

基礎論文

鏡像を用いた現実世界と仮想世界の重畳提示における 運動視差と前後関係把握精度の関係

佐藤 秀昭^{*1*2} 北原 格^{*3} 大田 友一^{*3}

Depth Perception by Motion Parallax in Mixed-Reality Mirror World

Hideaki Satoh^{*1*2}, Itaru Kitahara^{*3} and Yuichi Ohta^{*3}

Abstract — This paper introduces a method to merge real and virtual worlds in a mirror, and experiments to evaluate depth perception by motion parallax in the mirror world. Recently, the functions of a real mirror are enhanced by Mixed-Reality technique. In order to merge real and virtual worlds, conventional systems use a video monitor and a video camera as a metaphor of mirror. Therefore, it is difficult for them to reproduce motion parallax of a real mirror in Mixed-Reality world. Our method can reproduce motion parallax of a real mirror in Mixed-Reality world. A user can understand 3D position of mirror images with our method. Motion parallax is well known as one of the important stimuli to understand the depth information of the observing 3D object. However, the depth perception of motion parallax in the front-back reversal space as a real mirror world has not been clarified. The results of our subjective evaluations reveal that the motion parallax improves our depth perception, even in Mixed-Reality mirror world.

Keywords: Mixed Reality, Mirror World, Depth Perception, Motion Parallax

1 まえがき

本論文では、鏡像を用いて実世界と仮想世界を重畳提示する複合現実 (MR: Mixed Reality) 型の鏡像提示方式を紹介し、鏡像世界という前後反転(以降、鏡像反転と呼ぶ)する空間において、運動視差が物体の前後関係の把握に与える影響を主観評価実験により明らかにした結果について述べる。

自己の鏡像には、自己の身体動作に関する興味を起こさせる効果がある[1]。また我々は、鏡を日頃から使い慣れており、その見え方より、自己の動作・様子を直感的に理解することが可能である[2]ため、スポーツトレーニングやリハビリテーションにおけるフォームの確認や、服装や化粧の見栄えの確認などに鏡が一般的に利用されている。

このような鏡の特長に着目して、ビデオカメラで撮影した映像を用いて計算機内部で鏡を模した空間(デジタル鏡像)を構築し、現実の鏡の機能を拡張する試みが行われてきた。例えば、自己の身体動作を用いて、デジ

タル鏡像中の物体とインタラクションするシステム[3]-[7]、コンピュータグラフィックス(CG)を用いて生成したスポーツなどの教示動作を、デジタル鏡像上で重ね合わせ、フォーム確認の効率化を図るシステム[8]や、CGで生成した衣服をデジタル鏡像上で重ね合わせる仮想試着システムなどが提案されている[9][10]。

鏡像提示の応用事例として、3次元ゲーム、デジタルサイネージ、スポーツトレーニングにおけるフォーム確認などの表現力や操作性の向上への貢献が考えられる。3次元空間中に配置された仮想物体を、身体動作を用いて操作可能なインタフェースを導入することにより、実世界と仮想世界との幾何的位置関係を、より分かりやすくユーザに理解させることが可能となる。一方でこのような応用事例では、自己の身体を含めた実世界と、CGで合成した仮想世界との3次元的位置関係を、鏡像を介して直感的に理解することが要求される。そのため、ユーザの視点移動に伴って見え方が変化するという、我々が現実の世界で親しんでいる鏡像世界をデジタル鏡像中でも幾何的に再現することが望ましい。しかし、前述した従来研究では、環境に固定した1台のビデオカメラを用いて撮影した実世界の映像に仮想物体像を重畳する、左右反転した映像を、デジタル鏡像としてモニタに提示しているため、デジタル鏡像中の実世界と仮想世界の幾何的整合性が保たれているのは、ユーザが特定の視点から観察をしている場合に限られ、ユーザ

*1 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 知能機能システム専攻

*1 Department of Intelligent Interaction Technologies,

*2 日本電気株式会社

*2 NEC Corporation

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

*3 筑波大学 システム情報系

*3 Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

が視点を移動しても、提示されるデジタル鏡像の見え方は変化しない。この幾何的な不整合により引き起こされる問題の一例が、Augmented practice mirror[8]で報告されている。Augmented practice mirror では、教示動作とユーザ動作の差分を CG としてユーザ像に重畳することにより、直感的な提示を実現しているが、ユーザの視点変化に対する見え方の変化が再現されていないため、動作の差分が鏡に向かって前後方向に分布している場合、確認が困難になるという問題がある。

鏡を用いて3次元世界を観察する場合、我々は、両眼視差や運動視差など複数の奥行き手がかりを用いている。両眼視差は、前後関係を判断するための重要な手がかりである。しかしながら、ユーザが身体動作を観察する場合には、手や足などの身体部位とその他の物体によって隠れ領域が発生する。視点を移動させることにより発生する運動視差の活用は、隠れ領域の観察と3次元的な位置関係の理解に対して有効に機能すると考えられる。鏡像を介して生成される MR 空間において、従来のデジタル鏡像方式では実現困難であった実世界と仮想世界の運動視差を含めた幾何的整合性を実現することができれば、実鏡像と仮想鏡像の3次元的な位置関係の把握が容易な鏡像型提示装置として、新しい応用分野への展開が期待できる。

我々は、図 1 に示すように、現実の鏡の反射により得られる実鏡像に CG で生成した仮想鏡像を重畳することにより、幾何的整合性を保ちつつ実鏡像と仮想鏡像を融合可能な MR 型の鏡像提示方式を開発している[11]-[13]。ユーザの視点位置に応じて実鏡像と仮想鏡像の運動視差を実時間で提示することが可能である。運動視差を提示する機能を持たない従来のデジタル鏡像提示方式に比べ、実鏡像と仮想鏡像の前後関係の把握精度の向上が期待される。しかし、これまで、鏡像世界という鏡像反転する空間において、運動視差が前後関係の把握精度へ与える影響については十分な検討がなされていない。本論文では、鏡像反転が発生している状況においても、現実の世界と同様に運動視差が前後関係の把握精度の向上に貢献するか否かについて検討する。

以降、2節において鏡像における運動視差の提示手法について概観し、MR 型鏡像提示における、運動視差を含む鏡像の再現に関する課題について述べる。また、運動視差が前後関係の把握精度に与える影響を調査した従来研究を紹介し、本研究の位置づけについて述べる。3節で、鏡像を介して実世界と仮想世界を重畳する手法について述べる。4節では、実鏡像世界における運動視差と前後関係の把握精度に関する実験結果について述べ、5節では、4節の結果を踏まえた MR 型鏡像提示における運動視差と前後関係の把握精度の関係性について検討する。最後に6節で、まとめと今

