

鏡像を用いた仮想世界と現実世界の重畳提示

佐藤 秀昭

システム情報工学研究科
筑波大学

2013年 11月

概要

我々は、鏡を使い慣れており、学習した鏡の知識を用いて鏡像世界に対して自然にインタラクションをすることができる。このような鏡の特長から、鏡像世界は、自己の身体動作や様子を直感的に提示することに適しているため、複合現実(Mixed Reality:MR)提示への利用が期待されている。鏡を模した MR 空間の提示が可能となれば、我々の鏡に関する知識が無意識に働き、鏡を観察する際と同様に、MR 空間との自然なインタラクションが可能になる。しかし、従来の鏡を模した MR 提示システムでは、環境に固定した 1 台のビデオカメラにより撮影した実世界の映像に仮想物体像を重畳し、それを左右反転表示したものをデジタル鏡像としてディスプレイに 2 次元的に提示することが一般的である。そのため、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り、ユーザ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。鏡の幾何的な不整合は、ユーザがシステムを利用する際の違和感の原因となる。また、デジタル鏡像中で、手足や手に持った道具などによって、ユーザが観察不可能な隠れ領域が発生する。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時間処理により実現することができれば、隠れ領域の観察と実鏡像と仮想鏡像の鏡に向かって前後方向での位置関係の把握精度の向上が見込まれるため、鏡像間の 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。

本論文では、“MR 空間で鏡の幾何的整合性”、“実時間での鏡像の運動視差”を同時に実現することを目的とし、鏡の幾何的整合性を満たす仮想鏡像とハーフミラーにより得られる実鏡像を重畳する手法を提案した。提案手法を実現するため、MR-Mirror を実装し、MR 空間において鏡の幾何的整合性を満たすことを実験により検証する。時間的整合性については、仮想鏡像を生成する処理時間と提示遅延を明らかにし、実時間による MR 提示が可能であることを検証する。また、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把握精度の向上に貢献するか否かについての検討を行う。

さらに、ユーザが MR-Mirror を用いて MR 空間を把握する際に、検討が必要である三つの要素について検討する。第一に鏡像の運動視差が前後関係把握精度に与える影響、第二に仮想鏡像の提示遅延が運動視差による前後関係把握精度に与える影響、第三に仮想鏡像の運動視差の不連続性が前後関係把握精度に与える影響について検討し、MR-Mirror の有効性を示す。

目次

第1章	序論	4
第2章	関連研究	8
2.1	鏡を模した映像提示システム	8
2.2	鏡像における運動視差の提示手法	9
2.3	鏡像提示における実時間性の検討	10
2.4	鏡像世界における運動視差提示による前後関係の把握実験	11
第3章	鏡像を用いた仮想世界と現実世界の重畳提示手法	13
3.1	仮想鏡像提示における幾何的整合性の再現	16
3.1.1	仮想鏡像のモデリング	16
3.1.2	仮想鏡像のレンダリング	18
3.2	仮想鏡像における幾何的整合性再現に関する検証実験	20
3.2.1	仮想鏡像における幾何的整合性再現に関する実験環境	20
3.2.2	仮想鏡像における幾何的整合性再現に関する実験方法	21
3.2.3	仮想鏡像における幾何的整合性再現に関する実験結果	21
3.3	鏡像の幾何的整合性が身体動作の理解に与える影響に関する検討	22
3.4	実鏡像と仮想鏡像の時間的整合性	23
第4章	MR-Mirrorが前後関係の把握精度に与える影響要素とその評価	25
4.1	実鏡における鏡像の運動視差を用いた前後関係の把握精度	27
4.1.1	実鏡における鏡像の運動視差を用いた前後関係把握精度実験の環境	27
4.1.2	実鏡における鏡像の運動視差を用いた前後関係把握精度実験の手順	29
4.1.3	実鏡における鏡像の運動視差を用いた前後関係把握精度実験の結果	30
4.2	MR空間における鏡像の運動視差を用いた前後関係の把握精度	35
4.2.1	MR空間における鏡像の運動視差を用いた前後関係の把握精度実験の環境	35
4.2.1	MR空間における鏡像の運動視差を用いた前後関係の把握精度実験の手順	37
4.2.2	MR空間における鏡像の運動視差を用いた前後関係の把握精度実験の結果	38
4.3	仮想鏡像の提示遅延が前後関係の把握精度に与える影響	44
4.3.1	仮想鏡像の提示遅延が前後関係の把握精度に与える影響に関する実験環境	44
4.3.2	仮想鏡像の提示遅延	46
4.3.3	仮想鏡像の提示遅延が前後関係の把握精度に与える影響に関する実験方法	47
4.3.4	仮想鏡像の提示遅延が前後関係の把握精度に与える影響に関する実験結果	47
4.4	視点移動に応じた仮想鏡像の不連続性に関する考察	49
第5章	結論	51
5.1	まとめ	51
5.2	今後の課題と展望	52
謝辞		54
参考文献		55
公表論文リスト		60

図目次

図 1.1	実鏡像と仮想鏡像の融合提示	7
図 3.1	MR-Mirror	14
図 3.2	MR-Mirror の処理概要	15
図 3.3	仮想鏡像のモデリング	17
図 3.4	仮想鏡像のレンダリング	19
図 3.5	仮想鏡像における幾何的整合性再現に関する実験装置	20
図 3.6	デジタルカメラの位置による仮想鏡像と実鏡像の見え方変化	21
図 3.7	MR-Mirror の処理概要と仮想鏡像の提示遅延	24
図 3.8	MR-Mirror の処理のタイミングチャート	24
図 4.1	実鏡における鏡像の運動視差提示装置	28
図 4.2	鏡像中で発生する運動視差	29
図 4.3	立方体と矢印の奥行き値の差(絶対値)の平均値	32
図 4.4	各被験者の score	33
図 4.5	被験者 g の全試行のスコア	33
図 4.6	被験者 k の全試行のスコア	34
図 4.7	MR 空間における鏡像の運動視差提示装置	36
図 4.8	鏡の幾何を再現した MR 空間の運動視差提示	37
図 4.9	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	42
図 4.10	各被験者の score	42
図 4.11	被験者 b の全試行のスコア	43
図 4.12	被験者 f の全試行のスコア	43
図 4.13	仮想鏡像の提示遅延を与えた仮想鏡像提示装置	45
図 4.14	仮想鏡像の提示遅延	46
図 4.15	視点移動速度と運動視差提示の関係	50

第1章 序論

鏡は、我々が自己の様子を確認する最も一般的な道具である。例えば、我々は、スポーツトレーニング、リハビリテーションにおけるフォーム確認や、服装や化粧の見栄えの確認など様々な用途で鏡を利用している。

我々は、鏡が、目前の光景を映すものであることを知っている。また、鏡を用いて自身の姿を映すことができることも知っている。この鏡に対する我々の知識は、我々が鏡を利用する体験により得られる[1]。“自分が鏡の前に立てば、そこに映るのは自分の姿である”という認識が無意識に働き、我々は、学習した鏡の知識を用いて鏡像世界に対して自然にインタラクションをすることが可能となる。鏡を通して、自己の動作・様子を直感的に理解することも可能となる[2]。さらに、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もある[1]。森川ら[3]は、自己の姿を日常生活で見る機会は、鏡以外では一般的に存在しないため、自己像の動きの制御は、ビデオカメラの映像を左右反転表示したデジタル鏡像表示の方が、ディスプレイ上にそのまま映像を表示するよりも容易であることを主張している。さらに、自己像を左右反転しない映像（正像）とデジタル鏡像の2種類を見せた場合、違和感などの心理的な主観評価が、デジタル鏡像表示の方が好ましいことを示した。

このような鏡の特長から、鏡像世界は、自己の身体動作や様子を直感的に提示することに適しているため、複合現実(Mixed Reality:MR) [4][5]空間提示への利用が期待されている。MRとは、コンピュータグラフィックス(Computer Graphics:CG)で生成した仮想世界の見え方を、現実世界の見え方に重畳・提示する技術である。近年、医療、福祉、作業支援、スポーツやエンターテイメントなど様々な分野において、MRの応用が期待されている。鏡を模したMR空間の提示が可能となれば、我々が身に着けた鏡に関する知識が無意識に働き、鏡を観察する際と同様に、MR空間との自然なインタラクションが可能になる。

鏡を模したシステムの応用例は数多く存在する。例えば、森川らの提案した“超鏡”が代表的な例としてあげられる。森川らは、ビデオ通話において、本物の鏡と同様に画面の中の自己像が動く環境を構築し、自己と対話者との一体感が向上することを示した[12]。また、ビデオカメラで撮影したユーザの映像にCGで生成した衣服を重ね合わせる仮想試着システム[6][7][8]や、CGで生成した教示動作を重畳することによりスポーツのフォームの効率的な確認を実現するシステム[9]、身体動作を用いてMR空間に配置した物体とのインタラクションを実現するシステムなどが提案されている[11][13][14]。さらにMR技術の普及に伴い、鏡を模したシステムの商業応用も進んでいる。例えば、大日本印刷は、ユーザに衣装を試着させることなく、豊富なカラーバリエーションを持つ衣類をディスプレイ上に重畳提示するバーチャル試着システムを開発し、ユニクロなどの衣料量販店に提供している[15]。Zoffは、ビデオカメラにより撮影したユーザの顔に、CGの眼鏡を重畳提示することにより仮想的に眼鏡の試着を可能とするZoff Mirror [16]を提供している。ビデオカメラを用いて撮影したユーザの顔に、CGにより化粧を重畳提示することにより、実際に化粧をすることなく、仮想的に化粧を体験できるDigital Makeover Mirror [17]などもある。これらの応用例の多さから鑑みても、MR空間において鏡を模したシステムに対する期待が高いことがわかる。

しかし、前述したシステムの多くでは、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し、それを左右反転表示したものをデジタル鏡像としてディスプレイに2次的に提示することが一般的である。そのため、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 Mirror [6]、Augmented practice mirror [9]で報告されている。仲らは、デジタル鏡像中で、仮想物体を操作可能なシステムである Augmented Mirror を実現したが、ユーザが観察する視点と実世界を撮影するカメラの位置が一致していないこと（MR空間の鏡像の幾何的な不整合）が、ユーザがシステムを使用する時に生じる違和感の原因であると考察している。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。アフォーダンス[18]によると、ユーザが鏡らしいと感じれば感じるほど、直感的なMR空間の把握が可能になると考えられるため、MR空間において実鏡像と同様の光学現象を再現することができれば理想的な提示状況であるといえる。鏡像と同様の光学現象を再現するためには、現実の鏡と同様な物理現象をMR空間で再現する必要があり、ユーザの視点位置に応じた運動視差、両眼視差、焦点調節、輻輳、高解像度な映像提示などの要素をすべて実時間処理で再現しなければならない。しかしながら、これら全てを、MR空間において再現することは、現在利用可能な電子情報技術では実現が困難である。そのため、鏡の物理現象の一部を捨象し、鏡を模したMR空間を生成・提示するシステムが利用されている[3][6][7][8][9][10][12][14][15][16][17][19][20]。

我々が、実世界で鏡を用いる用途を考えると、自由な視点から自己の姿を含む鏡像を観察可能なこと（鏡像の幾何的整合性を満たすこと）と、鏡像間の3次元的な位置関係を把握することが重要だと考えられる。例えば、鏡を用いて、剣道やテニスなどのスポーツのフォーム確認をする際には、自己の鏡像と手に持った竹刀やラケットとの位置関係を理解する必要がある。さらに、手足や手に持った道具などによって隠れ領域が発生した際に、視点を自由に動かしながら自己を観察する。そのため、本研究ではMR空間において鏡を再現するための要素のうち、MR空間において鏡の幾何的整合性を満たすことと、ユーザの視点位置に応じて鏡の見え方を再現すること、すなわち運動視差に着目する。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、隠れ領域の観察と鏡像間の前後関係の把握精度の向上が見込まれるため、デジタル鏡像中の実世界と仮想世界の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。

我々が、3次元世界を観察する場合、運動視差だけでなく、両眼視差や焦点調節など複数の奥行き手がかりを用いている。James [21]らによると、観察者から観察対象物体までの距離が近い場合、両眼視差は、運動視差と同様に3次元的な位置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、鏡像の運動視差と両眼視差を同時に再現する場合、以下の二つの問題が存在する。第一に、ユーザの頭の動きが制限されることと、第二に滑らかな運動視差の再現が困難になることである。比較的簡易に両眼視差を提示する方法としては、赤と青の色フィルタを利用したアナグリフ方式、液晶シャッターや偏光フィルタを用いて左右の目に提示する映像を切り替える方式が存在するが、眼鏡を装着する必要があるため、ユー

ザの頭の動きが制限されてしまう。レンチキュラーレンズや偏光フィルム、微小なスリットなどを利用した視差バリア方式[22]やインテグラルイメージング方式[23]など裸眼立体視ディスプレイを利用した眼鏡を装着しない両眼視差提示方式の研究も進んでいる。しかし、視差バリア方式には見る位置が固定されるといった問題が存在する。Perlin[24]らは、可動視差バリアを、計測されたユーザの頭部位置に応じて制御することで、この問題を解決している。しかし、ユーザの視点位置を検出し、視差バリアを高精度かつ実時間で動かすための装置を構築するためには、解決すべき問題が依然多く存在する。インテグラルイメージング方式では、比較的自由に頭を動かすことが可能であるが、両眼視差を有する映像を観察可能な視差数は、ディスプレイの解像度に依存するため、現在一般的に用いられているディスプレイでは、滑らかな運動視差を再現することが困難である。

運動視差を知覚する際、ユーザは、移動範囲に対する制限がなく、滑らかに視点を移動させることが知られているが、これまでMR空間において鏡の幾何的整合性を再現し、運動視差を提示するシステムが存在していないため、鏡像世界という前後反転する空間（鏡像反転と呼ぶ）において、鏡像の運動視差が鏡像の前後関係の把握精度に与える影響に関する十分な検討がなされていない。鏡像間の前後方向の位置関係を理解できれば、身体動作を用いて鏡像とインタラクションすることや、CGにより生成したスポーツのフォームの教示動作と自己との差分を理解することに貢献することが考えられる。

以上の検討から、主に運動視差を手がかりとして鏡像間の3次元的な位置関係を把握するMR提示方式の実現のために、ユーザの視点移動に応じて鏡像世界において幾何的整合性を再現するシステムを提案し、その知覚評価実験を実施することが本研究の目的である。提案する提示手法は、図1.1に示すように、鏡の幾何的整合性を満たした仮想世界（仮想鏡像）と実世界（実鏡像）を重畳提示することにより実現する。実鏡像は、物理現象である鏡の反射を用いて取得することにより幾何的整合性を満たす。仮想鏡像は、ユーザの視点位置に応じて、CGにより仮想世界を生成・提示する。また、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鏡像間の前後方向の位置関係の把握精度の向上に貢献するか否かについての検討を行う。

本論文では、2章で従来の鏡を模したシステムと、運動視差に関する従来研究について述べ、本研究の位置づけについて述べる。3章では、我々が提案する現実世界の鏡像に仮想世界の鏡像を重畳する手法について述べ、実装した提案方式が、MR空間において鏡の幾何的整合性を満たし運動視差を再現可能かどうか検証する。また、実装した提案方式が時間的整合性を満たすかについても検討する。4章では、提案方式を用いてMR空間を把握するための要素とその要素について評価する。“鏡像の運動視差が前後関係の把握精度に与える影響”と“仮想鏡像の提示遅延が運動視差による前後関係の把握精度に与える影響”を検討する実験について述べる。さらに、“視点移動に応じた仮想鏡像の不連続性”に関する考察を行う。最後に5章で本研究の結論について述べる。

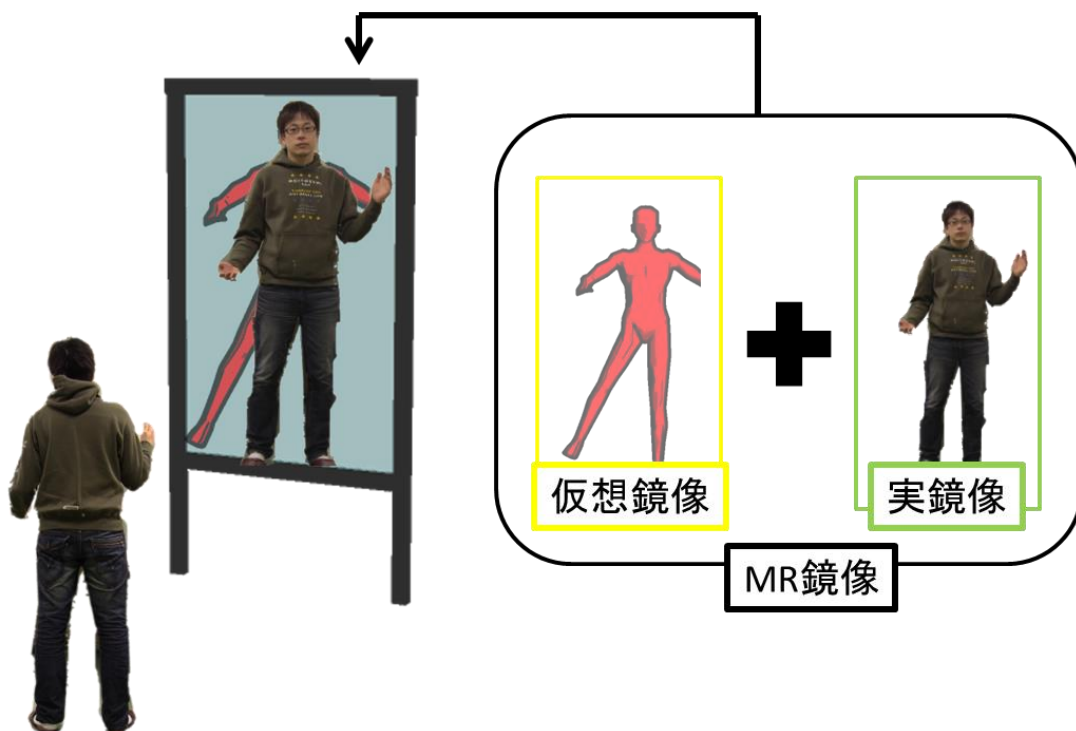


図 1.1 実鏡像と仮想鏡像の融合提示

実鏡像は、物理現象である鏡の反射を用いていることにより幾何的整合性を満たす。仮想鏡像は、ユーザの視点位置に応じて、CGにより仮想世界を生成・提示する。

第2章 関連研究

本章では、本研究の目的を実現するための課題を、関連研究について述べることにより明らかにする。まず、従来の鏡を模したシステムについて紹介し、改善すべき課題について述べる。次に、運動視差を再現する従来手法について述べ、鏡像の運動視差をMR空間で再現する課題について述べる。最後に、運動視差による前後関係の把握精度実験に関する従来研究について述べ、鏡像中での運動視差と前後関係の把握精度の実験の必要性を述べる。

