

# バーチャル・リアリティ・インタフェースを 評価するための多次元知覚空間の計算法

岡本正吾<sup>†</sup> 山田陽滋<sup>†</sup>

バーチャル・リアリティ・インタフェースにとって、生成された仮想刺激と本物刺激の類似性を評価することは永年の重要な課題である。評価実験の課題として最も頻繁に用いられるものの一つに、刺激同定課題がある。実験の参加者はランダムに呈示された刺激の種類を候補の中から選択・回答し、その結果は、混同行列としてまとめられる。本論文は、これらの混同行列を基に、仮想刺激と本物刺激を多次元知覚空間に配置する方法を開発した。刺激同士の知覚的非類似性は、空間上の距離として表わされるため、刺激の空間配置を見ることによって、刺激の類似性を容易に把握できる。これにより、バーチャル・リアリティ・インタフェースの開発者らは問題の所在を定量的に把握し、インタフェースの改善へとつなげることが可能となる。

## Computation Techniques of Multidimensional Perceptual Space for Evaluating Virtual Reality Interfaces

SHOGO OKAMOTO<sup>†</sup> and YOJI YAMADA<sup>†</sup>

For virtual reality interfaces, evaluating the perceptual similarity between virtual and real stimuli has long been a serious problem for researchers. One of the most commonly employed evaluation methods is an identification task where observers identify randomly presented stimuli among multiple candidate types. The results of this method are summarized using confusion matrices. We developed a method that allocates virtual and real stimuli to a perceptual space. The spatial distribution of the stimuli allows us to illustratively understand the perceptual relationships between stimuli. A systematic validation confirmed that the method was effective when the answer ratios of the confusion matrices were imbalanced to some extent.

### 1. 緒論: バーチャル・リアリティ・インタフェースの評価

バーチャル・リアリティ・インタフェースの問題の一つは、呈示された仮想物体および現象の質を如何に評価するかということである。例えば特定の物理量に着目し、模擬する刺激と、模擬された刺激を比較することが頻繁に行われる。しかしながら、実物と仮想刺激の間の物理的な差異は、両者の知覚的な差異と単純に対応するわけではないから、多くの工学者らや研究者らが、心理学実験によって知覚的な類似性の評価を行う必要があると考えている。このような知覚的な類似性の評価のためによく用いられる手法として、刺激同定課題がある。この課題では、参加者らは呈示された刺激に最も類似する本物の刺激を  $N$  個の選択肢から回

答する ( $N$  者強制選択課題)。そして、インタフェースもしくは呈示された刺激の性能は、この課題の回答率を基に評価される。一般的に、バーチャル・リアリティ・インタフェースを評価する時には、2種類の同定課題が実施される。第一に、仮想刺激に最も類似する本物の刺激を選択するという virtual-to-real 同定課題である。第二に、本物の刺激を体験し、それがどれであるかを回答するという real-to-real 同定課題である。両者の課題の成績は比較され、成績が似ているほど、インタフェースが優れた仮想刺激を呈示していることを意味する。

#### 混同行列と多次元尺度構成法

同定課題の結果は、混同行列を用いて表現される。行列の各セルは、呈示された刺激と参加者からの回答の組合せが観測された頻度を表わす。混同行列の頻度の解釈は容易でないことが多く、しばしば誤答率は注目されず、正答率のみが議論の対象になる。しかしながら、誤答率にこそ有意義な情報が多く含まれている。

<sup>†</sup> 名古屋大学 工学研究科 機械理工学専攻  
Department of Mechanical Science and Technology,  
School of Engineering, Nagoya University

この問題の解として、混同行列の意味を図を用いて分かりやすく表現するために、多次元尺度構成法が用いられることがある。この手法は、多次元空間上にて、刺激の知覚的類似性を幾何学的距離を用いて表現する、極めて有力な解析ツールである。しかしながら、バーチャル・リアリティ・インタフェースの性能を表現するためにこの多次元尺度構成法を用いるには課題がある。それは、先に述べたとおり、バーチャル・リアリティ・インタフェースの性能評価においては通常、2種類の同定課題が実施され、それぞれから異なる混同行列が得られる。これらの混同行列を構成する要素は異なっている。Virtual-to-real 同定課題から得られる行列は、仮想刺激と本物刺激の両方から成り、real-to-real 同定課題のそれは、本物刺激のみを要素に持つ。これまでの多次元尺度構成法は、このようなクラスの問題を対象としていなかったため、仮想刺激と本物刺激の評価に用いられなかった。多次元尺度構成法は様々なクラスの問題に適用するために開発が継続されているが、バーチャル・リアリティ・インタフェースに特有の局所的問題という条件が、適用可能な多次元尺度構成法が開発されてこなかった理由と考えられる。これまでに、複数の混同行列から要素の多次元尺度構成を計算する手法は提案されているが（例えば<sup>1)~3)</sup>、これらの手法の場合、複数の混同行列の構成要素は同じでなければならない。例えば、同じ構成要素を用いて、異なる参加者から得られた複数の混同行列を解析する目的などで用いられるものである。

### 研究目的

本研究の目的は、バーチャル・リアリティ・インタフェースの刺激の評価として頻繁に用いられる2種の混同行列から、仮想刺激と本物刺激の多次元知覚空間上での配置を計算する手法を開発することである。これが実現されれば、仮想刺激と本物刺激の知覚的類似性を図示的に理解することが可能となったり、仮想刺激に関する問題の所在を容易に特定できるようになるなどの利点があり、バーチャル・リアリティ・インタフェースにとって一般的な評価手法となり得る。

