

Haptic Interface による思考支援システム

野間 春生、 角 康之、 宮里 勉、 間瀬 健二
 (ATR 知能映像通信研究所)

Embodying Concept with Haptic Interface for Thinking

Haruo NOMA, Yasuyuki SUMI, Tsutomu MIYASATO, Kenji MASE
 ATR Media Integration and Communications Research Lab.
 Hikari-dai, Seika-cho, Kyoto, 619-02, Japan
 email : { noma,sumi,miyasato,mase}@mic.atr.co.jp

Abstract: In this paper, we present a new method for computer aided thinking using a haptic interface. We proposed the idea of embodying the mental world as the concept map in a virtual space on the analogy of mass and spring system. The concept map consists from some concepts, which are connected each other with spring. The system allows user to manipulate them with realistic sensation with haptic interface and it is expected that the user can find out new ideas from this interaction.

Keywords: Computer Aided Thinking, Haptic Display, Virtual Reality

1. まえがき

本研究では、コミュニケーションやアイデアの発想といった知的協調作業のため、VR 技術を応用してユーザーの思考する概念を多感覚情報として具象化させ、文字どおり思考概念を"操作"しながら思考活動を支援を行うシステムの開発を目指している。

我々がここで対象とする知的作業とは、例えば個人が新しいアイデアを構想する過程やグループでのディスカッションにおける議論の過程を想定している。このような知的作業過程において、思考過程で生じる多様な要素が交錯し発想が行き詰まったり、議論が噛み合わずに延々と発散してしまうことがある。その理由のとして以下のような問題の存在が考えられる。

[概念の把握・分節能力不足] その心的内容が漠然としていて自分自身でも対象概念の全体構造を把握、あるいは、形容できない。

[相互理解の欠如] ディスカッションを進める際に、発話者の言葉を聞き手が知らなかったり、異なる概念として認識していると、心的に存在する概念集合間の関連性や表現が異なる。

日常でのこれらの知的作業においては、メモやボードを用いて外部的に思考やコミュニケーションを補助する

手法を一般的にとるであろう。メモをすることによって、思考を複数の言葉あるいは絵の幾何学的な関係として表現し、主観的に整理を行なうものである。これまでに報告されている思考支援システムやグループウェアシステムは、このメモやボードの機能を電子メディアにより拡張・自動化したものと考えられる[1-4]。

ここでは従来の概念構造を理解するための視覚化技術を一步進め、VR 技術の導入により思考概念構造を具体化して、概念構造を直接操作することから思考活動を支援する手法について検討を進めている。

提案手法によって、以下のような応用が期待できる。

- ・ユーザーが自身の思考空間の概念構造をその構造自体の感触から直感的に認識し、新たな発想を得る手がかりとなる。
- ・グループのコミュニケーションの際に、互いに相手の思考空間の構造を結合・操作し合うことで他者の概念構造を理解し、新しい複合構造を発見する。

本論文ではこの研究目的に対する第一報として、まずこれまでの思考の概念構造の視覚化に関する手法をまとめ、それをもとに概念構造を VR インターフェースを用いて操作するメリットについて述べる。次に、ここで提案するテキストベースの概念モデルを力学のアナロジー

に変換する方法を示し、それを実現する試作環境について述べる。

2. 思考支援のための概念の可視化

2.1. 概念形成のダイナミックとその支援

ここでは、思考空間を、“思考活動に伴って意識に上っているアイデアや知識の断片とそれらの結び付きによって構成される心的空間”として定義している。また、アイデアや知識の断片の言葉による表現を概念素、その集合を概念として定義されるモデルを採用して以下の議論を進める。

思考の初期段階では、まず、対象に関するアイデアや利用可能な知識が概念素としての心的空間の中に浮かび上がる。それらを元に概念を形成する過程では、その概念を構成する概念素が離合集散を繰り返すと仮定する。ただし、概念素の集合は固定的なものではなく、グループ関係を動的に構築し、最終的にはそれらの構成から新しい発想に到達するとモデル化できる。思考過程を混乱させる要因は、概念素間の多重的で動的な関係の変化の管理が、概念が複雑になるにつれて困難となる点にある。この様なモデルはこれまでも多くの認知科学研究者や哲学者が採用してきたものである[5-6]。

