

4章 全天周型視聴覚併用複合現実空間 X-Media Galaxy

正会員 田村秀行[†]、木村朝子[†]

キーワード：複合現実感、全天周映像、立体音響、3次元音場、超音波スピーカ、シースルーHMD

1. まえがき

本稿の表題とキーワードを見て、本学会の会員読者諸兄はどのような話題や用途を想像されるだろうか。「全天周映像」という言葉からは、オムニマックスシアターやプラネタリウム施設、「立体音響」からは、そのシアターに配されたサラウンド方式のスピーカ群が思い浮かんだのではないだろうか。「視聴覚併用」は、映像と音声の同期に関する話題、「複合現実」は、二つの出来事（現実に起きた事件）の関連性を数値的に評価することだと思われていないだろうか。

笑話ではなく、上記は、当該技術の専門家ではない一般人が、かつてこれらのキーワードから実際に想像された事柄である。以下で「プラネタリウム」という言葉が登場するが、星座を天空面に投影する天象儀そのものを研究対象にしているのではない。そもそも本稿で解説するのは、そうしたすでに市販され、運用されている機器やサービスではなく、まだ実験室レベルの先行研究である。

「複合現実」が「人工現実（バーチャルリアリティ）」の発展形態であることをご存知ない読者には、想像がつかないかも知れないが、これは目の前の空間にCGで描いた仮想物体を出現させる技術である。ここでは、その最先端研究、とりわけ新しい立体音響技術を発展させるために設置した実験システムに関して述べる。

まだ基礎研究の段階にある技術が中心であるが、その全体利用も部分利用も大いなる発展性を秘めており、映像情報メディアとしての新しい利用形態を提唱しているので、そうした視点からお読み頂ければ幸いである。

2. 視聴覚併用複合現実感研究の流れ

人工現実感（Virtual Reality: VR）の発展形である拡張現実感（Augmented Reality: AR）や複合現実感（Mixed Reality: MR）の研究は、1990年代後半から活発化し、今世紀に入ってから、基幹手法の体系化とさまざまな分野での

[†]立命館大学

"X-Media Galaxy: Immersive Audio and Visual Mixed Reality Space" by Hideyuki Tamura and Asako Kimura (Ritsumeikan University, Kyoto)

実用化が図られている¹⁾²⁾。ARとMRに本質的な違いはないが、現在われわれは、現実世界に比較的簡単な電子データを付すものを「AR」、現実世界と仮想世界の継ぎ目のない融合を目指すものを「MR」と位置づけている。

世界各国でのAR/MR研究開発の大半は、視覚的な増強・融合に関するものであるが、筆者らの研究グループでは、早くからMR空間での視覚・聴覚・触覚の三感融合や相互補完に関する研究に取り組んできた。触覚提示デバイスには限界があり、万能の触力覚ディスプレイは存在しないため、広い用途をもつ汎用MRシステムの実現形態としては、視聴覚の二感に限定したMR体験空間を目指すことにした。

「視覚的MR」で現実と仮想の「幾何学的整合」、「光学的整合」を達成するのに比べて、実音と人工合成音を混合する「聴覚的MR」単独の実現はさほど困難ではない。ただし、MR空間中に視聴覚の同期をとって仮想物体を配置し、この人工物を現実世界の事象と融合させて、立体映像、立体音響として知覚させるには、実装上、さまざまな工夫が必要となった。筆者らは、（現実、仮想）と（視覚、聴覚）の組合せを同時に実現するものとして、これを「2×2視聴覚併用MRシステム」と呼んでいる（図1）。

その第1期実現システム³⁾では、視覚提示にはビデオシースルー型HMD (Head Mounted Display)、聴覚提示には開放型ヘッドホンを利用して、MR融合結果を体験できるようにした。視聴覚の対称性からすれば、ビデオカメラを内蔵したHMDに対して、マイクロホン（もしくは付着）した密閉型ヘッドホンを用いるべきであるが、そう

