

修士論文

タッチケアロボットのための 温度制御可能な受動機構を有する柔軟手の開発

北村 勇希

2019 年 3 月 15 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

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。

北村 勇希

審査委員：

小笠原 司 教授	(主指導教員)
佐藤 嘉伸 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)
GARCIA RICARDEZ Gustavo Alfonso 助教	(副指導教員)

タッチケアロボットのための 温度制御可能な受動機構を有する柔軟手の開発

北村 勇希

内容梗概

ユマニチュードやタクティールケアといった肌をなでる・さする・手を当てるなどの方法を用いて行われるタッチケアには、疼痛の緩和や不安の軽減、被施術者に疼痛の緩和、不安の軽減、および、リラックス効果を与える。さらに、タッチケアは認知症ケアに有用だと報告されており、近年では、介護や医療の現場でタッチケアが利用されている。しかし、実際には介護従事者の不足が深刻な問題となっており、ケアが十分にできていないという問題がある。タッチケアを自動化することで、スタッフの負担軽減が期待できる。本研究では、タッチケアの自動化のために、温度制御が可能な、受動機構を有したエンドエフェクタの開発を目的とする。1) 人の骨の剛性と関節, 2) 人肌の感触, 3) 人の温かさを再現できるように、エンドエフェクタを設計する。タッチケアロボットが介護や医療の現場に普及するための初期段階として、人同士でもたらされる身体接触の効果が、ロボットと人との間でも起こりうるのかを検証するために、製作したエンドエフェクタとロボットアームを用いて、タッチケア実験を実施する。タッチケア実施中における唾液アミラーゼ活性値が安静時よりも減少したので、タッチケアロボットとしての可能性を示すことができた。

キーワード

タッチケアロボット, エンドエフェクタ, 温度制御, 人を模した, 受動機構

Development of Flexible Hand with Temperature Controller and Passive Mechanism for Touch Care Robot

Yuki Kitamura

Abstract

Touching is an important communication method for human beings. Touch care, such as massage, tactile care and skin stroking can produce effects of pain relief, anxiety reduction and relaxation. It is also effective to avoid the dementia with the touch care. Today, in many fields of nursing care and medical care, touch care has been applied. However, sufficient care still cannot be provided due to the lack of care workers. It is an urgent need to reduce the burden of staffs by automating the touch care with robotics technology. In this research, an end effector for touch care is developed with a passive mechanism and a controllable temperature skin. For reproducing the human likeness, the developed effector has been designed to reproduce 1) the stiffness of human bones and joints; 2) the softness of human skin; 3) the warmth of human hand. In the experiment, the effectiveness of the designed end effector has been verified by attaching it to a robot arm to produce the human-like touch care motion to some subjects. Comparing with data at rest, the amylase measured during the experiment was reduced, which shows the possibility of our system as a touch care robot.

Keywords:

touch care robot, robot hand, temperature controller, anthropomorphic

目 次

1. はじめに	1
1.1 研究背景	1
1.2 関連研究	2
1.2.1 コミュニケーションロボット	2
1.2.2 介護支援ロボット	2
1.2.3 人の手を模したロボットハンド	3
1.3 研究目的	4
1.4 本論文の構成	5
2. タッチケアロボットのためのエンドエフェクタの設計・製作	6
2.1 エンドエフェクタの設計目標	6
2.2 3D モデルの取得	8
2.3 人の骨の剛性と関節を再現	11
2.3.1 手の骨を模した人工物の設計	11
2.3.2 手の骨を模した人工物の製作	11
2.4 人肌の感触の再現	14
2.4.1 人肌を模した人工物の設計	14
2.4.2 人肌を模した人工物の製作	14
2.5 人の温かさの再現	17
2.5.1 ヒータの設計	17
2.5.2 ヒータの製作	17
2.6 手の型の製作	22
2.7 製作工程	25
3. タッチケアロボットを用いた撫で動作の生成	27
3.1 ハードウェア構成	27
3.2 タッチケア動作生成	28
3.3 ソフトウェア構成	29

4. タッチケアロボットとしての評価実験	31
4.1 エンドエフェクタの温度制御機能の確認	31
4.1.1 人肌の温かさを決める実験	31
4.1.2 温度制御実験	32
4.2 実験概要	36
4.3 実験手順	36
4.4 実験Ⅰ：唾液とアンケートから得たストレス反応の変化	37
4.5 結果	38
4.6 考察	39
4.7 実験Ⅱ：断続的な唾液採取で得たストレス反応の変化	39
4.8 結果	40
4.9 考察	40
5. おわりに	45
5.1 本論文のまとめ	45
5.2 今後の課題と展望	45
謝辞	48
参考文献	49

目 次

1.1	Robot-PARO [9]	3
1.2	Care-robot-ROBEAR [13]	3
2.1	Constraction of the hand bones [22]	7
2.2	Change of the human hand motion/pose	7
2.3	3D model of hand bones	9
2.4	3D model of hand	10
2.5	Developed artifact human bones	12
2.6	Developed finger joint with a passive mechanism	12
2.7	Transformation of the passive finger joints	13
2.8	Artifact imitates the finger of the human	15
2.9	Temperature control units produced on the hand bones	18
2.10	Electrical diagram	19
2.11	Nichrome wire installed on aluminium foil	20
2.12	Effective of the interval of nichrome wire	21
2.13	3D model of the hand mold	23
2.14	Produced the mold of the hand	24
2.15	Production flow of the robot end effector	26
3.1	Experiment of the touch care robot system	28
3.2	System configuration of touching care robot	30
4.1	Experiment for confirming the temperature	31
4.2	Warming process of the heater	33
4.3	Temperature of the end effector	34
4.4	The positions of the minimum and maximum temperature for 40 minutes	35
4.5	Experimental set up	38
4.6	Result in stress assessment obtained by questionnaire	42
4.7	Result of the assessment obtained by questionnaire	43
4.8	Experiment procedure	44

4.9	Result of the salivary amylase monitor of subjectI	44
-----	--	----

表 目 次

2.1	Evaluation result of gloves	16
-----	---------------------------------------	----

1. はじめに

1.1 研究背景

「触れ合うこと」は人間にとって重要な非言語コミュニケーションである。人の体に触れるケア（以下、タッチケアと呼ぶ）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。特に、ユマニチュードやタクティールケアといった肌をなでる・さする・手を当てるなどの方法を用いて行われる「タッチケア」には、疼痛の緩和や不安の軽減、リラックス効果がある [1]。特に親しい人との触れ合いは、ストレス耐性を向上させたり、免疫力を向上させたりするなどの、望ましい効果をもたらすことが知られている [2]。タッチケアは手や足・背中全体をやわらかく包み込むようにゆっくりと撫でることで効果を得ることができる。マッサージとは異なり特定のツボや筋肉に強い刺激を与えないため、安全性が高いということ点で優れている [3]。

人間は脳内で「オキシトシン」と呼ばれる神経物質が働くことによって信頼関係や愛着を深め、幸福感を得ることができる。オキシトシンは、脳の視床下部にある視索上核と室傍核にある細胞で産生され下垂体後葉で分泌されるホルモンである [4]。オキシトシンは血中に極めて低濃度でしか存在しないが、繰り返し皮膚に触れる行為により C 触覚繊維と呼ばれる神経繊維の束が興奮し、オキシトシンが分泌される [5]。オキシトシンは不安感やストレスの軽減に大きく関わっている。

近年では、タッチケアに認知症ケアの有用性が報告されている [6]。厚生労働省によると、平成 29 年における 65 歳以上の者がいる世帯は 2378 万 7 千世帯（全世帯の 47.2 %）であり、その内単独世帯が 627 万 4 千世帯（26.4 %）を占めており [7]、社会的孤立は認知症の大きな危険因子といわれている [8]。これは他人とのコミュニケーション不足によって、脳の活動を低下させてしまうため生じると言われている。現在では、介護や医療の現場において「タッチケア」が利用されており、高齢者の認知症問題を解決する手段として有効であると考えられている。

しかし、実際には介護従事者の不足によって、ケアが十分にできていないという問題がある。タッチケアを自動化することによってスタッフの負担軽減や認知症患者の減少が期待できる。

1.2 関連研究

1.2.1 コミュニケーションロボット

タッチケアは人同士の身体接触によって生じるケアであるが，人と動物における接触でも同様な効果をもたらすアニマルセラピーがある．近年では，一般家庭におけるペット代替と医療福祉施設でアニマルセラピーを代替するセラピーロボットが普及している．代表的なものとして Fig. 1.1 に示すように（独）産業技術総合研究所が開発したパロがある [9]．パロを用いたセラピーによって，触れ合う人の気分が向上したり，言語機能が改善したり，回復した事例がある [10]．また，動物の形を模したロボットの方から人と会話や接触を図る研究もある．例えば，Shiomi らは人と抱擁することができるテディベア型ロボットを用い，一方的にハグするよりもハグし合う方がより社会貢献度が高まることを示した [11]．

これらの研究結果から，ロボットと人の触れ合いにおいても，人と人もしくは人と動物が触れ合う際と同様な効果を期待することができる．動物は，人との触れ合いからストレスを受け疲れてしまう．しかし，ロボットセラピーの場合はその心配が無く，必要に応じていつでもどこでも使えるという大きなメリットがある．

1.2.2 介護支援ロボット

介護従事者や整体師の身体にかかる負担をロボット技術によって軽減するという研究が多く行われている．代表的なものとして Fig. 1.2 に示すように，（独）産業技術総合研究所が開発した ROBEAR がある [12]．ROBEAR は移乗介助や起立補助など，人との柔らかな接触と大きな力が必要とされる動きをロボットで実現するための研究用プラットフォームとして開発された [13]．Ding らは ROBEAR を用いて，人を抱きかかえる際の動的モデル化を行い，人が心地よいと感じる抱きかかえ動作の生成を行った [14]．また，Chih-Hung らはレーザーレンジファインダと双腕ロボットを用いることで，運動障害の患者を対象にベッドバス（入浴・シャワー浴が不可能である患者の体をクロスで拭くなど清潔にすること）を自動で実施するロボットシステムを開発した [15]．



Fig. 1.1: Robot-PARO [9]



Fig. 1.2: Care-robot-ROBEAR [13]

一方で、マッサージといった人が人にもたらすリラクゼーションをロボットに代替させるという研究がある。例えば、Luo らは人のようなタッピング動作（力を込めずに軽く触れる動作）ができる双腕ロボットを開発した [16]。また、Tiffany らはタッチケアロボットを用いて前腕に触れる際の、声のかけ方に着目して印象の変化を調査した [17]。

このように、ロボット技術を用いて介護師やセラピストの役割を担おうとしている研究が数多く行われている。しかし、ロボットによるコミュニケーションに不信感を抱いている人が大多数である [18]。このことは、コミュニケーションロボットの接客においてではあるが、介護・医療ロボットにも当てはまるのではないかと考えられる。その要因の一つとして、実際に医療・福祉・看護の現場で活躍しているのは人間であり、機械的な見た目によって患者が不安や抵抗を抱くことが考えられる。そこで、人を模することでそういった負の感情を緩和することでできると考えられる。

1.2.3 人の手を模したロボットハンド

人の手を模したロボットハンドに関する研究が多く行われている。例えば、上野らは人間同士の接触を再現するためのロボットハンドの製作を実施し、ロボッ

トによる癒し効果について検討した [19]. また, 柏井らは外装温度が可変な握手用ロボットハンドを開発し, 握手でユーザに安心感を与える最適なパラメータの組み合わせの探索を実施した [20].

これらの研究では, いずれも人に安心感を与えるロボットハンドの開発に着手している. どちらの研究でも人肌の触感や骨格を再現することに成功しているが, 前者は人の手が持つ温かさを再現できていない. 人の手は温かさをもっており, 温かさの有無で人が感じる印象が異なってくる. 後者はフィルム型のヒータを備え付けることで温かさを再現しており, 本研究では, これらの技術がタッチケアロボットに応用できるように拡張することを目指す.

