

神経系活動に基づくフライス加工技能レベルの新しい定量的評価法

A New Quantitative Skill Evaluation Method Based on Nervous System Activities during Performance of Milling Work

不破 輝彦, 本田 寛享, 大友 勇人, 二宮 敬一, 池田 知純, 貴志 浩久
Teruhiko Fuwa, Hiroyuki Honda, Yuto Otomo,
Keiichi Ninomiya, Tomozumi Ikeda and Hirohisa Kishi

The purpose of this study was to evaluate the workers' skill levels quantitatively by biological measurement during performance of milling work. We evaluated the relationship between the workers' skill levels, the difficulty levels of the tasks, and the workers' nervous system activities, i.e., changes in oxyhemoglobin and deoxyhemoglobin in prefrontal cortex as central nervous system activities and LF/HF as autonomic nervous system activities. Subjects were divided into two groups, i.e., an expert group and an intermediate subject group. As a result, it was shown that there is a certain relationship between workers' skill levels, the difficulty level of the tasks and nervous system activities. In conclusion, there is a possibility that changes in nervous system activities can evaluate the workers' milling skill level quantitatively.

Keywords: Biological Measurement, Heart Rate Variability, Near-infrared Spectroscopy (NIRS), Milling Machine Skill, Skill Evaluation

1. はじめに

ものづくりの職業能力開発において、技能レベルの評価は重要な要素のひとつである。一般的な方法として、製作物の出来栄を主観的あるいは客観的に採点したり、製作に要した時間を記録したりすることが行われている。ここで、「技能」とは何かを考えると、森は「人間がもつ、技に関する能力」と定義した^[1]。この立場では、技能の評価において、作業員自身を測定・評価することには意義があり、技能評価を革新できる可能性がある。

このような技能評価の試みはいくつかある。例えば、近赤外分光脳イメージング装置を用いて、旋盤加工作業時を計測した研究^[2]、アイマークレコーダを用いてマイクロメータによる寸法測定作業中の注視点を計測した研究^[3]がある。モーションキャプチャーにより大工技能の動作を解析した研究では、塚崎らの研究^[4]がある。また、組立工程（部品挿入、はんだ付け、組立、梱包、目視検査）作業中の脳波、心電図を測定し、初心者と経験者との間で、作業時間、脳の使用率、自律神経活動を検討し、作業の習熟度を検討した研究^[5]がある。しかし、自律神経系および中枢神経系の測定結果を用いて、異なる技能レベルを持つ被験者の技能を定量的な指標で示した研究は見当たらない。また、従来研究の手法（動作解析や視線計測などを用いる方法）では、その作業の動作に限定さ

れた知見を期待できるが、神経系の測定結果を用いる手法では、作業の種類に限定されない普遍的な技能レベルを評価できる可能性がある。この点で、神経系による手法は従来手法に対して優位性がある。

本研究の目的は、神経系の生体計測結果を用いて、ものづくり中の作業員の技能レベルを評価する新しい方法を提案することである。ものづくり作業としてフライス加工を対象とし、生体計測として、心拍変動（自律神経系）、前頭前野の脳血流量変化（中枢神経系）を用いる。フライス加工を選んだ理由は、(1)機械系の職業訓練や技能検定、各種の技能競技大会の職種として用いられていることから、本研究成果の波及を見込めること、(2)フライス加工は、汎用工作機械作業のなかで技能レベルの差が生じやすい作業であることである。

本研究の着想に至った経緯は、技能レベルが異なると脳の使い方や神経の使い方に違いが生じるのではないかと仮説を立て、それを定量的に検証したいと考えたからである。そのために上記の生体計測を行う。

なお、本研究は「職業能力開発総合大学校ヒトを対象とした調査・研究倫理審査委員会」の承認（平成 29 年 6 月）を得たうえで実施した。

2. 方法

2.1. 被験者

フライス加工技能レベルの異なる被験者 15 名（熟練者 5 名，中級者 10 名）を用いた。熟練者は，技能五輪全国大会フライス盤職種の入賞経験者（3 名）と，技能検定（機械加工職種フライス盤作業）1 級相当の者（2 名）である。中級者は，技能検定（機械加工職種フライス盤作業）2 級相当の学生 10 名（職業能力開発総合大学校総合課程機械専攻 4 年生）である。

