

GUI上の探索作業におけるナビゲーション・キューの効果

緒方 啓史^{1,3,a)} 瀬谷 安弘² 渡邊 克巳³ 伊福部 達³

受付日 2012年6月20日, 採録日 2013年1月11日

概要: コンピュータの GUI (Graphical User Interface) から適切な情報を探す複雑な探索作業に対し、手がかりとなるキューの効果を検討した。たくさんのリンク・ボタンの中から、ボタン上のラベルを読み、適切なものを選ぶという作業タスクにおいて、ときどき、1つだけ輝度が高いボタンを探索キューとして提示した。このとき、正解ボタンを目立たせた場合の効果（ベネフィット）と、正解ではないボタンを目立たせた場合の負の効果（コスト）を調べた。その結果、実験 1, 2 では、ベネフィットがコストを上回ることが示された。実験 3 では、「コストは 1 回目の視線移動で正しいボタンに到達する機会の喪失に相当する」ことを定性的に示す結果が得られた。これらの結果は、ビルの中央監視業務のような、情報量の多い GUI 上の探索作業において、一定の予測精度が実現できるのであれば、手がかりとなるキューが作業効率を向上させることを示唆する。

キーワード: 注意機能, 視覚探索, ベネフィット, コスト, ユーザビリティ

Effects of Navigation Cues for Search Tasks on GUI

KEIJI OGATA^{1,3,a)} YASUHIRO SEYA² KATSUMI WATANABE³ TOHRU IFUKUBE³

Received: June 20, 2012, Accepted: January 11, 2013

Abstract: This study examined the cost and benefit of presenting visual cues on a complex visual search task on GUI (Graphical User Interface). Participants were required to search for a target button from many buttons by reading labels on the buttons. In this task, sometimes one button was highlighted with higher brightness than others. When the target button was highlighted, the cue was valid, otherwise the cue was invalid. Effects of valid cue (that highlighted target button) and invalid cue (that highlighted one of non-target buttons) were examined. The results of experiment 1 and 2 showed that the cost of presenting an invalid cue was smaller than the benefit of presenting a valid cue. The results of experiment 3 supported a simple probabilistic model that accounts for the cost-benefit asymmetry with the magnitude of the cost being related to the number of distractors. These results imply that, when the number of choices (e.g., buttons and links) and the cue validity are relatively large, the presenting visual cues are beneficial with small cost.

Keywords: attention, visual search, benefit, cost, usability

1. はじめに

大規模なビルやプラント等では、かつては大勢の作業者が個々の設備を巡回し点検していたが、現在では、中央監視システム（図 1）を用いて、ネットワークに接続された

設備の様々な状態を、数人で監視制御できるようになった。中央監視システムのグラフィック・ユーザ・インタフェース（以下、GUI と呼ぶ）は、一般的に、階層状に相互リンクされた画面で構成されており、画面間のハイパーリンク（以下、リンクと呼ぶ）をたどって任意の監視画面を表示できるように設計されている。たとえば、「A 棟・B 室・熱源設備 C・温度異常」という警報メッセージが表示された場合、オペレータはまず、画面を熱源設備の表示モードに切り替え、A 棟 → B 室 → 設備 C とリンクをたどり、最終的に温度異常の現状や原因を把握する画面を呼び出す。中央

¹ アズビル株式会社

Azbil Corporation, Fujisawa, Kanagawa 251-8522, Japan

² 立命館大学

Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

³ 東京大学

The University of Tokyo, Meguro, Tokyo 153-8904, Japan

a) ogata@human.rcast.u-tokyo.ac.jp

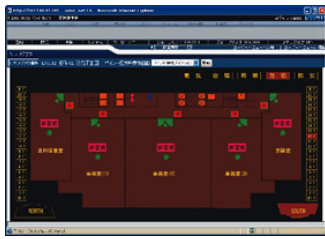


図 1 中央監視システムの GUI の例

Fig. 1 An example of GUI of a central monitoring system.

監視の対象が大規模であるほど、画面内の情報も遷移する画面数も多くなり、速やかな対応が難しくなる。

このような複雑な操作を支援する技術として、操作履歴から抽出したパターンに基づいて次の操作を予測し、ガイドを提示する adaptive navigation support と呼ばれる技術が提案されている [1], [2]。この技術により、たとえば、システムが警報対処の手順を学習し、警報発生時に、次に押すべきリンク・ボタンをオペレータに強調表示するという支援方法が可能となる。実際に、上野ら [3] は、このような予測技術を用いた中央監視業務の支援方法を提案している。しかし、予測はつねに正しいわけではないため、予測が正しかった場合と間違っていた場合の両方の影響を考える必要がある。

この支援技術による影響を、中央監視の作業に照らして分析してみよう。画面内の適切なリンク・ボタンを探す際に、まずオペレータは、いずれかのボタンに視線を向け、そこに付されたラベル（たとえば、建物の階数や設備の名称といったリンク先の情報）の意味を把握し、現在のタスクに関連するか否かを見分ける。無関係であれば、その他のボタンを対象として探索を続け、関連があれば、それを押してリンク先に画面を遷移させる。このような探索過程において、あるボタンが、他のボタンと異なる色や輝度で強調表示される場合、それは、オペレータにとって探索の手がかり（キュー）となる。予測が正しく、キューが適切なボタンの位置に示される一致キューだった場合、オペレータは、優先的にそのボタンのラベルを調べることができ、探索作業の効率が上がると考えられる。一方、予測が外れ、関係のないボタンを示す不一致キューが提示された場合は、オペレータの作業効率は悪くなると考えられる。

実際に、比較的単純な刺激あるいは課題においては、一致キューが作業効率（反応時間、正答率）を向上させ、不一致キューが低下させることが報告されている [4], [5], [6]。たとえば、Jonides [4] の実験では、参加者は円環状に等間隔に並んだ 8 つの文字の中に、大文字の “L” あるいは “R” が存在するか否かを調べるように求められた。8 カ所の候補位置のいずれか 1 カ所に探索ターゲット（L または R）が含まれた。この実験においてキューは矢印であり、文字が出現する直前に画面中心に出現した。一致キュー条件では、ターゲットの出現する場所を、不一致キュー条件では、ターゲットの出現しない場所をそれぞれ指し示した。