### 技術課題

古典的な多次元尺度構成手法は、その計算に全ての刺激間の距離を必要とする。後発の手法の中には、刺激間の距離情報が欠けていても適用可能なものがあるが、本論文で取り扱う問題の場合には、欠けている距離情報が多いために、計算精度が低下してしまう。したがって、図1に示すように、全ての刺激間の距離が計算されることが好ましいわけである。 $D_{s_i s_j}$  は、刺激  $s_i$  と  $s_j$  の間の知覚的距離である。 $r$  と  $v$  はそれぞれ、本物刺激と仮想刺激を意味する。 $r_i$  を模擬した仮想刺激が  $v_i$  である。図中の距離の中で、これ

|       | From real-to-real identification task |            |            | From both identification tasks |            |            |
|-------|---------------------------------------|------------|------------|--------------------------------|------------|------------|
|       | $R_1$                                 | $R_2$      | $R_3$      | $V_1$                          | $V_2$      | $V_3$      |
| $R_1$ | -                                     | $D_{r1r2}$ | $D_{r1r3}$ | $D_{r1v1}$                     | $D_{r1v2}$ | $D_{r1v3}$ |
| $R_2$ |                                       | -          | $D_{r2r3}$ | $D_{r2v1}$                     | $D_{r2v2}$ | $D_{r2v3}$ |
| $R_3$ |                                       |            | -          | $D_{r3v1}$                     | $D_{r3v2}$ | $D_{r3v3}$ |
| $V_1$ |                                       |            |            | -                              | $D_{v1v2}$ | $D_{v1v3}$ |
| $V_2$ |                                       |            |            |                                | -          | $D_{v2v3}$ |
| $V_3$ |                                       |            |            |                                |            | -          |

図1 Distance matrix of real and virtual stimuli (the case of three virtual and real stimuli)

までに計算法が示されているのは  $D_{r_{irj}}$  (本物刺激同士の距離) のみである。 $D_{r_{irj}}$  は similarity choice model<sup>4),5)</sup> や, overlap model<sup>6),7)</sup> もしくは、本研究でも用いる Clarke et al<sup>8),9)</sup> の手法を用いて計算可能である。しかしながら、これらの手法は本物刺激と仮想刺激の比較という問題を対象としていないため、 $D_{r_{ivj}}$  および  $D_{v_{ivj}}$  の計算には適用できない。したがって、図1の行列の計算手法に関する技術的課題は、主に以下の2点である。

第一に、 $D_{v_{ivj}}$  (仮想刺激同士の知覚的距離) の計算方法である。2種の同定課題では、課題の参加者らは仮想刺激同士を直接比較しない。Virtual-to-real 同定課題では、仮想刺激と本物刺激が比較される。Real-to-real 同定課題では、本物刺激同士が比較される。2種の混同行列からは、仮想刺激同士の知覚的距離を示す情報が直接得られない。しかしながら、われわれは、この情報は、複数の仮想刺激と本物刺激の距離を用いて計算が可能であることを示す。

第二に、2種類の同定課題の結果の一貫性を保つ必要がある。2種類の課題は独立に行われるから、これらの結果を一貫性を保ちながら統合する必要がある。このため、われわれは、 $D_{r_{ivj}}$  (仮想刺激と本物刺激の間の距離) を、2種の同定課題の結果の両方を用いて計算することで、これを実現する。

本論文では、以上の計算方法とその適用例、検証を示し、計算方法の有効性を示す。

## 2. 本物と仮想刺激の多次元尺度構成手法

多次元空間を構成するために、空間に配置される刺激同士の知覚的距離を計算する。刺激の組合せによって、異なる計算方法を適用する。刺激間の知覚的距離が計算されれば、計量的多次元尺度構成法をそれらに適用し、2次元もしくは3次元の知覚空間を構成する。さらに高次の空間の構成も可能であるが、4次元以上

の空間では可視性を損なう。

## 2.1 複数刺激に対する人間の内的応答の信号検出理論的モデル

複数の物理刺激に対する人間の内的応答を表現するモデルとして、信号検出理論を用いる。このモデルでは、物理刺激の同定問題は、多次元の知覚空間上に確率的に分布する信号の同定問題として捉えられる。確率分布としては、正規分布が実際とよく一致することがよく知られており、本研究でもこれを用いる。図2に示すように、物理刺激  $s_i$  に対する心的応答の知覚空間上での分布は、複数の変量の確率分布の合成として表わされる。図中では、2変量の分布の合成となっている。分布の中心を  $S_i$  で表わし、これは多次元知覚空間上での座標である。空間を構成する複数の変量(次元)は互いに独立であると仮定する。さらに、全ての刺激に対する確率分布関数の形状は等しいと仮定する。各変量の単位は、正規分布の分散と等しい。これは、各変量は分散によって正規化されていることと同義である。

このモデルでは、刺激  $s_i$  が人に与えられ、その心的応答が  $S_i$  に十分近ければ、刺激が  $s_i$  であると判断される。もし、心的応答がむしろ  $S_j$  に近ければ、その刺激は  $s_j$  として誤判断される。この判断の基準となる境界は、直線  $\lambda_{ij}$  で表現される。

多次元空間上での刺激の取り扱いを簡略化するため、Clarke et al<sup>(8),(9)</sup> の手法を用いる。この手法は、任意の2刺激の心的応答を、それら2刺激を結ぶ直線上で議論する手法である。図2の左上に、 $s_i$  と  $s_j$  の心的応答を直線  $S_i-S_j$  上で捉えた図を示す。 $\bar{S}_i$  および  $\bar{S}_j$  は、 $S_i$  と  $S_j$  の、直線上での座標である。 $\bar{\lambda}_{ij}$  は、 $\lambda_{ij}$  と直線の交点である。この直線上での  $\bar{S}_i$  と  $\bar{S}_j$  の距離  $D_{s_i s_j} = \bar{S}_j - \bar{S}_i$  を、多次元空間上でのこれら2刺激の距離として捉える。

