

TR - A - 0073

CG を用いた心理実験に基づく
方向評定モデル

藤井秀夫 乾敏郎

HIDEO FUJII TOSHIO INUI

1990年2月20日

ATR 視聴覚機構研究所

〒619-02 京都府相楽郡精華町乾谷 ☎07749-5-1411

ATR Auditory and Visual Perception Research Laboratories

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

Telephone: +81-7749-5-1411

Facsimile: +81-7749-5-1408

Telex: 5452-516 ATR J

目次

1. まえがき	2
2. CGを用いた実験システム	
2.1 CGを用いた実験	3
2.2 システム構成	3
3. 空間認知過程のモデル化	
3.1 空間把握実験	4
3.2 概念的な空間認知モデル	5
4. 空間認知モデルの精緻化のための実験	
4.1 実験1：直線距離の評定実験	7
4.2 実験2：複数距離の同時評定	8
4.3 実験3：閉じた経路の探索実験	8
4.4 移動による距離評定特性	9
5. 考察	10
6. むすび	11
謝辞	12
参考文献	13
図表	14

1. まえがき

空間認知に関する研究は、古くから行われてきたが、Tolman はネズミを用いた実験からネズミは単に道順を記憶しているのではなく「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(Cognitive map)」と呼んだ。その後、空間に関する知識は、一般に認知地図と呼ばれ、地理学、建築学、心理学、認知科学など様々な分野で研究されている^[1]。

まず、空間表象に関する研究がある。たとえば、道路の交角が90度に近いものとして記憶されること^[2]や経路上にある交差点の数が多い程経路を長く知覚すること^[3]など、様々な空間表象の歪みを実験的に調べられてきた。その結果、我々の記憶している空間は現実の正確な縮尺物ではなく、「一定の法則に基づいて単純化されたもの」と考えられている。次に、認知地図の形成過程に関する研究も多い。これらの研究は、見知らぬ場所を探索させた後、スケッチを描かせたり方向評定を行わせたりすることで空間把握過程の分析を行っている。その結果、空間情報の獲得に一定の傾向があること^[4]や方略に2つのタイプが存在すること^[5]などが報告されている。また、幼児の発達過程の研究から空間情報の体制化過程に一定の傾向があることなども述べられている^[6]。さらに、我々の空間内での行動が認知地図によってどのように規定されているかを調べる研究も多い。たとえば、全体的な地図を把握するにつれて、1つ1つの状況に依存した行動から、行動全体の目標を考え近道などを選ぶようになることが報告されている^[7]。

このように、認知地図に関しては様々な知見が得られているが、従来の手法では物理的な制約、要因の統制の難しさ等からいずれも現象の記述に留まっていた。そこで、我々は、統制された環境をコンピュータ・グラフィック(CG)を用いて生成し空間認知特性の定量的分析を試みた。本論文は、我々が構築した実験システムの概要と空間認知モデルの構築を目的に行った空間探索実験と距離評定実験について述べたものである。

2. CGを用いた実験システム

2. 1 CGを用いた実験

認知地図に関する研究の多くは、大学のキャンパスや街などの実際の空間を用いて実験を行っているが、現実の空間では道の長さやつながり具合などの物理的な制約を受けてしまう。また、実際に何を見て、何を憶え、またどんな要因がどのように利いているのか等を分析するのは困難である。このように、従来の手法では定量的評価が難しかった。

そこで、我々は、統制された環境で人間の空間認知特性を分析するため、CG（コンピュータ・グラフィクス）を用いた実験システムを構築した^[8]。この実験システムを用いれば、任意のCG環境が生成でき、移動速度、視野などの実験条件の統制も容易に行える。また、実験全体をコンピュータで制御したり実験データの管理等も容易に行える。

2. 2 システム構成

図1に我々が構築したシステムを構成を示す。このシステムは、

- 1、操作に対する応答のリアルタイム性
- 2、移動に伴うCG画面の更新の滑らかさ

を実現するため、高速の座標変換と高速の描画能力を持つグラフィック・ワークステーションを用いた。被験者は、ディスプレイを見ながらジョイスティックを操作すれば、操作に応じて提示画面がリアルタイムに更新される。したがって、このシステムを用いれば、任意のCG空間を自由に探索することが可能になる。また、このシステムは、被験者の操作内容や迷路内の移動経路、滞在時間等のデータを記録すると共に表示CGをビデオに録画できる。

図2にCG環境を生成する過程を示す。図2に示すように、我々のシステムではマウスで道の形状やランドマークの位置や種類等を指定するだけで、任意の環境を容易に生成することができる。

3. 空間認知過程のモデル化

3. 1 空間把握実験

空間認知過程の概略を把握するため、自由にCG空間を探索させて、記憶した空間をスケッチさせる実験を行った。

【 実験方法 】

ジョイスティック操作に慣れた後に、図3に示すような課題空間を90秒間自由に探索させた。探索が終了した後、解答用紙を手渡し、ランドマーク（アルファベット）やその接続関係をスケッチさせた。解答用紙を回収した後、同一空間の同じ出発点から再び90秒間自由探索を行わせ、2度目のスケッチを描かせた。そして、1つの空間に対して計6回スケッチを描かせる実験を行った。なお、被験者は大学生10名（男性2名、女性8名）であり、1人につき4種類の課題空間で実験を行った。

【 実験結果 】

スケッチの形状は、被験者により異なるが、図4に図3の課題空間に対する3名のスケッチ例を示す。我々は、特徴点（ランドマークのある点、曲がり角、交差点）の位置関係や接続関係などに着目して分析を行なった結果、次のような傾向を得た。

（傾向1）最初は、「Aが見えた」、「分岐点があった」など、断片的な記憶を順番に描いている。

（傾向2）ある特定部分のスケッチは、同じように描かれる。すなわち、一度描かれた部分的スケッチは変更されにくい。たとえば、図4-(a)の、B, C, Dの関係、A, Cの関係、出発点の周辺のスケットちは180秒以後、あまり変化していない。同様に図4-(b), (c)もある特定の部分が同じようにスケッチされている。

（傾向3）ランドマークの相対的位置関係は早期に把握される。たとえば、図4-(a)の場合180秒でBの周りにA, C, D, Eあるという大間かな位置関係が把握されている。同様に図4-(b), (c)の場合もA, C, E, Bの位置関係を早期に把握している。

（傾向4）発生頻度が高い特徴点のエラーパターンがある。たとえば、図5-(a)に

示すようにランドマークのない角が無視されたり、曲がり角の数に誤りが見られたりする。また、図5-(b)に示すように交差点がランドマークに吸収される場合がある。

(傾向5) 課題の空間と幾何学的性質が等しい(トポロジカルな)空間表現が把握される。たとえば、図4-(a)の場合360秒で、図4-(b)の場合450秒でトポロジカルな表現が把握されている。

(傾向6) 最初は、個々の道の長さや方向などをあまり意識しない。しかし、トポロジカルな空間を把握した後は、距離や方向を意識して実際の形状に近いスケッチを描くようになる。

