

## 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

釧路高専

北海道大学 工学部

本稿では、北海道大学で開発中のIntelligentPadを用いたCAIシステムについて示す。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。このIntelligentPadを用いた本CAI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および教授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。コンストラクションセットとして与えられる部品や道具は、全てパッドでできている。学習者は、与えられた部品や道具に対して、分解、複写、貼り合わせ等の操作をすることにより、新しい機能を持った部品や道具を創造することができる。

## A Microworld with its Construction Set

Takafumi Noguchi

Yuzuru Tnaka

Electrical Engineering Department    Electrical Engineering Department  
Kushiro Technical College                Hokkaido University

Presented in this paper is a CAI system on the IntelligentPad. The IntelligentPad was developed at Hokkaido university. A pad is an object with a function and users can paste it on another pad like a sheet of paper. Users can arbitrarily design the layout of pads and construct a composite pad with complex functions from them. The CAI system on IntelligentPad provides a microworld with its construction set. In this microworld, a student can construct various tools to try whatever idea he thinks. He can paste together primitive tools, decompose existing tools, and copy some of them to create new tools with new functions.

## 1. はじめに

Piagetは、子供の思考は、その年齢によって異なり、年とともに変化することを示したり。すなわち、大人の持っている知識をそのまま子供に与えても、子供が理解できるとは限らない。したがって、このような子供への教授戦略は、年齢によって変更しなければならない。一方、Piagetの影響を受けたPapertは、学習者自身による発見的学習が、学習に効果的であると考え、操作者が行った操作に対し、現実世界と同様な反応を返す学習環境をコンピュータ上に実現し、その環境をマイクロワールドと呼んだ<sup>2)</sup>。Papertは、学習者が自身の持つ概念をマイクロワールドで具体的に体験し、再利用可能な知識に変換することを意図したのである。

我々は、しばしば、色々な道具を本来の使用目的と異なった使い方をしたり、いくつかの道具を組み合わせ、新しい道具として使用することがある。たとえば、ドライバーは、穴を開ける道具として使用できるし、重石として使用することもできる。ドライバーにスパナを組み合わせ、大きなトルクでネジを締めることもできる。これは、ドライバーの使用目的に関する知識の他に、ドライバーが持つ形状に関する知識やその材料に関する知識を組み合わせることによって実現される。道具を本来の目的以外に使用することは、創造的活動である。現実世界は、我々が行うあらゆる操作に対し、我々が受け入れることのできる反応を返してくれる。その現実世界の精緻さが我々の創造を可能にしている。マイクロワールドは、教授者によって意図された知識を発見する場であるばかりでなく、創造的活動ができる場であるべきである。そのためには、与えられた道具が自由に使用、試行錯誤的な操作により思考したことを確かめることができる機能を持たなければならない。コンピュータの特性を生かし、現実世界で実現できないことをマイクロワールドでは可能にすることもできる。

Papertのマイクロワールドに作られた、Logoプログラムによって制御されるタートルは、幾何の学習をするには有効であったが、このシステムでディスプレイ上に表示されるオブジェクトは、タートル1つに限られていた。Sprite<sup>3)</sup>システムは、複数のオブジェクトを同時に表示し、かつ制御できたが、複数のオブジェクトを組み合わせ、新しい機能を合成するという機能は持っていない。LEGO/Logo<sup>4)</sup>は、初期のタートルがコンピュータの外部にあったのと同様に、その制御対象はコンピュータ外部にある道具で、LEGOブロック<sup>註1)</sup>によって作られている。学習者は、様々な道具を基本的なブロックやモーターやギヤーの組み合わせで作ることができる。しかし、このシステムでは、マイクロワールド内にお

いてブロック部品から道具を組み立てたり、実験をすることはできない。

本論文で提案するCAIシステムは、学習者が、自由に操作できる部品や道具を与えることができる。さらに、与えられた部品を学習者が自由に組み合わせ、新しい部品や道具を創造することができるように、コンストラクションセットを持つマイクロワールドを提供している。学習者が操作を行なうと、現実世界と同様の反応が即座に返される。

