

## 修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院情報システム学研究科 情報メディアシステム学専攻 博士前期課程		
氏名	高橋 宣裕	学籍番号	1150020
論文題目	皮膚感覚の入出力特性に基づく視触覚インタフェースに関する研究		
要旨	<p>近年、バーチャルリアリティ (VR) やオーグメンテッドリアリティ (AR) の研究の発展に伴い、多彩なコミュニケーション手法やエンタテインメントへの応用が提案されている。特に現在世界的に着々と普及しているテレビ電話やソーシャルネットワーキングサービスを利用した視聴覚情報を介する情報伝達に加え、人間の身体性に着目した情報伝達が行える触覚情報を用いたヒューマンインタフェースに注目が集まっている。主に画像提示装置を介する視聴覚情報の伝達は、相手に要件等を伝える用途において利便性に優れたコミュニケーション手段である。一方で触覚のような非言語情報の伝達は、相手が間近にいる状況では頻繁に行われるチャンネルであり、情報の解釈の過程を省略し直感的な教示が行える点、皮膚感覚入出力による情動的な情報伝達環境が構築できる点で、視聴覚情報の伝達のみでは代替が困難な非常に優れたモダリティであると言える。しかしながら、人間の皮膚感覚に近いインピーダンス特性を持った皮膚感覚提示を行うためには、既存の機械式アクチュエータのみで十分であるとは言い難い。</p> <p>そこで本研究では視触覚インタフェースとしての人工筋肉を提案し、皮膚感覚の入出力を拡張する2つのインタラクティブシステムの実装を行うことで、コミュニケーション手法やエンタテインメント表現への応用を図る。第一にコミュニケーション設計として抱擁感覚の要素抽出に着目し、マネキン型入力デバイスによる抱擁の検出と、人工筋肉・振動子を組み込んだ触覚提示ウェアによる圧迫感、ストロークの再提示を可能とするシステムの開発を行った。第二のアプローチでは生理学的知見および解剖学的知見に基づき、表皮の「質感」およ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、より人間の皮膚の入出力特性に近い見た目・感触の提示が行える視触覚インタフェースの研究開発を目的とする。研究手法としては、触覚コミュニケーションが行われる感覚器官を含む人間の身体部位に対して、表皮の質感および当該部位の視触覚的な変化特性を模倣した人工皮膚、人工筋肉を持つヒューマノイドを開発し、視触覚情報として提示可能なインタフェース及びエンタテインメント表現としての応用可能性を探る。</p>		

平成24年度 修士論文

皮膚感覚の入出力特性に基づく  
視触覚インタフェースに関する研究

電気通信大学 大学院情報システム学研究科

情報メディアシステム学専攻

1150020 高橋 宣裕

主任指導教員 小池 英樹 教授  
指導教員 栗原 恒弥 客員准教授  
指導教員 佐藤 俊治 准教授

提出年月日 平成24年7月20日

# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 背景	1
1.2 視触覚インタフェースとしての人工筋肉の必要性	2
1.3 研究目的	3
1.4 本論文の構成	5
<b>第 2 章 関連研究</b>	<b>6</b>
2.1 皮膚感覚入出力インタフェース	6
2.1.1 触力覚提示装置	6
2.1.2 抱擁の再現	13
2.1.3 アートとエンタテインメント	18
2.2 人工筋肉とその応用	23
2.3 ヒューマノイドロボットの感情表現手法	27
<b>第 3 章 Sense-Roid: 抱擁感覚拡張インタフェース</b>	<b>33</b>
3.1 コミュニケーション設計	34
3.1.1 触覚コミュニケーションの対象と親密性に関する考察	34
3.1.2 自己抱擁	35
3.2 Sense-Roid	40
3.3 システム構成	41
3.4 マネキン型センシングデバイス	42
3.4.1 圧迫入力の検出	44
3.4.2 ストローク入力の検出	45
3.5 触覚提示ウェア	46

---

3.5.1	McKibben 型人工筋肉	48
3.5.2	圧迫の出力	52
3.5.3	ストローク出力	54
3.6	記録と再生	59
3.7	展示発表における観察	60
3.8	考察	62
3.9	まとめ	64
<b>第 4 章</b>	<b>SHIRI: ヒューマノイドロボットの身体表現への応用</b>	<b>65</b>
4.1	インタフェース設計	66
4.1.1	Musculus-Haptic Display	67
4.1.2	基本設計	68
4.2	実装する身体部位の考察	71
4.2.1	筋構造	71
4.2.2	殿部と大殿筋	74
4.3	SHIRI	77
4.4	筐体デザイン	79
4.5	Gluteus Maximus Actuator	81
4.6	システム構成	83
4.7	動作パターン	86
4.7.1	緊張-弛緩	87
4.7.2	痙攣	88
4.7.3	突き出し	89
4.8	ユーザインタラクション	90
4.9	考察	92
4.10	まとめ	94

---

第 5 章 結論	95
謝辭	97
参考文献	98

## 目 次

2.1	inTouch[1]	7
2.2	RobotPHONE[2]	7
2.3	FEELEX2[3]	8
2.4	ピストン-クランク機構 [3]	8
2.5	コイル形状記憶合金を用いた 3次元形状ディスプレイ [4]	9
2.6	カメラとマーカを用いたピンアレイディスプレイの位置計測手法 [4]	10
2.7	Relief[5]	11
2.8	SmartTouch[6]	12
2.9	Huggy Pajama[7]	13
2.10	Controller と Pajama の身体部位のマッピング [7]	14
2.11	Hug vest[8]	14
2.12	The Hug[9]	15
2.13	Hug Shirt[10]	15
2.14	HaptiHug[11]	16
2.15	Thermoesthesia[12]	19
2.16	Gemotion Screen のシステム概要 [13]	20
2.17	Gemotion Screen 概観 [13]	20
2.18	Surround Haptics[14]	21
2.19	Inter Dis-communication Machine[16]	22
2.20	Jamming Skin[17]	23
2.21	Jamming Skin の動作 [17]	24
2.22	Jamming-based gripper[18]	25
2.23	PossessedHand[19]	26

2.24 Geminoid[20]	28
2.25 Telenoid[23]	28
2.26 CB <sup>2</sup> [24]	29
2.27 KOBIAN の概観及び自由度 [25]	30
2.28 KOBIAN による感情パタンの一例 [25]	31
3.1 他者に身体の各部位を触れられることによる快と不快の評価 [29]	36
3.2 触覚コミュニケーションの対象と効果	38
3.3 コミュニケーションの形式	39
3.4 Sense-Roid	41
3.5 Sense-Roid システム構成	42
3.6 マネキン型センシングデバイス正面（左）及び背面（右）	43
3.7 センサユニットの圧迫検出領域	44
3.8 センサユニットのストローク検出領域	45
3.9 触覚提示ウェア正面（左）及び背面（右）	47
3.10 McKibben 型人工筋肉	48
3.11 McKibben 型人工筋肉の動作原理	51
3.12 通常時（左）と収縮時（右）のスリーブ形状の変化	51
3.13 エアマッスの印加圧力と収縮率 [30]	52
3.14 圧迫出力システム	53
3.15 サーボ弁ユニット	54
3.16 振動子の概観	55
3.17 振動子の概要及び寸法	55
3.18 触覚提示ウェアの振動ユニット	56
3.19 振動出力領域	56
3.20 単電源-両電源回路図	57
3.21 発振回路図	57

3.22	ゲインコントロール回路図	58
3.23	実演展示の様子	61
4.1	気圧制御による MHD の硬度制御	69
4.2	McKibben 型人工筋肉による MHD の形状制御	70
4.3	軟質ウレタン素材を用いた人工皮膚	70
4.4	全身の姿勢筋と運動筋 [33]	72
4.5	骨格筋の構造 [33]	73
4.6	下肢後面の筋構造 (大腿, 骨盤, 殿部の筋) [33]	75
4.7	殿部表層の筋膜と皮下神経 [33]	76
4.8	SHIRI 概観	78
4.9	SHIRI 筐体内部の概観	78
4.10	SHIRI の内部構成	80
4.11	SHIRI の皮膚の質感及び凹凸形状	80
4.12	Gluteus Maximus Actuator (表)	82
4.13	Gluteus Maximus Actuator (裏)	82
4.14	SHIRI システム構成	84
4.15	空気圧制御ユニット	84
4.16	エアチューブの接続	85
4.17	緊張-弛緩パタンの動作原理	87
4.18	痙攣パタンの動作原理	88
4.19	突き出しパタンの動作原理	90
4.20	ユーザとのインタラクションの様子	91



## 表 目 次

2.1	各抱擁ディスプレイの特性 [11]	17
3.1	マネキン型センシングデバイスのセンサ配列	43
3.2	触覚提示ウェアのアクチュエータ配列	47
3.3	展示情報	60
4.1	SHIRI の寸法及び重量	77

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 背景

現在、五感の刺激により人工的に現実環境の実質を提示するバーチャルリアリティ（VR）技術や、現実環境をコンピュータによって拡張し提示するオーグメンテッドリアリティ（AR）技術の研究が盛んであり、PC やスマートフォンをはじめとする情報端末に応用され、多様なコミュニケーション手法やエンタテインメントへの応用が提案されている。特に、現在世界的に普及しているテレビ電話やソーシャルネットワーキングサービスを利用した視聴覚情報を介する情報伝達に加え、ヒトの身体性に着目した情報伝達が行える触覚情報を用いたヒューマンインタフェースに従来から注目が集まり VR や AR のアプリケーションとして様々な提案が行われている。

主に画像提示装置を介する視聴覚情報の伝達は、相手に要件等を伝える用途において利便性に優れたコミュニケーション手段である。また手の平に収まるサイズの携帯端末を用いて人々はいつでもどこでも相手の顔を見ながら通話を行うことが可能であり、ゲームやインターネットによる情報検索も容易に行うことができる。一方で、視聴覚情報以外の感覚器官を介した情報提示に関しても大きな利点がある。触覚情報すなわち非言語情報の伝達は相手が間近にいる状況では頻繁に行われるチャンネルであり、情報の解釈の過程を省略し直感的な教示が行える点、皮膚感覚入出力による情動的な情報伝達環境が構築できる点で視聴覚情報の伝達

のみでは代替が困難な優れた情報伝達手段である。

触覚を用いたコミュニケーション手法やエンタテインメントへの応用は従来も数多くの興味深い試みがなされて来ており、2章にて後述する偏心負荷を用いたDCモータによる振動刺激、マトリクス電極を用いた電気刺激、また直動アクチュエータの上下運動によって主に手掌部に触力覚提示を行うものが大半を占めている [26][27]。一方で、これらの手法は人間同士が間近にいる状況で行われる触覚を用いた具体的なコミュニケーション行為を想定したものではないと言える。つまり従来手法では人間同士が近接した状況で行われる肌を触れ合わせる感覚を再現することに対しては課題があると考えられる。

このような問題の解決を図るためには、ヒトの身体と身体の接触の再現が行えるインタフェース設計が必要であると考えられる。そこで本研究では人間の皮膚の質感と感覚入出力の特性に基づき、必要不可欠な視触覚的要素を抽出・提示することで高臨場かつ汎用性の高い皮膚感覚の入出力拡張インタフェースの可能性に着目する。

## 1.2 視触覚インタフェースとしての人工筋肉の必要性

前節で述べたように、従来の触覚インタフェースは大別して偏心モータや低周波スピーカを用いた振動刺激、マトリクス電極を用いた電気刺激、また直動アクチュエータの上下運動によって主に手掌部への刺激提示を行うものが大半であった。しかしながら身体と身体の接触を再現するためには、既存の機械式アクチュエータを組み合わせた提示手法のみではヒトの皮膚感覚に近いインピーダンス特性を持った刺激の提示を行うことが現状では困難であると考えられ、身体と身体の接触をインタフェース設計とした場合、従来とは全く異なるアプローチを図る必要が出てくると考えられる。

この課題に対する研究のアプローチの一つとして、人工筋肉をヒューマンイン

タフェースとして用いることで身体同士の接触の再現を行う手法が考えられる。仮にヒトの筋肉の見た目や動作の再現を行うことができるヒューマンインタフェースが存在すれば、ヒトの皮膚感覚特性に基づいた刺激提示が行えることが見込めるとともに、生物らしい視覚的なフィードバックを行うことが可能となると想定される。つまりヒトの筋肉のように形状や軟らかさを動的に変化させることができる視触覚インタフェースを開発することで、ヒトの肌のように軟らかく、筋肉のように弾性と硬さを兼ね備えた動的な感覚提示の実現が可能となると考えられる。

以上の考えから本研究では、身体と身体の接触を実現するためには人工筋肉を用いた皮膚感覚の入出力拡張インタフェースの開発が必要であると考え、また本手法を用いることでより「人間らしい」感覚伝達が可能となると想定され、エンタテインメント性を考慮したインタラクティブシステムの開発への応用と発展が期待できる。

### 1.3 研究目的

本研究ではこれまで述べた背景に基づき、ヒトの身体と身体の接触を再現する人工筋肉を用いた皮膚感覚の入出力拡張インタフェース開発とその応用に関する試みとして以下の二点のインタラクティブシステムの開発を行う。

#### **Sense-Roid: 抱擁感覚拡張インタフェース**

第一に触覚コミュニケーションにおける情動的特性を踏まえ、体幹部の感覚器官における皮膚感覚入出力を拡張するインタフェース Sense-Roid の研究開発を行い、コミュニケーション手法としての有用性を考察する。コミュニケーション設計として抱擁感覚の要素抽出に着目し、力センサが組み込まれたマネキン型入力デバイスによる抱擁の検出と、McKibben 型人工筋肉、振動子が組み込まれた触覚提示ウェアによる圧迫と振動の提示によって抱擁の再現が行えるシステムの開発を行う。また本システムでは触覚を用いたコミュニ

ケーションを行う際の最適な相手に関する考察を通し、自分自身とのバーチャルな抱擁を実現するシステムとして実装を行い、その有用性を検証する。

### **SHIRI: ヒューマノイドロボットの身体表現への応用**

第二に、生理学的知見および解剖学的知見に基づき、表皮の「質感」およ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、より人間の皮膚の入出力特性に近い見た目・感触の提示が行える視触覚インタフェースの開発を行う。研究手法としては、触覚コミュニケーションが行われる感覚器官を含む人間の身体部位に対して、表皮の質感および当該部位の視触覚的な変化特性を模倣した人工皮膚、人工筋肉を持つヒューマノイドロボットを開発し、視触覚情報として提示可能なインタフェース及びエンタテインメントとしての応用を探る。本稿ではヒューマノイドロボットの身体表現への応用の第一ステップとして殿部型ヒューマノイドロボット SHIRI の試作を行い、人間とロボットの身体同士の接触によるユーザインタラクションの実装を行う。

## 1.4 本論文の構成

本論文は以下の章により構成される。

### 第2章 関連研究

関連研究として皮膚感覚拡張入出力を用いた触覚インタフェース，人工筋肉，ヒューマノイドロボットの感情伝達手法に関する研究について述べる。

### 第3章 Sense-Roid: 抱擁感覚拡張インタフェース

抱擁感覚拡張インタフェース “Sense-Roid” のシステム，実装，再現性に関して考察する。また展示発表にて得られた知見，現状の課題及び展望に関して述べる。

### 第4章 SHIRI: ヒューマノイドロボットの身体表現への応用

筋肉の動作に伴う皮膚の質感及び形状の変化の再現を試みた人工筋肉に関して述べる。また開発した人工筋肉を応用した殿部ヒューマノイドロボット “SHIRI” のシステム，実装，ユーザインタラクションについて述べる。また本手法の応用に関する今後の展望を述べる。

### 第5章 結論

最後に本研究の結論を述べる。

## 第 2 章

### 関連研究

本章では、第一に皮膚感覚入出力を用いた触覚インタフェースに関する研究を 2.1 節にて紹介する。第二に主にロボットの駆動において用いられるアクチュエータとしての人工筋肉に関して、その代表的なものを 2.2 節で述べる。最後に 2.3 節にてヒューマノイドロボットにおける感情伝達手法に関する研究に関して述べる。

#### 2.1 皮膚感覚入出力インタフェース

本節では皮膚感覚入出力インタフェースに関連する研究に関して述べる。

##### 2.1.1 触力覚提示装置

遠隔地にある同一オブジェクトの操作を共有することで双方向の触覚提示を試みたものがいくつか存在する。

Brave らによる inTouch[1] は図 2.1 に示すように手元にあるローラオブジェクトを回転させるとことで、離れた場所にあるに同一のローラオブジェクトが同様に回転することで、手掌部へ双方向に触覚提示を行うものである。また Sekiguchi らの RobotPHONE[2] は図 2.2 に示すようにテディベアを外皮として用いたロボットであり、二台のロボットのポーズが常に同期するように無線で制御が行われている。これによって離れた所にいる相手がどの様にロボットを触っているかを知ることができるため、ロボットを入出力インタフェースとしたコミュニケーションツールと

して振舞うことができる。また相手が本ロボットの関節を動かす際に加わる力ももう一方ロボットに再現されるため、触覚コミュニケーションツールとしての意味合いも持つ。これらの研究は、主に手掌部への双方向の触覚提示をおこなうことで、握手や手を繋ぐ行為に見られるような軽いスキンシップによるコミュニケーションを可能としている。

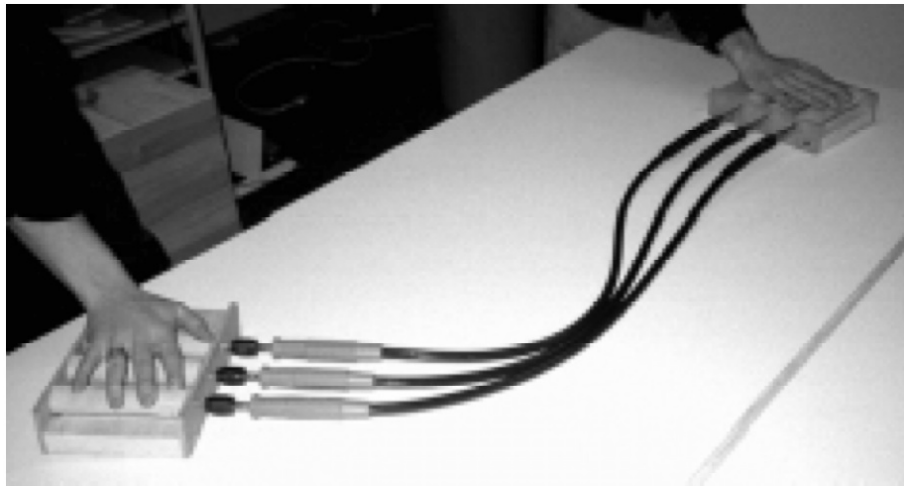


図 2.1: inTouch[1]



図 2.2: RobotPHONE[2]



触覚刺激と視覚的な表現の両方を提示を可能とする試みとしてピンアレイディスプレイの研究に注目が集められ、多くの研究が行われている。

図 2.3 に示す Iwata らの FEELEX2[3] は、図 2.4 のピストン-クランク機構を用いて、ロッドを直動運動させることによって触覚提示を行う装置である。直動運動を生作り出すためにモータを用いると空間の制約が生じてしまうことが問題であるが、図 2.4 のような機構を取ることでピンを高密度配置を可能とし提示刺激の解像度を上げる工夫がなされている。また FEELEX プロジェクトでは、ディスプレイ面にプロジェクション可能な布で覆うことで、プロジェクタによる映像に凹凸の表現を付加する試みを行っている。



図 2.3: FEELEX2[3]

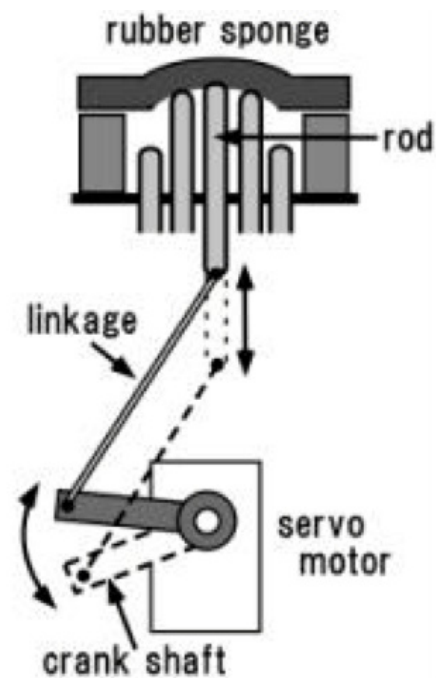


図 2.4: ピストン-クランク機構 [3]

図 2.5 は Nakatani らが開発したピンアレイディスプレイにより表現された凹凸形状である [4]。本デバイスはコイル状形状記憶合金を用いた 3 次元形状ディスプレイであり、コイル状の形状記憶合金の伸び縮みを制御することでピンアレイの高さのコントロールを行う手法を提案している。また本研究はピンアレイの高さを計測する手法にも工夫がされている。図 2.6 に示すように、ピンアレイ一本一本の端点付近に色付きのマーカを付け、ピンの軸に垂直の位置に配置したカメラによって色情報を取得しピンの高さの計測を行っている。これによりピンアレイ一つ一つにポテンシオメータ等を取り付けるような手法と比較し、省スペースかつ簡便な制御が行えるという利点がある。一方で、問題点として形状記憶合金が発生する熱の大きさや高さを正確な位置で止めることが困難であることを挙げている。

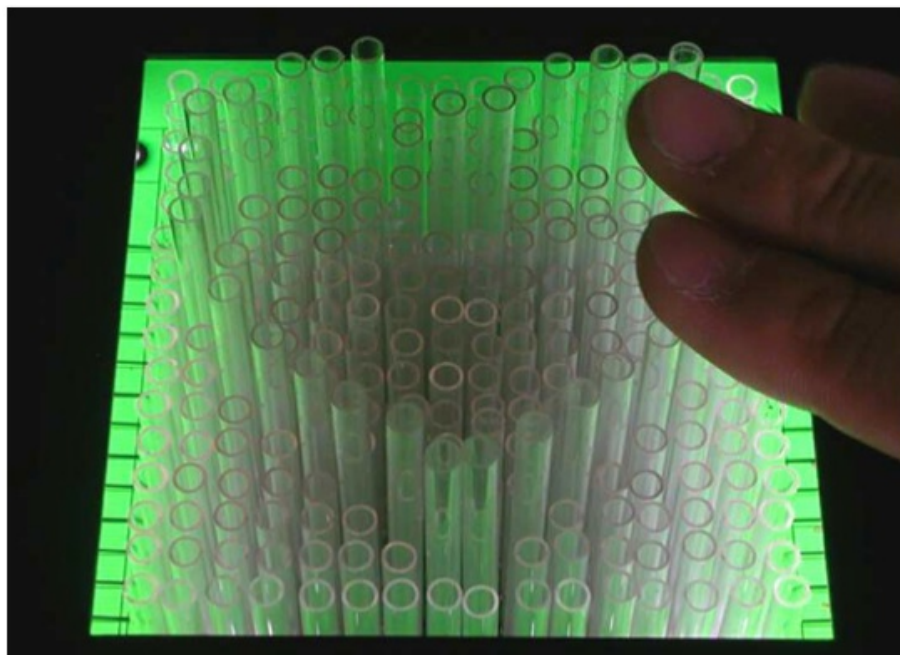


図 2.5: コイル状形状記憶合金を用いた 3 次元形状ディスプレイ [4]

