

電気通信大学 大学院情報理工学研究科

平成 25 年度修士論文

触覚フィードバックを用いた体性感覚の操作

学籍番号 1230033

氏名 栗原 洋輔

総合情報学専攻 メディア情報学コース

主任指導教員 梶本 裕之 准教授 印

指導教員 高玉 圭樹 教授 印

提出日 平成 26 年 1 月 30 日(木)

概要

人間が自らの肉体に対して持つ興味は大きい。多くの人間は体力的・知的・美的な面で他の人間よりも優れた肉体を欲すると考えられ、また様々な特殊な体を持つ空想上のキャラクターに憧れ人間とは異なる構造の身体に興味を持つ物も多いであろう。

だが身体機能の向上のためには通常長期間の継続した訓練を必要とし、人間とは異なる身体への変身は不可能であるといえる。科学技術の発展に伴い肉体形状および運動機能への物理的な介入方法が広まりつつあるが、未だに身体的リスクと金銭的成本が高く、複雑な装置を必要とするため誰もが気軽に利用できるものではない。

このような背景から本研究では、人間の肉体そのものに介入するのではなく、肉体が生成する感覚である体性感覚を肉体外部から操作することで肉体の主観的特性を操作することを目標とする。主に身体表面の感覚を刺激するアクチュエータとして広く使われているボイスコイル型振動子は、様々な触感の呈示を簡便なセットアップで実現できる。したがってこれを身体運動に同期させて駆動する振動フィードバックシステムを開発し、運動に伴って発生する身体内部の感覚を操作することを試みる。

体性感覚の操作に関する本研究は2つの戦略によって構成される。一つは体性感覚の「増強」である。これは自己身体運動を把握する能力を高め、より鮮明に、あるいは詳細に運動状態を知覚させる量的な操作である。一方で、もう一つの戦略は体性感覚の質的な操作である「変調」である。これは身体自体の硬さや重さといった特性を変化させることであり、結果として身体を構成する材質・構造を主観的に変調することになる。

これら2つの戦略に沿った具体的な手法を、体性感覚の増強に関して2件、変調に関しても2件設計した。

体性感覚の増強に関しては、第一にロータリスイッチの回転に伴うカチカチとした触覚・力覚フィードバック「カチカチ感」に着目した。これを肘関節に付与して運動時の体性感覚を鮮明化し、腕立て伏せ姿勢の教示を試みた(第3章)。第二に、自動車運転におけるアクセルペダルの操作を補助するため、ペダルの角度が一定値変化する度に瞬間的なクリック振動を呈示することで、ペダル角度の把握能力向上および操作性向上を試みた(第4章)。

体性感覚の変調に関しては、第一に様々な材質の衝突振動を再現する減衰正弦波モデルに着目し、これを身体運動に同期させて呈示することで身体材質感の変調を試みた(第5章)。これによりロボットやゴム人間といった特殊なキャラクターの体性感覚の再現を目指した。第二に、ロボットキャラクターのみに着目し、実際のロボットに生じる振動加速度を記録・モデリング・再生する手法によりロボットの内部構造に起因する体性感覚まで再現することを試みた(第6章)。またロボット感体験の総合的なリアリティ向上のため高品質な視覚・聴覚刺激を組み合わせたバーチャルリアリティゲームを開発した。

また体性感覚の操作をより広範囲で行うため、既存の触覚ディスプレイの問題点を考察し、身体広範囲に均等な触覚刺激を呈示する触覚ディスプレイを開発した(第7章)。

最後に本研究全体のまとめと結論を述べ、今後の展望を示す(第8章)。

目次

第 1 章	序論	1
1.1.	研究背景：肉体の操作	1
1.2.	体性感覚の増強	2
1.2.1.	感覚と運動制御	2
1.2.2.	体性感覚を増強する必要性	2
1.2.3.	触覚的手がかりの付与による運動機能の向上	3
1.3.	体性感覚の変調	4
1.3.1.	身体の材質・構造の変調	4
1.3.2.	身体構成物質が人間とは異なるキャラクター	4
1.3.3.	振動フィードバックによる特殊身体の体性感覚の再現	4
1.4.	研究目的	6
1.5.	本論文の構成	6
第 2 章	体性感覚	8
2.1.	触覚とは	8
2.1.1.	触覚の分類とハプティックス	8
2.1.2.	本論文における「運動感覚」および「身体感覚」の定義	9
2.2.	皮膚感覚	10
2.2.1.	機械受容器	10
2.3.	固有感覚	12
2.3.1.	肘関節の筋肉	12
2.3.2.	筋紡錘	13
2.3.3.	ゴルジ腱器官	14
2.3.4.	関節受容器	15
第 3 章	肘関節への「カチカチ感」付与による運動感覚の増強	16
3.1.	背景：運動教示	16
3.1.1.	一般的な運動教示における問題点	16
3.1.2.	先行研究：触覚呈示を用いた運動教示	16
3.1.3.	触覚呈示を用いた運動教示における問題点	18
3.1.4.	触覚の能動性を考慮した運動教示	19
3.1.5.	運動感覚の増強を用いた能動性を損なわない運動教示	19
3.2.	本研究の新規性	20
3.3.	ロータリスイッチがもつ触覚フィードバック「カチカチ感」	22
3.4.	腕立て伏せにおける肘屈伸運動の教示	23
3.5.	システム構成：カチカチ感呈示装置	24
3.5.1.	ばねと球を用いたカチカチ感呈示機構	24
3.5.2.	カチカチ感呈示原理	26

3.6.	実験1：限界まで大きく肘を屈伸する腕立て伏せにおける肘角度測定.....	27
3.6.1.	実験の目的.....	27
3.6.2.	実験環境.....	27
3.6.3.	実験手続き.....	28
3.6.4.	実験結果.....	29
3.6.5.	考察.....	30
3.7.	実験2：光学式モーションキャプチャシステムを用いた肘角度測定.....	32
3.7.1.	実験の目的.....	32
3.7.2.	実験環境.....	32
3.7.3.	実験手続き.....	32
3.7.4.	実験結果.....	33
3.7.5.	考察.....	35
3.8.	実験3：水平方向への腕屈伸運動の教示・再現.....	36
3.8.1.	実験の目的.....	36
3.8.2.	実験環境.....	36
3.8.3.	実験手続き.....	36
3.8.4.	実験結果.....	38
3.8.5.	考察.....	39
第4章	アクセルペダルへのクリック感付与による操作性向上.....	41
4.1.	背景：自動車の運転の難しさ.....	41
4.2.	先行研究：触覚を用いた運転補助システム.....	42
4.3.	既存の運転補助システムがもつ問題点.....	43
4.4.	アクセルペダルの踏み込み量知覚能力の増強.....	43
4.5.	アクセルペダル操作を補助する必要性.....	45
4.6.	システム構成：クリック感付きアクセルペダル.....	45
4.7.	実験1：ドライブシミュレータを使ったラップタイムとコースアウト確率の測定.....	47
4.7.1.	実験環境.....	47
4.7.2.	実験手続き.....	48
4.7.3.	実験結果・考察.....	49
4.8.	実験2：クリック感呈示回数の最適化.....	52
4.8.1.	実験環境.....	53
4.8.2.	実験手続き.....	53
4.8.3.	実験結果・考察.....	53
第5章	周期的な衝撃振動フィードバックによる身体材質感の変調.....	56
5.1.	背景：人体の材質の変調.....	56
5.2.	先行研究.....	57
5.2.1.	物体の触覚的特性の変調.....	57
5.2.2.	自己の身体感覚の変調.....	58

5.3.	Reality-Based approach による材質感の再現	59
5.4.	肘関節への離散的な振動フィードバック	60
5.5.	システム構成：肘関節の材質感変調	61
5.6.	実験：3つの材質の判別	63
	5.6.1. 実験手続き	63
	5.6.2. 実験結果	64
5.7.	考察	65
	5.7.1. 材質判別の正答率	65
	5.7.2. 振動を知覚した位置	65
	5.7.3. 振動呈示に伴う擬似反力の生起	66
	5.7.4. 本実験の改善すべき点	66
第6章	ロボット振動の記録・モデリング・再生を用いたロボットの身体感覚の再現.....	67
6.1.	背景：ロボットの身体への憧れ	67
6.2.	ロボット感とは	68
	6.2.1. ロボット感とアルミニウム感の違い	68
	6.2.2. モータ・ギヤによる高周波ノイズ	69
	6.2.3. 視覚・聴覚・体性感覚の融合	69
6.3.	Data-driven approach によるロボット感の再現	70
6.4.	ロボット振動の記録・モデリング・再生	70
	6.4.1. ロボットに生じる振動加速度の記録	70
	6.4.2. 線形予測符号化によるモデリング	71
	6.4.3. 振動モデルの再生	72
6.5.	実験：ロボット感の評価	74
	6.5.1. 実験環境	74
	6.5.1. 実験手続き	76
	6.5.2. 実験結果	76
6.6.	考察	77
	6.6.1. ロボット感の評価	77
	6.6.2. 抵抗感の評価	77
	6.6.3. ロボット感と抵抗感の相関関係	77
	6.6.4. 内観報告	78
6.7.	ロボット感体験 VR ゲーム「Jointonation」	80
	6.7.1. 没入感向上のための VR アプリケーション開発	80
	6.7.2. 2種類のロボット感の再現	81
	6.7.3. 運動停止後に生じる衝撃振動の再現	81
	6.7.1. システム構成：Jointonation	83
	6.7.2. 国際会議でのデモンストレーション	86
第7章	発泡ビーズの振動伝搬を用いた広範囲触覚ディスプレイ	88

7.1.	背景：身体広範囲への触覚呈示	88
7.2.	先行研究：ビーズの空気圧制御を用いた触覚ディスプレイ	90
7.3.	前腕部用の触覚ディスプレイ	91
	7.3.1. 予備実験	92
7.4.	実験：ビーズを介した振動知覚検証	92
	7.4.1. 実験環境	92
	7.4.2. 実験条件	92
	7.4.3. 実験手続き	93
	7.4.4. 実験結果	93
7.5.	考察	94
	7.5.1. 腕部広範囲への振動伝搬	94
	7.5.2. 被験者による内観報告	95
7.6.	触覚的花火体験装置“からだ花火”	95
	7.6.1. システム構成：からだ花火	96
	7.6.2. 子供へのデモンストレーション	96
7.7.	全身への触覚呈示に向けて	98
	7.7.1. 脚部への触覚呈示	98
	7.7.2. 胴体への触覚呈示	99
	7.7.3. 全身への触覚呈示	100
第8章	結論	101
8.1.	本論文のまとめ・目的の達成度	101
8.2.	総合考察	102
	8.2.1. 煩わしい装着品の感覚を逆利用し没入感を高める設計	102
	8.2.2. 体性感覚の操作によるユーザの行動の変化	103
8.3.	今後の展望	104
	8.3.1. 体性感覚の増強	104
	8.3.2. 体性感覚の変調	105
	謝辞	108
	参考文献	109
	関連発表	115

図表目次

図 1-1 体性感覚増強のイメージ	3
図 1-2 身体材質感の変調	5
図 1-3 本論文の概要	7
図 2-1 触覚の受容部位・知覚現象による分類	8
図 2-2 ヒトの手掌や足底などの被圧した皮膚無毛部の断面[23].....	11
図 2-3 肘関節の主な筋[24].....	12
図 2-4 筋紡錘とその感覚神経支配[24].....	13
図 2-5 ゴルジ腱器官[24].....	14
図 2-6 筋の固有感覚受容器の機構[24].....	15
図 3-1 振動フィードバックを用いたボートを漕ぐ動作の教示[25].....	17
図 3-2 振動呈示に用いられる振動子の例.	18
図 3-3 振動フィードバックによるヴァイオリン演奏姿勢のエラー矯正[27].....	18
図 3-4 力覚の能動性を活用した筆記運動の教示[37].....	19
図 3-5 運動前の感覚呈示（上）と運動後の感覚呈示（下） [44].....	20
図 3-6 触覚コンタクトレンズ[45].....	21
図 3-7 体毛一毛包受容器構造を模した皮膚感覚増強機構[46].....	21
図 3-8 自動車内のダッシュボードに取り付けられたロータリスイッチ.....	22
図 3-9 正しい腕立て伏せの姿勢（左）と誤った腕立て伏せの姿勢（右）	23
図 3-10 腕立て伏せ時のカチカチ感呈示イメージ	23
図 3-11 ばね機構を用いたカチカチ感呈示装置.....	24
図 3-12 ジョイント部の内部構造	25
図 3-13 腕部に装着したカチカチ感呈示装置	25
図 3-14 ばね機構を用いたカチカチ感呈示原理	26
図 3-15 実験設備：カチカチ感呈示装置と肘角度測定システム.....	27
図 3-16 実験の様子：限界まで大きく肘を屈伸する腕立て伏せ.....	28
図 3-17 3種類の呈示感覚と肘の左右における肘屈伸範囲の比較.....	29
図 3-18 3種類の呈示感覚における肘屈伸角度の時間的変化.....	30
図 3-19 カチカチ感の付与による運動量錯覚効果	31
図 3-20 実験設備：光学式モーションキャプチャシステム.....	33
図 3-21 実験の様子：光学式モーションキャプチャを用いた肩の高さ測定.....	33
図 3-22 肩の高さの時間的変化（90度屈伸）	34
図 3-23 肩の高さの時間的変化（MAX屈伸）	34
図 3-24 カチカチ感呈示装置装着時における腕部の肉の変形.....	35
図 3-25 水平方向への腕屈伸運動を計測する設備	37
図 3-26 水平方向への腕屈伸の教示と再現の様子	37
図 3-27 教示時と再現時の軌跡の比較	38

図 3-28 教示軌跡と再現軌跡の差の比較	39
図 3-29 姿勢安定効果の応用例	40
図 4-1 自動車運転に必要なタスク	41
図 4-2 安全性向上のための車両搭載技術.	42
図 4-3 触覚フィードバックを用いた運転補助システムの例.	43
図 4-4 クリック感を付与したアクセルペダル	44
図 4-5 車両相互事故の類型別発生件数[69].....	45
図 4-6 ペダル踏み違い事故の運転者死亡率（平成 12～21 年合計） [70].....	45
図 4-7 一定の踏み込み角度ごとにクリック感を提示するアクセルペダル.....	46
図 4-8 GRAN TURISMO[71]のグラフィックと現実写真の比較.....	47
図 4-9 専用運転座席と組み合わせたステアリング・ペダルコントローラ.....	47
図 4-10 実験 1：ドライブシミュレータを使った実験の様子.....	48
図 4-11 平均ラップタイムの推移	50
図 4-12 コースアウト確率の推移	50
図 4-13 振動による物体－皮膚間の摩擦係数変化を用いた垂直方向への力覚呈示[72].....	52
図 4-14 分解能 3, 5, 7, 9 に対するアクセルペダルの位置および操作性の評価.....	54
図 5-1 運動入力を用いてキャラクターになりきるゲームの例（左：[73], 右：[74]）	56
図 5-2 人体の材質感変調のイメージ 左から順にゴム, 木材, アルミニウムの腕を示す. .57	57
図 5-3 振動加速度の記録・モデリング・再生によるテクスチャ感の再現[79].....	58
図 5-4 物体の触覚的特性の変調	58
図 5-5 肘部筋紡錘への振動刺激による伸展錯覚とピノッキオ錯覚[90].....	59
図 5-6 衝突振動の計測（左）と減衰正弦波モデルのフィッティング（右） [12].....	60
図 5-7 周期的な減衰正弦波振動フィードバック	61
図 5-8 肘関節の材質感を変調するプロトタイプシステム.....	62
図 5-9 材質判別実験の様子	63
図 5-10 質問 1 および質問 2 に対して Yes と回答した確率.....	65
図 6-1 人体のロボット化のイメージ	67
図 6-2 ビデオゲーム用振動フィードバックデバイス.	68
図 6-3 ロボットの関節に生じる振動の記録	71
図 6-4 線形予測符号化によるロボット振動のモデリング.	72
図 6-5 ロボット感呈示システムの構成	73
図 6-6 研究室でデモンストレーションにおける体験者の反応.....	74
図 6-7 ロボット感呈示実験の様子	75
図 6-8 ロボット感の評価（左）と抵抗感の評価（右）	76
図 6-9 ロボット感と抵抗感の相関関係	78
図 6-10 ロボット感体験 VR ゲーム「Jointonation」	80
図 6-11 人間サイズのヒューマノイドロボットと巨大ロボットの 3D モデル[106].....	82
図 6-12 広視野角・立体視対応 HMD を用いた VR 体験[107].....	83

図 6-13 ゲームの流れ.....	85
図 6-14 国際会議 SIGGRAPH Asia でのデモンストレーションの様子.....	86
図 7-1 触覚フィードバックを用いた視聴覚コンテンツの臨場感向上システムの例.....	88
図 7-2 発泡ビーズの振動伝搬による触覚ディスプレイ.....	89
図 7-3 変形可能なテーブルトップ型触覚ディスプレイ「ClaytricSurface」.....	90
図 7-4 PMC による力覚呈示システム（右）と変形可能な靴（左）.....	90
図 7-5 減圧による発泡ビーズの硬化.....	91
図 7-6 直接刺激（左）とビーズ刺激（右）.....	93
図 7-7 右腕の各部位で感じられた振動強度.....	94
図 7-8 「からだ花火」体験の様子.....	95
図 7-9 圧縮袋に詰め込まれた発泡ビーズ入りストッキングの束.....	96
図 7-10 「からだ花火」装置のデモ会場でのセットアップ.....	97
図 7-11 「からだ花火」の子供へのデモンストレーション.....	97
図 7-12 足湯型触覚ディスプレイのプロトタイプ.....	98
図 7-13 胴体用触覚ディスプレイのプロトタイプ.....	99
図 7-14 全身触覚ディスプレイのプロトタイプ.....	100
図 8-1 カチカチ感をもつアクションフィギュア用関節「リボルバージョイント」 [125] ...	104
図 8-2 水と風の振動計測の様子.....	106
図 8-3 研究室内で行った風の振動呈示デモンストレーション.....	107

第1章 序論

1.1. 研究背景：肉体の操作

我々は人間である。人間は基本的に皆同様の肉体と運動機能を持ち、同様の生命活動を行う。生物学的に人間である限り、人種や性別が異なってもこの性質は変わらない。

このような事実とは対照的に、人間は「他の人間よりも秀でた肉体を持ちたい」という願望を持っていると考えられる。例えばスポーツ選手は競技力向上のために競って肉体を強化させ、一般人であってもより強く美しい肉体を目指して様々な努力を重ねている者は多いと推測される。

またそもそも人間であることから離れて「人間ならざる肉体を持ちたい」と考える人間もいる。例えば巨大ロボットやゴム人間といった人間の想像から生まれた架空のキャラクターは、現実世界の人間にはない身体的特性を持つ。その特殊な身体は人間の体しか体験したことのない我々にとって興味深いものであり、キャラクターの身体に「変身」したいという憧れを持つ者は多い。

しかしながら、身体機能の向上のためには通常長期間の継続した訓練を必要とし、また人間とは異なる身体への変身はそもそも人間の身体的成長によって達成できるものではない。人間の身体特性を短期間で人工的に操作する技術としては、薬物の服用や整形外科手術、また外骨格スーツの装着が考えられ、これにより身体機能の向上や身体形状の改変が可能である。しかし人体という複雑かつ未知の領域が多いものに直接介入するため身体にかかる負荷と金銭的負担が大きく、また複雑な装置が必要となる。したがって誰もが気軽に利用できるものではなく、より低リスク・低コストでの簡便な手法が求められる。

そこで本研究では、人間の肉体そのものを直接操作するのではなく、肉体が生成する「感覚」を操作することで人体の特性を実質的に改変することを目指す。

人間の肉体と深く結びついた感覚は体性感覚と呼ばれる。体性感覚は物体に触れた際に物体の性質を知覚する感覚の他に、筋や腱など自己身体そのものの感覚も含まれており、身体運動の制御において重要な役割を持つ[1]。また我々は夢か現実かを判断するために自己の身体をつねるといった行動をとることから、体性感覚は自己帰属性（自分の身体が現実の自分の身体であると信じること）の認識についても、無意識のうちに大きく貢献していると考えられる。

したがって、体性感覚を操作することで実質的には身体そのものを操作した場合と等価な効果が得られると考えられる。これはバーチャルリアリティ（以後 VR と呼ぶ）という現実の知覚現象と本質的に等価な現象を人工的に再現する分野の考え方でもある[2]。

本研究では、主に2つの戦略から体性感覚の操作を試みる。一つは体性感覚の「増強」である。これは自己身体運動を把握する能力を高め、より鮮明に、あるいは詳細に運動状態を把握させるといった量的な操作である。これに対してもう一つの戦略は、体性感覚の質的な操作に相当する「変調」である。言い換えると、人体とは異なる材質・構成をもつ身体が得ているであろう体性感覚を再現することである。本論文では体性感覚の「増強」と「変調」という2つの戦略を用いて、身体を人工的に操作する手法を提案・検証しその応用先を示す。

1.2. 体性感覚の増強

1.2.1. 感覚と運動制御

人間は様々な感覚を手がかりにして己の肉体を知る。視覚によって身体の動きを確認し、触覚によって身体の接触状態や力加減を認識する。また聴覚によって音源と自分身体の位置関係を推定する。これら複数の感覚が脳で統合されることによって、我々は自己身体の状態を把握し、それに適した運動を行うことができる[3][4]。

五感の一つである触覚の生理学的呼称が体性感覚であり、身体運動制御において重要な役割を持つ。例えば手で物を持ち上げる動作は一見とても簡単な動作に思えるが、無駄な力をかけず、かつ落とさないように把持するという複雑な運動制御を行っている。これは手指に加わる圧力や摩擦に加え筋肉の努力感や関節の回転角といった感覚を得て、それに応じた把持力のフィードバック制御を行うことによって実現されている[5]。我々が普段行っている運動には、たとえ意識していなくても自身の肉体からの体性感覚フィードバックが大きく貢献しているのである。

1.2.2. 体性感覚を増強する必要性

運動という出力のために体性感覚という入力が必要であるということは、より難易度の高い運動を行うためにより高度な体性感覚が必要であるということの意味する[6]。例えばプロスポーツ選手が難しい競技動作を正確に行えるのは、訓練によって所望の運動姿勢とそうでない姿勢のわずかな違いを識別する感覚を獲得しているからであると考えられる。また金属加工品などの表面を検査する職人は、熟練者であれば通常は気づかない微小な凹凸を検知ことができ、その凹凸を無くすよう絶妙な力加減で表面を研磨することができる。

スポーツや専門手技以外においても、より高度な感覚・運動能力が必要とされる場面は存在する。例えば自動車の運転は多くの人が行うが、これは視覚、聴覚、触覚（体性感覚）を複合的に扱う難しいタスクである。しかもひとたび運転操作を誤れば死亡事故に繋がる。運転免許取得までの訓練で身に付けるのは最低限の技能であり、交通事故をより減らすためにはアクセル・ブレーキペダルの操作といった運転技能の向上が求められる。

しかし 1.1 節でも示したように、体性感覚および運動制御の訓練は通常長期間に渡るものである。特にプロスポーツ選手や熟練技師に匹敵する感覚を得るためには数年～数十年もの訓練期間が必要な場合もあり、誰もが簡単に獲得できるものではない。したがって、より時間的・金銭的コストの低い手法で体性感覚を鍛える手法が求められる。

1.2.3. 触覚的手がかりの付与による運動機能の向上

体性感覚が鍛えられていない初心者は自己姿勢の詳細が把握できないため、複雑な運動を行うことが難しいといえる。頭の中で理想的な運動姿勢をイメージし、その通り運動しているつもりでも、実際には間違っていることが多い。

そこで本研究では、人間が本来持たない新たな触覚の手がかりを身体運動に付与することで、人工的に体性感覚を増強させ、自己身体の運動姿勢をより把握しやすくさせることを試みる（図 1-1）。私は体性感覚の増強に関して 2 つの手法で具体化した。

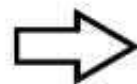
第一に、自動車内のダイヤルが返すようなカチカチとした触力覚フィードバック「カチカチ感」に着目し、これを人間の肘関節に適用する装置を開発して肘屈伸感覚の増強を試みた。腕立て伏せ時に疲労が溜まると肘屈伸姿勢が崩れてしまうことから、カチカチ感呈示を用いて肘屈伸運動の教示を行った。検証実験の結果、残念ながら正しい腕立て伏せ姿勢の教示は達成できなかったが、同じ姿勢の繰り返し運動の補助になるという新たな発見が得られた。

第二に、自動車アクセルペダルの踏み込み量に応じて振動フィードバック「クリック感」をペダルに呈示することで、ペダル踏み込み量の把握を補助することを試みた。ドライブシミュレータを用いた検証実験の結果、クリック感フィードバックがアクセルペダルの操作性向上に貢献し、安全運転を促進することを明らかにした。

不鮮明な体性感覚



触覚的手がかり
の付与



鮮明な体性感覚



図 1-1 体性感覚増強のイメージ

1.3. 体性感覚の変調

1.3.1. 身体の材質・構造の変調

人間は視聴覚に頼らずとも触覚の手がかりによって物体の材質や構造を判別することができる。例えば物体に触れる、叩く、なでる、つまむといった方法で対象物の特性を探り、柔らかく、軽く感じたのであればその特性を満たす触感は綿やスポンジなどを連想するだろう。逆に硬く、重く感じた場合は鋼鉄などを想起させる。また鋼鉄製の大きな物体が軽かった場合は、その内部が空洞であると考えられるだろう。したがって物体がもつ触覚的特性の操作は、対象物の材質や構造の操作を意味する。

それでは、この操作を人間の肉体に適用したら何が起こるだろうか。自己身体の触覚的特性を操作することは、皮膚や筋から得られる感覚を質的に操作すること、つまり体性感覚の変調に相当する。その結果もたらされるのは「身体の材質・構造の変調」である (図 1-2)。

1.3.2. 身体構成物質が人間とは異なるキャラクター

ここで、映画、漫画、アニメなどによって描かれるフィクション作品について考える。日本で生み出されたこれらのコンテンツは世界中で高い人気を誇っており、国家プロジェクトとしてこれらの市場を拡大しようという動きもある[7]。このような人気の原因として、作品に登場するキャラクターの魅力が考えられる。非現実の世界では、現実には存在しない特殊なキャラクターが数多く登場する。例えば巨大ロボット[8]やゴム人間[9]など身体の材質や構成が人間とは異なるキャラクターがそれに該当する。たとえ架空の存在であると分かっているとしても、作品内の描写から分かる身体的特性、例えばロボットが持つ鋼鉄の皮膚や、ゴム人間が持つ伸縮自在の腕は極めて興味深く、多くの視聴者が一度はその体になってみたいと思うだろう。

したがって、本項で挙げたような特殊な身体を持つキャラクターになりきるエンタテインメントシステムは世界的に高い需要があるといえる。本システムが一般ユーザでも利用できるような簡便かつ低価格の装置で実現できれば、それが世界に与えるインパクトは計り知れない。同時に日本のコンテンツ産業と結びつき経済発展にも貢献する可能性も考えられる。

その特殊な身体のカラクターになりきるシステムの核をなす技術こそ、1.3.1 項で示した「体性感覚の変調」であると考えられる。身体の材質・構造が人間と異なるのであれば、その体性感覚も人間とは異なり特定の材質・構造らしい感覚になることが想像できる。このような特殊な体性感覚を再現することは、特殊な身体のカラクターになりきる体験のリアリティを向上させると期待できる。

1.3.3. 振動フィードバックによる特殊身体のカラクターの体性感覚の再現

特殊な身体のカラクターを再現するとしても、体性感覚をどのように変調しどのような感覚を再現すればよいのかを知る者はいない。全ての人間の身体は同様の構造をしており、誰もが同質のカラクターを得ているからである。しかし、これまでに知られている人間の触覚メカニズムと、物体の材

質感を人工的に変化させる手法から、特殊な身体になりきる体験を体性感覚的に再現できる可能性が見えてきた。

本研究では、物体の触覚的特性を再現する振動モデルに着目し、これを身体運動に同期させて身体に呈示することで体性感覚を変調する手法を提案する。本手法により、視覚・聴覚のみならずキャラクターの体性感覚まで再現したバーチャルリアリティシステムを開発し、高い没入感を備えた新たなエンタテインメント体験を創出することを目指す。体性感覚の変調に関して2つの手法で具体化した。

第一に、ゴム・木材・アルミニウムの衝突時に生じる振動を再現する減衰正弦波モデル[11][12]に着目し、これを用いて肘関節の材質感を変調することを試みた(図 1-2)。肘屈伸運動に応じて本振動モデルを肘関節へ周期的に呈示することで、肘を屈伸させた際の体性感覚をゴム・木材・アルミニウムらしくするシステムを開発した。検証実験の結果、被験者は3種類の材質を正確に判別し認識することができた。

第二に、フィクション作品に頻繁に登場するロボットの身体感覚に着目し、身体の材質のみならずギヤやモータといった構造の感覚まで再現することを試みた。実際のロボットアーム駆動時に関節に生じる振動を記録・モデリングし、人間の肘関節の動きに合わせて再生することでロボットらしい身体感覚を再現するシステムを開発した。また振動の呈示にロボットらしい見た目(視覚)と効果音(聴覚)を組み合わせ、視覚・聴覚・触覚的にロボットになりきるバーチャルリアリティエンタテインメントシステム「Jointonation」を開発した。



図 1-2 身体材質感の変調

1.4. 研究目的

本研究の目的は、人間の体性感覚を人工的に操作することによって人体の主観的特性を操作することである。本論文ではこれを実現するための具体的な手法を提案・検証し、その応用先を示す。従来から肉体に人工的に介入する手法は提案されてきたが、侵襲的・化学的手法は身体的リスクが高く複雑高価な装置が必要であった。本研究では主に身体表面への触覚呈示を用いて従来の手法よりも低リスク・低コストかつ簡便な手法で体性感覚を操作し、身体特性が実際に変化した場合と同等の知覚現象を再現することを目指す。

1.5. 本論文の構成

本論文の構成概要を図 1-3 に示す。

第 1 章では、研究背景として人間の肉体の操作に対する需要を示し、これを低リスク・低コスト・簡便な機構で実現することを目的として「体性感覚の操作」を提案した。体性感覚を操作する 2 つの戦略として、体性感覚の量的な操作である「増強」と質的な操作である「変調」について例を挙げて説明した。

第 2 章では、人間の触覚メカニズムおよび運動制御プロセスの基礎的知見を生理学の観点から説明する。

第 3 章では体性感覚増強の第一手法として、離散的な触力覚フィードバック「カチカチ感」の肘関節への付与を提案する。また腕部装着型カチカチ感呈示装置の開発について説明し、これを用いた腕立て伏せの運動姿勢教示について検証実験を行う。

第 4 章では体性感覚増強の第二手法として、自動車アクセルペダルへの「クリック感」付与を提案する。運転学習効果についてドライブシミュレータを使った実験により効果を示す。

第 5 章では体性感覚変調の第一手法として、減衰正弦波モデルを用いた衝撃振動の呈示による肘関節の材質感変調について述べる。さらに材質感判別実験によって 3 つの材質感が呈示可能であることを示す。

第 6 章では体性感覚変調の第二手法として第 5 章での知見を元に、ロボット振動の記録・モデリング・再生を用いたロボットの身体感覚の再現を提案する。またエンタテインメント技術としての応用可能性を示すため、ロボットらしい視覚・聴覚と組み合わせたバーチャルリアリティシステムの開発についても述べる。

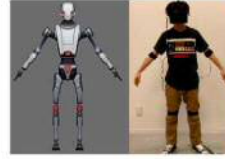
第 7 章では、体性感覚の変調をより身体広範囲に適用するため全身触覚ディスプレイが必要となることを示し、現在の問題点を考察する。さらにこれらを考慮して開発した発泡ビーズの振動伝搬による広範囲触覚ディスプレイについて説明する。また本触覚ディスプレイを用いた振動知覚実験とアプリケーションシステムについて報告する。

最後に第 8 章で本論文のまとめおよび結論と今後の展望を示す。

運動知覚能力の向上による
効果的な運動学習



SF キャラの特異な身体感覚を
再現したなりきり VR ゲーム



目的：人体特性の操作

物理的に操作しなくても
本質的には等価

低リスク・低コスト・簡便な機構
での実現

手法：体性感覚の操作

(人体特性の知覚的な操作)

戦略 1. 体性感覚の**増強**

量的な操作

- 動きがより鮮明に分かる
- 位置がより鮮明に分かる
- 運動量が増えたように感じる

第 3 章：腕立て伏せ時の「カチカチ感」付与による
運動感覚の増強



第 4 章：アクセルペダルへのクリック感付与による
操作性向上

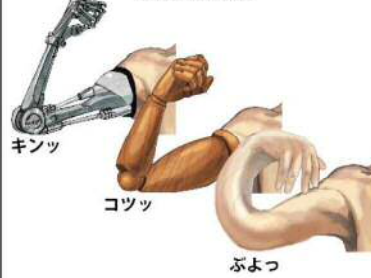


戦略 2. 体性感覚の**変調**

質的な操作

- 重さ感が変わる
 - 大きさ感が変わる
 - 摩擦感が変わる
- 材質・構成
が変わる

第 5 章：周期的な衝撃振動フィードバックによる
身体材質感の変調



第 6 章：ロボット振動の記録・モデリング・再生
を用いたロボットの体性感覚の再現



触覚ディスプレイ

(体性感覚操作のための道具)

[全身性]

- 身体広範囲への対応

[再現性]

- 身体部位・ユーザごとにばらつきのない刺激

[体験容易性]

- 体験準備に時間・手間がかからない

第 7 章：発泡ビーズの振動伝搬を用いた
広範囲触覚ディスプレイ



図 1-3 本論文の概要

第2章 体性感覚

2.1. 触覚とは

2.1.1. 触覚の分類とハプティクス

本章では、本論文で用いる触覚に関する用語を定義すると共に、触覚メカニズムと運動制御プロセスについて解説する。触覚とは一般には五感の一つであると認知されているが、触覚の定義および分類には文献や時代により違いが見られ、同じ用語でもそれに対応する感覚が一部異なる場合もあるなど混乱を極めている。しかしながら大まかには図 2-1 上のように、受容器の存在する場所によって分類されている。

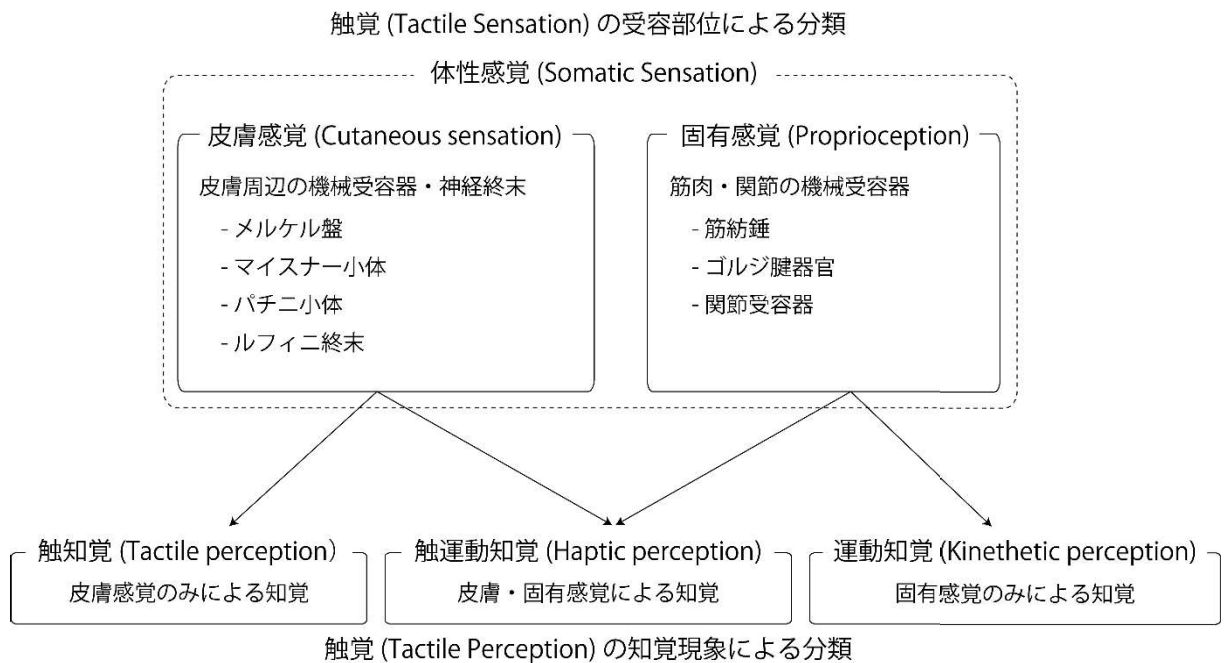


図 2-1 触覚の受容部位・知覚現象による分類

本論文で扱わない温度感覚，痛覚，内臓感覚などは図からは除いてある。

触覚の生理学的呼称である体性感覚は、受容器の存在する場所によって皮膚感覚と固有感覚に大別される[3][13] (図 2-1 上)。皮膚感覚とは、皮膚下に存在する機械受容器，温度受容器，痛覚受容器によって生じる感覚であり，触覚（接触の感覚）や圧覚，温度感覚や痛覚などを指す。一方で深部感覚とは，筋・腱・関節などに存在する機械受容器から得られる四肢の動きや位置，また力の感覚である[14][15]。

皮膚感覚と固有感覚は同時に生じる場合が多く，これらが協調して生じる複合的な知覚の概念を表すのが「ハプティクス (Haptics)」[14][17]という言葉である。ギリシャ語の「結合」に由

来するこの言葉は触覚について議論する上で極めて重要なキーワードであり、「アクティブタッチ」[18]と呼ばれる「能動的に触れる動作が知覚に重要である」という考えを元に提案された。例えば人が触覚によって物体の表面情報を得ようとするときには、多くの場合指を能動的に動かすため、皮膚感覚と固有感覚は協調するものと考えられる。我々の日常生活において生じるほとんどの触覚的知覚現象がハプティクスであり、日常的に使われる「触覚」という言葉に比べるとハプティクスはより本質をとらえた言葉であるといえる。

ハプティクスの考えから、皮膚感覚と固有感覚の協調の度合に応じて知覚現象としての触覚を三つに分類することが出来る(図 2-1 下)。第一の触覚は触知覚であり、皮膚感覚のみによる知覚である。第二の触覚は触運動知覚であり、皮膚感覚と運動感覚が相互に結合して処理されることで得られる。第三の触覚は運動知覚であり、皮膚感覚によらない知覚である。

本論文は人間に固有感覚を人工的に呈示する手法について扱う。したがって受容部位の分類としては固有感覚の呈示を、知覚現象としては運動知覚および触運動知覚の呈示を目的とする。

2.1.2. 本論文における「運動感覚」および「身体感覚」の定義

触覚に関わる分野ではほぼ同義で使われる異なる用語が多数存在し、それぞれ意味合いがわずかに異なる。よって混乱を避けるため各用語の違いをここで示し、本論文の各章ではそれぞれ適切であると思われる語を用いる。体性感覚の増強に関する第3章・第4章では固有感覚に相当する語として「運動感覚」を用いる。体性感覚の変調に関する第5章・第6章では体性感覚に相当する語として「身体感覚」を用いる。

2.1.2.1. 固有感覚に相当する語

固有感覚 (Proprioception)

その語の通り「固有の・自分自身の」という意味を強調する場合に用いられる。「自己受容感覚」と表記する場合もあるが、英語では同様に Proprioception である。

深部感覚 (Deep sensation)

皮膚感覚が身体の表面および表面付近で生じる感覚であるのに対し、身体の深部で生じる感覚であることを意味する[3][13]。深部感覚には深部組織に起こる痛覚(深部痛覚)および圧覚(深部圧覚)も含まれる[20][1]。生理学よりも解剖学的な語である[3]。

運動感覚 (Kinethesia)

固有感覚は平衡感覚(前庭感覚)を含む場合もあるが[21]、一方で運動感覚はこれを含まない。また固有感覚が位置と潜在意識[22]に着目した感覚であるのに対し、運動感覚は動きと行動に着目した感覚である[13][19]。本論文第3章・第4章では主に人間の動きによって生じる感覚について議論するため、運動感覚という語を用いる。

2.1.2.2. 体性感覚に相当する語

体性感覚 (Somatic sensation)

「体性」は「内臓」と対立する語として理解されているため、内臓感覚を含まないことが読み取れる[3]。触覚という語がもつ曖昧さを回避するため、生理学・解剖学といった専門分野では多くの場合この語が使われる。

身体感覚 (Body sense)

元々は一般感覚と呼ばれる視覚・聴覚・嗅覚・味覚以外の全感覚指す語であったが、現在では体性感覚に相当する語となっている[3]。体性感覚は人間もしくはその他動物を対象に用いられるが、本論文第5章・第6章ではゴム・木材・金属といった生体物質によらない身体を扱う。そのため体性感覚とは区別して、動物に限らない「身体感覚」という意味で身体感覚という語を用いる。

2.2. 皮膚感覚

ヒトの身体表面は皮膚で覆われている。皮膚に刺激が与えられた時に生じる感覚が皮層感覚である。皮膚の機械的変形は皮膚内部にある機械受容器で受容される。機械受容器内部には、末梢から中枢へと触覚情報を伝える一次求心性神経線維の末端が侵入している。皮膚に機械的刺激が与えられると、周辺の皮膚組織に歪みが生じる。これを機械受容器が感受し、固有の神経信号が生成され、大部分は脊髄や視床などを経由して大脳の中心溝後部にある中心後回に伝えられる。中心後回の皮質領域（一次体性感覚野）では、あらゆる種類の体性感覚情報が入力され、統合的・階層的な処理が行われる[15][24]。

一次体性感覚野で処理された情報は、二次体性感覚野や頭頂連合野などのより高次の皮質領域での情報処理を経て、運動制御に関与し、主観的感覚を呼び起こす。

2.2.1. 機械受容器

ヒトが外界とやりとりする際には、皮膚が肥厚した3つの無毛部である手指、手掌および足底が主要な役割を演じる。そこには多量の情報を受容するために受容器が集中していて、それらの形態的分類もルフィニ終末を除き明確である。図 2-2 はヒトの手掌や足底などの肥厚した皮膚無毛部の断面を示している。機械受容器としてはメルケル盤、マイスナー小体、パチニ小体、ルフィニ終末の4種が存在しているといわれており、各機械受容器はそれぞれ応答する刺激周波数が異なる[3][13][14][23]。また皮膚下に存在する密度もそれぞれ異なる。

なお有毛部においては、体毛とその根元に存在する毛包受容器によって人間の皮膚が知覚できない微小な力（そよ風・水面など）を検出している[3]。

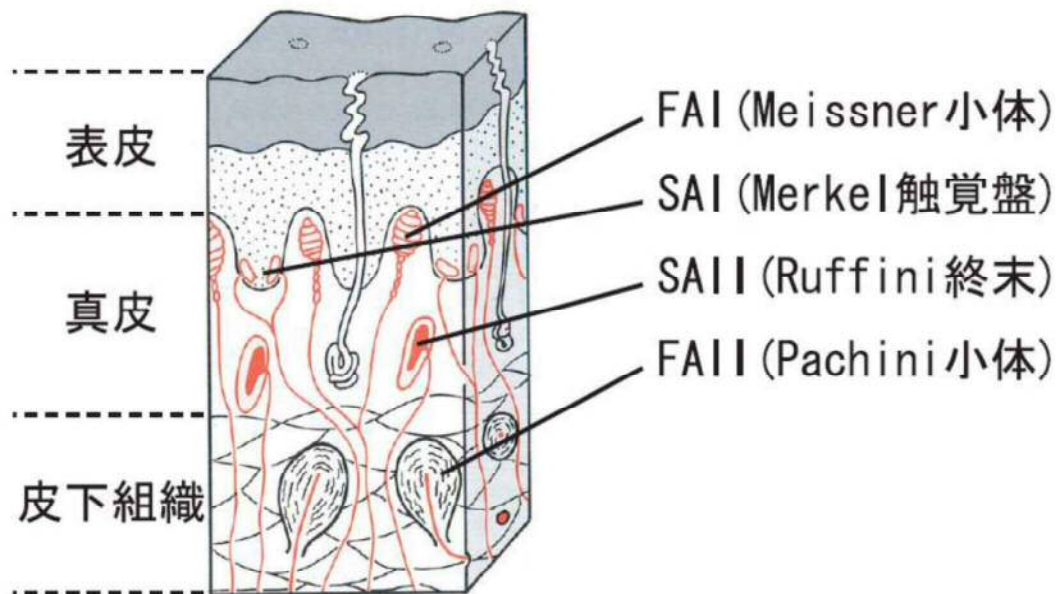


図 2-2 ヒトの手掌や足底などの被圧した皮膚無毛部の断面[23]

メルケル触覚盤 (Merkel disk)

メルケル触覚盤は皮膚下 0.9mm に密 (140 units/cm²) に存在する。メルケル触覚盤は、他の 3 つの機械受容器とは構造が異なり、メルケル細胞と神経終末が狭い隙間を挟んで対置する構造となっており、唯一の細胞性受容器である。静的な歪みに応答し、発火頻度はその大きさに比例する。単独の活動では純粋な圧覚を生成する。

マイスナー小体 (Meissner corpuscle)

マイスナー小体は皮膚下 0.7mm に密 (80 units/cm²) に存在する。低周波振動 (15~100Hz) に応答し、30Hz で共振する。5Hz~40Hz のパタパタとした感覚 (Flutter vibration) はマイスナー小体が単独で担っている。

パチニ小体 (Pacini corpuscle)

パチニ小体は皮膚下 2mm 以上の深部に疎ら (20 units/cm²) に存在する。高周波振動 (60~800Hz) に応答し、240Hz で共振する。単独の活動では音叉に触れたような振動感覚や指全体の痺れを生成する。本研究において用いる振動刺激の多くが約 240Hz である理由の一つは、このパチニ小体の共振周波数に合わせて振動を知覚しやすくするためである。

ルフィニ終末 (Ruffini ending)

ルフィニ終末は皮膚下 2mm 以上の深部に疎ら (10 units/cm²) に存在する。静的な横ずれに応答し、発火頻度はその大きさに比例する。単独の活動では感覚を生じない。

2.3. 固有感覚

固有感覚の受容器は主に筋紡錘，ゴルジ腱器官，関節であり，一部は前項で説明したルフィニ終末，パチニ小体などの触圧覚受容器も貢献していると考えられている[3].

