【論文】

高所恐怖症克服支援を目的とする簡易な背面投影ドームスクリーン VR システムの試作

Low-Cost Rear Projection Dome Screen Virtual Reality System to Overcome Fear of Heights

宮 兆喆(学生会員)*, 大島 哲平(非会員)*, 宮野 秀市(非会員)**,
増田 信之(非会員)*, 関根 正樹(正会員)***, 伊藤 智義(非会員)*
Zhaozhe Gong*, Teppei Oshima*, Hideichi Miyano**,
Nobuyuki Masuda*, Masaki Sekine*** and Tomoyoshi Ito*

Abstract

We developed a prototype of simple virtual reality (VR) system as a support tool to overcome fear of heights. The system consists of one personal computer, one projector and a hemisphere dome screen with the diameter of 1 m. It is a dome-screen type VR system because it makes little burden both to a medical doctor (or a counselor) and to a client. The dome screen is a low-cost type made milky-white plastic. We adopted rear projection using only one projector and could get an image with an effective field of vision. We can use a picture or a movie took from a personal-type digital camera. As for the correction of image distortion, we made the software tool originally. Therefore, the running cost is also low and the operation is easy. As the result of evaluation experiment, we confirmed that the system made a feeling of devotion with little sense of incongruity. It seems to show the possibility that the simple VR system can be utilized as a medical service tool of the spread type.

Key Words

Virtual reality, Dome screen, Rear Projection, Exposure therapy, Fear of heights.

2012 年 1 月 18 日受理

2012 年 7 月 28 日最終原稿受理

- * 千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻,
千葉市稲毛区弥生町1-33
- ** 宮崎大学 安全衛生保健センター清武分室, 宮崎市清武
町木原 5200
- *** 大阪電気通信大学地域イノベーション戦略支援プログラ
ム, 大阪府寝屋川市初町 18-8
- * Graduate School of Engineering, Chiba
University, 1-33, Yayoicho, Inageku, Chiba
- ** Health Care and Security Center, University of
Miyazaki, 5200, Kihara, Kiyotakecho, Miyazaki
- *** Regional Innovation Strategy Support Program,
Osaka Electro-Communication University, 18-8
Hatsucho, Neyagawa, Osaka

1. はじめに

特定の恐怖症の治療には、不適応な恐怖反応を惹起させてい
る恐怖の対象物や恐怖状況といった恐怖刺激に、恐怖反応が低
減するまでクライアントを暴露するエクスポージャー療法がある
1-3)。近年では、コンピュータ及び映像機器の発展から、バーチャ
ルリアリティ(VR)を利用したエクスポージャーシステムが注目さ
れている 4, 5)。

高所恐怖症の有病率は、1996 年に発表された Fredrikson ら
の調査によれば、男性では 6.3%、女性では 8.6%であり、広く認
められる障害であることがわかる 6)。認知行動療法、クライエント中
心療法、精神分析、家族療法など、様々な心理療法があり、エク
スポージャー療法は行動療法、認知行動療法に含まれる治療技
法の一つである。高所恐怖症を含む特定の恐怖症の治療には、
エクスポージャー療法、特に、実際の恐怖場面に恐怖反応が低
減するまで患者を暴露する in vivo エクスポージャーが有効であ

ることが知られている⁷⁾。

近年はVRを利用したVRエクスポージャーの治療報告が多くあり、高所恐怖症の治療においては、コンピュータグラフィックスで吊り橋やガラス張りのエレベーターなどの高所状況を再現するVRエクスポージャーは、従来のin vivoエクスポージャーと同様に効果があることが多くの研究で示されている^{8,9)}。Emmelkampらは、VRエクスポージャーとin vivoエクスポージャーの効果を比較する研究を行った¹⁰⁾。高所恐怖を訴える33名の参加者がVR条件群(n=17)とin vivo条件群(n=16)にランダムに配置され、VRエクスポージャーでは、in vivoエクスポージャーが実施された非常階段や屋上庭園などの高所の状況をコンピュータグラフィックスで正確に再現し、同様の手続きでエクスポージャーを実施した。その結果、高所恐怖症の程度を測定する質問紙や実際に階段を上って地面を見下ろすという行動テストにおいて、両条件で改善が認められ、また治療条件間に有意差が認められず、この改善は6か月後のフォローアップ期にも維持されていた。このことから、高所恐怖症の治療において、VRエクスポージャーはin vivoエクスポージャーと同等の効果があることが示された。

