

博 士 論 文

大きさ知覚特性に基づく 3 次元空間の  
視覚印象を表現する画像生成手法

Image Creation Method based on Size Perception  
for Representing Visual Impressions in 3-dimensional Space

2011 年 3 月

長田 和美

山口大学大学院 理工学研究科

## 論文要旨

本研究では、透視投影法で描画された画像を観察したときに脳内で 3 次元的解釈を行い知覚する空間と、人が実際の 3 次元空間（実空間）を観察したときに知覚する空間について、両者における対象の大きさや位置関係などの幾何学特性に着目した。映画やシミュレータに求められる映像のリアリティ・臨場感の向上に対して、実空間を観察したときに近い視覚印象（遠近感や大きさ感など）を再現するコンピュータグラフィックス（CG）画像生成手法の提案を目指す。画像観察時に視覚印象の不自然さを感じる人が多い風景として、遠方まで被写体が配置された広い空間を研究対象とした。

第 2 章では、実空間を観察したときに人が知覚する空間の全体像を捉えることを目的として、描画法および量推定法を用いて実空間における視覚印象の分析を行った結果について述べた。実験結果を基に空間の視覚印象を画像に表現する上で重要となる要素を整理し、大きさ感や遠近感・距離感を画像に表現するには画像上の対象の大きさや配置を変換する必要があることを確認した。特に、遠方物体（山や道幅）の過大視が顕著であったため、実空間において知覚される大きさと観察距離の関係について規則性を見出すことが重要であると結論付けた。

第 3 章では、視覚心理実験に基づく画像変換関数の導出について述べた。実験では、2 刺激比較法を用いて実空間にて知覚する大きさと観察距離の関係を調査し（提示距離：標準刺激 1m～120m, 比較刺激 4m）、実空間で知覚する大きさが透視投影画像における大きさの何倍であるかを示す拡大率を算出した。拡大率は観察距離の増加に伴って増加し、観察距離が 10m 以上になると増加の傾きが減少する傾向が見られた。ある距離以上で拡大率は飽和すると仮説を立て、拡大率に対して距離を変数とした S 字特性を持つ関数をフィッティングし、画像変換関数としての拡大率関数を導出した。なお、10m 以下の近距離においては、知覚される大きさと観察距離との関係を示す Thouless 指数と等価なべき指数  $a$  (約 0.6) により近似できる事を確認している。

第 4 章では、前章で導出した拡大率関数を適用し、距離に応じて画像上の対象の大きさを拡大描画する画像生成手法に関して述べた。すなわち、レンズ焦点距離を変化させて段階的に空間を描画した画像を組み合わせることで 1 枚の画像を生成する手法を提案した。提案手法の有効性を確認するため、透視投影画像と提案手法を適用して描画した屋外風景の CG 画像を用いて、主観評価を行った。

第 5 章では、本論文の結論及び今後の課題と展望を述べている。空間の視覚印象を表現する手法として、人の視覚系は透視投影画像とは異なる映像表現を採用している。この課題に関連して、補論にて消失点や平行線の知覚に関する実験と考察を追記し、研究の将来展望を補足している。

上述の通り、画像中の対象の大きさを拡大して描画することで、実空間を観察したときの視覚印象（対象の大きさ感や距離感）を画像に表現できることを示した。提案した画像生成手法は、静止画像だけでなく動画生成への応用が可能である。本研究成果は、映画やシミュレータ、バーチャルリアリティ分野における CG 画像作成への展開が可能で、遠距離まで被写体が置かれた広い空間を描画する場合に、実空間で得られる視覚印象を持つ画像生成に貢献する。

## Abstract

Perspective images (e.g., photographs) may give different impressions to the visual image sensed in a real three-dimensional space, with respect to the size and distance of objects. Researchers have reported that the perceived sizes and distances of objects in a photograph differ from those in the real space. We focused on the geometric characteristics of objects, such as size and distance, in a perspective image and in the real space. To improve the perspective of moving images in a driving simulator, we developed a method for computer generation of graphic images that closely represent our visual impressions sensed in the real space. The visual impression was perceived from a wide-angle, long-distance outdoor scene. Using this scene, we often had different impressions between the perspective image and the visual image.

In the second chapter, we describe the results of two experiments in which we used the drawing method and the magnitude estimation method to examine the visually perceived impressions of a real space. In this study, we confirmed that the heights of a mountain and a building at a distance were magnified in the perspective image. Therefore, to create an image that better represents our visual impressions in the real space, the relationship between the perceived apparent size and the viewing distance needs to be evaluated.

In the third chapter, we conducted studies to examine the relationship between the perceived size of an object and the size of the object on the retina for objects at viewing distances ranging from 1 to 120 m. We found that the Z-ratio function, as described in an earlier study (Thouless, 1931), could explain the relationship at short distances, but failed to explain the relationship at long distances. We developed a new logistic function that explains the results at both the short and the long distances. Accordingly, we established a magnification rate function that represents the visual impression at arbitrary viewing distances.

In the fourth chapter, we developed a new method to create images representing the visual impression using computer-generated images that were rendered using the proposed logistic function. The scene was divided into many regions according to the depth, and each region was rendered with a linear perspective with different viewing angles. For comparison, other images were rendered by the regular perspective. The visual impression was evaluated by observers who compared both of the rendered images with the actual scene. This study revealed that the new function generated images that were closer to the subjective impression than the regular perspective.

Here, we have proposed a new method to generate images based on size perception. Using the depth information, the apparent size of the object is transformed based on the magnification rate function. We found that our new method generated images that closely represented the perceived visual impression of real three-dimensional space. The method could be applied to generate static images but also a sequence of image. We believe that this approach will be particularly useful to develop more realistic images for use in entertainment technologies such as movies, driving simulators and virtual reality.

# 目次

第1章	はじめに.....	1
1.1	研究背景.....	1
1.1.1	3次元空間と2次元画像の知覚に関する先行研究.....	2
1.1.2	透視投影法と絵画に関する先行研究.....	6
1.1.3	非透視投影法に関する先行研究.....	9
1.2	本研究の目的.....	11
1.3	論文の概要と構成.....	11
第2章	風景観察時の視覚印象に関する分析.....	13
2.1	はじめに.....	13
2.2	描画法を用いた分析.....	13
2.2.1	実験方法.....	14
2.2.2	結果と考察.....	15
2.3	量推定法を用いた分析.....	22
2.3.1	実験方法.....	22
2.3.2	結果と考察.....	25
2.4	全体的考察.....	29
2.5	まとめ.....	30
第3章	知覚される大きさと観察距離の関係を示す拡大率関数.....	31
3.1	はじめに.....	31
3.2	近距離における拡大率関数.....	31
3.2.1	実験方法.....	32
3.2.2	結果と考察.....	34
3.3	遠距離における拡大率関数.....	37
3.3.1	実験方法.....	37
3.3.2	結果と考察.....	39

3.4	全体的考察.....	42
3.5	まとめ.....	46
第4章	拡大率関数を適用した画像生成手法とその評価.....	47
4.1	はじめに.....	47
4.2	画像生成手法.....	47
4.2.1	基本的な考え方.....	47
4.2.2	描画空間の小領域への分割.....	48
4.2.3	画角の設定.....	49
4.2.4	考察.....	50
4.3	画像生成手法の評価.....	51
4.3.1	実験方法.....	51
4.3.2	結果と考察.....	54
4.4	まとめ.....	57
第5章	おわりに.....	58
5.1	本論文の結論.....	58
5.2	今後の課題と将来展望.....	59
	参考文献.....	61
	謝辞.....	68
A	補論：3次元空間における平行線の知覚に関する考察.....	69
A.1	はじめに.....	69
A.2	消失点の知覚に関する分析.....	69
A.2.1	実験方法.....	69
A.2.2	結果と考察.....	73
A.3	平行線の知覚に関する分析.....	75
A.3.1	実験方法.....	75
A.3.2	結果と考察.....	76
A.4	全体的考察.....	80
A.5	まとめ.....	80
	研究業績.....	81

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究背景

近年、写真や映画などデジタル映像表現に関する技術の進歩が著しい。3次元空間を2次元画像に記録するデジタルカメラでは、高解像度で高精細な写真を撮影することが可能となった。また、コンピュータ上の仮想空間に作成された3次元物体を2次元平面に投影することによって画像を描画するコンピュータグラフィックス（Computer graphics：CG）映像の写実性やリアリティが高まっている。CGは、映画や運転シミュレータ、バーチャルリアリティ（Virtual Reality：VR、仮想現実）など広い分野で多用されている。物理的あるいはコスト的な問題で実写での撮影が難しい場合、CG映像を代用することでそれらの問題を解決することができる。例えば、実際に用いて飛行機や自動車を用いて運転訓練を行った場合、訓練者に危険が伴い、コストがかかるといった問題が発生する。そのため、CGや実写映像を用いて仮想的に訓練を行うシミュレータの開発が進んでいる。この場合、シミュレータ体験時に訓練者が感じる感覚が、実際の訓練で感じる感覚に近いことが最も重要である。その他、建築分野では、CGなどの仮想映像を用いて建築前の建物空間や景観の印象評価を行うことがある。この場合も、3次元空間に実際に存在する建物を見たときに近い視覚印象が想起されることが求められる。しかしながら、写真やCG映像を観察した時に、3次元空間で実物を観察した時とは異なる視覚印象を得ることがある。映像に対して違和感を覚えることや不自然さを感じることもあり、撮影者や映像制作者の意図とは異なる視覚印象を観察者が受けることがある。

このような現象が起きる要因の一つとして、画像を観察したときに脳内で3次元解釈を行い知覚する空間と、人が実際の3次元空間（実空間）を観察したときに知覚する空間が異なることが挙げられる。そのために、雄大な山の景色や、壮大な建築物などを撮影した写真に実際の場所で感じた山の雄大さや迫力が再現されず、失望することがある。人が実空間を認識するとき、実空間の情報は光として網膜に投影される。網膜に投影された像（網膜像）は脳に伝えられ、人は脳内で空間を再構成し外界を認識する。人が実空間で実際に見て知覚した景色は、脳内で情報処理が行われ再構築されたものであり、実際の世界とは一致していない。一方、写真やCG画像は、透視投影法（perspective、パース、線遠近法とも呼ぶ）によって3次元空間を2次元平面に投影

したものである。透視投影法とは、視点と3次元物体の間に立てた投影面と、視点と物体の頂点を結んだ直線との交点によって3次元物体を投影面に描画する方法である（図 1.1 参照）。透視投影法によって描画した画像は透視投影画像あるいは透視図と呼ばれ、透視投影画像に描かれる対象の大きさは視点からの距離に反比例するという特徴がある。

本研究では、透視投影法で描画された画像を観察したときに知覚する空間と、実空間を観察したときに知覚する空間について、両者における対象の大きさや位置関係などの幾何学特性に着目した。映画やシミュレータに求められる映像のリアリティ・臨場感の向上に対して、実空間を観察したときに近い視覚印象（遠近感や大きさ感など）を再現するCG画像生成手法の提案を目指す。特に、画像観察時に視覚印象に不自然さを感じる人が多い風景として、遠方まで被写体が配置された広い空間（例：道路が続く風景、遠景に山や建築物がある風景）を研究対象とする。なお、3次元空間を画像に投影する際、設定する画角によって画像に表現される範囲が変化する。写真撮影時にはレンズの焦点距離を変化させることで画角を調整する。一般的には、焦点距離50mm（対角画角46度）が標準レンズと呼ばれ、人が1点注視で視認できる範囲（中心ほど鮮明に見え、色の認識ができる範囲が40度程度、周辺領域になると解像度が落ちてぼやけて見える）に近いといわれる。本研究の対象である広い空間を撮像するためには、画角を大きくし、画像として切り取る領域を広く設定する必要がある。

本節では、本研究の位置づけを明確にするため、本研究に関連する3分野（3次元空間と2次元画像の知覚、透視投影法と絵画、非透視投影法）の先行研究および課題を述べる。

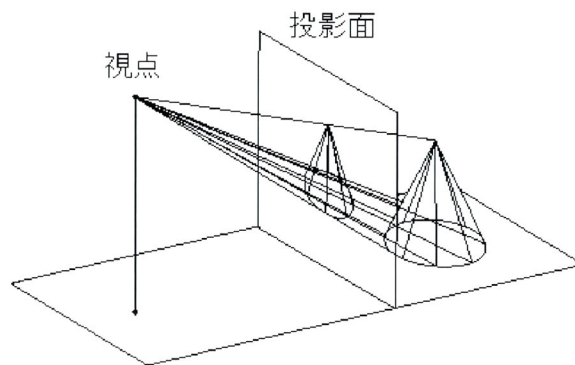


図 1.1 透視投影の原理

### 1.1.1 3次元空間と2次元画像の知覚に関する先行研究

人は3次元空間を2次元の網膜に受像し、脳において3次元的な解釈を行う。2枚の網膜像を使っていかに3次元空間を再構築しているのかその原理は明らかになっていない。これは「3→2→3次元」問題と呼ばれ、何世紀もの間、哲学者と科学者を悩ませてきた[1]。実在する3次元空

間を実世界、物理世界、実空間と呼ぶことに対して、脳によって作られた心理的な世界を視覚世界、知覚的世界と呼ぶ。視覚心理学の分野では、網膜像に対して脳内で再構築された像を知覚像と呼び、観察対象である画像と人が知覚した像とを区別する[2] (図 1.2 参照)。

人の視知覚特性に関して、実在する3次元空間(実空間)と人が脳内で再構築して知覚した空間とが異なることを示す研究は多々ある。有名なものに月の錯視(moon illusion)がある。天空のどこに位置しても月の視角は約0.5度であり、月の大きさが不変であるにも関わらず、位置によってみかけの大きさが変化する。水平線上の月は天頂の月に比べて1.15-1.3倍[3]、2倍[4][5]に見えることが報告されている。古くから月の錯視に関して多くの説明理論が存在するが、現象の理解には至っていない。月の錯視の要因として、実験的検証に基づき、眼球運動[6]や、地上の景色や空模様[4]、視空間が水平方向と垂直方向では性質が異なるという異方性[7]を挙げる説がある。

また、実空間の知覚において、人は「観察対象の性質と相違した網膜像を修正する」現象が知られており、恒常性(constancy)と呼ばれる。例えば、遠方に置かれた自動車を眺めたとき、網膜像上の自動車の大きさは小さいが、人はその自動車をおもちゃのミニカーだとは思わない。観察距離の変化に伴い網膜像上の大きさが変化しても、対象の知覚される大きさがあまり変化しない傾向を大きさの恒常性(Size constancy)と呼ぶ。また、長方形の壁を斜めから観察したとき、網膜上では壁は台形であるが、人は長方形の壁として正しく知覚する。このように視点が変わっても本来の物体の形を知覚できる傾向を形の恒常性(Shape constancy)と呼ぶ。大きさの恒常性については1860年代から多くの実験が行われ[8]、実空間で知覚される大きさと観察距離[9][10]、観察条件[10]、実験方法[11]などの関係について報告されている。Thouless[12]やBrunswik[13]は、対象の知覚される大きさと物理的大きさ、観察距離の関係をを用いて恒常度の度合いを示す恒常度指数を提案している。恒常度指数は、恒常性が完全なときに1、恒常性が全く見られず網膜像(あるいは写真画面)と等しいときに0となるものである。恒常度指数に関して多くの議論がなされており[14][15]、Thouless[12]の恒常度指数が最も有効だと言われている。観察対象である標準刺激と、観察対象とは異なる距離に置かれた比較刺激を用いて観察対象の知覚する大きさを測定したとき、Thouless[12]の恒常度指数は以下のように表現される。

$$Z = \frac{\log S - \log P}{\log W - \log P} \quad (1)$$

ここで、Wは標準刺激の物理的大きさ、Sは標準刺激と等しくみえると判断された比較刺激の物理的大きさ、PはWと等視角を張る比較刺激の大きさ(Sと両刺激の観察距離によって算出)である。

次に、実空間における平行線の知覚に関して先行研究を紹介する。遠方まで続く並木や直線道路に描かれた白線など、視線と平行な対象を観察したとき、観察者からは平行線が1点に収束するように傾き、角度を形成するようになる。Hillebrand[16]は、並木道の中央からまっすぐ前方を見たときの並木の見え方を調査した。観察者が平行に見える位置に対象を並べた場合、観察者から近い位置では左右の木の間隔が狭く、並木の配置は直線ではなく先広がり(曲線)であった



(図 1.3 参照). つまり, 3次元空間において平行に並んでいる対象を見ても, 平行には見えないことが示唆される. この平行知覚に関しては, 黒田[17]も同様のことを報告している. また, Doesschate[18]は, 観察者に床にある3本の縦に並んだ平行線を観察させ, 3次元空間では平行線のなす角度が実際より広く知覚されることを報告した(図 1.3 並行並木参照). 3次元空間において知覚される角度と, 写真において知覚される角度が一致しないことが確認されている[19][20].

実空間と2次元画像において, 対象の知覚される大きさ[21]や知覚される距離[20][22]に違いがあることが指摘されている. ただし, 写真において知覚される大きさ・距離は, 写真を撮影したレンズの焦点距離や, 写真のサイズや視距離の違いに影響を受ける[23][24][25]. 単眼で, 実空間における視角と一致する条件で写真を観察した場合, 小笠原[23]は写真上の対象の大きさ・距離に異様さは感じられないと報告しているが, Gibsonら[26]は距離の過大視を確認している. 日常で写真を観察する場合は両眼でL判写真を視距離40cm前後にて観察することが想定されるが, この場合, 写真上の対象の大きさは実空間における視角より小さくなる. このとき, 写真において知覚される距離は, 実空間にて知覚される距離より小さく[20], 写真にて知覚される大きさは, 近くの対象は拡大視, 遠くの対象は過小視[23]される. 写真と同様に透視投影法にて描画されたCG映像においては, VR空間[27][28]やドライビングシミュレータ映像[29], 知覚される距離と実際の距離の間に誤差があることが指摘されている. 両眼視差を利用したステレオ視においては, 提示物体の計算上の奥行き距離と観測者が立体映像を観察して知覚する奥行き距離に誤差がある[30]. また, 仮想空間では, 現実空間の距離より遠くに感じる傾向があることが確認されている[28].

人はカメラとは違い, 両眼から得た2枚の異なる画像を1枚に融合して1つの世界を認識し(両眼単一視), 2枚の画像の差(両眼視差)から1枚の画像以上の立体感を得る(両眼立体視). 「2つの眼で見ているのに見えている世界はなぜ1つなのか」「2つの眼でみるとなぜ立体的に見えるのか」といった課題に対して, 人の視知覚メカニズムの解明に取り組む研究が多くある[31]. 空間知覚の手がかりには, 両眼視差や, 輻輳, 調節, 運動視差, 絵画の手がかりなどがあり, 距離・奥行き手がかりとして整理されている(図 1.5 参照). この距離・奥行き手がかりは, 実空間および2次元画像において知覚される距離・大きさと関連が深い. 実空間で知覚される大きさは, 距離・奥行き手がかりが多い場合ほど対象の物理的大きさに近くなり, 手がかりが少なくなるほど網膜上での大きさ(物体の物理的視角)に近くなることが知られている. また, 知覚する大きさと観察距離の関係について調査を行った研究も多くあり, 観察距離の増加に伴って知覚する大きさが増加することが確認されている[10].

以上のように, 視覚心理学の分野では, 実空間を観察した場合と, 2次元画像を観察した場合の知覚に差があることが示されている. ただし, 月の錯視を除いて, 大きさや距離などの知覚に関する実験は, 室内で近距離を対象に行われたものが多く, 本研究の対象である広い空間を取り上げた事例は少ない. また, 先行研究の多くは視知覚メカニズムの理解や, 要因の整理を目的としたものである. 実空間を観察したときの遠近感や現実感を再現するCG画像生成を実現するた

めには、実空間を人が観察したときに人が知覚する空間における規則性を見出し、画像変換手法として確立する必要がある。

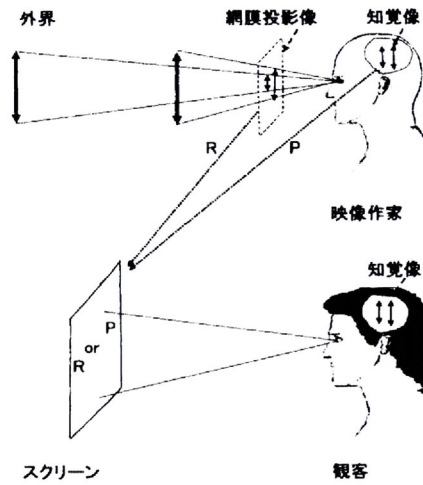


図 1.2 網膜像と知覚像 (大山[2]より引用)

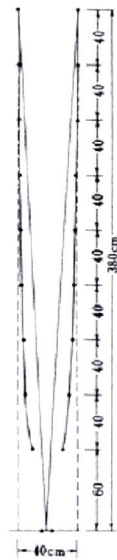


図 1.3 並行並木 (Hillebrand[16]より引用)

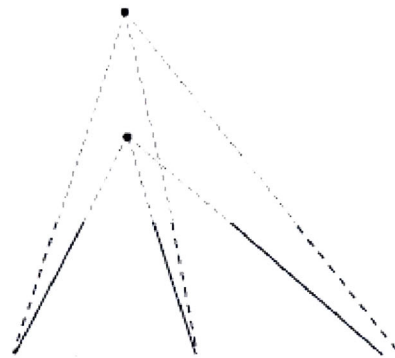


図 1.4 見えの消失点 (黒田[17]より引用)

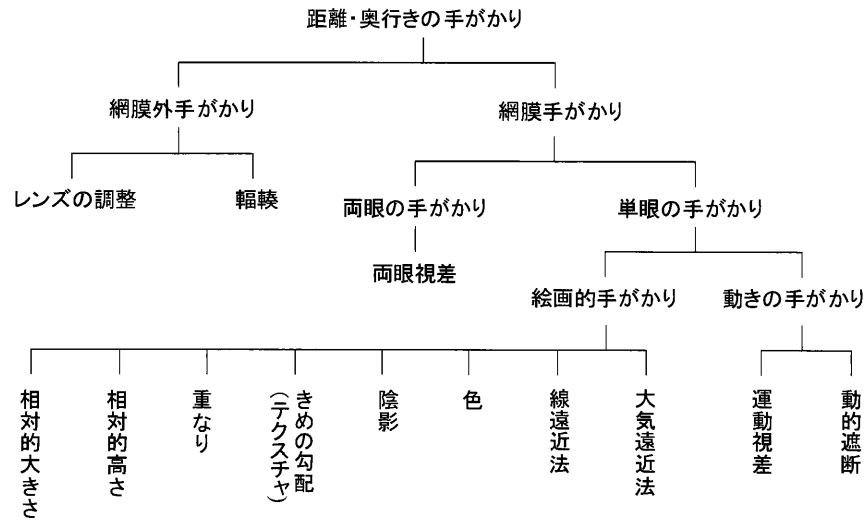


図 1.5 距離・奥行きの手がかり（中溝[31]を一部変更）

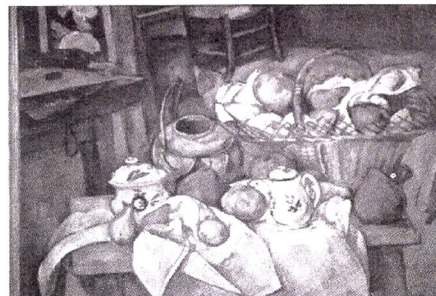
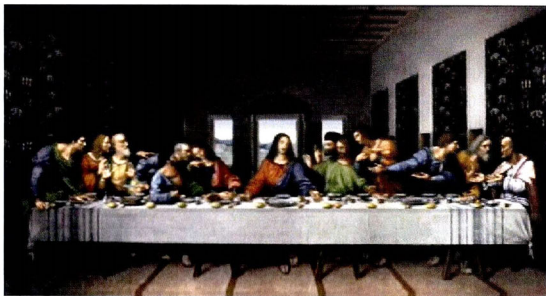
### 1.1.2 透視投影法と絵画に関する先行研究