後の課題を述べる。

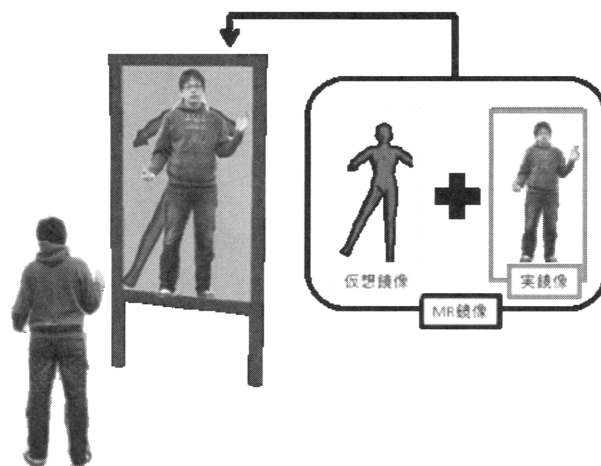


図 1 鏡像世界と実世界の幾何的整合性を実現可能な MR 型鏡像提示: 現実世界の鏡像に鏡の見え方を再現する仮想鏡像を重畳提示

Fig. 1 Mixed-Reality mirror world

2 関連研究

2.1 鏡像における運動視差の提示手法

鏡像における実物体の運動視差の再現について考える。鏡像を介する MR 型鏡像提示方式では、現実の鏡を使用して実物体の鏡像を生成するため、運動視差を実時間で再現することが可能である。一方、従来のデジタル鏡像方式では、ビデオカメラが環境に固定されているため、そのままでは実鏡像の運動視差の再現が不能である。デジタル鏡像提示方式によって実鏡像の運動視差を再現する方法には、大きく分けて三つのアプローチに分類される。一つ目は、ユーザの視点位置に応じて、現実世界を撮影するカメラの位置を動かすことである[14]。しかし、ユーザの視点位置を検出し、ビデオカメラを高精度かつ実時間で動かすのは現実的ではない。二つ目は、複数のカメラをアレイ状に配置し、ユーザの視点に応じて、カメラを切り替えるという方法であるが[15][16]、ユーザの視点位置に応じた全ての位置にカメラを配置することは困難である。三つ目は、ユーザの周囲の環境の3次元モデルを生成することにより、自由視点映像を提示する方法である[17]。しかし、撮影空間を動き回るユーザの精巧な3次元モデルを実時間で作成することは困難である。

2.2 鏡像提示の実時間性に関する検討

MR 提示における運動視差を再現するためには、センサの計測時間や CG の生成・提示処理時間が原因となり、ユーザが視点を動かしてから、それに応じた見え方の変化(運動視差)を観察するまでの遅延時間が発生する。重田ら[18]は、自己像を観察しながら活動する「超鏡」では、自己像の提示遅延が、

ユーザの心理状態や動きやすさに影響を及ぼすと考え、ユーザにとって許容可能な自己像の提示遅延を実験により明らかにした。具体的には、ユーザの自己像に提示遅延をフレーム単位で与え、手を大きく振る動作をさせたところ3フレーム程度（1フレームの処理時間は30[msec]）の遅延が与えられたとき、ユーザはその遅れに気付くことを示している。鏡像を介したMR空間の応用例が、自己の身体動作を用いて、鏡空間中の物体とインタラクションすることやスポーツのフォーム確認などダイナミックなイベントであることを考えると、ユーザが許容可能な時間内に提示遅延を収めることが好ましい。重田らの実験結果によると、提示遅延が2フレームと3フレームの間で有意差があるとされているため、我々もこの結果を採用し、提示遅延が2フレーム（60[msec]）以内であることを実時間提示の目安とする。

2.3 鏡像提示における運動視差による前後関係の把握実験

我々が提案するMR型鏡像提示手法の特長は、実鏡像と仮想鏡像の運動視差を実時間で再現可能なことである。これまでも、運動視差がユーザの前後関係の把握精度に影響を与えることを示す報告がなされているが[19]、鏡像世界において（鏡像反転が発生した状態）でも、同様に運動視差が前後関係の把握精度に与える影響の検証は例をみない。さらに、MR型鏡像提示における仮想鏡像と実鏡像の運動視差の再現が、仮想鏡像と実鏡像中の3次元位置の把握に影響を及ぼすか否かに関する調査も十分になされていない。

表1に、運動視差による前後関係の把握精度の影響に関する研究事例をまとめる。被験者が鏡像を介さずに現実空間を直接観察する“表1中(a)”に属する研究として、長田らの研究があげられる[20]。長田らは、被験者に頭を動かしながら、スリット越しに石膏像を観察させ、被験者の頭の速度が、運動視差による奥行感度の向上に貢献していることを示している。

被験者が鏡像を介さずに直接MR空間を観察する“表1中(b)”に属する研究として、末永やJonesらの研究が上げられる[21][22]。末永らは、仮想空間の運動視差だけでなく、絵画的な遠近感を同時に表現することにより前後関係の把握精度が向上することを示した。また、Jonesらは、複合現実空間において、ユーザと対象物体までの距離が3[m]から9[m]の間では、運動視差の前後関係の把握精度への影響がほとんど発生しないことを示している。

この他にも、鏡像を介さない（鏡像反転が発生しない）観察については、運動視差が前後関係の把握精度に与える影響について、数多くの議論が行われている[14][18]–[22]。その一方、“表1(c)(d)”の鏡像反転が発

生する状況下では、現実空間、MR空間共に十分な議論が行われていない。本論文では、その2項目において、運動視差が前後関係の把握精度に与える影響に関する主観評価実験を実施し、その結果より、鏡像を用いて現実世界と仮想世界を重畳提示する手法の有効性を検討する。

表1 運動視差による前後関係の把握精度に関する研究：赤枠の2項目については、十分な議論がなされていない。

Table 1 Researches for investigating depth perception by using motion parallax

提示空間	観察対象	鏡像でない	鏡像である
現実空間	(a)	実物体	実鏡像
	(c)	実物体	実鏡像
複合現実空間	(b)	実物体 仮想物体	仮想鏡像 実鏡像
	(d)	実物体 仮想物体	仮想鏡像 実鏡像

3 鏡像を用いた現実世界と仮想世界の重畳提示

本節では、本研究で構築したMR型鏡像提示手法について、図2を用いて説明する。本提示手法では、現実物体の鏡像は実物の鏡（ハーフミラー）を用いて提示する。ハーフミラーの背後に大型ディスプレイを設置し、仮想物体の鏡像を提示する。二つの鏡像幾何を整合させることにより、それらが融合されたMR型鏡像の提示が実現される。自然の光学現象である鏡の反射によって実物体の鏡像が得られるため、大掛かりな撮影装置や計算コストを要さない高品質な実鏡像の実時間提示が可能である。

