ位置がマーカ群の重心から離れている。
- 標的的位置がマーカ群の重心に近い。
- FLEが小さい。
- マーカ数が多い(影響は他の因子より弱い)。

対応点照合に基づく位置合わせ誤差

- 位置合わせ誤差の定義 (Fitzpatrick et al. IEEE-TMI 1998)
 - FLE (Fiducial Localization Error) 基準位置決め誤差
 - FRE (Fiducial Registration Error) 基準位置合わせ誤差
 - TRE (Target Registration Error) 標的的位置合わせ誤差

TRE (標的的位置合わせ誤差)

位置合わせ後の標的(ナビゲーション対象)の位置誤差



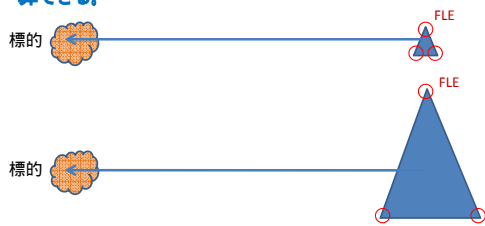
TREは位置合わせの基準マーカ配置に依存する。

TREが小さくなる条件

- 各マーカ位置がマーカ群の重心から離れている。
- 標的的位置がマーカ群の重心に近い。
- FLEが小さい。
- マーカ数が多い(影響は他の因子より弱い)。

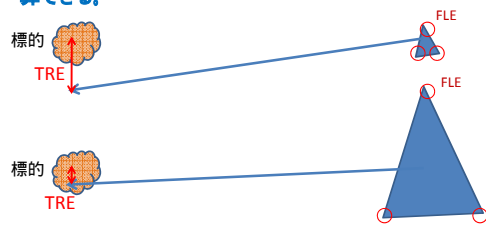
位置合わせ誤差:まとめ

- 位置合わせ誤差として、ナビゲーション対象の位置における TRE (Target Registration Error) 「標的的位置合わせ誤差」を評価する必要がある。
- 対応点照合による位置合わせでは、点の配置と各点における FLE が与えられれば、あらゆる標的 position での TRE を理論的に計算できる。



位置合わせ誤差:まとめ

- 位置合わせ誤差として、ナビゲーション対象の位置における TRE (Target Registration Error) 「標的的位置合わせ誤差」を評価する必要がある。
- 対応点照合による位置合わせでは、点の配置と各点における FLE が与えられれば、あらゆる標的 position での TRE を理論的に計算できる。



手術ナビゲーションシステム

基本機能: CTモデル上に術具位置を表示する。



復習:同次座標

(Homogeneous coordinates)

- 平行移動 t と 3×3 行列の回転 R (およびその他座標変換) を一つの 4×4 行列 T で表現

$$\begin{matrix} R_1 x_0 + t_1 \\ R_2(R_1 x_0 + t_1) + t_2 \\ R_3(R_2(R_1 x_0 + t_1) + t_2) + t_3 \end{matrix} \quad \rightarrow \quad \begin{matrix} x'_0 T_1 \\ x'_0 T_1 T_2 \\ x'_0 T_1 T_2 T_3 \end{matrix}$$

- 投影 P も 4×3 行列統一的に表現

$$x'_0 T_1 T_2 T_3 P$$

