サイクロトロンの視覚的な運転支援環境の実現と評価†

岡村 哲也*・村上 亨*・上松 敬**
奥村 進**・荒川 和夫**

A Visual Assistance Environment for Cyclotron Operation

Tetsuya OKAMURA*, Tohru MURAKAMI*, Takashi AGEMATSU**,
Susumu OKUMURA** and Kazuo ARAKAWA**

A computer-based operation system for a cyclotron which assists inexperienced operators has been developed. Cyclotron start-up operations require dozens of adjustable parameters to be finely tuned to maximize extracted beam current. The human interfaces of the system provide a visual environment designed to enhance beam parameter adjustments.

First, the mental model of operators is analyzed. It is supposed to be composed of five partial mental models: beam behavior model, feasible setting regions model, parameter sensitivity model, parameter mutual relation model, and status map model.

Next, based on these models, three visual interfaces are developed, i. e.,

- (1) Beam trajectory is rapidly calculated and graphically displayed whenever the operators change the cyclotron parameters.
- (2) Feasible setting regions (FSR) of the parameters that satisfy the cyclotron's beam acceptance criteria are indicated.
- (3) Search traces, being a historical visual map of beam current values, are superimposed on the FSRs.

Finally, to evaluate system effectiveness, the search time required to reach maximum beam current conditions was measured. In addition, system operability was evaluated using written questionnaires. Results of the experiment showed that the search time to reach specific beam conditions was reduced by approximately 65% using these interfaces. The written questionnaires survey showed the operators highly evaluate system operability.

Key Words: human interface, assistance system, visualization, mental model, cyclotron

1. はじめに

大規模な機械システムや化学プラントなどの制御システムでは、人間を制御ループに含むシステム構成が採られることが多い。これは、非定常のスタートアップ運転

や異常時の緊急運転まで考慮すると完全自動化は容易ではなく、たとえ可能でもコストパフォーマンスが現実的でないことが多いからだと考えられる。このような系では、オペレータの負担、スタートアップ時間、総合的な信頼性などがシステムの操作性に依存することが多く、その観点からヒューマンインタフェースの充実が望まれている。また、近年は、熟練オペレータの不足から未熟練者でも運転可能なシステムが要求されている。著者らは大規模システムの一つであるサイクロトロンを対象に運転支援システムを開発している^{1)~5)}。

オペレータの経験と勘に頼る作業に、多数の調整パラメータを試行錯誤的に調整し、最適運転条件をみつめる作業が含まれることがよくある。つまり、調整パラメータを軸とする多次元の操作空間内をオペレータが探索し、最適設定値を求めるわけである。サイクロトロンの

† 第7回ヒューマンインタフェースシンポジウムで一部発表(1991・3)

* 住友重機械工業(株)システム技術研究所 田無市谷戸町2-4-15

** 日本原子力研究所高崎研究所 高崎市綿貫町1233

* Systems Engineering Laboratory, Sumitomo Heavy Industries, Ltd., Tanashi

** Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, Takasaki
(Received January 28, 1992)
(Revised July 24, 1992)

場合は、多数の機器の設定値を調整して引出されるビーム電流を最大にするというビーム調整がこの作業に相当する。

現状の加速器ではすべての機器を遠隔操作できるので、初期のシステムより操作性は良くなっている。また、閉ループ制御系により部分的には自動化も進みつつある。しかし、人間と機械のインタフェースとしての切り口は従来と同様に、機器設定値とビーム電流値であることが多く、計算機側はそれ以上の情報をあまりオペレータに提供していない。完全自動化に至るステップとして、人間が能力を十分に発揮できるように機械が補助する運転支援システムが要望されている。

近年、運転支援システムとして、故障診断や運転ガイダンスなど AI 技術を適用したエキスパートシステムの研究が盛んであり、加速器の制御システムへの適用例も少なくない^{6),7)}。その多くは物理的知識や熟練オペレータの経験則を IF-THEN ルールとして記述し、それらを検索、推論してガイダンスを出力するものであり、ルール化の比較的容易な分野では有効なツールとなっている。このようなルールベースシステムでは、熟練者の意識下の知識をいかに引き出すかという知識獲得の問題や、IF 節に記述される運転状況をいかに判断するかという状況認識の問題が課題として残されている。また、言語メッセージとして正確なガイダンスが与えられたとしても、調整などスキルベースの作業では丹念にメッセージを読んでつぎの行動を計画するというステップがとられることは稀であり、より視覚的で直感的なガイダンス提示法が求められている。

