Avatar Crossing：空中像を用いた移動可能な実世界ＣＧアバタシステム

水田 柚花[†1,a)]　土谷 慧[†1,b)]　小泉 直也[1,†1,c)]

概要：CG アバタは，ロボットのアバタに比べ動きや見た目をより自由に表現できるが，主にソーシャル VR プラットフォーム内に限定され実世界内を動き回ることができなかった．そこで本研究は，空中像を用いた移動可能な実世界 CG アバタシステムを提案する．空中像アバタを視認可能な目の位置範囲（視域）を計算し，アバタ操作者に提示する視覚情報に視域をアノテーションした．また，計算した視域の中から空中像を撮影して，視域の計算値が正しいことを確認した．

1. はじめに

古来より，人は祭りや舞踏会で仮面をつけて自分の姿を隠し，自分以外の姿になってコミュニケーションするエンタテインメントを楽しんできた [6]．現代においても，ソーシャル VR プラットフォーム [24] でコンピュータグラフィックス（CG）のアバタの姿を借りたコミュニケーションが楽しまれている．ソーシャル VR プラットフォーム（VR 空間）で用いられる CG アバタは，ロボット等の実物体を用いたアバタと比べ，物理法則に縛られず，より自由な見た目や動きの実装が可能である．

CG アバタを VR 空間だけでなく実世界に表示する手法として，空中像でアバタを表示する Levitar[27] が提案されている．Levitar は，固定した光学系により空中像アバタを表示する．また，空中像として表示したアバタの位置にカメラを光学的に転送することで，アバタの視点から見た実世界の映像を撮影している．このように Levitar はアバタの視点から実世界を見ることに着目しており，アバタの移動は実装していない．

そこで本研究では，実世界中に表示した CG アバタの移動を可能にすることを目標として，移動可能な空中像提示装置でアバタを表示し，遠隔地から操作するシステムを提案する（図 1）．空中像光学系に移動機構を加え，遠隔からアバタの表示内容と移動機構を操作するシステムを実装する．ロボットの遠隔操作にはロボット自身が映り込む三人称視点の映像が適している [17] ことから，空中像アバタの視点ではなく後方からアバタが映り込むように撮影した映像を操作者に提示する．

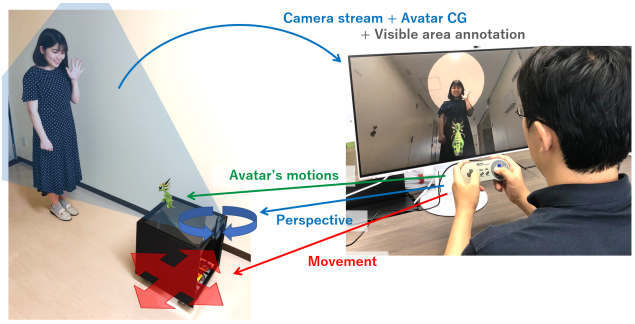

図 1　システム全体の様子

本システムは，CG アバタの姿を借りて実世界で移動しながらコミュニケーションをとるエンターテインメントを実現することから，エンタテインメントコンピューティングの更なる発展に貢献する．

システムの設計にあたり，空中像の視域を考慮する必要がある．空中像は実中に CG を表示し，特殊な機器を装着せずに見ることができるが，見ることができる角度（視域）が狭いという欠点がある．本システムでは，空中像光学素子 Micro Mirror Array Plates（MMAPs）によって光を反射させて空中像を表示している．そのため，MMAPs を覗き込む範囲から見なければ空中像全体を見ることができない．このように空中像の視域は，MMAPs のサイズと MMAPs の結像可能入射角の範囲によって制限される（図 2）．そのため空中像アバタを移動させるには，アバタの前にいる人にアバタが見えているのかを確認し，アバタを見せるために必要な移動量を明らかにする必要がある．そこで，実装したシステムが表示する空中像アバタの視域を計

1　情報処理学会
†1　現在，電気通信大学
a)　mizuta@media.lab.uec.ac.jp
b)　tsuchiya@media.lab.uec.ac.jp
c)　koizumi.naoya@uec.ac.jp

© 2020 Information Processing Society of Japan

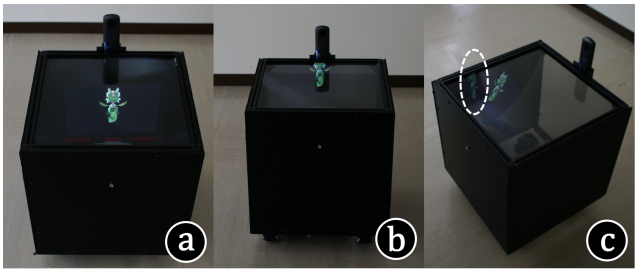

図 2 空中像の視域：視域内からは空中像全体が見える（視域内，a），MMAPs のサイズによる視域の限界のため空中像が欠けて見える（視域外，b），MMAPs の結像可能入射角範囲による視域の限界のため空中像の輝度が低くほとんど見えない（視域外，c）

算し，計算結果が正しいことをカメラによる空中像の撮影によって確認した．

2. 関連研究

2.1 CG アバタ

CG アバタは自分の外見を変えてコミュニケーションをとりたいという望みを実現する．お互いに自分の好きな CG アバタの姿でコミュニケーションをとることができるソーシャル VR プラットフォームとして，VRChat[28] や cluster[3], Hubs[16] 等が様々なイベントの開催に用いられている．また，アバタの姿で話す様子を撮影し，動画サイト YouTube に投稿する人々を示すバーチャルユーチューバーという言葉が生まれる [11], [22] など，CG アバタを介したコミュニケーションが広く普及している．