本CAIシステムは、IntelligentPadを用いて作られている。対象領域は、中学から高校で学ぶ力学である。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。本CAIシステムが提供するすべての部品はパッドで、他のシステムが提供するパッドと同様の機能を持っている。したがって、本CAIシステムは、IntelligentPad上に構築された種々のシステムの部品を借用することができ、開かれた環境を教授者および学習者に提供する、柔軟で強力なシステムである。

本論文では、部品間のデータの流れを単純化することにより、部品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、透明パッドに部品をアニメーション表示する方法をとることにより、複雑な部品の組合せをパッドの貼り合わせで定義できることを示し、著者等が開発したいくつかの力学実験部品とその組合せの例を示す。

## 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持ったシンセティック・メディア・システムとして開発されている<sup>5),6)</sup>。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り付けることにより、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。Mは内部構造を定義し、Vがパッドの画面上での形態を定義する。これらの様子を図1に示す。この基本パッドの貼り合わせは、図2のように行われる。

パッド間でのデータ通信は三種類のメッセージset, update, gimmeによってすべて行われる。下のパッドをマスターパッド、上のパッドをサブパッドと呼ぶ。マスターパッドに対しデータを送る時には、setメッセージを送る。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、マスターパッドに複数個持たせることができるが、一つのサ

註1) LEGO System Inc. 登録商標。

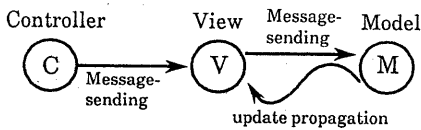


図1 パッドの内部構造

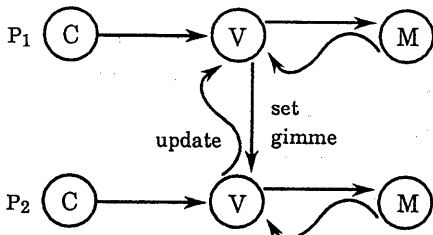


図2 パッド間の標準インターフェース

サブパッドとマスターパッドの間はただ一つのスロットしか使用できないようにしている。マスターパッドに対するsetメッセージにはスロット名が指定されている。また、マスターパッドに状態変化があった時には、すべての更新従属なパッドにupdateメッセージを送る。updateメッセージを受け取ったサブパッドは必要ならばマスターパッドに対し、gimmeメッセージを送る。gimmeメッセージには、読み出したいスロット名が指定され、受け取ったマスターパッドは指定された可観測要素の値を返す。

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、次章以下に示すような複雑な貼り合わせ構造が作成可能になる。また、パッド内部のプログラムの記述を容易にし、パッドの操作と内部の記述を完全に別のものとして考えることができるのである。パッドを使用するユーザは、全く内部の構造を知る必要がない。このことが、本システムの操作性を高めている。

### 3 IntelligentPadによるCAIシステムの実現

中学から高校で学ぶ力学を対象領域としたCAIシステムとして、滑車やばねを用いた力に関する実験場と振り子の実験場とを作成した。ここでは、各部品パッドの貼り合わせによる部品の結合および、その見せ方について述べる。このシステムは、Smalltalk-80 リリース4上に作られたIntelligentPadの上に構築されている。

#### 3.1 力学実験場における学習者の自由度

学習者に一つの部品を与えるとき、教授者は一つの意図を持っている。その部品が教授者の意図の通りにしか使えないものであれば、学習者は、教授者の

意図に沿って思考しなければ、その部品を使うことができないことになる。この様なことは、極めて不自然なことである。

我々は、すでに知っていることから、推測したり、思考したりし、ものごとを理解する。しかし、推測したことに対し思わぬ反応があったときの方がより学習することができる。与えられた部品が教授者の意図に関係なく、与えられた時点で学習者の思考に沿って使用でき、適切な反応を返してくれる方が望ましい。

たとえば、ばねに加えた力とその伸びを調べる実験を意図して部品が与えられたとき、学習者はそれを使って秤を作るかもしれない。また、ある学習者は、二本のばねを繋げるかもしれない。図3の左は、ばねパッドと錘パッドを組み合わせた例である。IntelligentPadでは貼り合わせによって機能合成を行っている。二枚のパッド(部品)の合成が可能であれば、それを一つの部品として扱うことができる。ここでは、各パッドの貼り合わせの状態が分かるように境界線が見えるようにしている。ばねパッドは透明で、その上にばねの絵が表示されている。