従来の思考支援システムの多くは、この思考モデルにおける概念形成時のダイナミクスをシミュレートし、半自動的に空間に概念素間の類似度の関係を反映させながら配置し、ユーザーがその結果である分類関係から発散的発想を得る手法が提案されている。以降ではまず、従来の思考支援システムの例を紹介した後、それらに対する本提案の位置付けを明らかにする。

2.2 従来の思考支援法

ここでは従来の思考支援法について概略を示す。

・アウトラインプロセッサ

アウトラインプロセッサは文章の構造を構成するために特化したワードプロセッサである。まず大まかに章のタイトルやキーワードを任意に入力し、ついでそれらの文章素を、章あるいは節や項単位で階層構造を構成しながら任意に配置する。下位の階層構造は操作に応じて表示を制御でき、文章作成の過程に応じて全体構造の見渡しと細部の詰め作業を連続的に行なえ、構造を維持しながら文章作成作業が行なえる。特に一連の文章の構成が目的であり、思考の方向が枝分かれを含む上から下の方向に限定される。従って、既にある程度まで形となったアイデアをトップダウンのプロセスで表現する目的には有効であるが、思考開始時の漫然としたアイデアを切り出す用途には構造が膠着することがある。

・KJ法[5]

日本の発想支援研究の多くに採用されているKJ法は、発想過程におけるボトムアップのプロセスを支援することを指向している。KJ法では概念素をカードにまとめ、思考の進行過程でそれらの配列をユーザー自身が構成しながらアイデアをまとめる。従って、一度空間を構成してしまうと、それを客観的に大きく再構成することはKJ

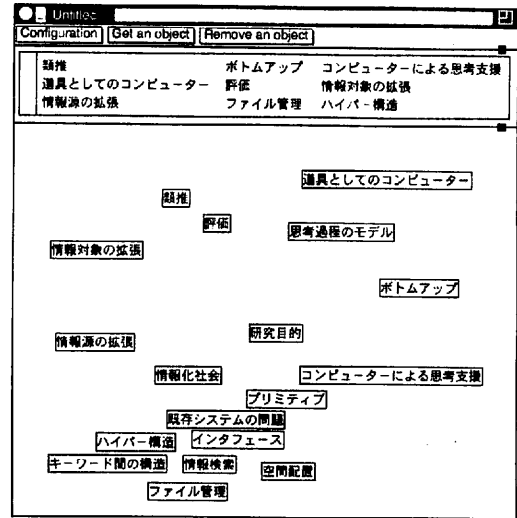


Fig. 1 発想支援システム CAT1

法の機構上熟練を要する作業である。

・計算機による思考支援

KJ法におけるカードの配置をカード間に定義される関連度から計算機によって自動的に構成することで発想を支援するシステムが幾つか提案されている[1-4]。

角らのCAT1[1]では(Fig. 1)、カードに相当するオブジェクトは、タイトルとそれを説明するテキスト、さらにユーザーが主観的に重み付けを与えながら宣言するキーワード群からなる。CAT1ではこの重み付きキーワード情報の関連度から多変量解析によって2次元平面上にオブジェクトを自動配置する。従ってこの配置はオブジェクト間の関係が全体構成の中で歪みを掛けられた状態で構成されている。ユーザーはキーワードの重みを操作したり、新たなオブジェクトを追加しながら、概念構造が変化していく様子を通して、概念構造の新たな切り口を発見していく。

