満足感に適応するヒューマン・マシン

インタフェースの開発*

— 作業方式の違いによる満足感の比較 —

松 永 久** 中 沢 弘***

Development of Adaptive Human-Machine Interface to Match Human Satisfaction

- Comparison of Satisfaction among Different Work Styles -

Hisashi MATSUNAGA and Hiromu NAKAZAWA

This paper proposes an adaptive human-machine interface to match human satisfaction which is evaluated by the satisfaction measurement system with neural network based on measuring electroencephalogram (EEG). This adaptive human-machine interface can adapt to individual operators and varying context based on human satisfaction. A prototype system was developed using a pacing mental task to test the proposed human-machine interface. The result of experiments showed that the adaptive human-machine interface which understands individual human satisfaction in real time and takes adaptive action based on operator's satisfaction change has the possibility in heightening or maintaining human satisfaction rather than other work styles such as machine paced mode and self-paced mode.

Key words: human-machine interface, system design, adaptive control, satisfaction measurement, electroencephalogram

1. 緒 言

21 世紀はロボットに代表される機械システムがさらに人間の生活環境に入り込んでくる時代であると言われおり、今まで以上にヒューマン・マシンインタフェース (Human-Machine Interface: HMI) が重要になると考えられる。従来、HMI の設計においては、画面の見やすさや操作系の使いやすさなどを考慮した研究が行われてきたが、これらはいわば静的な設計であった。一方、現在の HMI においてはシステムやタスクが複雑になるに連れ、オペレータとしての人間が機械システムに合わせなければならない状況が生じている。これに対して HMI の 1 つとして最近注目されてきているものに適応インタフェースが挙げられる¹⁾。これは人間の内的状況を機械が把握し、それに応じて機械やロボットが情報提示や操作の内容を自動的に変えていくことにより、今までのように人間が機械システムに対応するだけでなく、機械が人間に対応するものである²⁾。このような適応インタフェースによりオペレータは本来の自分のタスクに集中することができ、優れた能力を発揮することが期待できる。

適応インタフェースを実現するためには機械システムには表情やジェスチャーなどの動作情報や、心電図や脳波などの生理情報により人間の内的状態を把握し、それに応じて適切な適応

行動を起こす機能が求められ、これらの要素技術については様々な分野で研究が行われている。例えば生理情報による評価については、主に原子力や航空機などのオペレータを対象にシステムの複雑さから生じる作業負荷という観点から、情報処理ディマンドに対してどれくらいの情報リソースが注意に向けられているかという精神的作業負荷 (Mental Workload: MWL) が研究されており、高橋らは自律神経系の生理指標により計測される MWL に適応するインタフェースを開発し、実験的なシステムにおいてその有効性を確認している³⁾。

一方、人間は環境から取り入れられた刺激に基づき、遺伝的、生物学的基準や過去の経験・記憶に基づく価値判断により行動する。我々はこの価値判断において重要な役割を果たすのは満足感であると考え、我々が開発した脳波により人間の満足感を評価するシステム⁴⁾により評価される満足感に適応するヒューマン・マシンインタフェースを提案し、簡単なメンタルタスクにおいてその可能性を示してきた⁵⁾。本論文では適応方法についてのさらなる検討を行い、また作業方式の違いによる満足感とパフォーマンスの違いから、適応インタフェースの 1 つの形としての満足感に適応するヒューマン・マシンインタフェースの可能性、有効性について検討したので以下に報告する。

2. 満足感計測システム

本章では人間の満足感に適応するヒューマン・マシンインタフェースの開発において入力信号となる満足感を脳波により評価する満足感計測システムについて説明する。

筆者らは歴史的に作業意欲やモラールと結び付けられ、質問

* 原稿受付 平成 11 年 7 月 21 日

** 学生会員 早稲田大学大学院 (現、(株)電通; 東京都中央区明石町 8-1)

*** 正 会 員 早稲田大学理工学部 (東京都新宿区大久保 3-4-1)

紙法や面接法により評価されてきた職務満足感ではなく、脳波を計測することにより感情状態としての人間の満足感を評価するシステムの開発を行った。開発過程とシステムの詳細については文献⁹⁾を参照されたいが、開発にあたってはまず心理レベルにおいて言語的な満足感のモデル化を行った。次に様々な作業時における脳波を計測し、満足感の心理モデルとの関係から満足感を計測するための生理指標を求め⁹⁾、その生理指標として得られた出現率を情報として含むパワースペクトルを入力信号としたパターン認識問題として、ニューラルネットワークを用いることにより満足感を評価するシステムを開発した。