一方、図4-(a)の被験者の各特徴点での滞在時間を図6に示すが、滞在時間には次のような傾向が見られた。

- (1) 出発点には長時間滞在する。
- (2) ランドマークの無い角の滞在時間は短い。
- (3) 交差点での滞在時間は長い

3. 2 概念的な空間認知モデル

前章で述べた実験結果を基に、図7に示す空間把握過程の概念的モデルを構築した。

このモデルでは、空間を探索することにより獲得できる情報(入力情報)は、「視覚情報」と「移動感覚」と仮定している。そして、入力情報のうち視覚情報より「シーン」が、移動感覚と視覚情報より「距離や方向」が連続的に知覚される。しかし、連続的な情報をそのまま記憶することは不可能であり、知覚情報は、傾向1に見られるように断片的に記憶される。すなわち、最初は特徴的なシーン(たとえば、ランドマークの存在)や特定の位置関係等が記憶される。

次に、断片的な記憶は、ローカルな空間表現に統合される。すなわち、断片的なシーンと位置関係を統合することにより、傾向2に示したような局所表現が把握される。たとえば、図4-(a)においてランドマークAからランドマークCへ移動した場合、AとCに関する部分表現が把握されている。また、B、C、Dが見える交差点の中心で、1周することにより、BCDに関する部分表現も容易に形成される。このように、断片的情報を、常識的で直感的な範囲で統合することによ

り部分空間が形成されていく。

一方、部分空間の形成と平行して、断片的な位置関係を統合して全体的な関係も把握していく。すなわち、傾向3で示したように接続関係は明確ではないが、早期に相対的位置関係が把握される。たとえば、図4-(a)では180秒でグローバルな位置関係が把握されている。したがって、グローバルな空間表現は、特徴点（ランドマーク等）の相対的位置関係から把握されていく。

次の段階は、接続関係の把握である。この場合、物理的な接続関係ではなく、最初は「ランドマーク同士がつながっているかどうか」が重要視される。その結果、傾向4で述べたようにランドマークのない角にエラーが生じたり、交差点がランドマークに吸収されたりする。しかし、既に記憶した情報（部分表現やグローバルな関係）と新しく獲得した情報を矛盾なく統合することは難しく、かなりの時間が費やされる。たとえば、E,B,Dの見える交差点に、全体の17.8%も滞在しているが、この交差点では、ACの部分空間、BCDの部分空間、出発点の周りの部分空間、及びランドマーク全体の位置関係を統合するために長時間滞在したと考えられる。

部分空間、位置関係、接続関係等が矛盾なく統合された結果、傾向5で示した幾何学的性質が等しい表現、すなわち、「トポロジカルな表現」が形成される。この表現を用いれば相対的な方向や経路の有無を把握できるため、ある地点から任意の目標点への移動経路の推測が可能になる。しかし、トポロジカルな表現では移動距離や分岐の有無は明確ではない。

トポロジカルな空間を把握した後も探索を繰り返すと、空間表現は物理的な空間に近づいていく。すなわち、傾向6で示したように道の曲がり具合や距離、交差点の形状などが正確に把握される。

一般にイメージは階層的であると考えられている^[9]が、Wiltonらは反応時間の分析から空間イメージも階層的であることを示している^[10]。われわれのモデルでも、ローカルな空間表象が統合されてグローバルな表象が形成されるため「階層的イメージが探索により把握される」と考えられる。すなわち、空間情報は選択的に記憶され、断片的な表現から局所的な表現へ、局所的な表現から全体的な表現へとボトムアップ的に統合されて行くと共にトップダウン的に詳細化され、階層的な空間表象が形成されて行くようである。

4. 空間認知モデルの精緻化のための実験

前章で述べたモデルは概念的であり、より厳密なモデル化には、空間認知特性を厳密に調べ、各モジュール、あるいは、処理特性についての精緻化を行わなければならない。そこで、我々は、距離の評定特性についての検討を行った。

4. 1 実験1：直線距離の評定実験

【 実験方法 】

空間を移動した時の知覚距離を調べるため、図8-(a)に示すCGで生成した直線経路を出発点から目標(A)まで移動させる実験を行った。移動はジョイスティックを用いて行い、移動速度は一定(約20 m/sec.)である。この実験では、出発すると同時に図8-(b)のようなシーンが提示され、移動にともない目標である(A)が徐々に大きくなり、目標点に到達すると画面が消える。

実験条件は、物理距離が2～18ユニットの9種類(2,4,6,・・・16,18 ユニット、1ユニット = CG内距離10 m)をランダムに提示して、1セッションとした。

実験手順は、最初に10ユニットを「基準長」として数回移動させ、実験中は基準長との比較により距離を評定させた。解答は、あらかじめ出発点と基準長を記入した解答用紙に、知覚した目標の位置をプロットさせた。なお、予備実験として、基準長を10として口答で評定距離を答えさせた場合(通常のマグニチュード推定法)とスケッチさせた場合にもほぼ同じ実験結果が得られている。また、被験者には、移動時間を測定するのではなく、移動距離を直感で答えるように教示した。被験者は、大学生13名(男性3名,女性10名)で、1人の被験者につき4セッション行った。

【 実験結果 】

図9に物理距離と評定距離との関係を示す。この図を見ると、基準長付近では評定距離と物理的距離が近接しているが、それより短い距離に対しては過大視、長い距離に対しては過小視が生じる。また、(1)式で示すように評定距離は物理距離のべき関数で近似された。

$$\text{評定距離} = 1.97 * \text{物理距離}^{0.73} \quad \text{---- (1)}$$

なお、相関分析を行った結果、 $F(1,115)=1606.6$, $p < 0.01$ であり有意性が認められた。したがって、評定距離は物理距離のべき関数で近似されると考えた。

4. 2 実験2：複数の距離の同時評定

実験1では単独の距離の評定特性について検討したが、複数の距離の評定特性についても検討した。

【 実験方法 】

図10に示すように出発点と目標(A)の間に中間点(Z)を設けた直線経路を生成した。この経路を出発点から中間点(Z)まで移動し、一旦停止した後、目標(A)まで移動させた。課題空間は、出発点から中間点までの距離L2(4、8、12、16、20ユニットの5種類)と中間点から目標点までの距離L1(同様に5種類)を組み合わせた計25種類をランダムに提示し1セッションとした。移動速度や基準長は実験1と同様である。解答は、あらかじめ出発点と目標点を記入した解答用紙に中間点を記入させた。また、この実験も直感で答えるように教示した。被験者は、大学生24名(男8名,女16名)で、1人の被験者につき3セッション行った。

【 実験結果 】

実験により、L1とL2の評定距離比が得られるが、L1の評定距離は(1)式で近似できると仮定して、L2の評定距離を求めた。なお、L1とL2の長さの差による影響を除外するため、同一の課題長の評定距離比のデータ(たとえば、L2=4の時は、L1=4の時のデータ)だけを分析した。その結果を図11に示す。この図をみると実験1と同様に過大視・過小視が生じるが、その傾向は実験1よりも大きい。また物理的距離と評定距離との関係は(2)式により近似できた。($F(1,148) = 854.2$, $p < 0.01$)

$$\text{評定距離} = 2.48 * \text{物理距離}^{0.62} \quad \text{---- (2)}$$

4. 3 実験3：閉じた経路の探索実験

【 実験方法 】

図12に示すように、各頂点にランドマークを配置した閉じた経路を1周した後、

記憶した経路をスケッチさせる実験を行った。課題空間として、辺の長さが約1:2:3:4、頂角が30~160の統制された四辺形を4種類作成した。実験は、各四辺形の各頂点から出発させる計16種類の課題をランダムに提示した。解答は、基盤目の解答用紙に移動した空間を自由に描かせた。なお、被験者は、実験1、2で用いた女性2名で行い、経路が4角形であることを教示した。