CAT1の成果を引き継いだCSS[2]では、キーワードとオブジェクトの宣言の双対性に着目し、キーワード自身も双対尺度法を用いて概念マップ上に表示して、より深く認識・分析することをめざした。CSSでは、同じ概念であってもキーワードの重みを変えることで全く異なる概念マップを構成する。そこで、同じ概念を2名のユーザーに独立に処理させ、CSSによる結果を同一空間に同時表示することでお互いの同じ概念に対する認識の差を提示した。

CAT1やCSSが統計的手法からオブジェクトの関連性を空間表示するのに対して、田村のSPRING[3]では概念マップの形成に力学的センスを導入した。SPRINGではオブジェクト間の非類似度をオブジェクト間を結合するバネの自然長と、非類似度の重要性をバネ定数と、初期位置の重要性を空間の粘性係数と定義し、複数のオブジェクトとそれを結合するバネから構成される2次元の系のシミュレーションの収束結果を概念マップとして利

用した。SPRINGでも概念マップ全体としてのオブジェクトの距離関係の歪みを、構造の機械的制約により生じる弾性エネルギーとして定義できる。また、収束解は局所的なものであり、オブジェクトの追加や類似度の操作により構造は動的に変更される。

いずれのシステムでも、計算機が支援するのは概念マップを視覚化する段階までであり、その構造から意味を読み取る作業は純粋にユーザーの作業であった。

2.3 従来手法の支援過程と提案手法の目的

2.2項で述べた、計算機を用いた思考支援手法での思考の流れをFig. 2に示す。新しい発想を得るために、まず何らかの関係を有する概念素群をオブジェクトとして定義し、それらの特徴量から全体の関係を計算機によって抽出し、概念マップとして幾何学的に表示する手法を取っていた(Fig. 2の上部網掛領域)。その後の(Fig. 2の下部網掛領域)に相当する結果の評価と概念マップからの新たな思考については完全にユーザーに一任している。

さらに、何れの例でも幾何学的に表示される概念マップの操作は、オブジェクトのキーワードや類似度といった空間情報とは間接的な関係であるパラメータの操作であり、例えば思考の過程でまとまりつつある概念マップの一部のみを操作することは困難であった。

本研究では、これらの従来の思考支援手法をさらに発展させ、視覚化をさらに進めた概念マップの具象化を行い、Fig. 2の下部に相当する思考する過程を多感覚情報提示によって支援する手法の開発を目指している。

3. 発想のための概念の具象化

2.3項で示した目的のために、VRインタフェース、特に操作感覚を表現可能なHaptic Displayを利用するシステムの導入を検討している。VR技術を用いれば、本来は実在しないものであっても何らかの数値モデルに還元できれば、適当なインタフェースを用いることで十分な実在感を生成できる。

ここでは、仮想空間で思考空間を具象化するにあたって、SPRINGで提案された力学モデルを拡張し、概念マップを仮想空間で構築する。それは、実時間処理が可能でかつ直感的なオブジェクト間の関係記述が期待できるためである。概念マップのバネモデルへの変換の詳細については次章でまとめるとして、まず思考支援システムにVR技術を導入することのメリットについてまとめる。

VR技術の特徴付ける3つの要素は、多次元、実時間処理、直接操作、と挙げられる。バネモデルによって具象化される概念マップをVR環境で実現した場合にも、これらの特徴が反映されるメリットが生れる。

まず、本来は超空間内の構造を持つ概念マップを、従来は2次元のディスプレイ上で平面的に表示されていたが、構造が3次元化されることにより単純に表示できる情報の次元が増加するとともに、何らかの立体映像表示デバイスにより構造の認識度も向上する。

