

|| 投稿論文 ||

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と実態 ～媒体を通じた人の触知覚の実態～

茂木 正晴¹・藤野 健一²・三嶋 博之³

¹ 早稲田大学大学院人間科学研究科 (〒 359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15),
土木研究所 技術推進本部先端技術チーム主任研究員 (〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail : m-moteki@moegi.waseda.jp

² 土木研究所 技術推進本部先端技術チーム主席研究員 (〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail : fujino@pwri.go.jp

³ 早稲田大学人間科学学術院 准教授 (〒 359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15)

E-mail : mishima@waseda.jp

災害現場復旧において作業者の安全確保のための有効な施工方法として、無人化施工が活用されている。現在、災害現場で利用されている無人化施工技術の多くは、カメラからの伝送映像を中心とした視覚情報に依存したシステム構成となっている。また、実際の復旧作業の多くは、土砂掘削や盛土といった作業に限定されている。しかし、無人化施工技術が実際に活用されている現場では、ガレキの破碎や解体といった複雑な作業が必要な場合もあり、視覚情報のほかに物のかたさに関する情報が必要となるが触知覚に関する技術開発は、十分に組み込まれていない状況にある。

本研究では、建設機械オペレータへのヒアリングから、建設機械による掘削や破碎等の作業を安全・迅速に進めるうえで、能動的な探索行為による触知覚の情報が重要かつ必要であることを確認した。そして、実験により、媒体を通じたかたさ知覚が偶然によるものでなく知覚されていること、および、触知覚のための探索動作が、正解率上位者と下位者とで異なっていることを確認した。また、主に建設機械を遠隔で操作する際、効率的・効果的に現場で活用するために必要となる操作系インターフェースへの触知覚の必要性について述べる。

キーワード : *Unmanned construction, Haptic perception, Operational interface, Operational efficiency, Active touch*

1. まえがき

建設機械は、土木工事における構造物の構築、破碎・解体といった、あらゆる場面で利用されている。建設機械を操作するオペレータは、環境からの視覚・聴覚・触覚といった知覚情報を取得することによって目的とする作業を遂行している。

オペレータの多くは、工種や作業内容によって、視覚・聴覚・触覚といった知覚情報を無意識に使い分けている。例えば、山砂などのかたさの異なる材質による盛土・掘削作業に関しては視覚情報の利用を中心としているが、解体工や破碎作業のようなかたさの異なる材質を取り扱う作業に関しては、視覚情報の他に聴覚や触覚といった情報を取り入れて作業を進めていると考えられる。

このように、建設作業の場面や作業内容によっては、

視覚情報に限らず、適切な知覚情報をオペレータに対して総合的に伝達することが必要と言える。

しかしながら、現在、災害現場で利用されている無人化施工技術に関しては、カメラからの伝送映像を中心とした視覚依存のシステム構成となっており、実際の復旧作業の多くも、視覚的な情報のみでも行いやすい土砂掘削や盛土等を中心とした作業に限定されているのが実情である。

このような状況を踏まえ、視覚以外の知覚情報を利用するための検討も行われている。例えば、マイクロフォンによる破碎音(聴覚情報)をオペレータに聴覚的に伝達しての作業や、岩塊の破碎振動を運転座席に触覚情報として伝達して作業する事例が存在している。しかし、これらは現場での積極的な採用、実用化にまでは至っておらず、特に無人化施工技術が実際に活用されている現場

の実情に合わせたかたちでの触知覚に関する技術開発については、十分に組み込まれていない状況にある。

本報告では、昨今発生している災害時の復旧活動の1つであるガレキ等撤去時のガレキ破碎や解体において、一般的にオペレータからのニーズとしてあげられている触知覚情報の必要性和媒体を通じた触知覚の実態について実験をととして明らかにした。また、主に建設機械を遠隔で操作する際、効率的・効果的に現場で活用するために必要となる操作系インターフェースへの触知覚情報の必要性に関して述べる。

2. 背景と課題

2.1 無人化施工における作業効率向上の課題と研究対象

建設作業に関しては、一般的に形状等の状況判断を視覚情報により行っている部分が多いものと考えられている。また、近年火山・土石流等の災害発生時に人が入りこむことができない環境での復旧作業について、写真-1に示す建設機械をテレビカメラからの映像によって遠隔操作する無人化施工が適用されている。しかし、無人化施工による復旧作業は、テレビモニタからの映像による視覚情報のみを頼りに建設機械を操作することから、一般的に臨場感が乏しく直接搭乗して作業するより多くの時間を要するといわれている。

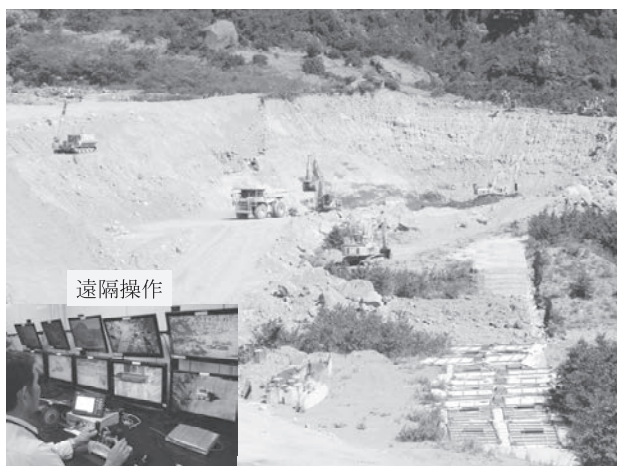


写真-1 無人化施工による施工状況（2013.9 雲仙復興現場より）

現場で活用されている無人化施工における作業効率の実態把握として、土木研究所内で搭乗操作と遠隔操作による比較実験¹⁾をオペレータ15人に実施している。結果として、図-1¹⁾に示すように遠隔操作は搭乗操作と比較して約2～3倍のサイクルタイム(作業時間)となるとい実態¹⁾が明らかとなっている。なお、映像情報量をパラメータとした実験が現在進められており、その詳細については、別報にて報告する予定である。

