知識工学と人工知能 58－3
（1988. 5. 11）

漠然性を含む空間状況解釈のための
ポテンシャル極小化アプローチ

山田 篤，西田 豊明，堂下 修司
京都大学・工学部・情報工学教室

空間的概念は人間の思考において基本的な概念である．本研究の目的は，与えられた制約を満たすシーンの再構成を通じて，漠然性を含む空間的概念の取り扱いの方法を示すことである．本論文では，例化による推論仮説，情報の暗黙的な順序づけ仮説と呼ぶ2つの作業仮説に基づく計算モデルとして，ポテンシャル極小化に基づく空間的制約解釈法を考案した．本手法では，空間的概念の意味を，与えられたパラメータ値の組がその概念にどれだけ違反するかを表すコスト関数（ポテンシャル関数）によって表し，全体のポテンシャルを最小とするパラメータ値の組を見出して，最も確からしい解釈とするものである．さらに柔軟な取り扱いをするために，領域や依存関係を用いて，衝突回避やフィードバック処理を行っている．

Interpretation of Spatial Situation using Potential Local Minimization

Atsushi YAMADA, Toyoaki NISHIDA, and Shuji DOSHITA
Department of Information Science
Kyoto University
Sakyo-ku, Kyoto 606, Japan

This paper describes a method for reconstructing spatial configuration from given symbolic constraints about objects. A theoretical device we present in this paper is called the potential model. It depends on two working hypothesis, one is inference by instantiation hypothesis, the other is implicit ordering hypothesis. The potential model provides a means for accumulating from fragmentary information. It is possible to derive maximally plausible interpretation from a chunk of information accumulated in the potential model. We also use region and dependency so that we can avoid collision and do feedback.

1. まえがき

人間は日常生活において，非定型的な情報から相手の意図を読み取り，言外の要求を自発的に実行したり，部分的な情報から全体的なイメージを再現したりしている．これは，我々が「常識」と呼ばれる一連の知識を共有しており，常識を用いて様々な情報を解釈しているからである．人間が扱っているような非定型な情報を処理し得る高度な知識情報処理システムを構築するためには，計算機が人間のもつ常識を共有することが一つの解決であると考えられる．

空間的概念は人間が常識的にもっている概念の一つである．人間は距離，位相，方向，形状，動きなどの空間的概念に関して豊富な語彙をもち，空間を比喩対象に用いることも多い．しかし，我々が日常取り扱っているような空間的概念を計算機でどのように処理するかについては，あまり研究がなされていない．

本論文では，空間的概念を処理するための基礎研究として，我々が提案するポテンシャル極小化に基づく空間的制約解釈モデル（以下，ポテンシャルモデルと呼ぶ）を用いて，定性的な空間的制約に常識的な解釈を施し，空間的シーンを再構成する方法について述べる．

以下では，空間的概念という問題領域を明らかにした後に，ポテンシャルモデルの基本的な考え方と，それに基づいて空間的概念を表現する方法について述べる．さらに特殊な場合として，対象が存在し得ない領域や対象同士の衝突，より確からしい解釈を導くための方法について考察する．

2. 空間的概念

空間的概念は，距離，位相，方向，形状，動きなど多くの概念を包括したものである．人間はこれらの概念を常識的にもっており，必要に応じて推論や問題解決に用いている．

我々が日常用いている空間的概念の表現には定性的なものが多い．このような表現は情報提示者側に知識が不足している場合に見られるが，その他にも，より詳細な情報が相手に有用でないと判断される場合に枝葉末節を省いたり，全体像の把握を促すために詳細を故意に伝えなかったりすることがある．

以下では，我々がもつ空間的概念[1]に関して，主に漠然性という観点から考察する．

2．1 距離概念

距離とは，ある空間における2者間の隔たりの最短の長さをいう．従って，ある広がりをもった2者間の距離は，その最も接近しているそれぞれの対象に属する2点間の距離となる．

一方，日常用いられる距離概念はあまり厳密なものではないことが多い．人間は，「2m前後」，「約3km」のような不確かな捉え方をすることがある．距離は連続的に変化する量であるから，このような不確かな表現によって表される距離が実際にもつ値は連続的な可能性の広がりをもち，その不確かな表現を満たす距離の明確な範囲は存在せず，表現されている値から離れるに従い漸次その可能性が減少していく．このような連続的な広がりをもつ可能性からの選択の問題を漠然性としてとらえる．

また，2者間の距離を他の2者間の距離と比較して，相対的に考えることがある．「京都大学から京都駅までは，京都大学から北大路駅までの倍はある．」というような場合がこれにあたる．この場合，何kmといった絶対的な距離概念は用いずに距離を考えている．

