

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

吉田俊介^{*1}, 宮崎慎也^{*2}, 星野俊仁^{*3}, 大関徹^{*3},
長谷川純一^{*2}, 安田孝美^{*4}, 横井茂樹^{*1}

A technique of high-precise depth correction in stereoscopic display

Shunsuke Yoshida^{*1}, Shin-ya Miyazaki^{*2}, Toshihito Hoshino^{*3}, Toru Ozeki^{*3},
Jun-ichi Hasegawa^{*2}, Takami Yasuda^{*4} and Shigeki Yokoi^{*1}

Abstract — This paper proposes a technique which high-precisely corrects errors of depth perception in a stereoscopic display. In spite of using identical values of correction parameters such as inter-pupillary distance, high-precise correction can be realized at an arbitrary presented depth. The eye-points and the screen position in stereo pair image generation are adopted as correction parameters based on the spatial distribution of depth errors measured using large plane screen of which the distortion of the display sufficiently corrected and optical sensor in which the measurement error is small. Procedures of obtaining optimum values of correction parameters from sample distribution of depth errors and propriety of the method are described.

Keywords : depth correction, depth perception, stereoscopic display, virtual reality

1. まえがき

両眼視差を利用したステレオ視において、提示物体の計算上の奥行き距離（提示距離）と観測者が実際に知覚する奥行き距離（知覚距離）にはズレ（奥行き誤差）が生じることが知られている[1-11]。工業製品のデザイン検討などの用途においては、このズレが大きいと立体視映像と実際の製品との間に印象の不一致が生じ、デザイナーが意図したデザインが製品に反映されないという問題が生じる。また、実物体の入力デバイスで表示物体を操作する場合に、細かい操作においてはズレが操作性に大きく影響する。これらの要求を満たすにはズレを数ミリ程度まで補正することが理想的である。

奥行き距離補正には通常、奥行きへの相関が大きい瞳孔間距離に補正パラメータを設定することが多い[4, 5, 11]。ズレの発生要因の一つに投影スクリーンと視点の相対位置に含まれる計測誤差が考えられるが、仮にズレの発生原因がこの計測誤差のみであり、補正精度の要求が厳しくない場合であれば、計測誤差の補正を瞳孔間距離に集約することは簡便で

合理的な方法である。しかしながら、計測誤差は瞳孔間距離だけではなく視点とスクリーンの間の距離にも存在する。我々の過去の実験においても[11]、瞳孔間距離のみでの補正では補正量を物体の提示位置とスクリーンとの距離に応じて可変とすることなしでは数ミリ程度まで補正することは不可能であった。

また、計測誤差が原因で現れるズレは、物体の提示位置がスクリーン上であるときは0となり、基本的には提示位置がスクリーンから離れるほど絶対値が大きくなるという特性がある。しかしながら実際には、過去の報告[3, 4, 11]においても、また我々の実験においても物体の提示位置がスクリーン付近にある場合でもズレが0とはならない。この原因としては焦点調節の影響や表示枠の影響（箱庭効果）[6-8]等が考えられているがこれらがどのように組み合わさってズレが発生するのかの詳細についてはいまだ明らかになっていない。瞳孔間距離を変化させてもスクリーン上に位置する表示物体の奥行きは原理的には変化しないので、瞳孔間距離による補正ではスクリーン付近の提示位置に対しては補正の効果が少ないだけでなく、瞳孔間距離の補正量が不必要に大きくなってしまふ。また、瞳孔間距離の補正量を可変にするためには観察者が注視している物体の奥行き距離が既知でなければならず、実用上問題がある。

*1: 名古屋大学大学院 人間情報学研究科

*2: 中京大学 情報科学部

*3: トヨタ自動車 株式会社

*4: 名古屋大学 情報文化学部

*1: Graduate School of Human Informatics, Nagoya University

*2: School of Computer and Cognitive Sciences, Chukyo University

*3: TOYOTA Motor Corporation

*4: School of Informatics and Sciences, Nagoya University

それは，以下の連立方程式を解くことにより求められる．

$$\frac{\partial g}{\partial dp} = \frac{\partial g}{\partial ds_1} = \frac{\partial g}{\partial ds_2} = 0 \quad (7)$$

