

コンストラクションセットを持つマイクロワールド

野 口 孝 文[†] 田 中 譲^{††}

本稿では、北海道大学で開発中の IntelligentPad を用いて開発した創造的思考育成型学習支援システムについて述べる。IntelligentPad における各パッドは、機能を持ったオブジェクトであるが、それ自身紙と同様に貼り合わせができる。利用者はパッドを貼り合わせるることにより、レイアウトデザインが自在にでき、そして、より複雑な機能を持ったオブジェクトを自在に構築することができる。IntelligentPad を用いた本学習支援システムは、操作性に優れ自由度の高いマイクロワールドを学習者に提供するとともに、学習者が自身の思考を確かめるために用いる部品や道具をコンストラクションセットとして、内部に持っている。これらの部品や道具は、すべてパッドとして定義されている。学習者は、与えられた部品や道具を、分解したり、複写したり、貼り合わせたりすることにより、新しい機能を持った道具を自在に創造することができる。

A Microworld with Its Construction Set

TAKAFUMI NOGUCHI[†] and YUZURU TANAKA^{††}

This paper extends the capabilities of microworlds by providing them not only with tools and objects that their users can easily combine, but also with the construction kits to define arbitrary tools and objects. This extension enables their users to customize or decompose the given tools and objects, or further to invent new tools and objects. Besides, a user can easily expand his microworld by importing new tools and objects from any other different microworlds. The IntelligentPad system that was developed at Hokkaido University has enabled this extension. Each component of the construction kit is generically represented as a pad, i.e., an active object with a rectangular shape. Arbitrarily shape objects such as pulleys and springs are animated on their transparent pad representations. When pasted together, they communicate with each other to readjust the location, the orientation, and the shape of each animated object so that they look as if they are mechanically connected.

1. はじめに

CAI システムにおいて効果的な学習支援を実現するには、次第に膨らんでいく学習者の思考と創造の自由を妨げない環境を提供することが必要である。さらに、その環境のもとで学習者が、持っている知識や与えられる知識を、再利用可能な知識に変換できなければならない。

Papert のマイクロワールド¹⁾は、幾何学の学習を学習者が試行錯誤の中から発見的に行うことを支援している。学習者は自身の考えを Logo のプログラムで表現し、ペンを持つタートルと呼ばれるオブジェクトを移動させて図形を描くことができる。学習者は、この図形の観察とプログラムの変更を繰り返すことで、自

身の考えを修正したり具体化する。このマイクロワールドではプログラムの記述によってオブジェクトの操作が行われるため、学習者が行える操作の自由度は高いが、タートルを初期の位置に戻したり、現在位置を表示させることもプログラムで行わなければならない。しかし、オブジェクトを直接操作する直観的に分かりやすい命令が用意されているため、プログラムは短く簡潔に記述でき、現在でも、さまざまな学習領域に応用されている^{2)~5)}。

近年、コンピュータおよび周辺装置の性能向上とともに、マイクロワールド上のオブジェクトの精緻さや操作性も向上してきた。蒸気プラントの操作をする技術者教育に作られた Steamer⁶⁾ に比べ、O'Shea, Hennessy らの力学の学習システム^{7), 8)} は、より自由ディスプレイ上のオブジェクトを操作することができる。しかし、ThingLab II⁹⁾ のように、部品を組み合わせるにより、新しい部品や実験装置を作り出すことはできない。また、ThingLab II も作成した装置から一部のデータを取り出して、自在に変換して可視

[†] 釧路工業高等専門学校電気工学科
Electrical Engineering Department, Kushiro
Technical College

^{††} 北海道大学工学部電気工学科
Electrical Engineering Department, Faculty of
Engineering, Hokkaido University

化したり、別の装置に転送し処理するといった自在性は考慮されていない。

著者らは、学習者が自由に操作できる部品や道具をマイクロワールドのコンストラクションセットとして提供しているさまざまな操作型学習環境 (Interactive Learning Environment, ILE) システムを研究開発してきた^{10)~12)}。それらには、従来のシステムにない次のような特徴がある。

- ①コンストラクションセットとして提供される部品を組み合わせ、新しい部品を作ることができ、またそれを部品としてコンストラクションセットに加えることができる。
- ②部品の組み合わせを限定したり、その数を制限していない。
- ③個別に作成した ILE システムを共存させ、相互に部品やデータを自在に流用することができる。

本論文で示す各 ILE システムは、北海道大学で開発されている IntelligentPad^{13)~15)}を用いて開発された。IntelligentPad は、紙の貼り合わせメタファを用いている。操作者は、パッドと呼ばれる機能部品を貼り合わせて、より複雑な機能部品を合成することができる。各 ILE システムで提供する部品もすべてパッドでできており、貼付等の基本操作および貼り合わされたパッド間のインターフェースはパッドの標準仕様に基づいて設計されている。したがって、IntelligentPad 上に構築された、あるいは今後構築されるであろう種々のシステムと相互に部品を流用して活用することができる。

本論文では、対象領域を中学から高校で学ぶ力学、初等関数および幾何学の各々に限定した ILE システムについて述べる。2章では、パッドの貼り合わせにおけるパッド間のメッセージ交換に関して、IntelligentPad が採用した標準プロトコルについて述べる。3章では、部品間のメッセージ交換のパラメータ値のデータ構造を、ILE システム用に標準化することにより、各種の ILE 部品をパッドとしてジェネリックに定義できることをまず解説し、透明なパッド上で各種部品をアニメーション表示する方法をとることにより、任意形状を持った可動部品の組合せと連携動作をパッドの貼り合わせで定義できることを示す。4章では、著者らが開発したいくつかの力学実験と初等関数、幾何学の学習に用意した部品とその組み合わせの例を示す。これらの異なった ILE システムは共存でき、相互に部品やデータを利用できることを示す。

2. IntelligentPad システム

IntelligentPad システムは、知的活動のための開放型包括的統合環境を実現するシンセティック・メディア・システムとして開発されている。このシステムでは、すべてのものをパッド、つまり一枚の紙として表現している。そして、一枚一枚のパッドに状態を持たせ、一つのパッドの上に複数枚のパッドを貼付することにより、複雑な機能を実現することを可能にしている。

2.1 パッド間の結合

各基本パッドは、Smalltalk-80 の MVC (Model View Controller) 構造を単純化した構造を持っている。パッドはモデル、ビュー、コントローラの三つのオブジェクトを一つにまとめ定義されている。モデルは、パッドの内部状態を定義し、この状態に変化があったときには、ビューにメッセージを送る。ビューはパッドの画面上での形態が定義され、パッドの表示領域内にモデルの持つ状態を表示する。表示領域の大きさや色、表示位置等の属性情報は、このビューが持っている。コントローラはパッドに対するユーザの操作を処理し、操作の種類ごとにビューに対しメッセージを送る。これらの様子を図1に示す。パッド P_2 をパッド P_1 上に貼付すると、図2のようなメッセージ交換リンクが P_2 と P_1 の間に張られる。 P_1 を P_2 の親パッド、 P_2 を P_1 の子パッドと呼ぶ。パッ

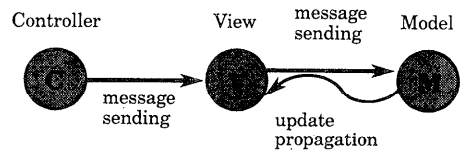


図1 パッドの内部構造
Fig. 1 The internal structure of a pad.

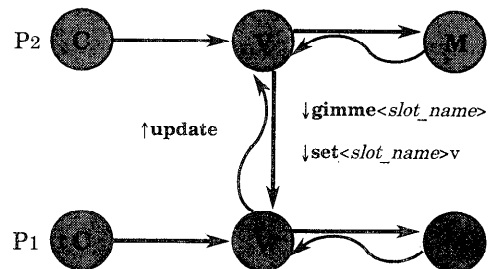


図2 パッド間の標準インターフェース
Fig. 2 Standard message interface between pads.

