

同一視点からの空間共有のための 裸眼3D映像のリアルタイム双方向通信

内田 早紀^{1,a)} 上間 裕二^{1,b)} 南澤 孝太^{1,c)} 館 暲^{1,d)}

概要: 本稿では、遠隔地にいる人との空間共有を目的として、裸眼 3D 映像のリアルタイム双方向通信手法を提案する。多視点裸眼 3D ディスプレイ RePro3D に対して撮像光学系を新たに設置することで、3D 映像の提示と撮影を同時に行い、撮影した映像を 2 台の装置間で相互に送り合うことで、3D 映像のリアルタイム双方向通信が可能となる。まず 2 眼式の装置を実装し、固定視点での裸眼 3D 映像のリアルタイム双方向通信が可能であることを確かめた。そして装置を多眼式に拡張し、多視点での可能性を検討した。

キーワード: 遠隔コラボレーション, 裸眼 3D ディスプレイ, 3D 映像伝送, 複合現実感

Full-duplex Communication of Auto-stereoscopic 3D Images to Share Space from the Same Viewpoint

Abstract: This thesis proposes a method to allow two people at a distance apart to share space through real-time full-duplex communication of auto-stereoscopic 3D images. By adding a new imaging optical system into the full-parallax auto-stereoscopic display, RePro3D, this system will continuously video-capture the 3D objects from multiple viewpoints while presenting the 3D images in real time. These 3D images will also be transmitted between two equipments. We implemented a prototype of this 3D images transceiver viewed from one viewpoint and also showed the possibility of the prototype to be viewed from multi-viewpoints.

Keywords: Remote Collaboration, Auto-stereoscopic Display, 3D Image Transmission, Mixed Reality

1. はじめに

Skype や Polycom 等のビデオ通話サービスの普及により、気軽に遠隔地間での 2D 映像のリアルタイム双方向通信が可能となった。一方で 3D プリンターや 3D スキャナーの出現により、遠隔地への 3D オブジェクトの伝送は可能となったが、遠隔地間でのリアルタイムな共有は難しい。

そこで本研究では、3D オブジェクトを介した遠隔での共同作業を実現するため、3D 映像による 3D オブジェクトのリアルタイムな相互伝送を可能とする装置の開発を目指す。図 1 のようにお互いの装置内の 3D オブジェクトを共有することで、どこからでも共同作業が可能となる。



図 1 3D オブジェクトを介した遠隔共同作業のイメージ
Fig. 1 Image of remote collaboration through 3D objects.

2. 関連研究

遠隔での共同作業を実現するには、そのための環境を

¹ 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Graduate School of Media Design, Keio University

a) saki.u@kmd.keio.ac.jp

b) uema@kmd.keio.ac.jp

c) kouta@tachilab.org

d) tachi@tachilab.org

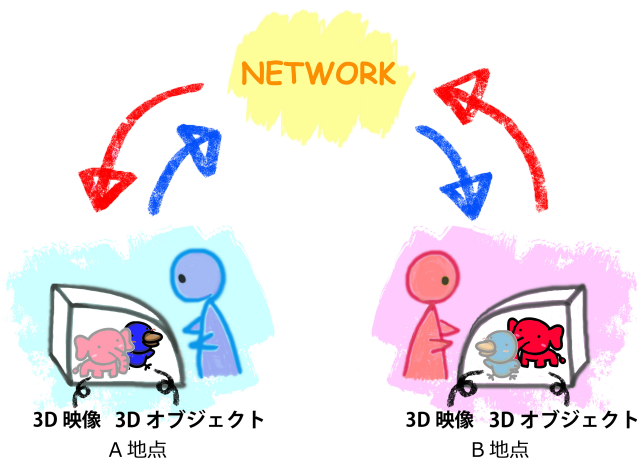


図 2 コンセプトイメージ
Fig. 2 Concept image.