式(7)の連立方程式は，数値的に解く必要がある．

2.3 実用的解法

2.2は数値解法に頼る必要があるため (dp, ds_1, ds_2) の解を常に得ることは難しい．従ってここでは，瞳孔間距離の計測値と真値との差が高々数ミリ以内であることに着目し，3変数のうち dp をこの範囲内で変化させながら dp を定数としたときの ds_1 および ds_2 の解析解を求めることを考える．

$$\delta_i = (s_i - x_i)(p + dp) + p x_i \quad (8)$$

とし，以下の3変数：

$$\alpha_i = -p x_i / \delta_i \quad (9)$$

$$\beta_i = -(s_i - x_i)(p + dp) / \delta_i \quad (10)$$

$$\gamma_i = \{(s_i - x_i)(x_i + y_i)dp + p s_i y_i\} / \delta_i \quad (11)$$

を用いて式(5)は以下のように表される．

$$f_i(ds_1, ds_2) = \alpha_i ds_1 + \beta_i ds_2 + \gamma_i \quad (12)$$

すなわち， (ds_1, ds_2) の最適解は以下の二元連立一次方程式の解となる．

$$\begin{cases} \sum_i \alpha_i^2 ds_1 + \sum_i \alpha_i \beta_i ds_2 + \sum_i \alpha_i \gamma_i = 0 \\ \sum_i \alpha_i \beta_i ds_1 + \sum_i \beta_i^2 ds_2 + \sum_i \beta_i \gamma_i = 0 \end{cases} \quad (13)$$

ここで，以下の5変数を用いれば，

$$a_1 = \sum_i \alpha_i \gamma_i \quad (14)$$

$$a_2 = \sum_i \alpha_i^2 \quad (15)$$

$$b_1 = \sum_i \beta_i \gamma_i \quad (16)$$

$$b_2 = \sum_i \beta_i^2 \quad (17)$$

$$c = \sum_i \alpha_i \beta_i \quad (18)$$

ds_1 および ds_2 の解析解は以下のように表される．

$$ds_1 = \frac{b_1 c - a_1 b_2}{a_2 b_2 - c^2} \quad (19)$$

$$ds_2 = \frac{a_1 c - a_2 b_1}{a_2 b_2 - c^2} \quad (20)$$

ここで， dp を0付近で連続的に変化させながら， dp に対応する ds_1 および ds_2 の解を求め，それらの中で式(6)を最小とするものを (dp, ds_1, ds_2) の最適解として選択する． dp の変動範囲はゆとりをもたせて $\pm 30.0\text{mm}$ 以内とし， 0.01mm 刻みとした．

3. 補正実験

3.1 実験環境

図2に本実験に使用した装置の配置を図示する．スクリーンの四隅と観察者の左右の視点位置に応じて生成される1組のステレオ画像を，プロジェクターにより大型スクリーンへ背面から投影する．立体視の方法は，液晶シャッター式メガネを用いてステレオ画像を左右の眼へ交互投影する方式を用いる[12]．

前回の実験[11]と同様に，提示する仮想物体の形状は比較的指示が容易な円錐（高さ100mm，半径25mm）とし，奥行き知覚距離の計測方法は被験者が位置センサである指示具を使い円錐の頂点を指示するものとする．画像の解像度は横1024pixel，縦786pixelでハードウェアによるアンチエイリアシング処理を施す．

物体の指示位置の計測はすべて光位置センサ（精度0.51mm）を用い，ステレオ画像生成に必要なスク

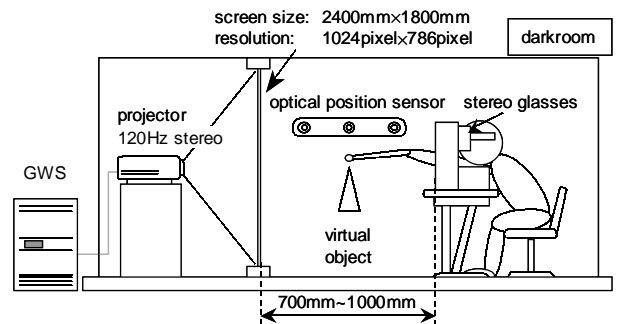


図2 実験装置

Fig. 2 Experimental system.

