

TR - A - 0072

CGを用いた心理実験に基づく
空間認知モデル

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. はじめに	1
2. 距離の評定特性	2
3. 方向評定特性	
3. 1 1回曲がりの方向評定	3
3. 2 2回曲がりの方向評定	4
3. 3 方向評定の定式化	4
4. 方向評定モデル	8
5. 考 察	10
6. むすび	11
謝 辞	12
参考文献	13
図 表	14

1. はじめに

空間認知は、地理学、建築学、心理学、認知科学などの様々な分野で研究が行われている。これらの研究は、空間表象に関するもの、空間認知過程に関するもの、そして空間の知識と行動に関するものの3つに大別される^[1]が、いずれの研究も物理的制約、要因の統制の難しさ等から現象の記述に留まり定量的評価は難しかった。

我々は、空間認知特性の定量的な分析から空間認知モデルを構築するため、CG（コンピュータ・グラフィックス）を用いた実験システムを構築した^[2]。このシステムを用いて空間把握過程の分析を行い、ローカルな情報を統合すると共にグローバルな表現を修正し、階層的な空間表象を形成していく概念的モデルを構築した^[3]。また、この概念的モデルを精緻化するため、局所情報の把握特性の定量的分析を試みている。我々は既に、距離の評定特性を定式化した^[4]が、本論文は、方向評定特性の定式化を目的に行った心理実験と生理学的見知に基づいて構築した方向評定モデルについて述べたものである。

2. 距離の評定特性

我々が行った距離評定実験の概略を述べる^[3]。まず、図1(a)に示す出発点から目標点までの単一距離を評定させた場合、評定距離は物理距離のべき関数で近似できることがわかった。

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

また、図1(b)に示すような出発点と目標(A)の間に中間点(Z)を設けて複数距離の評定特性について調べるため、L1とL2の評定距離比について分析した。その結果、L1を(1)式で近似すればL2の評定距離は(2)式で近似できることがわかった。

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

単一距離の場合、評定距離は移動することにより知覚した距離、すなわち、「知覚距離」と考えられる。一方、複数距離の場合、知覚した距離を記憶しておかなければならない。したがって、図1(b)のL1は知覚距離、L2は記憶距離と考えられる。一方、評定させる距離の数を増やして記憶負荷を増大させた場合、べき係数が小さくなる結果も得られた。したがって、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と考えられる。すなわち、距離評定は、次のように定式化できた。

$$\text{知覚距離} = 1.97 * \text{物理距離}^{0.73} \quad \text{----- (3)}$$

$$\text{記憶距離} = c * \text{物理距離}^n \quad (n < 0.73) \quad \text{----- (4)}$$

c、n : 定数

* n は記憶負荷が大きくなる程小さくなる。

3. 方向評定実験

3. 1 1回曲がりの方向評定

移動時に知覚する方向を定式化するため、90度の角を1回だけ曲がった時の方向評定特性について分析した。

【 実 験 方 法 】

図2(a)に90度の角を持つ経路を示す。この図は経路の鳥かん図であり、実験中は図2(b)示すような画像がディスプレイ上に提示される。被験者は、このような映像を見ながらジョイスティックを操作して経路内を出発点から目標(A)まで移動する。なお、移動中の速度は一定(約20m/s)である。目標点に到達した後、出発点からみた目標の方向を評定させた。解答は、図2(c)に示すように評定方向が円の中心からみた方向と一致する所に「X印」を記入させた。実験課題は、5種類(4, 8, 12, 16, 20ユニット, 1ユニット = 10m)のL1とL2の全てを組合せた25種類であり、これらをランダムに提示して1セッションとした。被験者は、大学生10名(男性2名, 女性8名)で、1人につき3セッション行った。

【 実 験 結 果 】

1回曲がりの方向評定結果を図3に示す。この図を見ると、物理方向が45度より大きい場合には過小視が、小さい場合は過大視が生じている。

3. 2 2回曲がりの方向評定

90度の角を2回曲がった時に知覚する方向の分析を行った。

【 実 験 方 法 】

図4(a)に2回曲がりの経路を示すが、2回目に曲がる方向により正の2回曲がり(L1とL3の進行方向が同じ)と負の2回曲がり(L1とL3の進行方向が逆)の経路を生成した。実験条件は図4(b)に示すように、正の2回曲がりについては、一定長のL3(4ユニット)、4種類のL2(2,4,8,12ユニット)、6種類のL1(2,4,8,12,16,20ユニット)を適当に組み合わせた18方向、負の2回曲がりについては、一定長のL3(4ユニット)、4種類のL2(2,4,8,12ユニット)、8種類のL1(2,4,6,8,10,12,16,20ユニット)を組み合わせた23方向の経路を生成した。実験は、正、負の2回曲がりを合計した41課題をランダムに提示し1セッションとした。被験者は、女性2名であり、1人につき6セッション行った。

【 実 験 結 果 】

物理方向と評定方向との関係を図5(a)に示す。また、物理方向と評定誤差(評定方向と物理方向との差)との関係を図5(b)に示す。これらの図を見ると、物理方向に応じて過大視・過小視が生じるが、L2の長さによりその傾向は異なる。

3. 3 方向評定の定式化

2章で述べた距離評定実験の結果を利用して、方向評定の定式化を試みた。まず、1回曲がりの実験結果を定式化するために、次のような仮定を設けた。

(仮定1) 出発点から交差点まで移動した時、L2の距離を知覚し記憶する。し

たがって、L2の評定距離は、(4)式で表される記憶距離で近似できる。

(仮定2) 交差点から目標点まで移動した時L1の距離を知覚する。したがって、

L1は(3)式で表される知覚距離で近似できる。

(仮定3) 目標点の方向は、次式のように評定距離の組合せで予測される。

$$\text{予測値} = \tan^{-1} (L1 \text{の知覚距離} / L2 \text{の記憶距離}) \quad \text{----- (5)}$$

したがって、図6に示すように L1を(3)式で、L2を(4)式で近似した時、(5)式で得られる予測値と実験により得られた評定値との2乗誤差が最小になるようにL2の係数を求めた。その結果、

$$L2 \text{の評定距離} = 2.19 \text{ 物理距離}^{0.64} \quad \text{----- (6)}$$

で近似すると、図7に示すように予測値と評定値は、よい一致を示した(平均2乗誤差=10.28度)。

このように、(3),(4)式で表された評定距離を組み合わせて方向評定の定式化を試みた。その結果、1回曲がりでは予測値と実験値の2乗誤差を最小にする記憶距離として(6)式が得られたが、この式は(2)式にほぼ一致している。すなわち、方向評定実験から計算により求めた式と距離評定実験から得られた式はほぼ一致した。したがって、1回曲がりの方向評定は評定距離の組合せにより定式化できると考えた。

一方、2回曲がりについても1回曲がりと同様に次の仮定を設けた。

(仮定1) L1は知覚距離である。

(仮定2) L2は記憶距離である。

(仮定3) 一定長のL3で実験を行ったので、評定値も一定である。

(仮定4) 評定方向は次式により予測できる。

$$\tan^{-1} ((L1 \text{の知覚距離} + L3 \text{の評定距離}) / L2 \text{の記憶距離}) \quad \text{--- (7)}$$

以上の仮定の基、(7)式で得られる予測値と実験値との2乗誤差を最小にする各係数を求めた。その結果、

(2回曲がり全体)

$$L2 \text{の評定距離} = 3.55 \text{ 物理距離}^{0.45} \quad \text{----- (8)}$$

$$L3 \text{の評定距離} = 4.8 \quad \text{----- (9)}$$

*平均2乗誤差 = 25.2度

(正の2回曲がり : 8.4度, 負の2回曲がり : 35.1度)

