

CGを用いた心理実験による空間認知モデルの検討

林 武文* 乾 敏郎**

*ATR視聴覚機構研究所

**京都大学

空間認知機能のモデル化は、空間型のマンマシン・インタフェース，都市計画学や建築学における空間設計，移動ロボットの認知地図形成問題など様々な分野への応用が可能であり重要な課題である。筆者らはコンピュータ・グラフィックスを用いた心理実験により、ヒトの空間認知特性を定量的に評価するとともに、その結果に基づいた空間認知モデルの検討を行っている。本報告では、CG上の複雑な空間を移動した場合の経路の記憶特性と学習効果について調べるとともに、実験結果を説明するモデルを考察する。

Study of The Human Spatial Recognition Property and Its Model based on
Psychological Experiments using a Computer Graphics System

Takefumi HAYASHI* and Toshio INUI**

*ATR Auditory and Visual Perception Research Laboratories

Sanpeidani, Inuidani, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02, Japan

**Kyoto University

Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606, Japan

A computational model of the spatial recognition property would be useful in engineering fields such as human-machine interface system, city planning, and Robotics. To study human spatial recognition properties quantitatively under controlled conditions, an experimental system utilizing Computer Graphics technique has been developed. This report presents the psychological experiments concerning the characteristics of spatial memory and learning process. The psychological models which can explain experimental results are proposed.

1. まえがき

人間を含めて動物は移動することによって得られる断片的な視覚情報を統合し、環境の空間配置を把握することができる。また、獲得した空間知識を逐次修正して見通しの利かない空間を自由に行動することができる。このような空間認知機能は、データベース検索等における空間型のインタフェース⁽¹⁾⁽²⁾や移動ロボットのナビゲーションシステム⁽³⁾⁽⁴⁾、都市計画学や建築学における空間設計⁽⁵⁾⁽⁶⁾などに有効な指針を与えるため、様々な分野においてモデル化が望まれている。

空間認知機能の研究は心理学の分野では古くから行なわれており、動物やヒトの空間行動と知識の獲得や利用および獲得された空間表象の性質などについて数多くの検討がなされてきた⁽⁷⁾。しかしながら、実際の空間では要因を統制した実験が困難であるために、多くの研究は実験結果の定性的な解釈のみに留まっていた。空間行動を定量的に予測する計算モデルを構築するためには、要因を統制した定量的な実験が不可欠となる。藤井と乾⁽⁸⁾⁽⁹⁾は、パラメータの変更が容易なコンピュータグラフィックス(CG)を用いた実験システムを構築し、空間距離や方向の評定特性に関する検討を行っている。このシステムでは、グラフィックディスプレイ上に任意の3次元空間を形成し、それをリアルタイムで更新することが可能である。被験者は、ジョイスティック操作により、あたかも街中を自動車に乗って走るようなイメージでCG空間を自由に探索することができる。

本報告では、複雑な空間を移動した場合の経路の記憶特性と距離の評定特性およびその学習効果をCGを用いた心理実験によって調べるとともに、実験結果に基づいた空間認知機能のモデル化について検討を行う。

2. CG空間における距離の評定特性⁽⁸⁾

最初にCGを用いた実験システムにより得られた距離の評定特性について述べる。

距離や奥行き知覚はStevensのべき法則に従い、

静止した状態で距離を評定する場合にはべき指数が1以下であることが多くの研究により報告されている⁽¹⁰⁾。また、BradleyとVido⁽¹¹⁾は、被験者が記憶した距離を評定する場合には、べき指数が減少することを明らかにしている。本実験システムにより、直線コースを一定速度で移動した場合に評定される距離 y (知覚距離)を物理距離 x のべき関数で近似した結果、式(1)に示すようにべき指数は0.73となる。

$$y = 1.97 x^{0.73} \quad (1)$$

また、複数の距離を同時に評定した場合(記憶距離)には、評定特性は実験課題の複雑さによって異なり、直線経路を用いて2つの道路の距離を評定する場合には式(2)、四辺形の経路を用いて4つの道路の距離を評定する場合には式(3)のようなべき関数で近似される。

