

早稲田大学審査学位論文
博士（人間科学）

探索棒を用いた人の触知覚
—異なる素材の弁別における探索行為の運動的特徴—

Perception of Remote Objects with Rigid Probe:
The Nature of Exploratory Movement
in Material Discrimination

2018年1月

早稲田大学大学院 人間科学研究科

茂木 正晴

MOTEKI, Masaharu

研究指導教員：三嶋 博之 教授

目 次

第1章 研究概要	1
1. 1 研究の背景と概要	1
1. 2 建設現場での作業実態と課題	5
1. 3 研究対象とする建設機械と研究の必要性	7
第2章 触知覚とは	9
2. 1 触知覚機能	9
2. 2 生体システムとしての触覚	11
2. 2. 1 触感覚について	11
2. 2. 2 感覚受容器の構造とバイオメカニズム	11
2. 2. 3 シナプスの可塑性	13
2. 3 触覚に関するこれまでの考え方	14
2. 3. 1 アリストテレスと触覚	15
2. 3. 2 一般感覚	15
2. 3. 3 近代の触覚, 皮膚感覚	15
2. 3. 4 感覚受容器の考え方と能動的触覚の意義	16
2. 4 知覚としての触覚	17
2. 4. 1 触覚探索行為と記憶との関係	17
2. 4. 2 アクティブ・タッチの神経機構	17
2. 5 媒体を通じた人の触覚	18
2. 6 本研究における触知覚に関する研究アプローチ	18
第3章 研究の目的と構成	23
3. 1 研究の目的	23
3. 2 先行研究との関係と研究範囲	23
3. 3 研究の構成	24
第4章 研究1：触知覚的な探索行為による異なる素材の弁別能力	26
4. 1 実験1	26
4. 1. 1 実験1の環境条件	26
4. 1. 2 実験1への実験参加者	29
4. 1. 3 実験1の手続き	29
4. 2 実験1の結果	34
4. 2. 1 振る・擦る・叩く探索行為における正解率の実態	34

4. 2. 2	触知覚把握のための探索行為	38
4. 2. 3	触知覚による各探索行為における供試体の弁別結果	39
4. 3	映像に基づく動作解析	41
4. 3. 1	動作解析手法	42
4. 3. 2	解析対象とする実験参加者の選定	42
4. 3. 3	動作解析における正解率上位者と下位者の相違	44
4. 3. 4	探索時における周波数特性(X方向)	46
4. 4	研究1の考察	48
4. 4. 1	振る・擦る・叩く探索行為における正解率の実態	48
4. 4. 2	触知覚による探索行為における異なる素材の弁別能力	48
4. 4. 3	正解率上位者と下位者の探索行為の相違	50
第5章 研究2：触知覚による探索行為の運動的特徴		52
5. 1	実験2	52
5. 1. 1	実験2の環境条件	52
5. 1. 2	実験2への実験参加者の選定	55
5. 1. 3	実験2の手続き	61
5. 2	実験2の結果	63
5. 2. 1	実験2における各探索行為の正解率	63
5. 2. 2	振る・擦る・叩く触知覚的な探索行為における弁別の安定性	64
5. 2. 3	触知覚による素材弁別の安定性	65
5. 2. 4	触知覚的な探索行為にかかる探索時間の傾向	67
5. 3	触知覚における探索行為の解析	71
5. 3. 1	RQA(Recurrence Quantification Analysis)	71
5. 3. 2	クラスター分析	79
5. 4	研究2の考察	96
5. 4. 1	実験1と実験2の素材弁別の安定性	96
5. 4. 2	触知覚による異なる素材の探索時間	96
5. 4. 3	素材の弁別向上につながる触知覚による探索行為の特徴	96
第6章 総合考察		100
6. 1	媒体を介した人の触知覚による素材の弁別能力	100
6. 2	異なる素材の弁別における探索行為の運動的特徴	100
6. 2. 1	振る探索行為の運動的特徴	100
6. 2. 2	擦る探索行為の運動的特徴	101

6. 2. 3 叩く探索行為の運動的特徴	101
6. 3 研究のまとめと建設作業における触知覚情報取得の必要性	102
第7章 今後の展望	104
謝辞	105
参考文献	106
参考資料	109

図・表目次

第1章

図 1.1	突発的に発生する大規模な土砂災害(2011.9 茂木撮影)	1
図 1.2	無人化施工による災害復旧状況(雲仙 2014.9 茂木撮影)	2
図 1.3	遠隔操作による建設機械の操作状況(2014.9 茂木撮影)	2
図 1.4	搭乗操作と遠隔操作の作業時間の違い(茂木ら(2015) [1])	3
図 1.5	視覚情報量の違いによる作業時間の違い(茂木ら(2016) [2])	3
図 1.6	油圧ショベルによる埋設物周辺の掘削	4
図 1.7	建設現場での地下埋設部に対する油圧ショベルの動き	5
図 1.8	災害復旧現場での無人化施工のシステム構成	6
図 1.9	災害によって露出した地下埋設管 (2011.9 茂木撮影)	7
図 1.10	油圧ショベルにおけるブーム・アーム・バケットの動作機構	8

第2章

図 2.1	地中内部での掘削作業時におけるアプローチ	9
図 2.2	掘削作業時の建設機械の状態(2013.3 茂木撮影)	10
図 2.3	掘削時のバケット先端部の状況(2013.3 茂木撮影)	10
図 2.4	知覚システムの構成(仲谷・箕・白土, 2011, p15 より作図[6])	11
図 2.5	感覚受容器(仲谷他, 2011, p21; 岩村, 2001, p209 より作図[6], [7])	12
図 2.6	第1体性感覚野のイメージ図(岩村, 2001, p74 より作図[7])	14
図 2.7	地中埋設部の掘削時における媒体を通した触知覚の伝達機構	20
図 2.8	油圧ショベルの動作と地下埋設部への掘削動作例	20
図 2.9	搭乗タイプの操作インターフェース	21
図 2.10	遠隔操作用ジョイスティックタイプのインターフェース	21
図 2.11	操作インターフェースにおける操作レバーのレイアウト(遠隔・搭乗共に同じレイアウト)	21

第3章

図 3.1	本研究の構成	24
-------	--------	----

第4章

図 4.1	媒体を介した人の触知覚探索実験のイメージ	26
図 4.2	各供試体(6種類の異なる素材)の顕微鏡による表面状況	27
図 4.3	鋼製フレームを含む供試体の形状	28
図 4.4	供試体(左からゴム, ウレタン, プラスチック, 木材, コンクリート, 鋼材)	28
図 4.5	実験1で使用する探索棒の仕様	29
図 4.6	探索棒先端部の顕微鏡による表面状況	29
図 4.7	実験における3つの探索行為	30
図 4.8	実験参加者が異なる素材の印象を確認している状況	31
図 4.9	視覚及び聴覚の情報を遮蔽した探索時の状況	32
図 4.10	実験1における探索状況	32
図 4.11	ビデオ撮影による探索状況の記録	33
図 4.12	振る・擦る・叩く探索行為における正解率の傾向	35
図 4.13	職種による各探索行為の正解率の傾向	36
図 4.14	各探索行為における年齢による正解率の傾向	37
図 4.15	各探索行為における正解率の実態	38
図 4.16	振る探索行為の動作軌跡例	44
図 4.17	擦る探索行為の動作軌跡例	44
図 4.18	叩く探索行為の動作軌跡例	45
図 4.19	振る探索行為の動作変位波形例	45
図 4.20	擦る探索行為の動作変位波形例	46

図 4.21	叩く探索行為の動作変位波形例	46
図 4.22	振る探索行為における周波数特性例	47
図 4.23	擦る探索行為における周波数特性例	47
図 4.24	叩く探索行為における周波数特性例	47
図 4.25	触知覚による各探索行為における異なる素材の弁別実態	49
図 4.26	触知覚による各探索行為における探索棒に作用する力や動き	51
表 4.1	各供試体の機械的特性	27
表 4.2	実験参加者内訳	29
表 4.3	異なる素材の判断一覧	32
表 4.4	探索行為毎の正解率集計	34
表 4.5	各探索行為の触知覚弁別における正解及び誤認傾向	39
表 4.6	実験 1 における触知覚による各探索行為の正解率一覧	43

第 5 章

図 5.1	実験 2 で使用する探索棒の仕様	53
図 5.2	実験 2 で使用する機器系統図	54
図 5.3	実験 2 における計測装置の配置状況	54
図 5.4	油圧ショベルによる操作の手順	57
図 5.5	油圧ショベルによる標準的な作業の流れ	58
図 5.6	実作業での土等の掘削作業とモデル化した作業	58
図 5.7	タスクモデルにおける作業環境	59
図 5.8	モデルタスクによる固形対象物の移設状況	59
図 5.9	実験 2 における探索棒を用いた供試体の事前把握	61
図 5.10	触知覚による探索と加速度 X, Y, Z 方向と探索計測状況	62
図 5.11	実験 1 と実験 2 における各探索行為の正解率に関する比較結果	64
図 5.12	振る探索行為による素材弁別の正解率の傾向 (1)は実験 1, (2)は実験 2 のデータ	65
図 5.13	擦る探索行為による素材弁別の正解率の傾向 (1)は実験 1, (2)は実験 2 のデータ	66
図 5.14	叩く探索行為による素材弁別の正解率の傾向 (1)は実験 1, (2)は実験 2 のデータ	66
図 5.15	触知覚による探索時の時系列波形と AIC による探索時間の切り出し作業手順	68
図 5.16	各探索行為における探索時間の傾向(正解データ)	69
図 5.17	各探索行為における探索時間の傾向(不正解データ)	70
図 5.18	時系列波形データの例[26]	71
図 5.19	リカレンスプロット(例)と Lmax, DET	72
図 5.20	次元(Dimension)の設定例	74
図 5.21	遅れ(lag)の設定例	74
図 5.22	各探索行為における変数間の相関関係	80
図 5.23	各探索行為のクラスターデンドログラム(6 クラス)	82
表 5.1	実験 2 における計測システムの構成	54
表 5.2	搭乗操作と遠隔操作の作業時間と実験 2 への参加者選定	60
表 5.3	実験 1 及び実験 2 の各探索行為の正解率一覧	63
表 5.4	振る探索行為における Lmax, DET の結果	76
表 5.5	擦る探索行為における Lmax, DET の結果	77
表 5.6	叩く探索行為における Lmax, DET の結果	78
表 5.7	各探索行為の傾向整理のための指標	83
表 5.8	クラス 1 の振る探索行為のまとめ	84
表 5.9	クラス 2 の振る探索行為のまとめ	85
表 5.10	クラス 3 の振る探索行為のまとめ	86
表 5.11	クラス 4 の振る探索行為のまとめ	86
表 5.12	クラス 5 の振る探索行為のまとめ	87
表 5.13	クラス 6 の振る探索行為のまとめ	88
表 5.14	クラス 1 の擦る探索行為のまとめ	88
表 5.15	クラス 2 の擦る探索行為のまとめ	89
表 5.16	クラス 3 の擦る探索行為のまとめ	90

表 5.17	クラス4の擦る探索行為のまとめ	90
表 5.18	クラス5の擦る探索行為のまとめ	91
表 5.19	クラス6の擦る探索行為のまとめ	92
表 5.20	クラス1の叩く探索行為のまとめ	92
表 5.21	クラス2の叩く探索行為のまとめ	93
表 5.22	クラス3の叩く探索行為のまとめ	93
表 5.23	クラス4の叩く探索行為のまとめ	94
表 5.24	クラス5の叩く探索行為のまとめ	95
表 5.25	クラス6の叩く探索行為のまとめ	95
表 5.26	振る探索行為の各クラスにおける正解数	97
表 5.27	振る探索行為のクラスと L_{max} , DET の傾向	97
表 5.28	擦る探索行為の各クラスにおける正解数	98
表 5.29	擦る探索行為のクラスと L_{max} , DET の傾向	98
表 5.30	叩く探索行為の各クラスにおける正解数	99
表 5.31	叩く探索行為のクラスと L_{max} , DET の傾向	99

第6章

図 6.1	建設作業における掘削行為（埋設管回避）と触知覚情報の取得	103
-------	------------------------------	-----

第1章 研究概要

1. 1 研究の背景と概要

自然災害の多くは、前触れも無く発生している（図 1.1）．近年発生している災害は我々の想定を越える大規模なもので、生活圏が密集している地域では人々に多大な影響を及ぼしており、その生命・財産を脅かすものとなっている．ひとたび、火山・地震・風水害等の災害が発生した際には、迅速な復旧活動が求められ、現場では、自衛隊・消防・警察などの人海戦術による捜索活動や、国土交通省を中心とした復旧活動が行われることになる．

しかし、災害の発生場所や規模によっては二次災害を生じる恐れもあり、復旧活動のための人員が現場に立ち入ることができないケースもある．



図 1.1 突発的に発生する大規模な土砂災害（2011.9 茂木撮影）

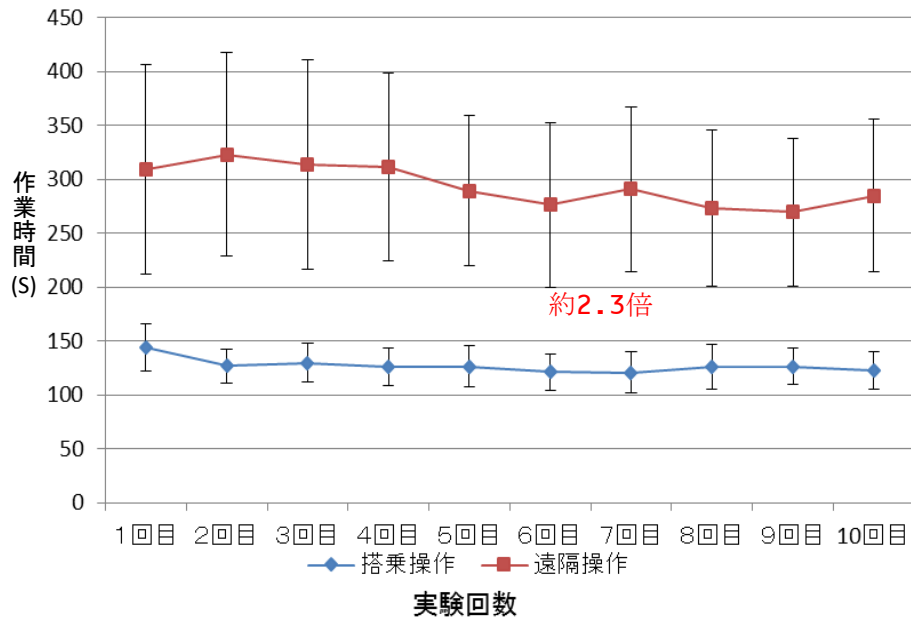
そこで、現場での安全性を確保しつつ復旧活動を迅速に進める観点から、伝送された映像を通じて建設機械を遠隔で操作する無人化施工技術が活用されている（図 1.2, 1.3）．しかしながら、無人化施工技術はオペレータの安全性を確保できるという大きなメリットがある一方で、茂木・藤野・油田（2015）が行った比較検証[1]では、建設機械に搭乗して行う有人操作と比較すると、約 2.3 倍（図 1.4）の作業時間を要してしまうといった課題がある．



図 1.2 無人化施工による災害復旧状況（雲仙 2014.9 茂木撮影）



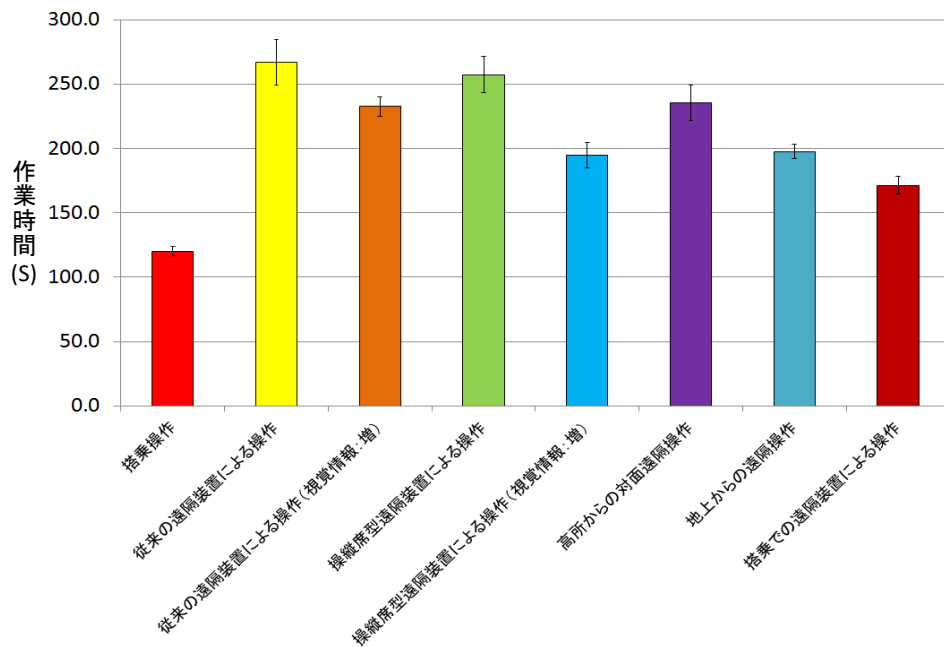
図 1.3 遠隔操作による建設機械の操作状況（2014.9 茂木撮影）



エラーバーは標準偏差

図 1.4 搭乗操作と遠隔操作の作業時間の違い (茂木ら (2015) [1])

遠隔での操作性を有人操作に近づけることを目的とした研究開発は、官学民で多くの研究者によって進められている。その1つとして、茂木・西山・橋本・藤野・油田 (2016) は、環境からの視覚情報を作業目的に応じて人に与えることにより、遠隔での作業効率が有人操作に近づくことを明らかにした (図 1.5) [2]。



エラーバーは標準偏差

図 1.5 視覚情報量の違いによる作業時間の違い (茂木ら (2016) [2])

一方、人が日常的に何らかの行動を行う場合、視覚情報だけでなく、物にさわることで得られる触覚情報も活用していると考えられる。建設作業においても触覚情報が利用されていると考えられ、建設機械の技術開発として触覚を活用した手法が必要とされている。

たとえば、建設機械を用いた作業のひとつに、水道管やガス管といったライフラインの維持工事として地中掘削作業がある。このとき、目的とする掘削作業を進めるため、地中に埋設されているライフラインと岩などの障害物を触覚的に、いわば“手探り”で選別することが必要となる場合がある（図 1.6, 1.7）。触覚の助けにより地中に埋設されているライフラインを損傷等せずに掘削作業等が進められるようにすることは、搭乗／遠隔操作にかかわらず、安全で効率的に作業を遂行する上で今後求められている重要な要素の1つだと考えられる。

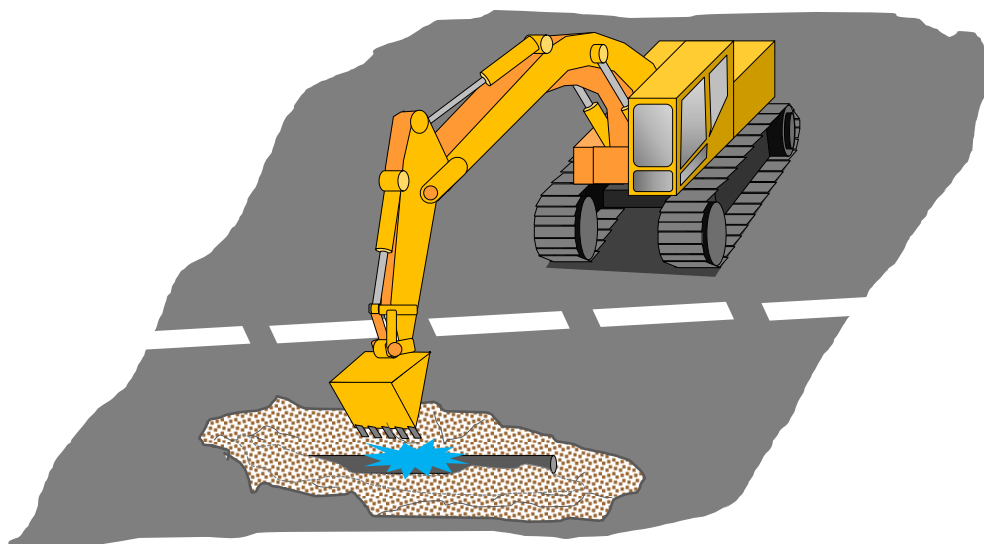


図 1.6 油圧ショベルによる埋設物周辺の掘削

人が対象物に直接手を触れることによって、異なる素材の弁別に必要な情報を得ることができることは、建設現場での作業状況から周知なことである。また、建設機械の操作レバーなどの媒体を介在した状況で対象物（地面等）の特徴を判断することは、建設機械を操作するオペレータの経験や技量に依存するものと考えられている。一方、一般的な触覚能力として、媒体を介して間接的に対象物に触れることでその対象を知覚できることも知られている。たとえば、カツツ(1925)は、鉛筆を使って紙に文字などを書くときに紙の種類や鉛筆の芯先の硬度を弁別できると述べており[3]、人は媒体を介して異なる素材の弁別が可能であると考えられている。さらに、ギブソン(1966)は、触覚において、手を自ら動かすなどの能動的な探索行為によって、より正確な情報が環境から得られる可能性を述べている[4]。

そこで本研究では、媒体を介した人の触覚による探索において、異なる素材の弁別能力及び触覚情報の取得に必要な探索行為の運動的特徴を明らかにすることとした。

1. 2 建設現場での作業実態と課題

2016年11月に九州博多で発生した陥没事故のような都市部での災害復旧活動では、地中内部に混在する上下水道、ガス管等が多く存在し、限られた視覚情報のみではそれらのライフラインを掘削時に損傷させ、復旧に支障が生ずることも想定される。

そのため、建設機械オペレータは、油圧ショベルを用いた掘削作業前に、予め地中内の情報を図面や台帳によって確認しているが、図面等の情報と実際の地中内部の状況に相違も多く見られることから、埋設管等の損傷を回避するためには慎重な作業が必要となる。手探りで地中内部の状況を確認・判断しながら埋設管等を損傷させずに掘削作業を行おうとする場合、油圧ショベルのバケット先端が埋設管に接触したときの違和感を確認しているものの、この段階では、それが埋設管なのか岩塊なのかといった異なる素材の弁別は必ずしも出来ていない状況となっている（図1.7）。

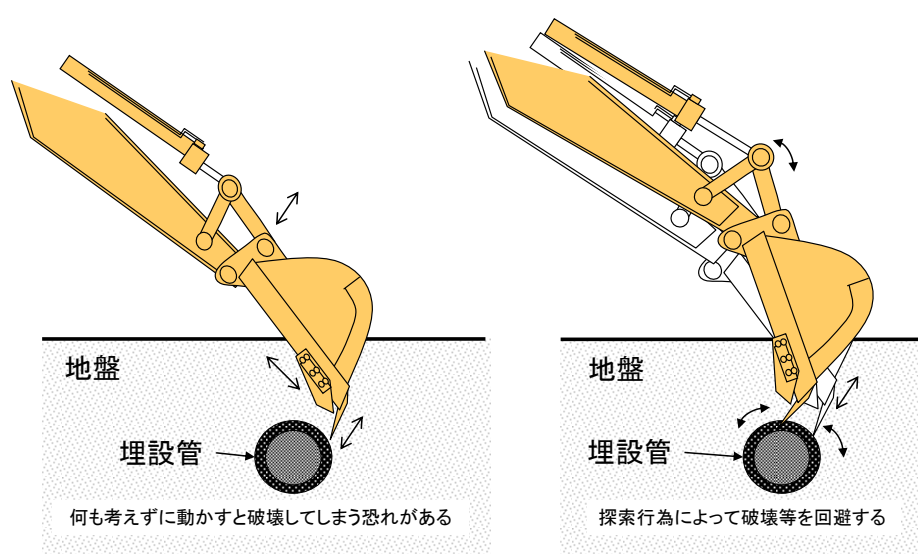


図 1.7 建設現場での地下埋設部に対する油圧ショベルの動き

したがって、次の段階では、対象物をより特定するために、それを損傷等しない程度でバケット先端部を接触させ、押しつけて先端部を振ったり、擦ったり、軽く叩くなどの探索を行い、作業環境内の状況や、接触している対象物固有の情報を取得し、それが埋設管なのか岩塊といった異なる素材となる対象物を確認したうえで、埋設管であればそれを損傷させずに回避した行動をとったうえで掘削作業を行っている。

このように、対象物に接触した際に対象物の感触を感じる触知覚は、安全で効率的に作業を進めるうえで必要な情報だと考えられる。建設機械オペレータは、地中内部の情報を、触覚や聴覚といった視覚以外の知覚を頼りに特定して作業を進めることになる。しかし、そのような高度な作業が可能なのは経験を積んだオペレータに限られ、また、通常の作業よりも多くの時間を要してしまうといった問題が生じる。

図1.8に示すように、火山・土石流などによって人が入り込めないような現場で活用されている無人化施工技術は、遠隔操作装置（コントローラ）により離れた場所から建

設機械を操作するシステムであり，操作時は，建設機械に搭載されたビデオカメラ映像を通した視覚情報から作業現場の状況を判断している．現行のシステムは，多くの場合，映像装置のみの構成のため，搭乗での操作時に得られる感触はコントローラに伝達されておらず，搭乗操作時に得られるような現実感のある触覚情報の伝達機能は有していないため，作業効率に影響を及ぼしているものと考えられる．



図 1.8 災害復旧現場での無人化施工のシステム構成

工場などのように，対象空間内の様々な条件が限定されている環境では，異なる素材の特徴を予め把握し，対象物の特徴となるパラメータの範囲を設定することによって知覚及び力覚を制御側にフィードバックすることが可能となる．現在，環境条件が整えられたダム工事などの建設現場では，工場での作業と同様に自動制御による施工が行われている．たとえば，コンクリートの締固め度合いを締固め機械（振動ローラ）から発生する加速度の反射により締固め（かたさ）の度合いを判断・制御している．

しかし，災害復旧や地下埋設掘削（図 1.9）などのような掘削作業での対象は，土のかたさや密度，さらには石や異物の混入などによって環境条件が異なる状態にある．したがって，掘削の対象となるものは幅広い特性をもち，工場や限定された条件の決められた空間内のように自動化が進んでいない状況となっている．今後，無人化施工技術を効率的・効果的な施工として推進させるためには，建設作業時に利用されている触覚を現場の状況に即して明らかにする必要がある．そのため，建設現場に存在する素材を触覚によって弁別する能力の実態や，弁別のために行われる探索行為の特徴を明らかにする必要がある．



図 1.9 災害によって露出した地下埋設管 (2011.9 茂木撮影)

1. 3 研究対象とする建設機械と研究の必要性

本来、建設機械は、人力によらず効率的に土木工事を可能にするために開発されたものである。建設機械の動作は、地面をならす、土をすくい上げる、盛り立てる、締固める、突き刺す等といった基本動作があり、それらは人が作業する行為を模している。

建設機械には、地面をならすことを目的としたブルドーザーやグレーダー、地面を固めるローラやコンパクター、くい打ち機など、用途に応じた建設機械が開発・使用されている。その中でも油圧ショベルは、人の腕を模したブーム・アーム・バケットで構成されており、汎用性の高い建設機械として広く普及している。特に災害現場や都市土木での掘削作業に必ず油圧ショベルが使用されている。この油圧ショベルは、図 1.10 に示すブーム・アーム・バケットの動きを操作レバーによって油圧制御している。動きの感触は油圧バルブから操作レバーへと、油圧を介して力学的に人に伝達されている。

油圧ショベル操作時に手に伝達される感触は、油圧を介して操作レバーに伝わる対象の触覚的な印象を形成しており、現場での操作者(雲仙普賢岳で無人化施工に携わっているオペレータ 12 人)へのヒアリング結果によれば、熟練した操作者は操作に慣れてくるとあたかも装置を自身の手のような感覚で操作しており、油圧ショベルのバケット先端は感覚的に自身の手先のようなものと述べている。

“手先のような”操作の感覚とは、一般的に人がスコップを用いて土を掘削するとき、スコップを押しつけてすくい上げるといった一連の動作で得られる感覚と類似したものと考えられる。このとき、地中内部に障害物が存在した場合、障害物を壊さないようにスコップ先端を対象物に押しつけて振ったり・擦ったり・軽く叩いたりといった探

索を行うことで障害物の感触を確認し，場合によってスコップで対象を砕いたり，掘り出すことで除去したり，回避したりといった作業を行う．スコップという媒体を介して感じる障害物の感触は，油圧ショベルによる作業時に操作者が体感する感覚，すなわち，“バケット先端は感覚的に手先のようなものだ”とする感覚に共通するものと予想される．

したがって，建設作業を遂行するうえで必要となる道具であるスコップや建設機械（油圧ショベルのバケット先端部）等の媒体を介する人の触知覚の実態を実験により明らかにすること，また，その触知覚の成立条件となる探索行為を分析することが必要であると考えられる．媒体を介した触知覚で利用されている知覚情報を特定することは，将来，日々の土木作業や災害現場の復旧活動に使用する遠隔での建設機械の操作（無人化施工技術）をより安全で効率的なものとするに寄与すると考えられる．

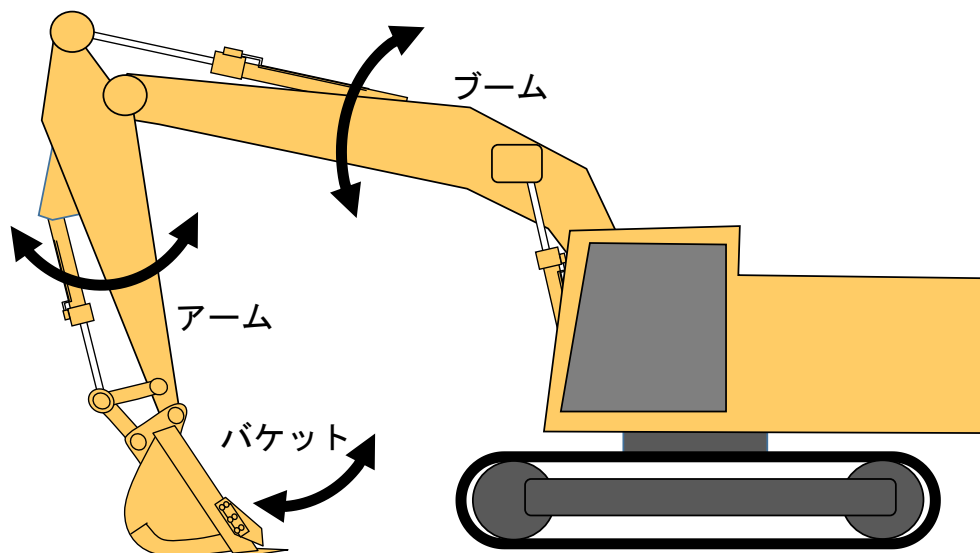


図 1.10 油圧ショベルにおけるブーム・アーム・バケットの動作機構

第2章 触知覚とは

2.1 触知覚機能

人は、触覚によって、形状や重さ、かたさや表面の凹凸等の情報を得ており、それに応じて目的とする行動をとっている。このような触覚は、必ずしも知覚者の身体で対象を直接に触れているときだけではなく、道具などの媒体を介して触れている場合でも有効であり、たとえば、スコップなどの道具や（図 2.1）、建設機械に搭乗して行う、土を掘る、叩く、押しつける等といった建設作業でも（図 2.2, 2.3）、人は当たり前のように道具や機械を使いこなして対象を触知し、環境に応じた振る舞いを行うことができる。このようにスコップや建設機械といった“身体の延長”そのものや、その“身体の延長”を通じた触知覚は、“ダイナミック・タッチ”（佐々木ら，2001, [5]；Turvey, 1996, [69])と呼ばれる。また、同様のことをギブソン(1966) [4]は、“注目すべきことは、人が何かに棒でさわるとき、何かを手で感じるのではなく、棒の先端で感じることである”と指摘している。

人が周辺環境の状況を判断する場合、目視確認のできる範囲では視覚優位となるが、地中内部に隠れているもののように視覚による情報が取得できない場合には、聴覚や触覚から得られる知覚情報を頼りに行動していると考えられる。このとき、触知覚による情報の取得に関しては、地中の内部で触れたものがコンクリートなのか土なのかといった素材の特徴について判断することを、スコップや建設機械などの先端部を媒介した触覚によって行っているものと考えられる。

以下、触知覚のメカニズムを把握するうえで必要となる基礎的な知見を概観する。

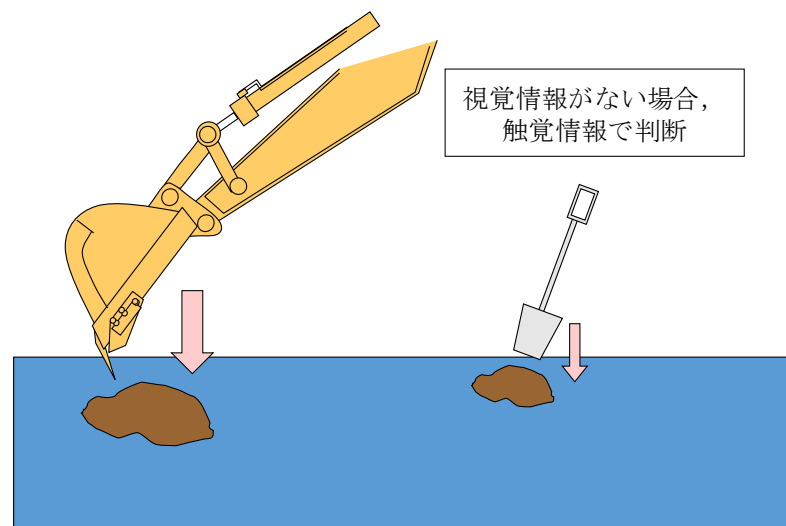


図 2.1 地中内部での掘削作業時におけるアプローチ



図 2.2 掘削作業時の建設機械の状態 (2013.3 茂木撮影)



図 2.3 掘削時のバケット先端部の状況 (2013.3 茂木撮影)

2. 2 生体システムとしての触覚

2. 2. 1 触感覚について

主な感覚受容器は、皮膚で感じる触覚（触れる）・温覚（熱い）・冷覚（冷たい）・痛覚（痛い）・圧覚（押される）といった感覚がある。

この触感は、一般的に図 2.4 に示すように視覚・触覚・聴覚といった知覚システムが単独若しくは複合、場合によっては言語・記憶が関連して触感となっているものと考えられる。また、触感の正確性については、経験や練習によって得られるものと考えられる。

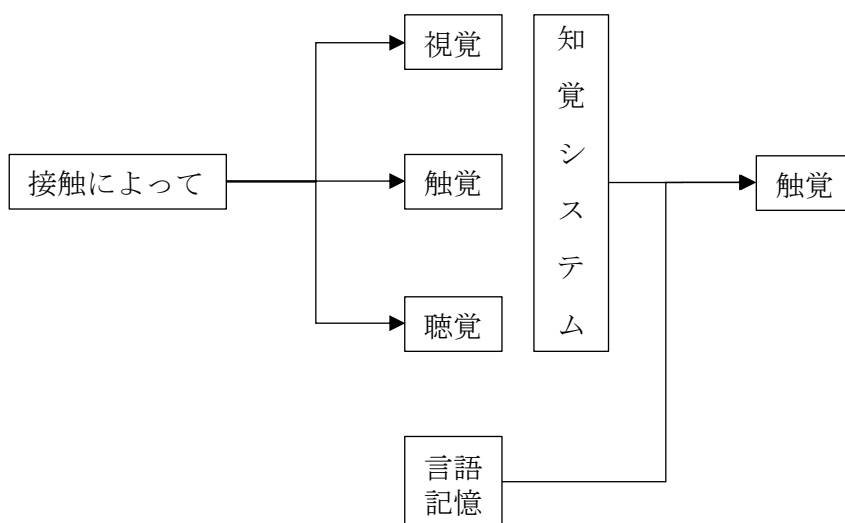


図 2.4 知覚システムの構成(仲谷・寛・白土, 2011, p15 より作図[6])

2. 2. 2 感覚受容器の構造とバイオメカニズム

触圧感覚受容器は、皮膚の表皮及び真皮には触圧覚に関与する種々の受容器が存在し、図 2.5 に示す感覚受容器で構成されている。

感覚受容器は、マイスナー小体、メルケル盤、ルフィニ終末、パチニ小体があり、触った感覚を知覚する速順応性のマイスナー小体、手掌（手のひら）や手指の真皮乳頭にある感覚受容器やメルケル盤・ルフィニ終末は持続的な機械刺激（圧覚）に関与する機能、パチニ小体は、真皮の深層部に分布し振動刺激に反応するといった機能を持っている。具体的な機能については、下記①～④(仲谷・寛・白土, 2011, pp. 26-27, [6])で述べる。

これらは、機能が全て明らかになっているものではないが、このように表皮から真皮において触圧の知覚に関与する機械的受容器で構成されている。触情報は、物に直接触れることや機械的な刺激が加わることによって受容器が反応し、感覚情報が中枢に伝達される。

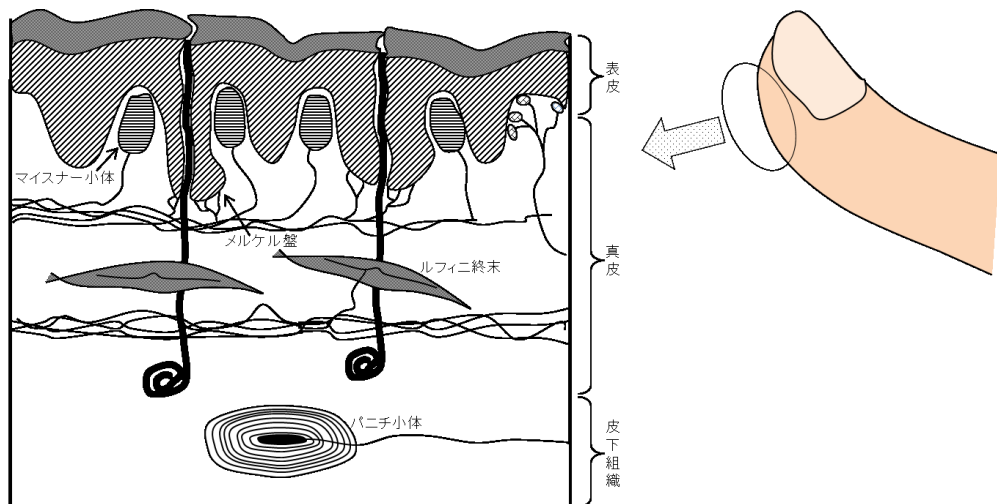


図 2.5 感覚受容器 (仲谷他, 2011, p21; 岩村, 2001, p209 より作図 [6], [7])

① マイスナー小体

指と物体との間にツツとした「すべり」が生じたときに素早く応答する受容器である。この感度に関しては、メルケル盤の4倍にもなる感度を持っている。

また、マイスナー小体はメルケル盤と比較すると指の中に多く存在している。ただし、メルケル盤ほどに明確な形の触感を脳に伝達できるものではないといった特徴を持っている。

すべり感への敏感さは、人間の触動作に大きく影響していることが考えられており、人間は、握っているものがすべると、思わず握ってしまう性質（把持力反射）がある。これは、マイスナー小体が反応しやすい周波数 30Hz で人間が持っている物体を振動させると、無意識のうちに物体を握る力が増えてしまうといった特性が考えられる。

② メルケル盤

メルケル盤は、指先に触れている物体表面のエッジに対して反応する特徴を持っている。また、物体の形状がどのような凹凸（曲率）を持っているのかといった情報を脳に伝達している。

形状の判断に関しては、このメルケル盤が担っているものと考えられる。

③ ルフィニ終末

皮膚の伸びに対して応答する。現段階ではその機能が明らかになっていない。

④ パチニ小体

他の受容器と比較して 10~100 倍ほどの大きい受容器である。また、高い振動周波数 200~500Hz によく反応する性質を持っている。この振動は、指で感じ取るやわらかい微弱な感覚を得ることができる。

パチニ小体は皮膚の奥に位置していることから触れている物体の振動に対して応答している。メルケル盤が凹凸したものに対して反応するのに対して、パチニ小体は、もっと細かい肌理に対して反応する性質を持っている。

棒を握る手のひらを中心とした皮膚の構造は、無毛部、角質層、表皮、真皮、皮下組織から構成されており、各層の厚さは、角質層が薄く、表皮、真皮、皮下組織といった身体内部の深部にしたがって厚いものとなっている。

この複雑な皮膚構造において、指先の無毛部のような一番表面に近い場所で表皮と真皮の境界にマイスナー小体とメルケル盤が多く存在しており、真皮側にルフィニ終末といった構成となっている。パチニ小体は、皮膚の深部である皮下組織に存在しており、皮膚構造と感覚受容器の複雑な組み合わせと環境から与えられる外圧やそれに伴う皮膚の変形によって触感に影響を及ぼしているものと考えられる。

このことから、本研究における媒体を通じた触知覚に関しては、持手の形態や力などによって、伝達される情報の質や量の違い、反応する受容器の位置等によって個人差が生ずるものと考えられる。

2. 2. 3 シナプスの可塑性

図 2.6 に示す知覚システムの中で、学習・記憶は、信号伝達に重要な働きをしているニューロンで行われている。このことは、対象物のかたさや表面の凹凸感といった感覚に関しては、発達段階及び習熟プロセスにおけるシナプスの可塑性が基本となるものといえる。

シナプスの可塑性には大きく分けてシナプス結合及び伝達といった 2 種類がある。シナプスの結合に関しては、神経・筋系・赤核・海馬で見出された発芽によって新たにシナプスが形成される。