図3は、実鏡像が観測される様子を示したものである。説明の簡略化のため、 X_w 軸、 Z_w 軸についてのみ説明するが、3次元空間への拡張は同様の考え方で可能である。世界座標系の原点を実物の鏡の左上 O_w とした場合、 M の位置に実物体が存在するとき、ユーザ視点 V_u における実鏡像が観測される光路は、図3中の実線矢印のようになる。実物の鏡が設置されている位置に大型ディスプレイを設置し、ディスプレイ面に対して実物体と面対称な位置 M' に仮想物体を設置すると、同様の観測光路を仮想的に再現することができる。 M から M' への座標変換は、ディスプレイ面を X_w - Y_w 平面として、仮想世界座標系の原点 O_{OG} と世界座標系 O_w とを一致させることにより、式(1)のような簡略な計算で実現できる。

$$M' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

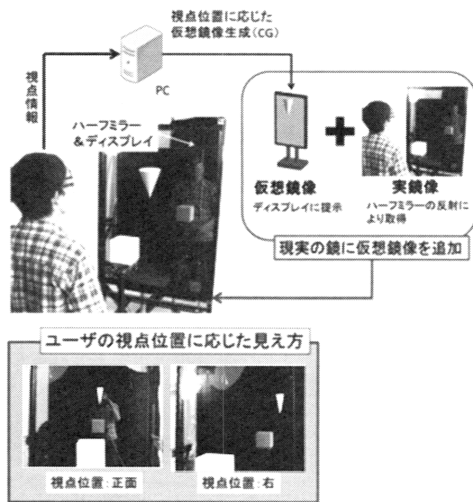


図 2 鏡像を用いた現実世界と仮想世界の融合提示: 実物の鏡によって得られる実鏡像と大型ディスプレイに提示する仮想鏡像が、ハーフミラーによって融合される。

Fig. 2 Merging real and virtual mirror worlds

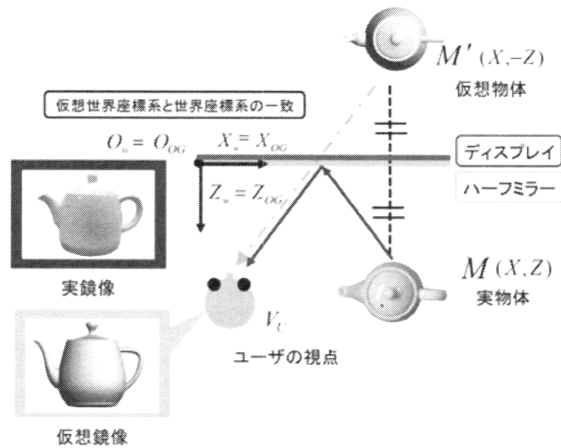


図 3 仮想鏡像のモデリング: ハーフミラーの面上に世界座標を設定することにより、実物体の Z 座標を反転する簡単な処理で仮想鏡像の生成が可能。

Fig. 3 Geometrical relationship between real and virtual mirror worlds

3.1 仮想鏡像のレンダリング

図 4 に仮想鏡像のレンダリング過程を示す。ユーザの視点位置 $V_u(X_V, Y_V, Z_V)$ と同じ位置に仮想鏡像を撮影する仮想カメラ (V_{cam}) を設置し、その画像面を図 3 中のディスプレイ面と一致させる。このとき、 V_{cam} を仮想カメラ座標系の原点 O_{CAM} とし、仮想カメラ座標系における仮想物体の位置を $M'_c(X_c, Y_c, Z_c)$ と定義すると、 M' から M'_c への座標変換は式(2)で表される。画像平面上にお

ける仮想物体の観測位置 (x_c, y_c) は、画像面からユーザ視点位置までの距離 Z_V に応じて、式(3)のように求まる。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X - X_V \\ Y - Y_V \\ Z + Z_V \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$s \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} Z_V & 0 & 0 \\ 0 & Z_V & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

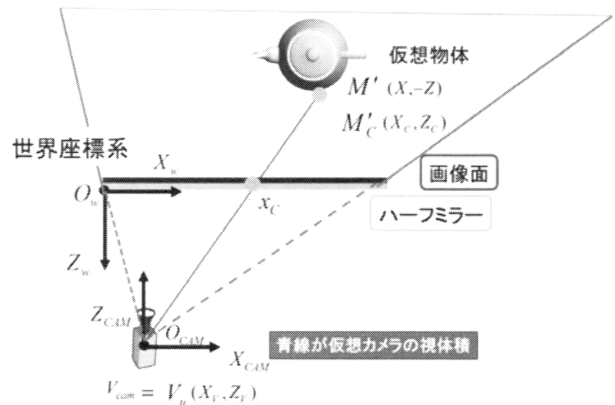


図 4 仮想鏡像のレンダリング

Fig. 4 Rendering the virtual mirror world

3.2 提案方式の処理概要と提示遅延

提案手法は、HMD (Head Mounted Display) を用いた MR 提示でいうところの光学シースルー方式を用いて仮想映像を重畳しているため、実物体と仮想物体の提示時間にズレ (提示遅延) が生じる。提示遅延は、運動視差を用いた前後関係の把握精度低下の要因となるため [23]、ユーザが知覚しない範囲に抑える必要がある。2.2 節で述べたように、本手法では、提示遅延を 60[msec] 以内に抑えることを実時間性能の実現目標値とする。

提案手法の提示遅延は、図 5 中の「仮想鏡像の提示遅延 T」であり、ユーザの視点位置変更後から、仮想鏡像を描画するまでの時間とする。ユーザの視点移動と同時にその位置を計測することは一般的に困難であるため、図 6 に示す計測遅延が生じる。同様に、計算機が描画命令を出してから、ディスプレイの画面が切り替わるまでの間にも描画遅延が生じる。視点移動した瞬間から計測が完了するまでの計測遅延を t_a 、マーカ位置計測用計算機で視点位置マーカを検出した時間と、CG 描画用計算機で視点位置情報をもとに仮想鏡像生成処理を開始する時間の同期遅延を t_b 、仮想鏡像を生成する処理時間を t_c とする。本提示方式では、位置センサとして、毎秒 60 回 (更新時間 16.67[msec]) の視点位

