

視覚・聴覚を併用した複合現実感システムの開発(4) —複合現実空間での音の反射・遮断の実現—

Mixed Reality System using Audio and Visual Senses (4) ---Implementation of Sound Reflection and Insulation in MR Space---

吉野将治¹⁾, 西浦敬信¹⁾, 木村朝子²⁾, 柴田史久¹⁾, 田村秀行¹⁾

Masaharu Yoshino, Takanobu Nishiura, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura

1) 立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1) 2) 科学技術振興機構 さきがけ (〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8)

Abstract: We developed an MR system that merges real and virtual worlds in both the audio and visual senses, and in which the geometric consistency of the audio sense with the visual sense was coordinated. However, the sound reflection and insulation weren't considered. In this study, we organized about sound reflection and insulation in MR space, and realized that the unique phenomenon in MR space; (1) reflection and insulation of artificial sound by real objects, (2) reflection and insulation of real sound by virtual objects. In addition, we considered the method of emphasizing reflection for stage managed by reflectance, and their effects. Additionally, we examined proper configuration of reflectance in emphasizing reflection.

Key Words: Mixed Reality, Audio and Visual Senses, Reflection, Insulation

1. はじめに

現実世界と仮想世界を継ぎ目なく実時間で融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) は、活発な研究が行われており、急速な発展を遂げている[1]。体験者を仮想世界のみに入らせる従来の VR に対して、現実空間に仮想情報を付加する MR は新たな情報提示技術として注目を浴びている。MR の研究の多くは視覚に対するものであったが、近年聴覚を含めた研究も行われ始めている。

これまでに我々は視覚的 MR の提示方法に相等する聴覚的 MR の提示方式として、実音は直接聴取し人工音のみヘッドホンより提示する「開放型音独立提示方式 (開放型方式)」, 耳で収録した実音と人工音を PC 内で混合しヘッドホンより提示する「密閉型混合音提示方式 (密閉型方式)」を考案し、視覚的 MR と聴覚的 MR が矛盾なく同時提示される「2×2 方式複合現実感システム」を実現した[2]。

本研究ではこの視聴覚併用型 MR システムの拡張として、現実空間での自然現象である音の反射・遮断現象を MR 空間でも実現することを考える。MR 空間では現実空間と仮想空間が融合されているため実音・人工音と実物体・仮想物体は図 1 のように相互に影響を及ぼし合う。

図 1 の 4 通りの現象のうち、実物体による実音への影響は自然現象であり、仮想物体による人工音への影響は、すでに VR の分野で反射音を有する研究が行われている[3]。そこで、本研究では図 1 のうち MR 特有の現象である

- (1) 実物体による人工音の反射・遮断
 - (2) 仮想物体による実音の反射・遮断
- の実現を目指し、その方法を検討する。またそれらが視聴

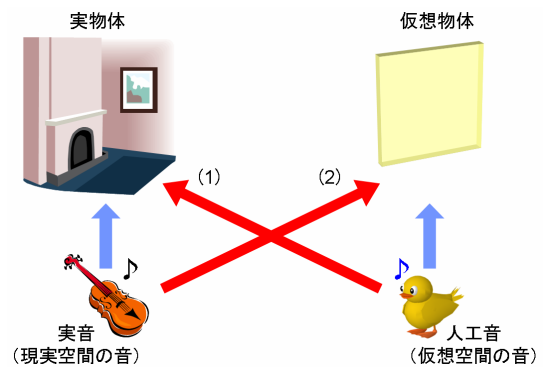


図 1 MR 空間における音と物体との関係

覚併用型 MR 空間の表現力を高めるのに効果的であるかを検討し、必要であれば誇張して表現することで演出効果として用いることを考える。

以下本稿では、2章で MR 空間における反射・遮断現象を実現する方法を、3章でその方法の妥当性を評価する実験を行い、その結果ならびに効果を考察する。4章では仮想物体による実音の反射を演出効果として用いる方法とその効果について述べる。

2. 複合現実空間での反射・遮断の実現方法

2.1 実時間での反射音の生成方法

MR では体験者の移動・対話的操作に対応した実時間での情報提示が必要である。そのため MR 空間中の反射・遮断現象も実時間で行い、それらに対応する必要がある。しかし反射音を生成する音場シミュレータは一般に多くの演算量が求められる。そのため実時間処理が求められる MR に適した高速な反射音生成が必要となる。

