

システム開発

18-F-13

操作器形状に応じた誘発運動を再現する  
デジタルハンド開発に関するフイージビリティスタディ  
報告書

— 要 旨 —

平成19年3月

財団法人 機械システム振興協会

委託先 社団法人 人間生活工学研究センター

**KEIRIN**



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

<http://www.keirin.go.jp>





## 序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、都市、防災、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには技術開発力の強化に加えて、多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢の変化に対応するため、財団法人機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、システム技術開発調査研究事業、システム開発事業、新機械システム普及促進事業を実施しております。

このうち、システム技術開発調査研究事業及びシステム開発事業については、当協会に総合システム調査開発委員会(委員長：政策研究院 リサーチフェロー 藤正 巖氏)を設置し、同委員会のご指導のもとに推進しております。

本「操作器形状に応じた誘発運動を再現するデジタルハンド開発に関するフイーグビリティスタディ」は、上記事業の一環として、当協会が社団法人人間生活工学研究センターに委託し、実施した成果をまとめたもので、関係諸分野の皆様方のお役に立てれば幸いです。

平成19年3月

財団法人 機械システム振興協会

## はじめに

経済産業省では、人間生活技術戦略ロードマップを策定し、平成18年4月に公表している。このロードマップの中には4つの戦略マップがあり、そのうちデジタルハンドなどの3次元CADマネキン技術は、「安全性・快適性向上に向けた3次元CADマネキンの高度化」として、安全快適なモビリティという戦略マップに組み入れられている。これらの高度な3次元CADマネキンは、自動車などのモビリティ以外にも、IT機器、パッケージ、光学機器など幅広い製造分野のユニバーサルデザインに活用できる。自動車、IT機器、デジタルカメラや内視鏡などの光学機器は国際的に日本が優位に立つ分野であり、これらの分野で単に機械性能が優れているだけでなく、人間との適合性に優れ、安全かつ効率的に機器を使用できる設計が実現されることが、より一層の競争力強化に繋がる。そのような施策戦略の中で、試作を仮想化しながらも人間適合性を事前評価するデジタルハンドなどの3次元CADマネキン技術は、特に重要な課題と位置付けられている。

一方、(社)人間生活工学研究センターでは、平成15年度に、(独)産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター(以下、DHRC)の協力を得て、デジタルハンド技術に関する調査研究を実施した。この調査結果から、3次元CADマネキンがドイツ・米国・フランスなどで研究されていること、JackやRAMSISという市販製品が実際に利用されていることが明らかになった。ただし、これらの市販CADマネキンに実装されている手のモデルは、形状も粗く、機能寸法再現精度も十分ではないことも明らかになった。それ故、これらの市販CADマネキンは、手で扱う工具や製品のデザインには利用されていなかった。その後の技術調査でも、市販CADマネキンの手モデルは特段の進歩を示していないまま、現在に至っている。

しかしその一方で、その頃から、詳細な手モデルに関する学術研究が見られるようになってきた。米国アイオワ大学では、独自開発のCADマネキン「Santos」の詳細手モデルとして構造と機能寸法を再現する「Santos Hand」を開発した(2004年)。また、フランスINRETSでも、独自開発のCADマネキンに組み込む詳細手モデルを開発している(2003年)。米国・フランスに、日本のDHRCが開発を進めている手の詳細モデル「DhaibaHand」を含めた3つが、デジタルハンドの世界的な研究開発競争をしている状況にある。その中で、DHRCの開発する「DhaibaHand」は、摩擦と変形をモデル化している点に優位性がある。本テーマは、「DhaibaHand」に、もう一つの重要な機能である運動生成機能(操作器形状に誘発される運動生成機能)を付加するものである。これは、冒頭で述べた技術戦略ロードマップを、国・大学・国研・企業で連携し、本格的に推進するための研究開発として重要なものである。

今回、(財)機械システム振興協会からの委託を受けて、(独)産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センターの協力を得て、上記の技術戦略ロードマップにおける重要な課題の一つを大きく推進することができたことを喜ぶたい。

平成19年3月

社団法人 人間生活工学研究センター

## 序

### はじめに

#### [目次]

|  |    |
|--|----|
| 1. スタディの目的                             | 1  |
| 2. スタディの実施体制                           | 2  |
| 2.1 実施体制                               | 2  |
| 2.2 調査開発委員会                            | 3  |
| 3. スタディの内容                             | 4  |
| 第1章 アフォーダンス実験                          | 4  |
| 1.1 事前実験                               | 4  |
| 1.2 詳細実験                               | 9  |
| 第2章 実験データの分析とモデル化                      | 14 |
| 2.1 操作パターンのクラスタ分析                      | 14 |
| 2.2 若年被験者との比較                          | 18 |
| 2.3 確率分布によるモデル化                        | 19 |
| 2.4 まとめ                                | 19 |
| 第3章 操作モデルソフトウェアの開発と組込                  | 20 |
| 3.1 ソフトウェアの開発概要                        | 20 |
| 3.2 Affordance Hand Visualizationプログラム | 22 |
| 第4章 検証実験                               | 24 |
| 4.1 テクスチャの決定                           | 24 |
| 4.2 検証実験                               | 25 |
| 4.3 分析                                 | 31 |
| 4.4 まとめ                                | 32 |
| 第5章 スタディの今後の課題及び展望                     | 33 |
| 参考文献                                   | 35 |

## 1. スタディの目的

現在実用されている機械システムの多くで操作するインタフェースを備えている。例えば、計測機器、VTR、カーナビ、券売機などは、スイッチ、ハンドル、ボタンで操作する機器であり、携帯電話、内視鏡などは手で握って使う小型の精密機器である。これらの機器操作においては、手の大きさに合わずしっかり握れない、指が届かない、操作方法が分からず押し間違えるといったさまざまな問題が生じている。これらの問題は、現象としては多様であるが、本質的に、設計者が利用者のバリエーションを想定できないことに起因している。「そんな大きさの手まで考えていなかった」「そんな使い方をするとは思わなかった」というものである。

そこで、コンピュータ上にユーザの手のモデルを生成することにより、手で扱うさまざまな製品（携帯電話、デジタルカメラ、パッケージ、各種操作機器など）の設計段階での仮想評価を実現しようとする技術が、本スタディで対象とする「デジタルハンド技術」である。

これまで、平成15年度の調査研究<sup>(1)</sup>において「デジタルハンド」の重要性・市場性を調査し、さらに、16年度のフィジビリティスタディ<sup>(2)</sup>においては、手の解剖学的構造、寸法バリエーションと表面形状、計測姿勢を再現できるデジタルハンドソフトウェアのプロトタイプを開発した。その後、(独)産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター（以下、DHRC）では、独自に研究を続けており、把持操作力や指先での摩擦・変形を再現できるモデルを開発している。

今後、本システムを実際の製品設計・評価に適用していく段階を考慮すると、ユーザの自然な操作運動を再現できることが重要であり、ユーザが製品の形状に対してどのような把持姿勢をとるかを確率的に模擬する必要がある。つまり、単に人間の手の構造や計測姿勢だけでなく、人間が対象物をどのように視覚的に認知し、自分の知識・経験と照合して、適切な操作運動を生成するのかといった、「視覚認知－知識照合－運動生成」の機能をモデル化し、再現しなければならない。このような人間が操作対象を視覚認知し、自分の知識・経験と照合して、操作運動を生成する脳内メカニズムは現在まったく解明されていないため、短期的にこの機能をモデル化するのに、脳機能計測などのアプローチをとるのは現実的な方法ではない。

そこで、本研究では、操作対象物を絞り込んで抽象化し、「アフォーダンス」の発想を取り入れて、操作器形状と運動生成の確率的マッピングを行う。ここでは特に、自動車など各種機器操作に広く利用されるスイッチ・レバーの基本形状要素に注目し、形状が変化した場合に、どの操作運動（押す、回す、倒す、スライドさせるなど）を自然に行うかについてデータを収集する。このデータを、ユーザの手の寸法と形状の関係、操作器形状の慣性モーメントなどに着目して抽象化・モデル化し、既存のデジタルハンドソフトウェアに組み込む。これにより、操作器形状に応じて誘発される操作運動（押す、回す、倒す、スライドさせるなど）を確率的に生成するソフトウェアシステムを試作することを目的とする。

### ※アフォーダンス

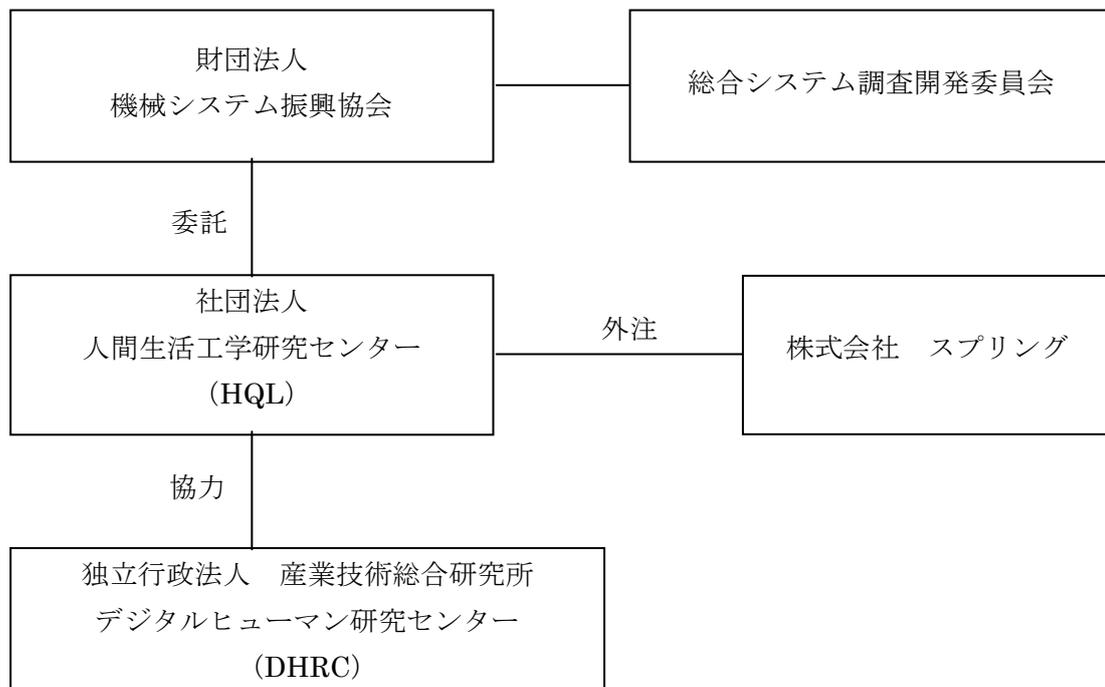
Gibson<sup>(3)</sup>が提唱した認知心理のパラダイムで、人間の認知・行動は空間情報が網膜上に結像した視覚情報のみによって決定されるのではなく、空間そのものがもつ情報に誘発されて決定する。

## 2. スタディの実施体制

### 2.1 実施体制

(財) 機械システム振興協会内に総合システム調査開発委員会を設置し、(社) 人間生活工学研究センターは、(独) 産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センターの協力を得て、フイービリティスタディを実施した。

なお、操作モデルソフトウェアについては、HQLが設計し、ソフトウェアの製造と組込を(株) スプリングに外注した。また、実験データの分析とモデル化および操作モデルソフトウェアの開発と組込については、(独) 産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センターの支援を得た。



## 2.2 調査開発委員会

総合システム調査開発委員会は、以下の委員で構成した。

### 総合システム調査開発委員会委員名簿（順不同・敬称略）

|     |   |         |
|-----|---|---------|
| 委員長 | 政策研究院<br>リサーチフェロー                         | 藤 正 巖   |
| 委 員 | 埼玉大学<br>地域共同研究センター<br>教授                  | 太 田 公 廣 |
| 委 員 | 独立行政法人産業技術総合研究所<br>エレクトロニクス研究部門<br>副研究部門長 | 金 丸 正 剛 |
| 委 員 | 独立行政法人産業技術総合研究所<br>産学官連携部門<br>コーディネータ     | 志 村 洋 文 |
| 委 員 | 東北大学<br>未来科学技術共同研究センター<br>センター長           | 中 島 一 郎 |
| 委 員 | 東京工業大学大学院<br>総合理工学研究科<br>教授               | 廣 田 薫   |
| 委 員 | 東京大学大学院<br>工学系研究科<br>助教授                  | 藤 岡 健 彦 |
| 委 員 | 東京大学大学院<br>新領域創成科学研究科<br>教授               | 大 和 裕 幸 |

### 3. スタディの内容

#### 第1章 アフォーダンス実験

本章では、操作器形状が変化した場合にどの操作運動を自然に行うかについて調べたアフォーダンス実験について述べる。まず、条件絞込みのために実施した事前実験について述べ、次いで多数の被験者を対象に実施した詳細実験について述べる。

##### 1.1 事前実験

###### 1.1.1 実験装置

###### (1) 操作器

自動車など各種機器操作に広く利用されるスイッチ・レバーの基本形状要素である円柱に注目し、径と高さが異なる円柱を形状の異なる操作器とした。円柱は木製で、円柱高さは5mm、10mm、20mm、30mm、50mm、100mm、150mm、200mmの8種類、円柱直径は5mm、10mm、20mm、30mm、40mm、50mm、60mmの7種類、合計56種類作成した。図1-1に円柱写真を示す。

###### (2) 円柱設置姿勢の制御用治具

操作器はさまざまな姿勢で使用されているため、姿勢制御用の専用治具を作成した。図1-1に治具写真を示す。治具は円柱設置面の角度を自在に変更でき、図では45度に設定している。治具の円柱設置面中央にはネジが切っており、円柱を設置する。