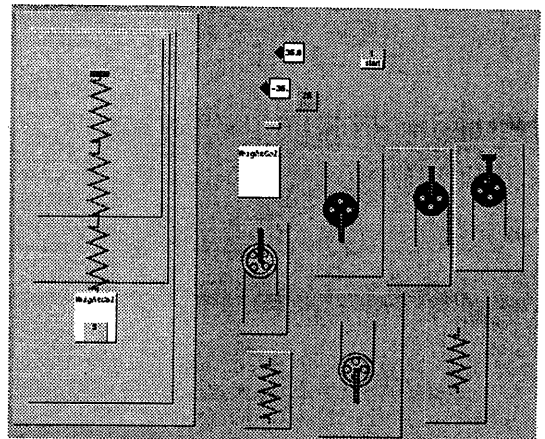


図3 力学実験におけるパッド部品

パッドの貼り合わせのみで新しい部品が構成できるので、学習者は、現実世界で道具を作成する場合と同様の考え方で道具を作ることができる。また、試行錯誤をしながら道具を作り、考えを整理することも可能である。そのときに返される反応は、多くの情報を含んでいるが、学習者は自分の考えたとおり操作を行えばよい。学習者が誤った考えに基づき操作しても、システムはその操作に応じた反応を返すだけで、難解な説明を加えることはしない。

著者等は、学習者の思考を妨げることなく自由にかつ、ジェネリックに道具を作ることができるシステムによって学習者の創造性を引き出すことができると考えている。図3に示した部品パッドは、後に示すいくつかの異なる実験場で共通に用いている。別

の場で使用した測定器パッドも使用している。その測定器パッド自体もパッドの組み合わせによって作られている。

### 3.2 機能合成とパッド間のデータの流れ

2章で述べたように、IntelligentPadでは紙のメタファを用い機能合成を貼り合わせによって実現している。そして、貼り合わせたパッドどうしは一つのスロットによってデータを交換している。基本的に二枚のパッドの合成ができれば、三枚の合成は、二枚のパッドからなる合成パッドを一枚のパッドに貼り合わせることを考えることができる。

図4(1)は、ばねの合成であるが三つのばねパッドを適当に貼り合わせるにより構成されている。

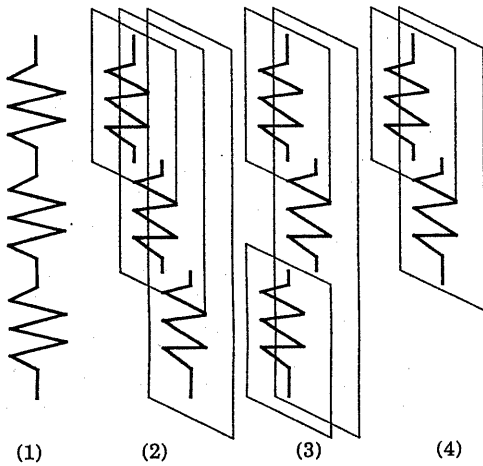


図4 パッドの貼り合わせ方と機能合成

三つのばねパッドを一つのパッドの上に並べ、合成する方法も考えられるが、そうすると、各ばねの両端の位置情報の他、留め金や錘のパッドの情報も一番下のパッドに伝えなければならない。パッドごとに下に伝えるデータの形式が異なると、下のパッドの処理プログラムが複雑になる。本システムでは、できるだけ処理が単純になるように、次のような方法で合成を実現している。IntelligentPadのサブパッドに対するマスターパッドは一つであるということを利用して、マスターパッド(部品)の各接続点のそれぞれにサブパッド(部品)をただ一つ取り付けることができるようにしている。サブパッド(部品)の一つに注目すると、その部品に取りつく部品は、マスターパッド(部品)に接続された一つの接続点を除きすべてそのサブパッド(部品)の上にある。そのサブパッド(部品)は、つぎの三つの情報を下のマスターパッド(部品)に伝えている。そのサブパッド(部品)とマスターパッド(部品)との接続点の現在位置。その接続点に加えられる力によってその接続点が移動するときの変位。そのサブパッド(部品)の上にある部品によ

