

# 視覚歪み空間論の提案

——主観的透視投影法による高度心象画像の生成——

梶 谷 哲 也\*

## A Proposition for The Visual Skew Space Theory

——Generation of Perspectives of Image Space Through Subjective Perspective Transformation——

Tetsuya KAJITANI\*

**要 旨** 本文では、視覚歪み空間論にしたがって、三次元空間を前処理する主観的透視投影法を報告する。本手法は、人間が自然な状態で誘起される心象に、単点透視投影図から誘起される心象を少しでも近づけることを目的としている。既に、物理的な大きさと心理的な大きさとの比（歪み率）を定量化する画像比較法（ICM）を提案し、それによって測定した歪み率を基に生成した単点透視投影図は、高度心象画像であることを実験的に検証した。さらに、局所的な歪み率の分布、それらの相互作用、および視点からの距離に関する相似性を検討した。

本報告では、新たに視空間ポテンシャル論を導入し、それに基づいて、空間全体にわたる歪み率を一義的に定める視覚歪み空間論を提案する。さらに、画像比較法によって奥行き方向に関する特性を考慮した心象空間を定義する。この定義によって、心象空間を二次元画像化することが可能となった。

キーワード：視覚歪み空間論，視空間ポテンシャル，画像比較法，奥行き知覚変換，高心象画像，主観的透視投影法

### 1. は じ め に

次世代の中心的な動画像符号化方式の一つと考えられるMPEG4（7および21）では、仮想視点から二次元画像を生成する機能を情報の復号化側の機能とし、符号化側はそのため必要となる三次元の情報（三次元オブジェクトとオブジェクト同士の関係に関する記述）をインタラクティブに復号化側に提供する。このことによって、復号化側が独立して三次元空間の情報を仮想視点からの二次元画像とすることを可能とした。さらに、復号化側に三次元空間に関するすべての情報がインタラクティブに提供される。加えて、三次元空間の構成、仮想視点の設定条件、視点からの画角などを符号化側とは

独立に選択/設定することが可能になった。ところが、人が自然な状態で両眼立体視によって三次元空間から誘起される心象（induced image）は、単眼に相当する視点から生成された既存の単点透視投影図から誘起される心象とは異なることがある。一方、MPEG4によって三次元空間を二次元画像に変換する方法は、基本的に、既存の単点透視投影法を採用しているために前述の差異や、観察者個人の主観的な個性（特徴）に対応することが困難な場合がある。

そこで、本報告では、人間が自然な状態で誘起される心象に、単点透視投影図から誘起される心象を少しでも近づけることを目的として、単点透視投影変換適用以前の三次元空間に視覚歪み空間論にしたがった前処理（知覚変換）をする主観的透視投影法を提案する。視空間歪み論では、観察対象を実空間から、視覚歪み空間

\* 本学助教授 知識工学，情報システム学

へ投影し、その空間上で単点透視投影図を生成する。その結果、生成される単点透視投影図は、従来より観察者にとって違和感の少ない心象を誘起するものと考えられる。ここで、この二次元画像を「高度心象画像」とする。また、その画像の生成手法全体を主観的透視投影法とする。

本文では、まず、視空間ポテンシャルを用いた視覚歪み空間論について報告する。次に、その根拠となる一連の実験とその結果の考察を行う。さらに、実空間で高度心象画像を生成するための前処理としての奥行き知覚変換について述べる。最後に、本論の有効性を実践的に検証するための予備実験の結果と、その結果から期待される内容について報告する。

## 2. 本研究の目的と主観的透視投影法の基本的な枠組み

人間が自然な状態（両眼立体視）で対象から受ける心象<sub>1</sub>（induced image）を視覚的自然認識系によるものとする。ところが、同じ対象でも受ける心象は写真のように二次元画像に変換する古典的透視投影術による心象<sub>2</sub>とは異なることがある。その例として、水平線上にある満

月の大きさをあげる事が出来る。月の大きさだけであれば、オブジェクトである月の大きさを大きくすればその場の問題は解決する。しかし、その体系的な方法論に関しては十分な検討がなされているとは言い難い。

そこで、人間の対象観察機能を近似的に線形システムと考え、古典的透視投影術を適用する前に、視覚歪み空間論にしたがった前処理を行うことにより、最終的に得られる心象<sub>3</sub>を視覚的自然認識系による心象に近似させることを目的とした透視投影法（主観的透視投影術）を提案する（図1）。

なお、人間の主観的な空間認識過程と考えられる前処理を、人間の主観的な空間認識過程である空間の心理的変形（知覚変換）と生理・物理的要因による視覚特性変換（視覚変換）の2変換に分解した。すなわち、現実空間対象（real object）を知覚変換と視覚変換とにより変換した後に、既存の古典透視投影術の単点透視投影変換（二次元画像化変換）を行うものとする。ただし、本文では知覚変換のみについて述べる。以下、人間の心理的変形（知覚変換）は、視覚歪み空間論に従ってなされるとする。

### 2.1 視覚歪み空間論

視覚歪み空間論は、対象の位置情報とその大

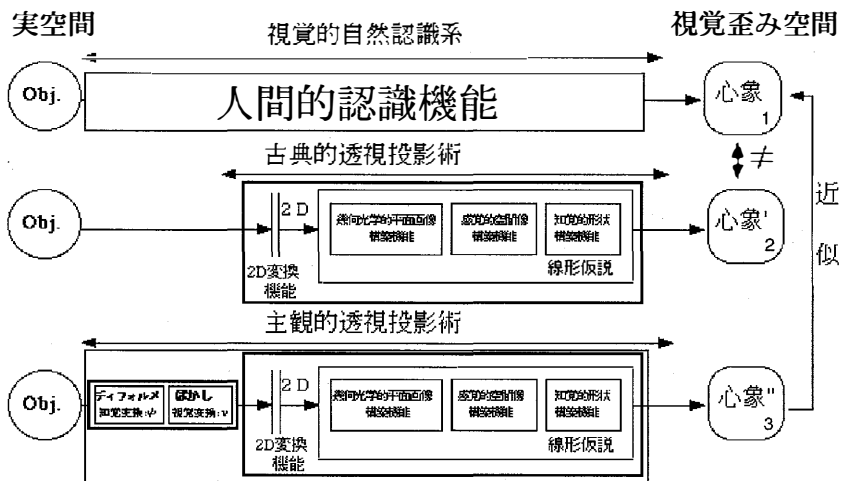


図1 本研究の目的と主観的透視投影法の基本的な枠組み

きさ（倍率）のみを対象とする。視覚歪み空間論を用いた、高度心象画像の具体的な生成手順は、以下のようなものである。

まず、実空間（real space）内にある対象（real object）を視覚歪み空間（visual skew space）へ写像（mapping）し、心象対象（image object）とする。なお、その時の対象と心象対象との大きさの比の量（歪み率：skew ratio;  $S_r$ ）は、画像比較法（ICM：Image Comparison Method）によって測定する。

測定された歪み率を、心象空間の三次元座標（ $r: x^*, y^*, z^*$ ）と歪み率との関数である、局所的視空間ポテンシャル関数（局所ポテンシャル：local visual space potential function） $\phi$ で規定する。なお、局所ポテンシャル $\phi$ は、領域係数（field coefficient）； $b$ 、振幅係数（amplitude coefficient）； $\lambda$ のパラメータをもつ。さらに、心象空間全体の視空間ポテンシャル $\Psi$ を導入し、局所ポテンシャル $\phi$ の線形和として、実用的な範囲で近似できることを観察実験により確認した。従って、心象空間の歪み率は、視空間ポテンシャル $\Psi$ で一義的に定まる。