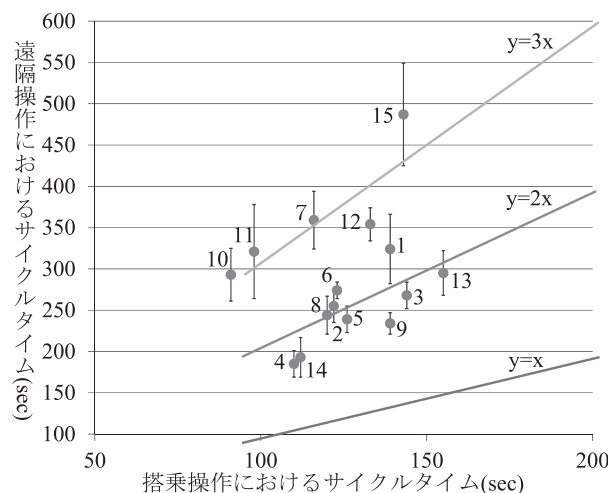


図-1 オペレータ15人による搭乗と遠隔操作の比較

遠隔操作に伴うこのような作業効率低下を改善するため、伝えられる視覚情報を改善する方策の検討が進められているが、作業効率を搭乗での建設機械の操作に近づけるためには、搭乗時にオペレータが体感している対象物への感触や音といった他の知覚情報も重要な要素だと考えられる。特に触知覚情報に関しては、遠隔での操作経験のあるベテランオペレータ10名へヒアリングを行った結果、現場での掘削、コンクリートブロックなどの破碎、建築物の解体・撤去等において対象物のかたい・やわらかいといった、触知覚の情報が重要かつ必要だとしており、触知覚を本研究対象にすることとした。

2.2 媒体を通じた触知覚情報の必要性

ベテランオペレータへのヒアリング結果から、触知覚の情報が重要かつ必要だとされているが、その背景については以下のようなことが考えられる。

人は、触知覚によって、物の大きさや重さ、かたさなどの情報を取得しており、取得された情報に応じて目的とする行動を調節することができる。例えば、日常場面では対象物に直接触ることで必要となる情報を取得している一方、全盲やロービジョンのように視覚障害がある場合、白杖を利用するような場面等では、直接地面に触れることがなく媒体を通じて状態を感知している。同様に、土木作業現場で作業者は、スコップ等の道具や建設機械等といった媒体を介して土に触れることでその状態を感知し、それに応じて掘る、叩く、押しつける等といった適切な作業を選択実行している。つまり、媒体を通じた触知覚を利用した探索の中で、作業者は能動的(アクティブ・タッチ²⁾)にかたい・やわらかいといった判断を行ったうえで、もしかたかった場合にアプローチしようとする対象物を破壊せずに除去、ないしは回避する行動をとることになる。

また、一般的な土木作業で土の内部に隠れているもの、例えば、土中にコンクリート片等が埋設されているか否かの判断(図-2)などは、スコップや建設機械などの先端部を介して得られる情報によって、聴覚的、触覚的に内部状況を判断している。ちなみに、土の締固め状態や、粘土から岩石までの段階を持ったかたさの判断は、ある程度の作業経験によって獲得が可能と現場では一般的に考えられており、目的とする作業を円滑に進めるうえで触知覚は必要な情報の1つだと考えられる。

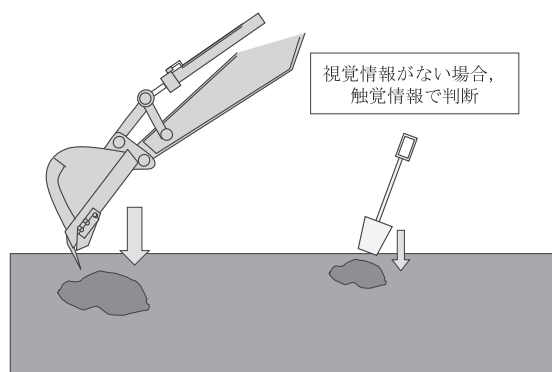


図-2 土木作業における触覚イメージ

3. 媒体を通じた人の触知覚に関する実験

3.1 実験の目的

本研究では、媒体を介した人の能動的(アクティブ・タッチ)なかたさ知覚の実態を実験により明らかにすることを目的とした。また、この実験結果に基づき、かたさ知覚の正確性として、正解率上位者と下位者において、触覚を得るための探索の動作(行為)に個人差があるのか、また、その動作には特徴的な傾向があるのか、動作解析により考察することとした。

3.2 実験内容

かたさの異なる6種類(ゴム、ウレタン、プラスチック、木材、コンクリート、鋼材、いずれも200 mm × 200 mm × 高さ100 mm)を用意した(写真-2)。また、後の分析で使用するため、6種類の供試体に対して、表-1に示すようにかたさを3つのカテゴリに分類した(以下、「カテゴリ別」という。)。探索方法は、図-3に示すように、探索棒を供試体に押しつけて振り、材質を答えてもらうことを12回実施した。次に探索棒で供試体を擦り、材質を答えてもらうことを12回実施した。最後に探索棒で供試体を垂直に叩き、材質を答えてもらうことを12回実施した。

実験に使用する探索棒は、ABS樹脂製の剛体の棒(φ20 mm × 250 mm、以下、探索棒という。)を用意した。



写真-2 供試体

表-1 供試体の種類

材質	やわらかい		ふつう		かたい	
	1	2	3	4	5	6
	ゴム	ウレタン	プラスチック	木材(松)	コンクリート	鋼材
縦弾性係数	約0.1 GPa	約0.5 GPa	約4 GPa	約9 GPa	約30 GPa	約200 GPa