て加えられている力の三つである。これにより、接続点が二つのばねも、一つの留め金も同じ形式でデータの転送が可能になっている。

図4(1)を実現するために、本システムでは、二通りの場合を考えている。図4の(2)と(3)の二通りである。図4(2)は、図4(4)の繰り返しにより記述できる。図4の(2)と(3)におけるデータの流れを図5に示す。

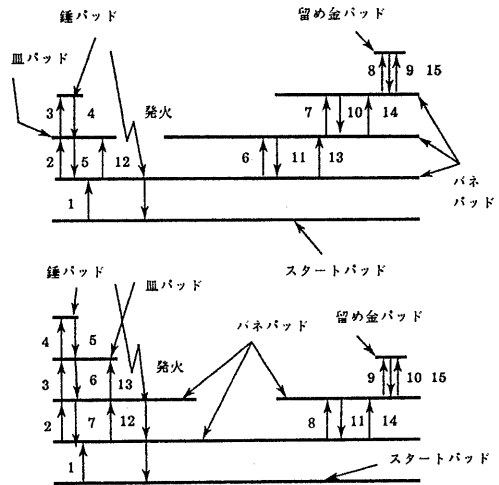


図5 パッドの機能合成とデータの流れ

ばねパッドは、その上にばねや錘のパッドを貼ったというイベントにより、そのばねパッドを含めて貼り合わされているすべての部品パッドにメッセージが送られ、動作するようになっていく。このイベントを図5に示す一番下のスタートパッドに送り、そこから上方に向けて、変更があったという事実をupdateメッセージによって順々に伝えるようになっている。updateメッセージを受けたパッドは、updateメッセージをさらに上のパッドに送る。一番上にあるパッドは、自己の状態を下のパッドへsetメッセージで伝える。上方からsetメッセージを受けたパッドは、そのパラメータ情報と自己の持っている性質とを合わせ、どの様な力を加えると位置がどの様に変わるかということをして自己の情報として下のパッドへ伝える。下のパッドは、上からの情報の中に接続点の情報を見つけ、自己の部品のどの位置に接続されるかを考慮して、上の部品の位置等を計算し、その結果を上へ伝える。この方法は、ばねパッドばかりでなく後に示す滑車パッドにおいても用いられている。

ばねパッドでは、自己の表示している部品の中央で上と下に分けて、上に貼られたパッドから送られてくる位置情報をそれらの領域で分け、自己の部品の

端点に接続するように、上のパッドへその値を送っている。後に示す滑車では、この位置情報の選択を三つの領域に分割して行っている。

図4(1)の合成を実現するために、ばねパッドは、図4の(2)と(3)の二通りの貼り合わせの場合について対処してプログラムされなければならない。各図の中央に位置するばねパッドは、上に貼られたばねパッドにデータを送るとき、上に貼られたパッド(部品)の数を考慮したり、特定のパッドにデータを渡す必要はない。図4(2)では、下のマスターパッド(ばね)から送られてきた情報も自己の情報に付加して、上のパッドへ伝えている。中央のばねパッドからは、どの位置にあるパッドがどのデータを使用するかを示す位置とデータの対を送っているだけである。したがって、図4の(2)と(3)でプログラムは同一である。上に貼られたパッド(部品)は、下から送られてきたデータの中に自己の部品の接続点を含む領域データを検索する。その領域データが見つかったら、それと対になった接続点のデータを取り出し、その位置に自己の接続点を合わせ絵を描きなおす。さらに、上の部品との接続を考慮して計算を行い、その結果を同様のデータ形式にして上のパッド(部品)に送る。

この方法は種々の応用に有用であり、後に示す実験場では、ばねや滑車に掛かる力を、表示器パッドを用いて表示するのに利用している。表示器パッドは貼る位置によって受け取るデータを選択することができる。部品間の接続に関する情報はすべてスロットを通し上方のパッドに伝えるので、上に貼ったパッドから下方のパッドのスロットを見ることができる。

