

NAIST-IS-MT1651079

修士論文

タッチケアロボットのためのエンドエフェクタの 設計と評価

豊島 健太

2018 年 3 月 13 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

豊島 健太

審査委員：

小笠原 司 教授	（主指導教員）
清川 清 教授	（副指導教員）
高松 淳 准教授	（副指導教員）
丁 明 助教	（副指導教員）

タッチケアロボットのためのエンドエフェクタの 設計と評価*

豊島 健太

内容梗概

介護やケアの一手法としてタッチケアが介護・医療の現場で注目されている．介護現場では人手不足が深刻な問題となっており，タッチケアを自動化することができれば，介護スタッフの負担の軽減が期待できる．本研究では，人の手によるタッチケアを再現するタッチケアロボットの開発を目指す．タッチケアロボットの開発について，1. 人の動きや感覚提示をできる限り模倣する方法と，2. 手段はともあれ心地よさのみを追求する方法の2つのアプローチが考えられる．本論文では人と接触するエンドエフェクタに着目し，機能が異なる4つのエンドエフェクタを製作し，比較することでエンドエフェクタに求められる機能について検討する．1つ目のアプローチを検討するために，人の手とエンドエフェクタで背中を撫で，どちらか人の手かを判断してもらい，その正答率（50％に近ければよい）で性能を評価した．その結果ゴム手袋が最も人の手に近い感触であり，次点で機構のないエンドエフェクタが人の手に近いという傾向が分かった．次に，2つ目のアプローチを検討するために，異なるエンドエフェクタをロボットアームを用いて同じ動作で撫でたときに，どちらのエンドエフェクタが心地よかったかを一対比較法で評価した．実際に3つのエンドエフェクタに温度差を加えた6パターンを比較した．その結果，接触面積が広く温かいエンドエフェクタが人到人らしさと心地よさを与えやすいという結果を得た．

キーワード

タッチケアロボット，エンドエフェクタ，タクトイル，心地よさ，人らしさ

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1651079, 2018年3月13日.

Design and Evaluation of End Effector for Touch Care Robots*

Kenta Toyoshima

Abstract

Touch care is attracting attention in the fields of nursing and medical care as a method of caregiving. Lack of personnel is a serious problem at health-care sites so the automation of touch care is expected to reduce the burden of healthcare staff. In this research, I aim to develop a Touch Care Robot that reproduces the touch care of a human hand. Regarding the development of the Touch Care Robot, two approaches are conceivable: 1) imitating as much as possible the movement or sensation of a human hand, and 2) seeking only comfort as a means. In this paper, focusing on the end effector in contact with people, I examine the functions required by the end effector and fabricate and compare four end effectors with different functions. In order to examine the first approach, I stroked human subjects' backs with a human hand and an end effector and asked them to judge which one is the human hand, and evaluated the performance of the correct answer rate. As a result, I found that the rubber gloves are the closest to a human hand, and the end effector without the mechanism is the second closest to a human hand. Next, in order to examine the second approach, I evaluated which end effector was pleasant when I stroked human subjects with different end effectors attached to a robot arm with the same motion using a pairwise comparison method. Actually, I compared six patterns with different temperature added to three end effectors. As a result, I found that the warm end effector with a wide contact area tends to give people a sense of human-likeness and comfort.

Keywords:

touch-care robot, end effector, tactile, comfort, human-likeness

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651079, March 13, 2018.

目次

図目次		v
第 1 章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	3
第 2 章	エンドエフェクタの設計と製作	4
2.1	予備実験	4
2.2	製作したエンドエフェクタ	6
第 3 章	人の手の感覚に近いエンドエフェクタの検討	8
3.1	実験の概要	8
3.2	実験方法	8
3.3	実験結果	9
	3.3.1 人の手/エンドエフェクタの区別の正解率	9
	3.3.2 人の手とエンドエフェクタを区別した判断材料について . .	13
3.4	考察	14
第 4 章	タッチケアロボットによる撫で動作の構成	15
4.1	使用するロボット	15
4.2	ばねを用いた緩衝機構	17
4.3	ロボットによる撫で動作	21
第 5 章	タッチケアロボットとして有用なロボットのエンドエフェクタの 検討	22
5.1	実験の概要	22
5.2	実験方法	23
5.3	実験結果	25
	5.3.1 人らしさの評価	25

5.3.2	心地よさの評価	30
5.3.3	人らしさと心地よさの関係	32
5.4	考察	33
5.4.1	人らしさについての考察	33
5.4.2	心地よさについての考察	34
5.4.3	人らしさと心地よさの関係についての考察	35
第 6 章	おわりに	36
6.1	本論文のまとめ	36
6.2	今後の課題と展望	37
謝辞		39
参考文献		40

図目次

2.1	Mannequin hand	5
2.2	Wooden hand	5
2.3	Ball throw hand	5
2.4	Ball catch hand	5
2.5	0DOF hand	6
2.6	1DOF hand	6
2.7	7DOF hand	7
2.8	Rubber glove	7
3.1	Experiment for finding the human-like end effector.	10
3.2	Result on end effector and accuracy rate	12
3.3	Result on Subject and accuracy rate	12
4.1	KUKA LBR iiwa 14 R820	16
4.2	Cushioning mechanism	17
4.3	Force plate SS-FP40AO-SY	19
4.4	Stroke motion with the cushioning mechanism	20
5.1	Impression evaluation experiment of comfort and human- likeness of the end effector.	24
5.2	Result of ranking of human-likeness	30
5.3	Result of ranking of comfort	32

第 1 章 はじめに

1.1 背景

介護やケアの一手法としてタッチケアが介護・医療の現場で注目されている [1]. タッチケアは人の体に触れるケアであり、乳幼児から高齢者まですべての人に対して適用でき、ストレスや痛みの緩和、認知症の抑制、幸福感・安心感・信頼感の形成、血圧・心拍数の低下によるリラクセス効果、睡眠の質の改善など幅広い効果が確認されている [2] [3] [4]. 人の体に触れるケアには、リンパなどのマッサージをはじめリフレクソロジーや指圧など、様々な手法がある。これらの療法では、ある特定のツボや筋肉を押したり揉んだりすることで効果を得ることができるが、施術者に知識と技術が求められ、場合によっては事故などのリスクを伴う。これに対してタッチケアは、特定のツボや筋肉に強い刺激を与えるのではなく、手や足・背中全体をやわらかくゆっくり撫でることで効果を得られるため危険が少なく、乳児から高齢者まで幅広い人が利用できる。認知症に対して有効なタッチケアとしてはスウェーデン発祥のタクティールケア [1] やフランス発祥のユマニチュード [5] が有名であり、日本でも実施されている。しかし昨今の介護現場では介護従事者の人材不足が深刻な問題となっており、このようなタッチケアを十分に行うことが困難である場合が多い。このようなタッチケアを自動化することができれば、介護スタッフの負担の軽減が期待できる。

タッチケアの重要な要素として 1. 人の手の感触, 2. 触れ方, 3. 安心・信頼感の 3 つが挙げられる [1]. 人の手の感触というのは主に人の手の柔らかさとぬくもりを指しており、やわらかく・温かく包み込むような感触が人に安心感を与える。触れ方にはさまざまな種類があり、叩く、つねるなど心身ともにダメージを与えるものから、撫でる、さする、手を当てるなど人に安心感を与える触れ方もある。ゆっくりとした優しい触れ方が、人にリラクセス効果を与え、タッチケアの効果を高める。山口は気持ちよさを感じる触れ方の法則があると述べており、1 秒間に 5cm ほどのゆっくりとした速度で撫でると最もリラクセス効果が得られると報告している [6]. また、触れる際の力は 400~800 グラム (約 4~8 [N]) が副交感神経系の応答を引き出しリラクセス効果が得られ適切であるとの報告もある [7].

ロボットがタッチケアを行うには、ロボットは人と接触する必要がある。ロボットと人が接触する研究としては、人と接触してしまった場合に接触した力や姿勢の検知 [8] や、人に触れられることによってその人の状態を取得するロボット [9] 等多くの事例があり、人へリラクゼーション効果を与える目的のロボットも研究されている [10]。これらの研究は人からロボットに接触するものであり、ロボットから積極的に接触を行うものではない。ロボットから人へ積極的に接触を行う研究として、介護支援ロボット [11] [12] がよく挙げられる。これらのロボットは人に不安を与えずに抱きかかえ・移乗支援を行うといったものが多く、人への精神的・肉体的ケアを目的にしていないことが多い。

ヒューマンケアやタッチケアを視野に入れた研究として、人に触れるためのハンドについての研究がある。梶川はシリコンゴム製のドーム型クッションを用いて柔らかい動作と変位・力のセンシングを両立したハンドを開発し、その性能を評価した [13]。その結果、外力に対する非常に良好な応答特性と、複数の外力を分別して精度よく推定できることが確認され、人の腕に対して一定の力で撫でる動作を実現した。しかし、柔軟なハンド故に指先力の限界が最大 2 [N] 程度となってしまう。中村らは、介護が必要な患者の情動に働きかけるケアシステムの開発の初期段階として、タッチ刺激システムを構成・検討している [14]。このケアシステムはタクティールケアやユマニチュードの自動化を目的としており、ロボットによるタッチケアに取り組んでいる。タッチ刺激システムは 1 軸のスライド機構と、2 軸の回転機構からなる装置で、「叩く」「撫でる」「握る」「揉む」動作を行えるように設計されている。この研究では叩く動作と撫でる動作は押し付け力が 4-8 [N]、撫でる速度は最大 5 [cm/s] と、参考文献 [6] [7] で述べられていた適切な撫で方・触れ方が実現されている。しかし、この論文では要件や設計についてのみ述べられており、触れられた人の感じ方や評価は行っていない。