図1にシステムの構成を示す。開発した満足感計測システムは前頭部双極誘導により脳波を計測し、FFTによって求められたパワースペクトルをもとに満足感を推定する学習済みのニューラルネットワークから構成されている。動作のある状況での計測に対応するために、満足感と同様にノイズの混入を識別するニューラルネットワークを備えている。ソフトウェアはMS-Windows上で動作し、微細振動をフィードバック情報として用いるフィードバック装置も備えている。満足感は0~1の値をとり、値が大きければ満足感が高いことを示す。満足感情の解析時間はFFTを行う際のサンプリング周波数とデータ長との関係から、8.53秒、4.27秒の2種類になっている。

満足感計測システムは心理情報と生理情報の対応をニューラルネットワークにより求めているが、そこから評価される値の妥当性はその一般性を様々な状況に適用可能であることを示して、帰納的に確立することが可能である。そこで、我々はニューラルネットワークの学習にデータを用いていない被験者を対象に様々な状況における計測を行い、システムの有効性を確認してきた⁹⁾が、そのうち本学男子学生が3種類のビデオを鑑賞している時の計測例⁹⁾を図2に示す。ビデオ鑑賞は脳波を用いた感情評価や脳波と感情の関係を調べる研究の仮説構築や検証において広く用いられている方法である。

図2によると満足感が高い順にコメディ、ドキュメンタリー、気持ちの悪い残酷なビデオとなっている。この結果は主観的報告とも一致しており、11人の被験者から得られた結果からも統計的な妥当性が確認されている。生理情報による感情評価の利点の一つはリアルタイムに経時的な評価ができることであるが、本システムによる満足感の評価はビデオ内容の時間的な変化にも対応していることもわかった。また、同時に計測した武者らが開発した多チャンネル脳波計測により喜怒哀楽を評価する感性スペクトル解析法¹⁰⁾による評価結果との比較⁹⁾や、MWLとの関係から、本システムによる満足感評価が様々な感情の総合的表現になることが示されている。実際の応用についても、システムの構造がシンプルでコストが安く、人を拘束せず、ノイズに強いという特徴を有しており、容易な適用が期待できる。

3. 満足感に適應するヒューマン・マシン インタフェースの開発

3.1 満足感に適應するインタフェースの構成

前章で説明した満足感計測システムを用いることにより、図3に示すような満足感に適應するヒューマン・マシンインタフェースを提案することができる。本インタフェースは従来からの人間と機械システム間の情報入力・提示機能に加えて、満足感計測システムからの情報をリアルタイムに受け取り、受け取った情報をもとに人間の満足感の状態を理解し、その結果に基づいてコントローラに信号を送ることにより機械システムの状

Fig.1 Configuration of the satisfaction measurement system

Fig.2 An example of satisfaction measurement when a subject was shown three types of video program

Fig.3 Configuration of the adaptive human-machine interface which adapts to human satisfaction

態を変化させる適応部を有している。これにより、オペレータの満足感の変化に基づいて適応した行動をとる機械システムが可能になる。

3.2 プロトタイプシステムの開発

前項の考え方にに基づき、計算問題をパーソナルコンピュータ上で行う作業において、プロトタイプシステムの開発を行った。開発したシステムは2けたの足し算作業において、作業者の満足感の変化に応じて表1に示すアルゴリズムに基づいてディスプレイ上に表示される問題の間隔を変化させるものである。図4に開発したプロトタイプの構成を示す。

作業者は椅子に座った状態でディスプレイ上に示される2けたと2けたの足し算の回答を数字から構成されるキーパッドにより入力する。答は2けたになるようにプログラミングされている。作業者は無線式脳波計を身に付けており、リアルタイムに脳波が満足感計測用パーソナルコンピュータに送られ、8.53秒あるいは4.27秒ごとに満足感が求められる。本システムで