2.1 鏡を模した映像提示システム

鏡を模したシステムとしては、ALIVE [11], HyperMirror [12], ミラーインタフェース[13]などがあり、盛んに研究が行われている。これらのシステムを用いて、ユーザは身体動作を用いてMR空間の直感的な操作が可能のため、MR空間における鏡の模倣の有効性が示されている。しかし、従来システムの多くは、環境中に設置したビデオカメラの2次元映像を左右反転して、デジタル鏡像としてディスプレイに提示する。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、ユーザの視点に応じた鏡像の見え方が再現されるのは、特定の視点から観察している場合に限られる。視点が移動した際に、実世界を撮影するビデオカメラを動かすことは難しく、デジタル鏡像中の幾何的整合性が保たれない。仲らは、デジタル鏡像中で、仮想物体の操作可能なシステムである **Augmented Mirror** を実現したが、ユーザが観察する視点と実世界を撮影するビデオカメラの位置が一致していないこと（MR空間の鏡像の幾何的な不整合）が、ユーザがシステムを使用する時に生じる違和感の原因であると考察している[6]。電脳化粧鏡[25]では、化粧のアイラインを引く場合、ディスプレイに提示されるユーザの目線が、実際のユーザの目線の高さ異なるため、化粧が難しくなるという問題がある。また、**Augmented practice mirror** [9]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（運動視差）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。

デジタル鏡像中の幾何的整合性を満たしたシステムとしては、**i-mirror** [10]などがある。このシステムでは、ハーフミラー面に関して、ユーザの視点位置と面対称な位置に、ビデオカメラを設置する。これにより、MR空間において、デジタル鏡像中の幾何的整合性を満たしている。しかし、デジタル鏡像を観察する範囲を固定しているため、ユーザの視点に応じた運動視差の実時間提示はそもそも考えられていない。

“鏡の幾何的整合性を満たしたMR空間の生成”と“MR空間における鏡像の運動視差の実時間提示”を共に満たすことが、従来の鏡を模したシステムを改善する大きな課題である。

2.2 鏡像における運動視差の提示手法

鏡の幾何的整合性を満たす実世界（実鏡像）における運動視差の再現について検討する。実鏡像に仮想鏡像を重ね合わせて運動視差を再現する提示方式は、Head Mounted Display (HMD)でいうところの光学シースルー方式と同様の特徴を有する。つまり、現実世界の見え方は実鏡像によって提示されるため、計算処理は特に必要がない。一方、従来のデジタル鏡像方式では、環境に固定されているビデオカメラを用いて取り込んだ現実世界の見え方を、鏡像になるように変換・加工し、それに仮想鏡像を重畳しているため、ビデオシースルー方式であるといえる。デジタル鏡像提示方式で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ビデオカメラの位置を動かすことである[26][27][28]。伊藤ら[26]は、ユーザの視点位置に応じて、ビデオカメラを操作し、その映像を提示することにより、運動視差を再現し、運動視差が奥行きを把握するために役立つことを実験により示した。しかし、スポーツなどのユーザの動作確認を考えた場合、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操作することは容易ではない。さらに、ユーザの自由な視点移動に応じて、ビデオカメラを動かすためには、大掛かりな装置を用意しなければならない。視点移動に応じた鏡の幾何的整合性を再現することは困難であると考えられる。

二つ目は、複数のビデオカメラをアレイ状に配置し、ユーザの視点に応じて、ビデオカメラを切り替えるという方法である[29][30]。あらかじめ設置されたビデオカメラを用いるため、ビデオカメラを高精度かつ実時間で動かす必要なく運動視差提示が可能である。しかし、ユーザの視点移動に応じた運動視差を再現するためには、ユーザが視点を動かすと思われる全ての位置にビデオカメラを配置する必要がある。また、鏡像を観察可能な視点数は、ビデオカメラの設置台数に依存する。カメラを十分数用意できない場合、運動視差の提示が離散的になってしまい、滑らかな運動視差提示が困難である。

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[31][32][33][34]。実環境の3次元モデルを生成することにより、ユーザの視点位置に応じた滑らかな運動視差提示が可能である。また、生成した3次元モデルとユーザの視点位置情報をもとに、鏡の幾何的整合性を満たした映像提示が可能である。しかし、3次元モデルを生成するためには、環境中に多数のセンサを設置する必要があり、大掛かりな装置を用意しなければならない。さらに、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。

鏡の幾何的整合性を満たす仮想世界（仮想鏡像）における運動視差の再現について検討する。実鏡像の場合と異なり、仮想鏡像は、あらかじめ計算機により生成したCGを用いることができる。そのため、仮想鏡像提示に関しては、仮想環境を撮影する仮想カメラの設置位置を、ユーザの視点位置に応じて任意に設定できる。光学シースルー方式、ビデオシースルー方式共に、ユーザの視点移動に応じた仮想鏡像の提示が可能のため、両方式とも、運動視差を含む鏡の幾何的整合性を満たした仮想鏡像提示が可能である。

MR空間で、鏡の幾何的整合性を満たすためには、実鏡像と仮想鏡像の幾何的整合性の両方を満たすことが重要な課題である。

2.3 鏡像提示における実時間性の検討

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。竹下ら[35]は、TELESAR3 でのバーチャルリアリティ（Virtual Reality: VR）環境において、ユーザの運動感覚と提示される視覚情報のずれによって誘発される身体動揺の評価と映像の遅延を認識できるかについての主観評価により、映像の提示遅延の許容範囲を求めた。具体的には、0, 25, 50, 100, 200 [msec]の5種類をシステムに提示遅延として与え、VR 環境に設置してある箱を、それを隠すように設置された壁の左右から交互に覗き込むように見るタスクを30秒間行った。メトロノームの音に合わせて、頭部運動を規則的にした場合は、ユーザが提示遅延を許容可能な閾値と身体動揺が誘発されない遅延の許容範囲として74 [msec]以下であることを示している。

また、重田ら[36]は自己像を観察しながら活動する場合、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たため、「超鏡」を用いる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。システムの応用事例として、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。

2.4 鏡像世界における

運動視差提示による前後関係の把握実験

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[26][37][38][39][40]、鏡像世界（鏡像反転が発生した状態）において、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、仮想鏡像と実鏡像の前後方向の位置を把握すること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。

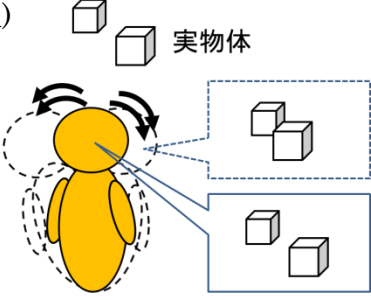
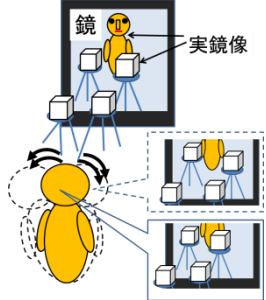
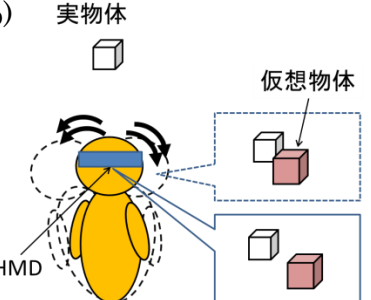
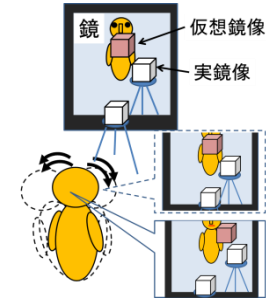
表 2.1 に、運動視差による前後関係の把握精度の影響に関する研究事例をまとめる。被験者が鏡像を介さずに現実空間を直接観察する“表 2.1 中 (a)”に属する研究として、長田らの研究があげられる[38]。長田らは、被験者に頭を動かしながら、スリット越しに石膏像を観察させ、被験者の頭の色が、運動視差による奥行感度の向上に貢献していることを示している。

被験者が鏡像を介さずに直接 MR 空間を観察する“表 2.1 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[39][40]。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、運動視差による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。その一方、“表 2.1(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。そのため、この 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することも、本研究の重要な課題の一つである。

表 2.1 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．下記の(a)-(d)図は，それぞれ，観察者の視点移動に応じた物体の見え方の変化（運動視差）を示す．(c)(d)については，十分議論されていない．(a)鏡像を介さず運動視差により実物体の前後方向の位置関係把握に関する実験，(b)鏡像を介さず運動視差により実物体と仮想物体の前後方向の位置関係把握に関する実験，(c)鏡像中の運動視差による実鏡像の前後方向の位置関係把握に関する実験，(d)鏡像中の運動視差による実鏡像と仮想鏡像の前後方向の位置関係把握に関する実験

観察対象 運動視差 の提示空間	鏡像ではない	鏡像である
現実空間	(a) 実物体 	(c) 
複合現実空間	(b) 実物体 仮想物体 HMD 	(d) 

第3章 鏡像を用いた仮想世界と 現実世界の重畳提示手法

本章では、MR空間において“鏡の幾何的整合性”，“鏡像の運動視差の実時間提示”を満たすMR提示手法として、仮想鏡像と実鏡像を重畳提示する手法を提案する。2.1節と2.2節で述べたように、HMDでいうビデオシースルー方式を用いて、MR空間で、“鏡の幾何的整合性”，“鏡像の運動視差の実時間提示”を共に満たすことは困難である。そこで、我々は、光学シースルー方式を用いて問題の解決を図る。計算機により生成する鏡の幾何的整合性を満たした仮想鏡像と実物の鏡により得られる実鏡像を重畳提示する。

提案手法を実現するため、図3.1のように、大型ディスプレイとハーフミラーを組み合わせた“MR-Mirror”を実装する。実鏡像提示にはハーフミラーを用いる。その背後に大型ディスプレイを設置し、実鏡像と仮想鏡像の融合提示を実現する。ハーフミラー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が不要となり、かつ高品質な鏡像提示が可能である。ビデオシースルー方式とは異なり、仮想鏡像を生成するのみで良いため、計算機の処理コストの削減が見込まれ、実時間でのMR提示が容易になる。さらに、ハーフミラーの背後にディスプレイを設置するだけという簡潔な装置であり、かつ仮想鏡像を表示しない場合は、実鏡として用いることができるため、日常空間の景観を損ねることがない。

MR-Mirrorを実現するための処理を図3.2に示す。ユーザは、まずMR-Mirror前方に立ち、自然現象である鏡面反射を用いて実鏡像を観察する。次に、赤外線カメラなどのセンサを用いて、ユーザの視点位置を推定し、ユーザの視点位置と同じ位置に仮想カメラを設置する。仮想カメラとは、仮想世界を撮影するカメラである。仮想世界を、ユーザの視点位置に応じた仮想カメラ位置より撮影することで、仮想鏡像を生成する。最後に、生成した仮想鏡像と実鏡像を融合提示することにより、MR-Mirrorを実現する。

MR-Mirrorを実現するためには、ユーザの視点位置に応じた仮想鏡像を生成し、鏡の幾何的整合性を満たしているかを検証する必要がある。また、光学シースルー方式では、仮想鏡像と実鏡像の間に提示遅延が生じることは避けられず、その影響を検討する必要がある。さらに、MR-Mirrorが、鏡像の運動視差を実時間により提示可能かについても検討する必要がある。

本章では、3.1節で、鏡の幾何的整合性を満たす仮想鏡像の生成方法について説明し、3.2節で、実装したMR-mirrorを用いて鏡の幾何的整合性を満たす実鏡像と仮想鏡像の融合提示が可能かについての実験について述べる。3.3節で、鏡像の幾何的整合性が身体動作の理解に与える影響について考察を行う。3.4節で、実鏡像と仮想鏡像の時間的整合性について述べる

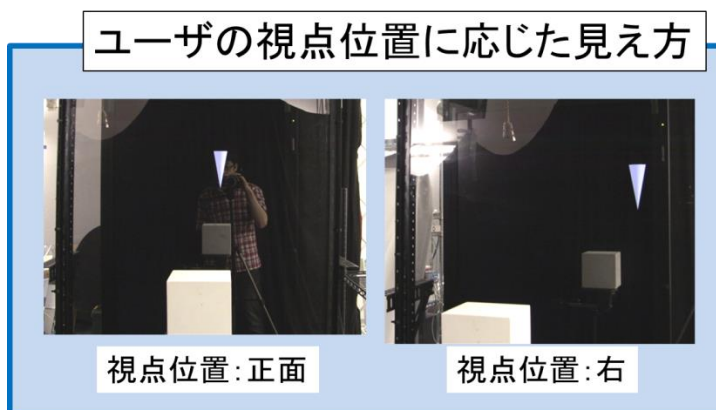
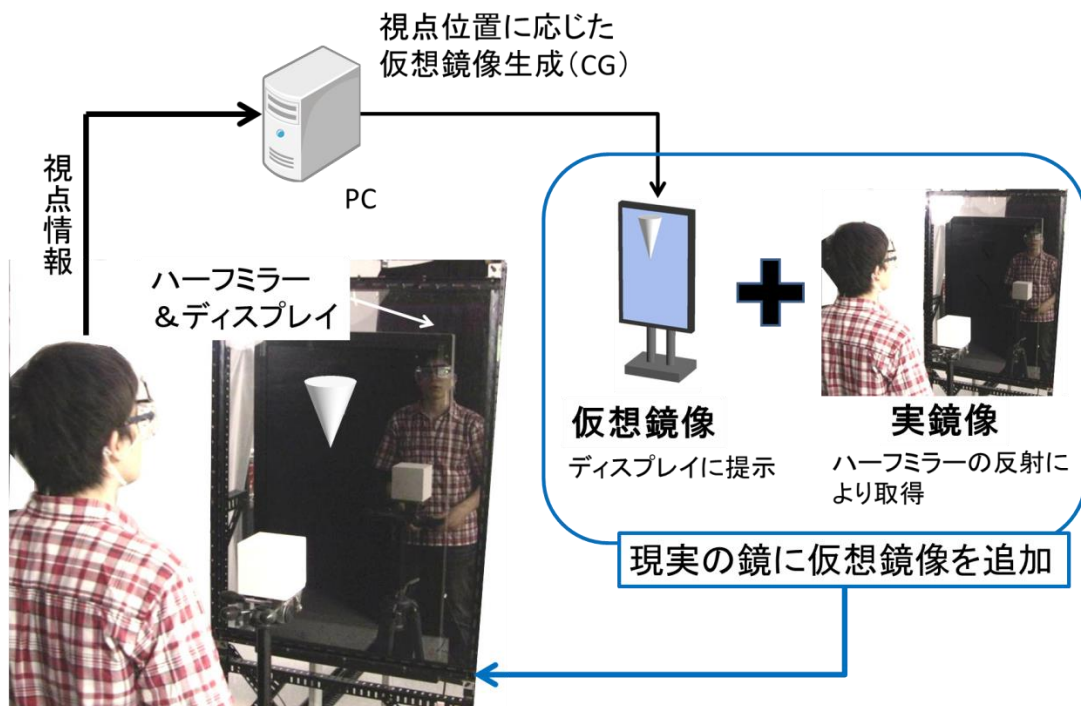