さらに，「2m以上」，「3km以下」，「近い」，「遠い」のような制限が入って，選択の幅が狭められることもある．

2．2 方向概念

方向概念は，実空間的なものと地理的なものにわけることができる．どちらの場合も，何かを中心にすえて，そこからの方向という表現法をとる．

実空間における方向概念としては，前，後，左，右，上，下，あるいはこれらの複合した概念がある．このうち上と下は重力の向きとも関連し，ある程度固定的である．これは体がどういう状態であろうと上と下は常に一定の方向を表すことからもわかる．これに対し，前，後，左，右は比較的流動的で，中心となる対象自身の向きを考慮したものと，視点との相対的な位置関係を考慮したものの2通りがある．対象自身の向きから見た場合，対象の向いている方向を前として考える．視点から見た場合は，対象から見て視点のある方向が前であり，左右は視点が対象の方向を向いているときの視点の左右をそのまま対象中心にうつす．従って，対象の向きから見た前方向に視点をおいて対象を見た場合，対象自身の右と視点から見た右は反対の方向を指すことになる．このような不連続な解釈のいずれを選択するかという問題を曖昧性としてとらえる．

次に，地理的方向概念としては東，西，南，北を基準とした方位の概念がある．

すべての方向概念に共通して，ただ一つ真にその表現が表す方向があるのではなく，多くの場合は，その表現の基準となる方向から少しずれても差し支えない．

また，どこまでがその表す方向の許容範囲内かという限界も明確には存在せず，漸次確からしさが減少する．このように方向概念もまた連続的に変化し，漠然性をもつ．

２．３　形状概念

空間的対象の形状は段階的な近似によってとらえられることが多い．例えば，テレビは荒い近似では単なる直方体としてとらえられ，より詳細な近似をするに至ってはじめて，様々な突起物の存在や全体としての直方体からの偏向が認められる．このように，形状概念は，対象の一つの属性として様々な詳細度のレベルのものが存在する．

形状はまた実対象に対してのみならず，対象の属するカテゴリーの属性としてもあらわれる．個別のコップの形状は一つ一つ異なるが，それらとは別に一般にコップというカテゴリーがもつ形状属性があると考えることもできる．これは対象の機能と形状が相互に関連していることを表す．

２．４　位相概念

位相概念は，対象間の連結関係を把握するときに用いられる．また，近傍の概念を用いると，同相の対象は連続的な変形を加えることによって，同一のものにすることができる．

２．５　運動概念

運動は一般には対象の空間的属性の時間的な変化としてとらえられる．連続的な時間変化に対応して，運動も連続的であると考えられる．運動の種類としては距離の変化，方向の変化，形状の変化などがある．

３　ポテンシャルモデル

３．１　ポテンシャル極小化法を用いた空間的概念の取り扱い

本論文では，空間的な概念のもつ連続性を表現するために，空間的属性の解釈の連続的な変化を連続関数を用いて表すことを考える[8][9]．関数の定義域としてある対象の一つの空間的属性に関する特定の解釈をパラメータ化したものを，値域としてその解釈が満たすべき制約にどれだけ違反するかを表すコストをとる．解釈の連続的な変化に応じてコストを連続的に変化させることにより，概念の連続性を表現する．物理におけるポテンシャルとのアナロジーから，このコストをポテンシャル，ポテンシャルを計算する関数をポテンシャル関数と呼ぶ．このとき，ポテンシャルを最小とするパラメータ値の組合せが最も確からしい解釈となる．この解釈を最尤解釈と呼ぶ．

我々は不確かな情報を取り扱う際に，例化による推論という作業仮説(Inference by Instantiation Hypothesis)をたてる．漠然性を含んだ状況を考えるときの我々の思考を内省してみると，我々は漠然性を含んだ状況に関して直接推論するのではなしに，漠然性を含まないいくつかの具体的な状況を想定し，それによって推論をしているのではないかと考えられる．この場合に重要なことは，実際には他の解釈をとる可能性もあることを十分にふまえた上で，例化を行なうことである．換言すれば，ある例化が状況から判断してふさわしくないと判断されれば，別の例化を行えるような機構が必要となる．

本手法では，基本ポテンシャル関数を組み合わせることで対象の一つの空間的属性に関するポテンシャル関数を構成的に導出する．ポテンシャル関数を重畳することにより，複数の制約を同時に考慮にいれることができる．また，ポテンシャル関数の重畳性は解釈の修正を容易にする．たとえば，ある対象の一つの空間的属性に関する制約が追加された場合には，

(1) 既存の基本ポテンシャル関数のパラメータを修正する．

(2) 新しい基本ポテンシャル関数を追加する．

のいずれかの方法を用い，ポテンシャル関数を修正することによって対応をはかる．

ポテンシャル関数で，最尤解釈を求める問題は最適化問題の一種であり，これを一般的に解決する方法は知られていない．アニーリング法(Simulated Annealing)[4]を用いることも考えられるが，本論文では簡単のため，ポテンシャルの最小値にかえて，極小値を求める方法を採用した．これをポテンシャル極小化法と呼ぶ．ポテンシャル極小化法では，パラメータの任意の初期値の組合せから出発し，それに最も近いポテンシャル極小点を数値的に求める．これは，初期値からはじめて，各点でポテンシャル関数によって形成されるポテンシャル場の傾斜に比例した摂動をかけること（最急降下法）により行う．この動きが止まったところでポテンシャルは極小値を取るため，そのときの解釈を確からしい解釈の一つとして採用する．これによって，例化による推論が可能となる．