このように、パッドの貼り合わせは、基本的に二枚のパッド間のことのみを考慮してプログラムをすればよい。パッド間でのデータは一つのスロットによって行われるという制約のために、逆に貼り合わせの整合性が取りやすい。一枚一枚のパッドを完全に独立に作る事ができる。上に貼られたサブパッドからのメッセージと下のマスターパッドからのメッセージ、これらに加えてマスターパッドのスロットのデータのみを考慮して各パッドをプログラムすることができる。現在既に、多くの部品パッドが作られている。この高い生産性は、後に作る部品パッドが前に作った部品パッドに影響を及ぼすことがないということに起因している。

### 3.3 機能合成された部品パッドの表示

本CAI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6に示す鍾皿パッドのように、パッドそのものが移動する型である。もう一つは、滑車やばねのように、パッドは移動しないが、透明なパッドに描かれた絵が動く型である。

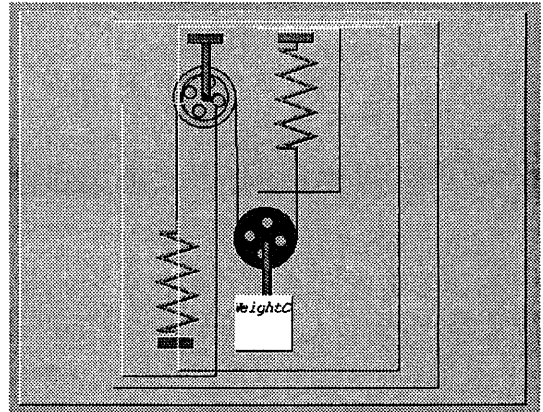


図6 パッドの合成時の見え方

鍾皿パッドの場合には、上方または下方にばねパッドや滑車パッドが取り付け、また、上には鍾皿パッドが載る。貼り合わせの関係をいうと、鍾皿パッドは、ばねパッドまたは滑車パッドの上に載り、この上には鍾が載る。鍾皿パッドの上にはばねや滑車が載ることはなく、すなわち、鍾皿よりも大きな構造が上に作られることがないので、鍾皿の表示の大きさとパッドの大きさが等しくて構わない。

ばねパッドや滑車パッドの場合には、それらの部品に繋がる形で他の部品が表示されるように、パッドを貼り合わせなければならない。図6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、さらにその上にはばねパッドと鍾パッドが載っている。上の滑車パッドが滑車の大きさしかなければ、ばねや鍾の表示ができなくなる。

本システムでは、パッドを透明にして、その上に部品の絵をアニメーション表示するようにした。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、部品パッドを接続したい部品パッドの上に載せ新しい部品を合成する。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、その部品パッドの上で、マウスボタンを押したままマウスカーソルを移動させることにより行う。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、ある程度全体の並びを決定できる位置に設定すると、後は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ように作っている。これは、部品パッドが、上に貼られる部品パッドの部品に対し、接続点を含む単純に分割した領域データと接続点データを対にして送ることで可能になっている。たとえば、ばねパッドでは、表示されたばねの絵の中央より上にある部品は、ばねの上方の端点に接続される。また、中央より下にある部品は、下方の端点に接続さ

れる。ただし、部品の移動は、それ自身移動ができるものに限る。

透明なパッドに部品を表示させる方法は、複雑な構造を作るときに有用である。構造を分割し部分ごとに動作を確認しながら、道具を組み立てていくことを可能にしている。また、この方法により、振り子の先に振り子が付いた二重振り子のような、複雑な実験場も作ることが可能になったと考えている。

#### 4. 力学実験CAIシステム

本CAIシステムで作成した各種の部品を組み合わせ構築された実験環境の例を示す。滑車やばねを組み合わせた実験場と振り子の実験場である。何れも多くの部品パッドを共通に用いており、部品の使用効率が高いことがわかる。もとは特定の目的のために作った部品パッドが、様々な場で他の目的にも使用できるように、各パッドがジェネリックに定義されていることがこれを可能にしている。

##### 4.1 滑車を用いた実験場

図7は、滑車とばねを適当に組合せた実験道具を示している。左例の動滑車パッドには錘皿パッドが付けられている。この上には錘パッドを載せることができる。皿のみの重さが10であることが示されている。滑車パッドやばねパッドの各部には、加えられている力が表示されている。

