

39. 無人化施工における生体情報を活用した 分析評価システム構築による作業定量化

立命館大学 ○児玉 耕太, 橋口 伸樹, 小林 泰三, 林 永周,
曹 劍飛
株式会社熊谷組 黒石 真一, 畑本 浩伸, 飛鳥馬 翼, 竹下 嘉人,
宮崎 康弘, 北原 成郎
東京工業大学 仙石 慎太郎
東京工業高等専門学校 松林 勝志

1 はじめに

大規模地震や風水害、火山災害といった自然災害が多い日本において、土石流などによる二次災害の危険が想定される建設土木工事では、安全な場所から建設機械を遠隔操作によって操作する工事施工が着目されている¹⁾。遠隔操作は実際の機械操作と比較して、建設機械および作業環境の状態を把握しにくいいため、慎重で丁寧な機械操作が必要であり、操作者にとっては心理的負荷が大きい傾向にある。この施工において、操作者はモニタ映像と建設機械の振動を通じて、建設機械の実際の状況（傾きや揺れ）を認識する。操作の精神的負荷を高めることなく確実に効率的な操作することが重要な課題となる。典型的な建設工事では、労働者の身体的な危険性を回避する優先度が高いため、心理的な負荷が注目された報告は少ない²⁾。よって、本研究では建設機械の操作技能者の精神負荷およびストレスに着目して、効率的で適切な操作を検証する。

あらゆる仕事における身体的および心理的負荷によるストレスは、満足感や幸福感を低下させて仕事の効率を低下させる可能性がある。ストレスの分析において、心臓の心拍間隔の変動を観測は、ストレスに反応する心臓血管系の自律神経調節の定量的な尺度となる³⁾。精神作業の負荷において、作業者は常に多くの注意を払う必要があり、もし精神作業の負荷リソースのバランスが崩れると、安全上の危険が生じる可能性がある。多くの職務上のタスクにおいて、心理的な負荷の評価は非常に重要となっている⁴⁾。そのため、精神作業負荷に対する心拍変動（HRV）およびMSEとの関係については、多くの文献で研究されている⁴⁾⁵⁾。

最近のウェアラブル技術の進歩は、対象者の生体情報や身体状況を簡単にモニタリングできる機会を提供する。ウェアラブルデバイスを使用して、心拍数（HR）の観測を通じて自律神経系の活動を監視することは、データへのアクセスが容

易で経済的である⁶⁾。日々の心拍数の変化に関する評価は、労働力の負荷⁷⁾、精神状態⁸⁾、身体状況⁹⁾に関する心臓の健康状態を理解するのに役立つ情報を提供する。従来の研究において5分間のHRV測定により、精度の良い解析が行えることが報告されている¹⁰⁾。

2 本研究の特徴

労働者の安全と健康を犠牲にすることなく期待される生産性を維持するためには、建設作業員の物理的な身体負荷を可視化し、許容限界内で管理することが重要である。一方で、バイオセンサシステム（例えば、心拍センサ）を装備したウェアラブル健康機器の近年の進歩により、現場労働者の様々な負荷を継続的に測定するのに十分な機能を有している。

開発したIoTシステムでは、ウェアラブルデバイス（下着型のセンサ搭載ウェア：以下、スマートウェア）を用いて、生体情報をモニタリングし、労働者の仕事を妨げることなく継続的に心拍変動から物理的な身体負荷を測定する。労働者の安全と健康を把握し、期待される生産性を管理が可能である。被験者の身体活動量、労働時間や休憩時間といった行動パターン、および心拍数の変動などの生体情報を記録し、被験者である作業員ごとに分析を行なうことによって、建設現場における作業にどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることができる。

3 研究方法

実験の全体概要を図-1に示す。

3.1 研究目的

この研究の主な目的は次のとおりである。

- ・操作におけるストレスと身体振動がHRに及ぼす影響を調査すること。
- ・心拍情報に現れる特徴から、搭乗操作と遠隔操作における労働状態を明らかにし、機械操作における作業効率の向上を図ること。