これらの条件に加え、この研究では中立条件が設定され、この条件では、キューとなる矢印ではなく、キューの情報を含まない菱形が表示された。これらの条件下で、探索パフォーマンス（反応時間または正答率）を計測し、特に、中立条件に対する一致キュー条件でのパフォーマンスの向上（ベネフィット）、および不一致キュー条件でのパフォーマンスの低下（コスト）に注目した。その結果、ベネフィットとコストの大きさに差がないことが示された。

以上のような先行研究の知見を、中央監視システムを含む複雑な視覚探索タスクにあてはめると、一致キューによるベネフィットは、不一致キューによるコストで相殺されてしまうため、adaptive navigation support は、キューの一致率（予測精度）が十分に高い場合しか役に立たないといえよう。ただし、これまで中央監視システムのような複雑な視覚探索におけるキューの効果を検討した研究はほとんどなされておらず、先行研究のような基礎的な実験結果をただちに実際の中央監視システム上の作業場面（図 1）に適用できるかどうかは、検討する余地がある。特に、中央監視システムでのタスクは、単にターゲットを検知するだけではなく、意味理解や判断といった複雑な処理を必要とするため、必ずしも不一致キューによる検出の遅れが最終的なタスクパフォーマンスの顕著な低下にはつながらない可能性も考えられる。

そこで、本研究は、中央監視システムのような複雑な作業環境において、次に押すべきリンク・ボタンを強調表示する技術の有効性を検討する。実験 1 と 2 では、実際の作業状況に近い探索タスクを用いて、一致/不一致キューによるベネフィット/コストを検討する。実験 3 では、実験 1、実験 2 の結果に基づき、キューの効果についての仮説を立て、リンク・ボタンの数を操作してその仮説を検証する。

2. 実験 1

中央監視作業においては、たとえば「温度異常」という警報が出た場合、オペレータは、ボイラや空調機といった熱に関連した機器を調べるために、画面内からそれらの機器名の表記されたラベルを探索する。このような探索状況を、中央監視の知識のない実験参加者においてシミュレートするために、すべての参加者が熟知していると考えられる単語を用いた探索タスクを設定し、ときどき、探索キューとして 1 つのボタンを他のボタンより明るく強調表示した。

2.1 参加者

23 名の大学生（男性 9 名、年齢 $M = 24.11$, $SD = 5.15$; 女性 14 名、年齢 $M = 24.50$, $SD = 6.71$ ）が一定の謝礼を受けて実験に参加した。なお、本研究では、すべての実験について、事前に参加者から書面でインフォームドコンセントを得た。



図 2 実験に用いたボタンとラベルからなる画面

Fig. 2 A screen capture of a stimulus that consists of buttons and labels.

2.2 装置

刺激はコンピュータにより生成され、21.5 インチのタッチパネル（アイ・オー・データ社製 LCD-MF222FBR-T）に提示された。リフレッシュレートは 60Hz、解像度は 1,366 × 768 であった。参加者による応答（入力）には専用のスタイラスペンを使用した。

2.3 刺激

刺激画像は、注視点画像、およびリンク・ボタンとキューから構成された画像の 2 枚であった。これらの画像は、いずれも、灰色背景（輝度 8 cd/m²）上に提示された。注視刺激は直径 5 mm の白色（輝度 148 cd/m²）の円であり、画面中央に提示された。ボタンは、1 辺 20 mm の灰色（輝度 43 cd/m²）の正方形であり、画面中央 89 mm × 89 mm の範囲に、3 mm の間隔をおいて、4 行 × 4 列で提示された（図 2）。すべてのボタンにはひらがな 2 文字の単語が黒色（輝度 1 cd/m²）で横書きされており、これら 16 個の単語のうち 1 個は動物を表す単語であり（ターゲット刺激）、残る 15 個は動物以外を表す単語であった（妨害刺激）。ボタン上の文字は、1 文字あたり 7 mm × 7 mm の等幅ゴシックフォントで表示され、ボタンと文字の輝度コントラストは 5 : 1 以上であった。以上の刺激のサイズおよび輝度コントラストは、ボタンの認識および文字の読みやすさにおいて十分な条件であった [7], [8]。

ターゲット刺激として、動物を表す単語（例：いぬ、ねこ）を 18 語、妨害刺激として動物以外を表す単語（例：あい、そら）119 語を用いた。用いた単語の親密度によって反応時間が変化する可能性を考慮し、すべての単語は、『日本語の語彙特性』[9]（天野・近藤, 1999）において、音声単語親密度が 5.5–6.5 の範囲にある名詞の中から、さらに同音異義語（例：かめ、くも）を除いたものを採用した。さらに、別途参加者（男性 3 名、女性 3 名、年齢 $M = 26.67$ 歳、 $SD = 3.88$ 歳）を募り、単語を提示して動物かどうかの判定を求める予備実験を行い、すべてのターゲット刺激について平均反応時間が 570–670 ms の範囲に収まることを確認した。試行ごとにこれらのターゲット刺激および妨害刺激が無作為に選ばれ 16 個のボタンと同時に表示された。

キューは、ボタンやラベルと同時に、16 個のボタンのい

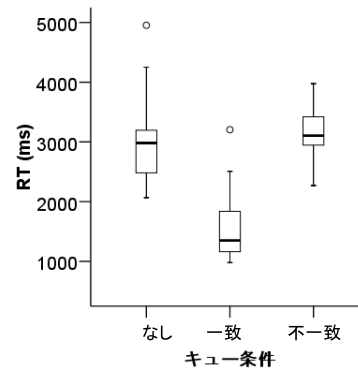


図 3 キュー条件ごとの探索時間（RT）の箱髭図

Fig. 3 A box plot of the RT for each cue condition.