$$y = 2.48 x^{0.62} \quad (2)$$

$$y = 3.60 x^{0.45} \quad (3)$$

図1に式(1)~(3)に基づく物理距離と評定距離(知覚および記憶距離)の関係を示す。ここで、 x_0 は評定の基準とした距離(基準長; 10ユニット=実空間で100mに相当)であり、ほぼ x_0 より長い距離が過小視され短い距離が過大視されることがわかる。また、記憶の効果により距離の評定感度が減少し、べき指数が小さくなることがわかる。すなわち、式(1)~(3)は次のように定式化される。

$$y = x_0 \cdot (x/x_0)^n \quad (4)$$

ここで、 $n=0.73$ (知覚距離)、 $n<0.73$ (記憶距離)である。

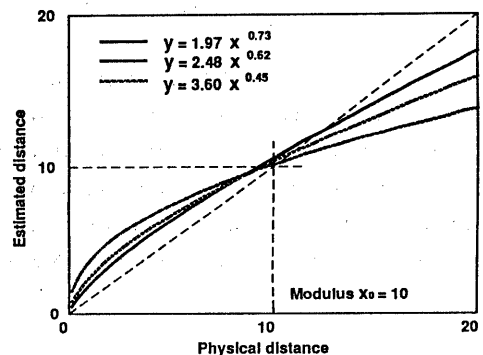


図1 CG空間における距離評定特性

3. 空間移動実験

空間情報の獲得過程では、移動に伴って複数のランドマークとその間の距離情報が記憶され、統合されることにより空間の2次元配置が把握され、と考えられる。そこで、上述のCGシステムを用いてさらに複雑な空間を移動した場合に移動経路の記憶特性と距離の評定特性およびその学習効果に関する検討を行った。

3.1 実験方法

【実験1】 経路の再生実験

被験者：大学生15名（男子2名，女子13名）
刺激：図2に示すような2～11個の直線のパスとコーナーより構成される10タイプの経路を用いた。パスの長さはCG空間上で、2，6，10，14，18ユニット（1ユニットは実空間の10mに相当）の5種類であり、これをほぼランダムに組み合わせた。また、全ての経路について、第一パスの長さ（ L_1 ）を10ユニットに固定しこれを評定の基準長とした。曲がる方向は右90度，左90度，直進の3種類をほぼランダムに、ただし経路が交差しないように組み合わせた。移動速度は一定である（実空間で時速約50kmに相当）。すべてのコーナーと終点（Goal）にランドマークとしてアルファベットの「A」の文字を設置した。パスの両側には壁が設置されているため、被験者は一度に全体の空間を見渡すことが出来ない。
手続き：10種類の経路をランダムに提示した。各経路を最後まで移動した後に経路全体の形状をスケッチにより再生させた。移動は1経路につき1回限りとした。経路の提示順序は被験者ごとに変えた。回答用紙は、縦30cm，横42cmの十分な大きな白紙で、中央に5cmの線が縦方向に印刷されたものを用い、この長さを最初のパス（基準長：10ユニット）のスケッチの長さとして、2番目以降のパスとコーナーを線分で記入させた。被

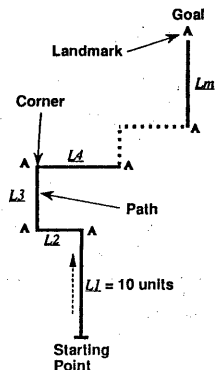


図2 刺激

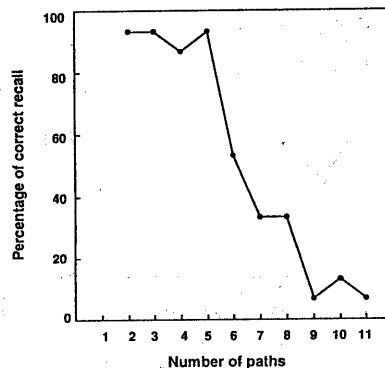


図3 経路の再生率（被験者数＝15名）

験者には実験前に基準長の長さの直線経路の移動を繰り返し練習させた。また、最初のパスの長さが基準長であること、コーナーが直角であることをあらかじめ教示した。

【実験2】 距離の評定と学習実験

被験者：大学生9名（男子2名，女子7名）

刺激：実験1で用いた刺激のうち、3，5，7個のパスから構成される3タイプの経路を用いた。パスの長さとしてコーナーの曲がる方向の組合せを変えて1タイプにつき5種類ずつ、合計15種類の経路を作成した。

