

自然言語における空間描写の解析と 情景の再構成†

山田 篤竹 網谷 勝俊竹 星野 泰一竹
西田 豊明竹 堂下 修司竹

空間描写は言語の非常に基本的な機能の一つであり、人間の空間知覚とも密接な関わりがある。本論文では、言語理解とは言語表現から対象世界の状況を再現することであるという立場をとっており、具体的なタスクとして、空間描写を含んだ情景描写から情景の幾何モデルを再構成する問題を取り上げる。このタスクにおいて解決すべき問題のうち、言語の統語や意味に関わる問題（言語内的問題）に関する本研究の主な成果としては、(1)空間描写において重要な役割を果たす空間語という表現のクラスの分析と解析アルゴリズムの提示、(2)空間描写に暗黙的になっている視点、視線に関する情報を自然言語の表現から抽出するアルゴリズムの提示がある。一方、空間概念そのものに関わる問題（言語外的問題）に関する成果としては、(3)空間描写解析で問題となる表現の漠然性の明示的な表現としてのポテンシャルモデルの導入、(4)ポテンシャルモデルと論理的制約を融合した空間的制約の表現方法の提示、(5)自然言語テキスト中に含まれる依存関係を利用した手続的な空間的制約解釈アルゴリズムの提示がある。本研究では、以上の手法を統合した実験システム SPRINT (SPatial Representation INTerpreter) をインプリメントし、手法の妥当性を検証した。この結果、深い言語理解モデルに基づく言語解析を行うことにより、表現と実体の関係、空間知覚への計算論的アプローチの手がかりを与えることができたと考えられる。

1. はじめに

自然言語の文章における空間的概念や関係に関する記述を空間描写と呼ぼう。空間描写は言語の非常に基本的な機能の一つであり、自然言語テキストのいたるところに出現する。また、空間描写は人間の空間知覚と密接な関わりがあり、空間描写の解析をとおして、空間知覚に関する手がかりが得られることが期待される。このように空間描写の解析は基礎応用のいずれにおいても重要である。

本研究では、空間描写が直接的に現れ、重要な役割を果たす情景描写（日本語）を取り上げ、これを対象とした言語理解モデルを示す。われわれは、言語理解とは言語表現から対象世界の状況を再現することであるという立場をとっている。これは空間描写理解の場合、空間描写から情景を再構成することに相当する。本研究ではタスクとして、情景描写から情景の幾何モデルを再構成する問題を取り上げる。

このタスクにおいて解決すべき問題は、大別すると言語の統語や意味に関わる問題（言語内的問題）と空

間概念そのものに関わる問題（言語外的問題）からなる。言語内的問題に関する本論文の主な貢献は次のとおりである。(1)空間描写において重要な役割を果たす空間語という表現のクラスの分析を行い、解析アルゴリズムを示した。(2)空間描写に暗黙的になっている視点、視線に関する情報を自然言語の表現から抽出するアルゴリズムを示した。一方、空間描写に関する言語外的問題に関する本論文の主な貢献は、(3)空間描写解析で問題となる表現の漠然性の明示的な表現としてのポテンシャルモデルを導入した。(4)ポテンシャルモデルと論理的制約を融合した空間的制約の表現方法を示した。(5)自然言語テキスト中に含まれる依存関係を利用した手続的な空間的制約解釈アルゴリズムを示した。

われわれは、以上の手法を統合した実験システム SPRINT (SPatial Representation INTerpreter) をインプリメントし、手法の妥当性を検証した。

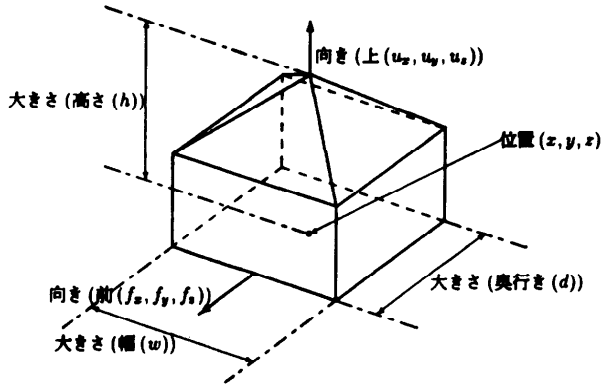
2. 手法の概要

2.1 対象世界の表現

本研究では、対象世界は空間描写で言及された対象に対応する幾何学的オブジェクトの集まりとして表現する。各幾何学的オブジェクトは大きさ、位置、向きなどの空間的属性を表すパラメータによって規定される。たとえば、「家」に対応する幾何学的オブジェク

† The Analysis of the Spatial Descriptions in Natural Language and the Reconstruction of the Scene by ATSUSHI YAMADA, KATSUTOSHI AMITANI, TAIICHI HOSHINO, TOYOAKI NISHIDA and SHUJI DOSHITA (Department of Information Science, Faculty of Engineering, Kyoto University).

竹 京都大学工学部情報工学教室



位置を表すパラメータ: x, y, z
 向きを表すパラメータ: 前 (f_x, f_y, f_z) , 上 (u_x, u_y, u_z)
 ただし, $(f_x, f_y, f_z) \cdot (u_x, u_y, u_z) = 0$
 大きさを表すパラメータ: w, h, d

図-1 「家」の空間的属性のパラメータ表示
 Fig. 1 Parametric representation for the "house".

図-1のように「家」の原型と位置、向き、大きさなど、その原型を規定するパラメータの値によって表現する。

さらに、具体的な対象物以外に空間の構成に関与するものとして、方向、視点、視線などの存在が考えられる。これらは必ずしも可視的な物体ではないが、対象空間の構成の基準となるものである。

以上によりわれわれの解決すべき問題は、与えられた文章を解析して、記述対象に対応する幾何学的オブジェクトを生成し、それらを規定するパラメータの値を決定する問題に帰着される。結果を3次元グラフィックスで表示するとき、各幾何学的オブジェクトはグラフィックスのオブジェクトに直接対応する。

2.2 空間概念の取り扱い

空間描写で言及される各対象のパラメータの値を、与えられた自然言語表現から直接決定することは困難である。これは文章中には対象同士の空間的な関係が定性的に表現されていることによる。そこで、自然言語テキストからいったん定性的な空間関係を対象の空

間的属性間に課せられた制約 (constraint) として抽出し、その後この制約を解釈するという方針をとる。

対象の空間的属性として、位置、向き、大きさ、形状を、視点の空間的属性として、位置、向きを考える。このうち、形状は対象の種類によって一意に定まるものとみなし、現在、形状の変更については考えていない。対象と視点の間の空間関係は、対象や視点の位置や向き、大きさなどの空間的属性の間に考えることができる。一方、なんらかの空間関係を表す語彙は、それ自体で同時にいくつもの関係を複合的に含んでいて、一つの関係概念が位置や向き、大きさなどに関わることもある。