ずれか 1 つに白色（輝度 148 cd/m²）で提示された。キューは、一致キュー条件では、ターゲットの提示されたボタン上、不一致キュー条件では、妨害刺激のあるいずれかのボタン上にランダムに提示された。キューが提示された場合の、キューの一致率は 50%であった。

2.4 手続き

参加者は課題に慣れるまで練習した後、暗室で本実験を実施した。参加者は、16 個のボタンの中から、動物名が書かれたボタンを見つけ、できるだけ早く正確にペンで触れるように教示された。また、ときどき、1 つだけ他より明るいボタンが出てくるが、それがターゲットを示す場合もあればそうでない場合もあると教示された。

実験が開始されると、まず画面上に注視点のみが 500 ms の間表示され、その後、ボタン、ラベル、キューが同時に表示された（キューなし条件ではキューは表示されない）。ボタン等の刺激が提示されてから参加者がペンでボタンを押すまでの時間を、反応時間（Reaction Time: RT）として計測した。

ターゲット刺激は、16 個のボタン位置に 3 回ずつ、それぞれ異なる条件（キューとともに提示される一致キュー条件、別のボタンにキューが表示される不一致キュー条件、キューなし条件）でランダムに表示された。実験は、これらのキュー条件（なし、一致、不一致）を要因とする一元配置計画で行われた。

2.5 結果

反応時間は各キュー条件で等分散しなかったため、中央値を算出した。エラー率は 1.25%と小さく、条件間の有意差も認められなかったため、以降、解析は行わない。

条件ごとの RT を図 3 に示す。RT を従属変数、キュー条件を参加者内独立変数としたフリードマン検定の結果、キュー条件の効果が有意であった ($\chi^2 = 34.70$, $df = 2$, $p < .001$)。続いて、ウィルコクソンの符号付き順位和検定を使用したライアンの方法による多重比較を行った結果、

すべてのキュー条件間の差が有意であった（すべて名義的有意水準1%未満）。図3では、一致キュー条件では、その他の2条件よりもRTが短く、不一致キュー条件はキューなし条件とほとんど同じくらいのRTに見える。実際に、ベネフィット（キューなし条件下のRTから一致キュー条件下のRTを引いた値）とコスト（不一致キュー条件下のRTからキューなし条件下のRTを引いた値）の値を、ウィルコクソンの符号付き順位検定により参加者内で比較したところ有意な差が確認された（検定統計量 $Z = 3.65$, $p < .001$ ）。

2.6 考察

本実験では、中央監視システム上の作業を想定した複雑な探索条件において、次に操作すべきリンク・ボタンを強調表示するようなキューの効果を検証することが主な目的であった。多重比較の結果は、複雑な探索条件において、一致キューによるベネフィットが、不一致キューによるコストを上回ることを示している。したがって、探索効率を高めるためには、キューを提示した方が有利であるといえる。

一致キュー条件におけるRTの短縮は、先行研究の知見と一致しており（たとえば文献[10]）、これは、キューの提示によって参加者の注意が移動したことを示唆する。キューの提示による注意の移動には、それぞれ、ボトムアップ[10]、[11]、トップダウン[12]、[13]と呼ばれる2種類のモードがあるといわれている。一般的に、ボトムアップな注意の移動は、周囲の背景に対して際立った（顕著性の高い）刺激により、観察者の意志に関係なく自動的に引き起こされる。これに対し、トップダウンな注意の移動は、何らかの予期に基づいた観察者自らの意志によって生じる。たとえば、あらかじめターゲットの特徴を告げられた観察者が、その特徴に注意を移動させる構えをつくって対応するような場合にトップダウンな注意の移動が起こりうる。

この2つのモードの効果には、時間的な差異があることが知られている。一般に、キュー提示後100ms以内の短い時間では、ボトムアップな注意の移動が生じ、その後、トップダウンな注意の振り分けが可能になるといわれている。たとえば、Kimら[14]は、不一致キューを、ターゲットに先行して提示した場合、キューが提示されてからターゲットが提示されるまでの時間（SOA: stimulus onset asynchrony）が短い条件（60ms）では、観察者は、キューがターゲットの位置にないことが分かっているにもかかわらず、いったんキューに注意を捕捉され[11]、[15]、[16]、[17]、[18]、[19]、SOAが長い条件（150ms）では、最初からターゲットに注意を振り向けることができることを示した[20]。

本研究では、キューがつねにターゲットや妨害刺激と同時に提示されていた（すなわちSOAが0msであった）。SOAが0msの場合には、ボトムアップな注意の移動が誘

発される[21]、[22]、[23]。したがって、一致キュー条件でRTが短縮されたのは、キューによりボトムアップに注意が捕捉され、キューが示したボタンのラベルが動物を意味する単語であることをより短い時間内で認識できたためだと考えられる。

一方、本研究において、コストが小さかった理由の1つとして、トップダウンな注意の移動の影響があげられる。本実験で測定したRTは、刺激提示からタッチパネルの入力にかかるまでの時間を含んでおり、その平均は1.5秒以上であった。これは、ボトムアップな注意の移動が生じるとされる時間を大きく上回っている。つまり、キューが提示された直後に、いったん注意の捕捉が起こったとしても、実際にタッチペンを動かしてボタンを押すまでに残されていた比較的長い時間の中で、参加者は意図を持って戦略的に（トップダウンに）ターゲットへ注意を向け直すことができたと考えられる。加えて、本研究では、ボトムアップな注意の移動が生じにくく、トップダウンに注意を移動させやすい探索条件であった可能性も指摘できる。先行研究では、注意の移動において、予期等の参加者自身の知識や意図に基づいてトップダウンに注意を移動することの効果は、刺激の顕著性等の刺激に基づいてボトムアップに注意を移動することの効果を上回る条件がいくつか報告されている。たとえば、Folkら[12]、[24]、[25]は、注意の捕捉が生じるキューを用いた場合においても、キューとターゲットが異なる特徴を有する場合（たとえば、キューが出現で特徴づけられているときに、ターゲットは色で特徴づけられている等）には、キューの効果が減少することを報告している。また、Ivanoffら[26]は、Folkら[24]の結果をふまえて、探索課題とともにキューの出現の有無や位置といった、キュー自体の検出を参加者に求めた場合とそうでない場合の効果を検討し、キュー検出を課題とした場合には顕著なキューの効果が生じるが、そうでない場合には、キューの効果が小さくなることを報告している。これらに対し、本研究では、キューは輝度の違い、ターゲットは単語の意味でそれぞれ判別されており、キューとターゲットの特徴が異なっていた。また、キューの検出自体は課題に含まれていなかった。以上より、本実験のキューでは、観察者の意思にかかわらず自動的に引き起こされるボトムアップな注意の移動が生じにくかったと考察できる。さらに、キューやターゲットは、ボタンが押されるまで提示されていたため、参加者は不一致キューから別のボタンへトップダウンに注意を向け直すことができたと思われる。

以上のように、トップダウンな注意の移動が可能であり、かつボトムアップな注意の捕捉の効果が弱い条件であったとすれば、一致キュー条件では、ボトムアップな注意の移動がそのままリンク・ボタンの押下につながり、大きなベネフィットを得ることができるのに対して、不一致キュー条件では、ボトムアップにキューに注意が向いた後、すぐ

