機械操作時における心負担推定に用いる
心拍変動モデルの構築*栗谷川 幸代^{*1}, 景 山 一 郎^{*2}A Modeling of the Heart Rate Variability to Estimate Mental Work Load
at Mechanical OperationsYukiyo KURIYAGAWA^{*3} and Ichiro KAGEYAMA^{*3} Nihon University, Dept. of Mechanical Engineering,
1-2-1, Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba, 275-8575 Japan

The method of task evaluation is divided into the following classes. One is operating achievement to determine the ability of each operator, the other is the relationship between the efficiency of the mechanical system and control result to determine the human-machine system. Recently, a lot of research has been done in the latter field. Therefore, it seems that the performance of mechanical systems have been developed rapidly. However, at the point of the task evaluation, it is very important to consider not only performance of the total human-machine system but also the mental stress and degree of effort of the operator. Because human being have a high adaptability to surroundings. Therefore, in order to take into account these aspects, the research on the Mental Work Load of the operator has been done recent years. Therefore we construct the dynamic human model to describe the dynamics of the Heart Rate Variability, because a strong relation exists between the Mental Work Load and the Heart Rate Variability which is determined by autonomic nervous system and is also easily measured. Therefore, it is possible to analyze the model to know the law of causation between the input and output.

Key Words: HRV Model, Heart Rate Variability, Mental Work Load, Factor Analysis, Neural Network

1. 緒 言

人間・機械・環境系を取扱う場合、キーとなる人間の特性、情報処理過程、評価などを明確にすることが重要となる。しかし、人間は高い適応能力をもつことから、機械の作業効率や作業成績だけでは十分な評価が行えない場合があり、人間が受ける精神的負荷や作業遂行に関する努力度合いも含めた評価が必要になる。これらの評価は、大きく分けて主観的評価と客観的評価の二つに分けられる。人間の意志に基づく前者の主観的評価は、被験者の年齢、熟練度、体調等に大きく依存し、再現性などに問題が残る。そこで、評価の数量化の観点からも、後者の客観的評価への移行が必要であると考え、このことから、心負担を受けたことにより生じる生体反応から、間接的に心負担を推定する方法が検討されており、過去、心負担と関連が強いとされる心拍、脳波、呼吸、脈波、皮膚温度といった種々の生体計測が行われてきた⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。これらの研究の多くは、ある作業を一定負荷と仮定したり、作業

パターンに対する平均的な評価として取扱っている。しかし、実際には多くの作業において時々刻々状況が変化しており、時系列的な心負担の評価が必要となる。これに加え、負荷の原因特定が行えれば、さらに人間・機械系の設計に大きな指針を与えられる可能性がある。しかし、時系列的な心負担の評価の検討はあまり行われていないのが実状である。そこで、本研究では、特に心負担にかかわりが深く、また計測が手技的に容易である心拍変動に注目し、この変動と負荷とを統合させた動的な心拍変動モデルの構築を行い、このモデルの因子解析を行うことにより、心負担の時系列数量化および負荷原因特定の可能性について検討を行う。

2. 心負担評価手法

生体反応とは、ある作業を遂行するために動員される生体機能の反応であり、この反応の変動を細かに追求していくことで、その作業あるいは作業手段の作業者に対する影響が明らかにできるものと考え、

心拍変動は、ストレスに対して反応する機構を担う交感神経と、安静時に逆の働きを担う副交感神経の相反する2種類の自律神経の活性度合いを反映する。このため、心拍間隔RRI(R-RInterval)は、被験者が受