リーンの位置や視点位置はスクリーン位置の経時変化を考慮して実験毎に測定し直した。瞳孔間距離は瞳孔間距離測定器（最小読み取り間隔0.5mm）を使用して実験前にあらかじめ測定したものを補正前のものとした。また、没入感の低下を防ぐため、表示系全体を暗室内に設置し、外部光がスクリーンに映りこまないよう考慮した。実験中は、背景としてチェックパターンをスクリーン上に表示し、相対的な奥行き手がかりを与えることで立体視を行い易くした。

3.2 実験結果

3名の被験者に対して補正前の画像を用いた奥行き知覚距離の計測を行った。その結果得られるズレ量のサンプルを元に2章の手順で補正パラメータの値を求めた。

手の届く範囲での物体操作を前提とし、700mm, 800mm, 900mm, 1000mmの4種類の視点-スクリーン間距離のそれぞれに対して、視点-物体間距離を300mm ~ 500mmの間の50mm置きに5種類に変化させた計20通りの場合について奥行き知覚距離を計測した。これを図1の画像生成時のパラメータ s と x で表すと以下ようになる。

- $s = 700\text{mm}, x = 200\text{mm} \sim 400\text{mm}$
- $s = 800\text{mm}, x = 300\text{mm} \sim 500\text{mm}$
- $s = 900\text{mm}, x = 400\text{mm} \sim 600\text{mm}$
- $s = 1000\text{mm}, x = 500\text{mm} \sim 700\text{mm}$

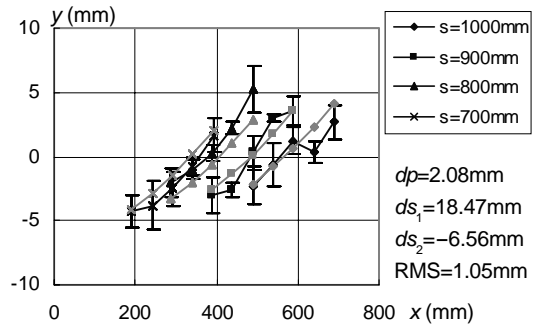
各条件におけるズレの計測値 y_i は、それぞれ5回の計測の平均値を代表値とした。この結果得られる計20個の (x, s, y) のサンプルから2章の計算方法で補正量 (dp, ds_1, ds_2) の最適値を決定する。

図3に、ズレの計測値 y_i を黒色の折れ線、補正量 (dp, ds_1, ds_2) と (x, s) を式(4)に代入することで得られるズレの理論値 y を灰色の折れ線で示す。各計測値の節点には標準偏差の幅も合わせて示す。

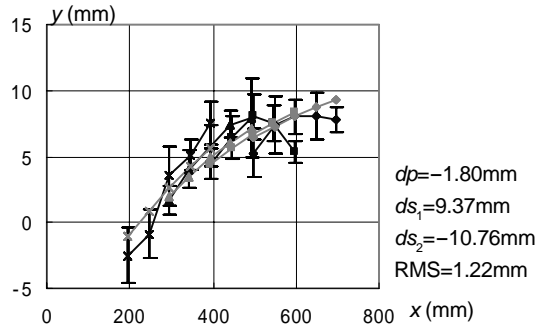
黒色と灰色の折れ線の各節点における y 座標の差は、補正後の視点位置とスクリーン位置によるステレオ画像を用いた場合の、補正後のズレ量として期待されるものである。従って、補正の良さの評価量として、それらの二乗平均平方根値 (Root Mean Square: RMS) についても併記する。

