

# 論文

## 重心動揺を指標としたサラウンド・ディスプレイの視覚的効果の測定

大西 仁<sup>†,††</sup> 望月 要<sup>†,††</sup> 杉本 裕二<sup>†</sup>

Measuring the “Reality” Given by Highly Realistic Surrounding Display Systems:  
Application of an ARX Model to Observer’s Body-sway Data

Hitoshi OHNISHI<sup>†,††</sup>, Kaname MOCHIZUKI<sup>†,††</sup>, and Yuji Y. SUGIMOTO<sup>†</sup>

あらまし 仮想環境に利用される没入型サラウンド・ディスプレイが与える『臨場感』、『没入感』といった心理的な印象の定量的評価法として、画像の動きに対応して誘導運動として生じる身体の微細な運動を重心動揺計で測定し、これを『臨場感』、『没入感』の指標とする方法を提案した。提案した方法では、視覚刺激の動きと観察者の重心動揺に ARX モデルをあてはめることにより、視覚刺激が重心動揺に与える影響の定量的な解析が可能になる。提案した方法を用いて、大型 5 面ディスプレイ及び小型 3 面ディスプレイによる視覚刺激提示時の重心動揺量を測定した。その結果、視覚刺激が roll 運動する場合は、水平視野角の増加（左右スクリーンの付加）は重心動揺量の左右成分を増加させるが、垂直視野角の増加（上下スクリーンの付加）は重心動揺量の左右成分を増加させないことが示された。また、提案した手法を適用することにより、集団の平均的挙動だけでなく、個別のデータに関しても、定量的な特性が明確になることが示された。

キーワード 人工現実感、サラウンド・ディスプレイ、臨場感、重心動揺、ARX モデル

### 1. ま え が き

近年、人工現実感（以下、VR）研究では、複数、あるいは曲面の大型ディスプレイで観察者を取り囲む没入型ディスプレイ・システム（以下、サラウンド・ディスプレイ）を利用して視覚情報を提示する手法が注目を集めている [1]~[4]。図 1 にサラウンド・ディスプレイの一例 [4] を示す。図 1 からわかるように、観察者のすべての視野空間を被うサラウンド・ディスプレイは、三次元空間内の位置関係を的確に表現するのに適し、また、単一ディスプレイに比べ『豊かな臨場感』を伝えられることから、シミュレーションデータの可視化、工業製品のプロトタイプング、住宅や都市のデザイン、遠隔地のサラウンド・ディスプレイ間を通信ネットワークで結ぶことによる臨場感会議システム [5] 等への応用が試みられている。

しかし、サラウンド・ディスプレイが与える視覚的



図 1 サラウンド・ディスプレイシステム [4]  
Fig.1 A surrounding display system [4].

効果の特徴をいい表す『臨場感』や『迫力』、『没入感』といった言葉は<sup>(注1)</sup>、日常用語の延長として使われることが多く、その心理的な効果を客観的に定義する方法、特に定量的に評価する手法は確立されていない。

(注1)：本論文の中では、以降『臨場感』という言葉で代表することにする。

<sup>†</sup>メディア教育開発センター、千葉市  
National Institute of Multimedia Education, Wakaba 2-12,  
Mihama-ku Chiba-shi, 261-0014 Japan

<sup>††</sup>総合研究大学院大学、千葉市  
The Graduate University of Advanced Studies, Wakaba 2-  
12, Mihama-ku Chiba-shi, 261-0014 Japan

従来、この種の評価には質問紙が用いられることが多かったが、質問紙調査は手軽である反面、リアルタイムの計測ができず、また、観察者が常に、自分の行動やその原因を正確に自覚し言語化できるとは限らない、といった問題点を抱えている。

本研究では、質問紙法に代わる視覚的効果の測定手法として、誘導運動を利用して、画像の動きに対応する身体の微細な運動を重心動揺計で測定し、これを指標とすることにより、視覚的効果を定量的に測定する手法を提案する。

これまでも、視覚刺激と重心動揺の関係性を調べた研究や、重心動揺を用いて『臨場感』の測定を試みた研究は見受けられる [6]~[9]。本論文においても検討するように、重心動揺は鋭敏な指標であるが、同時に個人差や視覚刺激以外の要因による変動を含むため、『臨場感』測定の手段として用いるには、こうした擾乱要因を取り除くことが大きな課題となる。従来の研究は、典型的な被験者のデータについて、重心動揺のスペクトルを示しただけのものが大半であり、こうした擾乱要因の処理が十分であったとはいえない。本研究では ARX モデルを用いた解析法を採用することにより、集団の平均的挙動だけでなく、個別データに関しても定量的な解析を可能にした。

以下、2. で誘導運動と重心動揺について説明する。3. で大型面ディスプレイの視覚的効果の測定実験について述べる。4. では、ARX モデルによる視覚刺激と重心動揺の定量的解析法について述べ、3. で得たデータの解析を行う。5. では、提案した手法を小型多面ディスプレイの視覚的効果測定に適用し、手法の汎用性を検討する。

## 2. 誘導運動と重心動揺

風に流される雲の間に見え隠れする月を眺めていると、静止した雲の間を月が動いていくような印象を受けることがある。このように、運動している対象に対して、客観的にどちらが運動し、どちらが静止しているかとは無関係に生じる動きの印象のことを誘導運動と呼び、古くから視覚心理学の研究対象とされてきた。『雲間の月』の例では、誘導運動は観察対象の相互の間に生じるが、同様の現象は、運動する観察対象と観察者自身の間にも生じる。橋の上から川の流れを眺めていると、ふいに自分自身が流れと反対の方向に移動しているような印象を受ける。対象と観察者の間で生じる誘導運動は、それが顕著な場合には、知覚された

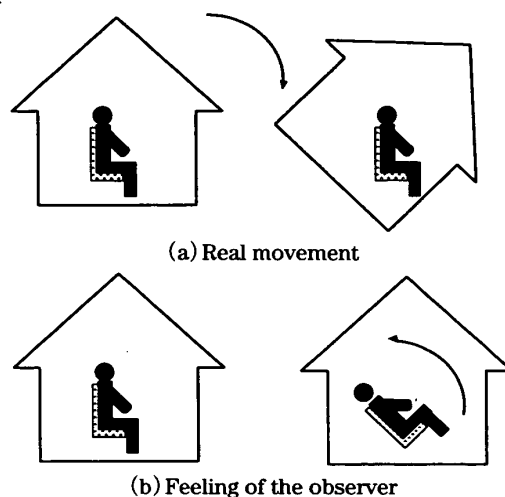


図 2 観察者と観察対象の間で生じる誘導運動の例  
Fig. 2 A example of induced movement occurs between an observer and an object.