図1-1 実験装置：円柱56種類と治具（手前）

###### 1.1.2 実験条件

###### (1) 円柱種類

上述の円柱56種類すべてを用い、被験者操作運動を調べた。

(2) 円柱設置姿勢

姿勢1～姿勢5の5種類の円柱設置姿勢で、被験者操作運動を調べた。図1-2に姿勢1～姿勢5の5種類の円柱設置姿勢を示す。

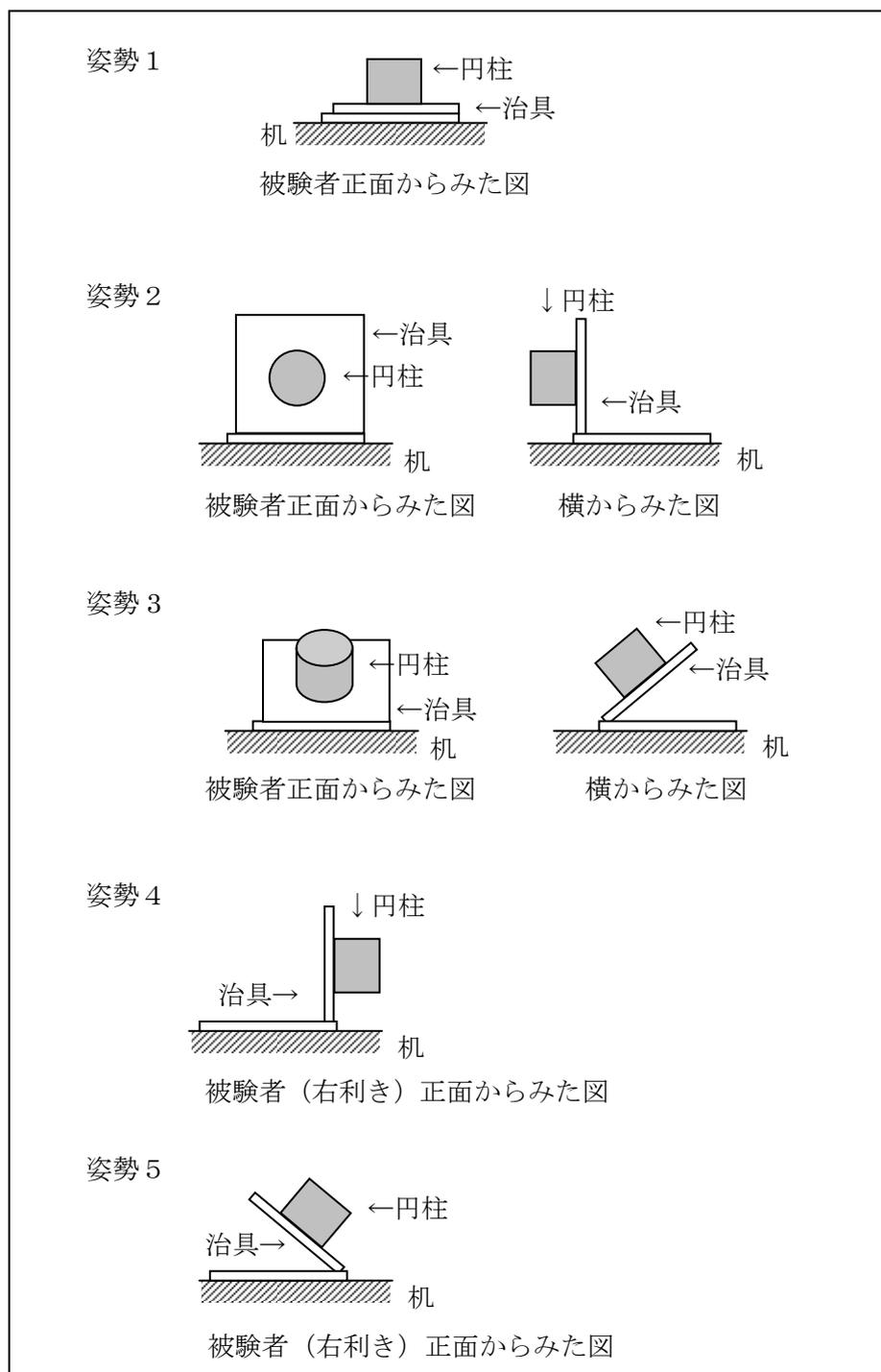


図1-2 円柱設置の5姿勢

姿勢4・5は左利きの場合、円柱は被験者左側に設置

(3) 操作指示

円柱の操作指示は、「二つの状態の切り替え操作」と「連続的な調節操作」の2種類を行った。

(4) 被験者

被験者は中高年の男女5名（30、40、50代女性各1名と30、50代男性各1名）である。実験は一人ずつ行った。以下では、被験者番号として、男性は、Pre\_Mxx、女性はPre\_Fxxと表記している。

以上により、事前実験として下記条件の実験を行った。

[操作指示(2種類)×全円柱(56種類)×全設置姿勢(5種類)×被験者(5名)]

1.1.3 事前実験結果

5名の被験者から得られた操作運動の種類を表1-1にまとめ、その一部の操作運動を図1-3に図示する。押す・回す・倒す・引く・スライドの基本操作の説明図は省略した。2種類の操作指示に対する各被験者操作運動の結果の内、「二つの状態の切り替え操作」についての操作運動の一例を図1-4に示す。

表1-1 事前実験の操作運動種類

| 分類   | 記号       | 動作        | 説明                      | 説明図                            |        |
|------|----------|-----------|-------------------------|--------------------------------|--------|
| 押す   | P        | 押す        | 円柱表面を下向きに押す。            | 省略                             |        |
|      | P1       | 押す（端押し）   | 円柱表面の端を押す。<br>円柱は片側に傾く。 | 1-5(a)                         |        |
|      | P1       | 端長押し      |                         |                                |        |
| 回す   | R        | 回す        | 円柱をつかんで回す。              | 省略                             |        |
|      | R        | 回す（指を表面に） | 円柱表面に指をあて、円柱を回す。        | 1-5(b)                         |        |
| 倒す   | T        | 倒す        | 円柱の根元を基点に倒す。            | 省略                             |        |
|      | T1       | 倒す力のみ     | 倒す方向に力を入れる。円柱は倒れない。     | 省略                             |        |
| 引く   | pull     | 引く        | 円柱をつかんで引く。              | 省略                             |        |
| スライド | S        | スライド      | 円柱をスライドさせる。             | 省略                             |        |
| その他  | 2動作を同時実行 | TR        | 倒し回し                    | 円柱の根元を基点に円柱を斜めにして、円錐形を描くように回す。 | 1-5(c) |
|      |          | PT        | 押し倒し                    | 押しながら倒す。                       | 省略     |
|      | その他      | Z2        | 表面をなぞる                  | 表面を指で円形になぞる。円柱は動かない。(指の動きを感知)  | 1-5(d) |
|      |          | Z5        | わからない                   | -                              | -      |

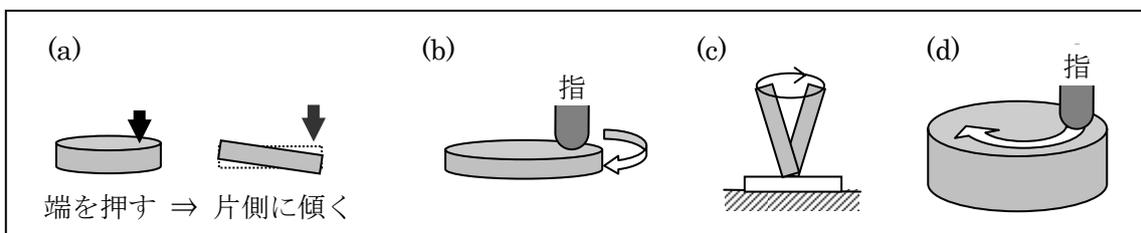


図1-3 操作運動説明図

(a) 押す（端押し）・端長押し、(b) 回す（指を表面に）、(c) 倒し回し、(d) 表面をなぞる

| 切り替え   |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 姿勢 1   |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5  | P       | P  | P  | P  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10 | P       | P  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 20 | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 30 | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 40 | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 50 | P       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
| 60     | P  | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   |     |

| 調節     |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 姿勢 1   |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5  | T1      | R  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10 | T1      | T1 | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 20 | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 30 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|        | 40 | P1      | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 50 | P1      | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
| 60     | Z2 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   |     |

| 切り替え   |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 姿勢 2   |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5  | P       | P  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 10 | P       | P  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 20 | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|        | 30 | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|        | 40 | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|        | 50 | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60     | P  | P       | P  | R  | R  | R  | P   | T   |     |

| 調節     |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 姿勢 2   |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5  | R       | T  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|        | 20 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|        | 30 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|        | 40 | P1      | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|        | 50 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60     | R  | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   |     |

| 切り替え   |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 姿勢 3   |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5  | P       | P  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10 | P       | P  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|        | 20 | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 30 | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 40 | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 50 | P       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
| 60     | P  | P       | R  | R  | R  | R  | R   | T   |     |

| 調節     |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 姿勢 3   |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5  | R       | T1 | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10 | T1      | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|        | 20 | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | R   |
|        | 30 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|        | 40 | Z2      | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|        | 50 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60     | R  | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   |     |

| 切り替え   |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 姿勢 4   |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5  | P       | P  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10 | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 20 | P       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|        | 30 | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 40 | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 50 | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60     | P  | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   |     |

| 調節     |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 姿勢 4   |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5  | R       | R  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10 | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 20 | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 30 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|        | 40 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|        | 50 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60     | R  | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   |     |

| 切り替え   |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 姿勢 5   |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5  | P       | P  | T  | T  | T  | R   | T   | T   |
|        | 10 | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|        | 20 | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|        | 30 | P       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|        | 40 | P       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|        | 50 | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60     | P  | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   |     |

| 調節     |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 姿勢 5   |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5  | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|        | 10 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|        | 20 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|        | 30 | R       | R  | R  | R  | R  | T   | R   | T   |
|        | 40 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|        | 50 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
| 60     | R  | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   |     |

図 1 - 4 被験者 Pre\_M02 の操作運動

図左側：「二つの状態の切り替え操作」指示に対する操作運動で、上から姿勢 1、2、3、4、5。

図右側：「連続的な調節操作」指示に対する操作運動で、上から姿勢 1、2、3、4、5。

操作運動の記号は、表 1 - 3 に示す記号である。

#### 1.1.4 詳細実験の条件決定

多数の被験者を対象とする詳細実験に先立ち、上述のとおり、少数の被験者で、  
[操作指示(2種類)×全円柱(56種類)×全設置姿勢(5種類)×被験者(5名)]  
の条件で事前実験を実施した。その結果、下記傾向が観察された。

- 1) 被験者個人間で円柱形状(種類)により操作運動が異なる。
- 2) 被験者個人間で、2種類の操作指示に対する操作運動は顕著に異なる。
- 3) ただし上記2)に関し、「二つの状態の切り替え操作」指示で「回す」操作運動を誘発した円柱は「連続的な調節操作」指示でも「回す」操作運動を誘発し、「連続的な調節操作」指示で「倒す」操作運動を誘発した円柱は「二つの状態の切り替え操作」指示でも「倒す」操作運動を誘発する傾向があった。操作器形状の影響が大きいと考える。
- 4) 被験者個人間で、円柱設置姿勢の違いによる操作運動の差は小さくなく、似た操作運動が誘発される。
- 5) 被験者間で操作運動は顕著に異なる。

詳細実験では実験時間短縮のため、上記4)より円柱設置姿勢の条件を減らし、円柱設置姿勢1・2・4で実験を行うこととした。

56種類ある円柱の絞込みも検討したが、円柱種類に対する操作運動の個人差が大きく、円柱種類は省略できないと結論した。

以上の結果より、詳細実験は下記条件で行った。

[操作指示(2種類)×全円柱(56種類)×全設置姿勢(3種類)×被験者数]

## 1.2 詳細実験

### 1.2.1 実験装置

事前実験と同様の装置を用いた。

### 1.2.2 実験条件

#### (1) 円柱・設置姿勢・設置場所・操作指示

前項で述べたとおり、円柱は事前実験と同じ56種類、円柱設置姿勢は図1-2に示した姿勢のうち姿勢1・2・4とした。また、円柱の操作指示も事前実験と同じ「二つの状態の切り替え操作」と「連続的な調節操作」の2種類を行った。

#### (2) 被験者

被験者は27歳～70歳の男女21名（男性10名、女性11名）である。以下では、被験者番号として、男性はMxx、女性はFxxと表記している。

以上により、詳細実験として下記条件の実験を行った。

[操作指示(2種類)×全円柱(56種類)×設置姿勢(3種類) ×被験者数(21名)]

### 1.2.3 詳細実験結果

21名の被験者から得られた操作運動の種類を表1-2にまとめ、その一部の操作運動を図1-5に図示する。前述の事前実験で観察された操作運動の説明図は省略した。

2種類の操作指示に対する各被験者操作運動の結果の内、一例として、「二つの状態の切り替え操作」指示に対する典型例に近いものとその反応時間を、図1-6に示す。「連続的な調節操作」に対して得た操作運動の図や他の被験者に関する両操作指示（「二つの状態の切り替え操作」指示と「連続的な調節操作」指示）に対する操作運動の図は割愛する。

また、事前実験と詳細実験で得た各円柱についての両操作指示に対する全員の操作運動を図1-7に示す。この図では操作運動は記号を省略し色表示した。表1-3に操作運動を表す色を示す。また図の操作運動と被験者の対応を表1-4（全員）に示す。

