

## 周辺の両眼視差情報と絶対距離知覚

金子寛彦\*・小阪朋也\*\*・内川恵二\*\*

\* (株) ATR 人間情報通信研究所

〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台2-2

\*\*東京工業大学 工学部 像情報工学研究施設

〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259

\*\*\*現所属：NTTヒューマンインタフェース研究所

〒180-0012 東京都武蔵野市緑町3-9-11

(受付 1997年8月11日；改訂受付 1998年1月5日；受理 1998年2月6日)

## Binocular disparity in periphery and the perception of absolute distance

Hirohiko KANEKO\*, Tomoya KOSAKA\*\* and Keiji UCHIKAWA\*\*

\*ATR Human Information Processing Research Laboratories

2-2 Hikari-dai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0288

\*\*Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology

4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8503

\*\*\*Present address: NTT Human Interface Laboratory

3-9-11 Midori-cho, Musashino-shi, Tokyo 180-0012

(Received 11 August 1997; Received in revised form 5 January 1998; Accepted 6 February 1998)

We investigated how differential perspective and binocular parallax in the peripheral visual field affects the perceived distance of the stimulus in the central visual field. Subjects responded the perceived distance of a circular test target in the center presented with a random-dot stimulus in the periphery, using the method of angle adjustment. The binocular parallax of the test stimulus target was fixed, and the binocular parallax and the differential perspective of the surround stimulus were manipulated. The results showed that the perceived distance of the test increased as the predicted distance from the binocular parallax of the surround stimulus decreased. The results also showed that the test distance increased as the predicted distance from the differential perspective of the surround stimulus increased even when the center and surround stimuli were separated in depth and that the effect of the differential perspective was mainly due to its horizontal disparity component.

## 1. はじめに

我々は、視覚情報を使って外界の対象物までの距離を知覚できる。例えば、我々は「机の上のコップは手を伸ばせば届く」とか「部屋の扉までは歩いて5歩くらい」とか「隣の家の扉まではボールを強く投げれば届く」といった感覚を持つ。このような、自分自身から対象までの距離の知覚を絶対距離知覚と呼ぶ。

絶対距離知覚に影響を与える可能性がある手がかりは数多くあるが、ここでは輻輳と調節による網膜像以外からの手がかり、および左右眼の網膜像差、特に differential perspective の手がかりについて考える。以下にそれぞれについて詳しく述べる。

両眼がある距離の対象を注視した場合、左右の視線がなす角度（輻輳角）と対象までの距離は一対一に対応している。このため、もし眼球の位置が正確にわかれば、対象物までの距離が理論的に計算できる。また、眼球の光学系が注視対象に正確にピントを合わせることができれば、このときの調節量から距離の情報が得られる。しかし、実際に輻輳と調節の情報が絶対距離知覚に寄与しているかどうかに関しては、必ずしも一貫した見解は得られていない。例えば、輻輳は距離知覚に寄

与しないことを示す実験結果<sup>7)</sup>がある一方、寄与するとしたものもある<sup>2,5)</sup>。後者でも、被験者間のばらつきが大きく、1～2 m以下の近い距離に限って輻輳が距離知覚に影響している。また調節に関して、輻輳と調節が矛盾する場合に、調節が距離知覚に与える影響はほとんどないことを示した研究<sup>9)</sup>がある一方、被験者によっては1 m以下の近い距離範囲で調節が距離知覚に寄与することを示した研究もある<sup>6)</sup>。これらの結果から、輻輳と調節は、条件や被験者によっては距離知覚にある程度の影響を与えるものの、距離知覚を生み出す確実な手がかりではないと考えられる。

絶対距離知覚に寄与しうる次の手がかりは differential perspective（特定の距離に対応する水平及び垂直視差の分布）である。ある点の垂直視差（垂直方向の相対視差）は方向と距離の関数になることが、理論的に示されている<sup>7,8)</sup>。これは、注視点の右（あるいは左）にある垂直線分は、右眼（あるいは左眼）までの距離が左眼（あるいは右眼）までの距離より短いため、左右眼に張る視角が同一ではないことを考えると直感的に理解できる。このためある点の距離は、その点の垂直視差と方向が決まれば一意に求められ、ある実際の平面が作り出す differential perspective は、その

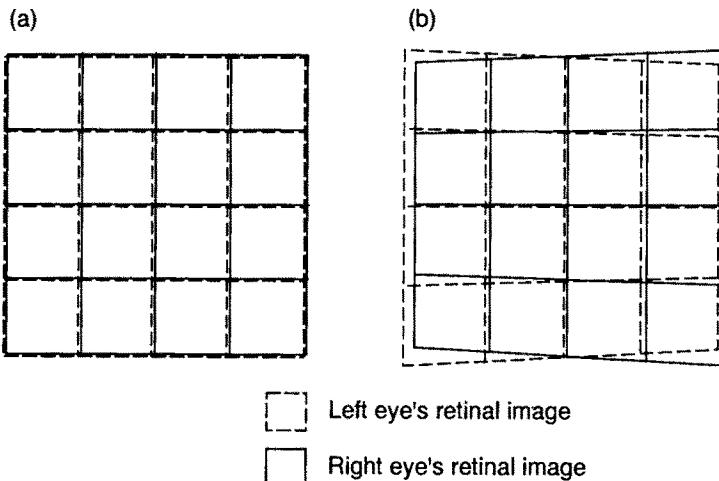


図1 (a) 無限遠にある平面と、(b) 近距離にある平面が、左右眼の網膜上につくりだす differential perspective のパターンの概略図。

面までの距離の情報になりうる。Differential perspective の概略は図1に示される。もし、無限遠にある額面平行面を観察した場合、左右の眼の像は同一になるが(図1(a))、近距離にある額面平行面を観察した場合には、図1(b)に示すような視差分布が生まれる。そして、この differential perspective が広い視野で与えられる場合に、それが距離知覚に影響を与えることが、単一の平面の刺激、口頭による応答を用いた実験で確かめられている<sup>13)</sup>。しかし、視野中に複数の奥行き位置の異なる面がある場合に、differential perspective がどのように距離知覚に影響を与えるかは明らかではない。また、differential perspective が観察対象の知覚的奥行きと知覚的大きさに影響することも報告されている<sup>9)</sup>。Differential perspective による知覚的奥行き及び大きさ変化の方向は、differential perspective から予想される絶対距離を用いて、奥行きと大きさの恒常性<sup>10)12)</sup>を保つ方向であった。この結果は、Differential perspective が絶対距離の手がかりになることを示唆するかもしれない。しかし、奥行きや大きさの恒常性を仮定することにより、それらの応答を絶対距離知覚の指標と考えることに関しては、慎重になる必要がある。それは、ある手がかり(今の場合は differential perspective) から直接的に奥行きや大きさが決まっている可能性があるからである。