1.2 研究目的

本研究はタッチケアを行うタッチケアロボットを製作することを目的としている。本論文ではタッチケアにおいて必要不可欠である感触、つまり接触部分にあたるエンドエフェクタについて取り組む。

ロボットによるタッチケアの実装において、2つのアプローチが考えられる。1つは人の動きや感覚提示をできる限り模倣する方法、もう1つは手段はともあれ心地よさのみを追求する方法である。この2種類のアプローチについて、エンドエフェクタに着目し、人に撫でられる感覚に近いものがよいのか、人とは違う心地よさを与えることができるのか、どのような要素が撫でられる際の心地よさに影響するのかを、エンドエフェクタを製作し実際に人に対して撫でる印象評価実験を行い検討する。1つ目のアプローチの人の模倣を目標とする場合に必要となる「人の手の感覚に近いエンドエフェクタ」について、作成したエンドエフェクタと人の手を直接比較することで、どのような要素が人の手に近いと感じさせるのかを検討する。2つ目のアプローチの心地よさの追求を目標とする場合、どのようなエンドエフェクタに対して心地よさを感じるのかを各エンドエフェクタを比較することで検討する。最終的にどのようなエンドエフェクタが有用であるかを調べると同時に、心地よさとエンドエフェクタの人らしさの関係についても検証する。

1.3 本論文の構成

2章では本論文で取り扱うエンドエフェクタの設計と製作について述べる。3章では人の手と製作したエンドエフェクタで被験者の背中を撫で、直接人の手とエンドエフェクタを比較する印象評価実験について述べる。4章では、ロボットを用いた実験を行うためのロボットシステムの構成、使用するロボットや安全性と押し付け力を再現する緩衝機構について述べる。5章では、ロボットによる撫で動作で各エンドエフェクタを比較する印象評価実験について説明する。最後に、6章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

第 2 章 エンドエフェクタの設計と製作

タッチケアロボットのエンドエフェクタは人と接触する部分であり，ここで人に不快感を与えてしまうとどのような触れ方・撫で方でもタッチケアとしての効果は期待できない．本章では，どのような要素が人に不快感を与えてしまうのかを予備実験により把握し，これに基づいて後の実験で検討するエンドエフェクタの設計・製作について説明する．

2.1 予備実験

エンドエフェクタを検討するにあたり，どのような要素が人に不快感を与えるのかを調べるため，既製品を用いた予備実験を行った．実験内容は実験試料であるエンドエフェクタを手で持ち，人の背中や肩，腕に触れ，その感想を聞きどのような要素がエンドエフェクタの評価に影響するのか調べる．実験に使用したエンドエフェクタの一例を Fig. 2.1～Fig. 2.4 に示す．Fig. 2.1 と Fig. 2.2 は市販品であり，Fig. 2.3 と Fig. 2.4 は過去の活動で製作した，キャッチボール用のエンドエフェクタである．この実験の結果をまとめると，以下の傾向があることがわかった．

- 硬さは優しく触れられた場合気になりにくい．
- 出っ張りや引っ掛かりが生じると不快感を与える．
- 接触面がまばらだと不自然に感じる．
- 接触面積が狭いと棒やペンで触れているように感じる．
- 接触面積が広すぎると人らしくはないが，不快感は感じないものもある．

この結果から，不快感を与えにくいエンドエフェクタを以下の 3 点の指針に基づいて設計・製作する．

- 出っ張りや引っ掛かりがない形状
- フィット感のある形状・機構
- 人の手と同じくらいの大きさ



Fig. 2.1 Mannequin hand



Fig. 2.2 Wooden hand



Fig. 2.3 Ball throw hand



Fig. 2.4 Ball catch hand

2.2 製作したエンドエフェクタ

前節の予備実験の結果を踏まえ、検討するエンドエフェクタとして4つのエンドエフェクタを製作した。1つ目は Fig. 2.5 に示すエンドエフェクタで、ドーム状のエンドエフェクタである。このエンドエフェクタは可動部分のないシンプルなエンドエフェクタかつ衣服などに引っ掛からずにスムーズに撫でることができるエンドエフェクタとして設計した。正面から見た時の大きさは直径 78 [mm] であり、これは握りこぶしの大きさを参考にして設計した。0 自由度のエンドエフェクタであることから、本論文ではこのエンドエフェクタを「0DOF ハンド」と呼称する。

2つ目は Fig. 2.6 に示すエンドエフェクタで、人の手の MP 関節にあたる関節にばねを用いた受動機構を有するエンドエフェクタである。これにより、起伏がある面に接触する際に機構のない平面状のエンドエフェクタよりも広い面積を接触させることができ、タッチケアにおける「密着感」を再現できるよう設計した。大きさについて、幅は 64 [mm] であり、長さは指と手のひらにあたる部分についてをそれぞれ 70 [mm] に設計した。これは人の手の、各指をくっつけた状態の大きさを参考に設計した。このエンドエフェクタは 1 自由度のハンドであることから、「1DOF ハンド」と呼称する。



Fig. 2.5 0DOF hand



Fig. 2.6 1DOF hand

3つ目は Fig. 2.7 に示すエンドエフェクタで、人の手の MP 関節と中手間関節にあたる関節にばねを用いた受動機構を有するエンドエフェクタである。これにより、1DOF ハンド以上の「密着感」を再現でき、特に「やわらかく包み込むような感触」を目的として設計した。中手間関節にあたる機構の実装に伴い、各指が独立して可動するようになっている。大きさについては各指の幅は 16 [mm]，長さは 70 [mm] と、1DOF と同じ寸法を用いているが、中手間関節の機構の分、全体の幅は 1DOF ハンドより広がっている。このエンドエフェクタは 7 自由度のハンドであることから、「7DOF ハンド」と呼称する。

4つ目は Fig. 2.8 に示すエンドエフェクタで、裏返した市販のゴム手袋に綿を詰めたエンドエフェクタである。全体的に柔らかさと弾力があり、人の手の感触に近いエンドエフェクタである。ただし、綿の密度や接触面の摩擦、母指球のふくらみ等によって、常に同じような触れ方や感触を得ることが難しい。大きさはについては市販のゴム手袋をしようしているため、人の大きさと同程度である。このエンドエフェクタは rubber glove から、「RG ハンド」と呼称する。

0DOF ハンド、1DOF ハンド、7DOF ハンドは 3D プリンタによって出力されたものであり、ABS 製である。



Fig. 2.7 7DOF hand



Fig. 2.8 Rubber glove

第 3 章 人の手の感覚に近いエンドエフェクタの検討

本章ではロボットによるタッチケアの実装にあたり，本来タッチケアは人対人で行うケアであることから，人の手と同様の機能を模倣するアプローチを考える．この際，ロボットの手となるエンドエフェクタは，人に触れられている感覚に近いものが望ましい．本章では，どのようなエンドエフェクタが人の手で撫でられる感触に近いのか，どのような要素が人の手らしくするかを検討する．

3.1 実験の概要

本実験では，2 章で述べたエンドエフェクタについて，人の手で撫でられる感触に近いかを印象評価実験によって評価する．実験内容としては，用意したエンドエフェクタと人の手で各 1 回ずつ被験者の背中を撫で，1 回目（A）と 2 回目（B）のどちらが人の手であるかとなぜそう判断したのかを回答してもらう．エンドエフェクタで撫でる際は実験者がエンドエフェクタを持ち撫でる．

3.2 実験方法

実験試料として，4 つのエンドエフェクタとシャープペンシルの計 5 パターンを用意する．シャープペンシルは，明らかに人の手と違う比較対象として実験試料に組み込んだ．本実験ではエンドエフェクタの形・機能を評価したいため，温度差による判別を防ぐためにエンドエフェクタと人の手の温度を同程度に調整する．そのための加熱装置として，ヒートガンと放射温度計を用いる．また，実験をスムーズに進行するための表示装置としてモニターと PC を使用する．

実験の様子を Fig. 3.1 に示す．被験者には背中が背もたれで隠れないよう，机に向かって椅子に座ってもらう．この机には用紙とモニターを配置する．モニターは PC に接続されており，実験に必要な情報を表示する．実験者は被験者の後ろに位置し，エンドエフェクタや手を使った撫で動作や PC の操作を行う．被験者の条件として衣服は 2 枚と統一し，ヘッドホン着用による遮音を行った．各セットで実験するエンドエフェクタの種類と順番については実験を行う前にランダムに決めてお

く．試行回数は被験者 1 名につき各エンドエフェクタ 10 回，合計 50 回とする．被験者の負担を考慮し，25 回目の実験が終わった後，約 5 分間の休憩を設ける．被験者は 22～29 歳の男性 10 名（平均 23.4 歳，分散 4.24）とした．

実験の流れを以下に示す．

1. PC を操作し，モニターに実験の説明を表示する．
2. その回で実験するエンドエフェクタを用意する．
3. 先（A）と後（B）のどちらを人の手で撫でるかをランダムに決定する．
4. 使用するエンドエフェクタを，ヒートガンと放射温度計を用いて現在の人の手と同じ温度（ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 程度）に調整する．
5. 撫で動作を行う．
 - (a) PC を操作し，X-A という画面を表示する（X は何回目の実験かを示す）
 - (b) 先（A）で撫でるエンドエフェクタ/手で背中を 2 回撫でる．
 - (c) PC を操作し，X-B という画面を表示する（X は何回目の実験かを示す）
 - (d) 後（B）で撫でるエンドエフェクタ/手で背中を 2 回撫でる．
6. PC を操作し，どちらが人の手であるかを回答するよう促す画面を表示する．
7. 被験者に，A/B どちらが人の手であるかの回答と，その判断理由を用紙に記入してもらう．
8. 被験者の記入終了の合図を確認したら，PC を操作し「準備中」の画面を表示する．
9. 実験終了まで 2～8 を繰り返す．