2.3.1. 肘関節の筋肉

身体の大部分を構成する筋は骨格筋と呼ばれ，関節の周囲の骨や頭部にある眼球を動かし，呼吸や顔の表情をコントロールし，そして声を出させる．それぞれの骨格筋には数百の筋線維があり，それぞれの筋線維は中枢神経から1本の軸索によって支配されている[24].

図 2-3 に肘関節の主な筋肉を示す．屈曲を起こす主な筋は上腕筋と上腕二頭筋であり，これらの筋はともに肘関節の屈筋と呼ばれ，屈曲の際に一緒に機能することから，互いは協同筋であるという．一方で肘関節の伸展における協同筋は上腕三頭筋と肘筋であり，ともに伸筋と呼ばれる．屈筋と伸筋は逆の方向へ関節を引っ張るため，互いを拮抗筋という[24].

筋は関節を引っ張って開くだけで，押して閉じることはできない．肘関節の単純な屈曲でさえ屈曲方向の協同筋の調節された収縮，および伸展方向の拮抗筋の弛緩を必要とする．このためにヒトの筋肉は1つではなく，屈筋と伸筋の2つがついているのである．また，屈筋と伸筋の収縮量の差をとることで，筋肉の硬さを変えることができる．すなわち，外力に対する抵抗力を変化させることで，我々は優しく触れる・強く触れるといった制御が可能となる．

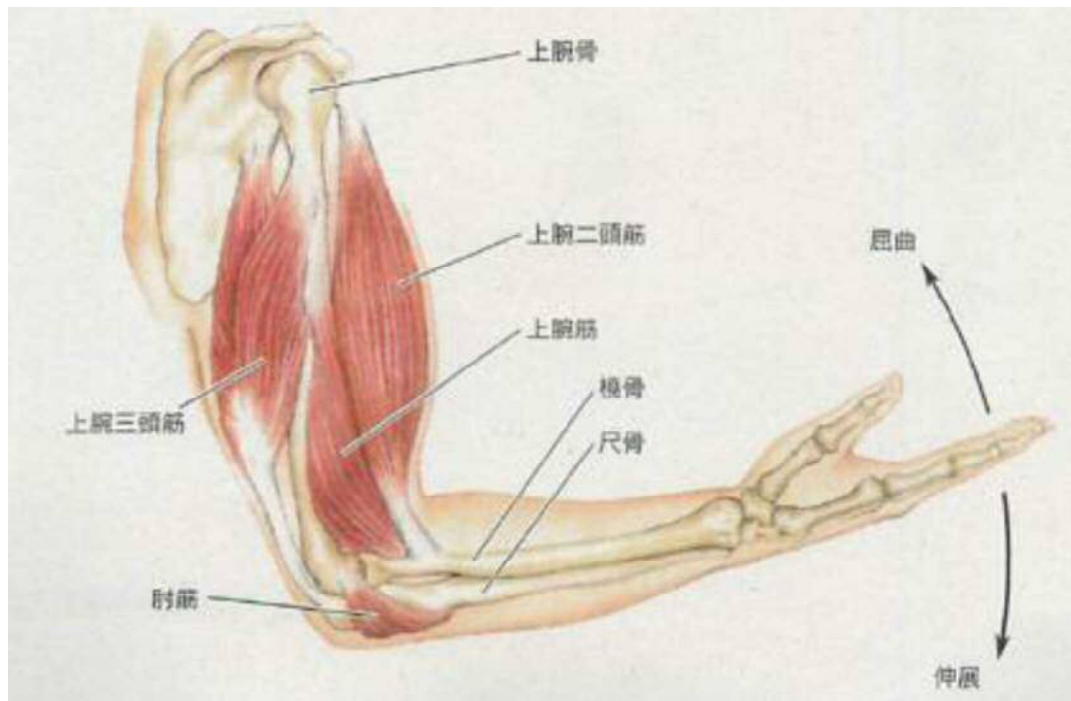


図 2-3 肘関節の主な筋 [24]

2.3.2. 筋紡錘

ほとんどの骨格筋の深部には筋紡錘と呼ばれる特殊な構造がある（図 2-4）．筋紡錘は伸張受容器ともよばれており，その名の通り筋の長さ（伸張）を感受する受容器である．筋紡錘は繊維状のカプセルの中にあり，主に錘内筋線維からできている．この中央には Ia 群線維とよばれる感覚神経線維が，筋紡錘の中にある筋線維に巻き付いている．筋紡錘と Ia 群筋線維は，「身体状況の感覚」のために特殊化した体性感覚系の構成要素であり，空間内での身体の位置や運動状況，すなわち固有感覚の検知器である．

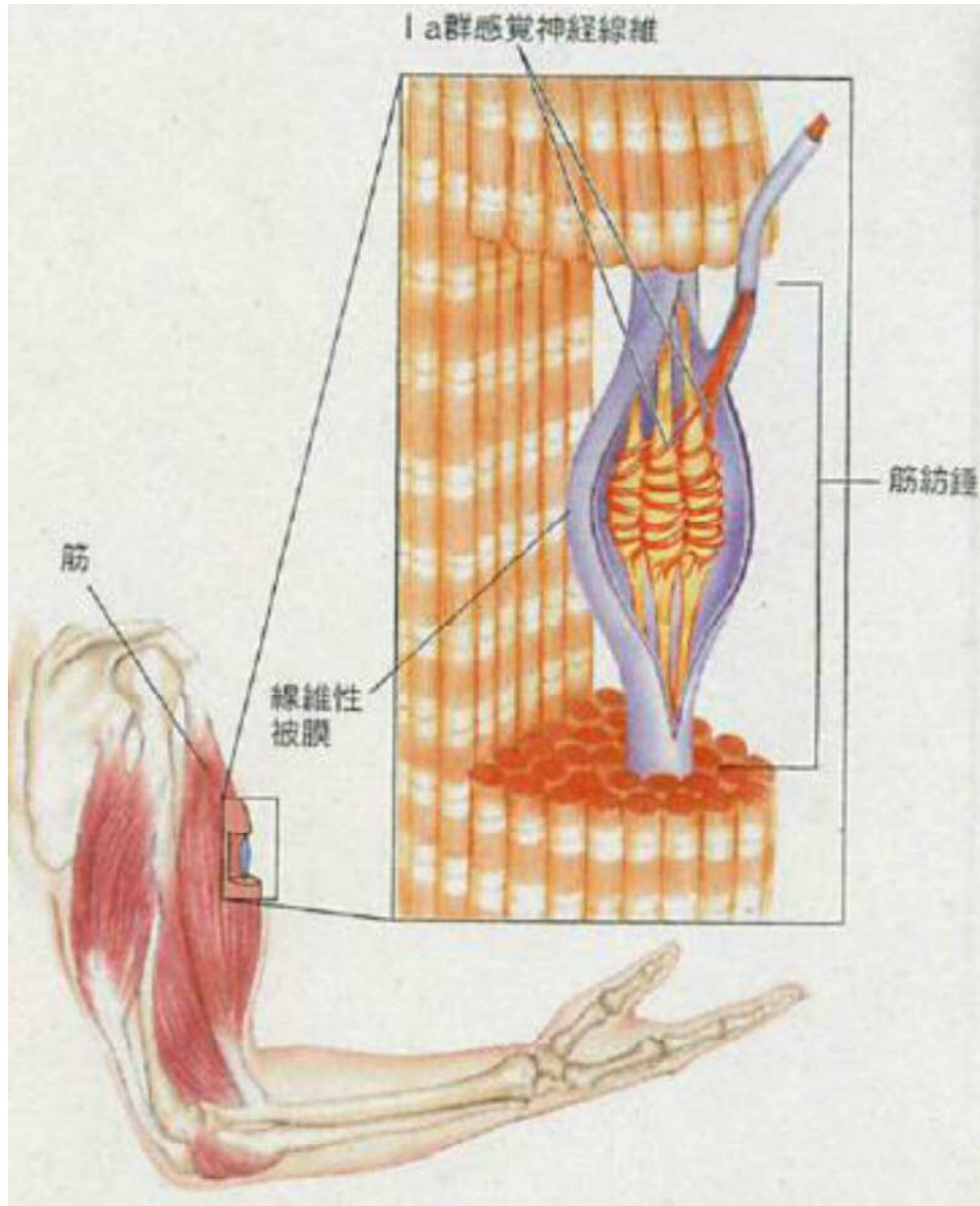


図 2-4 筋紡錘とその感覚神経支配[24]

2.3.3. ゴルジ腱器官

筋からの固有感覚の入力は筋紡錘からだけではない。もう1つの筋状況検出器はゴルジ腱器官である。これはばね計りのようなもので、筋の張力、すなわち筋の収縮時の力を検出するものである。ゴルジ腱器官は筋と腱のつなぎ目にあり、筋紡錘を支配する Ia 群線維よりも少し細い Ib 群線維により支配されている[24]。

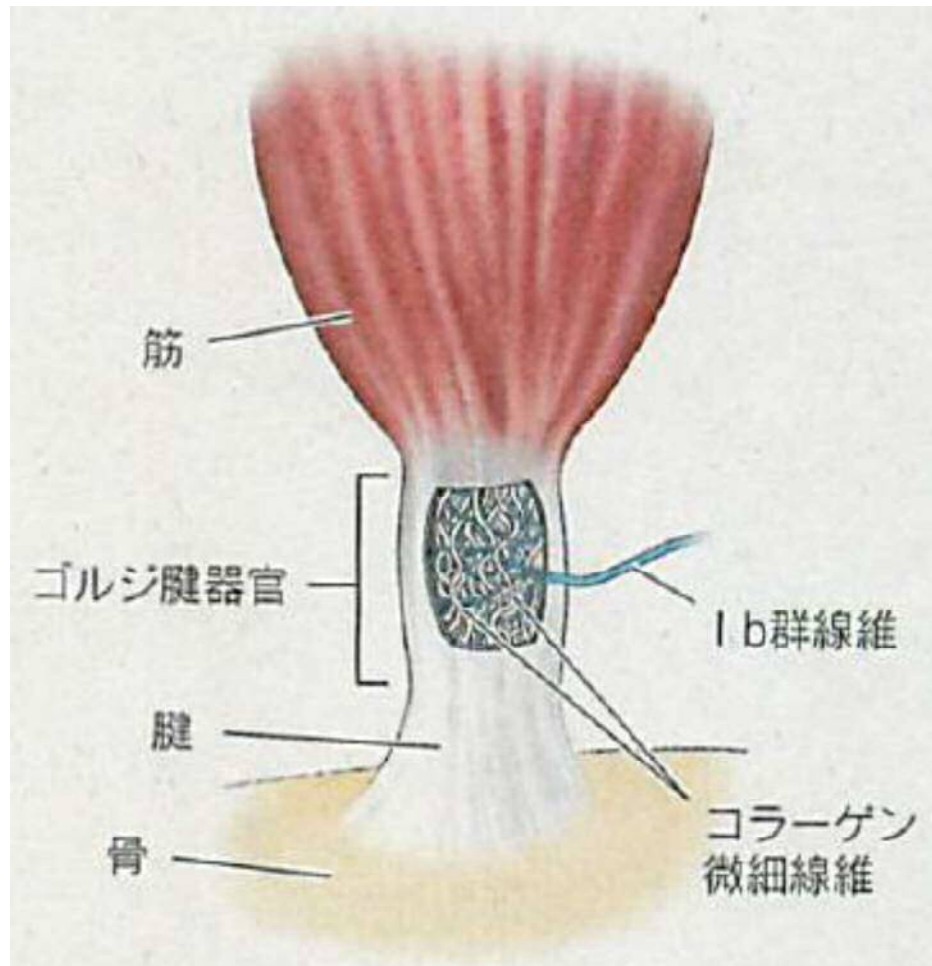


図 2-5 ゴルジ腱器官[24]

筋紡錘が錘外筋線維と並列に位置しているのに対し、ゴルジ腱器官は直列に位置している（図 2-6）。この解剖学上の配列の違いにより、2つの固有感覚器から脊髄に送られる情報の種類が異なる。筋紡錘からの Ia 群筋線維の活動は「筋の長さ」を送るのに対し、ゴルジ腱器官の Ib 群筋線維の活動は「筋の張力」を送る[24]。

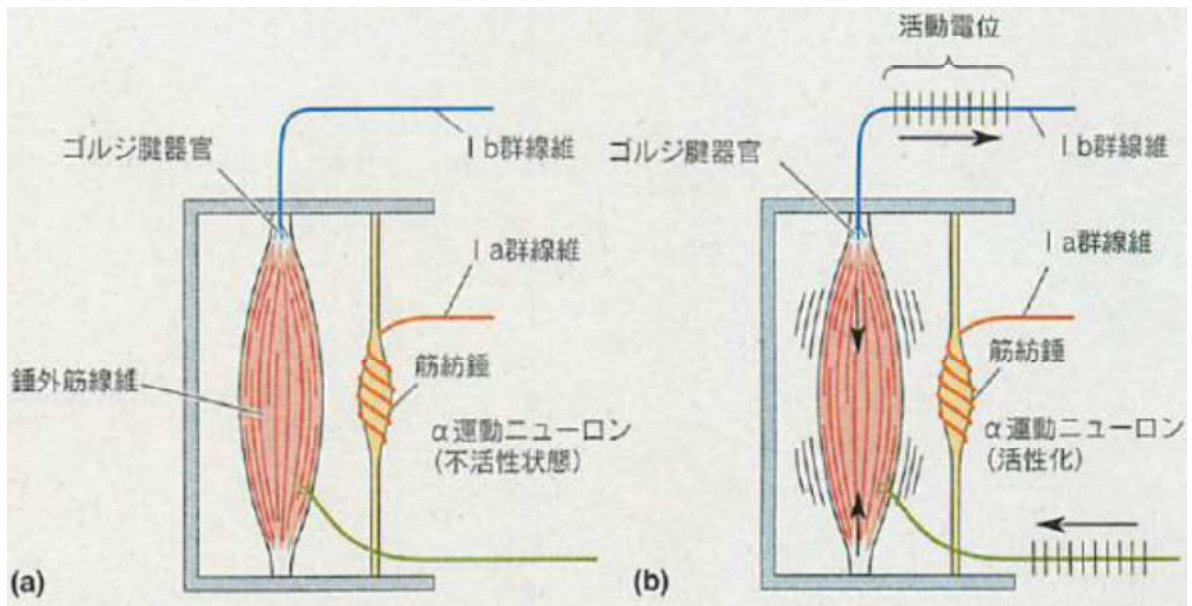


図 2-6 筋の固有感覚受容器の機構 [24]

(a)筋紡錘は錘外筋と並列であり、「筋の長さ」を検出する。ゴルジ腱器官は錘外筋と直列であり「筋の張力」を検出する。(b)この例では、筋が収縮しても長さは変化しないので、筋紡錘のIa群線維は発火せず、情報を送らない。

2.3.4. 関節受容器

筋紡錘やゴルジ腱器官の他にも、関節の結合組織，特に関節や靭帯の中にはさまざまな固有感覚を伝える感覚神経がある。これらは関節の動きの角度，方向，速度の変化に反応する。ほとんどの固有感覚受容器の反応は順応が速く，このことは静止している関節の情報はわずかで，動いている関節の感覚情報は豊富にあることを示している。しかし我々は目を閉じて静止している状態でも関節の位置を非常によく判断できる。これは，関節の角度を見積もるために，関節の受容器からの情報と筋紡錘やゴルジ腱器官，そして皮膚の受容器からの情報を組み合わせているからと考えられている。すなわち，ある情報源の消失は，他の情報源の使用で補うことができる。そのため，例えば関節炎の治療として人工関節置換手術を受け，股関節を金属やプラスチック製のものと交換されても，患者は腰と大腿骨の角度がわかるのである[24]。

第3章 肘関節への「カチカチ感」付与による運動感覚の増強

本章では第一の戦略である「体性感覚の増幅」を用いた腕立て伏せ姿勢の教示について扱う。

3.1. 背景：運動教示

3.1.1. 一般的な運動教示における問題点

スポーツ選手や楽器演奏者にとって、正しい運動を行うことは競技および演奏パフォーマンス向上のために非常に重要である。正しく身体を動かすことによって自分の筋力を最大まで引き上げ、最も美しい音色を奏でることができる。しかしながら、正しい運動を再現することは難しく、修得のためには通常長期間に渡る継続的な訓練を必要とする。

一般的な訓練方法には、(1) 熟練者の正しい動作を見て模倣する、(2) 熟練者の口頭指示を聞く、(3) 他動的に身体を動かしてもらい、といった手法がある。しかし、スポーツ、楽器演奏などにおいては周囲の状況確認や譜面の確認などの視覚的タスクを常に行わなければならない、視覚情報処理への負荷が大きい。また他の選手の声や環境音の認識など聴覚情報の処理も常に行わなければならない、特に楽器演奏では楽器の音色を確認することは極めて重要なタスクであると考えられる。したがって運動教示において(1)(2)などの視覚・聴覚的な教示手法はもともと負荷が大きい視覚・聴覚に対してさらに負荷をかけることになり、運動全体のパフォーマンスが低下する恐れがある。また(3)である程度身体の動きを学ぶことができるが、走りながら腕を動かす・指を素早く動かすといった複雑な動きへの対応は困難である。

3.1.2. 先行研究：触覚呈示を用いた運動教示

近年、より効果的な運動教示手法として、触覚呈示を用いた教示が注目されている。例えば Erp ら[25]は振動刺激によるボートを漕ぐ動作（ローイング）の運動教示を試みた（図 3-1）。訓練者の身体に複数の振動子を装着し、動かすべき部位に、動かすべきタイミングで振動刺激を呈示することで、「どこへ動くか」「いつ動くか」といった情報を直感的に呈示している。触覚呈示による運動教示はローイングの他にもサッカー[25]、ダンス[25]、軍用航空機の操作[26]、ヴァイオリン演奏[27]、ドラム演奏[28]、リハビリテーション[29]など様々な場面での活用が期待されている。

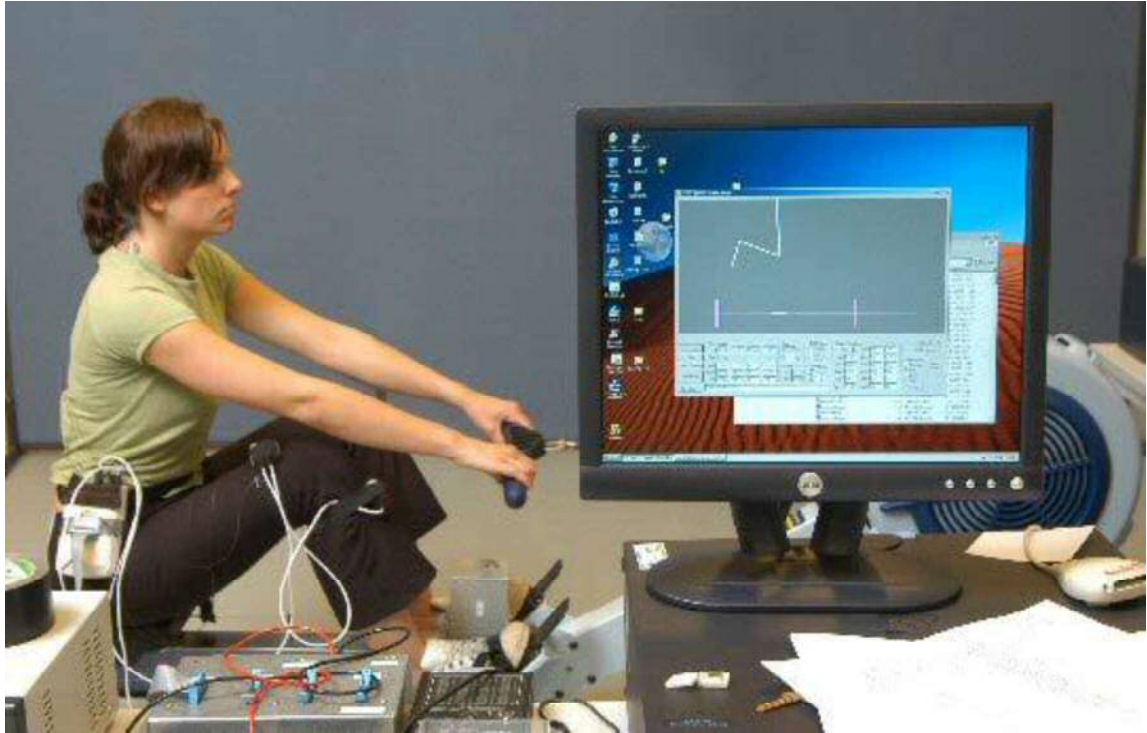


図 3-1 振動フィードバックを用いたボートを漕ぐ動作の教示[25]

上記の研究を含むこれまでの知見[32][33][34]から、運動教示に触覚呈示を用いるメリットは主に3つ考えられる。まず、自己姿勢認知に最も貢献しているとされる視覚[30][31]の処理に高負荷がかかっているにもかかわらず、触覚という別のチャンネルから入力された情報であれば同時処理が可能である。次に、触覚刺激には身体部位および方向の情報を含むため、身体の中のどの部位をどの方向に動かすかが重要な運動において効率的に情報を与えることができる。最後に、手本を見る・口頭での指示を聞くなどの視覚・聴覚的な教示ではその意味を解釈して行動に移すまでにわずかながら時間がかかるが、一方で触覚的指示に対しては瞬時に意味解釈がなされ、即座に行動に移すことができる。したがってタイミングや反応速度が重要な運動においてリアルタイム性を保ちながら教示を行うことができる。

呈示する触覚刺激の種類は様々なものが考えられるが、最も多く利用されているものは振動刺激である。振動呈示のために広く使われている振動モータやボイルコイルアクチュエータ[35]等は小型・軽量であるため運動を阻害せずに身体へ装着ができ、振動周波数を制御することで様々な感覚を与えることができる。また身体を強制的に動かすような外力ではないため、身体を損傷しない程度に運動を誘発することができ安全である。一方で筆記運動教示[36][37]やテレオペレーション（遠隔操作）[38]など力の入れ具合が重要かつ大きな動きが少ないタスクでは、力覚呈示が可能な設置型の触力覚呈示装置[39][40]などが用いられる傾向にある。なお身体装着型の力覚呈示装置としてはエグゾスケルトン（外骨格）型スーツ[41][42]等が挙げられる。一般に複雑かつ高価な装置であるが、腕部や腰部にかかる負荷をパワーアシスト機能により直接軽減することができ、レスキュー活動や介護用途への応用が期待されている。



図 3-2 振動呈示に用いられる振動子の例.

左：円盤型振動モータ（FM34F，東京モータ），中央：高周波向けボイスコイルアクチュエータ（ForceReactor，アルプス電気），右：低周波向けボイスコイルアクチュエータ（Haptuator，TactileLabs）[35]．他にも，振動と同時に大きな音が出て構わない場合にはフルレンジスピーカ等も幅広い帯域の周波数を出力できるため振動触覚呈示のために使われる．

以上のように振動刺激を用いた運動教示は効果的であり，本節で挙げた先行研究はどれも従来手法に比べ一定の学習成果を上げている．

3.1.3. 触覚呈示を用いた運動教示における問題点

触覚呈示が運動教示手法として有効であることは事実だが，改善すべき点も見受けられる．Linden ら[27]はヴァイオリン演奏訓練者の肘・手首・腰に振動モータを装着し，訓練者が誤った姿勢をとったときその身体部位に振動刺激を呈示することで姿勢教示を行った（図 3-3）．これは「訓練者のエラーに対する警告」という意味の振動刺激を呈示している．しかし訓練者は演奏姿勢の誤りを意味する振動を避けることに尽力してしまい，演奏技能習得という本来の目的に集中できなくなった．そのため演奏動作はぎこちないものとなった．これは訓練者が触覚刺激に対して「従属的」になってしまい，運動目的がヴァイオリン演奏そのものではなく「振動を避けること」になっていたことが原因であると考えられる．同様の問題は他の触覚的運動教示でも発生する可能性が考えられ，これを解決することでより高い教示効果が得られると推測される．

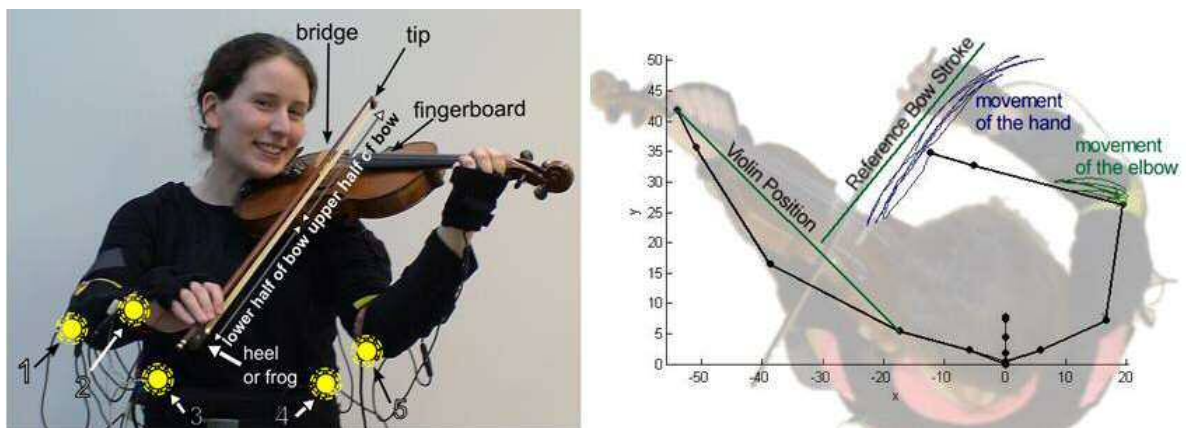


図 3-3 振動フィードバックによるヴァイオリン演奏姿勢のエラー矯正 [27]

3.1.4. 触覚の能動性を考慮した運動教示

訓練者が本来学習すべきことは、自ら能動的に身体を「動かした」ときに正しい動作ができることであり、身体を「動かされる」ことではない。これは本論文 2.1.1 項にて紹介した「アクティブタッチ」あるいは「ハプティックス」という能動性を含む触覚のことでもある。この考えに基づき、嵯峨ら[37]は運動学習においても訓練者の運動の能動性が重要であると主張している。筆記運動における従来の触覚的運動教示は主に所望の運動方向に誘導する力を呈示するというものであった。しかし嵯峨らはペン型の力覚呈示装置から所望の運動方向とは反対の方向に力を呈示し、訓練者がそれを打ち消すように力を加えて運動することで能動的な運動学習の実現を試みた（図 3.3）。従来手法との比較実験の結果、提案手法の方が従来手法よりも高い教示効果が得られたと報告されている。また Lee ら[43]はあえて運動の障害となる触覚的ノイズを呈示し、訓練者にこれを修正させることで効果的な運動教示が可能であると述べている。

しかしこれらの手法においても、「力が呈示された後」に訓練者がそれを打ち消す力を加えているので、運動を行うきっかけは未だ能動的であったとはいえない。

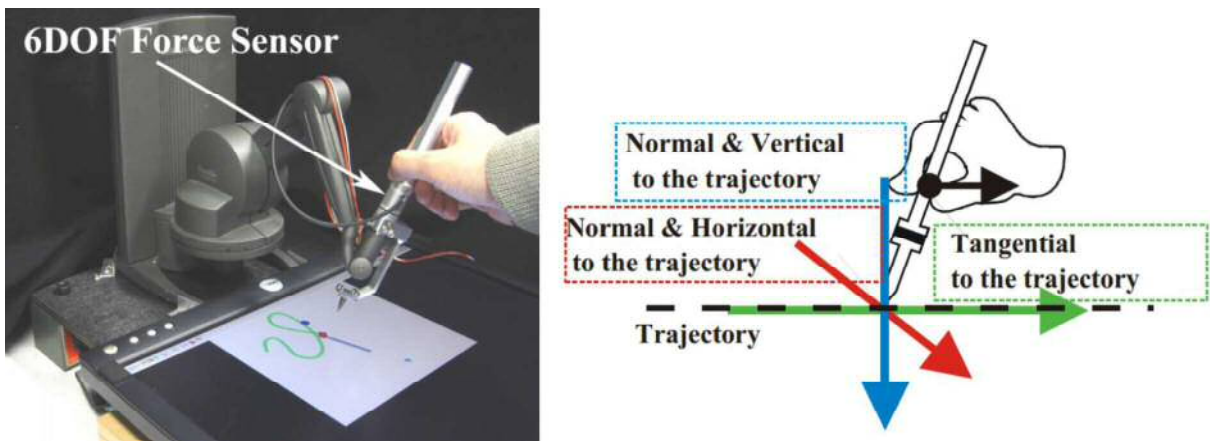


図 3-4 力覚の能動性を活用した筆記運動の教示[37]

3.1.5. 運動感覚の増強を用いた能動性を損なわない運動教示

完全な能動性を実現するため、蜂須らは「運動した後」に触力覚呈示を行うこと提案した[44]。運動後に刺激を与えることで、その感覚は訓練者にとって身体を動かすきっかけではなく、身体がどのように動いているか、あるいはどのように動いたかを知覚するためのフィードバックとなる（図 3-5）。つまり、人間の運動感覚は全て運動した「後」に生じるものであるから、運動後の感覚呈示は訓練者の運動感覚を増強する試みとも捉えることができる。

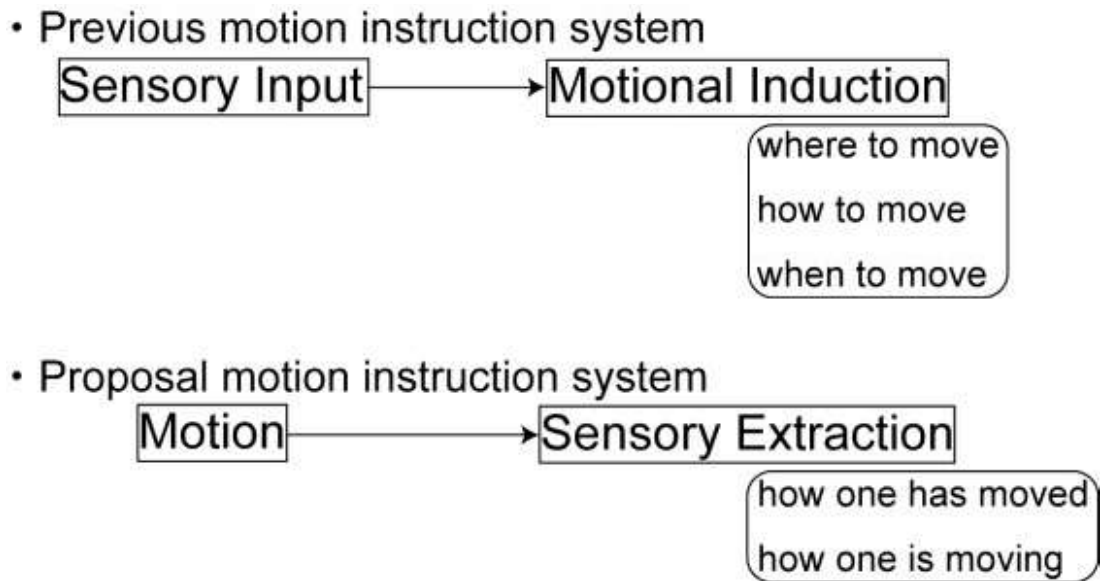


図 3-5 運動前の感覚呈示（上）と運動後の感覚呈示（下）[44]

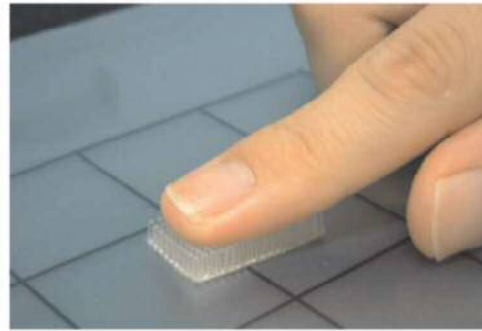
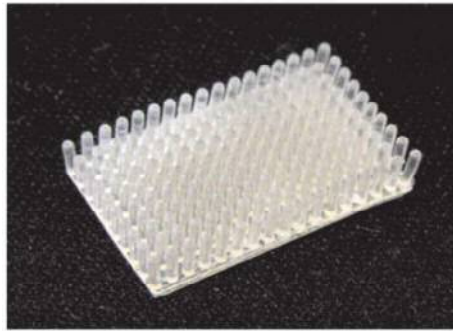
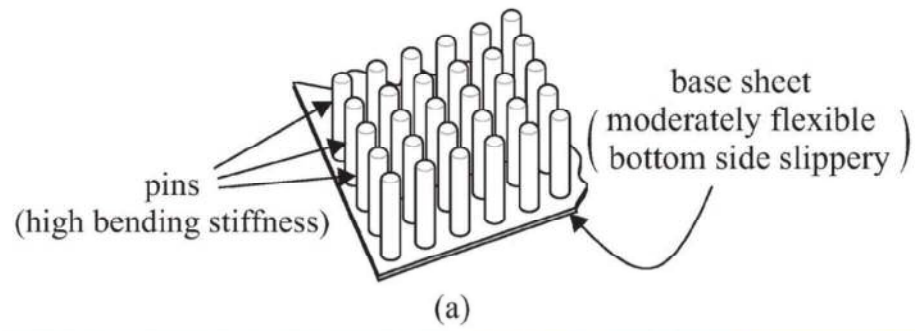
3.2. 本研究の新規性

本研究で私が提案する運動教示手法は、運動後の触覚呈示による運動感覚の増強である。すなわち、訓練者の運動と理想的な運動との「違い」を示して修正させるのではなく、「訓練者の運動そのもの」が現在どのような状態なのかを訓練者自身がより鮮明に知覚できるよう、身体運動に付随する触覚的手がかりを付与することで運動感覚を増強する。これにより訓練者自身で誤りに気づかせ、訓練者自身の力で修正させることで結果的に教示を実現するというものである。言い換えるとすれば、先行研究はより正確な運動を指示する「優秀な先生」を作り出す手法であったのに対し、提案手法では訓練者自身の運動感覚を増強し、学習能力を高め、より覚えの早い「優秀な生徒」にする手法であるといえる。

蜂須らの研究[44]では、運動後の感覚呈示を用いた肘屈伸運動の運動教示戦略について述べ、また DC モータのトルク制御を用いた設置型触力覚フィードバック装置を提案した。本研究では肘関節の運動感覚増強を目的としたウェアラブルな触力覚呈示装置を機械的機構によって実現する。また教示する運動の例として腕立て伏せの肘屈伸運動を取り上げ、肘角度測定実験によって教示効果を検証する。

なお皮膚感覚を増強する手法としては、佐野ら[45]による触覚コンタクトレンズという手指装着型のピンマトリクス器具が存在する（図 3-6）。これはテコの原理を利用して指先皮膚変位の増幅を行い、通常は検知できないほどの物体表面の微小な凹凸を鋭敏に検出できるようにするものである。また岡崎ら[46]は人間がもつ体毛一毛包受容器構造を模した人工毛による皮膚感覚増強器具を開発した。

これらの先行研究は体性感覚の増強という意味で本研究と同様のコンセプトを持つものであるが、本研究では皮膚感覚よりも運動感覚の増強に着目する。



(b)

(c)

図 3-6 触覚コンタクトレンズ[45]

a: ピンアレイ構造の模式図. b: プロトタイプの場合. c: 指先に装着した際の様子.

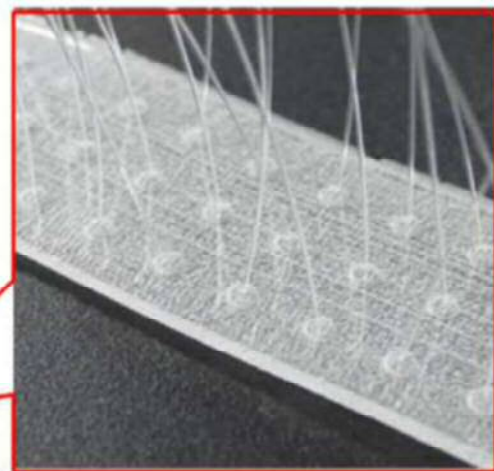
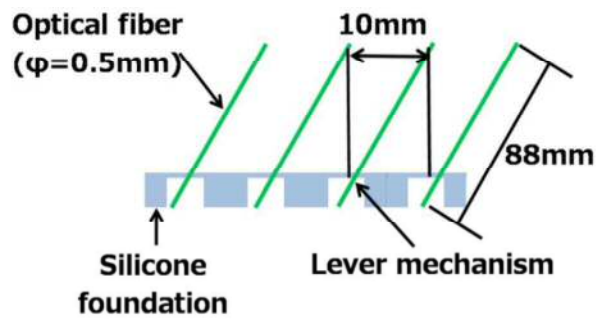


図 3-7 体毛-毛包受容器構造を模した皮膚感覚増強機構[46]

3.3. ロータリスイッチがもつ触覚フィードバック「カチカチ感」

自動車の空調操作ダイヤルなどに利用されているロータリスイッチ（図 3-8）を手で回すと、カチカチとした周期的な触覚が手に返される。このカチカチ感は、周期的な抵抗感の変化と衝撃感で構成されており[47]、ダイヤルの操作性向上に応用されている。例えば自動車内のダッシュボードに取り付けられたロータリスイッチによって、運転者は手元を見ることなくダイヤルを所望の位置に調整することができる[48]。またヒトがロータリスイッチの摩擦粘性感を知覚できる閾値は、運転中であるかどうかに関わらず一定であるという報告もあり、複数のタスクを同時に行なっても容易に知覚できる触覚刺激であるといえる[49]。

このカチカチ感は運動の結果を伝える触覚の手がかりであり、運動感覚の増強であるといえる。私はヒトの関節部屈伸運動にカチカチ感を適用することで、関節部の運動感覚をより鮮明にできるのではないかと考えた。

カチカチ感は、自己運動を計測するための客観的な指標としても機能すると考えられる。例えば熟練者により口頭指導を受けるような従来の訓練方法において、「腕を 60 度曲げる」といった教示をしても訓練者は 60 度の体性感覚が分からないためその姿勢を再現することが難しい。しかしカチカチ感を付与することで指導者と訓練者双方に共通の運動感覚を設ければ、「3 カチ曲げる」といった教示を行うことにより運動情報の伝達がよりスムーズに進むと考えられる。



図 3-8 自動車内のダッシュボードに取り付けられたロータリスイッチ
左のダイヤルがカチカチ感を呈示するもので、離散的に抵抗感が変化する。中央および右のダイヤルはカチカチ感を呈示しないもので、抵抗感の変化はなく、常に一定である。

3.4. 腕立て伏せにおける肘屈伸運動の教示

本研究では教示する運動の対象として腕立て伏せ（腕立て伏臥腕屈伸）を取り上げる。腕立て伏せの正しい姿勢には諸説あるが、本研究では[50]を参考に、腕を完全に伸展させた状態から胸が床につく直前まで可能な限り大きく肘を屈曲させることを正しい姿勢とする。腕立て伏せは自重を利用して上腕三頭筋や大胸筋を鍛えることにおいて有効であり、専用のトレーニング器具を必要としないことから、美容や健康維持目的として誰でも気軽に行える筋力トレーニングであるといえる。しかし運動強度は高く、疲れてくると無意識に他の筋肉に不可を逃がそうとして肘を屈伸せずの方や腰を動かすなど、誤った姿勢になることが多い（図 3-9）。崩れた姿勢でトレーニングを行っても所望の効果は見込めず、むしろ身体を壊す危険がある。

そこで、肘関節にカチカチ感を付与し肘の屈伸状態を鮮明に知覚させることを試みる（図 3-10）。これにより訓練者は自己姿勢を把握しやすくなり、十分に屈伸できていないことに自ら気づき、大きく屈伸する正しい腕立て伏せ姿勢をとるようになると考えられる。

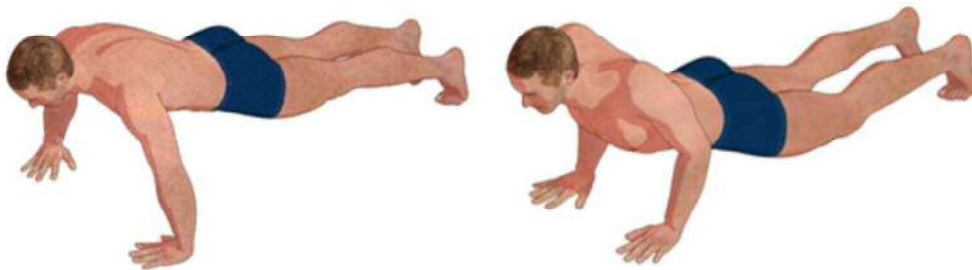


図 3-9 正しい腕立て伏せの姿勢（左）と誤った腕立て伏せの姿勢（右）



図 3-10 腕立て伏せ時のカチカチ感呈示イメージ

3.5. システム構成：カチカチ感呈示装置

本章では、私が開発した肘部屈伸運動に同期してロータリスイッチ的な触覚を呈示する装置、カチカチ感呈示装置の構造および開発の経緯について述べる。

3.5.1. ばねと球を用いたカチカチ感呈示機構

実際に電子部品として売られているロータリスイッチの内部機構を参考に、図 3-11 に示すカチカチ感呈示装置を製作した。本装置は円形のジョイント部、上腕リンクおよび前腕リンクから構成される。ジョイント部は ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)樹脂製、リンク部はアクリル製である。装置の全長は 205mm、重さは 105g である。

ジョイント部の内部構造を図 3-12 に示す。ジョイント部はジョイント A (図 3-12 青色部) とその内部のジョイント B (図 3-12 赤色部)、ステンレス製押しばねおよび 2 つのステンレス球から構成されている。ジョイント A・ジョイント B はそれぞれ上腕リンク・前腕リンクに接続されており、互いに独立して最大約 150 度回転する。ジョイント A の内径は 50mm で、内径上には最大高さ 3mm のなめらかな凸が 20 度ごとに合計 18 個ある。ジョイント B は押しばねとその両端に 2 つの球を内蔵しており、ジョイント A に格納されている。

本装置を腕部に装着したときの様子を図 3-13 に示す。2 つのリンクには ABS 樹脂製の腕部装着用アタッチメントが固定されており、皮膚接触面にはウレタンシートが貼付されている。アタッチメントは面ファスナー式 (マジックテープ) バンドで前腕・上腕に固定されている。