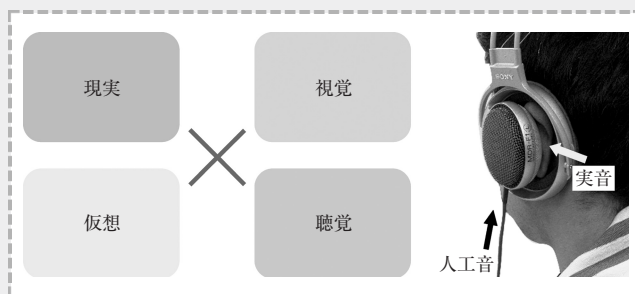


図1 2x2視聴覚併用MRの概念

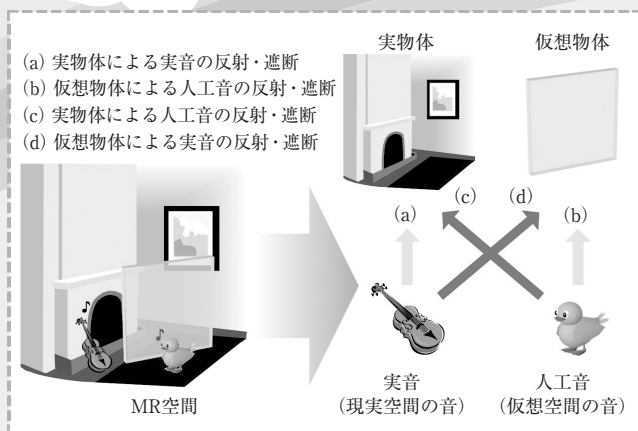


図2 聴覚的MRにおける音の反射と遮断

すると、体験者の手元の各種操作音やコードが擦れる実音をマイクが拾ってしまい、実用上、開放型ヘッドホンを用いざるを得なかったのである。

この2×2MRシステムでは、単に静的なMRを表現するだけでなく、仮想物体が運動することも許容し、それが引き起こすMR的な音の反射や遮断も実現した(図2)。すなわち、「実物体による人工音の反射・遮断」や「仮想物体による実音の反射・遮断」も達成し、それを活かした体験型アトラクションやコンテンツもいくつか制作した⁴⁾。

この種の視聴覚MRは世界初の実現例であったが、その後も、筆者らがこれを継続的に研究する唯一無二の研究グループとなっている。「複合現実感」を提唱し、視覚的AR/MRの長年の経験がある視覚班(映像チーム)と、立体音響の最先端研究を実施し得る聴覚班(音響チーム)が、学内で緊密に連携する態勢が整っているが、他ではこの連携がなかなか図れないためかと思われる。

3. 新3D音像再生方式：音像プラネタリウム法

3.1 音像プラネタリウム法の考案

上記の2×2MRシステムでは、仮想空間の人工物の視覚的提示にはCG映像の両眼立体表示を、人工合成音の3次元音像提示にはステレオヘッドホンで両耳に音像定位させるバイノーラル再生を採用している。視聴覚での対称性は保っているものの、バイノーラル方式にはMR空間体験の実運用上、大きな欠点があった。

HMDでの両眼立体視には、せいぜい体験者の左右眼間距離の違いが立体感に少し影響するだけであるが、ステレオヘッドホンでのバイノーラル受聴には、体験者の両耳での受聴特性(頭部伝達関数)の違いが大きく影響するためである。体験者自身の頭部伝達関数(Head-Related Transfer Function: HRTF)で再現しないと正しい3次元音場把握ができないが、HRTFの正確な測定は、専用機材を用いて経験者が行う必要がある。予め用意されている(他人の)多数のデータから体験者に合うものを選択できれば、ある程度

対処できるが、どれが合うかを判定するのも容易ではない。このため、不特定多数の体験者が訪れる展示会場やアトラクションでは、その場で素早くHRTFの測定や選択を行うことは事実上不可能であると言える。