手続き：同一の経路を5回連続して出発点から終点まで移動し、1回の移動が終了する度に実験1と同様の手続きで経路の形状をスケッチにより再生させた。経路の提示順序はランダムとし、被験者ごとに変えた。

3.2 実験結果および考察

実験1で被験者15人に対する経路の再生率を図3に示す。ここでは、パスの長さを無視して接続関係のみに注目し、スケッチ上ですべてのコーナーが正確に再生された場合を正答とした。パスの数が5以上で再生率が急激に低下しゼロに近づく。一般に、文字や図形の再生課題における短期記憶の容量は 7 ± 2 項目と言われているが⁽¹²⁾、本実験における経路の再生に関してもこれと類似の結果が得られており、記憶容量を超えた複雑な経路に対しては再生率が極めて低くなることがわかる。

実験2で得られたスケッチから評定距離を物理距離のべき関数に回帰させた結果、式(4)に示すような (x_0, x_0) を通るべき関数で近似された。図4に移動回数に伴う平均べき指数の変化の様子を

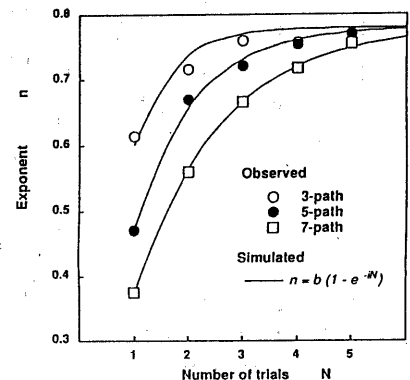


図4 経路の移動回数とべき指数の関係

3-パス、5-パスおよび7-パスの経路について示す。べき指数は第1回目の移動時が最も低く、移動回数に伴って増加する。5回の移動後には各タイプの経路ともべき指数は第2節で述べた知覚距離の値である0.7~0.8の間の値に収束する傾向を示す。これは、経路の学習が進み距離評定の精度が向上するためである。また、パスの数が多いほど第1回目の移動時におけるべき指数が小さく、知覚距離の値への収束が遅い。それぞれの経路のべき指数 n の変化は、次の学習曲線で近似された。

$$n = b (1 - \exp(-iN)) \quad (5)$$

ここで、 b は知覚距離のべき指数、 N は学習回数である。また、 i はパスの数に依存する係数であり、 $i \approx 4.5 / (\text{パスの数})$ の関係がある。

それぞれのタイプの経路について、べき指数をパス別に求めた結果を図5に示す。ここでは、最初のパスは基準長に固定されているため、考慮に入っていない。第一回目の移動時にはパスごとのべき指数の差異が著しいが、移動を繰り返すに従ってパス間の差異は減少し、全体的にべき指数が増加する。第一回目の移動のみに注目した場合、3-パス経路の場合は最後のパスのべき指数は最初のパスより大きく知覚距離の値に近い。また、5-パスおよび7-パスの場合には、最初と最後のパスのべき指数はほぼ同じで、経路中央部のパスのべき指数が小さいU字形の曲線になる。特に、7-パス経路の場合には5番目と6番目のパスのべき

指数が極端に低い。仮に実験1で示した短期記憶の容量を5パスとすれば、記憶容量を越えるパスに関しては、距離の評定感度が著しく劣化するためにべき指数が極端に低くなることがわかる。

本実験では空間の記憶方略に関する教示を与えていないが、実験後の被験者の内観報告から多くの被験者が移動の順序を言語化して、「最初の曲がり角を右に曲がった」「次に左に曲がった」...などと想起していることがわかった。しかしながら、記憶された情報は単なる言語情報のみでなく、感覚量である距離情報が含まれておりそれが経路の学習により精緻化されていくことが実験2の結果からわかる。

藤井と乾は、90度で1回または2回曲がって移動した場合に評定される方向が距離のべき関数を組み合わせて計算されることを示したが、その中で後に経験されるパスほどべき指数が知覚距離の値に近づくと仮定している⁽⁹⁾。この結果は、本実験における3パス経路の結果とはほぼ一致している。また彼らはさらに4パスから成る閉じた経路で距離を評定する場合には、各パスのべき指数の間には相関がなくほぼ同じ0.4~0.5の間の値となることを報告しているが⁽⁸⁾、本実験の5パスの経路の場合の結果がほぼこれに対応することがわかる。今回の実験によりこれまで個別の実験で評価されていた記憶距離の評定特性が、統一された条件下でしかも記憶負荷をパラメータにして評価されたことになる。