* 原稿受付 1999年7月12日。

^{*1} 准員、日本大学大学院 (☎ 275-8575 習志野市泉町1-2-1)。^{*2} 正員、日本大学生産工学部。

E-mail: c91830@ccu.cit.nihon-u.ac.jp

Fig. 1 Heart rate variability

Fig. 2 Flow chart for calculation of RRV

けている心負担と密接な関係をもつこととなり、常にゆらいている。

このRRIを周波数解析すると、図1に示す0.1 Hz付近に血圧性変動にかかわる成分および0.3 Hz付近に呼吸性変動に関わる成分がとらえられる。これらのピークは、被験者の状態に応じ、そのレベルおよび周波数が変化する。通常、心負担評価ではそれぞれのピークの発生原因から、0.1 Hz付近に表れるピーク(LF: Low Frequency)および0.3 Hz付近に表れるピーク(HF: High Frequency)に注目する。副交感神経が低い周波数から高い周波数までの広い領域の伝達特性を有するのに対し、交感神経は0.15 Hz以上の変動を伝達できないことから、これらの変動は、LFが心臓交感神経および副交感神経相互の、HFが副交感神経の活動指標として考えることができる^{(1)~(3)(8)}。一般的に、車両を操縦中の被験者において、LFは心負担により増加し、またHFは減少する。これらのピーク周波数成分の時系列的変動を、移動平均によるフィルタを用いて抽出したのがRRV(R-R Variabil-

Fig. 3 Experimental course

Fig. 4 Heart rate and results of RRV analysis

ity)法⁽⁹⁾(図2)である。ここで、RRV3はHFを含む約0.15 Hz以上の周波数成分をハイパスフィルタを用い、RRV9はLFに相当する約0.1 Hz付近の周波数成分をバンドパスフィルタを用い抽出したものである。そこで本研究では、時系列的な評価を考え、RRV3、RRV9をそれぞれの拍数の中心拍数について算出し、解析に用いた。

実験は、図3に示す(財)日本自動車研究所内、約660 mの片側一車線通行の道路を用い、2200 cc右ハンドルの国産車にて、ドライバの心拍および制御動作、車両の状態量、コース形状を計測した。また走行環境を一般道の通常運転時に近づけるため、コース内数箇所に速度標識、一箇所に段差として鉄板(図3中: plate)を設置し、対向車(図3中: pass)を走行させた。このコースで9名の被験者について2回の練習走行を行った後、計測走行を行った。ここでは、30歳男性(運転歴12年)の解析結果を示す。

図4に、心負担の時系列的評価で用いられる瞬時心拍とRRV解析結果を示す。図4より、心負担(MWL: Mental Work Load)増加によりRRV3は低い値を、瞬時心拍、RRV9は高い値を示す傾向が明確に見られる。また、特に瞬時心拍、RRV解析結果

ともに各カーブ通過による緊張度の増加が推測される箇所、その変動は(瞬時心拍, RRV 9 では上昇, RRV 3 では減少)顕著である。しかし, RRV 解析では明確に表れている対向車とのすれ違い, 道路に敷かれた鉄板の段差などによる心負担変動が, 瞬時心拍では捉えることができない。これは瞬時心拍が, 積分的に受ける外的負荷(ここではカーブ通過)に対する心負担変動の表現は可能であるが, インパルス的に受ける外的負荷(ここでは対向車とのすれ違い, 道路に敷かれた鉄板の段差)に対する心負担変動は, 表現できないことを示しているものと考えられる。このことから, RRV 解析が瞬時心拍に比べ, より厳密な心負担の時系列評価法として適当であることがわかる。また, 各カーブにおいては生体反応の遅れがみられるのに対し, すれ違いでは早くから反応がみられる。これは, ドライバが対向車を認識した時点で心負担が生じたためと考えられる。

3. 心拍変動モデル

2章では, 心負担評価手法について示したが, 心拍変動などの生体機能反応を用いて評価を行うには, 以下のような生体機能の一般的な性質を考慮する必要がある。

- ・個人差: 同一作業下でも, 生体機能の値, 変化量等が人により異なる。
- ・生活条件の影響: 同一被験者でも, 生活パターンの変化により変動する。
- ・日内変動: 同一被験者でも, 生体機能の値が一日の中で変動する。
- ・時間変動: 同一被験者でも, 作業開始から時間経過に伴い生体機能が変化する。

測定した生体反応には, 外部刺激を受けたことにより生じる心負担に, これらの性質が相互にからみ合っているものと考えられる。そのため, 被験者を限定した場合でも, 長時間の同一条件下における繰返し実験を行うことは不可能に近く, 人間に与える心負担の再現性にも十分な検証が行われていないのが実状である。