1.3 研究目的

タッチケアロボットのためのエンドエフェクタは人の手を模することが有用ではないかと考えられる. 本研究では, タッチケアロボットのための, 温度制御が可能であると同時に受動機構を有したエンドエフェクタの開発を目的とする. 温度制御を可能とすることによって, 人に長時間触れる場合でも, 常に一定の温度を保つことができる. また, 受動機構を有することで, 人がもつ撫でる機能を再現できると考える. エンドエフェクタは次の三つの方面から人らしさの実現を目指し設計を行う. 1) 人の骨の剛性と関節を再現, 2) 人肌の感触の再現, 3) 人の温かさの再現, である. 触れ合う際の接触力を人のように再現するため, トーションバネを用いて人の関節を再現する. また, 触れ合う際の温かさを再現するため, ヒータを内蔵し, さらに温度センサを追加することで温度制御を可能とする. アクチュエータの代わりにバネを用いることで, 能動的に動作せず, 受動的な動作を実現する. そのため, 人と握手したり, 物を掴んだりするアンドロイドロボットの手とは異なった機能を有する.

タッチケアロボットが医療や介護の現場に普及するためには, 人同士でもたらされる身体接触の効果が, ロボットと人との間でも起こりうるのかを検証する必要がある. そこで, 製作したエンドエフェクタとロボットアームを用いて, タッチケアを人に対して実施する. その後, タッチケアの成否を施術前後のストレス反応の変化によって評価する. 1.1 節で述べた, 人同士の接触によってストレス

の軽減する効果がロボットと人の間でも再現されるのかを検証する。ストレス反応の評価には、アンケートと唾液アミラーゼを用いる。また、エンドエフェクタに関するアンケートも同時に実施することで、開発したエンドエフェクタが設計目標通りになっているか検証する。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下のようになっている。2章ではタッチケアロボットのためのエンドエフェクタの設計目標や実際の製作工程に関して述べる。3章では開発したエンドエフェクタとロボットアームを用いた、タッチケア動作の生成方法に関して述べる。4章では開発したタッチケアロボットシステムの有用性に関して述べる。最後に、5章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2. タッチケアロボットのためのエンドエフェクタの設計・製作

本章では、人を模したエンドエフェクタがどのような設計目標によって開発されるのかを述べる。その後、人の手を模したエンドエフェクタの製作に関して述べる。

2.1 エンドエフェクタの設計目標

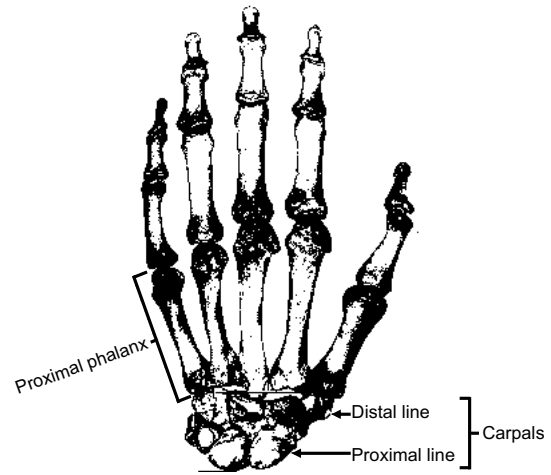
Fig. 2.1 は自然状態と考えられる人の手の骨格と構成である [21]。Fig. 2.1(a) が示すように、人の手指部分はアーチを描いている。一つは横アーチであり、もう一つは縦アーチである。横アーチは手根骨部で形成されたほとんど動かないアーチであるのに対して、MP 関節部の中手骨の骨頭により構成された縦アーチは可動性のあるアーチである。脱力した人の手に外力を加えると、縦アーチは無意識に自然状態へ戻ろうと動作する。この生物学的な特性によって、脱力した手 (Fig. 2.2(a)) を腕の力によって柔らかな面に押し付けることで、指先から面に力が加わる (Fig. 2.2(b))。人の撫でる動作を再現するためには、このような触れ合う際の接触力を再現することが必要であると考えられる。接触力を再現するために、触れた際に不自然ではない肉・骨の感覚が必要である。その際、人のような体温も得られることが望ましいと考えられる。以上の要素を全て持ったエンドエフェクタは、1.2.2 項で述べた通り、人の普遍的な手の形と機能を保持しなければならないと考えている。

よって、本研究で開発するエンドエフェクタが満たす要件は次の三点である。

- (1) 人の骨の剛性と関節を再現
- (2) 人肌の感触の再現
- (3) 人の温かさの再現



(a) Arrangement of hand bones



(b) Hand bones (dorsal aspect)

Fig. 2.1: Constraction of the hand bones [22]



(a) Natural state

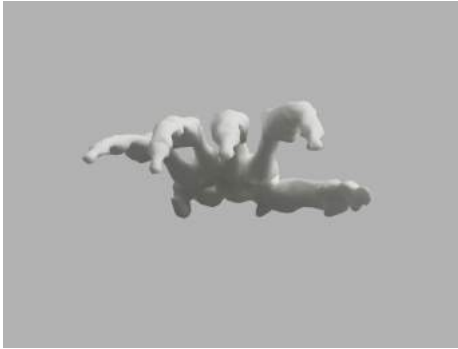


(b) Contact state

Fig. 2.2: Change of the human hand motion/pose

2.2 3D モデルの取得

本研究では、2.1 節で述べた要件 (1), (2) を、人の手の 3D モデルを用いて形状を模倣した。手の骨の 3D モデルは、STLFinder (オープンソースの 3D モデルデータベース) [22] を利用して Fig. 2.3 に示すような 3D モデルを取得した。取得したモデルのそれぞれの指の長さ (基節骨まで) は母指から順におよそ 55, 81, 90, 81, 71 [mm] となっており、これは 19 歳から 78 歳までの手に障害のない成人 66 名と比べると同程度である [23]。手の 3D モデルは、成人男性の右手を 3D スキャナでスキャンし、Fig. 2.4 に示すような 3D モデルを取得した。それぞれの 3D モデルは同じ右手ではあるが、得られたポーズが異なっているため、そのまま使用することはできなかった。そこで、手の中に骨がはみ出さずに収まるように骨の 3D モデルを編集した。



(a) Plan view



(b) Isometric view

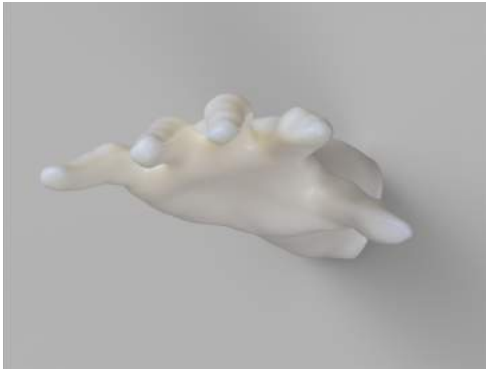


(c) Front view



(d) Side view

Fig. 2.3: 3D model of hand bones



(a) Plan view



(b) Isometric view



(c) Front view



(d) Side view

Fig. 2.4: 3D model of hand

2.3 人の骨の剛性と関節を再現

2.3.1 手の骨を模した人工物の設計

人の指は母指，示指，中指，薬指，小指の五本であり，母指以外は PIP 関節，DIP 関節，MP 関節の三関節を有する．MP 関節は顆状関節であり，屈曲・伸展と内・外運動をする．PIP，DIP 関節は共に蝶番関節であり，単に屈曲・伸展を行う．2.1 節で述べた指先からの力を再現するために，それぞれの指が持つ三関節を再現する必要があると考えられる．これを再現するために，各関節にバネを設けることが有用であると考えられる．特に，トーションバネと呼ばれる「円筒形に巻かれたバネ」を使用する．これによって，復元力を生じさせることができる．それぞれの関節に設けられたバネは，Toyoshima らが製作したエンドエフェクタ [28] を参考に，トルクバネ定数が 0.3 [Nmm/deg] のものを用いる．次の節で，バネを用いた手の骨の製作に関して述べる．

2.3.2 手の骨を模した人工物の製作

2 章で述べた設計方針に従い，図 2.5 に示すような手の骨を製作した．これは，2.2 節で取得した骨の 3D モデルを 3DCAD で編集することで，指の各関節にトーションバネ（T031A・T044A・T062A，株式会社アキュレイト）を設置した物である．Fig. 2.6 に示すように，それぞれの指の骨には切り込みが設けられており，二つの骨によって一つのトーションバネが両サイドから挟む形で固定した．造形には 3D プリンタを用いた．Fig. 2.7 に示すように，指先への外力に対して，変形することが可能である．トーションバネのはみ出した部分を切断し，切断箇所を粘着テープで覆った．また，手根骨にあるそれぞれの骨は円柱状の造形物によって隣同士で固定し，ロボットに取り付けるための出っ張りを中指の中手骨に設けた．次の節では，人肌の感触を再現する方法を述べる．



Fig. 2.5: Developed artifact human bones

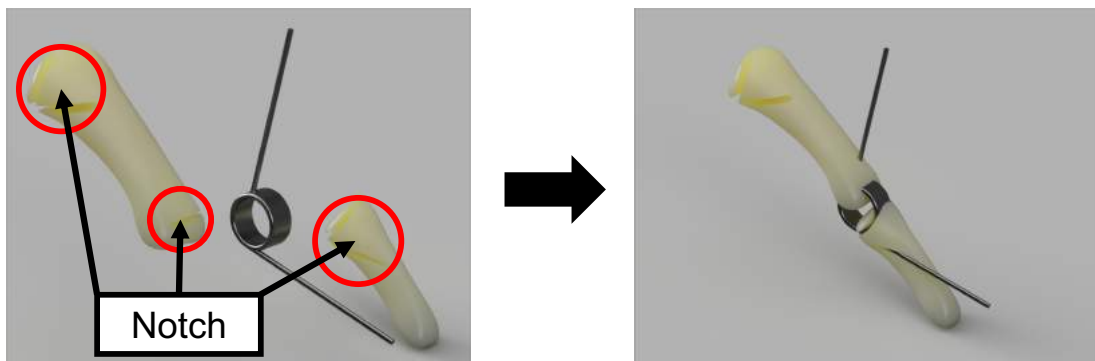


Fig. 2.6: Developed finger joint with a passive mechanism

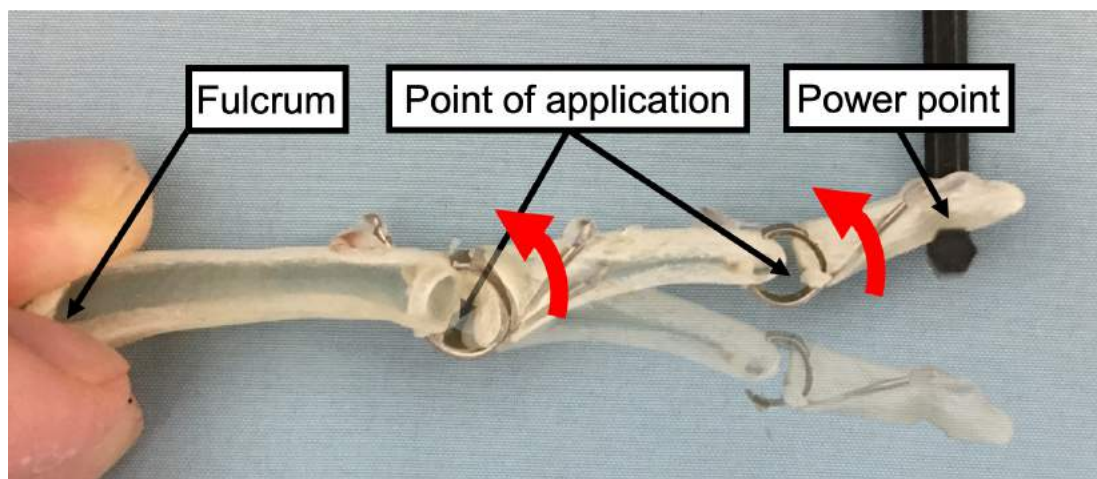


Fig. 2.7: Transformation of the passive finger joints

2.4 人肌の感触の再現

2.4.1 人肌を模した人工物の設計

人間の手を模したエンドエフェクタを製作するには、骨だけではなく皮膚が必要である。これにより、人肌の柔らかい感触を再現することができる。そこで、人の皮膚を模すために、二液反応性の造形用ウレタン樹脂「人肌のゲル」[24]を用いる。人肌のゲルにはアスカーC硬度0, 7, 15の三種類硬度がある。硬さは番号の低い方から順に、やわらかめ（赤ちゃんの肌、腹部程）、ふつう（顔、腕程度）、かため（足の裏、背中程度）である。本研究では人の手を再現するため、アスカーC硬度7を使用する。