【 実 験 結 果 】

解答用紙に描かれたスケッチを経路の全長で正規化した後に各辺の評定距離を求め、通過順序毎に整理した。その結果、いずれの通過順序でも評定距離は物理距離のべき関数で近似できたが、それぞれのべき係数は、0.45, 0.46, 0.49, 0.40(通過順)であった。したがって、評定距離の通過順による影響は見られなかった。そこで、すべての通過順の評定距離と物理距離との関係を図13に示す。なお、図13の黒丸の大きさは評定頻度を表している。また、評定距離と物理距離の関係を式(3)に示す。($F(1, 254) = 220.8$, $p < 0.01$)

$$\text{評定距離} = 3.6 * \text{物理距離}^{0.45} \quad \text{---- (3)}$$

4. 4 移動による距離評定特性

単一距離の場合、出発点から目標点まで移動することにより知覚する距離を評定しているので知覚距離と考えた。しかし、L1とL2の比のように2つの距離を組み合わせる場合、先に知覚した距離(L2)を記憶しておかなければならない。したがって、実験2の場合、L2は記憶距離、L1は知覚距離と考えられる。一方、実験3の場合も記憶距離と考えられるが、実験2よりも記憶に依存する度合(記憶負荷)は大きい。

これらの結果より、知覚距離、記憶距離共に「人間の感覚がべき関数で近似される」と言う Stevens の法則に従うが、記憶負荷が大きくなる程べき係数は小さくなることがわかった。なお、実験3においては知覚した順番に関係なく、べき係数は一定になったが、その原因については後で考察する。以上、距離の評定に関して次のような特性が得られた。

知覚距離 = 定数 * 物理距離^{0.73}

記憶距離 = 定数 * 物理距離ⁿ (n<0.73)

n:記憶負荷が大きくなる程小さくなる。

また、べき係数が小さくなると、過大視・過小視の傾向が強まり、結果的には評定距離が平均的な値に集中してしまう。これは、知覚した距離を記憶することにより「あいまいさ」が増大し、平均的な値に引っ張られるためと考えられる¹¹⁾。

5. 考 察

空間把握過程に関して Thorndyke らは実際の空間で行った実験で位相幾何的な表象を把握した後に正確な距離や方向を把握していくという結果を得ている^[4]。この傾向は、最初は個々の距離は意識せずに全体形状の把握に重点をおき、グローバルな表現(トポロジカルな表現)を把握した後に個々の距離を意識し始めるという我々の探索実験結果と一致している。また、実験3のように全体形状(この場合4角形)がわかっている場合、評定距離のべき係数が知覚順序に関係なく一定の値になったが、これは全体情報が個々の情報よりも優先されるためと考えられる。すなわち、全体形状に関する情報から典型的な形(プロトタイプ)がイメージされ、個々の情報はイメージされた全体表現の修正に用いられたと考えた。

このように、空間認知過程においてグローバル表現を把握することは、非常に重要な意味を持つ。通常、探索により把握されるグローバルな表現は、「課題空間の正確な縮尺物」ではなく「単純化された表現」と考えられている。我々の空間探索実験において把握されたトポロジカルな表現は、位置関係・経路の有無等の情報は保ちながら、分岐や経路の曲がり具合等の情報を簡略化した表現であった。すなわち、この表現は、目標方向の把握や経路の予測等のような空間探索に重要な情報を残して「空間全体を単純化した表現」と考えられる。したがって、空間認知過程をモデル化する場合、トポロジカルな表現の特徴や形成過程を明らかにすることは重要である。

一般に、トポロジカルな表現は、局所的な情報を統合することにより獲得され

る。したがって、局所情報の認知特性を定式化することは、空間認知過程をモデル化する場合にも重要である。今回分析した距離評定特性に関して Bradly & Vido^[12]は、景色を見ながら距離を評定する群（知覚群）と覚えている景色から距離を評定する群（記憶群）の違いを調べた結果、いずれの評定距離も Stevens の法則に従うが、べき係数は知覚群：0.811, 記憶群：0.596という結果を得ている。我々の実験は、実際に移動させている点で Bradly らの実験と異なるが、距離の評定が Stevens の法則に従うことや記憶のべき係数が知覚のべき係数より小さくなること等、共通の傾向が得られた。しかし、我々の実験は、課題距離や移動速度を統制して、より定量的な分析を行っている。また、空間探索実験に距離評定実験に用いた条件（移動速度や視野など）を用いれば、実験結果を空間認知過程の分析にも応用できる。したがって、今回定式化した距離評定特性は、空間認知モデルの構築に有効な指標になると考えている。

6. むすび

空間認知モデルの構築には、人間の空間認知特性の定量的分析が必要と考えCGを用いた実験システム構築した。このシステムを用いて空間把握実験を行い、ローカルな情報を統合すると共に把握しているグローバルな情報を修正して階層的な空間表象を形成していく概念的なモデルを構築した。しかし、より厳密なモデル化には、個々のモジュールの精緻化が必要と考え、移動時の距離評定特性について分析を行った。その結果、評定距離は、物理距離のべき関数で近似できるが、記憶負荷が大きくなるほどべき係数が小さくなることがわかった。

今回の実験によりCG環境で統制した実験を行えば、実際の空間で得られている定性的な傾向の定式化あるいはモデル化が可能なが確かめられた。今後、我々のシステムを用いて定量的な実験を繰り返し、様々な基本特性を分析して行くことで、空間認知モデルが構築できると考えている。

謝辞 日頃からご指導下さったATR視聴覚機構研究所 認知機構研究室の中根一成室長に深く感謝します。また、有意義な討論をして頂いた、ATR視聴覚機構研究所の諸氏、特に本郷節之氏、林武文氏に感謝します。

【 参 考 文 献 】

- (1) 村越真 : "認知地図と空間行動", 心理学評論 Vol.30, No.2, pp.188-207 (1987).
- (2) K. J. Byant : "Memory for urban geography", Quarterly Journal of Experimental Psychology 31, pp.147-154 (1979).
- (3) P. W. Thorndyke : "Distance estimation from cognitive map", Cognitive Psychology 13, pp.526-550 (1981).
- (4) P. W. Thorndyke, B. Hayes-Roth : "Differences in spatial knowledge acquired from maps and navigation", Cognitive Psychology 14, pp.560-589 (1982).
- (5) 中村奈良江 : "空間探索のストラテジーの分析", The Japanese Journal of Psychology, vol.55, No.6, pp.366-369 (1985).
- (6) A. W. Siegel, S. H. White : "The development of spatial representation of large-scale environments" In H. Rees (Eds.), "Advances in child development and behavior 10", pp.10-55, Academic Press (1975).
- (7) 紙野桂人, 舟橋國男 : "都市空間と歩行者の経路選択", IATSS Review Vol.10, No.5 pp.323-329 (1984).
- (8) 藤井秀夫, 本郷節之, 乾敏郎 : "認知地図形成過程のモデル化と検証システム", テレビジョン学会, Vol.12, No.58, pp.7-12 (1988).
- (9) 乾敏郎 : "視覚イメージの構造と形成過程", 心理学評論, 24, pp.85-107 (1981).
- (10) R. N. Wilton : "Knowledge of spatial relation", Quarterly Journal of Experimental Psychology, 31, pp.133-146 (1979).
- (11) 林武文, 藤井秀夫, 乾敏夫 : "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 MBE89-105 (1990).
- (12) D. R. Bradley, D. Video : "Psychophysical functions for perceived and remembered distance", Perception, Vol.13, pp.315-320 (1984).

