

**柔軟機構を用いた
対話型ヒューマノイド媒体による
身体境界の表現とその応用**

高橋 宣裕

**電気通信大学
大学院情報システム学研究科
博士（工学）**

2022 年 12 月

柔軟機構を用いた
対話型ヒューマノイド媒体による
身体境界の表現とその応用

博士論文審査委員会

野嶋 琢也 准教授

佐藤 俊治 准教授

橋山 智訓 教授

梶本 裕之 教授

坂本 真樹 教授

東京工業大学 小池 英樹 教授

著作権所有者

高橋 宣裕

2022 年

Interactive Humanoid Mediums with Soft Mechanisms: Expressions of the Boundary of the Human Body and Its Applications

Nobuhiro Takahashi

Abstract

The thesis discusses the significance of the positional manipulation and expression of body boundaries and their realization by using Interactive Humanoid Mediums (IHMs) and describes in detail the studies on multiple IHMs developed by the author. First, as a study focusing on the phenomenon that occurs at the boundary when independent bodies come into contact with each other, the study focused on hugging, which is one of the important forms of communication using body contact, and investigated the haptic sensation when hugging. This thesis describes “Sense-Roid series” enables the transmission of hugs between remote locations. Secondly, as a study to express a state approximating the fusion of the boundaries of the body, the author developed the soft exoskeleton glove similar to the anatomical structure of human body. “Soft-G” aims to achieve the acquisition of advanced skills such as a piano performance by directly teaching performance skills by expressing the movement of the dexterous finger movements. Third, as a study to transfer the boundaries of the body to a humanoid robot and try to express new emotions of the robot with the visual and tactile changes on the body boundary when the muscles are operated, the author developed “SHIRI” which is the buttocks humanoid that represents emotions with visual and tactual transformation of the Muscles. Fourthly, as a study to transfer the boundaries of the body to the humanoid robot, the author developed “SHIN-TAI” which expresses changes in physical characteristics that change according to the increase or decrease in fat mass, and give control elements to the robot’s physical personality using an unprecedented method.

In conclusion, through the above project, by realizing contact and fusion of the boundaries of the body using a humanoid medium, haptic communication between remote locations and

direct teaching and learning of bodily skillful movements will become possible. In addition, we found that it can be applied to emotional expression and individuality production by transferring the boundary to the robot body. Finally, the thesis discusses the generalization of the research on IHMs that physically expresses human body boundaries conducted in the studies, organize the issues that have been clarified, and discuss future prospects.

柔軟機構を用いた 対話型ヒューマノイド媒体による 身体境界の表現とその応用

高橋 宣裕

概要

現在、社会に広く浸透した情報提示手法は、PC やスマートフォン等に代表される情報通信端末を媒体として、文字、音声、映像等といった主に視聴覚情報が用いられる。人間同士のコミュニケーションにおいて、これらの言語を主に用いる情報の伝達は、思考や要件等を伝える用途においては利便性に優れた手法である。一方で、非言語情報を用いたコミュニケーションもまた人間にとって重要である。ロボット工学、バーチャルリアリティ (VR: Virtual Reality)、オーグメンテッドリアリティ (AR: Augmented Reality)、そして人間拡張 (Human Augmentation) に関する研究では、相互に分野を横断し、様々な情報提示手法が提案されてきた。一例として、遠隔地間のロボットを媒体としたコミュニケーションの可能性を示した試みが複数ある。また、情報提示手法そのものに焦点を当てた場合においても、視覚や聴覚のみならず、触覚を用いた刺激提示手法が多く提案されており、更には味覚や嗅覚といった感覚を刺激する手法も模索されてきた。このような過程は、従来の情報通信媒体に欠如する、人間の身体性に着目したインタフェースの重要性に関心が集められてきたことを示唆している。身体動作により生成される非言語的な身振り手振りや接触行為、あるいは身体そのものが持つ存在感は、言語的情報において必要となる解釈の過程を省略した、直感的な動作教示や親密な者同士の感情表現等が行える点において、視聴覚情報のみでは代替できない特長がある。人間同士が間近にいる状況においては、双方で身体動作を提示し合い、時には身体接触を交えたコミュニケーションが多彩な局面において観察される。しかしながら、従来の媒体を用いた情報提示手法は、視聴覚情報を提示する装置ならびにアクチュエータは豊富に存在するが、身体動作や身体接触等の表現や伝

達を行う手法には限界があり、伝達される情報が十分なものであるとは言い難い。すなわち、現状は媒体を介することにより人間が本来持つ身体性は大きく損失する傾向にある。

これまでの媒体による情報伝達は、個々人が独りでいる状況と同様であり、それぞれの身体の「境界」が独立した状態にある。そこで、独立した身体の境界に対し、双方の距離を無くすような操作ができるとするならば、境界同士の「接触」や「融合」、更には人間と同様の姿形を持つ人型ロボットへの「転写」といったシチュエーションが想定できる。このような観点から、媒体と人間の身体境界とを位置的に対応付け、身体境界で生じる現象を物理的に表現する媒体を開発することで、従来の媒体による情報提示の不足に関する課題を解決することに着目した。本研究では、人体に近似した構造を持った柔軟機構を用いた「ヒューマノイド媒体」によって、身体境界の物理的な表現にアプローチし、新たなコミュニケーションの形態や従来なかった情報提示手法の創出を図る。

従来、力触覚提示に用いられてきたアクチュエータには様々な種類がある。電磁モータや振動板等を用いた振動刺激の提示や、直動アクチュエータ等によって物理的な力を与えるもの、電極による皮膚への電気刺激の提示等があり、主に硬質の接触面を介して行われるものである。これらのアクチュエータは普及や小型化が進んでいるものも多く、情報通信端末や VR や AR に利用する装置や設備等、幅広い種類のシステムに組み込み易いという利点がある。しかしながら同時に、刺激提示による体験のバリエーションは相応に限定的なものとなる。例えば、人間の身体動作に伴って生じる力触覚出力、すなわち変化する感触や存在感に倣った情報提示手法については未だ向上の余地がある。本研究は、従来の力触覚提示のためのアクチュエータに関する課題に対し、ヒューマノイド媒体に搭載された、人間の皮膚や筋肉の動作や感触に近い空気圧人工筋肉や柔軟素材等で構成されるソフトメカニズムを共通して用い、従来にない力触覚提示を試みている。すなわち、単に力触覚提示手法としてのソフトアクチュエータの有用性を見出すだけでなく、ヒューマノイド媒体による物理的な境界表現と、人間に対する力触覚による情報提示を同時に達成することが基本的な設計思想となる。

本論文では、身体境界の位置的な操作及び表現の意義と、ヒューマノイド媒体によるその具現化に関する論を展開したのち、筆者が開発した複数のヒューマノイド媒体に関する研究について詳細を記した。第一に、独立した身体同士が接触した場合の境界で生じる現象に焦点を当てた研究として、身体接触を用いた重要なコミュニケーションの一つである抱擁に着目し、抱擁した際の力触覚を表現する媒体の開発を行い、遠隔地間で抱擁の伝達を可能とする「Sense-Roid」について述べる。第二に、身体の境界の融合に近似した状態を表現する研究として、人間の筋肉の解剖学的構造に近似したグローブを開発し、身体動作のうち最も技巧的なものの一つであるピアノ演奏の動作を表現することで、直接的な演

奏スキルの教示による高度な技能の習得の実現を目的とする「Soft-G」について述べる。第三に、身体境界をヒューマノイドロボットに転写し、ロボットの新たな感情表現を試みる研究として、筋肉が作動する際に境界で生じる視触覚的变化を表現し、従来にはない手法でロボットの感情表現の制御要素を付与することを目的とする「SHIRI」について述べる。第四に、体の境界をヒューマノイドロボットに転写し、脂肪量の増減により変化する身体的特徴の変化を表現し、従来にはない手法でロボットの身体的個性の制御要素を付与することを目的とした「SHIN-TAI」について述べる。

結論として、上述のプロジェクトを通じ、ヒューマノイド媒体を用いて身体境界の接触や融合を実現することにより、遠隔地間の力触覚コミュニケーションや、身体の技巧動作の直接的な教示と習得が可能となることが示唆され、更にロボットボディに境界を転写することで感情表現と個性の演出に応用できることを見出すことができた。論文の最後に、本研究で行われた身体境界を表現するヒューマノイド媒体に関する研究の総括を論じ、明らかとなった課題についても整理し、今後の展望について論じる。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	ヒューマノイドロボット	2
1.3	研究の目的	3
1.3.1	Interactive Humanoid Medium (IHM) :対話型ヒューマノイド媒体	4
1.4	本研究の新規性と意義	6
1.5	本論文の構成	7
第2章	身体境界に関する分類	9
2.1	接触	9
2.2	融合	10
2.3	転写	10
2.4	本研究の位置付け	11
第3章	身体接触感覚の伝達によるコミュニケーションの創出	13
3.1	研究背景	13
3.2	関連研究	15
3.2.1	遠隔地間での触覚伝送	15
3.2.2	抱擁の再現装置	16
3.2.3	「対自己コミュニケーション」	16
3.3	Sense-Roid の設計	17
3.3.1	トルソ型センシングデバイス	18
3.3.2	力触覚提示ウェア	18
3.3.3	動作原理	21

	3.3.4 圧迫力の計測とマッピング	21
3.4	実演展示	22
	3.4.1 印象評価	26
3.5	考察と課題	26
3.6	Sense-Roid Type-S: 人工筋肉ニットと空気圧バルーンを用いたハードウェア的改良	28
第 4 章	手指の巧緻な動作の教示による技能の習得	29
4.1	ソフト外骨格グローブ (Soft-G) の概要：手指の巧緻動作の教示	30
4.2	研究背景	30
4.3	関連研究	34
	4.3.1 ハード外骨格グローブ	34
	4.3.2 ソフト外骨格グローブ	34
	4.3.3 VR と人間拡張におけるフォースフィードバック	35
	4.3.4 手指の巧緻動作の制御と学習	36
4.4	前腕の解剖学と Soft-G への反映	36
	4.4.1 指屈筋と指伸筋に基づく設計方針	36
	4.4.2 細径のマッキベン型人工筋肉	38
4.5	設計と実装	38
	4.5.1 Soft-G の構造	38
	4.5.2 人工筋肉の制御システム	41
4.6	基本性能評価実験	41
	4.6.1 押下/引張力の計測	43
	4.6.2 連続押下速度の計測	44
	4.6.3 姿勢の制御性	45
	4.6.4 手指の剛性の制御可能性	49
	4.6.5 半自動装着システム	52
	4.6.6 基本性能評価実験のまとめ	55
4.7	ピアノ演奏に関する評価実験	55
	4.7.1 随意的指動作に対する機械的拘束の比較	56
	4.7.2 外骨格によって生成される受動的打鍵の比較	58
	4.7.3 Soft-G によるピアノ演奏の学習効果に関する実験	59
	4.7.4 ピアノ演奏実験に関する考察	62

4.8	まとめ	63
第 5 章	生理的身体動作の生成によるヒューマノイドロボットの感情表現	65
5.1	インタフェース設計	66
	5.1.1 Musculus-Haptic Display	66
	5.1.2 基本設計	67
5.2	実装する身体部位の考察	69
	5.2.1 筋構造	69
	5.2.2 臀部と大臀筋	71
5.3	SHIRI	72
5.4	筐体デザイン	72
5.5	Gluteus Maximus Actuator	76
5.6	システム構成	77
5.7	動作パタン	79
	5.7.1 緊張-弛緩	81
	5.7.2 痙攣	82
	5.7.3 突き出し	82
5.8	ユーザインタラクション	91
5.9	実演動画に対する反応	93
5.10	考察	93
5.11	まとめ	95
第 6 章	体型可変ヒューマノイドボディによるロボットの身体表現の拡張	96
6.1	SHIN-TAI: 人工筋肉, 人工脂肪によるヒューマノイドの体型のコントロール	96
6.2	研究背景	97
6.3	関連研究	100
	6.3.1 アンドロイド	100
	6.3.2 触覚インタフェース	100
	6.3.3 3次元形状の制御と再現	101
6.4	SHIN-TAI の設計	101
	6.4.1 構造と制御システム	101
	6.4.2 人工筋肉: 形状, 硬度のコントロール	101

	6.4.3	人工脂肪：体脂肪量のコントロール	104
	6.4.4	ボディ寸法の計測	105
6.5		考察	105
	6.5.1	動的人体彫刻	107
	6.5.2	アクティブヒューマノイドロボットへの実装	107
	6.5.3	人間の皮膚感覚の提示装置としての応用	107
6.6		まとめ	108
第7章		結論	110
		謝辞	113
		参考文献	115
		関連発表等	122
		付録	125

目次

1.1	身体の境界の位置的操作による分類	4
3.1	自己抱擁体験システム"Sense-Roid"の概観	15
3.2	対人コミュニケーション形態の概念図.	17
3.3	トルソ型センシングデバイスの概観とシステム構成.	19
3.4	触力覚提示ウェアの概観とシステム構成.	20
3.5	振動ユニットの概要.	21
3.6	人工筋肉による圧迫力の計測	23
3.7	Sense-Roid の実演展示の様子	25
3.8	SD 法による印象評価	27
3.9	"Sense-Roid Type-S"の概観.	28
4.1	Soft Exoskeleton Glove (Soft-G) の概観	32
4.2	細径空気圧人工筋肉（マッキベン型）の概観	33
4.3	指屈筋と指伸筋の解剖	37
4.4	Soft-G の構造	40
4.5	Soft-G の制御システム	42
4.6	Soft-G の押下/引張力の計測	44
4.7	Soft-G による連続押下の計測	45
4.8	指の姿勢変化の観測	47
4.9	示指と母指の可動範囲の三次元計測	48
4.10	剛性制御に関する実験の環境と計測結果	51
4.11	半自動装着システムを備えた Soft-G の概観	52
4.12	指固定部の人工筋肉のリング径の調節と圧搾の様子	53
4.13	半自動装着システムの動作の様子と計測環境	54

4.14	実験に用いた3種のグローブの概観と Soft-G の制御信号	56
4.15	外骨格グローブ装着時と非装着時の能動的なピアノ演奏における、指と 鍵盤の接触の持続時間（透明性）の比較	58
4.16	外骨格グローブによる受動的なピアノ演奏における、指と鍵盤の接触の 持続時間の標準偏差（打鍵の正確性）の比較	60
4.17	受動/能動トレーニング前後における楽曲演奏中の各打鍵の加速度の変動性	61
5.1	気圧制御による MHD の硬度制御	68
5.2	McKibben 型人工筋肉による MHD の形状制御	69
5.3	全身の姿勢筋と運動筋（[1]より再構成）	70
5.4	骨格筋の構造（[1]より再構成）	71
5.5	下肢後面の筋構造（大腿，骨盤，臀部の筋（[1]より再構成）	73
5.6	臀部表層の筋膜と皮下神経（[1]より再構成）	74
5.7	SHIRI 概観	75
5.8	SHIRI 筐体内部の概観	75
5.9	SHIRI の内部構成	76
5.10	SHIRI の皮膚の質感及び凹凸形状	77
5.11	Gluteus Maximus Actuator（表）	78
5.12	Gluteus Maximus Actuator（裏）	78
5.13	SHIRI システム構成	79
5.14	空気圧制御ユニット	80
5.15	エアチューブの接続	81
5.16	鼓動（平常時）パタンのタイムチャート	84
5.17	緊張-弛緩パタンの動作原理	85
5.18	緊張-弛緩パタンのタイムチャート	86
5.19	痙攣パタンの動作原理	87
5.20	痙攣パタンのタイムチャート	88
5.21	突き出しパタンの動作原理	89
5.22	突き出しパタンのタイムチャート	90
5.23	ユーザとのインタラクションの様子	92
6.1	SHIN-TAI の身体形状変化の例	99
6.2	SHIN-TAI システム構成	102

6.3	内部骨格の人工筋肉のレイアウト	102
6.4	SHIN-TAI の人工筋肉の動作原理	103
6.5	SHIN-TAI の人工筋肉の動作概観	104
6.6	人工脂肪の動作概観	106

表目次

4.1	人工筋肉駆動時の半自動装着システムの固定部のずれの距離の計測	54
5.1	SHIRI の寸法及び重量	73
6.1	SHIN-TAI の部位別周囲長の制御範囲	105
7.1	動画「SHIRI」に対する視聴者のコメント	126

第1章

序論

1.1 研究の背景

現在、社会に広く浸透した情報提示手法は、PC やスマートフォン等に代表される情報通信端末を媒体としたテキスト、音声、映像等の主に視聴覚情報を用いるものである。特に遠隔地間の人間同士のコミュニケーションにおいて、これらの言語的な情報の伝達は、意見や要件等を伝える用途においては利便性に優れた手法である。このような言語的な情報を用いる人間の基本的なコミュニケーションの用途においては、平面のディスプレイや音声の入出力インタフェースといった従来のインタフェースによって過不足のない情報の伝達が可能である。これに対し、ロボット工学、バーチャルリアリティ (VR: Virtual Reality)、オーグメンテッドリアリティ (AR: Augmented Reality)、そして人間拡張 (Human Augmentation) 等に関する研究では、相互に分野を横断しながら、多様な情報提示手法が提案されてきた。視覚や聴覚のみならず、触覚を用いた刺激提示手法が多く提案されており、更には味覚や嗅覚といった感覚を刺激する手法も模索されてきた。また、情報提示手法そのものに焦点が当てられたものだけでなく、例えば、遠隔地間のロボットを媒体としてコミュニケーションを可能とするものなど、複数の試みがなされた。このような過程は、従来の情報通信媒体によって授受される情報に欠如する、人間の身体性に着目したインタフェースの重要性に関心が集められきたことを示唆している。身体動作により生成される非言語的な身振り手振りや接触行為、あるいは身体そのものが持つ存在感は、言語的な情報において必要となる解釈の過程を省略した、直感的な動作教示や親密な者同士の感情表現等が行える点において、視聴覚情報のみでは代替できない特長がある。人間同士が間近にいる状況においては、双方で身体動作を提示し合い、時には身体接触を交えたコミュニケーションが多彩な局面において観察される。しかしながら、従来の媒体を

用いた情報提示手法は、視聴覚情報を提示する装置ならびにアクチュエータは豊富に存在するが、身体動作や身体接触等の表現や伝達を行う手法には限界があり、伝達される情報が十分なものであるとは言い難い。すなわち、現状は媒体を介することにより人間が本来持つ身体性は大きく損失する傾向にあるといえる。

近年のソーシャルロボットの普及や、VRやARの技術を応用した装着型デバイスを用いた作業支援やエンタテインメントに関連した産業に対する需要の高まりは、従来型媒体による限定された情報のやり取りから、異なる段階へ発展していくことを期待させるものである。この傾向は、従来の延長線上にある利便性をより向上させるものであると同時に、コミュニケーションの相手となる対象の実体に触れる、あるいはそれを想起させることによって、精神的な充足感をより満たすことのできるものとして注目される。従来型媒体の形態は、人間の意思がコンピュータのインタフェースが扱える記号的な視聴覚情報に置き換わったままの状態、限定的なコミュニケーションを行うことを強いられる状況であるといえる。人間の身体性が失われた媒体を用いることは、生来の人間同士が間近に居る状況におけるコミュニケーションも失われることに繋がることは想像に難くない。マーシャル・マクルーハンの有名な主張である「メディアはメッセージである (The medium is the message)」 [2] が示唆するように、所望の情報の伝達を達成するためには、媒体自体の形態に配慮する必要があると考えられる。人間にとって使いやすいコンピュータのシステムやインタフェースの概念であるユーザビリティ (Userbility) やユーザフレンドリ (User-friended) の向上を図る視点は重要であるが、その一方で人間の性質や肉体を考慮した媒体自体の新たな設計思想の確立と実装には、依然として発展の余地があると考えられる。

1.2 ヒューマノイドロボット

現在までに開発された人間に最も近い特徴を有する機械装置として、ヒューマノイドロボットが挙げられる。ヒューマノイドロボットは、古くからSF映画や漫画に取り上げられてきた題材であり、これを実現する技術に関しても長く人々の関心が集められてきた。旧来のロボットは、主に産業用途を目的として開発され、人間に不可能な作業を代替するため、硬質かつ頑丈であり、高度な性能を要求される機械という側面が強かった。一方で、そのような状況下においても、人間の作業を代行し、人間と協調することを目指した、ASIMO [3] や HRP-2 [4] といった性能重視の人型ロボットも複数開発された。近年では Boston Dynamics 社のヒューマノイドロボット PETMAN [5] において飛躍的な技術発展を遂げ、実用的な人型の"ハードロボット"として一種の到達点に達したともいえる状況と

なった。

それに対して、人間らしさや生物らしさの再現に重きが置かれ、関心が集められているのが人間とコミュニケーションすることを目的としたソーシャルロボットである。ソーシャルロボットは、実際の人間や動物とあたかもコミュニケーションしているかのような体験を提供することに着目され開発されてきた。中でも人間に非常に近い姿形を持つリアルヒューマノイド研究も盛んに行われてきた。これまでのリアルヒューマノイドは、人間と見紛うほどに姿形が精巧に作られ、旧来のハードロボットのよう運動性能は有していないものの、眼球の運動やボディジェスチャといったコミュニケーションに必要な動作が可能である。また、遠隔操作によって、実際の人間に代わって遠隔地にいる人間とコミュニケーションすることが可能なものも存在する。一方で、皮膚は柔らかい素材で成形されているが、触った際の感触は完全に人間を再現できているとは言い難く、常に一定の硬度であるという点は、従来のハードロボットと相違がない。本研究はこれまで試みられなかったヒューマノイドに欠如した要素を補完し、更には媒体としての新たな応用可能性を見出す位置付けにこの研究なりうるための提案と検証を行うことにフォーカスする。

1.3 研究の目的

本研究は如何にして情報媒体に人間の身体性を付与し、身体の感触や身体の動作を媒体によって物理的に伝達可能な一情報として取り扱うことができるかを模索するものである。すなわち、人間同士で相互に伝達される数ある感覚情報のうち、主に力触覚情報に焦点を当てた身体性の特徴を生かしたやり取りに着目する。本研究はその手法として、実世界上において物理的に制御可能な身体或いは身体部位をロボット/デバイスとして人工的に構成し、これを媒体として用いられる設計とすることで、非記号的な情報伝達が行えるシステムの実現とアプリケーションを提案する。

本研究の根本的な方針は、人間の身体の境界で生じる肉体的な現象を物理的に表現し、それを意義ある情報として人間に伝達するコミュニケーションデザインを成立させることである。従来のコミュニケーションツールとしての媒体による情報伝達は、あくまでも個々人が独りでの状況と同様であり、それぞれの身体の「境界」が独立した状態にあることが身体性が失われる一要因であった。そこで、独立したそれぞれの身体の境界に対し、双方の距離を無くすような操作ができた場合、境界同士が接したり重なり合わさったりといった「接触」や「融合」、更には人間と同様の姿形を持つ人型ロボットへの「転写」といったシチュエーションが生じることとなる(図 1.1)。このような観点から、媒体と人間の身体境界とを位置的に対応付け、身体境界で生じる現象を物理的に表現する

媒体を開発することで、従来の媒体による情報提示の不足に関する課題を解決できることに着目した。本研究では、人体に近似した構造を持った柔軟機構を用いた「ヒューマノイド媒体」によって、身体境界の物理的な表現にアプローチし、新たなコミュニケーションの形態や従来なかった情報提示手法の創出を図る。

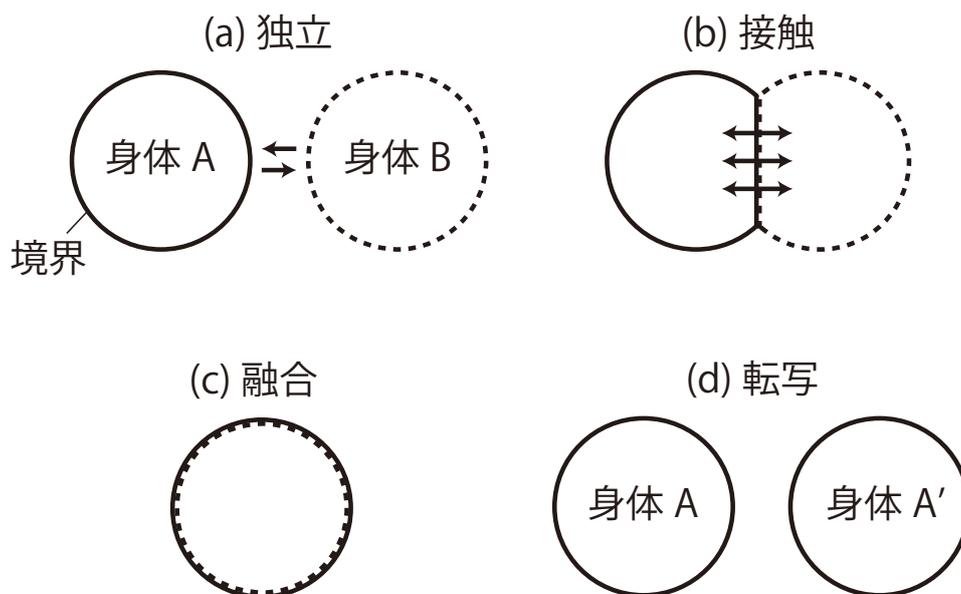


図 1.1 身体の境界の位置的操作による分類

1.3.1 Interactive Humanoid Medium (IHM) :対話型ヒューマノイド媒体

課題の実現のため、人体の解剖学的知見の参照を設計の基底とし、人体の形状、構造、動作、感触等を物理的に模倣することで人間の身体動作を部分的に再現するロボット/デバイスを開発する。これらに力触覚情報を伝達することができる媒体としての機能を持たせることで、身体動作を記録し物理的に再生可能なものとして扱うことを試みる。本研究が設計し開発する媒体の指針は、以下の特徴を同時に満たすものとしてまとめられる。

1. 人間の身体により発生する力触覚情報を伝達する媒体としての機能.
2. ソフトアクチュエーションによって人間の身体動作を再現する機構.
3. 人体を象徴する特徴を持った外観的な造形.

本研究ではこの媒体により再生される身体動作を利用することにより、新たな展開が期

待される応用先として導き出される，対人コミュニケーション，身体動作教示システム，ロボットデザインに関する各々のテーマにおいて，システムの設計と開発を行い評価する．本稿ではこれら一連のロボット/デバイスの基本概念を指して，対話型ヒューマノイド媒体 (Interactive Humanoid Medium) と呼ぶこととする．ヒューマノイド (Humanoid) という語は，「human (人)」と「oid (のようなもの)」を合成して成り立つものであり，この語単体でヒューマノイドロボットを意味するものとして用いられることもあるが，ここでは上記に挙げた機能と機構と造形とを内包し，物理的かつ象徴的に人間らしい特徴を持つことを意味する形容詞として用いている．すなわち本媒体は必ずしもヒューマノイドロボットの形態をとるものではなく，人間の身体の特定の要素を抽出した形態をとることを基本的な考えとする．以上の考えから，本研究の試みは身体の動作を再現するためのロボット工学に関わる観点と，情報伝達手法の確立とその応用としてのシステム実装を行うインタラクティブ技術に関わる観点，さらにはコミュニケーションの形態の再定義に対する試行に加え，如何にして人間の身体を造形的に表現するかという芸術的観点を併せ持つものである．

機能：力触覚情報を伝達する媒体

「1. 人間の身体により発生する力触覚情報を伝達する媒体としての機能.」に関連して記す．従来研究において力触覚提示に用いられてきたアクチュエータには様々な種類がある．電磁モータや振動板等を用いた振動刺激の提示や，直動アクチュエータ等によって物理的な力を与えるもの，電極による皮膚への電気刺激の提示等があり，主に硬質の接触面を介して行われるものである．これらのアクチュエータは普及や小型化が進んでいるものも多く，情報通信端末や VR や AR に利用する装置や設備等，幅広い種類のシステムに組み込み易いという利点がある．しかしながら同時に，刺激提示による体験のバリエーションは相応に限定的なものとなる．例えば，人間の身体動作に伴って生じる力触覚出力，すなわち刻々と変化する感触や存在感といった非記号的な現象に倣った情報提示手法については未だ向上の余地がある．

機構：ソフトアクチュエーションによる身体動作の再現

「2. ソフトアクチュエーションによって人間の身体動作を再現する機構.」に関連して記す．ロボット工学において身体動作の再現を試みることは，大半が産業用ロボットアームや人型ロボットの関節マニピュレーションの課題に変換されると言っても過言ではない．従来研究では関節のマニピュレーションの自由度の確保や角度の正確な制御といった性能が重視されるため，硬質の機構や機械式アクチュエータの設計や選定が不可欠である．一

方で、非記号的な人間の身体動作を再現するという目的においては、硬質な機構や機械式アクチュエータのみを用いた構造では、人間のような生物らしさを再現することは困難である。本研究は、従来の機械的機構を用いたロボット並びに力触覚提示のためのアクチュエータに関する課題に対し、人間の皮膚や筋肉の動作や感触に近い空気圧人工筋肉や柔軟素材等で構成することで実現されるソフトアクチュエーションを共通して用いる。これにより、人間のような生物らしい身体動作と力触覚提示とを同時に実現することを試みる。

造形：人体を象徴する外観

「3. 人体を象徴する特徴を持った外観的な造形。」に関連して記す。本研究は、実世界上に再生可能な身体をロボット/デバイスとして人工的に構成することで、非記号的な情報伝達の形式を成立させるインタラクションデザインを確立し、その応用可能性と意義を示すものである。開発するロボット/デバイスは、上述した機能と機構を満たすと同時に、人体を象徴するような外観として物理的に造形される。仮に機能と機構を満たしても、人間からかけ離れた造形であれば、使用する人間は媒体を身体として認識できない。人間がリアルな身体の一部として認識するに足る美的外観が基底にあることが望ましい。

1.4 本研究の新規性と意義

従来、力触覚提示に用いられてきたアクチュエータには様々な種類がある。電磁モータや振動板等を用いた振動刺激の提示や、直動アクチュエータ等によって物理的な力を与えるもの、電極による皮膚への電気刺激の提示等があり、主に硬質の接触面を介して行われるものである。これらのアクチュエータは普及や小型化が進んでいるものも多く、情報通信端末やVRやARに利用する装置や設備等、幅広い種類のシステムに組み込み易いという利点がある。しかしながら同時に、刺激提示による体験のバリエーションは相応に限定的なものとなる。例えば、人間の身体動作に伴って生じる力触覚出力、すなわち変化する感触や存在感に倣った情報提示手法については未だ向上の余地がある。本研究は、従来の力触覚提示のためのアクチュエータに関する課題に対し、ヒューマノイド媒体に搭載された、人間の皮膚や筋肉の動作や感触に近い空気圧人工筋肉や柔軟素材等で構成されるソフトメカニズムを共通して用い、従来試みられていなかった力触覚提示を試みている。すなわち、単に力触覚提示手法としてのソフトアクチュエータの有用性を見出すだけでなく、ヒューマノイド媒体による物理的な境界表現と、人間に対する力触覚による情報提示を同時に達成する手法を提案することに独自性がある。そして、複数のヒューマノイド媒体の開発とそのアプリケーションをそれぞれ実装し有効性を検証することで、今後普及し得る

媒体及び情報伝達手法のシーズとしての提案が行えることが期待できる。

1.5 本論文の構成

本論文では、身体境界の位置的な操作及び表現の意義と、ヒューマノイド媒体によるその具現化に関する論を展開したのち、筆者が開発した複数のヒューマノイド媒体に関する研究について詳細を記す。前節で述べた対話型ヒューマノイド媒体 (Interactive Humanoid Medium) の概念に基づき、対人の触覚コミュニケーション、身体動作教示システム、ロボットデザインに関する各々のテーマにおいて遂行されたプロジェクトの詳細について、関連する先行研究を俯瞰しつつ論じる。各々のプロジェクトを通じて得られた知見により本研究の意義を明らかにする。

第一に、独立した身体同士が接触した場合の境界で生じる現象に焦点を当てた研究として、身体接触感覚の伝達によるコミュニケーションに関する試みとして開発された、抱擁体験の記録・伝達が行えるインタラクティブシステム”Sense-Roid Series”について述べる。本研究は、ユーザの抱擁の力を検出するトルソ型センシングデバイスと、ユーザの身体に抱擁の感覚を提示する空気圧人工筋肉と振動アクチュエータを組み込んだウェアを開発し、身体同士の融合に該当する体験として、試作機では自己との抱擁を体験できるエンタテインメントシステムを実装した。実演展示等を通じて得られた知見を元に、体験型エンタテインメント及び遠隔コミュニケーションツールとしての有用性について論じる。また、試作機で明らかとなったハードウェアに関する問題点を改良する試みを図り、実用化を考慮したシステムとして実装した後継機”Sense-Roid Type-S”について考察を加え、今後の展開について議論する。

第二に、体の境界の接触及び融合に近似した状態を表現する研究として、身体の技巧動作の直接教示による技能修得に関する試みとして開発された、ソフト外骨格グローブ (Soft-G) について述べる。本研究は、人体の前腕に位置する手指の屈曲を担う骨格筋である指屈筋、指伸筋の解剖学的構造に着目し、これらの筋の動作、レイアウトを細径の空気圧人工筋肉によって模倣することで、5指で20操作自由度を持つ外骨格を実装し、力出力、応答性、姿勢や剛性の制御可能性等に関する性能を評価した。また、最も巧緻な手指の動作が要求されるパフォーマンスの一つとしてピアノ演奏に着目し、プロのピアニストを被験者とした実験を行い、既存のハード外骨格に対する優位性やピアニストが演奏可能な打鍵速度との比較検証等を行った。さらに、ピアノ演奏の訓練歴のない被験者に対し、本グローブを用いたトレーニングによって技能習得の効果があるか検証した実験について述べる。

第三に、身体の境界をヒューマノイドロボットに転写し、ロボットの新たな感情表現を試みる研究として、筋肉が作動する際に境界で生じる視触覚的变化を表現し、従来にない手法でロボットの感情表現の制御要素を付与することを目的とする「SHIRI」について述べる。調圧機構により制御される二種の人工筋肉の制御によって生じる人工皮膚の視触覚的が、ヒューマノイドロボットの身体表現や感情表現として成立し得るかを SHIRI の実装により検証した。

第四に、身体の境界をヒューマノイドロボットに転写するとともに境界の位置的操作自体を機能として応用する試みとして、脂肪量の増減により変化する身体的特徴の変化を表現し、従来にない手法でロボットの身体的個性の制御要素を付与することを目的とした「SHIN-TAI」について述べる。人工筋肉に加え、液体の流入出機構によって増減する人工脂肪を組み合わせることで、任意の特徴的な体型への可逆的に変化させることで実現される、ヒューマノイドロボットのデザインの制御可能性を SAIN-TAI の実装により検証した。開発を通じて得られた知見やオーディエンスによる反応を元に、将来のソーシャルロボットへの適用や芸術的視点から見た応用可能性について論じる。

論文の最後に、本研究で行われた身体境界を表現するヒューマノイド媒体に関する研究の総括を論じ、明らかとなった課題についても整理し、今後の展望について論じる。

第2章

身体境界に関する分類

従来の情報通信媒体による情報伝達の形態は、個々人の身体境界が分離している。つまり、自己の身体境界と他者の身体境界が独立しており、情報のやり取りをおこなう場合には二者間に距離が生じる。よって、コミュニケーションが表情やジェスチャといった視覚的に届けるもの、会話といった聴覚的に届ける手段に限定される。まず、独立した身体境界が接する状況を考えてみる。

2.1 接触

独立した境界の距離を無くし、双方が接した状況というのは、身体接触が生じている時である。身体接触を含むコミュニケーションは相手との深い交流を行う意思が明確になる。友情や親愛を伝えるには最も有効な手段一つとなり得る。その分、その意思がない状態で、相手に接触をするのは必然性や強い説得力を持った理由が無ければならず、不快感すら抱きかねない繊細な行為でもある。必然性や強い説得力を持った接触行為の例として利便性のための手段としても用いられる場合が挙げられ、道を案内等のナビゲーションや危険を促すために、身体を物理的に誘導するために接触する状況が多々ある。コミュニケーションにおいては、その微妙なバランスを取った結果、友好の意思を示す具体的な行為のスタートラインとして掌と掌という面積的には小さい部位同士を接触する行為である握手が選択される。また身体接触においては相手との関係性も無視できない。そして友情や親交が深まるにつれ、一般的に抱擁のような物理的に接触面が増えてゆく。更には特に親密な者同士においては、接吻といったような身体内の境界への侵入へと発展する。このように接触は日常生活における行為であるが、その再現は従来媒体では十分でない。

人間同士の身体動作により生じる身体接触を通じた力触覚入出力には、愛情表現や感情

表現といった人間の精神面に影響する情の発露を見出すことができる。人間が感情や愛情を伝える上で、身体接触を介したコミュニケーションは重要な手段といえる。前章で述べた従来媒体の問題点として、主に視聴覚情報のみの伝達による記号的な情報のやり取りに終始する傾向にあることを挙げた。従来の情報通信端末では代替が難しい親密な行為による身体の接触感覚を伝達するシステムを設計することで、新たなエンタテインメント体験や遠隔コミュニケーションの創出が期待される。

2.2 融合

身体境界が融合一致することが可能であると考えてみる。境界の融合は双方の境界が溶け、刻一刻と変化する身体に同期して双方が同様に作動される状態となる。身体境界の動きは、身体の動きに起因して生じる。境界は身体が呼吸を行えば微妙に形を変え、筋肉の動きに連動して関節が動作すれば大きくその姿を変える。ある境界が他方の境界と連動して変化することが、境界の融合である。境界を融合させることができると、自身の身体と他者の身体を区別することが困難になる。換言すれば、自身の身体のコピーを実世界に構築し、独立した複数の身体の状態をシンクロナイズすることができる。このようなことが可能となれば、例えば前述した注意喚起やナビゲーションを行いたい場合、会話や身振り手振りや身体接触で他者の身体を誘導する過程を省略することができ、自身の身体を動かすだけで、伝えたい情報の伝達が達成されることになる。境界の完全な融合は身体境界が常に重畳することが理想であり、本研究の媒体においては人間の身体を模した構造となることが基本となる。

人間特有の器用な身体動作には、例えば精密な作業が要求される製造業に留まらず、スポーツ、楽器演奏、絵画・彫刻といったエンタテインメントや芸術の表現にも技巧の発露を見出すことができる。前者は産業用機器や産業用ロボットで代替が可能な場合が多い。一方で後者については、高度な身体技能を習得するためには、依然として熟練者の口頭での指導や動作模倣といった訓練を重ねることが一般的である。訓練者の身体に対し所望の身体動作を直接教示できる媒体を開発することによって、これらの技能の習得を支援する有効な手法の創出が期待される。

2.3 転写

身体境界の転写の操作は、人間の身体境界内を空白にしたものを構築する操作に等しい。すなわち、ヒューマノイドロボットのボディを構築することに等しく、本操作に

よって実現されるアプリケーションとして、ロボットの皮膚の微妙な変化による身体表現や感情表現、そして姿形の変化による個性の演出が行える可能性に着目した。

身体およびその動作は、それ自体が人間の存在感を発露するものとして捉えられる。人間とコミュニケーションを行うロボットの形態に人型が採用される理由として、あたかも人間と対話しているような体験を創出できるためであると考えられる。また、絵画や彫刻の芸術においても、如何に人間の身体を表現するかという活動が歴史的に探求されてきたか述べるまでも無いであろう。従来の人間とコミュニケーションを行うことを目的としたヒューマノイドロボットの研究は、表情やボディジェスチャによって感情の伝達を行うことに主眼が置かれてきた。この手法は非言語情報の伝達と捉えることができるが、非記号情報の伝達が行えるものであるとは言い難い。表情やボディジェスチャは特定の文化で統一の解釈が存在し、よって記号的な意味合いが強く、従来のヒューマノイドロボットの表現もこのような文脈に沿った動作を生成することによって人間としての存在感や感情の伝達を試みている。一方で、生物に特有の非記号的ともいえる不随意運動や生理反応による身体の動作や表現が見過ごされがちな傾向があると考えられる。これらの要素を媒体によって伝達可能な情報として伝達することで、新たなロボットの感情表現や身体表現の創出が期待される。

2.4 本研究の位置付け

本研究ではこれらの目標を、身体境界の物理的な表現が行える媒体を開発することによってアプローチする。この接触や融合を物理的に実現する手法として提案するのが本研究が開発するヒューマノイド媒体である。身体境界で生じる現象を表現するために、人型の媒体を開発し、それにより新たなコミュニケーションの形態や従来なかった情報提示手法の創出を図る。

身体接触感覚の伝達によるコミュニケーションに関する試みとして開発された、抱擁体験の記録・伝達が行えるインタラクティブシステム”Sense-Roid Series”（第3章）は、主に境界の「接触」に該当し、更には「融合」にも関連して応用できることを示すプロジェクトであると位置付けられる。

身体の技巧動作の直接教示による技能修得に関する試みとして開発された、ソフト外骨格グローブ（Soft-G）（第4章）は、主に境界の「融合」に該当し、「接触」によって高度な身体動作の直感的な教示へと応用することができることをプロジェクトであると位置付けられる。

境界の転写に関連して遂行されたプロジェクトが、人間らしい身体の造形や動作を再現

することによるヒューマノイドロボットの新たな身体表現と感情表現に関する試みとして開発された、臀部型ヒューマノイドロボット"SHIRI" (第5章) と、身体造形をコントロールすることによる身体拡張表現に関する試みとして開発された体型可変のヒューマノイドスーツ"SHIN-TAI" (第6章) と位置付けられる。"SHIN-TAI"については、境界の位置的操作そのものが機能となる試みであるとも言え、これについては第6章にて考察を論じる。

次章より順に各々のプロジェクトの詳細について論じる。

第3章

身体接触感覚の伝達による コミュニケーションの創出

本章は、人間同士の親密なコミュニケーションとなり得る濃厚身体接触行為として抱擁に着目し、ウェアラブルデバイスによる抱擁の再現とその伝達手法について提案する。第一試作である Sense-Roid では、使用者自身の擬似的な抱擁体験を提供するシステムを開発し、ウェアラブルデバイスによって抱擁を再現するための基礎的な知見を得るとともに、自己との抱擁体験というコミュニケーション形態の意義について考察する。第二試作である Sense-Roid Type-S では、第一試作の開発過程で明らかになった技術的な諸課題に対する解決を図った。また、より汎用的な応用可能性の道標を示すべく GUI による操作インタフェースの実装を行った。最後に実装を通じて得られた知見や課題を統括し、今後の展望について述べる。

3.1 研究背景

近年のインターネットの通信環境の発展とソーシャルネットワーキング等のサービスの社会的浸透は、文字や音声や映像といった視聴覚情報の伝送による人間同士の遠隔地間コミュニケーションの機会を増大させている。一方で、直接他者と対面してコミュニケーションを行う機会は依然として失われていない。他者とのコミュニケーションのうち、現在遠隔地間では行うことが難しい行為として、抱擁に代表される身体接触を用いたインタラクションが挙げられる。身体接触は母子、成人男女、同姓同士など様々な対象同士で交わされ、安心感や信頼感を伝達する手段として日常的に用いられる。一方で身体接触が伴う行為は、相手との心理的な距離感を考慮した上で慎重に行うことが求められる。例え

ば、見ず知らずの人間であるにも関わらず、唐突に身体に接触されるようなことがあれば、瞬時に不快感を生じるものであることは想像に難くない。それに対し、そのような間柄であっても相手呼び止める意図で背中を軽く突く程度のものであれば比較的不快感は少ないであろう。このように他者と身体接触が生じる際は、対象となる相手との関係性によってコミュニケーションの効果が極端に左右されるものであるといえる。このことは、従来の心理学分野における複数の報告からも示唆される [6], [7]。すなわち、親密な間柄であれば触覚は最も重要なコミュニケーションの一つとなり得るが、親密でない者であれば著しく不快な感覚にもなり得る。

本研究では、心理的距離が最も近い対象である自分自身と触覚を用いたコミュニケーションを行うことができる状況を想定した際、人間にどのような印象を与えるものとなるか考察する。他者に行うように自己との触覚コミュニケーションが可能となることは、対象との間柄を配慮することなく、心理的に最も近い対象とのコミュニケーションを行うことが可能となることと換言でき、他者とコミュニケーションを行えない状況であっても同種の満足度の高い体験を提供できる可能性がある。そこで本研究は、自己との身体接触を擬似的に実現する触覚インタフェースを開発し、新たなコミュニケーション手法の確立を図る。

ここで、自己とコミュニケーションを想定した際、その行為について考える。触覚を用いたコミュニケーションの中で、身体が多岐な部位に渡り接触が交わされる行為として抱擁を挙げることができる。抱擁は恋人同士や家族間で日常的に行われるだけでなく、友人や知人同士、或いは初対面の人間に対する挨拶としても日常的に用いられ、国や文化を問わず世界中で広く行われている行為である。このことから、多くの人間が躊躇なく行うことができる行為であると考えられると同時に、高い親密度を伝える行為にもなり得る点が特徴である。よって前述した新たな形態のコミュニケーションを実現するにあたり、体験者の反応を観測するのに適した行為であると考えられる。

以上の考えに基づき、本研究は「対自己触覚コミュニケーション」の実現へのアプローチとして、図 3.1 に示す抱擁を再現する触力覚提示ウェアと、抱擁の際に加わる力と位置を検出するトルソ型センシング装置で構成されるシステム "Sense-Roid" を開発し、自己との抱擁体験を提供するシステムを構築した。本稿では、Sense-Roid による自己との抱擁の実現手法について述べる。また本システムは複数のユーザが体験しており、そこで観測された体験の様子や得られたフィードバックから、本システムの意義や有用性を考察する。

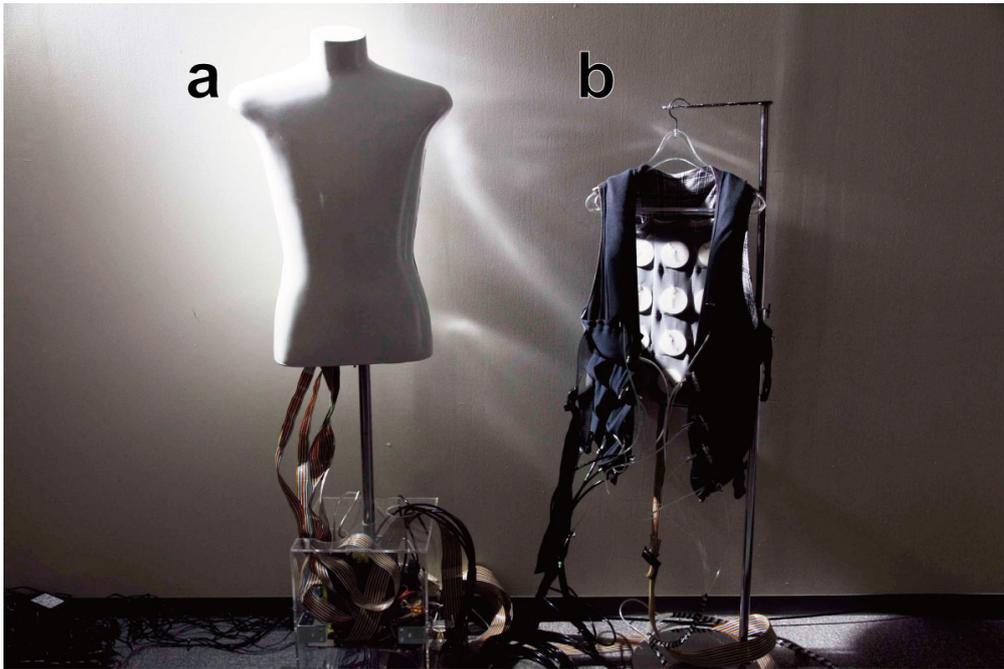


図 3.1 自己抱擁体験システム"Sense-Roid"の概観。トルソ型センシングデバイス (a) を触力覚提示ウェア (b) を装着したユーザが抱擁すると、その抱擁が自己にフィードバックされる。