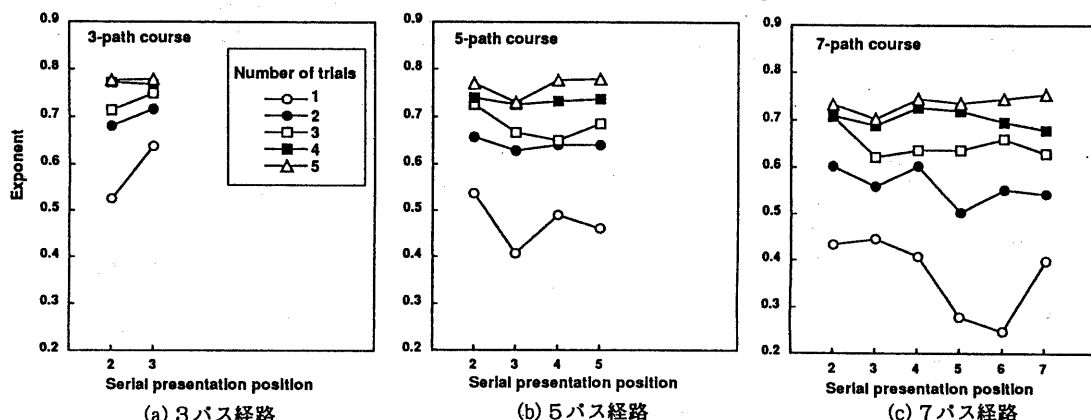


図5 パスの系列位置とべき指数の関係

4. 空間認知モデルの検討

4. 1 記憶距離のモデル

記憶距離のべき指数が減少する理由については信号検出理論（比較判断の法則）⁽¹³⁾に基づくモデルをすでに提案している⁽¹⁴⁾。ここでは、今回の実験における広範囲の記憶負荷条件に対しても本モデルの適用が可能であることを示す。

提示された物理刺激 x は、心理連続体上で平均値 x をもつ何らかの確率過程（弁別過程）に従い、被験者はこれを比較判断することにより刺激の弁別を行うと考えられている。音の大きさや重さ、距離など量的判断が可能な刺激（プロセディック連続体）に関しては、弁別過程のゆらぎは刺激レベルと正の相関をもつことが知られている⁽¹⁵⁾。すなわち刺激強度が大きい場合には評定のばらつきが大きくなる。ここでは弁別過程の確率密度関数としてガウス分布 $G(x, \sigma_m^2)$ を使い、図6に示すように標準偏差 σ_m が物理距離のべき乗に従って大きくなると仮定する。

$$\sigma_m = \sigma_0 + k \cdot (x/x_0)^b \quad (6)$$

ここに、 σ_0 は定常状態のノイズ成分、 x_0 は基準長、 b はべき指数、 k は記憶によって変化する係数である。

従来認知心理学では、記憶の忘却現象は記憶痕跡の強さの減少とノイズ増加のための干渉によって説明されてきた。これらは、それぞれ崩壊説、干渉説と呼ばれている⁽¹⁶⁾。いま、記憶された知覚量に、時間あるいは記憶負荷とともにノイズが加算されると仮定する。刺激の弁別感度 Δy は、二つの信号の平均値 μ_1 と μ_2 の差を弁別過程の標準偏差 σ_m で割ったものである。すなわち、

$$\Delta y = \frac{(\mu_1 - \mu_2)}{\sigma_m} \quad (7)$$

である。従って、記憶痕跡の強さが仮に一定に保持されていたとしてもノイズの増加とともに弁別感度は低下する。すなわち、図7に示すように記憶負荷が大きくなるに従って距離の差が大きくなければ二つの記憶距離の差が識別できないことになる。従って、直観的にはべき指数が低下するこ