本研究では、製作したエンドエフェクタを用いて人を撫でる。その際、人の手のような感覚を与えつつ、人に危害を加えないようにする必要がある。そのため、実際に人肌のゲルで製作した人工物が、これらの要件に対して適切であるか検討する必要がある、適切でなければ、解決策を考える必要がある。

2.4.2 人肌を模した人工物の製作

人肌のゲルを用いて、Fig. 2.8に示すような人の指を模した人工物を製作した。硬化した人肌のゲルは自己粘着性を持つため、ベビーパウダを使用して粘着性を弱めた。

次に、製作した人工物を用いて、人の背中を衣服越しに撫でた。しかし、衣服との摩擦によって表面が劣化してしまった。これはベビーパウダーのみでは粘着性を弱めるには不十分で、指と衣服との摩擦が大きいために生じたと考えられる。これによって、人を撫でる際大きな妨げとなってしまう。そこで、人の皮膚の代わりとなるものを選定する必要がある。表面がツルツルした材料（シルクやプラスチック製）を中心に手袋の候補を探した。その候補としては、以下に示す物が挙げられた。

- A. ポリエチレンゴム手袋（お料理にぴったり手袋，エステー株式会社）
- B. シルクゴム手袋（シルクプロテイン加工のゴム手袋，アイ・ジー・オー株式会社）



Fig. 2.8: Artifact imitates the finger of the human

- C. ニトリルゴム手袋（使い捨てニトリル手袋 TG スタンダード，トラスコ中山株式会社）
- D. 天然ゴム手袋（天然ゴム極うす手袋，株式会社大創産業）
- E. 天然ゴム手袋（天然ゴム手袋 うす手 裏毛なし，株式会社大創産業）

これらの手袋の中で，どれが最も本研究に適しているのかを調べるために，簡単な実験を実施した．実験内容は実験者の手にゴム手袋をはめ，実際に人の背中や前腕を撫でてそれぞれの手袋を評価した．その際，評価するポイントとして次の三点である．

- 人肌のゲルの感触を損なわない
- 手にぴったりとフィットする
- 表面の摩擦が少ない

人肌のゲルの感触は，人の腕程度の感触を再現することができており，これを損ないたくない．よって，薄いゴム手袋が望ましい．次に，エンドエフェクタに大きさが合わない手袋を装着してしまうと，撫でたりする際に手袋の皮が余ってしま

Table. 2.1: Evaluation result of gloves

Type	Feel	Fit	Friction
A	△	×	○
B	△	△	×
C	○	○	△
D	△	△	×
E	△	○	○

う．この余った皮によって，撫でるのに支障をきたす可能性が考えられる．よって，装着した際にエンドエフェクタにフィットする伸縮性のある手袋が望ましい．最後に，本研究では人を撫でることを実施するため，衣服との摩擦ができるだけ少なくしたい．よって，肌触りが滑らかな手袋が望ましい．

評価した結果を Table2.1 に示す．Table2.1 より，C と E の手袋の評価が高い．本研究の目的はタッチケアロボットのためのエンドエフェクタを開発することであり，撫でる動作がスムーズに行われることが最も望ましい．よって，E の手袋を装着することにした．次の節では，エンドエフェクタに温かさを持たせる方法に関して述べる．

2.5 人の温かさの再現

2.5.1 ヒータの設計

人の身体は温度を一定に保つために、常に深部で代謝活動をすることで熱を産出し、皮膚から熱を逃している [25]. この機能をエンドエフェクタに持たせる方法として、コード状のヒータを骨に巻きつけることを考えられる. コード状のヒータを採用することで、手を曲げた際の変形に対応可能である. しかし、既製品のヒータを 2.3 節で製作した骨全体に巻きつけると、ヒータの径が大きい・長さが足りないという問題が生じてしまう. そこで、ニクロム線を用いて制御回路を自作する必要がある. 温度センサにはフィルム型のサーミスタ (103JT-75, SEMITEC 株式会社) を使用する. フィルム型の温度センサを採用することによって、ヒータと同様に手を曲げた際の変形に対応可能である.

ニクロム線を巻きつけただけでは、温かさにムラが生じてしまう恐れが考えられる. そこで、ニクロム線をアムミ泊で覆うことが有用であると考えられる. その際、ニクロム線を骨に巻きつける間隔がどの程度が適当なのかを検証する.

2.5.2 ヒータの製作

Fig.2.9 に示すように、製作した骨にニクロム線とアムミ泊テープ貼付した. 制御対象は、母指、示指、中指、薬指、小指、手のひらの六箇所である. ヒータの長さは母指から順に、70 [cm], 80 [cm], 90 [cm], 80 [cm], 60 [cm], 110 [cm] それぞれに温度センサが一つずつ備え付けてある.

温度制御を実現する回路は Fig. 2.10 に示す通りである. マイコンには Raspberry Pi を用いた. Raspberry Pi には A/D コンバータが搭載されていないので、MCP3008 を使用した. MCP3008 を通して得られたサーミスタの電圧を Raspberry Pi で読み取り、内部で温度に変換した. 電圧を温度に変換する際、以下の式によって変換した.

$$R = R_0 \times e^{B(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{T_0+273})}$$

このとき



(a) Hand bones with heater



(b) The heater for palm

Fig. 2.9: Temperature control units produced on the hand bones

$$\left\{ \begin{array}{l} B = 3286.4 \text{ [K]} \\ R_0 = 10 \text{ [k}\Omega\text{]} \\ T_0 = 25 \text{ [}^\circ\text{C]} \end{array} \right\}$$

とした．

ニクロム線の制御には MOS FET を用いた．Raspberry Pi からフォトカプラを通した PWM 信号が MOS FET に入力されている．その際，サーミスタから得られた温度を目標温度として，ニクロム線の温度が目標温度に近づくような制御を実装した．目標値と現在値の差は，備え付けられた LED の明るさ具合によって把握することができる．

Fig.2.9(a), (b) に示した，ニクロム線を骨に巻きつける間隔は，Fig. 2.11 に示すような物を製作することによって調べた．Fig. 2.11 はアルミ箔に同じ長さのニクロム線を 10 [mm] から 25 [mm] までの間を 5 [mm] ずつ間隔を広げた物である．これらを用いて，線と線の間になどのように熱が伝わるのかを確認した．その際に，放射温度計（TA410TL，イチネン TESCO）を用いて経過時間（120 秒）における表面の温度を計測（Fig. 2.12）した．実験の際は，Fig. 2.11 に示したニクロム線が見えなくなるようにアムミ泊で覆った．Fig. 2.12 より，巻きつけた間隔に顕

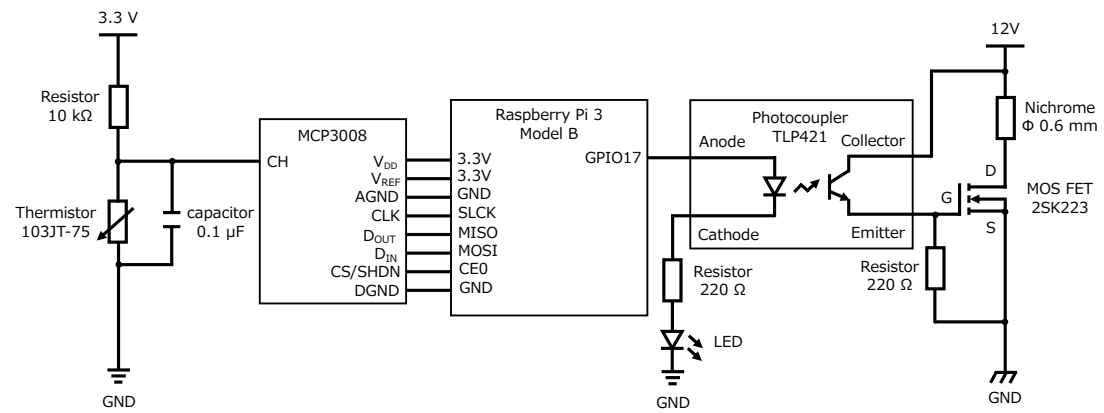
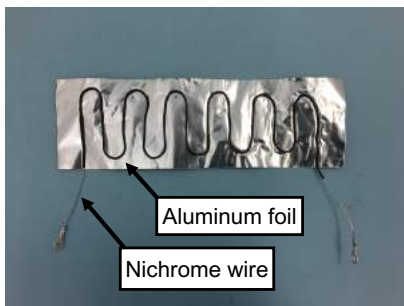


Fig. 2.10: Electrical diagram

著な違いは見受けられなかった． よって， 間隔は 10 [mm] から 25 [mm] までの間とした．



(a) Interval 10 [mm]



(b) Interval 15 [mm]



(c) Interval 20 [mm]



(d) Interval 25 [mm]