ド間でのデータ通信は三種類のメッセージ set, update, gimme によって行われる。また、パッドに対して行われた貼付や複写、移動などの操作に関するイベント情報は親パッドへと順に送られる。

親パッドに対しデータを送るときには、set メッセージを用いる。送出値は一つの可観測なスロットを通して渡される。スロットは、各パッドに複数個持たせることができるが、一つの子パッドが結合され得る親パッドのスロットはただ一つに限定している。親パッドに対する set メッセージにはスロット名がパラメータとして指定される。また、親パッドに状態変化があったときには、すべての子パッドに update メッセージが送られる。このメッセージはパラメータを持たない。update メッセージを受け取った子パッドは必要ならば親パッドに対し、gimme メッセージを送る。gimme メッセージには、このパッドの貼付時に結合された親パッドのスロット名がパラメータとして指定され、このメッセージを受け取った親パッドは指定されたスロットの値を返り値として子パッドに返す。set, update, gimme メッセージは、それぞれのパッドごとに禁止することができる。

パッド間のデータ通信には以上のような制限があるが、これがあることにより、任意のパッドを貼付して親パッドのスロットからデータを取り出したり値を与えるといった、貼付に関する自由度が高くなっている。また、自身の親パッドと直上の子パッドからの限られたメッセージとパラメータ値だけを考慮するプログラム作法は、パッド内部のプログラム記述を容易にするばかりでなく、パッドの操作と内部記述を独立して考えることを可能にした。パッドを利用するユーザは、内部の構造をまったく知る必要がない。

3. IntelligentPad による ILE システムの実現

我々が学習する事柄の多くは、実世界に関する知識である。マイクロワールドでは実世界に存在する道具や事物と同様の働きをするものが提供させることが望まれる。たとえば、実世界にあるばねが何本でも自由に繋げることができるように、マイクロワールドにおいてもこれができることが望ましい。IntelligentPad は、機能部品を貼り合わせるることにより、新しい合成機能部品を作り出すことができるシステムである。しかし、同じパッドを何枚も貼り合わせ、新しい機能や特性を持つ合成パッドを実現するには、パッド間の

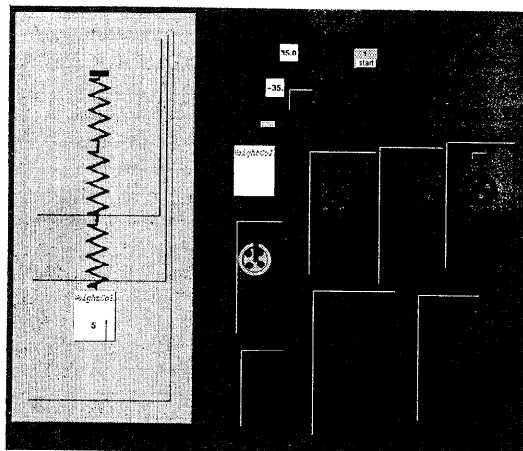


図 3 力学実験に用いる部品パッド

Fig. 3 A mechanical experiment and its component pads.

データの送り方や形式を合成パッドの貼り合わせ構造に依存しないように統一する必要がある。ここでは、基礎的な力学実験 ILE システムに使用する部品の機能と合成方法について述べる。

3.1 力学部品パッドの貼り合わせによる機能合成

図 3 は、本 ILE システムのために作成した力学実験部品の一部である。それぞれの部品はパッドで、パッドに対する基本操作として、貼付や複写、移動、消去等が適用できる。そして、同じ部品パッドを複数枚重ねて貼り合わせることや、それらを新しい一つの部品パッドとして扱うことができる。

図 3 の左は、ばねの上端を固定し、下端に錘を載せた錘皿を接続した構造をしている。このばねは、三枚のばねパッドを貼り合わせるにより作っている。任意本のばねの合成を同一パッドを用いて、作ることができる。さらに、ばねと滑車や、滑車と滑車を組み合わせたより複雑な実験装置を組み立てることができる。

このような複合部品を作るには、貼り合わせた部品の機能の合成のほか、部品の絵の合成もできなければならない。貼り合わせで部品を接続させるため、同一の部品接続構造に対して複数の貼り合わせ方法があり、これに対処しなければならない。図 4 の (1) は合成されたばねであるが、三つのばねパッドを図 4 の (2) と (3) の二通りの貼り合わせで構成できる。図 4 の (4) のように貼り合わされたばねを、一つのばねとして扱うようにしているため、三つのばねパッドを共通の親パッドの上に並べ構成することは許していな

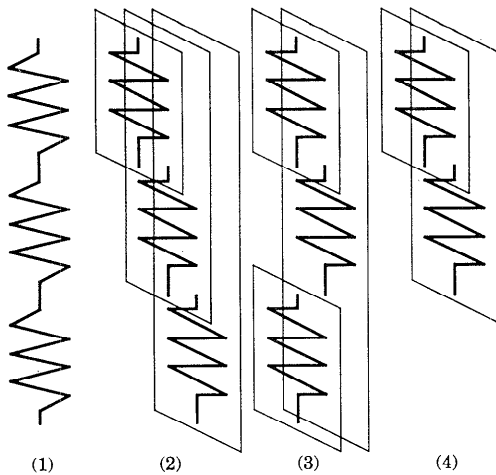


図4 パッドの貼り合わせ方と機能合成

Fig. 4 Two different composition structures for the same composed series of spring.

い。ばねの合成は、ばね定数やばね長を加算することで実現している。したがって、力学パッドでは制約プログラミングの手法を用いていない。貼り合わされたばねパッドは、合成に必要なデータを互いにスロットを介して交換している。また、3.2節で述べるスロット値に連想リストを用い、その変数名をキーとして必要なデータの授受やメッセージの制御を行うようにしている。そして、パッドの貼付等のイベントに始まるメッセージの送信制御により任意数のばねを貼り合わせることができるように標準化した。

留め金は、一端が固定されたばね定数が0のばねと同じであるから、スロットデータもばねと同じようにすることができる。さらに、ばねや留め金で二つの端点を固定した滑車も、部品の取りつかない端点に力を加えればばねと同様の振る舞いをする。留め金やばねおよびそれらを組み合わせた滑車のいずれもスロットデータを同じにでき、これらの部品パッドは、ばねと同様に任意の数貼り合わせることができる。一方、スロットデータの異なる部品パッドを力学部品パッドの上に貼付しても力学部品パッドは動作しないが、その動作を妨げもしない。

ばねパッドには、ボーダーの表示、無表示を選択する機能がある。図4の(2)や(3)のようにボーダーを表示することによって、学習者は全体の構造を見ながらパッドを貼付することができる。また、パッドを貼付する順序は、できあがった構造に依存しない。ボーダーの表示を禁止して、図4の(1)のように見せるこ

ともできる。

図4に示すような貼り合わせで機能合成ならびに絵の合成を行うために、各部品パッドは、他の部品を接続させることができる連結点を複数個持っている。ばねパッドは、部品の二つの端点を連結点にしている。そして、次のような方法で機能合成を実現している。

IntelligentPad システムでは、各々の子パッドに対する親パッドは一つしかない。これを利用して、親パッド(部品)の各連結点のそれぞれに子パッド(部品)をただ一つ取り付けられるようにした。子パッド(部品)の一つに注目すると、その部品の連結点の一つは親パッド部品との接続に用いられ、他の連結点は、この子パッド上に貼付される部品との接続用に用いられる。この子パッド(部品)は、次の三つの情報を下の親パッドに送る。親パッドとの接続に用いられた連結点の位置、その連結点に加えられる力によってその連結点が移動するときの変位係数、その子パッド(部品)の上にある部品によってその連結点に加えられる力の大きさである。