被験者への安全面の配慮について述べる。次節で述べるものづくり作業には，技能検定 2 級の加工要素が含まれる。したがって，加工中の安全面を配慮して，被験者の技能レベルは，技能検定 2 級相当の技能を有する中級者以上とした。

2.2. ものづくり作業

対象とするものづくり作業は，フライス加工である。用いた工作機械は，汎用立てフライス盤（2MW-V，日立ビアメカニクス製）である。工具には直径 20 mm のハイスエンドミルの 2 枚刃と 4 枚刃の 2 本を使用した。被削材には SS400（70×60×30 mm）を使用した。

作業内容は，図 1 に示す課題図面にしたがって幅 42 mm，深さ 10 mm の直溝と，幅 24 mm，深さ 20 mm の U 溝の，各エンドミル加工である。荒加工と中・仕上げ加工とで難易度の違いを出すために，寸法許容差と表面性状を指示した。また，中級者に対しては，直溝荒加工，U 溝荒加工，直溝中・仕上げ加工，U 溝中・仕上げ加工の加工工程と， $V=20\text{ m/min}$ （荒加工）と $V=25\text{ m/min}$ （中・仕上げ加工）の切削速度を規定した。熟練者に対しては，これらを規定せずに個人の判断に任せた。中級者だけに加工条件を設定した理由は，安全面での配慮である。中級者は技能検定 2 級の加工経験や知識を有するが，一部，経験が不足する（例えば 2 枚刃のハイスエンドミルの加工経験）と判断したからである。

本研究で上記の作業を選んだ狙いは 2 点ある。第一は，技能レベルの差が生じやすいように，複数の軸操作が必要で，かつ，多くの事項（次工程や工具の位置決め，寸法加工後のバリ取り作業や測定作業など）の検討が必要な作業としたことである。第二は，技能レベルの異なる被験者が難易度の違いにどう反応するかを見るために，低難度の作業と高難度の作業（2.4 節参照）を設定できるようにしたことである。

2.3. 生体計測

測定項目は，心電図と脳血流量変化である。計測システムには，携帯型無線計測装置（NeXus-10 MARKII，キッセイコムテック製）を使用した。心電図の計測のために，被験者の胸部 2 か所に使い捨て電極を装着した。脳血流量変化の測定のために，HEG センサ（NX-HEG2B，キッセイコムテック製）を前頭前野（国際 10-20 法の FP1）に装着した。HEG センサでは，oxy-Hb（酸素化ヘモグロビン濃度）と deoxy-Hb（脱酸素化ヘモグロビン濃度）を計測し，脳血流量変化の指標となる HEG 値が得られる。

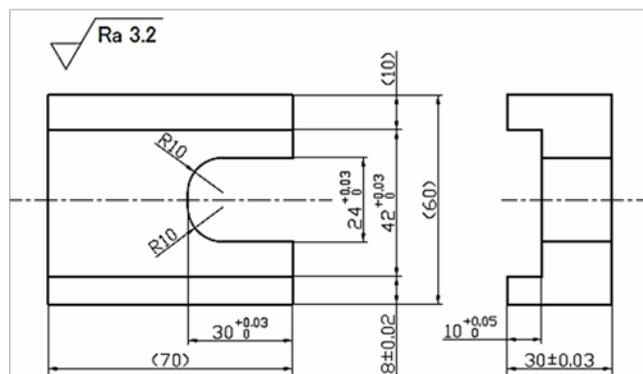


図 1 課題図面



図 2 各種の測定機器を装着した作業中の被験者の例

図 2 は，各種の測定装置を装着した作業中の被験者の一例の写真である。

生体計測の測定を開始後，5 分間は安静とし，その後フライス加工作業を行い，作業終了後に 5 分間の安静を経て，測定を終了する。加工作業に要する時間を規定せず，被験者毎に作業時間を記録する。測定中は，同時にビデオ撮影も行う。