一方で，ロボットアバタ [5], [32] や液晶パネルに表示したアバタ [1], [4] を通じて，VR 空間ではなく実世界の遠隔地でのコミュニケーションを実現する手法がある．ロボットを用いたアバタは，CG アバタに比べて見た目の改変の手軽さや動きの自由度が低い．液晶パネルに表示したアバタは，CG でアバタを表示するためアバタの見た目や動きがより自由に実装できるが，アバタの背後からの撮影ができない．

本研究では，アバタの移動を重視して，実世界に CG アバタを表示する手法を提案する．アバタの移動操作において，操作者に提示する視覚情報はアバタの視点から見た映像（一人称視点映像）よりも，アバタとその周りを映した映像（三人称視点）の方が適していると考えられる．小型ロボットの遠隔操作には，ロボットの前方を撮影した一人称視点映像よりもロボット自身が映り込む三人称視点映像の方が適しているという研究結果がある [17]．またビデオゲームにおいても「任天堂 あつまれどうぶつの森」[33] では，プレイヤーが操作するアバターキャラクターを見下ろすような視点が採用されている．そこで本研究では，アバタの操作者へ提示する視覚情報は三人称視点映像とする．

2.2 空中像表示技術

この節では，フォグディスプレイと光学的な手法を含め，空中像表示技術について述べる．空中像は空中に表示された実像であり，裸眼で観察することができる．

フォグディスプレイ [19], [26] は濃い霧に投影することで空中像を表示する．これらの手法は，3 次元の空中像を表示しやすいという利点がある一方で，空気の流れに敏感で，エアコンの風などによって簡単にかき消されてしまう欠点がある．したがって，動き回りながら空中像を表示する本研究の提案システムには適さない．

フォグディスプレイの他に，光の反射や屈折を用いて光学的に空中像を表示させる手法がある．空中像を結像する光学素子として，Dihedral corner reflector array（DCRA）[14]，ASKA3D[20]，Roof mirror array（RMA）[13] 等がある．DCRA と ASKA3D は，光源から出た光を素子内部の直交するミラーアレイで偶数回反射させ，素子に対して面対称な位置に実像を結像させる．DCRA と ASKA3D は共に MMAPs と呼ばれる．RMA は，鏡面の溝で光を反射させることで，素子に対して光源と同じ高さに空中像を結像する．これらの特殊な光学素子を用いる他に，フレネルレンズを用いて空中に結像する手法 [18] や，ハーフミラーで反射させた光を再帰的に反射させて空中像を結像する Aerial Imaging by Retro-Reflection（AIRR）と呼ばれる手法 [29] もある．これらの素子や手法で結像された空中像は，素子から出る光の方向が限定されているため，空中像を見ることができるユーザの位置範囲が限定されている．本研究では，空中像光学系の中でも市販されており入手が簡単な ASKA3D を用いる．

2.3 カメラを用いた空中像インタラクション

本研究では，空中像アバタを遠隔地から操作するために，アバタの進行方向の障害物の有無や周囲にいる人の様子を確認するための視覚情報の取得にカメラを用いる．空中像を用いた既存の研究では，空中像を観察するユーザの動作や位置を計測しインタラクションに用いるためにカメラが多く用いられている．

RGB カメラを用いた空中像インタラクションとして Levitar が挙げられる． Levitar では，空中像光学素子によってカメラ視野を転送する小泉らの手法 [12] の光学設計を用いて空中像から見える視界を取得している．これにより，空中像で表示したキャラクターに入り込む体験を実現している．

赤外線カメラを用いた空中像インタラクションとして Touching the Void[2] が挙げられる．Touching the Void では，2 つの赤外線カメラを用いてユーザの指先の位置を検出している．これにより，指先の位置に応じて空中像に指の影を映し，空中像に触れているのかどうかをユーザにわかりやすくしている．

© 2020 Information Processing Society of Japan

深度カメラを用いた空中像インタラクションとしてMARIO[8]，高崎らの研究 [23]，RePro3D[30]，HaptoClone[15] が挙げられる．MARIO は深度カメラによって実物体やユーザの手の高さを読み取っている．読み取った情報を用いて，空中像キャラクターが実物体やユーザの手の上に乗るインタラクションを実現している．高崎らは深度カメラによりユーザの視点と指先の位置を読み取り，それに応じて空中像の表示内容を変えることで，運動視差による立体視や，指の動作によって空中像が変形・移動・生成するインタラクションを実現している．RePro3D も深度カメラによってユーザの指先の位置を検出している．RePro3D では検出した指先の位置と空中像の位置を比較し指先につけたデバイスを駆動することで，空中像に触覚を付与するインタラクションを実現している．HaptoClone は，遠隔地に設置した 2 つの光学系を用いて互いの周辺状況を空中像として表示する．深度カメラによってユーザの指の位置と遠隔地の周辺状況を読み取り，触覚提示機構の制御に反映することで空中像に触覚を付与している．

他の研究では手など特定のものをセンシングするためにカメラを使用しているが，本研究では周りの環境全体の様子を撮影するため全天球カメラを使用した．

3. 提案手法

3.1 設計

本論文が提案するシステムは，操作者の操作を離れた位置に表示された空中像アバタの見た目と移動に反映し，アバタの周囲の環境を視覚情報で操作者に伝える（図 1）．システムは，カメラ・空中像光学系・移動機構からなる装置と，PC，ディスプレイ，コントローラからなる．これによって，操作者はコントローラで操作を入力し，アバタの周囲を見回したり，アバタのアクションを操作したり，実世界を動き回ることができる．