図 3.1 MR-Mirror

ハーフミラーの反射により得られる実鏡像と大型ディスプレイに提示する
仮想鏡像を融合提示

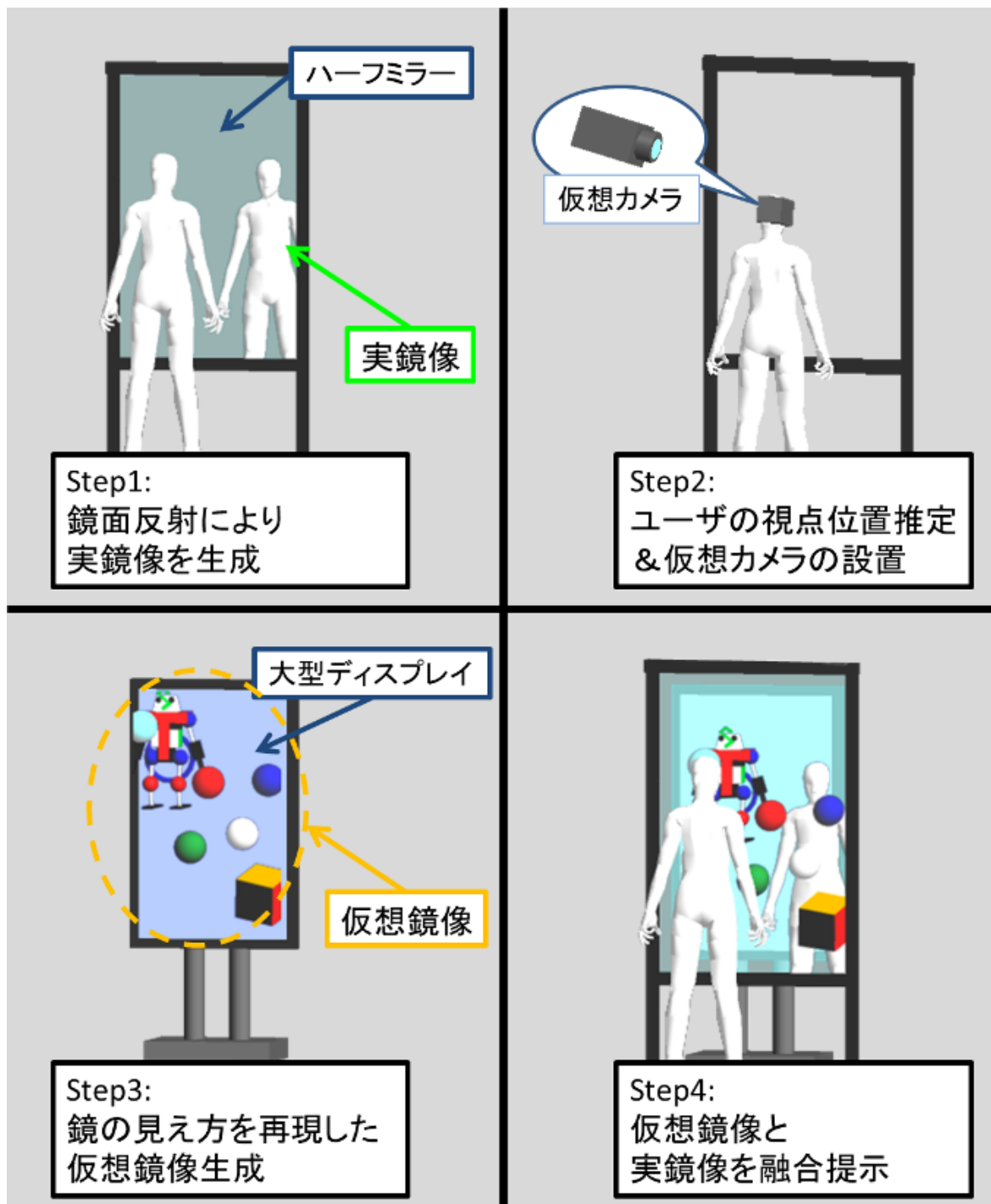


図 3.2 MR-Mirror の処理概要

3.1 仮想鏡像提示における幾何的整合性の再現

本節では、仮想鏡像を生成するために、ユーザの視点位置に応じた仮想鏡像のモデリング、レンダリング方法について説明する。

3.1.1 仮想鏡像のモデリング

図 3.3 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 (X, Y, Z) 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 3.3 中の実線矢印のようになる。ハーフミラー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。

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

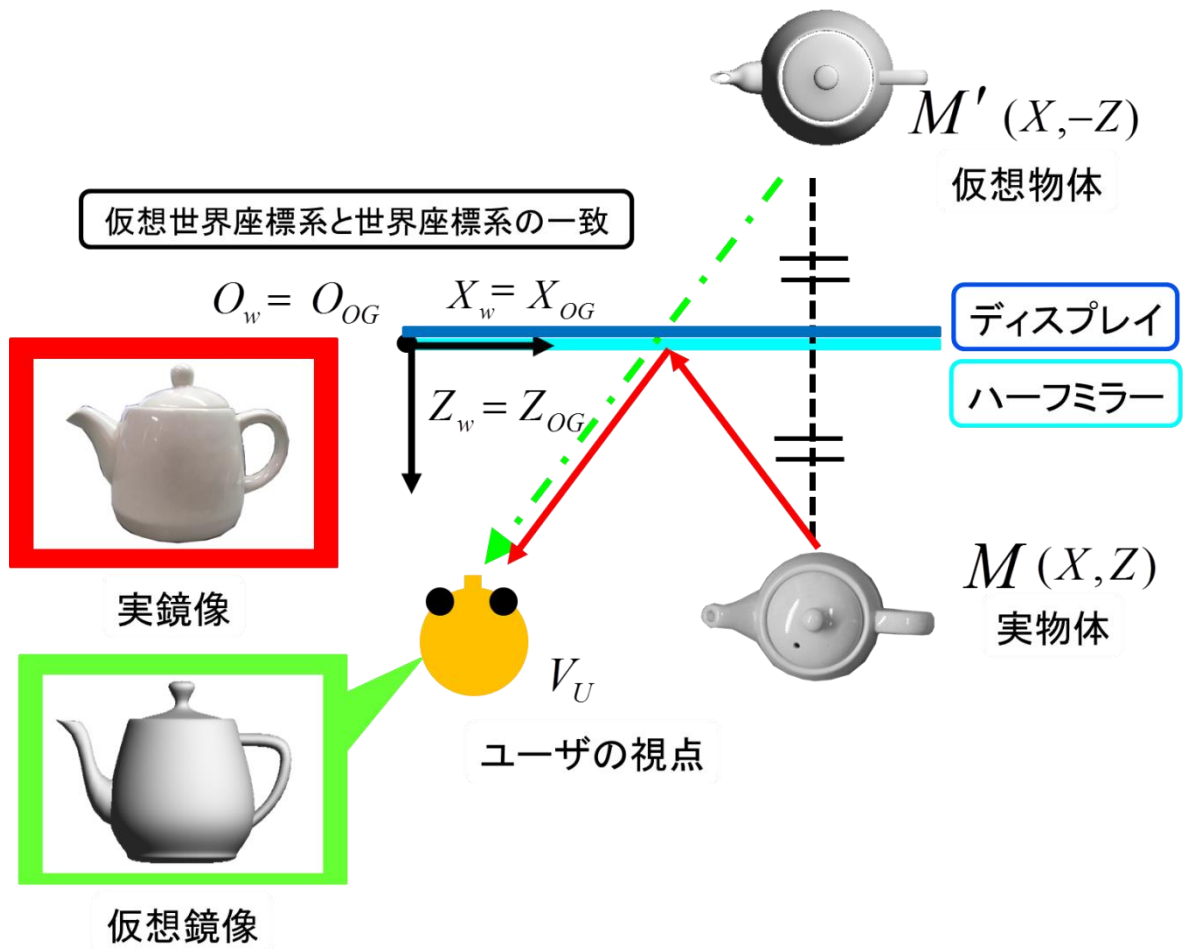


図 3.3 仮想鏡像のモデリング

ハーフミラーの面上に世界座標系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

3.1.2 仮想鏡像のレンダリング

図 3.4 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 3.4 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.

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X - X_V \\ Y - Y_V \\ Z - Z_V \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$s \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} Z_V & 0 & 0 \\ 0 & Z_V & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

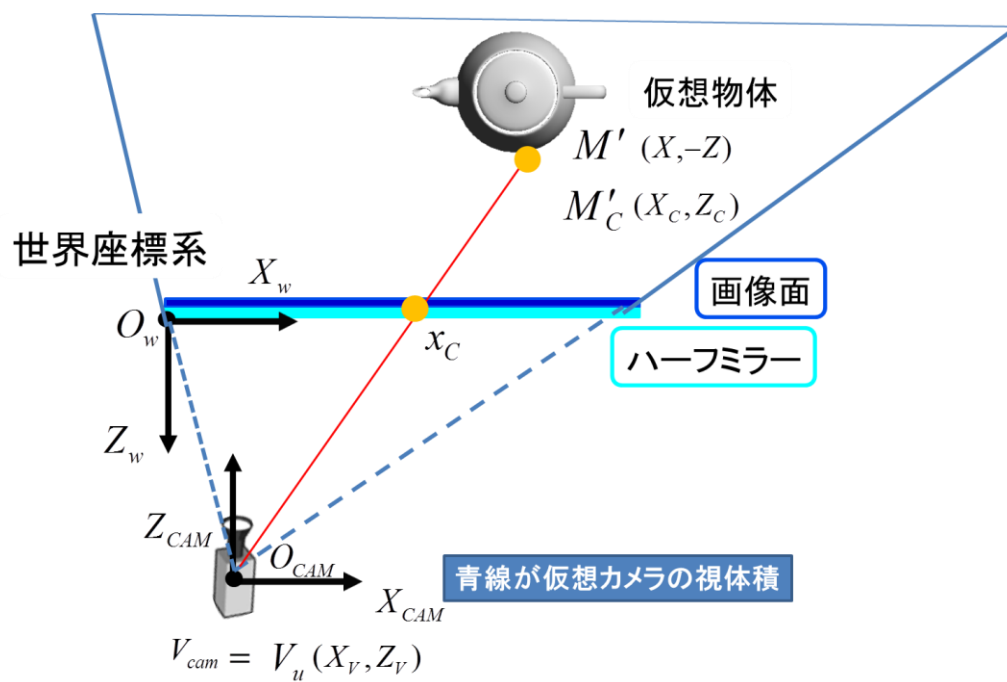


図 3.4 仮想鏡像のレンダリング

3.2 仮想鏡像における幾何的整合性再現に関する検証実験

MR-Mirror が、鏡の幾何的整合性を満たした MR 提示を実現しているか否かについての検証実験を行う。検証は、ユーザの視点位置に応じた仮想鏡像と、自然現象である鏡面反射により得られる実鏡像が、ある視点位置において同様な見え方で観測されるかについて比較することにより実施する。

3.2.1 仮想鏡像における幾何的整合性再現に関する実験環境

図 3.5 に実験環境を示す。実鏡像を取得するハーフミラーを、大型ディスプレイの画面と平行となるように金属製フレームで固定した。ハーフミラーの前に、実物体として、立方体の石膏像を設置する。実物体と同じ大きさのワイヤーフレームの立方体を、仮想物体として、実物体と同じ位置に設置する。なお、ユーザの視点の代わりに、デジタルカメラを設置する。ユーザの視点位置を計測するための視点位置マーカを固定したデジタルカメラを三脚に設置し、その 3 次元位置を ARTtrack [41] を用いて、毎秒 60 回検出する。ここで、デジタルカメラの光学中心と視点位置マーカの位置誤差を補正するため、デジタルカメラを設置した初期位置において、指標となる実物体と仮想鏡像を MR-Mirror 上に提示し、それらが重畳するように調整を行った。なお、使用する計算機の CPU は Intel “Xeon Duo” (3GHz) であり、メモリは 4GB である。仮想鏡像を描画するビデオカードは、nVidia “Quadro FX1700” を用いる。仮想鏡像を提示する大型ディスプレイには、SHARP “PN-455R” を縦置きにして用いる。画面の大きさは 985.9 [mm] × 554.6 [mm]、解像度は 1920 [画素] × 1080 [画素] である。

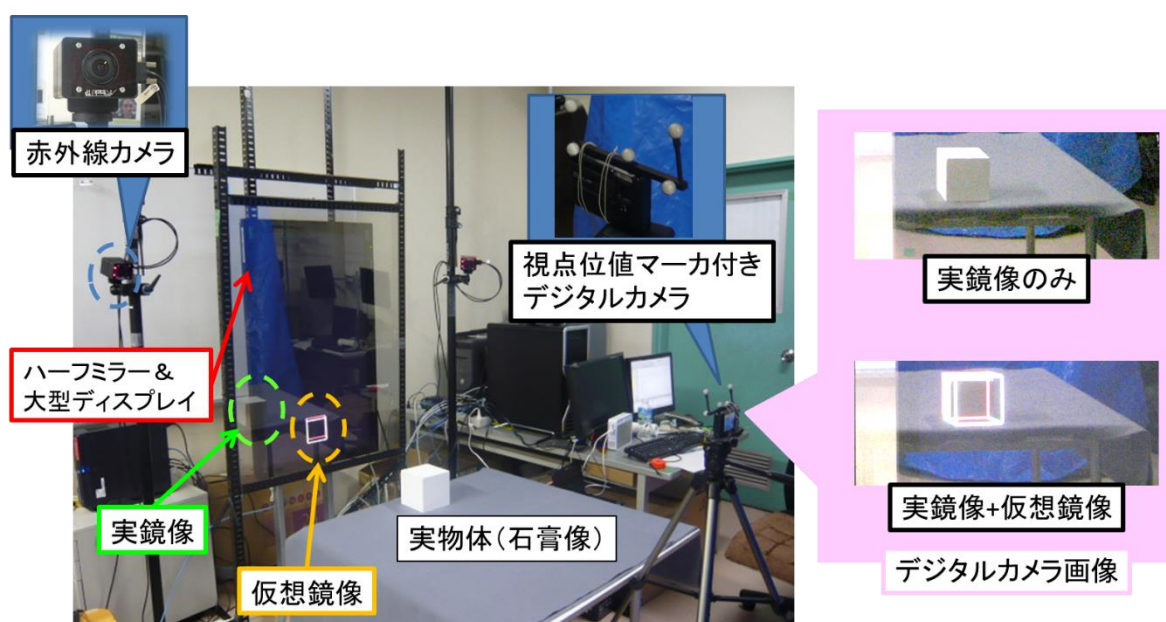


図 3.5 仮想鏡像における幾何的整合性再現に関する実験装置

3.2.2 仮想鏡像における幾何的整合性再現に関する実験方法

図 3.5 に示すように、ハーフミラーの正面に実物体として立方体の石膏像を、仮想世界中の同じ位置に同じ形状の仮想物体（ワイヤーフレーム）を配置する。デジタルカメラの位置に応じて鏡の見え方を再現した仮想鏡像を生成し、図 3.6 のように、MR-Mirror 上に提示された画像を撮影する。デジタルカメラの設置位置を移動させ、撮影した画像内において、仮想鏡像と実鏡像が同様な見え方になっているかを検証する。デジタルカメラは、実物体に対して、左、右、正面の 3 パターンに設置する。

3.2.3 仮想鏡像における幾何的整合性再現に関する実験結果

デジタルカメラを用いて撮影した図 3.6 に示す映像中で、仮想鏡像と実鏡像が重畳されていることが確認できた。提案手法が鏡の幾何的整合性を満たしていることが示された。撮影した画像中で、実鏡像のエッジと仮想鏡像であるワイヤーフレームの立方体が重なって観測され、MR-Mirror において、鏡の世界の幾何的整合性が実現されている。また、デジタルカメラの位置に応じて仮想物体であるワイヤーフレームの立方体の側面が観測できることから運動視差が再現されていることが確認できる。

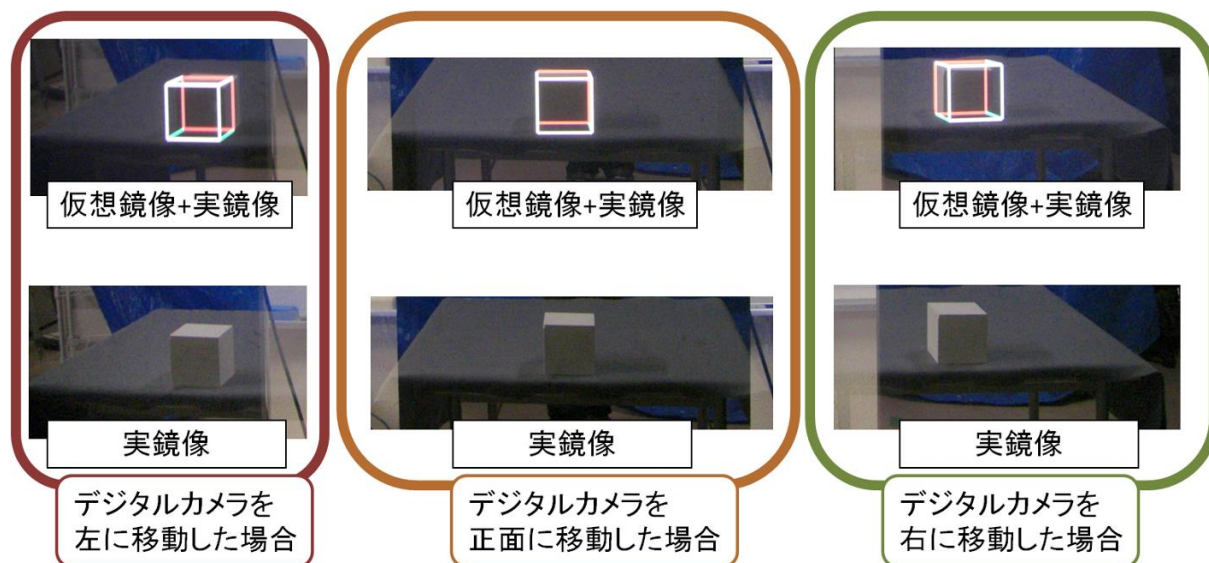


図 3.6 デジタルカメラの位置による仮想鏡像と実鏡像の見え方変化

3.3 鏡像の幾何的整合性が身体動作の理解に与える 影響に関する検討

森川ら[3]によると、自己の姿を日常生活で見る機会は、鏡以外では一般的に存在しないため、自己像の動きの制御は、ビデオカメラの映像を左右反転表示した鏡像表示の方が、そのままディスプレイ上に表示した場合よりも容易であることを主張している。さらに、自己像を左右反転しない映像（正像）と自己像を左右反転したデジタル鏡像（鏡像）の2種類を見せた場合、違和感などの心理的な主観評価が、デジタル鏡像表示の方が好ましいことを示した。自己像の鏡像表示は、鏡のメタファに基づき、自己の身体動作が理解しやすいため、身体動作を用いてMR空間を操作するための提示方式として利用されてきた[3][11][13][14]。

MR空間において、ユーザが身体動作を理解するためには、仮想物体とユーザの身体を含む実物体の位置関係を直感的に把握することが重要である。MR空間を観察する視点位置と、ユーザが、鏡像を見ながら身体動作を用いて空間中に浮かんだ仮想物体をポインティングすることに関しては、ユーザの正面から撮影した映像でないもの（非正面視点）であっても、従来有効性が示されているユーザの正面から撮影した映像[3][14]（正面視点）と同程度になる可能性を示している。具体的には、被験者の目の高さにそろえたビデオカメラを、被験者に対して同心円状になるように移動させ、撮影した映像を鏡像としてディスプレイに提示し、仮想物体のポインティングをさせた。その結果、前方カメラ角度間の全組み合わせ（6通り：0～67.5度 22.5度刻み）では有意な差が確認されなかった[52]。