この運用上の問題点を克服するため、ヘッドホンもHRTFも利用しない、まったく新しい3次元音場再生方法を考案した。多数の超音波スピーカを空間内に配置し、出力信号を壁面や反射板で反射させ、任意の位置に音像を定位させ、自由な位置で聴覚的MRを体験可能にする新方式である⁵⁾⁶⁾。超音波スピーカは、別名パラメトリックスピーカとも呼ばれ、超音波を搬送波として利用し、振幅変調した音信号を重畳して伝送するスピーカである。出力信号の指向性と直進性が高いため、駅構内での放送等、特定領域に音を伝達したい場合に利用されている。筆者らの新方式での3D音像定位は、この超音波スピーカの鋭い指向性を利用し、壁面で音信号を反射させることを前提としている。すなわち、スピーカからの直接音を受聴するのではなく、反射した間接音が聞こえるので、あたかも壁面に音源があると感じさせるのである。

これまで、立体音響(3次元音場生成)技術として、上記バイノーラル方式の他に、「マルチチャンネルステレオ方式(5.1chサラウンド等)」、「トランスオーラル方式」、「波面合成方式」等々が考案されているが⁷⁾、筆者らの新方式は、そのいずれとも発想が異なる。スピーカ設置の簡便さ、同時体験できる人数、再生音場の自由度等の点で優れている方式である。

本方式の実現形態として、一つの筐体に多数の超音波スピーカを配置し、その周りの壁面に向けて超音波を発する方法を採用した。筐体周囲の全方向に音像を定位できるというイメージから、この新手法を「音像プラネタリウム(Acoustic Planetarium: AP)法」と命名し、この筐体を「APベースユニット(AP/BU)」と呼ぶことにした(当初から、周りの壁面を全天周型と想定していた訳ではない)。AP/BUの1号機と2号機の外観を図3に示す。1号機は正20面体の上部10面に超音波スピーカを配置し、個々のスピーカは手動でその向きを変更できる。2号機では、スピーカの配置自由度を増す形状にし、底部にサブウーファを内蔵できる躯体とした。

3.2 AP方式の実装と発展形

前述の2×2MRシステムで、バイノーラル方式をAP方式に置き換えることに着手し、ヘッドホン着用なしで立体音を受聴できることを確認した。ここで部屋の形状によっては、反射パスを短くするため、適宜反射板を配置することを試みている。この大改変を加えたMRシステムもしくはMR空間を、「X-Media Galaxy」(クロスメディアギャラクシーと読む)と呼ぶことにした。

このX-Media Galaxyの完成時点で、魅力的なコンテンツも制作し、プレス発表や学会発表を積極的に行った。そ



図3 ベースユニット1号機と2号機

の結果、多数の見学者や体験希望者があり、さまざま好意的な意見や期待が寄せられた。その要望に応えるべく、その後、以下のような拡張を行っている。

(1) 全天周化と床面での吸音

通常の部屋でX-Media Galaxyを実現した後、「音像プラネタリウム」の名前に相応しい全天周型ドーム形状の壁面空間への移行を計画した。これは没入型の映像空間の導入が目的なのではなく、AP方式立体音響への配慮のためである。複数の平面壁面をもつ通常の部屋の場合、AP/BUから発せられた超音波は、壁面で多重反射し、不自然な残響が生じることがある。そこで、BU筐体から壁面までの距離をほぼ均等にするため、半球型壁面のドーム形状とし、その湾曲した壁面で内側に反射した音をすべて床面で吸収する方法を考えた(図4)。また、床下に間接スピーカを配置することで、目的音の残響成分だけを出力することで、残響の擬似的な制御も可能となる。このための床面、床下の構造は、その上を複数の体験者が歩き回る荷重に耐え、かつ十分な吸音効果があるよう配慮して設計した。