このように、高所恐怖の治療の手段としてVRエクスポージャーは有効であり、これまでもいくつかのシステムが構築されている。代表的な研究例として、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を用いたVRエクスポージャーシステムがある^{4,5)}。このシステムでは、クライアントがHMDを装着し、コンピュータ上の映像データをHMDに出力することで、クライアントに仮想空間を提示する。HMDの動きはセンサで検出され、映像データは装着者の頭の向きに連動して描画される仕組みになっており、クライアントは高い臨場感を体感できる。一方で、HMDの重量や頭の締め付けなどの不快な装着感があって仮想空間に集中できないこと、見回すことは可能だが視野角が狭いこと、モーションシックネスと呼ばれる車に酔った気分になるなどの難点も明らかになった。

HMDを使わないVRシステムとしては、CAVE¹¹⁾がある。クライアントを取り囲む空間に映像を表示するため、HMDのような不快な装着感がなくて仮想空間に集中しやすいが、大がかりである。

さらに、VRエクスポージャーがあまり普及しない本質が、単純な技術レベルの問題というよりも、カウンセラーにとっての負荷が大きいという報告がある¹²⁾。金銭的な負担と装置を取り扱う際の困難さである。この問題はハードウェアだけでなく、ソフトウェアについても同様である。

コンピュータグラフィックス(CG)を利用した従来のVRシステムは、ハードウェア面では十分に成熟してきているが、ソフトウェア面、特にコンテンツの提示に関する負荷が大きい。カウンセラーが自分でコンテンツを作るのは困難であるので、一般的には外注することになるが、数十秒の映像でも数百万程度の費用が生じる。そのため、各クライアントに応じた必要数のコンテンツを用意することは困難である。さらに、高機能化したVRシステムを運用するためには、専門の知識を習得する必要がある。NeuroVRシステム¹³⁾というフリーで利用できるCGコンテンツを提供するプロジェクトもあるが、既存のコンテンツが少ないため、患者に必要な物

がない可能性も高く、また、CG提示に関する専門知識が必要なのは解決しない。

そこで本研究では、安価で取り扱いの容易なシステムの構築を試みた。VRをエクスポージャーに適用する際、複数の人間が同時に映像を見る必要はないことと、必要以上に高精細な画質が要求されることがないことを考慮すると、ハードウェアを大幅に簡素化できる。さらには、映像もCGではなく、普通のビデオカメラで撮影したものを利用できるようにする。このことにより、金銭的な負荷が大きく減少し、取り扱いやすさが大幅に向上する。

この方針に沿って、ハードウェアに関しては、ドームスクリーンを利用した。観察者の負荷が少ない半開放的なVRシステムとして、都市開発分野(Cyber Dome)¹⁴⁾や天文分野(4D2Uプロジェクト)¹⁵⁾で応用されている。クライアントの負担が少ないということに加え、カウンセラーにとっては、コンテンツ撮影が市販のビデオカメラだけで可能であり、提示が容易であること、HMDなどのようなトラッキングセンサーなど必要としないこと、撮影から提示までソフトウェアもハードウェアも安価であることなどの利点がある。VRに関しての特別な知識のないカウンセラーでも運用しやすく、この技術はVRエクスポージャーとしても有効であると考えられる。

ただし、一般に市販されているドームスクリーンVRシステムは、プロジェクタを複数台使用し、映像表現を追求しているため、数百万円～数千万円と高価であり、取り扱いも専門知識が必要である。

本研究では、個人用のエクスポージャー専用システムとして、プロジェクタを1つだけ使用したドームスクリーンVRエクスポージャーシステムの開発を試みた。開発費は20万円程度であり、取り扱いも容易にすることに成功した。