したがって、学習・記憶段階により、シナプス数の増加や神経伝達物質の分泌量増加に伴う伝達能力が向上し、異なる素材の触知覚が可能なものになるといえる。

自身の運動・行動における、大脳からのアプローチは、ペンフィールド(1891-1976)の脳表面刺激の研究において定義された第一体性感覚が挙げられる。第一体性感覚野は、脳の中心溝と頭頂間溝を挟んで脳の奥に存在している。構成としては、ブロードマン地図における 1 野、2 野、3a 野、3b 野が触知覚に関連する要素だと考えられている。

第一体性感覚野に関しては、複数の皮質領域がネットワークを形成して、触知覚に関する機能が働いているものと考えられるが、本研究では脳科学・医学的な知見でのアプローチを考えていないことから、概要のみに留め、詳細は述べないこととした。

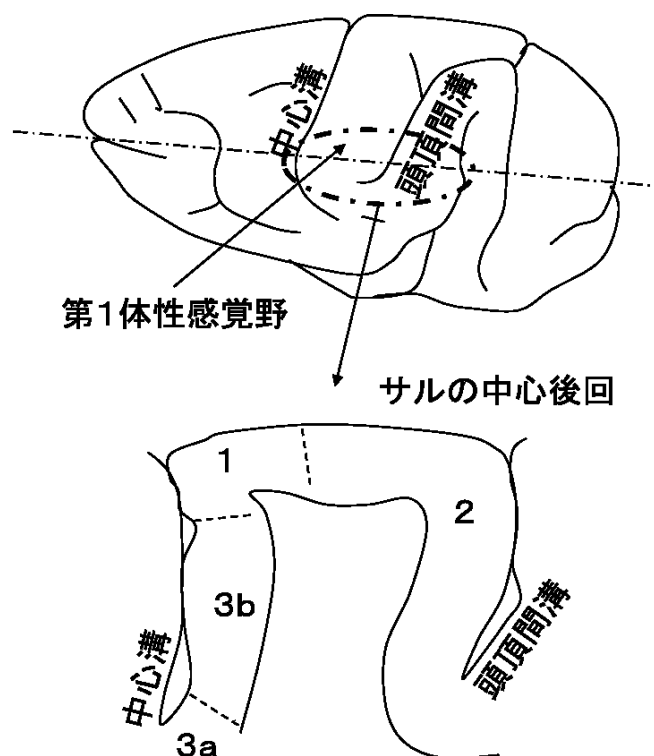


図 2.6 第1体性感覚野のイメージ図(岩村, 2001, p74 より作図[7])

図 2.6 に示す中心溝からの最前方に位置する 3 野は 3a, 3b 野に分かれている。3a 野は、関節や筋など深部情報が投射するが、運動野への移行部であり、単なる感覚野でないといった不明な点があるとしている[7]。

一方、3b 野に関しては、本研究とも関連することだが、岩村(2001)は“3b 野は皮膚ニューロンが主(62.7%) (岩村, 2001, p. 74, [7])”と述べており、その 3b 野の中の指領域に関しては、指先・腹側面・背側面がそれぞれに区分される(岩村, 2001, p. 76, [7])。

したがって、3b 野では、「擦る」「つまむ」「つねる」といった行為において異なる指を能動的に振る舞うことによって、ニューロンの部位が活性化しているものと考えられる。

2. 3 触覚に関するこれまでの考え方

紀元前から現代までに多くの哲学者・科学者によって、触覚に関わる考え方・メカニズムが検討されてきた。特に紀元前における哲学者アリストテレスによる知覚の考え方については、以降の科学研究の基礎となっている。現代においては、生理学・生態心理学等の科学的知見からの研究が進められている。

以下、これまでの触覚に関するとらえ方を時系列に沿って述べる。

2. 3. 1 アリストテレスと触覚

アリストテレスの時代(BC384-BC322)には、視覚・聴覚・味覚・嗅覚と、5番目の知覚として、皮膚に触れる感触(「ハペー」といった感覚が挙げられていた。

そもそも、この時代での触覚の考え方は、皮膚あるいは肉という等質な構造を介して経験する感覚と考えられており、“能動的にさわることによって起こる感覚”や19世紀末以降に定義された触覚“受け身の状態で体験する皮膚の感覚に限定されてはいない”といった考え方の基礎だといえる。(岩村, 2001, pp. 2-3, [7])

また、このアリストテレスの時代では、触覚の要素には、熱いもの、冷たいもの、固形のもの、流動的なものといった相互的な関係が含まれており触覚の要素となる種類が多くあることや、触覚を起こす刺激が何か、これを受容する仕組みは何かといったポイントが不明確であった。

2. 3. 2 一般感覚

アリストテレス以後、触覚は、「一般感覚」あるいは「普通感覚」と呼ばれていた。この感覚の中には、皮膚だけではなく、筋などの深部組織、内臓、三半規管に起こる感覚も含まれていた。

一般感覚について詳細な研究を進めたドイツの生理学者ウェーバー(1795-1878, [8])は、それを、視覚、聴覚、味覚、嗅覚、内臓感覚、平衡感覚を除く、身体で感じる感覚として定義していた。また、1970年代の日本の生理学では、「体性感覚」は5番目の知覚として考えられていた。(岩村, 2001, p. 4, [7])

体性感覚における考え方の背景は、感覚生理学における皮膚感覚の深部感覚の受容機構とその中枢メカニズムに関する研究によるものである。具体的に体性感覚の定義に関しては、岩村(2001)が述べている“身体の表層組織(皮膚や粘膜)や深部組織(筋・腱・骨膜・関節囊・靭帯)にある受容器が刺激されて生じる感覚で内臓感覚は含まないもの(岩村, 2001, p. 5, [7])”となっている。

また、体性感覚は、触覚・温度感覚・痛覚などの「皮膚感覚」、筋や腱、関節などの運動器官に起こる「深部感覚」として大別されており、対象とする身体部位、行動(行為)によって分けられている。

2. 3. 3 近代の触覚、皮膚感覚

本研究に関連する、近代の触覚に関する考え方は、主にウェーバー、ベル、ミューラー、ヘルムホルツらによって考え方が整理された(岩村, 2001, pp. 5-7, [7])。

ウェーバーが述べている“触覚(Tastsinn)を皮膚の受容器の働きのみによるもの[8]”とし、触覚(Tastsinn)を一般感覚(Gemeingefühl)から独立したものとして定義した。この中でウェーバーは、指先や唇、舌尖において空間分解能が高いことを見いだした。

また、ウェーバーは、元となる重さ w に対して識別できる最小の重さの増加・減少 dw の割合は一定であるとした「 $dw/w = \text{一定}$ 」ウェーバー・フェヒナーの法則を見出し

ており、定性的であった生理学・心理学における研究をより具体的に進められる基盤を構築した(岩村, 2001, pp. 6, [7]).

次にスコットランドのベル(1774-1842)は、アリストテレスの 5 つの感覚に対して、それぞれの特異性をもった神経が存在すると主張した。ドイツの生理学者であるミュラー(1801-1858)は、ある神経(神経走行)のどこを刺激しても同一の感覚を得ることが出来ることや刺激される神経が違えば起こる感覚も違うことを見いだした。

ドイツの生理学・物理学者であるヘルムホルツ(1821-1894)は、感覚のモダリティ(sensory modality)という用語を導入し、触・温・冷・痛の皮膚感覚があることを示した。

2. 3. 4 感覚受容器の考え方と能動的触覚の意義

感覚受容器に関しては、ドイツのフォン・フライ(1852-1932)が、触覚・温覚・冷覚・痛覚の4つは互いに独立し、皮膚感覚の種類として、それぞれ固有の受容器が存在することを主張した。

当初、フォン・フライは、人の皮膚内部の感覚受容器の役割として、クラウゼ(krause)小体を冷覚、ルフィニ(ruffini)終末を温覚、マイスナー(meissner)小体を圧覚、自由神経終末を痛覚とした生体システム的なアプローチを示した。後にクラウゼ(krause)小体を冷覚、ルフィニ(ruffini)終末を温覚については、誤りであることが明らかとなった。

また、フォン・フライは、要素的皮膚感覚を仮定した時、振動覚を圧覚に含めた、すなわち、皮膚には圧覚受容器だけが存在すると考えた。

しかし、ドイツの心理学者であるカツ(1884-1953)は、振動覚と圧覚は別ものであると主張し、4つの機械的受容器マイスナー小体、メルケル盤、パチニ小体、ルフィニ終末を示した。

本研究に深く関連しているアクティブ・タッチ(Active touch)又はハプティクス(haptics)とは、“手で自由に触ることによって生ずる対象の知覚で、能動的触覚(岩村, 2001, p. 17, [7])”と岩村が主張している。その主張は、カツ(1925)の“触覚を効率よくはたらかすためには運動が重要である(カツ(1925), p51)”に基づくものと考えられ、“手で自由に触ることによって生じる知覚、日常生活の中では、能動的に触れることで我々は自身ではなく、外界を知覚すること(岩村, 2001, p. 17, [7])”，すなわち、対象物に対して凹凸や肌理、かたさ等の感覚を能動的に触れることによって弁別が可能となるものといえる。

能動的感覚の意義に関して、カツの後、ギブソン(1904-1979)は、アリストテレスに始まった五感に区分する考え方は不十分であり、固有感覚に機械的受容器の考え方が含まれていないこと、能動的に働く時に起こるある種の体験が含まれていないといった重要事項を指摘した Gibson(1966) [4]。また、ギブソンは、形の知覚で動きの重要性を指摘し、知覚の不変性にも言及した。

ギブソンの提案は、5つの知覚システム、①基礎定位系、②聴覚系、③ハプティック系、④味臭覚系、⑤視覚系を挙げている。

ここで、③ハプティック系については、皮膚・関節・筋に存在する受容器群が共同して貢献する複合的な知覚系としており、ギブソン(1966)[4]は、手や口などの能動的な知覚器官を挙げ、人あるいは動物が身体に接触する環境や対象物あるいは自分自身の身体を知覚するための系としていると述べている。(岩村, 2001, pp. 17, [7])

しかし、皮膚感覚研究に携わった多くの心理学者にアクティブ・タッチが敬遠された一つの理由は、アクティブ・タッチは、皮膚感覚だけでなく運動感覚を含み、視覚あるいは他の手がかりも役割を演じ、運動系も関与すると考えられ、分析的な手法でのアプローチは複雑すぎると述べている(岩村, 2001, p. 17, [7])。

2. 4 知覚としての触覚

2. 4. 1 触覚探索行為と記憶との関係

触覚的弁別と記憶にかかわる体性感覚野ニューロンのメカニズムに関しては、手指を使っての探索、対象を操作する時には、接触のたびに知覚が生起するはずだが、対象を同定するため、また、探索や操作の動作を続けるためには、記憶にかかわる体性感覚野ニューロンの働きとして個々の知覚を一時記憶するメカニズムが関係しているものと考えられる。

2. 4. 2 アクティブ・タッチの神経機構

触知覚による対象物の探索メカニズムは複雑であり、脳科学・振動学・生理学・心理学等により整理するだけでは説明が難しい。特に触知覚による対象の特定や認識の過程は、パッシブ(受動的)なものに対してアクティブ(能動的)に探索することが効果的だと考えられる。

本研究でも、接触によって得られる情報、その情報を有効に認識するための能動的な手段について研究を進める必要がある。

そもそも、アクティブ・タッチについて、岩村(2001)は、“ギブソン(1966)が述べているアクティブ・タッチは一つの感覚の種だという基準には合わないが、外界について一つのはっきりした情報のチャンネルを提供するので、それ自体、他から分離できる知覚の形態だ”としており(岩村, 2001, pp. 149, [7])、本研究における異なる素材の弁別といった人の触知覚といった行為に対して有効なものだと考えられる。

2. 5 媒体を通じた人の触知覚

媒体を通じた触知覚に関する研究の代表として、ダーヴィット・カッツ(1925)「触覚の世界—実験現象学の地平線—」[3]があげられる。

特にカッツ(1925)が表面触に関する研究の中で述べている“硬い介在物を介して離れたものに触る条件”の中で[3]、本研究で明らかにしようとしていることと同様な視覚聴覚を遮蔽した条件による実験として、ヨハン・ファーバー社製の5本の鉛筆の硬度を弁別する課題を実施している。このカッツの実験では、鉛筆を持っている手の中で持続する圧と振動を被験者が感じており、それは鉛筆の硬度によって変化し、柔らかい鉛筆より硬いものの方が鋭く硬度を感じると述べている。

また、カッツ(1925)は“硬い柔らかいの判断に応じて、被験者は鉛筆の視覚的イメージをはっきりともち、鉛筆の線の太さ濃さまで分かる(カッツ, 1925, 東山他訳, 2003, pp. 75, [3])”としており、鉛筆という媒体を通じた触知覚の存在が示唆される。

次にカッツ(1925)は、同じペンを用いて、用紙の下敷きの材質を変えた実験を実施している。下敷きの材質には、紙・木・革・リノリウム・ガラス・金属といった異なる材質を用いて触知覚の違いを検証している。ペンとの接触部に関しては、紙を介在させ表面の粗さに違いを持たせないようになっている。結果として、それぞれの材質から異なった結果が得られ、下敷きのそれぞれの異なる弾性によってペンの振動が異なり、弁別されているものと考えられる。また、振動のほかに奥行方向にペンを押しつけた時にも弁別ができるものと考えられる。また、全長4~5cmの棒(ペン軸の先端に木の棒を取り付けており先端部は丸い形状のもの)を介して紙質(14種類の異なる紙質)の弁別ができることをカッツは実験により検証している。(カッツ, 1925, 東山他訳, 2003, pp. 75-76, [3])

カッツのこのような実験により、硬い介在物を用いて離れている対象を触覚的に弁別できるのは、摩擦によって作られた振動が殆ど損なわれずに情報として伝えられるときのみであり、それは手を動かすときに生ずる抵抗の違いによる材質差を経験することで得られるものだと述べている。

2. 6 本研究における触知覚に関する研究アプローチ

カッツ(1925)は、“多くの特定の面の触印象は、触官を動かしているときのみを生ずるものであって、動かしていないときは生じない(カッツ 東山他訳, 2003, pp. 36, [3])”と述べており、このような考え方は、後にギブソン(1966)が述べる“アクティブ・タッチ”の考え方に多大な影響を及ぼしたものと考えられる。

建設作業の現場で必要とされる触知覚もまた能動的であり、カッツ及びギブソンの考え方を踏まえ、本研究では人の能動的な触知覚に関する研究を進めることとした。

また、建設作業では道具を使用して作業を行うことが通常である。実際、建設作業に携わる作業員や建設機械オペレータにヒアリングを行うと、その多くは、道具を介してそれが触れている対象物を同定できると報告する。建設機械オペレータ12人にイン

レビューを行ったところ、土の下に埋設されている上下水道管や電線管、岩塊などに建設機械のバケット先端部が接触した場合には、概ね土とは違う感触を感じるのとことであつた。このとき対象の“素材”の違いを感じており、その際に対象の一部に接触するだけではなく、先端部を動かして能動的に探索していることを窺い知ることができる。建設現場のように、様々な素材や幅広い特徴を有する環境条件での人の触覚については、受動的な触覚による判断は難しく、環境に対して能動的に探索を行うことで積極的に情報を得る必要性が増すものと考えられる。その実態について定量的に明らかにすることが、将来的により人間の感覚に寄り添った建設機械を開発するためにも必要であるとされる。

ところで、搭乗による建設機械の操作の場合、建設機械オペレータの手は、地面やそこに埋設された構造物に直接触れているわけではなく、手に直接触れる操作レバーと、スコップのような機能を持つ油圧ショベルの作業装置であるブーム・アーム・バケットが、油圧による駆動機構によって媒介され人に対して間接的に触れるものとなっている¹ (図 2.7, 2.8)。このことから、建設現場における建設機械オペレータの触覚を検討する上では、道具に媒介されて間接的に得られる触覚を検討する必要があるだろう。

これについて検討する際、建設機械によって行われる作業やその基本動作 (図 2.8) は、規模こそ異なるものの、本来は人がスコップなどを使用して行う際のものと同様であり、いずれも対象との接触に物理的な伝達機構が介在するという意味で、それらは本質的に同等と見なせると考えられる。したがって、本研究では建設機械そのものは使用せず、手で把持した探索棒を介した触覚について検討することとする。

¹ 一方、遠隔操作型の建設機械においては、作業の対象物 (地面や構造物等) とオペレータとの間に物理的な接続はない (遠隔操作型のインターフェースについては図 2.10, 2.11 を参照。)。人が操作するレバーの変位を電気信号として送信し、受信された電気信号に基づき油圧バルブの開閉制御を行い油圧ショベルの作業装置であるブーム・アーム・バケットを動かしている。それらの中には人が触覚的な情報の接続は存在せず、オペレータから建設機械に対して送られる制御情報と、建設作業現場から得ることができる視覚情報のみとなる。現在、遠隔操作型の建設機械においては、建設作業において視覚情報を確保することのできない地下掘削に関し建設作業を進めるうえで建設機械オペレータが不足する知覚情報を補うための研究として、Fujino, Moteki, Nishiyama, Yuta (2013) は、掘削先端部 (バケット) に作用する力 (ひずみ) を計測し、計測データに基づき地下掘削作業における自動運転システム開発に向けた研究 [9]を進めている。

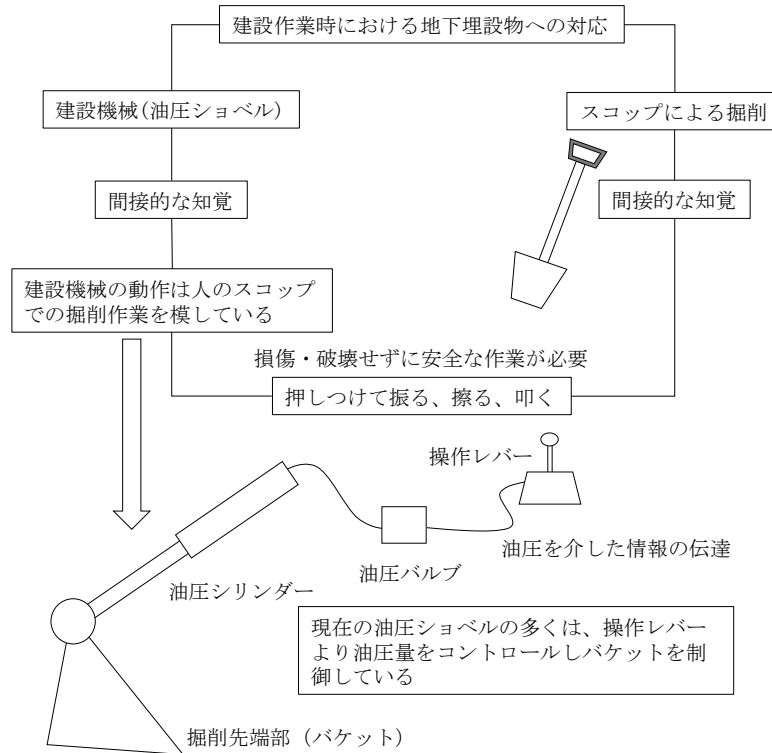


図 2.7 地中埋設部の掘削時における媒体を通した触知覚の伝達機構

油圧ショベルでの基本動作は、図 2.8 に示すように地面を掘削するため、ブーム・アーム・バケットを連動させて掘削機バケット先端を押し込み・引き寄せ・すくい上げるといった手順で行なわれている。

この一連の動作において地中内部に上下水道管などの地下埋設物といった障害物が存在する場合、障害物を損傷させずに回避する必要がある。地面内部で障害物に接触した際、埋設管等の埋設物の弁別が必要となる。現場で一般的な油圧ショベルの動作は、埋設管等に接触した際、油圧ショベルバケット先端を軽く押しつけてた状態で振る行為（対象に押しつけた先端部を始点としてブーム・アーム・バケットを「振る」のであり、対象を揺するものではない）を行い、次に擦る・叩くといった触知覚による探索行為によって生起する。

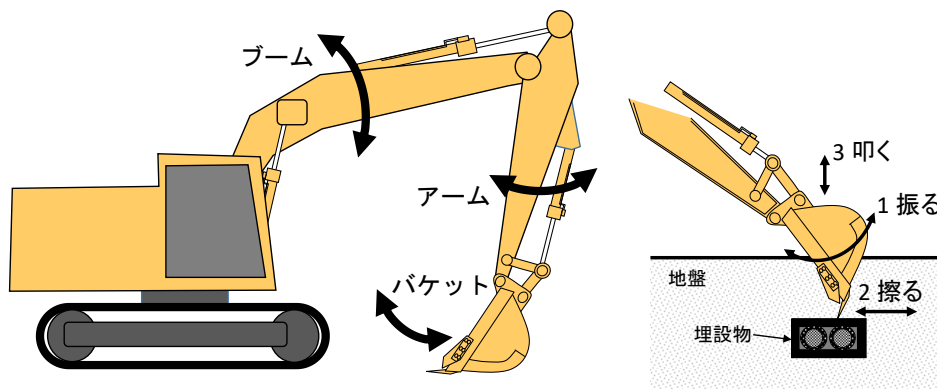


図 2.8 油圧ショベルの動作と地下埋設部への掘削動作例

油圧ショベルの操作は、図 2.9, 2.10 に示すインターフェースによって行われており、操作パターンは、図 2.11 に示すように左右の2つのレバーを前後左右に操作することによってブーム・アーム・バケットを制御している。



図 2.9 搭乗タイプの操作インターフェース



図 2.10 遠隔操作用ジョイスティックタイプのインターフェース

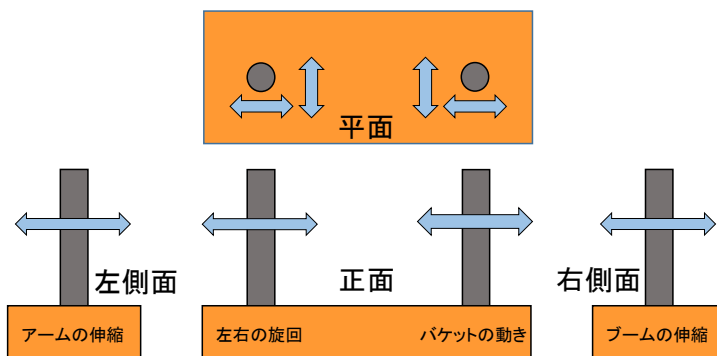


図 2.11 操作インターフェースにおける操作レバーのレイアウト
(遠隔・搭乗共に同じレイアウト)

探索時の行為に関しては、油圧ショベルでの掘削作業において、埋設物に接触した際、埋設物がどのようなものなのかを判断するまで、損傷・破壊させないために慎重な対応が必要となる。建設現場では、油圧ショベルやスコップによる掘削作業一般において、埋設物に接触した際、埋設物がどのようなものなのかを判断する行為として、バケットやスコップの先端が埋設部に接触した後、接触した埋設物を損傷・破壊させない程度にバケットやスコップの先端を対象物に押しつけて振る行為を行い、次に擦る行為を行った後、損傷・破壊させない程度に叩くといった行為を行っている。これまでの経験から接触時に振る行為から周辺を擦り、最後に叩くといった行為を行っているものと考えられる。

前述したように、本研究では、搭乗操作型の油圧ショベルを利用した建設作業として、地面を掘削する際に障害物となる埋設物をオペレータが知覚するという場面を想定しつつ、これを手で把持した探索棒による異なる素材の弁別課題として実験室実験に再構成したものを実施する。具体的には、油圧ショベルの操作レバーの代わりに、媒体としてABS樹脂で製作した棒（以下、「探索棒」）を用い、異なる素材の弁別を行う実験を行うこととした。

第3章 研究の目的と構成

3. 1 研究の目的

土木現場で掘削等の作業を安全かつ効率的に遂行する上で必要となる機材の開発を将来的な目標としつつ、現実の建設作業において生じている触覚的な弁別課題を実験室的な心理実験として再構成し、触覚的に、かつ媒体を通じて対象を同定するために必要な探索行為の運動的特徴を明らかにしようとするものである。

本研究は、研究1と研究2から構成される。研究1では、探索棒を媒体として異なる素材を弁別する人の触知覚能力について明らかにするための実験（実験1）を行った。探索行為は、建設現場における掘削作業の際に典型的に見られる行動に準拠して、“探索棒を供試体に押し付け、先端部を支点として探索棒を振る行為（以下、「振る探索行為」）”、“探索棒を供試体に押し付けて擦る行為（以下、「擦る探索行為」）”、“探索棒で供試体を叩く行為（以下、「叩く探索行為」）”の3種類とした。その上で、素材の弁別に関して正解率上位者と下位者における探索行為について特徴を明らかにした。

研究2では、素材毎の弁別が安定的なものであることを明らかにするため、実験1と同様の手順によって実験2を行った。また、実験2では、触知覚による探索時において探索棒に発生するひずみと加速度を計測し、弁別向上につながる探索行為の運動的特徴を明らかにするための分析を行った。

3. 2 先行研究との関係と研究範囲

本研究に関連する触知覚及び力覚に関する先行研究としては、カツツ(1925)の他、間接的な触知覚に関連する研究として、医療・福祉分野での研究が見られる。

福祉分野に関しては、大滝ら(2006)[10]、布川(2008)[11]が行っている白杖の利用における人への知覚情報の伝達について述べている。また、医療分野においては、腹腔鏡手術に関係する研究が挙げられ、中尾・黒田(2007)が“聴診器からメスまで様々なものを人体に当てる作業を行う際に、我々は無意識のうちに「衝突した」感覚や、「押している」感覚に頼って制御を行っている。これらの「操作」を伴う作業においては、力覚の計測・提示は重要な役割を果たしている(中尾・黒田, 2007, pp. 661, [12]).”と述べているように触知覚は重要な役割を果たしており遠隔での手術において力覚のメカニズム・フィードバック技術等の研究開発が進められている。また、村瀬・神谷・村上(2015)は、日常生活に関連する筆記等の分野においても筆圧等の力覚メカニズム [13]について研究が進められている。

これら先行研究における分野に関しては、触知覚の対象が紙・人体・点字ブロック等に限定されている。例えば、内臓や血管のかたさの違いや紙質・筆感といったいわば同質の対象を範囲とした研究となっている。

本研究は、媒体を介した人の触知覚（感覚・感触）として、符号化（デジタル化）されたかたさ情報を人に与えたり、同一な材質においてかたさのパラメータを変化させることによる弁別実験ではなく、建設作業で一般的に使用されるゴム・ウレタン・プラ

スチック・木材・コンクリート・鋼材といった異なる素材の弁別が可能であるか、また、弁別時に正解・誤認の再現性といった探索行為の実態を実験により明らかにするものである。

なお、本研究では、行動レベルでの現象としての触覚を直接の考察の対象とし、触覚を支える感覚受容器の低次のメカニズムについては、その前提知識を確認するにとどめる。

3. 3 研究の構成

本研究は、図 3.1 のフローに示す構成で進めた。

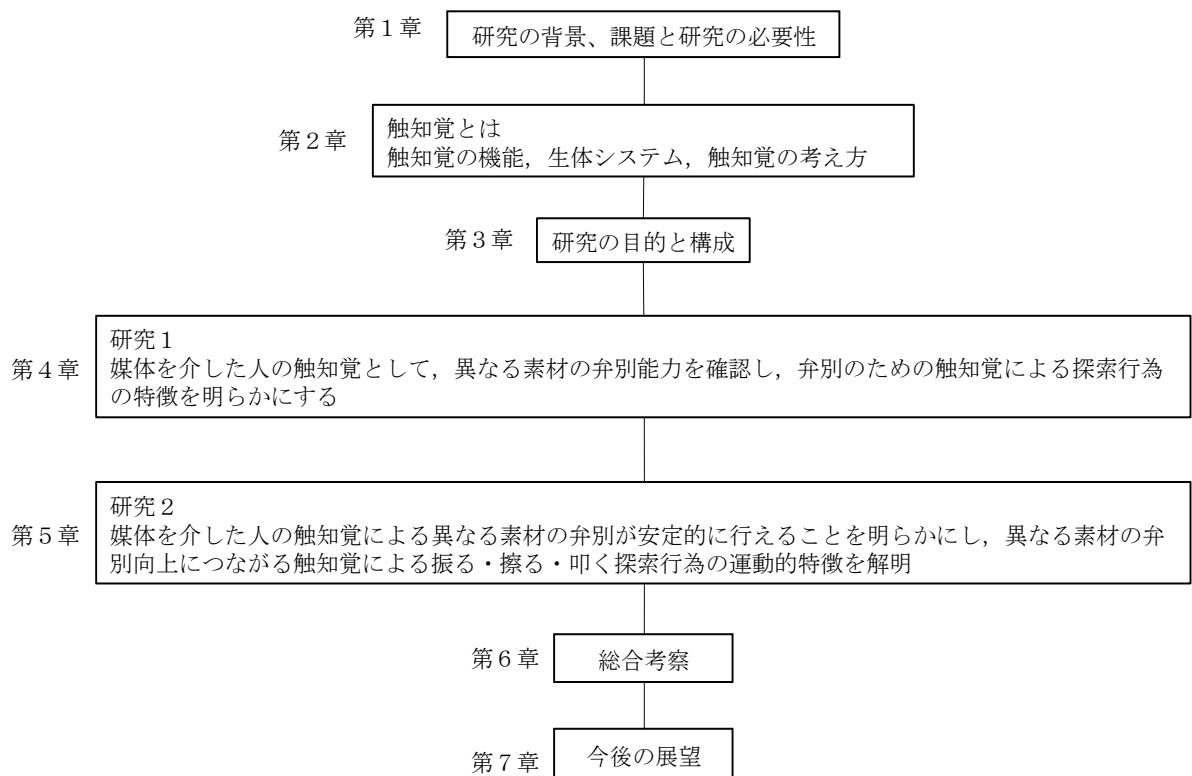


図 3.1 本研究の構成

第 1 章では研究の背景及び課題，研究の必要性について述べた．第 2 章では，生体システム(感覚受容器等)としての触知覚のメカニズムや神経機構等についての総論を述べ、本研究を進めるうえでの基礎的な知見と本研究を進めるうえで必要となる媒体を通じた人の触知覚に関する先行研究及び研究アプローチについて述べた。

第 3 章では，研究目的を述べるとともに研究の流れ及び研究対象とする範囲及び本論文の構成について述べた。

第 4 章では，研究 1 として，建設機械の操作レバーを模した探索棒を用い，供試体(ゴム・ウレタン・プラスチック・コンクリート・鋼材といった異なる 6 種類の素材)に対して触知覚的な振る・擦る・叩く探索行為(実験 1)に基づく異なる素材の弁別能力

に関する実験について報告する。また、実験1により異なる素材の弁別における正解率上位者と下位者に関して触知覚による探索行為の特徴を報告する。

第5章では、研究1によって明らかとなった異なる素材の弁別能力が安定的なものか実験2により検証した結果を述べる。また、触知覚による異なる素材の弁別における探索行為の特徴について、探索時において探索棒に作用する力(ひずみ)・動作(加速度)を定量的に計測し、評価手法として再帰性定量化解析(Recurrence Quantification Analysis)及びクラスター分析を用い、媒体を通じた触知覚による振る・擦る・叩く探索行為といった3つの探索行為における弁別向上につながる運動的特徴について述べる。

第6章では、総合考察として、媒体を通じた触知覚による振る・擦る・叩く探索行為における異なる素材の弁別能力とその弁別における探索行為の安定性や弁別向上につながる探索行為の運動的特徴とその背景にある関連因子について考察する。

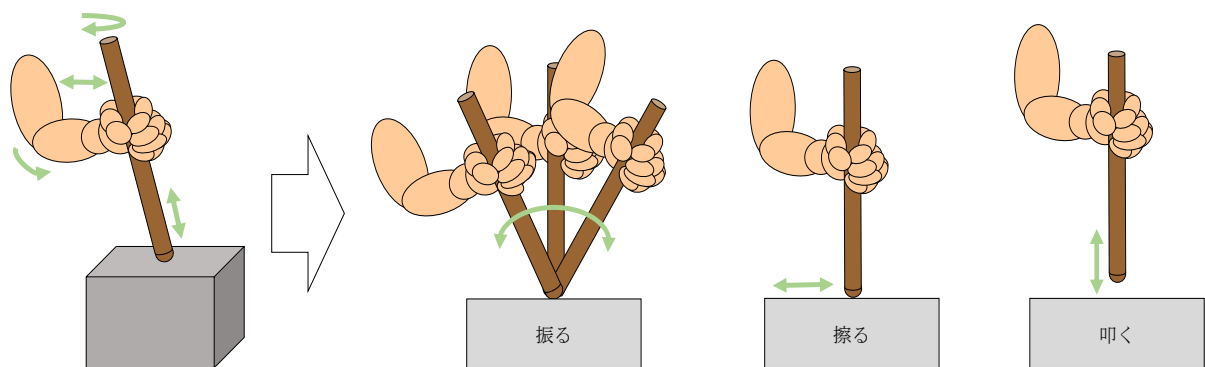
また、建設作業において視覚情報が遮蔽された地中内部等を対象とした作業時に必要となる探索行為及び触知覚情報取得の必要性を議論する。

第7章では、残された課題を示し、今後の進むべき研究に関して展望する。

第4章 研究1：触知覚的な探索行為による異なる素材の弁別能力

本章では、触知覚的な探索行為による弁別能力の実態を明らかにするために実施した実験1について報告する。具体的には図4.1に示すように、建設作業で建設機械のオペレータが障害物を触覚的に探索する際に行う動作である「振る探索行為」、「擦る探索行為」、「叩く探索行為」について、異なる素材を用いた弁別実験(実験1)を行い、弁別能力を明らかにする。次に、実験1の結果得られた正解率上位者と下位者において、触知覚による異なる素材の弁別のための探索行為の特徴的な傾向について動作解析による比較を行った。

なお、本研究における媒体を介した人の触知覚として、探索棒を用いた異なる素材の弁別実験は、a)知覚者が直接的に対象に触れないものの、b)媒体としての探索棒を通じて素材との接続が維持されることで、知覚者と対象物との自然法則に基づく情報のやりとりが行われるもので、知覚者が自覚せずに利用している触知覚について検討するための研究アプローチとした。



(1) レバー操作のイメージ (2) 右から「押し付けて振る・擦る・叩く探索行為」

図 4.1 媒体を介した人の触知覚探索実験のイメージ

4. 1 実験1

4. 1. 1 実験1の環境条件

(1) 実験に使用した供試体の物理的特徴

供試体に使用する素材の選定にあたっては、建設工事において、埋設管や土木構造物に使用されているゴム(天然ゴム)、ウレタン(発泡樹脂)、プラスチック(アクリル)、木材(ホワイトパイン材)、コンクリート(プレキャスト柵板)、鋼材(一般構造用圧延鋼材)とした。

この供試体となる6種類の異なる素材は、表4.1に示す機械的特性を持っている。また、建設工事における主な用途として、ゴムやウレタンは、緩衝材・断熱材などに使用されている。プラスチック・木材に関しては、建築や仮設資材、土留板等々に使用されている。コンクリート・鋼材に関しては、土木構造物本体や配管等々に使用されている。

供試体の表面は平坦に加工を行っており，表面の状態に関しては，実際の建設現場で使用されている状態と同等となっている．また，図 4.2 の顕微鏡画像（キーエンス，VH-Z500R，500 倍）に示すように素材の組成による相違が見られる．

表 4.1 各供試体の機械的特性

材質	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
縦弾性係数	約0.1GPa	約0.5GPa	約4GPa	約9GPa	約30GPa	約200GPa
横弾性係数	約0.05GPa	約0.15GPa	約1.3GPa	約3GPa	約13GPa	約80GPa
摩擦係数	0.455	0.421	0.388	0.445	0.310	0.340
重量	約1.10kg	約0.03kg	約0.90kg	約0.44kg	約3.60kg	約5.80kg

※材料の機械的特性に関しては，供試体製作会社にて確認

※摩擦係数に関しては，探索棒ABS樹脂と供試体の静摩擦係数で，縦横の平均値である．

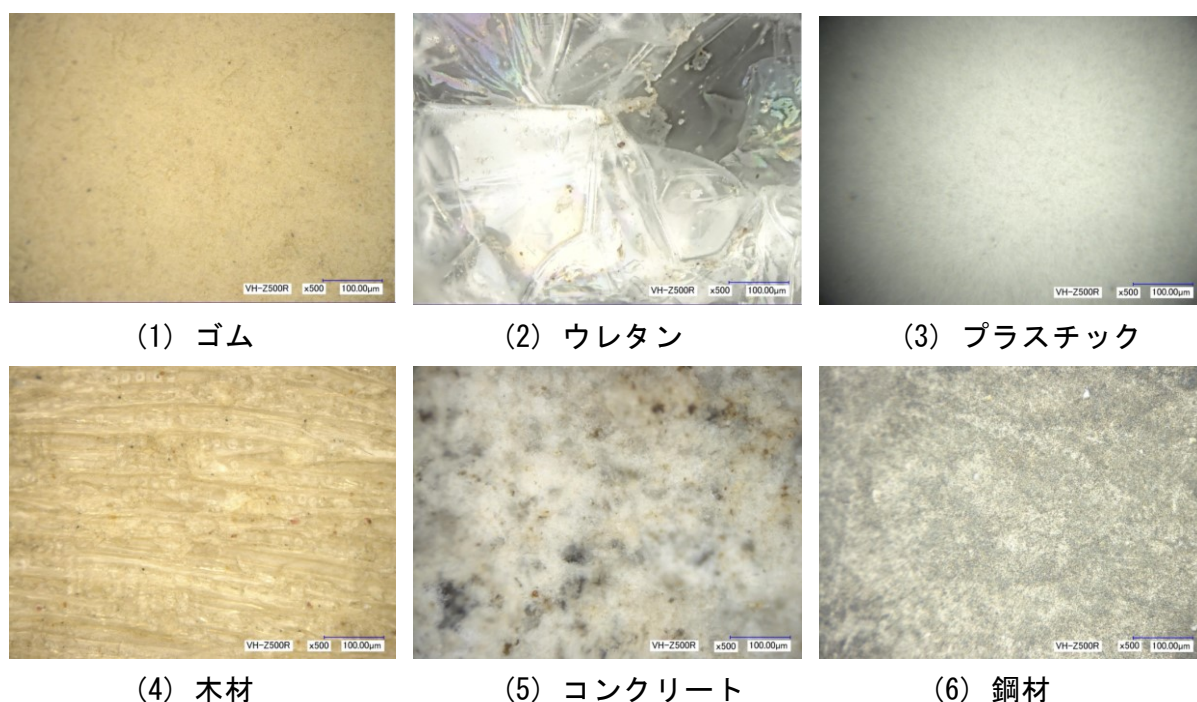


図 4.2 各供試体（6 種類の異なる素材）の顕微鏡による表面状況

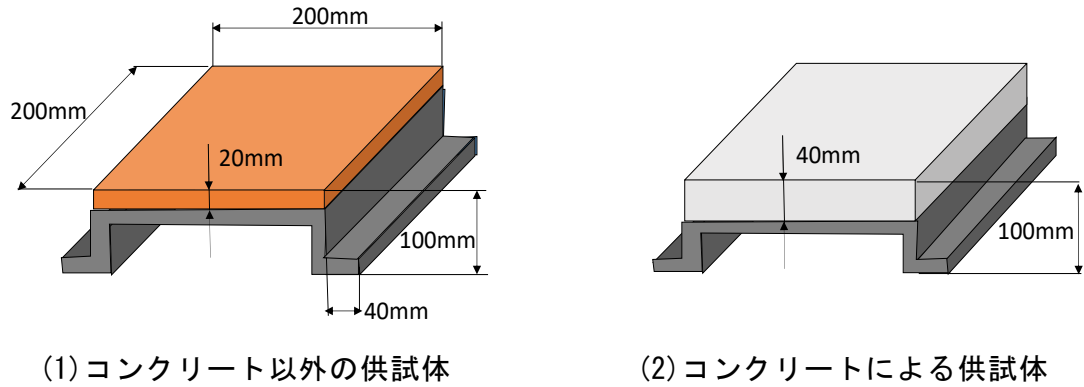
（2）供試体の寸法

供試体の大きさについては，それが小さすぎると探索時に探索棒が脱落してしまうことが考えられる．また，重すぎてしまうと容易に移動等が出来なくなってしまうことから試行錯誤の末，以下の仕様を決定した．

供試体の本体となる 6 種類の異なる素材は，いずれも 200mm×200mm×厚さ 20mm とした．建設資材で使用されている埋設物である管材などの板厚を参考に 20mm とした．供試体とする鋼製フレームを含め各材料の寸法は，実験の効率性・取扱の容易性を考慮し，図 4.3(1)，(2)，図 4.4 に示す形状とした．

鋼製フレームを含む供試体の形状に関しては，可搬できる構造とし，触知覚による押付や打撃等による，たわみ・ねじりを考慮し，剛性の高い鋼製フレーム(SS400, 重量

約 5kg, 厚さ約 10mm)とし, 対象となる供試体となる素材を接着剤により貼付ける構造とした. 接着剤に関しては, 鋼製基礎フレームと対象材料が実験中に分離しないようにすることと接着剤が緩衝材とならないように薄く均質に塗布した. なお, コンクリートに関しては, 叩く探索行為時に損傷防止策として, 図 4.3(2) に示す厚さ 40mmとした.



