

早稲田大学審査学位論文
博士（人間科学）
概要書

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

1. 緒言

本研究は、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て、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。

災害は時として私たちの想定を越えた規模で発生する。そして、災害の発生場所やその規模によっては、二次災害を生じる恐れから復旧のために人が現場に立ち入ることができない場合もある。そのため、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、このような現場では転送された映像を通じて建設機械を遠隔操作する無人化施工技術が活用されている(図1)。



図1 無人化施工技術(建設機械稼働状況と遠隔操作状況)

現在の無人化施工技術は、視覚に頼った技術が主流となっているが、通常の搭乗操作では視覚以外の情報も利用されていると考えられ、とりわけ地中内部の掘削作業等においては、触覚的に得られる情報が重要であると考えられる。

建設機械を用いた作業の一つとして、水道管やガス管等の“ライフライン”の維持のために行われる地中掘削作業がある。このとき、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”で弁別することが必要となる場合がある。このように、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させないことは、搭乗/非搭乗(遠隔)操作の区別にかかわらず、安全で効率的に掘削作業を遂行する上で求められる重要な要素の1つだと考えられる。

一般的な能力として、媒体を通じて間接的に対象物に触れることによってそれを知覚できることは知られている。たとえば、カツ(1925)は、鉛筆を使って紙に文字などを書くとき、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、人は鉛筆のような媒体を介した対象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行為によって、より正確な情報を環境から得られる可能性を述べている。しかしながら、建設現場に特有な素材群の組み合わせにおける触覚的な弁別能力については十分な検討は行われておらず、また、触覚のための探索においてどのように動くことが有効であるかについても十分な検討がなされていない。

2. 研究目的

本研究では、土木の現場で安全かつ効率的に作業を遂行する上で必要となる触覚の特性を明らかにするため、媒体を介した触覚によって、建設現場で利用される典型的な素材の弁別を課題とした心理実験を実施し、その際に行われる探索行為の特徴を明らかにすることを目的とした。

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て振る行為(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、異なる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的な傾向を明らかにした。

研究2では、異なる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. 研究1: 異なる素材の弁別能力と探索行為の傾向

媒体を介した触覚による振る・擦る・叩く探索行為(図2)に関する実験を実験参加者44名に行った(実験1)。媒体として、建設機械の操作レバーを模した“探索棒”を製作した。供試体には、建設作業に一般的に使用されている6種類の異なる素材(ゴム・ウレタン・プラスチック・木材・コンクリート・鋼材)を用意した。異なる供試体をランダムに実験参加者に提示し、視覚と聴覚を遮断した状態で、探索棒で触知させ、弁別をさせた(図3)。

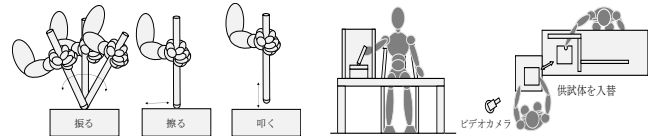


図2 探索方法

図3 実験状況

供試体となる6種類の異なる素材毎の弁別能力に関しては、図4に示すようにいずれもチャンスレベル(0.167)を上回る結果となり、実験参加者による弁別は偶然によるものではなく、異なる素材の差異を知覚していることが明らかとなった。また、各探索行為における素材毎の誤認の傾向が異なることも明らかとなった。このことは、触覚による振る・擦る・叩く探索行為における異なる素材の弁別に必要となる触覚情報取得に影響があることが考えられる。

そこで、正解率上位者/下位者別に、実験時の探索行為を記録した動画により動作変位量の時系列を抽出し、各探索行為の傾向を比較検証した。その結果、動作変位量の時系列(代表例を図5に示す)に見られる傾向から、正解率上位者には不規則に動作を調整する特徴が見られ、正解率下位者は定型的で周期的な動作を行う特徴が見られることが明らかとなった。

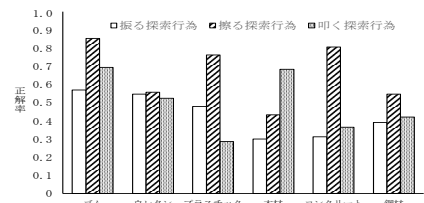
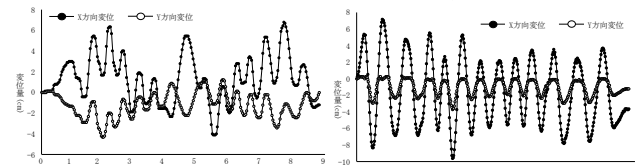


図4 触覚による異なる素材の弁別実験



(a) 正解率上位者

(b) 正解率下位者

図5 動作変位時系列波形例(擦る探索行為)

4. 研究2: 触覚による探索行為の運動的特徴

実験1と同様の手続きを用いつつ、媒体となる探索棒に発生するひずみ及び加速度の計測を付加した実験2を行った。計測されたひずみ及び加速度に基づき、探索行為の傾向を定量的に解析した。実験参加者は、実験1に参加した44名の中から、建設機械オペレータ10名を選出した。

実験1と実験2における同一の実験参加者(10名)に対して、各探索行為毎の正解率の平均及び標準偏差(図6)に基づき、ウェルチの法によるt検定(有意水準 $\alpha=0.05$, 両

側検定)を行い、異なる素材の弁別の安定性について検証した。検定の結果、3つの探索行為それぞれについて、実験1と実験2における正解率の平均には有意な差は見られず、触知覚による異なる素材の弁別が、探索行為の種類によらず安定的に行われていることが明らかとなった。

