

2次元平面におけるポテンシャルモデルを用いた 位置関係の推定[†]

山田 篤^{††} 西田 豊明^{††} 堂下 修司^{††}

高度な知識情報処理システムを構築するためには、人間がもっている常識的な概念を取り扱えることが必要である。空間的な概念はこのようなものの一つである。人間が常識的にもっている空間的概念には漠然性 (Vagueness) が含まれていると考えられる。たとえば、日常会話で方向、距離、形状などは厳密に言及されることはまれである。しかし、空間的概念に含まれる漠然性の取り扱い方法についてはまだ十分な研究が行われていない。本論文では空間的な概念の取り扱いに関する研究の第一歩として、空間的な位置関係を表す拘束条件から2次元質点空間内における対象の位置を推定する問題を取り上げる。本論文で提案するポテンシャルモデルでは、対象の位置から解釈の受け入れ難さを表すポテンシャルへの連続関数 (ポテンシャル関数) を用いることによって、位置関係に関して連続的に変化する漠然性を表す。各対象の最も確からしい位置は摂動法によって求める。位置の推定順序を表す対象間の依存関係は入力として与えられるものとする。依存関係に従って位置の推定を行ったときに矛盾が起こった場合には、フィードバック処理を行う。実際にポテンシャルモデルを用いて空間的な状況を推定するシステム SPRINT (SPatial Relation INTerpreter) を作成した。

1. はじめに

空間的概念とは、距離、位相、方向、形状、動きなどの概念を包括したものである。高度な知識情報処理システムを実現するためには、人間がもつ空間的概念を計算機上に表現し、その上で推論を行う機構を確立する必要がある。

人間が日常取り扱っている空間的概念には漠然性 (Vagueness) が含まれる。たとえば、「AはBの北にある」というとき、厳密な北ではなく、およそ北にあるということの意味することが多い。同様に「AはBの近くにある」というとき、どこまでを近くと呼ぶかに関する厳密な基準はない。

過去における空間的概念に関する研究では、空間的概念を量子化し、記号的表現に置き換えて処理を行っていた。G. Novak の研究²⁾では、対象を簡単なカテゴリーに分類し、各対象ごとに固有のケースフレームを準備した。前、後、右、左、上、下などの空間的な情報は、ケースフレームのスロットによって表現された。この表現は、記号化する際に一意な解釈を与え、その後は離散的な記号処理によって操作するため、漠然とした状況を表現できない。

E. Davis と D. McDermott によるファジィモデル³⁾では、ある対象と別の対象との相対的位置関係を

その対象のもつ局所的な座標系を用いて表す。対象の正確な位置が決められない場合に暫定的な位置を決めるために、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が用いられた。たとえば、「AはBの約50m右にある」という情報に対して、45m以上55m以下という領域を設定し、Aはその中にあるとする。しかし、この方法ではBとの距離が45mまたは55m離れたところで、Aの存在の確からしさが不連続に変化する。44.9m離れたところを不可、45.1m離れたところを可とするのは我々の直観に合わない。

本論文では、空間的概念の漠然性を取り扱う際に連続的に変化する存在の可能性を表現するためのモデルの構築法として、連続ポテンシャル場の概念を用いたポテンシャルモデルを提案する^{3),4)}。ポテンシャルモデルを用いて構築する対象世界のモデルは、常に修正可能で、モデルを構築した各時点において最も確からしいものだけが保持される。対象として、2次元質点空間内の位置関係に関して、距離と方向のように存在の可能性が連続的に変化する場合を中心に扱うが、領域、線等を用いて不連続な変化にも対応する。

以下では、はじめにポテンシャルモデルの基本的な考え方を示す。次に、これらを用いた空間的な概念の表現と位置の推定法について述べる。

[†] Reasoning about Relative Location with Potential Model on Two-dimensional Space by ATSUSHI YAMADA, TOYOAKI NISHIDA and SHUJI DOSHITA (Department of Information Science, Faculty of Engineering, Kyoto University).

^{††} 京都大学工学部情報工学教室

2. ポテンシャルモデル

2.1 ポテンシャルモデルによる空間的概念の取り扱い

本研究では、

is-to-the-north-of (A, B); AがBの北にある。

のような対象の位置関係に関する記号的記述から、対象間の最も確からしい位置関係を推定することを目的とする。入力として与えられた対象の位置関係記述には漠然性が含まれると考える。「AはBの北にある」という言明の意味は、Bの北と呼ばれる1点が存在してAが厳密にそこに位置すると解釈するのではなく、Aの存在の確からしさが真北を極大として、少なくともBよりも北の位置では連続的に変化すると解釈する。本論文で提案するポテンシャルモデルではこのことをポテンシャルという考え方によって表す。ポテンシャルとはある対象のその位置での存在を仮定した場合に、仮定の受け入れ難さを表す量で、ポテンシャルが小さいほどそこに存在することが確からしいとみなす。ポテンシャルの最小値は0とする。

ポテンシャルモデルでは、ある対象の位置に関する拘束条件を、その対象の位置を表す2次元のユークリッド空間の座標を定義域とするポテンシャル関数で表す。本論文で考察する範囲では、対象空間は質点系とし、対象は大きさや向きをもたないものとする。与えられた状況に対するポテンシャル関数は、距離、方向等を表す基本ポテンシャル関数から組み立てる。

ポテンシャルモデルでは、対象の最も確からしい位置はポテンシャルを最小とする位置であると考えられる。しかし、複雑なポテンシャル関数が与えられたとき、ポテンシャルの最小点を定めることは困難である。本論文のポテンシャルモデルでは対象の最も確からしい位置を最急降下法によって求める。はじめに、推定しようとする対象の位置を仮決めし、ポテンシャル関数のグラフ（ポテンシャル場）の傾斜に応じた分だけ摂動をかける。摂動のプロセスは、現在位置を推定中のすべての対象の動きが十分に小さくなるまで繰り返す。この様子を図1に示す。

本論文では、空間的概念の基本的な性質をとらえた簡単な基本ポテンシャル関数を用意して実験を行った。ポテンシャルモデルの空間概念モデルとしての妥当性は、予測される最も確からしい解釈の位置ばかりでなく、あらかじめ用意しておく基本ポテンシャル関数そのものの性質や、摂動における各対象の動きから

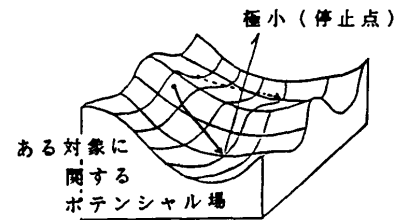


図1 摂動法による対象の位置の推定

Fig. 1 Reasoning of location with perturbation.

