

〔非公開〕

TR-C-0145

画像ボケによる
奥行き知覚誤差の定量化

内海 章 宮里 勉 岸野 文郎
Akira UTSUMI Tsutomu MIYASATO Fumio KISHINO

1 9 9 6 3 . 1 5

A T R 通信システム研究所

画像ボケによる奥行き知覚誤差の定量化

内海 章[†] 宮里 勉[‡] 岸野 文郎[‡]

[†] A T R 知能映像通信研究所 [‡] A T R 通信システム研究所

1996年3月15日

目 次

1	まえがき	3
2	画像ボケの奥行き知覚に対する影響	4
2.1	円形マーカによる実験	4
2.1.1	大きさ・明るさの調整	4
2.1.2	知覚誤差の測定	5
2.2	格子状マーカによる実験	6
2.3	画像ボケの奥行き知覚に対する影響：まとめ	7
3	画像ボケの仮想物体操作に関する影響	8
4	むすび	10

概 要

実物体と仮想物体の奥行き感の違い・ディスプレイによる奥行き感の違いの原因として、画像のボケに着目し検討する。2通りの実験によって画像ボケによる奥行き知覚誤差を測定した。これらの実験では、画像ボケとよく知られている他の奥行きの手がかり(大きさ・明るさ)の関係性を考慮した。画像のボケの影響として、例えば、仮想物体操作において、手(実物体)と仮想物体間での「画像のボケ方」の違いにより、知覚される奥行きに誤差を生じ、操作に支障をきたすことなどが考えられる。一連の実験の結果、画像ボケによる奥行き知覚誤差は、大きさ・明るさの影響を除いても、わずかながら存在することがわかった。仮想空間での位置合わせ作業では、被験者の行動はこの画像ボケによる影響を受けた。

1 まえがき

立体表示は、仮想空間提示システムの主要な技術としてますます重要となってきた。現在実用化されている立体表示技術には、頭部装着型の表示装置によるもの(HMD)、大画面の表示装置と特殊な眼鏡の組み合わせによるもの(液晶シャッタ眼鏡方式等)、レンチキュラ板を用いて非装着で立体表示を実現したものなどがある。これらの装置では、両眼視差・輻輳・調節・隠蔽等の多くの奥行き知覚の手がかりが表示に利用されるが、これら全ての手がかりについて同時に正しく表示することは困難であり[1, 2]、それにより引き起こされる問題点についていくつかの検討がなされてきた。

例えば、上に挙げたような表示装置では焦点調節の再現は原理上困難であるが、焦点調節機構の不備は融像の困難や疲労などの問題を生じることがよく知られている。[3, 4]

一方、両眼視差・輻輳による表示に重要な眼間距離等の設定誤差などは装置の調整により解決できることは理解されているが、調整の煩雑さなどから実際の装置においてはあまり考慮されず、結果として大きな表示誤差を生じさせている[5, 6]。

これに対し、ここでは従来あまり検討されていなかった画像品質の問題を考える。画像のもつ種々の2次元的特徴により奥行き感が異なることは古くから知られている[7]。最近の研究としては、隣接する2つの領域の明るさ・色相・彩度の違いと奥行き知覚量の関係を調べた Egusa の研究[8]、ワイヤフレーム画像を用いて、明るさと KDE (kinetic depth effect) [9]・明るさと両眼視差[10]の関係を調べた Sperling らの研究などがある。このような手がかりは、両眼視差・輻輳などに比べると立体表示における役割は大きくはないが、現状の表示装置はいずれも明るさや解像度などの点で制約があり、このような制約が知覚結果に与える影響を検討することは重要である。

我々は、実物体と仮想物体の奥行き感の違い・ディスプレイによる奥行き感の違いの一因として、画像の鮮明さの劣化・ぼやけ(以後、画像のボケと呼ぶ。また、実験のため鮮明さを劣化させた画像をボケ画像、鮮明さを保った画像を原画像と呼ぶ。)の問題に着目し検討してきた[6, 11]。

