ロボットソフトウェア特論（14−1）

2017.7.19

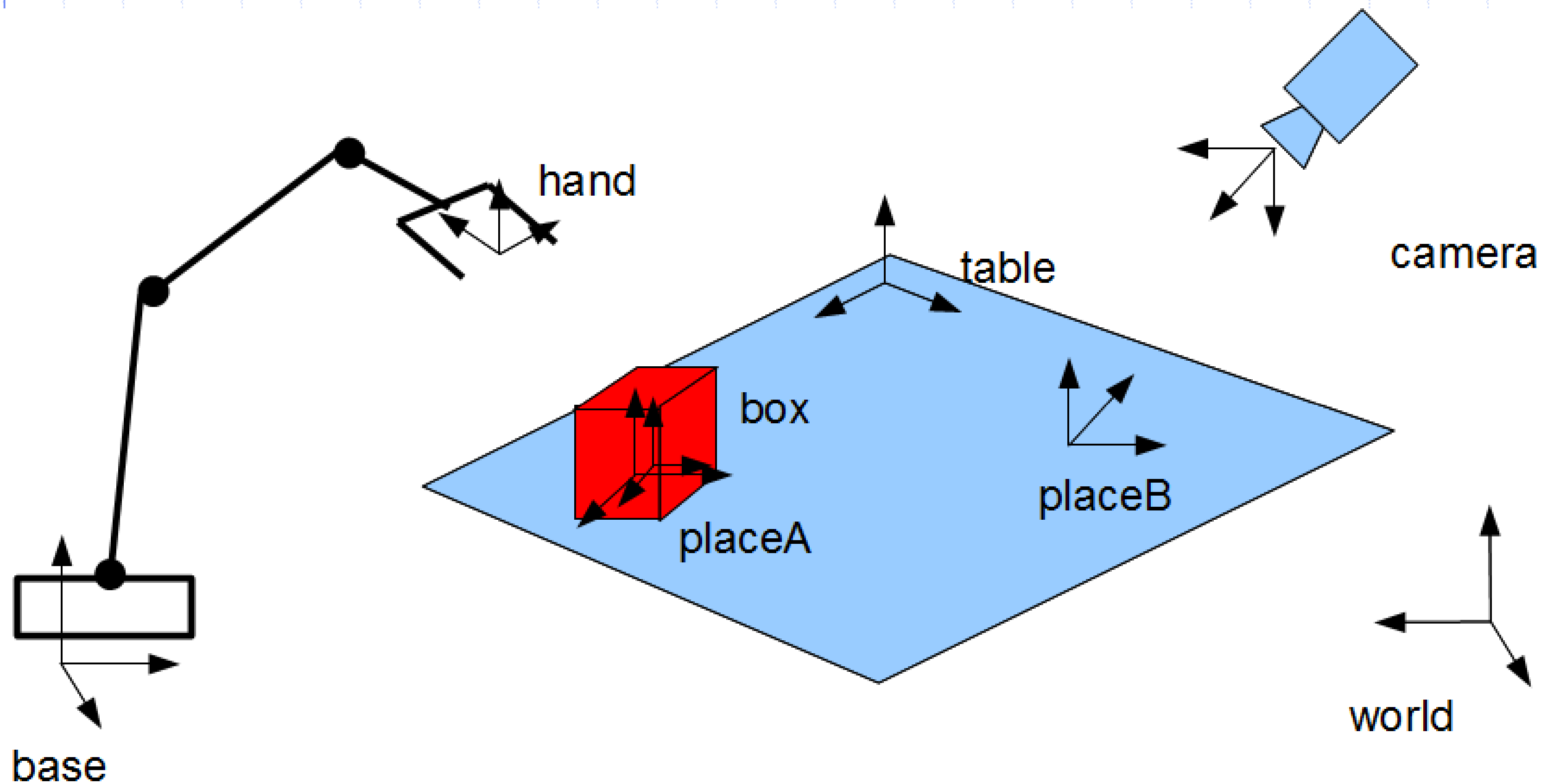
電気通信大学
大学院情報理工学研究科
末廣尚士

19 物体の位置姿勢計測とキャリブレーション