3.3 考察

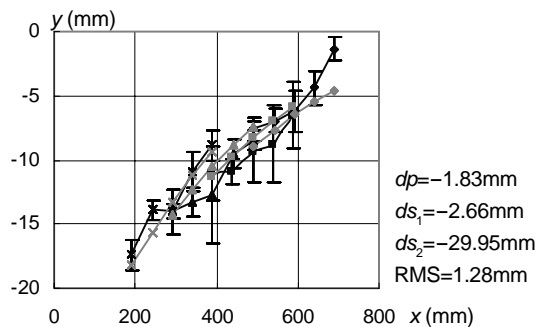
3つの補正パラメータのうち、 ds_1 は式(4)の x に s を代入したときの y の値と等しいことから、視点付近での奥行き距離の補正量となっていることがわ



(a) Subject A



(b) Subject B



(c) Subject C

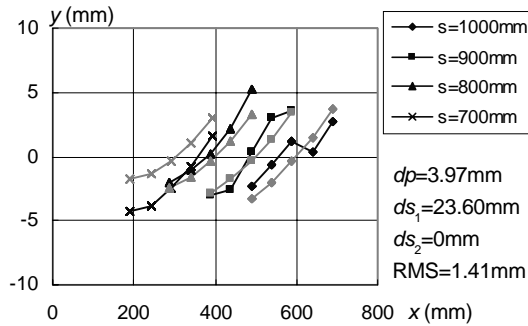
図3 物体 - スクリーン間距離とズレの関係

RMSは黒色と灰色の折れ線の各節点における y 座標の差の二乗平均平方根値を示す。

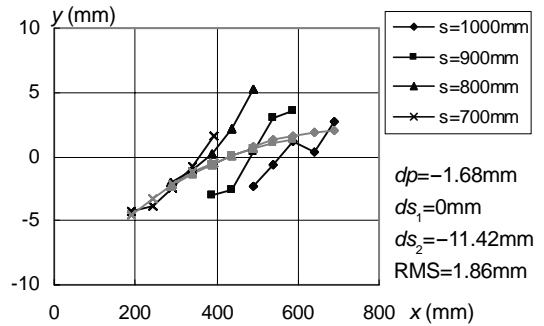
Fig. 3 Relationship between object-and-screen distances and depth errors.

RMS means root mean square of differences of y coordinates between corresponding nodes on black bend lines and gray ones.

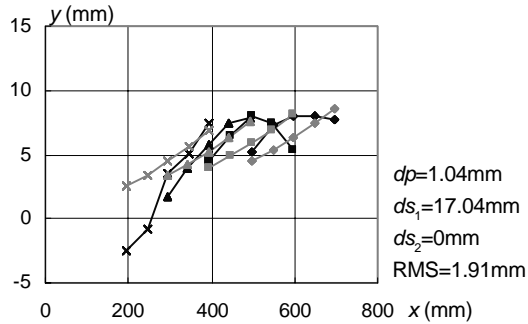
かる。同様に ds_2 は式(4)の x に 0 を代入したときの y の値が ds_2 となることから、スクリーン付近での奥行き距離の補正量である。図3における被験者Aの結果と被験者BおよびCの結果の間には明らかな空間分布の差異が見られるが、このように奥行き距離に一樣のバイアスをかける効果しかない ds_1 および ds_2 を変化させるのみでは、すべての被験者に対して効果的な補正を行うことは難しい。すなわち、図3のズレサンプルの x, s, y の3次元空間における分布曲面を考えた場合、 s 方向の傾き、分布の