一方、この仮想空間内で概念マップがバネモデルのシミュレーションにより局所的な収束状態に遷移していく状態を実時間で観察することも、構造の部分的な特徴を

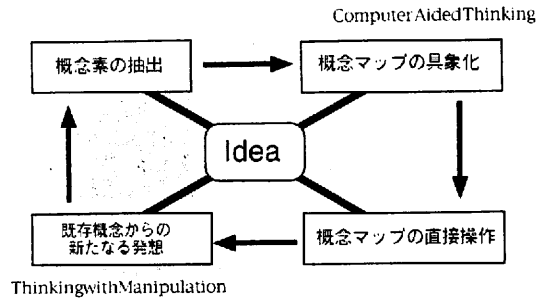


Fig. 2 発想支援の過程

認識する上では重要な情報となりえる。

また、概念マップを構成する個々の概念素であるオブジェクトへの直接操作は、例えば、思考過程である程度まで構造が固まった後に、概念マップのある不安定な部分だけの操作が必要な際に、3次元の操作性を生かした有効なインタフェースとして期待できる。

しかし、ここでは単にVRを応用して従来の思考支援システムを単に2次元平面から3次元空間モデルに拡張するだけでなく、操作感覚を表示できるHaptic Interfaceを導入することで、オブジェクトを操作する感触から新たな発想へと導く手法を検討している。触れることは、触れた物体に機械的な変化を発生させるだけでなく、局所的ながら多次元の情報をユーザーに提示する双方向性の高い行為である。視覚情報として全体の構造を捉えながら、直接概念素を動かすと同時にそのパラメータを操作反力として直感的に捉えられれば、丁度、絡まった紐を解くように、操作によってTry&Error的に概念マップの歪みを加減する操作を直感的かつ意識的にを行い、その過程から新たなアイデアへの発想を得られると期待できる。

4. 概念モデルの力学的表現

4.1 概念構造のバネモデルによる提示手法

ここで採用した手法は、特に概念マップ上での概念素、あるいは、概念素間の特徴を、概念の全体の特性として操作感触に反映する事を主眼にモデル化するために、まずSPRINGで提案された概念マップをバネ-質点系からなる力学系に変換するトップダウン的な手法を拡張して採用する。

具体的には、概念素をそれぞれ質点とし、2つの概念素間の類似関係からのみ定義するバネによってそれらを結合する。従って、力学的シミュレーションを実行することで、構造全体としては弾性エネルギーを局所的に極小とする状態で収束する。概念空間でこの収束した状態を考えるならば、全体の類似度の歪みを局所的に最少にしながら、相対的に近接している概念素同士が類似の概念であることを示している。また、ユーザーが概念マップを操作することで外乱を与えることになり、別の極小解に収束したり、一時的に外的な歪みを与えながら概念マップ中の概念素の状態を評価できる。

表1にトップダウン的に構成した力学系の物理量と概

Table 1 概念空間と力学系の対応関係

記号	力学系	概念空間
L_j	自然長	2概念素間の類似度
$ \bar{r}_i - \bar{r}_j $	バネ長	概念マップ内の概念素の類似度
k_j	バネ定数	類似度の重要度
D_j	バネ摩擦係数	類似度の変化許容度
m_i	質量	概念素の優位性・階層順位
\bar{r}_i	現在位置	他概念素との相対的關係
$\bar{r}_{i,0}$	初期位置	初期のユーザーの概念構造
$\bar{v}_{i,t}$	速度	歪みの強弱・概念素の優位性
$\bar{a}_{i,t}$	加速度	
D	空間の摩擦係数	全体構造の変化許容度
\bar{F}_{i-ext}	外力	外部から概念モデルに与える歪み

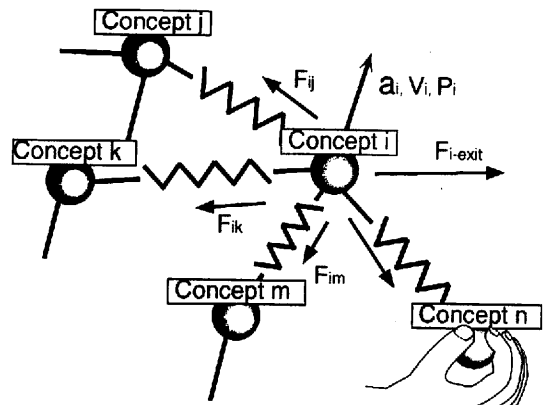


Fig. 3 バネモデルによる概念マップ

念空間の要素との対応を示す。表中の記号は以下の議論で用いるが、添え字 ij はそれぞれの要素が対応する質点を、 t はシミュレーションの時系列を表わしている。

概念マップが提示される概念空間とは、Fig. 3 に示す様に概念素を質点として配置する空間であり、本論文では3次元の線形空間である。概念空間上の絶対的な位置情報 \bar{r}_i は客観的な意味を持たず、概念素間の相対的な位置関係が概念マップの中でのそれらの類似度を示す。

