法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-14

人間の動作を模した双腕マニピュレータの軌道計画

西田, 知史 / NISHIDA, Tomofumi

(発行年 / Year)
2005-03-24
(学位授与年月日 / Date of Granted)
2005-03-24
(学位名 / Degree Name)
修士(工学)
(学位授与機関 / Degree Grantor)
法政大学 (Hosei University)

法政大学大学院　工学研究科　電気工学専攻

平成 16 年度　修士論文

人間の動作を模した
双腕マニピュレータの軌道計画

Human-like Motions by Dual Arm Robots

小林尚登研究室　03R3231
西田　知史　ニシダ　トモフミ

指導教授　小林 尚登

Abstract

Human friendly robots should behave as human beings as well as their appearances. This paper proposes a motion planning method that let robots' motions look like humans'. This paper deals with a very typical case that dual-arm robots execute partially restricted coordinated tasks The proposed method derives the desired trajectories by using a cost function consists of "minimum torque change" and "degree of visibility," the concept, "degree of visibility" is first introduced in this paper. Several simulations and human subjects' experiences have shown that this method can derive more human like behaviors than the conventional methods. Especially, it could be recognized that the "degree of visibility" may play some important roles for human perceptions.

keyword

Dual-arm Robot, Trajectory Planning, Human Arm Movements, Coordinated Tasks

本論文の構成

本論文は，全体が５章から構成される．

１章では，本研究の背景について示す．ロボットの今後について，及び今後求められることがら，また本論文で取り扱う複数台ロボットの協調作業の概要について述べる．

第２章で軌道計画方法の提案について示す．本論文で取り扱うシステム及び定式化，また人間の動作を模倣するための評価関数の提案，及び軌道生成のアルゴリズムについて述べる．

第３章ではシミュレーションについて示す．動作軌道生成の際に設定したタスクの概要について，また前章で提案した手法を用いて行ったシミュレーションの結果を述べる．

第４章では提案した手法の評価について示す．まず被験者による実動作を，続いて，提案した評価関数の重み係数の設定案，及び有効性について述べる．

そして最後に，第５章で結論を述べる．

目 次

1 はじめに **1**

2 軌道計画方法の提案 **3**

2.1 部分拘束協調作業の運動学による定式化 ・・・・・・・・・・ 4

2.1.1 記号 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4

2.1.2 位置・姿勢の定式化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5

2.2 人間の動作を模すための評価関数 ・・・・・・・・・・・・・ 7

2.2.1 腕のダイナミクスに依存する要素 ・・・・・・・・・ 7

2.2.2 対象物の見やすさに依存する要素 ・・・・・・・・・ 7

2.3 軌道生成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9

3 シミュレーション **10**

3.1 マニピュレータの設定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 10

3.2 タスクの概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 11

3.3 結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13

4 提案した手法の評価 **16**

4.1 人間の実動作の計測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 16

4.2 重み係数のチューニングによるトルク変化和，和比率変更の有効性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 21

4.2.1 軌道誤差による評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22

4.3 提案した評価関数における対象物の見えやすさに依存する要素を導入する有効性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27

4.3.1　軌道誤差による評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27
4.4　他の評価関数による軌道との比較 ・・・・・・・・・・・・・・ 28
4.4.1　軌道誤差による評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 29

5　終わりに　40

図 目 次

2.1 Modeling of partially restricted coordinated working by dual arm manipulator 3

2.2 Degree of visibility 8

3.1 Link structure of right side manipulator 11

3.2 Outline of tasks 12

3.3 Trajectries of the effectors derived by the proposed cost function (TaskA) 14

3.4 Trajectries of the effectors derived by the proposed cost function (TaskB) 15

3.5 Trajectries of the effectors derived by the proposed cost function (TaskC) 15

4.1 Motion Caputure 17

4.2 Camera Image 17

4.3 Wrist and Elbow trajectries during subjects (TaskA) 18

4.4 Wrist trajectries during subjects (TaskB) 19

4.5 Wrist trajectries during subjects (TaskC) 20

4.6 Wrist trajectries during weight parameters tuning 23

4.7 Case1 : Wrist and Elbow trajectries derived with comparative cost function with manipulability (TaskA) 30

4.8 Case2 : Wrist and Elbow trajectries derived with comparative cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:52)(TaskA) 31

4.9 Case3 : Wrist and Elbow trajectries derived with comparative cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:1)(TaskA) 31

4.10 Case1 : Wrist trajectries derived with comparative cost function with manipulability (TaskB) 32

4.11 Case2 : Wrist trajectries derived with comparative cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:52)(TaskB) 32

4.12 Case3 : Wrist trajectries derived with comparative cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:1)(TaskB) 33

4.13 Case1 : Wrist trajectries derived with comparative cost function with manipulability (TaskC) 33

4.14 Case2 : Wrist trajectries derived with comparative cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:52)(TaskC) 34

4.15 Case3 : Wrist trajectries derived with comparative cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:1)(TaskC) 34

4.16 Robots simulation 39

第 1 章 はじめに

人間とロボットの共存を実現するためには，ロボットはヒューマンフレンドリーである必要がある．近年，ヒューマノイドのような人型ロボットの研究開発により，人間が親近感を抱きやすいロボットが実現されつつある．しかし，ロボットと人間が日常的な生活場面において共存するためには，外見・容姿だけでなくその動作・振る舞いにもヒューマンフレンドリーであるべきであろう．人間にとってヒューマンフレンドリーな，少なくとも違和感を感じない動作をロボットに実行させるには，人間動作を模倣させることが一つの有効な手法であると考えられる．そこで，本論文では双腕マニピュレータの軌道計画において，人間の動作を模倣させる手法の提案を行う．

一方，人間の上肢動作解析に関する研究が数多く行われてきた．特に，人間のリーチング運動の軌道のモデル化について興味深い報告がある．小川ら [1] は，上肢の運動の速度伝達関数を 1 次遅れ系のカスケード接続と仮定し，さらに若干の修正を加え，実測値と比較しその有効性を確認した．Flash と Hogan[2] は，評価関数を手先の躍度の大きさの 2 乗の積で定義し，この関数を最小にすることにより軌道を求めた．Uno ら [3] は，評価関数を各関節のトルク変化の 2 乗和の積分と定義し，これを最小とする軌道生成を行った．柴田ら [4] は，位置決め精度の要求される人間の手先運動について，上記のモデルを検証しながら考察し，要求される位置決め精度の速度波形への影響を示した．これらの人間の動作解析に関する研究は，ロボットを人間らしく動作させるという観点から見ても，非常に有用であると思われる．さらには，人間の腕と同様の冗長自由度の機構に人間らしい腕姿勢を与えるために，空間中の手首位置と上肢の取

りうる姿勢について検証した研究 [5] などもある．そのほか，近年，単腕マニピュレータの軌道計画において人間の運動軌道を模倣させる研究が行われつつある [6].

他方，双腕マニピュレータの制御に関する研究も数多く行われている．山本 [7] らは，2 台のロボットの協調作業を運動学的な観点から次のように分類した．

- 完全拘束協調作業
- 部分拘束協調作業
- 非拘束協調作業

完全拘束協調作業は，作業中に両ロボットの手先位置・姿勢の幾何学的な相対変化が生じない作業を示す．作業例として協調搬送等がある．非拘束協調作業では，手先位置・姿勢の相対的関係は衝突を除けば基本的に自由である．作業例として塗装作業がある．部分拘束協調作業は，手先位置・姿勢の相対変化はあるが，ある幾何学的関係により部分的に拘束される作業である．作業例は溶接，絵付け，皮むき等である．

従来，複数ロボットの協調制御問題は，多指ハンドの制御を含め上記の分類で完全拘束協調作業にあたる単一物体の操りに力点が置かれ，マスタースレーブ制御 [8]，ハイブリッド制御 [9]，インピーダンス制御 [10] などが提案されてきた．一方，人間が行っている作業は多くが部分拘束協調作業に分類されると思われる．特に，本論文では双腕マニピュレータを人間らしく動作させるという視点で双腕マニピュレータの協調制御の研究をすすめることらから，部分拘束協調作業に限定して考える．山本らはこのような設定で問題の定式化を行い，2 台の平面 3 自由度マニピュレータのシミュレーションを示している [7] が，人間型の双腕マニピュレータによる部分拘束協調作業に分類される作業の検討は多く行われていない．

以上のような観点から，本論文では双腕マニピュレータの部分拘束協調作業について，人間の運動軌道を模する軌道計画問題を検討する．

第 2 章 軌道計画方法の提案

本論文で対象とする双腕マニピュレータの部分拘束協調作業の概要をFig.2.1に示す．左腕は手先に取り付けられたグリッパで対象物をしっかりと把持し，右腕は手先に作業を遂行するための工具が装着されているものとする．タスクと左右のマニピュレータの位置と姿勢の関係について運動学に基づき簡易な定式化を行う．

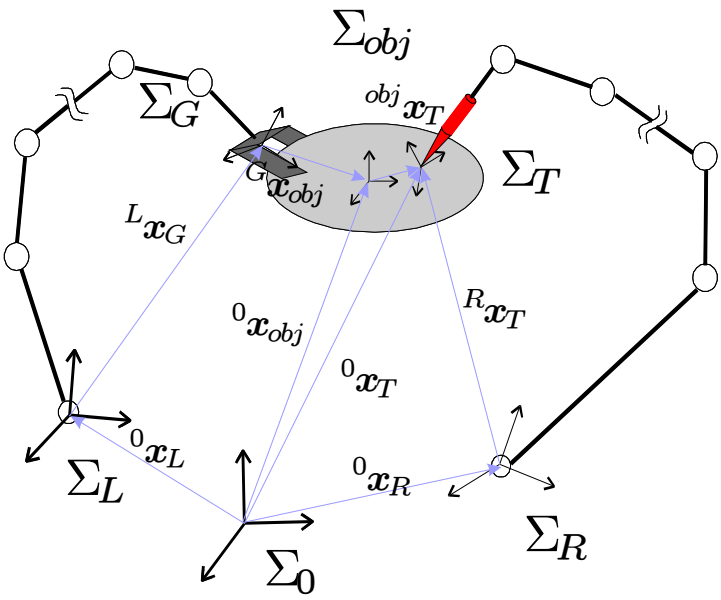


Fig 2.1 Modeling of partially restricted coordinated working by dual arm manipulator

2.1　部分拘束協調作業の運動学による定式化

2.1.1　記号

本論文で用いる記号を次のように定める.