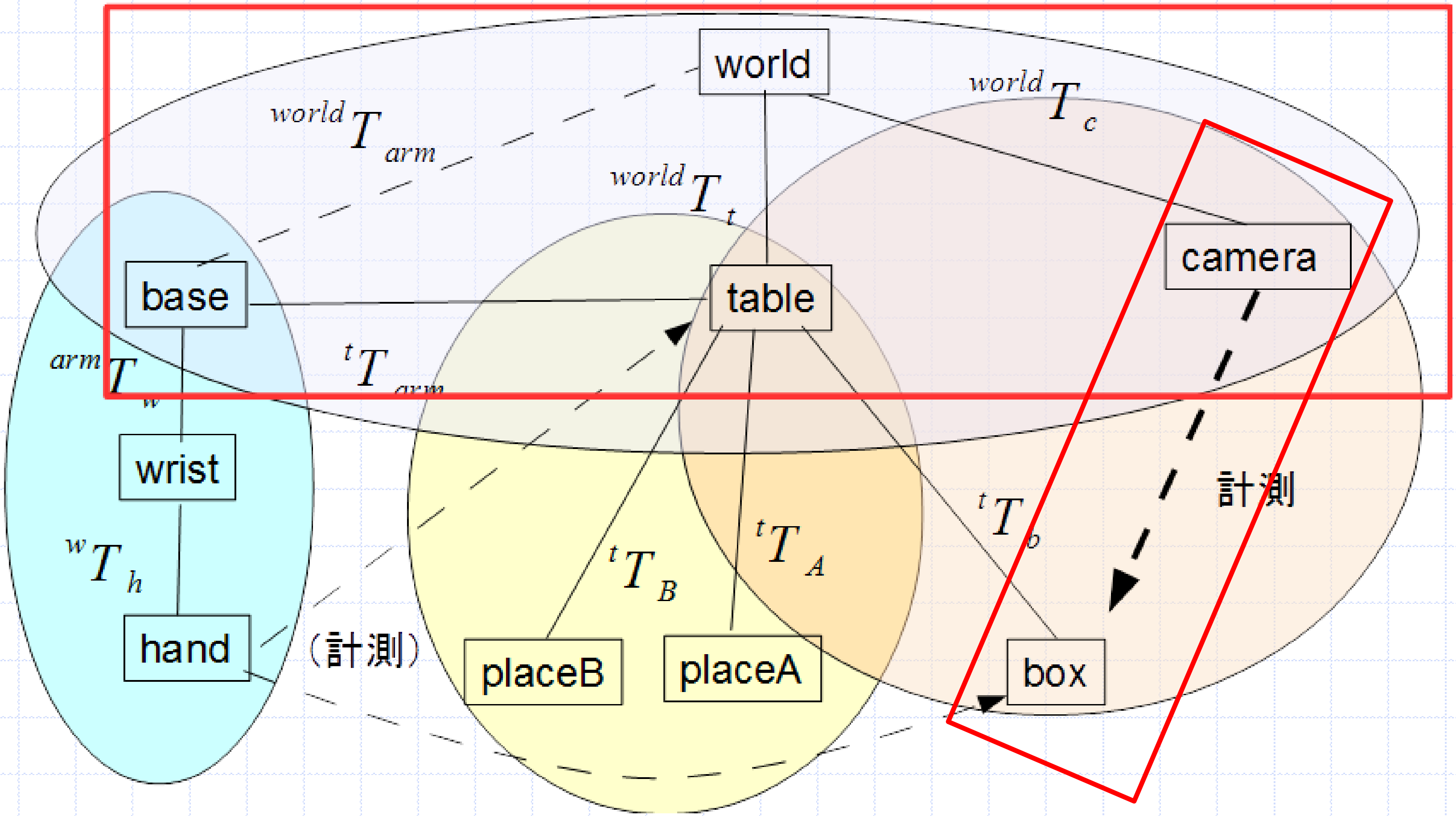
- 座標系表現でロボットを動かすには座標系(座標変換)を正しく定める必要がある
- 「物体の位置・姿勢計測」もその一つ，というか，これが座標系のキャリブレーションの基本となる．
- 「ハンド・アイ・キャリブレーション」も同様