3.2 実装

本システムを実装した様子を図 3 に示す．再帰透過光学素子は ASUKANET 製 ASKA3D-366（サイズ 366 mm × 366 mm × 5.3mm），ディスプレイは Apple 製第 6 世代 iPad，カメラは RICOH THETA V を使用した．移動機構には Nexus Robot 製 100mm4WD メカナムホイール学習セットを使用した．なお，コントローラ（BUFFALO レトロ調 USB ゲームパッド BSGP815GY）の十字キーで操作することから，回転せずに前後左右へ移動可能なメカナムホイール [7] を移動機構に使用した．また，PC の OS は Windows10 を用い，Unity 内部でシステム全体の制御を行った．装置に載せたカメラからリアルタイムに映像を取得し，リモート環境にいる操作者に提示する．このとき，カメラは空中像を背後から撮影しているため空中像はカメラ映像に映らない．そこでカメラ映像にアバタの CG を重畳して操作者に提示する．

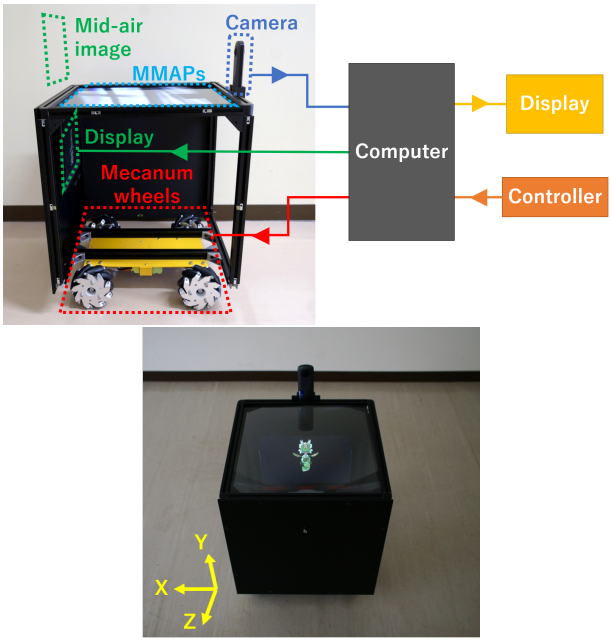

図 3　本システムの実装（上）と正面から空中像アバタ（ドラゴン）を見た様子（下）

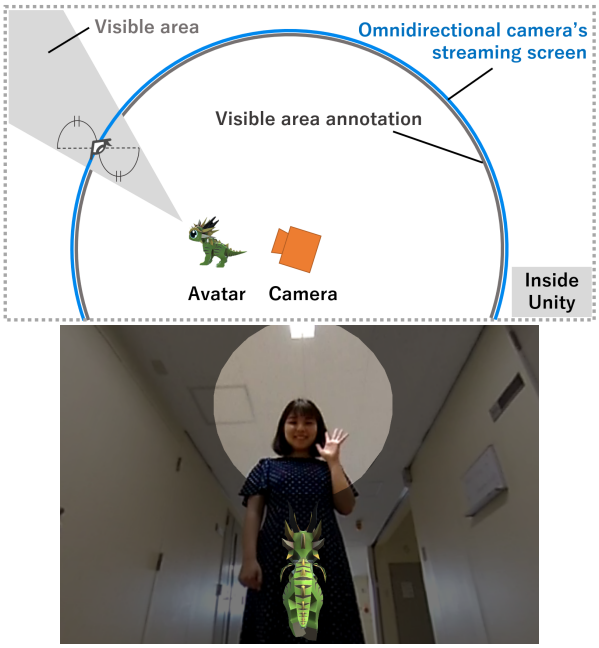

図 4　視域のアノテーションの付け方（上）と操作者に提示する視覚情報（下）

操作者に提示する視覚情報には，空中像アバタの視域を示すアノテーションも表示する．これはアバタ操作者にとって，アバタ周辺にいる人にアバタが見えているのかの目安となる．実装した装置が表示する空中像の視域は，空中像観察者の眼高によって変化する．よって，観察者の眼高が世界成人平均であり，立ち位置が視域の奥行方向の中心であると仮定してアノテーションを実装した．具体的には Unity 内部で，全天球カメラで取得した映像を映した球

© 2020 Information Processing Society of Japan

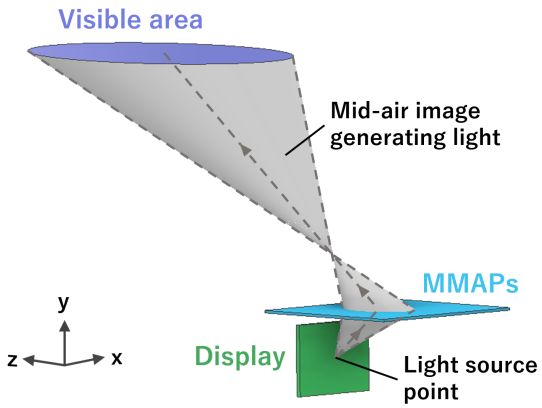

図 5　ディスプレイ上のある一点の発光に対する視域

が，実装した装置における世界の成人平均眼高での視域と交わらない領域を黒く着色して示す（図 4）．なお，球の大きさは成人平均眼高の観察者が視域の奥行方向の中心にいることから定められる．Unity はコントローラの入力を受けて，全天球カメラの映像のうちの操作者に提示する部分を動かして周囲を見回し，装置を移動させてアバターを実世界内で動かし，アバターのアクションを空中像に反映させる．