座標系

Σ_0 : 基準座標
Σ_{obj} : 対象物座標
Σ_T : ツール座標
Σ_G : グリッパ座標
Σ_R : 右腕取付座標
Σ_L : 左腕取付座標

位置ベクトル

${}^0\boldsymbol{x}_{obj}$: Σ_0に基づく対象物の位置ベクトル
${}^0\boldsymbol{x}_T$: Σ_0に基づくツールの位置ベクトル
${}^0\boldsymbol{x}_L$: Σ_0に基づく左腕の位置ベクトル
${}^0\boldsymbol{x}_R$: Σ_0に基づく右腕の位置ベクトル
${}^{obj}\boldsymbol{x}_T$: Σ_{obj}に基づくツールの位置ベクトル
${}^G\boldsymbol{x}_{obj}$: Σ_Gに基づく対象物の位置ベクトル
${}^L\boldsymbol{x}_G$: Σ_Lに基づくグリッパの位置ベクトル
${}^R\boldsymbol{x}_T$: Σ_Rに基づくツールの位置ベクトル

回転行列

${}^0\boldsymbol{R}_T$: Σ_0に基づくΣ_Tの姿勢
${}^0\boldsymbol{R}_{obj}$: Σ_0に基づくΣ_{obj}の姿勢
${}^0\boldsymbol{R}_L$: Σ_0に基づくΣ_Lの姿勢
${}^0\boldsymbol{R}_R$: Σ_0に基づくΣ_Rの姿勢
${}^{obj}\boldsymbol{R}_T$: Σ_{obj}に基づくΣ_Tの姿勢
${}^G\boldsymbol{R}_{obj}$: Σ_Gに基づくΣ_{obj}の姿勢
${}^L\boldsymbol{R}_G$: Σ_Lに基づくΣ_Gの姿勢
${}^R\boldsymbol{R}_T$: Σ_Rに基づくΣ_Tの姿勢

2.1.2　位置・姿勢の定式化

双腕マニピュレータが対象物にタスクを施す際の作業変数${}^{obj}\boldsymbol{x}_T$, ${}^{obj}\boldsymbol{R}_T$と基準座標における対象物の位置・姿勢${}^{0}\boldsymbol{x}_{obj}$，${}^{0}\boldsymbol{R}_{obj}$を入力条件とし，左右のマニピュレータの手先位置・姿勢について運動学に基づいた解析を行う．

基準座標における対象物の姿勢${}^{0}\boldsymbol{R}_{obj}$は次式で表される．

$$ {}^{0}\boldsymbol{R}_{obj} = {}^{0}\boldsymbol{R}_L \, {}^{L}\boldsymbol{R}_G \, {}^{G}\boldsymbol{R}_{obj} \tag{2.1} $$

ここで，${}^{0}\boldsymbol{R}_L$はマニピュレータの取付位置により既知であり，${}^{G}\boldsymbol{R}_{obj}$は対称としている協調作業の特性から対象物の把持位置・姿勢が固定で既知となり，左腕マニピュレータの手先姿勢は次式で導出できる．

$$ {}^{L}\boldsymbol{R}_G = ({}^{0}\boldsymbol{R}_L)^{-1} \, {}^{0}\boldsymbol{R}_{obj} \, ({}^{G}\boldsymbol{R}_{obj})^{-1} \tag{2.2} $$

一方，基準座標におけるツールの姿勢${}^{0}\boldsymbol{R}_T$は，Σ_LによるものとΣ_Rを用いたもので表すことができる．

$$ {}^{0}\boldsymbol{R}_T = {}^{0}\boldsymbol{R}_L \, {}^{L}\boldsymbol{R}_G \, {}^{G}\boldsymbol{R}_{obj} \, {}^{obj}\boldsymbol{R}_T \tag{2.3} $$

$$ {}^{0}\boldsymbol{R}_T = {}^{0}\boldsymbol{R}_R \, {}^{R}\boldsymbol{R}_T \tag{2.4} $$

これら式(2.3)，(2.4)をまとめ${}^{R}\boldsymbol{R}_T$について解くと右腕マニピュレータの手先姿勢は次式のように導かれる．

$$ {}^{R}\boldsymbol{R}_T = ({}^{0}\boldsymbol{R}_R)^{-1} \, {}^{0}\boldsymbol{R}_L \, {}^{L}\boldsymbol{R}_G \, {}^{G}\boldsymbol{R}_{obj} \, {}^{obj}\boldsymbol{R}_T \tag{2.5} $$

続いて双腕マニピュレータの手先位置に関する定式化を行う．Σ_0からみたΣ_Tの原点位置ベクトルは，Σ_Lを用いた表現とΣ_Rによるものがあり，それぞれ次のように表せる．

$$ \begin{aligned} {}^{0}\boldsymbol{x}_T = \quad & {}^{0}\boldsymbol{x}_L + {}^{0}\boldsymbol{R}_L \, {}^{L}\boldsymbol{x}_G + {}^{0}\boldsymbol{R}_L \, {}^{L}\boldsymbol{R}_G \, {}^{G}\boldsymbol{x}_{obj} \\ & + {}^{0}\boldsymbol{R}_L \, {}^{L}\boldsymbol{R}_G \, {}^{G}\boldsymbol{R}_{obj} \, {}^{obj}\boldsymbol{x}_T \end{aligned} \tag{2.6} $$

$$ {}^{0}\boldsymbol{x}_T = \quad {}^{0}\boldsymbol{x}_R + {}^{0}\boldsymbol{R}_R \, {}^{R}\boldsymbol{x}_T \tag{2.7} $$

ここで，求めるべき情報は${}^{L}\boldsymbol{x}_G, {}^{R}\boldsymbol{x}_T$であるので，式(2.6)，(2.7)をまとめ整理するとすると次式のようになる．

$$\begin{aligned} & {}^{0}\boldsymbol{R}_L\,{}^{L}\boldsymbol{R}_G\,({}^{G}\boldsymbol{R}_{obj}\,{}^{obj}\boldsymbol{x}_T + {}^{G}\boldsymbol{x}_{obj}) \\ & +{}^{0}\boldsymbol{x}_L - {}^{0}\boldsymbol{x}_R \\ = \; & {}^{0}\boldsymbol{R}_R\,{}^{R}\boldsymbol{x}_T - {}^{0}\boldsymbol{R}_L\,{}^{L}\boldsymbol{x}_G \end{aligned} \tag{2.8}$$

一方，基準座標Σ_0における対象物位置ベクトル${}^{0}\boldsymbol{x}_{obj}$は

$${}^{0}\boldsymbol{x}_{obj} = {}^{0}\boldsymbol{x}_L + {}^{0}\boldsymbol{R}_L\,{}^{L}\boldsymbol{x}_G + {}^{0}\boldsymbol{R}_L\,{}^{L}\boldsymbol{R}_G\,{}^{G}\boldsymbol{x}_{obj} \tag{2.9}$$

と表すことができ，${}^{L}\boldsymbol{x}_G$以外は既知であるので，${}^{L}\boldsymbol{x}_G$は次式で求めることができる．

$$\begin{aligned} {}^{L}\boldsymbol{x}_G = ({}^{0}\boldsymbol{R}_L)^{-1} \quad (\quad & {}^{0}\boldsymbol{x}_{obj} - {}^{0}\boldsymbol{x}_L \\ - \quad & {}^{0}\boldsymbol{R}_L\,{}^{L}\boldsymbol{R}_G\,{}^{G}\boldsymbol{x}_{obj}) \end{aligned} \tag{2.10}$$

この式(2.10)より${}^{L}\boldsymbol{x}_G$が算出できれば，式(2.8)にて${}^{R}\boldsymbol{x}_T$が導出できる．

以上より，各マニピュレータの取付け位置が固定であり，作業変数と対象物の位置・姿勢が与えられれば，各手先の位置・姿勢を求めることができる．

2.2　人間の動作を模すための評価関数

2.2.1　腕のダイナミクスに依存する要素

人間の上肢運動の解析は多く行われているが，Uno らは，その軌道は腕のダイナミクスが大きく影響しているとし，各関節におけるトルクを時間微分したものの二乗和の積分値で表される評価関数を提案した [3]. この関数を最小とする軌道は人間の動作を再現することが確認されている．そこで，提案する評価関数の一つの要素として，各関節のトルク変化について着目する．双腕マニピュレータの右腕，左腕のトルク変化和 ξ_1，ξ_2は次のように表される．

$$\xi_1 = \frac{1}{2}\int_0^{t_f}\sum_{i=1}^{n}(\frac{d\tau_{Ri}}{dt})^2 dt \tag{2.11}$$

$$\xi_2 = \frac{1}{2}\int_0^{t_f}\sum_{i=1}^{n}(\frac{d\tau_{Li}}{dt})^2 dt \tag{2.12}$$

2.2.2　対象物の見やすさに依存する要素

人間が両腕で何らかの作業を行うとき，多くの場合は対象物・手先は視界に入るように無意識に向けるのではと推測される．

本稿では，対象物の視覚情報に関する要素を評価関数に取り入れることとする．Fig.2.2がそのイメージ図である．具体的には，作業変数であるタスクが実行されている対象物面の法線ベクトル $({}^0\boldsymbol{n}_{obj})$ と，基準座標系からみた対象物の位置ベクトル $({}^0\boldsymbol{x}_{obj})$ との成す角 ψ について考慮する．この ψ は次式で表すことができる．

$$cos\,\psi = (\frac{{}^0\boldsymbol{x}_{obj}\cdot{}^0\boldsymbol{n}_{obj}}{|{}^0\boldsymbol{x}_{obj}||{}^0\boldsymbol{n}_{obj}|}) \tag{2.13}$$

ここで，この $cos\,\psi$は対象物の見えやすさを示す値として定義できると思われる．対象物面の法線ベクトル $({}^0\boldsymbol{n}_{obj})$ とロボットの基準座標から対象物へのベクトル $({}^0\boldsymbol{x}_{obj})$ が互いに逆向きの時に，すなわち $cos\,\psi = -1$ の

時，対象物が最も見やすい位置にあることになる．$cos\,\psi$は-1から1の間で変化するので，評価関数には次式で表される形で導入する．

$$\xi_3 = (1 + cos\,\psi)^{\alpha} \tag{2.14}$$

ここで，αは任意の正の定数である．

以上をまとめると，評価関数は次式で表すように，3つの要素により構成されることになる．

$$E = q_1\,\xi_1 + q_2\,\xi_2 + q_3\,\xi_3 \tag{2.15}$$

なお，q_iは重み係数である．

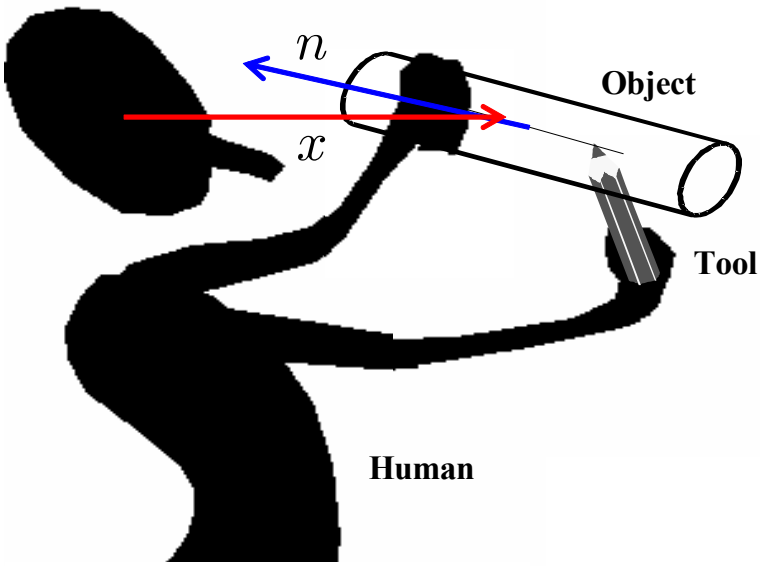


Fig 2.2 Degree of visibility

2.3　軌道生成

マニピュレータの軌道生成は，各ステップごとに作業変数が与えられ，設定された評価関数を逐次最小化することにより，最適な対象物の位置・姿勢を決定する．

ここで，設定された評価関数の解を得る方法は以下の通りである．評価関数 (2.15) は，任意の値である対象物位置${}^0\boldsymbol{x}_{obj}$，対象物姿勢${}^0\boldsymbol{R}_{obj}$ 及び${}^0\boldsymbol{n}_{obj}$による関数と捉えることができる．回転行列は3×3の行列であるが，XYZ固定角を用いて3変数に変換することができ，結果として評価関数 (2.15) は9次元の関数として捉えることができる．多変数の連続関数の最適化方法は多々あるが，ここでは，しばしば利用されるPowellの直接探索法 [13] を用いることとした．ここで，制約条件として，人間動作の模倣という観点から速度制限と関節角の可動域制限を次のように設けた．

$$| \hat{\boldsymbol{x}} - \boldsymbol{x} | \quad \leq \quad \Delta \boldsymbol{x} \tag{2.16}$$

$$\boldsymbol{\theta}_{TM} \leq \quad \boldsymbol{\theta}_T \quad \leq \boldsymbol{\theta}_{TP} \tag{2.17}$$

$$\boldsymbol{\theta}_{GM} \leq \quad \boldsymbol{\theta}_G \quad \leq \boldsymbol{\theta}_{GP} \tag{2.18}$$