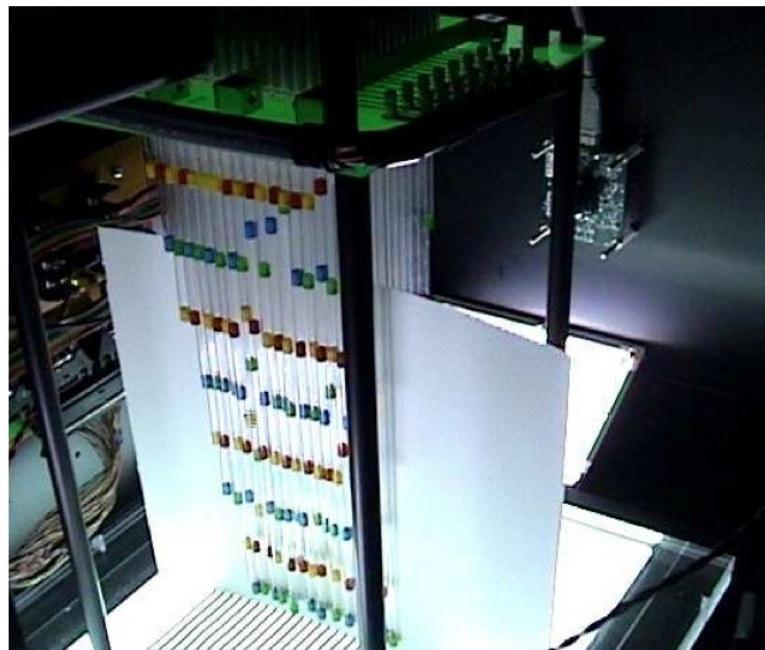
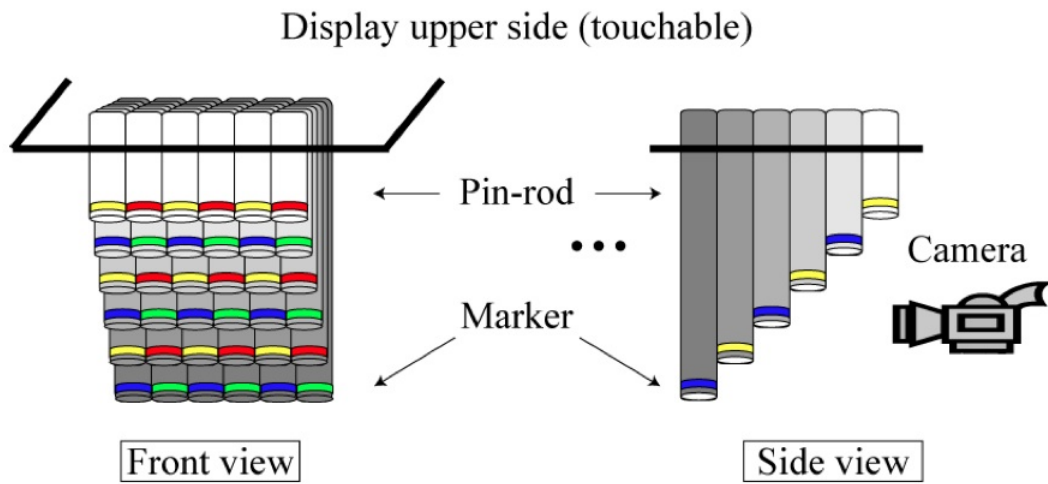


図 2.6: カメラとマーカを用いたピンアレイディスプレイの位置計測手法 [4]

Leithinger らは図 2.7 に示したポテンシオメータ一体型の直動アクチュエータを用いたピンアレイディスプレイ Relief[5] を提案している。Relief は隣接するピン間の距離が 1.5 インチとなっており、ピンの高さは最大 5 インチまで盛り上げることができ、図 2.7 の下図に示したような簡易的な地形の表現が行えるシステムとなっている。

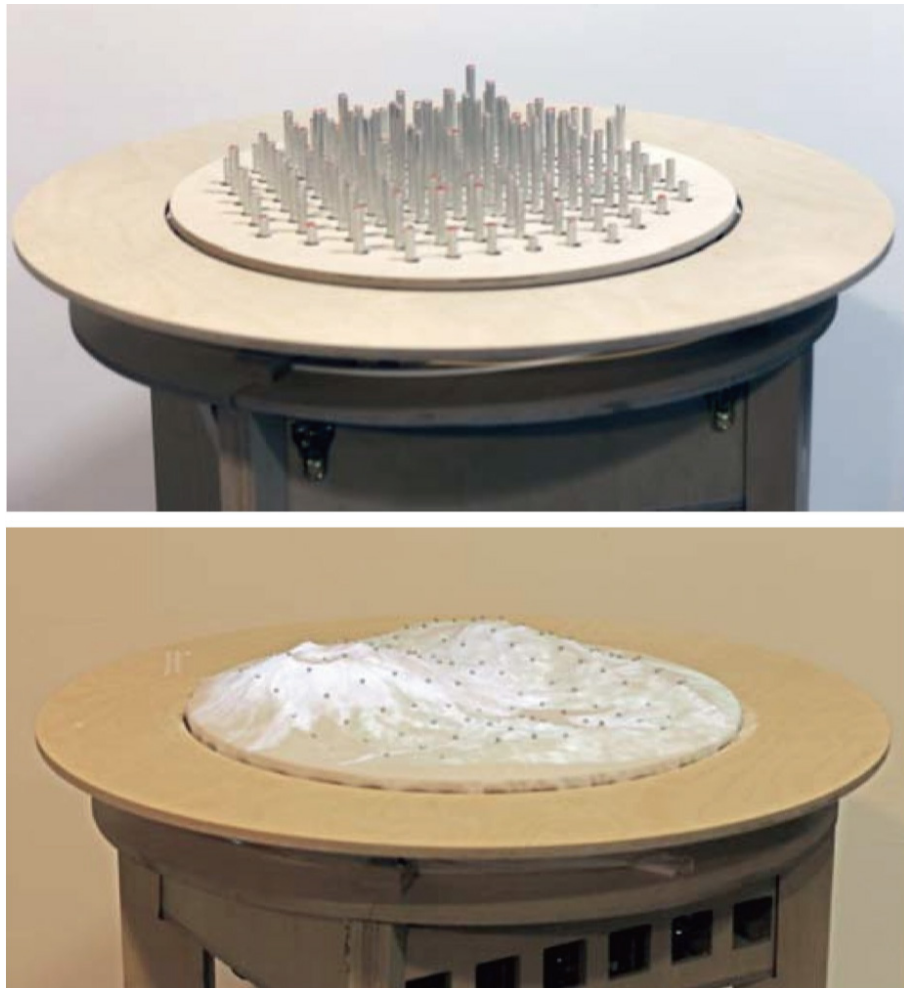


図 2.7: Relief[5]

Kajimoto らの SmartTouch[6] では、実際には凹凸のない紙面上に対し視覚と触覚の相互作用によって凹凸を感じるような錯覚を生じさせるシステムの提案を行

なっている。図に2.8示すように白黒の印刷パターンを光学センサによって判別しパターンに対応した電気刺激を提示を行なうことで、「実際には触れることにできないものに触れる」という皮膚感覚の拡張を提案している。

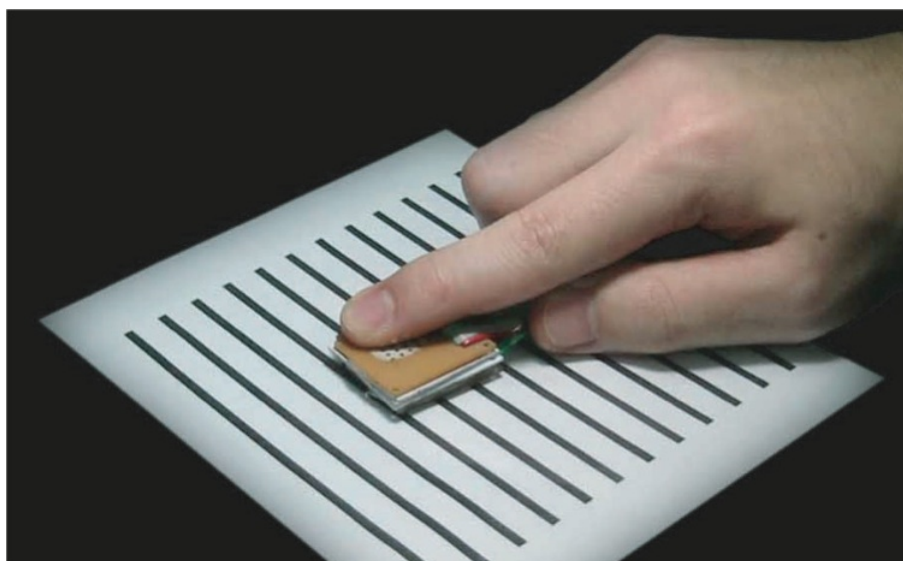


図 2.8: SmartTouch[6]

このように皮膚感覚拡張入出力インタフェースに関してこれまで多くの興味深い研究がなされた来た。これらの触覚提示手法は視覚情報とも密に関連していることが分かり、これまでにないコミュニケーション手段や立体ディスプレイへの応用に対する様々な工夫が見て取れる。一方で提示する刺激は機械式のアクチュエータや直動機構、また電気刺激によるものとなっており、いずれも皮膚と接触する面が剛体であるため、ヒトの筋肉のはたらきに伴う皮膚の軟らかさの動的な変化を再現することは困難であると考えられ、本研究が目的とする身体と身体の接触の再現するためには、他の提示手法の検討を行う必要があることが分かる。

### 2.1.2 抱擁の再現

従来研究においても実際の抱擁感覚の提示を試みた研究はいくつか試みられて来た。抱擁は身体と身体の接触による代表的なコミュニケーションの一例であり、抱擁感覚の再現は前節で述べた研究に対し具体的なコミュニケーション行為の再現を試みている点で異なるアプローチを図っていると言える。刺激提示手法には空気圧、振動刺激を用いたものを中心として様々な工夫が行われている。

Teh らによる Huggy Pajama[7] は図 2.9 に示すように、手元のコントローラで遠隔地にあるジャケットに空気を送り込み、ジャケットを膨張させることで身体を圧迫することで遠隔抱擁を試みたシステムである。本提案は離れた場所にいる子供を抱きしめ、安心感を与えることを目的としている。コントローラと出力のマッピングは図 2.10 に示すように 12 領域に分割が行われている。また Mueller らも図 2.11 に示すシステムを用いて、同様にウェアラブルデバイス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いる [8]。



図 2.9: Huggy Pajama[7]

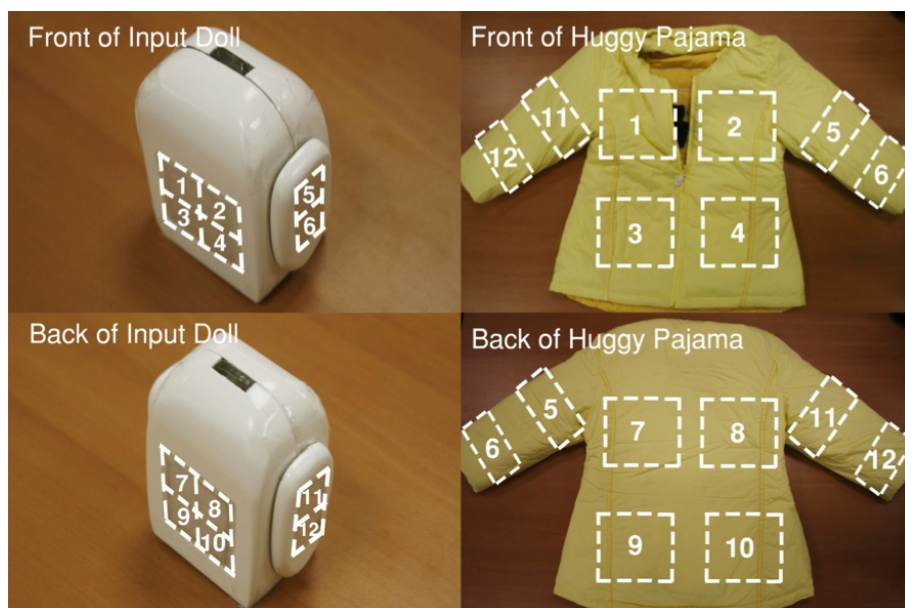


図 2.10: Controller と Pajama の身体部位のマッピング [7]

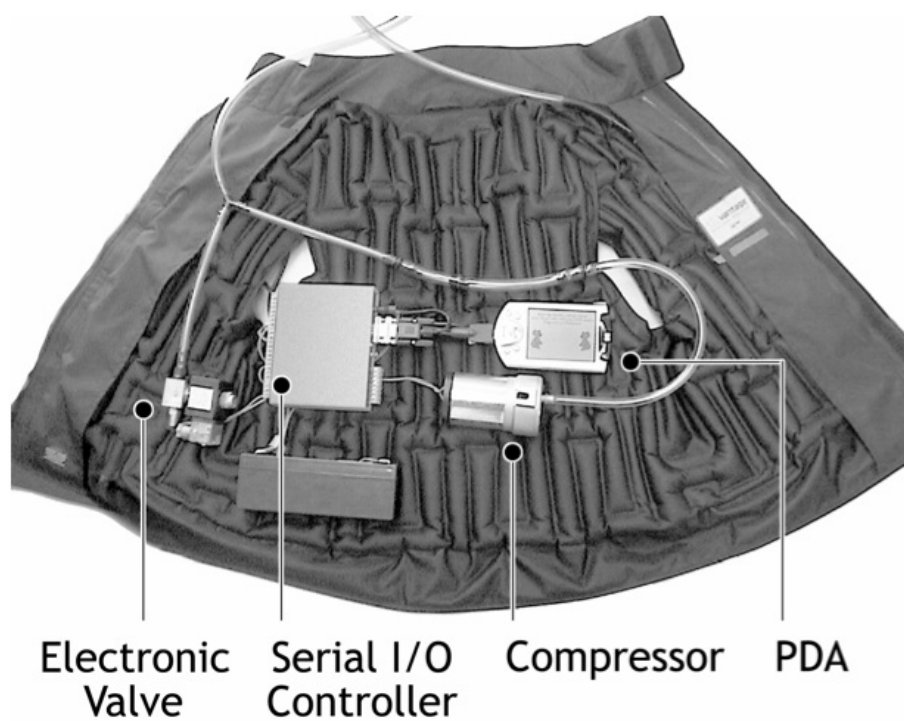


図 2.11: Hug vest[8]

DiSalvo らによる The Hug[9] は図 2.12 に示すように抱擁動作の姿勢を模したぬいぐるみを抱きしめることによって、遠隔地にある同一のぬいぐるみが発光及び振動の提示を行うシステムである。また CuteCircuit 社も遠隔感において抱擁を再現する衣服として図 2.13 に示す Hug Shirt[10] を提案しており、振動の提示によって遠隔抱擁を試みている。



図 2.12: The Hug[9]



図 2.13: Hug Shirt[10]



Tsetserukou による HaptiHug[11] は PC 上の 3 次元仮想空間ソフトウェアであるセカンドライフにおいてユーザ同士のアバターが抱擁をすると胸部に圧迫感のフィードバックが行われるシステムである。構造は図 2.14 に示すように、モータで腰回りのベルトを巻くことで身体に張力を与えるというシンプルなものとなっている。また表 2.1 に示すように、現在までの抱擁ディスプレイの特性を仕様としてまとめている。

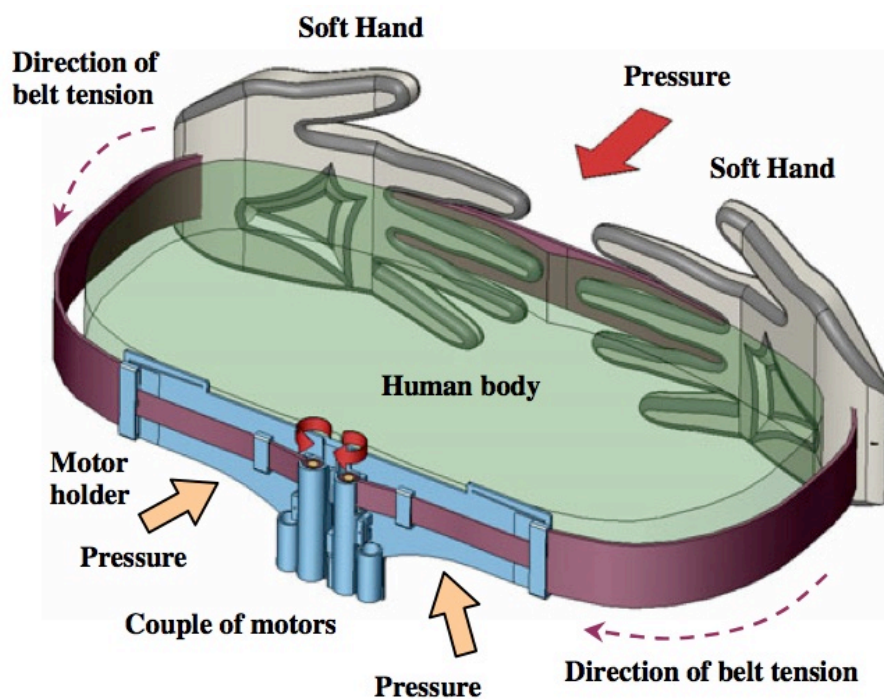


図 2.14: HaptiHug[11]

表 2.1: 各抱擁ディスプレイの特性 [11]

	HaptiHug	The Hug	Hug Shirt	Hug vest	Huggy Pajama
Weight	0.146 kg	>1.0 kg	0.160 kg	>2.0 kg	>1.2 kg
Overall sizes Height, m × Width, m	0.1 × 0.4	0.5 × 0.6	0.4 × 0.5	0.4 × 0.55	0.3 × 0.45
Wearable design	O	–	O	O	O
Generated Pressure	2.0 kPa	–	–	0.5 kPa	2.7 kPa
Actuators	DC motors	Vibro-motors	Vibro-motors	Air pump	Air pump
Visual representation of the partner	O	–	–	–	–
Social pseudo-touch	O	–	–	–	–
Based on human-human hug	O	–	–	–	–

以上のように従来の抱擁感覚の提示に対する試みは、以下のようにまとめることができる。

- 空気を送り込むことでウェア自体を膨張させ身体を圧迫する。
- 圧迫感の代替刺激として振動の提示を行う。
- モータを用いた機構によって発生する張力によって力覚提示を行う。

The Hug は 2.1.1 節で述べた RobotPHONE 同様、同一のぬいぐるみを中間媒体としてインタラクションを行う手法を取っているが、その他の研究はウェアラブルデバイスによって抱擁の再現を試みている。前者に対し後者は実際の抱擁の際の状況と、行為により提示される感覚の再現を試みていることが分かる。

一方で、従来研究では本研究が提案する感覚提示手法である人工筋肉を応用したものは存在しない。また実際の抱擁の際に提示される刺激の要素は身体同士の接触による圧迫だけでなく手腕部を動作させることによる刺激の変位などが考えられるが、これらの要素を複合的に提示する手法は提案されていない。これに対し 3

章で述べる本研究が提案する抱擁感覚拡張インタフェース Sense-Roid では、人工筋肉による圧迫と振動子による撫でられる感覚の再現を行うことで、従来手法とは異なる抱擁感覚の提示手法を試みる。

### 2.1.3 アートとエンタテインメント

皮膚感覚の入出力インタフェースはエンタテインメントやアートとしての文脈としても多く語られている。本研究が提案する Sense-Roid も、本来の自己と他者が存在することで成立するコミュニケーションとは相反する設計方針を取っており、利便性よりも人間の精神性を考慮したエンタテインメントとしての側面が強い。そこで本節でエンタテインメントやアートの表現として試みられてきた皮膚感覚入出力を用いた研究をいくつか挙げる。

Kushiya らは、温度感覚のフィードバックが行えるテーブル型のディスプレイである Thermoesthesia[12] を提案している。図 2.15 に示すように映像の投影はプロジェクタによって行われ、投影されるコンテンツに応じてテーブルに並べられたペルチェ素子の温度を制御している。これによって視覚と聴覚とともに、温かさや冷たさといった温度情報も伝達できるディスプレイとなっている。

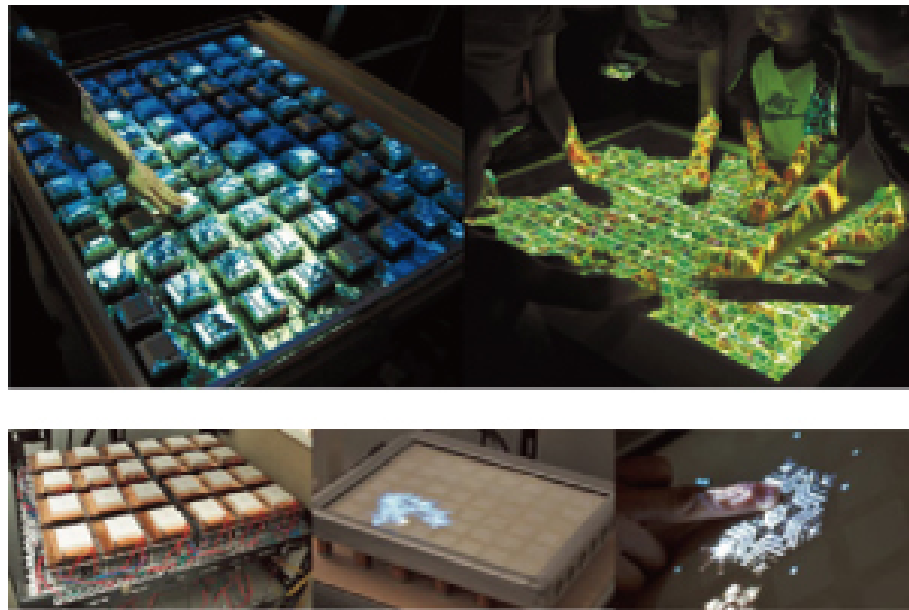


図 2.15: Thermoesthesia[12]

Niiyama らは動的に盛り上がる表現が行える壁面型ディスプレイ Gemotion Screen[13] を提案している。本ディスプレイの凹凸形状は図 2.16 のシステム概要に示したようにスクリーンの内部に組み込まれた複数の空気圧シリンダを制御することで表現される。映像が本スクリーンに投影された様子を図 2.17 に示す。2.1 節で紹介したピンアレイディスプレイと比較し、ピン間の距離は大きくなるが、流動的な映像に加えディスプレイそのものが大きいこともあり、ディスプレイ全体では滑らかな凹凸の表現が行われる。