(1) コンクリート以外の供試体

(2) コンクリートによる供試体

図 4.3 鋼製フレームを含む供試体の形状

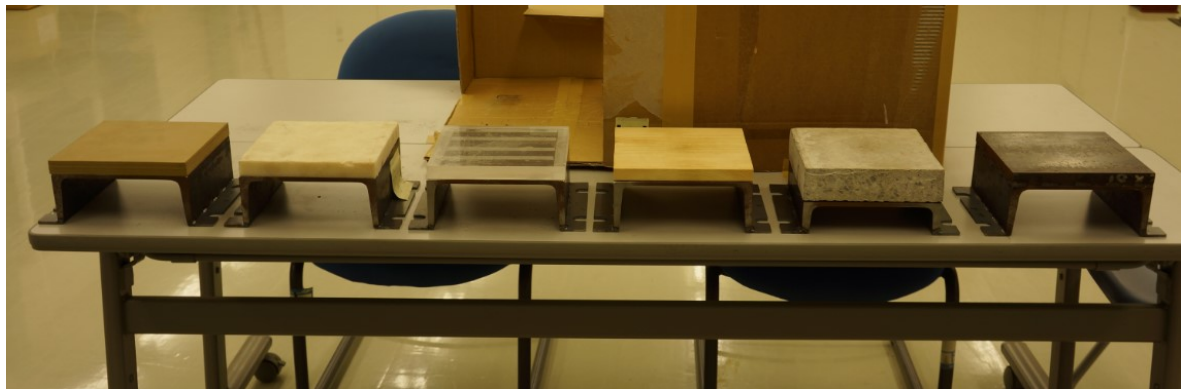


図 4.4 供試体(左からゴム, ウレタン, プラスチック, 木材, コンクリート, 鋼材)

(3) 媒体となる探索棒の仕様

間接的な能動的触感覚を見るために図 4.5, 4.6 に示すような統一した探索棒を用意した. 探索棒の形状に関しては, 油圧ショベルを操作する際に利用している操作レバーの形状を模し, 材質は, ABS 樹脂製(縦弾性係数約 2.3Gpa, 横弾性係数約 1.0Gpa, ソリッド構造, 約 200g)とした.

また, 操作レバーを模した探索棒の先端部に関しては, 端部の鋭角部を球形状(R30)に加工した.

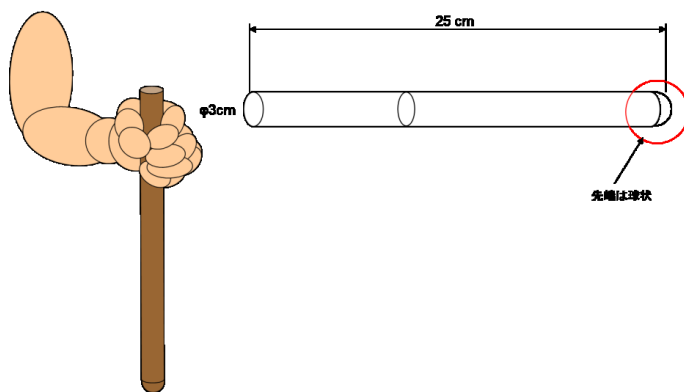


図 4.5 実験 1 で使用する探索棒の仕様



図 4.6 探索棒先端部の顕微鏡による表面状況

4. 1. 2 実験 1 への実験参加者

実験 1 への実験参加者は、土木工事に携わる関係者の協力のもと実施した。表 4.2 の内訳に示す建設機械オペレータ及び土木作業員(いずれも実務経験 5 年以上)、土木工学系研究者、事務員、行政技官の計 44 名にて実施した。

本実験は、早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の審査承認(2015-125, 研マネ第 252 号)に基づき実施した。

表 4.2 実験参加者内訳

実験参加者	参加者数	平均年齢(歳)	標準偏差
建設機械オペレータ	男性：16 名	41.19	9.84
土木作業員	男性：8 名，女性 3 名	51.55	14.44
工学系研究者	男性：11 名(左利き 2 名)	46.09	4.94
行政技官	男性：4 名	48.25	6.22
事務員	女性：2 名	29.50	6.50

※建設機械オペレータに関しては、建設機械操作の実務経験 5 年以上

4. 1. 3 実験 1 の手続き

実験は試行毎に、6 つの供試体を乱数表に基づきランダムな順番で同一の材質を 2 回提示するように設定した。実験参加者による触知覚による探索は、図 4.7(1)～(3)に示すように探索棒を供試体に押しつけながら振る探索行為、探索棒を供試体に押しつけた状態で擦る探索行為、探索棒で供試体を垂直に叩く探索行為をそれぞれ 12 回実施した。なお、試行回数は、実験参加者の疲労等の負担を考え、説明を含め 1 名の実験時間が 1 時間以内になるように設定された。

(1) 実験参加者への実験1における各探索行為の説明

実験参加者毎に、図 4.7 に示す、探索棒を用いて供試体に対して押しつけて振る、押しつけて擦る、叩くといった3つの触知覚による探索行為を対面で説明する。なお、探索棒の持ち手に関しては、位置の指定はしないが右手の5本指を使い探索棒を握ることとした。次に実験参加者が実験中に留意する点として、実験開始前の探索棒の取扱は実験者の誘導に従い、力を入れずに探索棒を握り、探索棒の先端が供試体に接触した状態で待機し、実験者からの実験開始の合図の後、探索を行う。振る探索行為において探索棒を供試体に押しつけた際に支点を著しく動かしてしまい、擦る若しくは叩いてしまう行為が発生することがないようにすること。また、擦る探索行為においては、探索棒を著しく傾斜させてしまい振る若しくは探索棒を擦る際に支点が浮いてしまい叩くといった行為が発生しないようにすること。叩く探索行為に関しては、探索棒を著しく斜めして供試体を叩かないようにすることを対面で説明した。

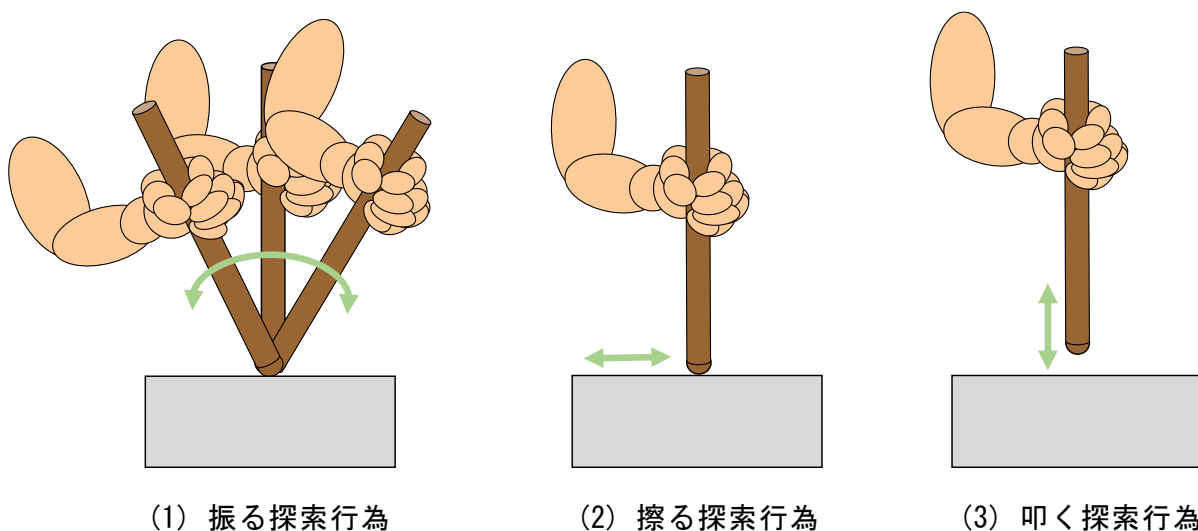


図 4.7 実験における3つの探索行為

(2) 供試体の事前把握(慣熟)

実験参加者は、実験1の開始前に全ての供試体に対して探索棒を用いて触知覚のほかに目視及び音による確認をしながら、振る・擦る・叩く探索行為によって異なる素材の特徴を事前に把握した(図 4.8)。把握までの時間は設定せず、課題に慣熟したことを実験参加者が自己申告するまで(概ね10分から15分程度)実施した。十分な慣熟によって、学習効果や不慣れな行為による影響を考慮した²。

² 第5章の実験2との比較による弁別の安定性を見る限り、実験実施中の正誤に関する学習効果は発生していないものと考えられる。



図 4.8 実験参加者が異なる素材の印象を確認している状況

(3) 実験 1 の実施

実験 1 は、国立研究開発法人土木研究所実験室において 2013 年 11 月～2014 年 8 月の期間に実施した。

図 4.9 に示すように実験参加者は、机の前に座り、供試体が実験参加者から見えないようにした状態で、探索棒により供試体を探索する。実験開始前の待機状態では、実験者が実験参加者を誘導し、探索棒を握らせ、不要な力が入らないようにすることや探索棒を実験前から動かさないようにした。

探索までの時間に関しては特に制限を設けないこととした。実験参加者は、試行毎に口頭にて表 4.3 に示す供試体の材質若しくは供試体番号を回答した。なお、実験参加者の回答に対するフィードバックはせず、素材の同定をさせないようにした。

実験開始前の待機状態では、実験者が探索棒と供試体が接触した状態で保持することとした。

なお、探索時には、擦り音・打撃音といった聴覚による探索が発生しないようにカナル型イヤホンを利用して外部音を遮蔽した。

利用した音源は、日本音響学会で定義している人の可聴域(60Hz～16kHz)を有する音源を利用した。また、音圧レベルに関しては、個人差が大きいことから実験開始前に供試体を打撃し音圧レベルの調整を実験参加者に対して行った。



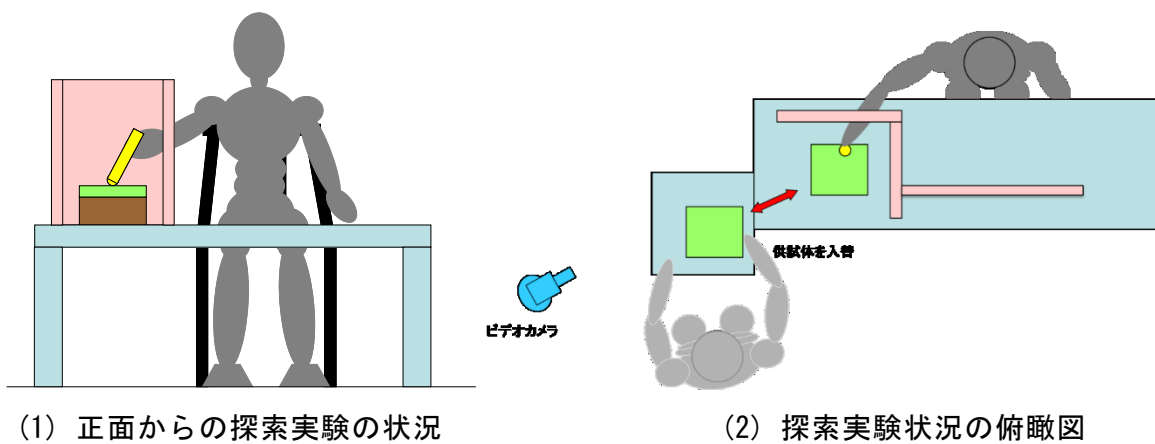
図 4.9 視覚及び聴覚の情報を遮蔽した探索時の状況

表 4.3 異なる素材の判断一覧

番号	供試体の材質
1	ゴム
2	ウレタン
3	プラスチック
4	木材
5	コンクリート
6	鋼材

(4) 記録

図 4.10 に示すように探索時には探索状況をビデオ撮影と 1 供試体毎の探索時間を計測する。ビデオ撮影に関しては、被験者の探索状況が分かるように撮影した。



(1) 正面からの探索実験の状況

(2) 探索実験状況の俯瞰図

図 4.10 実験 1 における探索状況

なお，探索時の動作については，図 4.11 に示すようにビデオ (SONY 製 HDR-TD10, 1920 ×1080/60fps) での撮影を行い，実験参加者の探索状況を記録した．



図 4.11 ビデオ撮影による探索状況の記録

4. 2 実験1の結果

4. 2. 1 振る・擦る・叩く探索行為における正解率の実態

実験結果として各実験参加者の正解率を探索行為毎に整理し、表 4.4 に示す。

表 4.4 探索行為毎の正解率集計

実験参加者 No	振る探索行為	擦る探索行為	叩く探索行為
1	0.500	0.750	0.583
2	0.583	1.000	0.417
3	0.167	0.333	0.417
4	0.417	0.667	0.417
5	0.417	0.917	0.500
6	0.333	0.667	0.583
7	0.333	0.500	0.500
8	0.250	0.583	0.417
9	0.500	0.583	0.417
10	0.833	0.833	0.417
11	0.500	0.417	0.417
12	0.583	0.667	0.583
13	0.333	0.833	0.583
14	0.500	0.333	0.750
15	0.583	0.917	0.500
16	0.500	0.750	0.583
17	0.583	0.667	0.500
18	0.417	0.500	0.167
19	0.250	0.750	0.500
20	0.333	0.417	0.500
21	0.417	0.833	0.500
22	0.417	0.417	0.250
23	0.333	0.750	0.500
24	0.000	0.667	0.333
25	0.500	0.500	0.417
26	0.417	0.500	0.583
27	0.167	0.667	0.250
28	0.417	0.583	0.417
29	0.167	0.833	0.583
30	0.583	0.583	0.750
31	0.333	0.500	0.167
32	0.250	0.833	0.750
33	0.833	0.667	0.667
34	0.500	0.917	0.333
35	0.167	0.583	0.333
36	0.500	0.500	0.417
37	0.417	0.667	0.583
38	0.500	0.750	0.500
39	0.500	0.583	0.750
40	0.583	0.417	0.500
41	0.417	0.583	0.583
42	0.750	0.917	0.667
43	0.417	0.583	0.583
44	0.417	0.583	0.583
平均	0.430	0.648	0.494
標準偏差	0.167	0.167	0.141
変動係数	0.389	0.257	0.286

(1) 振る・擦る・叩く探索行為における正解率の傾向

供試体の探索によって得られた結果として、振る探索行為では、正解率が平均 0.430 ± 0.167 ，変動係数 0.389 ，擦る探索行為での正解率は平均 0.648 ± 0.167 ，変動係数 0.257 ，叩く探索行為での正解率は平均 0.494 ± 0.141 ，変動係数 0.286 という結果となった。

図 4.12 に示すように振る探索行為と叩く探索行為では、一部を除いて、 $0.5-0.6$ が正解率の天井効果となる傾向が見られた。擦る探索行為に関しては、正解率は $0.5-0.6$ を中心とした山型の分布となった。

概ねチャンスレベル 0.167 を上回る結果となった。

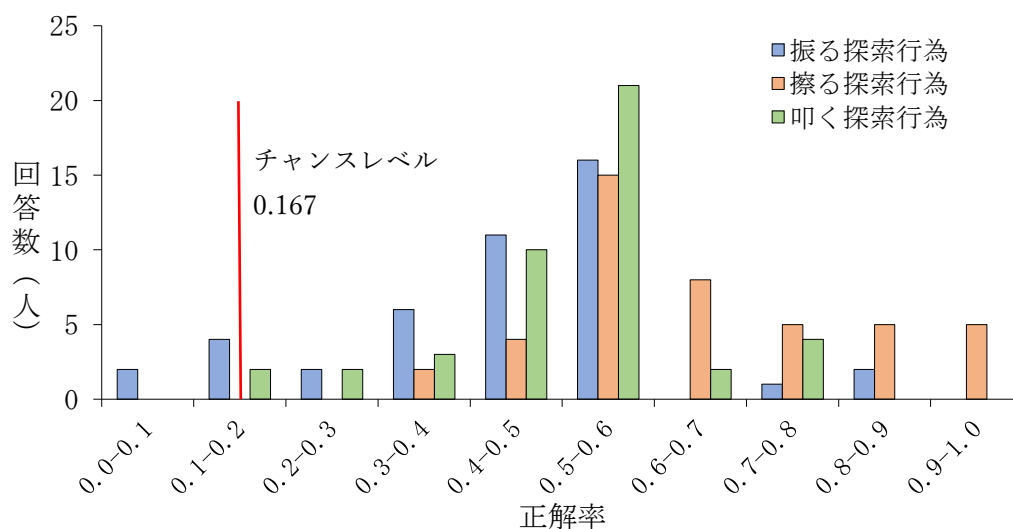


図 4.12 振る・擦る・叩く探索行為における正解率の傾向

(2) 各探索行為における実験参加者の職種による正解率の傾向

実験 1 への実験参加者は、土木工事に携わる関係者となっており、建設機械オペレータ、土木作業員、工学系研究者、行政技官、事務員といった職種構成となっていた。

建設機械オペレータ及び土木作業員に関しては、実際に土木工事現場での作業経験者（実務経験 5 年以上）を条件として選定している。工学系研究者、行政技官、事務員は、建設現場での直接的な作業を行っておらず、ディスクワークを中心としたものとなっていることから工学系研究者他として 1 つにまとめ、図 4.13 に示すように職種を 3 つに大別した。

振る探索行為での建設機械オペレータの正解率は、平均 0.479 ± 0.154 ，変動係数 0.322 ，土木作業員の正解率は、平均 0.341 ± 0.161 ，変動係数 0.471 ，工学系研究者他の正解率は、平均 0.441 ± 0.161 ，変動係数 0.365 となった。

擦る探索行為での建設機械オペレータの正解率は、平均 0.630 ± 0.167 ，変動係数 0.264 ，土木作業員の正解率は、平均 0.652 ± 0.132 ，変動係数 0.203 ，工学系研究者他の正解率は、平均 0.662 ± 0.184 ，変動係数 0.278 となった。

叩く探索行為では、建設機械オペレータの正解率は、平均 0.552 ± 0.150 ，変動係数

0.272, 土木作業員の正解率は, 平均 0.447 ± 0.156 , 変動係数 0.349, 工学系研究者他の正解率は, 平均 0.471 ± 0.099 , 変動係数 0.209 となった.

結果として, 振る探索行為に関しては, 相対的に建設機械オペレータと工学系研究者他となるデスクワークのグループは, 正解率が 0.5-0.6 に集中しているのに対し, 土木作業員は 0.4-0.5 とやや低い正解率の傾向が見られた. 擦る探索行為に関しては, 職種に関係なく比較的高い正解率となっている. 叩く探索行為の正解率は全ての職種において 0.5-0.6 を中心とした山型の分布となった.

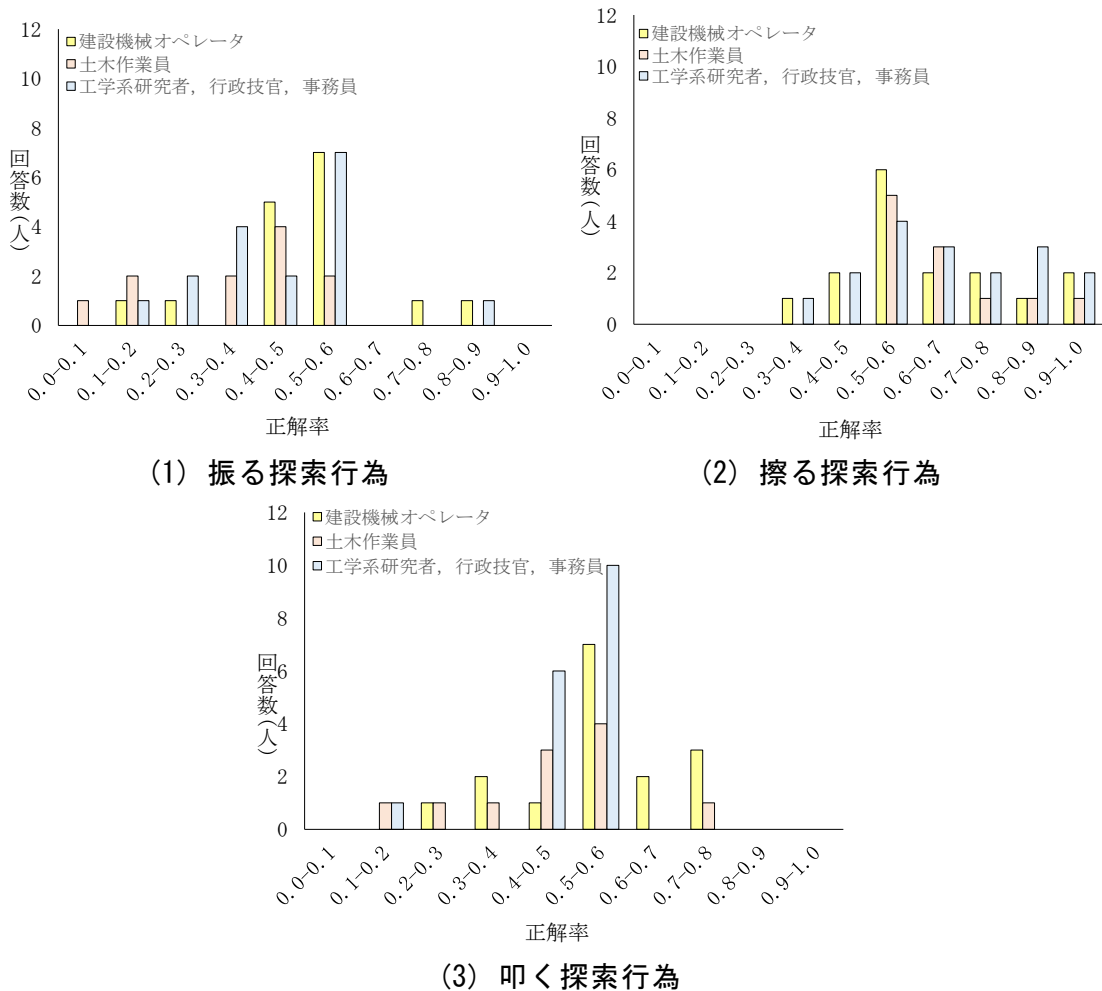


図 4.13 職種による各探索行為の正解率の傾向

(3) 各探索行為における実験参加者の年齢による正解率の傾向

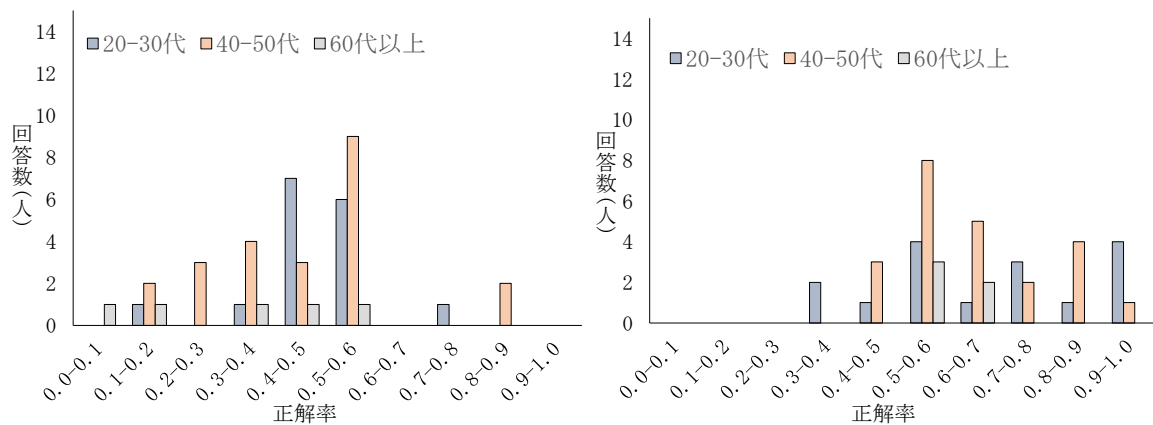
実験 1 への実験参加者の年齢に関しては, 20-30 歳代 ($n=16$, 平均 34.500 ± 4.381 歳), 40-50 歳代 ($n=23$, 平均 46.967 ± 5.095 歳), 60 歳以上 ($n=5$, 平均 68.400 ± 3.209 歳) となっている. 図 4.14 に年齢別の各探索行為における正解率の傾向を示す.

振る探索行為での 20-30 歳代の正解率は, 平均 0.453 ± 0.118 , 変動係数 0.260, 40-50 歳代の正解率は, 平均 0.446 ± 0.178 , 変動係数 0.400, 60 歳以上の正解率は, 平均 0.283 ± 0.179 , 変動係数 0.633 となった.

擦る探索行為での 20-30 歳代の正解率は、平均 0.672 ± 0.209 ，変動係数 0.312，40-50 歳代の正解率は、平均 0.641 ± 0.144 ，変動係数 0.225，60 歳以上の正解率は、平均 0.600 ± 0.063 ，変動係数 0.104 となった。

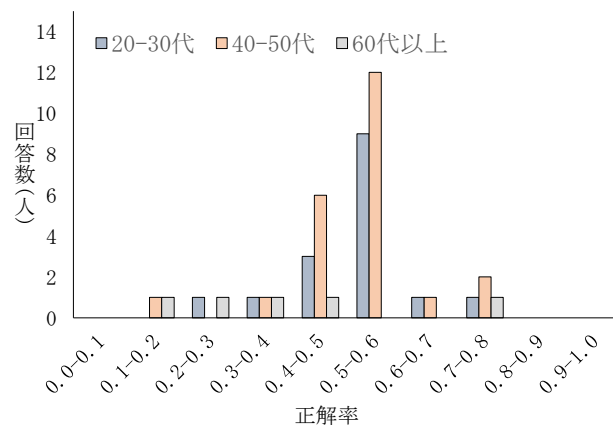
叩く探索行為での 20-30 歳代の正解率は、平均 0.510 ± 0.121 ，変動係数 0.237，40-50 歳代の正解率は、平均 0.507 ± 0.127 ，変動係数 0.251，60 歳以上の正解率は、平均 0.383 ± 0.201 ，変動係数 0.525 となった。

結果として、振る探索行為に関しては、40-50 歳代の年齢層は、正解率が 0.5-0.6 に集中している傾向が見られ、20-30 歳代に関しては、0.4-0.5 を中心とした山型分布となった。60 歳代以上に関しては、0.0-0.6 の正解率に分布する傾向が見られた。擦る探索行為に関しては、年齢に関係なく比較的高い正解率となっている。叩く探索行為の正解率は 20-50 歳代において 0.5-0.6 を中心とした山型の分布となり、60 歳代以上に関しては正解率に傾向が見られなかった。



(1) 振る探索行為

(2) 擦る探索行為



(3) 叩く探索行為

図 4.14 各探索行為における年齢による正解率の傾向

4. 2. 2 触知覚把握のための探索行為

現場での作業実態として振る・擦る・叩くといった段階的なプロセスにより探索を行っている。実験1の結果として、正解率の観点から各探索行為の中で触知覚把握に有意と考えられる探索行為を整理した。

実験参加者44人の正解率の平均値について、統計解析ソフトR及びjs-STAR[14][15]により分散分析を行った。結果として、平均正解率に基づき3つの探索方法における正解率の差により生じた分散比 $F=21.314$, $df=2$ 偶然出現率が限りなく0であり、有意水準 $\alpha=0.05$ を下回ることから、本実験で得られた正解率が偶然によるものではないことが確認できた。

次に各探索方法の多重比較(Holm法)に関しては、プールドSD(合算された標準偏差)を用いた t 検定(有意水準 $\alpha=0.05$, 両側検定)に基づき、振る探索行為、擦る探索行為、叩く探索行為について、総当たりでの一対比較を行った。

結果は、図4.15に示すように振る探索行為の正解率の平均が擦る探索行為より有意に小さく、擦る探索行為の正解率の平均は叩く探索行為より有意に大きく、叩く探索行為の正解率の平均は振る探索行為より有意に大きいことが確認できた。

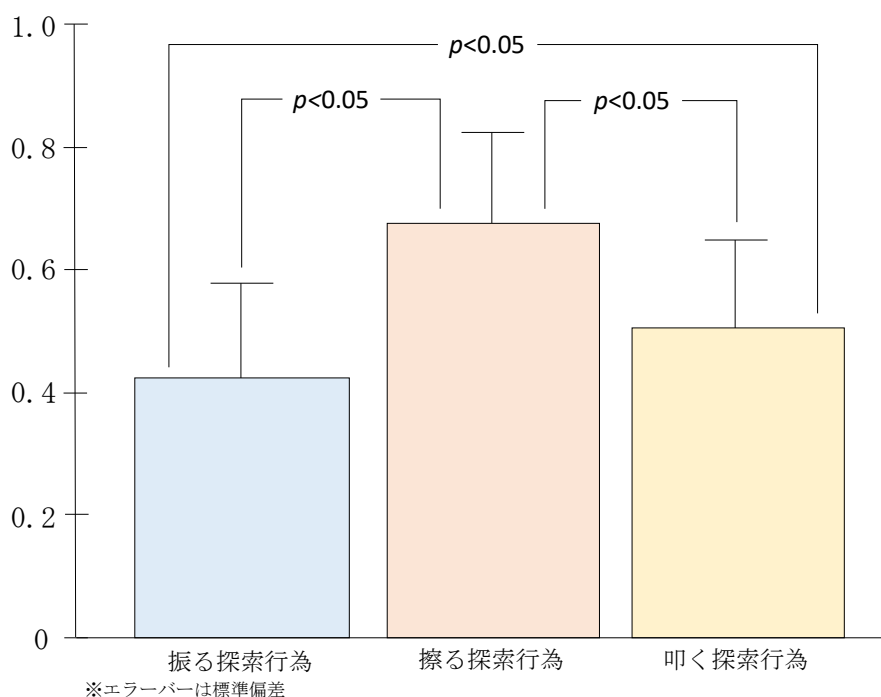


図 4.15 各探索行為における正解率の実態

4. 2. 3 触知覚による各探索行為における供試体の弁別結果

振る・擦る・叩く探索行為における実験参加者 44 人について、実験において提示された異なる素材の弁別はチャンスレベル 0.167 を超える結果となった(表 4.5)。しかし、提示された供試体に対してチャンスレベルを越える誤認回答が見られた。そこで、正確二項検定及びカイ二乗検定による多重比較を統計解析ソフト R 及び js-STAR[14][15]により行い、異なる素材の弁別の有意差を明らかにした。なお、 p 値の調整には、Benjamini & Hochberg(1995)[16]の方法を用いた。

表 4.5 各探索行為の触知覚弁別における正解及び誤認傾向

提示した供試体	探索行為	n	回答した供試体(回答数)					
			ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
ゴム	振る探索行為	n= 88	◎ : 50	○ : 20	3	10	5	0
	擦る探索行為	n= 88	◎ : 75	6	3	3	1	0
	叩く探索行為	n= 88	◎ : 61	○ : 25	1	1	0	0
ウレタン	振る探索行為	n= 88	○ : 26	◎ : 48	2	9	3	0
	擦る探索行為	n= 88	○ : 36	◎ : 49	3	0	0	0
	叩く探索行為	n= 88	○ : 40	◎ : 46	0	2	0	0
プラスチック	振る探索行為	n= 88	2	0	◎ : 42	5	13	○ : 26
	擦る探索行為	n= 88	1	1	◎ : 67	7	1	11
	叩く探索行為	n= 88	0	0	◎ : 25	○ : 23	○ : 21	○ : 19
木材	振る探索行為	n= 87	3	1	○ : 21	◎ : 26	○ : 18	○ : 18
	擦る探索行為	n= 88	3	5	○ : 26	◎ : 38	4	12
	叩く探索行為	n= 88	7	3	8	◎ : 60	6	4
コンクリート	振る探索行為	n= 87	2	1	○ : 20	10	◎ : 27	○ : 27
	擦る探索行為	n= 88	0	0	0	7	◎ : 66	○ : 15
	叩く探索行為	n= 88	0	0	○ : 21	11	◎ : 32	○ : 24
鋼材	振る探索行為	n= 87	1	0	○ : 29	8	○ : 15	◎ : 34
	擦る探索行為	n= 88	0	1	○ : 23	4	12	◎ : 48
	叩く探索行為	n= 88	1	0	○ : 18	10	○ : 22	◎ : 37

※ 「◎」は、チャンスレベル0.167を越える正答素材
「○」は、チャンスレベル0.167を越える誤認素材
無印は、誤認素材の回答数

(1) 触知覚におけるゴムの弁別

振る探索行為においては、ゴムを提示した際にウレタンと誤認回答されていた。正確二項検定の結果、ゴムはウレタンと有意に弁別されていることが示された ($p < 0.05$, $g = 0.214$ $power = 0.954$)。

擦る探索行為では、ゴムは他の素材と弁別されている結果となった。

叩く探索行為では、ゴムを提示した際にウレタンと誤認回答されている傾向が見られた。正確二項検定の結果、ゴムの弁別が有意である結果となった ($p < 0.05$, $g = 0.209$ $power = 0.976$)。

(2) 触知覚におけるウレタンの弁別

振る探索行為において、ウレタンを提示した際にゴムと誤認回答されていた。正確二項検定の結果、ウレタンの弁別が有意であった ($p < 0.05$, $g = -0.1486$ $power = 0.731$)。

擦る探索行為において、ウレタンを提示した際にゴムと誤認回答されていた。正確二項検定の結果、有意差は認められなかった ($p > 0.05$, $g = 0.077$ $power = 0.222$)。擦る探索行為においては、ウレタンを提示した際にはゴムと誤認されやすいと言える。ただし、検出力が小さいことからデータ数を増やす必要がある。

叩く探索行為において、ウレタンを提示した際にゴムと誤認回答されていた。正確二項検定の結果、有意差は認められなかった ($p > 0.05$, $g = 0.035$ $power = 0.079$)。したがって、叩く探索行為においては、ウレタンはゴムと誤認されやすいと言える。ただし、検出力が小さいことからデータ数を増やす必要がある。

(3) 触知覚におけるプラスチックの弁別

振る探索行為においては、プラスチックを提示した際に鋼材と誤認回答されていた。正確二項検定の結果、有意差は認められなかった ($p > 0.05$, $g = 0.118$ $power = 0.454$)。したがって、振る探索行為においては、プラスチックは鋼材と誤認されやすいと言える。ただし、検出力が小さいことからデータ数を増やす必要がある。

擦る探索行為においては、プラスチックは他の素材と弁別されている結果となった。

叩く探索行為では、プラスチック、木材、コンクリート、鋼材の4種類においてカイ二乗検定を行った結果、有意差はみられなかった ($\chi^2(3) = 0.9091$, $p > 0.05$, $effect\ size\ w = 0.1016$ $power = 0.1092$)。プラスチックは、木材、コンクリート、鋼材と弁別できていないようであった。

(4) 触知覚における木材の弁別

振る探索行為では、木材、プラスチック、コンクリート、鋼材を対象にカイ二乗検定を行った結果、有意差が見られなかった ($\chi^2(3) = 2.06$, $p > 0.05$, $effect\ size\ w = 0.1576$ $power = 0.1971$)。木材は、プラスチック、コンクリート、鋼材と弁別できていないようであった。

擦る探索行為においては、木材を提示した際にプラスチックと誤認回答されていた。正確二項検定の結果、有意差は認められなかった ($p > 0.05$, $g = -0.9380$ $power = 0.264$)。擦る探索行為においては、木材はプラスチックと誤認されやすいと言える。ただし、検出力が小さいことからデータ数を増やす必要がある。

叩く探索行為に関しては、木材は他の素材と弁別されている結果となった。

(5) 触知覚におけるコンクリートの弁別

触振る探索行為では、コンクリート、プラスチック、鋼材を対象にカイ二乗検定の結果を行った結果、有意差は見られなかった ($\chi^2(2) = 1.324$, $p > 0.05$, $effect\ size$

$w=0.1338$ $power=0.1621$) . したがって、鋼材は、コンクリート、プラスチックと弁別されていないようであった.

擦る探索行為に関しては、コンクリートは鋼材と誤認回答されていた. しかし、正確二項検定の結果、コンクリートの弁別が有意に大きかった ($p<0.05$, $g=-0.3143$ $power=1.000$) . 擦る探索行為においては、コンクリートは鋼材と弁別されていた. .

叩く探索行為に関しては、コンクリート、プラスチック、鋼材を対象にカイ二乗検定を行った結果、有意差は見られなかった ($\chi^2(2)=2.519$, $p>0.05$, $effect\ size\ w=0.1809$ $power=0.2754$) . コンクリートは、プラスチック、鋼材と弁別されていなかった.

(6) 触知覚における鋼材の弁別

振る探索行為において、プラスチック、コンクリート、鋼材を対象にカイ二乗検定を行った結果、有意差が見られた ($\chi^2(2)=7.462$, $p<0.05$, $effect\ size\ w=0.3093$ $power=0.6853$) . 正確二項検定を用いた多重比較(両側検定)によると、鋼材はコンクリートと有意に弁別されていた ($adjusted\ p<0.05$). しかし、鋼材はプラスチックとは弁別されていなかった ($adjusted\ p>0.05$).

擦る探索行為において、鋼材を提示した際にはプラスチックと誤認回答されていた. しかし、正確二項検定の結果、鋼材の弁別が有意に大きかった ($p<0.05$, $g=-0.1761$ $power=0.8135$) . したがって、擦る探索行為において、鋼材はプラスチックと弁別されていた.

叩く探索行為において、プラスチック、コンクリート、鋼材を対象にカイ二乗検定を行った結果、有意であった ($\chi^2(2)=7.818$, $p<0.05$, $effect\ size\ w=0.3186$ $power=0.707$) . 正確二項検定を用いた多重比較(両側検定)によると、鋼材はプラスチックと有意に弁別されていた ($adjusted\ p<0.05$). しかし、鋼材とコンクリートに有意差は見られなかった ($adjusted\ p>0.05$).

4. 3 映像に基づく動作解析

前節では、媒体を介した触知覚による異なる素材の弁別の実態を実験により明らかにした. その結果、媒体を介した触知覚が一定水準で行われていることが明らかとなった. ここでは、次に、素材の弁別における正解率上位者と下位者について、それぞれ触覚を得るための探索動作(行為)に特徴が見られるのかを検討するため、動作解析を行った.

動作解析を行うにあたっては、記録映像に基づき各探索行為における探索棒の動作変位量を測定し、探索時における正解率上位者と正解率下位者の傾向を分析した. 次に探索時の動作傾向について、フーリエ解析により周波数的な特性を明らかにした.