ここで$\boldsymbol{\theta}_T, \boldsymbol{\theta}_G \in R^6$はそれぞれの関節角，$\boldsymbol{\theta}_{TM}, \boldsymbol{\theta}_{TP}$及び$\boldsymbol{\theta}_{GM}, \boldsymbol{\theta}_{GP}$はマニピュレータの可動範囲を，$\hat{\boldsymbol{x}}$は導出過程で更新される$\boldsymbol{x}$で，$\Delta \boldsymbol{x} \in R^9$は適当な正定数を表している．

これらの条件を整えることにより，関数値が算出でき，対象物の位置・姿勢が決定される．その位置・姿勢に基づき両腕の各関節角度を算出し，作業変数の終了まで繰り返す．

第 3 章 シミュレーション

3.1 マニピュレータの設定

Fig.3.1はシミュレーションに用いる双腕マニピュレータの右腕のリンク機構を示している．なお，左腕の機構は対称型となっている．図に示すようにマニピュレータは人間の腕と同様の7自由度の機構を持ち，リンクパラメータは人間の腕を考慮しTable.3.1のように設定した．各リンクは棒として定義すると慣性モーメントは$I_n = \frac{m_n L_n^2}{12}$と求めることができる．

Table 3.1 Link parameters of manipulator

Link	Length [m]	Mass [kg]
0	0.20	0.0
1	0.30	2.5
2	0.25	1.5
3	0.10	0.5

ここで，評価関数値の算出のための各トルクは，ニュートン・オイラー法の漸化式表現を利用し各ステップ毎に数値の代入を繰り返し導出した．

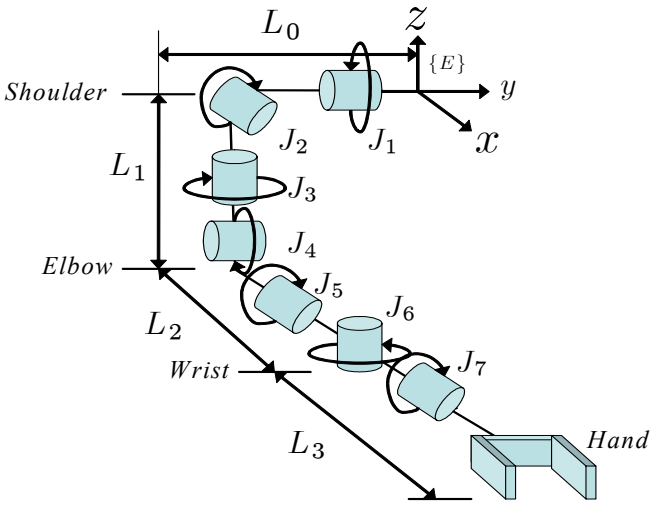


Fig 3.1 Link structure of right side manipulator

3.2　タスクの概要

Fig.3.2は，シミュレーションにおいて双腕マニピュレータが行うタスクの概要を示している．本報では，図に示すように3種類のタスクを用意した．タスクAでは，双腕マニピュレータは左腕で円柱状の対象物を把持し，右腕に持ったペン状のツールで対象物の表面に3本の線を平行に描く．ここで，円柱の直径，長さはそれぞれ60[mm], 300[mm] とした．また，円柱の表面の３本の線の長さは200[mm] で，それぞれ20[deg] の間隔である．

また，タスクBは板に正方形を描く作業，そして，タスクCは板に正三角形を描く作業とした．板のサイズは縦250[mm]，幅300[mm] で，正方形，正三角形は板の中心に１辺200[mm] で設定された．

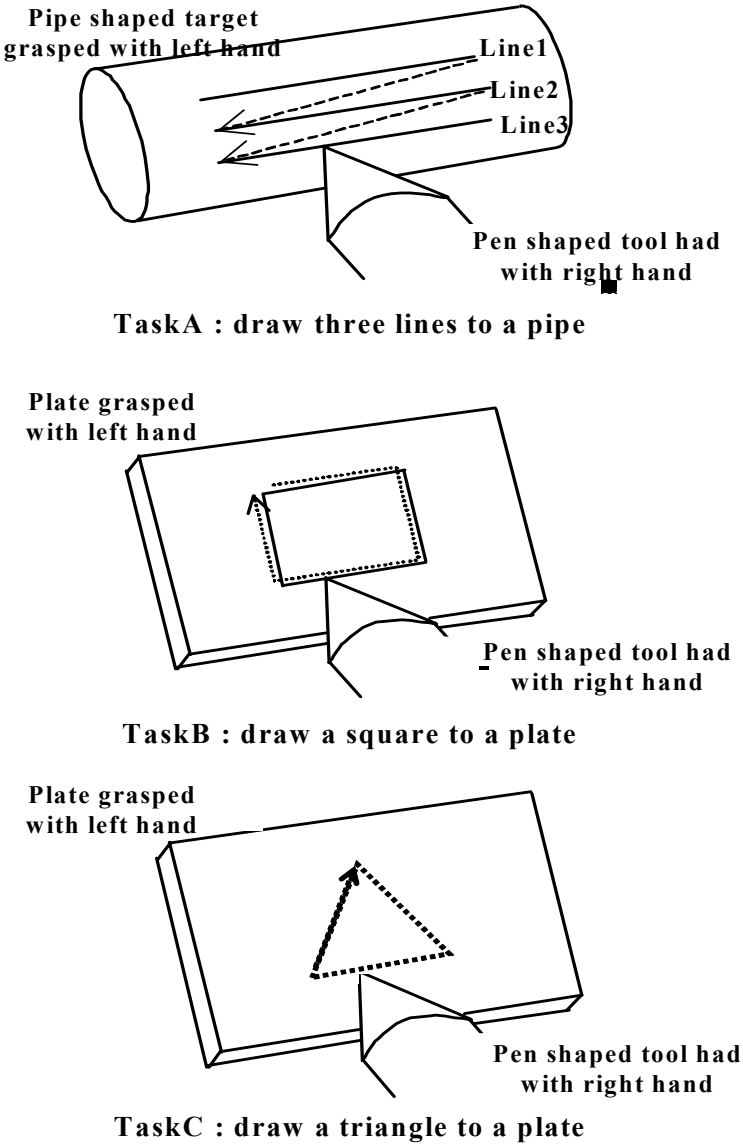


Fig 3.2 Outline of tasks

作業変数 ${}^{obj}\boldsymbol{x}_T(t)$ を入力情報とし，人間の動作を模するために設定された評価関数 (2.15) により双腕マニピュレータがタスク実行する際の手先位置・姿勢を算出する．ここで，タスクの内容を示す幾何学的な対象物座標系のツール位置ベクトルの集合から作業変数${}^{obj}\boldsymbol{x}_T(t)$ への変換には人間の書字運動のモデルを利用した．

3.3　結果

作業変数 ${}^{obj}\boldsymbol{x}_T(t)$ を入力情報とし，評価関数 (2.15) を用い算出された，各タスクを実行する場合の双腕マニピュレータの手首，肘位置・姿勢をFig.3.3からFig.3.5に示す．Fig.3.3はタスク A の結果，Fig.3.4はタスク B の結果，Fig.3.5はタスク C の結果である．ここで，評価関数における重み係数 q_nは，試行錯誤の結果，$(q_1, q_2, q_3) = (1, 52, 2000)$ とした．

これらのグラフより，両タスク共に，対象物を把持している左手はあまり動作せず，右手が主に作業を行う軌道を算出していると推測できる．

本報で取り上げている部分拘束協調作業では，タスクを遂行する際にそれぞれの腕が作業を分担することになる．例えば，リンゴの皮むきを例に挙げると，利き腕がナイフを持ち，もう片方の腕がリンゴをつかむことになるであろう．一方，両腕での重量物運搬のような完全拘束協調作業では，両腕の相対的な位置は変化せず，似た軌道波形をとるであろう．従って，利き腕のような特性を設定するために，それぞれの腕のトルク変化和に掛かる重み係数に変化を付けた．また，それぞれの要素の取りうる値を考慮して，q_3は設定した．

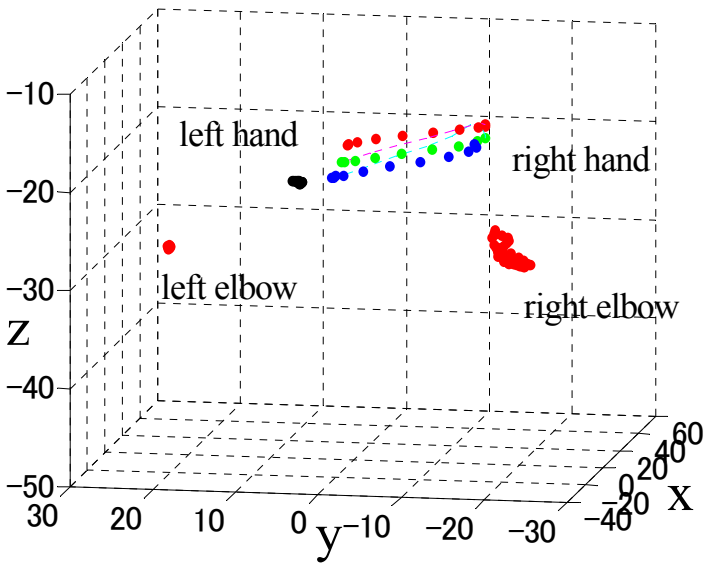


Fig 3.3 Trajectries of the effectors derived by the proposed cost function (TaskA)

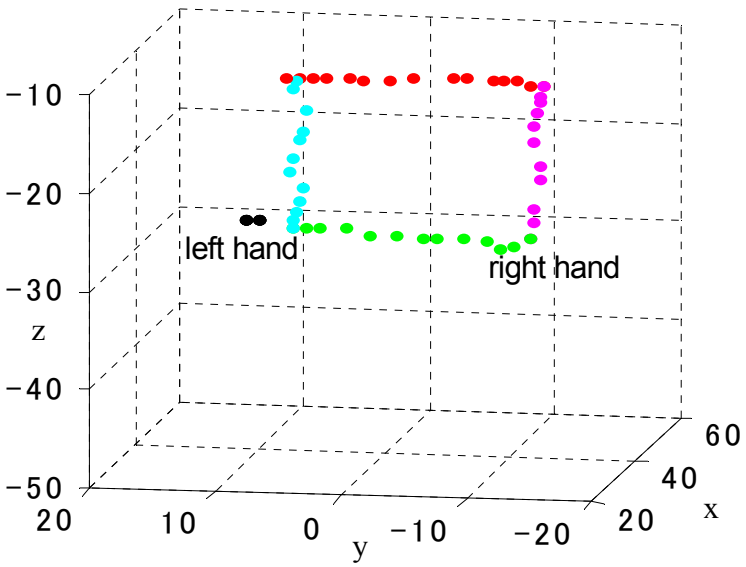


Fig 3.4 Trajectries of the effectors derived by the proposed cost function (TaskB)