3.3　視域式

本システムで実装した光学系の設計に基づいて視域を表す式を求めた．本システムの光学系は MMAPs を水平に配置し直立空中像を表示する設計である [9]．また本研究では，視域を「空中像が欠けずに見えるユーザの位置範囲」と定義する．視域は，MMAPs が空中像として結像できる光の入射角，光学系の配置，観察者の眼高の 3 つにより定まる．

ディスプレイ上のある一点から発光された光のうち，空中像として結像される光は円錐で表され，視域はその円錐の断面の楕円で表される（図 5）．この円錐を成す光は，MMAPs が空中像として結像できる入射角で MMAPs に入射する光である．

ディスプレイに対し MMAPs が十分に大きいと仮定したとき，視域は図 6 のように 4 つの楕円 E_1–E_4 で囲まれた領域で表される．E_1–E_4 はそれぞれ，ディスプレイの右下，右上，左上，左下の角から出た光の視域である．E_1–E_4 の式は式 (1) – (4) と求められた．式中の各値の説明を図 7 と表 1 に示す．なお，式を求める計算には計算ソフト Maxima（バージョン 5.43.0）[21] を用いた．

式 (1) – (4) を用いて，実装した装置の世界の成人（20–65 歳）平均眼高 157.8cm[25] における視域を求めた．今回実装した装置に用いた MMAPs の ASKA3D を製造している株式会社アスカネット [31] によると，ASKA3D が空中像として結像できる光は最小出射角度が 25°，最大出射角度が 65° である．MMAPs が空中像として結像する光は，

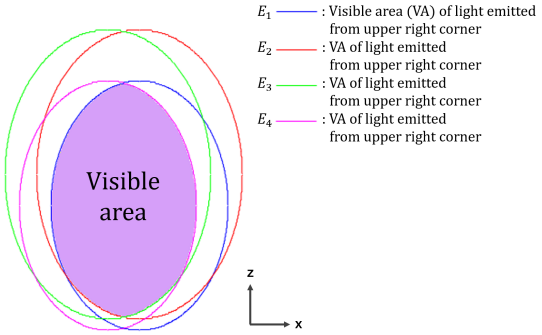

図 6　視域を定める 4 つの楕円の重なりの様子

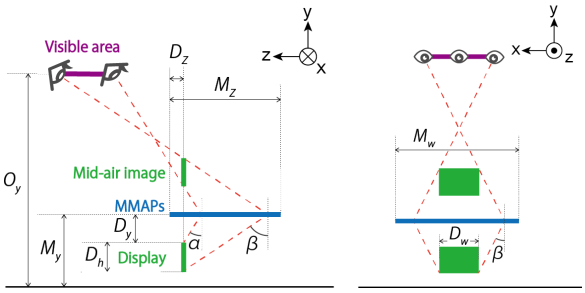

図 7　式中の各値．装置を右から見た図（左）と前から見た図（右）

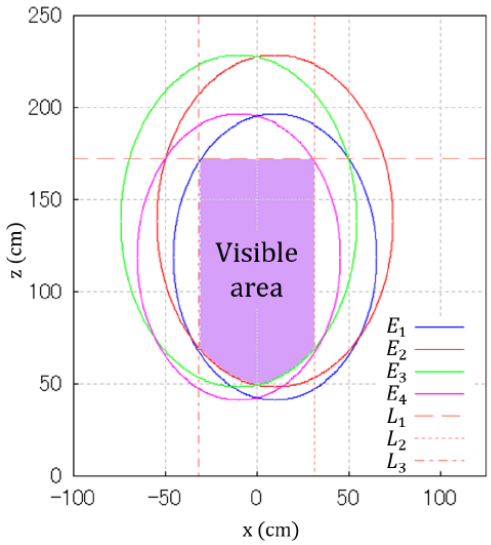

図 8　実装した装置における世界成人平均眼高での視域

MMAPs に対する入射角度と出射角度が等しくなるので，ASKA3D の空中像結像光入射角は 25–65° である．この値を用いて，実装した装置に対して，世界の成人（20–65 歳）平均眼高 157.8cm における視域を求めると，図 8 及び式 (5) – (11) で表される領域となった．なお，ディスプレイに対して MMAPs が十分に大きくないため，MMAPs の大きさによって図 8 中の橙の点線 L_1–L_3 のように視域が狭められている．

© 2020 Information Processing Society of Japan

$$E_1 : \frac{4\left(x - \frac{D_w}{2}\right)^2}{\left((\tan\alpha + \tan\beta)^2 + 4\right)\ \tan^2\frac{\alpha-\beta}{2}} + \frac{4\left(z - \frac{(O_y - M_y - D_y - D_h)(\tan\alpha + \tan\beta)}{2} + D_z\right)^2}{(\tan\alpha - \tan\beta)^2} = (O_y - M_y - D_y - D_h)^2 \tag{1}$$

$$E_2 : \frac{4\left(x - \frac{D_w}{2}\right)^2}{\left((\tan\alpha + \tan\beta)^2 + 4\right)\ \tan^2\frac{\alpha-\beta}{2}} + \frac{4\left(z - \frac{(O_y - M_y - D_y)(\tan\alpha + \tan\beta)}{2} + D_z\right)^2}{(\tan\alpha - \tan\beta)^2} = (O_y - M_y - D_y)^2 \tag{2}$$

$$E_3 : \frac{4\left(x + \frac{D_w}{2}\right)^2}{\left((\tan\alpha + \tan\beta)^2 + 4\right)\ \tan^2\frac{\alpha-\beta}{2}} + \frac{4\left(z - \frac{(O_y - M_y - D_y)(\tan\alpha + \tan\beta)}{2} + D_z\right)^2}{(\tan\alpha - \tan\beta)^2} = (O_y - M_y - D_y)^2 \tag{3}$$

$$E_4 : \frac{4\left(x + \frac{D_w}{2}\right)^2}{\left((\tan\alpha + \tan\beta)^2 + 4\right)\ \tan^2\frac{\alpha-\beta}{2}} + \frac{4\left(z - \frac{(O_y - M_y - D_y - D_h)(\tan\alpha + \tan\beta)}{2} + D_z\right)^2}{(\tan\alpha - \tan\beta)^2} = (O_y - M_y - D_y - D_h)^2 \tag{4}$$

