

(31) プラント施工現場での視線計測技術 による熟練者ノウハウ抽出に関する研究

屋代 裕一¹・王 ゴウ²・羽鳥 文雄³・矢吹 信喜⁴

¹学生会員 株式会社日立プラントコンストラクション 研究開発部

(〒170-8630 東京都豊島区東池袋三丁目1番3号 ワールドインポートマートビル9階)

E-mail: yuichi.yashiro.kp@hitachi.com

²非会員 株式会社日立プラントコンストラクション 研究開発部

(〒170-8630 東京都豊島区東池袋三丁目1番3号 ワールドインポートマートビル9階)

³正会員 株式会社日立プラントコンストラクション ICTM 開発部

(〒170-8630 東京都豊島区東池袋三丁目1番3号 ワールドインポートマートビル9階)

⁴フェロー会員 大阪大学教授 大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻

(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: yabuki@see.eng.osaka-u.ac.jp

日本の建設業では、少子高齢化や熟練技能者の減少が問題となっている。近い将来に熟練者が大量退職する前に、属人化しているノウハウ（暗黙知）を効果的に伝承する仕組み構築が急務である。本研究では、熟練者の身体的な情報に着目し、中でも熟練監督者が現場での確な決断を下す際にノウハウを働かせるプロセスの初動である視線情報の可視化をターゲットとした。プラントの施工で非常に重要な作業の一つである吊搬作業へ適用し、熟練者と非熟練者の視線情報を比較した結果、作業中の各対象物への注視回数や滞在時間の傾向の違いを把握することができた。さらに、熟練者は約90%の視線がノウハウを伴うものであり、さらに、非熟練者と比較して1.4倍のノウハウを働かせて作業を遂行していることが分かった。

Key Words: eye-tracking, plant construction, lifting work, expert know-how

1. はじめに

日本の建設業では、技能労働者は過去20年間で25%減少、高齢者層の増加（55歳以上が3割）と若年層の低下（29歳以下が1割）、さらに、将来的に2025年には37%減少する見込み（2014年比）という厳しい状況であり、製造業などの他の業界と比較しても人材供給の面で不足している状況である。さらに、団塊世代の退職で問題となった2007年問題に続いて、大量採用世代（1987年～1991年ころまでの入社世代）が2026年～2029年に大量退職する見込みである。

例えば、プラント施工の一つである原子力プラントの状況を見ると、2011年の東日本大震災が引き起こした福島第一原子力発電所の事故を受けて、国内の新規建設案件は停止状態となり、既存プラントは廃炉や新規規制基準適合性を確認中であり、定期検査は9年間未実施の状態

が続いている。従って、長期間にわたり原子力プラントの建設・定期検査に関わる熟練者のノウハウを伝承する機会を逸失している状況である。このような環境を考慮すると、数年以内に退職を迫られる大量の熟練者が社内に在職している間に、これまで培ってきたノウハウを若年層へ伝承するための枠組みが早急に必要となる。熟練者のノウハウは「暗黙知」と呼ばれ、属人的に熟練者の頭の中に存在するが、現場での教育はOJT（On-the-Job Training）による手法が主であり、熟練者から若手へ現場での実務を通して知識を共有することでノウハウを伝承していく。従って、暗黙知を各現場内の限られたメンバーで共有するのみで、全ての現場で体系化され効果的に伝承することが困難である。ノウハウを効果的に伝承するための代表的なモデルとして、野中らが提唱したSECIモデルがある（図-1）。個人に内面化（Internalization）されている暗黙知を、現場内で共同化



図-1 SECI モデル

(Socialization) し、それを表出化 (Externalization) させて「形式知」として体系的に整理し、複数の組織間でノウハウを共有して連結化 (Combination) させ、最終的に現場の非熟練者に体得させ、再度内面化するまでの一連の手法である。本モデルに従って暗黙知を形式知化する必要があるが、本研究では現場の「熟練監督者」の身体的な行動を伴うノウハウに着目した。監督者とは、現場での管理者であり、現場の状況に合わせて作業員へ適切に指示することで、安全に、高品質で、効率よく工事を遂行することが求められる。そこで監督者がノウハウを働かせるプロセスとしては、①現場で状況を読み（知覚）、②その過程で自らの過去の経験知や理論知に基づく知識を活用して考え（解釈）、③ある判断基準に基づいて解決手段を決断し（意思）、④結論を出して行動する（作業員への適切な指示）ことである。本研究では、そのプロセスの中でも、初動である「①現場で状況を読む」ための知覚の一つとして「何を見て（視線情報）」ノウハウを働かせたのかをターゲットとした。