とがわかる。

式(6)のべき指数 b が知覚距離のべき指数（ $= 0.73$ ）に等しいとする。 x, y をそれぞれ物理距離と評定距離、 x_0 を基準長とすると知覚距離 y_p に関するStevensのべき法則は、

$$y_p = x_0 \cdot (x/x_0)^b \quad (4)'$$

式(7)より、記憶の効果により知覚距離の評定感度 Δy_p が記憶距離の値 Δy_m に低下するとすれば、新たな評定感度は、

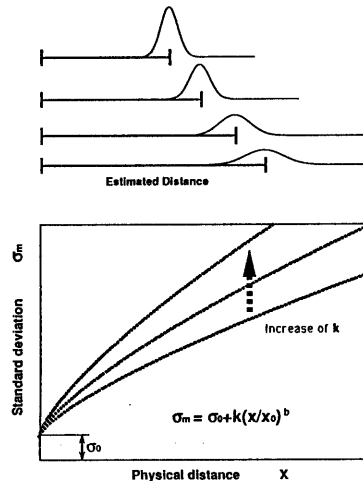


図6 物理距離と弁別過程が従う確率密度

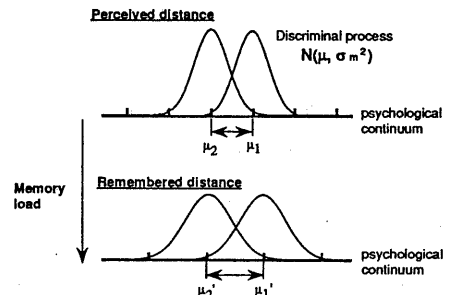


図7 記憶距離のモデル

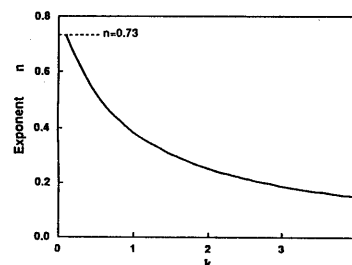


図8 係数 k とべき指数 n の関係

$$\Delta y_M = \frac{\Delta y_P}{\sigma_m} = \frac{b \cdot (x/x_0)^{b-1}}{\sigma_0 + k \cdot (x/x_0)^b} \quad (8)$$

となる。評定される距離すなわち記憶距離は式(8)を積分することにより求められる。記憶距離の評定曲線も基準長(x_0, x_0)を通ることを考慮して積分定数を決めると次のようになる。

$$y = \frac{x_0}{k} \log \left(\frac{\sigma_0 + k(x/x_0)^b}{\sigma_0 + k} \right) + x_0 \quad (9)$$

今回の実験結果では、記憶距離のべき指数すなわち式(4)の n はほぼ0.2~0.6の間の値である。本実験で刺激として用いた物理距離2ユニットから18ユニットの範囲で、それぞれの n に対して式(9)が式(4)に最も近づくように式(9)の k と σ_0 の値を計算した結果、 σ_0 の値は0.9ではほぼ一定であった。これは、 σ_0 が定常状態のノイズ成分であり常に一定値であるとした最初の仮定と一致している。そこで、 $\sigma_0 = 0.90$ に固定し、 k と記憶距離のべき指数 n の関係を求めると図8に示すようになった。図9に式(4)と式(9)の比較をべき指数 $n = 0.6, 0.4, 0.2$ (式(9)では $k = 0.313, 0.901, 2.68$ に対応する)について示す。両式の差異は物理距離2~18ユニットの範囲で5%以下であり、式(9)は近似的には記憶距離のべき関数の性質を表わすことがわかる。

4.2 経路の記憶モデル

本実験では、複雑な経路の1回目の移動時には被験者の多くが行動の系列すなわちコーナーで曲がる方向を記憶し再生する方略を用い、学習が進むに従って距離情報が精緻化されることを示した。