置マーカ計測が可能な赤外線カメラ[24]を用いるため、計測遅延 t_a の最大値 t_{a_max} は、16.67[msec]である。処理時間 t_c の内訳は、マーカ計測用計算機から視点位置情報取得に 0.67[msec]、仮想鏡像のモデリングに、1.30[msec]、仮想カメラの設定に 0.050[msec]、レンダリングに 13.03[msec]である。 t_c より t_b の最大値 t_{b_max} は 15.05[msec]である。レンダリング時間が大きいのは、ディスプレイのリフレッシュレート⁽¹⁾ (60[Hz])と描画処理を同期させるための待ち時間が含まれるためである。提案方式の各処理の更新時間と各遅延が一様分布であることを仮定すれば、提示遅延は、(4)式により求められる。提案手法の提示遅延の最大値が 46.77[msec]、期待値が 30.91[msec]となり、上述した 60[msec]以内に収まっていることがわかる。

$$\text{提示遅延} = \int_{t_{a_min}}^{t_{a_max}} \frac{t}{t_{a_max} - t_{a_min}} dt + \int_{t_{b_min}}^{t_{b_max}} \frac{t}{t_{b_max} - t_{b_min}} dt + t_c \quad (4)$$

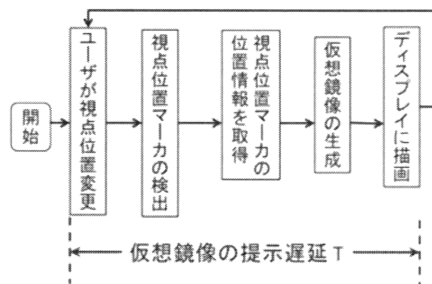


図 5 提案方式の処理概要
Fig. 5 Our system's processes

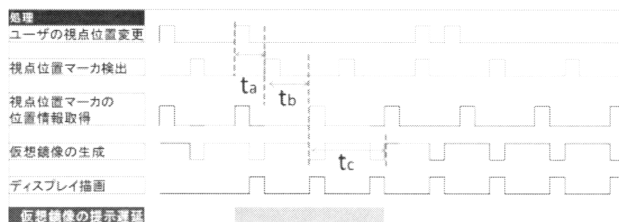


図 6 提案方式のタイミングチャート
Fig. 6 Our system's timing diagram

4 鏡像世界における運動視差と前後関係の把握精度に関する評価実験

本節では、鏡像世界における運動視差と前後関係の把握精度に関する評価実験を行う。

被験者は、図 7 に示すように、実験空間に吊るした円錐物体を矢印に見立て、実験空間中に配置した立方体の前面と矢印の前後関係を一致させる作業を行う。しかし、鏡の前に矢印と立方体を設置した状態で、上述した

実験を実施すると、鏡を介することなく両物体を直接観察することができ、鏡像中の運動視差以外の視覚情報を用いて前後関係の把握が可能になってしまう。本実験では、鏡をハーフミラーに変更し、矢印を鏡の奥(鏡に対して面对称の位置)、立方体を鏡の手前に設置する。そして、ハーフミラーを用いて両物体の像を重ね合わせることで、鏡像中の見え方のみを用いた前後関係の把握を実現する。

4.1 実験環境

実験装置は、図 7 に示すように、実鏡像を観察するためのハーフミラー、前後関係把握の参照基準となる立方体、前後関係の把握作業で操作する矢印により構成される。ハーフミラーの大きさは縦 1200[mm]、横 900[mm] であり、透過率は 50%である。立方体の大きさは一辺 120[mm]、矢印の大きさは底面の直径が 90[mm]、高さ 245[mm]である。鏡から立方体までの距離は、実験に合わせて変更可能である。矢印は、被験者が糸を引いたり緩めたりすることにより、世界座標系の Z 軸(前後)方向に移動させることができる。

被験者の頭部運動の範囲を統制するため、図 7 に示すように、実験空間に 2本の棒を 500[mm]の間隔で垂直に設置した。また、運動速度を制限するために、被験者には、メトロノームの音に合わせて、棒の間を動き続けるように指示する。このときの移動速度は、長田らによって示された運動視差による前後判定の弁別域が最小になる運動幅角速度[20]を参考に、鏡に反射した実物体に対して毎秒 10 度程度の角速度とした。

本実験の被験者は、20代の学生11名(全て男性)である。両眼視差が前後関係の把握に与える影響をキャンセルするため、映像は片目(利き目)で観察させ、もう一方の目には眼帯を装着させた。実験前に、観察対象の立方体と矢印と同じ大きさの石膏像を一度だけ観察させた。

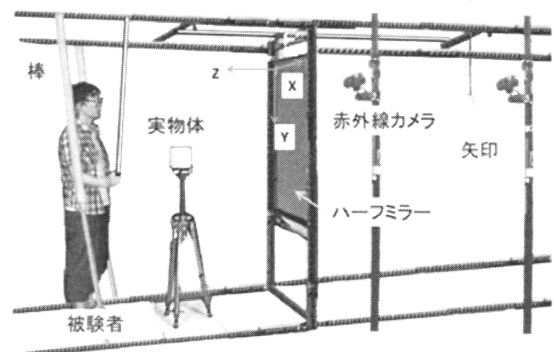


図 7 評価実験装置:被験者は、ハーフミラーを見ながら、紐を引いて、矢印の位置を動かし、実物体の鏡像と矢印の前後関係を合わせる。

Fig. 7 Experimental environment (Real mirror)

(1) 画面を赤色と緑色に交互に切り替えながら高速カメラで撮影した映像を用いて計測した切り替わり時間(リフレッシュレート)は、公開されている電気的な仕様とほぼ等しい 60.64Hz であった。

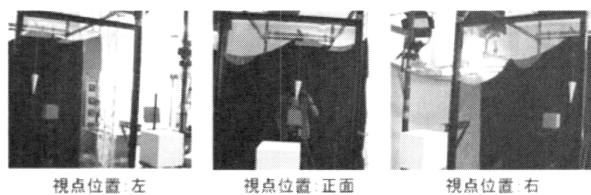


図 8 鏡像中で発生する運動視差:被験者は頭部を移動させることにより、運動視差の観察が可能。

Fig. 8 Motion parallax in the real mirror world

4.2 実験手順

被験者は、鏡に被験者の全身が映る距離 $Z = 1400[\text{mm}]$ に立ち、鏡を見ながら立方体の前面(鏡に映っている面)と矢印の先端の前後関係を合わせるように指示した。矢印の奥行きは、調整法[25]を実現するために、被験者自身が糸を引いたり・緩めたりすることによって調整できるようにした。運動視差を再現する場合としない場合で、同様のタスクをくり返した。被験者は、左右に頭を振ることにより、図 8 に示すような運動視差を観察することができる。運動視差を提示しない実験では、視点位置を固定した状態で観察するよう指示した。立方体は、 $Z = 800[\text{mm}]$, $1000[\text{mm}]$, $1200[\text{mm}]$ の3種類の奥行きに設置した。矢印の初期位置は、調整法に従い、鏡に十分に近づけた位置と鏡から十分遠ざけた位置の2パターンとする。メトロノームの周期は $Z = 800[\text{mm}]$ の時に、46[拍/秒]、 $Z = 1000[\text{mm}]$ の時に、50[拍/秒]、 $Z = 1400[\text{mm}]$ の時に、54[拍/秒]になるよう調整した。実験を実施する順番は、運動視差有・無を無作為に選択後、立方体の奥行き3パターンを無作為に選択し、計6回の試行が行われる。6回の内、矢印の初期位置が鏡に近づいた位置と、遠ざけた位置が同数となるように無作為に設定した。矢印の操作に関しては、実験前には練習をさせていない。

