姿勢推定における姿勢表現の比較
100物体を用いた実験

広島大学工学部　田中聡子
広島大学工学研究科情報工学専攻　原田健吾
玉木徹
Bisser Raytchev
金田和文
奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究所　天野敏之

姿勢推定

画像

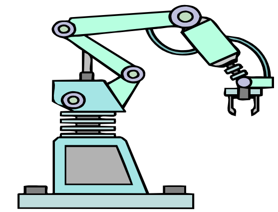
画像処理

物体の情報

45度
傾いている

応用例

・ロボットアーム

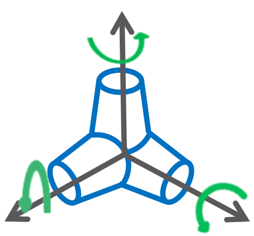


アプローチ

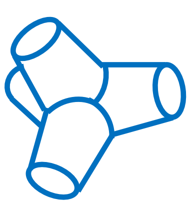
・モデルベースの手法

テスト画像

形状モデル



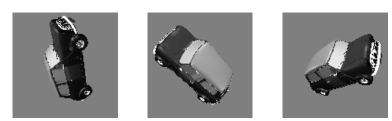
画像処理



照合

・見えに基づく手法

学習

画像				●●●
姿勢	p_1	p_2	p_3	●●●

テスト画像

比較

画像と姿勢を対応付ける

p

線形回帰を用いた見えに基づく手法

学習

$\mathbf{x}_j$ 画像ベクトル

$\mathbf{p}_j$ 姿勢表現

$$\mathbf{p}_j = F\mathbf{x}_j$$

学習画像

$\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \mathbf{x}_3 \quad \mathbf{x}_4 \quad \cdots$

姿勢パラメータ $\mathbf{p}_1 \quad \mathbf{p}_2 \quad \mathbf{p}_3 \quad \mathbf{p}_4 \quad \cdots$

画像と姿勢の対応関係 : F

推定

？？

$$\mathbf{p} \cong F\mathbf{x}$$

最適な姿勢表現 $\mathbf{p}$ は何か？

3自由度での線形回帰による姿勢表現に必要な性質

連続性 と **一対一**

玉木ら[‘08MIRU]

連続性

テスト画像

学習画像の線形和

$$\mathbf{x} = \sum b_j \mathbf{x}_j$$

⇔

姿勢

学習姿勢の線形和

$$\mathbf{p} \cong F\mathbf{x} = \sum b_j F\mathbf{x}_j = \sum b_j \mathbf{p}_j$$

b_j :重み


0°

$= \cdots +$


340°

$+$


350°

$+$


10°

$+$


20°

$+ \cdots$

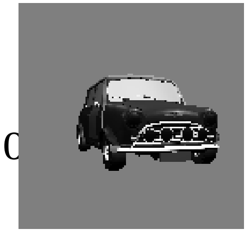
学習画像・姿勢

連続性

画像

$= a_{350}$

$+ a_{10}$



姿勢 $0°$ $350°$ $10°$

姿勢表現	不連続点	学習・推定
× 角度	2π	$180° \cong a_{350} \cdot 350° + a_{10} \cdot 10°$
○ sin cos	なし	$\sin(0°) \cong a_{350} \sin(350°) + a_{10} \sin(10°)$ $\cos(0°) \cong a_{350} \cos(350°) + a_{10} \cos(10°)$

姿勢表現は連続でなければならない

一対一

画像 $\mathbf{x}$ に対して、姿勢 $\mathbf{p}$ が一対一に対応しなければならない

一対一が満たされない場合

$\mathbf{p}_1$

$\mathbf{p}_2$

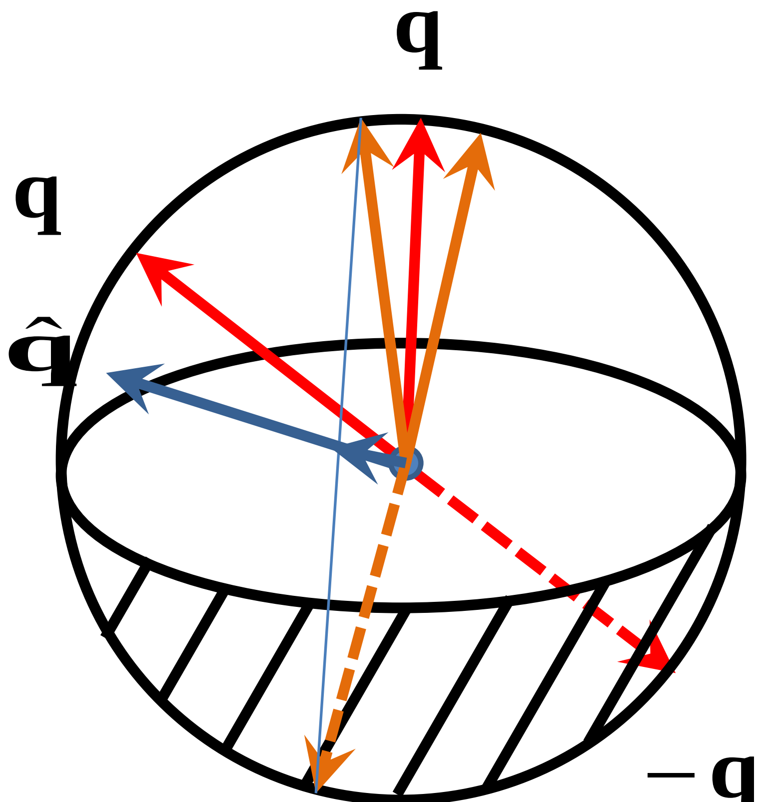
$$\mathbf{p}_1 \neq \mathbf{p}_2$$

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{p}_1 &= F\mathbf{x} \\ \mathbf{p}_2 &= F\mathbf{x} \end{aligned} \right.$$