親パッドは、子パッドから送られてきたこれらの情報をもとに、自身と直上の子パッドの状態を決定することができる。親パッドは、自身の直上にある合成パッドを一つの部品パッドとして扱うことができ、自身も含めて一つの部品パッドに機能合成される。親パッドと子パッドの連結点を一つにすることで、部品間のインターフェースを統一することができ、ばねや滑車やそれらを組み合わせたさまざまな合成部品を自由に混在させることができるようになった。さらに、できあがった構造のうち、一番下の部品の一つの連結点に取り付けられた部品を取り外すと、残った構造は一つの連結点が開放された部品として扱うことができる。この連結点にマウスカーソルを置き、他の部品の連結点に合わせるように移動し貼付することで、動作を確認しながら順に複雑な構造を組み立てることができる。しかし、ここで用意した力学パッドでは親子のパッド間において、2点以上の連結点で接続することを許していないため、図5に示すような二つの部品を並列に接続する構造は作ることができない。上に述べた操作性を変えずに図5の(1)から(4)を実現するには、並列接続をするパッドを用意し、子パッドの持つ定数値を予め受け取り、合成した部品として動作させることで実現できる。また、図5の(5)は、一つのパッドとして定義することによって対処できると考えている。

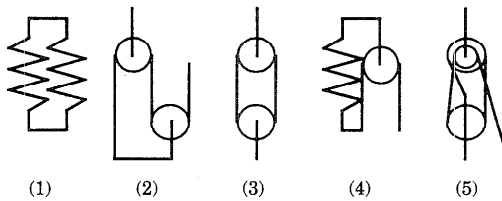


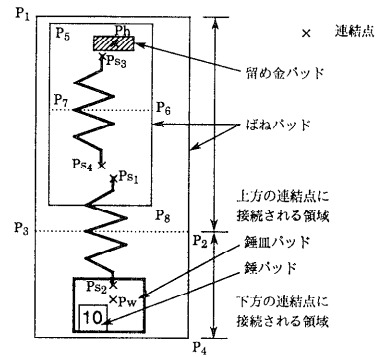
図 5 力学部品の並列接続

Fig. 5 Parallel connections of mechanical parts.

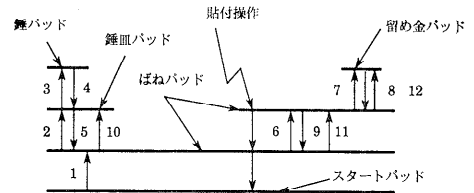
図 4 の (4) のように貼り合わせたばねパッドは, set, update, gimme のメッセージを用いスロットを介してデータを交換する. これらのメッセージはいずれもビューの処理手続から送られる. 親のばねパッドのビューは, 状態更新処理手続の中で子パッドに対し update メッセージを送る. 子のばねパッドのビューは, gimme メッセージを送り親パッドのスロット値を取り込む. ビューは, スロット値が親パッドからのデータ要求を表していることを判断し, 自身のデータ (ばね定数や連結点の座標値等) を引数値としてスロット書き込みメッセージをモデルに送る. モデルは, 引数値をスロットに書き込み, 状態更新処理メッセージをビューに送る. ビューは親のばねパッドに対し set メッセージを送る. 親のばねパッドのビューは, 子のばねパッドから受け取ったデータと自身のデータを加算によって合成し, 合成したデータを引数値としてスロット書き込みメッセージをモデルに送る. モデルは, 引数値をスロットに保存し, 状態更新処理メッセージをビューに送る. ビューは, 自身を描き直し, update メッセージを子パッドに送る. 子のばねパッドのビューは, gimme メッセージを送り, 親のばねパッドのスロット値を取り込み, そのデータに合わせて自身を描き直す. ばねパッドのビューは, 子のばねパッドのデータを収集し, 機能合成する機能や親のばねパッドにデータを送信する機能, およびばねの形状を表示する機能を持っている. モデルは, スロット値をスロットに書き込む機能やビューに状態更新処理のメッセージを送る機能を持っている. 二つの貼り合わされたばねパッドが動作するきっかけは, 親のばねパッドのビューに状態更新処理のメッセージを送ることによって開始されるが, この方法と具体的なスロット値については 3.2 節で述べる.

3.2 機能合成におけるスロットデータの役割

図 4 の (4) の貼り合わせに, 留め金および錘皿と錘のパッドを貼付した状態を図 6 の (a) に示す. 図 6 の (a) は, ちょうど上方のばねパッドを貼付したところ



(a) 図4-(4)に対応した貼り合わせ



(b) (a)の貼り合わせ断面図

図 6 パッドの機能合成とデータの流れ
Fig. 6 Message flows among component pads.

で, まだ各部品がばらばらの状態を示している. 図 6 の (b) に図 6 の (a) の貼り合わせ断面図を示す. 図 6 の (b) のスタートパッドは子パッドの貼付や移動等の操作によるイベント情報によって動作を開始するパッドである. ばねパッドは, このスタートパッドからのメッセージによって動作するようになっている. 図 6 の (b) に示すように, スタートパッド上でパッドの貼付や移動が行われると, そのイベント情報がスタートパッドに送られ, そこから上方に向けて変更があったという事実が update メッセージによって順々に伝えられる. スタートパッドから, その上の部品パッドへメッセージ送出を開始することにより, 部品パッドの貼付された順番や位置に関係なく, データの種類やメッセージの送出回数を (ばねパッドでは update が 2 回, set が 1 回に) 統一することができる. また, 学習者が貼付操作に専念できるように, 力学部品パッドでは, パッド間の結合に用いるスロット名を一つに予め限定している.

図 6 の (a) に示す各部品パッドは, それぞれが相互に繋がった形に表示できるように予め決められた連結点をいくつか持っている. 留め金と錘皿パッドは中央

に一つ、ばねパッドはばねの両端に連結点を持っている。ばねパッドは二つの連結点を持っているため、表示しているばねの中央より上と下の二つの領域にパッドの表示領域を分け、それぞれの領域に連結点が一つつづ含まれるようにしている。ばねパッドが連結点に関する情報を直上のパッドに送る時は、連結点とこの領域の情報の対を2対まとめて送っている。そして、直上に貼付された部品がこの二つの連結点のうち、それ自身の連結点を含む領域にある方の連結点を選択するようにしている。この領域をばねパッドにおける連結可能領域と呼ぶ。

図6の(b)で中の番号付き矢印は、上向きと下向きのそれぞれが update メッセージと set メッセージの送出を示している。これらのメッセージがパッド間で授受され、メッセージを受けたパッドがスロットから必要なデータを取り出し、さらに必要なスロットのデータを変更して直上または直下のパッドにメッセージを送る。IntelligentPad ではすでに2章で述べたとおり、パッドのビューの大きさや位置に関する属性操作¹⁶⁾を除いて、パッドに送るメッセージを set, gimme, update に限定している。そこで、パッド内部のいく種類の処理の一つを選択して動作の指示を行うために、本システムでは処理選択をメッセージの違いで指示する代わりに、標準メッセージのパラメータ値に連想リストを用いて指示することにした。この連想リストは set のパラメータ値やスロットの値として用いられ、set や gimme の授受により、この連想リストが直上や直下のパッドに送られる。後の章では、便宜上この連想リストを用いたデータの授受をスロットを介したメッセージの授受と呼ぶ。この連想リストは $((\langle\text{message}_1\rangle.\text{value}_1)(\langle\text{message}_2\rangle.\text{value}_2)\cdots(\langle\text{message}_n\rangle.\text{value}_n))$ という構造をしている。 $\langle\text{message}_i\rangle$ は変数名で value_i はその値を表している。

ここで図6の例について、スロットに設定される連想リストの構造について述べる。ただし、各ばねの変位係数を1、錘皿および錘の重さを10とする。

①1, 2, 3, 6, 7のメッセージは、直上のパッドに定義される部品の状態データを要求する update メッセージである。このメッセージは、スタートパッドから開始され、つぎつぎに直上のパッドへと伝えられていく。このとき、メッセージを送ったパッドのスロットには、 $((\langle\text{giveData}\rangle.\text{true}))$ という連想リストが設定されている。重力加速度等のようなシステム全体に配送したいデータはこのスロットデー

タの連想リストに、変数 $\langle\text{gravity}\rangle$ に重力加速度の値を代入したリストを付加し、 $((\langle\text{giveData}\rangle.\text{true})(\langle\text{gravity}\rangle.9.8))$ とすることで、すべてのパッドに送ることができる。

②3の update メッセージにより、スロットを介してデータ要求メッセージを受けた錘パッドは直ちに4の set メッセージを送る。この set メッセージのパラメータ値には、錘の重さ10の値を変数 $\langle\text{weight}\rangle$ に代入した連想リスト $((\langle\text{weight}\rangle.10))$ が設定される。