3.2 関連研究

3.2.1 遠隔地間での触覚伝送

触覚伝送に関する研究はバーチャルリアリティ (VR) やヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) の研究分野で様々な方向性から盛んに行われている。その中で遠隔地の相手との触覚を用いたコミュニケーションを可能することを目的としたヒューマンインタフェースの研究も複数行われている。電磁モータや振動アクチュエータなどを用いて、遠隔間における触覚伝達を実装したものや [8], [9], スマートフォンなどの通信端末を利用するもの [10], クッションやぬいぐるみなどの日常生活に馴染み深いオブジェクトを触覚インタフェース化するという観点から論じられた研究など [11], [12], そのコンセプトと提案手法は多岐に渡る。またテレイグジスタンス研究では遠隔地のロボットとその操縦者の視覚, 聴覚, 触覚といった感覚の共有を試みている。例えば, TELESAR [13] では遠隔地にある物体の温度や, 材質の違いによる触感の差を操縦者が判別可能なシステムを実装している。他にも恋人などの親密な者同士に対象を絞り, 口唇部の感覚を伝達するシ

システムが実装されている [14], [15]

3.2.2 抱擁の再現装置

抱擁の感覚の提示をを試みた研究も従来より複数行われている。Teh らの Huggy Pajama [16] は、手元で操作するコントローラへの入力によってジャケットに組み込まれたバルーンを膨張収縮させ、身体を圧迫するシステムである。Mueller らも同様にジャケットへ空気を送り込むことによって生じる膨張によって、抱擁の再現を試みており [17]、近年では Alexandra らが同様にバルーンの挙動を制御して VR システムの実装を行っている [18]。Tsetserukou による HaptiHug [19] は PC の 3 次元仮想空間上においてユーザーのアバターを操作し、他者と抱擁した際に胸部に巻きつけたベルトの張力によって圧迫感を提示するシステムである。また DiSalvo らは抱擁のジェスチャを模したぬいぐるみを抱きしめることで、遠隔地にある同一のぬいぐるみが発光及び振動するシステム The Hug [20] を提案している。

このように従来研究では、遠隔地間の人間やバーチャルキャラクターに対するコミュニケーションを実現する目的で様々な触覚インタフェースの研究が行われている。これに対し、本研究は対自己コミュニケーションを目的としており方向性が異っている。インタラクティブアート作品で自己と他者のコミュニケーションに着目し実装された装置としては、相手と視聴覚を「交換」する Hachiya の "Inter Dis-Communication Machine" [21] は特筆すべきである。

以上のように、抱擁感覚の提示にはソフトアクチュエータを用いて実現される例が多い。一方で、伸縮制御が可能な空圧式人工筋肉を用いた抱擁感覚提示を試みた先行研究は殆ど存在しない。抱擁は身体を柔らかく締め付ける行為であると言え、従来のバルーンを用いた提示手法では、主に出力強度の面で課題がある。VR によるエンタテインメント、医療、福祉など様々な分野へ応用できる、新たな全身触覚提示機構の提案を行うことも本研究の目的に含まれる。

3.2.3 「対自己コミュニケーション」

本研究は、VR 技術をベースにして自己とのコミュニケーションという新たな形態を確立するための基盤を築くことを主たる目的として遂行されるものである。対人コミュニケーションの主な形態を示した概念図を図 3.2 に示す。対人コミュニケーションは主体である自己に対し、客体となる他者が存在することによって成り立つものである。我々が日常

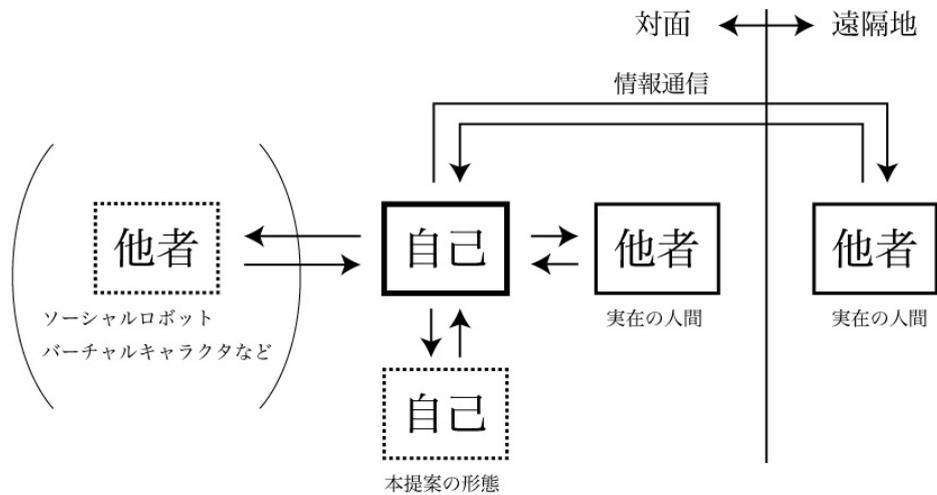


図 3.2 対人コミュニケーション形態の概念図. コミュニケーションは自己と対面の他者（人間）間，遠隔の他者（人間）間，対面の他者（ロボット等の非人間）間の形態によって成立する．本提案では自己と自己間のコミュニケーションを触覚 VR により構築する．

的に行っているのが，対面の他者（人間）間のコミュニケーションであり，会話やボディタッチがこれに該当する．遠隔の他者（人間）間は，スマートホンに代表される情報通信端末や，従来研究の触覚伝送技術やテレグジスタンス技術を用いたものが該当する．対面の他者（非人間）間は，近年発展しつつあるソーシャルロボットやバーチャルキャラクターの映像などが該当する．

触覚を用いたコミュニケーションにおいては自己は物理的に客体にはなり得ない．しかしながら，皮膚感覚を同期・共有する自己の疑似的な身体を実世界に構築することができれば，実質的には自己の触覚を主体と客体に分離させることが可能となる．この環境下では，疑似身体を抱擁することでその感覚が自身にフィードバックされることとなり，あたかも自分自身と抱擁を行っているような感覚を体験することができると想定される．

3.3 Sense-Roid の設計

Sense-Roid は，およそ成人した人間の等身大の大きさであるトルソ型センシングデバイスと，ユーザに抱擁の感覚を提示するウェアラブルデバイスである触力覚提示ウェアによって構成される．トルソ型センシングデバイスは，繊維強化プラスチック（FRP）で成形されたトルソの表面に複数のフィルム状圧力センサ（FSR）を配置した構造となっており，ユーザの抱擁の力と位置の検出を行うことができる．体験はトルソに対面して行う

ことを想定しているため、抱擁の際ユーザと接触する前面部にはセンサが配置されない。触力覚提示ウェアはベスト型のウェアラブルデバイスであり、ウェアに内蔵された複数の人工筋肉によってユーザに締め付け力の提示を行うことができる。また、触力覚提示ウェアの背面部には複数の振動アクチュエータが内蔵されている。トルソ型入力デバイスと抱擁出力ウェアはマイクロプロセッサを介して接続されており、マイクロプロセッサはPCと接続されている。トルソ型入力デバイスで記録された値に基づいて、触力覚提示ウェアがユーザの抱擁をリアルタイムに再現する。本章ではこれらの実装の詳細を記す。

3.3.1 トルソ型センシングデバイス

トルソ型センシングデバイスの概観とシステム構成を図 3.3 に示す。は等身大のマネキンの表面に 56 個の力センサ (FSR406 及び FSR402, Interlink Electronics 社製) を配置した。本デバイスにユーザが抱擁を行うことでその位置と力が記録される。センサはマネキン背面が縦方向 4 分割・横方向 3 分割の 12 ユニット、両側面が左右共通で縦方向 4 分割の 4 ユニット、両肩面が左右非共通で 2 ユニットに分かれている。

3.3.2 力触覚提示ウェア

触力覚提示ウェアの概観とシステム構成を図 3.4 に示す。触力覚提示ウェアには、抱擁の圧迫を再現のための空気圧駆動の McKibben 型人工筋肉 (神田通信工業社製) と、ストロークの感覚を再現するための振動ユニット (図 3.5) が組み込まれている。McKibben 型人工筋肉は人間の筋肉と同様に、経方向に膨張すると同時に軸方向に収縮して張力を発生する。我々はこの収縮力を抱擁感覚の提示に利用した。Sense-Roid の触力覚提示ウェアにはこの人工筋肉が胴部に 4 本、左右の肩部にそれぞれ 1 本の計 6 本がマウントされている。人工筋肉は装着者の身体に沿って取り囲むように配置されており、選択的に収縮・膨張させることで複数パタンの抱擁感覚が提示される。胴部に搭載した人工筋肉は 90 cm であり、肩部は 60 cm である。また、加圧時最大外径は約 50 mm である。6 本の人工筋肉は、それぞれマネキン型センシングデバイスの胴側部 (4 ユニット) 及び肩部 (2 ユニット) のセンサユニットと同一の部位にレイアウトされている。また、人工筋肉はエアコンプレッサからの圧縮空気を送り込むためのチューブが接続され、中間に空気流量調節のためのサーボ開閉弁が接続されている。また背部にはストロークの感覚を提示するための振動ユニットが 12 個マトリクス状に内蔵されている。これらの振動ユニットはマネキン型センシングデバイスの背面部のセンサユニットと一対一で対応している。振動ユニットの

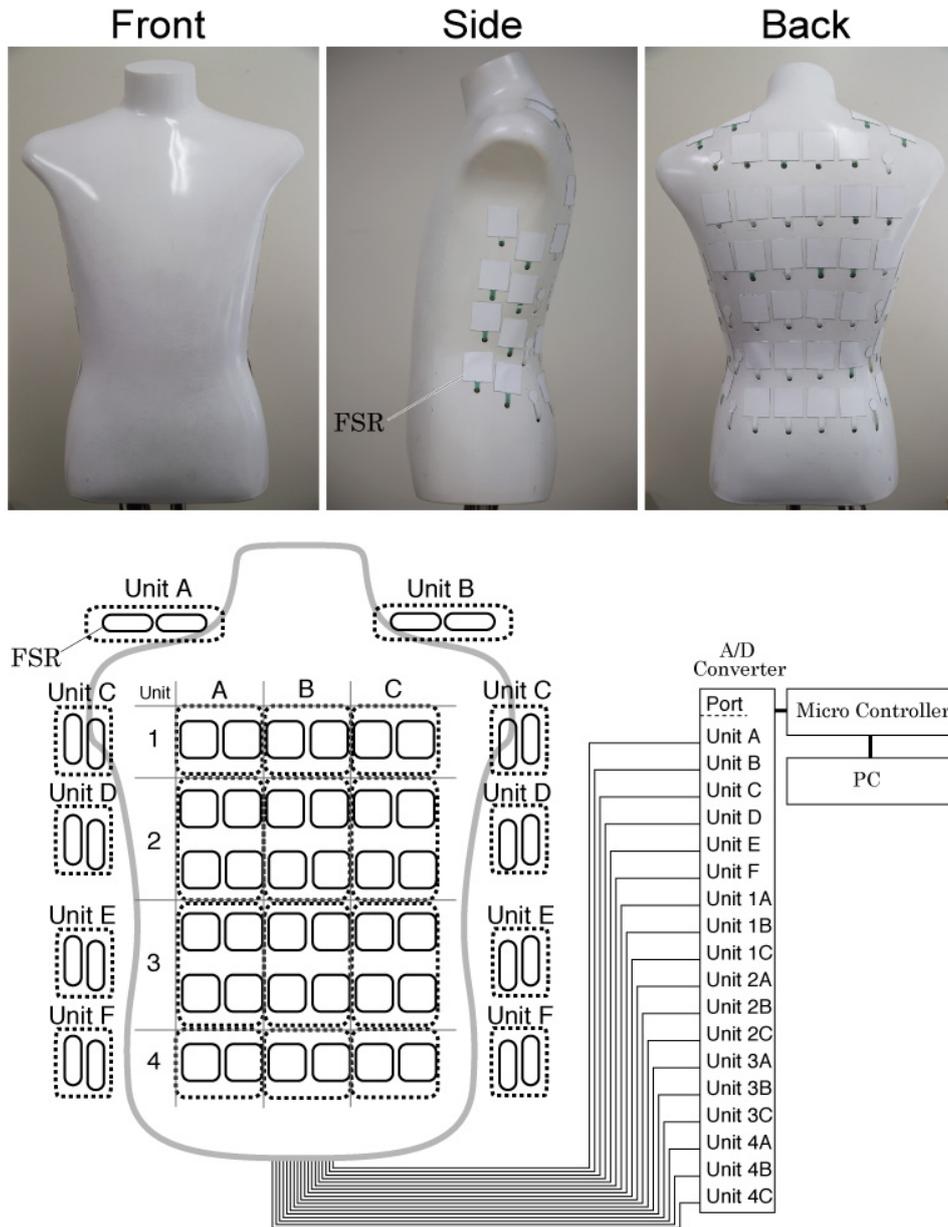


図 3.3 トルソ型センシングデバイスの概観とシステム構成。触力覚入力を肩部 2 領域，胴側部 4 領域，背部 12 領域の計 18 領域のセンサユニットによって検出する。

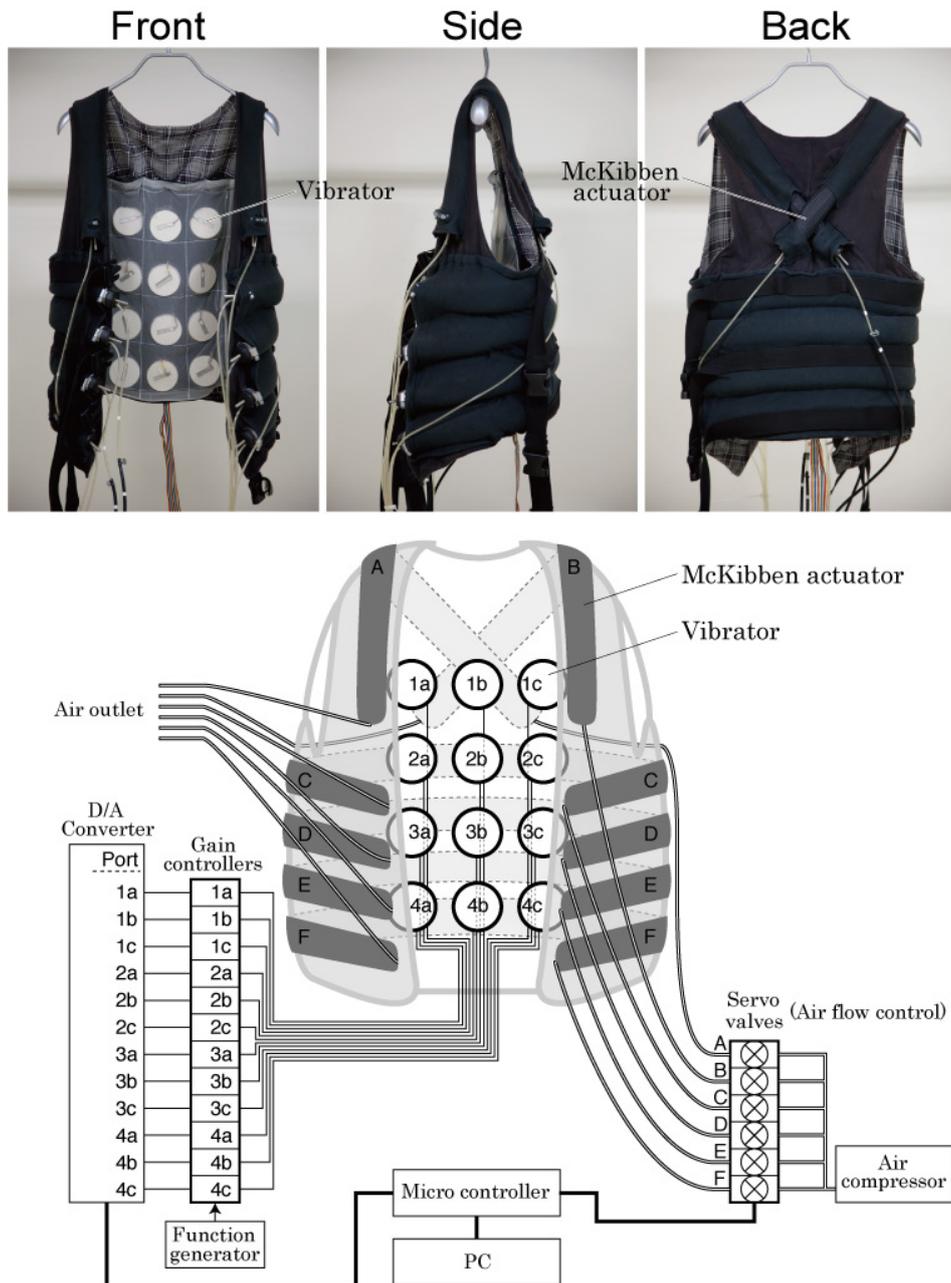


図 3.4 触力覚提示ウェアの概観とシステム構成。人工筋肉が肩部 2 本，胸部 4 本の計 6 本配置され，身体を圧迫する。また，背部の身体に接する領域には 3 行 4 列の振動ユニットが配置され，振動刺激を提示する。

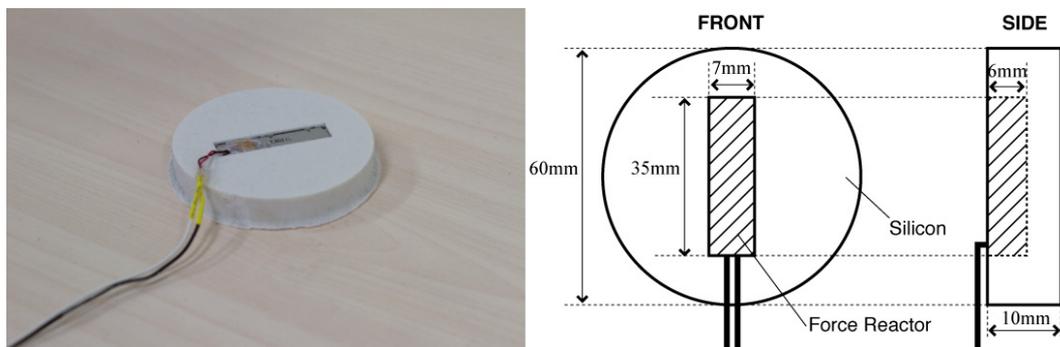


図 3.5 振動ユニットの概要。振動アクチュエータがシリコン筐体に内蔵され、身体に振動を伝達する。

アクチュエータには Force Reactor（アルプス電気社製）を用いた。ウェア重量はおよそ 2.5 kg である。

3.3.3 動作原理

Sense-Roid のすべてのセンサ及びアクチュエータはマイクロコントローラ（Arduino Mega 2560）によって制御される。マイコンはトルソ型センシングデバイスの力センサの値を元に、両側面への圧迫と背面をストロークする感覚を検出し、リアルタイムで触力覚提示ウェアを駆動させる。圧迫の強弱は、人工筋肉の内部を通過する圧縮空気の流量を変化させることによって調整される。センサの値に応じてサーボ弁の開閉角を変化させることで、圧縮空気は人工筋肉の一端へ供給され、他端から排出される。サーボ弁は有効断面積 10.5 mm^2 のボールバルブに、3D プリンタで製作したジョイントによってサーボモータを装着し、開閉角の制御を行うことにより流量を制御する機構を採用した。図 3.3 における、センサユニット A~F がそれぞれ、図 3.4 における人工筋肉 A~F に対応し連動して駆動する。振動刺激は、振動ユニットの Force Reactor に 120 Hz、振幅 10 Vp-p の正弦波信号が送られることで駆動する。アナログフォトカプラによって信号の振幅を変化させることができ、センサの値に対応して刺激の強弱が変化するため、ストロークの強弱が表現される。

3.3.4 圧迫力の計測とマッピング

McKibben 型人工筋肉は本来リハビリテーションの用途で開発されたアクチュエータであり [22]、Sense-Roid のように抱擁の感覚を再現する用途での使用は想定されていない。

そこで本アクチュエータによって出力できる力を検証する実験を行った。

触力覚提示ウェアをトルソ型センシングデバイスの肩部と胴体部に装着し、流量制御弁を 0° から 40° まで 1° ずつ開きながらそのときに提示された力を計測した。エアコンプレッサが出力する空気圧は 0.4 MPa に調圧した。力の計測はトルソ型センシングデバイス表面のセンサユニットにて計測し、本試行を3回行った。

計測結果を図3.6に示す。それぞれ肩、胴体側面、背中に提示された力を示している。横軸がサーボ弁の開角度($^{\circ}$)、縦軸が計測された力(gf)である。実験結果から、Sense-Roidが提示できる力の最大値は胴側部で 2.5 kg 程度、肩部で 4 kg 程度であった。

一方で、本計測では背部では十分な力が検出されなかった。これは計測環境上の問題であると考えられ、トルソの形状が原因となり同側部や肩部と比較して、背部へ十分に力が伝達されなかったためである。この実験により、装着者の身体に触力覚提示ウェアに十分に密着させて体験を行う必要があることが明らかとなった。よって、体験は触力覚提示ウェアの前開き部に3箇所設置されたバックルにより、強く締め付けた状態で行われる。

触力覚提示ウェアの人工筋肉による出力は、本計測結果に基づいてマッピングが行われた。すなわち、同側部と肩部で検出された力と等しい力で、体験者の身体へフィードバックが行われる。本計測実験により試行毎に提示される力のばらつきが少なく、本デバイスは安定して力の出力が行えることが確認された。また空圧式人工筋肉の動作原理から柔軟かつ力強い感触を提示することができることが特徴であると言え、出力される力の観点からも抱擁の再現に適したアクチュエータであることが確認された。

3.4 実演展示

本研究は、著者が開発した一連のロボットのうち、これまで最も多くの実演展示の機会が得られた研究である。Sense-Roidの最初の試作機が展示されたのは、第18回国際学生対抗バーチャルリアリティ大会(IVRC 2010)の決勝大会においてである。Sense-Roidの試作機は少しずつ改良を重ねながら、フランスのラヴァルで開催されたバーチャルリアリティ技術に関する学術会議併催の展示会であるLaval Virtual 2011 [23]、経済産業省・財団法人デジタルコンテンツ協会主催のDIGITAL CONTENT EXPO2011(日本科学未来館)(URL)、第19回3D&バーチャルリアリティ展(東京ビックサイト)(URL)など複数の機会での展示され、延べ数百名程度のユーザに対して実演が行われフィードバックが得ている。2019年には、異型の愛(URL)、EMTEC(URL)において展示され、浜松科学館(URL)では子供用のサイズのジャケットを製作の上展示が行われた。

実演展示の様子の一例を図3.8に示す。体験者から得られたフィードバックは個々人に

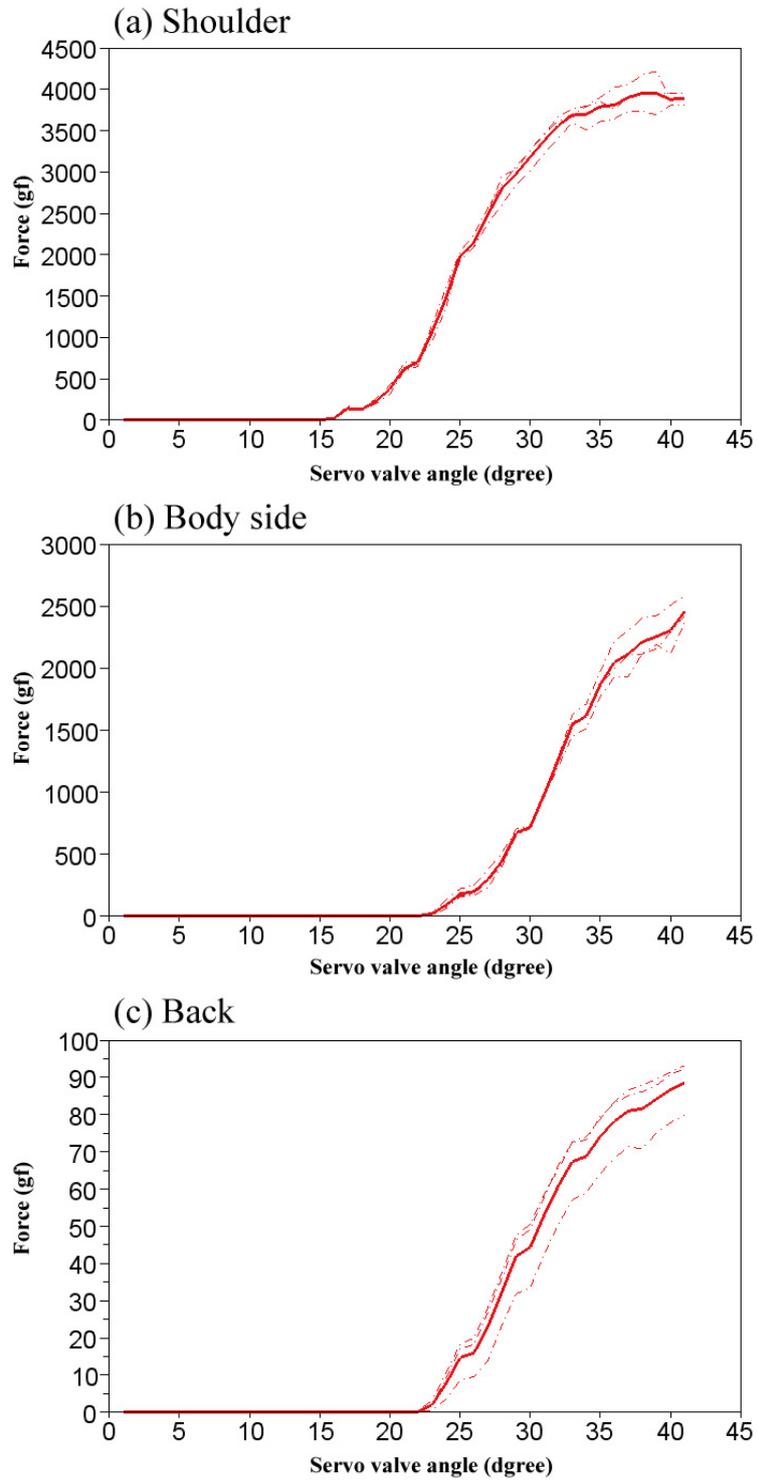


図 3.6 人工筋肉による圧迫力の計測.

よって全く異なる傾向があることが確認されており、これまでポジティブな意見とネガティブな意見が両者ともに多く得られている。フィードバックを通じて、抱擁の感覚の再現性に向上の余地があること、自分自身と抱擁体験が、実感として十分に認識されていない可能性があることが課題として挙げられた。マッサージを想起させるような「気持ちが良い」感覚があるというフィードバックがこれまで最も多数の体験者から得られた意見である。「気持ちが悪い」等といった否定的な意見に関しては、寧ろ肯定的に捉えられる面があると考えられる。なぜならば、強い抱擁のような親密度の高いコミュニケーションは、見ず知らずの間柄である他者に行われた際は本来不快感を感じるものであると考えられ、提示した感覚そのものは気持ち悪いと感じさせるほどリアリティを有していたと考えられるためである。ヒューマノイド工学における「不気味の谷現象」[24]に類似の現象が生じる体験であることも推定される。これらは今後の研究や作品製作へ展開してゆく動機としたい。体験者へのアンケートから得られたフィードバックのうち、複数回答があったものを抜粋し簡潔化した事項を以下に記す。

現状は、Sense-Roidを用いた自己とのコミュニケーションによる詳細な心理物理的評価実験は、その計測方法や実施方法の困難さの観点から行われていない。一方で、前述のように他者とのコミュニケーションのために使う様子が見られただけでなく、期せずして主に精神的治療の観点から介護や医療応用への応用に言及されることが少なくなかった。

肯定的なフィードバックの例

- 他人への抱きつき方が自分で体感できる。
- 気持ち良い。
- 落ち着く。
- 自分をマッサージをしている感覚。

否定的なフィードバックの例

- 抱擁の感覚と言うには違和感がある。
- 振動が気持ち悪い。
- 人間のような温かみが足りない。
- 頭や前面への刺激提示が無い。



図 3.7 Sense-Roid の実演展示の様子.

3.4.1 印象評価

実演展示において、Sense-Roid の抱擁体験の印象評価を SD 法により行った。「快-不快」、「かたい-やわらかい」、「強い-弱い」といった形容詞対を 21 要素使用し、それぞれ 7 段階の評価尺度にて回答を得た。被験者は 20 代-30 代の 16 名の男女に対して行われた。

図 3.8 に結果を示す。特徴的な結果としては、他者の抱擁を再現した体験が最も「感情的」かつ「敏感な」体験となることが示された。これにより Sense-Roid による抱擁の提示によって、有効な力触覚提示が行われたことが示唆された。一方で、他者の抱擁の再現は、実際の抱擁と比較して「単純」であるとの印象が顕著に現れた。現状の実装では、実際の抱擁のような細かい動きや感触の再現には至っていないといえる。また、自己抱擁の体験に関しては「かたい」かつ「大胆」であり、自分が行った抱擁との差異を認識する様子がうかがえる。これについては、抱擁の力の同期が違和感の無い程度に十分に再現がなされておらず、自身が行った抱擁よりも強い強度の抱擁で締め付けられる感覚となっていたと想定される。これについては、力を同期させるようなフィードバックループによる制御を組むなど解決策が複数考えられるが、「楽しい」や「好き」といった印象が最も大きくなった点は注目すべきであるといえる。必ずしも抱擁の力や感触の再現が不十分であることが、体験としての良し悪しに繋がるものではないことを示唆していると考えられる。

3.5 考察と課題

本章では、自己との抱擁を擬似的に再現するシステム "Sense-Roid" の詳細について述べた。トルソ型センシングデバイスの検出精度や触覚提示ウェアの再現性に関しては議論や向上の余地が残る結果となったが、對自己触覚コミュニケーションを実現する一手法の提案と実装を行い、ユーザ参加型の実演環境を構築した。

本システムの体験者の様子の観察やフィードバックを通じ、身体に対して心地良い刺激の提示や安心感が他者を頼ることなく生起させられることを示唆する、複数の肯定的な意見を得ることができた。このことから、第一にセラピー用途として応用が期待できるのではないかと考えられる。本システムのインタラクションデザインは自分自身との抱擁であったが、同一の構成で二者間で行うコミュニケーションに用いることも可能である。事実、実演展示において片方の体験者が触力覚提示ウェアを装着し、もう片方がトルソ型センシングデバイスに抱擁を行い、間接的に両者が抱擁に興じる様子が多く確認された。またセンサの値を記録しておくことで、そのデータから触力覚提示ウェアを駆動させること

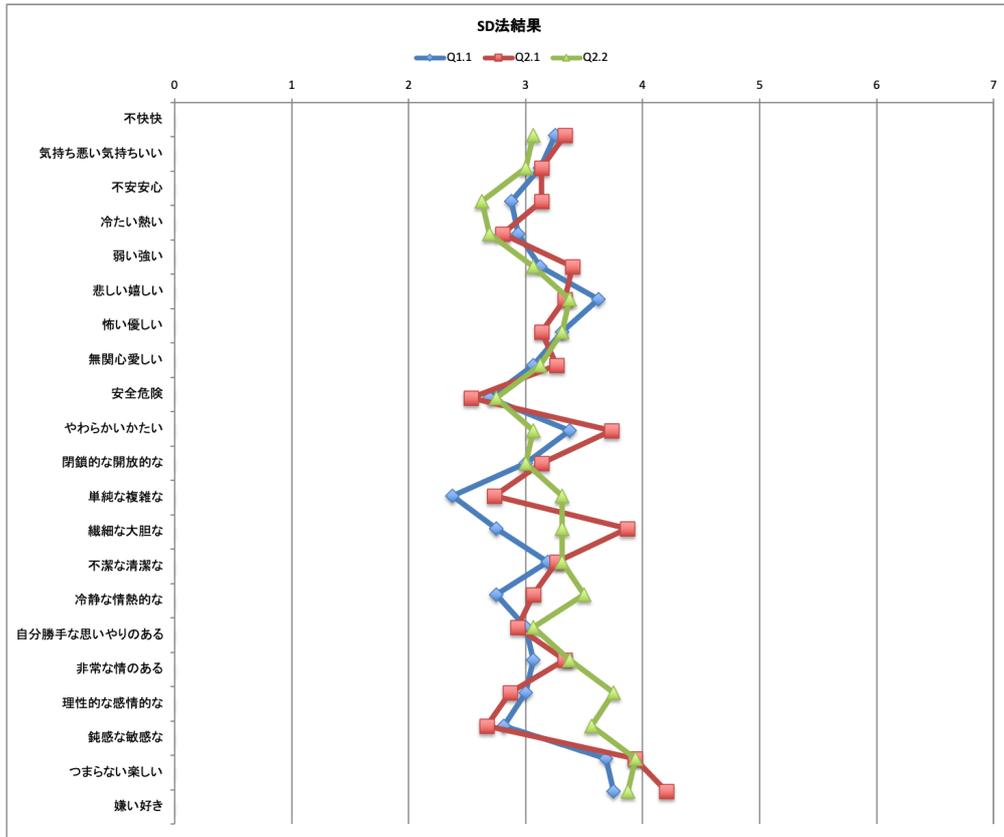


図 3.8 SD 法による印象評価. 青線：実抱擁との比較による印象，赤線：自己抱擁の印象（抱擁のリアルタイムフィードバック），緑線：他者抱擁の印象（記録された抱擁データの再生）. 評価尺度はどちらでもない（3）を中央値とし両側へ順にやや（2, 4），かなり（1, 5），非常に（0, 7）の7段階で評価した.

ができ、本システム環境を遠隔地間において複数構築すれば、遠隔で抱擁を伝達する用途にも対応ができる。異なる相手、場所、タイミングにおける効果の比較検証を詳細に分析することが今後の課題である。引き続き、抱擁の再現性や入力検出精度向上を図るとともに、対人コミュニケーションツールとしての有効性、有用性を詳細に検証し、視覚や聴覚を組み合わせた体験型エンタテインメントとしての品質向上、医療福祉分野への応用可能性を探究する所存である。

3.6 Sense-Roid Type-S: 人工筋肉ニットと空気圧バルーンを用いたハードウェア的改良

本章の最後に、現在まで2号機として開発が進行している"SENSE-ROID TYPE-S" (図3.9)の概要について簡潔に紹介する。"SENSE-ROID TYPE-S"は、2機のウェアラブルデバイスによって触覚入出力を行えるシステムである。再生ウェアは、空気圧式の細径人工筋肉がニットの毛糸のように編み込まれる形で構成される。編み込まれた人工筋肉を選択的に駆動することで、装着者の身体への触覚提示を行うことができる。記録ウェアはゴムシートで成形されたウェアに、内圧の変化を検出する空気圧バルーンが複数貼り付けられる形で構成される。空気圧バルーンは力センサとして機能し、入力ウェアを装着したユーザやトルソなどのオブジェクトに対して与えられた力と位置を検出することができる。出力ウェア、入力ウェアともに胴体の広い領域において入出力をカバーするため、タッチやハグなどの上半身を用いた触覚情報の入出力、すなわち記録と再生を行うことができる。今後も、本システムによる触覚提示や検出精度に関して詳細な検証を行うとともに、VRシステムや遠隔コミュニケーションツール等のアプリケーションの実装を図ってゆく。

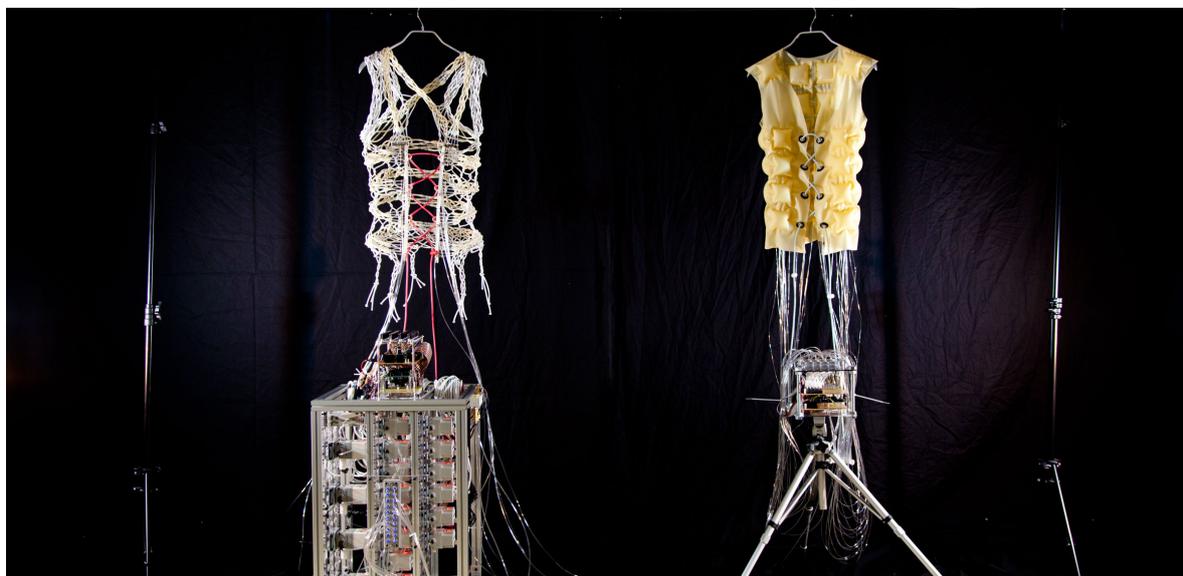


図3.9 "Sense-Roid Type-S"の概観.

第4章

手指の巧緻な動作の教示による 技能の習得

楽器演奏やスポーツなどを行う際の身体動作には、俊敏さや正確さが厳しく要求される。これらの技能を向上させるためのアプローチの一つとして、熟練者の動作を模倣し、繰り返し練習を積む方法が挙げられる。しかしながら、特に手指の動作はその複雑さゆえに、口頭による指導のみでは訓練者が熟練者を再現することに困難が伴う。この課題に対する解決手段の一つとして、指導したい手指の動作をパワーアシストデバイスによって教示する方法が考えられる。熟練者の手指における力加減や正しい姿勢といった所作を、訓練者の身体に再現できるロボットグローブの開発は、技能習得のために有効な新たな手法の一つとなり得る。

本章では、人間の身体動作を直接身体に伝達することによって、技能の習得や拡張を行うことを目的として開発された、外骨格グローブについて述べる。本研究は先に述べた、ヒューマノイド（身体模倣）媒体による人間拡張に対する試みとして行われた研究であり、人間の能力を拡張する装具として活用することの、潜在的可能性を見出すためのものである。本研究の外骨格グローブは、解剖学的知見を参照し、その選択的模倣によって設計・開発された。ここではその一連のプロセスの詳細について述べる。また、性能評価実験とユーザ評価実験を通じて導き出された有用性や課題について述べる。

4.1 ソフト外骨格グローブ (Soft-G) の概要：手指の巧緻動作の教示

本研究は、ユーザの随意運動に対する拘束を最小限に抑えつつ、精密で繊細な手指の動作のコントロールやサポートの実現を目的としたソフト外骨格グローブである、Soft-Gを開発した。Soft-Gは、手指の伸展を担う前腕の骨格筋に関する解剖学的知見に基づいて、ユーザの指の前後面に2本ずつ、計4本の人工筋肉が取り付けられる装具であり、様々な指の姿勢や動作を制御することができる。この特徴的な構造により、片手の全ての指を合わせて20の操作自由度を有する。併せて、ユーザごとに異なる手の形状やサイズに対しても適当かつ容易に装着・固定できる、半自動装着メカニズムを開発した。

Soft-Gによって受動的に生成される指先の静的な押下力は8N、伸展運動によるタッピングの速度は、1指によるものでは秒速10回(10 Hz)、5指全てを用いるものでは25 Hzである。また、前面と後面の人工筋肉(屈筋と伸筋)の相互収縮による拮抗を応用した剛性制御によって、タッピングの力を最大1.5倍まで増加させることができる。

既存の2種のハード外骨格を比較のために使用して調査した実験では、Soft-Gが最もユーザの能動的動作の妨げにならないことが示された。また、受動的に生成される指の屈伸動作の速度が最も高速であることが示された。これらの結果は、いずれもプロピアニストが装着して行われた評価実験で明らかとなった。

最後に、Soft-Gに運指をプログラムし、ピアノの鍵盤を自動的に打鍵して曲を演奏する学習システムを構築した。ピアノ演奏の学習経験が浅いユーザに対し、Soft-Gによる学習前と学習後の演奏結果を比較したところ、学習後において、打鍵動作の変則性の要素が減少することが確認された。Soft-Gを用いた能動的な動作教示による学習が、ピアノの演奏のように連続した指の打鍵を、一定の力によって適当にコントロールすることに効果があることが示唆された。

4.2 研究背景

外骨格とは、端的に述べれば、人間が所望の動作を行う際にサポート力を付与する、身体に装着することができるロボットである。身体内部にある筋肉や骨格が担うメカニズムを、外部にも人工的に設けることで、個々人の筋力だけでは不足するような状況において、力を増強することができる。数ある外骨格の中で、グローブ型の手指外骨格は、手先の器用な動作を必要とする作業をサポートするために、精密で繊細な制御が要求される。すな

わち、力のサポートだけでなく巧緻な動作をサポートする性能が要求される場面が多くある。従来手指外骨格は、主に失われた身体機能の代替としてサポートが行えるツールとして活用する、リハビリテーションを目的として開発されてきた経緯がある [25], [26]。近年においては、VR コンテンツ等と連動する触覚フィードバックやフォースフィードバックのための手段として、人間の指に直接かつ正確に相互作用する手指外骨格が複数提案されてきており、研究開発としてのみならず、産業的にも受け入れられつつある状況であるといえる。例えば、VR グローブとしては比較的歴史のある CyberGrasp [27] だけでなく、EXOS [28] 等もまた、コンシューマユースを対象とした製品として市場に出ている。しかしながら、これまでの研究されてきた外骨格は、ユーザの能動的な手指の動きの妨げにならないメカニズムと、軽量性を併せ持ったハードウェアデザインを成立させることに関しては課題があり、人間中心設計と巧緻動作のサポートを両立させることに対して、従来技術は十分であるとは言い難い状況にある。

これまで述べた諸課題や技術的限界を克服し、リハビリテーションや VR のためのツールのみならず、ヒューマン・コンピュータ・インタラクション (HCI)、楽器演奏やスポーツのための技術習得、医療手術等の分野に適用できる基盤手法を築くために、本研究は人間の指の解剖に倣った機構を持つ新たな外骨格の開発を試みた。この設計方針に基づく新しい外骨格グローブによって、第一に、ユーザの随意運動の妨げにならない透明性があり、俊敏性かつ十分な力出力を備えつつ、多自由度のコントローラビリティによって、巧緻な動作の生成やサポートが行えると考えた。なお、本研究で示す外骨格グローブの透明性とは、素手に近い装着感であることと定義し、透明性が最も高いのは身体に何も装着していない時の状態とする。第二に、所望の指の動作の習得が望まれるユーザに対し、外骨格グローブの駆動によって直接的に動作の教示を行うことで、巧緻な指動作をコントロールするスキルの訓練と習得に用いることができると仮説を立てた。

本研究は、これらの仮説が外骨格グローブによって実現可能かを検証するために、器用な指の動作が求められる代表的なモデルの一つである、ピアノ演奏のスキルをターゲットとした。すなわち、本研究は、身体の自然な動きのを妨げることなく精密で繊細な手指へのフォースフィードバックを提示するとともに、スキルを習得するための直感的なガイダンスを実現する外骨格グローブを掲げ、その潜在的意義を提案するものである。

Soft-G の概要を図 4.1 に示す。Soft-G は、装着したユーザの随意運動に対する拘束を最小限に抑えつつ、多自由度の指の屈曲動作を生成できるソフト外骨格グローブである。Soft-G は図 4.2 に示した軽量かつ細径の空気圧人工筋肉 (マッキベン型) を用いた。この人工筋肉は最大 0.4 MPa の圧縮空気を端から供給することで、最大約 20N までの張力が発生する。直径は約 2.5 mm であり、Soft-G に用いられた長さの人工筋肉 1 本の重量は

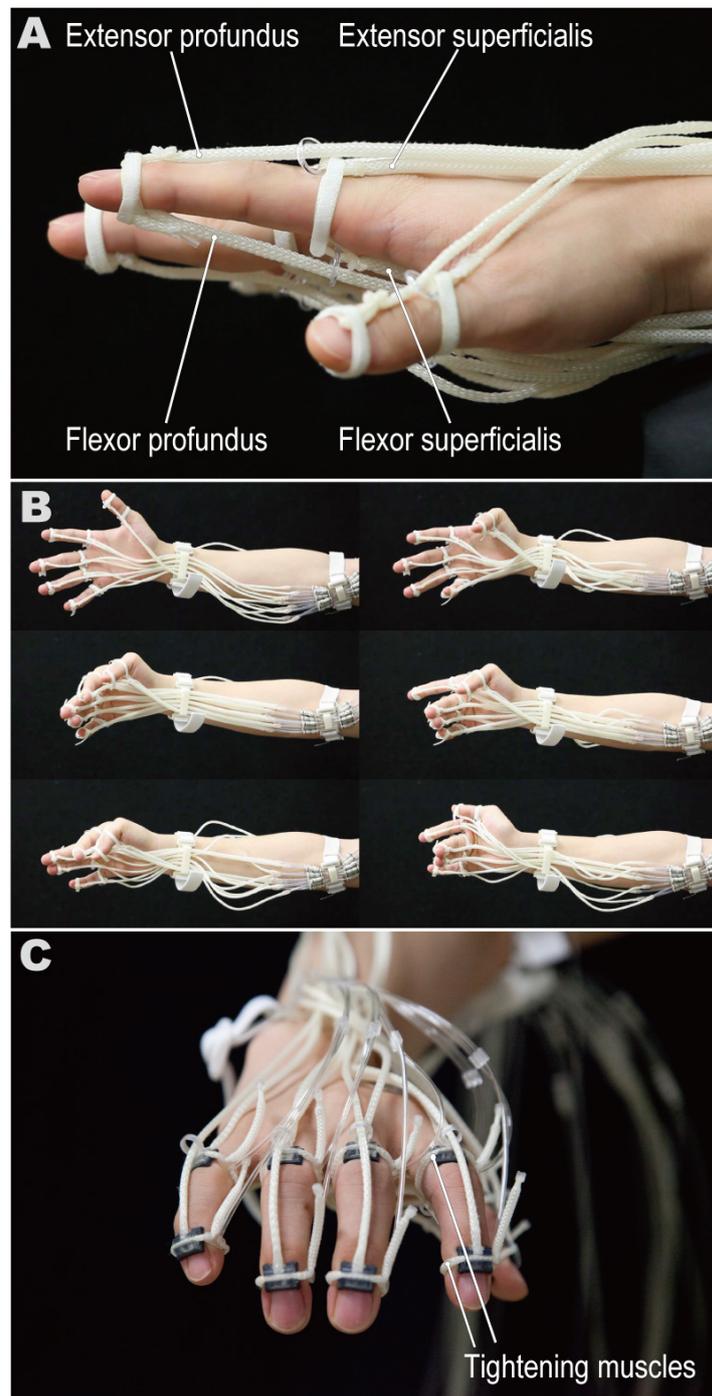


図 4.1 Soft Exoskeleton Glove (Soft-G) の概観. (A) Soft Exoskeleton Glove (Soft-G) の概観. 人間の指の屈曲に関する骨格筋の解剖学的構造に近似して、4本の細径空気圧人工筋肉が装着される. (B) Soft-Gは、20操作自由度のソフト外骨格となっており、受動的に様々な指の姿勢を生成することができる. (C) 人工筋肉を用いてグローブを身体に固定する、半自動装着システムの概観.