$\mathbf{p}_1$ $\mathbf{p}_2$ を同時に学習することはできない

一対二

例：単位四元数



4次元空間の単位球

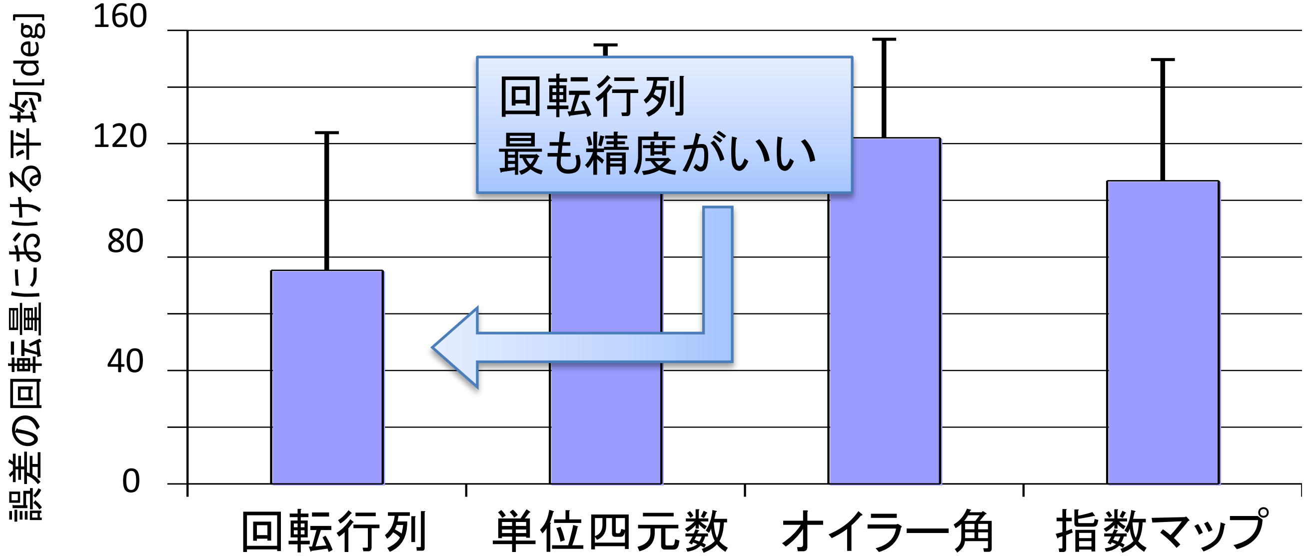
姿勢表現は連続でなければならない

姿勢表現の性質

姿勢表現	パラメータ	一対一	連続性
回転行列	$[r_{11}, \cdots r_{32}, r_{33}]^T$	○	○
単位四元数	$[q_0, q_1, q_2, q_3]^T$	×	○
オイラー角	$[\theta_x, \theta_y, \theta_z]^T$	×	×
指数マップ	$[\omega_1, \omega_2, \omega_3]^T$	×	×

実験

原田ら['09MIRU]による実験的評価



問題点：
推定した物体が1体なので実験の信頼性が低い

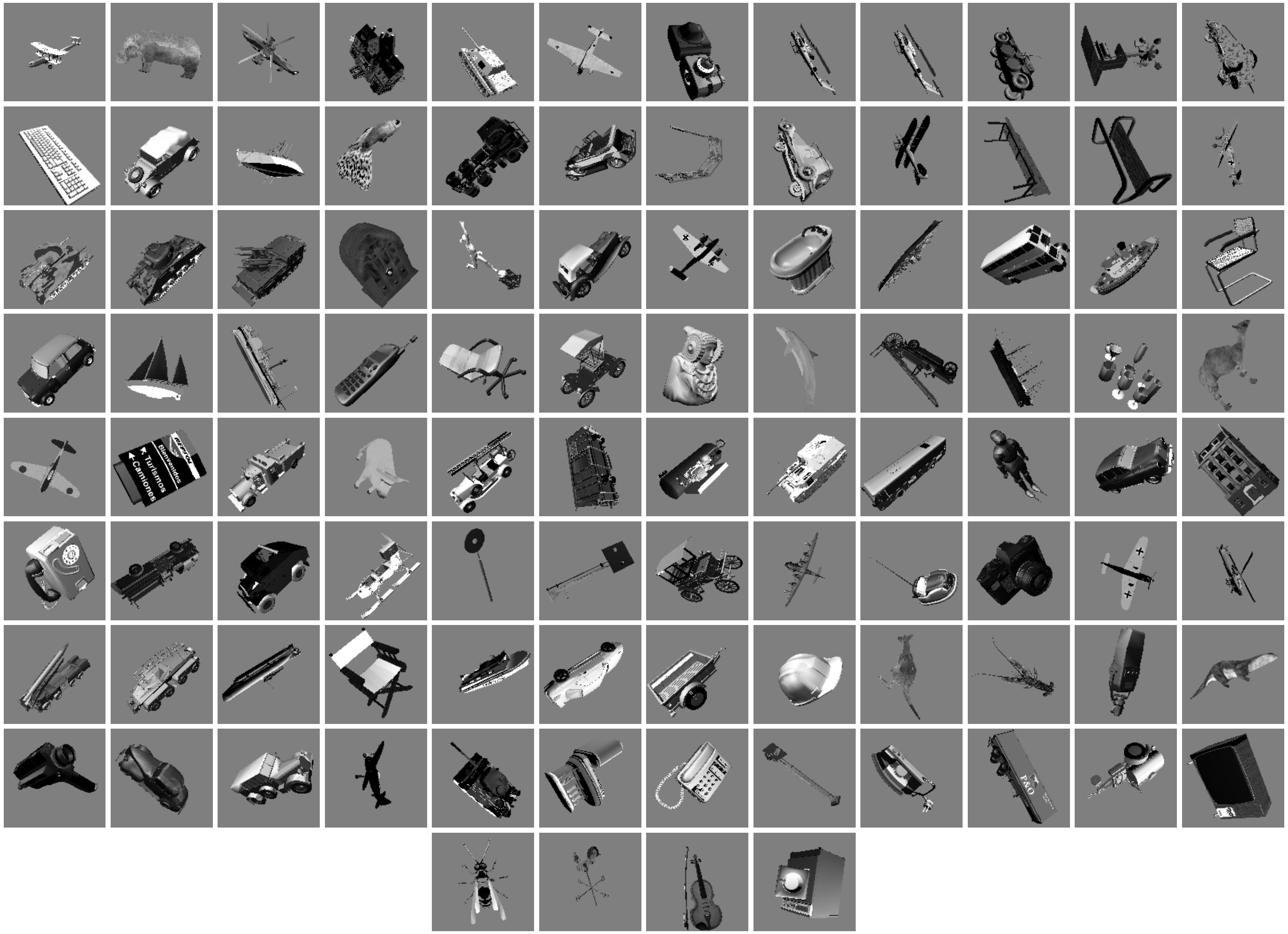
実験目的

推定する物体を100体に増やす
回転行列が有意に推定誤差が低いことを示す

実験内容

- 3Dモデル　500 3D-OBJECTS, vol.1 （100体）
- 推定手法　線形回帰
- 姿勢表現　回転行列・単位四元数
オイラー角・指数マップ
- 学習画像枚数　2500枚
- 推定画像枚数　1物体につき 100枚
- 誤差の評価　回転行列の距離関数