また, さらに心負担と生体反応との間の伝達特性把握, 心負担を引き起こす要因の特定など, 人間・機械・環境系としての総合的な評価も, 心負担の数量化を行うためには, 避けられない課題と考えられる。そこで, 本研究では, これらの問題を解決する手段として, 作業時における外部刺激とそれにより生じる心拍変動を再現するモデルの構築を行った。

解析対象として, 前節の自動車運転時の心拍データ(生体反応)を, 車両の状態量, 環境情報(外部状況)と

結びつけた心拍変動のモデル化を行う。本研究ではこのようなシステム同定に最適であり, また事前に人間の生体機能制御アルゴリズムを規定する必要がなく, 種々の情報の入力とその状態に対する出力を与えることにより内部の伝達特性を自己組成するニューラルネットワークシステム(以下 NNS)を用いた。

モデルの構築にあたり, 人間の運転動作にかかわる要因についての検討を行う必要がある。通常, 人間は自動車運転時, 絶えず速度などの車両の状態量と周囲の道路状況などの環境情報の処理判断を行い, 操舵などの車両の制御を行っているものと考えられる。また, このような状況下では, 心拍変動に制御過程における制御成績の善し悪しや情報収集等による情動履歴が含まれているものと推察される。そこで, 本研究では, 心拍変動の動特性表現を行うため, 動的 NNS モデルの構築を行う。

本モデルでは, 心拍の動特性表現のため, 現在の状態量から将来の RRI を推定することになる。そこで出力には RRI の増加分を取り, 現在値に加えることで次の RRI を出力させる。また出力された RRI をフィードバックすることにより, この計算を連続的に行うことができる。この動的モデルでは, 構造上次の RRI の増分を推定することから, テーラ展開を行った場合の高次微分項を考慮する必要がある。このモデルでは n 個前までの RRI を入力する。モデル構築において考慮すべき車両の状態量, 環境情報は, さまざまなものが考えられるが, ここではモデルの複雑化を避けるため, それぞれのパラメータの中から特に人間の制御動作に対し高い感度⁽¹⁰⁾を示すものを加えた。具体的には車両の状態量として, 横滑り角, ロールレイト, ヨー角加速度の3項目を, また環境情報としてレーダサイト概念に基づき進行方向を基準とした自車両から路端までの右に $30^\circ(R30)$, $90^\circ(R90)$, 左に $90^\circ(L90)$, そして進行方向(0°)の4項目を用いた。ここで, レーダサイトによる距離情報とは, 車両の進行方向に対し正負の角度を持った車両の重心点を基準にした複数の視線を考え, これと路肩およびセンターラインまでの距離を道路環境として表現するものである。つまり, ドライバが周りの位置関係(道路形状等を含め)と自車の走行位置を認識するのに使用する情報と考えられる。前述 n の決定においては, この値をパラメータとして解析を行ったところ, 図5より4程度で最終誤差がほぼ一定値に到達していることがわかり, 本モデルでは n を3とした($T(i)$: 現在, $T(i-1)$: 1 拍前, $T(i-2)$: 2 拍前, $T(i-3)$: 3 拍前)。これらを入出力情報とした心拍変動モデルを図6に示

Fig. 5 Integral of the square of the error at the convergence

Fig. 6 A Model of heart rate variability

す。なお、車両の状態量、環境情報は各心拍間隔 T の平均値を逐次与えた。使用した NNS は 3 層構造で入力層 11, 出力層 1 とし、中間層は試行錯誤の結果 20 として、学習時には誤差逆伝搬法を用いた。このモデルの実験結果と学習結果の比較を図 7 に示す。この図より、実験結果と学習結果が非常によく一致していることがわかり、本モデルが心拍変動と車両の状態量および環境情報との結びつきを表現できたものと考えられる。

次に、このモデルの確認を行うために、心拍変動を表現する $T(i)$, $T(i-1)$, $T(i-2)$, $T(i-3)$ には初期値のみを与え、入力として各心拍間隔 T における車両の状態量、環境情報の平均値を与え、動的解析を行った。実験結果と動的計算結果の比較を図 8 に示す。この図 8 より、実験結果と動的計算結果が非常によく一致しており、本モデルが、心拍変動と車両の状態量および環境情報との関係を明確に表現していることがわかる。これにより、今後の心負担解析のためのツールが構築されたものと考えられる。