そこで、多変数操作空間における最適値探索作業を支援するために、ビーム軌道の状態やおよその設定値の範囲などをオペレータに表示する視覚的な運転支援環境を開発した。この環境の特徴は、従来のエキスパートシステム型の運動支援システムのようにシステム側がオペレータに対して一方的に指示を与えるのではなく、オペレータ自身が操作しながら発見的に対象システムの振舞いに関する理解を深めていく環境であることである。このシステムの設計にあたってまず、オペレータの思考を分析し、メンタルモデルが五つの部分モデルからなることを示した。これらに基づき視覚的な運転支援環境におけるヒューマンインタフェースとして、軌道シミュレータを用いた軌道表示インタフェース、調整パラメータの設定可能領域(以後、FSR: Feasible Setting Regions と呼ぶ)を表示するインタフェース、それに調整の評価量であるビーム電流値の分布を操作履歴として表示するインタフェースを開発した。このなかで最も特徴的な機能は、パラメータの設定できる範囲を実時間に表示する FSR

表示である。これは設定操作を行う環境と同一の座標系でガイダンス情報を図を用いて表現するものであり、オペレータは高度な知的判断に依らず反射的にガイダンスを行動に結び付けることができる。また、推奨設定値が領域として示されるため、パラメータの感度や干渉度合など調整に必要な傾向を読みとることもできる。

最後に、実システムでの調整時間の測定と操作感覚のアンケート調査により、これらの機能を評価し、その有効性の考察を行う。

2. サイクロトロン の 構 造 と ビーム 調 整

サイクロトロンは、一様磁場中における荷電粒子の円運動の周期がその速度に依らず一定であるという事実と、その周期に同期した高周波電場による加速という原理に基づいており、その全体は Fig. 1(a) のような構造である。

ビーム調整は 30~50 の機器設定値を最適化して、出力のビーム電流を最大にする作業であるが、サイクロトロン の 入 り 口 か ら 出 口 ま で の ビーム 通 路 に は 開 口 が 数 mm のチャンネルが数カ所あり、ビーム調整はそこでの損失が小さくなる軌道を探すことだともいえる。軌道を直接見ることができない環境で、ビーム電流値だけを頼りに最適軌道を探索するところに針に糸を通すような調整のむずかしさがある。実際の調整では、すべてのパラメータをむやみに操作するのではなく、ビームの流れに沿ったいくつかの調整ブロックを順次最適化する。本論文では以下の三つの調整ブロックを取り上げる。

Fig. 1(b) に垂直入射ブロックの構造を示すが、このブロックは、外部から入射されたビームを加速平面に導くまでの区間である。このブロックの調整目標は、ブロック終端のインフレクタと呼ばれる狭いチャンネルに損失なくビームを通すことであり、そのために、四つの磁気レンズ A, B, C, D の電流値、つまり、焦点距離を調整してビームを絞り込むという調整を行っている。調整時の評価量は、インフレクタ下流のビーム電流センサでの検出値であり、それを最大にすればよい。

Fig. 1(c) は中心領域ブロックであり、サイクロトロン中心にあるインフレクタから二つのスリットまでのビーム軌道を調整するブロックで、加速空洞内での初期軌道を決める。スリットの本来の役割は、ビームと加速電界の位相差に起因するビームの拡がり除去してビーム位相幅を制限することであるが、初期軌道を所定の半径に通すための照準器の役割にもなっている。したがってスリットの間をうまく通すことがこのブロックの調整目標となる。調整パラメータは加速電圧(ディー電圧)、中心磁場、ビーム入射位相であり、それらを調整して、

Fig. 1 Schematic diagram of a cyclotron

スリット下流でのビーム電流値を最大にする。

加速ビームを加速箱から外部に取り出すためのブロックが Fig. 1(d) に示した引出しブロックであり、粒子に外向きの電磁力を与えるためのデフレクタと磁気チャンネルの間にビームを通して、出口までビームを導く。このブロックの調整パラメータはデフレクタ電圧と磁場チャンネルのコイル電流である。また、評価量はサイクロトロン出口のビーム電流値である。

3. オペレータのメンタルモデル

熟練度の高いオペレータが未熟練者に比べて上手に対象を操作できるのは、自らの経験やマニュアルなどの知識から対象機械に関するメンタルモデルをすでに形成しており、それに基づいて操作を行うためだと考えられる。良いヒューマンインタフェースとは、操作対象をブラックボックス化するのではなく、逆に未熟練者がシステムを理解して適切なメンタルモデルを形成するのを支援するものでなくてはならないと指摘されている^{8)~10)}。そこで、ビーム調整のためのインタフェースを設計するにあたって、まず、熟練オペレータがどのようなメンタルモデルをもって対象を操作しているかを分析した。

分析方法のフローチャートを Fig. 2 に示す。まず、実際の現場に立ち会ってオペレータの操作を観察し、その動作をビデオに撮り発話を録音した。同時に調整作業を妨げない程度の質疑応答も作業中に行った。さらに、録画や録音からのプロトコル解析に基づき、同時にしくは連続して操作されるパラメータ群を抽出して調整手順を整理した¹¹⁾。