与えられた制約に曖昧性がある場合には，ポテンシャル関数に各々の解釈に対応する極小点が存在することが望ましい．この場合も，ポテンシャル極小化法では初期値に最も近い解釈がただ一つ選ばれる．与えられた制約にn通りの曖昧性があるときに，ポテンシャル

関数に対応するn個の極小点があれば，我々のモデルは理想的であると考えられる．この点は，将来への研究課題である．

3．2　依存関係の利用

漠然性を含んだ入力を解釈することは人間にとっても困難な作業である．我々が空間的な状況について考えるときには，すべての対象の属性を同時に考慮しなければならないような状況に遭遇することはまれである．協調的なコミュニケーションでは，話し手は自分の意図を聞き手により受け取り易くするために，発話に様々な手がかりを盛り込んでいると考えることができる．例えば，空間的状況が自然言語を用いて伝達される場合には，言語的な手がかりにより対象空間の状況の判断順序に関する情報が得られることが多い．通常の文脈で，「AはBの前にある」という発話は，Bが以前の文脈に登場しており，Bの位置や向きがすでにわかっていることを前提にしている．このように，聞き手が空間のメンタルイメージを組み立てるための情報参照手順が暗黙のうちに発話の言語構造として与えられているという仮説を情報の暗黙的な順序づけ仮説(Implicit Ordering Hypothesis)と呼ぶ．このような順序づけを抽出することにより，対象空間の全状況の解釈を同時に行なうよりも計算量を減少させることができる．

本論文では，複数の対象の空間的属性値が決定される順序関係は入力として与えられると仮定する．自然言語を対象とした場合には，この順序関係は入力文章の言語的な解析により抽出することができる．

順序関係において，ある対象の空間的属性Aが別の対象の空間の空間的属性Bから決定されるとき，AとBの間に依存関係があるといい，Aを子側，Bを親側と呼ぶ．空間的属性値の推定は親側から子側へと行う．

さらに本手法では，依存関係に従った解釈の結果，局所的に確からしさの低い解釈が出現した場合に，依存関係を逆にたどって子側から親側へ影響を及ぼすフィードバック処理を施す．これにより，全体的により確からしい解釈を導くことができる．フィードバック処理については4.3節で述べる．

4．3次元ソリッドモデルを用いた空間的シーンの復元

4．1　空間概念の特性化

本論文で用いた3次元ソリッドモデルでは，空間的概念を，位置，向き，大きさ，形状を示す以下のようなパラメータによって表現する．

(1) 位置パラメータ

広がりをもった対象の位置は，どこをその対象の位置をはかるときに用いるかを決めておくことにより，1点の座標で表すことができる．3次元剛体空間において今，便宜的にこの1点として対象の底面の重心をとるものとする．位置を表すパラメータとしてはこの点の座標(x, y, z)を採用する．位置を表すパラメータは，このx, y, zの3つとなり，パラメータ空間は3次元空間になる．

(2) 向きパラメータ

3次元対象の向きは2つのベクトルを用いて一意に定めることができる．この2つのベクトルとして，対象の前を表す方向ベクトル(f-s, f-t, f-u)と対象の上を表す方向ベクトル(u-s, u-t, u-u)を用いる．これにより，向きを表すパラメータは，f-s, f-t, f-u, u-s, u-t, u-uの6つとなり，向きに関するパラメータ空間は最高6次元の空間になる．

(3) 大きさパラメータ

対象の形とは独立に大きさをパラメータ化するために，対象の大きさを対象の外接直方体の幅w，奥行d，高さhを用いて表す．よって，大きさを表すパラメータはw, d, hの3つとなり，大きさに関するパラメータ空間は3次元となる．

(4) 形状パラメータ

対象の形状は，記述の詳細度に応じていくつかのモデル化ができる．本論文では，対象間の漠然性をもつ関係の解釈が目的であるので，形状の本格的な取り扱いは本論文の範囲外とし，形状は直方体，角柱，錐，球等の簡単なプリミティブを用いて表す．更に詳細な形状の記述は，PSネットの入れ子構造を用いることにより，対象の形状の特徴点の位置パラメータ等に関するPSネットを組み込めば可能となる．

図1に，対象のパラメータ化の例を示す．

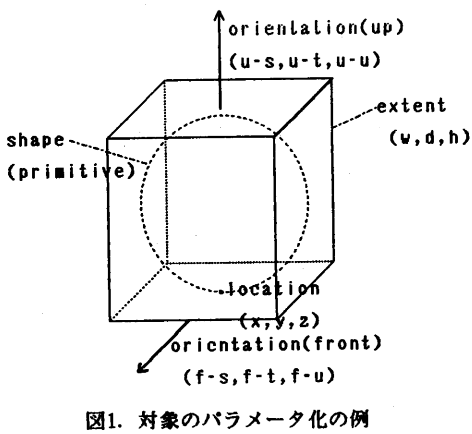


図1．対象のパラメータ化の例

４．２　3次元空間概念のポテンシャル関数表示

４．２．１　距離に関する制約

ここでは2つの対象の相対的な位置関係の一つとして，対象間の距離に関する制約について考える．ある対象を基準として，そこから一定の距離のところでの存在が最も確からしく，そこから離れるに従い確からしさが減少していく状況を考える．これを対象間の実際の距離と理想的な距離との差の2乗に比例したポテンシャルを用いて表す．点$M(x_0, y_0, z_0)$からおよそ距離Lだけ離れているという制約をもつ対象の，点$Q(x, y, z)$におけるポテンシャル$P(x, y, z)$を以下のように定義する．（ただし，$K(>0)$はポテンシャル場の急峻さを表す定数である．）

$$P(x,y,z) = \frac{K}{2}\left(\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}-L\right)^2$$

