知的作業の客観的評価の手法*

広瀬 通孝** 石井 威望**

A Method for Objective Assessment of Mental Work

by Michitaka HIROSE and Takemochi ISHII

A quantitative method to analyze mental work, such as programming or CAD operation, is discussed. The authors are proposing to define an index, named 'RRV', which is a variance of interval between successive R-spikes in E.C.G. (Electro Cardio Graph). In order to increase the measurement efficiency of RRV and to extend the time range of the measurement, a simple and handy-sized measuring unit is developed.

From the result of experiments, it is proved that RRV is strongly connected with the condition of mental work. Under such intensive mental work as repetitive calculation for a long time, the value of RRV of the worker becomes lower than that under usual mental work. In addition, other basic characters of RRV, for example, the time-scale of its dynamic behaviour, are studied.

Lastly, as a practical application, RRV is measured during computer programming, and several interesting phenomena are observed.

Key Words: Systems Engineering, Human Engineering, Man-Machine Interface, Electro Cardio Graph, Medical Electronics, Work Study

1. 序論

生産工程の自動化、合理化が著しく進展した結果、工程における筋肉労働は殆ど駆逐され、プログラミング、CAD作業、ワードプロセッサの操作など、所謂「知的作業」の重要性がますます増大しつつある。これらの作業は、(1)人間の高度な知的能力を必要とする作業である、(2)心理的、生理的状态により作業能率が大きく変化する、(3)外見的には顕著な体動を伴わない、などの特徴を有している。このような作業に対して、F. Taylorらによって提唱され、今日の作業管理手法の主流となっている作業・時間研究の考え方を適用することは、かなり困難である。

著者は、従来よりこの点に注目して、知的作業、特にプログラミング作業を対象とした作業研究の方法論の開発を行っている。上記のように、知的作業の特色は人間の内的状態の本質的な部分まで議論しなければならないところにある。然るに、たとえば作業に対す

る覚醒度のような知的活動に関連する基本的状態量すら、定量化がなされていないのが現状である。

知的作業のセマンティクスはひとまず除外するとし、作業者の内的状態をマクロにモニタするために、生体信号の計測が有効である。代表的なものとして、ECG(心電図)、EEG(脳波)、SPL(皮膚電位)、呼吸数、体温、血圧等を挙げる事ができる。たとえば西村ら[1]は、自動車運転時のSPLを計測し、それが運転者の覚醒度と極めて高い相関を有することを報告している。

本報告ではECGを利用する。それは、(1)計測が非侵襲的であり、危険が無い、(2)高価な測定器を必要としない、(3)変動の時間スケールが小さく、かなり高速な変化まで検出できる可能性がある等の理由による。関口ら[2]によって、航空機の操縦などの極めて高度の緊張を有する作業においては、心拍数の変動量が通常とは異なることが報告されている。本報告では、この現象を比較的軽度の作業計測にも利用することが試みられ、指標としての妥当性とその基本的性質、計測装置の設計、実作業における利用法等が論じられている。

* 昭和60年10月2日 第63期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和60年2月25日。

** 正員、東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

2. 精神的ストレスの指標化と RRV

典型的な心電図の波形を図1に示す。図中の棘波はR波と呼ばれるが、ここではさらにR波の間隔をRRI (R-R interval)、一定数のRRIの正規化された分散を計算し、その変動幅の指標としたものをRRV (R-R variance)と呼ぶこととする。つまり、

$$RRV = \{ (\overline{RRI^2}) - (\overline{RRI})^2 \} / (\overline{RRI})^2$$

である。

図1 心電図の波形

文献[3]では、被験者に対し、簡単な数字当て作業を行わせた時のRRVの変化が報告されている。この作業では、CRT上に0.5秒表示される一定桁数の数字を被験者が認識し、直ちにキーボードから再入力を行うことになっている。この作業時におけるRRVの平均値を、作業桁数をパラメータとして整理したのが図2である。図から明らかなように、作業桁数が増加するにつれてRRVは減少する。ただし、桁数が6桁を越えて、作業の難易度が著しく増大した場合、RRVは増加に転じる。