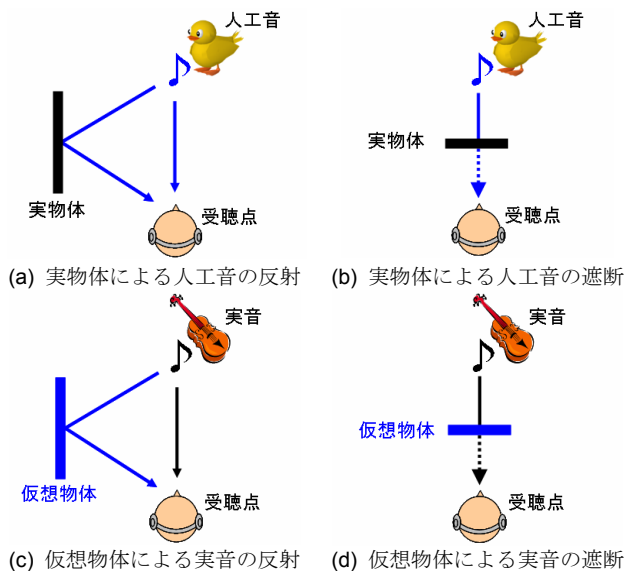


図 2 MR 特有の反射・遮断現象

反射音は、壁などの実物体に1~2回反射して体験者へ届く低次反射成分と、複数回反射してから届く高次反射成分に分けて考えることができる。低次反射成分は実物体との衝突回数が少なく、距離減衰の影響も少ないため、実時間で変化する体験者の頭部位置姿勢や音源位置などの影響を受けやすい。一方、高次反射成分は複数回の衝突を繰り返した残響音であり、これはあらゆる方向から体験者へ届く。そのため、精度の高いシミュレートを行うには多くの演算量が必要である反面、低次反射成分と比べて体験者や音源の位置が変わっても、その変化を感じにくいという特徴がある。

本研究では、反射音生成を実時間でこなすために、演算量の少ない低次反射成分のみ実時間で計算・生成し、演算量の多い高次反射成分はコンピュータによる演算を行わず、エフェクタを用いて機械的に付加する方法を採用する。具体的には、低次反射成分の生成には鏡像法を用いる。体験者、音源の位置に応じて反射経路を算出、経路ごとに距離減衰、衝突する壁の反射特性を考慮し、到来方向に応じたHRTFを用いインパルス応答を生成する。さらに経路長から到達時間を算出し、求めたインパルス応答をそれぞれ時間軸上で加算することで低次反射成分の反射インパルス応答を生成する。一方、高次反射成分は、実時間で求めた低次反射成分の反射インパルス応答を音源に畳み込んだ信号をエフェクタに入力することで、事前に設定した体験環境の残響音を機械的に付加する。

以下の節では、上記の反射音生成手法を利用してMR空間における実物体/仮想物体による人工音/実音の反射と遮断を実現する方法について述べる。

2.2 実物体による人工音の反射

MR空間では、壁やモノなどの実物体は視覚的に見えている。しかし、音源となる人工音の直接音を提示するだけでは、聴覚的には壁やモノが何も存在しない自由空間が実現されているにすぎない。実物体による人工音の反射は、

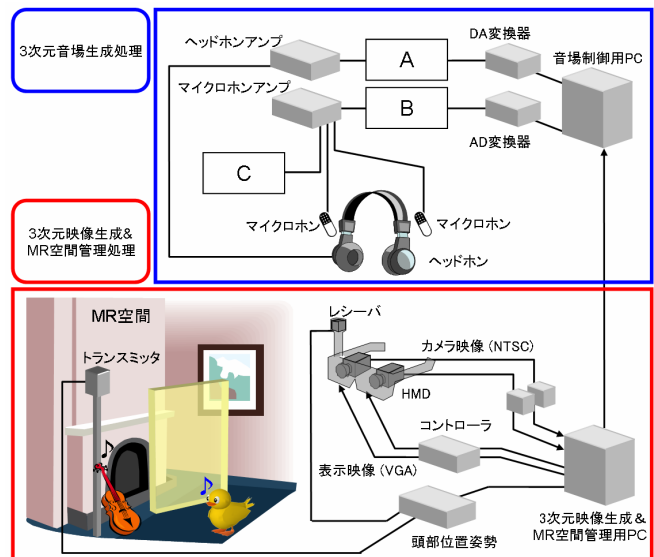


図 3 システム構成

視覚的に見えている実物体の影響を聴覚的にも実現するものであり、図 2 (a) のように、人工音が実物体と衝突して生じる反射音を直接音に付加することで実現する。ただし、実物体の位置姿勢および反射特性は、事前に計測、または磁気センサで計測するなどの方法により既知とする。この方法は開放型方式、密閉型方式で同じであり、システム構成は図 3 A にエフェクタが加わる。