※縦弾性係数に関しては、供試体製作会社にて確認

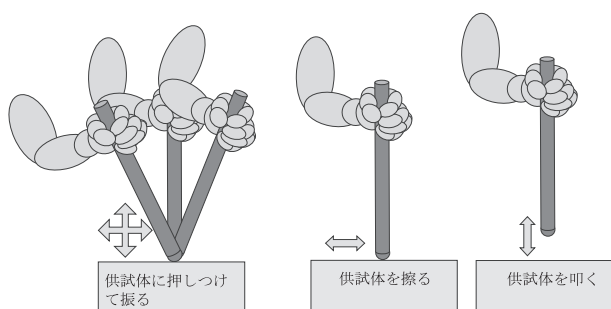


図-3 探索方法の種類

実験中は、実験協力者に供試体が目視できないように遮蔽し、聴覚による判別が発生しないように、カナル型イヤホンから提示されるノイズにより外部音を遮蔽した。また、12回の探索では、同材質を乱数表に基づき異なる順番で2回提示するように実施した。

なお、実験により得られたデータは、統計処理及び動作解析を行った。

3.2.1 実験の流れ

実験にあたっては、以下①～③の流れで進めた。なお、知覚対象の供試体は、乱数表に基づいて決定された順番で研究協力者に提示した。

- ①実験協力者は、本実験開始前に全ての供試体を目視しながら探索を行い、予めかたさに関する印象を確認する。
- ②実験協力者から供試体を見えないようにした状態で探索する(写真-3)。探索までの時間に関しては特に制限を設けないこととする。
- ③供試体の材質を回答してもらう。

3.2.2 実験協力者

実験協力者は、国立研究開発法人土木研究所において進めている「建設機械の遠隔操作技術の研究」における関係者44名(建設機械オペレータ16名、土木作業員11名



写真-3 実験状況

内女性3名、研究者11名、事務員等6名内女性2名、平均年齢44.9歳)にて実施した。

3.3 実験結果

3.3.1 探索方法毎の正解率

探索棒を供試体に押しつけて振る探索では、正解率が平均値及び標準偏差 0.430 ± 0.167 、変動係数 0.389、探索棒で供試体を擦る探索での正解率は平均値及び標準偏差 0.648 ± 0.167 、変動係数 0.257、探索棒で供試体を叩く探索での正解率は平均値及び標準偏差 0.494 ± 0.141 、変動係数 0.286 という結果となった。

図-4 に示すように「探索棒を供試体に押しつけて前後左右に探索」と「探索棒で供試体を叩く」では、一部を除いて、0.5-0.6 の正解率を境界とする傾向が見られた。「探索棒で供試体を擦る」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。

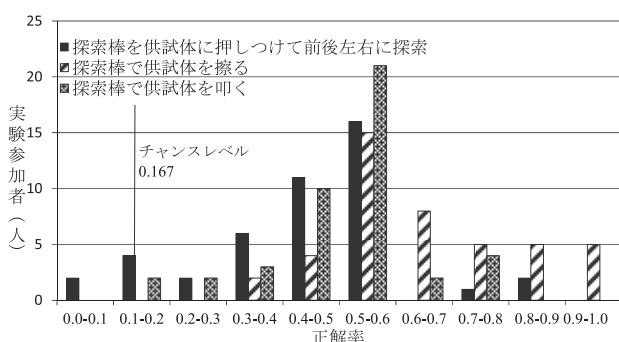


図-4 正解率に基づく探索方法毎のヒストグラム 1

いずれもチャンスレベル 0.167 を上回る結果となった。

表-1 に示す「やわらかい」「ふつう」「かたい」といったカテゴリ別での探索結果として、探索棒を供試体に押しつけて振る探索では、正解率が平均値及び標準偏差 0.646 ± 0.153 、変動係数 0.237、探索棒で供試体を擦る探索での正解率は平均値及び標準偏差 0.841 ± 0.129 、変動係数 0.154、探索棒で供試体を叩く探索での正解率は平均

値及び標準偏差 0.763 ± 0.132 、変動係数 0.172 という結果となった。

図-4 と比較した場合、概ね平均正解率が高いこと、バラツキが少なくなる結果となった。

図-5 のヒストグラムに示すように、探索棒を供試体に押しつけて前後左右に探索するケースでは正解率は低く、探索棒で供試体を擦る・叩くといったケースでは、正解率が高いことが確認できた。

実験協力者の多くは、「やわらかい」「ふつう」「かたい」といったカテゴリ別での判断は、媒体を通じた触覚において、概ね正確な判断が可能であることが確認できた。

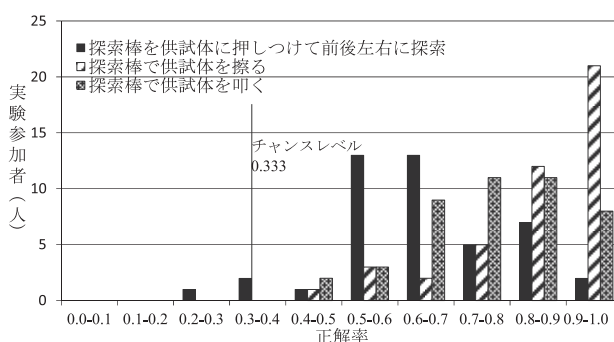


図-5 カテゴリ別における正解率のヒストグラム 1

3.3.2 動作解析評価

実験時の記録として撮影した記録映像に基づき、動作解析ソフト (Kinovea) による動作軌跡解析及び探索時の動作変位を動画記録を用いて比較検証した。

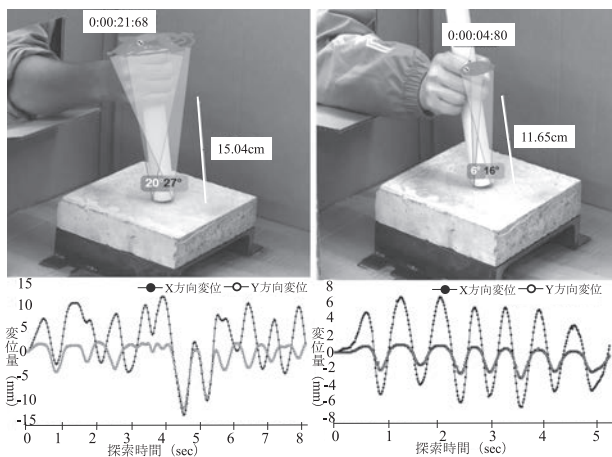
動作解析にあたっては、実験協力者 44 名中正解率上位者 10 % 以内から、正解率上位者 4 位までと下位者 4 位までを選抜し、それぞれの探索軌跡を解析した。