以上のような心象空間で、視点から既存の単点透視投影法（perspective）で単点透視投影図を生成すれば、高度心象画像（a perspective of image space）を生成することができる。ただし、主観的透視投影法（subjective perspective transformation）では、実空間内で単点透視投影法を適用する事で、高度心象画像を生成する事を前提としている。そこで、実空間で高度心象画像を生成する前処理として、心象対象それぞれを奥行き知覚変換（apparent depth transformation）する。これにより、心象対象は、実空間内で視点に対して高度心象画像とするために、適当な位置と大きさを持つ。最後に、その前処理（知覚変換）された対象を、視点を原点とする単点透視投影法を適用することで、高度心象画像を生成することができる。

### 3. 実空間と視覚歪み空間との歪み率 [1]

もっとも基礎的で最小の因子である「位置」と「大きさ」のみからなる三次元対象（球）を2つ用いて、画像比較法により、その歪み率を測定する。

#### 3.1 画像比較法

##### (ICM：Image Comparison Method)

画像比較法は、実空間内の三次元対象から観察者が誘起される心象の大きさ（みえの大きさ）を、実空間上での大きさとの比（歪み率  $S_r$ ：skew ratio）として測定する方法である。本報告では、その比は対象の大きさと心象対象の大きさとの比に相当する。

画像比較法の手順は、以下ようになる。まず、基準となる大きさの対象（参照球）を基準点に布置する。同時に、大きさを測定する対象（比較球）を測定点に布置する。次に、観察者はそれらを観察して、それらの相対的な「みえの大きさ」を記憶する。ここで対象の観察を中止して、その記憶（心象）にしたがってコンピュータ上に示された円（球の二次元表現）の比較球に相当する円の大きさを調整して、参照球の大きさに対する比較球の大きさの相対的な関係を再現する。なお、この操作は観察者が自ら行う。最後に、比較球に相当する円の大きさを測定値（調整値）として記録する。

それらの調整値を、参照球を基準とした比較球の「みえの大きさ  $A_s$ ：apparent size」とする。一方、参照球を基準とする比較球の「物理的な大きさ」を  $R_s$ （：real size）とする。すると、参照球を基準として、比較球の「物理的な大きさ」とその「みえの大きさ」との比率を定めることが出来る。

その比を歪み率（ $S_r$ ：skew ratio）と定義し、次式のように定める。

$$S_r = (A_s - R_s) / R_s \quad (1)$$

この結果、測定された歪み率は、三次元空間の座標に対応するスカラー値となる。一方で、測定された歪み率は、対象の観察方法や時間に関

して、制限をしていないことから、被験者の主観的な知覚の結果が反映された値であると考えられる。従って、その値は、対象の見る順序(数学的には、経路)によらないとする。

### 3.2 画像比較法による歪み率の測定

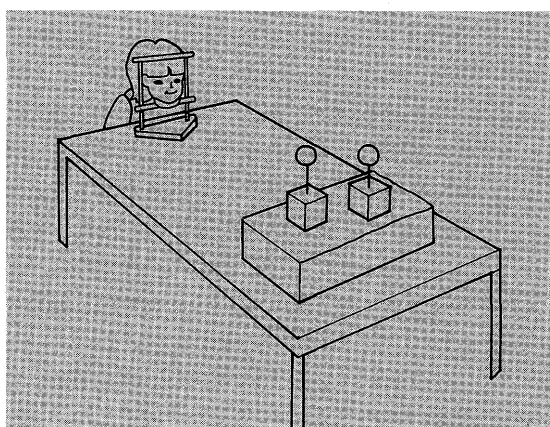
目的：対象(球)2個を両眼立体視した時の視覚歪み空間内の視対象の大きさを歪み率として測定する。

方法：デッサンなどの教育を受けたことのない女子大生(18～22歳)10人を被験者Aグループとして、図2、3のように、被験者から

600 mm 離れたところに、参照球と比較球を一つ布置して、画像比較法を用いて歪み率の測定を行った。

次に、デッサン教育を受けた女子大生(20～23歳)8人を被験者Bグループとして、同様な手順で実験を行った

結果：Aグループでは、図4のような結果を得た。この結果から、基準となる球の近傍で、歪み率が最大で13%程度となることが分かった。一方で、デッサンなどの訓練を受けたBグループでは、歪み率は、Aグループに比



(a)

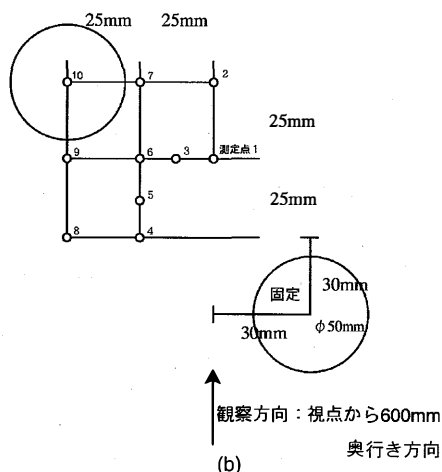
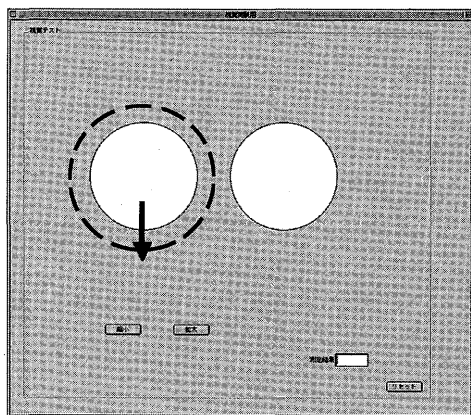
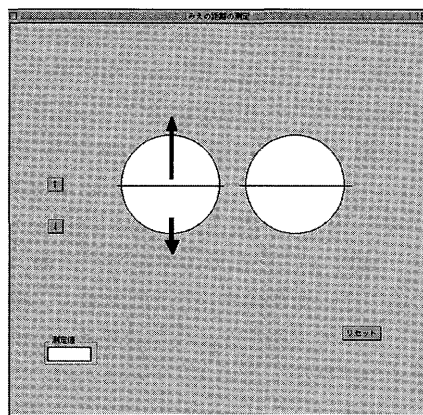


図2 歪み率の測定条件



(a) 相対的な大きさ



(b) 相対的な間隔 (本実験以降は使用せず)