一方で、仲らは、デジタル鏡像中で、仮想物体の操作が可能なシステムであるAugmented Mirrorを実現したが、ユーザが観察する視点と実世界を撮影するビデオカメラの位置が一致していないこと（MR空間の鏡像の幾何的な不整合）が、ユーザがシステムを使用する時に生じる違和感の原因であると考察している[6]。また、電脳化粧鏡[25]では、化粧のアイラインを引く場合、ディスプレイに提示されるユーザの目線が、実際のユーザの目線の高さとは異なるため、化粧が難しくなるという問題がある。Ushidaと田口らは、鏡を模倣する上で、ディスプレイに提示したユーザ像と、実際に利用するユーザの視線一致が重要であるとしている[6][10]。このように、ユーザが鏡を模したシステムを直感的に利用するためには、デジタル鏡像中において、鏡の幾何的整合性を満たすことが重要である。

以上の検討より、ユーザがシステムを利用して、自己の鏡像を含むMR空間の位置関係を直感的に理解するためには、我々が使い慣れている鏡との違和感をできるだけ少なくする方が良いと考えられる。しかしながら、従来の鏡のメタファを利用した多くのシステムでは、環境中に固定した1台のビデオカメラの映像を左右反転表示したものをデジタル鏡像として提示するものが多く、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、ユーザの視点に応じた鏡像の見え方が再現されるのは、特定の視点から観察している場合に限られる。視点が移動した際には、MR空間を撮影する仮想カメラを動かし、その見え方の変化を実時間で高品質に再現する必要があるが、従来技術では実現困難な問題であり、その結果、デジタル鏡像中の幾何的整合性を保つことは難しい。

我々の提案するMR-Mirrorは、ユーザの視点に応じて鏡の見え方（鏡の幾何的整合性）を再現するため、従来システムよりも、自己像の動作に対する違和感が軽減すると考えられる。

そのため、アフォーダンスの考えから、自己の身体動作を直感的に理解することが容易になると予想される。

3.4 実鏡像と仮想鏡像の時間的整合性

提案手法は、HMD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[42]、ユーザが知覚しない範囲に抑える必要がある。2.3節で述べたように、本研究では、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。

MR-Mirrorの提示遅延は、図3.7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3.7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0.05[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（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。なお、MR-Mirrorを構成するディスプレイのリフレッシュレートを高速カメラで計測したところ、公開されている電氣的な仕様とほぼ等しい60.64[Hz]となった。計測方法としては、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色が切り替わる時間を画像処理により算出した。

$$\begin{aligned}
 \text{提示遅延} = & \int_{t_{a_min}}^{t_{a_max}} \frac{t}{t_{a_max} - t_{a_min}} dt \\
 & + \int_{t_{b_min}}^{t_{b_max}} \frac{t}{t_{b_max} - t_{b_min}} dt \\
 & + t_c
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

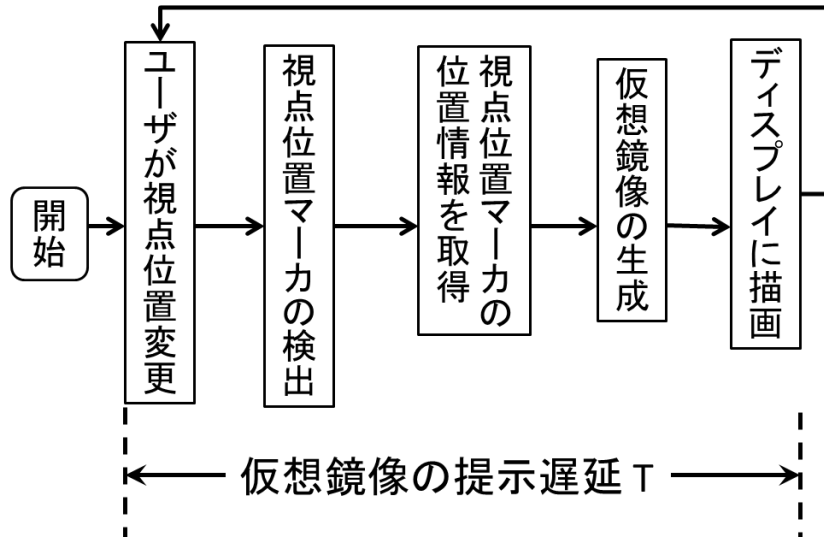


図 3.7 MR-Mirror の処理概要と仮想鏡像の提示遅延

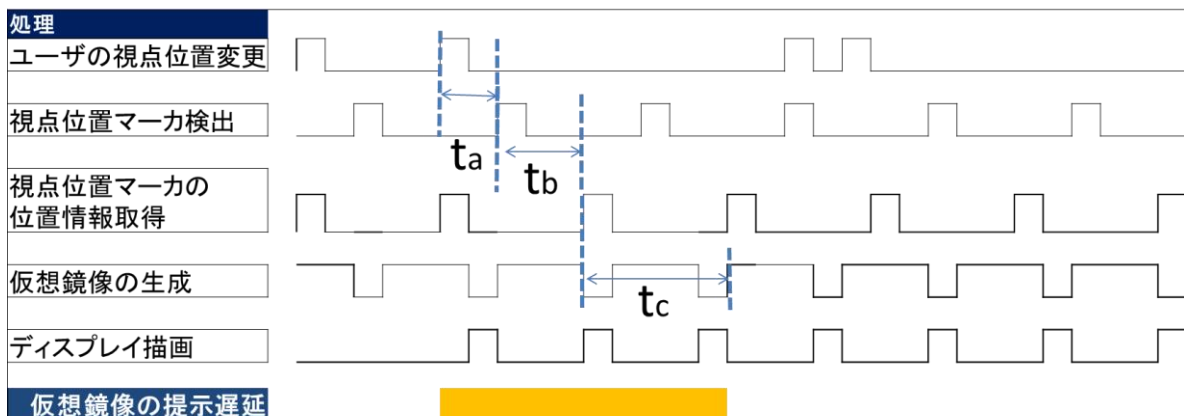


図 3.8 MR-Mirror の処理のタイミングチャート

第4章 MR-Mirror が前後関係の把握精度に与える影響要素とその評価

MR-Mirror は、従来システムにはない仮想鏡像と実鏡像の運動視差提示機能を保持しているため、従来システムよりも3次元的な提示が可能になると考えられる。自由な視点から自己の姿を含む鏡像を観察可能なことと、鏡像間の3次元的な位置関係を把握することが可能となる。しかしながら、2.4節で述べたように、運動視差は前後関係の把握精度向上に有用であることが良く知られているが[21][26][38][39]、鏡像反転（奥行きの前後が反転）する状況下では、現実空間、MR空間両方において運動視差と前後関係の把握精度の関係が十分に検証されていない。そのため、MR-Mirror の大きな特長である仮想鏡像と実鏡像の運動視差提示機能が、仮想鏡像と実鏡像の前後関係の把握精度へ与える影響を評価する。

MR-Mirror の応用例として、仮想鏡像として教示動作を提示し、運動視差を用いて自己像を含む実鏡像を見比べ、フォーム改善することや、3次元的に提示した仮想鏡像をユーザの手を用いて触るなどのインタラクションが考えられる。

MR-Mirror を用いてユーザが観察するMR空間は、仮想鏡像と実鏡像に着目すると、表4.1に示すように大きく分けて四つの場合に分類できる。a,bに該当する利用例としては、仮想鏡像として提示した一連の教示動作をユーザが模倣すること等である。aは、ダンスの練習のように、ユーザの視点移動と共に大きく移動するユーザの首や胴体などに仮想鏡像を重畳する状況である。一方で、bは、手に持ったラケットや竹刀等の先端のように、ユーザの視点移動と共に大きく移動しないものを観察する（ユーザがその場に手を固定していれば、視点の移動と共にラケットなどの実鏡像は移動しない）。a,bのような状況では、ユーザがMR-Mirror を用いて3次元的にMR空間を把握することに関して、システムの使いやすさが影響を及ぼすことが考えられる。例えば、仮想鏡像として一連の教示動作を提示するだけでなく、ユーザが自由に教示動作を止めて観察する機能等を追加することにより、システムの評価が変動することが考えられる。そこで、システムの使いやすさの影響を小さくし、MR-Mirror の3次元的な提示能力のみを考慮するため、仮想鏡像が静止した状況であるc,dに着目する。c,dに該当する利用例としては、仮想鏡像として提示する教示動作の一部を静止させた状態で提示し、自己像を含む実鏡像を見比べ、模倣すること等が考えられる。この例では、cは、ダンスの練習のように、ユーザの視点移動と共に大きく移動するユーザの首や胴体などに、仮想鏡像を重畳する状況である。一方で、dは、手に持ったラケットや竹刀等の先端のように、ユーザの視点移動と共に大きく移動しないものを観察する（ユーザがその場に手を固定していれば、視点の移動と共にラケットなどの実鏡像は移動しない）。手に持ったラケットと仮想鏡像として提示するラケットの軌跡のある一点を様々な角度から観察し、前後関係を含む3次元的な位置を合わせるといった状況が考えられる。

MR-Mirror の3次元提示能力を評価する際に、用途により適切な表示方法や評価方法が考えられる。しかしながら、それらすべてを評価することは現実的ではない。そのため、本論文では、鏡像の運動視差による仮想鏡像と実鏡像の前後関係の把握精度について着目し、MR-Mirror の3次元的な提示能力を評価する。MR-Mirror の3次元的な提示能力を評価するた

めには、cとdの両方を評価する必要があるが、cのような状況では、鏡像の運動視差以外にも考慮する要因が数多く存在する。仮想鏡像と実鏡像を見比べる際に、視点移動と共に実鏡像が移動してしまうため、視点移動による運動視差と実鏡像の移動により発生する見え方の変化が同時に発生すること、観察する仮想鏡像がユーザの胴体などに重畳されるため、ユーザの身体の正確な3次元情報取得の影響が発生することも考慮しなければならない。一方で、dのような状況では、視点移動による実鏡像の移動が発生しにくい。そのため、ラケットの先端と、手本として提示した仮想鏡像であるラケットの軌跡の3次元位置のみに着目することが可能である。

鏡像の仮想鏡像と実鏡像の前後関係の把握精度に着目すると、cは、視点と共に観察対象が移動するため、視点移動による運動視差と観察対象の移動そのものによる見え方の変化が発生するため、運動視差による影響を切り分けにくい。そのため、dのように、視点と共に移動しない観察対象を用いた評価を行う。また、dのように、手本として提示する仮想鏡像にユーザの手や道具などの実鏡像を合わせることは、鏡像の隠蔽関係など運動視差以外の要因の影響が発生することが考えられる。鏡像の運動視差以外の要因を排除するため、仮想鏡像を操作し、実鏡像との前後関係を合わせることにして評価を行う。

また、実装したMR-MirrorはHMDでいうところの光学シースルー方式であるため、実鏡像に対して仮想鏡像に提示遅延が発生する[43]。運動視差に不連続性や遅れを与えることにより、前後関係の把握精度に悪影響を及ぼすことが確認されている[42]。そのため、提示遅延についても検討する必要がある。

本章では、以上の点を踏まえ、dの場合で、MR-Mirrorを用いてMR空間を把握する際に、検討が必要な三つの要素について述べ、それぞれについて評価と考察を行う。

1. 鏡像の運動視差が前後関係の把握精度に与える影響
2. 仮想鏡像の提示遅延が、運動視差による前後関係の把握精度に与える影響
3. 運動視差の不連続性が、前後関係の把握精度に与える影響

MR-Mirrorは、実時間でのMR提示が可能であるが、実鏡像に対して仮想鏡像に提示遅延が発生する。従って、仮想鏡像の提示遅延と運動視差による前後関係の把握精度に関して評価を行う必要がある。

また、MR-Mirrorは、光学シースルー方式であるため、実鏡像の運動視差に関しては、不連続性がないが、仮想鏡像に対しては、不連続性が発生する。この仮想鏡像の不連続性により、ユーザの知覚する前後関係の把握精度への影響を検討する必要がある。

表 4.1 MR-Mirrorを用いてユーザが観察する仮想鏡像と実鏡像と観察視点位置

	仮想鏡像が移動	視点と共に実鏡像が移動
a	○	○
b	○	×
c	×	○
d	×	×

4.1 実鏡における鏡像の運動視差を用いた

前後関係の把握精度

本節では、鏡像世界における運動視差と鏡像の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 4.1 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（鏡に対して面対称の位置）、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鏡像の前後関係の把握を実現する。

4.1.1 実鏡における鏡像の運動視差を用いた前後関係把握精度実験の環境

実験装置は、図 4.1 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、前後関係推定作業で操作する矢印により構成される。ハーフミラーは、被験者の全身が十分に映り込む大きさとした。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 4.1 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奥行き弁別域が最小になる運動幅角速度[38]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精度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。

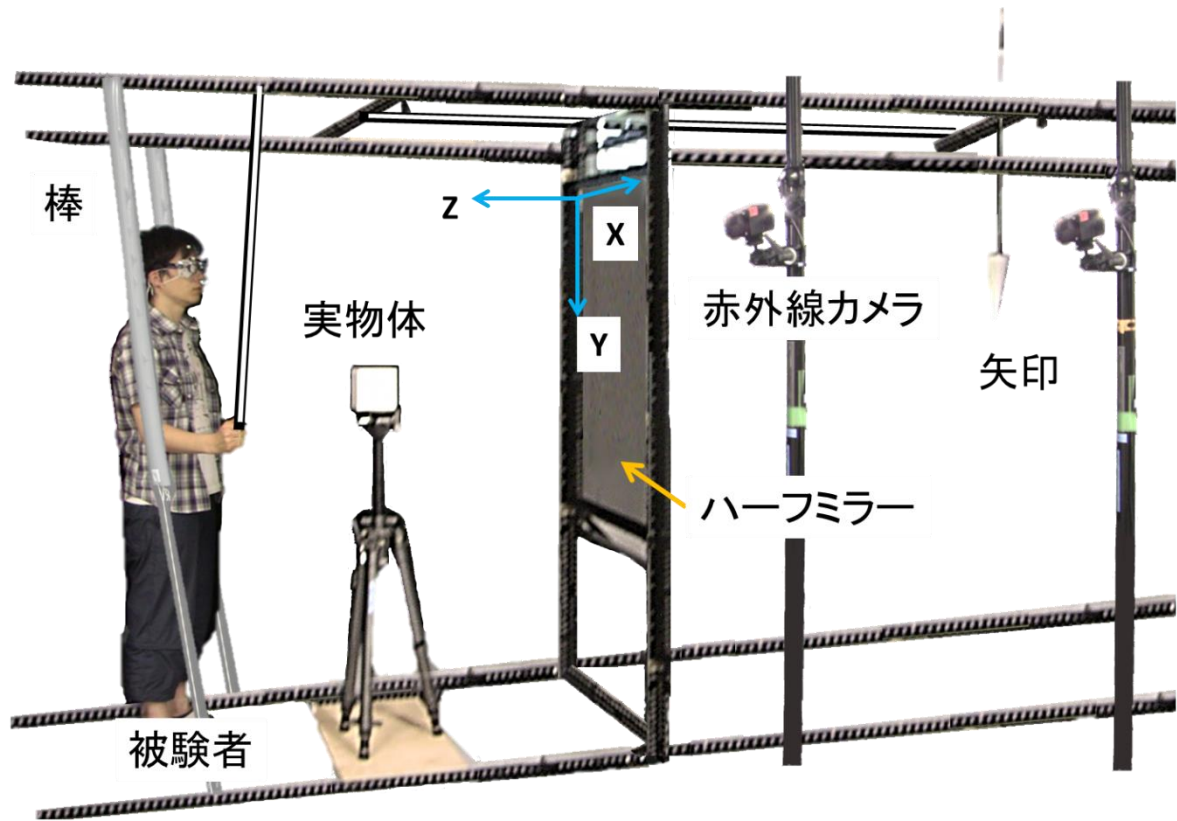


図 4.1 実鏡における鏡像の運動視差提示装置

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て、実物体の鏡像と矢印の前後関係を合わせる

4.1.2 実鏡における鏡像の運動視差を用いた前後関係把握精度実験の手順

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。矢印の前後方向の位置は、調整法[44]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 4.2 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に指示した。立方体は、 $Z = 800$ [mm], 1000 [mm], 1200 [mm] の 3 種類の奥行きに設置した。この奥行きは、MR-Mirror を用いる時に、ユーザの手が届く範囲を考慮した距離である。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 $Z = 800$ [mm] の時に、 46 [拍/分]、 $Z = 1000$ [mm] の時に、 50 [拍/分]、 $Z = 1400$ [mm] の時に、 54 [拍/分] 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 回の試行を行う。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。



図 4.2 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

4.1.3 実鏡における鏡像の運動視差を用いた前後関係把握精度実験の結果

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_{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。

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

実験結果を、表 4.2 と図 4.3 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。運動視差の有無と、鏡から実物体までの距離の 2 要因に対して、二元配置分散分析を行った結果、運動視差の有無に対しては、 $P = 0.013$ となり有意水準 5% の有意差があることが確認された。一方で、鏡から実物体までの距離に関しては、 $P = 0.470$ となり、有意な差が得られなかった。運動視差の有無と鏡から実物体までの距離の交互作用についても、 $P = 0.645$ となり、有意差が得られなかった。そのため、運動視差有無の要因にのみ着目し、運動視差有無の平均値に差があるかをテューキーの方法により多重比較を行った。結果として、 $P = 2.00 \times 10^{-7}$ となり、有意水準 1% の有意差があることが確認された。以上の結果により、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。

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 4.4 の各被験者の $score$ をみると、被験者 a,g,i,k が、 $score$ 傾向が他の被験者と異なっていたので、個別に考察を加える。

被験者 a は、運動視差有の場合、鏡から実物体の距離が $Z = 800$ [mm] の $score$ が、 $Z = 1000$, 1200 [mm] の $score$ と比べると大きい結果となっている。また、被験者 k は、運動視差有の場合、鏡から実物体の距離が $Z = 800$ [mm] の $score$ が、 $Z = 1000$, 1200 [mm] の $score$ と比べると大きい結果となっている。さらに、 $Z = 800$ [mm] の場合のみ運動視差無の $score$ の方が良い。 $score$ 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であったが、図 4.4 と図 4.6 によると、 $Z = 800$ [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、 $Z = 800$ [mm] の場合であった。

