

ディスプレイ・ベースの HCI の認知モデル

北島宗雄

工業技術院生命工学工業技術研究所

要旨：ディスプレイ・ベースのヒューマン・コンピュータ・インタラクションの大きな特徴は、ユーザが操作を選択し実行する過程がディスプレイに表示される視覚情報にガイドされながら進行することである。従来のコマンド・ベースのインタラクションでは予め周到に計画された操作系列が実行されるのと比較すると、非常に柔軟で、また、記憶に負荷を掛けない、優れたインタラクションの方式である。本論文では、ディスプレイ・ベースのインタラクションの特質を理論的に理解するために、ユーザが、ディスプレイに表示されている情報を見てから、適切な対象を選択し、操作を決定・実行するまでの過程を、6個の過程からなるアクション・サイクルの形でモデル化する。また、エキスパート・ユーザが犯すエラーについてモデルが与える新しい説明と、シミュレーション実験結果について述べる。

A Cognitive Model of Display-Based Human-Computer Interaction

Muneo Kitajima

National Institute of Bioscience and Human-Technology

Abstract This paper describes a computational model of skilled use of a graphical user interface based on Norman's action cycle model. The model uses knowledge of a detailed representation of information on the display, a user's task goals and device goals, knowledge about the interface, and knowledge about the application domain to compute actions necessary to accomplish the user's current goal. The model consists of six sub processes that make use of these kinds of knowledge to select appropriate objects and next correct actions. The model provides a well-motivated account of one kind of errors, action slips, made by skilled users. We describe results from simulation experiments that explain the reasons for errors in connection with task context defined by the current display, the current goals, and the elaborated display representations.

1. はじめに

コンピュータが日常生活のさまざまな場面において幅広く使われるようになり、タスクのコンピュータ化が進行してきている。例えば、オフィスにおいては、文書作成、表計算、作図、統計分析、...、などのタスクの一部がコンピュータにとって代わられつつある。また、一般家庭においても、多機能電話やビデオなど、多くの機器にマイクロ・コンピュータが内蔵され、予約などの便利な機能が利用できるようになってきている。

コンピュータに代表されるような現代の技術が、仕事ばかりでなく日常生活のなかに導入される場合には、タスクを達成するためのプロセスの変容をしばしば伴う。従来、文書作成をするための道具は、鉛筆、紙、消しゴムであったが、それら道具の機能上の制約により、現在、ワープロでは非常に簡単に実行できる“切り張り”は文書作成のプロセスとしては主ではなかった。“切り張り”を簡便にする新しい技術の導入により、文書作成タスクを構成するプロセスが大幅に変容した。ここに、技術がタスクのプロセスを変容させることの一例を見ることが出来る。このような点を重視し、技術の導入においては、それがサポートしようとするタスクを分析し、新しい技術がどのプロセスにどのように関わるのかを明確にして、デザインをする必要性が主張されてきている (Winograd and Flores, 1988)。

1.1 グラフィカル・インタフェース

オフィスへのコンピュータの導入が盛んに行なわれるようになった背景には、ハード、ソフト、両面の進歩がある。ハード面では、精彩な画像を表示できるビットマップ・ディスプレイ、画像を高速に表示できる CPU の開発・普及がその根底にある。

ソフト面では、グラフィカル・インタフェースの導入による使いやすさの向上がある。従来のインタフェースがコマンド入力を主体としたものであり、シンタックスに関する知識を持っていることが必要であったのに対し、グラフィカル・インタフェースでは、コンピュータの画面上に表示される対象、そ

れ自身、または、それらの間の関係から、その機能(何ができるのか)や結果(何が起こるのか)が容易に連想されることを利用して、認知的な負荷の低減や、誤操作の防止が図られている。

グラフィカル・インタフェースに用いられている基本的概念は WIMP と呼ばれている。これは、Windows、Icons、Menus、Pointing device の最初の文字を結合したものである。この概念の上に、デスクトップ・メタファを用いて、机の上のような環境をディスプレイの上を実現して、その上で、アイコンやウィンドウの中に表示された対象をマウスでポイントし、作業を進める直接操作方式 (Hutchins, Hollan & Norman, 1986) は、このようなグラフィカル・インタフェースの好例である。

人間は、非常の多くの情報が凝集されている視覚情報の中から、状況に応じて最も必要とされる情報に注意を向け、それを利用して次に行なうべき操作の選択を行なっている。グラフィカル・インタフェースは、人間のこの優れた特性を積極的に利用しようという試みである。その実践の一つの仕方は、インタフェース・デザイナーの直感に基づいてさまざまなアプリケーション・ソフトウェアを作成し、その性能をユーザに問うことである。

しかしながら、*Communication of ACM* で最近組まれたグラフィカル・インタフェースの特集 (Mandelkern *et al.*, 1993) に報告されているように、今後もますますハードウェアが進歩し、現在よりも多様な仕方で情報が表示できるようになることが確実であることを考えると、ここで一步戻って、前述した点、新しい技術がどのプロセスにどのように関わるのか、について、より基本的な観点から考察を行ない、例えば、なぜ、グラフィカル・インタフェースが使いやすいのか、どのようにしてユーザの認知的な負荷が低減されているのか、また、どのようなエラーが、どのようなときに発生しやすいのか、といった点について理解を深める必要がある。技術を利用するために発動される人間の情報処理の方式に適合した形にタスクに用いられるプロセスをデザインすることにより、始めて、技術の最大限の

利用が達成されるからである。

1.2 ディスプレイ・ベースの問題解決

グラフィカル・インタフェースを人間がどのように使っているか、それを考えるための一つの視点は、我々が日常生活において機器を使うときに、それらの 見え方 が次に行なうべき操作の決定にどのように関与するのか、を考えることによって与えられる。ここで 見え方 は単に何が見えたか、といった知覚レベルよりも、むしろ、さらに処理が進んだレベル、見えたものどうしの関連も意味づけられたレベルをさす。機器のボタンやスイッチの物理的な構造が次に行なえる操作を想起させたり、操作の範囲を限定し、エラーの発生を未然に、しかも自然に防いでいることは、身の回りの機器を考えるとよく分かるであろう。

Larkin (1989) はコーヒーメーカーでコーヒーを沸かすことや、代数の問題をノートの上で解くといった問題解決の場面を ディスプレイ・ベースの問題解決 (Display-Based Problem Solving) とよび、そのプロセスをプロダクション・システムを用いて分析している。彼女は以下のように、ディスプレイ・ベースの問題解決を特徴付けている。

- 1) プロセスは簡単である
- 2) 殆どエラーを犯さない
- 3) 割り込みによる影響を受けない
- 4) ステップは種々の順序で実行される
- 5) プロセスの変更は簡単である
- 6) タスクをスムーズに簡単に行なうには学習が必要である