にトップダウンに注意を向け直せるため、全体の RT に寄与するボトムアップな注意の移動の影響が非常に小さくなり、結果としてコストが小さくなる可能性がある。そこで、キュー提示直後の現象に焦点を当てるため、運動過程を排除し、知覚・認知過程のみを対象とした実験を行った。

3. 実験 2

実験 2 では、実験 1 と同様の刺激を短い提示時間（刺激の提示開始から終了までの時間）で提示し、参加者にターゲットの動物名を答えてもらった。このとき、視線の動きと正答率を調べ、運動レベルの反応に至る前の、知覚・認知レベルの過程で一致/不一致キューが探索にどのように影響しているのかを検討した。

3.1 参加者

大学生 20 名（男性 12 名，年齢 $M = 22.75$, $SD = 2.93$ ；および女性 8 名，年齢 $M = 24.13$, $SD = 5.11$ ）が一定の謝礼を受けて実験に参加した。

3.2 装置

実験 1 と同じ装置に加えて、視線追跡装置（SR Research 社製 EyeLink 1000）を用い、付属の解析ソフトによりサッケードや停留を判定した。その際、視線の移動速度が $30^\circ/\text{sec}$ 以上、または加速度が $8,000^\circ/\text{sec}$ 以上のものをサッケード、連続するサッケードの間を停留として定義した。

3.3 刺激

提示刺激は実験 1 と同じであった。

3.4 手続き

提示時間条件（200 ms, 500 ms, 1,000 ms, 1,500 ms, 2,000 ms）ごとに 5 つの試行ブロックを用意し、その中で、各キュー条件に対して 16 試行（合計 48 試行）をランダムに配した。ブロックの実施順序はカウンタバランスさせた。

参加者には、ターゲットのボタンをタッチするのではなく、試行ごとに動物名を口頭で回答するよう求めた。実験 1 と同様、注視点が 500 ms 表示された後、16 個のリンク・ボタンと文字、（条件によっては）キューがすべて同時に提示された。所定の提示時間が経過すると、リンク・ボタン上の文字はすべてアスタリスクに変化した。

実験計画は、3（キュー条件：キューなし、一致キュー、不一致キュー） \times 5（提示時間条件：200, 500, 1,000, 1,500, 2,000 ms）の 2 要因による参加者内計画であった。

3.5 結果

条件ごとの参加者の正答率の中央値を図 4 に示す。正答率データは正規分布を示さなかったため、ウィルコクソン

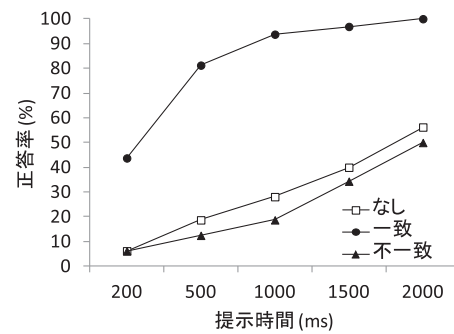


図 4 提示時間条件ごとの正答率

Fig. 4 Rate of correct answers for each lead time condition.

の符号付き順位和検定を使用したライアンの方法による多重比較を行ったところ、表 1 に示す結果が得られた。表 1 によると、提示時間 200 ms において不一致キューとキューなし条件の間に差が見られないほかは、すべての提示時間において、キュー条件間の正答率に有意な差があった。すなわち、提示時間 500 ms 以上の条件では、ベネフィットもコストも確認された。一方、提示時間の効果については、一致キュー条件において 1,000 ms 以上の各提示時間条件間に有意差が見られなかったほかは、すべてのキュー条件において提示時間条件が長いほど正答率が有意に向上することが示された。

参加者の視線データを解析した結果、刺激提示からキューが提示されたボタン位置に視線が停留するまでの時間の分布を得た（図 5）。図 5 によると、キューが提示されたボタンに視線が到達する時間は、すべての条件で 200–300 ms の範囲に集中していた。さらに、各参加者において、刺激提示後の経過時間 100, 200, 300, 400 ms においてキューが提示されたボタンに視線が到達した率（視線到達率）を算出し、キュー条件および提示時間条件を参加者内独立変数とした分散分析を行った結果、すべての経過時間において視線到達率に条件間の差は検出されなかった。

3.6 考察

実験 2 では、運動レベルの反応に至る前の、知覚・認知レベルの過程でのキューの影響を調べることを目的とした。図 4 からは、ベネフィット（一致キュー条件とキューなし条件の正答率の差）が、コスト（不一致キュー条件とキューなし条件間の正答率の差）より大きいように見える。実際に、各条件の正答率を多重比較した結果は、200 ms を除いたすべての提示時間においてベネフィットがコストより有意に大きいことを示している。これにより、本実験の刺激・課題条件では、知覚・認知レベルの過程においても、キューによるベネフィットがコストを上回ることが示唆された。なお、一致キューにおいて提示時間 1,000 ms 以上の提示時間条件間の正答率に差が検出されなかったのは、1,000 ms 以上の提示時間において、それ以上正答率が伸び

表 1 条件ごとの正答率の多重比較の結果

Table 1 Multiple comparison results of correct answer rates for each condition.

なし	200																						
	500	**																					
	1000	**	**																				
	1500	*	**	*																			
	2000	**	*	**	**																		
一致	200	*	*	n.s.	n.s.	**																	
	500	*	*	*	**	**	**																
	1000	*	**	**	**	**	**	*															
	1500	*	*	*	*	*	*	n.s.	n.s.														
	2000	*	*	**	**	**	**	*	n.s.	n.s.													
不一致	200	n.s.	**	**	**	**	*	**	*	*	*												
	500	*	**	**	**	**	**	**	**	*	*	**	*	*	*	*	*	*	*	*			
	1000	**	*	**	**	**	*	*	**	*	**	*	**	**	**	**	**	**	**	**			
	1500	**	**	*	*	*	n.s.	*	**	*	*	*	**	**	**	**	**	**	**	**			
	2000	*	**	*	†	**	**	**	**	*	**	*	**	*	*	*	*	*	*	*			
		200	500	1000	1500	2000	200	500	1000	1500	2000	200	500	1000	1500	2000							
						キューなし						一致キュー						不一致キュー					

網掛け部分は、提示時間条件ごとのキュー条件間の多重比較結果を示す。
 **, *, †は、それぞれ名義的有意水準1%, 5%, 10%未満であることを表す

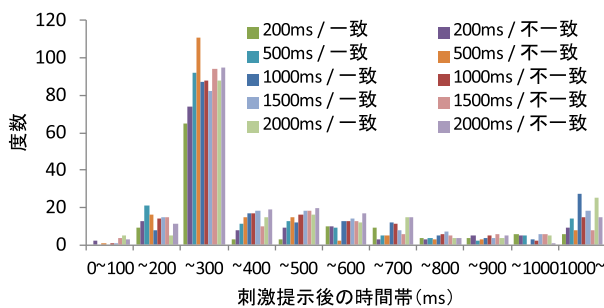


図 5 一致/不一致キューが提示された位置に視線が停留開始した時間の、提示時間条件ごとの度数分布

Fig. 5 Histograms for the start time of eye fixation onto a cued button for the valid/invalid cue condition in each lead time.