図3 心象としての大きさ、間隔を報告するためのプログラム

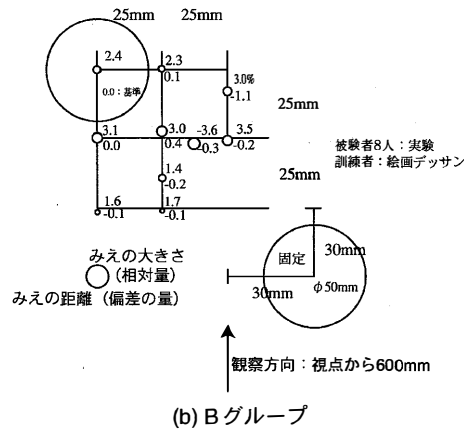
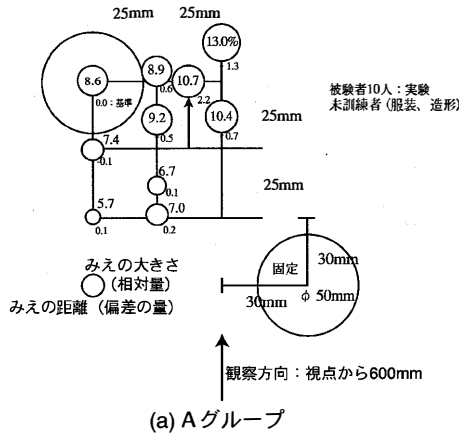


図4 グループ別の歪み率の分布  
図中の○の大きさは歪み率の大きさ

べ、小さい傾向があることが分かった。

考察：まず、測定された歪み率から、実空間では同一の対象が視覚歪み空間では、個人によってその大きさに差があることが考えられる。特に、Aグループの被験者で、2つの球が近接した時、同じ大きさの球であるにもかかわらず、視点から奥にある球が、手前の参照球よりも大きく見えるほど大きな歪み率が測定された。

### 3.3 歪み率の視空間ポテンシャル $\phi$ による表現

視空間ポテンシャルは、心象空間の各点 $[x^*, y^*, z^*]$ に対して歪み率 $S_r$ を規定するものである。具体的には、「同一形状のものでも、奥にあるものが大きく見える」という現象を表現させるもので、主観的な認知過程によって誘起される、次に示す心象空間の変形条件を満足しなくてはならない。

そのために、観察者（原点）の注目点（位置ベクトル $\mathbf{r}_s$ ）近傍（局所座標系：図5）で、主観的な空間認識過程における空間の心理的変形の性質として、次のような2つの仮定と、満足すべき3条件を導入する。

〈仮定〉

1. 歪み率の分布は、空間の位置だけで決定される。
2. 歪み率の値は、その位置までの経路によ

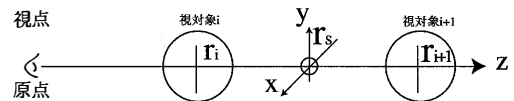


図5 一つの注目視野内の歪み率：実空間中に対象が2つ（ $m_i, m_{i+1}$ ）があり、観察者はその中央（ $\mathbf{r}_s$ ）を注目している場合

らない。

〈条件〉

- I：視点から注目点に対して、奥行き方向では歪み率は正となる。逆に、手前では負の値をとる。（変形作用の対称性）。
- II：視点に対して、互いに十分離れている対象同士の歪み率は、ほぼ0となる。（変形範囲の局所性）。
- III：視点に対して奥行き方向（z軸方向）に従った歪み率が支配的なため、それ以外の方向での歪みは十分に小さいとする（変形作用の方向性）。

ここで、以上のような仮定と、条件を満足する空間座標に対するスカラー値の分布は、空間ポテンシャルで規程できる。

そこで、局所ベクトルに関する局所的視空間ポテンシャル（局所ポテンシャル）関数 $\phi$ を導入し、次式のように定める。

$$\varphi(\bar{r}_s) = \lambda \left\{ \frac{\exp(\bar{r}_s, b) (\exp(\bar{r}_s, b) - 1)}{(\exp(\bar{r}_s, b) + 1)^3} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $(\bar{r}, b)$  は、 $\bar{r}_s$  と  $b = bk$  との内積を表し、 $k$  は  $z$  軸方向の単位ベクトルとする。

$b$  : 観察者の注意領域の広さを表す領域係数 (field coefficient)

$\lambda$  : 領域内の心理的変形の大きさを表す振幅係数 (amplitude coefficient)

なお、関数  $\varphi$  は各種解析に便利な性質も持っている。

### 3.4 局所ポテンシャル $\varphi$ のパラメータ $(\lambda, b)$ の決定

局所ポテンシャル関数  $\varphi$  は、図 6 のように、注目点  $\mathbf{r}_s$  から  $z$  軸方向に従って、正の大きな値となり、逆方向では負の値となる。ただし、注目点の横方向 ( $x$  軸方向) や縦方向 ( $y$  軸方向) では恒常的に 0 となるポテンシャル関数で、全体の形状は振幅係数  $\lambda$  と領域係数  $b$  とで決定される。そこで、これら  $\lambda, b$  の値を、実際の歪み率の平均値 (被験者 10 人、10 ヲ所) から、ポテンシャル関数の関数値と測定された歪み率との差の絶対値の平均値 ( $\bar{\Delta}(\lambda, b)$ ) が極小となる組み合わせとして求めた。その結果、A グループから測定された歪み率に対して、 $\bar{\Delta}(\lambda, b) = 2.20$  となる  $(\lambda, b)$  の組み合わせとして、 $\lambda$  : 振幅係数 3.50,  $b$  : 領域係数 5.00 が適切 ( $\bar{\Delta}(\lambda, b) = 2.20$ ) であることが分かった。同様に、B グループで測定された測定結果では、 $\lambda$  : 振幅係数 0.50,  $b$  : 領域係数 25.0, が適切 ( $\bar{\Delta}(\lambda, b) = 1.39$ ) であることが分かった。

## 4. 1 シーン内の複数の注目視野と視空間ポテンシャル $\Psi$ [2]

主観的透視投影法は、観察者が自然な状態で誘起される心象に近い心象を誘起する二次元画像 (以下、高度心象画像) を生成することを目的としている。ここで、その観察者の心象空間は、観察者本人が、主観的に同時と認知する、

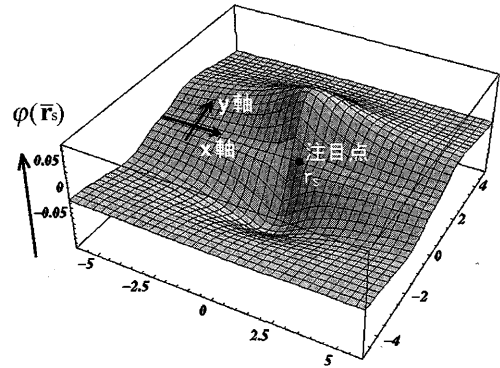


図 6 局所ポテンシャル  $\varphi$  の  $z$ - $x$  平面上の値 ( $\lambda = 1, b = 1$ )

図では、高さ方向が歪み率の値

複数の実空間に関する部分的な情報からなると仮定する。すると、それは複数の注目視野から得られた実空間に関する部分情報から構成されていると思われる [4]。そこで、以上で定義した視空間ポテンシャル  $\varphi$  を複数の視野に存在する複数の対象に対応させるために以下のような 3 つの条件を導入する。

- Ⅳ : 人間の視覚特性に起因する視野限界。従って、主観的に一つと認知される心象 (シーン) には、複数の注目視野が存在する。
- Ⅴ : 視覚的局所歪みの相互作用の存在。実空間内の対象それぞれは、心象空間の複数の視空間ポテンシャル全ての影響を受けるものとする。
- Ⅵ : 以上の変形作用は、相対的な空間の位置関係のみで定まる。

