

フライス加工中の自律神経及び中枢神経活動評価と技能レベルとの関係

職業能力開発総合大学校 機械システム工学科 ○福原 健司, 古川 眞規, 細野 雄治
職業能力開発総合大学校 能力開発院 二宮 敬一, 和田 正毅, ◎不破 輝彦

要 旨

フライス加工において、作業者の自律神経活動及び中枢神経活動を技能レベルに着目して解析した。作業はエンドミルを用いた段加工である。被験者は熟練者4名、中級者5名とした。測定項目は心電図、前頭前野の血流量変化、皮膚コンダクタンスで、併せて主観評価を行った。その結果、脳血流量変化、緊張度、一過性の精神的動揺に関して技能レベルで異なる変化が見られたが、被験者数が少ない問題があり、更なる検証が必要である。

1. 緒 言

技能の習得には、繰り返し練習により動作やコツを身に付けることが必要とされているが、最近では人間科学の手法を用いて技能の過程を評価し、暗黙知を形式化する試みも見られる。例えば武雄らは、アイマークレコーダを用いてマイクロメータによる測定作業時の視線に関して技能レベルで比較をしている¹⁾。しかし、技能レベルに着目してフライス加工中の自律神経活動及び中枢神経活動を解析した例はない。

我々は、これまでに正面フライス作業中の被験者の心電図及び脳血流量変化を測定し、自律神経活動と中枢神経活動を評価したが²⁾、被験者数が少なく(熟練者1名、中級者2名)、また被削材を切削する実時間も短かったため、技能レベルに応じた傾向を示すことができなかった。

本研究の目的は、フライス加工技能の形式化を目指すために、フライス加工中の自律神経活動及び中枢神経活動と技能レベルとの関係を定量的に評価することである。前発表²⁾に対して、加工時間が長くなるように作業を変更し、被験者数を増やして検証した。

2. 方 法

<2-1>被験者と生体信号測定システム

被験者は、熟練者4名(機械加工職種(フライス盤作業)の技能検定1級相当の技能を持つ本大学校教員、フライス盤作業経験年数 18.8 ± 11.8 年)、中級者5名(同2級相当の本大学校4年生、同経験年数 2.8 ± 0.4 年)とした。作業中の被験者の心電図、皮膚コンダクタンスGSR及び脳血流量変化を測定するために、被験者にはセンサを各部に装着し、携帯型計測装置を腰部に装着した。心電図用には使い捨て電極2個(L-150、日本光電製)を胸骨部と右下肋骨部に貼付し、GSR用には左手の薬指と小指にセンサ(NX-GSR1D、キッセイコムテック製)を貼付した。脳血流量変化用には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の位置)に装着した。各種センサからの信号は携帯型計測装置(NeXus-10 MARK II、キッセイコムテック製)に入力され、心電図のサンプリング周波数を256Hz、他は128HzでA/D変換し、パーソナルコンピュータに保存した。

<2-2>工作機械、加工方法及び切削条件

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)、工具はハイスエンドミル($\phi 20\text{mm}$, 2枚刃)を使用した。被削材は予め六面体加工($100\text{mm} \times 55\text{mm} \times 55\text{mm}$)をした機械構造用炭素鋼S50Cを使用した。切削条件は切削速度 $V=15\text{m/min}$ 、送り速度を手送り、切削幅10mm、切込み深さ5mmとした。また、加工方法は上向き削りの段加工を行った。

<2-3>測定手順

生体信号の測定開始後、最初の5分間は安静とし、その後、加工方法及び切削条件に従って切削し、切削終了後に5分間安静とした。この手順を2回繰り返し、1回目と2回目のインターバルは10分とした。作業後に、主観的評価のためにアンケート12項目を実施した。

<2-4>データ処理方法

心電図から、0.5s間隔で瞬時心拍数(HRV)を求めた。自律神経評価のために、HRVからLF/HFを以下の手順で求めた。HRVにハイパスフィルタ(カットオフ周波数0.04Hz)をかけた後にHRVの時間軸上に1s間隔で移動する時間窓(窓幅20s)を設け、自己回帰モデルによる時間周波数解析を行い、各時刻毎に得られたパワースペクトルに対して0.04-0.15Hz、0.15-0.4Hzの各積分値をLF、HFとし、LF/HFを交感神経活動指標として求めた。脳血流量変化については、HEGセンサで得られる値HEGを用いる。HEGが大きいくほど、脳血流量が増えることを意味する。生体信号の指標(GSR、HRV、LF/HF、HEG)の時間変化に対して、(a)切削開始前の5分間安静時、(b)切削加工中、(c)切削終了後の5分間安静時の各時間平均を求め、各指標毎に(a)の値で正規化した。