作り出さなければならない。それを目指した研究には、ClearBoard[1] や CAVE[2], TWISTER[3],そして Illumi-Room[4], inForm[5], BeThere[6] 等がある。これらは、自分の環境と相手の環境を空間的に共存させている。

また、共同作業をする上で重要なのが、各環境にある 3D オブジェクトを共存させることである。これを、3D オブジェクトを 3D 映像として遠隔地へ送ることで実現しようとしている研究には、Jones らの 3D 映像遠隔会議システム [7] や TransCAIP[8] 等がある。これらは、リアルタイムに 3D オブジェクトを 3D 映像として単方向に送っている。

そして 3D 映像を用いる際には、ユーザーが 3D 映像に存在感を感じるかが重要な要素だと言える。存在感のある 3D 映像提示の有力な手法の 1 つに実空間への 3D 映像の重畳があり、fVisiOn[9] や RePro3D[10] が実現している。

以上より、「3D オブジェクトを介した遠隔での共同作業」を実現するには、以下の 3 点を実現する必要がある。

- 自分の環境と相手の環境が空間的に共存。
- リアルタイムな 3D 映像の双方向通信。
- 存在感のある 3D 映像の提示。

ゆえに本研究では「3D 映像のリアルタイム双方向通信により、自分と遠隔地にいる人の目の前に共有スペースを作る」をコンセプトとし、図 2 のように自分と相手の環境にある 3D オブジェクトを 3D 映像としてリアルタイムに双方向通信し、2 つの環境を空間的に共存させることを目的とする。

3. 裸眼 3D 映像を送受信可能な設計の提案

3.1 設計要件

コンセプトを実現するには、以下の設計要件を全て満たす装置が必要となる。

- (1) 3D 映像の提示と撮影を同時に行う。
- (2) 3D 映像の裸眼立体視。
- (3) 3D 映像を実空間へ重畳。

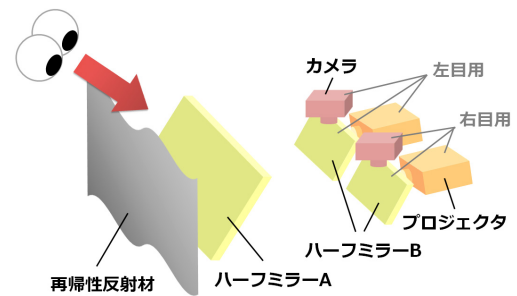


図 3 2 眼式 3D 映像送受信装置のシステム構成図
Fig. 3 System configuration of equipment from one viewpoint.

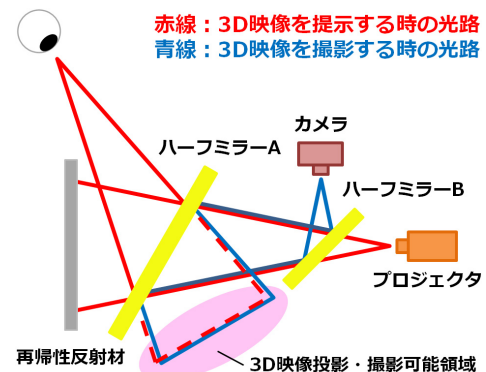


図 4 2 眼式 3D 映像送受信装置の光学系 (片眼分)
Fig. 4 Optical system of equipment from one viewpoint.

3.2 提案手法 -step1-: 視点固定による裸眼 3D 映像の双方向通信

設計要件を満たす 2 眼式 3D 映像送受信装置を提案する。

3D 映像の提示は、RePro3D[10] と同様の機構を用い、高密度プロジェクタアレイを 2 台のプロジェクタに代え、ヒトの平均的な眼間距離 65mm の間隔で設置したプロジェクタから両眼視差映像を投写することで行う (図 3)。この時プロジェクタから投写された光は、ハーフミラー B, A を順に通過し、再帰性反射材のスクリーンに投影され、再帰反射した光はハーフミラー A に反射し、各プロジェクタの投影レンズの共役点に集光する (図 4)。

3D 映像の撮影は、各プロジェクタのレンズ前に、45° 傾けたハーフミラー、その上にカメラを設置し、3D 映像の投影領域にある 3D オブジェクトの両眼視差映像を撮影することで行う。この時 3D オブジェクトから発せられる光は、ハーフミラー A, B に順に反射し、各カメラに届く。