これらの特徴は、そのままグラフィカル・インタフェースを用いてタスクを遂行するプロセスにもあてはまるように思われる。本論文では、この考え方に基づいて研究を進めている、ユーザの認知プロセスモデルについて述べる。このモデルは、Larkin がプロダクション・システムを用いて行なっている分析よりも詳細なレベルでの分析を行なうためのモデルであり、ユーザが、グラフィカル・インタフェースを備えた装置、これはコンピュータに限らないが、利用するとき、どのような知識をどのように使っ

て次に行なうべき操作を選択し実行するのか、その実行プロセスを認知のレベルでモデル化する。

本論文では、まず、モデルで扱おうとしているタスクとその遂行プロセスを、例を挙げて示し、グラフィカル・インタフェース使用プロセスが、ディスプレイ・ベースの問題解決の諸特徴を持っていることを示す。次に、モデルの提示を行なうが、最初に、ユーザとコンピュータの相互作用プロセスの基本的な視点を与えている Norman の行動理論を説明し、そのグラフィカル・インタフェースの認知プロセスモデルへの適用を説明する。

最後に、本モデルを用いて、エキスパート・ユーザが犯すエラーの発生メカニズムについて考察する。本モデルの大きな特徴は、特にエラーを発生させるための特別な誤った知識を仮定しなくても、時として犯されるエラーをシミュレートできることである。従来モデルによって与えられるエラーに対する説明と対比しながら、本モデルが与える新しい説明を述べ、さらに、エラーに焦点を合わせたシミュレーション実験の結果についても述べる。

2. タスクと実行プロセスの例

本モデルで理解しようとしている現象の代表例は、デスクトップメタファーを用いたアプリケーション・ソフトウェアの上で実行されるタスクの遂行過程である。本論文では、Macintosh のグラフ作成ツールのひとつである Cricket Graph をグラフィカル・インタフェースの例としてとりあげ、仮想的なユーザがそれを利用して実行するグラフ作成作業の遂行過程を分析する。以下に、タスクの例と、その遂行過程のシミュレーションを示す。

2.1 タスクの例

ユーザにタスク、

印刷されたグラフ (図1) を指定されたファイルのデータを用いて再構成する

が与えられたものとする。コンピュータ化されたタスクは、通常、ユニット・タスクに分解できる

(Card, Moran & Newell, 1983) が、この場合も、次のようなサブ・タスクに分解可能である。

- サブ・タスク1: “Serial Position” をX 軸,
“Observed” をY 軸として折れ線グラフを
描く。
- サブ・タスク2: グラフのタイトルを編集する。
- サブ・タスク...: ●●●

ユーザは、タスクを開始するに当たって、グラフを作成するのに必要なデータが、ドキュメント・ファイル “Example Data” に納められていると教示されている。

以上が、タスクが開始された時の状況の記述である。タスクがサブ・タスクに分解されていること、サブ・タスクの心的な表現が与えられていること、タスクとディスプレイ上の情報を関係付けるための知識が与えられていること、が主要な点である。

ユーザがまず最初に行なうことは、“Example Data” アイコンをダブル・クリック（マウスのボタンを2回連続して短時間のうちに押すこと）し、ドキュメント・ファイルを開くことである。これによりデータを納めたスプレッド・シートが表示される。また、同時に、Cricket Graph の作業環境に入ることができる。図2(a) は、この最初の操作によって表示される画面を示している。

この状態を最初の状態として、サブ・タスク1は、例えば、次のような操作の系列により遂行される。

- ステップ¹: マウスカーソルを **Graph** に移動する
- ステップ²: マウスボタンを押し続ける

図 2 (b) に示すプルダウン・メニューが表示される

- ステップ³: マウスカーソルを **Line** に移動する。
- ステップ⁴: マウスボタンを放す。

図 2 (c) に示す変数選択のためのダイアログ・ボックスが表示される

- ステップ⁵: マウスカーソルを X 軸選択リストの項目,
Serial Position に移動する
- ステップ⁶: マウスボタンを1回クリックする
- ステップ⁷: マウスカーソルを Y 軸選択リストの項

目, **Observed** に移動する。

- ステップ⁸: マウスボタンを1回クリックする
- ステップ⁹: マウスカーソルを **New Plot** ボタンに
移動する
- ステップ¹⁰: マウスボタンを1回クリックする

図 2 (d) に示す標準の折れ線グラフが表示される

ステップ 1 からステップ 10 を実行することにより、最初のサブ・タスクは達成されることになるが、目標とするグラフ（図 1）との違いはまだ大きく、それを縮めるために、サブ・タスク 2 を達成しようとする。

サブ・タスク 2 は、ステップ 10 によって得られる図2(d)に示した画面を初期画面として、例えば、次のように遂行される。

- ステップ¹¹: マウスカーソルを **Data from**
“Example Data”（グラフのタイトル）
に移動する
- ステップ¹²: マウスボタンをダブル・クリックする

図 2 (e) に示すグラフ・タイトル編集用のウィンドウが表示される

このようにして、順次サブ・タスクが遂行され、最終的に図 1 のゴールが達成される。

ここでは、2つのサブ・タスクの実行のようすを、画面の変化と共にその過程を追跡してきた。重要な点は、ユーザが何らかの操作を行なうと、ディスプレイに表示されている内容が大きく変化することである。例えば、プルダウン・メニュー（図2(b)）、変数選択のダイログ・ボックス（図2(c)）、標準の折れ線グラフ（図2(d)）、グラフ・タイトル編集用のウィンドウ（図2(e)）は、いずれも、ユーザの操作にシステムが応えてスクリーン上に表示したものであり、それ以前の表示内容が大幅に変更され、次の操作を選択するときの文脈を与えていることが分かる。

ここで述べたシミュレーションは、グラフィカル・インタフェースを用いたタスクの遂行過程の一例に過ぎない。また、そこに含まれる認知的なプロセスに深く踏み込んだ分析をしているわけでもない。し

かしながら、ディスプレイに表示されている情報が次の操作の決定に大きく影響し、それにより、操作選択の容易さ、エラーの発生の防止、割り込みの影響の受けにくさ、等、Larkin の主張しているディスプレイ・ベースの問題解決の特徴を再確認することができる。

3. アクション・サイクル

人間が一般の機器をどのように使うのか、その心理プロセスの見方のひとつに、Norman (1988, pp. 46 - 47) のアクション・サイクルがある。図 3 にその概略を示す。

Norman の考え方は非常に単純である。人間は、何かを成し遂げたいとき、まず、達成されるべき状態、即ち ゴール を持って機器に臨み、そして、それを達成するために 世界 に何らかの 働き掛け (実行) を行なう。また、その結果は、ゴール が達成されたかどうかという観点から 評価 される。そして、この評価に基づき、次に行なうべき操作が決定され、実行される。この要素を、人間が目的をもって機器を扱う場合に考えなければならない基本要素と考えるのである。