(2) 移動音の実現と放射特性の制御

原理的にはMR空間の自由な位置に3D音像定位可能であるが、限られた数の超音波スピーカでは、本方式でCG動物体に対応する(人工的な)移動音を表現するには対策が必要である。簡便な実現法としては、2地点での音像定位を実現し、その間を内挿する方法が考えられる⁸⁾。より自然な移動音の実現のため、超音波素子を配置する放射板を曲面形状にし(図5)、駆動させる素子に遅延を与えて信号を放射する方法を考案した⁹⁾。

また、放射面を湾曲させることにより、その曲率を変えることで、放射特性も制御可能となった(図6)。これによって、音像の体験者数も制御できるので、複数の体験者それぞれの位置で別の音像を提示できる道が拓けた。

(3) マルチBU配置による複数パスの確保

ドームの壁面が完全な球面でない場合、まったくの任意

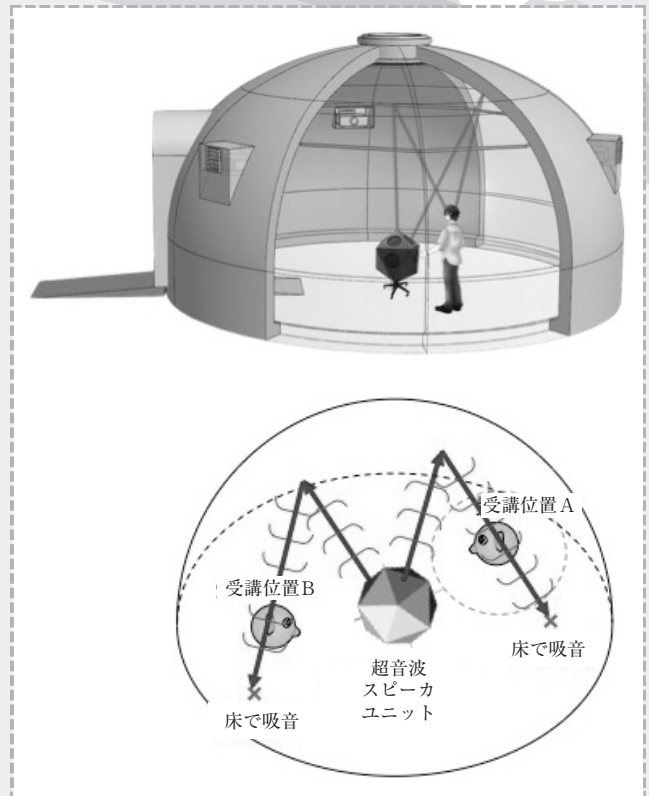


図4 ドーム内での音波の反射と床での吸音



図5 超音波素子を凹曲面形状に配置したスピーカ

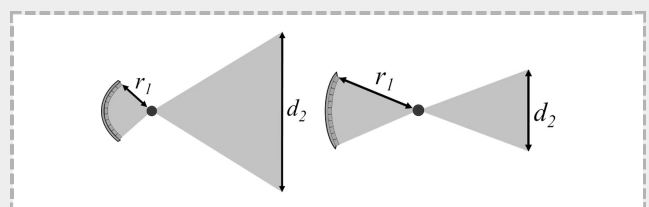


図6 曲面型超音波スピーカによる放射制御

の位置に音像定位ができず死角が生じる。また、ドーム内に現実物体を配置した場合、その物体表面による遮断や吸

音が生じてしまう。この問題の解決策として、AP/BUを複数台配置して、複数の伝達パスを確保する方法が考えられる。まずは、床面の他に天井にもBUを設置するダブルプラネタリウム方式を採用することとした。

4. 新しいMR体験空間としてのXドーム

4.1 X-Media Galaxy/Dome Typeの構成と意義

前述のように、MR体験空間の形状を全天周型にしたのは、AP方式による3D音像提示を発展させる聴覚班の基礎実験のためである。本研究の視覚班としては、この全天周壁面を3台のビデオプロジェクタで内側から映像を前面投影することとした。すなわち、ドーム壁面を曲面スクリーンと見立てたものであり、没入感を与えるVRドームシアターの方式である。