表 1 - 2 被験者操作運動種類

| 分類   | 記号     | 動作                         | 説明  | 説明図                               |                |
|------|--------|----------------------------|---|-----------------------------------|----------------|
| 押す   | P      | 押す                         | 円柱表面を下向きに押す。  | 省略                                |                |
|      | P      | 押す (高さ変化)                  | 高さ変化により調節。  | 省略                                |                |
|      | P1     | 押す (端押し)                   | 円柱表面の端を押す。<br>円柱は片側に傾く。                               | 1 - 5<br>(a)                      |                |
|      | P1     | 端長押し                       |   |                                   |                |
|      | P2     | 軽く複数回タッチ                   | 円柱表面を軽く複数回触る・タッチする。                                   | 省略                                |                |
| 回す   | R      | 回す                         | 円柱をつかんで回す。  | 省略                                |                |
|      | R      | 回す (指を表面に)                 | 円柱表面に指をあて、円柱を回す。                                      | 1 - 5<br>(b)                      |                |
|      | R      | 回す (指を上部エッジにかける)           | 上部エッジに指をかけ回す。   | 1 - 1 1<br>(a)                    |                |
|      | R      | 回す (指を上部エッジにかける・可動範囲 30 度) | 上部エッジに指をかけ回す (上記と同様)。<br>30 度くらいの可動範囲。<br>平たく薄い円柱が対象。 | 省略                                |                |
|      | R      | 回す (未使用時倒す)                | 回す。使わないときは折りたたむ。                                      | 1 - 1 1<br>(b)                    |                |
|      | R      | 回す (円柱を折る)                 | 円柱を途中で折って掴みやすくし、回す (120 度程度の範囲)。                      | 1 - 1 1<br>(c)                    |                |
| 倒す   | T      | 倒す                         | 円柱の根元を基点に倒す。  | 省略                                |                |
|      | T      | 倒す (段階的に)                  | 倒す。段階的に止まる位置がある。                                      | 省略                                |                |
|      | T1     | 倒す力のみ                      | 倒す方向に力を入れる。円柱は倒れない。                                   | 省略                                |                |
| 引く   | pull   | 引く                         | 円柱をつかんで引く。  | 省略                                |                |
|      | pull   | 押す/引く                      | 押すか引くと回答。引くに分類。                                       | 省略                                |                |
|      | pull   | 引く (高さ変化)                  | 高さ変化により調節。  | 省略                                |                |
|      | pull   | 引く (+折りたたみ)                | 引く。使わないときは折りたたむ。                                      | 省略                                |                |
| スライド | S      | スライド                       | 円柱をスライドさせる。   | 省略                                |                |
| その他  | 2 同時実行 | TR                         | 倒し回し  | 円柱の根元を基点に円柱を斜めにして、円錐形を描くように回す。    | 1 - 5 (c)      |
|      |        | RT                         | 回す*倒す   | 回すと倒す操作を同時に行う。                    | 1 - 1 1<br>(d) |
|      |        | RP                         | 回す*押す   | 回しながら押し込む。ねじ込む。                   | 省略             |
|      |        | Rpull                      | 回す*引く   | 引っ張りながら回す。上記の逆。                   | 省略             |
|      |        | PT                         | 押し倒し  | 押しながら倒す。                          | 省略             |
|      | 2 段階動作 | 2S1                        | 押し回し  | 円柱を押してから (スッパ-を外す) 回す。            | 省略             |
|      |        | 2S2                        | 押す (飛び出し) + 回す  | 円柱を押して飛び出させ、その後回す。                | 1 - 1 1<br>(e) |
|      |        | 2S3                        | 引く + 回す   | 円柱を引いてから (スッパ-を外す) 回す。            | 省略             |
|      |        | 2S4                        | 引く + 倒す   | 円柱を引いてから (スッパ-を外す) 倒す。            | 省略             |
|      | その他    | Z1                         | 叩く  | 円柱上部を叩く。                          | 省略             |
|      |        | Z2                         | 表面をなぞる  | 表面を指で円形になぞる。円柱は動かない。<br>(指の動きを感知) | 1 - 5<br>(d)   |
|      |        | Z3                         | 円を描く  | 円柱を握り棒とし、粉引き (あるいは水撒きホース) のように回す。 | 1 - 1 1<br>(f) |
|      |        | Z4                         | 横面を押す   | 円柱の横面に操作可能部があり、それを押す (両側)。        | 1 - 1 1<br>(g) |
| Z5   |        | わからない                      | -   | -                                 |                |

※表は事前実験でのみ観察された操作運動も含む。

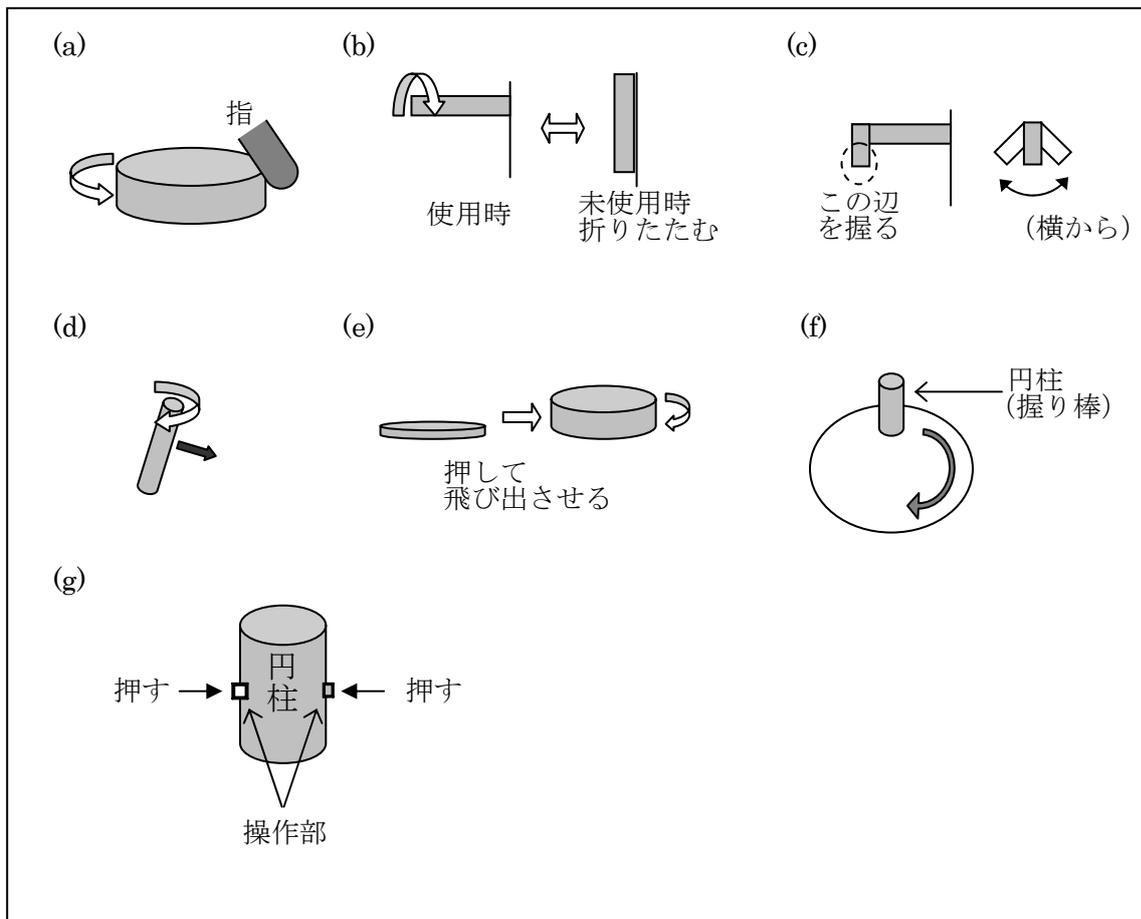


図 1 - 5 操作運動説明図

(a) 回す (指を上部エッジにかける)、(b)回す (未使用時倒す)、(c) 回す (円柱を折る)、  
 (d) 回す\*倒す、(e) 押す (飛び出し) +回す、(f) 円を描く、(g) 横面を押す

| F O 5 操作運動 |    |         |    |    |    |    |     |     |     | F O 5 反応時間 |     |         |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|------------|-----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 切り替え       |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     | 切り替え       |     | 高さ [mm] |     |     |     |     |     |     |     |
| 姿勢 1       |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 | 姿勢 1       |     | 5       | 10  | 20  | 30  | 50  | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm]     | 5  | P       | P  | T  | T  | T  | T   | T   | T   | 径 [mm]     | 5   | 0.9     | 0.7 | 1.8 | 1.2 | 1.8 | 1.4 | 1.3 | 1.2 |
|            | 10 | P       | P  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |            | 10  | 1.2     | 1.1 | 1.8 | 1.4 | 1.2 | 1.6 | 1.2 | 1.8 |
|            | 20 | S       | R  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |            | 20  | 1.8     | 1.4 | 1.3 | 1.1 | 1.9 | 1.5 | 1.4 | 3.2 |
|            | 30 | R       | P  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |            | 30  | 1.7     | 1.7 | 1.4 | 1.6 | 3.2 | 2.1 | 1.3 | 1.5 |
|            | 40 | R       | P1 | P  | R  | R  | R   | T   | T   |            | 40  | 2.2     | 1.3 | 1.6 | 2.1 | 1.7 | 1.5 | 1.8 | 1.9 |
|            | 50 | P1      | S  | R  | R  | S  | R   | T   | T   |            | 50  | 2.2     | 2.6 | 1.6 | 2.2 | 3   | 2.2 | 1.7 | 1.3 |
| 60         | P1 | R       | R  | P  | P  | R  | T   | T   | 60  | 1.8        | 2.3 | 1.3     | 1.7 | 1   | 1.9 | 5   | 2.5 |     |     |

| F O 5 操作運動 |    |         |    |    |    |    |     |     |     | F O 5 反応時間 |     |         |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|------------|-----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 切り替え       |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     | 切り替え       |     | 高さ [mm] |     |     |     |     |     |     |     |
| 姿勢 2       |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 | 姿勢 2       |     | 5       | 10  | 20  | 30  | 50  | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm]     | 5  | P       | P  | R  | T  | T  | T   | T   | T   | 径 [mm]     | 5   | 1       | 1.1 | 1.5 | 1.3 | 1.5 | 1.2 | 1.7 | 1.5 |
|            | 10 | P       | P  | R  | T  | T  | T   | T   | T   |            | 10  | 1       | 0.9 | 1   | 1.4 | 1.6 | 1.9 | 1   | 1.2 |
|            | 20 | P       | P  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |            | 20  | 0.9     | 0.7 | 1.5 | 1.3 | 1.9 | 1.8 | 1.5 | 1.6 |
|            | 30 | P       | P  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |            | 30  | 1.1     | 1.4 | 1.9 | 1.3 | 1.3 | 1.8 | 1.6 | 2.7 |
|            | 40 | P1      | P  | P  | R  | R  | R   | T   | T   |            | 40  | 1.4     | 1.1 | 1.5 | 0.9 | 1.1 | 1.1 | 2.4 | 1.6 |
|            | 50 | P1      | P1 | R  | R  | R  | R   | R   | T   |            | 50  | 1.3     | 1.6 | 1.3 | 1.1 | 1.3 | 1   | 0.6 | 1.5 |
| 60         | R  | P1      | P  | R  | R  | R  | R   | R   | 60  | 3.7        | 1.7 | 1.6     | 1.1 | 1.1 | 1.4 | 1.8 | 1.3 |     |     |

| F O 5 操作運動 |    |         |    |    |    |    |     |     |     | F O 5 反応時間 |     |         |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|------------|-----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 切り替え       |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     | 切り替え       |     | 高さ [mm] |     |     |     |     |     |     |     |
| 姿勢 4       |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 | 姿勢 4       |     | 5       | 10  | 20  | 30  | 50  | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm]     | 5  | P       | P  | T  | T  | T  | T   | T   | T   | 径 [mm]     | 5   | 1       | 1.3 | 1.8 | 1.2 | 1.6 | 1.1 | 1.5 | 1.3 |
|            | 10 | P       | P  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |            | 10  | 0.8     | 0.9 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.6 | 1.9 | 1.3 |
|            | 20 | P       | S  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |            | 20  | 2       | 1.2 | 1   | 1.2 | 1.3 | 1.2 | 1.3 | 1.5 |
|            | 30 | S       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |            | 30  | 1.7     | 0.8 | 1.2 | 1.6 | 1   | 1.3 | 0.6 | 1.6 |
|            | 40 | P1      | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |            | 40  | 1.8     | 1.3 | 2.4 | 1.3 | 1.2 | 1.3 | 1.1 | 1.3 |
|            | 50 | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |            | 50  | 1       | 1.1 | 1   | 1   | 1   | 0.9 | 0.9 | 1.7 |
| 60         | P  | R       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | 60  | 1.9        | 1.6 | 1.1     | 1.2 | 1.1 | 0.8 | 1.3 | 1.5 |     |     |

| F O 5 操作運動 |    |         |    |    |    |    |     |     |     | F O 5 反応時間 |    |         |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|------------|----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 調節         |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     | 調節         |    | 高さ [mm] |     |     |     |     |     |     |     |
| 姿勢 1       |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 | 姿勢 1       |    | 5       | 10  | 20  | 30  | 50  | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm]     | 5  | P       | R  | T  | T  | T  | T   | T   | T   | 径 [mm]     | 5  | 1.1     | 2.2 | 2.2 | 1.8 | 1.4 | 1.6 | 0.9 | 1.5 |
|            | 10 | R       | R  | R  | R  | T  | R   | T   | T   |            | 10 | 1.7     | 1.3 | 0.9 | 1.4 | 1.5 | 2.5 | 1.5 | 1.4 |
|            | 20 | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |            | 20 | 1.7     | 1.7 | 1   | 1.1 | 1.1 | 1.6 | 1.4 | 1.6 |
|            | 30 | P1      | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |            | 30 | 1.4     | 1.2 | 1   | 1.4 | 0.9 | 1.6 | 1.4 | 1.3 |
|            | 40 | P1      | P1 | R  | R  | R  | R   | R   | T   |            | 40 | 1.1     | 1.7 | 2.1 | 0.8 | 1.3 | 1.1 | 2.1 | 2.1 |
|            | 50 | P1      | P1 | R  | R  | R  | R   | R   | R   |            | 50 | 1.8     | 1.1 | 0.9 | 1.3 | 2.6 | 1.4 | 1   | 1.7 |
| 60         | P1 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | 60  | 1.4        | 2  | 1.9     | 1.6 | 0.8 | 1.9 | 1.2 | 1.5 |     |     |

| F O 5 操作運動 |    |         |    |    |    |    |     |     |     | F O 5 反応時間 |     |         |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|------------|-----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 調節         |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     | 調節         |     | 高さ [mm] |     |     |     |     |     |     |     |
| 姿勢 2       |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 | 姿勢 2       |     | 5       | 10  | 20  | 30  | 50  | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm]     | 5  | R       | R  | T  | T  | T  | TR  | T   | TR  | 径 [mm]     | 5   | 2       | 1.1 | 1.2 | 1   | 1.4 | 3.6 | 1.4 | 1.8 |
|            | 10 | R       | R  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |            | 10  | 1.8     | 1.4 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.3 | 1   | 1.8 |
|            | 20 | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |            | 20  | 1.2     | 0.7 | 1   | 1.1 | 1.5 | 1.6 | 1.3 | 1.5 |
|            | 30 | S       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |            | 30  | 1.2     | 1.2 | 1.1 | 1   | 0.7 | 1.5 | 1.9 | 1.5 |
|            | 40 | P1      | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |            | 40  | 1.2     | 0.9 | 1.1 | 0.7 | 1.2 | 1   | 1.4 | 0.8 |
|            | 50 | P1      | P1 | R  | R  | R  | R   | R   | T   |            | 50  | 1.3     | 1   | 1.2 | 0.8 | 1.5 | 0.9 | 1.2 | 1.5 |
| 60         | P1 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | 60  | 1.2        | 1.2 | 1.9     | 1.2 | 0.9 | 1.2 | 1.5 | 1.1 |     |     |

| F O 5 操作運動 |    |         |    |    |    |    |     |     |     | F O 5 反応時間 |     |         |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|------------|-----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 調節         |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     | 調節         |     | 高さ [mm] |     |     |     |     |     |     |     |
| 姿勢 4       |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 | 姿勢 4       |     | 5       | 10  | 20  | 30  | 50  | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm]     | 5  | R       | R  | R  | T  | T  | TR  | TR  | T   | 径 [mm]     | 5   | 1.5     | 0.9 | 1   | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 2   | 1.5 |
|            | 10 | R       | S  | R  | T  | T  | T   | T   | T   |            | 10  | 1.2     | 0.7 | 1.1 | 1.1 | 0.9 | 1.6 | 1.2 | 1.1 |
|            | 20 | S       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |            | 20  | 0.9     | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.9 | 0.9 | 1.5 | 0.9 |
|            | 30 | S       | S  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |            | 30  | 2       | 0.8 | 0.9 | 0.7 | 0.7 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
|            | 40 | S       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |            | 40  | 1.1     | 0.9 | 0.7 | 0.6 | 1   | 0.5 | 0.9 | 0.8 |
|            | 50 | R       | S  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |            | 50  | 1.5     | 0.6 | 1   | 0.8 | 0.6 | 0.6 | 0.9 | 0.5 |
| 60         | R  | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | 60  | 1.3        | 1.5 | 0.7     | 1.1 | 1   | 0.6 | 1.1 | 1.1 |     |     |