– 座標系を用いた表現

- table上のplace_Aにあるboxをplace_Bに動かす。



– 座標系の関係の決まり方



– 座標系の決まり方

$^{t}T_{A}$　$^{t}T_{B}$

場所を表すだけの形のない座標系は計測が難しい．
多くの場合，**設計値で決める．**
講義：座標系の表現

$^{arm}T_{w}$

$^{w}T_{h}$

アームやハンドの**設計値と運動学で決まる．**
講義：順運動学，逆運動学

$^{world}T_{t}$　$^{world}T_{c}$

$^{world}T_{arm}$　$^{t}T_{arm}$

設備の**レイアウト設計値で大まかな値が決まる．**
作業を行う場合には，精密な**計測が必要となる．**
移動ロボットの場合は移動ベース座標の**計測が必要．**
講義：座標系のキャリブレーション

$^{t}T_{b}$

工場などでは操作対象は**設計時に決められた場所に置くのが基本．**
日常生活，未整備環境では，カメラなどによる**計測が必要となる．**
講義：物体座標系の精密計測
講義外：物体認識，その他

– 座標系をどうやって決めるか

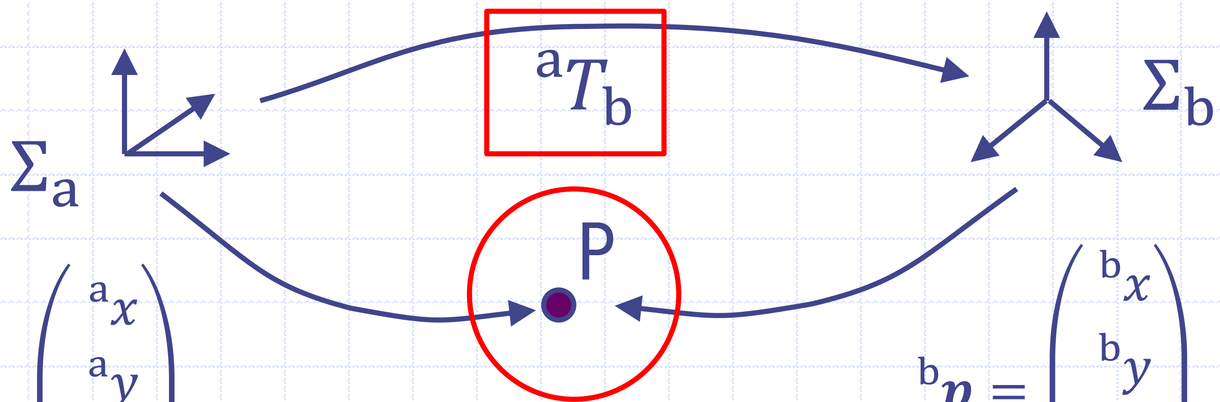
- 設計値
  CADやレイアウト図など
  実際にどれくらい精確に設計値が実現できているかは場合によって変わる
- 計測
  物差し，距離計，カメラなどで測る
  実はロボットアームも立派な3次元計測器

– 座標系計測の基本手順

- world座標系を定める
  - アームベース
  - チェスボード（キャリブレーションボード）
- world–計測系のキャリブレーション
  - worldがアームベースの場合，**ハンドアイキャリブレーション**
  - worldがチェスボードの場合，，，openCVの外部パラメタ．実は**物体の位置姿勢計測**問題．
- 後は，計測系⇔物体，アーム系の繰り返し
  - **物体の位置･姿勢計測**
  - **ハンドアイキャリブレーション**