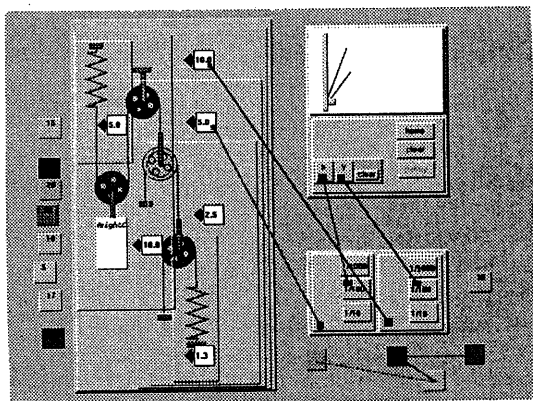


図7 滑車の実験場

3.2節で述べた通り、ばねパッドや滑車パッドは上に各部の情報を送っているため、その中で必要な情報を取り出すことができる。その中には、位置や力の情報もある。力を表示しているパッドは、そのパッドを貼った位置に対応する力の大きさをスロットの値として取り出すことにより、下の部品のその位置に加わっている力を表示することができる。図7の滑車やばねの横に表示されている、矢印付きの四角はこの方法を用いたパッドで、各点に掛かっている力を表示している。このパッドは力の向きによって矢印

の色を変える。必要ならば、各部品を接続している点の座標を取り出すこともできる。

図7右にはXYプロッタパッドが示されている。このXYプロッタパッドは13個の部品で構成され、左のばねの装置から取り出した2箇所位置の力をX入力とY入力に入力し表示している。X、Y入力にそれぞれ値を入力でき、二つの値が揃ったとき、その点までの線を描くようにしている。このXYプロッタは、後の図9に示すものと同じもので、様々な場で再利用することができる。

離れたパッド間のデータ伝送は、データ伝送パッドにより行っている。2章で述べたパッドのMVC構造のうち、モデル(M)を共通に持つパッドのコピーはシェアードコピーと呼ばれる。データ伝送パッドは、このシェアードコピーを用いて実現している。また、データ伝送パッドは、二つのパッド間に線を描くための機能を持っている。データ伝送パッドのビュー(V)は、そのマスターパッドからupdateメッセージを受けたりマウス操作を受けると、自身の中央座標をモデル(M)のスロットに設定するようにしている。その後、同じスロットの値を読み出し、今設定した値と異なる座標値があればその点まで線を描くようにしている。異なった座標点の間に線を描くことによって、それぞれのビュー(V)は対になった相手のビュー(V)と線で結ばれる。滑車装置とXYプロッタとの途中に置かれた、分数を表示している道具は係数器パッドで、XYプロッタへ入力する値を小さな値に変換している。図7では、滑車装置と計数器およびXYプロッタとの間を、データ伝送パッドが結び、データ伝送および結線表示を行っている。

本CAIシステムを用いて、ここに示したような装置を作る際には、動作確認を行うために、すべての部品配置の終了を待つ必要はない。本システムは、部分的にしか作成されていない構造の動作をも確認することができる。さらにそれを一つの部品としてより大きな構造に組み込むこともできる。

3.2節で指摘したように、部品すべてを一つのパッドの上にプログラムする方法では、内部プログラムの記述が難しくなる。一方、貼り合わせで構造を作る方法は、内部プログラムの記述が簡単であるばかりでなく、あるパッドの上にあるサブパッドはその上の構造も含めて、すべて一つの部品として扱うことができるという利点がある。

##### 4.2 天秤を用いた実験場

図8は、天秤パッドを示している。ばねパッドや滑車パッド、錘皿パッドを天秤に付いている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り、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。図ではトルクが一致し