運動に対してバランスを保とうとする身体の動きを伴う場合がある [10]。後者の場合、特にこれを視覚誘導自己運動と呼ぶ。かつて遊園地に見られた『ビックリハウス』は、この現象を応用したものである。ビックリハウスでは、物理的には図 2(a) に示すように家が回転するが、家の中にいる観察者は (b) のように自分が宙返りしているように感じ、椅子の肘掛けをつかんだり、両足に力を入れて踏みこたえる、というような身体の運動が生じる。

このような視覚誘導自己運動を、実験室において人工的な映像を利用して起こさせる場合、その映像が原刺激、すなわち現実の風景と類似していればいるほど、反応量が原刺激のそれに近づくと考えられる。したがって、視覚誘導自己運動の量を測定することで、それを生み出した映像と、実風景の間の主観的類似度を定量化することができる [11]。この主観的類似度は、色や形、テクスチャや運動などの印象が総合されたものであると考えられ、少なくとも我々が日常的に用いている『臨場感』という用語が含む意味の、重要な構成要素の一部に対応していると考えられる。

また、視覚誘導自己運動は、視野周辺部に提示される運動刺激の効果が大きく影響するといわれており、サウンド・ディスプレイの評価には特に有効であると思われる。身体の動きは、たとえ微細なものであっても比較的容易に機械計測が可能である。例えば、床面が周期的に前後するときのバランスを保とうとする身体の微細な動きを的確に測定することができるばか

りでなく、その際、視覚情報の有無による身体運動の差異を見出すことができる程度の検出力を備えている [12]。また、極端な視野周辺部の効果については、観察者に明確に意識されることが少なく、言語報告による評価が困難であると予測されるが、重心動揺を用いれば、観察者の意識しない効果についても、適切な評価が得られる可能性がある。また、画像の動きと同期した時系列データを得ることができるので、画像の動きや内容と『臨場感』を関係づけて評価することも可能になる。

実際、重心動揺は VR 研究で注目される以前から、人間の平衡機能の解析のためにスポーツ科学や医療の分野で用いられてきた [6]。また、VR 研究において、視覚刺激と重心動揺の関係も調べた研究もある [7]～[9]。

### 3. 大型 5 面ディスプレイの視覚的効果の測定

大型 5 面ディスプレイの視覚的効果を評価するため、視覚刺激を提示するスクリーンの面数を独立変数として、視覚的効果として生じる重心動揺量を比較した。

#### 3.1 方法

##### 3.1.1 実験環境

メディア教育開発センターの仮想環境システム TEELeX [4] の 6 面のディスプレイを利用した。TEELeX は 1 辺 3m の立方体の各面がスクリーンになっており、各面にステレオ (3D) 映像を表示することができ、被験者の全方位が映像で囲われる<sup>(注2)</sup>。

今回は、背面以外の 5 面のスクリーンに 2D 映像を表示した。正面スクリーンから 221cm、左右スクリーンから 150cm の位置に重心動揺計 (協和電業 ECG-1010D、高さ 50mm) を置いた。

##### 3.1.2 刺激

直方体の各面の内側にチェッカ模様を描き、これを直方体の内部に視点をおいて観察するような画像を作成し、この画像を正面スクリーンの中心を軸に roll 運動させた。揺れ幅は  $\pm 30^\circ$ 、周波数は 0.2 Hz とした。揺れ幅と運動の周波数については、先行研究 [7] において、重心動揺の大きかった条件に合わせた。

チェッカ模様の色は、仮想直方体の床面と天井面が緑、正面壁が赤、左右の壁が青であった。図 3 に正面スクリーンに表示される画像を示す。仮想直方体の正面壁と天井、床面が描かれており、仮想直方体の正面

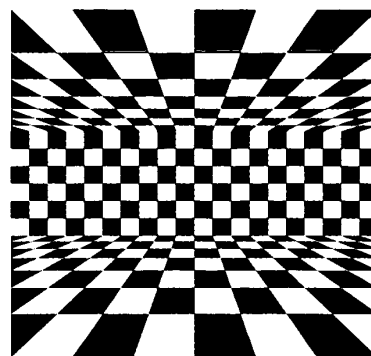


図 3 正面スクリーン上の画像 (初期状態)  
Fig. 3 An image on the front screen (initial state).

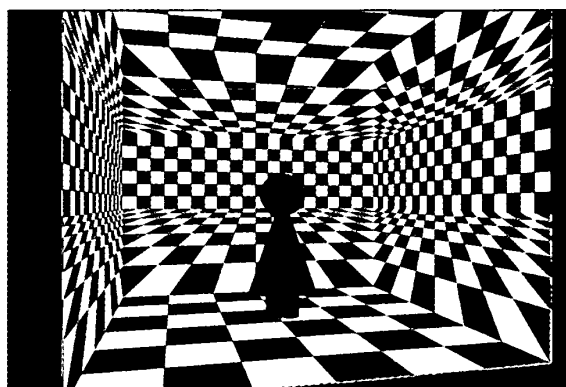


図 4 刺激及び実験のイメージ  
Fig. 4 An image of the experiment and the stimuli.

壁は正面スクリーンより奥にあるイメージとなる。

5 画面の画像は同期して動き、あたかも被験者を囲む仮想の直方体の部屋が、運動するような印象を与えるようにした。図 4 に視覚刺激及び実験のイメージを示す。

この視覚刺激を、1 面 (正面)、3 面 (正面+左右面)、4 面 (正面+左右面+床面)、5 面 (正面+左右面+床面+天井面) のスクリーンに提示し、被験者の重心動揺量を比較した。正面スクリーン単独では、水平、垂直とも約  $68^\circ$  の視野角が得られる。これに左右面及び床・天井面を加えると、水平、垂直とも  $180^\circ$  以上の視野角が得られる。

以前、今回と同一の実験環境、刺激で行った測定実験 [13] では、各被験者に上記 4 条件で視覚刺激を提示して、視覚的効果として生じる重心動揺量を比較した。しかし、4 回の測定により、被験者に馴れが生じたためか、条件間の差が明確にならなかった。そこで、今

(注2):ただし、天井面の中心部約 1m 四方は床面への投影のために開口している。

表 1 条件別被験者数  
Table 1 Assignment of participants.