画像のボケによる奥行き表現は空気遠近法と呼ばれ、従来より特にコンピュータグラフィックス等において奥行き感を増すために利用されてきた。しかしながら、これらは背景等の遠方に描かれるべき物体に関して、解像度を落とすあるいは色調を変えることで画像内の奥行きを表現するもので、両眼視差により近距離に立体表示された物体についての画像のボケと奥行き知覚の関係については従来ほとんど考察の対象となっていなかった。

実際に利用される仮想環境では、実物体(操作者の手など)と表示された仮想物体、あるいは種類の異なる複数の表示装置の組み合わせなどが操作者に同時に呈示されることがある[12]。このような統合環境においては、コンピュータグラフィックスにより表示された物体像の鮮明さが、画像の解像度・表示装置の制約により、実物体のそれに劣ることは避け難い。また、複数の表示装置の組み合わせでは、その劣化の度合いが異なることもあり得る。

このような画像のボケによって奥行き知覚誤差が生じれば、仮想環境内の操作者に視覚的な違和感を感じさせるだけでなく、仮想空間での作業に困難を生じさせることが考えられる。(例えば、仮想空間内で立体表示された物体を掴むという操作において、手(実物体)と仮想物

体間で「画像のボケ方」が異なることから、知覚される奥行きが影響を受け、操作に支障をきたすことが考えられるなど。)

我々は、このような問題意識から、画像ボケを他の要因(見かけの大きさ・明るさの変化)で説明することを試みた。画像ボケをよく知られたこれらの要因に置き換えて考えることができれば、前述の関連研究との関係が理解しやすくなる。さらには、表示系を比較的調整の容易なこれらの要因に関して調整することで、仮想空間表示の問題点を緩和することも可能となる。

次節以降、画像のボケと他の要因との関係について検討し(2節)、それらの影響を抑制した上で仮想空間操作への画像ボケの影響を測定した結果について述べる(3節)。最後に、今回の実験で明らかになったことを要約する(4節)。

2 画像ボケの奥行き知覚に対する影響

本節では、画像ボケによる奥行き知覚誤差の大きさについて検討する。ここでは、見かけの大きさや明るさの違いと画像ボケの関連についても明らかにするため、2種類の方法により大きさ・明るさの影響を画像ボケから分離し、測定を行った。1番目の方法では、ボケ画像と原画像の見かけの大きさ・明るさを、あらかじめ調整法による測定で一致させておく方法をとった(2.1節)[11]。2番目の方法では、円形マーカに替えて、大きさ・明るさの影響が少ないと考えられる格子模様のマーカを用いた(2.2節)。2.3節では2つの実験結果を比較検討することで画像ボケの影響の大きさについて議論する。

2.1 円形マーカによる実験

仮想物体表示に用いた原画像を図1左に示す。対象として、ここでは赤色の円形図形を利用した。背景は黒とした。ここで図形色に赤色を選んだのは、同時に計画した実物体による実験で使用した実マーカの色に一致させたためである[6]。図形の元サイズは直径256画素である。実験時にはこの画像は垂直方向に1/2の解像度に間引かれた上で表示画像中にハードウェアによりテクスチャマッピングされる。実験に利用した表示装置の解像度は約0.3mm/pixelで、投影された図形の大きさは、調整前の条件で画面上の位置において直径約7mmであった。また、原画像にガウシアンフィルタを適用したものをボケ画像として利用した(図1右)。

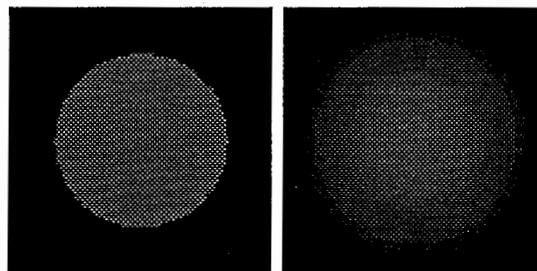


図1 提示画像：左(原画像)、右(ボケ画像)

ここでは、まず原画像の大きさ・明るさを調整して見かけの大きさ・明るさが生成したボケ画像に一致する条件を求めた。その後、調整有り・無しの両条件でボケ画像との知覚奥行き等の等しい点を測定し、画像ボケの奥行き知覚への影響を検証した。測定は10名の被験者について行なった。