つぎに、これらの結果や調整中の発話の説明を求める

Fig. 2 Flowchart for analysis of operator's mental model

形で、どのような効果を期待してその操作手順をとったか、そのときのイメージはどのようなものか、同時にしくは連続して操作するパラメータ間の関係は何かなどの項目についてヒアリングを行った。なお、あらかじめ数ヶ月にわたる運転記録より調整パラメータ間の相関関係や干渉度合を調べておき¹²⁾、ヒアリングの参考データとして利用した。最後に、調整中の発話やヒアリング時の発言をひとまず断片的なセンテンスに分け、それらをオペレータの想起しているイメージの観点から分類した。

以上の分析の結果、オペレータは以下の五つのメンタルモデルをもっていると推測できた。各モデルを代表する発話の例もあわせて示す。

[モデル1] 操作対象の物理的な振舞い、メカニズムに関するモデル。サイクロトロンでの操作対象はビーム軌道であるが、熟練オペレータは調整パラメータにより軌道がどのように変化するかを推測できる。たとえば、

コイル電流を増やすと磁場が強くなり、その結果、軌道半径が小さくなるという具合である。具体的な発話としては、「加速電圧を上げて軌道を外に動かす」というような軌道に関するものが挙げられる。

【モデル2】 調整パラメータのFSRに関するモデル。熟練オペレータは、試行錯誤的な探索を行う場合でも、およそどの範囲で設定値を調整すれば良いかを経験的に把握していることが、「多分30 A 以上だよ」というような発言に表われている。これは、多次元の操作空間におけるFSRをイメージしていることになる。

〔モデル3〕 調整パラメータの感度に関するモデル。
 設整時には、「このパラメータは効く」というような発言
 が聞かれる。この判断ができるのは、パラメータのビー
 ム電流に対する感度のモデルが形成されているからだ
 と考えられる。

【モデル4】 調整パラメータの干渉度合に関するモデル。オペレータは、たとえば加速電圧を大きくしても、磁場を小さくしてもビームの軌道半径は大きくなるという知識をもっている。これは、二つ以上のパラータが操作対象に対して相乗的に影響するか、相殺的か、それともほとんど無関係かという干渉度合に関するモデルをもっていることを示している。「この二つは相関が強いから同時に調整する」は代表的な発言である。

【モデル5】 評価量の操作空間における分布のモデル。最適設定値の探索においては、対象のある状態量を評価量として、その最大値/最小値を探索する。サイクロトロンの場合はビーム電流値がそれに当たる。オペレータは自らの探索履歴を記憶し、操作空間内での評価量の分布マップをイメージして、最適値を探索している。「さっきのところがいちばん良かった」などはこのモデルに関する発言である。

4. ビーム軌道調整のための視覚的な運転支援環境

4.1 支援環境のシステム構成

探索作業を支援するヒューマンインタフェースとして、メンタルモデルを視覚的に表現し可視化するような支援環境を設計する。五つのメンタルモデルの特徴を考察すると、モデル1はビーム軌道を幾何空間の中でイメージしたものであり、そのほかは設定値を座標軸とする操作空間における様々な属性に関するモデルである。したがってインタフェースとしても、軌道を幾何学的な座標系で表現したビーム軌道表示と、調整パラメータを座標軸としたほかのモデルの表示の2種類を用意する。ビーム軌道表示は、実時間で軌道の全貌を計測できないので、次善の策として機器設計において実績のある軌道シミュレーションを用いることにより実現する。

Fig. 3 Structure of the visual assistance system for cyclotron operation

つぎに、モデル 2~4 とモデル 5 を比較すると、前者は設定前のフィードフォワード的なモデルであるのに対し、後者は設定後にその効果を確認するフィードバックに関するモデルである。後で議論するがこれらは FSR 表示、操作履歴表示として実現する。フィードフォワード的なガイダンスとフィードバック情報を同一の座標系で視覚的に表現することにより、オペレータは双方の情報を一目で理解でき、反射的にガイダンスを行動に結び付けられるというのがこのインタフェースの利点である。以上を整理すると、この支援環境は以下の三つのインタフェースからなる。

① 軌道シミュレータによるビーム軌道のグラフィック表示インタフェース。これは実際には見ることでできないビーム軌道を表示することにより、あたかも直接ビームを操作しているかのような感覚をオペレータに与えるものである。

② 操作空間内における調整パラメータの FSR をリアルタイムに計算、表示するインタフェース。これはパラメータの設定可能な領域、つまり最適値の存在する可能性の高い領域を算出しそれを表示するもので、探索領域を限定することができる。

③ 調整の評価量であるヒーム電流値の分布を操作履歴として表示するインタフェース。これによりオペレータは、操作対象の状態量の操作空間内における分布を大局的に判断でき、最適設定点を同定しやすくなる。

このシステムの全体像をオペレータや操作対象との関係においてまとめたのが **Fig. 3** である。オペレータがマイクロトロン機器を設定し、その応答であるビーム電流値を確認してから、再度設定するという操作ループのなかに支援システムが組み込まれ、制御対象からオペレータに与えられる情報をシステムが補うという構造になっている。また、支援システムからオペレータへの出力情報はメンタルモデルと対応していることもわかる。