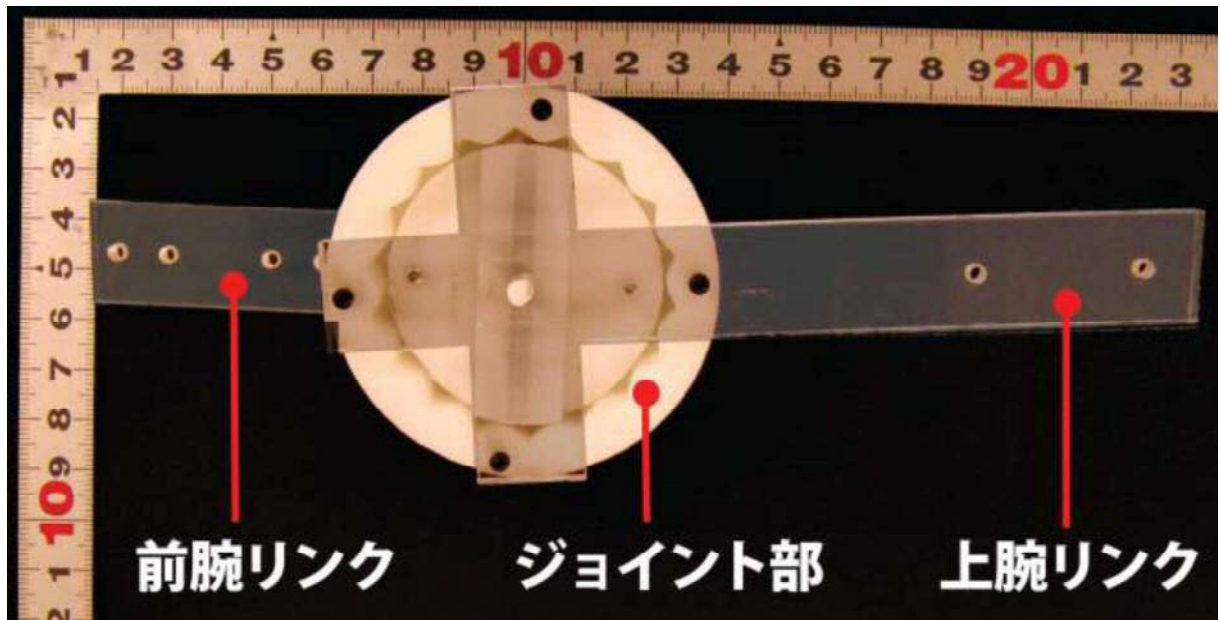


図 3-11 ばね機構を用いたカチカチ感呈示装置

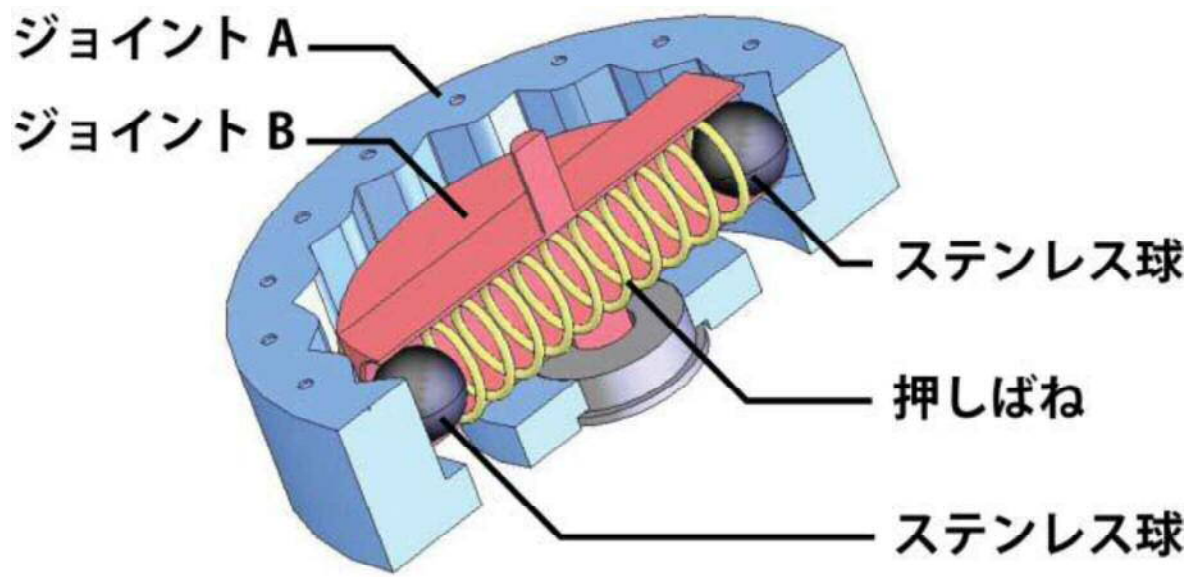


図 3-12 ジョイント部の内部構造

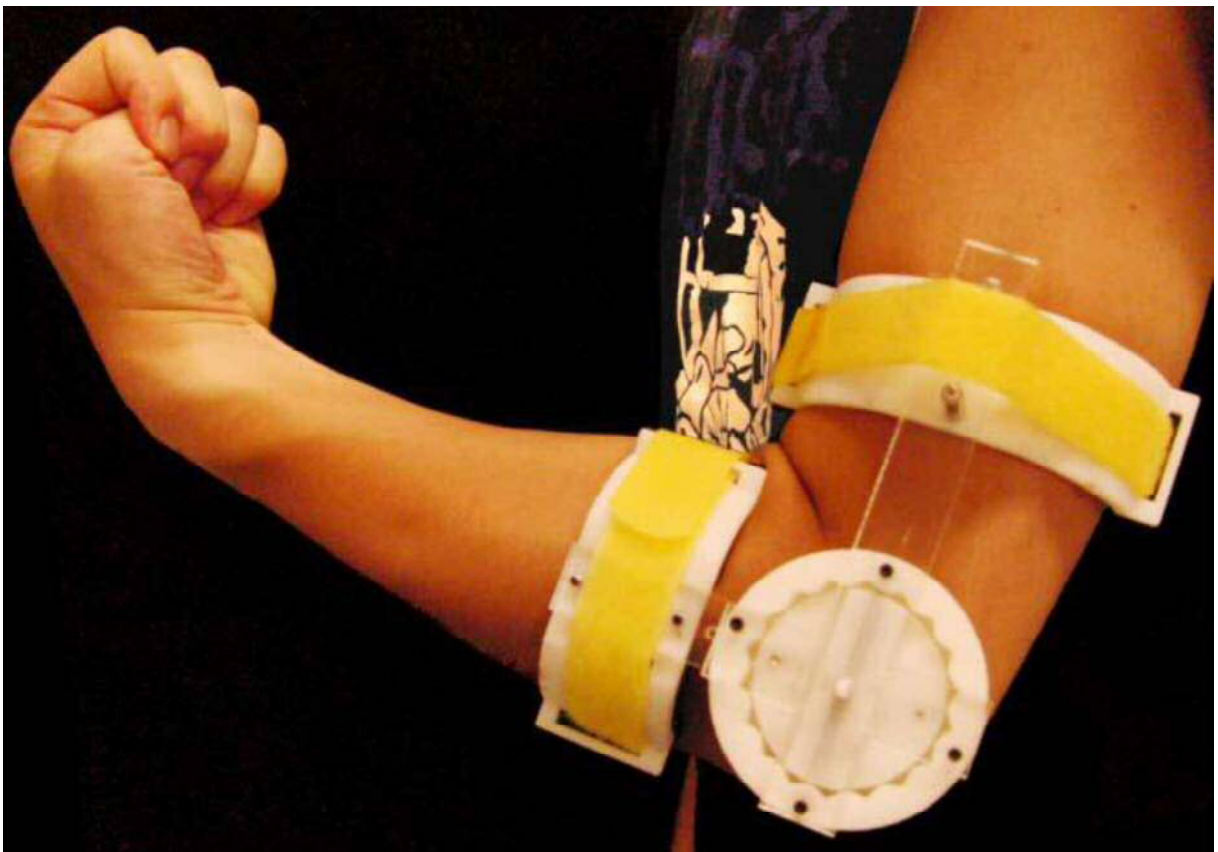


図 3-13 腕部に装着したカチカチ感呈示装置

3.5.2. カチカチ感呈示原理

本装置のカチカチ感呈示原理を図 3-14 に示す。初期状態で球はジョイント A の凸間の谷にある (図 3-14-1)。ジョイント B を肘屈伸により回転させると、ジョイント A の凸によってばねが押し縮められる (図 3-14-2)。その際ばねの弾性力に応じて球に遠心方向の力が加えられ、球と凸の間に回転方向と反対の方向に力が生じる。この反力に逆らって肘屈伸を続けると、球は凸の頂点を乗り越える。このとき縮んでいたばねの弾性エネルギーが解放され、球を遠心方向に押し出す (図 3-14-3)。このとき瞬時に反力が反転し、押し出された球は隣接する凸間の谷に衝突し、「カチッ」という衝撃が生じる。

本装置は肘が 20 度屈伸する度にカチカチ感を呈示し、最大約 150 度回転する。ただし、装置を限界まで伸展させた状態から最初に屈伸させるときだけは 10 度でカチカチ感が呈示される。それ以降は 20 度間隔、つまり 10 度、30 度、50 度…という間隔でカチカチ感が呈示される仕様である。

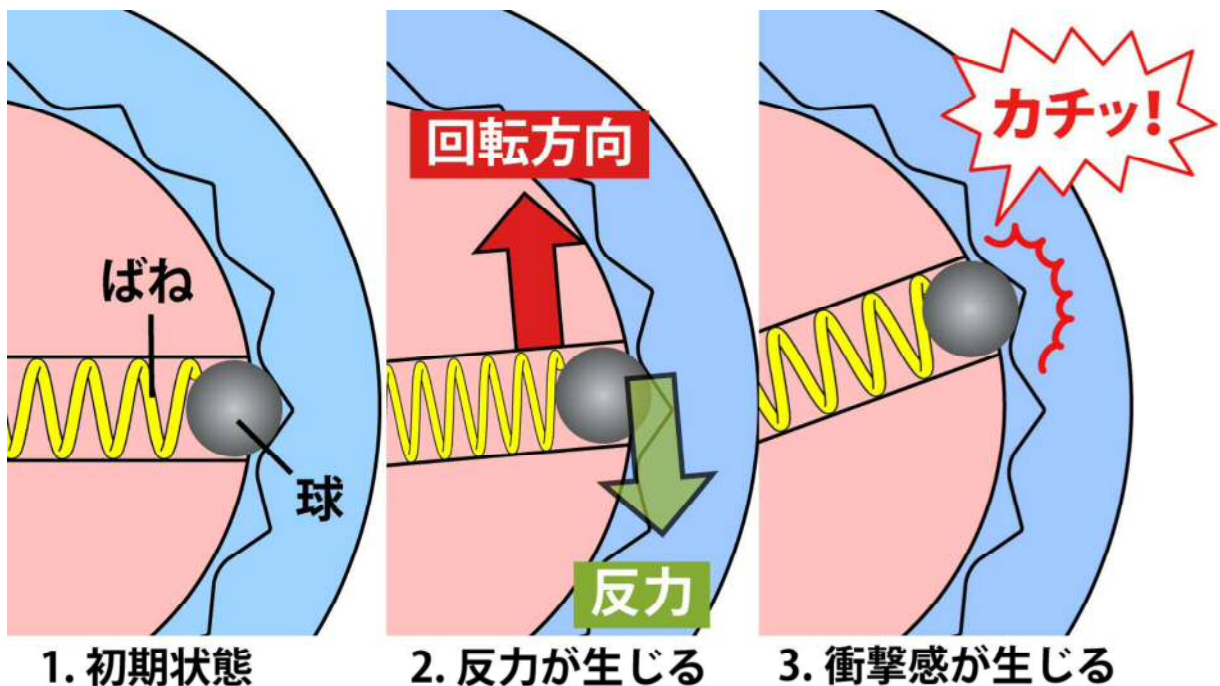


図 3-14 ばね機構を用いたカチカチ感呈示原理

3.6. 実験 1：限界まで大きく肘を屈伸する腕立て伏せにおける肘角度測定

3.6.1. 実験の目的

腕立て伏せ時の肘部屈伸運動にカチカチ感フィードバックを付与することで肘の屈伸範囲が大きくなるかどうかを検証した。

3.6.2. 実験環境

本実験には被験者の運動能力が大きく影響すると考えられる。そこで運動能力に偏りが出ないように、普段の運動頻度をもとにほぼ毎日運動を行う者から滅多に運動を行わない者まで偏りなく選定した。被験者は21～22歳の男性6名とし、全員本研究の趣旨については知らされていなかった。

実験設備の模式図を図 3-15 に示す。肘屈伸角度の測定には、ロータリセンサ (RDC506002A, アルプス電気, 抵抗式) および AD ボード (PCI-3523A, Interface, 電圧変換レンジ±10V, 解像度 12bit) を用いた。ロータリセンサをカチカチ感呈示装置に固定して 5.0V の電圧を印加し、出力電圧をサンプリングレート 1kHz で AD 変換し、PC に記録した。

本実験ではカチカチ感の有無が肘の屈伸角度に及ぼす影響を検証するために、カチカチ感呈示装置と、同装置からばねと球を取り除いたカチカチ感を呈示しない装置の 2 つを用いた。また本装置はカチカチ感を呈示する際に音が生じるため、被験者は触覚ではなく聴覚からカチカチ感を知覚する可能性がある。そこで触覚的カチカチ感の効果を検証するために、ヘッドホンを通じて聴覚遮断用のホワイトノイズを呈示した。したがって被験者に呈示される感覚は、「カチカチ感」「カチカチ感 (聴覚遮断)」「非カチカチ感 (呈示なし)」の 3 種類であった。

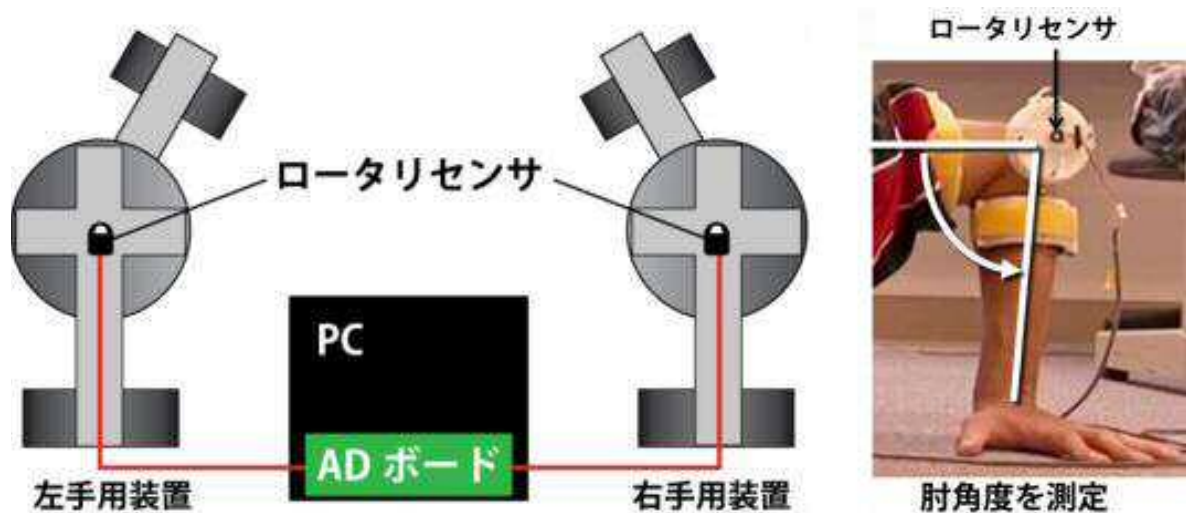


図 3-15 実験設備：カチカチ感呈示装置と肘角度測定システム

3.6.3. 実験手続き

被験者に本実験の意図を悟られないようにするために、被験者には事前に「筋活動の計測に関する実験」と伝えた。

まず実験者は被験者の両腕にカチカチ感呈示装置を装着させた。この時痛みがなく肘がスムーズに屈伸することを確認した。次に被験者に肘を自由に屈伸させ、しばらくカチカチ感を体感させた。装置を一度取り外した後も同じ位置に再装着できるように、被験者の腕の装着位置に水性ペンで印をつけた。

実験者から被験者には、「正しい腕立て伏せの姿勢とは腕を完全に伸展させた状態から胸が床につく直前まで可能な限り大きく肘を屈曲させ、その後元の位置に戻すことである」と説明した。説明後被験者に腕立て伏せの姿勢をとらせた。両手の位置は、肘を完全に伸展させた状態で肩幅程度に開き、胸が延長上に並ぶようにした。また両足は約 15cm 開くようにした。この状態を基本姿勢とし、実験者は被験者の両手足が置かれている位置にテープで印をつけた。印をつけた後、被験者に楽な姿勢をとらせ、装置を取り外した。

被験者は実験者が指示した装置を装着し基本姿勢をとった。実験者は被験者の目の前にスマートフォン iPhone3GS (Apple)を置き、画面上に 30bpm (1 往復 4 秒) の周期で往復する無音のメトロノーム (Metronome, MarketWall.com) を表示した。被験者にこのメトロノームを注視するように指示し、リズムに合わせて 2 秒で肘を屈曲させ、次の 2 秒で伸展させるように指示した。図 3-16 に示すように被験者は実験者の合図で肘の屈曲を開始し、正しい腕立て伏せの姿勢を心がけて 3 回連続で肘屈伸を行った。腕立て伏せ終了後被験者は楽な姿勢をとり装置を取り外した。これを 1 試行とし、その後再び被験者は実験者の指示した装置を装着し、同様の手順で腕立て伏せを行った。



図 3-16 実験の様子：限界まで大きく肘を屈伸する腕立て伏せ

3.6.4. 実験結果

被験者 6 名のうち 2 名は腕立て伏せを行うこと自体が筋力的に困難で、姿勢が著しく崩れていたため実験結果から除いた。実験結果を分析するために、まず各試行約 12 秒間のうち被験者の腕立て伏せの挙動が不安定になりがちであった最初の 3 秒と最後の 3 秒を除外した。次に肘の屈伸範囲を検証するために、肘が最も屈曲した時の角度と肘が最も伸展した時の角度の差を肘の屈伸範囲とした。

図 3-17 に実験結果を示す。グラフの横軸は 3 種類の呈示感覚と各呈示感覚における左肘・右肘を示し、縦軸は肘の屈伸範囲を示す。エラーバーは被験者間の標準偏差である。本実験結果に対して呈示感覚条件および左肘・右肘の 2 要因 (3×2) 被験者内計画とみなし分散分析を行った。その結果、左肘・右肘の単純主効果 ($F(1,3)=0.27, n.s$) および要因間での交互作用 ($F(2,6)=0.27, n.s$) は認められなかった。一方で、呈示感覚条件の単純主効果では有意差が認められた ($F(2,6)=19.84, p<0.01$)。LSD 法を用いた多重比較の結果、各呈示感覚条件における屈伸範囲では「カチカチ感<非カチカチ感」、および「カチカチ感 (聴覚遮断) <非カチカチ感」において有意差が認められた ($MSe=27.537, 5\%$ 水準)。この結果から、左肘・右肘およびカチカチ感呈示時の聴覚的手がかりの有無による屈伸範囲の有意差はなかったことが明らかとなった。

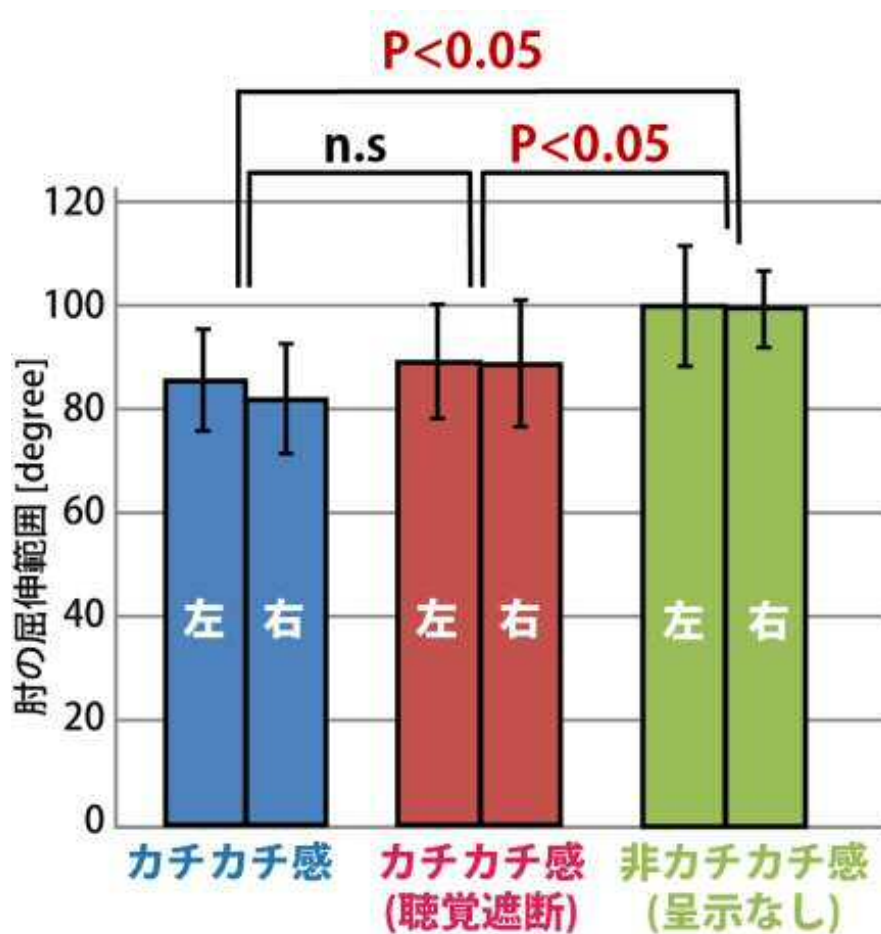


図 3-17 3 種類の呈示感覚と肘の左右における肘屈伸範囲の比較

図 3-18 に 1 名の被験者の左肘における 3 種類の呈示感覚各 1 試行分の代表的な肘屈伸角度の時間的変化を示す。グラフの横軸は時間を、縦軸は屈伸角度を示す。図 3-18 からカチカチ感を呈示した場合の方がカチカチ感を呈示しなかった場合に比べ屈伸範囲が小さかったことが観察できる。

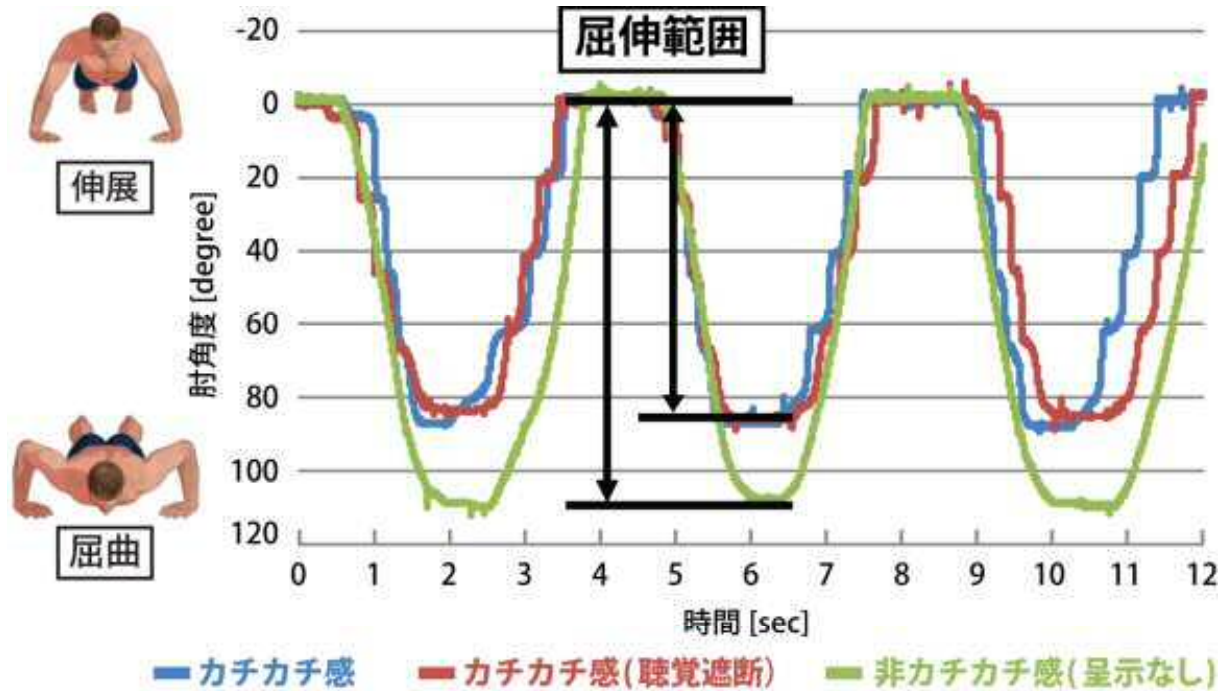


図 3-18 3 種類の呈示感覚における肘屈伸角度の時間的変化

カチカチ感を呈示した場合の方が呈示しなかった場合に比べて肘屈伸角度が小さいことがわかる。また、カチカチ感を呈示した場合と、聴覚を遮断してカチカチ感を呈示した場合では肘屈伸角度に差がないことがわかる。

3.6.5. 考察

本結果は腕立て伏せ中にカチカチ感を呈示すると肘の屈伸範囲が小さくなるというもので、私の予想とは逆の結果であった。したがって本研究の目的であったカチカチ感付与による正しい腕立て伏せの姿勢の教示は達成することができなかった。しかし、本実験から得られたデータは次の 3 つのことを示唆すると考えられる。

3.6.5.1. カチカチ感による運動量誇張

実験結果は腕立て伏せ中にカチカチ感を呈示すると肘の屈伸範囲が小さくなるというものであったが、一方で全被験者の内観報告において、カチカチ感が呈示された際肘を屈伸しにくくなったなどの回答は得られなかった。また事前の説明で可能な限り肘を屈伸するように指示したことから、カチカチ感によって被験者は肘の屈伸角度を実際よりも大きく見積もったと考えられる。つまりカチカチ感によって自身の運動量を実際よりも大きく見積もった可能性がある。

実際に運動量の誇張が生じたかについてはさらなる調査が必要であるが、錯覚が生じた原因として、カチカチ感が訓練者の認識上の運動量を増幅させたことが考えられる。通常ヒトは一定量以上運動しなければ自身の身体が運動したことを明確に知覚できない[3]。一方でカチカチ感呈示により屈伸状態の変化が鮮明になったことで、微小な屈伸状態の変化でも肘の運動を知覚できたと考えられる。その結果、被験者は通常よりも小さい屈伸量で限界まで屈伸したように感じていたと考察できる。



図 3-19 カチカチ感の付与による運動量錯覚効果

想像上では実際よりも深く屈伸しているため、実際の屈伸はカチカチ感無しの場合よりも浅くなった可能性がある。

3.6.5.2. 運動量錯覚効果による達成感増幅

本実験結果より、カチカチ感を呈示することで訓練者は少ない運動量でも実際より大きく運動したという達成感が得られる可能性が示された。筋力トレーニングにおいて鍛錬部位に意識を向けることはトレーニング効果の向上に寄与することが知られている[51]。訓練者に鍛錬部位をより大きく動かした達成感を与えることで、鍛錬部位を意識させることができ、トレーニング効果の向上が期待できる。また運動麻痺患者のリハビリテーションなど運動能力の面で肘を十分に屈伸することが難しい場合でも少ない運動量で達成感を与えることができ、モチベーションの維持に貢献できると考えられる。

3.6.5.3. ロータリセンサによる肘角度測定精度

本実験ではカチカチ感呈示装置の回転軸に抵抗式ロータリセンサを装着し、装置の回転に伴ってロータリセンサを回転させ抵抗値を変化させることで肘角度を測定した。しかし本装置は被験者の腕と腕部装着用アタッチメントをベルクロテープ式バンドで締め付けるといった簡素な装着方法をとっているため、被験者の腕に対し装置を完全に固定することができていなかったことが考えられる。そのためわずかな肘屈伸では装置が返す抵抗力により装置とロータリセンサが肘屈伸に伴って回転しないことがあった可能性がある。したがってカチカチ感を付与した際の肘角度測定の精度が低かったといえる。

したがって今後は肘角度測定手法の見直しが必要である。例えばモーションキャプチャシステムなど、カチカチ感呈示装置には影響されない測定方法が考えられる。

3.7. 実験 2：光学式モーションキャプチャシステムを用いた肘角度測定

3.7.1. 実験の目的

実験 1 においては 3.6.5.3 項に記した通り、カチカチ感呈示装置に装着したロータリセンサによる肘角度の測定はでは正確な測定が行えていない可能性が示唆された。そこでカチカチ感呈示装置を介さない測定手法である光学式モーションキャプチャシステムによる測定を行い、カチカチ感が腕立て伏せに与える影響を検証した。

3.7.2. 実験環境

被験者は 21～25 歳の男性 8 名とした。腕立て伏せにおける肘屈伸角度の目標値を 2 つ設定した。一つは肘角度が 90 度になるまで曲げる腕立て伏せ（90 度屈伸）、もう一つは実験 1 と同様に肘を限界まで曲げる腕立て伏せ（MAX 屈伸）とした。

図 3-20 に本実験の実験設備を示す。本実験に用いたのは光学式フルボディモーションキャプチャシステム（OptiTrack, NaturalPoint）であり、専用のカメラ（FLEX:V100R2, NaturalPoint, フレームレート 100fps）で直径 11mm 程度のマーカーを撮影し、その三次元座標を記録する。このマーカーを被験者の左肩に装着して腕立て伏せ時の床からの高さを測定した。カメラは 3 台用意し、それぞれ被験者の正面、斜め前、横に設置して常に全カメラの視野に被験者左肩のマーカーが写るようにした。実験 1 と異なり肘角度の測定は行なっていないため純粋に比較することはできないが、「カチカチ感付与によって生じる腕立て伏せ姿勢の変化を、カチカチ感呈示装置を介さずに検証する」という目的に対しては問題無い測定手法であると考えられる。

3.7.3. 実験手続き

実験の様子を図 3-21 に示す。被験者 1 名に対し目標角度 2 値×カチカチ感あり／なし条件で各 2 試行ずつ、合計 8 試行を行った。試行順序は被験者ごとに毎回変更して行った。1 試行での腕立て伏せの回数はこれまでと同様に 3 回とし、腕立て伏せ時の両手足の位置の固定および屈伸運動のタイミング等の実験手続きも実験 1 と同様に行った。



図 3-20 実験設備：光学式モーショキャプチャシステム



図 3-21 実験の様子：光学式モーショキャプチャを用いた肩の高さ測定

3.7.4. 実験結果

90 度屈伸時のカチカチ感ありと無しの場合における肩の高さの時間的推移を図 3-22 に、MAX 屈伸時のものを図 3-23 に示す。本実験結果に対してカチカチ感有無の 1 要因被験者内計画とみなし分散分析を行った。その結果、90 度屈伸 ($F(1,7)=0.93, n.s$)、MAX 屈伸 ($F(1,7)=2.44, n.s$) 共にカチカチ感有無の間で肩の高さに有意差は認められなかった。

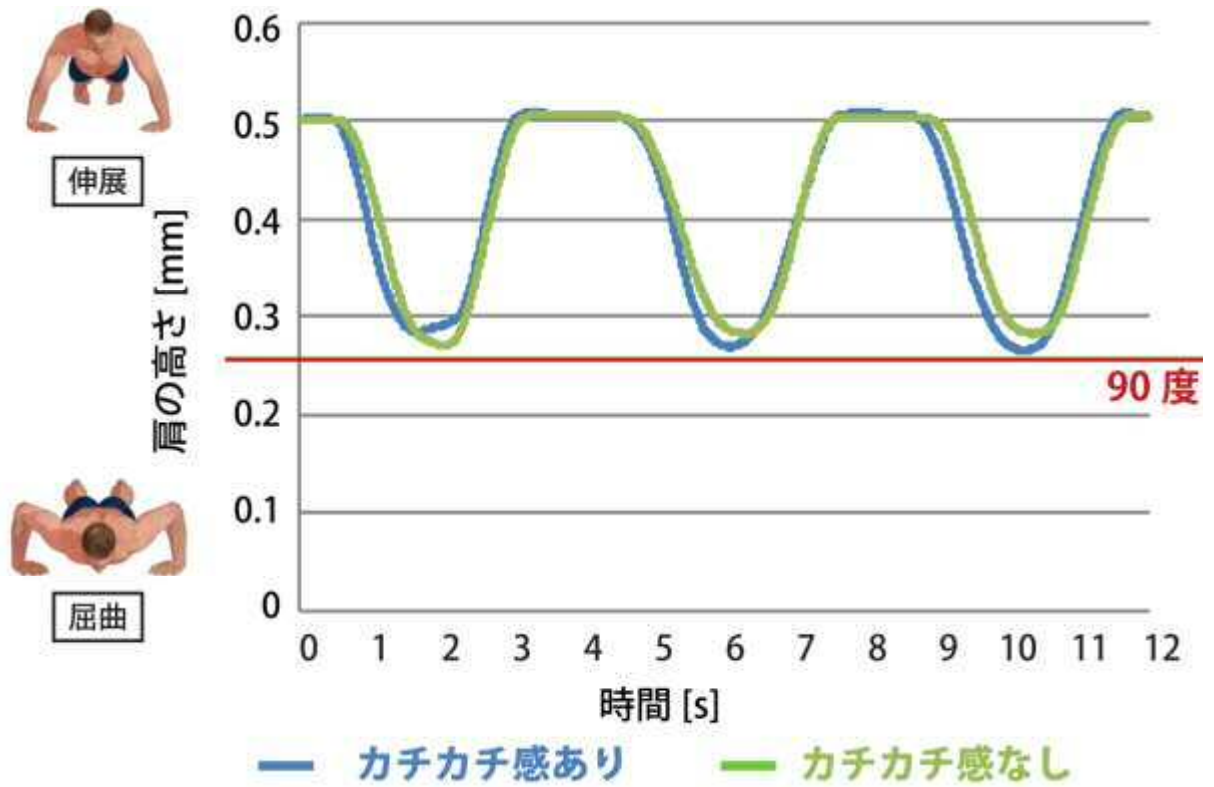


図 3-22 肩の高さの時間的变化 (90度屈伸)

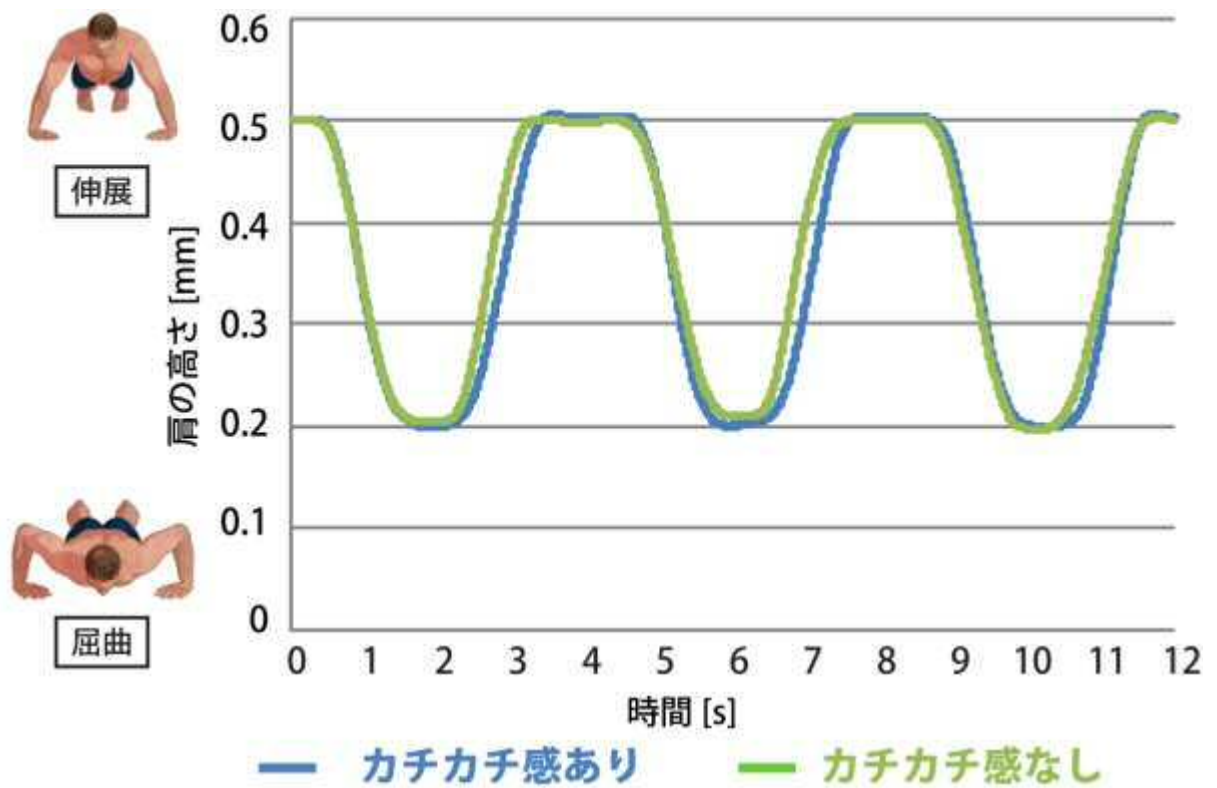


図 3-23 肩の高さの時間的变化 (MAX屈伸)

3.7.5. 考察

3.7.5.1. 腕部の肉変形による計測角度のずれ

本結果は「カチカチ感の付与は腕立て伏せ時の肘屈伸に影響を及ぼさない」というものであった。これは実験 1 の「カチカチ感付与により肘屈伸が小さくなる」という結果と相反するものである。

このような結果が出た原因として、カチカチ感呈示装置を装着した際の腕の肉の変形が考えられる（図 3-24）。本装置を装着した被験者が腕を動かすと、どうしても皮膚・肉の変形が発生してしまう。これにより装置を正しい肘角度、すなわち骨の角度と完全に同期して回転させることができなかつたと考えられる。実験 1 においては本装置を介して回転角度をロータリセンサで測定していたため、実際の肘角度と誤差が生じたものと考えられる。すなわち、残念ながら本来は実験 1 の段階で肘屈伸角度に有意な差が無く、運動量錯誤は生起していなかったということが示唆された。

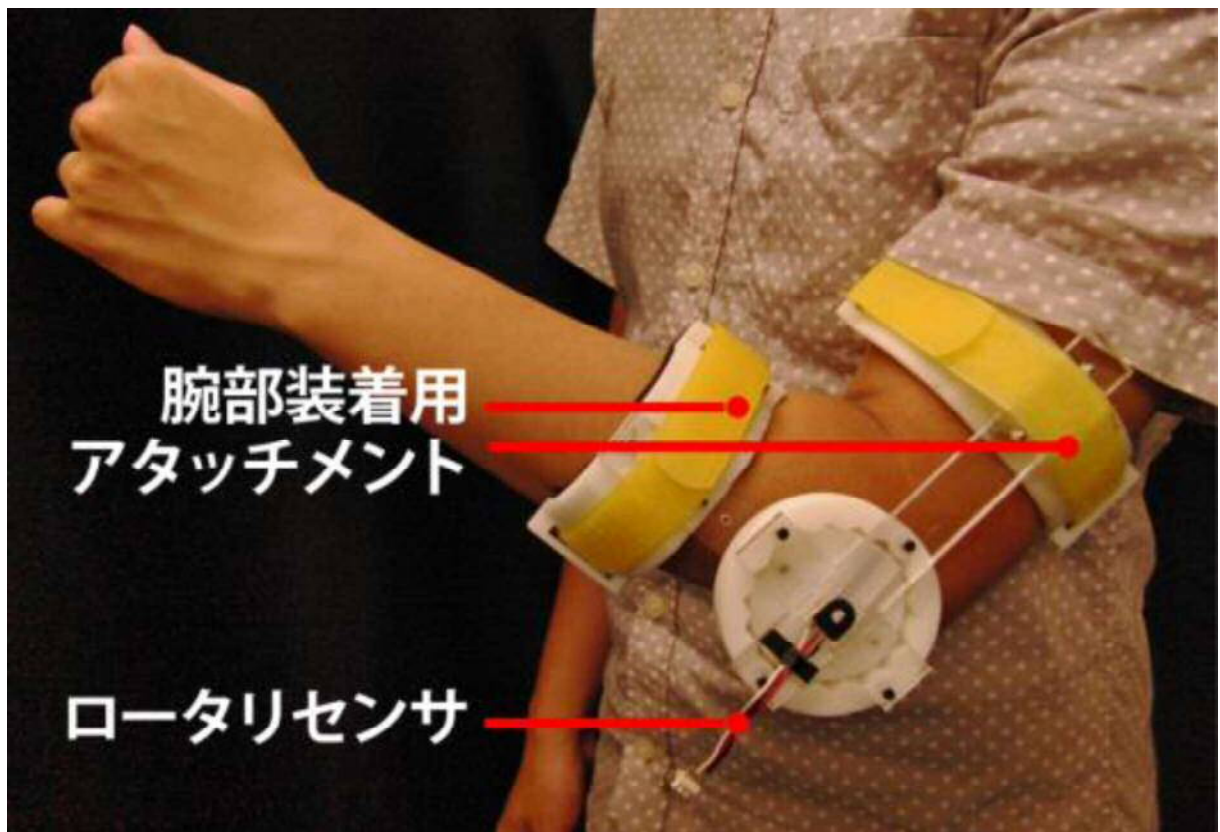


図 3-24 カチカチ感呈示装置装着時における腕部の肉の変形

3.7.5.2. 考察：疲労による姿勢の崩れを抑制するカチカチ感

カチカチ感・目標角度共に同じ条件で2試行を行ったうちの「2試行目のみ」を抽出して分析したところ、カチカチ感を付与した場合に肘屈伸が大きくなる傾向がわずかに見られた($F(1,7)=0.13$)。統計学的に有意傾向のある値ではないが、カチカチ感が及ぼす何らかの影響がこの数値に現れていると私は感じ、ここに着目した。

この原因として私が考えたのは、疲労による筋感覚の鈍りである。複数回腕立て伏せを行うことによって疲れてくると、ヒトは無意識のうちに屈伸が小さくなってしまふ。これは常に同じ姿勢を保とうと思っけていても、疲労により筋からの深部感覚が鈍るため屈伸量がわかりにくくなってしまっていることが原因であると考えられる。しかしここでカチカチ感が呈示されている場合は、カチカチ感を屈伸量の手がかりとして頼ることができるため、疲労があつたとしても屈伸量を知覚することができる。これにより疲労効果が考えられる第2試行でも肘屈伸が小さくならず腕立て伏せを行えたと考えられる。

3.8. 実験 3:水平方向への腕屈伸運動の教示・再現

3.8.1. 実験の目的

本実験の目的は、筋疲労がない場合におけるカチカチ感の肘屈伸への影響を検証することである。そこで、教示された肘屈伸角度を再現するように肘を屈伸するというタスクにおいて、カチカチ感の有無でその再現精度に差が出るかどうかを検証した。これまでの実験におけるタスクは全て腕立て伏せであつたが、腕立て伏せでは筋肉に過負荷がかかり容易に筋疲労が発生してしまうと考えられるので、単純に片腕を曲げるというタスクに変更して実験を行った。

実験結果の予想としては、カチカチ感を付与した場合にはカチカチ感を屈伸量の頼りにして屈伸できるのでより正確に教示角度を再現できると考えた。

3.8.2. 実験環境

被験者は21~25歳の男性4名とした。図3-25に実験の模式図を示す。実験3と同様の光学式モーションキャプチャシステムを用い、被験者の左手首に装着したマーカーの位置をカメラ3台で測定した。被験者には実験中常にアイマスクを装着させ、視覚を完全に遮断した状態で肘を屈伸させた。テーブルの上には腕固定台、分度器および0度確認用の箱を設置した。

被験者が教示を受ける肘角度は70度、80度、90度、100度の4値であり、教示する順序はランダムに入れ替えた。被験者はこの4値のどれかに教示されることを知らされていなかった。

3.8.3. 実験手続き

まず被験者は机の前に座つた状態で腕固定台の上に左上腕を載せ、実験中に腕の位置が動かないようにした。このとき実験者は被験者の肘の位置に分度器の中心を移動し、教示を行う際に被験者の肘角度がわかるようにした。0度確認用の箱は、被験者が左腕を完全に伸展させた状態で

被験者の左前腕に接触するように設置し、視覚が遮断された状態でも腕の初期位置を知覚できるようにした。その後被験者にアイマスクを装着させ、視覚を完全に遮断した。

実験者は被験者に対し、左腕の力を完全に抜くように指示した。これは腕の筋活動を可能な限り抑制し、カチカチ感のみを屈伸量の手がかりとして頼らせるためである。実験者は片手で被験者の前腕と持ち、もう片手を被験者の上腕に添え、教示角度まで肘を屈曲させた後、0度となる位置まで伸展させた(図 3-26 右)。肘の屈曲から伸展までにかかる時間は全被験者共通して約 3 秒とし、伸展させてから約 10 秒間そのままの状態で待機した。

次に被験者は自らの力で腕を動かし、教示された角度を再現するように肘を屈伸させ、元に戻した(図 3-26 左)。この教示→再現動作を 1 試行とし、被験者 1 名に対してカチカチ感(あり/なし)、教示角度(70,80,90,100 度)を変えて各 2 試行ずつ、計 16 試行を行った。