このとき，ポテンシャル場の傾斜から対象がうける力は，ポテンシャル関数の符号を変えたものをx, y, zそれぞれの軸に関して偏微分すれば求めることができる．この力$(f_X(x,y,z), f_Y(x,y,z), f_Z(x,y,z))$は以下のようになる．

$$f_X(x,y,z) = K\cdot\left(\frac{L}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}}-1\right)(x-x_0)$$

$$f_Y(x,y,z) = K\cdot\left(\frac{L}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}}-1\right)(y-y_0)$$

$$f_Z(x,y,z) = K\cdot\left(\frac{L}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}}-1\right)(z-z_0)$$

このポテンシャル関数の等ポテンシャルの点をつなげると球面を成す．これを図2に示す．

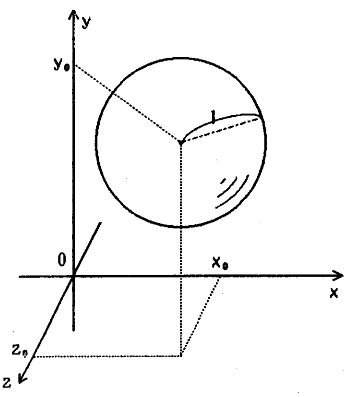


図2．距離を表すポテンシャル関数の等ポテンシャル面

相対的な距離を用いた制約は，基準となる距離が何らかの形で求まれば，上と同じ形にすることができる．

４．２．２　間に関する制約

対象の相対的な関係として，2つの対象の間に別の対象があるという関係を考える．2つの対象の間を一定の比率に分ける点で最もポテンシャルが小さくなる関数を考える．点$M(x_a, y_a, z_a)$と点$N(x_b, y_b, z_b)$の間を$t:(1-t)$にわけるところにあるべき対象の，点$Q(x, y, z)$におけるポテンシャル$P(x, y, z)$，およびポテンシャル場からパラメータがうける力$(f_X(x,y,z), f_Y(x,y,z), f_Z(x,y,z))$は次のようになる．（$K(>0)$はポテンシャル場の急峻さを表す定数である．）

$$P(x,y,z) = \frac{K}{2}\{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2\}$$

ただし，$x_0=x_a+t(x_b-x_a)$

$y_0=y_a+t(y_b-y_a)$

$z_0=z_a+t(z_b-z_a)$

$f_X(x,y,z)=-K(x-x_0)$

$f_Y(x,y,z)=-K(y-y_0)$

$f_Z(x,y,z)=-K(z-z_0)$

４．２．３　領域に関する制約

空間的概念の中に含まれる境界をもつ概念の表現のために，禁止領域を用いる．禁止領域はそこに対象が存在し得ないことを表す領域である．禁止領域以外の領域は対象が存在し得る領域となる．禁止領域は対象がある平面の片側にあることを禁止する禁止半開空間の論理的な演算によって表す．禁止領域は，禁止半開空間の共通部分(Intersection)ないし結(Join)によって表される．禁止領域は閉空間または半開空間のいずれかである．ある点Qが禁止領域に含まれるための条件は，禁止半開空間の結に対しては，任意の禁止半開空間にQが含まれること，禁止半開空間の共通部分に対しては，すべての禁止半開空間にQが含まれることである．凸禁止領域を構成する禁止半開空間が表す領域のうち，その共通部分に含まれない部分と，凹禁止領域を構成する禁止半開空間の境界面のうち，その共通部分に含まれる部分は影響を及ぼさない．

禁止半開空間は，境界面上の1点(x_0, y_0, z_0)と，この境界面の法線ベクトル(a, b, c)によって表す．境界面に対し法線ベクトルの負の方向を禁止される領域とし，点$Q(x, y, z)$がこの半開空間に含まれるための条件を，

$$a(x-x_0)+b(y-y_0)+c(z-z_0)<0$$

で表す．これを図3に示す．

４．２．４　方向に関する制約

対象からの方向を表すポテンシャル関数として，等ポテンシャルの点をつなぐと円錐面を成すものを考え

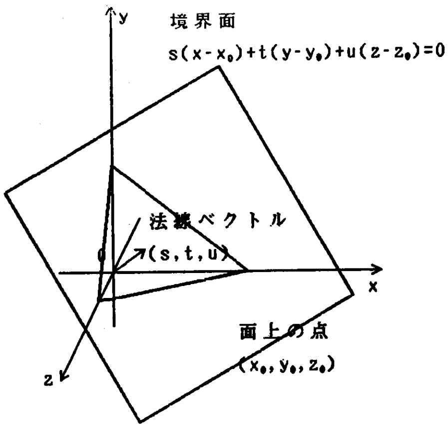


図3. 禁止半開空間の表現

る．たとえば，点$M(x_0, y_0, z_0)$を基準として，z軸の正方向を表す方向ベクトル(0,0,1)によって表される方向ポテンシャル$P(x,y,z)$および$(f_X(x,y,z), f_Y(x,y,z), f_Z(x,y,z))$は，次のようになる．

$$P(x,y,z)=\frac{K}{2}\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{(z-z_0)^2}$$