Fig. 2.11: Nichrome wire installed on aluminium foil

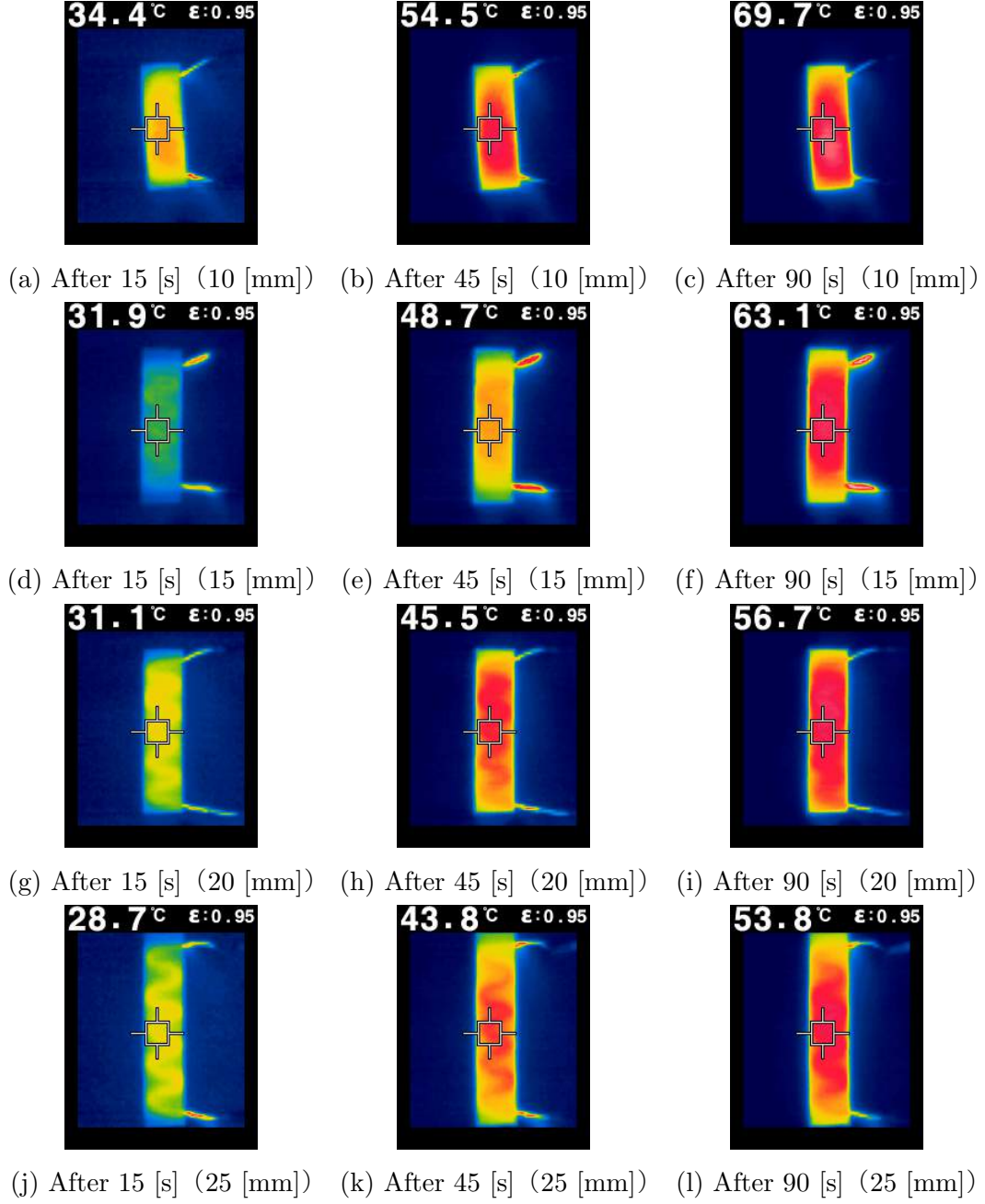


Fig. 2.12: Effective of the interval of nichrome wire

2.6 手の型の製作

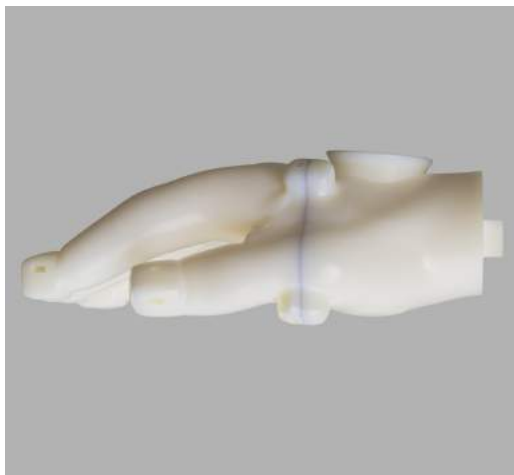
本研究で開発するエンドエフェクタは，2.3.2 項で製作した人工物を人肌のゲルで覆うために，骨とともにゲルを充填する型を製作した．2.2 節で取得した手の 3D モデルを基にして，3DCAD によって Fig.2.13 に示すような手の型を製作した．型は四角形ではなく，手形となっている．これによって，材料コストを大幅に削減することができた．また，型は ABS 樹脂でできているが，厚みが薄いと取り出す際に割れてしまうので，試行錯誤した結果，5 [mm] とした．3D プリントによって製作した実際の型は Fig. 2.14 に示す通りである．次の節で製作工程に関して述べる．



(a) Plan view



(b) Isometric view



(c) Front view



(d) Side view

Fig. 2.13: 3D model of the hand mold



(a) The mold for fixing the bones



(b) The mold for pouring

Fig. 2.14: Produced the mold of the hand

2.7 製作工程

製作は大きく分けて二段階である．Fig. 2.14(a) を用いることによって，骨が手の真ん中になるように固定する．その後，手のひら側のみを Fig. 2.14(b) に変更することに製作することができる．製作工程（Fig. 2.15）を以下に示す．

- (a) 骨の位置を固定するための型に油粘土を薄く貼りつけ，ベビーパウダーを塗布し，手のひらを温める制御対象を配置
- (b) 手の骨を配置
- (c) 手の甲側の型によってフタをする
- (d) 粘土で型を覆うことで，中の液体が漏れるのを防ぐ
- (e) 人肌のゲルを投入する
- (f) 手のひら側の型を取り外し，型を交換する
- (g) 再び人肌のゲルを投入する
- (h) 表面にベビーパウダーを塗布する



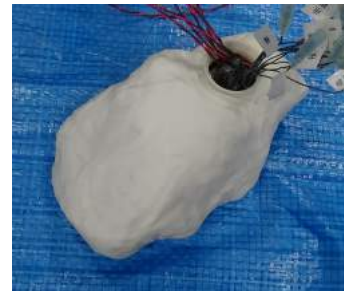
(a) Place the controlled object for palm is placed



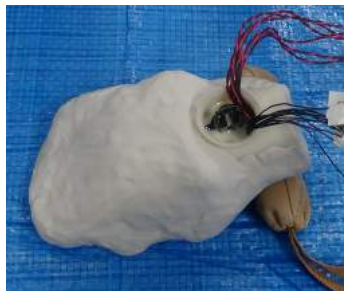
(b) Place the bones of the hand



(c) Place the cover is placed



(d) Prevent leakage of liquid with clay



(e) Pour Hitohadagel into the mold



(f) Remove the mold of palm side



(g) Pour Hitohadagel into the mold again



(h) Apply baby powder to the surface

Fig. 2.15: Production flow of the robot end effector

3. タッチケアロボットを用いた撫で動作の生成

本研究では、人が人に行うタッチケアをロボットによって行わせる。その際、ロボットと人との接触において、安全性の確保は重要な問題である。そこで、安全面に優れたロボットを用いることを考え、そのロボットを用いて撫で動作の生成方法に関して述べる。

3.1 ハードウェア構成

ロボットは KUKA 社の LBR iiwa 14 R820 [26] を使用する。最大可搬重量は 14 [kg] であり、軸数は七軸、最大作業領域は 820 [mm] となっている。さらに人が当たった時や触った時にストップする安全機構を採用しており、「人間と同じワークスペースで利用できる安全機能を備えた産業用ロボット」という特徴がある。

本研究では、ロボットが人への接触を図るため、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。人の上肢と同等の自由度を有するため、人の動作を模倣するのに適している。このロボットの制御には ROS (Robot Operating System) [27] を導入した。ROS とはロボット用ミドルウェアであり、「ノード」と呼ばれる実行プログラムを介してソフトウェア間の通信を行う。これにより、複数のセンサやロボットの組み合わせ制御が容易となり、将来的な拡張性も期待できる。

システム全体の外観は Fig. 3.1 に示す通りである。ロボットアームの先端には 2 章で開発したエンドエフェクタが取り付けられている。ロボットとエンドエフェクタの接続には、図に示すような緩衝機構を用いた。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 [28]。被験者を撫でる際に、やみくもに触れても相手がリラックスするどころか、不快感を感じる事が想像できる。ある程度の圧を加えるのが重要であり、軽くなでも効果は薄いと考えられる。その際、速度は 5~10 [cm/s]、圧する強さは 4~8 [N] 程度がよいとされている [29] [30]。この緩衝機構は、撫でる力が 6 [N] となるように設計されており、圧する強さを満たしている。速度に関しては、3.2 節で述べる。

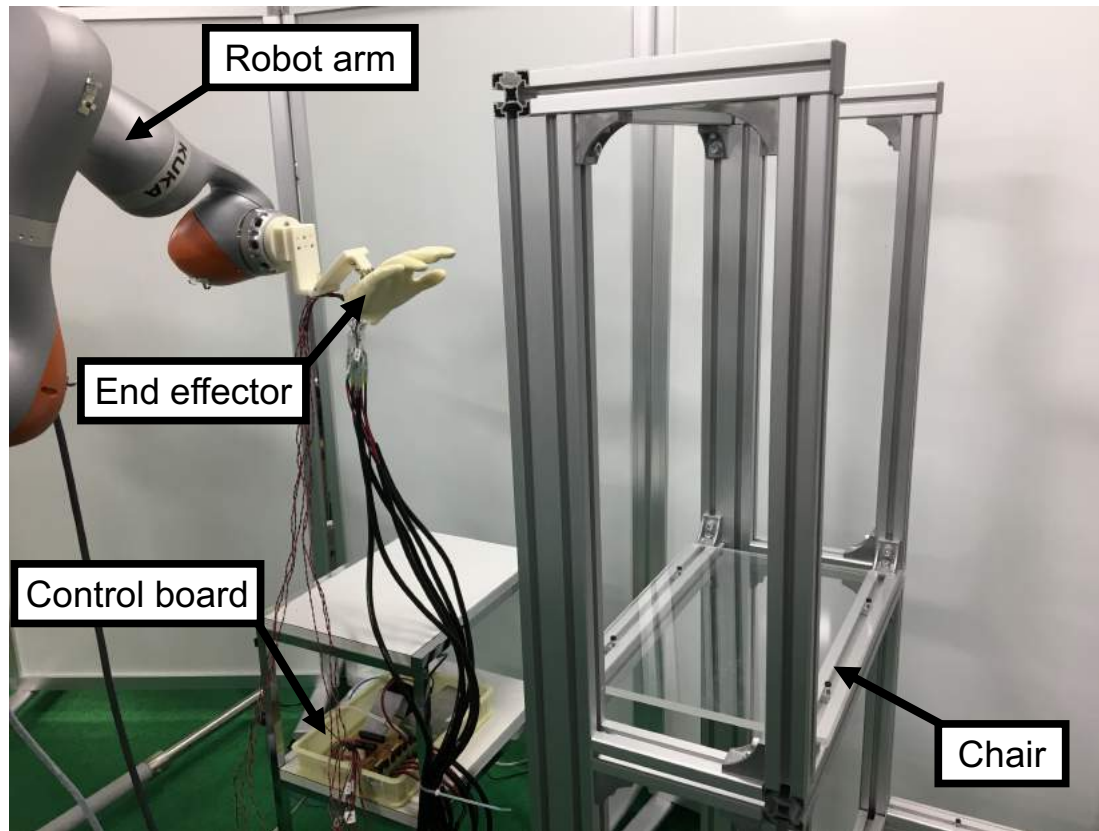


Fig. 3.1: Experiment of the touch care robot system

3.2 タッチケア動作生成

本研究では、人の背中を撫でるが、人の背中は猫背だったりが原因で、その人それぞれによって形が異なっている。そのために、人それぞれに合ったケア動作を生成する必要がある。ケア動作は、ダイレクトティーチングによって生成する。ダイレクトティーチングとはロボットアームを手で直接操作し、目標軌道を教え込むことである。その際に、smartPAD と呼ばれるロボットアーム用のコントローラを用いた。smartPAD を使用することで、ロボットアームの手先を任意の場所に移動することができる。ROS を使用したダイレクトティーチング機能が、ロボットアームには備わっていないので、実装した。ケア動作生成の流れは次の通りである。

1. 撫でる対象者に所定の椅子に座ってもらう
2. smartPAD を使用して，ロボットアーム手先で人の背中に触れる
3. smartPAD を使用して，背中の上部から下部に向けて一度撫でる
4. PC が ROS を用いて，ロボットアームの動きを記録する
5. PC 内で，記録した動作を往復運動に変換する

以上が撫で動作生成の流れである．これを手動キャリブレーションとして，実験開始前にはそれぞれの被験者に実施され，個々人に合った撫で動作が生成される．撫で動作に関する詳細事項をまとめると次の通りである．

- 撫でる速度は 4 [cm/s] とする
- 撫でる距離は 15 [cm] とする
- 撫で方は，一直線とする

3.1 節で述べたように，撫でる速度は 5～10 [cm/s] となることが望ましい．本研究では，5 [cm/s] となるように撫で動作の速度を設定したが，速すぎるとエンドエフェクタの重さが影響しているためか，動作中に横にブレてしまった．そこで，速度は 4 [cm/s] となるようにした．また，撫でる距離に関しては 15 [cm] とした．人の背丈に関する調査によると，平均的な男性の背丈は 45 [cm] である [32]．これに対して，撫でる距離が 15 [cm] となっているのは，短いと感じるかもしれないが，エンドエフェクタの手長は 19 [cm] であるため，34 [cm] の長さをカバーすることができる．また，撫でる距離が長くなってしまうと，首元付近を触れてしまうことになるので，不快感が生じると考え，15 [cm] とした．次に，撫で方に関しては一直線とした．smartPAD はロボットアームの手先位置を定義された XYZ 軸上を移動可能である．しかし，一度の入力で一軸のみ操作可能である．すなわち，コントローラでは直線的な移動しかできない．よって，撫で方は一直線とした．

3.3 ソフトウェア構成

本研究で使用するシステムのソフトウェア構成を Fig. 3.2 に示す．使用する PC の OS は Ubuntu16.04 であり，ROS のバージョンは ROS Kinetic である．