二つの概念素間には、二者からの関係から定義される類似度の逆数を自然長 L_j とするバネを定義する。外乱がない場合、これらのペアの関係はこの自然長に保たれる。その類似度を保持する度合である類似度の重要度は、バネの自然長を保持する度合であるバネ定数 k_j と定義できる。概念空間で自然長以上に伸びている概念素間には全体構造の中で類似性に歪みが生じており、Haptic デバイスはこの歪みを操作反力として直感的に提示する。また、概念素間距離の変化に対する抵抗の度合である類似度の変化許容度は、バネの摩擦係数 D_j と定義する。ある程度まで思考が進み、ある概念素ペアの関係を崩したくないとユーザーが判断した場合には、この摩擦係数を上げれば外乱に対してもペアの相対的關係を保持できる。

次に、質点として定義される概念素に関する要素に着目する。前述のように概念空間内の座標軸は客観的な意味を有しない。従って、概念素の階層関係を表現することは難しい。しかし、思考の過程で概念マップ構造を主観的に整理するためには、階層構造を導入することも有効であると考え、ここでは質点の質量 m_i によってそれを表現する。重要であると判断する概念素の質量を増加させて些細な外乱に対する位置変更を抑制できる。階層構造をさらに強化し、概念マップ形成における基準となる root の概念素については、それを基準点として概念空間中に固定する機能も操作の過程に導入できる。また、概念素の初期配置 $\bar{r}_{i,0}$ については、ユーザーが思考開始時に主観的に概念素を配置することで決められるが、それらの相対的位置関係がその後の収束の結果に大きく影響を及ぼす。

個々のバネの摩擦係数 D_j に対して、空間の摩擦係数

D は概念マップ全体の変化を妨げる度合である、概念構造全体の変化許容度と定義できる。思考の初期段階では摩擦を抑えて概念素が自由に動ける様に設定し、まとめの段階では逆に摩擦を加えることで全体構造の大きな変化を抑える。

以上の様に定義され、力学に則ったシミュレーションを実行すると、概念素はバネの弾性力や操作によって外部から入力される外力 \bar{F}_{i-ext} によって運動を行い、やがてエネルギーの極小値に収束し運動を停止する。その際の、概念素の運動速度 \bar{v}_i や加速 \bar{a}_i の状態は、操作入力に対する視覚情報により、ここで定義した概念の類似度の歪みの程度や優位性の表現として直感的にユーザーに提示されると期待できる。

4.2 操作感覚と概念モデル

ユーザーがある概念素を操作している際に提示される操作反力は以下の要素から構成される。

- 弾性力： 把持している概念素と他の概念素との類似度の歪みの量と方向
- 粘性： 操作している概念素の変化に対する許容度
- 慣性： 操作している概念素の重要性

実際に粘度やゴムを押す際に、それらの粘性や弾性、さらに慣性の違いは明確に知覚できる。従って、前項の様に定義した概念マップを操作することでも、同様にこれらの操作感覚の違いを直ちに認識できると期待される。例えば、操作感が非常に軽い概念素は、軽量であったり、接続されるバネのバネ定数が小さい、粘性が低い、などの要因が考えられるが、概念モデルの定義に従えば、これは優先度が低い概念素であったり類似性の重要度が低いものとなる。このような直感性の高い操作を重ね、概念がまとまるにつれて質量やバネ定数などのパラメータを操作していき、最終的には概念モデル全体の類似関係の歪みを抑えた”硬い”概念の構造を明確にできると考える。