4. 3. 1 動作解析手法

動画映像からの探索時の動作を質的に確認するだけでなく、正解率上位者と正解率下位者の探索行為の違いを定量的に検討するため、スポーツにおけるパフォーマンス向上やリハビリテーション等の現場で活用されている動作解析が有効だと考えた。実験時の探索運動をビデオ (SONY 製 HDR-TD10, 1920×1080/60fps) によって撮影し、その動画データから動作変位量を推定し、定量的に動作解析を行った。動作解析に使用したソフトウェアとして、Kinovea (<http://www.kinovea.org/>) を利用した。

フーリエ解析に関しては、技術計算製作所製のフーリエ変換ソフト Discrete Fourier Transform (窓関数：ハミング) により、探索時における周波数特性を明らかにした。

なお、フーリエ解析における解析対象データは、各種探索時の正解率上位者と下位者における探索棒の動き（振るに関しては探索棒上端部の XY 方向、擦る・叩くに関しては探索棒下端部の XY 方向）から、動作変位量の大きい X 方向を対象とした。

4. 3. 2 解析対象とする実験参加者の選定

動作解析にあたっては、表 4.6(1), (2), (3) に示す実験参加者 44 名から、振る・擦る・叩く探索行為それぞれの正解率において上位・下位約 10% に相当する上位 4 名と下位 4 名を選抜し、それぞれの探索軌跡を解析した。なお、表 4.6, (1), (2) の上位・下位の同位正解者の選定に関しては、振る・擦る・叩く探索行為の総合平均正解率の順位から選定を行った。また、 3σ による上下限值として、正解率 0 及び 1.0 を排除した。

選抜された正解率上位 4 名と下位 4 名の中から、各探索時における代表的な動作軌跡を示す (図 4.16~4.18)。それぞれの動作軌跡は、(1) が正解率上位者の代表的な動作軌跡で、(2) が正解率下位者の動作軌跡である。

表 4.6 実験 1 における触知覚による各探索行為の正解率一覧

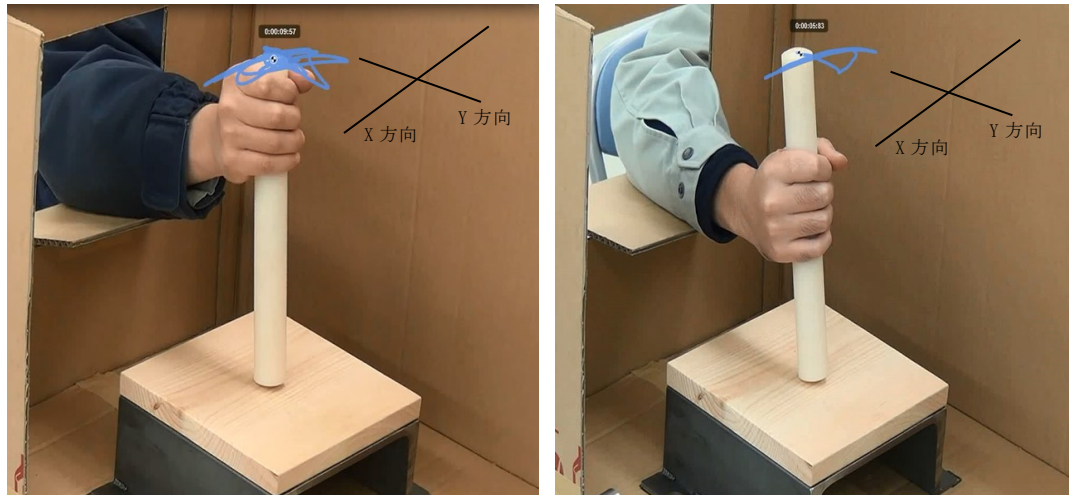
(1) 振る探索行為		(2) 擦る探索行為		(3) 叩く探索行為	
実験参加者 No	振る探索行為	実験参加者 No	擦る探索行為	実験参加者 No	叩く探索行為
10	0.833	2	1.000	14	0.750
33	0.833	5	0.917	30	0.750
42	0.750	15	0.917	32	0.750
2	0.583	34	0.917	39	0.750
12	0.583	42	0.917	33	0.667
15	0.583	10	0.833	42	0.667
17	0.583	13	0.833	1	0.583
30	0.583	21	0.833	6	0.583
40	0.583	29	0.833	12	0.583
1	0.500	32	0.833	13	0.583
9	0.500	1	0.750	16	0.583
11	0.500	16	0.750	26	0.583
14	0.500	19	0.750	29	0.583
16	0.500	23	0.750	37	0.583
25	0.500	38	0.750	41	0.583
34	0.500	4	0.667	43	0.583
36	0.500	6	0.667	44	0.583
38	0.500	12	0.667	5	0.500
39	0.500	17	0.667	7	0.500
4	0.417	24	0.667	15	0.500
5	0.417	27	0.667	17	0.500
18	0.417	33	0.667	19	0.500
21	0.417	37	0.667	20	0.500
22	0.417	8	0.583	21	0.500
26	0.417	9	0.583	23	0.500
28	0.417	28	0.583	38	0.500
37	0.417	30	0.583	40	0.500
41	0.417	35	0.583	2	0.417
43	0.417	39	0.583	3	0.417
44	0.417	41	0.583	4	0.417
6	0.333	43	0.583	8	0.417
7	0.333	44	0.583	9	0.417
13	0.333	7	0.500	10	0.417
20	0.333	18	0.500	11	0.417
23	0.333	25	0.500	25	0.417
31	0.333	26	0.500	28	0.417
8	0.250	31	0.500	36	0.417
19	0.250	36	0.500	24	0.333
32	0.250	11	0.417	34	0.333
3	0.167	20	0.417	35	0.333
27	0.167	22	0.417	22	0.250
29	0.167	40	0.417	27	0.250
35	0.167	3	0.333	18	0.167
24	0.000	14	0.333	31	0.167

※表の上が正解率上位者で下が正解率下位者

4. 3. 3 動作解析における正解率上位者と下位者の相違

映像に基づく動作解析結果を図 4.16～4.18 に示す。図中に示す青線は、探索時の軌跡を示すもので、振る探索行為に関しては、探索棒上端部の XY 方向の変位を示す。擦る・叩く探索行為に関しては、供試体と接触している探索棒下端部の XY 方向の変位を示す。

図 4.16 については、振る探索行為の代表的な動作軌跡例を示す。傾向として、正解率上位者は、前後左右や回転による変則的な探索を行っているのに対して、正解率下位者は、定型的な回転動作が行われていた。

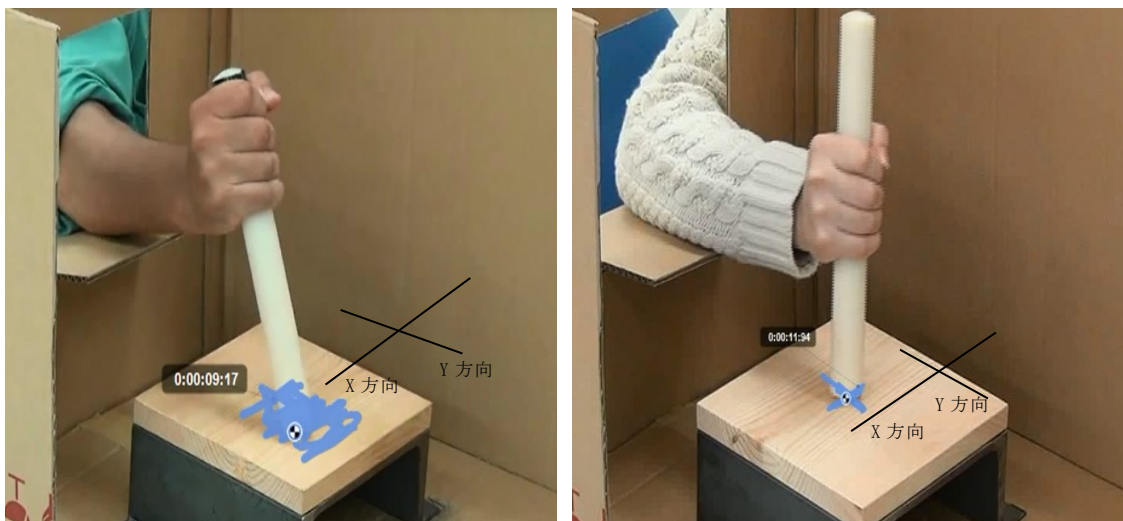


(1) No10 正解率上位者

(2) No35 正解率下位者

図 4.16 振る探索行為の動作軌跡例

図 4.17 は、擦る探索行為の代表的な動作軌跡を示す。正解率上位者は、広範囲に変則的な探索を行っていた。正解率下位者は、前後左右に定型的な探索を行っていた。

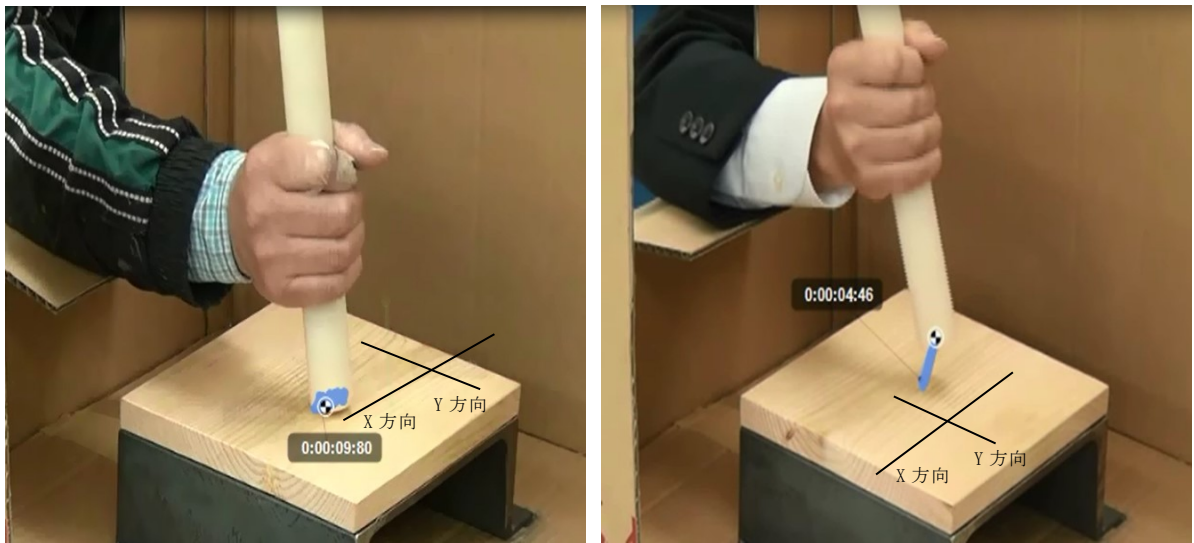


(1) No42 正解率上位者

(2) No3 正解率下位者

図 4.17 擦る探索行為の動作軌跡例

図 4.18 は、叩く探索行為の代表的な動作軌跡を示す。正解率上位者は、広範囲に小刻みな探索を行っていた。正解率下位者は、ほぼ同一の箇所に対して規則的な探索を行っていた。



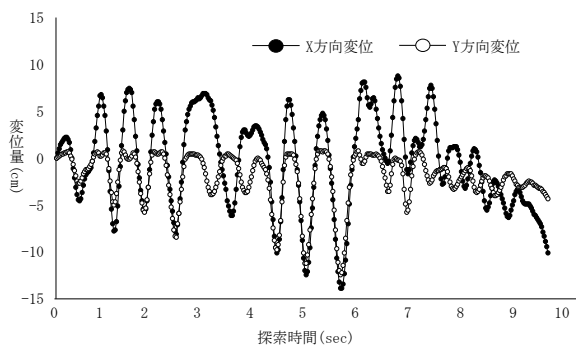
(1) No30 正解率上位者

(2) No18 正解率下位者

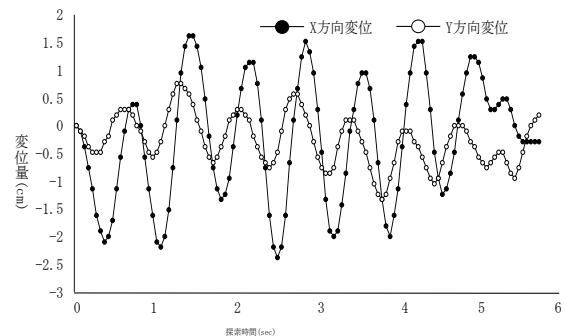
図 4.18 叩く探索行為の動作軌跡例

図 4.16～4.18 に示す記録映像から得られた動作の軌跡を目視により比較する限りでは、正解率上位者と下位者に相違があることが確認できた。次にビデオ(SONY 製 HDR-TD10, 1920×1080/60p)により記録した映像データから横軸を探索時間、縦軸を各探索行為における X, Y 方向の動作変位量としたグラフを作成した。グラフ化することによって、正解率上位者と正解率下位者の動作軌跡の違いを確認することとした。

代表的な解析結果を図 4.19～4.21 に示す。

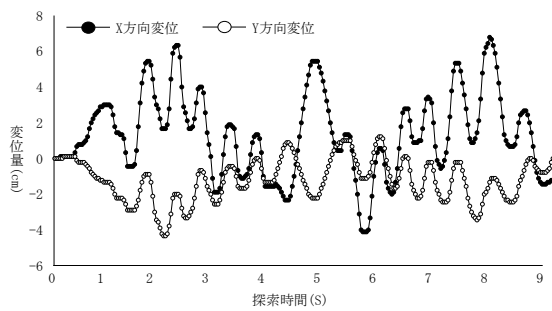


(1) No10 正解率上位者

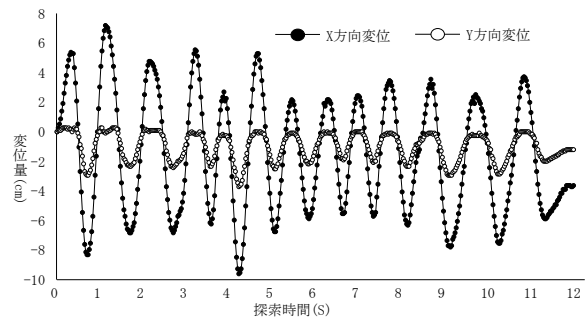


(2) No35 正解率下位者

図 4.19 振る探索行為の動作変位波形例

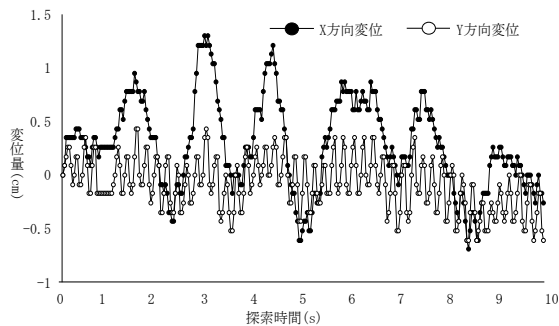


(1) No42 正解率上位者

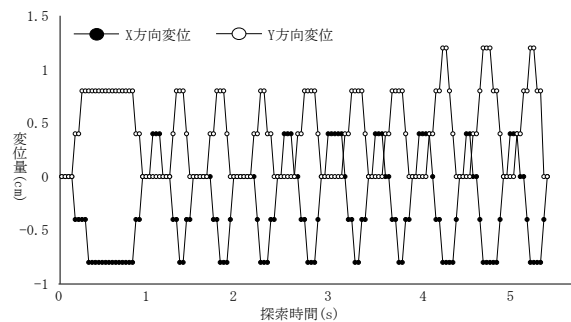


(2) No3 正解率下位者

図 4.20 擦る探索行為の動作変位波形例



(1) No30 正解率上位者



(2) No18 正解率下位者

図 4.21 叩く探索行為の動作変位波形例

各探索方法における正解率上位者と下位者の変位を比較すると図 4.16～4.18 に示す動作軌跡で述べた正解率上位者が不規則に変化して探索しているのに対して、正解率下位者は周期的な探索傾向となっていることが図 4.19～4.21 に示す動作変位から示唆された。

4. 3. 4 探索時における周波数特性(X 方向)

振る探索行為における、正解率上位者による探索時の周波数特性は、ピーク値の平均値及び標準偏差は $1.321\text{Hz} \pm 0.305$ となり、1Hz 周辺での探索特性が傾向として見られた。供試体固有の特性に依存する周波数特性は見られなかった。

正解率下位者は、平均値及び標準偏差 $1.558\text{Hz} \pm 1.454$ となり、1～3Hz の範囲に分布している傾向が相対的に見られた。図 4.22 に代表例を示す。

なお、正解率上位者と同様に正解と不正解及び供試体固有の特性に依存するような周波数特性は見られなかった。

擦る探索行為での正解率上位者における探索時の周波数特性は、平均値及び標準偏差 $1.423\text{Hz} \pm 0.715$ から 1Hz 周辺に見られた。

正解率下位者の探索時の周波数特性は、平均値及び標準偏差 $1.346\text{Hz} \pm 0.416$ となっており、探索棒を供試体に押しつけて前後左右に探索する正解率上位者に類似する 1Hz 周

辺での探索特性が見られた。図 4.23 に代表例を示す。

なお、正解率上位者と下位者共に正解と不正解及び供試体固有の特性に依存するような周波数特性は見られなかった。

叩く探索行為の正解率上位者及び下位者における探索時の周波数特性は、図 4.24 に示すように正解率上位者及び下位者の周波数特性としてピーク値が、広く分布する傾向が見られ、周波数特性としては、1Hz～4Hz の範囲に分布している傾向が相対的に見られた。

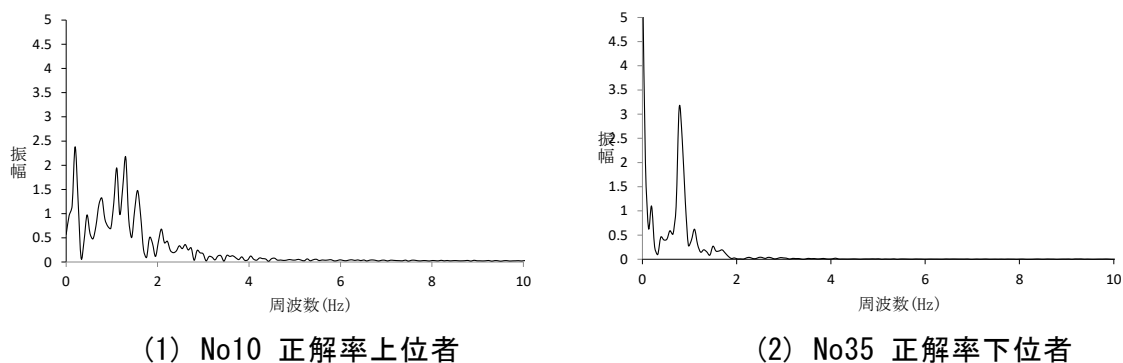


図 4.22 振る探索行為における周波数特性例

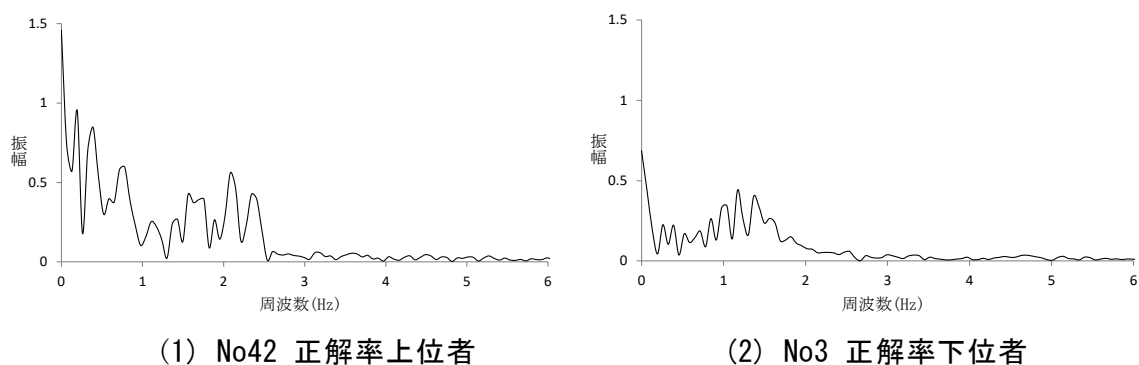


図 4.23 擦る探索行為における周波数特性例

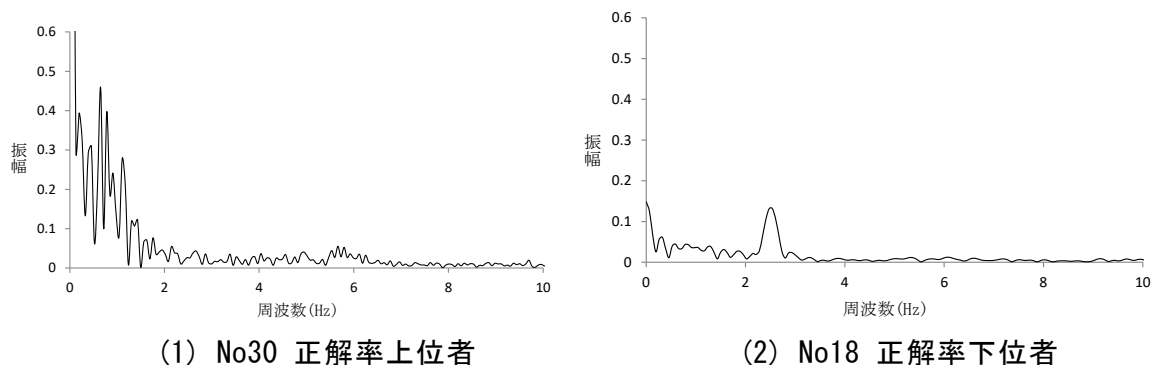


図 4.24 叩く探索行為における周波数特性例

4. 4 研究1の考察

4. 4. 1 振る・擦る・叩く探索行為における正解率の実態

実験1から、触知覚における振る・擦る・叩く探索行為による素材の弁別について、チャンスレベルを超える弁別能力があることが明らかとなった。この事実は、視覚的に遮蔽されており、かつ触覚的にも媒体を介した間接的な状況で対象を知覚しうることを示していると考えられる。

職種毎による各探索行為の弁別成績に関しては、大きな相違は見られなかった。年齢別では、擦る探索行為に関しては年齢による相違は見られなかった。振る・叩く探索行為に関しては、60歳以上はデータ数(n=5)が少ないものの正解率が低い傾向が見られた。正解率向上に年齢が関係している可能性があり、今後実験による検証が必要と考えられる。

振る・擦る・叩くという探索行為の違いによる素材の弁別を検討したところ、擦る探索行為は振る探索行為に比べ正解率が高い傾向が見られた。また、叩く探索行為に関しては、擦る探索行為に比べ正解率が低い傾向が見られた。

実際の建設作業では、油圧ショベルやスコップによる掘削作業において、埋設物に接触した際、埋設物がどのようなものなのかを判断する行為として、まずは損傷・破壊させない程度にショベルバケットの先端やスコップの先端を対象物に押し付けて振る行為を行い、次に擦る行為を行った後、損傷・破壊させない程度に叩くといった行為を行っている。本実験の結果は、このような建設作業の現場において行われている一連の経験的な行為において、叩く行為の前段階にあたる擦る行為で対象物の特定が概ね完了している可能性を示唆する。このことは、建設現場で経験的行われている一連の行動が、埋設物の損傷・破壊といったリスクを最小限に留める妥当な手順であることを示していると考えられる。

4. 4. 2 触知覚による探索行為における異なる素材の弁別能力

実験1結果、6種類の異なる素材の弁別は、偶然によるものではなく系統的に行われていることが明らかとなった。また、振る・擦る・叩く探索行為のそれぞれにおいて、素材の触覚的な弁別に特徴（成績の偏り）が見られることが明らかとなった（図4.25）。

以下に異なる素材の弁別結果のまとめと考察を述べる。

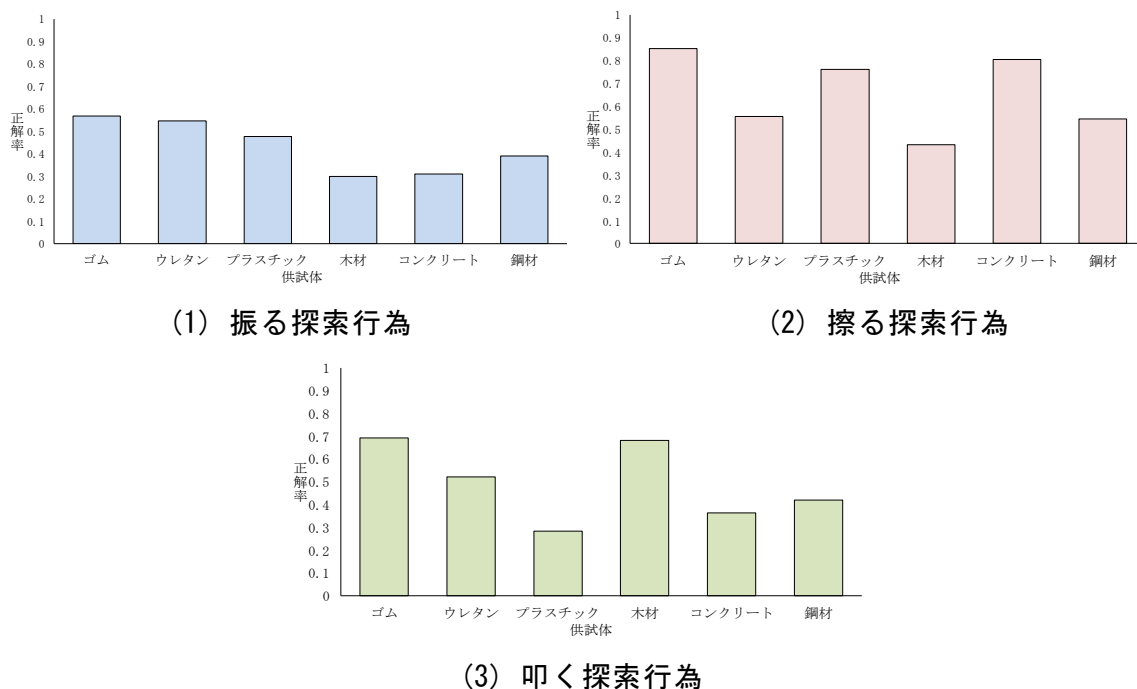


図 4.25 触知覚による各探索行為における異なる素材の弁別実態

(1) 振る探索行為による素材の弁別

振ることによる素材の弁別は可能と考えられるが、ゴム・ウレタンは振る探索において相互に誤認される傾向が見られた。また、プラスチックと鋼材は相互に誤認される傾向が、木材はプラスチック、コンクリート、鋼材に誤認される傾向が、コンクリートはプラスチック、鋼材とを誤認される傾向があった。

振る探索行為は、探索棒を供試体に押しつけて振ることにより弁別する行為であり、供試体に押しつけている探索棒の先端接触部(点接触)若しくは面的な接触によるもので擦るといった接触ではないことから、素材のかたさに起因する特徴を知覚していると考えられる。

特にやわらかいゴム・ウレタンについては類似したやわらかさを持っており、相互に誤認される傾向が見られたものと考えられる。プラスチック・木材・コンクリート・鋼材に関しては、それぞれの特性を弁別するのに必要な情報が不足していることにより誤認されたものと考えられる。

(2) 擦る探索行為による素材の弁別

擦る探索行為では、ゴム・プラスチック・コンクリート・鋼材については、誤認が少なく弁別されているという結果となった。ウレタンを探索する場合はゴムと誤認、木材を探索する場合はプラスチックと誤認される傾向が見られた。

擦る探索行為は、探索棒を供試体に押しつけて擦ることにより弁別する行為であり、供試体に押しつけている探索棒の先端接触部の点での接触のほかに、擦ることにより供試体表面の状態を知覚している。ゴム・プラスチック・コンクリート・鋼材といった誤

認の少ない素材については、かたさの他に素材表面の凹凸などに起因する特徴を検知しているものと考えられる。

ゴムは一般的には弁別ができているにもかかわらず、ウレタンとの誤認傾向があることに関しては、表面の粗さ等だけではなく、押し付け時に知覚するかたさの類似性による情報が考慮された結果によるものと考えられる。

また、木材に関しては、木目による表面の凹凸等により、プラスチックとの誤認はないものと当初は考えていた。しかしながら、今回使用した木材の供試体は表面が滑らかに加工されていたため、木目の凹凸からもたらされる情報が取得できず、結果としてプラスチックとの誤認につながったと考えられる。

(3) 叩く探索行為による素材の弁別

叩く探索行為によるゴムと木材の弁別に関しては、誤認が少ない傾向が見られた。

ウレタンについては、ゴムと誤認されやすい傾向が見られ、プラスチック・コンクリート、鋼材は、相互に誤認される傾向が見られた。

叩く探索行為は、探索棒で供試体を打撃することにより弁別する行為であり、探索棒を打撃した際に発生する反力や振動からかたさを知覚しているものと考えられる。

ゴム・木材に関しては、かたさ知覚の他に供試体を叩く際に素材固有の振動の伝達が生じている可能性がある。これにより弁別をしている可能性が考えられる。

ウレタンをゴムと誤認したりプラスチック・コンクリート、鋼材を相互に誤認することに関しては、素材のかたさを誤認しているものと考えられるが、これはかたさや振動による知覚のために必要となる情報が、叩く探索行為においては不足していることによると考えられる。

以上の点から触知覚における素材の弁別は、偶然によるものではなく、探索によって素材の特徴を検知していることからもたらされることが明らかとなった。一方で、状況によっては誤認が生じることもわかった。これは、次節でも述べるが、探索行為の方略によって、素材の弁別のために利用しうる触知覚情報に差があることによると考えられる。

4. 4. 3 正解率上位者と下位者の探索行為の相違

探索動作の時系列変位の代表例(図 4.19~4.21)を見ると、正解率上位者は探索時の動作が変化に富むのに対し、正解率下位者は、画一的な運動が繰り返される傾向が認められた。画一的な運動が繰り返される場合、利用可能な情報が限定され、結果として、素材を弁別する際に誤認が生じやすくなると考えられる。一方、正解率上位者は、変化に富んだ能動的な探索を行うことで、環境に存在する情報(ギブソン(1966)[4]の「不変項」)に対して知覚系として同調する機会を積極的に作り出していると考えられる。

実験1では、媒体を通じた触知覚による探索行為について、動作変位の観点から定性

的にその特徴を推定することができた。そこで次の段階として、図 4.26 に示すように、触知覚による探索時に人がどのように素材の弁別を行っているのか、その運動的な特徴をより定量的に明らかにする必要がある。そのため、特に探索行為の中で、探索棒が供試体に触れる際に作用する力(ひずみ)や探索棒の動き(加速度)等の運動的な特徴に注目することがまずは有用であると考えられる。

これについては、第 5 章の研究 2 で述べることとする。

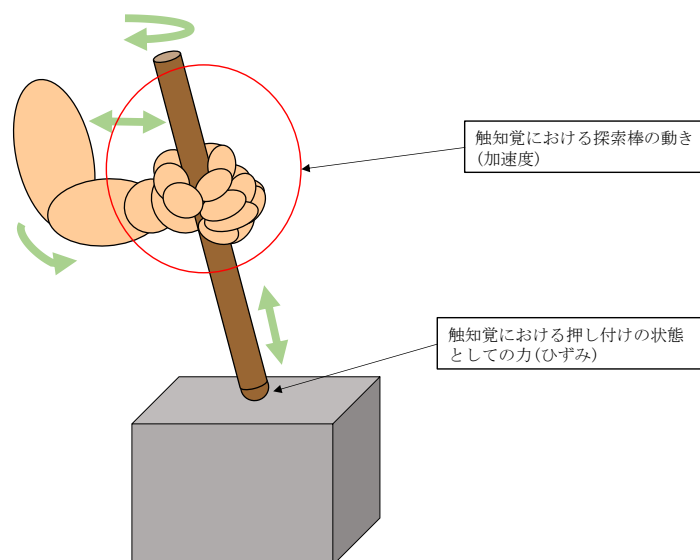


図 4.26 触知覚による各探索行為における探索棒に作用する力や動き

第5章 研究2：触知覚による探索行為の運動的特徴

研究1では、探索棒を用いつつ、振る・擦る・叩くといった触知覚的な探索行為によって素材を弁別する能力を明らかにした。また、記録映像による人の動作傾向から、正解率上位者と正解率下位者の相違を明らかにした。

実験1では、正解率上位者に見られた変化に富む探索により、素材の弁別が行われていることを定性的に推定した。しかし、探索行為において素材の弁別する能力は安定的なのか、弁別のための運動的な特徴を明らかにするには至っていない。

そこで研究2では、実験参加者44名から建設機械オペレータ10名を選抜し、実験1と同様な手順によって実験2を行い、媒体を介した人の触知覚による素材の弁別が安定的であることについて、実験1と実験2の弁別結果により比較する。また、実験2では触知覚による振る・擦る・叩く探索行為に要する時間の傾向を明らかにする。

さらに、実験2では、実験1で行った計測に加え、探索時に発生するひずみと加速度を計測し、素材の弁別向上につながる振る・擦る・叩く探索行為の運動的な特徴を明らかにすることを目的とした。

解析にあたっては、探索行為が能動的で変化に富むものであるのか、若しくは、規則的で画一的な動きなのかといった傾向を定量的に評価するため、時系列データの背後にある力学的な様々な情報を知ることができるRQA (Recurrence Quantification Analysis) [17]を行い、そのデータを用いクラスター分析によって運動的な特徴を明らかにした。

5.1 実験2

5.1.1 実験2の環境条件

(1) 実験2に使用した供試体

実験1で使用した、ゴム、ウレタン、プラスチック、木材、コンクリート、鋼材の6種類を供試体として使用した。

(2) 実験2で使用する探索棒の仕様

実験1で使用した探索棒と一部仕様の異なる探索棒を製作した。両者の違いは、実験2で使用した探索棒にひずみゲージ及び加速度計を装着したことである(図5.1)。その他の基本仕様は実験1と同様であり、素材はABS樹脂製(縦弾性係数約2.3Gpa, 横弾性係数約1.0Gpa, ソリッド構造, 約200g)と、また、操作レバーを模した探索棒の先端部に関しても、実験1と同様に端部の鋭角部を球形状(R30)とした。

測定系統及び機器構成については、ひずみゲージによる測定と3軸加速度計を用いた水平方向運動及び垂直運動の挙動について測定を行うものであり、図5.2, 5.3に示す。

測定に必要な機器の具体的な仕様に関しては、表5.1に示す。なお、探索棒はソリッド構造としているが、加速度装着部の空洞部には、同材質の樹脂を充填したうえで

重量の調整を行った。

また、実験2に使用する使用機器の性能確認及び精度確認を行った。3軸加速度計(三栄インスツルメンツ製、周波数範囲：0.5～15,000Hz、)はX,Y,Z成分 (m/s^2) がそれぞれ出力され、ひずみゲージ(共和電業製 $119.6 \pm 0.4 \Omega$)は、ゲージ出力(μST)としている。なお、分析等で使用する出力データは、計測によって出力されたひずみ(μST)と加速度(m/s^2)を使用した。

(3) 測定・記録

実験参加者及び試験の試行番号を設定したうえで、計測を進めることとした。

測定時におけるアンプはひずみアンプ AD 変換デバイス(トータル工業製、TUSB-S01LC2Z)、加速度計 AD 変換デバイス(トータル工業製、TUSB-S01A0C)を使用した。

測定時のサンプリング周期数は 100Hz とした。加速度計アンプゲインは 10 倍に設定し、ひずみアンプに関しては、倍率を 1 倍に設定した。

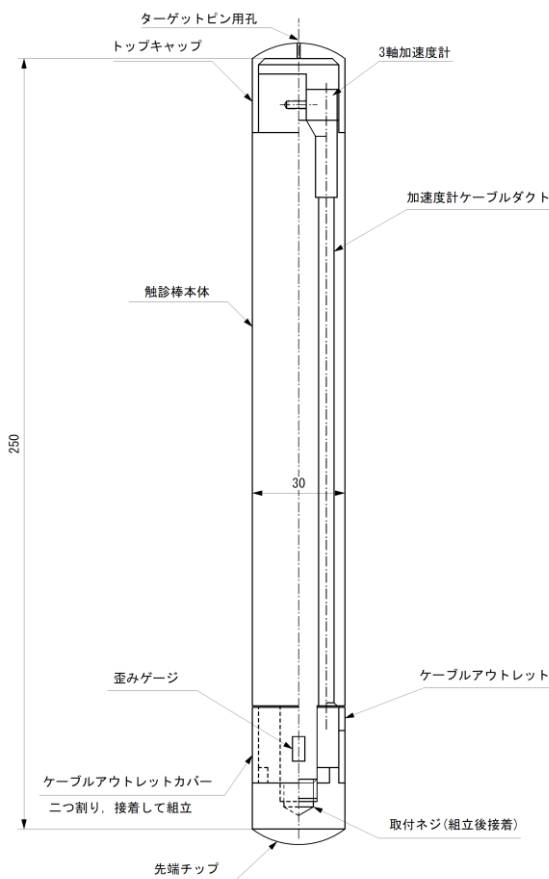


図 5.1 実験2で使用する探索棒の仕様

表 5.1 実験 2 における計測システムの構成

機 器 名	規 格	数 量
ひずみアンプ, AD変換デバイス	TUSB-S01LC2Z	1
加速度計, AD変換デバイス	TUSB-S01A0C	3
ひずみゲージ	KFG-5-120-C1 2Active, 2dummy	3
3軸加速度計	SA12ZSCA	1
USB HUB		1

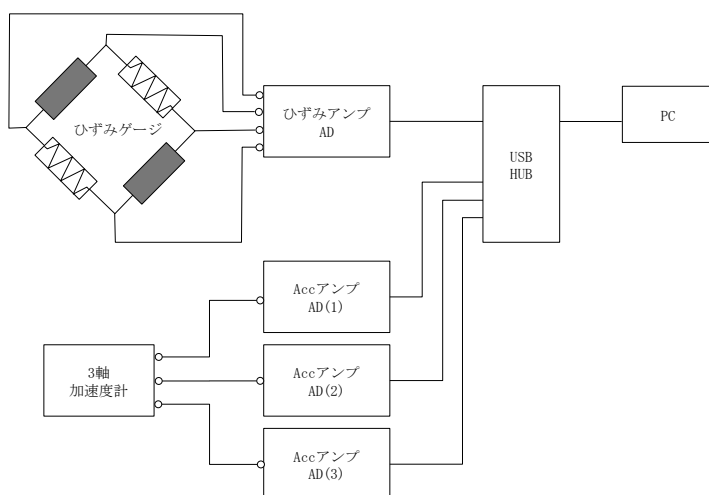


図 5.2 実験 2 で使用する機器系統図



図 5.3 実験 2 における計測装置の配置状況

5. 1. 2 実験2への実験参加者の選定

(1) 建設機械オペレータ選定

実験1では、媒体を介した人の触知覚の実態を把握するために、44名の実験参加者のデータを取得した。実験2では、建設作業における視覚や聴覚といった知覚情報が遮蔽された地中内部等を触知覚による振る・擦る・叩くといった探索行為を想定し、建設機械オペレータを実験参加者とした。

実験参加者の選定にあたって、建設機械オペレータの操作に関する技量に大きな差異のないことを考慮した選定が必要となるが、その評価手法は確立されていない。また、建設機械オペレータの作業効率を評価するために必要となる建設機械(油圧ショベル)を用いた作業時間を評価するための指標が存在せず、評価にあたっては現場での経験に基づく感覚的なものであった。

そこで、今後、本実験の他、建設機械オペレータの適性評価、開発装置の評価等、様々な基礎研究及び要素技術の研究開発を進めることを目的とした遠隔操作による作業効率評価のためのモデルタスク[18]を用い、モデルタスクに基づく操作実験結果により得られた結果から実験参加者となる建設機械オペレータを選定することとした。

(2) モデルタスク

国立研究開発法人土木研究所では、2010年より建設機械の遠隔操作における作業効率の向上に関する研究を進めている。ここでは、無人化施工における作業効率を作業時間の観点から評価し、ディスプレイや通信系などの機器の差異とオペレータの慣れや経験の各々について、それが作業時間に及ぼす影響を検討し、これに基づいて適切な操作方式や新しい機器の開発を目指している。この検討を進めるためには、現場で実際の建設機械を用いて具体的な作業を行い、その作業に要する時間を計測・評価することが重要であり、無人化施工以外にも建設機械を遠隔から働かせる幾つかの作業が報告[19],[20]されている。特に、建設機械に搭乗操作した場合と遠隔での操作などの操作条件の違いによる作業時間の比較を行うことは必須である。しかし、現場での作業は、建設の進行に伴って環境が変化するため、同一の環境条件での実験・計測を繰り返すことができず、これが作業効率に関する十分な検討を妨げていた。

そこで、無人化施工技術において実作業現場で作業効率を評価することの難しさ、次いで、作業効率評価のために定式化した現場での掘削作業を想定した繰り返しが可能なモデルタスクを茂木ら[18]が提案した。このモデルタスクに基づき実験を行うことによって、基礎研究及び要素技術の研究開発を進めるうえで必要となるデータ取得が可能になる。本研究では、モデルタスクに基づく操作作業時間の計測により実験参加者を選定した。

(a) モデルタスクの必要性

無人化施工の現場では、従来から、様々な工夫がなされ、オペレータへの視覚情報の提供や遠隔操作室の環境整備、作業分担などについて、一定の方式が確立しつつある。しかし、現状における無人化施工の作業効率はオペレータが搭乗して行う施工に比して低いことが知られており、その作業効率は、経験的ではあるが、建設機械オペレータの感覚として50%~70%であると言われている。このことは、現状の施工効率をもう一段階改善できる可能性を示しており、そのための技術開発が求められている。

例えば、油圧ショベルでの搭乗操作では、直接目視による視覚と体性感覚などの知覚情報がフル活用されていると考えられるが、遠隔操作では、作業対象から伝送された映像という限られた視覚情報だけで行われている。作業効率に影響している操作時の因子が何かを知ることは、今後、作業効率の向上を検討する上で有効かつ不可欠となる。そのことは、無人化施工における建設機械オペレータのインターフェースを設計するうえで基礎的な情報につながるものとなる。

しかし、これまで、一般に比較対象となる指標がないまま行われるため、様々な作業現場での作業時間が統計的に把握されるにとどまっていた。したがって、作業効率の評価結果は、異なる現場や異なる条件下でのデータと詳細に比較することが難しく、概略な評価にとどまり、客観性をもつものにはなっていないという問題があった。このため、現状では、実現場での作業効率を計測したものはあっても、現場における種々の条件に対してオペレータ搭乗時と非搭乗時の作業効率を比較することはできていない。そして、遠隔操作時には、搭乗時に比して作業効率が低下することは分かっているが、それは定性的な評価に過ぎないものであった。このため、いろいろな手法や条件が無人化施工の作業効率に与える影響を定量的に評価することが求められている。

特に災害現場で行われる無人化施工は、変動の大きい厳しい環境条件と、緊急あるいは限られた工期の中で進められるものであり、その条件下では作業効率の客観的な評価データを得ることは難しい状況にある。

この問題を解決し、施工における作業効率を定量的に評価するためには、現場の作業ではなく、評価を目的とした実験モデルが不可欠となる。

そのため、現場を模した作業において、条件をコントロールして実験を行う必要がある。ここで重要となるのは、実施する模擬作業の設定である。標準的な模擬作業を「モデルタスク」と呼ぶこととし、設定するモデルタスクは、遠隔操作および搭乗操作の双方で建設機械を操作して行うことのできる作業である必要がある。モデルタスクに要する作業時間を標準とすれば、異なる実験で得られたデータを比較することにより、作業の違いによる影響も検討できるため、経験・知見の一層の蓄積が可能となる。

(b) 油圧ショベルによる標準的作業

建設機械を用いた作業は、多岐にわたっているが、災害復旧現場や通常の土木工事で最も使用頻度が高い機械と標準的な作業を対象としたモデルタスクの構築から始めるのが良い。そこで、まず、全国の土木建設作業で最も頻繁に使用されている油圧ショベルを対象に標準的な作業条件を整理し、モデルタスクを検討することとした。

油圧ショベルは、建設機械として最も多く使われており掘削作業及びダンプトラックへの積み込み作業や運搬、のり面等の所定の形状への成形作業、油圧ブレーカやニブラなどによる解体・破砕作業等に利用されている。

油圧ショベル操作の多くは、図 5.4 のように、まず走行して対象物に近づき適切な位置に停止した後、作業対象を確認、バケット先端部を対象部にアプローチするために旋回・ブーム・アーム・バケットの動作を行う。この際、動作のパターンは、どのような操作内容であっても機体の走行と旋回・ブーム・アーム・バケットを単独若しくは複合によって操作するものとなっている。そこで、モデルタスクもこの一連の動作について構成する必要がある。

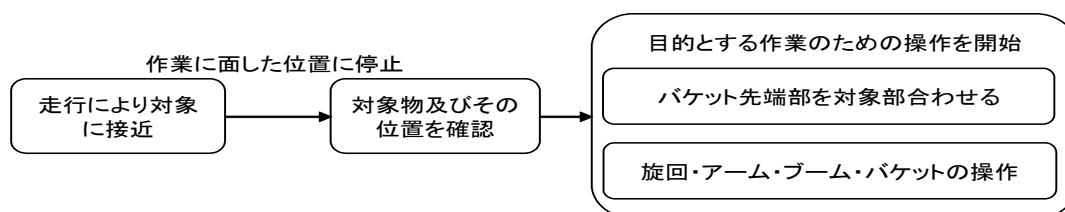


図 5.4 油圧ショベルによる操作の手順

(c) モデルタスクに必要な要件

建設機械による作業についてモデルタスクを設定する場合、実験の効果と効率を考えると、実際の現場において多くなされる作業とできる限り一致し(作業の標準性)、また、作業内容が現場でおこなわれるものから乖離しないことが求められる。さらに、作業の環境が現場の状況に近いこと。作業内容及び環境条件について、できる限り多くの現場の要素を含み、現場にない作業要素が入り込まないといった現実性(生態学的妥当性)、同条件での作業が繰り返し実施できる再現性、実験に際して準備が簡単であり、1回の作業を要する時間が短く、複数回の作業比較が容易にできる容易性といった条件が要求される。