Norman の考え方は、ゴール志向の行動を考えるための一般的な枠組みを提供している。コンピュータ化されたタスクは、高度にゴール志向的であり、また、世界 (この場合はインタフェース・デバイス) に対する操作、そして、その結果の評価がサイクリックになされる。本論文で提案する心理プロセスモデルは、Norman のアクション・サイクルの考え方を踏襲し、インタラクションが高度にディスプレイ・ベースに行なわれる場合に発展させたものである。

図 4 にディスプレイ・ベースの HCI の認知モデルの概略を示す。モデルは大きく分けて、

- ・ ハードウェア、
- ・ ゴール、
- ・ 実行のステージ、
- ・ 評価のステージ、

の 4 要素から構成される。これは、Norman のアクションサイクル・モデルと同じである。

図 4 の下部には世界を構成するハードウェアが示されている。そこには、視覚情報を表示するディスプレイ、また、操作が行なわれる装置である、マウスやキーボードが含まれる。他の 3 要素 (ゴール、実行のステージ、評価のステージ) は、いずれも心理的な内容を含んだ要素であり、それらを定義することによってモデルの記述が与えられることになる。

3.1 タスク・ゴールとデバイス・ゴール

図 4 の上部には 2 種類のゴールが示されている。Norman のモデルでは明確には区別されていなかったが、機器操作の心理モデルを考えるとき、以下に定義するように、ゴールを 2 種類に分けて捉えるのが重要である。この仮定は、*Yoked State Space Hypothesis* として提案され、その妥当性の検証が行なわれている (Payne, Squibb, & Howes, 1990)。

1つのゴールは、タスク・ゴールである。これは、タスクをサブ・タスクに展開したときに構成されるタスク・スペースの要素であり、その表現はタスクに直接関連したことばで与えられる。例えば、先に示した、サブ・タスク1、サブ・タスク2はタスク・ゴールの例である。いずれも、タスクのことば、つまり、図1 に示した再構成すべきグラフの要素や要素の間の関係を直接表す言葉で表現したものになっている。

もう1つのゴールは、デバイス・ゴールである。これは達成したいデバイスの状態の心的表現である。ディスプレイ・ベースの HCI においてデバイス・ゴールによって表現されるものは、ディスプレイに何が、どのように表示されているか、に関する心的表現である。図 2 に示したタスク遂行過程の途中に現われるディスプレイ状態のそれぞれに対して与えられる心的表現が、デバイス・ゴールに対応する。例えば、図 2 (b) では、メニュー・バーに表示されている項目、それ自身、また、その状態 (ハイライト、グレー、点滅、等) がディスプレイ表現の要素となる。デバイス・ゴールを相互に関連づけることによって、デバイス・スペースが構成される。

タスク・スペースとデバイス・スペースに関する

知識は長期記憶に保持されていると仮定するが、それらがどのように活性化され、また利用できるようになるか、その過程について、前節で示したシミュレーションを用いて説明する。ただし、これらの点は、操作決定をするためのアクション・サイクルの範囲を越えるものであり、本モデルでは取り扱っていない点を予め断っておく。

まず、タスク・ゴールとそのサブ・タスクへの分解は、タスクがユーザに与えられた時に、タスクに関連したタスク・ゴールを長期記憶から引き出すことによってなされる。ここでは、標準的な（ディスプレイ・ベースでない）問題解決のプロセスが働いていると考えられる。このようにして得られたのがサブ・タスク1と2である。そして、ディスプレイの状態を観察し、その心的表現を連合のキーとして、タスク・ゴールに関連したデバイス・ゴールが長期記憶から引き出される。例えば、サブ・ゴール1が設定されたとき、図2(b), (c), (d)を表現したデバイス・ゴールが長期記憶から引き出される。どのタスク・ゴールにどのデバイス・ゴールを結び付けるのか、ということは、操作の経験・学習を通じて獲得されるものであり、この知識も、長期記憶に格納されていると仮定する。このようにして、サブ・タスクの心的表現 ディスプレイの心的表現 デバイス・ゴールの活性化、が行なわれる。

タスク・ゴール、デバイス・ゴール、ディスプレイ上への情報呈示、の一組が既に与えられているものとして、本論文で提案しているディスプレイ・ベースのHCIの認知モデル（アクション・サイクル）の説明を、図4に従って、以下に述べる。まず、評価のステージ（図の右側）について説明し、次に、実行のステージ（図の左側）について述べる。なお、モデルに用いられているパラメタや仮定の詳細については、Kitajima and Polson (1992)を参照されたい。

3.2 評価のステージ

評価のステージは、ディスプレイ表現の形成、ゴール達成の検査、ディスプレイ表現の精緻化の3つのプロセスから構成される。

3.2.1 ディスプレイ表現の形成

ディスプレイに表示されているものは、物理的には、数百万のピクセルの濃淡パターンである。しかしながら、知覚レベルでは、近接するピクセルに表示されている情報を関連付けることにより、表示されているボタンから、何が、また、どのように表示されているのか、という情報が抽出される。

知覚レベルの表現には、対象が何であるか、という対象の アイデンティティ に関する表現と、対象の見え方、アピランスに関する表現が含まれる。例えば、本モデルでは、図2(a)のメニューの1つの項目である **Graph** のアイデンティティに関する表現として、次のものを与えている。

- ・ **Graph** はメニューの項目である
- ・ **Graph** は操作可能な対象である
- ・ ...

また、アピランスに関する表現は、次のように与えられている。

- ・ **Graph** はポイントされていない
- ・ **Graph** はハイライト表示されていない
- ・ ...

この例からもわかるように、ディスプレイ表現は知覚レベルの表現なので、対象に対してどのような操作が可能なのか、といった、操作決定には不可欠な情報が何も含まれていないのが特徴である。本モデルでは、このような情報は、対象の意味に関する情報であり、ユーザの知識が係わってはじめて顕在化するものであると仮定している。

3.2.2 ゴール達成の検査

このように構成されたディスプレイ表現は、まず、それがデバイス・ゴールを満たしているかどうかについてチェックされる。なお、先に述べたようにデバイス・ゴールは、ディスプレイに表示される対象により表現されているので、デバイス・ゴールはディスプレイ表現と照合ができるのである。

もし、現在のデバイス・ゴールが満たされているならば、さらに、現在のタスク・ゴールに関連づけ

られているデバイス・ゴールが全て満足されたかどうかテストされ、未達成のデバイス・ゴールがあれば、それを新たなデバイス・ゴールとして、次のプロセス(ディスプレイ表現の精緻化に進む。もし、すべてのデバイス・ゴールが達成されたならば、それらに関連したタスク・ゴールも達成されたことになるので、新たなタスク・ゴールの長期記憶からの検索・設定、連合されているデバイス・ゴールの検索・設定を行ない、新たな、タスク・ゴール、デバイス・ゴールの組み合わせのもと、次のプロセスへと進む。

3.2.3 ディスプレイ表現の精緻化

このプロセスは、表面的で、貧弱なディスプレイ表現を、長期記憶に蓄えられている知識を利用して深めるプロセスである。知覚レベルで与えられているディスプレイ表現は、そこに表現されている概念を手掛かりとして長期記憶に格納されている関連した情報を検索することにより精緻化される。この段階を経て始めて、ディスプレイの意味的な理解を導き出すことが可能となる。

長期記憶には、ディスプレイに表示される情報に関するさまざまな知識が納められている。Graphメニュー項目について例をいくつか挙げると、

- ・ Graph メニュー項目はプルダウンできる
- ・ Graph メニュー項目はテキストではない
- ・ Graph メニュー項目は折れ線グラフ・メニュー項目と連合している
- ・ ...