使用した3Dモデル100物体



3Dモデル

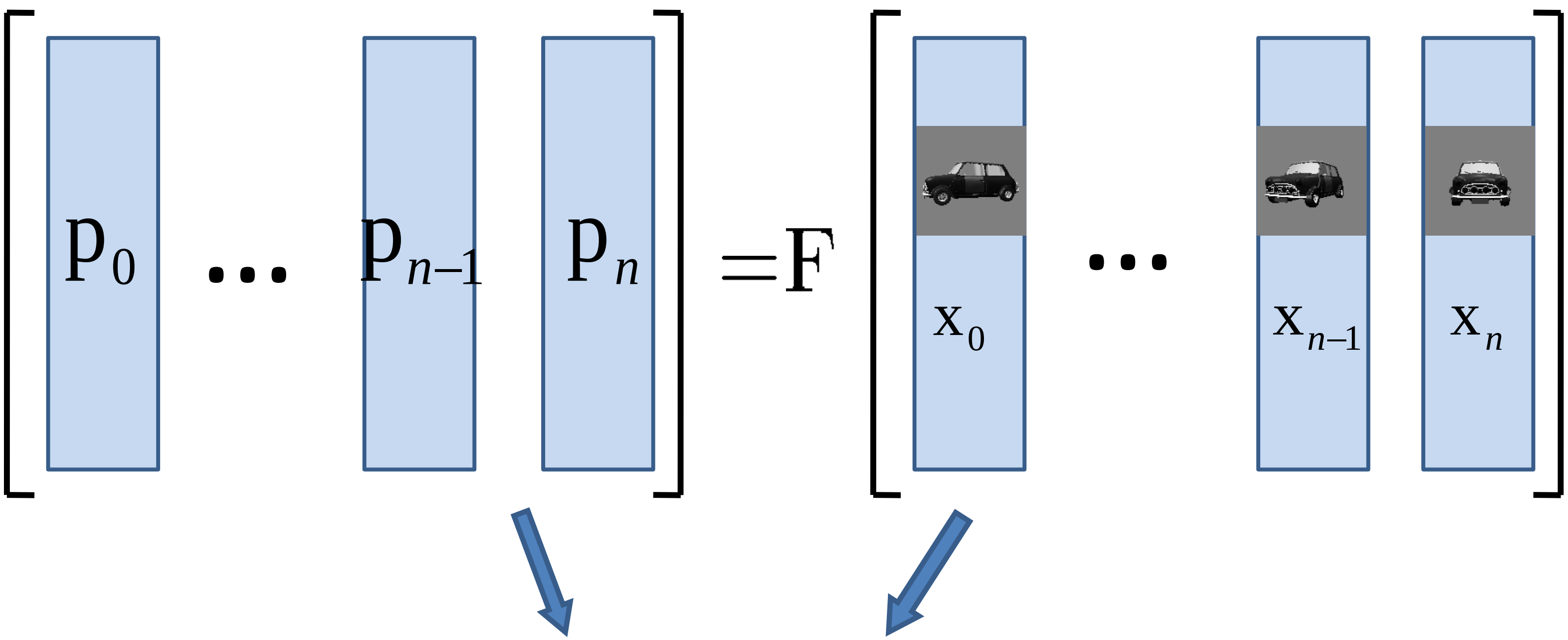
500 3D-OBJECTS, vol.1

学習の流れ

学習画像枚数 n＝2500

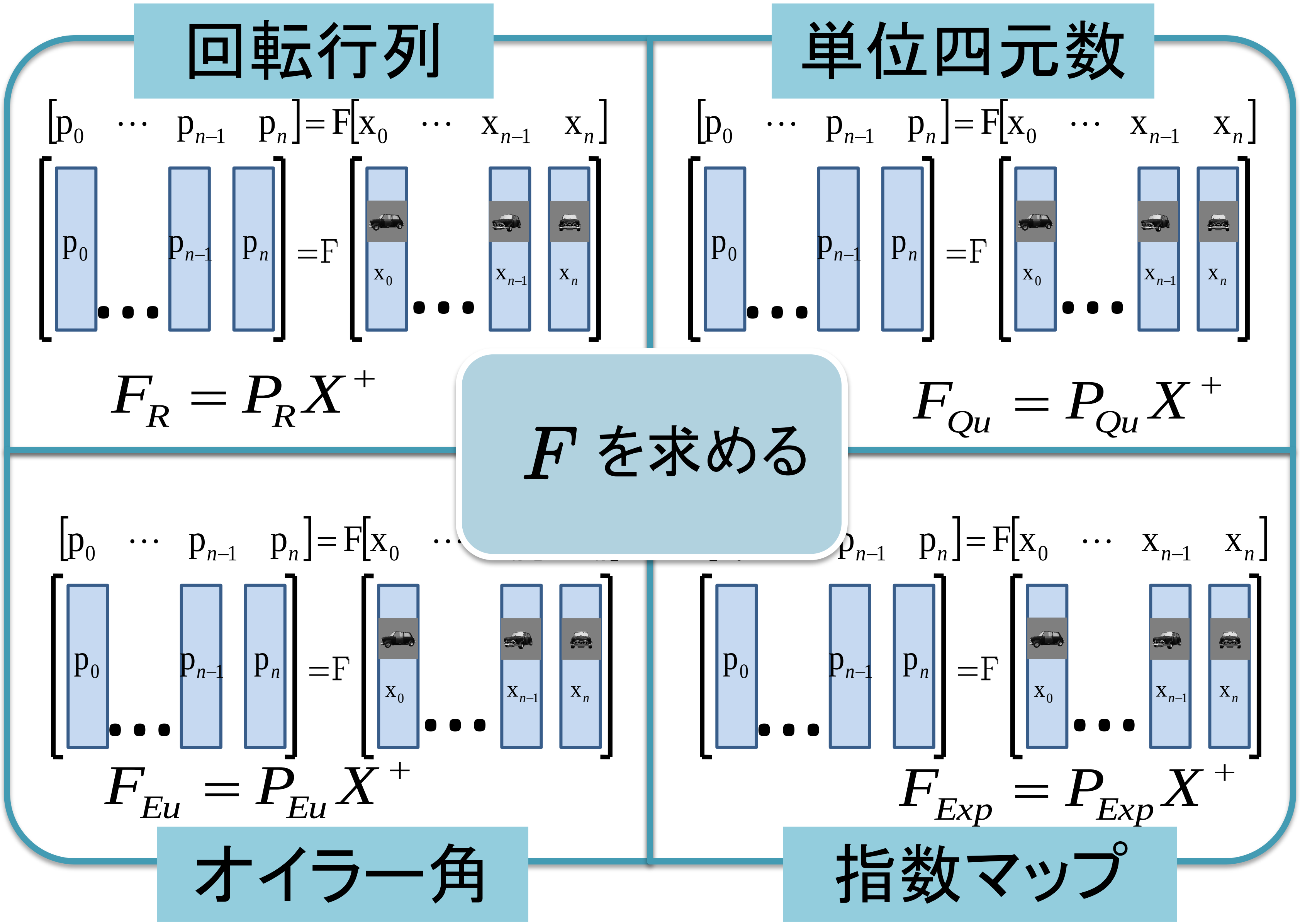
$$\mathbf{p}_j = F\mathbf{x}_j$$

$$\left[p_0 \quad \cdots \quad p_{n-1} \quad p_n \right] = F\left[x_0 \quad \cdots \quad x_{n-1} \quad x_n \right]$$