これだけなら、世の中のどこにでもあるイマーシブディスプレイであるが、筆者らのX-Media Galaxyでは、ドーム内部はビデオシースルーHMDを装着したMR体験空間であるのがユニークな点である。現状の解としては、ドーム壁面は単眼の映像投影、ドーム内部ではHMDによる両眼立体映像提示という組合せで実現している。壁面投影だけなら、偏光や液晶シャッター方式で3D表示は可能であり、いわゆるオムニマックス (IMAX Solido) 3Dシアターに類した実現方式になる。ところが、いずれも3Dメガネの着用を要するため、MR体験用のHMDとの併用は不可能に近い。

このため、ドーム壁面には単眼映像の投影で妥協している。MR空間体験者には、両眼立体視しているドーム内部の背景として、壁面投影映像が見える訳である。通常、遠景には両眼視差は少なく、背景が単眼映像であってもあまり支障はない。ただし、どうしても背景までも立体視したい場合は、壁面スクリーンにブルーやグリーン1色を投影し、コンピュータ内でクロマキー合成した両眼視差映像をHMDに表示することで、全体を3D映像化することは可能である。

MR表示は本来、現実世界を背景とし、そこに3D-CG映像を重畳・融合する技術である。したがって、本方式のように背景をスクリーン映像とするのは、変則、邪道であるとも言える。ただし、ドーム内ではしっかり現実物体と仮想物体を共存させ、共同体験者の動作も視認できるので、MR空間作業の特質の大半は維持できている。実運用上は、背景が映像投影で可変となったため、屋外に機材を持ち出すことなく、MR視聴覚体験が可能となり、利便性、実用性が増したと言えよう。意外にも、この形態で使われるMR体験はこれまでほとんどなかったが、今後もっと広く活用されてしかるべきかと思われる。

上記を検討した上で具現化したドーム状のMR体験システムを、「X-Media Galaxy/Dome Type」と呼び、「Xドーム」と略称している(図7)。第1期Xドームは、高さ3.6m、