などがある。

知識の検索プロセスは、認知心理学における文章理解プロセスのモデル (Kintsch, 1988) における記憶検索の方法 (Raaijmaker, J. G. & Shiffrin, 1981) に基づいている。すなわち、ディスプレイ表現に現われる個々の命題 (述語といくつかの引数によって定義される) と、(1) 長期記憶に蓄えられている命題、(2) ディスプレイを表現する命題、及び、(3) ゴールを表現する命題、の間の関連の強さは、それらの命題間で共有される引数の数に比例して大きくなり、連

合が成立する確率はこの関連の強さに比例する、と考える。

ディスプレイ、または、ゴールを表現する個々の命題が、長期記憶に格納されている命題と連合を成立させたとき、その知識は有効になる。検索された知識のみが、操作対象の選択や、操作の選択のプロセスで利用可能である。長期記憶の検索の試みは、個々のディスプレイ表現、ゴールを用いて、数回にわたって行なわれるが、検索される知識の内容は、命題間に与えられた関連の強さの具体的な割当方によって大きく影響される。もし、ディスプレイ表現における命題が、特定の命題と非常に強く関連づけられている場合には、何回検索を行なっても、同じ命題との間の連合が成立する確率が高いため、結果として、狭い範囲の知識しか検索されないことになる。一方、特に強い関連性を持った命題がない場合には、多くの知識が幅広く検索される確率が高くなる。また、ディスプレイに表示されている対象は全て検索に用いられる。従って、精緻化のプロセスによって長期記憶から検索される知識の具体的な内容は、ディスプレイに表示されている対象に敏感に影響されることになる。

このように、本モデルでは、検索される知識の内容は、

- (1) ディスプレイされている対象の内容、
- (2) 関連の強さを反映して与えられる連合が成立する確率、
- (3) 長期記憶を検索する回数、

に応じて変化することになる。また、ゴールと精緻化されたディスプレイ表現は、操作を決定し、実行する際に重要な役割を担う文脈を規定する。文脈の詳細がディスプレイが与えられた後に、知識検索プロセスを経て形成されることは、本モデルの重要な特徴であり、エキスパートの犯すエラーについての新しい理解を与えることになる。この点については、後でまた触れる。

3.3 実行のステージ

何を実行すべきかの決定・実行は、これまでに集

められた情報，すなわち，タスク・ゴール，デバイス・ゴール，そして，精緻化されたディスプレイ表現，を用いて，操作対象の選択，認知操作の選択，認知操作の実行，のプロセスを経て，なされる．図 5 は実行のステージを模式的に示している．図 4 の左上部から下方への実行のステージの流れは，図 5 の左から右への流れに対応する．

3.3.1 操作対象の選択

図 2 の，どの画面状態を見ても，ディスプレイには数多くの操作可能な対象が存在していることが分かる．本モデルでは，まず，どの対象が最も操作を行なうのに適切であるかを，既に得られた情報によって定義される文脈に照らして評価し，それに基づいて操作対象を選択する．

図 5 では，サブ・タスク2(グラフ・タイトルのエディット・タスク)の最初のステップ(正しい操作はマウスカーソルをグラフ・タイトルに移動する)が決定・実行されるときの流れが示されている．この場合には，恐らく，操作対象として，

Edit メニュー項目，
Formats メニュー項目，
Data from "Example Data" (グラフタイトル)，

が選ばれるであろう．いずれも，グラフ・タイトル，エディットといった現在のゴールに密接に関連したディスプレイ対象である．

3.3.2 認知操作の選択

モデルでは，ユーザは操作に関する汎用的な知識(汎用的な認知操作知識)を長期記憶に保有し，ディスプレイの具体的な状況に合わせてそれを特殊化して用いる(特殊化された認知操作知識)と仮定している．ユーザが知識として持っているのは，操作の物理レベルでの表現，例えば，カーソルを移動する，マウスボタンを押す，等，ではなく，認知レベルの表現である．認知レベルの表現は，操作前後のディスプレイの状態で規定されていると仮定されている．ここで取り上げているタスクの場合，本モデルでは，

物理的な操作として，

- (1) マウスカーソルを移動する，
- (2) マウスボタンを1回クリックする，
- (3) マウスボタンを2回クリックする，
- (4) マウスボタンを押し続ける，
- (5) マウスボタンを放す，
- (6) タイプする，

を考えているが，モデルでは，ユーザは，そのそれぞれに対して，ディスプレイの状態の操作前後の変化として定義される複数の認知表現を長期記憶に操作知識として持っているとは仮定している．

現在のモデルでは，右端に示した6種類の物理操作は，18種類の汎用的な認知操作知識によって表現されている．図 5 で，●●●●は個々の認知操作に対応する．例えば，マウスカーソルを移動するという物理操作(図中，最上段)は，認知的には6種類のバリエーションによって表現されている．ここでは，マウスカーソルを，テキスト領域に移動する場合，メニューの項目に移動する場合，プルダウンメニューの項目に移動する場合，等を，物理的には同一でも，認知的には異なった操作として区別している．

汎用的な認知操作では，操作は任意のディスプレイ対象に対するものとして表現されている．この表現と，先のプロセスで選ばれた操作対象候補を組み合わせることにより，汎用的な認知操作を実行可能な，特殊化された認知操作の形式とすることができ，実際に物理的に実行される操作は，この特殊化された認知操作に基づいている．

認知操作の選択のプロセスでは，特殊化された認知操作の中から，そのときの文脈に照らしてもっとも適当であり，また，実行可能な操作を選択することになる．なお，認知操作の表現には，それを実行するときに満たされていなければならない条件が含まれているが，精緻化されたディスプレイ表現によって規定される現在の文脈がそれを満たせば，その認知操作は実行可能となる．