4.3 実験結果

本実験では、(5)式を用いて実験結果を評価する。 D_{ARROW} は、世界座標系における矢印の奥行き、 $D_{\text{REAL_OBJ}}$ は、世界座標系における実物体の奥行きである。立方体と矢印の奥行き値の差が小さいほど、score が 0 に近づく。

$$\text{score} = \left| D_{\text{REAL_OBJ}} - \left| D_{\text{ARROW}} \right| \right| \quad (5)$$

実験結果を、表 2 と図 9 に示す。score の平均値と標準偏差から、運動視差有の方が、前後関係の推定精度が高いことがわかる。運動視差有と運動視差無の値に対して、対応のある t 検定を行った結果、立方体の位置 $800 [\text{mm}]$ で $P=0.014$ 、 $1200 [\text{mm}]$ では、 $P = 0.013$ となり有意水準 5% の有意差があることが確認された。1000 [mm] では、 $P = 0.001$ となり有意水準 1% の有意差が確認された。被験者間での評価傾向のばらつきに関する

検討とその原因や影響に関して考察を行ったところ、図 10 の各被験者のスコアをみると、被験者 a,g,i,k が、スコア傾向が他の被験者と大きく異なっていたので、個別に考察を加える。

被験者 a と被験者 k の score の傾向が他の被験者と異なった原因は、矢印の操作方法の慣れだと考えられる。被験者 a、被験者 k 共に立方体と矢印の前後関係の合わせ方については他の被験者と同様の結果であったが、図 10 と図 11 より、 $Z=800[\text{mm}]$ の場合には、運動視差有の条件下で、低い評価値となった。被験者 k のアンケートによると、「試行を繰り返すうちに、矢印が合わせやすくなった」とのコメントが得られた。両被験者の最初の実験試行は、 $Z=800[\text{mm}]$ の場合であった。

被験者 g の score の傾向が他の被験者と異なった原因は、実験経過に伴う疲労の蓄積と考えられる。被験者 g は、立方体と矢印の前後関係の合わせ方については、他の被験者と同様であり、立方体と矢印の相対的な動き方、大きさを手がかりにしていたが、「実験試行時間が長いため、疲労を感じた」とコメントが得られた。その結果、最後に行われた $Z=800[\text{mm}]$ の試行の score が一般的な傾向から外れたと考えられる。図 10 と図 11 より最初の試行である $Z=1200[\text{mm}]$ の場合の score の標準偏差が小さいことから、実験開始時に、非常に丁寧に試行していたことがうかがえる。被験者 i のスコア傾向が他の被験者と大きく異なる原因も、同じく実験による疲労だと考えられる。被験者 i のアンケートによると、「メトロノームの音に合わせて身体を動かし続けるのが困難だった」とコメントをしていた。被験者 i は、運動視差有の $Z=1200[\text{mm}]$ の試行を最後に行ったため、その実験で score に影響が大きく出ている。

上述した score の傾向が他の被験者と大きく異なる被験者を除去した場合の平均値を計算したところ、除去しなかった場合と同様、表 3 に示した平均値と標準偏差から、運動視差有の方が、前後関係の把握精度が高い結果となった。運動視差有と運動視差無の値に対して、対応のある t 検定を行った結果も、立方体の位置 $800 [\text{mm}]$ で $P=0.029$ 、 $1000 [\text{mm}]$ では、 $P = 0.029$ となり有意水準 5% の有意差があることが確認され、 $1200 [\text{mm}]$ では、 $P = 0.072$ となり有意傾向が確認された。そのため、鏡像中の運動視差が、前後関係の把握精度に貢献していることが確認された。

表 2 実験結果の平均値と対応のある t 検定の結果:括弧内は標準偏差値. 対応のある t 検定から運動視差を再現した方が, 前後関係の把握精度が有為が良いことがわかる.

Table 2 Average and result of t-test

鏡から立方体までの距離 [mm]	運動視差有 [mm]	運動視差無[mm]	P 値
800	77.476 (51.488)	170.004 (125.365)	0.014
1000	71.820 (60.197)	174.372 (122.451)	0.001
1200	76.381 (57.439)	210.999 (155.098)	0.013

表 3 傾向の異なる被験者を除いた実験結果の平均値

Table 3 Average and result of t-test without a,g,i,k users

鏡から立方体までの距離 [mm]	運動視差有 [mm]	運動視差 [mm]	P 値
800	66.126 (17.689)	132.715 (52.019)	0.029
1000	78.079 (46.681)	171.913 (81.639)	0.029
1200	94.470 (28.911)	219.892 (130.857)	0.072

5 MR 空間における鏡像の運動視差と前後関係の把握精度の関係

本節では, MR 型鏡像提示における運動視差が前後関係の把握精度に与える影響を, 前節と同様の枠組みで評価する実験について述べる.

5.1 実験環境

図 12 に実験環境を示す. 立方体と矢印の大きさ, 頭部運動の統制方法, 立方体から鏡までの距離は実験に合わせて変更可能である点は, 前節と同様である.

本実験における MR 映像の生成提示は, Intel Xeon Duo (3GHz)のプロセッサと 4GB のメモリ, ビデオカード (nVidia Quadro FX1700)を搭載した計算機によって行う. 3.2節で述べたように, 本システムの仮想鏡像の提示遅延は最大 46.77[msec]である. ディスプレイは, シャープ社製品モニタ (PN-455R)を縦置き設置で用いる. このディスプレイの画面の大きさは 45 型 (985.9[mm] × 554.6 [mm])であり, 解像度は 1920 [画素]×1080 [画素]である. ハーフミラーの大きさは縦 1200[mm]×横: 900[mm]であり透過率は 50%である. 被験者の視点位置検出には, 再帰性反射材製の視点位置マーカを用いる. マーカの3次元位置は, 赤外線カメラ[24]を用いて毎秒 60 回計測可能である. 被験者は, ゲームパッド

を用いて仮想物体(矢印)の奥行きを変更する.