このため、まず対象間の空間的な関係を表現する語を含む語句によって表されている空間概念を分析することが必要である。これまでに、

位置や方向を明示的に表現する語句の解析として、英語やドイツ語における前置詞句の解析^{31,32)}があるが、これらの言語と日本語における空間概念の現れ方は異なるので、そこから得られた知見を日本語の場合にそのまま当てはめることはできない。本研究では、対象世界を構成している要素間の空間的な関係を陽に表す語のクラスとして、空間語というカテゴリを定め、空間概念の分析に利用する。表-1に空間語の例を示す。

さらに制約抽出の際には、表現上の省略を補完して適当な制約を導くことが必要になることがある。空間的になんらかの関係をもつ対象は、語の係り受けによって互いに関連付けられていることが多い。そこで本論文では、このような空間的関係の省略を含んだ語の係り受けの解釈のために、あらかじめ用意しておいた知識を用いた補完を試みる。これらについては3.で詳しく述べる。

2.3 定性的表現のもつ濃然性

自然言語では空間的な概念や関係は定性的に表現されることが多い。定性的な制約の多くは具体的な解釈

表-1 空間語の例
 Table 1 Typical spatial words.

対象間の関係を表現する空間語	沿って 横切って 通って															
位置や向きを明示する空間語	方向提示型	東	西	南	北	上	下	前	後	左	右	こちら	そちら	あちら	向こう	手前
	境界提示型	内 外 中 境 まわり														
	距離提示型	近く	そば	付近	遠く	隣	際	麓	ほとり	…沿い	…辺					
	局所提示型	真ん中	中央	表	裏	縁	端	先	先端	突端	頂上	底	角	上流	一階	

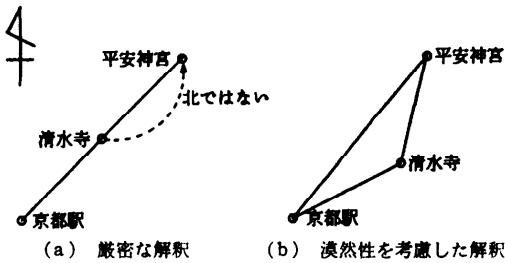


図-2 定性表現の解釈における漠然性の積極的な利用
Fig. 2 Vague interpretation of the qualitative expressions.

においてある特定の状況を要求するのではなく、ある程度の選択の幅をもっている。さらに、このような場合には、解釈と非解釈の間に明確な境界は存在しない。

このような制約に対し論理的に一意的な解釈を割り当てると、問題が生ずることがある。たとえば、京都の地理について「(1)平安神宮と清水寺はともに京都駅の北東にある。(2)京都駅から平安神宮までは清水寺までの2倍の距離である。(3)平安神宮は清水寺からみると北にある。」という文を個々に与えられると不自然さは感じないが、この三つの文が同時に与えられたとき、言葉の意味を狭義にとらえすべての条件を字義どおり厳密に解釈すると、これは全体的には解釈不能となる(図-2(a))。しかし、常識的なレベルでは、われわれは図-2(b)のような状況を思い浮かべることができる。これは表現の際に多少厳密な北東からずれていても表現上は北東としてしまうことに起因している。より一般的には、現実の状況に対し、それを一意に定めるほどには言語表現の粒度は細くないところに問題がある。したがって、そのような状況を逆に解釈する場合にはこの粒度の違いを考慮に入れて緩い解釈を行う必要がある。ただし、一つ一つの具体的な解釈の間にはもっともらしさの違いがあり、ある解釈と他の解釈のもっともらしさを比較するための評価尺度が必要である。また、どの制約を他の制約より確からしいと考えるかについても、評価尺度が必要である。このような漠然性を考慮した解釈については4.で詳しく述べる。

3. 情景描写文の解析

自然言語表現に現れている空間概念を計算機によって取り扱う場合には、以下の三つの点について考える必要が生じる。

(1) 省略時解釈のための対象に関する知識

自然言語の記述においては、それよりも詳しい説明を読み手が復元可能な範囲で適当に省略した表現がよく現れる。このような記述の対象世界に即した意味内容をとらえるためには、背景にあるその対象自身に関する知識や二つの対象相互の関係に関する知識をあらかじめ整理しておく必要がある。

(2) 方向を表す語句の解釈

同一の状況に対して、書き手が見え方としてとらえているか否かで用いる空間的な関係概念が異なることがある。一般に「前、後、左、右」などの方向概念が用いられたときには、一つの言語表現に対し、視点を基準とした方向か対象を基準にした方向かによって2通りの状況が考えられる。

(3) 視点の追跡

位置や方向に関する言及の中には、視点が基準となっている場合がある。この場合には、観察者の動きを表現している語句に含まれている動詞などをもとにして視点の向きを抽出しなければならない。さらに、このときの視点の移動方向の解釈においては(2)で述べた問題が生じる。

3.1 表現の分析

われわれは約50個の空間語に対して、空間語が単独で現れる場合、「側」「方」「部」の語をともなって現れる場合のそれぞれについて、言語表現とそれが表現する空間的な状況を分析した。空間語が表現し得る位置と対象が空間的に占める領域との関係についての分析結果の例を表-2に示す。

この分析結果を空間語の辞書に与えておくことにより、対象の位置や視点に関する可能なすべての空間的な関係の候補の抽出を行うことができる。

日本語において助詞「の」は、さまざまな意味を表現し得る^{9),10)}。空間的な関係という立場から「名詞+の+名詞」の型の名詞句をみると、助詞「の」の前後の二つの名詞が表している対象のカテゴリ間の関係がそれらの空間的な関係の決定に関与すると考えられる。現在のところ、われわれは表-3の4種類の関係を考えている。各対象を、二つの対象のカテゴリの間にどのような空間的な関係が存在し得るかによってタイプ分けし、対象のタイプとそれらの間に可能な空間的な関係との関係をルールとして与えておくことにより、「名詞+の+名詞」型の名詞句における二つの名詞が表している対象のカテゴリの間に存在する空間的な関係が抽出できる。

動詞によって対象が存在している位置や対象自体が

表-2 空間語が表現し得る位置と対象がもつ領域との関係の分析例

Table 2 Relationship between the location that the spatial word intends and the object region.