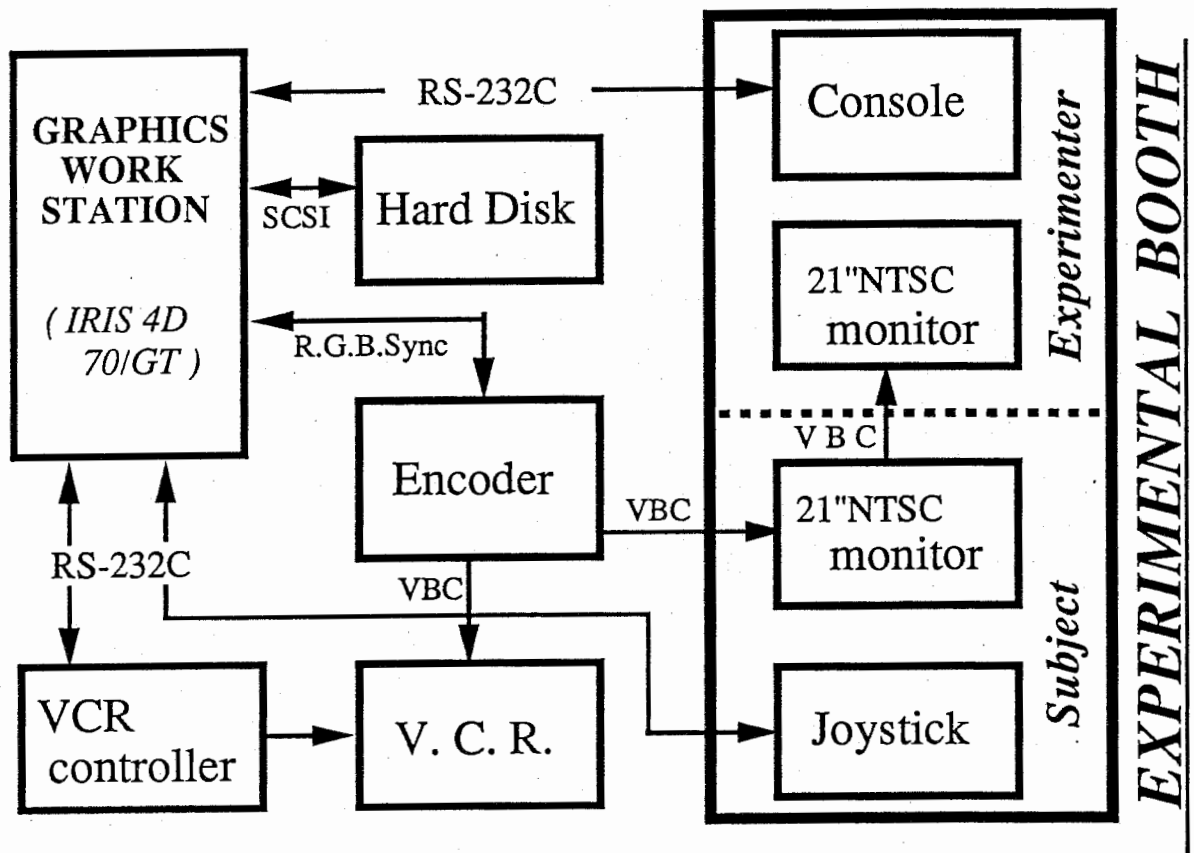
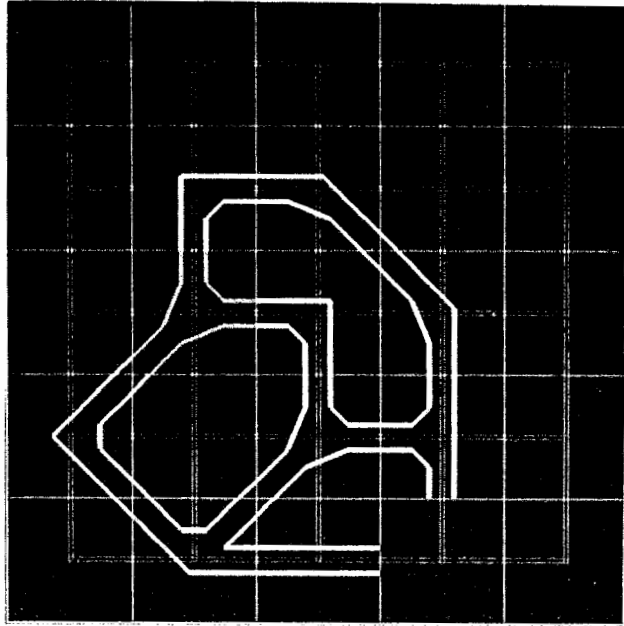
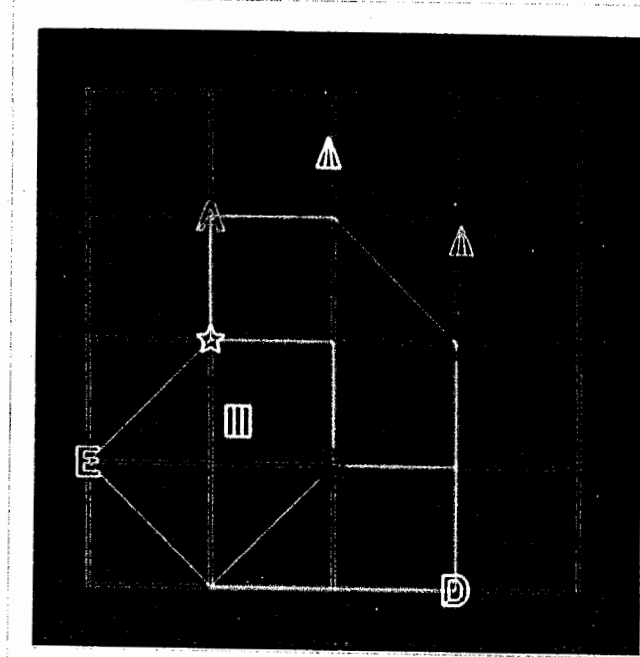


図1 システム構成



(a)



(b)