図-6～8 に、選抜された正解率上位者と下位者による、各探索時における動作軌跡の代表例を示す。それぞれの動作軌跡は、(i) が正解率上位者の動作軌跡で、(ii) が正解率下位者の動作軌跡である。

また、視覚的な動作軌跡だけでは、正解率の差異を明らかにすることが難しく、不明な点が多いことから、探索動作に関する傾向の解析を進めるうえで、動作軌跡の解析と同様に、正解率上位 4 位者と下位者 4 位までの動作状況について動作変位量に基づく解析を行った。具体的な解析方法は、映像の X (横)、Y (縦) 方向の動作軌跡を数値データ (CSV 形式) として記録したものを、Microsoft Excel により横軸を探索時間、縦軸を動作変位量とした時系列変位グラフを作成した。

a. 探索棒を供試体に押しつけて振る

図-6 については、「探索棒を供試体に押しつけて振る」

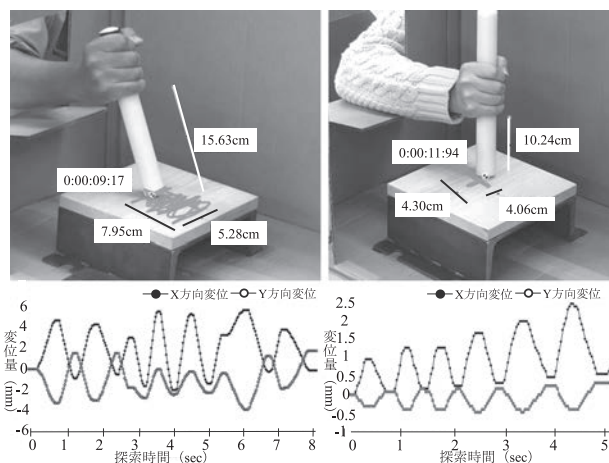


(i) 正解率上位者：時系列変位 (ii) 正解率下位者：時系列変位
図-6 探索棒を供試体に押しつけて振る

動作の代表的な動作軌跡例を示す。傾向としては、正解率上位者は、前後左右や回転による変化に富む探索を行っているのに対して、正解率下位者については、比較的画一的な回転動作が行われていることが分かった。

b. 探索棒で供試体を擦る

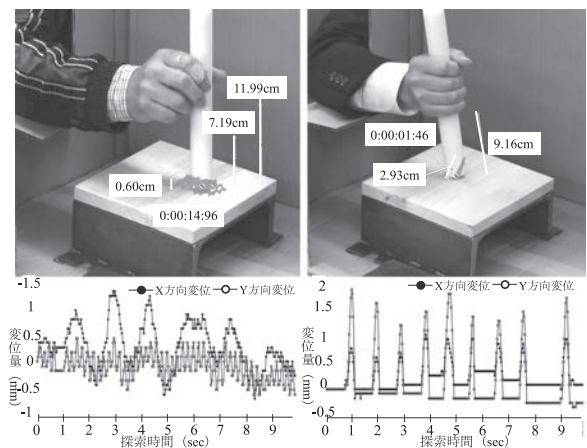
図-7 については、「探索棒で供試体を擦る」動作に関する代表的な動作軌跡を示す。正解率上位者は、広範囲に変化に富む探索を行っている。正解率下位者は、前後左右に画一的な探索を行っていることが分かった。



(i) 正解率上位者：時系列変位 (ii) 正解率下位者：時系列変位
図-7 探索棒で供試体を擦る

c. 探索棒で供試体を叩く

図-8 については、「探索棒で供試体を叩く」動作の代表的な動作軌跡を示す。正解率上位者は、広範囲に小刻みで変化に富む探索を行っている。正解率下位者は、ほぼ同一の箇所に対して画一的な探索を行っていることが分かった。



(i) 正解率上位者：時系列変位 (ii) 正解率下位者：時系列変位
図-8 探索棒で供試体を叩く

4. フーリエ解析及びRQA (Recurrence Quantification Analysis) による動作傾向の評価

正解者上位者と下位者の双方に見られる動作傾向について、より詳細に把握する手法として、正解率上位4位と下位4位までのデータ(時系列変位)についてフーリエ解析(技術計算製作所フーリエ変換ソフト Discrete Fourier Transform, 窓関数: ハミング)を行い、探索時における特性を明らかにした。

また、動作解析によって得られた時系列変位(図-6～8)は、正解率上位者と下位者の探索パターンに相違があると予測されることから、MATLAB Signal Processing Toolboxにより、平均値及び標準偏差では評価しえない不規則に変動する動作の時系列データを解析する手法としてRQA(再帰定量化解析: Recurrence Quantification Analysis)による解析を行い、解析によって得られた結果について正解率上位者と下位者における探索の有意差をt検定によって判定した。

4.1 フーリエ解析による探索特性

フーリエ解析結果として、各種探索時の正解率上位者と下位者における探索棒を握る手の動きについて(振る、擦るに関してはXY方向、叩くに関してはZ方向)周波数特性及び探索時の正解と不正解の周波数特性、供試体固有の特性に依存した周波数特性についてまとめた。

4.1.1 探索棒を供試体に押しつけて振る

正解率上位者におけ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、1 Hz 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特質した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 $1.558 \text{ Hz} \pm 1.454$ からによるバラツキが傾向として見られた。

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特質した周波数特性は見られなかった。

4.1.2 探索棒で供試体を擦る

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 $1.423 \text{ Hz} \pm 0.715$ によるバラツキが見られた。

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 1 Hz 周辺での探索特性が見られた。

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特質した周波数特性は見られなかった。

4.1.3 探索棒で供試体を叩く

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、正解率上位者の周波数特性としてピーク値が、2つ若しくは3つに分布する傾向が見られた。正解率下位者の周波数特性は、 $1 \text{ Hz} \sim 4 \text{ Hz}$ の範囲に分布している傾向が見られた。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特質した周波数特性は見られなかった。