操作対象の選択と認知操作の選択において，その時の文脈において最も適当なものを選ぶ，と述べた

が、具体的には、ネットワークモデルで用いられる活性伝播機構を用いている。精緻化されたディスプレイ表現を、各命題をノードとするネットワークにより表現し、ノード間のリンクをいくつかのパラメータで決定する。そしてディスプレイ表現の命題と、ゴールを表現する命題を、活性伝播の源として、長期記憶から検索された命題を表すノードや、認知操作を表すノードを活性化する。ネットワークの活性パターンが平衡状態に達したら、操作対象を表すノード、また、認知操作を表すノードのなかで活性レベルの高いものをそれぞれ選択する。

3.3.3 認知操作の実行

前段によって選択された特殊化された認知操作は、対応する物理操作にマップされ、実際に実行される。

図中、太い線で結ばれたものは、操作対象 **Edit** と、物理操作 **マウスカーソルを移動する** に対応する汎用的な認知操作が結合して形成される特殊化された認知操作 **...のディスプレイの状態の時に、マウスカーソルを Edit に移動する** の関係を示したものである。

本モデルでは、長期記憶に蓄えられている操作知識として汎用なものを仮定している。実際に実行可能な形式は、ディスプレイが与えられて始めて形成される文脈を考慮して選択される操作対象との組み合わせプロセスを経て構成される、特殊化された操作知識である。この操作知識は一時的に保持され、利用される。このことは、ユーザは、特殊化された恒久的な知識を持つ必要がないことを意味しており、記憶の負荷がどのようにして軽減されるかについての説明を与えている。

4. エラー

4.1 エキスパートの犯すエラーのモデル

本モデルの特徴は、エキスパートのパフォーマンスを 非常に低いレベルの操作を生成するアクション・サイクルの繰り返し によって特徴付けている点である。標準的なエキスパートのモデル

(Anderson, 1987; Bovair, Kieras & Polson, 1990; Newell, 1990) では、これとは対照的に、エキスパートの行動を 一連の操作系列に関する詳細な正しい知識の選択 によって特徴付けている。

この基本的な考え方の違いにより、エラーに対する説明も大きく異なってくる。例えば、ACT* (Anderson, 1983, 1987) やSOAR (Newell, 1990) のような理論によれば、学習の初期の段階では行動は本質的に問題解決行動であり、学習の積み重ねにより正しい行動系列がプロダクション・ルールの形式で長期記憶に蓄積されるとしている。エキスパートは、初心者が習熟した状態として位置づけられ、そのパフォーマンスの特徴は、長期記憶に完備された正しい規則と、それが確実に検索されるということある。従って、エキスパートのエラーの説明は、正しい規則が偶然に適用されないようにする仕組みを認知機構に仮定し、また、そのときに適用される誤った規則をエキスパートの知識に組み込む ことによってなされる (Brown & VanLehn, 1980)。

一方、本モデルによれば、エキスパート・ユーザが定型的なタスクにおいて非常に多くのエラーを犯すことの非常によい説明を、全く別の観点から与えることができる。まず、エキスパート・ユーザであるから、タスク・ゴール、デバイス・ゴール、汎用的な認知操作、長期記憶に蓄えられた知識、全てが、正しいと仮定できる。本モデルでは、知識が全て正しくても、精緻化のプロセスで得られるディスプレイ表現が、不完全、不正確な場合に、エラーが発生することが予測される。

ユーザがおかれている状況により、精緻化の程度は深くもなり、浅くもなる。例えば、タイムプレッシャーが非常に厳しいとき、また、注意レベルが低いときには、そのレベルは浅くなることが予想される。精緻化プロセスは本質的に記憶検索プロセスであるから、その時間は検索のための記憶走査の回数に比例する。従って、深い精緻化には時間を要することになるが、また、そうすることにより、重要な情報が見逃されない確率も増加することになる。深い精緻化により、タスクに関連した情報が幅広く検

索され、正しい操作対象の選択、正しい操作の選択の確度が上がることになる。逆に、精緻化に時間をかけなければ、エラーの確率が增大することになる。精緻化の深さの程度は 速さと正確さをどのようにトレードオフするか という判断の結果であると考えられる。

精緻化プロセスに起因するエラーは、その深さばかりでなく、ディスプレイに表示されている情報にも依存する。操作を実行するのに欠くことのできない重要な知識のよい検索手掛かりを与えないようなディスプレイが与えられた場合には、たとえ、正しい知識を持っていたとしても、エラー発生の確率が增大する。

本モデルでは、エラーという言葉で、標準的なモデルが主張する 誤った操作知識としてのエラー とは異なり、不完全な文脈においては最も適当な操作として選ばれた操作が、完全な文脈に基づく操作とは異なっている現象をさしている。そして、正しい操作を産み出すのと全く同じ知識と認知プロセスが、ディスプレイの理解の深さに依存して、このようなエラーをも引き起こす。エラーを、ディスプレイの誤解に基づく“正しい操作選択” と考えている。

4.2 シミュレーション実験

図6は例で述べた Cricket Graph タスクを用いて、知識検索の回数を様々に変化させてシミュレーションを行なった実験の結果を示している。知識検索の回数として、4, 8, 12, 16, 20, 24 を与え、それぞれについて 10 回のシミュレーションを行ない、その結果を、知識検索回数の小さいグループ(4, 8, 12) と大きいグループ(16, 20, 24) の2つにわけて、平均正操作選択率を操作のステップを横軸にとって表したものである。

なお、この実験は、エラーの様相を考察することを目的として行なっているので、長期記憶に格納されている知識、タスク・ゴール、デバイス・ゴール、認知操作の表現は予め用意したものをを用いている。また、完全に自立的にシミュレーションが進むわけ

ではなく、重要な節目で正しいディスプレイの状態に戻され(ステップ1, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 12 の前)、これらのディスプレイに対する表現として、アイデンティティ、アピランスが適当に与えられている。また、操作対象の選択には活性伝播機構を用いず、予め用意した操作対象の組を与えることでそのプロセスをシミュレートしている。ディスプレイ表現の精緻化プロセス(知識検索過程)と、操作選択プロセスは、計算機プログラムにより自動化され、シミュレートされている。

図から、知識検索回数が少ないグループで、正操作選択率が顕著に小さくなる箇所がいくつかあることがわかる。以下に、シミュレーション結果から読み取れるいくつかの特徴を挙げる。

第2, 4ステップでは知識検索の回数によらず正しい操作が選ばれている。また、これは、選ばれているメニューの項目の正誤に依存していない。メニューの項目が選ばれている状態に対するディスプレイ表現が、それに続く正しい操作の選択のための十分な文脈を与えているためである。

第3ステップでは、プルダウンメニューの項目にマウスカーソルを移動する操作を選択することが、知識検索の回数が少ない場合には難しくなっていることがわかる。その理由は、本モデルにおけるプルダウンメニュー選択の認知操作を可能とするための条件を満たすために、長期記憶に格納されている比較的多くの知識が必要とされるためである。