(d) モデルタスクの提案

以上の検討に基づいて、油圧ショベルによる標準的な作業として、主に実現場での掘削積み込み作業を想定した図 5.5 に示すタスクを設定した。ここでは、油圧ショベルは、待機場所から作業対象の前まで走行し、上部旋回体を旋回して対象物に正対する。次にアーム・ブーム・バケットを操作して対象物を掴み、旋回し、所定の位置に設置し、これを繰り返す。その後は再び走行して待機場所に戻る。このモデルは、機体質量 3 t 以

上の車両系建設機械（整地等）の運転作業に従事するために必要となる労働安全衛生法及び労働安全衛生法施行令（昭和47年6月8日法律第57号）[21]に基づく運転技能講習時に操作訓練するタスクに類似した動作である。また、走行姿勢等の操作に関しても運転技能講習における操作方法を基礎としている。

ここで、作業の再現性と現実性を両立させるために、掘削作業等の油圧ショベルを操作する際に標準的に生じる軌道でバケットを動かす動作として、図5.6に示すとおり固形対象物の掬い・引き上げを行わせることとした。

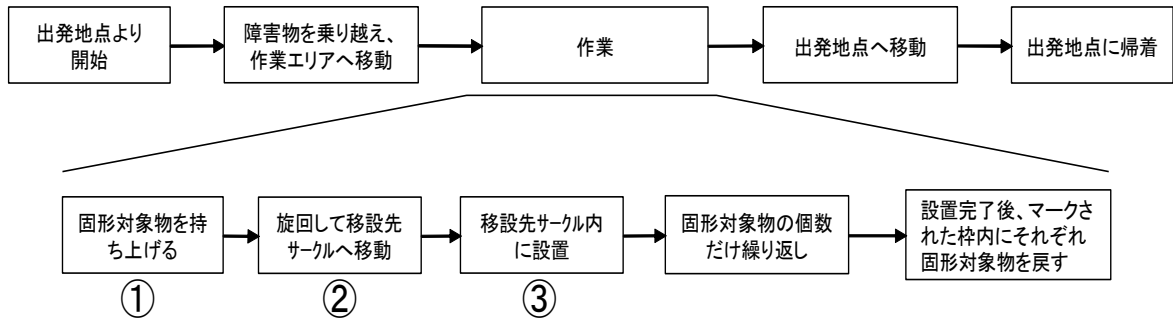


図 5.5 油圧ショベルによる標準的な作業の流れ

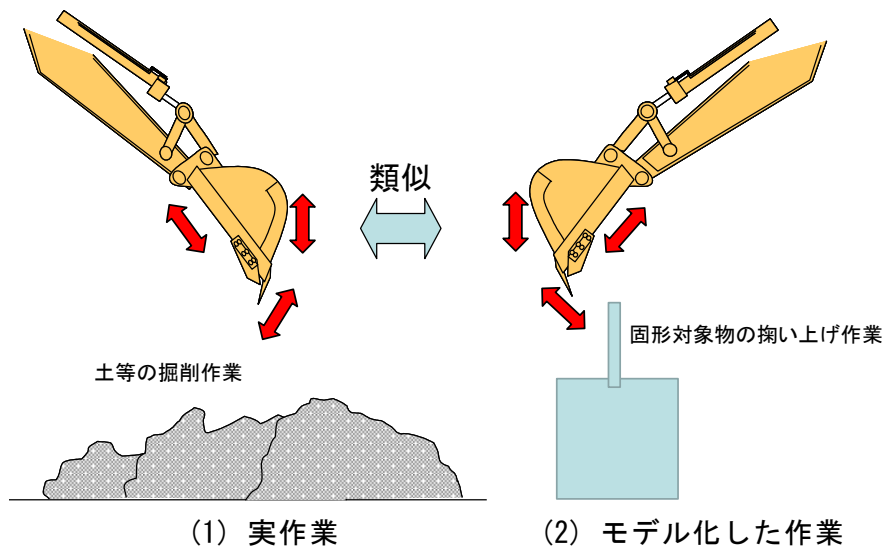


図 5.6 実作業での土等の掘削作業とモデル化した作業

このモデルタスクは、図5.7、5.8に示す作業環境において待機場所から作業エリアまで走行し、次に固形対象物を油圧ショベルのバケットによって移設する。

初期位置から、左折を含む約30mの経路を走行し、バケットによる作業に適した位置まで移動してから、固形対象物を移設先サークルに移設し、次に再び、初期位置の枠内（縦横990mm）に固形対象物を戻す。ここで移設する固形対象物は、鋼製フレーム縦横770mm、ドラム缶径570mm×高さ760mm、重量約100kg、持ち手高さ2,000mmとする。

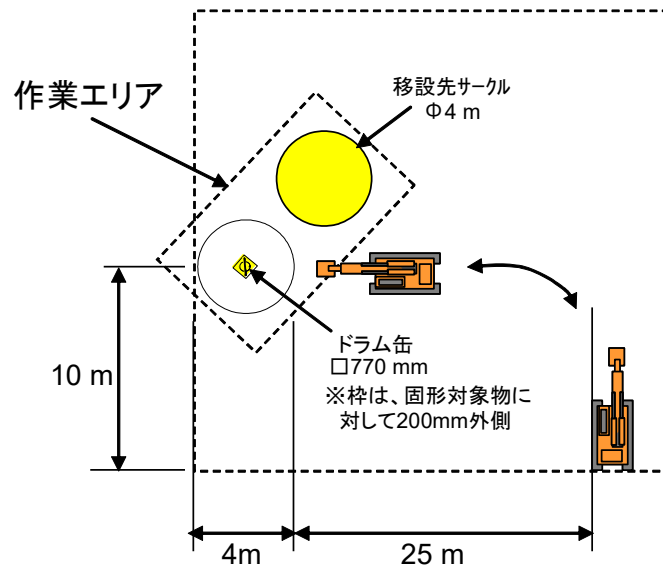


図 5.7 タスクモデルにおける作業環境



図 5.8 モデルタスクによる固形対象物の移設状況

(3) モデルタスクに基づく実験参加者の選定

モデルタスクに基づき、土木研究所保有の油圧ショベル（バケット容量 0.5m³ クラス）を利用し、土木研究所内建設機械屋外実験場において搭乗操作と遠隔操作による作業時間の計測[22]を行った。参加者は、実験1に参加した油圧ショベル操作歴が5年以上ある建設機械オペレータ 15名（平均年齢 39.22±8.07 歳）とした。モデルタスクに基づく搭乗操作と遠隔操作による作業時間の結果を表 5.2 に示す。

表 5.2 搭乗操作と遠隔操作の作業時間と実験2への参加者選定

実験1 実験参加者	モデルタスクによる操作実験結果			実験2 実験参加者
	搭乗操作による 作業時間(S)	遠隔操作による 作業時間(S)	遠隔操作/ 搭乗操作	
16	109.738	184.613	1.682	○
38	138.950	234.111	1.685	○
43	112.050	193.425	1.726	○
33	143.613	268.475	1.869	
34	126.163	238.550	1.891	○
42	155.038	295.400	1.905	○
37	120.063	243.575	2.029	○
32	121.913	255.475	2.096	○
35	122.575	273.875	2.234	○
22	138.838	323.838	2.332	
41	132.988	353.550	2.659	○
36	116.075	359.050	3.093	
39	90.975	292.650	3.217	
40	98.275	321.200	3.268	○
44	143.475	487.175	3.396	

選定にあたっては、実験2の目的が異なる素材の弁別向上につながる触知覚による探索行為の特徴を明らかにすることであることを踏まえ、搭乗操作における作業時間と遠隔における作業時間の差が少なく安定した技量を持つ建設機械オペレータを選定した。選定にあたっての指標として先行研究[1]で明らかとなっている遠隔操作と搭乗操作に対する約2.3倍の作業時間比を指標として10名を選定した。

なお、対象者2名のスケジュール等の調整から No22, 33 と No40(搭乗操作で安定した作業時間であるため), No41(遠隔操作と搭乗での操作との作業時間差指標値に近似しているため)を入れ替えた実験参加者の調整を図った。

5. 1. 3 実験2の手続き

(1) 実験2で検討する各探索行為の説明と事前把握(慣熟)

探索棒を供試体に押しつけて振る、押しつけて擦る、叩く3つの探索行為について実験参加者に対して対面でのレクチャーを行った。また、実験時における探索行為の注意点(実験1と同様)を説明した。

実験1と同様、実験参加者は、図5.9に示すように視覚と触知覚・聴覚によって供試体を探索し、予め供試体材質の特性を確認・把握(慣熟)させた。



図 5.9 実験2における探索棒を用いた供試体の事前把握

(2) 実験2の実施

実験2の実施にあたっては、国立研究開発法人土木研究所実験室内において2015年11月～2015年12月の期間に行った。

実験2の手続きは、実験1と同様であるが、差分を含めて以下に説明する。

実験参加者は、机の前に座り、供試体が見えない状態で探索を開始する。その際に計測装置により歪みと加速度の計測を開始した。探索までの時間に関しては特に制限を設けないこととした。実験時における探索棒の握りは探索棒の中央を握るように指定した。実験参加者は、口頭にて表4.3に示す供試体の材質供試体番号を回答してもらい、実験参加者に対して回答のフィードバックは行わない。また、探索時には、擦り音・打撃音といった聴覚による探索が発生しないようにカナル型イヤホンを利用して外部音を遮蔽した。

振る・擦る・叩く探索行為に関し、乱数によってランダムに供試体の材質を変え、素材の名称若しくは番号を答えてもらうことを12回実施した。

実験時の留意点として、計測直後毎に押しつけ時にひずみ及び加速度計のキャリブレーションを行うとともに図5.10に示す探索棒上端部にマークされた黒点を計測毎に正面に向け、加速度計X,Y,Z方向の補正を行った。

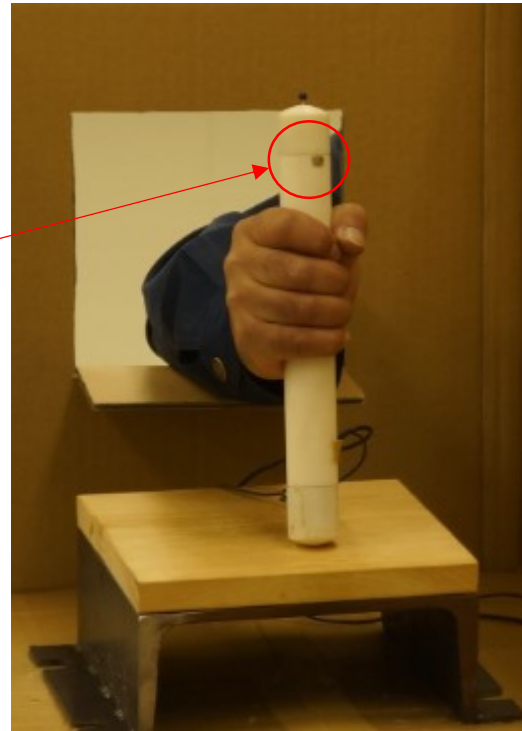
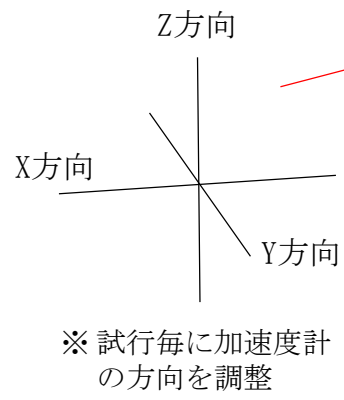


図 5.10 触知覚による探索と加速度 X, Y, Z 方向と探索計測状況

5. 2 実験2の結果

実験1では、媒体を介在した触知覚により、実験参加者は、振る・擦る・叩く探索行為を通じて、特徴の異なる素材を弁別できることを確認した。

実験2では、実験1と同様な方法により、振る・擦る・叩く探索行為による素材の弁別実験を行い、弁別が安定してなされているかについて、特に実験1と実験2の実験結果を比較しつつ検討した。また、探索方法による探索時間の傾向を明らかにした。

5. 2. 1 実験2における各探索行為の正解率

実験2に参加した建設機械オペレータ10名の実験1・実験2のデータを表5.3にまとめた。

表 5.3 実験1及び実験2の各探索行為の正解率一覧

実験参加者	実験No	振る	擦る	叩く
1	実験1	0.500	0.750	0.583
	実験2	0.333	0.917	0.750
2	実験1	0.250	0.833	0.750
	実験2	0.250	0.667	0.583
3	実験1	0.500	0.917	0.333
	実験2	0.417	0.500	0.583
4	実験1	0.167	0.583	0.333
	実験2	0.417	0.917	0.667
5	実験1	0.417	0.667	0.583
	実験2	0.500	0.667	0.417
6	実験1	0.500	0.750	0.500
	実験2	0.417	0.833	0.417
7	実験1	0.583	0.417	0.500
	実験2	0.250	0.667	0.667
8	実験1	0.417	0.583	0.583
	実験2	0.500	0.917	0.538
9	実験1	0.750	0.917	0.667
	実験2	0.333	0.667	0.250
10	実験1	0.417	0.583	0.583
	実験2	0.333	0.500	0.333
平均	実験1	0.450	0.700	0.542
	実験2	0.375	0.725	0.521
標準偏差	実験1	0.154	0.155	0.125
	実験2	0.085	0.154	0.153
変動係数	実験1	0.343	0.221	0.231
	実験2	0.228	0.212	0.294

5. 2. 2 振る・擦る・叩く触知覚的な探索行為における弁別の安定性

各探索行為における素材の弁別に再現性が認められるかについて検証するため、統計解析ソフト R 及び js-STAR[14][15]を用いたウェルチ法による t 検定を行った。帰無仮説を実験 1 と実験 2 の実験結果に違いが無いものとし、対立仮説として実験 1 と実験 2 に差があるものとして検証を行った。表 5.3 に示す各探索行為の正解率の平均及び標準偏差を図 5.11 に示す。

t 検定の結果、振る探索行為に関して実験 1 と実験 2 にはデータの平均に有意な差はなかった (t 値=1.2763, 自由度 $df=14.04$, $p=0.2226$, $effect\ size\ d=0.5708$, $power=0.2207$, 両側検定)。次に擦る探索行為に関して、実験 1 と実験 2 の平均に有意な差はなかった (t 値=-0.3465, 自由度 $df=18$, $p=0.733$, $effect\ size\ d=-0.155$, $power=0.0514$, 両側検定)。叩く探索行為に関して、実験 1 と実験 2 との平均に有意な差はなかった (t 値=0.2496, 自由度 $df=17.28$, $p=0.8059$, $effect\ size\ d=0.1116$, $power=0.0424$, 両側検定)。

以上の結果から、各探索方法において、実験 1 と実験 2 の間で、正解率の平均に有意な差は見いだせなかった。この結果から、触知覚による振る・擦る・叩く探索行為が短期間の練習(慣熟試行および実験試行)によりすぐに上達・習熟するものではなく、実験参加者の触知覚による探索行為のパフォーマンスは安定しているものと考えられる。

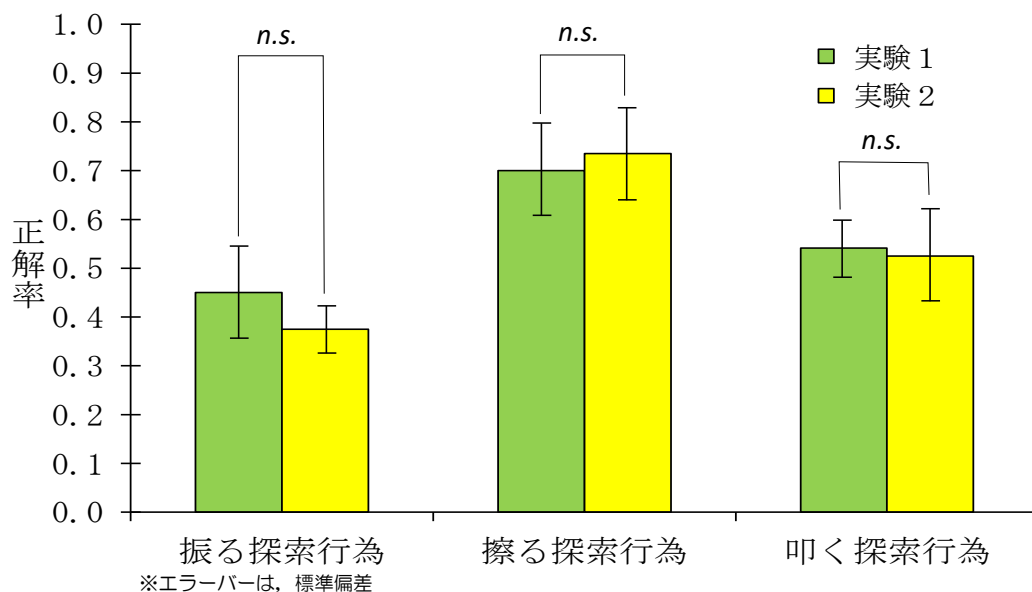


図 5.11 実験 1 と実験 2 における各探索行為の正解率に関する比較結果

5. 2. 3 触知覚による素材弁別の安定性

図 5.12～5.14 に実験で提示した供試体（ゴム、ウレタン、プラスチック、木材、コンクリート、鋼材）を縦軸に、実験参加者 10 人の回答を横軸に示し、実験参加者による回答の傾向（実験参加者回答数／各供試体提示回数:20 回）を探索行為毎にマトリクスとして整理した。マトリクスの対角線上の数値が正答の比率（すべて正答で 1.0）であり、図中では該当するセルの白黒を反転させた。また、対角線以外の数値は誤答の比率（正答以外の素材を選んだ比率）であり、提示された供試体を実験参加者が他のどの供試体と誤認したかが示されている。

(1) 振る探索行為

図 5.12(1), (2) に示される傾向を見ると、ゴムやウレタンのようなやわらかい供試体に関する正解率が高い傾向となった。プラスチック・木材・コンクリート・鋼材といった素材に関しては、これらの供試体間での誤答となる傾向が見られた。これらの傾向について、実験 1 と実験 2 に大きな相違は見られなかった。

		回答した供試体						
		ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材	
提示した供試体	ゴム	0.65	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	
	ウレタン	0.40	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	
	プラスチック	0.00	0.00	0.55	0.05	0.20	0.20	
	木材	0.05	0.00	0.10	0.30	0.35	0.20	
	コンクリート	0.00	0.00	0.05	0.20	0.30	0.45	
	鋼材	0.00	0.00	0.30	0.10	0.30	0.30	

(1) 実験 1

		回答した供試体						
		ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材	
提示した供試体	ゴム	0.45	0.35	0.10	0.10	0.00	0.00	
	ウレタン	0.30	0.55	0.05	0.10	0.00	0.00	
	プラスチック	0.00	0.05	0.30	0.15	0.35	0.15	
	木材	0.00	0.00	0.3	0.40	0.25	0.05	
	コンクリート	0.05	0.00	0.05	0.15	0.30	0.45	
	鋼材	0.05	0.00	0.20	0.15	0.35	0.25	

(2) 実験 2

図 5.12 振る探索行為による素材弁別の正解率の傾向：
(1)は実験 1, (2)は実験 2 のデータ

(2) 擦る探索行為

図 5.13(1), (2)より, ゴム・ウレタンといった比較的やわらかい供試体のほか, プラスチックに関し, 素材の弁別において正解率が高い傾向が見られた. 実験 1 と実験 2 に大きな相違は見られなかった.

		回答した供試体					
		ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体	ゴム	0.90	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00
	ウレタン	0.10	0.85	0.05	0.00	0.00	0.00
	プラスチック	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00	0.05
	木材	0.05	0.00	0.30	0.40	0.10	0.15
	コンクリート	0.00	0.00	0.00	0.05	0.65	0.30
	鋼材	0.00	0.00	0.35	0.00	0.20	0.45

(1) 実験 1

		回答した供試体					
		ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体	ゴム	0.85	0.05	0.10	0.00	0.00	0.00
	ウレタン	0.20	0.65	0.10	0.05	0.00	0.00
	プラスチック	0.00	0.05	0.95	0.00	0.00	0.00
	木材	0.00	0.00	0.15	0.60	0.05	0.20
	コンクリート	0.00	0.00	0.00	0.15	0.60	0.25
	鋼材	0.00	0.00	0.20	0.15	0.05	0.60

(2) 実験 2

図 5.13 擦る探索行為による素材弁別の正解率の傾向：
(1)は実験 1, (2)は実験 2 のデータ

(3) 叩く探索行為

図 5.14 (1), (2)に見られるように, ゴムと木材で正解率が高い傾向が見られ, その傾向は実験 1 と実験 2 に相違は見られなかった. 誤認に関しては, ウレタンをゴムと間違える傾向が一貫して確認された. 一方で, ゴムをウレタンと誤認する傾向は相対的に低かった.

		回答した供試体					
		ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体	ゴム	0.80	0.15	0.00	0.05	0.00	0.00
	ウレタン	0.45	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00
	プラスチック	0.00	0.00	0.20	0.25	0.50	0.05
	木材	0.00	0.00	0.10	0.75	0.10	0.05
	コンクリート	0.00	0.00	0.25	0.15	0.40	0.20
	鋼材	0.00	0.00	0.20	0.10	0.15	0.55

(1) 実験 1

		回答した供試体					
		ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体	ゴム	0.75	0.20	0.00	0.05	0.00	0.00
	ウレタン	0.55	0.30	0.10	0.05	0.00	0.00
	プラスチック	0.00	0.00	0.45	0.15	0.15	0.25
	木材	0.00	0.00	0.05	0.85	0.10	0.00
	コンクリート	0.00	0.00	0.15	0.30	0.35	0.20
	鋼材	0.00	0.00	0.25	0.05	0.20	0.50

(2) 実験 2

図 5.14 叩く探索行為による素材弁別の正解率の傾向：
(1)は実験 1, (2)は実験 2 のデータ

5. 2. 4 触知覚的な探索行為にかかる探索時間の傾向

(1) ひずみと加速度データの整理

実験2において、実験参加者10人のひずみと加速度データ X, Y, Z を取得した。ただし、これらには供試体を弁別するため探索を行う相、探索開始時と終了時に待機している相などのデータが混在している可能性があり、RQAの結果に影響を及ぼしかねない。そこで、これらの時系列データを赤池情報量規準(Akaike's Information Criterion:以下、「AIC」)[23], [24]の手法を利用して整理することにより、供試体を弁別するため探索を行う相と、探索開始時と終了時に待機している相とに分離した。

AICは、時系列波形に含まれる情報エントロピーを示すものであるが、波形信号が入力されると、それまでのシステムとは異なった情報が生成されることから情報エントロピーが上昇に転じ、これがAICに反映されると考えられる[24]。

動作のパターンが変わる際、AICが最小値を示し、動作パターンが継続している間は、AICが上昇、再び異なった動作パターンになると、AICが減少に転じると考えられる。1つの波形をある点 k において区分し、 N 個のサンプル数を持つ波形振幅値 X_i の $i=k$ 点でのAIC値導出に式5.2.1を利用した[24]。ここで、 $\text{var}(X[1, k])$ は波形振幅値 X_1 から X_k の分散であり、 $\text{var}(X[k, N])$ は波形振幅値 X_k から X_n の分散を表している[24]。

$$AIC(k) = k \cdot \log\{\text{var}(X[1, k])\} + (N - k) \cdot \log\{\text{var}(X[k, N])\} \quad (\text{式 5.2.1})$$

本研究では、図5.15に示すフロー図に基づき、計測された時系列波形の中で開始時点とAIC波形に見られる情報量の変化が発生している時点を確認し、探索開始時点とした。また、探索行為の終了付近に見られるフラット(待機)な状態とその手前に見られる触知覚による探索動作が行われている時系列波形の時点を確認し、AIC波形に見られる情報量の変化が発生している時点を探査終了時点として、探索時間の整理を行った。計測された時系列波形にフラット(待機)な状態が見られない場合は、計測された時系列波形データの開始から終了までを探索時間として整理した。なお、探索時間の切り出しに関しては、探索開始と終了時近傍の情報量変化のみとし、探索時間内における動作パターンの情報変化による波形の挙動に関しては、対象とはしなかった。

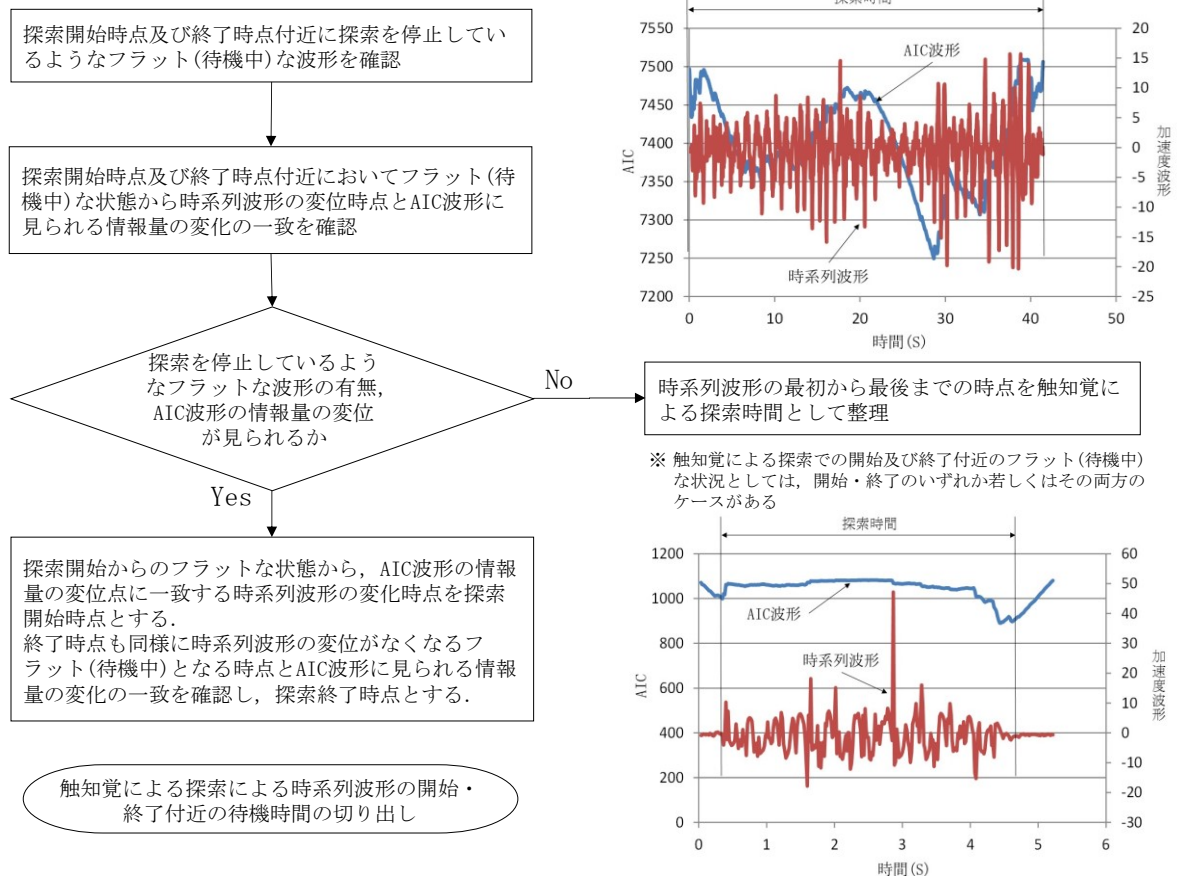
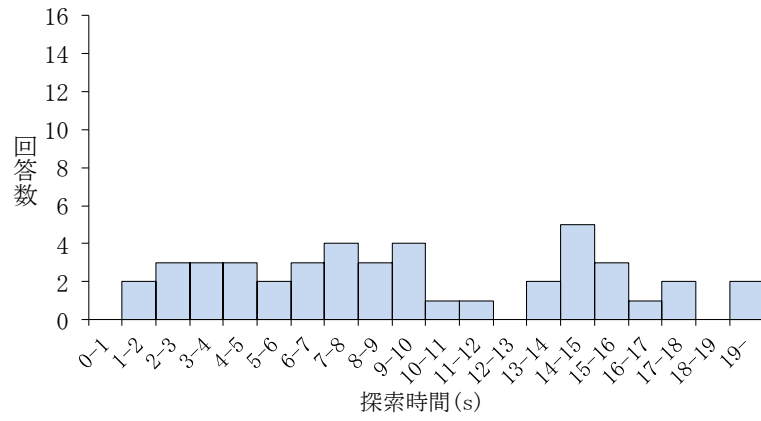


図 5.15 触知覚による探索時の時系列波形と AIC による探索時間の切り出し作業手順

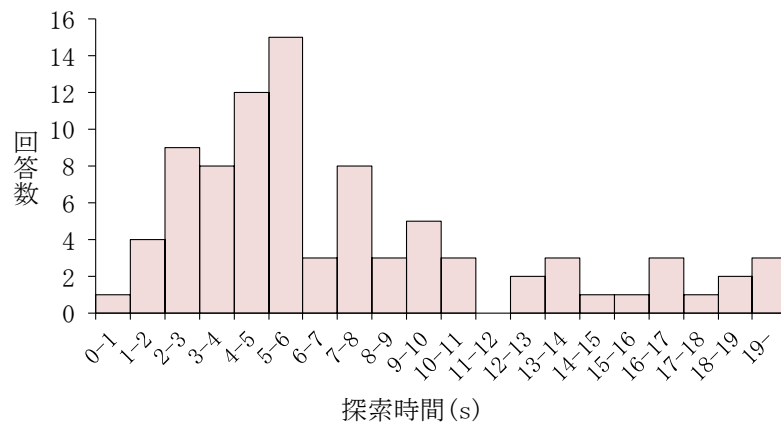
(2) 触知覚による各探索行為の時間的傾向

実験2で計測された振る・擦る・叩くの各探索行為における探索時間の傾向を整理した。ここでは、探索棒と供試体との接触時に発生するひずみデータを利用して探索時間を整理することとした。

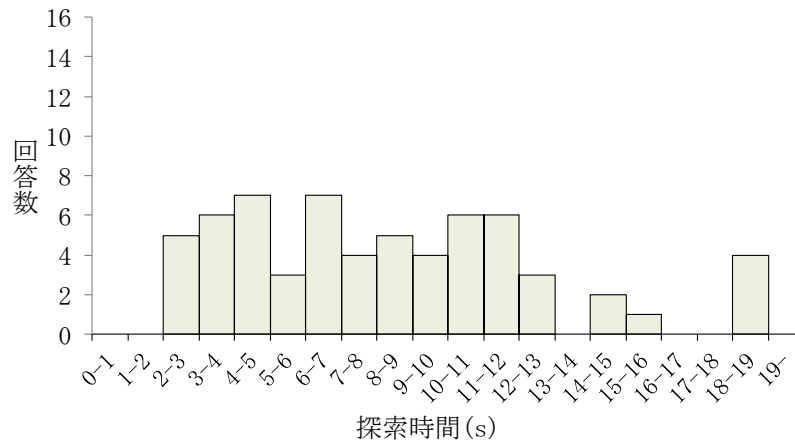
まず、触知覚による各探索行為毎に、“素材弁別が正解した場合のデータ”について、探索時間の分布（図 5.16(1), (2), (3)）を整理した。結果として、擦る探索行為は、探索時間の短い階級（5～6 秒）に分布が偏る傾向となった。一方、振る・叩く探索行為に関しては、探索時間の分布に偏りが見られなかった。



(1) 振る探索行為



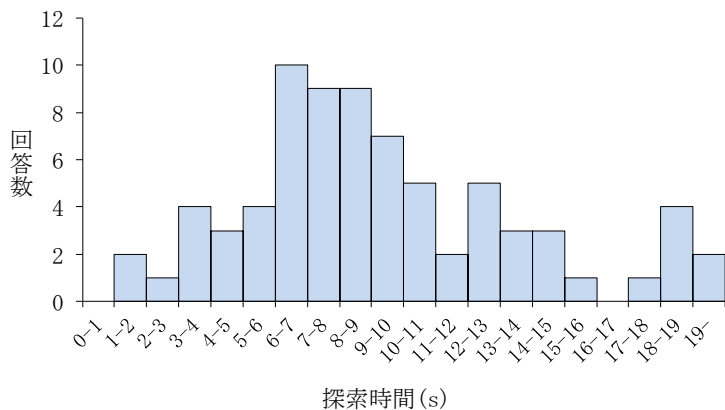
(2) 擦る探索行為



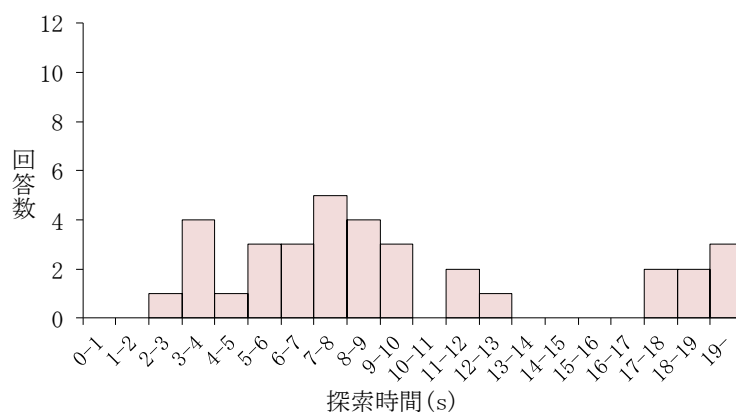
(3) 叩く探索行為

図 5.16 各探索行為における探索時間の傾向(正解データ)

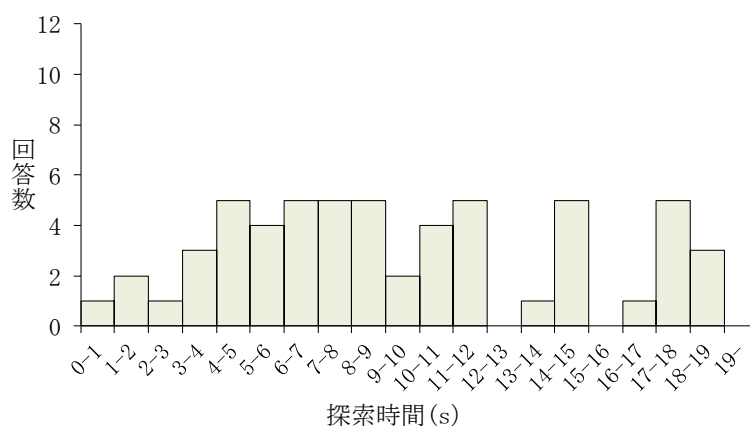
一方，素材の“弁別ができていない不正解であったデータ”についても探索時間の傾向を整理した(図 5.17(1), (2), (3))．これによると，振る・擦る・叩く探索行為のいずれも，正解時と比較して不正解時ではより探索時間の分布が右へシフトしていること，また特に振る探索行為においては，探索時間に正規分布の傾向が現れることが読み取れる．



(1) 振る探索行為



(2) 擦る探索行為



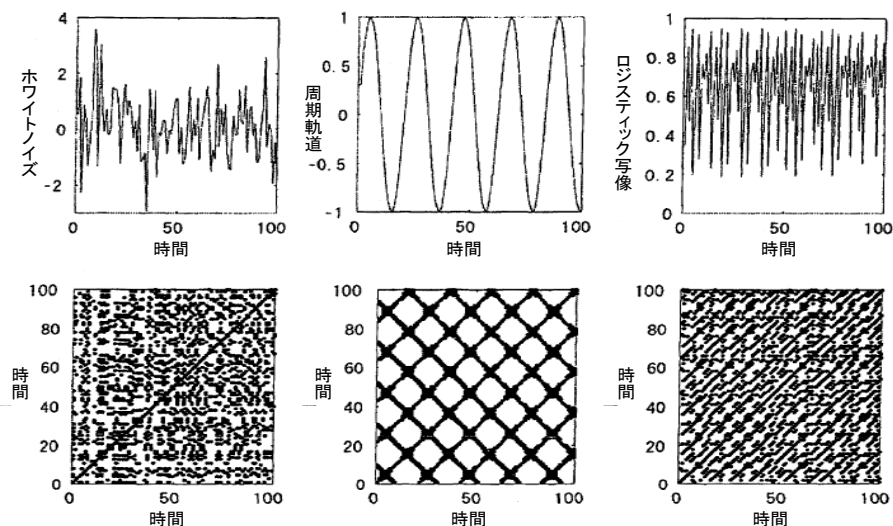
(3) 叩く探索行為

図 5.17 各探索行為における探索時間の傾向(不正解データ)

5. 3 触知覚的な探索行為の解析

5. 3. 1 RQA(Recurrence Quantification Analysis)

実験1で得られた探索時の動作変位波形から、規則性で画一的な動作と、能動的で変化に富む探索動作を確認することができた。しかし、これらの動作傾向を映像情報だけから確定することは根拠として乏しい。また、前章のフーリエ解析では、探索行為を評価するための特徴となる周波数を明らかにすることができなかった。そこで、探索時の探索棒の軌道や規則的な動作等について定量的に評価することを目的に、再帰性定量化解析 (Recurrence Quantification Analysis, 以下「RQA」という) [25]を用いて、探索行為に内在する特徴を抽出することとした。これは、Eckmann et al. (1987)により提案された手法であり、2つの対応する時系列における任意の2点の状態距離が近ければリカレンスプロット内の対応する場所に点を打ち、そうでなければ点を打たないことで描かれる2次元のパターンを利用して、時系列データの背後にある力学系の様々な情報を知ることができる解析である。例えば、図5.18に示すように、ホワイトノイズでは、リカレンスプロットにおける点の分布が不規則で一様に広がる。周期的な波形に関しては、周期的なパターンを示す点分布となっている。カオス的な時系列データに関しては、斜めの短い線分が多く分布するといった特徴を視覚的に見ることができる。RQAは、リカレンスプロットにおいて見られるこのような点の分布の特徴について定量的に評価する手法である。



(1) ホワイトノイズ (2) サイン関数波形 (3) ロジスティック写像

図 5.18 時系列波形データの例 [26]

※図の上を示す波形は、時系列波形を示す。図の下はリカレンスプロット

解析には、MATLAB (MATHWORKS 社) およびそのツールボックスである Signal Processing Toolbox を利用した。また、RQA の解析を実施するにあたり、Cross

Recurrence Plot Toolbox (Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M., Kurths, J., 2007. [27]) を使用した [28]. RQA においては, 前述の通り, リカレンスプロットにより視覚化されたパターンの中, 特にその斜線の特徴づける量 [25] として, 図 5.19 に示す斜線の最大長 (Maximal diagonal line length, 以下「Lmax」) と, 斜線をなす点の割合 (Determinism, 以下「DET」) に注目した.

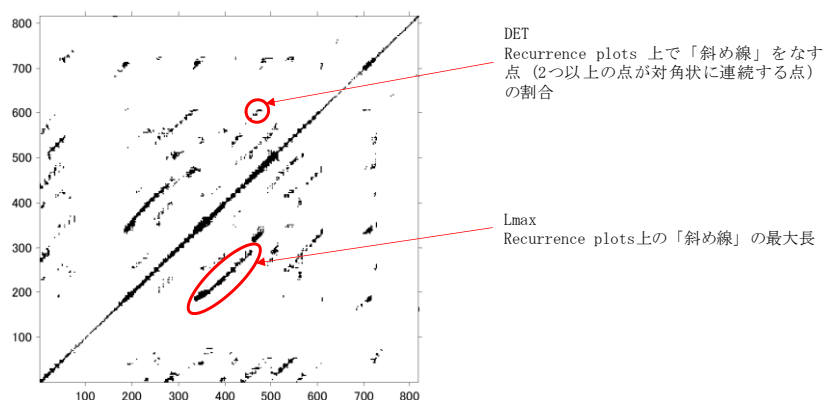


図 5.19 リカレンスプロット (例) と Lmax, DET

(1) Lmax, DETの定義

各探索行為における時系列変位について動作軌跡 (図4.16~4.18) を見る限り, 正解率上位者は変化に富む動きが見られるのに対し, 正解率下位者は画一的な動きが確認され, 探索パターンに相違が見られた. 変位量の平均値及び標準偏差では評価しえない視覚的に不規則に変動する動作の時系列データをRQAによって導出されるLmaxとDETに基づき確認した.

なお, 評価指標となる Lmax と DET については, 以下に定義を述べる.

(a) Lmax の指標

探索動作の規則性と不規則性を比較する指標の 1 つとして採用する Lmax は, リカレンスプロットによって得られた最も長い斜めの線の長さであり, 時系列の軌道の安定性を知るための指標となっている (平田, 2011. pp. 150-162, [26]). 空間 M での距離 d, 系列データの i 番目の状態を $x(i) \in M$ とし, リカレンスプロットを式 5.3.1 のように定義する.

$$R(i, j) = \begin{cases} 1, & d(x(i), x(j)) < r(i, j) \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (\text{式 5.3.1})$$

閾値 $r(i, j)$ を i 番目の点とその他の点から k 番目の距離, リカレンスプロットの斜め線の長さ l の集合 $D(l)$ は, 式 5.3.2 となる.

$$D(l) = \left\{ (i, j), i=1, 2, \dots, n-1, j=i+1, i+2, \dots, n \mid (1-R(i-1, j-1))(1-R(i+l, j)) \prod_{k=0}^{l-1} R(i+k, j+k) = 1 \right\} \quad (\text{式 5.3.2})$$

とし, 斜め線の最大長である Lmax は, 式 5.3.3 となる.

$$L_{\max} = \max\{l | D(l) \neq \emptyset\} \quad (\text{式5.3.3})$$

\emptyset は空集合を示し、リアプノフ指数と反比例 ($1/L_{\max}$) の関係となっている (平田, 2011. pp. 150-162, [26]) .