- I型: 対象を表す名詞+空間語
 II型: 対象を表す名詞+空間語+「側」
 III型: 対象を表す名詞+空間語+「方(方向, 手)」
 IV型: 対象を表す名詞+空間語+「部(部分)」

空間語	言語表現	対象が空間的に占める領域との関係
東, 西, 南, 北 (対象の位置のみによる)	I型 II型 III型 IV型	領域内, 境界上, 領域外のいずれか 領域内, 境界上, 領域外のいずれか 領域外 領域内
前, 後, 左, 右, 横 (対象あるいは視点の向きに対する相対的な関係による)	I型 II型 III型 IV型	領域内, 境界上, 領域外のいずれか 領域内, 境界上, 領域外のいずれか 領域外 領域内
近く, 遠く (対象の位置からの距離による)	I型 III型 IV型	領域外 領域外 領域外

表-3 「名詞+の+名詞」の型の名詞句に内在する空間的な関係

Table 3 Spatial relations in the noun phrase with Japanese particle "no".

空間的な関係	例
後の名詞の表している対象が, 前の名詞の表している対象とある空間的な関係にある	棚の本 「本は棚にのっている」
後の名詞の表している対象が, 前の名詞の表している対象の構成要素となっている	家の壁 「壁は家の構成要素である」
後の名詞の表している対象が, 前の名詞の表している対象の構成要素とある空間的な関係にある	家の窓 「壁は家の構成要素である」 「窓は壁にはめ込まれている」
前の名詞の表している対象が, 後の名詞の表している対象を構成要素とする対象とある空間的な関係にある	信号の角 (を右折する) 「角は交差点の構成要素である」 「信号は交差点にのっている」

もっている向きが表現される場合には, それらは動詞に係る語句によって表現される。この語句には空間語が含まれることが多く, 先の分析結果が利用できる。また, 対象間の関係が表現される場合には, 動詞自体の意味に依存した特定の空間概念が表現され, 動詞に係る語句もまた個々の動詞に依存する。人間が視覚を通じて空間概念を把握する動詞の場合には, 視点, 目標点及び視線の存在が想定される。視点の移動を含意する動詞については, 視点の移動場所, 移動前の視点, 視点の移動の向きに関する情報は動詞に係る語句あるいは文脈によって与えられる。視点の移動が言及される場合には, 視点の移動場所は名詞によって表現され, 視点の移動の向きは空間語を含む語句によって表現される。

3.2 制約の抽出

言語表現においては, いくつかの空間概念が明確に区別されずに複合して現れることが多い。本研究では, 対象の空間属性として, 位置, 向き, 大きさを考え, これらの間の関係として定性的に区別可能なものを空間的制約として取り扱う。言語表現の上に明瞭には現れてこなくても概念上の違いを対応する空間的制約の組合せの違いによって表現することができる。本論文で取り扱う空間的制約の種類を表-4に示す。

自然言語によって空間的な状況が記述される場合, 言語表現においては, おのおのの対象や空間概念を表す語句の関係付けは多く係り受けによって行われる。したがって, われわれは空間的制約を係り受けに注目した解析によって生成する方法を採っている。情景描

表-4 空間的制約の種類
Table 4 Type of the spatial constraints.

空間的制約の型	例
クラスとインスタンスの関係	(isa object1 house) object1 は家である
対象と対象の関係	(part-of object1 object2) object1 は object2 の一部である
対象と点の関係	(on-the-surface-of point1 object1) point1 は object1 上になっている
対象や点の位置を規定する関係	(is-located object1 (near point1)) object1 は point1 の近くにある
対象や視点の向きとベクトルの関係	(direct object1 vector1) object1 の向きは vector1 の向きである
ベクトルの属性を定義する関係	(from vector1 point1) vector1 の起点は point1 である

写文から係り受けの解析を繰り返すことにより空間的制約を抽出する過程を図-3に示す。

文脈情報として、係り受け解析の中間結果、書き手による対象の提示順序、視点の移動の道筋、視線の提示順序、空間的な関係の言及の順序を、解析結果から得られる空間的制約とともに作業領域に逐次的に記録していく。

係り受けの解析では、対象を表す名詞に対してはそれが表す対象のカテゴリ、属性、構成要素の抽出を行

い、空間語に対しては対象の位置や視点に関する可能なすべての空間的な関係の候補を抽出する。また動詞に対しては、それが対象の存在について言及するか否か、視線の存在を含意するか否か、視点の移動を含意するか否かを判定する。これらの解析に必要な知識は単語の辞書に与えておく。次に、語句に含まれる係り語を解析し、係り語としての可能なすべての機能を抽出する。多くの場合、係り語には助詞がとれない、これによって機能が限定される。助詞と係り語としての可能な機能との関係はルールとして与えておく。さらに、係り語が表す空間概念と係り語としての機能、及び係られる語が表す空間概念からその語句が表す空間

概念を導く。このための知識もまたルールとして与えておく。同一の言語表現に対して、複数の互いに排他的な空間的状況が可能な場合には、それまでの文脈記憶の内容を継承する二つの異なる文脈記憶を生成する。ここで生成される文脈記憶は、互いに排他的な並行文脈を表す。この段階で構造的に可能な格構造のうちのいくつかは意味的な矛盾から取り除かれる。

一般に係り受け解析は、その時点で存在するすべての文脈記憶から一つずつ参照文脈として取り出し、おのおののもので係り条件と空間表現単位のあらゆる組合せに対して行う。係り受け解析の詳細については文献5), 15)を参照されたい。

4. 定性的な制約の解釈

自然言語の文章から抽出した定性的な空間関係を、対象を規定するパラメータに関する制約として解釈し直す際にもとの制約がもつ漠然性を考慮に入れる。このために、われわれのコンピュータモデルでは、パラメータに関する制約として、漠然性をもつ制約、確定的な制約、禁止的な制約の3種を用意している。

4.1 漠然性をもつ制約

通常用いられる「東」は、必

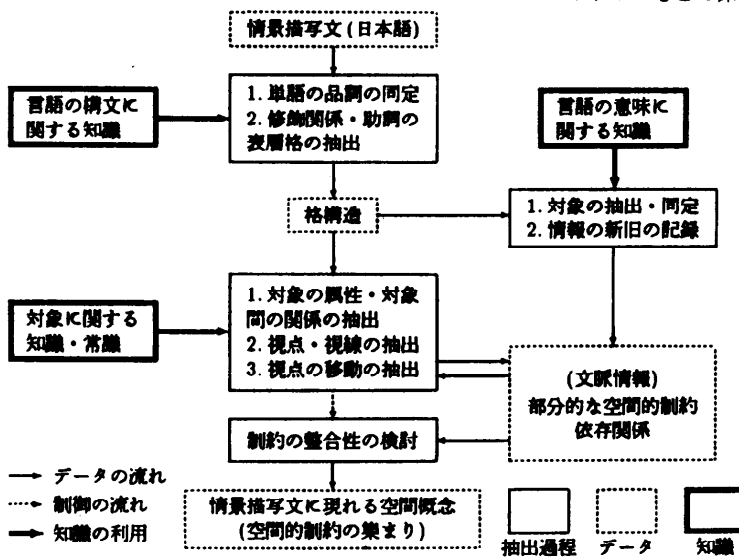


図-3 空間概念の抽出過程

Fig. 3 Process of the spatial constraints extraction.