以上の条件を満たす時、視空間全体の歪み率の分布は、空間座標に対応した歪み率として表すことができる。さらに、観察方法/時間に関しても制約をくわえていないため、測定される歪み率は、その見方 (経路) によらないと考えられる。従って、視空間全体の歪み率の分布も局所的視空間ポテンシャルと同様に空間ポテンシャルで規定できると考えられる。このポテン

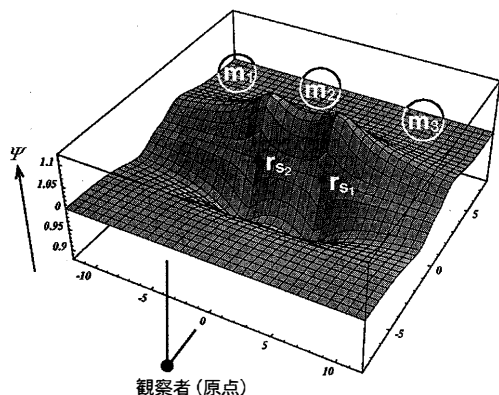


図7 相互作用の概念図

シャルを視空間ポテンシャル  $\phi$  とする(図7)。

さらに、本論では、この視空間ポテンシャルは、局所的視空間ポテンシャルの重畳によるものと、近接効果(作用)等によるものからなるとする。

#### 4.1 局所ポテンシャル $\psi$ の相互作用

以上の仮定から、視野限界に起因する複数の注目視野(watch field)には、それぞれ一つの局所ポテンシャル  $\phi$  で規定される歪みが起こり、その影響は注目視野の範囲を越えて、心象空間全体に影響を及ぼすことになる。ここで、心象空間全体に対して視空間ポテンシャル  $\Psi$  を想定し、複数の局所ポテンシャルの合成ポテンシャルとして表す。なお、局所ポテンシャル  $\psi$  は、本来局所的な歪み率を規定するポテンシャル関数であるため、それらの合成ポテンシャルである視空間ポテンシャル  $\Psi$  は、その重畳性の仮定から次式のように表現できる。

$$\begin{aligned} \Psi(r_1, r_2, \dots, r_n) \\ = \phi(\bar{r}_{s1}) + \phi(\bar{r}_{s2}) + \dots + \phi(\bar{r}_{sn}) + \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\varepsilon$  は近接作用項。また、 $\bar{r}_{si}$  は異なる注目点  $r_i$  に対する局所座標。

以下のような実験から各測定点に関する局所的視空間ポテンシャル  $\phi$  の相互作用の傾向を定量的に評価する。

#### 4.2 局所ポテンシャル $\phi$ の相互作用の測定

実空間に関する複数の注目視野の情報から形成される視覚歪み空間の歪み率を測定する。

実験1, 2:

目的: 画像比較法によって、参照球の位置の異なる局所的な対象の歪み率  $S_r$  を測定する。

方法: 被験者は、図8のような条件で、実際の2つの対象(球  $\phi=50$  mm)を使って、画像比較法によって歪み率を測定した。なお、測定順序は被験者によらず測定点番号順に行った[1]。

また、被験者は男女8人。(実験1: 図9-a, b 左半分、実験2: 図9-a, b 右半分)

実験3:

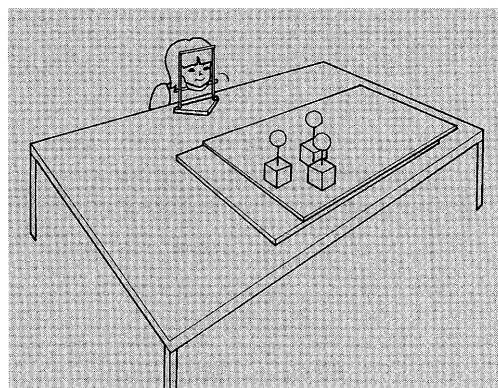


図8 歪み率の測定条件

目的: 視空間ポテンシャル  $\Psi$  の局所ポテンシャル  $\phi$  の線形加算による近似仮説を検証する。

方法: 図8の条件で、3つの球( $\phi=50$  mm)を観察し、提示された三次元対象がどのように見えたのかを定量的に報告する。その他諸条件は、実験1と同じ。

結果: まず、実験1, 2から、視点に対して参照球が左右にある時の歪み率が、それぞれ測定できた(図9-a, b)。さらに、実験3から、二つの球が存在する時の歪み率が測定できた(図9-c, d)。

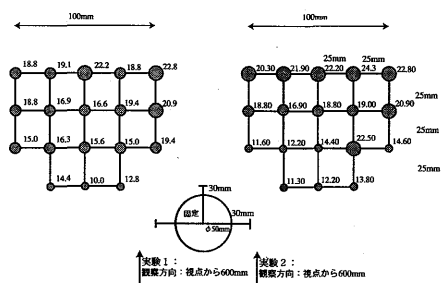
考察: 実験1, 2の歪み率をそれぞれ視空間ポテンシャル  $\phi$  右,  $\phi$  左として、その重畳(線形加算)で近似すると、それぞれのパラメータとその時の誤差は表1, 2のようになった。次に、実験3の各測定点から得られた歪み率と、局所ポテンシャル  $\phi$  右と  $\phi$  左の重畳値との残差はAグループで0.17, Bグループで0.10で

表1 Aグループの局所パラメータ値と誤差

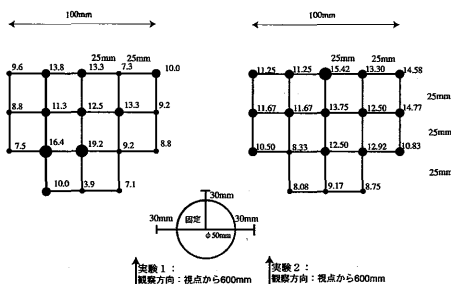
	$\lambda$	b	誤差の絶対値の平均 $\Delta(\lambda, b)$	$\Psi_{左右} = \phi_{右} + \phi_{左}$ としたときの誤差の絶対値の平均値
$\phi_{右}$ : 右に参照球	0.3	-55	0.14	—
$\phi_{左}$ : 左に参照球	0.5	-66	0.15	
$\Psi_{左右}$ : 左右に参照球	—			0.17

表2 Bグループの局所パラメータ値と誤差

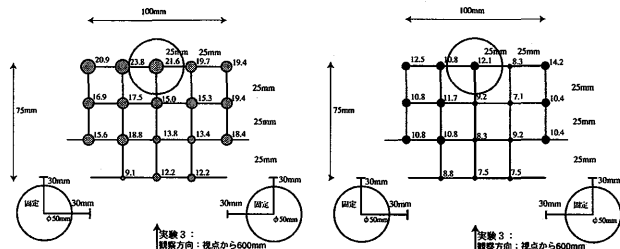
	$\lambda$	b	誤差の絶対値の平均 $\Delta(\lambda, b)$	$\Psi_{左右} = \phi_{右} + \phi_{左}$ としたときの誤差の絶対値の平均値
$\phi_{右}$ : 右に参照球	0.5	-70	0.09	—
$\phi_{左}$ : 左に参照球	0.1	-44	0.10	
$\Psi_{左右}$ : 左右に参照球	—			0.10



(a) Aグループの歪み率の分布 (参照球1個)



(b) Bグループの歪み率の分布 (参照球1個)