被験者 g においても、運動視差有の場合、鏡から実物体の距離が小さい $Z = 800$ [mm] の $score$ が、 $Z = 1000$, 1200 [mm] の $score$ と比べると大きい結果となっている。 $score$ 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 $Z = 800$ [mm] の試行の $score$ が影響を及ぼしたのだと考えられる。図 4.4 と図 4.5 より最初の試行である $Z = 1200$ [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 は、鏡から実物体の距離が $Z = 1200$ [mm] の場合のみ、運動視差有よりも運動視差無の *score* の方が良い結果となっている。この原因も、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 $Z = 1200$ [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 4.3 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。

運動視差の有無と、鏡から実物体までの距離の 2 要因に対して、二元配置分散分析を行った結果、運動視差の有無に対しては、 $P = 0.030$ となり有意水準 5% の有意差があることが確認された。一方で、鏡から実物体までの距離に関しては、 $P = 0.205$ となり、有意な差が得られなかった。運動視差の有無と鏡から実物体までの距離の交互作用についても、 $P = 0.548$ となり、有意差が得られなかった。そのため、運動視差有無の要因にのみ着目し、運動視差有無の平均値に差があるかをテューキーの方法により多重比較を行った。結果として、 $P = 1.00 \times 10^{-4}$ となり、有意水準 1% の有意差があることが確認された。以上の結果により、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 4.2 実験結果の平均値 (括弧内は標準偏差)

鏡から立方体までの距離 [mm]	運動視差有 [mm]	運動視差無 [mm]
800	77 (51)	170 (125)
1000	72 (60)	174 (122)
1200	76 (57)	211 (155)

表 4.3 傾向の異なる被験者を除いた実験結果の平均値（括弧内は標準偏差）

鏡から立方体までの距離 [mm]	運動視差有 [mm]	運動視差 [mm]
800	66 (18)	133 (52)
1000	78 (47)	172 (82)
1200	94 (29)	220 (130)

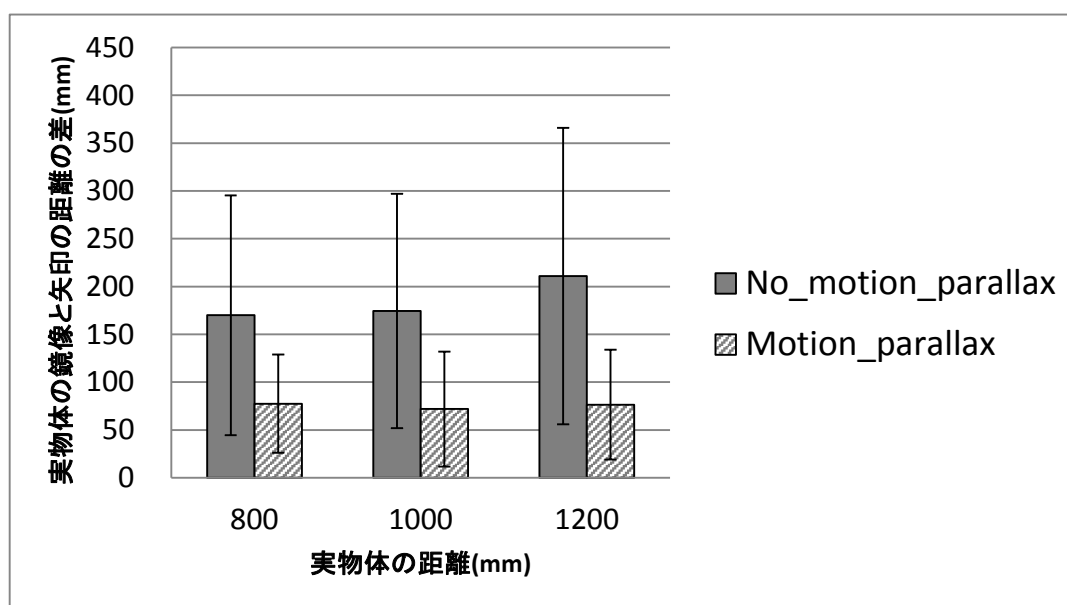


図 4.3 立方体と矢印の奥行き値の差(絶対値)の平均値

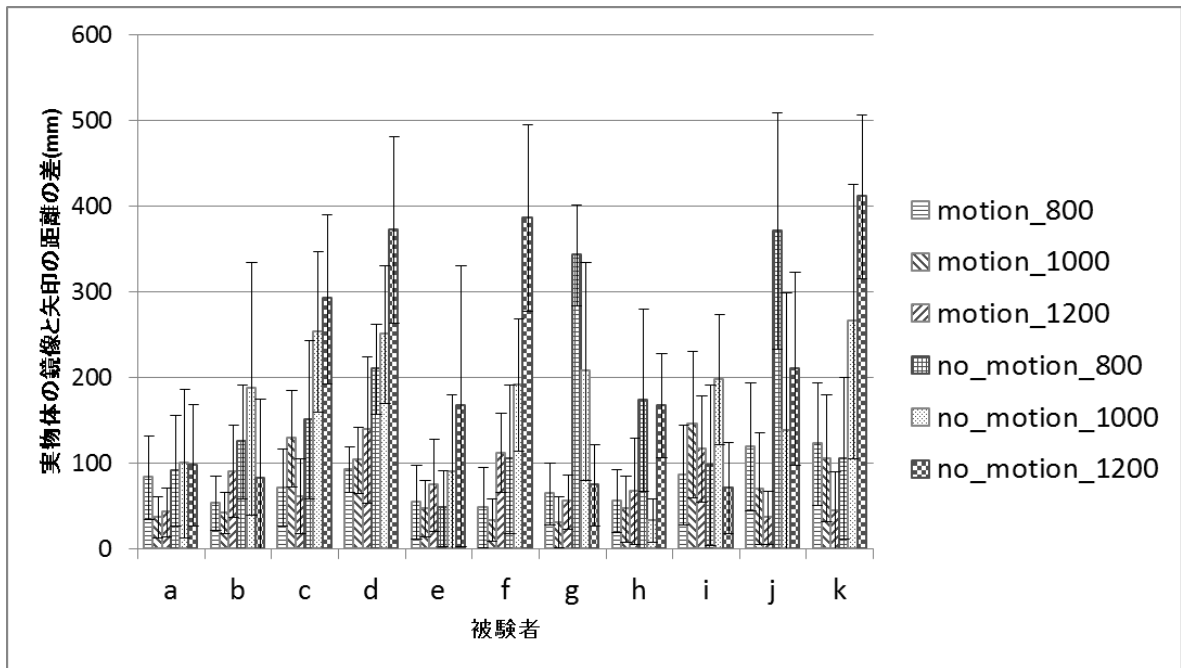


図 4.4 各被験者の score

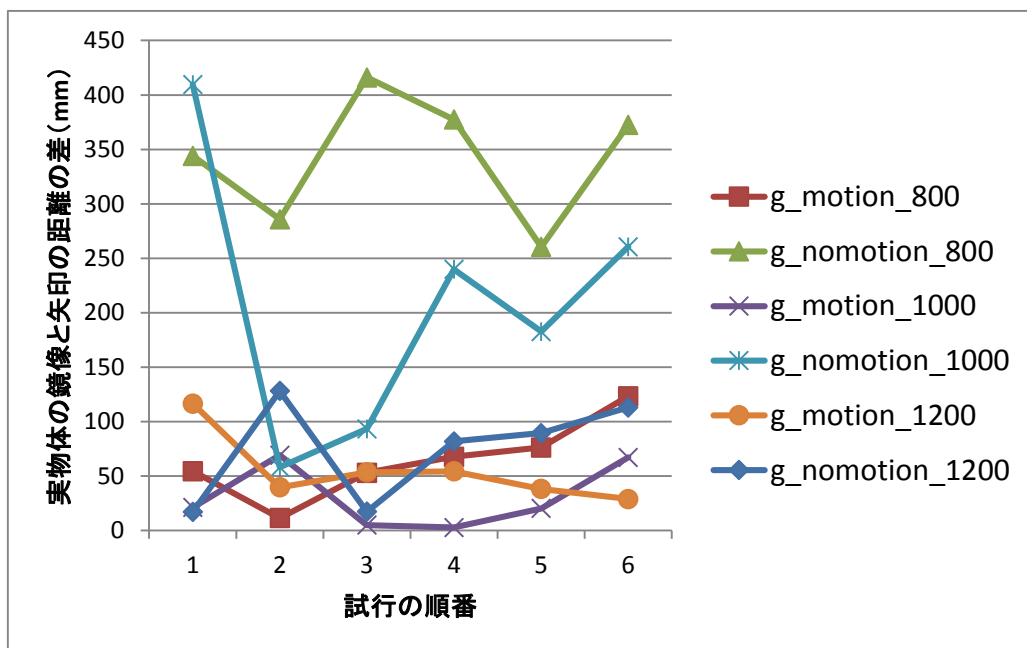


図 4.5 被験者 g の全試行のスコア

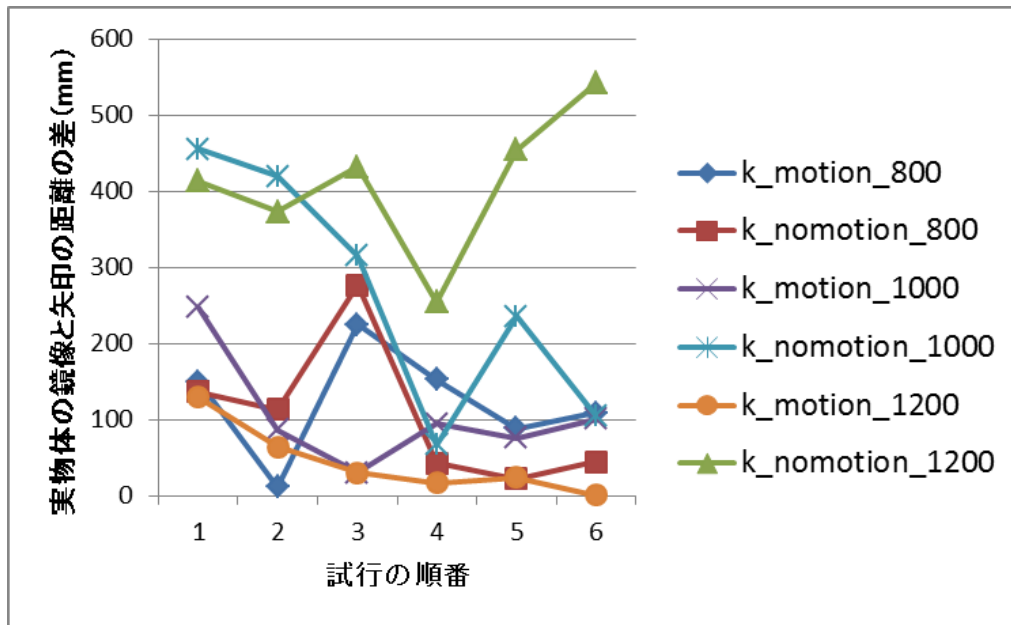


図 4.6 被験者 k の全試行のスコア

4.2 MR 空間における鏡像の運動視差を用いた 前後関係の把握精度

本節では、MR 型鏡像提示における運動視差が鏡像間の前後方向の位置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。

4.2.1 MR 空間における鏡像の運動視差を用いた前後関係の把握精度実験の環境

図 4.7 に実験環境を示す。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。被験者の頭部運動の範囲を統制するため、図 4.7 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奥行き弁別域が最小になる運動幅角速度[38]を参考に、鏡に反射した実物体に対して毎秒 10 度程度の角速度とする。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。3.4 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、シャープ社製晶モニタ (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。ディスプレイとハーフミラーの大きさは、被験者の全身が十分に映り込む大きさとした。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[41]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) の前後方向の位置を変更する。

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精度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。

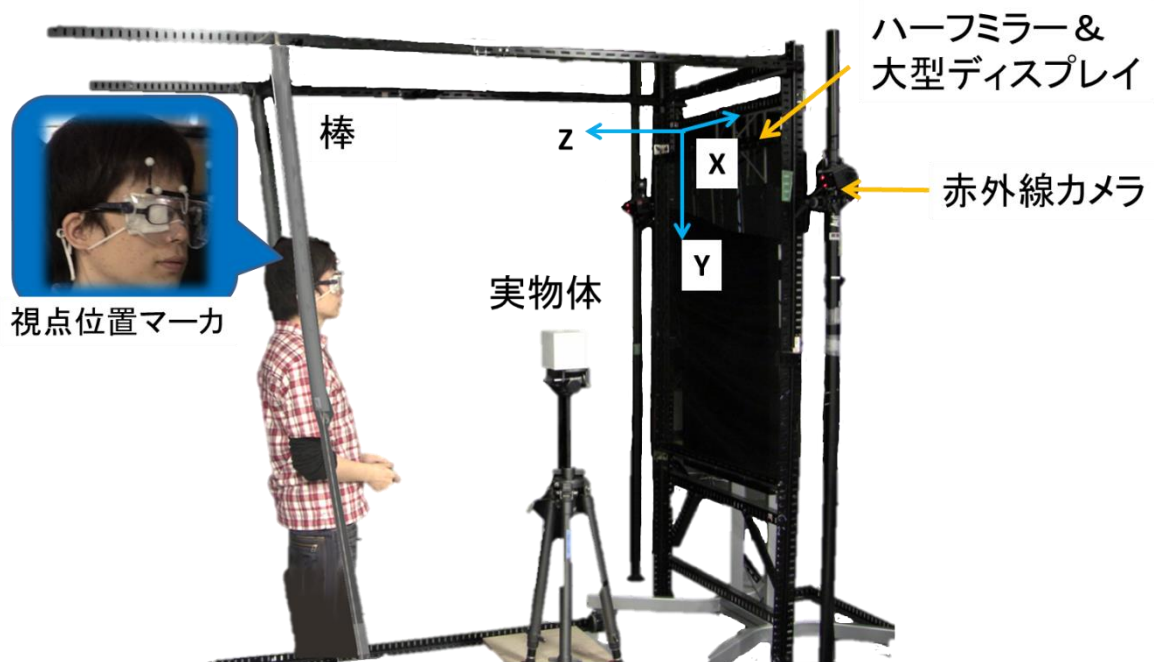


図 4.7 MR 空間における鏡像の運動視差提示装置：

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を前後方向に動かし、実物体の鏡像と前後方向を合わせる。

4.2.1 MR 空間における鏡像の運動視差を用いた前後関係の把握精度実験の手順

被験者を、鏡に被験者の全身が映る距離 $Z = 1400$ [mm] に立たせ、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方向を一致させるよう指示した。矢印の前後方向の位置は、調整法[44]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 4.8 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、 $Z = 800$ [mm], 1000 [mm], 1200 [mm] の 3 種類の奥行きに設置した。この奥行きは、MR-Mirror を用いる時に、ユーザが MR 空間とインタラクションすることを考え、手の届く範囲を考慮した距離である。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 $Z = 800$ [mm] の時に、46 [拍/分]、 $Z = 1000$ [mm] の時に、50 [拍/分]、 $Z = 1400$ [mm] の時に、54 [拍/分] 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 回の試行を行う。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。

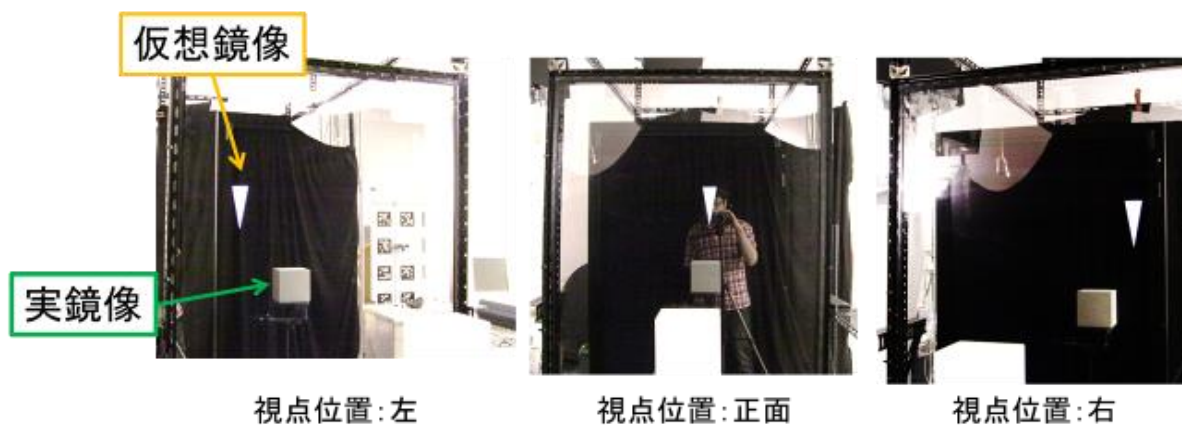


図 4.8 鏡の幾何を再現した MR 空間の運動視差提示

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

4.2.2 MR 空間における鏡像の運動視差を用いた前後関係の把握精度実験の結果

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_{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 4.4 と図 4.9 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把握精度が高いことがわかる。運動視差の有無と、鏡から実物体までの距離の2要因に対して、二元配置分散分析を行った結果、運動視差の有無に対しては、 $P=0.020$ となり有意水準5%の有意差があることが確認された。一方で、鏡から実物体までの距離に関しては、 $P=0.140$ となり、有意な差が得られなかった。運動視差の有無と鏡から実物体までの距離の交互作用についても、 $P=0.708$ となり、有意差が得られなかった。そのため、運動視差有無の要因にのみ着目し、運動視差有無の平均値に差があるかをチューキーの方法により多重比較を行った。結果として、 $P=1.00 \times 10^{-4}$ となり、有意水準1%の有意差があることが確認された。以上の結果により、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。