ずしも「真東」を表すものではなく、「だいたい東」ということを表している。このような漠然性をもつ制約をポテンシャルエネルギー関数^{13),14)}によって表す。これは関連するパラメータ群から計算されるある量が、特定の値に近ければ近いほど、その解釈は確からしいというものである。これによってたとえば、「銀閣寺は京都大学の東にある」という制約を図-4のように表す。ここで水平面は銀閣寺と京都大学の相対的な位置を表す2次元座標系、垂直面は京都大学に対する銀閣寺の相対的位置がそこにあるときのものとの制約の受け入れ難さを表す。すなわち、銀閣寺の位置が京都大学の真東にあるときこの制約はもっとも受け入れやすく、方向がそこから遠ざかるにつれて容認しにくくなることが表されている。このようにポテンシャルエネルギー関数はある制約に関連するすべてのパラメータを引数としてとり、各解釈に対するコストを出力するような関数である。このような表現をポテンシャルエネルギー関数表示と呼んでいる。これらは対象の幾何学的なパラメータに関する数値的な制約である。ポテンシャルエネルギー関数の値が小さいほど、そのときの幾何学的パラメータの組はもとの制約を満たす解釈として確からしくなる。

上の場合に銀閣寺に対して複数の制約があった場合には、それらのすべてに対応するポテンシャルエネルギー関数を重畳したものについて上と同様の解釈を行う。

現在、ポテンシャルエネルギー関数は、もっとも望ましいとされる量との差の2乗に比例したポテンシャルエネルギーをかけることによって表現している。「東」

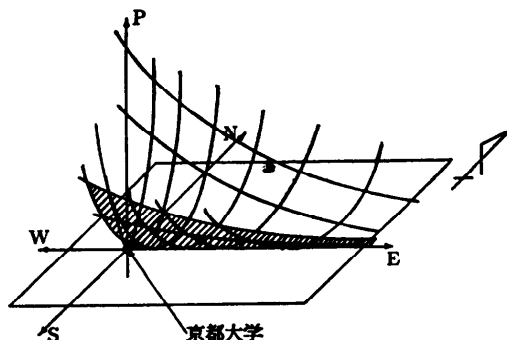


図-4 「銀閣寺は京都大学の東にある」に対するポテンシャルエネルギー関数表示（京都大学と銀閣寺の相対的位置を京都大学を固定して表示）

Fig. 4 Representation by the potential energy function for "Ginkaku-ji (temple) is to the east of Kyoto University".

の場合であれば、関連するパラメータ群が「真東」という解釈を表しているとき0で、真東からのずれの2乗に比例したポテンシャルエネルギーをかける。

ポテンシャルエネルギーという概念は元来、物理学のものである。一般に、ポテンシャルエネルギーをもつ力学系 (dynamical system) は非常に素直な性質をもつ。そのような系の状態はポテンシャルエネルギーの高いほうから低いほうへ遷移する。状態遷移の大きさと向きはポテンシャルエネルギー関数の勾配 (gradient) として与えられる。人間が無意識的に行う解釈の機構も定性的にはこのような側面をもっているのではないかと考えられる。本研究で用いているシミュレータは各地点で勾配を計算して、ポテンシャルエネルギーの低いほうへパラメータ群の状態を変えるようになっている。このようにポテンシャルエネルギーという概念に基づくシステム構成をとっておくことによって、制約あるいは確からしさばかりでなく、現在の解釈が受け入れ難いとき、パラメータをどちらのほうにどの程度変化させるとより確からしくなるかという手続的な情報まで簡潔に表すことができる。なお実際のポテンシャルエネルギー関数は上のような位置パラメータばかりでなく、あらゆる種類のパラメータを空間上に設定することができる。

一方、すべての制約をこのようにポテンシャルエネルギー関数として表すと一様性はあるが、元来漠然性を含まない制約にまでポテンシャルエネルギー関数表現を適用することは現実的でない。そこで論理的な制約も許すことにしている。これらについて次に述べる。

4.2 確定的な制約

何かと何かは接しているような場合には、両者の位置、向き、大きさの間には一定の関係が成り立っている。このような漠然性をもたず一意的に成り立たねばならない制約を固定関数によって表す。このグループの制約は、あるパラメータが特定の方程式を満たすような値をもたなければならないというもので、そのパラメータがもつべき値の計算式を与えることによって表す。

4.3 禁止的な制約

何かある剛体が存在している場所に別の剛体をおくことはできない。これはその剛体を表すパラメータ群において取りえない組合せが存在することを意味する。このようにあるパラメータの定義域の中で取りえない範囲を禁止領域として表す。禁止領域は禁止半開

空間（境界面上の1点の座標と禁止領域を向く法線ベクトルによって特徴化）の組合せ（union と intersection）によって構成的に表現している。ポテンシャルエネルギー極小化の過程で、ここからの脱出と再入阻止をはかる。

4.4 視線の取り扱い

視線は視点、目標点、向きの3要素からなる。一つの視線に関してこの3者の間には常に一定の関係、すなわち視点から目標点に向かうベクトルの向きが視線の向きであるという関係が成り立つようにする。実際には、視点、目標点、向きの三つの属性はそれぞれ他からの影響を受け得る。また、視線には、障害物との衝突の禁止という条件を与える。