表 1　式中の各値の説明

式中の値	説明	実装した装置の数値
α	MMAPs が結像できる光の最小入射角	25°
β	MMAPs が結像できる光の最大入射角	65°
D_h	ディスプレイの縦幅	14.9cm
D_w	ディスプレイの横幅	19.7cm
D_y	MMAPs とディスプレイの距離	3.3cm
D_z	MMAPs 前端とディスプレイの距離	1.8cm
M_w	MMAPs の横幅	36.0cm
M_y	MMAPs の高さ	47.2cm
M_z	MMAPs の奥行幅	36.0cm
O_y	空中像観察者の眼高	——

表 2　各条件での撮影地点の座標 (x, z) /cm

撮影地点	条件① 男性平均眼高	条件② 女性平均眼高	条件③ 視域外
P_1	(-33.3, 184)	(-27.7, 160)	(-33.7, 165)
P_2	(-34.4, 182)	(-28.7, 158)	(-33.7, 51.0)
P_3	(-34.4, 74.2)	(-28.7, 64.7)	(0, 35.7)
P_4	(0, 52.3)	(0, 46.4)	(33.7, 51.0)
P_5	(34.4, 74.2)	(28.7, 64.7)	(33.7, 165)
P_6	(34.4, 182)	(28.7, 158)	——
P_7	(33.3, 184)	(27.7, 160)	——
P_{center}	(0, 118)	(0, 103)	(0, 100)