この実験から明らかなことは、まず、この程度の端末作業においても、作業負荷に応じてRRVの変動が観測できることであり、作業負荷の増大に伴い、RRVが減少している。さらに作業負荷が大きい場合には、RRV値は却って増加することがわかる。(スノーイングと呼ばれる現象) つまり、RRVは、被験者の作業に対する覚醒度を反映する量である。少なくとも1時間程度の短期的作業においては、RRVが小さい程、作業

が作業に集中した望ましい状態にあるといえることができる。

図2 作業の難易度と RRV

この議論をさらに一般化して考えると図3のようになる。作業の良し悪しは作業の能率と容易性 (RRV) による。たとえば、作業Aという同一作業方式をとる限り、RRVが減少するほど作業集中度が増加し、作業能率は向上する。つまり、スノーイングを起こさない限りにおいて、RRVを低くするという代償のもとで作業効率を高めることは合理的な選択である。つぎに、異種作業の比較を行う場合、図で作業Aは作業Bより容易な上に能率的である。つまり、AはBより優れている。作業AとCを比較することは困難であるが、一般的には、スノーイングを起こさない限りCが選択されるであろう。しかしながら、作業能率が一定であれば、RRVは勿論大きいほど良い。

RRVを指標として採用することにより、マンマシンインタフェースの評価がより定量的に行えるようになった。従来、定性的言語でしか語れなかった「使用性」という概念を明確に定義できるようになるからである。

図3 作業能率と負荷の考え方

図4 RRV計測ユニット

3. RRV計測装置について

RRVを実際の作業の管理指標として活用するためには、計測装置を小型化し、被験者が携帯可能にすることが必要である。図4は著者らの開発した小型 RRV計測ユニットである。電源以外は煙草箱大のケースに収納されている。

被験者の胸部に固定された電極からの信号は差動増幅器、バンドパスフィルタ、コンパレータ等を経てR波成分が抽出される。ここではR波の検出だけを目的とし、波形全体を扱わないために、アナログ部は通常のME用ポリグラフに比べて著しく簡単な回路構成で済んでいる。

抽出されたR波は、1チップマイクロコンピュータに入力され、1拍毎にRRIが計算され、16個のRRIからRRVが計算される。これらの値は1分毎に加算されて8Kバイトのメモリに格納される。記録は1レコード8バイトから成り、RRVに4バイト、RRIに3バイト、心拍数1バイトである。このとき、全体で $8K/8=1000$ 分=17時間の記録が可能である。

ユニットの消費電力は、デジタル部で5V 120mA、アナログ部で12V 27mA、-12V 27mAである。デジタル部電源としての単3乾電池4本、アナログ部電源として006P乾電池2本を使用した場合、約10時間の動作が保証されている。

計測完了後、データは、RS-232Cを介して親コンピュータ(16bit パーソナルコンピュータ)に転送され、解析が行われる。以後、図示されるデータの殆どはこのシステムを使用して採取され、分析されたものである。

図5 RRIとRRVの長時間記録例

図6 長時間の足算作業における RRVと能率

なお、本システムは ECGを利用するため、電極の固定が必要であるが、これすら不可能な作業現場における計測のために、脈拍を光電式センサにより計測し、心拍数から近似的に RRIを計測し、RRVを求めることも検討している。この方式は、耳朶部にセンサを取り付けるだけでよいため、より簡単である反面、血管のダンピング効果のために、検出力は低下する。(詳細は文献[4])

4. RRVの時間変動とその基本的性格

上記のユニットを開発することにより、かなりの長時間にわたり被験者(男子学生約10名、年齢21~24才)の RRVをモニタすることが可能になった。まず、計測データのなかから、いくつかの興味ある事例を個別に述べる。図5は記録の一例である。被験者のひとりが午前中に試験を受験し、昼食をとった後、研究のため

図7 RRVと作業成績(作業全平均)