4. 心負担に対する因子解析

3 章において、心拍変動と車両の状態量および環境情報とを結びつけた動的な心拍変動モデルを構築した。そこで、本研究では、構築したモデルを用い、前述した人間・機械・環境系における総合的評価の課題であ

Fig. 7 Output of the NNS part

Fig. 8 Output of the dynamic model

Fig. 9 Factor analysis

る心負担を引き起こす要因特定のため、因子解析を行い、このような解析ツールとしての可能性について検討を行う。

本モデルが NNS で構築されていることから、まず図 9 に示す 1 個のニューロンについて考える。ニューロン内の計算過程は、まず、ある入力 X_i に重み W_i が掛けられ、それを線形結合させ、内部変数 u を構成する。この内部変数 u が出力 Y を算出するための出力関数 f の引数となるが、この u は各入力における $X_i \cdot W_i$ の線形結合で形成されるため、出力 Y は $X_i \cdot W_i$ の比で分けられることになる。このような方法で、全体のニューロンについて行い、出力層ニュー

ロンの出力 ΔT における各入力の影響度合いを求め、

まず、モデルの出力の心拍変動に対する各入力の影響度を図 10 に示す。ここで、図 10 中 A, B, C は前述の実験コースにおけるカーブ A, B, C を示している。図 10(a) より、心拍変動に対する右 30°, 90°, 進行方向 (0°), 左 90° の環境情報の影響が大きく、また変動していることがわかる。特に、比較的急なカーブ B, C 進入時において、この変動は顕著であり、この地点において、環境情報心負担因子による心拍変動が生じたものと考えられる。図 10(b) より、車両の状態量の影響は非常に小さいことがわかる。本実験では、被験者に通常運転(車速平均 48 km/h)を行うように指示しており、車両特性が不安定な挙動を起こすことはなかったため、車両の状態量が心負担因子にはならなかったものと考えられる。また、図 10(c) に示す RRI の現在の値以外の影響度は、非常に小さいことから、本実験では、心拍履歴の内的要因ではなく、環境情報の外的要因が心拍変動に対し、大きく影響したものと考えることができる。

そこで次に、心負担の評価値に対する各因子の影響度の変動をみるため、各入力の影響度に対し RRV 解析を行い、この総和を 100% としたものを図 11 に示す。図 11 より、心拍変動に対する影響度同様、各カーブにおいて右 30°, 90°, 進行方向, 左 90° の環境情報が心負担変動に非常に大きな影響を与えていることがわかる。また、緩やかなカーブ A 進入時における各因子の割合の変動は少ないが、見通しが悪く、急なカーブ C 進入時における割合には大きな変動がみられる。これは、急なカーブでは、環境変化が急激に起こっているため、ドライバの状況判断も早く対応する必要性があることから生じているものと考えられる。次に、この変動を応答性のよい RRV 3 (おもに副交感神経系の指標) について考察する。

ここで、RRV 3 は心負担により減少する指標であるから、RRV 3 をある瞬間、押し下げる方向に影響している因子に着目する。左カーブ B 進入時には、ほぼ一定割合であった L 90 (カーブ内側) が瞬間的に低くなり、その後 R 30 (カーブ外側) の割合が低くなっている。このような現象は、右カーブ C 進入時にもみられる。また、カーブ B に比べてさらに急なカーブ C ではこの変動は急激であり、応答性の悪い RRV 9 でもこの変動をみることができる。これは、見通しのよいカーブ B では、左右の十分な環境情報の収集が出来ることに対して、見通しの悪いカーブ C では、カーブ内側の環境情報がほとんど収集出来ないことか

(a) Information from the environment

(b) The behavior of vehicle

(c) Heart rate variability

Fig. 10 Influence of RRI

ら、これが心負担となり、このような急激な変動が生じているものと考えられる。これより、本被験者は、カーブ進入時にカーブ内側の形状をもとにカーブ形状を把握し、次にカーブ外側の形状 (L 90) をもとに実際の操舵などの制御を行っていく過程における情報収集作業が、心負担に大きく影響しているものと推察される。また、被験者は実験後のアンケートでカーブを走行する際には、カーブの内側と外側を見ていたと答え