③4の set メッセージを受けた錘皿パッドは自身のスロットに設定された連想リストから、変数 $\langle\text{weight}\rangle$ の値10を取り出し、自身の重さ10に加算(合成)する。そして、5の set メッセージを送る。この set メッセージのパラメータ値には、錘皿が固定されていないことを変数 $\langle\text{free}\rangle$ で示し、錘皿の連結点の座標値 P_w を変数 $\langle\text{point}\rangle$ に代入し、直上の錘と自身の重さを合成した重さ20の値を変数 $\langle\text{weight}\rangle$ に代入した連想リスト $((\langle\text{free}\rangle.\text{true})(\langle\text{point}\rangle.P_w)(\langle\text{weight}\rangle.20))$ が設定される。

④7の update メッセージにより、スロットを介してデータ要求メッセージを受けた留め金パッドは直ちに8の set メッセージを送る。この set メッセージのパラメータ値には、留め金が固定されていることを変数 $\langle\text{fix}\rangle$ で示し、留め金の連結点の座標値 P_h を変数 $\langle\text{point}\rangle$ に代入し、変位係数0の値を変数 $\langle\text{constant}\rangle$ に代入した連想リスト $((\langle\text{fix}\rangle.\text{true})(\langle\text{point}\rangle.P_h)(\langle\text{constant}\rangle.0))$ が設定される。

⑤8の set メッセージを受けた上方のばねパッドは自身のスロットに設定された連想リストから、変数 $\langle\text{fix}\rangle$, $\langle\text{point}\rangle$, $\langle\text{constant}\rangle$ の値を取り出し、自身の状態に合成する。そして、9の set メッセージを送る。この set メッセージのパラメータ値には、ばねが固定されていることを変数 $\langle\text{fix}\rangle$ で示し、留め金の連結点に自身の上方の連結点を固定した時の下方の連結点の座標値 P_{s4} を変数 $\langle\text{point}\rangle$ に代入し、留め金の変位係数の値0と自身の変位係数の値1を加算(合成)した値1を変数 $\langle\text{constant}\rangle$ に代入した連想リスト $((\langle\text{fix}\rangle.\text{true})(\langle\text{point}\rangle.P_{s4})(\langle\text{constant}\rangle.1))$ が設定される。このときのパラメータ値は、④に示した留め金が与えるパラメータ値と同一形式である。

⑥5と9の set メッセージを受けた下方のばねパッドは、それぞれのメッセージを受けると同時に、

自身のスロットに設定された連想リストから、変数〈fix〉, 〈point〉, 〈constant〉値を取り出し保存する。そして、自身の連結可能領域に含まれる直上部品の連結点 P_w と P_{s4} を P_{s2} と P_{s1} に対応させ二つのばねをつぎのように連結する。 P_{s4} に P_{s1} を連結 (P_{s1} に P_{s4} の値を代入) する。 P_{s2} を P_{s1} が移動した分だけ移動する。 P_{s2} に P_w を連結させる。つぎに、鍾皿の重さによって変位させられる各連結点の変位量を計算する。自身の変位係数値 1 と、これと直上部品の変位係数を加算 (合成) した値 2 に、力 20 をそれぞれ掛ける。それらの値 20 と 40 をもとに、 P_{s1} の座標を下方へ 20, P_{s2} の座標を下方へ 40 移動させる。これで、自身と直上部品の状態を決定 (機能合成) することができた。この結果に基づき、自身の絵を描き直す。そして、ばね自身の二つの連結点の座標値と連結可能領域を対にして、配列変数〈point〉に代入、さらに各連結点にかかっている力を配列変数〈weight〉に代入した連想リスト ($\langle\langle\text{point}\rangle, [((P_1, P_2) P_{s1})_1 ((P_3, P_4) P_{s2})_2]\rangle$) ($\langle\langle\text{weight}\rangle, [(20)_1 (40)_2]\rangle$) を自身のスロットに設定する。ここで、[] は配列データを表し、() の添字はその要素を表している。そして、update メッセージ (10, 11) を直上のパッドに送る。

⑦10 の update メッセージを受け取った鍾皿パッドは、直下のパッドのスロットから gimme メッセージによって連結可能領域 (P_1, P_2) および (P_3, P_4) を取り出し、自己の部品の連結点 P_w が属している領域 (P_3, P_4) と対になった連結点の座標 P_{s2} に自己の部品の連結点を合わせるように移動する。

⑧11 の update メッセージを受け取った上方のばねパッドは、直下のパッドのスロットから連結可能領域 (P_1, P_2) および (P_3, P_4) を取り出す。しかし、自身の連結点 P_{s3} と P_{s4} がともに同じ連結可能領域 (P_1, P_2) に含まれるため、連結点 P_{s1} に近いほうの連結点 P_{s4} を選択する。連結点 P_{s1} に自己の部品の連結点 P_{s4} を連結する。そして、 P_h に P_{s3} を連結する。自身と直上のパッドの状態が決定できたので、絵を描き直す。⑥と同様に、ばね自身の二つの連結点の座標値と連結可能領域の対と各連結点にかかっている力を配列変数〈point〉と〈weight〉に代入した連想リスト ($\langle\langle\text{point}\rangle, [((P_5, P_6) P_{s3})_1 ((P_7, P_8) P_{s4})_2]\rangle$) ($\langle\langle\text{weight}\rangle, [(20)_1 (20)_2]\rangle$) を自身のスロットに設定する。そして、update メッセージ (12) を直上のパッドに送る。これを受け取る留め金

パッドは、固定されているため移動しない。また、直下の部品に接続されている連結点のデータを直上に送る必要はないが、これを付加することによって、連結点の情報を取り出す表示器パッドを用い任意の連結点にかかる力を表示することが可能になる。

図 4 の (1) の合成を実現する図 4 の (2) と (3) のいずれの貼り合わせの場合も、①から⑥に示したデータの構造と形式は変わらない。また、スロットに与えるデータの形式は滑車パッドにおいても同じである。

3.3 機能合成された部品パッドの表示

本システムでは、力学実験の中で使用される可動部品パッドを二通りの方法で実現している。一つは図 7 に示す鍾皿パッドのような場合で、パッドそのものが移動する。もう一つは、滑車やばねのような場合で、パッドは移動しないが、透明なパッドに描かれた絵が移動する。鍾皿の場合には、上方または下方にばねや滑車を取り付けることができる。また、直上には鍾が載る。貼り合わせの関係は、鍾皿パッドがばねパッドまたは滑車パッドの上に貼付され、この上に鍾パッドが貼付される。

ばねパッドや滑車パッドの場合には、それらの部品の連結点に他の部品がつながるように、パッドを貼付しなければならない。このとき、滑車パッドが滑車の大きさしかなければ、ばねや鍾皿の表示をすることができなくなる。そこで、貼り合わせと絵の合成を可能にするために、これらの部品パッドは透明にしてその上に部品の絵をアニメーション表示している。図 7 では左の滑車パッドが一番下のパッドで、その上に動滑車パッド、さらにその上にばねパッドと鍾皿パッドが

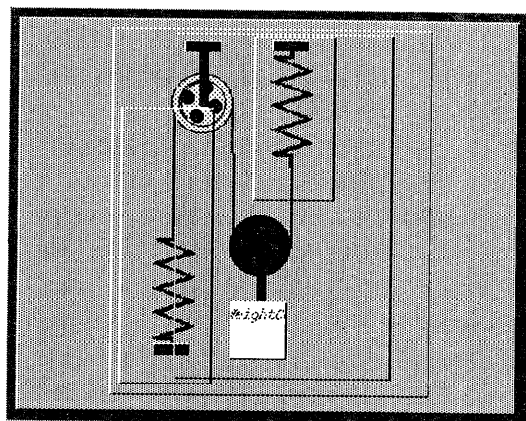


図 7 力学部品パッドを合成したときの表示例

Fig. 7 Display hardcopy of a composed pulley-and-spring pad.

