

# 自動化機械の調整作業を支援するユーザ・インタフェースの開発 —自動計量を対象とした機能間の意味構造の抽出と可視化—

堀口 由貴男\*<sup>1</sup> 朝倉 涼次\*<sup>1\*2</sup> 榎木 哲夫\*<sup>1</sup> 玉井 裕\*<sup>3</sup> 内藤 和文\*<sup>3\*4</sup>  
橋口 伸樹\*<sup>3</sup> 小西 洋江\*<sup>3</sup>

## Development of Smart User Interface to Enhance User Performance in Adjusting Automation —Extraction and Externalization of Functional Semantics of Automated Weighment—

Yukio Horiguchi\*<sup>1</sup>, Ryoji Asakura\*<sup>1\*2</sup>, Tetsuo Sawaragi\*<sup>1</sup>, Yutaka Tamai\*<sup>3</sup>, Kazufumi Naito\*<sup>3\*4</sup>,  
Nobuki Hashiguchi\*<sup>4</sup> and Hiroe Konishi\*<sup>4</sup>

**Abstract** – This paper presents a practical study on developing a smart user interface for supporting human works of adjusting complex mechanical systems, focusing on the actual automation of computer-controlled multihead weighers. Based upon the theoretical framework of Ecological Interface Design, the inherent functional structure of the work domain is clarified in terms of means-end relations, thereby visualized on the screen displays to encourage the human operator's "direct" perception of the meanings or values of his/her practicable actions to the automated processes. A comparative experiment using test users with a variety of skill levels is conducted to examine the effectiveness of this redesigned user interface. The result confirms that the well-considered user interface can facilitate unskilled operators appropriately evaluating and effectively responding to their immediate work situations, which will thus take the place of the experts' knowledge and insights on the works as one of the distributed resources for cognition.

**Keywords** : Ecological Interface Design, Work Domain Analysis, factory automation, user interface design

### 1. はじめに

機械は定型的な動作の繰り返しや維持において人間の能力を遥かにしのぐ。そのため、さまざまな領域で自動化の開発や導入が進み、作業の精度や信頼性の向上、省力化に大きく貢献している。一方で、自動化の状況判断は想定された仕様の範囲内に限定され、それを超える環境変化に関しては人の判断を仰がねばならない。しかし、高機能・高性能を実現するべく複雑化した機械は言わばブラックボックス化しており、外部からその動作の根拠や論理が見えにくくなっている。そのような機械を操作し管理する作業は非常に厄介な仕事である。

自動化の動作を調整する目的は、自動運転時に発生する環境変動下でも機械に安定したパフォーマンスを発揮させることである。これには機械の動作メカニズムについての深い理解が求められ、それゆえ作業者間の技量差が問題になる。すなわち、自動化の動作パ

ラメータの調整はオペレータ個人の能力に頼む部分が大きく、同じ機械であってもオペレータによって実際に発揮できるパフォーマンスがかなり変化する。これを改善する方法は2つある。ひとつは、環境変動に対して自らの動作を適応させるように自動化をより知的なものに改良することである。しかしこのようなさらなる自動化も、効果的な適応アルゴリズムの設計という難しい課題に加えて、適応動作のパラメータを調整するという同種の問題の危険を孕んでいる。もうひとつの方法は、機械が置かれている状態を為すべき操作の手がかりも含めて効果的に可視化すること、すなわちユーザ・インタフェース (UI) の改良である。本研究では後者の観点から自動化調整の問題にアプローチし、未熟なオペレータであっても機械が具備する能力を活かす高いレベルの調整を達成できる UI の開発について検討する。

調整作業を支援する UI の設計において鍵になるのが熟練者のもつ領域知識である。自動化機械はさまざまな機能要素が結びついたシステムとして構成されているが、熟練者はそれらの要素がどのように連動するかを理解しているからこそ、たとえ断片的な情報しか手に入らなくとも、それらが示唆するシステムの状態を的確に読み取り、作業要求を満たす状態に機械を確実に誘導することができる。そして、熟練者と未熟

\*1: 京都大学大学院 工学研究科

\*2: 同上修士課程修了後、現在株式会社日立製作所に勤務。

\*3: 株式会社インダ

\*4: 新光電子株式会社

\*1: Graduate School of Engineering, Kyoto University

\*2: He is currently with Hitachi, Ltd.

\*3: ISHIDA Co., Ltd.

\*4: SHINKO DENSHI Co., Ltd

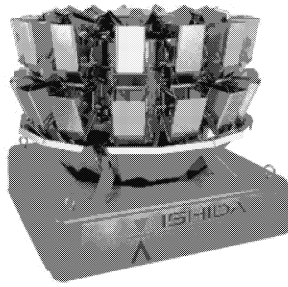


図1 組合せ計量装置 CCW-R-214W  
Fig.1 Multihead weigher CCW-R-214W.

練者の調整能力の差を解消する UI とは、この領域知識に倣う形でシステムの状態を「見える」ようにするものである。このような UI の開発には、自動化機械が備える機能群を体系的に整理して可視化すべき関係を抽出する作業が必要になる。本研究では、領域知識整理のツールとして作業領域分析 (Work Domain Analysis: WDA) [1],[2] の手法を用いることを提案する。そして、この手法と親和性の高い UI 改良の基本理論として、K.J. Vicente と J. Rasmussen によるエコロジカル・インタフェース設計 (Ecological Interface Design: EID) [3]~[5] の理論を利用し、状態と操作手段の可視化を実践する。UI 開発の具体例として、本稿では組合せ計量装置を取り上げる。この装置は生産における計量作業の自動化を担当するものであるが、熟練者と未熟練者の間で発揮できる自動運転時のパフォーマンスの違いが問題になる代表例となっている。

本稿の構成は以下のとおりである。まず第2章では、組合せ計量装置調整の現状について説明する。続く第3章では、WDA を用いて熟練者の領域知識を整理する。第4章では、WDA の結果に基づく現行 UI の問題点の分析と問題点解消のための UI 改良について述べる。第5章では、模擬的な装置調整作業課題を用いた UI 評価のための作業実験について報告する。第6章では、実験結果を詳細に分析し、UI 改良の効果について考察を行う。最後に、第7章において本研究の知見をまとめる。

## 2. 組合せ計量装置の調整作業

近年、効率化のために多種多様な自動化が生産現場に導入されているが、商品の計量作業も自動化の対象であり、設定された重量の商品をコンピュータ制御によって自動的に生成する装置が普及している。組合せ計量装置はその一種で、計量物を少量ずつ多数のまとまり (バッチ) に分けて各々の重量を測定し、いくつかのバッチを組み合わせるとして一回分の計量物として排出する「組合せ計量方式」によって商品を計量する。株式会社イシダが製造・販売する組合せ計量装置 (図1)

は、このプロセスでの計量物の搬送を「フィーダ」と呼ばれる加振装置による搬送面の機械的な振動と「ホッパ」と呼ばれる計量物を一時的にプールするバッファの開閉によって実現し、計量物の形状や性状に左右されない高速な計量を連続的に実行することができる。そのため、スナック菓子やキャンディ等の食品から機械部品に至るまで、幅広い製品の自動計量に利用されている。しかし、生産する商品種の変更によるラインの組み替えや調味料等の計量物の一部の搬送面への付着による搬送能力の変化によって計量条件はさまざまに変動する。その結果、事前に用意されたパラメータ設定の選択利用のみでは変動する計量条件の中で十分なパフォーマンスを達成できないため、自動化の動作の仕方を計量物の特性や環境条件に合わせて人間が適宜調整しなくてはならない。特に性能限界に近い稼働条件での運用では繊細な動作調整が求められる。

大量の商品を製造する生産ラインの中で、計量工程が商品重量の規格を満たさない不良品を頻出させたり、許容範囲内であっても目標重量に対する相応の誤差が累積することは、生産全体にとっても大きなロスである。また、動作パラメータの設定変更が計量物の搬送や組合せ計量に与える効果を正確に特定することは困難であり、調整は試行錯誤に頼らざるを得ない。さらに、設定変更の試行に対する効果は次サイクルの計量結果にすぐさま明瞭に現われるのではなく、計量物の搬送状態の漸次変化を通じて効果が徐々に明らかになる (つまり、システムの時定数が大きい) という特性がある。そのため、動作パラメータの調整作業はある程度継続する計量パフォーマンスの観察を必要とするが、その期間が長引くことは生産ロスを増大させる。以上の理由により「短時間で」「正確に」計量動作を調整することがオペレータには求められる。しかし、計量装置が導入される生産現場では、パートタイマーのような流動性の高い人間が計量装置の担当を任されることが少なくなく、また一人の作業者が計量装置を含むいくつものシステムを管理する勤務体制であるため、調整作業の十分な訓練や習熟を期待できない。例えば、調整後の計量装置の稼働率 (後述) を基準として比較した場合、イシダのサービスエンジニアであれば 99%以上のレベルに調整可能な計量条件であっても、一般の作業者は 95%程度の調整で運用している。さまざまな商品種の製造に対応するためには生産ラインを適宜組み換えて運用することが不可欠だが、自動化の調整作業に対するオペレータの技量という人的要因が生産効率化のボトルネックになるのが現状である。このような組合せ計量装置の運用に関する課題に対して、ファジィ制御器などの自動制御による解決 [6] が模索されているが、装置自身による動作パラメータの自