も評価する必要がある。このような視点からのポテンシャルモデルの評価は別の機会に行いたい。

ポテンシャル関数に複数個の極小点があるときは、与えられた状況記述に曖昧性があると考えられる。このようなとき、上に示した摂動法では、すべての極小点を一度に求めることはできないため、その中の最小点を求めることはできない。また、摂動をかけるために、初出の対象については初期位置を指定する必要がある。将来的には、初期的な位置決めを行うヒューリスティックを用いることも考えられるが、現在は人間の手で与えている。したがって、現在のモデルは、与えられた任意の初期位置に最も「近い」位置関係を推定するものである。ポテンシャルモデルでは拘束条件が追加されたとき、新しいポテンシャル関数を追加するか、既存のポテンシャル関数を修正することによって、ポテンシャルモデルを修正する。

2.2 依存関係の利用

我々が空間的な状況について考えるときには、すべての対象の位置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。たとえば、日常の会話で空間的状況が伝達される場合には、言語的な手がかりにより対象の位置推定の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の北にある」という発話は、Bが以前の文脈に登場しており、Bの位置がすでにわかっていることを前提としている。

本研究では、複数の対象の位置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。上の例のようにAの位置が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を依存側、Bを支配側と呼ぶ。位置の推定は支配側から依存側へ行う。

さらに、依存関係に従った位置の推定だけではあまり確からしい解釈が導けない場合には、依存側の対象が支配側の対象の位置を修正する必要がある。このフィードバック処理については4.4節で述べる。

3. ポテンシャルモデルによる空間的な拘束条件の表現

3.1 距離に関する拘束条件の表現

ある対象の位置が別の対象の位置を基準として、およその距離、近さ、遠さ等の概念を用いて表されているとき、その対象の位置は漠然性を持ち、その解釈としての座標値は連続的に変化する可能性をもつ。このような距離に関する漠然性をもつ関係によって拘束されているとき、その対象の位置は、基準点からある一定の距離だけ離れたところで最も確からしく、そこから離れるに従い確からしさが減少していくと考えられる。この最も確からしいと考えられる位置は、基準点を中心とする円周上に存在する。その拘束条件が単独で存在した場合には、この円周上の任意の位置が最も確からしい解釈として採用される。

以上の性質を満たす比較的簡単な関数として、基準点と対象間の実際の距離と理想的な距離との差の2乗に比例した値をポテンシャルとして用いる。差の2乗を用いる第一の理由は理想の距離から外れるに従いポテンシャルを速やかに上昇させるため、第二の理由は理想距離に一致する円周上でのポテンシャル関数の微分可能性を保証するためである。これにより、点 $M(x_0, y_0)$ からおよそ距離 L だけ離れているという拘束をもつ対象の点 $Q(x, y)$ におけるポテンシャル $P(x, y)$ 、およびそのポテンシャル場の傾斜から対象が受ける力 $(f_x(x, y), f_y(x, y))$ 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パラメータである)。

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

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

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

このポテンシャルの概形を図2に示す。

たとえば、

is-far-from (DESK, BOOKSHELF, 2)

; 机は本棚から 2m ほど離れている。

という制約に対して、机の位置は上のポテンシャル関数を用いると、本棚を中心とした半径 2m の円周上の任意の点の付近となる。このような距離に関する拘束条件しかない場合に、とりあえず解釈例として、その拘束条件を満たす適当な1点をもつことは、我々の直

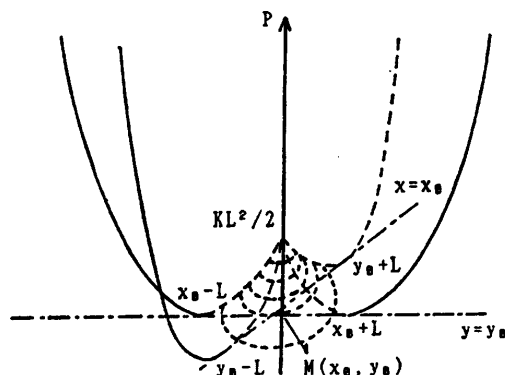


図2 距離を表すポテンシャル関数の概形
Fig. 2 Shape of the potential function for distance=L.

観にも合っている。実際にはこれに他の制約を表すポテンシャル関数を重ねることにより、より厳密な解釈を引き続き行うことができる。

なお、上の定義では $x=x_0$ かつ $y=y_0$ のときに限り、ポテンシャル関数が微分不可能となり、 $(f_x(x, y), f_y(x, y))$ を計算することができない。したがって、振動の過程で $x=x_0$ かつ $y=y_0$ なる状態を禁止し、もしもそうなった場合には、強制的に振動をかける必要がある。この状態は2次元平面上で2つの対象が同じ位置を占めることを意味し、対象の重なりを許さないということに対応する。

3.2 領域の表現

我々は部屋、構内、広場等を、はっきりとした境界をもち、一定の広がりをもつ領域を表す概念としてとらえている。部屋の中でのみ存在を許された対象があるとすると、この対象の位置に関する解釈の確からしさは、部屋の表す領域の境界で不連続に変化する。このような現象に対応するため、本論文では禁止領域という概念を用いて領域を表現する。

禁止領域は、対象がその中に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すべて対象が存在し得る領域とする。したがって、存在可能領域を明に定義することはしない。

本論文では禁止領域の境界を直線ないし線分で近似する。禁止領域を表現するための基本的な制約として、対象が境界直線の片側にあることを禁止する禁止半平面を用意し、禁止領域はその論理的な演算によって表す。これを用いると、禁止領域は禁止半平面の共通部分 (Intersection) ないし結 (Join) によって表される凸ないし凹図形となる。これを図3に示す。