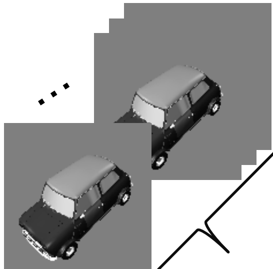


$$P = FX \Rightarrow F = PX^{+}$$

学習の流れ


回転行列
$[p_0 \ \cdots \ p_{n-1} \ \ p_n] = F[x_0 \ \cdots \ x_{n-1} \ \ x_n]$
$F_R = P_R X^+$
単位四元数
$[p_0 \ \cdots \ p_{n-1} \ \ p_n] = F[x_0 \ \cdots \ x_{n-1} \ \ x_n]$
$F_{Qu} = P_{Qu} X^+$
F を求める
$[p_0 \ \cdots \ p_{n-1} \ \ p_n] = F[x_0 \ \cdots$
$F_{Eu} = P_{Eu} X^+$
オイラー角
$p_{n-1} \ \ p_n] = F[x_0 \ \cdots \ x_{n-1} \ \ x_n]$
$F_{Exp} = P_{Exp} X^+$
指数マップ

推定の流れ（1物体）



テスト画像 x

100枚

推定値
(回転行列に変換)
$\tilde{R}$

回転行列

$F_R x = \hat{p}_R$ ⇒ R_R (○ … ○)

四元数

$F_{Qu} x = \hat{p}_{Qu}$ ⇒ R_{Qu} (○ … ○)

オイラー角

$F_{Eu} x = \hat{p}_{Eu}$ ⇒ R_{Eu} (○ … ○)

指数マップ

$F_{Exp} x = \hat{p}_{Exp}$ ⇒ R_{Exp} (○ … ○)

比較 ⇔

真値
R_t

R (○ … ○)

誤差

リーマン構造を用いた回転行列の距離関数を使用

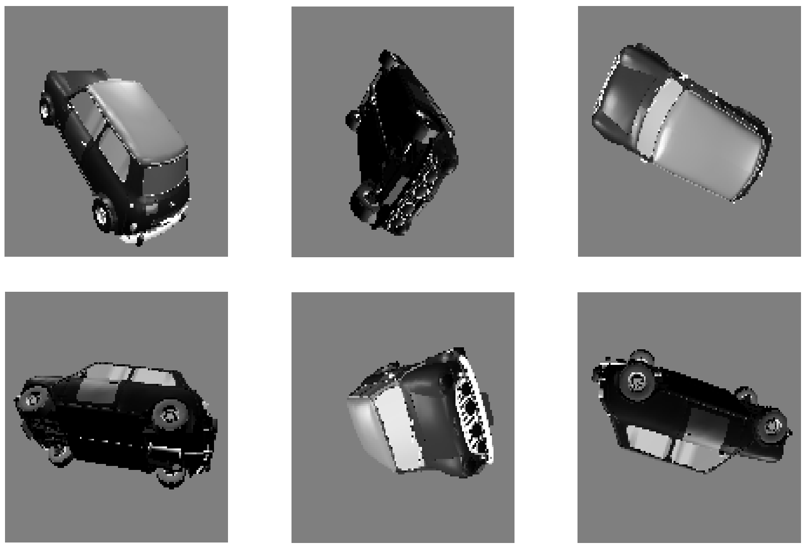
Maher Moakher [‘02SIAM]

$$d_F(R_t, \tilde{R}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \| \log R_t \tilde{R}^t \|$$

$$\log R = \begin{cases} 0 & (\theta = 0) \\ \frac{\theta}{2 \sin \theta}(R - R^t) & (\theta \neq 0) \end{cases}$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{trR - 1}{2}\right)$$