2. VRにおける視覚効果の有効範囲

VRシステムを用いる場合、映像そのものの高画質化よりも、没入感及び臨場感が治療効果に大きく関わる要素になると考えられる。そこで、VRの視覚提示は、単に映像を提示するだけではなく、バーチャル空間への没入感を体験者に与えることが必要になってくる。

Fig. 1 Vision map

両眼視野の最大領域(最大視野)は水平方向に 210° 、垂直方向に 125° 程度である。ただし、視覚によって文字や色などの詳細な情報を得ることができる範囲(有効視野)は、およそ水平方向に 30° 、垂直方向に 40° である。また、視野における映像が占有する範囲が拡大するにつれて、映像が視覚に与える影響は大きくなり、没入感が増す。しかし、ある程度を超えるとその効果が飽和し、それ以上映像範囲を拡大しても没入感が増えない。この範囲を誘導視野と呼び、水平方向 100° 、垂直方向 85° 程度である¹⁶⁾。

それぞれの視野の関係を Fig. 1 に示した。これらを考慮して、本研究では、水平視野 100° 以上、垂直視野 85° 以上の視覚提示を行うことにした。

3. 提案システム

本システムを Fig. 2 に示す。安価で取り扱いを容易にするために、プロジェクタを1台とした。単純に1台のプロジェクタで正面からスクリーンに投影すると、観察者が影となってしまふ。これを回避するもっともシンプルな手法として、スクリーンの背面から映写するリアプロジェクション方式を用いた。ただし、リアプロジェクション用のドームスクリーンは容易に入手できるものではなかったため、乳白色で直径 1m の安価なプラスチック素材の半球を利用した。次節で示すように、このシステムでも十分に映写が可能である。プロジェクタは、10 万円以下の普及機であった NEC 製 ViewLight NP901WJ を用いた。解像度 $1,280 \times 800$ 、明るさ 2000lm である。画角は、手動ズーム(1~1.2 倍)によって、 $21.5^\circ \sim 25.9^\circ$ で調整可能になっている。本実験では、Fig. 6 に示すように、 25° になる条件で使用した。

以上にもとづき、システム全体は、パソコン1台、プロジェクタ1台、及びドームスクリーンで構成し、高所恐怖症克服の目的に合わせて、のぞきこむ形にした。

外観を Fig. 3 に示す。ドームスクリーンを支える土台も安価で軽量のパイプを組み合わせて作製した。各パイプの長さは手動のネジで固定するようにしており、高さや傾きを容易に変更できる。プロジェクタの台も2枚の板を組み合わせた簡易なもので、ネジで傾きを調整できるようにした。

リアプロジェクションの場合、プロジェクタの光源方向にあたる場所が明るくなる。そのため、ドームに映る明るい光源を指標にすることで、専門知識や特別なツールを必要とすることなく、容易に光軸をセッティングすることができる。また、ドームが球状であるため、被験者の視線方向の中心を明るい光源像に合わせれば、視野マップがドーム中心からずれるだけで、プロジェクタからの映像を中心にとらえることができる。つまりは、逆の言い方をすれば、プロジェクタとドームスクリーンの位置を厳密に合わせる必要はないということでもある。被験者の視線方向とプロジェクタの光軸が直線上にあれば、ドームが球形のことより、次節で述べる歪み補正がそのまま適用できる。

後述する評価実験の結果では、被験者の視点が光軸を外れた場合でも実用上は支障のないことが示唆されており、補正に関しては、本手順による次節アルゴリズムで十分であると考えられ、採用した。

また、中心の明るい光源像については、映像鑑賞用のプロジェクションシステムでは取り除くことが必須のものである。これに関しても、評価実験において、22 名の被験者の誰からも問題視されず、本目的においては支障がないものと示唆されている。

Fig. 2 Outline of our proposed VR system

Fig. 3 Whole view of our system

4. 歪み補正

曲面形状スクリーンへの映像投影には、何らかの映像歪み機能を必要とする。光学システムに補正機能まで要求すると、非常に高価になる。本システムの映像は、市販のビデオカメラで撮影されたものを想定している。安価なビデオカメラの映像でも十分な利用可能にするための補正システム(ソフトウェア)も合わせて開発した。