図 1 - 6 被験者 F05 の操作運動と反応時間

図左側：操作運動。上から「二つの状態の切り替え操作」指示に対する姿勢 1、2、4 の結果と、「連続的な調節操作」指示に対する姿勢 1、2、4 の結果。操作運動の記号は、表 1 - 6 に示す記号である。

図右側：反応時間。上から「二つの状態の切り替え操作」指示に対する姿勢 1、2、4 の結果と、「連続的な調節操作」指示に対する姿勢 1、2、4 の結果。反応時間の単位は秒である。

表 1-3 操作運動の記号と色表示

|   |   |   |      |   |    |                |         |       |
|---|---|---|------|---|----|----------------|---------|-------|
| P | R | T | pull | S | TR | RT,RP,Rpull,PT | 2S1-2S5 | Z1-Z5 |
|---|---|---|------|---|----|----------------|---------|-------|

表 1-4 操作運動結果一覧図の被験者対応表  
 (図 1-1 3 の各円柱に記載している操作運動の被験者番号と年齢)

( ) 内は年齢

|         |             |             |             |         |             |
|---------|-------------|-------------|-------------|---------|-------------|
| M07(68) | F11(70)     |             |             |         |             |
| F04(54) | F09(54)     | Pre_M01(56) | M10(59)     | M04(66) | M02(68)     |
| F02(48) | F01(49)     | Pre_F03(50) | M05(52)     | F03(53) | F06(53)     |
| M09(36) | Pre_F02(39) | M06(40)     | Pre_F01(41) | F10(42) | F08(47)     |
| M01(27) | F05(27)     | F07(28)     | M08(30)     | M03(35) | Pre_M02(36) |

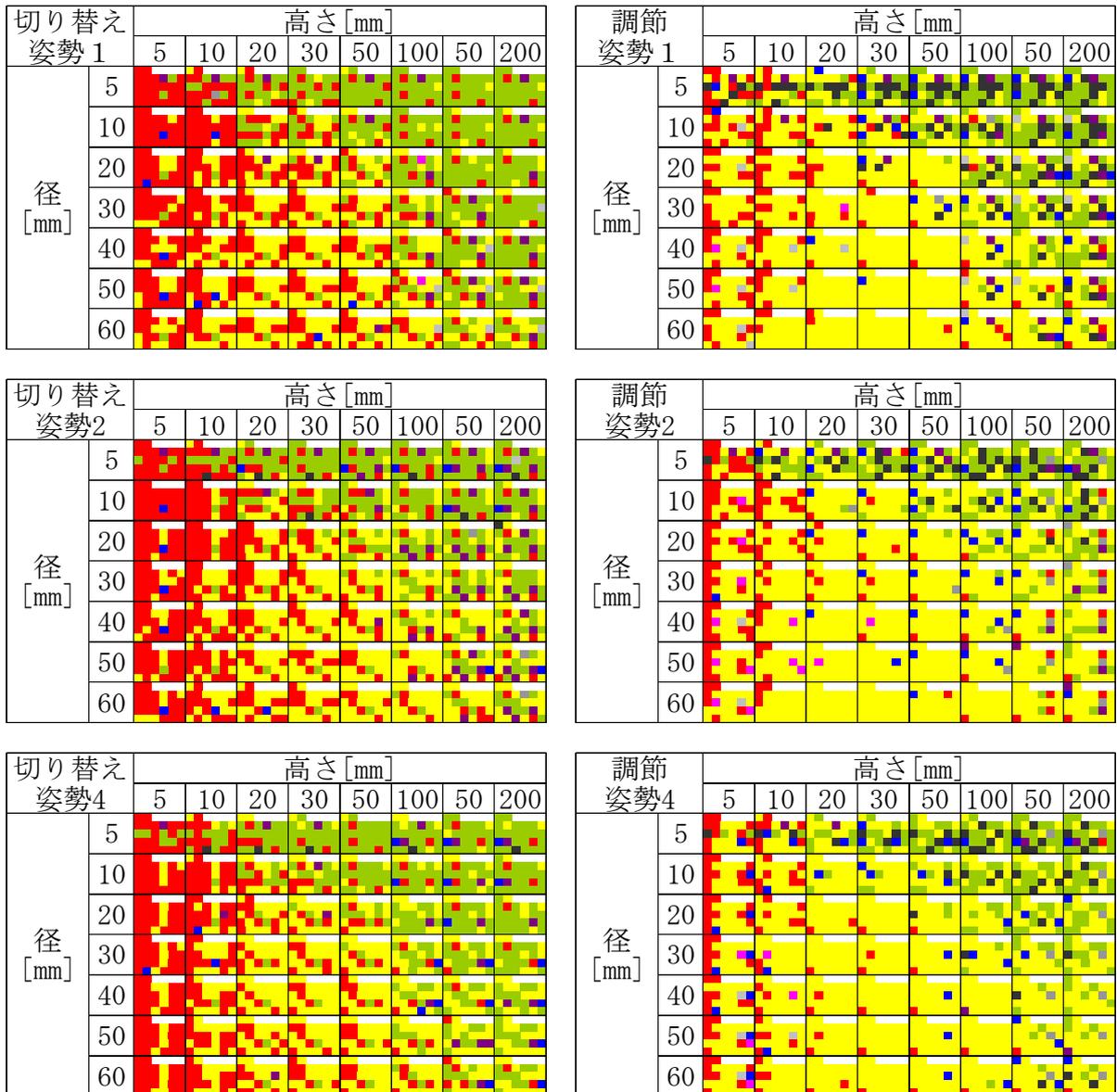


図 1-7 二つの操作指示に対する操作運動結果一覧図 (全員)

図左側：「二つの状態の切り替え操作」指示に対する操作運動。上から姿勢 1、2、4 の結果。  
 図右側：「連続的な調節操作」指示に対する操作運動。上から姿勢 1、2、4 の結果。

## 第2章 実験データの分析とモデル化

本章では、得られた詳細実験データの分析とモデル化について述べる。

結果一覧を見て分かるとおり、詳細実験の結果はすべての被験者において一貫したものではない。そこで、クラスタ分析を行って、操作戦略の類型化を行う。類型化されたうちのもっとも典型的な（被験者数の多い）操作パターンについて、DHRCでの先行研究によって得られている若年者の操作パターンと比較し、中高年被験者と若年被験者の差を明らかにする。さらに、典型的な中高年操作パターンの確率分布をモデル化する。

### 2.1 操作パターンのクラスタ分析

実験結果として得られた円柱の高さ×径の56個の操作カテゴリを、56行のカテゴリ変数ベクトルとして扱い、クラスタ分析を行った。姿勢1での「二つの状態の切り替え操作（以下、切り替え操作）」の分析結果を図2-1に示す。

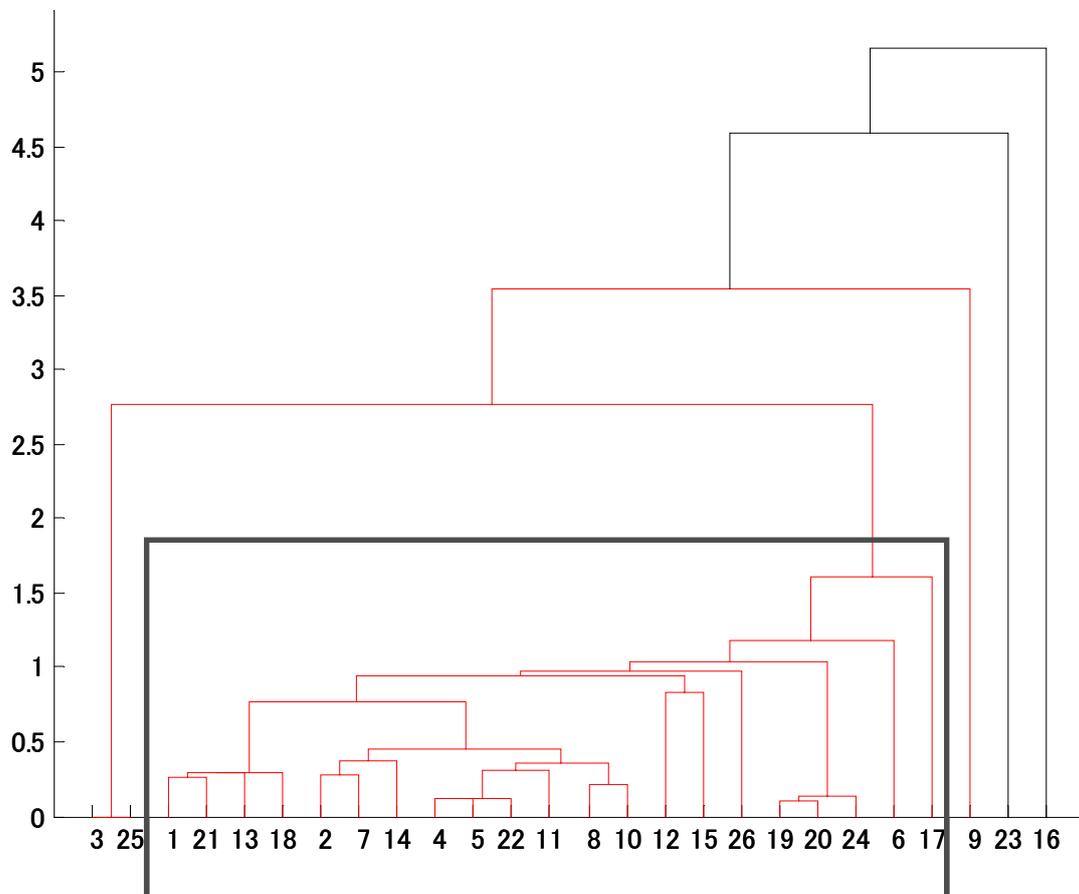


図2-1 姿勢1・切り替え操作のクラスタ分析（デンドログラム）

図中の四角枠の被験者は、操作パターンの距離関係が近く、類似した操作パターンであることがわかる。代表例を図2-2に示す。小さい円柱では押す操作、平たい円柱では回転操作、細長いから太い円柱では倒す操作が誘発されている。この集団とは別のクラスタに分類されている操作パターン例を図2-3、2-4、2-5に示す。図2-3は円柱の形状にかかわらずすべての操作を押す操作で行った被験者、図2-4は図2-3と対照的にほとんどの操作を倒すないしはスライドする操作で行った被験者、図2-5は引く操作が頻繁に誘発される被験者である。図2-3では、たとえば鉛筆が立っているような細長い円柱に対しても、「二つの状態（ON-OFF）の切り替え操作」に対して円柱を上から下に押す操作が誘発されており、また、図2-4では、たとえばコインのような平たい円柱に対して、円柱を倒す（裏返す）ような操作が誘発されている。

Pre\_F03

| 切り替え   |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 姿勢1    |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5  | P       | P  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10 | P       | P  | T  | P  | T  | T   | T   | T   |
|        | 20 | P       | P  | P  | P  | T  | T   | T   | T   |
|        | 30 | P       | P  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 40 | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 50 | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 60 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |

図2-2 姿勢1・切り替え操作の中高年典型操作例

F09

| 切り替え   |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 姿勢1    |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5  | P       | P  | P  | P  | P  | P   | P   | P   |
|        | 10 | P       | P  | P  | P  | P  | P   | P   | P   |
|        | 20 | P       | P  | P  | P  | P  | P   | P   | P   |
|        | 30 | P       | P  | P  | P  | P  | P   | P   | P   |
|        | 40 | P       | P  | P  | P  | P  | P   | P   | P   |
|        | 50 | P       | P  | P  | P  | P  | P   | P   | P   |
|        | 60 | P       | P  | P  | P  | P  | P   | P   | P   |

図2-3 姿勢1・切り替え操作の特異操作例（1）

Pre\_F01

| 切り替え   |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 姿勢1    |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5  | T       | PT | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10 | S       | S  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 20 | T       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 30 | T       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 40 | S       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 50 | S       | S  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 60 | T       | T  | T  | S  | T  | T   | T   | T   |

図2-4 姿勢1・切り替え操作の特異操作例（2）

| 切り替え   |    | 高さ [mm] |      |      |      |      |      |      |      |
|--------|----|---------|------|------|------|------|------|------|------|
| 姿勢1    |    | 5       | 10   | 20   | 30   | 50   | 100  | 150  | 200  |
| 径 [mm] | 5  | pull    | pull | pull | R    | pull | pull | T    | pull |
|        | 10 | P       | R    | P    | R    | pull | T    | T    | pull |
|        | 20 | R       | R    | pull | pull | R    | 2S3  | R    | T    |
|        | 30 | P       | R    | R    | R    | R    | R    | pull | T    |
|        | 40 | R       | R    | R    | R    | R    | R    | pull | pull |
|        | 50 | R       | R    | R    | R    | R    | 2S3  | pull | pull |
|        | 60 | R       | R    | R    | R    | R    | R    | T    | R    |