ているので天秤は平衡しているが、異なっていれば傾く。極端に値が異なっても傾きがある一定以上にならないように止め金も付いている。

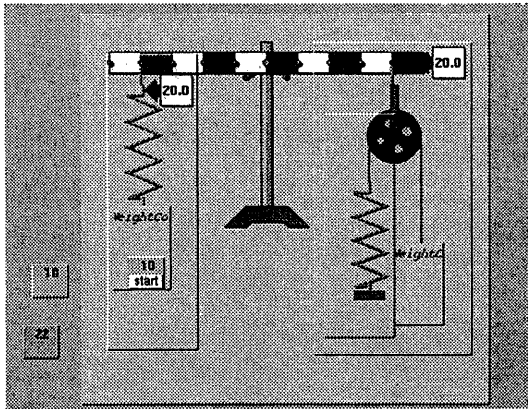


図8 天秤を用いた実験場

天秤は、トルクの学習に使用できるが見方を変えようと、これは、比較器になっている。色々な関数や演算をこのようなメタファに置き換えることにより、式の意味やプログラムの流れを具体的イメージとして、頭の中に描くことができるようになるだろう。この装置においても滑車パッドと同様に、上に貼るパッドを用いて真理値を取り出すようにすることができる。

ここに載っている錘パッドは、マウスクリック操作により自動的に重量が変化する錘である。マウスボタンを押しながらマウスカーソルを左右に移動させることにより、適当な最大重量を設定することができる。マウスをクリックすると、0から順に最大重量の10分の1のきざみで増した値を、錘皿と結合したスロットに設定するとともに、setメッセージを用いて下の錘皿パッドへこれらの値を順に10回送る動作を行う。図8の実験装置においてこれを用いると、錘の重さがいくらのとき天秤が平衡するかということを確認することができる。

### 4.3 振り子の実験場

図9は振り子の実験場である。この場合は、並行動作をさせるクロックパッドと紐を表示しているパッド、そして、錘を表示する振り子パッドからなっている。この実験場では、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。この実験場では、シングルプロセスの処理システムで並行動作を可能にするために、各振り子パッドは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ある。従って、ここに示したように、振り子をコピーして二つにしても並行に動作可能である。

動作を開始するきっかけは、一番下のクロックパッドが行っている。入力パッドから動作する回数を入力し、startボタンを押すと上のパッドに対しupdateメッセージを設定回数送るように作ってある。さらに、振り子のパッドをマウスで掴み好きな位置に置くことにより、振幅や紐の長さを変えることもできる。

図は、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。二つの振り子を同じものをコピーして用意し、片方だけ適当な位置まで振らせると、周期は同じで位相だけを変えた振り子を作ることもできる。たとえば、リサージュ図形で円を描くこともできる。

各振り子の位置データを取り出すには、シェアードコピーしたパッドの一方を振り子パッドの上に貼り、他方をxy座標からx座標のみを取り出すパッドの上に貼っている。このx座標の値をシェアードコピーしたパッドでXYプロッタパッドに伝えている。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を貼っている。ここでも、可観測なスロット値を一部取り出しその大きさに応じて矢印を表示している。

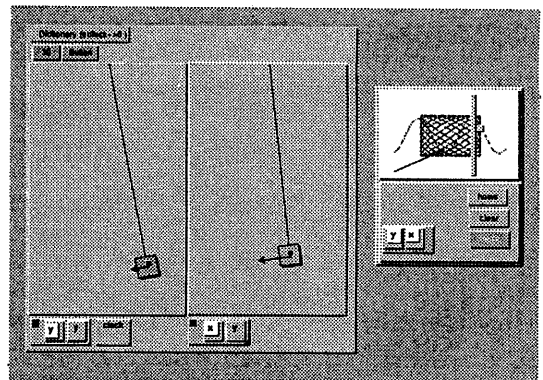


図9 振り子の実験場

### 4.4 学習者と教授者によるメタファの共有

教授者が学習者に知識を伝達するとき、両者が共に認識しうるメタファを適用すれば、効率的に学習を進めることができる。図10は、モータとギヤのバッドにより作られた装置である。この装置は、初等関数の広い範囲の学習に適用でき、学習者の思考の道具になると考えている。

図10において、各ギヤには、それぞれ歯の近くにか所マークが付けられ、その位置の座標を取り出すことができる。ただし、ギヤの径にかかわらず中心の座標が(0.5,0.5)となり、X、Yの最大値は1になるようにしている。また、ギヤのパッドをマウスでクリックすると、マークの位置座標は(0.5,1)に初期