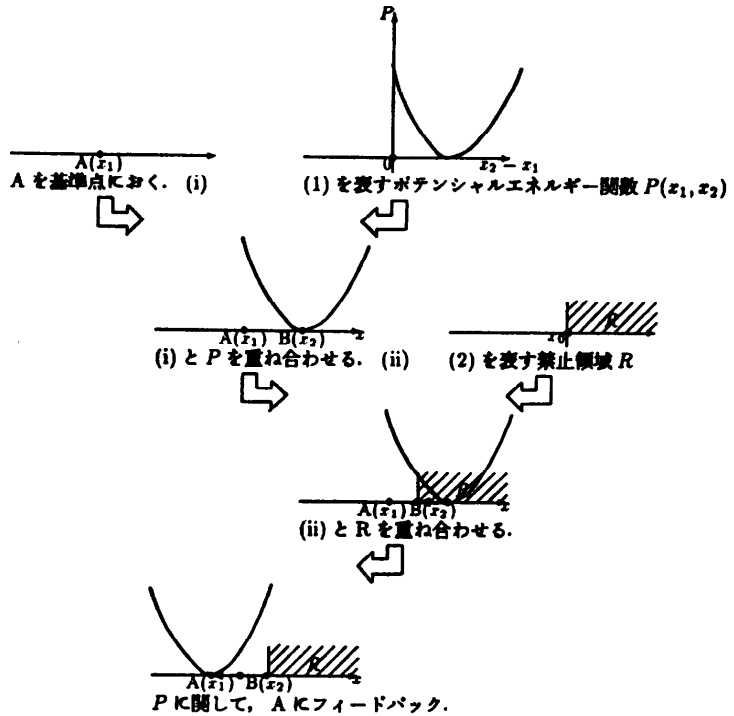
4.5 依存関係を利用したポテンシャルエネルギー極小化

以上において問題は情景を構成する対象の全パラメータの数だけの次元をもつパラメータ空間内のポテンシャルエネルギー最小化問題に帰着されるが、ポテンシャルエネルギー関数を無制限に選んだ場合、ポテンシャルエネルギーを最小にするパラメータの組を一般的に求めることは不可能である。そのためわれわれは現在、最急降下 (gradient descent) 法に基づく数値的な極小解探索アルゴリズムを用いている。

各パラメータの初期値がうまく与えられたならば、本手法はうまく動作する。われわれはこの過程を求解というよりも、むしろ解の調整過程としてとらえている。これは、現在信じている状況を初期状態として、それに対して新しく得られた情報をもとにして修正を施していく過程に相当する。

ここでわれわれがもっとも興味があるのはポテンシャルエネルギー関数全体の定性的な性質である。極小解は局所的にみたととき、その周辺においてもっとも確からしい解釈に相当する。与えられた問題に対して極小解が一つなのか、それとも複数個あるのか、特に複数個ある場合には、それらの確からしさは同程度なの

制約：(1)BはAの右に1km。
 (2) $x > x_0$ には別の物体が既に存在している。
 依存関係：A—B
 Aの位置(x_1)、Bの位置(x_2)とする。



(a) 禁止領域を考慮したポテンシャルエネルギー関数の利用例
 図5 ポテンシャルモデルを用いたパラメータの計算過程
 Fig. 5 Process of the calculation using the potential models.

か、それともいくつかは際立って確からしさが高いのか、といったようなことが実際の解釈としては問題となる。

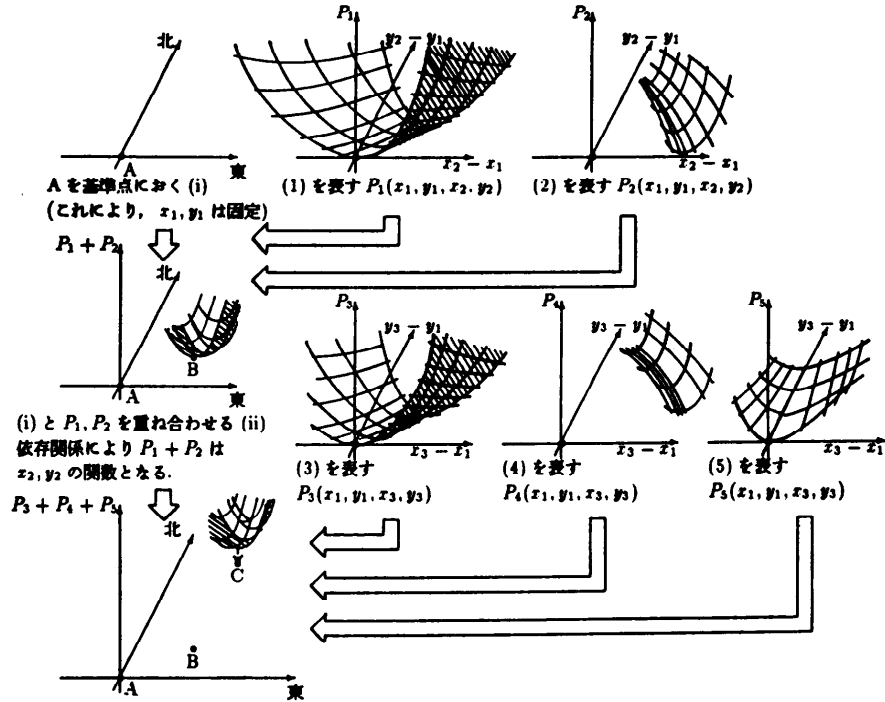
上で述べたポテンシャルエネルギー関数に、固定関数、禁止領域をも含めたパラメータに関する制約の表現全体をポテンシャル関数表示と呼ぶと、一つの対象世界に対して、その対象世界を構成する全対象物を幾何学的に記述するパラメータすべてを引数とするポテンシャル関数表示ができる。このポテンシャル関数表示において、パラメータの組合せのあるものは禁止領域によってとることができなかつたり、固定関数によって制約を受けていたりする。ここで残された自由度の中でポテンシャルを最小にするパラメータの組合せを計算するのも一つの方法であるが、一度にすべてを計算することは多大な計算時間を要する。

文章から得られる情報を対象間の空間的な関係を表す制約の単なる集まりと考えると、このような状況が

制約: (1)BはAの北東. (2)BはAから3km. (3)CはAの北東.
(4)CはAから6km. (5)CはBの北

依存関係: A → B → C

Aの位置 (x_1, y_1) , Bの位置 (x_2, y_2) , Cの位置 (x_3, y_3) とする.



(i)と P_3, P_4, P_5 を重ね合わせる. 依存関係により $P_3+P_4+P_5$ は x_2, y_2 の関数となる.
(このとき, $P_3+P_4+P_5$ の極小点は P_3, P_4, P_5 のおのおのの極小点にはなっていない.)

(b) ポテンシャルエネルギー関数の重ね合わせと依存関係の利用例

生ずるが、これは条件が厳しすぎて、現実的ではない。普段のコミュニケーションではそのような効率の悪いことはせずに、話者は聞き手が情景を再現するのを助ける情報を発話 (utterance) に盛り込んでいるものと考えられる。

自然言語の文章を解析してみると確かにそのような情報は含まれている。たとえば、前述の銀閣寺と京都大学の例で、もしも京都大学がそれ以前の文脈で既にでてきており、既知の対象となっていたならば、新たに現れた銀閣寺は京都大学に依存して考えることができる。そこでこれをパラメータ間の依存関係 (dependency) としてとらえ、パラメータ値の決定をこの順序に従って行う。このように情景構築の手順指示を依存関係によって与える。

そして、ある対象の一つの属性を記述するパラメータを一まとめにし、これを一つのパラメータ空間とみ

なし、一つ一つのパラメータ空間内での局所的なポテンシャル極小化を行う。これは依存関係を用いることにより、依存関係の親側の引数を既知のもののみなし固定することにより、計算を単純化していることになる。