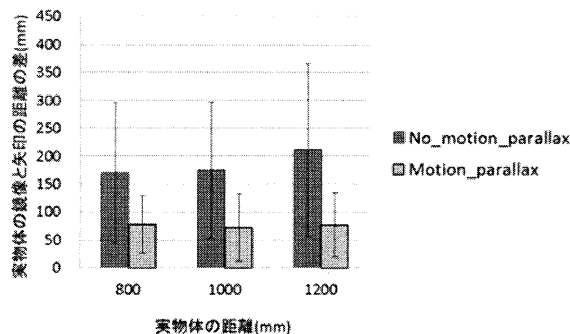


図 9 立方体と矢印の奥行き値の差(絶対値)の平均値
Fig. 9 Mean of absolute values (distance between the cube and the arrow)

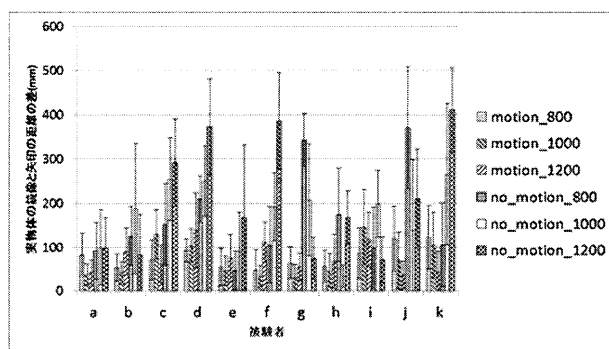


図 10 各被験者の score

Fig. 10 Mean of absolute values(each user's score)

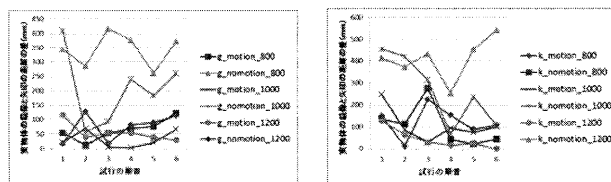


図 11 被験者 g と k の全試行の score

Fig. 11 All experimental score of g and k users

本実験は, 20代の学生13名(全て男性)を被験者として実施した. 両眼視差が前後関係の把握に与える影響をキャンセルするため, 映像は片目(利き目)で観察させ, もう一方の目には眼帯を装着させた. 実験前に観察対象の立方体と矢印と同じ大きさの石膏像を一度だけ被験者に観察させる.

5.2 実験手順

被験者は, 鏡に被験者の全身が映る距離 Z = 1400[mm]に立ち, 鏡を見ながら立方体の前面(鏡に映っている面)と仮想鏡像である矢印の先端の前後関係を一致させるよう指示した. 矢印の奥行きは, 調整法[25]を実現するためにゲームパッドにより被験者自身が調整可能である. 運動視差を再現する場合としない場

合において、同様のタスクを繰り返した。被験者は、左右に頭を振ることにより図 13 に示すような運動視差を観察することができる。運動視差を提示しない実験では、視点位置を固定した状態で観察するよう指示した。立方体は、 $Z = 800[\text{mm}]$, $1000[\text{mm}]$, $1200[\text{mm}]$ の3種類の奥行きに設置した。矢印の初期位置は、調整法に従い、鏡に十分に近づけた位置と鏡から十分遠ざけた位置の2パターンを用意した。メトロノームの周期は $Z = 800[\text{mm}]$ の時に、 $46[\text{拍/秒}]$, $Z = 1000[\text{mm}]$ の時に、 $50[\text{拍/秒}]$, $Z = 1400[\text{mm}]$ の時に、 $54[\text{拍/秒}]$ になるよう調整した。実験を実施する順番は、運動視差有・無を無作為に選択後、立方体の奥行き3パターンを無作為に選択し、計6回の試行が行われる。6回の内、矢印の初期位置が鏡に近づいた位置と、遠ざけた位置が同数となるように無作為に設定する。矢印の操作に関しては、実験前には練習をさせていない。

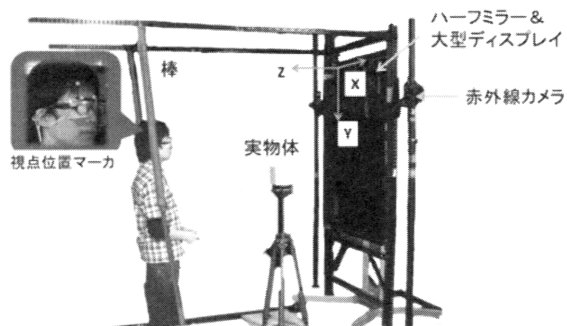


図 12 実験環境 (MR): 被験者はハーフミラーとディスプレイを見ながらゲームパッドで仮想鏡像の奥行きを動かし、実物体の鏡像と前後関係を合わせる。

Fig. 12 Experimental environment (MR)

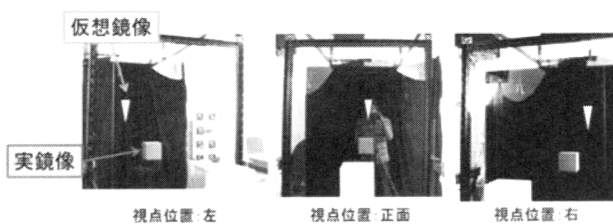


図 13 鏡の幾何を再現した MR 空間の運動視差: 被験者は頭部を移動させることにより、現実の鏡と同様の運動視差の観察が可能

Fig. 13 Motion parallax in merging MR mirror worlds

5.3 実験結果

本実験でも、(5)式を用いて実験結果の評価を行う。 D_{ARROW} は、世界座標系における仮想鏡像の矢印の奥行き値、 $D_{\text{REAL_OBJ}}$ は、世界座標系における立方体の奥行き値である。立方体と矢印の奥行き値の差が小さいほど、score が 0 に近づく。

実験結果を、表 4 と図 14 に示す。score の平均値と標準偏差から、運動視差有の方が前後関係の把握精度

が高いことがわかる。運動視差有と運動視差無の値に対して対応のある t 検定を行ったところ、鏡から実物体の距離が $800[\text{mm}]$ の実験では、 $P=0.002$ となり有意水準 1% の有意差が確認され、 $1200[\text{mm}]$ の実験では、 $P = 0.034$ となり有意水準 5% の有意差が確認された。 $1000[\text{mm}]$ の実験では、 $P = 0.105$ となり有意差が得られなかったが、この場合でも、score の平均値は、運動視差無よりも有の方が良い傾向が確認されている。被験者間で評価傾向のばらつきに関する検討とその原因や影響に関して考察を行ったところ、被験者 b,c,f,l,m においては、score の傾向が他の被験者と異なっていたため、個別に考察を加える。