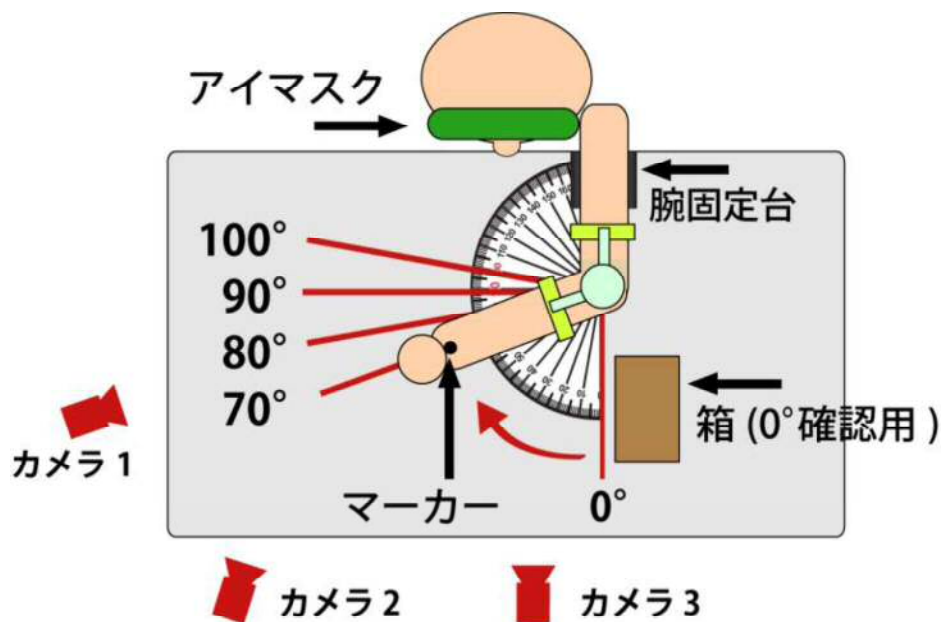


図 3-25 水平方向への腕屈伸運動を計測する設備

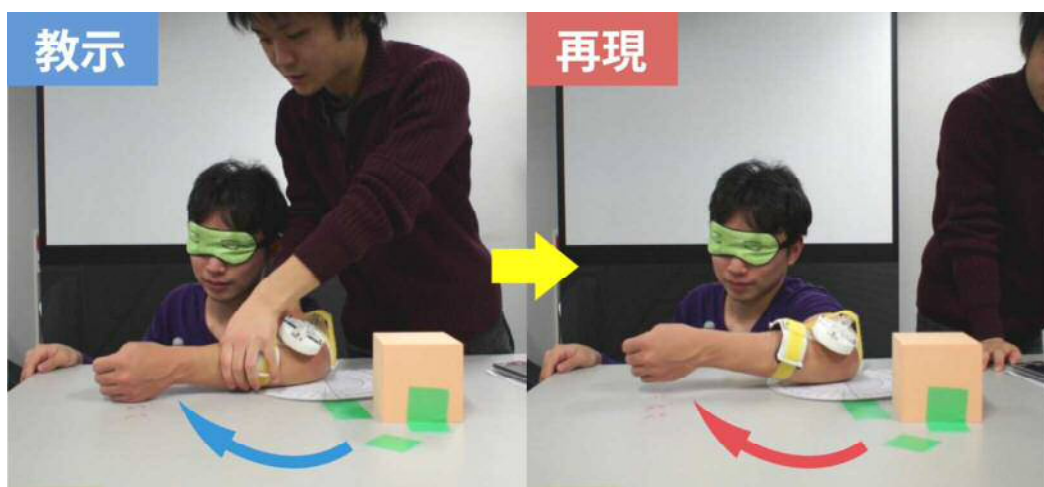


図 3-26 水平方向への腕屈伸の教示と再現の様子

3.8.4. 実験結果

図 3-27 にある被験者 1 名の教示時の軌跡と再現時の軌跡の比較を示す。実験結果を分析するために、再現軌跡の最大到達点と教示軌跡の最大到達点の 2 点間の符号付き距離を、再現時と教示時の差とした。

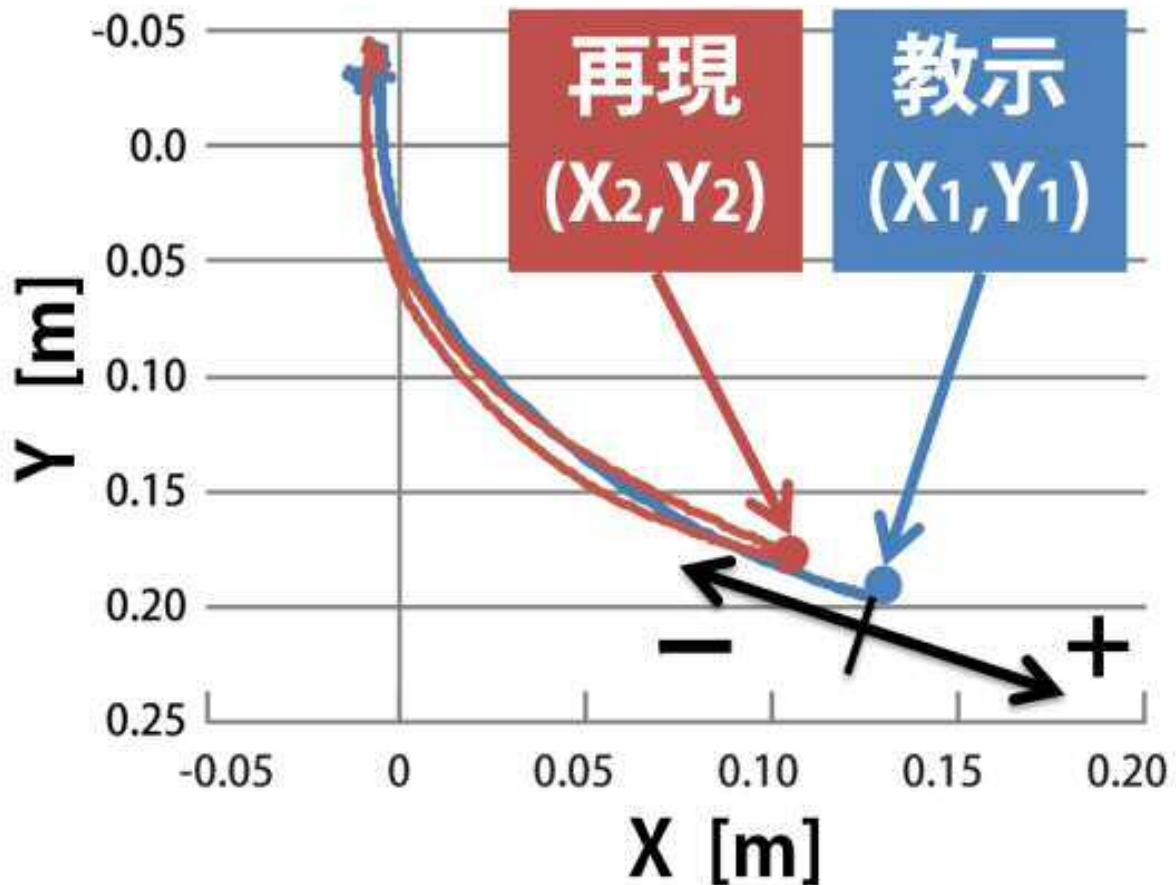


図 3-27 教示時と再現時の軌跡の比較

本実験結果に対してカチカチ感・教示角度・試行の 3 要因 ($2 \times 4 \times 2$) 被験者内分析とみなし分散分析を行った。図 3-28 に分析結果を示す。グラフの横軸はカチカチ感の有無と試行を、縦軸は教示軌跡と再現軌跡の差を示す。エラーバーは被験者間の標準偏差である。カチカチ感ありにおいては試行間で有意差は認められなかったものの、カチカチ感なしにおいては試行間で有意差が認められた($F(1,3)=16.45, p<0.05$)。

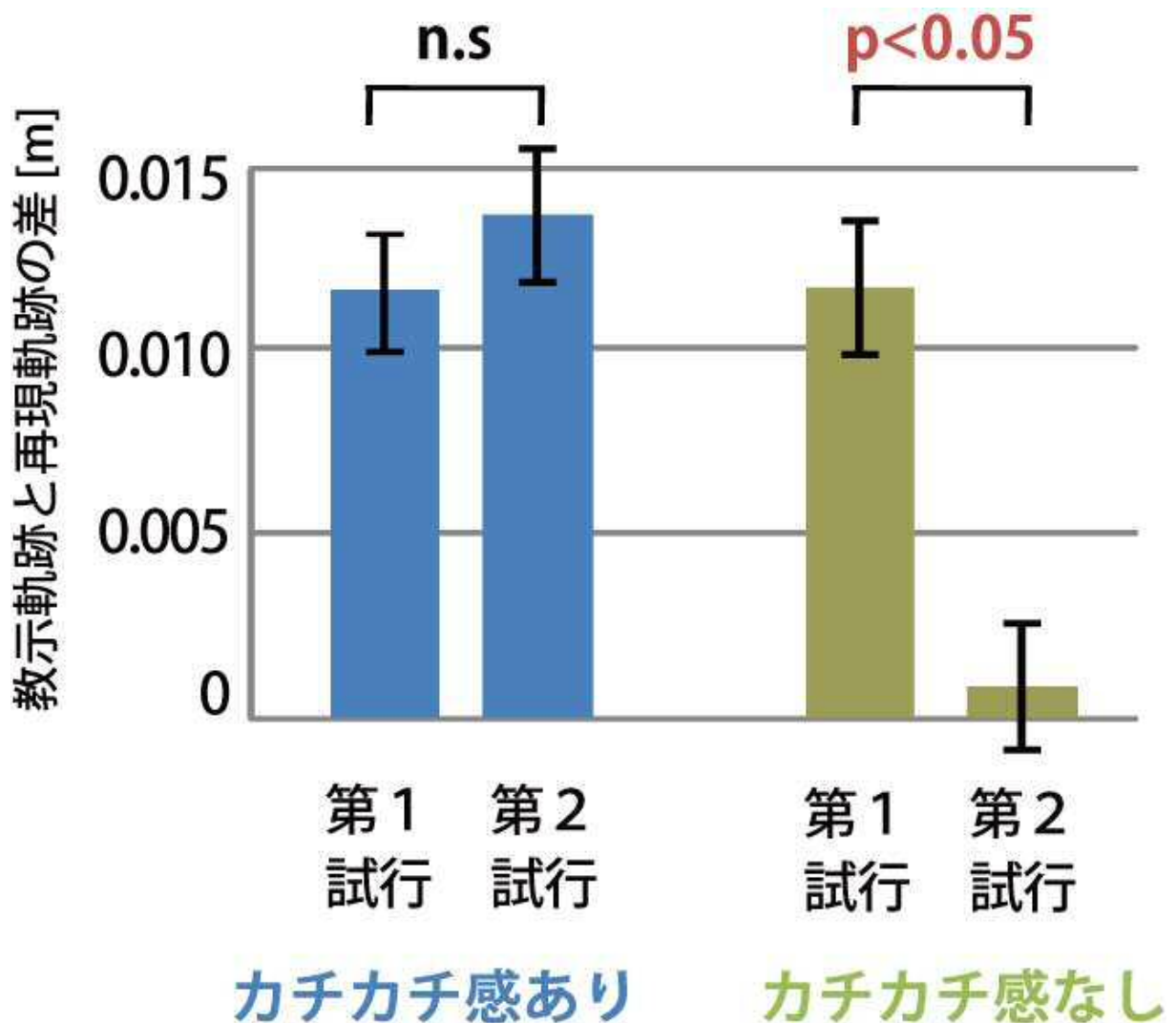


図 3-28 教示軌跡と再現軌跡の差の比較

3.8.5. 考察

3.8.5.1. 姿勢安定効果

カチカチ感ありの場合において、第1・第2試行共に教示軌跡からのずれは同じである。この結果は、我々の予想していた「カチカチ感ありの場合はより正確に教示角度を再現できる」というものとは異なるが、視点を変えると「毎試行同じ角度をとることができた」という結果とも捉えることができる。すなわち、カチカチ感なしの場合は毎回同じ姿勢を取ろうとしてもずれてしまうが、カチカチ感ありの場合はカチカチ感を絶対的な指標として手がかりにすることができ、毎回同じ姿勢を安定してとることができる。私はこれを姿勢安定効果と呼ぶこととした。

姿勢安定効果をマスゲームやダンスなどに応用することで、毎回同じ姿勢をとり続けることができ、運動姿勢の教示になると考えられる (図 3-29)。



図 3-29 姿勢安定効果の応用例
マスゲーム（上）、ラインダンス（下）

3.8.5.2. カチカチ感無し時における学習効果の否定

図 3-28 より、カチカチ感なしの場合は第 2 試行において教示軌跡からのずれが小さく、より正確に教示角度を再現できていたと考えられる。しかしながら、この結果からカチカチ感なしの方が教示による学習効果が高かったと結論付けることは困難である。本実験においては被験者が教示角度の再現動作を行った後に正しい角度の解答は与えていなかった。そのため再現角度がどれだけ教示角度に近かったかを知覚することができず、学習は行えなかったといえる。また、本実験では 2 試行しか行っていないため、仮に第 3 試行を行った場合は図 5.16 におけるエラーがマイナス方向に出てしまう可能性もある。したがって、今後はさらに試行数を増やして実験を行う必要があると考えられる。

第4章 アクセルペダルへのクリック感付与による操作性向上

本章では第一の戦略である「体性感覚の増強」を利用してアクセルペダルの操作性を向上させる手法について取り扱う。

4.1. 背景：自動車の運転の難しさ

自動車の運転において、最も気をつけるべきことは安全に運転することである。しかし自動車の運転は視覚・聴覚・触覚を用いて様々なタスク（e.g., 歩行者注意, 車幅確認, 後方確認, ナビゲーション音声聞き取り, ステアリング操作, アクセル・ブレーキペダル操作）を同時かつ正確に行わなければならない極めて困難な操作であるといえる[52]。運転免許取得の過程である程度は訓練を受けるが、運転の安全性をより高めるためにはより適切な操作が必要であると考えられる。



図 4-1 自動車運転に必要なタスク

様々な操作を複合的に行う必要があり難易度が高い。なお足元は視界から外れており、ペダルの操作は視覚に頼ることができない。

このような背景から、運転負荷を軽減し安全運転を促進するための車両搭載技術が多数提案さ

れている。広く利用されている簡単な方法としては、曲面鏡を用いたワイドビュールームミラーや、サイドミラーに取り付けるタイプの小型補助ミラー（図 4-2）などで死角を減らす、リヤカメラの映像をモニタに映し出す[53]、といったものが挙げられる。しかしながら運転に必要な情報の約 95%は視覚から得られており[54]、すでに大きな認知的負荷がかかっている。したがって運転補助のために視覚にさらに負荷をかけるという方法は別の視覚タスクのパフォーマンス低下に繋がると考えられる。またアラート音などを用いた聴覚的な運転補助は、環境ノイズ、カーナビゲーションの音声、車内音楽などにマスクされる恐れがあるため使いにくい。



図 4-2 安全性向上のための車両搭載技術。

左：小型補助サイドミラー。右：アラウンドビューモニター[53]。

4.2. 先行研究：触覚を用いた運転補助システム

近年、視覚・聴覚を使わず触覚を用いる自動車運転補助システムが注目を浴びている[56]。例えば振動フィードバックを使った衝突警告[57]、車線逸脱警告[58]、車線変更タイミング指示[59]、ナビゲーション[60]などが開発されている。自動速度制限システムである Intelligent Speed Adaptation [61]は、自車の速度が道路の制限速度を超えるとまず車内モニタとアラート音で警告しドライバーに減速を促す。しかしドライバーが減速を行わない場合は、自動的にアクセルペダルの反力を強める・エンジン出力を減衰させる等の方法で強制的に減速させる。同様の機能は Continental Automotive 社が開発した Accelerator Force Feedback Pedal [62]にも搭載されており、アクセルペダルの反力を制御するだけでなく、ペダルを振動させることにより適切なギヤシフトのタイミングを知らせる。本システムは一般に販売されている自動車にも搭載されている。

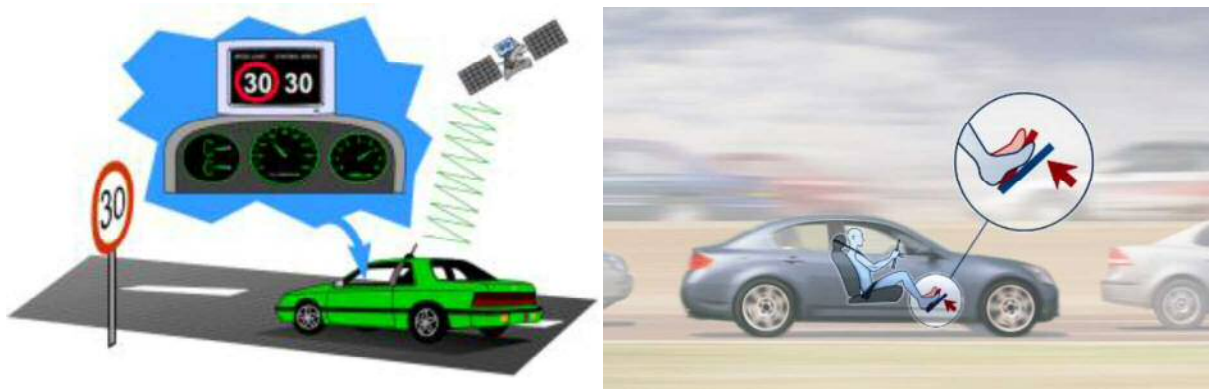


図 4-3 触覚フィードバックを用いた運転補助システムの例.

左 : Intelligent Speed Adaptation[61]. アクセルペダルの反力を強め、強制的に減速させる。
 右 : Accelerator Force Feedback Pedal [62]. ペダルの振動により適切なギヤシフトのタイミングを
 ドライバーに知らせる.

4.3. 既存の運転補助システムがもつ問題点

これらの先行研究で用いられている安全運転戦略は、車の適切な速度・車間距離などをドライバーに触覚を介して伝え、ドライバーはそれに従って操作することにより安全な運転を実現する、というものであった。これにより確かに自動車の安全性は向上したが、一方でドライバーの運転技能に関しては疑問が残る。

私は、運転補助システムが発達した現在こそドライバーの運転技能を向上させる必要があると考える。本項で示した運転補助システムに加え、すでに多くの自動車メーカーが導入しているクルーズコントロールシステム（ペダルを踏まずとも一定の速度や車間距離を維持する機能）[63][64]ではドライバーの操作に関わらず自動的にアクセル・ブレーキを制御するといった自動運転機能を持つため、ドライバーはシステムに頼りがちになってしまふと考えられる。したがってドライバーが運転補助システムを過信しすぎて注意散漫になり、事故が発生する恐れが考えられる。実際、車載レーダー等が正常に機能せず、頼りきっていた自動ブレーキがかからずに事故になった事例が報告されている[65]。このような事故に対し、事故の法的責任が運転者にあるのか自動車メーカーにあるのかといった問題も指摘されている[66]。どのような運転補助システムでも「絶対に衝突しない」といった確約はできないため、事故回避の最終判断はドライバーに委ねられているのである。こういった運転補助システムにおける問題点は、ドライバーを訓練し運転技能を向上させることが事故回避のために依然として重要であるということの意味する。

4.4. アクセルペダルの踏み込み量知覚能力の増強

そこで私は、第 3 章で示したカチカチ感のような離散的触覚フィードバックをアクセルペダルにも付与することで、ペダル操作の運動感覚を増強し、ペダルの踏み込み量を知覚しやすくできるのではないかと考えた。図 4-4 に示すようにアクセルペダルを一定角度踏み込む度に瞬間的な振動である「クリック感」を呈示することで、踏み込み量を知るための手がかりとなる触覚を返

す。これによりドライバーはより正確なペダル操作および加速度調節が可能になると考えられる。カチカチ感呈示による運動教示と同様にアクセルペダルの踏み込みはドライバーの能動的行為であるため、運動の能動性[37]を失っておらず、アクセル調節の学習に効果を発揮することが予想される。



図 4-4 クリック感を付与したアクセルペダル

可動範囲全体を 5 分割した角度を通過するたびに、ペダル裏に装着したボイスコイル振動子から瞬間的な正弦波を呈示した。

回転角度に同期して周期的な触覚を返す点では「カチカチ感」の戦術と同じであるが、「カチカチ感」が衝撃振動と反力の変化で構成されていたのに対し、「クリック感」は単純な振動刺激のみとする。これはアクセルペダルの反力が変化するとペダルの微調整が難しくなるであろうこと、また力覚呈示機構を組み込むと装置が複雑なることを考慮したためである。なお、本システムは既存の運転補助技術と組み合わせて利用することも可能であると考えている。

運転者の感覚を増強するシステムとしては、運転時の路面状態を足裏への振動刺激で知覚させるシステム[67]や、全方位レーザセンサを用いた死角の障害物検知[68]などがすでに存在するが、本研究ではアクセルペダルの位置・運動を知覚する感覚の増強に焦点を当てる。

4.5. アクセルペダル操作を補助する必要性

アクセルペダルの操作による加速度の調節は、適切な車間距離の維持、安全な右左折、なめらかな車庫入れなどのために正確に行うことが要求とされる。しかしドライバーは足元を見る余裕がないため踏み込み量の把握は足の体性感覚のみに頼らなければならない。つまり通常の自己運動が視覚・聴覚等も統合して知覚しているのに対してより難しいタスクとなっている。ダッシュボードのタコメーター（回転速度計）や速度メーターを見ることで間接的に踏み込み量を確認することもできるが、視覚はすでに他のタスクで大きな負荷がかかっているためメーターへ頻りに視点を移すことは難しい。また同じ踏み込み量でも自車の現在速度によってメーターの表示は変化するため絶対的な指標にはならない。

日本における 2010 年に発生した交差点内での交通事故数を図 4-5 に示す。この中で最も多い事故の種類は「追突」(約 38%) [69]であり、これにはアクセルペダルの不適切な操作が起因していると考えられる。また 2000 年から 2009 年までの 10 年間で交通事故全体の発生件数は約 21%減少しているが、ブレーキペダルとアクセルペダルの踏み違い事故が約 2%増加している [70]。すなわち全体に占める割合は増加傾向にあり、ペダル踏み違い事故は将来的に重大な問題となる可能性がある。図 4-6 に示す通り、全事故における運転者死亡率が 0.17%であるのに対しペダル踏み違い事故は 3.44%であり、運転者が死亡する確率の高い危険な事故であることがわかる。したがってアクセルペダルの踏み込み量知覚補助および操作性向上は、安全運転のために有効な手法であると期待できる。

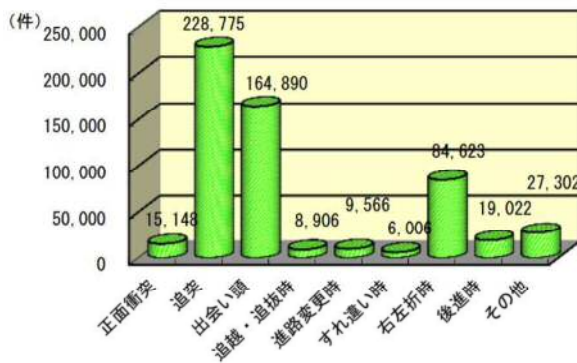


図 4-5 車両相互事故の類型別発生件数 [69]

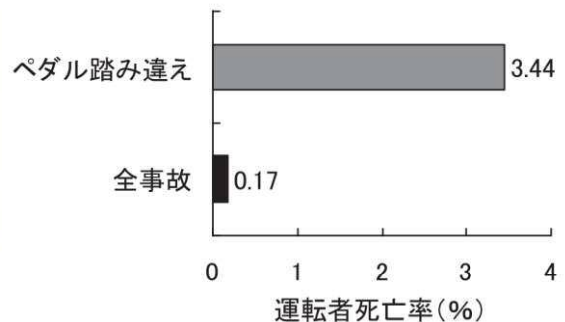


図 4-6 ペダル踏み違い事故の運転者死亡率
(平成 12~21 年合計) [70]

4.6. システム構成：クリック感付きアクセルペダル

クリック感を付与したアクセルペダルの構成を図 4-7 に示す。家庭用ゲーム機 PlayStation3 (Sony Computer Entertainment)のレースシミュレーションゲーム用アクセル/ブレーキペダルコントローラ (Driving Force GT, Logicool)を分解し、アクセルペダルのポテンシオメータからの出力電圧を PC の AD/DA ボード (PCI-3523A, Interface, 電圧変換レンジ $\pm 10V$, 解像度 12bit) で読み取ることでアクセルペダルの角度を得た。可動範囲全体を 5 分割した角度を通過するたびに瞬間的な正弦波を DA

出力し、オーディオアンプ(RSDA202, Rastene Ststens)で増幅、アクセルペダル裏面のボイスコイル型振動子(ForceReactor, アルプス電気)を駆動することでクリック感を呈示した。

振動の呈示には式(1)に示す減衰正弦波モデル[11][12]を用いた。

$$Q(t) = A(v)e^{-Bt} \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

ここで、 $Q(t)$ は物体への接触から時間 t が経過した後の振動加速度、 A は初期振幅係数、 v は衝突速度、 B は減衰係数、 f は振動周波数である。 A 、 B 、 f は材質によって定まるパラメータである。減衰正弦波モデルは異なる材質感を再現するために提案されたものであるが、瞬間的に立ち上がり減衰していく振動がマウスクリックに近い触覚を生む。そのためクリック感を呈示用に本モデルを採用し、 $A = 66 \text{ m/s}^{-1}$ 、 $B = 150 \text{ s}^{-1}$ 、 $f = 240 \text{ Hz}$ に設定し、1~2 波長(4.2ms~8.4ms)で振幅がほぼ 0 となるように減衰パラメータを調整した。用いた振動周波数 240Hz は、人間の触覚受容器のうち最も敏感に振動を知覚するパチニ小体の共振周波数であり (2.2.1 項参照)、足裏全体という広い面積でクリック感を呈示するためには最適であると考えられる。振動子として ForceReactor を採用した理由は、時間応答性に優れ、240Hz での駆動が可能であるためである。減衰正弦波モデルの本来の役割である材質感の再現については 5.3 節にて詳しく説明する。

なお今回のクリック感呈示はアクセルの角度に対する純粋な振動呈示のため、アクセルペダルを踏むための物理的な抵抗となることはない。

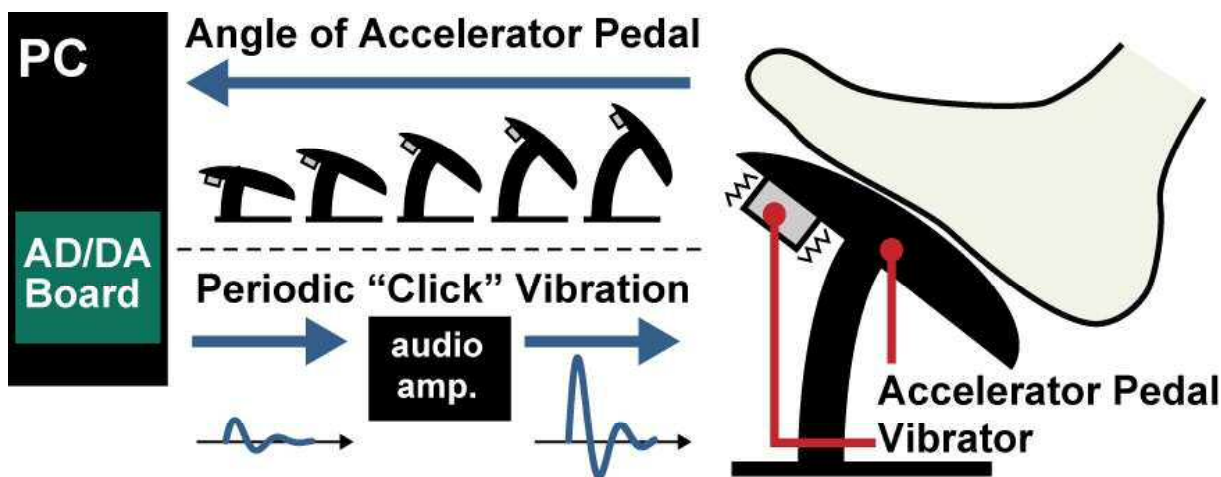


図 4-7 一定の踏込み角度ごとにクリック感を提示するアクセルペダル

4.7. 実験 1：ドライブシミュレータを使ったラップタイムとコースアウト確率の測定

クリック感の付与によりアクセルペダルの操作性が向上するかどうかを検証することを目的とし、ドライブシミュレータを用いた運転実験を行った。ラップタイム、コースアウト確率を計測し、クリック感の有無で比較した。また被験者のクリック感に対する評価について比較した。

4.7.1. 実験環境

被験者は 18～30 歳の 42 名とし、クリック感を呈示する群 (21 名・A 群) と、呈示しない群 (21 名・B 群) に分けた (表 4-1)。ドライブシミュレータとして PlayStation3 用ゲームソフト GRAN TURISMO 5 (ポリフォニー・デジタル社製) を用いた。本ゲームは 3D 表示グラフィック (図 4-8) および自動車の物理演算の再現性が高く、実世界のレーシングドライバー育成用ドライブシミュレータとしても使われすでに 8 名以上のプロレーシングドライバーを排出している[71]。したがって自動車の運転実験にも利用可能であると考えた。ディスプレイには家庭用テレビ最大級の 65V 型 3D テレビ (Sony 製, KDL-65HX920, 液晶シャッター眼鏡式 3D 表示) を用い、できる限りドライバーの周辺視を画面でカバーするようにした。運転中ゲームの BGM は OFF とし、効果音・環境音のみをヘッドホンから再生した。ドライバーの座席にはレーシングゲーム専用座席 (Playseat Revolution, Playseat) を用い、これにステアリングコントローラとクリック感呈示機構を組み込んだアクセル/ブレーキペダルコントローラ (4.6 節参照) を組み合わせ、実際の車の運転席を再現した (図 4-9)。本実験環境を図 4-10 に示す。

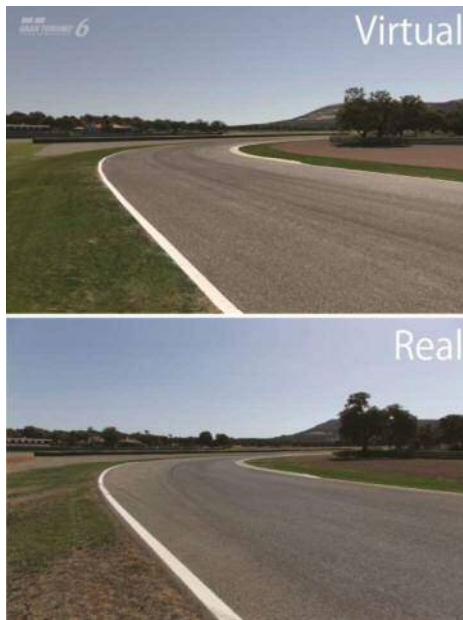


図 4-8 GRAN TURISMO[71]のグラフィックと現実写真の比較



図 4-9 専用運転座席と組み合わせたステアリング・ペダルコントローラ

実験タスクは本ゲームのトレーニングコース（国内 B 級ライセンス試験 07，アクセル調節練習用コース）で運転するというものであった。トレーニングコースを用いた理由は、通常のレースシミュレーションコースではアクセルを限界まで押し込んだ踏み状態と押さない状態の二つの中で切り替える方が良いタイムが出る傾向があり、アクセルの微調整を必要としないように観察されたためである。本コース 1 周を 1 試行し、本試行として A 群はクリック感ありで 30 試行，B 群はクリック感無しで 30 試行を行った。その後クリック感条件を逆にして追加試行 3 試行を行った（表 4-1）。

表 4-1 クリック感呈示条件

	A 群	B 群
本試行（30 試行）	クリック感あり	クリック感無し
追加試行（3 試行）	クリック感無し	クリック感あり



図 4-10 実験 1：ドライブシミュレータを使った実験の様子

4.7.2. 実験手続き

まず実験者から被験者に対して運転に対する自信について尋ねた。これは被験者の運転スキルを見積もるためであり、被験者は「自信を持って運転できる」「恐る恐るなら運転できる」「ペーパードライバーなので全く運転できない」「免許を持っていない」の 4 段階で回答した。

本実験について以下の内容を被験者に伝えた。

- アクセルワークの練習であること。
- ゴールまで 20～30 秒のコースを 30 回+3 回走ること。
- コースアウトを避けつつ出来るだけ早くゴールすること。
- 第 1・6・11・21 試行前に模範走行を確認し出来るだけその通りに運転すること。
- ステアリング・アクセル・ブレーキのみで操作すること。
- アクセルとブレーキは共に靴下を履いた状態の右足だけで踏むこと。

クリック感ありで実験を行う被験者に対しては、可動範囲内で等間隔に 5 回クリック感が呈示されることを伝えた。最後に 3D メガネとヘッドホンを装着して模範走行を見せ、試行を開始した。

各試行においてラップタイムとコースアウト回数を記録した。なおコースアウトした場合も 1 試行としてカウントした。本試行 30 回の後、クリック感条件を変えて追加試行 3 回を行った。これは被験者内でクリック感の効果を確認するためであり、ラップタイム・コースアウト確率のデータ分析からは除外した。最後にアンケート（クリック感付与による操作性向上に対する評価・クリック感の印象を回答）を行い、実験を終了した。

4.7.3. 実験結果・考察

被験者 40 名のうち以下の被験者を実験結果から省いた。

- (1) 普段からレースゲームを頻繁にプレイする者：経験者であるためナイーブとはいえないため。A 群の群から 3 名、B 群の群から 1 名を除外した。
- (2) 30 試行中 15 回以上コースアウトした者：運転技能が極めて低いためデータ解析に含めるべきではないため。A 群の群から 1 名、B 群から 3 名を除外した。なおこの時点で、コースアウトが原因で除外された被験者はクリック感無しの被験者よりも多くの被験者のほうが少ないことが分かる。

以上の除外により、結局クリック感ありの群は 17 名（男性 13 名、女性 4 名）、クリック感無しの群も 17 名（男性 11 名、女性 6 名）となった。また 30 試行中最初の 5 試行は練習とし、データ分析には用いなかった。

4.7.3.1. ラップタイム

図 4-11 に平均ラップタイムの推移を示す。横軸は試行回数、縦軸は平均ラップタイム、エラーバーは被験者間の標準偏差を示す。全体の傾向としてクリック感ありの場合の方が無しの場合よりもラップタイムが大きく、すなわち遅くなっていることが分かる。全ラップタイムの平均は、クリック感ありの場合で 23.046s (S.D. 1.53s)、無しの場合は 22.879s (S.D. 1.72s)であった。同じ傾向は最速ラップタイムにおいても見られた。しかしながら t 検定の結果有意な差は認められなかった ($p=0.75$, n.s.)。したがって、クリック感はラップタイムに影響しなかったと考えられる。

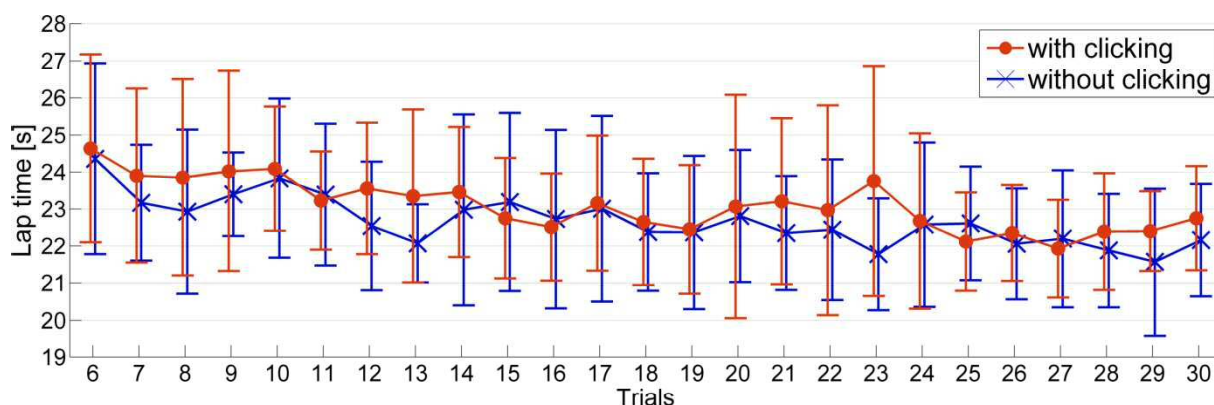


図 4-11 平均ラップタイムの推移

4.7.3.2. コースアウト確率

図 4-12 にコースアウト確率の推移を示す。横軸は試行回数、縦軸はラップタイムを示す。クリック感ありにおける平均コースアウト確率は 22.1%(S.D. 8.8)であり、クリック感無しでは 28.7%(S.D. 9.0)であった。t 検定の結果、このコースアウト確率の差は有意であると認められた ($p=0.008$)。したがって、アクセルペダルにクリック感を付与したほうがコースアウトしにくくなったといえる。

クリック感あり・無し両方のデータに対して線形フィッティング (図 4-12 破線) を行った (通常学習曲線に対するフィッティングは指数関数を用いるが、今回は比較のため簡易的な方法を用いた)。それぞれに対する線形フィッティングを見ると、クリック感ありの場合の方が線分の傾きが大きく、より学習効果が高いことが分かる。

以上、ラップタイムとコースアウト確率の結果をまとめると、クリック感を付与した場合ラップタイムに影響はないが、コースアウト確率は低下している。つまり、より「安全運転」になったといえる。

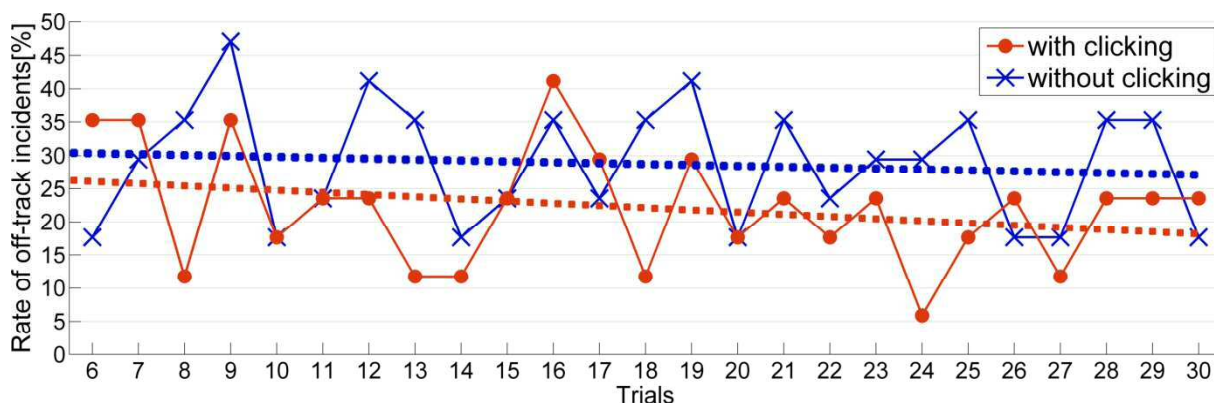


図 4-12 コースアウト確率の推移

4.7.3.3. アンケート結果：操作性に対する評価

全試行終了後アンケートを行い、被験者は「クリック感によってアクセルを制御しやすくなったかどうか」を1（制御しにくい）～5（制御しやすい）の5段階で評価した。

表 4-2 にアンケート結果を示す。まず運転スキルに関しては、「恐る恐るなら運転できる」群がクリック感を最も高く評価している。運転技能が低い被験者は運転に慣れていないため、クリック感が新たな触覚的手がかりとなり、アクセル調節の補助として働いていたと考えられる。一方で「自信を持って運転できる」群はクリック感を最も低く評価している。高い運転技能を持つ被験者はクリック感無しでの運転に慣れているため、クリック感の付与は逆に運転の妨げになってしまったと推測される。

本試行でのクリック感条件に関しては、クリック感無しで本実験を行った群の方がよりアクセル調節をしやすくなったと回答している。逆にクリック感ありで本実験を行った群は、クリック感が無くなったことで解放感を感じ、これがクリック感の低評価に繋がったものと考えられる。

表 4-2 クリック感による操作性向上に対する評価

運転に対する自信	A 群 (本試行クリック感あり)	B 群 (本試行クリック感無し)	平均
自身を持って運転できる	3.38	3.33	3.36
恐る恐るなら運転できる	3.00	4.67	3.83
ペーパードライバー	3.28	4.25	3.44
免許を持っていない	3.20	3.75	3.54
平均	3.14	3.86	3.50

4.7.3.4. クリック感の印象

操作性評価の他に、被験者はクリック感の印象について自由回答形式で回答した（表 4-3）。「アクセルの踏み込み量がよくわかる」という回答が17名で最も多く、他にも「より踏んでいる感がある」「アクセル調節が慎重になる」といった回答は運転がより安全運転側に変化したことを裏付けるものであるといえる。

ネガティブな回答としては、「クリック感がうるさくて運転の邪魔になる」という回答が7名から得られた。その内訳は、「自信を持って運転できる」群から3名、「恐る恐るなら運転できる」群から1名、「免許を持っていない」群から3名であった。

表 4-3 に示す回答以外にも「抵抗感・力覚を感じる」「クリック感がする位置にロックされているように感じる」といった回答が得られた。本実験では減衰振動のみの呈示であったが、減衰振動により物体-皮膚間の摩擦力を変化させることで擬似力覚が生起することがすでに知られている[72]。したがって本実験においてもこれに類する現象が発生し、その結果被験者はペダルの踏込みとは逆の方向に擬似的な力覚を感じていたと推測される。

表 4-3 クリック感の印象に対する評価

クリック感の印象	A 群 (本試行クリック感あり)	B 群 (本試行クリック感無し)	小計	合計
踏み込み量がよくわかる	8	9	17	29
より踏んでいる感がする	1	4	5	
よりアクセルを意識する	0	3	3	
アクセル調節が慎重になる	0	2	2	
触覚的に気持ち良い	1	1	2	
うるさくて運転の邪魔	4	3	7	7

Stick-Slip transition

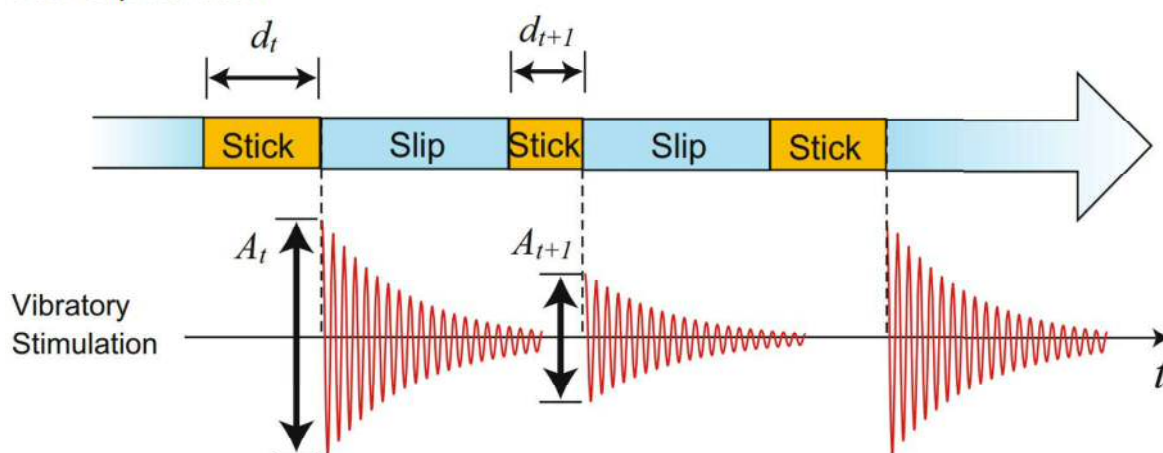


図 4-13 振動による物体-皮膚間の摩擦力変化を用いた垂直方向への力覚呈示 [72]

4.8. 実験 2： クリック感呈示回数の最適化

実験 1 (4.7 節) ではクリック感フィードバックがアクセルペダルの操作性向上に貢献することを証明した。しかしながら、ペダルの可動範囲内で呈示されるクリック感振動の回数が 5 回の場合のみで実験を行っており、この回数の最適化はされていない。したがって第 2 実験としてクリック感呈示回数、すなわち分解能の最適化を試みた。