よって、装置 A で撮影した映像を装置 B へ送りプロジェクタから投写すると、ユーザー B はユーザー A と同じ視点からの 3D 映像を見れる。そして双方向に行うことで裸眼 3D 映像の双方向通信が可能となる。

3.3 提案手法 -step2-: 視点移動可能な裸眼 3D 映像の双方向通信

2 眼式装置では視点を動かすことが出来ない。ゆえに、視点移動可能な多眼式 3D 映像送受信装置を提案する。

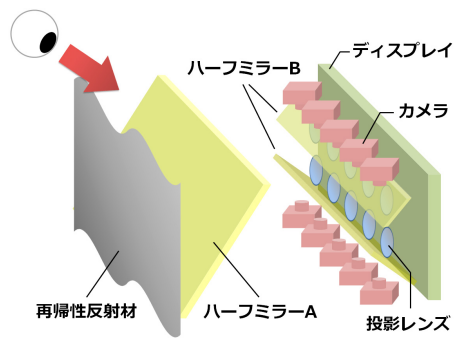


図 5 多眼式 3D 映像送受信装置のシステム構成図

Fig. 5 System configuration of equipment from multi-viewpoints.

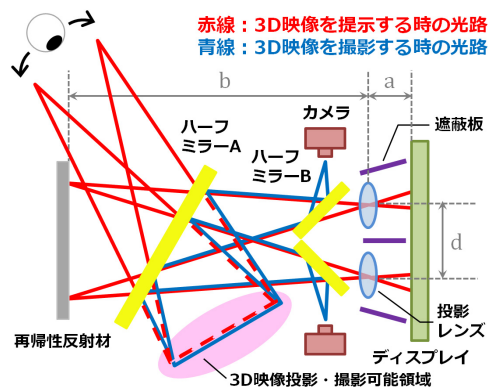


図 6 多眼式 3D 映像送受信装置の光学系 (縦方向の 2 視点分)

Fig. 6 Optical system of equipment from multi-viewpoints.

3D 映像の提示は, RePro3D[10] と同様の機構を用いる (図 5). この時ディスプレイから投写された光は, 投影レンズ, ハーフミラー B, A を順に通過し, 再帰性反射材のスクリーンに投影され, 再帰反射した光はハーフミラー A に反射し, 各投影レンズの共役点に集光する (図 6).

3D 映像の撮影は, 各投影レンズの再帰性反射材側に 45° 傾けたハーフミラー, その上か下にカメラを設置し, 3D 映像の投影領域にある 3D オブジェクトの多視点映像を撮影することで行う. 光路は 2 眼式装置と同様である.

また, ディスプレイ面と凸レンズ間の距離 a , 実像の結像位置と凸レンズ間の距離 b , ディスプレイ上の 1 視点分の長さ l , 実像の大きさ h , 凸レンズの焦点距離 f , 隣り合う凸レンズの間隔 d には, 以下の関係が成り立つ.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

$$\frac{b}{a} = \frac{h}{l} \quad (2)$$

$$\frac{b}{a+b} = \frac{d}{l} \quad (3)$$

4. システムの実装と検証

4.1 2 眼式 3D 映像送受信装置の実装

提案手法 step1 を基に, プロトタイプを実装した (図 7).

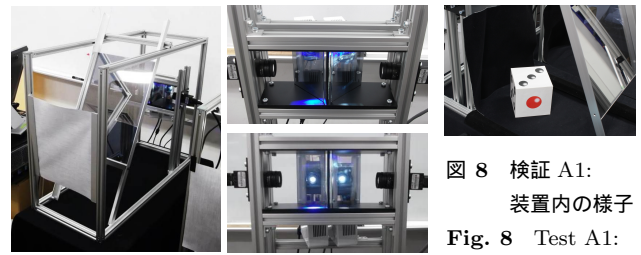


図 7 2 眼式装置のプロトタイプ
Fig. 7 Prototype of equipment from one viewpoint.