のプログラミングを行ったときの RRV の変化の様子が示されている。常識的に見て、この変化はきわめて妥当である。ただし、食事に見られる顕著な RRV の減少については、常識的には、精神的要因というよりは、むしろ別の生理的要因を考えがちである。しかしながら、知的作業とは何かをより詳しく考えていくと、食事を低級な作業と考えることも早計にすぎよう。脳全体の活動としてみたとき、かなりの情報処理を行っている可能性があるからである。

次に、図 6 (a) は一定内容の作業 (2 桁の加算を連続して行う作業) を長時間行った場合の RRV の変化の一例である。巨視的に見て、RRV は時間とともに増大している。これは、「飽き」、つまり作業に対する覚醒度が次第に低下していくことを表している。勿論、さらに細かい時間スケールでの RRV の変動も存在し、被験者の覚醒度は非常に細かいゆらぎを繰り返していることが観察される。

図 7 は、上の作業における RRV と時間あたりの正答数の、作業 1 回分の平均を全部の実験についてプロットしたものである。両者の間には、非常に高い相関のあることがわかる。図 8 は同じデータについて 1 分毎の平均をとり、平均値同士の相関を調べたものである。これも同様に高い相関が認められる。

図 6 (b) は (a) の作業の正答一つあたりに要した時間の変化を示しており、両者の相互相関係数を求めると、図 9 のようになる。図では $\tau = -2$ 分において、 $C(\tau)$ が極値をとっており、生産性に 2 分遅れで RRV に変化が現れていると言える。しかしながら、これは連続的作業における解析結果であり、後述のような外部環境の急激な変化に対する RRV の追従性は遙かに高速である。恐らく両者の変化に関するメカニズムが異なるための現象であろうが、詳細は不明である。

図 8 RRV と作業成績 (1 分毎)

図 9 図 6 (a)~(b) の相互相関

5. プログラミング作業への応用例

プログラミングは、一般にかなり高度な知的作業と言われているが、これにおいても RRV の挙動は同様である。図 10 の細線はプログラミング作業中の RRV の時間的变化である。図 6 (a) 同様、RRV は漸増し、2~3 時間後に飽和している。これは、プログラムに集中できる時間に関する我々の直観と一致する。

図 11 は、被験者がプログラム中に、他の人間から話しかけられた場合である。RRV が急激に増大し、それまでに順調に行われていた計算機へのコマンド入力も、一定時間中断されてしまう。このデータは、「プログラムに対する最大の生産性低下要素の一つは、電話による思考の中断である。」という、現場でよく言われる経験的主張を裏付けるものである。

つまり、知的作業は、周辺の作業環境に大きく影響される。図 12 は、周辺が静粛な場合と騒々しい場合の RRV のデータである。プログラミングに集中出来ない状況が客観的に判断可能である。

先に記した、時間による作業覚醒度の低下は、作業環境が劣悪なほど急速である。そこで、バイオフィードバックの手法を用いて RRV 増大の抑制を試みた結果が、図 10 の太線である。これは、先に述べた RRV 計測

図 10 プログラミング時の RRV

図11 プログラミング中の割込みの影響

図12 周囲の作業環境と RRV

用ユニットが計算する RRVの値を小型 CRT画面上に表示し、被験者に常に提示した場合の RRVの時間変動のグラフである。図から明らかなように、意識的に RRVの値を低レベルに保つことがある程度は可能である。図13は RRVをフィードバックした時とそうでない時のプログラムの完遂時間を示したものである。フィードバックにより、約30%の完遂時間の短縮が達成されている。

つぎに、RRVの挙動のより微細な構造について考察を行う。一般に、プログラミングは概略、「リストをキー入力している時」(作業Ⅰ)、「コンパイル時など、計算機の作業終了を待っている時」(作業Ⅱ)、あるいは「画面を見つめて考えている時」(作業Ⅲ)の3つの作業の繰り返しである。プログラミング中の被験者の RRVを作業の種類に対応させて図示したのが図14である。