ある点 Q が禁止領域に含まれるための条件は、禁

止半平面の結部分に対してはその点が任意の禁止半平面に含まれること、共通部分に対してはすべての禁止半平面に含まれることである。凸禁止領域を構成する禁止半平面が表す領域のうち、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平面の境界のうち、その共通部分に含まれる部分は意味をもたない。このため禁止半平面の境界は常に直線であるが、禁止領域の境界は一般に線分、または半直線になる。また、禁止領域は閉領域または半開領域のいずれかである。

禁止半平面は、境界直線上の1点 (x_0, y_0) と、 x 軸の正の方向を基準として測った直線の傾き θ によって表す。 θ の指す方向の右側の半平面が禁止される領域である。換言すると、点 $Q(x, y)$ がこの半平面に含まれるための条件は、

$$x \sin \theta - y \cos \theta - x_0 \sin \theta + y_0 \cos \theta > 0$$

が成り立つことである。この様子を図4に示す。

摂動の過程では、対象が禁止領域の中に配置されることを排除しなければならない。この方法については4.1節および4.2節で述べる。

3.3 壁の表現

2次元質点空間で、壁を直線で近似的に表現し、対象が壁を表す線上にあることを禁止するために禁止線概念を導入する。

禁止線は直線、半直線、線分のうちのいずれかである。直線で表される禁止線は端点をもたず、永久に続く。半直線で表される禁止線は一方にのみ端点を有する。線分で表される禁止線は両端に端点もち、有限の長さを有する。これらの組合せにより任意の形の禁止線を近似する。

摂動の過程で対象が禁止線上にきたときには、強制的な摂動をかけて、対象を線外に移動させなければならない。これについては、4.3節で述べる。

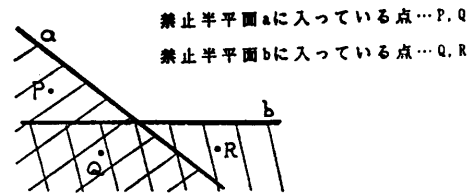
3.4 方向に関する拘束条件の表現

3.4.1 基準点からの方向

2次元質点系では対象自身の向きを考えていないため、方向概念としては地理的なものが中心となる。我々が日常用いる方向を表す概念は漠然性をもって

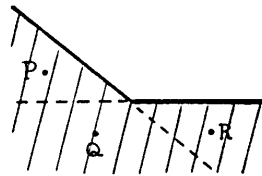
もとなる禁止半平面

(斜線部が各禁止半平面で禁止されている側とする)

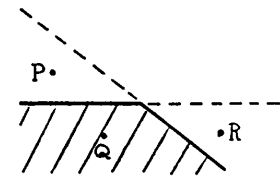


結 (Join)

共通部分 (Intersection)



禁止領域 $a \cup b$ に入っている点...P, Q, R



禁止領域 $a \cap b$ に入っている点...Q

破線は、禁止半平面を合成することにより、意味をもたなくなった部分。

図3 禁止領域の表現

Fig. 3 Expression of inhibited region.

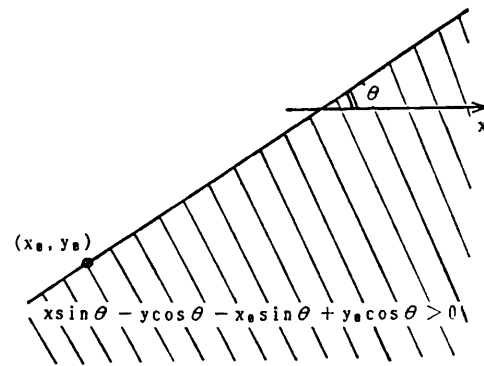


図4 禁止半平面の表現

Fig. 4 Expression of inhibited half-plane.

る。たとえば、

is-to-the-north-of (B, A); BはAの北にある。

では、Bの位置は、Aの北と目される範囲ではAの真北を中心として漸次存在の確からしさが低くなる。またAの南とみなせる位置にはBは存在し得ないと考えることができる。このような基準点からの方向を、漠然性をもち連続変化の可能性のある部分を方向を表すポテンシャル関数によって、また不連続的に存在し得

ないと考えられる部分に対しては禁止半平面を用いて表現する。

方向を表すポテンシャル関数が満たすべき性質として、意図する方向の上で極小値を取ること、基準点からみた方向がそこから離れるに従いポテンシャルが増加することがあげられる。

本論文ではこのような性質を満たすポテンシャル関数として、基準点から意図する方向にある位置では極小値を取り、そこから方向がずれるに従って加速的に値が増えてゆくものうち、比較的簡単な関数を用いた。原点を基準として、 x 軸の正の方向を表すポテンシャル関数 $P(x, y)$ 、およびこのポテンシャル場の傾斜から対象が受ける力 $(f_x(x, y), f_y(x, y))$ を次のように定義する。

$$P(x, y) = \frac{K_1 y^2 + k_2}{x + \delta^{-1}}$$

$$f_x(x, y) = \frac{K_1 y^2 + k_2}{(x + \delta^{-1})^2}, \quad f_y(x, y) = -\frac{2K_1 y}{x + \delta^{-1}}$$

これは x 軸上で双曲線 $\frac{K_2}{x + \delta^{-1}}$ となり、原点の正の近傍でポテンシャルエネルギーを高める働きをする。また x 座標を x_a に固定すると、 $y=0$ で最小値が $C = \frac{K_2}{x_a + \delta^{-1}}$ となる y 座標に関する 2 次関数 $\frac{K_2}{x_a + \delta^{-1}} y^2 + C$ となり、特定の方向からずれるに従い、ポテンシャルエネルギーを高める働きをする。ここに、 K_1, K_2, δ はそれぞれ放物線の形、双曲線の形、原点のときのポテンシャルの値に関するパラメータである。