また、ディスカッションの支援においては、参加者それぞれが有する複数の概念集合モデル間の関係の歪みを参加者自身の操作によって解消し、その過程から新たな発想や合意を見出せると期待している。Fig. 4 に示すよう

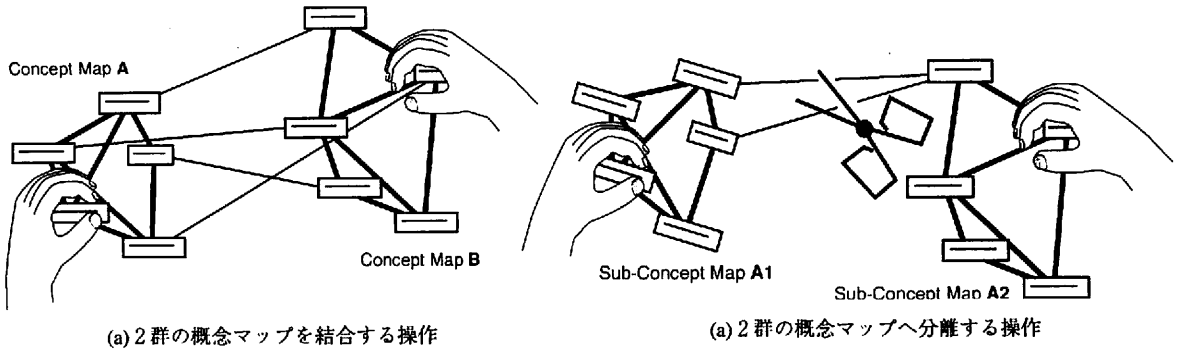


Fig. 4 複数の概念マップに関する操作

に、議論に先立ってそれぞれの参加者にはある程度まで自身の概念構造を確立させ、それぞれ概念マップの共通概念素をバネモデルで接合し、両者の概念マップをその歪みが最も少なくなる様に融和させることで、両者の持つ概念の差を埋めていけると考える。あるいは、逆に、混乱した共通概念をもつれた紐をほどく要領で分類し、結合の薄い部分で分割してお互いの見通しを立て直すなどして、コミュニケーションに役立てられると期待する。

5. 試作モデル

5.1 仮想スプリングネットワークモデル

前章で示した力学を導入した概念マップの運動と直接操作を仮想環境においてシミュレーションする方法について述べる。

概念マップは基本的に Fig. 3 に示されるような複数の質点が複数のバネによって接続されるモデルである。以下では Table 1 に示す記号を用いて説明を進める。自由運動を行なっている Concept_i へ接続されるバネから作用する弾性力 \bar{F}_{ij} は以下となる。

$$\bar{F}_{ij} = k_{ij} \cdot (|\bar{P}_i - \bar{P}_j| - L_{ij}) \cdot \bar{e}_{ij} - D_{ij} \cdot ((\bar{v}_i - \bar{v}_j) \cdot \bar{e}_{ij}) \cdot \bar{e}_{ij} \quad (1)$$

$$\bar{F}_i = \sum_{j: \text{connected to } P_i} \bar{F}_{ij} \quad (2)$$

Concept_i へ作用する外力は、この弾性力と空間からの粘性力、慣性、さらに外力であり、運動方程式は(3)式となる。

$$m_i \cdot \bar{a}_{i,t+1} = \bar{F}_i - D \cdot \bar{v}_{i,t} + \bar{F}_{i-ext} \quad (3)$$

Concept_i の加速度 $\bar{a}_{i,t+1}$ から差分計算により、式(4)(5)で速度と位置を近似的に得る。

$$\bar{v}_{i,t+1} = \bar{v}_{i,t} + \bar{a}_{i,t+1} \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$\bar{P}_{i,t+1} = \bar{P}_{i,t} + \bar{v}_{i,t+1} \cdot \Delta t \quad (5)$$