透視投影法で描画された画像には、「画像に描かれた対象の大きさは、視点からの距離に反比例する」「消失点 (vanishing point) が存在する」という特徴がある。消失点とは、視線に平行な線が画像上で収束する点である。透視投影法には、1点透視図法、2点透視図法、3点透視図法があり、各手法で描かれた画像上の消失点の数は、1点、2点、3点である。

透視投影法は、15世紀ルネサンス期に建築家ブルネレスキや画家アルベルティによって体系化された手法である。ルネサンス以前の絵画では、距離・奥行き手がかりの「相対的な大きさ」や「重なり」が多用され、平面的な絵画が目立ったが、ルネサンス期に透視投影法を適用した絵画が盛んに描かれた。レオナルド・ダビンチによる「最後の晩餐」(図 1.6 (a) 参照) や、フェルメールの絵画は透視投影法を適用した作品として有名である。しかし19世紀後半から、セザンヌやモネといった印象派による絵画のように、透視投影法に従わない絵画が再び盛んに描かれるようになった(表 1 参照)。セザンヌの作品(図 1.6 (b) 参照)には、複数の視点からの見え方が同時に描かれており、独創的な方法で一種の「運動視差」を表現している[32][33]。正しい透視投影法で描画せずやや歪ませて描画した絵画には緊張感が生まれ、ダイナミックさが増しているという[34][35]。また、ダリ(図 1.7 参照)は、ステレオ視を意識した2枚の絵画を描いており、3次元空間で得られる立体感の再現を試みている。左右の絵画において同一対象がやや異なる位置に描画されており、「両眼視差」が表現されている。また、ステレオ視した場合に光沢感を出すことを狙って、左右の絵画の色合いを変化させている。

日本においても、浮世絵で世界的に有名な葛飾北斎は、透視投影法について知識があったにも関わらず、独自の描画法として「三つわり法」を提案している(図 1.8 参照)。透視投影法を用いた場合は消失点が1点である風景に対して、三つわりの法では消失点を2点描画する方法である。また現代では、臨場感が高いと定評がある宮崎駿のアニメーション作品において、透視投影法を用いた場合に直線で描かれる建物の梁を曲線で表現して建物の高さを誇張している。また、遠景の人物を意図的に大きめに描画する、本来ならば消失点が1点である風景に対して、消失点がある大きさの円内に収めるように描画するといった工夫がなされている[36][39]。

このように、画家やアニメーション作家は、映像の心理効果を高めるために、透視投影法を歪ませた方法で描画している。しかし、これらは画家やデザイナーの個人の能力に依存したものであり、体系化された技法ではない。先人が残した絵画は、人が知覚する空間を表現した画像であるとも考えられ、研究対象としては興味深い。人の視覚印象を表現する画像生成手法の方向性として、画像中の対象の大きさや位置の関係、消失点の数や位置を変更することが示唆される。

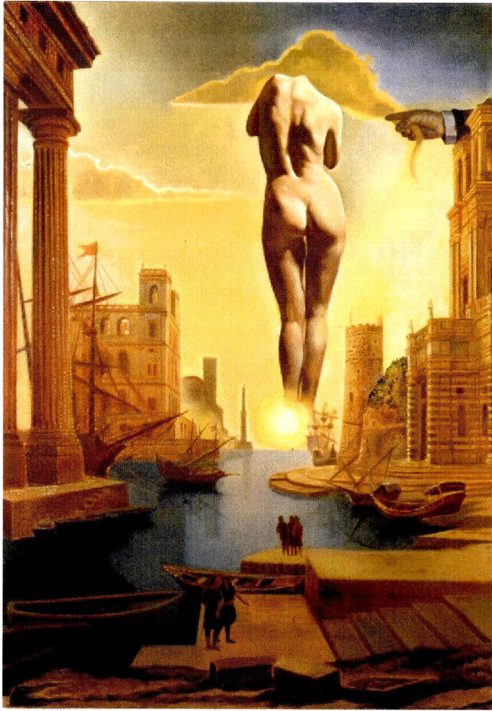


(a) レオナルド・ダビンチ「最後の晩餐」 (b) ポール・セザンヌ「果物籠のある静物」

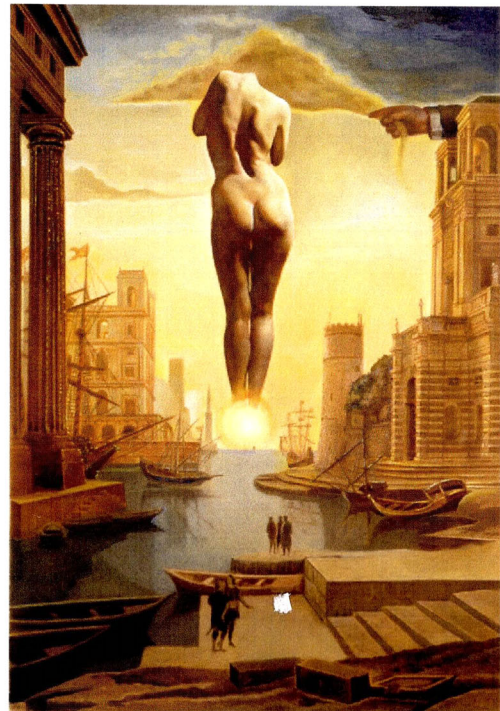
図 1.6 絵画の一例

表 1 絵画の歴史と奥行き・距離手がかりの関係 (Solso, 1994)

時代	相対的大小さ	重なり	陰影	高さ	きめの勾配	大気遠近法	線遠近法
先史時代	○	○	△	○	△	×	×
エジプト	×	○	△	○	×	×	×
ギリシア	△	○	×	△	×	△	△
ローマ	○	○	○	○	△	×	△
ルネサンス	○	○	○	○	○	△	○
印象派	○	○	○	○	○	○	△
現代	△	○	△	△	△	△	△



(a) 左眼用



(b) 右眼用

図 1.7 ダリ 立体鏡作品「太陽の後ろはるか遠くに全裸で出現するガラを見るために雲の形をした金羊毛を開けるダリの手」

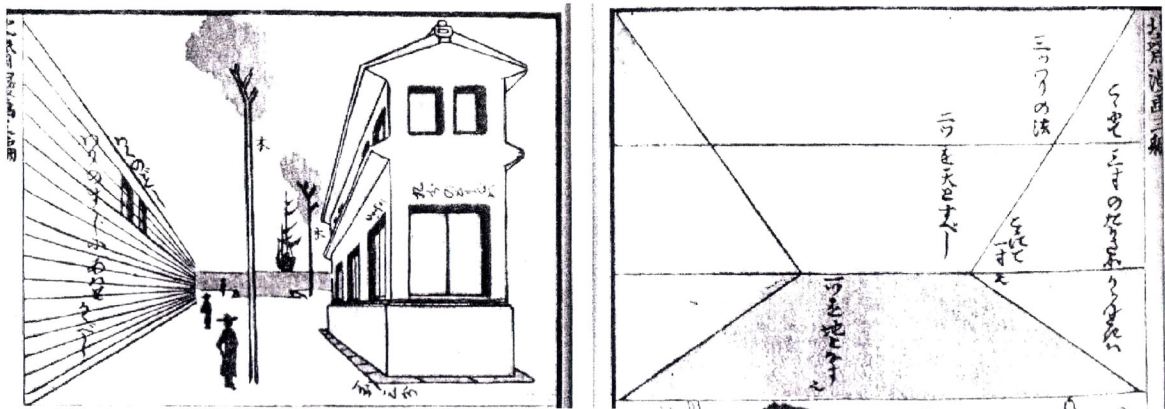


図 1.8 葛飾北斎 三つわりの法 (北斎漫画[38]より引用)

### 1.1.3 非透視投影法に関する先行研究

透視投影法に対して、人の視知覚現象を取り入れた知覚透視図の描画法が提案されている。Rauschenbach[39]による風景の知覚透視図は、鉛直方向の過大視と大きさの恒常性を取り入れて、道路の線を曲線に、直方体を縦長に、遠方の山を大きめに描画している。Reggini[40]は大きさの恒常性における Thouless の恒常度指数[12]を用いた知覚透視図を提案した。これらの手法は、知覚に関する従来の知見を安易に適用したものであり、実験的検討に基づく描画法の提案ではない。これに対し、黒田[41]は、建物の側面の見え方（大きさの恒常性、形の恒常性）について心理実験を行い、その結果を基に知覚透視図法を提案した。この黒田の提案する手法は、描画対象が建築構造物に限定されるが、人の知覚特性の定量化の結果を反映した描画方法であり、興味深い。また、吉田ら[42][43]は、非透視投影法として、ユーザが任意に設定した対象の大きさを基に、違和感のない空間の2次元画像を自動生成する手法を提案している。

上述の通り、情報工学分野においても、透視投影法で描画した画像を観察したときに知覚する空間と、人が実空間を観察したときに知覚する空間の違いに着目し、透視投影法に代わる新しい画像生成手法を提案する取り組みがある。Reggini[40]や黒田[41]による手法は、数式を用いて画像変換を行うため、描画対象とする建物の大きさや構造に制限がない。また、数式が持つパラメータの設定により、変換度合いの調整が可能である。そのため、ユーザの希望を反映した知覚透視図を描くことができる。本研究が対象とする遠方まで被写体が配置された広い空間について、実空間を観察したときに人が知覚する空間の幾何学特性を明らかにし、画像変換関数を導出することが本研究の課題である。

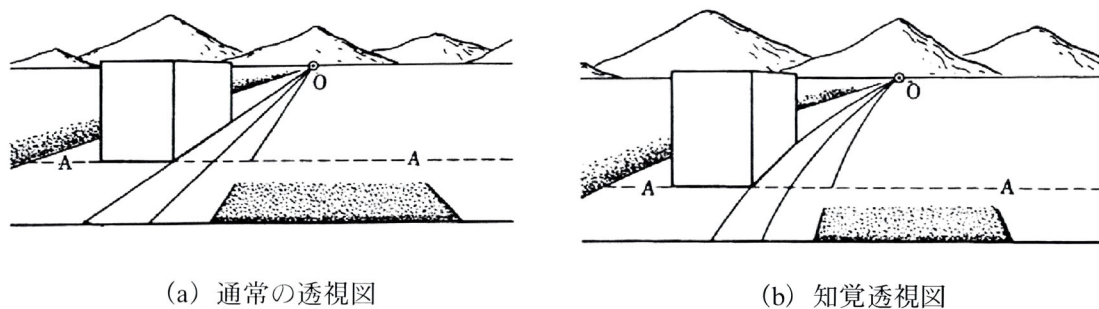


図 1.9 風景の知覚透視図 (Rauschenbach[39]より引用)

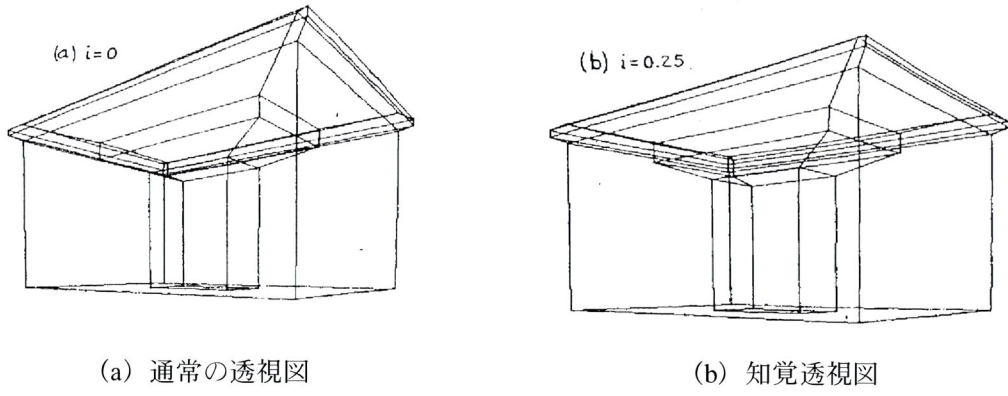


図 1.10 建物外観の知覚透視図 (Reggini[40]より引用)

## 1.2 本研究の目的

本研究では、以上の背景に基づいて、実空間を観察したときの視覚印象（遠近感や距離感、大きさ感）を表現するCG画像生成手法を提案する。そのためには、実空間を観察したときに人が知覚する空間の幾何学特性に注目し、画像作成の基礎となる数式（画像変換関数）を導出する必要がある。先行研究で示された空間知覚に関する知見と、画家やデザイナー独自の描画技法を参考にして、風景の視覚印象を表現する画像生成手法を提案する。本研究の主な目的を以下にまとめる。

1. 実空間を観察したときに人が知覚する空間の全体像を捉え、視覚印象を画像に表現する上で重要となる要素を整理し、画像変換関数の導出の方針を見出す（第2章）
2. 実空間を対象とした視覚心理実験を行い、人の視知覚特性に基づいた画像変換関数を導出する（第3章）
3. 導出した画像変換関数を用いて、視覚印象を表現する画像生成手法を提案し、主観的評価により提案手法の有効性を確認する（第4章）

## 1.3 論文の概要と構成

本論文は、本章と最終章、附論を含めた6つの章で構成する。各章の関係を図 1.11 に示す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、実空間を観察したときに人が知覚する空間の全体像を捉えるため、描画法および量推定法を用いた視覚印象の分析について述べた。実験結果を基に視覚印象を画像に表現する上で重要となる要素を整理し、遠近感や距離感、大きさ感を画像に表現するためには画像上の対象の大きさや配置を変換する必要があることを確認した。特に、遠方物体（山や道幅）の過大視が顕著であったため、実空間における知覚される大きさと距離の関係について規則性を見出すことが重要であると結論付けた。

第3章では、視覚心理実験に基づく画像変換関数の導出について述べた。実験では、2刺激比較法を用いて実空間にて知覚される大きさと距離の関係を調査し（提示距離：標準刺激 1-120m、比較刺激 4m）、実空間で知覚される大きさが透視投影画像における大きさの何倍であるかを示す拡大率を算出した。拡大率は、観察距離の増加に伴って増加し、観察距離が 10m 以上になる



## 第1章 はじめに

と増加の傾きが減少する傾向が見られた。そのため、ある距離以上で拡大率は飽和すると仮説を立て、拡大率に対して距離を変数とした S 字特性を持つ関数をフィッティングし、画像変換関数としての拡大率関数を導出した。

第4章では、前章で導出した拡大率関数を適用し、距離に応じて画像上の対象の大きさを拡大描画する画像生成手法に関して述べた。すなわち、レンズ焦点距離を変化させて段階的に空間を描画した画像を組み合わせて1枚の画像を生成する手法を提案した。提案手法の有効性を確認するため、透視投影画像と提案手法を適用して描画した屋外風景のCG画像を用いて、主観評価を行った。

第5章では、本論文の結論及び今後の課題と展望を述べている。空間の視覚印象を表現する手法として、人の視覚系は透視投影画像とは異なる映像表現を採用している。この課題に関連して、補論にて消失点や平行線の知覚に関する実験と考察を追記し、研究の将来展望を補足している。

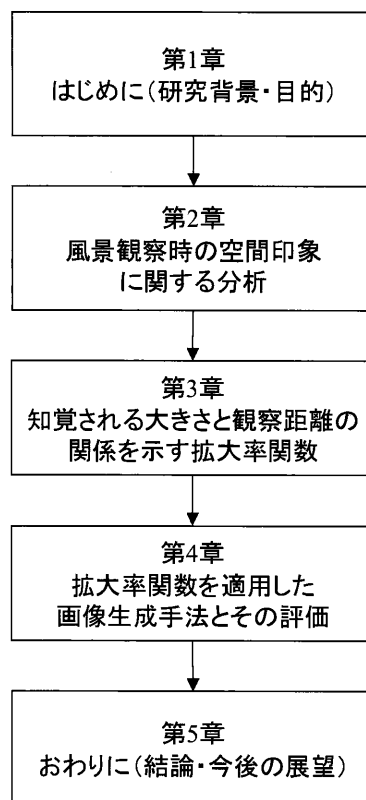


図 1.11 本論文の構成

## 第2章 風景観察時の視覚印象に関する分析

### 2.1 はじめに

本章では、実空間を観察したときの視覚印象を画像に表現するため、実空間を観察したときに人が知覚する空間について調査し、視覚印象の再現において重要なポイントを整理する。透視投影法を歪めて描いた絵画では、正しい透視投影法で描画した場合と比較して対象の大きさや位置の関係、消失点の数や位置が異なっている。したがって、研究対象である「遠方まで被写体が配置された広い空間」を観察したときの視覚印象や、人が知覚する空間における対象の大きさや位置関係について整理を行い、本研究の課題を明確にする。すなわち、描画法を用いて人が実空間を観察したときに知覚する空間の全体像を捉え、対象の大きさや位置関係を調査した。さらに、定量的評価として、量推定法を用いて実空間を観察した場合と画像を観察した場合に知覚する大きさ・距離・角度について比較検証した。詳細を以下に述べる。

### 2.2 描画法を用いた分析

遠景に道路や建物、空が広がり、近景に観察者が注目する対象が置かれた空間において、実空間を観察したときに人が知覚する空間の全体像を捉えるために、描画法を用いた実験を行った。描画法は古くから月の錯視の調査[44]などに用いられてきた手法で、本実験にはデッサン教育の受講経験がある者が参加した。描画されたスケッチに、実空間を観察したときに人が知覚する空間が再現されていると仮定し、観察者が描画したスケッチと観察者の視点から撮影した写真の比較を行い、実空間を観察したときに人が知覚する空間における対象の大きさや位置関係について議論する。

### 2.2.1 実験方法

#### (1) 実験環境

道路の両側および突き当たりに建物が配置された屋外空間（図 2.1 参照）において、突き当りの建物から約 140m の位置に観察者の視点を設定した。観察者の近景に、観察者が特に注目する対象として赤いコーン（高さ 0.7m）を設置した。また、観察者が描画したスケッチと観察者の視点から撮影した写真（図 2.2, Canon IXY Digital 200, 35mm フィルム換算で焦点距離 35mm）の比較を行うための基準線として、観察者から 6m の距離の地面に長さ 0.5m の白線を設けた。なお、実験条件 1 では赤いコーンを観察者から 4m の位置に設置し、実験条件 2 では、赤いコーンを観察者から 8m の位置に設置した。

#### (2) 手続き

スケッチと写真の比較を行うため、画用紙に基準線（画用紙の下から 7cm の位置、長さ 2cm の水平線）を記入し、実験用の記入用紙とした。記入用紙の縦横比による影響を取り除くため、記入用紙は一辺 19.2cm の正方形とした。観察者は、椅子に着座した姿勢で、鉛筆（2B, 3B, 4B）とプラスチック消しゴムを用いて風景のスケッチを行った。観察者は各自、描画がしやすい位置にイーゼルと記入用紙を設置した。観察者の目の高さは約 1.2m であった。

観察者には、記入用紙上の基準線と道路に引かれた基準線を同一とみなし、空間に置かれた赤いコーン、道路の線、正面の建物を描画するよう教示した。その他の物体の描画は自由とした。観察者の半数は実験条件 1 を行った後、実験条件 2 を行った。残り半数は、逆の手順で行った。なお、観察者には、両眼で空間を見るよう指示した。また、観察者が手や定規などを用いて対象の大きさを計測することを禁止した。

#### (3) 観察者

デッサン教育を受けた本学の学生 3 名と教員 1 名の計 4 名（男性 2 名、女性 2 名、22～40 歳）が参加した。

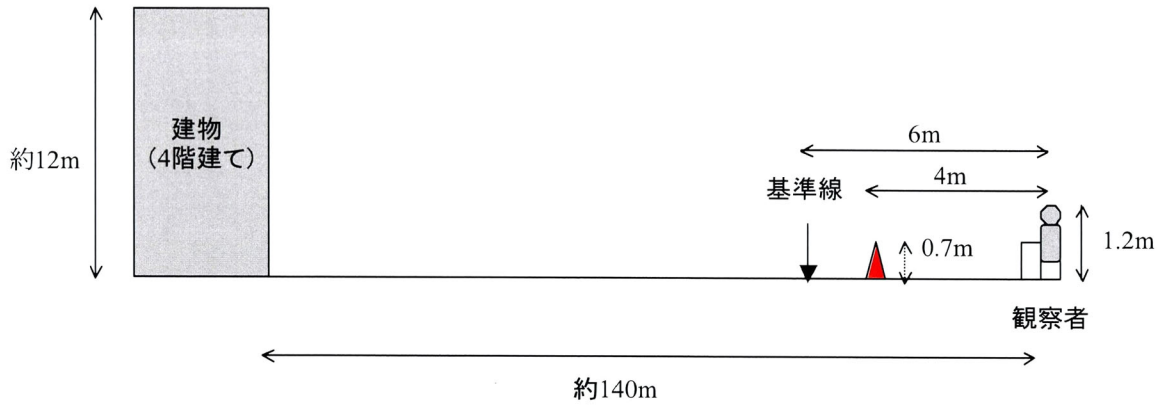


図 2.1 実験環境 (実験条件 1)



図 2.2 観察者の視点から撮影した写真 (35mm フィルム換算で焦点距離 35mm)

## 2.2.2 結果と考察

観察者 4 名のスケッチを図 2.3 に示す。いずれのスケッチにおいても、写真とスケッチでは空間の遠近感や広がり感がまったく異なる。写真に対してスケッチでは距離感が減少し、写真よりも遠方の建物が近くにあるように見える。全てのスケッチにおいて、写真と比較して遠方の建物が大きく描かれており、特に観察者 3、4 のスケッチでは遠方の建物が画用紙におさまっていない。また、道路の描き方が写真とスケッチでは大きく異なり、建物までの距離感の違いに影響を受けていると考えられる。各実験条件におけるスケッチの描画時間は 10 分程度であった。

描画されたスケッチと写真の比較を行うため、各々の像が捉えた対象の大きさや角度を計測し、スケッチに描かれた対象と写真における対象の比率を算出した。比率が 1.0 であればスケッチに

## 第2章 風景観察時の視覚印象に関する分析

描かれた大きさや角度が写真と同一であることを示し、比率が1.0より大きい場合はスケッチに描かれた大きさや角度が写真より大きいことを示す。まず、近景の対象に関して述べる。赤いコーンの高さ（図 2.4 参照）に関して、スケッチに描かれた対象の写真に対する比率は、観察者4名の平均値で、実験条件1において0.94、実験条件2において1.18であった。比率が1.0に近いため、近景においてはスケッチと写真の間に大きな差がないことを確認した。また、遠景の対象に関して、遠方建物に関連する4項目（遠方建物の手前の木、建物の高さ、1階の窓の縦・横の長さ）について述べる（図 2.4 参照）。全項目において、全ての観察者で、スケッチに描かれた対象の写真に対する比率は2.0以上であり、過大視傾向にあることを確認した。また、観察者によって遠方の建物の描く大きさに大きな差があり、過大視の度合いに個人差があることを確認した。なお、実験条件1と2において、大きな差は見られなかった。

次に、道路について述べる（図 2.5, 図 2.6 参照）。基準線と同距離の道幅と、遠方建物付近の道路幅を計測とした。基準線と同距離の道幅に関して、スケッチに描かれた対象の写真に対する比率は、観察者4名の平均値で、実験条件1において0.67、実験条件2において0.62であった。遠方建物付近の道路幅に関して、スケッチに描かれた対象の写真に対する比率は、観察者4名の平均値で、実験条件1において2.71、実験条件2において2.48であった。観察者に近い位置の道幅は狭く、遠い位置の道幅は広く描画され、写真とスケッチでは道路のなす角度に差が見られた。道路のなす角度は、写真130度に対して、スケッチでは観察者4名の平均値で、実験条件1, 2とも74度であった。スケッチに描かれた対象の写真に対する比率は0.57であり、角度の過小視が起きていることを確認した。