Fig. 11 Influence of RRV

ており、この解析結果を裏付けている。

これにより、心負担変動に与える個々の心負担因子の影響度合いが通過しているカーブ等、個々の環境情報ごとの影響度を分離しうる可能性が示された。

5. 結 論

本研究では、心負担の数量化の観点から、各種心負担評価手法のうち、特に心負担にかかわりが深い心拍変動に注目し、過去に報告されている RRV 法の確認を行った。次に、心負担による伝達特性の把握およびその要因の特定を行うため、ニューラルネットワークを用いて人間・機械・環境系を統合した心拍変動モデルを構築した。このモデルを用い、心負担を引き起こす要因特定として因子解析を行い、本モデルの心負担時系列評価の可能性について検討を行った。下記に本研究で得た結論をまとめる。

(1) 心拍変動に対する自律神経の動的な調節活動を、周波数のフィルタ特性を利用して抽出した RRV 法では、状況変化に伴う心負担変動を時系列的に表現するとともに、瞬時心拍では表現できないパルス的な外的負荷でも、より厳密に時系列評価が行えることを確認した。

(2) 人間の生体機能制御アルゴリズムを規定することは非常に困難であることから、内部の伝達特性を自己組成する NNS を用い、心拍変動モデルを構築した。NNS での構築には、入出力情報の選定が重要と

なるが、実験結果と動的計算結果を定量的に一致させることができ、本モデルが心負担の動特性表現を行えるとともに、内部には、心負担を引き起こす要因とそれにより変動する心拍変動のアルゴリズムが形成できたものとする。

(3) 心拍変動と車両の状態量および環境情報とを結びつけた心拍変動モデルを用い、心負担を引き起こす要因特定のため因子解析を行った。その結果、通過しているカーブ等、個々の環境情報変化により、心負担変動に与える個々の因子の影響度合いを分離しうる可能性が示された。

本研究の一部は文部省科学研究費により実施されたものである。実験時に多大なご協力を頂いた(財)日本自動車研究所に、また本研究の解析、実験等でご協力頂いた当研究室卒業生の野村氏、荒井氏、大学院の宮岸氏に対し、心から感謝する次第である。

文 献

- (1) 草野順一郎、心拍変動の自己帰帰スペクトル分析による自律神経機能の評価、自律神経、25(1988)、334-344。
- (2) 大須賀美恵子・ほか3名、自律系生理指標を用いたメンタルワークロードの評価に向けて、計測自動制御学会論文集、29-8(1995)、976-986。
- (3) 野口義博・ほか1名、心拍変動性指標による車両評価の検討、自動車技術会論文集、50-7(1996)、55-60。
- (4) 吉田倫幸、脳波の周波数ゆらぎ計測と感情評価、機誌、98-918、(1995)、71-74。
- (5) 片山硬・ほか2名、自動車運転時のドライバーの脈派のゆらぎ、自動車技術会論文集、27-4(1996)、89-93。

- (6) 西村千秋・ほか4名, 皮膚電位水準による自動車運転時の覚醒水準評価の試みⅠ, 人間工学, **23-2**(1987), 103-109.
 - (7) 松浦謙・ほか1名, 運転者の生体反応による運転作業負荷の評価に関する研究, 日本機械学会通常総会講演会論文集, IV, (1996), 376-377.
 - (8) 井上博編, 循環器疾患と自律神経機能, (1996), 58-88, 医学書院.
 - (9) 渥美文治, 心拍計測によるドライバの意識状態評価, 自技会学術講演前刷, 946(1994), 133-136.
 - (10) 景山一郎・ほか1名, 自動車を操縦するドライバの制御動作に関する研究, 第5回交通・物流部門大会講演論文集, (1996), 213-220.
 - (11) 景山一郎・ほか1名, 心負担の推定のための心拍変動モデルに関する研究, 第7回交通・物流部門大会講演論文集, (1998), 203-206.
-