

VR映像を用いた生体計測による 土木・建設現場の作業員が危険を感じた場面の検出可能性の検証

Varification of a Detectability of Dangerous Scenes
Felt by Civil Workers and Construction Site Workers
with Biological Measurement Using VR-Video

○学 杉本 瑞生 (東大) 濱崎 峻資 (東大)
谷島 諒丞 (東大) 山川 博司 (東大)
高草木 薫 (旭川医大) 正 永谷 圭司 (東大)
正 山下 淳 (東大) 正 浅間 一 (東大)
Mizuki SUGIMOTO, The University of Tokyo
Shunsuke HAMASAKI, The University of Tokyo
Ryosuke YAJIMA, The University of Tokyo
Hiroshi YAMAKAWA, The University of Tokyo
Kaoru TAKAKUSAKI, Asahikawa Medical University
Keiji NAGATANI, The University of Tokyo
Atsushi YAMASHITA, The University of Tokyo
Hajime ASAMA, The University of Tokyo

Civil engineering and construction industries have some fatal accidents, and there are more dangerous situations that do not reach the accidents. In the latter case, a worker sometimes generates an emotional reaction on-site. To detect such dangerous situations, in this research, a method to detect dangerous scenes automatically by measuring biological signals related to emotions of on-site workers is proposed. Firstly, some experiments using VR-video were performed to verify the possibility of detecting dangerous scenes. In the experiment, multiple biological signals related to emotions of the subject were measured while watching VR-video. Based on the experiment, significant biological signals for detecting dangerous scenes were identified.

Key Words: Safety, VR-Video, Biological Measurement, Construction

1 序論

厚生労働省の調査によると、日本では労働災害事故の発生件数が微増しており、特に全産業中、建設業の死亡労働災害事故は多い [1]。この原因として、少子高齢化による国内の人口減少に起因する労働者不足、現場作業員の高齢化が挙げられ、今まで以上に安全な作業環境を構築する必要性が高まっている。そのためには、現場に潜む危険を検出し、その原因を分析する必要がある。

現場に潜む危険の例として、作業員が危険を感じた場面である、いわゆる“ヒヤリ・ハット”が挙げられる。作業員が危険を感じた場面であるヒヤリ・ハットには、実際に危険な場面が多数存在していると考えられる。そのため、ヒヤリ・ハットを検出することは、現場に潜む危険を検出するのに有効な1つの手法であると考えられる。現在、建設業においては、現場作業員の報告により、ヒヤリ・ハットの事象の収集を行っている。しかし、現場作業員の報告では、作業員の記憶に依存しているため、作業員が忘れてしまったヒヤリ・ハットの検出が不可能である。作業員の報告に加えて、作業員が記憶していないヒヤリ・ハット、つまり、作業員が記憶をしていないが危険を感じ、情動反応が発生した場面も、現場における危険が含まれている可能性が高い。そこで、これらの危険事象を収集し、その原因分析をすることで、現場の安全対策を実施することが可能となると期待できる。そのため、本研究では、情動反応に関連する生体反応により、現場における作業員が危険を感じた場面を検出し、危険事象を収集することを目的とする。

本研究に関連する従来研究には、心拍数による建設現場でのヒヤリ・ハット検出手法がある [2]。この研究では、胸ベルト型スマートウォッチを用いて被験者の心拍数を計測し、心拍数変動を用いてヒヤリ・ハットを検出している。心拍数は、交感神経と副交感神経の活動により変動する [3]。これは、人の精神面と関連

性があり、緊張時に交感神経が優位となるため、心拍数が高くなる。つまり、危険を感じた時に心拍数が高くなる。しかし、一般的に心拍数は精神的緊張時だけでなく運動負荷時にも上昇することが知られている。建設現場では、作業員が重い資材を運んだり、運動負荷がかかる作業が多い。そのため、心拍数が増加した原因が、単純な作業のためなのか、作業員が危険を感じたためなのか、不明瞭になるという問題が発生すると考えられる。