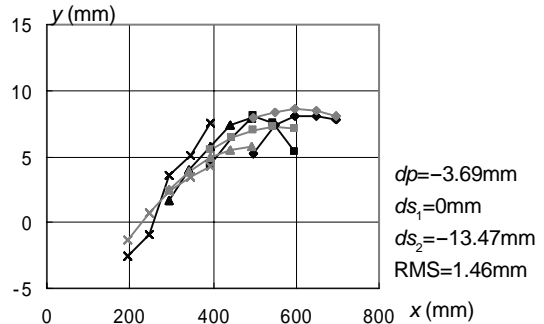
(a) Subject A



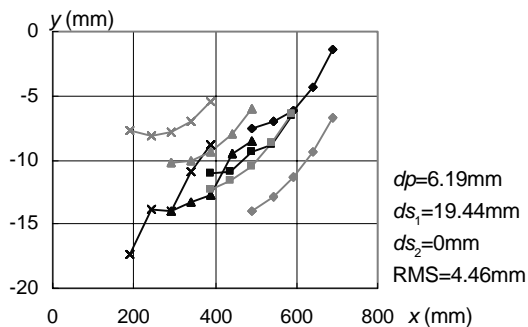
(a) Subject A



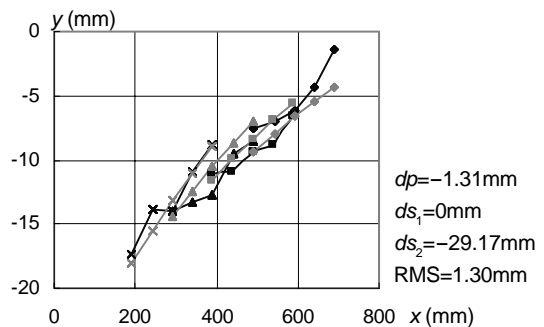
(b) Subject B



(b) Subject B



(c) Subject C



(c) Subject C

図4 ds_2 を用いない補正

Fig. 4 Correction without parameter ds_2 .

非線形の度合い(曲率)について被験者間にばらつきがあるにもかかわらず、 dp を用いるが故に3被験者のいずれの結果においても式(4)の示す理論曲面が分布曲面に非常に良くフィットしていると考えられる。

次に、 ds_2 の必要性を確認するために ds_2 を0とし、 dp および ds_1 の最適値を求めた結果を図4に示す。3被験者のうち被験者A、Bについては ds_2 を0としても補正効果はそれほど低下していないので、ズレ発生の原因がスクリーンに対する視点の相対位置が含む計測誤差のみであると考えて、 dp および ds_1 の2パラメータで補正の方が自然である。しかしながら被験者Cの結果では、 ds_2 を用いないことにより補正効果が明らかに低下している上に、 dp の補正量も6mm程度とかなり大きなものになってお

図5 ds_1 を用いない補正

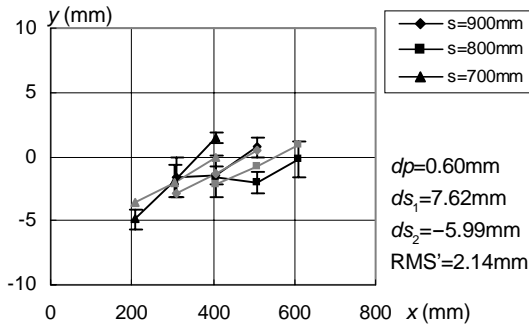
Fig. 5 Correction without parameter ds_1 .

り、 dp および ds_1 の2パラメータでの補正は不適当であると言える。また、図5に ds_1 を用いずに補正を行った結果を示すが、この場合には、被験者AについてRMSの増加、およびグラフの一致度の低下がみられる。

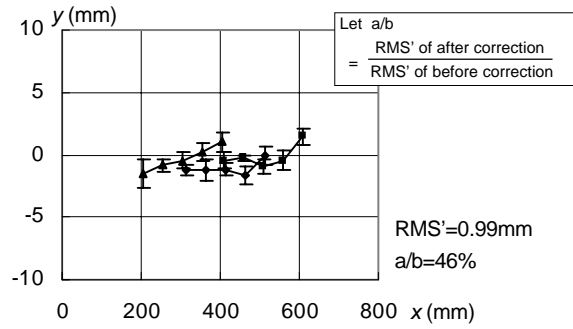
以上のような考察結果より、多くの被験者に幅広く対応するためには、これら3つのパラメータをすべて用いる方が効果的であると考えられる。