4.2 ビーム軌道表示インタフェース

オペレータがモデル 1 を形成するのを支援する一つの方法は、オペレータが操作対象を視覚的に現実感を伴っ

て見、それを直接操作しているように感じ、その変化を常に把握できる環境、いわゆる WYSIWYG (What You See Is What You Get) の環境を提供することである¹³⁾。

操作対象であるビーム軌道を実時間で計測し表示することができれば、そのような環境を作ることができるが、実際にはビーム軌道の全貌を計測することは困難である。そこで、ビーム軌道の数式モデルを用いて、オペレータの操作ごとにビーム軌道を計算し、表示するインタフェースを開発した。

Fig. 4(a)が、垂直入射ブロックにおけるビーム包絡線の表示例である。赤線は線対称のビーム包絡線の片側を表示したもので、調整パラメータを変更するたびに重畳して描かれる。ビームは画面右端から入射し、左端のインフレクタに絞込まれる。このビーム包絡線はビ-

(a) Axial injection block. Red lines are envelopes of beams in different conditions

(b) Central region block. Red line is a central trajectory, and blue lines are trajectories with different injection angle

(c) Extraction block

Fig. 4 Examples of beam trajectory display

ム光学的に定義された伝達行列を順次掛け合わせるにより求めることができる¹⁴⁾。

Fig. 4(b)は中心領域ブロックにおけるビーム軌道の表示例である。ビーム軌道は荷電粒子の運動方程式を数値積分法の一つである Runge-Kutta-Gill 法(RKG 法)によって逐次的に解いて求める¹⁵⁾。また、このインタフェースには、ビーム位相幅を変更するためにスリットが操作された場合に、画面上のスリット位置がアニメーション的に変更されるという機器配置の動的表示機能も含まれる。

Fig. 4(c)に引出しブロックでの表示例を示す。赤線は、理想軌道を横軸としてそれからの軌道の変位を条件ごとに表示したものである。軌道計算は、中心領域ブロックと同様に RKG 法による¹⁶⁾。また、この画面でもデフレクタや磁気チャンネルの配置はその調整にあわせて動的に表示される。

軌道表示インタフェースでは、オペレータが調整パラメータを変更するたびにビーム包絡線やビーム軌道を計算し、以前の結果に重畳表示している。これにより、軌道の変化量を確認でき、数式モデルに誤差が多少あっても、オペレータは少なくとも定性的には自らの操作がビームにどのような作用を及ぼしたかを把握できる。つまり、有効なフィードバック情報となっている。また、機器配置の動的表示も視覚的なフィードバックである。

このような操作環境は、CAI におけるマイクロワールド¹⁷⁾と同様に試行錯誤に基づく発見的な学習環境をオペレータに提供しているとみなすこともできる。したがって、オペレータは調整作業を行うと同時に、対象に対する理解を深め、モデル 1 を形成していくことができる。

4.3 FSR 表示によるオペレータガイダンス

調整パラメータのおよその調整範囲に関するメンタルモデル(モデル 2)のイメージを可視化することにより、未熟練者に対して探索範囲の指標を与えることができる。そこで、軌道の数式モデルの逆問題を解いて、FSR を求め表示するインタフェースを開発した。

多次元操作空間内で最適設定値を探索するための、具体的な操作インタフェースは、Fig. 5 に示すように多次元空間を 2 次元平面でスライスした操作平面を複数表示し、その上をマウスでポイントすることにより、実際の機器に設定値が送られるというものである。操作平面において、各軸は調整パラメータの設定値である。

操作平面内の黄色の領域が FSR であるが、その意味を Fig. 5 左側の操作平面で説明する。この FSR は、調整パラメータ C と D の値が現在の値から変更されない限り、この FSR 内にパラメータ A と B の設定値を設定す

Fig. 5 Adjustment planes and FSR display

れば、少なくとも数式モデルでは、ビームは目標のチャンネルを通過し、調整目標を達成することを示している。ここでの調整目標は、調整ブロックごとに設定されるが、垂直入射ブロックではビームがインフレクタを通過すること、中心領域ブロックではビーム中心軌道がスリットを通過すること、引出しブロックでは中心軌道が出口を通過することである。つまり、FSR は現在の動作点における計算上の設定値の許容領域である。

FSR を求めるには、操作平面内の各点においてビームが調整目標を満足するかどうかを判定しなくてはならないが、総当たり方式では計算時間が長くなり、実時間性を損なう。ここでは、黄金分割探索法と境界線追跡法を用いた高速の FSR 算出アルゴリズムを用いた³⁾。また、中心領域ブロックの FSR の算出においては、非線形モデリング法の一つである GMDH 法を用いてあらかじめビーム軌道の多項式近似式を求めておき、ビーム調整時にはそれを用いることにより高速化をはかっている⁴⁾。引出しブロックにおいても軌道計算の線形近似により高速化している。ここでの実時間とは、人間にあまり待つという感じさせない 1 秒以内の再計算と再表示である。