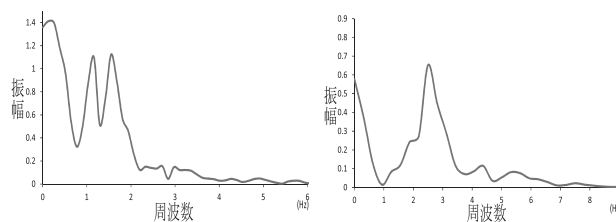
4.1.4 解析のまとめ

探索棒を供試体に押しつけて振る探索と探索棒で供試体を擦るといった探索方法は、探索時の時系列的な動作変位量に基づくフーリエ解析による周波数特性を見る限りでは、正解率上位者と下位者には、特徴的な差異を見ることができなかった。このことは、図-9、10の代表例に見られるような一部類似するような特性からもうかがうことができる。

探索棒で供試体を叩くに関しては、図-11の代表例に見られるように正解率上位者には、固有の特性として2つ若しくは3つの周波数ピーク値が傾向として確認できた。しかし、正解率上位者と下位者との特徴的な差異を見ることはできなかった。

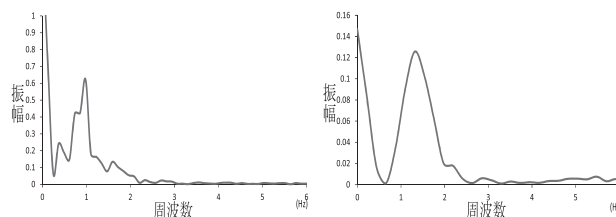
4.2 t検定に基づく正解率上位下位者の差異

各探索方法における時系列変位(図-6～8)を動作解析による動作軌跡を見る限り、正解率上位者に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



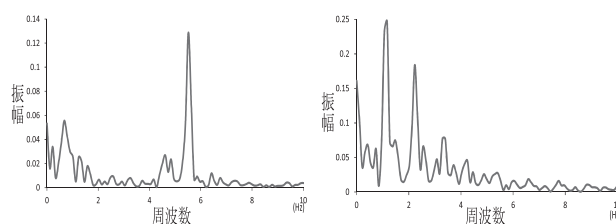
(i) 正解率上位者 (ii) 正解率下位者

図-9 フーリエ解析の代表例 1
(探索棒を供試体に押しつけて前後左右に探索)



(i) 正解率上位者 (ii) 正解率下位者

図-10 フーリエ解析の代表例 2
(探索棒で供試体を擦る)



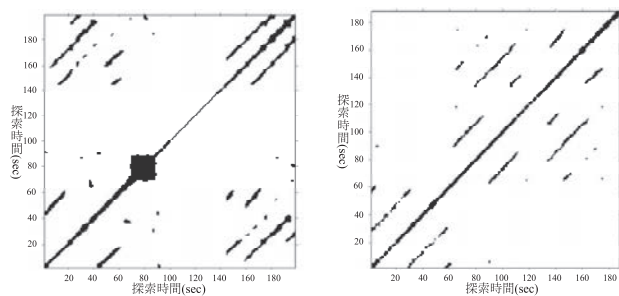
(i) 正解率上位者 (ii) 正解率下位者

図-11 フーリエ解析の代表例 3
(探索棒で供試体を叩く)

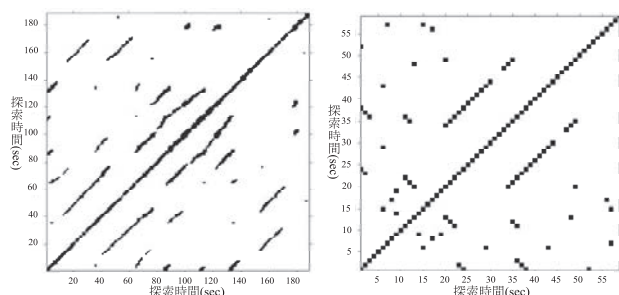
きが見られ、探索パターンに相違が見られた。

そこで、各探索方法における正解率上位者と下位者の視覚的な違いを定量的に評定した。まず、Cross Recurrence Toolbox³⁾により、RQA(Recurrence Quantification Analysis)を行った。RQAを進めるうえで各探索方法においてデータの解析プロット幅としてRR(recurrence rate)を2%～3%にほぼ収まるようにDimension, Lag, 閾値, Theiler window(RQAに必要となる埋め込み次元等のパラメータ)を設定し、解析結果として、各探索時における時系列動作変位量よりDET(Determinism)とLmax(Maximal diagonal line length)を整理した。

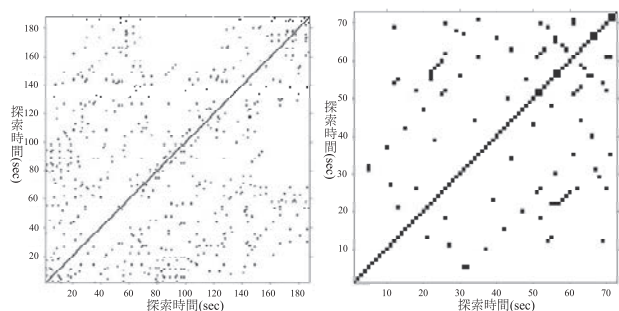
その結果、「探索棒を供試体に押しつけて振る」については、Dimension: 4, Lag: 6, 閾値: 0.65 SD, Theiler window: 3, 「探索棒で供試体を擦る」については、Dimension: 3, Lag: 5, 閾値: 0.5 SD, Theiler window: 3, 「探索棒で供試体を叩く」については、Dimension: 3, Lag: 5, 閾値: 0.5 SD, Theiler window: 3によりRQA



(i) 正解率上位者 (ii) 正解率下位者
図-12 RQA (探索棒を供試体に押しつけて前後左右に探索)



