

修士論文

記憶活動支援のための
単位動作マッチングによる操作弁別

木内 豊

2005年2月3日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

木内 豊

審査委員：

木戸出 正継 教授

小笠原 司 教授

河野 恭之 助教授

記憶活動支援のための 単位動作マッチングによる操作弁別*

木内 豊

内容梗概

本論文では、人が日常生活で物体に対して働きかける行為である“操作”を弁別するシステムの実現を目標とする。

近年、計算機の小型・軽量化や記憶装置の大容量化により、ユーザが計算機を常に身につけることで、計算機がユーザの状況を理解しさまざまなサービスを提供するというウェアラブルコンピューティングが注目を浴びている。ウェアラブルコンピューティングにおけるアプリケーション実現のために、人の記憶活動を支援するシステムの実現に向けた研究が増加している。ユーザの日常生活における操作を弁別することで、ユーザが遂行中のタスクを推測する情報としてシステムは使用できる。タスクに応じた情報をシステムがユーザに提示することで、記憶活動の支援が期待できると考えられる。

本論文では、ユーザの記憶活動を支援する情報を得るために、ユーザが実行した操作を弁別する。操作を弁別する手法として“単位動作マッチング”を提案する。単位動作は、操作を弁別するために学習サンプルとして与えられた時系列データ群の間で、共通する変化を起こす区間の動作である。単位動作マッチング手法は少ない学習サンプルで操作を弁別することが可能であるという特徴を持つ。これにより、操作弁別システムを利用するユーザが弁別させる操作を追加する際、少ない作業負荷でユーザはシステムに操作を弁別可能にすることができる。

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0351049, 2005年2月3日.

本提案手法は少ない学習サンプルでユーザの操作を弁別することが可能である。本提案手法の有効性を示すために、操作弁別システムに学習サンプルを与えることで操作の弁別性能を調査した。本実験では、単位動作マッチング手法を採用した操作弁別システムが日常生活で有効であることを示すため、人の日常生活で頻出する操作を観測・抽出して評価対象とした。

キーワード

操作弁別，単位動作マッチング，ウェアラブルコンピューティング，拡張記憶，パターン認識

A Unit Action Matching Method to Discriminate Object Operations for Supporting Human Memory Activities *

Yutaka Kiuchi

Abstract

This paper presents a method named "Unit Action Matching" for discriminating "operations" to an object. Unit Action is the actions that occurring common modification among time series data given as learning samples. Unit Action Matching enables learning operation using fewer learning samples. Thanks to this feature, when the user wants to add operations to discriminate, he/she can arrows the system to discriminate the operations.

In recent years, because of miniaturization computers and enhancing storage capacity, the wearable computer is closely watched that provides various services sense user's state. To realize applications using wearable computer, the researches that support humans memory activities are advanced.

This approach enables recognition user's operations using fewer learning samples. Experiment shows availability of this approach of recognition. We selected operations for experiment based on appearance ratio in daily basis to show the system is availableness in daily basis.

Keywords:

discriminating operations, Unit Action Matching, wearable computing, augmented memory, pattern recognition

* Master's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0351049, February 3, 2005.

目次

1. 序論	1
1.1 背景	1
1.2 動機	2
1.3 目的	4
1.4 論文の構成	4
2. 操作弁別システム	6
2.1 用語の定義	6
2.2 日常生活における「操作」の調査	7
2.2.1 調査方法	8
2.2.2 調査結果	8
2.2.3 物体と操作の分類	8
2.2.4 操作要素	10
2.2.5 動作の分類	12
2.2.6 操作の周期性の分類	13
2.2.7 考察	15
2.3 システム設計	17
2.3.1 ユーザの利用形態を考慮したシステム要件	17
2.3.2 ハードウェア構成	25
2.3.3 システム構成	31
3. 操作弁別手法	33
3.1 単位動作マッチングの概念	33
3.2 処理フロー	34
3.3 区間の定義	36
3.4 各区間が持つデータの形式	40
3.4.1 データ区間	40
3.4.2 操作区間	41

3.4.3	単位動作区間	42
3.5	基本処理	44
3.5.1	単位動作区間の抽出	44
3.5.2	区間マッチング	46
3.6	学習・弁別処理	51
3.6.1	単位動作区間セグメントセンサ群候補の列挙	51
3.6.2	代表データの選出	52
3.6.3	操作弁別閾値の導出	52
3.6.4	操作区間の確定	54
4.	実験	59
4.1	実験内容	59
4.1.1	学習サンプルの選択	59
4.1.2	パラメータの設定	62
4.1.3	学習パターンの評価	62
4.2	実験結果	64
4.3	考察	69
4.3.1	実験 1	69
4.3.2	実験 2	69
4.3.3	実験全体における正答受理率，誤答棄却率	70
4.3.4	学習パターンが作成できなかった操作	71
5.	結論	72
5.1	まとめ	72
5.2	関連研究との比較	72
5.3	今後の展望	73
	謝辞	77
	参考文献	78
	付録	81

A. 日常生活における操作と操作要素の構成	81
B. 操作弁別実験結果	99

目 次

1	1 物体あたりの操作数分布	10
2	手指関節動作（手指の曲げ伸ばし）	14
3	手指関節動作（指間の開閉）	14
4	姿勢動作	14
5	位置動作	14
6	周期性操作（往復周期性）	15
7	周期性操作（回転周期性）	15
8	データグローブ概観	27
9	データグローブのセンサ配置	27
10	体座標系	29
11	ISOTRAK II 概観	30
12	ISOTRAK II トランスミッタ装着位置	30
13	ISOTRAK II レシーバ装着位置	30
14	操作弁別システム構成	31
15	操作弁別システム処理フロー	34
16	区間の定義（ホッチキス）	40
17	操作区間の確定	55

表 目 次

1	タスクの例（粉末のインスタントコーヒーを入れる）	7
2	弁別対象操作	61
3	実験結果（手指操作弁別閾値）	64
4	実験結果（学習・テストサンプル数）	66
5	日常生活における操作と操作要素の構成	81

1. 序論

1.1 背景

近年，計算機とその入出力機器やセンサの小型化と高性能化，無線ネットワークの広域・広帯域化に伴い，ウェアラブルコンピューティングの研究が盛んになっている [1]．これは，ユーザが着用した小型の計算機が，ユーザの置かれている状況を観察し，最適なサービスを能動的に提供するための技術である．ウェアラブルコンピュータは常にユーザと対話可能な状態である．そのため，ユーザが操作を意識することなく行えるインタフェースの実現が可能であるという特徴を持っているので，多様な面からユーザの日常生活の補助に応用されることが期待できる．

日常生活において人は意識的・無意識的に関わらず，記憶活動を恒常的に行っている．例えば，人は待ち合わせの時間，集合場所，人物のプロフィール，行事の内容等，場所や時間に関わらず頻繁に記憶活動を行う必要がある．しかし人の脳の記憶容量には限界がある上に，時間とともに記憶の劣化が発生するため，重要な情報を忘却してしまうことが度々ある．このような忘却に対して人は，後に利用すると予測される情報をメモするなどの行為によってある程度対応することができる．しかし，身の回りに筆記具やメモ用紙などのメモを取ることができる環境が無い場合や，メモを取るほど重要でないと思われた情報が後から重要となる場合には，メモするという手段は役に立たない．また頻繁にメモを取るとは，メモを取る機会や閲覧する量を増加させるため，人に多大な負担を掛ける．

この問題に対して，ウェアラブルコンピュータなど計算機を用いてユーザの記憶活動を支援するという拡張記憶システムに関する研究が行われている [2][3]．このシステムは，ウェアラブルコンピュータを装着したユーザの状態を推定し，状態に応じたユーザの過去に所属する情報をその場で提供する．これらの研究では人が装着したセンサから，映像や音声などの視聴覚情報，歩行などの運動情報，気温や湿度などの環境情報をいつでも・どこでも獲得し，得られた情報を基にしてユーザの記憶支援を行うシステムの実現を目指している．代表的な研究としては，Rhodes の Remembrance Agent システムが挙げられる [4]．このシステムは，ユーザが特定の場所で利用したファイルやメールなどの利用履歴を時間情報と共

に記録する．そしてユーザが再び同じ時間帯に同じ場所を訪れたときに，ユーザに利用される可能性が高いファイルやメールを利用履歴から自動的に選択する．それにより，ユーザが過去に利用したファイルの存在を思い出すことを支援する．Lamming らの Forget-me-not システム [5] は，室内につけられたセンサとユーザが装着した Active Badge を用いてユーザの存在する場所を認識し，何時・どの場所で・どの人物と出会い，どの書類を渡したかの履歴情報を記録する．ユーザは携帯端末からこの履歴情報を参照することで記録した情報を想起することができる．塩見らは，展示場に設置した無線タグ読取装置や誘導のための赤外線カメラといったユビキタスセンサからの情報を利用して，ロボットや人の位置や行動の履歴を取得し，人に対してロボットに展示案内や相互作用を行うシステムを提案している [6]．相澤らはウェアラブルデバイスを使用してユーザの体験映像を記録することで，ユーザの一生相当の体験を保存する研究を行っている．その際に，ユーザが欲しいと思った映像を効率よく提示させるために，ユーザの脳波を使用することで個人にとって興味のある映像部分を選び出す手法を提案している [7]．Feiner らは DGPS (Differential Global Positioning System) と磁気センサ，慣性ヘッドトラッカーの組み合わせを用いて屋外環境におけるナビゲーションと注釈提示の応用例を実現している [8]．河村らは個人の記憶や環境の出来事を実世界の物理的オブジェクトに関連付けて記録する Ubiquitous Memories システムを提案している [9]．このシステムは，個人の記憶を実世界の物体と関連付けて記録・検索するシステムである．上岡らは，移動した実世界の物体がどこにあるかを忘れてしまうことを防ぐために，ウェアラブル装置を用いて物体の検索を行う I'm Here! システムを提案している [12]．これらの例に挙げたようなウェアラブルコンピューティングによる拡張記憶を実現することで，日常生活で頻繁に発生する記憶の劣化や忘却を軽減し，日常生活における記憶活動や思考をより豊かにすることが期待できる．

1.2 動機

ユーザに適切な記憶活動の支援を拡張記憶システムが行うためには，ユーザが欲しいと思う情報とシステムが与える情報との乖離が小さくなるようなキーを選

択してシステムに与える必要がある。ユーザが欲しいと思った情報を推測するためのキーの一つとして、ユーザが把持した物体が挙げられる。様々なタスクの実行パターンを、ユーザが物体を把持した履歴からあらかじめ抽出しておけば、システムはユーザの操作系列の変化パターンからユーザの実行中のタスクを推定することができる。システムがユーザのタスクを認識することによって、ユーザに対してそのタスクを支援するための情報を提供する拡張記憶システムが実現できる。例えば、インスタントコーヒーをいれるタスクを実行中のユーザが、砂糖壺を置いた場所をユーザが失念して探し回ることが無いように、カップやスプーン、インスタントコーヒーの瓶をユーザが把持した履歴を用いて、あらかじめユーザが最後に砂糖壺を把持した際の視点画像をユーザに提示する。これにより、ユーザは砂糖壺の場所を認識することができると考えられる。しかしユーザが把持した物体の履歴からユーザのタスクを推定することは、ユーザの行動の統一性が低い場合には困難である。例えばユーザが複数のタスクを並行して遂行している場合、双方のタスクに関わる物体の把持をユーザが行うため、把持履歴が複雑になり、ユーザが遂行しているタスクを推定し難くなる。

ユーザが把持している物体に加え、その物体に対する働きかけをシステムが弁別することができれば、複数の操作が実行可能な物体であってもユーザが遂行しているタスクを推定することが容易になる。また、ユーザの行動を物体の把持という単位から、操作というより細かな単位へ分けることができる。そのため、ユーザが遂行中のタスクをより高精度に推測することが可能になり、適切かつ即時的にタスク遂行を支援できると考えられる。例えば玄関の鍵を把持したまま施錠することを失念したままユーザが外出した場合の記憶支援を考える。ユーザが玄関のドアの開け閉めを行った後に、玄関の鍵を掛ける操作を行わなかった事を、操作履歴からシステムは警告を行うことができる。これにより、「玄関を施錠する」ことをユーザが忘却することを防ぐことができる。このように、操作を弁別することは日常生活におけるユーザのタスクを推定する情報として有効であると考えられる。

1.3 目的

本研究では日常的な記憶活動を支援するために、ウェアラブルコンピュータを装着したユーザが行う物体に対する手による働きかけを学習・弁別する手法を提案する。少ない学習サンプルで効率的に操作を学習・弁別するために、データグローブと位置方向センサから取得される時系列データを、単位動作と呼ぶ細かな動作に分割して学習する。また、日常生活で頻出する操作を弁別の対象として選択し、提案した手法による操作弁別性能を評価する。

1.4 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

2章 操作弁別システムの設計

日常生活における「操作」を調査するためにウェアラブルカメラを装着して日常における視野画像の取得を行う。その後、視野画像から得られた「操作」の特徴について考察する。それを基に、操作弁別システムの設計を行う。

3章 操作弁別手法

本論文で提案する操作の学習・操作手法の手順について述べた後、各手法の詳細について述べる。

4章 実験

提案する操作学習・弁別手法を用いて行った実験の概要、分析結果、考察について述べる。

5章 結論

本論文の内容をまとめ、今後の課題や展望について述べる。

2. 操作弁別システム

本章ではユーザに対するタスク支援を実現するための操作弁別システムの構成を設計する．最初に，日常生活における操作に関する用語を定義する．次に，日常生活においてどのような「操作」が人間によって行われており，それがどのような特徴を持つのかを調査する．最後に，操作弁別システムの構成について述べる．

2.1 用語の定義

本節では，日常生活における物体に対する働きかけに関する用語として，操作・物体・タスクを定義する．

- 操作
ユーザがある目的を達成するために実行する日常世界の対象への働きかけ
- 物体
ユーザが実行する働きかけの対象
- タスク
ユーザがある目的を達成するために実行する操作と物体の組み合わせの系列

日常生活において人は多くの手段で操作を行っているため，限られたセンサであらゆる操作を弁別することは困難である．本研究では操作の多くに使用されている人の手（利き手）による操作に着目して，ユーザのタスクを推定することを考える．

例として、「粉末のインスタントコーヒーを入れる」というタスクが操作と物体の組み合わせによってどのように表現されるかを表1に示す。

表 1: タスクの例 (粉末のインスタントコーヒーを入れる)

手順	物体	操作
1	コーヒーの瓶	蓋を開ける
2	スプーン	粉末(コーヒー)をすくう
3	コーヒーの瓶	蓋を閉める
4	砂糖壺	蓋を開ける
5	スプーン	粉末(砂糖)をすくう
6	砂糖壺	蓋を閉める
7	ポット	ボタンを押す(湯を出す)
8	スプーン	混ぜる

2.2 日常生活における「操作」の調査

物体に対して人が日常生活に実行する「操作」について調査した。本調査によって、以下の項目について考察する。

1. 人が日常においてどのような操作を実行しているか
2. 操作が実行される際の動作の構成
3. 操作が実行される際の動作の特徴
4. 操作弁別に必要なデバイス構成

2.2.1 調査方法

被験者にウェアラブルカメラを装着して日常生活を過ごしてもらうことで、日常生活における体験を録画した映像（体験映像）を取得してもらった。実験の条件を以下に述べる。

被験者 情報科学系 大学院生 2名

日数 5日間/人（計10日間）。

取得日の条件 大学の研究室で研究活動を行う日（日常的な活動日）

時間帯 起床後の着替え後から、帰宅まで

記録デバイス ハンディDVレコーダ

記録メディア DVテープ

カメラ視野角 垂直視野角85度、水平視野角110度

2.2.2 調査結果

調査の結果を付録Aの表5に示す。ユーザが何らかの対象に対して行った手による操作のうち、一般的な操作であると主観的に思われるものを列挙した。また、人が操作を行う際の動作の特徴について分類した。

2.2.3 物体と操作の分類

操作を列挙する際、用途や保管場所・使用場所等の下記の属性で物体をカテゴリ分けして整理した。

携帯物：日常生活間でユーザが常に身に着けている物体。操作する場所の制約をユーザに与えにくい。

筆記用具・文房具：手書きの文書を作成する際や工作を行う際に操作する物体。調査対象が学生であるため、研究活動中に高い頻度で操作が行われる。

読み物：文書の閲覧の際に操作する物体．調査対象が学生であるため，研究活動中に高い頻度で操作が行われる．また，研究の合間の休憩のために，雑誌や漫画などが定期的に操作される．

PC：PC本体とPC周辺機器（マウス，キーボード，モニタ等）．調査対象が情報科学研究科の学生であるため，研究活動中に非常に高い頻度で操作が行われる．

設備：特定の場所に設置されている物体．場所の制約を受ける．

食品容器：食物が入っている容器や，物を食べる際に操作される物体．食事は生活に欠かせない行為であるため，周期的，定期的に高い頻度で操作が行われる．

飲料容器：飲み物が入っている容器や，嗜好品（茶等）を作る際に操作される物体．食品容器同様，周期的，定期的に高い頻度で操作が行われる．

家事：工作用具と筆記用具以外の文房具．精密性を要求される作業に使われることが多いため，操作の際に特徴的な手指の動作が行われることが多い．

身嗜み・清潔：手洗い等の清潔性の保持や身嗜みを整える際に操作する物体．操作が行われる頻度は低いが，一日に必ず一回は操作が行われる等，習慣性が存在しやすい．

体験映像：操作を調査するために体験映像を取得する目的で操作した物体．そのため調査期間中，高い頻度で操作された．

また，各操作を操作要素で構成した．操作要素による操作の構成については，次節で詳細に述べる．

調査により列挙できた物体数は136，操作数は233であった．よって，ユーザが把持し得る物体数に対する操作数の平均は， $233/136 = 1.71$ となる（図1）に1物体あたりの操作数の分布をグラフで示す．これより，人が日常生活で操作する物体に関連づけられた操作数が1～3個の物体が大半を占めていることがわかる．

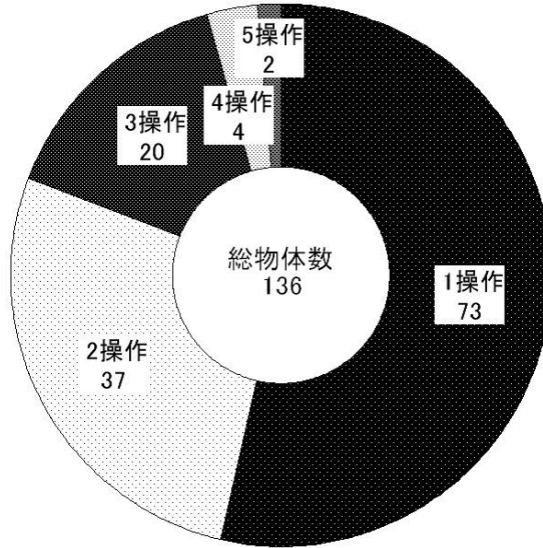


図 1: 1 物体あたりの操作数分布

2.2.4 操作要素

操作を実行する際の手の運動を分析すると、細かな運動の特定のパターンで操作を表現することが分かる。例えば、ユーザがスプーンで「容器の中の粉末をすくう」操作を実行するためには、以下に示す運動を実行する。

1. スプーンの下端を容器の中に入れる
2. 粉末をスプーンの先に載せる
3. スプーンの下端を容器から出す

本研究では、操作を構成する要素として人が認知できる最小単位を操作要素と定義する。調査の結果、操作要素による操作の構成には法則性が存在する事が確認できた。以下にそれらの法則性を列挙する。

連続性 AB

操作要素 A , B に連続性がある場合、 AB と表す。操作要素の連続性とは、「操作を実行するために、 A を実行した後に B を実行する」特徴を示す。連続性の例

として、スプーンで「容器の中の粉末をすくう」操作を示す。操作要素 A, B, C を以下のように割り当てると、操作「容器の中の粉末をすくう」は $ABCD$ と表すことができる。

A : スプーンの上端をつまむ

B : スプーンの下端を容器の中に入れる

C : 粉末をスプーンの下端に載せる

D : スプーンの下端を容器から出す

周期性 A^*

操作要素 A に周期性がある場合、 A^* と表す。操作要素の周期性とは、「操作を実行するために、 A を 1 回～複数回実行する」特徴を示す。周期性の例として、スプーンで「容器の中をかき混ぜる」操作を示す。操作要素 A, B, C を以下のように割り当てる。

A : スプーンの上端をつまむ

B : スプーンの下端を容器の中に入れる

C : 容器の内周に沿ってスプーンの先端を 1 周させる

D : スプーンの下端を容器から出す

操作要素 C が実行される回数が 1 回～複数回である場合、操作「容器の中をかき混ぜる」は ABC^*D と表すことができる。

周期性については 2.2.6 節で詳細に述べる。

選択性 $A|B$

操作要素 A, B に選択性がある場合、 $A|B$ と表す。操作要素の選択性とは、「操作を実行するために、 A または B を実行する」特徴を示す。選択性の例として、

キーボードで「タイプする」操作を示す．操作要素 A, B, C, \dots を以下のように割り当てる．

A : ' A 'キーに指を添える

B : ' B 'キーを指を添える

C : ' C 'キーを指を添える

D : 指を添えたキーを押し下げる

⋮

操作要素 A, B, C, \dots のいずれかを実行することで操作が実現される場合, $(A|B|C|\dots)D$ と表すことができる．

2.2.5 動作の分類

人が手（指）を動かすために使用可能な関節の部位は複数存在している．操作は関節の動きによって実現されるので，操作の特徴は関節の動きに現れる．人が操作を実行する際の手の動作の特徴を，関節の動きによって分類することが可能だと考えられる．本研究では，関節の動きによって，動作を手指関節動作・姿勢動作・位置動作の3種類に分類した．

- 手指関節動作

操作を実行する際，手指の関節の曲がりによって手形状自身が変わる動作を手指関節動作と呼ぶ．手指の曲げ伸ばしと指間の開閉が手指関節動作に該当する（図2）（図3）．「ホッチキスで紙を留める」，「はさみで紙を切る」等の操作が手指関節動作を特徴的に表す操作として挙げられる．

- 姿勢動作

操作を実行する際，手首の体に対する位置関係が変わる動作のうち，体に対する手の向きが変わる動作を姿勢動作と呼ぶ（図4）．手首の関節の曲がりや主に姿勢動作に寄与する．「コーヒーの瓶の蓋を回して開ける」，「鍵で開錠する」等の操作が姿勢動作を特徴的に表す操作として挙げられる．

- 位置動作

操作を実行する際，手首の体に対する位置関係が変化する動作のうち，体に対する手の座標が変化する動作を位置動作と呼ぶ（図5）．肘や肩の関節の曲がりや主に位置動作に寄与する．「冷蔵庫のドアを開ける」，「電動ポットのボタンを押す」等の操作が位置動作を特徴的に表す操作として挙げられる．

2.2.6 操作の周期性の分類

操作の周期性について分類する．操作は周期性の有無によって非周期性操作と周期性操作に分類した．さらに，周期性操作は往復周期性操作と回転周期性操作に分類した．

- 非周期性操作

操作を実行する際，操作内の動作が繰り返し発生しない操作を非周期性操作と呼ぶ．「ホッチキスで紙を留める」，「鍵で錠を開ける」等の操作が非周期性操作として挙げられる．