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 において、運動視差無の条件の方が、運動視差有よりも $score$ が良い場合が存在する。その原因は、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、 $Z = 1000$ [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 4.10, 図 4.11 より運動視差有の最後の試行である $Z = 1000$ [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うかがえる。被験者 c においても、運動視差有の条件について、 $Z = 1200$ [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 4.10, 図 4.12 より、運動視差有の前後関係の把握精度の方が、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 l の評価実験においては、 $Z = 1000$ [mm]の時に、運動視差有よりも、運動視差無の方が良い $score$ であった。被験者 l 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 l は「立方体と矢印の相対的な大きさを、前後関係を把握するため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、前後関係を把握するため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 [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、 $Z = 800$ [mm], 1000 [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 4.10 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 4.5 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。運動視差の有無と、鏡から実物体までの距離の 2 要因に対して、二元配置分散分析を行った結果、運動視差の有無に対しては、 $P = 0.001$ となり有意水準 1% の有意差があることが確認された。鏡から実物体までの距離に関しては、 $P = 0.020$ となり、有意水準 5% の有意差があることが確認された。運動視差の有無と鏡から実物体までの距離の交互作用については、 $P = 0.970$ となり、有意差が得られなかった。そのため、運動視差有無と鏡から実物体までの距離のそれぞれの要因に着目し、運動視差有無と鏡から実物体までの距離により平均値に差があるかをテューキーの方法により多重比較を行った。運動視差有無の要因に着目すると $P = 1.000 \times 10^{-4}$ となり、有意水準 1% の有意差があることが確認された。一方で、鏡から実物体までの距離については、 800 [mm] と 1000 [mm] の組み合わせでは、 $P = 0.706$ 、 800 [mm] と 1200 [mm] の組み合わせでは、 $P = 0.182$ 、 1000 [mm] と 1200 [mm] の組み合わせでは、 $P = 0.578$ となりそれぞれ有意な差が得られなかった。

以上の結果から、MR 空間における鏡像世界においても、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 MR-Mirror 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。

しかし、表 4.2 と表 4.4 をみると、実鏡像における運動視差有の前後関係の把握精度と、MR 空間における鏡像の運動視差有の前後関係の把握精度の実験結果が異なっていることがわかる。運動視差有りの *score* に着目し、実験環境 (MR か実鏡) と、鏡から実物体までの距離の 2 要因に対して、二元配置分散分析を行った結果、実験環境に対しては、 $P = 0.476$ となり有意差が得られなかった。鏡から実物体までの距離に関しても、 $P = 0.190$ となり、有意差が得られなかった。実験環境と鏡から実物体までの距離の交互作用については、 $P = 0.022$ となり、有意水準 5% の有意差があることが確認された。実験環境の各水準における鏡から実物体の距離の単純主効果と鏡から実物体の距離の各水準における実験環境の単純主効果をテューキー・クレーマーの方法により検定を行った。その結果を表 4.6 と表 4.7 に示す。表 4.6 によると、実験環境が MR で、鏡から実物体の距離が 800 [mm] と 1200 [mm] の場合のみ、有意水準 1% の有意差が得られた。表 4.7 によると、実物体の距離 800 [mm] の場合では、*score* の平均値に有意な差が見られないが、実物体の距離 1000 [mm] では、有意水準 5% の有意差が得られ、 1200 [mm] においては、有意水準 1% で有意差が得られた。検定結果より、鏡から実物体の距離が大きくなると実験環境により *score* に差が生じること、実験環境が MR の場合は、鏡から実物体の距離が大きくなると *score* に差が生じる傾向があることが示された。鏡から実物体の距離が大きくなるにつれ、実験環境の *score* に違いが出る理由としては、被験者と実物体の距離が大きくなるにつれ、運動視差以外の奥行き手がかりの影響が大きくなっていることが考えられる。MR 環境で行った実験のアンケートによると、実鏡像と比べると仮想鏡像の影がのっぺりしていて、立体に見えないという意見が、3 人から得られた。照

明や陰影は、前後関係の把握精度において影響を及ぼすことが知られており[21][44][45]，仮想鏡像と実鏡像の明るさと影の違いが影響を及ぼしていることが予想される。奥行き手がかりが相互的に作用して前後関係の把握精度に影響を及ぼす可能性もある[47]。このように、奥行き手がかりの違いが前後関係の把握精度に影響したのではないかと考えられる。実験環境がMRの場合は、鏡から実物体の距離が大きくなると *score* に差が生じる傾向についても同様に、被験者と実物体の距離が大きくなるにつれ、運動視差以外の奥行き手がかりの影響が大きくなるためだと考えられる。

また、本実験では、運動視差の影響のみを計測するため、片目で実験を行っているが、MR-Mirrorの利用シーンを考えると、ユーザは両眼でMR空間を観察する。実装したMR-Mirrorを用いて両眼でMR空間を観察すると、実鏡像には両眼視差が存在するが、一方で仮想鏡像には存在しない状況が発生する。この奥行き手がかりの違いが前後関係の把握精度に影響することが考えられる。また、実装した実験装置では、ユーザの左右の目に対して、鏡の幾何的整合性を満たすMR空間を同時に提示することが困難であり、いずれか一つでしか運動視差の幾何的な整合性が保てないため、ユーザが違和感をもつ原因となることが考えられる。ユーザの動作を拘束しない液晶シャッターメガネや、ディスプレイ装置の技術的な発展し、MR-Mirrorで利用するディスプレイを3次元提示可能なディスプレイに変更することにより、この問題を解決することが可能となるだろう。

表 4.4 実験結果の平均値(括弧内は標準偏差値)

鏡から実物体までの距離[mm]	運動視差有 [mm]	運動視差無[mm]
800	80 (51)	198 (145)
1000	122 (77)	199 (169)
1200	155 (109)	234 (171)

表 4.5 傾向の異なる被験者を除いた実験結果の平均値（括弧内は標準偏差値）

鏡から立方体までの距離[mm]	運動視差有 [mm]	運動視差無[mm]
800	71 (34)	209 (119)
1000	118 (58)	238 (159)
1200	143 (49)	267 (160)

表 4.6 実験環境の各水準における実物体の距離の単純主効果

実験環境	比較する群	有意確率	有意差
MR	800 [mm]と 1000 [mm]	0.142	-
	800 [mm]と 1200 [mm]	0.003	**
	1000 [mm]と 1200 [mm]	0.273	-
実鏡	800 [mm]と 1000 [mm]	0.922	-
	800 [mm]と 1200 [mm]	0.997	-
	1000 [mm]と 1200 [mm]	0.948	-

※ **は有意水準 1%で有意差有り

表 4.7 実物体の距離の各水準における実験環境の単純主効果

実物体の距離 [mm]	比較する群	有意確率	有意差
800	MR と REAL	0.853	-
1000	MR と REAL	0.021	*
1200	MR と REAL	0.003	**

※ **は有意水準 1%で有意差有り, *は有意水準 5%で有意差有り

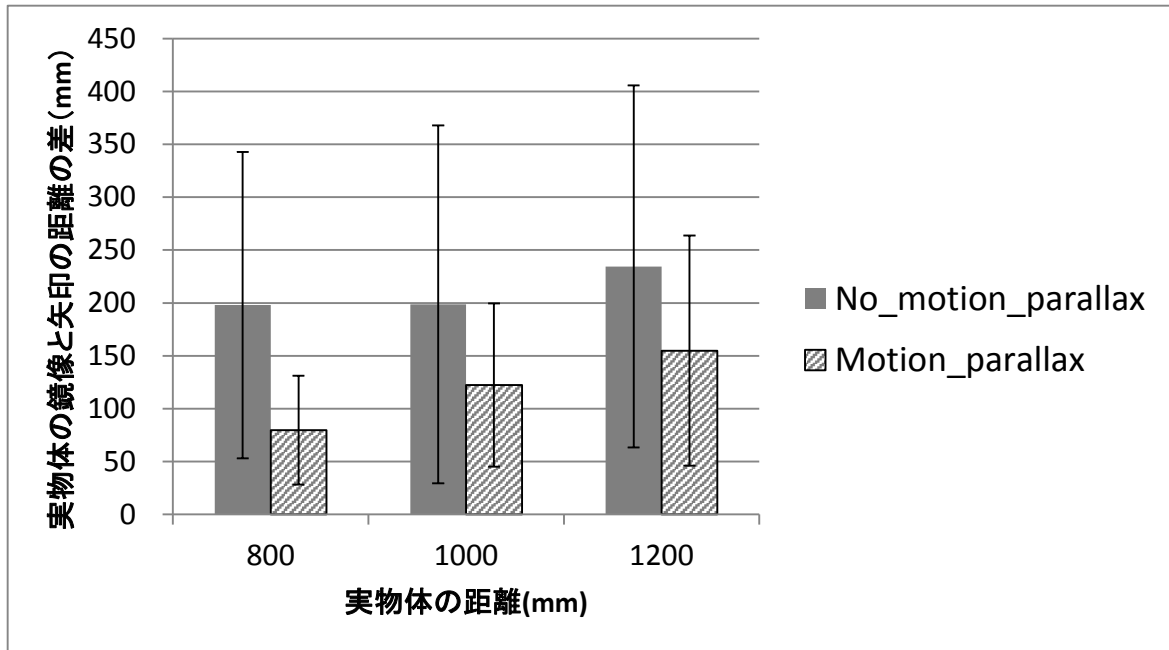


図 4.9 実鏡像（立方体）と仮想鏡像（矢印）の奥行き値の差（絶対値）の平均値

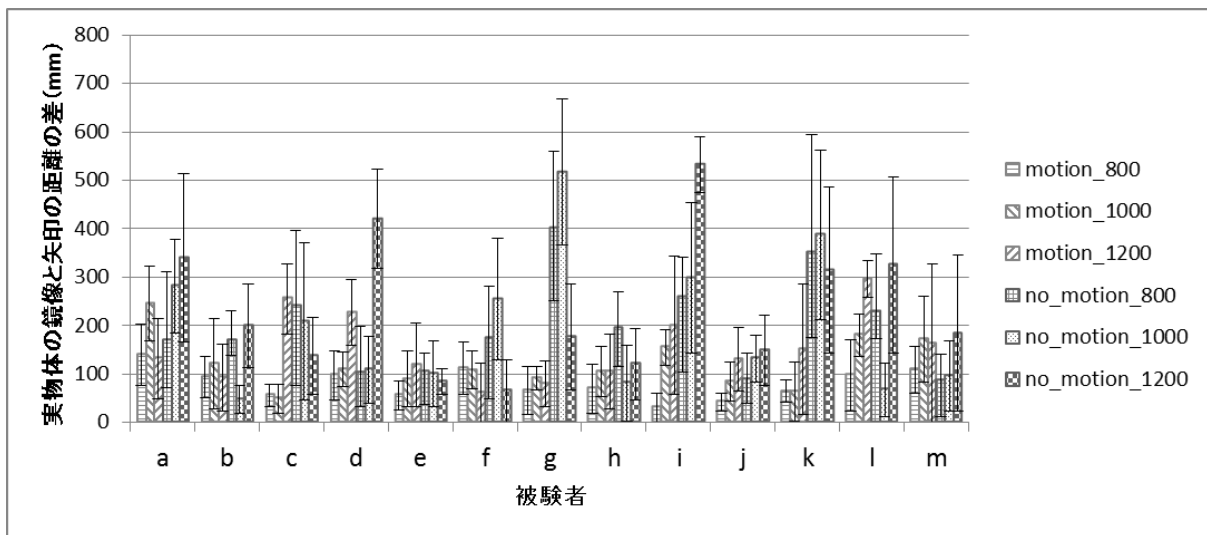


図 4.10 各被験者の score

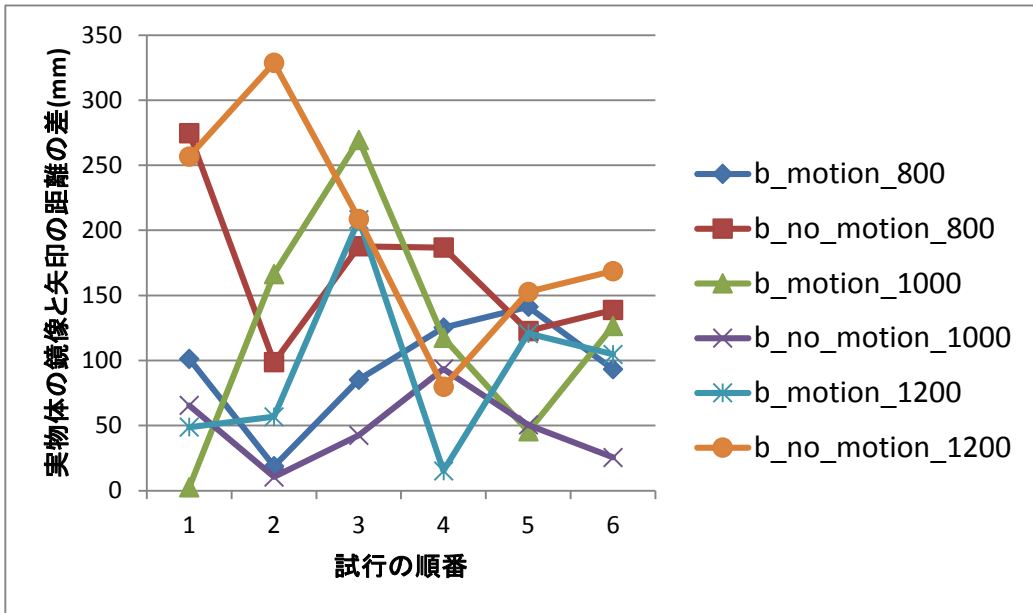


図 4.11 被験者 b の全試行のスコア

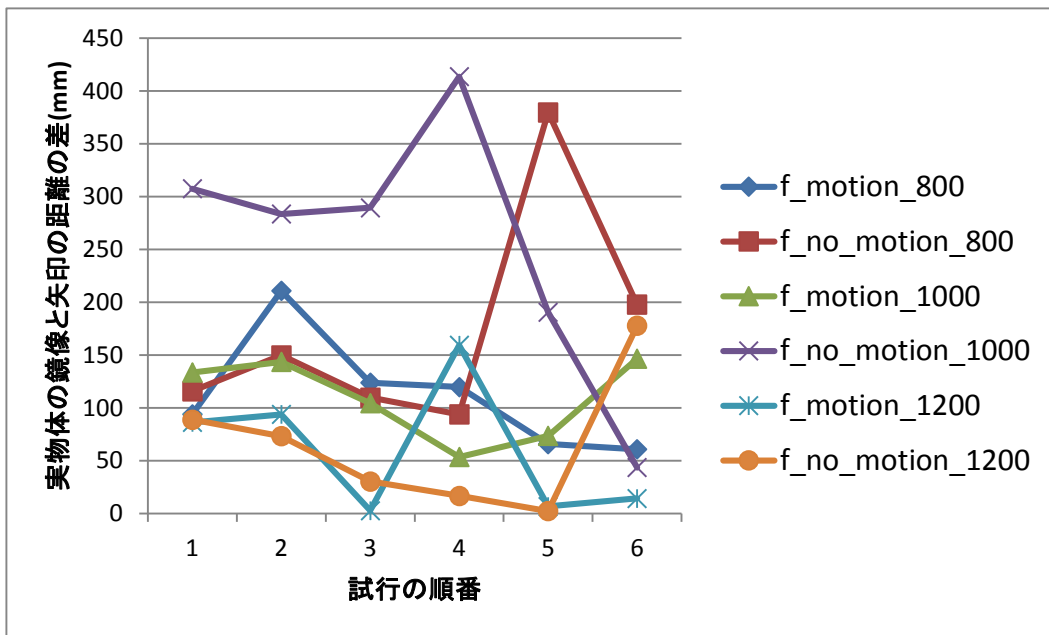


図 4.12 被験者 f の全試行のスコア

4.3 仮想鏡像の提示遅延が 前後関係の把握精度に与える影響

本節では, MR-Mirror の仮想鏡像の提示遅延と前後関係の把握精度の関係について述べる. 光学シースルー方式では, 実像と仮想像の間に提示遅延が生じることは避けられない. 運動視差に不連続性や遅れを与えることにより, 前後関係の把握精度に悪影響を及ぼすことが, 確認されている. そのため, 仮想鏡像の提示遅延と前後関係の把握精度の関係について明らかにし, MR-Mirror の仮想鏡像の提示遅延が十分な性能であるか検討する. 提示遅延を段階的に変化させ, 鏡像の運動視差と前後関係の把握精度に関する実験を行う.

4.3.1 仮想鏡像の提示遅延が前後関係の把握精度に与える影響に関する実験環境

実験環境を図 4.13 に示す. 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. 被験者の頭部運動の範囲を統制するため, 図 4.13 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奥行き弁別域が最小になる運動幅角速度[24]を参考に, 鏡に反射した実物体に対して毎秒 10 度程度の角速度とする. 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. 3.4 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, シャープ社製液晶モニター (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[41]を用いて毎秒 60 回計測可能である. 本実験は, 20 代の学生 11 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精度に与える影響を無効にするため, 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. 観察対象の立方体と矢印の大きさは, 事前に被験者に教えることとした.