補正は2段階で行う必要がある。カメラの歪み補正とドームスクリーンの形状による映像補正である。

まず、カメラの歪み補正について述べる。デジタル画像処理において、カメラキャリブレーションは、以下の手順で行われる。

- (1) 幾何特性が既知の物体を撮影する。
- (2) 撮影画像から、世界座標系と画像座標系の対応関係を何点か求める。
- (3) 得られた対応関係から、カメラモデルの内部及び外部パラメータを推定する。

カメラの歪み補正プログラムでは、OpenCV¹⁷⁾でカメラキャリブレーション関数として実装されているZhangのアルゴリズム¹⁸⁾を用いた。チェスボード(市松模様)を机上に置き、(右側)斜め上方向から撮影した像の補正前と補正後を、Fig. 4とFig. 5に示す。正しく補正されていることが確認できる。

Fig. 4 Chess board before camera calibration

Fig. 5 Chess board after camera calibration

次に、ドームスクリーンの形状による映像補正について述べる。プロジェクタの投影する映像が視点からどのように見えるかは、視点の位置やプロジェクタの位置、投影面の形状に影響される。このパラメータは可変であるが、本研究で用いた設定として、Fig. 6のように、プロジェクタをドーム型スクリーンの中央から180 cmの位置に置き、視点をドームの外径の中心に置いた場合で説明する。この視点を理想視点とする。青丸がプロジェクタ位置、赤丸が理想視点位置である。青色、赤色の3角形は、それぞれ、プロジェクタ投影領域、視野領域になっている。湾曲した灰色の円弧は半球ドーム型スクリーンである。

まず、プロジェクタからそのまま映像を投影した場合を考える。プロジェクタは平面スクリーンに投影するように設計されているので、仮想平面スクリーン上に等間隔で投影点Pを結ぶ。プロジェクタと投影点Pの延長上にドーム型スクリーンの投影点Dが結ばれる。投影点Dと理想視点位置を結ぶことで、理想視点から見た投影点Vがわかる。結果として、プロジェクタで等間隔に投影した投影点(P)は、理想視点からは外側に歪んだ点(V)として見え

る。

Fig. 6 Condition before correcting geometry distortion

次に、理想視点から見た投影点(V)が歪みなく等間隔に並べせることを考える。理想視点位置から見た投影点(V)が等間隔に並んだ点を追跡し、それに合わせてプロジェクタで投影する映像(P)に補正をかける。

補正の模式図をFig. 7に示す。まず、理想視点から見た投影点(V')を等間隔に並らばせる。理想視点と投影点(V')を結ぶ直線がドームスクリーン上と交わる点をD'とする。D'とプロジェクタ位置を結ぶ直線が仮想平面スクリーンと交わる点をP'とする。このように、視点から追跡して位置を決めた投影点をプロジェクタから投影すれば、結果として、視点から見た投影点は歪みのない等間隔に並んだ点として見えることになる。この画像変換は幾何学的に求まる¹⁴⁾。

Fig. 7 Condition after Correcting Geometry Distortion

正方格子を用いた補正の検証をFig. 8とFig. 9に示す。どちらも理想視点から撮影したものである。ドームスクリーンが半球であるため、1台のプロジェクタでは端の歪みまでは補正できない。ただし、実際に顔を入れて映像を見ると、必要な誘導視野(100°×85°)の範囲では十分な程度の補正となっている。

Fig. 8 Square grid before correction

Fig. 9 Square grid before correction

実際の映像例を Fig. 10 に示す。10 階建てのビルの屋上から地上を撮影した画像を補正処理して映写したものである。このような動画映像は、臨場感や没入感も大きく、高所恐怖症の VR エクスポージャーとして有効であると期待される。

色収差も生じているが、実際の違和感がなかったことから、本研究においては、色収差については補正していない。

Fig. 10 Snapshot of ground taken from roof of 10-story building

5. 評価

本システムの評価として、没入感のアンケートを行った。映像として、モノレールの車窓から見た動画を用いた。22 名の健康な男子大学生(平均年齢 23 ± 2 歳)に参加してもらって回答を得た。