で近似すると平均2乗誤差が最小になったがその値は25.2度と大きい。そこで、個別に正負の2回曲がりの分析を試みた。すなわち、正あるいは負の2回曲がりのどちらか一方の実験データとその予測値との2乗誤差を最小にする係数を別々に求めた。その結果、

(正の2回曲がり)

L2の評定距離 = 3.85 物理距離 0.45

L3の評定距離 = 5.3

平均2乗誤差 = 8.2度

(負の2回曲がり)

L2の評定距離 = 3.55 物理距離 0.45

L3の評定距離 = 4.8

平均2乗誤差 = 34.8度

が得られた。これらの結果は、2回曲がり全体で求めた値とほぼ同じであり、(8), (9)式を用いれば、正、負の2回曲がり共2乗誤差がほぼ最小になるようである。そこで、(7)式に(4), (8), (9)式を代入して求めた予想値と実験値の関係を図8に示す。この図を見ると正の2回曲がりに関しては、2乗誤差も小さく評定距離の組合せにより定式化が可能と考えた。しかし、負の2回曲がりに関しては、評定距離の組合せだけでは定式化できないようである。そこで、負の2回曲がりの予測値と実験値との誤差について分析した結果、次のような傾向が得られた。

- ・ L1の長さがL3に近い場合、評定方向は水平方向に引き込まれる。
- ・ L1がL3に比べてかなり長い場合、負の方向(-90度方向)に引き込まれる。

これらの傾向を説明するため、経験的あるいは潜在的に感じてしまう方向として「アトラクタ方向 (attractor direction)」を仮定し、周りの部分はこの特別な方向に引き込まれると考えた。すなわち、図9に示すように、評定方向

は「アトラクタ方向」からの「引き込み力 (Pulling effect) 」を受けると考えた。

そこで、「引き込み力」を定式化するため、次のような仮定を設けた。

(仮定1) アトラクタ方向をガウス関数 (V) の極値 (ピーク値) で表す。

$$V = A * \exp(-(\theta - \mu)^2 / \sqrt{2\pi} \sigma^2) \quad \text{---- (10)}$$

A, σ : 定数,

μ : アトラクタ方向

θ : (7)式により計算された方向

(仮定2) 引き込み力 (F) をガウス関数の負の1回微分で表す (図10参照)。

$$F = - dV / d\theta \quad \text{---- (11)}$$

(仮定3) 複数のアトラクタ方向が存在する場合、全体の引き込み力は個々の引き込み力の総和である。

$$\text{引き込み力} = \Sigma (f(i) * F_i) \quad \text{--- (12)}$$

F_i : i 番目の引き込む力

$f(i)$: i 番目の引き込み力を調節する関数

(仮定4) 方向は、評定距離の組合せ項に引き込み力を足し合わせた値に評定される。すなわち、評定方向は(7)式と(12)式を足し合わせた値である

$$\text{方向評定} = \text{評定距離の組合せ} + \text{引き込み力} \quad \text{--- (13)}$$

以上の仮定の基、負の2回曲がりの定式化を試みた。まず、「アトラクタ方向」は

・ 0 度: L1とL3が近いとき

・ -90度：L1がL3に比べてかなり長いとき

とし、(13)式で求められる予測値と実験で得られた評定値との2乗誤差を最小にする $k_i, \sigma_i, f(i)$ の値を求めた。その結果、

0度 : $A = 2900, \mu = 70.0, f(i) = 1$

-90度 : $A = 570, \mu = 45.0, f(i) = L1/L3$

のように係数を定めれば2乗誤差が最小になった。これらの係数を代入して得られた予測値と実験値の関係を図11に示す。図11より、予測値と実験値はよく一致しており、平均2乗誤差も12.1度と小さい。したがって、引き込み力を考慮することで負の2回曲がりの方向評定も定式化できた。

4. 方向評定モデル

方向評定の定式化について述べたが、この結果を基に図12に示す方向評定モデルを構築した。このモデルは、神経生理学における「ポピュレーション・コーディング」を応用して、評定距離の組み合わせから方向を計算するものである。

脳内には、図13に示すような線分方向に選択的に反応する細胞が存在し、その発火頻度はガウス分布で近似されることが知られている。ポピュレーション・コーディングとは、このような細胞の出力の総和から、線分方向を検出するモデルである^[4]。たとえば、図14に示すように網膜上に写った線分方向に対して、線分方向と選択的方向との差に応じてすべての方向選択性細胞が同時に発火する。そして、これらの細胞の出力（発火量）の総和は、線分方向にピークを持つガウス分布になる。したがって、統合された出力のピーク方向が、知覚される線分方向である。このように、方向選択性を持つ細胞の出力を統合することで、任意の線分方向を知覚することが可能になる。

また、サルを用いた実験から手を動かした方向に選択性を持つ細胞の存在も知られている^[5]。そこで、この細胞を基にして身体の動いている方向（移動方向）に選択性を持ち、出力は移動に伴い知覚される距離（知覚距離）に比例する細胞を考えた。すなわち、図15に示すような細胞を仮定した。

(1) 細胞の出力は移動方向にピークを持つガウス分布(分散: $\sigma = 80$ 度)である。

(2) ピーク値は知覚距離に比例した値である。

我々は、この移動方向に選択性を持つ細胞に、ポピュレーション・コーディングの考えを応用して「評定距離の組合せから方向を評定するモデル」を構築した。すなわち、様々な方向へ移動することにより発火した細胞の総和から目標の方向を検出するモデルである。このモデルは図12に示すように、

- ・ 移動により選択的方向と移動方向の差に応じて個々の細胞が発火する。
- ・ 移動距離が増えると、物理的移動距離のべき関数(べき係数=0.73)に比例して出力が増加する。
- ・ これらの細胞の出力を統合することにより、移動情報が知覚される。すなわち、移動方向はピークの方角として、移動距離はピーク値として知覚される。したがって、ピーク値は知覚距離に比例した値になる。
- ・ 移動情報を記憶する時、ピーク値は記憶距離に比例した値に変化する。すなわち、ピーク値は、記憶負荷の増加に伴いべき係数の小さいべき関数で近似される。
- ・ 目標点の方角は、知覚された出力と記憶している出力との総和が最大となる方角に知覚される。たとえば、図12に示すように1回曲がりの方角評定は、L1を移動することにより得られる0度をピークに持ち知覚距離に比例した出力とL2を移動することにより得られる90度をピークに持ち記憶距離に比例した出力との和が最大となる方角である。

このモデルを用いれば、(5)式あるいは(7)式で計算される値を ± 1 度程度の精度で求めることができる。また、交差点の角度が90度以外の場合や交差点を2回以上曲がった場合についてのシュミレーションでもよい近似値が得られた。ただし、交差点の角度が180度(Uターン)に近い場合は近似できなかった。しかし、道の交角が180度に近い場合やUターン等は非常に特殊なケースと考えれば、このモデルを用いれば評定距離の組合せから評定方角を求めることが可能と考える。

一方、負の2回曲がりのように引き込み力が存在する場合、知覚あるいは記憶された距離や方向からアトラクタ方向が知覚され、引き込み力は、そのアトラクタ方向を微分して求められる。したがって、評定方向は評定距離の組合せから得