比較条件	昇順人数	降順人数
静止	8	
1面 vs 3面	5	4
3面 vs 4面	4	5
4面 vs 5面	5	5

回の実験では2条件間の比較とし、被験者の馴れをできる限り減ずるようにした。具体的には、1面と3面、3面と4面、4面と5面、の間で視覚的效果として生じる重心動揺量の比較を行った。

### 3.1.3 被験者

大学学部生を被験者に用いた。各条件に用いた被験者数を表1に示す。例えば、1面条件と3面条件の比較では、先に1面条件で刺激を提示された被験者は5人で、先に3面条件で刺激を提示された被験者は4人である。刺激を繰り返して提示されると被験者に馴れが生じ、視覚的效果が小さくなるので、昇順と降順の被験者数は同数であることが望ましい。また、視覚刺激が動かない状態（静止条件）の重心動揺の測定のために、他の条件とは重ならない8人を割り当てた。

なお、複数の比較条件の実験に参加した被験者もいるため、「1面条件と3面条件の比較時の3面条件」での視覚的效果と、「3面条件と4面条件の比較時の3面条件」での視覚的效果を比較することや、1面条件と4面条件を比較することは、厳密には（統計的実験計画の観点からは）できない。

### 3.1.4 手続き

各条件のスクリーン数で視覚刺激を提示して重心動揺を測定した。重心動揺の測定時間は各回30sで、約1時間のインターバルが設けられた。

被験者は両足の踵と爪先をつけたRomberg立位でリラックスして重心動揺計上に立つこと、意図的に身体を動かさないこと、正面画面を中心に視野の全体ををぼんやりと見る（一点を凝視しない）ことを教示した。観察中の重心動揺を計測することには特に言及しなかった。視覚刺激観察中の被験者の重心位置の変化をサンプリング周期50ms、1/100mm単位で計測した。

静止条件の被験者に提示する視覚刺激は、5面条件と同じスクリーン構成で、5面条件における視覚刺激の初期状態とした。

## 3.2 結果と考察

図5～図8に各条件における左右方向の重心動揺

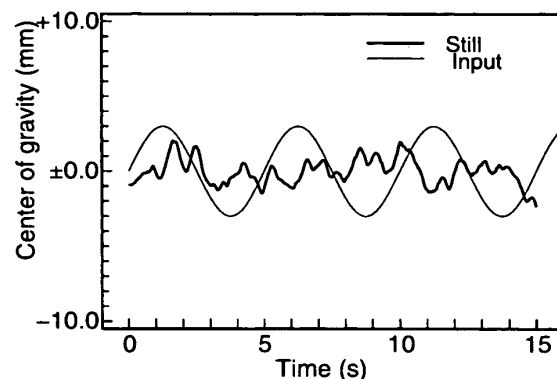


図5 重心動揺（静止条件、被験者8人分の平均値）  
Fig. 5 Mean movement of center of gravity (Still; 8 participants).

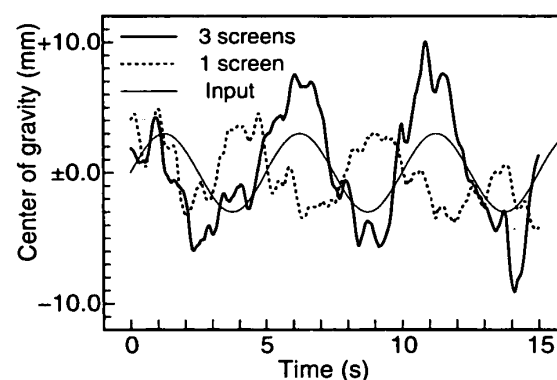


図6 重心動揺（1面 vs 3面、被験者9人分の平均値）  
Fig. 6 Mean movement of center of gravity (1 screen vs 3 screens; 9 participants).

の軌跡の平均値を視覚刺激の回転角と併せて示す<sup>(注3)</sup>。ただし、4.4に述べる方法でトレンドを除去し、更に平均が0になるように調整してある<sup>(注4)</sup>。また、すべてのグラフに関して、軌跡の特徴を見やすくするため、測定開始から15s分のみを表示してある<sup>(注5)</sup>。

これらの図から、おおまかには次のことが読み取れる。

- 3面以上の条件では、被験者の重心動揺に、視覚刺激の運動と同じ周期(5s)で動揺している大きな成分がある。
- 図6において、3面条件における重心動揺量が1面条件におけるそれを上回る。
- 3面以上の条件間では、重心動揺量の明確な差

(注3)：ただし、静止条件においては、実際には視覚刺激は運動していない。

(注4)：本論文で示す「生データ」は、すべて同様の処理をしたものである。

(注5)：データ処理にはデータの全体(30s)を使用した。

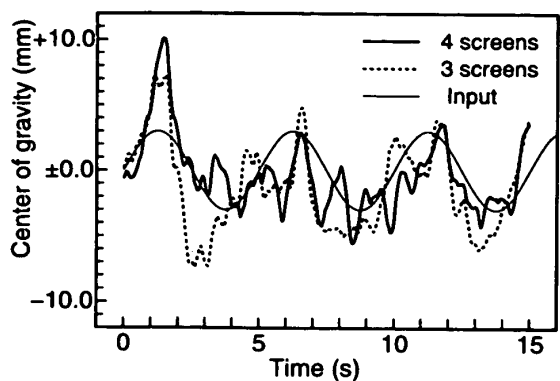


図7 重心動揺 (3面 vs 4面, 被験者 10人分の平均値)  
Fig. 7 Mean movement of center of gravity (3 screens vs 4 screens; 10 participants).

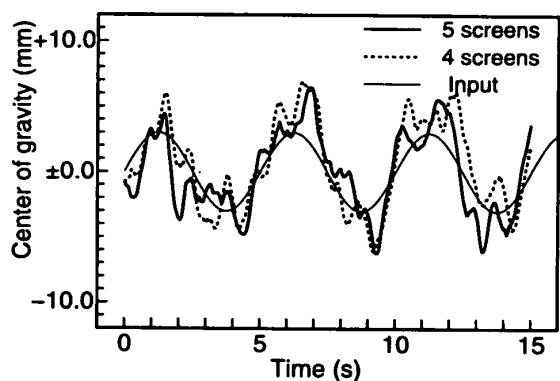


図8 重心動揺 (4面 vs 5面, 被験者 10人分の平均値)  
Fig. 8 Mean movement of center of gravity (4 screens vs 5 screens; 10 participants).