3.4 検証実験

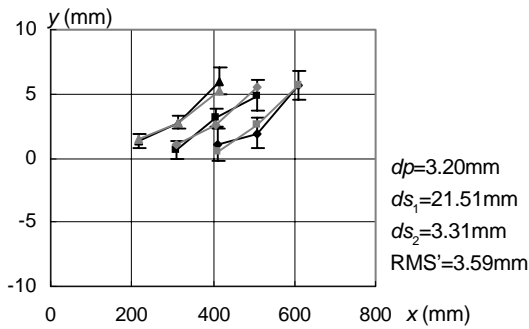
図6に、4名の被験者に対して本補正手法を適用した実験結果を示す。今回は、視点-スクリーン間距離を700mm,800mm,900mmの3種類、視点-物体間距離を300mm,400mm,500mmの3種類の計9箇所に仮想物体を提示した。得られた奥行き知覚距離



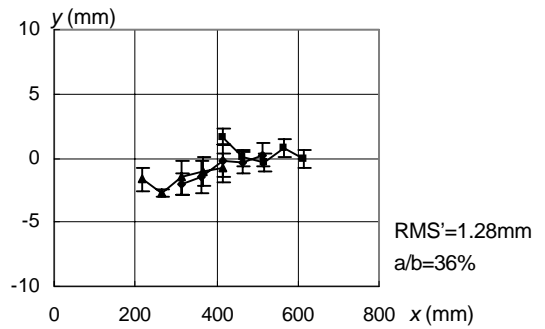
(a-1) Subject A



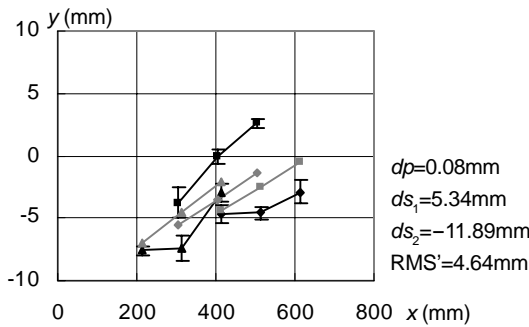
(b-1) Subject A



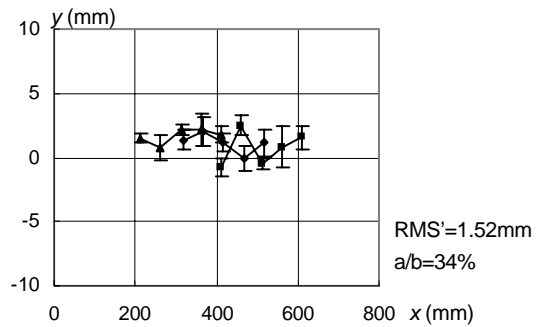
(a-2) Subject B



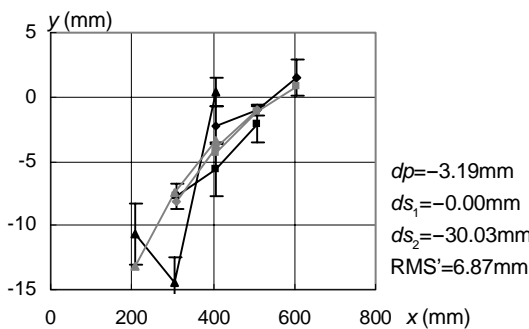
(b-2) Subject B



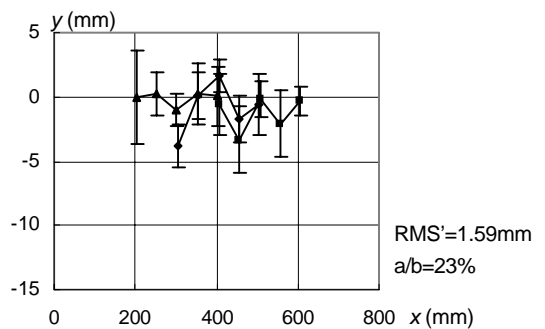
(a-3) Subject C



(b-3) Subject C



(a-4) Subject D



(b-4) Subject D

(a) before correction.

(b) after correction.

図6 補正前後のズレの比較

RMS'はズレ量の二乗平均平方根値を示す。

Fig.6 Comparison of depth errors between before and after correction.

RMS' means root mean square of depth errors.