動調整が対応できる状況は非常に限定されており、実用レベルには達していない。

組合せ計量装置の調整作業では、手技の巧みさよりも認知や判断といった情報処理の質が問われる。そこで著者らは J. Rasmussen の意思決定の梯子 (decision ladder) モデル [1], [2] の考え方をオペレータの調整作業スキルの分析に応用し、調整作業における情報処理プロセスの特徴を先行研究において分析した [7]。そして、未熟練者と熟練者の調整作業の比較から、操作判断時において装置の稼働状態を実行可能な手順に対して的確に同定できるか否かを両者の情報処理の違いとして確認した。この状態の同定には、UI 上の表示情報が示唆するものを的確に読み取るための領域知識が必要であり、この種の知識の習得と利用が計量装置の調整における熟練者の熟練者たる作業パフォーマンスを特徴づけている。

### 3. 組合せ計量の作業領域分析

UI の問題点の分析と改善の基礎として、組合せ計量という作業システムの機能構造を特定する必要がある。本研究ではこの作業に WDA [1], [2] を用いる。これは、対象とする作業システムの機能的な特性群を領域知識に基づいて目的—手段関係の観点から分析し、機能間の関係を抽象度の階層 (Abstraction Hierarchy) として表現するものである<sup>1</sup>。

#### 3.1 組合せ計量の仕組み

組合せ計量の基本的な仕組みを図2に示す。前段工程から供給コンベヤなどによって搬送されてきた計量物は、『クロスフィーダ』(Cross Feeder, 以降 CF) から計量装置上部の『分散テーブル』上に投入され、それが『分散フィーダ』(Dispersion Feeder, 以降 DF) が加える振動によって分散テーブル上を周囲に向かって移動する。この計量物の流れが、『放射フィーダ』(Radial Feeder, 以降 RF) が加振する、分散テーブルの周囲に放射状に配置された『放射トラフ』によって複数に分岐<sup>2</sup>した後、『プールホップ』(Pool Hopper, 以降 PH) に投入されて一時的にプールされる。プールホップは装置の中央制御部からの指令に基づいて所定のタイミングで開閉し、その真下に位置する『計量ホップ』(Weigh Hopper, 以降 WH) に中の計量物を引き渡す。各 WH には計量機構が付帯しており、投入された計量物の重量 (以降、ホップ重量) を測定する。

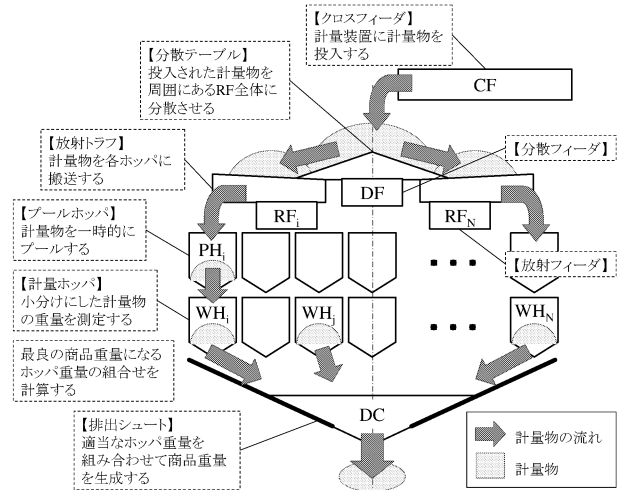


図2 組合せ計量の仕組み

Fig.2 Constituent processes of a multihead weigher system.

すべての WH が重量測定を終えると、測定値が演算部に集められ、ホップ重量のすべての組合せを計算する。そして、可能な組合せの中から「商品重量の目標値に最も近く、かつ目標値を下回らない」という判断基準を満たす組合せを選択して、その組合せを構成する WH に中身を排出させる。WH から選択的に排出された計量物は『排出シュート』(Discharge Chute, 以降 DC) で集められて、包装机などの下流工程に送られる。以上が1回の商品計量であり、ホップ重量を組み合わせて得られた商品重量のことを**組合せ重量**と呼ぶ。なお、排出後空になった WH には上段のプールホップでプールされている計量物が補充されることになる。また、選択されなかった WH 内の計量物はそのまま留まり、新しく投入される計量物とともに次の組合せ計算に用いられる。

組合せ計量装置のパフォーマンスは、与えられた規格を満たす分量 (以降、「正量」と表現) の商品を単位時間当たりどれだけの個数生産できるかによって評価することができる (例えば、図1の機種では最大で毎分180回の計量が可能)。そして、理想的な計量装置の稼働状態とは、設定されたサイクル時間ごとに繰り返される組合せ計算において正量の商品を毎回生産することである。しかし実際の稼働時には、前述の判断基準を満たす組合せが得られないために計量物の排出が見送られたり、重量の規格を満たさない不良品が排出されたりといった、機会ロスや商品不良ロスが発生する。生産システムの生産性向上のためにはこのようなロスのない状態 (稼働率100%) に近づけることが求められる。また、正量範囲内であっても目標値との誤差が大きかったり、商品重量が不揃いであることは決して好ましいことではないため、目標値との誤差

1: 大規模なシステムを対象とする場合には、目的—手段関係という機能的な抽象度の次元に加えて、部分—全体関係というシステムを捉える視野の範囲の次元からも、作業システムの機能構造は展開される [5]。組合せ計量装置のみを対象とする本研究では、機能的な抽象度の次元のみの展開で目的が達成された。

2: 組合せ計量に使用される計量ホップの個数 (放射トラフ、プールホップの個数も同じ) をヘッド数と呼ぶ。これは機種によって8から24ヘッドのバリエーションがある。

のない一定重量の商品を生産し続ける計量が理想である。組合せ計量装置のパフォーマンスはこれらの観点から評価することができる。そして計量装置の動作調整は、主として加振搬送を司るフィーダの振動強度と振動持続時間の設定値の変更を通じて行われる。

### 3.2 機能構造の抽出

WDA では、目的を与える上位機能とその実現の手段となる下位機能の関係を特定していくことで、抽象的な目的のレベルから具象的な機器の物理的形態のレベルにかけて展開される目的-手段関係の階層の中に、作業システムがもつさまざまな機能を位置づける。1つの目的を達成するための手段の実現にはより細分化された手段が必要になるが、そのような目的-手段関係を階層構造で表現したものが抽象度の階層である。そこでの機能間の関係は、システム稼働中のどの時点においても成立する不変なものであり、言わば作業システムがもつ機能の意味構造 (semantics) と見なすことができる。

組合せ計量装置の取り扱いに長けたインダの熟練技術者と協議を重ねながら WDA を実施し、図 3 に示す機能構造すなわち作業領域モデル (Work Domain Model) を特定した<sup>3</sup>。このモデルの各階層の記述内容を以下で説明する。なお、図中のノード間を結ぶ実線のリンクは異なる階層間の目的-手段関係を表し、破線のリンクは同階層内での処理の流れを表している。また、図が繁雑になるため、物理的機能以下の階層の記述は省略した。

#### 3.2.1 機能的目的 (Functional Purpose)

組合せ計量装置の調整の目的は計量パフォーマンスの最大化である。それは、3.1 節で述べたように、計量装置の稼働率と計量された商品重量の目標値に対する精度 (計量精度) によって評価することができる。図 3 では、それぞれを “Effective Combination Weighing” と “Accurate Combination Weighing” として表現した。

#### 3.2.2 抽象的機能 (Abstract Function)

組合せ計量装置の抽象的機能は、装置に投入される商品量 (流入量) と装置から排出される商品量 (流出量) との間で成立する商品流動のバランスの観点と、効果的な組合せ計算のためのヘッドへの計量物の分

配の観点から記述した。図 3 ではそれぞれを “Mass Flow” と “Adequate Pop. Size for Combination” として表現した。これらの抽象的機能の機能的目的との関連は以下のとおりである。

まず稼働率の効率を向上させることは時間当たりの流出量を最大化することであるが、この状態を維持しつづけるには常に流出量に釣り合う流入量が必要である。さらに、有効な組合せを次々と作るようにするには、各 WH への計量物の補充が滞らないように、計量物の分配を均等して全ヘッドが等しく使用されるようにする必要がある。一方、計量精度を向上させるには、組合せ重量の候補となるホップ重量の組合せのバリエーションをできる限り増やすことが望ましい。そのためには各ヘッドへの分配をある程度ばらつかせる必要がある。

#### 3.2.3 一般化機能 (Generalized Function)

組合せ計量の一般化機能のレベルは、以下の 5 段階のプロセスの連鎖として説明できる。

- (1) Mass Source: 上流工程からの計量物の取り込み
- (2) Mass Separation: 計量物の複数経路への分割
- (3) Mass Storage 1~N: 各経路での計量物の搬送と重量の測定
- (4) Mass Combination: 組合せによる商品の生成
- (5) Mass Sink: 下流工程への商品の送り出し