第11ステップでは、グラフのタイトルにマウスカーソルを移動することが難しい操作になっていることがわかる。それは、このディスプレイでは、正しい対象であるグラフのタイトルのほかに、メニューの項目である Edit もタスク・ゴールに関連しているために、そこへマウスカーソルを移動する操作も高い活性レベルを獲得するためである。

第12ステップでは、正しい画面が与えられているにも関わらず、ダブルクリックを選択することが難しくなっている。これは、ダブルクリック操作の条件、

グラフタイトルが編集用のダイアログボックスにリンクしている

の検索が難しいことが原因である。実際、この命題は、グラフ・タイトルを表現する命題により検索されなければならないが、その確率が、グラフ・タイトルがゴールと強い関連を持つことにより、小さくなってしまっていることが、シミュレーション実験の結果を分析することによってわかっている。

5. おわりに

本論文で述べたディスプレイ・ベースの HCI の認知プロセスモデルは、Norman のアクションサイクルモデルを基にして、ゴール、ディスプレイに表示される情報、長期記憶に蓄えられている知識、それらを用いて次に操作を行なうべき対象の選択と操作自身の選択がなされるプロセスをモデル化したものである。モデルはいくつかのパラメタによってその特性（操作選択の速度、エラー率、等）をコントロールでき、適当なパラメタの値を用いることによりエキスパートのパフォーマンスをシミュレートできることが確認されている（Kitajima and Polson, 1992）。また、本論文で述べたように、誤操作が行なわれる理由を、ディスプレイの状態や、正しい操作が実行されるための条件の点から考察できる。

本モデルを用いることにより、ゴール、ディスプレイ、長期記憶に蓄えられている知識が与えられ、仮想的なユーザの操作選択への構えが与えられたとき、エラー、実行速度、認知負荷など、さまざまなパフォーマンスの予測を行なうことが可能となる。また、逆に、エラーを減少させるようなディスプレイの設計を試すことが可能となる。操作説明書についても、その記載内容が長期記憶に蓄えられる要素となることを考えると、設計方法について、さまざまな代替案を試し、評価することが可能である。モデルに基づくパフォーマンスの解析により、ここに挙げたような点について実際的な示唆を得ることが期待される。これについては、可能性を確認すべく研究を進めているところである。

文献

- ANDERSON, J. R. (1983). *The Architecture of Cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- ANDERSON, J. R. (1987). Skill acquisition: Compilation of weak-method solutions. *Psychological Review*, **94**, 192-211.
- BOVAIR, A. S., KIERAS, D. E. & POLSON, P. G. (1990). The acquisition and performance of text-editing skill: a cognitive complexity analysis. *Human Computer Interaction*, **5**, 1, 1-48.
- BROWN, J. S. & VANLEHN, K. (1980). Repair theory: A generative theory of bugs in procedural skills. *Cognitive Science*, **4**, 379-426.
- CARD, S. K., MORAN, T. P. & NEWELL, A. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- HUTCHINS, E. L., HOLLAN, J. D., & NORMAN, D. A. (1986). Direct manipulation interfaces. In Norman, D. A. & Draper, S. W., Eds. *User Centered System Design*. 87-124. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- KINTSCH, W. (1988). The role of knowledge in discourse comprehension: A construction-integration model. *Psychological Review*, **95**, 163-182.
- KITAJIMA, M. & POLSON, P. G. (1992). A computational model of skilled use of graphical user interfaces. In *Proceedings of the CHI'92 conference on human factors in computing systems*. 241-249. New York: ACM.
- LARKIN, J. H. (1989). Display-based problem solving. In Klahr, D. & Kotovsky, K., Eds. *Complex Information Processing: The Impact of Herbert A. Simon*. 319-342. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Assoc.
- MANDELKERN, D. *et al.* (1993). Graphical User Interfaces: The Next Generation. *Communication of ACM*. **36**, 36 - 109.
- NEWELL, A. (1990). *Unified theory of cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- NORMAN, D. A. (1988). *The Psychology of Everyday Things*. New York: Basic Books.
- PAYNE, S. J., SQUIBB, H. R., & HOWES, A. (1990). The nature of device models: The yoked state hypothesis and some experiments with text editors. *Human-Computer Interaction*, **5**, 4, 415-444.
- RAAIJMAKER, J. G. & SHIFFRIN, R. M. (1981). Search of associative memory. *Psychological Review*, **88**, 93-134.

Jun 29, 1993

WINOGRAD, T. & FLORES, T. (1988). *Understanding Computers and Cognition: A New Foundation for Design*. MA: Addison-Wesley.

連絡先

北島宗雄

305 茨城県つくば市東 1 ~ 1

生命工学工業技術研究所

人間情報部心理情報研究室

phone: 0298(54)6731

e-mail: kitajima@nibh.go.jp

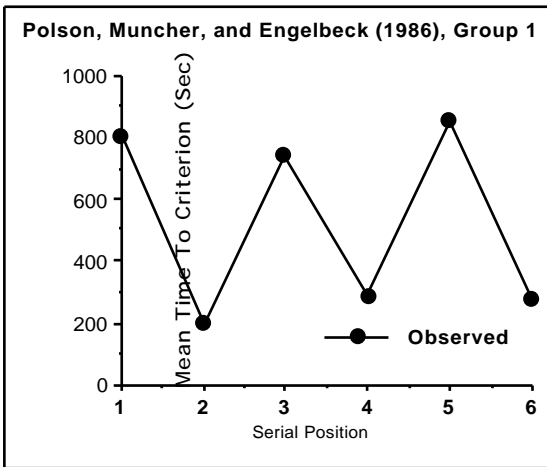


図 1 Cricket Graph タスク . ユーザのタスクはこのグラフを再現することである .

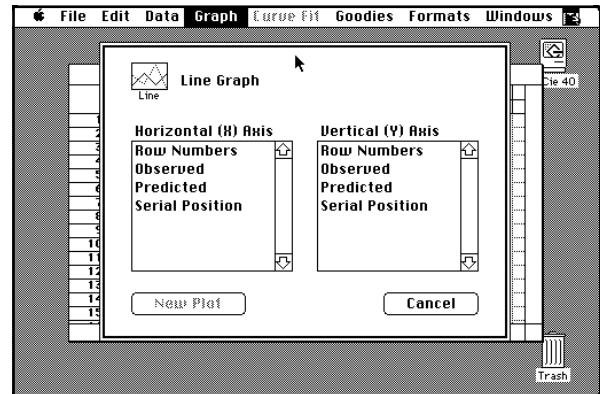


図 2 (c) 変数選択のためのダイアログ・ボックスが表示されているようです .