は見られない (ほとんど差はない)。

- 静止条件では、他条件に比べ重心動揺量が小さく、5s周期の大きな成分も見られない。

これらの印象を定量的に評価するために、重心動揺の指標として広く用いられている、軌跡長 (重心の移動距離) を求めた。表2に軌跡長の平均値と標準偏差を示す。

軌跡長の平均値は、1面条件のときが他の条件と比較して短く、3面条件以上ではほぼ同じであり、図6~図8から得た印象と一致する。しかし、標準偏差が大きく、1面条件と3面条件の間にも明確な差があるとはいえない。

また、別の指標としてパワースペクトルを求めた。表3にパワースペクトル (視覚刺激の運動と同じ0.2Hz成分) のスクリーンの面数ごとの平均値と標準偏差を示す。パワースペクトルはどの条件間でも明確な差がなく、図6~図8から得た印象や軌跡長とも食い違っている。したがって、パワースペクトルも適切

表2 重心動揺の軌跡長

Table 2 Mean and standard deviation of locaus length of body sway.

静止条件		
	平均 (mm)	標準偏差
	412	70
1面 vs 3面		
面数	平均 (mm)	標準偏差
1面	598	159
3面	720	190
3面 vs 4面		
面数	平均 (mm)	標準偏差
3面	780	248
4面	744	248
4面 vs 5面		
面数	平均 (mm)	標準偏差
4面	748	126
5面	737	181

表3 パワースペクトルの0.2Hz成分

Table 3 Mean and standard deviation of power (frequency=0.2 Hz).

静止条件		
	平均 (dB)	標準偏差
	108	6.9
1面 vs 3面		
面数	平均 (dB)	標準偏差
1面	119	9.4
3面	117	7.4
3面 vs 4面		
面数	平均 (dB)	標準偏差
3面	126	12.1
4面	130	7.0
4面 vs 5面		
面数	平均 (dB)	標準偏差
4面	125	6.9
5面	117	8.7

な指標にはならない。

この問題は、本実験に限ったことではなく、視覚刺激の重心動揺に与える影響を調べた研究ではつきまとうと推測される。実際、そのような研究の多くでは、典型的な被験者のデータが示され、本節であげたような印象が述べられているだけ、あるいは典型的なデータの軌跡長やスペクトルが示されている程度にすぎない。

これら、二つの指標が条件間の差を明確にできなかった理由として、重心動揺は視覚刺激によらない成分がかなり大きいことがあげられる。運動する視覚刺

激がない状況でも、人間の身体は常に揺れており、それが分散を大きくして、視覚刺激の影響を相対的に減じていると考えられる。この推測が正しければ、重心動揺から視覚刺激により生じた成分を抽出することができれば、抽出した成分を解析の対象にすることにより、微妙な条件間の差でも検出できるようになる可能性がある。次章では、視覚刺激と重心動揺を定量的に関係づける解析法について述べる。

#### 4. ARX モデルによる定量的解析

重心動揺から視覚刺激により生じた成分を抽出することは、「画像の動きを入力、観察者の重心動揺を出力とするシステムを数学的にモデリングする」と考えるのが素直であろう。対象となるシステムの入出力の時系列データから対象の数学モデルを作成することは、システム同定と呼ばれており、制御工学等の分野で利用されている。

本研究では、システム同定法のなかで最も単純な ARX モデル (autoregressive model with exogenous input) を導入し、視覚刺激と重心動揺の定量的な解析を試みる。

##### 4.1 ARX モデル

視覚刺激の運動は振動（並進，回転）であると仮定する。時刻  $t$  における視覚刺激の変位（回転角）を  $u(t)$ 、観察者の重心位置を  $y(t)$  とする。 $u(t)$  を入力、 $y(t)$  を出力とする時不変線形システムは一般に、

$$y(t) = G(z, \theta)u(t) + H(z, \theta)e(t) \quad (1)$$

と表される。 $G(z, \theta)$  はプラントの伝達関数、 $H(z, \theta)e(t)$  は観測雑音、 $e(t)$  は白色雑音である。 $\theta$  はモデルのすべてのパラメータからなるベクトル、 $z$  はシフトオペレータである。プラントの伝達関数  $G(z, \theta)$  が、

$$\begin{aligned} G(z, \theta) &= \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \\ &= \frac{B(z)}{A(z)} \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられたとする。更に、観測雑音  $H(z, \theta)$  が、

$$\begin{aligned} H(z, \theta) &= \frac{1}{a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \\ &= \frac{1}{A(z)} \end{aligned} \quad (3)$$

で与えられたとすると、式 (1) から、

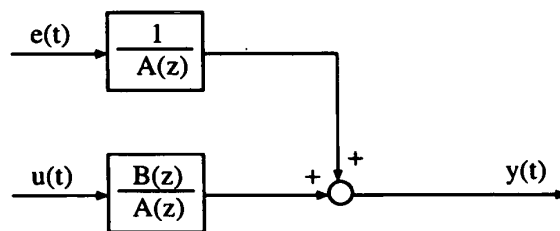


図 9 ARX モデル  
Fig. 9 ARX model.

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t) \quad (4)$$

あるいは、

$$\begin{aligned} y(t) + \sum_{i=1}^n a(i)y(t-i) \\ = \sum_{j=1}^m b(j)u(t-j) + e(t) \end{aligned} \quad (5)$$

を得る。これは、ARX モデル (autoregressive model with exogenous input) と呼ばれ、制御システムの同定に用いられている。ARX モデルのブロック線図は図 9 に示すとおりで、観測雑音が式 (3) で表されるような自己回帰過程を通して形成される (AR モデル) を仮定していることから ARX モデルと呼ばれている。

##### 4.2 ARX モデルの推定

システムのインパルス応答、伝達関数はパラメータを推定することにより得られる。式 (5) に関して、パラメータベクトル、回帰ベクトルを、

$$\theta = (a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m)^T, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & (-y(t-1), -y(t-2), \dots, -y(t-n), \\ & u(t-1), u(t-2), \dots, u(t-m))^T \end{aligned} \quad (7)$$

と定義する。式 (5) は、

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + e(t) \quad (8)$$

となる。

ARX モデルの推定法でいちばん簡単なのは最小 2 乗法である。最小 2 乗法では、

$$J = \sum_{t=1}^N [y(t) - \varphi^T(t)\theta]^2 \quad (9)$$

を最小にする  $\hat{\theta}_{LS}$  を  $\theta$  の推定値とする。 $\hat{\theta}_{LS}$  は、

$$\hat{\theta}_{LS} = \left( \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi(t)^T \right)^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)y(t) \quad (10)$$

で与えられる。

### 4.3 パラメータ数の決定

パラメータ数の選択は、モデル構築において重要である。パラメータ数の決定基準としては、AIC (Akaike's Information Criterion) 等が知られている。