2.3 実物体による人工音の遮断

MR空間で実物体が仮想物体を隠蔽する位置に存在する場合、実物体の位置姿勢がわかればマスク処理により仮想物体を視覚的に消すことができる。実物体による人工音の遮断は、この現象を聴覚的に実現するものであり、図 2 (b) のように実物体によって遮られる人工音を消去することで実現する。具体的には、2.2で生成した人工音の反射音のうち実時間で経路を算出している低次反射成分と実物体により遮られた直接音を提示しないことで実現する。ただし2.2と同様、実物体の位置姿勢および反射特性は既知とする。また開放型方式、密閉型方式で実現方法は同じで、システム構成も2.2と同じである。

2.4 仮想物体による実音の反射

仮想物体による実音の反射音は、図 2 (c) のように実音源が仮想物体に衝突したことで生じる反射音を受聴点での実音に付加することで実現することができる。ただし、実時間処理を実現するためには「音源付近に収音用マイクロホンを配置」「音源位置は既知」の2点が必要条件となる。また開放型方式、密閉型方式で実現方法が異なる。開放型方式では、実音をヘッドホンと耳の間の隙間から直接聴取するため、生成した反射音のみヘッドホンより提示する。密閉型方式ではヘッドホンに取り付けたマイクロホンで収音した実音と生成した反射音をPC内で混合し、ヘッドホンより提示する。システム構成は、図 3 B に高次反射部分の合成用のエフェクタが、図 3 C に実音源収音用のマイクロホンが加わる。

2.5 仮想物体による実音の遮断

仮想物体による実音の遮断は、図 2 (d) のように仮想物体に遮られる実音源からの直接音を除去することで実現する。ここでは、実音源からの直接音成分のみを遮断の対象とし、実音源が実物体（壁など）に反射した音は対象としない。開放型方式では、実時間性を優先するため、ノイズキャンセリングの原理を用いて、收音した実音の逆位相を位相反転器で生成、ヘッドホンより出力し遮音を実現する。一方、密閉型方式では、マイクロホンアレーで音源方向推定[4]を行い、遅延とアレーの原理を用いてマイクロホン間の実音到達時間差を補正し、直接音のみ低減させる。システム構成は、開放型方式ではヘッドホンの両耳部に実音收音用のマイクロホンと位相反転器が、密閉型方式ではHMD上に4チャンネルのマイクロホンアレーが加わる。

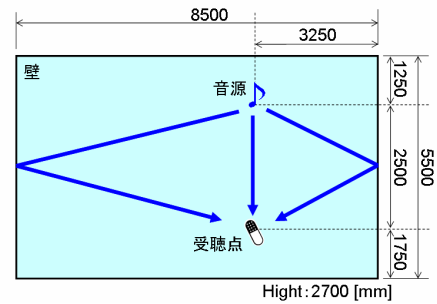


図 4 実験環境 1

表 1 実験結果

比較する收音データ	(1) の收音データに対するエネルギー比 [dB]
(2) 直接音のみ	-12.965
(3) 直接音+反射音	-8.508

3. 反射・遮断手法の評価

3.1 実験目的

2.1で提案した反射音生成法について、エネルギー量をもとに定量的評価を行い、その妥当性について考察する。また、2.2~2.5で述べた方法により、複合現実空間での反射・遮断を実現、運用した結果からその効果を議論する。

3.2 実験内容

2.1で提案した反射音生成法は、2.2~2.4で述べた実物体による人工音の反射・遮断、仮想物体による実音の反射を実現する際使用する。実験では、これらを代表して2.2の実物体による人工音の反射を対象に評価実験を行う。具体的には、図 4 の実験環境（実物体は、壁、天井、床の 6 面）を想定した以下の 3 つの音をマイクロホンにより收音する。收音したデータは、それぞれ直接音成分のエネルギー比で正規化し、再生音の総エネルギー量を比較する。