以上の問題点を解決するため、本研究では、心拍数以外の情動反応に関連する生体反応により、現場における作業員が危険を感じた場面を検出することを目的とする。これを実現するため、本研究では、建設現場で起こる危険事象を想定したVR映像を被験者に視聴させ、被験者の情動反応を咬筋筋電や目の周りの筋電で測定し、これらの生理指標による作業員の危険の検出可能性について検証する。

2 提案手法

2.1 手法概要

本研究の最終目的は、作業員が作業中、作業員が身に着けたウェアラブルセンサを用いて生体反応を計測し、作業内容と関連付けを行うことで、現場において作業員が危険を感じた場面を検出する手法を提案することである。これを実現するためには、作業員が危険を感じた場面を検出するために必要な生理指標の選定を行う必要がある。人の情動と関連のある代表的な生体反応の指標には、心拍数、発汗、咬筋筋電、目の瞬き等が挙げられる。

心拍数は、交感神経と副交感神経、つまり自律神経活動により変動する [3]。人の精神面と関連性があり、緊張時に交感神経が優位となるため、心拍数が高くなる。つまり、作業員の身に危険が迫り緊張状態となると、心拍数が増加すると考えられる。

発汗には、温熱性発汗と精神性発汗があり、それぞれ体温上昇

時、精神的緊張時に発現する。精神的作業負荷を与えた場合の発汗量の変化については、小川らをはじめ様々な報告がなされており、いずれも精神的緊張時には、発汗量が増すことが知られている [4]。

咬筋筋電を含む表情筋は、人の情動と対応していることが知られている [5]。そこで、咬筋の活動計測を用いて作業者の危険に対する情動を推定できる可能性がある。

眼の瞬きには、瞬きの頻度と人の情動が対応していることが Haak らにより報告されている [6]。ここでは、精神的ストレスが増加すると眼の瞬きの頻度が高くなることが示されている。そこで、眼の瞬きの頻度を計数することで、作業員の危険に対する情動を推定できる可能性がある。

以上に示した通り、心拍数、発汗、咬筋筋電、眼の瞬き等は、作業員が危険を感じた場面を検出する生理指標になり得る。

一方、土木・建設現場の作業員の仕事は、肉体を酷使する作業が多い。一般的に心拍数や発汗量は精神的緊張時だけでなく運動時にも上昇することが知られている。そこで、本研究では、運動時でも上昇することがないと予想される咬筋筋電や眼の瞬きを生体反応の指標の候補とすることとした。また、従来研究に心拍数を用いて土木・建設現場の作業員が危険を感じた場面の検出手法があることから、比較のため心拍数も生体反応の指標に用いる [2]。本研究では、これらの生体反応の指標の候補を計測することで現場作業員の危険な場面の検出できるかどうかを、屋内 VR 実験を用いて検証する。

2.2 評価手法

心拍数による精神的緊張時の評価には、一般的に用いられる、低周波成分 (LF) と高周波成分 (HF) の比である LF/HF 比を用いて評価することとする。低周波成分は、交感神経、副交感神経が共に活性化しているときに、高周波成分は、副交感神経が活性化しているときに強く表れる。精神的緊張緊張時には、交感神経が活性化するため、低周波成分が強くなり、LF/HF 比は大きくなる。

咬筋筋電図は、RMS により整流化し、各映像毎の最大振幅を確認し、評価することとする。咬筋は、精神的緊張時に筋肉が収縮し、筋電図の振幅が大きくなるため、被験者が危険を感じた時には最大振幅が大きくなると考えられる。

眼の周辺の筋電図は、RMS により整流化し、各映像毎の平均振幅を確認し、評価することとする。眼の瞬きは、眼を瞬く時に眼の周辺の筋肉が収縮し、筋電図の振幅が大きくなる。眼の瞬きには、瞬きの頻度と人の情動が対応しており、精神的緊張時にその頻度が高くなるため、その間の平均振幅が大きくなると考えられる。

以上の手法により、心拍数、咬筋筋電図、眼の周りの筋電図を用いて、現場作業員の危険な場面の検出できるかどうかを評価する。



Fig.1: Example of VR image

3 屋内 VR 実験

3.1 実験概要

本研究では、VR 映像により土木・建設現場の疑似環境を被験者に視聴させ、その間の生理指標をウェアラブルセンサから取得する実験を行った。

建設業では、作業員と建設機械や自動車等の機械が接触する人身事故が非常に多い [7]。そこで、本研究では、作業員と機械が接触しそうな危険な場面を VR 映像として用意した。具体的には、以下に示す 5 つの映像を用意した。