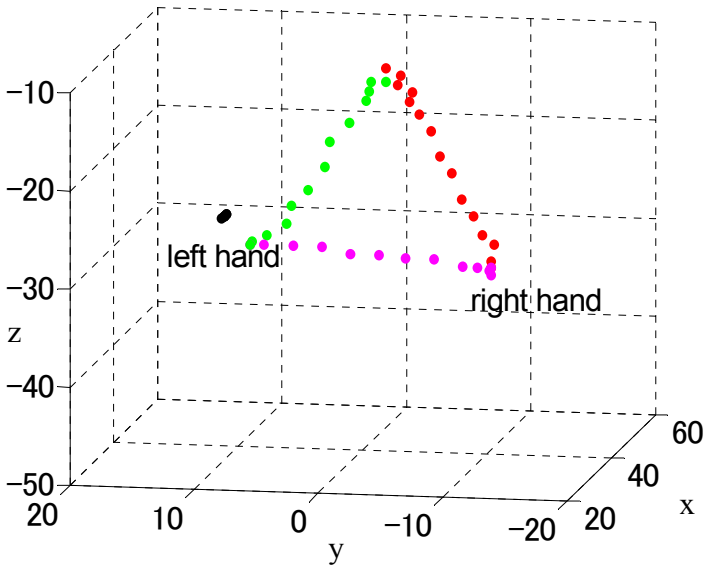


Fig 3.5 Trajectries of the effectors derived by the proposed cost function (TaskC)

第 4 章 提案した手法の評価

4.1 人間の実動作の計測

この研究の目的は双腕マニピュレータに人間らしい動作を行わせる制御則を導出することである．そこで，シミュレーションに用いた同様のタスクを人間が実行した場合の軌道の計測を行った．Fig.4.1のように，被験者の動作はCCDカメラにて撮影し，オフラインで空間中の手首，肘座標を算出した．被験者は右利きの大学生４名，各人５回動作を行った．Fig.4.3に，例として，被験者がタスクAを試行した際に計測された手首，肘位置の軌道を示す．同様にFig.4.4，Fig.4.5にタスクB，Cを試行した際に計測された手首位置の軌道を示す．

これらのグラフより，対象物を把持している左手はあまり動作せず，右手が主に作業を行っていることが観測できる．

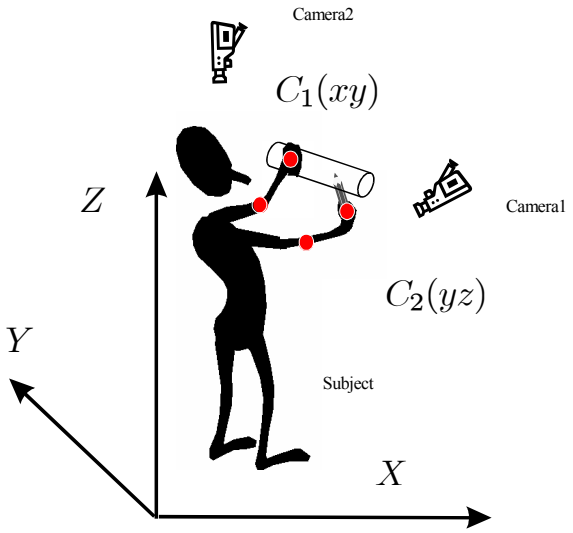


Fig 4.1 Motion Caputure

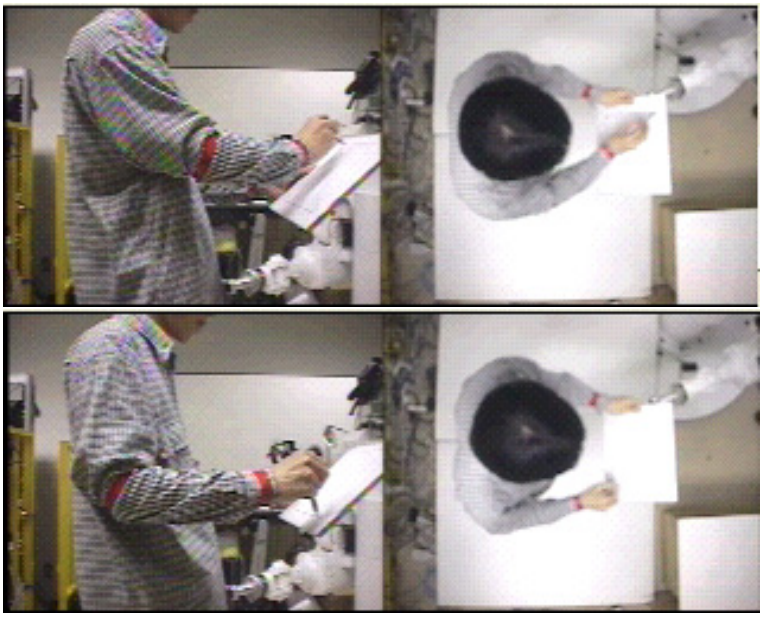
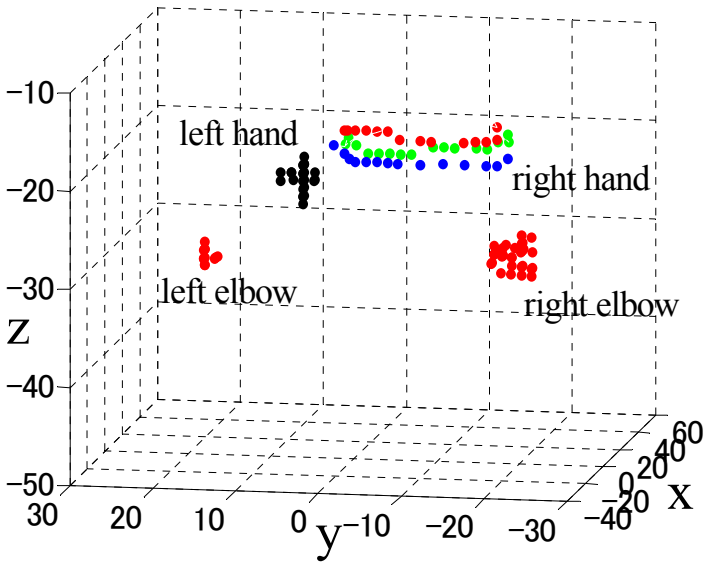


Fig 4.2 Camera Image



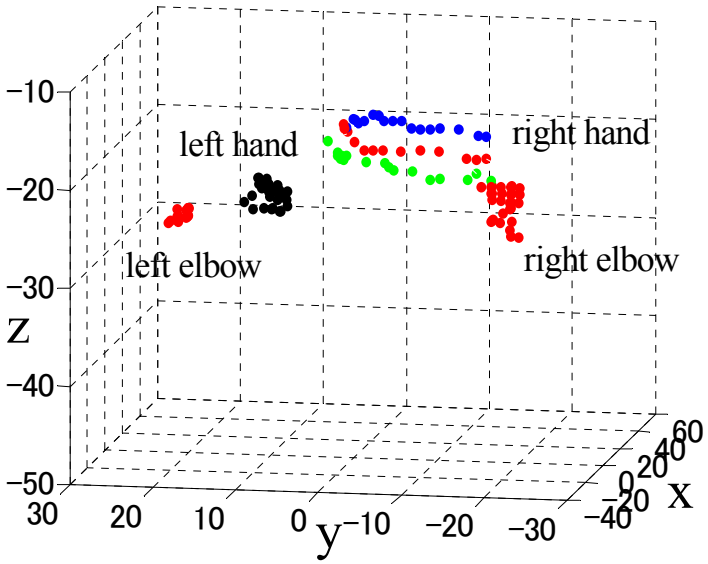
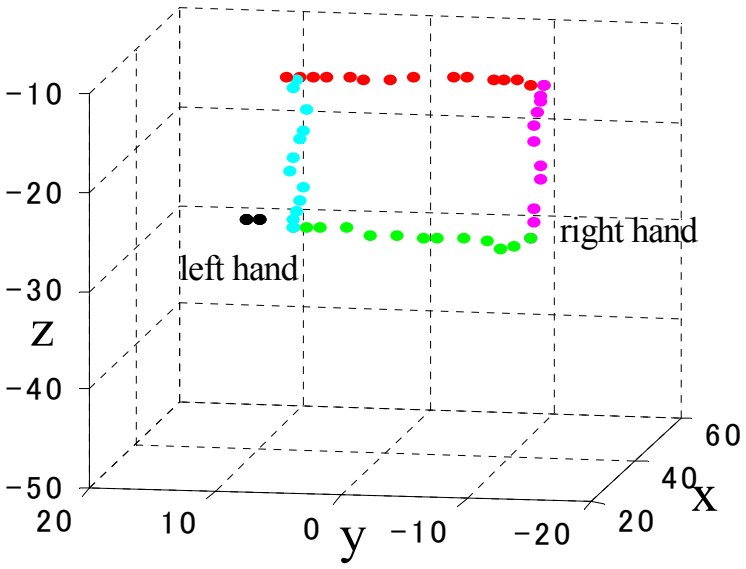


Fig 4.3 Wrist and Elbow trajectries during subjects (TaskA)



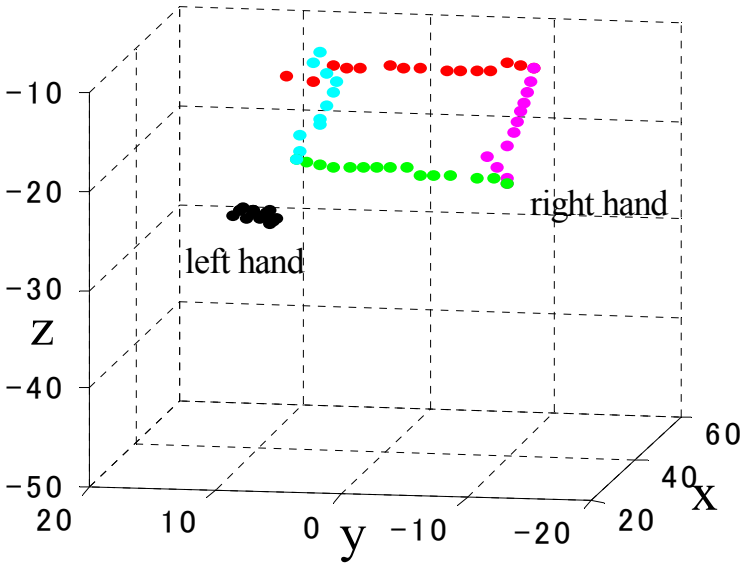
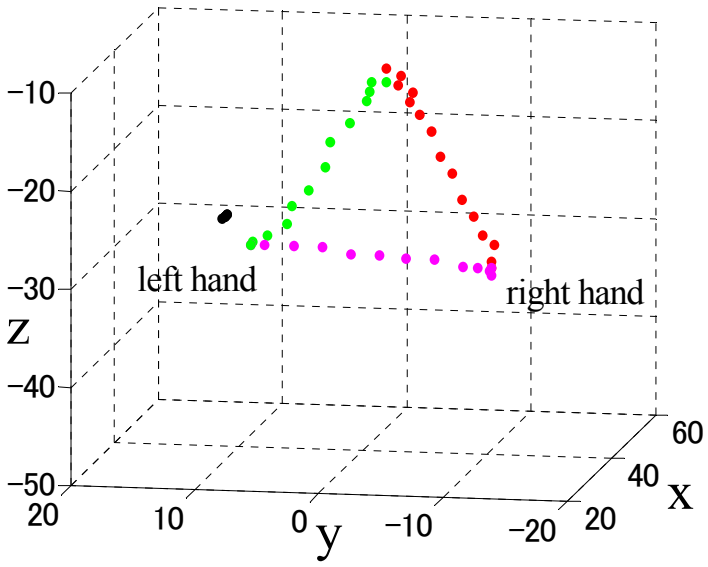