使用する画像

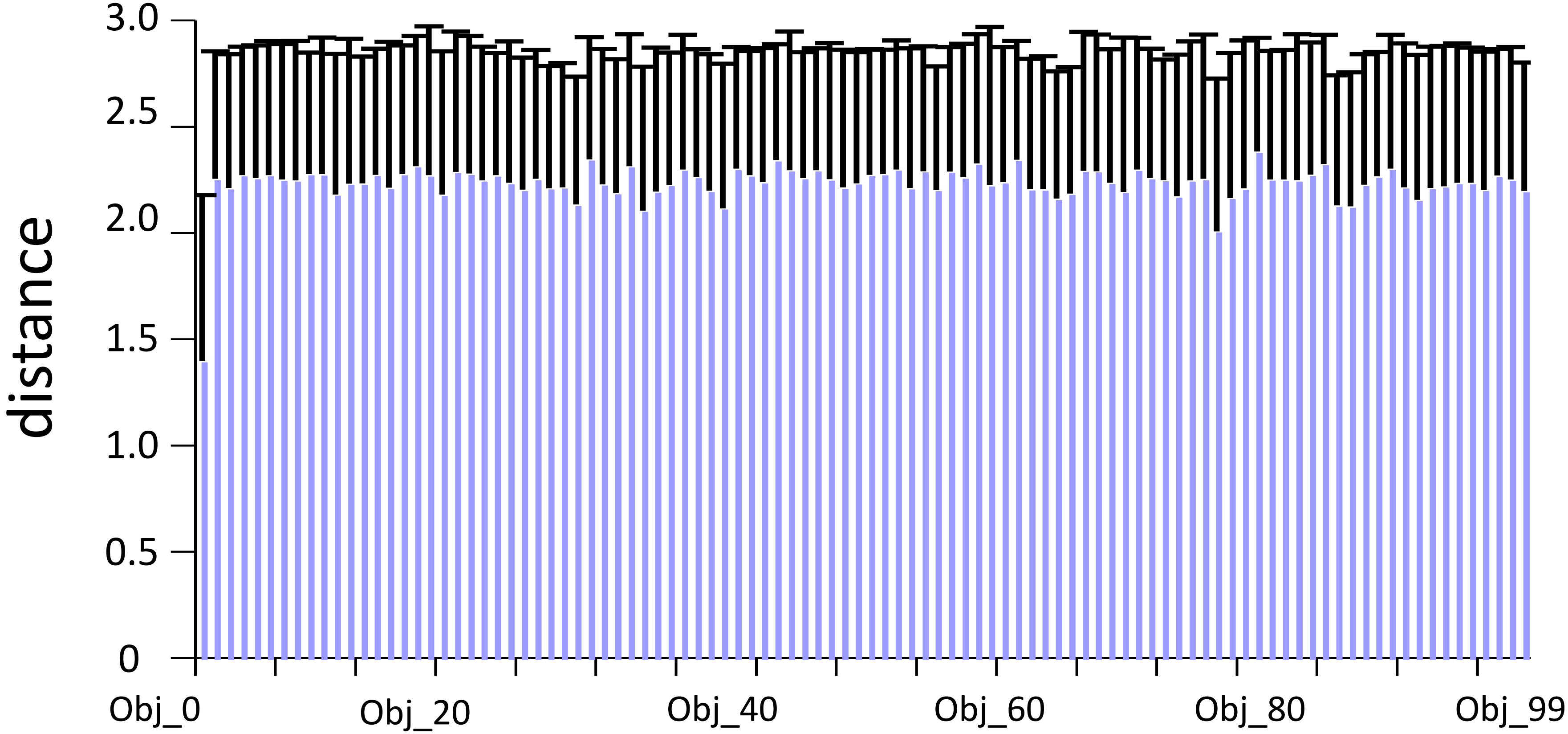


ランダムな姿勢の画像

不連続な姿勢の画像

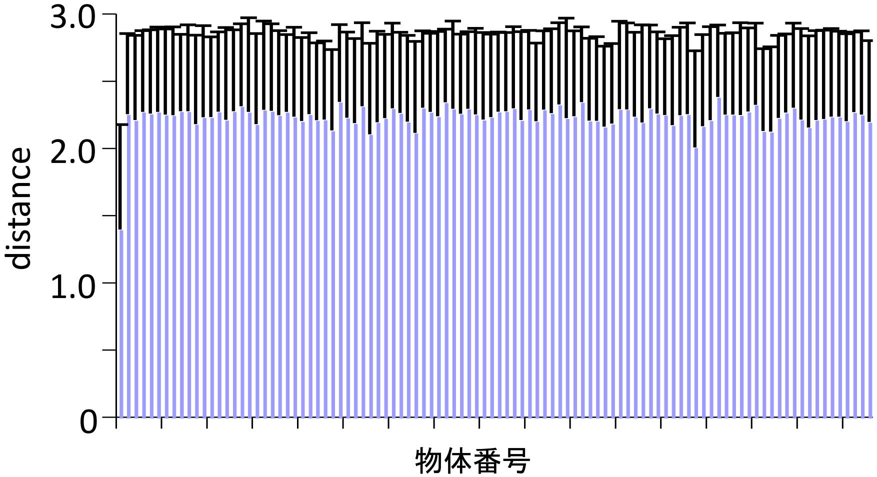
- 画像作成：OpenGLを使用
- 画像サイズ 128 × 128
- グレースケール画像
- 照明条件・カメラ距離は一定