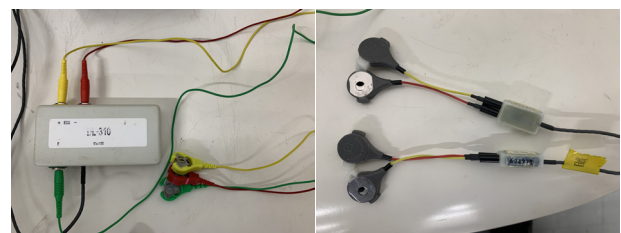
- 油圧ショベルが作業員の存在に気付かず後退し、作業員と接触しそうな危険な場面 (停止位置を変えて 2 種類)
- 油圧ショベルが作業員の存在に気付かず旋回し、バケットの先端が、作業員と接触しそうな危険な場面 (油圧ショベルとの距離を変えて 2 種類)
- 油圧ショベルが作業員から十分に離れた距離で待機している安全な場面 (1 種類)

本実験では、各被験者に対し、安全な場面の映像を 4 回、危険な場面の映像を 4 種類 1 回ずつ、安全な場面と危険な場面が交互に視聴可能となるように、映像を提示した。危険な場面の映像は、ランダムに並べ替えて被験者に視聴させた。また、各映像とも現場で指示書等の用紙を見ながら作業していることを想定し、被験者の手元付近に用紙が見えるような映像を用意した。用意した VR 映像の一例を図 1 に示す。これらの VR 映像は、土木研究所において、日立建機製 ZAXIS120 を操作し、Ricoh Theta V を用いて撮影を行った。

被験者は実験室の指定位置に着座し、生体計測のためのウェアラブルセンサを身に付け、VR 映像を視聴した。被験者には、VR 視聴中に、自分が建設現場にいる想定で、手元に映る用紙に注目しつつも前方の建設機械にも少し注意を向けるように予め指示をした。また、視聴後には、どの場面で危険を感じたのか被験者にヒヤリング調査を行った。なお、本実験は、東京大学倫理委員会の承認の基、実施された。

3.2 使用機器

本実験で使用したウェアラブルセンサを図 2 に示す。心拍数の計測には図 2a に示す S&M の DL-310 を、筋電の計測には図 2b に示す S&M の DL-140 を使用した。S&M の DL-310 は、センサにより検出された心電信号の R 波をフィルタアンプで増幅し、このパルスを出力する。なお、S&M の DL-140 は、2 か所の筋電を計測することができるため、今回は、顔の右半分の側頭部と眉の上に電極を貼付することで、咬筋と眼の瞬きを計測することとした。これらのセンサから取得された生体信号は、図 2c に示す S&M のデータロガー (DL-3100) に記録される。この S&M の DL-3100 は、サンプリング周波数 1000Hz、A/D 変換の分解能は 16bit であり、本体搭載のメモリに計測データを保存するこ