点 $M(x_0, y_0)$ を基準点とし、 x 軸の正の方向から反時計まわりに測った角度が θ である方向を表す方向ポテンシャル関数 $P(x, y)$ とこのポテンシャル場の傾斜から対象が受ける力 $(f_x(x, y), f_y(x, y))$ は、上式を (x_0, y_0) だけ平行移動し、 θ だけ回転させることにより次のように与えることができる。

$$P(x, y) = \frac{K_1 \{(x-x_0)\sin\theta + (y-y_0)\cos\theta\}^2 + K_2}{(x-x_0)\cos\theta + (y-y_0)\sin\theta + \delta^{-1}}$$

$$f_x(x, y)$$

$$= -\frac{2K_1 \sin\theta \{(x-x_0)\sin\theta - (y-y_0)\cos\theta\}}{(x-x_0)\cos\theta + (y-y_0)\sin\theta + \delta^{-1}}$$

$$+ \frac{\cos\theta \{K_1 \{(x-x_0)\sin\theta - (y-y_0)\cos\theta\}^2 + K_2\}}{\{(x-x_0)\cos\theta + (y-y_0)\sin\theta + \delta^{-1}\}^2}$$

$$f_y(x, y) = \frac{2K_1 \cos\theta \{(x-x_0)\sin\theta - (y-y_0)\cos\theta\}}{(x-x_0)\cos\theta + (y-y_0)\sin\theta + \delta^{-1}}$$

$$+ \frac{\sin\theta \{K_1 \{(x-x_0)\sin\theta - (y-y_0)\cos\theta\}^2 + K_2\}}{\{(x-x_0)\cos\theta + (y-y_0)\sin\theta + \delta^{-1}\}^2}$$

この方向ポテンシャルの概形を図 5 に示す。このポテ

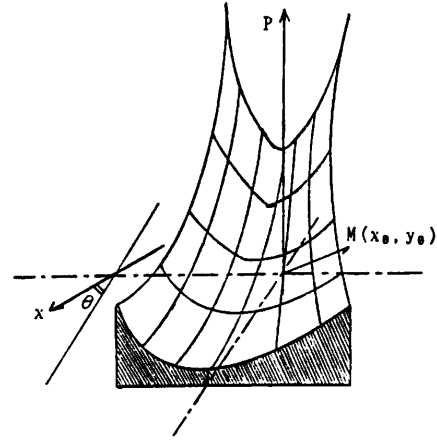


図 5 基準点からの方向ポテンシャルの概形
Fig. 5 Shape of potential function for direction.

ンシャル関数は制約とは反対方向に関しては全く考慮していないため、禁止半平面

$$x \sin \phi - y \cos \phi - x_0 \sin \phi + y_0 \cos \phi > 0$$

(ただし、 $\phi = \theta - \pi/2$)

を併用する必要がある。

日常用いられる「北に 3 km」のような距離の概念を含む方向概念は、詳細に検討すると距離に関する制約と方向に関する制約に分離することができる。そこで本論文では、このような状況に対しては必要に応じた確からしい距離に関する拘束条件を併用して、ポテンシャル関数の重畳を用いて対処する。別の方法として、方向ポテンシャルを用いずに、その方向で確からしい距離にある 1 点をとりあえず決め、そこから距離 0 の位置を最も確からしい位置とすることも考えられる。しかし、この方法では距離と方向の概念が分離されておらず、方向だけが変わっても、新たに全く別個の点を取る必要が生じ、現実的でない。

3.4.2 基準線からの方向

壁の前や後ろのように、一定の線分または直線を基準とした方向性を表現することを考える。このような基準線からの方向ポテンシャルは先の基準点からの方向ポテンシャルをさらに拡張したものとしてとらえることができる。基準点からの方向ポテンシャル場をその表す方向で切断し、その間を均一に補間したものを考える。これにより、ある基準線に対して、その線が存在する範囲では一方向を均一に表し、線がきれたところから先はその端点に関する方向を表すポテンシャル関数ができる。

たとえば、両端が $(x_a, 0), (x_b, 0)$ であるような基準線に対して $\theta = \pi/2$ を表す方向ポテンシャルは次のよ

うになる (ただし $x_a < x_b$ とする).

(a) $x < x_a$ のとき

$$P(x, y) = \frac{K_1(x_a - x)^2 + K_2}{y + \delta^{-1}}$$

(b) $x_a \leq x < x_b$ のとき

$$P(x, y) = \frac{K_2}{y + \delta^{-1}}$$

(c) $x \geq x_b$ のとき

$$P(x, y) = \frac{K_1(x - x_b)^2 + K_2}{y + \delta^{-1}}$$

この方向ポテンシャルの概形を図6に示す.

3.5 線上性の表現

壁は, 対象がその上に存在することを禁止された線であったが, 逆に, 対象がその上にしか存在できない線という拘束条件を考える. 例えば, 2次元平面で道路を線で表現したとすると,

on (A, ROAD); Aは道路上にある.

というような制約がこれにあたる. 解釈時に, ある線上に拘束されている対象がその線外にあった場合, これをその線上に射影する必要がある. この過程については4.3節で述べる.

4. 対象の位置関係の推定

2次元質点系におけるポテンシャルモデルでは, 一つ一つの対象の位置の解釈を2次元平面内の座標値で表し, 対象がある位置で空間的な制約から受ける影響をポテンシャル関数を用いて計算する. そのポテンシャルエネルギーが減少する方向に摂動をかけることにより, 最終的に対象をポテンシャルエネルギー極小点に導く. この考え方は, 漠然性をもち本質的に連続変化の可能性を有する概念に対して有効である.

一方, 本論文では領域, 壁, 線などの不連続性をもつ概念を併用している. このとき, ポテンシャル関数を用いた解釈法に対して, 不連続性を有する概念の取り扱いが問題になる. 具体的には, 対象が禁止領域の中や禁止線上にあった場合にそこから脱出させる方法, 禁止領域の中へ入り込むことを防ぐ方法, 存在すべき線上へ移動させる方法が必要になる.

また, 連続変化を扱うポテンシャル関数と不連続な概念を併用することによって, 依存関係に従った位置の推定だけでは局所的に確からしさが低くなることがある. これについては子側からフィードバックをかけることによって解決をはかる.