リアプノフ指数は解析対象が「どの程度カオス的か」であるかの指標となるが、リアプノフ指数の逆数である L_{\max} は高次空間内の軌道の安定性を定量化する指標であり、それが大きければ当該時系列の軌道が安定している傾向を示す (Charles and Webber, Marwan 2014. [17]) . また、逆に、高次空間での軌道が不安定 (アクティブな探索行為) となっている場合、 L_{\max} の値はきわめて低い傾向が見られる (Marwan, 2010, [29]) . 従って、本研究における定義としては、 L_{\max} が小さいことは、高次空間での軌道がカオス的であること、すなわちアクティブな探索行動であることの指標とした。

(b) DET の指標

DET は、リカレンスプロットの点パターンにより系の振る舞いの予測可能性を定量化する手法の 1 つとして提案されている [26] . RQA によって視覚化された Recurrence plots の斜め線を構成する点の割合である DET は、式 5.3.4 となる。

$$DET = \frac{\sum_{l \geq 2} l |D(l)|}{\sum_{l > 2} l |D(l)|} \quad (\text{式 5.3.4})$$

斜め線に関しては、一定の変化パターンが繰り返されていることを示しており (野中・西崎・佐々木, 2010, pp. 691-712, [30]) , 系の時間変化の規則性 (予測可能性) を知るための指標となっている。

ホワイトノイズのような乱雑性が高く不規則な時系列波形に関しては DET の値はきわめて低い傾向があり、時系列が決定論的であった場合、DET は高い傾向となる (平田, 2011. pp. 150-162, [26]) .

時系列データに決定論的な力学的特徴が見られる場合、DET は大きな値 (プロット点が多い) を示す傾向があるとされている。探索行為の特徴を見るうえでの指標とした (Charles, Webber, Marwan (2014). [17] , 平田, 2011. pp. 150-162, [26])) .

この決定論については、出来事が自然法則で解決できる、すなわちある行動・行為が予測可能であること、つまり、周期的な傾向があることとした。したがって、データから得られた DET の数値を相互に比較し、一方が高い傾向が見られた場合、その高いものは、より決定論としての傾向が強いものと評価した。

(2) RQAの手順

リカレンスプロットにおける再帰点の割合 RR (recurrence rate) が 2%~3%にほぼ収まるように次元(Dimension), 遅れ(Lag), 閾値を各探索行為において設定 (Charles and Webber, Marwan 2014. [17]) したうえで, Lmax, DET の導出を行った.

具体的な解析の手順として, 状態空間の次元(Dimension)の数 (m) を決定するため, false nearest neighbor method[31]と呼ばれる方法を用いた. ここでは, 時系列から間隔 t だけ離れた m 個の点を取り出して m 次元空間内の 1 点として埋め込み, m 次元空間内で近い距離にある 2 点を選び, normalized distance と呼ばれる m 次元ベクトルの最後の要素を m 次元空間内での距離で割って正規化した値が指定した値よりも大きい場合には実際には近い点ではない(false nearest neighbor)とみなしてその数がデータ点全体のなかで一定割合以下になる次元 m を埋め込み次元とした (Kennel and Brown, Abarbanel, 1992, pp. 3403-3411, [31]). 具体的には, 図 5.20 に示すように次元(Dimension)パラメータの設定に関しては, Cross Recurrence Plot Toolbox[27]による fnn(Y) コマンドにより次元を設定した.

次に, 遅れ(lag)の設定に関しては, 通常の時系列から力学系のアトラクタを再構成する方法と同様に遅延値を推定する. 時系列の値がとりうる最大値, 最小値間の範囲を一定間隔ごとに区切ったビン単位での離散的な分布を作り, その分布である時刻の間とそれから t だけ遅れた値との間の相互情報量(mutual information)が局所的に極小となるような最初の t を遅れ(lag)として設定した (Fraser and Swinney, 1986, pp. 1134-1140, [32]). 具体的には, 図 5.21 に示すように遅れ(lag)パラメータ設定に関しては, Cross Recurrence Plot Toolbox[27]による mi(Y) コマンドにより作図された曲線の最小値をパラメータとして設定した.

以上のように次元(Dimension), 遅れ(Lag), 閾値(RR が 2%~3%に収まる値)を設定し, 各探索時における時系列動作変位量として Lmax と DET を導出した.

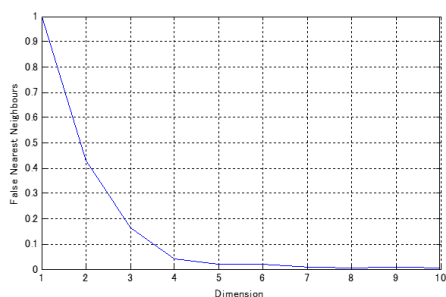


図 5.20 次元(Dimension)の設定例

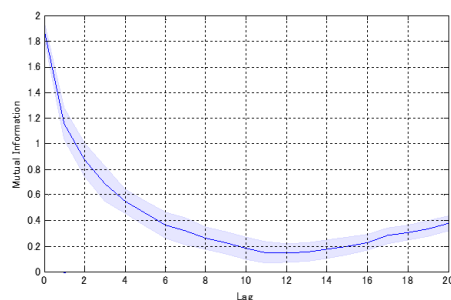


図 5.21 遅れ(lag)の設定例

(3) Lmax, DET の導出

10人の実験参加者の全てのデータを解析するため設定値となる次元(Dimension)・遅れ(lag)・RRの設定値を固定し、閾値を変数とし、Lmax及びDETを導出した。

次元(Dimension), 遅れ(lag)の設定に関しては、相空間の埋め込みについて全データの確認を行い、次元(Dimension)設定値を5次元, 遅れ(lag)設定値を10とした。RRの設定に関しては、設定値0.01~0.05(A. Syta and G. Litak(2015), [17], pp. 286)から最小値である0.01とするところであるが、フロア効果による検出力の低下が懸念されることから0.02~0.03の範囲に設定したうえで解析を進めることとした。

No1~10までのDET, Lmaxの算出一覧表の結果を表5.4~5.6に示す。

表 5.4 振る探索行為におけるLmax, DETの結果

実験2 実験参加者 No	正解 数	不正解 数	Lmax		Lmax		DET		DET		解答時間
			Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z	
上段：平均値, 下段：標準偏差											
1	4	8	310.500	147.583	35.917	137.583	0.901	0.733	0.469	0.720	6.493
2	2	9	265.213	154.085	18.750	160.184	0.109	0.188	0.156	0.169	4.014
3	5	7	285.818	384.909	113.636	36.273	0.832	0.933	0.481	0.560	8.626
4	5	7	254.378	218.927	120.430	31.606	0.078	0.030	0.165	0.089	3.066
5	6	5	325.500	170.500	11.167	15.167	0.896	0.731	0.229	0.332	7.662
6	5	7	227.187	107.154	9.272	24.055	0.063	0.122	0.108	0.254	3.467
7	3	8	529.417	325.083	36.500	123.000	0.887	0.884	0.379	0.716	10.317
8	6	6	207.529	177.350	16.771	94.898	0.053	0.054	0.086	0.086	3.332
9	4	6	610.727	215.727	34.909	146.091	0.927	0.852	0.345	0.779	11.236
10	4	7	235.536	78.660	15.318	110.028	0.030	0.035	0.094	0.047	3.401
合計	44	70	613.583	219.417	43.333	32.000	0.940	0.684	0.405	0.412	14.429
			256.064	154.800	19.054	38.378	0.029	0.131	0.117	0.181	4.552
			140.091	258.909	13.364	16.455	0.729	0.883	0.258	0.464	6.792
			129.015	178.133	13.600	14.494	0.208	0.027	0.154	0.076	1.948
			574.000	466.833	27.750	124.167	0.905	0.853	0.354	0.649	14.317
			206.822	246.655	15.674	87.697	0.053	0.102	0.076	0.178	3.661
			307.300	71.600	4.800	3.600	0.865	0.549	0.145	0.113	7.418
			206.804	49.297	1.833	0.917	0.160	0.045	0.039	0.033	2.565
			277.455	135.182	8.182	3.818	0.874	0.749	0.254	0.211	6.126
			221.760	103.490	6.058	1.029	0.098	0.059	0.097	0.094	3.279
			397.439	239.574	32.956	63.815	0.876	0.785	0.332	0.496	9.342
			159.607	115.662	29.890	57.413	0.057	0.111	0.103	0.216	2.952

表 5.5 擦る探索行為におけるLmax,DETの結果

実験2 実験参加者 No	正解 数	不正解 数	Lmax		Lmax		Lmax		DET		DET		解答時間
			Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z			
上段：平均値, 下段：標準偏差													
1	10	1	191.000	22.909	12.273	10.727	0.817	0.365	0.296	0.251	7.860		
			215.880	30.455	13.281	11.817	0.157	0.145	0.132	0.168	3.920		
2	8	4	40.583	18.833	10.833	9.000	0.500	0.217	0.189	0.189	7.889		
			51.422	24.792	15.192	12.708	0.172	0.113	0.120	0.156	5.542		
3	5	6	163.636	12.455	7.364	4.818	0.755	0.235	0.158	0.192	9.830		
			162.860	20.295	8.531	2.289	0.089	0.112	0.097	0.117	4.343		
4	10	1	34.091	6.000	3.818	3.182	0.548	0.282	0.135	0.120	5.833		
			22.142	3.766	1.641	1.113	0.127	0.106	0.044	0.055	2.245		
5	7	4	125.364	12.545	5.545	5.727	0.702	0.287	0.249	0.190	9.165		
			119.485	11.641	2.061	5.361	0.125	0.132	0.126	0.129	4.644		
6	10	2	411.417	20.000	25.583	19.083	0.880	0.297	0.329	0.315	12.830		
			219.840	20.392	24.230	24.043	0.068	0.140	0.141	0.246	5.387		
7	7	4	93.727	8.273	7.273	8.545	0.726	0.206	0.165	0.254	7.468		
			113.423	10.669	9.304	9.490	0.097	0.187	0.154	0.242	3.881		
8	10	1	16.000	10.364	3.636	4.000	0.362	0.220	0.112	0.177	7.941		
			18.974	12.622	1.432	1.859	0.094	0.105	0.038	0.077	5.998		
9	7	4	48.273	5.545	3.000	3.545	0.672	0.166	0.104	0.148	5.626		
			45.062	4.164	0.953	1.157	0.127	0.068	0.071	0.051	2.191		
10	6	6	98.333	11.917	5.333	3.500	0.737	0.250	0.195	0.121	6.562		
			105.711	12.264	4.288	1.658	0.084	0.127	0.153	0.048	3.899		
合計	80	33	122.242	12.884	8.466	7.213	0.670	0.253	0.193	0.196	8.100		
			110.750	5.627	6.394	4.690	0.148	0.054	0.072	0.059	2.016		

表 5.6 叩く探索行為におけるLmax, DETの結果

実験参加者 No	実験2 参加者	正解 数	不正解 数	Lmax		Lmax		Lmax		DET		DET		解答時間
				ひずみ	加速度X	加速度Y	加速度Z	ひずみ	加速度X	加速度Y	加速度Z			
上段：平均値, 下段：標準偏差														
1		9	2	66.545	37.455	20.182	34.364	0.859	0.562	0.489	0.694	0.145	0.145	6.355
2		7	5	46.765	31.658	15.367	34.286	0.095	0.121	0.507	0.677	0.507	0.677	3.913
3		7	5	30.583	26.583	30.167	35.333	0.581	0.502	0.182	0.140	0.182	0.140	8.444
4		8	4	28.114	22.823	22.416	26.800	0.188	0.187	0.404	0.680	0.404	0.680	2.651
5		5	7	11.083	6.750	6.917	8.167	0.515	0.389	0.048	0.062	0.048	0.062	11.063
6		5	7	8.180	1.422	1.037	1.675	0.125	0.088	0.257	0.475	0.257	0.475	2.707
7		8	4	10.667	5.500	5.000	6.500	0.411	0.244	0.064	0.077	0.064	0.077	9.024
8		7	5	11.905	1.443	0.816	0.645	0.178	0.079	0.465	0.711	0.465	0.711	2.776
9		3	9	22.500	8.250	9.083	10.500	0.613	0.352	0.103	0.128	0.103	0.128	6.809
10		4	6	35.762	6.660	4.499	6.449	0.114	0.112	0.304	0.464	0.304	0.464	3.237
合計		63	54	12.833	11.583	11.333	15.917	0.447	0.220	0.063	0.081	0.063	0.081	17.147
				7.347	6.751	5.749	8.693	0.158	0.059	0.387	0.677	0.387	0.677	2.197
				26.750	24.750	24.583	32.333	0.580	0.314	0.227	0.115	0.227	0.115	8.374
				28.285	29.335	28.573	36.132	0.133	0.202	0.198	0.441	0.198	0.441	3.689
				3.917	4.500	4.917	5.750	0.155	0.194	0.040	0.088	0.040	0.088	9.607
				1.382	1.500	1.754	1.588	0.065	0.074	0.172	0.439	0.172	0.439	5.307
				9.000	4.583	4.167	6.083	0.489	0.195	0.046	0.085	0.046	0.085	6.905
				2.677	1.256	0.687	1.256	0.116	0.126	0.179	0.313	0.179	0.313	2.252
				3.727	4.636	4.091	5.091	0.238	0.204	0.075	0.092	0.075	0.092	5.807
				1.420	2.568	1.443	1.781	0.120	0.115	0.336	0.557	0.336	0.557	3.290
				19.761	13.459	12.044	16.004	0.489	0.318	0.124	0.137	0.124	0.137	8.953
				17.867	11.187	9.018	12.174	0.188	0.126					3.131

5. 3. 2 クラスタ分析

RQAによって導出されたLmaxとDETより、各探索行為の特徴を明らかにするため、クラスタ分析を行った。クラスタ分析の目的は、分類対象となる実験参加者データの各要素となる、ひずみと加速度X,Y,ZのLmax、ひずみと加速度X,Y,ZのDETの8つの変数に基づき類似度を分類するもので、クラス化により探索行為の傾向を整理することとした。

分析にあたって、統計解析ソフトR及びjs-STAR[15][16]によるクラスタ分析を行った。

クラスタ分析に使用する変数となるLmax,DETに関しては、探索特性によっては変数同士が相関することがあり、クラスタ分析における一般的な問題点として挙げられる多重共線性の問題が生じる可能性が考えられる。実際、相関関係について分析を行ったところ、得られた結果として、図5.22(1),(2),(3)に示すように各探索行為において変数同士の相関が極めて高い傾向(|0.5|以上)が見られた。そのため、一般的にクラスタ分析に使用しているユークリッド距離による尺度を使用した場合、変数同士で高い相関があるものについては基本的な構成を過大評価してしまいクラスタ化に影響を及ぼすことが考えられことから、分析に使用する変数の調整(相関の高い変数の一方を排除)が必要となる。しかし、本研究によって得られたひずみと加速度X,Y,ZのLmax、ひずみと加速度X,Y,ZのDETの8つの変数には、探索行為の特徴を推定するうえで何らかの意味が存在することが考えられ、これらを変数から取り除くことは難しい。そこで、多重共線性を調整するうえで、マハラノビス距離[33]による尺度を使用することにより、分析に使用している8つの変数に基づく、クラスタ分析(ウォード法)を進めることとした。

	Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
Lmax ひずみ		0.496	0.113	0.489	0.478	0.097	0.104	0.292
Lmax 加速度X			0.273	0.414	0.074	0.498	0.161	0.328
Lmax 加速度Y				0.113	0.056	0.252	0.575	0.200
Lmax 加速度Z					0.266	0.327	0.181	0.613
DET ひずみ						0.009	0.190	0.168
DET 加速度X							0.155	0.595
DET 加速度Y								0.386
DET 加速度Z								

(1) 振る探索行為における変数間の相関関係

	L m a x ひずみ	L m a x 加速度X	L m a x 加速度Y	L m a x 加速度Z	D E T ひずみ	D E T 加速度X	D E T 加速度Y	D E T 加速度Z
L m a x ひずみ		0.210	0.399	0.371	0.582	0.168	0.276	0.263
L m a x 加速度X			0.630	0.559	0.138	0.615	0.479	0.382
L m a x 加速度Y				0.696	0.266	0.483	0.709	0.474
L m a x 加速度Z					0.129	0.430	0.507	0.759
D E T ひずみ						0.161	0.319	0.072
D E T 加速度X							0.535	0.455
D E T 加速度Y								0.525
D E T 加速度Z								

(2) 擦る探索行為における変数間の相関関係

	L m a x ひずみ	L m a x 加速度X	L m a x 加速度Y	L m a x 加速度Z	D E T ひずみ	D E T 加速度X	D E T 加速度Y	D E T 加速度Z
L m a x ひずみ		0.817	0.611	0.725	0.651	0.582	0.619	0.474
L m a x 加速度X			0.831	0.900	0.511	0.675	0.656	0.510
L m a x 加速度Y				0.846	0.447	0.634	0.740	0.477
L m a x 加速度Z					0.463	0.615	0.633	0.554
D E T ひずみ						0.654	0.667	0.671
D E T 加速度X							0.808	0.704
D E T 加速度Y								0.754
D E T 加速度Z								

(3) 叩く探索行為における変数間の相関関係

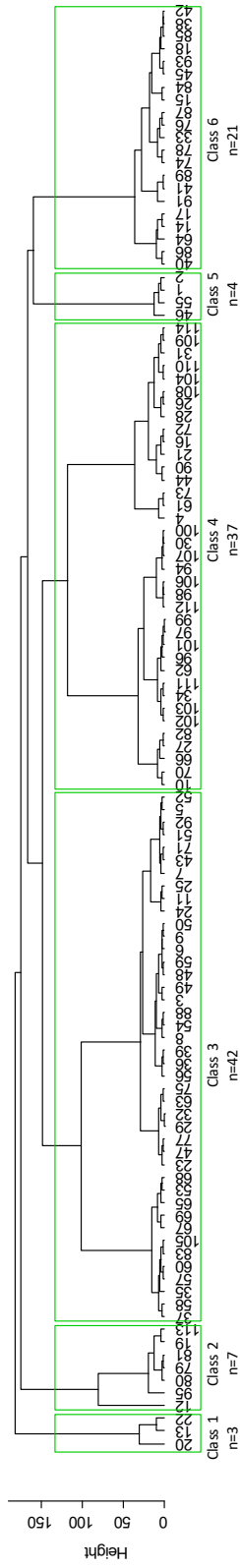
図 5.22 各探索行為における変数間の相関関係

(1) クラスの設定

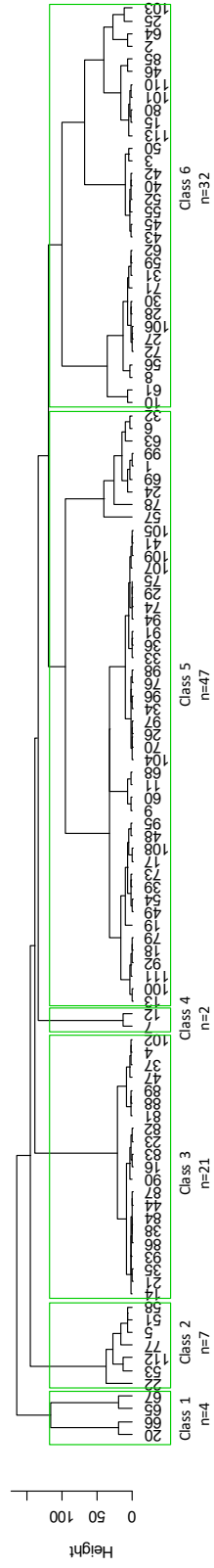
クラスター分析に使用したデータは、表 5.4~5.6 に示した実験参加者 10 名の 3 つの探索行為における、ひずみと加速度 X, Y, Z の Lmax, ひずみと加速度 X, Y, Z の DET の 8 つの変数について、js-star[15] を利用し分析のためのデータセットを整理し、R によりデンドログラムを作成した。また、RQA によって導出された、ひずみと加速度 X, Y, Z の Lmax, ひずみと加速度 X, Y, Z の DET の 8 つの変数によるデータは、クラスター分析を行う際に同一の尺度にする必要があり分析時にデータの標準化を図った。

クラスター分析を実施した結果として得られた図 5.23(1), (2), (3) に示す各探索行為におけるデンドログラムから比較的まとまりのあるクラスター数を 6 つとし、探索行為の特徴の推定を進めることとした。

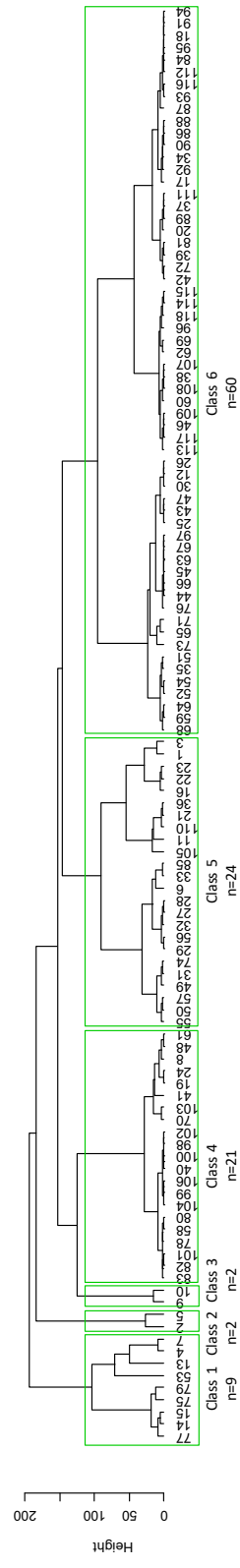
図 5.23(1), (2), (3) の各探索行為におけるデンドログラムの横軸は、実験参加者の実験データの通し番号である。縦軸は、実験参加者の実験データ間の距離（類似度）を示すマハラノビス距離である。距離の短い場所で結合している実験参加者データに関しては、よく似た傾向であることを示す。一般的にクラスター数の決定に関しては、変数に基づく特徴を説明可能なクラスター数が最適だと考えられており、本研究では各クラス内が同質とみなすことができ、また各探索行為の特徴を説明可能と考えられる 6 個のクラスを設定することとした。



(1) 振る探索行為のクラスターデンドログラム



(2) 擦る探索行為のクラスターデンドログラム



(3) 叩く探索行為のクラスターデンドログラム

図 5.23 各探索行為のクラスターデンドログラム(6クラス)

(2) 指標値の設定

図 5.23 に示すデンドログラムに基づき、各探索行為における各クラスの特徴を推定することとした。

クラスター分析によってクラス化された類似傾向を整理するうえで、まとまりのあるクラスの中で素材の弁別向上へつながる探索行為の傾向を整理するため、ひずみと加速度 X, Y, Z の Lmax, ひずみと加速度 X, Y, Z の DET の 8 つの変数を用いることとした。

また、Lmax, DET の大小を比較する指標値の設定については、先行研究を含め存在していないことから、本研究独自に設定したうえで、1 つの特徴を明らかにするための目安とした。

指標値設定は、指標となる基準として定性的ではあるが、Lmax は、階級として 1~10, 10~100, 100 以上といった対数によって小・中・大を指標とした。DET は、0~0.3, 0.3~0.7, 0.7~1.0 に分割し、小・中・大を指標とした。表 5.7 に示す指標一覧表を作成し、各探索行為におけるクラス毎の傾向をとりまとめた。

まず、ひずみや加速度の影響として、Lmax の大中小傾向、DET の大中小傾向を確認するほか、記録映像からの探索時の動作傾向や各クラス内での探索時の正誤の実態を整理した。振る・擦る・叩く探索行為の各クラスについて、正解・不正解データの各変数を表 5.8~5.25 にまとめた。作成した表は、各クラス内のデータに応じて平均値を整理し、表 5.7 の指標に基づき特徴をまとめた。さらに、各探索行為の中で主要な特徴となるクラスに関して詳細に傾向を把握するうえで、まとまりのある代表的な 3 クラスについては、ひずみと加速度 X, Y, Z の Lmax, ひずみと加速度 X, Y, Z の DET の 8 つの変数についてヒストグラム³により変数の大中小傾向を確認し、各探索行為の特徴を整理した。

表 5.7 各探索行為の傾向整理のための指標

変数	評価指標		
	$0 \leq L_{\max} < 10$	$10 \leq L_{\max} < 100$	$100 \leq L_{\max}$
Lmax	小	中	大
DET	$0 \leq \text{DET} < 0.3$	$0.3 \leq \text{DET} < 0.7$	$0.7 \leq \text{DET} \leq 1.0$
	小	中	大

³ 巻末、参考資料：まとまりのあるクラスにおける各変数のヒストグラム

(3) 振る探索行為におけるクラス毎の特徴

クラス1に関しては、探索棒の動きを記録映像で視認したところ、主にX方向(左右)に周期的な探索行為が見られた。表5.8のひずみLmax, DETの値が大きい傾向が見られた。加速度X方向のLmax, DETの値は大きい傾向、加速度Y方向のLmaxの値は大きい傾向、加速度Y方向のDETの値は中若しくは大傾向となった。

実験参加者1名のデータ(n=3, 正解率は0.333)となっているほか、このクラスに含まれる供試体は、ゴム・プラスチック・コンクリートがそれぞれ1件となっており、プラスチックのみ弁別している傾向となっている。

探索行為の特徴として、探索棒による供試体への押し付け力(ひずみ)や探索棒の動き(加速度)に関して、安定した軌道で乱雑さのない単調なものである。したがって、触知覚的な探索行為による素材弁別のための情報取得が難しいと考えられる。

表 5.8 クラス1の振る探索行為のまとめ

実験2 実験参加者 No	正解 不正解	Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
2	正解	132.000	268.000	250.000	22.000	0.832	0.958	0.546	0.499
	指標	大	大	大	中	大	大	中	中
2	不正解	154.000	506.000	416.000	9.000	0.803	0.933	0.714	0.392
2	不正解	354.000	182.000	201.000	50.000	0.855	0.854	0.764	0.591
	平均値	254.000	344.000	308.500	29.500	0.829	0.894	0.739	0.491
	標準偏差	100.000	162.000	107.500	20.500	0.026	0.039	0.025	0.100
	指標	大	大	大	中	大	大	大	中
			ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材	
	提示した供試体数		1	0	1	0	1	0	
	正解した供試体数		0	0	1	0	0	0	

クラス2に関しては、記録映像の視認による探索棒の動きは、X方向(左右に振る行為)若しくはX,Y方向に回転している探索傾向が見られた。

表5.9に示すようにひずみLmax, DETの値は小もしくは中の傾向が見られた。加速度Lmax, DETのX方向は大きい傾向、Y方向は小さい傾向が見られた。ただし、実験参加者1に関しては、加速度Lmax, DETのX方向が小さい傾向となり、Y方向は小さい傾向といった動作の違いが見られた。データ数は7件で正解率は0.571となっており、探索している供試体に関しては、ゴム・ウレタン・プラスチック・コンクリートとなっており、触知覚的な探索によって、ゴム・ウレタンを弁別している傾向が見られた。

探索棒による供試体への押し付け力(ひずみ)や探索棒の動き(加速度)は、相対的に不安定な軌道で乱雑さをもつ特徴が見られた。このような特徴は、変化に富む情報を知覚者に提示し、弁別を容易なものにすると予想されるが、本クラスにおいてはこの予想と異なり、ゴム・ウレタンのような比較的やわらかい素材の弁別ができていた一方で、それらよりも固い素材であるプラスチックやコンクリートの弁別については限定的なものになっていた。このような素材のかたさの違いによる弁別成績の差異は、振る探索行為に

において、素材に対して探索棒を押し付ける力（ひずみ）が一定ではなく、不安定であったことから生じた可能性があると考えられる。後述する、擦るや叩くなどの探索行為では、押し付ける力（ひずみ）が変化に富むことは弁別の成績を高める傾向があるが、振る探索行為では、押し付ける力（ひずみ）の不安定性はむしろ弁別を困難にする可能性が示唆された。

表 5.9 クラス 2 の振る探索行為のまとめ

実験2 実験参加者 No	正解 不正解	Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
1	正解	5.000	8.000	31.000	11.000	0.571	0.195	0.769	0.454
7	正解	6.000	155.000	4.000	15.000	0.383	0.867	0.146	0.443
9	正解	12.000	30.000	3.000	3.000	0.405	0.461	0.121	0.158
10	正解	5.000	34.000	3.000	3.000	0.610	0.831	0.213	0.240
	平均値	7.000	56.750	10.250	8.000	0.492	0.588	0.312	0.324
	標準偏差	2.915	57.582	11.987	5.196	0.100	0.277	0.266	0.128
	指標	小	中	中	小	中	中	中	中
2	不正解	61.000	142.000	9.000	18.000	0.642	0.910	0.227	0.586
7	不正解	9.000	292.000	8.000	9.000	0.358	0.911	0.204	0.450
7	不正解	28.000	323.000	6.000	7.000	0.457	0.865	0.123	0.379
	平均値	32.667	252.333	7.667	11.333	0.486	0.895	0.184	0.471
	標準偏差	21.484	79.037	1.247	4.784	0.118	0.022	0.045	0.086
	指標	中	大	小	中	中	大	小	中

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	1	2	2	0	2	0
正解した供試体数	1	2	0	0	1	0

クラス 3 に関しては、記録映像の視認による探索棒の動きは、X, Y 方向（前後左右、回転させる）での探索傾向が見られた。

表 5.10 によると、正解・不正解のデータに大きな相違は見られなかった。ひずみ Lmax, DET の値は大きい傾向が見られた。加速度 Lmax, DET の X 方向は大きい傾向、Y 方向に中の傾向が見られた。

データ数は 42 件で正解率は 0.429 となり、まとまったクラスの中では最も正解率が高い。このクラスに含まれる素材は、ゴム・ウレタン・プラスチック・木材・コンクリート・鋼材とすべての素材で偏りが無い。

触知覚的な探索行為の運動的特徴としては、探索棒を供試体へ押し付ける力（ひずみ）は、前述のクラス 2 とは異なり、安定した軌道で乱雑さのない特徴が見られた。一方、探索棒の動き（加速度）は、前後左右の動き（加速度）が見られており、相対的に不安定な軌道で乱雑さをもっていた。クラス 3 においては、安定した押し付け力（ひずみ）を維持したうえで、探索棒をアクティブに動かすことによって、弁別に必要となる素材の特徴を取得しているものと考えられる。

表 5.10 クラス 3 の振る探索行為のまとめ

正解・不正解		Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
正解 n=18	平均値	503.611	196.611	31.222	85.833	0.909	0.822	0.322	0.697
	標準偏差	310.259	103.088	19.089	53.040	0.055	0.068	0.111	0.148
不正解 n=24	平均値	463.542	171.292	32.625	66.250	0.916	0.813	0.363	0.653
	標準偏差	234.245	84.469	20.426	51.048	0.043	0.075	0.097	0.163
指標		大	大	中	中	大	大	中	中
			ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材	
提示した供試体数			2	7	6	9	9	9	
正解した供試体数			1	4	3	4	3	3	

クラス 4 に関しては、記録映像確認による探索棒の動きとして、X 方向を主体とした X, Y 方向(前後左右, 回転させる)による探索傾向が認められた。

表 5.11 の傾向として、ひずみ Lmax, DET は、大傾向となっている。加速度 Lmax, DET の X 方向は平均値では大きい傾向となっている。加速度 Lmax, DET の Y 方向は小から中の傾向であった。

データ数は 37 件で正解率は 0.405 となっている。このクラスに含まれる素材は、ゴム・ウレタン・プラスチック・木材・コンクリート・鋼材である。クラス 3 と同様に素材の偏りが無い。しかし、コンクリートに誤認傾向が見られた。

触知覚的な探索行為の運動的特徴としては、探索棒による供試体への押し付け力(ひずみ)は、安定した軌道で乱雑さのない特徴が見られた。探索棒の動き(加速度)は、横方向が安定しているのに対し縦方向に不安定な軌道で乱雑さをもっている。しかし、素材の弁別傾向をみると、コンクリート・鋼材といった比較的かたい素材に関する誤認傾向が認められ、クラス 3 に比べて押し付ける力(ひずみ)の Lmax が小さく、したがって押し付ける力(ひずみ)が不安定なことが、素材の弁別を難しくしていると考えられる。

表 5.11 クラス 4 の振る探索行為のまとめ

正解・不正解		Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
正解 n=15	平均値	251.867	127.400	17.400	7.200	0.912	0.700	0.346	0.278
	標準偏差	171.816	100.168	18.249	8.712	0.055	0.155	0.190	0.150
指標		大	大	中	小	大	大	中	小
不正解 n=22	平均値	312.409	120.909	11.500	7.773	0.894	0.684	0.266	0.207
	標準偏差	207.748	91.298	11.847	12.559	0.062	0.158	0.148	0.158
指標		大	大	中	小	大	中	小	小
			ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材	
提示した供試体数			10	8	5	5	5	4	
正解した供試体数			5	4	3	2	0	1	

クラス 5 に関しては、記録映像の視認による探索棒の動きは、X, Y 方向(前後左右)による探索傾向が認められた。

表 5.12 による傾向として、ひずみ $L_{max, DET}$ の値は大きい傾向であった。加速度 $L_{max, DET}$ の X 方向は大きい傾向、Y 方向は小から中の傾向であった。

このクラスに含まれる素材は、ゴム・プラスチック・鋼材で、それぞれに誤認する傾向があり、限定的な弁別傾向となっている。

触知覚的な探索行為の運動的特徴としては、クラス 3 に類似した傾向となっている。一方、データ数が少ないことから確定的ではないものの、加速度 $L_{max, DET}$ の X 方向がクラス 3 に比べて大きい傾向であり、安定的で画一的な運動が弁別を難しくしていると推測される。

表 5.12 クラス 5 の振る探索行為のまとめ

実験2 実験参加者 No	正解 不正解	L_{max} ひずみ	L_{max} 加速度X	L_{max} 加速度Y	L_{max} 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
1	正解	719.000	440.000	55.000	492.000	0.971	0.876	0.283	0.814
	指標	大	大	中	大	大	大	小	大
1	不正解	837.000	494.000	61.000	466.000	0.966	0.863	0.504	0.869
4	不正解	411.000	382.000	51.000	374.000	0.960	0.891	0.600	0.854
5	不正解	888.000	253.000	46.000	467.000	0.938	0.876	0.300	0.765
	平均	712.000	376.333	52.667	435.667	0.955	0.877	0.468	0.829
	標準偏差	213.855	98.469	6.236	43.607	0.012	0.012	0.125	0.046
	指標	大	大	中	大	大	大	中	大

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	2	0	1	0	0	1
正解した供試体数	1	0	0	0	0	0

クラス 6 に関しては、記録映像の視認による探索棒の動きは、X, Y 方向(前後左右)での探索傾向が認められた。

表 5.13 によると、ひずみ $L_{max, DET}$ の値は大きい傾向が見られた。加速度 $L_{max, DET}$ の X 方向は大きい傾向、Y 方向は中の傾向が見られた。これは、クラス 3 に類似しているが、加速度 $L_{max, DET}$ の X 方向に関しては、クラス 3 と比べ大きな値を示している。

このクラスに含まれる素材は、ゴム・ウレタン・プラスチック・木材・コンクリート・鋼材であり、クラス 3 と同様に素材の偏りが無い。ただし、プラスチック・鋼材に誤認傾向が見られた。

触知覚的な探索行為の運動的特徴としては、クラス 3 に類似した傾向となっているが、クラス 5 と同様、加速度 $L_{max, DET}$ の X 方向がクラス 3 に比べると大きい傾向があった。前後左右に探索棒を動かす際に Y 方向に大きく偏る運動的特徴が考えられ、このことが弁別を限定的なものとしていると推測される。

表 5.13 クラス 6 の振る探索行為のまとめ

正解・不正解		Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
正解	平均値	837.600	730.400	35.000	204.000	0.906	0.901	0.344	0.685
n=5	標準偏差	58.664	125.368	13.008	92.453	0.048	0.010	0.069	0.109
	指標	大	大	中	大	大	大	中	中
不正解	平均値	444.625	514.313	37.313	66.750	0.874	0.878	0.337	0.585
n=16	標準偏差	213.405	117.935	25.738	49.758	0.055	0.073	0.125	0.195
	指標	大	大	中	中	大	大	中	中

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	3	3	3	6	2	4
正解した供試体数	1	1	0	2	1	0

(4) 擦る探索行為におけるクラス毎の特徴

クラス 1 に関しては、記録映像の視認による探索棒の動きについて、X 方向(左右)での探索傾向が主に認められた。

表 5.14 に示した通り、ひずみ Lmax, DET の値は大きい傾向が見られた。加速度の Lmax と DET については X, Y 方向は中の傾向が見られた。

データ数は 4 件で正解率は、1.000 と高い正解率となっている。弁別できた素材は、ゴム・プラスチック・コンクリート・鋼材であった。

触知覚的な探索行為の運動的特徴は、探索棒の押し付ける力(ひずみ)が安定した軌道で乱雑さのないものとなっているが、探索棒の X 方向(左右)による動き(加速度)が不安定な軌道で乱雑であることが正解率の高さに寄与しているものと推測される。

表 5.14 クラス 1 の擦る探索行為のまとめ

実験2 実験参加者 No	正解 不正解	Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
2	正解	49.000	49.000	57.000	4.000	0.712	0.458	0.492	0.094
6	正解	387.000	75.000	74.000	79.000	0.837	0.536	0.414	0.678
6	正解	277.000	4.000	54.000	3.000	0.879	0.096	0.603	0.094
6	正解	641.000	44.000	63.000	60.000	0.841	0.473	0.507	0.765
	平均値	338.500	43.000	62.000	36.500	0.817	0.390	0.504	0.408
	標準偏差	212.985	25.407	7.649	33.679	0.063	0.173	0.067	0.315
	指標	大	中	中	中	大	中	中	中

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	1	0	1	0	1	1
正解した供試体数	1	0	1	0	1	1

クラス 2 に関しては、記録映像の視認では、X 方向(左右)での探索傾向が見られた。

表 5.15 による傾向として、ひずみ Lmax, DET は中の傾向が見られた。加速度 Lmax, DET の X, Y 方向も中の傾向が見られた。

正解率は、0.571 で、探索している供試体に関しては、このクラスに含まれる素材は、コンクリート・鋼材といった偏りが見られた。

触知覚的な探索行為の運動的特徴は、クラス1の傾向に類似しているが、探索棒を押し付ける力(ひずみ)の乱雑さがクラス1に比べて高い傾向があり、供試体を擦る際の力(ひずみ)のコントロールにより素材を弁別しているものと推測される。

表 5.15 クラス2の擦る探索行為のまとめ

実験2 実験参加者 No	正解 不正解	Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
5	正解	109.000	23.000	10.000	22.000	0.762	0.304	0.521	0.442
5	正解	180.000	3.000	7.000	6.000	0.800	0.137	0.472	0.411
7	正解	39.000	41.000	36.000	36.000	0.610	0.618	0.623	0.797
10	正解	6.000	2.000	5.000	3.000	0.669	0.187	0.577	0.137
平均値		83.500	17.250	14.500	16.750	0.710	0.312	0.548	0.447
標準偏差		66.987	16.068	12.540	13.255	0.075	0.187	0.057	0.234
指標		中	中	中	中	大	中	中	中
1	不正解	38.000	18.000	9.000	18.000	0.670	0.503	0.500	0.561
2	不正解	45.000	9.000	6.000	45.000	0.488	0.224	0.250	0.623
6	不正解	242.000	23.000	11.000	24.000	0.732	0.418	0.377	0.433
平均値		108.333	16.667	8.667	29.000	0.630	0.382	0.376	0.539
標準偏差		94.560	5.793	2.055	11.576	0.104	0.117	0.102	0.079
指標		大	中	小	中	中	中	中	中

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	0	0	0	0	2	5
正解した供試体数	0	0	0	0	0	4

クラス3に関しては、記録映像の視認により、X方向(左右)やX,Y方向(前後左右、回転運動)による探索傾向が確認された。

表 5.16 では、ひずみ Lmax と DET に関しては、平均値では中の傾向だが、ヒストグラムでは小さい傾向が認められた。加速度 Lmax と DET は小さい傾向が見られた。

データは 21 件で正解率は、0.905 となっている。探索している供試体に関しては、まとまったクラスの中では最も正解率が高く、このクラスに含まれる探索対象は、ゴム・ウレタン・プラスチック・木材・コンクリート・鋼材とすべての素材となっており、偏りなく素材の弁別を行っている傾向が見られた。

探索棒を押し付ける力(ひずみ)や動き(加速度)に不安定な軌道で乱雑さが高いといった変化に富む傾向が見られた。6つの素材全ての探索を偏りなく行っており、素材の特徴となる情報を探索行為により取得しているものと考えられる。

表 5.16 クラス 3 の擦る探索行為のまとめ

正解・不正解		Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
正解	平均値	11.526	5.211	3.368	3.316	0.380	0.205	0.126	0.136
n=19	標準偏差	13.705	3.901	1.306	1.379	0.094	0.099	0.049	0.065
	指標	中	小	小	小	中	小	小	小
不正解	平均値	7.500	5.500	4.000	3.500	0.345	0.280	0.155	0.192
n=2	標準偏差	0.707	0.707	0.000	0.707	0.065	0.017	0.035	0.016
	指標	小	小	小	小	中	小	小	小

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	4	3	3	3	3	5
正解した供試体数	3	3	2	3	3	5

