G-1-2 音による作業特性制御に関する基礎的研究

A Preliminary Study on Human's Operation Controlled by Beat Sounds

○正 高橋 宏 (湘南工大) 正 本多 博彦 (湘南工大)

Hiroshi TAKAHASHI, Shonan Institute of Technology, 1-1-25 Tsujido-Nishikaigan, Fujisawa, Kanagawa

Hirohiko HONDA, Shonan Institute of Technology

This is a preliminary study on new warning method for the Human-Machine-Interactive operation environment. Human's operation under hearing some beat sounds are paid attention. Relationship between frequency of beat sounds and human's operation are analyzed. In his experiments, easy to express the human operation, Uchida-Kraepelin test are performed. The results of many experiments performed with a different beat sound show that performance of Uchida-Kraepelin test will be changed unconsciously shortly after beat frequency changed.

Key Words: Human-Machine Interaction, Human Behavior, Beat Sounds, Auditory Information

1. はじめに

人間—機械系における相互のインタラクティブなコミュニケーションに着目する。人間が機械を操作し、その結果としての機械挙動を観測しながら人間が期待する目標状態に修正操作してゆく人間—機械クローズドループ系において、人間の操作入力に対する機械の挙動特性を動的に変化させることにより人間の操作特性も変化する、系全体のパフォーマンスを変化させることができる。McRuer⁽¹⁾などのクロスオーバー周波数を考慮した人間—機械系全体に対する検討⁽²⁾は、その代表例である。また、五十嵐⁽³⁾は、操作者が認識できない範囲内で機械の制御特性を段階的に変更し、操作者に意識されないうちに操作者の特性も変化させ、結果的に系全体としてのパフォーマンスを向上させる手法を提案している。

上記のような、機械的挙動を伴う操作のみならず、人間—コンピュータ系において、人間の操作入力に対するコンピュータスクリーン上の表示特性などを変化させることにより、系全体としてのパフォーマンスを変化させる例もある。例えば、筋ジストロフィーなどの症状を持つ患者が、コンピュータマウスを利用して、コンピュータスクリーン上のポインタを移動させるとき、マウスの移動量に対する画面上のポインタの移動量のゲインを大きくすることによって患者がマウスを移動させる距離が短縮され、患者にとっての操作負担が減少し、全体としての作業時間が短縮する場合がある⁽⁴⁾。このように、人間—機械系において機械挙動特性の変化が結果的に人間の操作特性を変化させ、その結果として系全体のパフォーマンスが改善され、人間に有益な効果をもたらせる枠組みが存在する。

しかし、例えば、自動車運転時に車線変更するときなどに操作者が周囲の状況をよく観察しないでステアリング操作を行っていたら、それはオープンループでの操作と見做すことができる。このように、操作結果が逐次知覚されないオープンループで操作が行われているときに人間の挙動特性を変化させ、結果的に系としてのパフォーマンスを改善するためには、上記と異なる枠組みが必要となる。人間に状況を注意深く観察させるように警報誘導などを行い、オープンループ系からクローズドループ系に切り替える枠組みも考えられるが、本研究ではオープンループのまま人間の操作特性を変化させる視座を持つ。よって、上記のオープンループ環境において、人間の操作パフォーマンスを向上させるために人間の操作を制御する方法の構築が重要な課題となる。ただし、人間が行う操作とは、多様な操作があり、何らかのトリガー刺激によってボタンを押すなどのきわめて単純な操作から提示された情報を高度に処理してその状態に対する対応策を入力するなどの

操作も考えられる。本研究では、こうした人間の操作をいかに制御し、結果的に良好なパフォーマンスが得られるかを検討する。上述したように、多様な操作が考えられることから、まず、基礎的な段階として、機械的に操作が規定される単純な作業ではなく、ある程度精神的負荷が発生する作業操作において、その操作を制御する手法に着目する。具体的には、作業操作のタスクとして、内田クレペリン検査⁽⁵⁾形式の暗算加算作業を取り上げた。