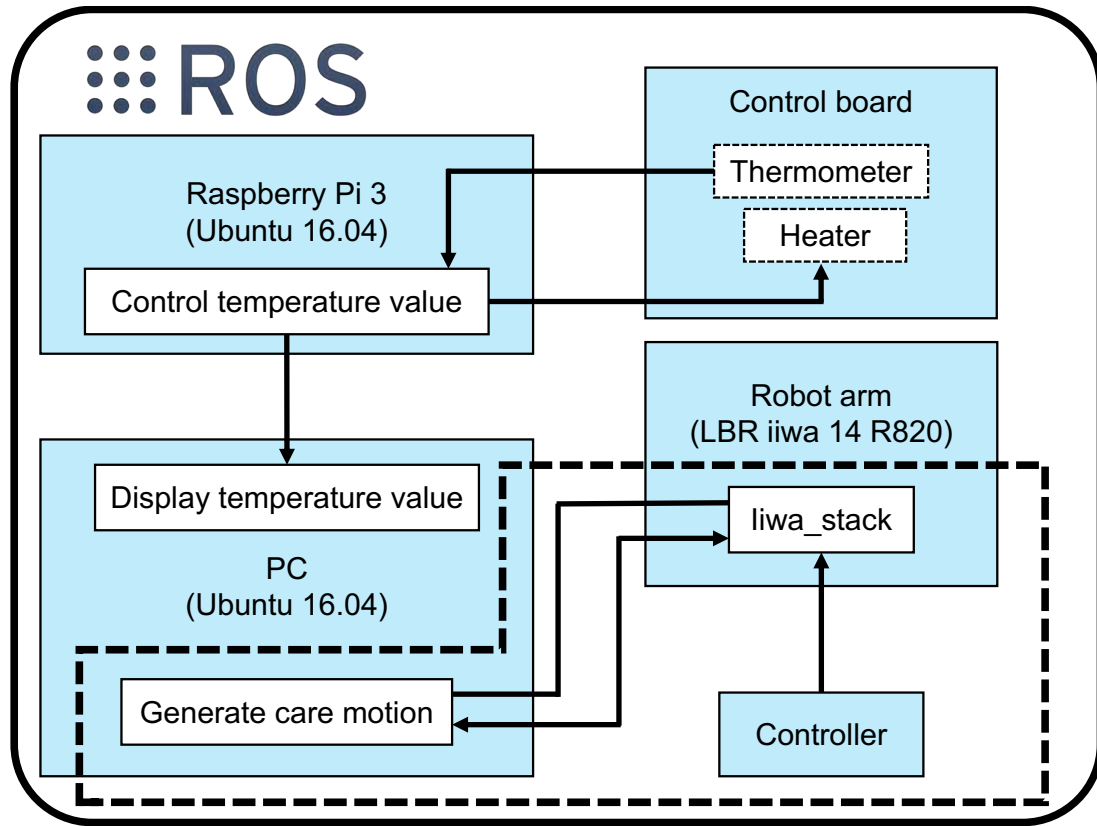


Fig. 3.2: System configuration of touching care robot

Raspberry Pi に搭載された OS も同様である．これらの働きは次の通りである．Raspberry Pi は，取得した電圧を温度に変換し，ROS を用いて温度を PC へ送信している．PC ではエンドエフェクタの温度を常に監視することができる．その際，数字ではなく視覚的にわかり易いように温度を可視化した．ロボットアームを ROS で制御するために，iiwa_stack [31] を用いた．Fig. 3.2 中において，点線で示された部分は 3.2 節で説明したタッチケア動作生成である．

本章で説明したキャリブレーション工程を被験者に対して実施することで，次の章で実施する，タッチケアロボットの評価実験を可能とする．

4. タッチケアロボットとしての評価実験

本研究で開発したタッチケアロボットが人の代替となりうるのかを検証する必要がある。タッチケアの成否には人のストレス反応を測定することで評価する。本章では、製作したエンドエフェクタに搭載したヒータが正確に動作しているのを確認する。その後、製作したエンドエフェクタを用いたロボットによる撫で動作を行い、アンケート評価と唾液アミラーゼモニターを用いることで、製作したエンドエフェクタに対する評価を実施するとともに、その施術前後で被験者のストレス反応がどのように変化したのかを検証する。

4.1 エンドエフェクタの温度制御機能の確認

4.1.1 人肌の温かさを決める実験

タッチケアロボットによる被験者実験を実施する前に、人にとって人肌程度の温かさがどの程度の温度であるのかを知る必要がある。実験方法は次の通りである。Fig. 2.11 を人肌のゲルで覆った物が配置された机 (Fig.4.1) の前に座ってもらう。その際、専用の型を用いることで、人肌のゲルが均等な厚さとなっている。また、温度は32, 35, 37, 40°Cである。実験協力者には、自身の手で四つの温度が異なる物を順番に触ってもらい、温かさを感じてもらう。最後に、「人肌の温度として最も適当な物はどれだと思いますか？」という問いに回答してもらう。

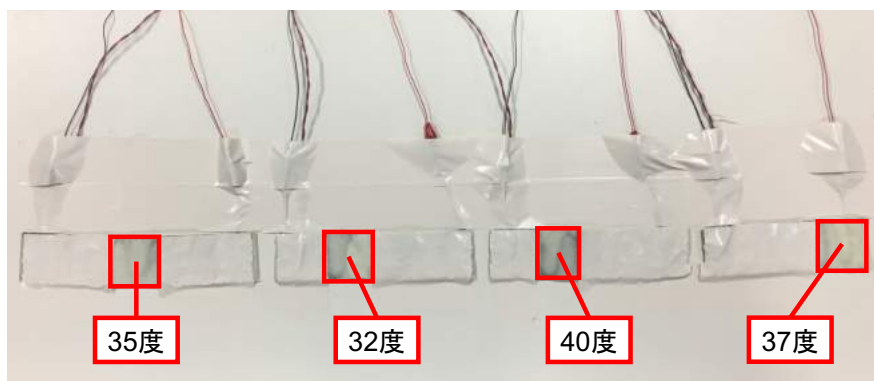


Fig. 4.1: Experiment for confirming the temperature

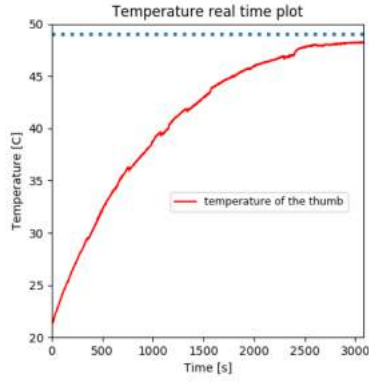
以上がアンケート内容である。実験参加者は十名であった。本来、この実験はエンドエフェクタの温度を変更して実施するべきであったが、エンドエフェクタの温度を直ぐに変更することが困難であり、実験には4日間必要であった。4日間に及ぶ実験だと、被験者にとってそれぞれの温度を比較することが困難になると考えられる。そのため、Fig. 2.11 に示すような物を製作した。結果は、35 °C が八人に支持された。よって、実際に被験者を撫でる実験を実施する際は、エンドエフェクタの温度を 35 °C とした。

4.1.2 温度制御実験

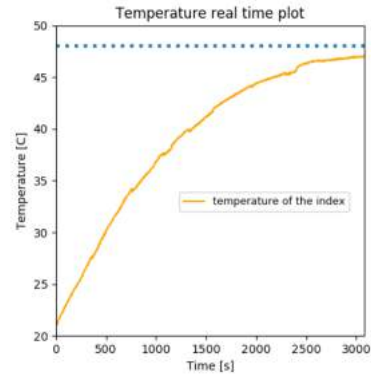
エンドエフェクタに備え付けられたそれぞれのヒータを動作させた際の経過時間における温度の変化を Fig4.2 に示す。目標温度は母指から小指に向けて順に 49,48,46,44,44°C であり、手のひらは 42°C である。これによって、エンドエフェクタの表面の温度が 35°C 程度となる。

次に、放射温度計を用いて経過時間（40 分間）におけるエンドエフェクタの表面の温度を計測した。その様子を Fig. 4.3 に示す。その際、温度のばらつき（最大値と最小値）は Fig. 4.4 に示す通りである。ばらつきはあるものの、局所的である。そのため、エンドエフェクタ全体としての温度は、おおむね 35 °C であると考えられる。

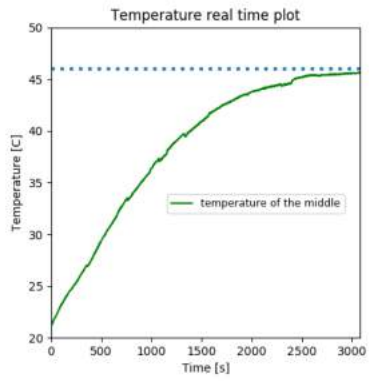
温めるのに必要な経過時間に関しては、40 分と非常に長時間を要する。これは、約 5 [m] のヒータに対して、使用している電源が出力できる電力が小さいためである。しかし、実験を開始する前に事前にエンドエフェクタを温めれば良く、実験中に迅速な温度変化が求められることはないと考えられる。そのため、本実験において問題とはならない。このエンドエフェクタを用いて、タッチケアロボットの評価実験を実施する。