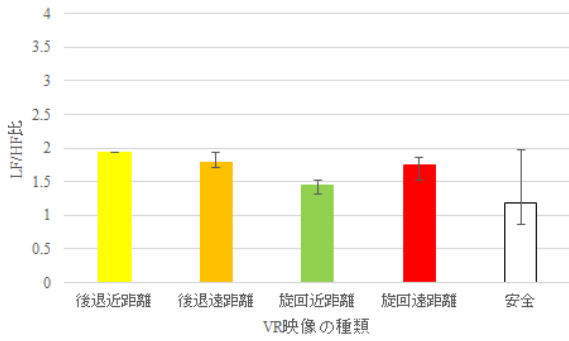
(a) S&ME DL-310

(b) S&ME DL-140

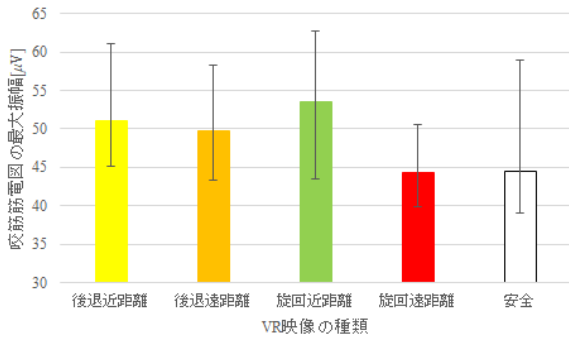


(c) S&ME DL-3100

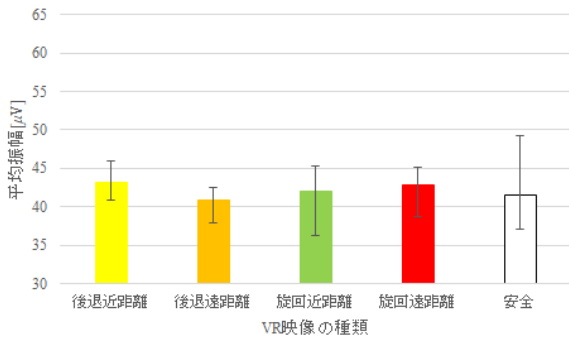
Fig.2: Secsors used in the experience



(a) LF/HF



(b) Maximum amplitude of masseter EMG



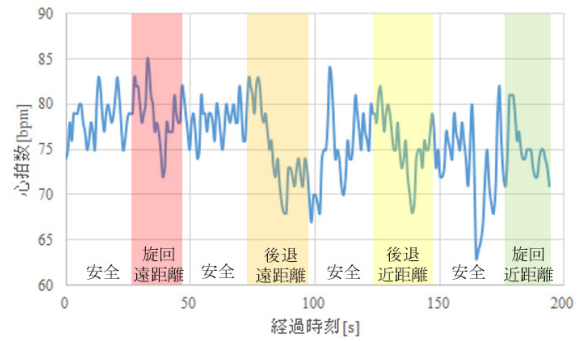
(c) Average amplitude of EMG around eye
Fig.3: Results of the experience

とが可能である。これらのウェアラブルセンサを被験者が身につけることで、生体反応を計測した。

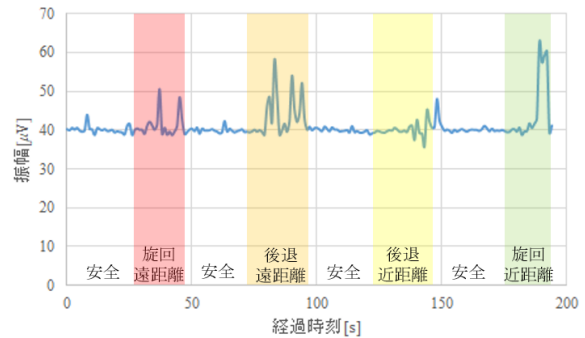
また、VR映像の提示には、Vive Cosmosを使用した。このヘッドマウントディスプレイには、ヘッドフォンも装備されており、被験者は映像とともに、撮影時に収録された音も聴けるようになっている。

3.3 実験結果

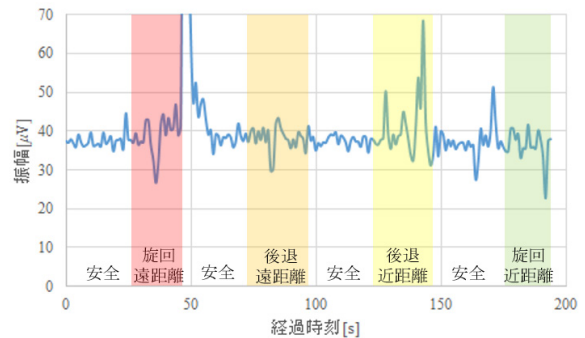
20代男性3名を被験者とし、実験を行った。3名の被験者の各映像におけるLF/HF比、咬筋筋電図の最大振幅、眼の周辺の筋電図の平均振幅を図3に示す。なお、心拍や筋電を落ち着かせるため、危険な場面の映像の視聴後の5秒間の安全映像の生体信号データは、除外した。図3aは、3名の被験者の各映像におけるLF/HF比の平均を示しており、横軸はVR映像の種類、縦軸はLF/HF比を表している。VR映像の種類は、後退近距離は、油圧ショベルが作業員に接触する直前まで後退する映像、後退遠距離は、後退近距離よりも1mほど遠くで油圧ショベルが停止する映像、旋回近距離は、油圧ショベルが作業員に接触する直前まで旋回して迫る映像、旋回遠距離は、旋回近距離よりも1mほど遠くで油圧ショベルが旋回する映像、安全は油圧ショベルが作業員から十分に離れた距離で待機している安全な場面の映像を示す。一般的に、LF/HF比は4以上で交感神経が活性化している



