

TR-A-0031

認知地図形成過程のモデル化に関する一考察

藤井 秀夫

本郷 節之

乾 敏郎

Hideo Fujii

Sadayuki Hongo

Toshio Inui

1988. 8. 29

ATR 視聴覚機構研究所

1. はじめに	1
2. 自律走行ロボットの地図形成過程	
2-1 自律走行ロボットと地図	2
2-2 地図形成過程のシミュレーション	2
2-3 地図形成過程における問題点	4
3. 人間の空間把握と認知地図	
3-1 空間のイメージ	6
3-1-1 空間の把握とイメージ	6
3-1-2 イメージの階層的な把握	7
3-2 空間の知識の種類と認知地図	8
3-2-1 空間の知識の種類	8
3-2-2 認知地図	9
4. 認知地図形成過程に関する一考察	
4-1 探索による空間の把握	11
4-2 人間の空間把握能力	11
4-2-1 状況の把握	11
4-2-2 刺激-反応対の把握	12
4-2-3 概念的イメージの把握	13
4-3 認知地図形成過程のモデル化	14
4-4 今後の課題	17
5. まとめ	18
謝辞	19
参考文献	19
図表	21

認知地図形成過程の

モデル化に関する一考察

A T R 視 聴 覚 機 構 研 究 所

藤 井 秀 夫

本 郷 節 之

乾 敏 郎

## 1. はじめに

自律走行ロボットの研究が各分野で行われており、実現のためには数多くの問題を解決しなければならないが、その中にロボットが持つべき「地図」の問題がある。通常、ロボットは、地図の作成のために距離センサーやビデオカメラなどから得た画像を処理して「部分空間」を求め、求めた部分空間を体制化することで「全体地図」を把握する。前者の入力画像から部分空間を把握する過程については、超音波方式・ステレオ画像方式・複数の単眼視画像を用いる方式など様々な手法が提案されているが（佐藤・築山，1988）、後者の全体地図を形成する過程に関しては移動した部分空間の単純な繋合わせ程度に留まっている。しかし、ロボットが、刻々と変化する状況に適応し高度に構造化された空間を移動する場合、柔軟な構造を持った「全体地図」は不可欠と考えられる。したがって、今後、全体地図の形成に有効な「空間情報の表現形式」や「部分空間の体制化過程」など「空間の把握に関する研究」は極めて重要になって来る。

一方、心理学では古くから人間の優れた空間認知特性に着目して様々な研究が行われてきた。これらの研究は、我々は探索により情景や道順を記憶するだけでなく、バラバラな知識を体制化して「認知地図」が形成されることを示している。すなわち、認知地図は、「個々の状況」とともに「全体的なイメージ」も把握した知識である。したがって、個々の状況での行動を全体的な知識を利用しながら規定できるため、認知地図は空間の把握に有効な概念と考えられる。しかし、認知地図に関する研究は、形成要因の抽出や統制の困難さ、定量的な評価の難しさなどから、現象の記述に留まり工学的応用が難しいのが現状である。

そこで、我々は心理学の研究成果を工学的に応用するため、認知地図形成過程の定量的な検討を進めつつある。本報告は、これまでに行った研究動向調査とその検討結果について述べるものであり、2章では地図形成過程のシミュレーションについて述べると共に認知地図をロボットに応用するための問題点について述べる。3章では心理学で行われてきた人間の空間把握能力について述べると共に探索により我々は「認知地図」を把握することを述べる。そして、4章では心理学で提唱されている人間の優れた空間認知特性を工学的に応用するために「認知地図形成過程のモデル化」について検討をおこない、最後の5章でまとめを行う。

## 2. 自律走行ロボットと地図形成過程

### 2-1 自律走行ロボットの地図

空間内の障害物を回避しながら自動的に走行するロボットの研究が各地で行われている。まず、日立のクローラ型移動ロボットのように移動空間の正確なモデルをあたえ現在の環境との誤差を検出しながら移動したり、山梨大学の晴信のように移動目標を与え目標物との距離を検出しながら移動したりするロボット（森・小谷・石黒・安富・茅野，1988）など、あらかじめ環境（地図）を与えその環境内を移動する手法が研究されている。一方、CMUのNavlab、メリーランド大学のALVINなどのように、未知の空間を障害物を回避しながら道路を逸脱することなく移動するロボット（Asada，1987）も研究されている。いずれの場合も、どのように環境を把握し表現するか？すなわち、「ロボットが持つ地図の表現や把握過程」は重要な研究課題と考えられる。

ロボットが空間を把握する過程について着目してみると、図-1に示すように各種センサーからの入力进行处理して「シーンを把握する過程」と、シーンをつなぎ合わせて「全体地図を形成する過程」に大きく分けることが出来る。現在の研究は前者の入力からどのようにして有効な情報を取り出し、解釈し、シーンを把握するかという「画像処理・画像理解」が中心であり、後者の地図形成過程に関する研究は少ない。しかし、今後、把握した情報から効果的な地図を形成する後者の過程も重要な問題となることが予想される。したがって、画像から必要な情報が十分抽出できたとして、それ以後の地図形成過程について考察することは興味深い。

### 2-2 地図形成過程のシミュレート

計算機上でのシミュレーションは、画像処理・画像理解の問題を除いて地図形成過程の検討を行えるため有効な手法と考えられる。しかし、通常、認知地図形成過程には、高次の処理が必要なため適切なシミュレーションは少ない。そのなかで、Yeapは（Wai K. Yeap，1988）図-2に示すようなシミュレーションを行っている。このシミュレーションは、2 1/2-Dスケッチを入力として部

分空間を形成し、全体地図形成過程を把握した部分空間の接続関係を単純に示した R C M ( raw cognitive map ) を生成する部分と、空間を階層に捉えた F C M ( full cognitive map ) を生成する部分に分けて考察している。

まず、部分空間の把握は、図-3 に示すように

- 1、2 1/2-D スケッチから各表面の位置を把握する
- 2、各表面から閉曲線を作る
- 3、極端な凹凸をなくす

の過程からなる。

また、R C M は 図-4 に示すように部分空間の接続関係を記述したものであり、この過程は

- 1、新しい部分空間か既に訪れた部分空間かを判定する
- 2、新しい部分空間なら記憶する
- 3、次の部分空間へ移動する
- 4、部分空間と部分空間をつなぐ

からなる。その結果、階層的ではないが空間全体を記述した地図、すなわち、R C M が生成される。

一方、F C M は R C M で把握した部分空間の関係を階層的な表現にまとめたものである。たとえば、図-5 では大学内の各教室や建物を大学内の役割に従い部分空間を分類し、まとめ上げ、階層化を行った例である。すなわち、所属学部や専行などを基準に各教室を分類し、建物や地区ごとにまとめて階層的に表現している。そして、F C M の利用により、レベルの異なる空間の関係や大まかな位置関係の把握などが容易になり、複雑な空間課題に対して柔軟に対応することができるのである。

次に、このモデルの特徴を考察してみる。まず、このモデルの特徴の1つは、2 1/2-D スケッチを入力に用いている点である。通常、画像をそのまま入力すると前処理が必要となるが、2 1/2-D スケッチを与えることで前処理なしにシミュレーションが開始できる。さらに、自律走行ロボットは障害物や壁までの距離や状態などが移動に不可欠な情報であるが、これらの情報は2 1/2-D スケッチから容易に求めることができる。したがって、2 1/2-D スケッチから認知地図形成を論じることは有効な方法と考えられる。

また、従来認知地図形成過程は、高次の知識を用いるため工学的に扱いにくかった。そこで、認知地図形成過程を知識が必要な部分とそうでない部分に分けて考察している点も非常に興味深い。すなわち、Yeapのモデルでは知識なしに行えるRCM生成モジュールと知識が必要となるFCM生成モジュールに分割しており、データ処理が中心となる部分（RCM生成過程）とデータベースなどを参照しながら高次の処理が必要な部分（FCM生成過程）に分離したことも重要な特徴である。

### 2-3 地図形成過程における問題点

前節で述べたように、計算機上のシミュレーションは認知地図形成過程の研究に有効な手法であり様々な知見が得られているが、まだまだ解決しなければならない問題点も多い。

自律走行ロボットは、移動により空間を把握していくが、この場合「現状の把握」が問題になる。すなわち、いまどこにいるか？どの方向を向いているか？あるいは、既に訪れたか空間かどうか？などが問題になる。そのため、通常はあらかじめ与えておいた情報（地図など）や移動中に獲得した情報と現状との比較から現状を把握する。たとえば、Yeapは、移動により別の空間に移動した場合、既に訪れた空間か新しい空間かの区別、すなわち「空間の同定」を、部分空間の出口の位置と通過状況から行っているが、これだけではうまく行かない場合もある。したがって、現状の把握が容易に行えるように、個々の空間を「どのように表現し特徴づけるか」がまず問題になる。

また、個々の空間を把握できたとしても、個々の空間を体制化して全体空間を把握する過程も問題である。Yeapのモデルでは、部分空間を体制化する過程はFCM生成過程に当たり、その例として大学内の建物の配置を用いている。彼は、全体空間把握のために教室や建物の性質や個人の役割などの「知識」を用いているが、「どのような知識を利用してどのように階層化するか」などはあまり明確に述べられていない。したがって、様々な課題に対して柔軟に対処できる表現を生成するために、どのような知識を用いてどのような過程で形成するかも重要な問題である。

このように、空間把握に関しては本質的な点が明確でないのが現状なのである。しかし、心理学の分野では古くから「人間の優れた空間把握能力」に着目し、様々な研究が行われてきている。そこで、工学的に応用が出来る知見を心理学に求めるため、次節では人間の空間把握能力について検討して行く。