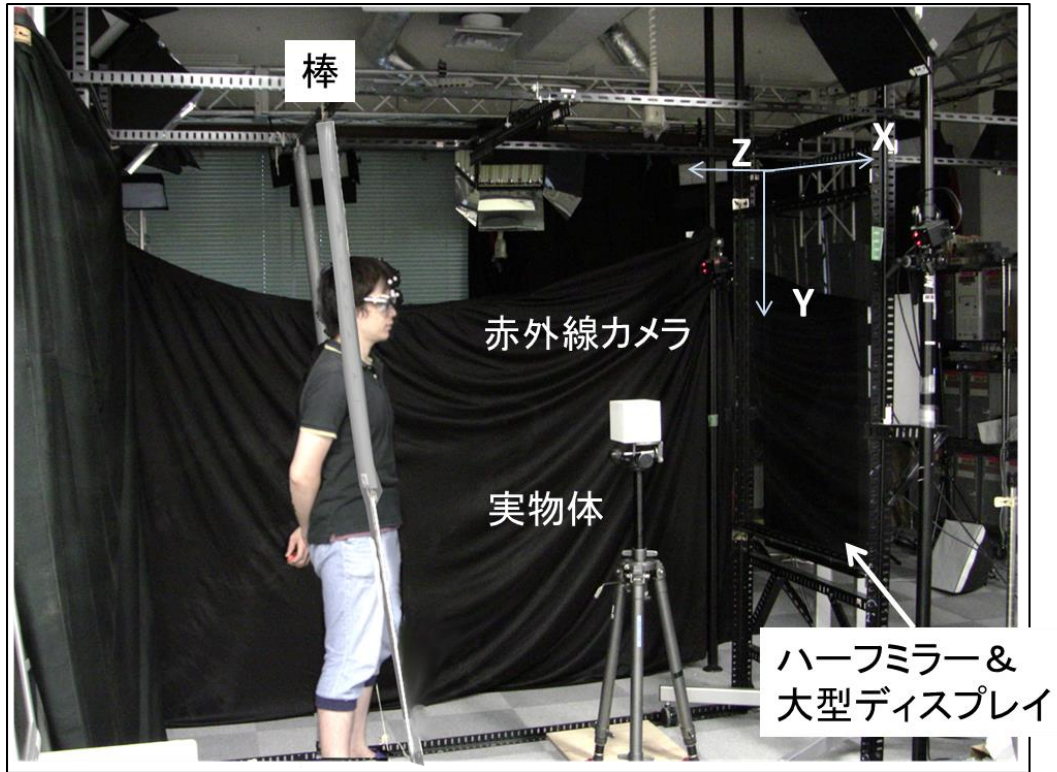


図 4.13 仮想鏡像の提示遅延を与えた仮想鏡像提示装置

4.3.2 仮想鏡像の提示遅延

仮想鏡像は、被験者の視点位置に応じて生成される。仮想鏡像の提示遅延は、3.4 節の図 3.7 に示す提案手法の処理で、視点位置マーカの位置情報の取得と仮想鏡像描画命令の間に待機命令を入れ、待機時間を調整することにより与えている。実際に、被験者が観察する仮想鏡像の提示遅延は、被験者の頭が動いてから大型ディスプレイに仮想鏡像が描画されるまでの時間である。提示遅延は 7 パターンであり、詳細を図 4.14 に示す。

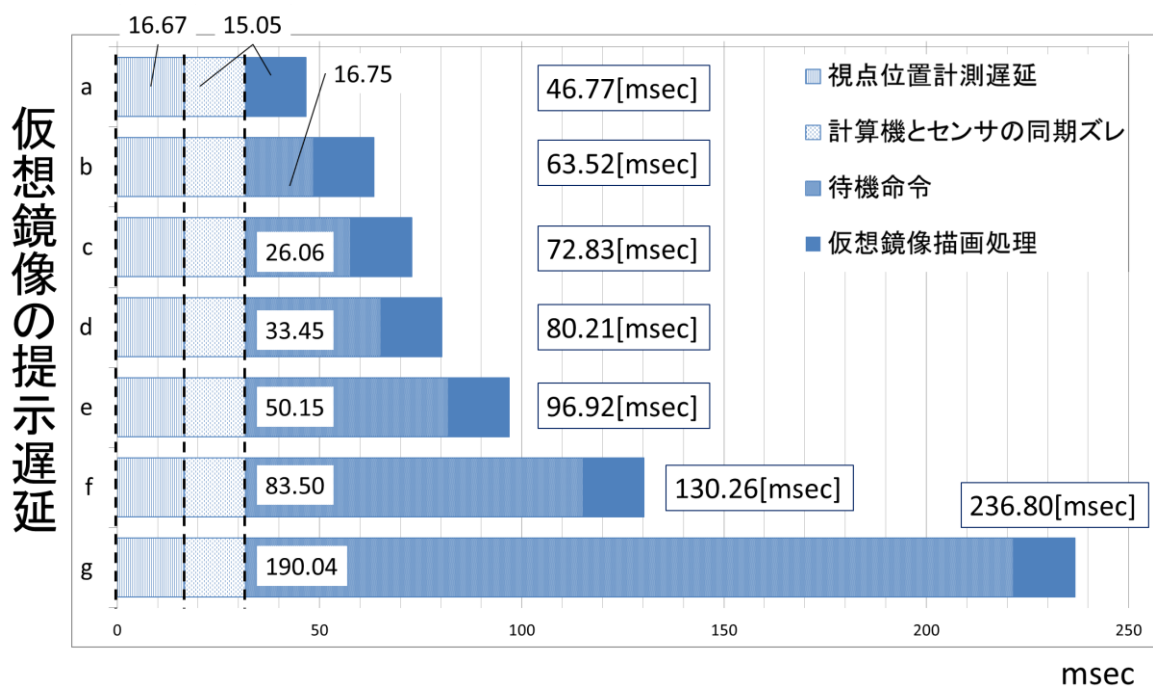


図 4.14 仮想鏡像の提示遅延

4.3.3 仮想鏡像の提示遅延が前後関係の把握精度に与える影響に関する実験方法

被験者に、鏡を見ながら立方体の前面と仮想鏡像である矢印の先端の前後関係を合わせるよう指示し、実験を行う。まず、被験者を奥行き $Z = 1400$ [mm]の位置に立たせた。次に、実験中は、ゲームパッドを用いて仮想鏡像を前後方向に自由に動かすことができることを被験者に教え、仮想鏡像と実鏡像の前後関係が一致したと判断した場合に、決定ボタンを押すように指示した後、実験を行った。被験者には、メトロノームの音に合わせて、設置した棒の間で、頭を左右に振らせることで運動視差を観察させた。実物体は、鏡像の運動視差による影響が出やすい位置であるハーフミラー面から、 $Z = 800$ [mm]に設置した。仮想鏡像の提示遅延は7パターンであり、それぞれ順番をランダムに入れ替えながら3回ずつ実験を行った。

4.3.4 仮想鏡像の提示遅延が前後関係の把握精度に与える影響に関する実験結果

実験結果を、表 4.8 に示す。7 パターンの提示遅延に対して分散分析を行った結果、 $P = 0.26$ となり、有意差が得られなかった。試行時間の平均値についても分散分析を行った結果、 $P = 0.10$ となり有意差が得られなかった。被験者のアンケートによると、6名の被験者が身体の動きと映像提示に提示遅延を感じ、違和感があるとコメントしている。また、仮想鏡像と実鏡像の前後関係の合わせ方については、5名の被験者が、仮想鏡像と実鏡像の前後方向の距離の差が小さくなるにつれ、仮想鏡像と実鏡像の相対的な動きが小さくなるはずであり、そのような状況になるまで矢印を操作し前後関係を合わせたとコメントしている。そのため、我々が日常的に観察している運動視差の見え方の知識を用いることにより、提示遅延が存在しても、前後関係の把握が可能であったと考えられる。

本実験の提示遅延は、3.4 節の図 3.7 に示す提案手法の処理で、視点位置マーカの位置情報の取得と仮想鏡像描画命令の間に待機命令を入れ、待機時間を調整することにより与えている。提示遅延は、被験者の頭が動いてから、画面に表示されるまでの提示遅延であるレイテンシとディスプレイのフレームレートの低下を含んでいる。前後関係把握精度に着目し、レイテンシとフレームレートの低下に関する各々の考察を行う。

前後関係の把握精度に着目すると、末永[48]の実験結果から、レイテンシによる影響は大きくないことが考えられる。一方で、立体感などの鏡らしさに関しては、被験者は違和感を持ったため、できるだけレイテンシが小さいほうが良いと考えられる。末永は、多視点データベースを用いてイメージベースによる運動視差を実時間で提示可能なディスプレイを実装した。2 [mm]の運動視差の提示間隔に対して、映像の提示遅延を、1000, 500, 250, 125, 0 [msec]と順番を変更し、立体感、物体の配置しやすさに関する実験を行った。具体的には、被験者にディスプレイを通して2つの円柱の運動視差を観察し、同様な配置になるように物体を配置させ、立体感と配置のしやすさについて評価を行った。その結果、立体感については、約 250 [msec]の遅れに対してユーザは違いを感じているが、物体を置く精度に関しては、レイテンシが大きくとも、本節の実験と同様に、有意な差が得られなかった。

また、フレームレートの低下により、ユーザが観察可能な運動視差の提示間隔が大きくなることが予想される。前後関係の把握精度とユーザの感じる違和感に着目すると、フレームレートの低下はできるだけ小さいほうが良いと考えられる。末永は[48]、運動視差の提示間隔に関しても立体感、物体の配置しやすさに関する実験を行った。その結果、運動視差の提示間隔が立体感と配置しやすさに影響があることを明らかにした。運動視差の提示間隔大き

くなれば、単位時間当たりの運動視差を提示する画像の枚数が少なくなる。具体的には、ディスプレイまでの距離は 500 [mm] であり、多視点画像の提示間隔は、左右に 150 [mm], 50 [mm], 10 [mm], 2[mm]刻みでそれぞれ、3 枚, 7 枚, 31 枚, 151 枚である。結果は、立体感においては、2[mm], 10[mm]それぞれについて 50[mm], 150[mm]より立体感が高いという結果が得られた。配置しやすさについては、2 [mm]と 150 [mm]の比較でのみ差が得られた。

表 4.8 に示す本実験の結果によると、7 パターンの提示遅延に対して分散分析を行った結果、 $P=0.26$ となり、有意差が得られなかった。また、試行時間に関しても、 $P=0.10$ となり有意さが得られなかった。そのため、本実験で与えたレイテンシとフレームレートの低下を含む提示遅延では、前後関係把握精度に関しては大きな影響を与えないことを示している。

以上の結果と考察により、実装した光学シースルー方式の MR-Mirror では避けられない実鏡像と仮想鏡像の間の提示遅延が、運動視差による前後関係の把握精度に大きな影響を与えないことを示すものである。これらを踏まえ、MR-Mirror により提示される MR 空間の鏡像の運動視差が前後関係の把握精度の向上に貢献していることが確認された。

表 4.8 仮想鏡像の提示遅延と前後関係の把握精度と試行時間

ケース	a	b	c	d	e	f	g
Score[mm]	164 (103)	160 (114)	178 (129)	206 (131)	177 (131)	188 (121)	280 (100)
試行時間[sec]	20.49 (12.60)	19.70 (11.36)	19.79 (9.08)	22.84 (12.68)	22.92 (12.43)	27.34 (12.87)	34.28 (17.80)

※括弧内は標準偏差値

4.4 視点移動に応じた仮想鏡像の不連続性に関する考察

視点移動に応じた運動視差の不連続性は、運動視差による鏡像間の前後関係の把握精度に影響を及ぼすことが考えられる。MR-Mirror は光学シースルー方式であるため、実鏡像に関しては、運動視差提示の不連続性が存在しないため、前後関係の把握精度に影響を及ぼさないことが考えられるが、一方で仮想鏡像には、運動視差の不連続性が存在する。運動視差の提示間隔が離散的になることにより、ユーザが奥行きを判断する手がかりが減少するため、前後関係を判断することに影響を及ぼすことが考えられる。

運動視差を連続的に提示するため、3次元ディスプレイにおいて様々な研究が行われてきた[22][24][26][29][39]。その中でも、ユーザが観察可能な視点数を増加させることは滑らかな運動視差提示において重要な課題の一つである。しかしながら、我々が実環境で観察するような滑らかな運動視差を再現するためには、既存のディスプレイでは多くの問題が存在する。インテグラルイメージング方式、視差バリア方式は、多視点からの映像提示が可能であるが、ディスプレイにより、異なった映像を観察可能な視点数が存在するため、滑らかな運動視差提示が困難である。このように物理的なデバイスにより視点が制限されることから、滑らかな運動視差として人間が許容可能な運動視差の提示間隔に関する研究も行われている。井ノ上ら[49]は、ハイビジョン画質の自然画像による両眼立体画像の提示時に、頭部位置の変化に応じた視点からの画像に切り替えることで多視点立体表示の状況を作り出し、この時の視点数とユーザが感じる映像のクオリティの関係を主観実験により評価した。また、末永は[48]、多視点データベースを用いてイメージベースにおける運動視差を提示可能なディスプレイを実装し、運動視差の提示間隔と立体感、物体の配置しやすさに関する実験を行った。運動視差の提示間隔を調整し、被験者に3次元ディスプレイを通して2つの円柱の運動視差を観察し、同様な配置になるように物体を配置させ、立体感と配置のしやすさについて評価を行った結果、運動視差の提示間隔が立体感と配置しやすさに影響があることを明らかにした。具体的には、ディスプレイまでの距離は500 [mm]であり、多視点画像の提示間隔は、左右に150 [mm], 50 [mm], 10 [mm], 2 [mm]刻みでそれぞれ、3枚, 7枚, 31枚, 151枚である。結果は、立体感においては、2 [mm], 10 [mm]それぞれについて50 [mm], 150 [mm]より立体感が高いという結果が得られた。配置しやすさについては、2 [mm]と150 [mm]の比較でのみ差が得られた。

このように、ユーザが、前後関係の位置を把握することや立体感を感じるためには、運動視差の提示間隔を密にする必要がある。MR-Mirrorにおいて頭の移動速度を一定とし、それを V_{head} , MR-Mirrorを用いて仮想鏡像を提示する時間を T_{mirror} とすると、仮想鏡像の運動視差の提示間隔 α [mm]は、以下の(6)式で表すことが可能である。

$$\alpha = V_{head}T_{mirror} \quad (6)$$

MR-Mirrorは、ディスプレイとユーザまでの距離と、ユーザの頭の移動速度を、ユーザが自由に設定することが可能である。従来のイメージベースの手法とは異なり、運動視差の提示間隔に関しても、図4.15に示すように頭を早く動かせば、疎になり、頭をゆっくりと動かせば密になるという特長が存在する。我々が日常的に鏡を用いて自己像を観察することを考えると、自己像を注意深く観察する場合には、頭をゆっくりと動かす。ユーザがMR-Mirrorを

鏡と同様に利用することを考えると、MR-Mirrorにおいても、自己像やMR空間を注意深く観察する場合には、ユーザが頭の速度を調整することが考えられる。そのため、前後関係の把握精度や立体感の維持が可能であると考えられる。また、(6)式より、提示間隔を密にするためには、MR-Mirrorの処理時間を高速にすればよいため、高フレームレートのディスプレイに交換するなどしてMR-Mirrorの処理時間を短縮することで改善を図ることができる。

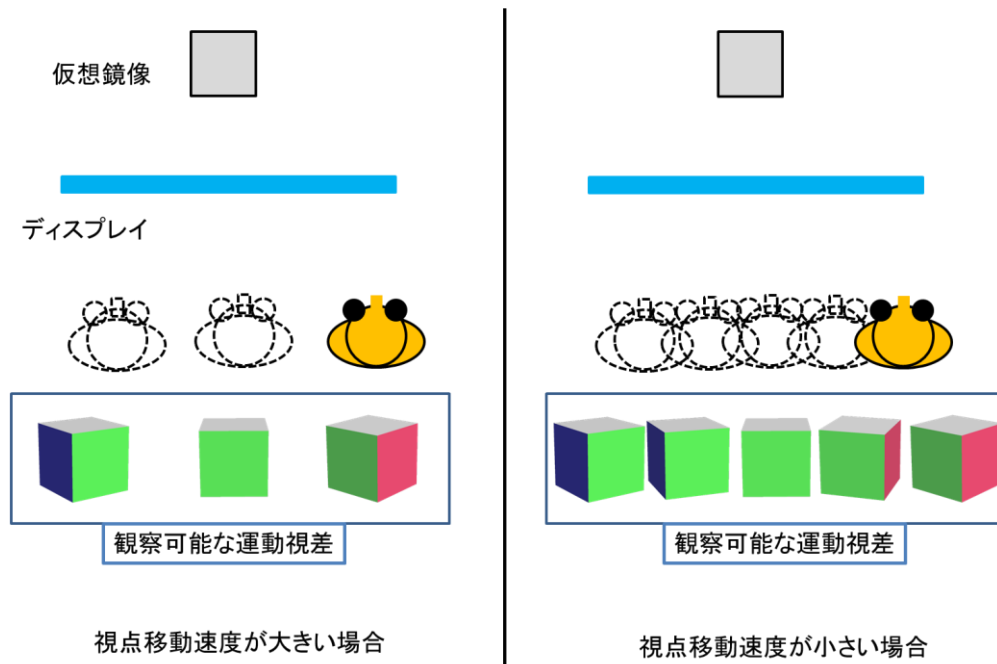


図 4.15 視点移動速度と運動視差提示の関係

運動視差の提示間隔は、ユーザの視点移動速度に依存するため、視点移動速度が小さいほど運動視差の提示間隔は小さくなる

第5章 結論

5.1 まとめ

鏡を模した MR 空間の提示は、我々が学習した鏡に関する知識が無意識に働き、鏡のようにみなして MR 空間に対して自然にインタラクションが可能になるため、様々な分野で利用が期待され、研究が盛んに行われている。しかしながら、従来の研究では、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、ユーザの視点に応じた鏡像の見え方が再現されるのは、特定の視点から観察している場合に限られる。視点が移動した際に、実空間を撮影するビデオカメラを動かすことは難しく、デジタル鏡像中の幾何的整合性を保つことは困難であるため、ユーザが違和感を持つ。また、多くの従来研究は、ビデオカメラを一台のみ用いるのが一般的であるため、自由な視点から自己の姿を含む鏡像を 3 次元的に観察することが困難であった。

そこで、本論文では、従来の鏡を模したインタフェースでは成し得ない“MR 空間で鏡の幾何的整合性”、“実時間での鏡像の運動視差”を同時に実現することを目的とし、鏡の幾何的整合性を満たす仮想鏡像とハーフミラーにより得られる実鏡像を重畳する手法を提案した。提案手法を実現するため、MR-Mirror を実装した。MR-Mirror は、ユーザの視点移動に応じた仮想鏡像を生成するだけでよく、実鏡像はハーフミラーの反射によって得られる。そのため、大掛かりな撮影装置や計算コストが不要となり、かつ高品質な鏡像提示が可能である。