3.3 実験結果

3.3.1 人の手/エンドエフェクタの区別の正解率

各被験者・エンドエフェクタについての正解率を Table 3.1 に示し，エンドエフェクタごとの正解率を Fig. 3.2 に，被験者ごとの正解率を Fig. 3.3 に示す．本実験では正解率が 1.0 に近いほどそのエンドエフェクタは手と区別がつきやすく，人が触れる感覚からは遠いといえ，0.5 に近いほどそのエンドエフェクタは手との区別がつきにくく，人が触れる感覚に近いといえる．Table 3.1 の平均値の列を見る

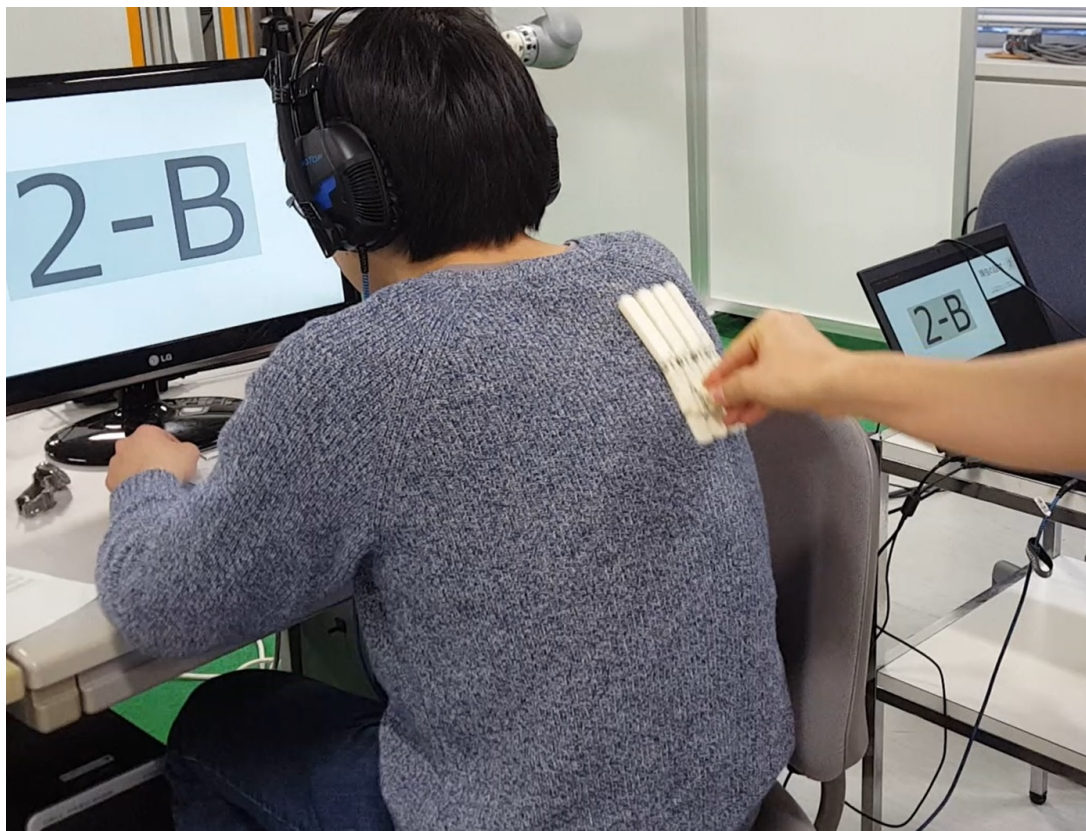


Fig. 3.1 Experiment for finding the human-like end effector.

と、正解率の平均値が最も低いエンドエフェクタは RG ハンドであり Fig. 3.2 においても RG ハンドの正解率が低いことから、5つの試料のうち最も人の手に近いエンドエフェクタは、RG ハンドであるといえる。Fig. 3.3 を見ると、いずれの被験者も中央値が 0.9 か 1.0 となっており、エンドエフェクタと人の手の区別がついているといえる。被験者 5 は正答率が 1.0 であるのに対して被験者 7 は中央値が 0.9、第 1 四分位点が 0.7 と、被験者によって正答率にばらつきがある。

各エンドエフェクタについて、人の手 (accuracy rate = 0.5) に対して t 検定を行った結果を Table 3.2 に示す。この結果から、RG ハンドについては有意水準 $p < 0.01$ で有意差があり、それ以外のエンドエフェクタについては有意水準 $p < 0.001$ で有意差があり、非常に有意な差があることがわかった。本検定において、非常に有意な差があるということはそのエンドエフェクタが人の手らしくない

ということを示している．RG ハンドについては，他エンドエフェクタと比べると人の手には近いが人の手らしいとはいいい難いという結果が得られた．また，被験者による正答率のばらつき・個人差が有意なものであるかを調べるために，被験者-正答率について分散分析を行った．その結果，p 値は 0.576 であったため個人差については有意差はないといえる．

Table 3.1 Result of comparative experiment

Subjects	0DOF	1DOF	7DOF	RG	Pen	Ave.
1	0.9	0.9	1.0	0.6	1.0	0.88
2	0.8	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9
3	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0	0.92
4	0.9	0.8	1.0	0.6	1.0	0.86
5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
6	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.98
7	0.7	1.0	1.0	0.7	0.9	0.86
8	0.9	1.0	1.0	0.7	0.9	0.9
9	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	0.96
10	1.0	0.9	0.9	0.6	0.9	0.86
Ave.	0.92	0.93	0.98	0.77	0.96	0.91

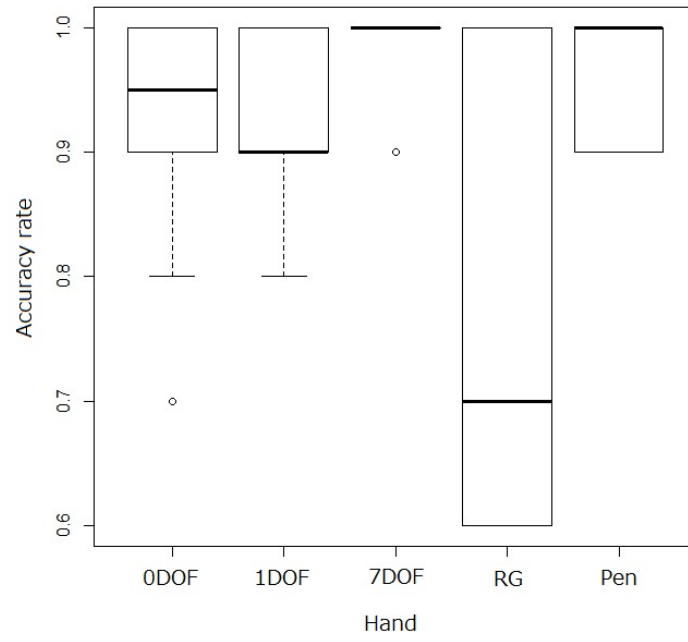


Fig. 3.2 Result on end effector and accuracy rate

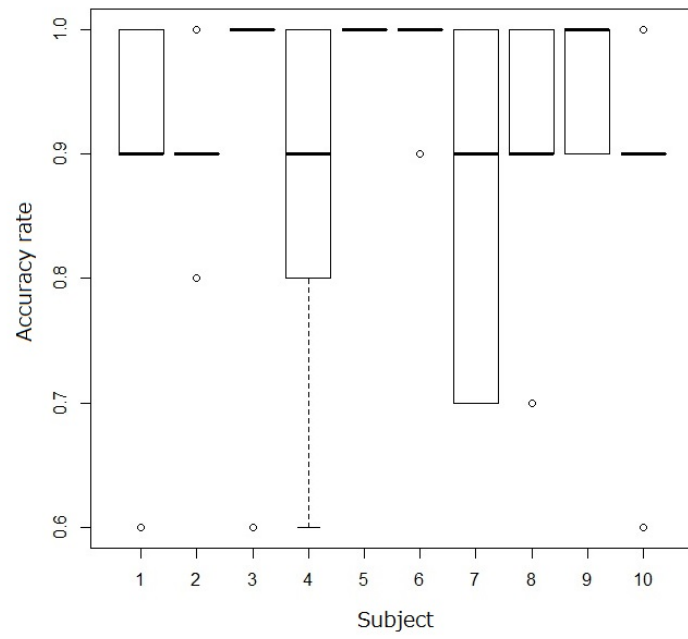


Fig. 3.3 Result on Subject and accuracy rate

Table 3.2 Result of t-test about comparative experiment

Hand	p-value
0DOF	4.26E-07 ***
1DOF	8.51E-09 ***
7DOF	4.87E-11 ***
RG	0.001171 **
Pen	4.35E-10 ***