（ただし，$z-z_0>0$）

$$f_X(x,y,z)=-K\cdot\frac{(x-x_0)}{(z-z_0)^2}$$

$$f_Y(x,y,z)=-K\cdot\frac{(y-y_0)}{(z-z_0)^2}$$

$$f_Z(x,y,z)=K\cdot\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{(z-z_0)^3}$$

この様子を図4に示す．なお，このポテンシャル関数は方向ポテンシャル(0,0,-1)をも表しているので，括弧内の条件により禁止半開空間を併用する．

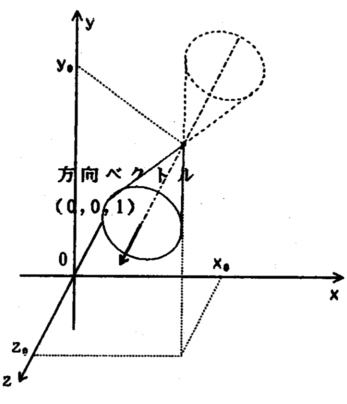


図4. 方向を表すポテンシャル関数の等ポテンシャル面

任意の方向を表すポテンシャル関数は，ある方向ベクトル(s,t,u)について，上記の方向ベクトル(0,0,1)を表す関数を一般化すればよい．ベクトル(s,t,u)をベクトル(0,0,1)に重ねる変換[6]を考え，ポテンシャルは変換後の座標でベクトル(0,0,1)について計算することにより，一般化を行う．ベクトル(s,t,u)をベクトル(0,0,1)に重ねる変換は次のように表される．

$$\begin{pmatrix}x\\y\\z\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}w/V & -st/(wV) & -su/(wV) & 0\\0 & u/w & -t/w & 0\\s/V & t/V & u/V & 0\\0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x'\\y'\\z'\\1\end{pmatrix}$$

ここで，$V=\sqrt{s^2+t^2+u^2}$，$w=\sqrt{t^2+u^2}$

また，これは$t=u=0$の場合は計算できないので，別に次のようになる．

$$\begin{pmatrix}x\\y\\z\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0 & 0 & -s/|s| & 0\\0 & 1 & 0 & 0\\s/|s| & 0 & 0 & 0\\0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x'\\y'\\z'\\1\end{pmatrix}$$

4．2．5　面の上に関する制約

平面は，面上の1点(x_0, y_0, z_0)と，この面の法線ベクトル(a,b,c)によって表す．点$Q(x,y,z)$がこの面上にあるための条件は，

$$a(x-x_0)+b(y-y_0)+c(z-z_0)=0$$

が成り立つことである．

4．2．6　向きに関する制約

ある対象の向きが，特定の方向ベクトル(s,t,u)を向くという拘束条件を考える．これは対象の実際の向き(f-s, f-t, f-u)と与えられた方向ベクトルのなす角θに比例したポテンシャルを用いることにより，表現できる．

4．3　3次元対象世界の状況の推定

各属性のパラメータ値の最尤値は依存関係にしたがって，ポテンシャル極小化を施すことによって得られる．ここでは，それ以外の特殊な場合について述べる．

4．3．1　方向ベクトルの計算

方向ベクトルは，それが方角のような絶対的な方向か，それ自身の向きから計算される相対的な方向か，視点からの見え方を考慮した視点相対的な方向かにより，求め方が異なる．

絶対的な方向の場合には，方向ベクトルそのものが与えられる．相対的な方向の場合には，基準となる対象の上と前を表すベクトルから目的の方向ベクトルは

計算できる．視点相対的な方向の場合には，前を表すベクトルを視点の位置と方向の基準点の位置から計算し，上は絶対的な上を用いることにより計算できる．

4．3．2　禁止領域からの脱出と非訪

あるパラメータが禁止半開空間内に存在するとき，そこからの脱出は禁止半開空間の境界面に垂直な成分と平行な成分に分けて考える（3次元の場合）．

今，禁止半開空間が境界上の点(x_0, y_0, z_0)と法線ベクトル(s, t, u)によって特性化されているとする．境界に垂直な成分は，禁止半開空間内の初期位置を(x_1, y_1, z_1)として，1回につき境界面と初期位置の距離の1/nだけ摂動をかける．点と面の距離は，

$$\frac{s(x-x_0)+t(y-y_0)+u(z-z_0)}{\sqrt{s^2+t^2+u^2}}$$

によって計算する．境界面に平行な成分は禁止半開空間内のその点でポテンシャル極小化法から計算された摂動の境界面への射影ベクトルを使用する．ある点でパラメータにかかる摂動を(f_x, f_y, f_z)とすると，この境界面上への射影は，