FSR は数式モデルに基づいているため、モデルの近似誤差や磁場や電場の推定誤差などにより、実システムとは正確には一致しない。したがって、FSR 内に設定しても必ずビームが通るとはいえず、オペレータによる試行錯誤探索は残るが、この表示により探索範囲はこの領域の近傍に限定されるため、探索作業の収束が早くなることが期待できる。また、モデル 2 のイメージを直接的に見ることができるため、メンタルモデルの形成が促進されると考えられる。

FSR の形状はモデル 3 およびモデル 4 に対応する情報も含んでいる。まず、モデル 3 の調整パラメータの感度については現在の設定値を示すクロスカーソルがおのの軸方向で FSR と交わる長さによって示される。この交差長が長ければパラメータを大きく変化させても

FSR 内に留まるので感度は低いといえる。逆に短ければ感度は高い。つぎに、モデル 4 のパラメータ間の干渉度合については FSR の傾きで示される。すなわち、Fig. 5 左側のように右下がりの FSR なら、パラメータ A を増やす操作はパラメータ B を減らす操作と同様の効果をもつ、つまり、二つのパラメータの軌道に対する作用は同じ方向であるので相乗的である。また、逆に右上がりであれば相殺的であるといえる。

4.4 操作履歴の表示インタフェース

オペレータは自らの操作によって操作対象の状態がどのように変化したかを常にモニタし、それが望ましい状態に近づいたかどうかを評価している。その際に重要なのは、毎回の操作と応答だけではなく、過去にどのような経過で探索を行ったかという履歴である。なぜなら、その操作と応答の履歴に基づいて操作空間における評価量の分布のイメージ(モデル 5)を作り上げていると考えられるからである。

サイクロトロンの場合には、オペレータの指示した操作平面上の位置とその位置でのビーム電流値を逐次記録したのが、操作履歴である。そこで、Fig. 6 に示すように、設定値を変更するたびにその値に対応する操作平面上の位置に、ビーム電流値を色表現したドットを表示するインタフェースを開発した。このように操作と応答を画面に記録することにより、オペレータは、評価量(ビーム電流値)の分布を多数のドットからなる色領域として大局的に把握することができる。操作履歴は FSR に重ねて表示されるため、色領域の分布と FSR の差、つまり、実システムと数式モデルの差をオペレータは視覚的に認識し、かつ補正しながら、限られた領域において試行錯誤探索を行うことができる。

Fig. 6 は実システムで記録した例であるが、FSR と最適設定値の間に差があることがわかる。この図は調整範囲の一部分の拡大図であり、カラスケールもビーム電流値の狭い範囲を拡大して割り当てているため、誤差が大きいとの印象を受けるが、実際には FSR 内の黄色の

Fig. 6 Search trace display, being a historical visual map of measured beam current values represented by various colored dots, superimposed on the FSR

点では目標の 90% を達成しており、FSR は十分に最適値近傍を示しているといえる。また、カラードットの分布が FSR のように単純ではなく、多くの凹凸があるように見えるのは、イオン源から出力されるビーム電流が時間的に微妙に変動しているからである。オペレータはこのよう変動を巧みにフィルタリングして最大値を見つけているが、それを自動化することは容易ではないことも、人間を介入させる方式にした理由である。

B. Shneiderman は、8 項目のインタフェース設計の原則を示している¹⁸⁾が、その中で有益なフィードバックの提供と短期記憶の負担軽減を挙げている。提案したインタフェースは、メンタルモデルの可視化だけでなく、この二つの原則を満たしている。つまり、オペレータの操作に対して、ただちに結果がポイントした位置に表示されるので、視覚的なフィードバックを構成している。また、操作履歴を視覚的に表示することは人間の短期記憶を補っており、探索における不都合な事態、たとえば、同じような設定値を何度も試してしまう堂々巡りや、少し前の設定値に戻せないという事態を防ぐ効果がある。

5. 評価実験と考察

評価実験を、日本原子力研究所高崎研究所の高エネルギーイオン照射装置(930 型 AVF サイクロトロン)¹⁹⁾において行った。評価方法は、調整時間の測定と操作感覚のアンケート調査である。

5.1 調整時間に関する評価と考察

インタフェースの違いによる調整時間の短縮の効果を調べるために、以下の三つの調整モードについて、目標ビーム電流値に達するまでの調整時間を計測した。

Mode 1: Fig. 7(a) のような従来型のコンソールで調整する。つまり、ビーム電流計を見ながら、四つのロータリエンコーダで設定値を変更する。このモードでは当然 FSR、操作履歴のいずれも表示されない。

Mode 2: Fig. 7(b) のように操作平面を表示し、その上をマウスでポイントすることにより、設定値を変更する。ビーム電流値はカラードットとして操作平面上に表示さ