AICは、最尤推定法で得られるモデルの悪さの尺度として、

$$AIC = -2(\text{最大対数尤度}) + 2(\text{パラメータ数}) \quad (11)$$

と定義され、AICが小さいほど良いモデルであるとみなされる。AICの算出のためには尤度の計算が必要になるが、予測誤差が正規性の場合、次式のように簡単になる<sup>(注6)</sup>。

$$AIC = \log \left[ \left( 1 + \frac{2d}{N} \right) J \right] \quad (12)$$

ただし、 $N$ はデータ数、 $d$ はパラメータ数であり、式(5)で表されるARXモデルでは、 $d = n + m$ となる。

### 4.4 トレンドの除去

重心動揺は視覚刺激と関係なく、0.1 Hz以下の大きな成分(トレンド)をもつ。トレンドは視覚刺激の重心動揺に与える影響を相対的に小さく、不明確にするだけでなく、システムを同定するうえでも好ましくないため、事前に取り除いておく必要がある。

トレンドを除去する簡単な方法は多項式を当てはめることである。30sのデータであれば、7次式を当てはめれば0.1 Hz以下の成分を取り出せる。これをもとのデータから引くことによりトレンドを除去できる。

### 4.5 ARXモデルによる重心動揺データの解析

3.で得られたデータをARXモデルで同定した。入力力は視覚刺激の回転角度、出力力は左右方向の重心位置とした。

データの前処理として、7次式をあてはめることにより、トレンドを除去した。前処理の後、最小2乗法によりパラメータ推定を行った。パラメータ数の選択はAICを用いた。表4、表5にAICを最小にするパラメータ数((5)式中の $n, m$ )の平均と標準偏差を示す。

推定されたパラメータを式(5)に代入し、 $e(t) = 0$

表4 AICを最小にするパラメータ数の平均値(標準偏差)  
Table 4 Numbers of parameters that minimize AIC: Means and (standard deviation).

	静止	1面	3面	4面	5面
$n$	5.4(1.2)	6.2(1.6)	5.7(2.1)	5.3(2.2)	6.0(1.6)
$m$	2.4(1.1)	3.3(1.8)	3.2(1.8)	2.3(1.4)	3.5(1.4)

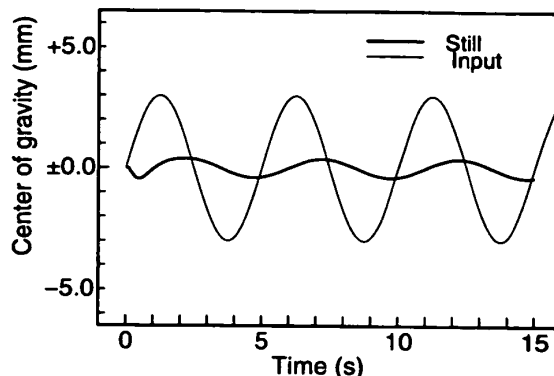


図10 モデルより再現された左右方向の重心動揺(静止条件、被験者8人分の平均値)

Fig. 10 Mean movement of center of gravity reproduced by ARX model (Still; 8 participants).

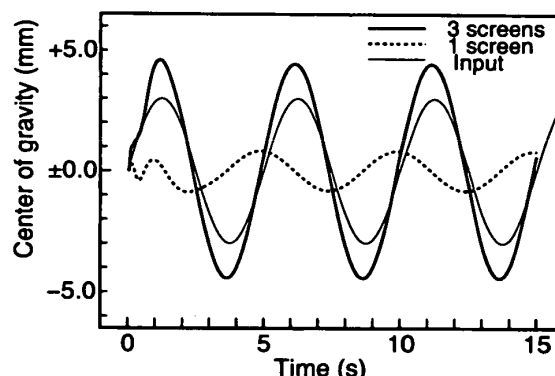


図11 モデルより再現された左右方向の重心動揺(1面vs3面、被験者9人分の平均値)

Fig. 11 Mean movement of center of gravity reproduced by ARX model (1 screen vs 3 screens; 9 participants).

とおくことにより、出力を再現した。図10~図13にモデルより再現された左右方向の重心動揺の平均値を示す。

ARXモデルにより再現した重心動揺は、3.2で見られた傾向をより明確に示している。図11において、3面条件の重心動揺量は、1面条件のそれより大きい。静止条件、1面条件におけるモデルから再現された重心動揺の振幅は1 mmにも満たないので、静止条件は

(注6): 式(12)の導出については文献[14]参照。

当然として、1面条件においても、視覚刺激は重心動揺にほとんど影響を与えていないと考えられる。

また、図12及び図13は、3面以上の条件では、上下のスクリーンを付加しても、重心動揺量は増加しないことを示している。上下スクリーンの効果がなかった理由として次の可能性が考えられる。

(1) 人間が平衡を保持するために重要なのは、左右方向の視覚情報である [15]。

(2) 今回の実験では、水平視野が  $180^\circ$  の条件で、上下スクリーンを付加したので、上下スクリーンの影響が抑制された、あるいは効果が既に飽和していた。

これらの可能性のうち、(2)については、正面スクリーンに上下スクリーンを加えた『縦3面条件』と、正面スクリーンのみ1面条件の間で重心動揺量に差がないことが確認されている [16]。したがって、(2)

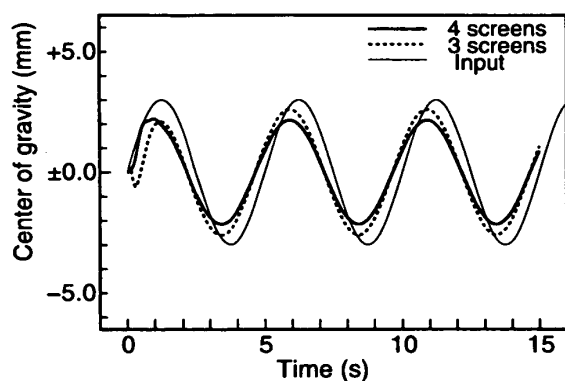


図12 モデルより再現された左右方向の重心動揺 (3面 vs 4面, 被験者10人分の平均値)

Fig. 12 Mean movement of center of gravity reproduced by ARX model (3 screens vs 4 screens; 10 participants).