### 3. 人間の空間把握能力と認知地図

#### 3-1 空間のイメージ

##### 3-1-1 空間の把握とイメージ

我々が空間の位置関係をどのように把握しているかは興味深い問題である。たとえば、大阪と東京、大阪と京都など様々な都市の位置関係を答えることができるが、これらの無数の位置関係を個々に記憶しているのだろうか。このような疑問から、「我々が空間をどのように把握しているか？」を知るために心理学の分野では様々な研究が行われてきた。

Wilton と File (1975) は、88人の学生に対して 図-6 に示すような図形を覚えさせた後、2つの円の位置関係を答えさせた。解答の方法は、四分円の方向で答えさせた。たとえば、図-6(a)の場合、被験者は円Fから見た円Zの方向を4分円の左上と答えれば正解である。ただし、Fから見たZの方向の4分円が黒くぬった部分の場合(図-6(c))は記憶する必要がないことを教示し、記憶する「関係の数」(44関係と66関係)と記憶に関与する円の「位置の数」(9個と13個)を変えて実験を行った。その結果、正答率は、記憶する位置の数が少ない方(9個の場合)が正答率がよかったが、関係の数には影響されないことがわかった。この結果からWiltonらは、我々が空間の位置関係を把握する場合、「個々の関係」をそのまま記憶しているのではなく、「空間内の位置」を記憶しており、把握した「空間内の位置」から個々の関係を求めていると結論した。

他の研究からも、我々は空間内の無数の組合せに対して直線距離・方向や接続関係など様々な「空間内の知識」をそのまま記憶しているのではなく、むしろ、接続関係・直線距離・方向等の課題に対して適当な答えが作り出せる表現を記憶していると言われている。そして、このような表現は「空間のイメージ」であり、我々は把握したイメージから空間内の位置を思い浮かべ、そこから方向や直線距離を求めていると考えられる。すなわち、我々はイメージを用いて複雑な課題に答えていると言える

空間をイメージとして把握している事を述べたが、このイメージはどのように記憶されているだろうか？

Wilton と File ( 1975 ) は、12個の円を任意に配置した8種類の原図形から、任意に6個選んだサブパターンと隣接する6個の円で構成したサブパターンを作成した。そして、複数の原図形を覚えさせた後、任意のサブパターンを提示しどの原図形から作ったものかを答えさせた。その結果、隣接する円で作ったサブパターンの方が任意に選んで作ったサブパターンより正答率が良く、彼らは空間の近接関係を「1つのまとまり」として把握していると結論した。

また、Wilton ( 1979 ) は地理学専攻の14人の学生に対しイギリス国内の2つの都市名を同時に提示し、北にある方の都市名を答えるRT(反応時間)を調べた。その結果、同じ距離でも England と Scotland のように異なる地方に属する都市の方が、同じ地方に属する都市間(たとえば共に England に属する都市間)のRTより短いことを示した。彼は、この結果から空間を近接関係で把握すると共に「比較的大きなまとまり」でも空間を把握していると考えた。

さらに、Wilton は先の実験で、2つの都市間の距離が遠い程RTが短いという実験結果も示しているが、これらの実験結果は、「階層的な空間のイメージ」を用いてうまく説明できる。つまり、我々は近接する都市間の位置関係を記憶すると共に都市にまとまりを用いて大まかな位置関係を記憶しているのである。また、都市間の位置関係を、最初におおまかな知識を用いた後に細かな知識を用いると考えれば、距離に反比例してRTが長くなることも説明できる。すなわち、我々は、記憶を上位から下位の階層へ順次たどって行くと考えられる。

このように、我々は空間を階層的なイメージとして捕らえていることは様々な実験結果からも言われている(村越 1987)が、イメージの具体的な表現について述べている研究は少ない。その中で、Palmer ( 1977 ) は「視覚イメージ」について図-7 に示すような階層的ネットワークを提案している。図-7 の中でSUと記されているのは構造単位( structural unit )を意味し、これは Miller ( 1956 ) のチャンクに対応するものである。RはSU間の幾何学的関係を、Pは個々のSUの全体的な特性( global property )を、Vはその定量的な値を

示している。そして、上位レベルのSUほど図形の全体的な構造を表現し、それはより細かな構造を示す複数の下位SUと関係Rで定義されている。

そこで、空間のイメージもPalmerが提案した階層的なイメージを用いて表現して見ると、空間のイメージでは、下位のSUでは個々の点や近接関係のまとまりを表現し、上位のSUは地図全体やEngland地方のような大きなまとまりを表現すると考えられる。また、Rに対応するものとして幾何学的な位置関係や包含関係などを表現していると考えられる。部分空間の特徴や性質、その定量的な値などは明確ではないが、空間のイメージも図-7に示すような階層的ネットワーク構造を持つことが予想される。

### 3-2 探索活動による空間の把握と認知地図

#### 3-2-1 空間の知識の種類

ここまでは、目的となる図形あるいは空間を一度に見ることが可能な場合について述べてきたが、一般に「空間の知識」は地図や見取図から得られる知識と実際に町や建物を探索することで得られる知識に大別される。まず、全体が与えられた場合、前節で述べたように「階層的なイメージ」が把握されるが、この知識を用いることで全体像を思い浮かべて様々な課題に対処することができるため、survey knowledgeと呼ばれる。一方、探索により得られる知識は、「この道をまっすぐいくと信号があり、その交差点を左に曲るとタバコ屋あるのでそこを・・・」のような「個々の状況」と「その状況での行動」を連続的に記憶したものであり、procedural descriptionとも呼ばれる。これは、状況（刺激）とその刺激に対して採るべき反応を記憶したものと考えれば「刺激-反応対」の記憶とも言える。（Presson, C.C., Hazelrigg, M.D 1984, Sholl, M, J 1987, Levine, M., Jankovic, I., & Palij, M. 1982）

このように、空間の知識には2種類あるが、これらの知識の特徴や相違点は興味深い。ThorndykeとHayes-Roth（1982）は図-8に示す様な建物について、実際に建物内を探索（navigation）することにより建物を把握している群（探索群）と地図の学習から建物全体を把握した群（全体群）について

「知識の特徴」と「時間的変化」を比較する実験を行った。彼らは、探索群として 図-8 の建物で働いた期間が 1~2カ月、6~12カ月、12~24カ月の 3群についてそれぞれ 8人ずつ選んだ。一方、建物の見取図を憶えさせた後にポイントの位置関係やつながり具合を書かせ、間違わずに書けるまで学習した者 8名、間違わずに記述した後さらに 30分間、60分間学習を続けた者それぞれ 8人ずつを全体群として選んだ。そして、実験は建物の各ポイントに被験者を連れて行き、目標ポイントまでの移動距離、直線距離、方向を答えさせた。

その結果、図-9 に示すように探索群は移動距離の見積に優れ、全体群は直線距離（幾何学的距離）の見積が正確であった。また、方向については図-10 に示すように全体群の方が正確であった。一方、見積の時間的変化については、地図を余分に学習しても空間の見積誤差は改善されず、地図などから得られた知識は一度記憶されるとあまり変化しないようである。しかし、図-9・10 を見ると、探索経験が増えるにつれて直線距離も方向の見積も共に改善されることがわかる。これは、探索により単に刺激に対する反応だけを学ぶのではなく、全体像も把握していることを示している。

### 3-2-2 認知地図

我々は全体を一度に見渡せない空間内で生活しているが、慣れ親しんだ空間では容易に目的地に到達することが可能である。そればかりか、我々は普段の経路が通れない場合でも別の道を通って迷うことなく目的地に到達できる。こうした行動は、頭の中に「空間を表現している知識」をもっていると仮定され、このような知識は「認知地図（cognitive map）」と呼ばれる。認知地図とは、Tolman（1946）が最初に用いた概念であり、彼は、図-11 に示す十字状の迷路の A 点に餌を置き、ネズミが B 点から目標（A 点）へ誤りなく到達できるように学習させた後、出発点を C 点に変えてもネズミは目標（これまでと同じ餌の場所である A 点）にすぐに到達出来ることを見いだした。彼は、この結果からネズミが単に道順を記憶するのではなくバラバラな知識を体制化して「頭の中に地図」を形成していると考え、このような知識を「認知地図」と呼んだ。

前節の実験結果が示すように、我々が未知の空間を探索する場合、探索により得られたバラバラな知識を体制化して「全体を表現した知識」、すなわち、「認知地図」を形成する。認知地図はイメージのようなものと考えられているが、視覚的なイメージのように実際に全体像を見たのではなく、むしろ頭の中で形成した「概念的なイメージ」と考えられる。したがって、

$$\underline{\text{認知地図} = \text{概念的イメージ} + \text{個々の状況と行動}}$$

と言えるのではないだろうか。

このように、地図などから得られる知識（視覚的イメージ）と認知地図は、共に空間全体を表す知識としては共通であるが、認知地図が「個々の状況」や「行動」も同時に把握している点で大きく異なる。したがって、認知地図は全体を一度に見渡せない場合でも、全体的なイメージを用いながら個々の状況での行動を規定できる。したがって、広大な空間内の行動計画を作成するような場合に、非常に有効な知識である。その点で認知地図は、ロボットの活動を規定する概念として有効である。

## 4. 認知地図形成過程に関する一考察

### 4-1 探索による空間の把握

前章では、認知地図が自律走行ロボットに有効なことを述べたが、この章では、ロボットが持つべき地図の表現と形成過程考察するため、我々が「認知地図をどのように表現し、どのような過程で形成していくか？」を考察していく。