られた方向に引き込み力を加えた値になる。

5. 考察

方向を評定するモデルは、神経回路の分野でも提案されている。たとえば、Zipserの空間に配置されたいくつかのランドマークの配置から目標方向を検出するモデル^[6]や4方向（東西南北）にあるランドマークとの位置関係を統合して目標方向を検出するBartoのモデル^[7]などである。これらのモデルは、空間に配置された複数のランドマークを利用して目標方向を検出するものであり、未知の空間への適用は難しい。しかし、我々のモデルは、移動により知覚あるいは記憶された評定距離の組合せを基礎にしており、未知の空間の方向評定には有効と考える。また、評定距離の組合せに \tan^{-1} を用いたが、 \tan^{-1} の計算を頭の中で行うことは難しく、交差点の角度が90度以外の場合、評定方向の計算は三角関数を用いた複雑な式になる。しかし、我々が提案した「ガウス関数の組合せによる評定距離組合せモデル」は、ガウス関数を評定距離に応じて定数倍し、足し合わせ、最大値を求めることで、複雑な数式を用いずに評定方向が得られた。一方、移動方向に選択性を持つ細胞を仮定しているが、その発火分布として分散値80度のガウス関数を用いた。Steinmetzらは、サルの運動方向に選択性を持つ細胞の発火分布をCOS関数で近似している^[8]が、COS関数は分散値65度のガウス関数でほぼ近似できる。したがって、いずれの分散値も比較的大きな値であり、我々が用いた分布関数（分散値が80度のガウス関数）は神経生理学的見知からも適当と考えられる。このように、我々のモデルは任意の空間に適応でき、また、生体系のモデルとしての可能性も十分あると思われる。

身体あるいは視点の回転による影響は「メンタル・ローテーション」として研究されているが、これらの研究から回転角が増加すると誤差も増加することが予想される。我々が提案した引き込み力も身体の回転に伴う「心理的誤差」と考えると、進行方向が反転した場合（負の2回曲がりの場合）には、心理的誤差も多く、評定距離の組合せ以外に引き込み力を考慮する必要があった。しかし、1回曲がりや正の2回曲がりのように身体の回転が少ない場合、その心理的誤差も小さい。したがって、評定距離の組合せだけで評定方向が定式化できたと考えられる。引

き込まれる方向として、Tverskyは、米国の都市や仮想の空間で都市の位置関係を判断させると、東西南北などの優位な方向に引き込まれることを示している^[9]。我々の実験でも、引き込まれる方向（アトラクタ方向）は0度や-90度（進行方向の前後左右）のような「優位な方向」と考えられる。したがって、引き込み力は、進行方向の反転により心理的誤差が増加し、評定方向が優位な方向に引き込まれるために発生したと考えられる。

空間の移動により獲得される基本情報は距離や方向である。そして、これらの基本情報は、空間の探索を繰り返すことにより統合され、広大な空間が認知されて行く。したがって、空間認知モデルの構築には、基本情報の統合過程のモデル化が重要課題であるが、この時、我々が定式化した距離や方向の評定特性は有効な指標となると確信している。

6. むすび

空間認知モデルの構築のため、CGを用いた実験システムで人間の方向評定特性の分析を試みた。その結果、90度の角を1回曲がった時あるいは正の2回曲がりの方向評定は、評定距離の組合せで定式化できた。一方、負の2回曲がりの場合は評定距離の組合せ項の他に優位な方向への引き込みを考慮することで定式化できた。今回の実験により、基本的な方向評定特性の定式化が行えたが、今後90度以外の角を曲がった時、あるいは2回以上曲がった時についても検討して行きたい。

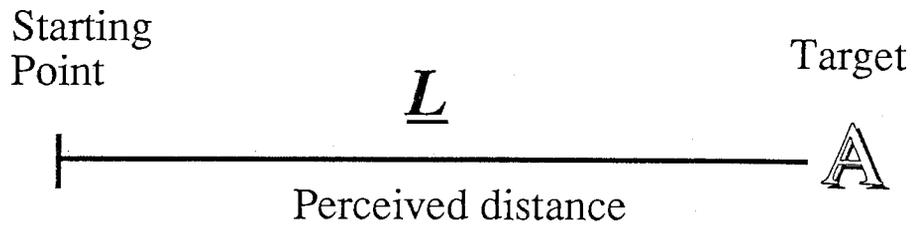
また、神経生理学の知見を考慮して、評定距離組合せモデルを構築した。このモデルは、進行方向に選択性を持つ細胞の出力としてガウス関数を仮定し、その出力を評定距離に応じて定数倍し、足し合わせ、最大値を求めることで、複雑な数式を用いずに評定方向が得られた。一方、引き込み力もガウス関数を用いて定式化しており、このモデルに引き込み力を組み込むことで方向評定モデルが構築できると考える。しかし、今回は特定の状況での引き込み力しか考察しておらず、今後様々な条件下の検討が必要と考える。

【 謝 辞 】

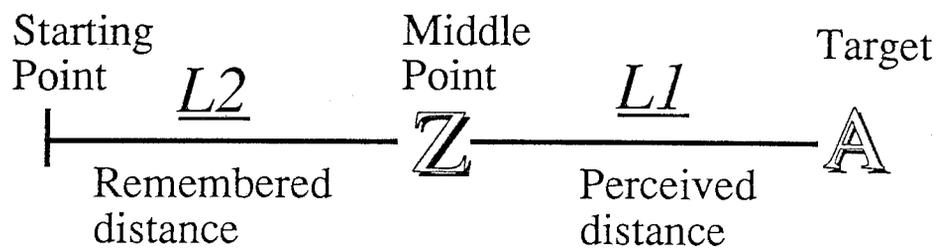
日頃からご指導下さったATR視聴覚機構研究所 認知機構研究室の中根一成室長に感謝します。また、有意義な討論をして頂いたATR視聴覚機構研究所の諸氏、特に林武文氏に深く感謝します。

【 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) 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,p7-12 (1988).
- (3) 藤井秀夫,乾敏郎 : "CGを用いた心理実験に基づく空間認知モデル", 電子情報通信学会論文誌投稿中
- (4) M.A.Paradiso : "A Theory for Use of Visual Orientation Information which Exploits the Columnar Structure of Strate Cortex", Biological Cybernetics 58, pp.35-49 (1988).
- (5) B.C.Motter, M.A.Steinmetz, C.J.Duffy, V.B.Mountcastle : "Functional Properties of Parietal Visual Neurons : Mechanisms of Directionality Along a Single Axis", The Journal of Neuroscience, January 1987, 7(1), pp.154-176 (1987).
- (6) D.Zipser : "Biologically Plausible Models of Place Recognition and Goal Location", In J.L.McClelland,D.E.Rumelhart and the PDP Research Groupe : "Parallel Distributed Proceccing" Vol.2 pp.432-470.
- (7) A.G.Barto:"An Approach to Learning Control Surfaces by Connectionist System", In M.A.Arbib, A.R.Hanson(Eds.) : "Vision, brain, and cooperative computation"pp.665-701.
- (8) C.j.Steinmetz, B.C.Motter, M.A.Duffy, V.B.Mountcastle : "Functional Properties of Parietal Visual Neurons : Radial Organization of Directionalities Whithin the Visual Field", The Journal of Neuroscience, January 1987, 7(1), pp.177-191 (1987).
- (9) B.Tversky:"Distortion in Memory for Maps", Cognitive Psychology, 13, pp.407-433 (1981).