4.1 禁止領域からの脱出

ポテンシャルモデルで, 初期位置として禁止領域内

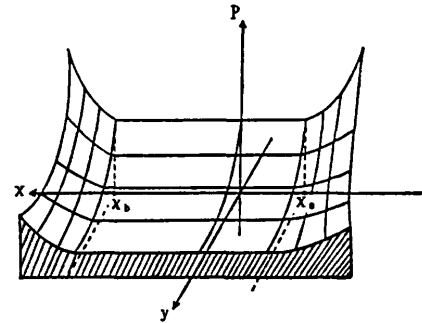


図6 基準線からの方向ポテンシャルの概形
Fig. 6 Shape of potential function for facial direction.

の位置が与えられたり, それまでの解釈で求められた位置が, 新しい制約の追加によって禁止領域に含まれた場合に, 解釈値としては禁止領域外の値をとる必要がある. そこで, 本論文では対象がなんらかの理由で禁止領域中に配置されている場合に, そこから脱出させることを考える.

初めに, 一つの禁止半平面から脱出する手順を考える. 禁止半平面から脱出するために, 禁止半平面の中に存在する対象を禁止半平面の境界に向かって移動させる. 対象が境界に達すると, 境界線上で摂動をかけ, 対象を非禁止半平面へ強制的に移す. 禁止半平面からの脱出に際しては, 対象に関する他の拘束条件からの影響を考慮に入れる. 具体的には対象が他の拘束条件から受ける力のうち, 禁止半平面の境界に対して垂直な成分は無視するが, 境界に平行な成分は脱出の際の摂動に寄与させる. よって, 禁止領域からの脱出は対象にかかるポテンシャル関数による力の計算を終えた後に行う.

今, 禁止半平面が点 (X, Y) と向き θ なる境界によって特性化された半平面であるとき, その半平面の中の位置 (x, y) に置かれた対象を n 回の摂動で境界まで移動させる. 各摂動における対象の移動量は, 境界に平行な成分 (d_{ux}, d_{uy}) と境界に垂直な成分 (d_{vx}, d_{vy}) に分けて計算する.

対象にかかっている力として表される他の拘束条件の影響を $f \equiv (f_x, f_y)$ とする. (d_{ux}, d_{uy}) は, f の境界に平行な成分 (f_{hx}, f_{hy}) を定数倍したものとす. $F_H \equiv |(f_{hx}, f_{hy})|$ とすれば,

$$F_H = f_x \cos \theta + f_y \sin \theta$$

であるから, その x, y 成分を求めると,

$$f_{hx} = F_H \cos \theta = f_x \cos^2 \theta + f_y \sin \theta \cos \theta$$

$$f_{hy} = F_H \sin \theta = f_x \sin \theta \cos \theta + f_y \sin^2 \theta$$

を得る。これを定数倍して、

$$d_{HX} = C(f_X \cos^2 \theta + f_Y \sin \theta \cos \theta)$$

$$d_{HY} = C(f_X \sin \theta \cos \theta + f_Y \sin^2 \theta)$$

を得る。

次に、各摂動において対象の境界に垂直方向の移動量は、禁止半平面からの脱出が開始されたときに対象の置かれていた位置から境界までの距離 L の $1/n$ である。対象のはじめの位置を (x_0, y_0) とすれば、境界との距離 L は、

$$L = |(x_0 - X) \sin \theta - (y_0 - Y) \cos \theta|$$

である。ゆえに、

$$dv_x = -L \sin \theta / n$$

$$dv_y = L \cos \theta / n$$

を得る。この様子を図7に示す。

禁止半平面からの脱出を用いて、禁止領域からの脱出を行う。凸禁止領域から脱出するためには、それを構成する禁止半平面のどれか一つから脱出すればよい。凹禁止領域からは最悪の場合、それを構成するすべての禁止半平面から脱出しなければならない。

4.2 禁止領域への非訪

ある時点で禁止領域の外側にある対象については、摂動の過程において禁止領域に入り込まないように常に検査をしなければならない。その結果、禁止領域外に置かれている対象が禁止領域内に配置されようとする場合、対象に対して禁止領域外でのみ移動するような変位をかける。禁止領域への非訪は、禁止領域を構成する禁止半平面のすべてに対する非訪によって実現する。

摂動アルゴリズムの示唆した座標を (x, y) とする。

$$L = x \cdot \sin \theta - y \cdot \cos \theta - X \cdot \sin \theta + Y \cdot \cos \theta > 0$$

ならば、対象は摂動を受けた後禁止半平面に入り込むので、 (x', y') に移動させる。ただし、

$$x' = x - (1 + \varepsilon) \cdot L \cdot \sin \theta$$

$$y' = y + (1 + \varepsilon) \cdot L \cdot \cos \theta \quad (\varepsilon \text{ は正の微小量})$$

とし、あたかも対象が禁止半平面の境界に沿ってスライドしたかのように動かす。この様子を図8に示す。

4.3 線の上への射影

線上に制約されている対象がその線外にあった場合、これを強制的に線の上にもってこなければならない。

直線 $l: ax + by + c = 0$ 上にあるべきある対象が、直線外の点 $M(x_0, y_0)$ にあった場合、この対象の位置を点 M から直線 l への射影 (x_1, y_1) にうつす。ただし、

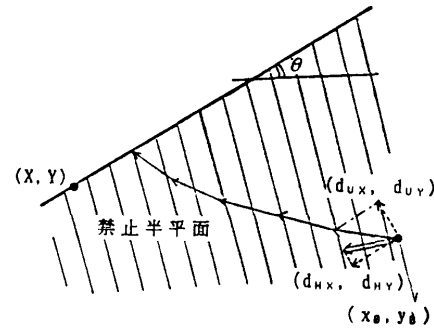


図7 禁止半平面脱出アルゴリズムの適用
Fig. 7 Pushing an object out of an inhibited region.