Fig 4.4 Wrist trajectries during subjects (TaskB)



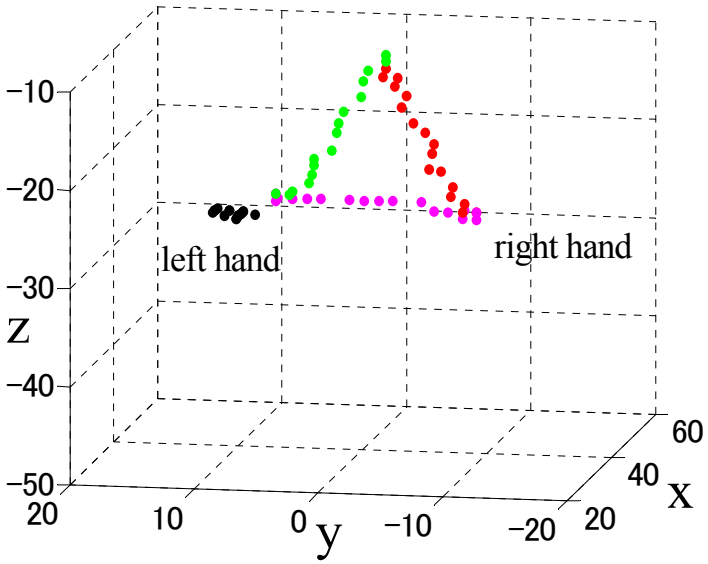


Fig 4.5 Wrist trajectries during subjects (TaskC)

4.2 重み係数のチューニングによるトルク変化和，和比率変更の有効性

本稿で提案した評価関数の重み q_i の決定については，試行錯誤の結果，$(q_1, q_2, q_3) = (1, 52, 2000)$ としたが多くの議論の余地がある．従って，重み q_i の決定法について検討する．ここでは重み q_1, q_2 の決定法を検討するため，評価関数 E_{ct} はトルク変化の最小二乗和のみで構成されるものとした．つまり，次のように評価関数 (2.15) の第 1 項と第 2 項のみで表される式となる．

$$E_{ct} = q_1 \xi_1 + q_2 \xi_2 \tag{4.1}$$

ここで，重み係数 q_1, q_2 については，

$$q_1 : q_2 = (1:1), (1:30), (1:52), (1:100), (50:1)$$

の 5 つの設定を用い，これらの重みを変更した評価関数を用いシミュレーションを行い軌道の算出を行った．それぞれのタスクを実行する場合の双腕マニピュレータの手先位置・姿勢例を Fig.4.6に示す．

シミュレーション結果より，全タスク共に，重み q_1, q_2 の設定を $q_1 < q_2$ とした場合は，対象物を把持している左手はあまり動作せず，右手が主に作業を行う軌道を算出していることが確認でき，対して重み q_1, q_2 の設定を $q_1 \geq q_2$ とした場合の軌道は前出の人間の軌道と比較し，作業の際に左腕が大きく動作していることが確認できる．

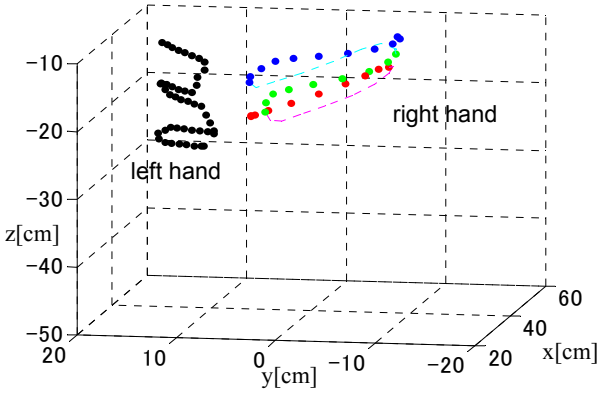
4.2.1 軌道誤差による評価

ここでは，各被験者の軌道と，重みをチューニングし算出された軌道の誤差を算出し，その結果を比較する．各被験者毎に作業時間が異なるため，軌道を補完し各ラインごとに誤差を算出した．なお，軌道誤差の算出には次式を用いた．

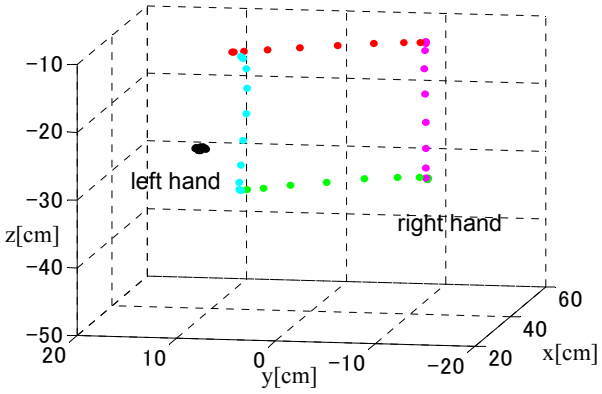
$$D = \frac{1}{k}\sum(d_r(k)^2 + d_l(k)^2) \tag{4.2}$$

$d_r(k)^2$および$d_l(k)^2$は，標本化点における右腕と左腕の軌道誤差である．

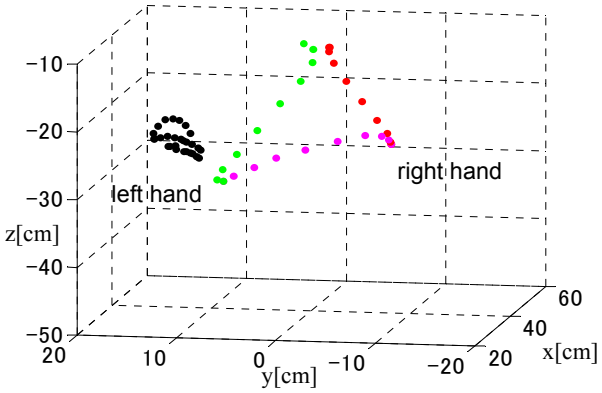
Table.4.1，Table.4.2，Table.4.3に，タスクA，B，C実行時において，被験者の軌道と各評価関数を用い算出された軌道間の平均誤差を示す．結果より，重みを$q_1 < q_2$とした評価関数を用いた場合の軌道と各被験者の軌道との差は，重みを$q_1 \geq q_2$とした評価関数を用いた場合に比べ低い値を取っている．このことから，本評価関数においてそれぞれの腕のトルク変化和に掛かる重み係数に変化を付けることにより，利き腕のような特性を設定することができ，人間の動作に近い動作を生成できていることを確認した．



(a) TaskA q1:q2 = 50:1



(b) TaskB q1:q2 = 1:100



(c) TaskC q1:q2 = 50:1

Fig 4.6 Wrist trajectries during weight parameters tuning

Table 4.1 Wrists trajectry differencies between subjects' and ones with simulations (TaskA)

(a) 重み係数のチューニング（1:1）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	12.79	12.69	10.13	11.40	10.66	11.53
被験者2	14.85	13.48	12.78	14.22	14.99	14.06
被験者3	12.40	11.90	13.36	11.12	14.43	12.64
被験者4	17.93	15.33	14.64	15.98	15.23	15.82

(b) 重み係数のチューニング（1:30）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	9.24	6.37	7.91	6.22	6.38	7.22
被験者2	8.93	8.35	9.71	8.94	9.59	9.10
被験者3	7.30	6.98	9.71	8.31	9.27	8.31
被験者4	12.11	8.35	7.37	9.35	8.60	9.16

(c) 重み係数のチューニング（1:52）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	9.33	6.65	7.84	6.21	6.47	7.30
被験者2	8.53	8.45	9.72	9.09	9.48	9.05
被験者3	8.04	7.34	10.37	8.75	9.25	8.75
被験者4	12.56	8.82	7.72	9.91	9.03	9.61

(d) 重み係数のチューニング（1:100）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	9.17	6.80	7.70	6.07	6.42	7.23
被験者2	8.27	8.11	9.47	8.77	9.09	8.74
被験者3	8.10	7.38	10.45	8.69	9.11	8.75
被験者4	12.33	8.73	7.72	9.93	8.94	9.53

(e) 重み係数のチューニング（50:1）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	19.72	19.52	16.85	18.47	17.95	18.50
被験者2	19.34	18.27	17.65	20.37	20.01	19.13
被験者3	19.37	19.90	20.50	17.00	19.53	19.26
被験者4	24.26	22.78	22.11	23.74	22.62	23.10

Table 4.2 Wrists trajectry differencies between subjects' and ones with simulations (TaskB)

(a) 重み係数のチューニング（1:1）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	14.58	12.79	13.72	12.88	12.10	13.21
被験者2	17.17	17.58	16.95	15.86	15.89	16.69
被験者3	13.31	14.45	15.22	14.10	14.18	14.25
被験者4	15.10	16.08	16.05	15.95	17.41	16.12

(b) 重み係数のチューニング（1:30）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	15.48	12.28	12.98	12.37	11.93	13.01
被験者2	19.36	18.80	17.58	16.52	15.28	17.51
被験者3	14.34	15.54	14.63	15.12	15.04	14.93
被験者4	15.94	16.40	16.22	16.95	18.37	16.78

(c) 重み係数のチューニング（1:52）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	13.92	10.79	11.54	10.85	10.32	11.48
被験者2	18.53	17.56	17.73	14.94	14.37	16.63
被験者3	14.46	14.86	14.17	14.37	15.19	14.61
被験者4	15.05	14.79	14.86	15.44	18.22	15.67

(d) 重み係数のチューニング（1:100）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	14.35	10.76	11.86	10.94	10.35	11.65
被験者2	18.49	17.53	17.76	15.15	14.91	16.77
被験者3	14.45	14.84	14.24	14.49	15.24	14.65
被験者4	15.12	15.11	14.94	15.46	18.35	15.80

(e) 重み係数のチューニング（50:1）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	18.68	15.65	15.79	15.40	14.51	16.01
被験者2	23.11	21.47	20.12	19.55	18.43	20.54
被験者3	17.32	18.75	17.09	18.05	17.75	17.80
被験者4	18.23	19.47	18.97	19.48	19.82	19.19

Table 4.3 Wrists trajectry differencies between subjects' and ones with simulations (TaskC)

(a) 重み係数のチューニング（1:1）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	13.96	13.85	14.45	12.86	14.32	13.89
被験者2	16.46	17.54	14.85	16.13	14.51	15.90
被験者3	13.13	16.43	13.65	16.23	14.28	14.75
被験者4	20.61	15.45	19.69	19.17	19.33	18.85