計量システムでの商品の流動状態は (1)(2)(3)(5) のプロセスの働きに影響を受ける。また、組合せのバリエーションの多寡はプロセス (3)(4) の働きによって決まる。なお、プロセス (3) は両方の抽象的機能の実現に影響するが、商品の流動に関しては全経路による搬送の総量が問題となり、組合せのバリエーションに関しては経路間の搬送量のバランスが問題となる。

#### 3.2.4 物理的機能 (Physical Function)

物理的機能は一般化機能を具現化する作業システムの物理的なコンポーネントによって代表され、図 2 に列挙されている。そして、それらの働きや相互の関係は 3.1 節にて詳細に説明した。

#### 3.2.5 物理的形態 (Physical Form)

物理的形態のレベルはコンポーネントの物理的形態や空間的配置を記述の対象とする。組合せ計量装置では、この階層の構成要素は物理的機能の階層のそれと同じであり、図 2 はその概形を与える。

### 3.3 状態変数間の関係の特定

WDA によって他との関係が明らかになった各機能には、その状態を代表する変数を対応づけることができる。すなわち、UI 上への表示対象である状態変数は、作業領域モデル内の目的-手段関係に則って相互の結びつきが特定される。表 1 では、組合せ計量装置で測定あるいは算出が可能な状態変数群を抽象度の階

3: Rasmussen は、工学システムの機能特性を階層的に表現する場合に以下の 5 つのレベルを用いることが有効であるとしている [1]: 機能的目的 (システムの目的、すなわち設計において意図された機能的効果による記述のレベル), 抽象的機能 (情報やエネルギー、質量、価値の流れを基礎づける因果関係によるシステム記述のレベル), 一般化機能 (抽象的機能の実現に寄与する、物理的な実装とは無関係な一般化されたシステムのプロセスによる記述のレベル), 物理的機能 (一般化機能のプロセスを実現する物理的なコンポーネントとその機能的な特性による記述のレベル), 物理的形態 (物理的なコンポーネントの形態や空間的配置による記述のレベル)。本研究もこれに倣って機能構造を記述した。

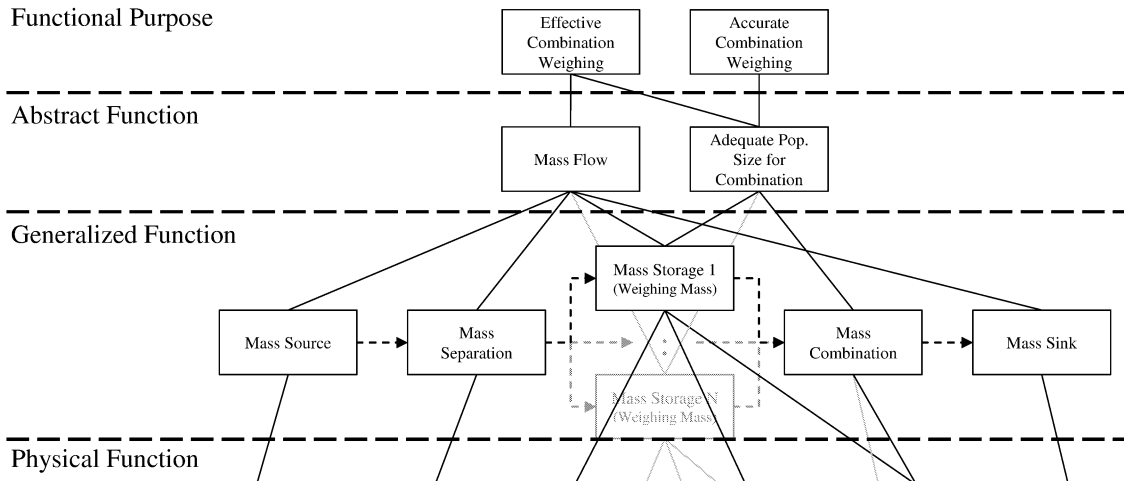


図3 組合せ計量装置の作業領域モデルの一部  
Fig. 3 Part of the work domain model for the multihead weigher.

表1 抽象度の階層の中に位置づけられた状態変数

Table 1 State variables classified into the levels of Abstraction Hierarchy.

抽象度のレベル	変数
機能的目的	稼働率 計量精度
抽象的機能	平均組合せ選択ヘッド数 投入ばらつき
一般化機能	分散投入重量 目標供給重量 投入重量 1~N (平均と標準偏差) 組合せ重量 ヘッドの選択
物理的機能	CF の供給状態 (ON/OFF) DF の振動 (強度と時間) RF <sub>1</sub> ~RF <sub>N</sub> の振動 (強度と時間) WH <sub>1</sub> ~WH <sub>N</sub> の計量状態
物理的形態	コンポーネントの空間的配置

層との対応によって整理している。なお、組合せ計量装置ではこの他にも多くの変数（エラー処理の方式や各コンポーネントの動作タイミングなど）が存在するが、ここでは現行 UI のフィーダ調整画面（後述）で表示されているものと表示されていなくても抽出された作業領域モデル内の機能と結びつきの強いものを主な状態変数として挙げた。表1に列挙した変数の中で、装置の動作調整に関して代表的なものについて以下で説明する。

### 3.3.1 機能的目的レベルの変数

**稼働率**は一定期間内の全計量サイクルに対する正量排出サイクルの比率として算出される。他方、**計量精度**は一定期間内に排出された商品重量の平均（の目標値との誤差）と標準偏差によって数値化できる。

### 3.3.2 抽象的機能レベルの変数

**平均組合せ選択ヘッド数**は、一定期間内の計量サイクルにおいて組合せ重量の生成のために使用された（選択された）WHの個数すなわち「組合せ選択ヘッド数」の平均をとったものである。商品重量をつくる組合せが途切れることなく継続的に得られていると、この値はある適正範囲内に維持される。

**投入ばらつき**は、組合せ重量を生成するためにWHから排出（投入）された計量物の重量（**投入重量**）がWH間でどれほどばらついているかを表す変数で、投入重量の標準偏差を投入重量の平均値で除したものである。計量物のヘッドへの分配について3.2.2項で述べたように、この値にも適正範囲がある。

### 3.3.3 一般化機能レベル以下の変数

オペレータが計量装置の動作調整のために操作する変数は抽象度の低いレベルに属している。**目標供給重量**は、CFから分散テーブルへの計量物の供給動作を制御するための上限と下限からなる区間変数である。分散テーブル上の計量物の重量（**分散投入重量**）が下限を下回るとCFは供給を開始し、上限を上回ると供給を停止することで、計量装置に投入される計量物の量をコントロールする。**DFの振動**は計量物を放射状に分散させるが、その加振動作は計量サイクルに合わせて間欠的に実行される。そのため、加振搬送を決定する変数は振動の**強度**と1計量サイクル期間中の振動の**持続時間**である。強度と時間が大きくなればなるほど、たくさんの計量物が搬送されることになる。分割された各経路での搬送を担当する**RFの振動**もDFと同じ方法で動作が決定されるが、こちらはRF毎に異なる動作の設定が可能である。

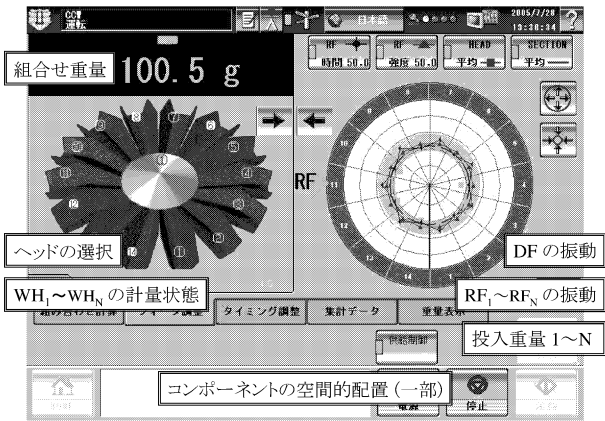
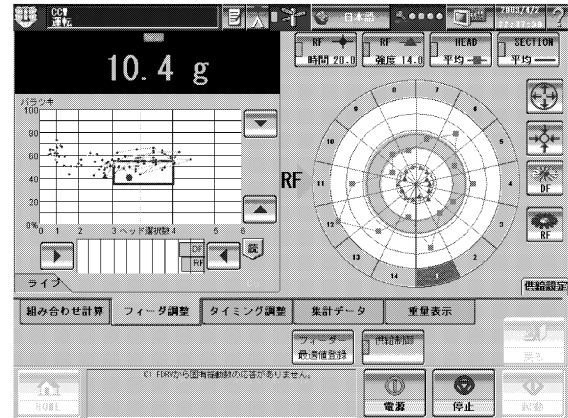


図4 現行UIのフィーダ調整画面  
Fig.4 The current version of control panel to condition the feeders' behaviors.