内田クレペリン検査は、被験者の作業特性を端的に分析するとき利用される。1桁の数字が横方向直前上に等間隔で記載されており、被験者は同一行内の隣同士の1桁の数を暗算で加算し、その下位1桁目を上記隣同士の数字の中央に記入する。そして、右方向に1桁ずらし、同様に繰り返す。1分経過したのち、下行に移動する。これを所定の時間繰り返し、疲労・慣れ・飽きなどの被験者の作業特性を観察する。こうした作業特性を把握することができるため、就職試験や職業適性検査などで利用されることがある。内田クレペリン検査の分析や結果の解釈の仕方については、多数の検討がある⁽⁶⁾。こうした暗算加算作業の成績は逐次リアルタイムで試験者には分からない。つまり、オープンループの操作環境下において、被験者の加算処理というパフォーマンスを制御する可能性を検討する。本研究では、後述する理由から操作の制御手段として聴覚的な刺激に着目した。2章で実験の手順や手法について述べ、3章で実験結果を示す。4章で考察し、5章でまとめる。

2. 課題設定と実験手法

操作タスクとして暗算加算作業を選んだ理由と操作制御手段としてビート音を設定した理由について述べ、その後、具体的な実験方法について説明する。

2・1 研究目的と手段としての暗算加算作業

人間の操作結果が逐次、操作者にフィードバックされない系で、操作者の操作特性を外部から制御する手段について検討する。最終的な研究目的は、人間—機械系オープンループ環境下で人間の操作特性を改善する手法を確立することであり、さらに、操作特性を制御することで、周囲への注意感度を制御する手法の実現可能性を見出したい。系の外部から人間の操作特性に影響を与える綿貫⁽⁷⁾の研究は、近赤外光を用いて頭皮上から非侵襲的に高次脳機能活動を測定する「近赤外光イメージング装置」(NIRS)を用いて、活性化する脳部位から指示教示のプロセスを生理的に解析している。本研究では初歩的なアプローチとして繰り返し練習などによって熟達した操作特性を外部からの操作制御手段によつ

て影響を与える手法を検討したい。この命題のもと、タスクを決定する必要がある。スタンプを繰り返し、印刷された枠の中に押してゆくなどの単純作業から虫食い算のような数学の問題を解法する作業などを準備として検討した。思考を伴わない単純作業では、作業ばらつきが出現するまでに多くの時間を要する。一方、複雑な問題をタスクとするとその問題に対する被験者の得意・不得意が顕著に発現し、熟達経緯や外部からの操作制御において作用因子が多数になり、制御効果の検証が複雑になると考えた。そこで、単純な作業でありながら、ある程度精神的な負荷があり、また、その傾向についての知見が多数ある暗算加算作業をタスクとして設定した。このタスクでは、単純な加算計算のため、作業者の回答が歪曲されることが少ないと考えられる。また、作業の実施・評価が容易で、短時間に作業に対して作業成績の評価が実施できる。さらに、被験者にとって基本的な作業については、特別な知識や器具が不要なので、誰でも容易に実施することができる。

2.2 操作制御手段としてのビート音提示

人間に操作制御刺激を提示する場面で、五感に作用する刺激として、例えば、計算している隣り合う数字の間に小さな光のスポットを照射し、その光のスポットをガイドとして作業方向に移動させる視覚的制御手法が考えられる。この移動速度を変更することによって作業変化を観測する。また、聴覚的刺激として、好きな音楽をかけるなどの手段、特異な臭覚刺激を与える手段などが考えられる。本研究では、複雑な装置などを設定することなく、簡便な手段による検証に配慮した。その点から、すべての被験者に一斉に刺激が簡単にほぼ均一に伝達できる聴覚的な刺激提示に着目した。超音波を用いた聴覚刺激と作業成績の関係においては、高橋ら⁽⁸⁾の研究がある。作業中の提示音楽と操作成績についての検討では、提示する音楽のリズム、音階、経時的なメロディ進行、提示音の周波数など多様なパラメータが存在するので音楽と操作の関係を逐次分析することが容易ではない。そこで、暗算加算作業における計算作業の繰り返しに着目し、ペースメーカーの指標になるビート音を提示し、そのビート音の拍数を変化させることによって操作制御の可能性を検証する。ビート音自体の周波数は440Hzとし、提示時間は0.5秒。ビート音間の無音部分の時間を変化させることによって拍数による変化を与えている。拍数の単位は、BPM (Beats Per Minute)で表現され、1分間の拍数を指標とする。提示音圧は、65dB SPL、約60phoneに相当する。実験では、1桁のランダムな数字をコンピュータで発生させ、A4用紙を長手方向に2枚繋げた用紙に9ポイントで1桁の数字を印刷した。作業による回答例をFig. 1に示す。左端から加算結果の1桁目のみを鉛筆で記入してゆく。1分経過するまでは、同じ行の計算を右方向に行う。1分経ったところで2行目の1列目に移り、その左端から加算する。以下同様に1分ごとの音声指示があり、1分ごとに行を下降する。前半15分間(15行)終了後、休憩を5分とり、再度後半15分間(15行)作業を繰り返す。1行の数字の数は100個あり、今回1分間で1行分の数字加算を最終の数字まで到達する被験者はいなかった。

```

3 5 9 5 5 2 6 9 8 4 1 5 1 2 3 2
8 4 4 0 7 2 5 7 2 5 6 6 3 5 5
9 8 5 2 3 3 4 6 8 5 4 7 9 1 5 8
7 3 7 5 6 7 0 4 3 9 1 6 0 6 3
6 5 8 2 5 4 9 6 3 1 1 3 5 2 4 5
1 3 0 7 9 3 5 9 4 2 4 8 7 6 9