ここでは、ShiffrinとCookによって提案された短期記憶のモデル⁽¹⁷⁾に基づいて、空間探索初期における情報の獲得過程を考察する。Shiffrinらは、4個または5個の子音の再生課題を行い、その結果として得られた系列位置曲線を説明するために、図10に示すような記憶構造を仮定した。i番目に提示された記憶情報は、 R_i ボンド(Relational bond)によって系列位置が記憶され、 I_i ボンド(Item bond)によって項目が記憶される。記憶の干渉説に基づき、両結合ともall-or-none fashionで消失し、被験者は結合が消失した場合には、項目の系列位置あるいは項目そのものを忘却する。項目の想起は両端のノードから中央のノードに向かって行われる。項目自体の記憶痕跡は、全項目とも同じと考え、 I_i ボンドは一定値とする。また、系列位置の記憶は、次の刺激が提示されるまでの時間間隔に依存するため R_i ボンドは、項目 i と($i+1$)の提示間隔 t_i を用いて次のように表される。

$$R_i = C t_i^{-\alpha} \quad (10)$$

$$R_s = R_e = C \quad (11)$$

ここに、 R_s と R_e は最初と最後の項目の関係の強さ、 α と C は定数である。Shiffrinらは、実験結果からパラメータを決定し、 I ボンドと R ボンドの間の相互作用を仮定してシミュレーションを行った結果、本モデルが多くの条件下での系列位置曲線の予測に適用可能であることを示した。

我々の実験では、Itemの部分には各コーナーにおいて曲がる方向(右90度、左90度、直進)が記憶されとする。被験者は、 R ボンドの消失によりコーナーの系列位置を、 I ボンドの消失に

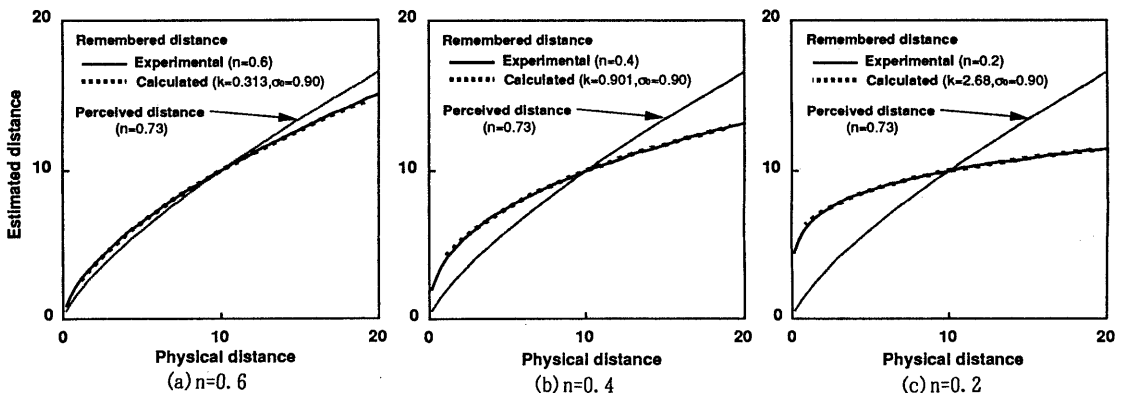


図9 計算結果

より曲がった方向を忘却する。距離情報については、ここでは簡単のためItemの属性として扱い、ひとつ前のコーナーからの距離情報が記憶されるとする。

kパスから構成される経路に対する忘却確率 r は記憶痕跡の強度と記憶負荷の関数であり、次式で与えられる。

$$r = \exp \{ -\bar{R} (1 - \beta_k) \} \quad (12)$$

ここで、 $\bar{R}$ はRボンドの平均強度を表す。また β_k ($0 < \beta_k < 1$) はk個のコーナーを記憶している場合の記憶負荷に相当する量で、コーナーの数に対する増加関数になる。図11に実験1の3パス、5パス、7パス経路に対する忘却確率 r ($= 1 - \text{再生率}$) を式(12)に代入して求めた $[-\bar{R} (1 - \beta_k)]$ の値と前節の式(6)の係数kの関係を示すが、両者はほぼ直線関係にあることがわかる。これより、記憶距離のべき指数を減少させる内的ノイズは、経路の忘却確率を決定する記憶痕跡(ボンドの強度)と記憶負荷の2つの要因によって決まることがわかる。

図12に、第1回目の移動時における係数kをパスの系列位置に関して示す。最後のパスでは、記憶負荷が大きいかかわらずkが小さい値を取るのは、次に続くパスが無いために式(10), (11)に従いRボンドの値が大きくなるためである。

