

技能伝承を目的とした生体センシング技術による技能分析の試み

前田建設工業(株) 正会員 ○今井 嵩弓
正会員 白根 勇二

1. はじめに

人口減少および高齢化は我が国の重要な社会課題であり、各産業で担い手不足が深刻化している。建設業においても、若年層の減少と高齢化の同時進行により技能労働者数は年々減少している。そのため、近年では人力で行っていた施工から機械へとシフトする自動化技術の開発による生産性向上の取組みが進められている。一方で、長年の経験から技能を習得できる工種には自動化が困難な場合もあり、効率的な育成が求められる。

著者らは、技能の伝承・維持への打ち手の一つとして、熟練した技能労働者（以降「熟練者」、対する労働者を「非熟練者」と称す）が有する高度な技能を生体センシング技術により分析し、技能を伝承する手法を提案している¹⁾。生体センシング技術を活用した技能伝承の流れを図-1に示す。提案手法は、生体データの分析により熟練者が有する暗黙知を分析し形式知化し、非熟練者へとフィードバックすることで技能の向上を目指すものである。

本稿は、人間の筋力と感覚器官を駆使した施工（以降、人力施工と称す）として左官工と、建設機械の操作による施工（以降、機械施工と称す）として油圧ショベルによる土工を対象に生体データの取得を試み、技能伝承における生体センシング技術の有用性について検討した結果を報告する。

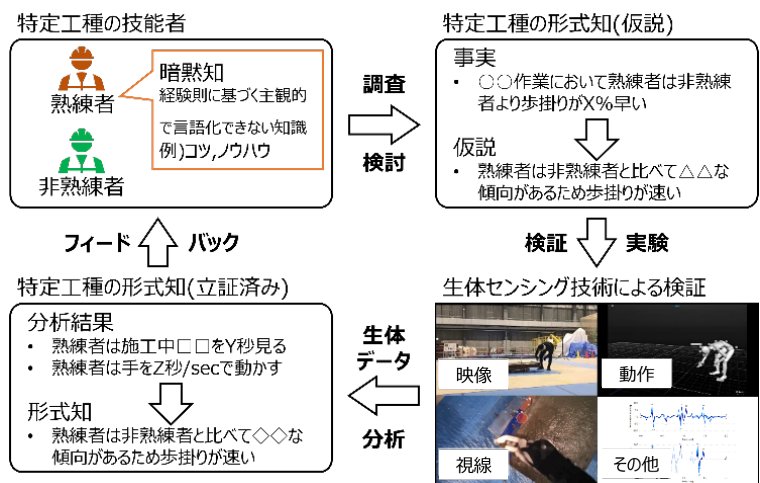


図-1 生体センシング技術を活用した技能伝承の流れ

2. 生体センシング技術の概要

(1) モーションキャプチャによる動作解析

モーションキャプチャとは、動作の基点である関節の動きを動的な三次元座標データをもとに解析する技術である。モーションキャプチャによる動作解析は幅広い分野で活用されており、スポーツ科学ではアスリートの動作解析²⁾などに用いられている。

モーションキャプチャの代表的な方式としては光学式や画像式が挙げられる。光学式は、赤外線 LED を搭載した赤外線カメラにより、入射光を光源方向に反射する特性（再帰性反射）を持つ球形マーカーの二次元座標を計測し、画角の異なる複数台のカメラによる計測結果から、三角測量により三次元座標へと変換する方式である。長所は計測精度が高いこと、短所は計測時の死角を無くすために計測対象を複数のカメラを囲むように配置する必要があるため、計測がカメラの設置範囲内に制限されることである。

画像式は光学式とは異なり、一般的なカメラで撮影した画像で動作解析可能な方式で、AIによる物体検出技術により身体の部位を認識し骨格の位置を推定する。画像式は光学式に比べ容易に計測できるが、計測精度は劣る。