なお、テキスト中に現れる依存関係に関する手がかりは部分的なものであると考えられるので、実際には全体の依存関係を部分的な情報から決定する機構が必要になる。

また、パラメータ値の決定を依存関係のとおりに一方向的に行くと、あるパラメータ値が決定不能になることがあり得る。これを解決するためには依存関係を絶対的なものとは考えず、必要に応じて依存関係の順序とは逆に計算を行う。依存関係を逆にたどる際には、親側のノードが子側に及ぼしているのと大きさは同じで向きが逆の力を子側から親側に作用させる。こ

れは、依存関係の順序に従って行う通常の計算に対するフィードバック処理と考えられる。いずれの場合にも、確定的な制約を表す固定関数、禁止的な制約を表す禁止領域は最優先で満たされなければならない。

以上の計算過程を模式的に図-5に示す。図-5(a)では、一般的な依存関係の利用と禁止領域に対する対処を、簡単のために1次元世界で説明している。ポテンシャルエネルギー関数 $P(x_1, x_2)$ は本来、 x_1, x_2 間の相対的な関係に対して設定されているが、 x_2 が x_1 に依存していることを考慮に入れることにより、通常は x_1 をもとに x_2 の値を計算するという方向で用いられる。この例では x_2 について、禁止領域による制約があるため、 x_2 は禁止領域外でポテンシャルエネルギーが極小となる値をとる。実際にはよりポテンシャルエネルギーの低い解釈が禁止領域内にあるが、 x_2 の変更によってこれ以上ポテンシャルエネルギーを低くすることはできない。そこで、 x_1 の値が変更可能な場合には、先のポテンシャルエネルギー関数において依存関係を逆にみて、 x_2 から x_1 を求めてみる。図-5(b)ではポテンシャルエネルギー関数の重ね合わせの際の依存関係の利用について示している。

5. 実験システム SPRINT の詳細

SPRINT は空間的な状況を記述した自然言語テキストを解釈して、対象世界の3次元モデルを構築する実験システムである。SPRINT の概要を図-6に示す。このうち、前半の言語からの制約抽出部を NTT ELIS 8150 上に、また、後半の制約の幾何的モデル化部を Symbolics 3650 上にインプリメントしている。

処理の前半は自然言語テキストから論理的な制約を抽出する過程である。これはさらに言語解析と空間的関係の抽出の二つのサブシステムからなる。

後半は対象間の制約を数値的に解釈し、対象世界の具体的な解釈を作成する過程である。これはポテンシャル関数作成とポテンシャル極小化、さらに描画の三つのサブシステムからなる。以下では、このシステムのうち、まだ述べていない部分について説明する。

5.1 統語解析

入力日本語で記述された情景

描写文とする。入力された文章を、統語解析サブシステムでパースして、表層格構造を得る。これは、自然言語表現において語の間の係り受けによって互いに関連付けられている対象は、空間的になんらかの関係をもつと考えられるからである。この段階で使う知識は、語の範疇に関する一般的な知識のみとする。実際には、簡単なチャートパーサを用いて格構造を出している。

一般にある文に対する格構造には多くの可能性がある。統語的、辞書的な知識からはどの構造が正しいかを確定できないときには、可能な解釈をすべて生成し、以後の過程に処理を委ねる。また、係り受けの曖昧性を対象世界の状況を考慮することで解決するのも、これより後の段階の処理である。現在はこれらの機能は考察にとどめ、人手で適当な格構造を選出し、次の過程に渡している。

5.2 ポテンシャル関数の生成

定性的に表現された空間的な制約を、対象に対応づけられたプロトタイプのパラメータに関する数値的な制約として解釈していく。この解釈に際して、言語から抽出された各制約から対象を表すパラメータの間の数値的な制約への変換規則を用意しておき、あらかじめ用意されたパラメータに関するプリミティブな制約を組み合わせることによって表す。

5.3 依存関係の作成

協調的なコミュニケーションでは情報の参照手順が文章の言語構造の中に情報の新旧という形で埋め込まれていると考えられる。そこで、言語解析時に保持しておいた情報の新旧に関する記録をもとに、まず対象

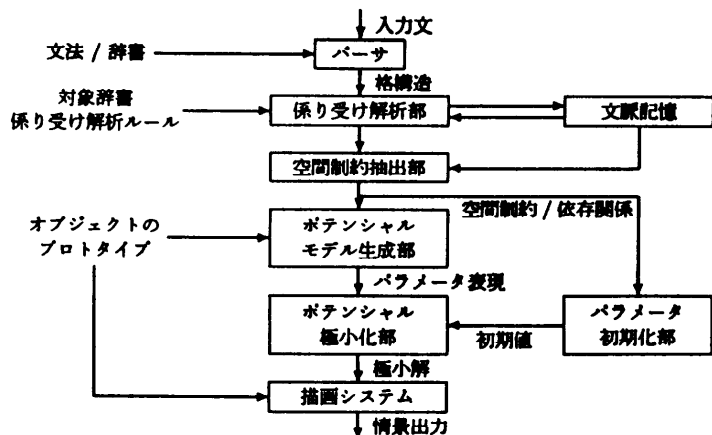


図-6 実験システム SPRINT の概要
Fig. 6 System configuration of SPRINT.

間の参照関係を定める。次に、すでに抽出された空間の関係から、ある対象間で実際に参照されているパラメータを選び、それらの間に参照側を子、被参照側を親とする依存関係のリンクを張る。

5.4 パラメータの初期値の設定

ポテンシャルモデルでは、ポテンシャルエネルギー極小化の際に、パラメータの初期値をどのように設定するかということが以降の計算に影響を与えることがある。ポテンシャルエネルギーの極小点が複数存在する場合には、計算を始めた値にいちばん近い値をとる。そこで、既知の世界のモデルの修正ということであれば、現在その世界について信じている状態を初期値にすればよい。一方で、計算の途中で禁止領域に入り込むことは注意深く排除されているが、初めから禁止領域の中にあつた場合には、脱出のために余分な計算が必要となる。このため、新たな対象をモデルにつけ加える際に初期値をうまくおくと、計算が簡単になることがある。現在は実験のために、初期値はランダムに与える、人間がその場で与えるという二つの方法をとっている。これについては、いくつかの制約に対応する典型的なシーンを記憶しておいて、それらをもとにして初期値を設定する方法が考えられるが、これは学習の問題とも関連するため、本研究では取り扱っていない。

5.5 解釈結果の表示

最後にシステムは最終的な解釈結果を3次元ソリッドモデルを用いてグラフィックディスプレイ上に表示する。これには Symbolics 社の3次元グラフィックパッケージ S-Geometry を用いている。各幾何学的オブジェクトにはグラフィックスのオブジェクトが直接対応する。

