

# シースルー型 HMD における視覚パラメータの距離に関する較正法

大倉典子\*<sup>1</sup> 大石峰士\*<sup>2</sup> 舘 暲\*<sup>1</sup>

## Calibration Method of Visual Parameters of See-Through Head-Mounted Display to Adjust Apparent Distance

Michiko Ohkura\*<sup>1</sup>, Takashi Oishi\*<sup>2</sup> and Susumu Tachi\*<sup>1</sup>

For the purpose of coinciding the virtual environment displayed by See-Through Head-Mounted Display (STHMD) with the actual environment, a new calibration method is proposed. The method is for the calibration of the difference between supposed position and actual position of the user's viewpoint, which is mainly caused by the individual difference of inter-pupil distance. This method is efficient to minimize the error concerning distance. The efficiency is evaluated by sensitivity analysis of visual parameters. It is also confirmed by experiment in which visual parameters of STHMD are calibrated individually, and the calibrated virtual environment matched the actual environment.

**Key Words:** Tele-Existence, Virtual Reality, See-Through Head-Mounted Display, Calibration of Visual Parameters, Distance.

### 1. はじめに

トレイグジスタンスあるいは人工現実感において、コンピュータグラフィックス (CG) により生成された仮想世界を現実の空間にスーパーインポーズする目的で、シースルー (See-Through) 型 HMD (Head-Mounted Display) (以下 STHMD) が用いられるようになってきた [1]. そこでは、仮想空間と実空間とを同時に提示するため、その両者の整合性が実用上の大きな課題となっている [2]. STHMD を装着する人間が実際に存在する実環境の座標系と CG で生成された仮想環境の座標系とを一致させるため、筆者らは誤差要因として

- HMD 製作時の視覚パラメータの設計値との誤差
- 装着時の視点位置の設計値とのずれ

の二つを想定し、これらを較正する手法を考案し、設計・試作した STHMD を用いてその有効性を実証した [3]. このたび、特に距離に関する誤差に対して有効な、視点位置ずれの新たな較正法を考案したので、報告する。

### 2. 視点位置ずれの新しい較正法

装着時の視点位置ずれの大きな原因として、瞳孔間距離 (inter-pupil distance, IPD) の個人差がある。これに起因する

水平方向の視点位置ずれは、高さ方向や奥行き方向の偶発的なずれとは異なり、装着法の工夫などによって小さくすることが、左右両眼同時には不可能である。

文献 [3] における視点位置ずれの較正結果において、例えば 4[m] の距離における RMS 誤差として、1.7[mm] (距離が 1[m] の場合の換算値) という結果が得られている。この結果は、較正前の RMS 誤差を半分以下に減少させているが、それでもなお実際には

$$0.0017 \times 4 = 0.0068 \text{ [m]} \quad (1)$$

の RMS 誤差が存在することを示している。これを距離に関する誤差に換算すると、Fig.1 に示すように、瞳孔間距離を 65[mm] として、

$$\frac{0.0068}{(0.065/2) + 0.0068} \times 4 = 0.692 \text{ [m]} \quad (2)$$

となる。これは距離 4[m] の 17.3% にあたり、仮想空間におい

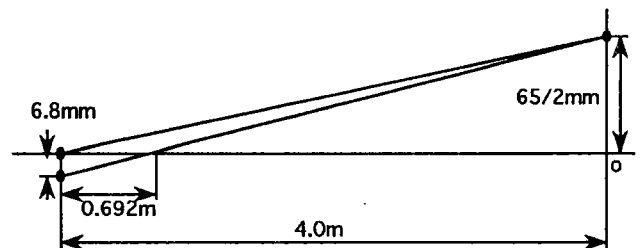


Fig.1 Relation between RMS error and error in distance

原稿受付 1994年9月2日

\*<sup>1</sup>東京大学先端科学技術研究センター

\*<sup>2</sup>東京大学先端科学技術研究センター (現在東京電力)

\*<sup>1</sup>RCAST, The University of Tokyo

\*<sup>2</sup>RCAST, The University of Tokyo (present address: Tokyo Electric Power Company)