れ、それが探索履歴として残る。ただし、このモードでは FSR は表示されない。

Mode 3: Mode 2 と同じ操作環境に加えて FSR も同様に表示される (Fig. 7(c))。

被験者は熟練者 1 名、訓練を受けた者 4 名、ほとんど素人 4 名の計 9 名のオペレータである。目標ビーム電流値は、あらかじめ熟練オペレータが調整したときの最大ビーム電流値の 95% とした。実験は最適設定値から故意にずらした設定値から被験者による探索を開始し、ビーム電流値が目標値に到達するまでの時間を各 Mode について 1 回ずつ計測した。調整順序は Mode 1, 2, 3 の順で行ったが、慣れや記憶による影響を少なくするために、設定値表示を隠し試行ごとにエンコード割当や操作平面の軸配置を変更した。また、できる限り実験条件を合せて比較を容易にするために、この実験は垂直入射ブロックの調整で行い、パラメータは四つの磁気レンズに限った。ただし、軌道表示インタフェースは使用しなかった。

評価実験の結果として、各人の調整時間とその中央値を Table 1 に示す。中央値を採用したのは平均値に比べて極端な値の影響を受けにくいからである²⁰⁾。数値は各人の Mode 1 での調整時間で正規化してある。

Mode 2 での調整時間は Mode 1 に比べて 20% 以上短縮された。Mode 1 より調整時間の長い被験者は 1 人だけであり、その差も小さいことから、ほぼすべての被験者にとって Mode 1 より Mode 2 のほうが操作性が良くなったといえる。なお、この 1 人は唯一の熟練者であり、従来のコンソールに習熟していたためにこのような結果になったと考えられる。操作性向上の理由としては操作履歴表示とマウス操作が考えられるが、アンケートでは二つとも有効であるとの回答が多く相乗的な効果によって調整時間が短縮されたものと考えられる。

Mode 3 での調整時間は Mode 1 と比べて 35% 以上、Mode 2 と比べても 15% 以上減少した。評価実験を行った状況では最適設定値は FSR の外側にあり、オペレータにとっては悪い条件下での実験であったにもかかわらず、FSR 内に設定するだけで 70~80% と比較的多くの

Fig. 7 Schematic diagram of evaluated interfaces

Table 1 Summary of search times using three interface modes

Operator	Level ^a	Mode 1 ^b (real time)	Mode 2 ^c	Mode 3 ^d
1	E	1.0 (203 sec)	1.07	0.59
2	T	1.0 (210)	0.76	0.86
3	T	1.0 (207)	0.68	0.63
4	T	1.0 (350)	0.97	0.73
5	T	1.0 (260)	0.67	0.46
6	N	1.0 (130)	0.92	0.85
7	N	1.0 (410)	0.95	0.80
8	N	1.0 (605)	0.65	0.42
9	N	1.0 (640)	0.47	0.34
Median		1.0	0.76	0.63

^a Level : E : Expert, T : Trainee, N : Novice.

^b Mode 1 : Using the existing console with dials and a current meter.

^c Mode 2 : Using the assistance system without the FSR display.

^d Mode 3 : Using the full assistance system.

ビーム電流値が得られ、目標ビーム電流値まで速やかに到達することができた。つまり、FSR 内に設定することにより、たとえ最適設定値がそのなかになくても最適値の近傍に達することができるので、探索作業の初期段階において FSR 表示のメリットは大きいと評価できる。

つぎに、Mode 3 の実験において観測された興味深い現象について考察する。被験者には目標ビーム電流に達した後も探索を続けて最大電流値を探すように要請した。実際の調整作業においては、調整ブロック間のバランスをとりながら最適設定値を求めるので個々のブロックで厳密に最大値を見つけることはあまり意味がないが、ここでは支援機能の評価を行うためこのように要請した。Mode 1, Mode 2 では全員が目標値到達後、短時間のうちに最大電流値に達している。また、Mode 3 においても 9 人中 6 人はやはり短時間で最大値に達しているが、オペレータ 2, 3, 5 については Mode 1 に比べてそれぞれ 1.76, 1.74, 4.40 と調整時間が長くなった。この理由を検討するために、各人の操作状況を録画から調べたところ、この 3 人の被験者は、いずれも FSR の内部のみを詳細に探索した結果、FSR から少しはずれた最大値を見つけられなかったことがわかった。つまり、FSR が多少不確かなガイダンス情報なのに、境界の明確な領域として表示したために、FSR の外側を探索することに対する心理的な障壁になったと考えられる。これと同様の現象は心理実験における“9 点問題”として指摘されている²¹⁾。これは、「3 個ずつ 3 列等間隔に並んだ 9 点をすべて通過する 4 本の直線を一筆で描け」というもので、9 点を囲む正方形内だけで考えていると解けないが、その外側まで直線を延ばせば解けるという問題である。つま