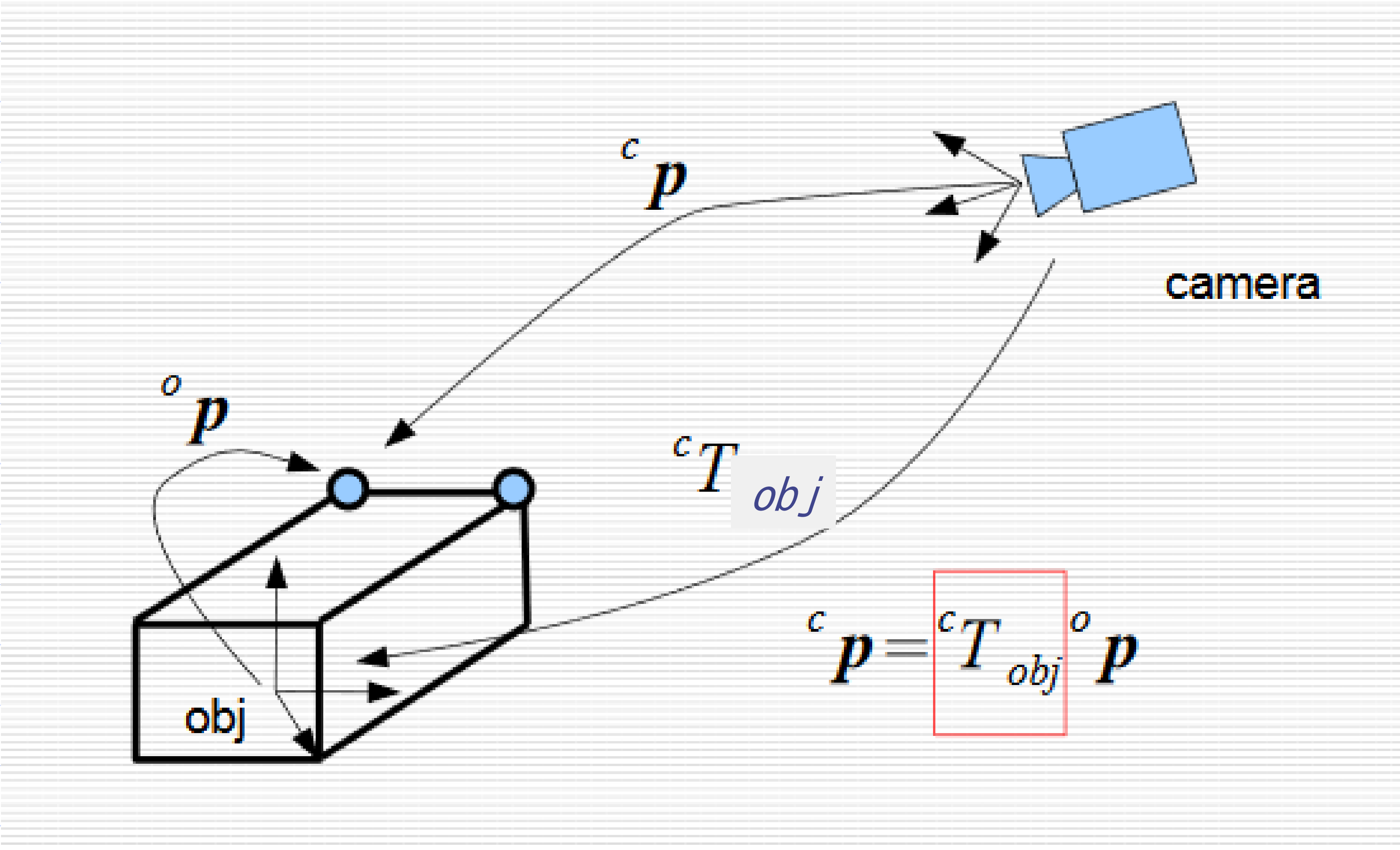
– キャリブレーション　ver. 1

- 二つの座標系Σ_a, Σ_bの座標変換 ${}^\mathrm{a}\mathrm{T}_\mathrm{b}$を求める
- 同じ点Pをそれぞれの座標系から測る
- すると ${}^\mathrm{a}\boldsymbol{p} = {}^\mathrm{a}T_\mathrm{b}\,{}^\mathrm{b}\boldsymbol{p}$



$$
{}^\mathrm{a}\boldsymbol{p} = \begin{pmatrix} {}^\mathrm{a}x \\ {}^\mathrm{a}y \\ {}^\mathrm{a}z \\ 1 \end{pmatrix}
\qquad
{}^\mathrm{b}\boldsymbol{p} = \begin{pmatrix} {}^\mathrm{b}x \\ {}^\mathrm{b}y \\ {}^\mathrm{b}z \\ 1 \end{pmatrix}
$$