Differential perspective が絶対距離知覚に影響を与えるとしたら、少なくとも二つの説明が考えられる。第一は、特定の距離に対応する differential perspective が抽出され、距離知覚を直接的に決定するという考え。第二は、距離によって異なる differential perspective によって刺激の知覚形状が変わり、相対的な関係から距離知覚が影響されるという考えである。近距離に呈示された平面が作る differential perspective の水平視差の成分(図1(b))は、画面の左右では中央に対して非交差視差を持っている。この水平成分から、視差ゼロの点を平面と仮定して奥行き形状を予想すると、図2(a)のように外側が奥に湾曲した面になる。この見えと奥行き同時対比効果から、図1(b)の differential perspective を持つ刺激を観察した場合に面の中心部に対する知覚距離が短くなるという実験結果<sup>13)</sup>の説明が可能である。しかし、図1(b)の differential perspective の垂直視差の成分から予想される奥行き形状は、図2(b)のように外側が手前に湾曲した面になる。これは、垂直大きさ視差と面の見えを調べた過去の研究から予想される<sup>14)</sup>。この見えと同時対比効果からは、面の中心部の知覚距離が長くなるという予想になり、過去の研究結果<sup>13)</sup>と矛盾する。また、図1(b)の differential perspective の水平と垂直視差の成分を合わせ持つ刺激から予想される見えは、図2(c)に示されるように、ほぼ平らな

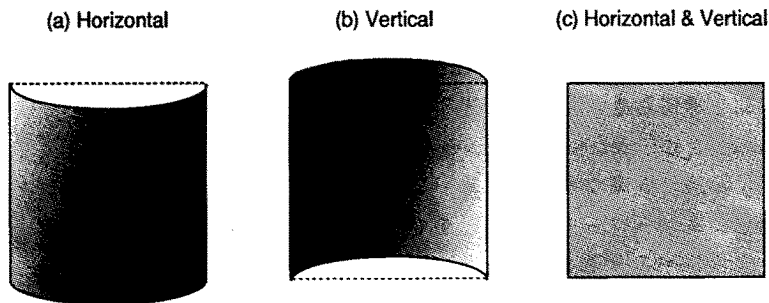


図2 近距離にある平面が網膜上につくりだす differential perspective の (a) 水平視差成分、(b) 垂直視差成分、(c) 水平及び垂直成分からそれぞれ予想される面の見えの概略図。視差ゼロの面が平面に知覚されると仮定した。

平面であろう。この見えからは、奥行き同時対比による知覚距離変化の説明は不可能である。

そこで本研究では、周辺に呈示される刺激の持つ両眼情報—differential perspectiveとbinocular parallax—が、中心に呈示される対象の距離知覚に及ぼす影響について調べ、特にdifferential perspectiveが奥行き位置の異なる他の対象の距離知覚にも影響を与えるかどうか調べ、differential perspectiveが距離知覚に与える影響に関する二つの説明、すなわちdifferential perspectiveからの直接的効果による説明と、面の見えと同時対比による説明、の妥当性を検討することを目的とした。実験では、視野の中心に呈示されるテスト刺激のbinocular parallaxは常に一定に保ち、周辺のdifferential perspectiveを変化させて、テスト刺激までの絶対距離知覚を測定した。この実験の結果、differential perspectiveは視野中の奥行き位置の異なる他の対象の距離知覚にも影響を与えることが確認された。また、differential perspectiveの絶対距離知覚への影響は、主にその水平視差成分によっていたが、単に面の見えと奥行き同時対比からは説明できないため、differential perspectiveを抽出するメカニズムの存在が示唆された。

## 2. 実験方法

被験者は、テスト刺激と周辺刺激からなる刺激を観察し、常にテスト刺激までの距離を応答した。刺激変数は周辺刺激のdifferential perspectiveとbinocular parallaxであった。実際の額面平行面をある距離に呈示した場合、binocular parallaxとdifferential perspectiveはともにその呈示距離に固有なものになる。これらの値は独立にコントロールすることができ、その方法は2.2節で述べる。実験では、テスト刺激が視野の中央に呈示され、そのbinocular parallaxは常に一定であった（比較実験を除く）。また、テスト刺激のdifferential perspectiveはそのサイズが小さいので定義さ

れない。この実験により、周辺に呈示される刺激の持つ、binocular parallaxおよびdifferential perspectiveの水平成分と垂直成分それぞれが、中心に呈示される刺激の絶対距離知覚に与える影響を調べた。

ここで言葉の定義について述べておく。外界のある対象点と左右眼の回転中心を結ぶ2本の線分のなす角度は一意に定まり、この角度はbinocular parallaxと呼ばれる。この角度は、眼球の位置に依存しないが、両眼が対象点を注視した場合は、両眼の輻輳角と等しくなる。Binocular parallaxは水平だけでなく垂直方向にも定義が可能であるが、今回は特に断らない限り水平方向の量を指すことにする。この定義はFoley (1991)<sup>15)</sup>による。Differential perspectiveは図1(a),(b)に示されるような、距離に固有な水平及び垂直方向の中央の点に対する相対視差の分布である。これは相対的な量であるため、眼球の位置に依存しない。