(a)

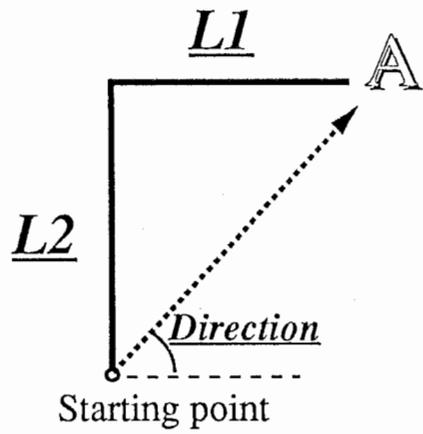


(b)

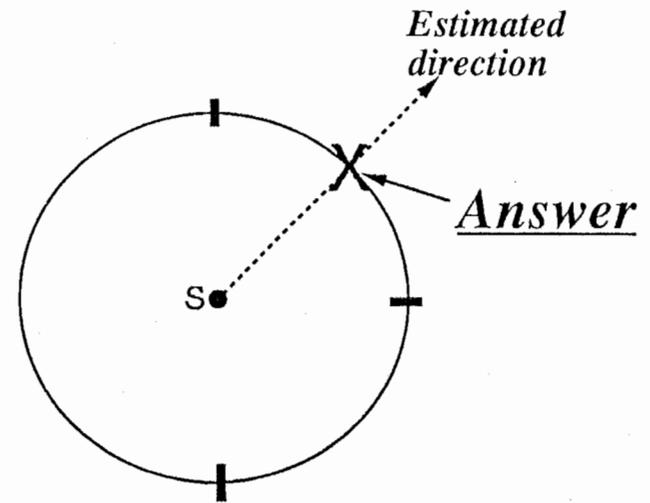
図1 距離評定実験

(a) 単一の距離

(b) 複数の距離



(a)



(b)

(c)

図2 1回曲がりの方向評定実験
 (a)課題空間
 (b)表示画面
 (c)解答方法

Direction (1turn)

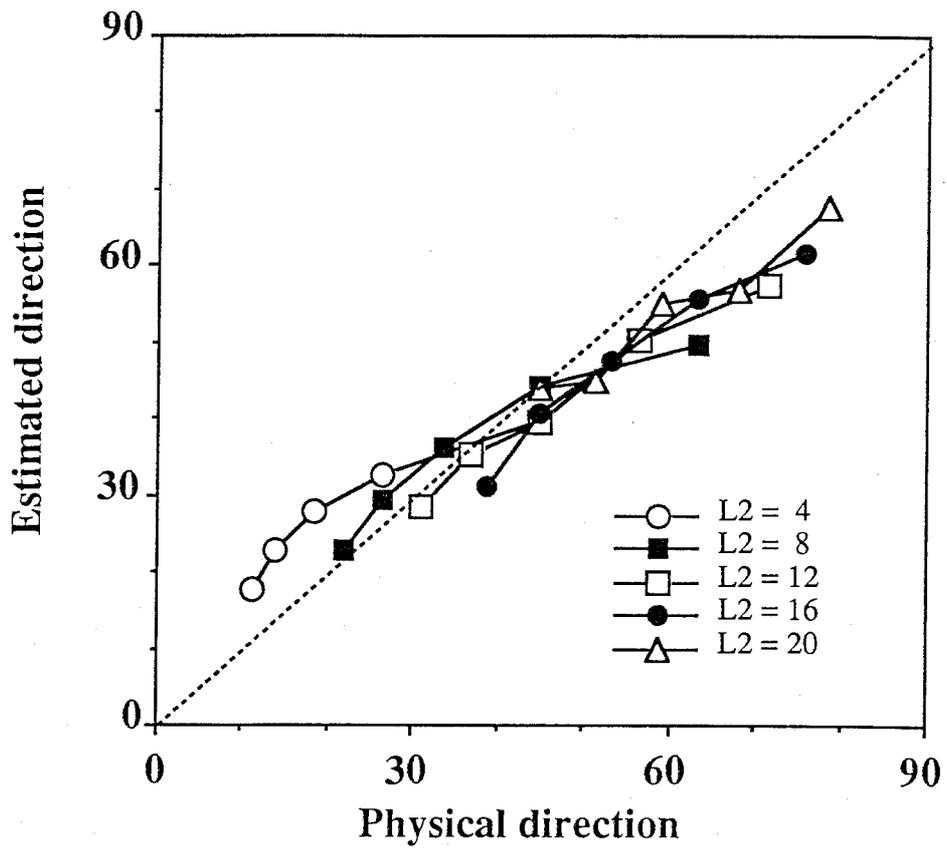
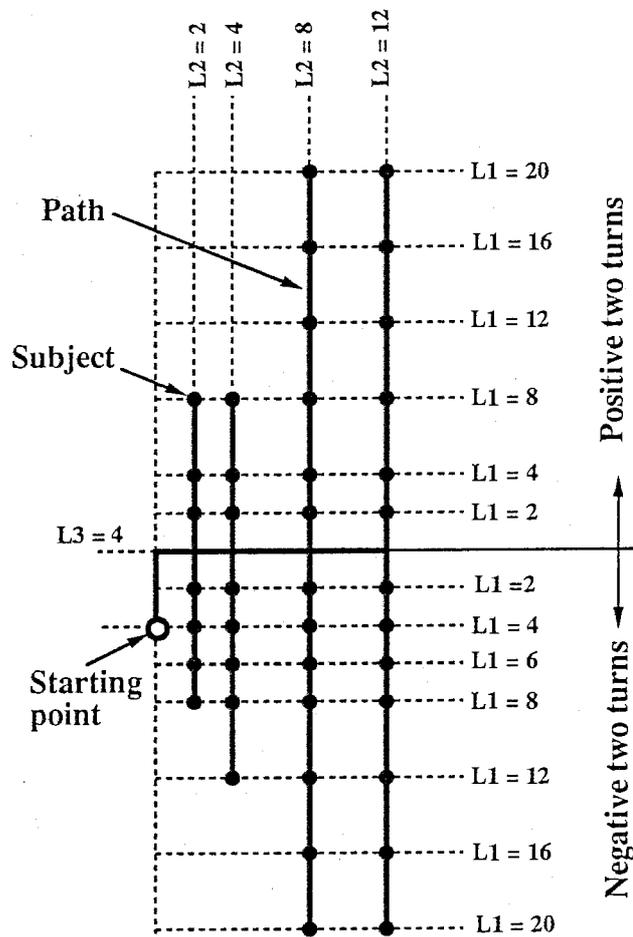
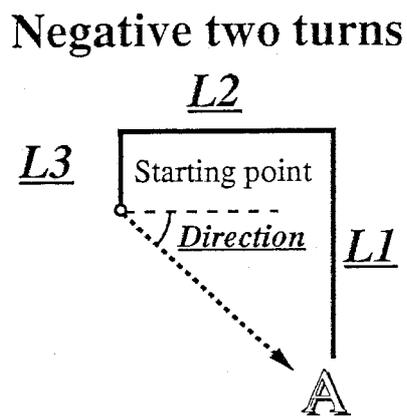
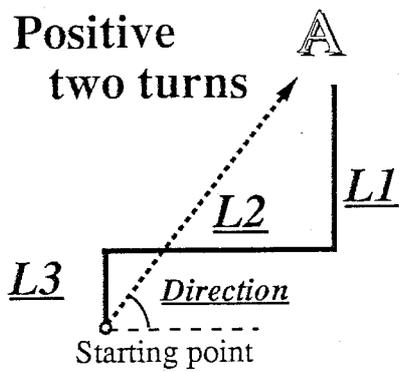


図3 1回曲がりの方向評定結果



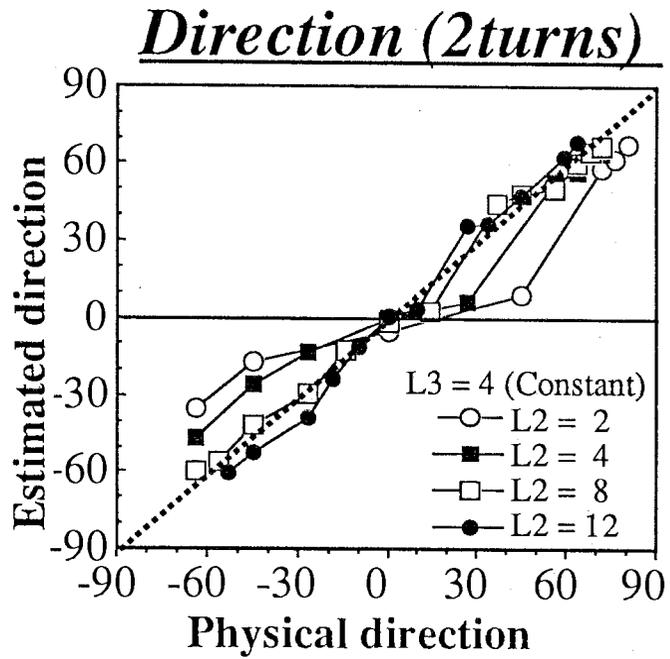
(a)