被験者 b,c の score の傾向が他の被験者と大きく異なる原因は、実験による疲労だと考えられる。被験者 b によると立方体と矢印の前後関係の合わせ方については、他の被験者と同様であり、立方体と矢印の相対的な動き方、大きさを手がかりにしているが、「実験試行時間が長いため、疲労を感じた」というコメントが得られた。運動視差有の条件について、 $Z = 1000[\text{mm}]$ の試行の順番が最後であったため、評価結果への影響が大きく出たと考えられる。図 15, 図 16 より運動視差有の最後の試行である $Z=1000[\text{mm}]$ の場合の評価値をみると、標準偏差が大きいことから疲労蓄積が伺える。被験者 c においても、運動視差有の条件について、 $Z=1200[\text{mm}]$ の試行が最後に行われていたため、評価結果に影響が出たと考えられる。

被験者 f においては、図 15, 図 16 より、運動視差有の前後関係把握精度の方が、運動視差無よりも優れているが、鏡から実物体の距離が大きい方が良いという、score 傾向であった。この原因については、矢印の操作方法の慣れだと考えられる。運動視差有無のそれぞれの場合で、被験者 f の試行の順番と標準偏差を比べると、試行を繰り返すほど、標準偏差が小さくなっていった。

被験者 1 の評価実験においては、運動視差有の場合よりも、運動視差無の場合の方が高い評価値となるケースが存在した。被験者 1 の score の傾向が他の被験者と異なる原因は、実験途中で前後関係を把握する方法を変更したためだと考えられる。被験者 1 は「立方体と矢印の相対的な大きさを前後関係把握の手がかりにしていたが、大きさがわからなくなってしまったため、試行の途中から大きさを前後関係把握の手がかりとして使用しなくなった」とコメントをしていた。最初の試行が運動視差無条件の $1000[\text{mm}]$ であったため、その評価結果に影響が出たと考えられる。

被験者 m においては、 $Z=800[\text{mm}]$, $1000[\text{mm}]$ の時は、運動視差無の評価値のほうが高い score になった。実験のアンケートによると、仮想物体と実物体の相対的な動き幅に関する感覚が、その他の被験者と異なっている。さらに、図 15, 図 16 に示すように、運動視差の有無が

score の変動に影響していないことから、被験者 m は運動視差を用いて前後関係を把握する能力が他の被験者と異なっていることが考えられる。

上述した score の傾向が他の被験者と大きく異なる被験者を除去した場合の平均値を計算し直したところ、除去しなかった場合と同様、表 5 に示した平均値と標準偏差から、運動視差有の方が、前後関係の把握精度が高い結果となった。運動視差有と運動視差無の値に対して、対応のある t 検定を行った結果も、立方体の位置 800 [mm]で P=0.019, 1200 [mm]では、P = 0.024 となり有意水準 5% の有意差があることが確認され、1000 [mm]では、P =0.082 となり有意傾向が確認された。そのため、鏡像中の運動視差が、前後関係の把握精度に貢献していることが確認された。以上の結果から、運動視差の再現が前後関係の把握精度の向上に有効であるといえる。運動視差の再現が可能な我々の提案する MR 型鏡像提示は、従来のデジタル鏡像提示に比べ、前後関係の把握精度に関して優れた性能を有することが確認された。

表 4 実験結果の平均値と対応のある t 検定結果:括弧内は標準偏差値。対応のある t 検定の結果より、運動視差が有る方が前後関係の把握精度が良いことがわかる。

Table 4 Average and result of t-test in MR environment

鏡から実物体までの距離[mm]	運動視差有 [mm]	運動視差無[mm]	P 値
800	79.700 (51.418)	197.963 (144.827)	0.002
1000	122.264 (77.161)	198.625 (169.208)	0.105
1200	154.908 (108.700)	234.428 (171.136)	0.034

表 5 傾向の異なる被験者を除いた実験結果の平均値

Table 5 Average and result of t-test without b,c,f,l,m users

鏡から立方体までの距離 [mm]	運動視差有 [mm]	運動視差無 [mm]	P 値
800	70.877 (34.121)	208.997 (118.677)	0.019
1000	118.324 (57.956)	238.376 (159.176)	0.082
1200	143.174 (48.802)	267.134 (159.521)	0.024

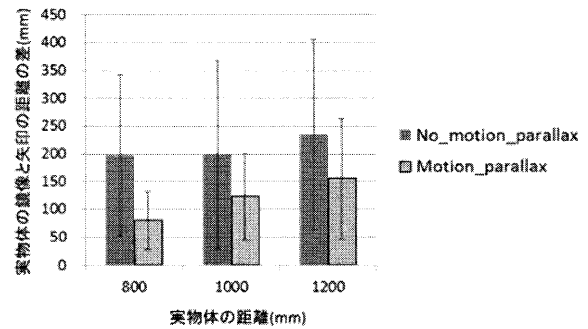


図 14 実鏡像(立方体)と仮想鏡像(矢印)の奥行き値の差(絶対値)の平均値

Fig. 14 Mean of absolute values (distance between the real mirror image and virtual mirror image)

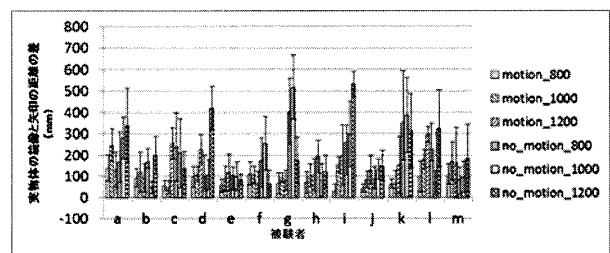


図 15 各被験者の score

Fig. 15 Mean of absolute values(each user's score)

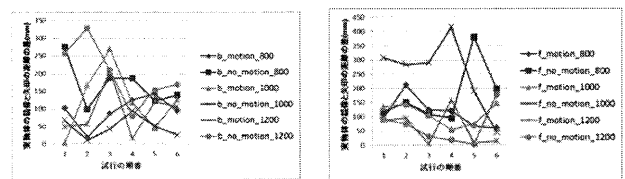


図 16 被験者 b と f の全試行の score

Fig. 16 All experimental score of b and f users

6 むすび

本論文では、鏡像を介することにより、仮想鏡像と実鏡像の幾何的、および時間的な整合性を実現可能な MR 型鏡像提示手法を紹介し、運動視差と前後関係の把握精度の関係の主観評価実験を実施した。評価実験の結果、実鏡像、MR 型鏡像の違いに関係なく、鏡像を介して物体を観察する場合でも、鏡像中の運動視差が、観察者の前後関係の把握精度の向上に貢献することが明らかになった。この結果より、従来のデジタル鏡像提示方式に対する提案方式の有効性が確認された。