大きな空間を把握する場合、我々は現在の視覚情報（画像）から「現在の状況」すなわち「部分空間」を把握し、次に、探索（移動）により把握される「個々の部分空間」を体制化して「認知地図」を形成する。では、この過程で我々は、どのような情報を獲得しているだろうか。もちろん、既に把握した認知地図を参照するが、新しく獲得する情報としては、個々の状況での「視覚情報」と「移動に伴う変化」だけである。すなわち、「画像」と「移動結果」だけから認知地図を形成していくことになる。

ところで、現在のロボットに「画像」と「移動結果」を入力すれば、我々が把握するような「認知地図」が形成されるだろうか？確かに、ロボットは、入力された画像を処理して移動可能領域や部分空間の境界の検出などから状況把握を行い、移動した空間をつなぎあわせている。しかし、我々が把握する認知地図は、多数の部分空間を階層的な構造で把握し、様々な課題を解決する際に必要となる情報をロボットよりも多く含んでいる。したがって、同じ入力に対して人間は、はるかに「高度な処理」で多数の情報を抽出し認知地図を形成していると考えられる。そこで、本章では、人間の優れた空間把握能力を述べ、その能力を認知地図形成過程に盛り込むことで、モデル化を検討して行く。

### 4-2 人間の空間把握能力

#### 4-2-1 状況の把握

現在のロボットは、画像から

##### 1. 移動可能領域に関する情報

障害物、道、出口はどこにあるか？

## 2、部分空間形成に関する情報

空間の境界はどこにあるか？部分空間の広さは？

のような「空間の形状」に関する情報を主に抽出している。そして、自律走行ロボットは、「空間の形状」から部分空間を把握し、全体地図を構成し、移動を行っている。我々にとっても、障害物の位置や部屋の境界のような情報は不可欠であるが、我々も「空間の形状」だけで空間を把握しているだろうか？たとえば、見知らぬ空間を探索した場合、移動可能範囲や部分空間を把握すると共に「特徴的なもの」や「目印」なども我々は記憶しているように思う。また、他人に部分空間を説明する場合も「信号のある交差点」や「絵の掛かっている部屋」のような空間を特徴づけるものを利用する。すなわち、我々は

## 3、空間を特徴づける情報

たとえば、高い木がある。壁に絵が掛かっているなども抽出し、利用していると思われる。

では、我々は「空間を特徴づける情報」をどのように利用しているだろうか？空間内の移動において既に訪れた空間か初めて訪れる空間かの区別、すなわち、「空間の同定」が問題になることを述べたが、「空間を特徴づける情報」は明らかにこの問題に利用できる。また、空間を階層的に記憶していることも述べたが、空間の特徴は「部分空間の統合化」に重要な役割をはたし、階層的な記憶の手助けになると思われる。したがって、「空間を特徴づける情報」の抽出と利用は、人間が優れた認知地図を形成できる1つの要因ではないだろうか。

### 4-2-2 刺激-反応対の把握

次に、状況を把握した時、その状況での行動について考察していく。我々は、探索により様々な状況に遭遇するが、「ある状況で、ある行動を取ると、別の状況になった」という経験を積むにしたがい、人間は「この状況で、もしこの行動を取れば、あの状況になるだろう」と予想し、予想に基づいた行動が取れるようになる。すなわち、現在の状況を知覚することを「刺激」、その刺激に対する予想を元にした行動を「反応」と考えると、我々は探索により「刺激-反応対」を

把握して行くと言える。

刺激－反応対は、ある状況での「行動を規定する概念」として重要であるが、同時に「状況と状況の関係」あるいは「部分空間と部分空間の関係」を明確にする。たとえば、「状況Aで右に曲がる（あるいは右のドアに入る）と状況Bになった」という刺激－反応対を把握したとする。この場合「状況Aの右の道（ドア）は状況Bにつながっている」という接続関係と共に「状況Aと状況Bの位置関係」も把握できる。つまり、我々がある状況の刺激－反応対を把握することは

- 1、 行動とその結果の把握
- 2、 接続関係の把握
- 3、 位置関係の把握

を意味する。

このように、人間は、移動により刺激－反応対を把握しその情報を元に空間の知識を増加させて行くが、現在のロボットは接続関係を利用しているだけである。したがって、移動により得られる情報の差も人間の優れた空間把握能力の理由の1つと考えられる。

#### 4－2－3 概念的イメージの把握

我々は、状況から「空間の特徴」を抽出することや、刺激－反応対から接続関係や位置関係が把握することを述べたが、これらの情報から空間内に「まとまり」を検出する場合がある。たとえば、状況Aと状況Bの位置が近接している場合「位置的なまとまり」が検出されるだろう。また、状況Aの壁の色と状況Bの壁の色が同じ場合「色のまとまり」が検出されるかもしれない。このように、我々は空間内の共通の性質や特徴を検出する過程、すなわち、「群化する過程」を通して「空間内のまとまり」を形成するのである。

群化過程により把握した「空間内のまとまり」は、個々の部分空間の性質や特徴を抽象化した「イメージ」のようなものであり、このイメージは探索により把握したバラバラな情報を統合して作られるため「概念的イメージ」と考えられる。そして、それは「近接関係についての概念的イメージ」であるかもしれないし、「色についての概念的イメージ」かもしれない。つまり、我々は探索により得た



情報を「異なる基準で群化して複数の概念的イメージ」を形成することが予想される。

人間の優れた空間把握能力として「状況」や「刺激－反応対」などから様々な情報を抽出することを述べたが、その結果、我々は膨大な量の情報を記憶しなければならない。したがって、探索活動により把握した膨大な情報の記憶や管理は非常に重要な問題となるが、「概念的イメージ」は、この問題に重要な見解を与える。たとえば、複数の部分空間に色のまとまりを検出して概念的イメージを形成した場合、イメージを用いて個々の状況の色を把握することができるため、個々の状況の色を憶えておく必要はない。すなわち、イメージの把握により、膨大な情報を統合して効率よく記憶できるのである。このように、我々の優れた空間把握能力として、単に有用な情報を抽出するだけでなく、情報を効率よく記憶している点も重要である。

#### 4-3 認知地図形成過程のモデル化

これまでは、人間の優れた空間把握能力として、探索活動により「状況」と「刺激－反応対」を把握し、これらの入力から空間の把握に必要な情報を抽出し、抽出された膨大な情報を「概念的イメージ」にまとめて記憶していることを述べてきた。では、実際に我々は、どのように空間を表現しているだろうか。すなわち「認知地図」はどのような表現であろうか。3-1では全体（地図など）が与えられた場合、我々は空間を階層的なイメージで把握していること述べた。3-2では、認知地図が個々の状況と共に概念的イメージを把握したものであることを述べた。また、4-2-3では、空間の情報を群化して「概念的イメージ」が形成されることを述べた。したがって、我々は探索活動により把握した膨大なデータから概念的イメージを形成し、概念的イメージを階層的に統合することで認知地図を形成していると考えられる。

そこで、この過程を

- 1、入力からの状況把握
- 2、移動による刺激－反応対を把握
- 3、群化による概念的イメージの形成

4、階層化による認知地図の形成  
に分けてモデル化して行く。

( 入力からの状況把握 )

4-2-1で述べたように、ある状況が与えられたとき、我々は 図-12  
に示すような部分空間(SU)を形成し、同時にそのSUの属性として部分空間  
の広さや出口の位置などの「空間の形状に関する情報」と「空間を特徴づける情  
報」を記憶する。そして、空間はSU単位で扱われ、空間の特徴や性質などはS  
Uの属性を参照することで利用できる。

( 移動による刺激-反応対の把握 )

次に、部分空間SU1で移動を行った結果、部分空間SU2になったとする。  
この時、2-3で述べたように「空間の同定」が問題になる。すなわち、到達し  
た空間(SU2)が既に訪れた空間かどうかの判定、言い替えれば、SU2が既  
に登録されているかどうかの判定をしなければならない。従来、空間の同定は「  
空間の形状」を元に行われる場合が多かったが、この場合SUは単に「空間の形  
状」だけでなく「空間を特徴づける情報」も記憶しているため、空間の同定が容  
易に行えるだろう。その結果、新しい空間の場合はSUを新たに形成し、既に訪  
れた空間の場合には登録したSUを参照すればよい。いずれの場合でも「部分空  
間SU1から移動を行った結果、部分空間SU2に至る」という刺激-反応対を  
把握した場合、図-13に示すようにSU1での「行動とその結果」がSU1  
の属性に追加され、SU1とSU2の間に接続関係Rがつくられる。そして、R  
にはSU1とSU2の位置関係が記録される。このように、刺激-反応対の把握  
により、単に接続関係を追加するだけでなく「行動とその結果」や「位置関係」  
も把握される。

( 群化による概念的イメージの把握 )

探索による空間情報 (SUの属性やR) の増加に伴い、個々の部分空間の性質や特徴が明らかになり、共通点や類似性が検出されてくるだろう。この場合、4-2-3で述べたように、SUの群化が行われ、図-14に示すような「概念的イメージ」pSU (Parent SU) が形成される。群化過程によって形成された「pSU」は、SUと同じ構造 (図-12) を持ち、属性は形成に用いた共通の特徴や性質である。pSUと個々のSUとは関係Rでつながっているため、関係 (この場合親子関係) をたどることでお互いの情報が参照し合える。したがって、SUに共通の性質はpSUで記憶し、SUは個別の情報だけを記憶すれば非常に効率がよい。

( 階層化による認知地図形成過程 )