(b)

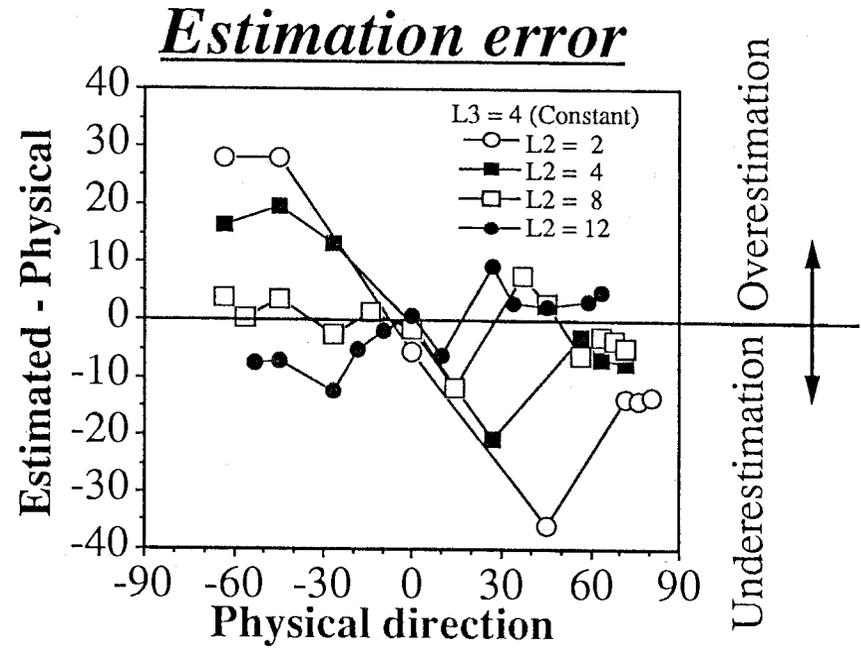
図4 2回曲がりの方向評定実験

(a) 正、負の2回曲がり

(b) 課題空間



(a)

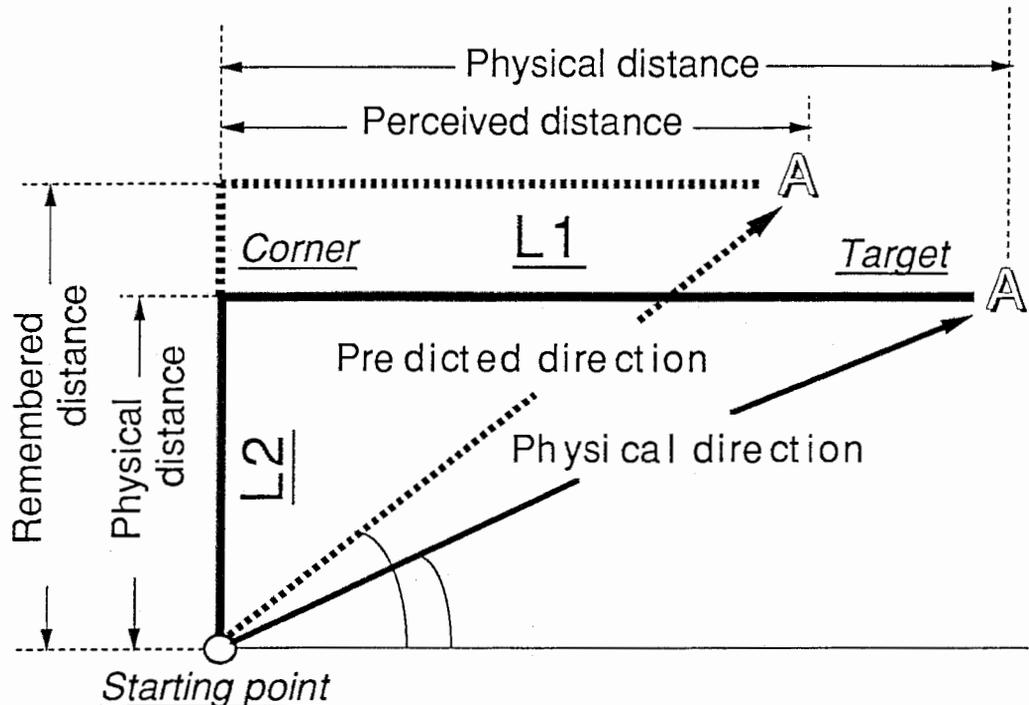


(b)

図5 2回曲がりの方向評定結果

(a) 評定方向

(b) 評定誤差



Predicted direction

$$= \tan^{-1} (\text{Perceived distance} / \text{Remembered distance})$$

$$L1: \text{Perceived distance} = 1.97 * \text{Physical distance}^{0.73}$$

$$L2: \text{Remembered distance} = 2.19 * \text{Physical distance}^{0.64}$$

図6 評定距離の組合せによる定式化

Direction (1 turn)

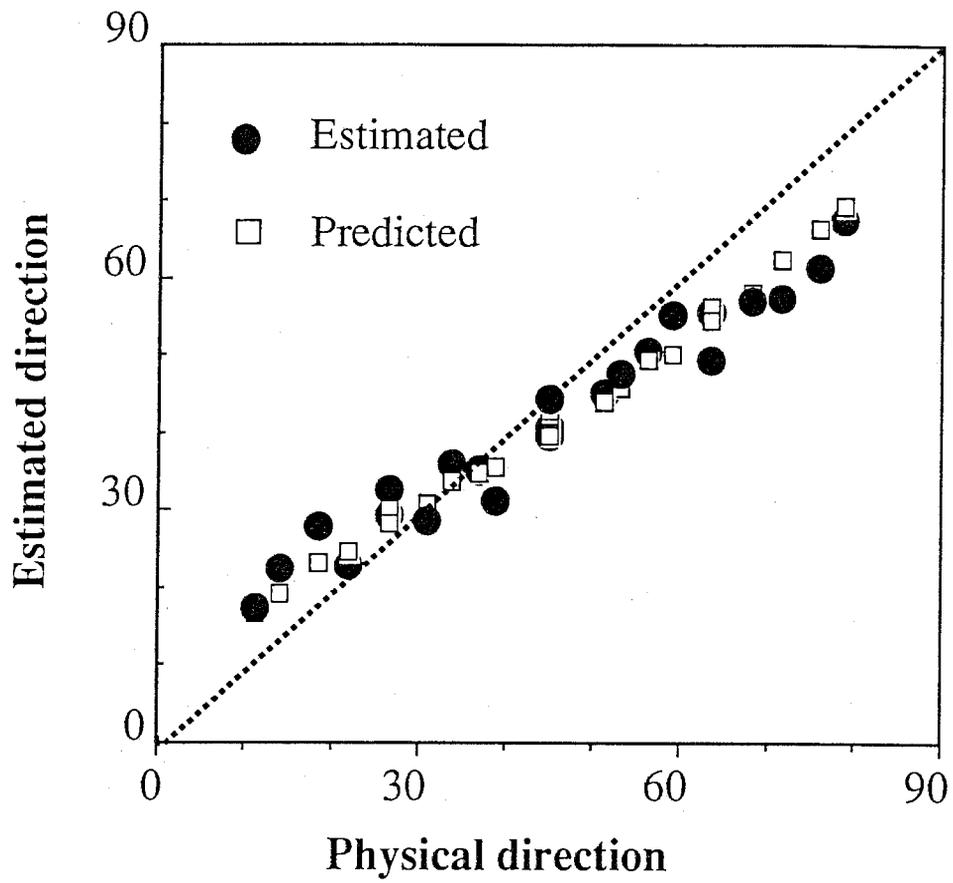


図7 1回曲がりの予測値

Predicted direction(2turns)