### 2.1 刺激および装置

刺激はステレオペアであり、左右の眼に呈示される二枚の画像はパソコンによって作られ、二台のプロジェクションモニターによって一枚のスクリーンに投影された。偏光板を

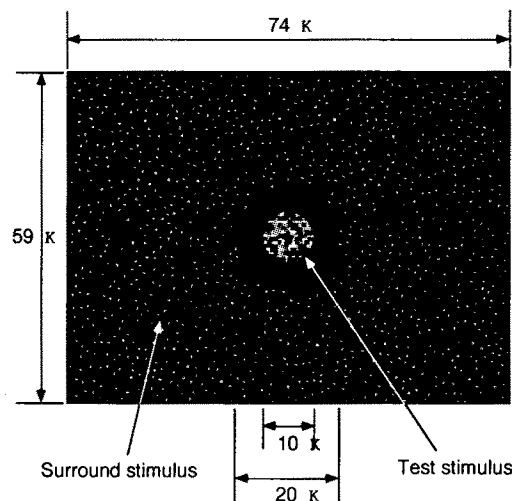


図3 刺激図。円形のテスト刺激と、ランダムドットからなる周辺刺激から構成される。

用いることにより、二枚の画像は左右の眼に分離して呈示された。主実験の刺激はテスト刺激と周辺刺激の二つの領域からなっていた(図3)。テスト刺激は視野の中心に呈示され、直径 10 deg の円形であった。テスト刺激の中心には黒の十字があり、その他の部分は濃淡のタイル模様であった。周辺刺激は黒地に白色のランダムドットからなり、ドットは、中心から直径 20 deg の円の外側で、縦 59 deg、横 74 deg の矩形の内側に分布していた。また比較実験の刺激は、円形のテスト刺激と暗黒の周辺からなっていた。スクリーンは被験者から 100 cm の距離にあり、画像全体のスクリーン上での実際の大きさは縦 113 cm、横 150 cm であった。各ドットは、直径は約 1 deg であり、ガウス型の輝度分布を持っていた。この輝度分布を変化させることにより、ドットの位置を 1/100 画素の単位で仮想的に調節することができた。これは視角 3 sec の解像度に相当した。画像は縦 786、横 1024 の画素を持っており、各画素は 256 段階のグレースケールを表現できた。刺激の最高輝度は 30.0 cd/m<sup>2</sup>、最低輝度は 0.02 cd/m<sup>2</sup> であった。

主実験ではテスト刺激の binocular parallax から計算される理論的距離は常に 100 cm であった。スクリーンまでの距離が 100 cm であったため、左右の眼に呈示されるテスト刺激の像は、常に画面上で重なっていた。テスト刺激を注視したときに得られる輻輳による情報は 100 cm を示すと考えられる。また、テスト刺激の直径が小さいことから differential perspective の影響は無視できると考えられる<sup>9,13,16-18</sup>。周辺刺激に、differential perspective と binocular parallax とを独立に変化させた視差パターンが導入された(後述)。Binocular parallax から計算される理論的距離は3種類(両眼間の距離は 6.5 cm とした場合、68, 100, 182 cm でそれぞれ 5.47, 3.72, 2.05 deg の binocular parallax に対応)、differential perspective の条件は、水平視差成分のみまたは垂直視差成分のみが変化するものと、二つ

の成分が伴って変化するものの3種類であった。Differential perspective から計算される理論的距離は5種類(52, 68, 100, 182, 1057 cm、それぞれの距離に対応する binocular parallax は 7.15, 5.47, 3.72, 2.05, 0.35 deg)を用いた。水平または垂直視差成分のみが変化する場合に、もう一方の成分の理論的距離は常に 100 cm (対応する binocular parallax は 3.72 deg) であった。比較実験ではテスト刺激の binocular parallax から計算される理論的距離は5種類(52, 68, 100, 182, 1057 cm、対応する binocular parallax は 7.15, 5.47, 3.72, 2.05, 0.35 deg) であった。

## 2.2 視差パターン

先に述べたように、周辺刺激の持つ両眼視差情報は binocular parallax と differential perspective の二つの成分に分けられる。本実験で使われたような実体鏡(3Dディスプレイ)を用いて、それらの成分を独立にコントロールする方法を以下に述べる。

まず、実物の対象物の作る両眼像を、ある一定の距離にあるディスプレイで再現する場

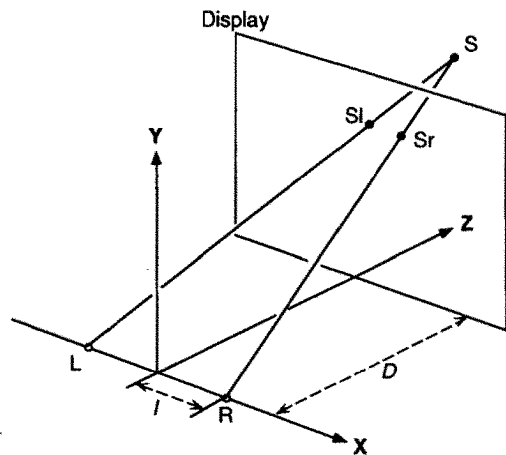


図4 実際の対象と、ステレオディスプレイ上のその対象の像位置との幾何学的な関係。R: 右眼、L: 左眼、S: 実際の対象点、Sr: 対象点のディスプレイ上での右眼像、Sl: 対象のディスプレイ上での左眼像、D: 眼とディスプレイの間の距離、l: 両眼間の距離の1/2。

合である。図4に示すように、両眼の間の点を原点とし、左右方向にx軸、上下方向にy軸、前後方向にz軸をとる。Rは右眼、Lは左眼、S(xo, yo, zo)は実際の対象物の座標、SrおよびSlはディスプレイ上での右眼像および左眼像の座標である。

直線RS, LSとディスプレイ面(Z=D)の交点を計算することにより、SrとSlが得られる。これは以下の式で示される。

$$\begin{aligned} S_r(x, y, z) &= (D x_o/z_o - I(D/z_o - 1), D y_o/z_o, D) \\ S_l(x, y, z) &= (D x_o/z_o + I(D/z_o - 1), D y_o/z_o, D) \end{aligned} \quad (1)$$

Dは原点から顔の向きと平行なディスプレイ面までの距離、Iは両眼間の距離の1/2である。この式によって作られる画像は、実際の対象物と同じbinocular parallaxとdifferential perspectiveを生み出す。

次にbinocular parallaxとdifferential perspectiveを、それぞれが異なる距離に対応するよう独立に変化させる方法である<sup>13)</sup>。ま

ず図5(a)に示すように左右方向にx軸、前後方向にz軸をとる(図4のxz平面)。ここでディスプレイ面上のパターンをbinocular parallaxは一定に保ったまま、differential perspectiveを異なる距離に対応するように変化させることを考える。このためには、ディスプレイ上の点S(xo, yo, zo)を固視点を含む鉛直軸を回転軸として左右眼像用にそれぞれ反対方向に、視線に対して垂直な面(点線)となす角が $\theta_s$ (differential perspectiveからの距離に対応するbinocular parallaxの1/2)になるように回転させ(S'r, S'l)、ディスプレイに投影される二点の座標(Sr, Sl)を求めればよい。簡略化のため、図には左眼用の像(Sl)しか描かれていない。このときbinocular parallaxに対応する距離は、スクリーンまでの距離(D)のままであるが、differential perspectiveに対応する距離は、図5(b)に示される距離Dsになる。これはディスプレイの中心を注視した場合、図5(a)のSr, Slが作る左