```

Fig. 1 Experimental results

3. 実験結果

3.1 被験者と実験方法

被験者は、Table 1に示す特性を持つ3名である。実験は一人につき約2時間程度行った。謝礼報酬はないが、就職試験の準備として作業に取り組むよう指示し、被験者の作業に対するモチベーションは高い。また、すべての参加者から事前にインフォームドコンセントを得ている。

Table 1 Attribute of subjects

	Age	Gender	Self-reported personality
Subject 1	24	male	Careful behavior
Subject 2	23	male	Patient behavior
Subject 3	24	male	Impatient behavior

3名の被験者は、実験で行う連続的な暗算加算作業は未経験である。以下のような実験を設定した。

- 実験1) 暗算加算作業に慣れ、成績が安定するまで検査を体験する。成績が安定したところでビート音などの提示を行う。成績が安定するまでの過程を検証する。
- 実験2) 一定拍数のビート音を提示した環境下における作業回答成績とビート音拍数の関係を調べる。
- 実験3) 作業途中でビート音拍数を変化させ、時間的な作業成績変化を検証する。

実験1については、前半15分、休憩5分後に後半15分の1セットを1日に3セット行った。セット間の休憩は、30分とした。1日3セットの試行を毎日継続し、被験者3人それぞれの作業成績の標準偏差がほぼ一定の値に安定するまで作業を繰り返した。1セット30分の作業の中で前半の10行目から15行回目の6回と後半の25行目から30行目までの6回の平均値と標準偏差を求め、上記標準偏差の比を作業安定の指標とした。

実験1の作業に対し、作業成績が安定した時点で実験2を行う。提示するビート音の拍数を30、60、90、そして、120BPMと変化した状態で作業を行う。

実験3については、実験1によって作業成績が安定した3人の被験者が行う。実験1における被験者3人の平均作業量を調べると、全員が1分につき60個前後の平均回答数だった。つまり被験者の作業速度が60BPMに近いペースで行われる。したがって、60BPMのビート音を聞きつつ作業を行い、その途中でビート音の拍数を変化させ、作業成績の変化の様子を観察する。実験では、60BPMのビート音を提示しながら前半1行目から7行目までの作業を行う。7行目終了後、8行目からビート音の拍数が30、90、もしくは、120BPMのいずれかに変化した8行目から15行目までの作業を行う。5分の休憩をはさんで、後半16行目から22行目まで60BPMのビート音で作業を行い、23行目から30行目まで前半に変化した拍数と同じビート音提示下で作業を行う。

3.2 実験1の実験結果

作業成績の変化の様子をFig. 2に示す。

Fig. 2 Performance vs. training trials

横軸が1セット30行のセット回数を表し、縦軸が30行分の平均正解回答数である。同様な実験において、1セット内の30行分の正解回答数の標準偏差変化を Fig.3 に示す。