: $p < 0.01$, *: $p < 0.001$

3.3.2 人の手とエンドエフェクタを区別した判断材料について

エンドエフェクタと人の手を比較したときの判断材料についてまとめた結果，すべてのエンドエフェクタにおいて硬さ・面積・摩擦を判断材料としたケースが多かった．しかし判断材料として硬さや摩擦を全く使わなかった人や，撫でられた際の最初の触れられ方から判断する人など，人によって判断材料が大きく異なっていた．0DOF ハンドに対しては硬さを感じた，接触面積が狭かったという意見がある一方で，わかりづらかった，難しかったという意見が多くみられた．1DOF ハンドに対しては，指の関節にしてはやわらかすぎる，密着というより離れた2か所で接触しているように感じる，不自然なフィット感，背中への触れ方が人らしくない，といった意見があった．7DOF ハンドについては1DOF ハンドと同じ意見が多く，それらに加え接触点が複数あり不自然に感じるとの意見があった．RG ハンドについては，わかりにくかった，難しかったといった意見がある一方，全体的にやわらかすぎる，指の関節の動きではないものを感じた，背中に触れるとき・離れるときの触れ方が不自然であるとの意見があった．ペンについては，棒状の物で触られている，くすぐったいのですぐわかったといった意見が多かったが，指で触られているような感じだったという意見もあった．

3.4 考察

前節での正解率や検定の結果から，各エンドエフェクタと人の手との間には有意な差があり，区別がついてしまうことが分かった．回答時の判断材料をみると，0DOF ハンドと RG ハンドの 2 つが人の手との判別がつきにくかったという意見が複数見られたことから，この 2 つのエンドエフェクタは人の手と直接比較する本実験において人の手と判別しづらかったといえる．RG ハンドが人の手に近いと感じられる理由としては，エンドエフェクタの素材がやわらかさ・摩擦の面で人の手に近いからではないかと考えられる．各 DOF エンドエフェクタを比べると，素材は同じ ABS であるが 7DOF ハンドについては正解率に差がある．判断材料についての結果で，人の指らしくない変な動きが感じられる，接触点が複数個あり不自然などの意見があり，多自由度のエンドエフェクタについて正解率が高いことから，機構・自由度が多いと「人の手らしくない情報・感覚」を与えてしまうと考えられる．また，明らかに人の手と違う比較対象として実験試料に組み込んだシャープペンシルが，温度の調整をせずに常温のまま実験に使用したにもかかわらず，指のようだったという意見があり，正答率も 7DOF ハンドより低くなっていることから，多機能なエンドエフェクタよりも，機構がなく接触面積の小さいエンドエフェクタの方が人の手や指のような印象を与えることがあることがわかる．

これらのことから背中へのタッチケアにおいて，エンドエフェクタは適度な柔らかさと摩擦があり，関節・機構が少ないと人の手に近い感覚となると考えられる．

第 4 章 タッチケアロボットによる撫で動作の構成

第 3 章の実験では人の手でエンドエフェクタを持ち被験者の背中を撫でたが、タッチケアロボットのエンドエフェクタの検討手法としては、1. 比較実験における撫で方の統一、2. ロボット用のエンドエフェクタを検討する、という観点からロボットを用いた実験を行うことが望ましい。本章では人に心地よさを感じさせる撫で方をロボットで再現することを目標とし、使用するロボットや安全性と押し付け力を再現する緩衝機構について述べる。

4.1 使用するロボット

ロボットは Fig. 4.1 に示す KUKA 社の LBR iiwa 14 R820 [15] を使用する。基本的な仕様を Table 4.1 に示す。このロボットは 7 自由度を備え、すべての軸にトルクセンサが装備されている。KUKA 社はロボットが人間と同じ作業空間で人をアシストするヒューマン・ロボット・コラボレーション (HRC) を提唱しており、区分けも保護フェンスもなく、共同作業ができるという特徴がある。

本研究ではロボットが人への接触を行うため、安全の確保が必要である。人と同じ空間にいることを前提に作られた安全なロボットが望ましいため、このロボットを使用する。このロボットの制御に ROS (Robot Operating System) [16] を導入した。ROS とは、ロボット用ソフトウェアフレームワークの 1 つであり、機能を有したソフトウェアをノードとして複数同時に実行し、それらのノードがメッセージという形でデータのやり取りを行うシステムである。これにより、複数のセンサやロボットを組み合わせて制御することなどができる。このシステムを導入することでロボットへの指令・制御が容易になり、将来的な拡張性も期待できる。ロボットの制御において、ROS パッケージ `iiwa_stack` [17] を使用した。これは LBR iiwa 14 R820 を ROS に対応させるためのパッケージファイルであり、このパッケージを導入することで ROS によるメッセージのやり取りでロボットを動かすことができるようになる。

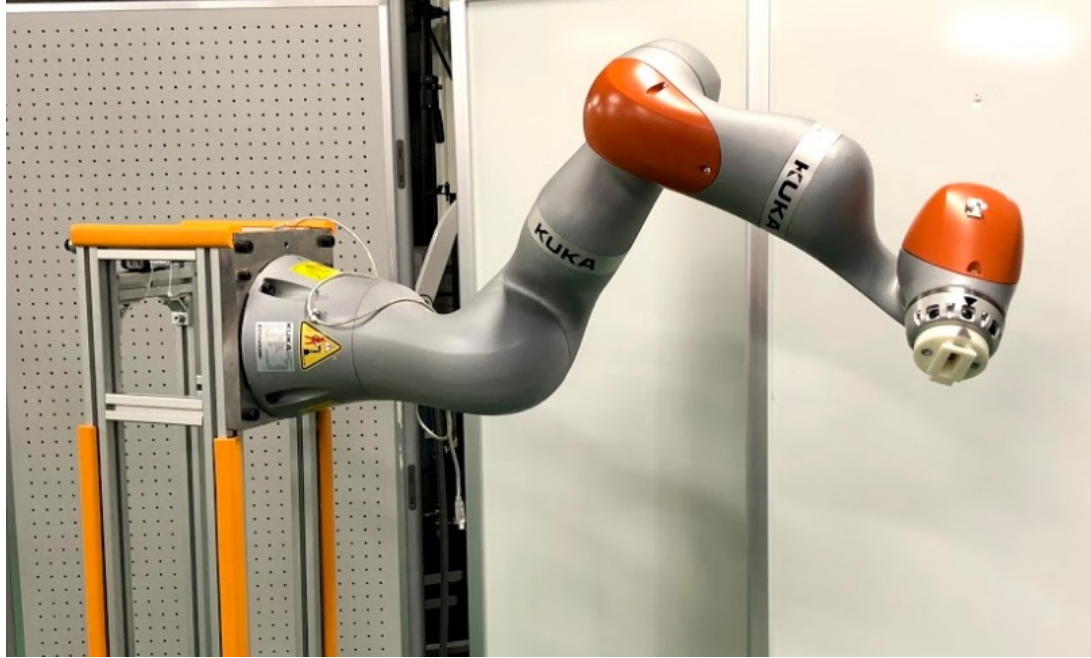


Fig. 4.1 KUKA LBR iiwa 14 R820

Table 4.1 Basic specification of the robotic arm

Specification	Value / Type
Model	LBR iiwa 14 R820
Number of controlled axes	7
Volume of working envelope	1.8 m ³
Pose repeatability	± 0.15 mm
Weight	approx. 29.9 kg
Related payload	± 14 kg
Maximum reach	820 mm

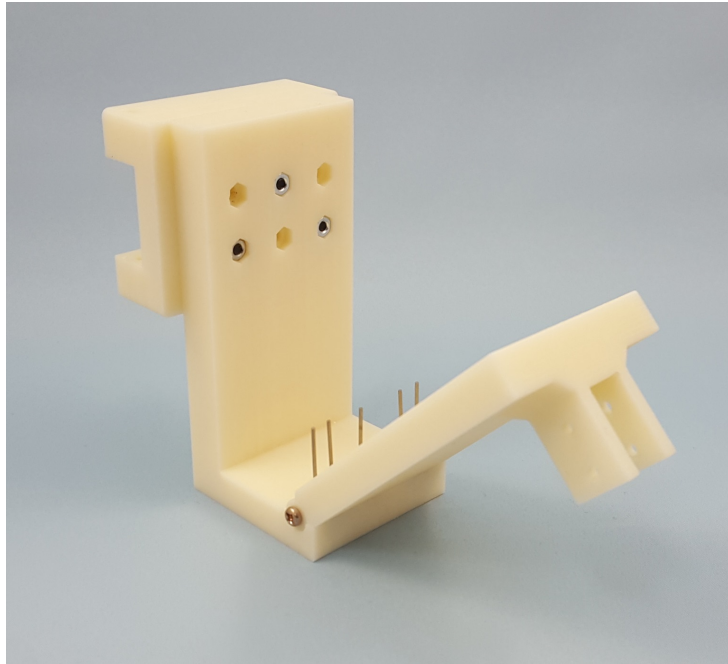


Fig. 4.2 Cushioning mechanism

4.2 ばねを用いた緩衝機構

本研究で使用するロボットアーム単体で、位置-力のハイブリッド制御を実装したところ、フィードバックの遅延などにより、ロボットの手先が少し離れた後、勢いよく押しに来るという動きがよくみられた。人を対象に撫でる実験を行うため、安全に撫でる必要がある。位置制御のみで撫で動作を行う際には、背中の起伏に引っ掛かって大きな力がかかってしまう場合があるという問題もあり、一定の押し込み力を与え続ける動きは位置制御のみでは難しい。

これらの問題を解決するために、Fig. 4.2 に示すような機構を製作した。これはロボットとエンドエフェクタの間に取り付ける機構であり、トーションばねによる受動機構の1自由度を有する。この機構は撫でる方向と押し込み方向に対して緩衝機能を有しており、ばねによって押し込み方向に対して力を加え続けることができる。この機構が緩衝できる可動範囲は 75 [mm] であり、関節部の可動範囲は 62 [deg] である。