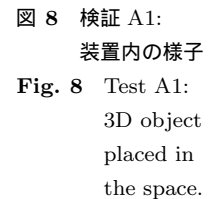


図 8 検証 A1:
装置内の様子
Fig. 8 Test A1:
3D object placed in the space.

装置内で手を動かしての作業を可能とするため, 3D 映像の投影領域が約 250×250mm となるように設計した. プロジェクタには明るさ 500lm, 解像度 1280×800pixel, 画角約 39°×25° である加賀電子株式会社の LED プロジェクタ (KG-PL05HW). カメラには解像度 648×488pixel である Point Grey Research, Inc. の Flea3 (FL3-FW-03S3C) を, フレームレートを 30fps の設定で用いた. カメラのレンズにはプロジェクタとほぼ同じ画角 (39°09'×29°52') である富士フィルム株式会社の固定焦点レンズ (HF9HA-1B). ハーフミラーには透過率 30%, 板厚 2mm であるアクリルハーフミラー. 再帰性反射材にはレフライト株式会社のブロードブラック 8318. 再帰性反射材のスクリーンとプロジェクタのレンズ間の距離 (投写距離) は約 600mm とし, その時のプロジェクタのスクリーンサイズは約 430×270mm (20inch) であり, その内の約 250×250mm を実際に用いた. この時, 各観察位置における投影映像の解像度は約 750×750pixel, 画素密度は約 3.0pixel/mm であった.

4.2 2 眼式 3D 映像送受信装置の検証

2 眼式装置のプロトタイプを 1 台用い, 検証を行った.

4.2.1 検証 A1: 3D 映像の撮影

3D オブジェクトを 3D 映像の投影可能領域に置き (図 8), 明るい環境下で 3D オブジェクトを手で動かしながら, 2 台のカメラから映像を撮影できるかを検証した.

結果, 2 台のカメラから撮影できることを確認した (図 9). 図中の左側, 右側とは, 観察者から見ての方向である.

4.2.2 検証 A2: 3D オブジェクトを 3D 映像として提示

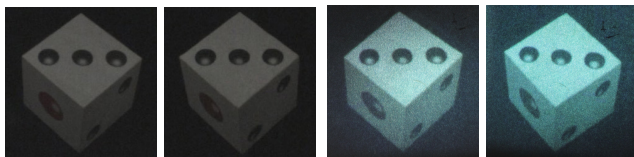
検証 A1 で撮影した映像 (図 9) を明るい環境下でプロジェクタから投写し, 3D 映像として提示できるかを検証した.

結果, 映像は結像し, 3D に見えることを確認した (図 10).

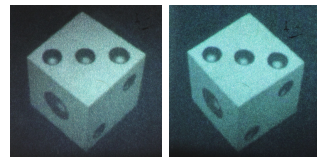
4.2.3 検証 A3: 3D 映像の提示と撮影を同時に行う

明るい環境下で, 投影可能領域に置かれた 3D オブジェクトをカメラで撮影しつつ, その視差映像をリアルタイムに各プロジェクタから投写し, 3D 映像の提示と撮影を同時に行えるかを検証した. ここで, 観察し易くするため, 本検証では映像の提示位置を 3D オブジェクトとずらした.

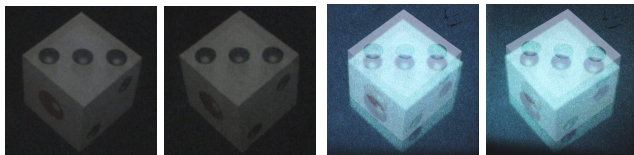
結果, カメラで撮影した映像に, プロジェクタから投写



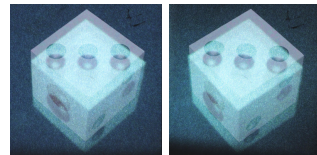
左側 右側
図 9 検証 A1: カメラで撮影
Fig. 9 Test A1: from each camera.