(b) 重み係数のチューニング（1:30）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	11.77	10.57	10.68	9.42	10.81	10.65
被験者2	18.74	15.81	13.10	14.65	12.98	15.06
被験者3	13.15	15.47	13.36	14.80	14.20	14.20
被験者4	18.18	13.15	17.06	16.55	16.68	16.32

(c) 重み係数のチューニング（1:52）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	12.06	10.73	11.14	9.51	11.07	10.90
被験者2	18.99	16.20	13.83	14.80	13.40	15.44
被験者3	13.36	15.67	13.62	15.55	14.43	14.53
被験者4	18.87	13.83	17.71	17.36	17.45	17.04

(d) 重み係数のチューニング（1:100）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	11.37	9.92	10.44	8.88	10.14	10.15
被験者2	18.82	15.59	13.10	14.37	12.76	14.93
被験者3	13.06	15.23	13.24	14.89	14.23	14.13
被験者4	18.27	13.40	16.97	16.71	16.79	16.43

(e) 重み係数のチューニング（50:1）による軌道と各被験者の軌道との差

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
被験者1	13.22	12.96	13.55	12.13	13.29	13.03
被験者2	17.20	16.70	14.51	15.63	14.01	15.61
被験者3	12.35	15.58	12.94	15.56	13.87	14.06
被験者4	19.48	14.91	18.89	18.49	18.60	18.01

4.3 提案した評価関数における対象物の見えやすさに依存する要素を導入する有効性

人間の動作は視界に入る範囲で行われているが，常にその位置が全く同じとは限らない．しかし人間の動作は対象物の視覚情報によって，常に作業のしやすい場所へ対象物を移動させ作業を行っている．このことから人間の動作を模倣するためには作業位置が変化しても自然な動作を行うことができる必要があると考えられる．つまり評価関数に対象物の見えやすさに依存する要素を導入することにより様々な位置での作業が可能になると思われる．

本評価関数で提案した対象物の見えやすさに依存する要素を導入することの有効性を検証するため，異なる対象物の初期位置を設定しシミュレーションを行い，自然な動作が可能か検討する．

人間の動作より取得した対象物の位置 $(x, y, z) = (38.0, -2.0, -25.0)$[cm] を基準の初期位置とし，前後上下左右に 5[cm] づつずらした対象物位置 7 点において，タスク A,B,C について提案した評価関数 (2.15) 及び見えやすさに依存する要素を追加していない評価関数 (4.3) を用い軌道を算出した．ここで，両評価関数とも重み係数 q_1, q_2, q_3 については，$q_1 : q_2 : q_3 = (1 : 52 : 2000)$ とした．

4.3.1 軌道誤差による評価

前述と同様の方法で被験者の軌道と両評価関数による軌道との誤差を算出し，その結果を Table.4.4に示す．対象物の見えやすさに依存する要素を追加した場合と追加しなかった場合の軌道誤差の比較結果から，3 種のタスク計 21 点での作業において対象物の見えやすさに依存する要素を追加することにより，21 点中 14 点でより人間の動作に近い動作を再現することができた．このことから提案した対象物の見えやすさのような要素を導入することが有効であると考えられる．

4.4　他の評価関数による軌道との比較

被験者の軌道と提案した手法により算出された軌道の差を評価するため，異なる設定の評価関数を用い軌道の算出を試みる．

マニピュレータの操作性を示す指標として，可操作度が多く用いられる．そこで，右腕，左腕の可操作度をw_Rおよびw_Lとし，次式のように，各腕の可操作度の和で表された評価関数E_{cm}を設定する．

$$E_{cm} = \epsilon_1 w_R + \epsilon_2 w_L \tag{4.3}$$

w_Rおよびw_Lは次のようにヤコビアンの行列式で表される．

$$w = \sqrt{det\,(\,J(\Theta)\;J^T(\Theta)\,)} \tag{4.4}$$

ここで，重み係数ϵ_1, ϵ_2は，シミュレーションにて用いた$(q1, q2) = (1, 52)$と同等の値を設定した．

もう一つの評価関数E_{ct}はトルク変化の最小二乗和のみで構成されるものとした．つまり，次のように評価関数(2.15)の第1項と第2項のみで表される式となる．

$$E_{ct} = q_1\,\xi_1 + q_2\,\xi_2 \tag{4.5}$$

ここで，重み係数ξ_1, ξ_2については，シミュレーションにて用いた$(q1, q2) = (1, 52)$と$(q1, q2) = (1, 1)$の二つの設定を用いた．

これら二つの評価関数 (4.3)，(4.5)を用い同様のシミュレーションを行い軌道の算出を行った．Fig.4.7から，4.15はその結果を示している．

これらの結果より，可操作度の和で設定した場合（Case 1）およびトルク変化和のみで係数比を1 : 1に設定した場合の結果（Case 3）と提案した評価関数による結果(Fig.3.3〜3.5)を比較すると，座標の推移に大きな違いがあることがわかる．一方，係数比を1 : 52に設定したトルク変化のみで評価関数を設定した結果（Case 2）との比較においては，顕著な差異は確認できない．この差を客観的に明示するために次節で軌道誤差を算出し比較を行う．

4.4.1　軌道誤差による評価

ここでは各被験者の軌道と提案した手法による軌道および，比較対象のために設定された評価関数による軌道の誤差を算出し，提案した手法の結果と他の手法による結果を比較する．

Table.4.5から 4.8に，タスク実行時において，各被験者と各評価関数を用いたシミュレーションで算出された軌道間の偏差を示す．これらの結果より，提案した評価関数を用いた場合の軌道と各被験者の軌道との差（表中 (a)）は，可操作度による評価関数を用いた場合（表中 (b)）やトルク変化和（1:1) による評価関数を用いた場合（表中 (d)）に比べ，低い値を取っており，それらの軌道に比べ人間の軌道に近いことがわかる．

一方，提案した評価関数を用いた場合の軌道と各被験者の軌道との差（表中 (a)）とトルク変化和（1:52) による評価関数を用いた場合の軌道と各被験者の軌道との差（表中 (c)）を比較すると，偏差に大きな差が見られない．そこで，タスク A においてこれらの結果について t 検定を実施したところ，手首位置偏差においては，検定統計量 $T = 5.515$ となり 0.05%水準で有意となり，差があることが確認できた．また，肘位置偏差においては，検定統計量 $T = 9.892$ となり，0.05%水準で有意となった．

これらの結果より，人間の動作模倣には，動作を決定する評価関数にトルク変化和を組み込み，さらに，今回提案した対象物の見えやすさのような要素を導入することが有効であることが示唆された．

Table 4.4 異なる初期位置における対象物の見えやすさ要素追加時と非追加時の軌道誤差の比較

(a) タスク A における被験者 4 人の軌道と両評価関数による軌道の平均誤差の和による比較

対象物初期位置変移	x-5cm	x+5cm	y-5cm	y+5cm	z-5cm	z+5cm	+-0cm
見えやすさ要素追加時	44.70	57.93	50.28	57.77	47.38	57.37	33.54
見えやすさ要素非追加時	58.10	58.01	49.24	54.59	50.43	57.92	34.71

(b) タスク B における被験者 4 人の軌道と両評価関数による軌道の平均誤差の和による比較

対象物初期位置変移	x-5cm	x+5cm	y-5cm	y+5cm	z-5cm	z+5cm	+-0cm
見えやすさ要素追加時	65.82	82.21	72.58	80.33	83.63	69.52	58.10
見えやすさ要素非追加時	69.66	82.18	76.22	78.73	83.24	70.07	58.39

(c) タスク C における被験者 4 人の軌道と両評価関数による軌道の平均誤差の和による比較

対象物初期位置変移	x-5cm	x+5cm	y-5cm	y+5cm	z-5cm	z+5cm	+-0cm
見えやすさ要素追加時	64.85	79.09	71.08	76.80	84.03	61.42	56.62
見えやすさ要素非追加時	65.73	79.19	71.70	73.70	82.81	62.00	57.91

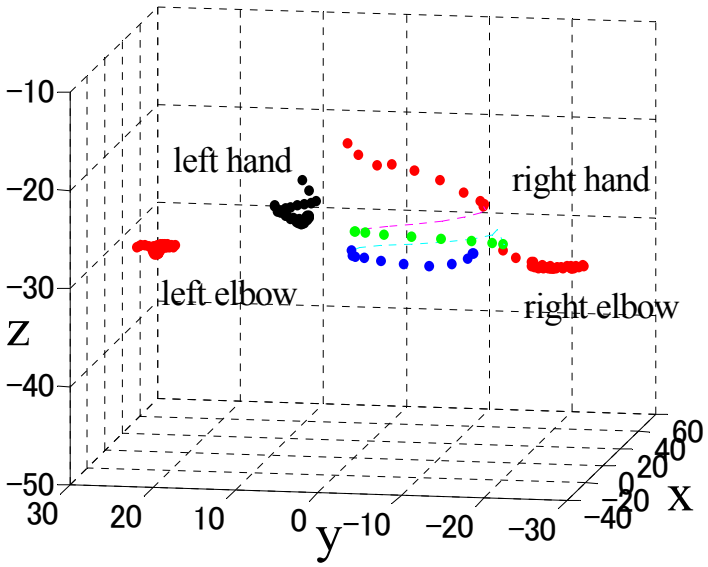


Fig 4.7 Case1 : Wrist and Elbow trajectries derived with comparative cost function with manipulability (TaskA)

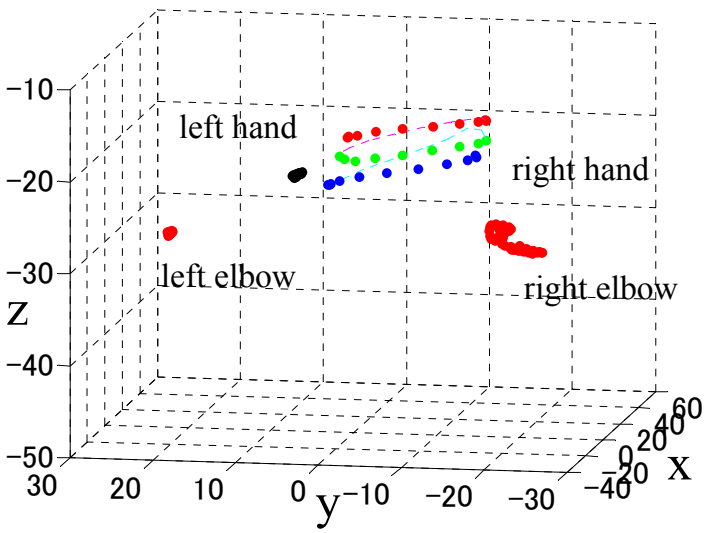


Fig 4.8 Case2 : Wrist and Elbow trajectries derived with comparative cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:52)(TaskA)