探索を繰り返すと、概念的イメージは曖昧なものから徐々に明確なイメージとして把握されるようになるだろう。また、既に群化された空間と部分空間が結び付いたり、群化した空間 (pSU) が結び付いたりするなど、順次高次の概念的イメージが形成されていく。そして、探索が進むにつれて「様々な階層」の「様々な基準」の概念的イメージ (たとえば、近接関係に関するイメージや色に関するイメージなど) が形成されるが、これらのイメージを総称するようなものとして「空間全体を表すイメージ」が形成されるだろう。

このような過程で形成された「空間全体を表すイメージ」は、イメージで空間を把握できると共に個々の性質や特徴も把握できることから、「認知地図」と考えられる。したがって、認知地図は、図-15に示すように、一つ一つの部分空間が複数の概念的イメージに属し、そのイメージがより高次のイメージに統合され、これら全てのイメージが包含されているものと考えられる。すなわち、認知地図は、概念的イメージを階層的にまとめ上げ総称して形成されるのである。

#### 4 - 4 今後の課題

3 - 1 - 1 で我々は「様々な課題に対して答えることが出来る表現」を記憶していることを述べたが、認知地図は、異なるイメージを用いることで様々な課題に対処できると共に全体的な課題に対しては高次の概念的イメージを用いて、細かな課題に対してはRをたどることで個々の性質を用いるため、様々な課題に非常に効率よく対処できる表現である。また、心理学の研究では、個人や目的、探索経路により異なる認知地図が形成されることが報告されているが、これは、空間から抽出する特徴や群化の基準が異なるため、同一の認知地図が形成されるには限らないことにも起因する。

このように、我々が述べた認知地図の形状や形成過程は、心理学で述べられている認知地図の特徴や性質を反映しているが、「どのような情報を空間から抽出するか?」「移動から位置関係をどのように見積るか?」「群化はどのような基準で行われるか?」など肝心の部分が明かでない。これは、従来の研究手法では空間を統制することの困難さから、現象の記述に留まり「定性的な評価」しかできなかつたためである。しかし、人間の認知地図形成過程を明らかにするためには、「定量的な空間認知特性」を把握する必要がある。そのためには、「統制された空間内」で「空間認知特性を定量的に評価」行うことが重要であり、その結果を基にした「認知地図形成過程モデル」を形成し、評価することで人間の認知地図形成過程が徐々に明らかになると考えられる。

また、本レポートでは、認知地図の形成過程と表現について述べてきたが、「認知地図がどのように利用されるか」についても非常に興味深く、今後の研究が望まれる。

## 5. まとめ

高度に構造化された空間をロボットが移動する場合、様々な状況に柔軟に対処するために「全体地図」は不可欠である。しかし、従来は「空間把握過程」や「空間の表現形式」などが不明確なため有効な「全体地図」の形成は困難であった。そこで、人間の優れた空間把握能力に着目し、心理学の分野に「全体地図」形成に関する知見を求めた。その結果、我々は、空間を探索することにより「個々の状況と行動」と「概念的イメージ」とから成る「認知地図」を把握していることがわかった。そして、「認知地図」は全体的イメージを利用しながら個々の状況での行動を規定する場合に非常に有効な概念であるが、現状では「認知地図」を定量的に扱った研究は少なく、工学的応用は難しかった。

そこで、工学的に応用できる認知地図形成過程を検討するため、まず、人間の「高度な処理」に着目した。その結果、人間は

- ・ 状況から「空間の形状」と共に「空間の特徴」を抽出している。
- ・ 移動により「接続関係」と共に「位置関係」や「行動とその結果」を把握する。
- ・ 部分空間の共通の特徴や性質を検出し「概念的イメージ」を形成する。

などがわかった。そして、認知地図を複数の概念的イメージを総称したものとして捉え、

- 1、状況を把握する過程
- 2、移動により刺激-反応対を把握する過程
- 3、群化により概念的イメージを形成する過程
- 4、概念的イメージを統合して認知地図を形成する過程

に分け、認知地図形成過程に人間の「高度な処理」を反映させながらモデル化を試みた。その結果、我々が提案したモデルは、心理学で述べられている認知地図の特徴や性質を反映しているが「どのような情報を空間から抽出するか?」「移動から位置関係をどのように見積るか?」「群化はどのような基準で行われるか?」など肝心の部分が明かでない。したがって、今後、人間の認知特性を定量的に評価する実験を行い、その結果をモデルに組み込むことで、認知地図形成過程を徐々に明らかにしていきたい。

## 謝 辞

本研究を行う機会を与えていただきましたATR視聴覚機構研究所 淀川英司社長に深謝します。また、日頃からご指導いただきました認知機構研究室 中根一成室長、並びに認知機構研究室、視覚機構研究室の諸氏に感謝致します。

## 参考文献

- 1) 佐藤淳, 築山俊史(1988): 自律走行のためのインクリメンタルな環境モデルの構築, 情報処理学会研究報告, CV53-2
- 2) 森英雄, 石黒浩, 茅野之雄, 小谷信司, 安富敏(1988): 構内道路を走行する自律移動ロボット, 日本ロボット学会誌5巻5号, pp.361-374
- 3) Minoru Asada (1987): Bulding A 3-D World For A Mobile Robot From Sensory Data, 情報処理学会研究報告, IE87-140
- 4) 白井良明: パターン理解 オーム社
- 5) Wai K. Yeap (1988): Towards a Computational Theory of Cognitive Maps. Artificial Intelligence 34, pp 297-360
- 6) Wilton, R.N., File, P.E. (1975): Knowledge of spatial relation: A preliminary investigation. Quarterly Journal of Experimental Psychology, 37, pp192-198
- 7) Wilton, R.N. (1979): Knowledge of spatial relation: The specification of the information used in making inference. Quaterly Journal of Experimental Psychology, 31, pp133-146
- 8) 村越真(1987): 認知地図と空間行動. 心理学評論 vol30, No2, pp-188-207
- 9) Palmer, S.E. (1977): Hierarchical structure in perseptual representation. Cognitive Pycology, 9, 441-474
- 10) Presson, C.C., & Hazelrigg, M.D. (1984): Bulding spatial representation through primary and secondary learning. Journal of Experimental Pycology: Learning, Memory, and Cognition, 10, pp716-722

- 11) Sholl, M. J. ( 1987 ): Cognitive Maps as Orienting Schemata. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 13, pp615-628
- 12) Levine, M., Jankovic, I., & Palji, M. (1982): Principles of spatial problem solving. Journal of Experimental Psychology: General, 111, pp157-175
- 13) Thorndyke, P., & Hayes-Roth, B. ( 1982 ): Differences in spatial Knowledge acquired from maps and navigation. Cognitive Psychology, 14, pp560-581
- 14) 小谷津孝明: 認知心理学講座2 記憶と知識 東京大学出版会
- 15) Canter, D. ( 1977 ), 宮田紀元, 内田茂訳: 場所の心理学 彰国社