ない天井効果が生じたためと解釈できる。

視線データ解析の結果 (図 5) は、ほとんどの場合、キュー提示後 200-300 ms の間にキューが示したリンク・ボタンに視線が停留していたことを示した。一般に意図的に眼をサックードさせる際の潜時は、200-250 ms といわれており、また、コンピュータの画面を操作している際のサックードの潜時が 230 ms という報告もある [27]。一方、図 5 および視線到達率の分散分析結果は、この停留が、あたかもボトムアップな注意の捕捉によって、キューが一致か不一致かに関係なく生じることを示唆している。

本実験では、キューは 50% の確率で一致しており、これに対し、参加者は、キューに注意するようにも、無視するようにも指示されていない。したがって、参加者にはあえてキューを無視する理由はなく、不一致キューに視線を向けたとしても、それがトップダウン、ボトムアップのいずれによるものなのか (随意だったのか不随意だったのか) は分からない。しかしながら、キューが輝度による顕著性を備えていた点を考慮すると、まず、キューによるボトムアップな注意の捕捉が生じたと推測できる。ただし、本研究の探索課題においては、実験 1 で考察したようにボ

トムアップの効果が弱かった可能性があり、さらに、参加者は、単に画面内の刺激に眼を向けるのではなく、積極的にリンク・ボタンのラベルを「読む」ための構え (心的な準備) を持って探索課題に臨んでいたため、注意の捕捉の効果は非常に短時間で終了し、そこに視線を向け始める段階ではすでにトップダウンな制御に切り替わっていた可能性がある。その後、キューが示すリンク・ボタンのラベルが動物名かどうかを判断するために、不一致キュー条件であっても、しばらく視線を停留させる必要があったため、あたかも、最初のボトムアップな注意の補足に由来した効果、すなわち輝度による顕著性の効果が長時間にわたって続いているかのような視線の動きとなったと考えられる。

では、ボトムアップな効果が持続したにもかかわらず、ベネフィットがコストと比べて大きくなるという現象はどうして生じるのであろうか? 1つの仮説として、次のような確率に基づく簡単なモデルを想定できる。視線が必ずキューが示した位置に集まり、かつターゲット位置に視線が到達すれば必ず正解できると仮定すると、一致キューは、1回目の探索を必ず成功させ、不一致キューは必ず失敗させる。このとき、探索候補数 d に対して、不一致キューによって奪われる機会損失は $1/d$ と表現できる。実験 2 の条件では、16個のリンク・ボタンから1つのターゲットを探索するのだから、1回目の探索機会での正解する確率は $1/16$ であり、これが不一致キューによって奪われる正答率、すなわちコストである。実際に、実験 2 の 200, 500, 1,000, 1,500, 2,000 ms の各提示時間条件において、キューなし条件の正答率から不一致キュー条件の正答率を引いたコストは、それぞれ 0, 6.25, 9.37, 5.63, 6.25% である。500 ms 以上の条件では、確かに上記で仮定した理論値である $1/16 = 6.25$ に近い値で一定している。提示時間 200 ms ではコストの値が小さいが、これは、200 ms では、キューなし条件、不一致キュー条件ともに多くの試行で1回目の探索を完了できず、どちらもほとんど正答できなかったた

め差がでなかったのだと考えられる。

4. 実験 3

先述の確率モデルを検証するため、実験 3 では、探索候補数（ボタンの数）を変えて正答率を検証した。不一致キューによって奪われる探索 1 回分の正答率がコストであるとする仮説に従うと、探索候補数が 16, 8, 4, 2 と少なくなるのに反比例して、コストは $1/16, 1/8, 1/4, 1/2$ と大きくなっていき、ボタン 2 個においては、キューなし条件でのチャンスレベル 50% に対して、コストもベネフィットも 50% となり釣り合うと予想できる。もっとも、実際には、探索候補数を変えることにより探索課題の難易度も変わってしまうため、仮説どおりの反比例関係にはならないと考えられる。そこで、本実験では、キューによるコストとベネフィットの相対的な差に注目し、探索候補数が少なくなるに従って、コストとベネフィットの差が縮まり、探索候補数 2 では、コストとベネフィットが同程度の大きさになることを定性的に検証した。

4.1 参加者

大学生 10 名（男性 4 名，年齢 $M = 22.0$, $SD = 4.08$ ；女性 6 名，年齢 $M = 25.17$, $SD = 4.28$ ）が一定の謝礼を受けて実験に参加した。

4.2 装置

実験 2 と同じ装置が使用された。

4.3 刺激

実験 3 では、実験 2 と同様に 16 個のリンク・ボタンが提示されたが、文字が表示されたボタンの数（探索候補数）が 2, 4, 8 に操作された。それぞれの条件における配置は、図 2 の各ボタン位置に左上から右下に向かって、01, 02, ..., 16 と番号を振ったときに、(01, 16), (01, 04, 13, 16), (01, 03, 06, 08, 09, 11, 14, 16) とした。たとえば探索候補数が 2 の場合、左上と右下の対角のボタンのみに文字が表示された。また、提示時間条件は、ボタン 4 個と 8 個の条件に対して 200 ms, 500 ms, 1,000 ms とし、ボタン 2 個の条件に対してのみ 200 ms, 300 ms, 400 ms とした。これは、探索候補数 2 においては、提示時間 500 ms 以上の正答率がほぼ 100% に達することが確認されたためである。