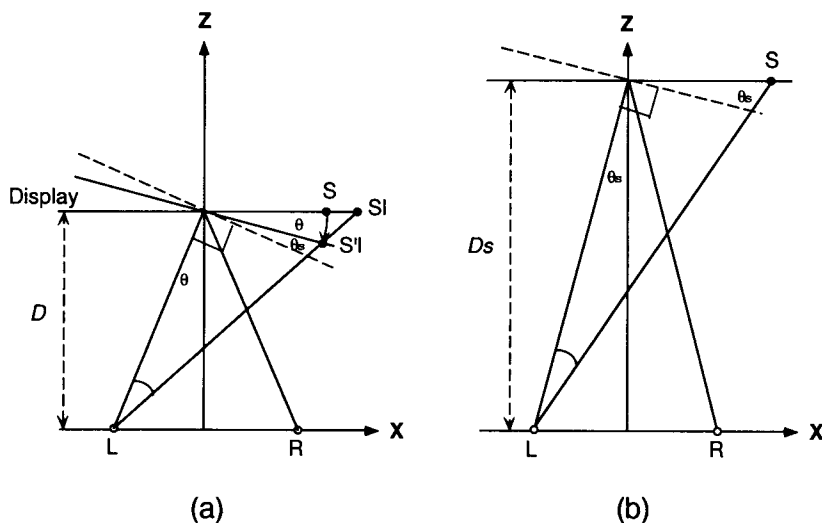


図5 Binocular parallaxとdifferential perspectiveに対応する距離が異なる刺激の作り方。(a)顔面平行面のbinocular parallaxに対応する距離をDに保ったまま、differential perspectiveに対応する距離をDsにする座標変換の原理図。(b)距離Dsにある顔面平行面を観察した場合の面と眼の幾何学的な関係。R: 右眼、L: 左眼、S: 実際の対象点、S'l: ディスプレイの鉛直軸時計回りに $\theta$ 回転した後のSの位置、Sl: 対象のディスプレイ上での左眼像、D: 眼とディスプレイの間の距離、Ds: differential perspectiveに対応する距離、 $\theta_d$ : 距離Dに対応するbinocular parallaxの1/2、 $\theta_s$ : 距離Dsに対応するbinocular parallaxの1/2、 $\theta: \theta_d - \theta_s$ 。

右の網膜像の位置が、図5(b)のSが作る網膜像と全く同じになるためである。また、直線R-SrとL-Slは、SがZ軸上にない限り交点を持たないので、このような視差を生み出す実際の対象はあり得ない。SrおよびSlは以下の式で与えられる(付録1)。

Sr(x,y,z)

$$= (D+I\theta) x_o / (D+x_o\theta), D y_o / (D+x_o\theta), D$$

Sl(x,y,z)

$$= (D+I\theta) x_o / (D-x_o\theta), D y_o / (D-x_o\theta), D$$

$$(\theta = \theta_d - \theta_s = I/D - I/D_s) \quad (2)$$

ただし、 $\theta_d$ はディスプレイの中心点のbinocular parallax(両眼で注視したときの輻輳角)の1/2、 $\theta_s$ は与えられるdifferential perspectiveからの理論的距離 $D_s$ に対応するbinocular parallaxの1/2である。Iは両眼間の距離の1/2である。またディスプレイまでの距離(D)、differential perspectiveからの理論的距離( $D_s$ )は両眼間の距離に対して十分に大きいとする。

### 2.3 応答方法

角度調整法という方法を考案し、これを絶対距離の応答に用いた。この方法は、被験者が、眼では観察されない指示棒をターゲット(テスト刺激)の中心位置に向けることにより、距離の応答とするものである。図6に示されているように、指示棒の回転軸Cと被験者の眼の位置が異なり、眼からターゲットへの方向が一定であれば、幾何学的には指示

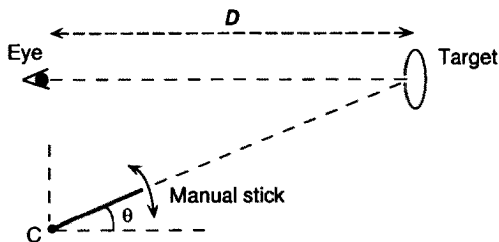


図6 角度調整法(指示棒の角度調整による絶対距離応答法)の原理図。D: 眼とターゲットの間の距離、 $\theta$ : 指示棒と水平軸のなす角度、C: 指示棒の回転中心。

棒の角度 $\theta$ がターゲットと眼との間の距離Dの指標になりうる。この幾何学的な関係が、知覚的にも成り立つかどうかは、付録2に示す評価実験により確かめられた。この実験では、距離情報が豊富な環境下で、いろいろな距離に置かれた実際の対象物の知覚距離を角度調整法により応答した。主実験で得られた角度のデータは、評価実験で各被験者毎に得られた $\theta$ とDの関係により距離に変換され、知覚距離として用いられた。

指示棒は、30 cmの長さがあり、顎の下約50 cmの位置に固定された水平軸の回りに水平から垂直まで90 deg回転させることができた。被験者は、指示棒を手で操作し、その先端がテスト刺激の中心(十字)を向くように調整した。角度の値は、ポテンショメータにより電圧に変換されパソコンに入力された。

### 2.4 手順

被験者は刺激を観察し、テスト刺激の絶対距離を角度調整法により応答した。観察時間は制限されていなかったが、1トライアルに通常10秒ほどの時間を要した。その後画面から刺激が消え、約2秒後に次の刺激が呈示された。また、刺激を観察する場合に眼球運動は特に制限されていなかった。被験者は、各トライアルごとに指示棒を水平に戻してから調整を始めた。各被験者毎に、異なる50種類の条件(本実験: {3(周辺刺激のbinocular parallax) × 5(differential perspectiveの値) × 3(differential perspectiveの条件: 水平のみ, 垂直のみ, 水平+垂直)} + {比較実験: 5(テスト刺激のbinocular parallax: 52, 68, 100, 182, 1057 cm)})がランダムに8回づつ呈示された。4人の被験者が実験に参加し、うち3人の被験者は視力矯正をして実験を行った。また、被験者全員が通常の立体視機能を有していること(27秒の両眼比対応を検出可能)を確かめた。被験者の頭は顎台によって固定された。装置の周辺は暗幕でおおわれ、被験者か

らスクリーン上の刺激以外のものは見えなかった。

### 3. 結果

図7, 8に4人の被験者の平均の結果を示す。図7はテスト刺激と暗黒の背景からなる刺激(比較実験)に対する結果, 図8はテスト刺激とランダムドット周辺刺激からなる刺激に対する結果である。横軸は, 図7ではテスト刺激の binocular parallax (下段) とその理論的距離(上段), 図8では周辺刺激の differential perspective からの理論的距離であり, 上段に距離(cm), 下段にその距離に対応する binocular parallax (deg) が示される。縦軸は応答距離を示すが, これは角度調整法により得られた角度値を, 予備実験の結果を用いて被験者毎に距離値に変換し平均したものである。右側の軸には距離(cm), 左側の軸にはその距離に対応する binocular parallax (deg) が示される。図8の(a), (b), (c)はそれぞれ, differential perspective の水平と垂直成