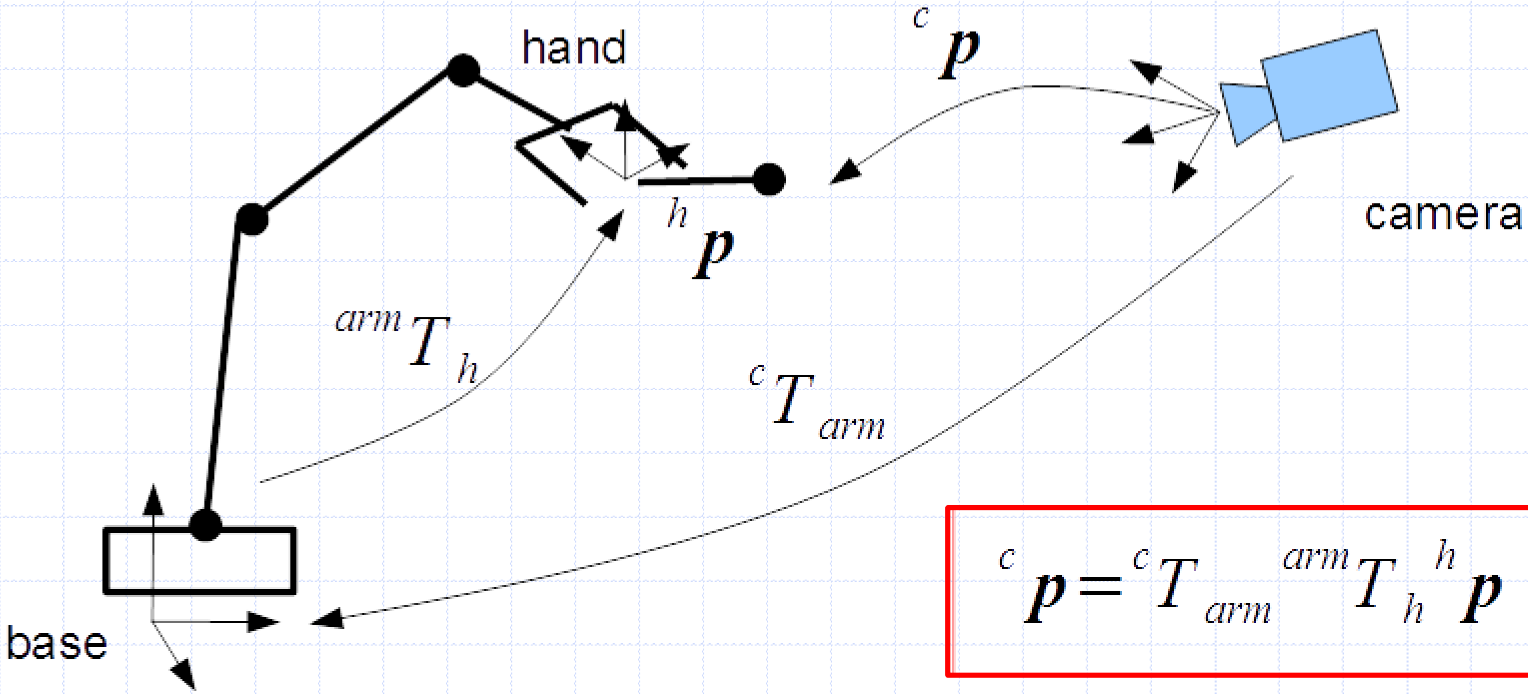
– 例1：物体の位置計測



${}^{c}\boldsymbol{p}$
camera
${}^{o}\boldsymbol{p}$
${}^{c}T_{obj}$
obj
${}^{c}\boldsymbol{p} = \boxed{{}^{c}T_{obj}}\,{}^{o}\boldsymbol{p}$