- 周期性操作

操作を実行する際，動作が周期性を持つ操作を周期性操作と呼ぶ．ユークリッド空間上で運動が停止する点の有無によって，周期性操作を往復周期性と回転周期性に分類する．

- － 往復周期性操作

操作を実行する際，ユークリッド空間上で運動が停止する周期性操作を往復周期性操作と呼ぶ（図6）．「包丁で千切りをする」，「シャープペンのボタンを押して芯を出す」等の操作が往復周期性操作の例として挙げられる．往復周期性操作は，手の運動から1周期分の動作の区間を決定することが容易である．例えば，動作の起点や終点をユークリッド空間上で運動が停止する点から決定できる．



図 2: 手指関節動作
(手指の曲げ伸ばし)



図 3: 手指関節動作
(指間の開閉)



図 4: 姿勢動作

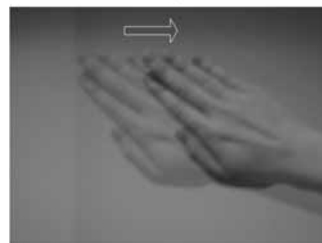


図 5: 位置動作

－ 回転周期性操作

操作を実行する際、ユークリッド空間上で運動が停止しない周期性操作を回転周期性操作と呼ぶ(図7)。「スプーンでカップ内を混ぜる」操作が回転周期性操作の例として挙げられる。操作を実行する際にユークリッド空間上で運動が停止しないため、動作が継続的に行われているように見える。そのため回転周期性操作は、運動が停止する点を起点や終点として1周期分の動作区間を決定することが困難である。

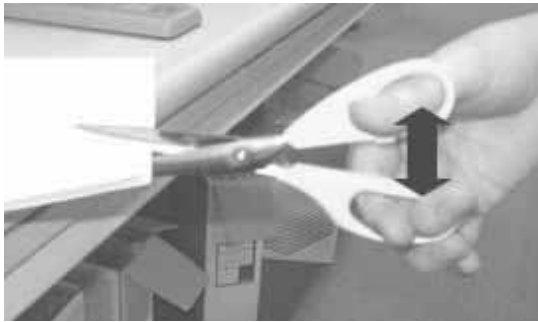


図 6: 周期性操作
(往復周期性)



図 7: 周期性操作
(回転周期性)

2.2.7 考察

操作を操作要素で構成することにより、システムに操作要素を弁別させることで操作弁別が可能になると考えられる。操作要素には操作を特徴的に表現するものが存在する。例えばスプーンで「容器の中をかき混ぜる」操作では、「容器の内周に沿ってスプーンの先端を1周させる」操作要素の方が、「スプーンの先端を容器の中に入れる」操作要素よりも、操作を特徴的に表現していると考えられる。これは、「先端を1周させる」ことで「混ぜる」という操作が実行されるためで、「先端を容器の中に入れる/出す」要素は「混ぜる(1周する)」事前や事後の動作を表す要素だからである。本研究では、操作を特徴的に表現する操作要素を実

行する際の動作をシステムに学習させることにより，ユーザが実行した操作を弁別する．

動作の分類結果より，ユーザが実行した操作を弁別するためには，手指・位置・姿勢という3種類の動作が取得できるようなデバイスが必要であることが分かる．

2.3.2節でこれらの動作が取得できるシステム的设计について述べる．

操作要素が周期性を持つ操作において中に繰り返される動作の回数が不定の操作を弁別する場合，繰り返される動作の回数に依存しない手法が必要になる．5.3節でこれらの设计について述べる．

2.3 システム設計

本節では本研究で提案する操作弁別システムの構成について述べる。

2.3.1 ユーザの利用形態を考慮したシステム要件

本節では、操作弁別システムの要件について、記憶支援システムを使用するユーザの利用形態を考慮しながら述べる。

本システムは、ユーザに対して日常生活での記憶支援を行う。常にユーザに対して記憶支援を行うことを目的とするため、本システムはウェアラブルデバイスで実現する。ユーザが実行した操作は、デバイスにより入力されるユーザの動作情報をウェアラブルコンピュータで解析することで弁別される。システムによってユーザに提供される情報は、ヘッドマウントディスプレイ等の出力デバイスで出力する。

拡張記憶システムに組み込まれた操作弁別システムを想定して、記憶支援を実現するために検討すべき内容について列挙する。

学習サンプル

システムに操作を学習させる際にユーザが与えるサンプルについて述べる。非周期性操作の開始点と終了点をユーザが指定することによって、その区間の動作情報をシステムに与える。

周期性動作の操作区間は、操作の開始から終了までの区間をユーザが指定する方法と、1周期の動作区間をユーザが切り出して指定する方法が挙げられる。回転周期性操作は1回分の動作を切り出すことが困難なため、操作の開始から終了までの区間をユーザが入力することでシステムに学習させる手法が望ましい。

システムにエラーサンプルを与える手法/与えない手法

エラーサンプルとは、ユーザが「物体を把持しているが、操作を実行していない」区間とする。システムに操作を学習させる際に、エラーサンプルを与える手

法と与えない手法が考えられる．それぞれの手法の特徴について述べる．

- エラーサンプルを与える手法

長所：ユーザが「操作を実行していない区間」を学習に使用できるため，操作を実行している区間としていない区間を弁別する精度が高くすることができる

短所：エラーサンプルを入力するコストが大きい

- エラーサンプルを与えない手法

長所：エラーサンプルを入力する必要が無い

短所：ユーザの操作をシステムに弁別させるための閾値を決定することが困難になる

本研究では弁別精度の向上を図るために，エラーサンプルを入力する手法を採用する．エラーサンプルを入力するコストを減少させるために，ユーザに学習サンプルを与えられた際に，同時にエラーサンプルをシステムが取得する手法を提案する．以下にその手順を示す．

1. 学習させたい操作を数回繰り返す
2. サンプルを取得する区間（操作を繰り返した区間全体）を指定する
3. 学習サンプル（操作区間）を指定する
4. サンプルを取得する区間から操作区間を取り除いた区間をエラーサンプルとしてシステムに取得させる

物体認識をする手法/しない手法

操作を弁別する手法として，システムが操作を弁別する前に，システムが物体を認識する手法としない手法が考えられる．それぞれの手法の特徴について述べる．

- 物体認識をする手法

物体をあらかじめ登録しておき，ユーザが把持した物体を認識してから操作を弁別する手法．

長所：ユーザが把持した物体に関連付けられた操作のみが弁別の対象になるため，弁別精度が高くなる

短所：物体を登録するコストが大きい

- 物体認識をしない手法

物体をあらかじめ登録せずに，ユーザの動作情報のみから操作を弁別する手法．

長所：物体を登録する必要が無い

短所：物体認識をする手法に比べ，弁別精度が劣る

2.2 節の調査の結果，ユーザが実行し得る操作は少なくとも 233 種類存在している．これらの操作には，ユーザの手の動作が類似するものが存在している．例えば，携帯電話のボタンを押す操作と，テレビのリモコンのボタンを押す操作は，動作が類似していると考えられる．そのため，これらの操作を動作から弁別することは困難である．2.2 節の調査の結果より，ユーザが把持し得る物体の数は 136 種類存在している．ユーザが把持し得る物体の数に対する，操作の数の平均は， $233/136 = 1.71$ となる．ユーザが実行する操作を物体に関連付けられた操作に絞り込むことで，1 物体ごとにおおよそ 1 ~ 3 種類の操作を弁別すれば良いことになる．本研究では操作の弁別精度の向上を図るため，ユーザが把持した物体を認識する手法を採用する．

操作弁別の物体/操作への特化

物体を認識してから操作を学習・弁別する手法には，物体に特化する手法と操作に特化する手法が挙げられる．以下に，それぞれの手法の特徴を述べる．

- 物体に特化する手法登録した物体ごとに操作を学習させる手法．

長所：ユーザが把持した物体に関連付けられた操作のみが弁別の対象になるため、弁別精度が高くなる

短所：システムに学習させるためのユーザのコストが大きい

- 操作に特化する手法

あらかじめシステムに操作を学習させておき、新たな物体を登録する際に、学習させておいた操作を登録する手法。例として、物体「ボールペンA」とに関連付けられる操作が「書く」「ボタンをロックする」であった場合の学習手順を示す。ユーザはあらかじめ「書く」「ボタンをロックする」「キャップを開ける」等の操作をシステムに学習させておく。新たな物体「ボールペンA」をシステムに登録する際に、「ボールペンA」に操作「書く」「ボタンをロックする」を関連付ける。それにより、あらかじめ学習しておいた操作「書く」「ボタンをロックする」を弁別する。

長所：新たな物体を登録する際、一度登録した操作は学習する必要が無いため、コストが小さい

短所：物体に特化する手法と比較すると弁別精度が劣る

操作に特化する手法は、学習のコストを減少させることが可能だが弁別精度が劣る。例えば、細いペンで操作「書く」を学習した後に、太いペンを登録した場合、ペンの持ち方等から「書く」操作が異なるなどの理由からの弁別精度が減少する。本研究では操作の弁別精度の向上を図るため、ユーザが把持した物体を認識する手法を採用する。

操作弁別のユーザへの特化/非特化

操作を学習・弁別する手法には、ユーザに特化する手法とユーザに特化しない手法が挙げられる。以下にそれぞれの手法の特徴を述べる。

- ユーザに特化する手法

ユーザに特化する学習・弁別手法では、ユーザごとに操作を学習する。学習

の際，ユーザは学習用のサンプルをシステムに入力する．学習用のサンプルとして，ユーザが操作を実行する際の動作をシステムが取得する．このサンプルからシステムは弁別用の辞書を作成する．この弁別用の辞書を使用して，システムはユーザの操作を弁別する．システムはこの辞書を，学習サンプルを入力したユーザのみに使用する．

長所：ユーザの手の動作に現れる個人差が，認識精度に影響を与えにくい
ユーザが任意の操作を登録することができる

短所：ユーザごとに操作を学習させなければならないため，ユーザが学習サンプルを入力するコストが大きくなる

- ユーザに特化しない手法

ユーザに特化しない学習・弁別手法では，あらかじめ操作を学習しておく．学習の際，複数の被験者から学習用のサンプルをシステムに入力する．学習用のサンプルは，被験者が操作を実行する際の手の動作から取得される．これらのサンプルから，システムは弁別用の辞書を作成する．この弁別用の辞書を使用して，システムはユーザの操作を弁別する．システムはこの辞書を，あらゆるユーザに共通して使用できる．

長所：ユーザごとに操作を学習させる必要が無い

短所：ユーザの動作に個人差が存在する場合，弁別精度が低下する

本研究では，高精度で操作の弁別を実行するために，ユーザに特化して学習する手法を採用する．

サンプル取得量の減少

本研究では弁別精度の向上を目指すために，物体，操作，ユーザごとに操作をシステムに学習させなければならない．そのため，学習のコストが大きくなる．ユーザにとって使いやすいシステムであるためには，一つの操作の学習に必要な

サンプルの量をなるべく少なくする必要がある。本研究では、センサから取得される時系列データを単位動作と呼ぶ細かな動作に分割してマッチングすることで、なるべく少ないサンプルで操作を学習する手法を提案する。操作を学習・弁別する手法の詳細は3章に示す。

物体の登録・認識ハードウェア

物体を認識する手法としては、ウェアラブルカメラによって画像認識を行う手法やRFID タグをリーダで読み取る手法が挙げられる。以下に、それぞれの特徴を述べる。

- ウェアラブルカメラによる画像認識
ウェアラブルカメラは、低電力で動作する小型のカメラである。このカメラをユーザの頭部や胴体に装着することにより、ユーザの視点から見た画像を取得することができる。上岡は、赤外・カラー複合撮像デバイスを使用してユーザが把持した物体を記憶・検索するシステムを提案している [10]。

長所：物体にタグ等を貼り付ける必要が無く、環境に影響を与える必要が無い

短所：認識の精度が保障されない

- 外観が似ている物体が複数存在する場合、認識ミスを起こす可能性が高い
 - 把持した物体がカメラの視野外に存在する場合は認識不可能
 - 物体とカメラの間に障害物が存在する場合は認識不可能
 - 照明の環境によって認識の精度が左右される
- RFID タグによる認識

RFID(Radio Frequency Identification) は電磁誘導を用いた非接触の物品認識システムで、コイン型やカード型をした小型のタグを非接触型タグリーダで読み取ることによって物体を認識することができる [11]。RFID タグを

利用して把持物体を認識する手法として、ユーザの腕部に RFID タグリーダを装着する方法が挙げられる。物体に予め RFID タグを貼り付けておき、これを腕部のリーダで読み取らせることで物体をシステムに認識させることができる。

長所：リーダがタグを読み取れる限り確実に物体を認識できる

短所：物体に予めタグを貼り付ける必要があるため、コストがかかる
腕部のリーダが認識できる位置にタグを貼り付けなければならない

本研究では操作を学習・弁別する手法に主眼を置く。そのため、ユーザが把持した物体を認識する方式として RFID を採用するものとし、ユーザが物体を把持したとき、システムはユーザが把持した物体を確実に認識するものとする。

動作の取得ハードウェア

操作を弁別するためには、ユーザの手指や腕の動作を取得する必要がある。手指や腕の動作を取得する手法としては、ウェアラブルカメラでの画像認識・データグローブや位置方向センサ等の物理情報が取得できるセンサの装着が挙げられる。以下にそれぞれの手法の特徴を述べる。

- カメラによる画像認識

- ウェアラブルカメラによる画像認識

ウェアラブルカメラを用いて画像認識を行うことで、手の位置や形状を取得する。寺部らは、赤外線反射光を解析して、平面物体をなぞる指先の軌跡を検出する入力インタフェースを提案している [13]。

長所：手にデバイスを装着する必要が無いため、日常生活に影響を与えにくい

短所：把持物体の認識手法と同様、認識の精度が保障されない

– 固定カメラとマーカによる画像認識

手にマーカを取り付けて固定カメラにより撮影し、画像処理によって手の位置や形状を取得する [20][?]

長所：認識精度がウェアラブルカメラによる画像認識より高い

短所：カメラが設置されている環境でしか実装できないため、ユーザの日常生活に対する支援が困難

● 物理センサによる物理情報取得

– データグローブによる手指形状取得

データグローブは、ユーザの手に装着する入力デバイスである。データグローブには、ユーザの指の主要な関節に位置する部分にセンサが配置されている。センサはユーザの指の関節の曲がり具合を計測する。データグローブは、センサが計測した関節の曲がり具合を計算機に出力することができる。

長所：画像認識技術に比べて、高精度で手指の形状が取得できる

短所：手の体に対する位置や方向を取得できないグローブに装着感があるため、日常生活に支障が出る

– 位置方向センサによる手指座標取得

位置方向センサは、任意の対象の位置や方向をトラッキングする入力デバイスである。位置方向センサはトランスミッタとレシーバで構成される。トランスミッタから出力される超音波や電磁波をレシーバで受信することによって、トランスミッタを原点としたレシーバの座標を取得することができる。

長所：画像認識技術に比べて、高精度で手の位置や方向が取得できる

短所：手の詳細な形状を取得するためには、指先や主要な関節に多数のレシーバを取り付けなければならない

手指の位置方向情報からでは手指の形状が推測しにくい

本研究では手の動作を高精度で取得できる環境を想定する．そのためにデータグローブを使用して手指の形状を取得し，位置方向センサを使用して手の位置と方向を取得する．

2.3.2 ハードウェア構成

本小節では本研究で提案する操作弁別システムのハードウェア構成について述べる．本研究では操作を実行する際の動作を取得するためのデバイスとしてデータグローブと位置方向センサを使用する．

データグローブ

- 概要

本操作弁別システムでは 5DT 社製の Data Glove 16 (図 8) を採用した．このデータグローブを使用することで，14 の関節の曲がり具合の時系列データから手指関節動作を取得する (図 9) ．

- 仕様 [14]

サンプリングレート 最大 100Hz

ダイナミックレンジ 各チャンネルごとに 8 ビット

グローブワイヤ長 30 m

- キャリブレーション

ユーザの手の大きさや装着具合による出力の差異を無くす為に，データグローブの入力のキャリブレーションを行う．データグローブを装着した状態で力を入れずに手指の関節を曲げ伸ばしする．その際の各センサからの入力の最小値・最大値を記録しておき，入力の値が 0.0 ~ 1.0 に納まるよう以下の式で正規化する．

$$of_{t,i} = \frac{of_{t,i}^* - of_{min,i}}{of_{max,i} - of_{min,i}} \quad (1)$$

ここで、 $of_{t,i}^*$ 、 $of_{t,i}$ は時刻 t におけるセンサ i の正規化前と後のセンサからの入力を示す。また、 $of_{min,i}$ 、 $of_{max,i}$ はキャリブレーション時にセンサから入力される最小値と最大値を示す。

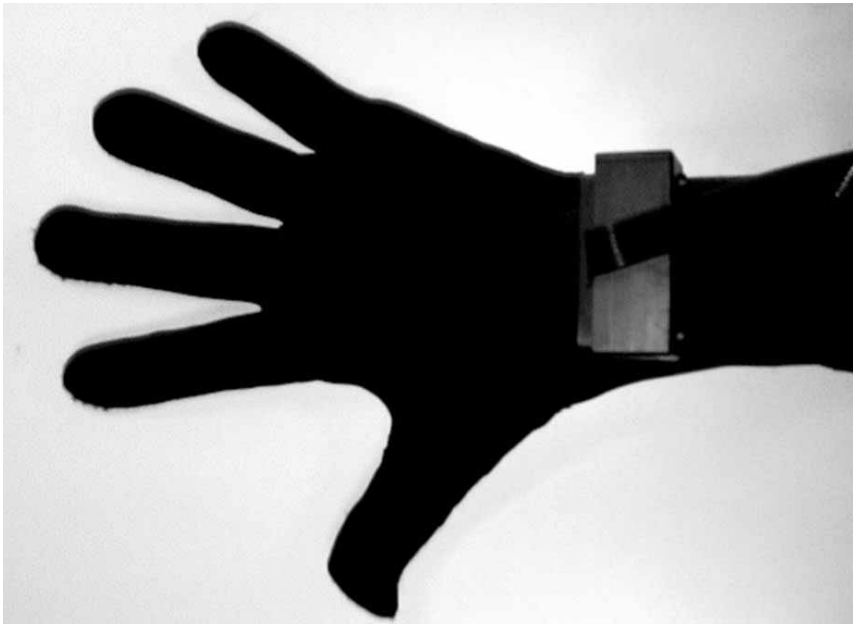


図 8: データグローブ概観

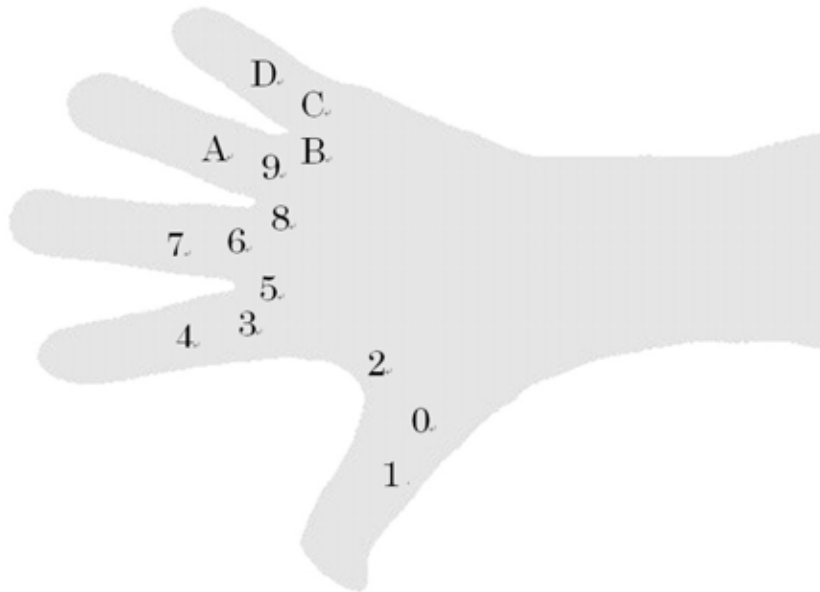


図 9: データグローブのセンサ配置

位置方向センサ

- 概要

本操作弁別システムでは Polhemus 社の 3SPACE ISOTRAK II 図 11 を採用した。ISOTRAK II は、磁気によってトランスミッタとレシーバの相対的な 3 次元位置座標値 (X,Y,Z) とオイラー角 (azimuth Ψ , elevation Φ , roll Θ) の 6 自由度を時系列データとして取得できる。Isotrak II のトランスミッタをユーザの背部に、レシーバをユーザの手首に装着することによって、ユーザの体に対する手首の座標を取得することが可能になる (図 12)(図 13)。

- 仕様 [15]

サンプリングレート 最大 60Hz

ダイナミックレンジ 各チャンネルごとに 16 ビット

トランスミッタワイヤ長 120inch

レシーバワイヤ長 240inch

測定範囲 トランスミッタを原点とした半径 75cm の半球内

- センサの設置・キャリブレーション

ユーザの両肩の中間点をを中心とした座標系を体座標系とする。体座標系を以下のように定義する (図 10)。

原点 ユーザの背部，両肩の中間点 (図 12)