2.4. 解析方法

作業内容を区分するために，撮影されたビデオ映像を用いた。被験者毎のビデオ映像を見ながら，測定時間を次の 6 種類，（1）安静（作業前），（2）直溝荒加工，（3）U 溝荒加工，（4）直溝中・仕上げ加工，（5）U 溝中・仕上げ加工，（6）安静（作業後）に区分した。各区分には，フライス盤を操作する作業だけでなく，段取りやバリ取り作業を含んでいる。また，（5）は U 溝加工の区間であるが，最終的な仕上げ作業（直溝部分のバリ取り作業など）も含む。6 区分のうち，荒加工（2），（3）を合せて「低難度」作業とし，寸法精度が要求される，中・仕上げ加工（4），（5）を合せて「高難度」作業として，2 種類の難易度を定めた。難易度の観点からは，作業の工程数，および，精神的負荷の大きさである。

測定された心電図から，自律神経バランス指標として LF/HF を以下の手順で求めた。心電図から心拍変動（0.5

s 間隔)を算出し、カットオフ周波数 0.04 Hz のハイパスフィルタをかけた。心拍変動の時間軸上を移動する分析区間(窓幅 20 s)内で自己回帰モデルによるパワースペクトルを求め、0.04~0.15 Hz および 0.15~0.4 Hz の各積分値をそれぞれ LF, HF として、LF/HF を求めた。LF/HF の時間変化に対して、作業の区分毎に時間平均を求めた。LF/HF の値が大きいほど、自律神経バランスが交感神経活動側であることを示す。例えば精神的緊張度が増すと、LF/HF は一般に大きくなる。

測定された HEG 値の時間変化に対して、作業区分毎に時間平均を求めた。ただし、HEG 値には、プライス加工作業に起因しない血流変化も反映してしまう問題があり、アーティファクトの低減が必要である⁶⁾。本研究では、安静(作業前)と安静(作業後)の HEG 値時間平均をベースラインとし、平坦なベースライン(安静(作業後)が安静(作業前)と同じになる)を得るために、各区分の時間平均に対して線形補間を用いて補正した。HEG 値の値が大きいほど、前頭前野の脳賦活度が大きいことを示す。例えば、作業手順の計画や思考、計算を行うと、HEG 値は大きくなる。

生体計測結果(HEG 値, LF/HF)に対して、統計解析を行った。「低難度」作業時と「高難度」作業時との比較においては、対応のある t 検定(有意水準 5%, 両側検定)を行った。熟練者と中級者との比較においては、ウェルチの t 検定(有意水準 5%, 両側検定)を行った。

3. 結果

熟練者 5 名は、中級者に与えた加工工程の指示と同じ順序で作業を行っていた。表 1 は、加工作業に要した時間(技能レベル別)である。図 3 は、生体計測結果の一例(熟練者 A)である。LF/HF と HEG 値(補正前の生データ)の各時間変化と、作業内容の 6 区分を色分けで示した。図 4 は、HEG 値(補正後)について安静時で正規化した結果を技能レベルで比較したグラフである。統計解析(熟練者: n=5, 中級者: n=10)の結果、統計的有意差のあった組み合わせを図 4 上に図示した。図 5 は、LF/HF について安静(作業前)で正規化した結果を同様に比較したものである。なお、ある中級者 1 名の心電図測定結果に欠損があったため、除外した。統計解析(熟練者: n=5, 中級者: n=9)の結果、統計的有意差のあった組み合わせを図 5 上に図示した。

4. 考察

図 4 の HEG 値(補正後)から、熟練者は「高難度」作業の方が「低難度」よりも統計的有意に HEG 値が高く、中級者では差があるとは言えない結果を示した。「高難度」/「低難度」の比を求めると、熟練者の平均値の方が大きくなった。この結果から、作業中の前頭前野の脳賦活度は中級者の方が熟練者より高い傾向がある。難易度に対しては、熟練者は難易度が高いほど脳賦活度が高まっ

表 1 加工作業時間(平均±標準偏差)

技能レベル	難易度別の作業時間 [s]		作業時間 [s] (全体)
	低難度	高難度	
熟練者	849±386	2383±1295	3232±1596
中級者	2574±789	4082±1545	6656±2210