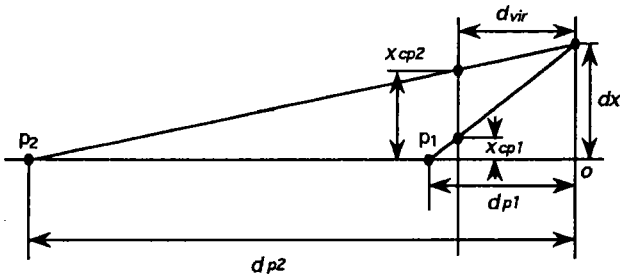


Fig. 2 Calibration of visual parameters using new method

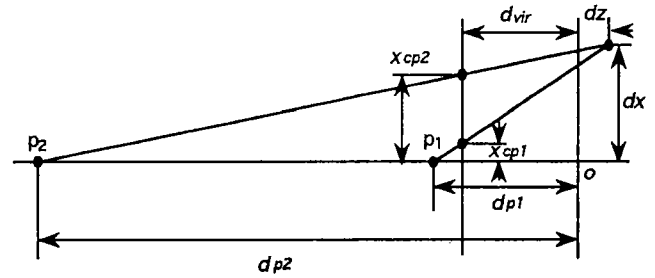


Fig. 3 Calibration of visual parameters using method I

て距離知覚を問題にする実験を想定した場合には無視できない大きさである。

そこで特に距離に関する誤差を少なくするような装着時における視点位置ずれの較正法として、以下のような較正法を考案した。

- (1) Fig. 2 に示すように、実環境内で被験者の正中面上の目の高さに、指標を 2 点用意する。(この較正法では、被験者の正中面と目の高さについては、あらかじめ誤差がなくなるように被験者と STHMD との位置関係を調整してあるものとする。これらは瞳孔間距離の個人差による視点位置ずれとは異なり、実環境上の指標と仮想環境上の指標とが重ね合わさるように視点の位置を動かすことができる。)
- (2) 仮想面 (HMD で仮想環境を提示する際の仮想的なスクリーン) 上に 2 個のカーソルを表示し、これらを動かして各指標に重ね合わせ、その最終位置を記録する。
- (3) 記録されたカーソルの位置と実環境上の指標の位置を結ぶ直線の交点が  $x$  軸上にあると仮定して、視点の位置と仮想面の原点からの距離とを求める。すなわち、実環境における 2 指標の位置  $d_{p1}, d_{p2}$  に対し、カーソルの  $x$  座標を  $x_{cp1}, x_{cp2}$  とおくと、視点の位置 (眼間距離の半分の値)  $dx$ 、仮想面の距離  $d_{vir}$  は、それぞれ

$$d_{p1} : dx = (d_{p1} - d_{vir}) : x_{cp1} \quad (3)$$

$$d_{p2} : dx = (d_{p2} - d_{vir}) : x_{cp2} \quad (4)$$

より

$$dx = \frac{d_{p1}x_{cp1} - d_{p2}x_{cp2}}{d_{p1} - d_{p2}} \quad (5)$$

$$d_{vir} = d_{p1} \left(1.0 - \frac{x_{cp1}}{dx}\right) \quad (6)$$

となる。

### 3. 誤差の感度解析

文献 [3] における視点位置ずれの較正法 (以下較正法 I) では、較正対象パラメータを視点位置の  $x, y, z$  座標 ( $dx, dy, dz$ ) としていた。これに対し前章で提案した較正法 (較正法 II) では、視点位置の  $x$  座標 ( $dx$ ) と仮想面の距離 ( $d_{vir}$ ) を較正対象としている。両手法における較正対象パラメータの距離に関する感度を、以下で検討する。

(1) 較正法 I の場合

較正法 II と比較するために、視点位置の高さ方向 ( $y$  軸) の誤差はないとする。また文献 [3] の実際のアルゴリズムでは、指

標とカーソルとの対応関係を 5 点について測定し、最小 2 乗法を用いて視点位置を計算している。しかしここでは解析が目的なので、初めは測定値に誤差はないと仮定してよく、したがって 2 点の測定値から 2 個の較正パラメータが求まるものとする。