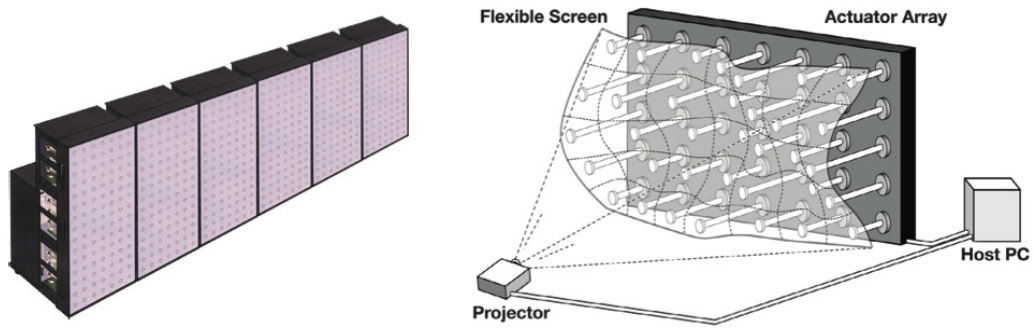


図 2.16: Gemotion Screen のシステム概要 [13]



図 2.17: Gemotion Screen 概観 [13]

Israr らが提案する Surround Haptics[14] は複数の振動子を内蔵した椅子を用い、レースゲームの映像における衝撃などを再現するエンタテインメントシステムである。本システムではディスプレイ上で操作を行う自動車のドリフトや追突に同期して、背中の振動刺激を車体と同方向へ移動させるフィードバックを行っている。身体動作に伴った振動提示を行い没入感の向上を試みるという点に関しては、Nintendo の Wii[15] などのテレビゲームにおいても積極的に採用されている手法である。

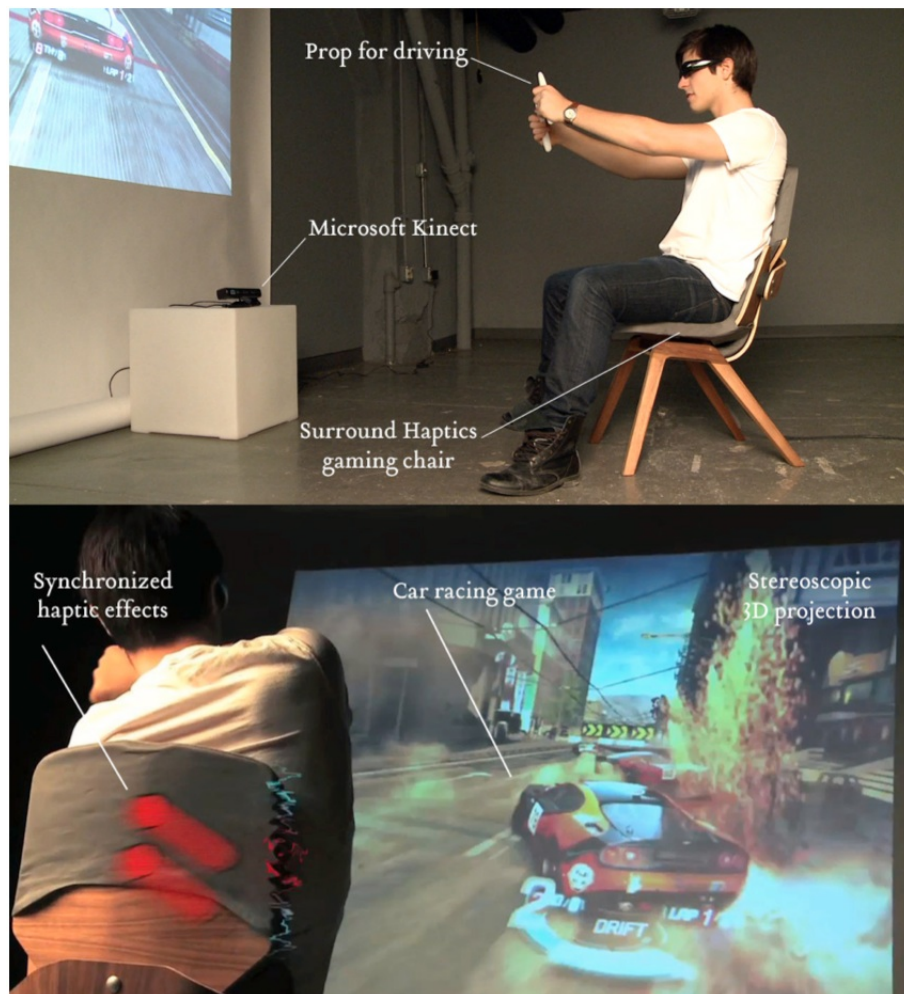


図 2.18: Surround Haptics[14]

Hachiya の Inter Dis-communication Machine[16] は、視触覚情報を用いる数ある作品の中でも興味深いインタラクション手法を取っている。体験者は2名で行われ、それぞれカメラ、ヘッドマウンテッドディスプレイ (HMD)、ヘッドフォンを、マイクが一体となったデバイスを装着する。ここでカメラ、マイクによる自分視点の映像及び音声は、相手の HMD 及びヘッドフォンへと出力される。これにより両者は視聴覚が交換された状態となり、「相手の立場に強制的に立たされてしまう」体験が行えるというものである。また相手に向かってキスを行うと、自分自身にキスをしているかのような感覚が生起すると言及されており、体験が二者で行われる点を除いて3章にて後述する自己帰還型コミュニケーションに一致する部分が存在する。



図 2.19: Inter Dis-communication Machine[16]

## 2.2 人工筋肉とその応用

人工筋肉は主としてロボットの関節機構のためのアクチュエータとして用られることが一般的である [28]. 一方で, その他の応用法に関して提案がされている研究もいくつか存在する. 本節では生物的な動作を行うことができる人工筋肉とその応用に関連する研究に関して述べる.

Mozeika らは図 2.21 に示した構造をもつアクチュエータ Jamming Skin[17] の実装を行っている. Jamming Skin の内部は液体で満たされており, 液中に膨張と収縮の動作を行うことができるアクチュエータが組み込まれている. また Jamming Skin を覆う外皮に容易に変形が生じる素材と, 変形が生じる素材の両方を用いており, 19面の膜のうち1面のみ変形が生じる素材としてある. このような構造を取ることで, 液中のアクチュエータの膨張及び収縮の制御を行うことで, 図 2.21 のように Jamming Skin を任意の方向に前進させることができる.

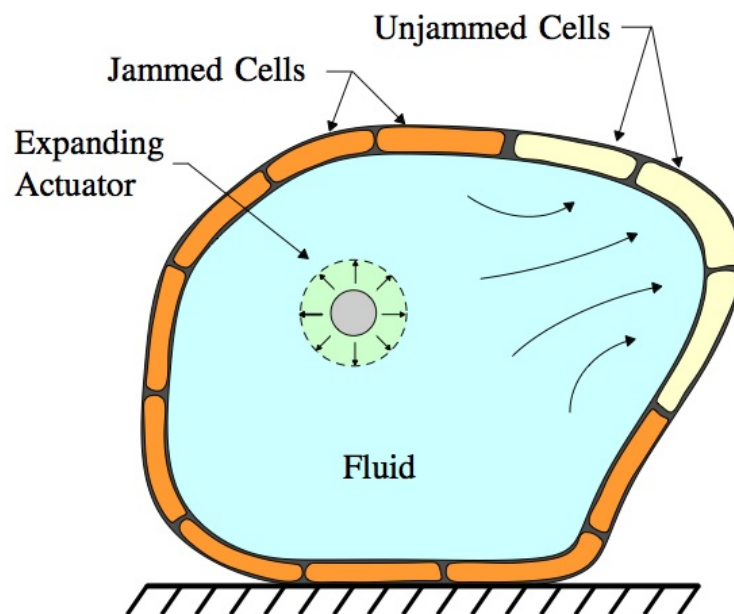


図 2.20: Jamming Skin[17]





図 2.21: Jamming Skin の動作 [17]

ロボット工学分野においては、実際の人間のように器用に物を掴んだり、投げたり、受け取ることのできるロボットハンドの研究が活発に行われている。これらロボットハンドの研究においては、人間の手の関節運動を模した設計を基本としてモータや人工筋肉を用いた関節機構によって物体の把持を行うものが一般的である。これに対し Brown らは、人間の手の形状とは全く異なる球体のロボットハンドで物体を把持する手法を提案している [18]。本ロボットハンドの概観、動作原理および実際に掴むことのできる形状に関する評価を表すグラフを図 2.22 に示す。

本ロボットハンドは粉粒子を充填したバルーン形状となっている。ロボットハンドが物を掴む手順を示したのが図 2.22D である。最初に対象に対してなるべく接触面積が大きくなるように、ロボットハンドを接触させる。つぎにバルーンの内部気圧を減圧させる制御を行う。するとロボットハンドの硬化が起こり、対象と接触させた形状のまま状態が固定されるため、対象を落下させることなく、持ち上げることができる。しかしながら図 2.22D に示すように形状によっては持ち上げることが難しい物もあるため、用途はやや限定される。本提案は物体の把持と解放に物体とアクチュエータとの接触面の軟らかさの変化を利用している点で興味深い。

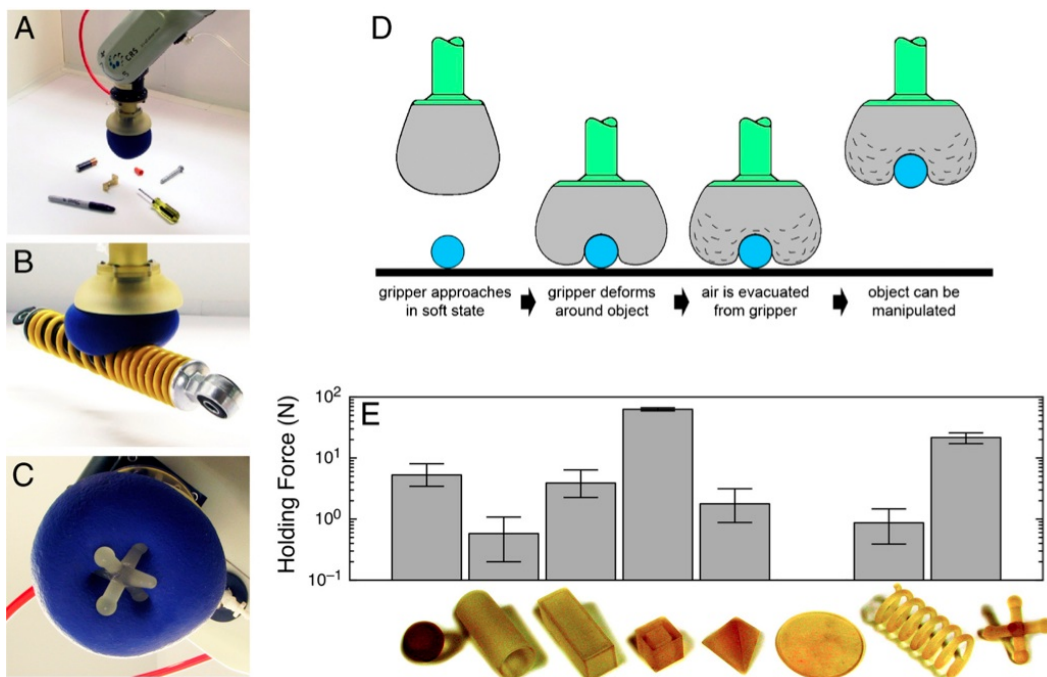


図 2.22: Jamming-based gripper[18]

— (A)Jamming-based gripper の概観. (B)衝撃吸収コイルを持ち上げる様子. (C)下から見た様子. (D)Jamming-based gripper が物体の把持を行う手順を表している. 装置の先端には粉粒子を充填したバルーンが取り付けられており, 減圧機構によるバルーンの硬度変化を利用して物体を把持することができる. (E)3D プリンタで出力したオブジェクトを把持する力をグラフに示したもの (大きさの基準として左の球体の直径は 2.54mm である). 右から三番目の薄いディスク形状のオブジェクトの把持は不可能であった.

また異なるアプローチとして実際の人間の筋肉の動作の制御を行うことを試みた研究として Tamaki らの PossessedHand[19] がある。PossessedHand は自身の筋肉に刺激提示を行うことで手の動作や姿勢の制御を行うことを目的としている。図 2.23 に示すように、本システムは腕の 2 本のベルトから前腕の筋肉に電気刺激を与えることで手指の動作の制御を行う。

刺激提示を行うベルトには 1 本につき 14 個電極パッドが配置されている。電極パッドの位置と刺激強度をコントローラによって選択的に刺激するが行える。なお被験者実験によって、手指の 16 関節の動作が行えることが確認されている。

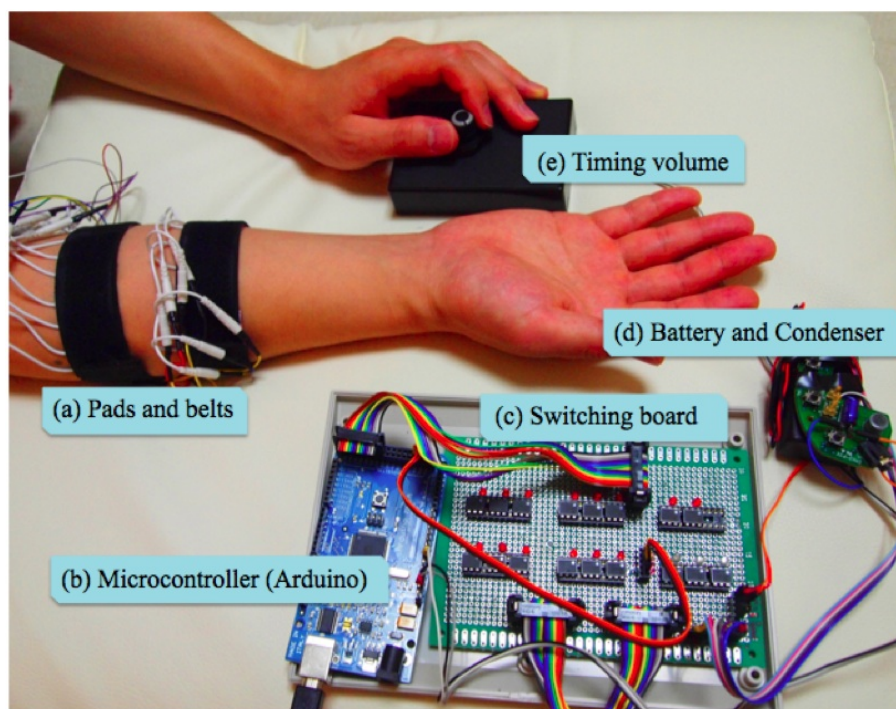


図 2.23: PossessedHand[19]

## 2.3 ヒューマノイドロボットの感情表現手法

本稿では人工筋肉を用いた視触覚インタフェースの応用として4章にて表皮の質感および当該部位の視触覚的な変化特性を模倣した人工皮膚，人工筋肉を持つ殿部型ヒューマノイドロボット“SHIRI”に関して述べる。本提案の大きな目的の一つは、より人間らしいロボットの動作を探求することである。従来研究においてもヒューマノイドロボットの感情伝達手法に関するいくつかの試みが行われている。本節ではヒューマノイドロボットの感情表現手法に関連する研究に関して述べる。

実在する人間を模したヒューマノイドロボットとして Geminoid[20][25][22]がある。その内の一つである Geminoid HI-1 の概観を図 2.24 に示す。

Geminoid は約 50 の自由度を持っており、空気圧駆動型の人工筋肉を制御することによって動作する。動作は人間の見た目、表情、仕草、ジェスチャからその人物の癖に到るまで、忠実に再現することを目的としている。特に見た目に関しては顔のつくりだけでなく、皮膚の質、髪の毛などの体毛をも再現するなど、遠目では実施の人間と区別が困難なほどのデザインとなっている。

また顔認識システム及び口動作生成システムによって頭や口の動きによって遠隔地の Geminoid の操作が行える遠隔操作システムの実装を行なっている。これにより本ロボットにに対する客観性だけでなく、主観性も考慮されたシステムとなっており、ロボットに自身が乗り移ったような感覚が生起するとしている。

また Ogawa ら遠隔コミュニケーションためのツールとして Telenoid[23]の研究を行なっている。Telenoid の概観を図 2.25 に示す。

Geminoid と比較して自由度は小さく、操作方法は異なるが、Telenoid も遠隔地からの操作が可能となっている。ロボットのデザインは、個人を特定するような情報を削ぎ落とし、誰が遠隔で操作を行っても違和感なく乗り移れることを指針としている。応用としては一人暮らしの老人などを対象とし、介護士や家族が Telenoid

を通して遠隔間で会話を行うことで、両者のコミュニケーションが円滑になる可能性が考えられるとしている。



図 2.24: Geminoid[20]



図 2.25: Telenoid[23]

Minato らは人間の乳児の容姿と動作の再現が行える CB<sup>2</sup>[24] の開発を行っている。図 2.26 に CB<sup>2</sup> の概観を示す。

本ロボットはおよそ 50 個のアクチュエータを用いており、ヒトの 1 歳児程度の知能を前提とした学習プログラムを実装することで、人間が発達してゆく過程の理解を深めることを目的としている。容姿は実際の乳児を忠実に再現できているとは言い難いが、身体動作に関しては足を交互に振る、寝転がる等の「乳児のような動き」を再現する多くの試行がなされている。



図 2.26: CB<sup>2</sup>[24]

また Zecca らは、「マンガチック」とも言える表情やボディジェスチャを用いて感情表現を行うロボット KOBIAN を開発している [25]。KOBIAN の概観および機構の自由度分布を図 2.27 に示す。動作は全身のモータによって制御され、自由度は顔を含めた全身で 48 自由度となる。KOBIAN による感情パタンの一例を図 2.28 に示した。KOBIAN では提示する感情パターンとして怒り、嫌悪、恐れ、悲しみ、混乱、喜び、驚きの表現を試みている。

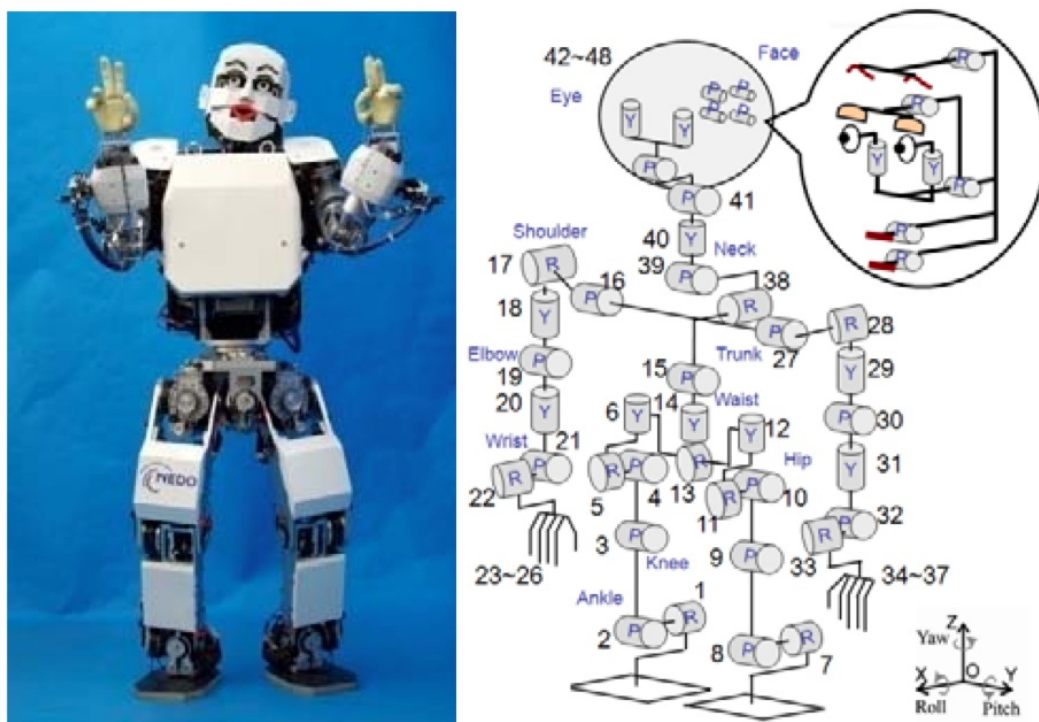


図 2.27: KOBIAN の概観及び自由度 [25]

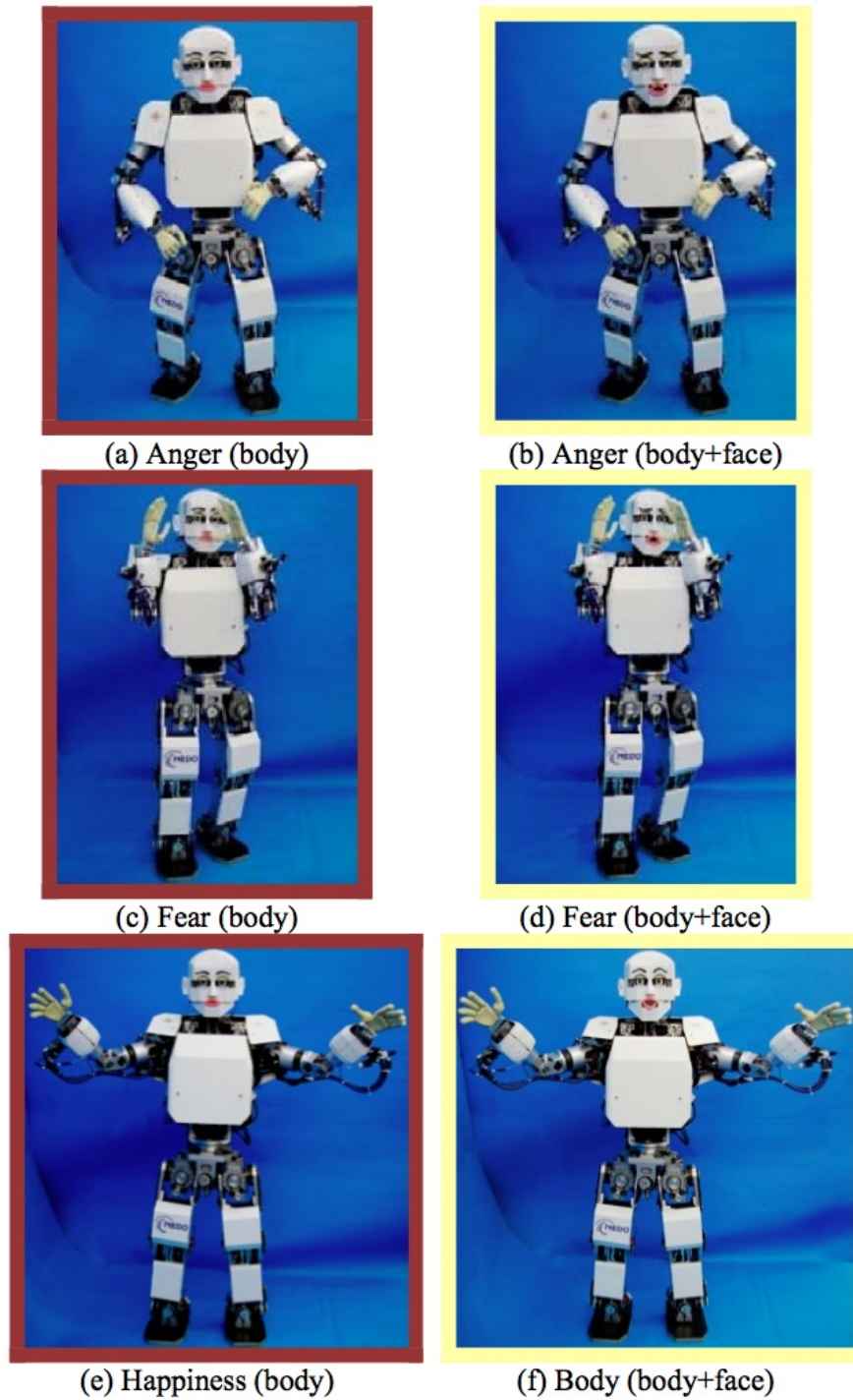


図 2.28: KOBIAN による感情パタンの一例 [25]