背景で述べたように適切な撫でる力である 4~8 [N] を目標にトーションばねを

選定する．トーションばねのトルクばね定数は記号 k_{td} [$\text{N} \cdot \text{mm}/\text{deg}$] で表される．今回は角度 θ が 45 [deg] のときに力 F が 6 [N] 出るようにばねを決定する．また，この機構のばねから力のかかるエンドエフェクタ取り付け部までの距離 x は 80 [mm] である．力 F と距離 x ，トルク τ の関係を式 4.2.1 に示し，トルクとばね定数 k_{td} ，角度 θ の関係を式 4.2.2 に示す．

$$\tau = Fx \quad (4.2.1)$$

$$\tau = k_{td}\theta \quad (4.2.2)$$

これらの式から，式 4.2.4 を得る．

$$k_{td} = Fx/\theta \quad (4.2.3)$$

ここで，力 $F = 6$ [N]，角度 $\theta = 45$ [deg]，ばねと力がかかる場所までの距離 $x = 80$ [mm] より，トーションばねのトルクばね定数 k_{td} は

$$k_{td} = 6 \times 80/45 = 10.67 \text{ [N} \cdot \text{mm}/\text{deg}] \quad (4.2.4)$$

となる．我々はトルクばね定数 $k_{td} = 1.62$ のばねを 6 つ使い， 9.72 [$\text{N} \cdot \text{mm}/\text{deg}$] のトルクばね定数をもつ機構として製作した．

この機構について，Fig. 4.3 に示すフォースプレート [18] を用いて，実際にかかる押し付け力を測定した．このフォースプレートの基本的な仕様を Table 4.2 に示す．力の測定は緩衝機構に 0DOF ハンドや 1DOF ハンドを装着し，人の手で持ちフォースプレートを撫でることで行った．このとき，フォースプレートの側面（X 面）を，緩衝機構の関節部が 45 [deg] になるように押し付けながら，Y 方向（横方向）に撫でた．

6 つのばねを用いた本機構での実験結果について押し付け力の平均値，最大値，最小値を Table 4.3 に示す．この表から，0DOF ハンド・1DOF ハンド共にかかった力の平均値が 7 [N] となっており，目標となる 6 [N] を上回っている．また，押し付け力の最大値が目標の上限である 8 [N] を大きく超えてしまっている．人体にかかる力が強くなってしまうことは，その人に不快感だけでなくダメージを与えてしまう場合があるので好ましくない．そこで，使用するばねを 1 つ減らして同様の実験を行った結果，Table 4.4 に示す結果が得られた．この表より，0DOF ハンドと

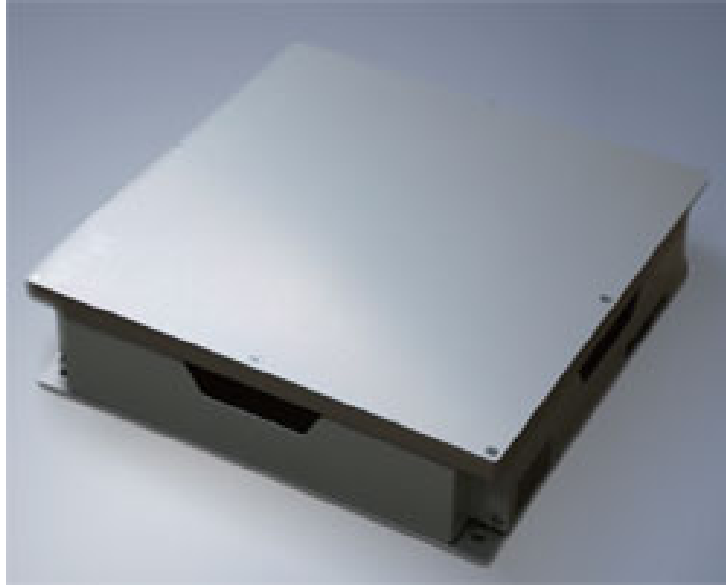


Fig. 4.3 Force plate SS-FP40AO-SY

Table 4.2 Basic specification of the force plate

Specification	Value / Type
Model	SS-FP40AO-SY
Dimensions (h× w× l)	110×400×400 mm
Rated payload	(f_x, f_y) : ± 2500 N
	(f_z) : $+ 5000$ N
	(M_x, M_y, M_z) : ± 500 Nm
Resolution	(f_x, f_y, f_z) : 0.305 N
	(M_x, M_y, M_z) : 0.0305 Nm
Data update frequency with USB	1000 Hz (Maximum)

1DOF ハンド共に平均値は 6 [N] を下回るが、6 つのばねを用いたときと比べると 6 [N] に近いことが分かる。また、力の最大値については 1DOF ハンドは 8 [N] を超えてしまっているが、許容範囲であるといえる。力の最小値は両エンドエフェクタ共に目標値を下回っているが、力が弱くなってしまうことがあるというのは安

Table 4.3 Result of force experiment about the cushioning mechanism with 6 springs

	Ave [N]	Max [N]	Min [N]
0DOF Hand	7.01	9.54	5.09
1DOF Hand	7.87	12.17	5.48

Table 4.4 Result of force experiment about the cushioning mechanism with 5 springs

	Ave [N]	Max [N]	Min [N]
0DOF Hand	5.41	7.25	3.63
1DOF Hand	5.56	8.95	3.38



Fig. 4.4 Stroke motion with the cushioning mechanism

全上問題はない。これらの実験結果から、この機構にはばねを5つ用いると決定した。また、実際にこの機構を使用してマネキンの背中を撫でている様子を Fig. 4.4 に示す。この機構によって緩衝が行われることで、ロボットが単純に上下に動くだけでも緩衝機構の可動範囲内であれば背中を撫でることが可能である。

4.3 ロボットによる撫で動作

ロボットによる撫で操作について，前節で製作した緩衝機構を用いることで，位置制御のみで撫で動作を行うことができる．参考文献 [6] [7] より，5 [cm/s] の速さで押し付け力が 4～8 [N] で撫でると人は最も心地よさを感じることができることが言われている．押し付け力については緩衝機構によって再現できるため，この速さで撫でる動作を実装することで，心地いい撫で方を再現する．

次に，撫でる距離であるが，マネキンを高さ 465 [mm] の椅子に座らせ，撫でる高さや距離を調整した．その結果，椅子に座っている状態で，地面から 780 [mm] ～ 930 [mm] の範囲が撫でやすいということが分かった．ロボットが動く距離は 150 [mm] であり，実際に 1DOF ハンドや 7DOF ハンドで撫でる場にはエンドエフェクタの長さによって撫でられる範囲は約 300 [mm] となる．また，撫でる回数については 1 回だけだと情報不足であると考え，背中に触れながら上下に 2 往復するよう設定した．

以上のことをまとめると，ロボットによる撫で動作は次のように行われる．

- 撫でる速度：5 [cm/s]
- 撫でる距離：150 [mm]
- 撫でる回数：2 往復

第5章 タッチケアロボットとして有用なロボットのエンドエフェクタの検討

本章では、ロボットによるタッチケアの実装にあたり、心地よさを追求する「タッチケアロボット」として有用なロボットを開発するというアプローチを考える。このアプローチを検討する際、人が撫でるときとは違う心地よさを与えることができるのか、やはり人に撫でられる感覚に近いものがよいのか等を知る必要がある。本章では製作したエンドエフェクタでロボットによる撫で動作を行い、「人らしい感覚がするか」と「心地よさ」について印象評価実験を行い、製作したエンドエフェクタに対する評価を行うとともに、人らしい感覚と心地よさの関係性を検証する。

5.1 実験の概要

本実験では、製作したエンドエフェクタを「人らしい感覚がするか」と「心地いいか」の2点について、フェッショエの一対比較法 [19] における中屋の変法 [20] を用いて評価する。2.1 節で述べたエンドエフェクタのうち、0DOF ハンドと 1DOF ハンド、7DOF ハンドの3つのエンドエフェクタについて、各エンドエフェクタの温度を常温（約 18℃）と体温付近（約 36℃）の2パターンに設定し、合計6パターンに対して実験を行う。この6パターンについて、エンドエフェクタの自由度 0/1/7 と温度 N (Normal temperature, 常温) / H (Human hand temperature) を組み合わせた記号で表記する（例えば温かい 7DOF ハンドは 7H と表す）。中屋の変法では比較順序を考慮しないため、比較する組み合わせは 15 通りである。

この実験では、第4章で構成したロボットによって撫で動作を行う。実験内容としては、ロボットに取り付けられているエンドエフェクタを取り替えながら被験者の背中を撫で、各回撫で終わった後に「今撫でたエンドエフェクタは一つ前に撫でたエンドエフェクタと比べて人らしいか/心地いいか」という質問をし、人らしさと心地よさについて5段階で評価してもらう。

本評価実験は奈良先端科学技術大学院大学の倫理審査委員会の承認を得て行い、実験協力者には事前に研究の内容とリスクに関する説明を文書と口頭で行い、同意を得た上で実験を行った。