以上の仮定のもとで、Fig. 3 より視点のずれを計算すると、

$$dz = \frac{d_{p1}d_{p2}(x_{cp2} - x_{cp1}) + d_{vir}(d_{p1}x_{cp1} - d_{p2}x_{cp2})}{x_{cp1}(d_{p2} - d_{vir}) - x_{cp2}(d_{p1} - d_{vir})} \quad (7)$$

$$dx = \frac{(d_{p1} + dz)x_{cp1}}{d_{p1} - d_{vir}} \quad (8)$$

となる。

次に、測定値に誤差がある場合の検討に入る。まず指標位置  $d_{p1}$  に測定誤差  $\Delta d_{p1}$  が存在すると、 $dx$  の誤差  $\Delta dx$ 、および  $dz$  の誤差  $\Delta dz$  はそれぞれ

$$\Delta dx \sim -\Delta d_{p1} \frac{x_{cp1}(d_{vir} + dz)}{(d_{p1} + \Delta d_{p1} - d_{vir})(d_{p1} - d_{vir})} \quad (9)$$

$$\Delta dz \sim O(\Delta d_{p1}) \quad (10)$$

となる。

同様にカーソル位置  $x_{cp1}$  に測定誤差  $\Delta x_{cp1}$  が存在すると、 $dx$  の誤差  $\Delta dx_c$ 、および  $dz$  の誤差  $\Delta dz_c$  はそれぞれ

$$\Delta dx_c = \Delta x_{cp1} \quad (11)$$

$$\Delta dz_c \sim \Delta x_{cp1} \frac{O(d_{p1})}{O(x_{cp1})} \quad (12)$$

となる。

すなわち単位を [m] として、 $dx$  ( $O(10^{-2})$ ) に対して、その誤差  $\Delta dx$  は  $O(10^{-4})$ 、 $\Delta dx_c$  は  $O(10^{-3})$  と問題のないオーダーとなっているが、一方  $dz$  (cm オーダ) に対しては、その誤差  $\Delta dz$  は  $\Delta d_{p1}$  のオーダーすなわち  $O(10^{-1})$ 、 $\Delta dz_c$  は  $O(10^0)$  となり、指標・カーソルどちらの測定誤差も拡大伝播することが分かる。

(2) 較正法 II の場合

較正法 II についても式 (5) (6) より同様に誤差を解析する。指標位置  $d_{p1}$  の測定誤差  $\Delta d_{p1}$  に対しては、 $dx$  の誤差  $\Delta dx$ 、および  $d_{vir}$  の誤差  $\Delta d_{vir}$  はそれぞれ

$$\Delta dx \sim \frac{x_{cp1}}{d_{p1}} \Delta d_{p1} \quad (13)$$

$$\Delta d_{vir} = \left(1.0 - \frac{x_{cp1}}{dx}\right) \Delta d_{p1} \quad (14)$$

となる。

Table 1 Experimental results

Subject		1	2
$x_{cp1}$ [m]		0.004725	0.005725
$x_{cp2}$ [m]		0.01869	0.02119
method I	$dx$ [m]	0.025	0.028
	$dz$ [m]	-0.31	-0.37
method II	$dx$ [m]	0.028	0.032
	$d_{vir}$ [m]	0.83	0.82
measured	IPD/2 [m]	0.028	0.030

同様にカーソル位置  $x_{cp1}$  に測定誤差  $\Delta x_{cp1}$  が存在すると、 $dx$  の誤差  $\Delta dx_c$ 、および  $d_{vir}$  の誤差  $\Delta d_{vir}$  はそれぞれ

$$\Delta dx_c = \frac{d_{p1}}{d_{p1} - d_{p2}} \Delta x_{cp1} \quad (15)$$

$$\Delta d_{vir} = \frac{d_{p1}}{dx} \Delta x_{cp1} \quad (16)$$

となる。

すなわち  $dx$  ( $O(10^{-2})$ ) に対して、その誤差  $\Delta dx$  は  $O(10^{-4})$ 、 $\Delta dx_c$  は  $O(10^3)$ 、また  $dv$  (1[m] 程度) に対しては、その誤差  $\Delta d_{vir}$ 、 $\Delta d_{vir}$  は共に  $O(10^{-1})$  となり、指標・カーソルどちらの測定誤差もそれほど大きく伝播しない。