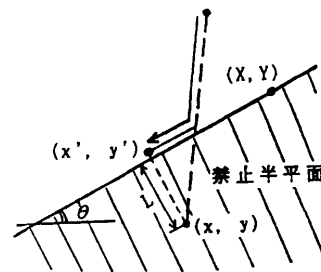


図8 禁止半平面非訪アルゴリズムの適用
Fig. 8 Avoiding to enter an inhibited region.

$$(x_1, y_1) = \left(\frac{b^2 x_0 - a b y_0 - a c}{a^2 + b^2}, \frac{-a b x_0 + a^2 y_0 - b c}{a^2 + b^2} \right)$$

である。これは他の漠然性を含む条件に比べて強い条件と考えられるため、常に満たされるように、その対象に関する他のすべての操作が終わった後に行う。

4.4 依存側からのフィードバック

対象間の依存関係が与えられたとき、位置の推定を支配側から依存側へ一方向に行くと問題が生じることがある。ポテンシャル場から算出されるある対象の最も確からしい位置が禁止領域の中であったならば、その対象を禁止領域外のポテンシャルの高い位置に置きざるをえない。我々は与えられた条件のもとで全体として最も確からしい解釈を求めたいので、このような局面では支配側の対象の位置を修正することにより、全体としてのポテンシャルの総和を減らす方向に動かす。換言すれば、支配側の対象を動かすことにより全体のポテンシャルの総和が減少するならば、依存側から支配側へ、依存関係とは逆に修正をかけることにより、全体としてのより確からしい解釈を導く。

依存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。通常的位置推定の際には、支配側から依存側への影響のみを考えている。依

存側からのフィードバックを考える際には、逆に依存側から支配側への影響を考える。これはちょうど支配側が依存側へ及ぼす力を作用と考えた場合に、これと大きさは同じで向きが反対の力（反作用）を依存側から支配側へかけることにより実現できる。

ある時点で求めることが可能な対象の位置がすべて求まった後に、特定の対象に対しポテンシャル場の傾斜によりかかる力の大きさが一定値以上であった場合は、その対象のポテンシャルをより低くする解釈があるにも関わらず、ポテンシャルが不当に高くなっていると考えられる。このとき支配側の対象に修正をかけることにより、より確からしい解釈が得られる場合がある。そこで、その対象の直接の親である対象から順に、自分の子の対象から受ける力（反作用）と親の力象から受ける力（作用）の合力に応じた摂動をかけていく。この過程をすべての対象の動きが十分小さくなるまで繰り返す。このフィードバック操作をどの対象の子でもない対象に至るまで続けた後に、今のフィードバックの影響を受けなかった対象の位置を再計算する。この後に得られる解釈はその時点で確からしさが極大のものであると考えられる。この様子を図9に示す。

5. 実験と検討

我々はポテンシャルモデルを用いた位置関係の推定法の有効性を確かめるために、実験を行った。実験では、2次元質点系を対象とした空間状況記述理解システム SPRINT (SPatial Relation INTerpreter) を京都大学情報工学教室の汎用計算機 FACOM M 360 R 上に UtiLisp (グラフィックパッケージは富士通の GSP を使用) を用いてインプリメントした。このシステムは簡単なパーサを直列に接続し、対象の存在を言明した単純な自然言語文から、対象の位置関係に関する拘束条件を抽出し、この関係を解釈した結果をディスプレイに表示する。自然言語理解を考えた場合には、自然言語によって記述された文章を解析し、そこから空間的な情報を抽出することが必要である。しかし、本論文では、漠然性を含んだ空間的な拘束条件の解釈を中心に考えたため、自然言語の解析についての詳細な検討は行っていない。したがって、入力文は「(対象)は(位置)にある。」といった対象の位置に関する非常に単純な言明のみを取り扱っている。それ以外の拘束条件については、プログラムで関係表現をつくっている。

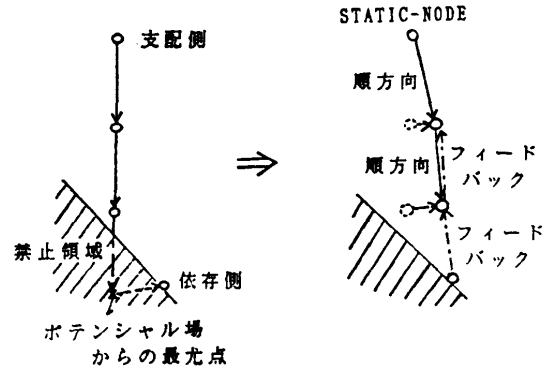


図9 フィードバックの適用

Fig. 9 Maximally plausible interpretation with feedback.

SPRINT の動作を例を用いて説明する。

【例1】 入力文として、

「京都大学は京都駅の北にあります。」……①
 が入ってくると、システムは簡単な格構造解析を行い、「ある」という動詞に接続している助詞に注目して、

is-to-the-north-of (京都大学, 京都駅)

という関係表現をつくり、京都駅を親、京都大学を子とする依存関係をつくる。次に、この関係表現をインタプリタにかけることにより、京都大学に関するポテンシャル関数を形成する。それぞれの対象の初期位置は、画面上でマウスを用いて人間が与える。続いて、支配側の対象がすべて確定した対象から順次摂動をかけていく。今の場合、京都大学に対して先に作成したポテンシャル関数を用いた摂動がかかる。画面には対象に対する摂動の過程と解釈結果を表示する。このときの画面を、図10(a)に示す。次に、

「銀閣寺は京都駅の北東にあります。」……②

という文に対しても、同様の処理を行う。このときの画面を、図10(b)に示す。さらに、

「京都大学は銀閣寺の西にあります。」……③

という文が入ってくると、システムは①で作成した京都大学に関するポテンシャル関数に、新しい拘束条件を表すポテンシャル関数を重畳することにより、京都大学に関するポテンシャル場を変形する。このときの様子を、図10(c)に示す。