## 2.2 本物刺激間の知覚的距離の計算

図3は、本物刺激  $r_i$  の直線  $R_i - R_j$  上での心的応答を示す。この直線上では、

$$\bar{\lambda}_{ij} - \bar{R}_i = Z\left(\frac{P_{riri}}{P_{riri} + P_{rirj}}\right) \quad (1)$$

が成立する。ここで、 $Z(p)$  は確率  $p$  の  $z$  スコアであり、

$$p = g(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (2)$$

$$Z(p) = g^{-1}(p). \quad (3)$$

で表わされる。同様に、 $\bar{R}_j - \bar{\lambda}_{ij}$  は、

$$\bar{R}_j - \bar{\lambda}_{ij} = Z\left(\frac{P_{rjrj}}{P_{rjrj} + P_{rjri}}\right). \quad (4)$$

で与えられる。以上の式を用いれば、2個の本物刺激

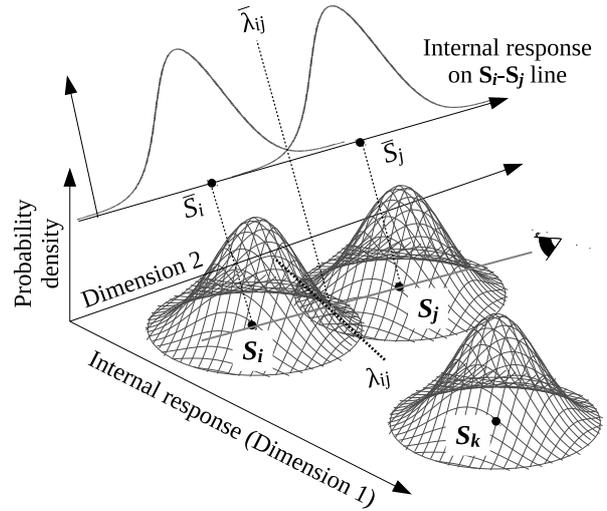


図2 Internal responses to multiple stimuli on perceptual multidimension and application of Clarke's rule

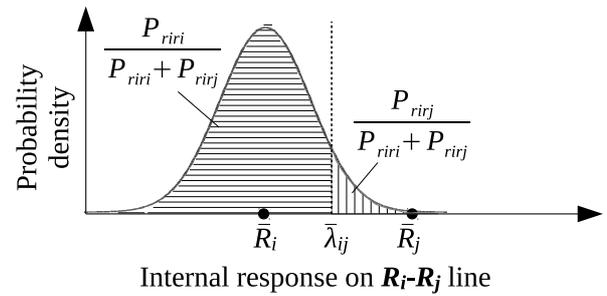


図3 Internal response to  $r_i$  on  $R_i-R_j$  line

の間の知覚的距離は、

$$D_{rirj} = |\bar{R}_j - \bar{R}_i| = \left| Z\left(\frac{P_{riri}}{P_{riri} + P_{rirj}}\right) + Z\left(\frac{P_{rjrj}}{P_{rjrj} + P_{rjri}}\right) \right| \quad (5)$$

となる。

## 2.3 本物-仮想刺激間の知覚的距離の計算

Virtual-to-real 同定課題では、実験の参加者は仮想刺激を本物の刺激に対応させる。これらの刺激の心的応答は図4のように表わされる。仮想刺激  $v_i$  が呈示され、その心的応答は  $V_i$  を中心に確率的に出現する。心的応答が  $R_i$  に近ければ、 $v_i$  は  $r_i$  と判断される。しかしながら、心的応答が  $R_j$  にむしろ近ければ、 $v_i$  は  $r_j$  として判断される。この判断基準となる直線を、 $\lambda_{ij}$  と表わす。この多次元空間を、 $V_i$  および  $R_i$  と  $R_j$  の中心を通る直線上で観察すると、図5が得られる。

$\bar{\lambda}_{ij} - \bar{V}_i$  は、

$$\bar{\lambda}_{ij} - \bar{V}_i = \left| Z\left(\frac{P_{viri}}{P_{viri} + P_{virj}}\right) \right|. \quad (6)$$

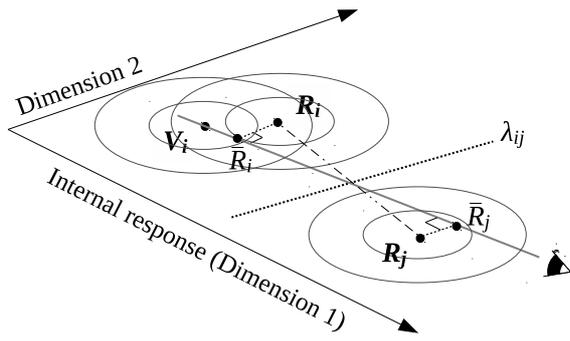


図 4 Internal response to  $v_i$ ,  $r_i$ , and  $r_j$ . For visual clarity, the probability densities are not shown.