(2) アイトラッキングによる視線計測

アイトラッキングとは、眼球を撮影した動画画像から瞳孔を識別し、眼球の方向を算出することにより、被験者の視線を追跡する技術である。卓上型のカメラによる視線計測も可能であるが、計測範囲がカメラの画角内に制限さ

キーワード 技能伝承、左官工、ICT 土工、モーションキャプチャ、アイトラッキング、表面筋電図

連絡先 〒302-0021 茨城県取手市寺田 5270 前田建設工業(株) I C I 総合センター TEL:0297-85-6171

れるため、眼鏡型のウェアラブルデバイスを用いた計測が一般的である。モーションキャプチャと同様、アイトラッキングも様々な分野で活用されており、例えば消費者の購買時の意思決定プロセスの把握等に用いられている。アイトラッキングによる視線計測データの分析においては、主に注視データが用いられ、視点がある範囲内に滞留した時間や回数、順番等の指標をもとに定量的な分析が行われる。また、注視点の累積マップ（ヒートマップ）などの画像解析が行われることもある³⁾。

(3) 表面筋電図による筋電位分析

表面筋電図は、骨格筋に複数の表面電極を貼り付けて筋繊維が収縮する際に生じる数 $\mu\text{V} \sim 10\text{mV}$ の活動電位を計測し、特定の動作でいつ・どの筋が活動したかを可視化したものである⁴⁾。筋力が強い場合は活動電位が大きく、弱い場合は小さくなる。ただし、筋繊維の量や長さには個人差があるため、異なる被験者の間では絶対値による比較ができない。

活動電位を計測する電極の種類には表面電極の他に針電極があるが、針電極は神経損傷や筋病変を診断するための局所的な筋活動を把握するために用いられるため、全身動作の解析に対しては表面電極が使用されることが多い。

3. 左官工の技能分析

(1) 左官工の技能分析における仮説

本章は、左官工を対象に実施した既往の生体データ計測実験の結果¹⁾を基に、人力施工の技能を伝承する際の生体センシング技術の有用性について考察する。

熟練者への事前ヒアリングの結果、非熟練者は塗付け時に肩から前腕までの腕を主に動かし、腰や膝といった下半身の動きが少ない、という意見が多くあった。そこで、「非熟練者は下半身を使わず腕の力で塗り付ける」という仮説を立て、生体センシング技術による検証を試みた。

検証では、光学式モーションキャプチャによる動作解析を実施するとともに、特定の動作においてどの筋が活動したかを捉えるために、表面筋電図による筋電位計測を実施した。また、前述の仮説とは異なる形式知を明らかにするためにアイトラッキングによる視線計測を実施した。

(2) 実験概要

生体データの取得対象はモルタル下塗り作業とし、**図-2**に示すようなA面とB面を対称構造としたモックアップ試験用の模擬構造体を製作した。熟練者と非熟練者がそれぞれA・B面を施工し、前述の生体センシング機器により各データを取得した。被験者は、左官工の従事歴が33年の熟練者と従事歴3年の非熟練者の各1名とした。

(3) 実験および分析の結果

熟練者と非熟練者のモーションキャプチャによる動作解析の結果を**図-3(a)**および**(b)**に示す。縦軸の変動係数は、関節を挟むように設置したマーカーの点間距離について一定時間の平均値を求め、それを標準偏差で割った値であり、関節の動きを表している。熟練者は、概ね全ての関節が動いているが、特に両膝や股関節といった下半身の変動が顕著であり、塗付けの際に屈伸する動作が確認された。