図2 CG空間生成過程

- (a) 経路は基盤目の任意の2点を指定することにより生成
- (b) 経路上に任意のランドマークを設置

Subject space

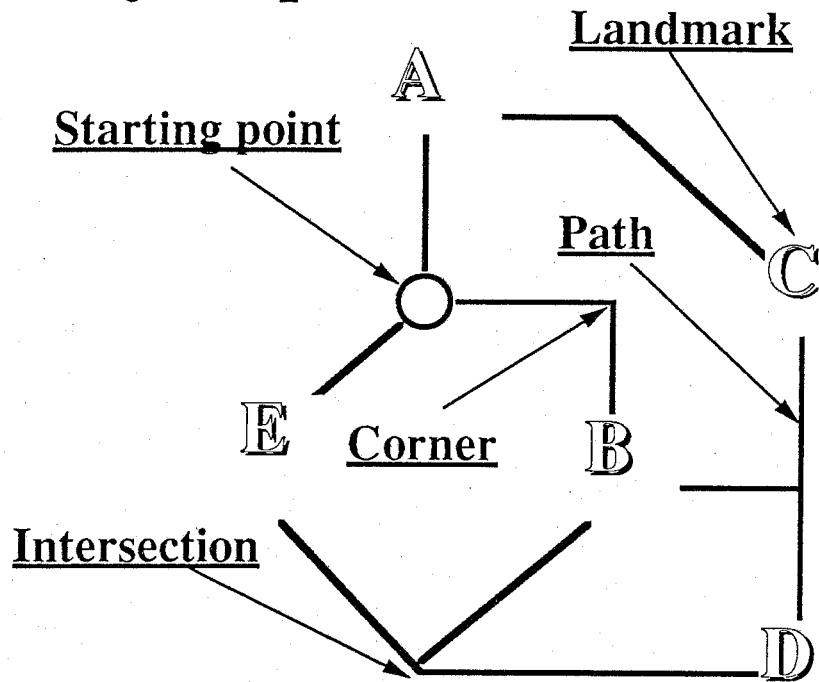


図3 探索実験の課題空間

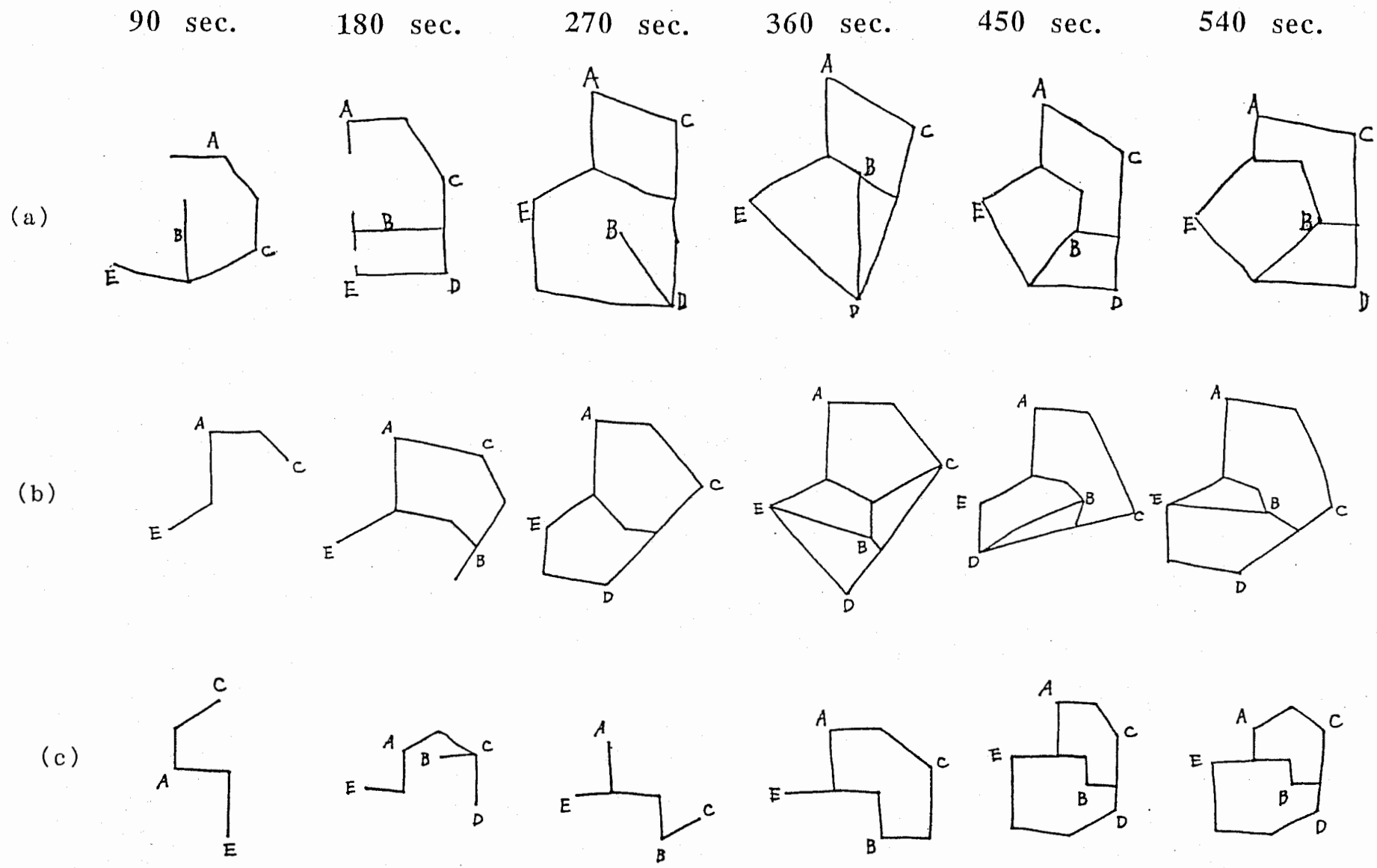


図4 探索実験のスケッチ例

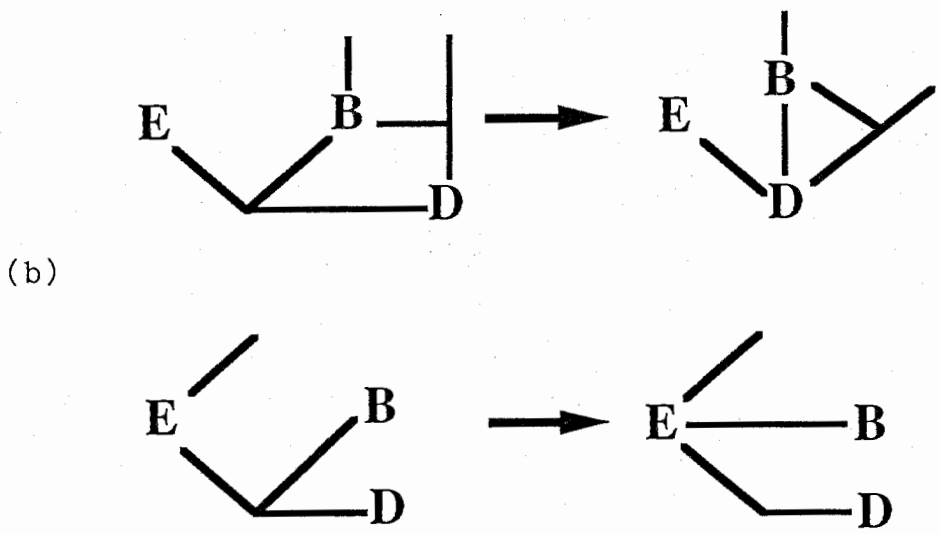
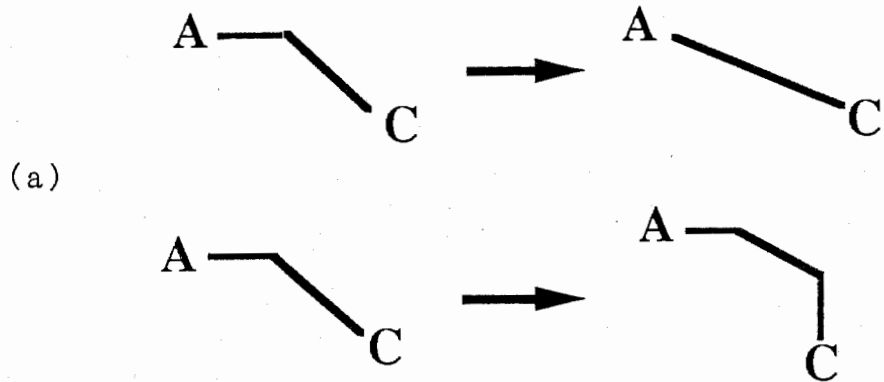