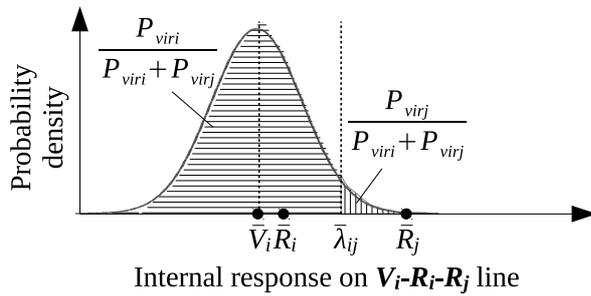


図 5 Internal response to  $v_i$  on the  $V_i$ - $R_i$ - $R_j$  line

で与えられる。さらに、実験の参加者らに特別なバイアスがない、すなわち  $\bar{\lambda}_{ij}$  が、 $\bar{R}_i$  と  $\bar{R}_j$  の中心にあるとき、

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{R}_i - \bar{V}_i \\ \bar{R}_j - \bar{V}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(\bar{\lambda}_{ij} - \bar{V}_i) \\ D_{virj} \end{bmatrix} \quad (7)$$

が成立する。仮想刺激と本物刺激の間の知覚的距離は、

$$\begin{bmatrix} D_{virj} \\ D_{virj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\bar{R}_i - \bar{V}_i| \\ |\bar{R}_j - \bar{V}_i| \end{bmatrix} \quad (8)$$

であるから、(7) を解くことによって、これらの知覚的距離が得られる。 $D_{virj}$  は、先の節で real-to-real 同定課題の結果を用いて求めた。したがって、 $D_{virj}$  および  $D_{virj}$  は、2 種の同定課題の結果の両方を用いて計算される。このことによって、2 種の課題の結果の一貫性を保つことが可能となる。

#### 2.4 仮想刺激間の知覚的距離の計算

最後に、仮想刺激間の知覚的距離を計算する。実験の参加者は、刺激同定課題の中で仮想刺激同士を直接比較しない。しかしながら、本物刺激間の評価基準を利用することで、仮想刺激間の距離の計算は可能となる。図 6 に  $v_i$  および  $v_j$  に対する心的応答と、 $R_i$  および  $R_j$  を示す。この多次元知覚空間を、 $V_i$  と  $V_j$  を通過する直線上から観察すると、図 7 が得られる。この直線上では、

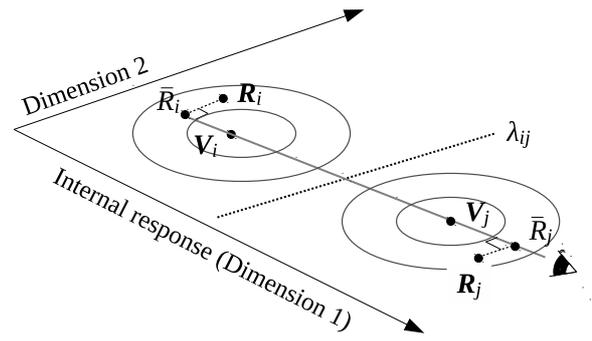


図 6 Internal response to  $v_i$  and  $v_j$

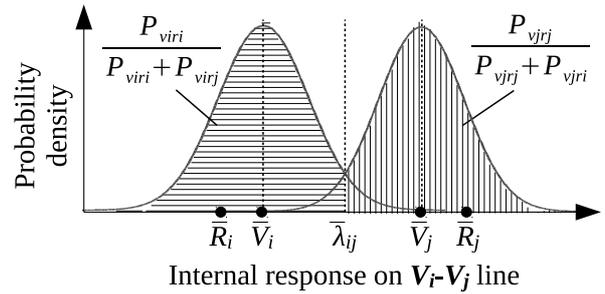


図 7 Internal response to  $v_i$  and  $v_j$  on the  $V_i$ - $V_j$  line

$$\bar{\lambda}_{ij} - \bar{V}_i = Z\left(\frac{P_{virj}}{P_{virj} + P_{virj}}\right) \quad (9)$$

が成立する。同様に、

$$\bar{V}_j - \bar{\lambda}_{ij} = Z\left(\frac{P_{vjrj}}{P_{vjrj} + P_{vjri}}\right) \quad (10)$$

も成立する。2 個の仮想刺激間の知覚的距離は、上記 2 式を用いて、

$$\begin{aligned} D_{vivj} &= |\bar{V}_j - \bar{V}_i| \\ &= \left| Z\left(\frac{P_{virj}}{P_{virj} + P_{virj}}\right) + Z\left(\frac{P_{vjrj}}{P_{vjrj} + P_{vjri}}\right) \right| \quad (11) \end{aligned}$$

と計算できる。

#### 2.5 多次元尺度構成法の適用

上記の計算により得られた刺激間の知覚的距離に多次元尺度構成法を適用して、多次元空間上での刺激の分布を計算する。多次元尺度構成法は、与えられた刺激間の距離情報を保ちながら、刺激の多次元空間上での座標を計算する。空間の次元数は任意に決定できるが、一般的に、次元数が高いほど、距離情報の再現性が高い。われわれの目的が図視的に刺激の関係を理解することであるから、2 次元か 3 次元が好ましい。本研究では、Torgerson<sup>10)</sup> が開発した計量的手法を用いる。計量的とは、与えられた距離情報と多次元空間上での距離が比例関係を有することを意味する。

### 3. 計算例

開発した計算手法をいくつかの混同行列の例に適用

表 1 Real-to-real identification task: Confusion matrix

|         |       | Answered |       |       |
|---------|-------|----------|-------|-------|
|         |       | $r_1$    | $r_2$ | $r_3$ |
| Present | $r_1$ | 0.8      | 0.1   | 0.1   |
|         | $r_2$ | 0.1      | 0.8   | 0.1   |
|         | $r_3$ | 0.1      | 0.1   | 0.8   |

表 2 Example 1 (shrunk): Confusion matrix for virtual-to-real id. task

|         |       | Answered |       |       |
|---------|-------|----------|-------|-------|
|         |       | $r_1$    | $r_2$ | $r_3$ |
| Present | $v_1$ | 0.7      | 0.15  | 0.15  |
|         | $v_2$ | 0.15     | 0.7   | 0.15  |
|         | $v_3$ | 0.15     | 0.15  | 0.7   |