(c) Cグループの歪み率の分布 (参照球2個)

(d) Dグループの歪み率の分布 (参照球2個)

図9 歪み率の測定結果

あった。

本報告で、視空間ポテンシャル  $\Psi$  を局所ポテンシャル  $\phi$  の重畳によって近似する妥当性は検証された。さらに、局所ポテンシャル  $\phi$  相互の近接効果等を検討することで、その精度を向上させることは今後の課題である。

## 5. 実空間での対象の幾何工学的な写真像とその心象

既知の単点透視投影法では、三次元立体は、視点に対して距離の二乗に反比例した大きさの面積（視野角）を持つ。この面積は、視点からの距離に関して比例関係を保持しているため、同時に、相似関係も保持していることになる。ところが、人間はその知覚特性から、必ずしもそうでない事が報告されている [5]。従って視覚歪み空間では、心象対象の大きさは視点からの距離に対して相似関係は保持されても、比例関係は保持されない。

### 5.1 視覚歪み空間における視点からの距離に関する心象対象の大きさの相似関係 [3]

ここで、従来の視空間ポテンシャル  $\Psi$  を、心象対象の大きさの相似関係に対応させるために、新たに、以下のような概念を導入する。

Ⅶ：人間の視覚特性に起因する実空間の分解能（視力）の限界。

Ⅷ：視覚歪み空間における、心象対象の大きさの距離に関する相似性。

実空間で局所的に同一な位置関係にある複数の対象に対応する心象対象の大きさは、視点からの距離によらず、その相似関係を保持する。ただし、その比例関係は保持されない。

### 5.2 心象対象の大きさの相似関係に関する実験

目的：実空間で局所的な対象に対応する心象対象の大きさが、視覚歪み空間で、視点から対象までの距離に対して相似関係を保つかを実験的に検討する。

方法：被験者は、女子大生5人と40代男性1人



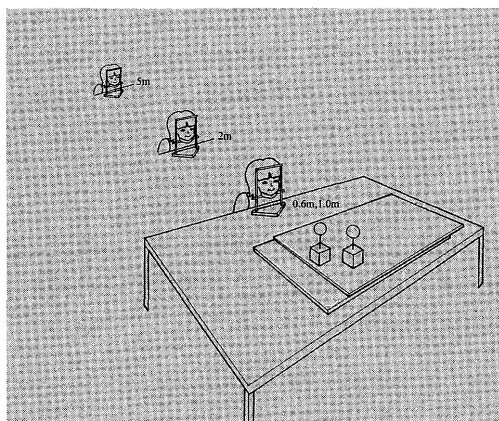
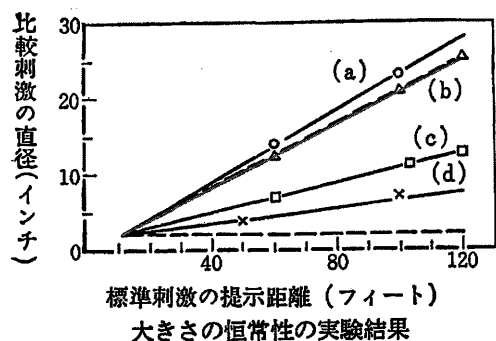


図10 相似関係に関する実験条件

の合計6人。観察者の視点から観察対象までの距離を0.6 m, 2.0 m, 5.0 mとした(図10)。この時、2つの球は、過去の実験結果[1]から観察者の歪み率が最も大きかった位置関係とした。なお、被験者は、その観察距離を変化させることに、2つの球の「見え」の大きさの(主観的な)関係に変化が有ったか無かったかを定性的に報告する。

結果：被験者全員から、「0.6 mで得られた2つの心象対象それぞれの大きさが、視点からの距離を変化させても変わらない」との内省報告が得られた。同時に、全く同一の実験条件にもかかわらず、常に前方の球が後方の球よりも大きくみえたと報告したものが2人、逆に後方の球が大きくみえたと報告したものが4人いた。考察：実験の範囲内で、2つの球の視覚歪み空間での大きさ(倍率)は、視点からの距離に関して相似関係を保つと思われる。さらに、仮に、0.6 mで得られる心象がその距離を変化させても相似関係を保つと一般に仮定できれば、観察者固有の歪み量は、視点からの距離が異なっても局所的な画像比較法により抽出した、局所ポテンシャル $\phi$ と同一のパラメータ( $\lambda, b$ )で規定できると思われる。



[Holway & Boring, 1941]

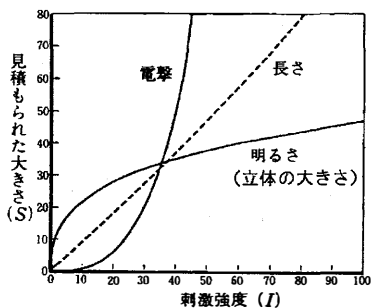
図11 大きさの恒常性の実験結果[6]

## 6. 視点からの距離に関する心象対象の大きさ (apparent size)

物理的に同じ物が与える網膜像の大きさ(あるいは視角)は、観察距離に反比例して変化する。それにもかかわらず、見かけの大きさはほぼ一定に保たれる傾向がある。これが「大きさの恒常性」と呼ばれる現象である。これは、人間の大きさの知覚が、たんに網膜像の大きさに比例するのではなく、他の刺激変数、とくに奥行き知覚の手掛かりによっても規定されることを示している。[文献6 | pp. 56 : Holway, A. H. & Boring, E. G. 1941] また、「大きさの恒常性」は、いわゆる奥行き知覚の手掛かりが豊富なほど明確に現れると考えられる、と報告されている[文献6 | pp. 56 : 笠原, 1952 ; 牧野, 1969] (図11)。

以上から、網膜上では、全く同様の大きさをしめる刺激(対象)に、その刺激の奥行き知覚の手がかりが加わると、観察者が知覚する対象の大きさは視点からの距離に対して、直線的な傾向を持つと考えられる。

一方で、視点からの一定の距離に大きさの異なる正方形(本文では、球のシルエットに相当)を提示すると、その対数に比例した知覚が得られることが報告されている。F. H. Weberは、「人間の感覚は、物の間の差違そのものを知覚



マグニチュード推定法による刺激強度と知覚の大きさとの関係  
(Stevens, 1961)

図12 刺激強度と知覚の大きさとの関係

するのではなく、物の大きさに対するその差違の比率を知覚する」とした。さらに、Fechnerは、Weberの法則が一般に成立すれば、「感覚の大きさは基本的刺激値の対数に比例する」とした(図12)。後に、Stevensによって、感覚量と刺激量のべき関数表現が提案された。この関数表現を用いて、投影された線分の長さに関するべき指数は1.0となることが報告されている[6]。同様に、投影された面積のべき指数は0.7となる事が報告されている。このことは、観察者の視点から等距離の場所に、倍の面積(報告では正方形)を提示しても、感覚的にはそれほど大きくなったとは思わないことを意味する。

以上から、観察者が、対象の網膜上の大きさだけを手掛かりとして、その大きさを知覚(推定)した場合、その大きさは刺激の大きさの対数に比例すると考えられる。

#### 6.1 奥行き知覚関数

##### (apparent depth function)

視覚歪み空間の視点に対して奥行き方向の特性を求める。ただし、これまでに、同じ対象が視点からの距離に応じてどのような大きさに見えるかに関する報告はない。そこで、人間の知覚量(R)は基本的に、刺激の全体量(S)に対する変化量( $\Delta S$ )との比で誘起されると仮定し、上述の報告を考慮し、視点からの距離と心象対象の大きさに関する仮説を設ける。