3. 実験結果および考察

<3-1>実験結果

正規化された生体信号の各指標の時間変化の例を図1~4に示す。各図の上段は1回目、下段は2回目の同一被験者の結果である。時間300sの点線は加工の開始時刻、それに続く点線は加工終了時刻を示す。点線の時間間隔(被験者が切削に要した時間)は各実験で異なり、熟練者の平均は1回目は 133 ± 46 s、2回目は 124 ± 48 s、中級者の平均は1回目は 220 ± 73 s、2回目は 233 ± 132 sであった。正規化された各指標の時間平均を、中級者毎、熟練者毎に平均した結果を表1から4に示す。

アンケートの結果は、12項目のうち、主要なものだけを以下に示す。項目2「工具と被削材が接触している時ハンドルを重く感じたか。」では、中級者は 1.20 ± 0.42 、熟練者は 0.25 ± 0.46 であった(値が大きいくほど質間に当てはまることを意味する。以下、同様)。項目5「切りくずの状態を意識的に見ていたか」では、中級者 1.00 ± 0.67 、熟練者は 1.75 ± 0.46 、項目6「切削加工中に違和感があったか?」では、中級者は 0.70 ± 0.82 、熟練者は 0.38 ± 0.74 、項目7「油のおいおいを気にしていたか」では、中級者 1.00 ± 0.94 、熟練者 0.38 ± 0.74 、項目8「切削音を気にしていたか」では、中級者 1.40 ± 0.70 、熟練者 1.13 ± 0.83 、項目9「切削終了間際の工具と被削材が離れる瞬間を集中的に見ていたか」では、中級者 1.00 ± 0.67 、熟練者 1.50 ± 0.53 、項目10「作業を楽に感じたか」では、中級者は -0.40 ± 0.97 、熟練者は 0.25 ± 0.46 となった。

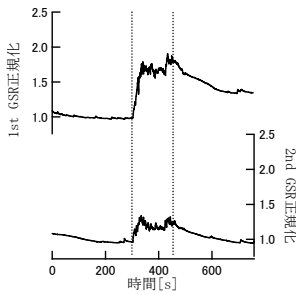


図1 正規化 GSR (中級者 A)

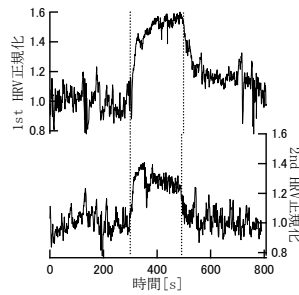


図2 正規化 HRV (熟練者 B)

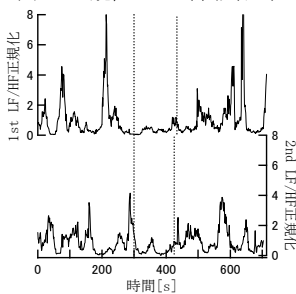


図3 正規化 LF/HF (熟練者 C)

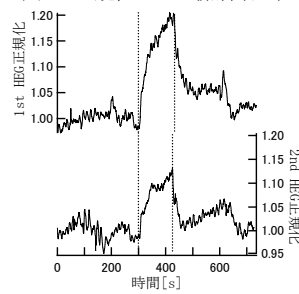


図4 正規化 HEG (熟練者 C)

表1 加工中の正規化 GSR 時間平均

技能レベル	1回目	2回目	平均
中級者	1.44±0.35	1.19±0.08	1.31±0.27
熟練者	1.27±0.23	1.14±0.10	1.21±0.18

表2 加工中の正規化 HRV 時間平均

技能レベル	1回目	2回目	平均
中級者	1.11±0.07	1.07±0.05	1.09±0.06
熟練者	1.22±0.18	1.12±0.12	1.17±0.15

表3 加工中の正規化 LF/HF 時間平均

技能レベル	1回目	2回目	平均
中級者	0.75±0.39	0.88±0.40	0.82±0.38
熟練者	0.71±0.34	0.43±0.06	0.56±0.27

表4 加工中の正規化 HEG 時間平均

技能レベル	1回目	2回目	平均
中級者	1.14±0.11	1.08±0.07	1.11±0.09
熟練者	1.05±0.08	1.02±0.06	1.04±0.07