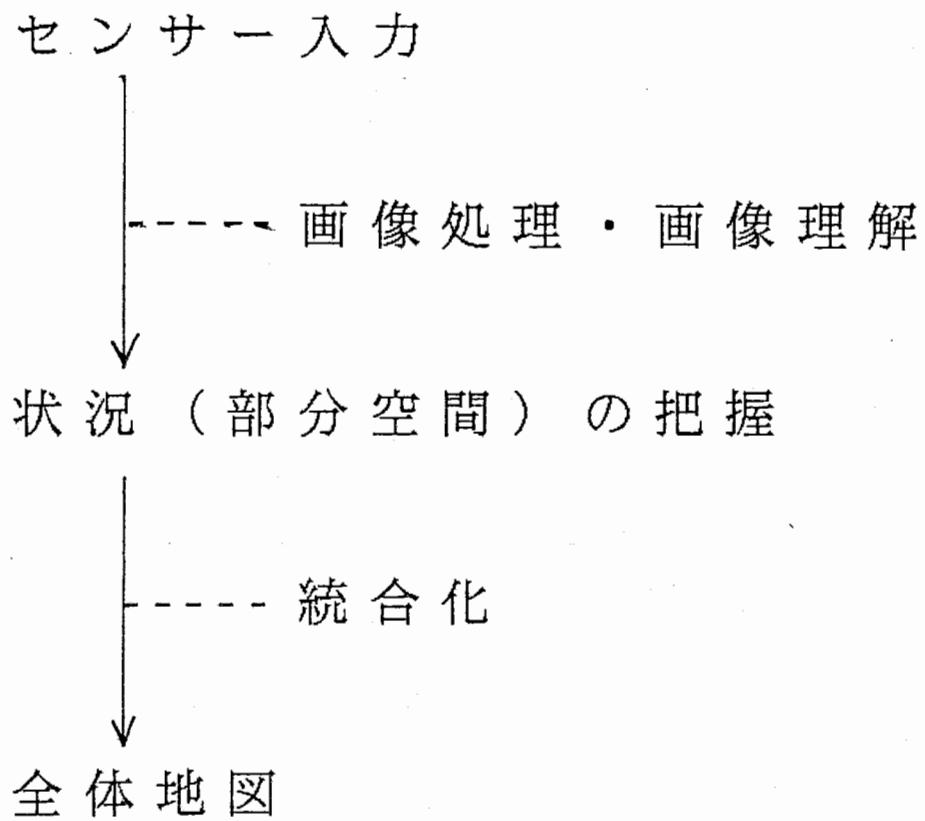


図-1 ロボットによる地図形成過程



2 1/2 D スケッチ



極端な凹凸が内容に表面をつなぐ

部分空間の把握



部分空間の接続関係を把握

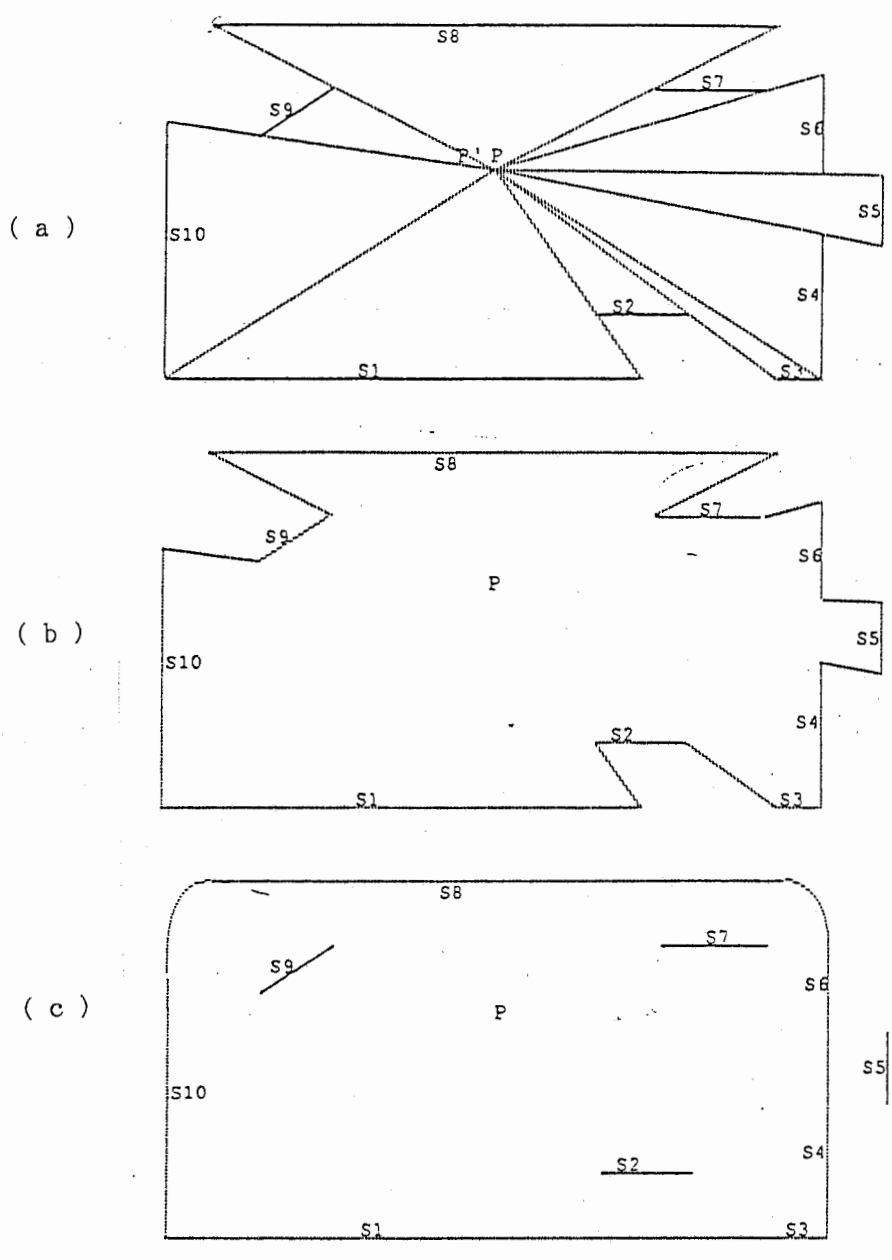
R C M ( Raw Cognitive Map )



部分空間を階層的に把握

F C M ( Full Cognitive Map )

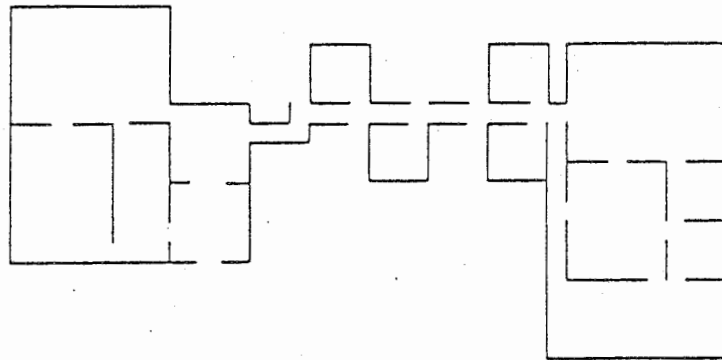
図 - 2 Yeap によるシミュレーション ( 1988 )



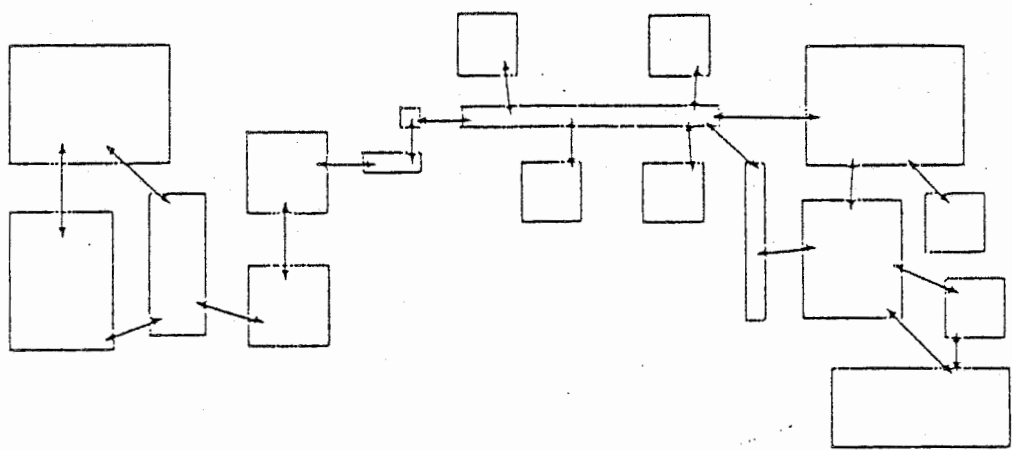
- ( a ) 2 1/2-Dスケッチから表面の位置を把握
- ( b ) 各表面をつないで閉曲線を作る
- ( c ) 極端な凹凸をなくす

図 - 3 部分空間把握過程

( a )



( b )