対象とする作業は、プラント施工現場では重要で頻繁に実施する作業の一つである「吊搬作業」を選定し、熟練者と非熟練者の視線情報を計測・比較し、その情報からノウハウに関連する視線情報の抽出手法を検討した。

2. 既往の研究

Yousefi ら⁷⁾は、建設現場における視線計測に関して調査し、特に安全な作業を遂行する上で労働者のリスク認識と視覚情報の関係を測定するための有望な技術であるとしている。既往の研究では、視線計測デバイスを装着して建設現場の画像から危険箇所を認知する研究が多くなされている。Jeelani ら⁸⁾は、現場写真から危険箇所を認知する実験を行い、探索時間、注視回数、注視時間が危険認識に強い相関があることを示した。Pinheiro ら⁹⁾は、個人の建設に関する知識レベルにより注視すべき AOI (Area of Interest) と注視時間に有意な差が出ることを示した。Dzeng ら¹⁰⁾は、実務経験の有無が認知速度にのみ寄与することを示した。Hasanzadeh ら¹¹⁾は、実務経験、

負傷経験、安全訓練の有無が異なる作業員による影響を測定した結果、負傷経験の有無がリスク探索に有意な影響を及ぼすと示した。また、視線計測により得た指標が注意力欠如によるヒューマンエラーの予測指標となる数学的モデルを開発した⁶⁾。

一方で、画像ではなくウェアラブルデバイスを装着して実際の現場で計測する事例も報告されている。

Hasanzadeh ら⁷⁾は、建設現場内を歩行して計測し、状況認識の評価手法である SART (Situation Awareness Rating Technique) によるアンケートを行った結果、測定結果と相関があることを示した。また、歩行中のつまずき転倒の危険にさらされたときの視線分布を調査した結果、知識や経験が異なる者の間での注意力の違いが出ることを確認した⁸⁾。Jeelani ら⁹⁾は、歩行している間の注意分布を記録し、建設現場で見逃しやすいた危険要因と、認識される確率が高い危険要因を予測するのに役立つことを検証した。森田ら¹⁰⁾は、経験年数が異なる現場監督を対象に、現場の巡回点検時のデータを計測し、熟練者の着眼点を定量化できる可能性を見出した。

また、画像や現場だけでなく、仮想環境での視線計測の例も近年は報告されている。Ye ら¹¹⁾は VR 内で建設現場を再現して視線データを定量的に計測する研究を報告している。Li ら¹²⁾は、掘削機オペレータを対象に仮想空間で操作した際の視線を計測し、危険検出能力の低下と精神的疲労度に相関があることを示した。Shi ら¹³⁾は、仮想空間内で危険行動する際の動作と視線を計測し、作業指示の方法によって危険行動を誘発する可能性がある事例を報告している。このように、様々な環境で建設現場に関する視線計測による研究がなされているが、プラントの吊搬作業のような重量物の移動や据え付けに関する視線計測の研究は報告されていない。

3. 実験方法

(1) 実験装置

視線計測デバイスは、Tobii 社の Glass2 を採用した。角膜反射法と呼ばれる手法を使用しており、角膜上に光の反射点を生じさせ、その画像をカメラで撮影し、撮影された眼球の画像から角膜上の光の反射点と瞳孔を識別する。光の反射点やその他の幾何学的特徴を基に眼球の方向を計算し、最終的に、空間中にある目の位置（焦点位置）の 3 次元座標を算出することができる。

(2) 作業概要

天井クレーンを操作して移動させ、吊荷を玉掛け（フックにワイヤで吊荷を掛ける）し、地切り（吊荷を地面から切り離す）後に吊り上げて、障害物（高さ 2m）を



図-2 作業概要

回避しつつ移動させ、所定の位置に据え付けるという基本的な動作とした(図-2)。作業員2名が玉掛け等の作業を行いクレーンオペレータ1名が天井クレーンを操作する。監督者は、現場の状況を見て、様々な判断を判断し、作業員とオペレータの合計3名に適切な指示を出す。本研究では、この監督者の視線をターゲットとして、視線計測デバイスを装着して実験を行った。

(3) 分析方法

被験者(監督者)は、吊搬作業は座学のみで実務経験がない非熟練者と、実務経験豊富な熟練者を選定した。2名の視線計測を実施後、録画した注視点動画を元にFrame by Frame分析法を用いてインタビューを行い、特定箇所を注視しているframeで、①何を見ていたのか、②なぜ見ていたのか(根拠)、③意識/無意識のどちらか、④品質/安全を考慮したものか、といった意見を抽出した。インタビュー実施後、各frameの視線の分類を行った。分類種別は、作業工程、視線を向けた対象物、視線の意味を整理した。分類の内訳を以下に示す。