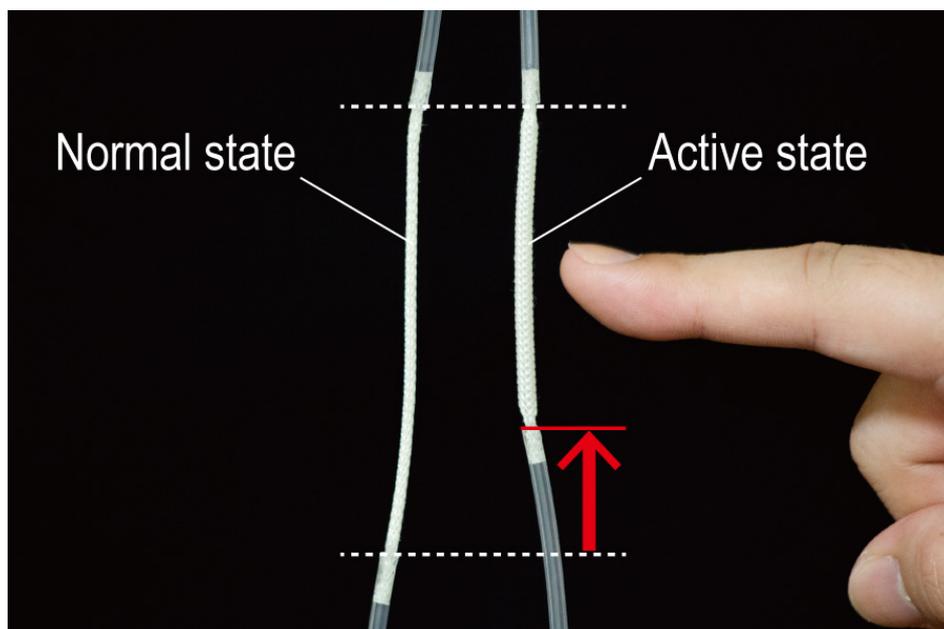


図 4.2 細径空気圧人工筋肉（マッキベン型）の概観。通常状態（左）と駆動時（右）の人工筋肉の様子。圧縮空気を供給することで、軸方向に収縮し張力が発生する。

2 g 以下である。図 4.1A に示すように、Soft-G の人工筋肉はそれぞれの指に対し 4 本ずつ配置される形となっており、指の前面と後面に対となった人工筋肉が 2 ペア固定され、前面の 2 本の人工筋肉は屈曲方向へ、後面の 2 本の人工筋肉は伸展方向へそれぞれ力を生成する。すなわち、手指の屈筋と伸筋としての機能を担う。これらの人工筋肉によって、それぞれの指を独立して様々な姿勢へ変化させることができる。この構造を 5 指全てに実装した結果、図 4.1B の動作例に示すように、片手で 20 操作自由度の外骨格グローブとなった。身体に近位の人工筋肉の片端は、手首部に取り付けられる 3D プリントされた鞘のパーツを介して、肘部の固定パーツに接続されている。これらの鞘や固定パーツの配置を工夫することで、実際の人間の骨格筋の経路に沿って、人工筋肉を外骨格に這わせることができる。Soft-G は、人間の解剖学的構造と同様に設計されており、人工筋肉は実際に人間が指の屈曲や伸展を行う際に動かす前腕の骨格筋に倣った経路となっている。このように人間の指の動作原理に倣い、かつ装着部にシンプルなメカニズムを採用した結果として、グローブを装着する際の機械的拘束が最小限に抑えられ、ユーザの随意運動を妨げない外骨格となった。

以後、関連する研究を紹介したのち、Soft-G の実装の詳細について述べ、一連のデバイス評価実験から得られた結果に基づいて、Soft-G の主要な性能について論じる。押下と引張の力、連続押下速度（俊敏性）、姿勢制御、剛性制御に関する評価実験に加え、図 4.1C

に示した，身体への強力な固定と装着を容易とする半自動装着システムについて説明したのち，ピアニスト参加実験による Soft-G の透明性や，ピアノ演奏における巧緻な打鍵動作のコントロールを行うためのスキルの習得可能性について述べる。

4.3 関連研究

4.3.1 ハード外骨格グローブ

パワーアシストが可能となる外骨格グローブの研究は，身体的にハンディキャップのある人や運動障害を患った患者の機能を回復すること，例えば一般的に高齢者のように力が弱い人々のサポートを行うこと等を目的として実に多くの試みがある。これらの外骨格グローブの多くは，電磁モータを用いたリンク機構等によって構成されており，エアシリンダ等の直動アクチュエータが用いられることもある [29], [30]。硬質な部材やアクチュエータが用いられ，メカニカルな機構によって組まれたハード外骨格グローブは，高い力出力が生成できるとともに，関節の角度や位置を高い精度でコントロールができること等，多くの利点がある。しかしながら，ハード外骨格グローブは，物理的にそれ自体がユーザの能動的な動作を阻害しがちとなる。仮に，バックドライバビリティを備えた機構により対策を行っても，グローブの重量の問題等も生じることとなる。また，5本全ての指を機械的にサポートすることができるシステムが多くの研究によって提案されているが，重量が重くなるため，環境設置型のシステムとする必要があるものも多く，ウェアラブルなグローブとして利用することができない [31], [32]。一方で，デバイスの小型化を試みるほど，生成できる力の出力に限界があり，かつ制御の自由度が比較的小さい設計にせざるを得ないと考えられる [33], [34]。

4.3.2 ソフト外骨格グローブ

軟質な素材で構成されたソフトアクチュエータを利用することは，前述の硬質な機構で組む設計にはない，いくつかの利点がある。例えば，比較的軽量である，ウェアラブルのための設計を行い易い，素材自体のバックドライバビリティにより運動に対する機械的拘束が少ない，といったことである。ソフトアクチュエータを用いた駆動システムは複数存在する。例えば，空気圧で駆動する人工筋肉（Pneumatic artificial muscles: PAMs），筋ワイヤ，電気活性ポリマー（Electroactive polymers: EAPs）を用いた高分子人工筋肉，など様々である [26], [35]。これらの中で空気圧駆動型の人工筋肉は高い柔軟性があり，エアの供給源を除けば特別な環境設置型のデバイスを必要としない。ゆえに，実用を考慮する

場合、最も理にかなったアクチュエータと一つであるといえる。

ソフトアクチュエータを用いた外骨格グローブに関しても、空気圧で駆動する人工筋肉であるマッキベン型人工筋肉を用いたもの [36]、同様に空気圧で駆動する、繊維強化構造を備えたシリコンで成形された高分子素材を用いたもの [37], [38]、あるいは電磁モータ等を使用する筋ワイヤによるものなどがある [39]–[42]。これらのソフト外骨格の研究は、特にリハビリテーションのために有用なアプリケーションを提案しており、軽量であるため、運動障害を患った患者に対する物理的な制約が抑えられている。一方で限界も存在し、例えば力の出力の大きさや自由度が不足する傾向にあること等、潜在的な課題が存在する。

4.3.3 VR と人間拡張におけるフォースフィードバック

近年、人間の能力を拡張するために、VR システムに統合された触覚フィードバックやフォースフィードバックが行えるグローブに関する研究事例の数が増えている [43]。その多くは電磁モータや振動モータを用いるものであるが、その他の代表例としては、ワイヤの張力を利用したシステムや [44]、PHANToM [45] を利用するシステムを始め、電気刺激 [46] や空気圧人工筋肉 [47] や静電ブレーキ [48] を用いるものも存在する。その他にも、動作の教示や人間拡張に関する試みとして、楽器演奏のスキルに関するものを挙げると、振動刺激によって動作のガイドを試みた研究や [49], [50]、前腕に電気筋肉刺激 (Electrical muscle stimulation: EMS) パッドを貼り付け、強制的に筋肉の収縮を生じさせることで指の屈曲をコントロールし、演奏のアシストを試みた研究がある [51], [52]。

人間の指は屈曲と伸展の両方に対して高い機動性があるが、従来研究における手指外骨格による指の可動範囲には、物理的に制約がある。その理由の一つとして、実装する手掌のスペースが限られていることが挙げられ、多くのシステムが屈曲あるいは伸展のどちらかの機能に限定される。加えてこれらのデバイスもまた、パワーアシストという観点から述べれば、実用に不可欠な可動範囲と力強い指の動作を生成するためには、出力強度、応答性や俊敏性、随意運動に関する制約に関して、さらなる機能の改善が必要である。随意運動に関する制約については、典型的に EMS を用いたシステムがその他のアクチュエータを用いたグローブに比較して優れている。ところが、EMS はグローブを装着せずに関節を駆動できる利点があるものの、すべての指の屈伸を制御するためには個々人で微妙に異なる筋肉の位置を推測して、電極を貼り付けるという非常に緻密な調整が必要となる。また、強い力を出そうとすると高い電気刺激を提示する必要があり、ユーザが痛みを感じるなど、不快な感覚が生じがちである。さらには、デバイスによる動作の生成が、人間に

とっていわば不意打ちともいえる感覚となりがちであり、過剰に強制力の高い提示となり得る傾向にあることが報じられており [53]、この問題に対する解決が待たれている状況である。

4.3.4 手指の巧緻動作の制御と学習

数多くの研究が、巧緻な指の動作を生成するための基礎となる、神経生理学的なメカニズムと生体力学的な原理について調査している [54]。ピアノの演奏は、高速かつ巧緻な指の動作が発揮されるパフォーマンスの一つであり、それぞれの指の独立した動作、姿勢、そして力の加減を、空間的にも時間的にも正確にコントロールすることが要求される [55]。このような高度な運動技能を習得するためには、一般的に複数年に及ぶ広範なトレーニングが必要であり、例えば局所性ジストニアのような、運動障害が引き起こされるリスクをも孕む [56]。しかしながら、どのようにそのような巧緻な運技能を習得することが、最も理想的な手段であるのかについては、依然として手法が確立されていない。したがって、外骨格がピアノ演奏のように、複雑な指のパフォーマンスの技能習得へ導くツールになることができれば、教育や臨床応用に有望であるが、従来このような試みは検証されてこなかった。

4.4 前腕の解剖学と Soft-G への反映

4.4.1 指屈筋と指伸筋に基づく設計方針

Soft-G は、人間の前腕に存在する指の屈曲と伸展を担う骨格筋に関する、解剖学的構造の知見の参照と選択を通じて、設計が進められた。図 4.3 に人間の前腕における手指の屈曲と伸展に関わる主要な筋肉の概要を示す。手指の関節結合された屈曲と伸展に関係する主要な骨格筋の多くは、他端が肘近傍まで伸びる構造となっている。この構造は、最大収縮率に限界がある筋肉において、収縮変位長の距離を確保し、指を広範に動かすために効果的である。そして、母指の特殊な構造を除き、他の 4 指全てに深指屈筋 (Flexor digitorum profundus) と浅指屈筋 (Flexor digitorum superficialis) が存在している [57]。深指屈筋は DIP 関節 (遠位より第 1 関節) 近傍に結合され、浅指屈筋は PIP 関節 (遠位より第 2 関節) 近傍に結合される。深指屈筋は PIP 関節近傍で、浅指屈筋を貫通するような形で交通し、共に重なり合うようにして MCP 関節 (遠位より第 3 関節) を通過し肘の方向まで伸びる構造となっている。この長短両方の筋肉が相互に駆動することで、巧緻な指の力や姿勢のコントロールが行われる。母指においても、長母指屈筋 (Flexor pollicis

longus) と短母指屈筋 (Flexor pollicis brevis) が、それぞれ深指屈筋と浅指屈筋に相当する筋肉として存在しており、全ての指は、いわば複数の操作自由度を持ったメカニズムによって屈曲が生じる。伸筋には屈筋ほど複雑な構造は見られないが、母指、示指、小指には屈筋と同様に複数の独立した筋肉が確認できる。

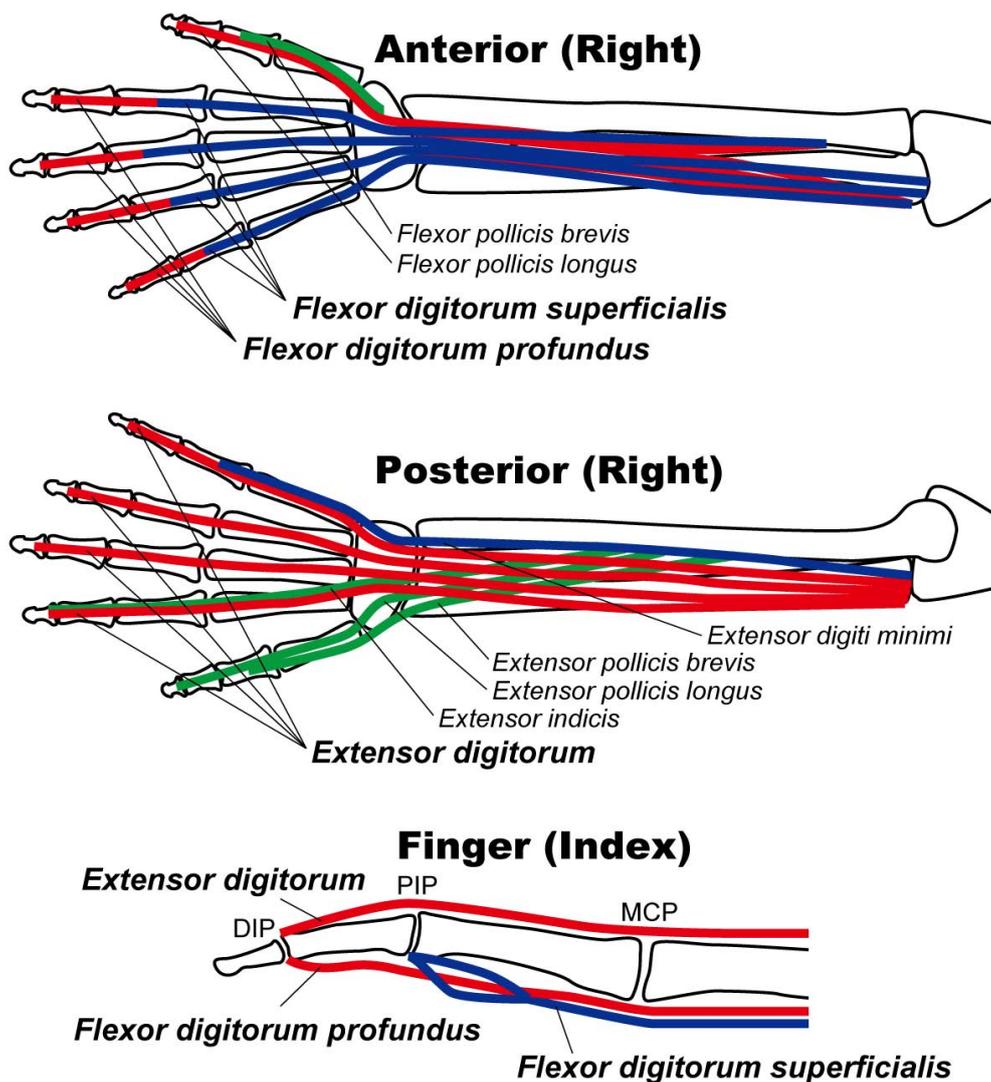


図 4.3 指屈筋と指伸筋の解剖. 右手の指屈筋と指伸筋の解剖の概略. 浅指屈筋 (Flexor digitorum superficialis) は PIP 関節近傍に接続され、DIP 関節近傍には深指屈筋が接続されている。浅指屈筋の遠位は鞘のような構造が確認でき、そこに深指屈筋が交通する構造となっている。

Soft-G の設計の基礎は、これらの指屈筋と指深筋の生体力学的な構造に基づいており、調査の限り、このような設計手法を採用した外骨格は他に確認されていない。この設計に

よって、様々な指の姿勢を生成することが可能となる。また、人間の指の動作原理に倣うことで違和感のないサポート力を提示するとともに、グローブを装着する際の機械的拘束を抑え、ユーザの随意運動を妨げない外骨格を実現することを意図している。

4.4.2 細径のマッキベン型人工筋肉

上述した指の筋肉の解剖学的構造を、外骨格へと適応して実装するために、Soft-G に用いるアクチュエータは空気圧人工筋肉の一つである、マッキベン型人工筋肉 (McKibben artificial muscle) を用いた。マッキベン型人工筋肉は、所定の角度で編み込まれたスリーブと、その中に挿入されるゴムチューブで構成されるシンプルなアクチュエータであるが、気体や液体によって高い圧力をチューブ内に供給することで、瞬時に収縮が生じ高い張力を生成させることができる。このアクチュエータ自体が本来有するコンプライアンス、すなわちバネのようなしなやかな特性を有しているため、電磁モータによるワイヤの引張と比較して身体への負荷が小さく、特に専用の制御システムを設けること無く、バックドライバビリティを持った自然な張力を発生させることができる。従来研究されている、最も細径のマッキベン型人工筋肉として直径 2 mm 以下のものがあり、スリーブ内部のチューブ外径は約 1.3 mm である [58]。人工筋肉に接続されたエアチューブを介して、駆動源である圧縮空気が供給されるため、ユーザの身体に機械的なアクチュエータ等を配置する必要がない。また、その厚みと重量に対して、高い張力を発生させることができるアクチュエータであるため、Soft-G のように指の皮膚上の限られたスペースに、複数配置する必要がある設計に適する。

4.5 設計と実装

4.5.1 Soft-G の構造

図 4.4 に、開発された Soft-G の構造の全体図を示す。深指屈筋と浅指屈筋を模した人工筋肉が前腕の前面に、同様に後面に指伸筋が前腕の後面に配置されており、それぞれの指に 4 本の人工筋を用いた。実際には後面の示指、中指、薬指においては浅筋に該当する指伸筋は存在しないが、単に模倣するだけでなく制御自由度の向上を図るため、一本の指に対し深・浅指屈筋と深・浅指伸筋を実装した。これにより 1 本の指に対し 4 の操作自由度があり、片手の 5 本の指全てを合計すると、20 操作自由度の外骨格グローブとなっている。人工筋肉は両手のすべての指に実装され、これを合計すると 40 操作自由度となる。「操作自由度」としたのは、一般的に電磁モータを用いる外骨格の関節は回転方向を 1 自

自由度として捉えるため、これに従えば、Soft-Gの制御自由度は10となるが、後述する剛性実験では前後面のそれぞれの人工筋肉を独立的かつ協調的に制御することで、指の姿勢や剛性の制御も可能としている。よって、Soft-Gにおいては実質的な制御自由度は20であると捉え、本研究における自由度数はアクチュエータの数として定義し、操作自由度と記すこととする。

深筋と浅筋に対応する人工筋肉の身体遠位の片端は、それぞれ指のDIP関節とPIP関節の近傍にベルクロバンドによって結び付けられる。浅筋が結び付けられたバンドの前面と後面には、深筋の鞘となるリングが取り付けられている。このリングに深筋を通すことによって、深筋と浅筋が束ねられる。すなわち、このリングは人体における腱鞘として機能しており、人工筋肉が位置されるべきルートのガイドとなっており、人工筋肉の駆動時に位置が崩れるなどして、出力に影響が生じることをないように考慮したものである。また、指腹部は露出させているため、指先を使った細かい作業を行うことができる。他端は身体近位へ伸び、手首に取り付けられた3Dプリンタで製作された鞘パーツを通過し、同様に3Dプリンタで製作されたエアチューブを固定する貫通継手パーツによって、腕に固定される。これにより、全ての人工筋肉が人間の指屈筋と指伸筋に近似したルートに導かれる。手首の鞘パーツと肘の貫通継手パーツは、いずれも布製のハンドによって身体に固定される。身体近位の人工筋肉の端には、圧縮空気供給のためのチューブが取り付けられており、このチューブを貫通継手パーツに挿入して固定することで、人工筋肉が両端から張られた状態で身体に固定されるようになっている。なお、貫通継手パーツはチューブの固定位置を自在に調整できるため、ユーザによって異なる手や腕の大きさに対応できるようになっている。

図4.2に示したように、Soft-Gに用いた空気圧人工筋肉は、駆動源である圧縮空気の供給をコントロールすることで、無段階に収縮し張力を発生させることができる。人工筋肉のスリーブ・チューブはs-muscle社製の直径約2.5mmのものを使用し、供給可能圧力のおおよそその最大値である0.5MPaの圧縮空気を供給することで、典型的に約25%の収縮率と、約30Nの張力が得られる。示指、中指、薬指、小指の深筋に対応する筋肉の長さは36cmとし、浅筋に対応する筋肉の長さは32cmとした。母指については、それぞれ32cmおよび28cmとした。これら数値は、人工筋肉の十分な収縮距離を確保しつつ、一般的な成人の前腕のサイズに幅広く対応できるように考慮して設定された。母指のは、他の指と比較して内転筋が発達しており、自然な曲げ伸ばしの際には内転方向に向かう傾向がある。この傾向を考慮して、母指の動作をコントロールする人工筋肉は、手首の母指から最も位置的に遠い鞘を通過するルートとなる配置とした。

本設計に関して、人工筋肉の最大収縮距離は、人工筋肉の長さ（スリーブ・チューブ長）

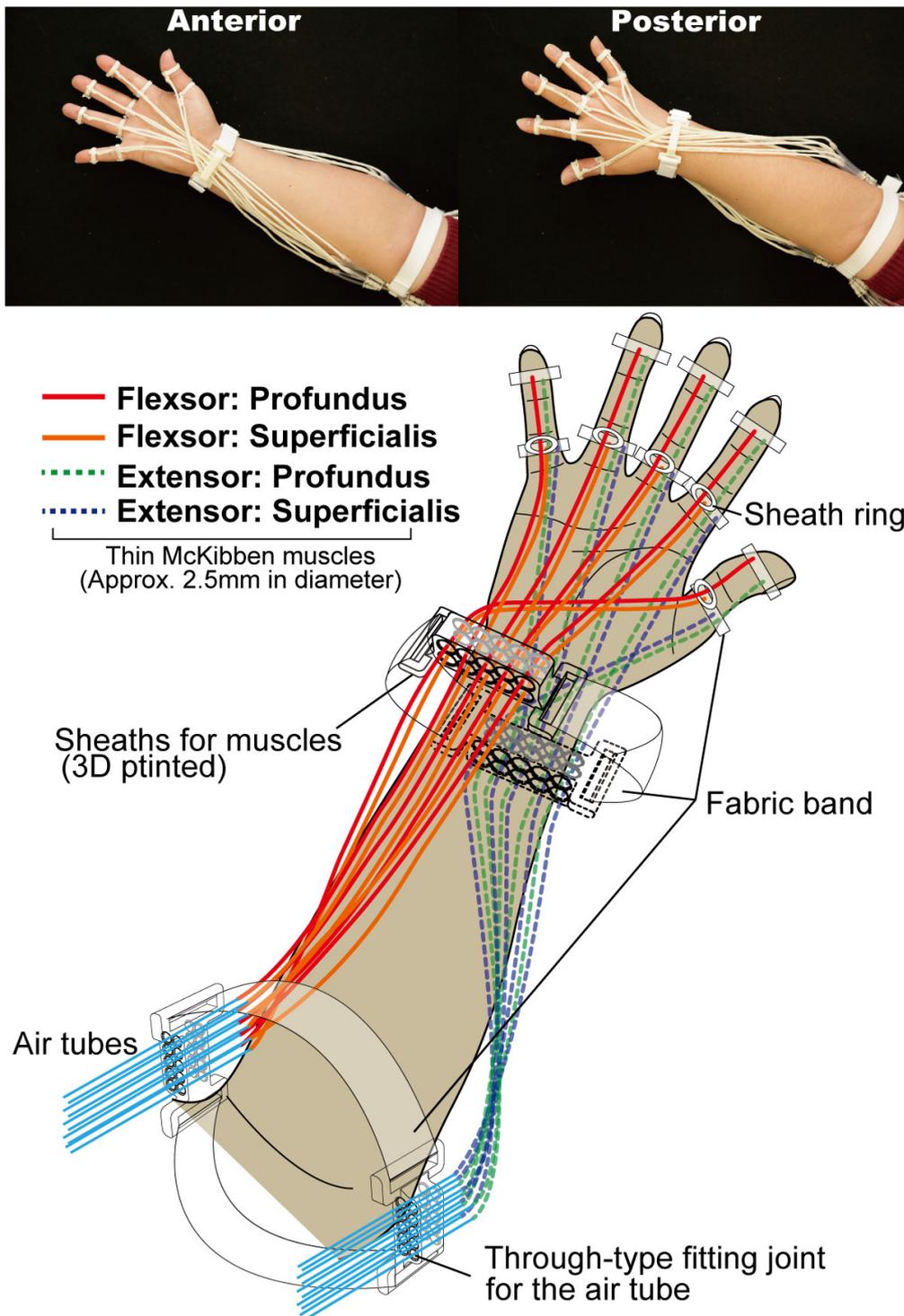


図 4.4 Soft-G の構造. Soft-G は片手 20 本の細径人工筋肉と、それを身体に固定するための極力素手に近い装着感を考慮した最小限のパーツにて構成されており、前腕の解剖学的な指の筋構造に近似した構造を持つ。

に依存するため、それぞれの人工筋肉の長さは特に指の姿勢の制御可能範囲に影響する。示指、中指、薬指、小指の DIP 関節近傍に取り付けられた 36 cm の人工筋肉を例に挙げると、その最大収縮率は約 25 % であるから、最大収縮距離を約 9 cm 確保することができる。これは換言するならば、指先に収縮率 100 % の性能を持った、長さ 9 cm アクチュエータを装着することを想定した状態と同様である、と捉えることができる。人間の指先の長さを考慮すると、この構造は指の解剖学的な可動範囲を広範にカバーすることができる。なお、人工筋肉の最大収縮率は典型的な無負荷時の性能であるため、実際の収縮距離は、人工筋肉の両端にかかる負荷が大きくなるほど小さくなる。

4.5.2 人工筋肉の制御システム

図. 4.5 に人工筋肉を制御するシステム構成を示す。人工筋肉の駆動源にはエアコンプレッサによって圧縮された空気が用いられる。圧縮空気はエアタンクに蓄えられ、電空レギュレータによって調圧されたのち、人工筋肉へ供給される。電空レギュレータは最大流量が約 1,500 L/min のものを使用した (SMC 社製, ITV2050-212L)。電空レギュレータの最大流量は機器内部のオフィス径等に依存し、原則として、より最大流量の大きい機器を用いることで、人工筋肉の応答性能を向上させることができる。電空レギュレータへの制御信号は、マイクロコントローラと D/A コンバータ (10bit) を経由させて PC から送信される。電空レギュレータは、各人工筋肉に対しにそれぞれ 1 機設けられるので、1 指につき 4 機用いられる。Soft-G の屈筋と伸筋に用いる圧縮空気の最大圧力は 0.4 MPa とし、電空レギュレータへの制御信号によって、圧縮空気は 0~0.4 MPa の範囲にて無段階で時間連続的に調圧される。この圧力範囲において、人工筋肉は約 0~20 N の張力と約 0~25% の収縮が生じる。エアタンクから圧縮空気の供給が続く限り、常に全ての人工筋肉を独立かつ同時に制御できる。電空レギュレータ、マイクロコントローラ、および DA コンバータ等は、すべて図. 4.5 に示した制御ボックス (幅 510 mm, 奥行 360 mm, 高さ 600 mm) に組み込まれている。制御ボックスから各人工筋肉へ接続されるエアチューブの外径は 3 mm, 内径は 2 mm であり、長さはそれぞれ 2 m とした。

4.6 基本性能評価実験

Soft-G の基本性能に関して評価実験を行った。装着者が手指の力を抜いた状態において、押下/引張力、連続押下による連続押下速度 (俊敏性)、手指の姿勢のコントローラビリティ、そして剛性制御に関する実験を行った。本実験は基本的な性能の評価を行うこと

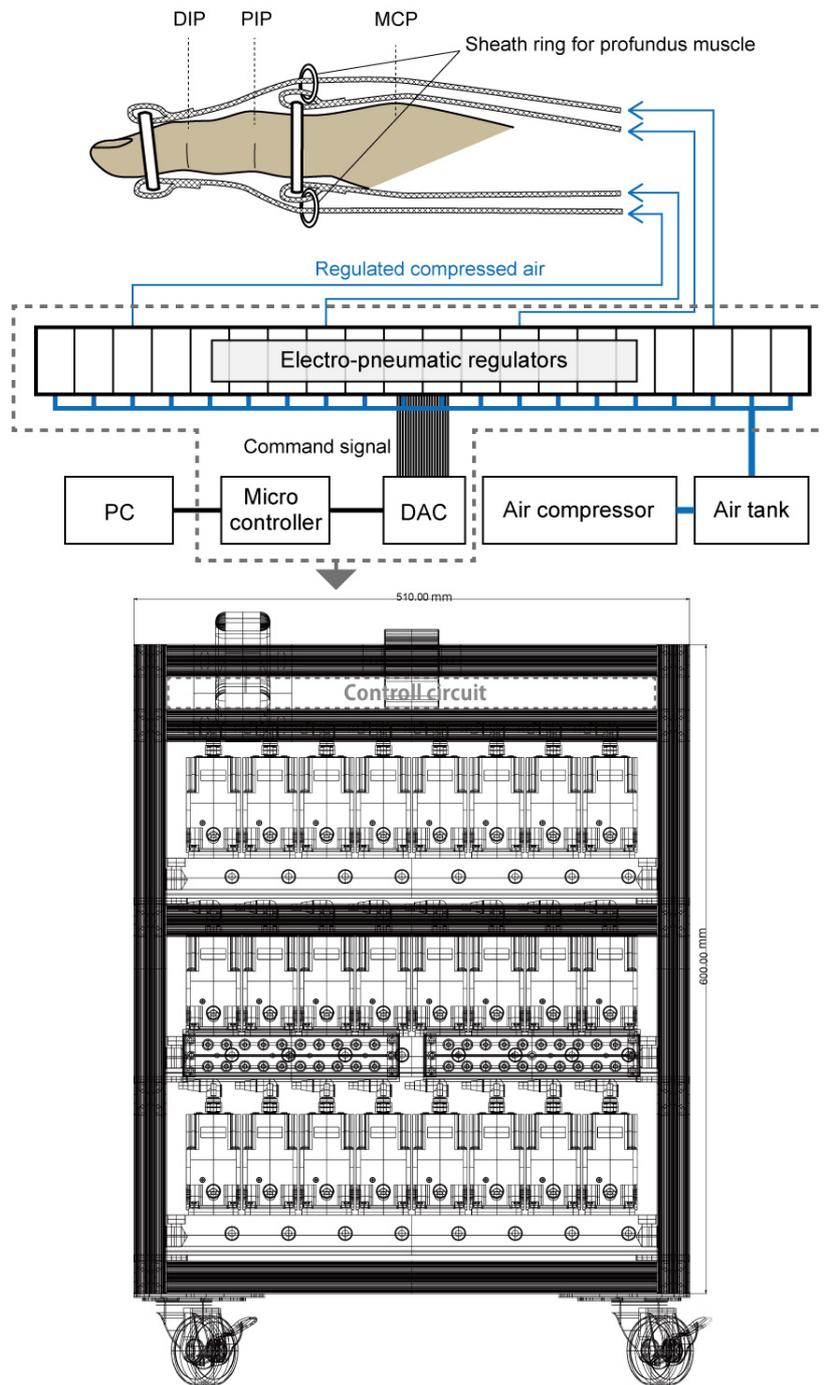


図 4.5 Soft-G の制御システム. 人工筋肉を制御するシステム構成 (示指を抜粋). 図下の制御ボックスに格納した電空レギュレータによって, 供給される圧縮空気を無段階に調圧し, 全ての人工筋肉の伸縮を独立に制御できる. DAC は Digital/analog converter (デジタル-アナログ変換器) を指す.

を目的としているため、示指に対して行うこととした。姿勢のコントローラビリティに関する実験については一部、5指のうち特に運動特性が異なる母指についても計測した。押下/引張力、連続押下による連続押下速度（俊敏性）、手指の姿勢のコントローラビリティに関する実験では、神経・筋疾患等の病歴が無い、健康な成人男性を被験者として行われた。また、前節の実装から新たに実験的に実装した、Soft-Gの半自動装着システムについても本節にて説明し、身体への固定力を評価するために行われた実験についても述べる。最後に、剛性制御に関する実験では、ピアノの打鍵動作によって評価することとし、ピアノ演奏の熟練者を被験者として募って計測し評価を行った。

4.6.1 押下/引張力の計測

Soft-Gによって生成可能となる指先の押下と引張の力を、デジタルフォースゲージ（IMADA社製、ZTA-50N）を用いて計測した。最初に押下の計測を行った。被験者にデバイスを装着させ腕を水平にした状態で、手首を支え台に置かせることで腕の自重による影響を軽減させ、指全体を自然に伸ばし、力を抜きリラックスした状態とさせ、デジタルフォースゲージに取り付けた、直径15mmの円形アタッチメントの上に示指を接触させた。その状態で示指の指屈筋の深筋と浅筋の両方の筋肉に、同時に同じ圧力の圧縮空気を送って押下力を生じさせた。この環境のもと、デジタルフォースゲージの測定値により、人工筋肉への供給圧力と指先における押下力の関係を調べた。圧縮空気は0~0.4MPaまでの間を、0.05MPa刻みの8段階で供給し、それぞれの押下力を記録した。

次に引張力の計測を行った。引張力に関しては、アタッチメントを吊り下げ式のものに替えたのち、押下力の計測と同様の環境と条件で行われた。示指の指伸筋の深筋と浅筋の両方の筋肉に、同時に同じ圧力の圧縮空気を送って引張力を生じさせた。押下力の計測と同じく、圧縮空気は0~0.4MPaまでの間を、0.05MPa刻みの8段階で供給し、それぞれの引張力を記録した。

図4.6に計測環境および計測結果を示す。計測はそれぞれの空気圧において20試行行われた。エラーバーは標準誤差を示す(N=20)。空気圧0.1MPa以下では屈曲や伸展が行われず、大きな力の変動がなかったため計測から除外している。計測値は被験者の手指の自重を含む。押下力、引張力の両方に関して、供給圧力と力がほぼ比例の関係となった。押下力に関しては、最大で約8N以上の力が計測された。一方で、引張力に関しては最大約4Nの力が計測され、押下力の半分以下の値であった。この原因として、人間の指の関節の構造自体が影響しており、押下力よりも引張力を発生させることの方が難しいことや、指の自重を含む計測値であること等が考えられる。引張力は押下力と比較して小さい

値となったが、指を人工筋肉の出力のみで持ち上げるためには十分な力であることを確認した。

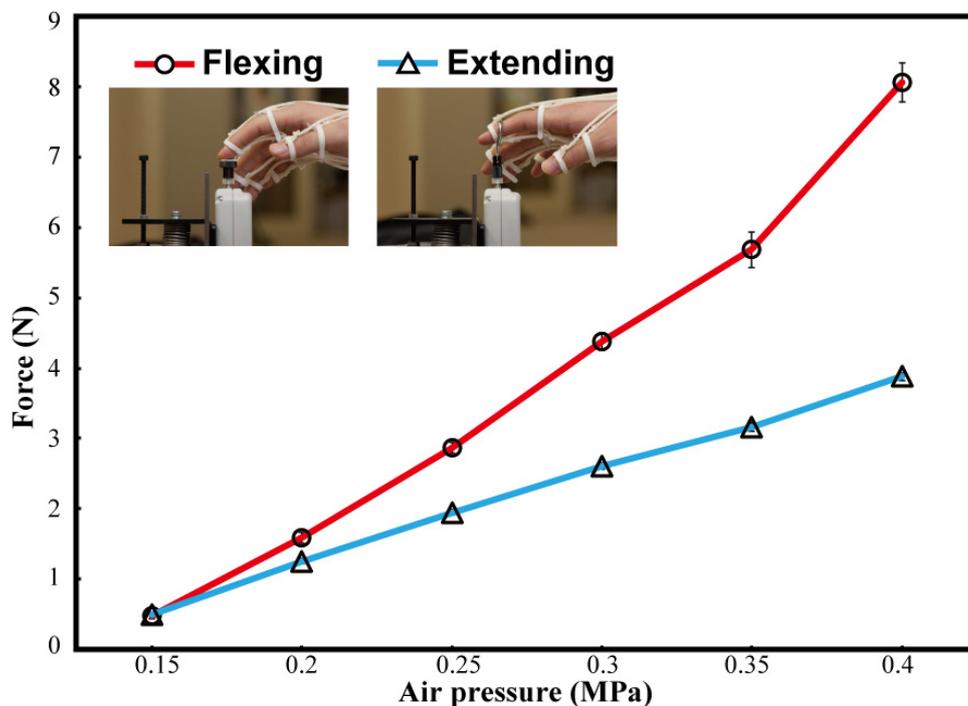


図 4.6 Soft-G の押下/引張力の計測. 供給空気圧と押下/引張力の関係を表すグラフと計測環境. エラーバーは標準誤差を示す (N = 20).

4.6.2 連続押下速度の計測

Soft-G の出力による指先の屈伸動作の俊敏性を評価した。本実験は、前節の押下力の計測と同様の環境を使用し、屈筋と伸筋の動作を一定時間間隔で交互に切り替える制御信号を送ることで、指の連続押下動作（指の屈伸運動によるタッピング動作）を生成した。屈筋および伸筋のそれぞれの深筋と浅筋に対して、同時に供給された圧縮空気は 0.4 MPa である。例えば、屈筋と伸筋の駆動を 0.1 s で切替える場合は、毎秒 5 回のタッピング動作を生成する指令であることを意味しており、5 Hz の指令周波数と表現される。屈曲動作の際に指先が振り下ろされる地点にフォースゲージを設置し、タッピング動作の指令周波数と押下力の関係を計測した。計測されたデータのうち、タッピング動作の指令周波数を 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz (すなわち、切り替え時間はそれぞれ 0.5 s, 0.1 s, 0.05 s) に変化させて得られたデータから、1 s 間の力の計測値を抽出して得られた結果を Figure 4.7 に示す。

計測結果より、本システムで 10 Hz の高速なタッピングが行えることが確認された。一

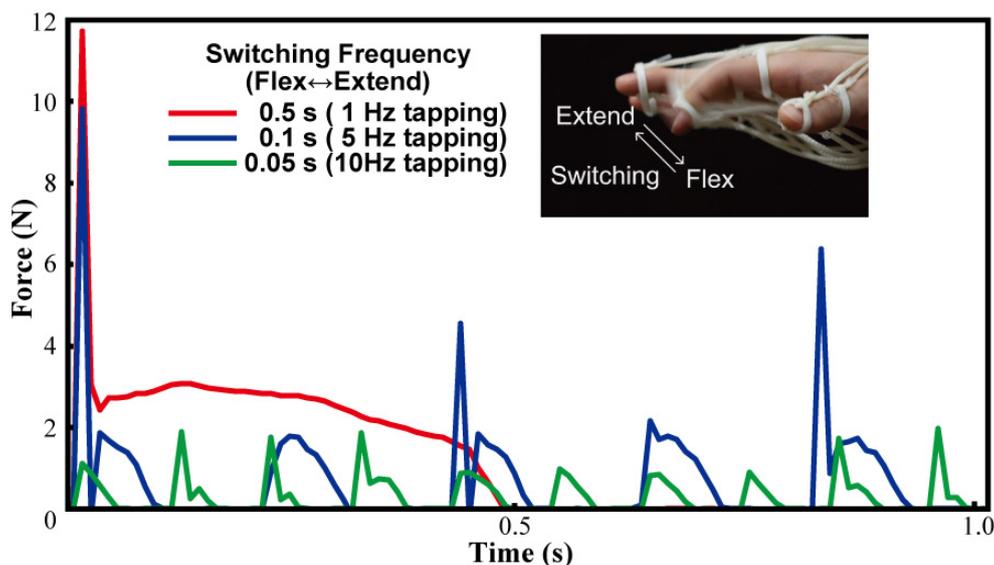


図 4.7 Soft-G による連続押下の計測. Soft-G のタッピング動作の俊敏性を示す. 3 パタンの指令周波数にて, それぞれ生成されるタッピング動作の押下力を表す.

方で, 切替時間が約 0.03 s より高速になると, 人工筋肉が細かく振動するような挙動となり, 規則的なタッピングを行うことが困難な状態となった. また, 指令周波数が大きくなるに従って, 計測される力が減少する傾向があることが観察された. これはフォースゲージに十分に力が与えられる前に, 指が持ち上げられるために生じるものであると考えられる. 原因の一つとして, 人工筋肉の内部が指定空気圧に到達するまでの時間遅延が影響しているものと考えられる. よって, 指定空気圧は同じであっても, 図 4.6 の静的な押下力の計測を行った実験で得られた力の大きさよりも小さな値となったと考えられる. 一方で, 実験中, 静的な押下力の計測を行った実験よりも大きい値となる, 10 N 以上の力がピーク値として頻繁に確認された. これは, 屈曲と伸展の連続的な切り替えによって指に慣性力が加わり, 「叩く」動作が生成されたためであると考えられる. 本実験により, Soft-G によって高速なタッピングが行えることを確認しただけでなく, 動的な指の動作の制御可能性が示唆される結果となった.

4.6.3 姿勢の制御性

姿勢のコントラビリティを評価するため, 人工筋肉の駆動パターンと, 変化する姿勢の関係性を調査した.