貼付されている。パッドの大きさは、自由に設定することができる。操作者は、任意の部品パッドを、接続したい任意の部品パッドの上に貼付して、新しい合成部品を合成することができる。パッドに表示された部品同士の接続は、部品の表示位置を移動させることにより行う。表示位置の移動は、その部品パッドの表示域で、マウスボタンを押し、そのままマウスカーソルを移動させる（掴む）ことにより行う。パッドの上にパッドを貼るとき細かい位置合わせは不要である。マウスの操作により、直下のパッドの連結可能領域内に自身の部品の連結点を置くと、3.2節に述べた原理によりシステムが自動的に絵を最適な位置に移動させてくれる。

4. ILE システム

IntelligentPad による ILE システムは、操作者の自由な操作によって、画面上に様々なオブジェクトのレイアウトを作れることを可能にしている。また、学習者は直接操作によって、与えられた学習教材を分解し部品を取り出し利用したり、自分専用に使いやすくなるように機能を付加することもできる。ここでは本 ILE システムの実現例として、中学から高校で学ぶ力学、初等関数、幾何学の学習システムを示す。各システムにおいて学習者の操作の自由度が高いことを示すとともに、学習者が自身の行った操作から効率的に発見的な学習が行えるように、行った操作の結果を多角的にかつ視覚的に見せるための道具について述べる。

4.1 力学の学習システム

限られた種類の部品であっても接続の方法に制限が少なければ多種類の合成部品を作ることが可能になる。その例を、力学実験のために作成した滑車パッドやばねパッドを用いて示す。

図8は、滑車とばねを組み合わせた実験道具を示している。左側の動滑車には錘皿が付けられている。この上には錘を載せることができる。錘皿のみの重さが10であることが示されている。滑車やばねの各部には、加えられている力が表示されている。

3.2節で述べたとおり、ばねや滑車パッドは上に貼付されたパッドに対し各連結点のデータをまとめてスロットを通して送っている。その中から必要なデータを取り出すことができる。その中には、連結点の座標や張力のデータもある。張力を表示しているパッドは、そのパッドを貼付した位置に対応する張力

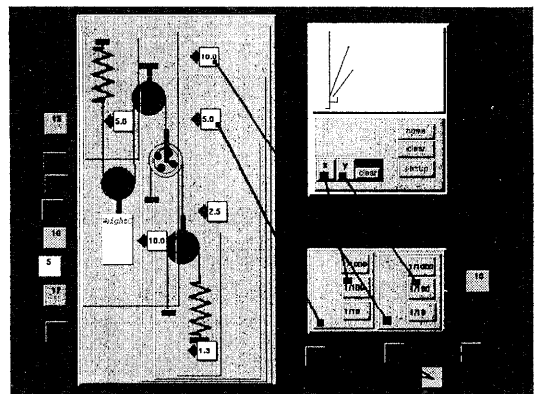


図8 滑車を用いた実験

Fig. 8 A mechanical experiment environment with pulleys and springs.

の大きさをスロットから取り出すことにより、直下の部品のその連結点に加わっている張力を表示することができる。図8の滑車やばねの横の矢印付きのパッドはこの仕組みを用いて、各連結点にかかっている張力を表示している。

図8の右方には XY プロッタのパッドが示されている。左の滑車とばねの装置から取り出した二か所の連結点にかかる張力を X 入力と Y 入力を入力しプロッタに表示している。貼り合わされていない二つのパッド間でデータ伝送を行うには、ワイヤの役目をはたすデータ伝送パッドを用いる。2章で述べたパッドの MVC 構造のうち、モデルを共通に持つパッドのコピーは共有コピーと呼ばれる。データ伝送パッドは、この共有コピーを用いて伝送線の役割を実現している。

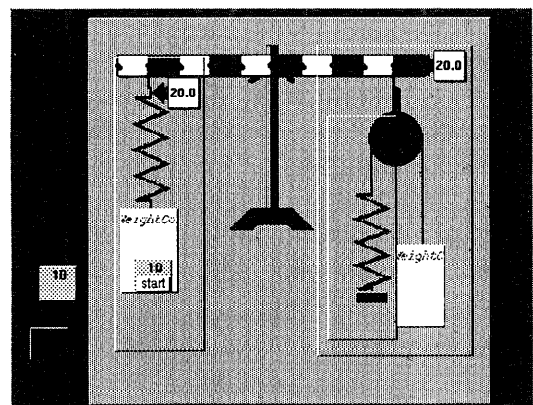


図9 天秤を用いた実験

Fig. 9 A mechanical experiment with a balance.

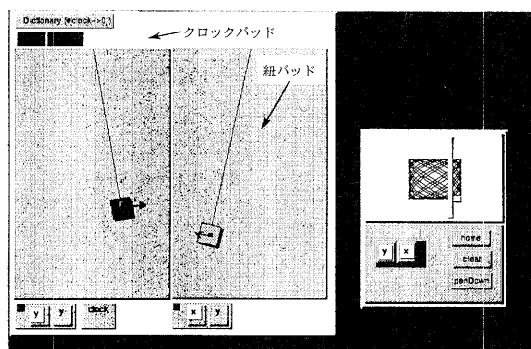


図 10 振り子の実験

Fig. 10 A mechanical experiment environment with pendulums.

図9では、天秤に示しているばねや滑車、鍾皿を天秤についている任意のくぎに取り付けることができる。天秤パッドの上に部品パッドを貼付し、マウスボタンを押しながら部品を移動させ、くぎの一つに近づけると、このくぎに部品を取り付けることができる。天秤の実験という、鍾をつるし、釣合いを観察する実験が一般的である。しかし、この天秤には、図8で示した滑車装置から任意の部品パッドをはがし、貼付することができる。図9は、新しい部品が追加されることにより、システムの使われ方が多様になることを示している。

この天秤パッドの実現方法は、ばねパッドや滑車パッドと同じである。連結点が11本のくぎの位置にある。連結可能領域は、くぎを1本ずつ含むように縦に11の領域に分かれている。直上に貼付された部品パッドから受ける力はトルクに換算して合成している。その値の正負によって天秤の絵を傾けて表示している。

図10は振り子の実験装置である。この実験装置は、クロックパッドと紐を表示している紐パッド、そして、振り子パッドから構成されている。クロックパッドは、直上のパッドに update メッセージを設定回数だけ送る。この設定値を適当に設定することによって、時間の経過に対する振り子の状態を観察することができる。振り子は、クロックパッドからの1回の update メッセージに対し、微小な一定時間後の位置を現在の位置、速度、加速度から計算して、移動するように作っている。本システムは、シングルプロセスの処理システムの上に作られているが、ここに示すように、振り子をコピーして二つにしても並行に動作している。

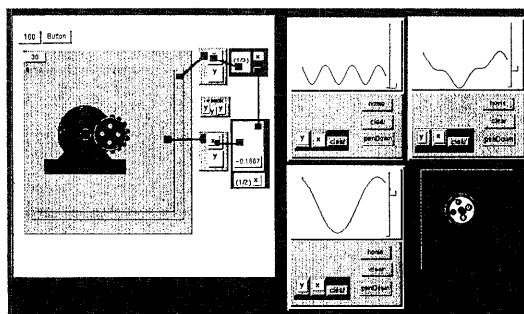


図 11 モータと歯車を用いた関数の学習

Fig. 11 The learning of elementary functions through mechanical experiments using a motor pad and gear pads.