2.1.1 大きさ・明るさの調整

測定方法

実験装置の概略を以下に示す。図2のように、CRT上に表示した2つの仮想物体を被験者に提示し、知覚距離に関する測定を行った。表示装置としてシリコングラフィックス社製のグラフィックスワークステーション(Onyx)とディスプレイ装置(CM2187ME)および液晶

シャッタ式立体視眼鏡 (Crystal Eyes) を用いた。被験者は顎台により頭部位置を固定し、後に述べるようにボタンまたはダイヤル操作により応答した。

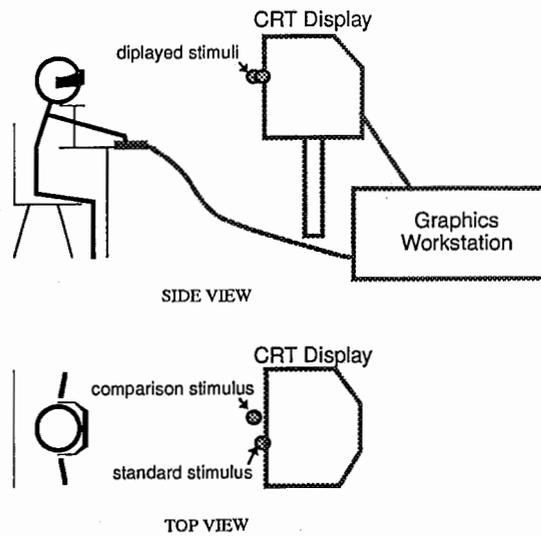


図2 実験環境

次に測定の手順について述べる。まず、原画像とボケ画像を並べて表示し、原画像の大きさを、輝度を一定に保ったまま、見かけの大きさがボケ画像と一致するまで変化させる。この操作をあらかじめ選んだいくつかの輝度値(4通り)を持つ原画像について行なう。原画像とボケ画像の並べ方は左右2通りを考える。各条件について測定回数が12回ずつになるようランダムな順序で測定を行う。同様に、あらかじめ選んだいくつかの大きさ(5通り)について、原画像の輝度を、大きさを一定に保ったまま変化させ、見かけの明るさの一致点を測定する。輝度・大きさの調整はダイヤル操作によった。

これら2種類の測定点は、大きさ-輝度を2軸にとったグラフ上で、それぞれほぼ直線とみなすことができた。図3に結果の一例を示す。図中で2直線の交点は見かけの大きさ・明るさが2画像間で一致した点と考えられる。各被験者についてこの一致点を求めた。

各被験者について得られた大きさ・明るさは表1の通りである。

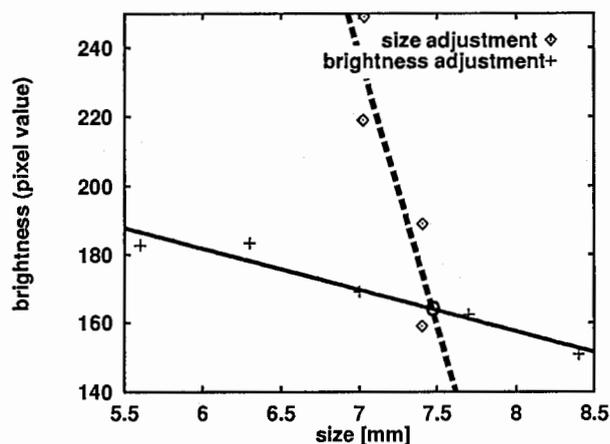


図3 大きさ・明るさの調整例 (被験者J)[交差点が大きさ・明るさの等知覚点を示す。]

2.1.2 知覚誤差の測定

前節の測定で得られた輝度値と大きさを持つ原画像はボケ画像と見かけの明るさ・大きさが一致すると考えられる。これら2つの画像を用いて奥行き知覚誤差の測定した結果、奥行き

表1 大きさ・明るさの等知覚点

Subject	Size (mm)	Intensity (value)
A	7.49	164
B	7.35	191
C	7.42	159
D	8.05	156
E	8.00	173
F	7.72	159
G	8.05	162
H	7.49	164
I	9.87	118
J	7.43	167