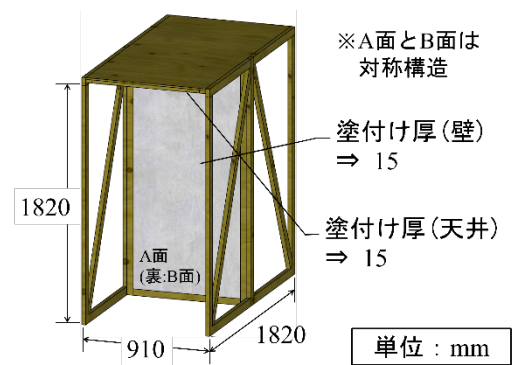


図-2 模擬構造体の寸法

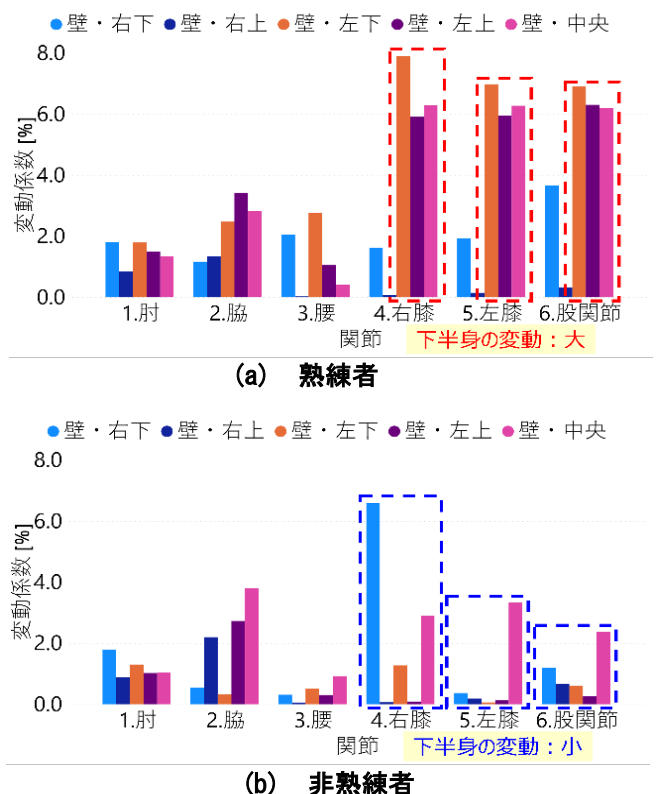
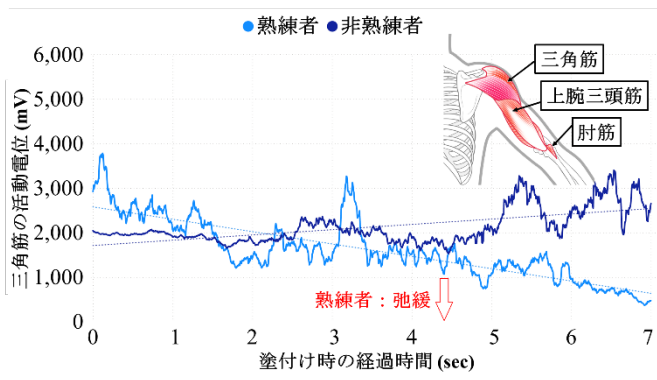
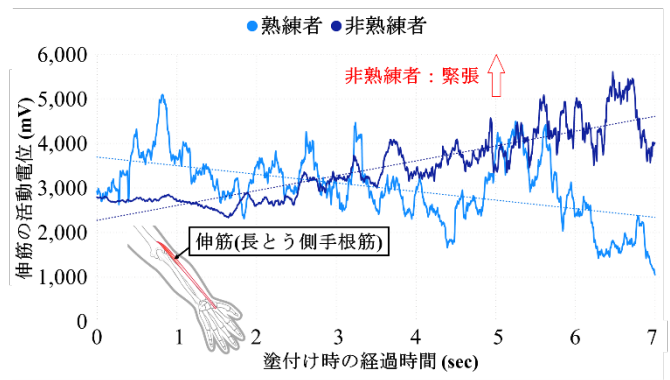