図2-5 姿勢1・切り替え操作の特異操作例（3）

次いで、姿勢1での「連続的な調節操作（以下、調節操作）」の分析結果を図2-6に示す。

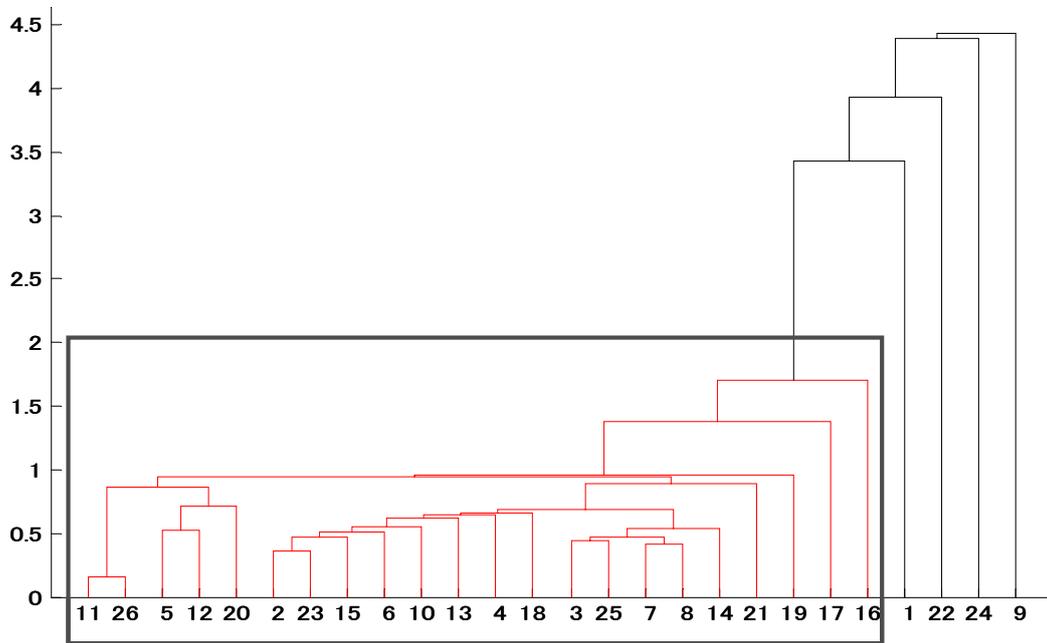


図2-6 姿勢1；調節動作のクラスタ分析（デンドログラム）

この例でも、図中四角枠の被験者は操作パターンの距離関係が近く、類似した操作パターンである。代表例を図2-7に示す。小さい円柱では押す操作、平たい円柱では回す操作、細長い円柱では倒す操作が誘発されており、図2-2の切り替え操作とよく似たパターンである。ただし、全体として回転操作の領域が広がっていることがわかる。この集団とは別のクラスターに分類されている操作パターン例を図2-8、図2-9に示す。図2-8は引く操作を多用する人で、図2-9はスライド型の操作が誘発される人である。図2-8の被験者では、たとえば、小さなスイッチや細長い鉛筆のような円柱スイッチに対して「連続的な（多段階の）調節操作」として引く操作が誘発されている。図2-9の被験者は、鉛筆状の円柱スイッチに対して倒す操作ではなくスライドする操作が誘発されており、またこの被験者では平たい円柱スイッチ（コイン状のスイッチ）に対して押す操作が誘発されている。連続的（多段階）に調節する際に、スイッチを複数回押すか、段階的に押し込むことで操作するという考え方が伺える。

| F05        |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|------------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 調節<br>姿勢 1 |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm]  | 5  | P       | R  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|            | 10 | R       | R  | R  | R  | T  | R   | T   | T   |
|            | 20 | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|            | 30 | P1      | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|            | 40 | P1      | P1 | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|            | 50 | P1      | P1 | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|            | 60 | P1      | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |

図 2-7 姿勢 1・調節操作の中高年典型操作例

| M10        |    | 高さ [mm] |      |    |      |       |       |      |      |
|------------|----|---------|------|----|------|-------|-------|------|------|
| 調節<br>姿勢 1 |    | 5       | 10   | 20 | 30   | 50    | 100   | 150  | 200  |
| 径<br>[mm]  | 5  | pull    | pull | R  | pull | pull  | pull  | pull | pull |
|            | 10 | R       | pull | R  | pull | pull  | Rpull | pull | pull |
|            | 20 | R       | R    | R  | pull | R     | pull  | pull | pull |
|            | 30 | R       | R    | R  | R    | Rpull | pull  | pull | pull |
|            | 40 | R       | R    | R  | R    | R     | pull  | pull | pull |
|            | 50 | R       | R    | R  | R    | R     | pull  | R    | pull |
|            | 60 | R       | R    | R  | R    | R     | pull  | pull | pull |

図 2-8 姿勢 1・調節操作の特異操作例 (1)

| 調節<br>姿勢 1 |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|------------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 調節<br>姿勢 1 |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm]  | 5  | R       | R  | R  | S  | S  | S   | S   | S   |
|            | 10 | R       | R  | R  | S  | R  | R   | Z3  | Z3  |
|            | 20 | R       | R  | R  | S  | R  | Z3  | Z3  | Z3  |
|            | 30 | R       | R  | R  | R  | S  | S   | Z3  | Z3  |
|            | 40 | P1      | P1 | S  | R  | R  | Z3  | R   | S   |
|            | 50 | P1      | P1 | R  | S  | R  | Z3  | Z3  | S   |
|            | 60 | R       | R  | P  | R  | R  | S   | R   | S   |

図 2-9 姿勢 1・調節操作の特異操作例 (2)

切り替え操作についても、調節操作についても、このような特異な操作パターンが誘発される人が存在するという点が高中年被験者の特徴である。これは、中高年者では生活経験の個人差が大きく、機器に対するリテラシ (literacy: 読み書き能力) が大きく異なることに起因すると思われる。いままでどのような機器スイッチを扱ってきたかで、スイッチに対するリテラシが異なると考えられる。家庭内での生活が中心で家電製品や住宅設備のスイッチを扱ってきた主婦層や、オフィス機器やデジタル機器を中心に扱ってきた労働者層ではスイッチに対するリテラシが異なって当然と言える。いずれにしても、典型的な操作パターンを持つユーザのみを想定して設計するだけでは、ユニバーサルデザインに至らないことがわかった。特異な操作パターンを持つ少数の高中年ユーザの操作パターンまで考慮し、誰にもわかりやすい操作インタフェース設計を行わなければならない。

## 2.2 若年被験者との比較

DHRC では、本研究に先行して若年者（工学系大学生）を中心に同様の実験を行っている<sup>(4)</sup>。この先行研究の結果と、今回の中高年齢者対象の結果との比較を行った。

図2-10に姿勢1・切り替え操作の中高年齢操作パターン（もともと頻度の高い典型操作）と若年者操作パターンを示す。両者はよく似ているが、高齢者では太く長い円柱に対しても倒す動作が誘発されており、若年者のようなスライド動作の誘発がみられない。図2-11は、姿勢1・調節操作の中高年齢操作パターン（もともと頻度の高い典型操作）と若年者操作パターンである。この例でも、やはり高齢者にはスライド動作の誘発がみられない。また、若年者は小さいスイッチやコイン状の薄い円柱スイッチでも、連続的な（多段階）調節操作であれば回転操作が誘発されるのに対して、中高年では押す操作が誘発されている。これは、スイッチを複数回押すことで多段階調節をする操作を想定して、操作を行っている。

| 切り替え<br>姿勢1 |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-------------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|             |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm]   | 5  | P       | P  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|             | 10 | P       | P  | T  | P  | T  | T   | T   | T   |
|             | 20 | P       | P  | P  | P  | T  | T   | T   | T   |
|             | 30 | P       | P  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|             | 40 | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|             | 50 | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|             | 60 | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |

|           |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5  | P       | P  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10 | P       | P  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|           | 20 | P       | P  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|           | 30 | P       | P  | R  | R  | R  | S   | T   | T   |
|           | 40 | P       | P  | R  | R  | R  | S   | S   | T   |
|           | 50 | P       | P  | R  | R  | R  | S   | S   | S   |
|           | 60 | P       | P  | R  | R  | R  | S   | S   | S   |

図2-10 姿勢1・切り替え操作の中高年齢操作パターンと若年者操作パターン  
(a) 中高年齢操作パターン、(b) 若年者操作パターン

| 調節<br>姿勢1 |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5  | P       | R  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10 | R       | R  | R  | R  | T  | R   | T   | T   |
|           | 20 | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|           | 30 | P1      | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|           | 40 | P1      | P1 | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|           | 50 | P1      | P1 | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 60 | P1      | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |

|           |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5  | R       | R  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10 | R       | R  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|           | 20 | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|           | 30 | R       | R  | R  | R  | R  | S   | T   | T   |
|           | 40 | R       | R  | R  | R  | R  | S   | S   | T   |
|           | 50 | R       | R  | R  | R  | R  | S   | S   | S   |
|           | 60 | R       | R  | R  | R  | R  | S   | S   | S   |

図2-11 姿勢1・調節操作の中高年齢操作パターンと若年者操作パターン  
(a) 中高年齢操作パターン、(b) 若年者操作パターン

このように、中高年では典型的な操作パターンであっても、小さいスイッチやコイン状の円柱形スイッチ、太く長いスイッチに対する誘発操作が若年者と異なっている。DHRCの先行実験で得られた若年者操作パターンは、主に工学系大学生を中心とする結果であり、これは、デジタル家電製品類のインタフェースを設計するエンジニアのリテラシに近い。すなわち、これらの設計者は、高齢者が小さいスイッチやコイン状の円柱形スイッチ、太く長いスイッチに対して、設計者自身とは異なる操作リテラシを持つことを理解した上で、中高年ユーザが操作に戸惑うことのないようなスイッチインタフェースデザインを行うべきである。

## 2.3 確率分布によるモデル化

詳細実験で得られた結果を、円柱の径と高さ、操作種別（切り替え・調節）に応じて、誘発される操作カテゴリの出現確率としてモデル化し、その結果、次章で述べる表3-1に示すような確率マップを構成した。

## 2.4 まとめ

円柱形スイッチの形状因子によって誘発されるスイッチ操作の実験結果を分析した結果、以下のような設計ガイドラインが得られた。

(1) 円柱形スイッチを、ON/OFFの切り替え操作として用いる場合：

ユーザに押す操作をさせたい：直径5-30[mm]×高さ5-10[mm]の小さい円柱

ユーザに回す操作をさせたい：直径30-60[mm]×高さ20-50[mm]の平たい円柱

ユーザに倒す操作をさせたい：直径5-20[mm]×高さ50-200[mm]の細長い円柱

(2) 円柱形スイッチを、連続的な（多段階の）調節操作として用いる場合

ユーザに回す操作をさせたい：直径10-60[mm]×高さ10-30[mm]の平たい円柱、  
あるいは、

直径40-60[mm]×高さ50-100[mm]の大きめの円柱

ユーザに倒す操作をさせたい：直径5-20[mm]×高さ50-200[mm]の細長い円柱

### 第3章 操作モデルソフトウェアの開発と組み込み

本章では、第2章でモデル化した操作カテゴリの出現確率に基づいて、誘発されるユーザの操作パターンを可視化するデジタルハンドソフトウェアの開発について述べる。

#### 3.1 ソフトウェアの開発概要

DHRC では、詳細な手の操作をコンピュータ上に再現し、設計されたさまざまな機器を仮想的に操作する手の機能モデル「デジタルハンド」を開発してきた<sup>(5),(6),(7)</sup>。これは、機器設計の早い段階でユーザの操作パターンを可視化するとともに、その操作性を仮想評価することで、人間中心設計を推進することを目的とするソフトウェアシステムである。本研究の成果であるユーザの誘発操作パターンも、単に確率分布データとして提供するだけでなく、設計者がスイッチのデザインをするときに、それを操作するであろうユーザの操作パターンを視覚的に提示することで、設計者には「こんな使い方をするユーザがいるのか」ということを設計の早い段階で提示でき、それ自体が、人間中心設計を支えることになる。そこで、本研究では、DHRC が開発したデジタルハンド構造モデルに、第2章で得られた操作カテゴリの出現確率マップを統合し、スイッチ操作パターンを視覚的に提示するソフトウェアを開発した。当該ソフトウェアの利用者（設計者）は、自らが設計するスイッチの操作種（切り替えスイッチであるか、連続的な多段階調節スイッチであるか）を指定した上で、円柱スイッチの径と高さを入力する。ソフトウェアシステムは、入力された円柱形スイッチを可視化するとともに、出現確率マップにアクセスしてあり得る操作カテゴリとその確率を表示する（図3-1）。ここで、操作カテゴリを選択すると、アニメーションで操作が提示される（図3-2：倒す、図3-3：引く、図3-4：押す、図3-5：回す）。