クラス 4 に関しては、記録映像の視認により、Y 方向（前後）、X,Y 方向(前後左右、回転運動)による探索傾向が確認された。

表 5.17 では、ひずみ Lmax は大きい傾向が認められ、DET は中の傾向であった。加速度 Lmax の X,Y 方向は中の傾向が見られた。加速度 DET の X 方向は中の傾向、Y 方向は小さい傾向が見られた。

このクラスに含まれる素材は、ウレタン・プラスチックであった。

探索棒を押し付ける力(ひずみ)や動き(加速度)に関しては、クラス 3 のような不安定な軌道と乱雑さは見られなかったが、記録映像での視認では変化に富む動きが見られ、探索対象となる素材を弁別しているものと考えられる。

表 5.17 クラス 4 の擦る探索行為のまとめ

実験2 実験参加者 No	正解 不正解	Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
1	正解	152.000	113.000	33.000	40.000	0.648	0.521	0.418	0.470
2	正解	76.000	86.000	4.000	4.000	0.643	0.323	0.107	0.154
	平均	114.000	99.500	18.500	22.000	0.645	0.422	0.262	0.312
	標準偏差	36.242	29.453	6.712	8.260	0.113	0.115	0.077	0.094
	指標	大	中	中	中	中	中	小	中

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	0	1	1	0	0	0
正解した供試体数	0	1	1	0	0	0

クラス 5 に関しては、記録映像の視認による探索棒の動きは、X 方向(左右)、X,Y 方向(前後左右、回転運動)、Y 方向（前後）による探索傾向が認められた。

表 5.18 によると、正解・不正解のデータに大きな相違は見られなかった。

ひずみ Lmax は中の傾向、ひずみ DET は大きい傾向であった。加速度 Lmax と DET の X,Y 方向は小さい傾向であった。

データ数 47 件で正解率は、0.574 となっている。このクラスに含まれる素材は、ゴム・ウレタン・プラスチック・木材・コンクリート・鋼材で、全ての弁別を行っている。ただし、クラス 3 と比較すると鋼材に誤認傾向が見られた。

クラス 3 と比べ探索棒を押し付ける力(ひずみ)が安定した軌道で乱雑さが低く、動き(加速度)には不安定な軌道で乱雑さが高いといった変化に富む傾向が見られた。この運動的な特徴が、素材の弁別に影響を及ぼしているものと考えられる。このことは、探索棒の動き(加速度)だけでは、素材の表面の状態のみの情報となり、押し付ける力(ひずみ)の変化が少ない場合、かたさに関する情報が不足し、弁別を困難にするものと推測される。

表 5.18 クラス 5 の擦る探索行為のまとめ

正解・不正解		Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
正解	平均値	77.444	5.333	4.074	3.370	0.746	0.177	0.148	0.153
n=27	標準偏差	126.200	3.289	1.864	1.252	0.125	0.065	0.080	0.113
不正解	平均値	65.000	6.350	5.300	5.600	0.700	0.203	0.156	0.213
n=20	標準偏差	71.635	5.180	4.627	5.704	0.124	0.126	0.085	0.161
指標		中	小	小	小	大	小	小	小

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	10	9	5	6	12	5
正解した供試体数	9	4	5	4	5	0

クラス 6 に関しては、記録映像の視認による探索棒の動きは、X 方向(左右)、X, Y 方向(前後左右、回転運動)、Y 方向(前後)による探索傾向が認められた。

表 5.19 によると、正解・不正解のデータに大きな相違は見られなかった。

ひずみ Lmax と DET は大きい傾向が見られた。加速度 Lmax と DET の X, Y 方向は小から中の傾向であった。

データ数 32 件で正解率は、0.750 であった。このクラスに含まれる素材は、ゴム・ウレタン・プラスチック・木材・コンクリート・鋼材であり、素材の偏りがない。ただし、ウレタン・プラスチック・木材に誤認傾向が見られた。クラス 5 と同様に探索棒を押し付ける力(ひずみ)が安定した軌道で乱雑さが低いことが、素材の弁別に影響を及ぼしていると考えられる。ただし、探索棒の動き(特に前後の加速度)に不安定な軌道で乱雑さが高いといった変化に富む傾向が、素材の弁別に必要な情報不足を補いつていると推測される。

表 5.19 クラス 6 の擦る探索行為のまとめ

正解・不正解		Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
正解	平均値	248.125	20.417	10.792	6.750	0.768	0.339	0.204	0.168
n=24	標準偏差	224.937	17.344	11.892	6.220	0.165	0.125	0.119	0.096
	指標	大	中	中	小	大	中	小	小
不正解	平均値	272.000	13.375	7.125	5.750	0.759	0.293	0.175	0.140
n=8	標準偏差	161.392	12.051	4.859	2.727	0.099	0.156	0.119	0.062
	指標	大	中	小	小	大	小	小	小

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	2	7	9	9	1	4
正解した供試体数	2	6	9	4	1	2

(5) 叩く探索行為におけるクラス毎の特徴

クラス 1 に関しては、記録映像の視認により、決められた 1 点への打撃による探索傾向が確認された。

表 5.20 では、ひずみ Lmax は中の傾向、ひずみ DET は大きい傾向が認められた。加速度 Lmax の Z 方向は中の傾向、DET の Z 方向は大きい傾向が認められた。

データ数 9 件で正解率は、0.556 であった。このクラスに含まれる探索対象は、ゴム・ウレタン・プラスチック・コンクリート・鋼材であり、木材が弁別対象となっていない傾向が確認された。

探索棒で供試体を叩く際の力(ひずみ)や動き(加速度)が安定した軌道で乱雑さが低いことが、この事例においては弁別を難しくしていると考えられる。

表 5.20 クラス 1 の叩く探索行為のまとめ

実験2 実験参加者 No	正解 不正解	Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
1	正解	46.000	5.000	17.000	6.000	0.904	0.362	0.535	0.431
2	正解	78.000	54.000	62.000	77.000	0.762	0.690	0.808	0.910
7	正解	76.000	88.000	83.000	98.000	0.673	0.675	0.775	0.765
7	正解	88.000	82.000	82.000	117.000	0.762	0.773	0.858	0.929
7	正解	57.000	46.000	50.000	50.000	0.757	0.377	0.617	0.758
	平均値	69.000	55.000	58.800	69.600	0.772	0.575	0.719	0.758
	標準偏差	15.258	29.665	24.326	38.826	0.074	0.171	0.122	0.178
	指標	中	中	中	中	大	中	大	大
1	不正解	61.000	9.000	26.000	32.000	0.888	0.416	0.668	0.671
2	不正解	10.000	6.000	47.000	55.000	0.659	0.540	0.514	0.770
2	不正解	85.000	68.000	74.000	85.000	0.767	0.675	0.717	0.814
5	不正解	139.000	17.000	14.000	20.000	0.814	0.239	0.461	0.570
	平均値	73.750	25.000	40.250	48.000	0.782	0.467	0.590	0.706
	標準偏差	46.397	25.150	22.786	24.789	0.083	0.161	0.106	0.094
	指標	中	中	中	中	大	中	中	大

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	2	2	1	0	3	1
正解した供試体数	1	1	1	0	1	1

クラス2に関しては、記録映像の視認では、決められた1点への打撃による探索傾向が確認された。

表5.21に示した通り、ひずみLmaxとDETの値は大きい傾向が見られた。加速度LmaxとDETのZ方向は大きい傾向が見られた。

データ数は2件で正解率は、1.000であった。弁別できた素材は、コンクリートの弁別であった。

探索棒で供試体を叩く際の力(ひずみ)や動き(加速度)は安定した軌道で乱雑さが低いことが弁別を難しくしていると考えられる。

表 5.21 クラス2の叩く探索行為のまとめ

実験2 実験参加者 No	正解 不正解	Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
1	正解	157.000	71.000	9.000	85.000	0.946	0.555	0.387	0.843
1	正解	121.000	104.000	39.000	120.000	0.899	0.645	0.486	0.964
	平均値	139.000	87.500	24.000	102.500	0.922	0.600	0.437	0.903
	標準偏差	18.000	16.500	15.000	17.500	0.023	0.045	0.050	0.060
	指標	大	中	中	大	大	中	中	大

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	0	0	0	0	2	0
正解した供試体数	0	0	0	0	2	0

クラス3に関しては、記録映像の視認による探索棒の動きについて、決められた1点への打撃での探索傾向が確認された。

表5.22では、ひずみLmaxは中から大の傾向となり、ひずみDETは大きい傾向が見られた。加速度LmaxとDETのZ方向は中の傾向が見られた。

データ数は2件で正解率は、0.500であった。このクラスに含まれる探索対象は、ゴム・ウレタンと偏った傾向が見られた。

クラス1に類似した傾向で、探索棒で供試体を叩く際の力(ひずみ)や動き(加速度)は安定した軌道で乱雑さが低いことが弁別の偏りに影響を及ぼしていたものと考えられる。

表 5.22 クラス3の叩く探索行為のまとめ

実験2 実験参加者 No	正解 不正解	Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
1	不正解	109.000	61.000	40.000	21.000	0.928	0.604	0.667	0.571
	指標	大	中	中	中	大	中	中	中
1	正解	53.000	56.000	50.000	18.000	0.888	0.656	0.549	0.565
	指標	中	中	中	中	大	中	中	中

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	1	1	0	0	0	0
正解した供試体数	1	0	0	0	0	0

クラス4に関しては、記録映像の視認により、広範囲な箇所への打撃となる探索傾向が確認された。

表 5.23 では、正解・不正解のデータに大きな相違は見られなかった。

ひずみ Lmax は平均値に中の傾向が見られたが、参考資料に示すヒストグラムでは小さい傾向が認められた。ひずみ DET は中の傾向が見られた。加速度 Lmax の Z 方向は小さい傾向が見られ、加速度 DET の Z 方向に関しては中傾向が見られた。

データ数は 21 件で正解率は、0.429 であった。このクラスに含まれる探索対象は、ゴム・ウレタン・プラスチック・木材・コンクリート・鋼材となっており、コンクリートと鋼材に誤認傾向が認められた。

しかし、クラス1~3と比較すると Lmax と DET は小さい傾向となっており、探索棒で供試体を叩く際の力(ひずみ)や動き(加速度)は相対的に不安定で乱雑さを伴ったものとなっていた。その結果、クラス4では、クラス1~3と比較して、素材の弁別がやや容易であったと推測される。

表 5.23 クラス4の叩く探索行為のまとめ

正解・不正解		Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
正解	平均値	10.667	7.444	7.222	10.000	0.637	0.237	0.241	0.573
n=9	標準偏差	5.249	4.425	3.909	4.690	0.113	0.108	0.071	0.068
	指標	中	小	小	中	中	小	小	中
不正解	平均値	14.333	5.917	6.000	7.833	0.620	0.221	0.231	0.539
n=12	標準偏差	11.528	3.353	3.028	2.672	0.122	0.090	0.079	0.110
	指標	中	小	小	小	中	小	小	中

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	4	3	2	5	4	3
正解した供試体数	2	2	1	4	0	0

クラス5に関しては、記録映像の視認による探索棒の動きは、決められた1点への打撃による探索傾向が確認された。

表 5.24 によると、平均値ではひずみ Lmax 及び加速度 Lmax の Z は中傾向が見られたが、参考資料に示すヒストグラムでは小さい傾向が確認された。ひずみと加速度 DET の Z 方向は大きい傾向が見られた。

データ数は 24 件で正解率は、0.542 であった。このクラスに含まれる素材は、ウレタン・プラスチック・木材・コンクリート・鋼材となっており、素材弁別の偏りが見られた。

クラス4と同様に Lmax と DET は小さい傾向が認められ、したがって、探索棒で供試体を叩く際の力(ひずみ)や動き(加速度)は不安定で乱雑さをもっているが、この傾向が本事例では弁別を難しくしているものと推測される。

表 5.24 クラス 5 の叩く探索行為のまとめ

正解・不正解		Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
正解	平均値	28.308	21.077	14.692	20.846	0.638	0.583	0.501	0.761
n=13	標準偏差	27.179	18.694	13.487	16.408	0.155	0.111	0.136	0.076
	指標	中	中	中	中	中	中	中	大
不正解	平均値	13.636	6.545	7.000	7.545	0.547	0.427	0.391	0.637
n=11	標準偏差	9.461	1.876	1.537	1.157	0.155	0.089	0.113	0.180
	指標	中	中	小	小	中	中	中	中

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	0	1	5	3	6	9
正解した供試体数	0	0	4	2	2	5

クラス 6 に関しては、記録映像の視認による探索棒の動きは、広範囲な箇所への打撃となる探索傾向が認められた。

表 5.25 によると、正解・不正解のデータに大きな相違は見られなかった。

ひずみと加速度 Lmax の Z 方向は小さい傾向が見られた。ひずみ DET の値は平均値では中の傾向が見られたが、参考資料によるヒストグラムでは小さい傾向が認められた。加速度 DET の Z 方向は中の傾向が見られた。

まとまったクラスの中では最も正解率が高く、データ数は 60 件で、正解率が 0.550 であった。このクラスに含まれる素材は、ゴム・ウレタン・プラスチック・木材・コンクリート・鋼材で、素材の偏りが無いグループである。

探索棒を押し付ける力(ひずみ)や動き(加速度)に不安定な軌道で乱雑さが高いといった変化に富む傾向が見られた。また、他のクラスに比べ X, Y 方向の Lmax, DET が小から中の傾向を示していることや探索棒を供試体に対して広範囲に探索している点から素材の特徴となる多くの情報を探索行為によって取得しているものと推測される。

表 5.25 クラス 6 の叩く探索行為のまとめ

正解・不正解		Lmax ひずみ	Lmax 加速度X	Lmax 加速度Y	Lmax 加速度Z	DET ひずみ	DET 加速度X	DET 加速度Y	DET 加速度Z
正解	平均値	7.606	6.394	6.394	7.727	0.306	0.202	0.249	0.451
n=33	標準偏差	6.358	5.410	5.075	5.556	0.153	0.079	0.112	0.129
	指標	小	小	小	小	中	小	小	中
不正解	平均値	6.815	7.815	7.852	11.259	0.345	0.237	0.283	0.477
n=27	標準偏差	3.323	5.735	4.859	8.847	0.148	0.071	0.102	0.124
	指標	小	小	小	中	中	小	小	中

	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材	コンクリート	鋼材
提示した供試体数	12	13	11	12	5	7
正解した供試体数	11	4	3	10	2	3

5. 4 研究2の考察

5. 4. 1 実験1と実験2の素材弁別の安定性

本研究では、振る・擦る・叩くといった3つの触覚的な探索行為に関する実験によって、素材の弁別ができるかどうかを検討した。実験1の結果との比較により、素材の弁別がこれらの探索行為によって安定的に行えることを確認した。

この安定性は、実験1の動作解析によって明らかとしたのと同様に、より多くの触覚の情報に能動的な振る舞いによって入手することで達成していることが示唆される。

5. 4. 2 触覚による異なる素材の探索時間

触覚による素材の弁別においては、正解率は、擦る探索行為での正解率が、振る・叩く探索行為と比べて高いだけでなく、探索時間についても擦る探索行為で短い傾向が見られた。擦る探索行為が、媒体を介した間接的な触覚において、効率よく多くの情報を短時間で得る手段として有効であることが示唆された。

5. 4. 3 素材の弁別向上につながる触覚による探索行為の特徴

クラスター分析によって、探索行為に類似性が見られるクラスの特徴を整理し、各探索行為の中から、特徴の異なる素材の弁別向上につながる探索行為の特徴を推定することとした。

(1) 振る探索行為

クラスター分析によって明らかとなった、素材の弁別につながる探索行為として、表 5.26 に示す回答数にまとまりのあるクラス 3 に着目した。また、実験参加者の正解データの多くがクラス 3 に属していることから、クラス 3 は素材の弁別につながる有効な探索行為となっていると考えた。また、記録映像の視認では、X,Y 方向(前後左右、回転)での振る舞いが見られ、探索棒の動きが予測の難しい不規則な動作となっていることが推定された。

表 5.27 によると、クラス 3 は、探索棒を押し付ける力(ひずみ)を、一定で乱雑さの小さい周期的なものとして制御し、探索棒の動き(加速度)を、高次元空間で不安定な軌道とすることで異なる素材の弁別向上につながる運動となっていると考えられる。

表 5.26 振る探索行為の各クラスにおける正解数

実験参加者 No	正解数					
	class1	class2	class3	class4	class5	class6
1	0	1	2	1	0	0
2	1	0	0	1	0	0
3	0	0	3	2	0	2
4	0	0	2	0	1	2
5	0	0	6	0	0	0
6	0	0	2	3	0	0
7	0	1	1	1	0	0
8	0	0	2	1	0	3
9	0	1	0	3	0	0
10	0	1	0	3	0	0
正解数	1	4	18	15	1	7
正解率	0.333	0.571	0.429	0.405	0.250	0.333
回答数	3	7	42	37	4	21

表 5.27 振る探索行為のクラスと Lmax, DET の傾向

クラス	正解数	Lmax				DET			
		ひずみ	加速度X	加速度Y	加速度Z	ひずみ	加速度X	加速度Y	加速度Z
1	n=1	大	大	大	中	大	大	中	中
2	n=4	小	中	中	小	中	中	中	中
3	n=18	大	大	中	中	大	大	中	中
4	n=15	大	大	中	小	大	大	中	小
5	n=1	大	大	中	大	大	大	小	大
6	n=7	大	大	中	中	大	大	中	中

※正解者における小中大の傾向

(2) 擦る探索行為

クラスター分析によって明らかとなった、素材の弁別につながる探索行為として、表 5.28 に示す回答数にまとまりのあるクラス 3, 5, 6 に着目した。さらに、正解率に着目すると、この中でもクラス 3 は、もっとも素材の弁別につながるものと考えられる。

素材の弁別につながる探索行為の特徴は、表 5.29 に示すクラス 3 をみると、探索棒を押し付ける力(ひずみ)や動き(加速度)については、変化を能動的に作り出す振る舞いとなっていることが特徴として見られた。

すなわち、擦る探索行為における素材の弁別向上につながる運動的特徴は、高次元空間での軌道が不安定で、乱雑さが大きく予測の難しい、不規則な振る舞いであると考えられる。

表 5.28 擦る探索行為の各クラスにおける正解数

実験参加者 No	正解数					
	class1	class2	class3	class4	class5	class6
1	0	0	1	1	4	4
2	1	0	3	1	2	1
3	0	0	0	0	2	3
4	0	0	4	0	3	3
5	0	2	1	0	0	4
6	3	0	0	0	3	4
7	0	1	0	0	5	1
8	0	0	8	0	0	2
9	0	0	1	0	5	1
10	0	1	1	0	3	1
正解数	4	4	19	2	27	24
正解率	1.000	0.571	0.905	1.000	0.574	0.750
回答数	4	7	21	2	47	32

表 5.29 擦る探索行為のクラスと Lmax, DET の傾向

クラス	正解数	Lmax				DET			
		ひずみ	加速度X	加速度Y	加速度Z	ひずみ	加速度X	加速度Y	加速度Z
1	n=4	大	中	中	中	大	中	中	中
2	n=4	中	中	中	中	大	中	中	中
3	n=19	中	小	小	小	中	小	小	小
4	n=2	大	中	中	中	中	中	小	中
5	n=27	中	小	小	小	大	小	小	小
6	n=24	大	中	中	小	大	中	小	小

※正解者における小中大的傾向

(3) 叩く探索行為

クラスター分析によって明らかとなった、素材の弁別につながる探索行為として、表 5.30 に示す回答数にまとまりのあるクラス 4, 5, 6 に注目した。さらに、この中でも正解率の最も高いクラス 6 に着目することとした。

素材の弁別につながる叩く探索行為の特徴は、表 5.31 によるクラス 6 の探索傾向によれば、探索棒を叩く際の力(ひずみ)のコントロールや探索棒の動き(加速度)は高次元空間での軌道が能動的で、かつ、探索棒で叩く際の力(ひずみ)のコントロールや動き(加速度)が乱雑さの大きい、予測の難しい不規則な振る舞いであることが推定される。

また、叩く探索行為の記録映像の視認によると、探索棒を供試体面に叩く際に素材面の広範囲にアプローチすることも、素材を弁別向上につながるものと考えられる。

表 5.30 叩く探索行為の各クラスにおける正解数

実験参加者 No	正解数					
	class1	class2	class3	class4	class5	class6
1	1	2	1	1	4	0
2	1	0	0	1	3	2
3	0	0	0	0	4	3
4	0	0	0	1	0	7
5	0	0	0	1	2	2
6	0	0	0	1	0	4
7	3	0	0	3	0	2
8	0	0	0	0	0	7
9	0	0	0	1	0	2
10	0	0	0	0	0	4
正解数	5	2	1	9	13	33
正解率	0.556	1.000	0.500	0.429	0.542	0.550
回答数	9	2	2	21	24	60

表 5.31 叩く探索行為のクラスと Lmax, DET の傾向

クラス	正解数	Lmax				DET			
		ひずみ	加速度X	加速度Y	加速度Z	ひずみ	加速度X	加速度Y	加速度Z
1	n=5	中	中	中	中	大	中	大	大
2	n=2	大	中	中	大	大	中	中	大
3	n=1	中	中	中	中	大	中	中	中
4	n=9	中	小	小	中	中	小	小	中
5	n=13	中	中	中	中	中	中	中	大
6	n=33	小	小	小	小	中	小	小	中

※正解者における小中大の傾向

第6章 総合考察

6. 1 媒体を介した人の触知覚による素材の弁別能力

本研究で実施した2つの実験により、視覚・聴覚が遮蔽された状態で、触知覚的な探索を通して6種類の素材の弁別が可能であることが明らかとなった。ただし、振る・擦る・叩く探索行為のそれぞれにおいて、素材毎の弁別に誤認による偏りが認められている。その要因の一つとしては、探索行為の種類の違いにより、素材の弁別に必要となる情報が不足する可能性が挙げられる。

なお、実験1と実験2で得られた素材の弁別結果を比較したところ、媒体を通じた触知覚が一定期間を経ても安定的に行われていることが明らかとなった。このことは、建設作業の中で曖昧と考えられていた触知覚が、場当たりのものではなく、一貫したものであることを示すと考えられる。

6. 2 異なる素材の弁別における探索行為の運動的特徴

研究1では、触知覚的な探索行為の動作を解析することによって、弁別正解率の上位者と下位者における振る・擦る・叩く探索行為の特徴を明らかにした。結果として、正解率上位者は、探索行為に変化をつくりだすことによって素材の弁別に必要となる触知覚情報を取得していることが明らかとなった。研究2では、触知覚において媒体となる探索棒に作用する力(ひずみ)や動き(加速度)を計測し、異なる素材の弁別の向上にむすびつく運動的特徴を検討した。結果として、相対的ではあるが、運動の高次元状態空間での軌道が変化に富むような動きを生成し、乱雑性のある不規則な探索を行うことによって、異なる素材の弁別能力を高めていることが明らかとなった。

以下の項では、本研究の総合議論として、研究1及び2によって明らかとなった振る・擦る・叩く探索行為による異なる素材の触覚的弁別と、その背景にある運動的特徴について考察を述べる。

6. 2. 1 振る探索行為の運動的特徴

研究1の結果から、振る探索行為による触知覚では、概ね異なる素材を弁別できているが、ゴムとウレタンを相互に誤認する傾向が見られたほか、プラスチック・木材・コンクリート・鋼材は相互に誤認する傾向が見られた。

振る探索行為による触知覚では、探索棒先端と供試体との接触面が限定されており、全ての素材を弁別するために必要となる情報を取得することが難しく、誤認しやすい傾向があったと考えられる。

研究2から明らかとなった探索行為の運動的特徴としては、供試体に押し付ける探索棒の力(ひずみ)については安定的かつ周期的に制御されていた一方、探索棒の動き(加速度)については、不安定な軌道で乱雑性が高く、不規則な振る舞いとなっていた。素材に加える力は一定としつつ、棒の動きに変化を付ける方略によって素材を弁別しよ

うとしたと考えられる。

6. 2. 2 擦る探索行為の運動的特徴

擦る探索行為による素材の触覚的弁別に関しては、ゴム・プラスチック・コンクリート・鋼材について誤認が少ない傾向であるが、ウレタンは、ゴムと誤認し、木材は、プラスチックと誤認している傾向が見られた。

擦る探索行為に関しては、探索棒先端を供試体の表面に接触させた後、押しつけながら前後左右等の運動によって供試体の表面を擦りながら移動することによって、素材の弁別を行っている。擦る探索行為による触知覚では、振る・叩く探索行為に比べて押し付け時のかたさに関する特徴や、擦りながらの移動による素材表面の特徴といった、触知覚に必要となる多くの情報を取得できる。その結果、素材の弁別に関する正解率が振る・叩く探索行為に比べて高いのであろう。

擦る探索行為は、媒体となる探索棒と供試体の接触時間や接触範囲などが振る・叩くといった探索行為に比べて多いことから、同じ探索時間であったとしても、触知覚に関する情報量という点で優位である。

また、擦る探索行為は、素材毎の表面特性すなわち凹凸や肌理によって発生する振動等が素材を弁別するうえで、重要な情報となっているものと考えられる。個人差はあるが、擦る探索行為によって得られる表面特性の把握に加えて、探索棒を供試体に対して変化に富むように動かすことや身体的特徴や探索位置関係などによって、摩擦抵抗や反力といったより多くの情報の取得が可能となり、より正確な弁別が達成できたものと考えられる。

擦る探索行為での弁別向上につながる運動的特徴は、供試体を押し付ける探索棒の力（ひずみ）や探索棒の動き（加速度）が、不安定な軌道で乱雑性が高く、不規則な振る舞いとなっていることが明らかとなった。

6. 2. 3 叩く探索行為の運動的特徴

叩く探索行為による触知覚では、探索棒で供試体を叩くことによって、素材の弁別を行っている。振る探索行為や擦る探索行為のように常に探索棒が供試体に接触しているわけではないことから、探索棒を振り下ろす力に対する素材の反発や、打撃時の振動等の伝達が素材の弁別の情報源となっていると考えられる。素材の弁別に関しては、ゴム・木材に関して誤認が少ない傾向が見られており、ゴムや木材特有の振動の伝達が他の素材にない振動の伝搬や減衰特性を持っていることと関係している可能性が考えられる。

また、実験参加者が探索棒を握った際の力加減によって、素材に応じた振動の伝搬が弁別のための情報となっていることも考えられる。ゴム・木材以外の素材に関しては、ウレタンはゴムと誤認される傾向が見られたほか、プラスチック・コンクリート・鋼材は、相互に誤認される傾向が見られており、誤認の傾向に、振る探索行為と類似した点

が見られる。この点に関しては、かたい表面の場合、高周波の振動が腕まで伝わるのに対し、やわらかい表面の場合、そういった振動が腕までは伝わらないことが考えられ、探索の際に、共振する身体部位が変化している可能性が考えられる。

叩く探索行為における素材の弁別向上につながる運動的特徴として、研究1では叩く探索行為の正解率上位者が、供試体面に対して広範囲に探索を行っている傾向が見られた。研究2では、探索棒で素材を叩く力(ひずみ)や動き(加速度)について、不規則な軌道で乱雑性の高い不規則な振る舞いであることが明らかとなった。

6. 3 研究のまとめと建設作業における触知覚情報取得の必要性

研究1では、建設作業での経験的な行為を模した触知覚による探索行為一振る・擦る・叩くといった探索行為一において素材の弁別が可能であることを明らかにした。また、研究2によって、実験1と実験2で得られた結果を比較検証し、触知覚による振る・擦る・叩く探索行為によって素材の弁別が安定的に可能であることを明らかにした。

素材の弁別向上にむすびつく運動的特徴は、研究2によって明らかとなった触知覚による振る・擦る・叩く探索行為として、相対的ではあるが探索時での探索棒を押しつける力(ひずみ)と探索棒の動き(加速度)について能動的に軌道を制御(高次元空間での軌道を不安定なものとする)する。さらに乱雑さのある(周期的な予測が難しい不規則性のある動き)探索をすることで触知覚情報によって素材の弁別向上につながる事が考えられる。

建設作業で地中埋設管を損傷等せずに掘削作業をする場合、油圧ショベルのバケット先端が埋設管に接触したときに手探りで内部の状況を確認・判断しながら素材を感覚的に弁別している(図6.1)。この感覚的な素材の弁別は、本研究で明らかとなった不安定な軌道で乱雑性の高い動きにより触知覚情報に得ることによるものと考えられる。また、建設作業において経験的に行われていた対象物に押し付けて振る行為を行い、次に擦る行為による順序により、概ね素材の特徴を弁別し、この段階で軽く叩くことを判断したうえで、埋設物の損傷・破壊といったリスクを最小限留める行為に当てはまるものと考えられる。これまで経験的に建設作業において損傷等のリスク回避が行われてきた行為に意味が存在していたことを示唆するものと考えられる。

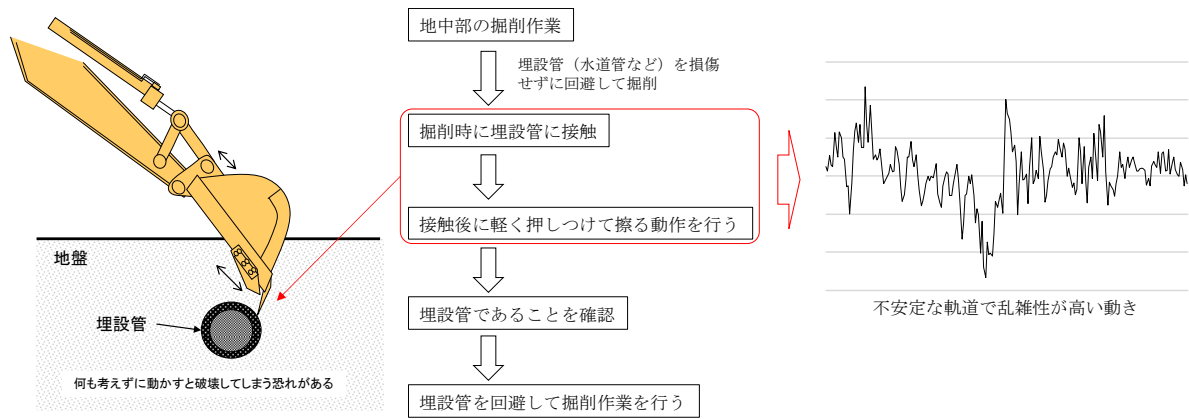


図 6.1 建設作業における掘削行為（埋設管回避）と触知覚情報の取得

第7章 今後の展望

本研究では、各探索行為において、異なる素材の弁別の向上に繋がる探索行為の特徴を明らかにした。

相対的な特徴としては、探索行為を高次元空間での軌道を不安定なものとし、さらに乱雑さを持たせた予測の難しい行為とすることによって、異なる素材の弁別が向上する可能性を見いだすことができた。具体的には、RQA の観点から言えば、 L_{max} 、DET が相対的に小さくなるような「変化に富む」探索運動が、素材の弁別能力の向上につながることを示した。

しかし、建設現場では、本研究で対象とした6つの素材だけでなく多くの素材が作業対象となる環境に存在している。今後、様々な素材による媒体を通じた触知覚による探索行為の運動的特徴を研究によって明らかにすることで、媒体を通じた触知覚による素材別弁の向上が図れ、建設現場での安全で効率的な地下埋設物へのアプローチに寄与できるもの考えられる。さらに、建設現場において作業手順の中で利用する場合、不安定な軌道と乱雑さのある探索条件を組み合わせた実験的な検討が必要となる。

また、探索時に人に伝達される様々な情報を符号化（デジタル）し、その符号化された情報を操作インターフェース等に反映させていく必要がある。インターフェース等の先行研究[34][35][36]はすでに進められているが、その研究の多くは、提供される情報による受動的なアプローチによるものが多い。本研究で対象としている土木作業における地下掘削のように環境から提供される様々な因子や因子に存在するパラメータに対して、探索行為に対応した力覚の正確な伝達と伝達された情報の処理プロセスや学習効果等の研究を今後進めることが多様な環境に対応するために必要となる。

なお、本研究において叩く探索行為に関しては、建設作業での作業においても埋設物を損傷させてしまうリスクがあり、これまで述べてきたように実際の現場では、一般的に振る・擦る探索行為によって探索を行った後、軽く叩くことによって埋設物の確認を行っている。振る・擦る探索行為とは異なる打撃による探索といった観点から、取得する多くの情報は打撃時に発生する振動や音の周波数が影響するものと考えられ、一打撃あたりの探索行為における振動周波数の分析等によって知覚情報が解明できるものと考えられる。ただし、事象として発生する振動の解析だけでは不十分な可能性があり（ギブソン(1966, pp. 100, [4])), 人の知覚の特徴について精査し、また探索行為における動作解析等を組み合わせたうえで、人の知覚と物理現象との橋渡しを行うことが必要である。

謝 辞

本論文の作成にあたり、多くの方々の協力をいただきました。

ご指導いただきました三嶋博之教授に深く感謝申し上げます。三嶋先生には、学部より長い間お世話になり、生態心理学の基礎をはじめ多くの知見を教授いただきました。大学院生活と社会人としての仕事を両立しながら研究を進めるうえで、三嶋先生の適切な指導と有意義な議論によって、新たな研究領域の開拓ができたことの収穫は、今後の人生を深めるうえでも大きな糧になるものと感じております。

ここに深く感謝を申し上げます。

藤野健一氏には、土木研究所内での実験にご協力をいただきありがとうございました。博士課程途中で氏が大病による長期入院から復帰された後も当方の心配をいただき、重ねて感謝申し上げます。

油田信一先生には、建設機械オペレータの評価を進めるうえで、工学的な観点からご指導をいただき、実験参加者の指標となるモデルタスクを構築することができました。誠にありがとうございました。

境友昭先生には、実験装置製作や解析手法についてアドバイスや御協力をいただき誠にありがとうございました。

橋本毅氏、西山章彦氏には、ご自身の研究テーマを抱えて忙しい中で実験のお手伝いをしていただき、誠にありがとうございました。

本論文の副査をお引き受けいただいた、先生方に感謝申し上げます。

藤本浩志先生には、副査をお引き受けいただきまして誠にありがとうございました。修士課程在籍中よりヒューマンインターフェースの考え方、実験の方法論についてご指導いただき、重ねてお礼申し上げます。

古山宣洋先生には、修士2年次の学会発表の際より、触知覚に関するご指導をいただきながら研究を進めて参りました。解析の考え方などについての丁寧なアドバイスをいただき感謝申し上げます。

三嶋研究室の皆様、友野貴之氏、牧野遼作先生には、論文作成にあたりアドバイスをいただき感謝申し上げます。

最後に、学部から博士課程までの長い間、理解と励ましてくれた妻の加寿子に感謝申し上げます。

引用文献

- [1] 茂木正晴・西山章彦・油田信一・安藤広志・伊藤禎宣・藤野健一 (2015). 無人化施工における各種遠隔操作による作業効率評価, 第15回建設ロボットシンポジウム 0-21.
- [2] 茂木正晴・西山章彦・橋本毅・藤野健一・油田信一 (2016). 油圧ショベルの遠隔操作における視覚及び操作インターフェースの違いによる作業効率の向上について, 第16回建設ロボットシンポジウム 06-4.
- [3] Katz, D. (1925). *Der Aufbau der Tastwelt*, Originally published by Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig Germany. (Katz, D. (著) 東山篤規・岩切絹代 (訳) (2003). 触覚の世界--実験現象学の地平線--, 新曜社.)
- [4] Gibson, J. J. (1966). *The Senses Considered as Perceptual Systems*, Oxford University Press, Oxford (J. J. ギブソン (著) 佐々木正人・古山宣洋・三嶋博之 (監訳) (2011). 生態学的知覚システム--感性をとらえなおす-- 東京大学出版会.)
- [5] 佐々木正人・三嶋博之 (編) 佐々木正人・三嶋博之・宮本英美・鈴木健太郎・黄倉雅広 (著) (2001). 身体とシステム アフォーダンスと行為, 金子書房.
- [6] 仲谷正史・寛康明・白戸寛和 (2011). 触感をつくる--<テクタイル>という考え方--, 岩波書店.
- [7] 岩村吉晃 (2001). タッチ, 医学書院.
- [8] Weber EH (1978). *The Sense of Touch*, Academic Press, New York.
- [9] Kenichi Fujino, Masaharu Moteki, Akihiko Nishiyama, Shinichi Yuta (2013). *Towards Autonomous Excavation by Hydraulic Excavator - Measurement and Consideration on Bucket Posture and Body Stress in Digging Works*, Proceedings of IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, pp. 231-236.
- [10] 大滝英・征門井裕紀・琴坂信哉・長坂保美 (2006). 点字ブロックの存在を手のひらに振動で伝達する白杖の研究, 日本機械学会論文集, Vol.72, No.724 pp. 3962-3968.
- [11] 布川清彦・井野秀一・伊福部達 (2008). 道具を用いた対象の触知覚 --全盲者と大学生による白杖を用いた対象の硬さ推定--, 基礎心理学研究, Vol.27 No.2 pp. 186.
- [12] 中尾恵・黒田知宏 (2007). 医療における力覚メディア, 電子情報通信学会誌, No90 pp. 659-664.
- [13] 村瀬悠佑・神谷直希・村上和人 (2015). 筆圧パターンの統計量を利用した筆記評価の一考察, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.39 No.39 pp. 5-8.

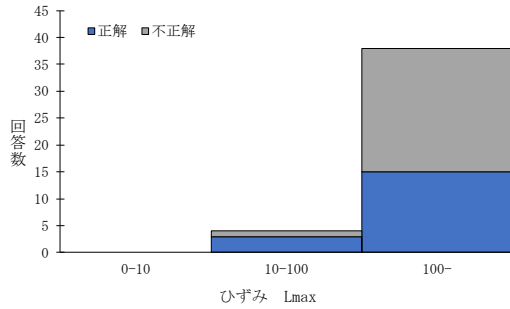
- [14] 田中敏・中野博幸 (2013). R&STAR データ分析入門, 新曜社.
- [15] js-STAR: <http://www.kisnet.or.jp/nappa/software/star/>
- [16] Benjamini, Y, Hochberg, Y. (1995). *Controlling the False Discovery Rate a Practical and Powerful Approach to Multiple Testing*, Journal of the Royal Statistical Society Series B, 57, pp.289-300.
- [17] Charles L, Webber Jr, Norbert Marwan Editors (2015). *Recurrence Quantification Analysis -Theory and Best Practices-*, Springer.
- [18] 茂木正晴・油田信一・藤野健一 (2014). 油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案, 建設機械施工論文, Vol.66 No.8 pp.71-79.
- [19] 吉江宗生・白井一洋・田中敏成・平林丈嗣 (2000). 港湾工事等へのロボット技術の導入, 第8回建設ロボットシンポジウム論文集, pp.29-36.
- [20] 西尾正巳・平松雄二・青野隆 (2002). 有珠山噴火災害緊急対策工事での無人化施工実績, 第9回建設ロボットシンポジウム論文集, pp.71-78.
- [21] キャタピラー教習所(株) (2013). 車両系建設機械運転者教本 -整地・運搬・積み込み用及び掘削用-, 技能講習テキスト.
- [22] 茂木正晴・油田信一・藤野健一 (2015). 無人化施工におけるヒューマンインタフェースの作業効率評価, 日本ロボット学会誌, Vol.33 pp.426-429.
- [23] 赤池弘次 (監修) 尾崎統・北川源四郎 (編) (1998). 時系列解析の方法, 朝倉書店, pp.91.
- [24] 沢田陽佑・大野健太郎・下薊普一郎・大津政康 (2009). AE-SIGMA 解析における AE 波初動部自動読み取り法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.31 pp.2101-2106.
- [25] C. L. Webber Jr, J. P. Zbilut (1994). *Dynamical Assessment of Physiological Systems and States using Recurrence Plot Strategies*, Journal of Applied Physiology, No.76 pp.965-973.
- [26] 平田祥人 (2011). リカレンスプロット --時系列の視覚化を越えて--, 数理解析研究所講究録, 第1768巻 pp.150-162.
- [27] Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M., Kurths, J (2007). *Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems*, Physics Reports, 438(5-6) pp.237-329.
- [28] 茂木正晴・藤野健一・三嶋博之 (2016). 無人化施工による破碎・解体作業時における触知覚情報の必要性和実態--媒体を通じた人の触知覚の実態--, 建設機械施工, Vol.68 pp.64-73.
- [29] Norbert Marwan (2010). *How to Avoid Potential Pitfalls in Recurrence Plot Based Data Analysis*, International Journal of Bifurcation and Chaos.

- [30] 野中哲士・西崎実穂・佐々木正人 (2010). デッサンのダイナミクス, 認知科学, Vol. 17 No. 4 pp. 691-712.
- [31] Kennel MB, Brown R, Abarbanel HD (1992). *Determining Embedding Dimension for Phase-Space Reconstruction using a Geometrical Construction*, The American Physical Society, Physical Review A Gen Phys, Vol. 45, No6 pp. 3403-3411.
- [32] Fraser AM, Swinney HL (1986). *Independent Coordinates for Strange Attractors from Mutual Information*, The American Physical Society, Physical Review A Gen Phys, Vol. 33, No2 pp. 1134-1140.
- [33] 救仁郷誠 (2001). マハラノビスの距離 入門 --MTS法を理解するために--, 品質工学, Vol. 9 No. 1 pp. 13-21.
- [34] 村瀬悠佑・神谷直希・村上和人 (2015). 筆圧パターンの統計量を利用した筆記評価の一考察, 一般社団法人映像情報メディア学会 映像情報メディア学会技術報告, 39(39), pp. 5-8.
- [35] 大海悠太・池上高志 (2009). ニューラルネットワークと触覚ディスプレイを用いたアクティブ・タッチの研究「うねうね」と「ざらざら」の触感の構成, 信学技報, pp. 17-21.
- [36] 小谷浩之・高橋正也・奈良高明・水野毅 (2006). 弾性表面波皮膚感覚ディスプレイにおける視覚情報と触覚情報の融合, 日本機械学会論文集, No. 06-7.