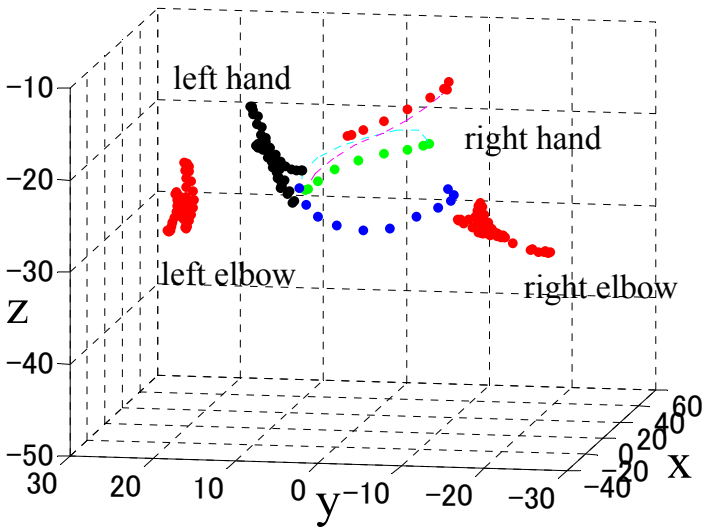


Fig 4.9 Case3 : Wrist and Elbow trajectries derived with comparative cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:1)(TaskA)

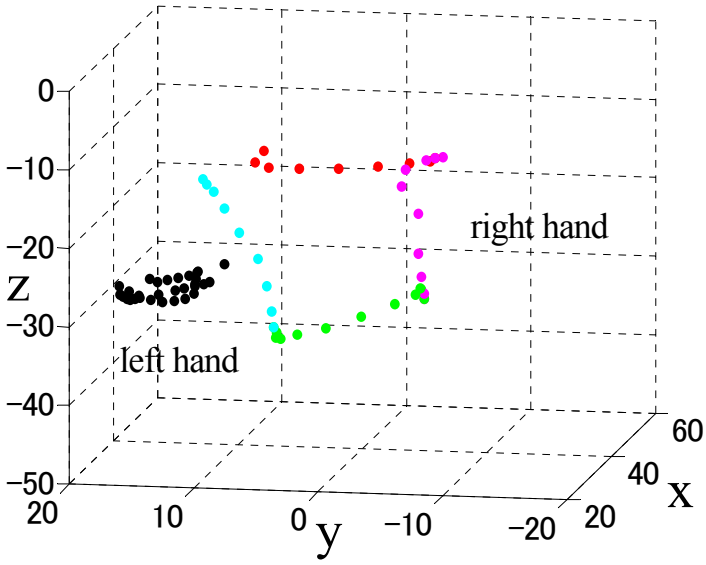


Fig 4.10 Case1 : Wrist trajectries derived with comparative cost function with manipulability (TaskB)

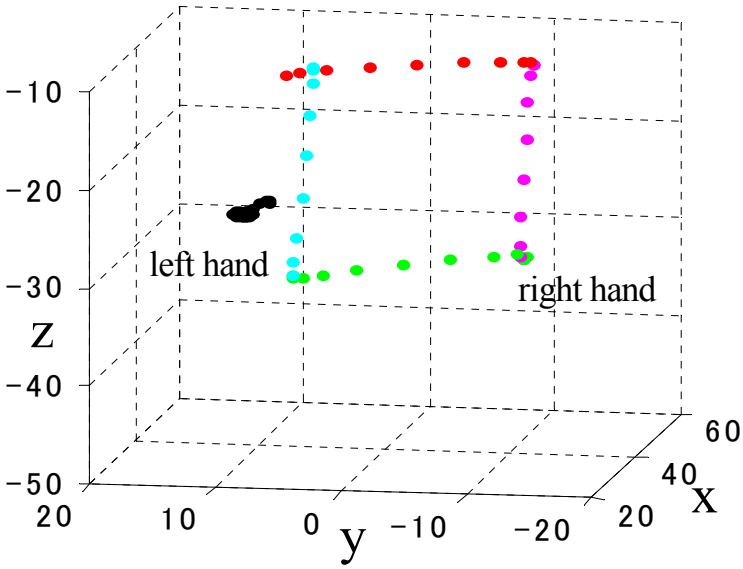


Fig 4.11 Case2 : Wrist trajectries derived with comparative cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:52)(TaskB)

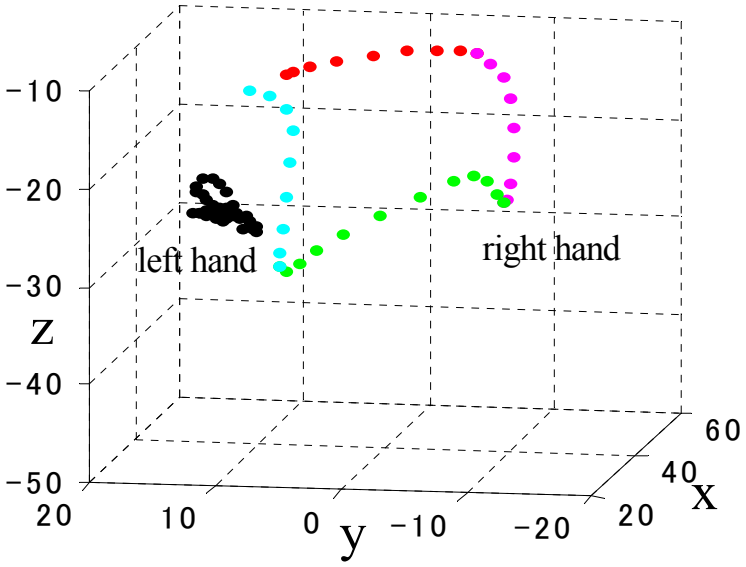


Fig 4.12 Case3 : Wrist trajectries derived with comparative cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:1)(TaskB)

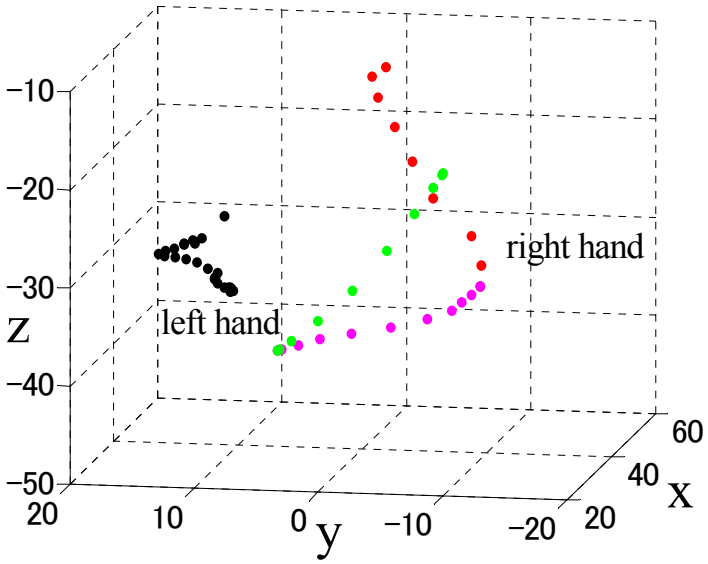


Fig 4.13 Case1 : Wrist trajectries derived with comparative cost function with manipulability (TaskC)

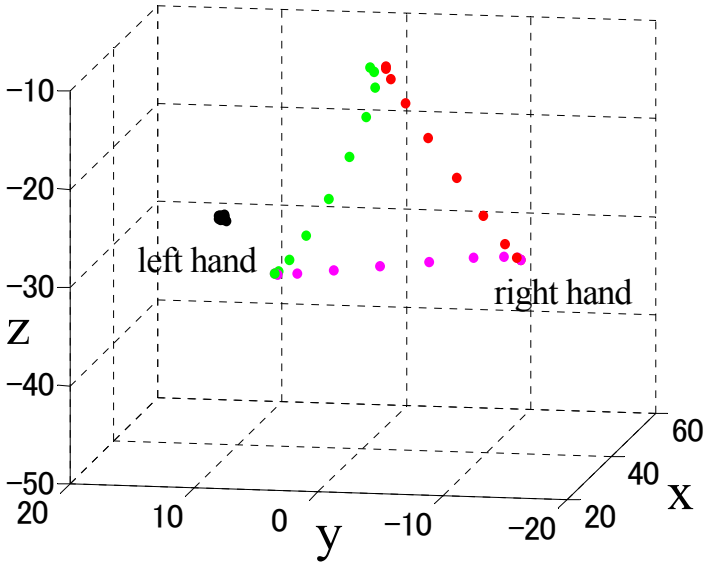


Fig 4.14 Case2 : Wrist trajectries derived with comparative cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:52)(TaskC)

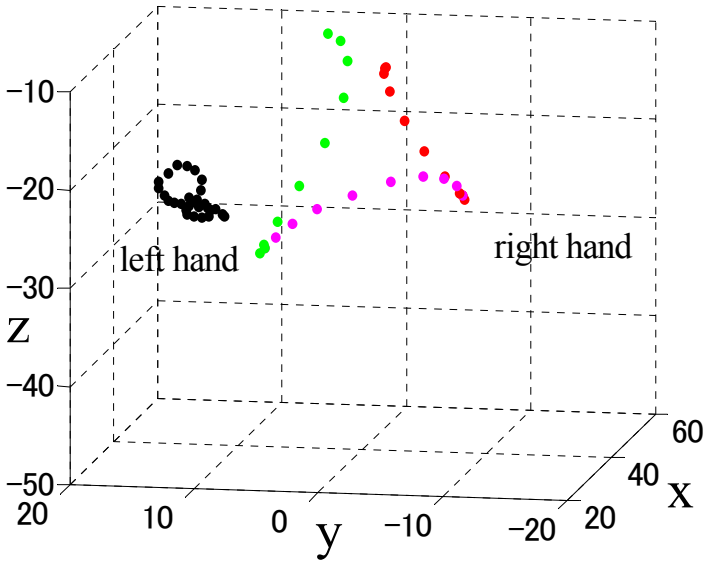


Fig 4.15 Case3 : Wrist trajectries derived with comparative cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:1)(TaskC)

Table 4.5 Wrists trajectry differencies between subjects' and ones with simulations (TaskA)

(a) The proposed cost function

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	9.26	6.03	7.77	5.99	6.09	7.03	1.70
subject 2	8.91	9.08	9.53	8.64	9.26	9.08	0.09
subject 3	7.24	6.45	8.90	8.09	8.75	7.88	0.86
subject 4	11.26	7.75	6.97	9.00	8.17	8.63	2.15

(b) Cost function with manipulability

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	17.50	11.58	17.58	14.49	15.25	15.28	4.91
subject 2	14.33	16.01	18.35	15.60	15.32	15.92	1.78
subject 3	12.93	13.00	13.47	16.53	14.04	13.99	1.77
subject 4	14.90	11.42	11.51	11.27	12.25	12.27	1.84

(c) Cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:52)

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	10.15	6.01	8.66	6.78	6.88	7.70	2.26
subject 2	9.07	9.33	10.29	9.52	9.99	9.64	0.20
subject 3	7.80	6.91	8.73	8.73	9.12	8.26	0.64
subject 4	11.62	7.82	7.09	9.01	8.29	8.76	2.43

(d) Cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:1)

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	18.30	12.96	16.05	15.52	14.65	15.49	3.07
subject 2	16.24	12.15	16.02	17.76	17.98	16.03	4.37
subject 3	13.74	14.15	12.17	13.46	15.78	13.86	1.36
subject 4	18.41	16.29	15.67	16.62	16.09	16.62	0.90

Table 4.6 Elbows trajectry differencies between subjects' and ones with simulations (TaskA)

(a) The proposed cost function

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	35.20	22.86	22.12	16.98	15.07	22.45	49.44
subject 2	28.17	14.49	21.24	23.30	26.40	22.72	22.70
subject 3	34.41	39.02	31.55	38.48	37.01	36.10	7.72
subject 4	21.77	15.44	29.94	25.72	14.75	21.52	34.27