本モデルにより、空間探索初期におけるパスの再生特性と記憶距離の評定特性およびその系列位置の効果を予測することが可能である。

4.3 方向評定モデル

安西ら⁽¹⁸⁾は、空間情報の獲得方略と形成される表象の性質に関する実験を行い、空間知識は方向性をもたないかあるいは方向性を自由にコントロールできるものであることを指摘している。前節の経路の記憶モデルは、ランドマークの相対的な方向を計算するモデルに拡張可能である。

コーナーを複数回曲がってゴールに到達した場合に出发点から見たゴールの方向を、距離情報とコーナーの角度情報から計算する生理学的モデルが提案されている⁽⁹⁾。このモデルでは図13に示すように、移動距離とコーナーの角度をGauss関数

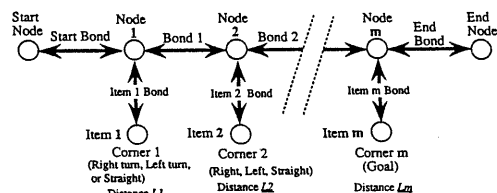


図10 短期記憶のモデル

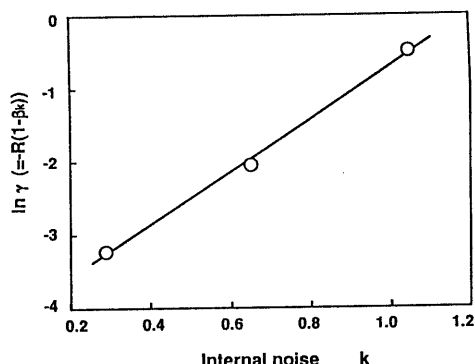


図11 忘却確率 r と係数kの関係

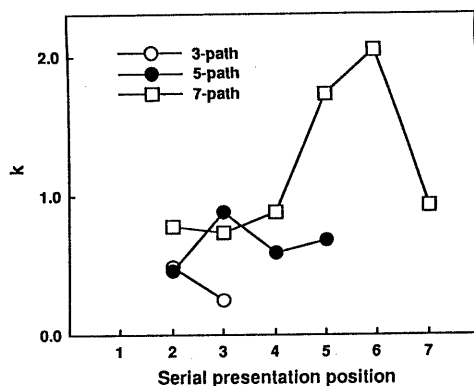


図12 パスの系列位置と係数kの関係

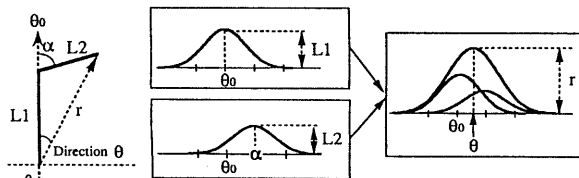


図13 方向評定モデル

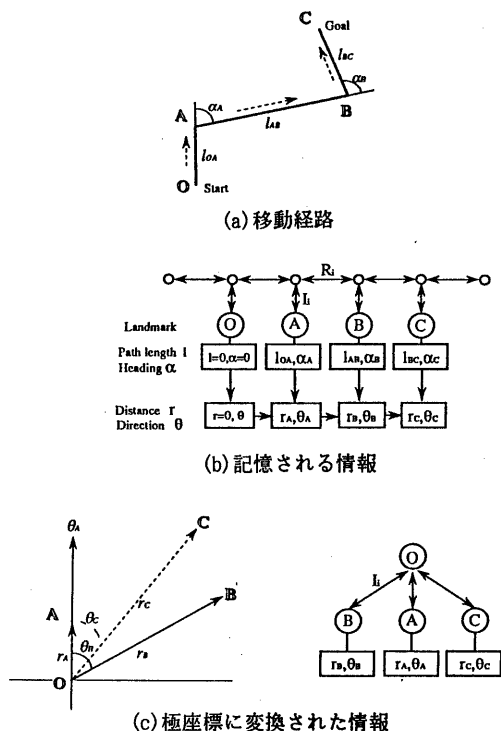


図 14 統合モデル

を用いて平均することにより、方向が計算される。図 14 (a) に示すような経路を出発点 O から ABC の順に移動した場合を考える。移動に伴ってコーナーのランドマークとパスの長さ l および曲がった角度 α の情報が記憶され、それらの情報から O 地点からの直線距離 r と方向 θ が図 13 に示したモデルにより計算される。最終的には、図 14 (c) に示すように系列位置の情報である R ボンドを必要としない、極座標で表示された情報が獲得される。視点の移動に関しては、極座標表示されたランドマークの位置情報に対し、自己中心座標系をランドマークの場所に移動させる変換を行う神経回路モデルが提案されており⁽¹⁹⁾、これらを統合したモデルへの拡張が可能である。