(a) Heart rate



(b) Amplitude of masseter EMG



(c) Amplitude of EMG around eye

Fig.4: The Example of results of the experience

目安であり、精神的緊張状態であるとされている。本実験では、どのVR映像においても被験者のLF/HF比は2を下回っており、心拍数変動解析では被験者が精神的緊張状態の場面、つまり、危険を感じた場面を検出できなかった。

図3bは、3名の被験者の各映像における咬筋筋電図の最大振幅の平均を示しており、横軸はVR映像の種類、縦軸は咬筋筋電図の最大振幅を表している。一般的に、咬筋筋電は、筋電位50 μV を基準に情動変化が識別される。旋回遠距離以外の危険な場面の映像である、後退近距離、後退遠距離、旋回近距離では、筋電位50 μV 以上かそれに近い値となり、安全な場面の映像よりも咬筋筋電図の最大振幅が大きくなった。これにより、咬筋筋電図から危険な場面を検出できる可能性が示された。

図3cは、3名の被験者の各映像における眼の周辺の筋電図の平均振幅の平均を示しており、横軸はVR映像の種類、縦軸は眼の周辺の筋電図の平均振幅を表している。どのVR映像においても、眼の周辺の筋電図の平均振幅は同程度となり、この結果からは危険な場面を検出できるとは言えない。

また、例として1名の被験者（以降、被験者Aと呼ぶ）の実験中の心拍数変動、咬筋筋電図の振幅の変動、眼の周辺の筋電図の振幅の変動の様子を、図4に示す。被験者Aには、安全、旋回遠距離、安全、後退遠距離、安全、後退近距離、安全、旋回近

距離の順に VR 映像を提示した。安全映像は、0 - 28 s, 45 - 73 s, 97 - 124 s, 147 - 175 s, 巡回遠距離は、29 - 44 s, 後退遠距離は、74 - 96 s, 後退近距離は、125 - 146 s, 巡回近距離は、175 - 194 s に提示した。実験後のヒヤリング調査では、被験者 A は、危険な場面の映像として用意した巡回遠距離、巡回近距離、後退遠距離、後退近距離の 4 種類全ての VR 映像で危険を感じたと回答し、安全な場面の VR 映像では危険を感じなかったと回答した。

図 4a は、被験者 A の実験時間における心拍数変動を示しており、横軸は実験の経過時刻、縦軸は心拍数を表している。一般的に運動負荷も精神的負荷もない平常時の心拍数は 60 - 90 bpm の間であると言われている。被験者 A の心拍数変動は実験時間中 60 - 90 bpm を推移しており、大きな変動は見られなかった。このことから、心拍数変動から、作業員が危険を感じた場面を検出できる可能性は低いと考えられる。

図 4b は、被験者 A の実験時間における咬筋筋電図の振幅の変動を示しており、横軸は実験の経過時刻、縦軸は咬筋筋電図の振幅を表している。この図から、被験者 A が危険を感じた巡回遠距離、巡回近距離、後退遠距離、後退近距離の各映像を視聴中に咬筋筋電図の振幅が変動し、振幅が大きくなり、咬筋に力がかかり収縮しているのがわかる。このことから、咬筋筋電図から、作業員が危険を感じた場面を検出する可能性は高いと考えられる。