5.2 実験方法

実験試料は実験の概要で述べたように 0DOF ハンドと 1DOF ハンド，7DOF ハンドの 3 つのエンドエフェクタに常温/体温を組み合わせた 6 パターンのエンドエフェクタである．温度の調整は第 3 章での実験と同様にヒートガンと放射温度計を用いて行う．実験の様子を Fig. 5.1 に示す．被験者にはロボットに背を向ける形で椅子に座ってもらう．実験者はロボットの操作を行い，緊急時にいつでもロボットを停止させることができるようにする．被験者にとって危険な状態になる兆候は緩衝機構の関節角度から確認できるため，実験者はロボットを側面から見るができる位置で操作を行う．被験者の条件として，衣服は 2 枚に統一した．

エンドエフェクタの種類と順番は，スムーズにすべての組み合わせが行えるようにあらかじめ決定する．6 パターンのエンドエフェクタの組み合わせについて，すべての組み合わせを 1 回ずつ行うように連続して撫でるようなエンドエフェクタの選び方は存在しないため，撫でる順番は Table 5.1 に示すように最初の 13 組はエンドエフェクタを変えながら 14 回撫でることで試行し，残りの 2 組は各組 2 回ずつ撫で動作を行うことで試行するよう設定した．

実験の流れを以下に示す．

1. ロボットを待機姿勢で固定し，被験者の座る位置・姿勢を調整する．
2. Table 5.1 に従い，エンドエフェクタをロボットに取り付ける．
3. 撫で動作を行う．
4. 質問に回答してもらう
5. 実験終了まで 2 ～ 4 を繰り返す．

ここでの質問は「一つ前に撫でたエンドエフェクタと比べて，今回撫でたエンドエフェクタは人らしいか？心地いいか？」というもので，それぞれ以下の 5 段階で回答してもらった．

- 5: 今回の方がよかった．
- 4: どちらかという今回の方がよかった．
- 3: どちらも変わらない．
- 2: どちらかという前回の方がよかった
- 1: 前回の方がよかった．

Table 5.1 Order of stroking hands

Number	1	2	3	4	5	6
Pair	-	0N1N	1N7N	7N0N	0N0H	0H1N
Hand	0N	1N	7N	0N	0H	1N
Number	7	8	9	10	11	12
Pair	1N1H	1H7N	7N7H	7H0N	0N1H	1H7H
Hand	1H	7N	7H	0N	1H	7H
Number	13	14	15	16	17	18
Pair	7H0H	0H1H	-	0H7N	-	7H1N
Hand	0H	1H	0H	7N	7H	1N

被験者一人につき 18 回撫で，人らしさ・心地よさについてそれぞれ 15 個のデータを得る．この実験を 10 名の被験者（22～33 歳の男性，平均年齢 24.8 歳，分散 11.4）に行った．

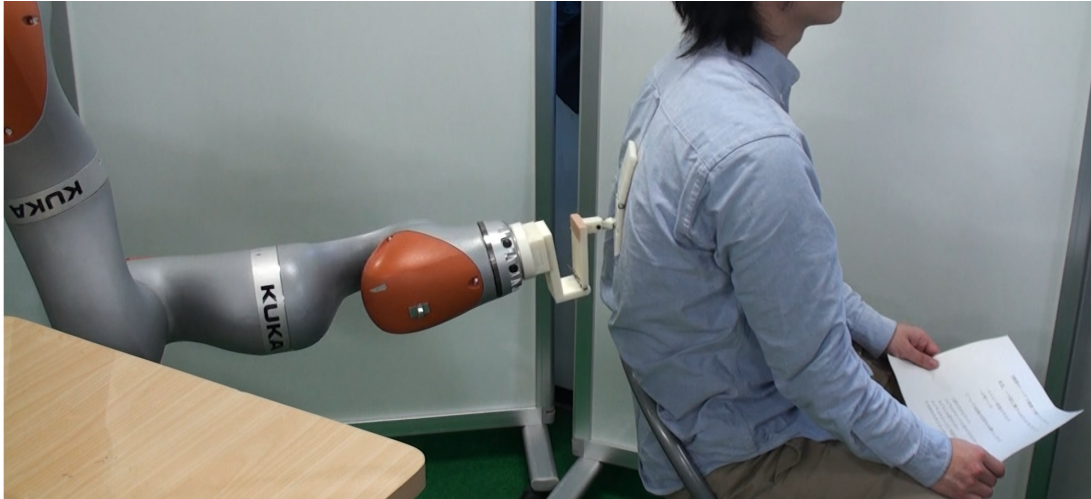


Fig. 5.1 Impression evaluation experiment of comfort and human-likeness of the end effector.

5.3 実験結果

5.3.1 人らしさの評価

人らしさについての回答から評価をまとめたものを，Table 5.2 に示す．表内の数値は，ハンド α とハンド β を比較した際に，以下のように評価した人数である．

- 左側の LH (Like Human):ハンド α の方が人らしい．
- 左側の SLH (Somewhat Like Human):ハンド α の方がやや人らしい．
- MtS (Much the Same):どちらも変わらない．
- 右側の SLH (Somewhat Like Human):ハンド β の方がやや人らしい．
- 右側の LH (Like Human):ハンド β の方が人らしい．

Table 5.2 Result of evaluation of hands about human-likeness

$Hand\ \alpha$	LH*	SLH**	MtS***	SLH**	LH*	$Hand\ \beta$
0N	0	3	1	5	1	1N
0N	0	2	1	4	3	7N
0N	0	1	6	3	0	0H
0N	0	0	1	4	5	1H
0N	0	0	1	4	5	7H
1N	0	2	2	6	0	7N
1N	3	3	0	2	2	0H
1N	0	0	2	5	3	1H
1N	0	2	4	3	1	7H
7N	4	5	1	0	0	0H
7N	0	1	4	4	1	1H
7N	0	0	2	6	2	7H
0H	0	0	1	5	4	1H
0H	0	0	1	4	5	7H
1H	0	4	3	2	1	7H

*:Like human, **:Somewhat like human, ***:Much the same

ここから，フェッシェの一対比較法を用いた解析を行う．Table 5.2 をデータ行列 A として次式のように表す．

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 1 & 5 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 4 & 3 \\ 0 & 1 & 6 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & 5 \\ 0 & 2 & 2 & 6 & 0 \\ 3 & 3 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 5 & 3 \\ 0 & 2 & 4 & 3 & 1 \\ 4 & 5 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 6 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 5 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & 5 \\ 0 & 4 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3.1)$$

人の手に似ている程度を表す得点を 4, 2, 0, -2, -4 と設定し，行列 B として次式のように表す．

$$B = \begin{bmatrix} 4 \\ 2 \\ 0 \\ -2 \\ -4 \end{bmatrix} \quad (5.3.2)$$

A・B を計算すると

$$A \cdot B = \begin{bmatrix} -8 \\ -16 \\ -4 \\ -28 \\ -28 \\ -8 \\ 6 \\ -22 \\ -6 \\ 26 \\ -10 \\ -20 \\ -26 \\ -28 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.3.3)$$

となる．これを従属変数として，ダミー変数を用いた回帰分析を行う．ダミー変数とは，本来数量で表すことができない質的な情報を数値として扱う変数で，今回は「比較されているエンドエフェクタ」を示す説明変数として設定する．この変数は各エンドエフェクタについて設定し，その値は，比較されている1つ目のエンドエフェクタとして選ばれている場合は1，2つ目のエンドエフェクタであれば-1，比較に使用されていないなら0としている．ダミー変数を用いた回帰分析を行うためのデータを Table 5.3 に示す．表中の 0N～7H の列は説明変数であり，AB は目的変数である．

Table 5.3 The data used for regression analysis using dummy variables

Pair	0N	1N	7N	0H	1H	7H	AB
0N-1N	1	-1	0	0	0	0	-8
0N-7N	1	0	-1	0	0	0	-16
0N-0H	1	0	0	-1	0	0	-4
0N-1H	1	0	0	0	-1	0	-28
0N-7H	1	0	0	0	0	-1	-28
1N-7N	0	1	-1	0	0	0	-8
1N-0H	0	1	0	-1	0	0	6
1N-1H	0	1	0	0	-1	0	-22
1N-7H	0	1	0	0	0	-1	-6
7N-0H	0	0	1	-1	0	0	26
7N-1H	0	0	1	0	-1	0	-10
7N-7H	0	0	1	0	0	-1	-20
0H-1H	0	0	0	1	-1	0	-26
0H-7H	0	0	0	1	0	-1	-28
1H-7H	0	0	0	0	1	-1	0

Table 5.3 のデータについて，目的変数である AB を y ，説明変数の 1N を x_1 ，7N を x_2 ，0H を x_3 ，1H を x_4 ，7H を x_5 として回帰分析を行うと，以下の回帰方程式を得る．

$$y = 1.0 + 10.7x_1 + 18.0x_2 + 1.3x_3 + 29.7x_4 + 29.3x_5 \quad (5.3.4)$$

式 5.3.4 の定数項と係数から各エンドエフェクタについての尺度値を得られる．Table 5.4 にその尺度値を示し，これを数直線上にプロットしたものを Fig. 5.2 に示す．この尺度値はそのエンドエフェクタの人らしさを示しており，大きいほどそのエンドエフェクタが人らしいことを示している．

Table 5.4 と Fig. 5.2 より，最も人の手に近いと感じられたエンドエフェクタは暖かい 1DOF ハンドとなり，僅差で暖かい 7DOF が人らしいと感じられていることが分かった．次点で常温の 7DOF ハンド，1DOF ハンドとなった．0DOF ハンドについては暖かい方が人らしいという結果が得られたが，どちらもあまり人らしくないという結果となった．エンドエフェクタの種類によらず，温かいエンドエフェクタであると人の手らしくなるということが分かる．

5.3.2 心地よさの評価

心地よさについての回答から評価をまとめたものを，Table 5.5 に示す．表内の数値は，ハンド α とハンド β を比較した際に，以下のように評価した人数である．

Table 5.4 Scale value about human-likeness

Hand	0N	1N	7N	0H	1H	7H
Scale value	1.0	10.7	18.0	1.3	29.7	29.3

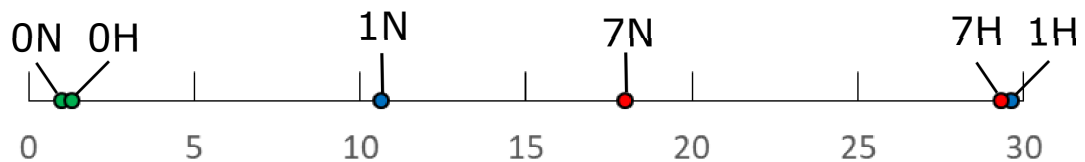


Fig. 5.2 Result of ranking of human-likeness

- 左側の C:ハンド α の方が心地いい.
- 左側の SC:ハンド α の方がやや心地いい.
- MtS:どちらも変わらない.
- 右側の SC:ハンド β の方がやや心地いい.
- 右側の C:ハンド β の方が心地いい.