以上の通り、スケッチに人が実空間を観察したときに知覚する空間が再現されていると仮定し、スケッチを分析した結果、以下のことが結論される。

- ・ 近景の対象はほぼ等倍であるが、遠景の対象が拡大されている（2-3倍）
- ・ 道路のなす角度が狭くなっている（0.57倍）
- ・ 過大視・過小視はあるが、空間としての整合性は保たれている

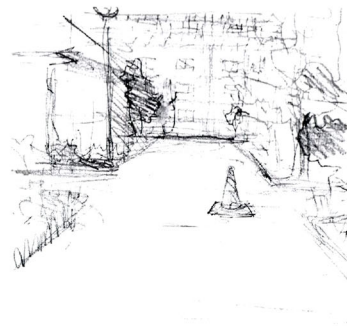
上記の特徴を画像に表現することにより、3次元空間を観察したときの視覚印象（写真と比較して距離感が減少し、遠方の建物が手前に見える）に近い画像を生成できると考える。本実験で確認された遠方の過大視については、視覚心理学の多くの先行研究（Holway & Boring,[10]他）の報告と一致しており、本実験の結果の妥当性を示すことができる。全体として、スケッチと写真において、物体の位置関係（隣り合う物体との接点や、前後関係）に差は見られなかった。対象を過大視しつつ空間の整合性を保つ上で、道路のなす角度の過小視が重要な役割を担っているように考えられる。一方、スケッチを用いて月の知覚される大きさを測定したコーニッシュ[44]は、描画のための訓練を十分にいき、頭を動かさず眼のみを動かして視野に入ってくる部分を画面の横幅に一致するようにして描く方法でスケッチを行った。しかし、本実験では、人が自然に観察したときの空間の見え方を調査することを目的としたため、観察者の頭の位置を固定しなかった。そのため、多視点で観察した風景を一枚のスケッチに表現したとも考えられる。ただし、本実験で採用した描画法は、観察者の描画テクニックによる影響を無視できない。遠方

## 第2章 風景観察時の視覚印象に関する分析

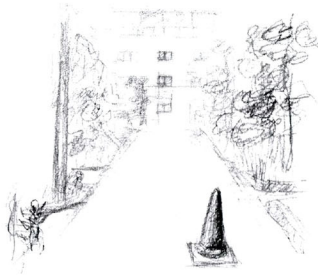
の建物の過大視の程度には個人差があったため、分析データを増やす必要がある。したがって、参加者を制限しない手法として量推定法を用いた追加実験を行い、実空間を観察したときに人が知覚する空間における対象の大きさや位置関係の分析を行う。



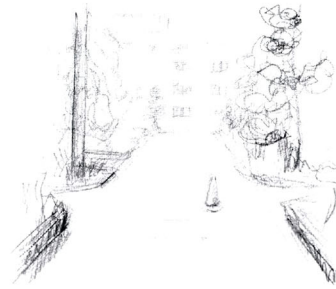
(a) 観察者1 実験条件1



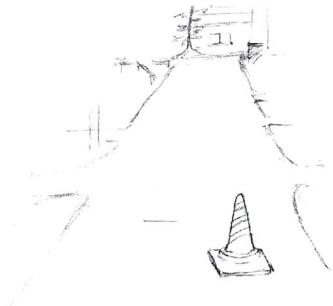
(e) 観察者1 実験条件2



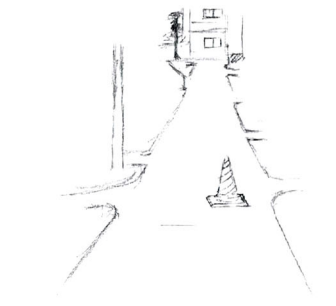
(b) 観察者2 実験条件1



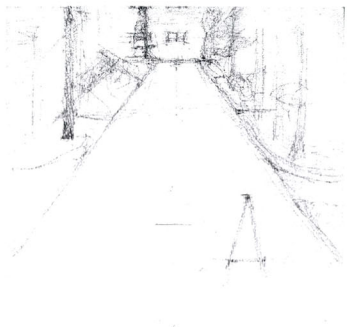
(f) 観察者2 実験条件2



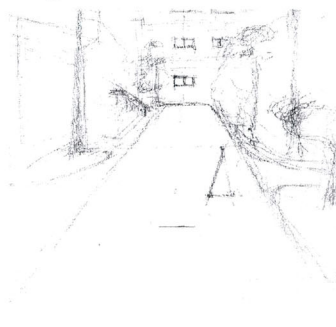
(c) 観察者3 実験条件1



(g) 観察者3 実験条件2



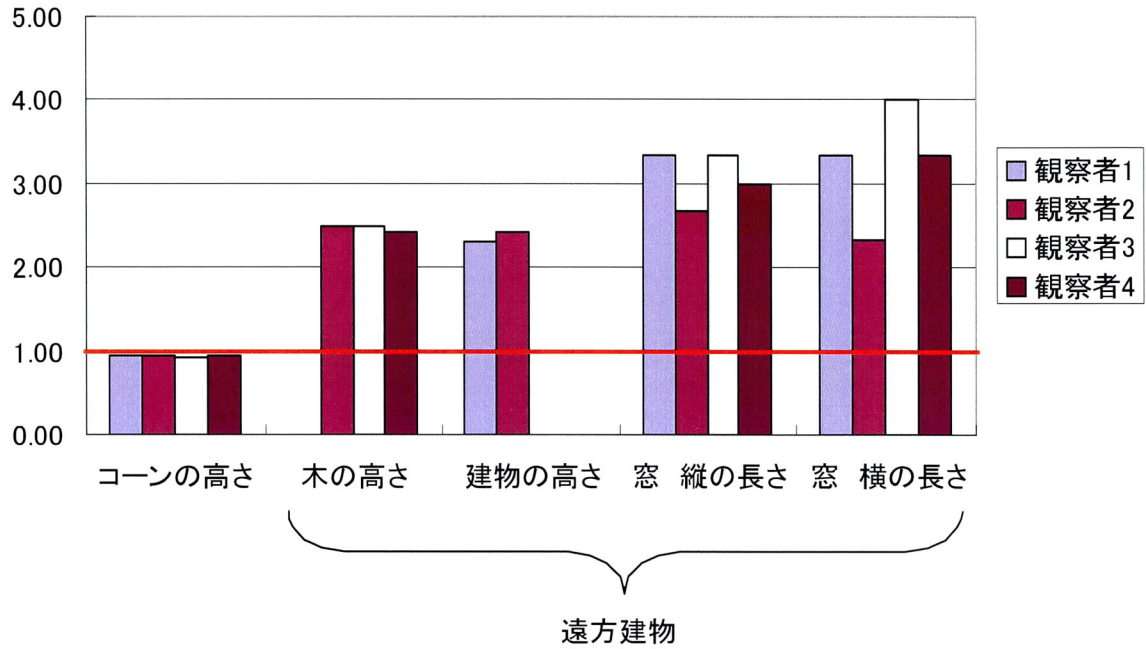
(d) 観察者4 実験条件1



(f) 観察者4 実験条件2

図 2.3 各観察者のスケッチ (実寸の約 1/4)

写真に対する比率(大きさ) 条件1



写真に対する比率(大きさ) 条件2

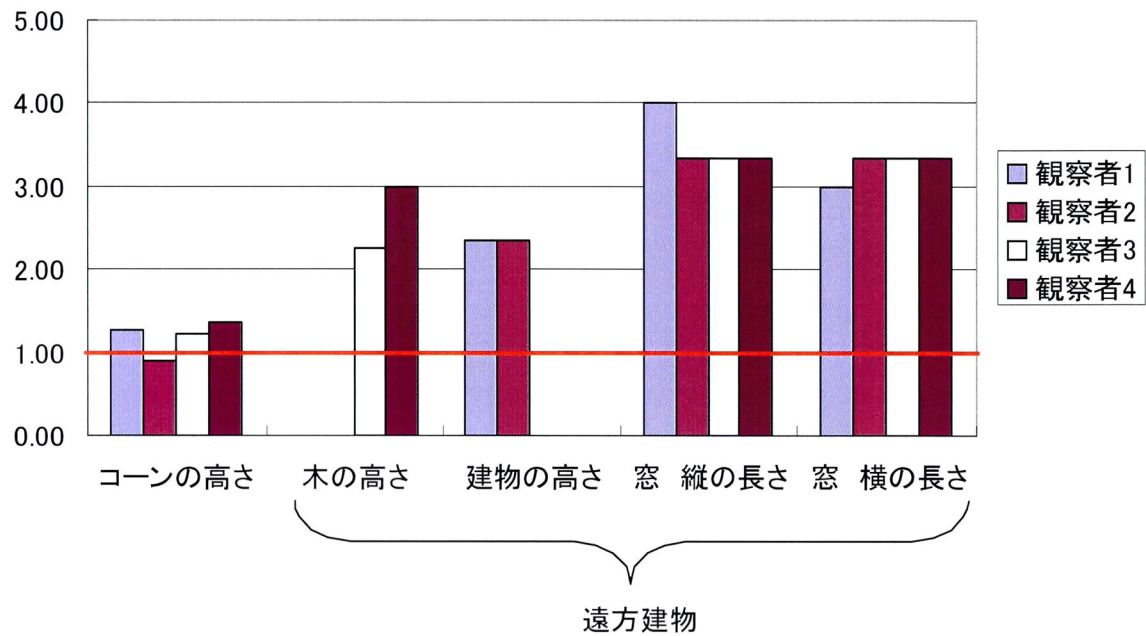
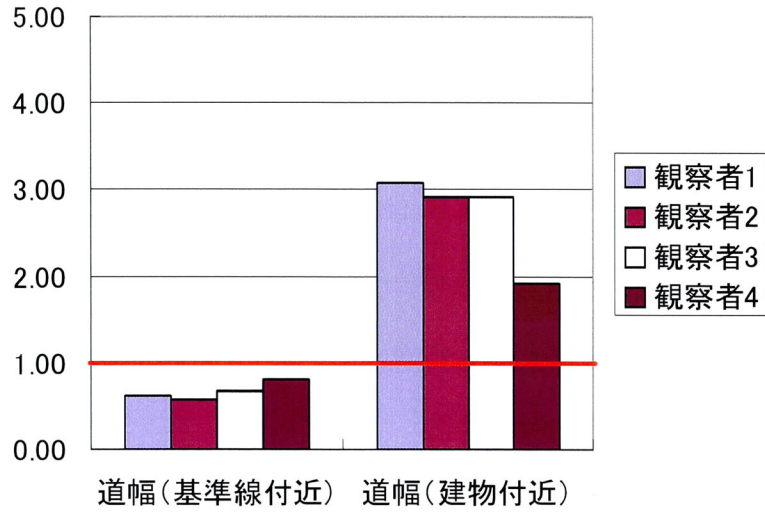


図 2.4 スケッチに描画された対象の大きさ (コーン, 遠方建物)



写真に対する比率(道幅) 条件1



写真に対する比率(道幅) 条件2

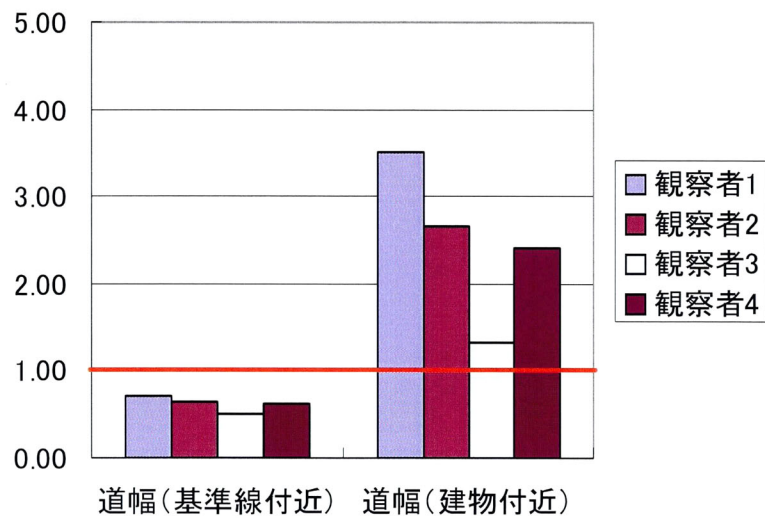


図 2.5 スケッチに描画された対象の大きさ(道幅)

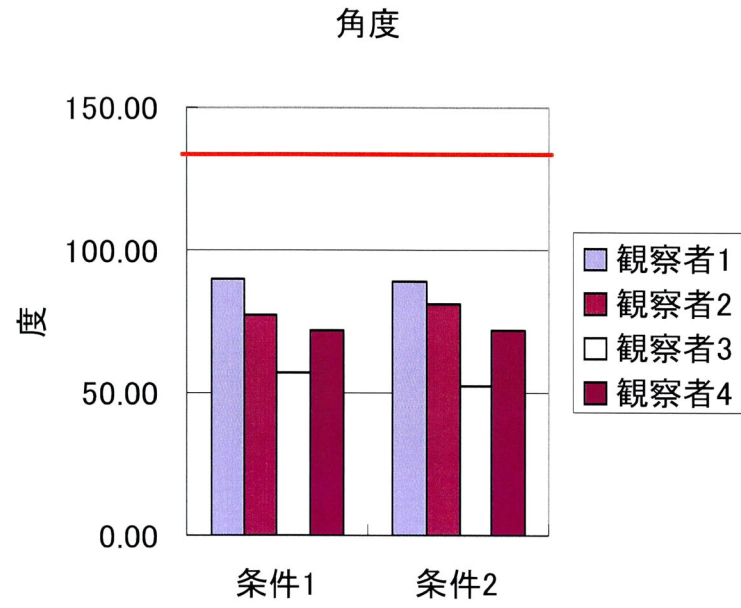


図 2.6 スケッチに描画された道路がなす角度

## 2.3 量推定法を用いた分析

遠方まで直線道路が広がる空間を観察したときに、人が知覚する空間における対象の大きさや位置関係を把握するため、参加者を制限しない手法である量推定法を用いた実験を行った。量推定法は、ある刺激に対して他の刺激がどれだけの比であるかを直接判断する手法である。比較対象があるため、観察者が判断を行いやすいという利点がある。本実験では、実空間で対象を観察した場合と、同一視点から撮影した映像を観察した場合に知覚される大きさ、距離、角度を測定し、両者の比較を行った。

### 2.3.1 実験方法

#### (1) 実験環境

車の通行がほとんどない直線道路において実験を行った。道路は片道2車線（両側4車線、1車線の道路幅は3m）で、観察地点から道路終了地点までの距離は619.5mであった。道路終了地点には、白いガードレールが設置されていた。道路両脇には約15m間隔で常緑樹（高さ約5m）が植えられていた。観察地点から約2.3kmの距離には高さ約600mの山がある。判断に用いる指標として、観察地点から直線距離38mの道路両脇に2つ、観察地点から直線距離88m先の道路両脇に、2つ赤いコーン（高さ0.7m）を配置した（図2.7参照）。

#### (2) 手続き

実験条件1では、観察者は車の助手席に着座した姿勢で対象を観察した。目の高さは1.2mであった。実験条件2では、実験条件1の観察地点と同じ位置から撮影した2種類の画像（画像の縦横比16:9と4:3）を観察した。車の助手席に三脚で固定した一眼レフ（Canon EOS Kiss Digital, 35mmフィルム換算でレンズ焦点距離18mm、画像の縦横比3:2）にて撮影し画像から、画像の縦がレンズ焦点距離50mmで撮影した写真と同一画角になるように、縦横比16:9と4:3の2種類の画像を生成した（図2.8）。カメラの高さは1.2mであった。実験条件2は暗室で行い、画像の提示にはプロジェクターを使用し、縦横比16:9の画像を140cm×79.1cm、縦横比4:3の画像を140.7cm×105.5cmでスクリーンに投影した。実際の視角と合うように垂直画角を27度として視距離を設定し、縦横比16:9の画像の場合、視距離は162.6cm、縦横比4:3の画像の場合、視距離は219.8cmで、目の高さは1.2mであった。

観察者の半分は、実験条件1の後に実験条件2を実施し、残りの半分の観察者は逆の順序で行った。実験条件2では、縦横比16:9の画像を用いた実験を行った後、続けて縦横比4:3の画像を用いた実験を行った。観察者は、実験条件1,2において共通の質問5つに回答した。自然な状態で対象を観察するよう指示し、片目や薄目にして対象を観察することや、手や定規などを用

いて対象の大きさを計測・比較することを禁止した。

(3) 質問項目

観察者への質問項目は、以下5つである。質問対象は、木の高さ、山の高さ、道路幅、ガードレールまでの距離、山までの距離、道路の角度である（図 2.9 参照）。

1. 木の高さ：木①は木②の高さの何倍に見えるか
2. 山の高さ：遠方の山の高さは、コーン B の高さの何倍に見えるか
3. 道路幅：コーン A-B の道路幅は、コーン C-D の道路幅の何倍に見えるか
4. ガードレールまで距離：コーン A から道路遠方のガードレールまでの距離は、コーン A-C 間の距離の何倍に見えるか。
5. 角度：左側白線とその右隣の白線（点線）のなす角度は何度に見えるか

(4) 観察者

本学の学生 10 名（男 7 人，女 3 人，21～24 歳）が参加した。



図 2.7 観察者の視点から撮影した写真（35mm フィルム換算で焦点距離 50mm）

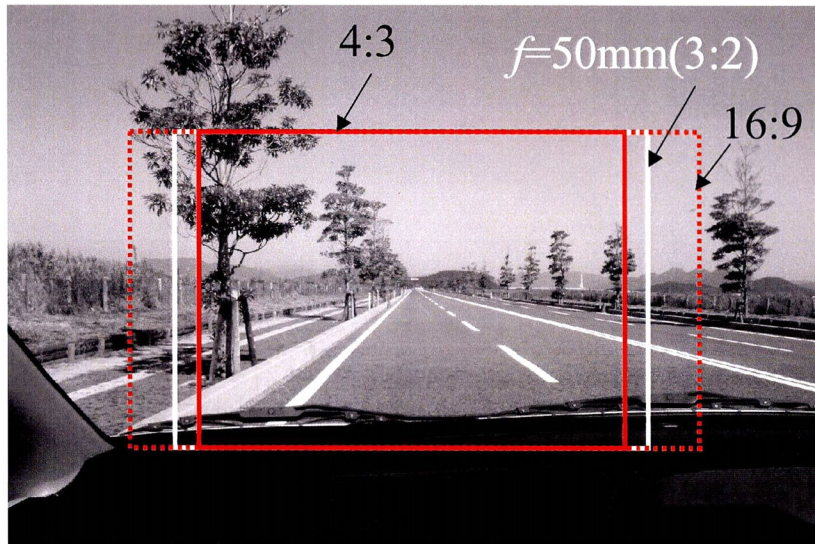


図 2.8 実験条件 2 提示画像

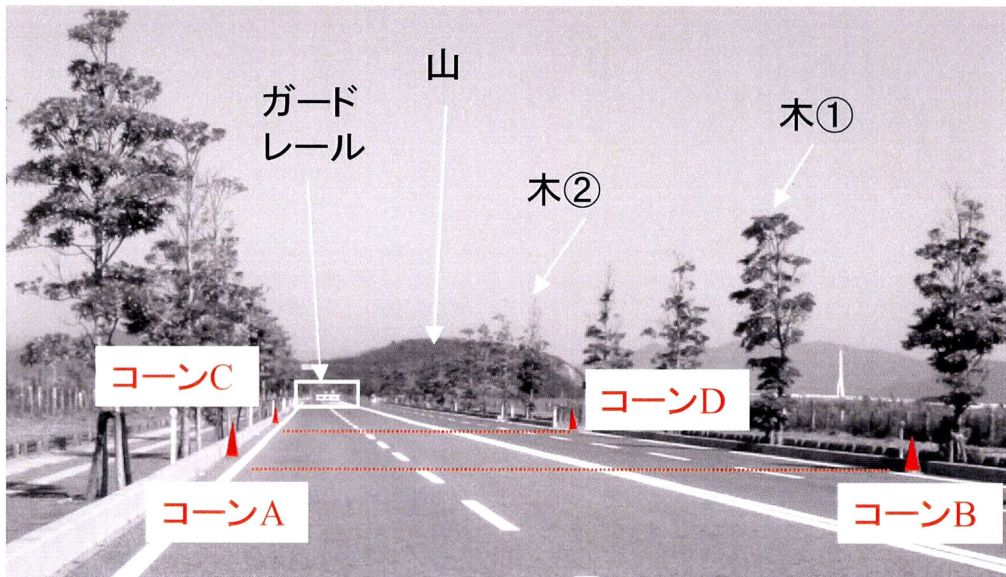


図 2.9 質問に用いた対象

### 2.3.2 結果と考察

5つの質問項目に関して、観察者10名の平均値と標準誤差を図2.10-図2.14に示す。それぞれの質問の真値として、透視投影法で描画した場合の比率や角度を算出し、実験結果のグラフに合わせて表示した。各質問項目における実験結果と考察を以下に述べる。

木の高さに関して、真値1.93倍に対して、観察者10名の平均値は実験条件1では1.40倍、実験条件2の縦横16:9では1.61倍、縦横比4:3では1.58倍であった(図2.10参照)。実験条件1, 2ともに真値より過小評価しており、異なる位置に植えられた2本の木について、透視投影画像上に描かれるほどの大きさの違いを感じていないことが分かった。透視投影画像上の平均値に対して1要因の分散分析を行ったところ、実験条件の主効果は認められなかった[F(2,18)=2.6]。

山の高さに関して、真値1.66倍に対して、観察者10名の平均値は実験条件1では2.37倍、実験条件2の縦横16:9では1.88倍、縦横比4:3では1.81倍であった(図2.11参照)。実験条件1, 2ともに真値より過大評価をしており、実際よりも遠方の山を大きく見ていることが分かった。平均値に対して1要因の分散分析を行ったところ、実験条件の主効果が認められた[F(2,18)=7.0, p<.05]。TurkeyのHSD検定によって、実験条件1と実験条件2の縦横比16:9、実験条件1と実験条件2の縦横比3:4の間に有意差が認められた。したがって、透視投影法で描画された画像を観察した場合と比較して、3次元空間では遠方の山を大きく知覚することが示された。

道路幅について、真値2.28倍に対して、観察者10名の平均値は実験条件1では1.70倍、実験条件2の縦横16:9では2.05倍、縦横比4:3では2.10倍であった(図2.12参照)。実験条件1, 2ともに真値より過小評価しており、異なる位置の道路幅について、透視投影画像上に描かれるほどの長さの違いを感じていないことが分かった。平均値に対して1要因の分散分析を行ったところ、実験条件の主効果が認められた[F(2,18)=13.4, p<.001]。TurkeyのHSD検定によって実験条件1と実験条件2の縦横比16:9、実験条件1と実験条件2の縦横比3:4の間に有意差が認められた。したがって、透視投影法で描画された画像を観察した場合と比較して、3次元空間では、近くの道路幅を狭く、遠くの道路幅を広く知覚することが示された。

ガードレールまでの距離に関して、真値11.63倍に対して、観察者10名の平均値は実験条件1では9.43倍、実験条件2の縦横16:9では6.02倍、縦横比4:3では5.62倍であった(図2.13参照)。実験条件1, 2ともに真値より過小評価しており、遠方までの距離を実際より短く感じていることが分かった。平均値に対して1要因の分散分析を行ったところ、実験条件の主効果が認められた[F(2,18)=2.8, p<.1]。TurkeyのHSD検定によって実験条件1と実験条件2の縦横比16:9、実験条件1と実験条件2の縦横比3:4の間に有意な差がある傾向が認められた。したがって、透視投影法で描画された画像を観察した場合と比較して、3次元空間では、距離を長く知覚することが示された。