また実験 1 における問題点の一つとして、被験者に対し出来るだけ早くゴールするよう指示していたことが挙げられる。このようなタスクは実際の運転環境とは異なるものであり、実験前の説明として不適切であったといえる。したがって本実験では、実際の運転環境と同様に安全運転を心がけるよう指示した。また実験 1 においてクリック感フィードバックに対して力覚を感じたという報告が得られたため、本実験ではすべての被験者に対して力覚を感じたかどうかを回答させた。

4.8.1. 実験環境

本実験は、アクセルペダルのクリック感分解能以外は全て実験 1 と同じ実験環境で行った。簡単な予備実験を行ったところ、可動範囲内で呈示するクリック感は 9 回（分解能 9）を超えるとクリック感呈示回数を数えられないような継続的な振動として知覚され、操作の邪魔になるように感じられた。また分解能 3 未満だとペダルの角度を把握するための手がかりとしては少なすぎると感じられた。したがって本実験では分解能 3, 5, 7, 9 の 4 条件を比較した。なお分解能 5 は実験 1 で用いていた分解能である。

実験一試行のタスクは、前回の実験と同じコースを 1 回ゴールまで走行することとした。ただし試行回数は 3 回とした。被験者は前回の実験に参加していない 17~37 歳の全 40 名とした。前回の実験と同様に、被験者は運転スキルが均等になるように 4 つのグループに分けられた。実験者は各グループに 4 つの分解能条件のうち一つを割り当てた。

4.8.2. 実験手続き

最初の試行の前に実験者は被験者に対して、実際に運転する時と同様に安全運転を行い、絶対にコースアウトしないよう厳しく指示した。しかし一方で 45 秒以内にゴールするよう指示した。この制限時間はあまりにもゆっくり走る運転、例えば頻繁に停止を繰り返すような運転を防ぐために設定したものであり、そのような運転をしなければ急がずとも 45 秒以内にゴールすることが可能である。

第一試行では、全被験者がクリック感無し条件を行った。本試行はトレーニングとし、実験結果からは除外した。第二試行では被験者の半分がクリック感あり条件で、もう半分がクリック感無し条件で実験を行い、第三試行では逆の条件で実験を行った。実験者はゴールまでのラップタイムとコースアウト回数を記録した。

第三試行終了後、実験者は被験者に対し下記の 3 つの質問に回答させた。

- Q1. クリック感によってアクセルペダルの位置を把握するのが簡単になりましたか？
- Q2. クリック感によってアクセルペダルを操作しやすくなりましたか？
- Q3. クリック感が呈示されたとき、足に反力を感じましたか？

Q1 および Q2 は 0~100 点（0：より難しくなった、50：どちらの条件でも同等、100：より簡単になった）で回答させ、Q3 は Yes/No の二択で回答させた。

4.8.3. 実験結果・考察

4.8.3.1. ラップタイムおよびコースアウト確率

全ての被験者が制限時間である 45 秒以内にゴールした。各分解能条件におけるラップタイムに対し一要因被験者間分散分析を行った結果、各分解能の間に有意差は認められなかった($F(3,32) = 0.9$, $MSe = 21.086$, n.s.). 本実験結果は前回の実験結果（分解能 5 と分解能 0 でラップタイムに有意

差無し)と合致するものであった。

本実験では安全運転を行いコースアウトしないよう事前に厳しく注意していたが、全 80 試行 (被験者 40 名×クリック感 2 条件×各 1 試行) のうち 6.25%がコースアウトとなった。しかしこの値は前回の実験でのコースアウト割合 26.47%に比べると明らかに低く、安全運転を心がける実際の運転環境に近づいたと考えられる。

4.8.3.2. アクセルペダルの位置把握 (質問 1)

図 4-14 (左) に、Q1 に対する被験者の評価を示す。被験者による全ての評価が 70 点を超過しており、全体の平均は 80.0 点であった。分解能別では分解能 7 が最も高く評価されていたものの (86.0 点)、分解能条件に対し一要因被験者間分散分析を行った結果、有意差は認められなかった ($F(3,36) = 0.20, MSe = 850.9, n.s.$)。

4.8.3.3. アクセルペダルの操作性 (質問 2)

図 4-14 (右) に、Q2 に対する被験者の評価を示す。全ての評価が 65 点を超過しており、全体の平均は 67.9 点であった。最も高く評価されていた分解能条件は分解能 9 で、平均 74.0 点であった。しかしながらペダルの位置把握と同様に分解能条件間で有意差は認められなかった (一要因被験者間分散分析, $F(3,36) = 0.20, MSe = 850.9, n.s.$)。

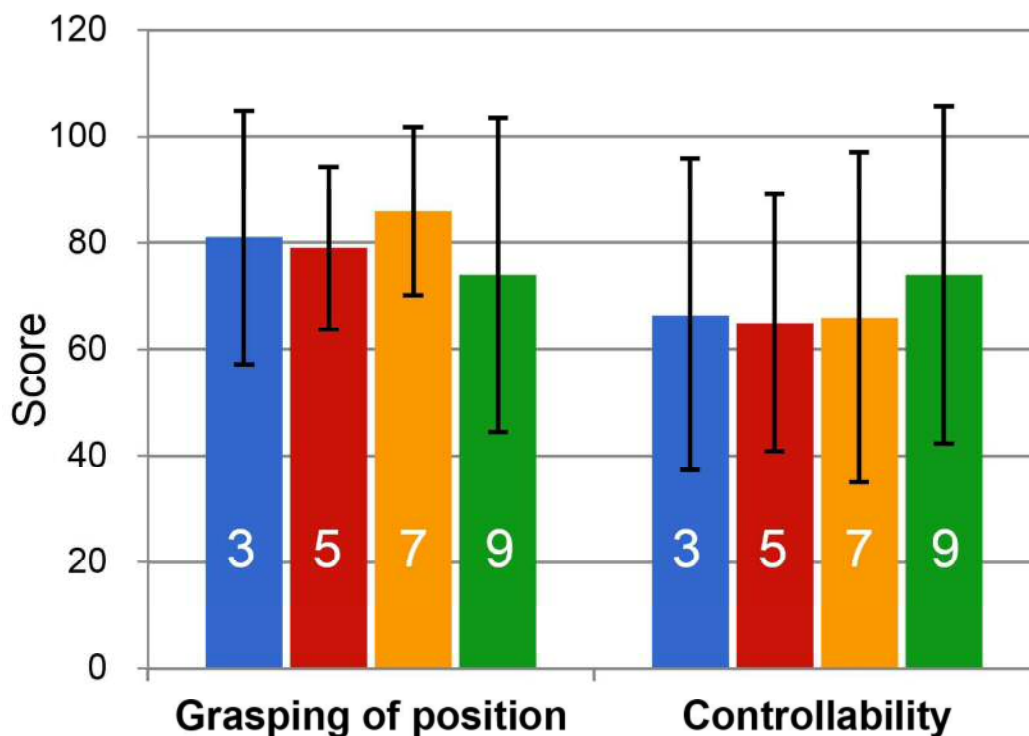


図 4-14 分解能 3, 5, 7, 9 に対するアクセルペダルの位置および操作性の評価

(0 : より難しくなった 50 : どちらの条件でも同等 100 : より簡単になった)

アクセルペダルの位置把握と操作性に関する結果をまとめると、分解能 3 から 9 の間ではどの

分解能でもほぼ同等の効果があることがわかった。またペダルの位置把握と操作性の評価について相関分析を行った結果、緩やかな相関が認められた ($R^2 = 0.28, p < 0.001$)。したがってクリック感フィードバックによりアクセルペダルの位置を把握しやすくすることはアクセルペダルの操作性を向上させていたと考えられる。

4.8.3.4. クリック感呈示による擬似力覚の生起

表 4-4 に、Q3 に対する被験者の評価（クリック感呈示時に擬似力覚を感じた確率）を示す。全ての分解能条件において、半分以上の被験者が擬似力覚を感じていることが分かる。特に分解能 5 においては 80%の被験者（10 名中 8 名）が力覚を感じたと回答していた。一方で Tukey-Kramer 法による事前多重比較の結果、4 つの分解能条件間に有意差は認められなかった。

全体では平均 65%の被験者がクリック感振動により擬似力覚を感じていた。減衰正弦波振動により擬似力覚を生起させる本手法は、ペダルに機械的に複雑な機構を組み込むことなくバーチャルな反力を呈示することができる点で応用の可能性があるといえる。例えば走行中の路面状況に応じてペダルにバーチャルな反力を加えるシステムを作る場合、反力の呈示に関してはペダルに振動子を取り付けるだけで実現できると考えられる。

表 4-4 擬似力覚の生起確率

Resolution	3	5	7	9	Total
Ratio	60%	80%	70%	50%	65%

第5章 周期的な衝撃振動フィードバックによる 身体材質感の変調

本章では第二の戦略である「体性感覚の変調」を利用して人体の材質感を変調する手法について取り扱う。

5.1. 背景：人体の材質の変調

人間の身体は、筋・腱・骨などといった生体物質により構成されている。しかし我々が身体を動かした時、これらの材質について意識することはない。一方で、映画・漫画・アニメなどでのフィクション作品では、ロボット[8]やゴム人間[9]など身体が人間とは異なる材質で構成されているキャラクターが登場する。たとえ実在しないキャラクターであると分かっているとしても、その身体的特性は極めて興味深く、視聴者の多くが一度はそのキャラクターになってみたいと思うだろう。

それでは、このような特殊なキャラクターの身体を手に入れるためにはどのようにしたら良いのだろうか。まず、視覚・聴覚的に実現することはすでに可能である。例えば図 5-1 に示すようなジェスチャ入力ビデオゲームでは、プレイヤーの動きをゲーム内のキャラクターの動きに反映させることで、まるでプレイヤー自身がゲーム内キャラクターになっているかのような環境を視覚・聴覚的に再現している[73][74]。またキャラクターの外見を模倣した服を身にまとうコスプレでも視覚的にキャラクターになりきることが可能である。またカメラで撮影したユーザの身体画像に三次元コンピュータグラフィックス（以後 3DCG と記す）を重畳し、ヘッドマウントディスプレイ（Head mounted display, 以後 HMD と記す）を介して自己身体を視認する方法も考えられる。しかしながら、触覚的もしくは体性感覚的にキャラクターになりきることが難しい。キャラクターが感じている身体感覚は我々が経験したことの無い感覚であるため想像することが困難である。



図 5-1 運動入力を用いてキャラクターになりきるゲームの例（左：[73]，右：[74]）

そこで本研究では、体性感覚操作の第二戦略である「体性感覚の変調」に基づき、人間が知覚する主観的な身体材質感を変調することを試みる。私は物体衝突時に生じる振動特性を再現する振動モデル[11]に着目し、これを人体に適用することを提案する。材質感ごとに波形が変化する本振動モデルをユーザの肘角度に同期させて肘関節に呈示することで、ゴム・木材・アルミニウムの3つの材質を再現する。

本手法によりユーザ自身の身体が金属やゴムになった身体感覚を再現できれば、例えば特殊な身体材質を持つスーパーヒーローになりきるゲームなど新たなエンタテインメントシステムへの応用が期待できる。



図 5-2 人体の材質感変調のイメージ
左から順にゴム，木材，アルミニウムの腕を示す。

5.2. 先行研究

5.2.1. 物体の触覚的特性の変調

人間の触覚を変調する研究はこれまでも数多く行われてきた。例えば、触覚 AR (Augmented Reality, 拡張現実感) に分類される研究では、力覚呈示装置を用いて実物体の硬さ[75]や境界[76]をバーチャルに変更するシステムが提案されている。

物体に生じる触覚情報を記録、モデリング、再生することで物体の触覚的材質感を変更することも可能であり、例えば砂利や霜柱を踏みしめた感覚[77]や、水槽の中に手を入れた感覚[78]、様々な材質の表面を撫でた感覚[79]、木材や金属を叩いた感覚[11][80]、液体を注いだ際の感覚[81]などを再現することができる (図 5-4)。

モデリングを行わずに記録された生データをそのまま再生する触覚呈示手法[82][83][84][85]も提案されており、複雑な信号処理が必要ないため簡便な機材で触覚呈示が可能である。これらのシステムは、我々が触れる様々な物体の触覚的特性を変化させることができる。

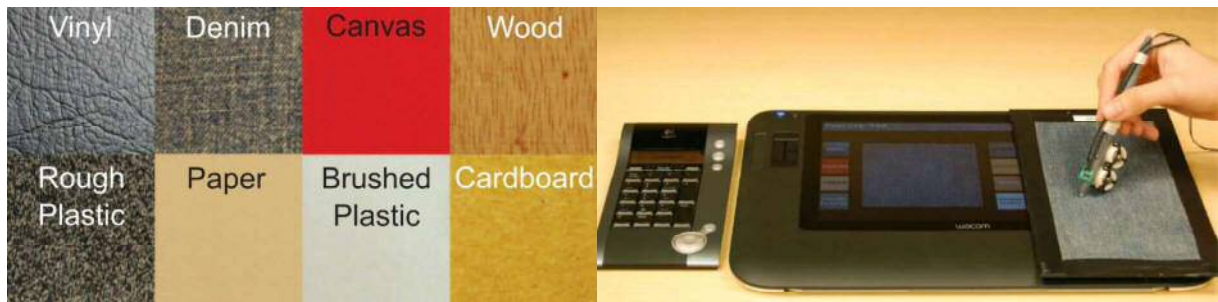


図 5-3 振動加速度の記録・モデリング・再生によるテクスチャ感の再現[79]

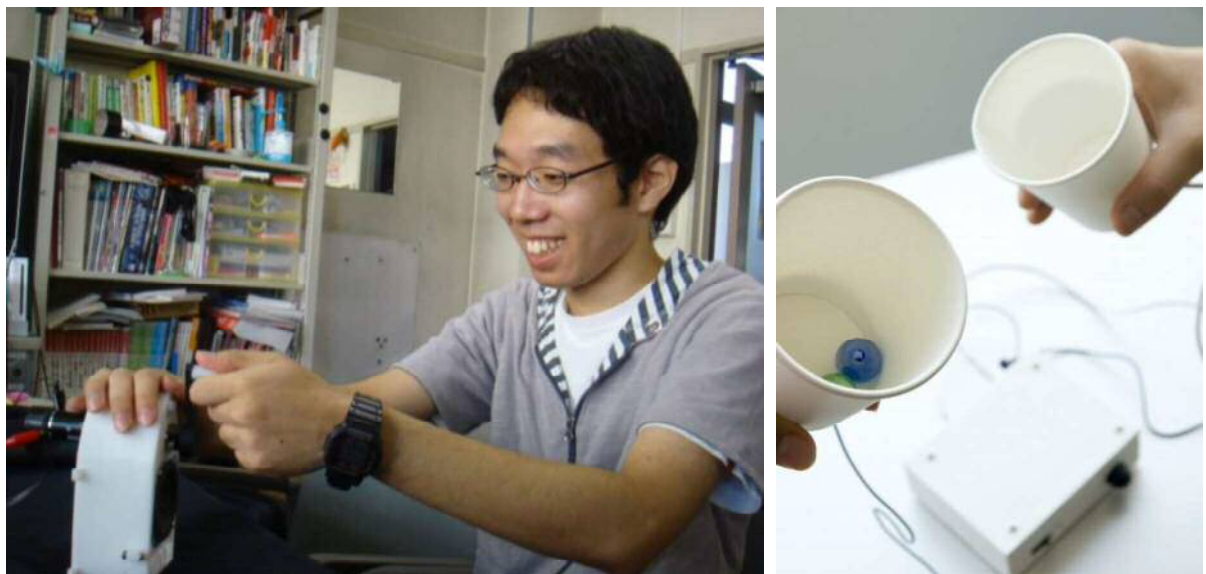


図 5-4 物体の触覚的特性の変調

左：鉛筆削り時に生じるトルクの記録・再生を用いた無限鉛筆削りデバイス[82]

右：振動データの記録と再生を用いたプロトタイピングツール「TECHTILE Toolkit」[85]

5.2.2. 自己の身体感覚の変調

環境に存在する物体ではなく人間自身の身体感覚を変化させる研究も行われており，その一つとして運動錯覚が挙げられる．前腕の運動錯覚は固定した腕の肘部筋紡錘に 100Hz 程度[86]の振動触覚刺激を与え，筋紡錘を人工的に興奮させることで引き起こされ[87]，実際には動いていないにも関わらず前腕が伸展しているような感覚を生起させることができる[88]．またこのとき手で鼻をつまんでいると鼻が伸びたような錯覚 (i.e., ピノッキオ錯覚[89]) が生じることも報告されており，人間には不可能な身体運動の感覚まで引き起こすことが知られている．これらの運動錯覚の応用し，身体を動かさずに運動の感覚のみを創出する試み[90]もある．

以上，5.2.1 項および本項において「物体の触覚的特性の変調」と「自己の身体感覚の変調」に関する先行研究を示した．しかしながら，「自己身体の材質感変調」に着目した研究は未だ提案されていない．

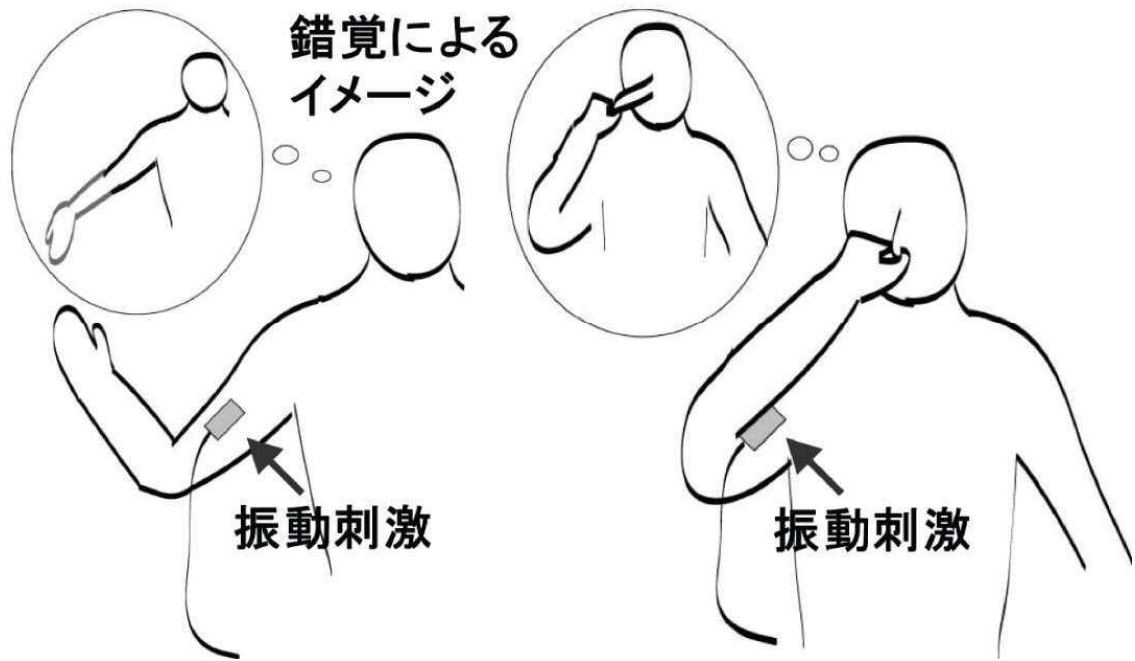


図 5-5 肘部筋紡錘への振動刺激による伸展錯覚とピノッキオ錯覚[90]

5.3. Reality-Based approach による材質感の再現

我々は特殊な材質で構成された身体感覚を知らない一方で、身体外部に存在する物体がどのように感じられるかについてはよく知っており、物体が持つ触覚的特性からその材質を特定することができる。主観的なリアリズムが実際の物理現象よりも材質の判別に貢献していることから、本稿ではユーザのリアリズムに基づいた既知の材質感呈示手法を用いることとする。

物体が衝突した際に生じる高周波振動は、その物体の判別に貢献する重要な手がかりであるといえる[11][91]。Wellman と Howe[11]は、人間が 1kHz 程度の振動まで皮膚感覚として知覚できるのに対し触力覚呈示装置では 30Hz 程度の振動しか再現できない問題点（現在では 500Hz 程度まで呈示可能）を指摘し、皮膚感覚呈示用にボイスコイルを搭載した触力覚呈示装置を提案した。彼らは高周波振動の呈示のため、5種類の素材（ポリエチレン・シリコン・木材・プラスチック・アルミニウム）を叩いた際の振動を計測し、その計測データと、物体の硬さ知覚には衝突振動の振幅と周波数に影響されるという先行研究の知見[91]から、各材質の特性を皮膚感覚的に再現する減衰正弦波モデルを提案した。本モデルを式(1)に示す。

$$Q(t) = A(v)e^{-Bt} \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

ここで Q は衝撃により生じる振動加速度、 t は衝突した瞬間からの経過時間、 A は初期振幅係数、 v は衝突速度、 B は減衰係数、 f は振動周波数である。このうち A 、 B 、 f は材質によって定まるパラメータであり、これらを設定することで様々な材質の衝突振動を再現することができる。

Okamura ら[12]は、減衰正弦波モデルを応用して一つの触力覚呈示装置のみにより触覚的材質感を再現することを提案した。高周波振動を再現できない触力覚呈示装置で材質感を再現するために、実際に生じている振動をそのまま再現するのではなく、人間の材質感判別に必要な本質的要素のみを抽出してより簡便に再現する「Reality-based approach」を用いた。ゴム・木材・アルミニウムの衝突時に生じる振動加速度の計測し、計測された波形に対し減衰正弦波モデルでフィッティングを行うことにより、実際の振動よりも低い周波数で材質感を再現する新たな振動モデル・パラメータ設計した (図 5-6)。また被験者実験により設計したモデルを用いて再現された3つの材質をユーザがそれぞれ識別可能であることを証明した。

私はこの減衰正弦波モデルを用いてユーザの肘関節に直接取り付けられた振動子を駆動し、ゴム・木材・アルミニウムの身体感覚を腕部に再現することを試みる。

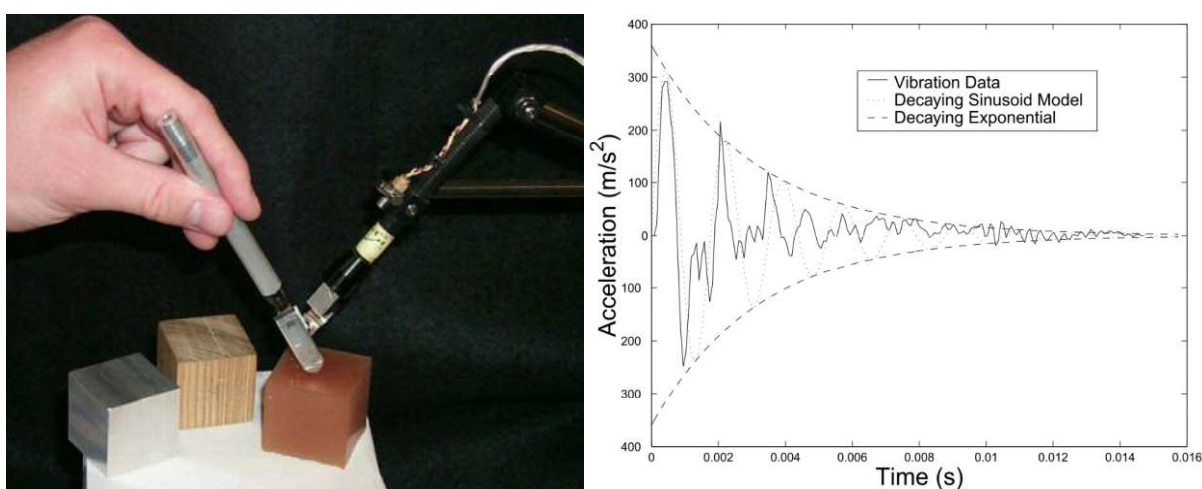


図 5-6 衝突振動の計測 (左) と減衰正弦波モデルのフィッティング (右) [12]

5.4. 肘関節への離散的な振動フィードバック

減衰正弦波モデルが単一の衝撃を再現するものであるのに対し、人間の体の運動は連続的である。そこで私はユーザの肘角度に同期した周期的な振動フィードバックを提案する。3.3 節で示した通り、ロータリスイッチを回した際に返されるような周期的な振動フィードバック「カチカチ感」[47]は、回転運動に対する体性感覚の拡張であると見なすことができ、これと減衰正弦波モデルを組み合わせることで身体の材質感を変調できるのではないかと考えた。

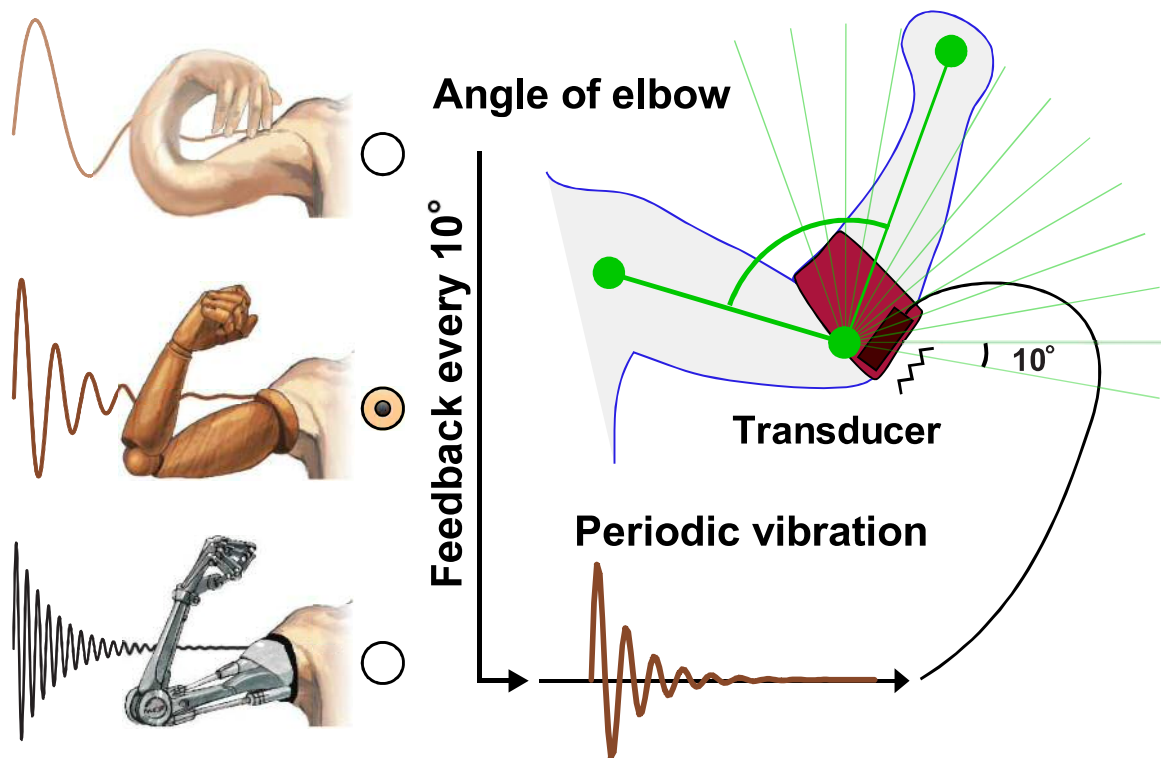


図 5-7 周期的な減衰正弦波振動フィードバック

5.5. システム構成：肘関節の材質感変調

肘関節の材質感を変調するプロトタイプシステムの構成を図 5-8 に示す。まず、モーションキャプチャカメラ (Kinect, Microsoft Corporation[73]) を用いてユーザの右肩・右肘・右手の 3 次元座標をサンプリングレート 30Hz で取得する。これらの 3 点から PC が肘角度を計算し、肘角度データをマイクロコントローラ (mbed NXP LPC1768, NXP Semiconductors) に送信する。肘角度が 10 度変わる度に mbed は減衰正弦波を D/A コンバータ (LTC1660, Linear Technology, 解像度 10 bit) を介してリフレッシュレート 10kHz で出力する。出力信号はオーディオアンプ (RSDA202, Rasteme Systems) によって増幅され、最後にアームバンドによって肘関節外側に取り付けられたボイスコイル型振動子 (Haptuator Mark II, TactileLabs) を駆動させる。材質感を再現するため、振動パラメータは表 5-1 に示す Okamura ら[12]と同じ値を用い、衝突速度 v は一定とした。

本システムでは肘角度の取得をカメラベースで行なっているためユーザの腕の動きに対して振動が呈示されるまでに約 50 ms の遅延が生じる。しかし腕を約 $90^\circ / s$ で動かした際に生じる角度誤差が約 4.5° であり、振動呈示の間隔である 10° の半分よりも小さいことから、私はこの遅延は十分に小さいと判断した。また第 5 章で述べた実験においてこの遅延に気づいた被験者は一人もいなかった。

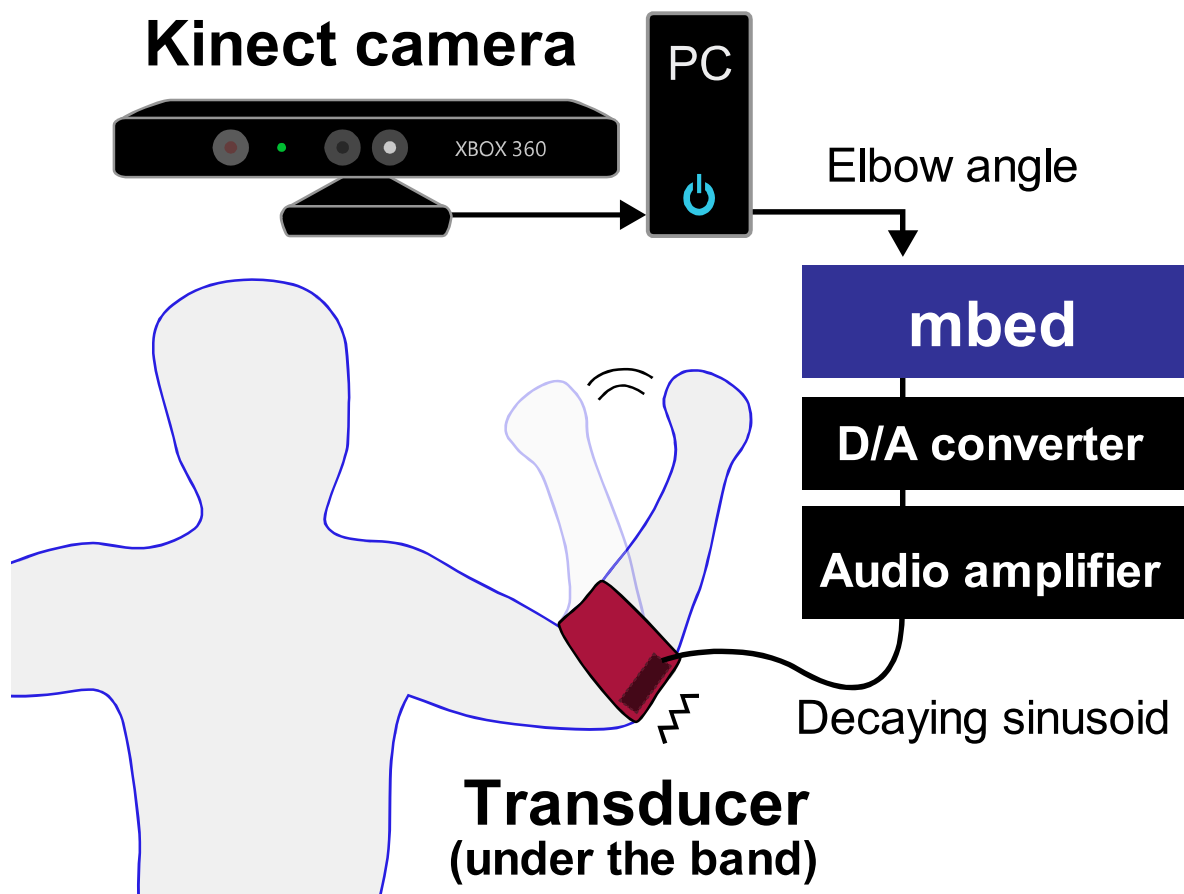


図 5-8 肘関節の材質感を変調するプロトタイプシステム

表 5-1 減衰正弦波モデルのパラメータ [12]

Material	A [m/s ²]	B [s ⁻¹]	f [Hz]
Rubber	15.1	60	30
Wood	10.5	80	100
Aluminum	19.6	90	300

5.6. 実験：3つの材質の判別

5.6.1. 実験手続き

5.5 節に示したシステムの身体材質感の変調効果を評価するため、3つの材質（ゴム・木材・アルミニウム）を判別する実験を行った。被験者は本研究室メンバーである男性5名・女性3名（22～27歳・右利き）とし、全員が本システムを未経験であった。図5-9のように被験者はアームバンドを右肘に装着し、Kinectカメラの正面に立った。どの材質の振動モデルかが分からない状態で3種類の振動フィードバックが被験者の腕の動きに合わせて肘関節に呈示され、被験者は手元のキーボードボタンを押すことで3種類のフィードバックを何度でも自由に体験することができた。被験者はどのフィードバックがどの材質かを回答するよう指示された。ただし、身体の材質が変わった感覚は被験者が全く体験したことがない感覚であり、選択肢無しに材質を判別することは極めて困難であると判断したため、被験者は3種類のフィードバックがゴム・木材・アルミニウムのそれぞれ異なる材質であることを知らされていた。学習効果を排除するため、実験の間正しい材質は被験者に伝えず、材質感判別の事前訓練なども一切行わなかった。本マッチングタスクを1試行とし、被験者一人につき3試行を行った。本実験で用いた振動子からは振動呈示時にわずかな駆動音が聞こえるが、骨伝導による聴覚刺激を防げないことから聴覚のマスキングは行わなかった。

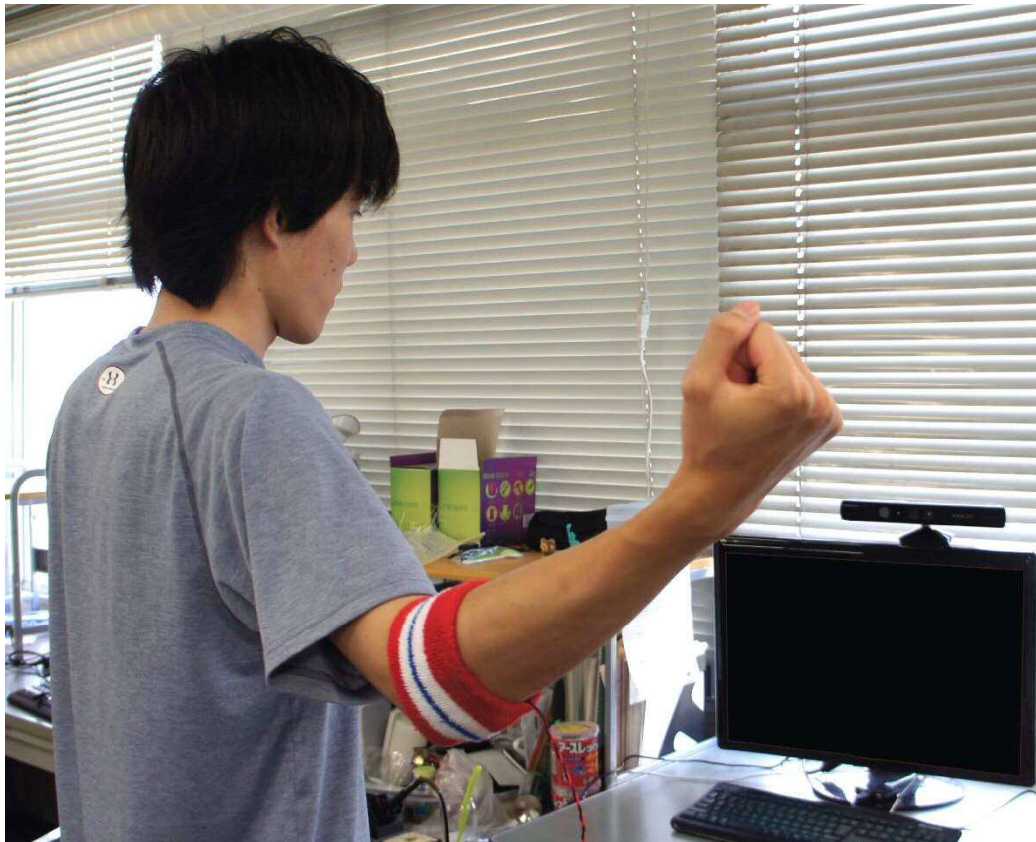


図 5-9 材質判別実験の様子

全試行終了後、被験者は以下の二つの質問に対して Yes / No の二択で回答した。

- (1) 振動を腕の内部から感じたか？：身体内部からの感覚は身体を構成する材質そのものを変調していることを示し、装着している振動子からの感覚もしくは外骨格型装具を取り付けたような身体外部からの感覚ではないと考えられるため。
- (2) 振動が呈示された際、腕に反力を感じたか？：バーチャルな身体材質感の変調には、運動に対する適切な「抵抗感」が伴うと考えられるため。被験者が振動によって擬似的な反力を感じていた場合、それは被験者の主観的なリアリズムの指標となると考えられる。

5.6.2. 実験結果

5.6.2.1. 振動モデルの正答率

3種類の振動モデルに対して被験者が回答した材質の正答率を示す。全振動モデルにおいて正答率は80%を超えており、全体での平均正答率は87.5%であった。各振動モデルにおける3つの選択肢の回答率に対してカイ二乗検定（比率の差の検定）を行った結果、全てのモデルにおいて選択肢間の回答率に有意差が認められた（ゴム： $\chi^2(2)=27.00, p<0.01$ 、木材： $\chi^2(2)=32.25, p<0.01$ 、アルミニウム： $\chi^2(2)=36.75, p<0.01$ 、）。したがって被験者は全ての振動モデルにおいてその材質を正しく判別できていたといえる。

表 5-2 3種類の材質振動モデルに対する正答率

Answer	Vibration model		
	Rubber	Wood	Aluminum
Rubber	83.3%	12.5%	4.2%
Wood	8.3%	87.5%	4.2%
Aluminum	8.3%	0.0%	91.7%

5.6.2.2. 振動を知覚した位置および反力の有無に対する回答

2つの質問に対して被験者が Yes と回答した確率を図 5-10 に示す。質問 1（振動を腕の内部から感じたか？）に対しては全体の回答率は62.8%で、ゴム（87.5%、7/8名）、木材（62.5%、5/8名）、アルミニウム（37.5%、3/8名）の順で高かった。質問 2（腕に反力を感じたか？）に対する全体の回答率は70.8%で、質問 1と同様にゴム（87.5%、7/8名）、木材（75.0%、6/8名）、アルミニウム（50.0%、4/8名）の順で高かった。

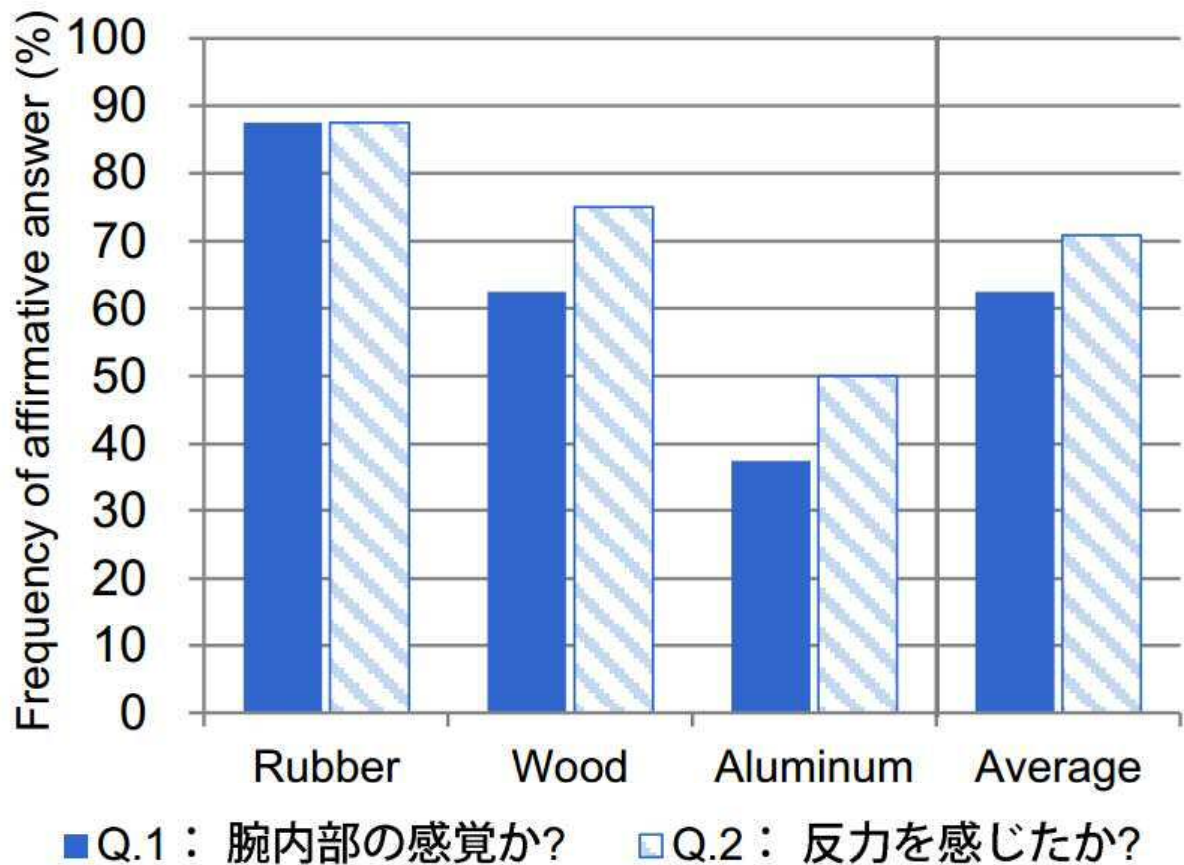


図 5-10 質問 1 および質問 2 に対して Yes と回答した確率

5.7. 考察

5.7.1. 材質判別の正答率

全種類の振動モデルにおける材質判別率の平均が 87.5%という高い値となったことから、振動モデルは材質の触覚的特性を肘関節に適用できており、被験者は材質を正しく判別できたといえる。誤回答の中では被験者はゴムと木を間違えて判別してしまう傾向があり、アルミニウムは比較的正しく判別されていたといえる。ただし同様の傾向は Okamura らによる実験[12]でも観察されており、もともと判別が難しいモデル同士であったと考察できる。

5.7.2. 振動を知覚した位置

振動フィードバックが身体のどこから感じられるかということに関しては、低周波の振動モデル（ゴム・木材）が特に肘関節の内部から感じられることが分かった。被験者は自身の肘関節がゴムや木材に変わったと報告していた一方で、未体験の感覚であるため確信が持てないとも報告していた。これらの結果により、皮膚上からの簡便な振動刺激により身体内部の感覚を操作できる可能性が示唆された。逆に最も高周波であるアルミニウムの振動モデルは、主に身体外部からの感覚、すなわち金属製の外骨格型スーツを身につけたような感覚として受容されていたことが

明らかとなった。ただし、本質問にて採用した二項選択（Yes/No 回答）としては被験者数が 8 名と少なかったため、統計解析に十分な信頼性が得られなかった。したがって今後は被験者数を増やす、または回答方法をアナログスケールにするなどといった統計解析を考慮した実験手法をとる必要があると考えられる。

5.7.3. 振動呈示に伴う擬似反力の生起

振動呈示時の擬似的な反力に関しては、本実験ではゴム（30Hz）・木材（100Hz）といった低周波の振動モデルにおいてアルミニウム（300Hz）よりも強い反力を感じたと報告していた。低周波振動において高周波振動よりも「肘そのものの材質が変わった」と知覚されていたことから、擬似反力は身体材質感変調に対する主観的な現実感を反映していると推測できる。

また実験が異なるため比較はできないが、4.8.3.4 項で示したアクセルペダルへのクリック感呈示実験において 240Hz の減衰正弦波振動でも擬似的な反力の生起が観察されていた。同項で紹介した Konyo ら[72]のシステムは摩擦感を再現する瞬間的な振動刺激により擬似力覚を呈示しているが、これは指先への振動刺激であり、本研究は肘関節（アクセルペダルへのクリック感呈示では足裏）への振動呈示を行っている。すなわち触覚刺激部位および運動部位が異なっており、本実験にて報告された擬似反力の説明としては部分的なものであると考えられる。

5.7.4. 本実験の改善すべき点

本実験においては主に二つの改善すべき点があると考えられる。一つは被験者が全て著者の研究室メンバーであったことである。被験者は高周波の振動が比較的硬い材質感を示すという法則を知っていたと思われ、したがって被験者が単純に振動周波数のみを手がかりに材質を判別していた可能性がある。もう一つは、振動子から発せられる僅かな音が材質の判別に寄与していた可能性があるということである。しかしゴムらしきフィードバックが呈示された際に「弾性」を感じたという報告が 2 名の被験者からあったことから、肘関節の材質が変わったと感じていたことは確かであるといえる。以上のことから、今後はナイーブな被験者を用い、振動子からの音をマスキングする等といった手法で実験を行うべきであると考えられる。