– 例2：ハンドアイキャリブレーション

- ハンドから既知の位置に固定されたマークの位置をアームの姿勢を変えながら多数回計測し，最小2乗推定を行う．



$$\boxed{{}^{c}\boldsymbol{p} = {}^{c}T_{arm}\,{}^{arm}T_{h}\,{}^{h}\boldsymbol{p}}$$

– キャリブレーション ver.1 (解法1)

- ${}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{p} = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}}\,{}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}}\,{}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p} \Rightarrow {}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{p} = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}}\,{}^{\mathrm{arm}}\boldsymbol{p}$
- ここで ${}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}}$を回転と並進で表すと
- ${}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{p} = {}^{\mathrm{c}}R_{\mathrm{arm}}\,{}^{\mathrm{arm}}\boldsymbol{p} + \boldsymbol{d}$
- ${}^{\mathrm{c}}R_{\mathrm{arm}} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{e}_{\mathrm{x}}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{y}}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{z}}^{\mathrm{T}} \end{pmatrix}$ とおくと ${}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{p} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{e}_{\mathrm{x}} \cdot {}^{\mathrm{arm}}\boldsymbol{p} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{y}} \cdot {}^{\mathrm{arm}}\boldsymbol{p} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{z}} \cdot {}^{\mathrm{arm}}\boldsymbol{p} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \boldsymbol{x} \cdot \boldsymbol{d} \\ \boldsymbol{y} \cdot \boldsymbol{d} \\ \boldsymbol{z} \cdot \boldsymbol{d} \end{pmatrix}$
- これを書き直すと ${}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{p} = \begin{pmatrix} {}^{\mathrm{arm}}\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{0} & {}^{\mathrm{arm}}\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & {}^{\mathrm{arm}}\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{z}^{\mathrm{T}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{e}_{\mathrm{x}} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{y}} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{z}} \\ \boldsymbol{d} \end{pmatrix}$

– キャリブレーション ver.1 (解法1)

- n点を連立させて

$$
\begin{pmatrix} \vdots \\ {}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{p} \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} & & \vdots & \\ {}^{\mathrm{arm}}\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}} \\ \mathbf{0} & {}^{\mathrm{arm}}\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}} & \mathbf{0} & \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & {}^{\mathrm{arm}}\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{z}^{\mathrm{T}} \\ & & \vdots & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{e}_{\mathrm{x}} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{y}} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{z}} \\ \boldsymbol{d} \end{pmatrix}
$$

これを $\boldsymbol{b} = A \begin{pmatrix} \boldsymbol{e}_{\mathrm{x}} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{y}} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{z}} \\ \boldsymbol{d} \end{pmatrix}$ とおいて，連立方程式として解く.

– キャリブレーション ver.1（解法1）

- 疑似逆行列を使って解くと
- $$\begin{pmatrix} \boldsymbol{e}_{\mathrm{x}} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{y}} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{z}} \\ \boldsymbol{d} \end{pmatrix} = A^{+}\boldsymbol{b} \text{ すなわち } {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} = \begin{pmatrix} & {}^{\mathrm{c}}R_{\mathrm{arm}} & & \boldsymbol{d} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
- この解法の問題点は ${}^{\mathrm{c}}R_{\mathrm{arm}}$ が直交行列である保証がないこと.
- ある程度の歪みも含めてキャリブレーションできたと考えることも出来るが，計測点数が不十分だと過学習の可能性もある.
- 収束計算が不要なので初期解を得るには有力な手法

– キャリブレーション ver.1 (解法2)

- ${}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{p} = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} {}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}} {}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p}$

これを

$$f(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} T(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) {}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}} {}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p} - {}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{p}$$

$$\boldsymbol{q} = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)^{\mathrm{T}}$$

$$T(\boldsymbol{q}) = T_{\mathrm{xyz}}(x, y, z) T_{\alpha}(\alpha) T_{\beta}(\beta) T_{\gamma}(\gamma)$$

整理して,

$$f(\boldsymbol{q}) = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} T(\boldsymbol{q}) {}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}} {}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p} - {}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{p}$$

として，ニュートン法を使う.