道路の白線のなす角度に関して、真値100度に対して、観察者10名の平均値は実験条件1では39.1度、実験条件2の縦横16:9では48.3度、縦横比4:3では47.4度であった(図2.14参照)。実験条件1, 2ともに真値と比較して極端な過小評価がされた。平均値に対して2要因の分

散分析を行ったところ、実験条件の主効果は認められなかった。

以上より、人が実空間を観察して知覚する空間には、透視投影画像に描画された空間（真値）と比較して以下の特徴がある。

- ・ 遠方の対象（山、道路幅）を過大視している
- ・ 異なる位置にある木の高さや道路幅において、透視投影画像上に描かれるほどの大きさの違いを感じていない
- ・ 道路のなす角度については、極度に過小視している

また、実空間を観察した場合に人が知覚する空間は、透視投影画像を観察した場合（実験条件2）と比較して、以下の特徴がある。

- ・ 遠方の対象（山、道路幅）を過大視する
- ・ 遠方の対象（ガードレール）までの距離を過大視する

視覚心理学分野の先行研究では、実際の視角に合う大きさで透視投影画像を観察した場合には、画像に描かれる空間に違和感がないと報告しているものがある[23]。しかし、本実験では、実空間で風景を観察した場合と同じ視角になるように画像を提示した条件下で、上記のような差が確認された。また、透視投影画像を観察した場合、画像の縦横比による違いは見られなかった。したがって、実空間における視覚印象の再現には、画像の縦横比や視距離を最適にする方法だけでは十分ではなく、透視投影法を歪ませた新しい画像生成手法が必要である。

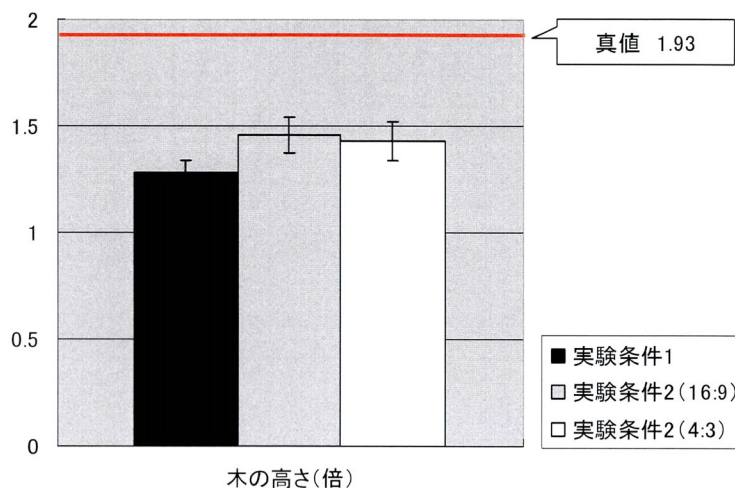


図 2.10 観察者 10 名の平均値と標準誤差（木の高さ）

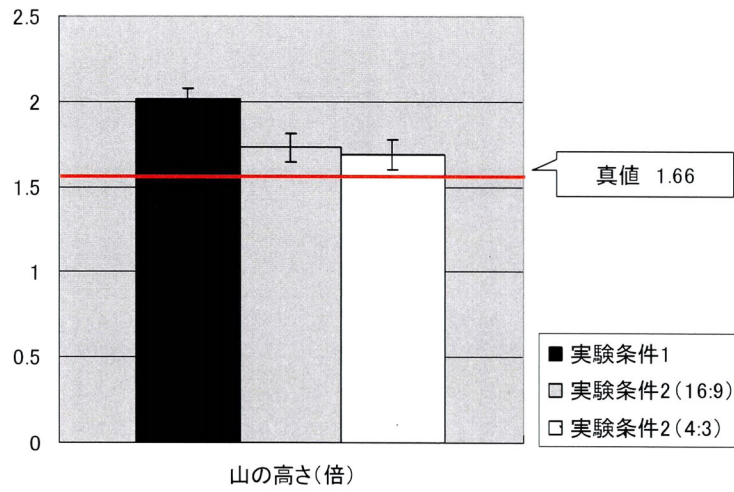


図 2.11 観察者 10 名の平均値と標準誤差 (山の高さ)

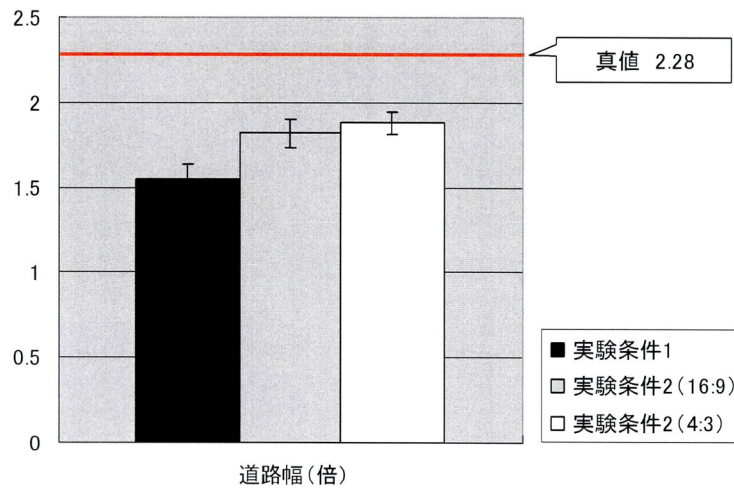


図 2.12 観察者 10 名の平均値と標準誤差 (道路幅)



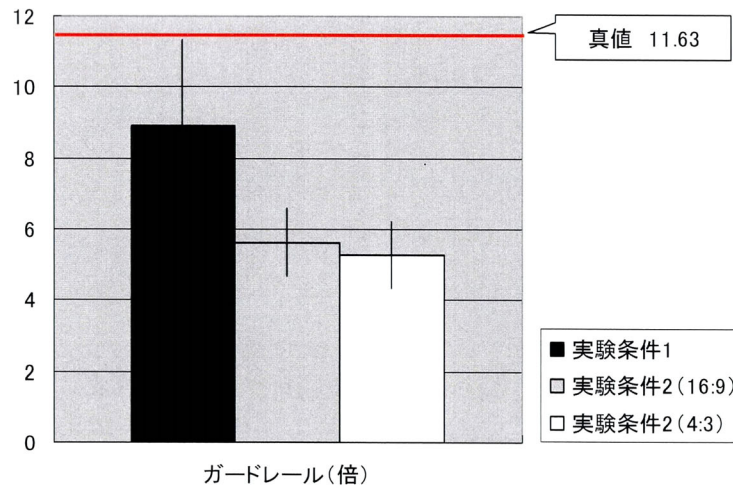


図 2.13 実観察者 10 名の平均値と標準誤差 (ガードレールまでの距離)

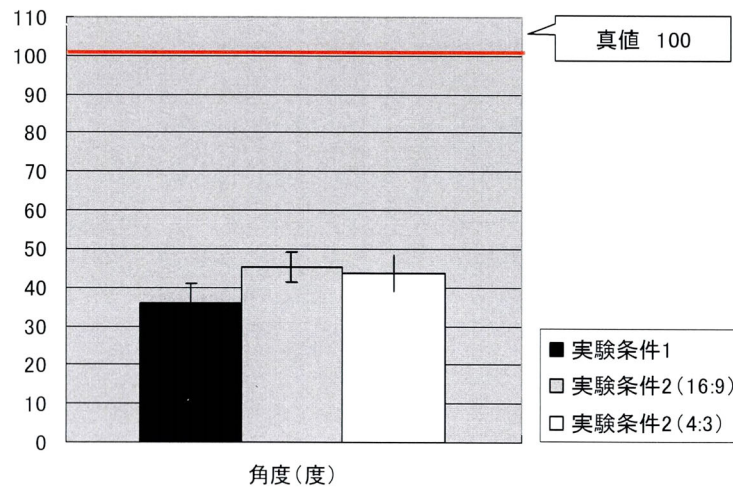


図 2.14 観察者 10 名の平均値と標準誤差 (道路の白線がなす角度)

## 2.4 全体的考察

描画法および量推定法によって、人が実空間を観察したときに知覚する空間を調査し、屋外風景の視覚印象を分析した。その結果、実空間を観察したときに人が知覚する空間と透視投影法に描かれた画像には、遠近感や距離感、大きさ感に違いがあることが明らかになった。

描画法と量推定法を用いた実験に共通して、遠景の対象と道幅の過大視が見られた。したがって、視覚印象を画像に表現するためには、特に遠景の対象の大きさを拡大し、遠方の道路幅を広げて描画することが重要である。描画法による実験の結果、実空間を観察したときに人が知覚する空間と透視投影法で描画された画像において、物体の位置関係（隣り合う物体との接点や、前後関係）に差は見られなかった。本実験の結果、拡大した対象を画像に収め、画像に表現される空間の整合性を保つ方法の一つに、距離に応じて道路幅を変化させ、道路のなす角度を狭くすることが挙げられる。したがって、実空間において知覚される大きさと観察距離の関係について規則性を見出し、その結果を基に画像変換関数を導出することを本研究の方針の一つとする。また、道路のなす角度を変更した場合、透視投影画像に表れる消失点の位置や数に変化が生じることが想定される。実空間において人が知覚する空間の幾何学特性を明らかにする上で、実空間を観察した場合の消失点に着目し、画像上に表現する物体の位置関係に関する知見を得ることも必要である。

実空間の距離感に関しては、2つの実験で得られた結果に違いが見られた。描画法による実験では、透視投影法で描画された画像と比較して、観察者が描画したスケッチの方が遠方の物体までの距離を近く感じた。一方で、量推定法による実験では、透視投影画像を観察した時と比較して、実空間で観察した場合の方が遠方の物体までの距離を遠く感じる事が確認された。距離知覚に関して渡辺[20]は、写真を観察した場合と比較して、実空間を観察した場合に距離を過大視すると報告しており、量推定法による結果と一致する。2つの実験結果に差が生じた原因の一つとして、比較に用いた画像の画角が異なる点が考えられる。Kraft, Patterson, & Mitchell[45]は画角が広い（レンズ焦点距離が短い）ほど、写真の奥行き感が増加することを報告している。描画法の実験で使用した画像は35mmフィルム換算で焦点距離35mm、量推定法の実験で使用した画像は焦点距離50mmのレンズで撮影した画像の画角に対応する。そのため、描画法の実験では写真観察時の奥行き感が増加したと考えられる。

道路のなす角度に関しては、2つの実験に共通して、実空間を観察した場合に角度の過小視が確認された。ただし、画像を観察した時にも極端な角度の過小視が起きた。画像上の道路のなす角度は実際には110度であるが、90度より小さく見える（図2.7参照）。この現象は錯視としての新規性が高く、後に「道路の角度錯視」として認定された[46]。Rock[47]は、図形の提示角度によって角度の判断のしやすさが異なると指摘している。垂直方向または水平方向に角度が示されている場合は角度の違いを認識しやすいが（図2.15(a)）、異なる角度に示された場合は角度の違いを認識しにくい（図2.15(b)）。そのため、道路の白線のなす角度を正しく判断すること

が難しいと思われる。過小視が生じた要因に関しては、今後、現象の解明に向けて検討が必要である。

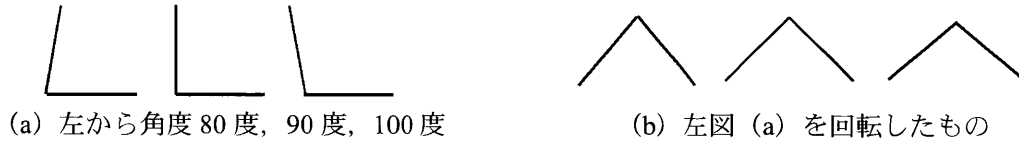


図 2.15 図形の回転が見えの角度に与える影響

## 2.5 まとめ

実空間を観察したときに人が知覚する空間の全体像を捉え、対象の大きさや位置関係を把握するため、描画法と量推定法を用いた実験を行い、屋外風景の視覚印象を分析した。分析の結果、実空間を観察したときに得る遠近感や距離感、大きさ感を画像に表現するためには、距離に応じて対象の大きさや道路の傾きを変化させることが重要であることが判明した。これにより、本研究の方針として、実空間において知覚される大きさと距離の関係について規則性を見出し、その結果を基に画像変換関数を導出することを目指す。

## 第3章 知覚される大きさと観察距離の関係を 示す拡大率関数

### 3.1 はじめに

本章では、実空間において知覚される大きさと距離の関係に規則性を見出し、視覚印象に近い画像を生成するために必要である画像変換関数を導出する。視覚心理学分野の先行研究には、大きさの恒常性や、知覚される大きさと観察距離の関係に言及しているものがある[8][9][10]。しかし、先行研究の多くは、手が届く距離 (reaching distance) や数 m 先までの近い距離、あるいは遠方の山や島など数 km 先を対象としており、数 100m 程度の範囲を対象としたものは少ない。加えて、本研究で必要とする画像変換関数として応用できる知見を見つけることはできなかった。そのため、本章では、古くから知覚される大きさの測定に多用されている 2 刺激比較法を用いて実空間における知覚される大きさと観察距離の関係を調査し、画像変換に用いる拡大率関数を導出する。2 刺激比較法は、提示した 2 つの刺激 (標準刺激と比較刺激) の比較判断によって心理量を計測する手法である。本実験では、観察者が標準刺激の見えの大きさに合うように比較刺激の大きさを自由に変更していく調整法を採用した。なお、知覚される大きさの判断において、教示による影響が指摘されている[48][49]。教示において、両刺激の網膜上の大きさが一致するように比較刺激の大きさを調整するよう伝えた。

### 3.2 近距離における拡大率関数

画像変換関数を導出するために、まず、知覚される大きさと観察距離の関係性について深く調査する。まず、実験を行いやすい屋内を実験環境とし、1-10m の範囲に 11 箇所と細かく測定点を設けて実験を行った。細かなデータを取得することで、知覚される大きさと観察距離が直線関係にあるのか否かを確認し、両者の関係を示す最適な関数の導出を目指す。一方、2 刺激比較法

### 第3章 知覚される大きさと観察距離の関係を示す拡大率関数

に関して、比較刺激の提示距離が標準刺激の知覚する大きさに影響を及ぼすことが指摘されている[50][51][52]. 画像変換関数の汎用性を高めるためには、実験手法による影響を含まないことが望ましい。したがって本実験では、比較刺激を3箇所を設定し、比較刺激による影響を調査するとともに、比較刺激提示距離に依存しない関数の導出を行う。また、個人差の表現法についても留意する。

#### 3.2.1 実験方法

##### (1) 実験装置と刺激

屋内の部屋（奥行き約13.7m、幅約5.8m、高さ約2.7m、壁は白色）にて実験を行った（図3.1参照）。全室内灯を点灯し、カーテンを閉めて外光を遮った状態で行った。標準刺激および比較刺激は白い正円とし、17インチCRTディスプレイを用いて提示した。両刺激の背景は黒色とし、両刺激はディスプレイ画面の中央に提示し、ディスプレイは観察者に正対するように配置した。標準刺激の左25度に比較刺激を配置し、標準刺激は、直径15.3cmと8.3cmの2種類であった。比較刺激の大きさ調節は、マウスの操作によって行われた。標準刺激は観察者から1m-10mの範囲で11箇所（1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 10.0m）に提示した（図3.2参照）。両刺激の円の中心と観察者の目の高さが同じになるように、あご台を用いて観察者の目の位置を固定した。比較刺激は1.0m, 2.0m, 4.0mに提示し、実験条件1, 2, 3とした。

##### (2) 手続き

観察者は、標準刺激の「見え」の視角に合うように、比較刺激の大きさをマウスで調節した。標準刺激準2種類を交互に3回ずつ提示した。標準刺激は、ランダムな順序で提示した。すべての観察者に対して、実験条件1, 2, 3の順序で実験を行った。観察者には両眼視で刺激を観察するよう指示し、手や道具を使って刺激の大きさを測ることを禁止した。観察時に、2つの刺激を交互にはっきり見比べるようにして行うことを指示し、数回の練習を行った後、本試行に入った。

##### (3) 観察者

条件1には、本学の学生11名（男性5名、女性6名、20~24歳）、条件2, 3には条件1の参加者から1名を除いた10名が参加した。

第3章 知覚される大きさと観察距離の関係を示す拡大率関数

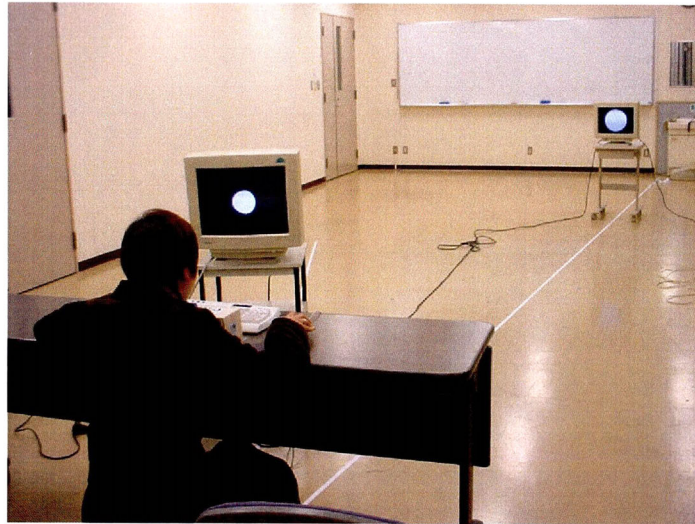


図 3.1 実験風景

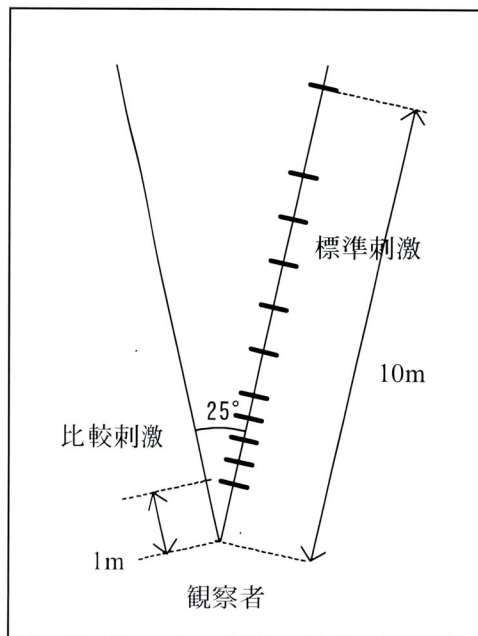


図 3.2 標準刺激と比較刺激の配置 (条件 1)

### 3.2.2 結果と考察

測定結果を用いて標準刺激と比較刺激の視角の比を算出し、実空間で知覚される対象の大きさが透視投影画像上の大きさの何倍であるかを示す拡大率を導出した。各条件における観察者全員の拡大率の平均値を図 3.3 に示す。標準刺激提示距離の増加に伴い、拡大率は規則的に増加した。Akishige[51]らの指摘の通り、比較刺激の提示距離によって異なる拡大率が得られた。比較刺激の提示距離 3 条件において、拡大率の変化の傾きが似ていることを確認した。これらの特徴に基づき、近距離（1-10m）を対象とした拡大率関数を次式で表現することとした。

$$f(D_s) = \left( \frac{D_s}{D_c} \right)^a \quad (2)$$

ここで、 $D_s$  は標準刺激提示距離 (m)、 $D_c$  は比較刺激提示距離 (m)、 $a$  は個人差を表すパラメータである。横軸を  $D_s/D_c$  と規格化し、縦軸に各実験条件における拡大率の平均値を示したグラフを図 3.4 に示す。観察者 10 名の拡大率の平均値において、 $D_c = 1.0$  のとき  $a = 0.58$  ( $r = 0.977$ )、 $D_c = 2.0$  のとき  $a = 0.59$  ( $r = 0.992$ )、 $D_c = 4.0$  のとき  $a = 0.62$  ( $r = 0.998$ ) となり、拡大率の平均値から算出した  $a$  の値が  $D_c$  に関わらずほぼ 0.6 になることを確認した。図 3.4 より、両対数の座標において拡大率と規格化された距離は線形的な対応関係にあることが確認できる。各観察者の拡大率 (図 3.5) においても、異なる  $D_c$  において  $a$  の値はほぼ一致する傾向を示し、 $a$  の個人差の範囲は 0.4-0.9 であった。また、 $a$  は Thouless 指数と数学的に等しいことを確認した。知覚される大きさと距離の関係が Thouless 指数で表現されることは、Leibowitz[14]、森[53]、牧野[9]によって示されており、それらの見解とも一致した。

本節では、従来の視覚心理学研究と同様に、2 刺激比較法を用いて近距離における知覚される大きさと観察距離の関係を測定し、拡大率関数を導出した。拡大率を比較刺激提示距離で規格化した観察距離 ( $D_s/D_c$ ) の関数として表現したため、実験での測定距離に限定せず連続値として拡大率を扱うことが可能となった。また、測定に影響を及ぼす比較刺激の提示距離をパラメータとして式に含めたため、2 刺激比較法に特有の課題を解決したといえる。

第3章 知覚される大きさと観察距離の関係を示す拡大率関数

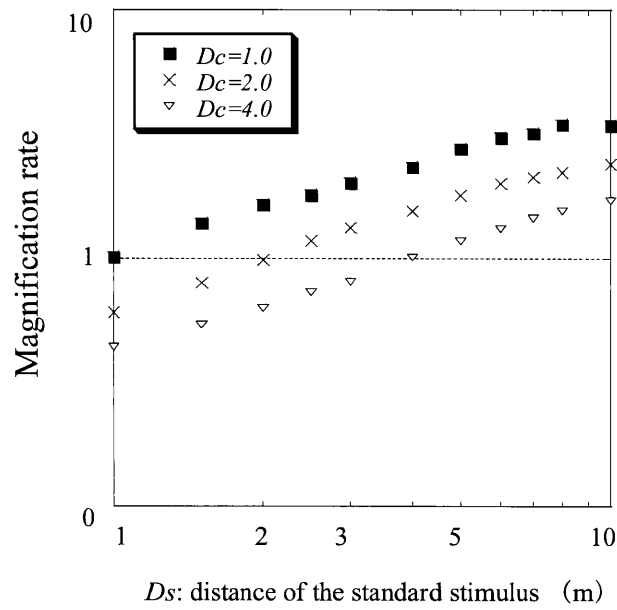


図 3.3 近距離における拡大率

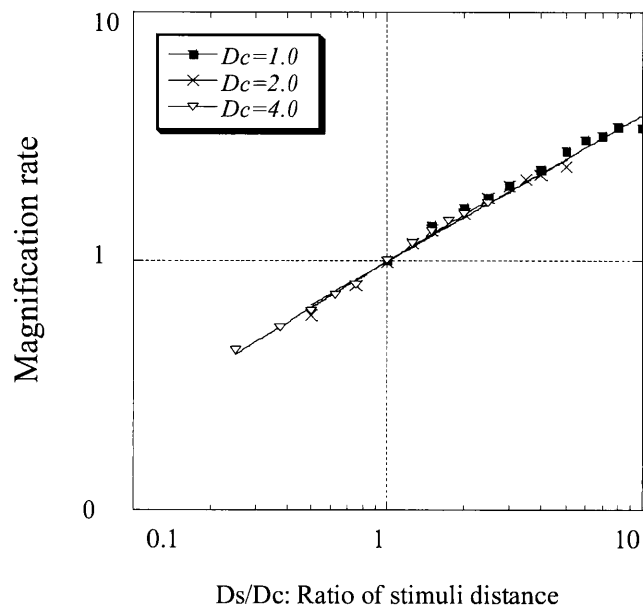


図 3.4 近距離における拡大率に対するフィッティング結果



第3章 知覚される大きさと観察距離の関係を示す拡大率関数

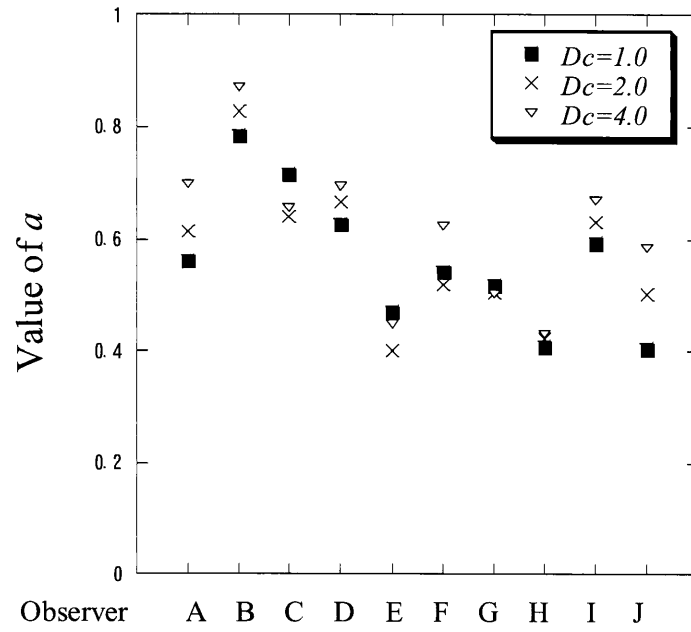


図 3.5 それぞれの観察者における  $a$  の値

### 3.3 遠距離における拡大率関数

本章では、本研究の対象である「遠方まで被写体が配置された広い空間」に対応する拡大率関数を導出するため、遠距離において知覚される大きさと観察距離の関係を調査する。近距離における実験において、観察距離の増加に伴い拡大率が直線的に増加をすることを確認した。しかし、地球から遠く離れた月（約 38 万 km）の知覚される大きさを参考にすると、距離を無限大にした場合に、拡大率が無限大になるとは考えにくい。拡大率は距離の変化に応じて増加し続けるのではなく、ある地点で飽和すると推定される。この仮説と遠距離における測定結果を基に、遠距離における拡大率関数を導出する。なお、本実験は本研究の対象である屋外空間にて実施し、4～120m の広範囲に刺激を提示する。近距離を対象とした実験にて、複数の比較刺激の提示距離において拡大率の変化の傾きが近いことを確認したため、本実験では実験時間の短縮化を図り、比較刺激の提示距離を 4m に固定した。