この分析の結果は、広く採用されているスマートウェアと心拍センサ、3軸加速度センサを使用して収集されるバイタルサインに従って、操作ストレスと運転時間の新しい計算モデルを導くことができる。

3.2 被験者

2020年7月29日、7月30日、2021年2月18日の日程で、建設会社の熊谷組（株式会社熊谷組、東京都千代田区）の筑波技術研究所においてデータを収集しました。建設会社より、遠隔操作の訓練を積んだ建設技能者9名を選出した。（年齢：35.6 [SD 12.8] 歳；身長：168.7 [SD 4.1] cm；体重：71.1 [SD 13.2] kg；BMI：24.9 [SD 4.4]）実験の被験者の選択基準は、18歳から50歳までの健康な成人として、現在の神経疾患、心血管疾患の参加者は除外基準とした。1周400mの工事現場に似せた試験コースにおいて、参加者はウェアラブルデバイスを装着しながら、建設機械であるCRAWLER CARRIER（IC120-2, KATO WORKS Co., Ltd.）を走行させた。すべての参加者は遠隔操作に慣れており、実験手順に精通していた。



図-1 実験の全体概要

3.3 実験プロトコル

データ収集の前に、我々の研究グループは、被験者の潜在的なリスクと不快感、およびデータ収集によるプライバシーの問題を調査した。センシング衣服は非侵襲的な装置であり、機械操作に支障がないことが確認された。ヘルシンキ宣言、ヒトゲノム、世界人権宣言に従い、被験者の心拍数、身体活動、プライバシー条件などのデータ収集プロトコルが、立命館大学研究倫理審査番号：BKC-2019-038のプロトコルが承認された。さらに、データ収集前に全ての被験者に配布されたインフォームド・コンセントの中で参加者の権利の説明が含まれ、参加者のデータの秘匿性が確保された。プライバシーに関する懸念については、従業員の個人情報が開示されるリスクを最小限に抑えるために、実験とデータ分析においては従業員の名前は使用しなかった。代わりに、データの取

集と分析のために、個人識別コードが各被験者（識別子）に割り当てられた。

3.4 データの収集方法と分析

測定時間は午前9時から午後4時までとし、いずれかの時間帯で操作者の心拍情報と身体振動のデータを収集した。参加者は全員男性で、年齢、身長、体重などの情報提供を求めた。心肺機能は、不健康な被験者を測定から除外することを目的としているため、参加者には心血管疾患の既往歴の有無や現在の健康状態（例えば、心血管疾患の既往の有無、現在の健康状態など）についても質問した。9人の参加者から集められた42個のデータセットは、データ収集の準備時間および休憩時間は除いて、いずれも約5分間程度の計測時間となった。

この実験において、測定者は被験者の活動を直接監視せず、遠隔操作席のエリアから離れて待機し、操作エリアに設置された2台のカメラの助けによって作業の記録を撮影した。我々の研究は、日常の建設機械の操作業務において生じる精神負荷に注目するため、測定を開始する前に、この研究は個人の操作スキルを計測するのではなく、操作時の負荷を測定することを意図していることを被験者に説明し、日常の操作意識から逸脱しないように指示した。

3.4.1 HRV

HRVは、自己調節能力や、心理的および生理学的ストレスなどの自律神経機能によって直接影響を受ける健康以外の側面にも関連している。HRVが低くなると、交感神経系と副交感神経系の間の不適切な調整を示し、将来の心血管疾患の十分に確立された予測因子となる。したがって、HRVの測定は、身体機能の評価に重要な情報を示し、身体的な疲労および衰弱のリスクを特定するのに役立つ可能性がある。