化される。モーターパッドの下にはクロックパッドがあり、クロックパッドのupdateにより、モーターは設定された角速度で回転する。角速度や回転方向は、スロットに設定された値または、デフォルト値により決まる。図10では、100回のupdateでモーターが1回転するように設定され、回転方向はデフォルトで左向きになっている。XYプロッタへは、二つ目の歯数20のギヤーのX座標値が送られている。この装置により、正弦関数波形を作り出すことができる。また、位相や周期の異なった正弦関数波形を作ることでもできる。さらに、回転運動を直線運動に変換する装置や演算装置を用意し、この装置と組み合わせることにより、いろいろな関数の演算を装置の動作に置き換えて観察することができる。

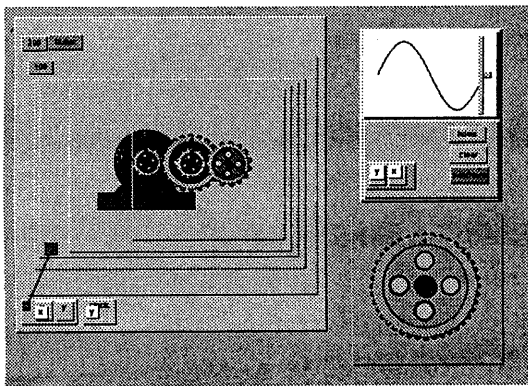


図10 モーターとギヤーのメタファ

## 5. おわりに

創造的学習のためには、学習者自身が自己の考えを修正発展させ、知識を増やしていける場を与える必要がある。本論文で示したCAIシステムは、力学の学習を対象とした。そこで作られた部品や道具は柔軟に様々な場で使用できることを示した。このことは、IntelligentPadを用いて開発された様々なCAIシステムは相互に部品や道具を再利用することが可能であり、一つのCAI環境に統合することもできることを示唆している。たとえば、数学の場で作成した関数発生器を物理の場で利用したり、物理の場で作った音を音楽の場で利用することができる。各場で作成した装置を自由にコピーして、別の環境で再利用することがIntelligentPadでは簡単にできるからである。

本CAIシステムにおける力学実験場では、基本パッドの合成により道具や実験装置が作られている。基本パッドの数が増すにしたがってシステムが提供し得る機能が拡張される。また、実験場に与えられた部品や道具の操作をマウスの操作で自在に行える。実験場へのパッドの追加は、そこへパッドを持ち込むだけでできる。これらのことから、本CAIシステム

は、操作性および拡張性に優れたコンストラクションセットを持つマイクロワールドと言える。

IntelligentPadを用いた本CAIシステムは、学習対象領域を力学実験としたが、このCAIのためにカーネルシステムとしてのIntelligentPadは一切変更を要していない。したがって、IntelligentPadは学習対象領域を選ばない、柔軟で強力なシステムであるとともに、異なった学習対象領域のCAIシステムの統合化を可能にするすぐれたプラットフォームと言えるだろう。

## 参考文献

- 1) S. Papert, The Conservation of Piaget : The Computer as Grist to Constructivist Mill., In G. Forman ; P. B. Pufall (Eds) Constructivism in the Computer Age., Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, pp. 15-35 (1988)
- 2) S. Papert, Mindstorms : Children, Computers, and Powerful Ideas., Basic Books, New York., (1980)
- 3) S. Papert, Microworlds: Transforming Education, Artificial intelligence and education, vol. 1, pp. 79-94 (1987)
- 4) S. Ocko; S. Papert; and M. Resnick, "I understand because I built it myself." Lego&logo; Learning about living with computers!, Australian Computers in Education Conference: Golden Opportunities, Proceeding, pp. 314-326 (1988)
- 5) Y. Tanaka, "A Toolkit System for the Synthesis and the Management of Active Media Objects", Proc. of the 1st Int'l Conf. on Deductive and Object-Oriented Database, Kyoto, Dec. 1989, pp.259-277
- 6) Y. Tanaka, "A Synthetic Dynamic-Media System", Proc. of International Conference on Multimedia Information Systems, Singapore, Jan. 1991, pp. 299-310