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t^2+u^2 & -st & -su & s(sx_0+ty_0+cz_0) \\ -ts & s^2+u^2 & -tu & t(sx_0+ty_0+cz_0) \\ -us & -ut & s^2+t^2 & u(sx_0+ty_0+cz_0) \\ 0 & 0 & 0 & s^2+t^2+u^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

なる変換を用いて，

$$(t^2+u^2)f_x-stf_y-suf_z$$
$$-stf_x+(s^2+u^2)f_y-tuf_z$$
$$-suf_x-tuf_y+(s^2+t^2)f_z$$

と計算できる．

パラメータに摂動をかけた後に禁止半開空間へはいる場合に備えて，禁止半開空間への進入を禁止する．このとき，禁止半開空間へ進入した分の摂動を点と面の距離を用いて計算し，その分だけを境界面に射影して，禁止半開空間へ入らないようにする．

4．3．3　対象の衝突回避

対象空間内の全ての対象は特別の場合を除いて，互いに衝突することがないように配置する必要がある．衝突の検査はその時点ですでに位置と大きさが確定している全ての対象に対して行う．このため，パラメータ計算の段階で，位置と大きさのうち，残っていたパラメータが計算される時に，衝突回避を行う．パラメータに摂動をかける度に，対象の大きさの分を実際に拡張して，多面体同士の位置関係を検査することは現実的でないので，ここでは別の方法を考える．

初めに，衝突回避対象のそれぞれについて，現在摂動をかけている対象の向きと大きさから，位置パラメータが衝突回避対象に対してどこまで近づけば衝突することになるかを計算する．次にそれぞれの衝突回避対象を中心として，今計算した衝突が起こるところまでを禁止領域に指定する．こうすることにより，以降は逐一拡張して多面体同士の関係を計算することなく，衝突検査は禁止領域と点の関係により判定できる[7]．この過程を2次元の場合について図5にモデル的に示す．

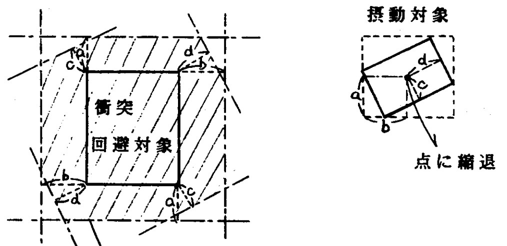


図5．対象間の衝突の回避

判定の結果，禁止領域内に点が存在するときには，実際には衝突が起こっていると考えられるので，禁止領域からの脱出の手法を用いて，対象を禁止領域外に持っていく．この過程が衝突の回避を表している．禁止領域からの脱出は，構成禁止半開空間の1つを選び，その禁止半開空間からの脱出を実行する．

4．3．4　子側からのフィードバック

対象間の依存関係からパラメータを決定していく過程において，子側でポテンシャルが不当に高くなった場合に，親側を修正することによって解決をはかる．ポテンシャル極小化法によって求められたパラメータ値が禁止領域内に存在して否定された場合等がこれに当たる．

子側からのフィードバックをかけるために，作用・反作用の概念を用いる．子側から親側への影響は，親側から子側へ及ぼす力（作用）と大きさは同じで向きが逆の力（反作用）を子側から親側へかけることにより実現できる．フィードバックの影響は，不動PS以外のすべてのポテンシャル空間がうける可能性がある．従って，フィードバックをかけることにより，初めに適当に値を入れておいた未定義PSのパラメータの値が決まることもある．

5. 実験と検討

5. 1 実験システムの概要

以上に述べたポテンシャルエネルギー極小化法に基づく空間的状況を記述した拘束条件の解釈法の有効性を確かめるために，実験システムを作成した.

実験システムはLispマシンSymbolics3650上にCommon Lispを用いて試作した．今回は，大きさや向きの影響を考慮にいれた，対象の位置の解釈に関する部分を実現した．また，すべてのパラメータの初期値は，なんらかの値を予め与えておくものとしている．システムに対する入力は，空間的な制約を表す関係表現の形で与える．今回用いた関係表現の例を図6に示す．システムの出力は，Symbolics上の3次元オブジェクト作成エディタ&データベースS-GEOMETRYを用いてディスプレイ上に表示する．対象の形状に関する考察は行っていないので，形状はこのエディタで予め作成したものを使用している.

・(is-in-rel-front-of B A)

BがAの向きから判断して，Aの前にあることを表す.

関係するパラメータ空間は，

Aの位置パラメータ空間（親側）

Aの向きパラメータ空間（親側）

Bの位置パラメータ空間（子側）

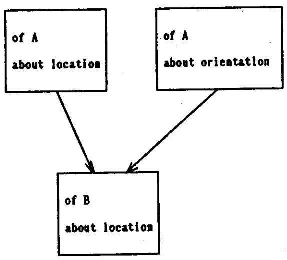


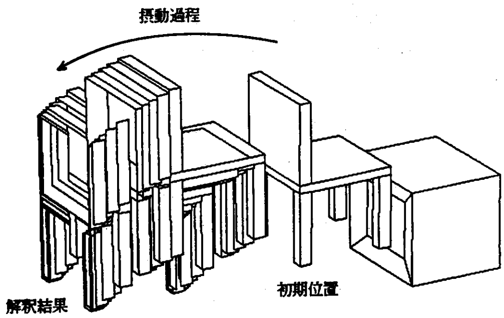
図6. 空間的な制約を表す関係表現の例

図7(a)に「椅子」が「テレビ」の前にあることが宣言されたときの，ある初期状態から解釈結果にいたるまでの摂動の過程を示す．図7(b)では同様の制約に対して，初期状態として衝突を起こした場合の様子が示されている.