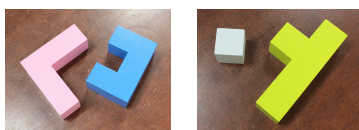
左側 右側
図 10 検証 A2: 観察位置で撮影
Fig. 10 Test A2: From each observing point.



左側 右側
図 11 検証 A3: カメラで撮影
Fig. 11 Test A3: From each camera.



左側 右側
図 12 検証 A3: 観察位置で撮影
Fig. 12 Test A3: From each observing point.



ユーザー A ユーザー B
図 13 各ユーザーに渡した立体パズル
Fig. 13 3D puzzles for each user.



図 14 完成図
Fig. 14 Completed drawing.

された映像がうっすらと映り込むことを確認した(図 11)。また、各プロジェクタから投写された視差映像は、余計な光や色等が入ることなく綺麗な映像であり、結像し、3D に見えることを確認した(図 12)。

4.2.4 考察

検証 A3 において、カメラで撮影した映像にプロジェクタから投写された映像が映り込んだのは、プロジェクタから投写される映像の輝度が高く再帰性反射材スクリーンに濃く映り、それをカメラが撮影したのだと考えられる。

4.3 視点固定による裸眼 3D 映像の双方向通信

2 眼式装置のプロトタイプを 2 台用い、裸眼 3D 映像の双方向通信の検証を行った。各装置を装置 A、B、各装置内を空間 A、B、各装置の使用者をユーザー A、B とする。

4.3.1 ケース 1: 立体パズル I

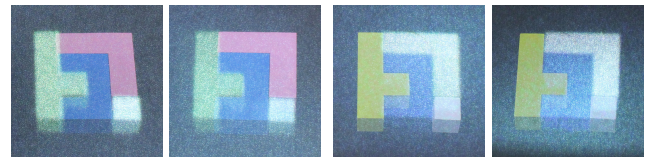
2 つの空間を正確に共有できているかを検証した。

本検証は、株式会社エド・インターの立体パズルを用いて行った。各ユーザーに 2 個ずつ立体パズルを渡し(図 13)、完成図(図 14)を見せた。そしてユーザー A、B の順で、完成図を目指して並べてもらった。

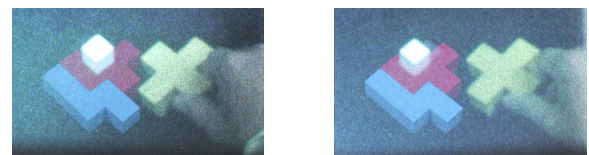
結果、各装置の各観察位置から見える 3D オブジェクトと 3D 映像の見え方はほぼ同じであった(図 15)。

4.3.2 ケース 2: 立体パズル II

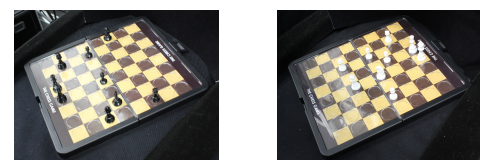
自由に共同作業をすることで起こる現象を検証した。



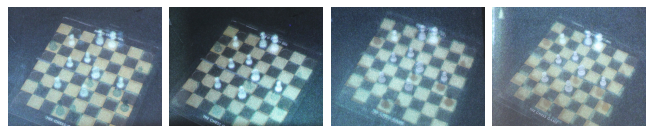
装置 A の左側 装置 A の右側 装置 B の左側 装置 B の右側
(実物: 赤・青 / 映像: 黄・白) (実物: 黄・白 / 映像: 赤・青)
図 15 ケース 1: 各装置の観察位置で撮影した写真
Fig. 15 Case 1: From each observing point.



左側 右側
(実物: 赤・青のピース / 映像: 手, 黄・白のピース)
図 16 ケース 2: 観察位置で撮影した写真
Fig. 16 Case 2: From each observing point.



空間 A 空間 B
図 17 ケース 3: 各空間にチェス盤と各色の駒が置かれている様子
Fig. 17 Case 3: Chessboard and chess pieces in each space.