Table 1 Algorithm for adaptation

Previous action	Satisfaction change	Present action
↗	↗	↗
↗	→	→
↗	↘	↘
→	↗	→
→	→	→
→	↘	↘
↘	↗	→
↘	→	→
↘	↘	↘

↗ : Interval is increased; increase in satisfaction
 → : Interval is maintained; no change in satisfaction
 ↘ : Interval is decreased; decrease in satisfaction

The prototype system changes intervals between problems based on the subject's satisfaction changes.

Fig.4 Experimental view

は 8.53 秒ごとの解析とした。適応部は求められた満足感情報に基づいて作業者の満足感状態を把握し、適応アルゴリズムによりシステムの状態を変化させるために LAN を通じて計算問題表示用コンピュータに問題間隔に関する指示を送る。

実験で用いた適応アルゴリズムはモデルベースであり、前回の適応行動により変化した満足感を参照し、前回の行動と現在の満足感の組合せにより、適応行動が決定される。本適応アルゴリズムは以下のルールに基づいて開発されている。

- ・満足感に変化がない場合には、問題間隔を保つ。
- ・満足感に変化があった時に、問題間隔を変化させる。
- ・一度に変化させる問題間隔の値は一定とする。
- ・最初に不満になった時に、問題間隔を短くする。
- ・問題間隔がゼロになる場合には、一つ前の問題間隔に戻す。

作業者が満足であるか、不満であるかは作業前約 2 分間 (8.53 秒 $\times$ 15 = 128 秒) の開眼安静時に計測された満足感の平均値からの変化によって決定される。安静時から 20%以上満足感が増加した場合を満足状態、逆に 20%以上減少した状態を不満状態とし、それ以外の場合は変化無しとする。過去 7 回の計測のうち 4 回いずれかの状態となった場合に、適応行動

が起こされる。一度適応行動が生じた場合はその効果を調べるために約 60 秒 (8.53 秒 $\times$ 7) はその状態が保持される。実験においての問題間隔の初期値は 6 秒であり、一度に変化させる問題間隔は 2 秒単位とした。

3.3 実験結果

図 5 に本研究の男子学生が「適応制御あり」と「一定間隔」で問題を解いている時の満足感の計測例を示す⁹⁾。これによると両ケースともに「適応制御あり」では満足感が低下してきても、満足感の変化に応じて問題間隔が変化しており、その変化に対応して満足感が高くなっているが、「一定間隔」と「自分のペース」では満足感が一度低下してしまうと低い状態のままであることがわかる。適応制御については各々の被験者について 2 回ずつ行っているが、ほぼ同じ結果が得られている。

(a) With adaptive control

(b) Without adaptive control (constant)

Fig.5 Comparison of satisfaction with and without adaptive control (subject A)

(a) With adaptive control

(b) Without adaptive control (at subject's own pace)

Fig.6 Comparison of satisfaction with and without adaptive control (subject B)

3.4 適応方法の検討

前項では「適応制御あり」と「適応制御無し」(一定と自分のペース)での満足感の比較を行ったが、その適応行動を行うにあたっての満足感の評価は実験前の安静時の満足感からの変化によっていた。この方法では安静時よりも満足感が低くならない限り適応行動が起こる可能性がなく、その場合は安静時の

満足感よりも常に満足感が高いので機械システムが適應する必要がないとも言える。しかし、安静時よりも満足感が低くない場合でも作業中の満足感の変動し、作業中の比較においては相対的に不満足になる状態は存在する。また、作業前の安静時における計測は実際の応用を考えた場合には実際的ではない。

そこで過去7回の値の平均値を基準満足感とし、作業前の平均値と置き換えて満足感の変化を決定する方式を採用した。基準満足感一度適応行動が起きたら、その直前の過去7回の満足感平均値と置き換えられ、満足感に変化がないと判定された場合はその前の基準満足感を維持することとした。これにより、適応行動の結果により生じる満足感の変化を判定することができ、その時々々の満足感の増減を把握することができ、より実際の満足感状態の判断が可能となる。図7に本満足感状態判定手法による適応行動の例を示す。