5.6 詳細例

(例1) SPRINT への入力として次の文を考える。「(1)山下公園の中央には噴水がある。(2)噴水のところから公園の柵の向こうに氷川丸を見ることができる。(3)氷川丸の右方にはマリンタワーがたっている。」

最初の文における「山下公園」の解析の際には参照文脈はなく、対象の概念が抽出されるだけである。「山下公園の」の解析では、係り単位「対象の概念+の」の係り語としての意味のあらゆる候補があがる。「山下公園の中央」の解析に至ると、それらの中から「位置を表す基準」が選択され、文脈記憶に記録される。同様に、「山下公園の中央には」の解析では、係り単

位「空間語+には」の係りの語としての意味のあらゆる候補があがり、解析が続けられる。また、動詞「ある」の解析においては、「山下公園の中央には」「噴水が」の係り語としての意味の候補の中から、それぞれ「存在位置を表す」「存在の主体を表す」が選択され、文脈記憶に記録される。同様に、2番目、3番目の文の解析がなされる。このとき、文脈記憶を引き継いでいるので、第1文の「山下公園」と第2文の「公園」、及び第1文、2文の「噴水」などは同一のものとして同定される。そして最終的に、文脈記憶の中から制約となり得るものが抜き出され、空間的制約となる。

この結果、次のような空間的制約が抽出される。

対象：公園、噴水、柵、視線、船、タワー

関係：噴水の位置＝公園の中央、公園の領域内

柵の位置＝公園の境界上

視点の位置＝噴水の近く、噴水の領域外

視線の向き＝視点から柵の方向

視線の目標点＝視点を基準として柵の外側

視線の目標点＝船

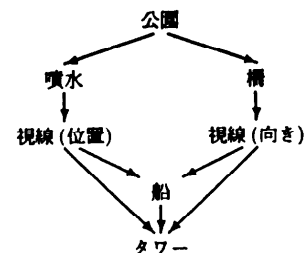
タワーの位置＝船の近く、

視点を基準として船の右、

船の領域外

また、このときの対象間の依存関係を図-7に示す。

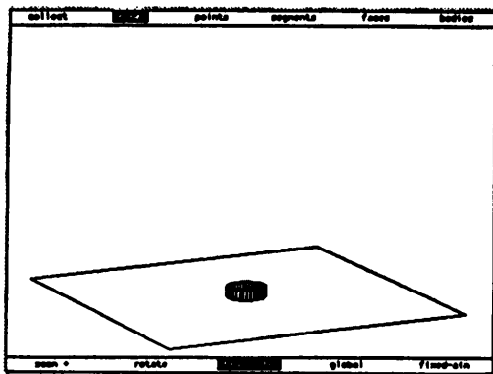
次にこれらの制約を対象のパラメータに関する制約に直して、それらの値を決定していく。この結果、まず、適当な大きさをもつ公園、噴水、柵、船、タワーに対応した幾何学的オブジェクトが用意される。おのおのについて大きさに関する制約がないので、デフォルトとして持っている適当な大きさが与えられる。はじめに他の対象に依存していない「公園」が適当な位置に置かれ、これが以降の基準となる。次に、「公園」の「中央」を表すポテンシャルエネルギー関数によって「噴水」の位置が決められる(図-8(a))。「噴水」の位置に関して他にいかなる制約もないとき、これは



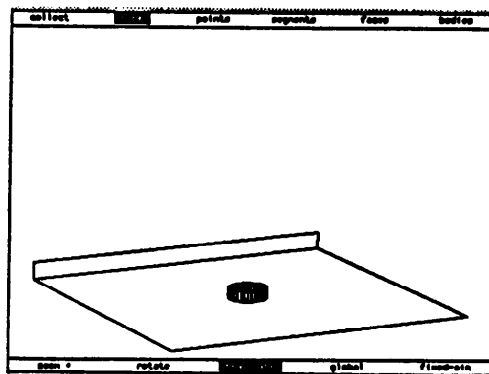
(A→Bは、Aが依存関係の親、Bが子であることを表す)

図-7 例1に対する依存関係

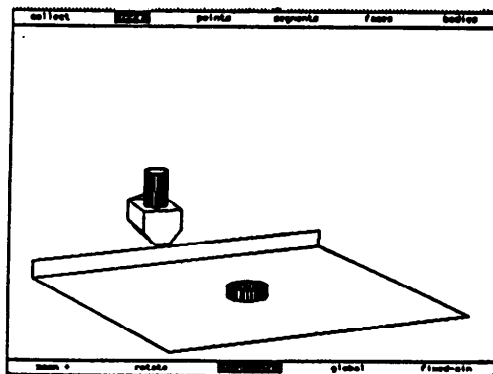
Fig. 7 Dependency for the example 1.



(a) 「噴水」の位置の決定



(b) 「柵」の位置, 向き, 大きさの決定



(c) 「噴水」の近くから「柵」に向かって設定した「視線」をもとにした「氷川丸」の位置の決定



(d) 「視線」をもとにした「右方」の解釈による「マリニタワー」の位置の決定

図-8 例1の解釈結果

Fig. 8 Result of the interpretation for the example 1.

真に「中央」を表す確定的な制約とほぼ同等の解釈を導く。一方で「公園」の適当な境界が選ばれ、その境界の大きさに応じた「柵」が固定関数によって計算され、その境界上に置かれる (図-8(b))。次に「噴水」のそばの適当なところに「視点」が設定され、その「視線」の向きは「柵」のほうを向く。その同じ「視線」の方向、「柵」の外側の領域に「船」が置かれ (図-8(c))、最後に「視点」からみた「船」の「右」方向、適当な距離に「タワー」が置かれる (図-8(d))。この場合、実際の環境内の視点の位置、視線の方向をもとに他の対象の位置が定まっている。なお、このとき、距離情報は表現されていないため、適当な値を仮定している。

(例2) 別の例として次の文について考えてみる。

- 「(1)国境の長いトンネルを抜けると雪国であった。
- (2)信号所に汽車が止まった。」

この場合、第1文を解釈した時点では「視点」が

「雪国」側にあることが分かるだけで「線路」や「汽車」はまだ存在していない。次に第2文を解釈したときに「トンネル」と「汽車」を結びつけることにより、「トンネル」、「線路」、「汽車」の関係を出すこと



図-9 例2の解釈結果

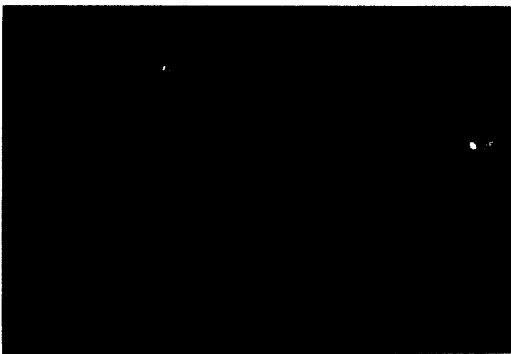
Fig. 9 Result of the interpretation for the example 2.