<3.2>考察

GSR は、一過性の精神的負荷により増大する。図1はその典型例で、切削開始時にGSRが上昇した。表1の正規化GSRを見ると、1回目、2回目共に値が1より大きく、加工中の精神的負荷が上昇していることが分かる。中級者は熟練者よりも加工中の上昇率が高く、1回目と2回目を比較すると、中級者の方が2回目の減少率が大きい(中級者は17%、熟練者は10%)。これは、中級者の方が作業に対する慣れの度合いがもともと低く、1回目の作業が2回目の作業に対して精神的負担を減らす効果が大きく出たと考えられる。1回目と2回目の実験のインターバルは10分であったが、インターバルを大きくすると、この特性がどのように変化するか、興味のあるところである。作業回数の増加が、緊張を緩和させるのではないかと推測できる。

HRVは、身体の動作や精神的緊張などの要因で上昇する。図2のHRVを見ると、切削加工中の値が上昇しており、切削作業に伴う身体動作や精神的緊張による上昇であると考えられる。表2の正規化HRVを見ると、1回目、2回目、平均の何れにおいても中級者は熟練者よりも値が小さく、GSRとは逆の結果となった。一方、1回目と2回目の比較では、中級者、熟練者ともに2回目の方が小さい(減少率は、中級者は3%、熟練者は8%)。HRVには精神的な面以外に運動による増加もあるので、GSRとの単純な比較はできないが、1回目より2回目の方が小さいこと

は共通しており、2回目は精神的負荷や緊張が和らいでいるのではないかと考察することができる。

LF/HFは、交感神経活動を表す指標としてよく用いられる。図3のLF/HFの時間変化を見ると、加工作業中の値の上昇があまり見られず、作業前後の安静中の方が大きな変化が見られる。表3を見ると、1回目、2回目、平均の全てにおいて、中級者、熟練者共に、正規化LF/HFが1を下回っている。これは、安静状態、立位の姿勢で実験開始を待っているよりも、加工作業をしている時間帯の方が交感神経活動が低い(すなわち副交感神経活動が高い)可能性を示すものである。中級者と熟練者の比較では、熟練者の方が値が小さく、熟練者は、作業に対して副交感神経活動がより高い(具体的には、より精神的負担が低い、リラックス度が高い、など)ことが示唆される。

HEGは、前頭前野の脳血流量変化を表している。脳血流量変化は脳の賦活度を表しており、前頭前野は、複雑な認知行動の計画に関与している部位である。図4を見ると、加工作業中のHEGが上昇しており、被験者が加工物やフライス盤の状況を認知し、作業のための行動を計画していたために、HEGの上昇が見られたのではないかと考えられる。図4の波形は一例であるが、波形のパターンには個人差が大きく、技能レベルに応じた特徴も見られなかった。表4のHEG時間平均を見ると、中級者、熟練者ともに作業中の上昇が見られるが中級者の方が上昇割合は大きく、1回目と2回目を比較すると、中級者の方が2回目の低下が大きかった。これは、作業に対する慣れが大きいほど、HEGは低い値を示すとも考えられる。

次に、アンケート結果と生体計測結果を比較する。項目2では、中級者の方が作業時のハンドルを重く感じたことあり、中級者は作業に対する慣れが不足しているとも考えられ、生体計測の結果と矛盾しない。項目6は違和感の質問であり、違和感が高いほど交感神経活動も高いと考えられる。アンケートでは中級者の方が熟練者より違和感が高く、生体計測でも緊張度や交感神経活動が高い結果となった。項目10の「楽さ」については、楽と感じるほど、副交感神経が高まると考えられる。アンケートでは熟練者ほど楽と回答し、LF/HFの結果も副交感神経活動は熟練者の方が高いことを示している。項目7の油のにおい、項目8の切削音については、中級者の方が気にしている度合いが大きかったが、項目9の切削終了間際の観察については、熟練者の方が高かった。項目7~9については、生体計測結果との関連は不明確で、今後、アイマークレコーダによる解析や、音声に対する反応などを検証する必要がある。

4. 結 言

フライス加工中の自律神経系及び中枢神経系の評価を行い、熟練者と中級者で比較した。中級者は熟練者より作業に対する精神的負荷を強く感じていることが示された。主観評価としてアンケートを実施し、一部の項目については、生体計測の結果を裏付ける回答が得られた。今後の課題は、被験者数を増やして統計的有意差検定を行うことである。

なお登壇者は、本実験の作業計画、実施、及び測定データの解析の部分を担当し、考察部分の議論にも参加した。

参 考 文 献

- 1) 武雄, 夏, 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(799), 814-826, 2013.
- 2) 不破, 池田, 岡部, 菅野, 寺内, 二宮, 繁昌, 和田, 古川, 身体性認知科学に基づくフライス加工技能の修得・伝承モデルの構築—第2報 自律神経および中枢神経活動の計測, 2014年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 741-742, 2014