Fig.7 An example of satisfaction measurement with adaptive control using varying based satisfaction

4. 作業方式の違いによる満足感の比較

4.1 実験方法

作業における速度の制約は心理的・生理的なストレスであり、自分のペースや機械のペース、あるいはその混合したものなどの方式において作業者が最も満足感を感じるかに関する研究が作業現場において多く行われている。一般的には自分のペースが最も満足感が高くなると考えるのが普通であるが、これらの研究結果からは必ずしもそうとは言えないことが指摘されている。3章における計測例では、「適応制御あり」では「自分のペース」や「一定速度」での作業に比較して満足感が高くなることが示唆されたが、適応制御の可能性を示したに過ぎない。そこで本章では同じ計算作業を「適応制御あり」、「一定速度」、「自分のペース」、「ランダム」で行っている時の満足感を比較した。

「適応制御あり」は前章における新しい適応方法を用いた。「一定速度」は6秒一定、「ランダム」は適応制御によりシステムが呈示速度を変えたものと全く同じ速度を用いた。これにより単に呈示速度が変化することにより生じる満足感の変化と満足感の変化に対応したシステムの変化との比較も行える。実験時間は各条件それぞれ25分とし、各条件の間には2分間の休憩を挟んだ。実験順番は乱数により決定したが、「ランダム」はその性質上必ず適応制御の後となるようにした。被験者は本研究室の男子学生3名とし、一連の実験を1週間において2度行った。

4.2 実験結果

満足感に限らず人間の心理的状态は文脈の影響を受けるので、単純な満足感の比較ではどの作業方式が人間の満足感にとって最も良いものなのかを特定するのは困難である。例えばある文脈では作業の種類によらず作業者の調子が良く満足感が高くなることも考えられ、逆も同様に考えられる。また作業時の満足

感を考えた場合、満足感が高い時にはそれがどのような作業方式であっても構わず、その意味では満足感が低下してきた時にいかに満足感を増加させることができるかが重要である。そこで本研究ではどれだけ満足感を高くすることができるかという観点から、式(1)により定義される変化率による比較を行った。

$$\text{Change rate} = \frac{\{X_i - X_{i-15} + X_{i-14} + \dots + X_{i-2} + X_{i-1}\}}{X_{i-15} + X_{i-14} + \dots + X_{i-2} + X_{i-1}} \quad (1)$$

式(1)で表される変化率は過去15回(128秒)の値の平均値からの規格化された変化率であり、過去約2分間の満足感の平均値からどれくらい増減したかを示すものである。図8に各作業方式による変化率の違いを示す。これによると「適応制御あり」が最も変化率が高く、次に「一定速度」と「ランダム」がほとんど同じで、「自分のペース」が最も低くなっているのが確認できる。

Fig.8 Comparison of change rate of satisfaction among four different work styles

4.3 パフォーマンスの比較

計算作業中の効率と正答率についての検討を行った。図9に各作業方式における効率としての作業中に解答した問題数とその正答率を示す。効率については「自分のペース」が最も高く、次に「適応制御あり」、「一定速度」の順となっている。「ランダム」は実験方式の都合上「適応制御あり」と同じ値である。1間に費やした時間は「適応制御あり」が4.15秒、「自分のペース」が2.60秒となっている。正答率は「一定速度」と「自分のペース」がほぼ同じで最も高く、次に「適応制御あり」と「ランダム」がほぼ同じ値となっている。

「一定速度」は6秒固定で2けたの加算問題を解くには十分な時間であり、「一定速度」であると効率が悪くなることを示している訳ではない。逆に速い速度に設定すれば効率は良くなるが正答率が悪くなることが予想され、「一定速度」は設定速度によりパフォーマンスが決定されるので、パフォーマンスという観点から他の方式と比較するのは難しい。パフォーマンスについては「自分のペース」が効率、正答率ともに最も良い結果を残していると言える。

Fig.9 Comparison of the number of answered problems and correct answer rate among different work styles