誤差が観測されなければ、画像のボケの奥行き知覚に対する影響は見かけの明るさ・大きさによって説明できることになる。一方、奥行き誤差が依然として存在すれば、画像のボケが見かけの明るさ・大きさと独立な奥行きの手がかりであるといえる。

測定は、前節で述べた装置を用い、大きさ・明るさの調整前・後の2種類の原画像とボケ画像との間の奥行き知覚誤差について、次の方法により行なった。

測定方法

原画像とボケ画像を並べて立体表示する。並べ方は左右2通りを考える。前後方向の表示位置に関しては、あらかじめ定めた組合せの中から選択表示する。被験者は2つの表示物体のうちどちらがより近くに見えるかを判断しボタン操作により回答する。表示は各位置について20回ずつとなるようランダムに行ない、比較刺激が近いと判断された回数を記録する。この近いと判断される割合が分布上で0.5となるところを2つの物体の知覚距離の等しい位置とする(恒常法)。ディスプレイと被験者の距離は120cm固定とし、両刺激の提示はディスプレイ管面を中心とした位置とした。

調整の前後の両条件での測定結果を並べて表2に示す。図中で正の値は、ボケ画像がより遠方に知覚されたことを示す。調整なしの条件で、観測された知覚誤差は平均約5.57mm(観察距離120cm、視差換算約52sec)であり、すべての被験者がボケ画像をより遠方に知覚した。

調整によりほぼ全ての被験者について奥行き知覚誤差は減少した。この結果により、前回の実験で観測された知覚誤差の一部は大きさと明るさの変化により説明されると言える。この場合見かけの大きさと明るさのいずれがより大きく奥行き知覚に影響を与えているのか、またボケ画像について見かけの大きさ・明るさはどのようにして決まるのかについては、今回の実験の結果からは知ることはできない。これらについては、今後の課題として引き続き検討していきたい。一方で、ほとんどの被験者は依然としてボケ画像を遠方に知覚する傾向にあり、半数の被験者については有意な知覚誤差が観測された。観測された知覚誤差は平均約2.37mm(観察距離120cm、視差換算約22.1sec)であった。これについては、次の実験の結果と合わせて考察する。

2.2 格子状マーカによる実験

続いて、両眼立体視の標識として円形画像にかえて格子状図形により測定を行った。格子状図形では、両眼視の手がかりとして図形内に規則的にあらわれる白黒の境界線が用いられるため、前節の実験で用いた円形マーカに見られた見かけの大きさの変化が生じにくいと考えた。また、前節の実験よりも大きな図形を用いることで、図形全体の見かけの明るさの変化の低減を図った。

測定に用いた原画像を図4左に示す(背景は黒)。また、1番目の実験と同様に原画像にガウシアンフィルタを適用したものをボケ画像とした(図4右)。図形の元サイズは512×512画

表 2 奥行き知覚差 [mm] A) 調整前 B) 調整後

Subject	A (not adjusted)		B (adjusted)	
	Separation	Significance	Separation	Significance
A	3.01	$t(198) = -1.19$ $p < 0.092$	0.07	$t(198) = -1.69$ $p < 0.027$
B	16.8	$t(98) = -0.643$ $p < 0.522$	0.571	$t(158) = -0.035$ $p < 0.972$
C	1.82	$t(58) = -0.881$ $p < 0.382$	1.55	$t(98) = -1.35$ $p < 0.179$
D	1.68	$t(158) = -3.48$ $p < 0.001$	0.263	$t(198) = -2.24$ $p < 0.026$
E	2.66	$t(198) = -1.71$ $p < 0.089$	3.94	$t(158) = -2.23$ $p < 0.027$
F	3.03	$t(98) = -1.49$ $p < 0.141$	0.176	$t(98) = -0.249$ $p < 0.804$
G	3.11	$t(158) = -1.62$ $p < 0.108$	2.66	$t(198) = -2.47$ $p < 0.014$
H	20.4	$t(198) = -2.07$ $p < 0.049$	13.2	$t(158) = -1.58$ $p < 0.117$
I	1.99	$t(98) = -1.77$ $p < 0.081$	-0.421	$t(98) = -0.420$ $p < 0.675$
J	1.22	$t(198) = -1.60$ $p < 0.112$	1.67	$t(198) = -2.15$ $p < 0.033$