物体ごとの実験結果〈ランダム〉

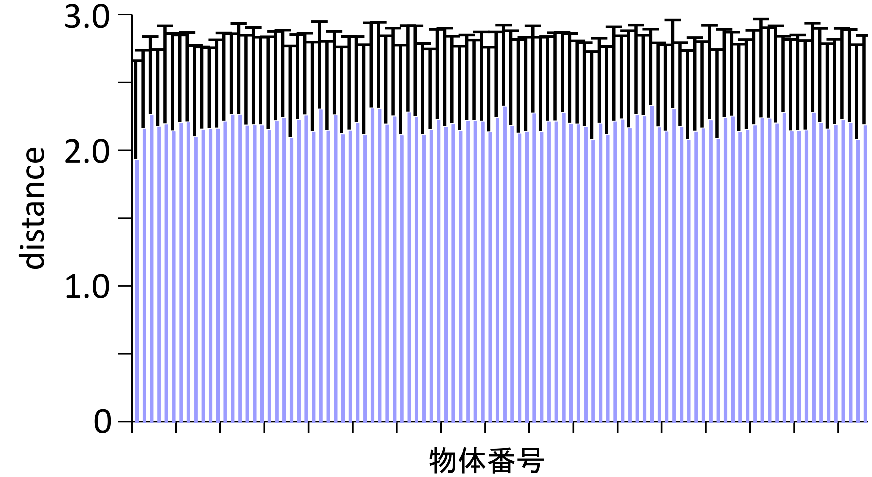


回転行列

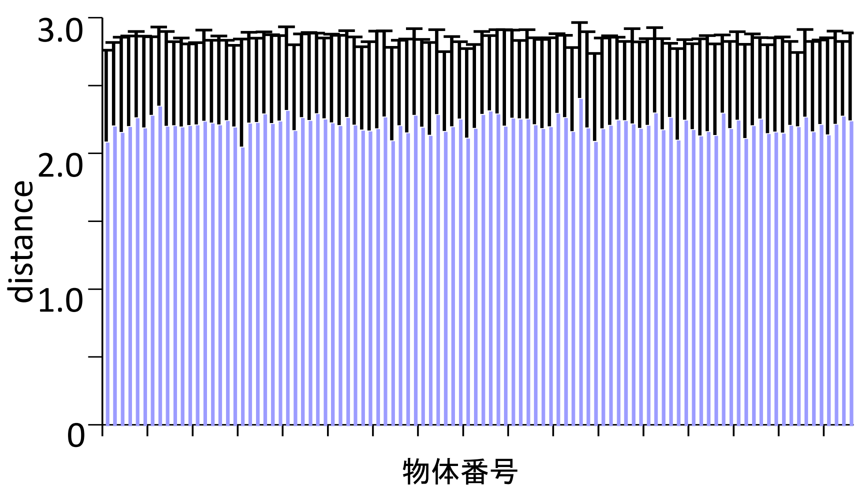
物体ごとの実験結果 〈ランダム〉



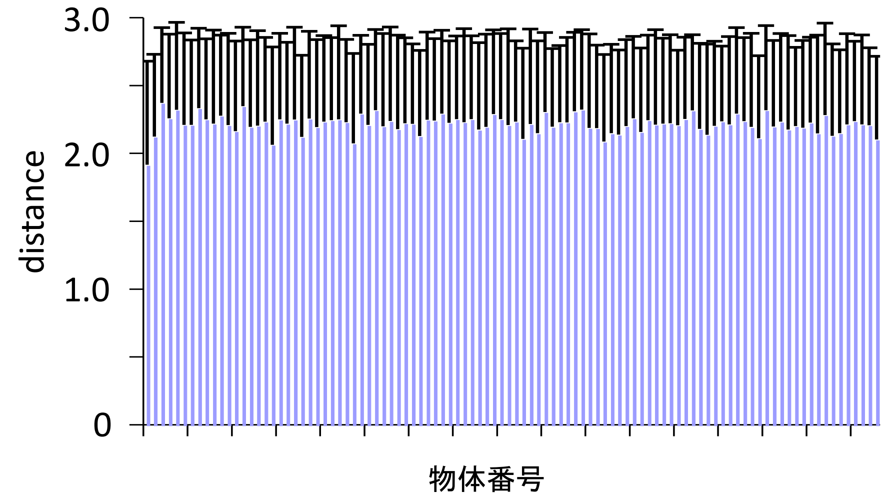
回転行列



単位四元数

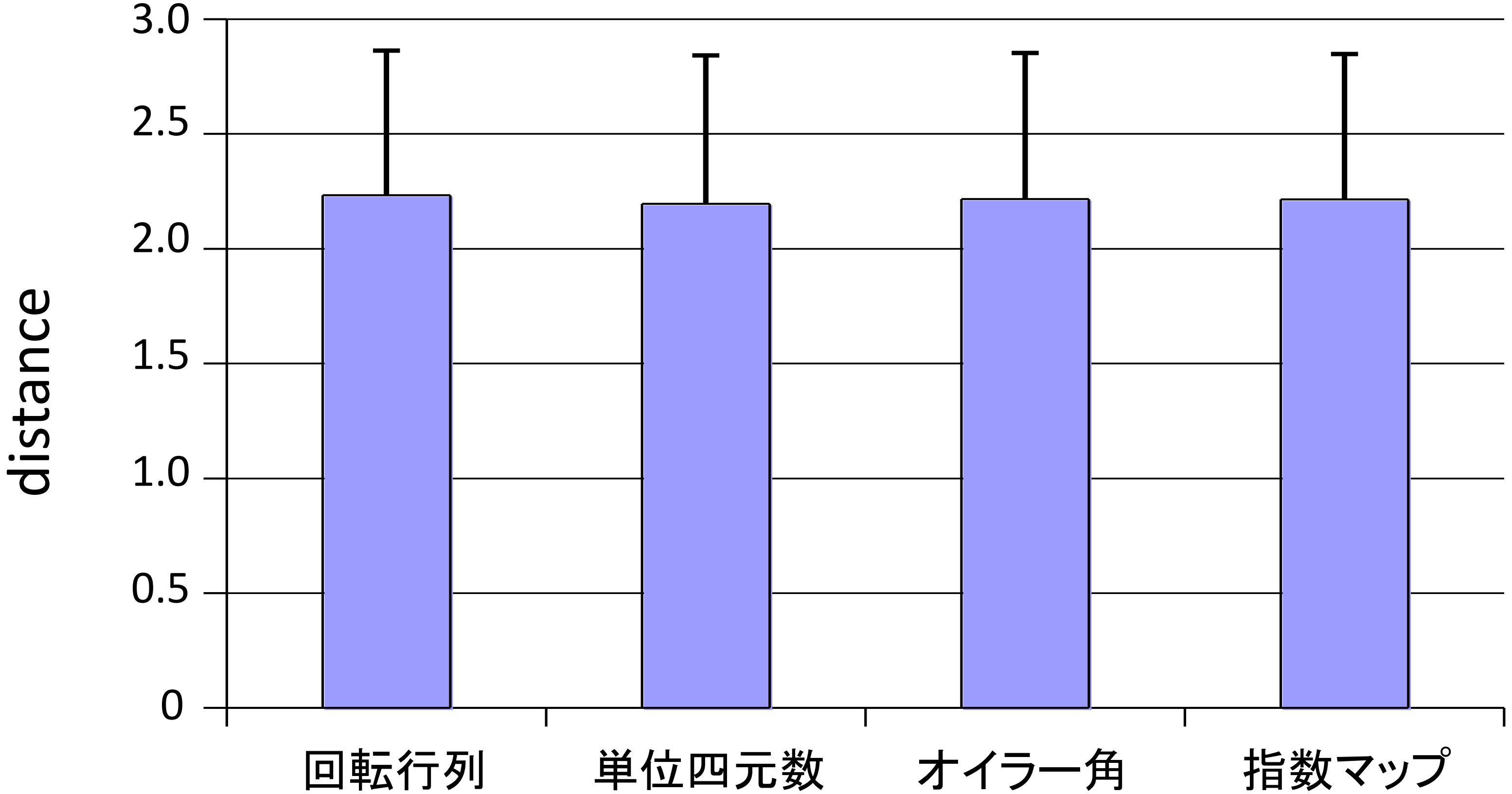


オイラー角



指数マップ

平均をとった実験結果<ランダム>

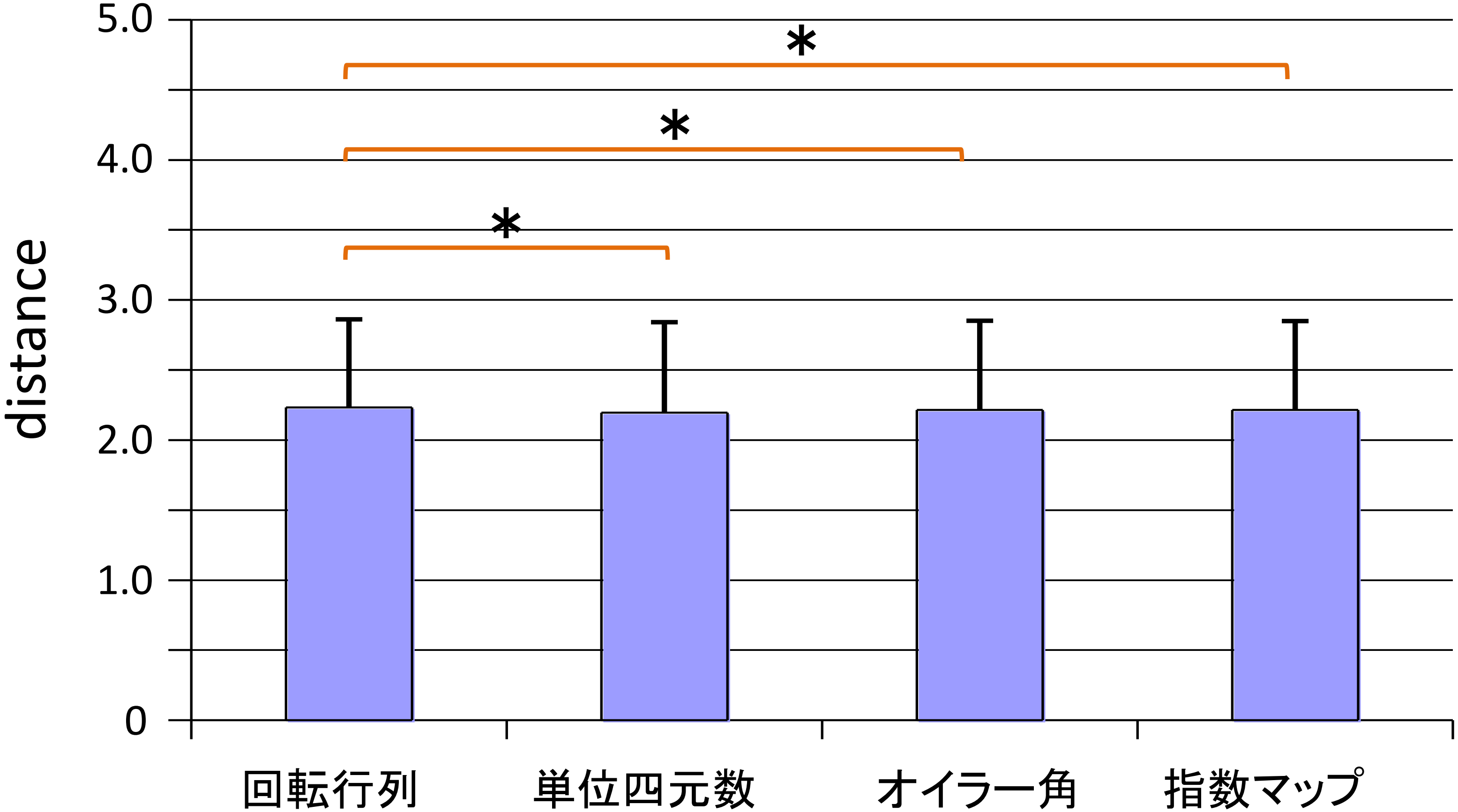