© 2020 Information Processing Society of Japan

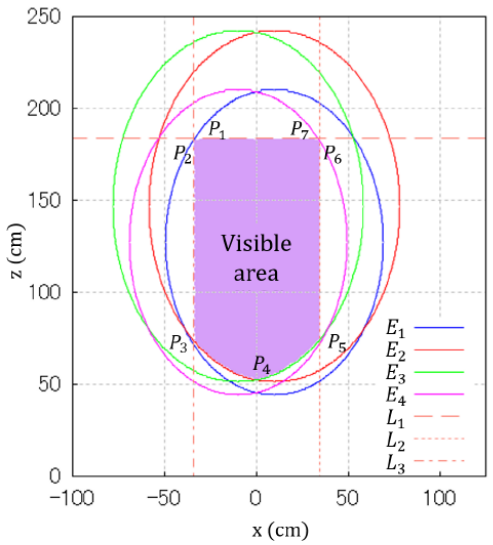

図 9　条件①（男性平均眼高）で式から求めた視域

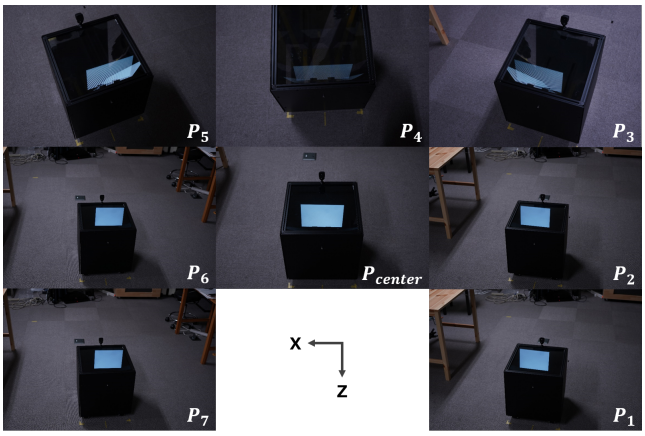

図 10　式から求めた視域の各地点での空中像の見え方（条件①男性平均眼高）

$$E_1 : 1.42(z-119)^2 + 2.79(x-9.85)^2 = 8556 \quad (5)$$

$$E_2 : 1.42(z-138)^2 + 2.79(x-9.85)^2 = 11535 \quad (6)$$

$$E_3 : 1.42(z-138)^2 + 2.79(x+9.85)^2 = 11535 \quad (7)$$

$$E_4 : 1.42(z-119)^2 + 2.79(x+9.85)^2 = 8556 \quad (8)$$

$$L_1 : z = 172 \quad (9)$$

$$L_2 : x = 31.6 \quad (10)$$

$$L_3 : x = -31.6 \quad (11)$$

4.　視域式の検証

4.1　目的

前章で求めた視域式 (1) – (4) を用いて算出した視域が，実際の視域と一致していることを確認した．

4.2　方法

世界の成人（20–65 歳）の男性平均眼高 164.3cm と女性平均眼高 151.4cm[25] について，式を用いて求めた視域の

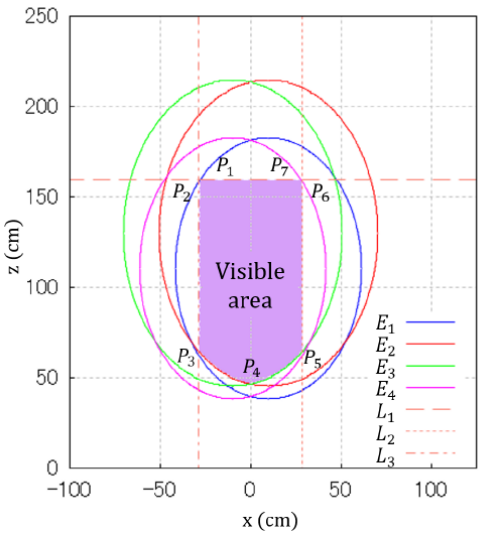

図 11　条件②（女性平均眼高）で式から求めた視域

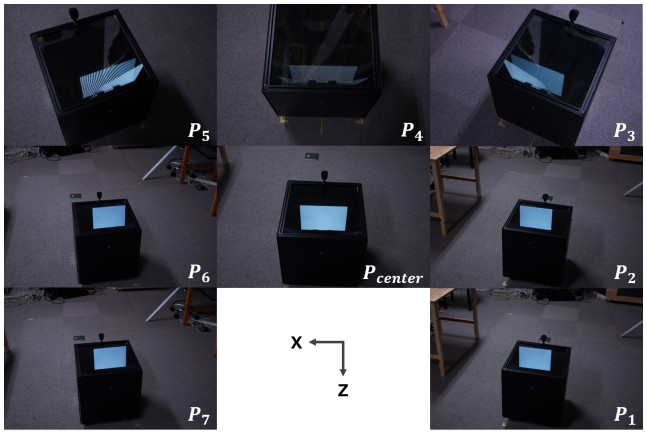

図 12　式から求めた視域の各地点での空中像の見え方（条件②女性平均眼高）

各頂点と中央にカメラを置き，眼高に設置したレンズを空中像に向けて撮影した．空中像表示には実装した装置を用いた．実装した装置の光学系の寸法は表 1 の通りである．光源には第 6 世代 iPad を用いた．また，式から求めた視域の外では空中像が欠けて見えることを確認するために視域の外での撮影もおこなった．眼高には女性平均眼高を用い，式のパラメータ α, β を MMAPs の結像入射角から 5° 広げた 20°, 70° として算出し，MMAPs のサイズによる視域の制限を 5cm 広げて同様に撮影した．以下，男性平均での撮影を条件①，女性平均での撮影を条件②，視域外での撮影を条件③の撮影と表記する．

4.3　結果

条件①，②の撮影結果を，各条件の視域と撮影地点とともに図 9–12 に示す．ただし撮影地点については，視域の各頂点を左上から反時計回りに順に $P_1, P_2, P_3, \ldots$ と番号を振り，視域の幅の中央を x 座標，奥行の中央を z 座標にもつ点条件①，②を P_{center} とした．各条件の撮影地点の座

© 2020 Information Processing Society of Japan

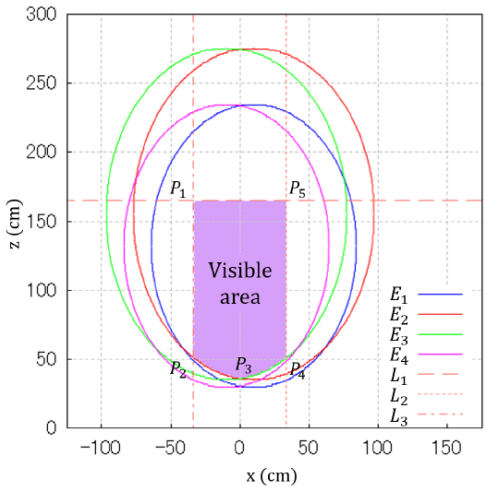

図 13　条件③（パラメータを広げた視域外）で式から求めた視域

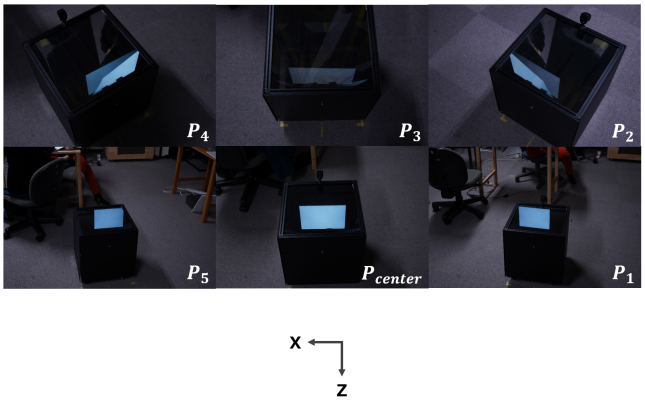

図 14　視域の外の各地点での空中像の見え方（条件③視域外）

標を表 2 に示す．条件①，②ではどの地点でも空中像が欠けずに写った．また，条件③の結果を図 13，14 に示す．条件③では P_2, P_4, P_5 で空中像の角が欠けて写った．

4.4　考察

式から求めた視域である条件①，②において空中像が欠けずに写り，視域外である条件③において空中像が欠けたことから，視域式が妥当であると確認された．

条件①，②の視域の前端 P_3, P_4, P_5 において，他地点 $P_1, P_2, P_6, P_7, P_{center}$ に比べ空中像が薄く観察された．これは，MMAPs が空中像を結像できる範囲内であっても入射角によって空中像の輝度が落ちることが原因であると考えられる．ゆえに MMAPs が結像できる光の入射角によって視域を定めるのではなく，MMAPs による空中像の輝度減少が許容される範囲に収まるような入射角によって視域を定めることで改善される．さらに，実装に用いた光源（iPad）はディスプレイ面から垂直に出る光が強く斜めに出る光が弱いが，本システムはディスプレイから斜め上に出る光を用いる設計となっている．そのため，ディスプレイ面から垂直に出る光を利用することで空中像の輝度が改善されると考えられる．具体的には，光路を曲げる性質をもつプリズムシートをディスプレイの前に配置することで，ディスプレイ面に対し垂直に発せられた光を MMAPs に入射させる．これにより，視域前端だけでなく視域の全体で空中像の輝度が上がると考えられる．