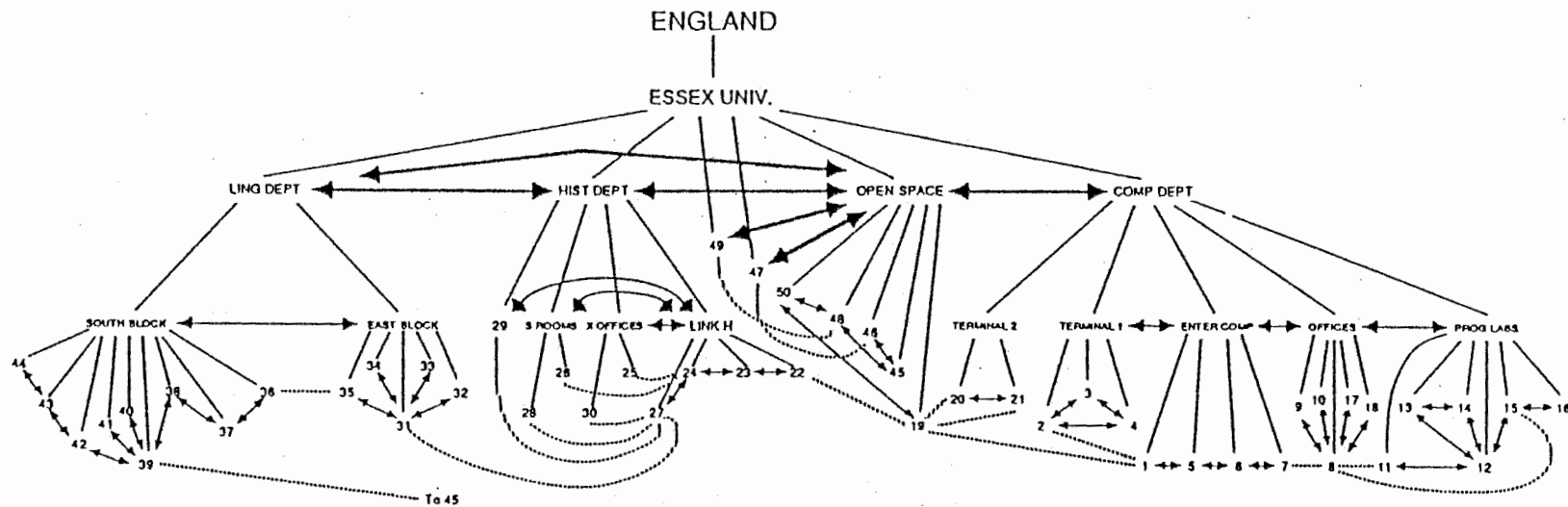


( a ) 全体空間

( b ) 各部分空間の接続関係を示した R C M

図 - 4 R C M の 例

5 FCM 例



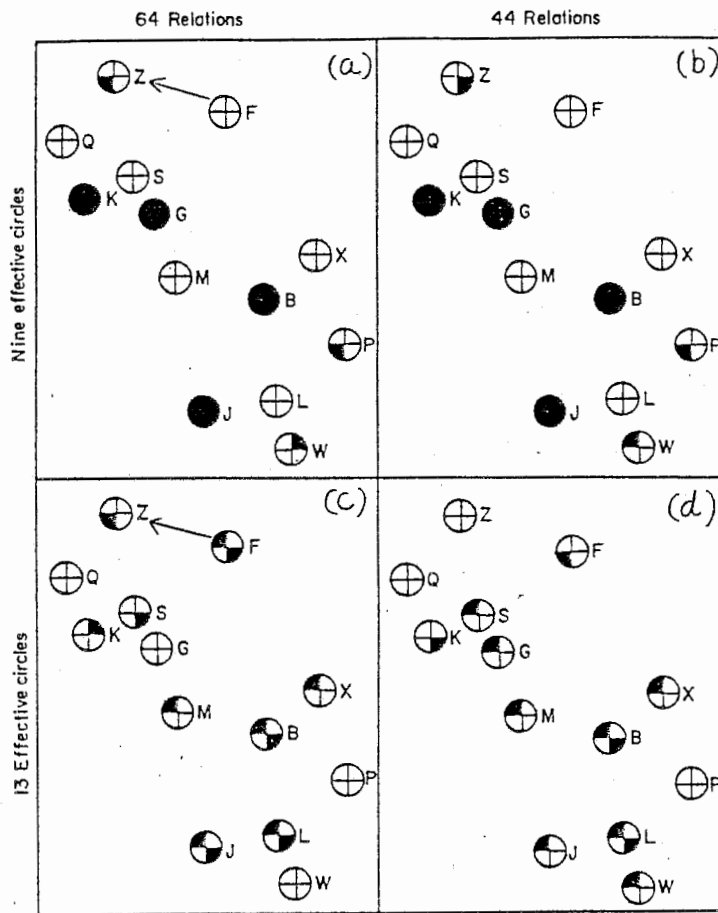


図 - 6 Wilton と File の実験 ( 1975 )

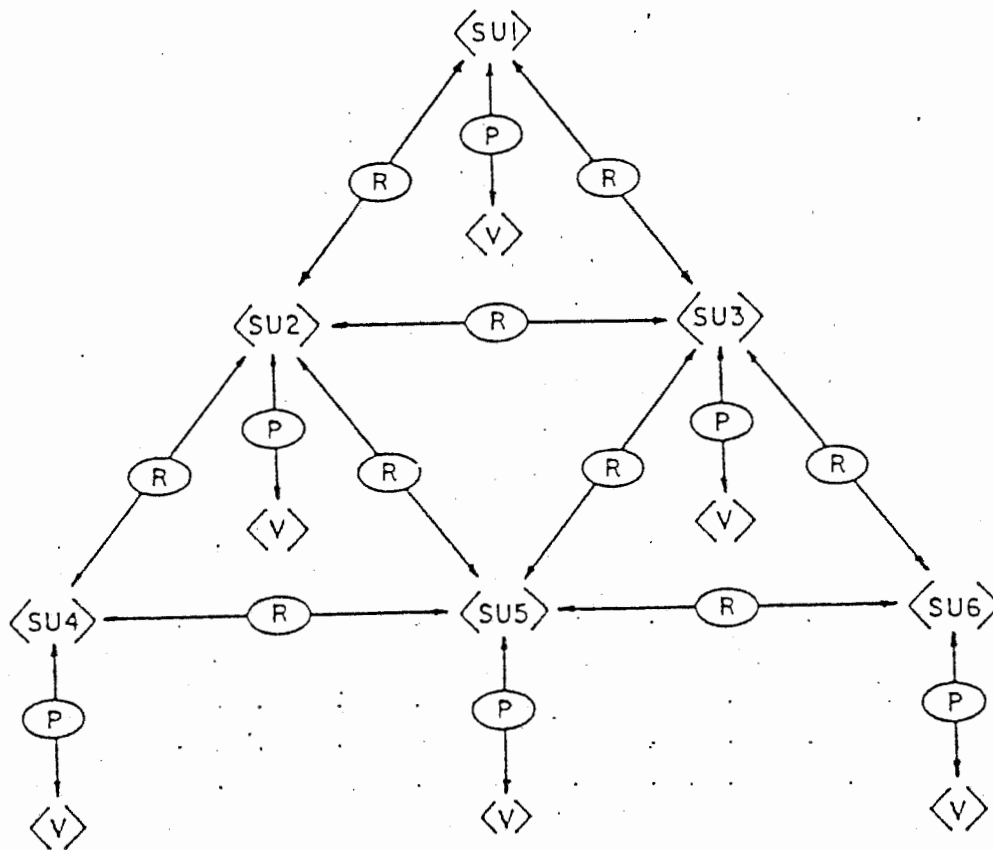


図-7 イメージの階層的ネットワーク構造 ( Palmer , 1977 )

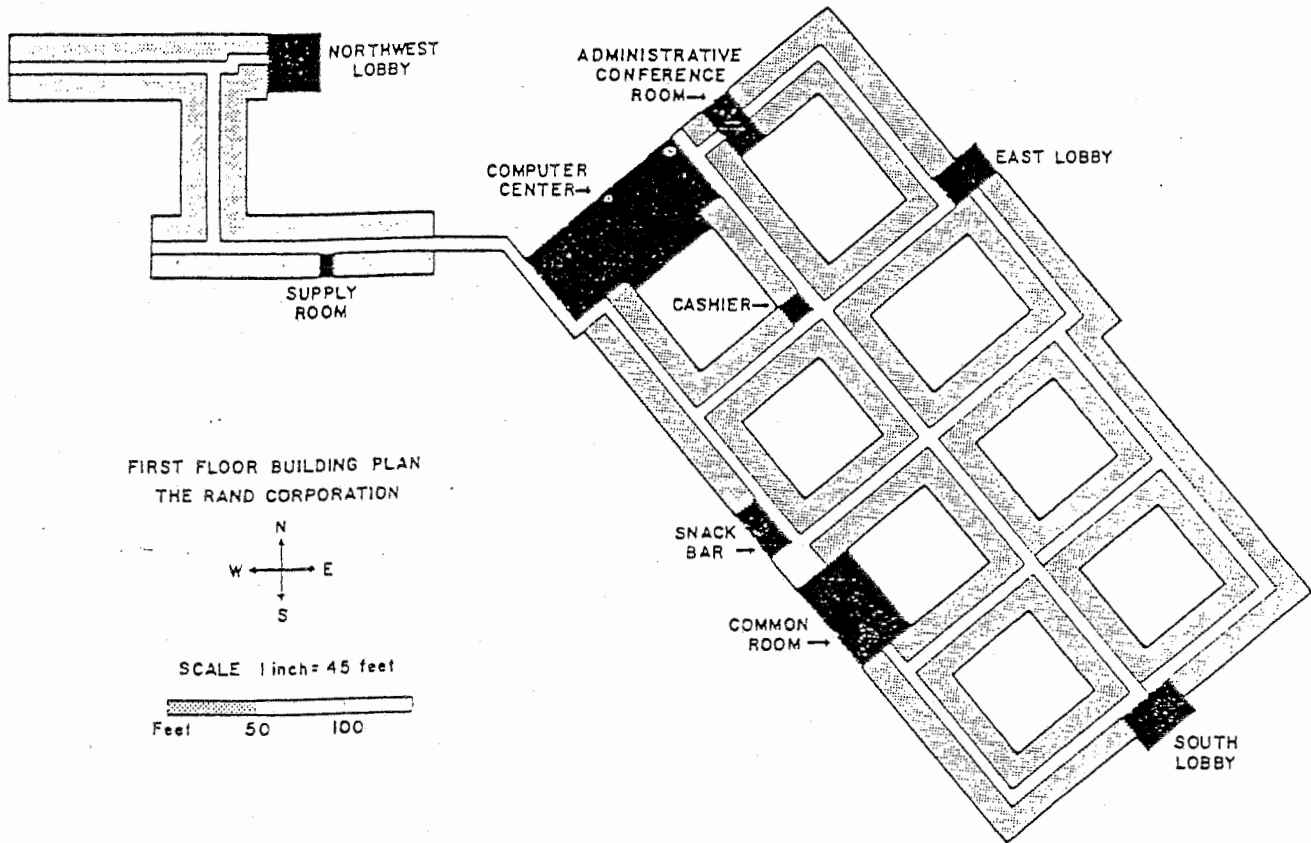


図 - 8 Thorndyke と Hayes-Roth の実験 ( 1982 )