(i) 正解率上位者 (ii) 正解率下位者
図-13 RQA (探索棒で供試体を擦る)



(i) 正解率上位者 (ii) 正解率下位者
図-14 RQA (探索棒で供試体を叩く)

を行い、図-12～14に示す結果が得られた。

DETは、Recurrence plotsの点パターンにより系の振る舞いを定量化する手法の1つとして提案されているものである。このDETは、RQAによって視覚化されたRecurrence plotsの斜め線をなす点の割合である⁴⁾。時系列データが探索として意味ある行動パターンの特徴(決定論的カオスの力学的特徴)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おり、正解率上位者と下位者の違いを見るうえでの指標とした。

Lmaxは、RQAによって視覚化されたRecurrence plotsの斜め線の最大長(対角線を除く。)であり⁴⁾、このLmaxは、リアプノフ指数⁴⁾の逆数と考えられている。リアプノフ指数は、解析対象が「どの程度カオス的か」⁵⁾

ということを定量化する指標であり、リアプノフ指数の逆数であるLmaxが小さければ、系の軌道不安定性が高い傾向にあるものと判断した。

なお、t検定は、統計解析ソフトR及びjs-STAR⁶⁾によるウェルチの法によるt検定を行った。帰無仮説は正解率上位者と下位者には違いが無いものとし、対立仮説を正解率上位者と下位者に差があるとした。

4.2.1 「探索棒を供試体に押しつけて振る」に関するt検定結果

DETにおけるt検定の結果、正解率上位者と下位者の平均の差は有意ではなかった(t値=-1.8159, 自由度df=6.20, $p=0.1177>0.05$, effect size $d=-0.9706$, power=0.3370, 両側検定)。しかし、検定力は小さいため、帰無仮説の採用には慎重になる必要があると考えられた。一方、効果量dが十分に大きいことを考えると、正解率下位者は上位者に比べてその振る舞いはより決定論的であった可能性が認められた(図-15)。

Lmaxにおけるt検定の結果、正解率上位者と下位者の平均の差に傾向差が見られた(t値=-2.2125, 自由度df=9.73, $p=0.0606>0.05$, effect size $d=-1.134$, power=0.4806, 両側検定)。ただし検定力は小さかった。一方、効果量dに注目するとそれは十分に大きいものとなっており、これらを総合して、正解率下位者は上位者に比べてLmaxが大きく、系の軌道安定性が高い傾向があると判断した(図-16)。

Lmaxはリアプノフ指数の逆数と考えられており、正解率上位者は下位者平均に比べてLmaxが小さいことから、軌道不安定性が高い傾向にある可能性が示された。

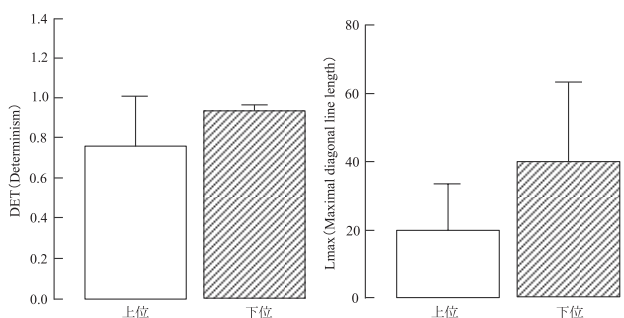


図-15 DET (振る)

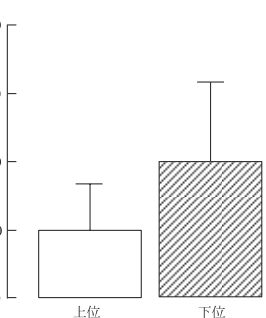


図-16 Lmax (振る)

4.2.2 「探索棒で供試体を擦る」に関するt検定結果

DETにおけるt検定の結果、正解率上位者と下位者の平均の差は有意だった(t値=2.3115, 自由度df=13.99, $p=0.0366<0.05$, effect size $d=1.1557$, power=0.5759, 両側検定)。検定力は十分でないものの、効果量dは十分に大きいことを総合して、正解率上位者と

下位者の DET における平均値に差があり、上位者は下位者と比べてより意味のある探索行為(決定論的な振る舞い)となっていると判定した(図-17)。

Lmax における t 検定の結果、上位者と下位者の平均の差は有意ではなかった(t 値 = -0.7366 , 自由度 $df = 9.98$, $p = 0.4783 > 0.05$, effect size $d = -0.3683$, power = 0.0982 , 両側検定)。検定力は小さいものの、効果量 d も小さいため、正解率上位者と下位者の Lmax における平均値には差が認められないと判定した(図-18)。

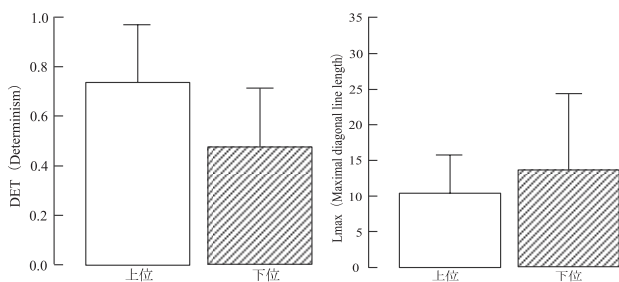


図-17 DET (擦る)

図-18 Lmax (擦る)

4.2.3 「探索棒で供試体を叩く」に関する t 検定結果

DET における t 検定の結果、正解率上位者と下位者の平均の差は有意ではなかった(t 値 = 1.1272 , 自由度 $df = 5.37$, $p = 0.3075 > 0.05$, effect size $d = 0.7129$, power = 0.1532 , 両側検定)。ただし、検出力は小さく、また効果量 d が中程度の大きさであることを考えると、正解率上位者と下位者の DET における平均値に統計的な差は認められないものの、一定の効果が存在する可能性については示唆された(図-19)。