4.4 手続き

9 種類の試行ブロック（3 種類の探索候補数 \times 3 種類の提示時間）を用意した。探索候補数 2 の場合は、2（ターゲット位置） \times 3（キュー条件）の 6 個の試行を 2 回ずつ、計 12 個の試行をランダムに配置した。探索候補数 4 の場合は、4（ターゲット位置） \times 3（キュー条件）の 12 個の

試行を 1 回ずつランダムに配置した。

探索候補数 8 の場合も 4 と同様に、8（ターゲット位置） \times 3（キュー条件）の 24 個の試行を 1 回ずつランダムに配置した。参加者は、9 種類の試行ブロックをランダムな順序で行った。ブロックの開始前には、1 分の休憩に次いで 6 試行の練習を挟んだ。その他の教示および実験手順は実験 2 と同様であった。

この実験 3 は、3（キュー条件：なし，一致，不一致） \times 3（提示時間：200 ms, 500 ms, 1,000 ms） \times 3（探索候補数：2, 4, 8）の 3 要因の参加者内計画であった。ただし、探索候補数 2 の場合のみ、提示時間は 200 ms, 300 ms, 400 ms であった。さらに、キューの効果が現れ、かつ正答率が飽和値に達しない提示時間を探索候補数ごとに求め、その時点におけるベネフィットとコストの大きさを検定した。

4.5 結果

図 6 に実験 3 における条件ごとの正答率、および実験 2 の 200 ms から 1,000 ms までの正答率を示す。図 6 によると、提示時間 200 ms においては、探索候補数 2, 4 において正答率はキュー条件にかかわらずチャンスレベル程度にとどまっている。逆に、探索候補数 2 における提示時間 400 ms や探索候補数 4 における提示時間 1,000 ms では、キュー条件によらず正答率はいずれも上限に近い値に収束している。そこで、図 6 よりキュー条件の効果が見られる提示時間条件として、探索候補数 2 における提示時間 300 ms、その他の探索候補数における提示時間 500 ms を設定した。これらの提示時間において、正答率を従属変数、キュー条件を参加者内要因とするフリードマン検定を行ったところ、探索候補数 2 では、有意傾向を示し ($\chi^2 = 4.80$, $df = 2$, $p < .10$)、探索候補数 4, 8 では有意であった（それぞれ、 $\chi^2 = 11.56$, $df = 2$, $p < .05$; $\chi^2 = 7.13$, $df = 2$, $p < .05$ ）。

次いで、ウィルコクソンの符号付き順位和検定を使用したライアンの方法による多重比較を行ったところ、すべての探索候補数において、一致キューと不一致キュー条件、および一致キュー条件とキューなし条件の差は有意であった（それぞれの名義的有意水準は、探索候補数 2 のとき、5%未満, 1%未満; 探索候補数 4 のとき、5%未満, 1%未満; 探索候補数 8 のとき、5%未満, 1%未満）。しかし、不一致キューとキューなし条件間の差については、探索候補数 2 のときに有意（名義的有意水準 5%未満）であったが、探索候補数 4, 8 においては、有意な差が見られなかった。

さらに、上記で設定した条件ごとにベネフィットとコストの差を検討した。探索候補数が 16 であった実験 2 の提示時間 500 ms におけるベネフィットとコストをウィルコクソンの符号付き順位和検定にかけたところ有意な差が示された ($Z = 3.722$, $p < .001$)。また、探索候補数 4, 8 の場合は、提示時間 500 ms においてベネフィットはあるがコ

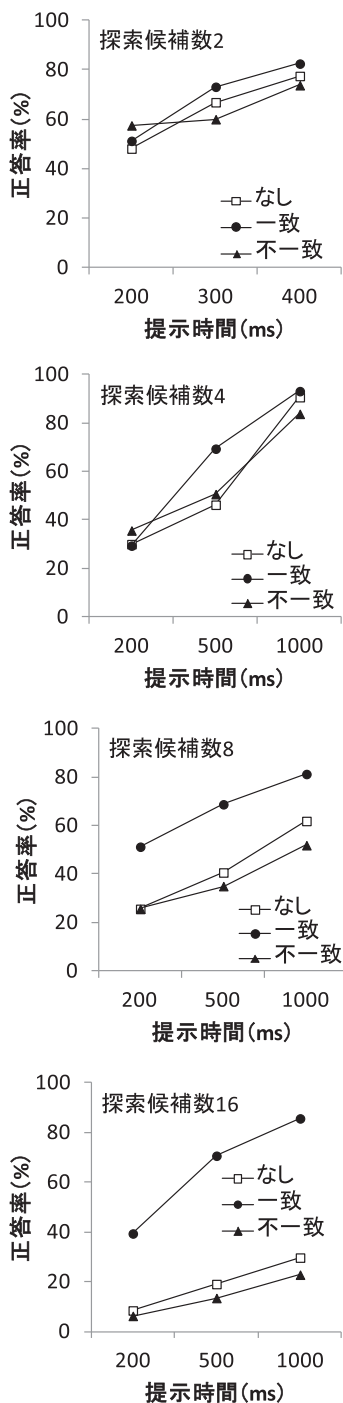


図 6 探索候補数 2, 4, 8, 16 の場合の、各提示時間に対するキュー条件ごとの正答率のグラフ

Fig. 6 Rate of correct answers for each cue and lead time condition in the case of 2, 4, 8 and 16 choices.

ストが検出できなかったのであるから、コスト 0 と比較して、ベネフィットの方が大きい。これらの結果および図 6 から、探索候補数が多いほどベネフィットとコストの差が大きいことが読み取れる。しかし、探索候補数 2、提示時間 300 ms の場合のみ、ウィルコクソンの符号付き順位和検定の結果、ベネフィットとコストに有意な差は見られなかった ($Z = .103, p = .918$)。以上の結果より、探索候補数が 16, 8, 4, 2 と減少するのに従って、ベネフィット