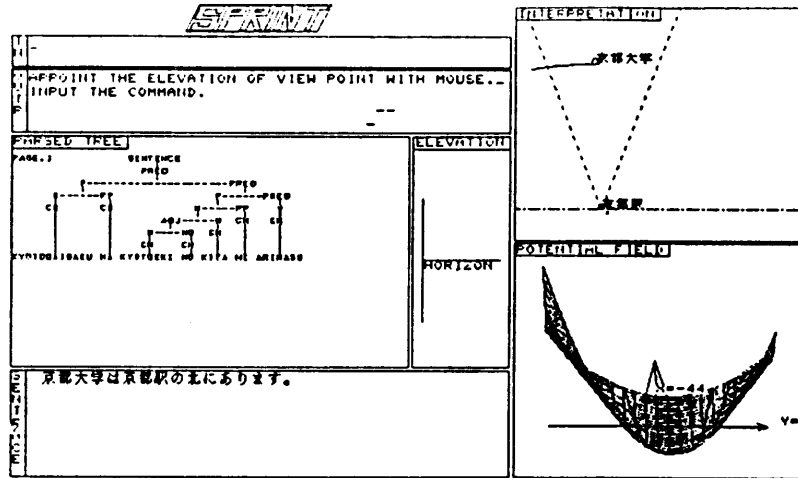
【例2】 システムに、

is-far-from (ステレオ, テレビ, 5m)

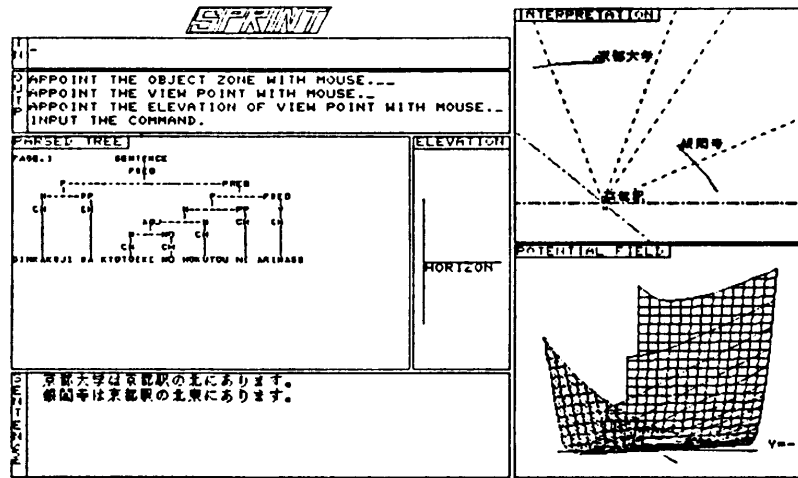
;ステレオはテレビから5m離れている。

……④

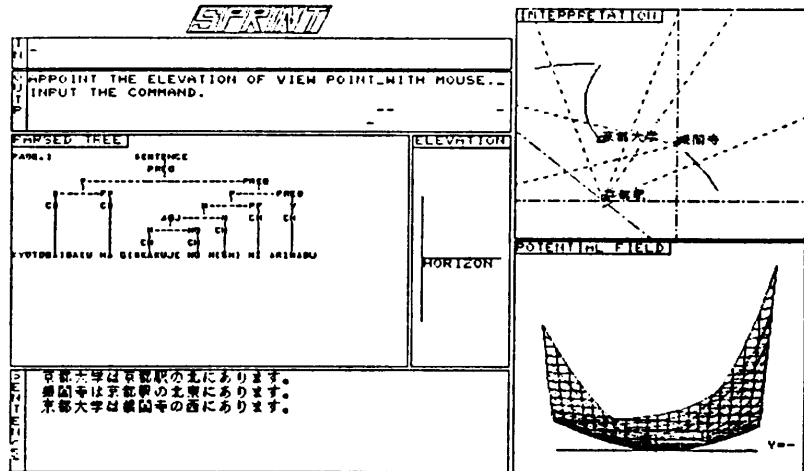
という関係表現を与えると、ステレオに関して、テレ



(a) 「京都大学は京都駅の北にあります。」の解釈

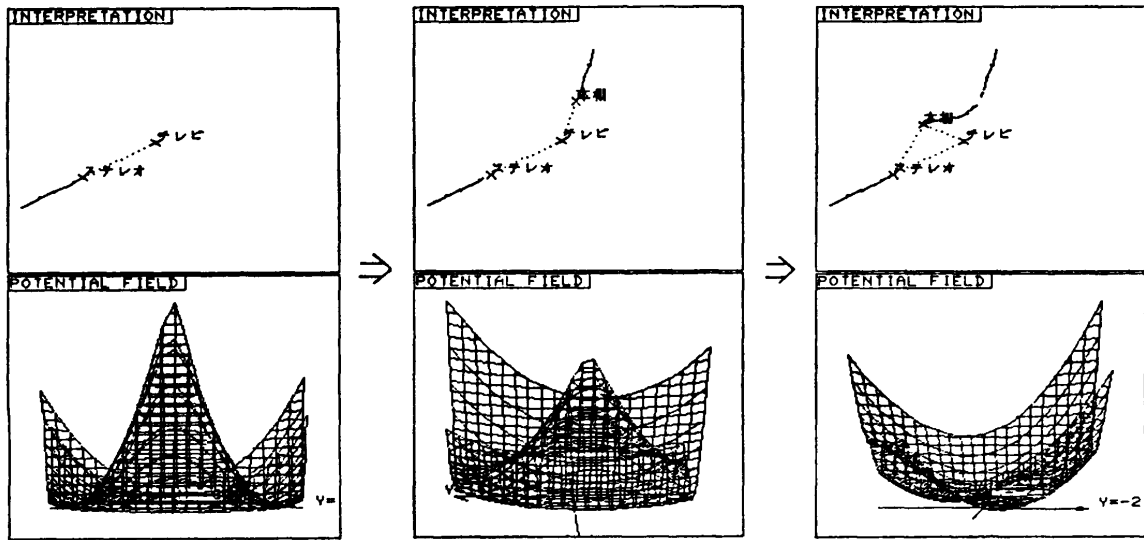


(b) 「銀閣寺は京都駅の北東にあります。」の解釈



(c) 「京都大学は銀閣寺の西にあります。」の解釈

図 10 SPRINT による位置関係推定の処理例
Fig. 10 Process of reasoning by SPRINT.



(a) (is-far-from ステレオ テレビ 5m)
; ステレオはテレビから 5m 離れています.

(b) (is-far-from 本棚 テレビ 3m)
; 本棚はテレビから 3m 離れています.

(c) (is-far-from 本棚 ステレオ 4m)
; 本棚はステレオから 4m 離れています.