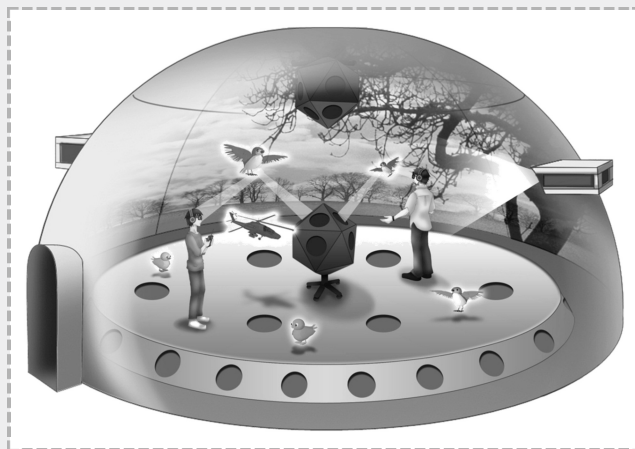


図7 X-Media Galaxy/Dome Typeのイメージ図

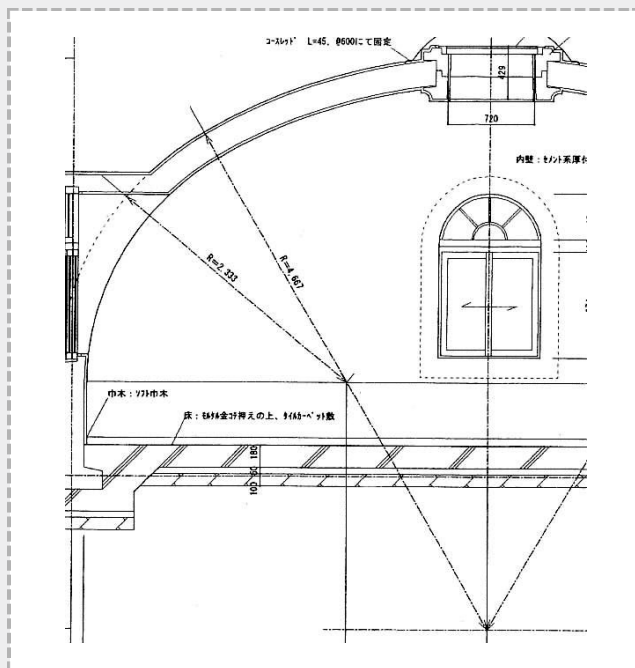


図8 Xドーム壁面の形状(断面図)

床面直径7.0mの躯体を施工した。この大きさは、天井高4.0mの実験室内に設置するという制約のためである。原理的には大きさの制限はないので、高さが許すなら、もっと大きなドームの方が体験空間としては好ましい。ただし、映像プロジェクタは最近かなり高輝度のものが市販されているが、現状の超音波素子の出力には限界があり、あまり大きな音を伝達できないので、Xドームもそう大きくはできない。

第1期Xドームの内壁は完全な半球状ではない。上部は球面だが、床からすぐ上は円筒面であり、その間はトーラス(円環、ドーナツ形状)面で接続されている(図8)。これは、天井高の制約とコスト削減のため、市販のプレパブ住宅の素材を利用したことによるものである。

Xドーム内部には、3台のHD映像プロジェクタを壁面に



図9 Xドームの外観と内部での体験風景

設置している。また、入力装置として、体験者の頭部位置姿勢の追跡するためのモーションキャプチャ装置、実物体の形状や前後判定を実時間で観測するためのデプスカメラ等も備わっていて、HMD、AP/BUと同様、MR空間管理用PCで制御されている¹⁰⁾。視聴覚併用MR体験空間としてのXドームの外観と体験風景は図9に、システム構成は図10に示した。

4.2 Xドームでの視覚体験、心理実験

上記のような視聴覚MR体験が可能な空間に適したコンテンツや応用システムの開発や、この閉空間の特性を活かした錯視現象の心理実験等を積極的に推進している。将来あるAP方式の3D音像再生にとってはまだ基礎実験の場であるが、視覚的にはすでに安定したMR体験環境となっている。

大学の研究室としては、立体視や立体音響を活かしたMRアトラクションやMRコンテンツを、学生たち自身に着想させ、チームで制作する課題を課している。毎年、魅力的な作品が生まれ、それがMR映像提示や3D音像再生の改良すべき問題点を示唆してくれる。残念ながら、Xドームは簡単に移設できないので、学会での技術展示、芸