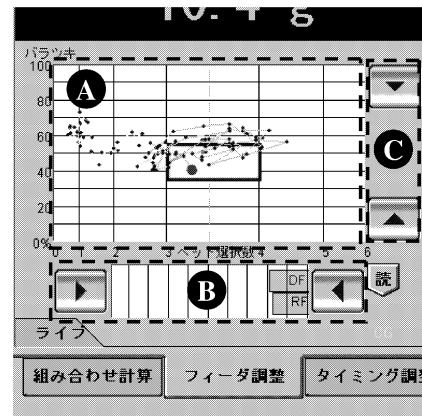
(a) 操作画面全体

#### 4. 作業領域モデルに基づく操作画面の改良

##### 4.1 現行のインタフェースの問題点

組合せ計量装置に対する操作は、装置本体とは別箇所に設けられた操作盤を介して行われる。操作盤はタッチパネル方式で実現されており、オペレータは画面内に配置されたボタンコントロールを押下することで計量動作を調整する。図4に現行UIの操作画面の一つである「フィーダ調整画面」を示す。この画面はフィーダの動作調整のために用意されたもので、装置の運転中に最もよく使用される<sup>4</sup>。図4では操作画面に表示されている表1内の変数名をラベルとして重畳している。

図4内の変数を表1の一覧と対照すると、現行UIで表示されている変数は、目的-手段関係の階層構造において一般化機能以下の抽象度の低いものに限られている。すなわち、機能的目的や抽象的機能に関する情報は画面上にまったく提示されていない。そのため、稼働率や計量精度といった作業システムの目的の観点において、システムの状態が目標状態からどれ程乖離しているかをオペレータは直観的に認識することができない。同様に、稼働率や計量精度を向上させるためにシステムをどの方向に誘導すべきかについての情報も可視化されていない。オペレータは、利用可能な具象的機能に関する情報を集計し総合して、このようなシステムの状態同定や操作の価値判断を自力で行わなくてはならないのである。緒言において言及した熟練者のシステムの機能構造に対する理解はこのような状況認識に大きく寄与するものであり、彼らの作業パフォーマンスを差別化する要因となっている。逆に



(b) 変更部分の拡大図

図5 改良UIのフィーダ調整画面  
Fig.5 The ecological version of control panel to condition the feeders' behaviors.

現行UIの問題点は、そこに提示されている情報が作業目的に対して断片的なものに限られている点であると指摘できる。

##### 4.2 上位機能に関する情報の可視化

現行UIにおいて考慮されていなかった機能的目的と抽象的機能を含む目的-手段関係の可視化について検討し操作画面の変更を行った。図5(a)に改良UIの操作画面を示す。図4と比較すると分かるように、変更範囲は画面左半分に着目している。変更範囲の限定は、画面構成や操作の様式が現行のUIから劇的に変化することは望ましくないという既存のユーザへの配慮と、この部分の表示情報がほとんど参照されていないという予備実験における注視点分析の結果に基づく判断である。

図5(b)は改良UIにおいて変更された部分の拡大図である。3.3節での分析により、稼働率と計量精度の

4: フィーダ調整画面以外の操作画面としては、計量対象となる商品種のデフォルトの設定を入力するための「予約設定画面」や、計量の成績を確認するための「集計データ画面」などがある。

次元で表現される作業システムの目的は、平均組合せ選択ヘッド数と投入ばらつきという2つの抽象的機能変数をそれぞれの適正範囲に誘導することで達成されることが明らかになった。そこで改良UIでは、平均組合せ選択ヘッド数と投入ばらつきの組で時々刻々変化するシステムの稼働状態と遷移を表現することにした。図5(b)内Aの「組合せ選択ヘッド数—投入ばらつきチャート」がそれである。平均組合せ選択ヘッド数と投入ばらつきはともに、差に意味があり、かつ原点を定めることのできる比例尺度 (ratio scale) [9]~[11]の変数である。表現される尺度の次元と表現する尺度の次元の整合を謳ったJ. ZhangらによるRelational Information Display (RID)の理論[12]によれば、これらの変数は比例尺度の全属性を過不足なく保持できる長さや距離の表示形式によって表現されることが望ましい。また、両変数は各々独立して変化するのではなく、一般化機能との結びつきを介して相互に影響を及ぼす関係にある。そのため、これらを別個の表示要素として表現するのではなく、1つの表示要素に統合してそこにオペレータの注意を集中させることが好ましい。以上を考慮して、組合せ選択ヘッド数—投入ばらつきチャートでは2つの変数を原点からの距離によって表現し直交座標系の上に統合している。チャートの横軸は平均組合せ選択ヘッド数に、縦軸は投入ばらつきに対応している。中央の矩形領域は良好な計量パフォーマンスを保証する適正範囲を表し、横軸側は稼働率の向上に、縦軸側は稼働率と計量精度の両方に向上に対応する。なお、稼働状態の適正範囲は計量対象によって変化するため、熟練技術者の経験的知識に基づいて商品種ごとに異なる設定が用意されるようになっている。また、チャートの横軸すなわち組合せ選択ヘッド数については適正範囲が拡大して表示されるようにスケールを調整している。図7に示すように、横軸は適正範囲の中央値を中心として折り返す形で、両側とも対数目盛となっている。このような形式で表示する理由は、適正範囲内にあるシステムは安定して稼働しているために微妙な状態の調整が有効で、小さな状態変化を強調して見せることが調整作業にとってより効果的だからである。一方適正範囲外の状態に関しては、システムが適正範囲を外れたことさえ把握できれば良く、さらに適正範囲から離れるほど不安定な稼働状態であるために、より大胆な操作がオペレータには求められる。そのため、大きな状態変化のみが知覚されるように目盛間隔を適正範囲に比べて小さくしている。

以上のような機能的目的と抽象的機能の間の目的—手段関係の可視化により、組合せ計量装置の動作調整作業は、システムの状態を矩形の範囲内に誘導すると

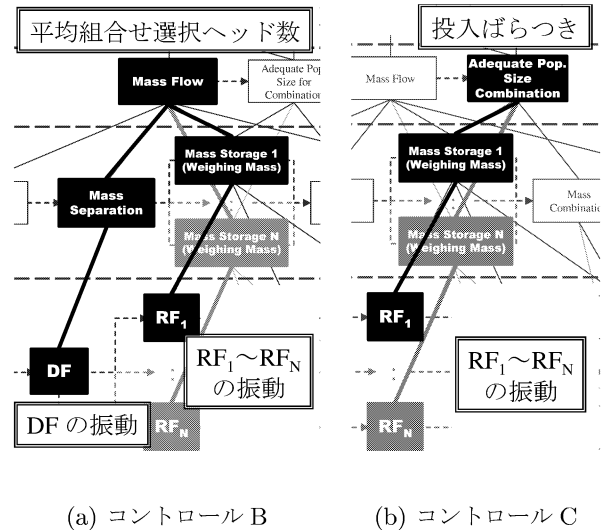


図6 改良UIにおいて追加された2つのコントロールを説明する目的—手段関係を説明する。Fig.6 The means-end relations explaining about the two newly added controls in the modified UI.

いう、オペレータにとってより具体的かつ直感的な作業に置き換えることができた。

### 4.3 直接操作性を向上させるコントロールの追加

組合せ選択ヘッド数—投入ばらつきチャートによる上位の目的—手段関係の可視化によってオペレータはシステムの状態をより直感的に解釈することが可能になった。しかし、この可視化だけでは直感的なインタラクションによるシステムの効率的なコントロールをオペレータに促すまでには至っていない。なぜならば、2次元で表現されたシステムの稼働状態に対して、少なくともフィーダの数だけ存在する操作可能な動作パラメータがどのように作用するかという因果関係をWDAからは厳密に特定できなかったからである。そのため、EID実現の標準的な方法[5]の適用のみでは、稼働状態を適正範囲に誘導するための操作をオペレータに「アフォード」[8]する可視化が実現されない。

上記問題の解決策として、図5(b)においてBとCで表記した2組のコントロールを追加した。これらは組合せ選択ヘッド数—投入ばらつきチャートで表現されるシステムの稼働状態に対する疑似直接的 (quasi-direct) な操作手段を提供する。コントロールBは、計量物の流動を加減するために、DFおよび全てのRFの振動強度を同時に一定量ずつ上下させる。一方コントロールCは、投入ばらつきを増減させるために、RF間で振動強度を均一化する方向に変更するのか、それとも差をつける方向に変更するのかを選択させる。両コントロールとも、個別に見れば非常に大きな自由度のある動作パラメータの操作選択に対して、変数間を

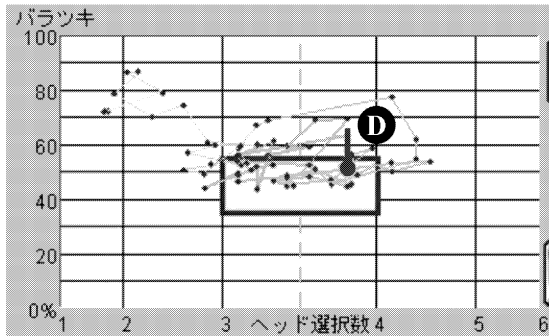


図7 組合せ選択ヘッド数-投入ばらつきチャートと操作入力の効果の疑似表示  
 Fig.7 The topological chart to represent the current weigher status with its target and historical context, and an indicator of a pseudo behavior of the system in response to the user operations.