心地よさの程度を表す得点を 4, 2, 0, -2, -4 と設定し, 人の手らしさについての結果と同様に解析を行い, 得られた尺度値を Table 5.6 に示し, これを数直線上にプロットしたものを Fig. 5.3 に示す. この尺度値が大きいほど, そのエンドエフェクタが心地いいことを示している.

Table 5.6 と Fig. 5.3 より, 最も心地いいと感じられたエンドエフェクタは温か

Table 5.5 Result of evaluation of hands about comfort

<i>Hand α</i>	C*	SC**	MtS***	SC**	C*	<i>Hand β</i>
0N	0	2	1	6	1	1N
0N	0	5	1	4	0	7N
0N	0	1	6	2	1	0H
0N	0	1	2	2	5	1H
0N	0	2	2	2	4	7H
1N	0	5	3	2	0	7N
1N	1	2	3	2	2	0H
1N	0	0	4	4	2	1H
1N	0	1	4	3	2	7H
7N	3	4	2	1	0	0H
7N	0	2	3	4	1	1H
7N	0	1	3	3	3	7H
0H	0	0	2	6	2	1H
0H	0	1	3	3	3	7H
1H	0	2	3	4	1	7H

*:Comfortable, **:Somewhat comfortable, ***:Much the same

い 7DOF ハンドとなり，次に温かい 1DOF が心地いいと感じられていることが分かる．次点で常温の 7DOF ハンド，僅差で 1DOF ハンドとなった．0DOF ハンドについては人らしさについての結果と同様に，温かい方が心地いいという結果が得られた．人らしさについての結果と同様に，エンドエフェクタの種類によらず，温かいと心地よく感じるということが分かり，温度感が同じだと心地よさについてのエンドエフェクタの序列もほとんど同じであることが分かる．

5.3.3 人らしさと心地よさの関係

150 回行った実験で得られた回答から，人らしさと心地よさの回答の組み合わせをまとめたものを Table 5.7 に示す．人らしさ・心地よさのこの表について，「同程度」行と列を削除したものを Table 5.8 に示す．この表について χ^2 検定を行った結果，p 値は 3.68×10^{-10} となり，有意水準 $p < 0.001$ より有意差がある，つまりエンドエフェクタが人らしいと感じられるならそのエンドエフェクタは心地いいと感じられる傾向があるという結果を得た．

Table 5.6 Scale value about comfort

Hand	0N	1N	7N	0H	1H	7H
Scale value	0.8	6.9	7.2	2.5	19.7	21.7

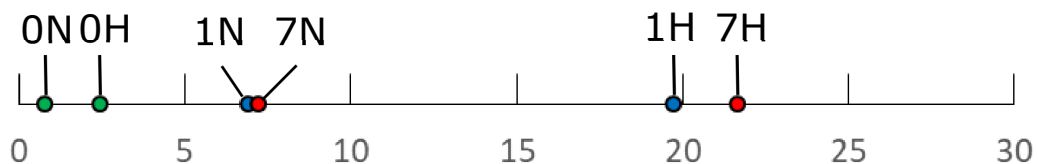


Fig. 5.3 Result of ranking of comfort

5.4 考察

5.4.1 人らしさについての考察

「人らしさの評価」について Table 5.4 や Fig. 5.2 から，1DOF ハンドと 7DOF ハンドが 0DOF ハンドと比べて非常に人らしく，温度が体温に近いほうが人らしいということが分かる．0DOF ハンドの感想として，人の手というよりマッサージ機で弱いマッサージを受けているように感じるというものが多かった．また，0DOF ハンドは温度差をあまり感じないという感想があり，尺度値も 0N と 0H で大きな差はなかった．これは接触面積が小さく，温度をあまり感じられなかったためと考えることができる．1DOF ハンドと 7DOF ハンドの感想としては，広い「面」で撫でられており人に撫でられているように感じる，温かいエンドエフェクタは温度が伝わってきて人の手のようだったという感想があった．これらのことから，接触面積が広いエンドエフェクタは温度の影響が大きいことがわかり，これは Fig. 5.2 に

Table 5.7 Combination of responses of human-likeness and comfort

	Like human	Much the same	Not like human	Total
Comfortable	51	6	9	66
Much the same	13	20	7	40
Not comfortable	8	4	32	44
Total	72	30	48	150

Table 5.8 Combination of responses of human-likeness and comfort for chi-square test

	Like human	Not like human	Total
Comfortable	51	9	60
Not comfortable	8	32	40
Total	59	41	100

も表れている。これらのことから、背中を撫でるエンドエフェクタは接触面積が広く、温かいと人の手らしいと感じるといえる。

この結果は3章で得られた「関節・機構が少ないと人の手に近い感覚となる」という考察とは異なっているように思えるが、各実験結果の詳細を見ると、この2つの結果は相反するものではないといえる。3章の実験では人の手とエンドエフェクタを比較しており、素材の硬さや機構の柔らかさ等の「不自然な情報」が目立ってしまうため、これが目立ちにくい接触面積が小さいものや機構のないものが良いという結果が表れており、不自然な情報が少ないRGハンドは接触面積が広いにも関わらず最も評価が良かった。このことから、エンドエフェクタは「不自然な情報」が少ない素材・形状で、接触面積が人の手で触れるときの広さと同じくらいのものが、人らしい感覚を与える理想的なエンドエフェクタであると考えられる。

1DOFハンドと7DOFハンドについて、常温においては7DOFハンドの尺度値が1DOFハンドの尺度値と比べて大きい。このことから、自由度の数、もしくは機構が人らしさについて影響を与えていると考えられる。

5.4.2 心地よさについての考察

「心地よさの評価」について、Table 5.6 や Fig. 5.3 より、エンドエフェクタの順位付け自体はエンドエフェクタ 1H と 7H、つまり温かい1DOFハンドと7DOFハンドの評価が入れ替わっている以外は「人らしさの評価」と同じである。つまり、接触面積の小さい0DOFハンドより、接触面積の広い1DOFハンドや7DOFハンドの方が心地よさを感じることができ、温かいエンドエフェクタで撫でられる方がより心地よさを感じることができる。1DOFハンドと7DOFハンドを比較すると、同じ温度であると尺度値もあまり変わらないことが分かる。このことから、心地よさについては自由度・機構はあまり影響しないと考えられ、1DOFハンドと7DOFハンドの機能はほとんど変わらないといえる。

5.4.3 人らしさと心地よさの関係についての考察

Table 5.4 と Table 5.6 を比較する。「心地よさの評価」の全体の尺度は、「人らしさの評価」と比べ約 25% 小さくなっている。これは、心地よさの評価において、最良と最悪の評価を受けたエンドエフェクタの評価の差が、人らしさの評価よりも小さくなっていることを示す。これにも関わらず、エンドエフェクタ 0N と 0H、つまり 0DOF ハンドの常温/体温間における評価の差は大きくなっている。これは、心地よさを検討するにあたって温度の差による影響が、人らしさについて検討する場合と比べて大きくなっているということである。エンドエフェクタ 7N と 7H（つまり 7DOF ハンド）についても同様の傾向がみられる。つまり、エンドエフェクタ間の評価の差は小さくなっているが、温度による評価の差が大きくなっており、心地よさについては温度が与える影響が大きいといえる。これらの考察については、Fig. 5.2 と Fig. 5.3 の比較からもうかがえる。

本実験をまとめると、背中を撫でるエンドエフェクタは、接触面積が広く温かいものが人に人の手らしい印象を与え、心地よさも与える傾向がある。また、心地よさにおいてはエンドエフェクタの温度の影響が大きく、人らしさについてはエンドエフェクタの機構・自由度が影響しているといえる。

第 6 章 おわりに

6.1 本論文のまとめ

本論文では、タッチケアロボットの製作にあたり、人との接触を担うエンドエフェクタについて実験と検討を行った。ロボットによるタッチケアの実装における 2 つのアプローチ、一つは人が撫でるような撫で動作を行う、人と同等の能力を持つロボットを目標とすること、もう一つは人が行うタッチケアを模倣せず、人に与える心地よさが向上するようなタッチケアロボットを目標とすることについて、エンドエフェクタの観点から実験・検討を行った。