Fig. 3 Standard deviation of performance

3・3 実験2の実験結果

実験1で作業成績の標準偏差が一定の値に収束した後、一定の拍数のビート音を作業時間中、終始提示したときの作業成績の変化を Fig.4, Fig.5 に示す。

Fig. 4 Performance vs. Beat number

Fig. 5 Standard deviation of performance vs. Beat number

Fig. 4, Fig. 5で横軸は、作業中に終始提示したビート音の拍数を示す。0 BPM は、ビート音を提示していないことを意味する。縦軸は、5セット実施したときの5セット目の30行分の正解回答数の平均値である。また、Fig. 5の縦軸は、上記5セット目における作業結果30行分の正解回答の数の標準偏差である。

3・4 実験3の実験結果

Fig.6に実験3の結果を示す。Fig.6の横軸は作業中に提示するビート音の拍数を示し、60BPM を起点に矢印の方向に示す拍数に変化したときの正解回答数の平均と標準偏差の変化の様子を示す。Fig.6におけるビート音拍数の変化の組み合わせは、60BPM→30BPM, 60BPM→90BPM, 60BPM→120BPMの3パターンである。

Fig. 6 performance change when BPM values of beat sound change

Fig.6では、前半、後半とも30, 90, 120BPMのビート音提示環境下での作業5回分の正解回答数の平均値として操作成績を表現しているが、ビート音が変化した直後の作業成績変化の特徴を詳細に検討したい。そこで、実際の正解回答がビート音の変化によってどのように変化しているかを Fig.7 に示す。Fig.7(a)は、60BPM から30BPMに変化したときの被験者別の正解回答数変化の様子を示し、Fig.7(b)は、60BPM から90BPMに変化したときの被験者別の正解回答数変化の様子を示す。図中に示す太線枠内がビート音の拍数を変化させた区間である。

Fig. 7(a) Performance change when BPM values change 60BPM to 30BPM

Fig. 7(b) Performance change when BPM values change 60BPM to 90BPM

4. 考察と操作制御の可能性

それぞれの実験結果について考察し、ビート音による操作特性制御の可能性について検討する。

4.1 実験1の考察

被験者 A は、2 回目から 1 分間 60 個程度の正解回答数となり、以後、大きな変化はない。一方、被験者 B は、1 回目の試行から徐々に正解回答成績を伸ばし、5 回目以降、おおむね安定した正解回答数となっている。なお、平均正解回答数を示しているので、1 セット内 30 行分の正解回答パターンは、微妙に異なるが、30 行分を平均化すると図のような収束状態が見えてくる。本来、内田クレペリン検査では、1 セット 30 行分の正解回答数の平均値を論じるよりも正解回答数の経時的な変化パターンに着目する。このパターンから作業特性を議論するが、本研究では、作業全体としてのパフォーマンス指標として 30 行分の正解回答の平均値を用い、1 セット内の行別変化については論じない。将来的には検討する必要があると考えるが、ビート音による操作成績の影響を解析するため、必要以上に問題を複雑化しないために個別の作業特性を全体の正解回答数の平均値を用いる。

Fig 2 では、4 回目以降比較的安定した平均正解回答数を示している被験者 C であるが、Fig 3 の標準偏差の変化では、4~7 回目付近で 30 回分の正解回答数の標準偏差が大きく変化し、詳細には不安定であることが見て取れる。しかし、3 被験者とも 7 回目以降において標準偏差の変化が小さくなっている。おおむね、作業成績が安定してきたと考えられる。実験 1 では、被験者が連続した 3 日にわたって、1 日に 3 セットずつ実験を行った。1 日目の 3 セット目と 2 日目の 1 セット目（最初からは、4 セット目）などとの作業成績の不連続性に注意したが、上述したように、1 セット 30 分の作業の中で前半の 10 行目から 15 行目の 6 回と後半の 25 行目から 30 行目までの 6 回の平均値と標準偏差を求めた数値としてため顕著な不連続性は見受けられなかった。