素であり、投影された図形の大きさは、画面上の位置において一辺約 40mm である。

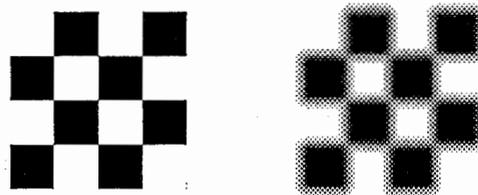


図 4 提示画像：左(原画像), 右(ボケ画像)

測定方法

前節(2.2.2)の実験同様、恒常法を用い、5名の被験者について行った。

測定結果を表 3に示す。いずれの被験者についても前節の実験の結果と同様にボケた画像をより遠方に知覚しているという傾向が得られた。しかしながら観測された知覚誤差は平均約 0.163mm(観察距離 120cm、視差換算約 1.52sec)とわずかであり、また、被験者 Gを除いて統計的な有意性は示されなかった。逆に被験者 Jについてはほとんど画像ボケの影響はみられなかった。

2.3 画像ボケの奥行き知覚に対する影響：まとめ

本章で述べた 2つの実験の結果、ボケ画像と原画像の間に見られた奥行き知覚誤差は、大きさ・明るさの違いを低減した実験においては、調整しない場合に比べいづれもかなり減少する結果が得られた。特に 1 番目の実験の結果は、奥行き知覚に対する画像ボケの影響が大きさ・明るさ調整によりかなり緩和できることを示している。今後、実物体と仮想物体の混在する環境でこのような調整が可能かどうかを明らかにしたい。

一方で、大きさ・明るさ調整後もわずかではあるがボケ画像が遠方に知覚される現象が観測された。その影響の程度は個人差が大きく、ほとんど影響のみみられない被験者もあったが、およそ半数の被験者については依然有意な知覚誤差がみられた。このことは、大きさ・明るさと

表 3 奥行き知覚差 [mm] A) 調整前 B) 調整後

Subject	Separation	Significance
F	0.107	$t(58) = -1.277$ $p < 0.207$
G	0.150	$t(118) = -1.595$ $p < 0.113$
H	0.370	$t(138) = -2.277$ $p < 0.0243$
J	0.030	$t(138) = -0.235$ $p < 0.814$
K	0.157	$t(118) = -1.002$ $p < 0.319$

独立な奥行きの手がかりとして画像ボケが考えられることを示すといえ、今後さらに検討を要する。

大きさ・明るさを調整した後の測定では、得られた知覚誤差は非常に小さく現実の仮想空間操作に用いる装置の精度を考えればほとんど無視できる程度であるといえるだろう。これについては、次節において仮想物体操作の実験を行い検討した。

3 画像ボケの仮想物体操作に関する影響

上述の実験によって、画像ボケの奥行き知覚に与える影響が確かめられた。ここでは、さらに仮想物体操作への影響について検討する。

前述のように、視差のない状況下ではほとんどの被験者がボケた画像をより遠方に知覚し、さらに視差を伴っても、ごく狭い範囲ではあるが画像のボケの効果のほうが両眼視差の効果を上回ることがわかった。このような知覚誤差は、本来の立体表示の目的である仮想空間での作業に影響を与える可能性が残る。

ここでは、このような奥行き知覚の受ける影響を反映しやすいものとして、2物体の奥行き方向の位置合わせのタスクを設定し、5名の被験者について所要時間等を計測することでその影響の程度を調べた。

測定方法

被験者は表示された2物体のうち無作為に選ばれた一方の奥行きをダイヤル操作により変化させ、奥行きが等しいと思われる点まで移動が終了したら、ボタンを押すことにより時刻・位置を記録する。調整は2物体の奥行き差がシステム内にあらかじめ設定した範囲内に収まるようになるまで繰り返すものとし、最終調整時刻 t_{last} および最大移動位置 Z_{max} を記録した(図5)。