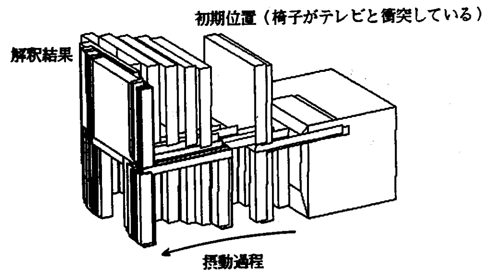
図8では，椅子がテレビの前にあるという制約のもとに，テーブルをテレビと椅子の間とおこうとしたところ，おけないのでフィードバックがかかって，椅子がテレビの前という制約を満たしつつ動かされている.

5. 2 実験システムに関する考察

一般に常識による補完を行いながら推論を行うときに，情報の送り手と受け手の間で誤解が生ずるのは，

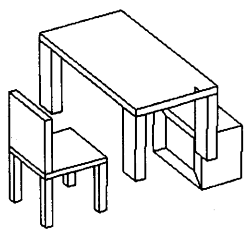


(a) 通常の方向ポテンシャルの作用例

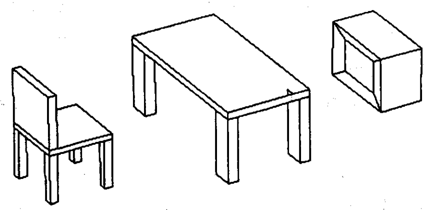


(b) 衝突の回避例

図7. システムの動作例



(a) フィードバックがかかる前



(b) 最終状態

図8. フィードバックの動作例

以下のような場合である.

(1) 知識の相違

解釈に用いる知識が送り手と受け手とで異なる場合には, 受け手は送り手の意図と違った解釈をする可能性がある.

(2) 情報の不足

解釈のもととなる情報が不足しており, 唯一の解釈ができない場合には, 受け手はその情報の解釈としては正しいが, 送り手の意図とは違った解釈をする可能性がある.

(3) 解釈の過多

解釈過程で受け手が常識の適用を, 送り手の予想以上に行った場合には, 受け手の解釈は送り手の意図とは異なる可能性がある.

(4) 解釈の不足

(3)とは逆に, 受け手が常識の適用を送り手の予想ほど行わなかった場合には, やはり受け手の解釈は送り手の意図とは異なる可能性がある.

空間的な状況の解釈において, (1)は解釈のための常識としてどのようなものをもつかという問題と関連する. 例えば「前」という概念をどう解釈するかということがこれに当たる. これは本手法では, 解釈に用いる関数の形としてあらわれる. この問題を解決する唯一の方法は, 大規模な心理実験を行って人間がどの様に空間的な概念を捉えているかを明らかにすることであると考えられる. しかし, 本論文では, ある解釈のための知識を仮定した場合に, その解釈を実際に導き出すための機構の整備が現状において必要であると考え, 解釈に用いる関数としては簡単なものを用いて, (1)に起因する誤解は取り扱っていない.

(2)の場合には, 与えられた情報だけでは複数の解釈が存在する. 本手法では, 一時にはただ一つの解釈例を提示するが, 実際にはそのときの条件を満たすような解釈は, すべて可能な状態としてもちうる. 従って, 後から新たな拘束条件が入ってきたときに, 別の解釈をもとにした例へ簡単に移行できる.

(3), (4)はそれぞれ, 解釈のための知識の適用の仕方に関するものである. 本手法では解釈を一つの例として提示するため, 常に解釈過多(Over-estimated)になる可能性を含んでいる. いつ, どれだけの詳細度で解釈を施すべきかについては検討の余地がある. 本論文では(1)と同様の理由で, 必要となったときに最も詳細に状況を推定する方法について検討した. 本手法を用いたシステムと相互作用的に解釈を進めることによって, このような誤解の修正は可能になると考えられる.

実際にシステムを試作した結果, ポテンシャル極小化法を用いた空間的拘束条件の解釈は, 漠然性を含む概念の解釈として妥当な例を導くことができることが確認された. また, ポテンシャル極小化法の枠組みの中で, 領域などの不連続な概念を処理できることもわかった. さらに, 例を提示しながらの解釈の進行は, 情報提供者と解釈実行者が相互作用的に解釈作業を進めていくときに, 有効な手段であることがわかる.

本研究では, 位置, 向き, 大きさなどの空間的概念のみを対象としたが, 実際の空間を対象領域とする推論を行うためには, この他に力学や運動学などの知識を取り入れ, 対象の機能や組成等の属性を統合的に取り扱う必要がある. 強力な解釈機構を構成することにより, 柔軟な言語理解システムを構築することが可能となる.