姿勢変化の観測

最初の検証として、手の平と腕を水平にさせ手の力を抜いた状態で、示指の4本の人工筋肉を選択的に駆動させ、指の姿勢の変化を観測した。駆動する人工筋肉の組み合わせは、屈筋と伸筋それぞれに対して、深筋のみ、浅筋のみ、深筋と浅筋の両方の3つであり、空気圧は0.1~0.4 MPa までの間を、0.1 MPa 刻みの4段階に変化させて供給した。これにより、合計して異なる24の駆動パターンによる姿勢変化の検証を行った。

カメラ画像により観測された様子を図4.8に示す。なお、供給圧力が0.1 MPa 以下の場合には、全てのパターンにおいて指の姿勢に変化は生じなかった。結果から、空気圧が大きくなるに従って、指の姿勢が段階的に変化していることが確認できる。また、屈筋と伸筋をそれぞれ別々に見てゆくと、同じ空気圧であっても、駆動させる人工筋肉のパターンの違いによって、目視でも容易に判別できる程に、指の屈曲や伸展の動作が異なる軌跡となる様子が観察された。屈筋の変化の観測について、深筋のみを駆動させた場合(図4.8A, Flexing Motion)は、空気圧が大きくなるに従って、特にDIP関節とPIP関節の角度が大きくなるのに対し、浅筋のみを駆動させた場合(図4.8B, Flexing Motion)は、DIP関節とPIP関節にはほとんど角度の変化は見られず、MCP関節のみが大きく屈曲する様子が確認できる。また、深筋と浅筋の両方を最大圧力の0.4MPaで駆動させた場合(図4.8C, Flexing Motion, 0.4 MPa)は、DIP関節とPIP関節の両方を自然な姿勢で屈曲させることができた。一方で、深筋にのみ最大圧力の0.4MPaで駆動させた場合(図4.8A, Flexing Motion, 0.4 MPa)、一見、深筋と浅筋の両方を駆動させた場合(図4.8A, Flexing Motion)に近い姿勢に見えるが、特にDIP関節の角度が異なることがわかる。

伸筋の変化の観測についても、屈筋と同様に、駆動させる人工筋肉のパターンの違いによって様々な姿勢の違いが観測された。深筋のみを駆動させた場合(図4.8A, Bending Motion)は、DIP関節とPIP関節はほぼ初期の姿勢を保ったままの状態、MCP関節が上方へ大きく持ち上げられていることがわかる。一方で、浅筋のみを駆動させた場合(図4.8B, Bending Motion)は、MCP関節の変化だけでなく、深筋のみの駆動では確認されなかったPIP関節が屈曲していることが確認できる。また、深筋と浅筋の両方を駆動させた場合(図4.8C, Bending Motion)については、指の曲がりには深筋のみを駆動させた場合(図4.8A, Bending Motion)と大きな違いは観察されなかったが、手全体が上方に持ち上げられていることがわかる。これは2本の伸筋を駆動させることで、伸展力が大きくなり、手首の関節にまで影響するに至ったためであると考えられる。また伸筋の変化の観測全体を通して、DIP関節に大きな変化は生じなかった。これは人間の指の関節構造上、DIP関節は屈曲方向には大きく変化させられるが、伸展方向にはほとんど動かすことがで

きないためであると考えられる。これらの結果により、本システムが指の姿勢を細かくコントロールできる可能性が示唆された。

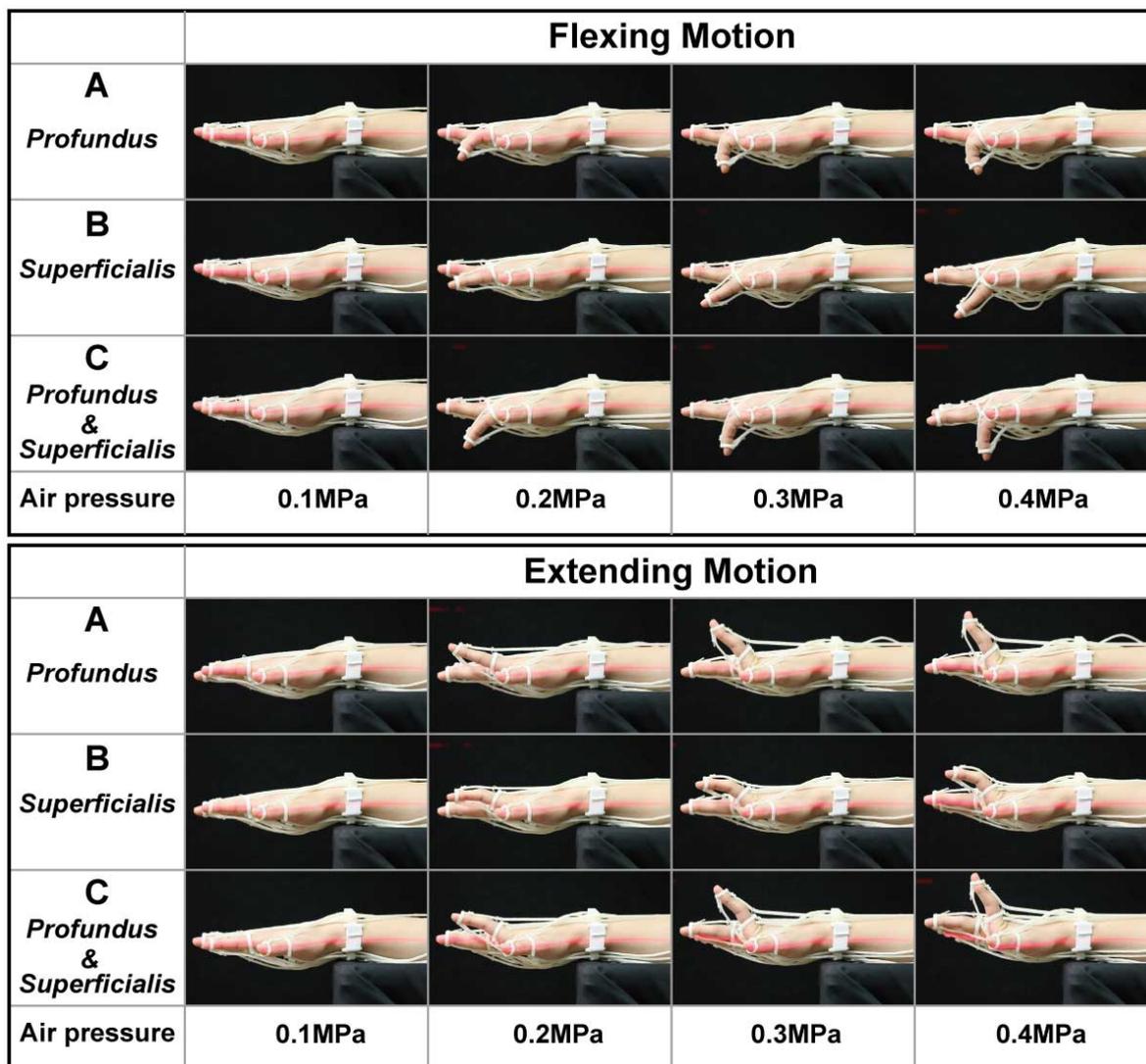


図 4.8 指の姿勢変化の観測。示指の4本の人工筋肉へ選択的（A：深筋のみ，B：浅筋のみ，C：深筋と浅筋の両方の3パターン）に、異なる空気圧（0.1～0.4 MPaの間で、0.1 MPa刻みの4段階）を供給した際の指の姿勢変化の観測。側面に投影した赤色の面レーザー線は、初期位置として手を水平にさせるための基準線として用いられた。

関節のトラッキングによる可動範囲の計測

次に、前述の示指の観測におけるの屈曲と屈伸における6パターンと、親指の屈曲の3パターンについて、選択的に0.4 MPaの空気圧を供給した際の3次元的な軌跡を計測し、

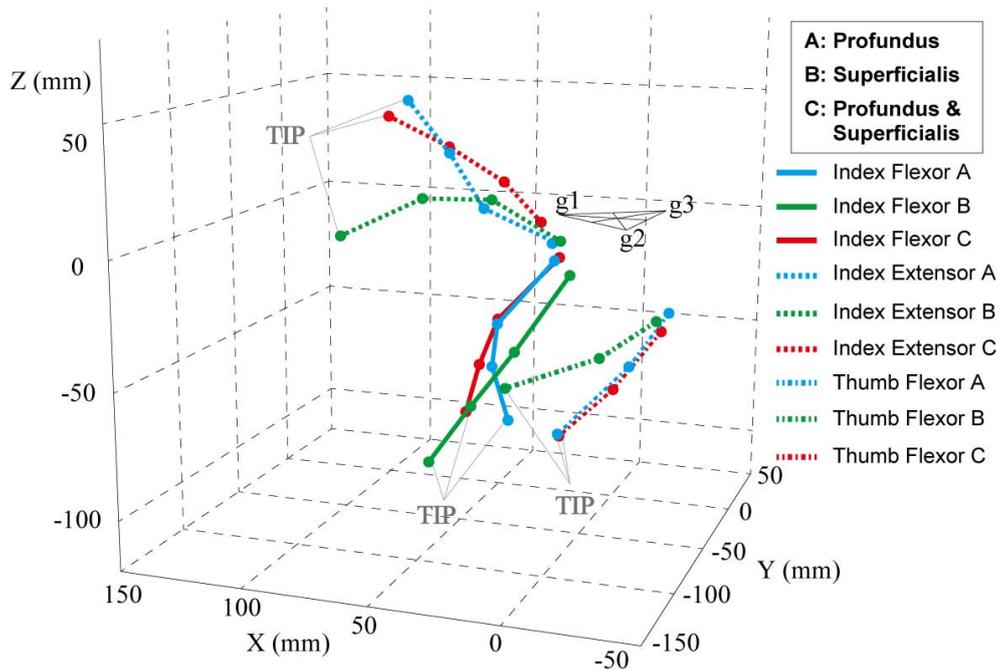
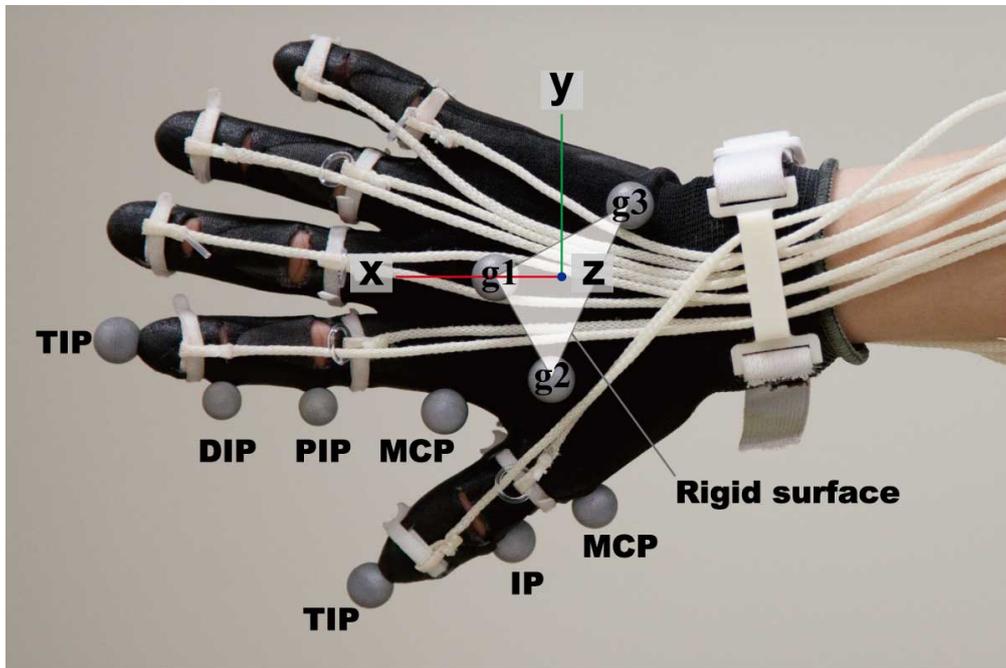


図 4.9 示指と母指の可動範囲の三次元計測. (図上) Soft-G にグローブ型の計測装置を組み込んだ状態. 姿勢変化の軌跡をキャプチャするために, 示指と母指の各関節に反射マークが取り付けられている. 計測には光学式モーションキャプチャシステム (OptiTrack) が用いられた. (図下) 示指と母指の人工筋肉へ, 選択的に 0.4 MPa の空気圧を供給した際 (図 4.8 参照) に, 計測された三次元空間における軌跡.

可動範囲を検証した。図 4.9 上に示したように、Soft-G に反射マークが取り付けられたグローブ型の計測装置を組み込み、光学式モーションキャプチャシステム (Oplitrack Flex3) を用いて計測した。

使用したモーションキャプチャシステムの空間座標の位置精度は、誤差 0.4 mm 以下である。マークは示指の指先 (TIP) とそれぞれの関節 (DIP, PIP, MCP) の側面に、母指の指先 (TIP) とそれぞれの関節 (IP, MCP) の側面に取付けた。屈曲と伸展の際に、姿勢の変化に影響の少ない手の甲を基準として計測を行うために、モーションキャプチャシステムが手の甲を剛体面として認識するための 3 つの反射マークを取り付けられた。計測結果を図 4.9 下に示した。結果から、人工筋を選択的に起動させることで、Soft-G が広い解剖学的範囲で、指の姿勢をコントロールできることが定量的に示された。

4.6.4 手指の剛性の制御可能性

Soft-G のユニークな特徴の一つとして挙げられるのが、前面と後面の人工筋肉 (屈筋と深筋) の相互収縮による拮抗を応用した剛性制御が行えることである。本実験では、ユーザによる随意運動でなく、Soft-G の駆動によって動的な指の屈曲動作を生成する最中に剛性の変化をコントロールすることで、指先による押下力に関する影響を評価する。ここでは、ピアノの打鍵運動を剛性を変化させて生成して評価するために、ピアノの鍵盤の形状をした力センサ [59] を使用した。実験はピアノ演奏の熟練者 5 名 (男性 4 名, 女性 1 名, 平均年齢は 32 歳でありその標準偏差は ± 10.2 歳) を被験者として行われた。Soft-G による受動的な動作の生成を評価するために、被験者になるべく指の力をリラックスさせた状態とするように指示し、剛性なしと剛性最大の 2 パターンの打鍵動作を生成し、センサに加わる力のピーク値を計測した。剛性のコントロールは、伸筋の深筋の協調的な制御を行い、拮抗を生じさせることで実現された。これに加えて、比較のため、ピアニストにグローブを取り外した上で、普段ピアノの演奏をする時と同様の動作でなるべく強く打鍵をするように指示し、計測を行った。

図 4.13 に実験環境、力のピーク値の計測結果、打鍵動作を生成するために用いた Soft-G への指令信号のコマンドプロットをそれぞれ示す。図 4.13 中央のグラフに示した力のピーク値はピアニスト 5 名の平均値を示し、エラーバーは標準誤差を示す。図 4.13 下にコマンドプロットで示したように、剛性を最大にする場合 (図 4.13(a)) は、打鍵動作の際に指が振り下ろされるのとほぼ同時のタイミングで、伸筋の深筋の出力を最大値 (0.4 MPa) まで徐々に上げてゆくことで、打鍵動作と屈筋と伸筋の拮抗を両立させた。その他 3 本の人工筋肉の制御については、ピアニストによる聞き取り調査を通じて、自然な打鍵の所作

を再現できるようにプログラムしたものである。剛性なしの場合（図 4.13(b)）には、伸筋の深筋は駆動されず拮抗は生じない。計測結果から、剛性を最大にした打鍵動作は剛性なしの場合と比較して、約 1.5 倍の力を生成できることが明らかとなった。なお、グローブを取り外した状態で計測された力のピーク値の平均値は 6.9 N であった。使用した鍵盤型センサは、実施のピアノの鍵盤のように打鍵の際の沈みが生じないため、演奏時に鍵盤に加わるとの単純比較はできないが、Soft-G による打鍵動作に剛性を加えることで、素手で行うよりも大きな力を生じさせることができることが確認された。

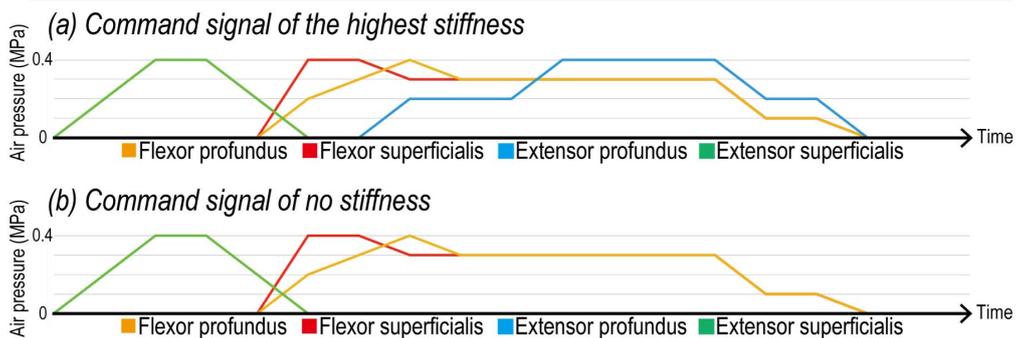
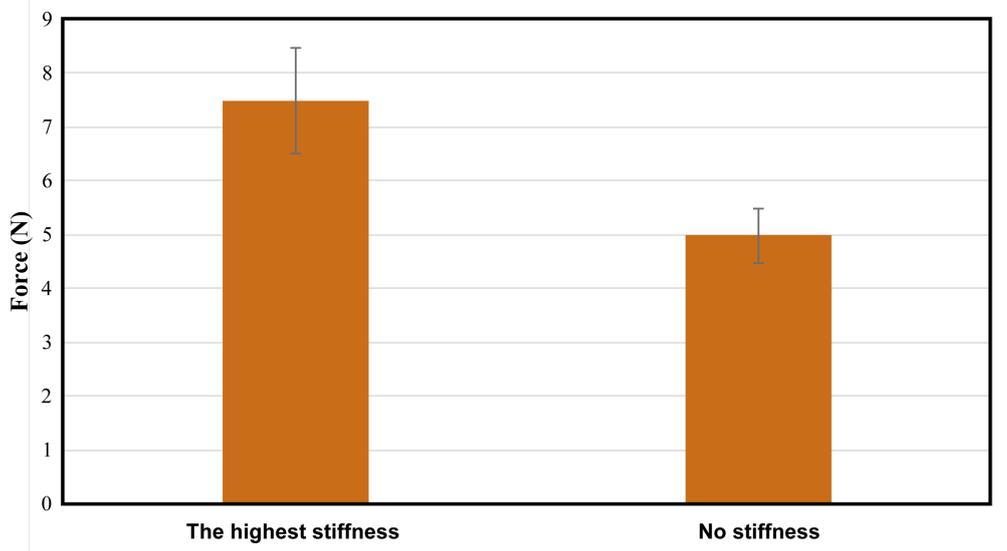


図 4.10 剛性制御に関する実験の環境と計測結果. 図上: 計測に用いた鍵盤型センサと実験環境. 図中央: 剛性最大 (左) と剛性なし (右) の制御の打鍵動作にて検出された力のピーク値の平均値と標準誤差. 図下: 剛性最大 (a) と剛性なし (b) の制御の打鍵動作を生成するために, 示指の人工筋肉へ送った指令信号のコマンドプロット.

4.6.5 半自動装着システム

Soft-G は、所定の身体部位に這わされた人工筋肉の張力によって指の関節を駆動させる設計となっているため、安定した性能を確保するためには、初期の装着位置からずれが生じないように配慮する必要がある、そのために身体への確実な固定が要求される。Soft-G の基本実装として、人工筋肉やパーツをベルクロバンドや布バンドで身体に固定する手法を採ったが、この手法は固定力を高めるために身体への締付けを強くするほど、ユーザに痛みや不快感を生じさせる傾向がある。また、特に指のベルクロバンドは、数が多いため着脱には相応の手間が掛かることに加え、様々なユーザの身体のサイズに対応するには限界がある。この問題を解決するために、細径の人工筋肉を応用した半自動装着システムを新たに試験的に実装した。本システムの指部に用いられた人工筋肉の直径は約 1.8 mm である。図 4.11 に半自動装着システムを備えた Soft-G の概観を示す。

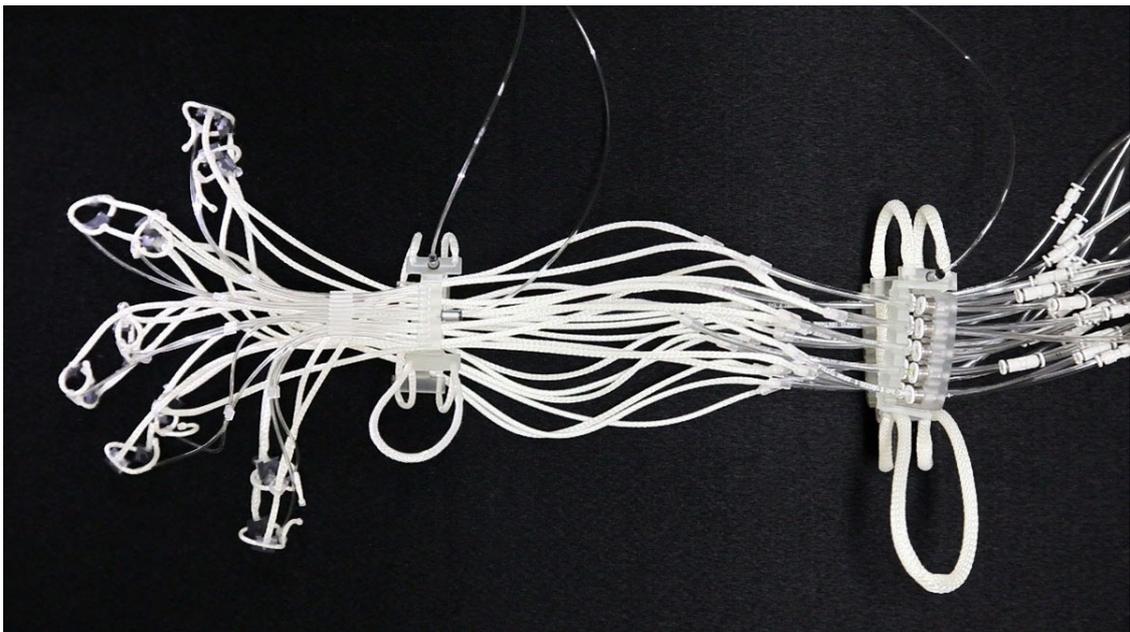


図 4.11 半自動装着システムを備えた Soft-G の概観。半自動装着システム用の人工筋肉への圧縮空気の供給は、3D プリンタによって製作されたパーツを介して行われる。

装着の手順

半自動装着システムの使用方法を順に説明する。最初に、図 4.12 左に示すように、ユーザは自身の指のサイズに合わせてリング状の人工筋肉の径を手動で調整し装着する。次

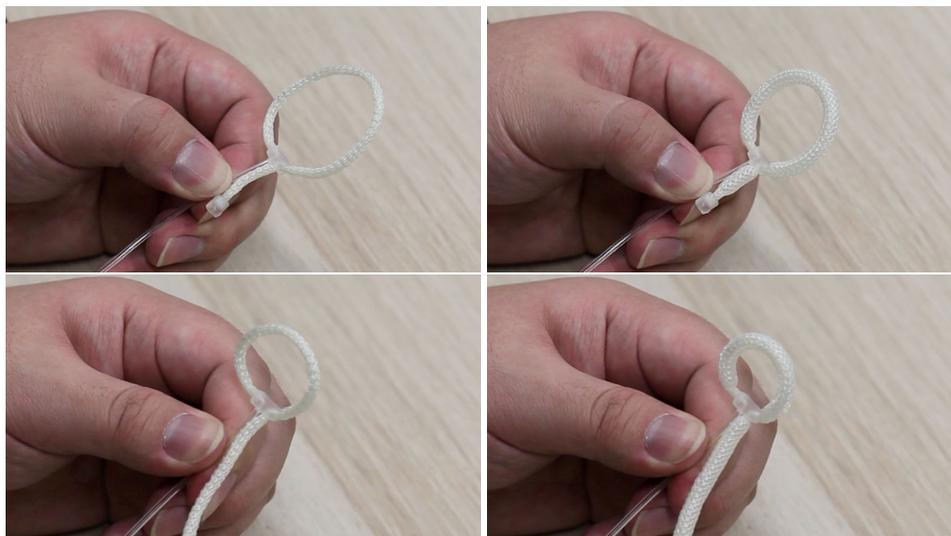


図 4.12 指固定部の人工筋肉のリング径の調節と圧搾の様子。手でリング状の人工筋肉の径を調整したのち（図左），圧縮空気を送り込むことで圧搾し，身体に固定される（図右）。

に，図 4.12 右に示すように，リング状の人工筋肉へ圧縮空気を送ることによってリングの直径が縮まる方向に力が生じ，指を圧搾し固定される。これは，リング状の人工筋肉が固定パーツの鞘を介する形で取り付けられており，鞘の内径が駆動時の人工筋肉の直径と比較して充分小さく設計されているため，鞘内部では人工筋肉の移動が生じないためである。このプロセスを行うことによって，本メカニズムを備えた Soft-は，異なる様々な指のサイズに合わせて身体に固定することができる。同様のメカニズムは指，手首，肘のパーツに対して実装された（図 4.13 左）。

固定力の評価実験

半自動装着システムが，伸筋と屈筋が長時間に連続的に駆動される状態であっても，確実に身体に固定できるか評価を行った。固定のために用いるリング状の人工筋肉の空気圧を，0.3～0.5 MPa までの間を 0.1 MPa 刻みの 3 段階に変化させて固定し，それぞれの状況において，屈筋と伸筋のそれぞれの深筋と浅筋の両方に同時に圧縮空気を供給し，屈曲動作と伸展動作を繰り返し，固定部のずれを計測した。屈伸動作についても，0.3～0.5 MPa までの間を 0.1 MPa 刻みの 3 段階で力を変化させてそれぞれのずれの距離を計測した。図 4.13 左に示したように，初期位置にて指にマーカを記し，屈伸動作後にずれが生じた距離をノギスで計測した。

表 4.1 に計測結果をまとめた。屈曲動作と伸展動作の繰り返し回数は 100 回であり，最

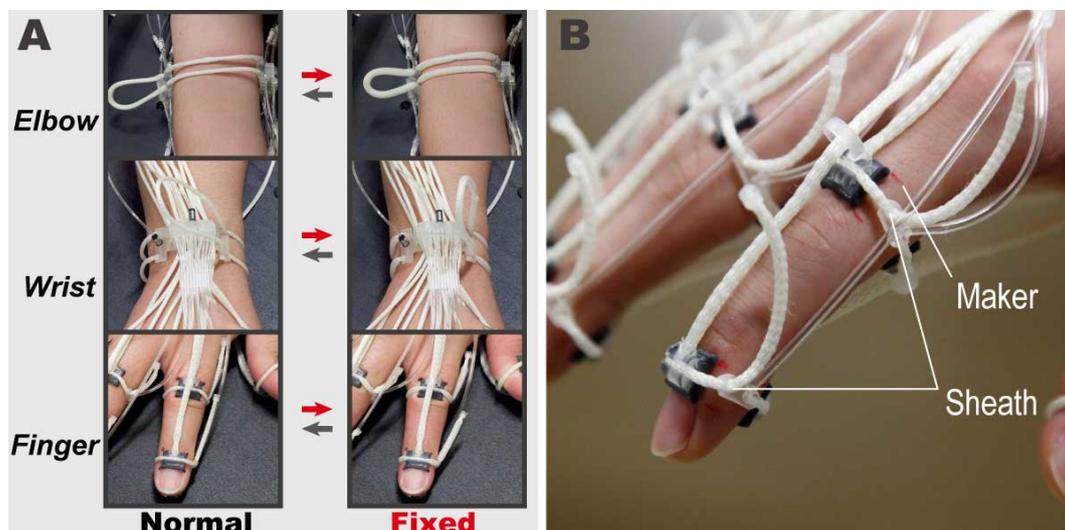


図 4.13 半自動装着システムの動作の様子と計測環境。(A) 半自動装着システムの動作前と動作後の様子。(B) 示指の半自動装着システムの拡大図ならびに伸筋と屈筋の動作中の固定のずれを計測するために記されたマーカ。

表 4.1 人工筋肉駆動時の半自動装着システムの固定部のずれの距離の計測

Driving force (Switching flexion and extension)		Fixing force for the finger joint (DIP, PIP)		
		0.3 MPa	0.4 MPa	0.5 MPa
0.3 Mpa	N ^a = 10	(2.0, 1.0, 0, 1.0) ^b	(0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0)
	N = 100	(2.5, 1.0, 0.5, 3.0)	(0.5, 0.5, 0.5, 1.0)	(0, 0, 0, 1.0)
0.4 MPa	N = 10	(3.0, 2.0, 0, 1.0)	(1.0, 1.0, 0, 1.0)	(1.0, 0, 0, 0)
	N = 100	(4.0, 2.0, 0, 3.0)	(2.0, 1.0, 0, 3.0)	(1.0, 0, 0, 0)
0.5 MPa	N = 10	(10.0, 1.0, 2.0, 2.0)	(5.0, 0, 0, 0)	(3.0, 0, 0, 0)
	N = 100	(15.0, 2.0, 10.0, 5.0)	(8.0, 1.0, 1.0, 1.0)	(4.0, 0, 0, 0)

^a Number of repetitions.

^b Distance (mm) deviated from the marker (DIP (extensor), PIP (extensor), DIP (flexor), PIP (flexor)).

初の10試行までが最も固定が不安定である傾向が確認されたため、参考までに10回目のずれも計測した。計測結果から、0.4 MPa以下の空気圧による人工筋肉の圧搾は、少なくとも数ミリ程度のズレが生じることが確認されたが、0.5 MPaの圧搾に関しては、Soft-Gの屈筋と伸筋の最大使用圧力である0.4 MPaまでの屈伸動作であれば、ほぼずれることなく固定できることが確認された。なお、手首と肘の固定に関しては、0.3 MPa程度の圧力を供給すれば、最大圧力による屈伸動作を繰り返しても位置ずれは生じないことを確認した。

4.6.6 基本性能評価実験のまとめ

基本性能評価実験では、押下と引張の力、連続押下速度（俊敏性）、姿勢制御、剛性制御に関するSoft-Gの性能の評価を一指に対して行った。開発されたソフト外骨格は、指差の静的な押下力をリニアに制御でき、屈筋と伸筋の出力を高速に切り替えることで、連続的かつ高速なタッピングのような相互伸展動作をコントロールできることを示した。最も特筆すべきことは、指屈筋と指伸筋の解剖学の参照と選択に基づいて提案された新たなソフト外骨格の構造によって、指の動作や姿勢を独立的かつ広い可動範囲でコントロールできることを明らかにしたことである。これは、アクチュエータの要件と装着するための空間的な制約が厳しい、従来のハード外骨格では実現困難であった。また、屈筋と伸筋の拮抗を応用した剛性の制御によって、指先の押下力を1.5倍向上させることができることを明らかにしたことについても、外骨格グローブとしての新規性があるといえる。解剖学や生体力学が明らかにするように、人間は屈筋と伸筋の筋肉の相互収縮によって関節の剛性を高めている。この性質は、例えばピアノの打鍵運動のような、身体と環境との間に生じる機械的な衝突が補正されるだけでなく、動作の精度を向上させるための、機械的な安定性にも寄与することがわかっている [60]。Soft-Gに実装された剛性制御が、指の屈伸動作の正確性を向上させることができるかについての詳細は、今後評価すべき研究対象となり得る。

4.7 ピアノ演奏に関する評価実験

ピアノ演奏における巧緻な指の動作に対する、Soft-Gの有効性を検証するために、3つの実験を行った。

最初に、ピアニストの能動的な随意運動による指の動作に対する、外骨格の機械的な拘束（透明性の高さ）について評価した。実験は、外骨格を装着する場合としない場合に

ついて、ピアノ演奏の熟練者によるピアノ演奏時の動作の違いを比較した。使用する外骨格は、比較のため、図 4.14 上に示した、Soft-G とその他既存の 2 種のハード外骨格グローブの 3 種に対して評価した。また、一連の実験における打鍵の教師動作として用いた、Soft-G への指令信号のコマンドプロットを図 4.14 下に示した。

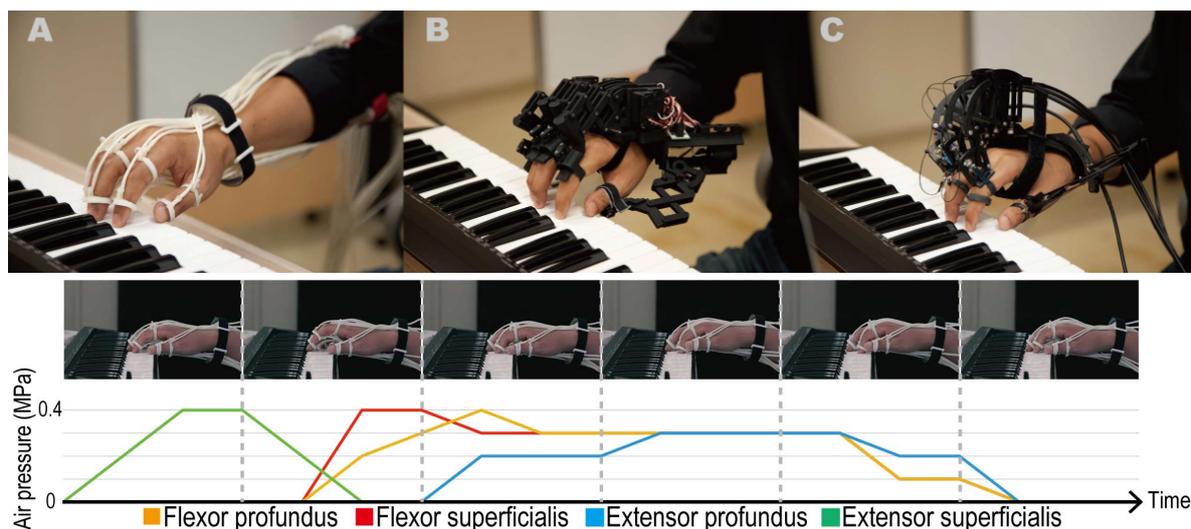


図 4.14 実験に用いた 3 種のグローブの概観と Soft-G の制御信号。(図上) 比較に用いた Soft-G を含む 3 種の異なる外骨格グローブ (A: Soft-G, B: EXOS (Exiii 社), C: CyberGrasp (CyberGlove Systems 社))。 (図下) Soft-G による打鍵動作に用いた指令信号のコマンドプロット。

次に、3 種の外骨格グローブによって生成される受動的な指の動きによる演奏と、ピアニスト自身による演奏の比較を行い、外骨格グローブによる打鍵動作の精度を検証した。また、Soft-G とピアニストの最大秒速打鍵数の比較を行った。

最後に、ピアノ演奏の訓練を受けていない初心者に対し、短期間、Soft-G によって受動的に生成される運指を提示することによって、ピアノ演奏における巧緻な打鍵動作のコントロールの向上を促進する効果があるか検証する実験を行った。本節における実験では、MIDI センサ付きの電子ピアノ (Roland 社製, A-49) を用いて打鍵動作の計測を行った。

4.7.1 随意的指動作に対する機械的拘束の比較

本実験では、Soft-G の透明性を既存の 2 種のハード外骨格グローブと比較して検証した。5 名のプロのピアニストに外骨格グローブを装着させた状態において、ピアノの演奏中に生じる随意的指動作に対する機械的拘束を評価した。被験者としたピアニストは男性

4名、女性1名、平均年齢は32歳でありその標準偏差は±10.2歳である。被験者のピアニストの選出条件は、クラシック音楽におけるピアノの訓練歴が15年以上あり、国内外のいずれかのコンクールで受賞歴がある者とした。

Soft-G とハード外骨格である EXOS と CyberGrasp をそれぞれピアニストに装着させ (図 4.15 上)、隣接する5つのピアノの白鍵盤に対し、右手の親指、示指、中指、薬指、小指を順に打鍵することを1シーケンスとして、できるだけ早く打鍵を繰り返すように指示した。シーケンスは連続して10回繰り返し演奏させた。EXOS はサーボモータを駆動源としたリンク機構を用いており、CyberGrasp はモータによるワイヤの引張構造を用いている。なお、ここでは外骨格グローブの構造的な透明性を行うことが主旨であるため、外骨格グローブは非駆動の状態とした。本実験では、外骨格グローブの装着によるピアニストの随意的指動作に対する機械的拘束は、鍵盤を押してから離すまでの時間、すなわち指と鍵盤の接触の持続時間 (CD: Contact duration) が長くなるほど大きくなると定義することとした。なぜならば、この指標は、指を屈曲方向から伸展方向への動作に切り替えるための俊敏性を表すためである [56]。比較のため、ピアニストに外骨格を脱着して同じシーケンスを演奏するように指示し、同様に接触の持続期間の計測を行った。接触の持続期間は、電子ピアノによって記録された MIDI 信号から算出した。

図 4.15 に計測結果を示す。指定したシーケンス演奏時の指と鍵盤の接触の持続時間 (Contact duration) は、素手、Soft-G、CyberGrasp、EXOS の順に短くなり (すなわち透明性はこの順に高くなる)、各グループの平均値と標準偏差はそれぞれ、 0.112 ± 0.015 s、 0.124 ± 0.014 s、 0.129 ± 0.020 s、 0.149 ± 0.015 s となった。

透明性の評価に用いた統計手法の詳細を記す。コルモゴロフ-スミルノフ検定 (Kolmogorov-Smirnov test) にてデータが正規分布に従わなかったため ($p < 0.05$)、反復測定による一元配置分散分析に相当するノンパラメトリック検定である、フリードマン検定 (Friedman rank sum test) (4水準、1因子) を実行した。これにより、各外骨格グローブおよび素手の間の主効果が有意であることが明らかになった ($\chi^2 = 12.12$, $p = 0.007$)。Benjamini-Hochberg 法 (BH 法) に基づいて多重比較を補正した上で、事後検定として行ったウィルコクソン検定 (Wilcoxon test) では、素手で演奏した場合は、いずれの外骨格グローブ装着時よりも、指と鍵盤の接触の持続時間が短くなることが示された。これは透明性の比較として妥当な結果であるといえる。一方で、Soft-G とハード外骨格グローブ (EXOS) の比較において有意差が確認され、Soft-G の接触の持続時間がより短くなることが明らかになった ($p < 0.05$)。この結果から、サーボモータを備えたハード外骨格グローブと比較すると、Soft-G がより透明性が高いことが示され、ピアノ演奏時の随意的指動作への影響が小さくなることが明らかとなった。

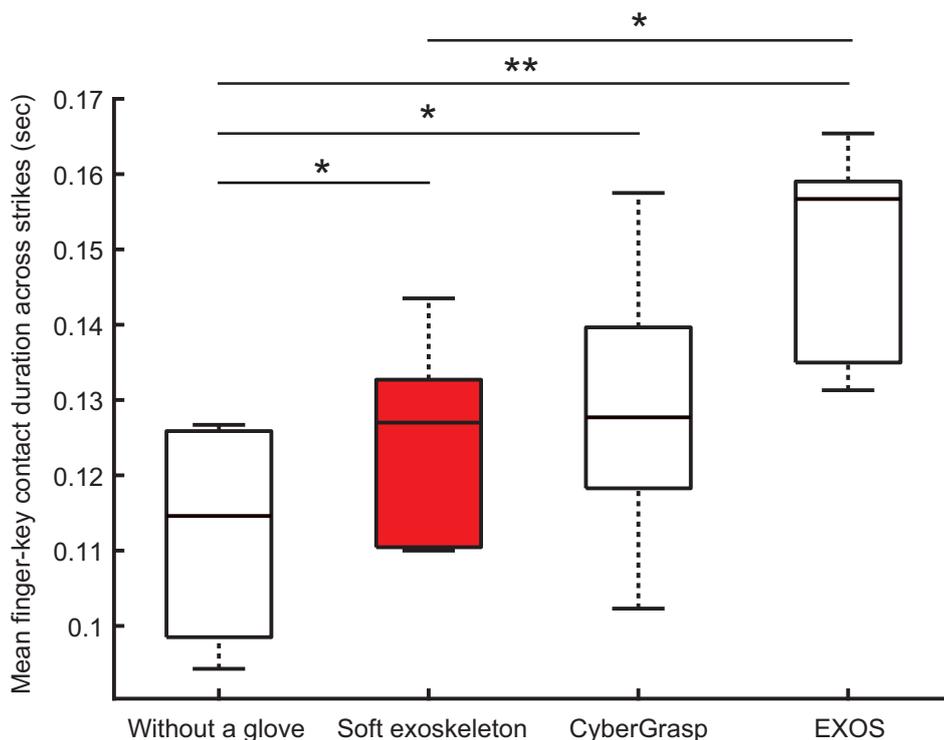


図 4.15 外骨格グローブ装着時と非装着時のピアノ演奏における、指と鍵盤の接触の持続時間の比較。外骨格グローブ装着時 (Soft-G, CyberGrasp, EXOS) と非装着時 (素手) のピアニストによるピアノ演奏の際の、指と鍵盤の接触の持続時間の平均値。アスタリスクは有意差を示す (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$.)。

4.7.2 外骨格によって生成される受動的打鍵の比較

外骨格グローブによって、ピアノ演奏のための巧緻な指動作が生成できるか比較検証した。前節の実験と同様の 5 名のピアニストに対し、Soft-G とハード外骨格グローブ (EXOS) を装着させ、自身の能動的な指動作を伴わない状態において、グローブによって受動的にピアノの鍵盤に打鍵を行わせた。本実験では、前節の実験に用いた CyberGrasp は用いていない。CyberGrasp は指の伸展方向への力出力に限定されており、打鍵動作の生成が不可能であるためである。ここでは、外骨格グローブによる打鍵の正確さを検証する。

各グローブは、隣接する 5 つのピアノの白鍵盤に対し、右手の親指、示指、中指、薬指、小指を順に打鍵することを 1 シーケンスとして、秒速 15 打鍵、および性能限界の速度のテンポで駆動させた。シーケンスは連続して 10 回繰り返し再生させた。最初に、soft-G

とハード外骨格グローブ (EXOS) の打鍵速度の性能限界を実証したところ、それぞれ秒速 25 打鍵、秒速 20 打鍵であった。この秒速打鍵数は、実験に参加したピアニストが素手で行うことが可能な打鍵速度よりも高速であり、実際に計測を行った結果は、平均が秒速 13.8 打鍵、その範囲は秒速 10.0 打鍵～秒速 17.5 打鍵であった。

次に、ピアニストが素手で行うことが可能な打鍵速度に基づき、外骨格グローブによって秒速 15 打鍵で駆動させた際の打鍵の正確性を検証した。Soft-G、ハード外骨格グローブ (EXOS)、そして素手による能動的打鍵について、指と鍵盤の接触の持続時間の標準偏差 (SD: Standard deviation) を示した図 4.16 に示す。この指標は、指と鍵盤の接触の持続時間の変動性、すなわち打鍵のタイミングのばらつきを示すものであり、これにより打鍵の正確さを評価した。各グループの平均値と標準偏差は、Soft-G、 0.070 ± 0.025 s となり、ハード外骨格グローブ (EXOS) では、 0.132 ± 0.040 s となった。また素手については、グローブを外したピアニストに対し、同様のシーケンスで秒速 15 打鍵で打鍵を行うように指示して計測し、その平均値と標準偏差は、 0.021 ± 0.007 s であった。

外骨格グローブ (Soft-G, EXOS) による秒速 15 回の受動的打鍵、および素手による秒速 15 回の能動的打鍵の正確性の評価に用いた統計手法の詳細を記す。コルモゴロフ-スミルノフ検定 (Kolmogorov-Smirnov test) にてデータが正規分布に従わなかったため ($p < 0.05$)、前節の実験と同様に、反復測定による一元配置分散分析に相当するノンパラメトリック検定である、フリードマン検定 (Friedman rank sum test) (3 水準, 1 因子) を実行した。これにより、各外骨格グローブおよび素手の間の主効果が有意であることが明らかになった ($\chi^2 = 8.40, p = 0.015$)。Benjamini-Hochberg 法 (BH 法) に基づいて多重比較を補正した上で、事後検定として行ったウィルコクソン検定 (Wilcoxon test) では、Soft-G で受動的に演奏した場合は、素手による能動的な演奏よりも、指と鍵盤の接触の持続時間の標準偏差が大きかったが、外骨格グローブ (EXOS) で受動的に演奏した場合と比較すると小さかった。この結果から、サーボモータを備えたハード外骨格グローブと比較すると、Soft-G による打鍵は、ばらつきがより少ないことが確認され、外骨格グローブによる受動的なピアノ演奏時の打鍵のタイミングの正確性が高いことが明らかとなった。

4.7.3 Soft-G によるピアノ演奏の学習効果に関する実験

本実験では、本研究の仮説として挙げた、所望の指の動作の習得が望まれるユーザに対し、外骨格グローブによって直接的に動作の教示を行うことで、スキルの訓練と習得に用いることができるかを検証する。Soft-G の駆動による受動的打鍵によって、短期間においてピアノを演奏するための技能の向上を促進させる可能性があるか評価するため、動作

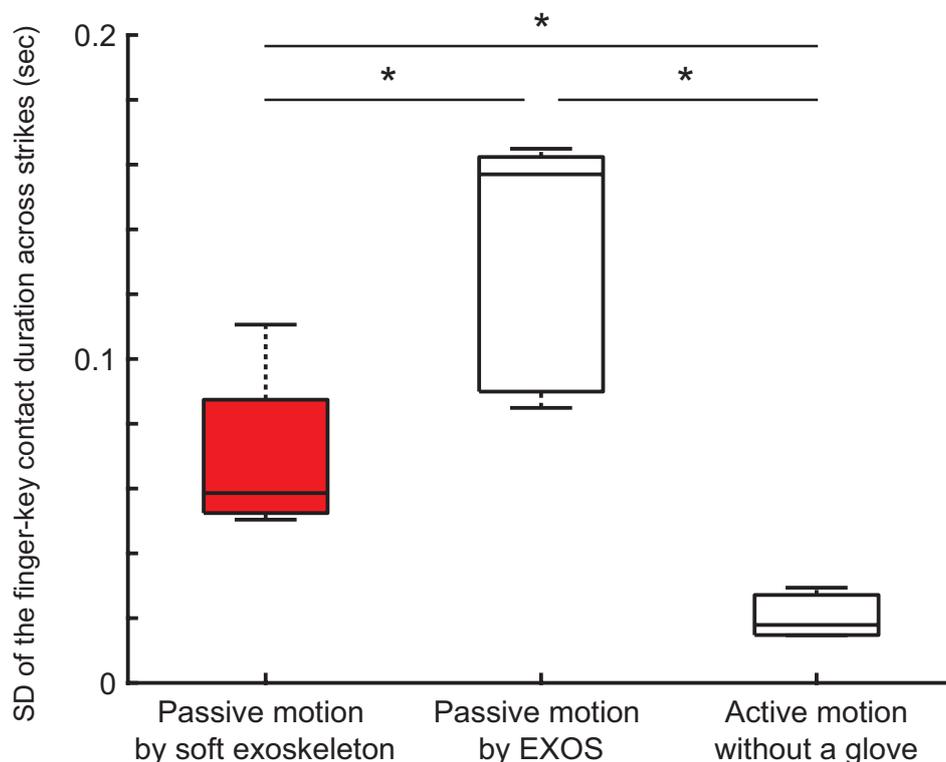


図 4.16 外骨格グローブによる受動的なピアノ演奏における、指と鍵盤の接触の持続時間の標準偏差（打鍵の正確性）の比較。ピアニストを被験者とした、外骨格グローブ（Soft-G, EXOS）による秒速 15 回の受動的打鍵、および素手による秒速 15 回の能動的打鍵の、指と鍵盤の接触の持続時間の標準偏差。数値が小さいほど打鍵のばらつきが少なく、タイミングの正確性が高いことを示す。アスタリスクは有意差を示す（*: $p < 0.05$ ）。

の学習効果に関する実験を行った。実験は”受動トレーニング（Passive training）グループ”と”能動トレーニング（Active training）グループ”の2つに分け、楽器の訓練経験のない 10 名の被験者を各グループに 5 名ずつランダムに割り当てた。受動的トレーニンググループは、Soft-G によって指定された楽曲の抜粋（“When The Saints Go Marching In”（聖者の行進）の冒頭の 8 小節）を譜面通りに運指が生成される教師プログラムを作成し、60 BPM のテンポで演奏するように動作させ、30 分間の受動的なトレーニングを行わせた。対して能動トレーニンググループは、Soft-G を駆動させずに、受動トレーニンググループと同一の楽曲の抜粋を、同一の運指とテンポで演奏するように指示し、30 分間の能動的なトレーニングを行わせた。各トレーニングセッションの前後において、グローブを取り外した状態で事前テスト（Pre test）と事後テスト（Post test）を行い、被験者に対し同一の楽曲の抜粋を、同一の運指とテンポによって、ピアノを被験者自身で演奏す

るように指示し、MIDI データからトレーニング前後の演奏の差を調査した。各打鍵の巧緻な力のコントロール性の指標として用いられる、楽曲演奏中の各打鍵の加速度 (MIDI Velocity) の標準偏差 (SD) を、事前テストと事後テストのそれぞれについて評価した。この指標が小さいほど各打鍵の力のばらつきが小さく、力を適当にコントロールできることを示している。計測結果を図 4.17 に示す。

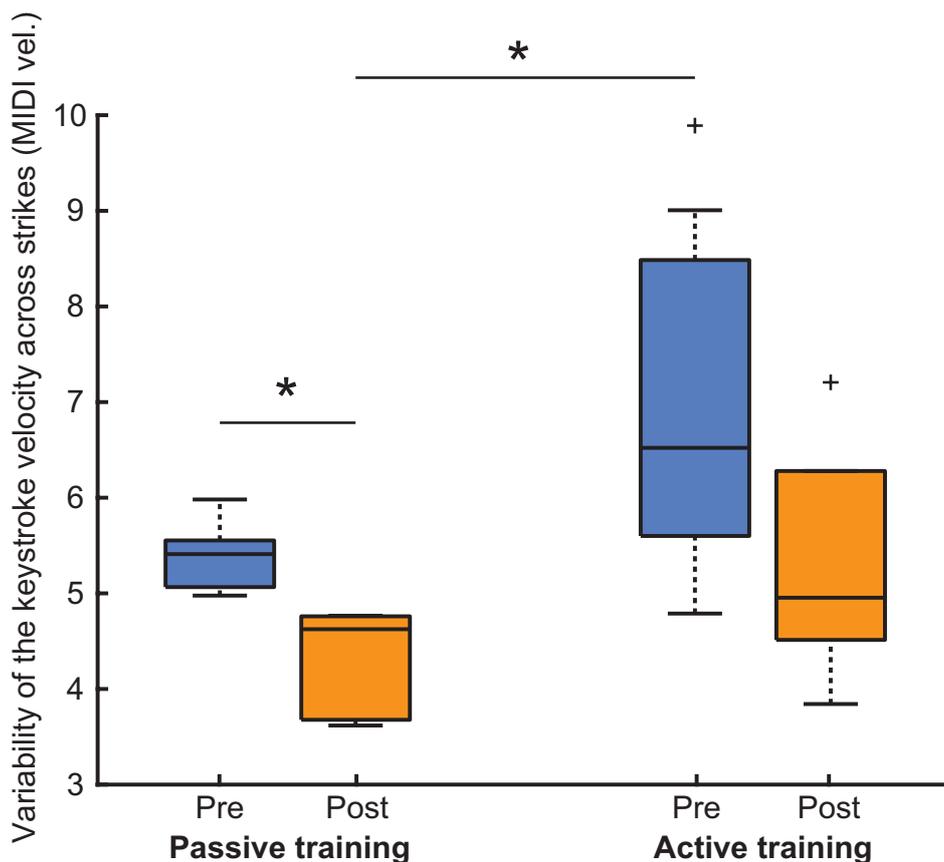


図 4.17 受動/能動トレーニング前後における楽曲演奏中の各打鍵の加速度の変動性。受動トレーニング (Passive training) グループと能動トレーニング (Active training) グループのトレーニングセッション前後における、楽曲演奏中の各打鍵の加速度 (MIDI Velocity) の変動 (標準偏差)。アスタリスクは有意差を示す (*: $p < 0.05$)。