以上のように従来研究ではヒューマノイドロボットの身体表現に関する試みとして人間の姿形そのものやボディジェスチャを模した動作の再現に着目しており、人間とコミュニケーションを行うことのできるロボット開発を主な目的として多くの興味深い研究開発が行われている。

一方で、従来のヒューマノイドロボットは皮膚の形状変化や柔らかさの動的なフィードバックのための制御は行われておらず、筐体に人工皮膚を覆うなどして軟らかい感触を提示する工夫こそ行われているものもあるが、人間の身体とロボットの身体の接触に関するインタフェース設計には依然として発展の余地が残されていると考えられる。

本稿ではこの点に着目し、4章にて人工筋肉を用いた視触覚インタフェースをヒューマノイドロボットの身体表現へ応用する試みに関して述べる。

## 第 3 章

# Sense-Roid: 抱擁感覚拡張インタフェース

触覚を用いたコミュニケーションは親密度の高い行為であり、相手に信頼や安心を伝える上で有効な行為である。この種のコミュニケーションは相手の身体に直接接触し合うため、特に親密度の高い者同士で行われるといった特徴がある。また軽い握手などの行為は、これから親密度を高めてゆく意志のある間柄の者同士にとって、いわゆるアイスブレイキングとして機能する。双方で軽い身体の接触が交わされることで、徐々に両者の溝を狭める役割を果たしているのである。一方で、例えば見ず知らずの他人に了解なしに突然強く身体を触れられた場合、人間は強い不快感を抱く状況となることは想像に難くない。但し、見ず知らずの相手であっても、相手を呼び止める等といった意図で軽く背中を突付かれる程度では大きく気分を害することはないと考えられる。このように単に相手に接触する言っても、その行為と接触する身体部位によってコミュニケーションとしての効果に差が生じる。また前述したように、相手との間柄によってその効果は良い方にも悪い方にも大きな変動が起こり得ると考えられる。

触覚を用いたコミュニケーションの中でも最も重要なコミュニケーションの一つに「抱擁」がある。顔、腕、腹部、背部といった上半身の複数部位を完全に密着して行われる抱擁は、触覚コミュニケーションの中でも特に高い親密度を示す行為である。抱擁は恋人や家族間で頻繁に行われる親密度の高い行為であるが、友人や知

人同士であっても例えばスポーツの試合中にメンバーと抱き合い歓喜に浸るシーンなども多く見られ、文化を問わず幅広く行われている行為である。また抱擁という行為そのものは、幼少の時期まで遡ることができ、その時期のほとんどの人間は母親や父親といった親族からの抱擁を経験する。言わば人間の生得的な行為の一つであると考えられる。

そこで本研究では抱擁に着目し、抱擁動作の記録及び感覚提示が行えるシステムの開発を行い、触覚入出力インタフェースとしての有効性及び有用性を検証する。本章では抱擁の動作認識を可能とする人型入力装置と、入力した動作の再現を行う人工筋肉を用いた抱擁感覚提示ジャケットから構成される抱擁感覚入出力インタフェース “Sense-Roid” について述べる。

## 3.1 コミュニケーション設計

触覚を用いたコミュニケーションについて取り扱うとき、その行為を行う相手との関係性による影響に関して考察する必要がある。というのも身体を接触させる行為はその相手との関係性によって快にも不快にも大きく振れるという特徴があるためである。そこで実際の抱擁感覚提示装置の使用環境を想定し、最適なコミュニケーション設計を本節にて考察する。

### 3.1.1 触覚コミュニケーションの対象と親密性に関する考察

抱擁は年齢、性別および家族、恋人、知人友人といった関係性を問わず幅広い組合せで行われる行為である。一方で、相手によって得られる感情もまた異なる。Heslin らは大学生男女の被験者に対し、同姓もしくは異性の他人あるいは親友に対して組合せについて 1) 相手に触れられることが好ましい部位、2) 相手に触れられることが好ましくない部位、3) いずれの感情も生起しない部位の 3 項目に関してアンケートの回答を集め、その結果を元に図 3.1 に示した身体部位のタブーマッ

プを作成している [29]。図 3.1 において、全体的に同姓の他人で最も触れられても良い部位が少なく、異性の親密な間柄で最も触れられることに快を感じる事が分かる。特に女性においては他人と親密な間柄の者との差が顕著であり、異性の親密な間柄に対して全身の全ての部位で快を感じる傾向があるのに対し、同姓では親密な間柄であっても触れられても良い部位がおよそ半数に留まっている。さらに他人に至っては手部以外は全て触れられることに不快を感じていることがわかる。男性は比較的身体に触れられることに寛容である傾向があるようだが、やはり対象が他人となると多くの部位が触れられることに抵抗を感じる部位となっている。この報告からも身体の接触が相手との関係性によって大きく心理面に影響を与えることを推測することができる。

### 3.1.2 自己抱擁

前節で挙げたようにコミュニケーションを扱う触覚インタフェースを設計するにあたり、行為を行う両者の間柄を考察する必要がある。一貫して言えることは親密な間柄であればあるほどコミュニケーションとしての効果が大きく、赤の他人のような軽薄な間柄においては強い拒絶反応を示す傾向があるということである。この傾向を踏まえ、本研究ではインタフェース設計として抱擁の最適な対象を探ることとした。

議論の前提として、なぜ我々は互いにコミュニケーションを取るのか考察を行う。これまで紹介してきた研究の多くが「コミュニケーション」「双方向」「ヒューマンインタフェース」を種々の方法で実現するものであった。言葉の違いこそあれ、これらは「自分が自分以外の外界に対してはたらきかけ、その結果として何らかのフィードバックを受け取る」という点で共通している。すなわち、人々が一方方向通信に満足せず双方向に拘るのには、この「外界からのフィードバックを受け取りたい」という抗し難い欲望が存在するためであるのではないかと考えられる。

そしてそのフィードバックは「自分が望む結果」であればある程好ましいと言え

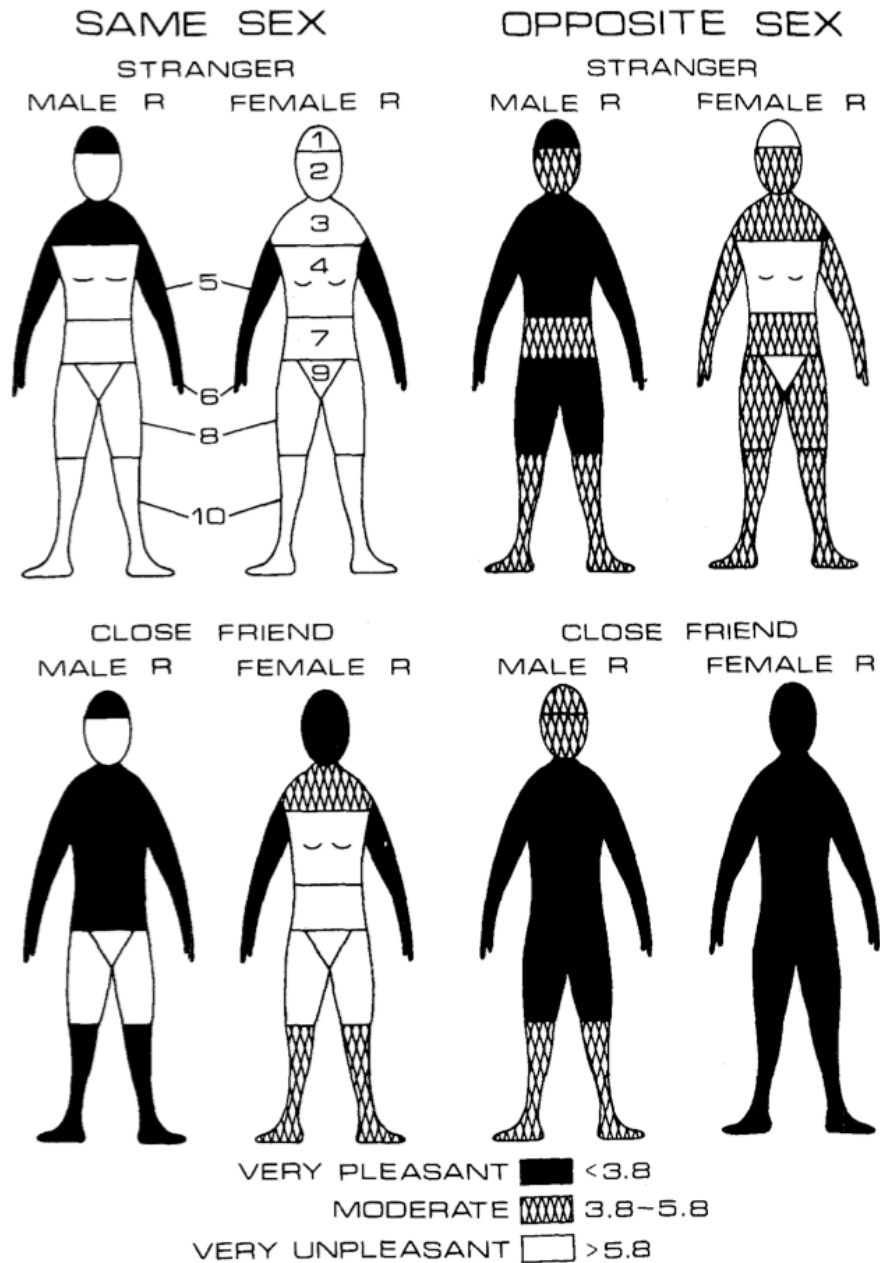


図 3.1: 他者に身体の各部位を触れられることによる快と不快の評価 [29]

— 黒色で示される領域ほど触れられることに快を感じる部位を示しており、白色で示される領域は触れられることに不快を感じる身体部位を表している。

るだろう。自分の意に反した結果ばかりが返ってきた時や、自分の働きかけに対して一切の反応がなければ、やがて人はコミュニケーションをやめてしまうことも十分に考えられる。すなわち自分が望む反応が返ってきたときこそ、人間はコミュニケーションに満足し、その対象を愛でる気持ちが生まれ、心身の距離が縮まるのであると本研究では仮説を立てた。

そのことを表す図をを図3.2に示す。同じ他者とのコミュニケーションでも、他人や知り合いより、自分の望む答えが返ってくる確率の高い恋人や家族の方がコミュニケーションの満足度は高く、結果として信頼や愛情の感が生まれる。時としてゲームやインターネットの画面の中で展開される空間、いわゆる“二次元”の世界にのめりこんでしまう人がいるのも現実の社会よりもゲームの方が自分の期待通りのフィードバックを返してくれるようプログラミングされているからであるとも捉えることができる。そして仮にこの世の中で自分への最適なフィードバックを生み出してくれる存在、すなわち自分自身が外界の一部として存在し、その自分に対してコミュニケーションを行うことができれば人間は自分にとって最も心地よく意図した通りのフィードバックを得られることが見込まれる。本研究ではこの仮説に基づき、「外界に存在し、コミュニケーション可能ながらも、最も自分に近い自分」を媒介として、自己帰還型コミュニケーションの実現を図る。

図3.3に人間のコミュニケーションに関する簡潔な図式を示す。双方向コミュニケーションでは自分が相手にはたらきかけることで何らかのフィードバックを得る、という形式となっている。また一方向コミュニケーションでは、自身のはたらきかけに対しフィードバックが得られない、或いは全く両者の意が通じない形式を示している。最後に自己帰還型コミュニケーションでは自身の働きかけが何らかの形で直接自身にフィードバックされる形式を示している。

以上の考察に基づき、本研究では最も親密度の高い行為の一つである抱擁を自分自身を対象として行うことのできる触覚インタフェースの開発を行い、自己抱擁のコミュニケーションとしての効果の検証を試みる。

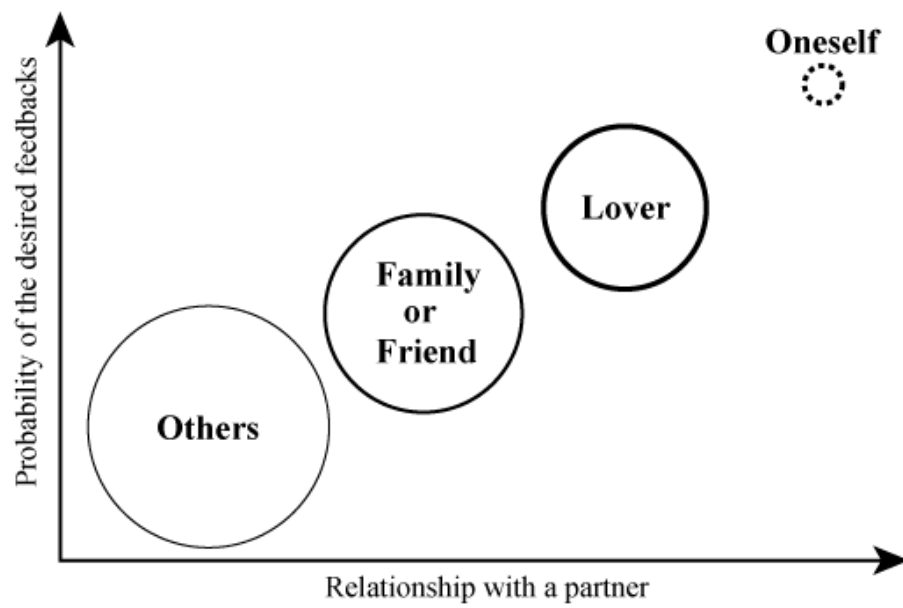


図 3.2: 触覚コミュニケーションの対象と効果

— 縦軸は理想的なフィードバックが享受される見込み, 横軸は対象との親密度を示す.

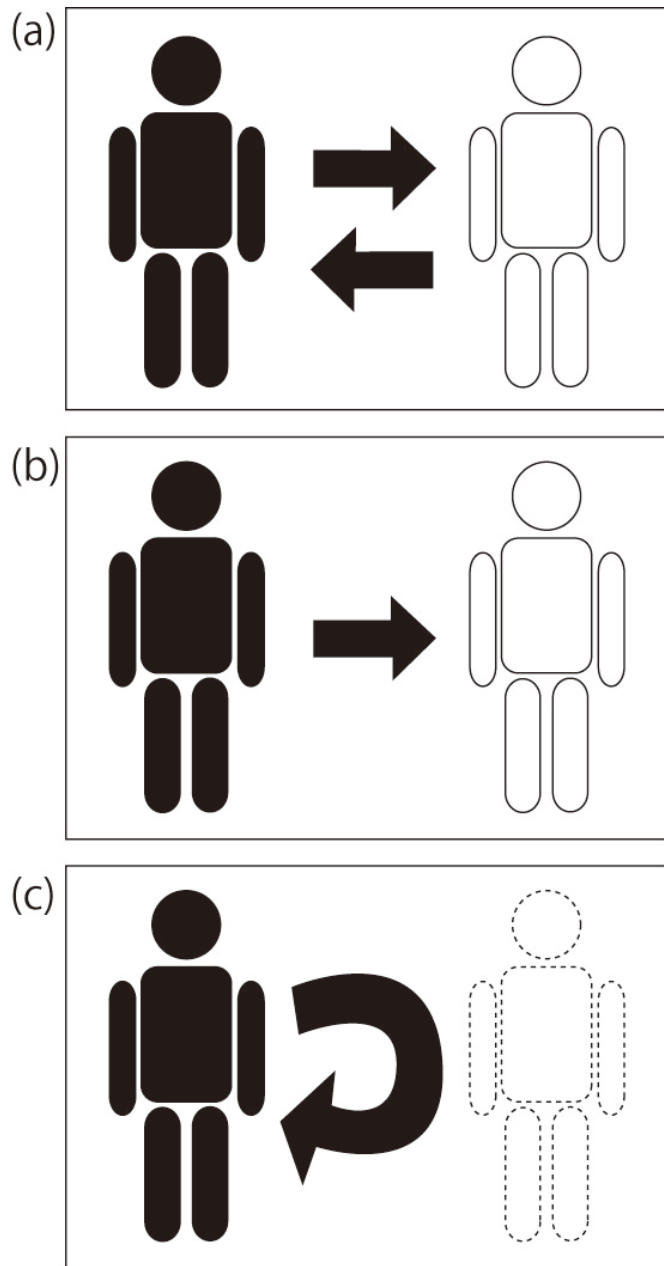


図 3.3: コミュニケーションの形式

— 自身のはたらきかけに応じ，(a)はフィードバックが得られる双方向コミュニケーション，(b)はフィードバックのなされない一方のみのコミュニケーション，(c)は直接的に自身にフィードバックが行われる自己帰還型コミュニケーションを示す。



## 3.2 Sense-Roid

Sense-Roid は自分自身とのバーチャルな抱擁を実現する触覚入出力システムである。本研究ではデバイス設計にあたり、抱擁における触覚入出力を次の二つの要素に分解し提示を行う。

### 圧迫の入出力

身体を接触させることにより伝達される圧迫感の検出と再現を行う。

### ストロークの入出力

圧迫に加え手腕部で身体を撫でる際に提示される感覚の入出力の実装を試みる。本稿ではこの身体を撫でる動作を「ストローク」と定義することとする。本システムでは背中へのストロークによる刺激の検出と再現を行う。

図 3.4 に Sense-Roid の概観を示す。本システムの体験にはマネキン型センシングデバイスと、空気圧駆動型人工筋肉及び振動ユニットが組み込まれた触覚提示ウェアを用いる。体験者が触覚提示ウェアを装着しマネキン型センシングデバイスに抱擁することで、体験者自身の抱擁を再現した感覚がウェアを介して身体にフィードバックされる。Sense-Roid には、リアルタイムモード及び記録・再生モードの2つのモードが存在し、モードの選択はPCのGUIにて行うことができる。リアルタイムモードではマネキン型センシングデバイスへの入力動作がリアルタイムフィードバックされるため自分自身に抱擁を行い、かつ自分自身から抱擁を受ける、という体験が行える。記録・再生モードでは、マネキン型センシングデバイスによる入力動作の記憶が可能となっており、触覚提示ウェアに記憶された動作の再現が行われる。すなわち、この2つのモードを採用することで体験者は現在及び過去の自分自身の抱擁を体感することができる。



図 3.4: Sense-Roid

### 3.3 システム構成

システム構成を図 3.5 に示す。本システムはマネキン型センシングデバイス、触覚提示ウェア、エアコンプレッサ (PAOCK 社 ROL-12AS, 370W)、マイクロコントローラ (Arduino MEGA)、サーボ弁ユニット、制御回路、アンプ回路及び PC により構成される。マネキン型センシングデバイスの筐体には上半身のラッカーボディを用いており、肩部、側面部及び背面部に合わせて 54 個のフィルム状力センサ (INTERLINK ELECTRONICS 社 FSR-402/FSR-406) が配置されている。触覚提示ウェアには McKibben 型人工筋肉 (神田通信工業, エアマッスル, 1.5 インチ) が 6 個及び背部にフォースリアクタ (ALPS 社 FORCE REACTOR) を用いた 12 個の振動子が組み込まれている。サーボ弁ユニットは小型のサーボモータ (GWS 社 MICRO 2BBMG) の回転軸に ABS 樹脂で成形したアタッチメントを取り付けボールバルブに結合させることで、サーボモータの制御による開閉弁の任意の角度への調整を可能とした。エアコンプレッサから制御システムへ圧縮空気の供給

には外径 6mm 内径 4mm のポリウレタン製のエアチューブを使用した。

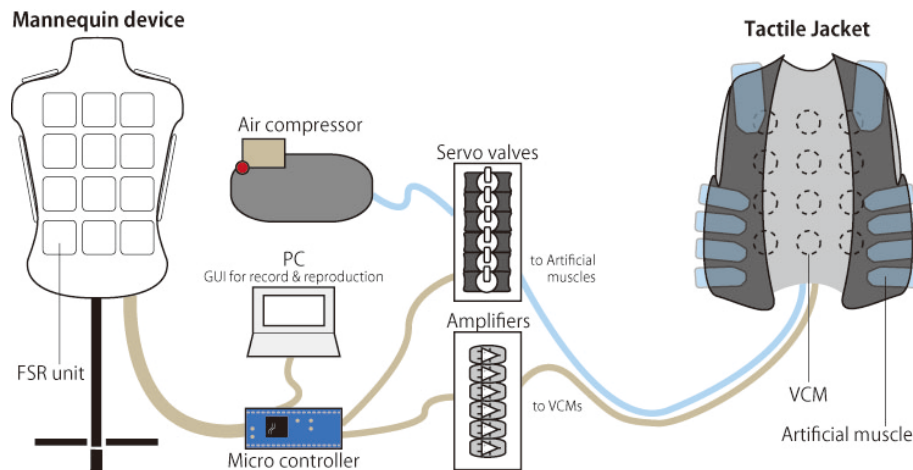


図 3.5: Sense-Roid システム構成

### 3.4 マネキン型センシングデバイス

マネキン型センシングデバイスの概観を図 3.6 に示す。マネキン型入力装置は抱擁を行う際になるべく違和感が生じぬように、成人の等身大のラッカーボディを用いた。本ボディのモデルは男性を基にしたものであるが被験者の性別によって効果が左右されることを避けるため、極力性別を判断し難い中性的な外観を持ったものを採用した。また高さ調節が可能な支柱を用いることで、体験者の身長に応じて装置本体の高さの調整を行うことが可能となっている。入力された力を検出する圧力センサは、実際の抱擁の際に力が掛かる部分である肩部、体幹部、背部におよそ数 cm のマトリクス状に配置した。マネキン型センシングデバイスのセンサ配列を表 3.1 に示す。腹部に関しては正面からの抱擁を想定した際に、そもそも体験者と筐体の腹部が接触し押し合うため、検出するためのセンサ機構は排除することとした。