心拍数（HR）および心拍変動（HRV）のメトリックは、医療提供者への複数のアプリケーションで最近有望なことが示されている¹¹⁾。HRV分析の利用した報告は古くからあるが、改善された技術と多くの研究者と医師らの関心の高まりが、この新しい調査分野に注目が集まっている。交感神経バランスを測定するためのHRVデータの特定のメトリックスの有効性に関する懸念（たとえば、HRVの低周波[LF]パワーおよびLFと高周波[HF]パワーの比率）はあるが、多くの先行研究が、HRV分析が身体の交感神経と副交感神経の緊張のバランスを明らかにできるという概念を支持している。HRVを使用することにより、心理的なストレスに対する自律神経反応が研究されている。HRVに関する注目すべき研究では、医療従事者のストレスの客観的測定値の価値を強調されており、Josephら¹²⁾は、自己申告によるストレスに比例して上昇

した生理学的ストレスのレベルを示したと報告している。これらの結果は、医師、特に時間にタイトな状況で日常的に外科的な医療職務にあたっての医師らが、自身のストレス評価について説得力のある証拠を提供している。客観的で生態学的に有効なストレスの測定基準を広く使用することは、緊張した状況の心理的負荷を理解して軽減するため重要なヒントとなる可能性がある。

広く受け入れられているHRVメトリックが幾つかある¹³⁾。HRV計測では、時間領域メジャーと周波数ドメインメジャーの2つのカテゴリーに分類される。HRVのメトリックには、連続差の二乗平均平方根 (RMSSD; 時間領域) とLF/HF比 (周波数領域) が含まれる。企業の従業員を対象とした先行研究において、RMSSD値が知覚された精神的ストレスと関連していることを発見されており、低い値は高いストレスを示していた。RMSSDメトリックは、欠落しているデータポイントの量に対する感度が低くなる。したがって、RMSSDは、データ品質が低い患者にとって、より堅牢なメトリックと見なすことができる。

HRVの測定値は、RRデータから導出され、時系列の期間 (データポイントの数)、時間帯、体の向き、および実行されているアクティビティの影響を受けることに注意することが重要である。可能な場合、これらの要因は5分間のRRを使用し、各アクティビティに関する値を提供することが多いが、Troubat et al.¹⁴⁾は、短期間の精神的ストレスにおいても、平均HRVの低下と関連していることを発見している。

3. 4. 2 MSE

マルチスケールエントロピー (MSE) は、時系列の複雑さをさまざまな時間スケールで評価するため、ここ20年程で広まった解析アルゴリズムである¹⁵⁾。健康と幸福のための安定した状態を維持することに関与する生理学的システムは複雑であり、システムコンポーネント内およびシステムコンポーネント間の複数の相互作用が影響する。解析対象の時系列データの複雑さは、出力信号の変動性の時間的な構造に反映されている。エントロピーは、心拍数、脳波、身体の揺れなどに関するダイナミクスに適用して計算することにより、システムの複雑さの優れた指標として認識されている。エントロピーの低下は、虚弱、疲労、加齢、機能障害に関連していることが多く、対照的に高いエントロピーは、変化する環境への適応能力の高さと関連している。エントロピーは、自律神経系および体性神経系における神経生理学的な複雑性と適応性に対する信頼できるマーカーであるとの報告がある¹⁶⁾。本研究では、タスクの疲労などによって適応能力が低下することをエントロピーの数値によって確認している。

MSEアルゴリズムは、考案時からさまざまな用途の解析に適用されて、多くの成功を納めてきた。しかし、MSEは時間スケールファクターが増加すると、粗視化系列のサンプルエントロピーの統計的な信頼性が低下するという懸念が指摘されている。近年、この対応として数々の改善されたアルゴリズムが示されており、750ポイント以下の比較的小規模な時系列データの分析においても精度良く適用できるようになってきている。本研究におけるMSEに解析ではRCMSEを利用して被験者の心拍データの分析を行なった。