4.2 実験2の考察

ビート音を提示しない状態で操作成績が安定した被験者に対して 30BPM のビート音を作業中終始提示していると全体として、操作成績が低下し、また、Fig 5 より正解回答数の標準偏差が大きくなる。明らかに、30BPM のビート音に作業ペースを乱され、正解回答がでにくくなったと考えられる。一方、60BPM においては、被験者 A においては、標準偏差が小さくなり、作業成績もビート音がない試行と同等なレベルになっている。被験者 B、C も 30BPM 提示時よりは操作成績、および、その標準偏差がビート音を提示していない試行の値に近づいている。さらに、提示するビート音の拍数を大きくすると、作業成績への影響が及ばなくなってくると考えられる。これは、1 セット全体を通しての評価値であるが、全体のパフォーマンスを見る範囲では、ビート音の拍数を上昇させることにより作業を速めに制御することはできない。Fig 5 の標準偏差から考察すれば、30BPM で作業が大きく乱されているが、60BPM 以上では、ビート音を提示しないときの正解回答数と同等の標準偏差が示している。被験者に作業時の印象を聞くと、大きな拍数を持つビート音では、ビート回数が最初は気になるが、その後、単なる背景音として認識され、作業にあまり影響がなくなってくるとのコメントを得た。一方、30BPM においては、作業中、いつまでも気になる状態が続いていたとの報告を受けている。その結果が、Fig 4、5 に表れていると考えられる。このことから、この実験においては、提示ビート音を実際の作業テンポよりも小さくすると、そのビート音の影響を受け、作業ペースが乱れ、作業成績が低下し、作業のばらつきが生じる。一方、ビート音が実作業テンポよりも大きくなると、最初のうちは影響を受けるものの、自分のテンポで作業を行い、外部のビート音に影響されない状態となることが分かる。また、ビート音を実作業テンポよりも

大きい拍数で提示しても、作業全体としての制御効果は認められなかった、人間が自分の操作テンポよりも速い聴覚的刺激に対して、大きな負担を感じ、疲労することにより、刺激音としてのビート音が気にならなくなるのかもしれない。逆に、遅いテンポのビート音に対しては、遅いビート音に慣れることなく、作業に影響が現れた。

4.3 実験3の考察

作業途中でビート音の拍数を変化させたときの作業成績の変化について検討する。正解回答数の平均計算の範囲を少なくして、逐次的な変動が観測できるようにした。Fig 6 において、どの被験者も 60BPM から 30BPM にビート音を変化させたとき作業成績が低下する。各被験者 5 回の試行データからすべての被験者において、有意水準 0.01 で有意な差異が認められる。この様子は、Fig 7(a) のデータ例から顕著に知ることができる。明らかに、どの被験者においても 7 回目までの 60BPM から 8 回目の 30BPM で大きく作業成績を落としている。しかし、正解回答数のばらつきが大きいながら、30BPM のビート音提示内で成績の回復が見られる。同様な変化が前半と後半の 60BPM から 30BPM に変化する過程に見られる。一方、60BPM から速い拍数となる 90BPM については、Fig 6 に示すように有意な正解回答数の変化は認められない。しかし、細かく正解回答数の変化を観測すると、Fig 7(b) に示すように、90BPM に変化した直後に 1 行分は、作業成績を伸ばす。しかし、その後時間が経過するにつれて、作業成績は低下し、60BPM の時と差がなくなる。よって、大局的に観測するならば、Fig 6 で示すように、60BPM と 90BPM の作業成績は大きく違わない。よって、ビート音を上昇させることにより、非常に短い期間の作業成績改善は観測されるが、すぐ作業成績が元に戻る傾向がある。このことは、前述したように、拍数の多いビート音は、最初は気になるがすぐ気にならなくなるという被験者の感想で納得できる。一方、ビート音の拍数が自分の作業テンポよりも大きく遅い場合、その遅さに慣れにくく、作業を抑制する方向に動く可能性があることが見て取れる。

ここで、定常的なビート音提示下での作業成績と作業中にビート音を変化させたときの作業成績の違いに着目する。実験 3 において、ビート音の拍数が上昇した直後の作業成績が 1 分程度分と短期間変化することに着目し、1 行ごとにビート音を 60BPM と 90BPM に変化させ、正解回答数の変化を検証した。具体的には、1 行目が 60BPM、2 行目が 90BPM、3 行目が 60BPM とビート音を変化させ、前述の被験者 3 名が 5 セット同条件で試行したときの平均正解回答数を Fig.8 に示す。