#### 3.3.1 実験方法

##### (1) 実験装置と刺激

道路の両側、突き当たりに建物がある屋外で実験を行った（図 3.6 参照）。標準刺激は 4, 8, 16, 30, 60, 120m の 6 箇所提示した。実験環境上の制約により、標準刺激を観察者の正中間に提示し、比較刺激を観察者から左方向に 25 度傾いた位置に提示した（図 3.7 参照）。各標準刺激は、すべての距離で物理的な視角が一致する寸法で作成した。例えば 4m の距離では直径 4cm、120m の距離では直径 120cm の白色正円であった。比較刺激は液晶ディスプレイを用いて観察者から 4m の位置に提示した。

##### (2) 手続き

観察者は、標準刺激の「見え」の視角に合うように、比較刺激の大きさをマウスで調節した。標準刺激は、ランダムな順序で提示した。観察者には両眼視で刺激を観察するよう指示し、手や道具を使って刺激の大きさを測ることを禁止した。観察時に、2つの刺激を交互にはっきり見比べるようにして行うことを指示し、数回の練習を行った後、本試行に入った。

##### (3) 観察者

近距離における拡大率の計測実験に参加していない本学の学生 9 名（男性 5 名、女性 4 名、20-23 才）が参加した。

第3章 知覚される大きさと観察距離の関係を示す拡大率関数



図 3.6 実験風景

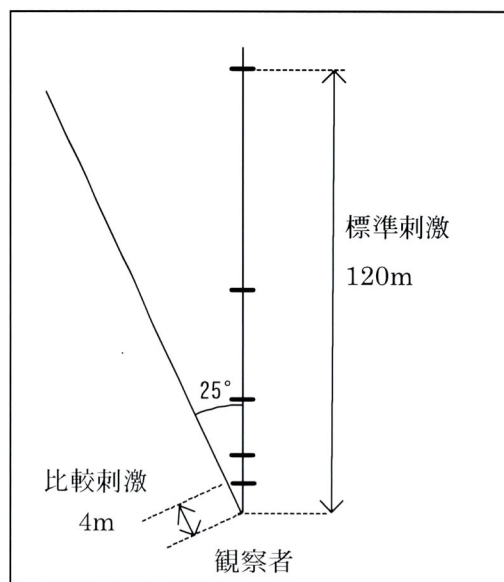


図 3.7 標準刺激と比較刺激の配置

### 3.3.2 結果と考察

近距離実験では、比較刺激と基準刺激が同じ距離に提示された場合、両者の大きさはほぼ一致したため、標準刺激の物理的視角を基に拡大率を算出した。しかし、遠距離実験においては、提示距離を4mにおいて、比較刺激の大きさは標準刺激より小さくなる傾向が確認された。そのため、標準刺激の観察距離を4mとした場合に測定された大きさ（知覚された大きさ）を基に拡大率を算出した。上記の違いが見られた原因として、刺激配置の違いによる影響が考えられる。近距離実験では、両刺激はそれぞれ観察者から左右に等しく12.5度傾いた位置に提示した。他方、遠距離実験では比較刺激のみ観察者から左方向に傾いた位置に提示した。そのため、遠距離実験では比較刺激の方が観察者からの奥行き距離が近く、比較刺激の方が手前にあるように感じられたことが要因として考えられる。

各標準刺激提示距離における拡大率（観察者全員の平均値）を両対数のグラフに表した（図3.8参照）。近距離実験と同様、観察距離の増加に伴い拡大率が増加する傾向が確認された。ただし、近距離実験では拡大率と観察距離の関係は両対数グラフ上で直線に近かったが、遠距離実験では、拡大率の増加率が減少し、直線の傾きに変化が見られた。したがって、遠距離における拡大率関数は、式(1)のようにThouless指数そのものでは表現できず、直線の傾きが距離に応じて減少する特性を持つ関数が必要であることが示された。「ある距離を越えると拡大率は飽和する」という仮説をあわせて考慮し、両対数グラフ上の拡大率に対して、観察距離を変数としたS字特性を持つ関数をフィッティングするのがよいと判断した。

本研究ではS字特性を持つ数式として、生物の個体数変動のモデルとして考案されたロジスティック方程式[54]を使用する。初期条件を時刻 $t=0$ で $N(t=0)=N_0$ とすると、個体数 $N$ と時刻 $t$ の関係は、以下の微分方程式で表される。

$$\frac{dN}{dt} = (\alpha - \lambda N)N \quad (3)$$

ただし、 $\alpha$ 、 $\lambda$ は定数である。 $\alpha$ は増加率、 $\lambda$ は環境変数を示す。これを解くと、個体数 $N$ の時間変化 $N(t)$ は

$$N(t) = \frac{\alpha N_0 e^{\alpha t}}{\alpha + \lambda N_0 (e^{\alpha t} - 1)} \quad (4)$$

となる。式(3)は、 $\alpha > 0$ であれば $t \rightarrow +\infty$ のとき $N_\infty = \alpha/\lambda$ となり、一定値 $\alpha/\lambda$ に漸近的に接近していく。上述したロジスティック方程式を利用して拡大率関数 $f(D)$ を導出する。拡大率（観察者全員の平均値）と観察距離 $D$ は両対数のグラフ上でS字特性を示すため、 $t = \ln D$ 、 $N = \ln f(D)$ のとき、拡大率関数 $f(D)$ は以下のように定義される。

$$f(D) = e^A \quad (5)$$

$$A = \frac{\alpha N_0 D^\alpha}{\alpha + \lambda N_0 (D^\alpha - 1)} - C$$

ここで、 $C$ は $D=0$ において $f(D)=1$ 、すなわち $N_0=1$ にするためのパラメータである。各観

### 第3章 知覚される大きさと観察距離の関係を示す拡大率関数

観察距離における拡大率に関する実験結果に対して式(4)を非線形最小二乗法によってあてはめ、 $\alpha = 0.87$ ,  $\lambda = 0.29$ ,  $C = 1.82$ を得た。このときの相関係数  $r = 0.995$  であり、式(1)と同様にあてはまりが良いことが示された。実験範囲4~120mに対し、参考として1000mまでのフィッティング結果を図3.9に示す。なお、飽和値は3.25であった。

さらに、観察者の個人差を確認するために、各観察距離における近距離実験で得た拡大率の平均値と、遠距離実験によって得た各観察者の拡大率を用いて、上記と同様にフィッティングを行った。その結果、 $\alpha$ の値は0.78-1.55、 $\lambda$ の値は0.21-0.87の範囲であることが分かった。以上より、遠距離における拡大率関数は、式(4)によるパラメータフィットが可能であることを示した。

第3章 知覚される大きさと観察距離の関係を示す拡大率関数

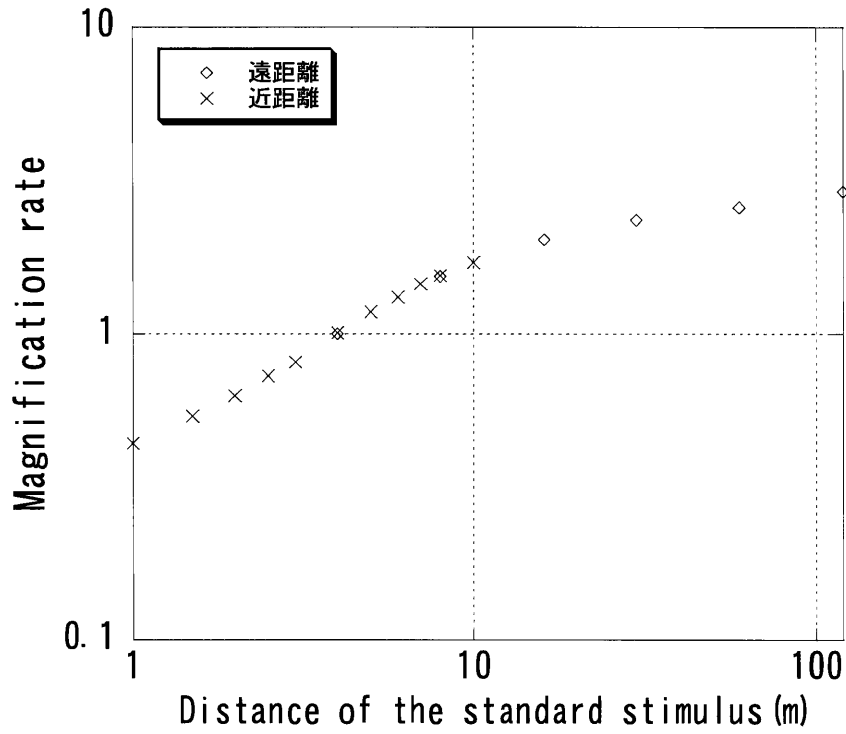


図 3.8 遠距離における拡大率と観察距離の関係

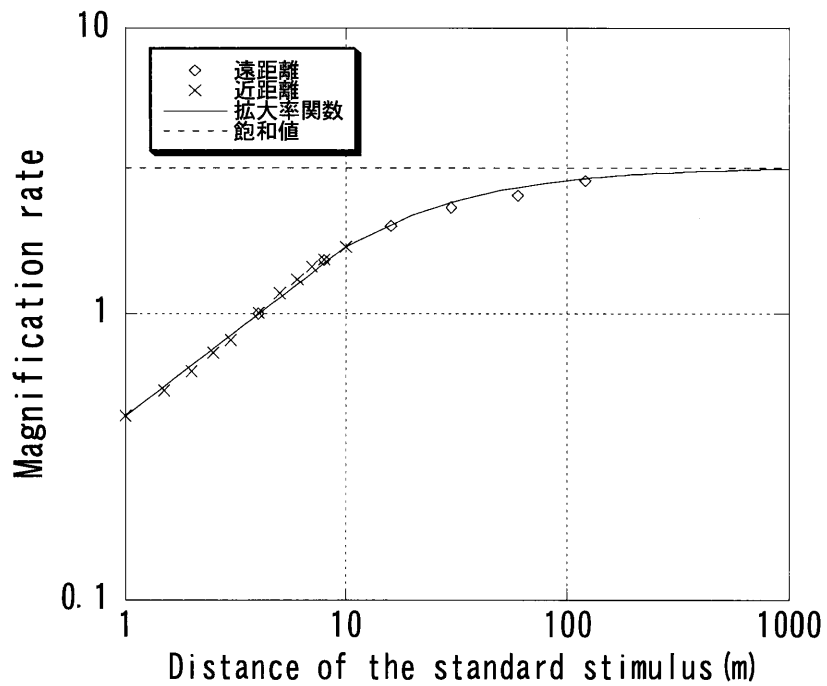


図 3.9 遠距離における拡大率に対するフィッティングの結果

### 3.4 全体的考察

観察距離 1~120m の範囲に対して、実空間で知覚される大きさと観察距離の関係を調査し、拡大率と観察距離の関係性をロジスティック関数：式 (5) にて示した。観察距離 10m 付近までは拡大率は直線的な増加傾向を示したが、観察距離 10m 以上では緩やかな増加傾向に変化した。この要因として、知覚される大きさと知覚される距離との関係性が挙げられる。Kilpatrick & Ittelson[55]は、知覚される大きさと知覚される距離の比が対象の視角によって決定されるという距離不変仮説 (size distance invariance hypothesis) を説き、それ以来多くの研究者が知覚される大きさと距離との関係を指摘している。知覚される距離は、距離・奥行き手がかり (図 1.5 参照) と関連性が深い。手が届く範囲では、調節や輻輳が有効に働き距離知覚の確度は非常に高く、2~20m の範囲では、両眼視差、運動視差、経験的大きさが有効に働き、1km 以上では、距離手がかりの有効性はほぼ失われ、熟知距離 (familiar distance) の概念によって距離を知覚する (Higashiyama, 1994)。一方、距離・奥行き手がかりが無い場合、距離感が働く範囲は単眼で 2m、両眼で 20m までである。これ以上の距離は、個人の経験的な知識の正確さに依存する (加藤, 1997)。したがって、観察距離の増加に伴い、距離知覚に有効な手がかりが減少したことが拡大率の減少に影響したと考えられる。

次に、個人差について述べる。比較刺激提示距離 4m における拡大率の被験者全員の平均値と標準誤差を図 3.10 に示す。第 2 章の描画法を用いた視覚印象の分析において、知覚する空間には個人差があることが示唆された。拡大率においても同様に個人差が見られ、観察距離が 10m を超えると個人差が大きくなった。したがって、3次元空間を観察したときの視覚印象 (遠近感や距離感、大きさ感) を CG 画像に表現する場合、リアリティを高めるためには各観察者の個人差を反映した表現ができることが重要である。ここで、拡大率と観察距離の関係を示す式 (4) に含まれるパラメータを変更することで、観察者の個人差の再現が可能である。導出した拡大率関数は、本研究にて必要とする画像変換関数として有効である。

拡大率の被験者全員の平均値に対して式 (4) でフィッティングした場合、飽和値は 3.25 であった。Higashiyama (1994) は、観察距離 1km 以上において、山や島の高さが何 km に見えるかを口頭で聞き、対象の知覚される大きさを測定した。その結果、距離が増加するほど過大視する傾向を示した (図 3.11 参照)。実験対象のうち最も遠方の島 (観察距離 4.8km) の幅は、実際には 0.4km であるが 1.4km に知覚され、約 3.5 倍に過大視された。本研究において、遠方の対象の拡大率は 3.25 で飽和することを示しており、Higashiyama[59]の結果と近い値であることを確認した。

3.2 節で述べた近距離 (1-10m) における拡大率に対しても、ロジスティック関数をフィッティングした結果、非常に高い相関を示した (図 3.12 参照)。パラメータは以下の通りである。

比較刺激提示距離 1m :  $\alpha = 1.03$ ,  $\lambda = 0.40$ ,  $C = 0.98$  (相関係数  $r = 0.995$ )

比較刺激提示距離 2m :  $\alpha = 1.05$ ,  $\lambda = 0.38$ ,  $C = 1.49$  (相関係数  $r = 1.000$ )

### 第3章 知覚される大きさと観察距離の関係を示す拡大率関数

比較刺激提示距離 4m :  $\alpha = 0.75$ ,  $\lambda = 0.22$ ,  $C = 1.82$  (相関係数  $r = 0.999$ )

これにより、遠距離だけでなく、近距離の実験結果についてもロジスティック方程式によって説明ができることが明らかとなった。先行研究では、知覚される大きさと観察距離の関係が Thouless 指数で表現され、観察距離の増加に伴って Thouless 指数が直線的に減少することが報告されている[57][58]。ただし、近距離から遠距離の範囲において、知覚される大きさと観察距離の関係を式で表現し報告した研究はない。したがって、近距離から遠距離において、拡大率と観察距離の関係をロジスティック関数という一つの式で表現できることを示したことは、本研究の成果であるといえる。

今後は、知覚される大きさと観察距離の関係が個体数の増加モデルであるロジスティック方程式と対応する根拠を明らかにすることにより、実空間の知覚メカニズムの解明に発展すると考える。立体や距離の知覚において、距離・奥行きの手がかりがいろいろな形態で統合され、あるいは相互作用をして、その結果が最終的な 3次元空間として知覚されるという[59][60][61][62]。数式に含まれるパラメータが大きさ知覚と関連する距離・奥行き手がかりに関する情報として対応し、数式の説明がなされると、本研究で導出した拡大率関数の解釈として有効であろう。一方、拡大率関数として S 次特性を持つ他の関数を利用することは可能だと考えられる。実空間の知覚メカニズムの理解において、他の関数によるフィッティングを試みることも解決策の一つだと考える。



第3章 知覚される大きさと観察距離の関係を示す拡大率関数

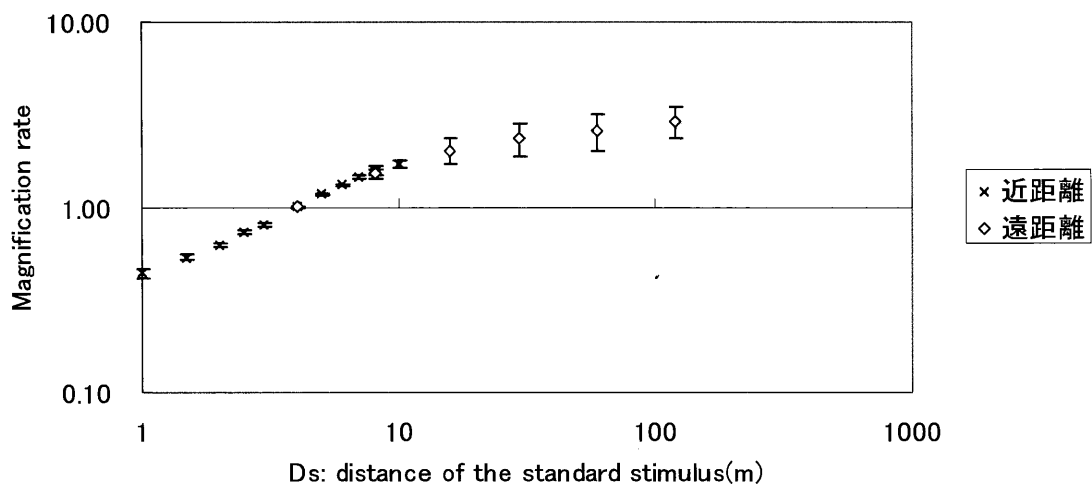


図 3.10 比較刺激提示距離 4m における拡大率の平均値と標準誤差

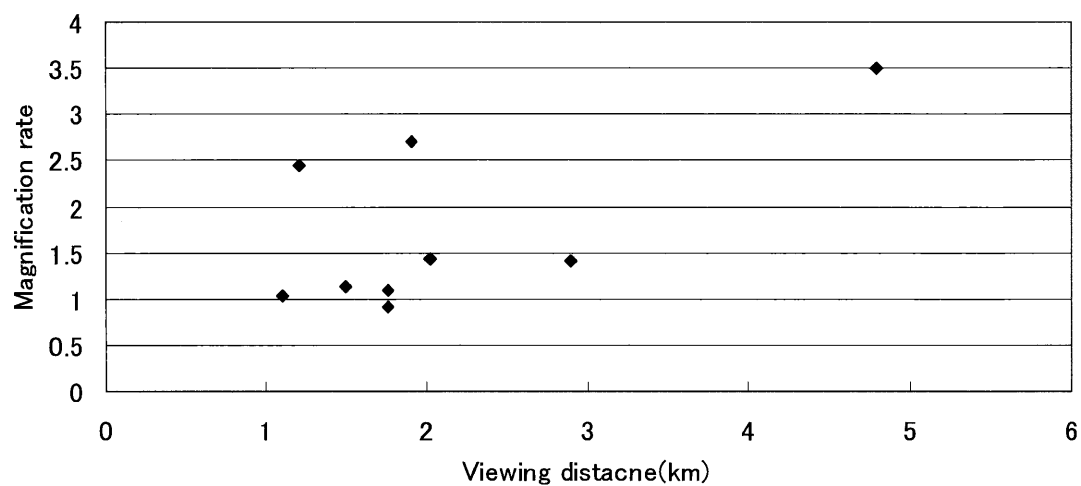
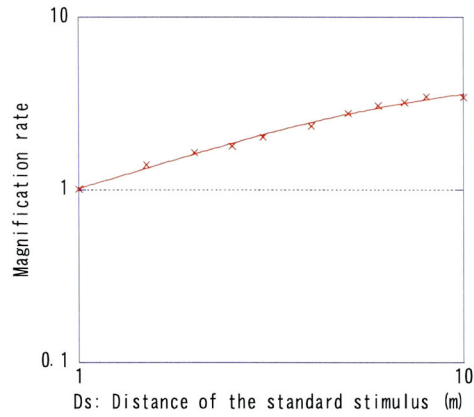
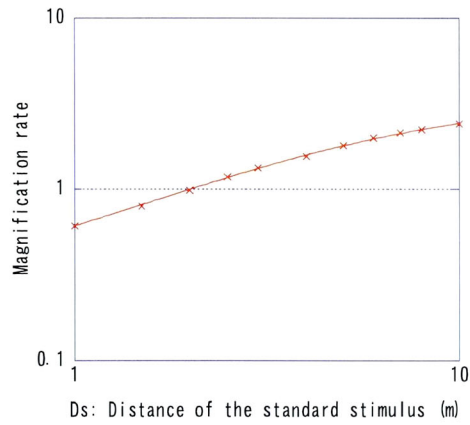


図 3.11 観察距離 1km 以上における拡大率（知覚される大きさと物理的大きさの比率）  
 (Higashiyama[56]のデータを基に算出)

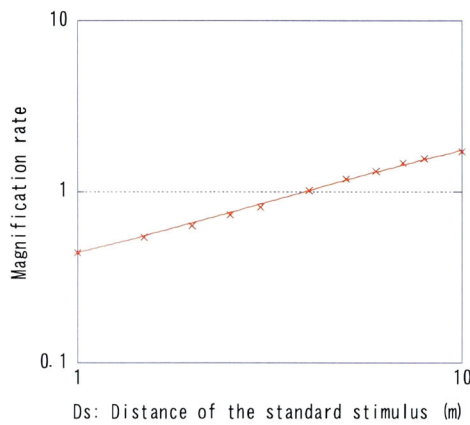
第3章 知覚される大きさと観察距離の関係を示す拡大率関数



(a) 比較刺激提示距離 1m



(b) 比較刺激提示距離 2m



(c) 比較刺激提示距離 4m

図 3.12 近距離の拡大率に対するロジスティック方程式の  
フィッティング結果

### 3.5 まとめ

実空間において知覚される大きさと観察距離の関係から、知覚される大きさを画像として表現するための拡大率関数を導出した。従来の視覚心理学的研究では、知覚される大きさと距離の関係は、Thouless 指数によって表現され、観察距離に応じて指数の値が変化することが示されている。本章における近距離を対象とした実験において、先行研究と同様に Thouless 指数によって両者の関係が説明できることを実証した。遠距離においては、観察距離の増加に伴い Thouless 指数が減少することを確認し、知覚される大きさと観察距離の関係が S 字特性を持つ関数で表現できることを示した。また、その関数のパラメータの調整により、個人差による拡大率の違いを反映することも可能である。