2つのグループの事前テストと事後テストにおける、各打鍵の巧緻な力のコントロール性を比較評価するために用いられた統計手法を示す。コルモゴロフ-スミルノフ検定 (Kolmogorov-Smirnov test) にてデータが正規分布に従わなかったため ($p < 0.05$)、混合モデルの並べ替え検定 (Permutation test) による二元配置分散分析 (ANOVA) (受動/能動グループの2水準と事前/事後テストの2水準に対する2因子) を実行した。本実験では、

独立変数が2つあるためフリードマン検定ではなく、並べ替え検定による分散分析を用いた。なお、並べ替え検定の繰り返し回数は1000回とした。結果、受動/能動グループ ($p = 0.016$) と事前/事後テスト ($p = 0.012$) のそれぞれの主効果で有意差が認められた。一方で、両者の交互作用は示されなかった ($p = 0.682$)。Benjamini-Hochberg 法 (BH 法) に基づいて多重比較を補正した上で、事後検定として行ったウィルコクソン検定 (Wilcoxon test) では、受動トレーニンググループにおける各打鍵の加速度の標準偏差は、事前テストと比較して事後テストにおいて有意に小さくなることが明らかになった。一方で、能動トレーニンググループでは前後のテストで有意な差異は確認されなかった。これにより、Soft-G による受動的な動作教示によって、楽器演奏のトレーニング歴のない各人に対し、ピアノ演奏中の打鍵の力の巧緻性という特定のスキルを改善できることが確認された。

4.7.4 ピアノ演奏実験に関する考察

ピアノ演奏に関する一連の実験によって、3つの主要な発見があった。第一に、本研が提案したソフト外骨格グローブである Soft-G は、既存のハード外骨格グローブと比較して、能動的に生成する指の動作への阻害が小さかった (透明性が高かった) ことである。この結果は、従来外骨格グローブを装着した状態で生じがちであった、ピアノ演奏中のピアニストの指動作の機械的拘束を抑えることができ、同時にフォースフィードバックも提示できることを意味しており、例えば、好ましくない指の動作や姿勢をリアルタイムで補正するといった制御を行う場合には不可欠な要素である。

第二に、Soft-G は既存のハード外骨格グローブよりも、より速く正確なタイミングで指を動かすことができるということである。これは、巧緻な指動作を生成するという目標に関して、Soft-G が比較的優れた制御可能性を有していることを示している。調査の限り、Soft-G は、ソフト外骨格グローブによって、ピアノを弾くための指動作を生成し評価した最初の研究であり、打鍵の最大速度 (秒速 25 打鍵) に関しては、プロのピアニストの能力を超える性能が発揮された。しかしながら、Soft-G による能動的な演奏は、打鍵全体の指と鍵盤の接触の持続時間の標準偏差 (打鍵のばらつき) は、ピアニスト自身による能動的な演奏よりも大きくなった。これは、ピアニストが指先と鍵盤の接触によって生じる機械的な不安定性を補正しているためであると示唆される。より巧緻な動作を達成するためには、このような補正が Soft-G の制御手法に統合される必要があるといえる。

第三に、Soft-G を用いた受動的な動作教示によって、グローブを取り外した後に演奏する場合であっても、ピアノ演奏中の打鍵の力の巧緻性の向上が促進された。興味深いことに、楽器演奏のトレーニング歴のない被験者に対し、Soft-G によるサポートを行わずに自

身で楽曲演奏のトレーニングを行った場合は、事後に力の巧緻性が向上することはなかった。この能動トレーニンググループの結果は、Soft-Gによる受動的な演奏のトレーニングが、ピアノ演奏における指動作の細かい力のコントロールの技術を、効率的に学習できる効果があることを示している。これは、Soft-Gが出力する教師動作に対応した、正しい体性感覚のフィードバックが身体にさらされ続けたためであると考えられ、結果として、人間の感覚運動システムの使用依存的可塑性（use-dependent plasticity）が強化され、運動記憶が統合された可能性がある [61]。

4.8 まとめ

本章では、空気圧人工筋肉を用い、人間の指の筋肉解剖学に基づいて設計したソフト外骨格グローブ（Soft-G）の構造、仕様、実装、機能について記した。Soft-Gには特有の、複数の機能が搭載された。第一に、指の前後面に拮抗する2つの筋肉のペアを設けることで、各指の動作や姿勢を独立に制御するだけでなく、剛性の制御も可能とした。特に、打鍵動作の際中に、対をなす筋肉を相互に収縮・拮抗させ関節の剛性を高めると、指先による打鍵の力を大きくできることを示した。第二に、Soft-Gの制御システムによって、指の押下力と連続押下動作を正確にコントロールできることを示した。第三に、細径人工筋肉を用いた半自動装着システムによって、Soft-Gを身体に容易に装着できることを確認し、屈伸動作中もほぼずれなしに固定できることを確認し、非効率的な力の伝達を防止できることを示した。第四に、外骨格グローブを装着したプロピアニストがピアノを演奏する際の機械的拘束を、従来のハード外骨格グローブを比較して抑制できることを示した。第五に、Soft-Gによって受動的に生成される運指は、既存のハード外骨格グローブと比較して、短いシーケンスの楽曲の繰り返しをより正確なタイミングで演奏できることを示した。最後に、楽器演奏のトレーニング歴のない各人に対し、Soft-Gを用いた受動的な動作教示を行うことで、グローブを取り外した後に演奏する場合においても、ピアノ演奏中の打鍵の力の巧緻性の向上することが確認され、一定の学習効果が認められることを示した。

これらの結果は、ピアノ演奏が巧緻な指動作の独立したコントロールが最も高度に要求されるモデルの一つであることを考慮すると [55]、Soft-Gが楽器演奏、スポーツ、外科手術など様々な局面において、精密で繊細な指の動作の生成とスキルの獲得のためのガイドとり得る潜在的可能性があることを示唆している。今後は、現段階で本研究では取り扱っていない、ユーザによる指の能動的な動作の最中に、Soft-Gによる力のフィードバックを行うことで与えられる影響について調査する必要がある。将来的に様々な局面において汎

用性の高いシステムとするには、指の動作や姿勢のセンシング機能を備えたりリアルタイムのフィードバック制御システム等を用いて、指の動作や姿勢に基づいて Soft-G をコントロールする統合システムの実装が不可欠であると考えられる。

第5章

生理的身体動作の生成による ヒューマノイドロボットの感情表現

現在のヒューマノイドロボットの研究は大きな進展を遂げており、近い将来人間とロボットのコミュニケーションがあたかも人間同士でコミュニケーションをするように円滑で濃密なものになると期待されている。Geminoid [62] や Telenoid [63] のようにヒューマノイドロボットは単に人間の形状をした「機械」に留まらず、アイデンティティを持った人工生物として人間に接するようになって来ている。このようなヒューマノイドロボットは容姿そのものや表情、手を振るといったボディジェスチャを人間に模することでユーザにロボットの感情を認知させることを試みている。

しかしながらヒューマノイドロボットは依然として人間を構成する様々な要素を十分に網羅しているとは言い難い。これらのロボットは姿形やボディジェスチャそのものこそ人間に非常に近い要素を有しているが、内部はモータ等で構成された機械的な機構であるため、厳格に見ると動作が不自然である上に、実際の人間のように身体に触れたときの感触に変化はない。我々がヒューマノイドロボットに関してこのような微細な動作に着目する理由は、実際の人間はしばしば何気ない繊細な動作や反応に対しても敏感に相手の感情を読み取ることができるためである。しかしながら、従来のヒューマノイドロボットにはこのような動作を表現することは困難である。

そこで本研究は従来の機械的機構を含まず微細な動作で感情表現が行えるヒューマノイドロボットへのアプローチを図る。実装にあたり我々は身体の様相を決定する重要な要素の一つである筋に着目した。筋は関節を駆動させるためにも用いられるだけでなく、敏感に皮膚表面の形状や身体の軟らかさそのものを常に変化させる。ここで本研究は実際の人間には存在し、ヒューマノイドには存在しない情動表出が行われる「何か」を構成するも

のとして、このような全身の筋の意識的もしくは無意識的な微細な動作が必要な要素の一つであるのではないかと考えた。

以上の考えから本研究は人工筋肉をヒューマノイドロボットの視触覚インタフェースとして応用することで、ロボットの身体表現を向上させるためのアプローチを図る。

5.1 インタフェース設計

人間の身体動作は、生理的には感覚器官から得た信号パタンに応じ、脳による情報処理を介して筋を動作させることにより生じた出力結果であると言い換えることができる。例えば人間は表情やボディジェスチャなどによって意思提示や感情表現を記号的に扱うが、これらの視覚的意思表示も元を辿れば全身にある特定の筋肉を複合的にはたらかせることによる出力結果であると捉えることができる。つまり人間の入出力機能を扱うインタフェース設計を行うに当たっては、生理学的知見及び解剖学的知見に理解を深めた上でインタフェース設計を行うことが極めて重要であると考えられる。特に皮膚感覚入出力を用いたインタフェースにおいては、人間の身体表面における基本的な特性である表皮の柔軟な質感と筋肉のはたらきに伴う皮膚の視触覚的特性の動的な遷移を考慮することが重要であると考えられる。

一方で従来の皮膚感覚の入出力拡張インタフェースの研究分野においては、実際の人間の大きな特徴である表皮の質感及び内包する骨格筋の動作によって皮膚上に生じる形状・硬度の変化といった非記号的な視触覚的特性に着目したインタフェース設計に対して十分な試みがなされていないのが現状である。また、触覚コミュニケーションにおける人間の行為に伴う皮膚感覚入出力の構成要素を深く掘り下げるためには、以上のような観点からアプローチを図ることが必要不可欠であると考えられる。

このことから本研究では生理学的知見及び解剖学的知見に基づき、表皮の質感及び骨格筋の動作によって皮膚上に生じる形状・硬度の変化を再現し、より人間の特徴に近い見た目・感触の提示が行えるインタフェースの設計を検証する。

5.1.1 Musculus-Haptic Display

本研究で達成すべきは、生理学的知見及び解剖学的知見に基づく皮膚の「質感」及び骨格筋の動作によって皮膚上に表れる「形状・硬度の変化」を再現することで、人間の特徴に近い見た目・感触の提示が行える視触覚インタフェースへの応用を図ることである。身体を構成する筋構造とその機能に関する知見を基に、

- 各身体部位に対して、皮膚上の形状・硬度の変化を決定付ける筋の選定を行う。
- 選定した筋の機能を模倣・簡略化した筋アクチュエータを開発する。
- 人間の皮膚の質感を再現する人工皮膚に筋アクチュエータを組み込むことで、表皮に表れる形状及び硬度の動的変化を可能とするヒューマノイドを開発し、人間の皮膚感覚の入出力機能特性に基づいた視触覚インタフェースの設計のための知見を得る。

ということを目的とし、以上の考えにより開発する視触覚インタフェースを **Musculus-Haptic Display (MHD)** と名付ける。

5.1.2 基本設計

MHD の設計方針は、骨格筋の緊張と弛緩によって生じる形状の変化と硬度の変化を模倣し、解剖学的知見に基づく骨格筋構造と同座標に MHD を配置することで、人間の皮膚の視触覚的な特性を再現することである。つまり、MHD の設計と制御の指針は以下の通りである。

座標の一致

解剖学的知見に基づき筋のサイズ・形状及び骨格筋構造に対応する MHD の空間的座標の一致を図る。

形状制御

筋肉の形状変化の時間軸方向に伴う遷移の動的な制御を可能とする。

硬度制御

筋肉の硬度変化の時間軸方向に伴う遷移の動的な制御を可能とする。

人体を構成する骨格筋の出力は緊張と弛緩による 1 自由度の運動とそれに伴う硬らかさの変化である。MHD は、形状と硬度の独立な制御を可能とするため、直径数 mm のパーティクル粒子を充填した柔軟性・気密性のあるバルーンと McKibben 型人工筋肉の 2 系統で構成する。

図 5.1 に示すように、バルーンは内部の気圧を外部の真空ポンプと制御弁を用いて内部圧力を制御することで、隣接するパーティクル間の摩擦力を自在にコントロールすることを可能とし、バルーン全体の硬度の連続的な制御を行う。本バルーンは大気圧下でクッションのような柔軟な感触を持つ点において機械式アクチュエータでは実現が困難な利点

であると考えられる。

形状の変化は図 5.2 に示すように、バルーンに McKibben 型人工筋肉を組込み、制御弁を用いて供給する圧縮空気の圧力を制御することによりバルーンと McKibben 型人工筋肉の接触面における張力のコントロールによって任意の形状に遷移させることが可能となる。以上のように 2 系統の出力パラメータを構成することで、骨格の動作特性を再現する制御手法を検証する。

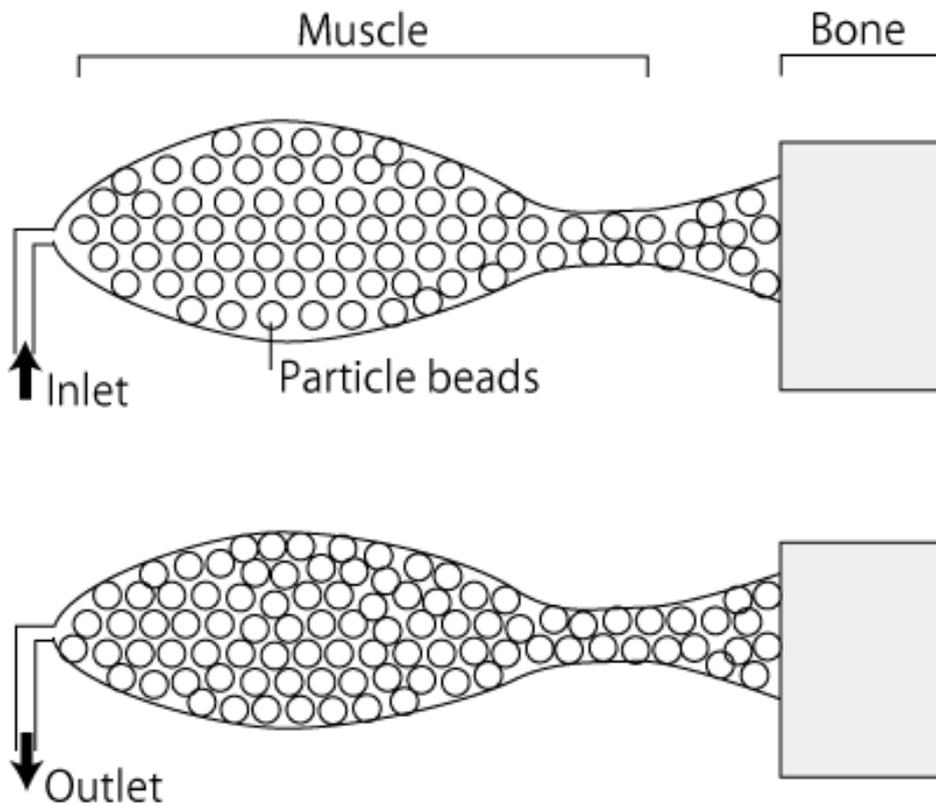


図 5.1 気圧制御による MHD の硬度制御

— 上:軟状態、下:硬状態

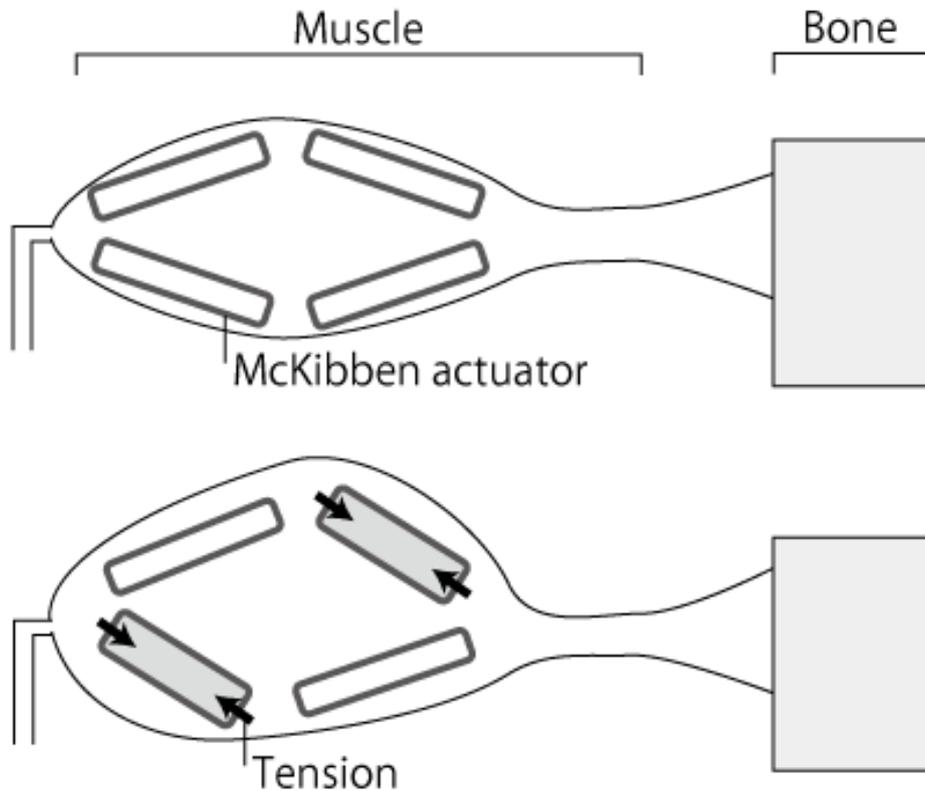


図 5.2 McKibben 型人工筋肉による MHD の形状制御

— 上:定常状態、下:変形状態

5.2 実装する身体部位の考察

人間がコミュニケーションを行う際に最も用いている部位は表情やジェスチャを提示する顔や腕部であると考えられる。これらの部位は動作の矛盾が多少なりとも起こると、人間は非常に敏感に反応して違和感を感じる事となる。そこで人間が意思伝達を行う際に頻繁に用いられる部位は実装の対象から除外することとし、全身を構成する骨格筋のうち、第一ステップとして MHD の実装に適する部位の考察を行う。

5.2.1 筋構造

全身の筋の構造を図 5.3 に示す。人体にはさまざまな形状や大きさを示すおよそ 220 個の自身の意志で動かすことのできる骨格筋が存在する。骨格筋全ての総重量は人体の約

40%を占め、人体で最も重量の大きい器官である。身体運動に関係する筋は、姿勢筋と運動筋に分類させる。また図5.4に示すように骨格筋の構造は筋繊維と結合組織の密着した束のような構造となっており、機能的な連合体となっている。なお骨格筋の筋繊維はほぼ全て同じ直径である。一方で1)筋繊維の長さ、2)筋の全長に対する筋繊維の長さの割合、3)張力に対する筋繊維の傾斜角に関してはそれぞれ大きく異なる。これらの要素によって以下のように筋のはたらきが決定される。[1]

- 筋繊維が長いほど、収縮が可能となる距離は大きくなる。
- 筋繊維の筋全長に対する割合が大きいほど、筋の生理学的横断面が小さいため収縮力も小さくなる。
- 筋繊維の腱に対する傾斜角が大きほど、生理学的断面が大きいため収縮力も大きくなる。

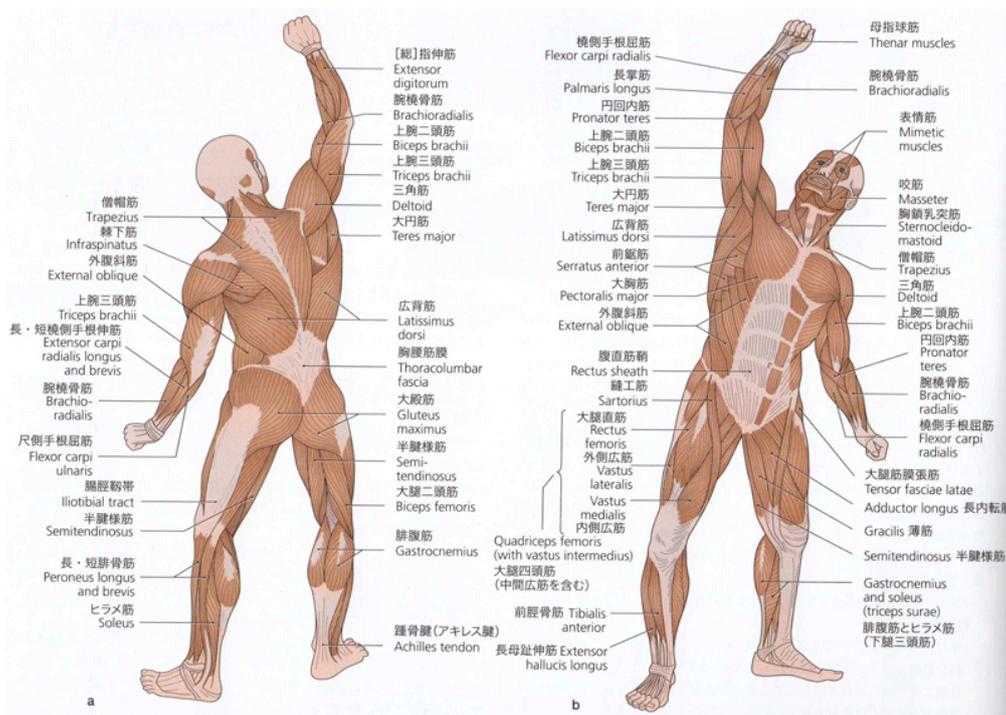


図 5.3 全身の姿勢筋と運動筋（[1]より再構成）

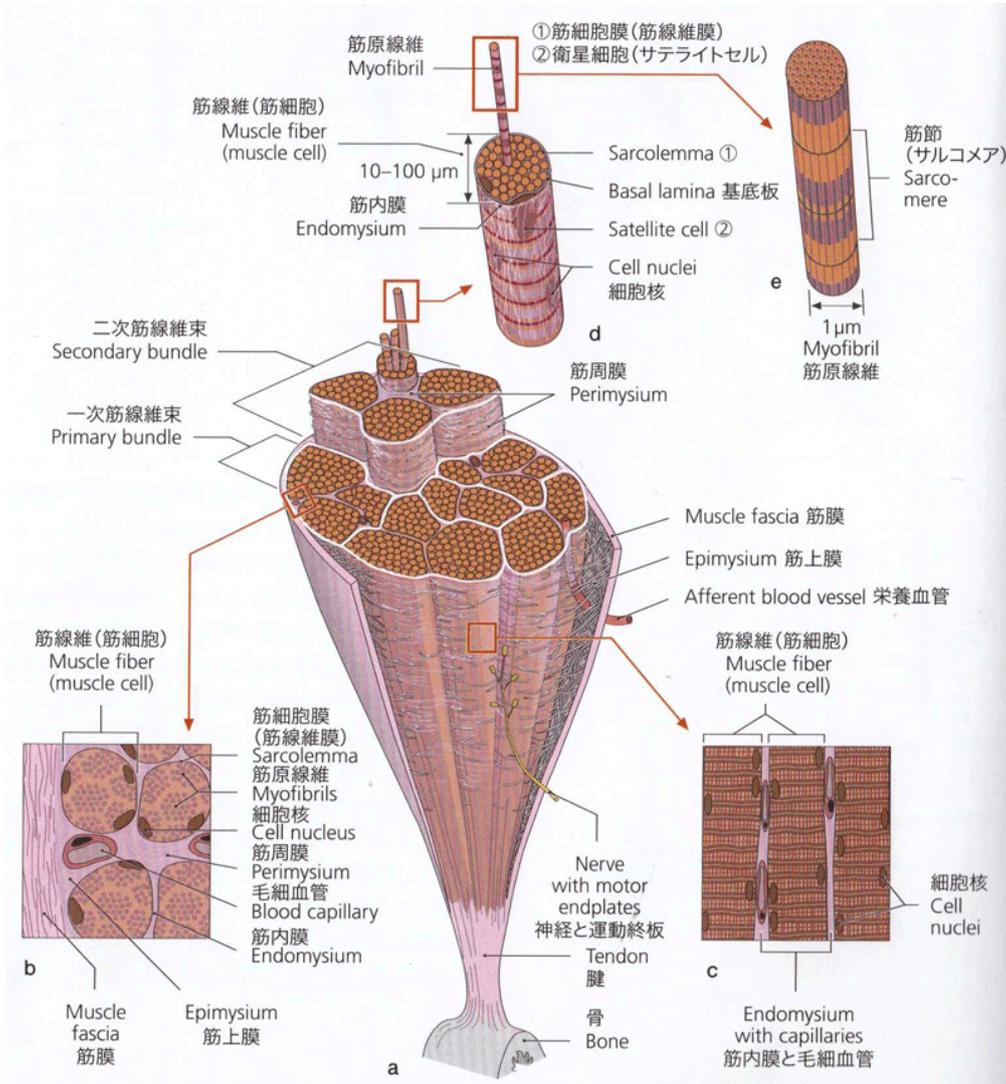


図 5.4 骨格筋の構造 ([1] より再構成)

5.2.2 臀部と大臀筋

図 5.5 に下肢後面の筋構造を示し、図 5.6 に臀部皮膚表層の大臀筋の筋膜と皮下神経の配置図を示す。

本研究では、筋動作における特徴的な身体部位一つとして臀部に着目する。臀部は普段は衣服に隠れている部位であるが、臀部の骨格筋の大部分を占める大臀筋は全身の筋部位の中で最も体積が大きく、緊張-弛緩間の変位及び収縮力が大きい部位の一つである。それゆえ皮膚上の凹凸形状、軟らかさの変化が非常に豊かに表現することができると考えら

れる。さらに臀部は人体のうち最も脂肪が厚い部位であるため、触覚的なフィードバックの多様性に富んだ部位であるといえる。

また臀部は「尻叩き」として躑のため用いられること、漫画や喜劇におけるエンタテインメントの表現として用いられること、さらには性的な対象や彫刻などの芸術表現としての側面を有するなど実に多彩な文脈を人間に想起させる部位でもあり、ユーザインタラクションの設計の検証を行うに当たっても興味深い部位である。

本提案手法を用いたヒューマノイドロボットの視触覚インタフェースはこれまで試みられていないものであるため、ロボットの身体表現の向上を図るために効果的な身体部位は現状では明らかではないが、本研究では以上の考えに基づき MHD の一実装として臀部を対象とし、大臀筋の形状及び動作を模倣した MHD の開発と臀部型ヒューマノイドロボットの試作を行う。また本実装ならびに考察を通じて今後の MHD の研究基盤を得ることを目標とする。

5.3 SHIRI

臀部ヒューマノイドロボット“SHIRI”の概観を図 5.7 に示し、筐体内部の概観を図 5.8 に示す。SHIRI は人間の臀部を模した見た目、軟らかさを有した等身大のロボットであり、表 5.1 にあるように高さが 350mm、幅が最大で 270mm、周囲が最大で 830mm、重量が 5Kg となっている。動作は大きく分けて 3 パタンあり、筐体内部に組み込まれた空気圧駆動型の大臀筋アクチュエータ (GMA: Gluteus Maximus Actuator, 以下 GMA と記す) を制御することによって緊張や弛緩、痙攣、突き出しといった表現を行うことができる。

またユーザによる打撃、ストロークといった入力を判別する試験的なシステムを構築し、ユーザの入力に応じた動作を出力するユーザインタラクションの実装を行った。入力を受けたロボットの筋は打撃やストロークといった行為に応じて緊張状態や弛緩状態に動的に遷移する。この状態変化は実際の人間の筋と同様、皮膚上の形状だけでなく軟らかさも変化するため、ユーザとのインタラクションは姿形変化による視覚情報のみならず、触って変化を感じることで触覚情報を用いて行うことを可能としている。

5.4 筐体デザイン

SHIRI の筐体は図 5.9 に示すように、骨格、骨盤、GMA 及び人工皮膚で構成される。筐体の基礎となる骨格は硬質ウレタンのキューブを鋸で削り出すことで加工・整形を

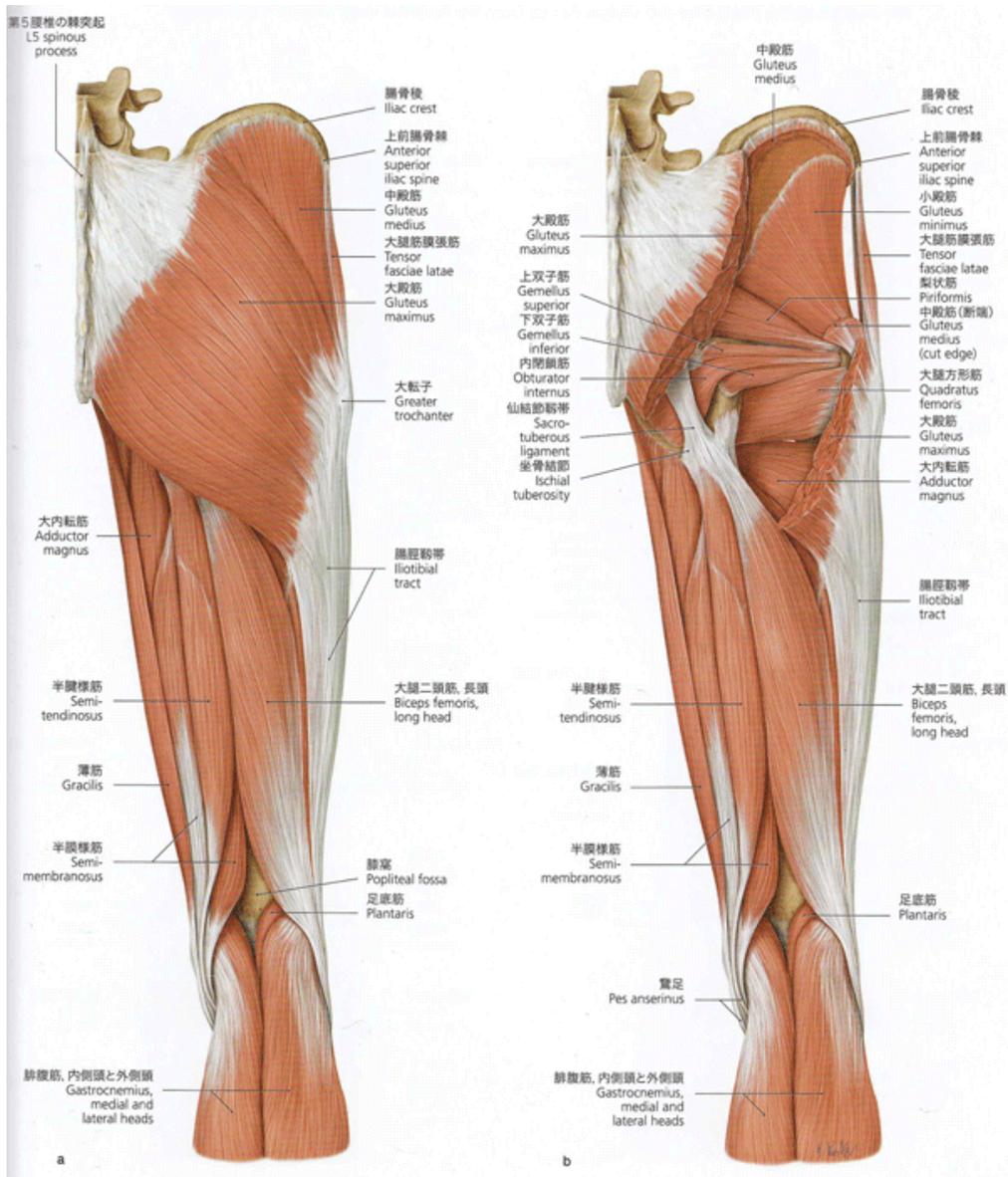


図 5.5 下肢後面の筋構造 (大腿, 骨盤, 臀部の筋 ([1] より再構成))

表 5.1 SHIRI の寸法及び重量

高さ	350mm
幅 (最大)	270mm
周囲 (最大)	830mm
重量	5kg

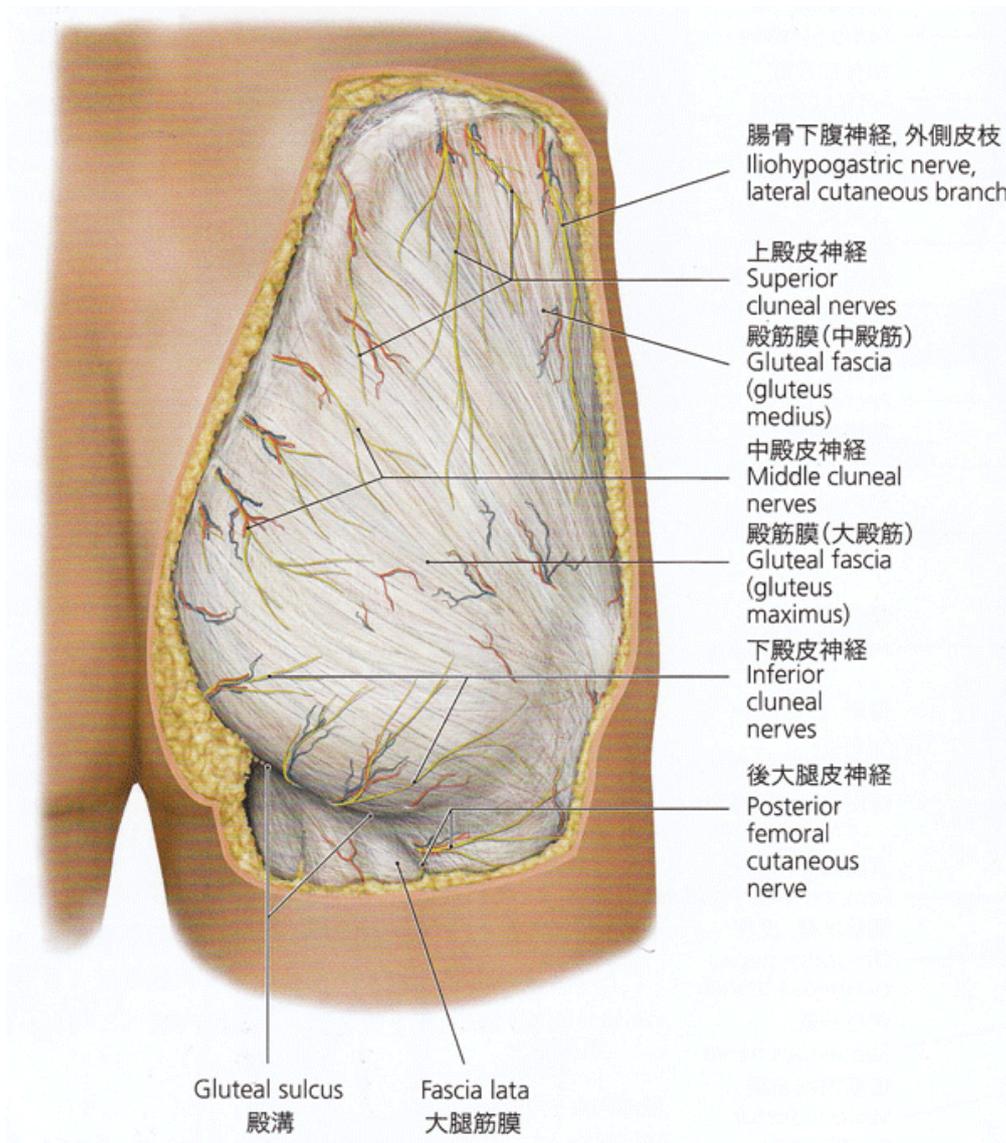


図 5.6 臀部表層の筋膜と皮下神経 ([1] より再構成)

行った。使用した硬質ウレタンは硬度が高いため臀部側の皮膚直下に位置した場合、臀部の感触に影響を及ぼすことが考えられる。そこで骨格は前半身を柱とした構造となっており、臀部側の領域には皮膚直下に GMA が配置される設計とした。本骨格は図 5.9 にあるように、背面に骨盤模型を組み込むことができる構造となっており金属の留め具は一切使用していない。また筐体内部の GMA やセンサ素子に接続されているエアチューブ及び配線を通すための管が上面に設けられている。GMA は骨盤と結合することが可能な設計となっている。GMA の両端には腱を模倣した帯が取り付けられており、この帯によって骨



図 5.7 SHIRI 概観



図 5.8 SHIRI 筐体内部の概観

盤と GMA を結合する。そしてこれらの機構に臀部型の軟質シリコン素材を用いた厚さ約 1mm の人工皮膚を覆うことで、筐体が構成されている。骨盤及び GMA の位置や大きさは、臀部型人工皮膚のサイズを元に解剖学的知見に基づいて決定されている。

以上のような素材や構造を設計することで、図 5.10 に示すように皮膚に繊細な質感や凹凸が生じる。このように SHIRI の筐体デザインでは、GMA の動作によって皮膚上に再現される筋の形状や感触の変化のみならず、部位による皮膚の柔らかさの違いや骨のある硬い部位の感触といった要素に至るまで忠実な再現を試みている。



図 5.9 SHIRI の内部構成

— 左から順に人工皮膚，GMA，骨盤，骨格。

5.5 Gluteus Maximus Actuator

GMA の概観を図 5.11 及び図 5.12 に示す。GMA の実装は 5.1 節で述べた MHD の基本設計に基づいて行われている。

GMA はポリスチレン粒子で充填した伸縮性・気密性のあるラテックス素材のバルーンと、左右のバルーンを結合する McKibben 型人工筋肉の 2 系統で構成される。ポリスチ



図 5.10 SHIRI の皮膚の質感及び凹凸形状

レン粒子は 2-3mm のものを用いている。バルーンの形状は実際の大臀筋の形状を模して製作した。また上端には空気の供給及び吸引を行うためのチューブが装着されている。バルーンは真空ポンプによる減圧を電磁弁によって制御することで、柔らかい状態から硬直した状態までダイナミックに変化させることができる。さらに圧縮空気を送り込むことで、バルーン全体を膨張させることができる。このバルーンの膨張は実際の骨格筋の動作特性を模したもので無く脚色の加わった身体表現となるが、多彩な視触覚出力を行うことに貢献できると考え実装を行った。McKibben 人工筋肉はバルーンに張力を与え、GMA 全体の形状を変化させる役割を果たしている。

これらバルーンと人工筋肉の複合的な制御を行うことにより、人間が臀部を引き締めた際に皮膚上に表れる筋肉の形状の変化と感触の変化を自然な動作で再現することができる。また空気の供給と吸引を高速で行うことで、振動を発生させることも可能としている。

5.6 システム構成

システム構成を図 5.13 に示す。本システムは SHIRI 筐体、GMA(パーティクルバルーン、McKibben 型人工筋肉)、エアコンプレッサ (PAOCK 社 ROL-12AS, 370W)、真空ポンプ (ROBINAIR 社 15800J, 1 馬力)、マイクロコントローラ (Arduino UNO)、3ポート電磁弁 (CKD 社 3PB210-M1D)、加速度センサ及び PC により構成される。

図 5.14 に空気圧制御ユニットとその制御回路の概観を示し、電磁弁とエアチューブの



図 5.11 Gluteus Maximus Actuator (表)



図 5.12 Gluteus Maximus Actuator (裏)

接続図を図 5.15 に示す。電磁弁は空気圧制御のために 6 個用いており、それぞれの弁の開閉の組合せをマイクロコントローラでリレー回路を制御することで GMA の硬度及び形状のコントロールを行うことができる。真空ポンプとエアコンプレッサはエアチューブで空気圧制御ユニットに接続されており、パーティクルバルーン及び McKibben 型人工筋肉の内部気圧を真空状態からエアコンプレッサ内蔵のレギュレータによって指定した圧力までコントロールが行える。

またユーザの入力は、接触や平手打ちによって筐体に与えられる振動や衝撃を加速度センサーで検出し、Arduino と PC で認識を行っている。

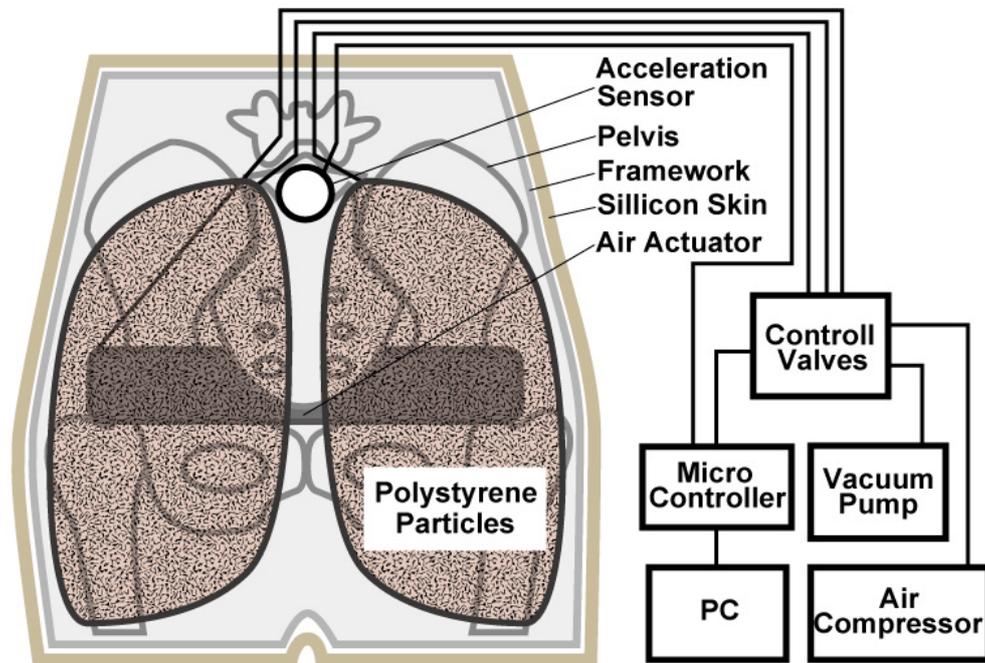


図 5.13 SHIRI システム構成

5.7 動作パターン

SHIRI では次の 3 つの動作パタンのプログラムを組み、臀部による以下のような情動表出を試みた。また、平常時は図 5.16 に示すタイムチャートによって SHIRI が定期的に鼓動を打つように動作し、生物感の表現を行う。

緊張-弛緩

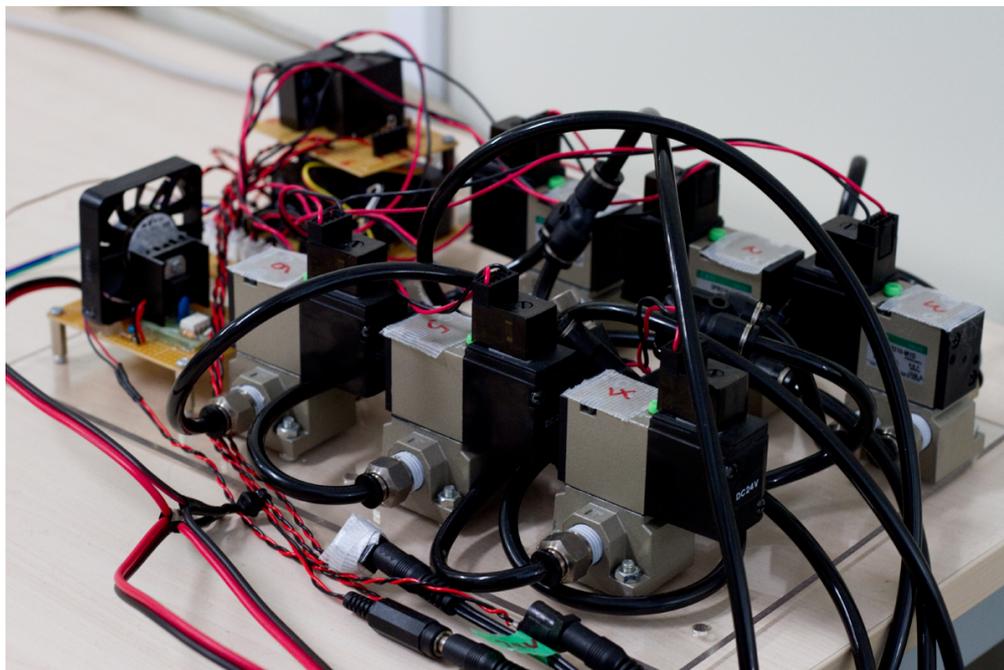


図 5.14 空気圧制御ユニット

恐怖，警戒，身体の強張りを示す身体表現を筋の緊張によって表出させることを試みる。また筋を緊張状態から弛緩状態に移行させることで，恐怖，警戒，身体の強張りから解放される安心感といった情動表出の表現を試みる。

痙攣

筋を小刻みに振動させ，身体の痙攣を表現することで，怯えや恐怖といった情動表出の表現を試みる。

突き出し

臀部を左右交互に膨張させ，ダンスを行っているかのような表現を行う。この動作により喜びや幸福感，さらには挑発といった身体表現を試みる。

SHIRI の基本動作は怯えや恐怖といった情動の表出を目的として生成している。怯えや恐怖といった感情は外敵から身を守るために備わった生物の基本的な本能であるといえる。Grandjean らは，被験者に通常の会話と怒声両方を聞かせ，脳の活動を fMRI でスキャンをする実験を行ったところ，怒声を聞かせた場合で有意に上側頭溝が活発に活動したと報告している [64]。この報告からも人間は他者の怒りや恐怖を無視することができず，危険から逃れようとする反応は人間らしい自然な反応であると考えられる。よって本研究ではシステムの基本的な設計方針として，怯えや恐怖を表現する動作パタンの実装を

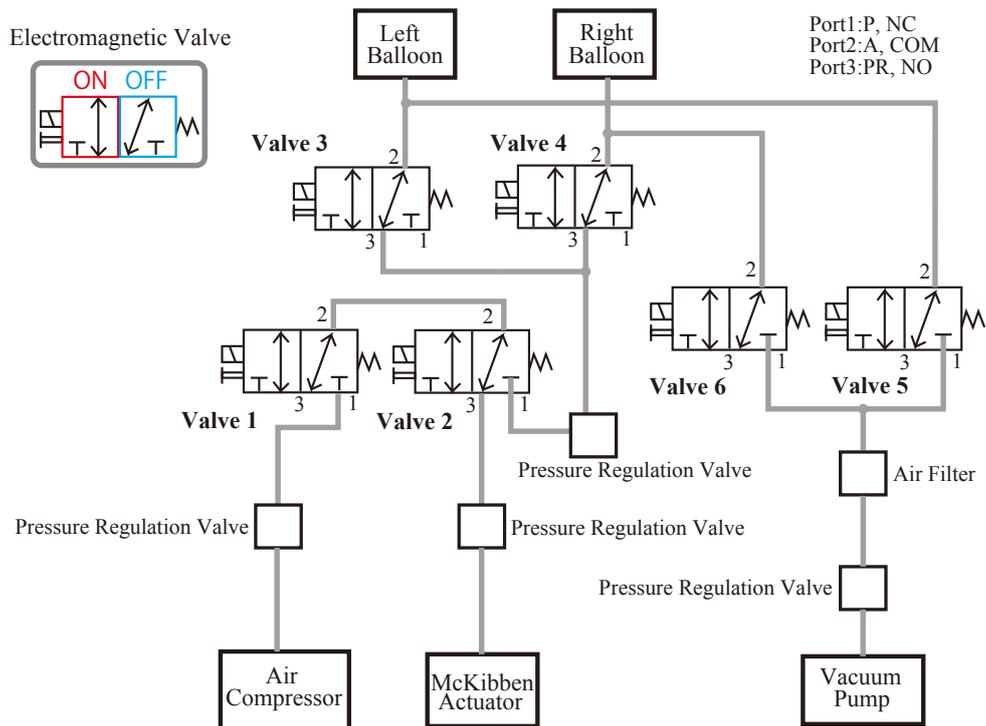


図 5.15 エアチューブの接続

試みることにする。

5.7.1 緊張-弛緩

「緊張-弛緩」パタンの動作原理を図 5.17 に示し、タイムチャートを図 5.18 に示す。緊張した筋は、筋繊維の軸方向に収縮し硬度が大きくなるという特徴がある。そこで GMA においてこの動作の再現を行う。本動作パターンでは GMA のパーティクルバルーンと McKibben 型人工筋肉の双方を同時に用いる。