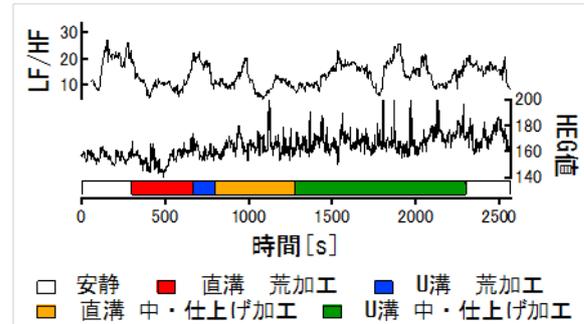


図 3 LF/HF および HEG 値の測定例(熟練者 A)。HEG 値は補正前の生データ

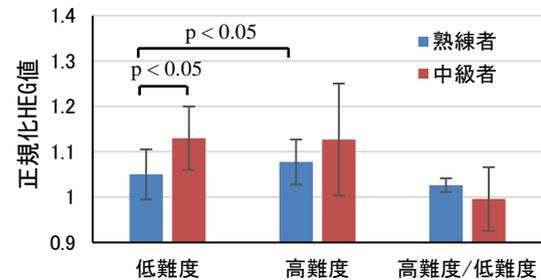


図 4 安静時で正規化した HEG 値(補正後)の比較

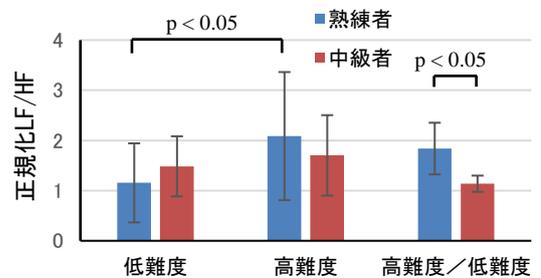


図 5 安静(作業前)時で正規化した LF/HF の比較。中級者の平均は、1 名にデータ欠損があったため 9 名分

たが、中級者は違いが無かった。「低難度」作業時の中級者の脳賦活度が、「高難度」作業時と同様であったと考えることができる。以上のことから、作業難易度に対する前頭前野の脳賦活度の反応は、作業者の技能レベルで異なる可能性がある。

図 5 の LF/HF から、熟練者は「高難度」作業の方が「低難度」作業よりも統計的有意に LF/HF が高く、中級者では差があるとは言えない結果となった。「高難度」/「低難度」の比を見ると、統計的有意に熟練者の方が大きい値を示した。「高難度」/「低難度」の比の結果から、熟練者は難易度が高いほど交感神経活動が高まったが、中級者は違いがない。これらの LF/HF の傾向は、HEG 値の

傾向と類似していることがわかる。

以上より、難易度の異なる作業に対する中枢神経系（HEG 値）および自律神経系（LF/HF）の応答を調べることで、熟練者と中級者の違いを生体信号から定量的に評価できる可能性がある。今回の難易度設定の場合、熟練者にとっては、「高難度」作業に比べて「低難度」作業の負荷が小さかったと推測できる。一方、中級者にとっては、「低難度」作業と設定された作業であっても、「高難度」作業と同様に負荷が大きかったと推測できる。

上記の推測を作業時間から考察する。作業時間は、一般的な技能評価方法のうちの一つである。作業時間（表 1）の結果から、全体の作業時間に占める「低難度」作業の割合を求めると、熟練者 26%、中級者 63%となった。作業時間について被験者毎に「高難度」/「低難度」の比を平均すると、熟練者 3.0、中級者 1.6 となり、ウェルチの t 検定（両側）の結果、有意水準 5%で統計的有意差が認められた。この結果は、生体信号から得られた結果と同じ傾向を示している。熟練者は「低難度」作業よりも「高難度」作業に、多くの時間をかけていた。一方、中級者は「低難度」作業に対して熟練者よりも多くの時間をかけていた。つまり、中級者にとっては、「低難度」作業であっても、「高難度」作業と同様に負荷が大きかったと推察できる。

最後に、技能レベルによって加工条件が異なる点について考察する。2.2 節で述べたように、安全面での配慮から、熟練者には加工条件を規定せず、中級者に対しては規定した。これは、一般に、加工時間や仕上がり面には影響するが、神経系の活動には影響が少ないと考える。本研究結果の場合では、加工作業時間（表 1）において中級者にだけ作業時間の短縮効果があった可能性がある。しかし、中級者の作業時間は熟練者に比べて十分に長かったことから、上記で考察した作業時間の傾向の考察に対しては、影響しないと考える。