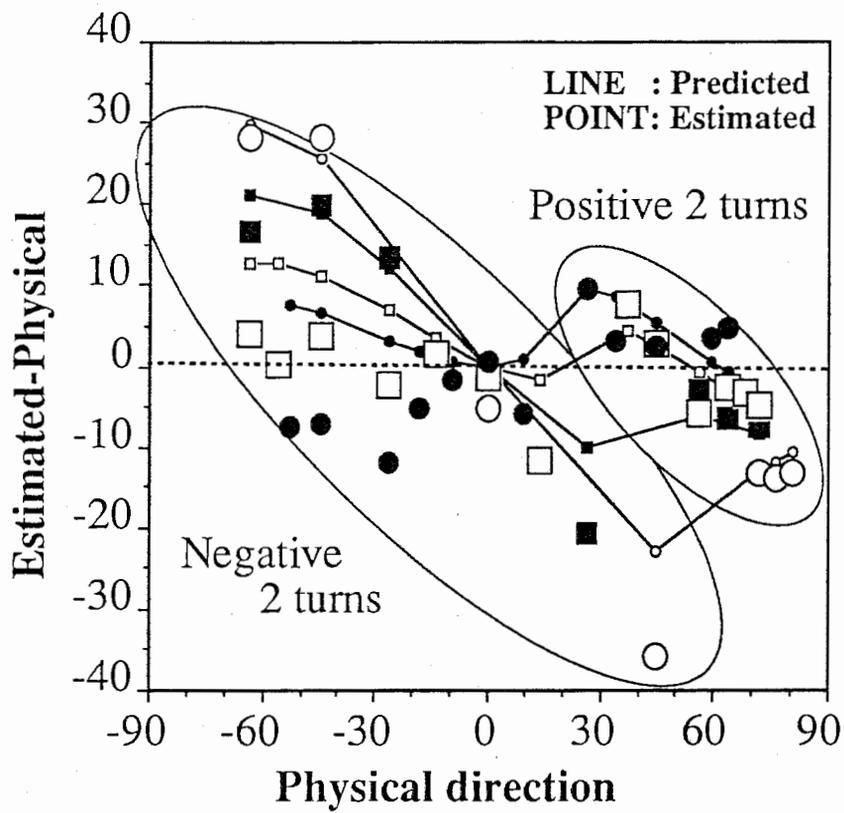
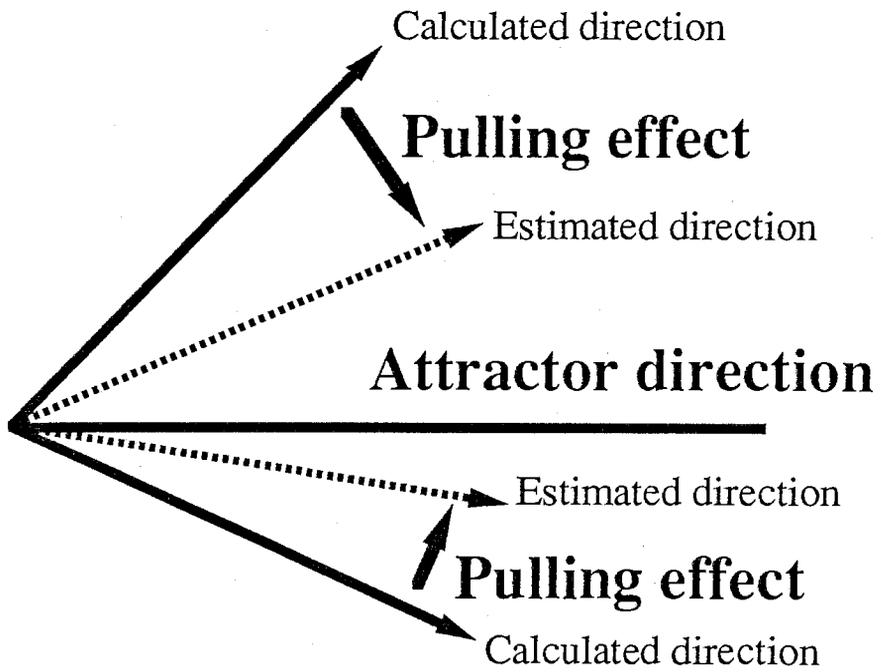


図8 2回曲がりの予測値(評定距離の組合せ)



Calculated direction :
calculated by combination of estimated distances

図9 アトラクタ方向と引き込み力

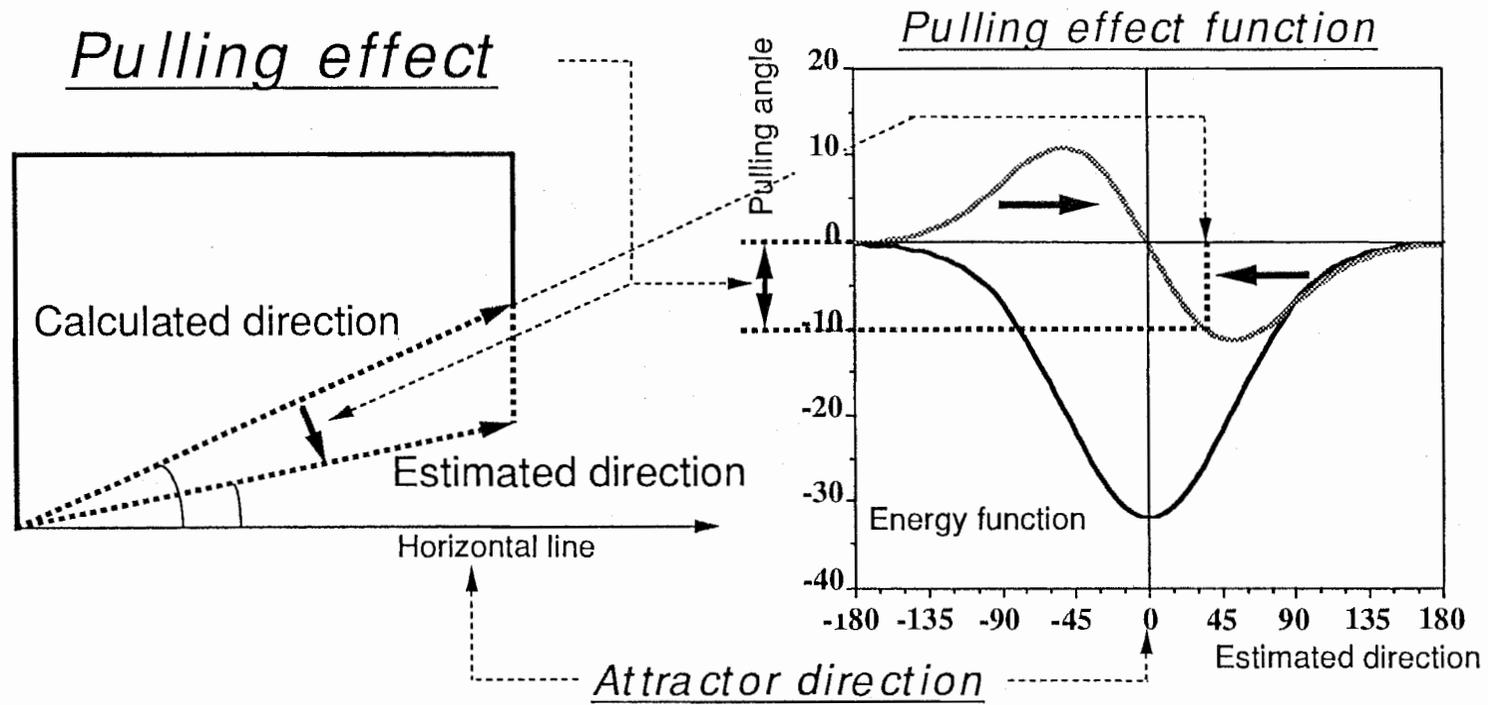


図10 引き込み力の定式化（水平方向）

Predicted direction(2turns)