図 11 互いに不連続な複数の極小点ができる場合
Fig. 11 Existence of multiple discontinuous local minimum.

ピを中心とする半径 5m の円周上で極小となるポテンシャル場が形成される. このとき, ある初期位置から出発すると, 解釈結果は図 11(a) のようになる. 次に,

is-far-from (本棚, テレビ, 3m)
; 本棚はテレビから 3m 離れている.
.....⑤

という関係表現に対しても, システムは同様の処理を行い, その結果は図 11(b) のようになる. さらに,

is-far-from (本棚, ステレオ, 4m)
; 本棚はステレオから 4m 離れている.
.....⑥

という関係が追加されると, 本棚に関するポテンシャル場は図 11(c) に示すようになる. ここでこのポテンシャル場の極小点は 2 か所あるが, システムは図 11(c) のように, 先の解釈に近い方の極小点を今回の解釈として採用する.

【例 3】 システムに,

- is-to-the-north-of (比叡山, 京都駅).....⑦
- is-to-the-north-of (京都大学, 京都駅).....⑧
- is-to-the-north-of (修学院, 京都大学).....⑨

という関係を同時に与えた時, それぞれの対象の適当な初期位置に対して, システムが図 12(a) に示すような解釈をしたとする. ここでさらに

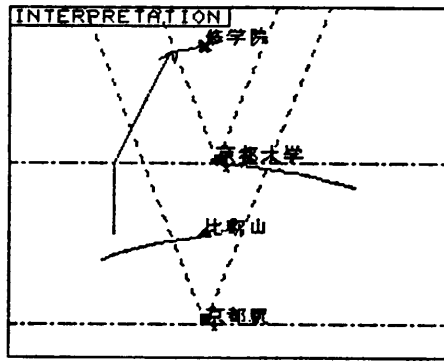
is-to-the-south-of (修学院, 比叡山).....⑩

を与えると, 今の解釈では, これらすべてを同時に満たすような位置は見出し得ないので, システムはフィードバック処理を開始する. 今の場合, 位置決め順序は図 12(b) のようになっており, ⑩のところでは失敗したので, システムは⑦を満たす範囲で比叡山の位置に対して修学院からフィードバックをかけていく. このときの解釈結果を図 12(c) に示す.

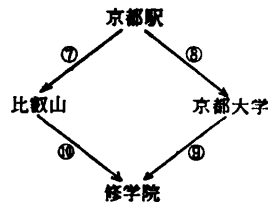
6. おわりに

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, ポテンシャルモデルを用いた解釈の方法について述べた.

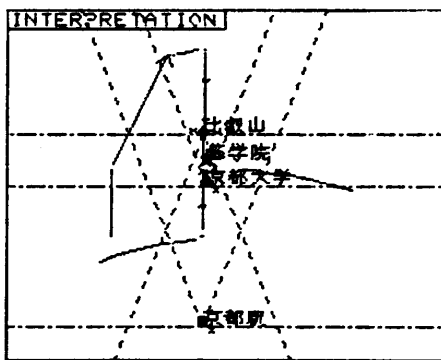
本手法は, 漠然性をもった拘束条件を解釈して, 確からしさの高い一つの例を提示することを目的としている. 本手法では, 漠然性をもった概念の解釈の可能性をポテンシャル関数で表現することにより, 様々な漠然性に対応できる. 複数の拘束条件に対しても, ポテンシャル関数を重畳することにより対応できる. また, ポテンシャル関数の重畳は, 解釈の修正を容易にする. 領域等によって引き起こされる存在の可能性の不連続な変化も, 本手法で用いる摂動法の枠組みの中で処理することに成功した. さらに, 局所的にポテンシャルが高くなる場合には, フィードバックをかける



(a) フィードバックがかかると前の状態



(b) 対象間の依存関係



(c) フィードバックがかかった後 (解釈結果)

図 12 フィードバック処理の適用例

Fig. 12 Process of reasoning with feedback.

ことにより、全体としてより確からしい解釈を導くことを試みた。

なお、今後の課題としては、一つ一つの拘束条件の確信度に応じたポテンシャル関数のパラメータの変更、入力に曖昧性が含まれていて複数の可能性が生じた場合のもっともらしさ (Plausibility) によるモデルの管理等がある。

謝辞 図形理解のための属性概念のご研究についてご教示いただきました大分大学工学部の岡田直之教授に深謝いたします。

参 考 文 献

1) Davis, E.: Organizing Spatial Knowledge,

Report 193, Yale University (1981).

2) Novak Jr., G.S.: Representations of Knowledge in a Program for Solving Physics Problems, *Proc. IJCAI-77*, pp. 286-291 (1977).
 3) 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資料, 50-3 (1987).
 4) 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, 第34回情報処理学会全国大会論文集, 2W-1 (1987).

(昭和62年6月17日受付)

(昭和63年7月15日採録)



山田 篤 (正会員)

1962年生. 1986年京都大学工学部情報工学科卒業. 1988年同大学院修士課程修了. 現在, 同大学院博士課程在学中. 自然言語理解, 空間推論の研究に従事. 人工知能学会,

認知科学会各会員.



西田 豊明 (正会員)

1954年生. 1977年京都大学工学部情報工学科卒業. 1979年同大学院修士課程修了. 1980年同大学院博士課程退学. 同年より, 京都大学工学部助手. 1988年6月助教授. 教育学部講師併任. 人工知能基礎, 特に定性理論と空間推論, 自然言語理解などの研究に従事. 京都大学工学博士. 1984年から1年間 Yale 大学客員研究員. 人工知能学会, 認知科学会, ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, AAI, ACL 各会員. ICOTWG (FAI) 委員.



堂下 修司 (正会員)

昭和33年京都大学工学部電子工学科卒業. 昭和35年同大学院修士課程修了. 昭和38年同博士課程中退. 同年京都大学工学部助手. 昭和43年東京工業大学助教授, 昭和48年京都大学工学部教授. その間, 音声の認識, オートマトンの構成, 人工知能など情報処理の研究に従事. 工学博士. 昭和34年度稲田賞受賞. 電子情報通信学会, 音響学会各会員.