- (1) 実環境：音源位置からスピーカ再生した音を受聴点で收音
 - (2) MR 環境（直接音のみ）：音源位置から再生した人工音の直接音のみを受聴点（ヘッドホン近接）で收音
 - (3) MR 環境（直接音+反射音）：音源位置から再生した人工音の直接音と提案手法で生成した実験環境での反射音の合成音を受聴点（ヘッドホン近接）で收音
- 実験環境は暗騒音 43dBA のオフィス環境で、音源と受聴点は図 4 のように配置する。音源には帯域幅の広い楽曲（クラシック）を使用し、スピーカ再生する音も人工音と同様に点音源とするため 12 面体スピーカ（SOLID ACOUSTICS SA-335sn）を用いる。使用するシステムのサンプリング周波数は 16kHz、処理フレーム長は 128ms である。壁、床、天井の 6 面による 1 次反射までを実時間演算し、壁の反射特性、反射係数には一般的な部屋に用いられる石膏ボードを用いる。エフェクタ（ZOOM RFX-2200）は、事前に用意されたエフェクトの中で実験環境に最も近い会議室の残響を設定し、残響時間は実験環境の容積、表面積、壁の反射率から求めた約 135ms に設定した。本実験では、聴覚的 MR の提示方式として「2×2 方式複合現実感システム」において優位性のある開放型方式を用いる。

3.3 結果と考察

表 1 に (1) 実環境の音に対する (2), (3) の MR 環境での音のエネルギー比を示す。表より (2) の直接音の場合よりも (3) の反射音を加えた場合の方が約 4.5dB 改善されていることがわかる。ただし、(3) の場合でも約 8.5dB エネルギーが不足している。これは低次反射成分が 1 次反射までの再現であることが原因と考えられる。一方、(3) の MR 環境生成に必要な処理速度が約 60 fps であったことから、提案手法を採用することで、実時間処理が可能となったことがわかる。今後は、処理の高速化を図り、実時間処理が可能な範囲で 2 次反射以降の演算も追加することで改善を行う。

3.4 運用結果と効果

ここでは、2.2~2.5 で述べた反射・遮断手法を開放型方式、密閉型方式について実装し、運用した結果とその効果を議論する。

【実物体による人工音の反射】 図 4 のような壁、床、天井の 6 面の実物体による反射を付加したところ、付加しない場合と比べ聴覚的に実環境の音に近づいた。また、壁に接近することで壁からの反射音も知覚できた。このように、実環境から受ける反射をシミュレートしているため、実音と人工音の混ざり具合が向上するという効果があった。また、開放型方式、密閉型方式では同様の結果が得られた。

【実物体による人工音の遮断】 図 2 (b) のように実物体を配置しそれぞれ稼働させたところ、音源、壁、体験者の配置に応じて人工音が正しく遮断された。このように聴覚的なマスク処理が実現されることで、体験者が音源と実物体との位置関係を容易に把握できるという効果が確認された。開放型方式、密閉型方式での大きな違いは無かった。

【仮想物体による実音の反射】 図 2 (c) のように仮想壁を 1 枚配置したところ、実音を直接聴取する開放型方式では、処理遅延により、実音と生成した反射音との時間的ずれを顕著に感じる結果となった。一方、実音を一旦收音し合成音をヘッドホンから提示する密閉型方式では実音と生成した反射音との時間的ずれを感じなかった。実際、体験者と配置した仮想壁の位置に応じた反射音を知覚すること

ができたが、高だか1枚の仮想壁を配置しただけでは聴感上の効果はごく僅かであった。以上のことから、「2×2方式複合現実感システム」において仮想物体による実音の反射と遮音は必ずしも不可欠な要素ではないこと、仮想物体による実音の反射を実現する場合には密閉型方式を採用する必要があることがわかる。

【仮想物体による実音の遮断】図2(d)のように仮想壁を1枚配置したところ、開放型方式では雑音が低減される程度で、かつ目的とする実音以外も全てキャンセルされてしまった。密閉型方式では、実音の直接音成分の低減を知覚することができたが、実音の到来方向に応じて時間差を補正し実音を抑圧しているため、音源方向の推定誤差の影響を受ける、低域成分と比べ高域成分があまり低減できないという問題が残った。また反射と同様、聴感上の効果はごく僅かであった。以上のことから、仮想物体による実音の遮断についても密閉型方式が適していること、また必ずしも不可欠な要素ではないことがわかる。

4. 演出効果としての利用

4.1 目的

3.4より、仮想物体による実音の反射・遮断に関しては、高だか1枚の仮想壁では効果はごく僅かで、周囲を仮想壁で囲むような場合を除けば、視聴覚併用型のMR空間において、仮想物体による実音の反射と遮断は必ずしも不可欠な要素でないことがわかった。しかし、演出効果として残響などを誇張して利用する場合には十分効果があると考えられる。そこで本章では、仮想物体による実音の反射に関して、反射音を誇張する方法を提案・評価する。