緊張状態においては、バルーンの内部と真空ポンプの吸引口の空間を空気圧制御ユニッ

トの電磁弁の開閉のコントロールによって同一とした上で、真空ポンプを稼働させバルーン内部を減圧させることで硬化させる。同時に人工筋肉の内部とエアコンプレッサの吐出口の空間を電磁弁の開閉のコントロールによって同一とした上で、エアコンプレッサを稼働させ人工筋肉に圧縮空気を送り込み、バルーンに張力を与える。圧縮空気の圧力は0.3MPa、減圧は-20Paに設定した。これにより大臀筋に力を入れた際に発生する収縮と形状の変化に伴う皮膚の凹凸形状、感触の変化の再現を行う。またバルーンと人工筋肉の内部を電磁弁の開閉によって大気放散することで弛緩状態となる。

5.7.2 痙攣

「痙攣」パタンの動作原理を図 5.19 に示し、タイムチャートを図 5.20 に示す。人体における痙攣は一般的な小型の偏心モータやボイスコイルモータでは再現が困難な高振幅かつ低周波の振動によって生成されていると考えられる。それに対し GMA は、パーティクルバルーンへの圧縮空気の供給と吸引の周期を制御することで、高振幅かつ低周波帯域の振動を生成することができる。また本システムは GMA と人工皮膚の接触面積が大きいいため、筐体の広域に振動を伝達することができるという利点がある。

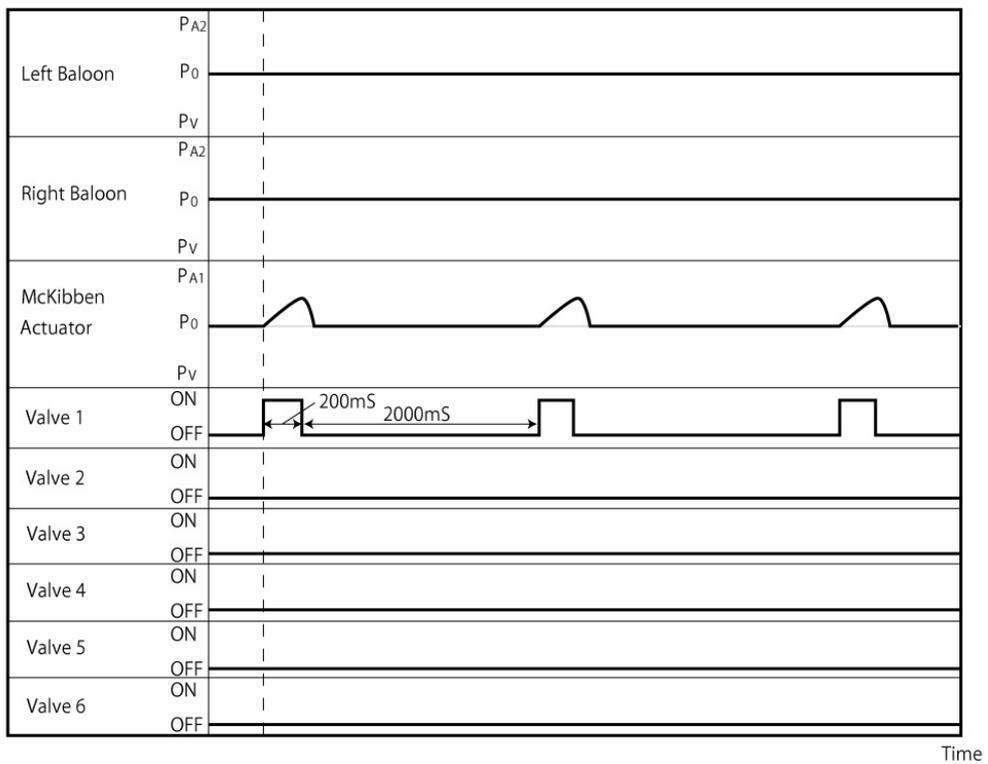
本動作パターンでは、バルーン内部の減圧を続けながら圧縮空気を周期的に送り込むことにより大臀筋アクチュエータが振動を生成し、筋の痙攣の動作を表現する。圧縮空気の圧力は 0.3MPa、減圧は-20Pa に設定した。圧縮空気を供給する周波数はパーティクルバルーンとエアコンプレッサ間の空間を挟む電磁弁の ON/OFF を切り替えることでコントロールする。振動の周波数は観測から 5~10Hz 程度が適当であると判断し、本システムでは 7Hz で圧縮空気の供給を行っている。

5.7.3 突き出し

「突き出し」のパタンの動作原理を図 5.21 に示し、タイムチャートを図 5.22 に示す。臀部を突き出すことによるダンスや挑発の行為はエンタテインメントとしての表現としてしばしば用いられる。そこで GMA においてこの特徴の再現を試験的に試みる。本動作パターンでは GMA のパーティクルバルーンを左右交互に膨張させることで、臀部の突き出しを再現する。この筋の動作は筋の特性とは異なる出力手法であるが、GBA によって可能となる新しい身体表現の一つとして提案する。

本パタンの動作は、パーティクルバルーン内部への真空ポンプによる吸引とエアコンプレッサによる圧縮空気の供給を空気圧制御ユニットによって交互に切り替えることで、左右のバルーンへの吸引と給気が交互に周期的に行われることにより生成される。圧縮空気の圧力は 0.3MPa、減圧は-20Pa に設定した。パーティクル内部の吸引と圧縮空気を供給する周波数はパーティクルバルーンとシンクポンプ及びエアコンプレッサ間の空間に位置する電磁弁の ON/OFF の切り替えの周期を制御することによってコントロールを行う。周波数は観測から 0.5-1Hz 程度が適当であると判断し、本システムでは 0.5Hz で切り替えを行っている。

「鼓動」の表現



PA1 : エアコンプレッサ側のレギュレータ (圧力調整弁) で指定する圧力値
 PA2 : Valve2-Valve3/4 間のレギュレータ (圧力調整弁) で指定する圧力値
 P0 : 大気圧
 PV : 真空ポンプ側のレギュレータ (圧力調整弁) で指定する圧力値
 PA1 ≥ PA2
 ON : 通電
 OFF : 非通電

図 5.16 鼓動 (平常時) パタンのタイムチャート

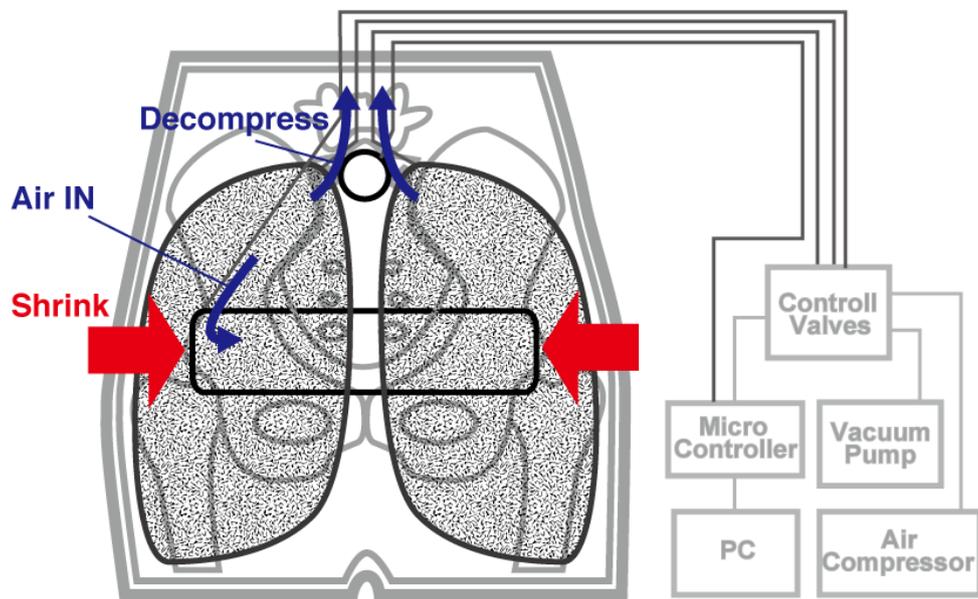


図 5.17 緊張-弛緩パタンの動作原理

「緊張」の表現

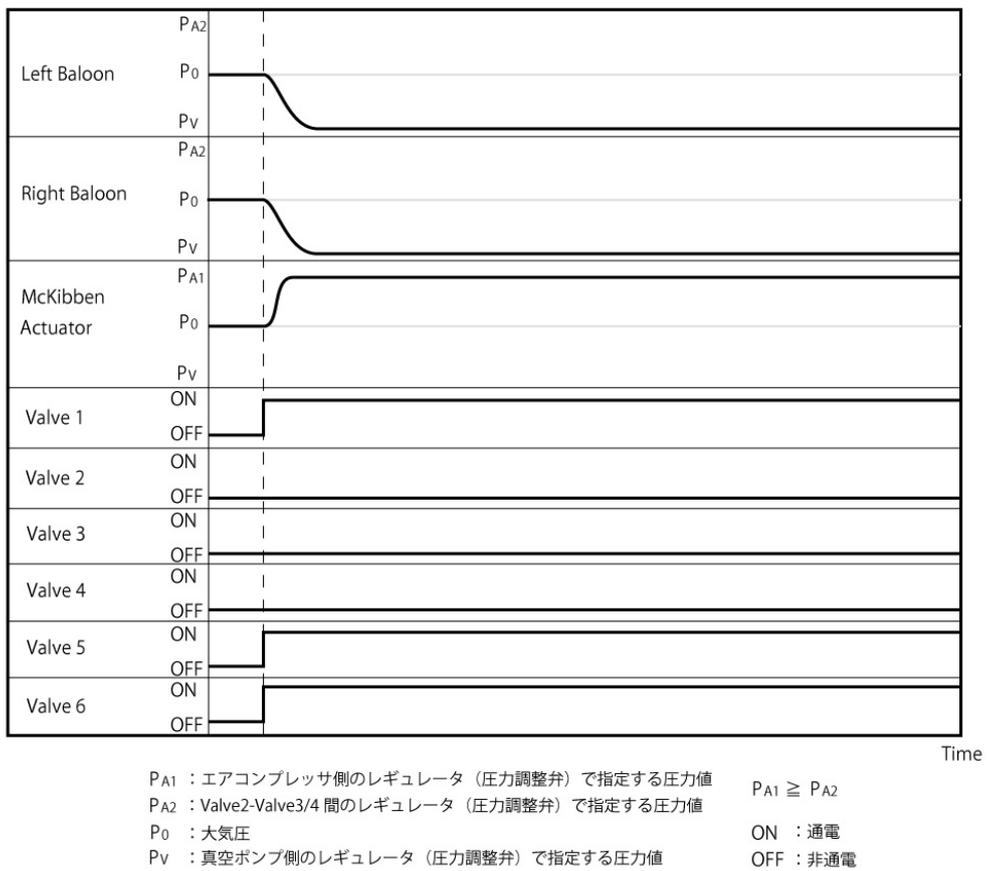


図 5.18 緊張-弛緩パタンのタイムチャート

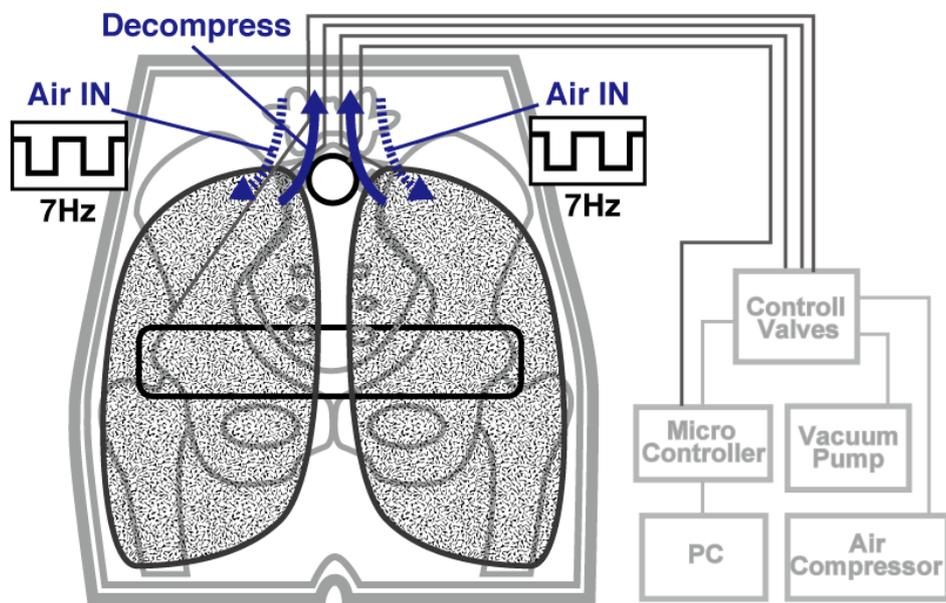


図 5.19 痙攣パタンの動作原理

「痙攣」の表現

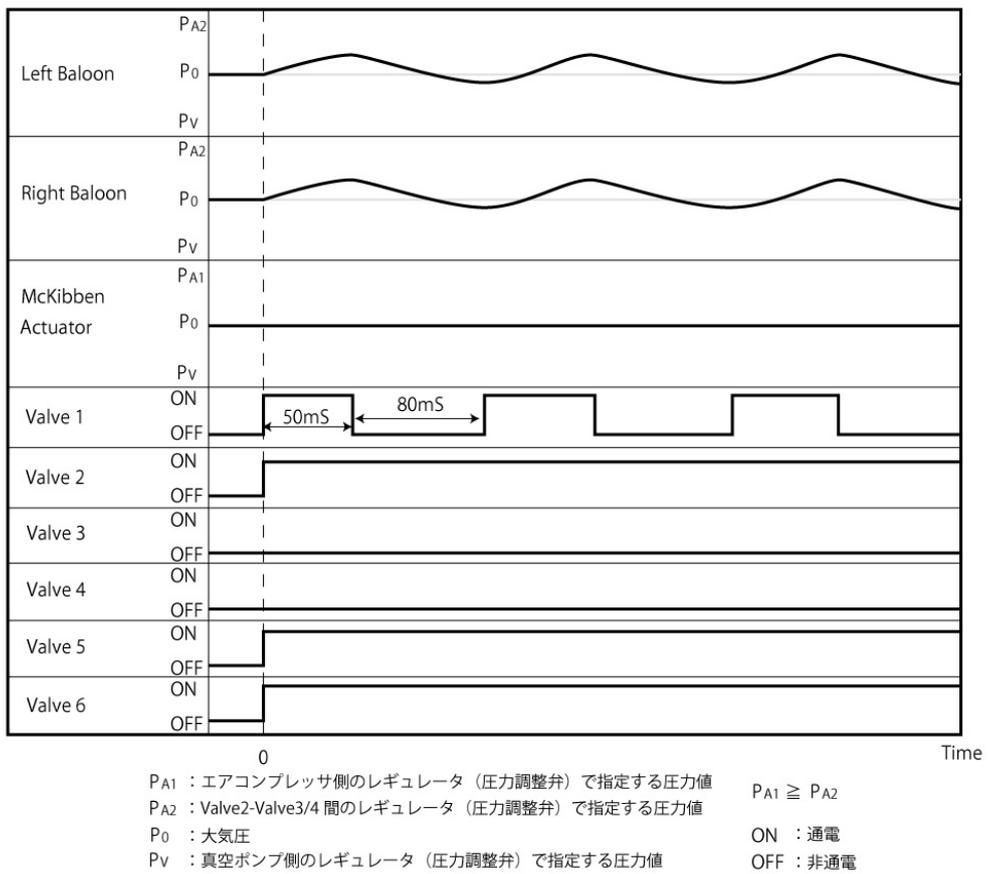


図 5.20 痙攣パタンのタイムチャート

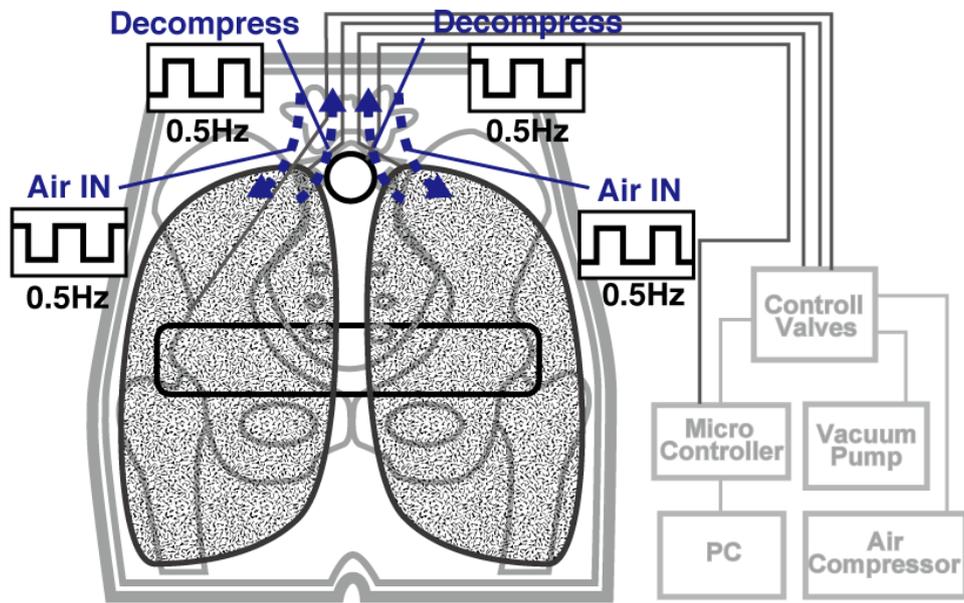


図 5.21 突き出しパタン動作原理

5.8 ユーザインタラクション

SHIRI を用いた試験的なユーザインタラクションの実装を行った。図 5.23 にインタラクションの様子を示す。体験の内容は以下の通りである。

1. ユーザが SHIRI を叩くことで、SHIRI は「緊張」のパターンを示す。
2. 「緊張」の動作を行っている状況でユーザが SHIRI を撫でた際は「弛緩」する。
3. 「弛緩」している状況でユーザが SHIRI を撫でた際は「突き出し」或いは「痙攣」のパターンをランダムに行う。
4. 「突き出し」或いは「痙攣」の動作を行っている状況でユーザが SHIRI を撫でた際は現在行っている動作を継続する。
5. それぞれの動作パターンの継続時間はそれぞれ 10 秒に設定し、ユーザの入力が行われない場合、時間経過後に SHIRI は「弛緩」する。

なお、ユーザの入力の認識は加速度センサの値に二段階の閾値を設定し、より加速度の大きな値がマイクロコントローラに送信された際は「叩く」行為であると認識し、小さい値が送信された場合は「撫でる」行為と認識を行なっている。現状は以上のような簡易的なアルゴリズムによるインタラクションとしているが今後の課題としては学習アルゴリズムを組み、より自然なコミュニケーション手法の検討を行う必要がある。

(a) 叩きによる「緊張 - 弛緩」



(b) 接触による「痙攣」



(c) 撫でによる「突き出し」



図 5.23 ユーザとのインタラクションの様子

5.9 実演動画に対する反応

SHIRIの実演動画[65]を動画配信サイト(YouTube)にアップロードしたところ、国内外で180万回以上視聴され、多くのフィードバックを得ることができた。配信サイトのアナリティクス機能を用いることで、SHIRIが与える印象について検証を行った。視聴者の国別の動画再生回数の上位5カ国は、アメリカ、日本、ブラジル、フランス、ロシアの順に多く、割合はそれぞれ39%、35.2%、7.7%、6.2%、6.0%という結果となった。また、年齢層は13-17歳で2.5%、18-24歳で33.0%、25-34歳で40.9%、35-44歳で14.5%、45-54歳で5.6%、55-64歳で2.1%、65歳以上で1.4%であり、性別は男性86.3%、女性13.7%であった。また、動画の評価ボタンとして設けられている"Likes"と"Dislikes"については、"Likes"(vs Dislikes)が71.5%となり、7割以上の視聴者が動画に対して肯定的な印象を持ったという結果となった。

表7.1(付録)に投稿されたコメントを示す。コメントはおよそ1000件弱寄せられ、動画の管理者はコメントに対する編集などは一切行わず、率直な視聴者の意見を収集した。また、動画の概要欄には説明文等は記載せず、一切のバイアスは排除してある。コメントは臀部ロボットに対する奇怪さやロボットとして実装することへの疑問を表すような反応が半数以上を占める結果となった。本研究は筋肉の微妙な動作によるロボット新たな感情表現による院ららクシヨンの目的としており、ボディは男性とも女性とも判断ができないデザインを指針として実装を行った。しかしながら、本ロボットに対して性的な魅力を見出すコメントや、逆に抵抗感を表すコメントも少なくなかった。一方で概ねエンタテインメントとして受け入れた視聴者が多くを占めていることから、ロボットの新たなエンタテインメント表現として肯定的に捉えられたと考えることもでき、SHIRIのヒューマノイドロボットとしてのプレゼンスの高さを示した結果として評価できる。

SHIRIの動画の派生と考えられるプロモーションビデオを使用した、アーティストの投稿も確認された。(Basement Jaxx - Never Say Never ft. ETML [66])。なお、本動画の再生回数は執筆時点で3000万回以上となっており、これらの反響により、SHIRIによる感情表現が一定のインパクトの大きさを示すものであったものと評価することができる。

5.10 考察

本研究が提案するヒューマノイドロボットの身体表現の向上に貢献できるか否かは未だ仮説の域を出ていないのが現状である。しかしながら、提案手法を用いた皮膚の形状・硬

度変化の表現は実際の人間には必ず備わっている特性であることは紛れもない事実であり、従来のヒューマノイドロボットではこのような試みが行われて来なかったこともまた然りである。今後は筋の動作の再現性の向上を図ると共に、臀部以外の部位の実装を行うことで筋の視触覚的变化がロボットの身体表現に与える影響に関して詳細な検証を行う必要があると考えられる。また既存のヒューマノイドロボットの皮膚に MHD による表現を追加することで、ユーザの認知に変化があるのか検証を行うことも提案手法の有効性の重要な判断材料となることが見込まれる。

個々の要素に関して今後検討すべき課題を以下に述べる。

筐体デザイン

本稿による筐体のデザインは視覚的には質の高いものとなったと考えている。一方で、人体における臀部の弾性感の再現に関しては特に改善の余地が残されている。解剖学的には、臀部は皮膚と大臀筋膜の間には厚い脂肪が含まれており、これが臀部特有の感触における重要な要素となっている。よって本来脂肪が配置されるべき領域に、軟質のシリコンやウレタンの層を追加することで、人間に近い皮膚感覚の提示を行うことができると考えられる。

Musculus-Haptic Display

本稿では、Musculus-Haptic Display を提案し、筋動作の再現を行うための制御手法を示した。実装を行った大臀筋アクチュエータは、左右の大臀筋を模したパーティクルバルーン及びそれらを結合する 1 本の McKibben 型人工筋肉を用いた設計としたが、実際の大臀筋の硬度と形状の変化には未だ差異があることが課題の一つである。これに対する対策として第一に、パーティクルバルーン内部のパーティクルの素材や大きさの選定を深く考察する必要があると考えられる。第二に、McKibben 型人工筋肉の本数や配置を見直すなどして、実際の臀部の挙動との比較実験を通して詳細に検証することが求められる。

動作パターン

本システムでは、動作パターンとして怯えや恐怖といった情動の表出を表現の基礎として「緊張-弛緩」、「痙攣」のパターンを生成した。それに加えて喜びを表現する試みとして「突き出し」のパターンの表現を行った。出力された動作は主観的な評価となるが、生物感を感じることでできるような視触覚提示が行えたと考えている。しかしながら、本ロボットによる任意の情動の表出をユーザに対し認知させることができるか否かは未だ疑問が残っている。一方で、エンタテインメントとしていわゆる「面白い動き」であるとの意見は実演展示などを通して得られており、パフォーマンス

ンスロボットとしての一定の価値を提供することができるものであることが示唆された。

他の身体部位への応用

例えば背中のように臀部以外の部位への実装も検討する必要がある。骨格筋は人体の大部分を占める器官であるため、どの身体部位に関しても本提案手法が適用を行うことができると見込まれる。最終的には人体の全ての部位への実装を図ることが本研究の終着点の一つとなるであろう。

5.11 まとめ

本研究では、人間の筋の硬度変化・形状変化と、それに伴って皮膚上に表れる質感や凹凸の変化の表現を可能とするヒューマノイドロボットを提案した。実装する身体部位として、人体の骨格筋に中でも最も体積が広く、形状の変位が大きい大臀筋と特有の多彩な文脈を有する臀部に着目し、臀部ヒューマノイドロボット“SHIRI”を開発し、ユーザインタラクションの実装を行った。

今後は動作の再現性の向上とユーザに対するインタラクションの充実を図ってゆくと共に、他の身体部位に関しても実装を検討する。また本提案手法によるロボットの身体表現がユーザの認知に及ぼす影響に関して、評価実験を通して明らかにしていきたいと考えている。

第6章

体型可変ヒューマノイドボディによるロボットの身体表現の拡張

本章では、前章のヒューマノイドロボットの感情表現を主な目的として設計されたSHIRIに対し、ヒューマノイドロボットの身体の拡張に関する試みとして行われたSHIN-TAIについて論じる。

6.1 SHIN-TAI：人工筋肉，人工脂肪によるヒューマノイドの体型のコントロール

本研究は、個性的な複数の体型に変身するヒューマノイドロボットボディ SHIN-TAI の開発を行う。SHIN-TAI は、人間とインタラクションする人型ロボットを、個々人が好む性別・身体的特徴へ可逆的に自由に変化させることを可能とするために実装されたシステムである。人間とソーシャルロボットがインタラクションを行う状況において、親近感や安心感といった感情を助長させるためのロボット筐体デザインの基盤を築くことを目的とする。

本プロジェクトでは、ロボットの身体的特徴をコントロールする手法として、皮膚の直下に存在し、姿勢に顕著な影響がある組織である筋肉と脂肪に着目した。実装にあたり、第一に筋肉の動作に伴う形状と硬度の変化をコントロール可能とする人工筋肉の開発を行った。開発した人工筋肉は筋肉量の増減、筋肉の駆動によって生じる微妙な身体形状や感触の変化を再現する。第二に身体の体積の増減のコントロールを可能とする人工脂肪の開発を行った。人工脂肪は筐体の皮膚に複数組み込まれ、身体部位別に体脂肪率を増減させることにより、体型と感触のバリエーションを拡張する機能として実装された。これら

のメカニズムにより SHIN-TAI は痩せ型、標準体型、肥満体といったように可逆的に体型を変化させることができる。また、例えば男性的な筋肉質の体型、女性的な柔らかい印象の体型などの身体的特徴を模倣したものに変化させることができる。

6.2 研究背景

人間とコミュニケーションを行うことができるロボットに注目が集まっている。殊にヒューマノイドロボットに関するシステムはこれまで数多く提案されており、従来の映画、漫画、アニメ等の娯楽作品にも数多くの人型ロボットが登場し根強い人気を集める事例が珍しくないことなどからも人々からの関心を最も集めるロボットの形の一つであるといえる。近年になりロボット技術や人工知能 (AI) の著しい発展によって、人型ロボットは人間に迫る繊細な表情や身体動作を獲得しつつある。広告やエンタテインメント業界での活躍のみならず介護福祉の現場でも心理療法の一手法として導入されるなど、様々なユニークなロボットが社会に浸透し始めている。これらの現在の人型ロボットの姿形の設計指針は主に人間に極限まで近づける機能を求めたものか、人間をデフォルメしたデザイン (“ かつこいい”, “ かわいい” 等の印象を与えるもの) に仕上げるかに分類される傾向がある。それらのロボットの筐体のほとんどは生物の皮膚とは対比的に硬い材質で形成されており、かつ形状が不変なものである。それに対し、本研究で提案する人型ロボットの設計指針はそのどちらにも分類されない。すなわち、ある部分においてはロボット特有の機能によって実現される人間を超えた性能と、人間らしいリアリティのあるデザインの両方を同時に満たすものである。

ソフトロボットの分野ではロボットの内部にモータのようなメカニカル機構を用いず、生物のようなしなやかな動きや機能を実現するいくつかの研究がある。空気圧を動力源として起動するロボットハンド [67], [68] や人工生命 [69]–[71], また着色された液体によって擬態とディスプレイを実装したロボット [72] など独特な研究が遂行されている。これらの研究はロボットそのものの柔らかさを備えること、ロボットに必要な機能を実装することを同時に実現しているといえる。このように、人間には再現することが難しい身体動作や機能を持たせることができ、単に人間の身体動作に近づけるだけでなく様々な展開が可能である。これはヒューマンロボットコミュニケーションにおいてとりわけ重要である姿形に置き換えても同様である。すなわち姿形を単に人間に近付けるだけではなく、ロボットにしか担えない表現の展開があるのでないかと考える。ヒューマノイドロボットのデザインに関しては、実際に存在する人間を忠実に再現することを目的としたもの、人間に対する親しみやすさを増幅させる意図のもとで簡素化を目指したものなどがあるため単

一の指標で語れるものではないが、共通した課題として人間と何らかのインタラクションを行うロボットにおいては、如何にロボットに人間らしい特徴、個性、生命感を与えることができるかという点が最も重要な要素の一つである。

本研究ではこれらの課題に対し、ヒューマノイドロボットのボディの形状すなわち身体的特徴が不変であることに問題意識を持ち、この点にフォーカスした。従来のロボット研究では人間の姿形を再現し、表情やボディジェスチャも同様に模倣して人間らしさを追求したものが複数あるが、それでもなお身体的特徴は実装された段階のものから不変である。実際の人間においては、身体的特徴はその人の個性を形成する重要な要素の一つである。すなわち身体的特徴をコントロールすること可能となれば、単一のロボットがあらゆる身体的な個性を持つことが可能となるのではないかと考えた。従来手法では身体的特徴の異なるロボットを実現する場合、それぞれのロボットを複数台製作すること必要があった。人間の身体的特徴は様々であり、その様々な特徴を持ったロボットをその都度製作していくことに限界があるのは明らかである。

本研究が目指すのは単一のロボット異なる身体的特徴にトランスフォーム(変態、変身)する人工生命(ロボット)であり、ヒューマンロボットインタラクションにおいてロボットを各々の人間が好む身体的特徴にトランスフォームさせることで、人間のロボットに対する親近感や安心感を助長させる新しいロボットボディのデザインである。”SHIN-TAI”は等身大の上半身型のヒューマノイドロボットボディであり,”スリム”,”筋肉質”,”官能的”,”肥満体”といった体型を再現する様々な状態にトランスフォームさせることができる(Fig. 6.1)。併せて、SHIN-TAIは身体的特徴を変化させると同時に皮膚形状や皮膚感覚も変化する。これは例えば筋肉質と肥満体では身体接触を介したコミュニケーションにおける感覚提示も異なることから、姿形だけでなく皮膚感覚も再現する必要があると考えたためである。このことは対人コミュニケーションを行うロボットにおいて重要な要素であると考えられる。なぜならば、実際の人間のコミュニケーションにおいても身体的特徴に関する個性は相手への好意に関わる重要な要素であり、親密度が向上するに従って身体接触を介したコミュニケーションの機会も増え関係がより深まってゆく過程が見られるからである。

SHIN-TAIでは身体的特徴をコントロールする手法として、身体の皮膚下に存在する顕著に視触覚的な変化が生じる筋肉、脂肪の2つの構成要素に着目している。第一に筋肉の動作に伴う形状と硬度の変化を再現するコントロール可能な人工筋肉を実現することで、筋肉量増減、微細な身体表現、皮膚感触の変化の表現を試みた。更に第二に皮膚に内蔵したコントロール可能な人工脂肪を実現とすることで、体脂肪率の増減による体型と感触のバリエーションの拡張を試みた。これらを複合的に制御可能なヒューマノイドロボット

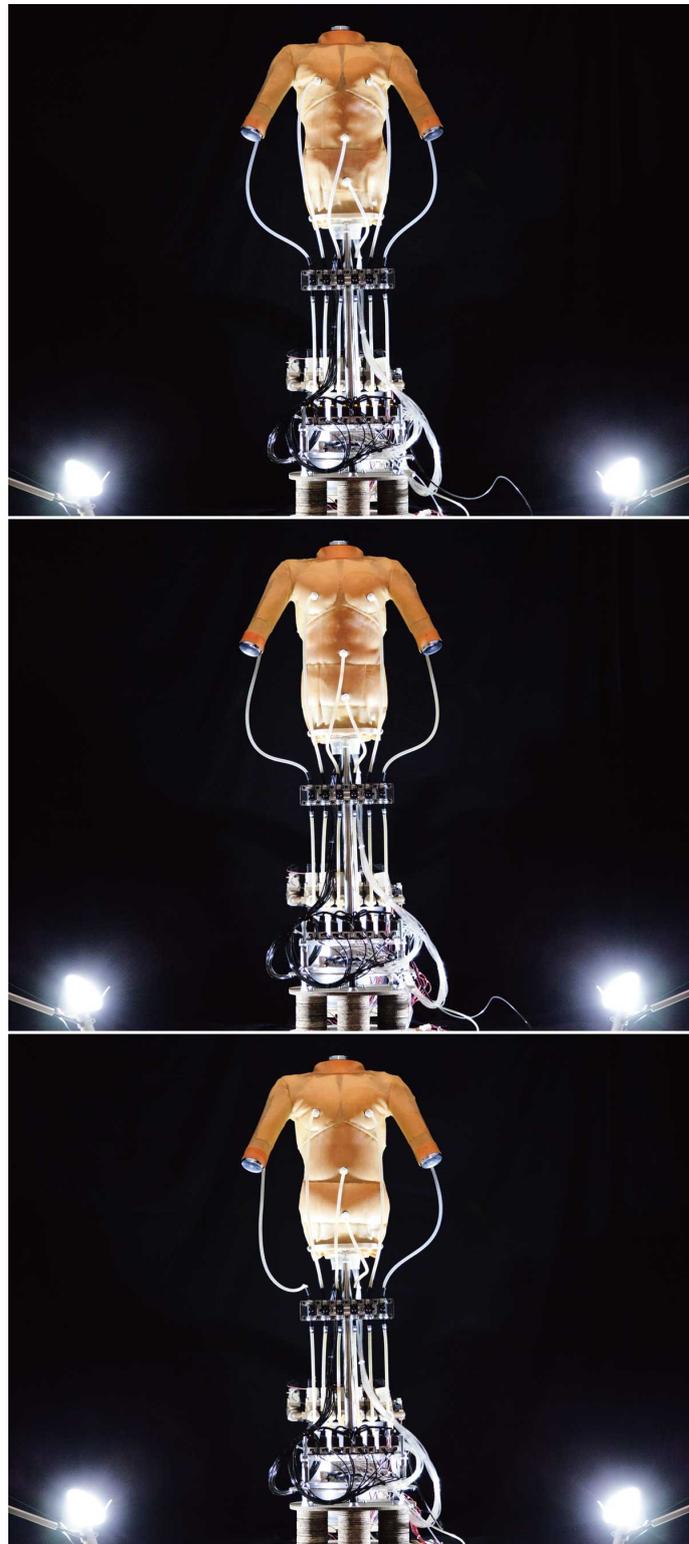


図 6.1 SHIN-TAI の身体形状変化の例. “筋肉質” (上), “官能的” (中央), “肥満体” (下).

のボディを開発することによって、個性的な体型に動的に変化する新たなロボットデザインを確立するための基盤を築く。

6.3 関連研究

6.3.1 アンドロイド

アンドロイド研究によって、人間の姿形やボディジェスチャに非常に近いロボットが開発されており、人間対ロボットのコミュニケーションが人間対人間のコミュニケーションに近い体験として成立しつつある。人間の姿形、表情、ジェスチャなどをリアルに再現することを目的としたヒューマノイドロボットとしては Geminoid[1] や Telenoid[2] がある。Geminoid の顔面部は人間の型を取って制作されており、姿形の再現性が非常に高いロボットとすることができるのが利点である。他にも hanson technique 社などがリアルなヒューマノイドを開発している。一方でこれらロボットに共通する課題として、任意の顔、性別、体型を持つロボットをそれぞれ別途製作する必要がある点が挙げられる。

6.3.2 触覚インタフェース

触覚情報の伝達を利用したインタラクティブ技術に関する研究はバーチャルリアリティ (VR) やヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) といった研究分野で様々な文脈のもと盛んに行われている。遠隔地の相手とのコミュニケーションを可能することを目的としたヒューマンインタフェースとして、遠隔間においてモータの回転角やアクチュエータの振動を通信することで触覚伝達を試みる簡便な機構を持つものや [8], [9], スマートフォンなどの通信端末はもちろんのことクッションやぬいぐるみなどの日常生活に馴染み深いオブジェクトを触覚インタフェース化するという観点から論じられた研究など [10], [73], そのコンセプトと提案手法は多岐に渡る。テレグジスタンス研究の分野では遠隔地のロボットとその操縦者の視覚、聴覚、触覚といった感覚の共有を試みている。TELESAR V [74] は遠隔地にある物体の温度や、材質の違いによる触感の差まで操縦者が判別可能であることに言及しており、ロボットに対面した者は遠隔地にいる操縦中の者を間近に感じ取ることが出来る。

6.3.3 3次元形状の制御と再現

形状や硬度の変化を再現するアクチュエータとして関連する研究を述べる。直動機構によって上下するピンアレイによって2.5次元形状を表現する研究としてFEELEX [75], Pop UP! [76], inFORM [77]などがある。これらのピンアレイ型ディスプレイは応答性や位置制御の正確性に利点があるが、解像度を向上させるためには膨大な数のアクチュエータが必要となり設置環境が大きくなる傾向があることが挙げられる。これらのシステムでは身体形状や感触の変化を表現することは難しい。ファッション業界に対する貢献として、体型を変化させることのできるロボットマネキンであるi.dummyという製品も存在する。また前章のSHIRIは、身体の形状の一部(臀部)を模した筋肉の形状硬度による皮膚の視触覚的变化を再現することで、ロボットの身体表現や感情表現を目的として実施された。SHIN-TAIはリアルに形状を模倣しながら、体型、皮膚の視触覚的变化を再現することが従来研究では実現されなかった重要なポイントであり、ロボットの身体表現と身体拡張を目的としている点でSHIRIとの共通点はあるながら、異なるアプローチで行われたものである。

6.4 SHIN-TAI の設計

6.4.1 構造と制御システム

SHIN-TAIの概観とシステム構成を図6.2に示す。筐体は等身大のサイズで実装した。実装された人工組織の形状は、解剖学的知見に基づき、3DCADを用いて設計された。図6.3に示した人工筋肉は上半身の16の筋(大胸筋・左右, 腹直筋, 外腹斜筋・左右, 前鋸筋・左右, 僧帽筋, 広背筋・左右, 三角筋・左右, 上腕二頭筋・左右, 上腕三頭筋・左右)の形状とレイアウトを模して16個実装された。人工脂肪は筐体を覆うラテックス製の皮膚の胸部2領域, 腹部2領域, 腕部2領域の計6領域に分割して組み込まれている。身体的特徴の変化はこれら人工筋肉, 人工脂肪の駆動を独立に制御することで実現される。

6.4.2 人工筋肉：形状、硬度のコントロール

SHIN-TAIに用いた人工筋肉の概要を6.4に示す。開発した人工筋肉は、空気圧人工筋肉(McKibben artificial muscle)と、筋肉の形状を模して製作したシリコン粒子が充填されたエアバッグにより構成される。筋肉の形状をコントロールするアクチュエータとして

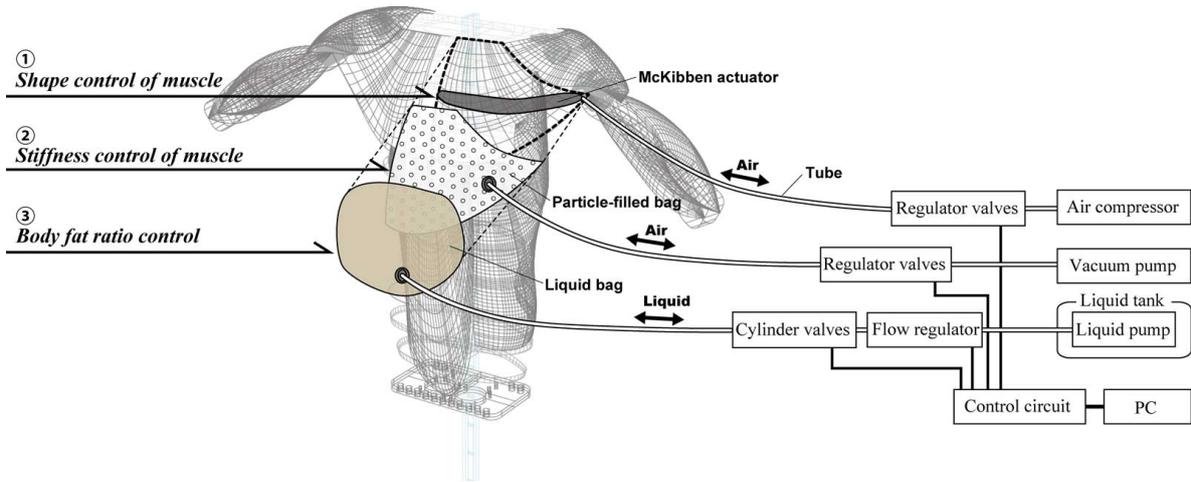


図 6.2 SHIN-TAI システム構成.



図 6.3 内部骨格の人工筋肉のレイアウト.

空気圧人工筋肉が用いられ、硬度をコントロールするアクチュエータとしてエアバッグが用られた。

図空気圧人工筋肉は筋肉が伸縮する方向に沿ったレイアウトで両端がエアバッグにマウントされ、エアコンプレッサが生成する圧縮空気を送り込むことで軸方向に収縮し張力を発生させ、径方向に膨張する。人工筋肉に供給される圧縮空気は電空レギュレータが組み

込まれた制御ユニットによって0~0.3 MPaの範囲で調圧され、人工筋肉の軸方向への収縮率と径方向への膨張の大きさがコントロールされる。この結果、人工筋肉全体の形状が変化する。硬度をコントロールするエアバッグの内部は気密性が保たれており、シリコン素材のパーティクルが充填されている。エアバッグ内部の気圧を減圧することで全体が硬化され、筋肉が力を出力した際の硬度の変化を再現する。減圧は真空ポンプにより行われ、真空用の電空レギュレータによって-40~0 kPaの範囲で調圧され、エアバッグ内部の空気が排出される。真空度を大きく制御するほど、大きな硬度が得られる。

人工筋肉に以上の2つのメカニズムを採用することによって、人間が筋肉に力を入れた際に生じる筋肉の盛り上がり動作や筋肉量の変化を再現するとともに触覚的变化が生じる。人工筋肉の駆動量を大きくすることは、主に男性的な体型に変身させる場合に有効となる。全ての人工筋肉を動作させた状態においては筋肉量が大きいよち男性的な体型にトランスフォームする(図6.5)。

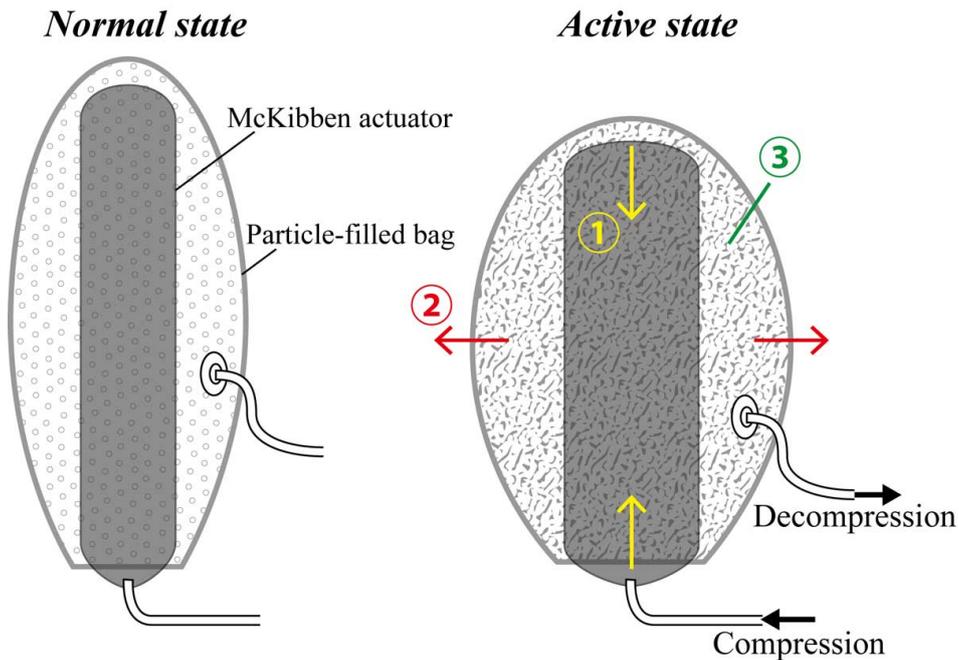


図 6.4 SHIN-TAI の人工筋肉の動作原理. (1) 空気圧人工筋肉による収縮, (2) 筋肉の全体形状の変化, (3) 減圧によるパーティクル充填エアバッグの硬化.