実装した MR-Mirror が MR 空間において鏡の幾何的整合性を満たすことを実験により検証した。時間的整合性については、仮想鏡像を生成する処理時間と提示遅延を明らかにし、実時間による MR 提示が可能であることを示した。

さらに、MR-Mirror の利用シーンについて考察し、本論文では、鏡像の運動視差のみを考慮するため実鏡像と仮想鏡像の前後関係把握精度について着目した。以下に示す三つの要素を、MR-Mirror を用いて MR 空間を把握する際に、検討が必要であるとし、その理由を述べた。1 と 2 については、実験を行い、その結果について示した。3 については、関連研究を交えて考察した。

1. 鏡像の運動視差が前後関係の把握精度に与える影響
2. 仮想鏡像の提示遅延が、運動視差による前後関係の把握精度に与える影響
3. 仮想鏡像の運動視差の不連続性が、前後関係の把握精度に与える影響

1 については、MR 空間における鏡像の運動視差が前後関係の把握精度の向上に貢献していることを示した。運動視差に関する従来研究では十分に検討されていない鏡像反転が発生している状況下で、実験を行った。鏡像の運動視差が無い場合と有る場合を比較し、運動視差が有る場合の方が、仮想鏡像と実鏡像の前後関係の把握精度が向上する実験結果が得られた。

2 については、実鏡像と仮想鏡像の間の提示遅延が、運動視差による前後関係の位置把握に大きな影響を与えないことを明らかにし、MR-Mirror の提示遅延が実用に足ることを示した。MR-Mirror で発生する仮想鏡像の提示遅延を段階的に変化させ、運動視差による前後関係の把握精度に関する実験を行った。その結果、仮想鏡像の提示遅延が前後関係の把握精度に与える影響は大きくないことが示された。

3 については、MR-Mirror では、自己像や MR 空間を注意深く観察する場合には、日常的に鏡を用いるのと同様に、ユーザが頭を速度を調整することにより、前後関係の把握精度の維持が可能であると考えられる。MR-Mirror は、ディスプレイとユーザまでの距離と、ユーザの頭の移動速度を、ユーザが自由に設定することが可能であるため、運動視差の提示間隔に関しても、頭を早く動かせば、疎になり、頭をゆっくりと動かせば密になるという特性が存在する。我々が日常的に鏡を用いて自己像を観察することを考えると、自己像を注意深く観察する場合には、頭をゆっくりと動かす。そのため、現実世界で鏡を用いる場合と同様に頭を速度を調整することにより、前後関係の把握精度の維持が可能であると考えられる。

5.2 今後の課題と展望

実装した MR-Mirror は、実鏡像はハーフミラーにより得られるため、提示する物体の色や照明、陰影も正確に再現可能である。しかしながら、仮想鏡像については、実世界の光源情報をもとに色や照明や陰影などを正確に再現していない。照明や陰影は、前後関係の把握精度において影響を及ぼすことが知られている。また、実鏡像と仮想鏡像の奥行き手がかりの不一致が、ユーザに鏡としての不自然さを感じさせる可能性がある。そのため、魚眼カメラなどのセンサを用いて実世界の光源情報を取得し、仮想鏡像の色、照明、陰影を再現することができれば、MR-Mirror の性能の向上が見込まれる。

身体動作を用いて、MR 空間とインタラクションすることを考えると、仮想鏡像と実鏡像の隠蔽関係を再現することが望ましい。現在の MR-Mirror では、ユーザの視点の 3 次元位置については計測しているが、ユーザの身体については計測していない。そのため、kinect[50]などの非接触なセンサを用いて身体の 3 次元情報を計測し、実鏡像と仮想鏡像の隠蔽関係を再現することも今後の課題の一つである。

ユーザの視点位置計測に関しては、本研究では、正確な運動視差を再現するため、視点位置マーカを用いて計測している。しかしながら、MR-Mirror を実際に利用することを考えると、ユーザに拘束感を与えることは、システムの使いやすさ、満足感に大きく影響を与えることが予想される。そのため、カメラや kinect などの非接触なセンサにより、ユーザに何も装着させることなく視点位置を計測することが必要である。

これらの課題を実現し、4 章で述べた MR-Mirror の利用シーンにおいて、仮想鏡像が移動する場合やユーザの視点移動と共に大きく移動するユーザの身体に仮想鏡像が重畳される場合に関して評価を行うことも今後の検討課題の一つである。

鏡は、我々の周りに存在し、日常的に利用するものである。我々が日常的に利用するものに情報端末の機能を持たせ、直感的なインタフェースとして用いる試みが行われてきた[51]。鏡は、駅やショッピングモール、博物館、自宅などの日常空間に設置され、様々な用途に利用される。従来の鏡の機能を MR 技術により拡張し、ユーザの身体動作を用いて MR 空間を

観察・操作する機会の増加が予想される。そのため、鏡は、直感的に理解しやすい MR 空間を提示するシステムとして今後も研究が盛んに行われていくだろう。本研究の成果が、MR 空間を提示するディスプレイ開発、鏡の性質を理解するための一助になれば幸いである。

謝辞

研究室に配属されてから六年間、懇切丁寧な御指導を賜りました、本学大学院システム情報工学研究科 北原格准教授に感謝の意を表します。ゼミやミーティングを通して非常に参考となる助言を頂きました、本学大学院システム情報工学研究科 大田友一教授、亀田能成准教授にも感謝の意を表します。

本学大学院システム情報工学研究科 北原格准教授には、本研究の立ち上げから遂行に当たり、様々なご助言ご指導をいただきました。投稿論文や発表練習の際には、お忙しい中、時間を取って頂きありがとうございました。また、研究の方向性の議論の際に、私の考えの至らぬ点や社会人・研究者としての在り方を丁寧に指導していただき、誠にありがとうございました。先生のご指導により、スケジュール管理の重要性と社会人として常識を学ぶことができました。

本学大学院システム情報工学研究科 大田友一教授には、研究に対する取り組み方や研究者としての在り方、社会人の常識をご指導・ご助言いただきました。また、私の研究を温かく見守ってくださり深く感謝しております。私の考えが至らぬ点が多く、失敗ばかりでしたが、先生のご指導により、社会人として特に重要な“自分で考える力”と“自分で決断する力”を学ぶことができました。深く感謝いたします。

本学大学院システム情報工学研究科 亀田能成准教授には、本研究を遂行する上で大変貴重なご助言、ご指摘をいただきました。本研究をまとめる上で不足な点を明確にすることができました。また、先生のご指導・ご指摘により、論理的に考え、発言する能力を身に付けることができました。機材やプログラミング言語など情報技術に関わる広い知識を身につける機会を与えてくださいましたことを深く感謝いたします。

また、本論文を査読していただき、貴重なご意見を頂きました、本学システム情報工学研究科 葛岡英明教授、掛谷英紀准教授に心からお礼申し上げます。

研究を進める上で、数々の助言を頂きました、本学画像情報研究室卒業生の皆様、特に南谷真哉先輩、精神的な成長を促してくれた中野学先輩、博士課程進学に対してご助言を頂き、よき相談相手になってくださった糟谷望先輩に御礼を申し上げます。研究を進めるにあたり数々の助言や議論を頂き、多くの評価実験に快く協力してくださった、本学画像情報研究室の皆様、OB・OGの皆様にも深く感謝いたします。

最後に、研究をしたいという私の希望を快く受け入れ、精神的にも、経済的にも決して楽ではなかった研究生生活を支えてくれた母と父に心から深く感謝致します。

参考文献

- [1] ルネザン, 加藤義信訳: “鏡の心理学”, ミネルヴァ書房 ISBN4-623-03062-8, (1999)
- [2] 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, vol.60, no.4, pp.499-501, (2006)
- [3] 森川 治, 福井幸男, 山下樹里, 佐藤 滋: “人に優しい超鏡対話における指差し行為”, 情報処理学会論文誌, vol.41, no.5, pp.1290-1297, (2000)
- [4] Y. Ohta, and H. Tamura: “Mixed Reality-Merging Real and Virtual Worlds”, Ohmsha Ltd., (1999)
- [5] O. Bimber, B. Frohlich, D. Schmalstieg, and L. M. Encarnação: “The Virtual Showcase,” IEEE Computer Graphics & Applications, Vol.21, No.6, pp.48-55, (2001)
- [6] 仲洋平, 加藤博一, 橋啓八郎: “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, no.38, pp.47-50, (2001)
- [7] 田口哲典, 青木輝勝, 安田浩: “デジタルミラーシステムにおける一検討”, 情報処理学会研究報告, pp.1-6, (2001)
- [8] M. Fiala: “Magic Mirror System with Hand-held and Wearable Augmentations”, IEEE Virtual Reality Conference, pp.251-254, (2007)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] P. Maes, T. Darrell, B. Blumberg, and A. Pentland: “The ALIVE System: Wireless, Full-Body Interaction with Autonomous Agents”, Multimedia Systems vol.5, no.2, pp.105-112, (1997)
- [12] O. Morikawa, and T. Maesako: HyperMirror: “To-ward pleasant-to-use video mediated communication system”, CSCW'98, pp.149-158, (1998)

- [13] E.Hosoya, M. Kitabata, H. Sato, I. Harada, H. Nojima, F. Morisawa, S. Mutoh, and A. Onozawa: "A Mirror Metaphor Interaction System: Touching Remote Real Objects in an Augmented Reality Environment", ISMAR2003, pp.350-351, (2003)
- [14] 佐木俊史, 渋谷雄, 田村博: "パソコン映像入力を用いたアクション・インタフェースの試み" 第12回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.213-218, (1996)
- [15] バーチャル試着システム: http://www.dnp.co.jp/news/10056353_2482.html
- [16] Zoff Mirror: <http://www.zoff.co.jp/mirror/>
- [17] Digital Makeover Mirror:
<http://mattelbrandsmedia.com/product.php?category=32&product=3>
- [18] 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)
- [19] 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, pp.315-332, (2005)
- [20] 西田佳史, 平山敏行, 柿倉正義, 堀俊夫, 末広尚士, 平井成興: "3次元視覚を用いた洗面台型ディスプレイ", 電気学会システム・制御研究会, SC-01-5, (2001)
- [21] 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).
- [22] 増谷健, 東野政弘, 安東孝久, 金山秀行: "解説:メガネなし3dディスプレイの開発", システム制御情報学会誌, Vol.49, No.9, pp.351-356, (2005)
- [23] 平和樹, 福島理恵子, 最首達夫, 永谷広行, 平山雄三: "インテグラルイメージング方式による立体表示とその応用", 電子情報通信学会技術研究報告, vol.106, No.338, pp.27-32, (2006)
- [24] K. Perlin, S. Paxia, and J.S. Kollin: "An Autostereoscopic Display," Proc. Siggraph 2000, (2000)
- [25] 岩渕絵里子, 椎尾一郎: "電脳化粧鏡:メイクアップを支援する電子鏡台", wiss2008, 日本ソフトウェア科学会研究会資料シリーズ, ISSN 1341-870X, No. 58, pp.45-50, (2008)

- [26] 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集中編, Vol.63, No.613, pp. 3094-3100, (1997).
- [27] Y. Yanagida, S. Saito, S.Yano, T.Maeda, and S. Tachi: “A Head-Tracked, Live-Video-Based Telexistence System Using a Fixed Screen”, ICAT2001, (2001)
- [28] 財津義貴, 中川高志, 稲見昌彦, 川上直樹, 柳田康幸, 前田太郎, 舘暲: “トレイグジスタンスの研究(第 32 報) -頭部運動に高速追従するトルソ型撮像ロボットの開発-”, 信学技報 MVE2001-11, pp.51-54, (2001)
- [29] 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, no.10, pp.1267-1275, (1994)
- [30] V. Nozick and H. Saito: “On-line free-viewpoint video From single to multiple view rendering”, Journal of Automation and Computing (IJAC), vol.5, no.3, pp.257-267, (2008)
- [31] 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)
- [32] M. Straka, S. Hauswiesner, M. R  ther, and H. Bischof: “A free-viewpoint virtual mirror with marker-less user interaction.” In Proc.of the 17th Scandinavian Conference on Image Analysis, (2011).
- [33] T. Kanade, P. Rander, and P. J. Narayanan: “Virtualized Reality: Constructing Virtual Worlds from Real Scenes”, IEEE MultiMedia, vol.4, no.1, pp.34-47, (1997)
- [34] P. J. Narayanan, P. Rander, and T.Kanade: “Constructing Virtual Worlds Using Dense Stereo”, ICCV 1998, pp.3-10, (1998)
- [35] 竹下佳佑, 渡邊孝一, 佐藤克成, 南澤孝太, 舘暲: “トレイグジスタンスの研究(第 63 報) -Telesar3 において許容される通信遅延の検討-”, 日本バーチャルリアリティ学会 第 15 回大会, (2010)
- [36] 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, no.4, pp.509-514, (2006)
- [37] 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)
- [38] 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, pp.649-655, (1977)
- [39] 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)
- [40] J. A. Jones, J. E. Swan, G. Singh, E. Kolstad, and S. R. Ellis: “The Effects of Virtual Reality, Augmented Reality, and Motion Parallax on Egocentric Depth Perception”, APGV08, pp.9-14, (2008)
- [41] Advanced Realtime Tracking GmbH. : <http://www.ar-tracking.de/>
- [42] A. Lazinica, and H. Kawai: “Robot Manipulators New Achievements”, pp.663-670, InTech, (2010)
- [43] R. T. Azuma: “A survey of augmented reality” ,Presence: Tele operators and Virtual Environments, vol.6, no.4, pp.355-385, (1997)
- [44] 佐藤信：“官能検査入門”，日科技連出版社, ISBN-10: 4817190019, (1978)
- [45] 竹市博臣：“知覚と運動, 第1章”，pp.15-48, 東京大学出版会, (1995)
- [46] 大山正：“視覚心理学への招待-見えの世界へのアプローチ- 第7章”，pp.147-181, サイエンス社, (2000)
- [47] E. B. Johnston, B.G.Cumming, and M.S.Landy: “Integration of Stereopsis and Motion Shape Cues”, Vision Research 34, pp.2259-2275, (1994)
- [48] 末永剛：“視点位置計測に基づく運動視差3次元ディスプレイの開発と立体感の評価”，Ph.D thesis, 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科情報システム学専攻, (2008)
- [49] 井ノ上直己, 根岸一平, 矢野澄男：“立体画像の評価における運動視差の解像度の影響”，電子情報通信学会信技術報告, MVE109(466), pp.3-8, (2010)
- [50] Kinect: <http://www.xbox.com/ja-JP/kinect>
- [51] 原島博, 牛田啓太, 田中悠, 苗村健：“街の情報化を考える-” いまだけ・ここだけ “の情報環境デザイン”，電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーショングループ大会特別講演, pp.1-9, (2002)

- [52] 細谷英一，原田育生，小野澤晃，村瀬洋：“非正面視点からの自己像を利用した対話インタフェースにおける指示容易性評価”，ヒューマンインタフェース学会論文誌， vol.13, no.3, pp.221-233, (2011)

公表論文リスト

査読付き論文誌

1. 佐藤秀昭, 北原格, 大田友一: “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”, 日本 VR 学会論文誌, Vol.18, No.3, pp.421-430, 2013

査読付論文 (国際学会)

1. Hideaki Sato, Itaru Kitahara, Yuichi Ohta: “MR-Mirror:A Complex of Real and Virtual Mirrors”, HCI International 2009, San Diego, July 2009, Proceedings of the 3rd International Conference on Virtual and Mixed Reality: Held as Part of HCI International 2009, pp. 482-492.

その他の公表論文

1. Hideaki Satoh, Itaru Kitahara, Yuichi Ohta: “MR-Mirror: A Method to Merge Real and Virtual World by Using Mirror Metaphor”, The 3rd Korea-Japan Workshop on Mixed Reality, Gyeongju, Korea, April 2010.
2. Hideaki Satoh, Itaru Kitahara, Yuichi Ohta: “A Development Report of MR-Mirror with Binocular and Motion Parallax”, The 4th Korea-Japan Workshop on Mixed Reality, Osaka, Japan, April 2011.
3. 佐藤秀昭, 北原格, 大田友一: “MR ミラー: 仮想鏡像を用いた複合現実感型提示方式”, MIRU2008 第 11 回画像の認識・理解シンポジウム, DS-11, 長野, 2008 年 7 月
4. 佐藤秀昭, 北原格, 大田友一: “MR ミラー: 仮想鏡像を用いた複合現実感提示方式の実現”, 日本バーチャルリアリティ学会 第 13 回大会, 1C1-2, 奈良, 2008 年 8 月
5. 佐藤秀昭, 北原格, 大田友一: “MR ミラーにおける視点位置推定のための顔領域検出手法”, 電子情報通信学会 2009 年総合大会 ,D-12-88, 愛媛, 2009 年 3 月
6. 佐藤秀昭: “MR ミラー: 鏡像を用いた現実世界と仮想世界の融合提示”, TX テクノロジー・ショーケース 2010, 94, 茨城, 2010 年 2 月
7. 佐藤秀昭, 北原格, 大田友一: “運動視差を再現した鏡の中の仮想世界と現実世界の融合提示”, 18th Workshop on Interactive Systems and Software, B14, 福島県, 2010 年 12 月
8. 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 年 1 月

9. 北原 格, 池田 聖, 一刈 良介, 植松 裕子, 佐藤 秀昭, 牧田 孝嗣, 宮下 勉: ”ISMAR2010 報告 –複合現実感研究の最新動向–”, 電子情報通信学会 技術研究報告 PRMU, vol.110, no.381, pp.279-286, 2011 年 1 月.
10. 佐藤秀昭, 北原格, 大田友一: ” MR-Mirror における両眼視差による立体映像提示の検討” ,電子情報通信学会 2011 年総合大会, D-12-17, 東京, 2011 年 3 月

受賞など

1. 山崎真也, 古畑俊一郎, 佐藤秀昭, 渡辺大介
:”2008 年 PRMU アルゴリズムコンテスト 入賞”, 2008 年 9 月