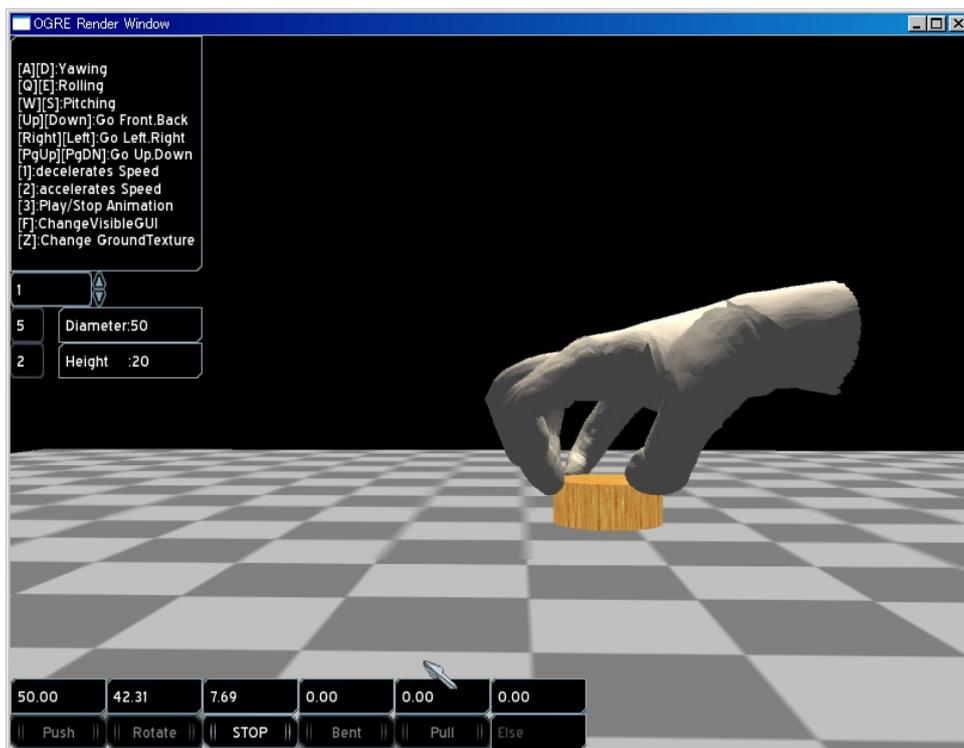


図 3-1 スイッチ操作を可視化するデジタルハンドソフトウェア

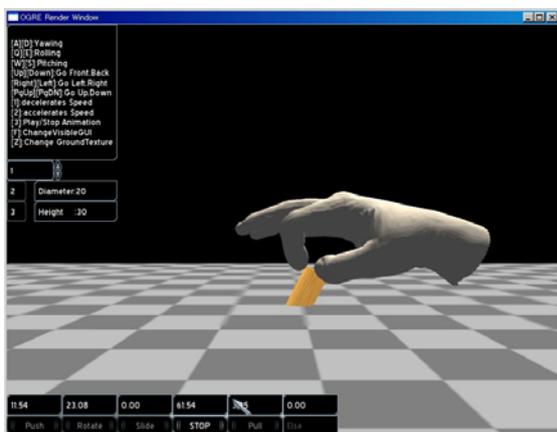


図 3-2 倒す操作

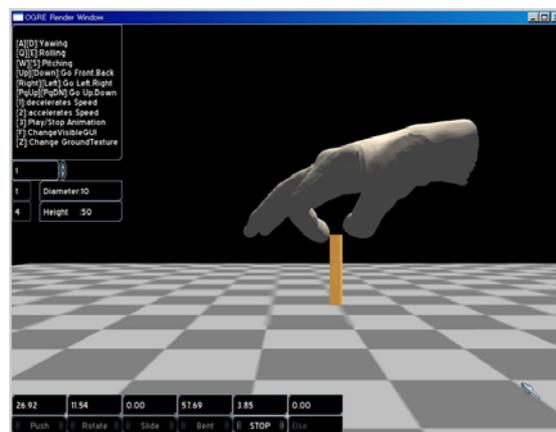


図 3-3 引く操作

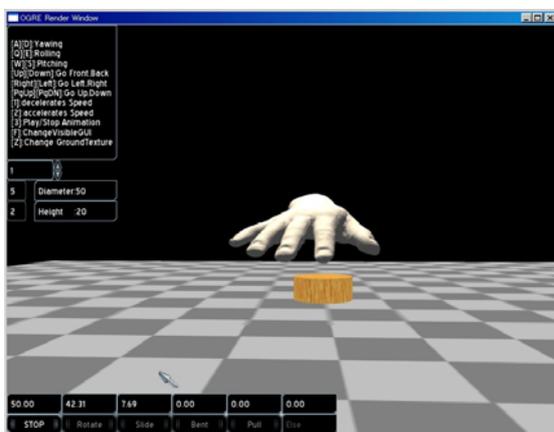


図 3-4 押す操作

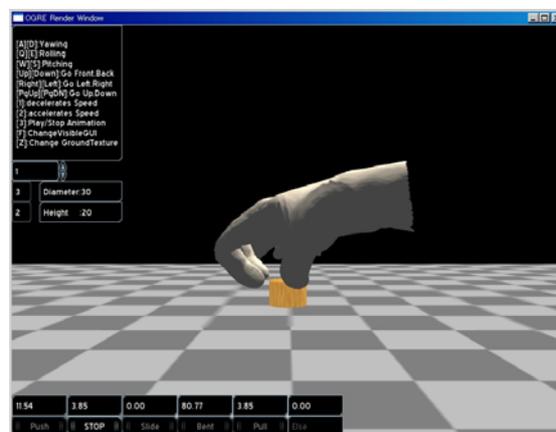


図 3-5 回す操作

## 3.2 Affordance Hand Visualization プログラム

以下、開発したソフトウェア Affordance Hand Visualization の概要を述べる。

### 3.2.1 操作方法

プログラムを実行したときの操作方法を説明する。実行すると以下のような図 3-6 に示す画面が表示される。

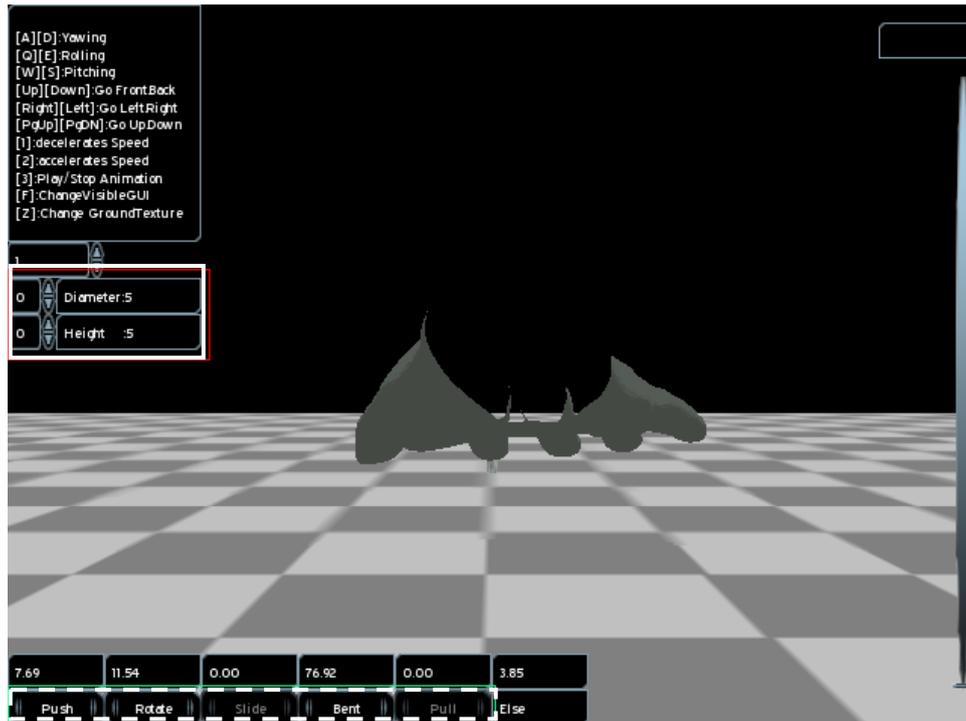


図 3-6 プログラム実行の画面

太い白枠で囲んである部分が画面に表示されている円柱を操作するスピンボックスであり、上下の三角を押して円柱のサイズをコントロールする。

図左下の破線枠で囲んである部分が、現状の円柱サイズで可能なアニメーションを行うボタン群である。ボタンの上にある数字はそのアニメーションが現在の円柱に対して行われた確率を別ファイルに用意された確率マップを読み、表示している。この状態でボタンを押すと各ボタンに表示された名前どおりのアニメーションが現在の円柱に対して行われる。なお、文字の暗いアニメーションはそのサイズの円柱に対しては再生不可能である。

それぞれのアニメーションボタンを押すと、ボタンのキャプションが”Stop”に変わり、アニメーションが始まる。”Stop”ボタンを押すと現在再生中のアニメーションが解除され、ほかのアニメーションを選択することが可能となる。

また、キーボードではカメラの操作を行う。

- |          |                       |
|----------|-----------------------|
| [A][D]キー | : カメラ Y 軸回転(Yawing)   |
| [Q][E]キー | : カメラ Z 軸回転(Rolling)  |
| [W][S]キー | : カメラ X 軸回転(Pitching) |

カーソル[上][下] : カメラ前進/後進  
 カーソル[右][左] : カメラ横移動  
 [PageUP][PageDN] : カメラ上下移動  
 [1]キー(メイン側) : アニメーション速度減少  
 [2]キー(メイン側) : アニメーション速度増加  
 また、画面左上に操作方法のヘルプが記述されている。

### 3.2.2 確率マップについて

本ソフトウェアではモデルの動作確率を外部ファイルから読み込み、使用している。そのファイルの形式は以下の表 3-1 のようになっている。

表 3-1 確率マップのファイル形式

| Push | 5     | 10    | 20    | 30    | 50    | 100   | 150   | 200   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5    | 7.69  | 69.23 | 88.46 | 7.69  | 38.46 | 11.54 | 42.31 | 7.69  |
| 10   | 76.92 | 23.08 | 92.31 | 7.69  | 26.92 | 76.92 | 15.38 | 34.62 |
| 20   | 7.69  | 11.54 | 42.31 | 11.54 | 26.92 | 19.23 | 11.54 | 88.46 |
| 30   | 61.54 | 7.69  | 11.54 | 30.77 | 11.54 | 34.62 | 38.46 | 46.15 |
| 40   | 11.54 | 23.08 | 34.62 | 69.23 | 42.31 | 15.38 | 26.92 | 11.54 |
| 50   | 11.54 | 34.62 | 50    | 30.77 | 69.23 | 15.38 | 11.54 | 7.69  |
| 60   | 50    | 38.46 | 34.62 | 73.08 | 61.54 | 26.92 | 30.77 | 11.54 |

別の確率マップファイルを準備する際はこの形式に準拠する必要がある。また、ファイル形式は csv 形式である。

## 第4章 検証実験

本章では、テクスチャが操作運動に及ぼす影響を検証した結果について述べる。

第1章で述べたアフォーダンス実験は、特別なテクスチャは付加せず、円柱の形状の違いと操作戦略との関係を調べるものであった。しかし一般に、日常生活で目にするインタフェース類は、色や文字、矢印、目盛りといったテクスチャ情報を持ち、操作戦略に何がしかの影響を与えていると考えられる。アフォーダンス実験で得られた結果が、このようなテクスチャによりどのような影響を受けるかを検証した。

### 4.1 テクスチャの決定

#### 4.1.1 一般家庭の住宅内に存在する機器類調査

平均的な一般家庭の住宅内に存在する、あらゆる機器類の円柱形状をした操作器について、形状やサイズ、色、テクスチャ等を全列挙により調査した。円柱形状をした操作機器はさまざまな形状やサイズ、色、テクスチャ等があることが確認できた。これらは、円柱部分に何らかの意味のある記号や模様が描かれているもの、三角や丸など意味のありそうな記号や模様が描かれているもの、意味が明瞭でない記号や模様が描かれているもの、円柱部分には何も描かれていないものに分類できた。なお、円柱以外の他の部分は、今回の検討対象から除いた。

#### 4.1.2 検証実験テクスチャの決定

上記の結果から、検証実験に用いるテクスチャを決定した。参考にした操作機器テクスチャを図4-1に示す。図の(a)は円柱側面に線状のテクスチャが付加されたもので、回転操作運動を行う。図の(b)は円柱上面に描かれた電源マークで、押す操作運動を行う。図の(c)は円柱上面の赤い線が描かれたもので、回転操作運動を行う。

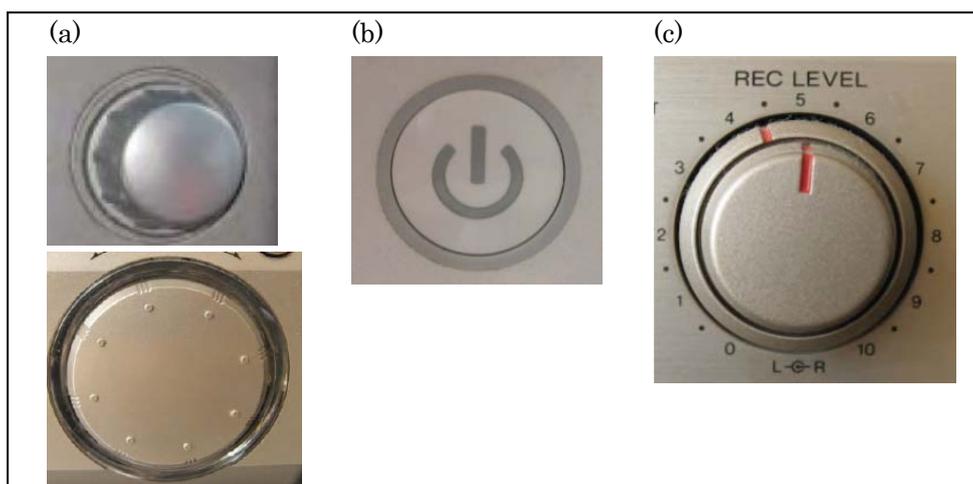


図4-1 検証実験の参考にした操作機器テクスチャ  
(a) 側面に線状テクスチャ、(b) 上面に電源マーク、(c) 上面に赤い直線

検証実験のテクスチャを図4-2に示す。図4-2(a)は図4-1(a)を参考に、円柱側面に縦縞を付加した。図4-2(b)は図4-1(b)を参考に、円柱上面に電源マークを付加した。図4-2(c)は図4-1(c)を参考に、円柱上面に赤い線を付加した。



図4-2 検証実験テクスチャ

(a) 円柱側面に縦縞、(b) 円柱上面に電源マーク、(c) 円柱上面に赤い直線

## 4.2 検証実験

### 4.2.1 実験装置

第1章アフォーダンス実験に用いた56種類の円柱に、図4-2に示した3種類のテクスチャを付加したものをを用いた。円柱設置用治具はアフォーダンス実験と同じ治具を用いた。

### 4.2.2 実験条件

#### (1) 円柱種類

上記のとおり56種類の円柱に、3種類のテクスチャを時期をずらして貼り付けた円柱(合計168種類)すべてを用い、操作運動に対するテクスチャの影響を調べた。

#### (2) 円柱設置姿勢

円柱姿勢は、姿勢1(図4-2参照)のみとした。

#### (3) 円柱設置場所と操作指示

アフォーダンス実験と同様位置に円柱を設置し、操作指示も同様に「二つの状態の切り替え操作」と「連続的な調節操作」の2種類を行った。

#### (4) 被験者

被験者は、アフォーダンス実験被験者の内の中老年男女4名(男女各2名)とした。以下では、被験者番号として、男性はMxx、女性はFxxと表記している。

以上により、検証実験として下記条件の実験を行った。

[テクスチャ(3種類)×操作指示(2種類)×全円柱(56種類)×設置姿勢(1種類)×被験者(4名)]

### 4.2.3 検証実験結果

各4名の被験者から得られた操作運動の種類は、前述のアフォーダンス実験で観察した操作運動種類(表1-2)のいずれかであった。

側面に縦縞を付加した円柱を用いて、2種類の操作指示の内「二つの状態の切り替え操作」に対して得た各被験者操作運動を図4-3に示す（図左側にテキストなし、右側にテキスト付加の場合）。また、テキスト有無で操作運動を比較した結果を、図4-4に示す。「連続的な調節操作」に対して得た各被験者操作運動の図は割愛する。

上面に電源マークを付加した円柱を用いて、2種類の操作指示の内「二つの状態の切り替え操作」に対して得た各被験者操作運動を図4-5に示す（図左側にテキストなし、右側にテキスト付加の場合）。また、テキスト有無で操作運動を比較した結果を、図4-6に示す。「連続的な調節操作」に対して得た各被験者操作運動の図は割愛する。

上面に赤い直線を付加した円柱を用いて、2種類の操作指示の内「二つの状態の切り替え操作」に対して得た各被験者操作運動を図4-7に示す（図左側にテキストなし、右側にテキスト付加の場合）。また、テキスト有無で操作運動を比較した結果を、図4-8に示す。「連続的な調節操作」に対して得た各被験者操作運動の図は割愛する。