4.4 「自分のペース」と「一定速度」の比較

本研究では計算問題の呈示速度を制御因子として満足感の違いを比較しているが、満足感が呈示速度の速さの違いのみを反映していることも考えられる。そこで「一定速度」を速い場合と遅い場合に分けて、「自分のペース」も含めた比較を行った。被験者は本研究の男子学生7名で、「一定速度」は「遅い」(10秒)、「速い」(2秒)の2条件とした。作業時間は各条件15分とし、作業は休憩を挟まず連続して行い、実験前後に2分間の開眼安静時の満足感を計測した。実験順番は乱数により決定した。

図10に安静時の満足感により規格化された満足感の平均値を示す。ここではどれだけ満足感を高くすることができるかという適応制御との比較ではないので、純粋に満足感による比較を行った。これによると問題呈示速度が速くても遅くても「一定速度」の場合には満足感がほぼ同じレベルであり、「一定速度」の方が「自分のペース」よりも満足感が高くなっているのが確認できる。また図11によると、パフォーマンスにおいては、効率は「速い」、「自分のペース」、「遅い」の順であり、正答率は「遅い」、「自分のペース」がほぼ同じであり、「速い」が最も低くなっているのがわかる。「自分のペース」では1問に費やした時間が2.70秒であり、前述の結果とほぼ同じ結果となっている。以上の結果から、本計算作業では単に問題呈示速度の速い、遅いのみ、つまり脳で扱う情報量を示す精神的作業負担にだけ対応して満足感が変化している訳ではないことが確認された。

Fig.10 Comparison of satisfaction between constant (slow and fast) and self-paced modes

Fig.11 Comparison of the number of answered problems and correct answer rate between constant (slow and fast) and self-paced modes

5. 考 察

本研究では速度により制約がある計算問題加算作業において、我々が提案している満足感に適應するヒューマン・マシンインタフェースが異なった4作業条件の中で最も満足感を高める可能性があることを示した。作業方式が満足感に与える影響は

様々な現場を対象にアンケートやインタビューにより調査されているが、これらの態度に着目した調査は固定観念や質問項目に対する言葉のとらえ方に主観的なバイアスが入る可能性が常に指摘されている。BroadbentとGath⁽¹⁾は従来の研究は主観的なバイアスが混入していたとして、統制されたアンケート調査を行い、繰返し作業を行っている作業者は繰返しを行っていない作業者よりも満足感を感じていない一方で、組立てラインのペースで作業している作業者とそうでない作業者の間には満足感に差がなかったと報告している。またKhalequeとHossain⁽²⁾は自動化に組込まれている作業者が最も満足感を感じており、その次がマニュアル作業をしている作業者であり、自動化とマニュアルの混在している作業者が最も不満であったという研究結果を示している。

これに対して生理情報による評価は人間の意志や主観的なバイアスが混入しにくく、アンケートに比較して客観的であると言われているが、本研究で行った満足感計測システムによる評価では一定速度の方が自分のペースよりも満足感が高くなっており、Khalequeらと同じ結果が得られている。しかし、作業方式の違いによる満足感はその対象とする作業の種類や個人の嗜好による違いが考えられ、これにより従来の研究では統一的な見解が得られていないとも言える。このような意味でも人間を対象としたシステム設計において固定的なシステムを決定するのは困難であり、脳波計測に基づいた満足感計測システムにより評価されるその時々々の満足感に応じて適応した行動をする、個人差と変化する文脈に対応できる適応インタフェースは有効であると考えられる。もちろんこの結果のみだけで、適応制御が他の方法に比べて必ず満足感を高めると言える訳ではないが、その時々々の満足感に応じてシステムの状態を変化させることができる適応インタフェースは他の方式に比べて、作業者の満足感を高めて、それを維持する可能性が高いことを示すことができたとと言える。

パフォーマンスからは効率、正答率の両方で自分のペースが最も良い結果となっているが、適応制御では問題間隔が2秒になることもあり、2秒一定では約40%の正答率であったことを考えるとこれが正答率を下げていると言える。これは適応制御のシステム設計において、最初にシステムの幅を適切に決めることの重要性を示しており、これによりパフォーマンスの改善が期待できる。またランダムとの比較からも、単にシステムが変化することの多様性から満足感が高くなる訳ではなく、その時々々の満足感に適應する方が満足感が高くなることを示しており、機械に人間が合わせるよりも、機械が人間の状態を理解して適応する適応制御が優れていることを示している。

