

# 牽引力錯覚と映像錯覚による 空中投映物体との接触感提示手法

池田 泉<sup>1,a)</sup> 井上 亮文<sup>1</sup> 星 徹<sup>1</sup>

**概要:** 3D 映像技術の一般化に伴い、次世代の映像技術として空中投映ディスプレイが注目されている。空中投映ディスプレイとは、映像が空中に浮かび上がって見えるディスプレイの総称であり、インタラクティブコンテンツの基盤として期待されている。しかし、霧を用いるフォグスクリーンのように、スクリーンが固体ではない空中投映ディスプレイはユーザに視覚と聴覚以外のフィードバックを与えることが難しい。本稿では、牽引力錯覚と映像錯覚の二つを利用することで、ユーザに空中投映物体からの方向性を有した接触感を提示する手法を提案する。提案手法では、ユーザは振動アクチュエータを用いたデバイスを装着する。ユーザの手が投映物体と接触したとき、振動デバイスを制御し、ユーザに投映物体と反発する方向への牽引力錯覚を与える。同時に、スクリーン上に映像エフェクトを表示し、牽引力錯覚を増強する。評価の結果、牽引力錯覚の方向性提示の効果は低かったものの、全体として接触感を向上させることができた。

**キーワード:** 空中投映ディスプレイ, フォグスクリーン, 仮想力覚

## A Tactile Sensation Feedback Method for Virtual Objects Based on Virtual Directional Force and Synchronized Visual Effects

IZUMI IKEDA<sup>1,a)</sup> AKIFUMI INOUE<sup>1</sup> TOHRU HOSHI<sup>1</sup>

**Abstract:** Aerial display is the hottest field in next generation display technologies for the basis of interactive contents. However, fog screens, an example of the aerial display, have no rigid body. We can't confirm whether the touch operation on the fog screen is succeeded or not. In this paper, we propose a tactile sensation feedback method from virtual objects on a fog screen. In this method, a user puts a vibration device that consists of four actuators on his/her wrist, and then touches on the fog screen with the hand. When the user's hand comes into contact with the displayed object, the system controls the vibration device and induces a virtual directional force. This virtual force is augmented by an visual effect that is displayed on the fog screen at the same time as the vibration. We confirmed that the prototype could not induce directional force so much, whereas the combination of virtual force and visual effect feedback could improve the tactile sensation on virtual objects on a fog screen.

**Keywords:** aerial display, fog screen, virtual force sensation

### 1. はじめに

3D 映像技術の一般化に伴い、次世代の映像技術として空中投映ディスプレイが注目されている。空中投映ディスプレイとは、スクリーンの存在が希薄、もしくは不可視と

なっており、映像が空中に浮かび上がって見えるディスプレイの総称である。本研究では、アミューズメントパークなどで実用化され、一般的に普及しているフォグスクリーンに着目する。

フォグスクリーンとは、空中に発生させた霧の上にプロジェクタで映像を投映する空中投映ディスプレイである。映像が映った霧の中を人や物体が通り抜けることができ、

<sup>1</sup> 東京工科大学 コンピュータサイエンス学部  
School of Computer Science, Tokyo University of Technology  
<sup>a)</sup> c011104348 at edu.teu.ac.jp

ユーザと映像とがインタラクションをするコンテンツの基盤として期待されている。

ガラスやアクリルを用いた一般的なタッチスクリーンでは、ユーザは指先がスクリーン表面へ接触した感覚を頼りにコンテンツを操作する。しかし、フォグスクリーンには硬質な外殻が存在しない。ユーザは自身の身体がコンテンツに触れたかどうかを判断できないため、操作の成否がわからず、ユーザの意図したタイミングや奥行き感覚でインタラクションを行うことが難しい。

本研究では、投映物体とのインタラクションが容易なフォグスクリーンの実現を目的とし、牽引力錯覚と映像錯覚の二つを利用することで、ユーザに空中投映物体からの方向性を有した接触感を提示する手法を提案する。提案手法では、ユーザは振動アクチュエータを用いたデバイス(以下振動デバイス)を手首に装着する。ユーザの手が投映物体と接触したとき、振動デバイスを制御し、ユーザに投映物体と反発する方向への牽引力錯覚を与える。同時に、スクリーン上に映像エフェクトを表示し、牽引力錯覚を増強する。

本論文の構成について述べる。1章では背景と課題、本研究の目的について述べた。2章では関連研究について述べる。3章では本研究の提案手法について述べる。4章では提案システムのプロトタイプシステムについて述べる。5章ではプロトタイプシステムの評価実験について述べる。6章では本研究の発展例について述べる。7章では本研究の結論を述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 フォグスクリーン