図13 RRVフィードバックの効果

RRVの値は作業Ⅱが最も高く、作業Ⅲが続ぎ、作業Ⅰが最も低くなる。作業Ⅱの集中度が低いのは当然であるが、作業Ⅰと作業Ⅲを比較した場合、常識的には、作業Ⅲの方が容易であるとは考えづらい。むしろ難易度の点からみれば、Ⅲははるかに高度な作業である。しかし一方、作業Ⅲでは、キー入力のように明白なタスクを次々と処理しなければならないわけではなく、瞬間的な作業負荷は却って小さいともいえる。

図14 プログラミング作業の内容分類

6. 知的作業の内容と RRV

前章のように、より細かく作業を分析しようとする、作業の内容に言及せざるを得ない。RRVの絶対値は個人差が大きいものの、足算のような簡単であるが明白に定義された作業の方が、プログラミングのような一見高級な作業よりも低いのが普通である。より多くの作業について同様の検討を行ってみたのが表1である。

作業	15分毎の RRVの平均値	作業内容
1 数の入力	0.0018~0.0024 sec	明白
2 足算	0.0017~0.0019 sec	明白
3 4桁数の記憶	0.0023~0.0032 sec	あいまい
4 大小判断	0.0034~0.0040 sec	あいまい

表1 各種作業の RRV値の比較

定量的な検討は次報に譲るが、作業が明白に定義されていれば、端末との間の単位時間あたり情報交換量は多くなる。前節で議論した作業ⅠとⅢの場合においても、現実に入出力される情報量は、Ⅰの方がはるかに多い。ただし、ここでの情報量とは、シンタクティックな情報量（：意味を含まない、単に量としての情報量）である。したがって、RRVで測定が可能なのは知的作業のシンタクティックな側面ではないだろうか。セマンティックス（意味論）については、さらに研究の余地があると考えられる。

被験者 (a)

被験者 (b)

図15 足算作業における RRVの個人差

あくまで仮説として、次のようなことが考えられる。よく言われるように、知的作業は階層構造をなしており、上の階層ほど高度な能力が必要な反面、内容があいまいである。逆に下の階層ほど作業は簡単であり、その内容は明白である。つまり、知的作業のなかでも、相対的に知的でない部分も多い。熟練者は、作業の要点を掴んでいると言われるが、これは作業内容を整理し、多くの作業を所謂明白な作業として固定し、思考の外に置いているからである。それによって、限られた知能を本来の知的な部分の問題解決に使用することができる。つまり、知的作業に熟練するとは、低レベルの作業をより明白化し本来の作業に集中できるようになることである。

このような仮説にたてば、知的作業がどの程度円滑に遂行されているかを、RRVにより、ある程度モニタすることが可能であろう。例として、ごく簡単なデータを示しておく。図15(a)と(b)とはかなりパターンが異なっているが、じつは異なる被験者による同じ2桁の足算作業のデータである。(a)の被験者は非常に我慢強く、6時間にわたり作業を継続することが可能だったのに対して、(b)は2時間程度しか継続が出来ず、能率も(a)の24問/分に対し、(b)は19問/分であった。つまり、この作業に関しては(a)の被験者の方が自らを集中させることに成功しているが、RRVにより、この状況を定量的にモニタすることができる。

7. 結論

心電図を利用して、被験者の作業に対する集中度を計測する手法を提案し、RRVなる管理指標の使用を試みた。さらに、マイクロコンピュータを搭載し、作業現場にも適用可能な計測ユニットを開発した。そのユニットを用いて、まず RRVの基本的性質を明らかにした上で、プログラム作業を例題として、RRVにより所謂知的作業の内容を分析し、その能率向上について考察した。

参考文献

- [1] 西村ほか2名, 医用電子と生体工学, 22-特別号, (昭和58), 558.
- [2] Sekiguchi, C., Aviation, Space, and Environmental Medicine, Jul. (1978), 920.
- [3] 広瀬, 機論, 48-432, C (昭和57), 1304.
- [4] 石井ほか2名, 機構論, No.844-5, (昭和59), 82.
- [5] 広瀬, SICE関西支部シンポジウム「これからのマンマシンインタフェース」, (昭和58), 139.
- [6] 安心院ほか4名, 機構論, No.824-10, (昭和57), 60.