本稿では制御因子が1つの作業を対象に人間の満足感に適應するヒューマン・マシンインタフェースの可能性を示すことができたが、複数の制御因子がある場合には適応行動の決定方法が複雑になることが予想される。今後は学習機能を有した適応方法の決定方法なども含めて、さらに満足感に適應するヒューマン・マシンインタフェースについての研究を行う予定である。

6. 結 論

本研究より以下の結論を得た。

- (1) 前頭部双極誘導により計測される脳波をもとに人間の満足感を評価する満足感計測システムを用いた人間の満足感に適應するヒューマン・マシンインタフェースを提案し、計算作業においてプロトタイプシステムを開発した。

- (2) 被験者に「適応制御あり」、「自分のペース」、「一定速度」、「ランダム」の4条件で作業を行ってもらったところ、「適応制御あり」において最も満足感の上昇率が高いことが示され、満足感に適應するインタフェースは人間の満足感を高めたり維持することができることを示した。
- (3) 上記結果により、満足感に適應するヒューマン・マシンインタフェースの有効性を示すことができ、人間の心理的側面を理解する機械システム実現の可能性を示すことができた。

謝 辞

本研究を行うにあたり実験に協力していただいた当時本研究室学部4年生の小木曾弘之君と本名正雄君に感謝する。本研究は一部日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「人間指向シンセシスの科学（課題番号：96P00703）」および文部省科学研究費補助金により行われた。

参 考 文 献

- 1) F.Norcio and J.Stanley : Adaptive Human-Computer Interfaces - A Literature Survey and Perspective, IEEE trans. syst. man, and cybern., **19**, 2, (1989) 399.
- 2) 新井 豪 3名ほか：生理指標に基づく適応インタフェース構成の試み, Human interface N&R, **9**, (1994) 191.
- 3) M. Takahashi et al. : Experimental Study toward Mutual Adaptive Interface, IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, (1994) 271.
- 4) 松永 久・中沢 弘：脳波による満足感計測の試み, 日本機械学会論文集C編, **65**, 633, (1999) 401.
- 5) H. Matsunaga and H. Nakazawa : Design Method Considering Human Satisfaction -Development of Adaptive Human-Machine Interface to Match Human Satisfaction, Int. J. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, **9**, 3, (1999) 266.
- 6) 松永 久・中沢 弘：満足感計測のための基礎的研究－主観的な満足感と前頭部双極誘導による脳波との関係, 日本人間工学会誌, **34**, 4, (1998) 191.
- 7) H. Matsunaga and H. Nakazawa : Satisfaction Measurement, in *Human Factors in Organizational Design and Management VI*, P.Vink, E.A.P. Koningsveld and S.Dhondt ed., Elsevier Science B.V., (1998) 623-628.
- 8) H. Matsunaga and H. Nakazawa : A study on Human-Oriented Manufacturing System (HOMS) -Development of Satisfaction Measurement System (SMS) and Evaluation of Element Technologies of HOMS using SMS, Int. Conf. Manufacturing Milestones toward the 21st Century, (1997) 217.
- 9) 松永 久・中沢 弘：人間の満足感に基づく感性評価, 1999 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1999) 612.
- 10) T. Musha, et al. : Feature Extraction from EEGs Associated with Emotions, Artif. Life Robotics, **1**, (1997) 15.
- 11) D. E. Broadbent and D. Gath : Symptom Levels in Assembly-line Workers, in *Machine Pacing and Occupational Stress*, G. Salvendy and M. J. Smith ed., Taylor & Francis Ltd., London, (1981) 243.
- 12) A. Khaleque and M.M. Hossain : Job Satisfaction, Fatigue and Mental Health of Manual, Semi-automated and Automated Workers, in *The Ergonomics of Manual Work*, W.S. Marras, W. Karwowski, J. L. Smith and L. Pacholski ed., Taylor & Francis Ltd., London, (1993) 441.