分, 水平成分のみ, 垂直成分のみが変化する刺激に対する結果である。また, シンボルは周辺刺激の binocular parallax の違いを示す。誤差棒は標準誤差を示す。

図7から明らかなように, テスト刺激と暗黒の背景からなる刺激を用いた場合, テスト刺激の binocular parallax からの理論的距離の増加に伴って知覚距離も増加した。この結果は統計的にも有意であった ( $F_{4,12} = 15.73, p < 0.01$ )。この結果から, テスト刺激を注視したときに得られる輻輳の情報が距離知覚に影響を及ぼすことが示唆される。

次にテスト刺激は一定で, 周辺刺激の binocular parallax と differential perspective が変化する場合である(図8)。まず, 水平と垂直成分(a), 水平成分のみ(b), 垂直成分のみ(c)の条件全てで周辺刺激の binocular parallax から予想される理論的距離が増加するにつれて, テスト刺激までの知覚距離が減少した。また, (a)と(b)の条件では, differential perspective から予想される理論的距離が増加するにつれて, テスト刺激の知覚距離は増加した。そしてこの効果は, 水平と垂直成分の条件(a)と, 水平成分のみの条件(b)でほとんど差がない。一方, 垂直成分のみの条件(c)では differential perspective がテスト刺激の知覚距離に与える効果は見られなかった。これらの結果は, 統計的に確かめられた。Binocular parallax の効果は(a), (b), (c)の条件で統計的に有意であった((a):  $F_{2,6} = 13.77, p < 0.01$ , (b):  $F_{2,6} = 14.94, p < 0.01$ , (c):  $F_{2,6} = 16.48, p < 0.01$ )。Differential perspective の効果は, 水平と垂直成分(a)と水平成分のみ(b)の条件では統計的に有意であったが((a):  $F_{4,12} = 10.19, p < 0.01$ , (b):  $F_{4,12} = 10.16, p < 0.01$ ), 垂直成分のみ(c)の条件では有意差はなかった( $F_{4,12} = 0.67, p = 0.63$ )。これらの傾向は, 異なる binocular parallax の条件を個別に見た場合でも確認された。また, binocular parallax と differential perspective の交互作用は, (a), (b), (c)の全ての条件で, 5%水準では有意で

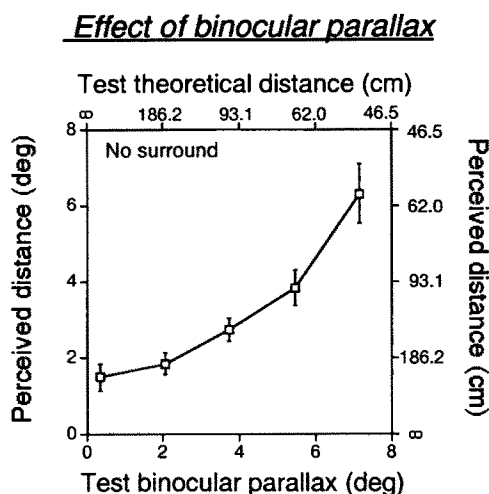


図7 比較実験の結果。横軸はテスト刺激の binocular parallax (下段) およびその理論的距離(上段)。縦軸はテスト刺激に対する知覚距離であり, 距離(右軸)およびその距離に対応する binocular parallax の値(左軸)が示される。



はなかった (a) :  $F_{8,24} = 2.20, p = 0.07$ , (b) :  $F_{8,24} = 2.13, p = 0.07$ , (c) :  $F_{8,24} = 1.41, p = 0.24$  . 次に 3 要因の分散分析により, 水平と垂直成分 (a) と水平成分のみ (b) の条件で, differential perspective の距離知覚への影響に差があるかどうか調べた. この結果, それらの条件の効果, および条件の効果と differential perspective の効果の交互作用は, 5%水準では確認されなかった (条件の効果 :  $F_{1,3} = 0.75, p = 0.80$  ; 条件 x differential perspective :  $F_{4,12} = 2.79, p = 0.08$  ) .

#### 4. 考察

本実験から, 対象の知覚距離はその対象自身が持つ binocular parallax だけでなく, その周辺に呈示される刺激の binocular parallax と differential perspective にも影響されることがわかった. 以下に, binocular parallax と differential perspective の影響についてそれぞれ詳しく述べる.

#### 4.1 Binocular parallaxの影響

冒頭で述べたように, 対象それ自体の binocular parallax は, 観察者からその対象までの距離情報になりうる. そして本実験の結果 (図 7) は, 刺激の binocular parallax により知覚距離が影響されることを示している. 次に問題となるのは, 刺激の binocular parallax が人間の側でどのような情報として捕らえられているかということである. 一つの可能性は眼球の輻輳位置に起因する網膜像以外の情報, もう一つの可能性は網膜像差による情報である. 本実験 (図 7) では, テスト刺激以外は何も呈示されず, 画面の枠も視野の周辺にあり (左右 37 度, 上下 30 度), 実験室内も暗黒に保たれた. すなわち, テスト刺激と網膜像差を持つような刺激は極力排除されるように注意が払われた. このため, 本実験のように観察時間が制限されていない場合には, 眼球位置に起因する網膜像以外の情報, すなわち輻輳の情報が捕らえられている可能

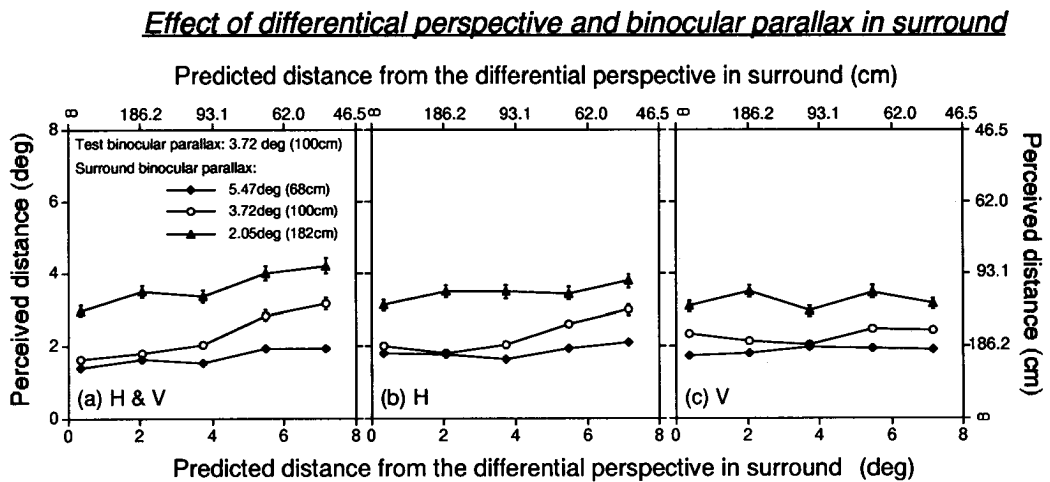


図 8 主実験の結果. 3つのパネルはそれぞれ, 周辺刺激のdifferential perspectiveの, (a)水平および垂直成分, (b)水平成分のみ, (c)垂直成分のみ, が操作された条件の結果を示す. 横軸は, 周辺刺激のdifferential perspectiveからの理論的距離(上段)およびその距離に対応するbinocular parallaxの値(下段). 縦軸はテスト刺激に対する知覚距離であり, 距離(右軸)およびその距離に対応するbinocular parallax(左軸)が示される. シンボルは, 周辺刺激のbinocular parallaxおよびその理論的距離を示す.