図5 特徴点のエラーパターン

(a) ランドマークのない角

(b) 交差点

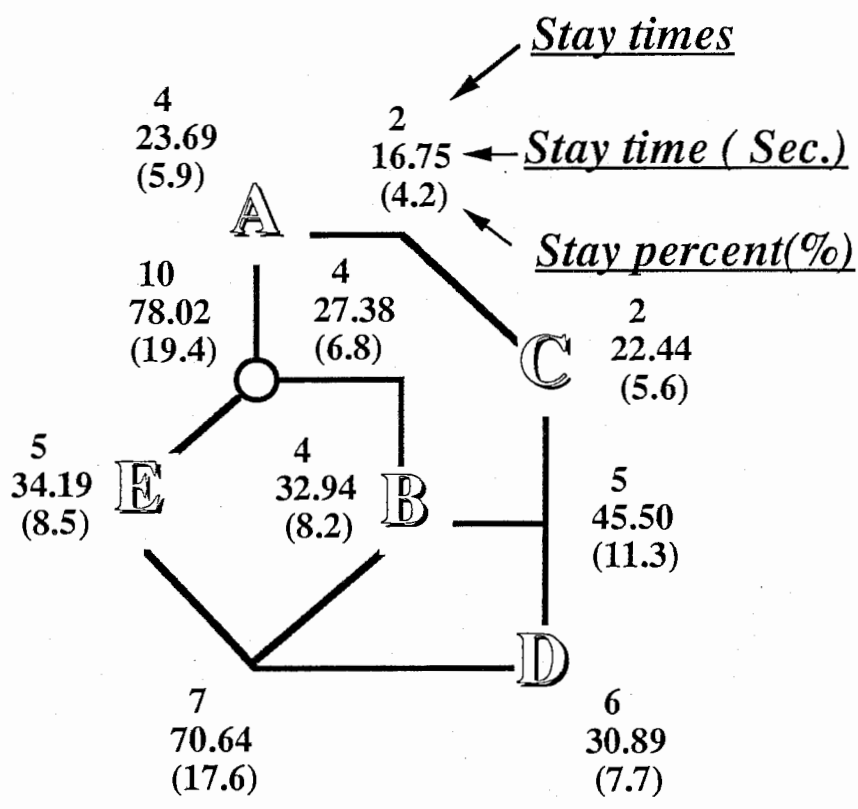


図6 特徴点での滞在時間

General Spatial Recognition Model

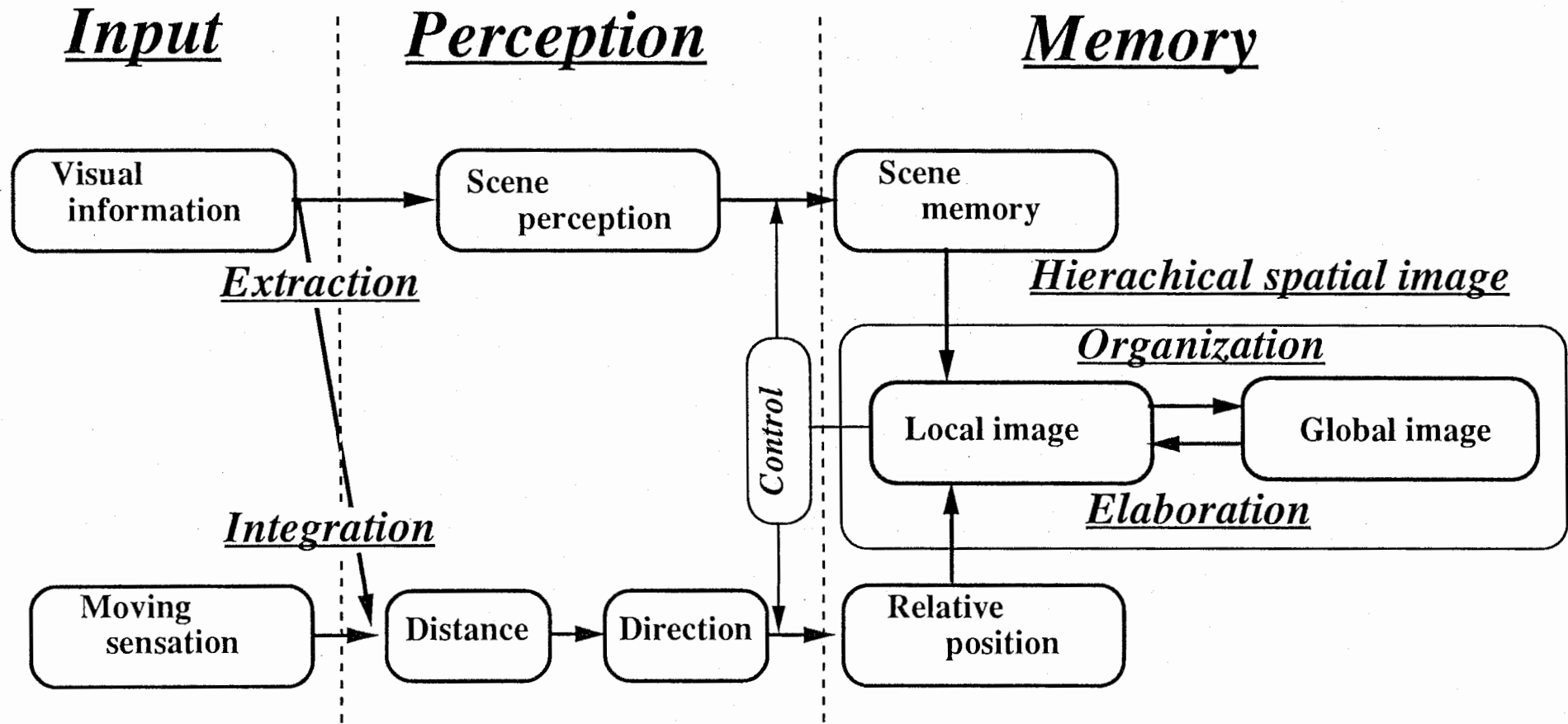
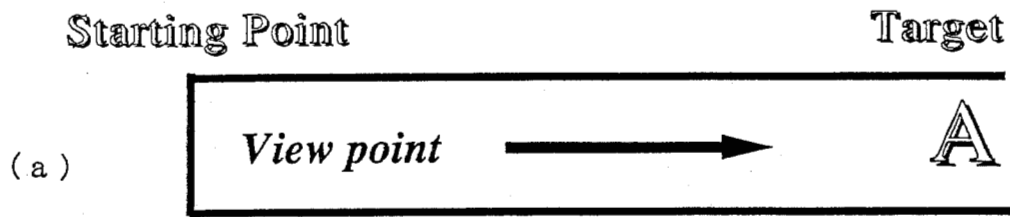