X ユーザが起立して正面を向いた場合，ユーザの左方向

Y ユーザが起立して正面を向いた場合，ユーザの上方向

Z ユーザが起立して正面を向いた場合，ユーザの正面方向

手首位置方向は位置方向センサを使用して取得する。手首位置は体座標系における手首の座標で表される。手首方向は体座標系における手首の方向で表される。

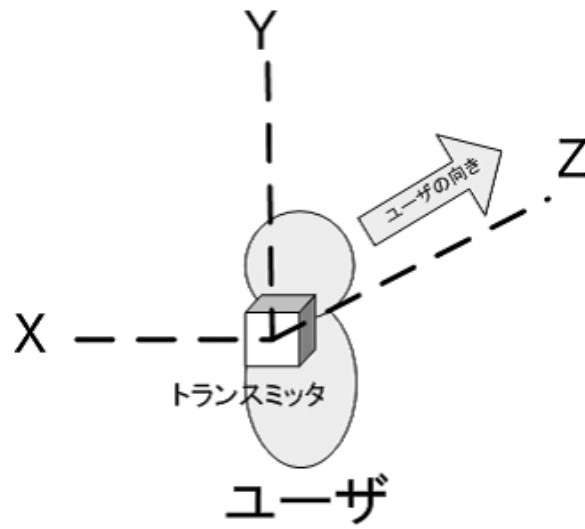


図 10: 体座標系

各軸の距離を，ユーザの両肩間の距離が 1.0 となるようにキャリブレーションする．

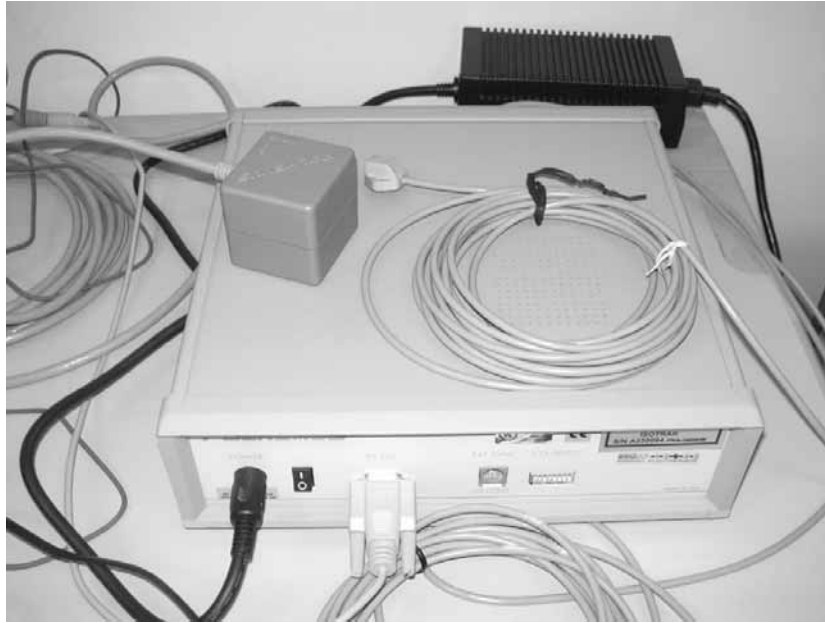


図 11: ISOTRAK II 概観



図 12: ISOTRAK II
トランスミッタ装着位置



図 13: ISOTRAK II
レシーバ装着位置

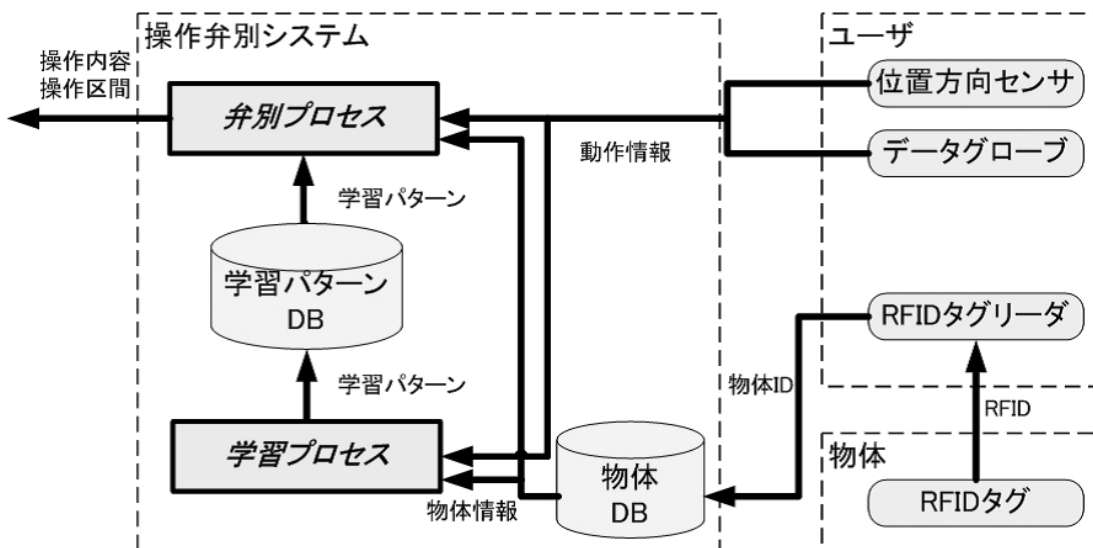


図 14: 操作弁別システム構成

2.3.3 システム構成

本研究で提案する操作弁別システムの構成を図 14 に示す。

- 物体データベース (物体 DB)

物体データベースには物体情報が保管される。物体情報は物体名・物体 ID とその物体に関連付けられた操作名・操作 ID で構成される。物体データベースに RFID タグリーダーから読み込まれた物体 ID が入力されると、物体データベースは各プロセスに物体情報を出力する。
- 学習パターンデータベース (学習パターン DB)

学習パターンデータベースには学習パターンが保管される。学習パターンは、操作を弁別する際に使用する情報である。学習パターンの詳細については 3 章で述べる。操作の弁別を実行する際に操作弁別システムは、学習パターンデータベースから学習パターンを読み込む。読み込んだ学習パターンを使用して、システムは操作弁別を実行する。
- 学習プロセス

学習プロセスは、操作を学習して学習パターンを作成する。学習プロセスの詳細な処理については3章で述べる。操作の学習には物体情報、動作情報を用いる。動作情報は手指関節動作・姿勢動作・位置動作の3つの動作の時系列情報で構成される。

- 弁別プロセス

弁別プロセスはユーザが実行した操作を弁別する。弁別プロセスの詳細な処理については3章で述べる。操作の弁別にはユーザが把持した物体の物体情報、動作情報、学習パターンを用いる。弁別の結果、操作弁別システムは操作内容と操作区間を出力する。操作内容とは、ユーザが実行した操作のIDと物体のIDで構成される情報である。操作区間とは、ユーザが実行した操作の開始時間と終了時間で構成される情報である。

3. 操作弁別手法

本章では、単位動作マッチングを行うことで操作を学習・弁別する手法について述べる。3.2 節では処理の大まかな流れについて述べる。3.3 節では本システムで使用する入力データについて定義する。3.3 節では本システムで操作弁別を行うための区間について定義する。3.5 節では各処理で頻繁に使用される基本的な処理について述べる。3.6 節では具体的な処理について述べる。

3.1 単位動作マッチングの概念

本節では単位動作マッチングの概念について述べる。人が操作を実行する際には共通している動作が存在していると考えられる。例えば、ホッチキスで紙を挟む操作を実行する際には、指の付け根の関節が曲がった後に伸びる動作が共通している。また、机の引き出しを開ける際には、手が体の方向へ移動する動作が共通する。本研究では、これらの共通した動作を単位動作として学習し、弁別に使用する手法を提案する。

学習には、学習サンプル・評価サンプル・エラーサンプルの3種類のサンプルを入力する。サンプルの定義を以下に示す。

学習サンプル・評価サンプル：操作を実行した区間（操作区間）における手指関節動作の時系列データ

エラーサンプル：操作を実行していない区間における手指関節動作の時系列データ

単位動作マッチングでは、操作を実行する際の共通した動作（単位動作）を抽出して操作をマッチングする。操作を学習する際には、単位動作を抽出するためのセンサの組み合わせ（単位動作セグメントセンサ）を決定する。決定した単位動作セグメントセンサによって、評価サンプルを操作として受理し、エラーサンプルを棄却するような閾値を決定する。

単位動作マッチングによる操作弁別システムの処理の大まかな流れを3.2 節で述べる。

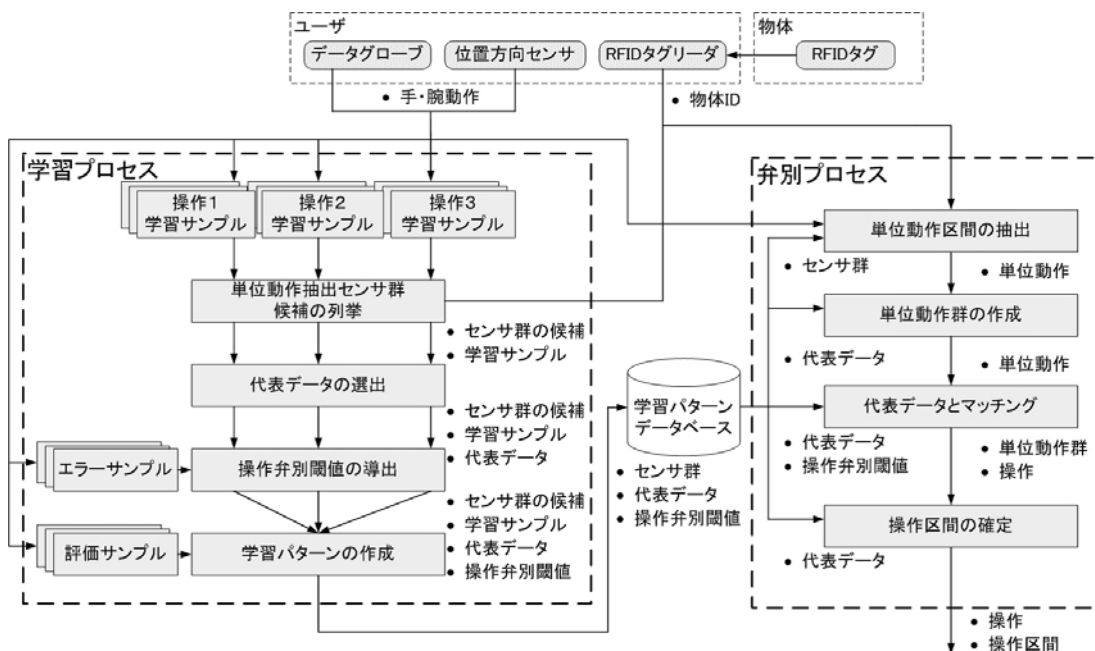


図 15: 操作弁別システム処理フロー

3.2 処理フロー

本節では処理の大まかな流れについて述べる．本論文で提案する操作学習システムは，ユーザが入力した学習サンプルを用いて操作を学習する学習プロセスと，ユーザが行った操作を弁別する弁別プロセスの二つのプロセスで構成される．学習プロセスや弁別プロセスで使用される定義や処理に関しては，3.5 節で詳細に述べる．

学習プロセス

本プロセスでは，弁別プロセスで操作を弁別するための学習パターンを作成する．学習のためには，学習サンプル・評価サンプル・エラーサンプルを入力する．本プロセスは単位動作セグメントセンサ群の候補の列挙，代表データの選出，操作弁別閾値の導出，学習パターンの作成の4つのプロセスで構成される．学習パター

ンは、後述する単位動作区間セグメントセンサ群，代表データ，操作弁別閾値の3つで構成される。

単位動作区間セグメントセンサ群候補の列挙

学習する操作に対して，単位動作が実行されている区間（単位動作区間）を抽出するためのセンサチャンネルの集合となる単位動作区間セグメントセンサ群（以下センサ群）の候補を列挙する。

代表データの選出

弁別プロセスにおいて，操作のマッチングや操作区間の確定に使用する代表データを学習サンプルの中から選択する。

操作弁別閾値の導出

弁別プロセスで入力とのマッチングが行われた結果，入力を操作として弁別するか棄却するかを決定するための閾値（操作弁別閾値）を導出する。閾値の決定には学習サンプルとエラーサンプルを使用する。学習サンプルを操作として受理し，エラーサンプルを棄却できるような閾値を決定する。

学習パターンの作成

学習パターンを作成するために，学習パターンの候補を操作ごとのセンサ群候補を組み合わせて作成する。学習パターンの候補に対して評価サンプルを入力し，最も正しく操作を受理できた学習パターンの候補を学習パターンとして決定する。

弁別プロセス

本プロセスでは，手指関節動作と物体の入力から操作を弁別する。本プロセスは，単位動作区間の抽出，単位動作群の作成，代表データとマッチング，操作区間の

決定の4つのプロセスで構成される。

単位動作区間の抽出

手指関節動作から学習パターンのセンサ群を使用することで単位動作区間を抽出し、単位動作を取り出す。

単位動作群の作成

入力された単位動作を代表データの区間に存在する単位動作の数と一致するまで集め、単位動作群を作成する。

代表データとマッチング

入力された単位動作群と代表データの区間に存在する単位動作の集合のマッチングを行い、操作を弁別する。

操作区間の確定

入力された単位動作群と操作から、代表データに関節動作が一致するように操作区間を確定する。

3.3 区間の定義

本小節では、データ区間・操作区間・単位動作区間の3種類の区間について定義する。本システムではこれらの区間を使用して操作を弁別する。

- データ区間

データ区間とは、入力データがシステムに入力されている区間である。入力データは、データグローブからの入力を示す手指入力データと、位置方向センサからの入力を示す腕入力データの二つに分けられる。ここで、データ区間における全ての入力データ区間の集合を O 、手指入力データの集合を

OF , 腕入力データの集合を OF と定義する . このとき , O が OF と OA の和集合であることを , 式 (2) , OF と OA が互いに素であることを (3) で表現する .

$$O = OF \cup OA \quad (2)$$

$$OF \cap OA = \phi \quad (3)$$

- 操作区間

操作区間とは , ユーザが操作を実行している区間である . 学習プロセスでは , ユーザが手作業で操作の開始点と終了点を入力することで操作区間を決定する . ユーザが決定した操作区間は , 学習サンプルとして操作弁別システムに入力される . 弁別プロセスでは , ユーザが実行した操作区間をデータ区間から抽出する .

ここで , データ区間における全ての操作区間の集合を A , 手指操作の集合を AF , 腕操作の集合を AA と定義する . このとき , A が AF と AA の和集合であることを式 (4) , AF と AA が互いに素であることを (5) で表現する .

$$A = AF \cup AA \quad (4)$$

$$AF \cap AA = \phi \quad (5)$$

また , 操作区間内の手指入力データの集合 AF , 操作区間内の腕入力データの集合 AA と定義すると , AF が OF に含まれることを式 (6) , AA が OA に含まれることを式 (7) で示す .

$$AF \subset OF \quad (6)$$

$$AA \subset OA \quad (7)$$

- 単位動作区間・非単位動作区間

単位動作区間とは，操作弁別システムによって機械的に切り出される区間である．単位動作区間は，単位動作が行われている区間を示す．単位動作は，操作区間内のユーザの手指や腕による操作の特徴を表す動作で，2つの操作区間の類似性を導出する際に使用される．非単位動作区間は，操作区間から単位動作区間を取り除いた際に残る，連続した区間である．単位動作区間・非単位動作区間を動作の部位によって，手指と腕に分類する．

- － 手指単位動作区間・手指非単位動作区間

手指単位動作区間は，手指関節曲がりの時間当たりの変化量が，手指単位動作を切り出すためのある閾値を上回る区間を示す．ここで，手指単位動作区間の集合を UF ，手指非単位動作区間の集合を \bar{UF} と定義する． UF ， \bar{UF} が AF に含まれることを式 (8) で示す．

$$UF, \bar{UF} \subset AF \quad (8)$$

手指操作区間の集合 AF の元 AF_n は唯一の手指操作集合 PF_n を持つ． PF_n は (9) で表される．

$$PF_n \subset AF_n \quad (9)$$

$$PF_n = UF^{AF_n} \quad (10)$$

AF が UF と \bar{UF} の和集合で表されることを (11)， UF と \bar{UF} が互いに素であることを式 (12) で示す．

$$AF = UF \cup \bar{UF} \quad (11)$$

$$UF \cap \bar{UF} = \phi \quad (12)$$

- － 腕単位動作区間・腕非単位動作区間

腕単位動作区間は，腕関節曲がりの時間当たりの変化量が腕単位動作を切り出すための，ある弁別閾値を上回る区間を示す．ここで，腕単

位動作区間の集合を UA , 腕非単位動作区間の集合を $\bar{U}A$ と定義する .
 UA , $\bar{U}A$ が ΛA に含まれることを式 (13) で示す .

$$UA, \bar{U}A \subset \Lambda A \quad (13)$$

ΛA が UA と $\bar{U}A$ の和集合で表されることを (14) , UA と $\bar{U}A$ が互いに素であることを式 (15) で示す .

$$\Lambda A = UA \cup \bar{U}A \quad (14)$$

$$UA \cap \bar{U}A = \phi \quad (15)$$

腕操作区間集合 ΛA の元 ΛA_n は唯一の腕操作集合 PA_n を持つ . PA_n は (16) で表される .

$$PA_n \subset \Lambda A_n \quad (16)$$

$$PA_n = UA_n^{\Lambda A} \quad (17)$$

ここで , P_n を手指操作集合 PF^n と腕操作集合 PA^n の和集合で表す .

$$P^n = PF^n \cup PA^n \quad (18)$$

操作区間から単位動作区間がシステムによって切り出される例を示す . 日常的な操作を行った際の手指関節動作が切り出された例を図 16 に示す . 図の横軸は時間の遷移を示す . 縦軸は各チャンネルからの入力値を示す . 図 16 はホッチキスで紙を留める操作を実行した際のデータ区間を示す . 表示の簡易化のため , 図 16 ではデータグロブのセンサチャンネル 2,3,6,B に割り当てられている手指データ入力値のみを示す . ホッチキスで紙を挟む瞬間と離す瞬間に単位動作が抽出されている事が分かる .

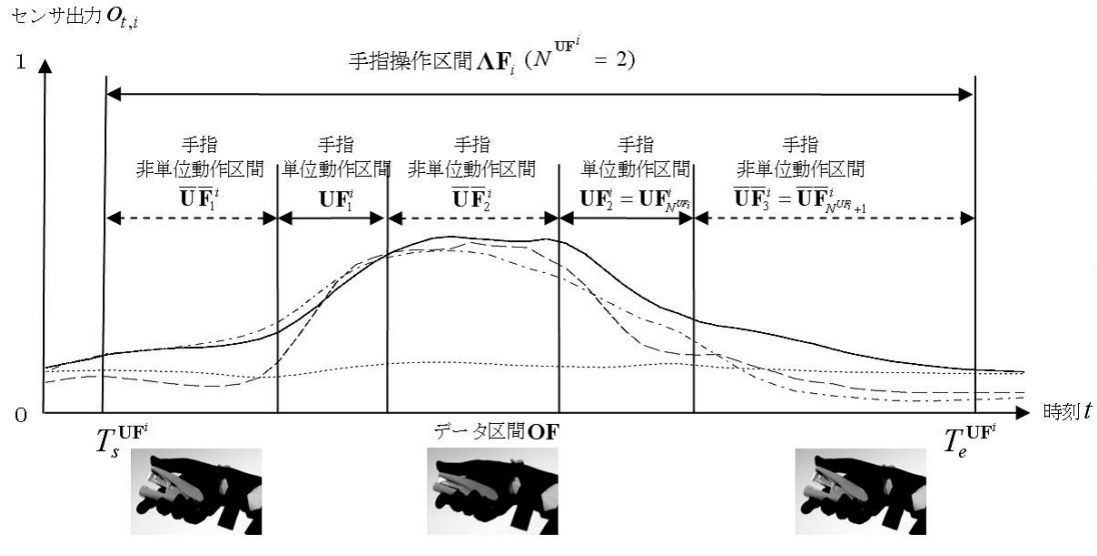


図 16: 区間の定義 (ホッチキス)

3.4 各区間が持つデータの形式

3.4.1 データ区間

手指データ区間

データグローブの各センサチャネル $i (1 \leq i \leq 14)$ におけるサンプル時刻 $t (1 \leq t \leq N^O)$ の出力値を $of_{t,i}$ とする．ここで，手指のデータ区間を示すデータグローブの時系列データ OF を (19) で表現する．また，時刻 t におけるデータグローブの全チャネルの出力 of_t を (20) で表現する．ここで， N^O は O におけるサンプル数とする．

$$OF = \begin{bmatrix} of_{1,1} & of_{2,1} & \dots & of_{N^O,1} \\ of_{1,2} & of_{2,2} & \dots & of_{N^O,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ of_{1,14} & of_{2,14} & \dots & of_{N^O,14} \end{bmatrix} = [\mathbf{of}_1 \quad \mathbf{of}_2 \quad \dots \quad \mathbf{of}_{N^O}] \quad (19)$$

$$\mathbf{of}_t = \begin{bmatrix} of_{t,1} \\ of_{t,2} \\ \vdots \\ of_{t,14} \end{bmatrix} \quad (20)$$

腕データ区間

位置方向センサの各センサチャンネル $i (1 \leq i \leq 6)$ におけるサンプル時刻 $t (1 \leq t \leq N^o)$ の出力値を $oa_{t,i}$ とする．ここで，腕のデータ区間を示す位置方向センサの時系列データ \mathbf{OA} を (21) で表現する．また，時刻 t における位置方向センサの全チャンネルの出力 \mathbf{oa}_t を (22) で表現する．

$$\mathbf{OA} = \begin{bmatrix} oa_{1,1} & oa_{2,1} & \dots & oa_{N^o,1} \\ oa_{1,2} & oa_{2,2} & \dots & oa_{N^o,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ oa_{1,6} & oa_{2,6} & \dots & oa_{N^o,6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{oa}_1 & \mathbf{oa}_2 & \dots & \mathbf{oa}_{N^o} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{oa}_t = \begin{bmatrix} oa_{t,1} \\ oa_{t,2} \\ \vdots \\ oa_{t,6} \end{bmatrix} \quad (22)$$

3.4.2 操作区間

Λ を操作区間と定義する，操作区間 Λ を，操作の部位によって手指操作区間 ΛF と腕操作区間 ΛA に分類する．このときデータ区間の開始点から n 番目の操作区間 Λ_n が， n 番目の手指操作区間 ΛF_n と， n 番目の腕操作区間 ΛA_n で構成され， ΛF_n と ΛA_n の区間の開始点 λ_s^n と終了点 λ_e^n が一致することを．式 (23) で表現する．

$$\Lambda_n = \begin{bmatrix} \Lambda F_n \\ \Lambda A_n \end{bmatrix} \quad (23)$$

手指操作区間

手指操作区間の集合が N^Λ 個の手指操作区間 ΛF を持つ時, $n(1 \leq n \leq N^\Lambda)$ 番目の手指操作区間 ΛF_n (開始点: λ_s^n , 終了点: λ_e^n) は (24) で表せる.

$$\Lambda F_n = \left[\text{of}_{\lambda_s^{\Lambda_n}} \quad \text{of}_{\lambda_s^{\Lambda_n+1}} \quad \dots \quad \text{of}_{\lambda_e^{\Lambda_n-1}} \quad \text{of}_{\lambda_e^{\Lambda_n}} \right] \quad (24)$$

手指操作区間 ΛF は, 手指単位動作区間 UF と, それ以外の区間を示す手指非単位動作区間 $\bar{U}F$ を持つ. 手指単位動作, 手指非単位動作を $UF, \bar{U}F$ と表すと, n 番目の手指操作区間 ΛF_n は (25) と表すことができる. ここで, N^{UF_n} は手指操作区間 ΛF_n に含まれる手指単位動作 UF の数とする.

$$\Lambda F_n = \left[\bar{U}F_1^{\Lambda_n} \quad UF_1^{\Lambda_n} \quad \bar{U}F_2^{\Lambda_n} \quad UF_2^{\Lambda_n} \quad \dots \quad UF_{N^{PF_n}}^{\Lambda_n} \quad \bar{U}F_{N^{PF_n}+1}^{\Lambda_n} \right] \quad (25)$$

腕操作区間

腕操作区間の集合が N^Λ 個の腕操作区間 ΛA を持つ時, $n(1 \leq n \leq N^\Lambda)$ 番目の腕操作区間 ΛA_n (開始点: λ_s^n , 終了点: λ_e^n) は (26) で表せる.

$$\Lambda A_n = \left[\text{oa}_{\lambda_s^n} \quad \text{oa}_{\lambda_s^n+1} \quad \dots \quad \text{oa}_{\lambda_e^n-1} \quad \text{oa}_{\lambda_e^n} \right] \quad (26)$$