Fig 8 Performance change when BPM values change alternatively

Fig 8 では、被験者ごとに無音状態の場合、60BPM、90BPM のビート音提示環境下、そして、上記の 1 分ごとの 60、90BPM のビート音変化別の平均正解回答数を示す。全体としての作業成績が

90BPMのみ提示した場合よりも60BPM, 90BPMを1分ごとに繰り返した場合のほうが作業成績が向上する。被験者 A, B においては、有意水準 0.05 で無音, 60BPM, 90BPM に対して 60BPM, 90BPM の交互提示環境下に作業成績の有意差が認められる。ビート信号を交互に変化させたほうが、制御成績は向上すると考えられる。

5. まとめ

ビート音の提示拍数と暗算計算作業成績に着目し、以下の検討結果を得た。

1. 暗算計算作業は、ビート音の提示で作業成績が変化する。
2. 暗算計算の自己ペースのテンポよりも遅いビート音に対しては、作業成績が長期間影響される。
3. 暗算計算の自己作業ペースのテンポよりも速いビート音の提示では、一瞬作業成績に影響が出るが、その後影響しなくなる。
4. ビート音拍数を短時間で変化すると、作業成績に長期的な変化が現れることがある。

本基礎的研究では、被験者が少数でさらなる実験が必要であるが、3名の被験者が類似した傾向を示したことから本研究で得られた知見の可能性は大きい。被験者を拡大し、より信頼性の高い検討結果を得たい。

今回の実験では、暗算加算というタスクに対する作業成績に着目した。暗算加算の作業成績が改善されるということは、集中力が増加して計算処理の処理量や正解数が多くなると考えられる。つまり、作業成績が改善したということは、高次脳機能の視点から作業に対して意識を集中させるレベルが上昇したと言える。このことの生理的な立証は、十分に必要であるが、作業成績と意識レベルや注意レベルとの相関が認められるとすれば、聴覚的なビート音によって注意意識を制御できる可能性を示したことになる。例えば、1章で述べたように、車線変更時にターニングナルライトレバーを操作する。この時に、ターニングナルライトの点滅に同調して音が鳴るが、この音の周期を断続的に変化させることにより、車線変更時の集中力を高め、周囲状況を十分に確認するこ

となく漫然と車線変更する場面で効果が期待できる。また、車両後退時にも断続的な警報音が鳴るが、この警報音の拍数を変化させることで、注意を喚起できるかもしれない。こうした分野への適用については、まだ多くの検討の必要がある。今後、被験者を増やして実験の回数をこなすことによってより多くの実験データを測定すると共に、さらに聴覚刺激の形態を変化させオープンループの人間—機械系で人間の操作特性などに影響を与える仕組みを検討する。

謝 辞

本研究は、平成 24 年度科学研究費補助金 基盤研究 (A) 24241056 「想定外リスク環境下でのシステム安全のための人と技術と法のレジリエンスデザイン」の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- (1) D. T. McRuer, E. S. Krendel, Mathematical Models of Human Pilot Behavior, AGARD-AG-188, (1974).
- (2) 島田竜矢, 諏訪正典, 田中敬司, 操縦装置が人間—機械系に及ぼす影響, 人間工学, Vol.47, No.1, (2011), 36-40
- (3) Hiroshi Igarashi, Subliminal Calibration for Machine Operation, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.16, No.1, (2012), 108-116
- (4) Hirohiko Honda, Mouse Operation Support for the Physically-Challenged Person's Who have Progressive Intractable Diseases, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.16, No.1, (2012), 131-138
- (5) 内田勇三郎, 新適正検査法—内田クレペリン精神検査—, 日刊工業新聞社, (1957).
- (6) 清野絵, 笠井清登, 工藤紀子, 健康成人における内田クレペリン検査成績と人格特性との関連, 精神医学 Vol.48, No.2, (2006), 127-133
- (7) 綿貫啓一, 鋳造における技術・技能伝承, 塑性と加工, Vol. 47, No.550, (2006), 1027-1032
- (8) 高橋宏, 本多博彦, 運転支援への超音波利用の可能性に関する一考察, 電気学会論文誌 C, Vol.130, No.9, (2010), 1636-1643