第6章 ロボット振動の記録・モデリング・再生 を用いたロボットの身体感覚の再現

本章では第二の戦略である「体性感覚の変調」を利用して人体をバーチャルにロボット化する手法について取り扱う。実世界のロボットアームの関節に生じる振動を記録・モデリングし、これを肘関節に再生することでロボットらしい身体感覚の再現を試みる。

6.1. 背景：ロボットの身体への憧れ

現代の社会は多くの作業用ロボットによって支えられている。一方で、映画・アニメ・ビデオゲームといったフィクションの世界ではキャラクターとしてのロボットが数多く登場する。5.1節で述べた通り、ロボットキャラクターの身体的特性は興味深く、多くの人々がロボットの身体に憧れを持っていると考えられる。

そこで本研究では、ロボットの身体感覚を人間に再現することによる人体のバーチャルなロボット化を目標とする（図 6-1）。ロボット感の要素にはモータやギヤによる音や振動が考えられることから、実際のロボットの関節に生じる振動の記録・モデリング・再生を提案する。さらにユーザの動きに同期したロボットアニメーションと駆動音を組み合わせることで、ユーザを視覚・聴覚・触覚的にロボット化することを試みる。



図 6-1 人体のロボット化のイメージ

ロボットらしい見た目と音に加え、関節に生じる振動を身体感覚として知覚すると想像できる。
なお 6.7 節では 2 種類のロボットの身体感覚について取り扱う。

本研究は、ジェスチャ入力型ビデオゲームにおける没入感向上に貢献できると考えられる。近年、ビデオゲーム業界には様々なジェスチャ入力デバイス[73][74][93][94][95]が登場し、プレイヤーの動きを操作キャラクターの動きに反映させることでゲームへの没入感を高めてきた。また、操作キャラクターが触覚インタラクションを振動刺激によってプレイヤーの実際の身体に再現するデバイスも提案されており、例えば銃弾を受けた感覚[96][97]や剣で斬られた感覚[98]など体感することができる(図 6-2)。



図 6-2 ビデオゲーム用振動フィードバックデバイス。

左：銃弾を受けた感覚の再現。右：剣で斬られた感覚の再現。

しかしながら、ゲームで操作できるキャラクターは人間に限らず、例えばロボットキャラクターを操作することもあり得る。したがって運動入力に対する体性感覚フィードバックをロボットらしくすることで、プレイヤー自信が本当にロボットになっているような没入感の高い体験になると考えられる。

6.2. ロボット感とは

6.2.1. ロボット感とアルミニウム感の違い

第5章において、私はアルミニウムの触覚的材質感を再現する減衰正弦波モデル[11]を身体運動に適用することでアルミニウム製の身体感覚を再現することを試みた。これにより金属製のロボットらしい感覚が生起するのではないかと私は期待していた。しかしアルミニウムの衝突振動ではあくまでアルミニウムらしい感覚しか生成せず、また自己身体そのものの変調というよりは身体外部に外骨格を装着しているような感覚であった(5.7.2 項)。すなわち「アルミニウム感」とは材質そのものを表現する低次の感覚であるのに対し、「ロボット感」とは材質のみならず構造

まで表現するより高次の感覚であることに気づいた。したがって、ロボットの身体感覚を再現するためには「材質」だけでなくモータやギヤといった「機構」がもつ触覚的特性も再現する必要があると考えられる（表 6-1）。

6.2.2. モータ・ギヤによる高周波ノイズ

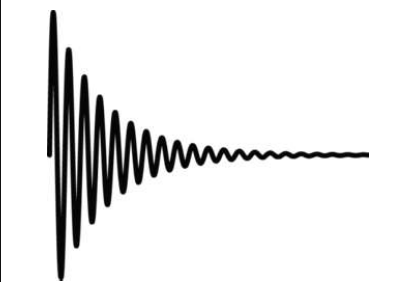

ロボットの身体を構成するモータやギヤは、駆動中常に高周波振動を発生させる。ロボット自身によるこのノイズはロボット制御において深刻な問題となっており、身体に取り付けられた加速度センサやマイクなどの機能を妨害する原因となっている。そのため、ロボット工学の分野ではこの高周波ノイズを抑える手法が数多く提案されている[100][101]。

一方で人体のロボット化という観点から見ると、内部機構に起因するこの高周波ノイズこそがロボットらしい身体感覚の知覚に貢献する触覚の手がかりになるのではないかと私は考えた。つまり高周波ノイズ対策がなされていない古いロボットのモータやギヤによるギシギシといった摩擦振動の再現である。

6.2.3. 視覚・聴覚・体性感覚の融合

高品位なロボット感、すなわち自分の身体が本当にロボットになったと信じこませるような完成度を実現するためには、ロボットの体性感覚だけではなく、見た目や効果音もロボットらしく装飾する必要があると考えられる。なぜならユーザは本当のロボットの身体感覚を知らず、身体感覚のみを呈示してもそれが何を意味するのか理解できない可能性が高い。本研究の主な貢献はロボットの身体感覚を再現する技術、すなわち触覚的なロボット化にあるが、最終的には視覚と聴覚も組み合わせたバーチャルリアリティシステムを開発し、高いロボット感を再現することを目指す。

表 6-1 アルミニウム感とロボット感の違い

	身体材質感の変調（第 5 章）	ロボットの身体感覚の再現（本章）
再現する感覚	材質そのもの （アルミニウム感）	ロボットの身体構造 （ロボット感）
振動	瞬間的な衝撃振動	継続的な摩擦振動
波形		

6.3. Data-driven approach によるロボット感の再現

6.2 節で示した考察を基に、本研究では実際のロボット振動の記録・モデリング・再生を提案する。実際のロボット駆動時に生じる振動を記録・モデリングし、これをユーザの運動に同期させて呈示することで、ロボットらしい身体感覚が再現できると考える。このように実世界から得られたデータをできる限り正確に再現することを目指す手法は **Data-driven approach** と呼ばれ、Okamura ら[12]が減衰正弦波モデルの再設計のため用いた **Reality-based approach** とは逆の戦略であるといえる。**Data-driven approach** も物体の触覚的特性の変更にも用いられており、高品位な触覚呈示が可能であるという報告もある[79][101]。したがって本手法はロボットの身体感覚の再現にも有効であると期待できる。

また、身体感覚だけでなく視覚的・聴覚的にもユーザの身体をロボット化するため、ユーザの腕の動きを追従するロボットアームのアニメーションをモニタ上表示し、同時にロボットの効果音を再生する。これはラバーハンド錯覚[102][103]という自己の身体感覚が別の対象に帰属される現象を利用した手法である。ラバーハンド錯覚はユーザから見えない状態にした自身の手と、その隣に置かれたゴム製の手に同時に触覚刺激することで引き起こされ、ユーザはゴム製の手が自分の手であるかのように感じる。この身体保持錯覚はユーザの手の動きに同期したバーチャルな手をスクリーン上に表示することでも生起することが報告されている[104]。したがって、ユーザの動きに同期して動くバーチャルなロボットアームを表示することで、それがユーザ自身の腕であるかのように感じさせることを試みる。

6.4. ロボット振動の記録・モデリング・再生

本節では、ロボット振動の記録・モデリング・再生の具体的な手法について説明する。

6.4.1. ロボットに生じる振動加速度の記録

ロボット振動の記録には、産業用卓上 6 軸ロボットアーム (Unimate PUMA260, Unimation) を用いた。振動の記録対象となるロボットは様々なものが考えられるが、サーボモータとギヤで構成されたシンプルな機構が比較的大きな振動を出し、人間にとっても知覚しやすいであろうという理由から PUMA260 ロボットを採用した。図 6-3 に示すように、本ロボットの肘関節に 3 軸加速度センサ (BMA180, Bosch Sensortech, 加速度計測レンジ $\pm 16G$, 解像度 14bit) をホットボン드로固定し、肘関節を 0, 10, 20 … 80 °/s の角速度で両方向に 90° 回転させた。0° /s での回転とは静止状態を意味するが、わずかながら振動を検出した。80°/s を超える角速度で振動を検出できなかった理由は、本ロボットの最高角速度が 85°/s 程度であったためである。ロボットの駆動中、肘関節の 3 軸加速度をサンプリングレート 2.5kHz で取得し、マイクロコントローラ (mbed NXP LPC1768, NXP Semiconductors 社製) を経由して PC に記録した。またエイリアシング効果を防ぎ正確な振動波形を計測するため、加速度センサに内蔵されている 1.2kHz ローパスフィルタ機能を用いて計測を行った。なお人間が知覚できる振動周波数帯域は 1kHz 程度まで[3]であることが知

られており，本ローパスフィルタはこの帯域をカバーしている．

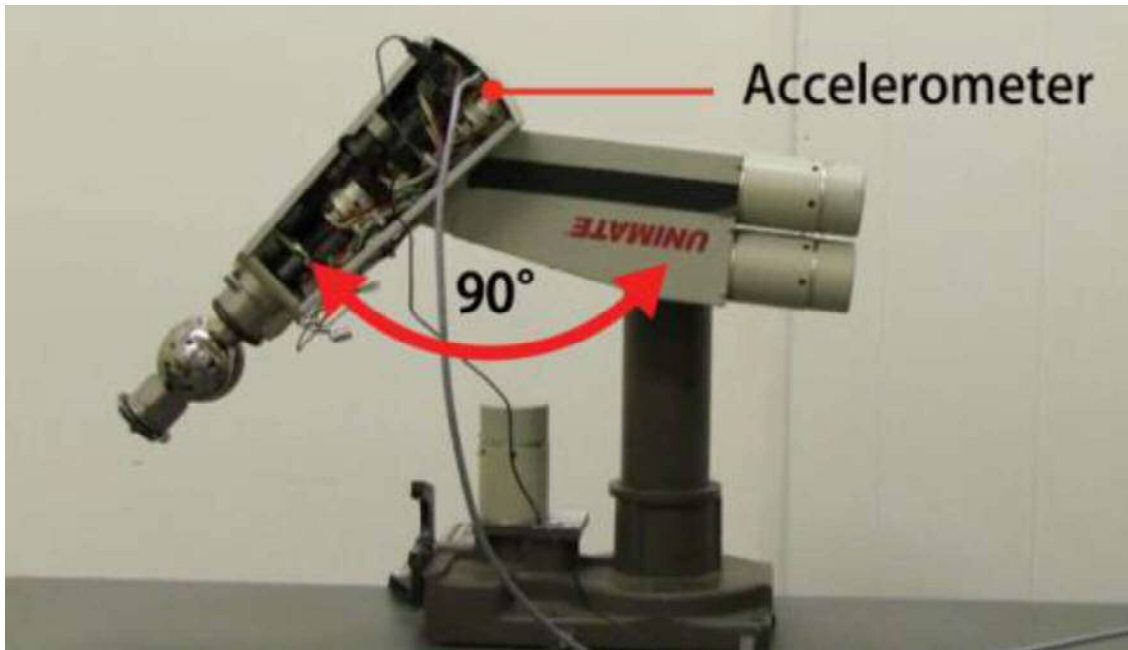


図 6-3 ロボットの関節に生じる振動の記録

6.4.2. 線形予測符号化によるモデリング

ロボット振動のモデルを構築するため，記録された振動データに対して信号処理を行った．まず記録された各軸の生データに対して 20Hz のハイパスフィルタを適用し，ロボット前腕の傾き変化に起因する低周波成分を取り除いた．次に各軸のデータを時間領域で加算し一つの振動波形とした．またロボットの回転範囲 90° の中心となる 45° 周辺の 1 秒間を抽出し，異なる角速度条件で記録されたデータの時間幅を統一した．

本研究では Data-driven なモデリング方式として線形予測符号化 (Linear Predictive Coding, LPC) を採用した．これにより元の加速度データがもつパワースペクトル密度，すなわち周波数特性の再現を試みた (図 6-4)．LPC は主に音声信号の符号化に用いられる信号処理であるが，振動加速度データのモデリングにも利用されている [79][99]．振動データに対して 10 次の FIR (Finite Impulse Response) フィルタを適用し，最小二乗法を用いて生データの周波数特性と可能な限り一致するような LPC 係数ベクトル $\vec{a}(k)$ ($k = 1, 2 \dots 10$) を計算した．本演算には数値解析ソフトウェア MATLAB (MathWorks) の lpc 関数を用いた．

本モデリングの目的は，過去の信号 (振動加速度データ) を用いて現在の信号を予測することである．現在信号値 $\hat{x}(n)$ は式 (2) のモデルを用いて過去の信号から推定することができる．

$$\hat{x}(n) = w - \sum_{k=1}^{10} a(k) x(n-k) \quad (2)$$

ここで n はステップ数, $x(n-k)$ は k ステップ過去の信号値, $a(k)$ は LPC 係数, w は生成されるホワイトガウシアンノイズの 1 サンプルを表す. 本稿では現在の信号のみ推定できればよいので, $n=0$ が代入される. ホワイトガウシアンノイズにより推定値がランダム性を持つため, パワースペクトルは元のデータを再現しているものの時間領域では一定の波形の繰り返しにならず, 常に新しい信号値を生成するモデルとなる.

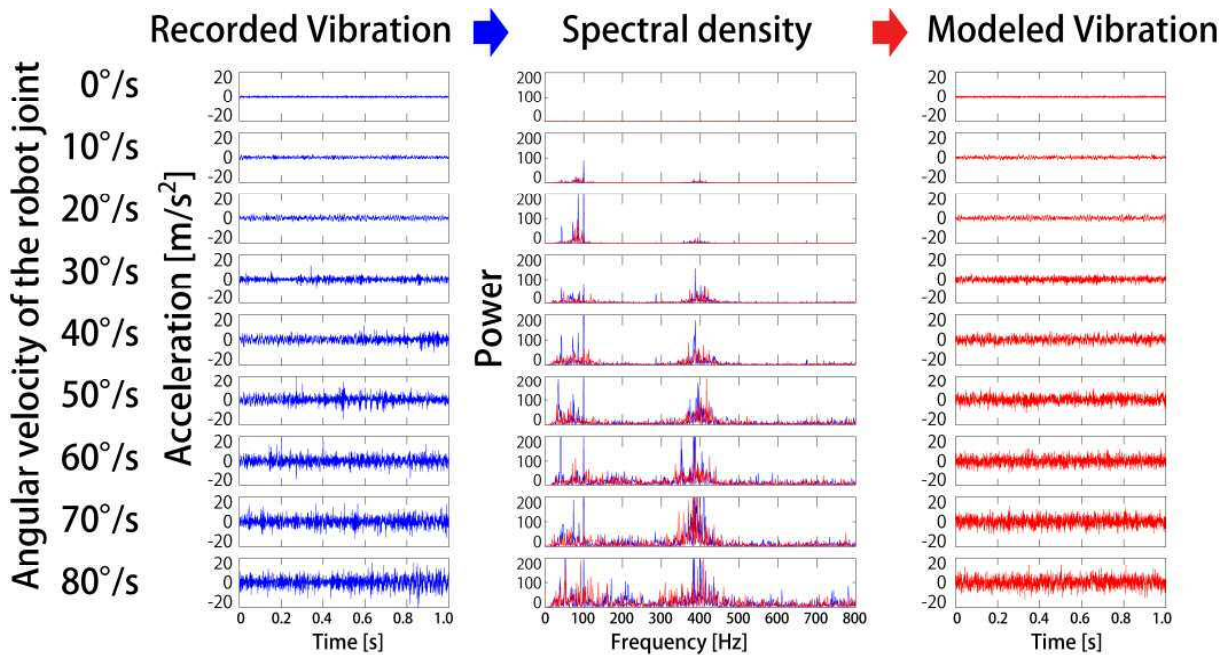


図 6-4 線形予測符号化によるロボット振動のモデリング.

左: 計測された加速度データ. 右: LPC でモデリングされた振動の例. 中央: 計測された振動とモデル化された振動例のパワースペクトルの重ね合わせ.

6.4.3. 振動モデルの再生

ロボット振動モデルを人体に再生するプロトタイプシステムの構成を図 6-5 に示す. 本システムは 5.5 節にて示した肘関節の材質感変調システムを応用したものであるが, 適用する振動モデルおよび視覚・聴覚刺激を呈示する点で異なる. まず, 材質感変調システムと同様に Kinect カメラを用いてユーザの右肩・右肘・右手の 3 次元座標をサンプリングレート 30Hz で取得する. また PC が肘屈伸運動の角速度を計算し, 角速度データをマイクロコントローラ (mbed NXP LPC1768, NXP Semiconductors) に送信する. ここで mbed にはロボットの駆動角速度(0, 10, 20...80° /s)ごとにあらかじめ算出しておいた LPC 係数が保存されている. ユーザの肘屈伸角速度に最も近い角速度の LPC 係数, 算出されたホワイトガウシアンノイズの値および式に基づいて推定信号値をリフ

レッシュレート 2.5kHz で出力する。例えばユーザの肘屈伸角速度が $35 \sim 44^\circ /s$ の範囲内にある場合は、全て $40^\circ /s$ でロボットを駆動した際の LPC 係数を用いて信号波形を生成する。出力信号は D/A コンバータ (LTC1660, Linear Technology, 分解能 10 bit) によりアナログ電圧に変換され、オーディオアンプ (RSDA202, Rasteme Systems) によって増幅される。最後にアームバンドによって肘関節外側に取り付けられた振動子 (ForceReactor, アルプス電気) を駆動させ、ユーザに振動刺激を呈示する。

呈示される振動モデルが一定の角速度を閾値をとって変化するため、例えばユーザの肘屈伸角速度が $34 \sim 35^\circ /s$ 周辺の値をとり続ける場合、 $30^\circ /s$ のモデルと $40^\circ /s$ のモデルが頻繁に入れ替わることになる。したがって急激かつ頻繁な振動モデルの変化によって不自然な感覚が生起されることが危惧されたが、そのような報告いまのところされていない。これは振動モデルのレンダリングに用いているホワイトガウシアンノイズが高いランダム性を持っているためであると考えられる。

アームバンドにはスピーカも内蔵されており、振動子と同じ加速度データを入力して音として出力する。ただし 4 章で述べる実験においては条件の統制のためスピーカではなくヘッドホンを用いた。ユーザ正面のモニタには振動記録の対象とした PUMA260 ロボットのアニメーションが表示され、ユーザの肘角度と同じ角度をとるように画面内のロボットアームの前腕部が動く。

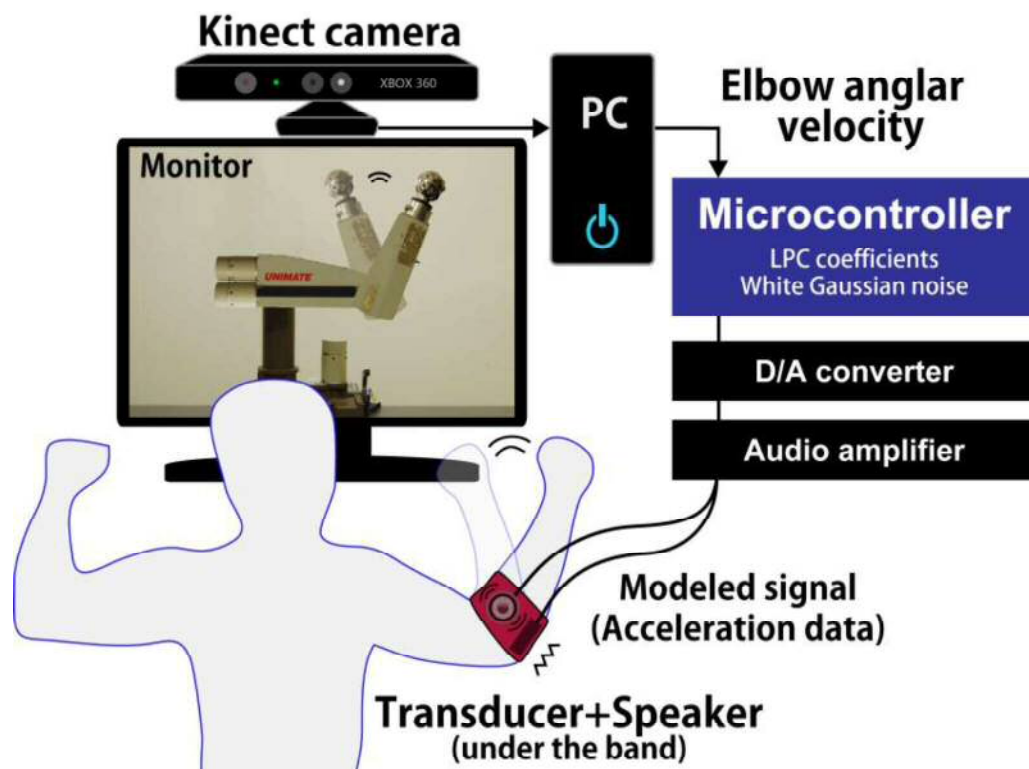


図 6-5 ロボット感呈示システムの構成

5.5 節にて示した肘関節の材質感変調システムと同様に、本ロボット感呈示システムでも Kinect カメラを用いているため 50ms 程度の遅延が生じる。しかしこの値は人間の動きに対する視覚刺激のレスポンスとしては許容できる値であるという報告[105]があるため、この遅延は十分に小さい

ものであると判断した。

研究室で試験的に本プロトタイプシステムのデモンストレーションを行い、本システムを体験者したことのない者 10 名程度に体験させた (図 6-6)。その結果、システムの遅延に気づく者はいなかった。体験の感想は全体的にポジティブであり、「自分の腕がロボットになった」「腕の中にモータとギヤが入っている」といったコメントが得られた。



図 6-6 研究室内デモンストレーションにおける体験者の反応

6.5. 実験：ロボット感の評価

本実験の目的は、実際のロボットに生じる振動を元にモデリングされた振動フィードバックがロボット感呈示にどれだけ貢献しているかを検証することである。前章にて述べたシステムを用いて、4 種類のフィードバック条件：視覚のみ (V)、視覚+聴覚 (V+A)、視覚+触覚 (V+H)、視覚+聴覚+触覚 (V+A+H) を比較した。

6.5.1. 実験環境

被験者は男性 6 名・女性 1 名 (21~23 歳・右利き) とした。被験者は Kinect カメラとモニタの前に立ち、アームバンドを右肘に装着した。また振動子駆動時に振動子から発せられる音の実験に影響を与えることが考えられるため、被験者にノイズキャンセリングヘッドホン (QuietComfort 15, BOSE) を装着させ、振動子からの音を聞こえないようにした。ただし、ロボット振動を知覚する身体部位とロボット駆動音の音源部位が同じであるかどうかはロボット感の評価に影響すると考えられたため、駆動音の呈示にはヘッドホンの右側出力のみを使用しロボット振動の呈示位

置である右肘側から駆動音が聞こえるようにした。実験者は被験者の肘に装着した振動子を試験的に駆動させ、被験者が右肘に触覚刺激を明確に感じるようオーディオアンプの増幅率を操作して振動強度を調節した。

実験の様子を図 6-7 に示す。実験者は被験者に対し、モニタ内のロボットアームを注視しながら 1 試行 15 秒で右肘を様々な速度で屈曲・伸展させるよう指示した。1 試行ごとに以下の二つの質問について回答させた。

- (1) **自分の腕がロボットになったと感じたか**：被験者の腕自体が画面内のロボットのように感じたかどうかの確信度を、0~100 のアナログスケール（0：全くロボットでない，100：とてもロボットになった）で回答させた。ただしロボット感とは被験者が体験したことのない感覚であり，評価基準が被験者ごとに異なることが予想されたので，回答の基準となる 50 点は「V+A 条件におけるロボット感」と定義し，他の条件では V+A 条件と比較して回答するよう被験者に指示した。
- (2) **腕に抵抗感を感じたか**：ロボット感の体験には運動による摩擦力のような力覚も伴うと推測される。よってもし振動のみの呈示にも関わらず被験者が擬似的な抵抗感を感じていた場合，それは被験者の主観的なリアリズムの指標になると考えられる。被験者にはこの抵抗感の量を 0~100 のアナログスケール（0：とてもスムーズ，50：普段と同じ，100：とても抵抗を感じる）で回答させた。



図 6-7 ロボット感呈示実験の様子

6.5.1. 実験手続き

まず被験者は全4種類のフィードバック条件を1度ずつ体験した。必ず最初にロボット感回答基準(50点)となるV+A条件を行い、その後残りの3条件をランダムに1回ずつ行うようにした。ここでロボット感・抵抗感について被験者が回答することはなかったが、被験者には頭の中でロボット感・抵抗感の回答を考えるよう事前に指示し、実験手順に慣れるための練習とした。

実験本番では、まず基準となるロボット感の確認のためV+A条件を被験者の回答なしで行った。その後V+A条件を含めた全4条件を1試行ずつランダムな順番で行い、被験者は毎試行ロボット感・抵抗感について評価した。これを1セットとして全3セットを行った。

6.5.2. 実験結果

ロボット感および抵抗感評価の被験者間平均を図6-8に示す。エラーバーは被験者間の標準偏差を表す。被験者はV+A+H条件で最もロボット感が強いと評価した。本実験結果に対して一要因分散分析を行った結果、フィードバック条件間に有意差が認められた($F(3,24) = 3.35, p < .001$)。また多重比較(Tukey's HSD法)を行った結果、V+A対V+Hの組では有意傾向が認められ($p = 0.07 < 0.10$)、それ以外の全ての組では有意差が認められた($p < .05$)。

抵抗感の評価では、V+A+H条件において最も抵抗感が強いと評価された。一要因分散分析の結果、フィードバック条件間に有意差が認められた($F(3,24) = 3.34, p < .05$)。また多重比較を行った結果、V対V+A+Hの組合せのみで有意差が認められた($p < .05$)

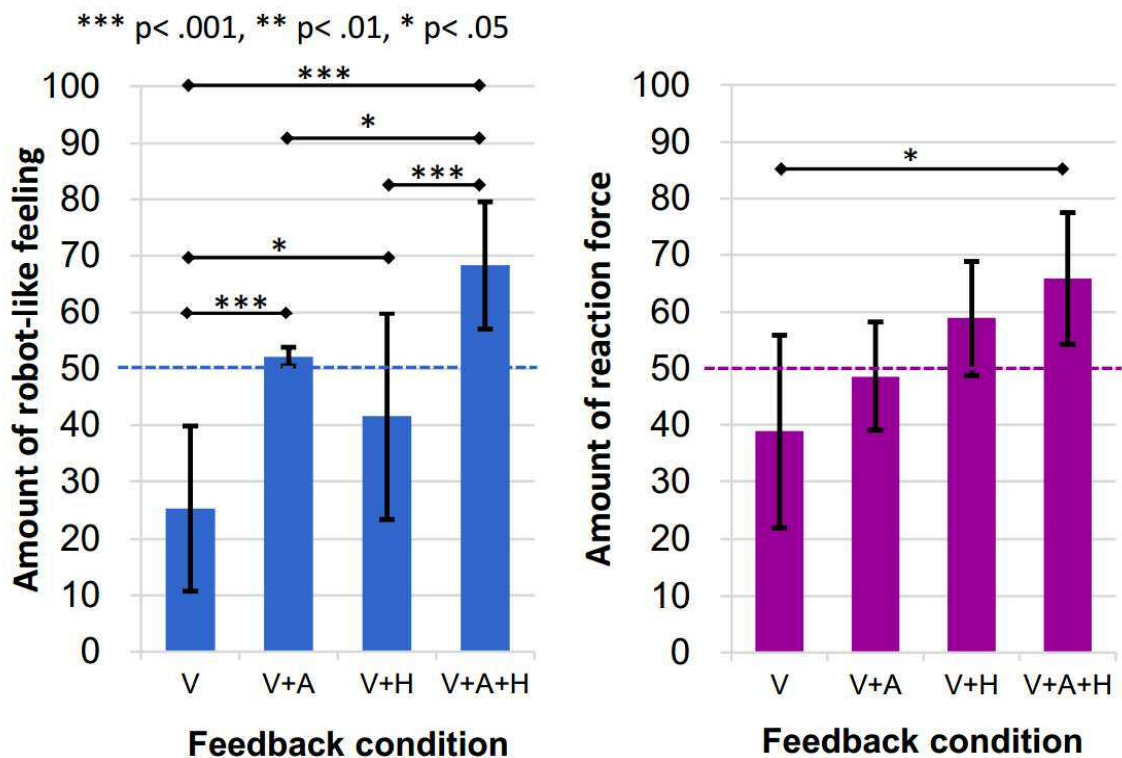


図 6-8 ロボット感の評価(左)と抵抗感の評価(右)

6.6. 考察

6.6.1. ロボット感の評価

ロボット感についてはV+A+H条件が他のどの条件よりも有意に高く評価されていたことから、視・聴・触覚フィードバックの組合せがロボット感向上に貢献していたことが明らかとなった。

ロボット感評価の基準（50点）としたV+A条件においては全被験者の平均評価も52.1点と基準値に近く、標準偏差が他の条件に比べ明らかに小さかった。したがって被験者は基準を正しく理解し評価できていたといえる。

6.6.2. 抵抗感の評価

抵抗感においてもロボット感と同様にV+A+H条件で最も強く感じられていたことから、視・聴・触覚の組合せが擬似力覚の呈示に最も効果的であったと考えられる。

視覚のみの条件（V）にて被験者は普段よりも腕がスムーズに動いていたと評価していた。これは本実験において被験者は必ず聴覚を付与した条件（V+A）を経験した後にV条件を体験していたためであると考えられる。すなわち以前の試行では存在していた刺激が取り除かれたことで解放感を感じ、普段よりスムーズに動いているように感じていたと考えられる。したがって被験者は無意識のうちにV+A条件を基準（50点）としていた可能性が考えられ、実際にV+Aにおける抵抗感評価の結果も50付近となった。

6.6.3. ロボット感と抵抗感の相関関係

図6-9は、ロボット感評価を縦軸に、抵抗感評価を横軸にとり本実験での回答全84ペア（フィードバック4条件×3試行×被験者7名）をプロットしたものである。本データに対して線形回帰分析を適用した結果、ロボット感評価と抵抗感評価間にはゆるやかな相関が認められた（ $R^2 = 0.425$ ）。本結果は、ロボット感の一部が抵抗感によって説明できること、つまり抵抗感が高ければロボット感も高くなることを示唆している。

しかしながら図6-8に示す通り、V+A条件とV+H条件の比較においては異なる傾向が見られる。ロボット感評価では $V+A > V+H$ という結果であるのに対し、抵抗感評価では $V+A < V+H$ という結果となっている。本実験におけるこの矛盾は、（1）ロボット感自体の評価には聴覚フィードバックが特に大きく貢献していること、および（2）ロボット感を構成する一要素である抵抗感の評価には振動フィードバックがより大きく貢献しているということの2点に起因していると考えられる。

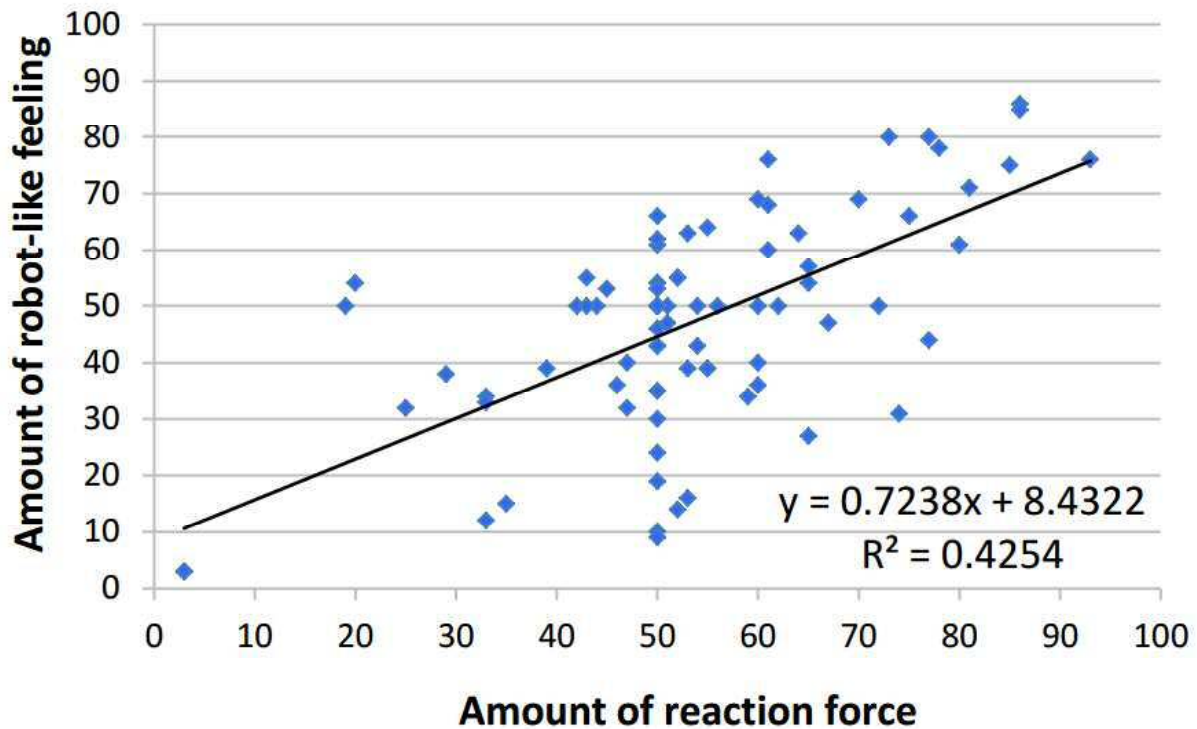


図 6-9 ロボット感と抵抗感の相関関係

6.6.4. 内観報告

6.6.4.1. 身体感覚に関するコメント

被験者全7名のうち3名から、触覚フィードバックがある条件 (i.e., V+H および V+A+H) のときは腕に「きしみ」もしくは「しびれ」を感じたという内観報告が得られた。したがって、ロボット振動の触覚フィードバックがロボットアームの駆動にみられるギンギンとした摩擦振動感を一部の被験者には呈示できていたことが分かった。また「アニメーションが腕の動きに同期していたので自分の腕のように感じた」といった報告が2名から得られた。ラバーバンド錯覚に関する先行研究[104]にて報告されていたように、画面内のロボットがユーザの腕と同じ動きをすることが身体の同一性を高めていたと考えられる。

これらの内観報告にロボット感と抵抗感の評価も含めて考察すると、実際のロボット駆動時に生じる振動をユーザの運動に同期させてフィードバックし、これに視覚・聴覚フィードバックを組み合わせることでよりリアリズムの高いロボット感を再現できるということが示されたといえる。

6.6.4.2. 効果音に関するコメント

「呈示される音が普段イメージしているロボットの音とは異なる」という内観報告が3名の被験者から得られた。本実験での聴覚フィードバックには1.2kHzのローパスフィルタを適用した加速度データを用いていたため、1.2kHz以上の高周波は呈示音に含まれておらず、実際にロボットに生じている音とは異なる音になっていた可能性がある。これを検証するため、小型マイク

(Gigaware 60139B, RadioShack)使ってロボットの駆動音を記録し、この音データをモデリングせずにフィードバックするユーザテストを行った。しかし被験者は加速度データと音データの違いを判別することができなかった。したがって聴覚フィードバックに加速度データを用いるか音データを用いるかという選択は、「呈示音が被験者のイメージするロボット音と異なる」という問題の解決には結びつかないと現段階では判断できる。

音に対する違和感の別の原因として、今回振動の記録対象とした PUMA260 が産業用ロボットであり、一般の人々が本ロボットの姿や動作音を知る機会が滅多に無いことが挙げられる。本ロボットの元々の駆動音が被験者にとって聞き慣れていない音であり、イメージするロボット音とはマッチしていなかったのではないかと考えられる。実際、実験前は全ての被験者が本ロボットを知らなかった。

6.6.4.3. ユーザ毎に異なるロボット感への対応

各ユーザが異なるロボット感をイメージしていることを考慮してシステムを設計することは本研究において非常に重要であると考えられる。この点について今後の実験ではまず PUMA260 ロボットが実際に駆動している動画を被験者見せ駆動音を認識させた上で、そのロボットを再現するという旨で評価実験を行うべきであるといえる。

一方で本研究は主観的なリアリズムの向上を目指しているため、大多数のユーザが納得できる「ロボットの音と振動」を呈示することも考えられる。例えばロボットアニメにてロボットの駆動音として使われている効果音は必ずしも実際のロボット駆動音ではない。しかしながら大多数のユーザがロボットの音であると認識可能であるため、主観的なリアリズムを向上させる可能性があるといえる。

また単に「ロボット」と言うだけでは、本実験で用いた産業用ロボットアームの他にも人間型アンドロイドからロボットアニメに登場するような巨大ロボットまで様々なロボットが当てはまる。ロボットの種類ごとにロボット感も異なると考えられるので、ロボットの特徴に合致した様々なロボット感刺激を用意すべきであると考えられる。

6.7. ロボット感体験 VR ゲーム「Jointonation」

本節では、より没入感の高いロボット感体験を実現するために開発した VR ゲーム「Jointonation」について取り扱う。

6.7.1. 没入感向上のための VR アプリケーション開発

ロボット感呈示実験（6.5 節参照）において、振動フィードバックがロボット感を向上させることを示した。しかしながら、実験に用いたプロトタイプシステムでは視覚・聴覚・触覚刺激の質が決して高くはなかった。したがって、総合的なロボット感体験としてはあまり魅力的なものではなかったと考えられる。

そこで私は、プロトタイプシステムよりも高品位な視覚・聴覚・触覚呈示を行い、より没入感の高いロボット感体験を実現することを目指す。そのために本ロボット化技術を用いたロボット感体験 VR ゲーム「Jointonation」を提案する（図 6-10）。本 VR ゲームでは振動の呈示部位を両肘・両膝の 4 つに拡張し、HMD と 3DCG モデルを用いて高い没入感を実現する。ロボット化技術を用いた魅力的かつ具体的なアプリケーションシステムを開発することで、本技術が持つ価値を社会に示すことができると考えられる。

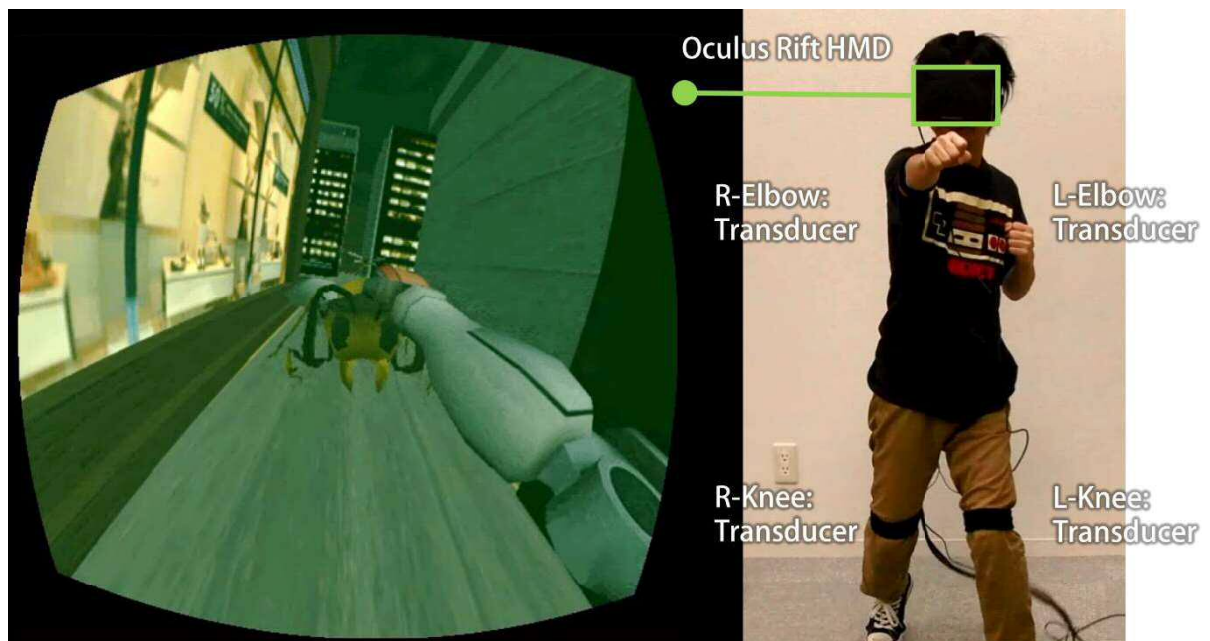


図 6-10 ロボット感体験 VR ゲーム「Jointonation」

プレイヤーの正面に設置された Kinect カメラでプレイヤーの身体運動を計測する。プレイヤーの運動はアバタであるロボットの動きに反映され、ロボットの視界がプレイヤーの HMD に表示される。これによりプレイヤーは VR 空間内にロボットとして存在しているかのような状態となる。

6.7.2. 2種類のロボット感の再現

没入感の高いロボット感呈示システムを開発するためには、6.6.4.3 項で指摘したユーザ毎に異なるロボット感への対応も必要であると考えられる。一般の人々がよく目にするのは現実のロボットではなく、アニメなどのフィクション作品に登場するロボットキャラクターであると考えられる。そこに登場するロボットはその大きさによって主に2種類に大別でき、一つは人間サイズのヒューマノイドロボット、もう一つは主に人間が機体の中に乗り込んで操縦する巨大ロボットである。これら2種類ロボットが一般的なロボットのイメージとしてある程度浸透していると私は考える。

以上のことから、私は Jointonation システムにおいて図 6-11 に示すヒューマノイドロボットと巨大ロボット2種類のロボット感を再現することを試みる。具体的には、まず視覚的にヒューマノイドロボットと巨大ロボットの姿を見せ、どちらの身体になるのかをユーザに示す。その後それぞれの身体に適合したロボット感を再現することで、多くのユーザに対して説得力のあるロボット化体験を実現できると考えられる。

6.7.3. 運動停止後に生じる衝撃振動の再現

ロボットの動きを言葉で表す際、一般的には「ギィー・ガシャ」といった2つの擬音語を使うことが多いと推測される。このうち「ギィー」は運動中に生じるノイズを形容するものであると考えられ、これまでに私が提案していたロボット駆動中の摩擦振動に相当するものである。一方で「ガシャ」という表現は、主にロボットが運動を停止した後に生じる衝撃振動を表すものであると考えられる。人間の運動がゆっくりと動き出しゆっくりと止まるスムーズなものであるのに対し、ロボットは急に動き出し等速度で運動した後急に止まるといったぎこちないものである。その結果、運動の急停止に伴い「ガシャ」といった衝撃振動を生む。このようなロボットらしい動きを人間が再現することは、エンタテインメントパフォーマンスの一つであるロボットダンスとして広く受け入れられている。

私はこの「運動の急停止後に生じる衝撃感」を再現することで、より高品位なロボット感体験を実現できると考えた。これまでのシステムで呈示していた「ギィー」という摩擦振動に加え、Jointonation では「ガシャ」という衝撃振動を呈示し、運動中と運動後の身体感覚を再現することを試みる。



図 6-11 人間サイズのヒューマノイドロボットと巨大ロボットの 3D モデル[106]

本ロボットモデルに加え、敵モンスターとなる蜂、蜘蛛、ドラゴン、および市街地マップは Unity Technologies 社が提供している Unity 向けデータストア Unity Asset Store にて入手した。

6.7.1. システム構成 : Jointonation

本項ではロボット化体験 VR システム Jointonation の詳細について説明する。

6.7.1.1. 視覚 : HMD とゲームエンジンを用いた VR 空間の再現

Jointonation システムでは、ゲームエンジン (Unity, Unity Technologies 社製) [106]を用いて VR 空間を作成し、その中にプレイヤーのアバタとして図 6-11 に示すヒューマノイドロボットと巨大ロボットを設置した。また広視野角 HMD (Oculus Rift, Oculus 社製, 視野角 110 度, 解像度 1280 × 720, 3D 表示対応) [107]をプレイヤーに装着させ、ここにロボットアバタの視界を投影した。このとき眼鏡をかけている者は外した状態で HMD を装着する。本システムで採用した Oculus Rift HMD は左右 2 つのレンズを用いて 3D 表示 (図 6-12) を行っているが、これには度の異なる 3 種類のレンズを使うことができ、プレイヤーの視力に合わせて適したレンズを用いている。さらに HMD のヘッドトラッキング機能および Kinect カメラを用いてユーザ全身の運動状態を計測し、ロボットアバタにその動きを反映させる。これにより、プレイヤーは VR 空間内で自分の身体の見え目がロボットになったように感じることができる。