仮想的な制約構造によって相互に結びつけることで各抽象的機能の実現に特化した1自由度の操作手段を提供している。仮想的な制約構造は、図6に示す作業領域モデル内の目的-手段関係によって図示されている。オペレータが操作可能な「DFの振動」と「RF<sub>1</sub>~RF<sub>N</sub>の振動」の動作パラメータの中でどれがどの抽象的機能に影響するのかを作業領域モデルから読み取ることができる。そこで特定された動作パラメータ群の連動のさせ方を試行錯誤を繰り返して検討した結果が、平均組合せ選択ヘッド数と投入ばらつきに対するマクロ・コントロールの実装となっている。なお、両コントロールの実装に取り入れられなかったフィードの振動時間の操作手段や、マクロ・コントロールでは調整できない振動強度の個別操作の手段については、現行UIと共通の画面右側のコントロール群によって確保されている。

#### 4.4 応答遅れへの対策

組合せ計量装置は時定数の大きなシステムで、加えた操作が計量結果に反映されるまでかなりの時間遅れが存在する。また、バッチを組合せて商品を生産するために商品重量は不連続に変化する。そのため、装置の調整状態を大局的に評価するためには、平均組合せ選択ヘッド数と投入ばらつきというシステムの稼働状態を表す統計量の更新時間間隔をある程度大きくとらなくてはならない。これらは、システムの挙動についての予測を困難にするという意味において、オペレータとシステム間の「評価の淵」(gulf of evaluation) [13] を押し広げ、インタフェースの操作性の低下を招く要因となる。そこで、BとCの操作入力に対して、それらがシステムの状態をどの方向にどの程度変化させる操作であるかを疑似的に示す表示要素を組合せ選択ヘッド数-投入ばらつきチャートに追加し

た。これを図7において記号Dで示す。時間的に連続した操作入力の後しばらくの間、入力を開始した時点のシステムの状態を表す点が強調されるとともに、そこから変更操作方向に向かう、押下回数に比例して伸びる突起が表示される。この表示要素によってオペレータは、自分が入力した操作がどれ程システムの状態に影響を与えるかをおおよそ見積ることができる。

#### 4.5 EIDとしての改良操作画面

EIDの理論は、複雑な技術システムに内在する機能間の意味的な繋がりを目的-手段関係を手がかりに特定して、その**直接知覚** (direct perception) [8] と**直接操作** (direct manipulation) [14] をユーザに促すようにUIを構成することを主旨としている。そして、操作に対する価値判断を含むシステムの稼働状態の解釈を直感的なものにする外部認知資源を提供することで、UIを通じて対象システムを機能的に『透明』(transparent) にすることを目的とする [3], [4]。本研究の計量装置調整用改良操作画面では、これまで明示されていなかった、機能的目的を基準にしたシステムの稼働状態の可視化 (4.2節) を実現する一方で、その可視化から必要な操作がアフォードされるように操作手段の拡張 (4.3節) を行っている。さらに、オペレータにとって自身の操作ならびにその効果が見えること (4.4節) は、システムの透明性を高める上で不可欠な特徴である。上記のいずれの拡張もUIを通じたシステムの透明化に貢献するものであり、それらが組み合わせることで、「環境からの制約と支援」 [13] を体現する“エコロジカル”なインタフェースの実現となっている。

#### 5. インタフェース評価のための作業実験

現場の作業要求を念頭に置いた模擬的な装置調整作業課題を用いて操作実験を実施し、その結果からUIを評価する。UIの評価は、調整後の計量装置のパフォーマンスと調整作業に要した時間という調整作業についての評価の観点と、被験者が調整作業に対して感じたワークロードの評価という2つの観点から行う。

##### 5.1 実験設定

組合せ計量装置調整の基本的な作業要求は、計量エラー (正量範囲に収まるホップ重量の組合せが存在しない状態) が頻発して稼働率が悪化している状態から正量を安定して供給する状態にシステムを誘導することである。このことを念頭に置いて、ホップへの計量物の供給量が過剰で計量装置のパフォーマンスが不安定になるように設定された初期状態から、フィード調整画面上の情報だけを頼りに動作パラメータを適切に調整して、エラーのない稼働率100%の運転状態にシステムを誘導するという作業課題を設定した。そして、図1のCCW-R-214W組合せ計量装置 (14ヘッド) を



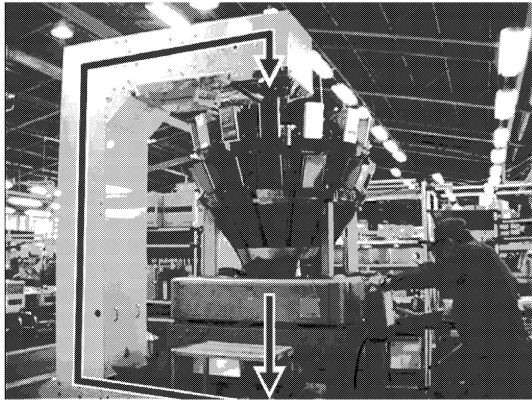


図8 実験用の実機作業環境  
Fig. 8 The work environment with a real machine for the experiment.

対象として、実機環境とシミュレータ環境を用いて操作実験を実施した。実機環境は、図8において矢印で示すような、計量装置が排出した商品をコンベアで供給側に再帰させる閉じた系を構築して用いた。シミュレータ環境は、実機環境に近い動作状況を計算機で再現しPCを操作端末とした。両環境ともに計量装置は目標値10gの商品重量を毎分120回計量する条件で運転させた。

実機環境の被験者A～Eはインダの社員5名で、彼らの計量装置の操作経験は次のとおりである。被験者AとEは操作経験がない初心者である。被験者Bは社内での調整作業を長年担当していたベテランであるが、最近はその仕事から離れており、この実験が久しぶりの調整作業であった。被験者Cは計量装置のソフトウェア開発を担当しており、納入先での調整作業の経験もある。被験者Dは、まだ数ヶ月ほどではあるが、装置納入先での調整作業を業務としてよく行っている高度熟練者との共同作業で操作経験を積んでいる。本研究では、被験者B～Dを調整作業の熟練者と見なす。一方、シミュレータ環境の被験者F～Lは大学生3名と大学院生4名で、全員計量装置に関する知識のない初心者である。そのため、彼らには図2を用いて計量の仕組みを実験者が実験前にレクチャーした。なお、シミュレータは計量物との物理的な相互作用を含む実機の複雑なダイナミクスを厳密に再現するには至っていない。しかし、計量装置についてまったく無知な人々を対象とした操作実験では実機との微妙な動作の違いが実験結果に影響しないと考え、実験実施の容易さを重視して、被験者F～Lに対してはシミュレータ環境を用いた。

各被験者は現行UIと改良UIを用いる調整作業をそれぞれ1回ずつ実行した。表2に示すとおり、現行UIを先に使用する被験者と改良UIを先に使用する被験

表2 各被験者の実験条件

Table 2 Experimental conditions for each subject to test the two different UIs.

被験者	1回目	2回目
A	現行UI	改良UI
B	現行UI	改良UI
C	改良UI	現行UI
D	改良UI	現行UI
E	改良UI	現行UI
F	現行UI	改良UI
G	現行UI	改良UI
H	現行UI	改良UI
I	現行UI	改良UI
J	改良UI	現行UI
K	改良UI	現行UI
L	改良UI	現行UI



図9 実機実験での作業の様子  
Fig. 9 Photograph of a test subject operating the machine in the experiment.