図 3.6: マネキン型センシングデバイス正面（左）及び背面（右）

表 3.1: マネキン型センシングデバイスのセンサ配列

	肩部	胴体側面	背部
センサ単数	4	16	36
センサユニット数（検出領域）	2	4	12
隣接するセンサ間の距離	1.5cm	0.5～4.0cm	0.5～4.0cm
センサ部の面積	76.4cm <sup>2</sup>	305.6cm <sup>2</sup>	555.8cm <sup>2</sup>
圧力感度範囲	0.01～10kgf		

### 3.4.1 圧迫入力検出

圧迫の検出は、マネキン型センシングデバイスの胴体側面及び両肩部に配置された合計6領域のセンサユニットにて行う。図3.7に示すようにセンサユニットが胴体部は縦軸に4領域、肩部は両肩で2領域に分かれている。ユニットの配置は一般的に行われる抱擁のパターンに基づいて設定し、表3.1に示すように隣接するセンサ間の距離の最長が40mmであるため、手腕部をマネキン型センシングデバイスの側面に接触させた場合に、いずれかのセンサが力を検出する配置となっている。同一ユニット内のFSRは制御回路で並列に接続されているため、力の検出はユニット単位で行われる。ユニット内のいずれかのFSRに力が入力されると、そのユニットごとに12bitのA/Dコンバータを介してマイクロコントローラの入力ポートに数値データが送信される。この数値データをマイクロコンピュータが19200bpsのシリアル通信で8bitのデータに変換して送信する。圧迫の力は表3.1に示したように0.01~10kgfの力の範囲で計測が行える。

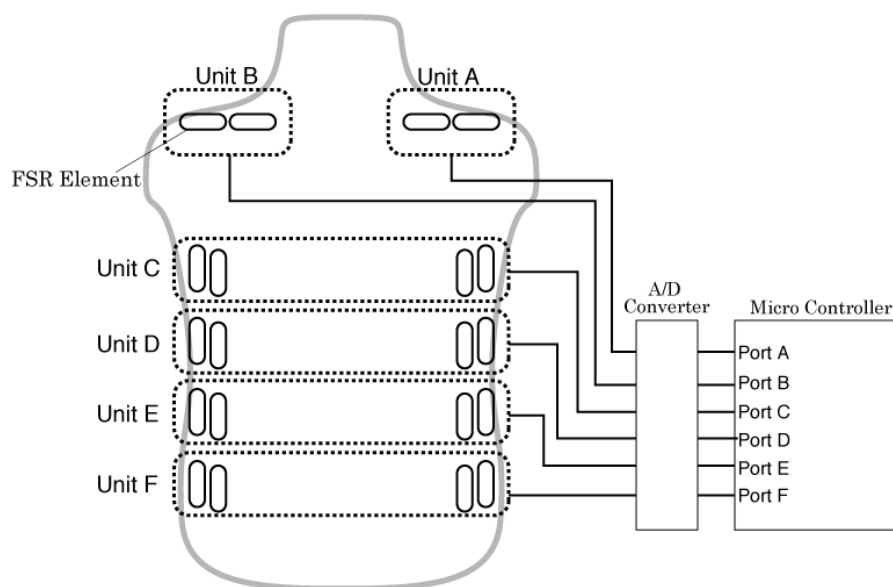


図 3.7: センサユニットの圧迫検出領域

### 3.4.2 ストローク入力の検出

ストローク検出システムの基本構成は 3.4.1 節と同様である。ストロークの検出はマネキン型センシングデバイスの背面部に配置された合計 12 領域のセンサユニットにて行う。実際の抱擁の際にストロークが行われる部位は抱き合った際の腕が掛かる部位である背部を主な対象として行われると考え、検出領域はボディの背面部に限定した。圧迫の検出と同様に同一ユニット内の FSR は制御回路で並列に接続されており、力の検出はユニット単位で行われる。ユニット内のいずれかの FSR に力が入力されると、そのユニットごとに 12bit の A/D コンバータを介してマイクロコントローラの入力ポートに数値データが送信し、この数値データをマイクロコンピュータが 19200bps のシリアル通信で 8bit のデータに変換して送信する。また検出を FSR で行うことにより、ストロークの際の座標位置の変位のみならず、接触判定及び触れた際の力の計測が可能である。

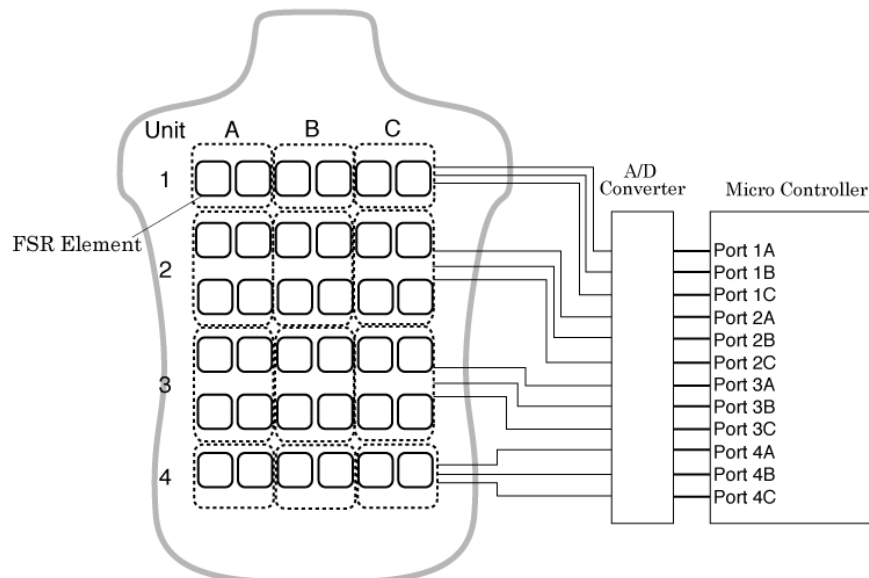


図 3.8: センサユニットのストローク検出領域

## 3.5 触覚提示ウェア

触覚提示ウェアの概観を図3.9、アクチュエータの個数と配置を表3.2に示す。本研究では、体験者がマネキンに抱擁を行うというインタラクション手法を取っているため、能動性を考慮して触覚提示システムはウェアラブルである必要があると考えた。他の手法としては抱き返すロボットを開発するという方針が考えられるが、抱擁を行う相手が自分自身であるという設計方針を取っているため、ロボットの姿勢や動作を忠実に体験者自身に似せる必要があると考えられ現実的ではない。そこで没入感を阻害する可能性のある視覚的要因は極力排除するという考えに基づき、ウェアラブルデバイスという形式を取っている。ウェアはベスト型で重量は2.7kgであり、装着による身体への負担は大きくない。

圧迫感の提示には空気圧で駆動する人工筋肉を用いている。触覚提示ウェアには両肩にそれぞれ1本、胴体部に4本の計6個のMcKibben型人工筋肉が組み込まれている。McKibben型人工筋肉のウェアへの組込みは、円筒状のポケットをウェアに縫製しその中に挿入する方法を取っている。また人工筋肉を駆動させた際に力の分散を抑え、十分な力が体験者の身体に加わるようにするため、各々の人工筋肉の両端はホースバンド金具で固定されている。さらに装着は体験者の体格に関わらず行えるよう全面3箇所を長さ調整可能なバックルで締められる構造とし、アクチュエータと体験者の身体のフィットするデザインとなっている。なお人工筋肉へ空気を供給するためのチューブは極力装着感に支障がなく、かつ十分な流量が確保するため外径4mm内径3mmのものを使用している。

ストロークのフィードバックを行う振動子はウェアの背裏面に配置されている。振動子は4×3のマトリクス状に配列されており、シリコンを媒体として身体背部における広範囲に振動の提示を行う。



図 3.9: 触覚提示ウェア正面 (左) 及び背面 (右)

表 3.2: 触覚提示ウェアのアクチュエータ配列

	肩部	前面	背部
振動子個数	0	0	12 (4×3マトリクス)
人工筋肉本数	2 (1.5 インチ,600mm)	4 (1.5 インチ,900mm)	
隣接する振動子間の距離	40mm		
重量	2.7kg		



### 3.5.1 McKibben 型人工筋肉

ここで参考として、触覚提示ウェアに用いている McKibben 型人工筋肉の力学モデルに関して述べる [31][28]。本人工筋肉の概観を図 3.10 に示す。McKibben 型人工筋肉は図 3.11 に示すように、ゴムチューブに螺旋状に編みこまれた繊維を覆った構造を取っている。動作原理はゴムチューブ内に圧縮空気を送り込むことで内部圧力が上昇し、網状の繊維の特性によって軸方向への収縮及び径方向への膨張が生じることで力が出力される。



図 3.10: McKibben 型人工筋肉

McKibben 型人工筋肉の力学的特性に関して記述する。人工筋肉の直径を  $D$ 、スリーブにおける繊維の角度を  $\theta$ 、膨張した際の繊維の張力を  $t$ 、人工筋肉の膨張により生じる張力と均衡する外力を  $F$  とする。人工筋肉のチューブが膨張したとき、軸方向の力学的要素に関して次の関係が成り立つ。

(繊維の軸方向における張力)

$$=(\text{チューブ端面へ加わる圧力 } P \times \text{端面の面積}) + (\text{収縮力 } F)$$

ここでスリーブの繊維の本数を  $n$  とすると、平衡式は次式となる。

$$nt \cos \theta = \frac{\pi}{4} D^2 P + F \quad (3.1)$$

次に径方向の平衡式を求める。スリーブの繊維の1周回長における軸方向の長さは  $\pi D / \tan \theta$  と表すことができることを考慮すると、均衡式は以下のように示すことができる。

$$2nt \sin \theta = \frac{\pi D^2 P}{\tan \theta} \quad (3.2)$$

ここで、式 (3.1) と式 (3.2) より以下の式を導くことができる。

$$F = \frac{\pi}{4} D^2 P \left( \frac{2}{\tan^2 \theta} - 1 \right) \quad (3.3)$$

次に人工筋肉の収縮時と通常時におけるスリーブの形状変化と収縮率に関して考察する。図 3.11 に示したように、収縮時は膨張時と比較し繊維の角度が大きくなる。ここで、図 3.12 に示したように、通常状態の人工筋肉の長さ  $L_0$  をとり、直径を  $D_0$ 、繊維の角度を  $\theta_0$  とし、収縮時の長さ、直径、繊維の角度をそれぞれ  $L$ 、 $D$ 、 $\theta$  とすると、人工筋肉の長さを底辺、直径を高さとした直角三角形で示すことができる。この図より径方向の膨張率を次式で示すことができる。

$$D = \frac{\sin \theta}{\sin \theta_0} D_0 \quad (3.4)$$

同様に図 3.12 より、軸方向の収縮率  $\varepsilon$  は次式により求められる。

$$\varepsilon = \frac{L_0 - L}{L_0} = \frac{\cos \theta_0 - \cos \theta}{\cos \theta_0} \quad (3.5)$$

以上より式 (3.3)、式 (3.4) 及び式 (3.5) より以下の式が導かれる。

$$F = \frac{\pi}{4} D_0^2 P \frac{1}{\sin^2 \theta_0} \{3(1 - \varepsilon)^2 \cos^2 \theta_0 - 1\} \quad (3.6)$$

また  $D_0$ 、 $\theta_0$  は人工筋肉の通常時の直径及び角度であり、定数で示すことができるため、以下の式で表すことができる。

$$F = P \{a(1 - \varepsilon)^2 - b\} \quad (3.7)$$

このとき  $a, b$  は人工筋肉の形状によって決定される以下の定数式となる。

$$a = \frac{3\pi}{4} D_0^2 \cot^2 \theta_0 \quad (3.8)$$

$$b = \frac{\pi}{4} D_0^2 \csc^2 \theta_0 \quad (3.9)$$

ここでは参考として McKibben 型人工筋肉の力学的特性に関して述べた。以上より McKibben 型人工筋肉は印加圧力と張力の関係は式 (3.7), 式 (3.8), 式 (3.9) に示したように人工筋肉の直径とスリーブの繊維の角度に依存することがわかる。つまり、任意の径と力出力が行える McKibben 型人工筋肉をこれらの式を元に自作することも可能である。

本システムでは神田通信工業の直径 1.5 インチの McKibben 型人工筋肉 (エアマッスル [30]) を用いている。図 3.14 にエアマッスルにおける印加圧力と収縮率の関係を示す。収縮の特性は両端に加わる負荷の大きさで異なり、負荷が 10kgf の場合では最大でおよそ 33 % の収縮率を得ることができる。一方で負荷が 250kgf の場合では 0.6MPa の圧縮空気を送り込んだとしてもおよそ 5 % の収縮率を得ることが限界である。一方で本システムではエアマッスルを身体に巻きつけることで圧迫の提示を行っており、端点の負荷が内力に変換され大きな収縮率を得ることができるため、実際の抱擁と比較しても十分な力出力を行うことができると考えられる。

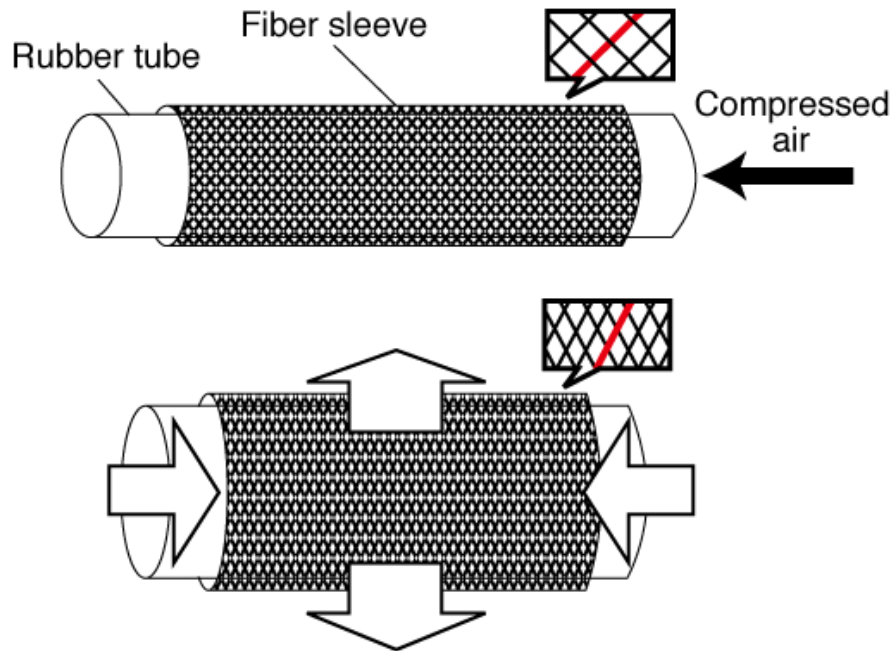


図 3.11: McKibben 型人工筋肉の動作原理

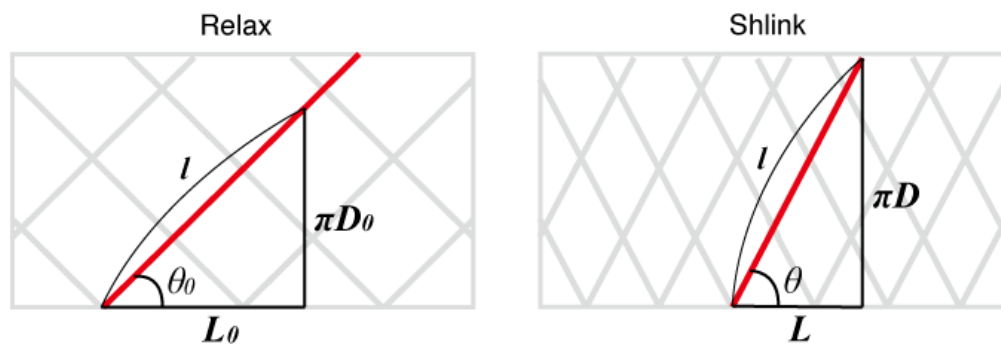


図 3.12: 通常時（左）と収縮時（右）のスリーブ形状の変化

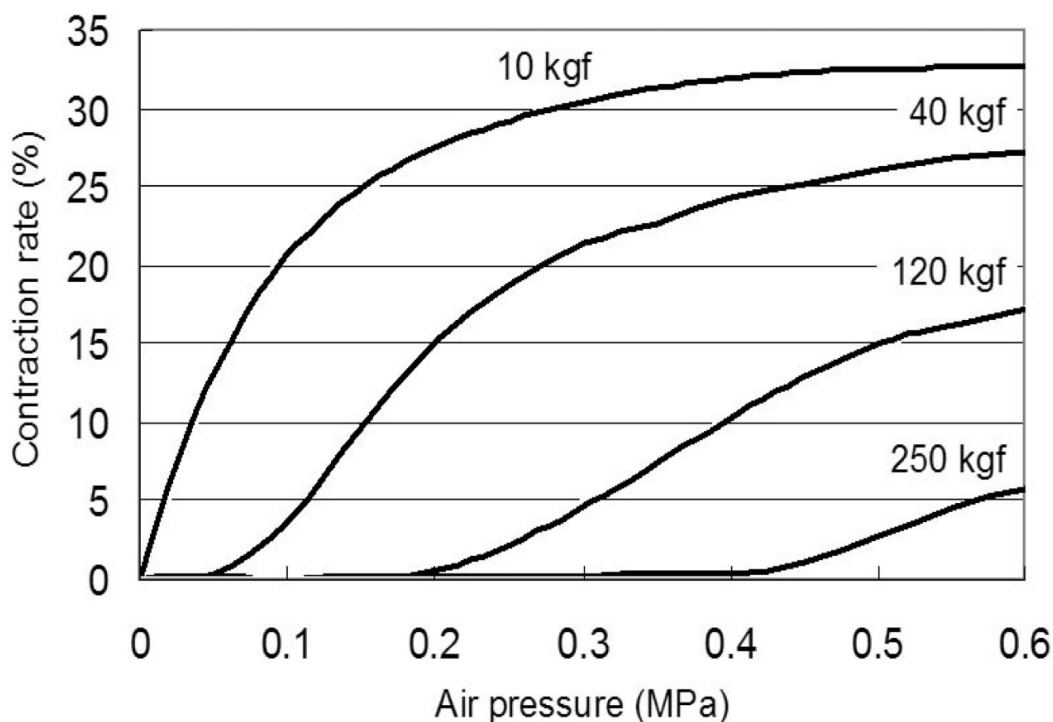


図 3.13: エアマッスルの印加圧力と収縮率 [30]

### 3.5.2 圧迫の出力

圧迫の出力には図 3.5.1 で述べた McKibben 型人工筋肉を用いる。McKibben 型人工筋肉は主にロボットにおける関節駆動の動力として用いられているアクチュエータである。ロボットの関節駆動において最も代表的なものはモータであるが、空気圧式の人工筋肉を用いることでより滑らかな挙動となるため、生物を模したロボット等の関節駆動に採用されている。また伸張時には柔軟性があり、圧縮空気を送り込むと硬度が大きくなるのが特徴であり、人間の実際の筋肉と非常に近い動作特性を持っている。そこで本研究では圧迫感の提示に McKibben 型人工筋肉を用いることでウェアラブルかつ抱擁の感覚特性に近い低周波の刺激提示を試みた。

圧迫を提示するシステムの構成を図 3.14 に示す。McKibben 型人工筋肉は片端に圧縮空気の給気のためのチューブ、もう一方の片端に排気のためのチューブが取

り付けられている。それぞれの人工筋肉はジャケット内で環状に配置されており、圧縮空気の供給により収縮を起こすことで身体への圧迫を行う。排気チューブの内径は3mmで固定されているため、エアコンプレッサから供給された圧縮空気がサーボ弁ユニットの開閉角度によって流量の調整が行われ、人工筋肉の収縮率のコントロールを可能としている。なおエアコンプレッサから供給する圧縮空気は0.3MPaに設定した。

サーボ弁ユニットを図3.15に示す。サーボ弁はマネキン型センシングデバイス胴体側面のFSRユニットで検出された値のマッピングを行い、PWM制御で0～90°の範囲で開閉角の制御を行う。それぞれのFSRユニットの領域と人工筋肉の座標は一对一对で対応しているため、マネキン型センシングデバイスの筐体に対し圧迫が加わった位置と同一部位の人工筋肉が駆動する。これにより体験者自身が加えた圧迫の力・位置が体験者自身にフィードバックされるミラーリングシステムとなっている。

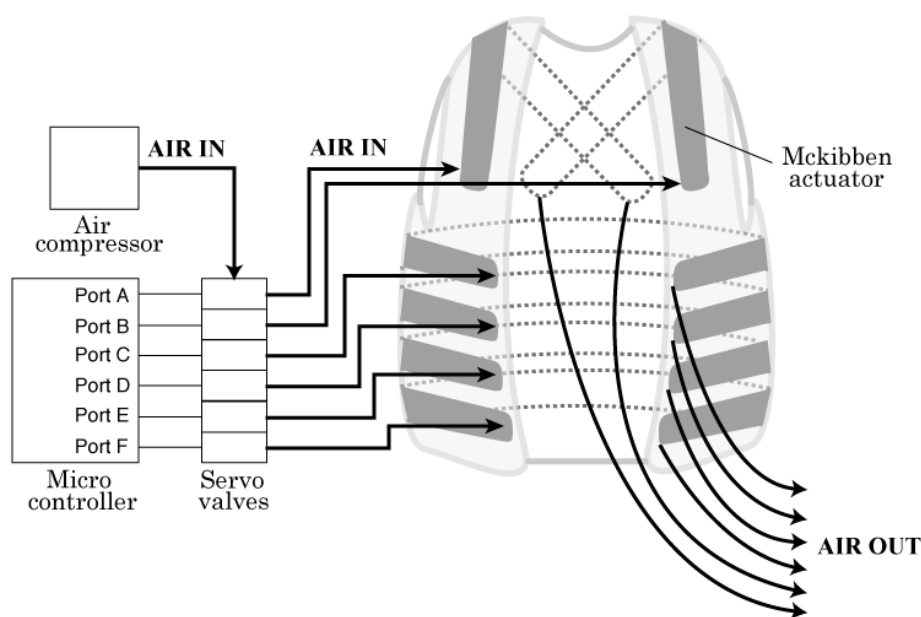


図 3.14: 圧迫出力システム

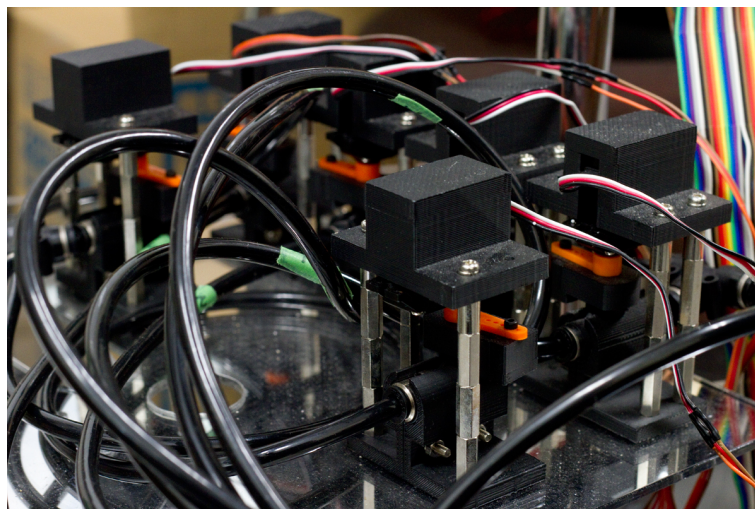


図 3.15: サーボ弁ユニット

### 3.5.3 ストローク出力

ストロークの再現に用いる振動子の概観を図 3.16 に示し、寸法図を図 3.17 に示す。アクチュエータにはフォースリアクタを使用しており、円筒状のシリコンを媒体として振動を提示する。本媒体を用いた理由は、第一にフォースリアクタ単体では低周波帯域の振動提示が困難であるのに対し、弾性媒介を中間に挟むことで提示できる低周波の帯域幅が大きくなること、第二にアクチュエータと身体の接触面積が大きくなるため広範囲に振動を提示することができるためである。図 3.19 に示したデバイスが本振動子を  $4 \times 3$  のマトリクス状に組み込んだものであり、触覚提示ウェアの背部裏面に装着される。