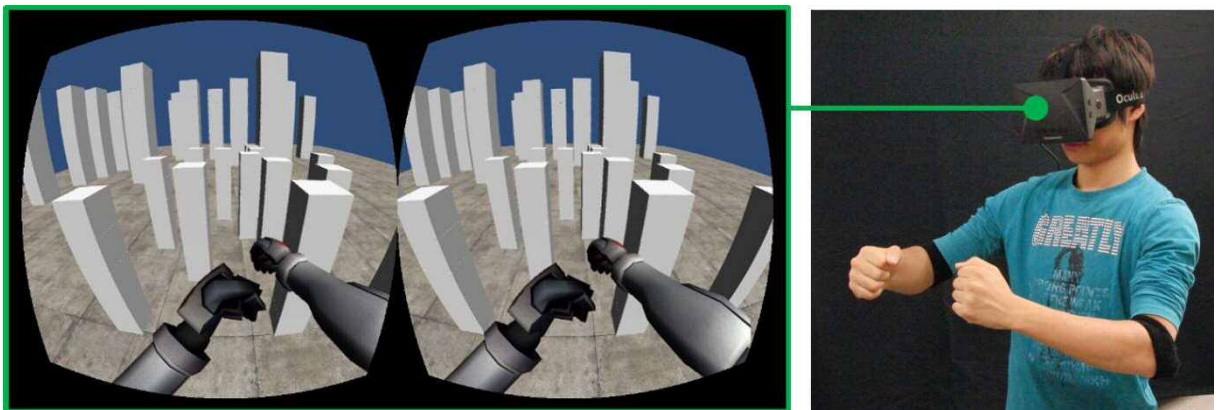


図 6-12 広視野角・立体視対応 HMD を用いた VR 体験 [107]

6.7.1.2. 聴覚 : ロボットらしい効果音の再現

実験に用いたプロトタイプシステムでは、加速度センサを用いてロボットから記録した振動データを音声として出力していた。しかし 6.6.4.2 項で考察した通り、この音は多くのユーザにとってイメージとは異なる音であり、同様にマイクを使って記録したデータもロボットらしい音であるとは認識されなかった。すなわち聴覚の Data-driven approach はロボット感向上のためにあまり効果的ではないと考えられる。

そこで Jointonation では聴覚の Reality-based approach に相当する手法として、人工的に作られたロボットらしい効果音を用いた。運動中には「ギイー」と聞こえる摩擦音を、運動停止時には「ガシャン」と聞こえる衝撃音をプレイヤー背後のステレオスピーカから出力した。また Unity ゲームエンジンの 3D 音響機能を用いて、運動している肘・膝関節からその部位の効果音が聞こえる

ように設計し、各関節の駆動に起因する音であることを強調した。巨大ロボットではヒューマノイドロボット用の音のピッチ（周波数）を下げたものを用い、重量感・巨大感を表現した。

6.7.1.3. 触覚：衝撃振動の追加と複数関節への拡大

衝撃振動の加速度データは、摩擦振動と同様に実際のロボットから計測した。6.4.1 項にて示した摩擦振動の計測データを分析すると、PUMA260 ロボットの関節が回転運動を停止した瞬間から約 0.3 秒間過渡的な衝撃振動が計測されていた。したがって、計測データの衝撃振動の部分 0.3 秒間を抽出し、これをユーザの動きが停止した際に振動子から再生するようにした。なお衝撃振動は摩擦振動と違って連続では呈示されないため、振動の繰り返し再生時に生じる「うねり」は考慮する必要がなく、触覚的な不自然さは生じないと考えられる。したがって衝撃振動の呈示は生データをそのまま再生することとし、モデリングは行わなかった。

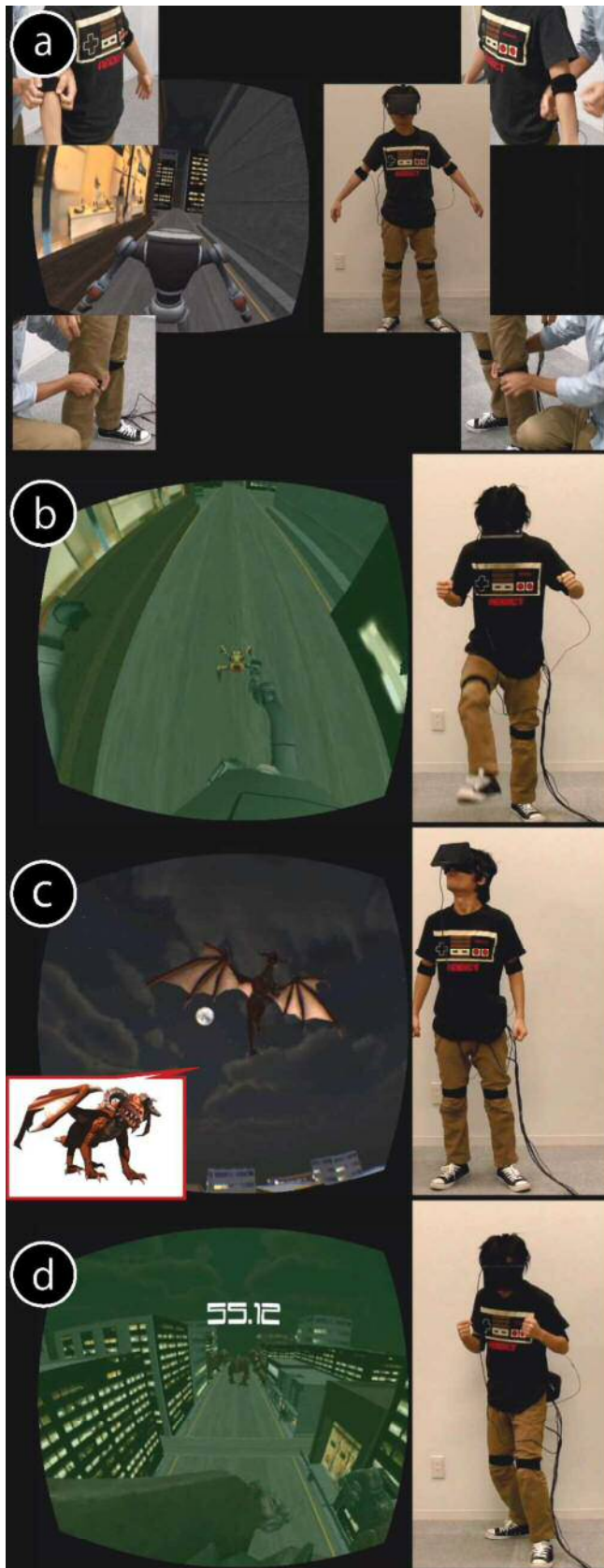
ヒューマノイドロボットでは実世界の PUMA260 ロボットから記録された摩擦振動モデルおよび衝撃振動を呈示した。またこれらの振動に 300Hz のローパスフィルタを適用したものを巨大ロボットの振動として呈示した。

6.7.1.4. 体験の流れとゲーム設計

まずプレイヤーは Kinect カメラの正面に全身が映るように立つ。次に両肘・両膝に振動子を装着し、腰に HMD 用のコントロールボックスを入れたウエストポーチを装着する。また HMD を装着し、ゲームのスタート画面が正しく見えていることを確認する。

Jointonation ゲームの開始から終了までの流れを図 6-13 に示す。ゲームはまずヒューマノイドロボットと一体化するシーンから始まり、正面から迫り来る蜂や蜘蛛のモンスターをパンチおよびキック・踏みつけで倒していく。銃撃などの飛び道具ではなく自己身体による打撃攻撃を用いた理由は、より頻繁に関節を動かしてプレイさせ、本研究の主な貢献であるロボットの身体感覚を強調するためである。飛行する蜂はプレイヤーの頭程度の高さに向かって接近させ、プレイヤーのパンチ動作を誘発させる。一方で蜘蛛は地面を這って接近させ、キックおよび踏みつけ動作を誘発するようゲームを設計した。

敵を一定数倒すと、上空から巨大なドラゴンが登場する。これを撃退するため、プレイヤー（ヒューマノイドロボット）はジャンプして巨大ロボットに乗り込み、これと一体化する。巨大ロボットになったプレイヤーにはヒューマノイドロボットとは異なる振動および効果音が呈示され、これまでとは異なる身体になったことを実感させるよう設計されている。また本ゲームのマップはビルが立ち並ぶ市街地を採用し、巨大ロボットやドラゴンがビルと比べてどれだけ大きいかを明確に判断できるよう設計した。



人間サイズのヒューマノイドロボットが手前に近づいてきて、衝撃音と共にプレイヤーと一体化する。

ロボットになったプレイヤーの身体にはロボット振動と駆動音が呈示される。正面から蜂と蜘蛛のモンスターが近づいてくるので、これらをパンチおよびキック・踏みつけて倒す。

蜂と蜘蛛を一定数倒すと、上空からドラゴンが舞い降りてくる。これを倒すため、巨大ロボットに乗り込む。

巨大ロボットと一体化し、ドラゴンと戦うボス戦へ突入する。より低周波のロボット振動と音が呈示され、巨大ロボットの重量感を表現する。制限時間内にドラゴンを倒すとゲームクリアとなる。

図 6-13 ゲームの流れ

6.7.2. 国際会議でのデモンストレーション

私は Jointonation システムを国際会議 ACE2013 (Advances in Computer Entertainment Technology, オランダ, 2013 年 11 月 12-15 日)および SIGGRAPH Asia 2013 (2013 年 11 月 19-22 日)にて実演展示を行った。体験者の総数は両国際会議合わせて 300 人程度であり, 体験時間は振動子等の装着時間も含め一人あたり 5 分程度であった。多くの体験者が, ゲーム中はあまり表情を変えず静かに身体を動かしてプレイし, 体験後に笑顔の感想を述べた。このような行動は体験者がゲームに深く没入していたことを裏付けるものであるといえる。体験者のコメントは「本当にロボットになった」「関節がギシギシ/ガシャンガシャンした」「没入感が高かった」など極めて良好であり, 学会での評価は高かった。以上の観察から, 多くの被験者に対して没入感の高いロボット化体験を実現できたと考えられる。



図 6-14 国際会議 SIGGRAPH Asia でのデモンストレーションの様子

体験者から得られたコメントのうち特筆すべきと考えられる 3 つを以下に示す。

- C1. 巨大ロボットになったとき, 身体が重くなった/大きくなった。
- C2. 肘・膝へ伸びているケーブルが運動の邪魔になる。
- C3. HMD による視覚刺激が強烈で, 関節への振動をあまり意識しない。

C1 に関しては、ヒューマノイドロボットでの身体感覚と比較することで巨大ロボットの特徴が強調されていたことが伺える。また体験者の中には巨大ロボットのシーンになった際腕を普段よりも広げる者もいた。この行動に対しては、巨大ロボットの CG モデルの大きな胴体が体験者の視界下部を遮っており、自分の胴体が太っているということを体験者が認識した結果、それに合わせて四肢を外側に広げたという考察ができる。すなわち、これらの行動をとった体験者には巨大ロボットの身体形状まで再現できていたと考えられる。

C2 に関しては、今後改善の余地がある内容であるといえる。体験者の四肢の外側にケーブルを這わせ身体運動への影響を少なくする方法や、蛇腹ケーブルを用いることでたるみを抑える方法などが考えられる。また本システムはパンチやキックなどプレイヤーの激しい運動を伴うため、これに耐える高いロバスト性を備えることも重要であるといえる。実際、デモ展示中に肘・膝へ伸びている振動子ケーブルが断線することが数回あった。したがって、屈曲・ねじれなどに強く実際の産業用ロボットや工作機械の配線に使われているロボットケーブルを用い、ハードウェアの耐久性を上げるべきであるといえる。

C3 は、本研究で最も対策を行うべき点である。本デモンストレーションのエンタテインメント性は極めて高かったが、本研究の学術的貢献である「ロボットらしい体性感覚を呈示する技術」を示すという点では改善の余地があるといえる。本システムで用いた HMD である Oculus Rift は人間の視野をほぼ全てカバーする視野角を備えており、視覚的な没入感は極めて高かったが、触覚的な没入感がこれに追い付いていないと考えられる。例えば身体運動計測に用いた Kinect カメラはリフレッシュレートが 30Hz であり、これが運動から振動呈示までの遅延を生み、触覚の質を下げていると考えられる。6.4.3 項にてこの遅延は知覚されない程度のものであると示したが、遅延としては認識されなくとも触覚的な違和感が生じていた可能性は考えられる。なお衝撃振動が呈示されるべき運動に対して呈示されないといった感想も得られたことから、衝撃振動の呈示を決定するアルゴリズムも見直しの必要があると考えられる。

第7章 発泡ビーズの振動伝搬を用いた広範囲触覚ディスプレイ

本章では、体性感覚の操作を身体広範囲に適用するために必要とされる触覚ディスプレイについて取り扱う。減圧させた発泡ビーズによる振動伝搬という新機構を用いてユーザの身体広範囲にくまなく均等に振動呈示を行う全身触覚ディスプレイを提案する。

7.1. 背景：身体広範囲への触覚呈示

映画・音楽など視聴覚コンテンツ体験における臨場感向上を目的として、ユーザの身体に振動触覚刺激を呈示する手法が数多く提案されてきた。中でも最も古いものとして知られているのは、1962年に発明された SENSORAMA[108]という筐体一体型のゲームシステムである。ゲームの状況に合わせて手に握ったハンドルからの振動、前方からの風、食べ物の匂いなどが呈示され、振動のみならず五感全てを使ってゲームを体感できる。また Tactile Jacket[109]はジャケットに内蔵した複数の振動子を動画に合わせて駆動することで、動画を視覚・聴覚のみならず胴体で触覚的に体感できる。他にも、椅子の背面に装着された振動子を音楽やゲームコンテンツに併せて駆動することで臨場感を向上させるシステム[110][111]や、ブランケット型の触覚フィードバックデバイス[112]など様々な提案がされている。



図 7-1 触覚フィードバックを用いた視聴覚コンテンツの臨場感向上システムの例
a:SENSORAMA[108], b:Tactile Jacket[109], c:Surround Haptics[111], d:Tactile Blanket[112].

しかしながら身体の広範囲にくまなく触覚を呈示するためには大量の振動子を敷き詰める必要があり、装置の複雑化やコスト増大を招く[113]. また大量の振動子を用いたとしても、各ユーザの身体形状に振動面を適合させることが難しく、振動子の接触具合が部分的に異なる結果となる[114]. これによりユーザが感じる振動強度にばらつきができてしまい、設計者が望んだ通りの触覚呈示が行えないことが危惧される.

そこで私は、より少ない振動子による身体広範囲への均等な触覚呈示を目的として、発泡スチロール製ビーズの振動伝搬を用いた触覚ディスプレイを提案する. ビーズの中に身体を入れることで、身体表面にくまなくビーズが接触する. さらに減圧によって圧縮・硬化させたビーズを介して振動呈示を行うことで、ビーズが触れている身体広範囲に振動を伝搬させることを試みる(図7-2).

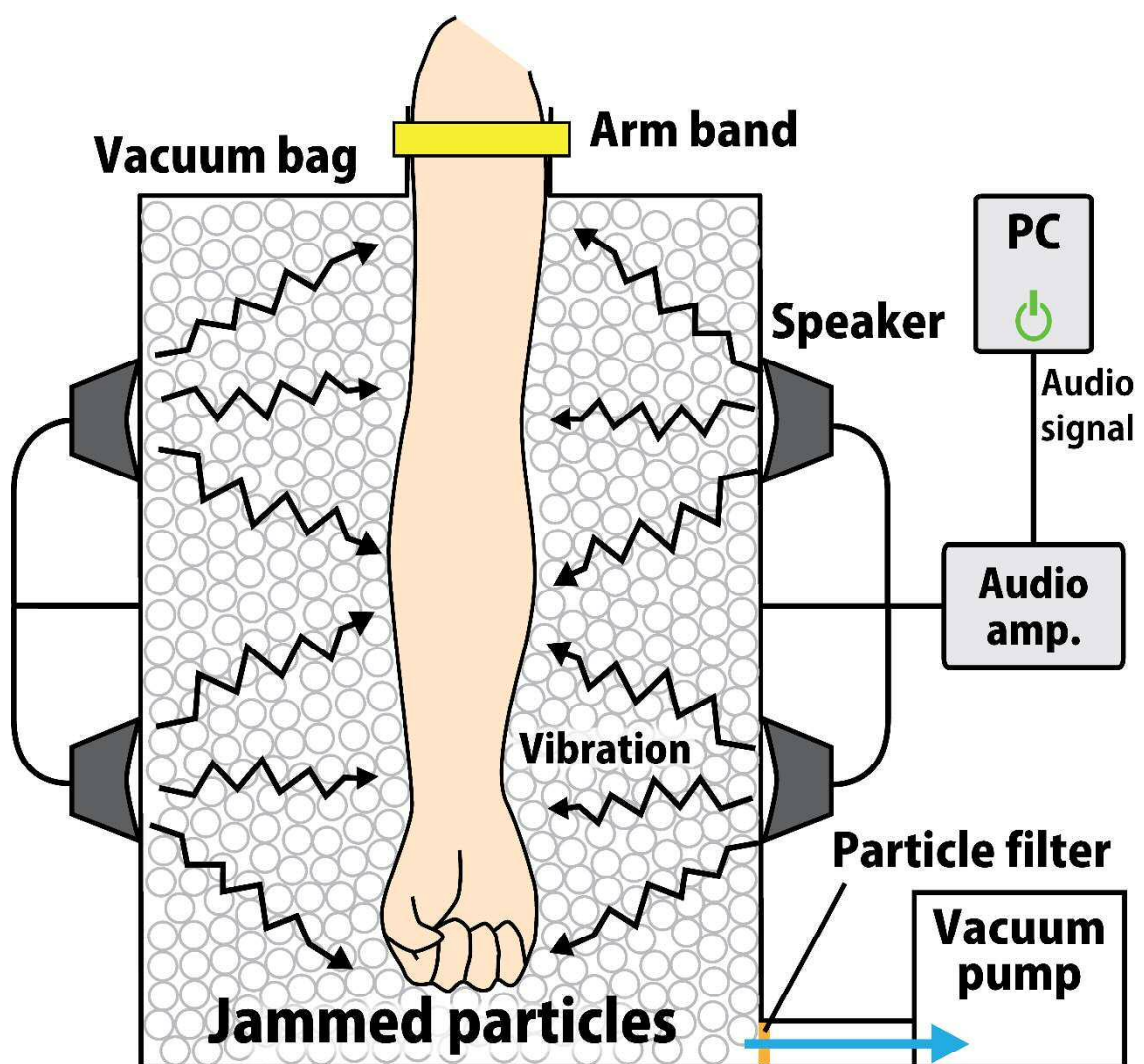


図 7-2 発泡ビーズの振動伝搬による触覚ディスプレイ

7.2. 先行研究：ビーズの空気圧制御を用いた触覚ディスプレイ

密閉されたビーズの空気圧制御を用いた触覚ディスプレイはこれまでも様々なものが提案されている[115][116]. 佐藤ら[117]は、密閉された発泡ビーズの空気圧制御により表面の形状・硬度が可変なテーブルトップ型触覚ディスプレイ「CraytricSurface」を開発した(図 7-3). 本システムではビーズが粘土のように柔らかい大気圧状態で成形を行い、その後硬化(減圧)させて形を保つといったインタラクションが可能である. また満田ら[118]は発泡ビーズを内蔵した蛇腹ビニルチューブの空気圧制御による剛性・粘性操作機構(Particle Mechanical Constraint, PMC)を開発し、これを用いた力覚呈示装置を開発した(図 7-4 左). これらのシステムでは、空気圧制御によるビーズの形状・硬度変化そのものが触覚・力覚呈示機能として働いている.

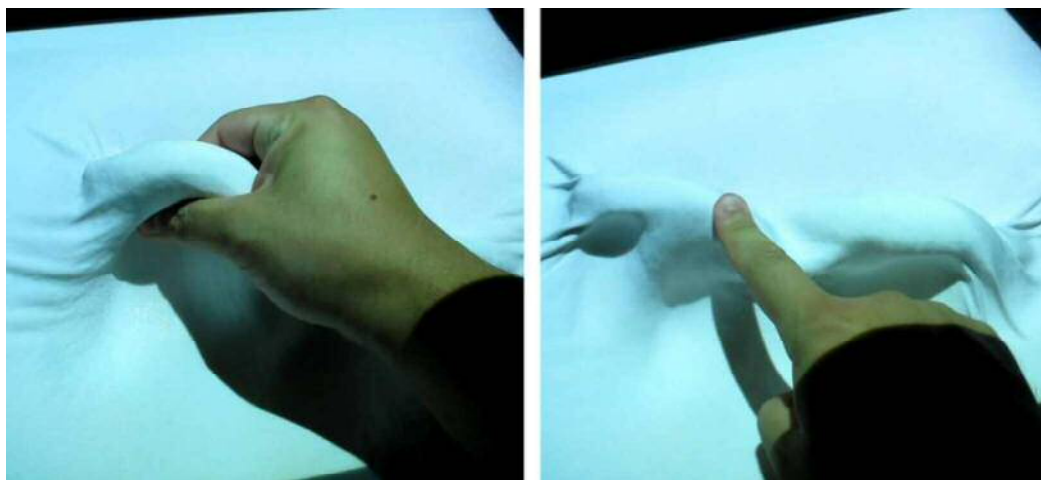


図 7-3 変形可能なテーブルトップ型触覚ディスプレイ「CraytricSurface」

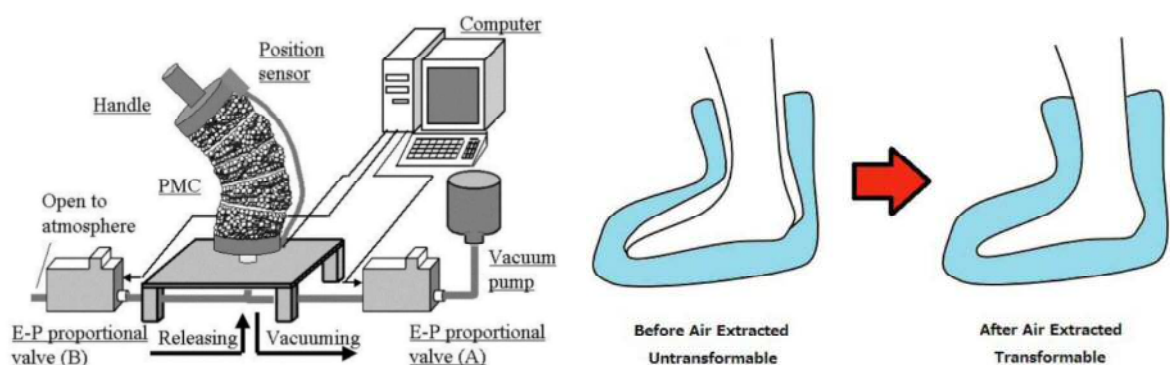


図 7-4 PMC による力覚呈示システム(右)と変形可能な靴(左)

これらに対し私が提案するのは、ビーズを「振動伝搬用の媒介」として用いた振動触覚ディスプレイである. すなわちビーズの形状・硬度変化自体が目的ではなく、これを用いた振動の伝搬が目的である. Rebane ら[119]は発泡ビーズの形状・硬度制御を用いてどんな足の形状にもフィットする靴を開発した(図 7-4 右). したがって同様の手法で身体にくまなく密着させた発泡ビーズを振動させることで、身体広範囲にむらなく振動を呈示できるのではないかと私は考えた. 本研

究は、ビーズの空気圧制御を用いた広範囲触覚ディスプレイの新たな形として触覚学（Haptics）の分野に貢献できると考えられる。

7.3. 前腕部用の触覚ディスプレイ

ビーズによる振動伝搬を用いて前腕部全体（掌から肘関節まで）に触覚呈示を行うプロトタイプを製作した。図 7-2 にシステムの模式図を示す。幅約 40cm、長さ約 50cm の密閉袋の内部を、直径 5mm の発泡スチロール製ビーズで約 7 割を満たした。被験者が腕を密閉袋の中に入れると、被験者の上腕までビーズに覆われる。様々な大きさおよび別の素材のビーズも検討したが、静電気が発生しにくく密閉袋から腕を出す際にビーズが腕にまとわりつかない点、また軽量で振動を伝えやすい点などを考慮して直径 5mm の発泡スチロールビーズを採用した。密閉袋の上腕側はアームバンドバンドで上腕に締め付け、密閉した。密閉袋の下部はビーズを遮断するフィルタを介して真空ポンプ（VP0625, 日東工器, 真空到達度-33.3kPa, 吐出空気量 40L/min）と接続されている。袋内を減圧し真空状態にすることで内部のビーズが密着・圧縮され、全体が硬化する（図 7-5）。密閉袋前腕側の内部には気圧センサ(20 INCH-D2-P4V-MINI, All Sensors Corporation)が装着されており、真空度をモニタリングする。密閉袋の両側面にはフルレンジスピーカ（W2-800SL, Tang Band）が 2 個ずつ装着されており、PC からの音声をオーディオアンプ（RSDA202, Rasteme Systems）で増幅し出力する。ビーズが硬化した状態でスピーカを駆動するとスピーカコーンの駆動によって生じる振動がビーズに伝搬し、ビーズに埋まっている前腕全体に振動が伝わる。

ビーズはユーザの前腕部全体の表面にくまなく接触しており、また密閉袋内の空気圧はどの部位でも均等に低下し前腕にかかる圧力はどの部位でも等しくなる。したがって前腕部全体に振動強度のばらつきなく触覚刺激を与えることが可能となる。また身体広範囲への振動触覚呈示を行う場合、従来手法では振動子およびスピーカを敷き詰める必要があったが、本提案手法を用いればスピーカ 4 個のみで前腕全体への振動呈示が可能となる。

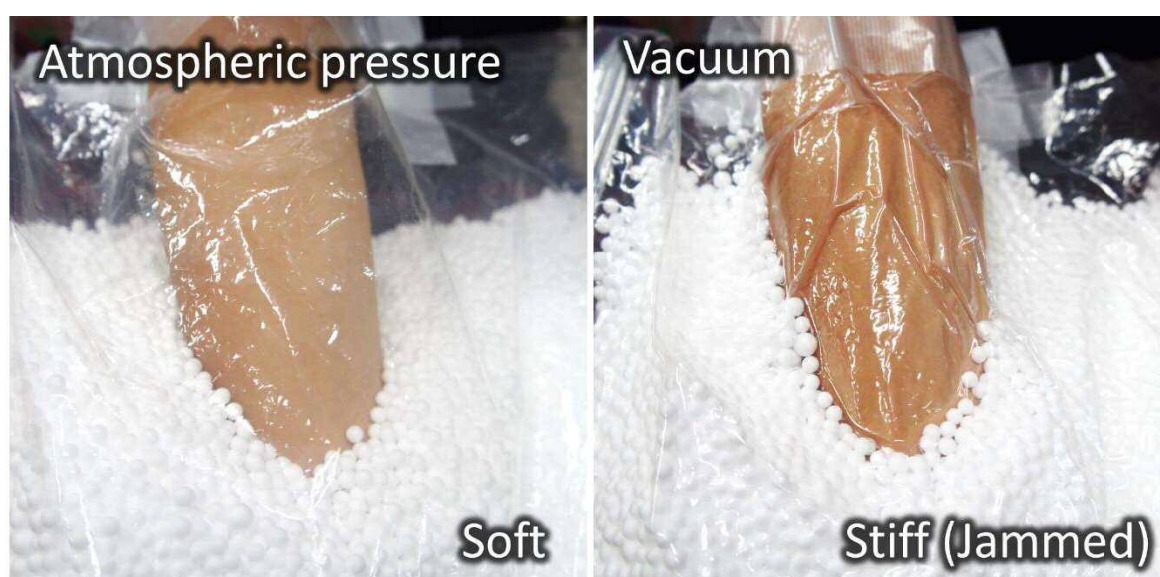


図 7-5 減圧による発泡ビーズの硬化

7.3.1. 予備実験

前腕部用のプロトタイプシステムを用いて、オーケストラ演奏動画および打ち上げ花火の動画を被験者 3 名に鑑賞させた。ポンプから発生する騒音によりスピーカからの動画音声聞こえにくくなることを考慮して、聴覚呈示にはノイズキャンセリングヘッドホン (QuietComfort 15, BOSE) を用いた。

ユーザテストの結果、全ての被験者から「減圧すると前腕に明確な振動を感じる」「前腕部全体にビーズが密着している」といったコメントが得られた。特に打ち上げ花火の破裂音のような瞬間的な振動は音楽に比べて知覚しやすく、より臨場感が高まったという感想が得られた。

7.4. 実験：ビーズを介した振動知覚検証

減圧により圧縮したビーズを介して振動を十分に感じることができかどうかを検証するため、掌から肘関節における振動知覚実験を行った。

7.4.1. 実験環境

実験装置は 7.3 節にて説明した前腕部用のプロトタイプ (図 7-2) に類似しているが、実験条件の統制のためスピーカ 4 個の代わりに振動モータ 1 個のみを用いた装置にて行った (図 7-6)。密閉袋の掌側に円盤型振動モータ (FM34F, TPC 社製) が 1 個装着されており、約 200Hz の振動刺激を被験者に呈示する。

7.4.2. 実験条件

本実験の被験者として男性 4 名 (21~23 歳, 右利き) に協力を依頼した。に実験の概観を示す。被験者の右腕に対し、実験刺激として下記の 2 つの条件で振動を呈示した。

直接刺激： 被験者の右前腕・掌側の中央に振動モータを直接貼り付け、振動刺激を呈示した。したがって本条件では振動モータが装着された部位の周辺でのみ振動が感じられると予想された。

ビーズ刺激： 被験者はビーズで満たした密閉袋の中に右腕を上腕まで入れた。振動モータは、被験者の右前腕・掌側の中央の密閉袋上に 1 個配置した。密閉袋内部の空気圧は常に約 96.1 kPa 程度になるよう気圧センサの値を確認しながらポンプの出力を手動で調整した。圧縮された発表ビーズにより、振動は腕全体で感じられると予想された。

6 個の振動モータを被験者左腕の (1) 掌側の手, (2) 前腕, (3) 肘および (4) 手の甲側の手, (5) 前腕, (6) 肘に一個ずつ装着し、基準刺激としてこれら 6 個の振動子を同時に駆動した。左腕への基準刺激と右腕への実験刺激は同時に 10 秒間呈示された。被験者は、右腕掌側の

手，前腕，肘および手の甲側の手，前腕，肘における振動の強度を，左腕の同 6 部位と比較して視覚的アナログ尺度で評価した（0：全く振動を感じない，100：左手の同部位と同じ位強い）。



図 7-6 直接刺激（左）とビーズ刺激（右）。

どちらの条件でも被験者の左腕には振動子が 6 個（掌側の手，前腕，肘，および手の甲側の手，前腕，肘）装着されており，比較の基準となる振動を呈示する。

7.4.3. 実験手続き

まず被験者を椅子に着席させ，ヘッドホンからホワイトノイズを再生することで振動モータおよびバキュームポンプから発せられる音をマスキングした．実験者は被験者の左腕に振動モータを 6 個粘着テープで貼り付けた．

被験者 4 名のうち 2 名は直接刺激を先に行い，その後ビーズ刺激を行った．残りの 2 名は逆の順序で行った．直接刺激の試行およびビーズ刺激の試行毎に，被験者は右腕への実験刺激の強度を回答した．直接刺激とビーズ刺激のペアを 1 セットとし，これを被験者毎に 3 セット繰り返した．

7.4.4. 実験結果

図 7-7 に被験者が右腕で知覚された振動強度の平均値を示す．直接刺激では前腕部・掌側，すなわち振動モータが装着されていた場所において他の部位よりも極めて強い振動が知覚された．これは実験前の予想通りの結果である．

本実験結果に対して 2 要因分散分析（2 振動条件×6 刺激位置，被験者間計画）を行った．その結果，直接刺激条件における刺激位置に関して有意差が認められた($F(5, 36) = 39.32, p < .01$)．一方でビーズ刺激条件における刺激位置に関して有意差は認められなかった ($F(5, 36) = 1.54, p = 0.20, n.s.$)．Holm 法を用いた刺激位置の多重比較の結果，前腕・掌側での振動が他のどの部位よりも有意に強く感じられていたことが明らかとなった．

刺激位置別に着目すると、2つの位置において直接/ビーズ刺激間で有意差が認められた。一つは、前腕・掌側においてビーズ刺激が直接刺激よりも有意に弱かったこと ($F(1, 36) = 77.57, p < .01$)、もう一つは手・掌側においてビーズ刺激が直接刺激よりも有意に強かったことである ($F(1, 36) = 7.10, p = 0.011 < .05$)。また、手・手の甲側においてビーズ刺激の方が直接刺激よりも有意に強い傾向があった ($F(1, 36) = 2.99, p = 0.092 < .10$)。

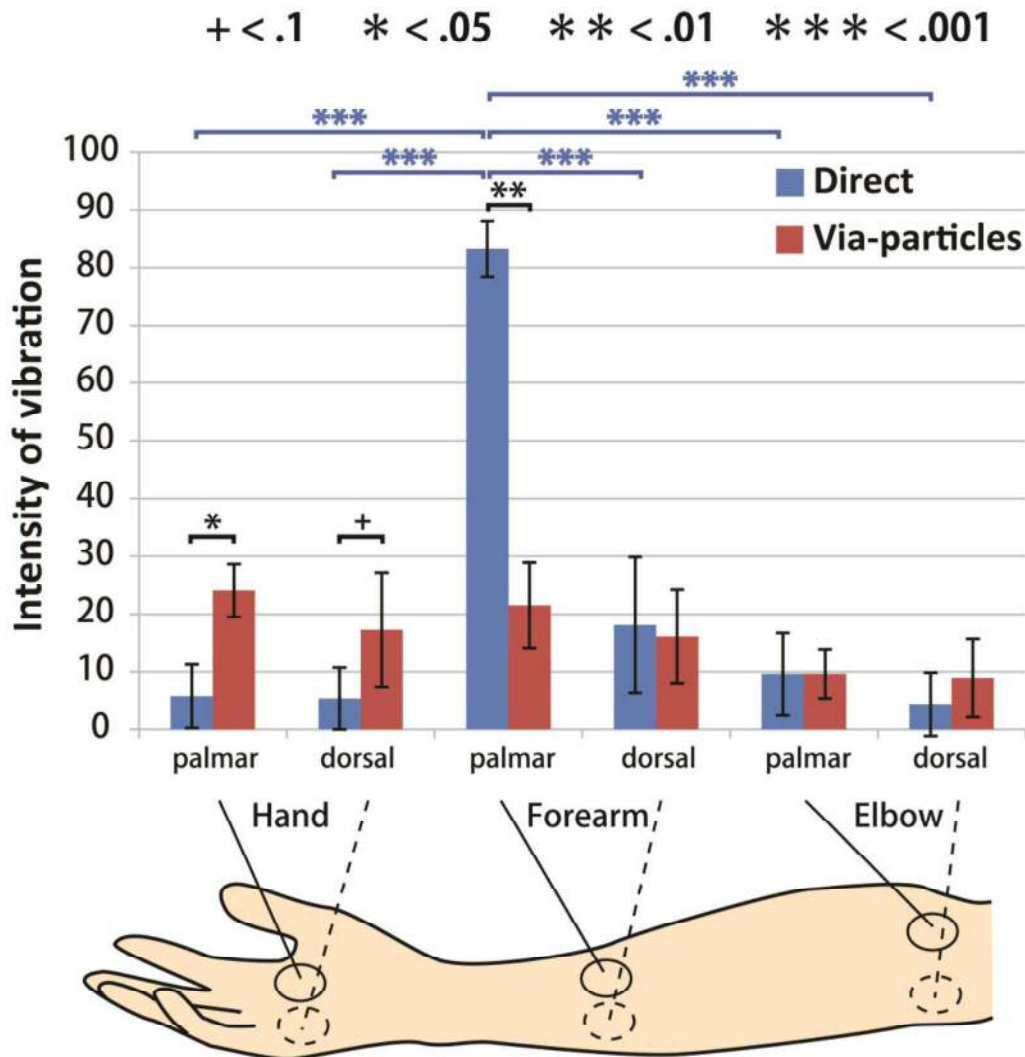


図 7-7 右腕の各部位で感じられた振動強度。

エラーバーは標準偏差を表す。縦軸の 100 点は左腕で知覚された基準刺激の強さに対応する。

7.5. 考察

7.5.1. 腕部広範囲への振動伝搬

実験結果によると、発泡ビーズを介した振動刺激は右腕の全 6 部位において均等な強さで知覚されていたといえる。すなわち、密閉袋の表面に装着された単一の小型振動モータのみにより広

範囲への振動触覚呈示が可能であるということである。

一方で、振動条件（直接刺激/ビーズ刺激）間の有意差は前腕・手の甲側、肘・掌側および肘・手の甲側においては認められなかった。これは人間の腕部における触知覚能力の違いに起因していると考えられる。一般に、人間の肘関節は触覚受容器が少なく触知覚能力に乏しいため、被験者は振動を感じにくかったと考えられる。また手で振動が強く感じられた事についても、手には触覚受容器が密集しているという事実により説明がつく。

7.5.2. 被験者による内観報告

ビーズ刺激条件において全4名の被験者から、「右腕全体がぼんやりと振動しており振動源を特定できない」といったコメントが得られた。本コメントは発泡ビーズによる振動伝搬が腕全体に対して振動を呈示できていることを示していると考えられる。被験者1名からは「振動の強さが圧縮袋内の空気圧によって変わる」といった報告が得られた。今後は、振動をより効率よく伝搬させる空気圧などを検証し明らかにする必要があると考えられる。

7.6. 触覚的花火体験装置「からだ花火」

発泡ビーズを用いた身体広範囲への振動伝搬手法を用いたアプリケーションシステムとして、打ち上げ花火の爆発を足全体で触覚的に鑑賞できる装置「からだ花火」を開発した。本システムの目的は、ユーザの足全体に対して花火の振動を呈示することで、花火を視覚・聴覚のみならず触覚的にも楽しめる新たな花火鑑賞体験を作り出すことである。



図 7-8 「からだ花火」体験の様子

7.6.1. システム構成：からだ花火

本システムでは、実験に用いたシステムのように発泡ビーズをそのまま密閉袋に入れるのではなく、まずストッキングに詰め込んでからビーズ入りストッキングの束を圧縮袋に入れた。これは、ユーザの身体に発泡ビーズがまとわりつくのを防ぐため、また発泡ビーズをユーザの足全体に均等な厚みで分布させるためである。ビーズ入りストッキング 27 本を図 6 に示すように両足が入るように並べ、粘着テープで固定し、黒布を巻いた状態で幅約 75cm、長さ約 130cm の密閉袋に入れた。ユーザは足を伸ばして床に座った状態で本装置に両足を入れ、臀部と床で密閉袋を挟むことで袋内部の空気の流出を防ぐ。

左右両端のストッキング、および左足と右足を仕切るストッキングのふくらはぎ部分と太腿部分には1つずつボイスコイル型振動子 (Haptuator Mark II, TactileLabs) が埋め込まれており、オーディオアンプ (RSDA202, Rasteme Systems) を介して PC のオーディオジャックに接続されている。すなわち PC から出力される花火のオーディオ信号によって4つの振動子が駆動され、ユーザに振動刺激を呈示する。



図 7-9 圧縮袋に詰め込まれた発泡ビーズ入りストッキングの束

本装置およびユーザの周囲を暗幕で覆うことで暗室をつくり、密閉袋の上部にプロジェクタで花火の動画を投影する (図 7-8)。花火動画の音声信号は、ユーザ前方のスピーカから音として呈示されると同時に振動子の駆動にも利用される。この際、密閉袋の内部を掃除機で圧縮しビーズを硬化させることで、両足全体に均等に振動が伝搬する。

プロジェクタからの映像は、あえてビーズ袋から少しはみ出すように投影する。これにより、通常は足を入れたビーズ袋上のみ花火が投影されるが、しばしば打ち上がる大きな花火の場合はビーズ袋外周の床面にも花火が投影され、より迫力のある体験となる[121]。

7.6.2. 子供へのデモンストレーション

本システムを 2013 年 11 月 09～10 日に開催された「いしかわ夢未来博 2013」にて実演展示し

た（図 7-11）. 体験者のほとんどは小学生～中学生程度の子供であり「身体の中から弾ける感じがする」「気持ちいい」「熱い」といった感想が多く得られた.