## 第4章 拡大率関数を適用した画像生成手法と その評価

### 4.1 はじめに

前章にて導出した拡大率関数を利用して、距離に応じて対象の大きさを拡大して描画するCG生成手法を提案する。レンズ焦点距離を変化させて段階的に空間を描画した画像を組み合わせる1枚の画像を生成する手法である。提案手法の有効性を確認するため、透視投影画像と提案手法を適用して描画した屋外風景のCG画像を用いて、画像の主観評価実験を行った。

### 4.2 画像生成手法

拡大率関数を適用して画像を生成するためには、特殊な投影法を用いるか、シーン中の物体を変形するかのいずれかが必要と考えられる。しかし、いずれも処理が複雑になることが予想される。そこで、本研究では、拡大率関数を適用した画像を生成する方法として、描画空間を視点からの奥行きにより小領域に分割し、それぞれの小領域を異なるズームパラメータで透視投影により描画し、それらを合成する手法を提案する。

#### 4.2.1 基本的な考え方

図 4.1 は、提案手法による画像生成の流れを擬似コード表現したものである。この処理の引数である  $near$  は画像作成における  $near$  clip 面の位置、 $far$  は  $far$  clip 面の位置を表す。 $v$  は描画空間の分割の細かさを表すパラメータであり、 $v$  の値が大きいほど分割数が多い ( $0 \leq v < 1$ )。まず、 $v$  を用いて視点から最も遠い位置に描画小領域を設定する。そして、視点から小領域の中心までの距離に応じて、それぞれの小領域に適用する拡大率を算出する。次に、求めた拡大率に対

応する画角を計算し、その画角を用いて小領域を描画する。同じ手順で視点に近い位置の小領域を描画し、奥の小領域を描いた前回の画像に上書きする。この処理を繰り返すことで最終画像を得る。

```

画像生成 (near, far,  $\nu$ )
{
    do{
         $\nu$  を用いて描画小領域を設定;
        拡大率を算出;
        描画小領域の描画に用いるが画角算出;
        小領域の描画;
        それまでの画像に画像を重ねて合成;
    }while(描画小領域が near より奥にある);
    return 最終画像の出力;
}

```

図 4.1 基本的な考え方

#### 4.2.2 描画空間の小領域への分割

描画空間を段階的に描画するため、以下の手順で描画小領域を設定する (図 4.2 参照)。分割パラメータ  $\nu$  により、描画小領域が視点に近いほど、描画小領域の間の拡大率の差が小さくなるような描画が可能となった。

1. 視点から最も遠い奥行き (far clip 面までの奥行き)  $d_1$  に対して、 $\nu d_1$  を  $d_2$  とする
2. 視点からの奥行きが  $d_1$  から  $d_2$  の区間を、描画小領域 1 として設定する
3.  $\nu d_2$  を  $d_3$  とし、視点からの奥行きが  $d_2$  から  $d_3$  で与えられる区間を描画小領域 2 とする
4.  $\nu d_3$  を  $d_4$  とし、視点からの奥行きが  $d_3$  から  $d_4$  で与えられる区間を描画小領域 3 とする
5. 同様の作業を以後、描画小領域が near clip 面より手前に位置するまで繰り返し、描画小領域  $n$  まで設定する

ただし、1つの対象が複数の小領域に属する場合、その物体はそれぞれの小領域において異なる拡大率で表示されるため、物体の連続性が保たれなくなる (図 4.3 (a) 参照)。この現象は、物体を構成する面が (1) 視軸と垂直でない (2) 視軸と平行でない (3) 視軸と交わる。あるいは物体を構成する面を手前側に延長した場合に、視軸と交わる、という3条件すべてを満たす場合に発生する。この課題を解決するため、図 4.2 (e) に示すように、描画小領域に重なりを与えて描画小領域を設定することとする。最も奥に位置する描画小領域を除き、残りの描画小領域の far clip 面を、その小領域の奥行きが倍になるように後退させる (図 4.2 (b) ~ (d))。すなわち、

奥から  $i$  番目 ( $i \geq 2$ ) の描画小領域は,  $d_{i+1}$  と  $2d_i - d_{i-1}$  の位置にクリップ面を設定する.

以上の手法により, 物体の連続性が保持されない課題を解決した (図 4.3 (b)). ただし, 空間分割後の小領域の奥行き幅や対象とする空間に応じて, 小領域の重なり量を適切に設定する必要があるため, 注意が必要である.

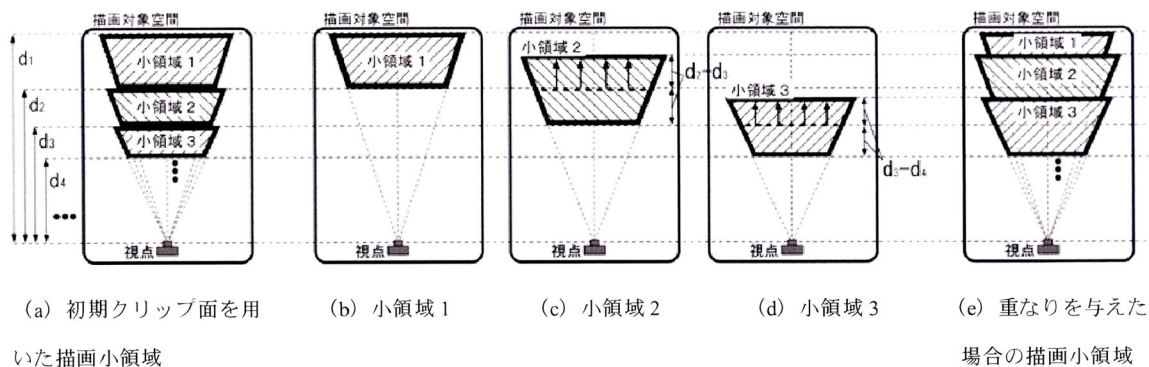


図 4.2 描画小領域の設定

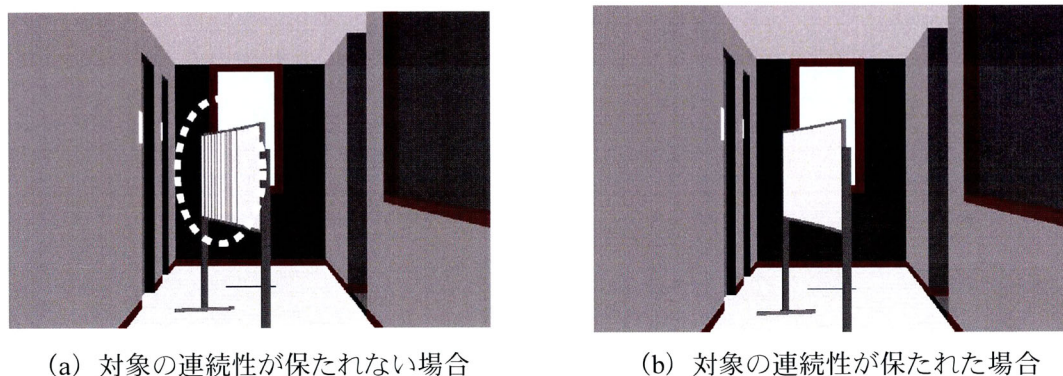


図 4.3 拡大率関数を適用した画像生成における技術的課題

### 4.2.3 画角の設定

実験によって得られた拡大率関数と視点から小領域の中心までの距離を用いて, 描画小領域  $i$  に適用する拡大率  $g_i$  を算出する. そして, 拡大率  $g_i$  を用いて画像の描画に用いる画角  $\alpha_i$  を算出する.

ここで, 基準画角を  $A$ , 投影面の幅を  $R$ , 焦点距離を  $f$  (定数) とする.  $R$  と対象物の投影面上での幅の割合は反比例する.  $A, f, R$  には, 次式のような関係がある[63].

$$A = 2 \tan^{-1} \frac{R}{2f} \quad (6)$$

したがって、描画小領域  $i$  の画像描画に用いる画角  $\alpha_i$  は、次式で得られる。

$$\alpha_i = 2 \tan^{-1} \left( \frac{\frac{R}{2f}}{g_i} \right) = 2 \tan^{-1} \left( \frac{\tan \frac{A}{2}}{g_i} \right) \quad (7)$$

#### 4.2.4 考察

上述した手法により、拡大率関数で決定される対象の大きさを画像上に再現する画像生成が可能となった。奥行き方向に描画対象領域を分割して異なる望遠レンズの画像を描画した後にそれらを合成している手法で、単一画角による透視投影の場合に比べて、視点から遠い位置にあるほど画像中の対象を段階的に大きく描画する。描画する小領域を重ね合わせて描画する手法により、物体の連続性を保って描画することを可能とした。これにより、画像に欠落などが発生せず、違和感のない空間を描画することができる。

先行研究の Reggini[40]による知覚透視図は、3次元における線分の頂点を座標変換した後に2次元画像を描画する手法である。Regginiの考え方では、線分やポリゴンの頂点座標のみが変更されるために、観察距離方向に伸びた線分やポリゴンの描画時に、観察距離に対して非線形に変化する拡大率を反映することができない。線分またはポリゴンを奥行き方向に分割することによりその問題を回避することは可能である。しかし、線分またはポリゴンを奥行き方向に分割した場合、計算手順の複雑化、描画データの増加という問題が発生する。したがって、拡大率関数を適用して対象の大きさを変換して描画することを目的とした場合、本研究の手法が有効であるといえる。

河島ら[64]は、人が記憶している風景に近い画像を得る手法として、注視点から遠ざかるほど画像をデフォーカスし、色の彩度を落とす処理を行う手法を提案している。この手法は、焦点の当て方に注目するものであり、これまで述べてきた対象の画像中における大きさ知覚に関する問題の解決を目的としたものではない。しかし、長距離の空間における表現に関して相補的な関係があると思われるため、両者の併用効果について今後検討していく必要があると考える。

今後の課題としては、描画の高速化や、空間の分割位置や分割数の最適化、自然物の描画、基準画角の自動設定、拡大率の関数に設定する最適なパラメータの自動設定などが考えられる。

## 4.3 画像生成手法の評価

画像システムやその要素技術の研究開発の過程において、画像の品質を評価することは重要であり、物理的特性（解像度や、SN比）を計測する物理的評価や、主観的評価が多用されている。本節では、提案手法の有効性を確認するため、CGを用いて屋外空間を透視投影法で描画した画像と、提案手法で描画した画像を用意し、屋外空間とそれらの画像を比較した。提案手法により生成した画像は、単一画角による透視投影で描画した画像と比較して、遠距離になるほど物体が大きく描画されている。その特徴を踏まえて、画像中の遠方の物体を中心に評価を行った。観察者は、画像が屋外空間を観察したときの視覚印象に合うか否かを段階評定法で評価した。

### 4.3.1 実験方法

#### (1) 実験環境

大学構内の建物に挟まれた道路にて実験を実施した（図 4.4 参照）。観察地点から画像中の奥にある建物までの距離は 93m であった。

#### (2) 実験刺激

実験対象の空間を CG で再現し、条件の異なる CG 画像 6 枚の評価画像として用意した（図 4.5 参照）。35mm 版フィルム換算で焦点距離 20mm, 35mm, 50mm に相当する画角を設定し透視投影法により描画した 3 枚の画像（図 4.5 (a) (b) (c), 順に N1, N2, N3 とする）と、35mm フィルム換算で焦点距離 15mm, 25mm, 35mm に相当する画角を基準画角として、本研究の提案手法の手法により描画した 3 枚（図 4.5 (d) (e) (f), 順に T1, T2, T3 とする）である。提案手法の基準画角は、提案手法にて変換された画像（例えば T1）と対応する透視投影画像（N1）の両者において、視点から約 8m の距離に置かれた直方体の大きさが一致するように設定した。つまり、透視投影画像 N1 と提案手法による変換画像 T1、透視投影画像 N2 と提案手法による変換画像 T2、透視投影画像 N3 と提案手法による変換画像 T3 は、それぞれ視点から約 8m の距離に置かれた直方体の大きさが一致する対であり、この対において透視投影法と提案手法の比較を行う。なお、画像の注視点は、遠方の建物 2 階窓枠の右下隅である。実空間を観察した場合に、実空間と画像における影の違いが実験結果に影響することを避けるため、影を省略した画像を用いた。分割の細かさを示すパラメータ  $\nu = 0.98$ 、画像解像度は  $900 \times 600$  pixel、評価画像のサイズは  $127\text{mm} \times 89\text{mm}$ （写真 L 判）であった。

#### (3) 手続き

直径 0.8cm の棒を用いて、高さ 120cm、観察者正中面から左  $55^\circ$ 、45.5cm の距離に、画像の



#### 第4章 拡大率関数を適用した画像生成手法と評価

中心が目の高さとなるように固定して画像を観察者に提示した。CG 画像生成時のカメラ位置に対応する場所を観察視点とした。観察者は、椅子に座り、あご台によって視点位置が固定された状態で実空間と画像を観察した。観察者は提示された1枚の画像と屋外空間を見比べ、画像から受ける視覚印象が実空間を見たときの視覚印象に合っているかを11段階で評価した。画像から受ける視覚印象が実空間を観察したときの視覚印象に完全に合っている場合は100%、全く合っていない場合は0%を意味した。観察者は、遠方の建物の大きさ感・距離感、遠方の道幅の印象について判断を行った。6枚の画像の提示順序はランダムとした。生成した画像に合わせて曇天の日に実験を行った。

##### (4) 観察者

本学の学生10名（男性5名、女性5名、21-23才）が参加した。



図 4.4 観察者の視点から撮影した写真（35mm フィルム換算で焦点距離 28.8mm）



(a) 焦点距離 20mm (透視投影画像 N1)



(d) 焦点距離 15mm (変換画像 T1)



(b) 焦点距離 35mm (透視投影画像 N2)



(e) 焦点距離 25mm (変換画像 T2)



(c) 焦点距離 50mm (透視投影画像 N3)



(f) 焦点距離 35mm (変換画像 T3)

図 4.5 評価画像

### 4.3.2 結果と考察

観察者全員の評価値の平均および標準誤差を図 4.6-図 4.8 に示す。6 枚の評価画像について対応のある 1 要因の分散分析を行った結果、それぞれの評価項目において画像間の有意差が認められた[大きさ評価 :  $F(5,45) = 24.5, p < .001$  ; 距離評価  $F(5,45) = 15.9, p < .001$  道幅評価 :  $F(5,45) = 9.45, p < .001$ ]。次に、Tukey の HSD 検定を行った結果、大きさ・距離・道幅のすべての評価結果において、変換画像 T1 と透視投影画像 N1、変換画像 T2 と透視投影画像 N2 の間に有意差が認められた ( $p < .05$ )。つまり、提案手法により変換された画像 T1 及び T2 はそれぞれ、透視投影画像 N1 及び N2 より、3 次元空間を観察したときの視覚印象に近いことが示された。特に変換画像 T2 は、6 枚の評価画像の中で、大きさ・距離・道幅のすべての項目で最も評価が高かった。変換画像 T2 に対応する透視投影画像 N2 で、レンズ焦点距離 35mm で撮影した場合の画角と等しい画像である。したがって、広角レンズで撮影した透視投影を本手法で変換することが最も効果的であるといえる。

透視投影画像 (N1, N2, N3) に関して、レンズ焦点距離の増加に伴い評価値が増加する傾向が見られた。透視投影画像の中では、レンズ焦点距離 50mm で撮影した画角と等しい透視投影画像 N3 の評価が最も高かった。一般的に焦点距離 50mm は標準レンズと呼ばれており、広角レンズと比較して、実空間で得る視覚印象の表現に適するといえる。しかし、透視投影画像の中で最も評価が高かった N3 は、変換画像 T2 の評価を超えるものではなかった。変換画像 T3 は、透視投影画像 N3 より評価が低かったが、両者に統計的に有意な差は認められなかった。

最後に、大きさ・距離・道幅の印象には相互作用があると判断し、大きさ・距離・道幅に関する観察者の全員の平均値を乗算することで、以下のように画像の総合評価点を算出した。

$$\text{総合評価点 (\%)} = \text{大きさ評価値 (\%)} \times \text{距離評価値 (\%)} \times \text{道幅評価値 (\%)} \quad (8)$$

各評価画像の総合評価点を図 4.9 に示す。結果として、提案手法を用いて変換した画像 T2 の評価点が非常に高く、実験対象の視覚印象を再現した画像として最も適していることを確認した。

本実験では、画像内に遠方の建物が収まり、空の領域が描画された画像を評価画像とした。なぜなら、遠方建物が途中で切れるかたちで画像に描画された場合、極端に評価値が下がることが予想されたからである。

以上より、提案手法により距離に応じて対象の大きさを拡大して描画した画像は、一般的な透視投影法で描画した画像と比較して、実空間の視覚印象に近いことを確認した。変換画像 T2 と透視投影画像 N2 はそれぞれ、第 2 章の描画法で紹介したスケッチと写真に対応しており、提案手法によって、実空間を観察したときに人が知覚する空間を表現できた可能性を示唆する。本実験により本研究で提案した視覚印象を表現する画像生成手法の有効性を示した。

第4章 拡大率関数を適用した画像生成手法と評価

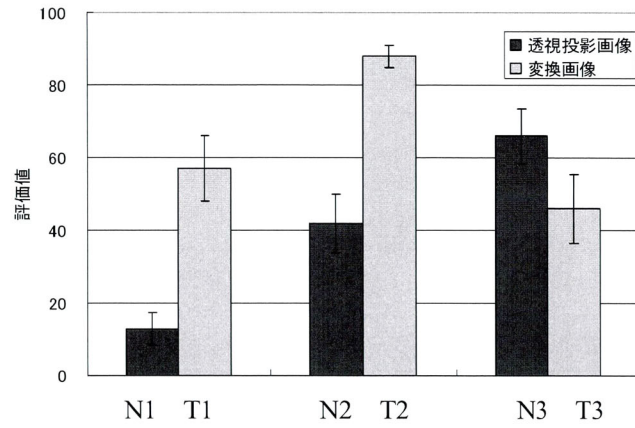


図 4.6 大きさの評価結果

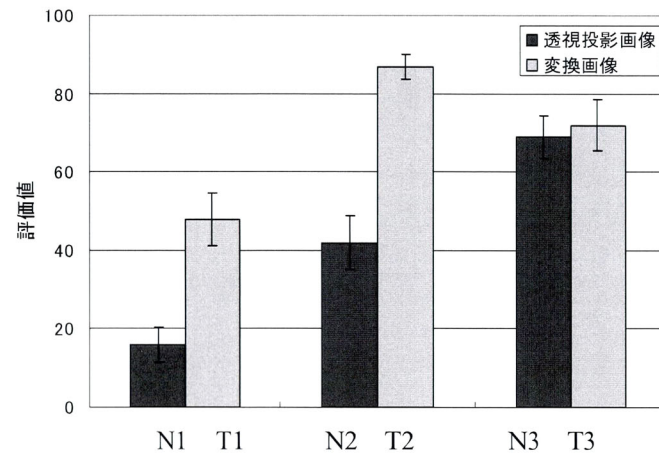


図 4.7 距離の評価結果

第4章 拡大率関数を適用した画像生成手法と評価

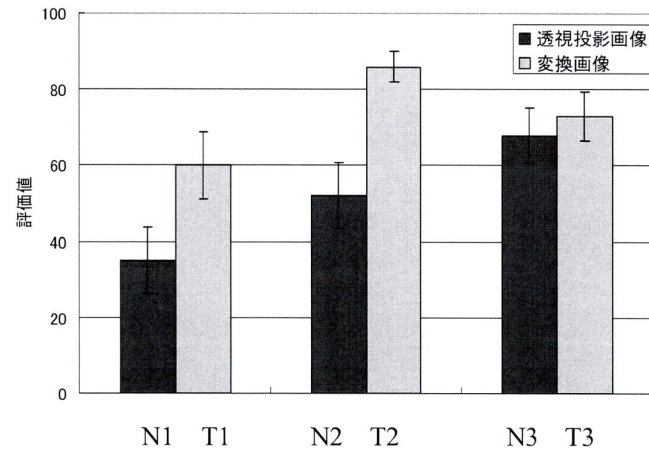


図 4.8 道幅の評価結果

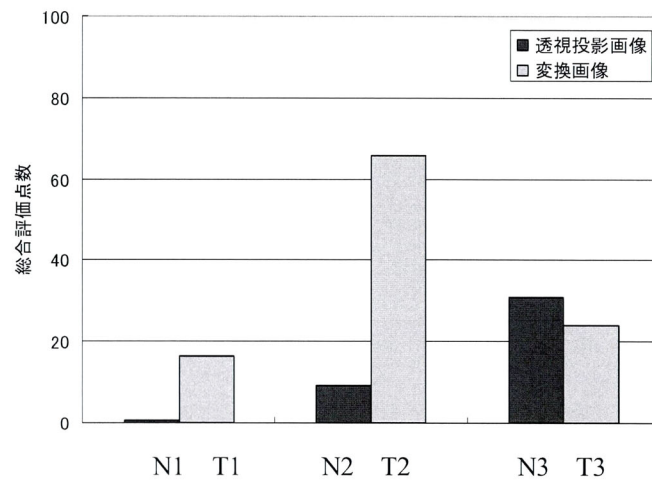


図 4.9 各評価画像の総合評価点数

## 4.4 まとめ

本章では、実空間における視覚印象を表現する画像生成手法として、第3章で導出した拡大率関数を適用して画像上の対象の大きさを拡大して描画する手法を開発した。物体の連続性を維持し、空間としての自然さを保つことができたことが本手法の成果である。提案手法の評価として、画像の主観的評価を行い、提案手法によって対象の大きさを距離に応じて拡大して描画した画像は、透視投影法で描画した画像と比較して、実空間の視覚印象に近いことを確認した。以上のことにより提案手法の有効性を示した。

## 第5章 おわりに

### 5.1 本論文の結論

本論文では、人が実際の3次元空間（実空間）を観察したときの視覚印象（対象の大きさ感や距離感）を表現するCG画像生成手法の提案を目的として、実空間を観察したときに人が知覚する空間の視覚印象の分析、画像変換の基礎となる拡大率関数の導出、拡大率関数を適用した画像生成手法の提案・評価を行った。本研究の成果を以下にまとめる。

(1) 描画法と量推定法を用いて風景観察時の視覚印象を分析し、遠近感や距離感、大きさ感を画像に表現するためには画像上の対象の大きさや道路の角度を変換する必要があることを確認した。特に、遠方物体（山や道幅）の過大視が顕著であったため、実空間における知覚される大きさと距離の関係について規則性を見出すことが重要であると結論付けた。また、実験により空間の見え方に個人差があることを確認した。個人差を含めて人が実空間を観察したときの視覚印象を画像に再現するためには、画像の変換度合いを調節するパラメータを用意できると良いことが示唆された。

(2) 2刺激比較法にて実空間で知覚される大きさと観察距離の関係を調査し、画像変換の基礎となる拡大率関数を導いた[65][66][67]。先行研究では、知覚される大きさと観察距離の関係がThouless指数で表現され、観察距離の増加に伴ってThouless指数が直線的に減少することが報告されていた[57]が、本研究では1-120mにおける実験結果を基に、S字特性を持つ関数で拡大率と観察距離との関係を表したことにより、拡大率を連続値として扱うことが可能となった。また拡大率関数のパラメータ調整により観察者による過大視の個人差の再現も可能となった。