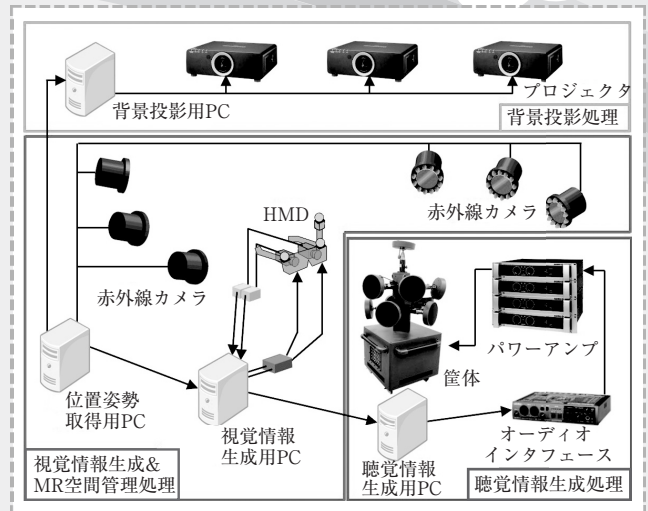


図10 Xドームのシステム構成

術展示に出展する機会がない。

視覚的MRに重きをおいた応用システム開発としては、海底、火災発生現場、火山噴火、原子力発電所等での極限作業の予行演習、模擬体験用のシステムを開発している¹¹⁾。水中、煙や霧の中など、視界不良の環境下で、複数人が実物の装置や設備を点検・操作する作業を、予めMR模擬体験できることは大いに意義がある。直接、想定する現場で実施しなくても、ドーム内に装置・機材さえ持ち込めれば、背景映像を変え、視界不良状態をCGで描画できれば、効果的な事前体験が可能である。

閉空間であるXドームの内壁面に単眼映像投影、内部空間では立体MR映像体験という、ユニークな組合せから起こり得る錯視現象の確認実験も行っている¹²⁾。現在のXドームは床面の直径7mであるので、平均的な立ち位置では、見回すと3~4mの位置に壁面スクリーンが存在する。ところが、HMDではその壁面より遥か遠くに位置する仮想物体を立体表示できる。この場合、壁面を感じずに、スクリーン位置より遥か後方に(すなわちドームの外に)仮想物体があると感じられる。さらには、体験者位置から壁面を超えて遠方に、あるいは遠方から壁面を通過して体験者の手元に移動して来るCG動物体を表示した場合にも、興味深い錯視現象が生じる。壁面に遠景を投影した場合、窓枠を設けた場合、ドーム内部の実物体近くを通過した場合等の条件で現象が異なるが、多くの場合、壁面の存在を感じない演出が可能なが判明している。ここに聴覚刺激を加えれば、さらにその効果が増すことも確認している。

このことは、Xドームの設置床面積に制限があっても、その壁面位置を超えたMR空間体験が可能であることを意味している。

4.3 部分的、発展的な利用形態

Xドーム(X-Media Galaxy/Dome Type)は、視聴覚併用MR体験のための実験空間であるが、そこに盛り込まれた

要素技術は、必ずしもそのままの形態で利用する必要はなく、以下のような形態での利用も考えられる。

- (1) 新3D音像再生技術だけの利用：AP（音像プラネタリウム）方式は、多数のスピーカの設置工事を必要とせず、筐体を移動するだけで所望の3D音場を生成できる特長を有している。筆者らは残響感の制御のため、ドーム形状の実験空間を構築したが、しかるべき筐体配置と反射板設置が可能なら、AP技術はどのような部屋やホールでも利用できる。映像はまったく利用することなく、この新立体音響技術単独でも利用価値は高い。
- (2) 単純な映像+AP音響での利用：もちろん、上記の映像投影が加わるのは充分有り得る形態である。映画館、講演会場等で、現在のマルチチャンネルステレオを置き換える技術にもなり得る。ある特定の領域（座席）に特定の音響信号を伝達できるので、同じ映像提示しながら、ゾーン毎に異なった言語の音声を流すといった利用形態も考えられる。
- (3) Xドーム型MR映像+通常スピーカ：聴覚的にはAP方式でなく、通常の据置スピーカやヘッドホンで済ませる形態も有り得る実現形態である。壁面での音信号の反射を考慮しなくて良いのであれば、スクリーン面はドーム状である必要はなく、円筒状でも立方体状でも差し支えない。また、床面での吸音を要しないのなら、床をモーションベース駆動にすることで、映像と運動感覚の連携が強化できる。この種のMR空間体験は、テーマパーク・アトラクション、科学博物館、防災訓練施設等での利用が期待されている。

5. むすび

基盤研究として推進している「視聴覚併用複合現実空間」の現状に関して述べた。その中心となっている「音像プラネタリウム法」の研究開発経過は順調に推移し、高音質化のための努力が実を結びつつある。大学では実用化のための詰めに限界があるが、産業界からの関心が高いので、立体音響技術の手法として、そう遠くない将来、実用域に達することを期待している。