4.2 反射の誇張方法と効果

反射音を変化させるパラメータには反射率、到達時間、残響時間などがあるが、本研究では反射率を増減することで反射音を誇張する方法を採用する。ただし、反射率の変更は実時間計算が可能な低次反射成分のみとする。

4.3 評価実験

【実験目的】反射音を誇張することによる効果、および反射音をどの程度誇張すると違和感があるかを調べる。

【実験内容】図5のように実音源、仮想壁を配置し、被験者は受聴点にてHMDおよび密閉型方式のヘッドホンを装着する。実音源は、帯域幅の広い楽曲(クラシック)を12面体スピーカから再生する。被験者はまず、仮想壁と重なるように実壁(900×1800×12[mm])を配置した環境(実世界における反射音)を体験する。次に、仮想壁のみの場合について反射率を自由に調節させ、印象をコメントさせた。被験者は正常な聴力を持つ大学生4名である。

【結果と考察】被験者全員が、反射率を上昇させると仮想壁の存在感が増すとコメントした。また個人差はあるものの実壁を置いた場合よりも反射を誇張した場合の方が「視覚との統一が取れて自然に感じた」というコメントも得られた。これらのコメントから、反射音の到来方向からの音量が増加することで、その反射音を生じさせる仮想物体の存在感が増す効果があると考えられる。

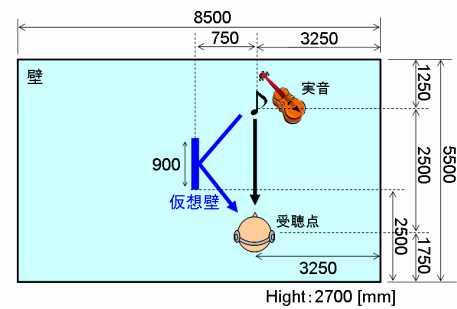


図5 実験環境2

また、実音よりも反射音の音量が上回る場合に「壁から音が出ているように感じる」「どこから音が出ているわからなくなる」「頭の中で鳴っているように聞こえる」というコメントが得られた。違和感を覚え始める反射率には個人差があったが、ある量を超えて反射率を上げた場合に被験者全員が違和感を覚えると回答した。生成した反射音の実音の音量を多少超える程度であればこれを許容する傾向も見られた。これは先行音(実音)の定位感保持の効果(音響効果の第一波面の法則)によるものだと考えられる。ただし、実音と反射音がほぼ等しい場合でも違和感を覚える被験者もいたことから、反射率は反射音の実音よりも小さい範囲で設定すると効果的であることがわかった。

5. むすび

本稿では、視聴覚併用型複合現実空間における反射・遮断現象のうちMR特有の現象を実現した。また、MRの特性に合わせた簡易で高速な反射音の生成方法を提案・評価するとともに、MR空間における実音・人工音の反射・遮断を実現した結果とその効果を検討した。結果、比嘉らの報告では開放型方式に優位性があったが[2]、実音に対する反射・遮断処理を行う場合、開放型方式での実現が難しいことがわかった。次に、効果が僅かであった仮想物体による実音の反射について、演出効果としての利用を想定し、反射音の誇張方法を提案した。また実験を通して、その効果を確認するとともに、違和感のない誇張の範囲を求めた。

今後は、反射音生成処理の高速化や室内音響指標を用いた反射音の評価を予定している。また、反射音の到達時間や残響時間などのパラメータを反射音の誇張に利用する方法についても検討を行い、その効果を検討したい。

謝辞 本研究の一部は、科研費・基盤研究A「三感融合型複合現実空間の構成法に関する研究」による。

参考文献

- [1] “複合現実感特集1~4”, 日本VR学会論文誌, 1999, 2002, 2005, 2008.
- [2] 比嘉恭太, 他: “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”, 同上, Vol. 13, No. 2, pp. 227 - 237, 2008.
- [3] 大久保洋幸, 他: “CG画像と同期したインタラクティブ音場再生システムについて”, 同上, Vol. 5, No. 3, pp. 965 - 974, 2000.
- [4] 大槻麻衣, 他: “複合現実空間との新しいマルチモーダル・インタラクション方法の提案と実現”, 同上, Vol. 13, No. 2, pp. 247 - 255, 2008.