振り子パッドは、マウスで個々任意の位置に置くことができ、それによって振幅や紐の長さを変えることができる。図10は、二つの振り子の周期を変え、リサージュ図形を表示させたものである。

各振り子の位置データを取り出すには、データ伝送パッドを用いている。この例では、伝送パッドの二つの共有コピー間の線分が表示されていないが、伝送パッドはこの線分を必要に応じて表示する機能を持っている。途中、 xy 座標から x 座標のみを取り出すためのパッドを経由して、 x 座標の値を XY プロットパッドに送っている。また、各振り子パッドの上には、速度ベクトルを表示する透明なパッドが貼ってある。ここでも、可観測なスロット値から速度データを取り出し、その大きさに応じた矢印を表示している。

図11はモータと歯車および XY プロットを組み合わせた装置である。図におけるモータや歯車は一つ一つがパッドで、その貼り合わせによって装置は作られている。モータと歯車は、振り子と同様にクロックパッドを用いて、一定角速度で回転する。図10の例とこの例はともに、ダイナミックなシミュレーションをアニメーション表示によって見せている。さらに、各パッド部品から取り出される値を加算や乗算の機能を持ったパッドを通すことによって、複雑なグラフ曲線を表示させることもできる。振り子とモータの装置を同時に動作させ比較し、二つの単振動の類似性を確認することも可能である。

以上の力学 ILE の例で示したとおり、パッドを用いた ILE システムでは、単機能部品を作ることとスロットのデータの形を統一することで、部品の再利用率を高めることができた。そして、部品の種類が少ないにもかかわらず、多様な道具や装置を組み立てるこ

とが可能になった。また、学習者にとっても、初めに覚えなければならない操作の種類を低減することができ、道具を創造したり、それらを活用してさまざまな実験を創造的に行うことができるようになった。

4.2 関数を歯車と同様な部品として扱える初等関数 ILE

図 11 の装置は、実世界にあるモータと歯車をシミュレーションすることによって、単振動を学習する装置であった。これと同様の結果を初等関数 ILE を用いて得ることもできる。また、これら二つのシステムは共存することができ、学習者は一つの事柄を、一方では具体的な実世界にある装置としてそれを観察しながら、他方では抽象的な式を組み合わせながらという二つの見地から学習することができる。

初等関数 ILE では、学習者はパッドでできた関数を貼り合わせることによって、複雑な合成関数も定義できるようにした。変数の持っていた値は、順に関数パッドを通りそのたびに交換されていく。このシステムを用いて学習者は、与えられた合成関数を構成する関数によって、値が交換されていく様子を観察しながら、この合成関数の座標空間における軌跡を観察することができる。

ここでは、関数式をキーボードから一つの式として入力し評価するという従来の方法は用いていない。式の入力および編集という観点からはキーボード入力のほうが効率的と思われるが、本システムの方法としては学習者の思考の仕方が異なってくる。本システムにおいて学習者は、与えられた合成関数を分解することで、関数が単純な機能を持った部品であることを理解する。そして、すべての基本関数が値を変換するという共通した機能を持っていることと、複雑な合成関数も基本関数の貼り合わせによる積み重ねで実現できることが容易に理解でき、簡単な関数から複雑な関数までまったく同じ考え方で作ることができる。

図 12 は、関数の合成をパッドの貼り合わせで実現し、変数に値を与え関数値を得る原理を示している。関数パッドは、上方のパッドから下方のパッドへデータを伝えている。こうすることにより、ある関数パッドの上にあるパッドは、その貼り合わせの構造にかかわらず、一つの関数パッドとして扱うことができる。すなわち、複雑な合成関数も、合成途中でできる部分合成関数パッドの性質を確認しながら順に組み立てることが可能になる。ここで、関数パッド間においてスロット結合されるスロット名は、力学部品パッドと同

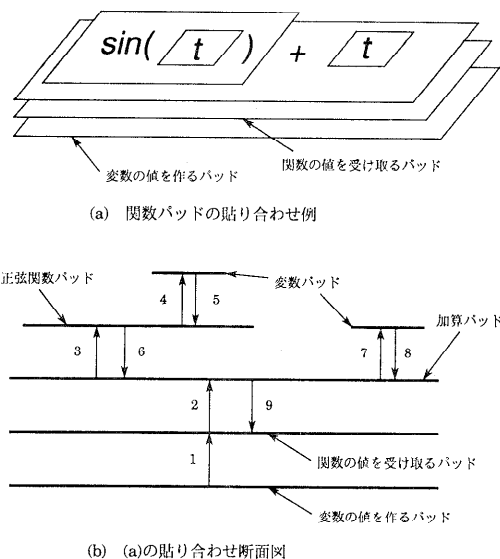


図 12 関数パッドの貼り合わせとデータの流れ
Fig. 12 Message flows among component pads.

様に一意に定められている。

各関数パッドは、直上に貼付した変数パッド、定数パッド、またはこれらの子パッドに持つ関数パッドが数値をパラメータ値に設定した set メッセージを送ることによって起動される。しかし、図 12 の貼り合わせでは合成関数パッドが二つの変数パッドを含むことから、加算パッドは二つのデータが揃うまで、直下のパッドに対して加算結果を送ることができない。このような制御法を取ると、直上のパッドがデータを送ってくるパッドか、そうでないかを判別する必要がある。そこで、関数パッドは直上のパッドがデータを与え起動する方法のほかに、3章で示した力学部品パッドと同様の方法を採用し、直下のパッドにデータを要求されることによって起動するようにしている。

合成パッドの起動は、一番下に置かれたパッドが要求する関数値に対応する変数値を直上の関数パッドに与えることにより開始される。図 12 の (b) に示すようなデータの流れて、3.2 節で述べた方法と同様にスロットを介したメッセージを用いて実現している。このとき、update メッセージを送るそれぞれのパッドのスロットに設定される連想リストは、(`<<giveData>.true><<variable>.x>`)である。ここで、`x` は変数の値である。このスロットを介したデータ要求メッセージと変数値のデータ対は、一番上の変数パッドまたは定数パッドまで送られ、そこから直下の関数パッドに対

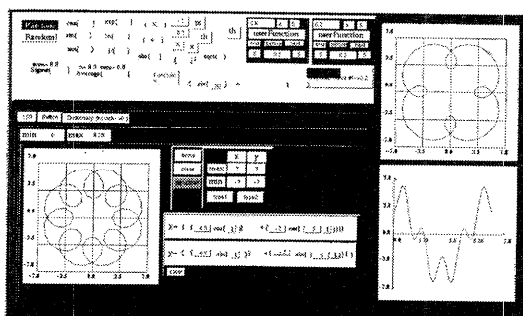


図 13 初等関数の学習

Fig. 13 A learning environment of elementary functions.

して変数値または定数値が渡される。

図 13 は作成した関数パッドおよび表示パッドである。この図 13 のシステムでは、関数値を要求するパッドとしてクロックパッドとクロック値変換パッドが、貼り合わされて一番下に置かれている。クロックパッドには変数領域の分割数を設定することができる。クロックパッドのスロットに設定される連想リストは、($\langle\langle\text{giveData}\rangle\rangle.\text{true}\rangle(\langle\text{variable}\rangle.n)$) である。ここで、 n は整数値 ($0 \leq n < \text{分割数}$) である。クロック値変換パッドでは、変数領域を設定することができる。クロック値変換パッドのスロットに設定される連想リストは、($\langle\langle\text{giveData}\rangle\rangle.\text{true}\rangle(\langle\text{variable}\rangle \cdot x)$) である。ここで、 x は変数領域内の実数値である。表示部には、表示領域を設定し、幾種類かの目盛りを記入することができる。関数グラフを媒介変数で表示することもできる。さらに、貼り合わせでできた関数の一部の合成パッドの下に表示パッドを挿入し、その一部の関数グラフと全体の関数グラフを同時に表示することもできる。

そして、IntelligentPad の機能として、これらのグラフは自由に複写や消去ができ、ファイルに保存することもできる。関数式とそのグラフを対にして保存しておき、ライブラリを作ること可能である。

4.3 透明なグリッドパッドの上で動画表示もできる幾何学 ILE

幾何学の ILE では、そこに与える直線、円、円弧、四角形パッドといった部品同士は親子関係を作らないようにしている。力学 ILE や初等関数 ILE で見られるように、これらの部品は貼り合わせによって機能合成されることはない。代わりに、学習者が与えられた場を観察するためのいろいろな道具が用意されている。