Lmax における t 検定の結果、上位者と下位者の平均の差は有意ではなかった(t 値 = -0.208 , 自由度 $df = 6.39$, $p = 0.8417 > 0.05$, effect size $d = -0.1315$, power = 0.0375 , 両側検定)。検定力は小さいものの、効果量 d も小さいため、正解率上位者と下位者の Lmax における平均値に差はないと判定した(図-20)。

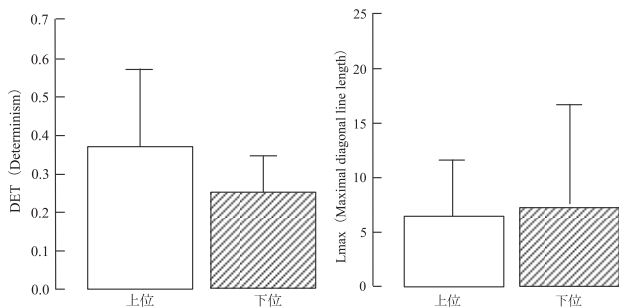


図-19 DET (叩く)

図-20 Lmax (叩く)

5. 考察

各探索方法によるかたさ判断因子の抽出及び動作解析結果から、探索動作傾向について考察する。また、建設機械を効率的・効果的に現場で活用するために必要となる操作系インターフェースへの触知覚情報の必要性について述べる。

5.1 各探索方法によるかたさ判断因子の抽出

本研究では、かたさ知覚が触覚的に有効に行われている可能性を3つの探索方法において実験的に検証し、偶然によるものでなく一定の正解が得られることを確認した。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が知覚されること、すなわち対象の内部特性が触覚的に認識されうることと示していると考えられる。

供試体の弁別については、探索棒で供試体を擦る方法での正解率が高い結果となっていたことから、表面特性すなわち対象表面の肌理が重要な情報因子となっていたと考えられる。また、個人差はあるが、探索棒で供試体を擦る方法によって得られる表面特性の把握に加えて何らかの圧力が供試体に与えられ、摩擦抵抗や反力といった情報因子によって優位な弁別が図られたものと考えられる。

また、探索棒を供試体に押しつけて前後左右に探索する方法や、探索棒で供試体を叩く方法も、材料の内部特性を把握する手法として一定程度有効な探索方法であると考えられる。

5.2 探索動作傾向

探索動作の時系列変位の代表例(図-6～8)を見ると、正解率上位者は探索時の動作が変化に富むものとなっている一方で、正解率下位者については、画一的な運動が繰り返される傾向が認められる。

正解率上位者の探索動作時系列変位に見られる複雑性は、正解率上位者がより多くの情報を得ようと、環境に対してアプローチしていることが反映しているものと考えられる。一方、正解率下位者に関しては、画一的な動作に終始していたため、環境に対して情報を得ようとするアプローチに至っていないものと考えられる。このことは、本実験での正解率上位者の多くは、ギブソン²⁾が述べている環境に存在する情報「不変項」に対して、変則的でアクティブな探索を行うことによって系として同調しようとしているものと考察する。

また、本実験における正解率上位者と下位者との間の探索動作の差異は、RQAの指標であるDETもしくは

Lmax の差異によって定量的に確認できることが明らかとなった。

DET については、正解率上位群は下位群に比較して、「探索棒を供試体に押しつけて振る」動作で低く、「探索棒で供試体を擦る」動作と「探索棒で供試体を叩く」動作で高くなる傾向があった。Lmax については、正解率上位群は下位群に比較して、「探索棒を供試体に押しつけて振る」動作で低くなる傾向があった。DET と Lmax は、どちらも異なる種類の系の安定性の指標であり、それらが数値的に高ければ、系は安定していると判断される。ただし、知覚判断においては、必ずしも「安定」していることがいつも知覚的な成績を向上させるとは限らない。単に身体運動として安定していても、外界の情報への感受性が低ければ知覚的な成績は低くなると考えられる一方、身体運動単体としては不安定であっても、環境をも系として含む「身体-環境系」として安定した状態を構築できれば、知覚的な成績は向上する可能性がある。また、知覚情報の発見という観点から見れば、知覚情報を発見できていない状態での系の安定は知覚を向上させ得ないが、系に一定の不安定性があれば、現時点では感受できていない知覚情報を探索し、それに遭遇する可能性を増やすという効果を持ちうる。DET や Lmax がどの種の安定性/不安定性の指標となっているのかについては、知覚学習の過程をも射程にのけた観察を通じて、今後も慎重に検討していくことが必要である。

5.3 操作系インターフェースにおける触知覚の必要性

建設機械の搭乗・遠隔操作に関係なく、オペレータに対して作業環境に関わる情報をより多く伝達することは、安全・迅速な作業を進めるうえで必要だと考えられる。

現在、2. で述べている災害時の復旧活動に利用されている無人化施工技術の作業効率が低いといった課題に対して、視覚情報の提供を中心とした研究開発が進められている。具体的には、映像技術や操作系インターフェース等^{7)~9)}の研究開発が、民間及び国立研究機関で進められている。

しかし、視覚情報ではカバーできない不可視部における建設作業を対象とした触知覚に関する研究は十分に行われていない状況にある。

そこで、本研究で対象としている触知覚に関する基礎研究は、作業効率を向上するうえで必要であり、オペレータのニーズのひとつでもある。特に無人化施工技術を利用した災害時の復旧活動で見られる掘削時における土中の岩塊や瓦礫の破碎撤去といった作業において、操作系インターフェースに触知覚情報を提供することは、安全・

迅速な作業を進めるうえで重要な要素だと考えられる。

6. まとめ

建設機械オペレータへのヒアリングから、建設機械による掘削や破碎等の作業を安全・迅速に進めるうえで、能動的な探索行為による触知覚の情報が重要かつ必要であることを確認することができた。

また、実験により、媒体を通じたかたさ知覚が偶然によるものでなく知覚されていること、および、触知覚のための探索動作が、正解率上位者と下位者とで異なっていることが確認できた。

本研究では、実験をとおし媒体を通じた人の触知覚が探索時の行為によって、かたさに関する正確な情報を得ることができる可能性を見ることができた。この点において、本研究の知見は、今後の操作系インターフェースの研究に一定の貢献が可能と考えられる。