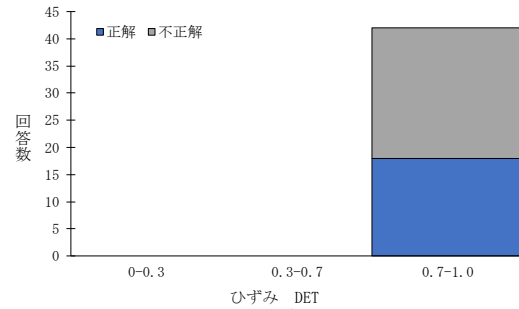
参考資料

クラスター分析におけるまとまりのあるクラスの各変数ヒストグラム

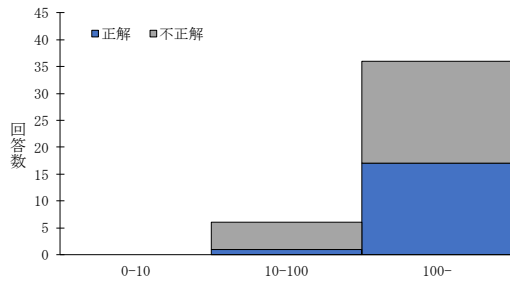
1. 振る探索行為 クラス3



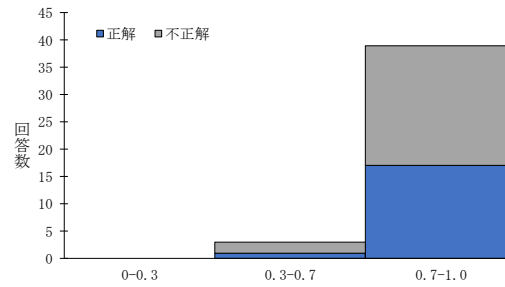
(1) ひずみ_Lmax



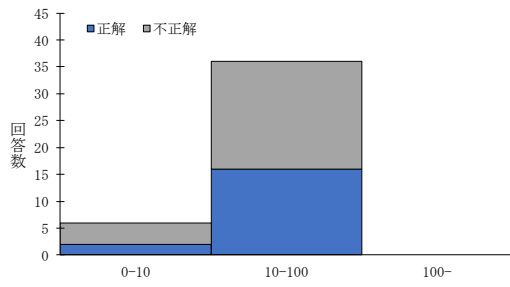
(2) ひずみ_DET



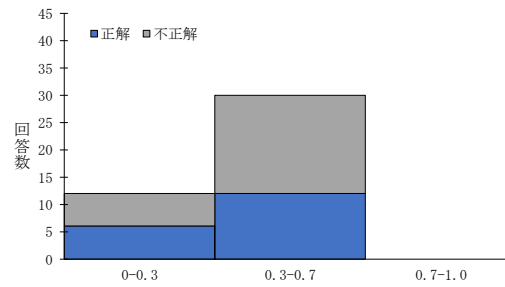
(3) 加速度X_Lmax



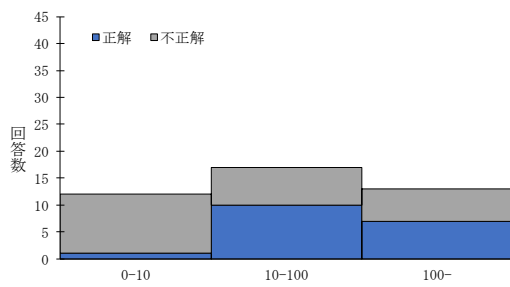
(4) 加速度X_DET



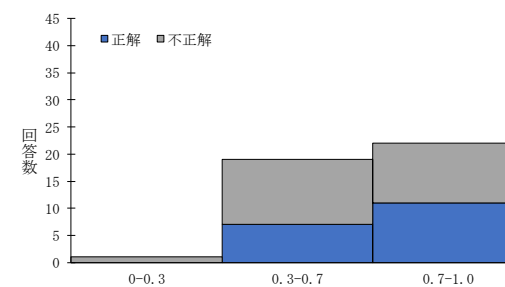
(5) 加速度Y_Lmax



(6) 加速度Y_DET

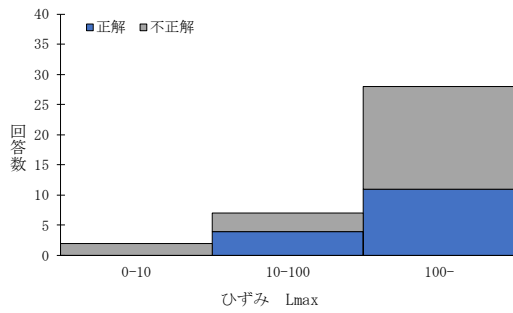


(7) 加速度Z_Lmax

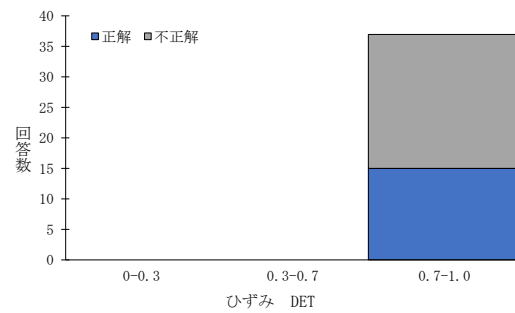


(8) 加速度Z_DET

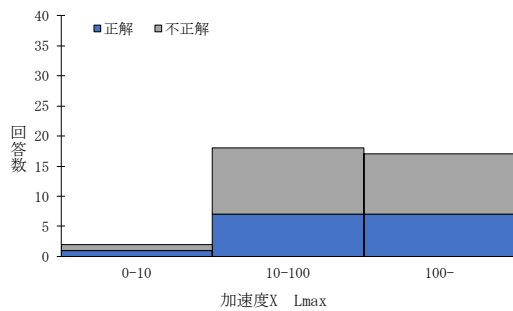
2. 振る探索行為 クラス 4



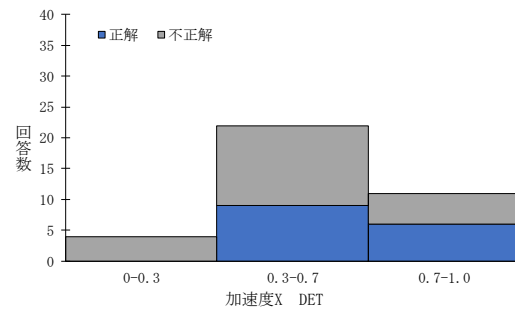
(1) ひずみ_Lmax



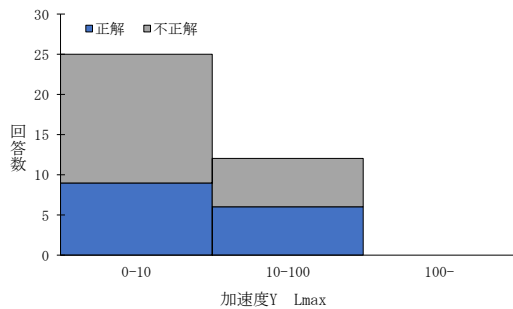
(2) ひずみ_DET



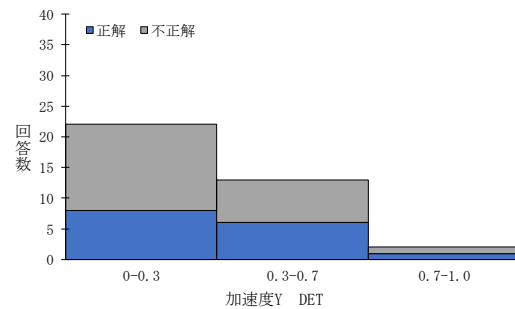
(3) 加速度X_Lmax



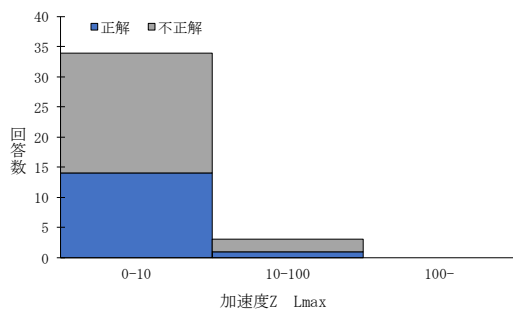
(4) 加速度X_DET



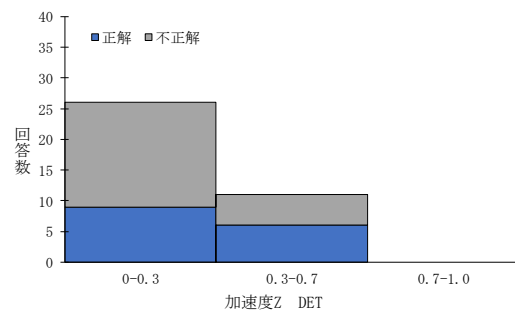
(5) 加速度Y_Lmax



(6) 加速度Y_DET

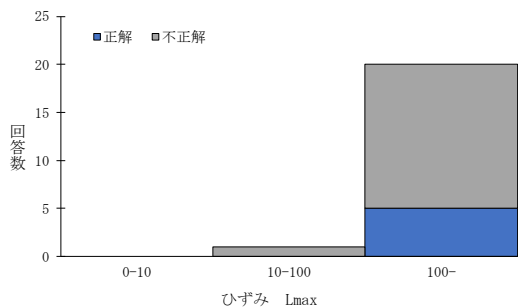


(7) 加速度Z_Lmax

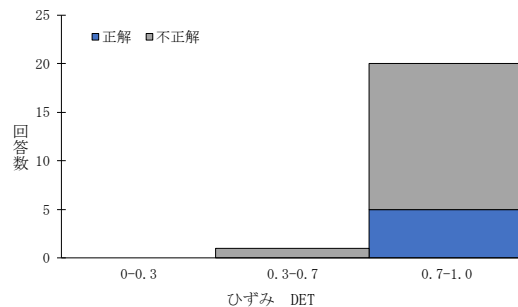


(8) 加速度Z_DET

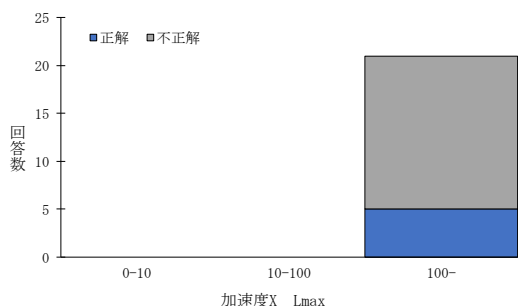
3. 振る探索行為 クラス 6



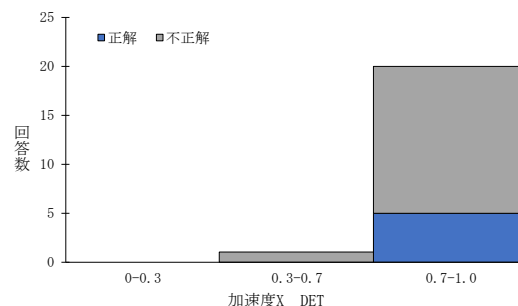
(1) ひずみ_Lmax



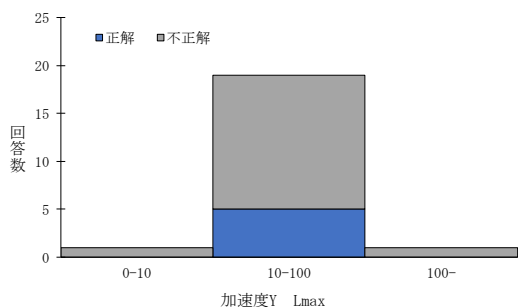
(2) ひずみ_DET



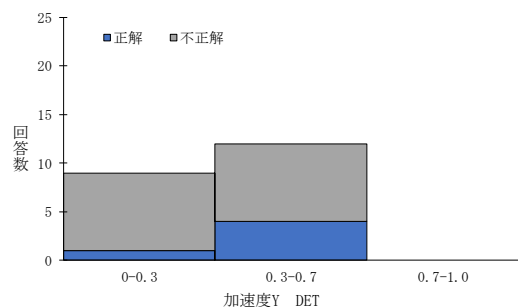
(3) 加速度X_Lmax



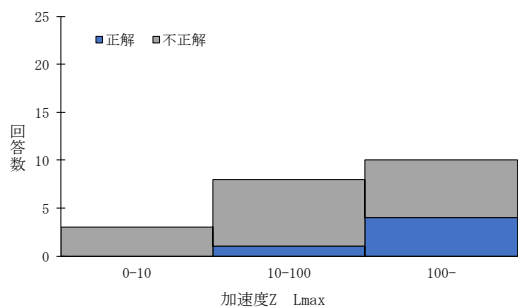
(4) 加速度X_DET



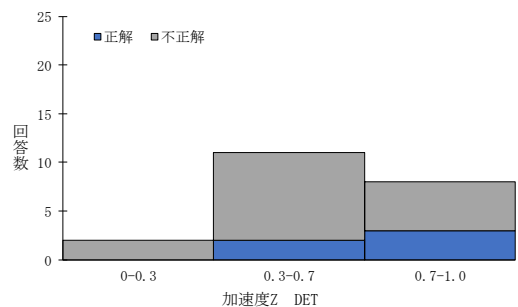
(5) 加速度Y_Lmax



(6) 加速度Y_DET

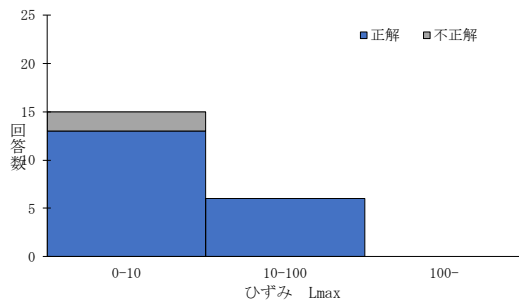


(7) 加速度Z_Lmax

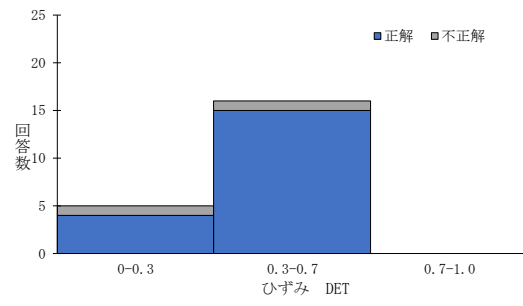


(8) 加速度Z_DET

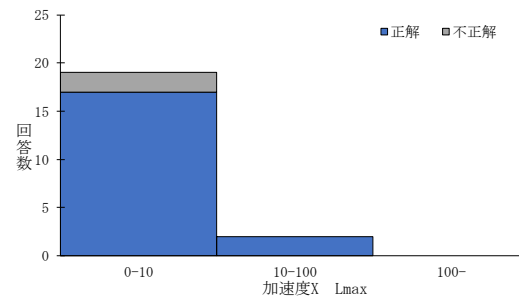
4. 擦る探索行為 クラス 3



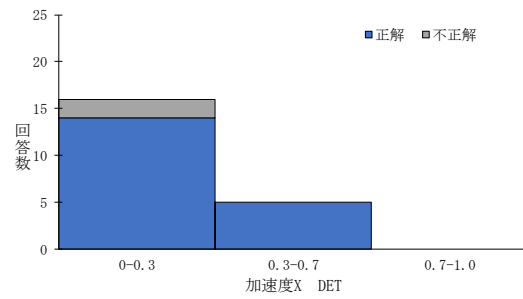
(1) ひずみ_Lmax



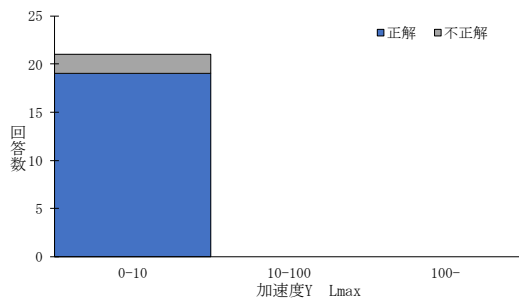
(2) ひずみ_DET



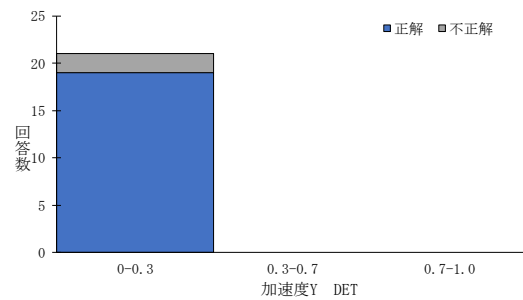
(3) 加速度X_Lmax



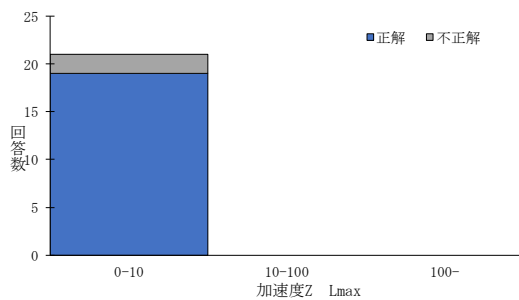
(4) 加速度X_DET



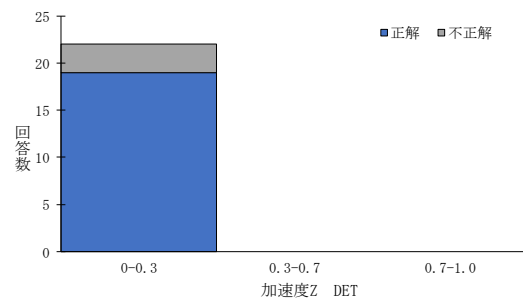
(5) 加速度Y_Lmax



(6) 加速度Y_DET

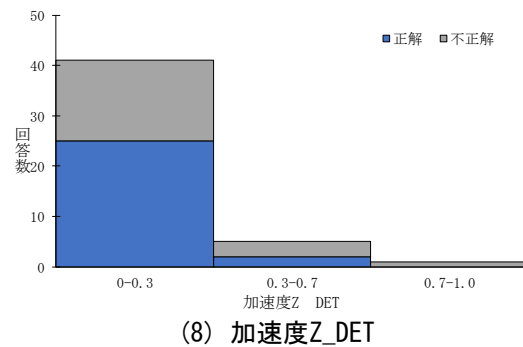
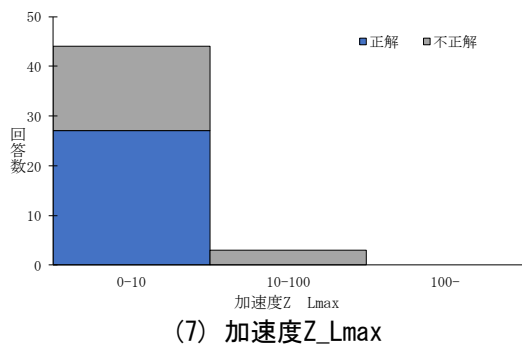
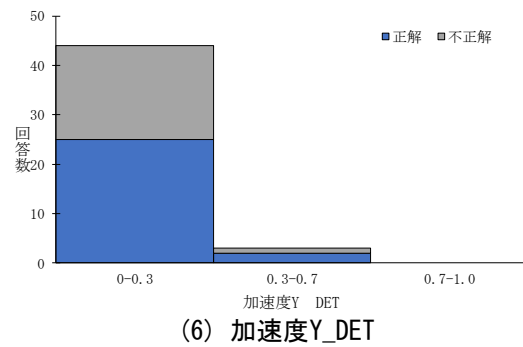
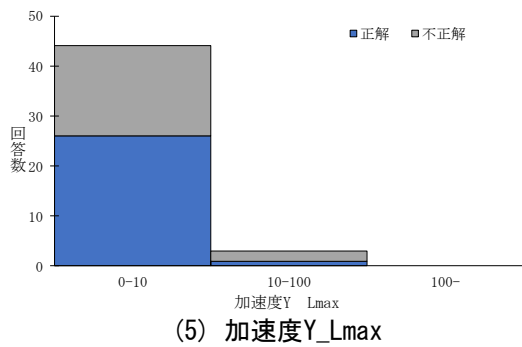
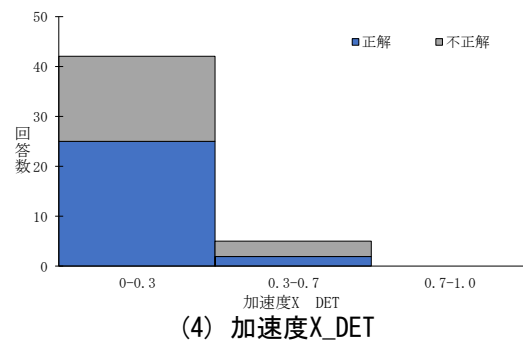
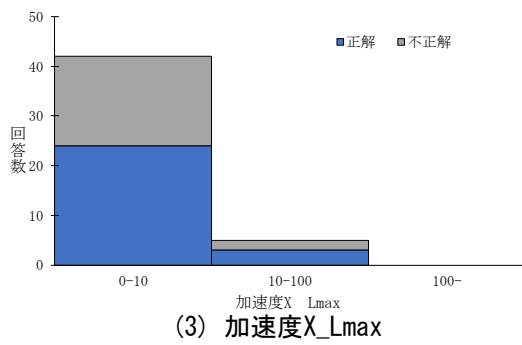
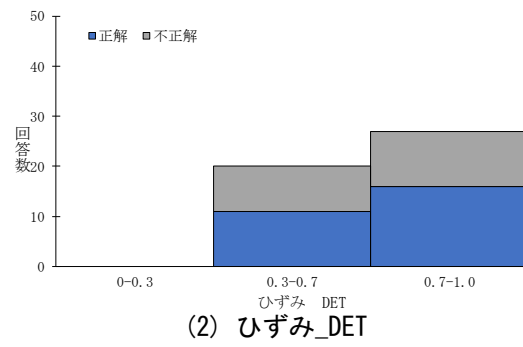
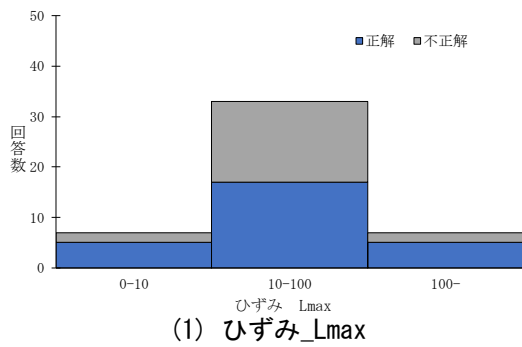


(7) 加速度Z_Lmax

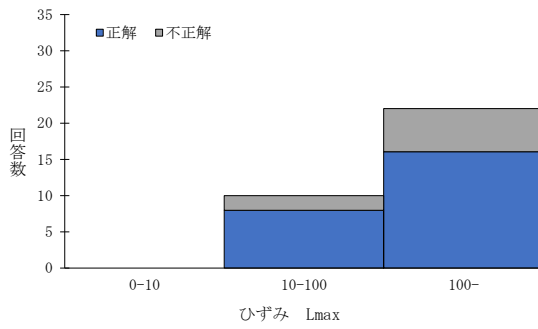


(8) 加速度Z_DET

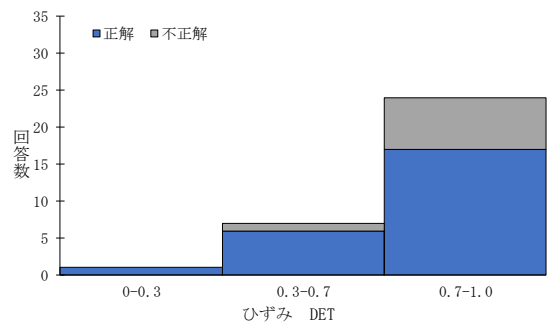
5. 擦る探索行為 クラス 5



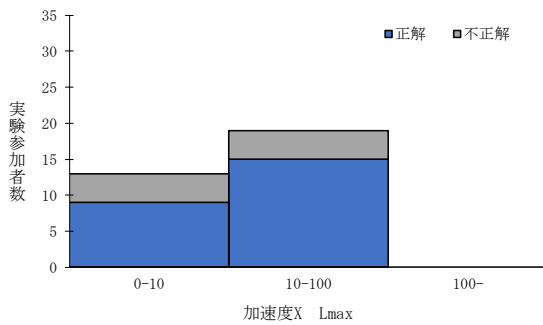
6. 擦る探索行為 クラス 6



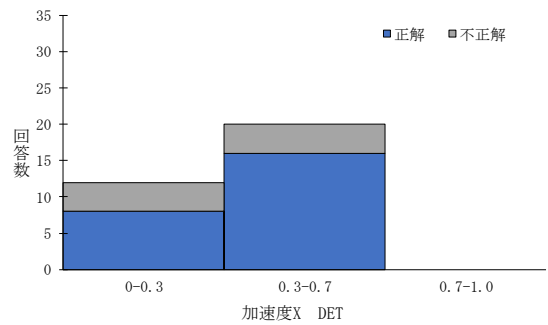
(1) ひずみ_Lmax



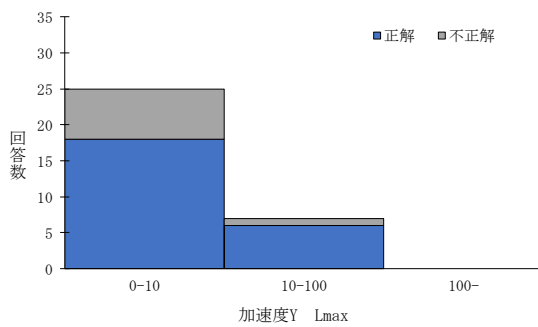
(2) ひずみ_DET



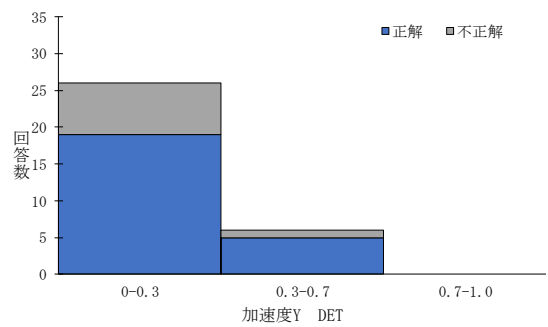
(3) 加速度X_Lmax



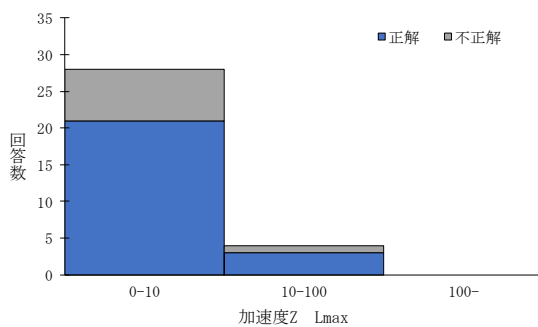
(4) 加速度X_DET



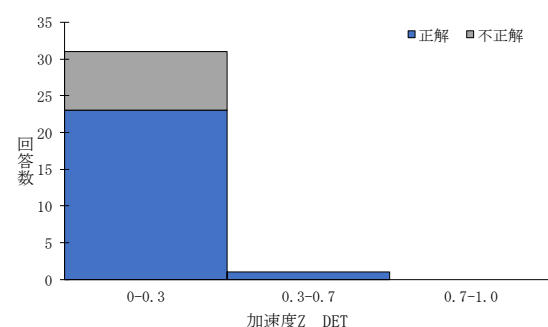
(5) 加速度Y_Lmax



(6) 加速度Y_DET

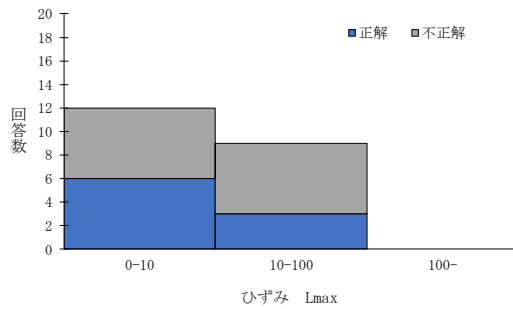


(7) 加速度Z_Lmax

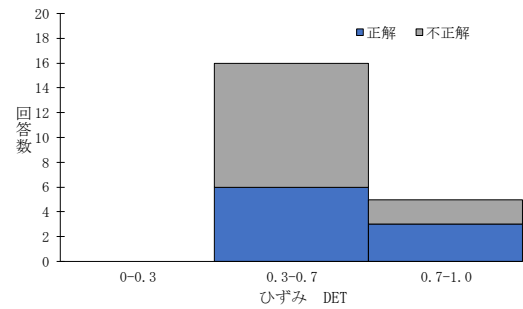


(8) 加速度Z_DET

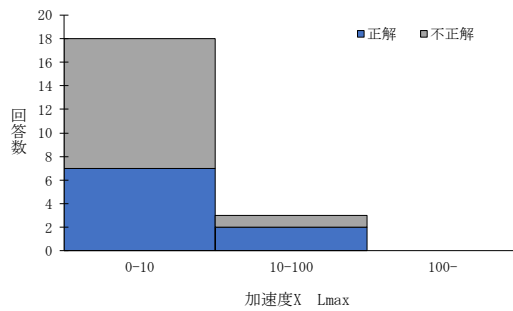
7. 叩く探索行為 クラス4



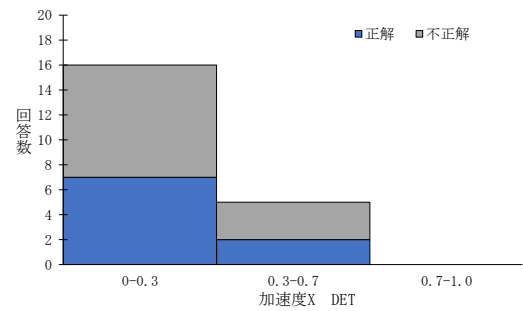
(1) ひずみ_Lmax



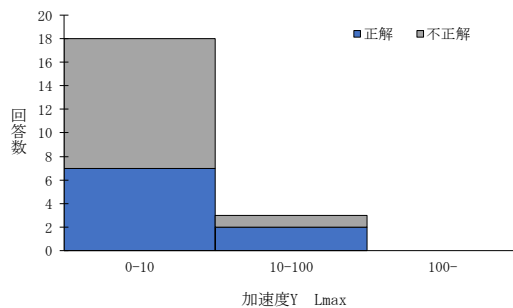
(2) ひずみ_DET



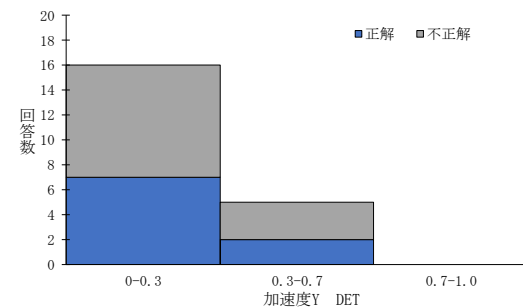
(3) 加速度X_Lmax



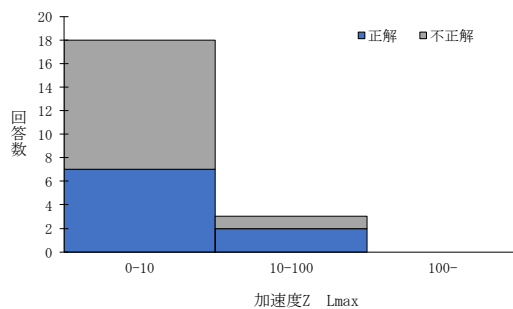
(4) 加速度X_DET



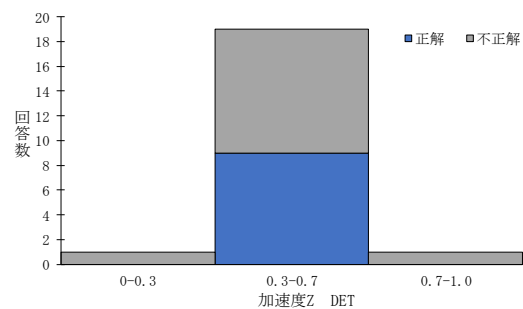
(5) 加速度Y_Lmax



(6) 加速度Y_DET

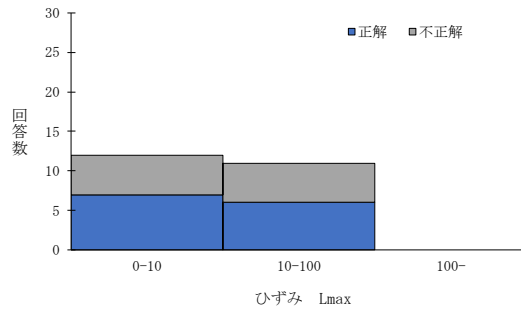


(7) 加速度Z_Lmax

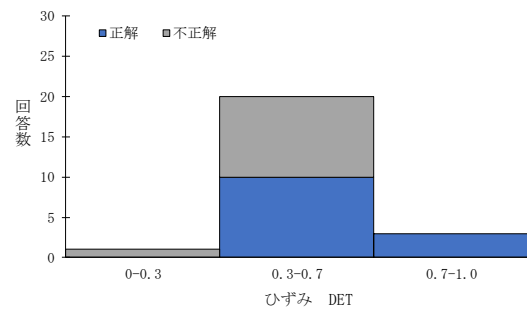


(8) 加速度Z_DET

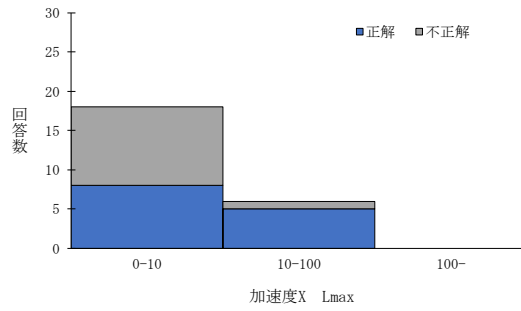
8. 叩く探索行為 クラス 5



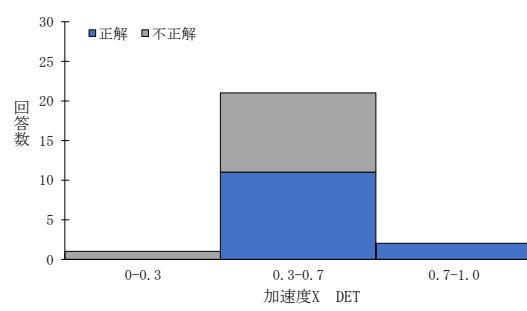
(1) ひずみ_Lmax



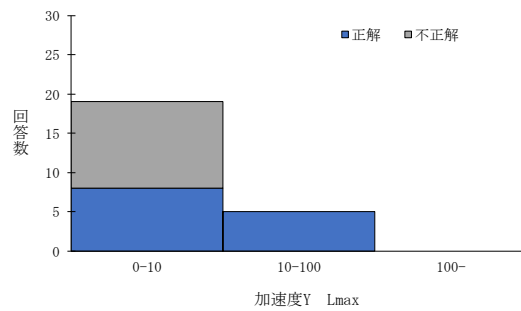
(2) ひずみ_DET



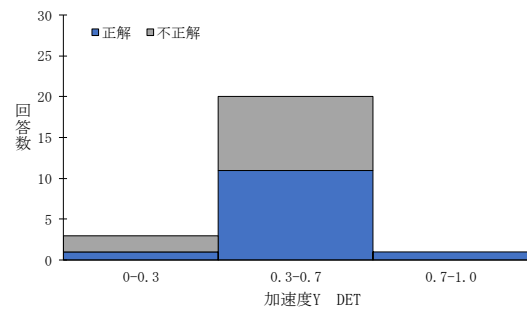
(3) 加速度X_Lmax



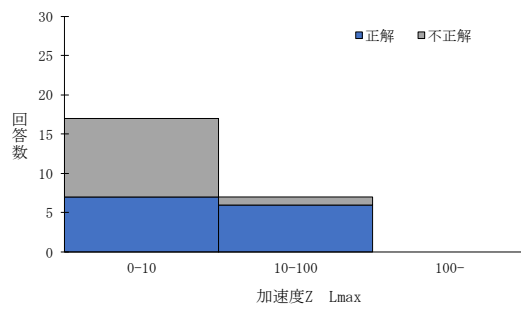
(4) 加速度X_DET



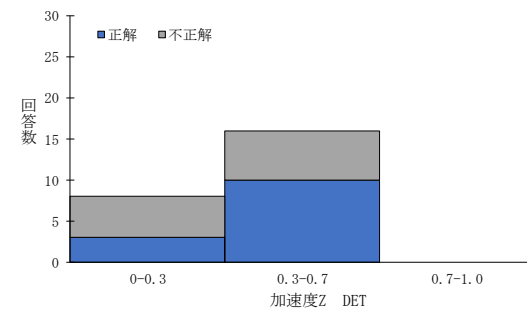
(5) 加速度Y_Lmax



(6) 加速度Y_DET

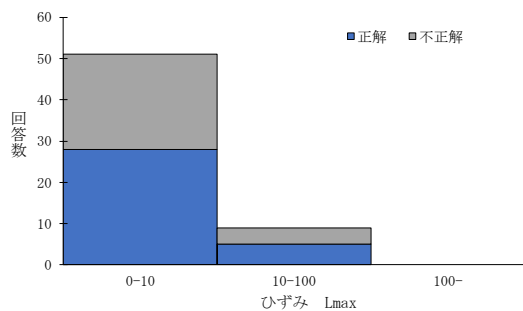


(7) 加速度Z_Lmax

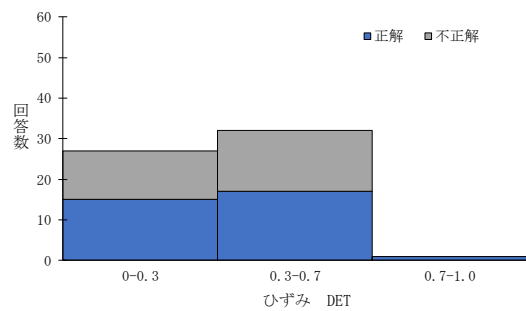


(8) 加速度Z_DET

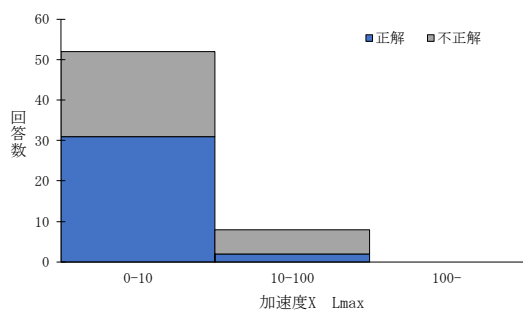
9. 叩く探索行為 クラス6



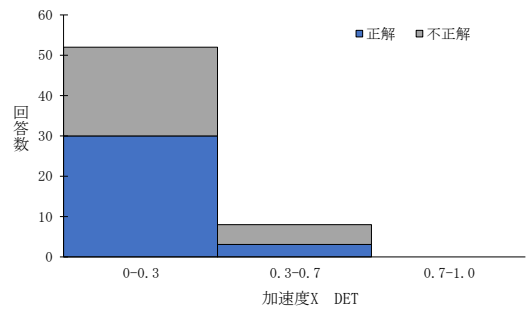
(1) ひずみ_Lmax



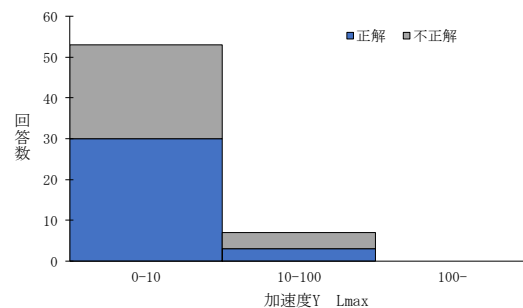
(2) ひずみ_DET



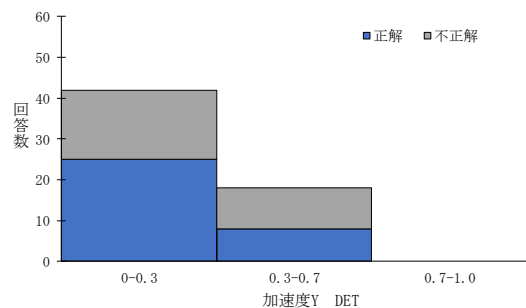
(3) 加速度X_Lmax



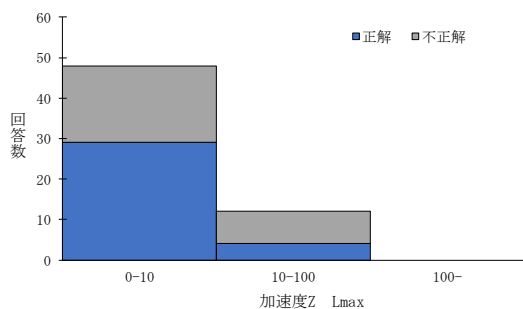
(4) 加速度X_DET



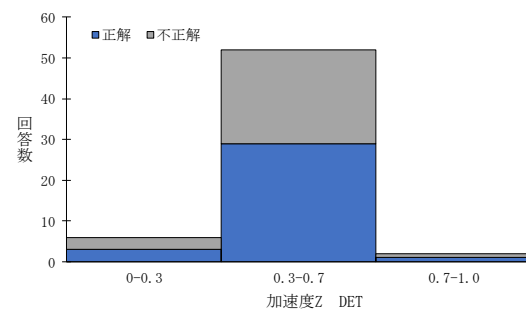
(5) 加速度Y_Lmax



(6) 加速度Y_DET



(7) 加速度Z_Lmax



(8) 加速度Z_DET