腕操作区間 ΛA は, 腕単位動作区間 UA と, それ以外の区間を示す腕非単位動作区間 $\bar{U}A$ を持つ. 腕単位動作, 腕非単位動作を $UA, \bar{U}A$ と表すと, n 番目の腕操作区間 ΛA_n は (27) と表すことができる. ここで, N^{PA_n} は腕操作区間 ΛA_n に含まれる腕単位動作 UA の数とする.

$$\Lambda A_n = \left[\bar{U}A_1^{\Lambda_n} \quad UA_1^{\Lambda_n} \quad \bar{U}A_2^{\Lambda_n} \quad UA_2^{\Lambda_n} \quad \dots \quad UA_{N^{PA_n}}^{\Lambda_n} \quad \bar{U}A_{N^{PA_n}+1}^{\Lambda_n} \right] \quad (27)$$

3.4.3 単位動作区間

手指単位動作区間

手指の単位動作 UF において, データグローブの各センサチャネル $i(1 \leq i \leq 14)$ におけるサンプル時刻 $t(1 \leq t \leq N^{UF})$ の出力値を $u_{f,t,i}$ とする. ここで, 手指に

よる単位動作の時系列出力データ UF を (28) とする . また , 時刻 t におけるデータグループの全チャンネルの出力 uf_t を (29) とする . ここで N^{UF} は手指単位動作 UF のサンプル数とする .

$$UF = \begin{bmatrix} uf_{1,1} & uf_{2,1} & \dots & uf_{N^{UF},1} \\ uf_{1,2} & uf_{2,2} & \dots & uf_{N^{UF},2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ uf_{1,14} & uf_{2,14} & \dots & uf_{N^{UF},14} \end{bmatrix} = [\mathbf{uf}_1 \quad \mathbf{uf}_2 \quad \dots \quad \mathbf{uf}_{N^{UF}}] \quad (28)$$

$$\mathbf{uf}_t = \begin{bmatrix} uf_{t,1} \\ uf_{t,2} \\ \vdots \\ uf_{t,14} \end{bmatrix} \quad (29)$$

腕単位動作区間

腕の単位動作 UA において , 位置方向センサの各センサチャンネル $j (1 \leq j \leq 6)$ におけるサンプル時刻 $t (1 \leq t \leq N^{UA})$ の出力値を $ua_{t,j}$ とする . ここで , 手指による単位動作の時系列出力データ UA を (30) とする . また , 時刻 t における位置方向センサの全チャンネルの出力 \mathbf{ua}_t を (31) とする . ここで N^{UA} は手指単位動作 UA のサンプル数とする .

$$UA = \begin{bmatrix} ua_{1,1} & ua_{2,1} & \dots & ua_{N^{UA},1} \\ ua_{1,2} & ua_{2,2} & \dots & ua_{N^{UA},2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ua_{1,6} & ua_{2,6} & \dots & ua_{N^{UA},6} \end{bmatrix} = [\mathbf{ua}_1 \quad \mathbf{ua}_2 \quad \dots \quad \mathbf{ua}_{N^{UA}}] \quad (30)$$

$$\mathbf{ua}_t = \begin{bmatrix} ua_{t,1} \\ ua_{t,2} \\ \vdots \\ ua_{t,6} \end{bmatrix} \quad (31)$$

3.5 基本処理

3.5.1 単位動作区間の抽出

手指単位動作区間

時刻 t におけるデータグロブのセンサチャンネル i の出力値 $of_{t,i}$ の時間微分
の値 $vf_{t,i}$ を式 (32) で求める。ただし, $\Delta t_{t,t-1}$ は時刻 t と時刻 $t-1$ における時間差
を示す。

$$vf_{t,i} = \frac{1}{\Delta t_{t,t-1}} |of_{t,i} - of_{t-1,i}| \quad (32)$$

手指単位動作を切り出す計算に用いられるセンサチャンネルの集合を S とする。
また Th^{UF} を手指による単位動作を切り出す閾値とし, 集合 S の内, 閾値 Th^{UF}
を上回る $vf_{t,i}$ を持つデータグロブのセンサチャンネルの集合を $Smax$ とする。
この時, 時刻 t における $Smax$ は式 (33) となる。

$$Smax_t = \{i | vf_{t,i} > Th^{UF}, i \in S\} \quad (33)$$

式 (32) および (33) より, 時刻 t における時間微分の値 $vf_{t,i}$ が示す集合 S または
 $Smax$ に属するセンサチャンネルを対象とした, 時間微分の最大値を $VFmax_t$ と
する。また, 時間微分の最小値 $VFmin_t$ をとする。 $VFmax_t$ および $VFmin_t$ を
式 (34) および (35) で求める。

$$VFmax_t = \max_{i \in S} vf_{t,i} \quad (34)$$

$$VFmin_t = \min_{i \in Smax} vf_{t,i} \quad (35)$$

最終的に式 (32) ~ (35) を用いて, α 番目の手指単位動作 UF_α が式 (36) として
決定される。

$$uf_k^\alpha = \begin{cases} uf_1^\alpha, (VFmax_t > Th^{UF}, of \notin UF_{\alpha-1}) \\ uf_{N^{UF_\alpha}}^\alpha, (VFmin_t \leq Th^{UF}, of_{t-1} \in UF_\alpha) \end{cases} \quad (36)$$

ここで, 手指単位動作 UF_α の開始時刻を $T_s^{UF_\alpha}$, 終了時刻を $T_e^{UF_\alpha}$ とする時,
データ uf と出力データ of は ($1 \leq k \leq N^{UF_\alpha}$) において式 (37) の関係を持つ。

$$\begin{aligned} uf_k^\alpha &= of_{T_s^{UF_\alpha+k-1}} \\ &= of_{T_e^{UF_\alpha-N^{UF_\alpha+k}}} \end{aligned} \quad (37)$$

腕単位動作区間

時刻 t における位置方向センサのセンサチャンネル i の出力値 $oa_{t,i}$ の時間微分の値 $va_{t,i}$ を式 (38) で求める .

$$va_{t,i} = \frac{1}{\Delta t_{t,t-1}} |oa_{t,i} - oa_{t-1,i}| \quad (38)$$

また時刻 t で , 手首に設置した位置方向センサのレシーバが体座標系を移動する速度 va_t^V を式 (39) によって求める .

$$va_t^V = \sqrt{va_{t,1}^2 + va_{t,2}^2 + va_{t,3}^2} \quad (39)$$

ここで , $va_{t,1}, va_{t,2}, va_{t,3}$ はそれぞれ , 体座標系における x 軸 , y 軸 , z 軸を移動する速度を表す .

また時刻 t で , 手首が体座標系を回転する速度 va_t^R を式 (40) , 及び (41) によって求める .

$$\tau_t = [oa_{t,4}, oa_{t,5}, oa_{t,6}] \quad (40)$$

$$va_t^R = \cos^{-1} \frac{\tau_t \cdot \tau_{t-1}}{|\tau_t| |\tau_{t-1}|} \quad (41)$$

ここで , $oa_{t,4}, oa_{t,5}, oa_{t,6}$ はそれぞれ体座標系における x 軸 , y 軸 , z 軸を中心に回転する角度を表す .

$Th^{UA,V}, Th^{UA,R}$ を腕単位動作を切り出す閾値とする . 式 (38) ~ (41) を用いて , 腕による α 番目の単位動作 UA_α が式 (42) として決定される .

$$ua_k^\alpha = \begin{cases} ua_1^\alpha, (va_t^V > Th^{UA,V} \text{ or } va_t^R > Th^{UA,R}) \\ ua_N^\alpha, (va_t^V \leq Th^{UA,V} \text{ or } va_t^R \leq Th^{UA,R}) \end{cases} \quad (42)$$

ここで , 腕単位動作 UA_α の開始時刻を $T_s^{UA_\alpha}$, 終了時刻を $T_e^{UA_\alpha}$ とする時 , データ ua と出力データ oa は $(1 \leq k \leq N^{UA_\alpha})$ において式 (43) の関係を持つ .

$$\begin{aligned} ua_k^\alpha &= oa_{T_s^{UA_\alpha} + k - 1} \\ &= oa_{T_e^{UA_\alpha} - N^{UA_\alpha} + k} \end{aligned} \quad (43)$$

3.5.2 区間マッチング

操作区間の類似性を求めるために，操作区間に含まれる単位動作同士の距離を求める．本小節では手指単位動作同士と腕単位動作同士の距離の導出方法についてそれぞれ述べた後，それらを使用して操作区間の類似性を導出する方法について述べる．

手指単位動作マッチングの重みの導出

本研究では手指単位動作同士の類似性を求める際に，学習サンプル集合 Ψ に含まれる単位動作 \mathbf{XF} ， \mathbf{YF} を用いて，データグロブのチャンネルごとの出力に対する重みを決定する．チャンネルごとに DP(Dinamic Programing) マッチング [16] [17] を行い，その DP 距離の平均から重みを導出する．

手指単位動作 \mathbf{XF} が学習サンプル集合 ψ の操作区間集合 A^j に含まれることを (44) で示す．

$$\mathbf{XF}_k \subset A^k, k \in \Psi \quad (44)$$

以下に単一のチャンネル l のみの出力に注目した DP マッチングの定義を示す．

$$dfl(x, y, l) = uf_{x,l}^{\mathbf{XF}} - uf_{y,l}^{\mathbf{YF}} \quad (45)$$

$$gfl(1, 1) = dfl(1, 1) \quad (46)$$

$$0 \leq i_k - i_{k-1} \leq 1, \quad 0 \leq j_k - j_{k-1} \leq 1 \quad (47)$$

$$i_1 = j_1 = 1, \quad i_k = N^{\mathbf{XF}}, \quad j_k = N^{\mathbf{YF}} \quad (48)$$

ここで式 (45) の $dfl(x, y, l)$ は，チャンネル l における二つの出力値 $uf_{x,l}^{\mathbf{XF}}$ ， $uf_{y,l}^{\mathbf{YF}}$ の距離を求める関数を表現し，式 (46) は DP の初期条件，(47) は単調性と連続性の条件 (48) は境界条件を示す．

マッチングには式 (58) に示す対照型のパスを用いる．

$$gfl(x, y) = \min \left[\begin{array}{l} gfl(x, y-1) + dfl(x, y, l) \\ gfl(x-1, y-1) + 2dfl(x, y, l) \\ gfl(x-1, y) + dfl(x, y, l) \end{array} \right] \quad (49)$$

以上の定義から，手指単位動作 \mathbf{XF} ， \mathbf{YF} のチャンネル l における距離 $DFL(\mathbf{XF}, \mathbf{YF}, l)$ は式 (50) で求められる．

$$DFL(\mathbf{XF}, \mathbf{YF}, l) = \frac{gfl(x_k, y_k, l)}{x_k + y_k} \quad (50)$$

以上の定義から，手指単位動作 \mathbf{XF} のチャンネル l における重み $wf_l^{\mathbf{XF}}$ は式 (51) で求められる．

$$wf_l^{\mathbf{XF}} = \frac{TF(\mathbf{XF}, l)}{\sum_m TF(\mathbf{XF}, m)} \quad (51)$$

$$TF(\mathbf{XF}, l) = \sum_{i, j \in \Psi} DFL(\mathbf{XF}_i, \mathbf{XF}_j, l) \quad (i \neq j) \quad (52)$$

手指単位動作マッチング

二つの手指単位動作 \mathbf{XF} ， \mathbf{YF} の距離 $DF(\mathbf{XF}, \mathbf{YF})$ はチャンネルごとに重み付けした DP マッチング (以下，重み付け DP マッチング) を用いて導出する．

ここで単位動作 \mathbf{XF} が学習サンプル集合 ψ の操作区間集合 A^j に含まれることを (53) で示す．

$$\mathbf{XF}_k \subset A^k, k \in \Psi \quad (53)$$

今回使用した重み付け DP マッチングの定義を示す．

$$df(x, y) = \sqrt{\sum_l \left\{ wf_l^{\mathbf{XF}} \cdot (uf_{x,l}^{\mathbf{XF}} - uf_{y,l}^{\mathbf{YF}})^2 \right\}} \quad (54)$$

$$gf(1, 1) = df(1, 1) \quad (55)$$

$$0 \leq i_k - i_{k-1} \leq 1, \quad 0 \leq j_k - j_{k-1} \leq 1 \quad (56)$$

$$i_1 = j_1 = 1, \quad i_k = N^{\mathbf{XF}}, \quad j_k = N^{\mathbf{YF}} \quad (57)$$

ここで式 (54) の $df(x, y)$ は二つの出力値 uf_x^{XF} , uf_y^{YF} の距離を求める関数を表現し, 式 (55) は DP の初期条件, (56) は単調性と連続性の条件 (57) は境界条件を示す. マッチングには式 (58) に示す対照型のパスを用いる.

$$gf(x, y) = \min \begin{bmatrix} gf(x, y-1) + df(x, y) \\ gf(x-1, y-1) + 2df(x, y) \\ gf(x-1, y) + df(x, y) \end{bmatrix} \quad (58)$$

以上の定義から, 手指単位動作 XF, YF の距離 $DF(XF, YF)$ は式 (59) で求められる.

$$DF(XF, YF) = \frac{gf(x_k, y_k)}{x_k + y_k} \quad (59)$$

腕単位動作マッチングの重みの導出

本研究では腕単位動作同士の類似性を求める際に, 位置方向センサのチャンネルごとの出力に対する重みを決定する. チャンネルごとに DP マッチングを行い, その DP 距離の平均から重みを導出する. 距離の平均が小さいものは, 操作区間中におけるそのチャンネルからの入力が安定していると仮定し, 重みをより大きくする. 以下に単一のチャンネルの出力のみに注目した DP マッチングの定義を示す.

本研究では手指単位動作同士の類似性を求める際に, 学習サンプル集合に含まれる単位動作 XA, YA を用いて, 位置方向センサのチャンネルごとの出力に対する重みを決定する. チャンネルごとに DP を行い, その DP 距離の平均から重みを導出する.

腕単位動作 XA が学習サンプル集合 ψ の操作区間集合 Λ^j に含まれることを (60) で示す.

$$XA \subset \Lambda^j, j \in \psi \quad (60)$$

以下に単一のチャンネル l のみの出力に注目した DP マッチングの定義を示す.

$$dal(x, y, l) = ua_{x,l}^{XA} - ua_{y,l}^{YA} \quad (61)$$

$$gal(1, 1) = dal(1, 1) \quad (62)$$

$$0 \leq i_k - i_{k-1} \leq 1, \quad 0 \leq j_k - j_{k-1} \leq 1 \quad (63)$$

$$i_1 = j_1 = 1, \quad i_k = N^{\mathbf{XA}}, \quad j_k = N^{\mathbf{YA}} \quad (64)$$

ここで式(45)の $dal(x, y, l)$ は、チャンネル l における二つの出力値 $ua_{x,l}^{\mathbf{XA}}, ua_{y,l}^{\mathbf{YA}}$ の距離を求める関数を表現し、式(46)はDPの初期条件、(47)は単調性と連続性の条件、(48)は境界条件を示す。マッチングには式(73)に示す対照型のパスを用いる。

$$gal(x, y) = \min \begin{bmatrix} gal(x, y-1) + dal(x, y, l) \\ gal(x-1, y-1) + 2dal(x, y, l) \\ gal(x-1, y) + dal(x, y, l) \end{bmatrix} \quad (65)$$

以上の定義から、腕単位動作 \mathbf{XA}, \mathbf{YA} のチャンネル l における距離 $DAL(\mathbf{XA}, \mathbf{YA}, l)$ は式(66)で求められる。

$$DAL(\mathbf{XA}, \mathbf{YA}, l) = \frac{gal(x_k, y_k, l)}{x_k + y_k} \quad (66)$$

以上の定義から、腕単位動作 \mathbf{XA} のチャンネル l における重み $wa_l^{\mathbf{XA}}$ は式(67)で求められる。

$$wa_l^{\mathbf{XA}} = \frac{TA(\mathbf{XA}, l)}{\sum_m TA(\mathbf{XA}, m)} \quad (67)$$

$$TA(\mathbf{XA}, l) = \sum_{i,j \in \Psi} DAL(\mathbf{XA}_i, \mathbf{XA}_j, l) \quad (i \neq j) \quad (68)$$

腕単位動作マッチング

二つの腕単位動作 \mathbf{XA}, \mathbf{YA} の距離 $DA(\mathbf{XA}, \mathbf{YA})$ はチャンネルごとに重み付けしたDPマッチング(以下、重み付けDPマッチング)を用いて導出する。今回使用した重み付けDPマッチングの定義を示す。

$$da(x, y) = \sqrt{\sum_l \left\{ wa_l^{\mathbf{XA}} \cdot (ua_{x,l}^{\mathbf{XA}} - ua_{y,l}^{\mathbf{YA}})^2 \right\}} \quad (69)$$

$$ga(1, 1) = da(1, 1) \quad (70)$$

$$0 \leq i_k - i_{k-1} \leq 1, \quad 0 \leq j_k - j_{k-1} \leq 1 \quad (71)$$

$$i_1 = j_1 = 1, \quad i_k = N^{\mathbf{XA}}, \quad j_k = N^{\mathbf{YA}} \quad (72)$$

ここで式(69)の $da(x, y)$ は二つの出力値 $ua_x^{\mathbf{XA}}, ua_y^{\mathbf{YA}}$ の距離を求める関数を表現し, 式(70)はDPの初期条件, (71)は単調性と連続性の条件, (72)は境界条件を示す. マッチングには式(73)に示す対照型のパスを用いる.

$$ga(x, y) = \min \begin{bmatrix} ga(x, y-1) + da(x, y) \\ ga(x-1, y-1) + 2da(x, y) \\ ga(x-1, y) + da(x, y) \end{bmatrix} \quad (73)$$

以上の定義から, 腕単位動作 \mathbf{XA}, \mathbf{YA} の距離 $DA(\mathbf{XA}, \mathbf{YA})$ は式(74)で求められる.

$$DA(\mathbf{XA}, \mathbf{YA}) = \frac{ga(x_k, y_k)}{x_k + y_k} \quad (74)$$

操作区間マッチング

本研究では, 比較元である操作集合 P_n と同数の単位動作区間を持つ比較対象である操作集合の候補 P_* との間での類似性を計算する. これを操作区間マッチング $DS(P_n, P_*)$ と呼ぶ.

操作集合 P_n と操作集合の候補 P_* 中の手指単位動作区間の数および腕単位動作区間の数が同数であることを式(75)(76)で表現する.

$$NF = N^{\mathbf{PF}_n} = N^{\mathbf{PF}_*} \quad (75)$$

$$NA = N^{\mathbf{PA}_n} = N^{\mathbf{PA}_*} \quad (76)$$

式 (54) ~ (59), (69) ~ (76) 用いて, 式 (77) に示す操作区間マッチングを行う.

$$DS(\mathbf{P}_n, \mathbf{P}_*) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{NF} \frac{DF(\mathbf{PF}_n, \mathbf{PF}_*)^2}{NF} + \sum_{m=1}^{NA} \frac{DA(\mathbf{PA}_m, \mathbf{PA}_*)^2}{NA} & (NF > 0, NA > 0) \\ \sum_{n=1}^{NF} \frac{DF(\mathbf{PF}_n, \mathbf{PF}_*)^2}{NF} & (NF > 0, NA = 0) \\ \sum_{n=1}^{NA} \frac{DA(\mathbf{PA}_n, \mathbf{PA}_*)^2}{NA} & (NF = 0, NA > 0) \end{cases} \quad (77)$$

3.6 学習・弁別処理

3.6.1 単位動作区間セグメントセンサ群候補の列挙

本研究では, 正答となる操作集合の集合である学習サンプル集合 Ψ とエラーとなる操作集合の集合であるエラーサンプル集合 Φ を用いて操作弁別の学習を行う. 本研究では, 学習サンプル区間に切り出される腕・手指単位動作区間の数が一致するセンサチャネルの集合を, 単位動作区間セグメントセンサ群の候補として全て列挙する. 式 (78) に, 学習サンプル区間に切り出される手指・腕単位動作区間の数が一致する条件を示す.

$$Same \geq |\Psi| \cdot (1 - Th^L) \quad (78)$$

ここで, $Same$ は手指・腕単位動作区間の数が一致している学習サンプルの数, $|\Psi|$ は学習サンプル数を示す. $Th^L (0 \leq Th^L < 1)$ は単位動作の数が一致している学習サンプルの許容率を示す定数で, $Th^L = 0$ の時, 単位動作の数が全ての学習サンプルで一致したものを候補として出力し, Th^L の値が上昇するほど単位動作の数が一致しないサンプルを許容する傾向を示す. $Same$ の導出式を (79) ~ (83) に示す.

$$Same = \sum_{n \in \Psi} SC(n) \quad (79)$$

$$SC(n) = \begin{cases} 1 & (N^{\mathbf{PF}_n} = Unit_F, N^{\mathbf{PA}_n} = Unit_A) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (80)$$

$$Unit_F = \max_{Same} n(n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (81)$$

$$Unit_A = \max_{Same} m(m = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (82)$$

$$Unit_F + Unit_A > 0 \quad (83)$$

ここで， $Unit_F$ および $Unit_A$ は，学習サンプル区間中に切り出される手指・腕単位動作の数の内，学習サンプル中で最も共通して切り出される数を示し，式(83)は，学習サンプル区間中に切り出される単位動作が少なくとも1つ以上存在する制約条件を表す．

3.6.2 代表データの選出

学習サンプル集合から代表データ P_R を選出する．そのために，学習サンプル集合内の操作集合間の DP 距離の二乗和を最小化するような操作が代表データとなるように，式(77)を用いた式(84)によって代表データのインデックス R を選択する．

$$R = i \mid \min \sum_{i \in \Psi, j \in \Psi} \{DS(\mathbf{P}_i, \mathbf{P}_j)\}^2 \quad (i \neq j) \quad (84)$$

3.6.3 操作弁別閾値の導出

代表データ P_R を用いたサンプル集合 $\Omega (= \Psi \text{ または } \Phi)$ に対する平均値 μ と標準偏差値 σ は式(77)を用いて式(85)および(86)で求められる．

$$\mu^\Omega = \frac{\sum_{Y_i \in \Omega} DS(\mathbf{P}_R, \mathbf{Y}_i)}{N^\Omega - 1} \quad (85)$$

$$\sigma^\Omega = \sqrt{\left(\frac{\sum_{Y_i \in \Omega} DS(\mathbf{P}_R, \mathbf{Y}_i)}{N^\Omega - 1} \right)^2 - (\mu^\Omega)^2} \quad (86)$$

学習サンプル集合から求められる正答弁別閾値 Th^Ψ は式(87)で求められる．また，エラーサンプル集合から求められるエラー棄却閾値 Th^Φ は式(88)で求めら

れる．ここで γ は閾値の強度パラメータであり， γ_Ψ の値が大きいほど受率が増加する方向に働き， γ_Φ の値が大きいほど棄却率が増加する方向に働く．最終的に操作弁別閾値 Th_{Err} は式 (89) によって求まる．

$$Th^\Psi = \mu_\Psi + \gamma_\Psi \sigma_\Psi \quad (87)$$

$$Th^\Phi = \mu_\Phi - \gamma_\Phi \sigma_\Phi \quad (88)$$

$$Th_{Err} = \begin{cases} Th^\Psi & (Th^\Psi \leq Th^\Phi) \\ Th^\Phi & (Th^\Phi \leq Th^\Psi) \end{cases} \quad (89)$$