装置 A の左側 装置 A の右側 装置 B の左側 装置 B の右側
(実物: 黒駒, 盤 / 映像: 白駒, 盤) (実物: 白駒, 盤 / 映像: 黒駒, 盤)
図 18 ケース 3: 各装置の観察位置で撮影した写真
Fig. 18 Case 3: From each observing point.

各ユーザーに 4 個ずつ立体パズルを渡し、その内の 4 個を使用した完成図を目指して自由に並べてもらった(図 16)。

結果、ユーザー A が空間 A 内にユーザー B の手の 3D 映像が入るのを見た時、手を引っ込める現象が観察できた。

4.3.3 ケース 3: チェス

各空間に同じ 3D オブジェクトを同じ位置に置き、その上で作業をすることで起こる現象を検証した。

本検証は、株式会社ハナヤマのポータブルチェスを用いて行った。各空間に同じチェス盤を置き、空間 A には黒い駒を、空間 B には白い駒を置いた(図 17)。そして各ユーザーに各空間内にある実物の駒を交互に動かしてもらった。

結果、実物のチェス盤と 3D 映像のチェス盤は完全に一致していなかった。また、実物の駒が見づらかった(図 18)。

4.3.4 考察

ケース 2 において、自分の手を引っ込める現象が起きたのは、空間外の相手の手の動きを予測できず、突然視界に



図 19 自発光するチェスの駒
Fig. 19 Light-emitting chess pieces.

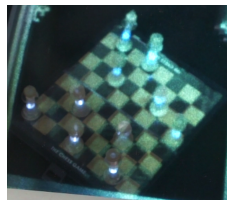


図 20 図 19 を観察位置で撮影
Fig. 20 The chess pieces from observing point.

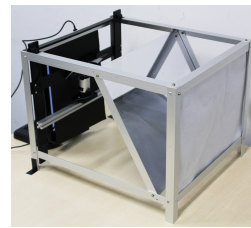


図 21 多眼式装置のプロトタイプ

Fig. 21 Prototype of equipment from multi-viewpoints.

入ってきた 3D 映像に驚いたからだと考えられる。

次にケース 3 において、実物と 3D 映像のチェス盤が完全に一致しなかったのは、プロジェクタを斜めに置いているため、プロジェクタの映像投影面とカメラの撮像面が厳密に一致していないためだと考えられる。また、実物の駒が見つらなかったのは、実物の駒から発せられる光の量が少なかったため、そして、プロジェクタからの輝度の高い光が実物の駒に重畳されているためだと考えられる。これを解決するには、プロジェクタの輝度を落とす、3D オブジェクトにライトを当てる、3D オブジェクト自体を発光させる等の方法が考えられる。

そこで自発光するチェスの駒 (図 19) を作成し、再び検証を行ったところ、自発光する駒を使用した方が、実物の駒と 3D 映像の駒の両方が見易いことを確認した (図 20)。

よって、3D オブジェクトの自発光とプロジェクタの輝度の制御により、実物体と映像のオクルージョンの問題が解決できると考えられる。また、3D オブジェクトを介した遠隔共同作業の実現には、自分と相手の各空間にある 3D オブジェクトの融合が不可欠だと考えられる。また、学習者が熟練者と同じ視点からの映像を見ながら指導を受けることで、学習支援になると考えられる。しかし、対面式のゲームには不向きである。

4.4 多眼式 3D 映像送受信装置の実装

提案手法 step2 を基に、プロトタイプを実装した (図 21)。

装置内で手を動かしての作業を可能とするため、3D 映像の投影領域が約 $200 \times 200 \text{mm}$ となるように設計した。投影レンズには直径 15mm、焦点距離 30mm の凸レンズを横 1 列の 5 個用いた。ディスプレイには解像度 $2,560 \times 1,600 \text{pixel}$ 、画素ピッチ 300ppi である Google Inc. の Nexus10。カメラには対角視野 75° である Microsoft Corporation の Life-Cam Studio を、解像度 $1920 \times 1080 \text{pixel}$ の設定で用いた。ハーフミラーには透過率 30%、板厚 2mm であるアクリルハーフミラー。再帰性反射材には反射率 90% 以上であるレフライト株式会社のブロード高輝度シルバー 9301。光学パラメータは表 1 の通りである。この時、各観察位置における投影映像の解像度は約 $200 \times 200 \text{pixel}$ 、画素密度は約 1.0pixel/mm であった。また、1 つのカメラを横にスライドさせて各レンズ前から撮影できるように設計した。

表 1 多眼式 3D 映像送受信装置のプロトタイプ光学パラメータ値
Table 1 Optical parameter values of prototype from multi-viewpoints.