3. 4. 3 Physical Vibration

振動は身体に対して、内力または外力のいずれかに晒されたときに発生する。騒音、熱、振動、放射などの物理的要因は、健康に有害な刺激が多くあり、身体機能を変化させる可能性のある環境ストレスとなる¹⁷⁾。振動は強度および/または曝露時間に応じて、人間の健康に有害である可能性がある。ISO 2631-1規格 (ISO2631-1、1997)¹⁸⁾において、人間の振動への暴露の評価方法の使用方法に関するガイダンスを提供する。そのために、振動に対する人間の反応とその効果は振動の周波数、方向、および研究された効果 (健康、快適さ、またはタスク) に依存することが知られているため、各評価軸の周波数加重と倍率が適用される。

外部システムから人体への振動の伝達は、快適性、性能、健康に大きな影響を及ぼす。建設機械の実操作およびVRを含めた遠隔操作席は動的システムであるため、それに関連する伝達は入力モーションの周波数と方向に依存する。振動の伝達率は、振動にさらされるシートの特性にも依存する。オンロードおよびオフロード車両は、道路および土壌におけるプロファイルの不均一性、機械内の可動要素によって引き起こされる振動にさらされる。この傾向は、技術車両および車椅子システムでも同様の傾向を示す。10~12Hz以下の周波数範囲内の振動は人体全体に影響を及ぼすが、12Hzを超える振動は局所的な影響しか及ぼさない。凹凸のある道路を車両のタイヤが転がるなどの低周波 (4~6 Hz) の周期的な動きは身体を共振させる可能性がある。座ったままの状態において振動にさらされると、筋肉の疲労を引き起こし、軟組織を弱め、操作者の背中、全身への負担が増す。外部からの強制的な身体振動が続くと、気怠さ、違和感といった不快な症状、ひどい場合は嘔吐に至る場合がある。本研究において、機械操作者が操作席に座りながら、スマートウェアに装着した3軸加速度センサ出力から、以下の指標を計測する。

・2乗平均加重加速度 (weighted acceleration rms、略称: Aw)

- ・ 4乗振動Dose法 (Vibration Doses Value、略称:VDV)
- ・ MSDV指標 (Motion Sickness Dose Value、略称:MSDV)

3.4.4 作業負荷(予備心拍数、%HRR)

Hwangら¹⁹⁾は、建設業者の間で30-40%HRRの継続に注意が必要であることを示唆し、Nortonら²⁰⁾は、座りがちな人の適切な健康管理に対して、40-60%HRRが30-60分持続は中程度の身体負荷であることを示唆した。40%HRRの高い許容労働負荷制限を超える身体的負荷に晒されることが多い建設労働者(例えば、とび職や鉄骨の運搬作業員)に比較して、建設機械の操作者は高い心理的負荷とストレスに晒されており、心理的要因による負荷は、HRにいくらかの影響を及ぼす。HRを長期間測定した場合の影響は無視できるが、短時間の影響は存在する可能性がある。

HRRは、筋肉活動に関連する労働負荷、または仕事における圧力強度の指標であり、式(1)が推定される。

$$HRR = (HR_{working} - HR_{resting}) / (HR_{maximum} - HR_{resting}) \times 100 [\%] \quad (1)$$

HR_{working} : 作業時平均心拍数、HR_{resting} : 安静時平均心拍数、HR_{maximum} : 年齢別最大心拍数

3.4.5 操作終了後の半構造化インタビュー

3種類の操作方法を体験後、別室に移動して20分程度の半構造化インタビューを行った。インタビュー実施前に、インフォームド・コンセントに則って、プライバシーの保護、回答拒否の自由、録音・録画の許可、撮られたデータは研究のみ使うことを確認した。インタビューでは、事前に用意したインタビューガイドラインに基づき、仕事に対する安全性に関する質問5項目、仕事に対する生産性に関する質問3項目、仕事に対する満足度に関する質問5項目、仕事に対する期待に関する質問3項目の質問を行い、対象者の主観について回答を得た。