一方の視覚側は、壁面への単眼映像投影+両眼立体視による複合現実感提示という、従来にはない体験空間を実現している。従来のドームシアターとはまったく異なる用途での活用が期待できるので、そうした観点から、今後も関心を寄せて頂ければ幸甚である。

謝辞 音像プラネタリウム方式の実現は本学・西浦敬信教授と西浦研究室の諸氏、MRシステムの実現と諸実験は柴田史久教授、橋口哲志助教と当研究室学生諸君の協力によるものである。本研究の最近の成果は、科研費・基盤研究(S)「複合現実型情報空間の表現力基盤強化と体系化」の支援による。
(2015年6月24日受付)

〔文 献〕

- 1) “特集：拡張現実感 (AR)”，情報処理，51，4 (2010)
- 2) “特集：新しい飛躍の時代を迎えた複合現実感”，日本VR学誌，15，2 (2010)
- 3) 比嘉恭太，西浦敬信，木村朝子，柴田史久，田村秀行：“視覚・聴覚の現実と仮想を融合する2×2方式複合現実感システムの実現”，VR学論誌，13，2，pp.227-237 (2008)
- 4) 村井嘉彦，深川亜美，木村朝子，柴田史久，田村秀行：“Rhythm of the Rain in 3D - 視聴覚3D-MR空間の表現力を体験できる複合現実型アトラクション-”，第13回VR学大会論集，pp.560-563 (2008)
- 5) 杉林裕太郎，栗元総太，森勢将雅，西浦敬信，柴田史久，田村秀行：“壁面反射型オーディオスポットを用いた高臨場感3D音場提示手法の検討”，第15回VR学大会論集，pp.204-207 (2010)
- 6) Y. Sugibayashi, S. Kurimoto, D. Ikefuji, M. Morise and T. Nishiura: "Three-dimensional acoustic sound field reproduction based on hybrid combination of multiple parametric loudspeakers and electrodynamic subwoofer", Applied Acoustics, 73, 12, pp.1282-1288 (2012)
- 7) “特集：立体音響技術”，映像学誌，68，8 (2014)
- 8) 伊藤仁一，中山雅人，西浦敬信，木村朝子，柴田史久，田村秀行：“X-Media Galaxyにおける移動音像実現のための音像補間”，VR学論誌，18，3，pp.405-414 (2013)
- 9) 生藤大典，中山雅人，西浦敬信，山下洋一：“曲面型パラメトリックスピーカによる移動音像の構築”，音響学2014秋季発表会，pp.879-880 (2014)
- 10) 鈴木翔伍，杉山孝之，宮井貴史，木村朝子，柴田史久，田村秀行：“全天周型視聴覚複合現実体験空間とその基幹ソフトウェア”，信学技報，PRMU2011-261 (2012)
- 11) 小池龍正，橋口哲志，木村朝子，柴田史久，田村秀行：“極限作業模擬体験に適した複合現実空間の描画法”，2015信学総大，A-16-14 (2015)
- 12) 上原祐馬，木村朝子，柴田史久，田村秀行：“全天周型X-Media GalaxyにおけるCGの奥行き知覚の実験と考察”，2013信学総大，A-16-13 (2013)



田村 秀行 1970年，京都大学工学部電気工学科卒業。工業技術院電子技術総合研究所，キヤノン（株）等を経て，2003年より，立命館大学理工学部教授。現在，同大学総合科学技術研究機構教授，画像情報処理，マルチメディア，人工現実感の研究開発に従事。工学博士。正会員。



木村 朝子 1996年，大阪大学基礎工学部システム工学科卒業。1998年，同大学博士前期課程修了。同大学助手を経て，2003年，立命館大学理工学部助教授。現在，同大学情報理工学部教授。実世界指向インタフェース，複合現実感，ハプティックインタフェースの研究に従事。博士（工学）。