振動を提示するシステムの構成を図 3.19 に示す。フォースリアクタはボイスコイルモータ (VCM) と同様に基本的にスピーカと同一の構造及び動作原理となっており、入力波形がそのまま出力されることで振動が提示される。交流波形は図 3.20 の分圧回路によって得る。本システムでは入力波形に図 3.21 の発振回路によって生成されたホワイトノイズを入力波形として用いている。入力波形はマネキン型センシングデバイス平面の FSR ユニットで検出された値に対してマッピング

を行い，図 3.22 のゲインコントローラによって振幅がコントロールされる．ゲインコントローラには主にアナログフォトカプラを使用しており，19200bps のシリアル通信によって Arduino から 12bit の D/A コンバータを介して電圧制御を行う．

### 仮現運動

本システムによるストロークにおける移動感覚の再現は仮現運動として知覚されることを狙いとしている．仮現運動は，2 点の点刺激を順に振動させることで移動刺激を提示しなくとも 2 点の点刺激が他方へ連続的に移動して知覚される現象として知られている [32]．本システムにより提示される振動刺激自体は本来のストロークのように実際に動く刺激ではなく非連続であるが，本現象の知見に基づき，振動子の個数を減らすことでデバイスの小型化を図っている．

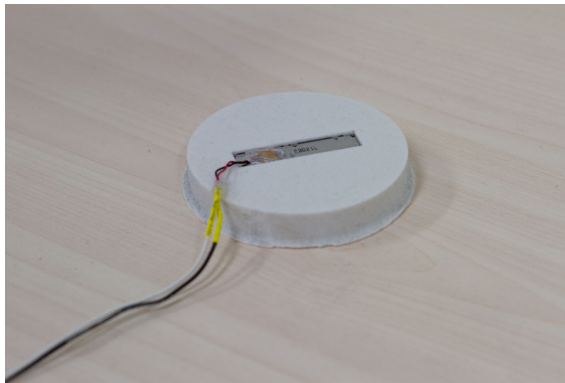


図 3.16: 振動子の概観

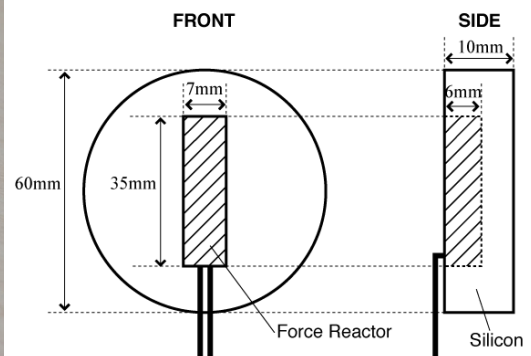


図 3.17: 振動子の概要及び寸法





図 3.18: 触覚提示ウェアの振動ユニット

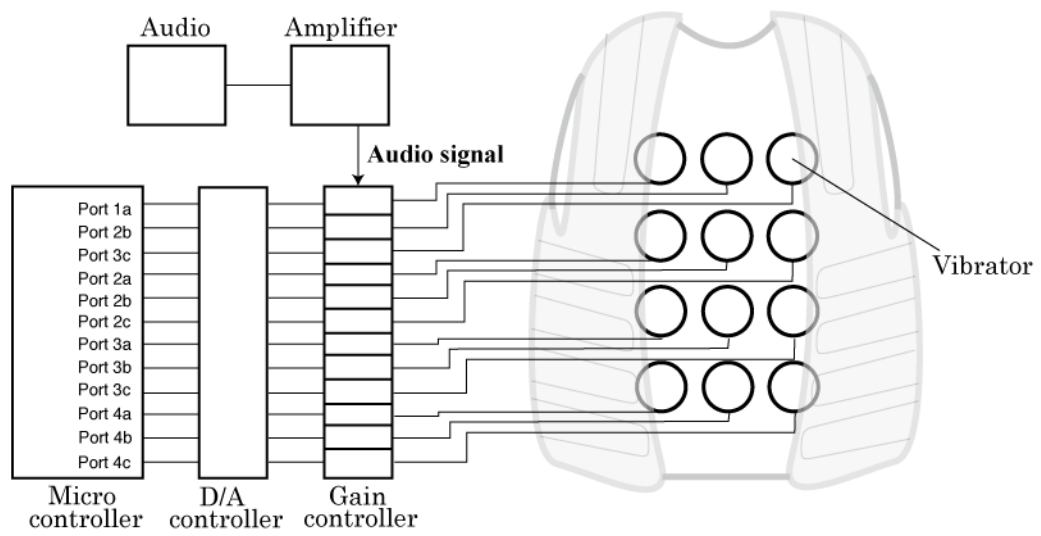


図 3.19: 振動出力領域

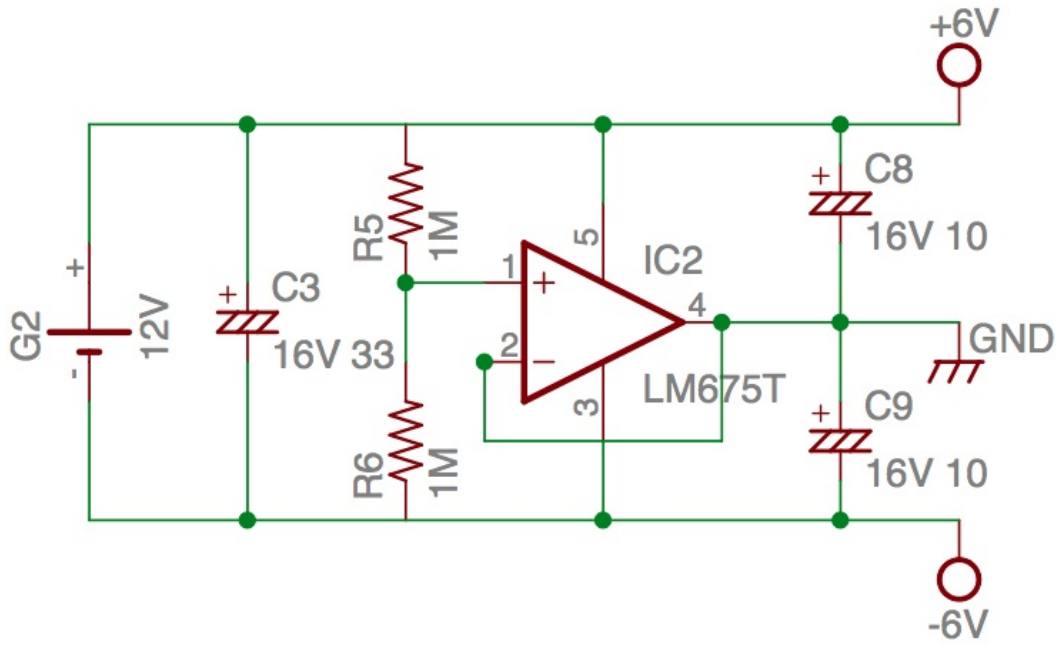


図 3.20: 単電源-両電源回路図

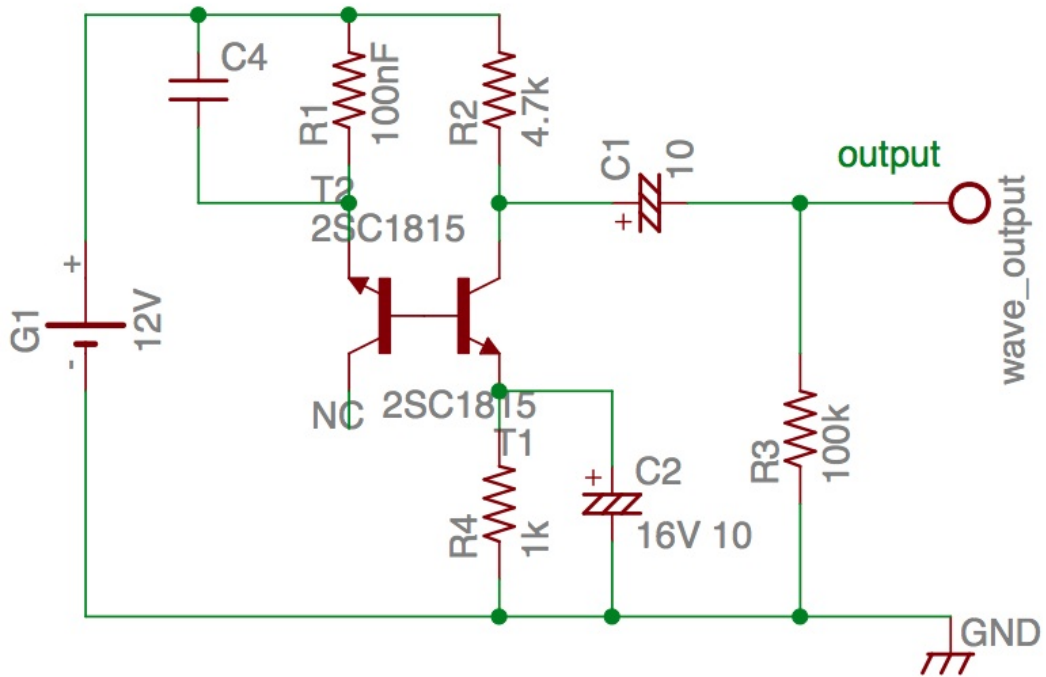


図 3.21: 発振回路図

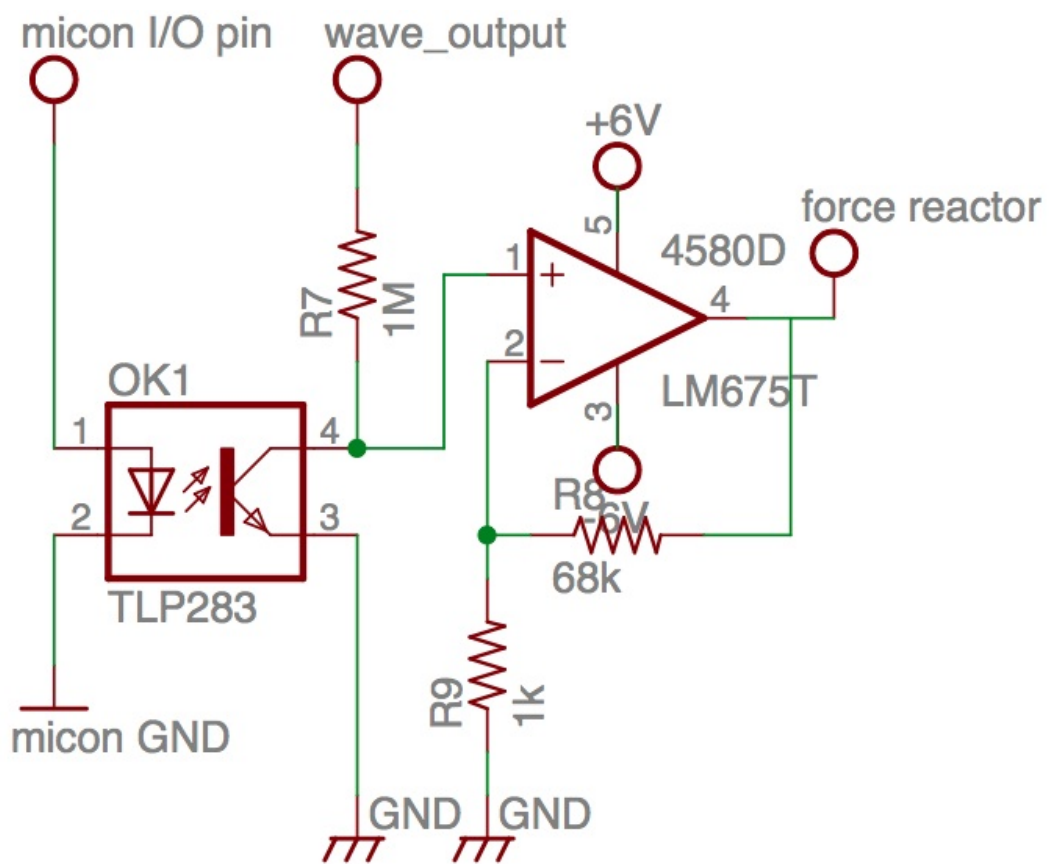


図 3.22: ゲインコントロール回路図

## 3.6 記録と再生

抱擁動作の記録はマネキン型センシングデバイスのセンサユニットへ入力された力をテキストデータとしてPCに保存することで行う。センサへの力の入力からテキストデータ化までの手順を以下に示す。

### 記録手順

- FSR ユニット力が加わることで検出される電圧値の値を A/D コンバータを介して Arduino に読み込む。12 ユニットの FSR に対し 12 ポートの Arduino のデジタルピンへそれぞれ値が送信される。
- Arduino に読み込まれた値を 19200bps のシリアル通信にて PC に送信を行う。
- Processing にて Arduino から PC へデータを受け取る。
- 受け取ったデータをテキストファイルとして保存する。

同様に抱擁動作の再生は以下の手順により行う。

### 再生手順

- 記録モードにて保存したテキストデータを Processing で読み込む。
- 19200bps のシリアル通信で読み込まれたデータを Arduino に送信する。
- Arduino がデータを受け取り、値のマッピングを行う。
- 圧迫検出ユニットにて得られたデータに対しては、Arduino からサーボモータへ PWM 制御信号にマッピングし送信される。同様にストローク検出ユニットで得られたデータは、ゲインコントローラのアナログフォトカプラに D/A コンバータを介し送信される。
- サーボモータの回転角により人工筋肉の収縮率を制御し、入力された圧迫の再現を行う。同様にゲインコントローラによってオーディオ信号の振幅を制御し、入力されたストロークの再現を行う。

### 3.7 展示発表における観察

Sense-Roid の試作システムをフランス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 Virtual2011, 経済産業省・財団法人デジタルコンテンツ協会主催のデジタルコンテンツエキスポ 2011 (DC EXPO2011) 及び東京ビックサイトにて行われた第 19 回 3D & バーチャルリアリティ展 (IVR2011) にてデモ展示を行っており, 来場者の中から複数の体験者が本システムを使用した。それぞれの展示会における来場者を表 3.3 に示す。

表 3.3: 展示情報

展示会名	開催場所	来場者
DC EXPO2011	日本科学未来館	約 1 万 6000 人
Laval Virtual 2011	Laval, France	約 1 万 3000 人
19th IVR 展	東京ビックサイト	約 8 千 500 人

実演展示を通し, 体験者から以下のような感想が得ることができた。

- 最初に体験したときは驚いたが徐々に体験に慣れ, 長時間の使用で心地良くなって来る。
- 自分の恋人と抱き合っているようで安心感を感じる。
- 自分と抱き合っているというよりは, 他人と抱き合っているようである。
- 一家に一台欲しい。
- 体験したことのない感覚で何とも言えない。

一方で以下のような問題点の指摘もあった。

- 人間に抱き締められている感覚とは異なっている。
- やや気持ち悪く感じる。
- 抱きしめられた際の体温も感じられると良い。

体験者の感想に共通して言えることは、本システムの使用によって笑顔或いは安心した表情を示す体験者の様子が観察されたが、一方で抱擁の感覚提示の再現性に向上の余地があること、自分自身との抱擁しているような感覚が十分に生起されていないと考えられることである。「やや気持ち悪く感じる」という意見に関しては、寧ろ肯定的に捉えて良いと考えられる。なぜならば抱擁のような親密度の高いコミュニケーションは、赤の他人のような間柄の者に行われた際は本来不快感を感じるものであり、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があったと考えられるためである。



図 3.23: 実演展示の様子

## 3.8 考察

Sense-Roid ではバーチャルな自己抱擁が行えるシステムとして、自分自身の抱擁動作を直接自分自身にフィードバックする基本的なシステム設計を構築し、実装することに成功した。一方で実装に関して幾つかの問題点が残されており、検討を行う必要があると考えられる。

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。

### マネキン型センシングデバイスのデザイン

現状のマネキン型センシングデバイスは、一般的なラッカーボディを用いており没入感を阻害する視覚的な要因を極力排除する方向性を取っている。しかしながら抱擁した時の感触はボディが硬いため実際の人間に抱きつく感覚とは異なる。このことが、人間を抱擁しているという状況を想起させ難くしていると考えられるため、例えば筐体を人工皮膚で覆うなどして効果の比較、検証を行うことが重要である。また感触だけでなく筐体にペルチェ素子などの熱電素子を組み込むことで、人間の体温と同一に保つことも実装として考えることができる。

姿勢に関しては例えば自分自身の映像をボディにプロジェクションする等の視覚情報を重畳させることで、よりセンシングデバイスを自分自身であると錯覚させることができる可能性がある。また現状では体験者に合わせてボディの高さのみ調整が可能となっているが、ボディ自体の体格を可変とする機構を組むことができればより体験者自身の姿勢に近づける事ができると考えられる。

### 再現性の向上

現状の触覚提示ウェアにおいて出力される刺激は圧迫とストロークの2種類である。圧迫に関しては人工筋肉を複数本組み込んでいるが、配置の関係上、胴体に関しては圧迫提示が水平線の均一な刺激となっているため、腕を斜め

にして身体を圧迫するといった状況や軸方向にリニアな圧迫提示には対応できていない。そのため、抱擁の際の圧迫の再現性を向上させるためには、人工筋肉の大きさや、配置を再構築する必要がある。

ストロークに関しては、本実装では振動刺激による再現を試みているが、ストロークの際に提示される触覚要素に関しては未だ十分な知見が得られていないのが現状である。またセンシングに関しても背面部をFSRを用いて12領域に分けて行っているが、より正確な位置判定と周波数成分を解析するために他のセンサを用いることも含めてより精細な検証が必要である。

### 応用に関する所見

実演展示による観察を通して、本システムを使用した多くの体験者が安心感を抱く様子を観察することができた。よって応用先としては一種のセラピーツールとしての効果を見込むことができると考えている。また本研究では自分自身との抱擁を目的として実装を行ったが、二者間のコミュニケーションのためにも用いることができる。具体的には本システムにおいて、片方の体験者が触覚提示ウェアを装着し、もう片方の体験者がマネキン型センシングデバイスに抱擁を行うことで間接的に両者が抱擁を行うことが可能となる。また他者の抱擁を記録することで、任意の際に触覚提示ウェアにその動作の再生を行うことができる。また本システム環境を遠隔地間において構築すれば、二人の人間が遠隔で抱擁を行うことができるといった用途にも対応が可能である。また叩く、搔く、揉むといった触覚入出力にも対応できれば、より高品質な体験が行えることができると考えられる。これが実現すれば医療や福祉方面への応用の可能性も大きく広げることができると期待される。



### 3.9 まとめ

本章では自分自身とバーチャルな抱擁が行えるシステム Sense-Roid に関して述べた。マネキン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の余地が残るが、自分自身との抱擁を可能とする基礎的なシステムの構築に成功した。

今後は、装置の再現性や検出精度向上に関して検証するとともに、本システムのコミュニケーションツールとしての有効性、有用性のより詳細な検証を被験者実験を通して行ない、エンタテインメントとしての質の向上及び医療や福祉分野方面への応用可能性を探求して行く。

## 第 4 章

# SHIRI: ヒューマノイドロボットの身体表現への応用

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[22] や Telenoid[23] 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。

## 4.1 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ーンに応じ、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。

#### 4.1.1 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。

### 4.1.2 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 4.1 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 4.2 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。