3.6.4 操作区間の確定

図 17 に操作区間の確定例を示す．入力操作区間 Λ_α の開始点 λ_s^α および終了点 λ_e^α を確定するために，区間 M_s^R と M_s^α ，区間 M_e^R と M_e^α の DP 距離が最小になるような区間幅 i と j を導出する．

比較対象の手指操作区間 ΛF_α から，手指非単位動作である $\bar{U}F_1$ および $\bar{U}F_{N^{PF}N^{PF}+1}$ を排除した操作区間を ΛF_α^* とすると手指データ区間は (90) のように表すことができる．

$$\mathbf{OF} = \{\mathbf{OF}_{Head}^\alpha, \Lambda F_\alpha^*, \mathbf{OF}_{Tail}^\alpha\} \quad (90)$$

ただし，

$$\Lambda F_\alpha^* = \{\mathbf{UF}_1^\alpha, \bar{\mathbf{U}}F_2^\alpha, \mathbf{UF}_2^\alpha, \dots, \bar{\mathbf{U}}F_{N_\alpha^{PF}}^\alpha, \mathbf{UF}_{N_\alpha^{PF}}^\alpha\} \quad (91)$$

$$\mathbf{OF}_{Head}^\alpha = \{\mathbf{of}_1, \mathbf{of}_2, \dots, \mathbf{of}_{TF_s^{UF_1^\alpha-1}}\} \quad (92)$$

$$\mathbf{OF}_{Tail}^\alpha = \{\mathbf{of}_{TF_e^{UF_{N^{PF}N^{PF}+1}^\alpha}+1}, \mathbf{of}_{TF_e^{UF_{N^{PF}N^{PF}+2}^\alpha}+2}, \dots, \mathbf{of}_{N^{OF}}\} \quad (93)$$

ここで，手指非単位動作である $\bar{U}F_1$ および $\bar{U}F_{N_\alpha^{PF}}$ は (94) および (95) となる．

$$MF_s = \bar{U}F_1 \quad (94)$$

$$MF_e = \bar{U}F_{N^{PF}\alpha} \quad (95)$$

操作区間 Λ_α の開始点 λ_s^α と終了点 λ_e^α を式 (94) および (95) をそれぞれ i と j の変数で関数化した場合 (92) および (93) との対応より，式 (96) および (97) で表すことができる．

$$MF_s^\alpha(i) = \{\mathbf{of}_k | i \leq k \leq TF_s^{UF_1^\alpha-1}, i \in \mathbf{OF}_{Head}^\alpha\} \quad (96)$$

$$MF_e^\alpha(j) = \{\mathbf{of}_k | TF_e^{UF_{N_\alpha^{PF}}^\alpha} + 1 \leq k \leq j, j \in \mathbf{OF}_{Tail}^\alpha\} \quad (97)$$

また， MF_s^R および MF_e^R はそれぞれ (98) (99) のようになる．

$$MF_s^R = \{\mathbf{of}_k | \lambda_s^R \leq k \leq TF_s^{UF_1^\alpha} - 1\} \quad (98)$$

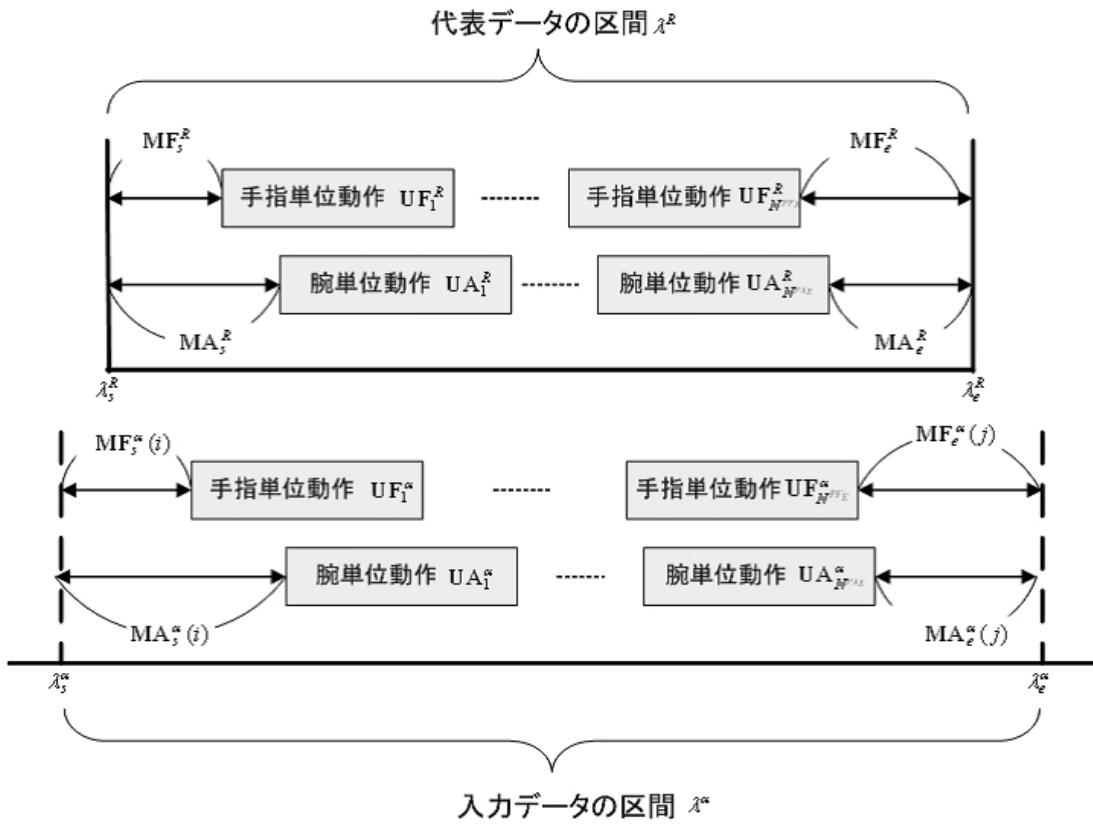


図 17: 操作区間の確定

$$\mathbf{MF}_e^R = \{\mathbf{of}_k | TF_e^{UF_N^{PA\alpha}} + 1 \leq k \leq \lambda_e^R\} \quad (99)$$

次に, 比較対象の腕操作区間 ΛA_α から, 腕非単位動作である $\bar{U}A_1$ および $\bar{U}A_{N^{PA}PA+1}$ を排除した操作区間を ΛA_α^* とすると腕データ区間は (100) のように表すことができる.

$$\mathbf{OA} = \{\mathbf{OA}_{Head}^\alpha, \Lambda A_\alpha^*, \mathbf{OA}_{Tail}^\alpha\} \quad (100)$$

ただし,

$$\Lambda A_\alpha^* = \{\mathbf{UA}_1^\alpha, \bar{\mathbf{U}}A_2^\alpha, \mathbf{UA}_2^\alpha, \dots, \bar{\mathbf{U}}A_{N^{PA}}^\alpha, \mathbf{UA}_{N^{PA}}^\alpha\} \quad (101)$$

$$\mathbf{OA}_{Head}^\alpha = \{\mathbf{oa}_1, \mathbf{oa}_2, \dots, \mathbf{oa}_{TA_s^{UA_1^\alpha-1}}\} \quad (102)$$

$$\mathbf{OA}_{Tail}^\alpha = \{\mathbf{oa}_{TA_e^{UA_{N^{PA}PA+1}^\alpha}}, \mathbf{oa}_{TA_e^{UA_{N^{PA}PA+2}^\alpha}}, \dots, \mathbf{oa}_{N^{OA}}\} \quad (103)$$

ここで, 腕非単位動作である $\bar{U}A_1$ および $\bar{U}A_{N^{PA}}^\alpha$ は (104) および (105) となる.

$$\mathbf{MA}_s = \bar{U}A_1 \quad (104)$$

$$\mathbf{MA}_e = \bar{U}A_{N^{PA}}^\alpha \quad (105)$$

操作区間 Λ_α の開始点 λ_s^α と終了点 λ_e^α を式 (104) および (105) をそれぞれ i と j の変数で関数化した場合 (102) および (103) との対応より, 式 (106) および (107) で表すことができる.

$$\mathbf{MA}_s^\alpha(i) = \{\mathbf{oa}_k | i \leq k \leq TA_s^{UA_1^\alpha-1}, i \in \mathbf{OA}_{Head}^\alpha\} \quad (106)$$

$$\mathbf{MA}_e^\alpha(j) = \{\mathbf{oa}_k | TA_e^{UA_{N^{PA}PA+1}^\alpha} + 1 \leq k \leq j, j \in \mathbf{OA}_{Tail}^\alpha\} \quad (107)$$

また, MA_s^R および MA_e^R はそれぞれ (108) (109) のようになる.

$$\mathbf{MA}_s^R = \{\mathbf{oa}_k | \lambda_s^R \leq k \leq TA_s^{UA_1^\alpha} - 1\} \quad (108)$$

$$\mathbf{MA}_e^R = \{\mathbf{oa}_k | TA_e^{UA_{N^{PA}PA+1}^\alpha} + 1 \leq k \leq \lambda_e^R\} \quad (109)$$

最終的に操作区間 Λ_α の開始点 λ_s^α および終了点 λ_e^α を (110) および (111) によって確定する .

$$\lambda_s^\alpha = \begin{cases} i | \min_{i \in \mathbf{OF}_{Head}^\alpha} DFM(\mathbf{MF}_s^R, \mathbf{MF}_s^\alpha(i)) & (TF_s^{UF_1^\alpha} \leq TA_s^{UA_1^\alpha}) \\ i | \min_{i \in \mathbf{OA}_{Head}^\alpha} DAM(\mathbf{MA}_s^R, \mathbf{MA}_s^\alpha(i)) & (TF_s^{UF_1^\alpha} > TA_s^{UA_1^\alpha}) \end{cases} \quad (110)$$

$$\lambda_e^\alpha = \begin{cases} j | \min_{j \in \mathbf{OF}_{Tail}^\alpha} DFM(\mathbf{MF}_e^R, \mathbf{MF}_e^\alpha(j)) & (TF_e^{UF_{N^{PF\alpha}}^\alpha} \geq TA_e^{UF_{N^{PA\alpha}}^\alpha}) \\ j | \min_{j \in \mathbf{OA}_{Tail}^\alpha} DAM(\mathbf{MA}_e^R, \mathbf{MA}_e^\alpha(j)) & (TF_e^{UA_{N^{PA\alpha}}^\alpha} < TA_e^{UA_{N^{PA\alpha}}^\alpha}) \end{cases} \quad (111)$$

ここで $DFM(\mathbf{MF}^R, \mathbf{MF}^\alpha)$ は区間 $\mathbf{MF}^R, \mathbf{MF}^\alpha$ の距離を求める関数を示し, $DAM(\mathbf{MA}^R, \mathbf{MA}^\alpha)$ は区間 $\mathbf{MA}^R, \mathbf{MA}^\alpha$ の距離を求める関数を示す . $DFM(\mathbf{MF}^R, \mathbf{MF}^\alpha)$ および $\mathbf{MA}^R, \mathbf{MA}^\alpha$ は DP マッチングによって求める . $\mathbf{MA}^R, \mathbf{MA}^\alpha$ を導出する DP マッチングの式を以下に定義する .

$DFM(\mathbf{MF}^R, \mathbf{MF}^\alpha)$ は式 (112) ~ (117) で定義する .

$$dfm(x, y) = \sqrt{\sum_l (uf_{x,l}^{\mathbf{MF}^R} - uf_{y,l}^{\mathbf{MF}^\alpha})^2} \quad (112)$$

$$gfm(1, 1) = dfm(1, 1) \quad (113)$$

$$0 \leq i_k - i_{k-1} \leq 1, \quad 0 \leq j_k - j_{k-1} \leq 1 \quad (114)$$

$$i_1 = j_1 = 1, \quad i_k = N^{\mathbf{MF}^R}, \quad j_k = N^{\mathbf{MF}^\alpha} \quad (115)$$

ここで式 (112) の $dfm(x, y)$ は二つの出力値 uf_x, uf_y の距離を求める関数を表現し, 式 (113) は DP の初期条件, (114) は単調性と連続性の条件 (115) は境界条件を示す . マッチングには式 (116) に示す対照型のパスを用いる .

$$gfm(x, y) = \min \begin{bmatrix} gfm(x, y-1) + dfm(x, y) \\ gfm(x-1, y-1) + 2dfm(x, y) \\ gfm(x-1, y) + dfm(x, y) \end{bmatrix} \quad (116)$$

以上の定義から, 手指単位動作 $\mathbf{MF}^R, \mathbf{MF}^\alpha$ の距離 $DFM(\mathbf{MF}^R, \mathbf{MF}^\alpha)$ は式 (117) で求められる .

$$DFM(\mathbf{MF}^R, \mathbf{MF}^\alpha) = \frac{gfm(x_k, y_k)}{x_k + y_k} \quad (117)$$

$DAM(\mathbf{MA}^R, \mathbf{MA}^\alpha)$ は式(118)～(123)で定義する.

$$dam(x, y) = \sqrt{\sum_l (ua_{x,l}^{\mathbf{MA}^R} - ua_{y,l}^{\mathbf{MA}^\alpha})^2} \quad (118)$$

$$gam(1, 1) = dam(1, 1) \quad (119)$$

$$0 \leq i_k - i_{k-1} \leq 1, \quad 0 \leq j_k - j_{k-1} \leq 1 \quad (120)$$

$$i_1 = j_1 = 1, \quad i_k = N^{\mathbf{MA}^R}, \quad j_k = N^{\mathbf{MA}^\alpha} \quad (121)$$

ここで式(118)の $dam(x, y)$ は二つの出力値 ua_x, ua_y の距離を求める関数を表現し, 式(119)はDPの初期条件, (120)は単調性と連続性の条件, (121)は境界条件を示す. マッチングには式(122)に示す対照型のパスを用いる.

$$gam(x, y) = \min \left[\begin{array}{l} gam(x, y-1) + dam(x, y) \\ gam(x-1, y-1) + 2dam(x, y) \\ gam(x-1, y) + dam(x, y) \end{array} \right] \quad (122)$$

以上の定義から, 手指単位動作 $\mathbf{MA}^R, \mathbf{MA}^\alpha$ の距離 $DAM(\mathbf{MA}^R, \mathbf{MA}^\alpha)$ は式(123)で求められる.

$$DAM(\mathbf{MA}^R, \mathbf{MA}^\alpha) = \frac{gam(x_k, y_k)}{x_k + y_k} \quad (123)$$

4. 実験

提案する操作弁別手法の有効性を確認するために実験を行った。実験では、提案する操作弁別手法の操作弁別性能を評価するために、学習パターンを作成し、正答受理率と誤答棄却率を導出した。正答受理率は、ユーザが実行した操作を正しく弁別した割合を示す。誤答棄却率は、ユーザが実行していない操作を正しく棄却した割合を示す。正答受理率、誤答棄却率が高い場合、ユーザの操作を実行した区間をシステムが正しく弁別できたを示す事ができる。これらの値によって操作の弁別精度を考察した。操作を弁別させる対象としては、日常性の高い操作を選択した。

本研究では、入力のパラメータを変化させることで、2種類の実験を行った。変化させるパラメータは以下のとおりである。

- 実験1 手指単位動作を切り出す閾値
- 実験2 学習サンプル数・テストサンプル数

実験1では、手指単位動作を切り出す速度閾値を変化させることで、単位動作を切り出す最適な閾値を考察した。実験2では、入力するサンプル数を変化させることで、サンプル数に対する学習の効率を考察した。

具体的なパラメータの値は4.1.2節で述べる。

4.1 実験内容

4.1.1 学習サンプルの選択

弁別の対象となる操作は、以下の条件を満たすものから選択した。

1. 日常で頻繁に行う操作であること
2. 操作を行う際の腕/手指による運動の特徴（動作の部位・動作の方向・手指の姿勢）が、他の弁別対象の操作と異なる性質を持つと考えられること

表 2 に弁別の対象として選択した操作を示す。

2.2.6 節で述べたとおり，操作中に繰り返される動作の回数が不定の場合，繰り返される動作の回数に依存しない操作弁別手法が必要となる．そのために，本実験では操作の周期性の特徴ごとに，学習サンプルの区間の切り出し方を変更した．以下に本実験で採用した，区間切り出す手法について示す．

- 非周期性操作
操作の開始から終了までの区間を切り出す．
- 周期性操作
1 周期分の動作を示す区間を切り出す．1 周期分の区間の開始点・終了点は以下のように決定した．
 - － 往復周期性操作
ユークリッド空間上で腕/手指の運動が停止している点．
 - － 回転周期性操作
ユークリッド空間上で腕/手指の運動の速度が最も遅い点．

表 2: 弁別対象操作

物体	操作
ホッチキス	はさむ
シャープペンシル	ノックする
	書く
ドア	開ける
	閉める
ドアロック	開ける
	閉める
机	(引き出しを)開ける
	(引き出しを)閉める
キーボード	打つ
マウス	右クリック
	左クリック
	滑らせる
	(ホイールを)前転
	(ホイールを)後転
ハサミ	挟む
壁スイッチ	押す
ペットボトル	(キャップを)開ける
	(キャップを)閉める
	飲む
携帯電話	開く
	閉じる
	(ボタンを)押す
水道の蛇口	開ける
	閉める
鍵	開ける
	閉める
コーヒーの瓶	(蓋を)開ける
	(蓋を)閉める
スプーン	すくう
	混ぜる
	口に運ぶ

4.1.2 パラメータの設定

実験 1 : 指単位動作を切り出す閾値の変化

単位動作を切り出す閾値を以下のように与えた .

$$\text{手指単位動作 } Th^{UF} = 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.50, 1.00, 3.00$$

$$\text{腕単位動作 } Th^{UA} = 4.00$$

操作弁別閾値の強度パラメータを以下のように与えた .

$$\text{受理率の強度 } \gamma_{\Psi} = 2.0$$

$$\text{棄却率の強度 } \gamma_{\Phi} = 2.0$$

単位動作の数が一致している学習サンプルの許容率を示す定数 Th^L は 0.1 とした .
学習サンプル数・テストサンプル数は , 20 とした .

実験 2 : 学習サンプル数・テストサンプル数の変化

単位動作を切り出す閾値を以下のように与えた .

$$\text{手指単位動作 } Th^{UF} = 0.30$$

$$\text{腕単位動作 } Th^{UA} = 4.00$$

操作弁別閾値の強度パラメータを以下のように与えた .

$$\text{受理率の強度 } \gamma_{\Psi} = 2.0$$

$$\text{棄却率の強度 } \gamma_{\Phi} = 2.0$$

単位動作の数が一致している学習サンプルの許容率を示す定数 Th^L は 0.1 とした .
学習サンプル数・テストサンプル数は , 5 , 8 , 10 , 13 , 15 , 18 , 20 と変化させた .

4.1.3 学習パターンの評価

操作弁別システムに正答サンプルと誤答サンプルを入力することで , システムの評価を行った . 正答・誤答は以下のように取得した .

正答 ユーザが物体を把持している区間から，操作区間の開始点と終了点を選択して取得する（学習サンプルと同じ方法）．

誤答 正答サンプルを取得する際のユーザが物体を把持している区間から，操作を実行していない区間及び他の操作を実行している区間を取得する．

システムに対して，正答サンプルを 20 サンプル与えた．また，正答サンプルを取得する際に得られた誤答サンプルを全て与えた．

正答サンプル・誤答サンプルが弁別・棄却された結果によって，各サンプルの弁別結果を以下の 4 種類に分類した．その結果から正答受理率と誤答棄却率を導出した．

正答受理 システムによって弁別された単位動作が，ユーザが与えた操作区間内に全て存在する場合．

正答棄却 ユーザが与えた操作区間に，操作弁別システムが弁別した操作区間が含まれなかった場合．またはユーザが与えた操作区間内に，操作が全く弁別されなかった場合．

誤答棄却 誤答の区間内に操作が弁別されなかった場合．

誤答受理 誤答の区間内に操作が弁別された場合．

正答受理率と誤答棄却率を式 (124) および (125) で求める．正答受理率は入力した正答が正しく受理された割合を表す．誤答棄却率は入力した誤答が正しく棄却された割合を表す．

$$\text{正答受理率} = \frac{\text{正答受理数}}{\text{正答受理数} + \text{正答棄却数}} \quad (124)$$

$$\text{誤答棄却率} = \frac{\text{誤答棄却数}}{\text{誤答受理数} + \text{誤答棄却数}} \quad (125)$$

4.2 実験結果

各実験の結果を付録Bの表に表す。各操作に対して、手指単位動作を切り出す閾値ごとの学習パターンの単位動作区間セグメントセンサ群；正答受理数；正答棄却数；誤答棄却数；誤答受理数；正答受理率；誤答棄却率を示す。結果の詳細を以下に述べる。

実験1：手指単位動作を切り出す閾値の変化

実験1の結果を手指単位動作を切り出す閾値ごとにまとめたものを、表3に示す。

表3: 実験結果（手指操作弁別閾値）

物体	操作	手指操作弁別閾値													
		0.05		0.10		0.20		0.30		0.50		1.00		3.00	
		*正	*誤	*正	*誤	*正	*誤	*正	*誤	*正	*誤	*正	*誤	*正	*誤
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	60	98	60	98	60	99	60	99	65	99	—	—	—	—
	(蓋を)開ける	—	—	50	97	75	93	60	92	55	99	65	96	—	—
ドア	閉める	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80	97	—	—
	開ける	80	100	75	99	75	100	70	100	60	97	70	97	—	—
机	(引き出しを)閉める	60	100	60	100	60	100	60	100	60	100	60	100	60	100
	(引き出しを)開ける	35	81	35	81	65	100	65	100	65	100	65	100	65	100
携帯電話	閉じる	85	97	90	98	85	97	85	97	85	97	—	—	—	—
	開く	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	100	55	100	
	(ボタンを)押す	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	—	—	55	97	75	93	60	90	70	87	—	—
	開ける	—	—	—	—	—	—	—	—	—	85	97	—	—	
キーボード	打つ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	30	97	—	—	—	—	—	40	97	—	—	
マウス	(ホイールを)後転	75	89	75	91	75	78	60	91	60	78	55	84	—	—
	(ホイールを)前転	85	88	85	86	70	92	80	89	80	89	90	92	—	—
	左クリック	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	右クリック	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	ノックする	—	—	45	100	45	100	50	100	45	100	—	—	—	—
ペットボトル	書く	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)閉める	30	85	30	85	30	99	45	99	30	91	25	84	—	—
	飲む	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ハサミ	(キャップを)開ける	5	93	10	92	30	87	30	99	20	97	15	96	—	—
	挟む	—	—	55	99	70	99	65	100	65	98	—	—	—	—
スプーン	混ぜる	60	99	55	99	60	100	—	—	—	—	—	—	—	—
	口に運ぶ	75	98	85	98	70	98	75	99	75	97	—	—	—	—
	すくう	65	90	65	99	55	99	75	99	65	100	65	100	—	—
ホッチキス	はさむ	60	100	65	100	65	100	50	97	55	100	50	100	—	—
水道の蛇口	閉める	—	—	—	—	—	—	45	100	50	99	55	99	—	—
	開ける	—	—	—	—	—	—	—	—	75	96	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