パラメータ	値 (mm)
a	33.8
b	350.0
f	30.0
h	200.0
l	17.5
d	16.0



図 22 検証 B1: ディスプレイ上に表示した視差映像
Fig. 22 Test B1: Parallax images on the display.



図 23 検証 B1: 観察位置で撮影した写真
Fig. 23 Test B1: From each observing point.

4.5 多眼式 3D 映像送受信装置の検証

多眼式装置のプロトタイプを 1 台用い、検証を行った。

4.5.1 検証 B1: 3D 映像の提示

5 つの視差映像 (図 22) を暗い環境下でディスプレイに表示し、3D 映像として提示できるかを検証した。

結果、提示された映像は結像し、3D に見えることを確認した。また、その 3D 映像は少し暗いように感じた (図 23)。図中の数字は、観察者から見て左から何番目の観察位置で撮影した写真を表している。

4.5.2 検証 B2: 3D 映像の撮影

3D オブジェクトを 3D 映像投影可能領域に置き (図 24)、明るい環境下で 5 つのレンズ前からカメラでそれぞれ映像を撮影できるかを検証した。

結果、5 つのレンズ前から撮影できることを確認した (図 25)。図中の数字は、観察者から見て左から何個目のレンズ前で撮影した写真を表している。

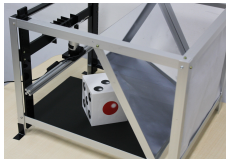


図 24 検証 B2: 装置内の様子

Fig. 24 Test B2: 3D object placed in the space.

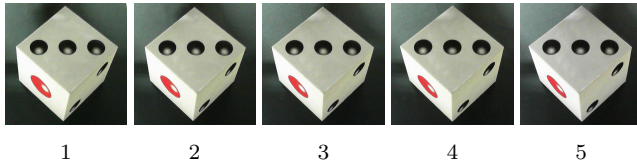


図 25 検証 B2: 各レンズ前からカメラで撮影した写真

Fig. 25 Test B2: From the camera in front of each lens.

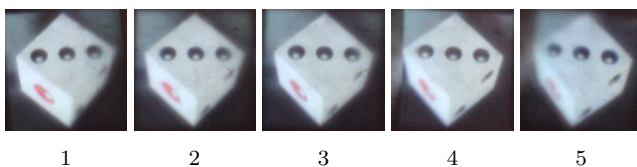


図 26 検証 B3: 観察位置で撮影した写真

Fig. 26 Test B3: From each observing point.



図 27 検証 B4: (左)ライトなし,カメラで撮影。(中)ライトあり,カメラで撮影。(右)ライトあり,観察位置で撮影。

Fig. 27 Test B4: (Left)Without light, from the camera. (Center)With light, from the camera. (Right)With light, from observing point.

4.5.3 検証 B3: 3D オブジェクトを 3D 映像として提示

検証 B2 で撮影した写真 (図 25) を暗い環境下でディスプレイに表示し, 3D 映像として提示できるかを検証した。

結果, 提示された映像は結像し, 3D に見えることを確認した。また, その 3D 映像は少し暗いように感じた (図 26)。

4.5.4 検証 B4: 3D 映像の提示と撮影を同時に行う

暗い環境下で, 投影可能領域に置かれた 3D オブジェクトをカメラで撮影しつつ, ディスプレイに視差映像を表示し, 3D 映像の提示と撮影を同時に行えるかを検証した。ここで, 映像を観察し易くするため, 本検証では映像の提示位置を 3D オブジェクトとずらした。