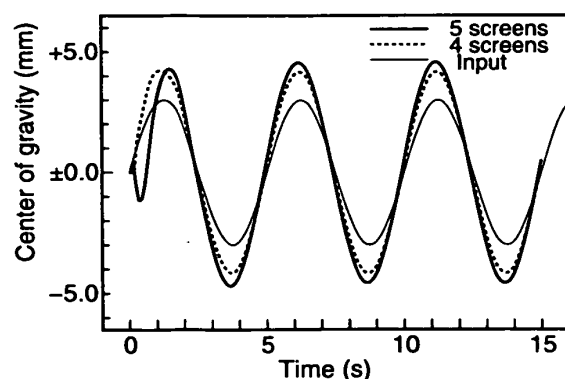


図13 モデルより再現された左右方向の重心動揺 (4面 vs 5面, 被験者10人分の平均値)

Fig. 13 Mean movement of center of gravity reproduced by ARX model (4 screens vs 5 screens; 10 participants).

の可能性は低いと考えられる。

視覚刺激と重心動揺の位相関係に関しては、ARXモデルにより重心動揺を再現することにより、生データでは読み取ることが困難であった傾向が読み取れるようになる。図11~図13から、定常状態では、視覚刺激の影響がなかった1面条件を除いて、重心動揺は視覚刺激よりやや進む傾向にあることが読み取れる。図中では、重心動揺のほうが平均  $4^\circ \sim 25^\circ$  位相が進んでいる。

視覚刺激と重心動揺の位相関係を調べた先行研究では、次のようなことが報告されている。

(i) 視覚刺激の運動が  $0.3\text{ Hz}$  を超えると、重心動揺は視覚刺激より位相が遅れる [7]。

(ii) 視覚刺激の運動が  $0.2\text{ Hz}$  のとき、重心動揺と視覚刺激の位相差は被験者により  $\pm 50^\circ$  程度に分布している [8]。

- 視覚刺激の運動が  $0.2\text{ Hz}$  のとき、平均的には重心動揺は視覚刺激より位相が進み、周波数が高くなるにつれて、重心動揺の位相が遅れる傾向にある。また、視覚刺激の運動を被験者に予測不可能なものにすると、重心動揺の位相は遅れるようになる [17], [18]。

これらのことから、重心動揺のほうが視覚刺激より位相が進むのは、

- 被験者が意識的あるいは無意識的に視覚刺激の運動を予測し、事前に身体を動かしていること、
  - それに加えて、視覚刺激の運動が遅いこと、
- が原因であると考えられる。

ここまでは、集団の平均的挙動に関して議論してきたが、ARXモデルをあてはめることにより、個別のデータの特長も明確にすることができる。図14はあ

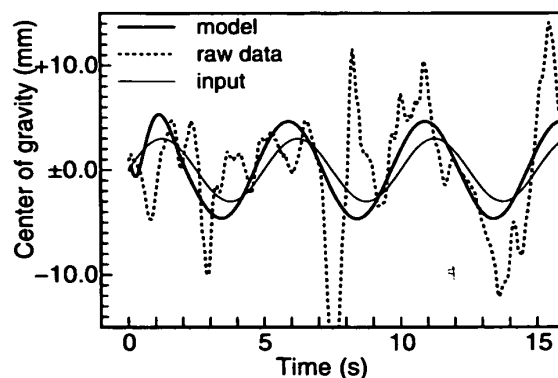


図14 3面条件における一被験者の重心動揺  
Fig. 14 Movement of center of gravity of a participant in the 3 screens condition.



る被験者の3面条件における重心動揺のデータである。生データでは、視覚刺激の影響が不明確であるが、ARXモデルをあてはめることにより、データの特性が明確になる。例えば、定常状態では、視覚刺激よりも重心動揺のほうが約 $25^\circ$ 位相が進んでいることが読み取れる。

## 5. 小型3面ディスプレイの視覚的効果の測定

3.の方法で重心動揺を測定し、ARXモデルをあてはめることにより、1辺が3m程度の大型5面ディスプレイの視覚的効果を測定できることが示された。この手法の汎用性を検討するために、小型3面ディスプレイの視覚的効果を測定した。

### 5.1 方法

#### 5.1.1 実験環境

42インチディスプレイ(画面縦横比9:16)3台を被験者の正面と左右にコの字形に配置し、「3面ディスプレイ」を構成した。両脇の画面の間隔は94cm、画面中央の高さは155cmとし、被験者は正面画面から86cmの距離に立たせた。実験は暗室内で実施した。被験者の足下に重心動揺計を置いた。

#### 5.1.2 刺激

視覚刺激は可能な限り3.1.2に合わせるようにした。CG画像は、直方体の各面の内側にチェッカ模様を描き、これを直方体の内部に視点をおいて観察するような画像を正面画面の中心を軸にroll運動させた。roll運動の揺れ幅は $\pm 30^\circ$ 、揺れの周波数は0.2Hzとした。

視覚刺激は1面(正面のみ)及び3面(正面+左右面)で提示し、被験者の重心動揺量を比較した。正面ディスプレイ単独では、水平約 $56^\circ$ 、垂直約 $33^\circ$ の視野角を有する。3面条件では、水平視野角は $180^\circ$ 以上になる。図15に視覚刺激及び実験のイメージを示す(注7)。

#### 5.1.3 被験者、手続き

大学学部生14名を被験者に用いた。被験者の半数は1面条件を先に観察し、残りの半数は3面条件を先に観察した。

手続きは3.の手続きと同一とした。

### 5.2 結果と考察

表5にAICを最小にするパラメータ数((5)式中の $n, m$ )の平均と標準偏差を示す。

図16に左右方向の重心動揺(生データ)の平均値

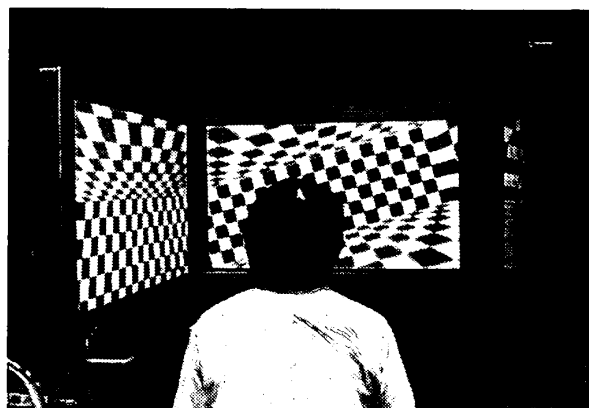


図15 刺激及び実験のイメージ

Fig.15 An image of the experiment and the stimuli.

表5 AICを最小にするパラメータ数の平均値(標準偏差)  
Table 5 Numbers of parameters that minimize AIC:  
Means and (standard deviation).