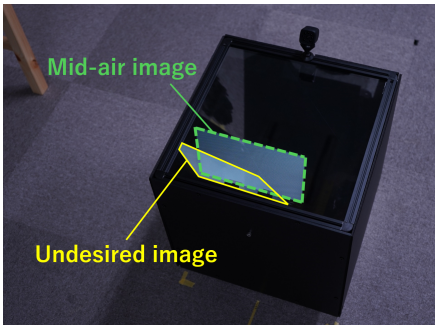

図 15　空中像（緑破線）と迷光（黄実線）

また条件①，②の P_3, P_5 において，迷光と空中像が重なってしまっている（図 15）．迷光とは MMAPs 内部での反射回数が過多または不足した光が結像する不要な像で，本来表示したい像である空中像とは区別される [10]．今回求めた視域の式では迷光の発生位置を考慮していないため，式から求めた視域では迷光の重なりによって空中像が見えにくい部分がありうることがわかった．

5.　アプリケーション

本システムは，CG キャラクターの姿を通じて，実世界を舞台にして動き回りながら周囲の人と協力するゲームに応用できる．操作者はプレイヤとして，空中像で表示された CG ゲームキャラクターを遠隔操作して実世界内で移動させる．操作者に提示する視界情報に，CG キャラクターの他に的などのゲームオブジェクトを重畳して表示することで，シューティングゲームをプレイできる（図 16）．また，空中像の周りにいる人が AR マーカを環境に設置したり，着ている衣服に貼り付けることで，ゲームオブジェクトを配置したり，自身がターゲットとなってゲームに参加することができる（図 17）．さらに，顔検出を行うことで映っている顔をカウントし，スコアとするゲームが考えられる（図 18）．このゲームでは，できるだけ多くの顔を映すために，実世界内を動き回り人に近づいて呼びかけ，協力してもらう必要がある．そのため CG キャラクターを通じて実世界の人とのコミュニケーションが生まれる．さらにこれらの他にも，例えば観光地での案内ロボットの代わりに CG アバタによるエージェントとして活用するなど，リモート操作による実世界 CG アバタとしての応用が期待できる．

6.　おわりに

本研究では，実世界を CG アバタを通じて移動できるよ

© 2020 Information Processing Society of Japan

図 16　実世界を舞台にしたシューティングゲーム

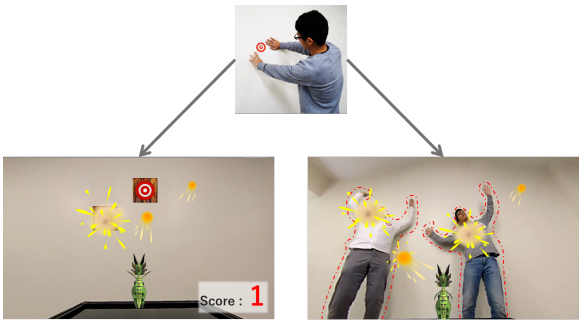

図 17　AR マーカを用いた創作ゲーム

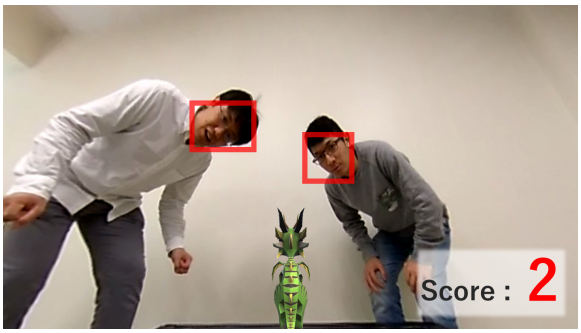

図 18　顔をできるだけ多く写すゲーム

うにすることを目的として，移動可能な空中像提示装置の表示内容と移動を遠隔で操作するシステムを提案した．空中像の視域が狭いことから，アバタの前にいる人に空中像が見えているのか，見せるためにどれくらい移動する必要があるかを操作者に提示するために，空中像で表示された CG アバタの視域を計算により求め，計算値をカメラによる撮影で確認した．

謝辞　本研究は科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（さきがけ，JPMJPR16D5）と JSPS 科研費 JP20H04223 の助成を受けたものである．

参考文献

[1] avatar-in Inc.: avatar-in, ANA ホールディングス (online), available from ⟨https://avatarin.com/⟩ (accessed 2020-07-30).

[2] Chan, L.-W., Kao, H.-S., Chen, M. Y., Lee, M.-S., Hsu, J. and Hung, Y.-P.: Touching the Void: Direct-Touch Interaction for Intangible Displays, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 2625–2634 (online), DOI: 10.1145/1753326.1753725 (2010).

[3] Cluster, Inc.: cluster, (online), available from ⟨https://cluster.mu/⟩ (accessed 2020-07-30).

[4] Double Robotics, Inc.: Double, (online), available from ⟨https://www.doublerobotics.com⟩ (accessed 2020-07-30).

[5] Fernando, C. L., Furukawa, M., Kurogi, T., Kamuro, S., Sato, K., Minamizawa, K. and Tachi, S.: Design of TELESAR V for transferring bodily consciousness in telexistence, *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5112–5118 (online), DOI: 10.1109/IROS.2012.6385814 (2012).

[6] 原島　博：顔学への招待，岩波書店 (1998).

[7] Ilon, B. E.: Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base (1975). US Patent 3,876,255.

[8] Kim, H., Takahashi, I., Yamamoto, H., Maekawa, S. and Naemura, T.: MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects, *Entertainment Computing*, Vol. 5, No. 4, pp. 233 – 241 (online), DOI: https://doi.org/10.1016/j.entcom.2014.10.008 (2014).