表 3 Example 2 (distorted): Confusion matrix for virtual-to-real id. task

|         |       | Answered |       |       |
|---------|-------|----------|-------|-------|
|         |       | $r_1$    | $r_2$ | $r_3$ |
| Present | $v_1$ | 0.8      | 0.1   | 0.1   |
|         | $v_2$ | 0.1      | 0.7   | 0.2   |
|         | $v_3$ | 0.1      | 0.2   | 0.7   |

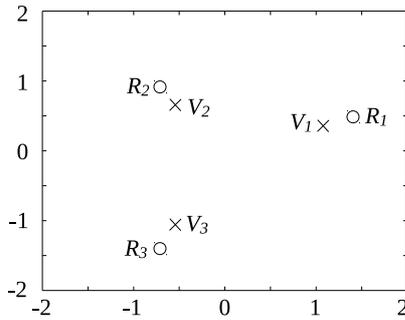


図 8 Example 1 (shrunk): Stimuli distribution on perceptual space

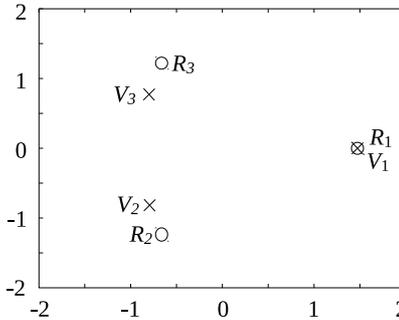


図 9 Example 2 (distorted): Stimuli distribution on perceptual space

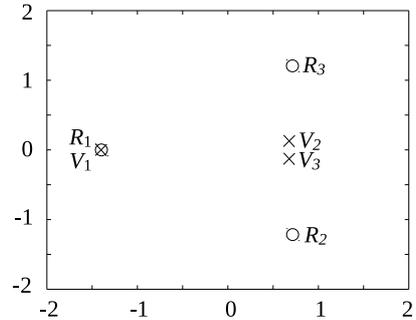


図 10 Example 3 (confused): Stimuli distribution on perceptual space

表 4 Example 3 (confused): Confusion matrix for virtual-to-real identification

|         |       | Answered |       |       |
|---------|-------|----------|-------|-------|
|         |       | $r_1$    | $r_2$ | $r_3$ |
| Present | $v_1$ | 0.8      | 0.1   | 0.1   |
|         | $v_2$ | 0.1      | 0.4   | 0.5   |
|         | $v_3$ | 0.1      | 0.5   | 0.4   |

した結果を述べる. 表 1 に real-to-real 同定課題の結果である混同行列を示す. この行列といくつかの異なる virtual-to-real 同定課題の行列に対して, 開発した手法を適用する. 以下の例では, 2 個の刺激の間の距離が 2 であれば, それらは 84% の確率で正しく同定されることを意味する ( $2 \cdot Z(0.84) = 2.0$ ).

#### Example 1 (Shrunk space)

まず, virtual-to-real 同定課題の結果が表 2 の混同行列で表わされている場合を取り扱う. 正答率が 0.7 と, real-to-real 同定課題よりも低い値である. 誤答率は均等に設定した. 表 1 と 2 にわれわれの手法を適用し, 刺激の知覚空間上での配置を計算すると, 図 8 が得られる. 両方の混同行列とも誤答率が均等であるため, 仮想刺激で構成される多角形と本物刺激で構成されるそれは相似である. しかしながら, 仮想刺激の正答率がより小さいために, 仮想刺激間の距離は, 本物刺激間の距離よりも小さい. その結果, 仮想刺激から構成される三角形の面積の方が小さい.

#### Example 2 (Distorted space)

次に, virtual-to-real 同定課題の結果が表 3 で与えられている場合にわれわれの手法を適用し, 図 9 の知

覚空間を得た. 表 1 と 3 は, 1 行目の値が同じである. すなわち,  $r_1$  と  $v_1$  は, 本物刺激との関係において等しいわけであるから, 知覚空間上では  $R_1$  と  $V_1$  の位置が一致する. さらに, 表では,  $P_{v_2r_2}$  と  $P_{v_3r_3}$  の値が 0.7 であるから,  $v_2$  と  $v_3$  は,  $r_2$  と  $r_3$  に比べて, 弁別が難しく, 知覚的に類似している. したがって,  $V_2$  と  $V_3$  の間の距離は  $R_2$  と  $R_3$  のそれに比べて小さくなる.

#### Example 3 (Confused case)

上記の例では, 正答率が誤答率よりも高いという理想的な状況であった. 次に, 表 4 のように, 誤答率が正答率よりも高いという結果が得られた場合に, われわれの手法を適用し, 図 10 の知覚空間を得た.  $v_2$  が  $r_2$  であると判断された確率は 0.4 である. 一方,  $v_2$  が  $r_3$  であると判断された確率は 0.5 であるから,  $v_2$  は  $r_2$  よりもむしろ  $r_3$  に似ているということである. 同様に,  $v_3$  は  $r_3$  よりもむしろ  $r_2$  に似ている. したがって, 図のように,  $V_3$  は  $R_2$  に,  $V_2$  は  $R_3$  に知覚的に近いという結果が得られる.  $v_2$  と  $v_3$  は完全に混同されてしまっていることが分かる.

以上の例のように, われわれの手法を用いることによって, 本物刺激と仮想刺激の知覚関係が図示され, 容易に理解できるようになる. 説明の都合上, 少ない刺激数での簡単な例を示したが, 刺激の種類が増え, 混同行列が複雑になるほど, 知覚空間を用いた理解は効果を発揮する.