とコストの差が縮まり、探索候補数 2 では差がなくなる、という仮説が検証された。

4.6 考察

実験 3 では、リンク・ボタンの個数を変えた探索タスクにおいて、キューによるベネフィットとコストの相対的な差に注目して調べた。

キューの効果が有意である提示時間条件において、キュー条件ごとに正答率の差を検定した結果、探索候補数が 16, 8, 4 と少なくなるにつれて、コストとベネフィットの差が小さくなっていき、ボタン 2 個ではコストとベネフィットの差がなくなることが示された (図 6)。以上の結果は、実験 2 の考察において示した、不一致キューによって奪われる探索 1 回分の正答率がコストであるとする仮説を支持する。しかし、探索候補数を変化させると探索課題自体の難易度が変わるため、この仮説で説明できる探索候補数の範囲は限定的である。たとえば、探索候補数 2 においては、仮説が正しいければ、提示時間 300 ms の一致キュー条件では正答率が 100%、不一致キュー条件では 0% になるはずであるが、実際は、両者とも 70-80% 程度の正答率である。これは、この短い提示時間では、一致キューが出ても正解できない場合がある一方で、たった 2 つの探索候補数であるために、不一致キューにより視線が逆のリンク・ボタンに向けさせられたとしても、視線の移動中、あるいは周辺視により、もう 1 つのボタン上の動物名を読み取ることができたためと考えられる。

5. 総論

本論文では、中央監視システムを使った業務のように、リンク・ボタンに付されたラベルの内容を基に、相互リンクをたどって画面を遷移させ、必要な情報を探すタスクにおいて、履歴を利用して次に押すべきリンク・ボタンを予測し、キューを用いてそのボタンをオペレータに強調表示する支援技術が有効かどうかを検討した。予測精度は 100% ではないため、正しい予測に基づいた一致キューと、誤った予測に基づいた不一致キューの効果を考慮する必要がある。もし不一致キューが作業パフォーマンスに与える負の影響が、一致キューによる正の影響を打ち消す、あるいは上回るとすれば、この支援技術はそれほど役に立たない。そこで、本研究は、一致キューによるベネフィットと不一致キューによるコストの、それぞれの大きさに注目した。

実験 1 では、反応時間を短縮させる一致キューの効果 (ベネフィット) が、反応時間を増大させる不一致キューによる負の効果 (コスト) を上回ることが示された。実験 2 では、ボタンを押す運動に至る前の知覚・認知過程においても、ベネフィットがコストを上回ることが示された。また、オペレータの視線が 200-300 ms の間にキューの提示

されたボタンに停留することが明らかになった。実験3では、「不一致キューによるコストは1回目の移動で視線が正しいリンク・ボタンに到達する機会の喪失に相当する」という仮説を検証した。探索候補となるリンク・ボタンの数を d 個としたとき、コストとして失う正答率は $1/d$ である。したがって、探索すべきボタンの数が多いほど、コストは小さくなる。一方、一致キューは、ボタンの数に関係なく、オペレータが正しいリンク・ボタンを見つけるまでの時間や正確性を向上させる。普通、支援技術を必要とするような状況では、リンク・ボタンの数はある程度多いと考えられるため、このようなベネフィットがコストより大きくなる現象が生じやすい。さらに、本研究が想定した中央監視システムにおける探索では、オペレータがキュー自体の特徴や位置等を認識するよう求められることはなく、キューには、探索ターゲットの特徴とは異なる特徴を持たせる。このような条件下では、オペレータは、ボトムアップな注意の捕捉から抜け出し、トップダウンに注意を移動させることが比較的容易であると推測できる。この推測が正しいとすると、一致キューでは、オペレータの注意はボトムアップに補足され、短時間のうちに視線がターゲットに停留するため、大きなベネフィットを得ることができる。一方、不一致キューでは、いったん注意が捕捉されても、その直後に「ターゲットではない」と判断したオペレータの意図的な注意の移動により、ただちに探索が再開されるので、コストは小さいと考えられる。以上を考慮すると、中央監視システムのような探索タスクにおいて、キューは出さないより出した方が有利である。

最後に本研究の課題と限界について述べる。本研究の結論は、キューの一致率が50%の場合の検討結果である点に注意が必要である。キューの予測精度、すなわち一致率が変化すれば、キューに対するオペレータの依存度合いも変わることが知られている [28]。また、一致率の高い状況下で、不一致キューが提示されてしまった場合、オペレータは「キューが提示されているのだから正しいはず」と解釈して操作エラーを起こしてしまうことも考えられる。このような、キューの一致率の影響についてさらなる検討が必要である。

最後に、本研究は、エラーの重大性や、正確性とスピードのどちらを優先するか、といった現場の作業特性を考慮していない。たとえば、エラーが許されない現場においては、キューを提示してオペレータに予断を与えることは受け入れられないだろうし、逆にスピードが優先的に求められる状況であれば、もっとオペレータの判断のための負担を軽減するようなキューの出し方を工夫したほうが良い。現場作業に本研究を応用するには、その作業特性を詳細に検討したうえで、本研究の知見を足がかりに、さらに高次の認知過程を考慮に入れたインタフェースをデザインする必要があるだろう。