(a) 作業工程の分類

- ・工程A：作業準備やクレーンの移動
- ・工程B：玉掛け
- ・工程C：地切り
- ・工程D：吊上げて移動し所定場所に据付け

(b) 視線を向けた対象物の分類

- ・対象1：エリア(干渉物、危険物、据付け位置)
- ・対象2：作業員(作業員の手元・足元・指先)
- ・対象3：クレーン(本体、フック、表示板)
- ・対象4：吊具関係(吊具、ワイヤ、枕木)
- ・対象5：吊荷(吊荷全体、吊荷の一部)

(c) 視線の意味の分類

- ・視線I：目的意識や特別な意味がない視線
- ・視線II：通常の作業手順の再確認の視線
- ・視線III：作業遂行上重要な視線(位置合わせ等)
- ・視線IV：異常の有無に関連(安全・品質に関連)

非熟練者の分析マップ

IV	0%	13%	0%	30%	17%
III	0%	0%	5%	13%	7%
II	0%	3%	0%	0%	0%
I	0%	2%	2%	5%	3%
	エリア	作業員	クレーン	吊具関係	吊荷

総注視数:60回

熟練者の分析マップ

IV	0%	0%	7%	20%	13%
III	0%	0%	27%	0%	33%
II	0%	0%	0%	0%	0%
I	0%	0%	0%	0%	0%
	エリア	作業員	クレーン	吊具関係	吊荷

総注視数:15回

図-3 作業工程C「地切り」の分析マップ

視線の意味に関して、特に、III、IVは被験者が保有しているノウハウ(経験・理論)に起因した視線である。これらの分類した結果を、最終的に作業工程毎に分析マップとして集計した。また、インタビューとは別に、動画のみから各対象を見ている時間(注視以外も含む)を算出し、時系列変化と視線の滞在時間を可視化した。

4. 実験結果と考察

図-3に一例として、作業工程C「地切り」の分析マップを示す。横軸は視線を向けた対象物、縦軸の数字(I~IV)は視線の意味を示す。また、被験者によって注視する総数が異なるため、各領域で集計した注視数を総注視数で除算して比率で算出した。熟練者は、クレーンや吊荷に対して作業遂行上重要な視線(視線の意味:III)が多かった。一方、非熟練者は吊具に対して異常の有無に関連する視線(視線の意味:IV)が多かった。更に、総注視数にも違いがあり熟練者は非熟練者よりも総注視数が少なかった。地切りでは、吊荷が地面から離れた瞬間に荷ぶれしないために、クレーンフックと吊荷の重心位置を合わせることが非常に重要なノウハウである。熟練者は両者の位置関係を重点的に見ているが、非熟練者は目の前の吊具関係に注視していた。その結果、実際の実験では、非熟練者の合図で地切りした後に荷ぶれが発生したことが観察された。また、熟練者の総注視数が少ないのは、要所だけを重点的に注視しているのに対して、非熟練者は様々な箇所を目的意識無く見ているためであると考えられる。この分析マップをすべての工程で行った結果、各工程で熟練者と非熟練者の注視の傾向に違いが出ることを定量的に可視化することができた。さらに、全ての工程でノウハウに起因した視線(視線の意味:III、IV)の割合を集計した結果、非熟練者は64.7%に対して熟練者は89.7%であった。熟練者は約9割の視線がノウハウを伴う意味のあるものであり、非熟練者と比較して約1.4倍のノウハウを活用して作業を遂行していることが分かった。