	1面	3面
$n$	5.1(2.2)	5.5(2.3)
$m$	2.6(1.5)	3.1(1.9)

を示す。図から以下のことが読み取れる。

(i) 3面条件における重心動揺量は1面条件におけるそれより大きい。

(ii) 3面条件においては、被験者は視覚刺激の運動に合わせて、0.2Hzで動揺している。

これらは、図17に示すように、測定データをARXモデルにあてはめることによりいっそう明確になる。

興味深いことに、3面条件における重心動揺の挙動は、大型多面ディスプレイの3面条件におけるそれと非常に類似している(図11参照)。両者を厳密に比較することはできないが、

- 大型、小型とも、水平視野角は $180^\circ$ 以上、
- 3面条件における垂直視野角は、大型 $68^\circ$ 、小型 $33^\circ$ で差があるが、大型多面ディスプレイにおける測定において、4面条件及び5面条件における重心動揺量が3面条件におけるそれを上回らなかった(左右方向の運動に関しては垂直視野角の効果は小さかった)、

ということを考慮すると、総合的な結果であると考えられる。

(注7): 実際は、暗室状態で実験を行っているので、ディスプレイ以外のものはほとんど見えない。

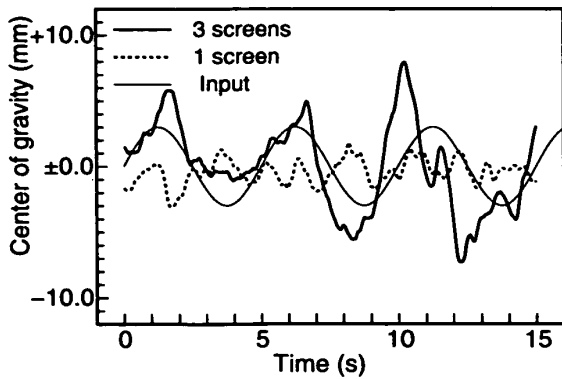


図 16 重心動揺の平均値

Fig. 16 Mean movement of center of gravity (1screen vs 3screens; 14 participants).

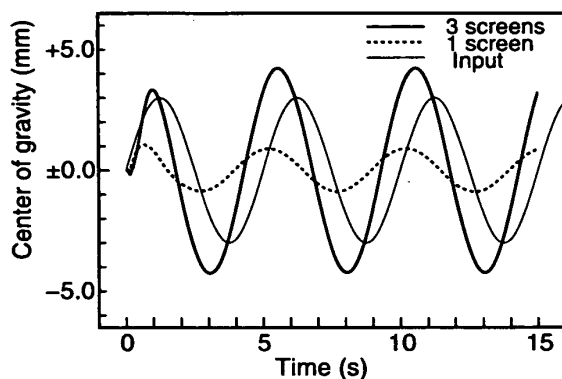


図 17 ARX モデルにより再現された重心動揺の平均値  
Fig. 17 Mean movement of center of gravity reproduced by ARX model (1screen vs 3screens; 14 participants).

## 6. む す び

本研究では、サラウンド・ディスプレイが与える視覚的効果の定量的な測定法として、画像の動きに対応する重心動揺を指標とする方法を提案した。また、提案した方法を、大型及び小型のサラウンド・ディスプレイの視覚的効果に適用し、その有効性を示した。

測定手法をまとめると以下ようになる。

- (1) 視覚刺激の作成
- (2) データの採取 [馴れによる視覚的効果の低下、不公平な比較を極力避ける]
  - 観察者は Romberg 立位
  - 測定時間は 30s
  - 測定順序、測定回数を考慮
- (3) データ処理
  - テレンドの除去
  - ARX モデルの推定、伝達関数を求めて出力を

## 再現

### (4) 評価

- 振幅、位相等の特性の読取り
- 条件間の比較

これまでも、視覚刺激と重心動揺の関係を調べた研究、提示系の与える『臨場感』を重心動揺を利用して示した研究は少なからずあった。しかし、それらの研究の多くでは、典型的な被験者のデータが示され、その特徴が述べられている程度であった。本研究で提案した ARX モデルを用いた解析法により、集団の平均的挙動だけでなく、個別データについても定量的な解析が可能になった。また、視覚刺激の運動を単振動にしなくても、視覚刺激の運動と被験者の重心動揺を定量的に関係づけることができるので、一度の測定で周波数応答を求めることも可能となり、被験者の馴れによる視覚的効果の低下の防止や測定時間の短縮にもつながる。この方法を用いることにより、重心動揺を利用した『臨場感』研究は、デモンストレーションから測定と呼べる水準に移行すると考えられる。

本研究で提案した測定法の応用としては、視覚刺激の適応的表示が考えられる。ARX モデルによる同定は、RLS 法 [14] 等の逐次的パラメータ推定アルゴリズムを用いることにより、リアルタイムでの同定が可能である。観察者の重心動揺の特性をリアルタイムで同定して、観察者の特性に応じて視覚刺激を適応的に表示することにより、重心動揺量を制御することも可能であると考えられる。このような視覚刺激の適応的表示は、アミューズメントや平衡機能に関連するトレーニングやリハビリテーション等に利用することが考えられる。

今後の課題としては、

- (1) 4.5 で述べた上下スクリーンの効果を含め、他の視覚刺激提示時の重心動揺特性の検討、
- (2) より小さな視野角の差、立体画像、ヘッドマウント・ディスプレイ、デスクトップ VR 等、効果がより微細な場合でも、視覚的効果があるのであれば検出できるような測定法の改良、
- (3) 効果的な視覚刺激の適応的表示の方法の開発、の 3 点があげられる。(2) については、以下のような方策が考えられる。
  - (i) 垂直成分を強調するなど、重心動揺を誘導しやすい視覚刺激を作成する。
  - (ii) 重心動揺には個人差があるので、被験者をスクリーニングすることにより、分散が不必要に拡大す

## 論文/重心動揺を指標としたサラウンド・ディスプレイの視覚的効果の測定

ることを防ぐ。

(iii) 視覚刺激の影響を受けやすく、他要因の影響を受けにくい被験者の観察姿勢を探索する。あるいは、そのような観察のための補助器具を開発する。

(iv) より適切な測定モデルを開発する。例えば、ARXモデルの代わりにARMAXや非線形ARXモデル等を用いることのほかに、姿勢制御モデル[19], [20]を利用することも考えられる。また、4.5で議論した位相の問題は、適応制御や繰返し学習等を含む知能制御[21], 予見制御[22]の理論も有効な手法となる可能性がある。