今後は, ポテンシャル極小化法を様々な空間的概念の解釈に適用するとともに, 本手法を用いて時間的な連続変化としての運動を解析する予定である.

6. 関連研究

空間的な概念の取り扱いを考えた場合には, 空間的概念が本質的にもつ連続的な変化の可能性を考慮にいれた上で曖昧性や漠然性の問題を解決することが必要である.

従来の研究では, 空間的概念はあらかじめ量子化され, 記号的表現に置き換えて処理されることが多かった. このような方法では, 記号に置き換えることで空間的概念のもつ連続変化の可能性を捨象している. G. Novakの研究[5]では, 対象を簡単なカテゴリーに分類しモデル化を行った. ある場合には人は質点としてモデル化される. 各対象は固有のケースフレームをもち, 前, 後, 左, 右, 上, 下などの位置情報に対応して, ケースフレームの各スロットが用意された. この表現は, 記号化する際に一意な解釈を与え, その後は単純な記号処理によって操作するため, あまり複雑な処理には向いていない. また, 複数の対象間の関係も離散的な記号処理によって表されるため, 漠然とした状況を表現できない.

位置に関して漠然とした可能性の広がりを表現するための手法として, E. Davis, D. McDermottによるファジィモデル[2][3]がある. ファジィモデルでは, ある対象と別の対象との相対的位置関係はその対象のもつ局所的な座標系(frob=frame-object)を用いて表す. 対象の正確な位置が決められない場合の暫定的な位置の決め方として, その中では一定の確率で存在し, 外では存在確率が0になるような領域の概念(fuzz box)が用

いられた．この手法は，領域の取り方と，対象が存在し得る領域と存在し得ない領域の境界で対象の存在確率が不連続に変化することに問題がある．もとの空間的な概念が連続的であった場合，この不連続性は不適当である．また，ファジィモデルでは，漠然性の表現と弱い例化がfuzz boxによってなされていると考えることができる．ファジィモデルではfuzz boxの中のどの点を例として採用するかは自由である．fuzz boxがうまく重なっていけば，選択の範囲は狭まっていく．fuzz boxが重ならなかった場合にはモデルの作り替えが必要と考えられるが，この問題にはうまく対応できない．

我々の手法は，漠然性に関する制約を，与えられた定義域からコストへの関数として定義し，全体のポテンシャルが最小である位置を見出して，最も確からしい解釈としようというものである．これにより，上に述べたような存在確率の不連続性の問題は解決できる．また，すべての制約を一様にポテンシャルを用いて取り扱うのではなく，領域や，依存構造などを利用して，柔軟な取り扱いを行っている．

7．むすび

本論文では，漠然性を含んだ空間的な概念の取り扱いに関して，ポテンシャル極小化法を用いた空間的制約の解釈について述べた．

ポテンシャル極小化法は，漠然性をもった制約を解釈して，確からしさの高い一つの例を提示することを目的としている．本手法では，漠然性をもった概念の解釈の可能性を，ポテンシャル関数という形で表現することにより，様々な漠然性に対応できる．ポテンシャル関数は，ある解釈が満たすべき制約にどの程度違反するかを表すコストを計算する．複数の拘束条件に対しては，ポテンシャル関数を重畳することで対応する．ポテンシャル関数の重畳により，解釈の修正が簡単に行える．また，空間の中にあらわれる領域などの不連続な概念も，本手法で用いる摂動法の枠組みの中で処理できる．

本手法では，空間的属性に関する制約に付随する依存関係を用いている．3次元剛体空間を対象とした解釈を行うために，空間的属性を表すパラメータ空間によるネットワークを導入した．さらに，局所的にポテンシャルが高くなる場合には，フィードバックをかけることで，より確からしい解釈の導出を試みた．

このように，ポテンシャル極小化法は，漠然性の問題について，一つの解決を与えており，漠然とした知識をもとにした推論への応用が期待できる．

参考文献

[1] A.Herskovits:Language and spatial cognition, Cambridge University Press (1986).

[2] D.McDermott and E.Davis:Planning Routes through Uncertain Territory, Artificial Intelligence, 22, pp.107-156 (1984).

[3] E.Davis:Organizing Spatial Knowledge, Report 193, Yale University (1981).

[4] 深尾：アニーリング法－一つの最適化手法，電子情報通信学会誌，Vol.70，No.12，pp.1247-1250 (1987).

[5] G.S.Novak Jr.：Representations of Knowledge in a Program for Solving Physics Problems, in Proc.IJCAI-77, pp.286-291 (1977).

[6] プラストック，カレイ：コンピュータグラフィックス，マグロウヒル大学演習シリーズ (1987).

[7] 杉原：図形の移動と変形に関する推論技術，情報処理学会誌，VOL.28，NO.11，pp.1485-1492 (1987).

[8] 山田，西田，堂下：連続ポテンシャル場を用いた位置関係の推定，情報処理学会，知識工学と人工知能研究会，50-3(1987).

[9] 山田，西田，堂下：連続ポテンシャル場を用いた空間記述の解釈，情報処理学会第34回全国大会予稿集，2W-1 (1987).