図-3 塗付け中の関節の変動係数



(a) 三角筋



(b) 伸筋（長とう側手根伸筋）

図-4 塗付け中の活動電位

一方、非熟練者は、下半身の関節の変動は小さく、屈伸する動作はあまり確認されなかった。

図-4(a)および(b)に塗付け中の活動電位を示す。熟練者は、塗り付ける動作の始まりから終わりにかけての三角筋の活動電位の差が大きく、徐々に弛緩していく傾向を示した。これは、腕と胴体の支点となる肩の筋に力を入れて塗り付けていたものと考えられる。一方、非熟練者は三角筋の電位差は小さく、伸筋（長とう側手根伸筋）が徐々に緊張し、電位差が大きくなる傾向を示した。これは主に前腕部の筋に力を入れて塗り付けていたことを示している。

これらの結果から、熟練者は屈伸運動をしながら肩に力を入れて全身を使用した塗付けを行っていることに對し、非熟練者は下半身をあまり動かさず前腕に力を入れて塗り付ける傾向を確認した。これは、「非熟練者は下半身を使わず腕の力で塗り付ける」という形式知が存在し、当初の仮説が正しかったことを示している。

図-5は、アイトラッキングから得られた塗付け中の注視点の分析結果である。角度は、AIによる物体検出技術により認識した鍬の中心を基準に注視点がどの範囲に位置するかを示しており、目盛は作業中にどの程度の時間を注視していたかを示している。同図から、両者は共通して鍬の右側を見ているが、熟練者は特に60°~90°間の30°の範囲に注視点が集中している。

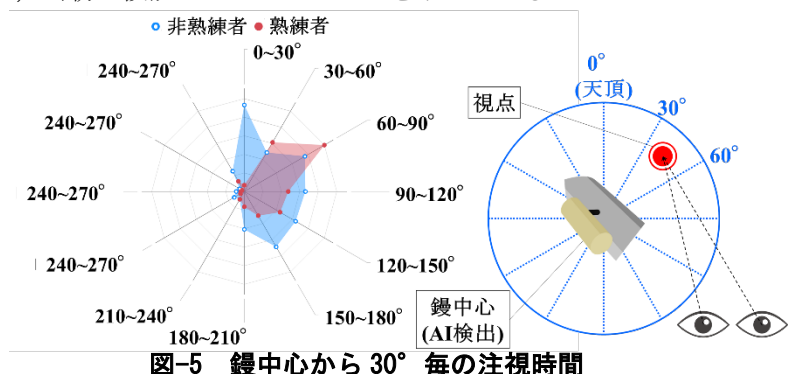


図-5 鍬中心から30° 毎の注視時間

ここで、塗付け中に鍬を動かさず先を注視すると

仮定すると、熟練者の塗り付ける方向は右斜め上方向にほぼ一定だが、非熟練者は鉛直上方向および右斜め下方向にも塗り付けていると推察される。鍬の操作方向にも形式知が存在するものと考えられる。

本検討で計測した各種生体データは、いずれも形式知を把握する上で有用であったことから、人力施工の技能伝承においてモーションキャプチャ、アイトラッキングおよび表面筋電図の活用が有効であると言える。