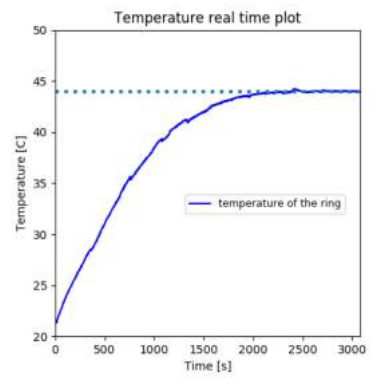
(a) Temperature of the thumb



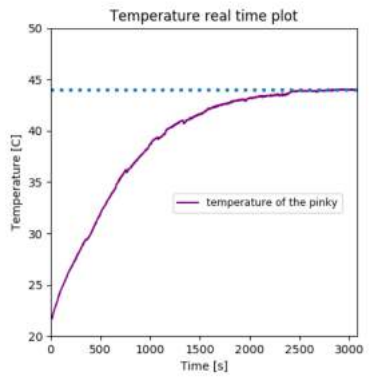
(b) Temperature of the index



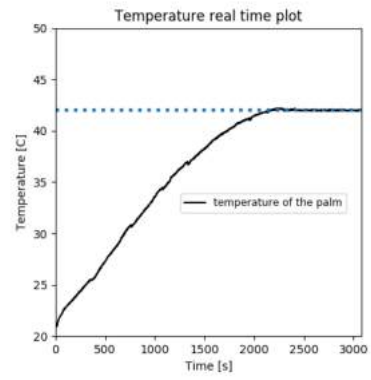
(c) Temperature of the middle



(d) Temperature of the ring

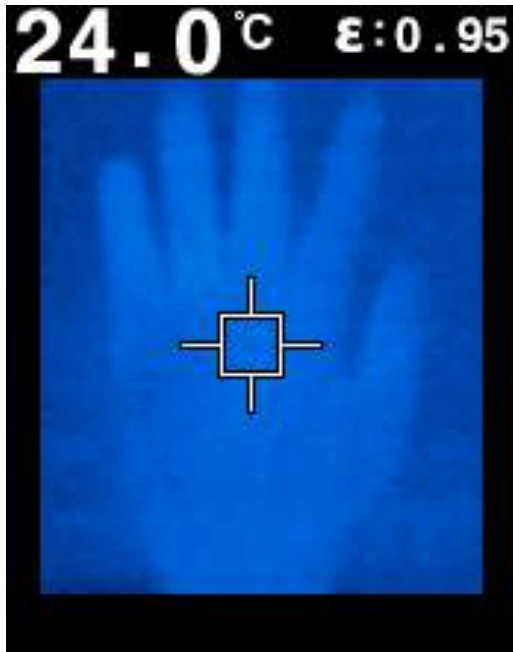


(e) Temperature of the pinky

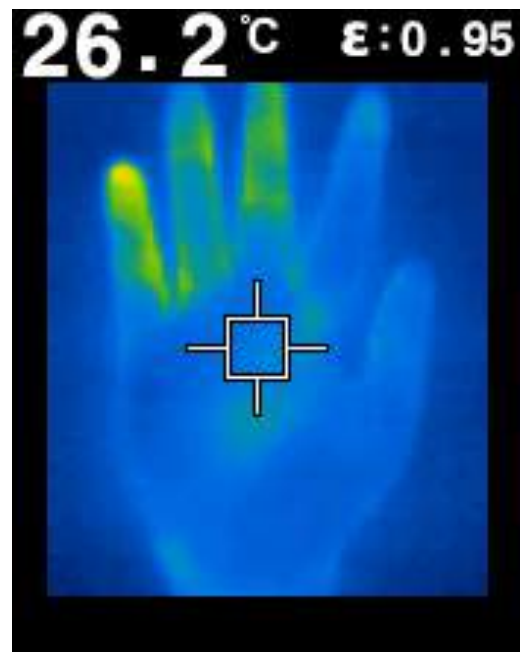


(f) Temperature of the palm

Fig. 4.2: Warming process of the heater



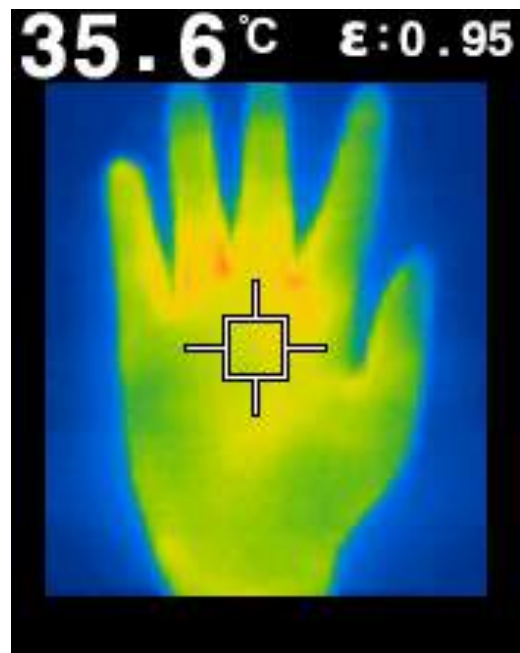
(a) 0 minutes has past



(b) 10 minutes has past

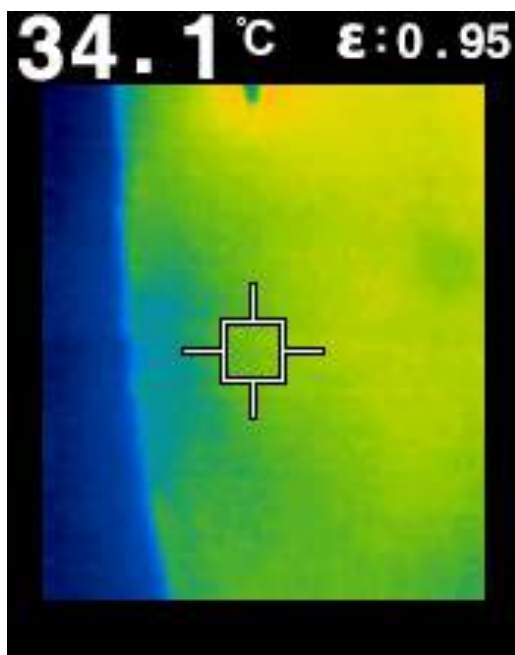


(c) 20 minutes has past

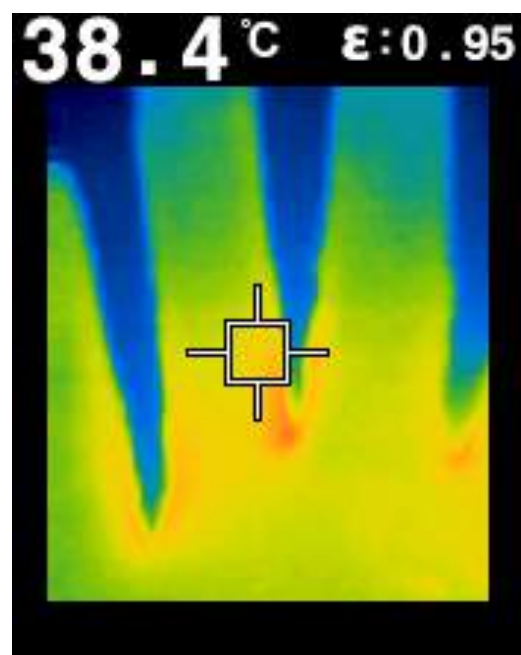


(d) 40 minutes has past

Fig. 4.3: Temperature of the end effector



(a) Minimum temperature



(b) Maximum temperature

Fig. 4.4: The positions of the minimum and maximum temperature for 40 minutes

4.2 実験概要

本実験では、開発したタッチケアロボットシステムを用いて、ロボットによる撫で動作を人に対して実施する。撫でる箇所は背中である。その際、エンドエフェクタと施術前後におけるストレス反応の評価を実施する。アンケートを実施することによってロボットが触れて感じたことを評価する。評価項目は三項目である。実験は二つ実施され、次の節で説明する。

ストレスの評価には、唾液アミラーゼモニター（NIPRO 社製）を使用する。唾液アミラーゼモニターとは、唾液中に含まれる消化酵素のひとつの唾液アミラーゼ（唾液中の α -アミラーゼ）を非侵襲で簡単に測定できる分析装置であり、客観的にストレスを評価するための指標となり得る [33]。人の交感神経系の活動変動に伴って、唾液中に含まれる消化酵素の一つである、 α -アミラーゼの濃度も変動するという医学的知見に基づいて製作されている [34]。唾液アミラーゼ分泌が亢進されるのに一分～数分要する。血液・尿に含まれるストレス関連物質を指標とした検査方法に比べて、レスポンスが非常に早いことが特徴である。

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。また、使用後の唾液採取チップは測定後被験者の同意を得て取得し、廃棄した。データは研究のみに使用し厳重に管理することを説明した。

4.3 実験手順

ストレスがタッチケアの成否に関する評価指標となり得るかを調べるために、定性・定量的に調べた。まず、実験Ⅰを実施した。実験ⅠではVASと呼ばれる評価方法を用いて、主観的なストレスを計測する。その際、実験終了時にアンケートを実施することによって、エンドエフェクタの評価を実施する。次に、実験Ⅱを実施した。その際、ストレスを与えてから安静にした場合と、ストレスを与えてからロボットによるタッチケア施術を実施した際の唾液アミラーゼ活性値を比較した。

4.4 実験Ⅰ：唾液とアンケートから得たストレス反応の変化

実験の流れを以下に示す．

1. ロボットに背を向ける形で自作した椅子に座ってもらう
2. 3章で説明した手動キャリブレーションを行い，撫で動作を生成
3. VAS を実施
4. 二または三桁の暗算（加算減算）を十分間実施
5. VAS を実施
6. 自作した椅子に座ってもらい，ロボットによる撫で動作を二分間実施
7. エンドエフェクタに関するアンケートと VAS を実施

暗算を実施前に，正答率が90 %を超えないとやり直してもらうと伝えた．しかし，実際には正答率は関係しておらず，被験者がよりストレスを感じるようにした．

実験中は，ロボットの撫で動作は実験者が持っているコントローラで行い，緊急時にいつでもロボットを停止させることができる．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確認できる位置で操作を実施する．被験者の条件として，衣服が二枚以下になるようにしてもらった．また，ロボットが撫で動作を行なっている間は被験者にイヤーマフをしてもらい，ロボットが発生するモータ音等が聞こえないようにした．実験風景は Fig. 4.5 に示す通りである．

主観的なストレスの評価には VAS（Visual Analogue Scale）を用いた．その際，100 [mm] の線の左端を「リラックス状態」，右端を「緊張状態」とした．被験者には，現在のストレスの程度を表すところに印を付けてもらう．ストレス以外のアンケートによる質問項目は以下に示す通りである．

- ロボットの触り心地は，人の手の感触でしたか？
- ロボットから感じる温かさは，適温でしたか？
- ロボットが撫でる力は，適度でしたか？

質問項目は全て以下のような五段階で評価される．

1. 非常にそう思わない

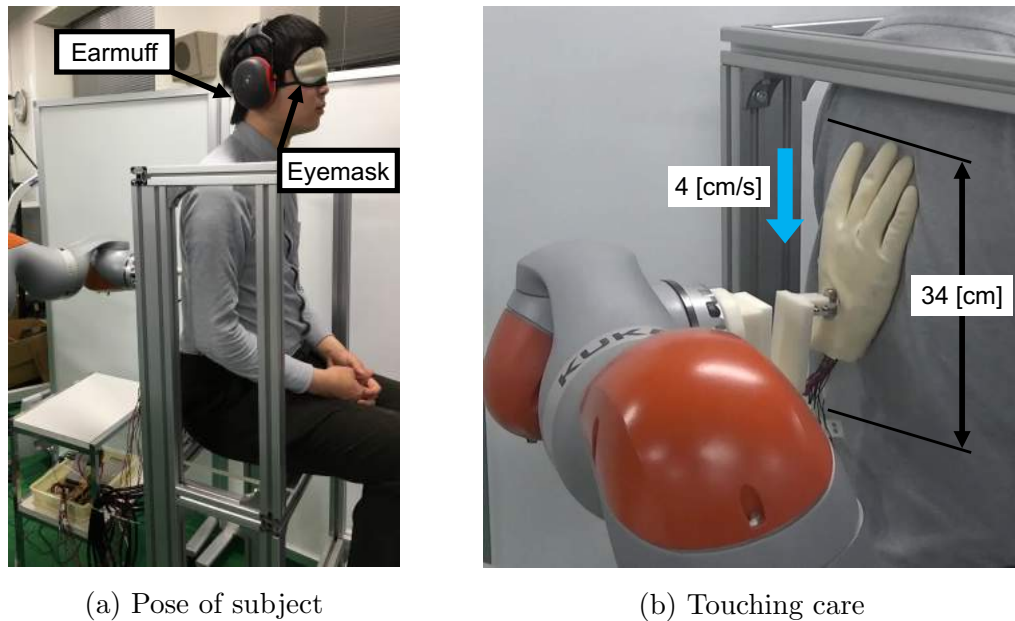


Fig. 4.5: Experimental set up

2. そう思わない
3. どちらでもない
4. そう思う
5. 非常に思う

実験には、健康な成人男性五名（22 歳～24 歳）に協力して頂いた。

4.5 結果

本実験より得られたアンケート結果を Fig. 4.6, Fig. 4.7 に示す． Fig. 4.6, Fig. 4.7 はアンケートによって得られた主観的なストレス反応とエンドエフェクタを評価したものである． Fig. 4.6 より，実験開始時のストレスが 37.2 ± 20.5 mm，暗算時のストレスが 65.4 ± 18.6 mm，タッチケア時のストレスが 41.6 ± 15.3 mm である． Fig. 4.7 より，撫で心地の評価が 3.0 ± 0.9 ，温度の評価が 4.2 ± 0.7 ，撫でる力の評価が 3.2 ± 1.0 である．次の節で，得られた結果に関して考察する．

4.6 考察

本実験で期待するストレス反応の推移は，実験開始時を安静状態とすると，次の通りである．

- (1) 施術終了時のストレス反応は，実験開始時のストレス反応以下
- (2) 暗算タスク時のストレス反応は，実験開始時のストレス反応以上

Fig. 4.6 より，本実験で期待するストレス反応の推移がみられた．施術によって暗算時よりストレス反応が減少していることから，1.1 節で説明した人同士の触れ合いによって生じる効果が，人とロボットの間で再現された可能性を示唆したと考えられる．しかし，単に時間的経過によってストレス反応が減少したという可能性も否定することはできない．よって，暗算タスクによってストレスを与えた後に，施術するのではなく，安静にした場合のストレス反応とを比較する必要がある．

Fig. 4.7 より，人の手の感触に関する評価と撫でる力に関する評価は温かさの評価に比べて低いことがわかる．これはエンドエフェクタとロボットアームの接続方法に問題がある．ロボットアームによって力を加えても，接続場所の一点にしか力を加えることができないため，エンドエフェクタが人の背中に対して浮いた状態になってしまう．その結果，局所的にしか力が加わらず，撫でる感触と，撫でる力の評価が低かったのではないかと考えらる．よって，面で手を押すような接続方法が望まれる．

3つの項目において60%の評価を得ており，特に温度に関する項目は84%と非常に高い結果となっている．これより，エンドエフェクタ全体を温かくすることによって，人の手のような温かさをもたらすことができたと考えらる．

4.7 実験Ⅱ：断続的な唾液採取で得たストレス反応の変化

実験で用いるエンドエフェクタ，ロボットおよびケア動作生成方法は4.4節で述べた実験Ⅰと同様である．また，実験中の被験者と実験者の振る舞いに関しては同様である．実験Ⅰと異なる点は，アンケートは実施せず，唾液アミラーゼモニ