7. 今後の課題

土木工事で見られる、掘削時における土中の岩塊や埋設物の有無、破碎等の作業に関しては、その表面の状態を擦って確認できない場合も多い。本実験によって擦る以外の探索方法でもかたさの知覚が一定の正解率で可能であることが確認できた意義は大きいものと考えられ、更なる研究の必要性があるものと考えられる。

特に、正解率上位者に特徴的にみられる能動的な探索時に発生する振動や応力の把握といった工学的なアプローチと、ギブソン²⁾が述べている環境に存在する不変項を明らかにするといった生態心理学的アプローチの更なる融合が期待される。更に生態心理学的な視点から建設機械の操作時における外部特性に類似した個別情報(反力や振動・加速度などの情報)の研究を進め、人と機械をつなぐマンマシンインターフェースの提案を進めたい。

参考文献

- 1) 茂木正晴, 藤野健一, 油田信一: 無人化施工におけるヒューマンインターフェースの作業効率評価, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.6, pp.426-429, 2015.
- 2) Gibson, J. J.: The senses considered as perceptual systems, Oxford University Press, 1966. (Gibson, J. J. (著) 佐々木正人, 古山宣洋, 三嶋博之 (監訳): 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, 2011.)
- 3) Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M., Kurths, J.: Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems, Physics Reports, 438 (5-6), 2007, pp.237-329.
- 4) 平田祥人: リカレンスプロット-時系列の視覚化を超えて-, 数理解析研究所講義録, 第1768巻, pp.150-162, 2011.
- 5) 池口徹, 小室元政, 山田泰司 (著), 合原一幸 (編): カオス時系列解析の基礎と応用, 産業図書, 2000.

- 6) 田中敏, 中野博幸 (著): R&STAR データ分析入門, 新曜社, 2013.
- 7) 吉瀬裕: 大型マニピュレータのヒューマンインターフェース, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.6, pp.396-399, 2015.
- 8) 山田宏尚: 建設機械の遠隔操作のためのヒューマンインターフェース, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.6, pp.400-403, 2015.
- 9) 平林丈嗣: 水中油圧ショベルのためのヒューマンインターフェース, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.6, pp.412-415, 2015.
- 10) 茂木正晴, 三嶋博之: 媒体を通じた触覚によるかたさ知覚について—間接的な人の触覚に関する実験報告—, 日本生態心理学会第5回大会, 2014.
- 11) 茂木正晴, 油田信一, 藤野健一: 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, Vol.66, No.8 pp.71-79, 2014.
- 12) Masaharu Moteki, Kenich Fujino, Takashi Ootuki, Takeshi Hashimoto.: RESEARCH ON VISUALPOINT OF OPERATOR IN REMOTE CONTROL OF CONSTRUCTION MACHINERY, The28th International Symposium on Automation and Robotics in Construcion, pp.532-537, 2011.
- 13) 茂木正晴, 藤野健一, 西山章彦: 建設機械遠隔操作の習熟に関する研究 —建設機械の搭乗及び遠隔操作時における作業効率・精度に関する考察—, 平成24年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.19-24, 2012.
- 14) Masaharu Moteki, Kenich Fujino, Akihiko Nishiyama.: RESEARCH ON OPERATORS' MASTERY OF UNMANNED CONSTRUCTION, The30th International Symposium on Automation and Robotics in Construcion, USB No.186, 2013.
- 15) 茂木正晴: 媒体を通じた触覚による人のかたさ知覚に関する研究, 早稲田大学大学院人間科学研究科修士論文, 早稲田大学, 2014.
- 16) 佐々木正人, 三嶋博之 (編訳): アフォーダンスの構想—知覚研究の生態心理学的デザイン—, 東京大学出版会, 2001.
- 17) 三嶋博之: エコロジカルマインド—知性と環境をつなぐ心理学—, NHK 文庫, 2000.
- 18) ダーヴィット・カット (著) 東山篤規, 岩切絹代 (訳): 触覚の世界—実験現象学の地平線—, 新曜社, 2003.
- 19) 岩村吉晃: タッチ, 医学書院, 2001.
- 20) 仲谷正史, 寛康明, 白戸寛和: 触感をつくる—〈テクタイル〉という考え方—, 岩波書店, 2011.
- 21) 木戸口孝人, 清水能理, 高橋潤: リカレンスプロットに基づくカオス時系列の統計的解析, 計測自動制御学会東北支部第250回研究集会, 資料番号250-4.

(2016. 1. 19 受付, 2016. 6. 30 採用決定)

Haptic perceptual information in the operation of unmanned construction machines

— Haptic perception of remote objects through a rigid probe —

Masaharu MOTEKI¹, Kenichi FUJINO² and Hiroyuki MISHIMA³

¹Waseda Graduate School of Human Sciences,

(Senior Researcher, Construction Technology Research Department, Public Works Research Institute)

²Team Leader, Construction Technology Research Department, Public Works Research Institute

³Associate Professor, Faculty of Human Sciences, Waseda University

Unmanned construction systems, which are remotely controlled by human operators, have been utilized for construction operations in serious disaster areas where humans cannot enter due to safety concerns. In the present unmanned construction systems, transmitted information for operators depends heavily on vision, whereas, in typical manned construction situations, operators also use other information like haptics. Consequently, teleoperations for dismantling or crushing, in which haptic information about the hardness of an object has an important role in controlling the action, are much more difficult than ordinary manned construction situations where operators can utilize haptic information about objects conveyed through operating levers. Therefore, there is a high demand for technological development of efficient haptic interfaces for unmanned construction systems. In this study, an interview survey of construction machine operators found that the operators seemed to regard haptic information about objects as being important and necessary for smooth operation. In addition, a perceptual experiment showed that (1) the hardness of six different test pieces was haptically distinguished by participants using a rigid probe, (2) their exploratory movements were qualitatively different between a high perceptual performance group and a low perceptual performance group. The role of haptic perceptual information in developing a teleoperation interface to promote work efficiency is discussed.