(3) 導出した拡大率関数を基にして、画像上の対象を拡大して描画するCG画像生成手法を提案した[68]。視点からの距離にあわせてレンズ焦点距離を変化させ、段階的に空間を描画した画像を組み合わせて1枚の画像を生成する手法で、物体の連続性を維持し、空間としての自然さを保つことができた。画像の主観的評価実験を通して、屋外風景の視覚印象を表現する手法として

提案技術の有効性を確認した。

透視投影法を歪ませた方法で描画することにより映像の臨場感や緊張感を高める手法は、絵画や映画の分野において多用されていたが、描画者独自のテクニックであり、体系化されたものではなかった。一方、遠距離まで被写体が置かれた広い空間に対して、空間全体を画像に収めるために広い画角を設定して画像を生成した場合、実空間を観察した場合と画像を観察した場合に受ける視覚印象が異なるという問題があった。この問題に対し、本論文では、対象の距離に応じて対象の大きさを拡大して描画することで、実空間を観察したときの視覚印象（対象の大きさ感や距離感）を表現できることを示した。

本研究では「遠方まで被写体が配置された広い空間」を対象として、視覚印象を表現する画像生成手法を提案することを目的とした。具体例として、空間の中央に道路があり、道路の延長線上で視点から100mの位置に建物がある屋外風景を対象とした。対象とした空間を透視投影法で描画した場合、1点透視（消失点が1つ）に近い画像が生成される。このような空間においては提案した画像生成手法の有効性が確認された。

空間知覚に関する視覚心理実験では、人によって見え方が異なることが確認された。提案した拡大率関数は、パラメータ調整により個人差を再現することが可能であるため、観察者が受けた視覚印象を反映した画像生成への可能性が示唆される。提案した画像生成手法は、静止画像だけでなく動画像への応用が可能であり[69]、本研究成果は、映画やシミュレータ、VR分野におけるCG映像作成への展開が期待される。

## 5.2 今後の課題と将来展望

今後は、画像の印象表現の向上、提案手法の適用範囲の拡大が課題である。より実空間の視覚印象に近い画像を生成するには、対象の大きさと位置関係を考慮することが必要である。実空間における平行線の知覚に関する調査を行い、実空間で知覚される平行線や、平行線が交わって見える位置と、透視投影画像に表現される平行線、消失点には明らかに違うことを確認した[70]。視覚印象を表現する画像生成手法として、描画対象とする空間に対して分析を行い、人が特に注目する対象の配置を考慮して、対象の位置関係を決定する必要がある。実空間における消失点の見え方を再現することで、空間の広がりや迫力に関する表現が向上すると思われる。

提案手法の適用範囲の拡大については、対応できる空間条件を広げていく必要がある。1点透視で描画される空間に限らず、2点透視、3点透視で描画される空間配置への対応、屋外に限定せず、天井が存在する室内空間への対応が考えられる。また、空間知覚において、対象の色や明るさ、背景とのコントラストによる影響が指摘されている。例えば霧や夜間の道路など、視覚的手がかりが少ない場合には対象の大きさ・距離の知覚傾向が変化する。視覚印象を表現する画像生



成手法の適用可能範囲を広げるためには、これらの環境条件に応じた画像変換パラメータを用意するといった工夫が求められる。また、透視投影法で描画した場合に2点透視で描かれるような空間、さらに奥行きがある空間を対象とした評価および画像生成手法の改良が必要である。

提案手法の適用先としては、実空間と同様の感覚の再現が求められる運転シミュレータ、臨場感や現実感の高い表現が求められる映画やVR、実空間の距離情報の取得が可能になった場合にはデジタルカメラが挙げられる。ただし、映像の視覚印象や臨場感は、提示する映像の大きさや視距離に影響を受けるため、画像に表現する空間特性に応じた映像の提示環境について検討を行い、アプリケーションにあった提示手法を構築する必要がある。また、実空間の視覚印象を画像に表現する上で、観察者による見え方の違い(個人差)を無視できない。子供は目の高さが低いため、距離を過大評価することが知られている[71][72]。観察者の年齢や体格、性別、国籍による違いを調査し、それらを再現することで、ユーザを限定しないシステムの提案が可能となる。特にシミュレータやVRなどの体験型装置においては、大きさや距離知覚の個人差、空間知覚と年齢との関係、聴覚や触覚などの他感覚との相互作用[73]を考慮する必要がある。他の感覚情報を踏まえた視覚情報を与えることで、映像制作者の意図する視覚印象を観察者に与えるシステムの実現が可能になると思われる。一方で、実用化においては、デジタルカメラへの適用を考えた場合、リアルタイム処理が必要であり、個人差を再現するパラメータの算出や画像変換における処理の高速化が求められる。動画像の場合には、処理コストが増加するため、アプリケーションに応じて、違和感のない処理の簡略化やパラメータ最適化を行うことが必要だと考えられる。

## 参考文献

- [1] D.Marr: Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information, San Francisco, W.H.Freeman, 1982. / 乾敏郎, 安藤広志訳: ビジョンー視覚の計算と脳内表現, 産業図書, 1987.
- [2] 大山正: 視覚像としてのアニメーション, アニメーション研究, Vol.6, No.1, pp.38-48, 2005
- [3] 和田陽平, 大山正, 今井省吾編: 感覚+知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, 1969
- [4] Kaufman, L. & Rock, I.: The moon illusion 1, Science, Vol.136, pp.953-961, 1962
- [5] Rock, I. & Kaufman, L.: The moon illusion 2, Science, Vol.136, pp.1023-1031, 1962
- [6] Holway, A. H. & Boring, E. G.: The moon illusion and the angle of regard, American Journal of Psychology, Vol.53, pp.509-516, 1940
- [7] Higashiyama, A.: Anisotropic perception of visual angle : Implications for the horizontal-vertical illusion, overconstancy of size and the moon illusion, Perception & Psychophysics, Vol.51, No.3, pp.218-230, 1992
- [8] 上野雄宏: 大きさの恒常性の研究, 大阪市立大学文学部紀要人文研究, Vol.20, pp.65-150, 1968
- [9] 牧野達郎: 「見えの大きさ」と「距離」との関係について, 大阪市立大学人文研究, Vol.7, pp.235-250, 1956
- [10] Holway, A. H., & Boring, E. G.: Determinants of apparent visual size, American Journal of Psychology, Vol.54, pp.21-27, 1941

- [11] Makino, T & Ueno T.: Methodological studies of size constancy (1) :size constancy measured by two experimental methods, Japanese Psychological Research, Vol.5, pp.91-102, 1963
- [12] Thouless, R. H.: Phenomenal regression to the 'real' object, British journal of psychology, Vol.21, pp.339-359, Vol.22, pp.1-30, 1931
- [13] Brunswik, E.: Zur Entwicklung der Albedowahrnehmung. Z. Psychol., Vol.109, pp.40-115, 1928
- [14] Leibowitz, H. W. & Harvey, L, O, Jr: Size matching as a function of instructions in a naturalistic environment, Journal of Experiments Psychology, Vol.74, pp.378-382, 1967
- [15] 小笠原慈瑛, 森孝行: 大きさの恒常の度を示す度数について, 心理学評論, Vol.8, pp.241-258, 1959
- [16] Hillebrand, F.: Theorie der Scheinbaren Crosse bei Binokularem Sehen, 1902
- [17] 黒田正巳: 空間を描く遠近法, 彰国社, 1992
- [18] Doesschate, G, T. & Kylstra, J.: The perception of parallels, Ophthalmologica, Vol.131, pp.61-65, 1956
- [19] Hecht, H., van Doorn, A., & Koenderink, J. J.: Compression of visual space in natural scenes and in their photographic counterparts. Perception & Psychophysic, Vol.61, pp.1269-1286, 1999
- [20] 渡辺利夫: 写真の奥行き知覚における空間の異方性について, 心理学研究, Vol.75, No.1, pp.24-32, 2004
- [21] Gibson, J. J.: Motion picture testing and research. Aviation Psychology Research Reports, No. 7. Washington: U.S. Government Printing Office, .1947
- [22] Smith. Olin W. & Gruber, H: Perception of depth in photographs, Perception and Motor Skills, Vol.8, pp. 307-313, 1958
- [23] 小笠原慈瑛: 写真における距離・大きさ・形の知覚, 心理学評論, Vol.16, pp.1-17, 1973

- [24] 松田隆夫：二次元画像上の人物に対する距離の知覚，立命館人間科学研究，Vol.3，pp.47-54，2002
- [25] 松田隆夫，竹澤智美：画像上の人物に対する絶対距離と相対距離の知覚，立命館人間科学研究，Vol.3，pp. 9-18，2002
- [26] Gibson, E. J., & Smith, J. A.: The effect of training in distance estimation on the judgment of size-at-a-distance. *Hum Resour. Res. Cent., Lackland AFB, San Antonio*, pp.1-19, 1952
- [27] 内海章：仮想空間表示における奥行き知覚誤差の要因について．信学技報，HC94-10，pp. 63-70，1994
- [28] 林光雄，向井信彦，小杉信：仮想空間と現実空間における立体感覚の比較（映像表現&コンピュータグラフィックス），映像情報メディア学会技術報告，Vol.31，No1.37，pp.45-48，2007
- [29] Baumberger, B., Flückiger, M., Paquette, M., Bergeron, J., & Delorme, A.: Distance perception in a driving simulator Perception of relative distance in a driving simulator. *Japanese Psychological Research*, Vol.47, No.3, pp.230-237, .2005
- [30] 吉田俊介，宮崎慎也，星野俊仁，大関徹，長谷川純一，安田孝美，横井茂樹：ステレオ視表示における高精度な奥行き距離補正の一手法，TVRSJ，Vol.5，No.3，2000
- [31] 中溝幸夫：視覚迷宮一両眼視が生み出すイリュージョンー，ブレーン出版，2003
- [32] Solso, R.: *Cognition and the visual arts*. Cambridge: MIT Press. 1994 / 鈴木光太郎，小林哲生共訳，*脳は絵をどのように理解するかー絵画の認知心理学*，新曜社，1997
- [33] Loran, E: *Cezanne's composition*. Berkeley: University of California Press. 1943 / 内田園生訳，*セザンヌの構図*，美術出版社，1972
- [34] 石坂裕子，高橋晋也：表現技法の教示が絵画の印象に与える影響ー遠近法の歪みに着目してー，*心理学研究*，Vol.77，pp.124-131，2006
- [35] Arnheim,R.: *Art and visual perception a psychology of the creative eye*. Berkeley: University of California Press, 1954

- [36] 植草信和（編）：千と千尋の神隠しを読む 40 の目，株式会社キネマ旬報社，p.77，2001
- [37] 平沼久典：千と千尋の神隠し，東宝株式会社，p.26，2001
- [38] 葛飾北斎：北斎漫画三篇，1815 / 永田生慈：アート・ビギナーズ・コレクション もっと知りたい葛飾北斎 生涯と作品，東京美術，p.38，2005
- [39] Rauschenbach, B. V.: Perceptual Perspective and Cezanne's Landscapes, Leonardo: international journal of the contemporary artist, Vol.15, No.1, pp.28-33, 1982
- [40] Reggini, H. C.: Perspective using curved projection rays and its computer application, Leonardo: international journal of the contemporary artist, Vol.8, pp.307-312, 1975
- [41] 黒田正巳, 福原昌明: 対象の大きさが大きさと形の恒常視に及ぼす影響に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, Vol.61, pp.85-93, 1959
- [42] 吉田謙一, 高橋成雄, 西田友是: 2次元投影図上の見えの操作に基づいた非透視投影の設計, Visual Computing グラフィックスと CAD 合同シンポジウム予稿集 2006, pp.41-46, 2006
- [43] 吉田謙一, 高橋成雄, 藤代一成: 遠近法の手がかりの配置に基づく非透視投影図生成, Visual Computing グラフィックスと CAD 合同シンポジウム予稿集 2007, pp.253-258, 2007
- [44] コーニッシュ：東洋恵訳，風景の見方，中央公論社，1980
- [45] Kraft, R. N., Patterson, J. F., & Mitchell, N. B.: Distance perception in photographic displays of natural setting. Perceptual and Motor Skills, Vol.62, pp.179-186, 1986
- [46] 長篤志, 長田和美, 三池秀敏, 一川誠, 松田憲：道路の角度錯視，第2回錯視コンテストグランプリ受賞，2010
- [47] Rock, I.: Form and orientation, Academic Press, 1973
- [48] Carlson, V. R.: Size-constancy judgments and perceptual compromise, Journal of Experimental Psychology, Vol.63, pp.68-73, 1962
- [49] Chalmers, E. L.: Monocular and binocular cues in the perception of size and distance. American

- Journal of Psychology, Vol.65, pp.415-423, 1952
- [50] 秋重義治：知覚空間の構造に関する実験的研究，心理学研究，Vol.11，pp.515-530，1936
- [51] Akishige, Y.: Effekt der Entfernung des Darbietungsortes der Normalgrose auf den Grad der Grossenkonstanz. Mitt.-Lit. Fak. Kyushu Univ., Vol.4, pp.37-58, 1937
- [52] Kuroda, T.: Experimental studies on size constancy. Bulletin of the Faculty of Literature of Kyushu University, Vol.7, pp.59-102, 1961
- [53] 森孝行：大きさの恒常と観察距離の関係について（1），日本心理学会第25回発表論文集，p.36，1961
- [54] Verhulst, P. F.: Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement, *Correspondance Math'ematique et Physique Publi'ee par A. Qu'etelet*, Vol.10, pp.113-121, 1838
- [55] Kilpatrick, F. P. & Ittelson, W. H.: The size-distance invariance hypothesis, *Psychological Review*, Vol.60, pp.223-231, 1953
- [56] Higashiyama, A.: How accurate is size and distance perception for very far terrestrial objects? Function and causality, *Perception & Psychophysics*, Vol.55, pp.429-442, 1994
- [57] 久米京子：みえの大きさと観察距離との関係並びに大きさの恒常を規定する要因について1，心理学研究，No.22，No.4，pp.235-244，1952
- [58] 久米京子：みえの大きさと観察距離との関係並びに大きさの恒常を規定する要因について2，心理学研究，No.23，No.1，pp.32-43，1952
- [59] Bülthof HH: Space from X: psychophysics and computation. Landy MS, Movshon, JA. (eds.) :Computational Models of Visual Processing, pp.305-330, MIT Press, 1991
- [60] Young MJ, Landy MS, Maloney LT: A perturbation analysis of depth perception from combinations of texture and motion cues, *Vision Research*, Vol.33, pp.2685-2696, 1993
- [61] 坂野雄一，金子寛彦，松宮一道：両眼視差と遠近法情報の統合過程における視距離と過去の経験の影響，光学，Vol.33，pp.110-121，2004

- [62] 塩入論 (編) : 講座<感覚・知覚の科学>2 視覚Ⅱ—視覚系の中期・高次機能—, 朝倉書店, 2007
- [63] 丹野清志 : カメラのしくみ, ナツメ社, 2001
- [64] 河島修正, 藤代一成 : 人の視覚特性を考慮した考慮した心象風景レンダリング. 芸術科学会論文誌, Vol.2, No.3, pp.101-104, 2003
- [65] Atsushi Osa, Nagata, K., Tsukamoto, S., Kinoshita, T., Miike, H.: A Human-oriented rendering based on perception of visual angle and viewing distance, Proceedings of the Second IASTED International Conference, pp.545-550, 2002
- [66] Nagata, K., Osa, A., Ichikawa, M., Kinoshita, T., & Miike, H.: Magnification rate of objects in a perspective image to fit to our perception, Japanese Psychological Research, Vol.50, No.3, pp.117-127, 2008
- [67] 長田和美, 三輪智也, 長篤志, 一川誠, 水上嘉樹, 多田村克己, 三池秀敏 : 知覚される大きさと観察距離の関係を示す拡大率関数 実空間で得られる視覚印象を表現する画像生成に向けて, 認知科学, Vol.15, No.1, pp.100-10, 2008
- [68] Mizukami, Y., Nagata, K., Miwa, T., Osa, A., Miike, H., & Tadamura, K.: A scene rendering method with modified perspective close to subjective impression, Proceedings of the IEEE Image Electronics and Visual Computing Workshop 2007, 3B-5 (付属 CD-R), 2007
- [69] Honda, Y., Nagata, K., Osa, Hidetoshi Miike, A driving simulator realizing visual perception -modification of apparent size in landscape image-, Proceeding of the International Workshop on Advanced Image Technology 2007, pp.567-571, 2007
- [70] Nagata, K., Osa, Ichikawa, M., Miike, H.: Creating image close to visual impression formed in a real space based on apparent vanishing points and size, Proceedings of The First International Workshop on Kansei, pp.61-64, 2006
- [71] 加藤孝義 : 空間感覚の心理学 左が好き? 右が好き?, 新曜社, 1997
- [72] 西山啓 : ドライバー教育の実践. 安全運転の人間科学 3—ドライバー教育のすすめ, pp.87-113.

1982

[73] 大山正：視覚心理学への招待－見えの世界へのアプローチ，サイエンス社，2000



## 謝辞

山口大学理工学研究科 三池秀敏教授には、学部4年から今日に至るまで懇切なご指導をいただきました。研究を通して、探求していくことの楽しさを知り、最後まで考え抜く姿勢や、広い視野で物事を考える意識、人から理解を得るための伝え方・話し方などを学びました。学会や研究会など多くの発表の機会をいただき、その度に成長をしたという自覚があります。長い期間、あたたかくご指導いただきましたことに心から深く感謝いたします。

山口大学理工学研究科 長 篤志准教授には、研究に対して有意義なアドバイスをいただくとともに、日頃から幅広いご指導をいただきました。小さな疑問から難しい課題まで、常に相談にのってくださり、問題解決へのヒントを多くいただきました。心から感謝いたします。

博士論文をご審査いただいた山口大学理工学研究科 中園真人教授、多田村克己教授、松田 憲講師には、審査の折に有益なコメントを多数いただきました。至らぬ点が多くご迷惑おかけしましたが、ご指導いただいたことを心に留め、今後活かしていく所存です。本当にありがとうございました。

千葉大学文学部 一川 誠教授には、研究に対するご助言をいただくとともに、実験方法やデータ分析の方法など熱心にご指導いただきました。学会や研究会の折には、他大学の先生を交えた有意義な議論の場など貴重な機会を与えていただきました。心から感謝いたします。

山口大学理工学研究科 木下武志准教授には、デザインの基礎を教えていただくとともに、研究を進めるにあたり有益なご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

山口大学理工学研究科 水上嘉樹准教授には、画像生成手法の提案に際して、多大なるご支援をいただきました。心から感謝いたします。

本研究の一部は、山口大学理工学研究科 修了生 本多洋介氏、三輪智也氏の卒業研究として行われました。本多洋介氏、三輪智也氏に、深く感謝の意を表します。

株式会社東芝 澤田 彰部長、馬場賢二グループ長、榎原孝明主務には、入社以来、論文活動に対する理解と多大なご支援をいただきました。心より礼申し上げます。

本論文の執筆に至るまで、あらゆるかたちで関わってくださったすべての方々に、心から御礼申し上げます。最後に、大学入学から、あらゆる面で心強く支えてくださった両親と友人に、改めて深く感謝いたします。

## A 補論：3次元空間における平行線の知覚に関する考察

### A.1 はじめに

本研究では、実空間で知覚される大きさと距離の関係性に基づき、実空間における視覚印象を表現するCG画像生成手法を提案した。今後、画像の印象の向上を図るためには、描画する対象間の配置関係を考慮した画像生成を行う必要がある。第2章にて、道路のなす角度の過小視を確認し、視覚印象を表現する手法の一つとして距離に応じた道路幅の変更が示唆された。したがって本章では、画像生成手法の今後の展開に言及するために、廊下における平行線の知覚に関して調査を行い、透視投影画像との比較を行う。

### A.2 消失点の知覚に関する分析

視覚印象を高める画像生成手法の提案に向けて、屋内の廊下を対象として描画法を用いて実元空間における消失点の知覚について調査する。

#### A.2.1 実験方法

##### (1) 実験環境

突き当たり壁が縦2.29mで横2.48mである屋内廊下にて実験を行った(図A.1参照)。突き当たりの壁には、アルミサッシの扉が設置してあり、扉の窓越しに屋外風景がやや見える環境であった。扉の中央で高さ1.2mの位置に、観察者の視線方向を指示するための目印として、幅19mm高さ100mmの×印(赤色)を貼付した。実験条件1では廊下から6.8mの位置を観察地点とし(図A.2(a)参照)、実験条件2では廊下から13.6mの位置を観察地点とした(図A.2(b)参

照).