以上の処理をユーザーに操作されていない全ての概念素に関して行なう。

ユーザーに直接操作されている物体に関しては、まずシミュレーションの次ステップでの位置、速度、加速度の情報を Haptic Interface から得られた手先の運動情報に

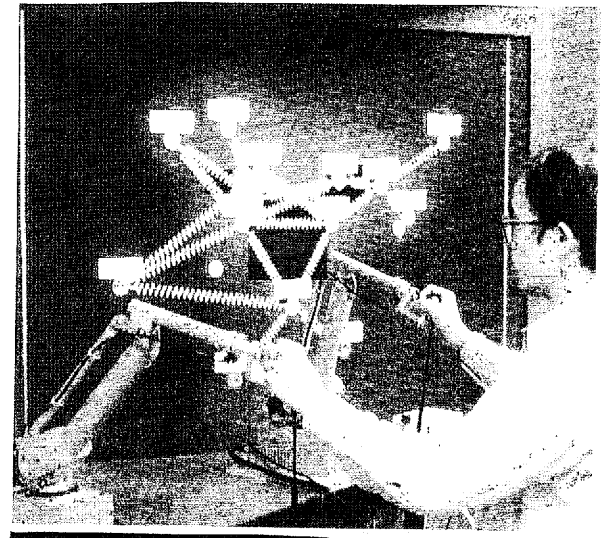


Fig. 5 試作システム

よって決める。

$$\bar{P}_j = \bar{P}_{hand} \quad (6)$$

$$\bar{v}_j = \bar{v}_{hand} \quad (7)$$

ここで操作されている概念素の運動方程式より操作している手先に提示すべき操作反力 F_{hand} は(8)式で示される。

$$F_{hand} = \bar{F}_j - D \cdot \bar{v}_j + \bar{F}_{j-ext} - m_j \cdot \bar{a}_{hand} \quad (8)$$

5.2 複数腕対応 VR システムによる実装

このスプリングモデルで表現される概念マップを提示し直接操作を可能とするために、Haptic Interface として Force Display を 2 基有する VR システムを試作した(Fig. 5)。概念モデルが表示される思考空間は大型のプロジェクタースクリーン上に視点位置追従型の時分割立体映像として表示される。同時に、6 軸 Force Display を介して操作入力と操作結果としての反力提示を両手に独立に行なえる。思考空間内には、概念マップとユーザーの手先の動きに合わせて動く手先アイコンが表示されており、

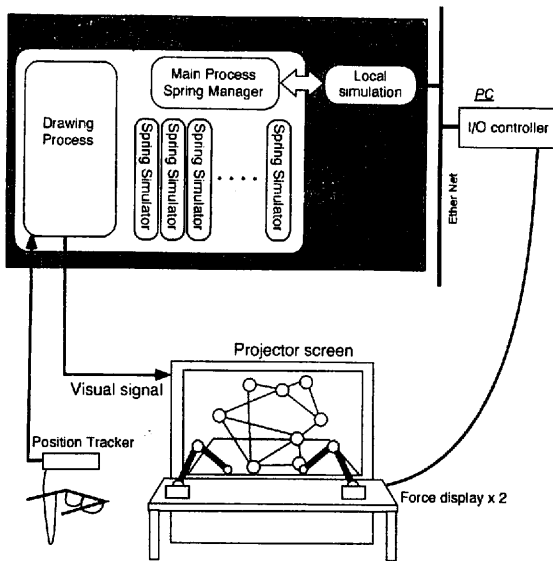


Fig. 6 試作システムの構成

この手先アイコンを概念素に重ね、グリップ先端のスイッチを操作することで概念素の把持と解除を制御する。両腕で概念マップを操作することによって、一方の手で基準となる概念素を保持し、他方で他の概念素の感触を連続的に比較しながら構造の整理を行なうといった、ごく自然な操作環境を実現できた。