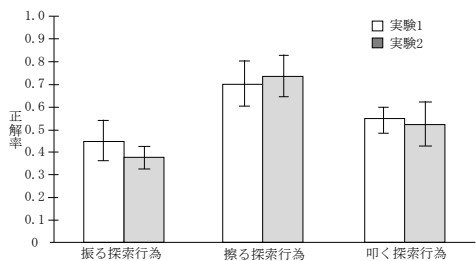


図6 実験1と2の各探索行為における弁別傾向の比較

次に、取得されたひずみ及び加速度の時系列データから、触知覚による探索行為の特徴をより定量的に評価するため、再帰性定量化解析(Recurrence Quantification Analysis)により、“最大線長”(Lmax)および“決定率”(DET)を導出した(Marwan, Romano, Thiel, Kurths., 2007)。一般に、Lmaxが大きければその時系列は軌道安定性が高く、DETが大きければその時系列は乱雑性が低く予測可能性が高いとされる(図7)。

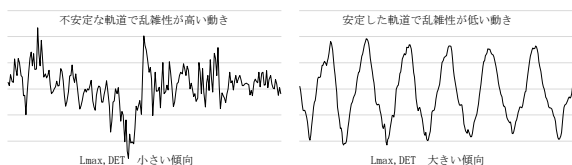


図7 Lmax, DETの傾向と探索行為との関係例

実験参加者10名による3つの探索行為それぞれから得られたひずみのLmax、加速度X,Y,ZのLmax、ひずみのDET、加速度X,Y,ZのDETの8つの変数について、クラスター分析(ウォード法、マハラノビス距離)を行った。クラスター分析から得られた各クラスについて、弁別の正解率に着目し、異なる素材の弁別向上に関連すると考えられる探索行為の運動的特徴について以下のような結果を得た。

4.1 効果的な振る探索行為の運動的特徴

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。また、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。素材に対して与えられ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。

4.2 効果的な擦る探索行為の運動的特徴

供試体に押し付ける探索棒の力(ひずみ)と探索棒の動き(加速度)は、共に不安定な軌道で乱雑性が高く、不規則な振る舞いであることが明らかとなった。

擦る探索行為では、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、異なる素材の弁別を行っていることが特徴として考えられる。擦る探索行為は、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知覚情報のほか、擦りながらの移動による素材表面の凹凸や肌理によって発生する振動等により触知覚に必要となる多くの情報を取得している。この多くの情報の取得により、触知覚による擦る探索行為は、弁別を効果的に行うことができたと考えられる。

4.3 効果的な叩く探索行為の運動的特徴

探索棒で異なる素材を叩く際の力(ひずみ)と動き(加速

度)の制御については、共に不安定な軌道で乱雑性が高く、不規則な振る舞いであることが明らかとなった。なお、研究1において叩く探索行為の正解率上位者は、供試体面に対して広範囲に探索を行う傾向が見られた。

5. まとめ

研究1では、建設作業において触知覚のために典型的に行われる3種の探索行為(振る・擦る・叩く)によって、媒体である探索棒を介しつつ、6種の異なる素材の弁別が可能であることを確認した。振る・擦る・叩く探索行為を相互に比較すると、擦る探索行為は、振る探索行為と叩く探索行為に比べて正解率が高い傾向が見られた。この結果は、建設作業において経験的に行われている触知覚の方法—すなわち、まず対象物に建設機械の先端部等を押し付けて振ることで大まかな感触を確かめ、次に擦ることで素材の特徴をほぼ確定し、最後に必要に応じて軽く叩くことで埋設物の損傷・破壊のリスクを最小限留める方法—とも整合性があると考えられる。建設作業の現場において損傷等のリスク回避のためにこれまで経験的に行われてきた方法が、知覚的にも妥当性を備えていたことを示唆するものと考えられる。

研究2では、実験1と実験2で得られた結果を比較検証し、振る・擦る・叩く探索行為による触知覚を通じて、異なる素材の弁別が安定的に可能になっていることを確認した。また、3種の探索行為の違いにより、素材毎の弁別の正解率や、素材弁別の誤認傾向の違いが見られることが明らかとなった。これは、探索行為の種類によって弁別しやすい/しにくい素材の構成が異なり、したがって建設作業の現場において複数の探索行為を組み合わせることが触覚的弁別の正確性を向上させることに寄与することを示唆していると考えられる。さらに、研究2で実施した探索行為の運動的特徴に関する解析の結果から、探索時に探索棒を押しつける力(ひずみ)とその動き(加速度)について、定型的で周期的な運動を繰り返すよりも、能動的に変化をつくりだすことが素材の弁別の向上に繋がることを示唆された。今後、本研究の知見を建設現場での作業手順等に還元することによって、埋設管等の損傷を回避し、安全な作業を実施することに寄与できるものと考えられる。

6. 今後の展望

本研究では、「変化に富む」探索運動が、異なる素材の弁別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つの素材以外にも、多くの素材が作業対象となる環境に存在している。また、探索のための行為についても、対象とした3種の方法以外に有効な探索行為が存在している可能性がある。今後、素材や探索行為の対象を拡大し、その探索行為の運動的特徴を明らかにすることが必要であろう。これらの知見を積み重ねることにより、建設作業の現場で利用される触知覚の情報を明らかにすることは、これまで視覚情報に偏っていた無人化施工技術における情報伝達に新たな可能性を与えると考えられる。

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.)

Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*, Oxford University Press, Oxford. (Gibson, J. J. (著) 佐々木正人・古山宣洋・三嶋博之(監訳) (2011). ギブソン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.)

Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M., Kurths, J. (2007). Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems, *Physics Reports*, 438(5-6), 237-329.