– キャリブレーション ver.1 (解法2)

◆ $T(\boldsymbol{q})$を$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{0}$で偏微分する

$$\frac{\partial T_{\mathrm{xyz}}}{\partial x} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \frac{\partial T_{\mathrm{xyz}}}{\partial y} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \frac{\partial T_{\mathrm{xyz}}}{\partial z} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial T\mathrm{\alpha}}{\partial \alpha} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \frac{\partial T_{\mathrm{\beta}}}{\partial \beta} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \frac{\partial T_{\mathrm{\gamma}}}{\partial \gamma} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

– キャリブレーション ver.1 (解法2)

◆ $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q})$を$\boldsymbol{q}=\boldsymbol{0}$で偏微分する

$$\frac{\partial f}{\partial x} = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} {}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}}\ {}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p} = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \frac{\partial f}{\partial y} = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \frac{\partial f}{\partial z} = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} {}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}}\ {}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p} = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times {}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}}\ {}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p} \right)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \beta} = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \times {}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}}\ {}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p} \right) \quad \frac{\partial f}{\partial \gamma} = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \times {}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}}\ {}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p} \right)$$

– キャリブレーション ver.1（解法2）

◆ 偏微分行列（ヤコビアン）を書き下す

$$\begin{pmatrix} \vdots \\ \dfrac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{q}} \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \boldsymbol{x} & \boldsymbol{y} & \boldsymbol{z} & {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}}\left(\begin{pmatrix}1\\0\\0\end{pmatrix} \times {}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}}\ {}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p}\right) & {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}}\left(\begin{pmatrix}0\\1\\0\end{pmatrix} \times {}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}}\ {}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p}\right) & {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}}\left(\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix} \times {}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}}\ {}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p}\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}$$

ただし ${}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} = (\boldsymbol{x} \quad \boldsymbol{y} \quad \boldsymbol{z})$

– キャリブレーション ver.1（解法2）

◆ニュートン法の適用

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q}) \approx \boldsymbol{f}(\mathbf{0}) + \left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\boldsymbol{q} = \mathbf{0}$$

$$\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\boldsymbol{q} = -\boldsymbol{f}(\mathbf{0})$$

これを疑似逆行列を使って解く

$$\boldsymbol{q} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^{+}\boldsymbol{f}(\mathbf{0})$$

$T_{k+1} = T_k T(\boldsymbol{q})$ として収束するまで繰り返す.