## 4. 開発した手法の検証

これまでに述べた計算方法および内的応答モデルは

多くの仮定を含んでいる。信号検出理論に関する仮定、つまり確率分布の等分散性やバイアスの有無、知覚空間を構成する変数の独立性の成立は、バーチャル・リアリティ・インタフェースや模擬される仮想刺激の種類に依存する。したがって、これらの仮定の妥当性は本論文で取り扱うべきではなく、個別の案件ごとに考察されるべきものである。本論文で検証すべきは、われわれが開発した手法に特有の計算手法である。それは、本物-仮想刺激間の距離  $D_{rivj}$  および仮想刺激間の距離  $D_{vivj}$  を、一次元空間上で近似的に算出する手法である。本節では、開発した手法をランダムに生成された多数のケースに適用することで、この近似計算の妥当性を検証する。本物刺激間の距離  $D_{rirj}$  の計算の妥当性については既に、いくつかの文献<sup>7)~9),11),12)</sup>で報告されている。

#### 4.1 検証方法

##### 4.1.1 概要

3 種の本物刺激と仮想刺激がある場合（計 6 刺激）について、われわれの手法の検証を行う。なお、4 種（計 8 刺激）と 5 種（計 10 刺激）の場合でも同様のことが成立することを確認している。手順の概要を述べる。まず、参照用として 3 種の本物および仮想刺激を含む 2 次元の知覚空間をランダムに用意する。次に、知覚空間から 2 種の混同行列を計算する。そして、混同行列にわれわれの手法を適用し、知覚空間を再構成する。こうして再構築された知覚空間と参照用のその類似性を比較する。比較のために、刺激間の距離を基にした指標を用意する。

##### 4.1.2 参照用ランダム空間の生成

2 次元の知覚空間の上に、3 種の本物刺激  $R_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) をランダムに配置した。ただし、それぞれの間の距離が 2.5 を超えないように拘束した。知覚空間上で 2 種の刺激の距離が 2.5 であるとき、それらは 90% ( $2 \cdot Z(0.9) = 2.5$ ) の確率で弁別可能である。次に、 $R_i$  から距離 0.5 の範囲内に、仮想刺激  $V_i$  をランダムに配置した。

##### 4.1.3 混同行列の計算

参照用空間を基に 2 種の混同行列（real-to-real 課題および virtual-to-real 課題）を計算したが、その方法を述べる。 $s_i$  が  $s_j$  と判断される確率は、

$$P_{s_i s_j} = P(s_j | s_i) = \int_{A_j} f(\mathbf{S}_i) d\mathbf{S} \quad (12)$$

$$f(\mathbf{S}_i) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{(x_1 - S_{ix1})^2}{2} + \frac{-(x_2 - S_{ix2})^2}{2}\right) \quad (13)$$

で計算される<sup>13)</sup>。 $A_j$  は、 $R_1, R_2, R_3$  の垂直二等分線で区切られた面である（図 11）。 $S_i$  は刺激  $s_i$  の知覚空間上での分布の中心の座標である。 $S_{ix1}$  と  $S_{ix2}$  は、その座標の  $x_1$  成分と、 $x_2$  成分をそれぞれ表わ

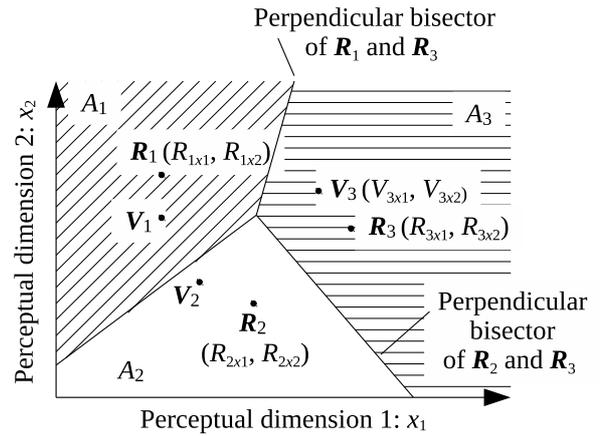


図 11 Stimuli distribution and bisectors for the computation of confusion matrices

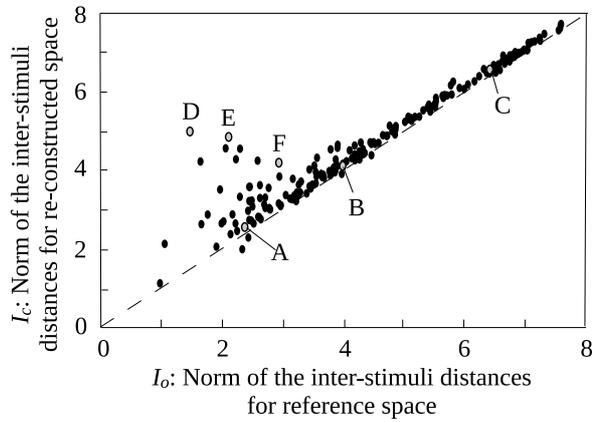


図 12 Indices of inter-stimuli distances for reference and reconstructed stimuli spaces (3-stimuli case)

す。確率は、2 個の正規分布の同時確率密度関数の面積分で与えられる。判断の基準線を、本物刺激間の垂直二等分線としているから、 $s_i$  が呈示されたとき、その心的応答に最も近い  $R_j$  として同定されるという一般的なモデルである。

##### 4.1.4 知覚空間比較用の指標

参照用の空間と、われわれの手法によって再構築された空間の類似性を比較するために刺激間の距離を基にした指標を導入する。指標は、刺激間距離を要素とするベクトルのノルムであり、

$$I = \|[D_{r1r2}, \dots, D_{s_i s_j}, \dots, D_{v2v3}]\| \quad (14)$$

$$i = 1, \dots, 5, j = i + 1$$

$$\mathbf{S}_1, \dots, \mathbf{S}_6 = \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3, \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3$$