5. むすび

CG システムを用いた空間認知実験により、空間移動時における経路の記憶と距離の評定特性を検討した。経路の再生実験により、短期記憶の容

量を超える複雑な経路に対しては再生率が著しく低下すること、記憶負荷の影響が記憶距離のべき指数に反映されること、学習によってべき指数が増大し知覚距離の値に漸近することを示した。また、信号検出理論に基づき、べき指数の減少が定量的に説明されることを示した。最後に、経路の記憶モデルとそれに基づいて環境の空間配置を計算するモデルを考察したが、今後データの階層構造と学習効果に関する検討を加えるとともに、詳細な実験によりモデルのパラメータを決定する予定である。

謝辞 本研究を行う機会を与えて頂いた ATR 視覚機構研究所、淀川英司社長ならびに認知機構研究室、中根一成室長に感謝する。また実験のご指導と有益なご議論を頂いた近畿日本鉄道株式会社、藤井秀夫氏（旧認知機構研究室研究員）に感謝する。

(参考文献)

- (1) Donelson W.C.: "Spatial Management of Information", SIGGRAPH '78, pp. 203-209 (1978).
- (2) 広瀬通孝: "空間認知とヒューマン・インタフェース" 人工知能学会研究会資料, SIG-HICG-8803, pp. 3-11 (1988).
- (3) Yeap W.K.: "Towards a Computational Theory of Cognitive Maps", Artificial Intelligence, 34, pp. 297-360 (1988).
- (4) 柿倉正義: "自律移動ロボットの経路探索問題", 信学誌, 73, 7, pp. 744-753 (1990).
- (5) Lynch K.: "The Image of The City", MIT Press, (1960).
- (6) Downs M.D. and Stea D.: "Image And Environment: Cognitive Mapping and Spatial Behavior", Aldine Publishing Co. (1973).
- (7) 村越 真: "認知地図と空間行動", 心理学評論, 30, 2, pp. 188-207 (1987).
- (8) 藤井秀夫, 乾 敏郎: "CG 空間内の移動距離評定特性", 信学論 (D-II), J74-D-II, 4, p. 543-549 (1991).
- (9) 藤井秀夫, 乾 敏郎: "CG 空間の移動における方向評定特性", 信学論 (D-II), J74-D-II, 印刷中.
- (10) Da Silva, J.A.: "Scales for Perceived Egocentric Distance in a Large Open Field: Comparison of Three Psychophysical methods", American J. Psychology, 98-1, pp. 119-144 (1985).
- (11) Bradley D.R. and Video D.: "Psychophysical Functions for Perceived and Remembered Distance", Perception, 13, pp. 315-320 (1984).
- (12) Miller, G.A.: "The Magical Number Seven, Plus or Minus two: Some limits on Our Capacity for Processing Information", Psychological Review, 63, pp. 81-97 (1956).
- (13) 岡本栄一: "数理モデル", 新曜社 (1979).
- (14) 林 武文, 藤井秀夫, 乾 敏郎: "認知地図形成過程における距離評定の諸特性とモデル", 信学技報 MBE89-78, pp. 99-106 (1990).
- (15) Stevens, S.S. and Guirano, M.: "Loudness, reciprocity and partition scales", J. Acoustical Soc. America, 34, pp. 1466-1471 (1962).
- (16) 乾 敏郎: "記憶の数理モデル", 心理学評論, Vol. 25, 4, pp. 333-358 (1982).
- (17) Shiffrin, R.M., and Cook, J.R.: "Short-Term Forgetting of item and order information", Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 17, pp. 189-218 (1978).
- (18) 安西祐一郎, 嶋崎 暢: "空間記憶の方向性について", 認知科学会第 2 回大会発表論文集, pp. 69-70 (1985).
- (19) O'Keefe, J.: "The Hippocampal Cognitive Map and Navigation Strategies", Brain and Space, Oxford University Press, pp. 274-295 (1991).