仮説:「同じ大きさの対象を、視点から異なる距離で観察した時、視点から近距離(<10 m)ならば、その奥行き情報の豊富さからほぼ直線的な知覚が得られ、それ以上の距離になって奥行きの情報が十分でなくなると、対数に比例した知覚が得られる傾向が強くなる。」

このような、物理的距離情報を、心理的な感覚情報に変換する奥行き知覚関数(apparent depth function)を次式とする。

$$f(z) = d \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{m}{d} \right) z \right) \quad (4)$$

なお、 $m$ は個人の恒常性の程度を表す係数(apparent size constancy coefficient)。また、本報告では、臨界点(相転移定数  $d$ : phase distance constant)を長田の報告を用いて決定した。長田は各種の奥行き手がかりの有効な範囲とその相互作用を奥行き感度で定義し、報告した[6]。その報告によれば、視点から10 mで、奥行きに関する手がかりの数が減少し、さらに、残った手がかりの奥行き感度も減少する。そこで、相転移定数  $d$  を10 mと定めた。

#### 6.2 視点からの距離に関する心象対象の大きさの測定

目的: 視点からの距離を変化させた時の、心象対象の大きさを画像比較法により測定する。

方法: 図13のような奥行き方向に長いテーブル上に置かれた球( $\phi = 50$  mm)の「見え」の大

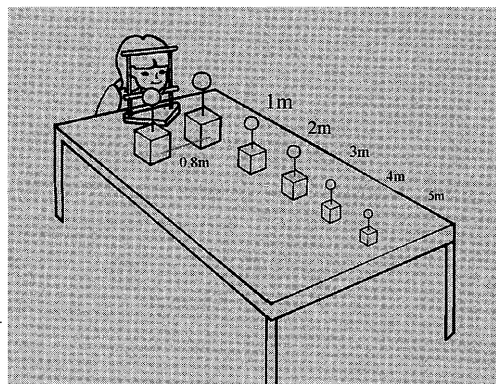


図13 視点からの距離に関する心象対象の大きさ測定条件

きさを、視点に対して向かって右側、視点から1 m のところに固定した参照球に対する相対的な大きさとして報告させた。

被験者は、女子大学生 (21~23才) 11人。これらの被験者を2つのグループに分けて測定した。まず、Aグループは、彫刻を専攻しデッサンなどの訓練を受けた5人。Bグループは、被服衛生を専攻しデッサンなどの訓練を受けていない6人とした。それぞれの被験者は、対象の距離を変化させて、その時の「みえ」の見えの大きさを定量化した。変化させた距離は、視点から1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m。両方の球の間隔は80 mmとした。また、以上の測定を同一被験者が、時間間隔を取りながら4回繰り返した。

結果：図14のような結果を得た。なお、この結果の集計には、4回の実験結果のうち、後半の3回分を用いた。

考察：これらの実験結果から、すべての被験者は、異なる程度の恒常性が働く可能性があることがわかった。また、彫塑を専攻しているAグループの学生は一定の恒常度に集中する傾向があることが分かった。一方で、他方のグループでは、学生ごとに大きく異なる傾向があることが分かった。

以上の結果を、各グループごとに平均化し、奥行き知覚関数(式4)で近似した。その結果、Aグループは、相転移係数  $d=10$  とした時、恒常数  $m=0.3$ 、誤差の絶対値の平均値1.96。一方、Bグループは、 $d=10$  とした時  $m=$

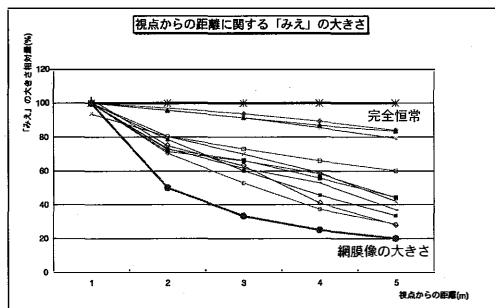


図14 心象対象の測定結果

0.16, 誤差の絶対値の平均値1.16となった (図15, 16)。

### 6.3 心象空間の座標

以上で、視覚歪み空間の視点からの距離に関する心象対象の大きさの傾向が明らかになった。そこで、実空間座標  $[x, y, z]$  に対して、新たな座標  $[x^*, y^*, z^*]$  を以下のように定める。ここで、この新たな座標による空間を心象空間 (image space) と定める。

$$[x^*, y^*, z^*] = \left[ x, y, 10 \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{m}{10} \right) z \right) \right] \quad (5)$$

ただし、局所ポテンシャル  $\phi$  など局所的な(距離の)範囲では、 $z^*=z$  としてもその誤差が非常に小さいために、明確な差違は認められ

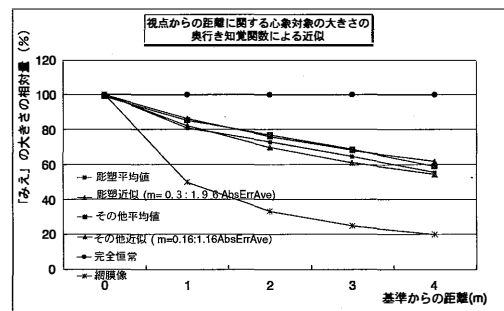


図15 各グループ別の「みえ」の大きさの奥行き知覚関数による近似

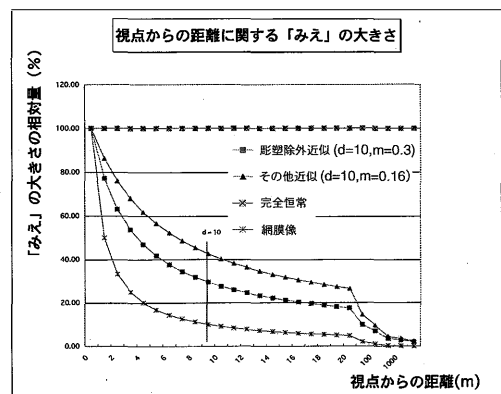


図16 奥行き知覚関数の特徴

ない。

## 7. 高心象画像の生成

### 7.1 最終的な心象対象の大きさの決定

これまでで、視空間ポテンシャル  $\Psi$  と、心象空間  $[x^*, y^*, z^*]$  を決定した。そこで、それらを使って心象空間内の心象対象一つ々の大きさを定める手順を述べる。

まず、観察者の局所的な視空間ポテンシャル  $\phi$  を画像比較法により求める。ここで、観察者に固有の係数  $\lambda, b$  が定まる。同様に、画像比較法を用いて、視点から奥行き方向に関する固有の恒常度係数  $m$  を求める。

以上の係数が定まれば、 $n$  番目の心象対象  $n$  の歪み率  $s_{\Psi}$  は、視空間ポテンシャル  $\Psi$  から、以下のように求めることが出来る。

$$S_{\Psi}^n = \Psi(r_n) = \Psi(r_{n,1}) + \Psi(r_{n,2}) + \cdots + \Psi(r_{n,n}) \quad (6)$$