図 4c は、被験者 A の実験時間における眼の周辺の筋電図の振幅の変動を示しており、横軸は実験の経過時刻、縦軸は眼の周辺の筋電図の振幅を表している。この図から、被験者 A が危険を感じた巡回近距離の映像の視聴直後と後退近距離の映像を視聴中に振幅が大きくなっているのがわかる。眼の周辺の筋電図の平均振幅の平均には表れないが、この時には、眼の周りの筋肉に力が加わり収縮し、大きく瞬きをしたり短時間で瞬きを多くしたり眼を見開いたりという動きをしたと思われる。本実験では、VR 映像を提示するためのヘッドマウントディスプレイに覆われているため、実際の眼の動きは把握できないが、眼の瞬きから作業員が危険を感じた場面を検出する手法も期待できる。そこで、今後は、ヘッドマウントディスプレイ内の眼元の撮影等を実施することで、具体的な眼の動きを把握し、検証することを検討している。

4 結論

本研究では、作業員の情動反応に関連する生理指標を選定し、選定した生理指標の検知による、作業員が危険を感じた場面を検出可能性の検証を行った。生理指標には、情動反応と関連があり、運動時でも影響が少ないと考えられる咬筋筋電や眼の瞬きを選定し、VR 映像により土木・建設現場の疑似環境を被験者に体験させて、生理指標の変動を確認する屋内実験を行った。なお、従来研究との比較のため、心拍数計測を同時に行い、実験後には、被験者にどの場面で危険を感じたのかのヒヤリング調査を行った。その結果、実験時間中、大きな心拍数の上昇が見られず、被験者が危険を感じた場面を検出できなかった。一方、咬筋筋電が上昇した場面と被験者が危険を感じた場面が一致し、咬筋筋電から作業員が危険を感じた場面を検出できる可能性が示された。眼の瞬きについては、各映像視聴中に眼の周りの筋電図の平均振幅に差は見られなかったが、一例での実験時間中の眼の周りの筋電図の振幅の変動を見ると、危険な場面の映像視聴中やその直後に振幅が大きくなっているのが確認できた。眼の周りの筋電図の振幅が大きくなっているときには、眼の周りの筋肉に力が加わり収縮し、大きく瞬きをしたり短時間で瞬きを多くしたり眼を見開いたりという動きをしたと思われる。本実験では、VR 映像を提示するためのヘッドマウントディスプレイ内の眼元の撮影をしていないので、具体的な眼の動きは把握できなかったため、今後、ヘッドマウントディスプレイ内の眼元の撮影等を実施することで、具体的な眼の動きを把握し、眼の瞬きから作業員が危険を感じた場面を検出できる可能性の検証を行う。また、今後は、作業員が危険を感じた場面を検出可能と特定した後、実際の現場における作業員が危険を感じた場面を検出する手法の構築を行うことを計画している。

参考文献

[1] 厚生労働省: “平成 29 年度 労災発生状況”, <https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000209118.html> (Access: 7th July 2019) .

- [2] 今井 龍一, 神谷 大介, 井上 晴可, 田中 典成, 櫻井 淳, 藤井 琢哉, 本間 伸哉, 伊藤 誠: “建設現場への適用に向けたスマートウォッチによるヒヤリハット及び疲労度把握の可能性実験”, 土木学会論文集 F3, Vol. 74, No. 2, pp.167-177, 2018.
- [3] 矢島潤平, 尾形尚子, 河野愛生: “メンタルストレステストによる心臓血管系反応と主観的ストレス反応との関連性”, 別府大学大学院紀要, Vol. 12, pp. 31-39, 2010.
- [4] 小川徳雄: “Thermal Influence on Palmar Sweating and Mental Influence on Generalized Sweating in Man”, The Japanese Journal of Physiology, Vol. 25, pp. 525-536, 1975.
- [5] 菅原徹: “顔面筋の筋電図による情動の計測”, 電気情報通信学会技術報告, Vol. 102, No. 341, pp. 41-44, 2002.
- [6] Marcel Haak, Sophie Bos, S. Panic, and Léon J. Rothkrantz, “Detecting Stress Using Eye Blinks and Brain Activity from EEG Signals”, Proceeding of the 1st Driver Car Interaction and Interface (DCII 2008), pp. 35-60, 2009.
- [7] 建設業労働災害防止協会: “平成 30 年 建設業における死亡災害の工事の種類・災害の種類別発生状況”, https://www.kensaibou.or.jp/safe_tech/statistics/construction/h30.html (Access: 19th February 2020) .