環境は、日中の明るい室内であった。例えば、暗室で行うことで効果が高まる可能性があるが、今回はシステムの評価ということで、環境的な要因を考慮しないように一般的な状況を条件とした。

理想視点位置に固定して見た場合(理想視点)と、自由に視点位置を変えながら見た場合(自由視点)の 2 パターンでアンケートをとった。

Table 1 Immersive reality

Viewpoint position	Yes	No
Ideal	100%	0%
Free	100%	0%

まずは、理想視点(ideal viewpoint)と自由視点(free viewpoint)の場合それぞれでの没入感(immersive reality)を調べた。測定方法は、次の二つから一つを選択してもらう 2 件法を用いた。

「没入感を感じた」(Yes)

「没入感を感じない」(No)

Table 1 がその結果であり、本システムから没入感の得られることが確認された。

次に、観察領域の違いによる没入感と違和感についての評価を行った。被験者は、理想視点位置に固定の場合でも、自由に視点位置を変える場合でも、どちらにおいても、見る場所は正面に限らず、被験者の自由意志とした。その上で、誘導視野における感じ方と、半球ドーム全体を見回したときの感じ方の差異を評価した。これは、本システムが誘導視野の映像を重視して試作されており、その評価である。

評価方法は、三つから一つを選択してもらう 3 件法を用いた。それぞれの選択肢は以下の通りである。

【没入感(Immersive reality)】

「誘導視野領域に限定して観察の方がより強く感じた」

(Inductive field)

「自由にドーム全体を観察の方がより強く感じた」

(All of dome)

「両者に特に差は感じなかった」

(No difference)

【違和感(Feeling of strangeness)】

「誘導視野領域に限定して観察の方がより強く感じた」

(Inductive field)

「自由にドーム全体を観察の方がより強く感じた」

(All of dome)

「特に違和感は感じなかった」

(No strangeness)

Table 2 Evaluation on ideal viewpoint position

Immersive reality	Inductive field	All of dome	No difference
	27%	55%	18%
Feeling of strangeness	Inductive field	All of dome	No strangeness
	14%	32%	54%

Table 3 Evaluation on free viewpoint position

Immersive reality	Inductive field	All of dome	No difference
	14%	77%	9%
Feeling of strangeness	Inductive field	All of dome	No strangeness
	18%	45%	37%

Table 2 及び Table 3 の結果から、見る領域を誘導視野領域に限定するよりも半球ドーム全域に広げた方が、より没入感が増すことがわかった。ただし、違和感も増している。これは、へりを観察した場合はスクリーンを意識させてしまうためであると考えられる。

理想視点と自由視点の結果を比較する。没入感については、理想視点のときは「誘導視野」と「半球ドーム全域」で 2 倍の差が出ているが、自由視点においては、その差がさらに大きく、ほぼ 8 割が「半球ドーム全域」のときの方が没入感が大きいと回答している。このことから、自由にドーム全域を観察できるときに、もっとも大きな没入感が得られることを示唆される。また、違和感については、理想視点においては半数以上が違和感はない(特に感じない)と回答している。自由視点では、やや低く、半数を下回る結果となった。

これらの結果から、本システムは、頭の位置を理想視点において、そこからドーム全域を自由に見るような使い方が、もっとも有効であり、本システムが有効に機能する可能性が示唆された。

本研究は、千葉大学倫理委員会の承認を得た後、参加者から書面にて同意を得て実施した。

6 む す び

高所恐怖症の克服を支援する目的で、安価なドームスクリーン型 VR エクスポーザーシステムの試作を行った。誘導視野である水平方向 100°以上、垂直方向 85°以上の視覚提示を行うことに成功し、ドームの形状による視野を覆う効果で、没入感が強くなることがわかった。

今後は、平面映像との定量的な比較や、先行研究となっている HMD システムと本システムの効果を比較していくなど、さらに評価を進める予定である。コストとともに、扱いやすさも重要であ

る。臨床において、両者に同様な効果があると検証されれば、安価で手軽な普及型の VR エクスポーザーシステムとなり、当該分野の発展に貢献できるものと期待される。臨床医や臨床心理士と積極的に議論を重ねながら、本研究課題を発展させていきたいと考えている。