テクスチャなし（第1章の詳細実験結果）

円柱側面に縦縞を付加

| M04       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | T       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10          | R       | P  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|           | 20          | R       | P  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|           | 30          | P       | P  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|           | 40          | P       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|           | 50          | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
| 60        | P           | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   |     |

|           | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10          | P       | R  | R  | P  | T  | T   | T   | T   |
|           | 20          | P       | R  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|           | 30          | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|           | 40          | P       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|           | 50          | P       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
| 60        | R           | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   |     |

| M02       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10          | P       | P  | R  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 20          | P       | P  | R  | P  | R  | R   | T   | R   |
|           | 30          | R       | P  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|           | 40          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|           | 50          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60        | R           | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   |     |

|           | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | P  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10          | P       | P  | R  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 20          | P       | P  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|           | 30          | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|           | 40          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | T   | R   |
|           | 50          | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
| 60        | R           | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   |     |

| F11       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | P  | P  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10          | P       | P  | R  | R  | R  | T   | R   | R   |
|           | 20          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 30          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 40          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 50          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60        | P           | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   |     |

|           | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | P  | P  | P  | P  | R   | R   | R   |
|           | 10          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 20          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 30          | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 40          | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 50          | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60        | P           | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   |     |

| F02       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10          | P       | P  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 20          | P       | P  | P  | P  | T  | T   | T   | T   |
|           | 30          | P       | P  | P  | P  | P  | T   | T   | T   |
|           | 40          | P       | P  | P  | P  | P  | T   | T   | T   |
|           | 50          | P       | P  | P  | P  | P  | P   | T   | T   |
| 60        | P           | P       | P  | P  | P  | T  | T   | T   |     |

|           | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |      |    |      |    |     |      |     |
|-----------|-------------|---------|------|----|------|----|-----|------|-----|
|           |             | 5       | 10   | 20 | 30   | 50 | 100 | 150  | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | T    | T  | TR   | T  | TR  | TR   | R   |
|           | 10          | P       | R    | R  | R    | R  | T   | TR   | TR  |
|           | 20          | P       | P    | R  | pull | R  | T   | T    | TR  |
|           | 30          | P       | pull | P  | pull | R  | T   | T    | T   |
|           | 40          | P       | P    | R  | R    | R  | T   | TR   | TR  |
|           | 50          | P       | P    | P  | R    | P  | R   | T    | TR  |
| 60        | P           | P       | P    | R  | R    | R  | R   | pull |     |

図4-3 「二つの状態の切り替え操作」指示に対する操作運動

図左側：テクスチャなしの円柱に対する操作運動（第1章詳細実験結果）。

図右側：側面に縦縞を付加した円柱に対する操作運動。

上から被験者番号 M04、M02、F11、F02 の実験結果で、操作運動の記号は表1-6 参照。

| M04       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |     |    |     |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10  | 20 | 30  | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | T→P     |     |    |     |    |     |     |     |
|           | 10          | R→P     |     |    | R→P |    | T→T |     |     |
|           | 20          |         | P→R |    | R→T |    |     |     |     |
|           | 30          |         |     |    | R→R |    | R→T |     |     |
|           | 40          | P→P     |     |    |     |    |     |     |     |
|           | 50          |         |     |    |     |    |     |     |     |
| 60        | P→R         |         |     |    |     |    |     |     |     |

| F11       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |     |     |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30  | 50  | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           |         |    |    | T→P |     |     | T→R |     |
|           | 10          |         |    |    |     |     |     |     |     |
|           | 20          | P→P     |    |    |     |     |     |     |     |
|           | 30          |         |    |    |     | R→R |     |     |     |
|           | 40          |         |    |    |     |     |     |     |     |
|           | 50          |         |    |    |     |     |     |     |     |
| 60        | P→R         |         |    |    |     |     |     |     |     |

| M02       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |     |    |     |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10  | 20 | 30  | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           |         | T→P |    |     |    |     | T→T |     |
|           | 10          |         |     |    |     |    |     |     |     |
|           | 20          | P→P     |     |    | P→R |    | R→T |     | R→T |
|           | 30          |         |     |    |     |    |     |     |     |
|           | 40          |         | P→R |    |     |    |     |     | T→R |
|           | 50          |         |     |    |     |    |     | R→T |     |
| 60        |             |         |     |    |     |    |     | T→T |     |

| F02       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |        |     |      |     |     |        |      |
|-----------|-------------|---------|--------|-----|------|-----|-----|--------|------|
|           |             | 5       | 10     | 20  | 30   | 50  | 100 | 150    | 200  |
| 径<br>[mm] | 5           |         | T→T    |     | T→T  | T→T |     |        | T→R  |
|           | 10          |         | P→R    |     |      | T→R |     |        | T→TR |
|           | 20          | P→P     |        | P→R | P→R  |     |     | T→T    |      |
|           | 30          |         | P→pull | P→P | pull |     |     |        |      |
|           | 40          |         |        |     |      |     |     |        | T→TR |
|           | 50          |         |        |     | P→R  | P→P | P→R | T→T    |      |
| 60        |             |         |        |     |      | T→R |     | T→pull |      |

図4-4 「二つの状態の切り替え操作」指示に対する操作運動の変化

図左側：男性被験者の変化。図右側：女性被験者の変化。操作運動がテクスチャ有無で変化した円柱のみを色づけした。

テクスチャなし（第1章の詳細実験結果）

| M04    | 切り替え |   | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|------|---|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|        | 姿勢1  |   | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5    | T | T       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10   | R | P       | R  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|        | 20   | R | P       | R  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|        | 30   | P | P       | R  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|        | 40   | P | R       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 50   | R | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|        | 60   | P | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |

| M02    | 切り替え |   | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|------|---|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|        | 姿勢1  |   | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5    | P | T       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10   | P | P       | R  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 20   | P | P       | R  | P  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 30   | R | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|        | 40   | P | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|        | 50   | P | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|        | 60   | R | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |

| F02    | 切り替え |   | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|------|---|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|        | 姿勢1  |   | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5    | P | T       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10   | P | P       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 20   | P | P       | P  | P  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 30   | P | P       | P  | P  | P  | T  | T   | T   | T   |
|        | 40   | P | P       | P  | P  | P  | T  | T   | T   | T   |
|        | 50   | P | P       | P  | P  | P  | P  | T   | T   | T   |
|        | 60   | P | P       | P  | P  | P  | T  | T   | T   | T   |

| F08    | 切り替え |   | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|------|---|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|        | 姿勢1  |   | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5    | P | P       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10   | P | P       | P  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 20   | P | P       | P  | R  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 30   | P | R       | P  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|        | 40   | P | R       | P  | R  | P  | T  | T   | T   | T   |
|        | 50   | P | P       | R  | R  | P  | T  | T   | T   | T   |
|        | 60   | P | R       | R  | R  | R  | P  | P   | T   | T   |

上面に電源マークを付加

| M04    | 切り替え |   | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|------|---|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|        | 姿勢1  |   | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5    | P | T       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10   | P | P       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 20   | R | R       | R  | R  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 30   | P | R       | R  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|        | 40   | P | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|        | 50   | P | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|        | 60   | R | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |

| M02    | 切り替え |   | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|------|---|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|        | 姿勢1  |   | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5    | P | P       | T  | T  | T  | R  | T   | T   | T   |
|        | 10   | P | P       | R  | R  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 20   | P | P       | R  | R  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 30   | R | R       | R  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|        | 40   | R | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|        | 50   | R | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|        | 60   | R | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |

| F02    | 切り替え |    | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|------|----|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|        | 姿勢1  |    | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5    | TR | R       | R  | T  | R  | R  | T   | T   | TR  |
|        | 10   | T  | S       | T  | T  | T  | R  | T   | T   | T   |
|        | 20   | P  | R       | R  | R  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 30   | S  | R       | R  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|        | 40   | P  | P       | R  | R  | P  | R  | S   | T   | T   |
|        | 50   | P  | P       | S  | R  | R  | R  | S   | S   | T   |
|        | 60   | S  | S       | P  | R  | R  | S  | T   | S   | T   |

| F08    | 切り替え |   | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|--------|------|---|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|        | 姿勢1  |   | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5    | R | R       | T  | TR | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 10   | P | R       | R  | R  | T  | T  | T   | T   | T   |
|        | 20   | R | R       | R  | R  | R  | S  | T   | T   | T   |
|        | 30   | R | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|        | 40   | R | R       | R  | R  | R  | S  | T   | T   | T   |
|        | 50   | R | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|        | 60   | R | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | S   |

図4-5 「二つの状態の切り替え操作」指示に対する操作運動

図左側：テクスチャなしの円柱に対する操作運動（第1章詳細実験結果）。

図右側：上面に電源マークを付加した円柱に対する操作運動。

上から被験者番号 M04、M02、F02、F08 の実験結果で、操作運動の記号は表1-6 参照。太字の操作運動記号は、倒す・スライド方向をテクスチャから決定した操作運動を示す。

| M04    | 切り替え |     | 高さ [mm] |     |     |    |    |     |     |     |
|--------|------|-----|---------|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|
|        | 姿勢1  |     | 5       | 10  | 20  | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5    | T→P |         |     |     |    |    |     |     |     |
|        | 10   | R→P | P→P     | R→T |     |    |    | T→T |     |     |
|        | 20   | R→R | P→R     |     |     |    |    |     |     |     |
|        | 30   |     |         |     |     |    |    |     |     |     |
|        | 40   | P→P |         |     | R→R |    |    |     |     | T→R |
|        | 50   | R→P |         |     |     |    |    |     |     |     |
|        | 60   | P→R |         |     |     |    |    |     |     |     |

| M02    | 切り替え |     | 高さ [mm] |     |     |     |    |     |     |     |
|--------|------|-----|---------|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
|        | 姿勢1  |     | 5       | 10  | 20  | 30  | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5    |     | T→P     |     |     |     |    | T→R |     |     |
|        | 10   | P→P |         |     | T→R |     |    |     | T→T |     |
|        | 20   |     |         | P→R |     | R→T |    |     | R→T |     |
|        | 30   | R→R |         |     |     |     |    |     |     |     |
|        | 40   |     |         |     | R→R |     |    |     | R→T |     |
|        | 50   |     | P→R     |     |     |     |    |     |     | R→T |
|        | 60   |     |         |     |     |     |    |     | R→T | T→T |

| F02    | 切り替え |      | 高さ [mm] |     |     |    |     |     |     |      |
|--------|------|------|---------|-----|-----|----|-----|-----|-----|------|
|        | 姿勢1  |      | 5       | 10  | 20  | 30 | 50  | 100 | 150 | 200  |
| 径 [mm] | 5    | P→TR | T→R     |     |     |    | T→R |     |     | T→TR |
|        | 10   | P→TR | P→S     |     | T→T |    |     | T→R |     |      |
|        | 20   | P→P  |         |     |     |    |     |     |     |      |
|        | 30   | P→S  |         |     | P→R |    |     |     |     |      |
|        | 40   |      | P→P     |     |     |    |     |     | T→R |      |
|        | 50   |      |         | P→S |     |    |     |     |     | T→S  |
|        | 60   | P→S  | P→P     |     |     |    |     |     | T→S | T→T  |

| F08    | 切り替え |     | 高さ [mm] |    |     |      |    |     |     |     |
|--------|------|-----|---------|----|-----|------|----|-----|-----|-----|
|        | 姿勢1  |     | 5       | 10 | 20  | 30   | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径 [mm] | 5    |     |         |    | T→T | T→TR |    |     |     |     |
|        | 10   | P→P | P→R     |    |     |      |    |     | T→T |     |
|        | 20   |     |         |    |     |      |    |     | T→R | T→S |
|        | 30   |     | R→R     |    |     |      |    |     |     | T→R |
|        | 40   |     |         |    |     |      |    |     | P→R | T→S |
|        | 50   |     |         |    | R→R |      |    |     |     | T→R |
|        | 60   |     |         |    |     |      |    | P→R |     | T→S |

図4-6 「二つの状態の切り替え操作」指示に対する操作運動の変化

図左側：男性被験者の変化。図右側：女性被験者の変化。操作運動がテクスチャ有無で変化した円柱のみを色づけした。

テクスチャなし（第1章の詳細実験結果）

上面に赤い直線を付加

| M04       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | T       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10          | R       | P  | R  | R  | T  | T   | T   | T   |
|           | 20          | R       | P  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|           | 30          | P       | P  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|           | 40          | P       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|           | 50          | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
| 60        | P           | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   |     |

| M04       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10          | P       | P  | R  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 20          | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|           | 30          | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|           | 40          | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 50          | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60        | R           | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   |     |

| M02       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | T  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10          | P       | P  | R  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 20          | P       | P  | R  | P  | R  | R   | T   | R   |
|           | 30          | R       | P  | R  | R  | R  | R   | T   | T   |
|           | 40          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|           | 50          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60        | R           | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   |     |

| M02       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | T  | T  | T  | R  | T   | R   | R   |
|           | 10          | P       | P  | R  | R  | R  | T   | R   | T   |
|           | 20          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 30          | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | T   |
|           | 40          | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 50          | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60        | R           | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   |     |

| F11       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | P  | P  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10          | P       | P  | R  | R  | R  | T   | R   | R   |
|           | 20          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 30          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 40          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 50          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60        | P           | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   |     |

| F11       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | T  | R  | P  | R  | R   | R   | R   |
|           | 10          | P       | P  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 20          | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 30          | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 40          | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
|           | 50          | P       | R  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| 60        | P           | R       | R  | R  | R  | R  | R   | R   |     |

| F08       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | P  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10          | P       | P  | P  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 20          | P       | P  | P  | R  | T  | T   | T   | T   |
|           | 30          | P       | R  | P  | R  | R  | T   | T   | T   |
|           | 40          | P       | R  | P  | R  | P  | T   | T   | T   |
|           | 50          | P       | P  | R  | R  | P  | T   | T   | T   |
| 60        | P           | R       | R  | R  | R  | P  | P   | T   |     |

| F08       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | P       | P  | T  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 10          | P       | P  | R  | T  | T  | T   | T   | T   |
|           | 20          | P       | P  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|           | 30          | R       | R  | R  | R  | R  | R   | T   | S   |
|           | 40          | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
|           | 50          | P       | R  | R  | R  | R  | T   | T   | T   |
| 60        | P           | R       | R  | R  | R  | R  | S   | T   |     |