ターによってストレスを評価することである。実験の流れは Fig.4.8 に示す通りである。

唾液の採取は、暗算開始前、暗算開始後二分おき、安静開始時、安静開始後二分おき、二度目の暗算開始時、二度目の暗算開始後二分おき、施術開始時、施術開始後二分おき、施術終了後、施術終了後二分後の合計 22 回である。この際、被験者に唾液測定チップを渡して自ら口に含んでもらった。一度目と二度目の暗算タスクの内容は異なったものである。なお、実験には、健康な成人男性五名（22 歳～24 歳）に協力して頂いた。

唾液アミラーゼモニターの測定法の操作は機器の使用説明書に従った。始めに専用チップを舌下に挿入し、30 秒間唾液を浸み込ませる。唾液を採取したチップをすみやかに本体に挿入すると操作が開始され、約 60 秒後には唾液中のアミラーゼ活性が KU/I の単位で表示されると共に判定結果が得られる。測定結果の評価は、0～30 [kIU/L] がストレスなし、31～45 [kIU/L] はストレスややあり、46～60 [kIU/L] はストレスあり、61 [kIU/L] 以上はストレスがかなりある、が結果の目安である。

4.8 結果

実験の結果を Fig.4.9 に示す。グラフは被験者五人の平均値であり、縦軸は実験開始時に対するストレスの増減率を示している。横軸は時間である。Fig.4.9 に示すように、一度目の暗算時は 0.48% ストレスが開始時に比べて減少し、安静時は 0.33% 減少し、二度目の暗算は 0.41% 減少し、タッチケアによって 0.67% 減少している。次の節で、得られた結果に関して考察する。

4.9 考察

本実験で期待するストレス反応の推移は、次の通りである。

- (1) 暗算時のアミラーゼ活性値は、実験開始時に対するストレス比べて増減している

- (2) 安静時のアミラーゼ活性値は，暗算時に比べて減少している
- (3) タッチケア時のアミラーゼ活性値は，暗算時に比べて減少している
- (4) タッチケア時のアミラーゼ活性値は，安静時よりも減少率が多い

(1)，(2) に関しては，被験者によってはその傾向がみられたが，平均でみるとその傾向はみられなかった．これは，ストレスタスクに問題があると考えられる．本実験では，ストレスを与えるタスクとして2, 3桁の暗算を実施した．しかし，人によって問題を解くことに喜びを感じる物があり，これによって本来ストレスとなるはずが，かえってリラックスしてしまったのではないかと考えられる．また，安静時にも問題があったと考えられる．被験者によっては，安静時であるはずなのに，アミラーゼ活性値が増加した．安静時は単に椅子に座ってもらうだけとなっており，リラックスできない被験者もいたと考えられる．

(3)，(4) に関しては，Fig.4.9 よりその傾向がみられた．ストレスを与えてから安静にするよりもタッチケアロボットによる施術の方が唾液アミラーゼ活性値が減少傾向にあることから，タッチケアロボットとしての可能性を示した．

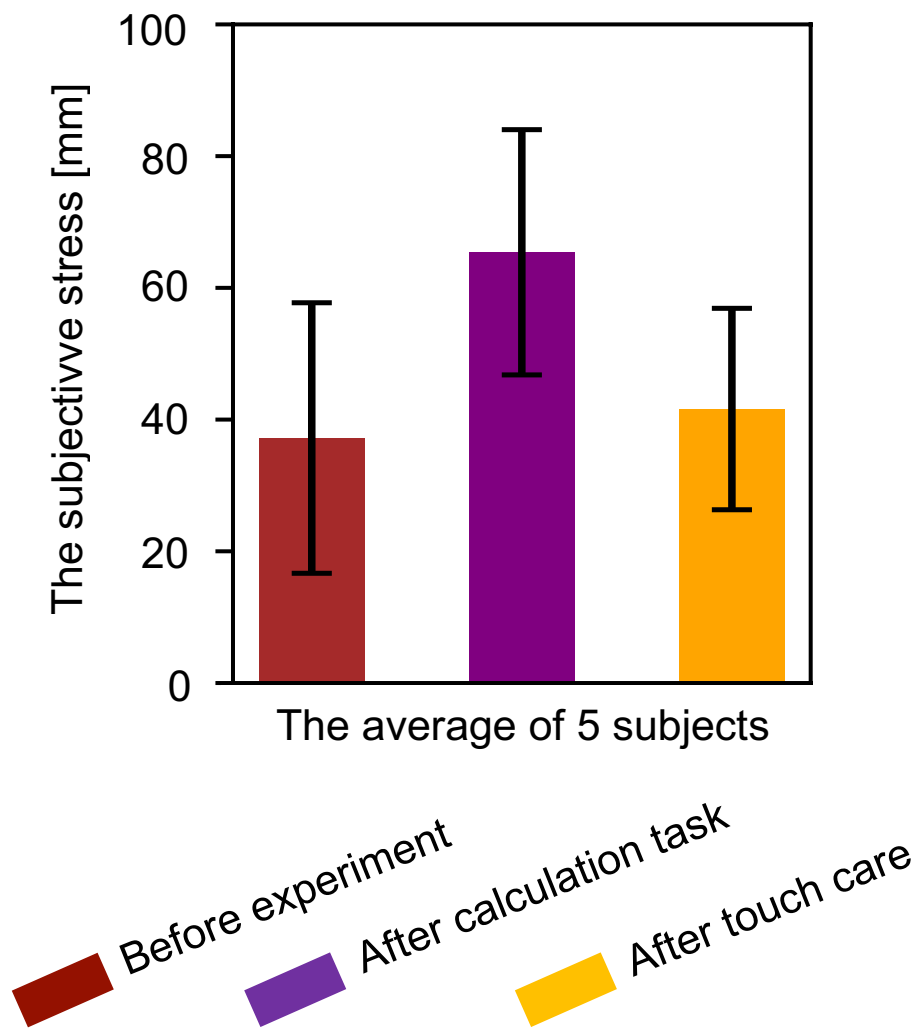


Fig. 4.6: Result in stress assessment obtained by questionnaire

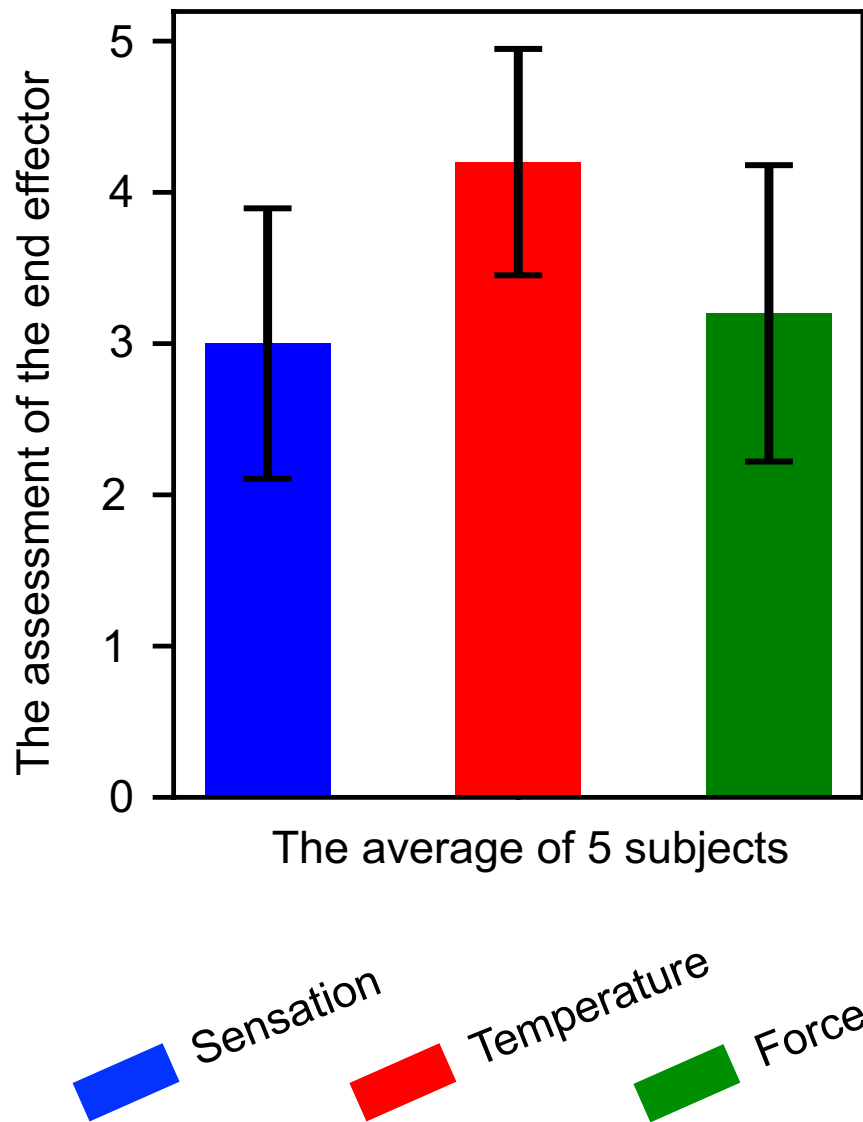


Fig. 4.7: Result of the assessment obtained by questionnaire

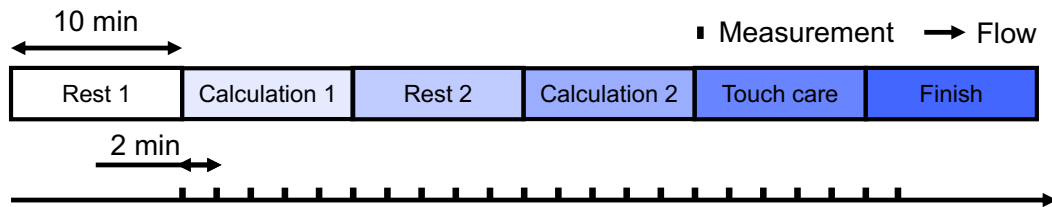


Fig. 4.8: Experiment procedure

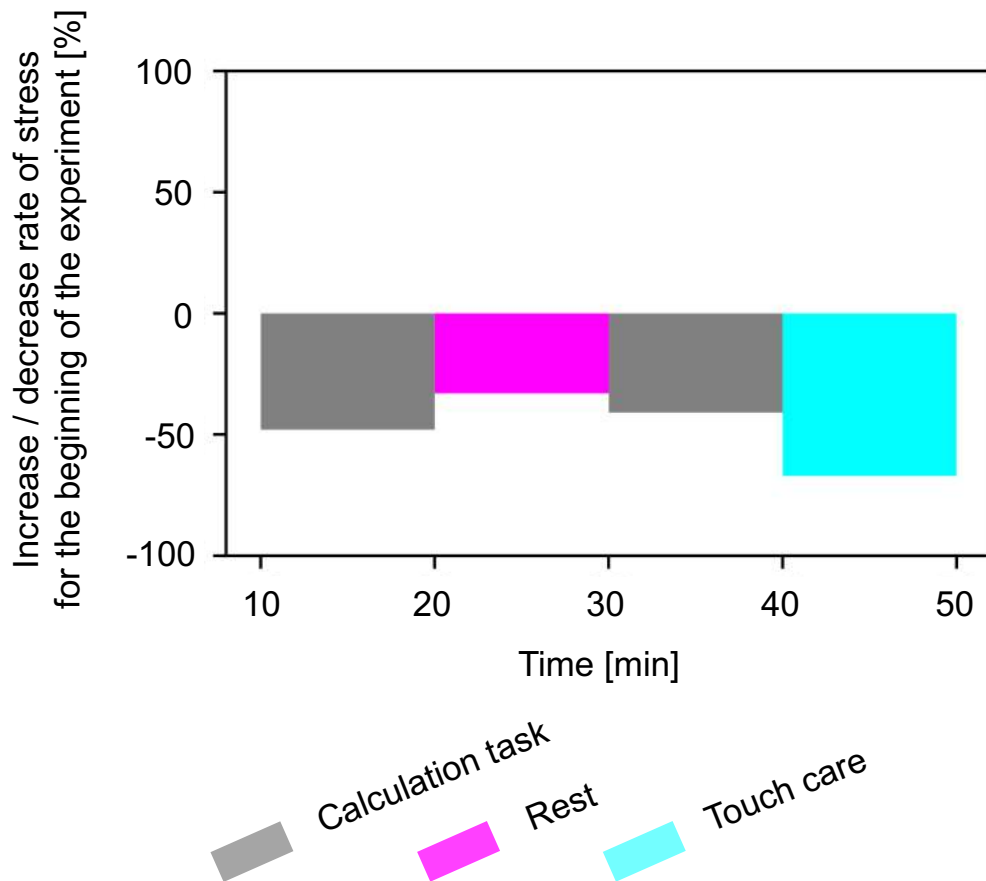


Fig. 4.9: Result of the salivary amylase monitor of subjectI

5. おわりに

5.1 本論文のまとめ

本件研究では、温度制御が可能であると同時に受動機構を有したエンドエフェクタの開発を実施した。その際、エンドエフェクタが満たす要件は、1) 人の骨の剛性と関節を再現、2) 人肌の感触の再現、3) 人の温かさの再現、であった。触れ合う際の接触力を人のように再現するため、トーションバネを用いて人の関節を再現した。また、触れ合う際の温かさを再現するため、ヒータを内蔵し、さらに温度センサを追加することで温度制御を可能とした。エンドエフェクタの温度は、アンケートによって 35°C とした。