で表わされる。 $I_o$  と  $I_c$  はそれぞれ参照用空間と再構築された空間の指標である。

#### 4.2 比較結果

図 12 に、ランダムに生成された 200 点のサンプルについて、 $I_o$  と  $I_c$  の関係を示す。両指標は高い線形性

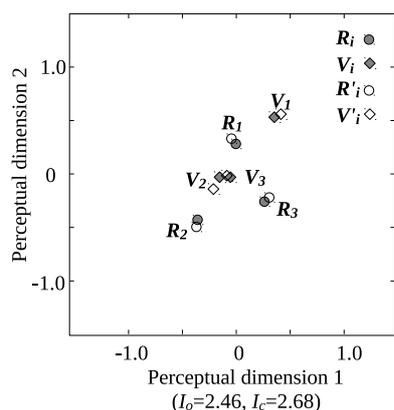


図 13 Case A: Small distribution

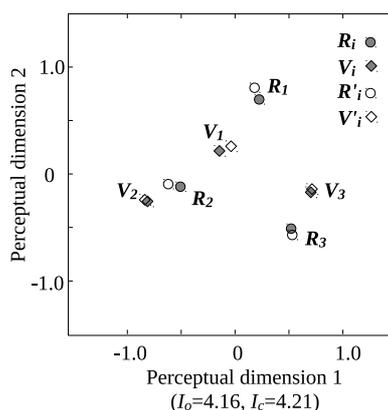


図 14 Case B: Middle-sized distribution

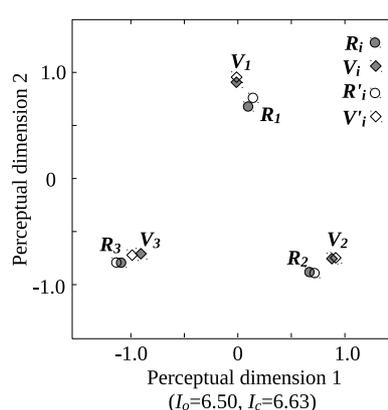


図 15 Case C: Large distribution

を示し (Pearson's  $r = 0.957$ ) , 再構築された知覚空間は、参照用空間に配置された刺激間の距離をよく再現していることが示された。空間の例として、図 13-15 に、Cases A-C を示す。Cases A-C は、図 12 の A, B, および C に対応する点であり、Case A は比較的小さな空間の例、Case B は中程度、Case C は大きな空間の例をそれぞれ示す。 $R_i$  と  $V_i$  は参照用刺激の位置であり、 $R'_i$  と  $V'_i$  は再構築された空間での刺激の位置である。いずれの例でも、ランダムに生成された参照用空間が十分に再構築されている。

一方、 $I_o$  と  $I_c$  の線形性は、 $I_o$  の値がおおよそ 3 以下の小さいときに損なわれることがある。次節で空間の再構築に失敗した例を紹介する。

#### 4.3 知覚空間の再構築に失敗した例

知覚空間の構築に失敗した例として、図 12 の D, E, F をそれぞれ、図 16, 17, 18 に示す。これらの例は、いずれも  $I_o$  の値が 1-3 と、小さいときに限られる。Case D (図 16) について特に詳細に述べると、参照用空間の刺激と再構築された空間の刺激の配置が全く異なっている。

これは、多次元空間上の刺激の距離を、一次元空間上で推定したことによる誤差が原因である。特に、3 個以上の刺激がほぼ同一直線上に近接して配置されているとき、推定距離が実際よりも大きく見積られてしまう。本研究の手法では、直線上には 2 個の刺激しかおおよそ存在しないという仮定のもと、刺激間の距離推定を行っているため、3 個以上の刺激が存在する場合には推定誤差が大きくなる。図 16 では、 $V_1, V_2, V_3$  (黒塗りのひし形) が近接して直線上に配置されている。 $R_1, R_2, R_3$  (黒塗りの丸) も直線上に配置されている。しかしながら、複数刺激が直線上に配置されていても、互いに十分に離れて配置されている場合には、推定誤差は問題にならない。例えば、Case B (図 14) では、直線上に  $R_1, R_2, V_1, V_2$  が並んでい

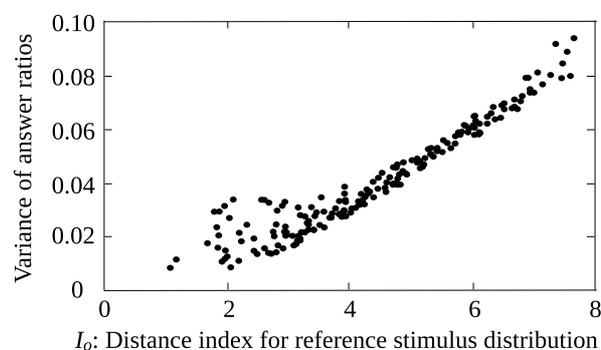


図 19  $I_o$  vs. variance of answer ratios (3-stimuli case)

るが、知覚空間は精度よく再現されている。

同様に、Case E (図 17) と F (図 18) についても参照用空間の刺激が近接して直線上に配置されているため、空間の再構築に失敗している。

#### 4.4 適用可否のガイドの導入

上節で述べたように、ランダムに生成された参照用空間のほとんどは、精度良く再構築されたが、われわれの手法は  $I_o$  の値が小さい場合には不適切であることが明らかになった。 $I_o$  が概ね 3 以下であれば、われわれの手法を適用可能である。 $I_o$  の値をあらかじめ知ることはできないので、 $I_o$  の代わりとなる指標を導入する。その指標は、混同行列の回答率の分散である。図 19 に、 $I_o$  と対応する分散の関係を示す。 $I_o$  と分散の間には比例関係があることがわかる。 $I_o$  の値が大きときは、知覚空間上の刺激が互いに離れている。このとき、刺激の同定は比較的容易になるため、混同行列の正答率は上昇し、誤答率は低下する。したがって、回答率の分散が大きくなる。一方、 $I_o$  の値が小さいときは、知覚空間上の刺激は互いに近く、混同されやすい。そのため、正答率は低下し、誤答率が上昇し、結果として全ての回答率がチャンスレベルに近づき、回答率の分散が小さくなる。図によると、 $I_o = 3$  は、分散の 0.02-0.04 に対応する。したがっ