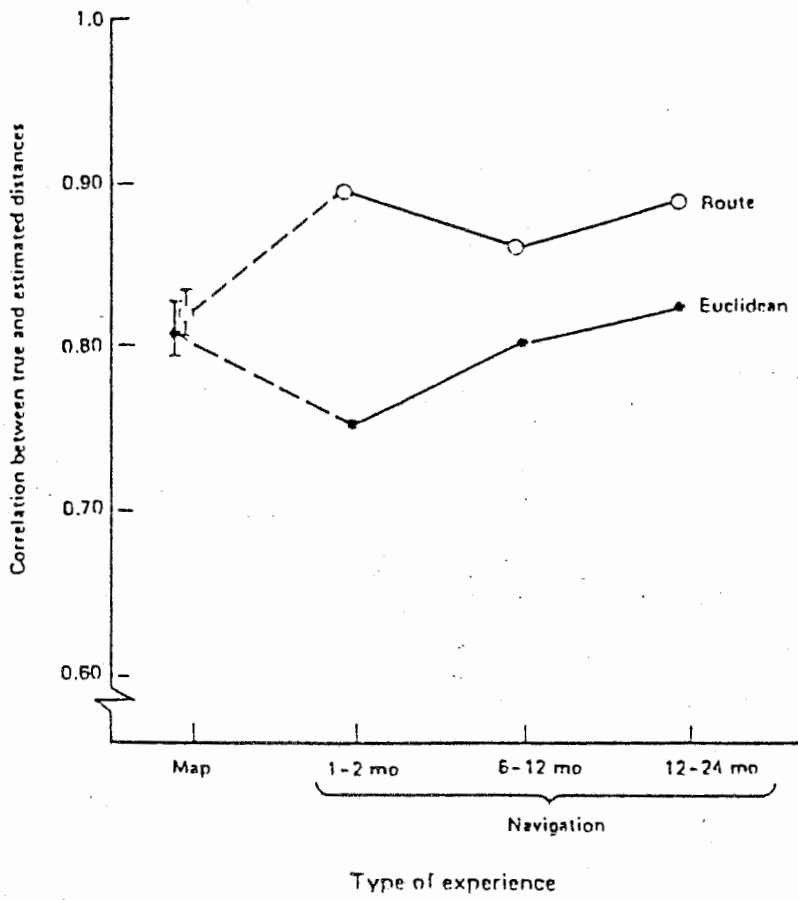


図 - 9 経験の種類と距離の見積誤差



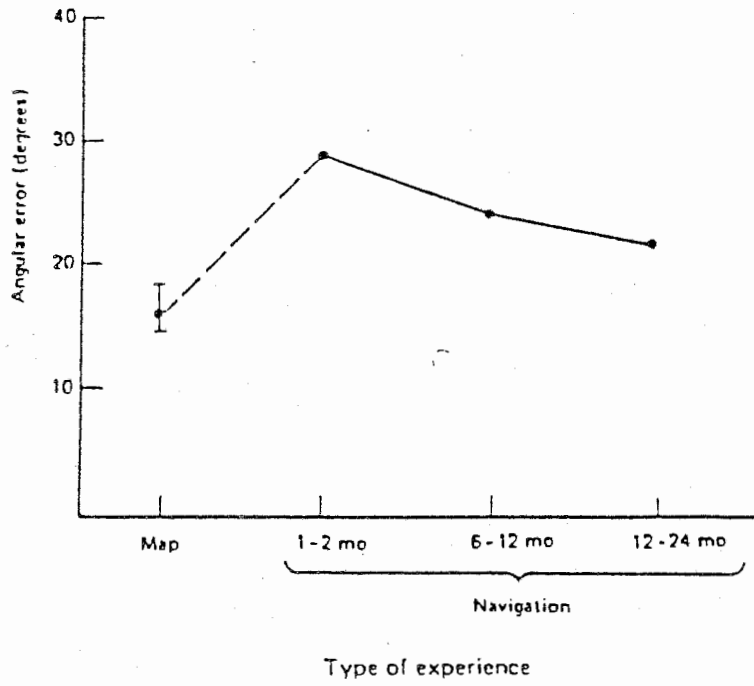
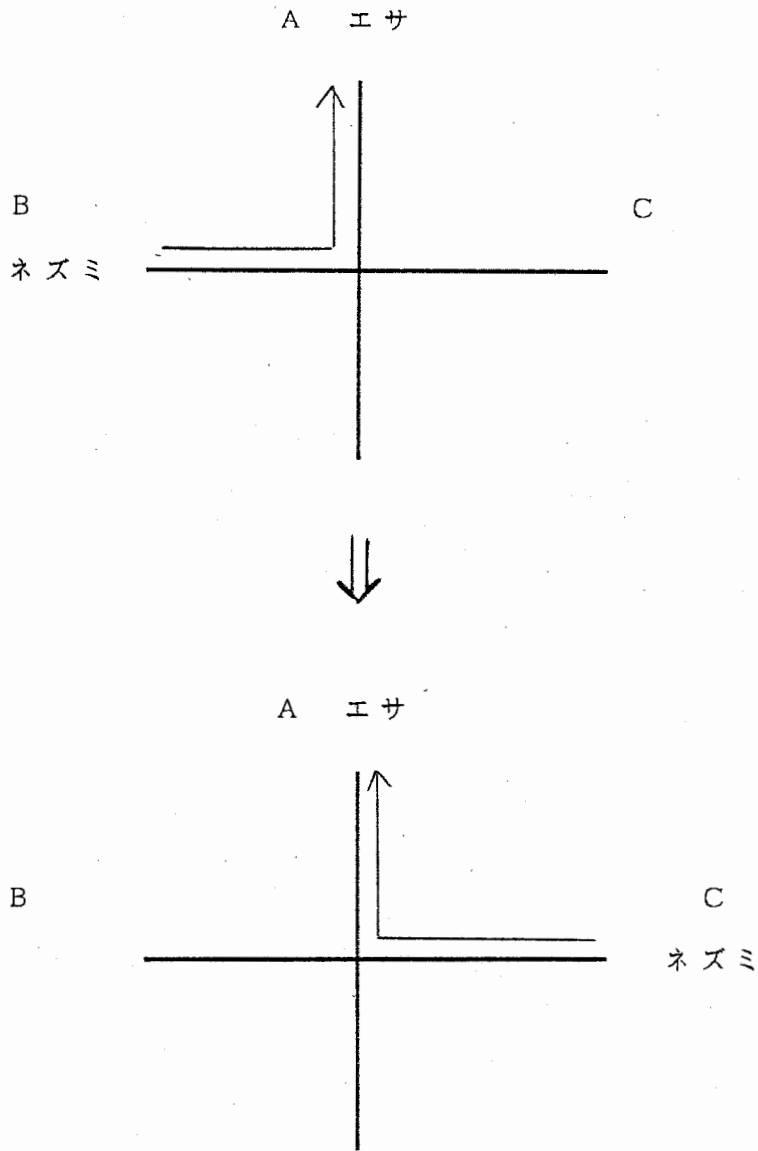


図 - 1 0 経験の種類と方向の見積誤差



ネズミの出発点を B から C に変更しても、すぐにエサにたどり着く

図 - 1 1 Tolman の実験 ( 1946 )