図7 概念的な空間認知モデル



(b)

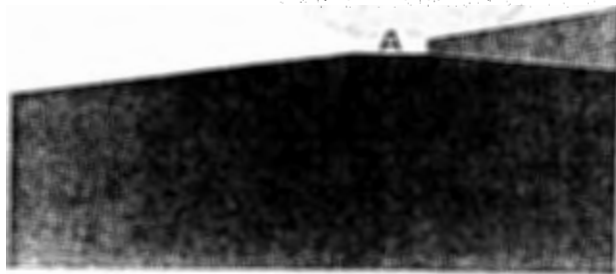


図8 単一距離の評定実験
(a) 課題空間の鳥かん図
(b) 表示画面

Perceived Distance

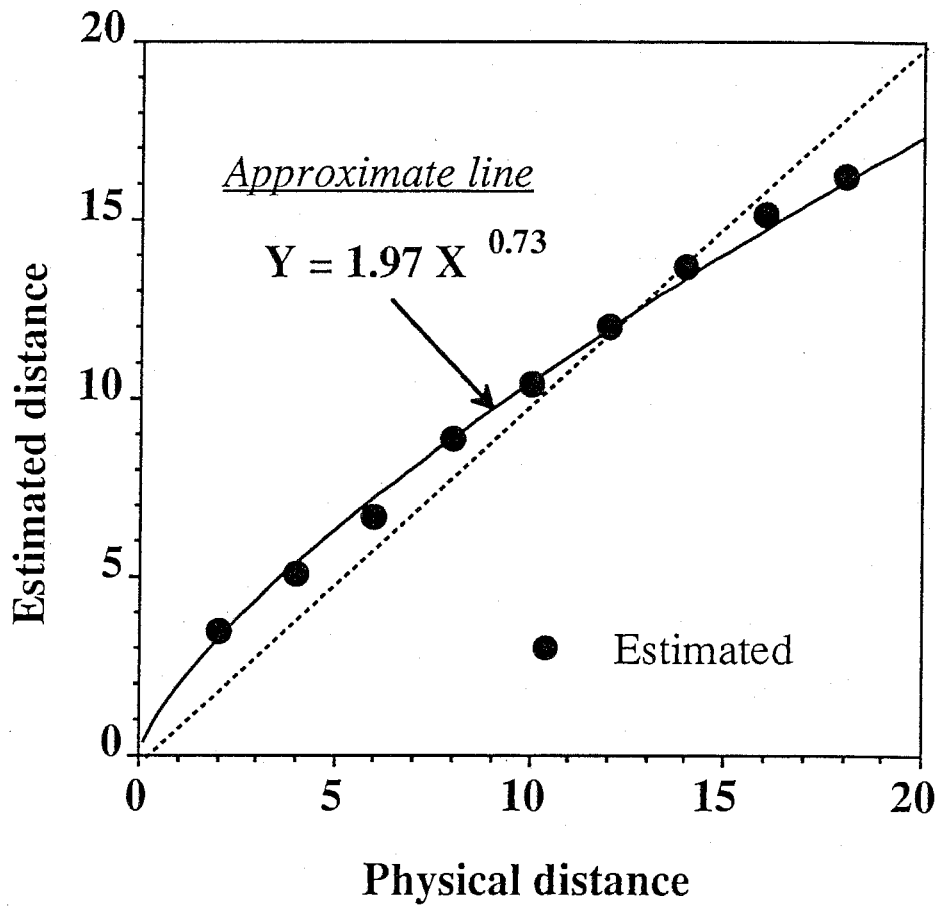


図9 単一距離の評定結果

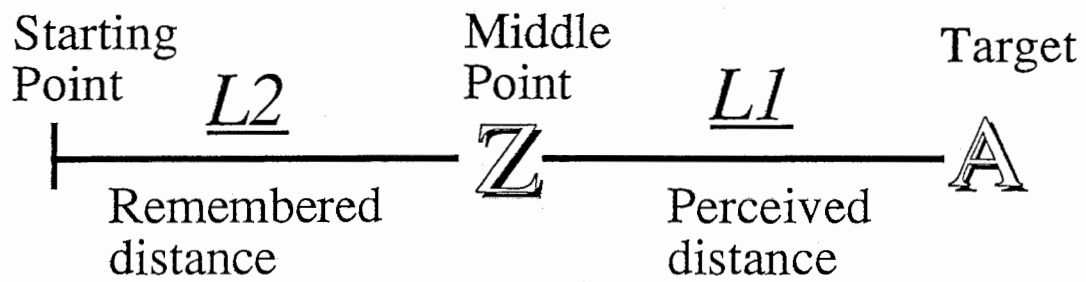