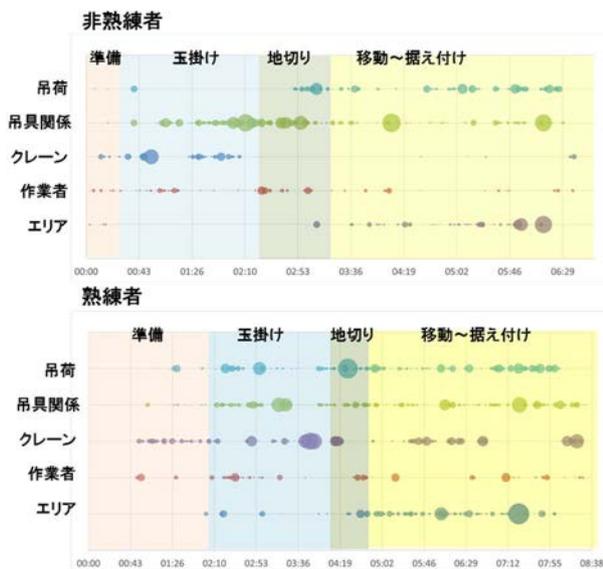


図-4 視線の時系列変化と滞在時間

次に、図-4に各対象への視線の時系列変化と滞在時間を分析した結果を示す。横軸は時間（各作業行程で4分割）、縦軸は視線の対象とし、円の大きさは滞在時間の長さを示す。全体的な傾向として、すべての工程において、熟練者は各対象を満遍なく見ているのに対して、非熟練者は見ている対象に偏りがあることが分かった。熟練者は様々なノウハウを働かせて多方面に注意を払って作業している様子が伺える。一方、非熟練者は、目の前の事象だけに焦点を当ててしまう傾向があるため、視線を向ける方向が狭くなっていると考えられる。さらに具体例として、熟練者は準備工程でクレーンの位置合わせに時間をかけて調整していたり（非熟練者はクレーンを殆ど見ていない）、前述したように地切りの工程（地切り直前も含む）近辺でもクレーンと吊荷を重点的に往復して見ながら芯合わせを行っている様子が観察できた。移動～据え付けの工程においても、熟練者は作業員やエリアへの干渉を気にしながら、各対象を交互に観察して注意を払って作業を遂行している様子が伺えた。

5. 結論

プラントの吊搬作業を対象に、熟練者と非熟練者の視線計測とインタビューを実施した結果、熟練者のノウハウを伴う視線情報の抽出に有効であることが分かった。視線の対象と意味を分析し、時系列で滞在時間を可視化することで、熟練者と非熟練者の作業中の視線の傾向を定量的に比較することができた。今後の課題としては、実務に近いより複雑な作業へ水平展開し、熟練者の詳細なノウハウを抽出していきたい。さらに、計測結果自体を教育資料として活用することで、ノウハウの伝承を効

果的に行うことができる仕組み構築を目指す。

参考文献

- 1) Yousefi, M. V., Karan, E. P., Mohammadpour, A. and Asadi, S.: Implementing Eye Tracking Technology in the Construction Process, *51st ASC Annual International Conference*, 2015.
- 2) Jeelani, I., Han, K., and Albert, A.: Automating Analysis of Construction Workers' Viewing Patterns for Personalized Safety Training and Management, *International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2018.
- 3) Pinheiro, R. B. O., Pradhananga, N., Jianuc, R., and Orabi, W.: Eye-Tracking Technology for Construction Safety: A Feasibility Study, *International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2016.
- 4) Dzung, R., Lin, C., and Fang, Y.: Using eye-tracker to compare search patterns between experienced and novice workers for site hazard identification, *Safety Science*, Vol.82, pp.56-67, 2016.
- 5) Hasanzadeh, S., Esmaceli, B., and Dodd, M. D.: Measuring the Impacts of Safety Knowledge on Construction Workers' Attentional Allocation and Hazard Detection Using Remote Eye-Tracking Technology, *Journal of Management in Engineering*, Vol.33, Issue 5, 2017.
- 6) Hasanzadeh, S., Esmaceli, B., and Dodd, M. D.: Impact of Construction Workers' Hazard Identification Skills on Their Visual Attention, *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.143, Issue 10, 2017.
- 7) Hasanzadeh, S., Esmaceli, B., and Dodd, M. D.: Measuring Construction Workers' Real-Time Situation Awareness Using Mobile Eye-Tracking, *Construction Research Congress*, 2016.
- 8) Hasanzadeh, S., Esmaceli, B., and Dodd, M. D.: Examining the Relationship between Construction Workers' Visual Attention and Situation Awareness under Fall and Tripping Hazard Conditions: Using Mobile Eye Tracking, *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.144, Issue 7, 2018.
- 9) Jeelani, I., Han, K., and Albert, A.: Automating and scaling personalized safety training using eye-tracking data, *Automation in Construction*, Vol.93, pp.63-77, 2018.
- 10) Morita, J., Fujimoto, N., and Yanagita, K.: Approach to the transfer of quality control skills at the construction site using eye-gazing data, *32nd Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, 2018.
- 11) Ye, X., and König, M.: Applying Eye Tracking in Virtual Construction Environments to Improve Cognitive Data Collection and Human-Computer Interaction of Site Hazard Identification, *International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2019.
- 12) Li, J., Li, H., Wang, H., Umer, W., Fu, H., and Xing, X.: Evaluating the impact of mental fatigue on construction equipment operators' ability to detect hazards using wearable eye-tracking technology, *Automation in Construction*, Vol.105, 2019.
- 13) Shi, Y., Du, J., Ahn, C. R., and Ragan, E.: Impact assessment of reinforced learning methods on construction workers' fall risk behavior using virtual reality, *Automation in Construction*, Vol.104, pp.197-214, 2019.