以上の検討から、較正法 II では、測定誤差の拡大伝播がないのに対し、較正法 I では測定誤差が視点位置の  $z$  軸方向の誤差を極めて大きくすることが分かった。視点位置の  $z$  軸方向の誤差は、式 (10) の関係から、そのまま指標の仮想環境における距離の誤差に反映する。

#### 4. 検証実験

前章の検討結果を実証するために、文献 [3] で用いた STHMD を用いて、上記較正法の評価実験を行った。視覚パラメータは製作時の誤差について較正した結果を用い、実環境上の指標を 1.0[m] と 2.5[m] の位置に設定した。まず 2 名の被験者に対して指標とカーソルを重ね合わせる実験を行い、2 種類の較正法についてそれぞれ新しい視覚パラメータを求めた。結果を Table 1 に示す。

また上記被験者を含めて計 4 名の被験者に対して較正法 II による較正手続きを行い、Table 2 に示すような新視覚パラメータを得た。なお Table 1, Table 2 共に、最下段には瞳孔間距離の実測値を 2 で割った値を示してある。

前章の結果から予測されたように、較正法 I では視点位置の  $z$  軸方向の較正値が  $-31 \sim -37$  [cm] となっており、この値は顔の形状 (鼻の高さ) の個人差の範囲を大きく超えている。これに対し較正法 II では、計算により求められた  $dx$  が、最下段

Table 2 Calibrated visual parameters

Subject	1	2	3	4
$dx$ [m]	0.028	0.032	0.033	0.031
$d_{vir}$ [m]	0.82	0.82	0.72	0.78
IPD/2 [m]	0.028	0.030	0.033	0.031

Table 3 Displacement of cursor

Distance [m]	1.0	2.0	2.5	5.0
Displacement [m]	0.000	0.000	0.000	0.001

に示した瞳孔間距離の実測値を 2 で割った値とよく一致している。ここで、本来は一定値であるべき仮想面までの距離  $d_{vir}$  が個人ごとに異なっているが、これが仮想環境における距離に及ぼす影響は、式 (14) から元の  $d_{vir}$  の誤差と同じオーダーとなるので問題ないといえる。

また Table 2 の新視覚パラメータを用いて、それぞれの被験者にあらかじめ指標位置に対応する仮想空間上の位置にカーソルを表示したところ、較正前は最大 3 [mm] 程度あった指標とカーソルとのずれが、すべての被験者について 0.0 [mm] となった。

さらに被験者 1 に対して、実空間上 2.0 [m] と 5.0 [m] の位置にも指標を置き、同時に新視覚パラメータを用いて仮想空間上の同じ位置にカーソルを表示したところ、Table 3 に示すようなカーソル位置ずれがあった (仮想面上の変位)。距離 5.0 [m] におけるカーソル位置ずれによる距離の誤差は 0.12 [m] と計算され、これは 5.0 [m] の 2.4% に相当し、実用上十分満足できる範囲内であるといえる。

これらの結果から、本較正法は STHMD の距離に関する視点位置の較正法として極めて有効であることが、確認された。

#### 5. まとめ

シースルー型 HMD における仮想空間と実空間の整合性を図るために、特に距離に関する誤差に対して有効な、視点位置ずれに対する新たな較正法を考案した。またその有効性を、視覚パラメータの感度解析により評価し、さらに個人ごとの STHMD の較正実験により検証した。

#### 参考文献

- [1] 館, 廣瀬: “バーチャル・テック・ラボ”, 工業調査会, 1992.
- [2] 廣瀬, 木島, 佐藤, 石井: “シースルー型 HMD を用いた仮想空間による実空間の修飾の研究”, 第 6 回ヒューマン・インターフェイス・シンポジウム論文集, pp.1-8, 1990.
- [3] 大石, 館: “シースルー型 HMD における視覚パラメータの較正法”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.6, pp. 911-918, 1994.