(b) Cost function with manipulability

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	31.93	24.48	24.69	15.57	21.76	23.68	27.85
subject 2	38.35	18.40	24.15	27.72	35.61	28.85	53.70
subject 3	38.34	41.61	36.26	40.19	41.54	39.59	4.17
subject 4	32.33	24.39	32.53	30.36	23.92	28.70	14.42

(c) Cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:52)

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	35.19	23.55	22.57	17.35	16.05	22.94	45.86
subject 2	28.96	15.42	21.89	23.86	27.24	23.47	22.34
subject 3	34.96	39.24	31.91	38.80	37.63	36.51	7.49
subject 4	22.56	16.28	30.21	26.38	15.49	22.18	32.37

(d) Cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:1)

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	39.56	28.25	23.77	24.52	16.21	26.46	58.18
subject 2	23.71	19.43	25.06	23.94	21.79	22.79	3.93
subject 3	32.03	37.14	29.84	38.00	34.07	34.22	9.37
subject 4	14.07	14.17	28.24	22.81	11.58	18.17	39.85

Table 4.7 Wrists trajectry differencies between subjects' and ones with simulations (TaskB)

(a) The proposed cost function

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	13.95	11.00	11.74	11.07	10.42	11.64	1.51
subject 2	18.27	17.19	17.42	14.73	14.51	16.42	2.31
subject 3	13.95	14.63	14.02	14.32	14.86	14.36	0.12
subject 4	14.95	14.88	14.90	15.39	18.30	15.68	1.75

(b) Cost function with manipulability

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	18.99	17.81	17.09	17.31	17.29	17.70	0.47
subject 2	24.72	24.10	21.19	21.92	18.35	22.06	5.14
subject 3	18.24	19.94	19.85	20.49	19.41	19.58	0.57
subject 4	20.87	20.82	20.74	23.13	22.19	21.55	0.91

(c) Cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:52)

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	13.92	10.79	11.54	10.85	10.32	11.48	1.64
subject 2	18.53	17.56	17.73	14.94	14.37	16.63	2.73
subject 3	14.46	14.86	14.17	14.37	15.19	14.61	0.13
subject 4	15.05	14.79	14.86	15.44	18.22	15.67	1.67

(d) Cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:1)

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	14.58	12.79	13.72	12.88	12.10	13.21	0.73
subject 2	17.17	17.58	16.95	15.86	15.89	16.69	0.48
subject 3	13.31	14.45	15.22	14.10	14.18	14.25	0.38
subject 4	15.10	16.08	16.05	15.95	17.41	16.12	0.55

Table 4.8 Wrists trajectry differencies between subjects' and ones with simulations (TaskC)

(a) The proposed cost function

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	11.68	10.44	10.93	9.26	10.86	10.63	0.63
subject 2	18.37	15.91	13.43	14.58	13.19	15.10	3.61
subject 3	12.91	15.31	13.08	14.90	14.00	14.04	0.91
subject 4	18.77	13.57	17.54	17.12	17.25	16.85	3.03

(b) Cost function with manipulability

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subject 1	21.37	19.49	19.76	18.31	19.40	19.66	0.97
subject 2	27.67	25.42	23.21	23.85	22.16	24.46	3.70
subject 3	22.12	24.22	22.93	24.53	21.85	23.15	1.23
subject 4	27.00	22.64	26.20	26.27	25.18	25.46	2.32

(c) Cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:52)

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subjest 1	12.06	10.73	11.14	9.51	11.07	10.90	0.68
subjest 2	18.99	16.20	13.83	14.80	13.40	15.44	4.07
subjest 3	13.36	15.67	13.62	15.55	14.43	14.53	0.91
subjest 4	18.87	13.83	17.71	17.36	17.45	17.04	2.87

(d) Cost function with torque change when parameters set as (q_1:q_2=1:1)

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均	分散
subjest 1	13.96	13.85	14.45	12.86	14.32	13.89	0.31
subjest 2	16.46	17.54	14.85	16.13	14.51	15.90	1.22
subjest 3	13.13	16.43	13.65	16.23	14.28	14.75	1.81
subjest 4	20.61	15.45	19.69	19.17	19.33	18.85	3.14

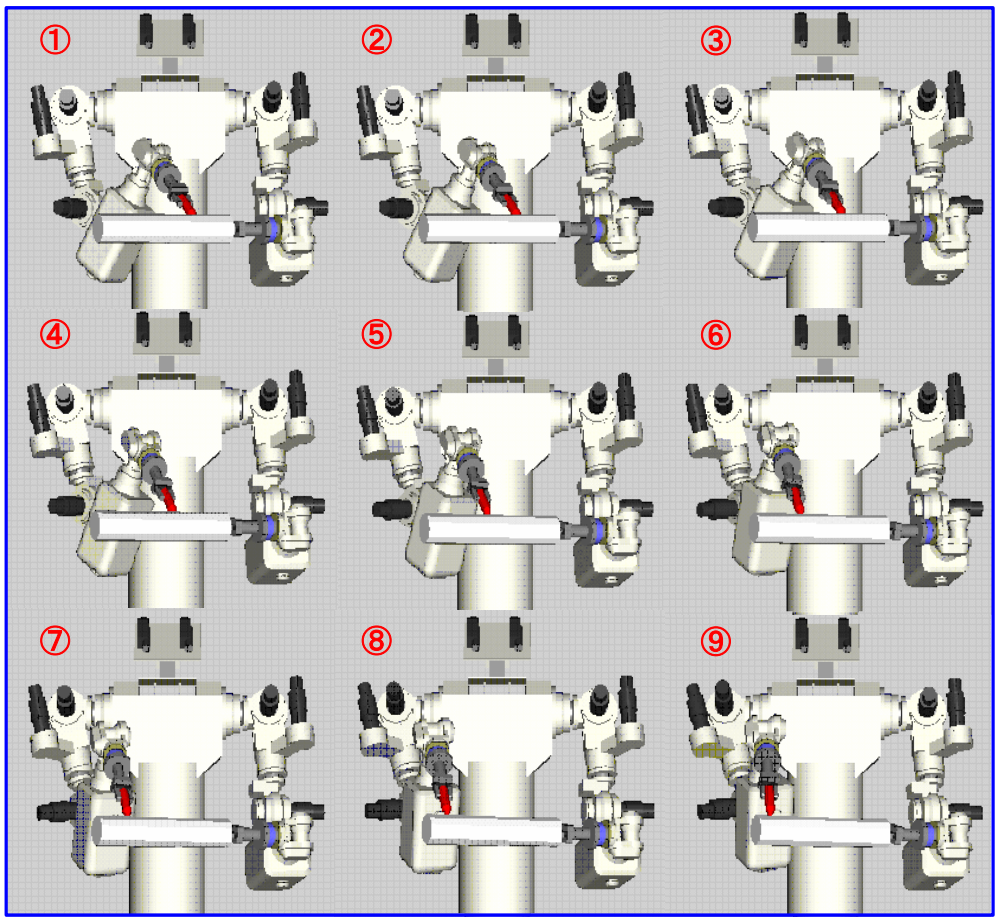


Fig 4.16 Robots simulation

第 5 章 終わりに

本研究では，双腕マニピュレータが部分拘束協調作を行う時における人間らしい動作の導出を目的とした評価関数による軌道生成の方法を提案した．提案した評価関数は，トルク変化だけでなく物体の見えやすさの観点も考慮し設定した．提案した手法を用いシミュレーションを行い，その結果を人間の実動作と比較したところ，人間の動作に近い動作を生成できていることを確認した．特に，トルク変化のみで構成された対照の評価関数との差から，人間らしい動作の表現には，腕のダイナミクスによる項だけでなく，”見えやすさ”のような要素も必要であることが示唆された．しかし，評価関数の設定，特に重み係数の問題，その他の要素の導入などには十分考慮する余地があり，多くの動作を解析しながら検討していく必要があると思われる．

謝辞

まず，小林尚登教授に感謝の意を申し上げます．教授には，研究の知識とアイデアを提供して頂いただけでなく，様々な面でご指導いただきました．

中村秀男先生には，予算の面において多大な労力を費やしていただき大変感謝しております．

また，3年間樹野先生，川端先生，稲垣先生，には大変お世話になりました．それぞれ正規の勤務地における活動がお忙しいにもかかわらず，わざわざ法政大学まで足を運んでいただき，われわれの研究について親身になって相談に乗っていただきありがとうございます．

特に，樹野先生には様々なアイデアの提供，論文の構成，学会の発表など，言葉には表せないほどのご迷惑をおかけしました．

川端先生，稲垣先生は，豊富な知識と経験でご指導アドバイスをいただきました．

最後に，本研究を共に励んできた先輩，同輩ならびに後輩の皆様に対して，感謝の意を申し上げて本論文の結びとさせていただきます．

参考文献

[1] 小川鉱一，森政弘：”物体を持った上肢の直線運動の実験公式 –機械動作美化のための基礎研究–”, バイオメカニズム, Vol.5, pp.121-129, (1980)

[2] T. Flash and N. Hogan: ”The Coordination of Arm Movements: An Experimatally Confirmed Mathematical Model”, J. of Neuroscience, Vol.5, No.7, pp. 1688–1703, (1985)

[3] Y. Uno, M. Kawato and R. Suzuki: ”Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multi-Joint Arm Movement”, Biological Cybernetics, Vol. 61, pp. 89–101, (1989)

[4] 柴田論, 大場光太郎, 猪岡光：位置決め精度が必要な人間上肢運動に関する実験的考察，人間工学，Vol.29, No.5, pp.279–287, (1993)

[5] 田所諭，市道和広，相川誠：上肢運動の動作解析に関する研究–手首位置と肩の回転角との関係について–，人間工学，Vol.26, No.1, pp.41–47, (1990)

[6] 加島，石動: ”ヒトの運動軌道を目指したマニピュレータの軌道計画”, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 8, pp. 1131–1137, (1998)

[7] 山本，黒田，毛利: ”複数台ロボットによる協調作業経路計画”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 2, pp. 217–226, (1993)

[8] E. Nakano, S. Ozaki, T. Ishida and I. Kato: ”Cooperative Control of the Anthoropomorphous Manipulator MELARM”, Proc. of 4th

Int. Symp. Indusrial Robots, pp. 251–260, (1974)

[9] 内山，ドシェ: ”両手ロボットの対称型運動学と非マスタスレーブ協調制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 1, pp. 19–30, (1989)

[10] 小菅ら : ”インピーダンス制御に基づく双腕マニピュレータの協調制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 3, pp. 404–410, (1995)

[11] 宮代信夫, 横溝克己: ”眼球運動の時間構造からみた両手動作の眼と手の協調性について”, 人間工学, Vol.25, No.2, pp.101–107, (1989)

[12] Y.Wada，M.Kawato, and R.Suzuki: ”Formation and control of optimal trajectory in human arm movement-minimum torque-change model”, Biological Cybernetics，Vol. 61，pp. 89-101，(1989)

[13] Powell: ”A method for Non-Linear Constraints in Minimization Problems in Optimization”, Chapter 19, R. Fletcher (ed.), Academic Press, New York, (1969)

[14] Y. Yoshikawa: ”Manipulability of Robotic Mechanisms”, The International Journal of Robotics Research, Vol.4. No.2, MIT Press, (1985)