ここで利用した2物体は前節の2番目の実験で用いたものと同じ格子状マーカで、次の4条件について行った。

	初期位置		移動する物体
	手前	奥	
1	ボケあり	ボケなし	奥
2	ボケなし	ボケあり	手前
3	ボケなし	ボケなし	奥
4	ボケなし	ボケなし	手前

なお、ディスプレイと被験者の距離は60cm固定とし、使用した装置の制約から物体の移動範囲は表示管面の前後10mm(視差換算約6.2min)内に制限した。(前節の実験よりもディスプレイ-被験者距離を短くしたのは、仮想物体の可動範囲を大きくするため。)各条件についての測定回数が10回ずつとなるようランダムな順序で測定を行った。

表4に最大移動位置 Z_{max} の20%調整平均を示す。

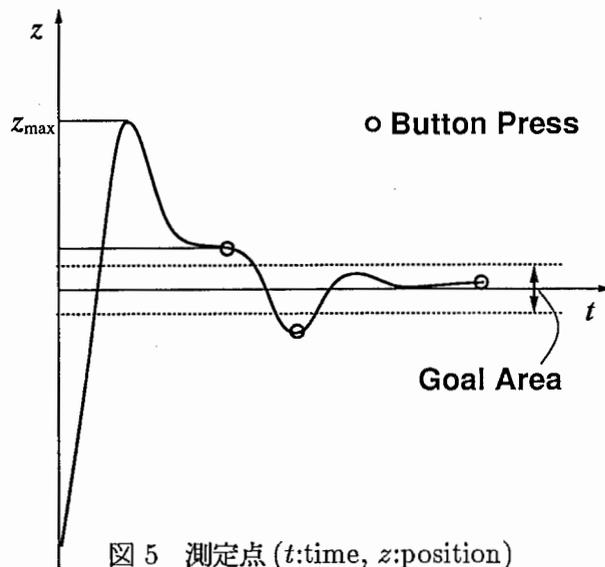


図5 測定点 (t:time, z:position)

表4 Z_{max} [mm] s-s) 原画像-原画像 s-f) 原画像-ポケ画像

Subject	$Z_{max}(s-s)$	$Z_{max}(s-f)$	Significance
G	1.53	1.92	$t(22) = -1.341$ $p < 0.194$
H	3.82	6.40	$t(24) = -4.876$ $p < 0.00006$
I	2.32	5.45	$t(19) = -2.468$ $p < 0.0233$
J	2.13	0.90	$t(25) = 2.290$ $p < 0.031$
L	8.09	10.0	-
M	4.42	6.09	$t(23) = -1.790$ $p < 0.087$

Z_{max} の値は、位置調整の際に一致点を越えた移動量の最大値である。ここで値がいずれも正であるのは、一致点を乗り越えた移動が少くとも一度行われたことを示す。ここに見られるように、ポケ画像が含まれるときにはその値は被験者 J を除き大きくなった。上述の初期位置の設定と合わせて考えれば、ポケ画像が含まれるときにポケ画像がより手前にくるような移動が行われたことになる。2種類の条件間には、被験者 G 以外では統計的に有意な差異が見られた。特に被験者 L については、常にポケ画像と原画像の奥行き差が最大になるまで移動させた。以上の結果から、画像ポケが本タスクにおける被験者の行動に影響を与えたといえる。

一方で、タスク終了までの時間については一定した傾向は観察されなかった。画像のポケは、被験者に余分な移動を行わせたものの、その影響は実行時間に関する他の誤差要因に比べて有意な大きさを持たなかったことになる。本タスクは、奥行き知覚の影響を強くうけるように選択されたものであり、その実行時間にほとんど差異が見られなかったことは、明るさ・大きさを除いた画像ポケのようなわずかな奥行き誤差要因は通常の仮想空間作業において、作業効率に影響することはほとんどないことを示す。

しかしながら、被験者がより多くの動作を強いられたことは確かであり、これは快適な仮想空間作業という観点からは決して望ましいことではない。仮想空間作業における画像品質の重要性が奥行き知覚の面から明らかになった。この問題は、実物体と仮想物体の混在する環境でさらに明確になると考えられる。また、ここで見られた被験者の行動の変化は、少なくとも初

期の印象においては、被験者がボケ画像をより遠方に知覚したことを示している。今回の実験では一方の物体は常に静止状態であったが、実際の仮想環境作業では複数の物体が同時に運動することが多く、そのような凝視が困難な環境では初期の印象がより大きな意味を持つと考えられる。これについては、動物体を対象にした実験においてさらに明らかにしていきたい。