図 7-10 「からだ花火」装置のデモ会場でのセットアップ

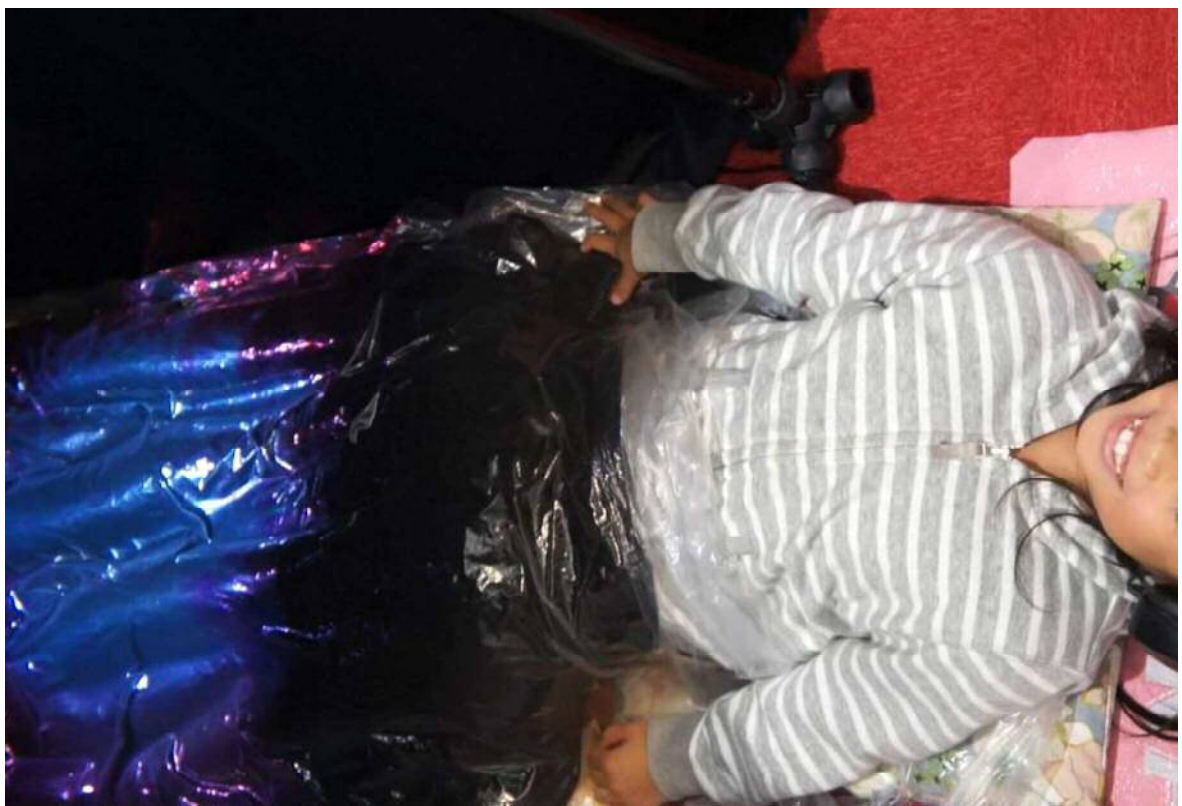


図 7-11 「からだ花火」の子供へのデモンストレーション

人間の体内への触覚呈示は、振動源が体内にあると錯覚させることで可能であることが知られている。例えば身体両面への振動刺激[98]により体内でのファントムセンセーション[121]を生じさせる手法や、ユーザの身体を人工的に膨張させることにより本来体表であった部位を体内だと錯覚させる手法[123][124]が報告されている。足全体に振動を呈示し、さらに足を発泡ビーズで包み込み膨張させる本手法を用いることで、まるで足全体の中で花火が爆発しているような新しい花火鑑賞体験を作り出すことができたといえる。

気持ちよさに関しては、花火の爆発の振動に加え、密閉袋の圧縮により両足にかかる適度な圧迫感も寄与していると考えられる。また温覚に関しては、花火のイメージから連想する熱に加え、足が密閉されることで内部温度が実際に上昇することで感じていたと推測される。

7.7. 全身への触覚呈示に向けて

全身への触覚呈示を目指し、他の部位に振動刺激を伝搬させる触覚ディスプレイも開発した。どれもプロトタイプ段階ではあるが、ビーズを介しての振動を明確に知覚した。

7.7.1. 脚部への触覚呈示

図 7-12 に、足への触覚呈示を目的とした足湯型触覚ディスプレイを示す。本システムは合計 4 個のスピーカ（両脚×前背面）を用いており、ビーズを介して膝から下全体に振動を呈示する。



図 7-12 足湯型触覚ディスプレイのプロトタイプ

7.7.2. 胴体への触覚呈示

図 7-13 に胴体用の触覚呈示システムを示す。実験で用いたシステムや、からだ花火装置および足湯型装置は身体を密閉袋の中に直接入れていた。一方で胴体向けの触覚ディスプレイは密閉袋の外側に身体を接触させる。発泡ビーズが入ったマットレスで身体を包み込み減圧して固定・装着する仕組みは、傷病者の欠損部位を固定するための救命救急器具としてすでに実用化されている[119]。したがって本手法でも身体形状への適応性は高いと考えられる。ただしビーズ内に身体を入れる場合に比べ身体を締め付ける圧力が弱く、知覚される振動強度は低下することが確認された。



図 7-13 胴体用触覚ディスプレイのプロトタイプ

7.7.3. 全身への触覚呈示

首から下の身体全てをビーズに浸すことで、身体表面全てに触覚呈示を行うことも検討した。図 7-14 にプロトタイプシステムの概観を示す。これにより、従来は難しかった頭部以外の全身にくまなく触覚呈示をすることも将来的には可能であると考えられる。



図 7-14 全身触覚ディスプレイのプロトタイプ

第8章 結論

8.1. 本論文のまとめ・目的の達成度

本論文の目的は、低リスク・低コストかつ簡便なシステムによる人体特性の操作であった。これを実現するため、身体外部からの触覚刺激を用いた体性感覚の操作を提案し、人体の主観的な特性の操作することを試みた。体性感覚の量的な操作である「増強」と質的な操作である「変調」という2つの戦略を定義し、それぞれ2件ずつ具体的な手法を開発・検証した(図 1-3)。

S1. 体性感覚の増強

手法1: 肘関節への「カチカチ感」付与による運動感覚の増強

第3章では体性感覚増強の第一手法として、ロータリスイッチがもつ触覚・力覚フィードバック「カチカチ感」を肘屈伸運動に付与することを提案し、これを用いた腕立て伏せの姿勢教示を試みた。ロータリスイッチの機構を模倣した腕部用カチカチ感呈示装置を開発し、正しい腕立て伏せ姿勢である深い肘屈伸がカチカチ感付与により助長されるかどうかを検証した。一連の実験の結果、私の予想とは異なり正しい腕立て伏せの姿勢教示は達成できなかった。しかしながら、運動後の主観的な達成感を増幅する効果と、繰り返し同じ運動を続けることができる効果の2つが新たに示唆された。

手法2: アクセルペダルへのクリック感付与による操作性向上

第4章では体性感覚増強の第二手法として、アクセルペダルの踏込み量に同期したクリック感振動フィードバックを提案した。ペダル操作に対する新たな触覚的手がかりを付与することで、ペダル踏み込み量知覚能力の向上と操作性の向上をねらい、結果として安全運転を促進することを検討した。ドライブシミュレータを用いてラップタイムとコースアウト確率の測定実験を行い、クリック感付与によって安全運転が促進されることを明らかにした。

S2. 体性感覚の変調

手法1: 周期的な衝撃振動フィードバックによる身体材質感の変調

第5章では体性感覚変調の第一手法として、材質ごとに異なる衝突振動を再現する減衰正弦波モデルを用いて身体材質感の変調を提案した。肘関節の角度が一定値変化する度にゴム・木材・アルミニウムの振動を呈示するシステムを開発し、これを用いて材質判別実験を行った。実験の結果、被験者は3つの材質を正しく判別できたことが示され、本手法によって肘関節に各材質の触覚的特性を付与できることが証明された。

手法2: ロボット振動の記録・モデリング・再生を用いたロボットの身体感覚の再現

第6章では体性感覚変調の第二手法として、ロボットキャラクターの身体感覚を人間に再現する手法を提案した。実際のロボットアーム駆動中に関節に生じる振動を記録・モデリング

し、これを人間の関節運動に同期させて呈示することで、ロボットがもつ摩擦振動感を自己身体感覚として知覚させることを試みた。ロボット感評価実験の結果、視覚と聴覚に加えロボット振動を呈示することがよりロボットらしい体験に繋がることを示した。またより現実感の高いロボット感体験を実現するため、視覚・聴覚・触覚全てにおいてより高品位な刺激を呈示するバーチャルリアリティゲーム「Jointonation」を開発した。国際会議でのデモンストレーションを通じて、本システムが高い現実感を持つロボットらしい身体感覚を再現していることを示した。

T1. 体性感覚操作のための道具

発泡ビーズの振動伝搬を用いた広範囲触覚ディスプレイ

第7章では身体広範囲に体性感覚の操作を適用するため、発泡ビーズ減圧を用いた振動伝搬機構を新たに開発し、身体広範囲にくまなく均等に振動刺激を呈示する触覚ディスプレイを開発した。また振動知覚実験を行い本システムが身体広範囲に振動を伝搬させることを確認した。さらに身体広範囲への触覚呈示が身体内部の感覚を生成することを利用して、体内で花火が爆発しているような感覚を呈示する装置「からだ花火」を開発した。主に子供を対象としたデモンストレーションを行い、本システムが多くの子供に喜ばれる魅力的なコンテンツとして受け入れられることを確認した。

以上、本論文では体性感覚の操作を行う2つの戦略と4つの具体的手法について述べ、さらに体性感覚操作の面積化を狙った新たな触覚ディスプレイを開発した。これらの手法は、これまでに人体特性の直接的操作で用いられてきたような高リスク・高コスト・複雑な装置を要する手法ではない。したがって、本論文の目的を満した人体特性の操作技術が実現したと考えられる。

8.2. 総合考察

本節では、本研究全体を通して得られた特筆すべき知見およびそれに対する考察を述べる。

8.2.1. 煩わしい装着品の感覚を逆利用し没入感を高める設計

本論文で提案した手法によりユーザが触覚刺激を知覚する際、その刺激がユーザ自らの身体から出力されたと認識するかどうかは、人体特性の主観的な操作を行う上で極めて重要であると考えられる。触覚フィードバックの発生源が自己身体にあると認識させれば、その触覚が表現する特性が自己身体に備わっていると信じ込ませることができると考えられる。一方で、振動フィードバックの発生源が身体外部のアクチュエータであると認識されてしまった場合は、その触覚が表現する特性も自己身体のものではなくなってしまう、結果として「自己身体の特長」ではなく「アクチュエータが出す感覚」となってしまう。体性感覚の増強が目的である場合は、例えば外部アクチュエータによる感覚だと認識されていても運動に同期していれば動き・位置の手がかりとして機能するためあまり問題ではない。しかし体性感覚の変調の場合は、触覚源が外部装置にあ

ると認識されるとその触覚は身体材質・構造の変化に結びつかない。

以上のことから、装置の存在をユーザに意識させないようなシステムの設計が必要であると考えられる。これを解決するための手段として触覚アクチュエータの小型化・軽量化・無線化が有効であることは言うまでもないが、触覚刺激の十分な強度・応答速度を考えるとこれらの手段には限界がある。

そこで、本来煩わしく思われてしまう装置に有用な意味を持たせることで装着を許容させるといった手法が考えられる。例えば Jointonation システムではプレイヤーは両肘・両膝に振動子入りリストバンドを装着するが、アバタとなるロボットキャラクターにもリストバンド型の武器等を装備させ、振動子入りリストバンドに「ゲーム内の装備品」という別の意味を持たせる。これにより、現実のリストバンドの装着感とはアバタロボットが得ている装着感として対応付けられ、振動子固定用の単なるアタッチメントであったリストバンドがより没入感を高める道具として成り立つ。結果としてその中に組み込まれている振動子への意識も薄れ、呈示される振動の発生源は自己身体であると認識されると考えられる。

Jointonation 体験者のコメントとして得られた「ケーブル類が邪魔」といった問題点を解決する手法としても、本手法は有効であると考えられる。すなわち、アバタロボットの背中から肘・膝にかけてゲーム内で意味のあるワイヤ等を配線し、振動子までの有線接続を許容させるといった設計が可能である。

本手法は、装着品の煩わしい感覚を逆利用して没入感を高めているため、場合によってはアクチュエータの単純な小型・軽量化などよりも没入感向上に有効であると推測される。

8.2.2. 体性感覚の操作によるユーザの行動の変化

国際会議等における Jointonation システムのデモンストレーションにて体験者を観察していたところ、システム体験者自身にしか分からない身体の「感覚」が変わっただけでなく、観察者である私から見ても分かる体験者の「行動」に変化が見られた。体験者の動きは通常時よりも急に動き出し、急に止まるといった古いロボットらしいぎこちないものとなった。体性感覚の増強および変調を目的としたシステムは全て身体運動に同期して触覚を呈示するため、体験者のために頻繁に身体を動かすことは当然であるが、そのような目的による運動が誘発されないと思われる Jointonation システムにおいて体験者の行動変化は顕著に観察された。Jointonation はアクションゲームであり、ゲームに関係ない身体運動はゲームクリアの妨げになるため、無駄に身体を動かすことは稀であると思われる。なお体験者の行動変化は、6.4 節にて説明したプロトタイプシステムでは観測されなかった。

体験者の行動が変化した原因として考えられるのは、Jointonation システムにて新たに追加された「ガシャ」という衝撃感（衝撃振動と衝撃音）である。本システムでは体験者が人間らしく滑らかに動作を停止したとしても肘・膝の屈伸角速度が約 $20^{\circ}/s$ 以下になった瞬間に衝撃感が呈示される。本来衝撃が少ないはずであるなめらかな運動に対して明確な衝撃感が返ってくることから、これは不自然感・不快感を生むと考えられる。よって体験者はこのミスマッチを無意識のうちに排除しようとして自らの運動を変え、衝撃感と運動の整合性をとったのだと考えられる。す

なわち、ロボットらしい衝撃感の呈示によってロボットらしい行動が誘発されたと推測される。衝撃感を呈示しているという意味ではカチカチ感・クリック感・減衰正弦波振動なども全て同様だが、これらは全て一定角度ごとに衝撃感を呈示していた。一方で Jointonation では動作が停止した瞬間のみ衝撃感を呈示していたことから、衝撃感の質だけでなく衝撃感を呈示するタイミングも本行動変化の要因の一つとして考えられる。なお 6.7.2 項にて示したように、ロボットの胴体が太っていることを体験者が視覚的に認知し、そのサイズに合わせて腕をより広く広げるという視覚に起因すると考えられる行動変化も観察された。

本研究は体性感覚の操作によって人体の特性を「主観的に」操作するものである。すなわち、システム体験者が受容する「感覚」さえ変わればそれで目的は達成であった。しかしながら、感覚だけではなく体験者の「行動」にまで変化が見られたことは特筆すべき興味深い事項であり、今後より詳しい検証が必要であるといえる。

8.3. 今後の展望

本節では、本研究によって得られた知見をもとに、本研究が今後進むべき道筋を示す。

8.3.1. 体性感覚の増強

体性感覚増強の第一手法であるカチカチ感付与については、今後の展望として装置の多自由度化を考えている。現在の装置は 1 自由度の回転のみであるが、ボールジョイント等の機構を利用することで 2 自由度・3 自由度の運動に対しカチカチ感を付与することができると推測される。このような機構はアクションフィギュアの関節を所望の位置で固定する目的で用いられており [125]、これを人間の身体に適用することで同様の効果が見込めると考えられる。



図 8-1 カチカチ感をもつアクションフィギュア用関節「リボルバージョイント」 [125]

体性感覚増強の第二手法であるアクセルペダルへのカチカチ感付与については、より現実に近い環境での実験が必要であると考えられる。これまでの実験で用いてきたドライブシミュレータはCG等の再現性は高かったが、実際の自動車運転のような平衡感覚の変化はなく、また事故に対する緊張感に欠ける。したがって実際の運転ではよりタスクが難しくなり、より速度を落として運転すると推測される。そのような状況でクリック感がどのような効力を発揮するのかを検証することは、本システムの応用および実用化に向けて重要な課題であると考えられる。

8.3.2. 体性感覚の変調

体性感覚変調の第一手法である身体材質感の変調については、減衰正弦波振動を出力する頻度を材質ごとに最適化すべきであると考えられる。すなわち、今回はゴム・木材・アルミニウム全ての材質モデルにおいて肘角度が 10° 変わると振動を呈示していたが、この角度を変更することによって材質によっては材質感変調に対する確信度や腕に感じる抵抗感に変化が見られる可能性が考えられる。また5.7.4項で示したような実験の不備を解消すべく、ナイーブな被験者を採用する・振動子からの音をマスキングするなどの方法でより適切な実験を設計する予定である。

体性感覚変調の第二手法であるロボットの身体感覚の再現では、ロボット感体験VRゲームJointonationを開発したが、本システムの性能評価は国際会議での体験者によるコメント以外なされていない。したがって今後は、ロボット振動フィードバックによってどれだけロボット感が向上したのかを実験で検証する必要があるといえる。本論文6.5節に記したプロトタイプシステムのロボット感評価実験では、被験者間でロボットのイメージが異なる、視・聴・触覚刺激の質が低いといった不備が考えられたため、より定量的にロボット感を評価する実験を設計する必要がある。

Jointonationではロボットの身体感覚を呈示することによりロボットなりきりゲームのエンタテインメント性を高めることを狙いとしている。しかしながら、エンタテインメントシステムの評価はしばしばユーザの感情・情動の評価を意味するので、定量的に計測することが難しい分野である。これまでの研究で主に用いられてきたエンタテインメントシステムの定量的な評価手法は、主に人間の情動喚起に伴って表出する生理反応の計測であった。例えば心拍数、呼吸数、皮膚コンダクタンス、表情筋活動などの計測などが挙げられる[126][127]。これによってシステムがユーザにもたらす感情が測定できたとしても、「ロボット感」なる感覚が生理反応としてどのように表出するかは不明である。また定性的な評価としては、QoE (Quality of Experience, 体験の質) を構成するいくつかの要素を定義し、これらを別々に評価する手法が用いられている[126]。しかしながら「ロボット感」を定義することは未だ難しく、例え私が定義を決定したとしても被験者によっては納得出来ない可能性が高い。

以上の問題点から、より明らかな計測対象として私はユーザの行動の変化に着目することを提案する。8.2.2項にて示したように、ロボット感の呈示に伴いユーザの行動がよりロボットらしくなるという発見があった。このような行動の変化は、VR空間のアバタとの身体同一性と相関があることが知られている[128]。したがって、ユーザの行動の変化を計測することにより、ロボット

アバタとの身体同一性を評価することができると考えられる。これは「自分の身体がどれだけアバタのロボットと一体化しているか」というロボット感を評価することに相当し、有力なロボット感評価方法であると期待できる。今後は本手法を用いた実験を行いロボット感の評価を行うと同時に、ロボット感を構成する要素についてより知見を深めていく。

本研究にて用いた実世界振動の記録・モデリング・再生はロボットの体性感覚以外にも応用が可能であると考えられる。私はこの **Data-driven approach** に基づき、シャワーから水を出した際のシャワーノズルの振動、エアブローワーから風を出した際のノズルの振動などを計測およびモデリングした (図 8-2)。これらの振動モデルを掌に取り付けたスピーカから再生することにより、手から水や風が出ているような感覚が生起することを予備実験で確認した。特に、肘を曲げた時に振動を止め、肘が伸展していくにつれ振動強度が上がっていくように設計することで、ユーザが自らの腕の動きによって水・風を操っているような感覚となった (図 8-3)。本現象を用いれば、手から水や風を出して攻撃するヒーローキャラクターの能力をバーチャルに再現することが可能であると考えられる。今後は物質知覚実験などを通して本知覚現象の生起に重要な要素を突き止め、魅力的なアプリケーション開発を通して「体性感覚の操作」の有用性について主張していきたい。



図 8-2 水と風の振動計測の様子

左：シャワーノズルに取り付けた加速度センサで水を放出している際の振動を記録している様子。

右：エアブローワーのノズルに取り付けた加速度センサで風の振動を記録している様子。



図 8-3 研究室で行った風の振動呈示デモンストレーション

振動子が肘に装着されているものの、体験者(写真左)は自身の肘を伸ばすにつれ大きくなる風の音と振動を理解し、手から風を出すようなジェスチャを展示者の説明を受ける前に自然と行った。

謝辞

学部から修士までの3年間、研究を通してたくさんの方を学びました。その中の多くは主任指導教官である梶本裕之准教授によるものでした。手厚くご指導していただき心から感謝しております。梶本先生の存在は私の思考と行動に大きな影響を与えました。梶本先生から学びたいことはまだまだあり、もうすぐ卒業してしまうのが非常に残念です。

研究室の先輩である蜂須拓さんには公私に渡り多大なるご指導を頂きました。研究に悩む私にいつも解決の糸口を示してくださる非常に頼れる先輩でした。そのため逆に私自身が自立できないと感じ、修士2年からは意識してあまり頼らないようにしておりました。そんな配慮が必要となるほどの超優秀な先輩に指導して頂けてとても幸せでした。ありがとうございます。

My research of robot-like body sense (Section 6) started when I was visiting the Haptics Group, GRASP Laboratory at the University of Pennsylvania (09/17/2012-12/31/2012). I am extremely grateful to associate professor Katherine J. Kuchenbecker, who helped me build up the basic theory of robotization. No matter how busy she was, she always made time for my weekly research meeting. Even when there was a hurricane and all the classes were cancelled, she was the only faculty member who came to work. I truly admire and respect her passion toward her research. I would also like to say thanks to the students who worked with me, Ryan Wilson, William McMahan, Heather Culbertson, Craig G. McDonald and Rebecca Pierce.

現東京大学 PD の福嶋政期さんには研究室での指導に加え、就職活動や SIGGRAPH2012 用 ChillyChair デモ開発、留学中の MIT Media Lab 案内、クリスマスに自宅に泊めてくださるなど様々な面でお世話になりました。福嶋さんが卒業された後 SIGGRAPH Asia デモ開発のリーダーを私も経験し、その大変さが身に染みしました。Chilly Chair では文句言ってもすみませんでした。

ロボット体験 VR ゲーム「Jointonation」は学部4年の武井くんと中井さんなくしては絶対に開発できませんでした。さんざん働かせてしまって申し訳ありませんでしたが、2人ともとても優秀でタスクを次々と消化してしまい、最終的には国際会議2件で賞を取ってしまうほどの素晴らしいデモが完成してしまいました。その素晴らしい働きに心から感謝しています。

研究室で共に修士課程へ進学した西村さんと渡辺くんとは同じ苦しみと楽しみを特に共有できたように思います。就職する西村さん、また一緒にライブ行きましょう。博士課程に進む渡辺くん、また一緒に食神行きましょう。

後輩であった中村紗誉さんには、デバイス開発の速度に驚かされました。同様に後輩であった高下昌裕くんには低ノイズ回路設計の知識に驚かされました。私がどれだけ有益な指導ができたか分かりませんが、優秀な後輩を持てたことを嬉しく思います。

副指導教官である高玉圭樹教授からは、本論文の完成度を高めるための重要なコメントを頂きました。おかげで私自身にとってもより納得できる論文となりました。

最後に、お世話になった全研究室メンバーと、私生活を支えて下さった家族、親戚、友人に感謝の気持ちを伝えたいと思います。ありがとうございました。

参考文献

- [1] S. Blakeslee and M. Blakeslee. The body has a mind of its own: How body maps in your brain help you do (almost) everything better. Random House Trade Paperbacks, 2008.
- [2] 館暉, 佐藤誠, 廣瀬通孝. バーチャルリアリティ学. 工学調査会, 2010.
- [3] 岩村吉晃. タッチ. 医学書院, 2001.
- [4] 赤松幹之. 視覚と触覚と運動の統合. 電子情報通信学会誌, 76(11):1176-1182, 1993.
- [5] R.S. Johanson. Sensory Control of dexterous manipulation in humans. Hand and brain: The neurophysiology and psychology of hand movements, pp.381-414, 1996.
- [6] 金子文成. 運動感覚機能の向上は運動機能の向上に結びつくか. バイオメカニズム学会誌, 31(4):196-200, 2007.
- [7] 経済産業省. クールジャパン/クリエイティブ産業.
http://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/creative/
- [8] サンライズ. "機動戦士ガンダム" シリーズ.
<http://www.gundam.jp/>
- [9] 尾田栄一郎. ONE PIECE.
<http://one-piece.com/>
- [10] バイダイナムコゲームス. "鉄拳"シリーズ.
<http://www.tekken-official.jp/>
- [11] P. Wellman and R. D. Howe. Towards realistic vibrotactile display in virtual environments. Proceedings of ASME Dynamic Systems and Control Division, 57(2): 713-718, 1995.
- [12] A. M. Okamura, M. Cutkosky, and J. Dennerlein. Reality-based models for vibration feedback in virtual environments. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 6(3):245-252, 2001.
- [13] 大山正, 今井省吾, 和氣典三. 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック. 誠信書店, 1994.
- [14] 内川恵二. 講座"感覚・知覚の科学" 聴覚・触覚・前庭感覚. 朝倉書店, pp.102-177, 2008.
- [15] N. R. Carlson. Physiology of Behavior. Pearson Education, 1986.
- [16] J. J. Gibson. Observations on active touch. Psychological Review, 69:477-491, 1962.
- [17] J. J. Gibson. The senses considered as perceptual systems, Houghton Mifflin, 1966.
- [18] D. Katz. Der Aufbau der Tastwelt. Johann Ambrosius Barth, 1925 (Written in German).
- [19] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, and P. B. C. Matthews. The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralyzing joint afferents. Brain, 95(4):705-748, 1972.
- [20] 岩田洋夫. 体性感覚呈示技術. バイオメカニズム学会誌, 31(2), 2007.
- [21] O. Sacks. The man who mistook his wife for a hat: and other clinical tales. Touchstone, 1998.
- [22] M. Schuenke, E. Schulte, U. Schumacher, and Jürgen Rude. Theime atlas of anatomy: head and neuroanatomy. Theime, 2007.
- [23] Robert F. Schmid (訳: 岩村吉晃). 感覚生理学 第2版. 金芳堂, 1991.
- [24] M. F. Bear, B. W. Connors, and M. A. Paradiso. Neuroscience: Exploring the brain (third edition). Lippincott Williams & Wilkins, 2006.
- [25] J. B. F. van Erp, I. Saturday, and C. Jansen. Application of tactile displays in sports: where to, how and when to move. Proceedings of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS), pp.90-95, 2006.
- [26] J. B. F. van Erp, J. A. V. Hans, and H.A.H.C. van Veen. A tactile cockpit instrument to support altitude control. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 47(1):114-118, 2003.
- [27] J. van der Linden, R. Johnson, J. Bird, Y. Rogers, and E. Schoonderwaldt. Buzzing to Play: Lessons learned from an in the wild study of real-time vibrotactile feedback. Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI), pp. 533-542, 2011.
- [28] S. Holland, A. J. Bouwer, M. Dalgelish, and T. M. Hurtig. Feeling the beat where it counts: fostering multi-limb rhythm skills with the haptic drum kit. Proceedings of the International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI), pp.21-28, 2010.
- [29] R. W. Lindeman, Y. Yanagida, K. Hosaka, and S. Abe, The TactaPack : A wireless Sensor/Actuator Package for Physical Therapy Applications. Proceedings of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS), pp.337-341, 2006.

- [30] I. Rock and J. Victor. Vision and touch: an experimentally created conflict between the two senses. *Science*, 143(3606):594-596, 1964.
- [31] J. R. Lishman and D. N. Lee. The autonomy of visual kinaesthesia. *Perception*, 2(3):287-294, 1973.
- [32] D. Feygin, M. Keehner, and F. Tendick. Haptic guidance: experimental evaluation of a haptic training method for a perceptual motor skill. *Proceedings of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS)*, pp.40-47, 2002.
- [33] G. Grindlay. Haptic guidance benefits musical motor learning. *Proceedings of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS)*, pp.309-404, 2008.
- [34] J. Lieberman and C. Breazeal. TIKL: Development of a wearable vibrotactile feedback suit for improved human motor learning. *IEEE Transaction on Robotics*, 23(5):919-926, 2007.
- [35] H.-Y. Yao and V. Hayward. Design and analysis of a recoil-type vibrotactile transducer. *Journal of the Acoustical Society of America*, 128(2):619-627, 2010.
- [36] K. Henmi and T. Yoshikawa. Virtual lesson and its application to virtual calligraphy system. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2:1275-1280, 1998.
- [37] S. Saga, N. Kawakami, and S. Tachi. Teaching using opposite force presentation. *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference*, 2005.
- [38] L. B. Rosenberg. Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp.76-82, 1993.
- [39] T. H. Massie and K. J. Salisbury. The PHANTOM haptic interface: A device for probing virtual objects. *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, 55:295-299, 1994.
- [40] M. Sato. Development of string-based force display: SPIDAR. *Proceedings of the International Conference on Virtual Systems and Multi Media*, pp. 1034-1039, 2002.
- [41] H. Kawamoto and Y. Sankai. Power assist system HAL-3 for gait disorder person. *Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICHP)*, pp.196-203, 2002.
- [42] CYBERDYNE. HAL (Hybrid Assistive Limb). <http://www.cyberdyne.jp/>
- [43] J. Lee and S. Choi. Effects of haptic guidance and disturbance on motor learning: Potential advantage of haptic disturbance. *Proceedings of IEEE Haptics Symposium*, pp.335- 342, 2010.
- [44] 蜂須拓, 梶本裕之. 運動後に感覚呈示を行う触力覚運動教示システム. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2010.
- [45] R. Kikuuwe, A. Sano, H. Mochiyama, N. Takesue, and H. Fujimoto. Enhancing haptic detection of surface undulation. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2(1):46-67, 2005.
- [46] R. Okazaki, M. Sato, S. Fukushima, M. Furukawa, and H. Kajimoto. Tactile enhancement structure mimicking hair follicle receptors. *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference*, pp.335-337, 2011.
- [47] 佐藤淑美, 橋本悠希, 梶本裕之. カメラ回転時の「カチカチ感」付与による操作感向上. インタラクション, 2008.
- [48] M. Badesc, C. Wampler, and C. Mavroidis. Rotary Haptic Knob for Vehicular Instrument Controls. *Proceedings of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS)*, pp.342-343, 2002.
- [49] M. Kühner, J. Wild, H. Bubb, K. Bengler, and J. Schneider. Haptic Perception of Viscous Friction of Rotary Switches. *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference*, pp.587-591, 2011.
- [50] F. Delavier. 目でみる筋力トレーニングの解剖学. 大修館書店, 2002.
- [51] 谷本道哉. 筋トレまるわかり大辞典. ベースボール・マガジン社, 2010.
- [52] T. Horberry, J. Anderson, M. A. Regan, T. J. Triggs, and J. Brown. Driver distraction: the effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment, complexity and age on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 38(1):185-191, 2006.
- [53] 日産自動車. アラウンドビューモニター. <http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/avm.html>
- [54] D. Shinar and F. Schieber. Visual requirements for safety and mobility of older drivers. *Human Factors*, 33(5):507-519, 1991.
- [55] G. Burnett and J. M. Porter. Ubiquitous computing within cars: designing controls for non-visual use. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(4):521-531.

- [56] J. B. F. van Erp and H. A. H. C. van Veen. Vibrotactile in-vehicle navigation system. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 7(4-5):247-256, 2004.
- [57] J. D. Lee, J. D. Hoffman, and E. Hayes. Collision warning design to mitigate driver distraction. *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp.65-72, 2004.
- [58] P.G. Griffiths and R.B. Gillespie. Sharing control between humans and automation using haptic interface: primary and secondary task performance benefits. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 47(3):574-590, 2005.
- [59] J. Chun, I. Lee, G. Park, J. Seo, S. Choi, and S. H. Han. Efficacy of haptic blind spot warnings applied through a steering wheel or a seatbelt. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 21:231–241, 2013.
- [60] H. Z. Tan, R. Gray, and J. J. Young. A haptic back display for attentional and directional cueing. *The Electronic Journal of Haptics Research (Haptics-e)*, 3(1), 2003.
- [61] O. M. J. Carsten and F. N. Tate. Intelligent speed adaptation: accident savings and cost–benefit analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 37(4):407-416, 2005.
- [62] Continental Automotive, Active force feedback pedal (AFFP).
http://www.contonline.com/generator/www/de/en/continental/automotive/themes/passenger_cars/chassis_safety/chassis_components/fahrwerkselektronik/fahrwerkselektronik_en.html
- [63] P. A. Ioannou and C. C. Chien. Autonomous intelligent cruise control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 42(4):657-672, 1993.
- [64] 日産自動車. インテリジェントクルーズコントロール.
<http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/icc.html>
- [65] マツダ. 安全装備の体感試乗会における事故について (第1報). 2013.11.12.
<http://www.mazda.co.jp/corporate/publicity/release/2013/201311/131112a.pdf>
- [66] 日本経済新聞. 安全運転支援車の功罪 事故原因・責任に課題多く. 2013.10.14.
http://www.nikkei.com/article/DGXNASFP09001_Z01C13A0TCJ000/
- [67] Y. Ochiai and K. Toyoshima. Invisible feet under the vehicle. *Proceedings of third Augmented Human International Conference*, 2012.
- [68] A. Cassinelli, C. Reynolds, and M. Ishikawa. Augmenting spatial awareness with Haptic Radar. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC)*, pp.61-64, 2006.
- [69] 三井住友海上. 平成 24 年の自動車事故データをみる – 車両相互事故の類型別発生件数.
http://www.ms-ins.com/pdf/rm_car/jiko_data.pdf
- [70] 国際交通安全学会. アクセルとブレーキの踏み間違い -エラーの原因分析と心理学的・工学的対策の提案-.
<http://www.iatss.or.jp/common/pdf/research/h2294.pdf>
- [71] Gran Turismo.com. GT Academy.
<http://www.gran-turismo.com/jp/academy/news/>
- [72] M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto, and S. Tadokoro. Alternative display of friction represented by tactile stimulation without tangential force. *Haptics: Perception, Devices and Scenarios (Proceedings of the EuroHaptics'08)*, 5024:619-629, 2008.
- [73] Microsoft. Kinect.
<http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>
- [74] バンダイ. バトル体感ゴムゴムのかめはめ波～おめえの声でおらをお呼び～
<http://www.bandai.co.jp/catalog/item/4543112549990000.html>
- [75] S. Jeon and A. Choi. Haptic augmented reality: taxonomy and an example of stiffness modulation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 18(5):387-408, 2009.
- [76] T. Nojima, D. Sekiguchi, M. Inami, and S. Tachi. The SmartTool: a system for augmented reality of haptics. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference*, pp.67-72, 2002.
- [77] Y. Visell, A. Law, and J. R. Cooperstock. Touch is everywhere: floor surfaces as ambient haptic interfaces. *IEEE Transactions on Haptics*, 2(3):148-159, 2009.
- [78] G. Cirio, M. Marchal, A. L'ecuyer, and J. R. Cooperstock. Vibrotactile rendering of splashing fluids. *IEEE Transactions on Haptics*, 6:117-122, 2012.
- [79] J. M. Romano and K. J. Kuchenbecker. Creating realistic virtual textures from contact acceleration data. *IEEE Transactions on Haptics*, 5(2):109-119, 2012.

- [80] T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, and H. Kajimoto. Augmentation of material property by modulating vibration resulting from tapping. *Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication (Proceedings of the EuroHaptics'12)*, 7282(1):173-180.
- [81] S. Ikeno, R. Okazaki, T. Hachisu, M. Sato, and H. Kajimoto. Audio-haptic rendering of water being poured from sake bottle. *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE)*, LNCS8253:548-551, 2013.
- [82] Y. Kojima, Y. Hashimoto, and H. Kajimoto. Eternal sharpener - a rotational haptic display that records and replays the sensation of sharpening a pencil. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp.18-21, 2009.
- [83] 國安裕生, 福嶋政期, 古川正紘, 梶本裕之. 液体を注ぐ際の心地よさに着目した触覚ディスプレイの提案. *エンタテインメントコンピューティング (EC)*, 2010.
- [84] Y. Takeuchi, S. Kamuro, K. Minamizawa, and S. Tachi. Haptic duplicator. *Proceedings of the Virtual Reality International Conference*, 30, 2012
- [85] K. Minamizawa, Y. Kakehi, M. Nakatani, S. Mihara, and S. Tachi. TECHTILE Toolkit: a prototyping tool for designing haptic media. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, 22, 2012.
- [86] G.M. Goodwin, D. I. Mccloskey, and P. B. C. Matthews. The contribution of muscle afferents to kinesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralyzing joint afferents. *Brain*, 95(4):705-748, 1972.
- [87] D. Burke, K. E. Hagbarth, L. Löfstedt, and G. Wallin. The responses of human muscle spindle endings to vibration of non-contracting muscles. *Journal of Physiology*, 261(3):673-693, 1976.
- [88] E. Naito. Sensing limb movements in the motor cortex: how humans sense limb movement. *Neuroscientist*, 10(1):73-82, 2004.
- [89] J. R. Lackner. Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation. *Brain*, 111(2):281-297, 1988.
- [90] 友田達也, 上杉繁, 三輪敬之. 上腕への腱振動刺激と他動運動による 過伸展錯覚の特性. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*. 4(3):361-369, 2009.
- [91] K. J. Kuchenbecker, J. Fiene, and G. Niemeyer. Improving contact realism through event-based haptic feedback. *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, 12(2):219-230, 2006.
- [92] M. A. Srinivasan and R. H. LaMotte. Tactual discrimination of softness. *Journal of Neurophysiology*, 73(1):88-101, 1995.
- [93] 任天堂. Wii リモコン.
http://www.nintendo.co.jp/wii/features/wii_remote.html
- [94] ソニー・コンピュータエンタテインメント. PlayStation Move.
<http://www.jp.playstation.com/ps3/move/>
- [95] Virtuix Technologies LLC, Omni.
<http://www.virtuix.com/>
- [96] S. Palan, R. Wang, N. Naukam, and K. J. Kuchenbecker. Tactile Gaming Vest (TGV). *Proceedings of the IEEE Haptics Symposium*, 2010.
- [97] TN Games. 3RD Space FPS Gaming Vest.
<http://tngames.com/products>
- [98] S. Ooshima, Y. Hashimoto, H. Ando, H. Watanabe, and H. Kajimoto. Simultaneous presentation of tactile and auditory motion to the abdomen to present the feeling of being slashed. *Proceedings of the Society of Instrument and Control Engineers (SICE) Annual Conference*, pp. 467-471, 2008.
- [99] J. M. Romano, T. Yoshioka, K. J. Kuchenbecker. Automatic filter design for synthesis of haptic textures from recorded acceleration data. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1815-1821, 2010.
- [100] G. Ince, K. Nakadai, T. Rodemann, Y. Hasegawa, H. Tsujino, and J. Imura. Ego noise suppression of a robot using template subtraction. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 199-204, 2009.
- [101] W. McMahan and K. J. Kuchenbecker. Spectral subtraction of robot motion noise for improved event detection in tactile acceleration signals. *Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication (Proceedings of the EuroHaptics)*, 7282:326-377, 2012.
- [102] M. Botvinick and J. Cohen. Rubber hands “feel” touch that eyes see. *Nature*, 391(6669):756, 1998.
- [103] M. Tsakiris. My body in the brain: a neurocognitive model of body-ownership. *Neuropsychologica*, 48(3):703-712, 2010.

- [104] M. Slater, D. Perez-Marcos, H. H. Ehrsson, and M. V. Sanchez-Vives. Inducing illusory ownership of virtual body. *Frontiers in Neuroscience*, 3:214-220, 2009.
- [105] J. R. Dabrowski and V. Munsone. Is 100 milliseconds too fast? *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) Extended Abstracts*, pp. 317-318, 2001.
- [106] Unity Technologies. Unity (game engine). <http://unity3d.com/>
- [107] Oculus VR Inc. Oculus Rift. <http://www.oculusvr.com/>
- [108] M. L. Heilig. Sensorama Simulator. U. S. Patent (3,050,870), Patented August 28, 1962.
- [109] P. Lemmens, F. Cromptoets, D. Brokken, J. van den Eerenbeemd, and G.-J. de Vries. A body-conforming tactile jacket to enrich movie viewing. *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference*, pp. 7-12, 2009.
- [110] M. Karam, C. Branje, G. Nespoli, N. Thompson, F. A. Russo, and D. I. Fels. The emoti-chair: an interactive tactile music exhibit. *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) Extended Abstracts*, pp.3069-3074, 2010.
- [111] A. Israr, I. Poupyrev, C. Ioffreda, J. Cox, N. Gouveia, H. Bowles, A. Brakis, B. Knight, K. Mitchell, and T. Williams: Surround haptics: sending shivers down your spine. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, 2011.
- [112] E. O. Dijk, A. Weffers-Albu, and T. De Zeeuw. A tactile actuation blanket to intensify movie experiences with personalised tactile effects. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Technologies for Interactive Entertainment (INTETAIN)*, 2009.
- [113] R. Tadakuma and R.D. Howe. A whole-arm tactile display system. *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference*, pp. 446-451, 2009.
- [114] R. W. Lindeman, Y. Yanagida, H. Noma, and J. L. Sibert. Wearable vibrotactile systems for virtual contact and information display. *Journal of Virtual Reality*, 9(2-3):203-213, 2006.
- [115] A. A. Stanley, J. C. Gwilliam, and A. M. Okamura. Haptic jamming: a deformable geometry, variable stiffness tactile display using pneumatics and particle jamming. *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference*, pp.25-30, 2013.
- [116] S. Follmer, D. Leithinger, A. Olwal, N. Cheng, and H. Ishii. Jamming user interfaces: programmable particle stiffness and sensing for malleable and shape-changing devices. *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, pp.519-528, 2012.
- [117] T. Sato, Y. Matoba, N. Takahashi, and H. Koike. Interactive surface that have dynamic softness control. *Proceedings of the ACM Advanced Visual Interfaces (AVI)*, pp.796-797, 2012.
- [118] T. Mitsuda, S. Kuge, M. Wakabayashi, and S. Kawamura. Wearable haptic display by the use of a particle mechanical constraint. *Proceedings of the Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS)*, pp.153-158, 2002.
- [119] K. Rebane, Y. Matoba, A. Hakamatsuka, T. Sato, S. Kodama, and H. Koike. Development of and experimentation on deformable three-dimensional figures by the use of polystyrene beads, a pressure sensor, and an air pump. *Proceedings of the Workshop on Smart Material Interfaces (SMI): A Material Step to the Future*, 2012.
- [120] Hartwell Medical Corporation. EVAC-U-SPLINT. <http://www.hartwellmedical.com/evacsplint.php>
- [121] B. R. Jones, H. Benko, E. Ofek, and A. D. Wilson. IllumiRoom: peripheral projected illusions for interactive experiences. *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp.869-878, 2013.
- [122] G. V. Bekesy. Neural funneling along the skin and between the inner and outer hair cells of the cochlea. *Journal of Acoustical Society of America*, 31(9), pp. 1236-1249, 1959.
- [123] T. Kosaka, H. Misumi, T. Iwamoto, R. Songer and J. Akita. "Mommy Tummy" a pregnancy experience system simulating fetal movement. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, 2011.
- [124] M. Katoh, S. Nakamura, S. Ikeno, T. Kikuchi, S. Kudo, and H. Kajimoto. ViVi-EAT: augmentation of food-flowing sensation using tactile feedback, *Laval Virtual ReVolution*, 2013.
- [125] 海洋堂. REVOLTECH (リボルテック) シリーズ. <http://www.kaiyodo.co.jp/revoltech/>
- [126] F. Danieau, A. Lecuyer, P. Guillotel, J. Fleureau, N. Mollet, and M. Christie,. Enhancing audiovisual experience with haptic feedback: a survey on HAV. *IEEE Transactions on Haptics*, 6(2):193-205, 2012.

- [127] S. Fukushima and H. Kajimoto. Facilitating a surprised feeling by artificial control of piloerection on the forearm. Proceedings of the ACM Augmented Human International Conference (AH), 2012.
- [128] K. Kilteni, I. Bergstrom, and M. Slater. Drumming in immersive virtual reality: the body shapes the way we play. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 19(4):597-605, 2013.

関連発表

国際会議（査読付き）

1. Y. Kurihara, Y. Kuniyasu, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, H. Kajimoto. Augmentation of Kinesthetic Sensation by Adding "Rotary Switch Feeling" Feedback. ACM Augmented Human International Conference, March 8-9, 2012, Megève, France. Hands-on demonstration.
2. Y. Kurihara, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, H. Kajimoto. Periodic Tactile Feedback for Accelerator Pedal Control. IEEE World Haptics Conference, April 14-17, 2013, Daejeon, South Korea. Poster presentation.
3. Y. Kurihara, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, H. Kajimoto. Virtual Alteration of Body Material by Periodic Vibrotactile Feedback. IEEE Virtual Reality Conference, March 16-23, 2013, Orlando, FL, USA. Oral presentation.
4. Y. Kurihara, T. Hachisu, K. J. Kuchenbecker, H. Kajimoto. Virtual Robotization of the Human Body via Data-Driven Vibrotactile Feedback. International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE), November 12-15, 2013, Enschede, the Netherlands. Oral presentation and hands-on demonstration.
5. Y. Kurihara, T. Hachisu, K. J. Kuchenbecker, H. Kajimoto. Jointonation: Robotization of the Human Body by Vibrotactile Feedback. ACM SIGGRAPH Asia 2013, November 19-22, 2013, Hong Kong. Emerging technologies demonstration with short talk.
6. Y. Kurihara, M. Koge, R. Okazaki, H. Kajimoto. Large-Area Tactile Display Using Vibration Transmission of Jammed Particles. IEEE Haptics Symposium, February 23-26, 2014, Houston, TX, USA. Poster presentation and hands-on demonstration (accepted).

国内会議

7. 栗原洋輔, 國安裕生, 蜂須拓, 佐藤未知, 福嶋政期, 梶本裕之: 腕立て伏せ時の「カチカチ感」付与による運動感覚の拡張. エンタテインメントコンピューティング (EC), 2011.09.07-11, 日本科学未来館. 口頭発表およびデモ展示.
8. 栗原洋輔, 國安裕生, 蜂須拓, 佐藤未知, 福嶋政期, 梶本裕之. 腕立て伏せ時の「カチカチ感」付与による運動量錯覚. 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SICE-SI), 2011.12.23-25, 京都大学吉田キャンパス. 口頭発表.
9. 栗原洋輔, 蜂須拓, 佐藤未知, 福嶋政期, 梶本裕之. アクセルペダルへのクリック感付与による操作性向上. 日本バーチャルリアリティ学会大会, 2012.09.12-14, 慶応義塾大学日吉キャンパス. 口頭発表.
10. 栗原洋輔, 蜂須拓, Katherine J. Kuchenbecker, 梶本裕之. ロボット振動の記録・モデリング・再生による人体のバーチャルなロボット化. 日本バーチャルリアリティ学会大会, 2013.09.17-19, グランフロント大阪. 口頭発表およびデモ展示.
11. 栗原洋輔, 高下昌裕, 岡崎龍太, 梶本裕之. 発泡ビーズの振動伝搬を用いた広範囲触覚デ

ディスプレイ. エンタテインメントコンピューティング (EC), 2013.10.04-06, サンポートホール高松・かがわ国際会議場. デモ展示.

12. 栗原洋輔, 西村奈令大, 高下昌裕, 梶本裕之. 発泡ビーズの振動伝搬を用いた広範囲触覚ディスプレイ(第 2 報) -振動知覚実験およびアプリケーション開発-. インタラクション, 2014.02.28-03.01, 日本科学未来館. デモ展示 (accepted).

実演展示

13. からだ花火. いしかわ"夢"未来博 2013, 2013.11.09-10, 石川県産業展示館.

記事

14. "Ten of the best new 3D tech developments - Jointonation". 3D Artist magazine, Issue 62, pp.16-17, Image Publishing, UK, December 4, 2013.

受賞

15. 学術奨励賞.
栗原洋輔, 蜂須拓, Katherine J. Kuchenbecker, 梶本裕之. ロボット振動の記録・モデリング・再生による人体のバーチャルなロボット化. 第 18 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2013.09.17-19, グランフロント大阪. 口頭発表およびデモ展示.
16. Best Paper Silver.
Y. Kurihara, T. Hachisu, K. J. Kuchenbecker, H. Kajimoto. Virtual Robotization of the Human Body via Data-Driven Vibrotactile Feedback. 10th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE), November 12-15, 2013, Enschede, the Netherlands. Oral presentation and hands-on demonstration.
17. Best Demonstration Award voted by the Program Committee (Emerging Technologies Prize).
Y. Kurihara, T. Hachisu, K. J. Kuchenbecker, H. Kajimoto. Jointonation: Robotization of the Human Body by Vibrotactile Feedback. SIGGRAPH Asia 2013, November 19-22, 2013, Hong Kong. Emerging technologies demonstration with short talk.