結果, カメラで撮影することは出来なかった。そこで, 3D オブジェクトにライトを当てたところ, 若干余計な光が入ったが撮影することができた。その時, 観察位置から提示された映像も見えることを確認した (図 27)。

4.5.5 考察

検証 B1, B3 において, 3D 映像が少し暗いように感じたのは, ディスプレイと 3D オブジェクトから発せられる光がハーフミラー A, B (透過率 30%) を介すことで, 撮

影時は元の光量の 50%程度, 映像提示時は 6%程度, 撮影した映像の提示時は 3%程度となるためだと考えられる。

次に検証 B4 において, ライトを当てないと撮影出来なかったのは, ディスプレイから発せられる光がハーフミラー B を通るため, また, 3D オブジェクトから発せられる光の光量が少なかったためだと考えられる。

5. 結論

本研究では, 遠隔地にいる人と同一視点で装置内にある空間を共有することを目的として, 裸眼 3D 映像のリアルタイム双方向通信手法を提案した。まず 2 眼式装置を実装し, 裸眼 3D 映像のリアルタイム双方向通信を実現した。そして多眼式に拡張した装置を実装し, 視点移動可能な裸眼 3D 映像のリアルタイム双方向通信の可能性を示した。

謝辞 本研究は JST-CREST「さわれる情報環境」プロジェクトの一環として行われた。また, 本研究への有益な助言を頂いた吉田匠氏に深く感謝する。

参考文献

- [1] Ishii, H., Kobayashi, M. and Grudin, J.: Integration of Interpersonal Space and Shared Workspace: ClearBoard Design and Experiments, *ACM Transactions on Information Systems*, Vol. 11, No. 4, pp. 349–375 (1993).
- [2] Cruz-Neira, C., Sandin, D. J. and DeFanti, T. A.: Surround-screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, *SIGGRAPH '93 Proceedings*, pp. 135–142 (1993).
- [3] 館暁: TWISTER: 相互テレグジスタンス可能な没入型全周囲裸眼 3 次元ブース, *ASIAGRAPH '07 Proceedings*, Vol. 1, No. 2, pp. 1–6 (2007).
- [4] Jones, B. R., Benko, H., Ofek, E. and Wilson, A. D.: IllumiRoom: Peripheral Projected Illusions for Interactive Experiences, *CHI '13 Proceedings*, pp. 869–878 (2013).
- [5] Follmer, S., Leithinger, D., Olwal, A., Hogge, A. and Ishii, H.: inFORM: Dynamic Physical Affordances and Constraints through Shape and Object Actuation, *UIST '13 Proceedings*, pp. 417–426 (2013).
- [6] Sodhi, R. S., Jones, B. R., Forsyth, D., Bailey, B. P. and Maciocci, G.: BeThere: 3D Mobile Collaboration with Spatial Input, *CHI '13 Proceedings*, pp. 179–188 (1990).
- [7] Jones, A., Lang, M., Fyffe, G., Yu, X., Busch, J., McDowall, I., Bolas, M. and Debevec, P.: Achieving Eye Contact in a One-to-many 3D Video Teleconferencing System, *SIGGRAPH '09 Papers*, pp. 64:1–64:8 (2009).
- [8] Taguchi, Y., Koike, T., Takahashi, K. and Naemura, T.: TransCAIP: A Live 3D TV System Using a Camera Array and an Integral Photography Display with Interactive Control of Viewing Parameters, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. E74, No. 9, pp. 2495–2503 (1991).
- [9] Yoshida, S.: fVisiOn: Glasses-free Tabletop 3-D Display - Its Design Concept and Prototype -, *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, p. DTuA1 (2011).
- [10] Yoshida, T., Shimizu, K., Kurogi, T., Kamuro, S., Minamizawa, K., Nii, H. and Tachi, S.: RePro3D: full-parallax 3D display with haptic feedback using retro-reflective projection technology, *ISVRI '11 Proceedings*, pp. 49–54 (2011).