	1	2	3	4	5
Observed	802.574	816.951	1.000		
Predicted	200.823	205.089	2.000		
Serial Position	788.800	889.700	3.000		
Column 4	289.514	214.542	4.000		
Column 5	848.743	634.852	5.000		
	271.714	360.569	6.000		

図 2 (a) "Example Data" をダブル・クリックしてデータの収まっているファイルが開かれたようです .

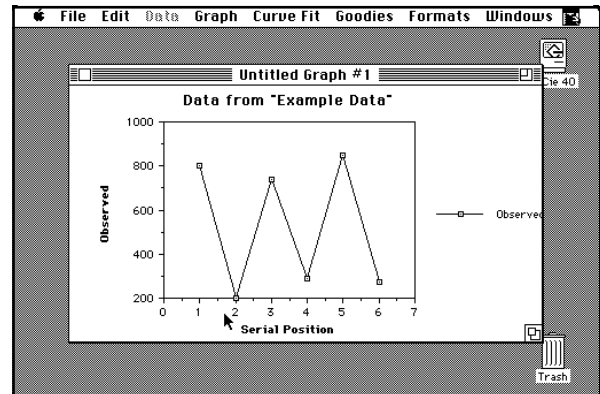


図 2 (d) 標準の折れ線グラフが表示されているようです .

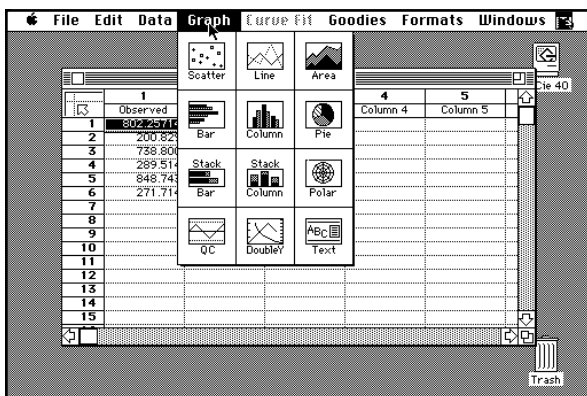


図 2 (b) Graph メニューがプルダウンされたようです .

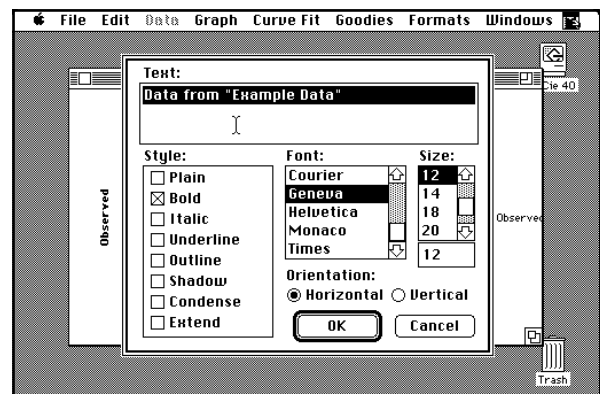


図 2 (e) グラフのタイトルを編集するためのウィンドウが表示されているようです .

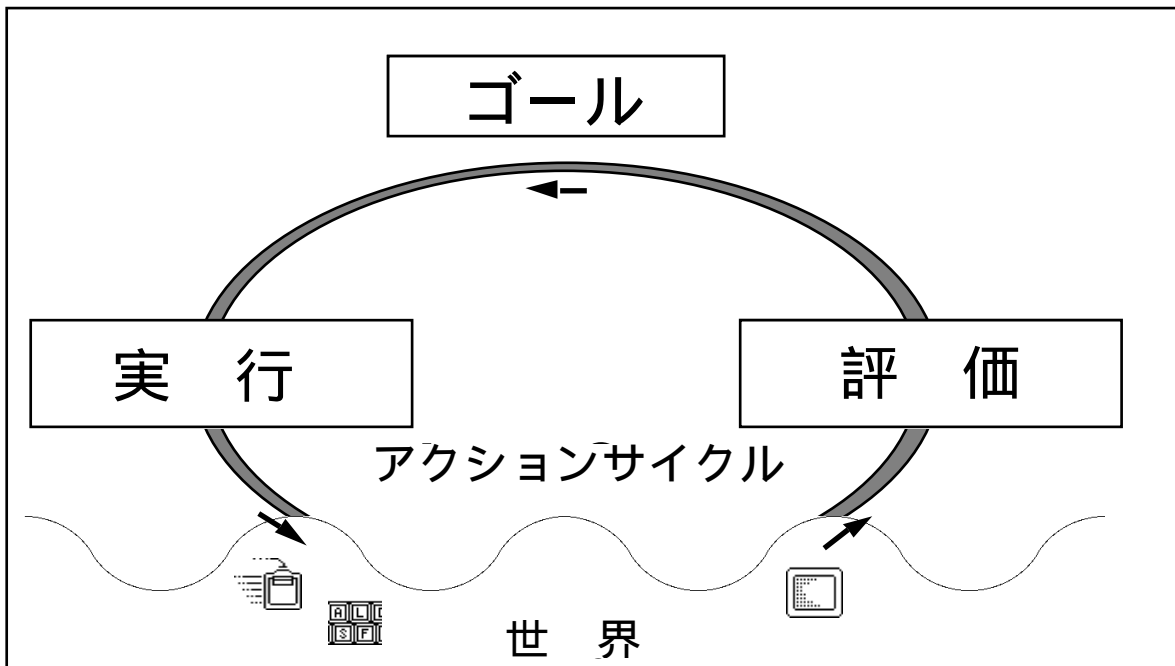


図3 Norman のアクション・サイクル・モデル . ユーザのゴールと装置 (世界) の間は 実行 と 評価 によって橋渡しされている .