者が同数になるように実験を設計している。また、実験開始時の不適切な動作パラメータの設定はすべての試行で同一のものを用いた。すなわち、実機とシミュレーションの違いがあるために不完全ではあるが、被験者間およびUI使用条件間に難易度の差が発生しないように実験の初期条件を統制している。

各実験試行前に使用するUI上の表示情報とパラメータの操作方法について実験者が説明し、被験者の理解を得てから実験を開始した。図9の写真は実機実験での作業の様子である。計量装置の状態変数と被験者による操作入力は計量サイクル毎にすべてログデータに記録した。さらに、被験者が各調整作業に対して感じた主観的なワークロードを評価するためにNASA-TLXを使用したワークロード調査も実施した。NASA-TLX (Task Load Index) とはNASA エイムズ研究センターで開発されたワークロードの評価ツールで、その指標は6つの尺度—精神的要求・身体的要求・時間的要求・作業成績・努力・フラストレーション—から構成されている。被験者は、当該作業遂行時のワークロード要因として、全尺度の相対的な重要性を尺度間の対比

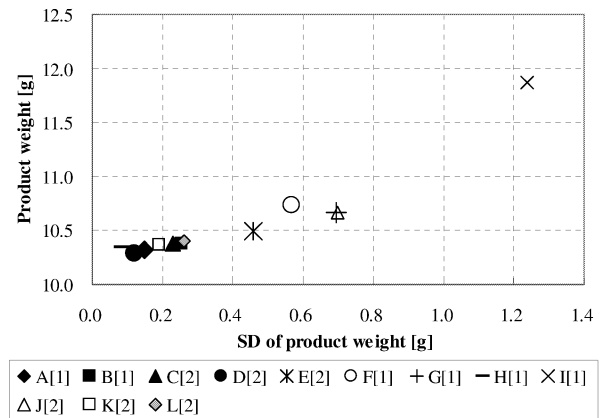
較によって決定する。また、被験者は各尺度についての負担の大きさを評価する。そして、重要度を重みとして全評価点の加重和を求め、それを被験者の主観的なワークロードの指標とする (Weighted Work Load: WWL)。このスコアが大きいことは被験者が感じた負担感が大きいことを意味する。本研究では芳賀による日本語版<sup>[15]</sup>を用いた。なお作業終了は、調整によって計量装置が「安定運転」(エラー警告が操作画面上に表示されなくなり、被験者がフィーダの動作パラメータの大きな操作をしなくなった状態)に入り、500 サイクル(約5分)程度の十分な運転時間が経過したことを実験者が確認できた後に合図した。そして作業終了後には、操作する際に画面上のどの部分をよく参照したか、その情報の表示に関して何か問題があったか、その情報の操作に関して何か問題があったかという3点を中心にインタビューによる聞き取り調査を行った。

5.2 実験結果

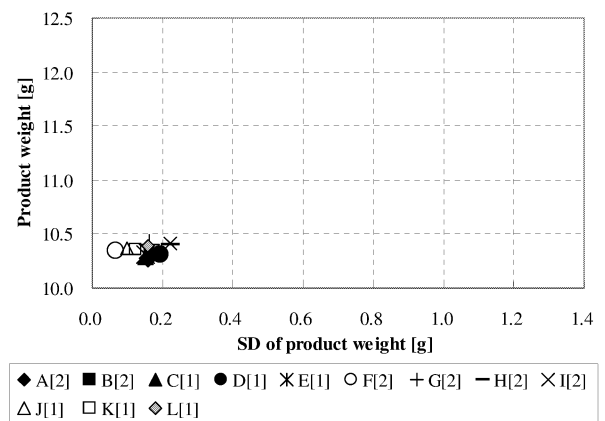
5.2.1 調整後の計量パフォーマンスの比較

調整後の計量パフォーマンスを比較することで調整作業に対する UI 改良の効果について評価する。調整作業終了後の 100 サイクルで組合せ計量装置によって計量された商品重量をそのための指標として用いた。図 10 は、各 UI 使用条件について、商品重量の平均値を縦軸に、標準偏差を横軸にとって各被験者の調整結果をプロットしたものである。グラフ左下の領域は、目標重量からの誤差の小さい商品が計量サイクル間でばらつくことなく安定して計量されている計量状態を意味する。逆にグラフ右上の領域は、計量される商品の誤差が大きかつ商品重量間に大きなばらつきのある計量状態を意味している。なお、凡例の被験者識別記号後ろの角括弧内の数字は各被験者の実験での通算作業回数を表している。また、I[1]の試行は調整完了に至らなかったため、被験者 I が調整を断念した時点からの 100 サイクル分をサンプルデータとして用いている(稼働率 96%)。

図 10(a)のグラフでは点が広範囲に分布し、現行 UI による作業の場合には調整後の計量装置のパフォーマンスが被験者間で明らかにばらついていることが分かる。一方、図 10(b)では点がグラフ左下の領域に集まり、改良 UI を使用した場合には被験者の作業経験に関係なく良好な計量結果が得られていることが分かる。そして図 11 では、現行 UI で調整に失敗した被験者 I を除く 11 名の被験者について調整後 100 サイクルの商品重量の平均 (a) と標準偏差 (b) の平均をとり、それらを UI のパフォーマンス指標として 2 つの UI 使用を比較している (ヒゲ線は標準偏差を表す; 後述の図 12 と図 13 についても同様)。これより、実験での現行 UI (Current UI: CUI) と改良 UI (Ecological UI:



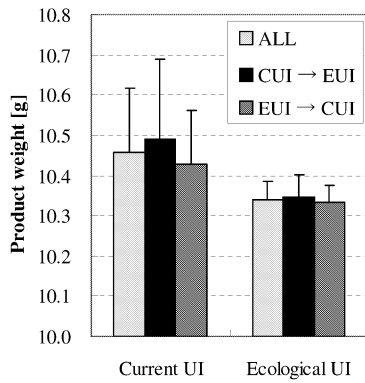
(a) 現行 UI 使用時



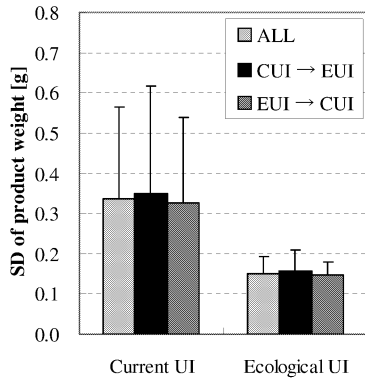
(b) 改良 UI 使用時

図 10 調整後の計量パフォーマンスの分布  
Fig. 10 Performance distribution of weighers conditioned by all subjects.

EUI) の使用順 (“CUI → EUI” および “EUI → CUI”) に関係なく、計量パフォーマンスとそのばらつきが低減されていることが分かる。F 検定を適用したところ、UI の使用順に無関係の被験者間平均 (“ALL”) については 1% の有意水準で、同じ使用順の被験者間平均 (“CUI → EUI” と “EUI → CUI”) については 5% の有意水準で、2 つの UI 使用条件の商品重量の 100 サイクル平均の等分散性が棄却された。また、商品重量の標準偏差の等分散性については、CUI → EUI の場合には 1% の有意水準で、他は 5% の有意水準で棄却された。以上より、オペレータの技量差を吸収するという UI 改良の目的の達成が計量装置の調整結果に関して確認できた。



(a) 商品重量の平均



(b) 商品重量の標準偏差

図 11 調整後の計量パフォーマンスの被験者間平均による UI の比較: 調整後 100 サイクルの商品重量の (a) 平均と (b) 標準偏差

Fig. 11 Comparison of the two UIs in terms of the inter-subject average of the conditioned weigher performance metrics, i.e., 100-cycle average of product weights (a) and their standard deviations (b).

### 5.2.2 調整作業時間の比較

調整作業を評価するための指標としては、調整後の計量パフォーマンスの他に、システムが安定した稼働状態に至るまでに要した調整作業時間（以降、所要調整サイクル）が挙げられる。図 12 のグラフは、図 11 と同様に、被験者 I を除く 11 名の被験者について所要調整サイクルの平均をとり、それを UI のパフォーマンス指標として 2 つの UI を比較したものである。現行 UI では、例えば図 10(a) の A[1] や H[1] のように、作業経験の乏しいオペレータであっても試行錯誤によって良好な計量パフォーマンスを得ることができた。しかし、そのような調整結果に至るまでに要した

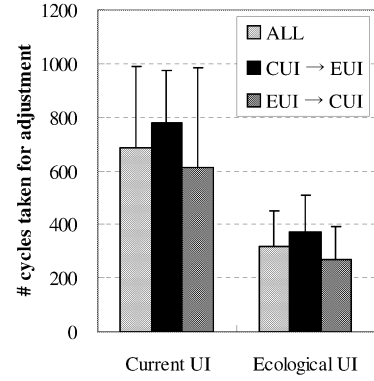


図 12 被験者間平均による所要調整サイクルの UI 間比較

Fig. 12 Comparison of the two UIs in terms of the inter-subject average of measurement cycles required for adjustment works.

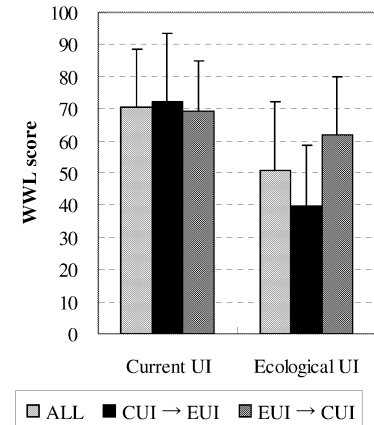


図 13 被験者間平均による WWL 評点の UI 間比較

Fig. 13 Comparison of the two UIs in terms of the inter-subject average of WWL score.