ただし、座標  $[x^*, y^*, z^*]$ 。また、 $r_{n,1}$  は、 $n$  番目の対象の中心を原点とする局所ベクトル。 $r_{n,1} = r_n - r_0$ 。従って、 $r_{n,n} = 0$ 。

同様に、1 番目～ $(n-1)$  番目までの心象対象の大きさも同様に決定する。

### 7.2 奥行き知覚変換

以上で、心象空間内の心象対象全体の大きさを求めることができた。このまま、心象空間内で、視点を原点として、単点透視投影法を適用すれば、それが高度心象画像となる。

ただし、本研究の基本的な枠組みとして、二次元化画像の生成は、実空間内で行うものとしている (図 1)。そこで実空間で単点透視投影法を適用した時、高度心象画像となるように、各対象の心象空間での大きさと実空間での大きさの比で、改めて、それらの大きさを変換する。ここに、心象対象の中心座標  $r$  と、奥行き知覚変換関数  $f$  (式 4) を用いる。

$$\delta(r) = \frac{(r, k) + 1}{10 \ln \left[ 1 + \left( \frac{m}{10} \right) (r, k) \right] + 1} \quad (7)$$

ここで、 $k$  は、心象空間の  $z$  軸方向の単位ベク

トル。 $(r, k)$  は内積。

以上から、奥行き知覚変換された  $n$  番目の心象対象の大きさ  $w_n$  は、

$$w_n = (\Psi(r_n) + 1) \delta(r_n) \quad (8)$$

となる。

同様に、1 番目～ $(n-1)$  番目までの心象対象の大きさの差も同様に決定する。

## 8. ま と め

本報告では、これまでに行ってきた、物理的な大きさと心理的な大きさとの比 (歪み率) を定量化する方式を画像比較法 (ICM) とした。次に、その測定法を基にして、改めて、局所的な歪み率の分布、それらの相互作用、および視点からの距離に関する相似性の検討を行った。

さらに、新たに視空間ポテンシャルを導入し、それに基づいて空間全体にわたる歪み率を局所ポテンシャルの結合として定める視覚歪み空間論を提案した。また、画像比較法によって奥行き方向に関する特性を考慮した心象空間を定義した。この定義によって、心象空間を二次元画像化することを可能とした。

最後に、後述のような、本論の有効性を実践的に検証するための予備実験の結果に基づく考察を行った。

## 9. 本論の検証を目的とした予備実験

### 9.1 予備実験 A

目的：参照球を含む 3 つの球を、図 17 の条件で、図 18 のような位置に 3 つの球を配置し、その歪み率を画像比較法により測定する。この相対的な位置関係は、過去の実験で高い歪み率が測定された位置に相当し、球が互いに重なって見える。次に、視点に対する相似性を視点から距離を変化させて画像比較法により検討する。

方法：図 18 のような位置に、参照球を含む 3 つの球 ( $\phi = 50$  mm) を配置する。次に、画像比較法により、歪み率を測定する (図 19)。さらに、観察位置を 2 m ～ 5 m まで 1 m おきに变化

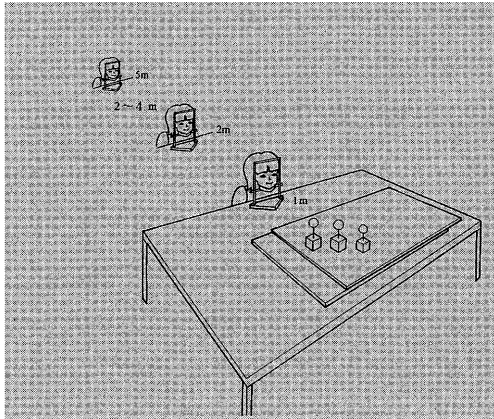


図17 予備実験環境

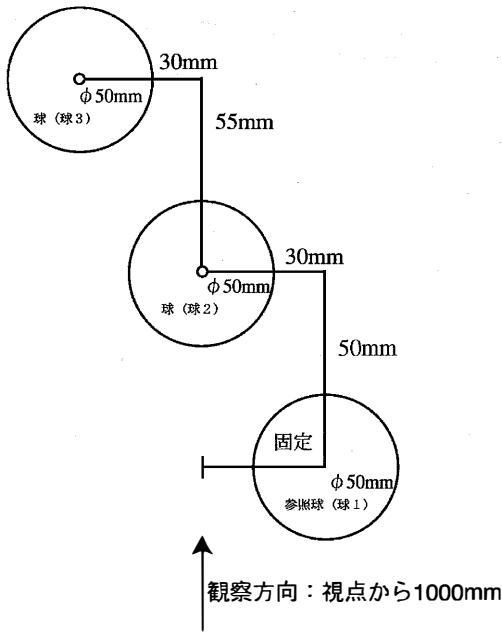


図18 3つの球の相対的位置関係

させ同様に測定する。以上の試行を時間を置いて4回繰り返す。なお、被験者は、デッサンなどの訓練を受けていない40代男性1人（被験者1）と彫刻を専攻している20代女性1人（被験者2）。

結果：各被験者の全4回の試行の平均は、表3、図19となった。ここで、被験者が、視距離

表3 測定された歪み率（％）

	球3	球2
被験者1 (未訓練)	18.72	9.14
被験者2 (彫塑専攻)	4.52	2.49

1 mの測定時に調整した状態をそのままにして、その後の測定を行った。そのため、被験者が、それらの相対的な大きさの変化が無いと感じていたために、その後は測定用のソフトウェアを操作することがなかった。以上の理由から、2 m～5 mまでの全ての歪み率は1 mでの測定値と同じ。

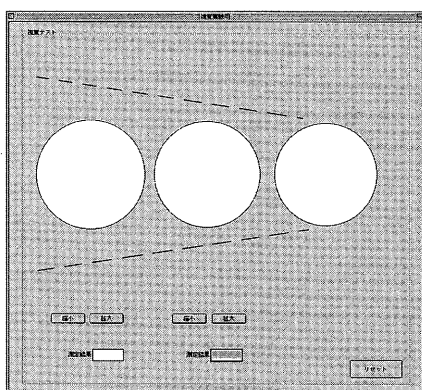
考察：被験者1の視距離1 mにおいて測定された歪み率の値から、視点から最も奥にある球（球3）の歪み率が大きくなっていた。この値は、参照球よりの中央の球（球2）が、さらにその大きさよりも奥の球（球3）が大きく見えていたことを示している（図19）。このような現象（歪み率の分布）も、それぞれの視対象に対応した局所ポテンシャルの重畳としての視空間ポテンシャルで説明することが可能であると思われる。一方で、被験者2のように、異なる局所ポテンシャルであった場合、被験者2のような幾何光学的な見え方（球1の大きさ>球2の大きさ>球3の大きさ）も同時に説明できる。

ここで、被験者1のような歪み率の分布（見え方）は、結果として「広角透視図法」[7]と同様な効果をもつことは興味深い。一方で、まったく同じ方法論でも、局所ポテンシャルが異なると、概知の単点透視投影法とはほぼ同じとなる[5]。