実鏡像を活用する MR 型提示方式の特長を高めるためには、非装着型センサによる視点位置検出が好ましいが、今回の実験でユーザに視点位置マーカを装着させた理由は、被験者の視点位置観測ノイズを極力排除して、正確に再現された運動視差による前後関係の把握精度評価を実施するためである。アフオーダンス[26]

によると、鏡像中の仮想物体がより鏡らしく感じる方が、直感的なインタラクションが可能であるといわれているため、今後は、現実世界と仮想物体の光学的整合性についても検討する予定である。

参考文献

- [1] 苗村健：自己投影型エンタテインメント体験をもたらす映像メディア技術, 映像メディア学会誌, 第60巻(第4号), pp499-501, (2006)
- [2] ルネザゾ, 加藤義信訳: 鏡の心理学; ミネルヴァ書房 ISBN4-623-03062-8(1999)
- [3] K. Ushida, Y. Tanaka, T. Naemura, and H. Harashima : i-mirror: An Interaction/ Information Environment Based on a Mirror Metaphor Aiming to Install into Our Life Space. ; ICAT2002, (2002).
- [4] K. Fujinami, F. Kawsar and T. Nakajima: AwareMirror: A Personalized Display using a Mirror; in Proc. Pervasive 2005, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3468, 315-332, (2005)
- [5] Maes, P., Darrell, T., Blumberg, B. and Pentland. A: The ALIVE System: Wireless, Full-Body Interaction with Autonomous Agents.; Multimedia Systems Vol. 5(2), 105-112,(1997)
- [6] O. Morikawa and T. Maesako: HyperMirror: To-ward pleasant-to-use video mediated communication system.; CSCW'98, pp.149-158 (1998)
- [7] E.Hosoya, et al. : A Mirror Metaphor Interaction System: Touching Remote Real Objects in an Augmented Reality Environment.; ISMAR2003, pp.350-351, (2003)
- [8] I. Kuramoto, Y. Inagaki, Y. Shibuya, and Y. Tsujino: Augmented practice mirror: A self-learning support system of physical motion with real-time comparison to teacher's model.; HCI International 2009, pp.123-132,(2009)
- [9] 仲洋平, 加藤博一, 橘啓八郎: Augmented Mirror:鏡の中の拡張現実感; 映像情報メディア学会技術報告 vol.25 (38) ,47-50, (2001)
- [10] Fiala, M: Magic Mirror System with Hand-held and Wearable Augmentations; IEEE Virtual Reality Conference, pp. 251-254,(2007)
- [11] H. Sato, I. Kitahara, Y. Ohta : MR-Mirror:A Complex of Real and Virtual Mirrors.; HCI International 2009, pp. 482-492. (2009)
- [12] 佐藤秀昭, 北原格, 大田友一: MR-Mirror: 鏡像を用いた仮想世界と現実世界の融合提示; 電子情報通信学会 技術研究報告 PRMU, vol.110, no.381, pp.341-346.(2011)
- [13] H. Satoh,I. Kitahara,Y. Ohta: A Development Report of MR-Mirror with Binocular and Motion Parallax; The 4th Korea-Japan Workshop on Mixed Reality, (2011).
- [14] 伊藤祐一, 吉本賢一: 固定スクリーンによる運動視差の呈示; 日本機械学会誌論文誌 C編, Vol.63, No.613, (1997).
- [15] 磯野春雄, 安田稔, 竹森大祐, 金山秀行, 山田千彦, 千葉和夫: 8眼式メガネなし3次元テレビジョン; テレビジョン学会誌 ,vol. 48(10), 1267-1275,(1994)
- [16] V. Nozick and H. Saito. : On-line free-viewpoint video From single to multiple view rendering; Journal of Automation and Computing (IJAC), vol.5(3),pp257-267, (2008)
- [17] T. Adachi, T. Ogawa, K. Kiyokawa, and H. Takemura : A telepresence system by using live video projection of a wearable camera onto a 3d scene model ,HCI International 2005, (2005)
- [18] 重田 勝介,中澤 明子, 松河 秀哉, 奥林 泰一郎, 三原 勉, 船田 武志, 大澤 政寛, 前迫 孝憲, 森川 治: 「超鏡」における映像遅延の影響; ヒューマンインタフェース学会論文誌 vol.8(4), 509-514, (2006)
- [19] J. Cutting and P. Vishton : Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth; in W. Epstein & S. Rogers (eds), Perception of Space and Motion, Academic Press, pp. 69-117 (1995).
- [20] 長田昌次郎: 視覚の奥行距離情報とその奥行き感度; テレビジョン学会誌, vol.31, 649-655(1977).
- [21] 末永剛, 松本吉央, 小笠原司: 非拘束な運動視差3次元ディスプレイの提案と評価; ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.9, No.1, pp.49-56,(2007) .
- [22] Jones, J., et al. :The Effects of Virtual Reality, Augmented Reality, and Motion Parallax on Egocentric Depth Perception; APGV08. pp.9-14. (2008)
- [23] L. Aleksandar and K.Hiroyuki : Robot Manipulators New Achievements; pp663-670, InTech ,(2010)
- [24] Advanced Realtime Tracking GmbH. : <http://www.ar-tracking.de/>
- [25] 佐藤信: 官能検査入門; 日科技連出版社, ISBN-10: 4817190019 , (1978)
- [26] 佐々木正人: アフォーダンス-新しい認知の理論; 岩波化学ライブラリー12, 岩波書店, ISBN-10: 4000065122, (1994)

(2013年4月1日受付)

[著者紹介]

佐藤 秀昭(学生会員)



2010年筑波大学大学院システム情報工学研究科修了。2013年 NEC (株) 入社。複合現実感における鏡の特性, 3次元ディスプレイに関する研究に従事。修士(工学)

北原 格(正会員)



1996年筑波大学大学院理工学研究科了。同年シャープ(株)入社。2000年筑波大学先端学際領域研究センター助手。2003年 ATR 研究員。2005年筑波大学大学院システム情報工学研究科講師。2008年同准教授。コンピュータビジョン, 複合現実感の研究に従事。2003年 IEEE VR2003 Honorable Mention Award。2009年度日本バーチャルリアリティ学会論文賞など受賞。博士(工学)。

大田 友一(正会員)



1977年京都大学大学院博士課程了。京都大学情報工学科助手, 筑波大学電子・情報工学系講師, 同助教授を経て, 1992年同教授。2004年同大学院システム情報工学研究科教授。視覚情報メディア, 複合現実感の研究に従事。パターン認識国際連盟フェロー, 電子情報通信学会フェロー, 情報処理学会フェロー。工学博士。