作業時間にはオペレータの技量差が明瞭に現れた。そして、改良 UI では所要調整サイクルが少なくて済みかつ被験者間の所要調整サイクルのばらつきも低減されたことが図 12 のグラフから確認できる。F 検定を適用したところ、ALL と EUI → CUI の場合について 5% の有意水準で 2 つの UI 使用条件の所要調整サイクルの等分散性が棄却された。さらに、両側 t 検定を適用したところ、ALL と CUI → EUI の場合について 1% の有意水準で 2 つの UI 使用条件間で所要調整サイクルの平均に有意差を確認した。以上より、調整作業に必要な時間に関しても、オペレータの技量差を埋め作業パフォーマンスの底上げを図るという UI 改良の目的を達成することができた。

### 5.2.3 WWL 評点の比較

被験者が調整作業に対して感じた主観的ワークロードの観点から UI を評価する。図 13 のグラフは、被験者全員について WWL 評点の平均をとり、2つの UI 間で比較したものである。図 11 と同様に、UI 使用順ごとにグループ化した平均値も併記している。グラフより、最初に現行 UI での作業を経験した被験者グループは改良 UI によって負担感が大きく改善されたことが確認できる。両側 t 検定を適用したところ、このグループでは 5% の有意水準で 2つの UI 使用条件間に WWL 評点の平均について有意差を確認した。一方、逆の順序で作業を経験したグループについては WWL 評点に関して有意な差を確認することができなかった。著者らは、調整作業に対する負担感は被験者の作業経験や技量によって変化する傾向を先行研究において確認している<sup>[16]</sup>。また、他の被験者に比べて常に低く評価するといった、被験者ごとにワークロードの評価に偏りがあった。そのため WWL 評点については、次章の被験者ごとの分析において、インタビュー結果と合わせて詳細に検討する。

## 6. インタフェース改良効果の検討

UI 改良の効果について、被験者ごとの実験結果の分析に基づいて検討する。図 14 は、調整後の商品重量の標準偏差<sup>5</sup>と所要調整サイクルと WWL 評点という 3つの UI のパフォーマンス評価指標について、現行 UI 使用時の値の改良 UI 使用時の値に対する比によって被験者ごとの各指標の改善率を表したものである。棒グラフ上の\*印は、改良 UI において悪化した（比が 1 より小さい）指標を指し示している。

所要調整サイクルについては、被験者 D を除く全員に改善効果が見られる。特に、組合せ計量装置の調整作業の経験がない初心者 A と E~L に対してその効果が非常に大きい。熟練者 D については、改良 UI を使用して行った 1 回目の調整作業の経験を通じて、実験用の作業課題の特徴についておおよそ見当がついていたことが作業後のインタビューにより明らかになった<sup>6</sup>。再帰供給用コンベアに対して加えられる外乱（例えば、計量物の追加や除去）はすべて目標供給重量の設定に基づく CF の自動制御によって除去される。また、調整作業中に実験者が計量装置のパラメータ設定に介入することはできない。そのため、実験において与えることができる条件変動は、実機環境にせよシミュレータ環境にせよ、実験開始時の不適切な動

作パラメータの設定のみに制限された。そして全試行とも同一の初期条件で実験を行ったために、ある程度のレベルの作業経験者には調整の方針が容易に想起できる<sup>7</sup>。このことが結果的に熟練者 D の 2 回目（現行 UI）の作業パフォーマンスに影響したと考える。

調整後の計量精度については、作業経験の乏しいオペレータであっても試行錯誤の中で良好な結果を得ることができるため、1 回目（現行 UI）に非常に優秀な調整ができた初心者 A と H の場合には悪化が見られる。熟練者 D については、所要調整サイクルに関する考察で触れたように、作業課題の特徴が把握できており、また使い慣れた UI での作業であることも影響した結果であると考えられる。ただし改良 UI を使用する実験では、現行 UI との比較のために動作パラメータの操作手段を図 5(b) の部分のコントロールに限定して作業させたが、その操作性がより精度を出すための調整作業に影響したことも考えられる。この点については後述する。

WWL 評点は、熟練者 D と初心者 H および L で改良 UI の導入による悪化が見られた。初心者 H の場合は現行 UI での作業に比べてより強い身体的要求を改良 UI での作業に対して感じたことが、初心者 L の場合は作業成績に対するより強い不満を強く感じたことが、彼らの WWL 評点を押し上げる主要因となった。両者ともインタビューにおいて、組合せ選択ヘッド数—投入ばらつきチャート上でシステムの稼働状態を表す点の動きが急に变化する要因が分からないことや点の動きがうまく予測できないことに不満を述べている<sup>8</sup>。不規則な点の動きは計量方式自体に起因し、動作パラメータの操作がなくても発生する現象ではあるが、操作に対するシステムの反応とその時間遅れを見積ることが難しく、自身の操作に対するシステムの反応を探りながらの調整作業に難がある。そのため、装置そのものを直接操作している感覚に乏しく、「安心できず、ずっとチャートを見ていないといけない」（初心者 H）、「漠然と作業しても結果として何となくうまくいってしまうために作業に対する満足感が下がる」（初心者 L）といった指摘があった。また、投入ばらつきを修正するアルゴリズムがブラックボックス化されているが、その効き方が本人の感覚に合わない（初心者 H）という指摘もあった。改良 UI での作業に対して全体的に悪い評価を下した熟練者 D も含めて、いずれも計量装置の調整作業（特に計量精度を向上させる

5: 正量範囲外の商品は計量装置から出力されないため、商品重量自体ではなく、その標準偏差が装置調整の良し悪しを評価する指標として現場で用いられている。ここでもその慣例に従い、商品重量の標準偏差を評価指標として用いた。  
6: 「実験の初期条件がシビアだと感じていたので急いで操作をした」（熟練者 D）。

7: 熟練者 D 以外では、「大まかな操作量が分かったのでそれを利用した」という熟練者 C の回答があった。

8: 「何が起こって変化しているのか分からない」（初心者 H）。「思うように動いてくれない感じなので成績が良くなくても満足感につながらない」（初心者 L）。他の被験者からも「操作とシステムの挙動の因果関係が掴めずストレスがたまる」との指摘があった。

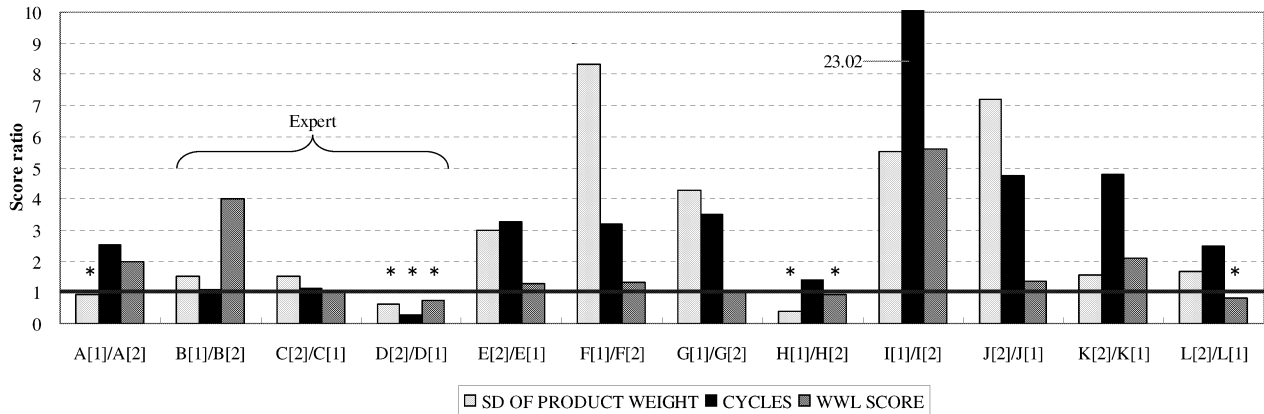


図 14 被験者の改良 UI による作業成績と WWL 評点の改善率  
 Fig. 14 Every subject's improvement ratios of the two performance metrics and of WWL score obtained by the proposed UI.

こと)に高いモチベーションを持つオペレータであると想定することができ、そのようなオペレータのニーズをうまく汲み取る改良を進める必要がある。

しかしながら、図 13 の WWL 評点の差が示唆しているように、被験者全体を通じた改良 UI の評価はおおむね良好であった。組合せ選択ヘッド数一投入ばらつきチャートの導入によって現行 UI では漠然としていた調整作業の目標が明確なものに変化し、実施すべき操作を判断するためのシステムの状態を解釈すること、つまり「状況の評価」が容易になったとの意見を得ている。これは、システムの状態を同定するのに重要なパラメータをその目標状態とともに可視化するという UI 改良の意図が被験者にうまく理解された証拠であると言える。また、改良 UI の使用経験に基づいて、現行 UI での作業でもその可視化情報に相当するものに目を向ける（例えば、ヘッドの選択状態をしばらく眺めて平均組合せ選択ヘッド数を推定したり、投入重量 1~N のばらつき具合をレーダーチャートから読み取ろうとする）ようになったが、それが指し示している状況に対処するためにどのような操作をとればよいかが分からない（初心者 E）との意見もあり、目的に特化した操作手段の提供もまた有効な作業支援を構成しているとの認識を得た。

以上のように、未熟練オペレータの作業パフォーマンスの改善とオペレータ間の技量差に起因する計量装置のパフォーマンスのばらつきの低減という本研究の根幹に関して、開発した改良 UI はその目標を十分に達成できたものと考え、今後このインタフェースをより実用的なものにするためには、ユーザビリティに関する実装上のより細やかな修正が必要である。例えば、「マクロ・コントロールのボタン配置が直感に反する」「うまく調整できてもチャート中央の矩形領域内に