4 実証実験の分析結果

4.1 データの正規性検定

集されたデータの正規性に関して判定を行なった。サンプルサイズが50以上である場合、正規性の判定はKolmogrov-Smirnov testのみが使用できる。しかし、本研究ではサンプルは十分に大きいとはいえず、Shapiro-Wilk testとKolmogrov-Smirnov testにおいて、いずれにおいても正規性を確認できたもの正規分布のデータと考えた。どちらの検定においても、帰無仮説はデータが0.05のアルファ値で正規分布していることを前提としており、p値が0.05未満の場合、帰無仮説は棄却され、データは非正規分布に見なせる。HRVの時間領域および周波数領域、身体の労働負荷、

操作環境の振動指標、心拍変化に関連した疲労やストレス指標(LF/HF、MSE)、機械の運転時間について正規性検定を実施した。それらのうち、LF、MSE、%HRR、VDVに関するデータは正規分布の条件を満たしていた。

4.2 記述統計学と群間比較

記述統計、平均および標準偏差を使用して、操作環境である、実機操作、モニタ映像のみによる遠隔操作、VRの操作環境の3グループにおいて、グループ毎に収集されたデータ間で有意差があるかどうかを確認した。正規分布のデータの分析については、一次配置分散分析においてBonferroniによる多重比較が採用された。また、非正規分布のデータの分析については、Kruskal-Wallis testでSteel-Dwassによる多重比較が実施された。

Kruskal-Wallis testでは、母集団に関する正規分布の要件はない。その帰無仮説(H0)は、有意水準0.05で「3つのグループ間に差はない」としている。p値が0.05未満の場合、H0は棄却され、平均値に統計的に有意な差があることを示す。Bonferroni testは、Kruskal-Wallis testと同じ仮説を持っているが、母集団の正規性と均一性の仮定に依存する。

HRV時間領域パラメータでは心拍数RRI、HRV周波数領域パラメータではLFs、LFs/HFs、心拍変動の複雑度MSE、労働負荷%HRR、身体振動のAw、VDV、MSDV、そして、建設機械の運転時間については、2つの操作環境間において統計的有意となった。さらに、HRV周波数領域パラメータのLFs/HFs、身体振動のAw、MSDV、そして、建設機械の運転時間には3つの操作環境間において統計的有意差が見られた。

建設機械の搭乗操作は、ストレス指標であるLFs/HFsと、身体振動を示すAwとMSDVが最も大きく、運転時間が最も短縮できた。搭乗操作の運転時間は短くなるものの、操作者のストレスは高くなった。逆にモニタ映像による遠隔操作はLFs/HFsと、AwとMSDVが最も小さく、運転時間は最も長くなることが明らかになった。モニタ映像による機械走行は操作者にとってストレスは低いが、運転時間は長くなった。

4.3 心理的負荷、労働負荷と身体的振動の関係

表-1 心理負荷および労働負荷と身体振動の関係

独立変数	%HRR			従属変数 LFs/HFs			MSE		
	B	s.e.	P	B	s.e.	P	B	s.e.	P
指標									
Aw	-0.002	0.039	0.956	0.0238*	0.0093	0.0143	-0.031	0.0175	0.367
VDV	0.0006	0.0003	0.056	0.000	0.0001	0.821	-0.0001	0.0001	0.239
MSDV	0.515	0.294	0.087	0.0983	0.0693	0.164	-0.156	0.130	0.0748

3つの操作環境で採取したデータを組み合わせ、心理負荷および労働負荷に対する影響を分析した。重回帰分析を使用して、心理負荷および労

働負荷と身体振動の有意な関係を評価した。結果が表-1に示す。重回帰分析では、独立変数（身体振動の指標）に多重共線性がないことをチェックした。その結果、3つの身体振動の指標、すなわちAw、VDV、MSDVは全てVIFが10以下でした。その後、操作時の負荷と身体振動の分析において、以下の関係において有意な関係があることが示唆された。

表-2において、労働負荷%HRRに対し、4乗振動ドーズ法によるVDVの大きな振動は、正の影響が見られた。この回帰式の調整済みR2乗は0.193でした。表-3において、ストレス指標HRV LFs/HFsに対し、2乗平均加重加速度Awの時間平均値は正の影響が見られた。この回帰式の調整済みR2乗は0.287でした。表-4において、心拍の複雑度から推測される適応性の指標MSEに対し、2乗平均加重加速度Awの時間平均値は負の影響が見られた。この回帰式の調整済みR2乗は0.189でした。