また、本研究を足がかりとして、応用研究も進めていきたいと考えている。本システムの特徴は、映像の精細さを求めることをやめて、安価で取り扱いを容易にしたことである。現在の映像機器は、技術の進歩とともに高精細化が急速に進んでいる。ただし、人間の目にはオーバースペックな場合も多々見受けられ、それほどの精細さは必要ないけれども、ポータブルで安価な映像情報機器が大量に必要な場合もある。例えば、自動車運転のシミュレーションシステムがある。近年、高齢者の自動車事故が増加しており、70 歳以上の免許更新では高齢者講習が義務付けられている。本システムを応用して、ポータブルな運転シミュレーションシステムの開発を行うなどの貢献ができればと、検討を始めている。

参考文献

- 1) Y. Choy, A. J. Fyer and J. D. Lipsitz, Treatment of specific phobia in adults. Clinical psychology review, 2007; 27: 266-286.
- 2) D. F. Grös and M. M. Antony, The assessment and treatment of specific phobias: a review. Current psychiatry reports, 2006; 8: 298-303.
- 3) R. T. LeBeau, et al., Specific phobia: a review of DSM-IV specific phobia and preliminary recommendations for DSM-V. Depression and Anxiety, 2010; 27: 148-167.
- 4) M. Krijin, P. M. G. Emmelkamp, R. P. Olafsson and R. Biemond, Virtual reality exposure therapy of anxiety disorders: a review. Clinical psychology review, 2004; 24: 259-281.
- 5) J. Bush, Viability of virtual reality exposure therapy as a treatment alternative. Computers in Human Behavior, 2008; 24: 1032-1040.
- 6) M. Fredrikson, P. Annas, H. Fischer and G. Wik, Gender and age differences in the prevalence of specific fears and phobias. Behaviour Research and Therapy, 1996; 34: 33-39.
- 7) I. M. Marks, Fears, phobias and rituals: Panic, anxiety and their disorders. Oxford University Press (New York), 1987; 457-494.
- 8) C. M. Coelho, A. M. Waters, T. J. Hine and G. Wallis, The use of virtual reality in acrophobia research and treatment. Journal of Anxiety Disorders, 2009; 23(5): 563-574.
- 9) L. F. Hodges, et al., Virtual environments for treating the fear of heights. Computer, 1995; 28(7): 27-34.
- 10) P. M. Emmelkamp, M. Krijin, A. M. Hulsbosch, S. de Vries, M. J. Schuemie and C. A. van der Mast, Virtual reality treatment versus exposure in vivo: a comparative evaluation in acrophobia. Behaviour Research and Therapy, 2002; 40(5): 509-516.
- 11) C. Cruz-Neira, D. J. Sandin and T. A. DeFanti, Surround-Screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE.

- Computer Graphics. Proc. SIGGRAPH '93, 1995: 135-142.
- 12) R. Segal, M. Bhatia and M. Drapeau, Therapist's Perception of Benefits and Costs of Using Virtual Reality Treatments. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 2011; 14: 29-34.
  - 13) G. Riva, et al., NeuroVR 2-A Free Virtual Reality Platform for the Assessment and Treatment in Behavioral Health Care. *Medicine Meets Virtual Reality*, 2011; 18: 493-495.
  - 14) 柴野伸之, 澤田一哉, 竹村治男, マルチプロジェクトを用いたスケーラブル大型ドームディスプレイCyberDomeの開発. *日本バーチャルリアリティ学会誌*, 2004; 9(3): 327-336.
  - 15) 小久保英一郎, 他, 国立天文台 4 次元デジタル宇宙プロジェクト. *日本バーチャルリアリティ学会誌*, 2003; 8(4): 59-60.
  - 16) 澤田一哉, スケーラブル半球ドーム型立体映像提示システム. *システム/制御/情報*, 2005; 49(9): 369-373.
  - 17) OpenCV (Open Source Computer Vision). <http://opencv.jp/opencv/document/>
  - 18) Z. Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration. Microsoft Research, 1998 (last updated 2008).