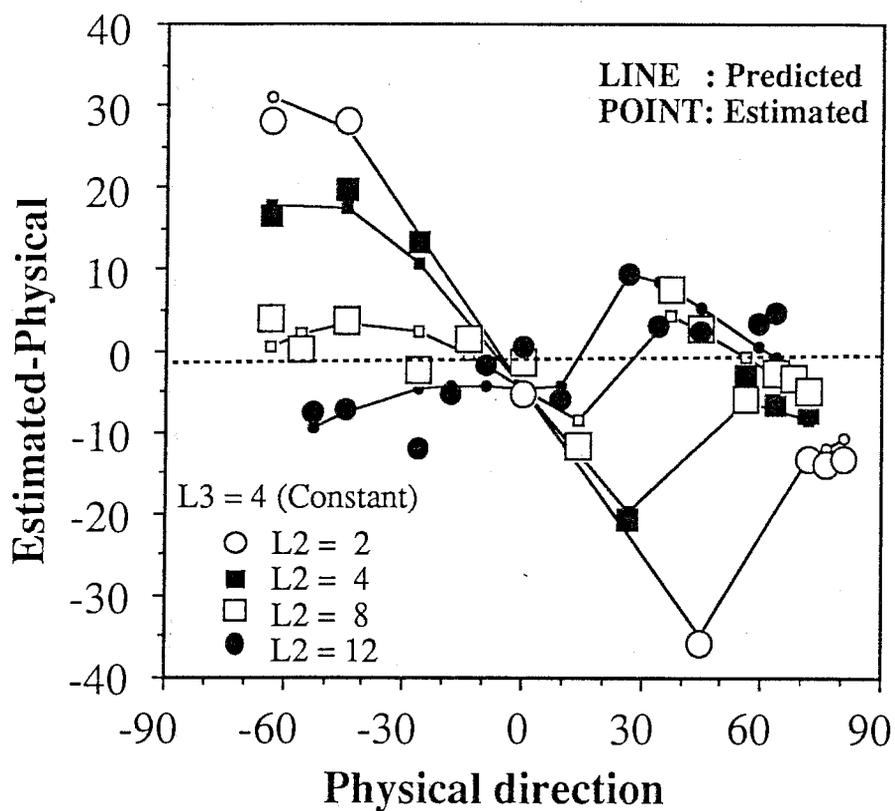


図11 2回曲がりの予測値 (引き込み力あり)