表-2 作業時の振動が労働負荷に及ぼす影響

Model 1-1:		従属変数 %HRR			
独立変数	Estimated	s.e.	t-value	p-value	
VDV	0.0008	0.0003	3.29	0.0021**	
(Intercept)	5.469	1.07	5.11	<0.001***	
Multiple R ²	0.213				
Adjusted R ²	0.193				
F static value	10.8			0.0021**	

表-3 作業時の振動がLFs/HFsに及ぼす影響

Model 1-2:		従属変数 LFs / HFs			
独立変数	Estimated	s.e.	t-value	p-value	
Aw	0.0329	0.0079	4.18	<0.001***	
(Intercept)	1.817	0.405	4.49	<0.001***	
Multiple R ²	0.305				
Adjusted R ²	0.287				
F static value	17.5			<0.001***	

表-4 作業時の振動がMSEに及ぼす影響

Model 1-3:		従属変数 MSE			
独立変数	Estimated	s.e.	t-value	p-value	
Aw	-0.0485	0.00149	-3.24	0.024**	
(Intercept)	10.55	0.768	13.7	<0.001***	
Multiple R ²	0.208				
Adjusted R ²	0.189				
F static value	10.5			0.0024**	

これらの結果より、%HRRはVDVと有意な関係が認められた。但し、その他の振動指標であるAwおよびMSDVは、%HRRとの間で有意な関係は見られなかった。また、LFs/HFsおよびMSEは、Awとの間において有意な関係が確認できた。操作環境における労働負荷を示す%HRR、心理負荷を示すLFs/HFsおよびMSEに対して、いくつかの振動指標による影響が示された。

4.4 運転時間に対する各指標の関係性

3つの操作環境で採取したデータを組み合わせ、重回帰分析を使用して、建設機械の運転時間に対する、いくつかのHRV指標と心拍変化の複雑度を示すMSE、心拍数RRI、身体振動のパラメータの関係を評価した。統計的に有意な関係が確認で

きた重回帰式は、以下の2つとなった。まずは重回帰分析において、独立変数に多重共線性がないことをチェックした。その結果、使用された従属変数間のパラメータ、すなわちLFs/HFs、RR間隔、MSDV、およびMSE、RRI、MSDVはVIFが1~2の間にあり、多重共線性の恐れはないことが確認された。その後の操作時の身体的および心理的な負荷と身体振動の分析において、以下の2つの有意な関係があることが示唆された。

1つ目は運転時間に対し、説明変数のストレス指標 LFs/HFs、心拍RR間隔、振動MSDVが影響し、その回帰式の調整済みR2乗は0.449であった。次は、運転時間に対し、説明変数の心拍変化の複雑度MSE、心拍RR間隔、振動MSDVが影響し、回帰式の調整済みR2乗は0.400であった。

操作環境ごとの建設機械の操作において、得られたデータの重回帰分析により、運転時間は、操作ストレスを示す LFs/HFs、および適応性を示すエントロピー値MSE、心拍RRI、振動指標MSDVの影響が示唆された。運転時間 HRVおよび運転時間MSEに関して得られたられた重回帰式は、以下の(5)と(6)式となる。いずれの回帰式においても、建設機械の走行が速まり運転時間が短くなると、操作作業員の操作ストレスが上昇し、タスクに対する適応性は低下し、心拍数RR間隔および振動指標MSDVも大きくなる関係が見られた。

$$\text{運転時間 HRV} = -24.5 * \text{LFs/HFs} - 0.350 * \text{RRI} - 10.7 * \text{MSDV} + 2115 \quad (5)$$

$$\text{運転時間 MSE} = 10.5 * \text{MSE} - 0.259 * \text{RRI} - 10.3 * \text{MSDV} + 1823 \quad (6)$$