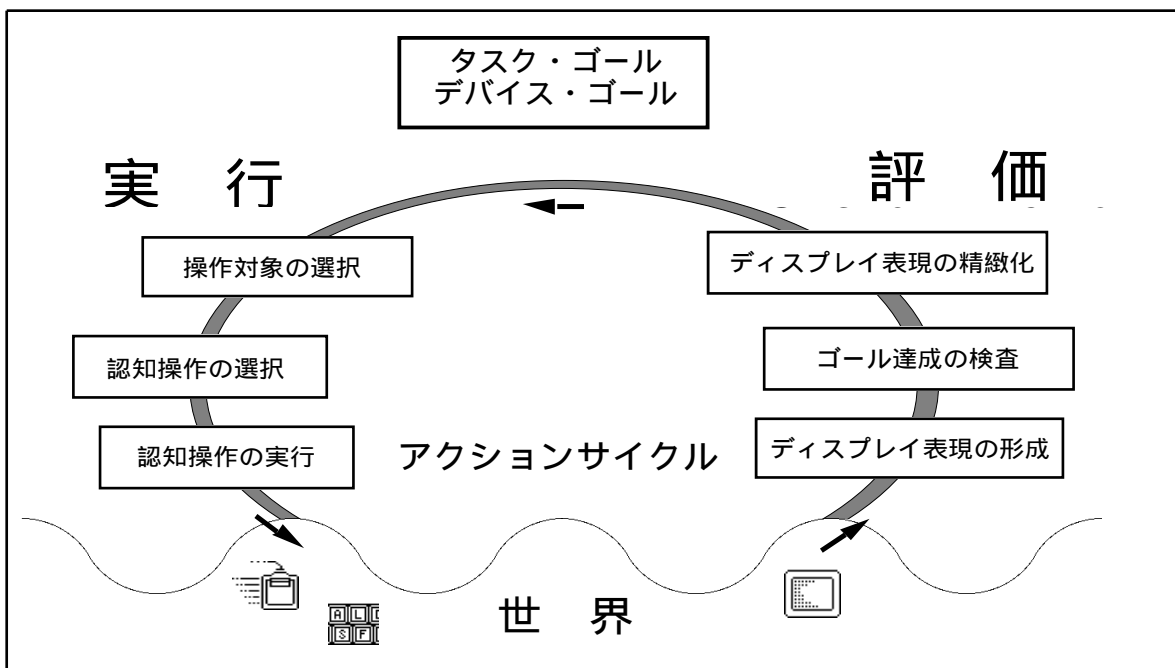


図4 ディスプレイ・ベースのHCIの認知プロセスモデル . 図3 に示した Norman のアクション・サイクル・モデルを基にして , 6つの過程でディスプレイ・ベースの HCI の認知プロセスをモデル化している .

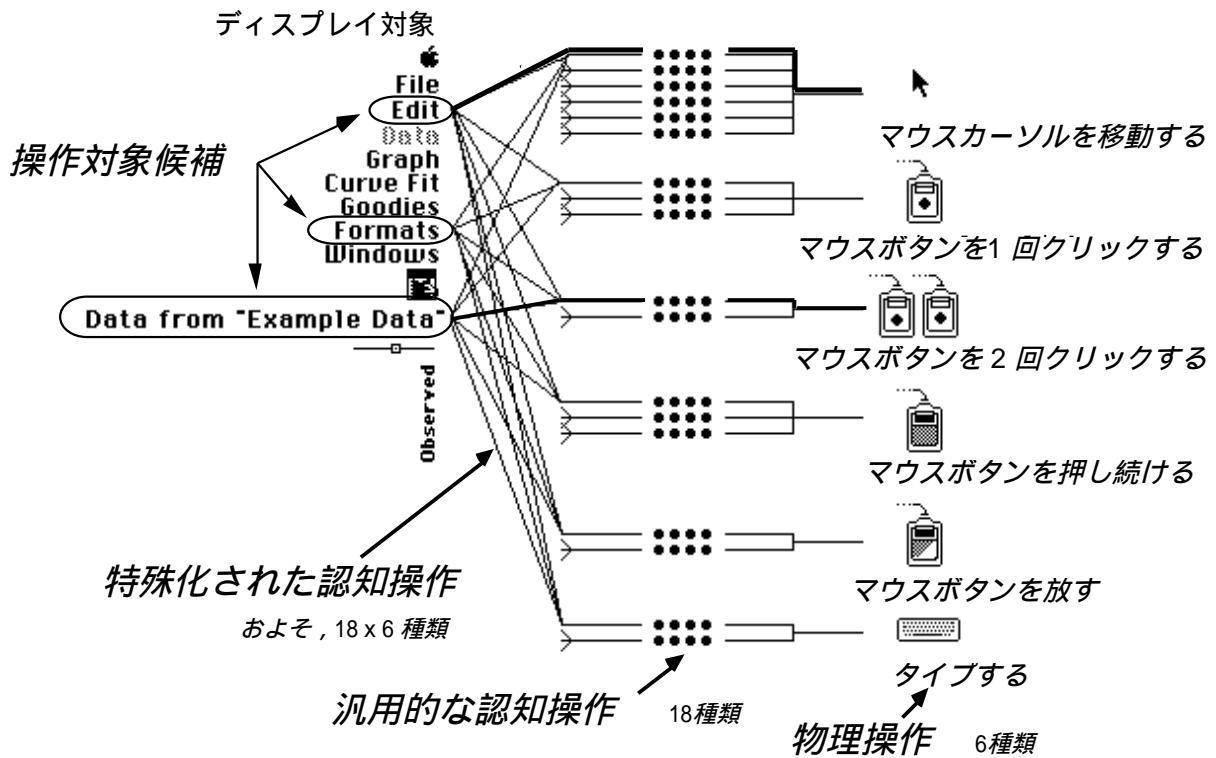


図5 実行のサイクル．左から右に操作選択がなされる．まず、操作を行なう対象がディスプレイされている対象のなかから選ばれ(左)、次に、それらの候補と、操作に対して与えられている汎用的な表現(汎用的な認知操作)とが結び付けられ、特殊化された認知操作が構成される(中)．個々の特殊化された認知操作のなかで最もその時の文脈において適切であり、しかも実行可能なものが選択され、実行される(右)．

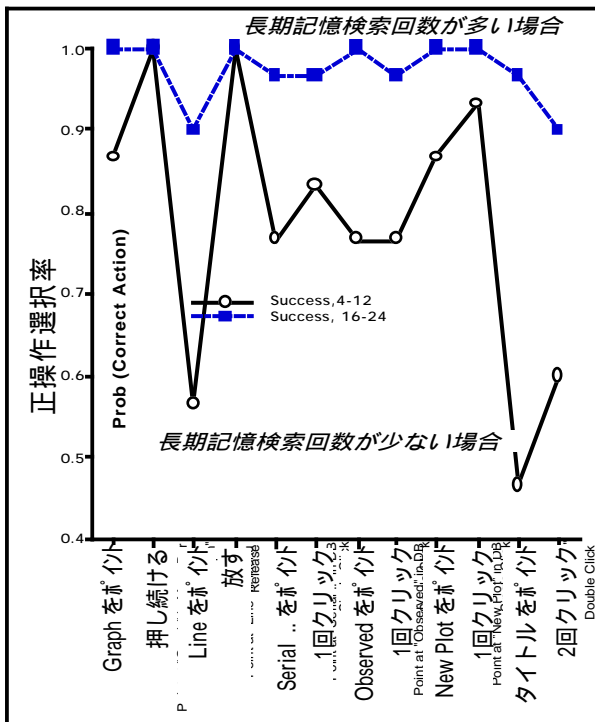


図6 Cricket Graph タスクのシミュレーション結果．長期記憶を検索する回数が少ないグループ(4, 8, 12)と、大きいグループ(16, 20, 24)にわけてプロットしてある．横軸は、ステップ、縦軸は、各記憶検索回数について10回シミュレーションを行なったときに正しい操作が選択される確率(正操作選択確率)を、それぞれのグループで平均した値である．