これらに関しては今後検討していきたい。

## 文 献

- [1] C. Cruz-Neira, D.J. Sandin, and T.A. DeFanti, "Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the CAVE," ACM SIGGRAPH'93 Proceedings, pp.135-142, 1993.
- [2] C. Cruz-Neira, "Immersed in science and engineering: Projection technology for high-performance virtual reality environments," ICAT'96, pp.77-81, 1996.
- [3] 廣瀬通孝, 小木哲朗, 石綿昌平, 山田俊郎, "多面型全天周ディスプレイ (CABIN) の開発とその特性評価," 信学論 (D-II), vol.J81-D-II, no.5, pp.888-896, May 1998.
- [4] K. Asai, Y.Y. Sugimoto, and F. Saito, "Multi-Screen Display with Liquid Crystal Projectors," Proc. Topical Workshop on Virtual Reality and Advanced Human-Robot Systems (ISMCR'99), pp.253-258, 1999.
- [5] 鈴木健治, 田中健二, 鈴木龍太郎, 荒川佳樹, 小木哲朗 "4者間討議空間システムの構築," ヒューマンインタフェース学会研究報告集, vol.1, no.2, pp.39-42, 1999.
- [6] 中川 隆, 古瀬正浩, 渡辺行雄, 袋谷賢吉, 林 隆一, "視覚情報と身体動揺," 第17回医療情報学連大, 3-F-1-3, 1997.
- [7] 竹田 仰, 金子照之, "広視野映像が重心動揺に及ぼす影響," テレビ誌, vol.50, no.12, pp.1935-1940, 1996.
- [8] 高田 一, 佐藤祐二, "揺動映像注視者の動特性 (立姿勢における重心の振動特性)," 機械学論 (C), vol.63, no.609, pp.134-139, 1997.
- [9] 清水俊宏, 矢野澄男, "広視野覚刺激と聴覚刺激の同期提示による重心動揺への誘導効果," 信学論 (A), vol.J83-A, no.7, pp.912-919, July 2000.
- [10] 松田隆夫, 知覚心理学の基礎, 培風館, 2000.
- [11] 小川 隆 (監修), 杉本助男, 佐藤方哉, 河嶋 孝 (共編), 行動心理ハンドブック, 培風館, 1989.
- [12] 塚原 進, "画像による心理反応の客観計測 — テレビ画像とまばたき —," テレビ誌, vol.33, no.12, pp.1040-1046, 1979.
- [13] 大西 仁, 望月 要, 杉本裕二, 永岡慶三, "大型5面サラウンド・ディスプレイの視覚的効果の測定—ARXモデルによる解析—," 信学技報, MVE2000-105, CQ2000-89, 2001.

- [14] L. Ljung, System Identification Theory for the User, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1999.
- [15] 高木貫一, "視空間", 梅津八三, 宮城音弥, 相良守次, 依田 新 (編), 心理学辞典, pp.244-246, 平凡社, 東京, 1957.
- [16] 望月 要, 大西 仁, 杉本裕二, "大型5面サラウンド・ディスプレイの視覚的効果の測定—上下面のスクリーンの影響—," 2001 信学ソ大, B-11-7, 2001.
- [17] 望月 要, 大西 仁, 杉本裕二, 永岡慶三, "大型5面サラウンド・ディスプレイの視覚的効果の測定—映像刺激の周波数の影響— (1)," 2001 信学総大, B-11-26, 2001.
- [18] 杉本裕二, 大西 仁, 望月 要, 永岡慶三, "大型5面サラウンド・ディスプレイの視覚的効果の測定—映像刺激の周波数の影響— (2)," 2001 信学総大, B-11-27, 2001.
- [19] 菊池 誠, 白石昌武, "立位姿勢制御系における制御パラメータの自動同定法," 機械学論 (C), vol.66, no.651, pp.161-165, 2000.
- [20] 白石昌武, 菊池 誠, "ヒューマンダイナミクスにおける安定性と健康に関する一考察," 精密工学誌, vol.67, no.6, pp.949-953, 2001.
- [21] 猪岡 光, 石原 正, 池浦良淳, 知能制御, 講談社サイエンティフィク, 2000.
- [22] 土屋武士, 江上 正, デジタル予見制御, 産業図書, 1992.

(平成14年5月16日受付, 8月6日再受付)



大西 仁 (正員)

平2東工大・工・制御卒。平7同大大学院・総理工・システム科学博士課程了。同年放送教育開発センター研究開発部助手。メディア教育開発センター研究開発部助手を経て、現在、メディア教育開発センター研究開発部助教授、及び総合研究大学院大文化科学研究科助教授(併任)。博士(学術)。認知科学(特に類似性、類似性に基づく推論)、コミュニケーション品質の定量的評価の研究に従事。著書「類似から見た心(認知科学の探究)」(共編著)。日本認知科学会、情報処理学会、日本バーチャルリアリティ学会、The Cognitive Science Society 各会員。



望月 要 (正員)

昭60慶大・文・心理卒。平3同大大学院・心理学・博士課程了。現在、メディア教育開発センター及び総合研究大学院大文化科学研究科助教授。博士(心理学)。実験心理学及び行動分析学の立場からマルチメディア環境下での人間行動の研究、行動を通じたマルチメディア環境の評価研究に従事。日本行動分析学会、日本基礎心理学会、日本動物心理学会、日本心理学会各会員。



杉本 裕二 (正員)

昭48同志社大・工・電気卒。昭51同大大学院修士課程了，同年郵政省電波研究所（現；通信総合研究所）入所。同所鹿島支所にてCS（実験用中容量通信衛星），BS（実験用中型放送衛星）によるデジタルTV(PCM)伝送実験の研究，VLBI（超長基線電波干渉計）デジタル系システムの研究開発（相関処理システム等）・実験，GPS(Global Positioning System)利用高精度測位システムの研究開発に従事（鹿島支所第3宇宙通信研究室長）。この間，昭60・10月から10か月間，科学技術庁長期在外研究員として，Jet Propulsion Laboratoryにて，VLBI用高速相関処理システムの研究に従事。平元・5月から3年間，文部教官併任（文部省国立天文台地球回転研究系助教授）。その後，企画調査部企画課主任研究官を経て，陸上移動通信の研究に従事（通信科学部総括主任研究官，通信方式研究室長，総合通信部総括主任研究官）。平10・4月文部省メディア教育開発センター教授，現在に至る。現在，仮想環境システムを用いた教育手法の研究開発プロジェクト（研究代表者），コラボレーションシステムの統合と国際化の研究に従事，教育ネットワーク研究開発系研究主幹，博士（工学）。多文化関係学会理事。日本バーチャルリアリティ学会会員。