Fig.6にブロック構成を示す。プロセスは高速処理を要求されるForce Displayの制御系統とバネシミュレーション系統、CG処理系統からなる。バネシミュレーション系は実時間で自然な動きを再現するために、Multi Threadによるプロセス分割を施し、これらを並列計算可能なSGI社ONYX上で実行する。

6. 今後の展開 - Thinking by hand manipulation -

本論文ではVR技術を適用し、本来は実体の無い思考活動を具象化し、この具象化の結果である概念マップを直感的に操作する過程から新しい発想を得ることを目的としたシステムの構想についてまとめた。まず、研究の背景として従来の発想支援システムについて整理し、その発展として思考概念を多感覚情報として操作するメリットについて検討し、概念マップをバネモデルとして定義し、概念マップの操作結果を操作反力として提示するための一手法をまとめた。さらに、この提案を実際にHaptic Interfaceを用いた環境上で試作した。

現状は、このプロジェクトの第一報として、従来の発想支援システムで得られている概念マップの特徴から考察して、トップダウン的に概念マップと力学モデルのアナロジーを構築した段階である。従って、今後の一番の

課題としては、客観的な手法の評価を行ない、我々の想定する感覚による思考モデルの認識が可能であるかの確認せねばならない。

また、思考の構造の認識に直感性を重視する本手法では、感覚情報間の矛盾についても考慮する必要がある。例えばFig.5に示す様に、試作環境では視認性を考慮して現実のバネの形状を模したCGによって概念素間を接続しているが、バネの形状や伸び具合といった視覚的な情報でそのバネのバネ定数や伸びといった、本来は視覚では伝わらない情報も伝達してしまう。この特性を有効に利用できれば全体構造のより直感的な認識に貢献できると期待できるが、反面、現実感を大きく損なう原因となる恐れもある。

さらに、試作環境では操作感覚の確認を行なう環境であり、一切のUser Interface (UI)を実装しておらず、現状ではテキストベースで与えられる概念素のデータベースを読み込んで仮想空間に提示するのみである。評価実験を行なうためにもVRの機能を生かした直感的なUIの実装が必要となる。例えば、提示手法ではバネや概念素のパラメーターは思考の進行にあわせてユーザーが主観的に変更することを検討しているが、このパラメータ変更の場合や、既存の概念マップに新しい概念素を追加する様な場合でも、例えばジェスチャーや音声入力などを併用して、UIによる操作が思考を妨げることがないように配慮しながら、適切な環境の設計をすすめていく。

参考文献

- [1] 角, 堀, 大須賀, "テキストオブジェクトを空間配置することによる思考支援システム", 人工知能学会誌, Vol. 9, No. 1, pp. 139-147, (1994)
- [2] 角, 小川, 堀, 大須賀, 間瀬, "思考空間の可視化によるコミュニケーション支援手法", 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J79-A, No. 2, pp. 251-260, (1996)
- [3] 田村, "記号間の力学に基づく概念マップ生成システム SPRING", 情報処理学会論文誌, Vol. 33, No. 4, pp. 465-470, (1992)
- [4] 吉住, 堀, 大須賀, "概念形成から形状設計までを支援する発想支援システムの一提案", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J80-D-II, No. 7, pp. 1887-1895, (1997)
- [5] 川喜田, "発想法", 中公新書, (1967)
- [6] Finke, Ward, Smith, 'Creative Cognition,' MIT Press, (1992)
- [7] Polany, "The Tacit Dimension," Routledge & Kegan Paul Ltd, (166), 伊東 訳, " : " 暗黙知の次元", 紀伊國屋書店, (1980)
- [8] 野間, 宮里, 岸野, "VR研究における力覚提示装置の分類とTOCUSを利用した試作装置の提案", ATR Technical Report, TR-C-0140, (1996)
- [9] Brooks, Ough-Young, Batter, "Project GROPE-Haptic Display for Scientific Visualization", ACM Computer Graphics, Vol. 24, No. 4, pp. 177-185, (1990)