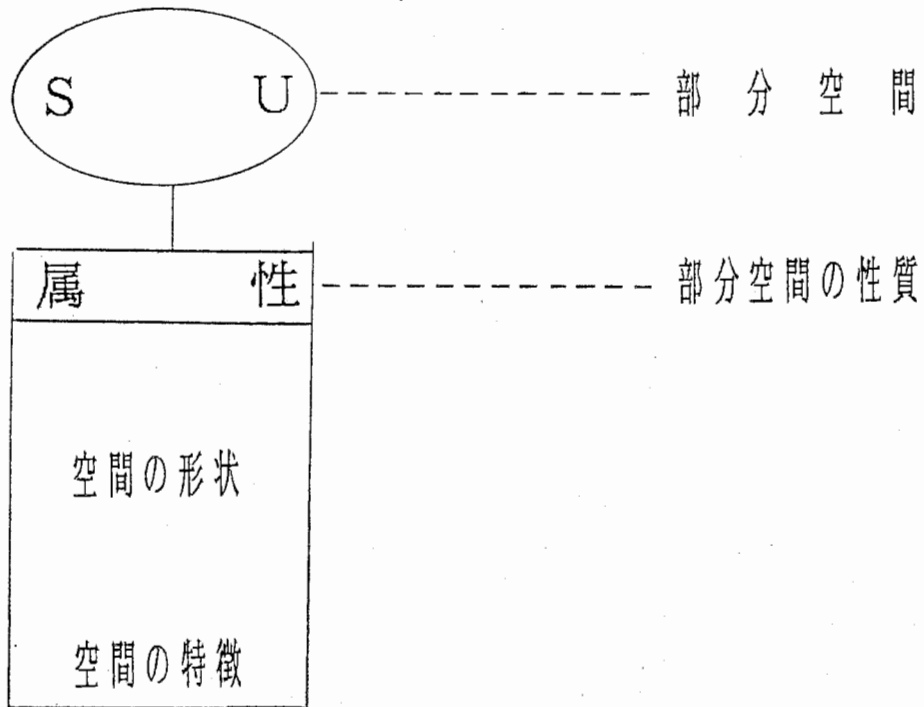


図 - 1 2 部分空間の把握

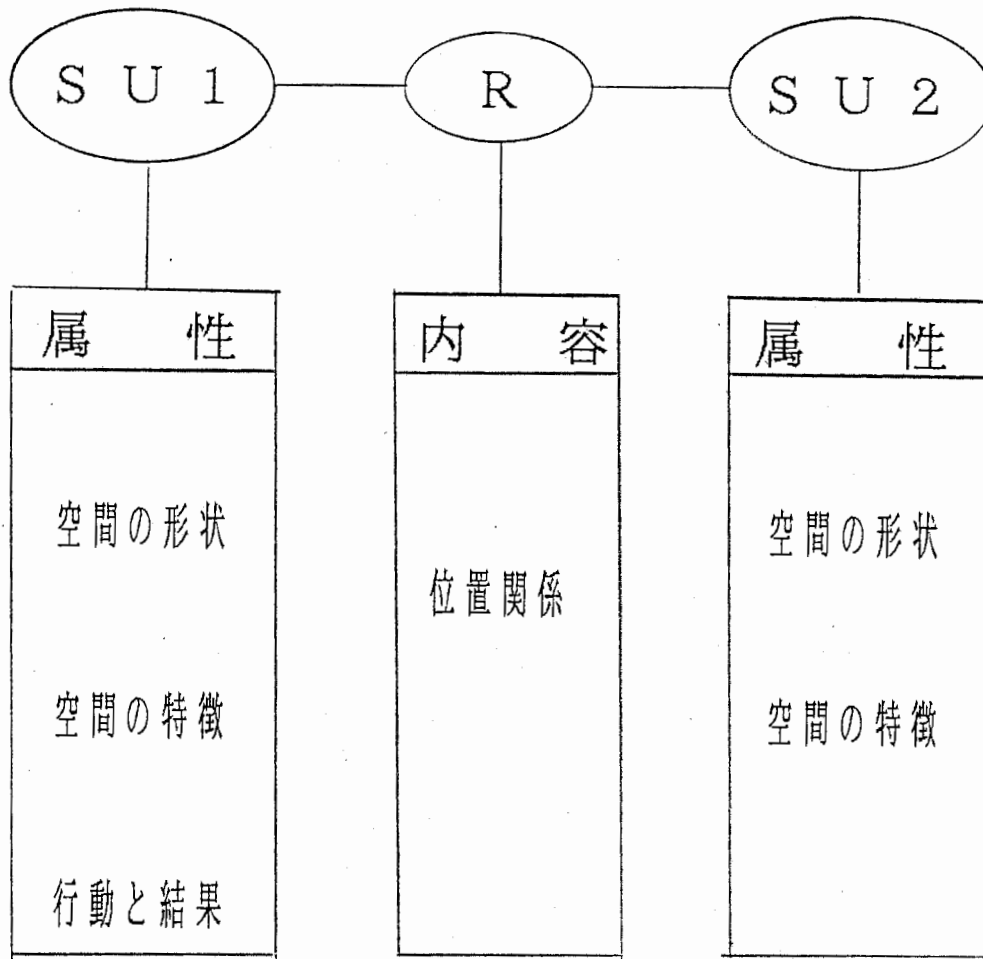
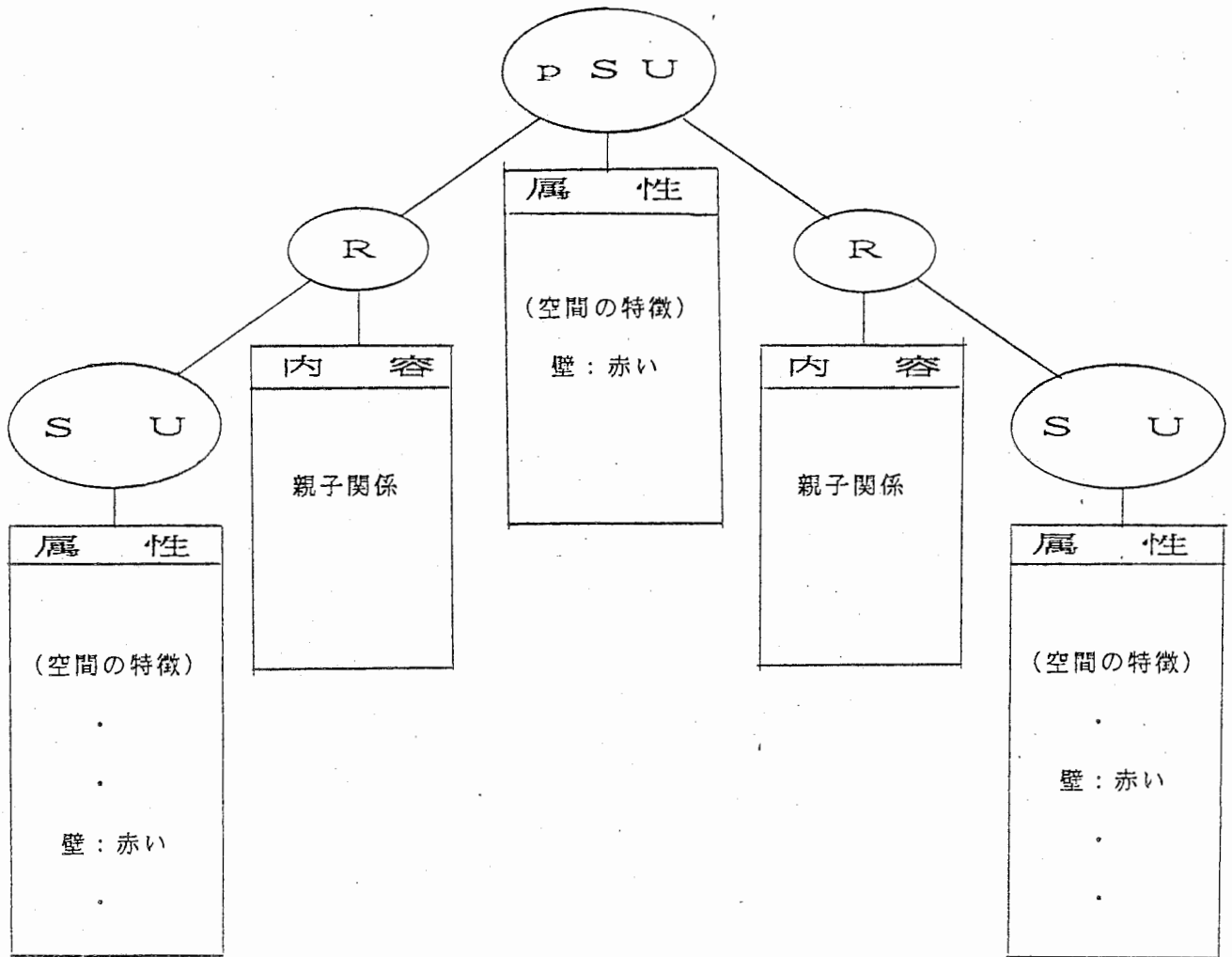


図 - 1 3 刺激 - 反応対の把握



壁の色に共通性を検出した結果形成された「概念的イメージ」

図-14 概念的イメージの形成

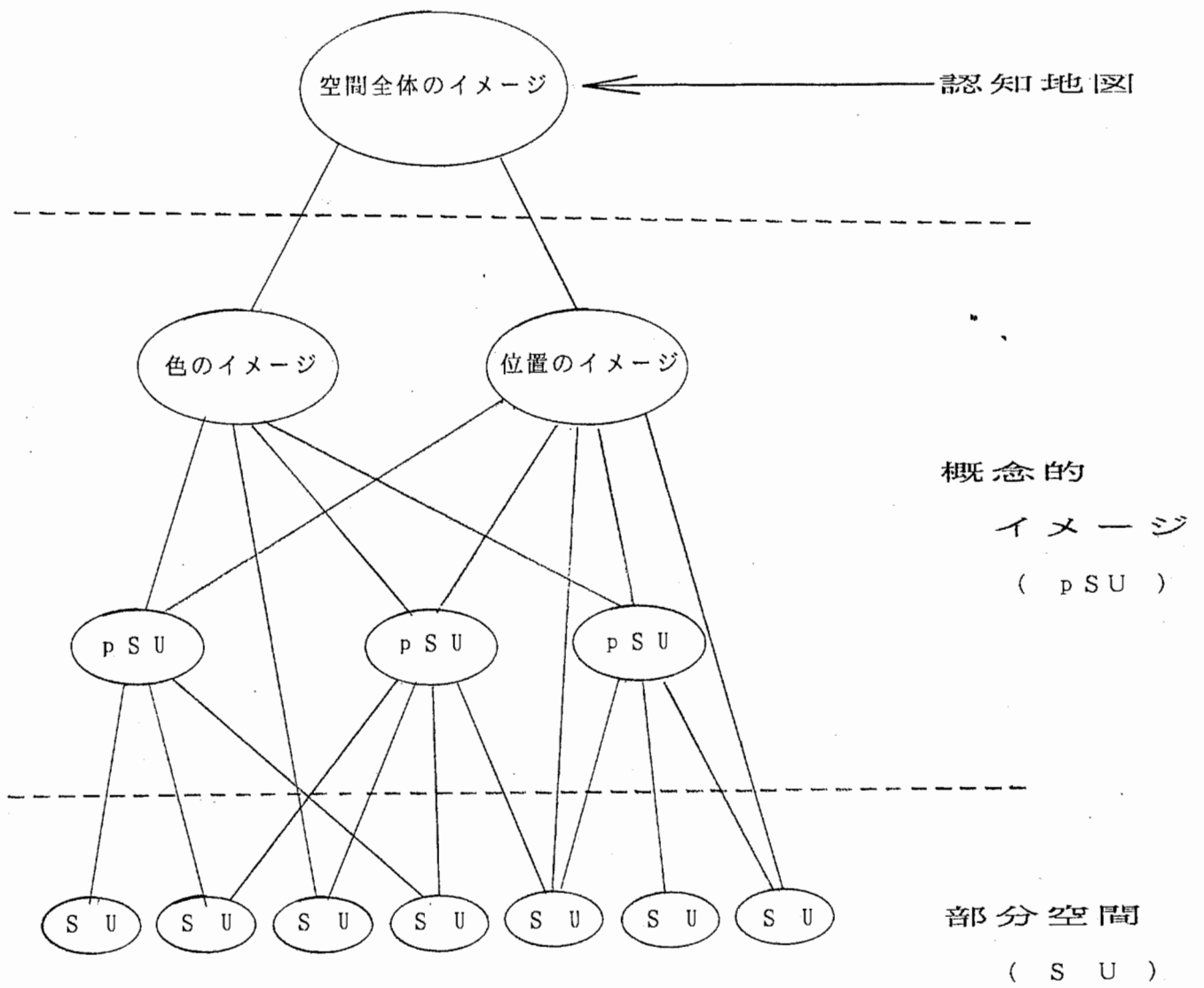


図-15 認知地図の形成