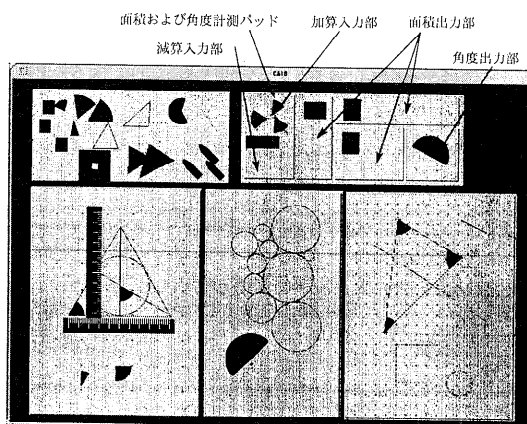


図 14 幾何学 ILE の部品とその使用例

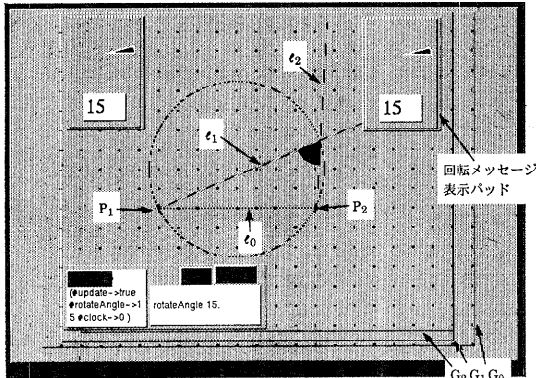
Fig. 14 A component ILE for the geometry study.

角度を計測し、その角度を加算したり、比較することができる。実世界では、数値を比較したり、演算をすることは簡単である。しかし、角度や面積は、そのままの形で加算したり減算し、その結果を見るには扱いにくい。本システムでは、計測パッド上の入力パッドの上に載せた複数のパッドの面積の合計や円弧パッドの角度の合計を表示することができる。これを用い角度や面積を比較によって計測することができる。幾何学 ILE のための部品を図 14 に示す。直線、円、円弧、四角形パッド等と、それらを貼る台紙になるグリッドパッド、大きさや角度を計測する計測パッドなどが見えている。計測パッドの上に計測された大きさを表示している四角形や円弧も四角形パッドおよび円弧パッドである。

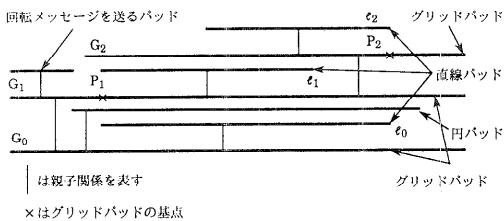
直線、円、円弧、四角形パッドは、不定形パッドで、部品上にマウスカーソルを重ねマウスボタンを押すことにより、個別に変形や移動等の操作を行うことができる。また、これらのパッドはいずれもスロットを介したジオメトリ操作に関するメッセージによっても、回転、移動、拡大、縮小を行うことができる。グリッドパッドに対し、ジオメトリ操作のメッセージを送ることによって、グリッドパッド上のすべての直線、円、円弧、四角形パッドを一度に操作することができる。

座標変換など幾何学的操作に関する問題を不得意とする学習者にとって、変換過程の様子を観察する装置は有用と考えられる。学習者は、直線や円などの基本部品を使って、透明なグリッドパッドの上に自由に絵を描くことができる。そして、この図形を連続的に座

標変換することによって、図形の変換過程をアニメーション表示で観察することができる。グリッドパッドでは、任意の位置に基点を設定することができる。グリッドパッド上の部品パッドは、その基点を中心に回転や拡大、縮小を実行する。グリッドパッド自身も、メッセージによって回転および移動ができる。また、



(a) 幾何学パッドの貼り合わせ例



(b) (a)の貼り合わせ断面図

図 15 円に内接する三角形の角の性質

Fig. 15 The study of the characteristic of a triangle touching internally a circle.

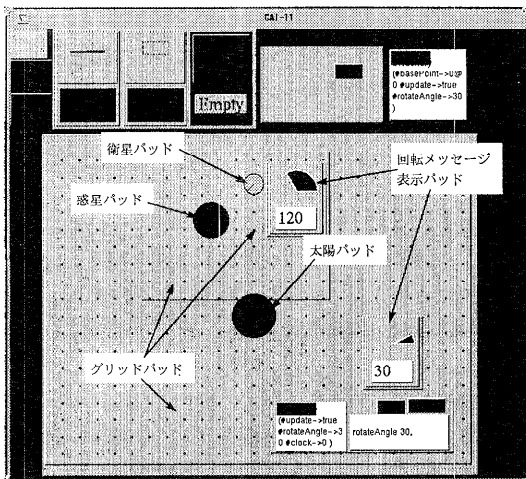


図 16 サイクロイド曲線を描く衛星の軌跡

Fig. 16 A satellite and its cycloid trajectory.

グリッドパッドは、受け取ったメッセージのうち、回転角や拡大率の値を変換して直上のパッドに伝えるように設定することもできる。これらの機能を用いた例を図15と図16に示す。

図15の(a)は、三角形の1辺を固定し、頂角を一定に保ったときの頂点の描く軌跡を実験観察する装置である。装置は、3枚の透明なグリッドパッドと直線パッドからできている。貼り合わせの関係を図15の(b)に示す。図15の(b)は、底辺になる直線 l_0 と軌跡が円になることを確かめるための円パッドが一番下のグリッドパッド G_0 に貼付されている。そのグリッドパッド G_0 の上に、底辺の一端の座標を基点とするグリッドパッド G_1 と、さらに G_1 上にもう一方の端を基点とするグリッドパッド G_2 が貼付されている。 G_1 と G_2 のグリッドパッドには、それぞれの基点を端点にした l_1 と l_2 の直線パッドが貼付されている。これら G_1 と G_2 のグリッドパッドは、回転メッセージに対して移動しないように固定されている。 G_1 のグリッドパッドに、一定角度の回転メッセージをスロットを介して送ると、そのメッセージは、グリッドパッドの基点座標データが付加され、二つの直線パッドに送られる。それぞれの直線パッドが受け取る連想リストは、 $((\langle \text{rotate} \rangle, \theta) (\langle \text{basePoint} \rangle, P_1))$ と $((\langle \text{rotate} \rangle, \theta) (\langle \text{basePoint} \rangle, P_2))$ である。そして、それらの直線は、グリッドパッドの基点 P_1 と P_2 を中心に同一方向に、それぞれ一定角度 θ 回転する。このとき、それらの直線のなす角度は一定に保たれ、交点の軌跡は円を描く。図15の(a)において、回転メッセージをアニメーション表示するパッドが、直線パッドの載った二つのグリッドパッドの上にそれぞれ貼付されている。

図16に示す例は、座標変換を学習するために作成した装置である。太陽の周りを公転する惑星および衛星をモデルにしている。このとき惑星の描く軌跡は、惑星に伝えられるメッセージ、衛星に伝えられるメッセージと順に追っていくことによりその動作を確認しながら理解することができる。この装置では、図13の初等関数 ILE で示している関数の軌跡と同様の結果を観察することができる。

貼り合わせは、グリッドパッドの基点に太陽に対応する円弧パッド、少し離れた位置に惑星に対応する円弧パッドとその円弧パッドの中心と基点を同じくする二つ目の透明なグリッドパッドが貼付されている。さらに、二つ目のグリッドパッドには、衛星に対応した

円弧パッドとその円弧パッドの中心と基点を同じくする三つ目の透明なグリッドパッドが貼付されている。三つ目のグリッドパッドの上に表示器パッドが貼付されている。また、二つ目のグリッドパッドが直下から送られてきた回転角の値を変更して直上の円弧パッドに送ることによって、二つの円弧の公転周期を変えることができる。

4.4 システムの使用法を提示するパッド

本 ILE システムでは、様々な部品やそれを合成した道具を学習者に与えることができる。個々の部品の機能は単純で、容易に使用することができる。しかし、初めて学習者に与えられる部品や道具については、その使用法を提示する必要がある。

図 17 は提示パッドで、このパッドに貼付されている複数のパッドの状態を複数通り記憶しておくことができる。そして、一つの状態から次の状態（記憶しているいずれの状態へも遷移できる）に移るとき、パッドの貼付位置が異なっていれば、その変化を滑らかに移動させながら見せるようにしている。状態の記憶は、記憶する順番を表す番号を設定し、memory ボタンを押すことでできる。呼出しは、play ボタンを押すことで順番に記憶した状態を再現することができる。