図10 複数の距離の同時評定実験

Remembered Distance

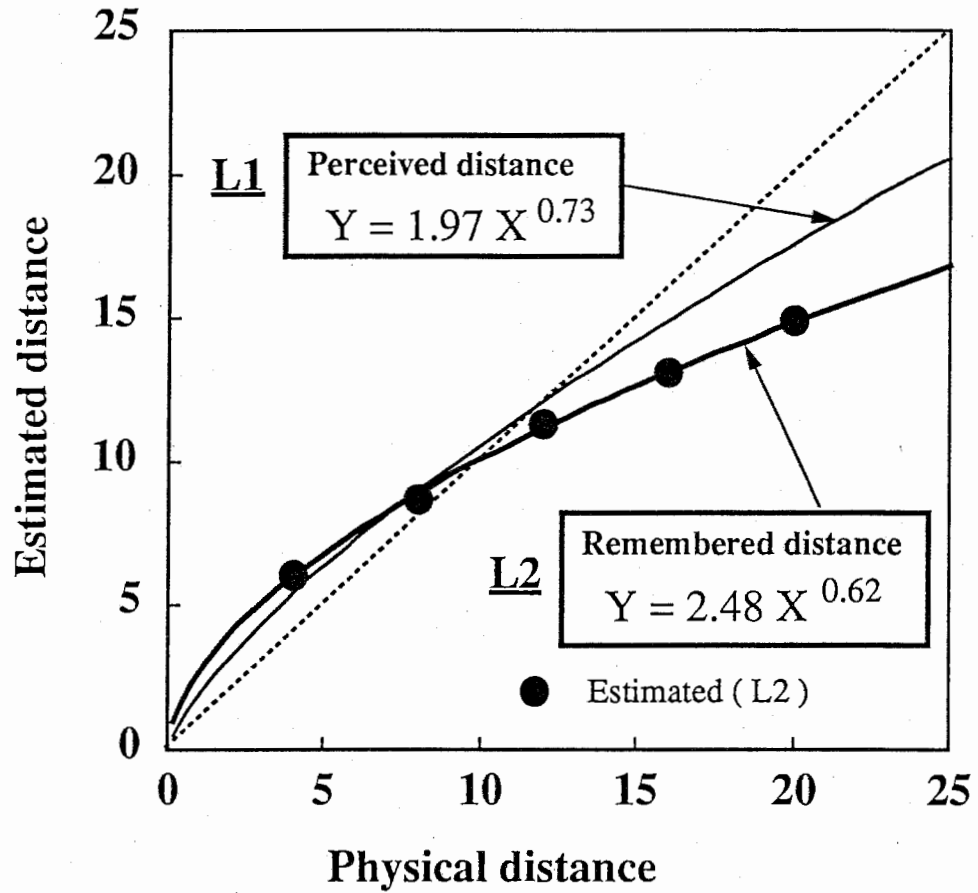


図11 複数の距離の評定結果

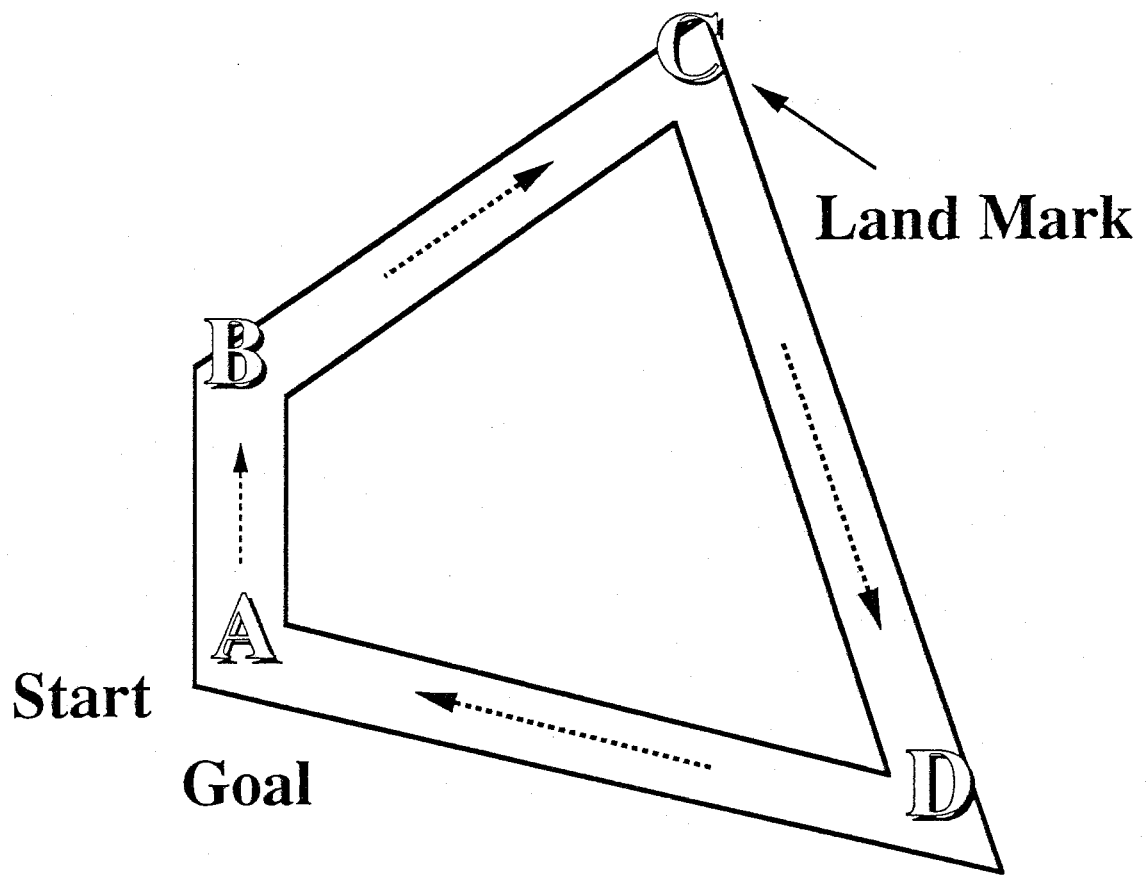


図12 閉じた経路の探索実験

Remembered Distance

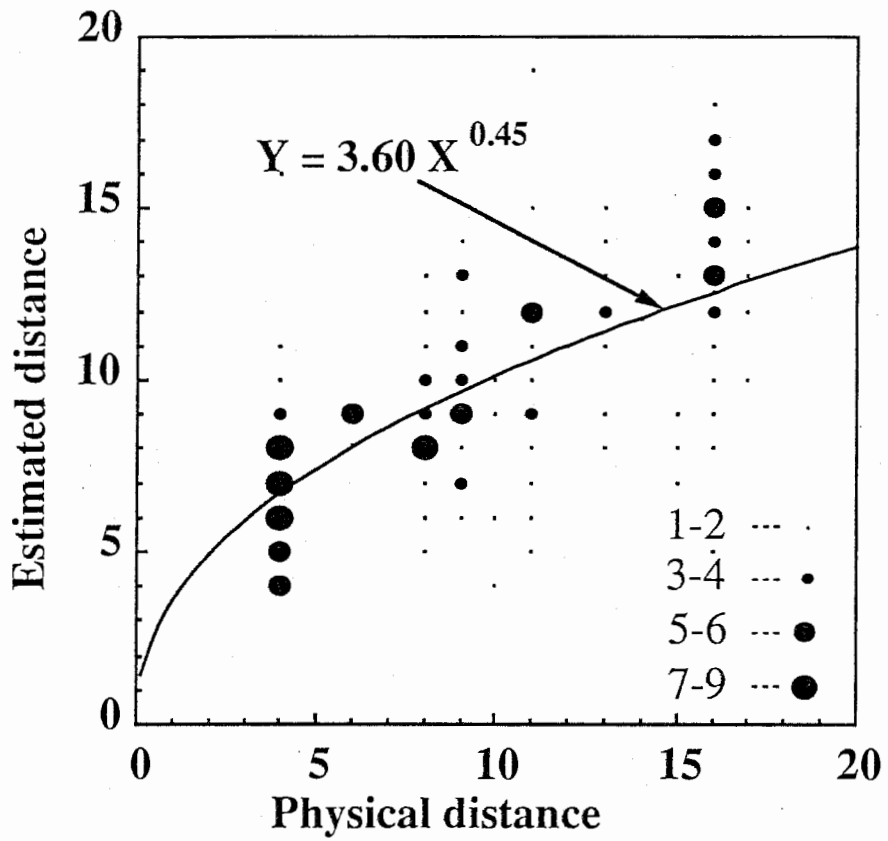


図13 閉じた経路の距離評定結果