タッチケアの動作はロボットアーム用のコントローラを用いて、ダイレクトティーチングによって生成した。ロボットアームを用いて、二つの実験を実施した。評価方法は、アンケートと唾液アミラーゼであり、実験Ⅰは、唾液アミラーゼと主観的なストレス反応を比較した実験であり、実験Ⅱは、唾液アミラーゼが本研究におけるタッチケアの成否に関する評価指標となり得るかを調べるためであった。実験によって、タッチケア実施中における唾液アミラーゼ活性値が安静時よりも減少したので、タッチケアロボットとしての可能性を示すことができた。

5.2 今後の課題と展望

今後の課題としてタッチケア動作が挙げられる。本研究では、タッチケア動作をロボットアームにダイレクトティーチング機能を持たせることで実現した。しかし、ロボットアーム専用のコントローラによって生成したため、人の背中に沿わせるような軌道とはなっていない。それによって、ロボットアームから人へ伝わる力が、場所によって強かったり、弱かったりした。このことは、力センサと深度カメラによって解決できると考えている。エンドエフェクタに力センサを備え付けると、押さえつけている力の状態を監視することができるので、撫でる場所によって生じる力のムラを防ぐことができると考えられる。さらに動作生成に関しては、あらかじめ被験者の背中の形状をスキャンすることによって、形状を把

握し、それを用いて動作の生成に役立てることができると考えられる。

これらのステップによって人のようなタッチケア動作をロボットに実装することができるが、実用化という面で考えると問題がある。一つ目は、コスト面である。現在ロボットアームを用いており、システム全体は非常に高価である。二つ目は、信頼関係である。ご高齢の方は、ロボットの接客に対して不信感を覚えている人が大多数であり、施設に導入したとしても使用されるかは疑問である。タッチケアの成否には精神的な要因も存在しており、不信感を抱いた状態で施術を受けても、効果は薄いと考えられる。

次に挙げられる課題として、エンドエフェクタの改良が考えられる。中の骨は人の関節全てを再現することができていない。特に、母指に関しては、屈曲・伸展動作の再現はできているが、内転・外転動作の再現はできていない。これによって、手を開いた状態にする妨げとなったと考えられる。従って、人に触れた際に「面」で感じるができなくて、不快なものとなってしまった可能性がある。このことは、人の手の骨の再現度を高めることで解決できると考えている。

温度の評価に関しては、アンケート結果によって評価が高かった。しかし、長時間撫でると熱くなりすぎるという問題が挙げられる。そこで、エンドエフェクタの表面にも温度センサを取り付ける必要がある。そうすることで、相手の温度を測ることができ、温かすぎると少し離れたりするという制御が可能となる。本研究ではエンドエフェクタの温度を予備実験によって、35°Cとした。予備実験ではアルミホイルを人肌のゲルで包んだ製作物を用いた。アンケートによって最も人肌に近い温度を決めたが、被験者の手の温度によって感じ方が異なってくる可能性が考えられるため、被験者との温度差を考慮した実験をする必要がある。

さらに、メンテナンス性を向上させることも課題である。本研究で製作したエンドエフェクタは、人肌のゲルで骨やセンサ等が覆われているため、断線といった際にメンテナンスが困難である。メンテナンスの度に人肌のゲルで覆っているのは、費用がかさむ。そこで、取り外し可能な人肌のゲルでできたカバーを製作することでこの問題を解決できると考えている。

そして、長時間の使用を考えた時に、表面の素材も課題である。本実験で、撫で動作を生成する際に表面が磨耗してしまい、手袋の滑り易さが損なわれてしまっ

た。これによって、実験中に被験者を撫でる妨げとなってしまうと考えられる。そこで、表面の素材を検討する必要がある。

最後に挙げられる課題として、被験者の数と評価方法が挙げられる。唾液アミラーゼモニターを用いて、タッチケアロボットとしての可能性を示すことはできたが、被験者数が少なく、参考程度である。今後、実験のプロトコルを整えて、実験の手順、及び条件等について検討し、さらなる検証が必要である。エンドエフェクタに関するアンケートも、被験者の数が少なく、今後被験者を増やすなどして、さらなる検討が必要である。また、唾液アミラーゼ以外の定量的な評価方法を検討する必要もある。本実験で得られた結果はたまたまであった可能性も否定することはできない。そこで、脳波や脈拍といった別のバイタルサインを測定するがよいと考えられる。

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室の小笠原司教授に深く感謝致します。

中間発表，論文執筆にあたり，大変貴重なご意見を頂きました副査指導教員である本学情報科の佐藤嘉伸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室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室の丁明助教に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり，研究会やグループミーティング等において様々なご指導，ご助言を頂きました本研究室の Garcia Ricardez Gustavo Alfonso 助教に深く感謝致します。

論文執筆の際に様々なご指導，ご助言を頂きました本研究室の湯口彰重氏に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり，様々なご助言頂きました本研究室の趙崇貴氏，清川拓哉氏に深く感謝致します。

本件研究で開発したエンドエフェクタの電気回路に関しまして，多大な協力を頂きました本研究室の木下勝吏氏に深く感謝致します。

ロボットアームの制御方法に関しまして，多大な協力を頂きました本研究室の佐久間達也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に深く感謝致します。

本研究の先輩および同輩の皆様，後輩達には研究を進める上で様々なご協力を頂きました。ここに深くお礼申し上げます。

最後に，2年間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] 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.
- [2] S. Cohen, D. Janicki-Deverts, R. B. Turner, and W. J. Doyle: “Does hugging provide stress-buffering social support? a study of susceptibility to upper respiratory infection and illness,” *Psychological science*, vol. 26, no. 2, pp. 135-147, 2015.
- [3] 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 マーケティング, 2008.
- [4] 高辻功一, からだを理解するための解剖・生理学, 金芳堂, 1999.
- [5] 山口創, 人は皮膚から癒される, 草思社, 2016.
- [6] 菊本由里, 河野由美：“認知症高齢者へのタクティールケアの有効性について 一不安尺度と唾液アミラーゼ活性値から－”, 畿央大学紀要, vol. 11, no. 1, pp. 29-37, 2014.
- [7] 厚生労働省, 平成 29 年国民生活基礎調査の概況,
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa/k-tyosa17/dl/02.pdf> (2019 年 1 月 17 日参照)
- [8] A.Terracciano^a, Y.Stephana^b, M.Luchetti^a, E.Albanese^c and A.R.Sutina: “Personality traits and risk of cognitive impairment and dementia,” *Journal of Psychiatric Research*, vol. 89, pp. 22-27, 2017.
- [9] パロに関するホームページ, <http://paro.jp> (2019 年 1 月 17 日参照)
- [10] W.Moyle, M.Cooke, E.Beattie, C.Jones, B.Klein, G.Cook and C.Gray: “Exploring the effect of companion robots on emotional expression in older adults with dementia: A pilot randomized controlled trial,” *Journal of gerontological nursing*, vol. 39, no. 5, pp. 46-53, 2013.
- [11] M.Shiomi, A.Nakata, M.Kanbara and N. Hagita: “A hug from a robot encourages prosocial behavior,” *IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 418-423, 2017.
- [12] ロベアに関するホームページ, <http://rtc.nagoya.riken.jp/ROBEAR/> (2019 年 1 月 17 日参照)

- [13] T.Mukai, S.Hirano, H.Nakashima, Y.Kato, Y.Sakaida, S.Guo and S.Hosoe: “Development of a nursing-care assistant robot riba that can lift a human in its arms,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5996-6001, 2010.
- [14] M.Ding, R.Ikeura, T.Mukai, H.Nagashima, S.Hirano, K.Matsuo, M.Sun, C.Jiang and S.Hosoe: “Comfort estimation during lift-up using nursing-care robot — RIBA,” Conference on Innovative Engineering Systems, pp. 225-230, 2012.
- [15] Chih-Hung King, Tiffany L. Chen, Advait Jain and Charles C. Kemp: “Towards an assistive robot that autonomously performs bed baths for patient hygiene,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 319-324, 2010.
- [16] R.C.Luo and K.C.Hsieh: “Tapping motion control of dynamic impulse-momentum contact to human body for robotic therapeutical percussive massage,” IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 1135-1140, 2017.
- [17] Tiffany L. Chen, Chih-Hung King, Advait Jain and Charles C. Kemp: “Touched by a robot: An investigation of subjective responses to robot-initiated touch,” ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, pp. 457-464, 2011.
- [18] 株式会社クロス・マーケティング, コミュニケーションロボットによる接客に関する調査 (2016), <https://www.cross-m.co.jp/report/it/rb20160531/> (2019 年 1 月 17 日参照)
- [19] 上野安澄, 三浦祐太, 水内郁夫: “人間同士の接触を再現するための弾性を含む関節と肉質を持つロボットハンドの開発”, 第 19 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2018) 講演論文集, pp. 826-830, 2018.
- [20] 柏井雄登, 田中文英: “外装温度を可変としたロボットハンドがユーザの安心感に与える影響”, 人工知能学会, pp. 4L103-4L103, 2018.
- [21] 上羽康夫, 手その機能と解剖, 金芳堂, 1970.
- [22] Stlfinder, <https://www.stlfinder.com/> (2019 年 1 月 17 日参照)
- [23] B.Alexander and K.Viktor: “Proportions of hand segments,” International Journal of Morphology, vol. 28, no. 3, pp. 755-758, 2010.

- [24] 人肌のゲルのホームページ, <http://www.exseal.co.jp/creative/hitohadanyu.htm>
(2019 年 1 月 17 日参照)
- [25] N.Pan, P.Gibson: “Thermal and Moisture Transport in Fibrous Materials,” Woodhead Publishing, pp. 560-602, 2006.
- [26] LBR-iiwa に関するホームページ,
<https://www.kuka.com/en-my/products/robotics-systems/industrial-robots/lbr-iiwa>
(2019 年 1 月 17 日参照)
- [27] M.Quigley, K.Conley, B.P.Gerkey, J.Faust, T.Foote, J.Leibs, R.Wheeler, and A.Y.Ng: “ROS: an open-source Robot Operating System,” ICRA workshop on open source software, 2009.
 , “ROS: an open-source Robot Operating System,” in ICRA Workshop on Open Source Software, 2009.
- [28] K.Toyoshima, M.Ding, J.Takamatsu and T.Ogasawara: “What is required for a robot to gently stroke a human using its hand,” Proceedings of ICRA2018 Workshop on Elderly Care Robotics Technology and Ethics, 2018.
- [29] 山口創, 手の治癒力, 草思社, 2012.
- [30] 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, 2012.
- [31] C.Hennersperger, B.Fuerst, S.Virga, O.Zettinig, B.Frisch, T.Neff and N.Navab: “Towards MRI-based autonomous robotic US acquisitions: a first feasibility study,” IEEE transactions on medical imaging, vol. 36, no. 2, pp. 538-548, 2017.
- [32] 生命工学工業技術研究所, 設計のための人体寸法データ集, 日本出版サービス, 1996.
- [33] 萩野谷浩美, 佐伯由香: “ストレス評価における唾液 α アミラーゼ活性の有用性”, 日本看護技術学会誌, vol. 10, no. 3, pp. 19-28, 2012.
- [34] 山口昌樹, 花輪尚子, 吉田博: “唾液アミラーゼ式交感神経モニタの基礎的性能”, 生体医工学, vol. 45, no. 2, pp. 161-168, 2007.