り、境界を強く意識することが正解への到達を阻害する可能性があるという点で FSR の場合と類似している。

しかし、このようなオペレータでも FSR と最適値の間に不一致があることをアドバイスすると容易に最大値に達したことから、この事実を認識していれば実際の作業において混乱はないと考えられる。また、実システムとの差が問題になるのは、最適値をかなり絞り込んだ最終的な局所探索の局面においてであるが、その時点ではオペレータの注意は履歴表示を参考にして最適値の見当をつけることに向けられており、FSR の誤差によりオペレータをミスリードするというデメリットは小さい。これは 3 人以外のオペレータが、初期の大域的探索においては FSR を参照して速やかに最大値近傍まで達し、ここからの局所的探索においては FSR に重きを置かず試行錯誤的に最大値を探したため短時間で探索を完了していたことから裏付けられる。

積極的な対策としては、FSR の境界を等高線表示にしたりぼかしたりする方法により、完全に正確なガイダンス情報ではないことをユーザに直感的に認識させるような工夫が考えられる。これは「～らしい」という言語表現に相当する図的表現にあたる。また、実システムにおける探索履歴から FSR との誤差方向を推測し、探索方向についてのガイダンスをオペレータに示すことも有効な対策であろう。

5.2 アンケートによる操作性の評価

アンケート調査とインタビューにより、定性的ではあるが本システムによる操作性の向上度合を評価した。オペレータには、すべての機能を自由に操作してもらった後に、① ビーム軌道表示、② FSR 表示、③ 操作履歴表示、④ 機器配置の動的表示、⑤ マウスによる設定について、その有効性を 5 段階 (5 : 有効性が大きい, 4 : 有効である, 3 : どちらともいえない, 2 : あまり有効でない, 1 : 全く有効でない) で評価してもらった。回答者は 7 名である。

Table 2 に各機能に対する評価値の平均値と度数を示すが、すべての機能について 4.0~4.7 と高い評価値が得られた。またその分散も大きくないので全員から高い評

Table 2 Questionnaire results on the effectiveness of the assistance system

Function	Average Score	Histogram					
		5	4	3	2	1	
(1) Trajectory display	4.29	2	5				
(2) FSR display	4.00	2	3	2			
(3) Search trace display	4.14	3	3				
(4) Display layout	4.71	5	2				
(5) Operation by mouse	4.14	2	4	1			

価を得ていることがわかる。熟練者と未熟練者の回答を比較しても際だった差異はみられなかった。

詳細に検討すると、軌道や機器配置を可視化するインタフェースに対する評価が相対的に高い。これは、逆説的に解釈すると、従来のようなブラックボックス型インタフェースに対するユーザの不満を表わしており、ユーザに内部を見て理解したいという要望があることがわかる。また、FSR 表示インタフェースに対する評価が若干低い理由は、やはりモデルと実システムとの不一致にあると考えられる。誤差要因を解明してその補正を数式モデルに盛り込むことによりガイダンスの精度を高めることは今後の課題である。すでに垂直入射ブロックについては粒子間の相互作用による空間電荷効果の補正を検討中である。提案したシステムがどのような場面で有効かという質問に対しては、素人のオペレータのトレーニング、調整前の事前シミュレーション、最適値の大域的探索に有効であり、局所的な微調整については従来方式が良いとの意見が得られた。この理由としては、マウスとロータリエンコーダの特性の差、ビーム電流表示の応答性の差が考えられる。

6. おわりに

サイクロトロン運転支援システムとして、オペレータのもつメンタルモデルのイメージを可視化するヒューマンインタフェースを開発した。本稿では、まず、オペレータが五つのメンタルモデルをもって操作にあたっていることを明らかにした。つぎに、それらを図的に表現して、未熟練者がメンタルモデルを生成するのを支援するインタフェースとしてビーム軌道表示、FSR 表示、操作履歴表示を提案し実現した。最後に、その効果を検証するために、実システムにおいて調整時間の測定と操作感覚のアンケート調査を行った。その結果、このインタフェースにより、目標値を得るまでの時間は従来のシステムに比べて 30% 以上減少することを確認した。また、アンケート調査の結果、これらの有効性についてすべてのオペレータから高い評価が得られた。

本システムの実装と評価から、試行錯誤的な探索作業を支援するインタフェースの一般的な設計指針として、① 内部状態をホワイトボックス化することによりオペレータの深い理解を助けること、② 言語メッセージではなく、図的表現により直感的にガイダンス情報を与えること、③ 信頼できる数式モデルがあるなら、FSR 表示は有効であること、④ 視覚的フィードバックにより操作の作用を常時確認できることをあげることができる。また、設計に先だって人間のメンタルモデルを十分に分析することが人間とシステムの不整合を防ぐために重要である