*（正：正当受理率，誤：誤答棄却率）

以下に、手指操作弁別閾値ごとに、もっとも正当受率率が高くなる操作を示す。
なお正当受率率が高い場合、誤答棄却率が高い方が、さらに誤答棄却率が高い場合は手指操作弁別閾値が低い方が、正当受率率が高いとして示す。

- 0.05
開ける（ドア）; 引き出しを閉める（机）
- 0.10
閉じる（携帯電話）; ホイールを後転（マウス）; 口に運ぶ（スプーン）; すくう（スプーン）; はさむ（ホッチキス）
- 0.20
蓋を閉める（コーヒーの瓶）; 引き出しを開ける（机）; 挟む（ハサミ）; 混ぜる（スプーン）
- 0.30
閉める（鍵）; ノックする（シャープペンシル）; キャップを閉める（ペットボトル）; キャップを開ける（ペットボトル）; すくう（スプーン）
- 0.50
蓋を閉める（コーヒーの瓶）; 開ける（水道の蛇口）
- 1.00
閉める（ドア）; 開く（携帯電話）; 閉める（鍵）; 開ける（ドアロック）; ホイールを前転（マウス）; 閉める（水道の蛇口）
- 3.00
なし

また、以下の操作はいずれのパラメータ（手指単位動作を切り出す閾値）であっても、学習パターンを作成することができなかった。

書く（シャープペンシル）; 打つ（キーボード）; 押す（壁スイッチ）;
右クリック, 左クリック, 滑らせる（マウス）; 飲む（ペットボトル）;
ボタンを押す（携帯電話）; 閉める（ドアロック）

実験 2 : 学習サンプル数・テストサンプル数の変化

実験 2 の結果を学習・テストサンプル数ごとにまとめたものを，表 4 に示す．

表 4: 実験結果 (学習・テストサンプル数)

物体	操作	学習サンプル数, テストサンプル数													
		5		8		10		13		15		18		20	
		*正	*誤	*正	*誤	*正	*誤	*正	*誤	*正	*誤	*正	*誤	*正	*誤
コーヒーの瓶	(蓋を) 閉める	5	99	25	99	20	98	50	93	40	99	60	99	60	99
	(蓋を) 開ける	10	97	30	96	10	99	60	97	45	99	—	—	60	92
ドア	閉める	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	35	100	35	100	75	98	70	99	65	100	70	100
机	(引き出しを) 閉める	35	65	40	100	35	100	35	100	35	100	60	100	60	100
	(引き出しを) 開ける	60	100	45	100	55	100	50	100	55	100	65	100	65	100
携帯電話	閉じる	35	99	35	97	45	99	50	98	50	98	75	97	85	97
	開く	0	100	60	100	55	100	—	—	—	—	—	—	—	—
	(ボタンを) 押す	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	75	93
	開ける	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	10	68	—	—	25	44	—	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	20	95	70	92	70	88	—	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	10	99	45	90	15	94	15	99	—	—	—	—	—	—
マウス	(ホイールを) 後転	5	98	20	96	15	97	35	98	30	97	50	90	60	91
	(ホイールを) 前転	20	98	30	99	25	99	40	99	35	95	45	93	80	89
	左クリック	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	10	100	15	99	20	99	35	100	50	99	50	100	50	100
	書く	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを) 閉める	—	—	—	—	55	98	55	98	40	96	35	97	45	99
	飲む	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを) 開ける	10	96	15	99	20	99	70	98	45	98	50	98	30	99
ハサミ	挟む	40	100	70	100	60	100	50	100	65	100	65	100	65	100
スプーン	混ぜる	—	—	—	—	20	100	30	100	—	—	—	—	—	—
	口に運ぶ	5	100	70	99	65	99	60	99	65	98	85	99	75	99
	すくう	25	98	45	97	30	97	40	100	40	99	75	99	75	99
ホッチキス	はさむ	—	—	—	—	—	—	35	98	45	100	60	100	50	97
水道の蛇口	閉める	0	100	40	97	35	99	45	98	55	99	—	—	45	100
	開ける	40	93	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* (正 : 正当受率率, 誤 : 誤答棄却率)

以下に，学習・テストサンプル数ごとに，もっとも正当受率率が高くなる操作を示す．なお正当受率率が高い場合，誤答棄却率が高い方が，さらに誤答棄却率が高い場合は学習・テストサンプル数が低い方が，正当受率率が高いとして示す．

- 5
なし
- 8
開く（携帯電話）；閉める，開ける（ドアロック）；挟む（ハサミ）
- 10
閉める（ドアロック）；キャップを閉める（ペットボトル）
- 13
蓋を開ける（コーヒーの瓶）；開ける（ドア）；キャップを開ける（ペットボトル）；混ぜる（スプーン）
- 15
閉める（水道の蛇口）
- 18
蓋を閉める（コーヒーの瓶）；引き出しを閉める，引き出しを開ける（机）；ノックする（シャープペンシル）；口に運ぶ，すくう（スプーン）；はさむ（ホッチキス）
- 20
蓋を開ける（コーヒーの瓶）；閉じる（携帯電話）；閉める（鍵）；ホイールを後転，ホイールを前転（マウス）

また，以下の操作はいずれのパラメータ（学習サンプル数・テストサンプル数）であっても，学習パターンを作成することができなかった．

閉める（ドア）；書く（シャープペンシル）；打つ（キーボード）；押す（壁スイッチ）；右クリック，左クリック，滑らせる（マウス）；飲む（ペットボトル）；ボタンを押す（携帯電話）

4.3 節で，実験の考察を行う．

4.3 考察

4.3.1 実験 1

「携帯電話を開く」「鍵で開ける」操作等は、手指操作弁別閾値が 1.00 と他の操作と比べて高い値で弁別精度が高くなった。これらの操作は、操作弁別閾値が低い場合に、操作に関連性の低い動作を単位動作として抽出してしまうためである。これは操作を実行する際に、微小に動作する手指が多数存在するためであると考えられる。

「携帯電話を閉じる」「スプーンを口に運ぶ」操作は、手指操作弁別閾値が 0.10 と他の操作と比べて低い値で弁別精度が高くなった。これらの操作は、操作弁別閾値が高い場合に、操作に関連性の高い動作を単位動作として抽出できないためである。これは操作を実行する際に、操作に関連性の高い動作が微小なためであると考えられる。

もっとも高い精度で操作を弁別できる手指操作弁別閾値は、操作ごとに異なる。そのため、操作弁別閾値を操作ごとに変えることで弁別精度が向上できる。操作弁別閾値を操作ごとに変える手法としては、山登り法などで最適な操作弁別閾値を設定する方法が考えられる。

4.3.2 実験 2

学習パターンを作成した 23 種類の操作の内 11 種類が、学習・テストサンプル数が 18～20 のときに最も高い弁別精度が得られた。これらの操作は、学習サンプルを増加させることで弁別精度をさらに上昇させることが期待できる。

他の 12 種類の操作に関しては、学習・テストサンプル数が 15 サンプル数以下のときに最も高い弁別精度が得られた。これらの操作は、サンプル数の増加に対する弁別精度の上昇が最大になっていると考えられる。

また、「携帯電話を開く」「ドアロックを開ける」操作等は、学習サンプルを増やすことで学習サンプルが作成できなくなった。これは、学習サンプルの中に、他のサンプルとは大きく異なる動作によって操作を実行したものが存在することで、操作における動作の共通性が失われたためであると考えられる。これを防ぐため

には、単位動作の数が一致している学習サンプルの許容率を示す定数 Th^L の値を上昇させる方法が考えられる。しかし Th^L の値を上昇させすぎると、単位動作セグメントセンサの候補が多くなりすぎるために学習効率が落ちる上に、ノイズとなる学習サンプルを許容し過ぎるために、弁別精度が低くなってしまう恐れがある。それらを防ぐために、操作ごとに Th^L の値の値を変化させる必要がある。考えられる方法としては、 Th^L の値を少しずつ上昇させ、単位動作セグメントセンサの候補の数がある一定以上に達した際の Th^L を用いて学習する手法が考えられる。

4.3.3 実験全体における正答受理率、誤答棄却率

学習サンプルを作成した全ての操作において、高い誤答棄却率を得ることができた。そのため、本手法で提案した学習サンプルを取得しつつエラーサンプルを手法が有効であると考えられる。

「引き出しを開ける」、「ホッチキスで挟む」、「ハサミで挟む」等の、正答受理率、誤答棄却率がともに 80 % を上回るような、他と比べて高い弁別精度を得られた操作は、動作する指の関節の数が少なく、それらの関節がほぼ同時に動いたために高精度な弁別が実行できたと考えられる。

正答受理率が低い操作に関しては、以下の理由が考えられる。

操作の類似性 マウスで「ホイールを前転する」、「ホイールを後転する」操作は、相反する操作のため、動作が異なるように考えられるため、弁別精度が高くなると期待できた。しかし、「ホイールを前転させる」操作の弁別精度の方が「後転」に比べて高い傾向を持った。また、誤答棄却率が他の操作と比べて低い傾向を持った。これは、どちらも「中指を折り曲げた後、伸ばす」動作を行う点で共通しているために、「後転する」操作を「前転する」操作としてシステムが弁別してしまったためだと考えられる。このように、一見異なる操作であっても指や腕の動作が類似しているために、弁別精度が低くなる操作が存在すると考えられる。

操作弁別閾値の不適性 「ドアを開ける」、「ドアロックを開ける」操作では、正答

受理率が低い結果が得られた。また、誤答の棄却率が高い値が得られた。これは、操作差分別閾値が、操作を棄却しやすい値として学習されたためであると考えられる。

4.3.4 学習パターンが作成できなかった操作

操作によっては学習パターンを作成できなかったものが存在した。これらは、単位動作セグメントセンサ群（以下、センサ群）の候補を全く作成できなかったためであると考えられる。センサ群の候補を作成するためには、学習サンプル同士で抽出された単位動作の数が一致するセンサ群を抽出する必要があるが、その条件が満たされなかったためであると考えられる。

動作の多様性・複雑性 「シャープペンシルで字を書く」「キーボードを打つ」等の操作は動く手指の関節が多く、「書く」「打つ」といった抽象化された操作レベルでは動作そのものに規則性が現れない複雑な操作となる。この時、操作区間内に単位動作区間が非常に多くセグメントされ、またセグメントされるパターンも多様となることから、操作を弁別する上で特徴的な単位動作の取得が不可能になった原因と考えられる。

動作量の不足 本研究では、単位動作を切り出す閾値を定数として与えた。「マウスでクリックする」「シャープペンシルをノックする」等の操作は、操作中の動作量が小さい。そのため、操作中の単位動作速度が閾値を下回らず、単位動作が切り出されていないためと考えられる。

5. 結論

5.1 まとめ

本研究では，ユーザの記憶活動への支援を実現するために，ユーザの物体に対する操作を弁別する手法を提案した．本手法では，データグローブや位置方向センサから取得される時系列データを単位動作と呼ぶ細かな動作に分割することで，少ない学習サンプルでユーザの実行した操作を弁別した．また，日常生活で頻出する操作を弁別の対象として選択して提案手法を評価した．学習には操作を行った際のサンプルを5～20サンプル（学習サンプル，テストサンプル）とエラーサンプルを用いた．

5.2 関連研究との比較

本手法を，ユーザの手の動作のパターンを学習する研究と比較する．

佐々木らは，モーションキャプチャとデータグローブの入力から複数の自己組織化マップを作成し，手話動作の認識する手法を提案している [21]．この手法の評価実験では，17種類の基本的な手話動作を学習するために，2人の被験者から合計626個のサンプルで学習を行った．その結果73.49%の認識率で手話動作を認識した．研究 [21] では1手話動作あたりに $626/17 = 36.8$ のサンプルを与えている．本研究ではユーザが把持した物体に関連付けられる操作のみを弁別の対象とすることで，20サンプルで学習を行うことを可能にした．また [21] では，学習パターンとして与える動作を手動で基本動作に分ける必要がある．例えば，“話す”を表す手話動作は，研究 [21] ではユーザが2つの基本動作に分けてシステムに与えている．本手法では，操作区間から機械的に単位動作を抽出する手法を適用しているため，動作（操作）を基本動作に分けてシステムに与える必要が無い．

堀口らは，データグローブと位置方向センサの入力からDPマッチング及びFFTによる高調波分析による手話単語認識手法を提案している [18]．この研究では，任意の手話単語330種類を学習するために，サンプルを各単語ごとに5サンプルづつ与えて学習を行った．この結果，DPマッチングによる特定話者での認識率が

99.3 % , 4 名の複数話者での認識率が 25.1 % という結果が得られた . また , 高調波分析を用いた特定話者での認識率が 92.0 % , 4 名の複数話者での認識率が 64.7 % という結果が得られた . この研究では入力した手話単語を手話によって表している区間を手動で切り出している . 手話単語学習支援システムを念頭に置いた場合 , 単語区間の自動切り出しが必要である . 本手法では , 操作区間から機械的に単位動作を抽出する手法を適用しているため , 操作区間を自動的に切り出すことを可能にしている .

近藤らは , ロボットハンドに物体操作のために , 教示するデータグローブと位置方向センサ , 接触センサを用いて操作を認識するシステムを提案している [19] . この手法では , 個人差を持つ操作の認識を行うために , 多くの操作のデータから解析を行い , 個人差を考慮して工夫した状態の定義を行う必要がある . 本手法では , 操作の学習を個人に特化することを前提とすることで個人差による問題を回避している . また , 本手法では日常生活における記憶支援を実現するために , ユーザの日常生活に支障が発生しないシステムの実現を目指している . そのため , システムに与える情報を , 将来的に非接触デバイスで取得することが期待できる , 把持物体と動作情報のみに限定している . 本研究ではこれらの前提において , なるべく学習時にユーザに対するコストが少くなるような学習手法を提案した .

5.3 今後の展望

今後の課題としては , 以下のものが挙げられる .

- 弁別精度の向上
 - － 学習サンプルのクラスタリング
「ペンで字を書く」, 「キーボードを打つ」等の操作には操作要素の多様性が多数存在する . このような多様性の多い操作を学習する際に , 学習サンプルを予めクラスタリングし , それらをクラスタごとに学習することで学習する手法を検討する .
 - － 静止特徴の学習サンプルへの適用

本手法では学習サンプル内に存在する共通する動作を弁別に使用したが、“動作しないことが共通している”関節や位置・姿勢を学習に使用する。例えば、「ホッチキスで紙を挟む操作を実行している際には、腕の位置はユーザの正面前方で静止している」「机の引き出しを開ける際には、手の形状が静止している」等の特徴が考えられる。これらの特徴を学習に使用する手法を検討する。

－ 確率・統計モデルの使用

統計と確率を用いることで操作の弁別精度を上昇させる手法を検討する。ユーザが実行した操作の統計から、ユーザが前に実行した操作から、次に実行する可能性の高い操作が推測できる。例えば、ユーザがペンで「(蓋を)開ける」操作を実行した場合、次にペンで「書く」操作を実行する可能性が高いと考えられる。また、単位動作と代表データとの距離から、ユーザが操作を実行している期待値を導出できる。これらの、“ユーザが前後に実行した操作”と“デバイスからの入力”の両方の情報を用いて、ユーザが実行する可能性の高い操作を推測、弁別する手法を検討する。

－ 動作量が小さな操作の弁別

動作量が小さな操作を弁別する手法として、単位動作を切り出す閾値の動的決定と、接触センサの追加が考えられる。以下にそれらの特徴を述べる。

* 単位動作を切り出す閾値の動的決定

本研究では単位動作を切り出す閾値を定数として与えた。閾値を小さくすることによって、動作量が小さな動作の単位動作を切り出すことが可能になる。しかし、閾値が小さすぎると、操作に関係しないような小さな動作まで単位動作として切り出されると考えられる。単位動作を切り出すための閾値を、操作やセンサチャンネルごとに動的に決定できれば、弁別に必要な動作のみを単位動作として切り出せる。

* 接触センサの追加

データグローブの指先や掌に接触センサや圧力センサを装着することによって、スイッチを押す瞬間やシャープペンシルのボタンを押す瞬間が検出できると考えられる。接触センサを追加することによる特徴を以下に挙げる。

長所：高精度に操作区間を切り出す事ができる。

短所：接触センサに装着性があるため、日常生活に支障が出る。本研究ではデータグローブを使用して手指動作を取得したため、接触センサを追加しても、ユーザへの装着性の影響は少ない。しかし、今後カメラデバイスなどの非接触型センサ手指動作を取得しようとする場合に、接触センサによる装着性が問題となり得る。

● インタフェースの操作性の向上

－ 周期性操作区間からの動作区間自動切り出し

本研究では、周期性を持つ操作を学習する際に、1周期的分の動作区間を1つの学習サンプルとして与えた。で述べたように、周期性操作全体の開始点と終了点を指定するだけで1周期分の動作区間を自動的に抽出する手法を検討する。それにより、学習サンプルの取得の容易化が期待できる。

－ 学習サンプルからの操作区間自動切り出し

本研究ではユーザが操作した区間をユーザ自身が指定することで、学習サンプルをシステムに入力する。しかし、入力された操作区間に時間のずれが存在すると、操作区間内に不必要な単位動作が含まれたり、必要な単位動作が操作区間に含まれなかったりという不具合が起きる可能性がある。また、区間を入力するコストがユーザに対して大きい。このようなことを防ぐために、ユーザが学習区間を学習サンプルとしてシステムに与えた場合に、自動的に操作区間を切り出す手法を検討する。

－ 個人差の小さな操作の前学習

「ホッチキスで紙を挟む」、「鍵でドアを開錠する」等、日常で頻繁に実行され、動作の個人差が小さいと思われる操作は、予め認識できるように多者間で学習しておく。また、実行頻度や動作の個人差が大きな操作は、追加して登録できるようにしておく。このような、頻繁に実行される操作を予め登録しておくことで、登録のコストを減少させる手法を検討する。

- インタフェースの拡張

- － 両手への対応

- 両手の把持物体や操作を認識・弁別する手法を検討する。これにより、両手を使う操作や、複数の物体の組み合わせによって実行される操作を弁別する。

- － 画像センサによる動作取得

- 画像センサを使用することによって手や指の動作を取得する手法を検討する。これにより、データグローブを使用せずに動作が取得できるようになる。日常に影響が出難いインタフェースが実装できる。しかし、画像センサによる動作認識では認識ミスやオクルージョン [22] が発生するため精度が低くなる。そのため手指の動きによって、動作推測の精度を向上させる手法が必要になる。

- － 画像センサによる物体認識

- 画像センサを使用することによって把持物体を認識する手法を検討する。これにより、予め RFID タグを貼り付けずに、物体の外観をカメラに登録するだけで把持物体を認識することができる。しかし、画像センサによる物体認識は動作認識同様、精度が低くなる。そのため手指の動きによって、物体推測の精度を向上させる手法が必要になる。

謝辞

本研究は、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報処理学専攻の木戸出正継教授の御指導の下で行いました。研究を進めるにあたり、様々な御指導、御助言を賜りました木戸出正継教授に深く感謝致します。また論文執筆にあたり、丁寧な御検討、御教示いただきました本研究科小笠原司教授に深く御礼申し上げます。また様々な点において適切な御助言を頂き、御指導して頂きました本研究科河野恭之助教授に深く感謝致します。本論文の執筆にあたって、適切な御助言を頂きました本研究科久米出助手に心より感謝致します。本研究の遂行から、論文執筆に至るまで様々な点において幅広い専門知識による適切な御助言を頂きました本研究科河村竜幸教務職員に心より感謝致します。本研究を遂行するに当たって御支援いただいた、科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究推進事業（CREST）「高度メディア社会の生活情報技術」プログラムに深く感謝いたします。本研究の基盤となる5DT DataGloveおよびPOLHEMUS 3SPACE ISOTRAK IIの御提供からメンテナンスまで行っていただいた日商エレクトロニクス株式会社の皆様に心より感謝致します。そして、研究にとどまらず、様々な面で助言、手助けして頂いた本講座内同グループ所属の上岡隆宏氏、村田賢氏、奥健太氏に深く感謝致します。

参考文献

- [1] S. Mann, “ Wearable Computing: A first step toward Personal Imaging , ”
IEEE Computer , Vol.30 , No.2 , pp.25-32,1999.
- [2] 河野恭之, 河村竜幸, 上岡隆宏, 村田賢, 浮田宗伯, 木戸出正継, “ ウェアラブル日記の実現に向けて - 日常記憶の検索・編集・整理・共有機構 - , ”
電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解 (PRMU) 研究会 , pp.55-60 ,
Jan. 2003.
- [3] 河村 竜幸, 上岡隆宏, 浮田宗伯, 河野恭之, 木戸出正継, “ 着用指向情報パートナーにおける記憶支援システムの開発に向けて ”
人工知能学会 第3回 AI 若手の集い (MYCOM2002) , pp.139-146 , 2002.
- [4] B.Rhodes , “ The Wearable Remembrance Agent: a System for Augmented Memory , ”
In Proc. of The First International Symposium on Wearable Computers , pp.123-128 , 1997.
- [5] M.Lamming , M.Flynn , “ Forget-me-not: Intimate Computing in Support of Human Memory , ”
In FRIEND21: International Symposium on Next Generation Human Interface , pp.125-128 , 1994.
- [6] 塩見昌裕, 神田崇行, D.Eaton, 石黒浩, “ コビキタスセンサネットワークと連動したコミュニケーションロボットによる科学館での展示案内 , ”
インタラクシオン 2005 論文集 , pp.127-134 , 2005 .
- [7] 相澤清晴, 石崎健一郎, 椎名誠, “ ウェアラブル映像の構造化と要約: 個人の主観を考慮した要約生成の試み , ”
電子情報通信学会論文誌 Vol.J-86-D-II No6 , pp.807-815 , Jun.2003 .
- [8] S.Feiner , B.MacIntyre , T.Höllerer , A.Webster ,
“ A Touring Machine:Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Enviroment , ”
ISWC99 , pp.37-43 , 1999 .