参考文献

- [1] 増井俊之：予測/例示インタフェースの研究動向，コンピュータソフトウェア，Vol.14, No.3, pp.4-19 (1997).
- [2] Sarukkai, R.R.: Link Prediction and Path Analysis Using Markov Chains, *Computer Networks*, Vol.33, No.1-6, pp.377-386, DOI: 10.1016/S1389-1286(00)00044-X (2000).
- [3] 上野洋平, 森 一之, 小橋 晶：先端技総研プラント監視制御システム向け操作予測支援システムの検討，ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集 (CD-ROM), No.1312 (2010).
- [4] Jonides, J.: Towards a Model of the Mind's Eye's Movement, *Canadian Journal of Psychology*, Vol.34, No.2, pp.103-112, DOI: 10.1037/h0081031 (1980).
- [5] Müller, H.J. and Rabbitt, P.M.: Reflexive and Voluntary Orienting of Visual Attention: Time Course of Activation and Resistance to Interruption, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol.15, No.2, pp.315-330, DOI: 10.1037/0096-1523.15.2.315 (1989).
- [6] Warner, C.B., Juola, J.F. and Koshino, H.: Voluntary Allocation Versus Automatic Capture of Visual Attention, *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol.48, No.3, pp.243-251, DOI: 10.3758/BF03211524 (1990).
- [7] 高橋 純, 山西潤一, 佐々木和男：高齢者に対応したコンピュータ画面上の文字の配色とサイズの検討，日本教育工学会論文誌，Vol.27, pp.127-134 (2003).
- [8] Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.0. Retrieved June 4th, 2012, available from (<http://www.w3.org/TR/WCAG20/>).
- [9] 天野成昭, 近藤公久：NTT database series 日本語の語彙特性，1巻，三省堂 (1999).
- [10] Posner, M.I.: Orienting of Attention, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol.32, No.1, pp.3-25, DOI: 10.1080/00335558008248231 (1980).
- [11] Theeuwes, J.: Perceptual Selectivity for Color and Form, *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol.51, No.6, pp.599-606, DOI: 10.3758/BF03211656 (1992).
- [12] Folk, C.L. and Remington, R.W.: Selectivity in Distraction by Irrelevant Featural Singletons: Evidence for Two Forms of Attentional Capture, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, Vol.24, pp.847-858 (1998).
- [13] Folk, C.L. and Remington, R.: Top-down Modulation of Preattentive Processing: Testing the Recovery Account of Contingent Capture, *Visual Cognition*, Vol.14, pp.445-465 (2006).
- [14] Kim, M.S. and Cave, K.R.: Top-down and Bottom-up Attentional Control: On the Nature of Interference From a Salient Distractor, *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol.61, No.6, pp.1009-1023, DOI: 10.3758/BF03207609 (1999).
- [15] Cave, K.R. and Wolfe, J.M.: Modeling the Role of Parallel Processing in Visual Search, *Cognitive Psychology*, Vol.22, pp.225-271 (1990).
- [16] Koch, C. and Ullman, S.: Shifts in Selective Visual Attention: Towards the Underlying Neural Circuitry, *Human Neurobiology*, Vol.4, pp.219-227 (1985).
- [17] Theeuwes, J.: Cross-dimensional Perceptual Selectivity, *Perception & Psychophysics*, Vol.50, pp.184-193 (1991).
- [18] Wolfe, J.M.: Guided Search 2.0: A Revised Model of Visual Search, *Psychonomic Bulletin & Review*, Vol.1, pp.202-238 (1994).
- [19] Wolfe, J.M., Cave, K.R. and Franzel, S.L.: Guided Search: An Alternative to the Feature Integration Model

for Visual Search, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol.15, No.3, pp.419–433 (1989).

- [20] Theeuwes, J., Atchley, P. and Kramer, A.F.: On the Time Course of Top-down and Bottom-up Control of Visual Attention, *Control of Cognitive Processes*, Monsell, S. and Driver, J. (Eds.), pp.102–124, The MIT Press (2000).
- [21] Franconeri, S.L., Simons, D.J. and Junge, J.A.: Searching for Stimulus-driven Shifts of Attention, *Psychonomic Bulletin & Review*, Vol.11, No.5, pp.876–881 (2004).
- [22] Theeuwes, J.: Temporal and spatial Characteristics of Preattentive and Attentive Processing, *Visual Cognition*, Vol.2, No.2-3, pp.221–233, DOI: 10.1080/13506289508401732 (1995).
- [23] Theeuwes, J., Kramer, A.F., Hahn, S., Irwin, D.E. and Zelinsky, G.J.: Influence of Attentional Capture on Oculomotor Control, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol.25, No.6, pp.1595–1608, DOI: 10.1037/0096-1523.25.6.1595 (1999).
- [24] Folk, C.L., Remington, R.W. and Johnston, J.C.: Involuntary Covert Orienting Is Contingent on Attentional Control Settings, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol.18, No.4, pp.1030–1044, DOI: 10.1037/0096-1523.18.4.1030 (1992).
- [25] Folk, C.L., Remington, R.W. and Wright, J.H.: The Structure of Attentional Control: Contingent Attentional Capture by Apparent Motion, Abrupt Onset, and Color, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol.20, pp.317–329 (1994).
- [26] Ivanoff, J. and Klein, R.M.: Orienting of Attention without Awareness is Affected by Measurement-Induced Attentional Control Settings, *Journal of Vision*, Vol.3, No.1, pp.32–40 (2003).
- [27] Card, S.K., Moran, T.P. and Newell, A.: *The Psychology of Human-computer Interaction*, Erlbaum (1983).
- [28] Yantis, S.E. and Howard, E.: On the Distinction Between Visual Saliency and Stimulus-driven Attentional Capture, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol.25, No.3, pp.661–676, DOI: 10.1037/0096-1523.25.3.661 (1999).



緒方 啓史 (正会員)

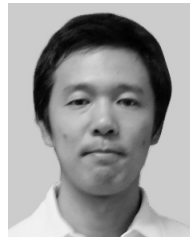
2012年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。2002年アズビル株式会社(旧社名:(株)山武)に入社し、現在に至るまで、高齢者向け健康情報サービス、ビルの中央管理システム等の使いやすさに関わる研究開発に従事。

主に、加齢による認知特性の変化と製品やサービスの使いやすさをテーマとした研究に携わる。日本認知科学会、電子情報通信学会、HCD-Netの各会員。



瀬谷 安弘

2007年東京都立大学大学院(現、首都大学東京大学院)理学研究科博士課程修了後、甲南大学知的情報通信研究所・博士研究員、東北大学加齢医学研究所・産学官連携研究員を経て、2012年より立命館大学情報理工学部知能情報学科助教。現在に至るまで、眼球運動が知覚・認知情報処理に及ぼす影響、運転者の知覚、視覚的注意の空間特性に関する研究に携わる。



渡邊 克巳

2001年カリフォルニア工科大学博士課程計算科学-神経システム専攻修了(Ph.D.)。2003年産業技術総合研究所研究員。2007年東京大学先端科学技術研究センター准教授(認知科学分野)。人間の心という主観的な現象に対して、認知科学・心理学・脳神経科学等の最先端の方法を使って、心を作り出している意識的・無意識的過程の科学的解明、認知科学のその他の研究分野への拡張、それらの知見の産学連携を通じた社会への還元を目指している。



伊福部 達 (正会員)

1971年北海道大学大学院修士課程(電子工学)修了後、1989年北海道大学電子科学研究所教授、2002年東京大学先端科学技術研究センター教授。北海道大学名誉教授、東京大学名誉教授。2011年より高齢社会総合研究機構・特任研究員。この間、感覚・コミュニケーション支援のための福祉工学の開拓と産業応用の研究に従事。電子情報通信学会フェロー、VR学会フェロー(現:会長)、JST S-イノベ「高齢社会(略称)」総括代表、著書に『音声タイプライタの設計(CQ出版, 1983)、『音の福祉工学』(コロナ社, 1997)、『福祉工学の挑戦』(中公新書, 2004)、『ゴジラ音楽と緊急地震速報』(監修, ヤマハ MM, 2012)等。