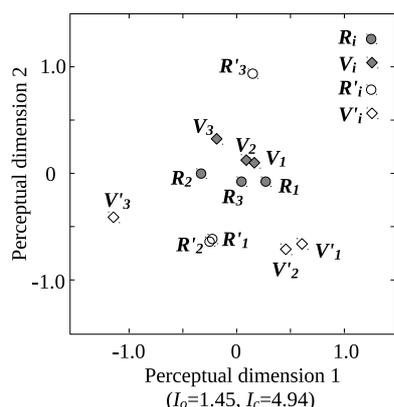


図 16 Worst case D

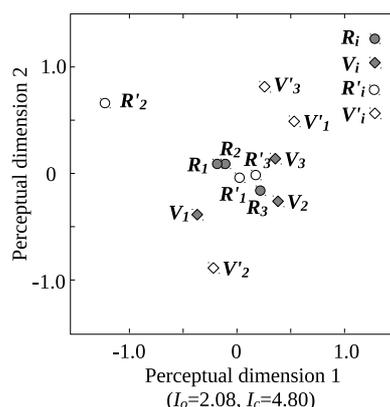


図 17 Worst case E

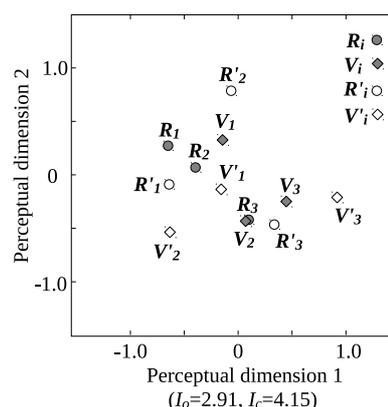


図 18 Worst case F

て、3種の刺激を用いる場合には、混同行列の回答率の分散が0.04以上のときに、われわれの手法が適している。この値は、一般的な刺激同定課題としては相当に難しいときに限られ、われわれの手法は実用的にはほとんどの課題に適用可能である。

同様に、4種と5種の刺激を用いる場合についても、適用の可否を決定する分散の値を調べた。4種と5種の場合には、混同行列の回答率の分散が0.03以上のときに、われわれの手法を用いるべきである。

## 5. 結 論

本研究は、バーチャル・リアリティ・インタフェースおよび仮想刺激の品質を知覚関係図を用いて評価する新しい手法を提案した。この手法は、刺激同定課題の結果から仮想刺激および本物刺激の間の知覚的距離を計算し、多次元尺度構成法を用いて、刺激の知覚的類似性を多次元空間上に再現する。本稿は、計算手法の課題の解法を示し、手法をいくつかの例に適用してみた。また、ランダムに生成された多数の例に対して本手法を適用し、その有効性と制約を確認した。混同行列の回答率の分散が、本手法の適用の可否のガイドとなることを示した。本手法を一般的なバーチャル・リアリティ・インタフェースに適用すれば、仮想刺激の品質を図示的に確認することが可能である。

謝辞 本研究は、MEXT KAKENHI 23135514の支援を受けて行われたものである。

## 参 考 文 献

- 1) Carroll, J.D. and Chang, J.J.: Analysis of individual differences in multidimensional scaling, *Psychometrika*, Vol.35, pp.283–319 (1970).
- 2) Tucker, L.R. and Messick, S.: An individual differences model for multidimensional scaling, *Psychometrika*, Vol.28, pp.333–367 (1963).
- 3) Takane, Y., Young, F. W. and De Leeuw,

J.: Non-metric individual differences multidimensional scaling: an alternating least squares method with optimal scaling features, *Psychometrika*, Vol.42, pp.7–67 (1977).

- 4) Luce, R. D.: *Individual Choice Behavior: A Theoretical Analysis*, Dover Publications (2005).
- 5) Luce, R.D.: *Detection and Recognition*, Dover Publications (1963).
- 6) Townsend, J.T.: Theoretical analysis of an alphabetic confusion matrix, *Perception & Psychophysics*, Vol.9, pp.40–50 (1971).
- 7) Townsend, J. T. and Landon, D.E.: An experimental and theoretical investigation of the constant-ratio rule and other models of visual letter confusion, *Journal of Mathematical Psychology*, Vol.25, pp.119–162 (1982).
- 8) Clarke, F.R.: Constant ratio Rule for Confusion Matrices in Speech Communication, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.29, No.6, pp.751–720 (1957).
- 9) Clarke, F. R. and Anderson, C. D.: Further Test of the Constant ratio Rule in Speech Communication, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.29, No.12, pp.1318–1230 (1957).
- 10) Torgerson, W.S.: Multidimensional scaling: I. Theory and method, *Psychometrika*, Vol. 17, pp.401–419 (1952).
- 11) Hodge, M.H. and Pollack, I.: Confusion matrix analysis of single and multidimensional auditory displays, *Journal of Experimental Psychology*, Vol.63, pp.129–142 (1962).
- 12) Hodge, M.H.: Some further tests of the constant ratio rule, *Perception & Psychophysics*, Vol.2, pp.429–437 (1967).
- 13) Macmillan, N.A. and Creelman, C.D.: *Detection theory - a user's guide*, Psychology Press, 2nd edition (2009).