- 回転行列が一番誤差が小さい
- 相対的に誤差が大きい

*t*検定

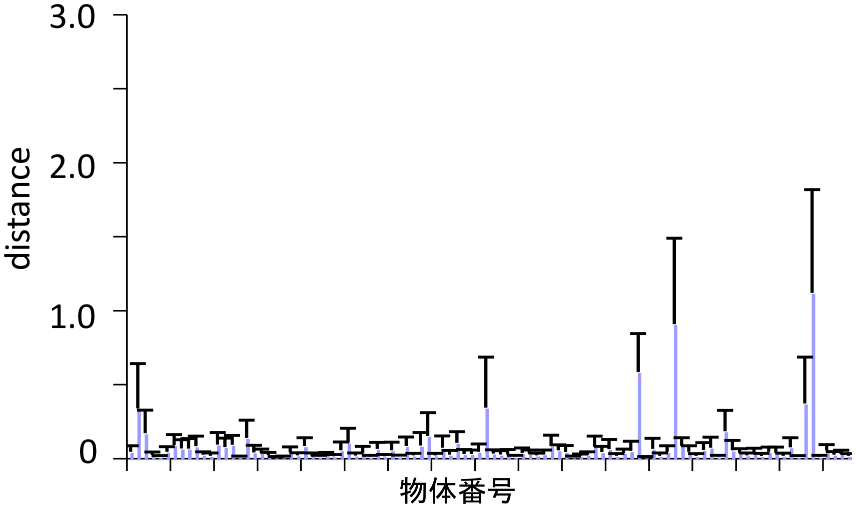
ペアワイズ*t*検定

100枚の画像の推定誤差×100物体＝10，000点

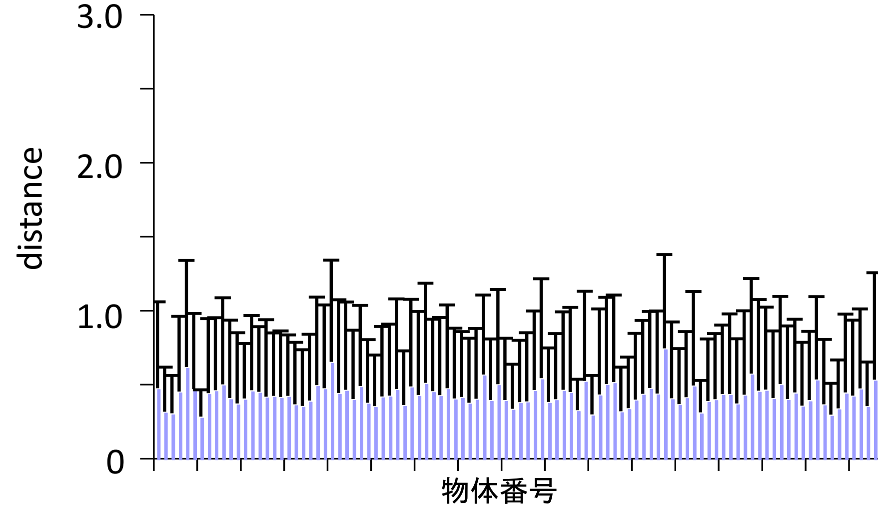


＊：　棄却率1%で有意差はある

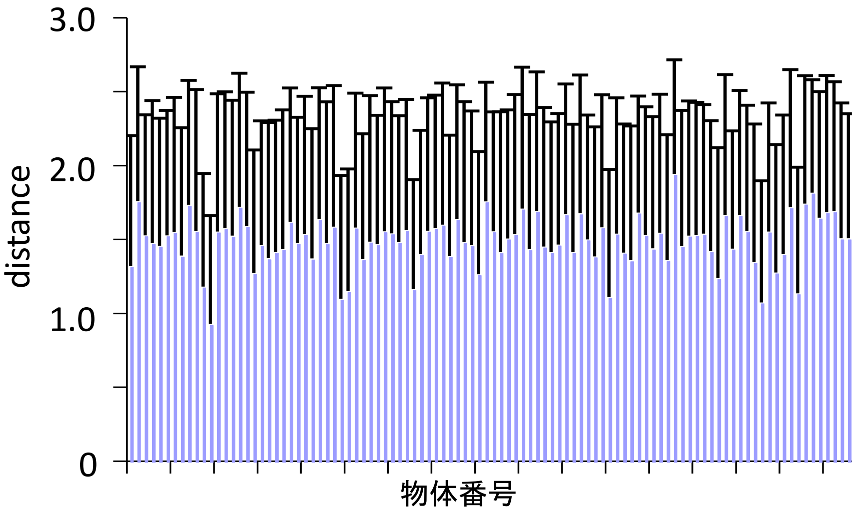
物体ごとの実験結果 〈不連続〉



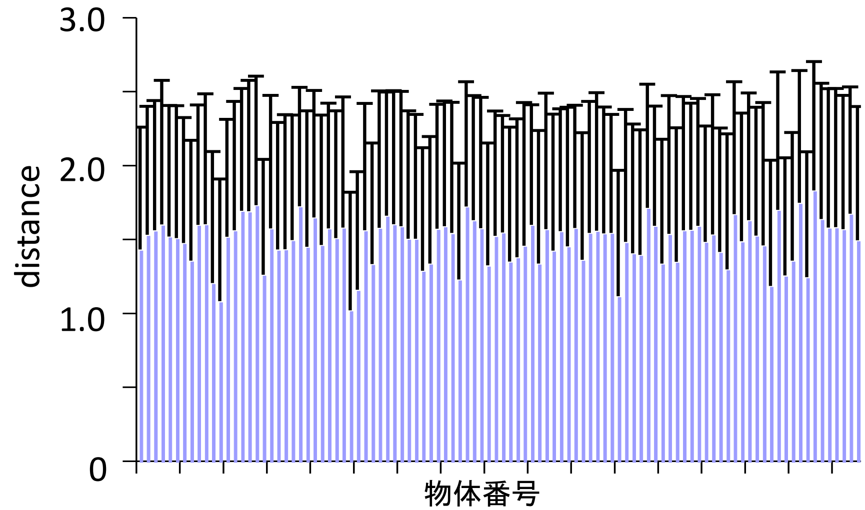