## (2) 手続き

観察者は、廊下の中央に置かれた椅子に着座した姿勢で空間を観察し、天井、床、右壁、左壁における消失点(図 A.3 参照)を想像し、手元の記入用紙に想像した消失点の位置を×印で記入した。例えば天井における消失点について報告する場合、天井と左右の壁がつくる境界線 2本を遠くまで延長するようにイメージし、2本が交わる位置を想像して、その交点を手元の記入用紙に×印で書き込むようにと指示した。記入用紙は縦 14.8cm 横 21cm の用紙で、廊下の縦横比を再現した縦 8cm 横 8.6cm の長方形と長方形の中央に縦の点線が記入されたものである(図 A.4 参照)。

観察者の目の高さを 1.2m とし、あご台を用いて頭を固定した。観察者の視線方向を廊下の壁面と平行に保つため、実験中は扉に貼付した目印が観察者の目の前であることを意識するよう指示した。扉に貼付した目印は、観察地点を視点として対象を透視投影法で描画した場合に、透視投影画像における消失点の場所と一致し、本実験の真値となる。しかし、観察者にはこの情報を与えずに実験を行った。

観察条件として、両眼と単眼の 2 条件を設けた。観察者は、両眼視で天井と床における消失点の報告を交互に 5 回ずつ行った後、単眼視で同じ試行を繰り返した。次に、両眼視で右壁と左壁における消失点の報告を交互に 5 回ずつ行った後、単眼視で同じ試行を繰り返した。片目や薄目で対象を観察することや、手や道具を用いて対象の大きさを測ることを禁止した。知識や経験に惑わされず、見た目に素直に行うよう教示した。

## (3) 観察者

実験条件 1 には本学の学生 10 名(男 5 人, 女 5 人, 20~23 歳)、実験条件 2 の天井と床における消失点の観察には本学の学生 10 名(男 5 人, 女 5 人, 21~27 歳)、実験条件 2 の右壁と左壁における消失点の観察には上記とは重複しない本学の学生 10 名(男 4 人, 女 6 人, 21~23 歳)が参加した。

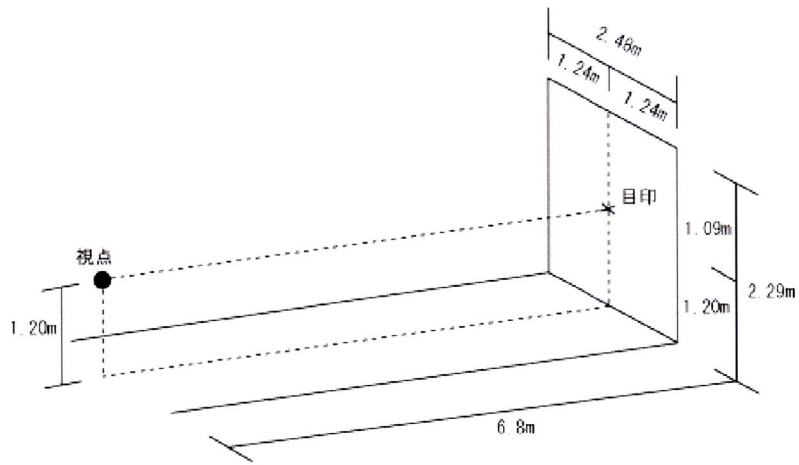
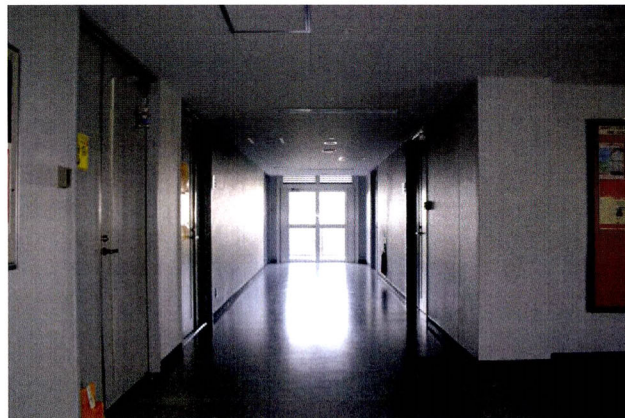


図 A.1 実験環境 (実験条件 1)



(a) 実験条件 1 : 観察距離 6.8m



(b) 実験条件 2 : 観察距離 13.6m

図 A.2 観察者の視点から撮影した写真 (35mm フィルム換算で焦点距離 36mm)



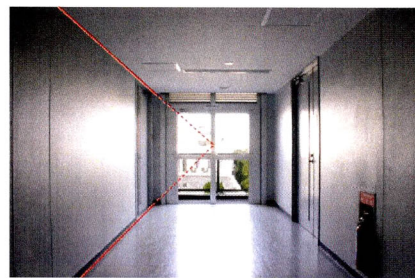
(a) 天井における消失点



(b) 床における消失点



(c) 右壁における消失点



(d) 左壁における消失点

図 A.3 天井・床・壁に注目したときの消失点

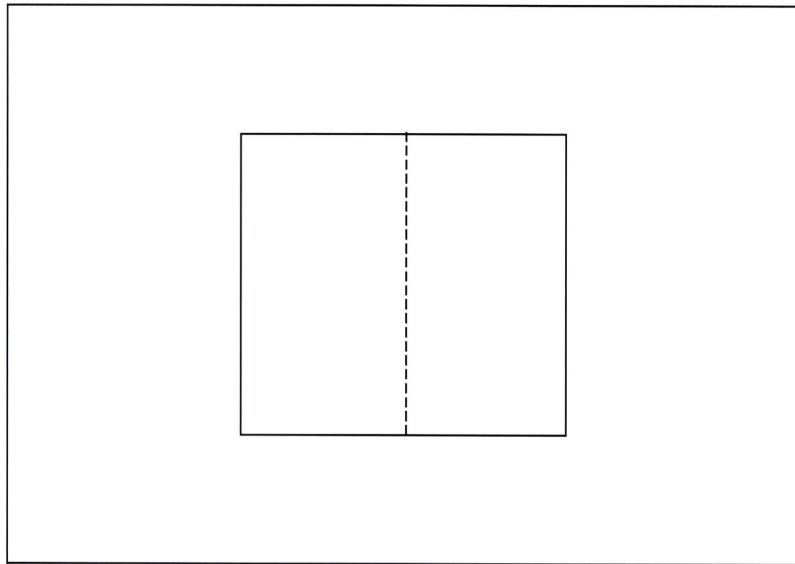


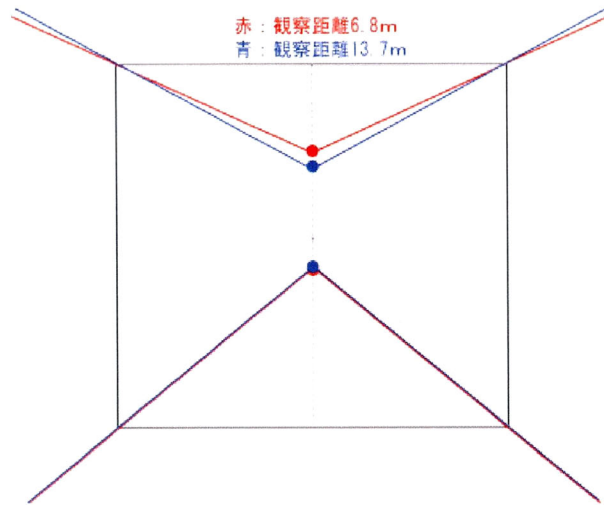
図 A.4 記入用紙 (実寸の約 1/4)

## A.2.2 結果と考察

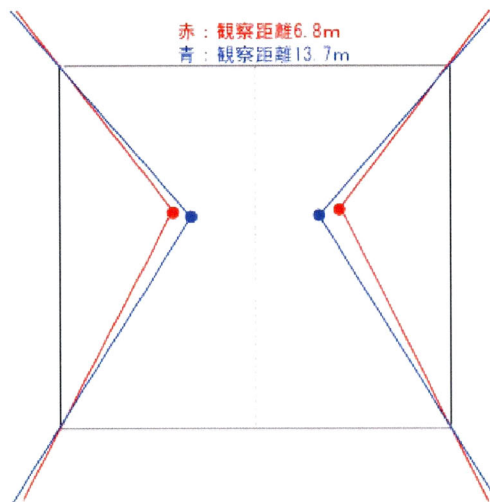
実験結果に対して、透視投影画像における消失点の位置からのずれを視角で計算し、観察者が知覚した消失点が透視投影画像における消失点と一致した場合は0、透視投影画像における消失点より上側に位置した場合は正值、下側に位置した場合は負値、右側に位置した場合は正值、左側に位置した場合は負値として分析を行った。

観察者全員の平均値を図示したものを図 A.5 に示す。天井、床、右壁、左壁の知覚された消失点について、信頼係数95%の信頼限界を求め、透視投影画像における消失点(値:0)が限界に含まれているかを確認した。その結果、実験条件1と2ともに両眼視、単眼視条件において、天井の知覚された消失点において、5%の有意水準で透視投影画像における消失点との差が認められた。また、左右の壁の知覚された消失点それぞれの水平方向の変位と、透視投影画像上における消失点の位置においてt検定を行った結果、実験条件1と2ともに両眼視、単眼視条件において、透視投影画像における消失点との差が認められた( $p<.05$ )。また、実験条件2つと、観察条件2つにおいて、 $2\times 2$ の分散分析を行い、天井において、観察距離によって知覚される消失点の位置が異なることが示された。また右壁における消失点の水平方向の変位は、観察距離により異なる傾向があることが認められた。このことから、知覚される消失点の位置は、着目する場所ごとに観察距離による違いがあり、観察距離が長くなると、透視投影画像上の消失点の位置に近づくことが示された。観察条件による違いは認められなかった。

以上のことから、実空間で知覚される天井の消失点は、透視投影画像における消失点の位置より上方に位置し、右壁の消失点は透視投影画像における消失点の位置より右側に知覚され、左壁の消失点は透視投影画像における消失点の位置より左側に知覚されることを確認した。実験により、左右の壁における消失点(図 A.5 参照)が、葛飾北斎の浮世絵における消失点の位置に類似していることを確認した。



(a) 天井と床



(b) 左右の壁

図 A.5 知覚された消失点と、そこから想像される境界線  
(実験条件1: 赤, 実験条件1: 青)

## A.3 平行線の知覚に関する分析

前節において、実空間で知覚される消失点の位置と、透視投影像上における消失点の位置に違いがあることを確認した。しかし、画像描画においては、境界線の描画方法が重要となってくる。本節では、前節の実験と同じ空間で、廊下をなす平行線（境界線）の知覚について調査を行う。なお、消失点の知覚において両眼視と単眼視に差が認められなかったため、本実験では両眼視にて行う。

### A.3.1 実験方法

#### (1) 手続き

観察者は、廊下の中央に置かれた椅子に着座した姿勢で空間を観察し、天井、床、右壁、左壁における境界線（図 A.6 参照）を想像し、手元の記入用紙に想像した境界線を記入した。例えば天井における境界線について報告する場合、天井と左右の壁における境界線が、廊下の突き当たりの壁に対して、どのように見えているか観察し、その角度にあうように用紙に線を記入するようにと指示した。記入用紙は、前節の実験で用いたものと同様である。

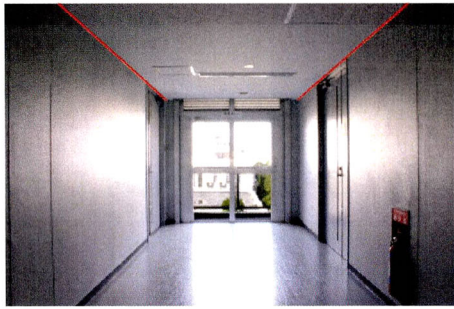
観察者の目の高さを 1.2m とし、あご台を用いて頭を固定した。観察者の視線方向を廊下の壁面と平行に保つため、実験中は扉に貼付した目印が観察者の目の前であることを意識するよう指示した。扉に貼付した目印は、観察地点を視点として対象を透視投影法で描画した場合に、透視投影画像における消失点の場所と一致し、本実験の真値となる。しかし、観察者にはこの情報を与えずに実験を行った。

観察者は、両眼視で天井と床における境界線の報告を交互に 5 回ずつ行った後、右壁と左壁における境界線の報告を交互に 5 回ずつ行った。片目や薄目で対象を観察することや、手や道具を用いて対象の大きさを測ることを禁止した。知識や経験に惑わされず、見た目に素直に行うよう教示した。

#### (2) 観察者

本学の学生 10 名（男 5 人、女 5 人、21～24 歳）が参加した。

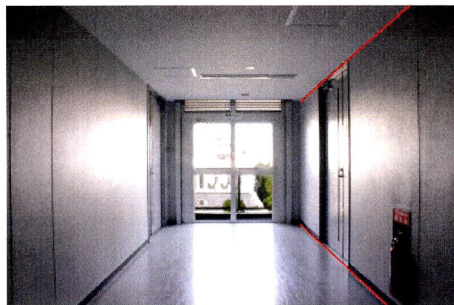




(a) 天井における境界線



(b) 床における境界線



(c) 右壁における境界線



(d) 左壁における境界線

図 A.6 観察対象とした境界線

### A.3.2 結果と考察

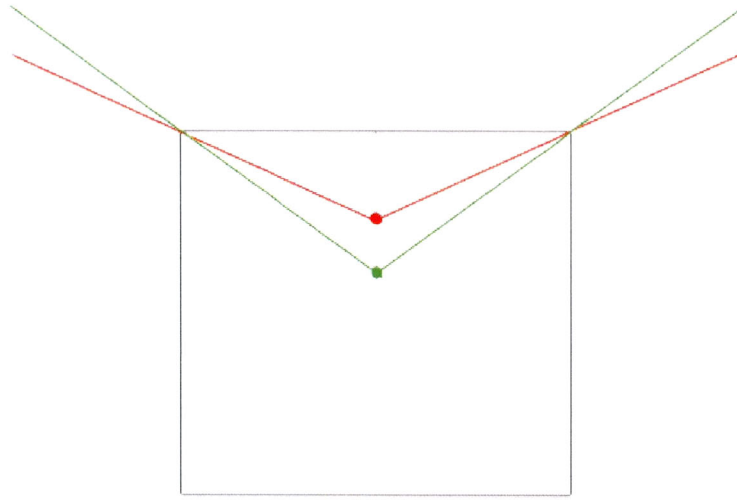
実験結果に対して、描画された2本の境界線の角度を計測し、透視投影画像における境界線の角度とのずれを計測し分析を行った。観察者全員の平均値を図示したものを図 A.7、図 A.8 に示す。天井、床、右壁、左壁の知覚された境界線の角度について、信頼係数 95%の信頼限界を求め、透視投影画像における境界線の角度が限界に含まれているかを確認した。その結果、床における境界線と左右壁における境界線の上側の境界線について、透視投影画像における境界線との差が認められた。

床の境界線について、実空間で知覚される境界線の角度は、透視投影画像における境界線の角度と異なり、透視投影画像における境界線のなす角度より鋭角になった。この結果は、Hillebrand (1902) の実験結果と類似している。右壁の上側の境界線について、実空間で知覚される境界線の角度は、透視投影画像における境界線の角度と異なり、透視投影画像における境界線より下側であった。左壁の上側の境界線について、実空間で知覚される境界線の角度は、透視投影画像上における境界線の角度と異なり、透視投影画像上における境界線より下側であった。

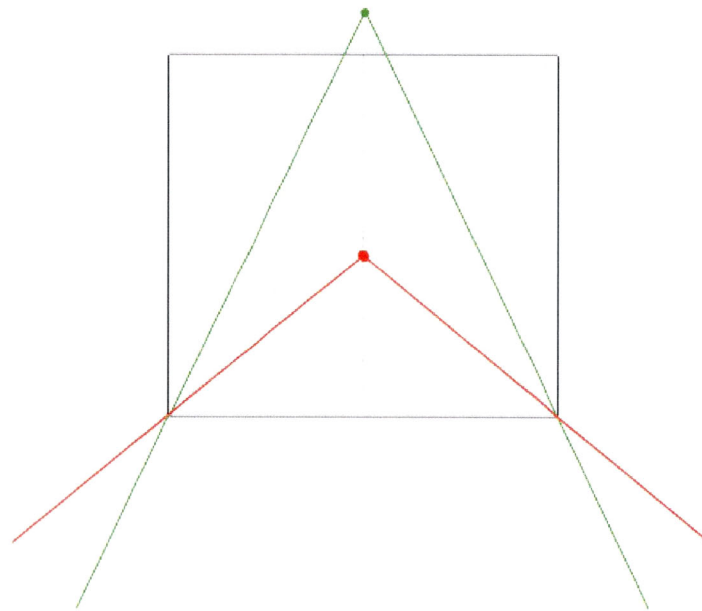
以上の結果と前節に記載した消失点の知覚に関して、それらの結果は一致しなかった。実空間で知覚される消失点と、知覚された境界線について比較した結果、天井に関しては、実空間で知覚される消失点の位置と透視投影画像における消失点の位置に差が認められた。しかし、天井の境

### 補論 3次元空間における平行線の知覚に関する考察

界線に関しては、両者に差は認められなかった。床に関して、実空間で知覚される消失点の位置と透視投影像における消失点の位置に差は認められなかったが、床の境界線に関しては両者に差が認められた。この違いについて、実空間の知覚特性の視点から要因を分析する必要がある。

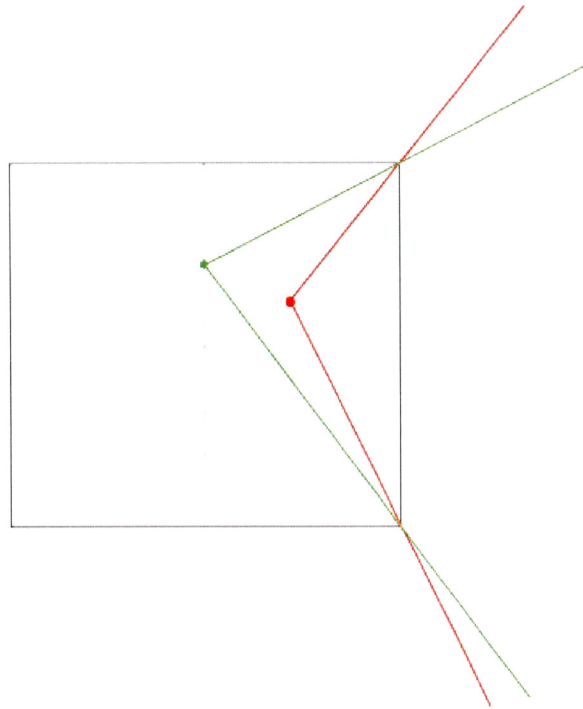


(a) 天井

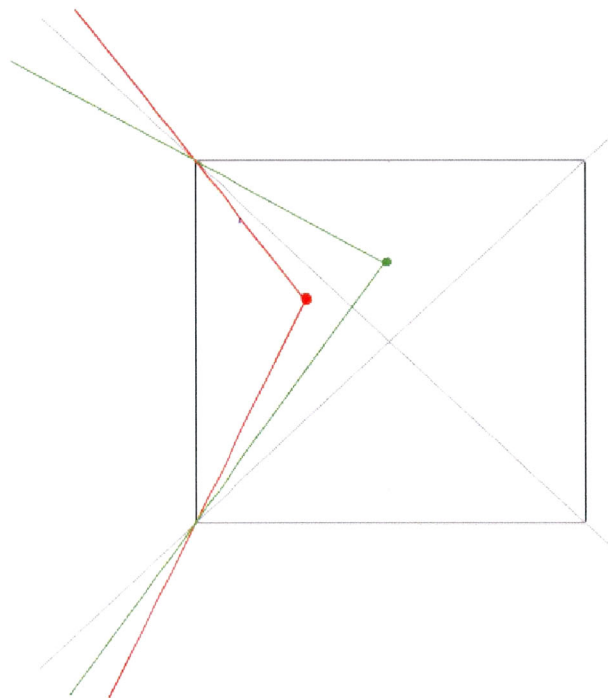


(b) 床

図 A.7 知覚された境界線（緑）と，知覚された消失点から想像される境界線（赤）



(a) 右壁



(b) 左壁

図 A.8 知覚された境界線（緑）と，知覚された消失点から想像される境界線（赤）

## A.4 全体的考察

実空間で知覚される消失点の位置と、知覚される境界線に関して、結果の不一致が見られた。この理由として、消失点の位置を観察する場合は、観察者の位置から外に向かって境界線を見たが、境界線を観察する場合は、奥から手前に境界線の見たとという視点動向の違いが挙げられる。日常生活において前方や周囲の情報の取り込み方、注意の働き方が異なるように、視覚的注意（visual attention）をどこに向けるかによって、同じ内容であっても異なった内容を見たり、気づいたりすることがある。また、人の視界は200度に開けているが、細部まで見えることができるのは2度程度に限られており、注視箇所から少し離れると、細部まで見える力が急激に低下することが知られている。注視できる領域である2度とは、1m先での直径約3.5cm、10m先での直径約35cmである。廊下観察時に、観察者は、様々な箇所を注視した結果を統合して、消失点および境界線の判断をしたと思われる。視線の向け方の違いが、取得できる情報の違いにつながり、2つの実験結果に差が生じたと思われる。また、人の視野は下方向の方が広いことが知られている。天井と床の見え方に違いが生じたことと関連すると思われる。

本実験において、知覚される消失点や消失線を考慮した画像生成を行うことの必要性が示されたが、画像への反映方法については今後検討が必要である。本実験にて、人が多視点で対象を観察した結果、空間知覚をしており、その視線の向け方によって知覚に違いが生じる可能性が示された。視覚印象の再現には、描画対象とする空間に対して分析を行い、描画空間に特有の視知覚特性（異方性など）や人が特に注目する対象の配置を考慮して対象の位置関係を決定することが必要だと思われる。

## A.5 まとめ

本論で提案した3次元空間にて得られる大きさ感や距離感に近いCG画像生成手法に対して、さらなる印象向上を図るために、実空間における消失点、平行線の知覚に関して分析を行った。その結果、3次元空間で知覚される消失点・消失線と透視投影画像における消失点・消失線には明らかな違いが確認された。人が注目する対象の位置や視方向の違いによって空間の見え方が異なることが示唆され、描画対象の空間に置かれた対象とその位置関係に応じた画像変換を行うことが今後の展開のひとつとして示された。

## 研究業績

### 1. 査読のある雑誌

[1] Kazumi Nagata, Atushi Osa, Makoto Ichikawa, Takeshi Kinoshita, & Hidetoshi Miike, "Magnification rate of objects in a perspective image to fit to our perception", Japanese Psychological Research, Vol.50, No.3, pp. 117-127, 2008

[2] 長田和美, 三輪智也, 長篤志, 一川誠, 水上嘉樹, 多田村克己, 三池秀敏, "知覚される大きさと観察距離の関係を示す拡大率関数：実空間で得られる視覚印象を表現する画像生成に向けて", 認知科学, 15 (1), pp. 100-110, 2008

### 2. 査読のある国際会議の会議録や国内の雑誌

[1] Yoshiki Mizukami, Kazumi Nagata, Tomoya Miwa, Atsushi Osa, Hidetoshi Miike, & Katsumi Tadamura, A scene rendering method with modified perspective close to subjective impression, Proceedings of the IEEE Image Electronics and Visual Computing Workshop 2007, 3B-5 (付属 CD-R), 2007

[2] Yousuke Honda, Kazumi Nagata, Atsushi Osa, Hidetoshi Miike, A driving simulator realizing visual perception -modification of apparent size in landscape image-, Proceeding of the International Workshop on Advanced Image Technology 2007, pp.567-571, 2007

[3] Kazumi Nagata, Atsushi Osa, Makoto Ichikawa, Hidetoshi Miike, Creating image close to visual impression formed in a real space based on apparent vanishing points and size, Proceedings of The First International Workshop on Kansei, pp.61-64, 2006

[4] Atsushi Osa, Kazumi Nagata, Sosuke Tsukamoto, Takeshi Kinoshita, Hidetoshi Miike, A Human-oriented rendering based on perception of visual angle and viewing distance, Proceedings of the Second IASTED International Conference, pp.545-550, 2002

3. その他：学会・研究会等の発表

- [1] 長田和美, 三池秀敏, 長篤志, 多田村克己, 水上嘉樹, 木下武志, 一川誠, “視覚印象に近い映像生成手法ー知覚される大きさと消失点に着目してー”, 第 55 回知覚研究会, 2009
- [2] 長田和美, “実空間で得られる視覚印象を表現する映像生成手法”, 日本心理学会第 72 回大会, 発表論文集 p. WS42, 2008
- [3] 長田和美, 本多洋介, 長篤志, 三池秀敏, “透視投影法と人が知覚する空間の比較ー消失点の位置に関する分析ー”, 第 41 回知覚コロキウム, 2008
- [4] 三輪智也, 長田和美, 水上嘉樹, 多田村克己, “人の見た目に近い遠近感を持つ画像生成手法の開発”, 平成 18 年度電気・情報関連学会中国支部第 57 回連合大会, p.31, 2006
- [5] Kazumi Nagata, Atsushi Osa, Makoto Ichikawa, Hidetoshi Miike “Comparison of perceived scene and perspective image in terms of the apparent vanishing point” Proceedings of The Fourth Asian Conference on Vision, p.189, 2006
- [6] 長田和美, 染矢香理, 一川誠, 長篤志, 三池秀敏, “撮影距離とレンズ焦点距離が写真における大きさ・距離知覚に与える影響”, 第 38 回知覚コロキウム, No.6, 2005
- [7] Kazumi Nagata, Atsushi Osa, Makoto Ichikawa, Takeshi Kinoshita, Hidetoshi Miike "Magnification Rate to Create Digital Image Matching Perceived Size", Proceedings of The Third Asian Conference on Vision, p.116, 2004
- [8] 長田和美, 長篤志, 一川誠, 木下武志, 三池秀敏, “知覚している大きさを表現する画像生成手法 2~観察距離に基づく拡大率関数の設定”, 日本視覚学会 2004 年夏季大会, VISION(The journal of the vision society of Japan), Vol.16, p.202, 2004
- [9] 長田和美, “見えに近い画像生成手法の提案~大きさ知覚研究からのアプローチ~”, Young Perceptionists' Seminar, 2003
- [10] 長田和美, 長篤志, 木下武志, 一川誠, 三池秀敏, “知覚している大きさを表現する画像生成手法”, 日本視覚学会 2003 年夏季大会, VISION(The journal of the vision society of Japan), Vol.15, pp.219-220, 2003

[11] 長田和美, 長篤志, 一川誠, 木下武志, 三池秀敏, “大きさ知覚の距離依存性を考慮した投影法”, 第 21 回動画像計測処理研究会, 2002

[12] Kazumi Nagata, Aatsushi Osa, Sosuke Tsukamoto, Takeshi Kinoshita, Hidetoshi Miike "Relationship between apparent visual angle and distance", Proceedings of The Third Asian Conference on Vision, p.31, 2002

[13] 長田和美, 塚本荘輔, 長篤志, “大きさ知覚に基づいた人間の印象に近いデジタル 2 次元画像の生成”, 第 20 回動画像計測処理研究会, 2001