性が高いと言える。しかし、本実験で統制しきれなかった周囲の刺激、画面上のテクスチャーや観察者自身の鼻などとテスト刺激との網膜像差、あるいは、輻輳安静位におけるテスト刺激の絶対視差の影響を十分考慮した実験を行って、結論を下すべきだと思われる。

ある対象の周囲の binocular parallax は、幾何学的にはその対象自身の絶対距離の情報にはなり得ない。しかし本実験の結果から、周辺刺激の binocular parallax が中心のテスト刺激の絶対距離に影響することが確認された。周辺刺激がテスト刺激より遠くに知覚される場合は、テスト刺激の知覚距離は近くなり、周辺刺激が近い場合はテスト刺激の知覚距離は遠くなった。これは、いわゆる前後方向の奥行き同時対比効果<sup>19)</sup>から説明ができる。通常この効果は、同じ binocular parallax を持つ二つの刺激を、周辺にそれぞれ交差視差と非交差視差を与えて同時に比較した場合に、それら二つの中心刺激の奥行きの違いとして示されるが、本研究の結果は、中心と周辺からなる一組を単独で観察した場合でも、中心刺激の絶対距離の応答の変化として示されることを明らかにした。また、奥行きの同時対比効果の定量的な評価を行ったことにより、この現象には前後方向の非対称性があることが観察された。図8の多くの場合で、周辺刺激と中心刺激の間の両眼視差量が（ほぼ）同じならば、周辺が中心より遠い場合（▲）の方が、周辺刺激が近い場合（◆）より奥行き同時対比効果が大きいことがわかる。そして、統計的には有意ではなかったが、図8から奥行き同時対比効果と differential perspective の効果の間に、若干の相互作用があることも観察される。

絶対的な距離知覚が相対的な刺激配置に影響を受けるという事実は、興味あるものである。この問題をさらに理解するためには、今回用いた二つの面を持つ単純な刺激だけでなく、観察者からの距離の異なる多くの面を

持った刺激を用いて実験を行うことが重要であると思われる。このような刺激を統制するのは非常に難しいが、実際の環境における対象までの距離知覚を調べるためには必要であろう。

#### 4.2 Differential perspective の影響

本文の冒頭で述べたように、ある距離に呈示された平面が作り出す differential perspective は、観察者からその面までの絶対距離の情報になりうる<sup>7,8)</sup>。そして、刺激が小さい場合には、differential perspective が奥行き知覚に影響しないが<sup>17,18)</sup>、その分布が広い視野範囲に広がる場合には、その情報が確かに奥行き知覚に影響することが示されている<sup>9,13,16)</sup>。しかし、その differential perspective が距離知覚それ自体に影響することを示したのは Rogers と Bradshaw (1995)<sup>19)</sup> の論文の付録に記載された補足的な報告だけである。彼らは、一枚の平面からなる刺激と口頭による応答により、視差分布から予想される距離と知覚距離が、ほぼ直線の関係をもつことを示した。本研究の結果は、基本的に彼らの結果を支持するものであるが、単一平面ではない刺激に対しても、視差分布が視野の他の部分の距離知覚に影響を及ぼすことを新たに示した。本実験のように、テスト刺激と周辺刺激の binocular parallax が異なりそれらの見えの奥行きが異なるとき、周辺の differential perspective を変化させた場合に、differential perspective のテスト刺激の距離知覚への影響の方向は二つの可能性が考えられた。一つはテスト刺激の知覚距離が周辺刺激の differential perspective から予想される距離の変化と反対方向に変化するという予想である。これは binocular parallax が距離知覚に与える影響と同じ方向である。もう一つは differential perspective からの距離の変化と同方向に変化するという予想である。結果は後者であった。

また、本研究から differential perspective の距離知覚へ与える効果は、その水平方向の成

分からの効果からほぼ説明され、その垂直方向の成分単独の効果は確認できなかった。ただ、*differential perspective* の効果が、水平と垂直成分を持つ場合と水平成分のみを持つ場合で変化が見られなかったこと、また垂直成分のみを持つ場合で反対方向の効果は見られなかったことから、単に面の見え（と奥行き同時対比）からは結果の説明はできない。なぜなら、*differential perspective* の垂直成分のみを持つ刺激を観察した場合、*differential perspective* の水平成分のみを持つ刺激を観察したときに知覚される面の湾曲（図2(a)）と反対方向の面の湾曲（図2(b)）が知覚されることが報告されており<sup>14)</sup>、また *differential perspective* の水平および垂直成分をもつ刺激を観察した場合には、面はほぼ平らに知覚される（図2(c)）からである。すなわち、面の見えと知覚距離の変化は対応していない。このことから、視野の広い範囲から抽出される特定の *differential perspective* が、視野全体の距離知覚に影響する可能性が示唆される。

いずれにしても、それ自体の *binocular parallax* は変化のない中心刺激に対する知覚距離が、周辺の刺激の視差情報に影響を受けるという事実は、視差の相対的な分布により視野全体の距離知覚の基準位置を調整するプロセスがあることを示唆するのではないだろうか。例えば、視覚系が環境の明るさに応じて順応して個々の対象の明るさを知覚するように、である。もしこの考えが正しければ、次に解決しなければならない問題は、観察者から異なる距離に対象が無数に存在する実際の状況で、*binocular parallax* と *differential perspective* がどのように抽出、解釈され、距離知覚に影響するかということである。

## 5. まとめ

本実験の結果から、ある対象の知覚距離は、その対象それ自体が持つ *binocular parallax* のみならず、周辺に呈示される刺激の *binocular parallax* と *differential perspective* に