- [9] 福原 知宏, 河村 竜幸, 松本 文宏, 高橋 徹, 寺田 和憲, 松塚 健, 武田 英明, "Ubiquitous Memories: 実世界の物理的オブジェクトを用いた記憶外在化システム," 第 15 回人工知能学会全国大会予稿集, 2001 .
- [10] 上岡隆宏, 河村 竜幸, 浮田 宗伯, 河野 恭之, 木戸出 正継, " ウェアラブル装置によるオブジェクト登録・管理システムの基礎実験," 映像情報メディア学会技術報告, Vol.26, No.7, pp.25-30 , 2002 .
- [11] 椎尾一郎, 早坂達, " モノに情報を貼りつける-RFID タグとその応用-, " 情報処理, 40 巻 8 号, pp.846-850, 1999.
- [12] 上岡隆宏, 河村竜幸, 浮田宗伯, 河野恭之, 木戸出正継, " ウェアラブルオブジェクト位置想起支援システムの試作," インタラクション 2002 論文集, pp.63-64, 2002.
- [13] 寺部亮紘, 浮田宗伯, 河野恭之, 木戸出正継, " ウェアラブル仮想タブレット ~ 赤外線照射カメラを利用した指先入力インタフェース ~ , " In Proc. of MIRU2002, pp.25-30, 2002 .
- [14] Fifth Dimension Technologies, " 5DT DataGlove 16 User's Manual, Version 1.00, " Feb, 2000 .
- [15] 日商エレクトロニクス株式会社, " 3SPACE Isotrak II 日本語マニュアル, " Mar, 2003 .
- [16] 山中晋爾, 浜本隆之, 半谷精一郎, " ペンの傾きを利用した署名照合方式の改良," 信学技報 ISEC2000-18, pp.65-72, May . 2000 .
- [17] 中西功, 西口真澄, 伊藤良生, 福井裕, " DWT によるサブバンド分解と適応信号処理を用いたオンライン署名照合," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-A, No.6, pp.80-815, Jun . 2004 .
- [18] 堀口進, 阿部亨, 山森一人, " 指手運動軌跡による手話認識・学習支援システムの研究 (継続), " 電気通信普及財団, 平成 12 年度研究調査報告書 No.15, pp.750-762 .

- [19] 近藤誠宏, 上田淳, 松本吉央, 小笠原司, “ 接触状態遷移に基づく物体操作の認識, ”ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 2P2-H-48, Jun.2004 .
- [20] S . Iba , J . M . V . Weghe , C . J . J. Paredis , P. K. Khosla , “ An Architecture for Gesture-Based Control of Mobile Robots” , Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems , pp.851-857 , 1999 .
- [21] 佐々木尚洋, 石川真澄, “ 複数の自己組織化マップを用いた手話認識, ”信学技報 NC2001-144 , pp.91-98 , Mar . 2002 .
- [22] 松島宏典, 内村圭一, “ オクルージョンを考慮した交通流計測, ”電気学会論文誌 C , 122-C 巻 , 12 号 , pp.2120-2127 , 2002.

付録

A. 日常生活における操作と操作要素の構成

表 5: 日常生活における操作と操作要素の構成

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
携帯物			
ID カード	リーダーに通す	AB	A: カードをリーダーに添える
			B: カードをリーダーに沿って動かす
カバン	開ける	AB	A: ファスナーのつまみをつまむ B: つまみを開方向へ引く
	閉じる	AB	A: ファスナーのつまみをつまむ B: つまみを閉方向へ引く
タバコ	吸う	ABC	A: タバコのフィルター部をつまむ B: タバコのフィルター部を口に運ぶ C: タバコのフィルター部を口から放す
タバコの箱	開ける	AB	A: 蓋に手を添える B: 蓋を引く
	閉じる	AB	A: 蓋に手を添える B: 蓋をはめる
マッチ	着火する	AB	A: マッチの末端をつまむ B: 先端を滑らせる
マッチ箱	開ける	AB	A: マッチ箱の端に指を添える B: 端を開方向に押しこむ
	閉じる	AB	A: マッチ箱の端に指を添える B: 端を閉方向に押しこむ
ライター	着火する	AB	A: 着火ボタンに指を添える B: ボタンを押し込む
リップクリーム	開ける	AB	A: キャップをつまむ
			B: キャップを引く
	塗る	ABC*D	A: リップクリームをつまむ
			B: 先端を口に運ぶ C: 先端を押し付ける D: 先端を口から放す
閉じる	AB	A: キャップをつまむ	

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
ロッカーの鍵	開ける	ABCD	B:キャップをはめる
			A:鍵をつまむ
			B:鍵を挿す
			C:鍵を開方向へ回す
	閉じる	ABCD	D:鍵を抜く
			A:鍵をつまむ
			B:鍵を挿す
			C:鍵を閉方向へ回す
携帯電話	押す	((A B ...)C)*	A:1 キーに指を添える
			B:2 キーに指を添える
			C:3 キーに指を添える
			D:指を添えたキーを押し下げる
	開ける	AB	A:開閉部をつかむ
	B:開閉部を引く		
閉じる	AB	A:開閉部をつかむ	
		B:開閉部を押し込む	
財布	開ける	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を押し込む
傘	(ボタンを) 開ける	AB	A:ボタンをつまむ
			B:ボタンを引く
	(ボタンを) 閉じる	AB	A:ボタンをつまむ
			B:ボタンをはめる
	差す	AB	A:開ボタンに指を添える
	閉じる	AB	B:開ボタンを押す
			A:把持部をつかむ
	B:把持部を引く		
紙袋	開ける	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を引く
車の鍵	(エンジンを) 切る	ABC	A:鍵をつまむ
			B:鍵を逆イグニッション方向方向へ回す

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
	(エンジン)を入れる	ABC	C: 鍵を抜く
			A: 鍵をつまむ
			B: 鍵を挿す C: 鍵をイグニッション方向へ回す
	開ける	ABCD	A: 鍵をつまむ
			B: 鍵を挿す
			C: 鍵を開方向へ回す
			D: 鍵を抜く
	閉じる	ABCD	A: 鍵をつまむ
			B: 鍵を挿す
			C: 鍵を閉方向へ回す
			D: 鍵を抜く
	小銭入れ	開ける	AB
閉じる		AB	A: 開閉部をつかむ B: 開閉部を押し込む
筆記用具・文房具			
(キャップ式)ボールペン	開ける	AB	A: キャップに手を添える
			B: キャップを引く
	書く	ABC*D	A: ペン中央部に手を添える
			B: ペンの先端を書く対象に添える
			C: 対象に添えたままペンの先端を動かす
			D: ペンの先端を対象から放す
閉じる	AB	A: キャップに手を添える	
		B: キャップに手をはめる	
(ボタン式)ボールペン	押す	AB	A: ボタンに指を添える
			B: ボタンを押し下げる
	書く	ABC*D	A: ペン中央部に手を添える
			B: ペンの先端を書く対象に添える
			C: 対象に添えたままペンの先端を動かす
			D: ペンの先端を対象から放す
(ボタン式)水道の蛇口	押す	AB	A: ボタンに掌を添える

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
			B:ボタンを押し下げる
クリップ	挟む	ABC	A:先端をつまむ
			B:先端を押し下げる
			C:先端を放す
クリップ付き 下敷き	挟む	ABC	A:先端をつまむ
			B:先端を押し下げる
			C:先端を放す
シャープペン シル	押す	AB*	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
	書く	ABC*D	A:ペン中央部に手を添える
			B:ペンの先端を書く対象に添える
			C:対象に添えたままペンの先端を動かす
D:ペンの先端を対象から放す			
ダブルクリッ プ	挟む	ABC	A:先端をつまむ
			B:先端を押し下げる
			C:先端を放す
ドライバー	開ける	ABC	A:把持部を握る
			B:先端を対象にあてる
			C:把持部を開方向へひねる
ノート	めくる	AB	A:ページをつまむ
			B:ページを動かす
ハサミ	挟む	A(BCD)*	A:把持部に指を通す
			B:把持部を開く
			C:先端を対象にあてる
			D:把持部を閉じる
ビニールテー プ	伸ばす	AB*	A:テープの端をつまむ
			B:テープの端を引く
	貼る	AB*	A:テープを対象にあてがう
			B:テープを押し付ける
ファイルケー ス	開ける	AB	A:開閉部に手を添える
			B:開閉部を引く

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
	折り曲げる	<i>AB</i>	A: 折り目の両端をつまむ B: 折り目に沿って曲げる
	閉じる	<i>AB</i>	A: 開閉部に手を添える B: 開閉部を閉じる
ペンケース	開ける	<i>AB</i>	A: ファスナーのつまみをつまむ B: つまみを開方向へ引く
	閉じる	<i>AB</i>	A: ファスナーのつまみをつまむ B: つまみを閉方向へ引く
ペンチ	挟む	<i>ABCD</i>	A: 把持部を握る
			B: 把持部を開く
			C: 先端を対象にあてる
			D: 把持部を閉じる
ホッチキス	挟む	<i>ABC</i>	A: 把持部を握る
			B: 先端を対象にあてる
			C: 把持部を閉じる
ホワイトボード ドレイサー	こする	<i>ABC</i>	A: イレイサーを握る
			B: 対称にあてる
			C: 対象にあてたまま先端を動かす
ホワイトボード マーカー	開ける	<i>AB</i>	A: キャップを握る
			B: キャップを引く
	書く	<i>ABC*D</i>	A: ペン中央部に手を添える
			B: ペンの先端を書く対象に添える
			C: 対象に添えたままペンの先端を動かす
			D: ペンの先端を対象から放す
閉じる	<i>AB</i>	A: キャップを握る	
		B: キャップをはめる	
マジックペン	開ける	<i>AB</i>	A: キャップを握る
			B: キャップを引く
	書く	<i>ABC*D</i>	A: ペン中央部に手を添える
			B: ペンの先端を書く対象に添える
			C: 対象に添えたままペンの先端を動かす
			D: ペンの先端を対象から放す
	閉じる	<i>AB</i>	A: キャップを握る
B: キャップをはめる			

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
ラベル	はがす	AB	A:ラベルの端をつまむ B:ラベルの端を引く
	貼る	AB	A:ラベルを端をつまむ B:ラベルを対象に押し付ける
印鑑	押す	AB	A:印鑑の中央をつまむ B:先端を対象に当てる
工具箱	開ける	AB	A:開閉部をつかむ B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部をつかむ B:開閉部を押し込む
朱肉	開ける	AB	A:蓋をつまむ B:蓋を開方向へ回す
	閉じる	AB	A:蓋をつまむ B:蓋を閉方向へ回す
消しゴム	こする	ABC	A:消しゴムを握る
			B:先端を対称にあてる
			C:対象にあてたまま先端を動かす
PC			
PC のボタン	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
PC ディスプレイ	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
キーボード	タイプする	((A B C ...)D)*	A:A キーに指を添える
			B:B キーに指を添える
			C:C キーに指を添える
			D:指を添えたキーを押し下げる
ノートパソコン	タイプする	((A B C ...)D)*	A:A キーに指を添える
			B:B キーに指を添える
			C:C キーに指を添える
			D:指を添えたキーを押し下げる
	開ける	AB	A:開閉部に手を添える
			B:開閉部を引く
閉じる	AB	A:開閉部に手を添える	
		B:開閉部を押す	

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
プリンタ	(トレイを)開ける	AB	A:開閉部に手を添える
			B:開閉部を引く
	(トレイを)閉じる	AB	A:開閉部に手を添える
			B:開閉部を押す
マウス	右クリックする	AB	A:右ボタンに指を添える
			B:右ボタンを押し込む
	左クリックする	AB	A:左ボタンに指を添える
			B:左ボタンを押し込む
	滑らせる	AB	A:マウスに手を添える
			B:マウスを動かす
	(ホイール)を前転させる	AB	A:ホイールに指を添える
			B:ホイールを前転させる
	(ホイール)を後転させる	AB	A:ホイールに指を添える
			B:ホイールを後転させる
電子辞書	押す	((A B C ...)D)*	A:A キーに指を添える
			B:B キーに指を添える
			C:C キーに指を添える
			D:指を添えたキーを押し下げる
	開ける	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を引く
閉じる	AB	A:開閉部をつかむ	
		B:開閉部を押し込む	
CD ケース	開ける	AB	A:蓋に手を添える
			B:蓋を引く
	閉じる	AB	A:蓋に手を添える
			B:蓋を押す
CD プレイヤー	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
	開ける	AB	A:蓋に手を添える

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
			B:蓋を引く
	閉じる	AB	A:蓋に手を添える
			B:蓋を押す
CD プレイヤーのリモコン	押す	$((A B C \dots)D)^*$	A:再生ボタンに指を添える
			B:早送りボタンに指を添える
			C:巻き戻しボタンに指を添える
			D:指を添えたキーを押し下げる
カセットケース	開ける	AB	A:開閉部に手を添える
			B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部に手を添える
			B:開閉部をはめる
カセットテープの箱	開ける	AB	A:開閉部に手を添える
			B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部に手を添える
			B:開閉部をはめる
デジタルカメラ	スイッチを入れる	AB	A:スイッチに指を添える
			B:スイッチを ON 方向に回す
	スイッチを切る	AB	A:スイッチに指を添える
			B:スイッチを OFF 方向に回す
	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
設備			
(エレベータの)ボタン	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
(エレベータ内の)ボタン	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
(コック式)水道の蛇口	開ける	AB	A:コックに手を添える

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
			B:コックを時計回りに回転させる
	閉じる	AB	A:コックに手を添える
			B:コックを反時計回りに回転させる
(プッシュ式) 水道の蛇口	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
(券売機の) ボタン	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
お茶用の給湯 器	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
ふすま	開ける	AB	A:取っ手に手を添える
			B:取っ手を引く
コピー機	(トレイを) 開ける	AB	A:トレイに手を添える
			B:トレイを引く
	(トレイを) 閉じる	AB	A:トレイに手を添える
			B:トレイを押す
	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
	開ける	AB	A:蓋に手を添える
			B:蓋を上げる
	閉じる	AB	A:蓋に手を添える
			B:蓋を下ろす
シュレッダー のボタン	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
セキュリティ システムのボ タン	押す	((A B C ...)D)*	A:1 キーに指を添える
			B:2 キーに指を添える
			C:3 キーに指を添える
			D:指を添えたキーを押し下げる
ドアの鍵	開ける	ABCD	A:鍵をつまむ

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
			B:鍵を挿す
			C:鍵を開方向へ回す
			D:鍵を抜く
			A:鍵をつまむ
	閉じる	ABCD	B:鍵を挿す
			C:鍵を閉方向へ回す
			D:鍵を抜く
			A:鍵をつまむ
ドアノブ	開ける	AB(C D)	A:ノブを掴む
			B:ノブを回す
			C:ノブを引く
			D:ノブを押す
	閉じる	A(B C)	A:ノブを掴む
			C:ノブを押す
ドアロック	開ける	AB	A:ロックをつまむ
			B:ロックを開方向へひねる
	閉じる	AB	A:ロックをつまむ
			B:ロックを閉方向へひねる
ポット	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
レターケース	開ける	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を押し込む
ロッカー	開ける	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を押し込む
液晶パネル	押す	AB	A:パネルに指をあてる
			B:パネルを押し下げる
机の引き出し	開ける	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を押し込む
給湯器	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
空調のパネル	開ける	AB	A:開閉部をつまむ B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部をつまむ B:開閉部を押し込む
空調ボタン	押す	AB	A:ボタンに指を添える B:ボタンを押し下げる
券売機のボタン	押す	AB	A:ボタンに指を添える B:ボタンを押し下げる
自動販売機のボタン	押す	AB	A:ボタンに指を添える B:ボタンを押し下げる
自動販売機の釣銭レバー	ひねる	AB	A:レバーをつまむ
			B:レバーをまわす
車のドア	開ける	AB	A:ノブに手を添える B:ノブを引く
	閉じる	AB	A:ノブに手を添える B:ノブを押し込む
車のハンドル	回す	A(B C)*	A:ハンドルに手を添える B:右に回す C:左に回す
洗濯機	押す	AB	A:ボタンに指を添える B:ボタンを押し下げる
	開ける	AB	A:開閉部をつかむ B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部をつかむ B:開閉部を押し込む
照明のボタン	押す	AB	A:ボタンに指を添える B:ボタンを押し下げる
卓上電話	押す	AB	A:ボタンに指を添える B:ボタンを押し下げる
段ボール箱	開ける	AB	A:開閉部をつかむ B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部をつかむ B:開閉部を押し込む

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
電子レンジ	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
	開ける	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を押し込む
目覚まし時計	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
郵便受け	開ける	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を押し込む
冷水機	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
冷蔵庫	開ける	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部をつかむ
			B:開閉部を押し込む
テレビのリモコン	押す	((A B C ...)D)*	A:電源ボタンボタンに指を添える
			B:チャンネル1 ボタンに指を添える
			C:チャンネル2 ボタンに指を添える
			D:指を添えたキーを押し下げる
空調のリモコン	押す	((A B C ...)D)*	A:電源ボタンに指を添える
			B:設定温度上昇ボタンに指を添える
			C:設定温度下降ボタンに指を添える
			D:指を添えたキーを押し下げる
食品容器			
おむすびの包装	開ける	ABCD	A:包装の上端をつまむ
			B:包装の上端を引く
			C:包装の両端をつまむ
			D:包装の両端を引く
インスタントラーメン	開ける	AB	A:蓋のつまみをつまむ

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
			B:つまみを引く
インスタント 焼きそば	開ける	AB	A:蓋に手を添える
			B:蓋を引く
	湯切りする	ABC	A:容器の両端に手を添える
			B:容器を傾ける
			C:容器を水平にする
	閉じる	AB	A:蓋に手を添える
B:蓋をはめる			
カップアイス	開ける	AB	A:蓋に手を添える
			B:蓋を引く
カップラーメン	開ける	AB	A:蓋に手を添える
			B:蓋を引く
ガムのケース	開ける	AB	A:蓋に手を添える
			B:蓋を引く
	閉じる	AB	A:蓋に手を添える
			B:蓋をはめる
スナックの箱	開ける	AB	A:蓋に手を添える
			B:蓋を引く
	閉じる	AB	A:蓋に手を添える
			B:蓋をはめる
スナックの包装	開ける	AB	A:上端をつまむ
			B:上端を引く
スプーン	掬う	ABCD	A:上端をつまむ
			B:下端を容器の中に入れる
			C:対象を下端に乗せる
			D:下端を引き上げる
	食べる	ABC	A:上端をつまむ
			B:下端を口に運ぶ
			C:下端を口から放す
ゼリーの容器	開ける	AB	A:フィルムの先端をつまむ
			B:フィルムの先端を引く
トンゲ	挟む	ABC	A:両端をつまむ
			B:両端を押し下げる

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
			C:両端を放す
レトルトパウチ	開ける	AB	A:端をつまむ B:端を引く
	中身を出す	AB*	A:レトルトパウチをつかむ B:レトルトパウチを握りこむ
レトルト米	開ける	AB	A:フィルムの先端をつまむ B:フィルムの先端を引く
割り箸	割る	AB	A:両端をつまむ B:両端を引っ張る
	混ぜる	ABC*	A:割り端の中央部を握る B:先端を対象に入れる C:先端を動かす
	食べる	ABCD	A:割り端の中央部を握る B:先端を対象に当てる C:先端を口に運ぶ D:先端を口から放す
醤油入れ	注ぐ	ABC	A:醤油入れを握る B:醤油入れを傾ける C:醤油入れを垂直にする
調味料の缶	振る	AB	A:缶を握る B:上下に動かす
調味料の袋	開ける	AB	A:端をつまむ B:端を引く
	中身を出す	AB*	A:端をつまむ B:上下に動かす
弁当箱	開ける	AB	A:開閉部をつかむ B:開閉部を引く
薬の包装	開ける	AB	A:包装に指を添える B:指を押し込む
飲料容器			
マグカップ	飲む	ABCDE	A:カップの取っ手をにぎる B:カップを口に運ぶ C:カップを傾ける D:カップを水平にする E:カップを口から放す

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
グラス	飲む	ABCDE	A:グラスに手を添える
			B:グラスを口に運ぶ
			C:グラスを傾ける
			D:グラスを水平にする
			E:グラスを口から放す
コーヒーポット	注ぐ	ABC	A:取っ手を握る
			B:取っ手を傾ける
			C:取っ手を垂直にする
ストロー	伸ばす	AB	A:両端をつまむ
			B:両端を引く
	挿す	AB	A:先端をつまむ
			B:逆端を対象に挿し込む
ティーパックの包装	開ける	ABCD	A:開閉部をつまむ
			B:開閉部を引く
			C:つまみをつまむ
			D:つまみを引く
ペットボトル	飲む	ABCDE	A:ボトルの中央に手を添える
			B:ボトルの先端を口に運ぶ
			C:ボトルを傾ける
			D:ボトルを水平にする
			E:ボトルの先端を口から放す
	開ける	AB*	A:キャップを握る
			B:キャップを開方向へまわす
	振る	AB*	A:ボトルの中央に手を添える
B:ボトルを上下に動かす			
閉じる	AB*	A:キャップを握る	
		B:キャップを閉方向へまわす	
ボトル缶 ジュース	飲む	ABCDE	A:ボトルの中央に手を添える
			B:ボトルの先端を口に運ぶ
			C:ボトルを傾ける
			D:ボトルを水平にする
			E:ボトルの先端を口から放す
	開ける	AB	A:キャップを握る

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
	閉じる	AB	B:キャップを開方向へまわす A:キャップを握る B:キャップを閉方向へまわす
缶ジュース	飲む	ABCDE	A:缶の中央に手を添える
			B:缶の先端を口に運ぶ
			C:缶を傾ける
			D:缶を水平にする
			E:缶を口から放す
開ける	ABC	A:タブをつまむ	
		B:タブを引き上げる	
		C:タブを押し込む	
湯呑み	飲む	ABCDE	A:湯飲みに手を添える
			B:湯飲みを口に運ぶ
			C:湯飲みを傾ける
			D:湯飲みを水平にする
			E:湯飲みを口から放す
家事			
食器用たわし	磨く	A	A:たわしを食器に添える
洗濯ネット	閉じる	AB	A:ファスナーのつまみをつまむ
			B:つまみを閉方向へ引く
身嗜み・清潔			
オーデコロン	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
	開ける	AB	A:キャップに手を添える
			B:キャップを引く
	閉じる	AB	A:キャップに手を添える
			B:キャップをはめる
紙ナプキン	拭く	AB*	A:紙ナプキンを対象にあてがう
			B:対象にあてたまま紙ナプキンを動かす
タオル	拭く	ABC	A:タオルを対象にあてがう
			B:対象にあてたままタオルを動かす
			C:タオルを対象から放す
ティッシュペーパー	拭く	AB*C	A:ティッシュペーパーを対象にあてがう
			B:対象にあてたままティッシュペーパーを動かす

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
トイレット ペーパー	拭く	AB^*	A:トイレットペーパーを対象にあてがう
			B:対象にあてたままトイレットペーパーを動かす
	伸ばす	$A(BC)^*$	A:トイレットペーパーの先端を持つ
			B:トイレットペーパーを引く
			C:トイレットペーパーを折る
	切る	AB	A:切る部分の両端に手を添える
B:両端を引く			
ハンカチ	拭く	AB^*	A:ハンカチを対象に当てる
			B:対象にあてたままハンカチを動かす
ハンドソープ	押す	AB^*	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
安全カミソリ	剃る	ABC	A:把持部を握る
			B:先端を顔に当てる
			C:先端を動かす
歯ブラシ	磨く	ABC^*D	A:把持部を握る
			B:先端を口に運ぶ
			C:先端を動かす
			D:先端を口から放す
歯磨き粉	開ける	AB^*	A:キャップをつまむ
			B:キャップを開方向へまわす
	中身を出す	AB	A:チューブの中央を握る
			B:チューブの中央を握り込む
	閉じる	AB^*	A:キャップをつまむ
			B:キャップを閉方向へまわす
電 動 シェー バー	スイッチを切 る	AB	A:スイッチに指を添える
			B:スイッチを押す
	スイッチを入 れる	AB	A:スイッチに指を添える
			B:スイッチを引く
	剃る	$ABCD$	A:把持部を握る
			B:先端を顔に当てる
			C:先端を顔に当てたまま動かす
			D:先端を顔から放す