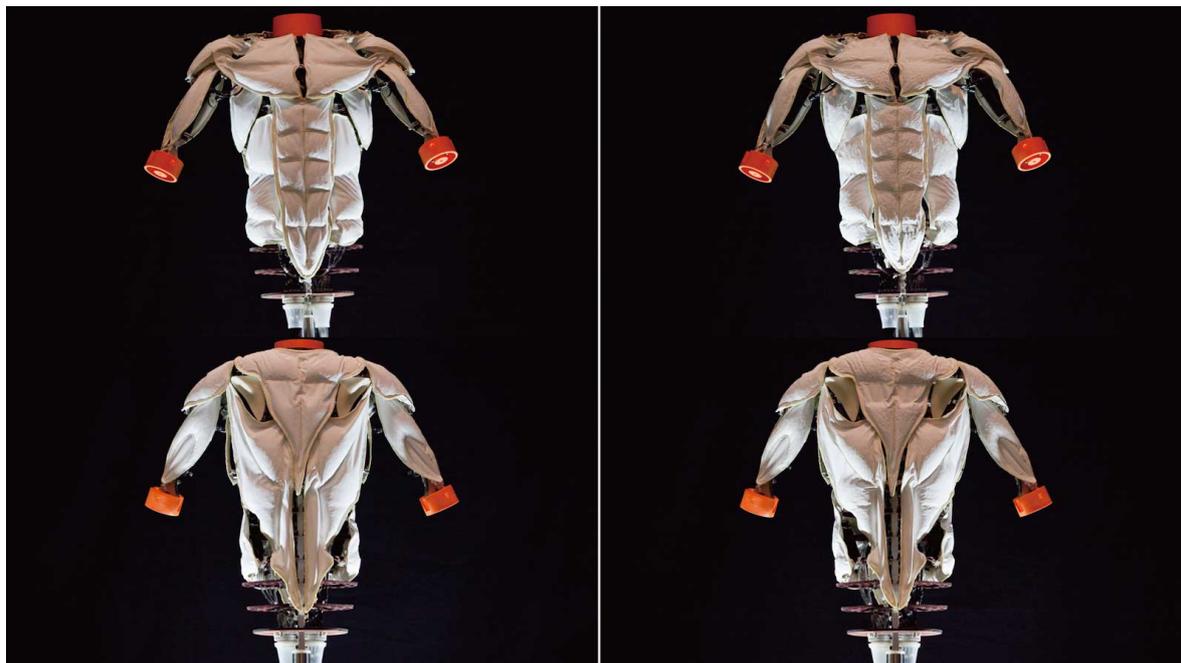


図 6.5 SHIN-TAI の人工筋肉の動作概観. 平常時 (左) と筋肉の駆動時 (右) の様子.

6.4.3 人工脂肪：体脂肪量のコントロール

SHIN-TAI の体脂肪率の増減をコントロールする人工脂肪を実現するアクチュエータとして、人工皮膚に直接マウントされる液体バッグが用いられた。液体バッグは液体の送水、排水によって容積が増減し、人間の身体の体脂肪率の増減を再現する。液体には水道水等を用いることができる。液体はタンクに蓄えられており、これを水中ポンプによって汲み上げることによって送水される。汲み上げられた液体はシリンダバルブユニットによって経路がコントロールされ、部位選択的に液体バッグへ送水される。各部位の液体バッグへの送水量をコントロールすることで、6 部位の体脂肪量の制御が行うことができる。水中ポンプが汲み上げる液体の流量を制御するため、デジタルフロースイッチ (SMC PF3W704) を用いて積算流量を算出し、送水量をコントロールすることで脂肪の増減が調整される。送水時の液体の流量は 4 L/min に設定され、排出の際はポンプを停止し全てのシリンダバルブを開放することで自動的に液体タンクへ排水される。また一度給水してチューブとボディの接合部を止水すれば、水用チューブを外しても形状を維持することが可能である。これは将来的に移動するロボットのボディに応用する際に有用となる。

6.4.4 ボディ寸法の計測

人工脂肪によって変化する部位別周囲長の制御範囲を表 6.1 に示す。を通常時の SHIN-TAI の周囲長は、胸部 78cm、上腹部 66cm、下腹部 69cm、上腕部 23cm と計測された。人工脂肪量が最大値にコントロールした際の SHIN-TAI の周囲長は、通常時の周囲長と比較し、胸部 14cm、上腹部 9cm、下腹部 11cm、上腕部 7cm の増加が確認された。その際に送水された液体の量はそれぞれ順に 1900ml、1550ml、1900ml、750ml であった。体重に換算するとおよそ 6kg 以上変化したことを意味している。人工脂肪の増加前を増加後の変化を観察した様子を図 6.6 に示す。図 6.6 上は女性的な体型、図 6.6 下は肥満体の体型の再現を試みたものである。

体脂肪量を大きくしすぎると、液体バッグの構造や耐久性の問題によりバッグが破壊される問題が生じた。表 6.1 に示した最大値は、破壊の可能性が少ない範囲での最大値であり、液体バッグの耐久性を向上させることができれば、より大きな体脂肪率を実現できると考えられる。

表 6.1 SHIN-TAI の部位別周囲長の制御範囲

	Chest (symmetrical)	Upper abdomen	Lower abdomen	Upper arm
Normal circumference (unit: cm)	78	66	69	23
Maximum circumference (unit: cm)	92	75	80	30
Maximum amount of fat (unit: ml)	1900	1550	1900	750

6.5 考察

SHIN-TAI が提案するコンセプトと関連技術は、様々な領域での応用可能性が考えられる。筆者が考える今後の展開を本章にて考察する。

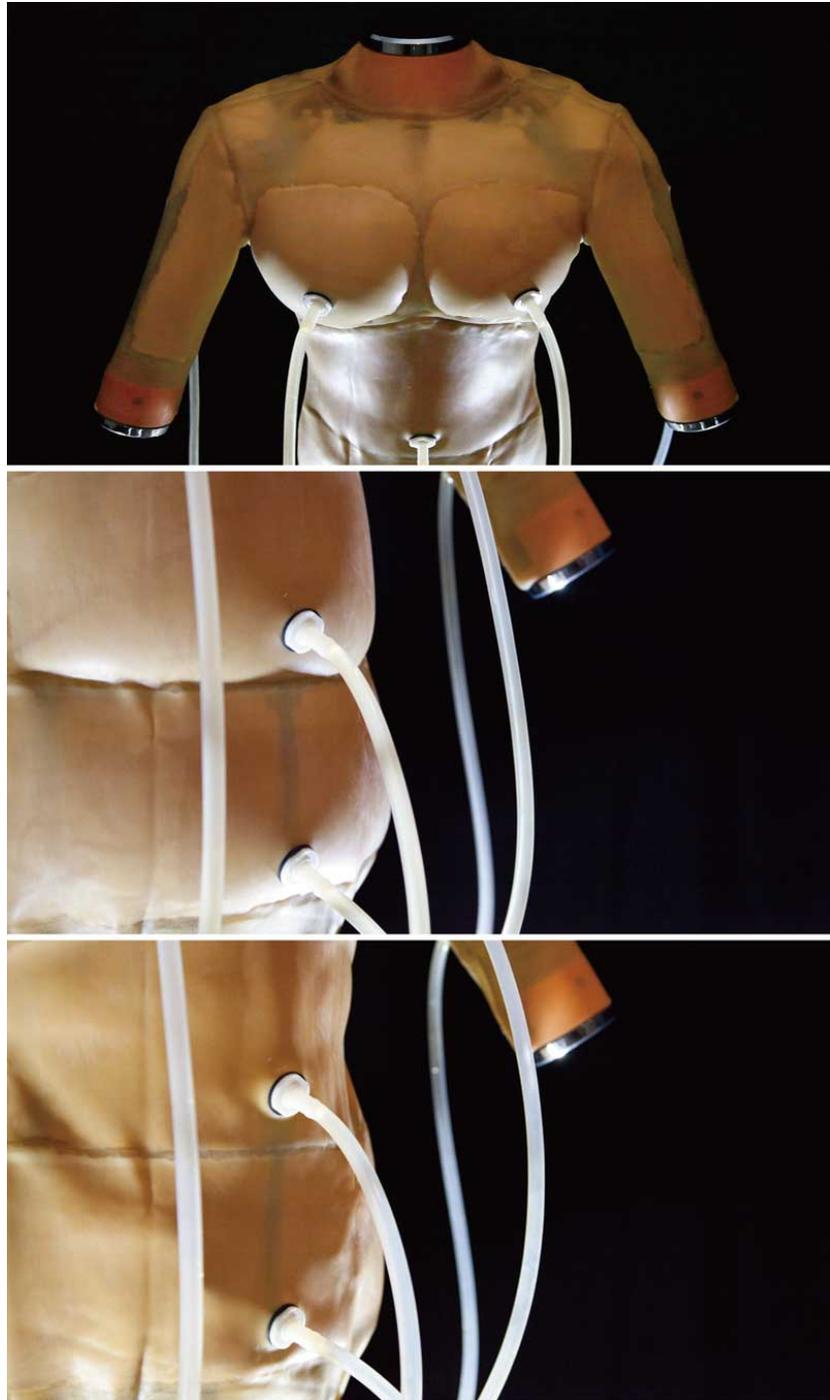


図 6.6 人工脂肪の動作概観。胸部の人工脂肪が増加する様子(上)と腹部の人工脂肪が増加する様子(中央)。脂肪量の減少も液体流量制御機構により行われる(下)。

6.5.1 動的人体彫刻

人体彫刻は、身体の美的外観を追求した芸術作品であり、作者が望ましいと考える特定の身体の瞬間的な姿勢を掘り出すことで半永久的にその造形を保存することができる。神話上の人物や仏像など、宗教的に意味のある創作である場合も多く、歴史上数多くの芸術家が様々な目的の元に静的な美的造形を有した人体彫刻を作り出してきた。SHIN-TAIはソフトロボティクス技術を用いた動的な人体彫刻であると捉えることができ、ソフトアクチュエーションによって動的な身体表現が行える彫刻表現の基盤技術としての応用可能性を示す側面を持つ提案であると考えている。この新しい彫刻表現のパイオニアとしての作品制作を今後行って行きたいと考えている。

6.5.2 アクティブヒューマノイドロボットへの実装

本研究の手法により実装される人工筋肉、人工脂肪は皮膚の直下に配置されており、フレームワーク内部の空間にゆとりを持って設計することができる。このことは、関節を駆動して四肢と身体の動作を行うための、硬質機構や機械式アクチュエータが内蔵されたロボットに対しても適合可能であることを意味する。すなわち歩行やボディジェスチャを行うロボットの皮膚に実装を行うことができ、体型の変化を再現する本手法の要素を加えることができると考えられる。将来的には、こういった高機能なロボットの特徴を活かしつつ体型可変の要素を追加することで、よりユーザが親しみを持つロボットが開発できるのではないかと考える。

6.5.3 人間の皮膚感覚の提示装置としての応用

本研究で提案した人工筋肉と人工脂肪の組み合わせによる機構は、人間の皮膚感覚の再現という側面も兼ねている。例えば、ヒューマノイドロボットの皮膚として実装すると、ユーザがロボットに触れた際にリアルな皮膚の感触を提示することができる。よって人間とロボットのコミュニケーションにおいて、会話やジェスチャのみならずタッチインタラクションも、実際の間人同士が行うものに近づけることができると考えられる。SHIRIで実装したように、ユーザのタッチ入力を検出し応じてロボットが何らかのアクションを起こすようなインタラクションを実装することで、人間とロボットのコミュニケーションがより人間対人間の要素に近い自然なやり取りとして実現することが期待できる。

6.6 まとめ

本研究が焦点を置いた課題は、人間とコミュニケーションを行う人型ソーシャルロボットの容姿・感触デザインに関するものである。我々が考える現在の人型ロボットデザインに対する課題として、以下の二点を挙げる。

- 筐体がソリッドで人工的であり生物感に欠けること。
- 製造した時点から姿形の変化がないこと。

本研究は、人間とロボット間のコミュニケーション形態を現在の” Human-Robot” から人間同士が行うことと同等の” Human-Human” へ展開するための一試行であるといえる。姿形や会話、ジェスチャの自然さにフォーカスした研究が従来より盛んに行われているが [78]、姿形や感触を制御の観点から充実させるための試みは充分追求されているとはいえない。生物感のある姿形や感触といった情報は、人間同士のコミュニケーションにおいては仮に意図せずとも頻繁に交わされるものであり、ソーシャルロボットの技術発展に重要な点であると考えられる。

ロボットの姿形を可逆的に変化させることを可能とすることで、ロボットの個性を制御する新しいパラメータとして導入できる可能性がある。人間と寸分違わぬ人型ロボットが開発される状況を想定した場合においても、既存手法では製造されてから廃棄されるまで姿形が変化するものではないため、身体形状は常に一定となる。今後益々、人型ロボットが社会に浸透してゆく展開を想定した際、提案手法を用いることで、例えば家庭内での個人的趣向や商業施設内での使用環境等において最適な身体的個性を有したロボットに変形させることが可能となり、1体のロボットが行える演出のバリエーションを拡張させることができると考えられる。

本稿では人工筋肉、人工脂肪を用いることによって様々な身体的特徴に変態することができる、ヒューマノイドボディ SHIN-TAI に関するコンセプトと実装について述べた。本研究が提案したロボットのデザインは、全く新しい手法であるため体型や皮膚感覚の再現性には未だ向上の余地があるといえる。取り組むべき課題としては以下のような項目が挙げられる。

- 被験者参加実験による、本手法の印象評価
- 人工筋肉、人工脂肪の構造的正確さの詳細調査とそれに基づく実装の拡張
- 歩行ロボットなどに適用した際の性能への影響

今後はより美しい体型や、よりユニークな体型を追究することで、ヒューマンコンピュータインタラクションやロボットを用いた芸術表現など、様々なフィールドでの展開を期待する。

第7章

結論

本章では本論文のまとめを行う。本研究では身体の境界の位置的操作に着目したヒューマノイド媒体により、作動される身体動作を利用することにより、新たな展開が期待される応用先として導き出される、対人コミュニケーション、身体動作教示システム、ロボットデザインに関する各々のテーマにおいて、システムの設計と開発を行った。

第3章では、抱擁の伝達が行えるシステム"Sense-Roid"について述べた。実演展示等を通じて自己との抱擁体験および他社との遠隔抱擁体験がコミュニケーションツールとして機能することを確認することができた。また、一号機により明らかとなった技術的課題をもとに、二号機以降の改良点の指針を立てることができた。今後の展望として、ネット回線を通じた遠隔抱擁のシステムを実装し、社会的意義のある媒体として発展させてゆくことを優先的に行ってゆく。また、自己抱擁のシステム実装にあたって、応答性に関する課題や力触覚提示のみの提示では筆者が意図した体験として認識されない可能性も明らかとなった。これに対し、視聴覚情報等も用いたクロスモーダルによる情報提示や、二号機以降で試行しているハードウェア的改良による、力触覚の応答性や解像度の向上等を図ることで解決したいと考えている。

第4章では、人間にとって最も巧緻な身体動作のモデルの一つとして、ピアノ演奏に着目し、解剖学的知見に基づいて設計されたソフト外骨格グローブ"Soft-G"によって、被験者実験によりピアノ演奏の技能習得に対する有効性があることを示した。また、連続打鍵速度においては熟練者のい能力を超える動作教示が行える性能を有することが確認された。一方で今後行うべき課題も少なくはない。第一に、熟練者の指動作を記録し、それをSoft-Gによって再生するシステムの構築である。実現のためには、熟練者のピアノ演奏時の指動作を正確に記録するシステムの開発と、それをSoft-Gによって忠実に再生するシステムの開発が必要となる。本論文ではSoft-Gの基本性能と技能教示システムとしての

潜在的な可能性は示すことができた。今後はフィールドワークを更に進め、人間の身体動作技巧の保存と再生に対する取り組みを更に進めてゆきたいと考えている。

第5章では、非記号的な身体動作によるロボットの感情表現に対する試みとして、臀部型ヒューマノイドロボット"SHIRI"について述べた。SHIRIで開発した大臀筋アクチュエータの動作のみで、一定の生物らしい動きの再現が行えることが確認できた。また、SHIRIに対する反響も多く得ることができ、ロボットの新しい情報伝達手法に基づくヒューマノイドロボットとして、一定のインパクトを与えられたものと評価できる。

第6章では、SHIRIの試みに一部共通しながらも、新たにヒューマノイドロボットの身体の拡張表現として、体型が可変するロボットボディ"SHIN-TAI"について述べた。ヒューマノイドロボットの感情表現に留まらず、ロボットならではの表現として、体型の変化による個性やパーソナリティのコントロールを試みた。変化する体型の幅に限界はあるが、複数のパタンの体型に変化させられることが確認された。SHIN-TAIは、アクティブヒューマノイドロボットへの適合や、彫刻としての表現のプラットフォームの確立を鑑みて遂行されたプロジェクトであった。一方で、第3章のSense-Roidのセンシングデバイスにも応用が可能であると考えている。媒体としての身体の体型を変化させることで、所望の身体的特徴を有した媒体として扱うことができ、将来的には遠く離れた特定の人物あるいは故人の身体を媒体によって再生させ、インタラクションを行うことができるようなコンテンツの制作などを応用的な展開として考えることができる。

本論文では「ヒューマノイド媒体を用いて身体の境界の接触や融合を実現することにより、遠隔地間の力触覚コミュニケーションや、身体の技巧動作の直接的な教示と習得が可能となることを示し、更にロボットボディに転写することで感情表現と個性の演出に応用できることを見出した。一方で、例えばSense-Roidにおける身体境界の接触の表現については、遠隔の二者間で用いる場合は身体接触を介したコミュニケーションとして成立するが、自己抱擁の提示として用いる際は、接触のみならず自己の身体境界との融合も同時に成立していると捉えることもできる。また、転写に関わる分類まで設計を拡張すると、複数人に対して同時に抱擁を提示するなどの応用も可能である。Soft-Gにおいても、人工筋肉を皮膚上に配置せざるを得ないため、あくまでも融合の近似を表現しているに過ぎず、結果として筋肉の境界による接触を用いた動作提示として説明することも可能である。SHIRIやSHIN-TAIについても、ユーザが形状や感触が変化するロボットに触れることで接触によるコミュニケーションが成立する。よって、本論文において開発した媒体は、接触、融合、転写といった分類に必ずしもそれぞれ一対一で対応するものであるとは言えず、目的とするアプリケーションによって相互に分類を横断する可能性があることについては議論の余地がある。しかしながら、各々の分類における主たるアプリケーション

を想定した媒体の実装と評価を行ったことで、有用性や有効性が示され、改善すべき課題も明らかにすることができたと考えている。将来の情報通信媒体の新たな一展開として、潜在的可能性が期待できる知見が得られたと考えている。

謝辞

本論文は著者が電気通信大学大学院情報システム学研究科博士前期課程および博士後期課程在学中に行った研究についてまとめたものである。博士前期課程よりご指導頂き、東京工業大学研究員として受け入れて頂いた小池英樹教授（現東京工業大学情報理工学院情報工学系）ならびに指導教官の野嶋琢也准教授に深く御礼申し上げます。著者の研究活動は、両先生の熱心なご指導ご鞭撻、そして寛容な空気に支えられ前進することができた。

博士論文審査委員の佐藤俊治准教授、橋山智訓教授、梶本裕之教授、坂本真樹教授には本論文をまとめる上で幾度にも渡り多くの貴重なご助言を頂いた。

第4章のソフト外骨格グローブの開発にあたっては、鈴木康一教授（東京工業大学工学院機械系）に多くのご助言と激励を頂いたことで実現することができた。古屋晋一氏（Sony CSL シニアリサーチャー）にはピアノ演奏への応用にあたり、共同で研究を行うことができ幸甚であった。プロトタイプの開発にあたっては、東京工業大学小池研究室の修士学生であった高橋勇人氏の貢献があった。

第3章の Sense-Roid の開発にあたっては、初期のプロジェクト発足時、梶本裕之教授ならびに当時梶本研究室に在籍していた岡崎龍太氏、山川隼平氏、岡部裕之氏、栗生加奈子氏、横山牧氏、吉川博美氏のご助言とご協力により形にすることができた。

電気通信大学大学院情報システム学研究科在学中には、的場やすし氏（現ものづくり大学客員教授）、佐藤俊樹助教（現北陸先端科学技術大学院大学准教授）には日頃より研究の楽しさを教えて頂き、大変お世話になった。

最後に、これまで何不自由なく研究活動が行えるようご支援頂き、暖かく見守り続けて

頂いた両親，家族に心より深く感謝する。

参考文献

- [1] M. Schunke, E. Schulte, U. Schumacher, M. Voll, and K. Wesker. プロメテウス解剖学アトラス 解剖学総論/運動器系 第2版, 医学書院, 2011.
- [2] Marshall McLuhan. *Understanding media: The extensions of man*. New York: McGraw-Hill; London: Routledge and Kegan Paul, 1964.
- [3] Honda ASIMO, <https://www.honda.co.jp/ASIMO/>.
- [4] Kenji Kaneko, Fumio Kanehiro, Shuuji Kajita, Kazuhiko Yokoyama, Kazuhiko Akachi, Toshikazu Kawasaki, Shigehiko Ota, and Takakatsu Isozumi. Design of prototype humanoid robotics platform for hrp. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 2431–2436. IEEE, 2002.
- [5] Gabe Nelson, Aaron Saunders, Neil Neville, Ben Swilling, Joe Bondaryk, Devin Billings, Chris Lee, Robert Playter, and Marc Raibert. Petman: A humanoid robot for testing chemical protective clothing. *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 30, No. 4, pp. 372–377, 2012.
- [6] R. Heslin, T. D. Nguyen, and M. L. Nguyen. Meaning of touch: the case of touch from a stranger or same sex person. *Journal of Nonverbal Behavior* 7, pp. 147–157, 1983.
- [7] S. M. Jourard. "an exploratory study of body - accessibility. *British Journal of Social & Clinical Psychology*, Vol. 5, No. 3, pp. 221–231, 1966.
- [8] S. Brave, H. Ishii, and A. Dahley. Tangible interfaces for remote collaboration and communication. In *Proceedings of Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'98)*, pp. 169–178, 1998.
- [9] A. Chang, S. O'Modhrain, R. Jacob, E. Gunther, and H. Ishii. Comtouch: design of a vibrotactile communication device. In *Proceedings of the 4th conference on Designing interactive systems (DIS 2002)*, pp. 312–320, 2002.
- [10] K. Iwasaki, T. Miyaki, and J. Rekimoto. Affectphone: A handset device to present user'

- s emotional state with warmth/coolness. In *Bio-Inspired Human-Machine Interfaces and Healthcare Applications*, pp. 83–88, 2010.
- [11] D. Sekiguchi, M. Inami, and S. Tachi. Robotphone: Rui for interpersonal communication. In *Extended Abstracts of ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2001)*, No. 277–278, 2001.
- [12] H. Tsujita, K. Tsukada, and I. Siio. Syncdecor: Communication appliances for virtual cohabitation. *Proceedings of Advanced Visual Interfaces (AVI 2008)*, pp. 449–453, 2008.
- [13] C. L. Fernando, M. Furukawa, T. Kurogi, K. Hirota, S. Kamuro, K. Sato, K. Minamizawa, and S. Tachi. Telesar v: Telexistence surrogate anthropomorphic robot. In *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, 2012.
- [14] 高橋, 國安, 佐藤, 福嶋, 古川, 橋本, 梶本. 口腔内動作を入出力とする触覚コミュニケーションデバイス. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 13, No. 4, pp. 53–62, 2011.
- [15] H. A. Samani, R. Parsani, L. T. Rodriguez, E. Saadatian, K. H. Dissanayake, and A. D. Cheok. Kissenger: design of a kiss transmission device. *Proceedings of the 11th international conference on Interaction design and children (IDC' 12)*, pp. 48–57, 2012.
- [16] J. K. S. Teh, A. D. Cheok, R. L. Peiris, Y. Choi, V. Thuong, and S. Lai. Huggy pajama: a mobile parent and child hugging communication system. *Proceedings of the 7th international conference on Interaction design and children (IDC' 08)*, pp. 250–257, 2008.
- [17] F. F. Mueller, F. Vetere, M. R. Gibbs, J. Kjeldskov, S. Pedell, and S Howard. Hug over a distance. In *Extended Abstracts of ACM Conference on Human factors in Computing Systems (CHI 2005)*, pp. 1673–1676, 2005.
- [18] D. Alexandra, K. Nakagaki, R. L. Klatzky, S. E. Hudson, J. F. Lehman, and Sample A. P. Force jacket: Pneumatically-actuated jacket for embodied haptic experiences. *Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ' 18)*, Article 320, 2018.
- [19] D. Tsetserukou. Haptihug: A novel haptic display for communication of hug over a distance. In *Proceedings of EuroHaptics 2010*, pp. 340–347, 2010.
- [20] C. DiSalvo, F. Gemperle, J. Forlizzi, and E. Montgomery. The hug: an exploration of robotic form for intimate communication. In *Proceedings of 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN'03)*, pp. 403–408, 2003.

- [21] K. Hachiya. Inter dis-communication machine. *PRIX ARS ELECTRONICA* '96, pp. 138–139, Springer Wien New York, 1996.
- [22] V. L. Nickel, J. Perry, and A. L. Garrett. Development of useful function in the severely paralyzed hand. *Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol. 45A, No. 5, pp. 933–952, 1963.
- [23] N. Takahashi, R. Okazaki, H. Okabe, H. Yoshikawa, K. Aou, S. Yamakawa, M. Yokoyama, and H. Kajimoto. Sense-roid: Emotional haptic communication with yourself. In *Proceedings of Virtual Reality International Conference 2011 (VRIC2011)*, 2011.
- [24] M. Mori, K. F. MacDorman, and N. Kageki. The uncanny valley [from the field]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 19, No. 2, pp. 98–100, 2012.
- [25] P. Heo, G. M. Gu, S. Lee, K. Rhee, and J. Kim. Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 5, pp. 807–824, 2012.
- [26] P. Polygerinos, N. Correll, S. A. Morin, B. Mosadegh, C. D. Onal, K. Petersen, M. Cianchetti, M. T. Tolley, and R. F. Shepherd. Soft robotics: Review of fluid-driven intrinsically soft devices; manufacturing, sensing, control, and applications in human-robot interaction. *Adv. Eng. Mater.*, Vol. 19, No. 12, 1700016, 2017.
- [27] CyberGlove Systems LLC, <http://www.cyberglovesystems.com/cybergrasp/>.
- [28] Exiii Inc., <https://exiii.jp/exos/>.
- [29] Y. Hasegawa, Y. Mikami, K. Watanabe, and Y. Sankai. Five-fingered assistive hand with mechanical compliance of human finger. In *in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, pp. 718–724, 2008.
- [30] P. M. Aubin, H. Sallum, C. Walsh, L. Stirling, and A. Correia. A pediatric robotic thumb exoskeleton for at-home rehabilitation: The isolated orthosis for thumb actuation (IOTA). In *Proc. IEEE Int. Conf. Rehab. Robot. (ICORR)*, pp. 1–6, 2013.
- [31] L. Dovat, O. Lambercy, R. Gassert, T. Maeder, T. Milner, T. C. Leong, and E. Burdet. Handcare: A cable-actuated rehabilitation system to train hand function after stroke. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, Vol. 16, No. 6, pp. 582–591, 2008.
- [32] S. Ueki, H. Kawasaki, S. Ito, Y. Nishimoto, M. Abe, T. Aoki, Y. Ishigure, T. Ojika, and T. Mouri. Development of a hand-assist robot with multi-degrees-of-freedom for rehabilitation therapy. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, Vol. 17, No. 1, pp. 136–146, 2012.
- [33] J. Arata, K. Ohmoto, R. Gassert, O. Lambercy, H. Fujimoto, and I. Wada. A new hand

- exoskeleton device for rehabilitation using a three-layered sliding spring mechanism. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, pp. 3902–3907, 2013.
- [34] C. G. Rose and M. K. O’Malley. Hybrid rigid-soft hand exoskeleton to assist functional dexterity. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, Vol. 4, No. 1, pp. 73–80, 2018.
- [35] Y. Bar-Cohen. Electroactive polymer (eap) actuators as artificial muscles: Reality, potential, and challenges. SPIE press, 2004.
- [36] T. Noritsugu, H. Yamamoto, D. Sasaki, and M. Takaiwa. Wearable power assist device for hand grasping using pneumatic artificial rubber muscle. In *in Proc. SICE 2004 Annu. Conf.*, pp. 420–425, 2004.
- [37] H. Zhao, J. Jalving, R. Huang, R. Knepper, A. Ruina, and R. Shepherd. A helping hand: Soft orthosis with integrated optical strain sensors and EMG control. *IEEE Robot. Autom. Mag.*, Vol. 23, No. 3, pp. 55–64, 2016.
- [38] P. Polygerinos, Z. Wang, K. C. Galloway, R. J. Wood, and C. J. Walsh. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation. *Rob. Auton. Syst.*, Vol. 73, pp. 135–143, 2015.
- [39] M. A. Delph, S. A. Fischer, P. W. Gauthier, C. H. M. Luna, E. A. Clancy, and G. S. Fischer. A soft robotic exomusculature glove with integrated sEMG sensing for hand rehabilitation. In *Proc. IEEE Int. Conf. Rehab. Robot. (ICORR)*, pp. 1–7, 2013.
- [40] H. In, B. B. Kang, M. Sin, and K.-J. Cho. Exo-glove: A wearable robot for the hand with a soft tendon routing system. *IEEE Robot. Autom. Mag.*, Vol. 22, No. 1, pp. 97–105, 2015.
- [41] M. Xiloyannis, L. Cappello, D. B. Khanh, S.-C. Yen, and L. Masia. Modelling and design of a synergy-based actuator for a tendon-driven soft robotic glove. In *Proc. IEEE Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics (BioRob)*, pp. 213–219, 2016.
- [42] D. Popov, I. Gaponov, and J. H. Ryu. Portable exoskeleton glove with soft structure for hand assistance in activities of daily living. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, Vol. 22, No. 2, pp. 865–875, 2017.
- [43] C. Pacchierotti, S. Sinclair, M. Solazzi, A. Frisoli, V. Hayward, and D. Prattichizzo. Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: Taxonomy, review, and perspectives. *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 10, No. 4, pp. 580–600, 2017.
- [44] M. Sato. Development of string-based force display: SPIDAR. In *8th Int. Conf. Virtual Syst. Multimedia*, pp. 1034–1039, 2002.
- [45] Thomas H Massie, J Kenneth Salisbury, et al. The phantom haptic interface: A device for

- probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, Vol. 55, pp. 295–300. Chicago, IL, 1994.
- [46] Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, Susumu Tachi, and Masahiko Inami. Smarttouch: Electric skin to touch the untouchable. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 24, No. 1, pp. 36–43, 2004.
- [47] L. Connelly, Y. Jia, M. L. Toro, M. E. Stoykov, R. V. Kenyon, and D. G. Kamper. A pneumatic glove and immersive virtual reality environment for hand rehabilitative training after stroke. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, Vol. 18, No. 5, pp. 551–559, 2010.
- [48] R. Hinchet, V. Vechev, H. Shea, and O. Hilliges. DextrES: Wearable haptic feedback for grasping in VR via a thin form-factor electrostatic brake. In *Proc. 31st Annu. ACM Symp. User Interface Software Technol. (UIST)*, pp. 901–912, 2018.
- [49] Simon Holland, Anders J Bouwer, Mathew Dalgelish, and Topi M Hurtig. Feeling the beat where it counts: fostering multi-limb rhythm skills with the haptic drum kit. In *Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction*, pp. 21–28, 2010.
- [50] Janet Van Der Linden, Rose Johnson, Jon Bird, Yvonne Rogers, and Erwin Schoonderwaldt. Buzzing to play: lessons learned from an in the wild study of real-time vibrotactile feedback. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human factors in Computing Systems*, pp. 533–542, 2011.
- [51] E. Tamaki, T. Miyaki, and J. Rekimoto. Possessedhand: Techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli. In *Proc. SIGCHI Conf. Hum. Factors Comput. Syst. (CHI)*, pp. 543–552, 2011.
- [52] A. Ebisu, S. Hashizume, K. Suzuki, A. Ishii, M. Sakashita, and Y. Ochiai. Stimulated percussions: method to control human for learning music by using electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference*, pp. 1–5, 2017.
- [53] S. Kasahara, J. Nishida, and P. Lopes. Preemptive action: Accelerating human reaction using electrical muscle stimulation without compromising agency. In *Proc. 2019 CHI Conf. Hum. Factors Comput. Syst. (CHI)*, Article 643, 15 pages, 2019.
- [54] M. H. Schieber and M. Santello. Hand function: Peripheral and central constraints on performance. *J. Appl. Physiol.*, Vol. 96, No. 6, pp. 2293–2300, 2004.

- [55] S. Furuya, M. Flanders, and J. F. Soechting. Hand kinematics of piano playing. *J. Neurophysiol.*, Vol. 106, No. 6, pp. 2849–2864, 2011.
- [56] S. Furuya, K. Uehara, T. Sakamoto, and T. Hanakawa. Aberrant cortical excitability reflects the loss of hand dexterity in musician’s dystonia. *J. Physiol.*, Vol. 596, No. 12, pp. 2397–2411, 2018.
- [57] J.R. Doyle. Anatomy of the finger flexor tendon sheath and pulley system. *J. Hand Surgery*, Vol. 13, No. 4, pp. 473–484, 1988.
- [58] S. Kurumaya, H. Nabae, G. Endo, and K. Suzumori. Design of thin McKibben muscle and multifilament structure. *Sens. Actuators, A*, Vol. 261, pp. 66–74, 2017.
- [59] M. Hosoda and S. Furuya. Shared somatosensory and motor functions in musicians. *Sci. Rep.*, Vol. 6, No. 1, 37632, 2016.
- [60] P. L. Gribble, L. I. Mullin, N. Cothros, and A. Mattar. Role of cocontraction in arm movement accuracy. *J. Neurophysiol.*, Vol. 89, No. 5, pp. 2396–2405, 2003.
- [61] N. Kumar, T. F. Manning, and D. J. Ostry. Somatosensory cortex participates in the consolidation of human motor memory. *PLoS Biol.*, Vol. 17, No. 10, pp. 1–21, 2019.
- [62] Nishio S., H. Ishiguro, and N. Hagita. Geminoid: Teleoperated android of an existing person. In *Humanoid Robots: New Developments*, pp. 343–352, 2007.
- [63] K. Ogawa, S. Nishio, K. Koda, G. Balistreri, T. Watanabe, and H. Ishiguro. Exploring the natural reaction of young and aged person with telenoid in a real world. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 15, No. 5, pp. 592–597, 2011.
- [64] Grandjean D., Sander D., Pourtois G., Schwartz S., Seghier M.L., Scherer K.R., and Vuilleumier P. The voices of wrath: brain responses to angry prosody in meaningless speech. *Nature Neuroscience*, Vol. 8, pp. 145–146, 2005.
- [65] SHIRI, <https://www.youtube.com/watch?v=vhHo6CUq4-o>.
- [66] Basement Jaxx – Never Say Never ft. ETML, <https://www.youtube.com/watch?v=U0eS3zC3Jco>.
- [67] K. Suzumori, S. Iikura, and H. Tanaka. Applying a flexible microactuator to robotic mechanisms. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 12, No. 1, pp. 21–27, 1992.
- [68] R. Deimel and O. Brock. A compliant hand based on a novel pneumatic actuator. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013)*, pp. 2047–2053, 2013.
- [69] K. Suzumori, S. Endo, T. Kanda, N. Kato, and H. Suzuki. A bending pneumatic

- rubber actuator realizing soft-bodied manta swimming robot. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007)*, pp. 4975–4980, 2007.
- [70] A. D. Marchese, C. D. Onal, and D. Rus. Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators. *Soft Robotics*, Vol. 1, No. 1, pp. 75–87, 2014.
- [71] M. Wehner, R. L. Truby, D. J. Fitzgerald, B. Mosadegh, G. M. Whitesides, J. A. Lewis, and R. J. Wood. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots. *Nature*, Vol. 526, No. 7617, pp. 451–455, 2016.
- [72] S. A. Morin, R. F. Shepherd, S. W. Kwok, A. A. Stokes, A. Nemiroski, and G. M. Whitesides. Camouflage and display for soft machines. *Science*, Vol. 337, No. 6096, pp. 828–832, 2012.
- [73] D. Sekiguchi, M. Inami, N. Kawakami, and S. Tachi. The design of internet-based robotphone. In *Proceedings of the 14th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT)*, pp. 223–228, 2004.
- [74] C. L. Fernando, K. Furukawa, K. Minamizawa, and S. Tachi. Experiencing ones own hand in telexistence manipulation with a 15 dof anthropomorphic robot hand and a flexible master glove. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT)*, pp. 20–27, 2013.
- [75] H. Iwata, H. Yano, F. Nakaizumi, and Kawamura R. Project feelex: Adding haptic surface to graphics. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH'01)*, pp. 469–476, 2001.
- [76] M. Nakatani, H. Kajimoto, K. Vlack, D. Sekiguchi, N. Kawakami, and S. Tachi. Control method for a 3d form display with coil-type shape memory alloy. In *Proceedings of IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA 2005)*, pp. 1332–1337, 2005.
- [77] S. Follmer, D. Leithinger, A. Olwal, A. Hogge, and H. Ishii. inform: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2013)*, pp. 417–426, 2013.
- [78] D. Hanson, A. Olney, S. Prilliman, E. Mathews, M. Zielke, D. Hammons, R. Fernandez, and H. Stephanou. Upending the uncanny valley. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1728–1729, 2005.

関連発表等

原著論文（査読付）

1. N. Takahashi, S. Furuya and H. Koike, "Soft Exoskeleton Glove with Human Anatomical Architecture: Production of Dexterous Finger Movements and Skillful Piano Performance," *IEEE Transactions on Haptics*, 12pages, doi: 10.1109/TOH.2020.2993445.
2. N. Takahashi, Y. Kuniyasu, M. Sato, S. Fukushima, M. Furukawa, Y. Hashimoto, H. Kajimoto, "Kiss Interface for Intimate Communications", *Journal of Human Interface Society*, Vol.13, No.4, pp.53-62, 2011. (in Japanese)

国際会議発表（査読付）

1. B. Wang, N. Takahashi, and H. Koike, "Sensor Glove Implemented with Artificial Muscle Set for Hand Rehabilitation," In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference (AHs '20)*, 2020.
2. N. Takahashi, H. Takahashi, H. Koike, "Soft Exoskeleton Glove Enabling Force Feedback for Human-Like Finger Posture Control with 20 Degrees of Freedom," In *Proceedings of IEEE World Haptics Conference (WHC 2019)*, pp. 217-222, 2019. (Award Nominated Paper)
3. H. Takahashi, N. Takahashi, S. Furuya and H. Koike, "Design of Control Method for Soft Exoskeleton Glove," In *Proceedings of the 26th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR 2019)*, 2019
4. N. Takahashi, H. Takahashi and H. Koike, "A Novel Soft Exoskeleton Glove for Motor Skill Acquisition Similar to Anatomical Structure of Forearm Muscles," In *Proceedings of the 26th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR 2019)*, 2019.

5. N. Takahashi and H. Koike, “SHIN-TAI: A Method for Controlling Characteristics of a Humanoid Robot’s Body Using Artificial Muscles and Fats,” In Proceedings of 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2017), pp. 1400-1405, 2017.
6. N. Takahashi, Y. Matoba, T. Sato, H. Koike, SHIRI: Buttocks Humanoid that Represents Emotions with Visual and Tactual Transformation of the Muscles, Advanced Visual Interfaces 2012 (AVI2012), 2012.
7. N. Takahashi, R. Okazaki, H. Okabe, H. Yoshikawa, K. Aou, S. Yamakawa, M. Yokoyama, H. Kajimoto, Sense-Roid: Emotional Haptic Communication with Yourself, Proceedings of Virtual Reality International Conference 2011 (VRIC2011), 2011. (Laval Virtual Award 2011 “Category: Architecture, Art & Culture”)

国内学会発表（筆頭のみ）

1. 高橋, 車谷, 鈴森, 小池, "SENSE-ROID TYPE-S: 人工筋ニットと空気圧バルーンを用いた触覚記録再生ウェア," ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 (ROBOMECH2019), 2A1-U06, 2019.
2. 高橋, 高橋, 鈴森, 小池, "指屈筋と指伸筋の構造を模倣したソフトロボットグローブ," 第 36 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2018), 1B3-01, 2018.
3. 高橋, 小池, "SHIN-TAI: 体型可変のソフトヒューマノイド筐体," ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018 (ROBOMECH2018), 2A2-I10, 2018.
4. 高橋, 山川, 岡崎, 梶本, 小池, "Sense-Roid: 自己との触覚コミュニケーションへのアプローチ", 第五回横幹連合コンファレンス, 2013.
5. 高橋, 山川, 梶本, 小池, “Sense-Roid02: 自己抱擁の時空間拡張,” 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2012.9（講演）
6. 高橋, 梶本, “IVRC2010 優勝作品「Sense-Roid」,” 第 16 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2011.9.（講演）

受賞等（抜粋）

1. 2021 年, 2021 IEEE Transactions on Haptics Best Application Paper Award
2. 2012 年, Laval Virtual Awards 2012 “Category: Industrial Design and Simulation”

3. 2011 年, 日本ソフトウェア科学会 WISS2011 対話発表賞
4. 2011 年, Laval Virtual Awards 2011 “Category: Architecture, Art&Culture”
5. 第 18 回国際学生対抗バーチャルリアリティコンテスト (IVRC2010) 総合優勝

展示・講演・解説等（抜粋）

1. TBS テレビ「審査員長・松本人志」 | 『ダメされたと思ってやってみ?』と言いたくなる近未来テクノロジーコンテスト 優勝, 2020.9.5 O.A. (解説・実演)
2. N. Takahashi, Expression, Transmission, and Archiving of Humanity by Using “Interactive Humanoid Mediums,” EMTECH Conference: "Emotional Attachment to Machines: New Ways of Relationship-Building in Japan," Berlin, Germany, 2019. 10. (Invited Talk)
3. NHK 総合テレビ よるドラ「決してマネしないでください」, センスロイド協力, 2019.10.26 O.A. (技術協力)
4. 展覧会《人と科学と現代アート》—ステレオタイプを超えてゆけ—, 東京工業大学百年記念館, 2019.6 (展示)
5. 高橋, 小池, “人体解剖学からアプローチする超人化スーツの可能性,” バイオメカニクス研究, Vol. 23, No. 2, pp. 104-108, 2019. (解説)
6. 浜松科学館特別展「感覚の迷宮」, 浜松科学館, 2019.7.20 - 9.1. (展示)
7. NHK 教育テレビ「ろんぶ〜ん」 | 「キス」, 2019.2.14 O.A. (解説・実演)
8. N. Takahashi, “Sense-Roid: Emotional Haptic Communication with Yourself,” SIG-GRAPH2011 Birds of a Feather “Session: IVRC (International Collegiate Virtual Reality Contest), 2011.8. (Invited Talk)
9. 第 19 回 3D&バーチャルリアリティ展 (IVR), “Sense-Roid” , 東京ビックサイト, 2011.6. (展示)
10. DCEXPO2010 (ConTEX), “Sense-Roid” , 日本科学未来館, 2010.10 (展示)
その他, メディア出演や新聞・雑誌等の取材による記事掲載複数あり.

付録

表 7.1 動画「SHIRI」に対する視聴者のコメント

#	COMMENT
1	What in the world am I looking at?
2	a robot ass, duh
3	I just asked myself the same and hoped for a reasonable answer o.O This is a new upload for the weird part of youtube... Or just a new weird fetish gadget for asian interests --
4	I...but...it.....i mean.....who would....oh god.....,does it come in woman's? is its wrong of me to want one? I mean strictly for science....yes, science....
5	That is a man ass!
6	OH ! NO ! I haven't save enough money to buy a humanoid !
7	OP is a technosexual
8	2:36 Please stop.
9	WOMEN ARE FINALLY OBSOLETE, THANK GOD.
10	That ass is modeled after a male's ass, btw.
11	But, will it blend?
12	I like the part when he plays his ass like a bongo drum.
13	What the heck did I just watch?
14	I'm in the weird part of Youtube again..
15	can it fart, because if not, it's not ready
16	dafuq did I even get here?
17	Congratulations -- you have nominated the first video in the new 'Weird Part of YouTube' playlist. Thank you, @esyacreations (and the OP).
18	BUTTBOT
19	That's a man ass robot in the video, you moron.
20	turn that bitch over!
21	This turned me on.. :ohgodwhy:
22	Man ass? It's a piece of hardware, it can be whatever gender you want it to, you moron. Also, the point is in the technology, not the actual item, you moron.
23	we are so late in robotics and these guys are wasting time and resources in robots ass
24	i think he or she meant that it looks more like a man's ass based on the shape
25	Looks like I'm on the wrong side of internet again
26	That robot-ass is expressing emotions ? Ok, I can see where this is going, and yeah, i get the commercial potential for this new kind of sex toy. I just have trouble imagining all the R&D and shiver when i hear all the pseudo scientific tech babble that is involved to make the next cumtoy. Seems like the biggest waste of human brain time i've ever seen. Right now i feel really sorry for the human race.
27	He's beating them like drums Lmao!
28	I think we all want to know when the one with a hole comes to the market.
29	Robotic Ass To-Do List: 1) Reduce sounds of gaseous decompression.
30	oh
31	Why the heck is it breathing?
32	What the actual fu...
33	what kind of butt has a prominent pulse like that? wtf?
34	Dear Japan: Human beings rarely communicate through the butt. Therefore using it as a medium for communications with robots is just fucking weird, no matter how you want to dress it up. Love, The Rest of Humanity
35	WTF?!
36	I said what what in the butt.
37	Come back when it can fart and take a shit, only then is it a real assbot!
38	Hold on, I'm going in dry!
39	professor: Does anyone have any question? student:Can you fuck it? professor: well no. everyone gets up and leaves
40	Japan really wants to make a real live Chi..
41	This is pretty fascinating. Imagine a sexdoll like this simulating the buttocks-clench of a good orgasm- one step from artificial whores. Really, there'd be much less need for prostitution, and guys would loose some of the pressure of trying to find a girl each weekend to releave themselves so to speak. Interesting.
42	I have the Chuck Norris Version of this on my Channel.

#	COMMENT
43	it just ahd to be japan
44	L.A. face with an Oakland Booty!
45	I have you're mother on my channel
46	THE FUTURE
47	zone sent me here...still confused...
48	what the fuck am i watching
49	They can spend millions of dollars and thousands of man hours to build a twitchy butt and yet we cant find a cure for cancer or put an end to world hunger.. Boggles the mind
50	but why
51	Don't you mean BUTT why? HAHAAHAHAHAHAHAHAHAHAHAhahahaqahahaha
52	DAT ASS
53	Seriously no sexual top rated comments???
	er... ah... It's not gay since you don't know if it's a guy or not... or something..
54	what the fuck
55	must be a fortune telling device
56	I think I look AWESOME in this video. It makes me, shiver...ooooohhh... Follow me on Twitter @robobutt
57	Zone brought me here.
58	Zone, what the fuck are you showing me?
59	If they could make the cheeks clap, they would be in business...lol.
60	Definitely male.
61	whyyyyy?
62	butt wuppin
63	robottocks
64	I didn't know that butts conveyed emotion.
65	Someone beep me when there is a female version.
66	"No description available." That's actually pretty accurate..
67	I, butt robot, shall not harm a human or let a human come to harm from lack of booty tensing, ass-twitching, rump-protruding, or badunk-tensing. I shall always obey dumper-demands of humans, unless it shall harm a human. I will protect and preserve myself, unless my hindquarters' preservation might lead to the harm of a human.
68	Everyone Else: Why? Japan: Why not?
69	Looks tight as hell. how long until I can buy one?
70	Just stick a fleshlight in that shit and you'll be good to go
71	wat
72	OH GOD IT SOUNDS LIKE IT'S BREATHING
73	Thanks to all my fans! Keep the comments coming, they make me twitch. Follow @robobutt on Twitter
74	WHAT IN THE ROYAL NAME OF FUCK
75	In case your eyes or lack of judgement failed you, that piece of hardware is shaped after a man's ass. Someone's mad.
76	It's 4.30am, why the fuck am I watching videos about robotic asses
77	but why a butt?
78	1:00 <--that's this robot's titti dance
79	it's pretty cool...butt...
80	dafuq did i just watch
81	I guess they are one stepp closes to give Apples Siri a body...
82	Left cheek Right cheek
83	the fuq did i just watch ...
84	So how does it respond when someone tries to shove their cock in it?
85	ಠ_ಠ
86	lemme see dat booty wurk
87	but will it blend?
88	And they said there are no geniuses at this time.
89	I for one welcome our new roboass overlords
90	i had to ask myself if i as a member of this race was ready for that. i'm not sure. i'm just not sure.