も影響されることが確認された。周辺の *binocular parallax* は、中心刺激の知覚距離を周辺の刺激から遠ざける方向に変化させた。一方、周辺の *differential perspective* は、中心刺激の知覚距離を、周辺刺激と同方向に移動させるように変化させた。そして、周辺刺激の *binocular parallax* と *differential perspective* の中心刺激の知覚距離に与える効果は、ほぼ足し合わされていた。そして *differential perspective* の効果は、主にその水平視差成分によるものだったが、単に面の見えと奥行き同時対比効果からは説明できないため、特定の *differential perspective* が距離知覚に影響を与えていることが示唆された。また、テスト刺激の *binocular parallax* もテスト刺激の知覚距離に影響を及ぼした。そしてその知覚距離の変化の方向は、*binocular parallax* から予想されるものであった。

これまで、両眼視情報から決まるある点の知覚的空間位置は、その点の情報から一意的に決まると一般に信じられてきたように思われる。しかし、これまで述べてきたように、ある対象の知覚距離は、周辺刺激の両眼視情報に大きく影響を受ける。これは幾何学的には説明できない。そこで、今後の両眼立体視の研究では、いろいろなパターンの視差の分布と奥行き知覚の関係を明らかにすることが重要である。この問題を明らかにすることは、効率的な立体画像の圧縮、臨場感のある立体画像の作成など、立体視に関連した工学分野を発展させるためにも非常に有効であると思われる。

## 謝辞

研究を進める際に多くの助言をして下さり被験者としても実験に参加していただいた、ATR 人間情報通信研究所の宇和伸明氏、奈良先端科学技術大学院大学の福永克巳氏に感謝いたします。また、有益なコメントをして下さった査読者の方々に感謝いたします。

## 文 献

- 1) C. W. Crannel and G. Peters: Nomocular and binocular estimations of distance when knowledge of the relevant space is absent. *Journal of Psychology*, 76, 157-167, 1970.
- 2) H. W. Leibowitz and D. Moore: Role of changes in accommodation and convergence in the perception of size. *Journal of the Optical Society of America*, 56, 1120-1123, 1966.
- 3) J. D. Morrison and T. C. D. Whiteside: Binocular cues in the perception of distance of a point source of light. *Perception*, 13, 555-566, 1984.
- 4) 金子寛彦, 内川恵二, 池田光男: 輻輳による距離知覚と大きさ知覚の比較. *光学*, 20, 285-293, 1991.
- 5) W. Richard and J. F. Miller: Convergence as a cue to depth. *Perception and Psychophysics*, 5, 317-320, 1969.
- 6) S. K. Fisher and K. J. Ciuffreda: Accommodation and apparent distance. *Perception*, 17, 609-621, 1988.
- 7) J. E. W. Mayhew and H. C. Longuet-Higgins: A computational model of binocular depth perception. *Nature*, 297, 376-378, 1982.
- 8) B. Gillam and B. Lawergren: The induced effect, vertical disparity and stereoscopic theory. *Perception and Psychophysics*, 34, 121-130, 1983.
- 9) B. J. Rogers and M. F. Bradshaw: Vertical disparity, differential perspective and binocular stereopsis. *Nature*, 361, 253-255, 1993.
- 10) J. M. Foley: Binocular distance perception: Egocentric distance tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11, 133-149, 1985.
- 11) J. M. Foley: Binocular distance perception. *Psychological Review*, 87, 411-433, 1980.
- 12) 東 巧, 中溝幸夫: 輻輳と網膜像差と知覚された奥行きの関係. *Vision*, 8, 87-95, 1996.
- 13) B. J. Rogers and M. F. Bradshaw: Disparity scaling and the perception of front-parallel surfaces. *Perception*, 24, 155-179, 1995.
- 14) H. Kaneko and I. P. Howard: Spatial limitation of vertical-size disparity processing. *Vision Research*, 37, 2871-2878, 1997.
- 15) J. M. Foley: Binocular space perception. D. Regan (ed): *Binocular vision*. Macmillan, London, 75-92, 1991.
- 16) M. F. Bradshaw, A. Glennerster and B. J. Rogers: The effect of display size on disparity scaling from differential perspective and vergence cues. *Vision Research*, 36, 1255-1264, 1996.
- 17) B. G. Cumming, E. B. Johnston and A. J. Parker: Vertical disparities and perception of three-dimensional shape. *Nature*, 349, 411-413, 1991.
- 18) E. C. Sobel and T. S. Collett: Does vertical disparity scale the perception of stereoscopic depth? *Proceedings of the Royal Society of London B*, 244, 87-90, 1991.
- 19) M. Graham and B. J. Rogers: Simultaneous and successive contrast effects in the perception of depth from motion-parallax and stereoscopic information. *Perception*, 11, 247-262, 1982.

### 付録 1. Binocular parallax と differential perspective を独立に変化させる場合の座標の計算

Binocular parallaxに対応する距離を一定に保ったまま, differential perspectiveに対応する距離を独立に変化させるには, まず距離 Dにある平面上の点を, 右眼像を計算するためには反時計回り (+ $\theta$ ), 左眼像を計算するためには時計回り (- $\theta$ ) に固視点を通る垂直軸を中心に回転させる (図 5 (a)). そして, それらの点とそれぞれの眼を結ぶ線分 (R-Sr, L-Sl) と, ディスプレイ面 (z=D) との交点を計算する.  $\theta$  はディスプレイの中心点の binocular parallax の 1/2 ( $\theta d$ ) と, differential perspectiveによって示される距離 (Ds) に対応する binocular parallax の 1/2 ( $\theta s$ ) との差である.

ディスプレイ平面上の点 S(xo, yo, D) は固視点を通る垂直線分の回りの回転変換により, 左右眼用の点それぞれ

$$\begin{aligned} S'r(x, y, z) &= (x_0 \cos(\theta), y_0, x_0 \sin(\theta) + D) \\ S'l(x, y, z) &= (x_0 \cos(\theta), y_0, -x_0 \sin(\theta) + D) \\ (\theta &= \theta d - \theta s = I/D - I/D_s) \end{aligned}$$

となる。

これらの点を左右眼それぞれと結ぶ線分と、ディスプレイ面との交点の座標は、

$$Sr(x, y, z) = ((D \cdot x_0 \cos(\theta) + I \cdot x_0 \sin(\theta)) / (x_0 \sin(\theta) + D), D \cdot y_0 / (x_0 \sin(\theta) + D), D)$$

$$Sl(x, y, z) = ((D \cdot x_0 \cos(\theta) + I \cdot x_0 \sin(\theta)) / (-x_0 \sin(\theta) + D), D \cdot y_0 / (-x_0 \sin(\theta) + D), D)$$

となる。また、DはIに比べて十分に大きいとすると  $\sin(\theta) = \theta$ ,  $\cos(\theta) = 1$  となり、ディスプレイ上の左右眼像の座標（本文中（2）式）が得られる。