[9] Kim, H., Yamamoto, H., Koizumi, N., Maekawa, S. and Naemura, T.: HoVerTable: Dual-Sided Vertical Mid-Air Images on Horizontal Tabletop Display, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, p. 1115–1120 (online), DOI: 10.1145/2702613.2732699 (2015).

[10] Kiuchi, S. and Koizumi, N.: Micro-mirror array-plates simulation using ray tracing for mid-air imaging, *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 769–770 (online), DOI: 10.1109/VRW50115.2020.00235 (2020).

[11] Kizuna AI Inc.: Kizuna AI official website|BIOGRAPHY, (online), available from ⟨https://kizunaai.com/biography/⟩ (accessed 2020-07-30).

[12] Koizumi, N., Niwa, Y., Kajita, H. and Naemura, T.: Optical design for transfer of camera viewpoint using retrotransmissive optical system, *Optical Review*, Vol. 27, No. 1, pp. 126–135 (2020).

[13] Maeda, Y., Miyazaki, D. and Maekawa, S.: Aerial imaging display based on a heterogeneous imaging system consisting of roof mirror arrays, *2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 211–215 (online), DOI: 10.1109/GCCE.2014.7031217 (2015).

[14] Maekawa, S., Nitta, K. and Matoba, O.: Transmissive optical imaging device with micromirror array, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 6392, pp. 130–137 (online), DOI: 10.1117/12.690574 (2006).

[15] Makino, Y., Furuyama, Y., Inoue, S. and Shinoda, H.: HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-Time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 1980–1990 (online), DOI: 10.1145/2858036.2858481 (2016).

[16] Mozilla Corporation: Hubs by Mozilla, (online), available from ⟨https://hubs.mozilla.com/⟩ (accessed 2020-07-30).

© 2020 Information Processing Society of Japan

[17] Naoji, S., Noritaka, S., huan Chiu, Y. and Fumitoshi, M.: Study on effective camera images for mobile robot teleoperation, *RO-MAN 2004. 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (IEEE Catalog No.04TH8759)*, pp. 107–112 (online), DOI: 10.1109/ROMAN.2004.1374738 (2004).

[18] Nii, H., Zhu, K., Yoshikawa, H., Htat, N. L., Aigner, R. and Nakatsu, R.: Fuwa-Vision: An Auto-Stereoscopic Floating-Image Display, *SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies*, p. 1–4 (online), DOI: 10.1145/2407707.2407720 (2012).

[19] Norasikin, M. A., Martinez-Plasencia, D., Memoli, G. and Subramanian, S.: SonicSpray: A Technique to Reconfigure Permeable Mid-Air Displays, *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, p. 113–122 (online), DOI: 10.1145/3343055.3359704 (2019).

[20] Otsubo, M.: Optical imaging apparatus and optical imaging method using the same (2014). US Patent 8,702,252.

[21] Project Maxima: Maxima, a Computer Algebra System, (online), available from ⟨http://maxima.sourceforge.net/⟩ (accessed 2020-07-30).

[22] Sony Music Entertainment Inc.: Kaguya Luna | PROFILE, (online), available from ⟨https://www.kaguyaluna.jp/profile/⟩ (accessed 2020-07-30).

[23] Takasaki, M., Ohashi, K. and Mizuno, S.: Interaction of a Stereoscopic 3DCG Image with Motion Parallax Displayed in Mid-Air, *SIGGRAPH Asia 2018 Posters*, (online), DOI: 10.1145/3283289.3283343 (2018).

[24] Tanenbaum, T. J., Hartoonian, N. and Bryan, J.: “How Do I Make This Thing Smile?”: An Inventory of Expressive Nonverbal Communication in Commercial Social Virtual Reality Platforms, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 1–13（オンライン），DOI: 10.1145/3313831.3376606 (2020).

[25] Tilley, A. R. and Associates, H. D.: *The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design Revised Edition*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA (2011).

[26] Tokuda, Y., Norasikin, M. A., Subramanian, S. and Martinez Plasencia, D.: MistForm: Adaptive Shape Changing Fog Screens, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 4383–4395 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025608 (2017).

[27] Tsuchiya, K. and Koizumi, N.: An Optical Design for Avatar-User Co-axial Viewpoint Telepresence, *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 108–116 (online), DOI: 10.1109/VR46266.2020.00029 (2020).

[28] VRChat Inc.: VRChat, (online), available from ⟨https://vrchat.com/⟩ (accessed 2020-07-30).

[29] Yamamoto, H., Tomiyama, Y. and Suyama, S.: Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR), *Opt. Express*, Vol. 22, No. 22, pp. 26919–26924 (online), DOI: 10.1364/OE.22.026919 (2014).

[30] Yoshida, T., Kamuro, S., Minamizawa, K., Nii, H. and Tachi, S.: RePro3D: Full-Parallax 3D Display Using Retro-Reflective Projection Technology, *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*, (online), DOI: 10.1145/1836821.1836841 (2010).

[31] 株式会社アスカネット：原理と仕組み，（オンライン），入手先 ⟨https://aska3d.com/ja/technology.php⟩（参照 2020-07-30）.

[32] 米澤　謙，上田博唯：遠隔地の複数鑑賞者の存在感を表現するテレプレゼンスロボット，エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2013 論文集，pp. 278–282 (2013).

[33] 任天堂株式会社：あつまれどうぶつの森，（オンライン），入手先 ⟨https://www.nintendo.co.jp/switch/acbaa/index.html⟩（参照 2020-07-30）.

© 2020 Information Processing Society of Japan