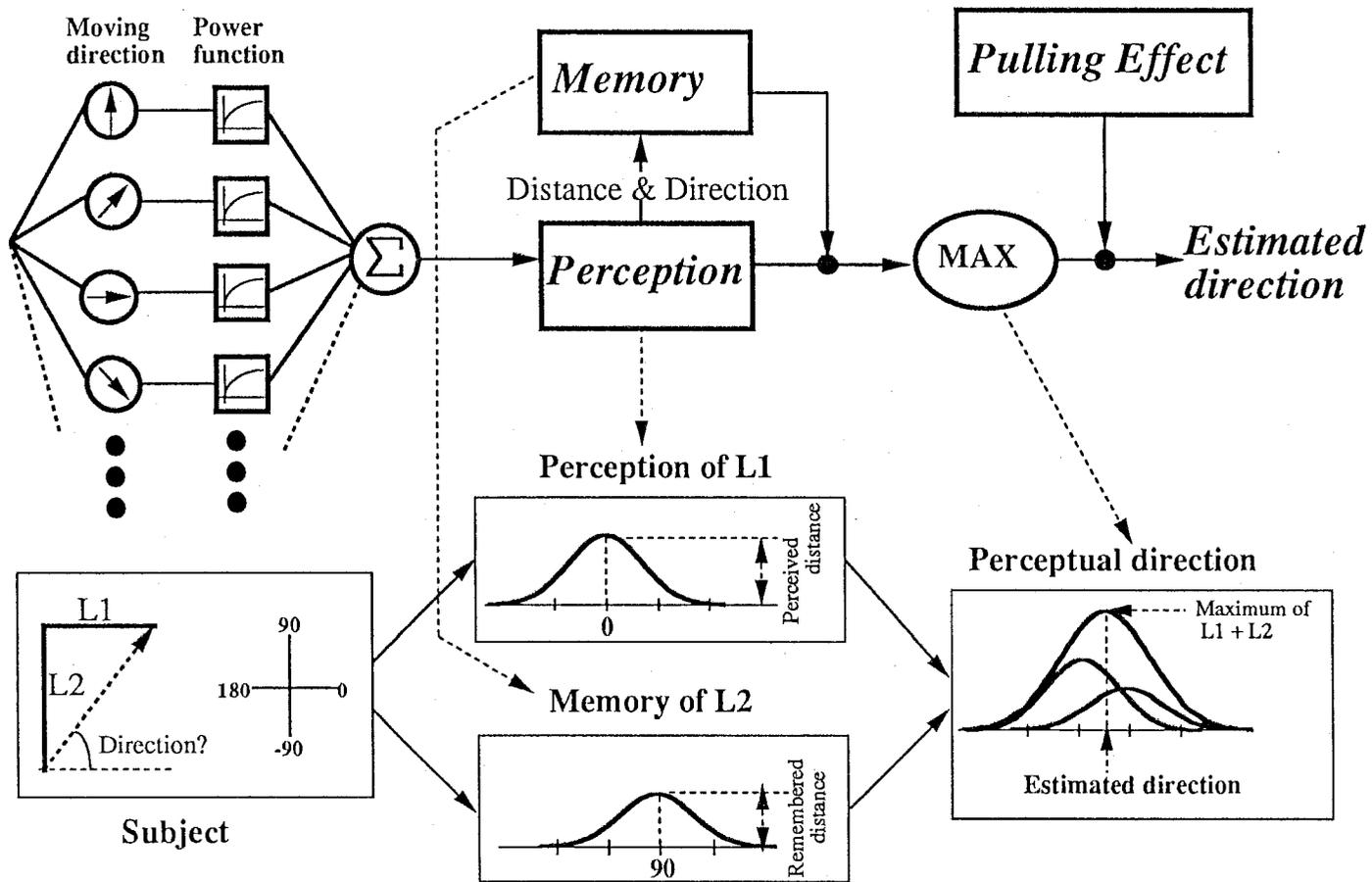


図12 評定距離組合せモデル

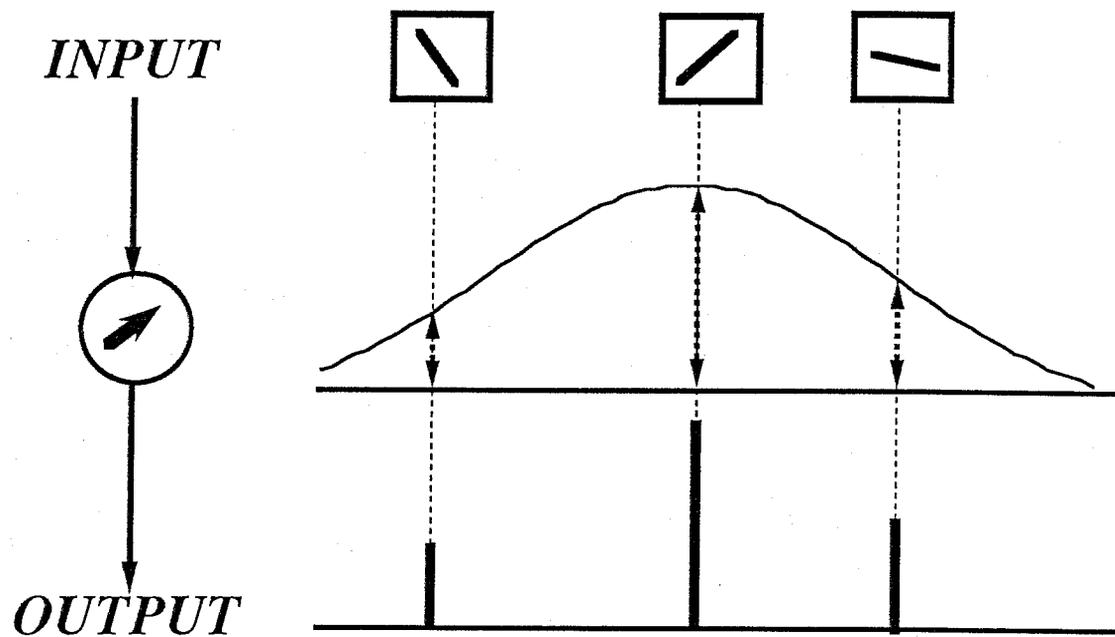


図13 線分方向に選択性を持つ細胞

Population coding

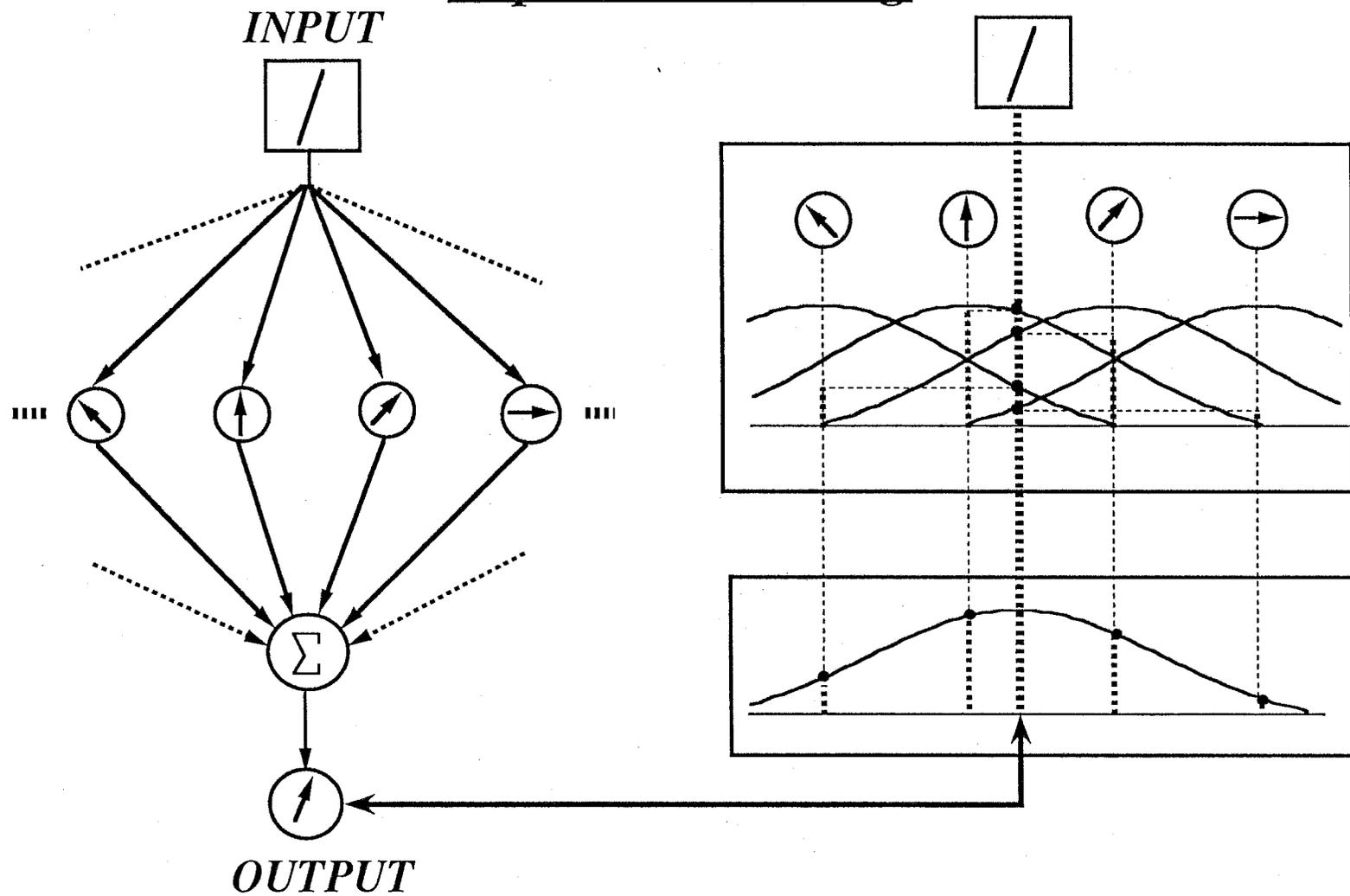


図14 ポピュレーション・コーディング

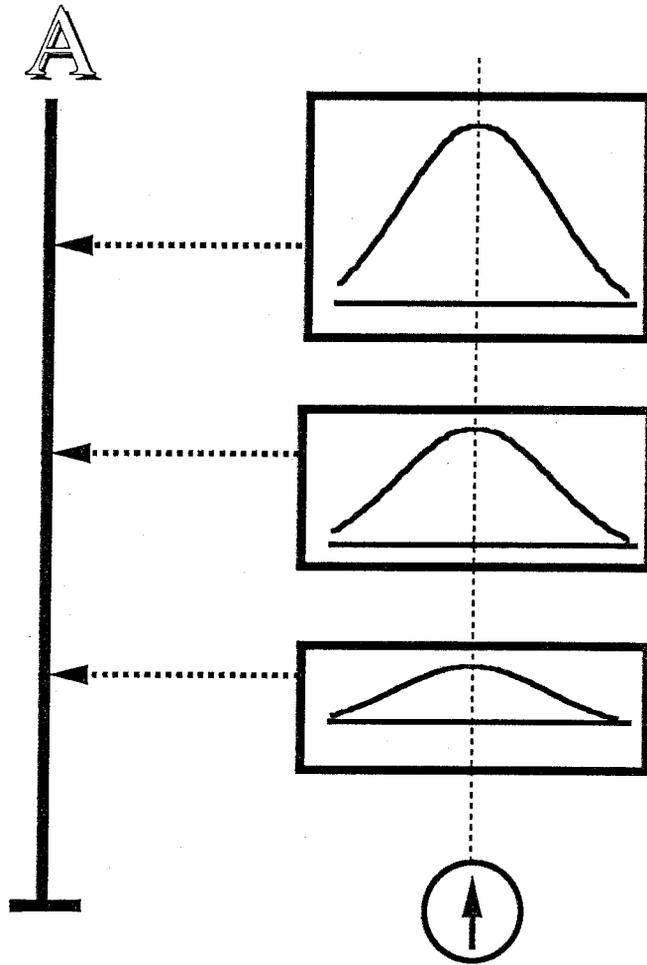


図15 移動方向に選択性を持つ細胞