4.5 操作ストレスの許容範囲

本研究で得られた建設機械の運転時間に関する重回帰式の(5)式を用いて、操作ストレスを抑えつつ、建設機械の走行時間の短縮を考える。(5)式は機械操作時の身体振動と心理負荷の関係を示すため、操作時の身体振動を低減することにより、操作ストレスが低減できることが期待できる。2乗振動の時間平均であるAwによるストレスを許容レベルに抑えることで、運転時間の短縮と操作者ストレスの低減が両立できる可能性がある。

ストレスレベルに対するLFs/HFsを定量的に決定する報告はありませんが、座位姿勢における被験者のストレスを調査した報告²¹⁾に基づき、LFs/HFs = 2 を許容できるストレスレベルとすると、この時のAw LFs/HFs=2は、(3)式よりVR走行での2乗振動加速度の平均Aw LFs/HFs=2 = 2 / 0.0329 - 1.82 ≒ 59.0 m/s²程となる。建設機械の運転時間 = -24.5 * 2 - 0.35 * 742.0 - 10.7 * 131.7 + 2115 ≒ 397.1 [sec/around]が一周辺りの運転時間となり、走行速度 = 400 [m] / 397.1 [sec] ≒ 1.01 [m/sec.] ≒ 3.63

[km/h] が、心理的負荷の許容される機械の走行速度となることが推定された。

4.6 半構造化インタビューの結果

被験者1名は、最後の操作であるVRでの遠隔操縦の規定周回数である3週を、体調不良のため回ることができず、途中終了した。この原因として、半構造化インタビューの中でVR映像とVRに付随する振動に若干のズレがあったことが体調不良の原因となったと発言している。この被験者は、遠隔施工の経験がなく、また建設重機の操縦経験も浅いこともこの体調不良の一因であることが示唆される。加えて、比較的操縦経験の長い被験者からは、今回対象とした建設重機であるクローラー・キャリアダンプでは、VRのメリットが出づらいため、より手先の操作が重要となるバックホウへの適応が良いのではないかと、という意見があった。

5. 考察

この研究では、建設業界における機械操作の心理的健康に対するストレスの影響と、適切なストレスと建設機械の運転時間の関係を調査した。3軸加速度計を装着したスマートウェアを用いて測定した心拍情報から算出したHRVとMSE、ISO7631に基づく身体振動の測定値を用いて、運転時間との関係を調査した。HRV LFs/HFs と心拍数の複雑度を示すMSE と身体振動 との間に有意な関係が観察され、我々の主な仮説は支持された。さらに、2乗振動加速度の時間平均であるAwによる操作ストレスを許容レベルに抑えて、操作者のストレスを考慮して、運転時間の短縮が図れることが示唆された。

6. まとめ

本研究における理論的な貢献は次の2つである。まずは、建設機械の操作においてHRVに加えて、MSEによる心理的負荷の関連が示され、技能労働者の心理負荷は、心拍間隔、労働環境における振動、および建設機械の運転時間への影響が明らかになったことである。さらに、建設機械の運転時間に対する心拍に関する生体情報、労働環境の振動指標を用いた関係モデルが示すことができた。

実践的な貢献は次になる。機械操作の労働環境における振動の大きさと、走行操作の心理的な労働負荷を定量化したことである。さらに、操作時の心理的な負荷と振動環境の影響が明らかになり、このことにより建設会社は労働環境の改善と労務管理に寄与できる可能性がある。

謝辞: 本研究は国土交通省令和元年度建設技術研究開発助成制度政策課題解決型「無人化施工における生体情報を活用した生産性向上のための分析評価システム」の助成を受けたものである。本研究の遂行に関して協力・助言いただいた 立命館