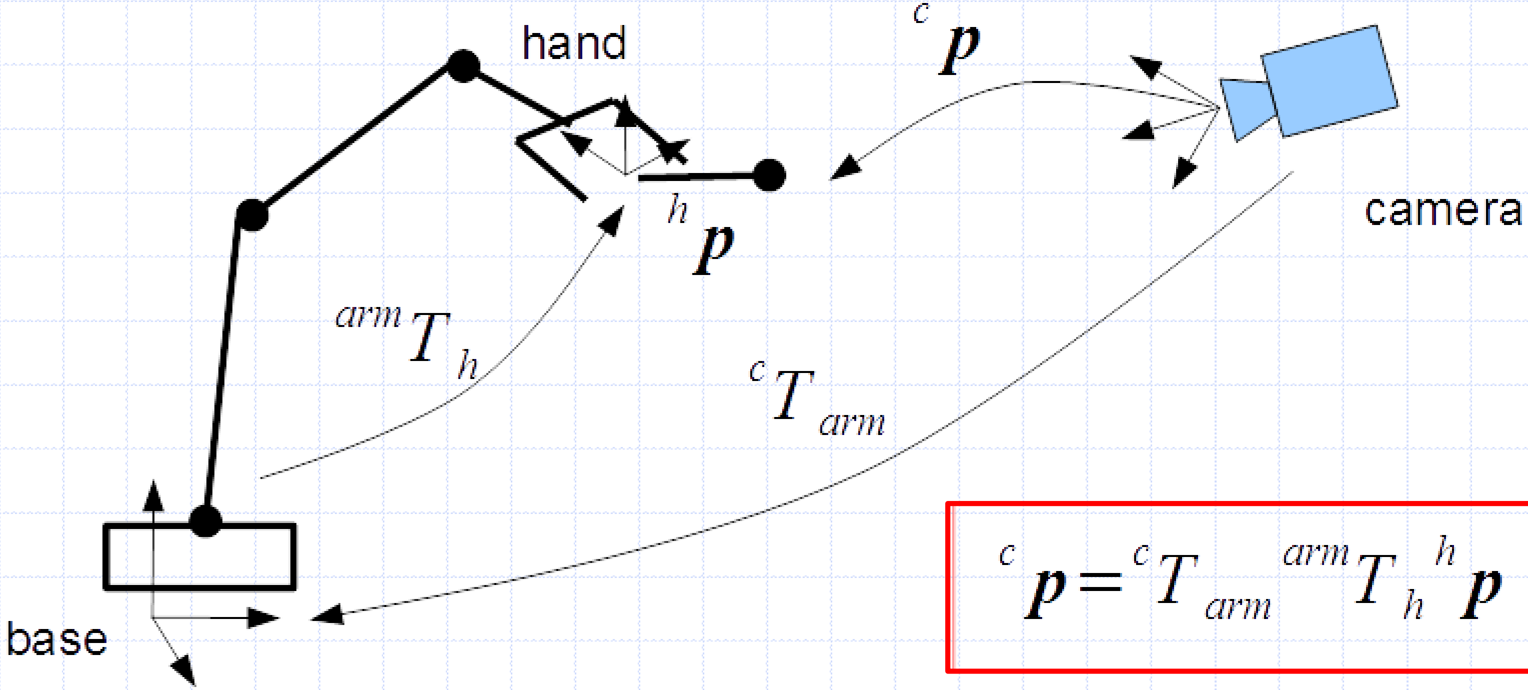
− 解法2の利点

- 未知パラメタが増えた場合でも定式化しやすい
  => ver. 2

- 非線形を含めて様々な制約を入れることができるので応用範囲が広い
- 座標変換の部分は定式化できるので座標系をうまくとると制約を簡単に書ける
  => 計測点の様々な面へのフィッティング

– ハンドアイキャリブレーション ver.2

- ハンドから**未知の位置**に固定されたマークの位置をアームの姿勢を変えながら多数回計測し，最小2乗推定を行う．



$$\boxed{{}^{c}\boldsymbol{p} = {}^{c}T_{arm}\,{}^{arm}T_{h}\,{}^{h}\boldsymbol{p}}$$

– キャリブレーション ver.2 (解法)

$$ {}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{p} = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} {}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}} {}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p} $$

これを

$$ f(\boldsymbol{q}) = f\left(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma, p_x, p_y, p_z\right) $$
$$ = {}^{\mathrm{c}}T_{\mathrm{arm}} T(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) {}^{\mathrm{arm}}T_{\mathrm{h}}\left({}^{\mathrm{h}}\boldsymbol{p} + \boldsymbol{p}(p_x, p_y, p_z)\right) - {}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{p} $$

$$ \boldsymbol{q} = \left(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma, p_x, p_y, p_z\right)^{\mathrm{T}} $$

$$ T(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) = T_{\mathrm{xyz}}(x, y, z) T_{\alpha}(\alpha) T_{\beta}(\beta) T_{\gamma}(\gamma) $$

として，ニュートン法を使う．

ver. 1との違いは$\boldsymbol{p}(p_x, p_y, p_z)$の部分だけ．偏微分は簡単に求められるのであとは省略．

位置姿勢計測，キャリブレーションのまとめ

- 考え方は，位置姿勢計測もキャリブレーションも同じ．
- 未知パラメタが正しく求められた場合に成立する等式を未知パラメタについて解く．
  - 未知パラメタに関して線形方程式が得られれば疑似逆行列ですぐに解ける．
  - 非線形の場合は，ヤコビアンを使って局所的に線形化して，繰り返し法で解く．
  - 未知パラメタをまとめて解く方が全体最適化がやりやすいが，多すぎると収束性が悪くなることがあるので要注意
- 座標変換パラメタの推定問題に落とし込めれば定式化は比較的簡単