4. ICT 土工の技能分析

(1) ICT 土工の技能に関する仮説

本章は、ICT 土工を対象に機械土工の技能伝承における生体センシング技術の有用性について検討した結果を示す。

図-6は、熟練者および非熟練者がマシンガイダンス機能を搭載した油圧ショベルによって切土を掘削する際の、30秒当たりの掘削範囲（切土の幅）を



図-6 30秒当たりの掘削範囲の比較

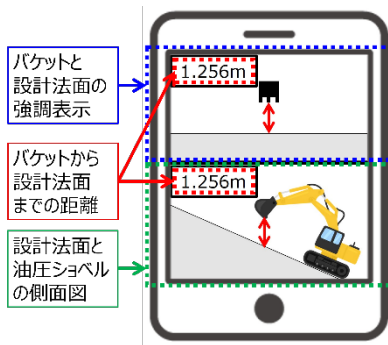
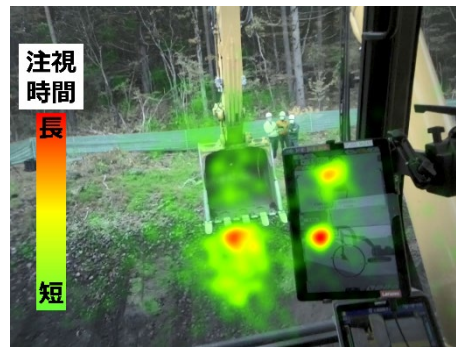
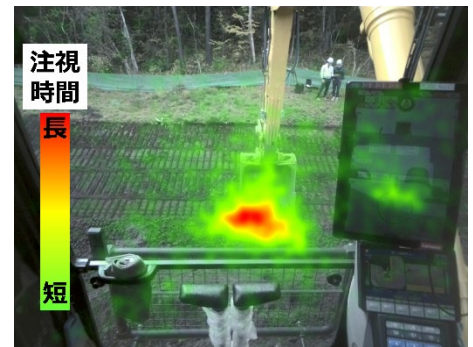


図-7 タブレットの表示設定



(a) 熟練者



(b) 非熟練者

図-8 注視点の累積マップ（ヒートマップ）

示したものであるが、非熟練者は30秒間で掘削した幅は約5mであったことに対し、熟練者は約10mと2倍程度の出来高であった。この結果を参考に「非熟練者はマシンガイダンス機能を有効に活用できていない」という仮説を立てた。

(2) 実験概要

マシンガイダンス機能を搭載した油圧ショベルによる切土掘削は、キャビンに設置されたタブレットに表示された出来形に関する情報を基に作業する。タブレットの使用頻度を評価するためには、注視データの分析が適していると考えられたため、本検討ではアイトラッキングによる視線計測を実施した。被験者は、熟練者および非熟練者1名ずつとし、1.4m³級油圧ショベルを使用した。図-7に油圧ショベルに設置したタブレットの表示設定を示す。画面の上半分にはバケットの先端と設計法面を強調表示した図を、下半分には設計法面と油圧ショベルの側面図を表示し、それぞれの左上に設計法面までの距離を表示させた。

(3) 実験および分析の結果

図-8(a)および(b)に、切土掘削における熟練者および非熟練者の注視点の累積マップを示す。まず、熟練者と非熟練者は両者ともバケット先の掘削箇所を注視していることがわかる。これは、掘削状況を確認していたものと考えられる。しかし、非熟練者は掘削箇所の注視時間が長い、タブレット上の注視時間は非常に短く、一方、熟練者は掘削箇所だけでなく、タブレット上に表示されたバケットから設計法面までの距離やバケットと設計法面の強調表示にも注視していることがわかる。マシンガイダンスを使用した施工では丁張を設置しないため、熟練者はタブレットから出来形に関する情報を得て、効率的に掘削作業を行っていたものと考えられる。非熟練者は操縦に慣れていないため、タブレット上に表示される施工データを活用する余裕がなく、結果的に効率の悪い施工となっていると思われる。

これらの結果から、機械土工の技能伝承に対してアイトラッキングによる視線計測が有用であることが明らかとなった。

5. まとめ

左官工のような人間の筋力と感覚器官を駆使した人力施工では、モーションキャプチャによる動作解析、アイトラッキングによる視線計測および表面筋電図による筋電位分析が、施工技能に関する形式知の把握に有効であった。また、ICT 土工のような建設機械を操作する機械施工では、アイトラッキングによる視線計測が形式知の把握に有効であった。

参考文献

- 1) 今井ほか: 生体センシング技術による左官技能の分析に関する一考察, 土木学会全国大会年次学術講演会, CS9-64, 2023
- 2) 十河ほか: 動作解析を用いた野球打撃動作における技術差の定量的比較, 電気学会論文誌 C, Vol.137, pp.60,2016
- 3) 山本淳子: アイトラッキングによる農産物に対する消費者行動の把握, 関東東海北陸農業経営研究, 第110号, pp.35, 2020
- 4) 松本ほか: 表面筋電図を用いたペダリング運動時における負担度評価, Yamaha Motor Technical Review, V46, pp.127, 2010