この提示パッドによって、一つの部品や道具の複数通りの使用法を、教授者や他の学習者が操作している様子を横で見ているかのように再生して見せることができる。さらに、テキストパッドや音声再生パッドを共存させれば、文字や音声による説明を入れることもできる。図 17 では、テキストパッドが表示されて

いる。

提示パッドは、印刷されたカタログや本と異なり、ダイナミックに部品や道具を提示し、使用方法を解説することができる。また、ビデオとも異なり提示されたパッドに対して、コピーやレイアウト変更や新しいパッドの追加といった操作を自由に行うことができる。教授者がこの提示パッドを使用すると、従来のビデオ編集のような複雑な操作をすることなく、ダイナミックな提示による教材を作ることができる。

5. おわりに

IntelligentPad を用いた力学、初等関数および幾何学の学習のための ILE システムについて述べた。

ここで開発した、透明パッドに部品を表示する方法とデータの制御方法は、任意形状のオブジェクトをジェネリックなパッド部品として定義することを可能にした。また、パッドとして作られる部品をできるだけ単純な単機能部品にすることで、むしろ単純な道具から複雑な道具まで柔軟に利用できるようになった。提案した ILE システムでは、部品の再利用率が上がり、部品の種類が少ないにもかかわらず、多様な道具を作ることができている。

一方、定義された装置が与えられたとき、それを分解して取り出したパッドは、その上に貼付されたパッド部品も含めて、一つの部品として扱うことができる。力学 ILE では、部品間の連結点のみを考慮して合成部品を作ることができ、初等関数 ILE における関数パッドでは、関数は関数の合成でできており、どこで分解してもその関数のグラフの形状を観察することができた。また、幾何学 ILE では、スロットを通してグリッドパッドに貼付した部品パッド全体のジオメトリを一括操作することが可能になった。

合成された部品は、その構成部品の動作から説明することができる。学習者は、一つ一つ部品を取り外し動作を確認したり、他の部品で置き換えて全体の様子を観察することが可能である。さらに、学習者の発見的学習の効率を高めるために、部品間のメッセージの送受をスロットを通して行い、そのデータを視覚的に見せるための道具を用意した。本論で示した道具は、いずれも共存することができる。このとき、それぞれの装置は、部品を共通に利用できるばかりでなく、データを共有したり、一方で計算されたデータを他に転送し利用することもできる。本システムを用いることによって、学習者は、一つの現象を様々な装置から

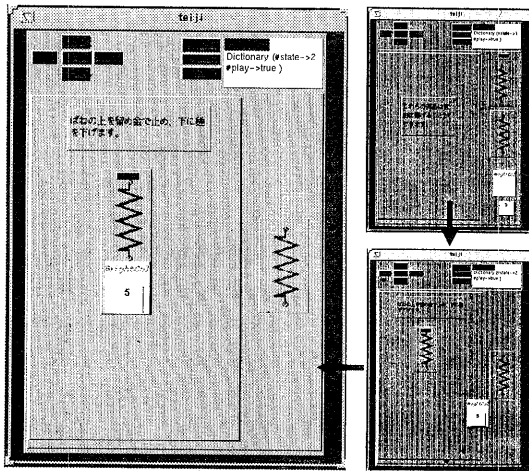


図 17 パッドの使用法を提示するパッド

Fig. 17 A special pad showing how to combine and decomposed component pads.

多角的に観察し、学習することが可能になった。

IntelligentPad を用いた本 ILE システムは、多様な学習者に対して、高い自由度を維持し、かつ思考を積み重ねることができる環境を与えることができた。また、教授者に対し柔軟で強力な ILE システム開発ツールとなることを示した。

参 考 文 献

- 1) Papert, S.: *Mindstorm: Children, Computers, and Powerful Ideas*, Basic Books, New York (1980).
- 2) Papert, S.: *Microworlds: Transforming Education*, *J. Artificial Intelligence and Education (USA)*, Vol. 1, No. 1, pp. 79-94 (1987).
- 3) Ocko, S., Papert, S. and Rensnick, M.: I Understand Because I Built It Myself, *Proc. of the Australian Computers in Education*, pp. 314-326 (1988).
- 4) Alakent, B. and Orhun, E.: Computer Microworlds for Pre-school Children, *Proc. ISCIS III. The Third International Symposium on Computer and Information Sciences*, pp. 131-138 (Nov. 1988).
- 5) McMillan, B. W.: Exploring Two-Dimensional Planes with a Logo Microworld, *Proc. IFIP TC 3 Fifth World Conference on Computers in Education*, Amsterdam, pp. 671-675 (July 1990).
- 6) Stevens, A. L., Roberts, B. and Stead, L.: The Use of a Sophisticated Graphics Interface in Computer-Assisted Instruction, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 3, March/April, pp. 25-31 (1983).
- 7) Hennessy, S., Spensley, F., O'Mally, C., Byard, M., Driver, R., Mallen, C., Mohamed, R., O'Shea, T. and Scanlon, E.: A Direct Manipulation Microworld for Vertical Motion, *Proc. IFIP TC 3 Fifth World Conference on Computers in Education*, Amsterdam, pp. 375-382 (July 1990).
- 8) O'Shea, T.: Magnets, Martians and Microworld: Learning with and Learning by OOPS, *J. Artificial Intelligence Education (USA)*, Vol. 1, No. 3, pp. 11-25 (1990).
- 9) Maloney, J. H., Borning, A. and Freeman-Benson, B. N.: Constraint Technology for User-Interface Construction in ThingLabII, *Proc. OOPSLA '89 Conf.*, ACM, pp. 381-388 (Oct. 1989).
- 10) 野口, 田中: 創造的 CAI への IntelligentPad の応用, 人工知能学会ヒューマンインターフェース研究会報告書, pp. 87-94 (Jan. 1992).
- 11) 野口, 田中: コンストラクションセットを持つマイクロワールド 初等関数の学習への応用, 人工知能学会全国大会 (第6回) 論文集, pp. 655-658 (1992.6).
- 12) 野口, 田中: オブジェクト間メッセージに着目した幾何学 CAI, 人工知能学会全国大会 (第7回) 論文集, pp. 773-776 (1993.7).
- 13) Tanaka, Y.: A Toolkit System for the Synthesis and the Management of Active Media Objects, *Proc. 1st International Conference on Deductive and Object-Oriented Databases*, Kyoto, pp. 259-277 (Dec. 1989).
- 14) Tanaka, Y.: A Synthetic Dynamic-Media System, *Proc. International Conference on Multimedia Information Systems*, Singapore, pp. 299-310 (Jan. 1991).
- 15) Tanaka, Y., Nagasaki, A., Akaishi, M. and Noguchi, T.: A Synthetic Media Architecture for an Object-Oriented Open Platform, *Proc. IFIP 12th World Computer Congress*, Madrid, pp. 104-110 (Sep. 1992).
- 16) 長崎, 田中: シンセティック・メディアシステム IntelligentPad, 日本ソフトウェア科学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 36-48 (1994).

(平成6年3月28日受付)

(平成6年10月13日採録)



野口 孝文 (正会員)

1953 年生。1978 年室蘭工業大学電気工学科卒業。1980 年室蘭工業大学電気工学専攻修士課程修了。現在、釧路工業高等専門学校電気工学科助教授。教育工学、学習支援システム、ヒューマンインタフェース等の研究に従事。電子情報通信学会、ソフトウェア科学会、人工知能学会各会員。



田中 譲 (正会員)

1950 年生。1972 年京都大学電気工学科卒業。1974 年京都大学電子工学専攻修士課程修了。工学博士。現在、北海道大学電気工学科教授。データベースマシン、データベース理論、メディア・ベース、論理型プログラミング、ヒューマンインタフェース等の研究に従事。主たる著書、「コンピュータ・アーキテクチャ」(オーム社、共著)。「コンピュータ・アーキテクチャ」(オーム社、共著)。IEEE、ソフトウェア科学会、人工知能学会各会員。