のズレのサンプルから補正パラメータの最適値を求め、補正後の視点位置とスクリーン位置を用いてステレオ画像を生成し、再度奥行き知覚距離のズレを計測した。補正効果の評価値として、補正前と補正後のズレ量の二乗平均平方根値(RMS')を図6中に示す。

この結果、補正後のRMS'は全被験者平均で1.35mmと補正前の31%に減少していることから、物体-スクリーン間距離に不変の補正パラメータ値を用いているにもかかわらず、視点-スクリーン間距離および物体-スクリーン間距離の計測範囲の全てに関して本補正手法の効果が確認できた。

4. むすび

本文では、奥行き知覚距離計測の実験結果に基づき、ステレオ画像生成時の視野に関する3つのパラメータを用いて、ステレオ視における仮想物体の奥行き距離を補正する手法を提案した。ズレ量のサンプル分布から補正パラメータの最適値を求める具体的な手順を示し、本手法で選択した補正パラメータの妥当性について考察した。また、検証実験より補正の効果を確認した。今回提案した手法は、前回の補正パラメータを瞳孔間距離のみとし物体-スクリーン間距離に対して可変とする方法と比較して、補正パラメータを追加することにより物体-スクリーン間距離に対して不変の補正パラメータ値を用いながら同程度の補正精度を実現している。

今回の実験では安定した結果を得るためのズレ量のサンプル数は経験的に定めた。ズレ量のサンプルを多く採取すれば補正精度の向上が期待できるが、実用化においては、少ないサンプルでより高い精度の補正を行うことが重要となる。また、ズレ量のサンプルをユーザが満足するまで逐次的に入力するなど、入力操作を工夫することによってユーザの負担を軽減することも考えられる。要求されるズレの許容範囲に対して、必要最低限のサンプルの数を決定することも今後の課題である。

参考文献

- [1] Deering, M., "High Resolution Virtual Reality", COMPUTER GRAPHICS, Vol 26, No.2, pp.195-202, 1992.
- [2] 柴崎宏武, 猪田克美, "CADの3次元直接操作手法の検討", 8th Symposium on Human Interface, pp.1-6, 1992.
- [3] 内海章, ポール ミルグラム, 竹村治雄, 岸野文朗, "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.
- [4] 清水久夫, 砂川正一, 小田哲, 宮近幸逸, "二眼

式立体表示における立体知覚に関する研究", Progress in Human Interface, 4, pp.85-90, 1995.

- [5] 黒川隆夫, 村田浩之, 宮南雅也, 緒方誠人, 森本一成, "液晶眼鏡を用いた両眼立体視における奥行き知覚特性とそのモデル", Progress in Human Interface, 5, pp.61-68, 1996.
- [6] Ohtsuka, S., Ishigure, Y., Kanatsugu, Y., "Virtual Window: A Technique for Correcting Depth-Perception Distortion in Stereoscopic Displays", The Society for Information Display Symposium Digest, 27, pp.893-898, 1996.
- [7] 志和新一, 大村克之, 岸野文郎, "焦点調節を補償する立体表示3DDAC", テレビジョン学会誌, Vol.50, No.5, pp.570-576, 1996.
- [8] 森田寿哉, 比留間伸行, 三橋哲雄, 元木紀雄, "両眼融合式立体画像における大きさの知覚と輻輳運動", テレビジョン学会誌, Vol.50, No.9, pp.1300-1310, 1996.
- [9] 高野英彦, "見やすさと距離認識誤差を考慮した仮想物体表示法の評価について", 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.5, pp.347-352, 1998.
- [10] 長田昌次郎, "立体映像の奥行き感と大きさ感", 映情学技報, HIR'97-35, pp.45-50, 1997.
- [11] 吉田俊介, 星野俊仁, 大関徹, 宮崎慎也, 長谷川純一, 横井茂樹, "大型スクリーンを用いたステレオ視表示に基づく表示誤差の評価とその補正", 日本VR学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.331-338, 1999.
- [12] Cruz-Neria, C.N., Sandin, D.J., Defanti, T.A., "Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE", COMPUTER GRAPHICS Proceedings, Annual Conference Series, pp.135-142, 1993.
- [13] 松田隆夫, "視知覚", 培風館, 1995.

(1999年12月22日受付)