物体	操作	操作要素の構成	操作要素の詳細
保湿クリーム	開ける	AB*	A:キャップをつまむ
			B:キャップを開方向へまわす
	中身を出す	AB	A:チューブの中央を握る
			B:チューブの中央を握り込む
	閉じる	AB*	A:キャップをつまむ
			B:キャップを閉方向へまわす
読み物			
冊子	めくる	AB	A:ページをつまむ
			B:ページを動かす
雑誌	めくる	AB	A:ページをつまむ
			B:ページを動かす
書籍	めくる	AB	A:ページをつまむ
			B:ページを動かす
漫画の単行本	めくる	AB	A:ページをつまむ
			B:ページを動かす
体験映像			
ウェストポーチ	開ける	AB	A:ファスナーのつまみをつまむ
			B:つまみを開方向へ引く
	閉じる	AB	A:ファスナーのつまみをつまむ
			B:つまみを閉方向へ引く
ビデオレコーダー	スイッチを切る	AB	A:スイッチに指を添える
			B:スイッチを開方向へ回す
	押す	AB	A:ボタンに指を添える
			B:ボタンを押し下げる
	開ける	AB	A:開閉部に手を添える
			B:開閉部を引く
	閉じる	AB	A:開閉部に手を添える
			B:開閉部を押す

B. 操作弁別実験結果

実験 1 結果

手指操作弁別閾値 = 0.05

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	0—C-	1	12	8	5	321	60	98
	(蓋を)開ける	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
ドア	閉める	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	0————	1	16	4	0	274	80	100
机	(引き出しを)閉める	—	1	————	—	12	8	0	93	60	100
	(引き出しを)開ける	—	—	-2-56-8---	1	7	13	29	130	35	81
携帯電話	閉じる	—	—	-1————	2	17	3	11	504	85	97
	開く	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
	(ボタンを)押す	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
マウス	(ホイールを)後転	—	—	-1-45-9-D	1	15	5	49	404	75	89
	(ホイールを)前転	—	—	0————D	1	17	3	42	335	85	88
	左クリック	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
	書く	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	-1-3-6---CD	1	6	14	63	373	30	85
	飲む	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	0-2345678-BCD	1	1	19	30	413	5	93
ハサミ	挟む	—	—	————	—	—	—	—	—	—	
スプーン	混ぜる	—	—	-3-7---CD	2	12	8	2	456	60	99
	口に運ぶ	—	—	-1-4-6-9A-C-	1	15	5	6	517	75	98
	すくう	—	—	012-5---A-D	1	13	7	39	356	65	90
ホッチキス	はさむ	—	—	-1-4-----	2	12	8	0	95	60	100
水道の蛇口	閉める	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	————	—	—	—	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	————	—	—	—	—	—	—	

* (S : センサ群, U : 単位動作数)

手指操作弁別閾値 = 0.10

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	0-----C-	1	12	8	5	314	60	98
	(蓋を)開ける	—	—	---45-----	1	10	10	8	329	50	97
ドア	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	0-----	1	15	5	1	254	75	99
机	(引き出しを)閉める	—	1	-----	—	12	8	0	93	60	100
	(引き出しを)開ける	—	—	-2-56-8---	1	7	13	31	134	35	81
携帯電話	閉じる	—	—	-1-----	2	18	2	10	495	90	98
	開く	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	(ボタンを)押す	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	-123---78---	1	6	14	11	482	30	97
マウス	(ホイールを)後転	—	—	01-45-7-9-BCD	1	15	5	39	419	75	91
	(ホイールを)前転	—	—	0-----A-D	1	17	3	45	296	85	86
	左クリック	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	-1---78-A---	2	9	11	0	222	45	100
	書く	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	-1-3-6---CD	1	6	14	64	385	30	85
	飲む	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	0-2345678-BCD	1	2	18	34	434	10	92
ハサミ	挟む	—	—	0-----C-	1	11	9	1	126	55	99
スプーン	混ぜる	—	—	-1---678---CD	2	11	9	1	343	55	99
	口に運ぶ	—	—	-1-3-----A-CD	1	17	3	11	611	85	98
	すくう	—	—	-----D	1	13	7	3	483	65	99
ホッチキス	はさむ	—	—	-1-4-----	2	13	7	0	98	65	100
水道の蛇口	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	

* (S : センサ群, U : 単位動作数)

手指操作弁別閾値 = 0.20

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	0-----C-	1	12	8	3	302	60	99
	(蓋を)開ける	—	—	-1-4-----	1	15	5	17	264	75	93
ドア	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	0-----	1	15	5	0	215	75	100
机	(引き出しを)閉める	—	1	-----	—	12	8	0	93	60	100
	(引き出しを)開ける	—	1	-----	—	13	7	0	95	65	100
携帯電話	閉じる	—	—	-1-----	2	17	3	11	470	85	97
	開く	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	(ボタンを)押す	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	---6---	1	11	9	14	484	55	97
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
マウス	(ホイールを)後転	—	—	01---89A-D	1	15	5	84	309	75	78
	(ホイールを)前転	—	—	01---89-CD	1	14	6	28	368	70	92
	左クリック	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	-1---7---BC-	2	9	11	0	217	45	100
	書く	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	---5---	1	6	14	2	339	30	99
	飲む	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	0-2345678-BCD	1	6	14	63	438	30	87
ハサミ	挟む	—	—	0---6-8---	1	14	6	1	134	70	99
スプーン	混ぜる	—	—	-1-3-67-9-CD	2	12	8	0	472	60	100
	口に運ぶ	—	—	-1-45---9A-CD	1	14	6	6	514	70	98
	すくう	—	—	-1-----D	1	11	9	3	490	55	99
ホッチキス	はさむ	—	—	0-4---A-	2	13	7	0	95	65	100
水道の蛇口	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—

* (S : センサ群, U : 単位動作数)

手指操作弁別閾値 = 0.30

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	0-2-----C-	1	12	8	1	380	60	99
	(蓋を)開ける	—	—	0-----9--	1	12	8	21	249	60	92
ドア	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	0-----	1	14	6	0	172	70	100
机	(引き出しを)閉める	—	1	-----	—	12	8	0	93	60	100
	(引き出しを)開ける	—	1	-----	—	13	7	0	95	65	100
携帯電話	閉じる	—	—	-1-----	2	17	3	11	450	85	97
	開く	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	(ボタンを)押す	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	01-3-5-9-D	1	15	5	67	901	75	93
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
マウス	(ホイールを)後転	—	—	-1-4--9-BCD	1	12	8	35	354	60	91
	(ホイールを)前転	—	—	012--89A-CD	1	16	4	33	271	80	89
	左クリック	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	-1-3-67--C-	2	10	10	0	187	50	100
	書く	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	01-----	1	9	11	3	344	45	99
	飲む	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	01-----	1	6	14	2	337	30	99
ハサミ	挟む	—	—	-----9--	1	13	7	0	94	65	100
スプーン	混ぜる	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	口に運ぶ	—	—	-1-3-5-9-CD	1	15	5	6	594	75	99
	すくう	—	—	--5--B-D	1	15	5	1	436	75	99
ホッチキス	はさむ	—	—	0-----A-	2	10	10	2	90	50	97
水道の蛇口	閉める	—	—	--5-----	1	9	11	0	213	45	100
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—

*(S:センサ群, U:単位動作数)

手指操作弁別閾値 = 0.50

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	0-2——BC-	1	13	7	1	425	65	99
	(蓋を)開ける	—	—	—45—9-C-	1	11	9	3	337	55	99
ドア	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	0—————	1	12	8	3	132	60	97
机	(引き出しを)閉める	—	1	—————	—	12	8	0	93	60	100
	(引き出しを)開ける	—	1	—————	—	13	7	0	95	65	100
携帯電話	閉じる	—	—	-1—————	2	17	3	9	425	85	97
	開く	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	(ボタンを)押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	—456—9—	1	12	8	61	592	60	90
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
マウス	(ホイールを)後転	—	—	01——6-89AB-D	1	12	8	54	202	60	78
	(ホイールを)前転	—	—	-1-345—9-BCD	1	16	4	44	363	80	89
	左クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	-1——6789A—D	2	9	11	0	217	45	100
	書く	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	—56——C-	1	6	14	33	370	30	91
	飲む	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	—34-678-A—D	2	4	16	12	488	20	97
ハサミ	挟む	—	—	——6——	1	13	7	1	88	65	98
スプーン	混ぜる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	口に運ぶ	—	—	——56——B-D	1	15	5	8	389	75	97
	すくう	—	—	—3——B-D	1	13	7	0	400	65	100
ホッチキス	はさむ	—	—	-1-4——9A—	2	11	9	0	95	55	100
水道の蛇口	閉める	—	—	—————A—	1	10	10	1	264	50	99
	開ける	—	—	-1—————	1	15	5	8	196	75	96
壁スイッチ	押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—

* (S : センサ群, U : 単位動作数)

手指操作弁別閾値 = 1.00

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	
	(蓋を)開ける	—	—	——8—C-	1	13	7	8	237	65	96
ドア	閉める	—	—	——9A-D	1	16	4	3	133	80	97
	開ける	—	—	0——8—	1	14	6	3	134	70	97
机	(引き出しを)閉める	—	1	—————	—	12	8	0	93	60	100
	(引き出しを)開ける	—	1	—————	—	13	7	0	95	65	100
携帯電話	閉じる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開く	—	—	——6——	1	12	8	0	268	60	100
	(ボタンを)押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	01-45-7-9-C-	1	14	6	117	809	70	87
	開ける	—	—	—34-6——	1	17	3	7	302	85	97
キーボード	打つ	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	-23——89—D	1	8	12	12	392	40	97
マウス	(ホイールを)後転	—	—	0—4-78—CD	1	11	9	71	382	55	84
	(ホイールを)前転	—	—	0-345-7-9-B-D	1	18	2	30	346	90	92
	左クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	書く	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	-1———B-D	1	5	15	47	261	25	84
	飲む	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	—34-678-A-D	2	3	17	16	423	15	96
ハサミ	挟む	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
スプーン	混ぜる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	口に運ぶ	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	すくう	—	—	—3-56—B-	1	13	7	0	170	65	100
ホッチキス	はさむ	—	—	0-3——9-C-	2	10	10	0	102	50	100
水道の蛇口	閉める	—	—	——6—AB-	1	11	9	3	343	55	99
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—

* (S : センサ群, U : 単位動作数)

手指操作弁別閾値 = 3.00

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	
	(蓋を)開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	
ドア	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	
机	(引き出しを)閉める		1	—————	—	12	8	0	93	60	100
	(引き出しを)開ける		1	—————	—	13	7	0	95	65	100
携帯電話	閉じる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開く	—	—	0-3-67-9	1	11	9	0	165	55	100
	(ボタンを)押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
マウス	(ホイールを)後転	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	(ホイールを)前転	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	左クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	書く	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	飲む	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ハサミ	挟む	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	
スプーン	混ぜる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	口に運ぶ	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	すくう	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ホッチキス	はさむ	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	
水道の蛇口	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	

*(S:センサ群, U:単位動作数)

実験 2 結果

学習サンプル数, テストサンプル数 = 5

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	—34-7-9A-CD	2	1	19	2	419	5	99
	(蓋を)開ける	—	—	—8-AB-D	2	2	18	10	421	10	97
ドア	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
机	(引き出しを)閉める	—	—	—34—8-B-	1	7	13	59	112	35	65
	(引き出しを)開ける	—	1	—————	—	12	8	0	95	60	100
携帯電話	閉じる	—	—	-1——A—	2	7	13	2	740	35	99
	開く	—	—	—45-7-A—	3	0	20	0	1000	0	100
	(ボタンを)押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	—	—	—4-67-AB-D	1	2	18	10	22	10	68
ドアロック	閉める	—	—	-1——ABCD	1	4	16	22	508	20	95
	開ける	—	—	0—456789AB-D	1	2	18	3	463	10	99
マウス	(ホイールを)後転	—	—	01-3-6-89ABCD	1	1	19	6	501	5	98
	(ホイールを)前転	—	—	0-2-56-89ABCD	2	4	16	6	581	20	98
	左クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	01-3———	2	2	18	0	225	10	100
	書く	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	飲む	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	—4-6—A-CD	2	2	18	17	427	10	96
ハサミ	挟む	—	—	012——789A-D	1	8	12	0	126	40	100
スプーン	混ぜる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	口に運ぶ	—	—	0——78-AB-D	1	1	19	0	489	5	100
	すくう	—	—	—3-5—9AB-D	1	5	15	6	486	25	98
ホッチキス	はさむ	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	
水道の蛇口	閉める	—	—	0—4-6—C-	3	0	20	0	641	0	100
	開ける	—	—	-12-5——C-	1	8	12	34	453	40	93
壁スイッチ	押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—

* (S : センサ群, U : 単位動作数)

学習サンプル数，テストサンプル数 = 8

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	012-5-89-C-	1	5	15	3	434	25	99
	(蓋を)開ける	—	—	0-23-567-A—	2	6	14	14	405	30	96
ドア	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	0—4————	2	7	13	0	331	35	100
机	(引き出しを)閉める	—	1	—————	—	8	12	0	93	40	100
	(引き出しを)開ける	—	1	—————	—	9	11	0	95	45	100
携帯電話	閉じる	—	—	-12——9-C-	2	7	13	19	922	35	97
	開く	—	—	——6——	1	12	8	0	525	60	100
	(ボタンを)押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	—	—	01-3-6—BCD	1	14	6	39	459	70	92
	開ける	—	—	01—5-8—	1	9	11	50	473	45	90
マウス	(ホイールを)後転	—	—	-1——9ABCD	1	4	16	9	286	20	96
	(ホイールを)前転	—	—	01——6-9ABCD	2	6	14	4	467	30	99
	左クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	-123-567—B-	2	3	17	1	191	15	99
	書く	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	飲む	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	0-3-678—D	2	3	17	3	495	15	99
ハサミ	挟む	—	—	-12—6-9A-D	1	14	6	0	124	70	100
スプーン	混ぜる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	口に運ぶ	—	—	-1-3-56789-B-D	1	14	6	1	510	70	99
	すくう	—	—	-23-56-9AB-D	1	9	11	9	438	45	97
ホッチキス	はさむ	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	
水道の蛇口	閉める	—	—	0-3—7-9A-D	2	8	12	14	554	40	97
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	

* (S : センサ群 , U : 単位動作数)

学習サンプル数, テストサンプル数 = 10

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	-2-5-789-CD	1	4	16	6	440	20	98
	(蓋を)開ける	—	—	-2-5-9AB-D	2	2	18	3	449	10	99
ドア	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	0-4-————	2	7	13	0	331	35	100
机	(引き出しを)閉める	—	1	—————	—	7	13	0	93	35	100
	(引き出しを)開ける	—	1	—————	—	11	9	0	95	55	100
携帯電話	閉じる	—	—	-12-6-————	2	9	11	6	891	45	99
	開く	—	—	——6-————	1	11	9	0	525	55	100
	(ボタンを)押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	—	—	——6-8-AB-	1	5	15	21	17	25	44
ドアロック	閉める	—	—	-1-3-6-9ABCD	1	14	6	54	433	70	88
	開ける	—	—	0123-89ABCD	2	3	17	19	345	15	94
マウス	(ホイールを)後転	—	—	01-4-789-BCD	1	3	17	11	538	15	97
	(ホイールを)前転	—	—	0-6-89ABCD	2	5	15	4	539	25	99
	左クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	-23-56-——D	2	4	16	2	223	20	99
	書く	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	——5-——CD	1	11	9	6	413	55	98
	飲む	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	0-5-6789-CD	2	4	16	4	535	20	99
ハサミ	挟む	—	—	-12-6-9A-D	1	12	8	0	124	60	100
スプーン	混ぜる	—	—	-1-3-7-9-CD	2	4	16	0	422	20	100
	口に運ぶ	—	—	-1-3-56789-B-D	1	13	7	1	510	65	99
	すくう	—	—	-1-——8-CD	1	6	14	11	467	30	97
ホッチキス	はさむ	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	
水道の蛇口	閉める	—	—	-2-——CD	2	7	13	3	595	35	99
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	

* (S : センサ群, U : 単位動作数)

学習サンプル数，テストサンプル数 = 13

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	01-45-7-9-C-	1	10	10	29	394	50	93
	(蓋を)開ける	—	—	-1-45—A—	1	12	8	10	388	60	97
ドア	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	0—————	1	15	5	3	169	75	98
机	(引き出しを)閉める	—	1	—————	—	7	13	0	93	35	100
	(引き出しを)開ける	—	1	—————	—	10	10	0	95	50	100
携帯電話	閉じる	—	—	-12—6—	2	10	10	10	878	50	98
	開く	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	(ボタンを)押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	-1234—9-B-	1	3	17	1	483	15	99
マウス	(ホイールを)後転	—	—	01—789-BCD	1	7	13	10	539	35	98
	(ホイールを)前転	—	—	01—56-89ABCD	2	8	12	4	518	40	99
	左クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	-1—67—B-	2	7	13	0	156	35	100
	書く	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	—3—7—C-	1	11	9	8	485	55	98
	飲む	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	—4—BC-	1	14	6	5	401	70	98
ハサミ	挟む	—	—	-12—6-9A-D	1	10	10	0	124	50	100
スプーン	混ぜる	—	—	-1-3—7-9-CD	2	6	14	0	439	30	100
	口に運ぶ	—	—	-1—5-78-B-D	1	12	8	1	514	60	99
	すくう	—	—	—3-5—B-D	1	8	12	0	521	40	100
ホッチキス	はさむ	—	—	—4—9—D	2	7	13	1	82	35	98
水道の蛇口	閉める	—	—	0-3—7-9A—	2	9	11	8	530	45	98
	開ける	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	—————	—	—	—	—	—	—	—

* (S : センサ群 , U : 単位動作数)

学習サンプル数，テストサンプル数 = 15

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	0—C-	1	8	12	1	288	40	99
	(蓋を)開ける	—	—	-1-3-5—A—	1	9	11	1	402	45	99
ドア	閉める	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	0—4—	2	14	6	1	329	70	99
机	(引き出しを)閉める	—	1	—	—	7	13	0	93	35	100
	(引き出しを)開ける	—	1	—	—	11	9	0	95	55	100
携帯電話	閉じる	—	—	-12—6—	2	10	10	11	878	50	98
	開く	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	(ボタンを)押す	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
マウス	(ホイールを)後転	—	—	01—789-BCD	1	6	14	11	538	30	97
	(ホイールを)前転	—	—	01—56—9ABCD	2	7	13	24	534	35	95
	左クリック	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	-123—BCD	2	10	10	1	187	50	99
	書く	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	—5-8—	1	8	12	13	368	40	96
	飲む	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	0—	1	9	11	4	325	45	98
ハサミ	挟む	—	—	-12—6—9A-D	1	13	7	0	124	65	100
スプーン	混ぜる	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	口に運ぶ	—	—	—5-8—B-D	1	13	7	5	460	65	98
	すくう	—	—	—5—B-D	1	8	12	1	436	40	99
ホッチキス	はさむ	—	—	0—4—A—	2	9	11	0	88	45	100
水道の蛇口	閉める	—	—	-1—5—	1	11	9	4	416	55	99
	開ける	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

*(S:センサ群, U:単位動作数)

学習サンプル数，テストサンプル数 = 18

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	0-2-----C-	1	12	8	1	380	60	99
	(蓋を)開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
ドア	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	0-----	1	13	7	0	172	65	100
机	(引き出しを)閉める	—	1	-----	—	12	8	0	93	60	100
	(引き出しを)開ける	—	1	-----	—	13	7	0	95	65	100
携帯電話	閉じる	—	—	-1-6-----	2	15	5	20	800	75	97
	開く	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	(ボタンを)押す	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
マウス	(ホイールを)後転	—	—	-1-4--9-BCD	1	10	10	37	355	50	90
	(ホイールを)前転	—	—	012--89A-CD	1	9	11	21	290	45	93
	左クリック	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	-1-3-7-BCD	2	10	10	0	193	50	100
	書く	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	---5-8---	1	7	13	9	372	35	97
	飲む	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	0-----	1	10	10	5	325	50	98
ハサミ	挟む	—	—	-----9---	1	13	7	0	94	65	100
スプーン	混ぜる	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	口に運ぶ	—	—	-1-5-89-B-	1	17	3	1	513	85	99
	すくう	—	—	-1-----D	1	15	5	3	381	75	99
ホッチキス	はさむ	—	—	0-4--A-	2	12	8	0	88	60	100
水道の蛇口	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—

*(S:センサ群, U:単位動作数)

学習サンプル数，テストサンプル数 = 20

物体	操作	単位動作セグメントセンサ群				正 答 受 理 数	正 答 棄 却 数	誤 答 受 理 数	誤 答 棄 却 数	正 答 受 理 率 [%]	誤 答 棄 却 率 [%]
		腕		手指							
		S*	U*	S*	U*						
コーヒーの瓶	(蓋を)閉める	—	—	0-2-----C-	1	12	8	1	380	60	99
	(蓋を)開ける	—	—	0-----9--	1	12	8	21	249	60	92
ドア	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	0-----	1	14	6	0	172	70	100
机	(引き出しを)閉める	—	1	-----	—	12	8	0	93	60	100
	(引き出しを)開ける	—	1	-----	—	13	7	0	95	65	100
携帯電話	閉じる	—	—	-1-----	2	17	3	11	450	85	97
	開く	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	(ボタンを)押す	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
鍵	閉める	—	—	01-3-5-9-D	1	15	5	67	901	75	93
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
キーボード	打つ	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
ドアロック	閉める	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
マウス	(ホイールを)後転	—	—	-1-4--9-BCD	1	12	8	35	354	60	91
	(ホイールを)前転	—	—	012--89A-CD	1	16	4	33	271	80	89
	左クリック	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	滑らせる	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	右クリック	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
シャープペンシル	ノックする	—	—	-1-3-67--C-	2	10	10	0	187	50	100
	書く	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
ペットボトル	(キャップを)閉める	—	—	01-----	1	9	11	3	344	45	99
	飲む	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	(キャップを)開ける	—	—	01-----	1	6	14	2	337	30	99
ハサミ	挟む	—	—	-----9--	1	13	7	0	94	65	100
スプーン	混ぜる	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
	口に運ぶ	—	—	-1-3-5-9-CD	1	15	5	6	594	75	99
	すくう	—	—	--5--B-D	1	15	5	1	436	75	99
ホッチキス	はさむ	—	—	0-----A-	2	10	10	2	90	50	97
水道の蛇口	閉める	—	—	--5-----	1	9	11	0	213	45	100
	開ける	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—
壁スイッチ	押す	—	—	-----	—	—	—	—	—	—	—

*(S:センサ群, U:単位動作数)