1 つ目のアプローチについては、人の背中を 4 つの製作したエンドエフェクタと人の手で撫で、直接比較する実験を行い、どのようなエンドエフェクタ・要素が人の手らしさを再現できるかについて検討した。その結果、柔らかさと適度な摩擦を有するゴム手袋を用いたエンドエフェクタが最も人の手に近く、次点で機構がなく接触面積が小さめなエンドエフェクタが人の手に近いという結果を得た。

2 つ目のアプローチについては、3 つのエンドエフェクタと温度（常温/体温）の組み合わせの 6 パターンに対して、エンドエフェクタ同士で「人らしさ」と「心地よさ」を比較する実験を行い、どのようなエンドエフェクタ・要素が人らしさ・心地よさを表現できるのか、また、人らしさと心地よさにどのような関係があるかを検討した。その結果、エンドエフェクタは接触面積が広く温かいものが人に人らしさと心地よさを感じさせることができるという結果を得た。

2 つの実験結果から、硬さや機能に人らしくない「不自然な情報」が少なく、接触面積が人の手で触れるときの広さと同程度のエンドエフェクタが理想的であると考えられる。

1DOF ハンドと 7DOF ハンドの違いについては、常温における人らしさの比較時には 7DOF ハンドの尺度値が 1DOF ハンドの尺度値と比べて大きくなっているが、それ以外の条件での尺度値にはあまり違いがみられなかった。このことから、少なくとも心地よさに関しては自由度はあまり重要ではないといえる。また、エンドエフェクタが人らしいと感じられるならそのエンドエフェクタは心地いいと感じられる傾向があることが分かった。このことから、人を模倣するようなエンドエフェ

クタを作ることができれば、そのエンドエフェクタで撫でられた人は心地よさを感じる可能性が高いといえる。また、温度は心地よさに強く影響し、エンドエフェクタの形や機構は人らしさに影響する傾向があることが分かった。

これらのことから、タッチケアを行うロボットのエンドエフェクタは接触面積が広く、温かいものが人らしさと心地よさの面で適切であることを示した。

6.2 今後の課題と展望

今後の課題として、発熱装置の実装と制御、実験するエンドエフェクタの条件の細分化と具体的な設計指針の提示が挙げられる。発熱装置について、本論文の実験ではヒートガンによって熱を加えて、放射温度計によって温度を確認して撫で動作を行っていたが、実際のタッチケアロボットではエンドエフェクタに発熱機能を実装する、もしくは自動で設定温度まで温める機能を実装することが望ましい。発熱機能の実装方法としては電熱線等の発熱装置を実装し、温度センサを用いて温度の制御を行う手法が考えられる。自動で設定温度まで温める機能としては、エンドエフェクタを装着したロボットが手先を発熱装置近くまで移動させ、センサで温度を確認し設定温度まで温めてから撫で動作を行うという手法が考えられる。

本論文で実験に使用したエンドエフェクタは4種類であったが、得られた結果としてはタッチケアを行うエンドエフェクタは接触面積が広く、温かいものがよいというものであり、具体的な設計指針については示すことができていない。また、本論文で使用した0DOF ハンドはドーム型であったが、角ばったものや平べったいものなど多くの候補を挙げることができ、形状によっては接触面積を広くすることもできる。具体的な設計指針や、どのような要素がどのように感じ方に影響するかを調べるには条件を1つだけ変え他はなるべく同じにして複数の実験を行う等、もっと時間をかけて条件を細分化する必要がある。

今後の展望について、大きく2つのステップがある。一つは接触によって人や物体の状態を取得するセンシングシステムの開発である。タッチケアは「気持ちを感じる・伝えるコミュニケーション」という側面を持っており、我々は最終的にはこの気持ちを感じる・伝えるコミュニケーションを含めたタッチケアを行えるロボットを目指している。本論文で得られた知見を踏まえて、人に不快感を与えずに人へ

接触し，人や物体の姿勢や温度，硬さなどの状態を取得するエンドエフェクタを開発することを目的とする．

もう一つは，接触によって人に感覚や感情を伝える動きの実装である．先述した「感じる」に対する「伝える」コミュニケーション要素である．本論文では撫でる動作のみを扱ったが，接触動作には中村らの研究 [14] で述べられていたように「叩く」「撫でる」「握る」「揉む」というものがある．「撫でる」動作だけでは伝えられる情報に限りがあるため，より多彩な情報を接触によって伝えるにはこれらの動作は不可欠である．これらの動作は人に対して行う前提のため，安全かつ正確な制御が必要となる．また，動作の実装には，人がある情報・感情を伝えたいときどのような動作を行うのかを知る必要があるため，人の動作の計測も必要である．

本研究の最終形としては，人の情報を感じるセンシングシステムと，人に情報を伝える動きの両方を組み合わせ，気持ちを感じる・伝えるコミュニケーションを行えるロボットを製作することを目指す．

謝辞

本論文は著者が奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報科学専攻博士前期課程在学中にロボティクス研究室で行った研究をまとめたものである。

本研究を遂行するにあたり，貴重なご指導とご助言と賜りました本研究科の小笠原司教授に深く感謝致します。

本研究の方針決定，遂行，論文執筆などにおいて多くのご助言，ご指導を頂きました本研究科の高松淳准教授に深く感謝致します。

本研究の方針決定，遂行，論文執筆など研究全般に渡り幾度となく丁寧にご指導，ご助言を頂きました本研究科の丁明助教に深く感謝致します。

本研究についての様々な議論や論文執筆，英文添削など多くの点においてご指導，ご助言を頂きました本研究室博士研究員の Garcia Ricardez Gustavo Alfonso 氏に深く感謝致します。

大学生活や学会発表における事務処理の面で様々なサポートをして頂きました本研究室秘書の大脇美千代氏，池田美輝氏に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり，様々な議論やご助言を頂いた本研究室センシンググループの山崎亘氏，趙崇貴氏に感謝致します。

本研究の実験遂行にあたり，被験者に協力して下さった先輩・同期・後輩の皆様に感謝致します。

最後に，長年の学生生活を支えて頂いた両親，家族，友人達に深く感謝致します。

参考文献

- [1] タクティールケア普及を考える会, タクティールケア入門 第3版, 日経 BP コンサルティング, 2014.
- [2] 山本裕子: "触れるケアの効果", 千里金蘭大学紀要 11号, pp.77-85, 2014.
- [3] Tabatabaee A, Tafreshi MZ, Rassouli M, Aledavood SA, AlaviMajd H, Farahmand SK, "Effect of therapeutic touch on pain related parameters in patients with cancer: a randomized clinical trial," *Materia socio-medica*, vol. 28, no. 3, pp. 220-223, 2016
- [4] Suzuki M, Tatsumi A, Otsuka T, Kikuchi K, Mizuta A, Makino K, Kimoto A, Fujiwara K, Abe T, Nakagomi T, Hayashi T, Saruhara T, "Physical and Psychological Effects of 6-Week Tactile Massage on Elderly Patients With Severe Dementia," *American Journal of Alzheimer's Disease & Other Dementias(R)*, vol. 25, no. 8, pp. 680-686, 2010.
- [5] 本田美和子, イヴ・ジネスト, ロゼット・マレスコッティ, ユマニチュード入門, 医学書院, 2014.
- [6] 山口創, 手の治癒力, 草思社, 2012.
- [7] 堀内園子, 触れるケアー看護技術としてのタッチング, ライフサポート社, 2010.
- [8] H. Iwata, S. Sugano, "Human-robot-contact-state identification based on tactile recognition," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 6, pp. 1468-1477, 2005.
- [9] S. Yohanan, K. MacLean, "A tool to study affective touch: Goals & design of the haptic creature," *CHI 2009 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4153-4158, 2009.
- [10] K. Wada, T. Shibata, "Social effects of robot therapy in a care house - change of social network of the residents for two months -," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1250-1255, 2007.
- [11] T. Mukai, M. Onishi, T. Odashima, S. Hirano, Z. Luo, "Development of the tactile sensor system of a human-interactive robot RI-MAN," *IEEE Transactions on Robotics*, vol.24, no.2, pp.505-512, 2008.

- [12] 佐藤侑, 郭士傑, 稲田誠生, 向井利春: "介護支援ロボット RIBA-II の動作設計と評価実験", 日本機械学会論文集 C 編, vol. 78, no.789, pp. 1899-1912, 2012.
- [13] 梶川伸哉: "身体接触作業用ロボットハンドの開発", 計測自動制御学会論文集, vol.44, pp.948-955, 2008.
- [14] 中村数磨, 中谷真太郎, 西田信一郎: "タッチケアロボットの動作および構成の検討", 日本機械学会 中国四国支部第 55 期総会・講演会 講演論文集, 2017.55 巻, K1216, 2017.
- [15] Industrial-robots/LBR-iiwa,
<https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/industrial-robots/lbr-iiwa> (2017 年 1 月 31 日参照)
- [16] 岡田慧: "ROS (ロボット・オペレーティング・システム)", 日本ロボット学会誌, vol.30, no.9, pp.830-835, 2012.
- [17] iiwa_stack, https://github.com/IFL-CAMP/iiwa_stack (2017 年 1 月 31 日参照)
- [18] 株式会社スポーツセンシング フォースプレート, http://www.sports-sensing.com/products/dynamic_balance/force_plate.html (2017 年 1 月 31 日参照)
- [19] H. Scheffé, "An analysis of variance for paired comparisons," Journal of the American Statistical Association, Vol. 47, No. 259, pp. 381-400, 1952.
- [20] 中屋澄子: "Scheffé の一対比較法の一変法", 第 11 回官能検査大会報文集, pp. 1 - 12, 1970.