5. まとめ

ものづくり中の作業者の神経系情報を計測することにより、技能レベルを定量的に評価することを試みた。その結果、以下が明らかになった。

(1) 熟練者の場合、「高難度」作業時の方が「低難度」作業時よりも神経系指標（HEG 値、LF/HF）が有意水準 5%で統計的有意に高くなったが、中級者の場合、作業難易度の差があるとは言えない。

(2) LF/HF において、「高難度」/「低難度」の比をとると、熟練者の方が中級者よりも有意水準 5%で統計的有意に高くなった。

以上のことから、技能レベルを生体情報から評価できる可能性を示した。

本研究の課題として、被験者数が少ない点がある。被験者数を増やして統計的な検出力を高めることが必要である。また、本手法は神経系指標を用いているため、フライス加工作業に限らず、他のものづくり作業にも適用

できると考える。検証するものづくり作業の対象を広げることにより、生体計測による普遍的な技能評価の方法論を確立したい。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 25289018, 17K01068 の助成を受けました。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 森和夫：「技術・技能伝承ハンドブック」、JIPM ソリューション、東京（2005）。
- [2] 侯磊，綿貫啓一：「NIRS を用いた旋盤加工作業時における脳賦活反応計測」、日本機械学会論文集（C 編），79 巻，800 号，pp.1124-1133（2013）。
- [3] 武雄靖，夏恒：「技能伝承のためのマイクロメータによる寸法測定作業中の注視点移動に関する実験的検討」、日本機械学会論文集（C 編），79 巻，799 号，pp.814-826（2013）。
- [4] 塚崎英世，玉井瑞又，西口光太郎，前川秀幸，松留慎一郎：「大工技能の動作解析と指導方法に関する研究—のこぎり作業について—」、2018 年度日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.13-14（2018）。
- [5] 小竹康代，王丹妮，東佑一朗，横田悠右，成瀬康，中嶋宏：「実作業下での生体・行動センシングによる作業者の習熟度の定量評価及び効果的な指導法の検討」、第 33 回フエジシステムシンポジウム講演論文集，pp.227-228（2017）。
- [6] 野澤孝之，近藤敏之：「NIRS 脳計測データのオンライン分析のためのアーティファクト除去手法の比較」、第 24 回生体・生理工学シンポジウム論文集，pp.381-384（2009）。

（原稿受付 2022/01/05，受理 2022/03/11）

*不破 輝彦，博士（工学）

職業能力開発総合大学校，能力開発院，心身管理・生体工学ユニット，〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1

Teruhiko Fuwa, Faculty of Human Resources Development, Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035.

Email: fuwa@uitec.ac.jp

*本田 寛享，修士（人間科学）

日本電気株式会社，〒108-8001 東京都港区芝 5-7-1

Hiroyuki Honda, NEC Corporation, 7-1, Shiba 5-chome Minato-ku, Tokyo 108-8001.

Email: honda.hiro@nec.com

*大友 勇人

職業能力開発総合大学校，長期養成課程職業能力開発研究学域，電子情報学専攻，〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1

Yuto Otomo, Graduate school, Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035.

Email: m20301@uitec.ac.jp

*二宮 敬一，博士（工学）

職業能力開発総合大学校，能力開発院，機械設計ユニット，〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1

Teruhiko Fuwa, Faculty of Human Resources Development,

Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira,
Tokyo 187-0035.
Email: ninomiya@uitech.ac.jp

*池田 知純, 博士 (工学)
職業能力開発総合大学校, 能力開発院, 福祉工学ユニット, 〒
187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1
Tomozumi Ikeda, Faculty of Human Resources Development,
Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira,
Tokyo 187-0035.
Email: ikeda@uitech.ac.jp

*貴志 浩久, 博士 (工学)
職業能力開発総合大学校, 能力開発院, 心身管理・生体工学ユ
ニット, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1
Hirohisa Kishi, Faculty of Human Resources Development,
Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira,
Tokyo 187-0035.
Email: kishi@uitech.ac.jp