## 付録2. 角度調整法の精度

絶対距離知覚手がかりの豊富な環境で、角度調整法の評価実験を行った。被験者は、幅2m、高さ3m、長さ21mの廊下に置かれた7種の距離（50, 60, 75, 100, 146, 274, 2030cm）の実際の指標に対し、角度調整法によって絶対距離を応答した。各距離9回の応答を行い、その平均値と実際の距離との関係を双曲線関数で最小二乗フィッティングを行った。本実験に参加した4人の被験者が、この実験を行った。

図9に各被験者毎の結果を示す。横軸は被験者が調整した指示棒の角度、縦軸は指標までの実際の距離である。誤差棒は標準偏差を示す。また、図中にフィッティングによる曲線と

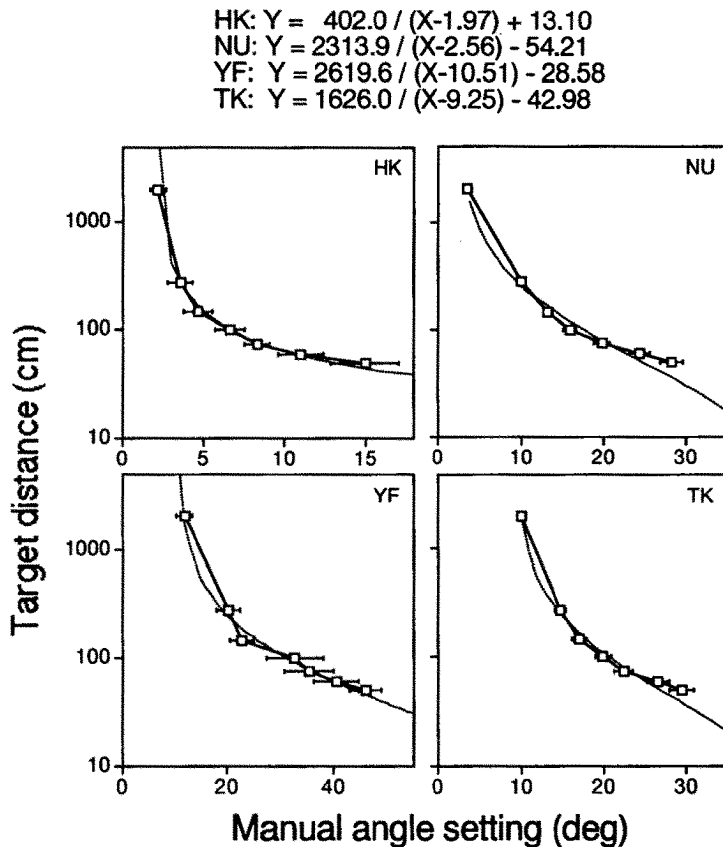


図9 各被験者毎の角度調整法の評価実験の結果。実空間に置かれたターゲットの距離（縦軸）と各被験者が調整した指示棒の角度（横軸）の関係を示す。誤差棒は標準偏差を示す。点線は、結果にフィットされた双曲線関数であり、その式はグラフの上方に示される。

式も示されている。このグラフより、被験者が調整する指示棒の角度が対象の距離によって変化していることがわかる。図10に、図9のフィッティング関数を使って角度の値を距離に変換し、実際の距離に対してプロットしたグラフを示す。ここで、実際の距離が2030 cmの場合に測定距離が負になる場合が生じたが、それらのデータはグラフには含まれていない。このグラフより、この方法で得られた測定距離と実際の距離との関係が傾き1の直線でほぼ表されること、距離が近い場合は測定誤差は小さいが距離が遠くなると距離変化に対応する角度変化が小さくなるために測定誤差が大きくなることがわかる。以上の検討により、この角度調整法が近距離の範囲では絶対距離の応答として有効であることがわかる。主実験では、各被験者毎に図9の関数を用いて角度データを距離に変換した。

従来、距離応答として、口頭で距離を答える口頭法と、実際に手で指標の位置を指し示す指さし法が使われる場合が多いが<sup>10-13)</sup>、今回使われた角度調整法は、口頭法に比べ過去の応答によるバイアスが少なく、指さし法より遠距離の範囲（～3 m）でも有効であると思われる。

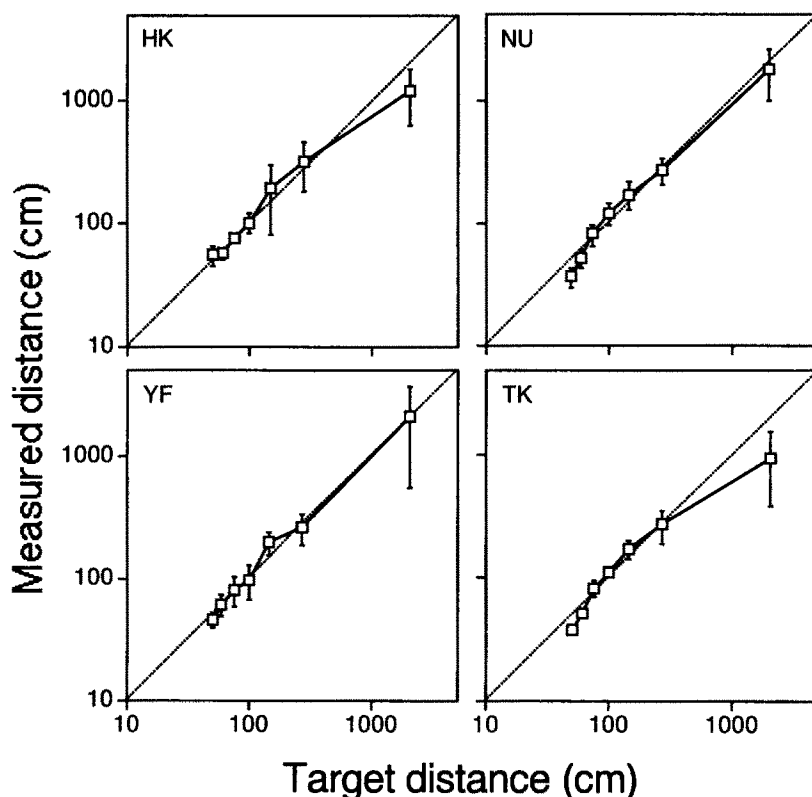


図10 各被験者毎の角度調整法の評価実験の結果。ターゲットの実際の距離（横軸）と、各被験者が調整した指示棒の角度と図9に示す式から得られた測定距離（縦軸）との関係を示す。誤差棒は標準偏差であり、点線は傾き1の直線を示す。