図4-7 「二つの状態の切り替え操作」指示に対する操作運動

図左側：テクスチャなしの円柱に対する操作運動（第1章詳細実験結果）。

図右側：上面に赤い直線を付加した円柱に対する操作運動。

上から被験者番号 M04、M02、F11、F08 の実験結果で、操作運動の記号は表1-6 参照。太字の操作運動記号は、倒す・スライド方向をテクスチャから決定した操作運動を示す。

| M04       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |     |    |    |     |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10  | 20 | 30 | 50  | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           | T→P     |     |    |    |     |     |     |     |
|           | 10          | R→P     | P→P |    |    |     |     | T→T |     |
|           | 20          | R→R     |     |    |    | T→R |     |     |     |
|           | 30          |         | P→R |    |    |     |     | T→R |     |
|           | 40          |         |     |    |    |     |     |     | T→R |
|           | 50          |         |     |    |    | R→R |     |     |     |
| 60        | P→R         |         |     |    |    |     |     |     |     |

| F11       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |     |     |     |    |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10  | 20  | 30  | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           |         | P→T | P→R | T→P |    |     | T→R |     |
|           | 10          | P→P     |     |     |     |    |     |     |     |
|           | 20          |         |     |     |     |    |     |     |     |
|           | 30          |         |     |     |     |    |     |     |     |
|           | 40          |         | P→R |     |     |    |     | R→R |     |
|           | 50          |         |     |     |     |    |     |     |     |
| 60        |             |         |     |     |     |    |     |     |     |

| M02       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10  | 20  | 30  | 50  | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           |         |     | T→T |     |     | T→T | T→R |     |
|           | 10          | P→P     |     |     |     |     |     |     | T→T |
|           | 20          |         |     |     |     | T→R |     |     | R→T |
|           | 30          |         |     |     | P→R |     |     |     | T→T |
|           | 40          |         | P→R |     |     |     |     |     | T→R |
|           | 50          |         |     |     |     | R→R |     |     | R→R |
| 60        |             |         |     |     |     |     |     | T→R |     |

| F08       | 切り替え<br>姿勢1 | 高さ [mm] |     |     |    |     |     |     |     |
|-----------|-------------|---------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|
|           |             | 5       | 10  | 20  | 30 | 50  | 100 | 150 | 200 |
| 径<br>[mm] | 5           |         |     | P→P |    |     |     |     |     |
|           | 10          |         |     |     |    |     |     |     | T→T |
|           | 20          |         |     |     |    | P→R |     |     |     |
|           | 30          | P→R     |     |     |    |     |     |     | T→R |
|           | 40          |         |     |     |    |     |     |     | T→R |
|           | 50          | P→P     | P→R |     |    | R→R |     |     | T→S |
| 60        |             |         |     |     |    |     | P→R | P→S |     |

図4-8 「二つの状態の切り替え操作」指示に対する操作運動の変化

図左側：男性被験者の変化。図右側：女性被験者の変化。操作運動がテクスチャ有無で変化した円柱のみを色づけした。

検証実験終了後、被験者から聞き取ったテキストチャに対するコメントを表4-1にまとめる。

表4-1 検証実験被験者コメント

| テキストチャ   | 被験者番号 | コメント   |
|----------|-------|--|
| 側面に縦縞    | M04   | 引っ掛かりができて、回したくなる感じ                                   |
|          | M02   | 動作には、特に影響を与えない                                       |
|          | F11   | 細く見える、目立つ  |
|          | F02   | 回しやすい  |
| 上面に電源マーク | M04   | 単なるしゃれたデザインとの認識、動作には影響しなかった                          |
|          | M02   | デザインは動作にあまり関係なし                                      |
|          | F02   | 押す場所、倒す・スライドの方向、回す範囲のデザインイメージ                        |
|          | F08   | 棒線は向き・目盛情報、一部描欠け円は回す（範囲）情報                           |
| 上面に赤い直線  | M04   | 目盛・スタート位置を連想、回しなさいといったイメージ、今までで一番目立つ、「押す」は中央に●のデザインか |
|          | M02   | 動作はサイズ・形の方が優先  |
|          | F11   | テキストチャを標準に操作する                                       |
|          | F08   | スタート位置、方向の情報、色が目立つ                                   |

また、反応時間も観察した（データ省略）。平均反応時間は検証実験の方がアフォーダンス実験より速くなる傾向を得たが、実験の慣れによるものか、あるいはテキストチャ効果によるものか判断できなかった。

### 4.3 分析

検証実験の結果は2つの意味を持つ。第一に、本研究の仮説である「スイッチ操作は、主としてスイッチの形状因子に誘発されて決定される」ことを検証し、形状因子以外の要因の影響度を定量的に考察することである。第二は、この結果をより積極的に活用し、スイッチの形状因子から誘発される操作パターンが被験者間でばらつく（一致しない）場合に、形状以外の因子を活用することで、設計者が想定する操作パターンの誘発確率を向上させることである。

第一について、結果からわかるとおり、スイッチ操作の誘発確率は、円柱スイッチの形状因子だけでなく、テクスチャ・色・記号の因子の影響を受けることがわかる。ただし、その影響は限定的と言える。図4-4、図4-6、図4-8をみてわかるとおり、操作カテゴリの変化は、テクスチャ等を付加しない場合の操作カテゴリ境界線付近でのみ起こっており、形状によらずすべての操作が回転操作になると言うような大きな影響は観察されていない。テクスチャなどの付加は、操作カテゴリが切り替わるような境界付近の操作器形状において付加的に作用すると言える。すなわち、操作カテゴリの出現確率は、第一義的には本研究の基本仮説のとおり「スイッチの形状因子に誘発」されており、さらに、その操作カテゴリが切り替わるような境界部分の形状においては、テクスチャ、色、記号などの付加によって誘発される操作カテゴリが変わりうるということになる。

このことは、そのまま第二の目的である「形状以外の設計因子の活用」に繋がる。たとえば、実験において付加した「側面の縦縞」や「上面の赤い直線」は、実験者の意図したとおり操作カテゴリが切り替わる境界の形状において、回す操作の領域を拡張するような変化をもたらしている。この操作カテゴリが切り替わる境界の形状とは、第2章で得られた操作カテゴリの出現確率マップにおいて、操作カテゴリが被験者間でばらつく（一致しない）形状領域である。すなわち、このように被験者間で誘発される操作がばらつくようなスイッチ形状を、設計の事情でどうしても使用したい場合に、「側面の縦縞」や「上面の赤い直線」を付加することで、誘発される操作カテゴリを被験者間で一致させることができる。被験者間でばらつきが少ないということは、すなわち、設計者の意図する操作が多くユーザで自然に誘発されることを意味している。

一方で「上面に電源マーク」を付加した場合の誘発操作パターンの変化は、実験者の意図とは異なるものであった。電源マークを付加した場合は、押す操作領域が拡張すると期待されたが、実際には回す操作領域が拡張している。これは「電源マーク」という記号の意味自体がユーザに伝わっていない（＝ユーザのリテラシがない）ことに起因している。表4-1に示すように、被験者の一部が「電源マーク」ではなく「回転の目盛り」と認識していることがわかる。なお、今回の実験では条件設定をしなかったが、実際の電源スイッチは、高さゼロ（スイッチ正面とスイッチ周辺の高さが同じ）で設計されることが多く、回す、倒す、引くという操作ができないようになっている。この場合は、必然的に押す操作が強く誘発されることになる。

#### 4.4 まとめ

本研究の仮説である「スイッチ操作は、主としてスイッチの形状因子に誘発されて決定される」ことを検証するために、家庭内にある実際のスイッチ製品を調査・分類し、「側面の縦縞」「電源マーク」「上面の赤い直線」というテクスチャ・記号を備えた円柱オブジェクトを用いて、誘発操作の実験を行った。この結果、テクスチャ・記号の付加により、誘発動作は操作カテゴリが切り替わる形状の境界付近で作用し、回す動作など記号によって誘発される操作カテゴリを強める働きがあることがわかった。しかしながら、その効果は限定的であり、あくまでも主要因が形状因子であることも確認できた。この効果を利用すれば、第2章、2.4節でまとめたガイドラインの形状因子に、さらに、その効果を強めるテクスチャ・記号を付加することで、誘発される操作行動を幅広いユーザーで一致させることができるようになる。

## 第5章 スタディの今後の課題及び展望

スイッチの形状因子に基づいてどのような操作行動が誘発されるかという問題は、人間工学分野で古くから観察・研究されているものである。本研究では、このような伝統的な課題にあえて再挑戦し、その結果をガイドラインとしてまとめるだけでなく、デジタルハンドという可視化ツールとして提供し、設計支援に役立てられるようにした。このような研究を行った背景には、利用者（ユーザ）の世代間のばらつきが大きい時代であるということと、さまざまなスイッチが氾濫しユーザが混乱するようになってきているという2つの時代背景があった。現在の生活者現役世代を考えると、高度成長期、IT革命期など、それぞれ世代ごとに異なる経験を有しており、それが機械に対するリテラシの違いとして蓄積されていると思われる。このような中で、伝統的な人間工学の教科書にあるとおりの設計指針で、本当にユーザの行動に即した、直感的に使いやすいインタフェースデザインができるかどうか、疑問がある。白黒テレビで育った世代、オフィス機器で育った世代、家電製品で育った世代、携帯電話で育った世代でそれぞれにリテラシが違い、スイッチ形状から誘発される操作パターンが違ってしかるべきである。これは、設計者が実際のユーザが取り得る操作パターンを想定できないことを意味している。「こんな使い方をするユーザがいるとは思わなかった」ではなく、「こんな使い方をするユーザもあり得る」ことを設計段階で提示することが、この解決に大きく役立つであろう。本研究は、世代間での誘発行動の違いを明らかにし、それを設計に活かすためのガイドラインを与えるとともに、設計者にその操作パターンを「見える」ようにした点で、意義のある成果であると考えている。

今回の研究成果は、スイッチ類のユニバーサルデザインを進める上で、機械システム製造メーカーに対して、(1) 例外的なスイッチ操作行動をできるだけ発現させないような、スイッチ形状設計やテキスト・記号の付加のガイドラインを提供するとともに、(2) あり得るユーザの操作行動を可視化することで、デザイナーへの注意喚起を実現する。また、これらの成果に基づけば、(3) 操作目的に応じたスイッチ部品の削減と共用化も可能となろう。

一方で、今回の研究成果は、あくまでも円柱形スイッチに限定されたものであり、また、被験者数も30名程度にとどまっており、確率分布の信頼性は必ずしも高いものではない。また、特異な操作パターンを誘発される被験者のデータも十分ではなく、さらに、それらの被験者が、なぜ特異な操作パターンを誘発されるのかを知るためのバックデータ（いままでの機器操作履歴に繋がるデータ）も得られていない。今回の手法をより一般化し、ユーザ層に応じて、誰にも誤操作のない、自然な操作を誘発する機器設計を進めるためには、より多くの被験者（数百から数千人）で、さらに、被験者個人の機器操作履歴情報まで含めたデータ収集を行う必要がある。今回のフィジビリティスタディ（以下スタディという）から、われわれは、このような今後の研究課題を解決するための指針を得ることができた。第一は、実験方法である。今回は、ユーザが直接触れて動かすような円柱の模型を準備し、それを用いた実験を行った。ただし、実際にはユーザは円柱模型を「見た」段階で、自分が行うべき操作カテゴリを「決定」しており、実験において実際に操作を行わせたことで、操作カテゴリが変わったわけではなかった。これは、実験が仮想化できる可能性を示唆している。すなわち、円柱の大きさを実感できるように自分の仮想の手（デジタルハンド）と円柱をPC画面上のCGとして提示し、その手

に、どのような操作をさせるかを「回答」させるだけで、実験できる可能性がある。これは、いわば Web 実験であり、アンケート調査と同様に大量の被験者を短時間に集め、全国レベルで同時実験を行うことができる。DHRC では、感性実験において Web を用いた実験を行った経験があり、全国 300 人の被験者実験を 3 時間ほどで終えることができた。このような Web 実験の採用により、より多くの被験者データを効率的に収集できるようになるだろう。本スタディで得られた第二の知見は、実験条件の絞り込みである。今回の研究では、スイッチのさまざまな姿勢での実験を行ったが、結果を見る限り、形状因子の影響が第一義であり、姿勢因子の効果はあまり大きくなかった。すなわち、スイッチの形状を中心として、円柱に限らず、さまざまな形状に対する誘発操作行動のデータを、Web 実験を通じて収集することで、より信頼性の高い、汎用的な誘発操作行動データベースが構築されると考えている。誘発操作行動が、ユーザの経験や履歴に依存するのであれば、単に世代間に差があるだけでなく、国の間にも差があることが想定される。将来的には、国際的な操作行動データベースを構築する必要があるかも知れない。その観点からも、本スタディで方法と条件の絞り込みを実現でき、Web 実験への可能性を開いた意義は大きい。

DHRC では、人体の全身的な体形や運動、さらには、手の詳細な構造、寸法、運動を再現するデジタルヒューマンソフトウェア“DhaibaHand”の研究開発を進めている。このプロジェクトでは、実際にあり得る個人差を再現するために体形や運動のデータベースを構築している。本スタディは、従来の体形や基本運動とは異なる、認知-行動のデータベース蓄積に相当する。どのような経験属性を持つユーザが、対象となる操作器形状を視覚認知して、それに応じてどのような誘発行動をどのような確率で発現するのかをモデル化し、デジタルヒューマンソフトウェアに組み込むことで、人間中心設計の支援が大きく展開できるであろう。

## 参考文献

- (1) 機械システム振興協会、人間生活工学研究センター：デジタルハンド技術に関する調査研究報告書，2004.
- (2) 機械システム振興協会、人間生活工学研究センター：デジタルハンド技術の開発に関するフイージビリティスタディ報告書，2005.
- (3) J. J. Gibson (古崎敬ほか訳)：生態学的視覚論 (原題 The Ecological Approach of Visual Perception)，サイエンス社，1985.
- (4) 金指 央樹，宮田 なつき，太田 順：円筒形インターフェイスのサイズとユーザーの手のサイズを考慮した操作方法，ヒューマンインタフェースシンポジウム2006，倉敷，2006.
- (5) 遠藤維，金井理，岸浪建史，持丸正明，河内まき子ほか：デジタルハンドとプロダクトモデルとの統合によるアーゴデザイン支援システムの開発 (第1報) - システム機能構成及び基本把持姿勢生成機能 -，日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会，1A1-N-036，2005.
- (6) 持丸正明：ユーザビリティ評価のための人体構造・機能モデルDhaiba，日本AEM学会誌，13-3，215-220，2005.
- (7) 宮田なつき，金井理：デジタルハンドモデルと3次元CADの統合，精密工学会誌，71-4，431-434，2005.

— 禁無断転載 —

システム開発 18-F-13

操作器形状に応じた誘発運動を再現するデジタルハンド  
開発に関するフィージビリティスタディ報告書  
— 要 旨 —

発行 平成19年3月

発行者 財団法人 機械システム振興協会

〒108-0073 東京都港区三田一丁目4番28号

電 話 03-3454-1311

社団法人 人間生活工学研究センター

〒550-0012 大阪市西区立売堀一丁目4番12号

電 話 06-6539-2348

本報告書の内容を公表する際は、あらかじめ上記にご連絡ください。