またHMDの提示界面に図4.3に示すようなシリコン或いは軟質ウレタンを配合した人工皮膚を配置することで皮膚の質感と柔軟な感触の提示を試みる。

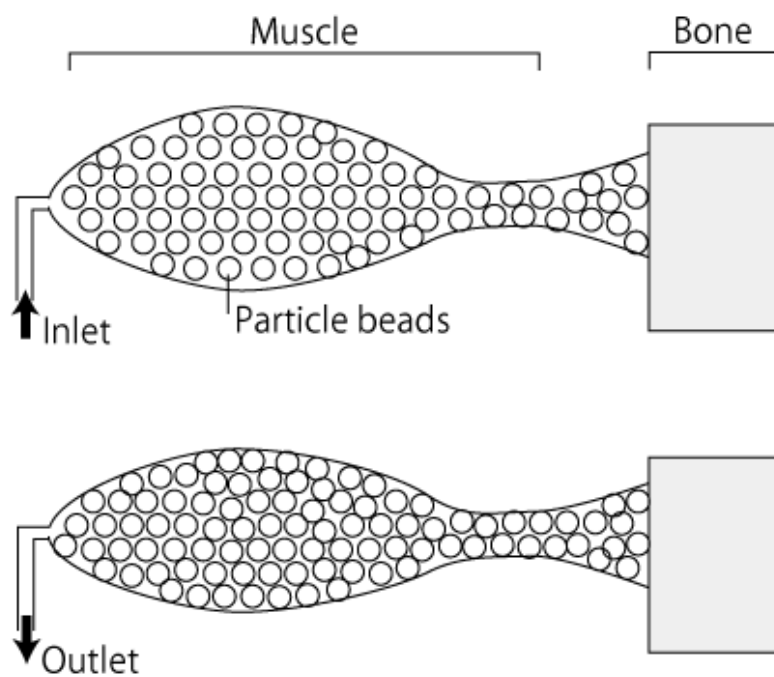


図 4.1: 気圧制御による MHD の硬度制御

— 上:軟状態、下:硬状態

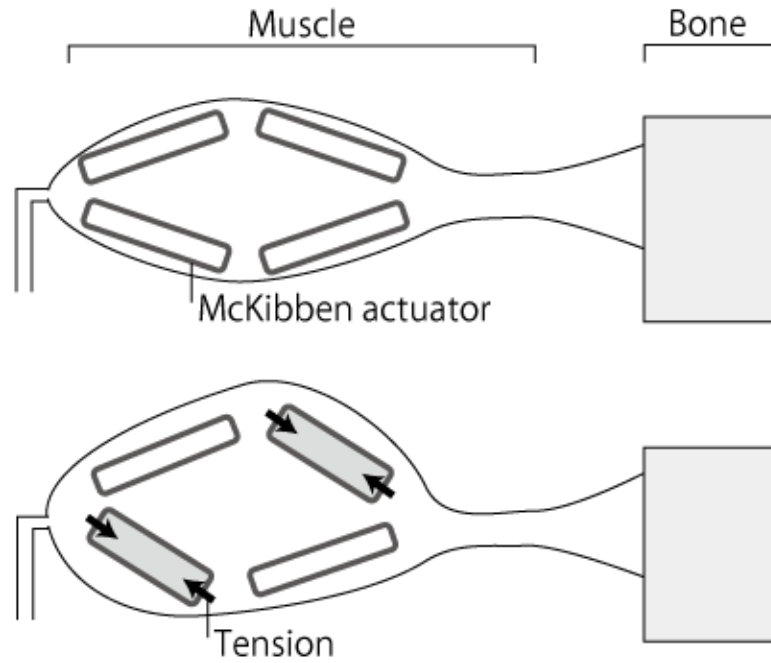


図 4.2: McKibben 型人工筋肉による MHD の形状制御

— 上:定常状態、下:変形状態

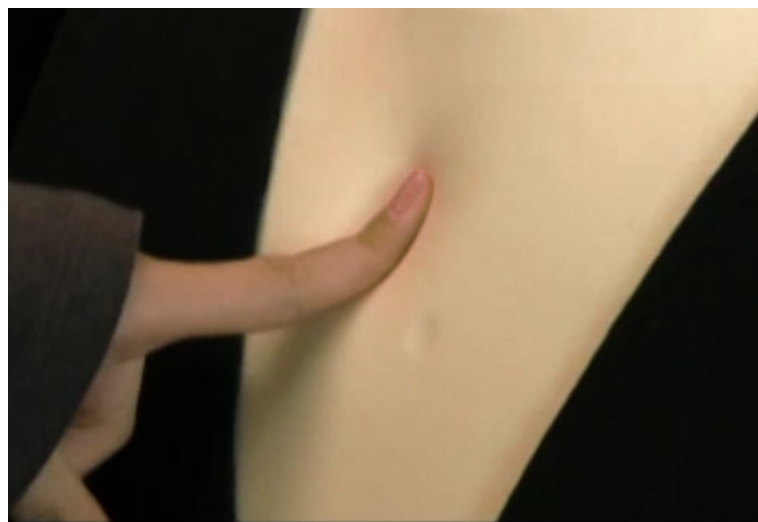


図 4.3: 軟質ウレタン素材を用いた人工皮膚

## 4.2 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ー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。

### 4.2.1 筋構造

全身の筋の構造を図4.4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4.5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。

- 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。



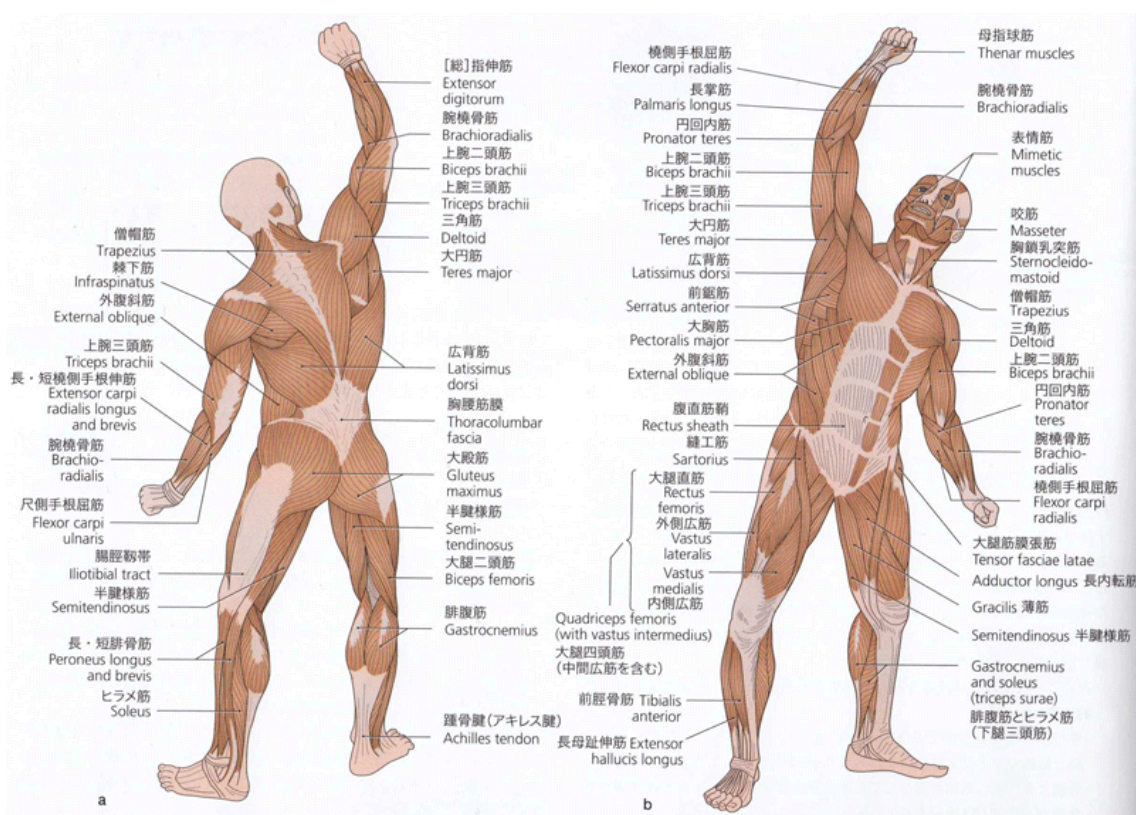


図 4.4: 全身の姿勢筋と運動筋 [33]

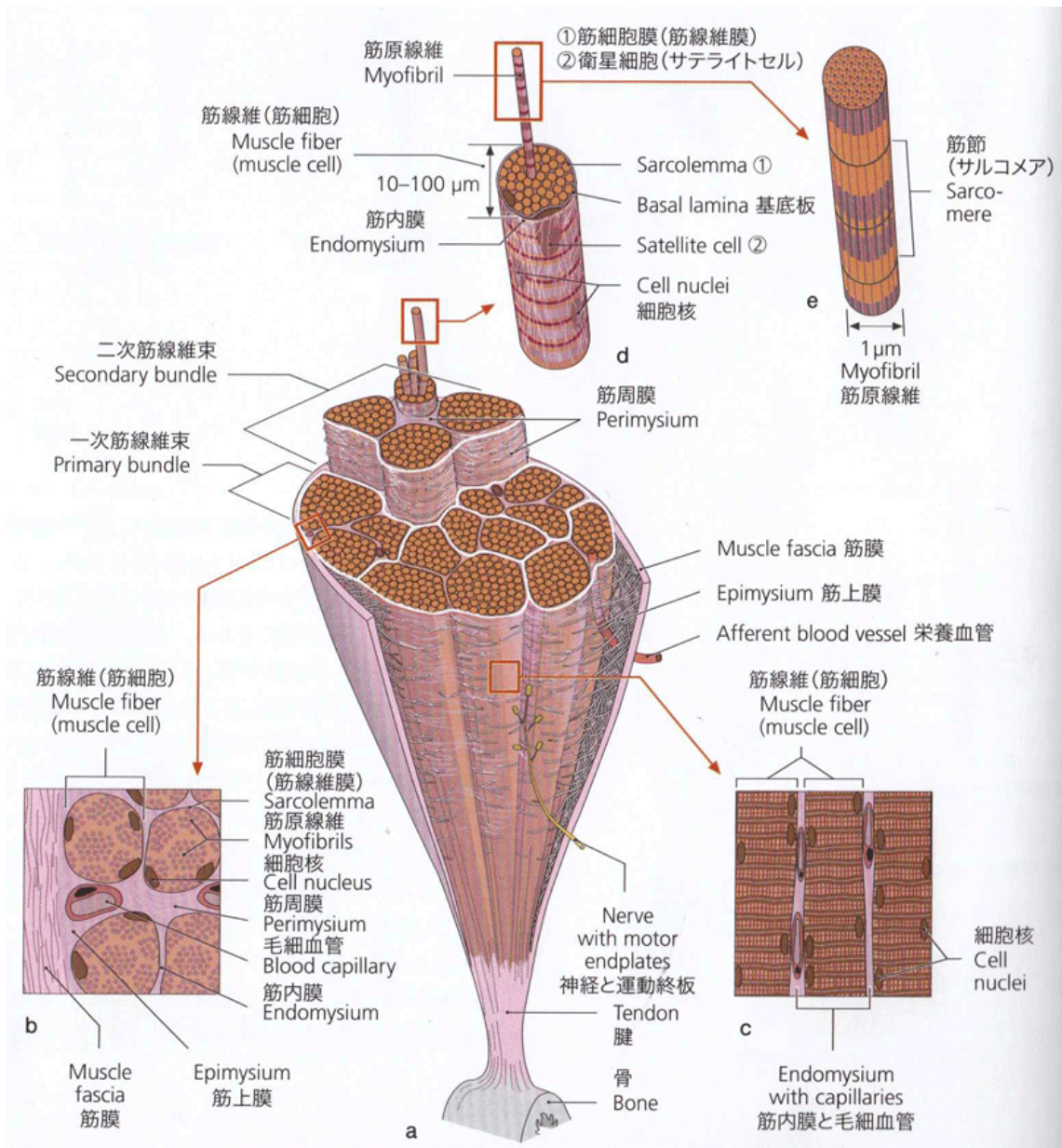


図 4.5: 骨格筋の構造 [33]

### 4.2.2 殿部と大殿筋

図 4.6 に下肢後面の筋構造を示し、図 4.7 に殿部皮膚表層の大殿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殿部に着目する。殿部は普段は衣服に隠れている部位であるが、殿部の骨格筋の大部分を占める大殿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。さらに殿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言える。

また殿部は「尻叩き」として躰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 の一実装として殿部を対象とし、大殿筋の形状及び動作を模倣した MHD の開発と殿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。

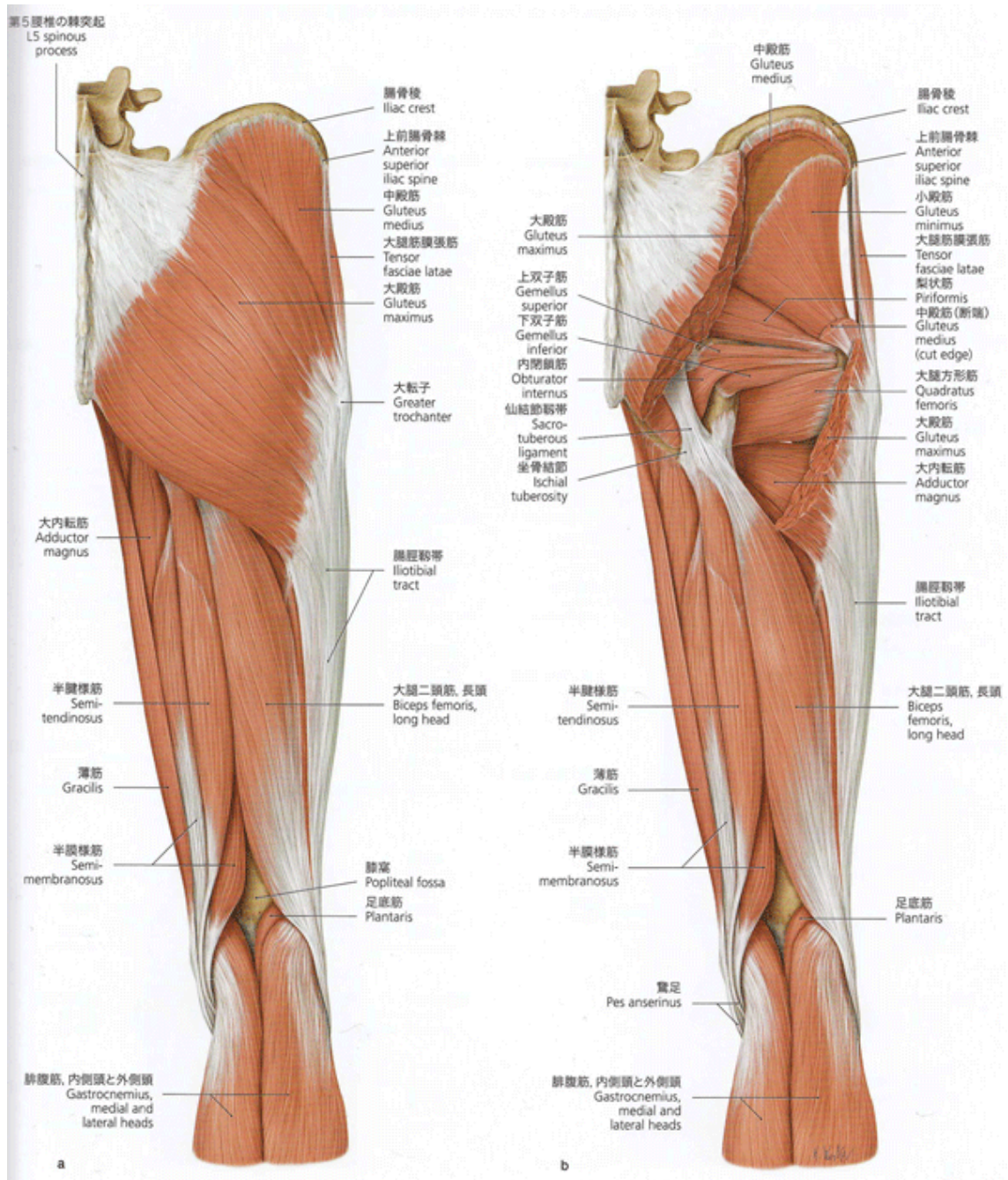


図 4.6: 下肢後面の筋構造（大腿，骨盤，殿部の筋） [33]

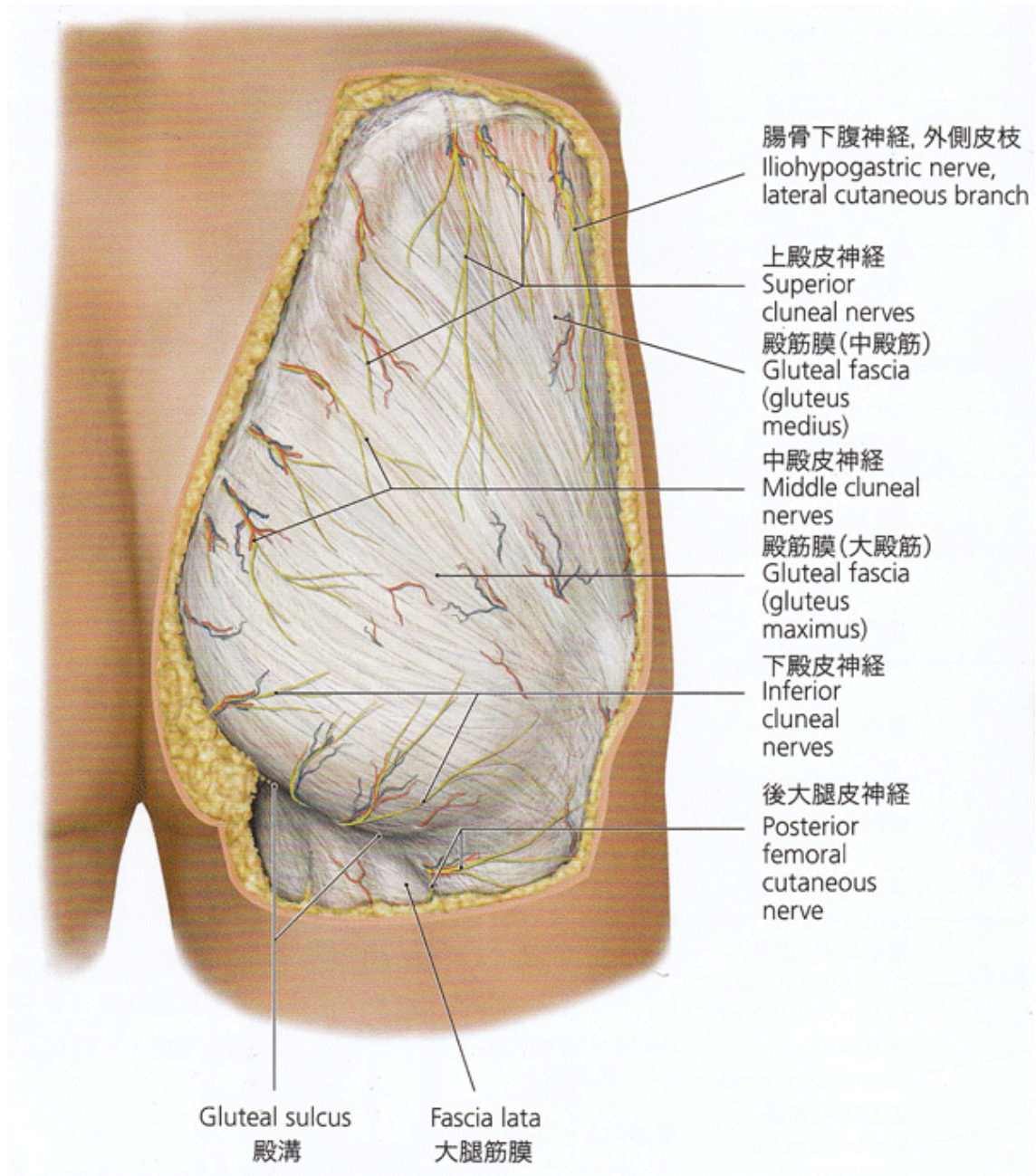


図 4.7: 殿部表層の筋膜と皮下神経 [33]

### 4.3 SHIRI

殿部ヒューマノイドロボット“SHIRI”の概観を図4.8に示し、筐体内部の概観を図4.9示す。SHIRIは人間の殿部を模した見た目、軟らかさを有した等身大のロボットであり、表4.1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パターンあり、筐体内部に組み込まれた空気圧駆動型の大殿筋アクチュエータ（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できる触覚情報を用いて行うことを可能としている。

表 4.1: SHIRI の寸法及び重量

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



図 4.8: SHIRI 概観



図 4.9: SHIRI 筐体内部の概観

## 4.4 筐体デザイン

SHIRI の筐体は図 4.10 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鑿で削り出すことで加工・整形を行った。使用した硬質ウレタンは硬度が高いため殿部側の皮膚直下に位置した場合、殿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、殿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 4.10 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 の両端には靭帯を模倣した帯が取り付けられており、この帯によって骨盤と GMA を結合する。そしてこれらの機構に殿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、殿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 4.11 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 4.10: SHIRI の内部構成

— 左から順に人工皮膚, GMA, 骨盤, 骨格.

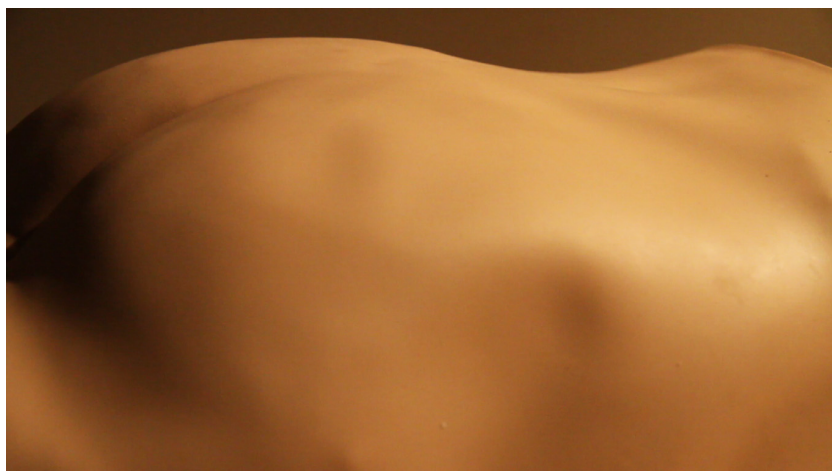


図 4.11: SHIRI の皮膚の質感及び凹凸形状

## 4.5 Gluteus Maximus Actuator

GMA の概観を図 4.12 及び図 4.13 に示す。GMA の実装は 4.1 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殿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、人間が殿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。



図 4.12: Gluteus Maximus Actuator (表)



図 4.13: Gluteus Maximus Actuator (裏)

## 4.6 システム構成

システム構成を図 4.14 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 4.15 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接続図を図 4.16 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で検出し，Arduino と PC で認識を行っている。