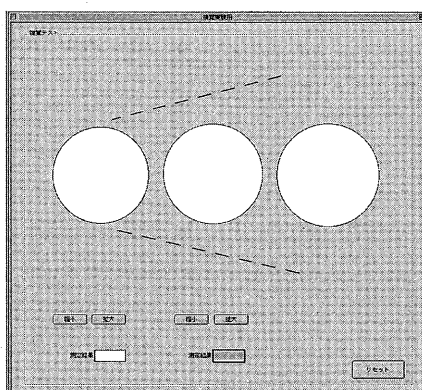
さらに、観察距離を変化させても、対象間の歪み率の値は変化することはなかった。これは、局所的な相互作用を伴う歪み率の分布も、視点からの距離によらない可能性を示唆するものと考えられる（5.1章）。

## 9.2 予備実験B

目的：参照球を含む3つの球を、図18のような



(a) 被験者 1 の平均的な見え



(b) 被験者 2 の平均的な見え

図 19 画像比較法による平均的な測定値

位置に配置し、球 2, 3 を参照球と同じ大きさに見えるまで、視点に対して奥行き方向に後退させて、その距離（大きさ）を測定する。

方法：図 18 の位置に、参照球を含む 3 つの球（ $\phi = 50 \text{ mm}$ ）を配置する。次に、観察位置を 1 m とする。この位置から、その他の球の「みえの大きさ」が参照球と同じ大きさになる位置を測定する。なお、球の移動は、被験者以外の補助者が、0.5 cm ずつ、被験者の指示（前、後ろ）の指示に従って前後させた。ただし、補助者は、その移動量を被験者に報告しない。以上の試行を、時間をおいて 4 回繰り返す。なお、被験者は、デッサンなどの訓練を受けていない 40 代男性 1 人（被験者 1）と彫刻を専攻している 20 代女性 1 人（被験者 2）。

結果：被験者 1 の結果は、表 4、図 20 のようになった。ただし、被験者 2 は、図 18 の条件を無視して、視点から等距離に 3 つの球を置かないかぎり、同じ大きさには見えなかった。

考察：被験者 1 のような見え方をするものによって、視対象が同じ大きさであると考えていても、後方のものが、視点に対して迫ってくるように見える。これに類似した二次元化図形の生成手法にハウクの主観透視図（法）（図 21）がある。

これまでにも、ハウクの手法以外にも人間の網膜（球面）に映る像をそのまま取り出そうと

表 4 同じ大きさになるまでの後退した距離（cm）

試行回数	球 3	球 2	参照球
1	7.7	3	0
2	7.5	4	0
3	7.5	2.5	0
4	8.5	3.5	0

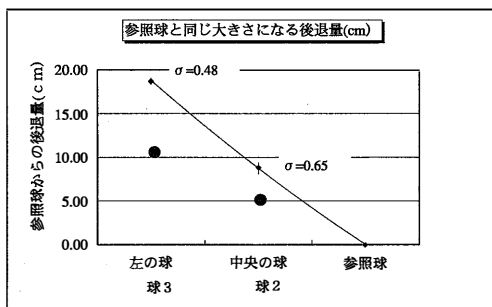


図 20 参照球と同じみえの大きさになるまでの後退量

する投影法や、その手法の縦方向を近似的に垂直みなして円柱状の透視図を生成する手法などが提案されている。確かに、これらの手法（図法）を用いて、たくさんの柱が林立する状況を透視投影図にすると、人間の知覚に近い単点透視投影図（図 21）が得られることは知られていた。ただし、それらの手法では、空間に対して

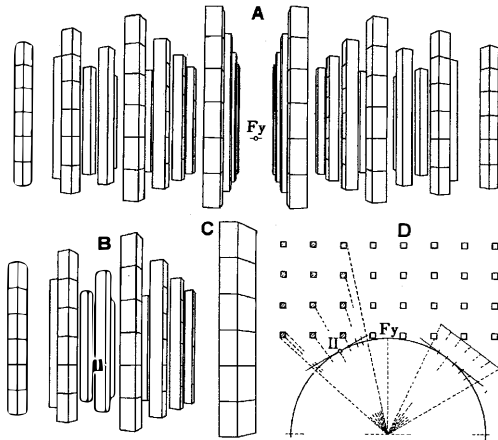


図21 ハウク（1879）の主観透視図：A, B, C 主観透視図 D-平面図 [5: pp. 224]

複数の異なる変形作用を、対象ごとに、その相互作用を考慮してリアルタイムに具現化することができない。その原因の一つとして、観察している空間を一つの規則で全てを表現し、同時に、その空間が内包している対象（物体）全て、同一の規則で表現しようとすることがあると思われる。

今後、「ユビキタス・コンピューティング」の概念にもあるように、誰もが自由に高度な情報環境を利用することが可能となる。そこで、そのような環境を背景とした新たな透視投影法の一つとして、本論を明確化してゆく必要がある。

## 10. 今後の課題

今後は、画像比較法（ICM）による歪み率の測定精度をより向上させるために、実験計画の再検討を行う。次に、視空間ポテンシャル  $\Psi$  の近似精度を向上させるために、局所的ポテンシャル  $\phi$  相互の近接効果等を検討する必要がある。また、心象対象の大きさの相似性に関する検討が本来の予備実験のまま行われているため、画像比較法を用いて定量的に検証する必要がある。一方で、本視覚歪み空間論で、有限な大きさを持つ対象の「平行並木」様問題の

説明を試みることで、本理論の有効性を実践的に検討する必要がある。

また、現在、ものの色は客観的な物理現象とともに、人間の主観的な評価（知覚）によることも広く認知されているために色彩に関する学問に関して、改めて「主観的」とことわることがない場合もある。同様にものの色ばかりでなく、その形態も観察者の主観的な知覚にもとづいている場合があることを明確にしてゆきたい。

## 〈謝辞〉

東京都立大学人文学部 市原茂教授には、主観量の測定実験に関する実験計画に関してご助言をいただきました。感謝します。さらに、創価大学工学部 渡部和教授には、本研究全体にわたる御指導をいただいた。感謝します。

## 参 考 文 献

- † 本紀要は、文献[0]を加筆/補足したものである。
- [0] 梶谷哲也，渡部和，“高心象画像生成のための視覚歪み空間論の提案—主観的透視投影法に関する研究—”，映像情報メディア学会技術報告，Vol. 25, No. 64, pp. 29-34, MIP2001-77, 2001
- [1] 梶谷，渡部，“知覚変換の提案とその実験的検証—主観的透視投影法の研究—”，電子通信学会信学技法，HCS2000-28, pp. 225, A-15-1, 2000
- [2] 梶谷，渡部，“局所的知覚変換の相互作用に関する考察—主観的透視投影法の研究—”，信学会総合大会，A-15-1, pp. 300, 2001
- [3] 梶谷，渡部，“視点からの距離に関する「みえ」変形の相似性に関する—主観的透視投影法の研究—”，電子通信学会基礎・境界ソサエティ大会 A-14, pp. 185, 2001
- [4] 大山正ほか，“新編感覚・知覚ハンドブック”，誠信書房，1996
- [5] 黒田正巳，“空間を描く遠近法”，彰国社，1992
- [6] 大山正ほか，“講座心理学第4巻 知覚”，東京大学出版会，1970
- [7] 梶谷，他，“コンピュータを利用した透視図に関する研究—広角透視図法に関する一考察—”，日本建築学会第18回情報システム利用技術シンポジウム論文集，pp. 457-462, 1995