大学 建山和由先生、土木研究所 森川博邦先生、国土交通省総合政策局 新田恭士先生、工学院大学 羽田靖史先生に謹んで感謝する。

参考文献

1. Chikushi S, et al, Automated Image Presentation for Backhoe Embankment Construction in Unmanned Construction Site; Proceedings of the 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration Honolulu, Hawaii, USA, January 12-15, 2020; Hawaii, USA, IEEE
2. Brandt M, et al, Effects of a Participatory Ergonomics Intervention With Wearable Technical Measurements of Physical Workload in the Construction Industry: Cluster Randomized Controlled Trial. *Journal of Medical Internet Research* 2018; 20(12):e10272
3. Ernst G. Heart-rate variability-more than heart beats? *Front Public Health* 2017;5:240 [FREE Full text] [doi: 10.3389/fpubh.2017.00240] [Medline: 28955705]
4. Shaffer F, Ginsberg JP. An overview of heart rate variability metrics and norms. *Front Public Health* 2017;5:258 [FREE Full text] [doi: 10.3389/fpubh.2017.00258] [Medline: 29034226]
5. Tiwari A, et al, Multi-Scale Heart Beat Entropy Measures for Mental Workload Assessment of Ambulant Users. *Entropy* 2019, 21, 783
6. Salahuddin L, et al, Ultra short term analysis of heart rate variability for monitoring mental stress in mobile settings. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2007;2007:4656-4659. [doi:10.1109/IEMBS.2007.4353378] [Medline:18003044]
7. Hashiguchi N, et al, Practical judgment of workload based on physical activity, work conditions, and worker's age in construction site. *Sensors* 2020, 20, 3786.
8. Castaldo R, et al, Ultra-short term HRV features as surrogates of short term HRV: a case study on mental stress detection in real life. *BMC Med Inform Decis Mak* 2019 Jan 17;19(1):12
9. Matsuura H, et al, Validity of simplified, calibration-less exercise intensity measurement using resting heart rate during sleep: A method-comparison study with respiratory gas analysis. *BMC Sports Sci. Med. Rehabil.* 2019, 11, 27.
10. Shaffer F, Ginsberg JP. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health* 2017, 5(258)
11. Amirian I, et al, Decreased heart rate variability in surgeons during night shifts. *Can J Surg* 2014 Oct;57(5):300-304. [doi: 10.1503/cjs.028813] [Medline: 25265102]
12. Joseph B, et al. Stress among surgical attending physicians and trainees: a quantitative assessment during trauma activation and emergency surgeries. *J Trauma Acute Care Surg* 2016 Oct;81(4):723-728.
13. Hashimoto T, et al. Physical activity of elderly patients with rheumatoid arthritis and healthy individuals: an actigraphy study. *Biopsychosoc Med* 2015;9:19 [doi: 10.1186/s13030-015-0046-0] [Medline: 26442128]
14. Troubat N, et al, The stress of chess players as a model to study the effects of psychological stimuli on physiological responses: an example of substrate oxidation and heart rate variability in man. *Eur J Appl Physiol* 2009;105(3):343-349. [doi: 10.1007/s00421-008-0908-2]
15. Costa M, et al, Multiscale Entropy Analysis of Complex Physiologic Time Series. *Physical Review Letters* 2002, 89, 6, 068102-1-068102-4.
16. Tiwari A, et al, Multiscale Entropy Analysis on Human Operating Behavior. *Entropy* 2016, 18, 0003.
17. Duarte MLM, et al, Correlation between weighted acceleration, vibration dose value and exposure time on whole body vibration comfort levels evaluation. *Safety Science* 2008, 46, 218-224.
18. ISO2631-1, 1997. International Organization for Standardization ISO2631-1, Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration.
19. S. Hwang, S. Lee, Wristband-type wearable health devices to measure construction workers' physical demands, *Autom. Constr.* 2017, 83:330-340.
20. Norton, K.; Norton, L.; Sadgrove, D. Position statement on physical activity and exercise intensity terminology. *J. Sci. Med. Sport.* 2010, 13, 496-502.
21. Skibniewski, FW, et al, Preliminary Results of the LF/HF Ratio as an Indicator for Estimating Difficulty Level of Flight Tasks. *Aerospace Medicine and Human Performance* 2015, 86(6): 518-523.