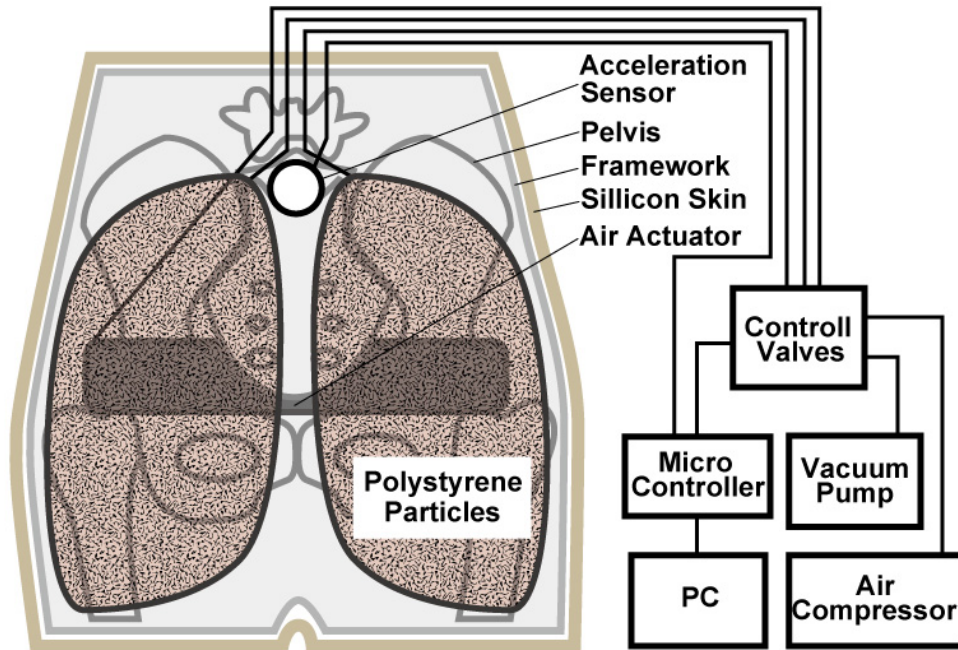


図 4.14: SHIRI システム構成

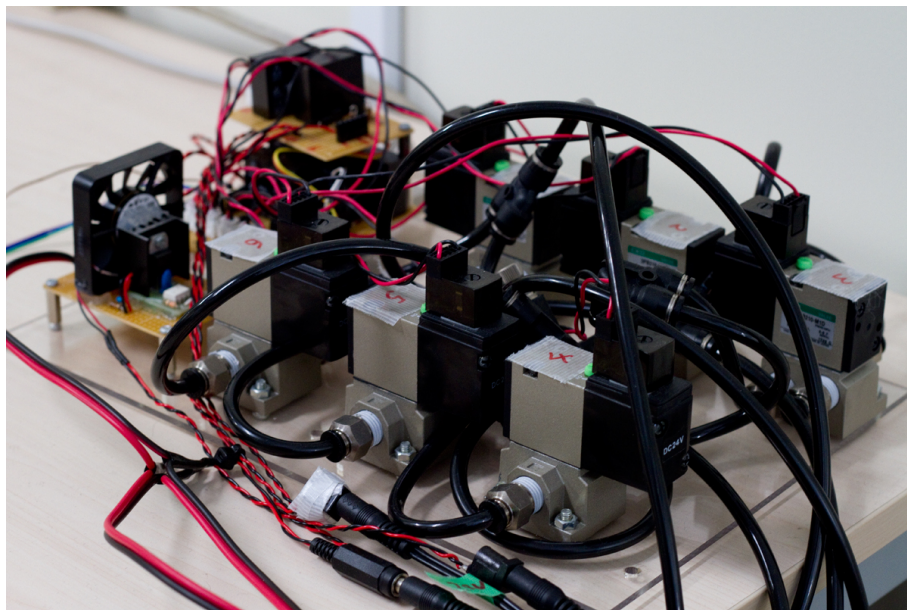


図 4.15: 空気圧制御ユニット

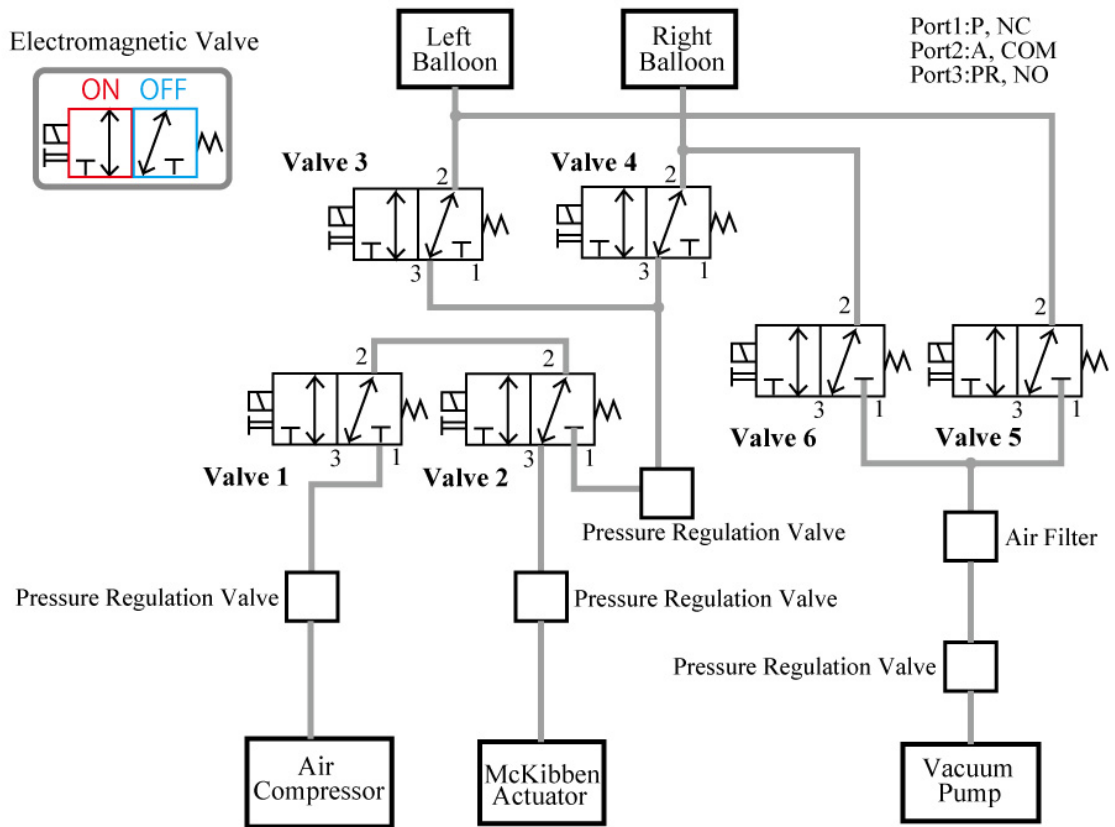


図 4.16: エアチューブの接続

## 4.7 動作パターン

SHIRI では次の3つの動作パターンのプログラムを組み、殿部による以下のような情動表出を試みた。

### 緊張-弛緩

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

殿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言える。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 [34]。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ーンの実装を試みることにする。

### 4.7.1 緊張-弛緩

「緊張-弛緩」パタンの動作原理を図 4.17 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。これにより大殿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。

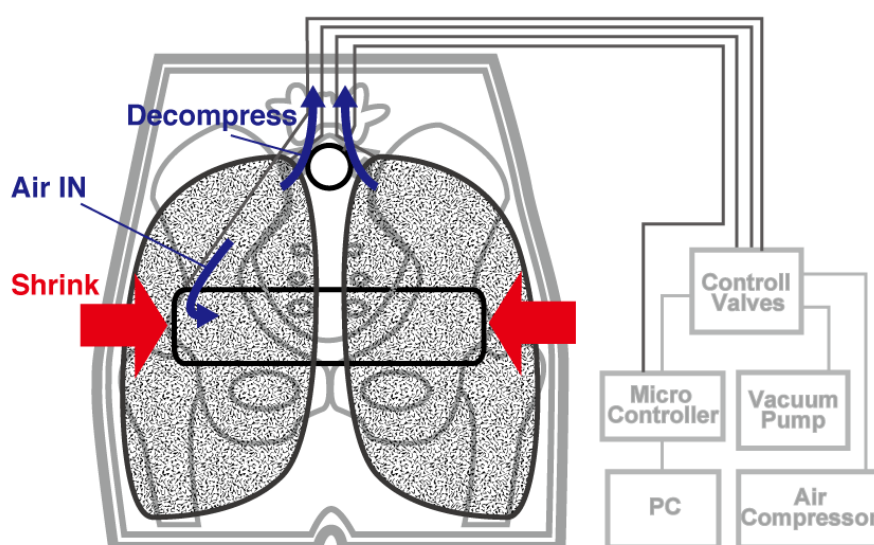


図 4.17: 緊張-弛緩パタンの動作原理



## 4.7.2 痙攣

「痙攣」パタンの動作原理を図 4.18 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殿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。

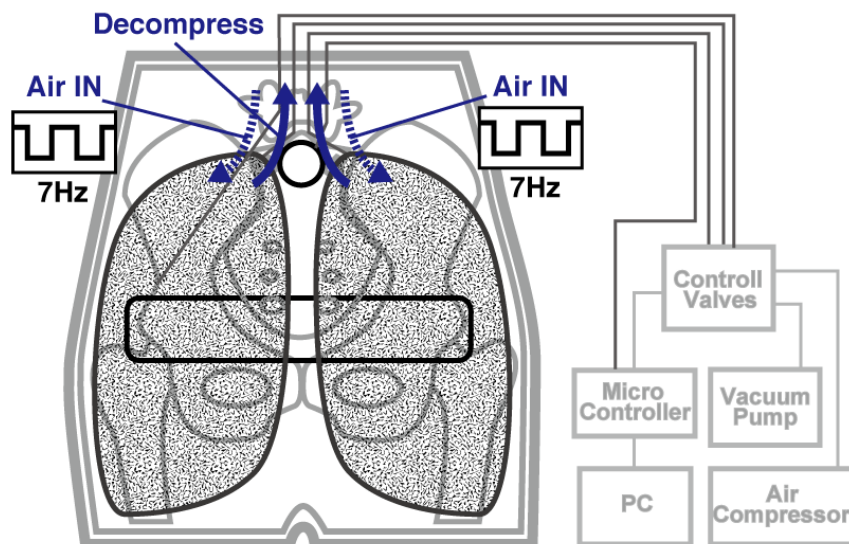


図 4.18: 痙攣パタンの動作原理

### 4.7.3 突き出し

「突き出し」のパタンの動作原理を図4.19に示す。殿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、殿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。

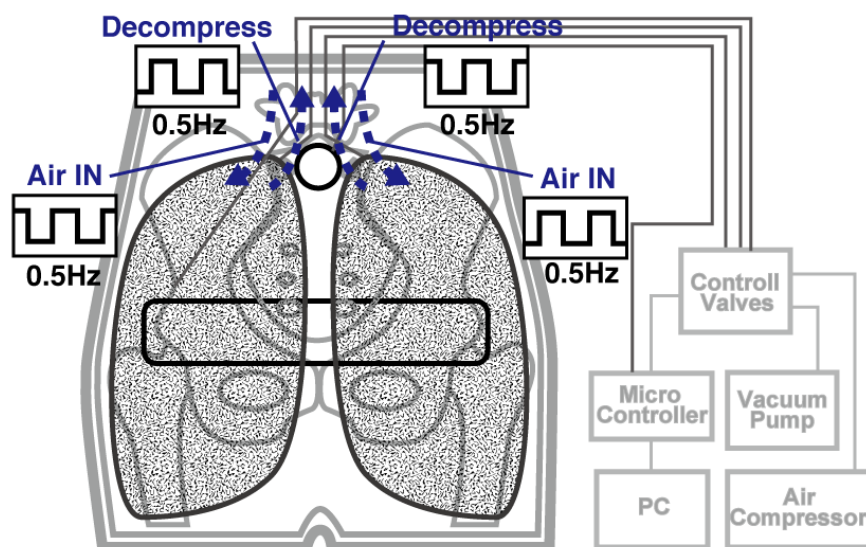


図 4.19: 突き出しパタンの動作原理

## 4.8 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 4.20 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。

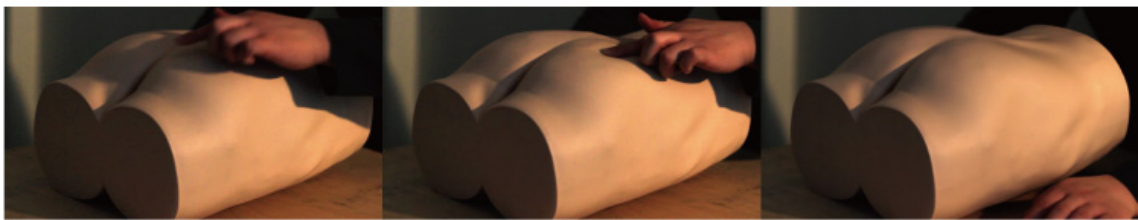
1. ユーザが SHIRI を叩くことで、SHIRI は「緊張」のパターンを示す。
2. 「緊張」の動作を行っている状況でユーザが SHIRI を撫でた際は「弛緩」する。
3. 「弛緩」している状況でユーザが SHIRI を撫でた際は「突き出し」或いは「痙攣」のパターンをランダムに行う。
4. 「突き出し」或いは「痙攣」の動作を行っている状況でユーザが SHIRI を撫でた際は現在行っている動作を継続する。
5. それぞれの動作パタンの継続時間はそれぞれ 10 秒に設定し、ユーザの入力が行われない場合、時間経過後に SHIRI は「弛緩」する。

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」

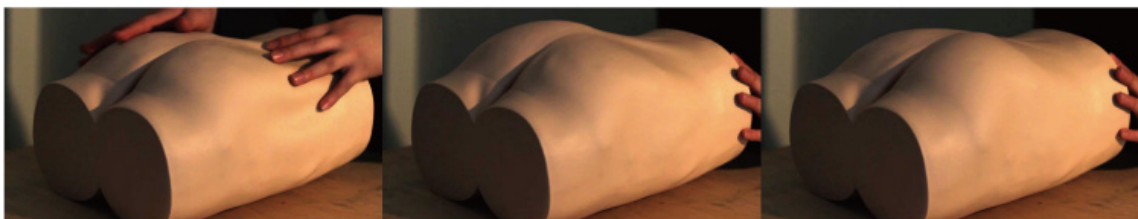


図 4.20: ユーザとのインタラクションの様子

## 4.9 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、殿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、人体における殿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、殿部は皮膚と大殿筋膜の間には厚い脂肪が含まれており、これが殿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。実装を行った大殿筋アクチュエータは、左右の大殿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、実際の大殿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、実際の殿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もの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殿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の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。

## 4.10 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、人体の骨格筋の中でも最も体積が広く、形状の変位が大きい大殿筋と特有の多彩な文脈を有する殿部に着目し、殿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 5 章

### 結論

本研究は、人間の皮膚の質感と感覚入出力の特性に着目し、エンタテインメント性を考慮したヒトの身体と身体の接触を再現する人工筋肉を用いた二点のヒューマンインタフェースの開発及びインタラクティブシステムの実装を行った。

第3章では抱擁感覚拡張インタフェース Sense-Roid に関して述べた。Sense-Roid では抱擁感覚の要素を圧迫感、ストロークの低周波及び高周波の成分に分割し、広帯域力センサをマトリクス上に高密度に配列したマネキン型入力デバイスによる抱擁感覚の検出と、McKibben 型人工筋肉、振動子を組み込んだ触覚提示ウェアによる再提示を可能とした。McKibben 型人工筋肉の柔らかく大きな力の出力が行える点を生かし、抱擁の感覚特性に近い自然な圧迫感提示を行うことを可能とした。また実演展示における体験者の感想から本システムがエンタテインメントとしての体験を提供することが可能であるとともに、一種のセラピーツールとして機能する可能性が示唆された。今後はエンタテインメントとしての質の向上を図ることはもちろんのこと、医療や福祉の分野における応用の可能性も模索する意義があると考えている。

第4章では殿部ヒューマノイドロボット SHIRI に関して述べた。SHIRI では人工筋肉をヒューマノイドロボットの皮膚の質感、軟らかさの再現を行うための視触覚インタフェースとして用いることで、ロボットの身体表現の向上を試みたものである。第一ステップとして大殿筋アクチュエータ GMA を開発し、殿部ヒューマノイドロボットによって緊張-弛緩、痙攣、突き出しの動作パターンを生成し、ユーザ



とのインタラクションの実装を行った。現時点のシステムでは筋動作の再現性向上の余地こそ課題として残されているが、ロボットと人間の新しいコミュニケーション手法の提案を行うことができたと考えている。今後は他の身体においても本提案手法による身体表現を行うとともに、実験により人間とロボットのコミュニケーションに与える影響に関して明らかにして行く所存である。

## 謝辞

私は本学の電気通信学部から博士前期課程より情報システム学研究科小池研究室へ進学し、今こうして修士論文の謝辞を書いている訳ですが、振り返って見ましても実に充実した研究生生活を過ごさせて頂けたと強く感じています。

指導教員である小池英樹教授には多大なご指導を頂きました。日頃より素晴らしい研究環境と的確かつ鋭い御助言を頂けたことに心より感謝致します。また研究の方向性を深く考える機会を提供して下さいました野嶋琢也准教授に感謝致します。

佐藤俊樹助教、博士後期課程の的場やすし氏には公私に渡り大変お世話になりました。研究に行き詰まりそうになった時も、お二人のアドバイスに何度も救われました。またゼミやミーティングで活発な議論の場を提供して頂きました栗原恒弥客員准教授、修士研究に関して多大なアドバイスを頂きました佐藤俊治准教授、大学院に進学した後も度々研究内容に関する貴重なアドバイスを下さいました総合情報学科の梶本裕之准教授に心より感謝致します。

また共に研究を行って来ました研究室のメンバには日頃よりお世話になりました。学部生時代から研究環境を共にして来ました同期の吉川博美氏、山川隼平氏には特にお世話になりました。

そして私の研究生生活を暖かく見守って下さる両親に尊敬の意を示します。

最後に本研究分野の一線で活躍する全ての先生方に感謝致します。

## 参考文献

- [1] Brave, S., Ishii, H., Dahley, A., “Tangible interfaces for remote collaboration and communication,” Proceedings of Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW '98), pp. 169-178, 1998
- [2] Sekiguchi, D., Inami, M., Tachi, S., “RobotPHONE: RUI for Interpersonal Communication,” Extended Abstracts of ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2001), pp 277-278, 2001
- [3] Iwata, H., Yano, H., Nakaizumi, F. and Kawamura R., “Project FEELEX: Adding Haptic Surface to Graphics,” Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001, pp. 469-475, ACM press, 2001
- [4] Nakatani M., Kajimoto H., Vlack K., Sekiguchi D., Kawakami N., and Tachi S., “Control method for a 3D form display with coil-type shape memory alloy,” Proceedings of IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA 2005), Barcelona, Spain, Apr. 2005, pp. 1332-1337, 2005
- [5] Leithinger D. and Ishii H., “Relief: A scalable actuated shape display,” Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible and Embedded Interaction (TEI'10), pp. 221-222, ACM Press, 2010
- [6] Kajimoto H., Inami M., Kawakami N., Tachi S., “SmartTouch: Electric skin to touch the untouchable,” IEEE Computer Graphics and Applications, 24(1), pp. 36-43, 2004
- [7] Teh J.K.S., Cheok A.D., Peiris R.L., Choi Y., Thuong V., Lai S., “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
- [8] Mueller, F.F., Vetere, F., Gibbs, M.R., Kjeldskov, J., Pedell, S., Howard, S., "Hug Over a Distance," Extended Abstracts of ACM Conference on Human factors in Computing Systems (CHI 2005), pp. 1673-1676. ACM Press, 2005
- [9] DiSalvo, C., Gemperle, F., Forlizzi, J., Montgomery, E., "The Hug: an Exploration of Robotic Form for Intimate Communication," Proceedings of 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN'03), pp. 403-408. IEEE Press, 2003
- [10] Hug Shirt, CuteCircuit (<http://www.cutecircuit.com/hug-shirt/>)
- [11] Tsetserukou D., "HaptiHug: A Novel Haptic Display for Communication of Hug over a Distance," Proceedings of EuroHaptics 2010, pp. 340-347, 2010
- [12] Kushiyama, K., Inose, M., Yokomatsu, R., Fujita, K., Kitazawa, T., Tamura, M., Sasada, S., "Thermoesthesia: about collaboration of an artist and a scientist," Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006 Sketches, 2006.
- [13] Niiyama, R. and Kawaguchi, Y., "Gemotion Screen: A Generative, Emotional, Interactive 3D Display," Proceeding of the ASIAGRAPH 2008, pp.115-120, 2008
- [14] Israr, A., Poupyrev, I., Ioffreda, C., Cox, J., Gouveia, N., Bowles, H., Brakis, A., Knight, B., Mitchell, K., Williams, T., "Surround Haptics: Sending Shivers Down Your Spine," Proceeding of ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies, 2011
- [15] Wii, Nintendo (<http://www.nintendo.com/wii/>)

- [16] Hachiya K., “Inter Dis-communication Machine,” PRIX ARS ELECTRONICA '96, Springer Wien New York., pp.138-139, 1996
- [17] Mozeika, A., E. Steltz, Jaegerm, J.M., “The First Steps of a Robot Based on Jamming Skin Enabled Locomotion,” International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2009), pp. 408-409, 2009
- [18] Brown E., Rodenberg N., Amend J., Mozeika A., Steltz E., Zakin M.R., Lipson H., Jaeger H. M., “Universal robotic gripper based on the jamming of granular material,” Proceedings of the National Academy of Sciences, 107(44), pp. 18809-18814, 2010.
- [19] Tamaki E., Miyaki T., Rekimoto J., “PossessedHand: Techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli,” Proceedings of ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2011), pp. 543-552, 2011.
- [20] Nishio S., Ishiguro H., Hagita N., “Geminoid: Teleoperated android of an existing person”, In Humanoid Robots, New Developments, I-Tech, pp. 343-352, 2007
- [21] Becker-Asano, C., Ogawa, K., Nishino, S. and Ishiguro, H. 2010. “Exploring the uncanny valley with Geminoid HI-1 in a real-world application”. In IADIS International Conference Interface and Human Computer Interaction 2011, pp. 121-128, 2011
- [22] Geminoid, <http://www.geminoid.jp/>
- [23] Ogawa K., Nishio S., Koda K., Balistreri G., Watanabe T., Ishiguro H., ”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.
- [24] Minato T., Yoshikawa Y., Noda T., Ikemoto S., Ishiguro H. and Asada M., “CB<sup>2</sup> : A child robot with biomimetic body for cognitive developmental robotics,” ” in Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2007
- [25] Zecca, M., Mizoguchi, Y., Endo, K., Iida, F., Kawabata, Y., Endo, N., Itoh, K., Takanishi, A., “Whole body Emotion Expressions for KOBIAN Humanoid Robot - preliminary experiments with different emotional patterns,” Proceedings of 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 387-394, 2009
- [26] 梶本, 触覚ディスプレイ, 計測と制御 (計測自動制御学会), Vol.47, No.7, 2008
- [27] Hashimoto Y., Kajimoto H.. “Emotional touch: a novel interface to display emotional tactile information to a palm,” ACM SIGGRAPH 2008 new tech demos, 2008
- [28] 中村太郎, 図解 人工筋肉, pp.47-111, 日刊工業新聞社, 2011
- [29] Heslin R., Nguyen T.D., Nguyen M.L., “Meaning of touch: the case of touch from a stranger or same sex person,” Journal of Nonverbal Behavior 7, pp.147-157, 1983
- [30] 神田通信工業, エアマッスル  
(<http://www.kanda.co.jp/jp/examples/medical/muscle/index.html>)
- [31] Chou C.P., Hannaford B., “Static and Dynamic Characteristics of McKibben Pneumatic Artificial Muscles ,” Proceedings of IEEE International Conference

- on Robotics and Automation (ICRA'94), pp.281-286, 1994
- [32] Kirman J.H., "Tactile apparent movement: The effects of interstimulus onset interval and stimulus duration", *Perception & Psychophysics*, Vol.15, No.1, 1974
- [33] Schunke, M., Schulte, E., Schumacher, U., プロメテウス解剖学アトラス 解剖学総論／運動器系, 医学書院, 2007
- [34] Grandjean D., Sander D., Pourtois G., Schwartz S., Seghier M.L., Scherer K.R., Vuilleumier P., "The voices of wrath: brain responses to angry prosody in meaningless speech," *Nature Neuroscience* 8, pp. 145-146, 2005