4 むすび

本報告では、実物体と仮想物体の奥行き感の違い・ディスプレイによる奥行き感の違いの原因として、画像のボケに着目し検討してきた。画像のボケの影響として、例えば、仮想物体操作において、手(実物体)と仮想物体間での「画像のボケ方」の違いにより、知覚される奥行きに誤差を生じ、操作に支障をきたすことなどが考えられる。

一連の実験を通じて得られた結果をまとめると次のようになる。

- 大きさ・明るさの調整の有無の両条件で、画像ボケによる奥行き知覚誤差(ボケ画像が遠方に知覚される)が観測された。これにより、大きさ・明るさと独立な奥行きの手がかりとして画像ボケが考えられることが示された。
- 一方、観測された奥行き知覚誤差は、大きさ・明るさ調整により緩和されることが確認できた(平均値で5.57 mm から2.37 mm と約60%の減少)。
- 仮想空間での位置合わせ作業において、被験者の行動は画像ボケの影響を受けて変化することが観測された。ただし、その変化は全体の作業時間に影響するほど大きなものではなかった。

以上の結果により、位置合わせ作業の実験結果を含めて、快適な仮想空間作業における画像品質の重要性が明らかになったといえる。

今後は、動物体を対象に奥行き知覚への画像ボケの影響を調べるとともに、実物体と仮想物体の混在する環境で大きさ・明るさの調整による知覚誤差の緩和が可能かどうかを検討する。また、画像ボケ以外の、大きさ・明るさといった他の要因も含めて、奥行き知覚誤差の仮想空間作業への影響評価を行っていきたい。

参考文献

- [1] Drascic, D., and Milgram, P. (1991). Positioning accuracy of a virtual stereographic pointer in a real stereo-scopic video world. SPIE Vol 1457 - Stereoscopic Displays and Applications II, San Jose, California.
- [2] Ellis, S.R., and Bucher U.J. (1992). Depth perception of stereoscopically presented virtual objects interacting with real background patterns. Proceedings of Conference of the Psychonomic Society, St.Louis, MO.
- [3] 宮尾 克: “液晶シャッターによる立体表示の調整とパフォーマンス”, 3D映像, Vol. 9, No. 1, pp. 16-21, 1995.
- [4] 井上 哲理: “二眼式立体ディスプレイにおける調節の変化”, 3D映像, Vol. 4, No. 4, pp. 50-53, 1990.
- [5] Rosenberg, L.B. (1993), The effect of interocular distance upon operator performance using stereoscopic displays to perform virtual depth task. IEEE 0-7803-1363-1/93.
- [6] 内海, ミルグラム, 竹村, 岸野: “仮想空間表示における奥行き知覚誤差の要因について”, 第29回ヒューマンインタフェース研究会, pp.295-302, 1994.
- [7] Wickens, C.D., Todd, S and Seidler, K. (1989). Three-Dimensional Displays: Perception, Implementation, and Applications. Technical Report, Aviation Research Laboratory, Institute of Aviation, University of Illinois.
- [8] Egusa, H. (1983). Effects of brightness, hue, saturation on perceived depth between adjacent regions in the visual field. Perception, pp167-175, vol.12, 1983.
- [9] Schwartz, B.J., Sperling, G. (1983). Luminance controls the perceived 3-D structure of dynamic 2-D displays. Bulletin of the Psychonomic Society, 21(6), pp.456-458.

- [10] Doshier, B.A., Sperling, G., Wurst, S.A. (1986). Tradeoffs between Stereopsis and Proximity Luminance Covariance as Determinants of Perceived 3D Structure. *Vision Research*. Vol.26, No.6 , pp.973-990.
- [11] Akira Utsumi, Paul Milgram, Haruo Takemura, Fumio Kishino: "Effects of fuzziness in perception of stereoscopically presented virtual object locations", *SPIE 1994 Conference on Telem manipulator and Telepresence Technologies*, pp.250-254 (1994-10).
- [12] 岸野: "臨場感通信", *テレビジョン学会誌*, Vol.46, No.6, pp.698-702 (1992).