点が留まるわけではないので、どのタイミングで作業を切り上げて良いのか判断しにくい」「操作入力の効果の予測表示と実際の値の表示のズレにストレスを感じる」などの問題点が被験者から指摘されている。また現状では、どのような経路をたどってシステムを矩形領域に誘導するのがより効果的かという操作戦略レベルの知識を可視化した支援を提供するまでには至っていない。現在、このような課題の解決に取り組むとともに、計量装置の前後のプロセスも含む統合化されたファクトリー・オートメーション全体の管理業務に対する作業支援インタフェースに対して本研究で実践した方法を展開することを検討している。

## 7. おわりに

本稿では、組合せ計量装置を具体的な対象として、オペレータの技量差が自動運転時のパフォーマンスに大きく影響する自動化機械の調整作業について、未熟練者であっても高いレベルの調整を可能にする UI による作業支援の実現に取り組んだ。特に、熟練オペレータが機械の状態を的確に同定するために習得し活用している領域知識に着目し、それを WDA によって作業システムの機能構造の形で整理することを実践した。そして、UI 上の提示情報が作業目的と直接関係しない断片的なものに限られているという問題を、欠落している目的-手段関係を表現する状態の可視化と操作手段の提供によって解決した。これを評価するための作業実験の結果として、未熟練オペレータに対する非常に高い支援効果とオペレータ間のパフォーマンスのばらつきの低減を確認した。

技量差を補うようにオペレータの認知・判断を方向づける認知リソースとして UI を位置づけると [17],[18], それは熟練者の思考様式の一部を具現化したものであ

る。機械の状態と為すべき操作の適切な可視化のためには、個々の状態変数のパフォーマンスへの影響を検討するのみでは不十分で、それら相互の関係を議論の俎上に載せる必要がある。そのような関係情報を熟練者から抽出する上で WDA は有用な指針と方策を与えてくれた。一方で、可視化される情報は機械の調整に関する属人的な知識を形式化したものと言えるが、WDA による機能間の関係の整理はこの形式化の方法に依存する。そのため WDA と可視化は、双方の検討が幾度となく繰り返される中で洗練されていったことを付記しておく。

### 参考文献

- [1] Rasmussen, J.: *Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering*; Elsevier Science Publishing Company, Inc. (1986) [J・ラスムッセン: インタフェースの認知工学—人と人間の知的かかわりの科学 (海保 博之, 加藤 隆, 赤井 真喜, 田辺 文也 訳); 啓学出版 (1990)].
- [2] Rasmussen, J., Pejtersen, A.M. and Goodstein, L.P.: *Cognitive Systems Engineering*, Wiley-Interscience, (1994).
- [3] Vicente, K.J. and Rasmussen, J.: The Ecology of Human-Machine Systems II: Mediating "Direct Perception" in Complex Work Domain; *Ecological Psychology*, Vol.2, No.2, pp.207-249 (1990).
- [4] Vicente, K.J. and Rasmussen, J.: Ecological Interface Design: Theoretical Foundations; *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.22, No.4, pp.589-606 (1992).
- [5] Burns, C.M. and Hajdukiewicz, J.R.: *Ecological Interface Design*; CRC Press, (2004).
- [6] 山守 啓文, 小野 敏郎, 玉井 裕, 内藤 和文: 電磁式振動分散フィードの搬送量制御; 日本機械学会関西支部講演会講演論文集 004-1, pp.8/57-58 (2001).
- [7] 朝倉 涼次, 堀口 由貴男, 榎木 哲夫, 玉井 裕, 内藤 和文, 橋口 伸樹, 小西 洋江: ユーザ・インタフェースの改良によるパフォーマンス向上のための自動計量システムの操作スキルの分析; ヒューマンインタフェースシンポジウム 2005 論文集, pp.799-802 (2005).
- [8] Gibson, J.J.: *The Ecological Approach to Visual Perception*; Houghton Mifflin (1979) [J・J・ギブソン: 生態学的視覚論—ヒトの知覚世界を探る— (古崎 敬, 古崎 愛子, 辻 敬一郎, 村瀬 旻 訳); サイエンス社 (1985)].
- [9] Stevens, S.S.: On the Theory of Scales of Measurement; *Science*, Vol.103, No.2684, pp.677-680 (1946).
- [10] Stevens, S.S.: Mathematics, Measurement, and Psychophysics, (S.S. Stevens, Ed.) *Handbook of Experimental Psychology*, pp.1-49, Wiley (1951).
- [11] 齋藤 堯幸, 小川 定暉, 野嶋 栄一郎: データ解析 (2): 一次元尺度構成に関する総合報告; 総研紀要, 日本ユニバック総合研究所, Vol.2, No.2, pp.17-226 (1972).
- [12] Zhang, J.: A Representational Analysis of Relational Information Displays; *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol.45, pp.59-74 (1996).
- [13] Norman, D.A.: *The Psychology of Everyday Things*; Basic Books (1988) [D・A・ノーマン: 誰

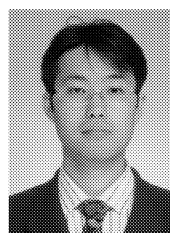
のためのデザイン—認知科学者のデザイン言論— (野島 久雄 訳); 新曜社 (1990)].

- [14] Shneiderman, B.: *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*, Third Edition; Addison Wesley Longman, Inc. (1998).
- [15] 芳賀 繁: メンタルワークロードの理論と測定; 日本出版サービス (2001).
- [16] 堀口 由貴男, 朝倉 涼次, 榎木 哲夫, 玉井 裕, 内藤 和文, 橋口 伸樹, 小西 洋江: 組合せ計量装置の調整作業を支援するエコロジカル・インタフェースの開発, ユーザインタフェースシンポジウム 2006 論文集, pp.383-388 (2006).
- [17] Suchman, L.A.: *Plans and Situated Actions: The Problem of Human-Machine Communication*, Cambridge University Press (1987) [L・A・サッチマン: プランと状況的行為—人間—機械のコミュニケーションの可能性 (佐伯 胖 監訳), 産業図書 (1999)].
- [18] 堀部 保弘: インタフェースのエコロジー; 認知的道具のデザイン (加藤 浩, 有元 典文 編), 金子書房, 第 2 章 (2001).

(2007 年 10 月 25 日受付, 2008 年 3 月 17 日再受付)

### 著者紹介

堀口 由貴男 (正会員)



1999 年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。2003 年同大学院博士課程指導認定退学。同年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻助手。2005 年改組により機械理工学専攻助手。2007 年同専攻助教となり、現在に至る。その間、2001~2003 年日本学術振興会特別研究員。人間機械系における協調のためのインタラクションデザインに関する研究に従事。ヒューマンインタフェース学会、計測自動制御学会、システム制御情報学会、日本知能情報フレンジ学会、IEEE の会員。京都大学博士 (工学)。

朝倉 涼次



2006 年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。同年、株式会社日立製作所に入社、現在に至る。同社生産技術研究所生産システム第一研究部第三研究室所属。現在、製品開発プロセスの分析と高度化に関する研究に従事。

榎木 哲夫 (正会員)



1983年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。1986年同大学院博士課程指導認定退学。同年京都大学工学部精密工学教室助手。1994年同大学院工学研究科精密工学専攻助教授、2002年同教授、2005年改組により機械理工学専攻教授、現在に至る。その間、1991～1992年米国スタンフォード大学客員研究員。現在、人間-機械共存環境下での協調システムの設計・解析と知的支援等に関する研究に従事。京都大学工学博士。ヒューマンインタフェース学会、計測自動制御学会、日本機械学会、システム制御情報学会、IEEEなどの会員。

玉井 裕



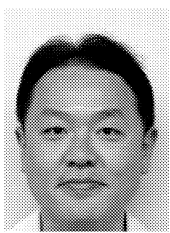
1986年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。同年(株)河合楽器製作所入社、1993年(株)インダ入社、現在に至る。同社技術管理部基礎開発課主任技師。産業用計量機器、検査機器開発及び、同機器に適用する計測制御技術の開発に従事。

内藤 和文



1975年同志社大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。1978年(株)石田衡器製作所(現(株)インダ)入社、技術部長、技術開発部長を経て、現在、新光電子(株)取締役。主に流通、工業用はかり及び産業用計量機の質量センサー及び計量信号処理の開発に従事。電気学会、電子情報通信学会会員。

橋口 伸樹



1995年京都工芸繊維大学大学院電子情報工学専攻修士課程修了。同年(株)インダ入社、現在に至る。同社ESL技術部課長代理。計量機器、検査機器の開発及び、同機器に適用する情報処理、計量技術の開発に従事。

小西 洋江



1992年大阪電気通信大学短期大学部電子情報学科課程修了。同年(株)インダ入社、現在に至る。同社産機技術部自動計量技術課第2係所属。主に産業用計量機制御部の開発に従事。