#	COMMENT
91	...With a bit of luck, his life was ruined forever. Always thinking just behind some narrow door in all of his favorite universities, men in black long-sleeve shirts are getting incredible kicks from things he'll never know.
92	dat ass
93	Huh?
94	lololol
95	なにこれイヤラシイ!!!
96	These dudes made an ass that beats like a heart.
97	I, for one, don't beat my ass in time to my heart. This is bizarre. Not sure how this contributes to the future of robotics, but it's certainly interesting. Not sure anyone will ever register an emotional response from this aside from "What the fuck, why is there an ass on your table?", though.
98	Yup, no doubt about it. Japan will have the first fully functional sex robot. /facepalm
99	ladies and gents : the fart machine !
100	did he fuck THAT?
101	Assoteric
102	WHY?
103	What do I have to be mad about? I'm not even a woman.
104	it farts?
105	DAT ASS!
106	If you switch to another tab, you can pretend it's some weird electro track...
107	That is the noisiest robot ass I've ever seen.
108	Has anyone named it the Ro-butt yet?
109	an I the only one who thinks that they're going to use this for some sort of sex toy?
110	Wtf
111	no, no you are not
112	Youtube censors nudity yet allows this perversion?
113	Japan, we need to talk. I know you've always had a few issues, and we've been very tolerant of them, but this shit really is going too far.
114	please. give the porn industry maybe a year. this has them written alllllll over it.
115	USA invents robots -> their violent tendencies leads to some kind of sci-fi apocalypse Japan invents robots -> animated blowup dolls
116	WTF JAPAN !
117	needs more giant tentacles
118	Behold! The Fleshlight of the next generation!
119	I am disappoint by the lack of fart sounds
120	this is going to a perve's bff
121	Now, correct me if I'm wrong, but if I've been following the news correctly, Obama is fighting for my right to marry this robot ass, right?
122	For Science!
123	WTF?
124	dat ass
125	its good to know science is delving into new fields of ass robotics. Totally useful for our boys overseas who get their ass blown off.
126	Huh?
127	You haven't seen many then...
128	creep
129	When your hired to be a "Robot ass slapper" do you add it to your resume! High school drop outs please Note how the airbag works , becuase you might end up a sex robot repairman!
130	Bite my shiny metal as-oh. Bite my rubbery humanoid ass!
131	Of course the robot ass was invented by a Japanese guy. Why am I not surprised?
132	The new "uncanny valley".
133	Is he sniffing at 2:55 ?
134	At first I was sitting here trying to come up with some logical reasoning for this thing's existence I thought of several potential answers came most of them plausible. Then I saw him caressing the butt and I burst out laughing. Truly the joke of the fact that this exists is reason enough for it's existence.
135	Sez you.
136	When do people start fucking it?
137	People in japan express their emotions through their ass? IT ALL STARTS MAKING SENSE NOW
138	77-----!!
139	So basically you are telling as... thats a pretty emotional piece of ass?
140	Finally, we have reached the pinnacle of technological advancement. There's nowhere to go now. We have reached our apex.
141	! they need 2 do a latin booty and 2:28 hey this is for perv and sick of mid ppl wht u guy are promoting
142	Underwear bomber
143	Maybe in a year or 2 we will be see a complete body
144	Don't be rude this piece of ass has feeling!
145	i cant watch this. thats a male robots naked ass

#	COMMENT
146	The emotion evoked by looking at this thing was "What the fuck? Ew."
147	Hahaha ths is NOT how my ass moves
148	My butt cheeks always make the same noise
149	"buttox humanoid that represents emotions with visual and tactual transformation of the muscles" haha l'm fucking dying here.
150	Best. Youtube. Comment. Ever.
151	AND COMING....ROBOT FART!
152	What the fuck am I doing with my life?
153	no fart function???
154	I have the Chuck Norris Version of this on my Channel.
155	CAN YA FUCK IT?
156	wtf
157	good god why?
158	One step closer to terminators?
159	...thanks zone I needed this.
160	they will use such asses in robotic gfs :D
161	Only in Japan..
162	Why
163	OVER 20 POUNDS OF PUSSY AND ASS: Skynet edition.
164	Of course Japan would make an interactive butt
165	I, for one, welcome our new buttocks overlords.
166	inb4datass
167	Why this demo involves him slapping it? So weird.
168	Fleshlight 2.0?
169Why?
170	The creators definitely fucked it...
171	l'm rock hard right now.
172	Was I the only one that was expecting some penetration?
173	secret butt fun
174	I was going to say a joke, butt fuck it.
175	Reminds me of my therapists, physio and massage!!! They keep me able to do all these neat things.
176	Don't know how all you commenters swing, but that looks like a man's ass to me.
177	ANOSAa.....
178	l'm that weird part of the weird part of youtube again
179	Yes you are.
180	MOOOMMMM.... l'm in the weird part of Youtube again.
181	3:16
182	Does it come with a remote "fart" control?
183	Me gusta..
184	someone actualy made an ass robot
185	Someone get this guy a real ass to fondle.
186	Mechanical butt. This is why we DON'T have nice things.
187	maybe shetri
188	we are one step closer to robocop
189	Japan-producing 78% of the worlds weird shit since 1952 !
190	"HEY INSTEAD OF HAVING LIKE A FACE TO SHOW EMOTIONS, HOW ABOUT AN ASS?" "YEEEAHH! WHAT A GREAT IDEA!!"
191	that guy is touching it waaay too passionately,i felt awkward
192	Yes but... can it love?
193	will it blend? that is the question
194	that's super creepy! molesting a robot :
195	does ass move in this way?
196	Japan is the source of the weirdest shit in the world, seriously.
197	1:53 I think it farted.
198	Wind ass. 555+ i want to know about controlling by sound. bang bang doom doom doom.
199	If someone's butt started making those noises, l'd be very concerned... While l'm running away as fast as I freaking can.
200	What the fuck did I just watch?
201	I love science
202	What the fuck, Japan. Just. What the fuck. xD
203	No description available. That's for fucking sure.
204	Okay what?
205	laughed my ass off xdd

#	COMMENT
206	Oh, they're Japanese. Suddenly this makes a lot more sense. Kind of.
207	but can it fart?
208	3:18 LOL BITCH SLAP :D
209	Atheists 1 Christians 0
210	How do people get funding for this? What do they tell their prospective funders?
211	nice high school joke
212	What the actual fuck?
213	fuckin scientists
214	My opinion of the Human species has once again taken a serious nosedive.
215	The question is.....will it blend?
216	O-shiri!!
217	Now put a fleshlight in there.
218	What the fuck did I just watch?
219	%%%%%%%%%%
220	can japan just hurry up and get laid already!?
221	Mechanical Buttocks.
222	I just have one question: Why?
223	Shiri needs some liposuction big time
224	@2:22 Oh yeah. slap that ass...
225	Dat ass
226	What the fuck Japan???
227 my first thought was "OMG is it going to fart?"
228	Japan, seriously, wtf.
229	SHIRI + Fleshlight. you know where this is going ;)
230	mann, japanesse?? whats wrong with you?
231	I feel dirty watching this shit...
232	Thats a pretty noisy butt.
233	Now make a women's butt..... ;)
234	i think im un the wierd part of youtube O.o
235	Ok, I watched this because when I saw a thumbnail icon of a dismembered robo-ass I couldn't NOT watch it just to see what the hell it was. Now, having watched it... what the flying fuck did I just watch? This has got to be at least a few dozen kinds of creepy.
236	well this in particular is not for sexual pleasure but if they put a hole or a dildo on it i guess yes
237	that ass
238	The new Boong-Ga Boong-Ga interface.
239	How the hell I end up in this page?
240	That's Siri from Apple!
241	Shake that moneymaker Shiri, shake it!
242	Wait, wut?
243	can you tap it?
244	I wass think the same thing hahaha
245	they said they still don't know exactly what else this will be used for. beyond training.
246	dafuq?
247	Keep in mind somebody paid money for that ass... No doubt the first android will have a perfect functional ass. It will lack an AI, legs, hands and won't be able to move easily. I believe the breast should be OK too ^^
248	'Dat Ass
249	And the sex toy industry steals this idea in 3... 2... 1...
250	This brings new meaning to the phrase "you're such an ass"; Also, notice the artistic manner in which the "master" (?) slaps.
251	From 2:44 is hilarious.
252	Apesar de ser muito estranho e chega tambem a ser muito criativo.... mais qual a finalidade desse projeto, o que esse cara realmente estava querendo só da tapa numa bumbum robotico.....
253	-Emotions ? MY ASS ! -Yes, you're right -Huh ?
254	MAKE IT TO THE PORN INDUSTRY PLEASE (I GUESS...)
255	Forever Alone LVL: Japonese...if you know what I mean
256	yeah, but, when can i fuck it?
257	Butt will it blend ?
258	kkkkkkkkkk

#	COMMENT
367	Японцы изобрели робожопу как барабан!!!! Секрет открыт
368	Мне страшно...
369	если эта херня ебательна, то якупил
370	Японцы...такие японцы...
371	Ah je pensais que c'était encluable c'est nul en fait...
372	а дупла то нет...
373	еще более идиотское изобретение - это наноунитаз, изобретенный теми же японцами (причем они за это премию какую то научную получили)
374	Сколково?
375	1:04 чо за... ???
376	Sounds flatulent ...
377	Why? Warum? Naze? Pochemu?
378	от стаса!
379	Мне кажется, или я один пытался повторить все эти движения своей задницей тоже?...
380	Ну почему жопа то??
381	This is Хорошо
382	why the people make that
383	WTF? Япония такая Япония, чему тут удивляться?..
384	Вот вы говорите фуу да это жоопа.А эти японцы получают миллионы и аплодисменты за это великое изобретение.
385	2:36 смотрите как он её ласкает? ^)^\
386	товарищи, это пиздец.
387	ясно, секс роботу уже жопа сделана. скоро и всё остальное будет)
388	Летающий самонаводящийся член давно изобрели и испытали, правда не совсем удачно (search "Kasparov vs Fly Fallos"). Теперь вот жопу сделали. А потом из всего этого получится робот-актунг. Ждите.
389	Odd compliment.
390	its fucking shit
391	EXPRESSING THOSE EMOTIONS
392	But...theyre buttocks.....wouldnt a face have been more appropriate? or is a disembodied head winking at you on a desk just a tad too creepy?
393	buttbot
394	U TALKN' SHIT TO ME SHIRI?!?
395	TECHNOLOGY HAS REACHED NEW HEIGHTS NEVER BEFORE THOUGHT POSSIBLE.
396	I didn't know they were remaking the first Terminator movie.
397	Dat ass?
398	y 292 человек батхёрт.
399	Меня обуревают совсем не смутные сомнения, что разработчики думали совсем не о массажистах и врачах...
400	:\
401	注文はどこだ?
402	шири-шири жопу тыри!
403	Это жопа РОБОКОПА!
404	Мне кажется или чувак на видео влюблен в жопу? куда катится человечество... эмоции на заднице? да я ни разу в жизни не видела, чтобы у людей так жопа дрожала. вопрос: на что люди убивают время и деньги????
405	nie widzę jeszcze żadnego komentarza w stylu ruchałbym ;D cud ! :D
407	Как в "Тайне третьей планеты": Это Индикатор, он все понимает. но не говорит. он только шевелит жопой
408	мне противно смотреть как он ласкает ее своими руками!!!! (@_@)
409	вообще-то данный робот-жопа изображает человеческие эмоции в целом (смех и т.д.), а не то, как себя ведет жопа человека в тех или иных ситуациях.
410	They have to do the robot in the form of the penis to complete the sensation! Им осталось сделать робота в виде члена, для полноты ощущений!
411	日本人で良かった
412	グラスノスチ & ベレストロイカ、革命でもおこりそうな反響だぜ。。。
413	так вот как выглядит настоящая жопа ! а я то думал ...
414	o_o
415	You are doing it wrong...
416	これって、男のお尻だよな?
417	Shiri: siri's ass.
418	Oh cmon!!!Madness...
419	wow ..the world really needs this!! ... i think he should get a nobel or something

#	COMMENT
420	I don't get it.
421	@2:59 spanking
422	Sorry for my bad english ;)
423	Aw God! I feel like I'm watching some kind of sick porn! ..o
424made in japan?
425	That farts!!
426	SLAP DAT ASS
427	着々と進んでるな 完成も近い v=J_R7fgo0FLc
428	"also can detect the user's touch, stroke and slap" lmao!
429	А где-то дети голодают, а тут... жопа. Какое бессмысленное изобретение, ещё бы пульсирующий пенис и вагину изобрели - полный пиздец!
430	oh Japan, you are weird
431	here comes the vsause
432	what kind of butt pulses like that or has one side get bigger than the other?!?
433	Да так то есть уже такие штуки ,I, o0Oo ;)
434	Dat ass XD
435	i have the wierdest boner...
436	Do these come in boobs?
437	but WHY an ass?
438	(// ω //) 並々ならぬお尻への執着。。
439	I'm actually reminded of a video on America's Funniest Home Videos, when Bob Saget was hosting.
440	Me Gusta.
441	I don't have to say it, you're already thinking it.
442	"express emotions" by which i assume they mean "stimulate penis"
443	This project does not have 2 main points. It only has one, and you all know that they tried it already.
444	Let's just all admit this is going to lead to sex robots.
445	Mmmm.. my future wife to be. Can i have one which actually likes whipping?
446	the guy who made this is fucked!
447	what a freak
448	Be still my beating fart...
449	My guess is that every dislike comes from a real ass who knows they're going to be replaced when this goes worldwide.
450	We have a flying car. More like a helicopter + mini car. The price is around a lamborghini Aventador and it is set to release at 2013
451	You just revived the strangest compliment I have EVER seen. In the strangest place too.
452	My only question is, can I put my penis in it?
453	они там что обдолбанные?
454	I was going to joke about this, butt fuck it.
455	this is a grate way to communicate with assholes!
456	この研究者が何考えてるのか理解できない w
457	I see what you did there!
458	i have a bad news for you... It is man's ass!
459	А где ебанутые комменты типо: "Кто от Стаса - палец вверх!"
460	Ass massage FTW :)
461	2:34 :Forever Alone:
462	пиздец, ну и хуйта
463	WHY THE FUCK WOULD ANYBODY EVER BOTHER MAKING THIS?
464	На 2:30 минуте начинается полный пиздец!!!
465	需要がどうかじゃないんだよ 好きな物を好きに作れる事こそが重要なんだよ
466	なぜこれを作ったのかわからない! 男のようなケツに見えるだもん! 女性型のお尻の開発を期待してます
467	一体なんなんだこれは。 笑いが止まらん
468	これはワロタ
469	OMG !
470	Это точно не секс игрушка?
471	海外向けに発信してるんだろうが、日本語で説明して欲しい 何故、叩いたり撫でたりするのか? その後理解出来たけど、最初から理解のないまま見ると辛い...

#	COMMENT
472	Dumb as fuck.
473	Haaa??
474	I'm trueborn Japanese though I can't get this....the only thing I can say is Dentsuu univ. is consisted of only men..
475	何者も恐れることはない、先駆者とはいつの時代も異端視され石つぶてを投げつけられるものだ 閉塞した時代を切り開くのは、いつの時代であれ男子の肥大化した（エロ）妄想なのだから！
476	Dat ass.
477	We proud, because this is not understood from world.
478	Well, kiss my shiny metal ass!
479	コロンブスの卵 Egg of Columbus Huevo de Colón Œuf de Colomb Ei des Kolumbus Uovo di Colombo
480	Holy shit that is the hottest fucking thing I've ever seen in my life.
481	What if I like it and I want to put a ring on it?
482	+1
483	This is fucking stupid.
484	SURPRISE BUTTSECKS!
485	I'm confident that the inventor will be sued by Apple, because I guess this device must be inspired by a functionality included in iPhone. We Japanese call this part of body "siri";
	Siri in iPhone allows us to communicate with the device, but this device allows us to communicate with siri. This is the "reversal" idea.
486	Nah, the inventor will be sued by Apple because the thing looks like Steve Jobs.
487	Butt is it Art?
488	日本の名物は女尻シリーズ量産だろ常考
489	...So it's an aftermarket interface device based on a translation-related pun? Because that's the sanest interpretation I can come up with, here.
490	これに抵抗を示したり批判してる海外の奴らは馬鹿なんだな。 将来完璧なアンドロイドや義手義足などの機械の体が構築されたとき、お尻だけがシリコンゴムの塊で動かないとなると、それこそ片手落ちの不備になるだろう。 そのためにお尻の技術の積み重ねが必要なんだよ。
	本当か？w
491	why is this even needed
492	ЖОПА!!!!!!!!!!!!
493	It looks like someone is farting &_>
494	びっくりするほどユートピア！（へチへチ）
495	あのさぁ・・・
496	無用の用
497	またおまえか
498	あんたあ...!!!
499	これは尻（例：桂正和）ではない！！ケツ（例：寺沢武一）だ！！！！
500	Кто от Стаса! Палец Вверх!
501	なんかむなし・・・
502	ххахахахахах дятка лапает жопу хвхахахахахахааааа
503	変態に技術を与えた結果がこれだよ！
504	lolwut
505	お尻そっくりロボを開発っていう話題聞いた時、 もしかしていつものアイツじゃねえの・・・？ と思って動画見てみた。 そしたらやっぱりいつものアイツだったよ！！ 世界を巻き込む革命の準備が着々と進められている・・・
506	кто от стаса палец вверх
507	But can she cook?
508	But why
509	Maybe, this ass is not the goal. I think that more complex organ will be created future. One of the strange place of Japan will be forced to express the progress.
510	大学生だね。本人は、女性のつもりで作ったんじゃない？ でも男尻になっちゃったw このロボットをもっと伸ばして、尻文字ロボットなんてどうよ？ いろいろ作ってれば、いつの日か人の為になるロボットができるよ。
511	Penis goes where?
512	This is probably the only time in history where anyone will be able to stroke robotic butt for completely scientific reasons.
513	wut.

#	COMMENT
514	shiri, like siri, but... shiri...!
515	does ur butt really do that? cuz whenever im happy im pretty sure my buttcheeks dont flex one at a time. '. '
516	gidin biraz kızlarla ilgilenin nesliniz tükenecek
517	man the government needs to do important shit wit our tax money not make robot ass's
518	Wtf
519	you know what you are absolutely right i respect that foreal, thank you
520	筒井先生！リアル「オイドイド」ですよ！
521	ЭТО HOPMA!!!
522	lol ::applauds::
523	why? why an ass?
524	So....I'm supposed to understand an communicate with an ass?
525	what's the point? I feel like I'm missing something
526	Yall got wayyyyyy!!!!!!! Too much time on your hands... thats stupid
527	Not much different then daily life.
528	You do realize that pmgruhn basically just described communism, right?
529	I truly don't get it. Sure we need to figure out how to accurately emulate muscles, but an ass? Really? Has anyone ever looked at an ass long enough to tell that it's reacting to emotions? No one? Okay.
530	yes
531	Sigh.
532	why someone would give money to make this? just a waste of time!
533	Me too.
534	A BUTT WITH EMOTIONS?! WHY?! WHY A BUTT?!...I think that it might be used for something else, if it's a butt...
535	didney worl
536	"No description available" pretty much sums it up.
537	"This project has two main point, we totally forgot what the fuck they were."
538	I thought whether to have been the every day of Mexico.
539	what's wrong with you Japan ?
540	What the hell is up with the way he spansk it and caresses it at 2:27 I would hate to see what this guy does with this thing when nobody is watching.
541	(Сделал палец вверх)Как говорит Стас: ЭТО РОБОЖОПА!!
542	a fake butt. why
543	a fake butt. why
544	thumbs up if you came from vsauce2 for some weirdness!
545	Okay, so we got the Fleshlight and the SHIRI. When does some Japanese genius put them together and make me a sex robot?
546	The Japanese never fail to surprise me...
547	This is just one of the many test they do for the future sex androids.
548	why don't you focus on making giant robots instead of pointless shit japan
549	only on the Japanese scientists might expect such a...
550	that ass
551	at least your country has awesome spelling skills!
552	FAIL
553	it's a male buttocks. those of you who got boners might wanna think about this fact.
554	Well thats got to be up in the top 10 of gayest things ever ...
555	これは一技術要素にすぎない。 作者 高橋novriki 大研究員の一連のビデオをみれば、 だまっけても、めざすものがみえてくる。 未来の日本は アマゾネス・イアンフ・アンドロイドを大規模にPKO機動展開するかもしれない。しかもマップで。
556	"no description available" YOU'RE DAMN RIGHT
557	Right.
558	I don't want to talk about it...
559	whaaaaaaaaaaaaaat
560	okay. What is the FUCKING point, of making this?!?!?!?!?
561	ЧЕ ЗА ХУЙНЯ
562	If I got a nameless generic overly sexual and cheezy gangster compliment on a youtube video about a robotic ass that feels emotion. I can see how you would feel that way. May your comment response history improve!
563	978K views! I'm heading for the big 6 zeros. Yeah baby!

#	COMMENT
564	actually the country where you're from is totally irrelevant, as my joke was solely referring to your more than poor spelling skills. but as can be seen from your reaction, your spelling skills seem the least of your problems. btw: my favorite comment you wrote was about the ipad: "iPhone owns, I mean seriously why people need? such a huge ass iphone?" if were meant ironic, it would be awesome. but hey... nevermind.
565	ROBOTICS WILL NEVER BE THE SAME
566	aint no hole lol. plus its flat:/
567	Why so awesome, random YouTube user?
568	vsauce brought me here :)
569	but can it shit?
570	ебнутые япоши!!!
571	I don't quite know I guess its like gambling, commenting on videos of bizarre things like this.
572	somebody clearly has been denied any chance of some anal action at home
573	The start of The Buttlerian Jihad XD XD
574	i'm in that weird part of youtube again
575	Agreed.
576	robutoff. :l
577	god damnit japan
578	What the fudge did I just watch?
579	i'm 27 and what is this
580	Why.... Besides the obvious. ~_ O_o
581	Gambling that forces you to listen to a butt make heartbeat noises every time you check your inbox, replying to some youtuber who replied to some comment you made a really long time ago.
582	Здравствуй, Жопа, Новый Год!
583	Sospecho que si los electrodomésticos hablaran, en Japón se quejarían de abuso sexual.
584	WHAT DAFUUUUUQ IS DATT SERIOUSLY!!!
585	it does respond, but the response is really late....lol
586	fapin video?
587	LOL
588	Alright!.. i'm in that weird part of youtube again.
589	"i'm referring to YOU ARE more than poor skills" sounds a bit odd don't you think? so let's do it the proper way again: "i'm referring to YOUR more than poor skills" hint: "YOU'RE" is short for "YOU ARE" i think it's ok for you to blush now, stand in the corner and wear your dunce-cap! epic skillz, bro... haha! P.S.: you really can't "fuck a dildo up the ass" go ask your teacher for correct phrasing and word choice. keep exercising!
590	How did I get here?
591	I don't see this D:
592	You're cruel dude.
593	Shiri, remind me to call my girlfriend when I leave work.
594	I don't think the word "emotions" means what they think it does.
595	I thought that at least the British and German can enjoy this kind of project. But I might be wrong. Is this only in Japan?
596	Japan, on the forefront and the backside of robotics.
597	WTF!?!?
598	Arriba si estas aca por T!
599	i don't quite get why you're quoting my full comment only to spice it with more of your bad fantasy english. what does "this isn't school too" mean? since you're not stating anything else that is not school, why use the word "too"? "your skills" and not "you're skills". it's sometimes a good habit to realize when you're wrong a refrain from senseless shouting. but it seems that is the main thing you do on the internet... a little google search shows that on an epic scale... time to mute.
600	beautiful... just beautiful! so far my favorite comment of yours. i like "keep copy of my words", the "And" after a period (.) sign, the concept of a "gay mind"... i like 'em all.
601	Pretty much the worst video to have an extended youtube conversation on, I must admit, butt your being equally cruel ass well!
602	I know, though it's only a matter of time until someone butts in on our conversation. Butt hopefully well be able to slap it in the right direction.

#	COMMENT
603	I have as same perception as yours, butt I think... *One of most excited people are Russian, as you can infer from lots of Cyrillic comments. *I think German already started making similar but powerful robobutt. *I think some British already owns similar thing. *I'm a Japanese.
604	Frankly, I think I am the ass who butted in. >..<
605	афигеть
606	Well that was weird
607	guess what, it's the wierd part of youtube again.
608	Thank you for your reply. Well, I got it. There is always better someone.
609	dat ass
610	But wut?
611	we all know what their real intentions are. they should stop trying to explain it over emotions and shit.
612	WTF
613	Gentlemen, I present Kardashian v 1.0.
614	lol, exactly 27 likes xD
615	狂ってやがる、遅すぎたんだ
616	This is why aliens searching the universe for intelligent life will skip Earth and keep going.
617	早すぎたのかも(´・ω・`)
618	Guy version of a vibrator?
619	Oh Japan...
620	i'd hit that
621	まーた電通大か
622	'No description available.'
623	I think someone already beat you to it. It isn't pretty, but it does exist. Just google Roxxy, you should find info on a sex robot, it even speaks to you too!
624	Nobuhiro Takahashi did it again!
625	Okay, but will it blend?
626	I was walking through the halls and someone touched my butt, i dropped everything and started moving each cheek one at a time for a few seconds to show my happiness.
627	Anyone else start flexing their glutes with SHIRI?
628	gotta go pee pee
629	I'm kind of scared that this thing is gonna come and kill me in my sleep
630	so where's the hole?
631	Put some legs on that thing, and you've got Assy McGee.
632	Honestly, this is just fucking stupid.
633	WHAT THE FUCCK?
634	ROBOT BUTTS
635	What the fuck is this even for?
636	For fucking.
637	I think it's butt-tastic!
638	wat
639	GOD FUCKING DAMNIT, ED
640	why they didnt show the "my body is ready" emotion?
641	SHIRI? MORE LIKE SHITTY AMIRITE? ***BA DUM TSSS****
642	HOW THE FUCK DID I GET HERE????
643	I don't want an ass, but, I will take a silicon vagina. I'll throw my wife the fuck out. You were listening instructions from Apple's Siri.
644	1. Open up new tab 2. Go to youtube 3. /watch?v=XpqqjU7u5Yc 4. Enjoy :D
645	Spanking and stroking. If Shiri could talk, I bed she'd proclaim "Why are you always so hot and cold, Jerry!" On another note, ass-emotions?
646	Dirty little secrets, I understand, but would they have a ridiculous quivering-butt-robot? I just feel embarased that with all our technological advancements we're building quivering-butt-robots. Not mecha-suits, not space-elevators. Just quivering-butt-robots. And still no flying cars! Beyond 2000 lied to me *sulks*
647	HAHAHA why convey emotions with an ass? Someone is either fucking with us or this is 100% serious.
648	No description possible...
649	Japan is always pushing the boundaries and breaking the limits of technology, science, and wtfuckery
650	Let's not put all our focus into developing walking-talking robots. First we'll develop a nice butt to squeeze ready for them when they get here. How would we keep them from overthrowing us if we can't give them a good spanking?
651	WHAT THE FUUUUCK
652	Universally Awkward!!

#	COMMENT
653	Why?
654	Japan is trolling the world again. They can't have an army, so they're using psychological warfare
655	You don't want to see when it gets sad...
656	does it fart as well?hahahaha
657	who's ass is vibrating????
658	wonder where you can get one... !
659	okay who else came here from encyclopedia dramatica?
660	I was just thinking the same....otherwise is pretty useless! :)
661	That, and Jersey Shore.
662	dat ass
663	I know its kinda hard to swallow for someone from your culture, but there are nations that dont want to have an army
664	loly fuckin shit.
665	omg
666	Way to take something out of context. Everything must devolve into American Hate on youtube comments.
667	What if you put a finger inside the butthole xD!?!?
668	The greatest sex toy ever invented.
669	o_o
670	LOL
671	Right! And there are children that don't want to have parents. And some people don't wanna have nails and bones. It's up to them completely.
672	gay
673	They can't have an army dipshit.
674	The..... fuck....? (Say it slowly...)
675	Just looks odd seeing a guy play with a rubber butt.
676	oooooooooh O_O myyyyy *_* god (ノσσ)ノ ㄟ└└└└
	As seen on AOTS...
677	Nope, that's not weird... not weird at all... Just Japan being Japan...
678	i have the weirdest boner...
679	pero que puta mierda? (WTF?)
680	Tú vienes de Salvador Raya? :\$
681	Try this game, fun for...well maybe not all the family. Whenever a piece of text comes up in this video, just say out loud: "Yes, but why is it an arse?"
682	contracts...
683	No van a faltar los pendejos con falta de atencion que digan que vienen por duxativa, dejen de mamar. Vean el video y punto.
684	Ejercito de Duxativa :D
685	ejersito de del pajero de duxa
686	Es... por que no decirlo... traserísticamente inquietante... bienvenidos al culo del misterio
687	inches cochinadas
688	ejercito culon de shiri !! duxativa
689	que tortazo le mete al final xDDD
690	ejercito pajero de duxa!!!!!!!!!!!!
691	ULTRA GAAAYYYY!!!!!!!
692	ahuevo
693	QUE SHIRI
694	xd quiero hacerlo con shiri *.*
695	DA FAQ?
696	Maldito duxa de donde sakas estas noticias xD
697	porque es genial :D
698	:O wtf cada vez pienso q los chinos con esas ideas q tienen van a destruir el mundo :D
699	pajeros DUXA!!!! FA'P
700	Son japoneses ㄟ
701	Dat Ass
702	yo solo pienso que son unos PAJEROS xD
703	2:28 spank time
704	ajjaajaj que estupidez . Tenia que ser japones .
705	wajajajaj q arrecho el tipo!
706	2:36 loh potoh, loh potoh, siempre loh potoh...
707	Ahh a que mierda con eso ¡¡ DUXA ATACAMOS ¡
708	a webo
709	Chiri culo hejaponés.
710	DUXA el primer hombre en comprar shiri xD
711	solo una palabra GAY!!!!!!! por como lo toca para mi es un trolaso porque es un tarsero de hombre xD

#	COMMENT
712	I know what you did there ㄟㄟ
713	DAFUQ I JUST WATCHED!
714	Asiáticos são tarados demais, acho que eles se excitam até com uma laranja HAHHAHAHAHA
715	¡Nalgame dios!
716	ЖОПА!
717	What the watch did I fuck
718	Sei Muito Bem pra que eles fizeram isso hahaha
719	Dios k salidos estan los chinos...
720	el nuevo control para la ps3 jajajajaja
721	They want to "raise the argument"; of what kind of reaction people will get to that robot. Well, let's politely say something ELSE is gonna raise. There, I already finished the experiment. Problem solved. I can has university grant nao?
722	una conspiracion japonesa D:
723	Que mierda mas gay y perversida, es cosa de ver cuando lo cachetea y acaricia D: ... Que enfermo xD
724	THIS IS INSANE
725	Forever Alone. Level: Asian
726	なんで男のケツやねん
727	...this isn't where I parked.
728	Como coño e llegado aqui! Like si te paso lo mismo!
729	si señor,el nuevo articulo para que los tios...bueno ya sabeis...xD!
730	yo creo que con esto se gana la vida el tio puajajaja!
731	Aprende a escribir, perversido.
732	no entiendo una mierda :S
733	Quien va a querer comprar esa cosa?
734	Es una idea muy rentable... es bien sabido que a los japoneses les dan asco las mujeres y su más grande deseo es crear mujeres de plástico a las que puedan cogerse (claro que estoy exagerando un poco con el lenguaje... pero es cierto)... Ahora... visto como lo que es: "un par de bolsas de aire con dispositivos mecánicos de control";, en realidad es una idea increíblemente estúpida.
735	Yo lo haria para eso no para simular contracciones musculares
736	por favor que raro cuando empieza a tocar el culo.....
737	Muchachos :D
738	DAIANAGM BABS PLAYER BARBIE XD
739	Thevloggames
740	Player Barbs Melocoteia
741	To aqui pela live da cagona ou solange do canal TheVlogGames
742	Babs me truxe aki
743	WTF????????!!
744	Gay Detected
745	WHAT THE FUCK?!?! O.o
746	I knew it!!!! Japan creates robot just for sex!!! Don't they or you who support feel ashamed?
747	I never thought a video about buttocks could be so boring. Where's the sax?
748	It's afraid.
749	Of course they can, constitution can be changed fuckface
750	I must admit I dont fully understand your message, but I generally disagree with anything that starts with words "everything must"; I also think you shouldn't take things so seriously, when the debate starts with robotic arse
751	I was watching the Mass Effect 3 Extended cut then ended up here.
752	Under they're current constitution they can't and they're culture certainly isn't the reason they don't so confuse your own ignorance for being other than what it is.
753	Constitution represents the will of the people, so it they can have an army, if they really want. Everything I said is true, so I have shown no ignorance, unlike you, who haven't mastered english grama enough to be at least understood.
754	LOL
755	Whoa, man. You realize this is a video about a butt robot?
756	fuck off.
757	Wow....that's...completely retarded, I mean what were they thinking when they invented this? "Hey you know what the world needs? A robot butt with emotions."
758	You start bullshit debate by an insult, what do you expect? You brought this on your head yourself, sad fool
759	No, you insulted me by sayin an insult, the last word of your first comment to be exact, can you even remember what are you saying? Regarding your "stating the facts";, I already explained to you, why are you wrong and you were not able to counter my arguments, so read it again several times, until you understand, if it is within your capacity. If you want to stop this conversation, do it yourself, I am not responding to your commands.
760	..He touched the butt.
761	Wow! BUTT-MAN(called"Ketsu-dake Seijin" in Japanese) does really exist!! 「ケツだけ星人」が実在したとは... (^ ^ ;

#	COMMENT
762	What a "SILLY" item !
763	" english grama" Perhaps you should pay more visits to school once in a while, your spelling SUCKS BALLS.
764	"I have shown no ignorance, unlike you, who haven't mastered english grama enough to be at least understood."
765	Instead of arguing about a robotic plastic butt, you'd better search "les fantastiques aventures d'Athanas" on youtube and watch it. It's freakin funny! (can't give the link here)
766	is that a but messenger?
767	AppleのSirilに掛けたんだよな・・・? w w w
768	I was talking about this fool not being understood, not criticising spelling imperfection you idiot, learn to think a bit. and I dont claim MY gramas good, get it? BTW maybe you could correct me when youre so smart
769	No I won't, I hate idiots who pick on your grammar, It's like the last ace in the sleeve of a desperate man who lost an argument and decides that an ad hominem (attacking the person directly instead of giving him a counterargument) argument is the best thing to do... Using it would make me a giant hypocrite. And I'm not English or American, I'm from Europe and I do agree that the English language is pure shit, It's overly complicated and full of 1 million useless words...
770	And the pronunciation is simply... I have no words for it. I wanted to learn japanese and I noticed it was just as hard as this shit. Symbols for every word, they're pronounced differently, none (that I know of) prefixes it's just too complicated it's supposed to be a language not an Olympic sport only 0.5% of the humans can master. An universal language would actually have an useful alphabet. You know how "s", "h", "i", and "t" are pronounced? good, then you'd know to pronounce "shit".
771	But I wasnt picking on anyones grammar, I was just pointing out that person inability to be understood. If you hate people who do that, maybe you shouldnt do it yourself, unless you hate yourself. I checked accuracy of my comments with my native english speaking pal and he confirmed what I suspected - your ballsucking remark is a pile of horseshit, i.e. "the last ace in the sleeve of a desperate man who lost an argument and decides that an ad hominem", even more pathetic being your first words.
772	Since when do butts pulse?
773	Can it fart?
774	I DON'T UNDERSTAND!!!
775	Dont be an ass.
776	This is what our advances in science has given us
777	Is everyone in agreement that Japan needs a new hobby that doesn't involve creating useless robotics.
778	Let's see how well Shiri communicate with shotgun...
779	I was going to make a penis joke, but it was too long.
780	WTF! You wasting you time to create this useless butt for to see the muscle! instead to create a beautiful boobies!
781	For some reason I want one.
782	Vagina jokes aren't funny. Period.
783	dat ass
784	DAT ASS
785	I was wondering the same thing.
786	Innovative MY ASS!
787	Oh like eating too much fast food and becoming fat and gross as shit ?
788	You need to look around not all fat people are gross (if you believe this you have been brainwashed by the media). Not all fat people eat a lot of fast food, I am fat but I only eat out maybe once a month. Learn to think for yourself and turn off the tv.
789	The awful thing is that I didn't say any of those implications about fat people and fast food. I think that the reason you had that prejudice about my sayings is because society is a bitch sometimes and made you a defensive fellow. By the way I don't watch TV and 'try' to think for myself (that's why I hate "fast food society") so as far as I can see is that if you hate prejudice then I encourage you to not fight it with prejudice and take back those words. Have a nice day.
790	All because you didn't say it first doesn't mean you have to repeat it. We have a choice each day to be smart or be an idiot you're an idiot (gave up debating people on the internet because people are stupid). Don't blame me blame genetics.
791	It's a shame you used the resource of insulting, for a moment when you told me to turn off the TV I had some faith in the discussion, but now look at you having the arrogance and pride to say people are stupid. So rubbish that I lost interest in this thread, goodbye and sicerely have a nice day.
792	DAT ROBOT
793	Your existence is stupid, you failed abortion...
794	The butt has been made?? well, that's the hard part over
795	I don't get it, what is this thing for? It's evidently not a sex toy, so what's it good for?
796	"No description available." Indeed.
797	Yes, protrusion is after all a very human emotion... I feel it all the time...
798	1. Googles for best Korean films 2. Finds film called "Shiri", noted as the first Hollywoodized Korean film 3. Clicks a review's trailer link 4. Ends up here
799	I can see how hard to try to make a serious but they failed
800	did anyone clench their ass?
801	O.O
802	iphone?

#	COMMENT
803	Hello my name is assbot
804	この実験 \('o` : どういう 意味が、あるの??
805	すいません、海外在住の日本女性ですが、いつも日本のテクノロジーには驚かされています。 私の居ない間に、日本は全く違う国に変わり果てたことを、どう受け止めてよいか解りません。
806	Who the heck moves one butt cheek a time when they're happy?
807	So, the real question, what would be the actual purpose of this?
808	I'd love to see you all find out its a dudes ass
809	Its hard not to say this butt... DAT ASS
810	Press 8
811	人類がどんな反応するかの実験じゃない? 間違いなくこのコメント欄もチェックされてるな。Robuttに。
812	Sounds similar to siri
813	I Think what everyone here want's to know is... Will it blend...?
814	you can always try...
815	I'm proud of you, science.
816	this is kind of disgusting to see how he touches the butt.... O.o with that expression on his face...
817	イグノーベル賞狙いかな? It seems that it aims at Ig Nobel Prize.
818	Dat Ass!
819	Forever alone
820	Only one thing I wonder is "how many hole does this robot have";...
821	Antone one else want this for sexual pleasure?
822	Artificial sex
823	Don't butt out of making a fucking joke!
824	Well sex of course
825	Well I don't know, but I could Fap to it
826	Para que fins isso é usado? Sex shop? o.O;
827	part one of robot girlfriend complete!!!
828	dat ass
829	quanta utilidade aushauhsuha
830	is there a role?
831	Science isn't about "why"; It's about "why not";
832	I have the most synthetic boner right now.
833	robotwerking
834	can't think of usage
835	But why?
836	WOOP WOOP
837	What's this?? ... something seems sex maniac ...
838	Horniness, I'd imagine.
839	My ass i am a robot !
840	He can't fart ... My ass is far superior ! Listen ... BRAAAAAHPPROOOOW
841	I'm gonna smack that ass.
842	the most realistic fake anal sex lol
843	Its an ass....
844	Arousal
845	WOW! SCIENCE!!
846	Dat ass ;) lol
847	I don't think anyone has the ability to vibrate their buttocks like that regardless of their emotions...?
848	Ever watched hula?
849	I'd say if you want it to express emotions then just make it talk, but I already know enough people who talk out of their ass.
850	A única explicação pra isto é que no futuro será possível fazer algum tipo de "robô prostituta"; em seria uma versão avançada da conhecida boneca inflável. E essa "bunda robótica"; poderia ser aprimorada para ser usada nessa tal de "robô prostituta"; Pode parecer absurdo mais existem lugares no mundo onde há poucas mulheres em que eu aposto que homens iriam pagar caro pra ter uma dessas...
851	Whats the usage of it....pillow? Alright,if its a girl's bottom i'll think about it.
852	Anyone else come here after seeing this on World's Dumbest (Smartest) Inventions?
853	カニイコ- ニホン' ソカニイコ-
854	Ok... that's enough internet for today.
855	от стаса или просто русский лайк))
856	As weird and awkward of a subject as it is, it's pretty innovative when you think about it. Had the form of the robot been more serious, it would mean the Japanese have managed to create artificial intelligence that can respond to the outside and living world (touches, in this case). Whatever they come up with next it's going to be insane.

#	COMMENT
857	They are. Even if the art disturbs, it doesn't mean they are not artists. People have created disturbing arts using nudes of people for centuries; just because it freaks out a good deal of people, doesn't mean it's not still art. Any creative expression of emotions could be considered art.
858	凄いだらうけど・・・尻叩いて去る瞬間笑ってしまうw
859	scared or nervous probably what if they make a robotic penis know as *TESTical*
860	when he rubbed it XD
861	my reply to this guy is a translation which says "it was my idea!"
862Why?....
863	two questions... why? and, what actually they do with this?
864	Бля робот жопа кто до этого до думался
865
866	There are no words for how disturbing this is.
867	TWERK IT
868	why baby why?
869	i want it on my bed u.u
870	I have never been more turned on in my life.
871	Wow, they even made it sound like a real butt LOL 2:22
872	Next up, making it sound like an ass.
873	Moral: slap butts FOR SCIENCE!
874	lol
875	anybody here express your emotion with you ass?
876	Nobel. Now!
877	I've never known my butt to pulse so violently.
878	WTF?
879	well Anal sex with a robot is now off my "things I really shouldn't do before I die list"
880	робожопа, спасибо что делаешь наш мир лучше!!!
881	Just... WHY?!!
882	why don't they just add a fuckable butthole, market it as a sex toy, and do away with all the pretense?
883	I like how he just slaps it and walks away.
884	This will go perfectly well with /watch?v=GuqV1EaM8TE
885	Well what a surprise, they made a realistic butt. They wont release any beneficial technology but they have time to make realistic sex toys to keep them warm at night under the cold chill of Corporate fascism! Classic!
886	For himself, he made one with a hole.
887	Он так чувственно её трогает)
888	whats your job? i'm a butt slapper.
889	ROBUTT
890	2:35 LOL Seems so pornographic...
891
892	@themistoklas I hate you so much right now omg
893	can i fuck it?
894	Repugnant is a creature who would squander the ability to lift an eye to the heavens conscious of his fleeting time here.
895	Oh look, it's robo-twerking.
896	ah the luxerys of bieng a nurd XD
897	что я здесь делаю
898	so they study the ass in making ths
899	The sounds it makes are wonderful!!! shared via: occultronic.tumblr.com
900	Add a twerk button!
901	Хааахахахахаха
902	wtf?
903	has anyone said robutt yet
904	No, Youtube, stop! I do not want to watch this in 720p!
905	Guess what else protrudes when a gentle stroke is applied.
906	why would you do this?! ...oh wait its Japan. Carry on.
907	For science.
908	To all Japanese engineers: just because you can make something, doesn't mean you should.
909	Will Smith kicking asses, literally XD
910	Can't wait for the Will Smith movie where he kills these sonsuhbitches
911	I would like to see the proposals submitted to the people who fund this.
912	that is terrifying because it is so naive. the creator of the atomic bomb, oppenheimer, was quoted as regretting making the bomb just to see if he could not if he SHOULD.
913	"Science isn't about "why not" - it's about "why not" - Cave Johnson.
914	YES, BRILLIANT
915	Go home Japan, you're drunk.
916	1:02 OH GOD... IT TWERKS

#	COMMENT
917	What an ass.
918	Finally, realistic robo asses. Humanity is truly at its peak. What a time to be alive!
919	A robotic. ass. NOT a robot WITH an ass. But just a robotic. ass. I'm going home now..
920	welp. looks like miley cyrus is gonna be out of work soon.
921	Not yet! We STILL need to attach it to a robot with other "essentials", and some sort of artificial inteligens, and THEN, well se! But were getting CLOSE, i think!
922	WE DID IT.
923	THE FUTURE, BIATCH!! XD LOL
924	Wtf did I just watch?
925	Why? I'm just speechless. The guy touching it....CREEPY!!!!!!!!!!
926	Am I the only one who truly became creeped out when he started "gently stroking" it? I just...I can't...
927	I'm pretty sure our butts don't act like that.
928	loool this will encourage handicapped male rape
929	This is so very disturbing.
930	lmao
931	That's some whack ass shit.
932	I'll take one! Now we just need to use all our science and knowledge to make a FULLY working sex robot!
933	Funny considering it looks like a man's ass!
934	Everyone who doesn't like this is ether: gay, retarded/stupid, or have yet to get any "big boy" hair!
935	Try not to laugh or smile while watching this. I DARE YOU!!!
936	I just saw this on Dumest Commercials....c'mon people what is the purpose of this??
937	Whoop whoop pull over
938	It's funny how they put that robot ass in that position to block us from seeing slappy-ass guy's boner.
939	sounds like a roller coaster... I'd ride it
940	Yessss. YEAHHH!!!!
941	Props for making it male.
942	Yep
943	Is that an ass robot?
944	Dat ass.
945	I think people would use this as a sex toy... just for grinding
946	did you make it in http://www.youtube.com/watch?v=vH06CUq4-o&t=3m00s >3:00 or so in and think..... what the fuck am I watching!?!?!?
947	what a fook
948	nextgen nicki minaj
949	don't use money for your leisure!!
950	[Insert Clever Comment Here] Because I got nothing.
951	The butt was nowhere near today's ass standard size in pop culture.
952	Hllaris
953	They need to combine this butt with the keepon dancing robot idea. A butt that moves to music
954	"people who communicate with SHIRI" lol!
955	ЖОПА
956	Pretty much just like the Basement Jaxx - Never Say Never video.
957	There is no going back now, Science!
958	what thefuck.....
959	+U WOT M8? ハハハdatのロボットのお尻を取得 hahaha getting dat robot ass
960	Well im putting my dick in that.
961	Wtf
962	But does its fart?
963	RoButt
964	+maximusdarkultima YESSS
965	I was going to make a joke about it butt f*ck it
966	WTF???
967	Shiri farts
968	Hey SHIRI!
969	It's a ROBUTT!!!
970	wth
971	what.
972	If you really don't want me to think this was made for a sex bot, then maybe you shouldn't be spanking it.. never mind that whole vibrating thing it's doing.
973	又、電気通信大学ですか... いや、嫌いじゃないんだけどさ
974	我が母校が。ううう、頭がいたい。。
975	ははは
976	how did I end up here thinks back on how she started watching buzzfeed videos
977	The inventor probably had a friend who tried to say "You should build a robot!" But accidentally said "You should build a robutt!"
978	👉
979	Te daria like, pero estoy en movil