ことも示した。

最後に、本研究で常にご指導いただいた(財)パーソナル情報環境協会 FRIEND 21 研究センタ長上滝致孝博士に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) T. Okamura and T. Murakami: A Support System for Beam Adjustment of Cyclotron Based on Fuzzy Grading Model and Texture Display, 11th IFAC World Congress, IV, 57/62 (1990)
- 2) 岡村, 村上: ファジィ関係に基づくサイクロトロンのビームパターン診断と調整ガイダンス, 計測自動制御学会論文集, 26-8, 870/877 (1990)
- 3) 岡村, 村上: 設定可能領域のリアルタイム表示によるサイクロトロンの調整ガイダンス, 計測自動制御学会論文集, 26-11, 1305/1312 (1990)
- 4) 岡村, 村上: GMDH によるビーム軌道の近似モデルを用いたサイクロトロンの調整ガイダンス, 第 33 回自動制御連合講演会, 3073, 493/494 (1990)
- 5) 岡村, 村上: メンタルモデルに基づく機械システムの視覚的な運転支援環境, 計測自動制御学会第 7 回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, 517/522 (1991)
- 6) W. F. S. Poehlman and J. W. Stark: Integrating Knowledge-Based Systems into Operations at the McMaster University FN Tandem Accelerator Laboratory, IEEE Transactions on Nuclear Science, NS-36-5, 1494/1498 (1989)
- 7) D. E. Schultz and P. A. Brown: The Development of an Expert System to Tune a Beam Line, Nucl. Instr. and Meth., A293, 486/490 (1990)
- 8) 佐伯胖: インタフェースと認知工学, 情報処理, 30-1, 2/14 (1989)
- 9) 佐伯, 西田: 認知科学の視点からみたヒューマンインタフェース, 電学誌, 109-8, 645/647 (1989)
- 10) D. A. Norman: Psychology of Everyday Things, Basic Books (1988), 野島久雄訳: 誰のためのデザイン?, 新曜社 (1990)
- 11) 岡村, 村上: サイクロトロンのビーム調整における調整手順ルールの抽出, 第 27 回 SICE 学術講演会予稿集, 19/20 (1988)
- 12) 村上, 岡村: サイクロトロンビーム調整におけるパラメータ次元の縮約, 第 27 回 SICE 学術講演会予稿集, 21/22 (1988)
- 13) B. Shneiderman: Direct manipulation; A Step Beyond Programming Language, IEEE Computer, 16-8, 57/69 (1983)
- 14) K. L. Brown, et al.: TRANSPORT; A Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport System, CERN, Geneva, Switzerland, Tech. Rep. CERN 80-04, 129/195 (1978)
- 15) C. J. Kost: The Computer Code "TRIWHEEL", TRIUMF, University of British Columbia, Canada
- 16) 高山猛: AVF サイクロトロンの軌道解析プログラムについて, 住友重機械技報, 24-72, 11/16 (1976)
- 17) 大概, 竹内, 有村, 森: マイクロワールド型 CAI と学習者の意図の推定, 情報処理学会研究報告, CE-91-33, 137/144 (1991)
- 18) B. Shneiderman: Designing the User Interface (1987) Addison-Wesley, 東, 井関監訳: ユーザー・インタフェースの設計, 日経 BP 社 (1987)
- 19) S. Okumura, et al.: Control System of JAERI Cyclotron, Proc. of 8th Symp. on Accelerator Science and Technology, 356/358 (1991)

- 20) 渡部, 鈴木, 山田, 大塚: 探索的データ解析入門, 17/18, 朝倉書店(1985)
- 21) M. Minsky: The Society of Mind, Simon & Schuster (1986), 安西祐一朗訳: 心の社会, 216/217, 産業図書(1990)

[著者紹介]

岡村 哲也 (正会員)

1980年, 京都大学工学部電気第2学科卒業。同年住友重機械工業(株)入社。以来, システム技術研究所にて計算機制御, 運転支援システムの研究開発に従事。情報処理学会, 電子情報通信学会, IEEEなどの会員(工学博士)。

村上 亨 (正会員)

1985年, 大阪府立大学大学院工学研究科修士課程修了(電気工学専攻)。同年住友重機械工業(株)入社。以来, システム技術研究所にて運転支援システム, ヒューマンインタフェースの研究開発に従事。情報処理学会の会員。

上松 敬

1978年, 長野県立長野工業高等学校電気工学科卒業。同年日本原子力研究所入所。82年群馬大学工業短期大学部電気工学科卒業。大線量率電子線の線量測定技術, 工業用X線発生装置の線量解析プログラム, 簡易型アラニン線量計測システム, 走査型分光光度計の開発に従事。

奥村 進

1989年, 筑波大学理工学研究科修了。同年日本原子力研究所高崎研究所入所。サイクロトロンの運転・技術開発に従事。

荒川 和夫

1965年, 長野県立長野工業高等学校電気課程卒業。同年日本原子力研究所入所。負イオン生成機構とイオン分子反応の研究, サイクロトロンの研究に従事し現在に至る。日本原子力学会, 日本化学会, 日本質量分析学会, 加速器科学研究会などの会員(工学博士)。