ができる（これには、係り受け以外の言葉の結びつきを想起するような機構が必要になる。この解析は机上で行ったものである）。ポテンシャルモデルを用いたこの解釈結果を図-9に示す。

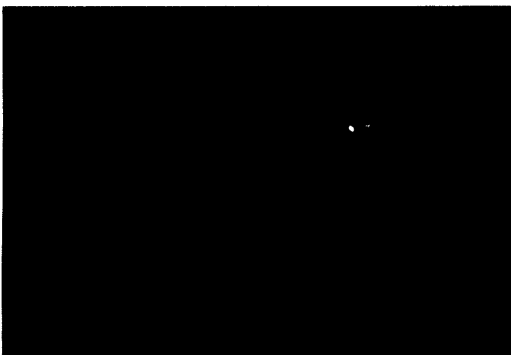
（例3）「広場の近くの家の南の窓からは丘の上に飛行機が見えた。」



(a) 「飛行機」が「丘」に対して「接して上」にある場合



(b) 「飛行機」が「丘」に対して「離れて上」にある場合



(c) (a)に対してさらに「家が広場の西側にある」場合

図-10 例3の解釈結果

Fig. 10 Result of the interpretation for the example 3.

この場合、「飛行機」と「丘」の関係として、(a)「接して上」、(b)「離れて上」の二つが考えられ、SPRINTはこの二つに対応した解釈を作る。なお、この例の場合、「広場」、「丘」、「家」の3者の相対的な位置関係に関する情報がまだ与えられていないので、この段階ではさまざまな可能性が考えられる。この場合にも、システムは適当な初期値から計算を始めることにより、一つの解釈を示す。図-10(a)、(b)に解釈結果の1例を示す。このとき、各制約はポテンシャルエネルギー関数で表されているので、次に、「家は広場の西側にある。」という文を解釈すると、システムは再計算を行い、たとえば、図-10(c)に示すような結果を得る。

これまでに他に6例について実験を行い、現在引き続き評価を行っている。

6. おわりに

本論文では、自然言語テキストを入力として、その解釈を行い対象世界の3次元モデルを再構成する実験システムの概要について述べた。

従来の自然言語理解に関する研究において、文法理論や意味論に基づく方法論の提案は多いが、本研究のように計算モデルに基づき、表層から深層まである程度の範囲についての言語現象を取り扱った研究は少ない。一方で、図形と自然言語の関係を取り扱った研究^{7),8),11)}はあるが、自然言語理解という立場からのものではない。

また、言語理解モデルとして従来の表現法をみた場合、スロットフィルラー表現^{9),12)}や領域的な考え方¹⁾は対象空間との実際の対応という点であまり適していない。われわれのアプローチでは意図された状況に応じて、連続的、または不連続的に変化するもってもらしさを表すための数値的な計算モデルを用いて、論理的な制約と漠然性をもつ制約の統合をはかっている。

今後の課題としては、以下の点があげられる。

- (i) 作成したモデルの解釈過程での積極的な利用
 - (ii) 人間の空間知覚²⁾を反映したポテンシャルエネルギー関数の設定
 - (iii) 幾何的推論を用いた効率的な解釈
 - (iv) 一般的な概念の空間的アナログの分析
- 本研究の成果をまとめると、次のようになる。

1. 深い言語理解モデルに基づく言語解析

日常的な自然言語表現を対象世界の空間的な状況を実際に考えてみるという観点から分析し、そこに何が

表現されており、何が暗黙のうちに前提とされているかを明らかにすることにより、理解を進めた。

2. 新しい方法論による言語理解の部門の開拓

文章理解を表現内容の理解という観点からとらえ、そこに対象世界の具体的な状況、特に位相構造を持ち込むことにより、表現と実体の関係、空間知覚への計算論的アプローチの手がかりを与えた。

本研究において取り上げた空間概念は、位置、向き、距離、包含関係、接触関係などの対象の幾何的な性質や関係に関するものであった。今後は、本論文で明らかにした言語表現と空間概念との関係をもとに、機能的性質、社会的性質などの他の性質についても考察することが必要となろう。

参 考 文 献

- 1) Davis, E.: *Organizing Spatial Knowledge*, Yale University (1981).
- 2) 藤井, 乾: コンピュータ・グラフィックスを用いた探索実験による空間認知モデルの構築, 人工知能学会第3回全国大会論文集, 3-5, pp. 145-148 (1989).
- 3) Herskovits, A.: *Language and Spatial Cognition*, Cambridge University Press (1986).
- 4) 平井, 北橋: 日本語文における「の」と連体修飾の分類と解析, 情報処理学会自然言語処理研究会, 58-1 (1986).
- 5) 星野: 空間的状況に関する自然言語表現の解析, 京都大学特別研究報告書 (1989).
- 6) Novak Jr., G. S.: *Representations of Knowledge in a Program for Solving Physics Problems*, In *Proceedings IJCAI-77* (1977).
- 7) 岡田, 田町: 自然言語および図形解釈のための単純事象概念の分析及び分類, 電子通信学会論文誌, Vol. 56-D, No. 9, pp. 523-530 (1973).
- 8) 岡田, 田町: 図形の意味解釈とその自然語記述—要素的図形認識と構造分析, 電子通信学会論文誌, Vol. 59-D, No. 5, pp. 323-330 (1976).
- 9) Retz-Schmidt, G.: *Various Views on Spatial Prepositions*, *AI Magazine*, Summer, pp. 95-105 (1988).
- 10) 島津, 内藤, 野村: 助詞「の」が結ぶ名詞の意味関係の subcategorization, 情報処理学会自然言語処理研究会, 53-1 (1986).
- 11) 高橋, 伯田, 小林: 2次元世界の位置関係作成とシーンの記述について, 人工知能学会第3回全国大会論文集, 9-1, pp. 425-428 (1989).
- 12) Waltz, D. L.: *Towards a Detailed Model of Processing for Language Describing the Physical World*, In *Proceedings IJCAI-81* (1981).
- 13) 山田, 西田, 堂下: 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, 情報処理学会知識工学と人工知能研究会, 58-3 (1988).
- 14) 山田, 西田, 堂下: 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, 情報処理学会論文誌, Vol. 29, No. 9, pp. 824-834 (1988).
- 15) 山田, 網谷, 星野, 西田, 堂下: 情景再構成としての文章理解, 人工知能学会知識ベースシステム研究会, SIG-KBS-8902-6 (1989).

(平成元年8月31日受付)