回転行列



単位四元数

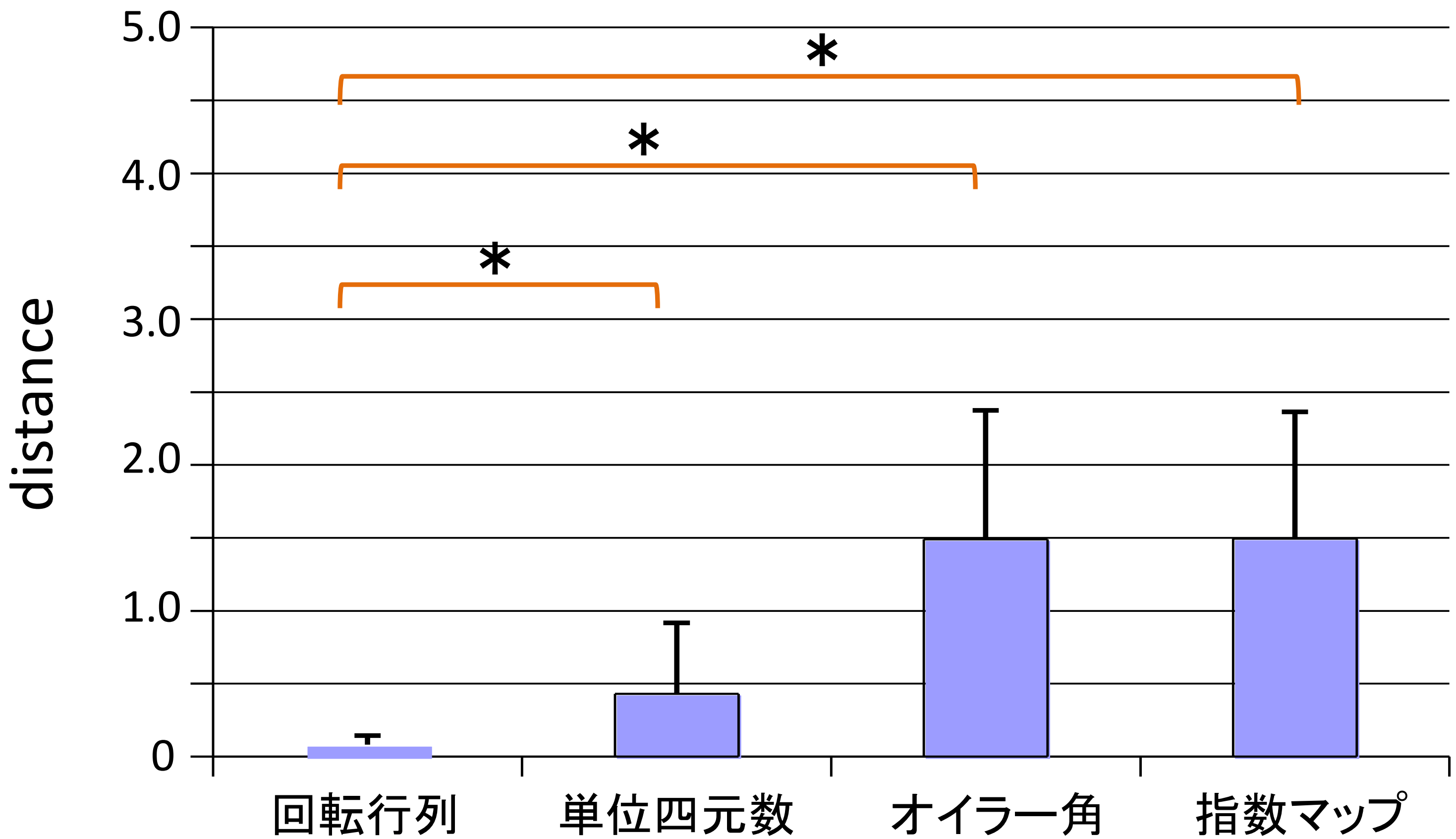


オイラー角



指数マップ

平均をとった実験結果＜ランダム＞



- 回転行列の誤差が一番小さい
- オイラー角と指数マップの誤差が大きい
- T検定の結果

  棄却率1％で有意差はあった

まとめ・考察

◎実験結果

線形回帰手法における最適な姿勢表現：回転行列

今後の方針

◎誤差を数式で表現し、姿勢表現の違いで誤差が異なる理由を解明する

◎線形回帰ではない手法でも実験

・SVR (Support Vector Regression)