三輪らは、フォグスクリーンを三次元的ディスプレイ装置として拡張する研究 [1][2] を行っている。三輪らが作成した多層型霧状スクリーンは、一般的なものに比べ微細な霧を用い、複数層を持つフォグスクリーンを実現した。これに映像を投映することで、映像の立体感や奥行き感を高め、映像空間を現実空間上により自然に表現する。この研究によりフォグスクリーンが3次元的な空中投映ディスプレイに拡張されたが、ユーザと直接インタラクションを行うことはできず、投映コンテンツとしての機能しか持たない。

Displair社はユーザに投映物体への直感的な操作を提供するフォグスクリーンとして、Displairを発売している。Displairはジェスチャ認識機能を搭載した小型フォグスクリーンであり、スクリーンにユーザが触れると投映画面へのタッチを認識できる。このタッチと、手を水平方向に振るスワイプジェスチャなど何種類かのジェスチャを組み合わせることで、投映画面のスクロールや投映物体の移動、拡大・縮小といった直感的な操作をユーザに提供する。これにより、フォグスクリーン上の投映物体とユーザがイン

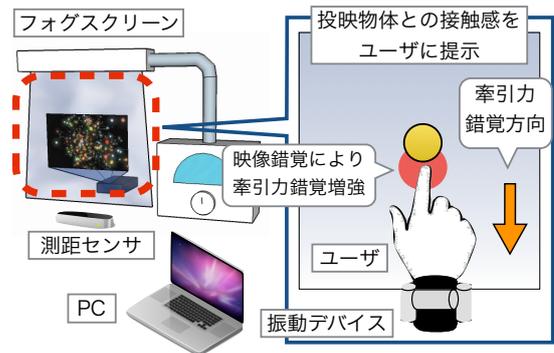


図 1 提案手法概要

Fig. 1 Overview of the proposed method.

タラクションを行うことが可能になったが、ユーザへのフィードバックは視覚と聴覚に限定されている。

### 2.2 仮想力覚提示

仮想力覚とは、ユーザにフィードバックを与えることで表現される、仮想物体からの力覚を指す。

暦本は、バネ式の振動アクチュエータを用いた仮想力覚提示システム Traxion[3] を提案している。Traxion は内部にバネ式のアクチュエータを設置しており、矩形波の入力によって非対称な加速度で振動を行う。この矩形波の入力デューティ比を調整することで、ユーザに対し一方向への牽引力錯覚を与える。

Lecuyerらは、視覚的錯覚から仮想的な力覚を提示する研究として、Pseudo-Haptic Feedback[4] を提案している。Pseudo-Hapticとは映像により視覚的に与えられる錯覚の一つであり、ユーザの身体の一部やその代わりとなるポインタの動きを時間的または空間的に変化させることで、力覚を提示することができる。例として、ユーザの手の動きを映像内で時間的に遅らせた場合、ユーザは実際には存在しない空中からの抵抗力を感じる。

本研究では、これらの仮想力覚を提示する仕組みをフォグスクリーンに対して利用することで、空中投映ディスプレイをインタラクティブコンテンツとして拡張する。

## 3. 牽引力錯覚と映像錯覚による空中投映物体との接触感提示手法

本研究では、牽引力錯覚と映像による視覚的錯覚の二つを利用することで、ユーザに空中投映物体との接触方向に応じた接触感を提示する手法を提案する。本稿における接触感とは、投映物体にユーザが触れたタイミングの明確化とその接触の方向、投映物体の持つ形状や力の提示を指す。これにより、空中投映面上の物体という実在しないものについて、触る・押す・引かれるといったフィードバックをユーザに提示する。

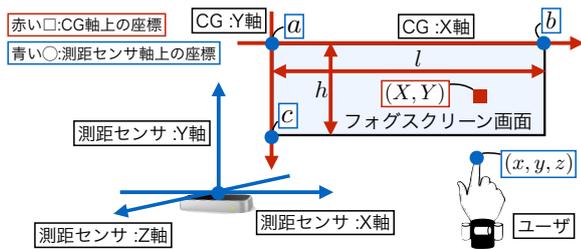


図 2 システム上の座標軸

Fig. 2 Two coordinate axes in the proposed method.

### 3.1 提案手法概要

図 1 に本手法の概要を示す．本手法では，測距センサを用いてユーザの手の位置を取得し，空中投射ディスプレイ上に投射された物体との接触を判定する．その際，ユーザが装着した振動デバイスによって，投射物体と反発する方向へ牽引力錯覚を発生させる．同時に，スクリーン上に映像エフェクトを表示し，ユーザに映像錯覚を与える．これにより，錯覚による牽引力と投射物体の動き・力を関連付け，強化することで，ユーザがフォグスクリーンの投射物体に触れたような感覚を提示する．

### 3.2 投射物体との接触判定

本手法では，ユーザの手の位置情報からフォグスクリーン上の投射物体との接触を判定する．そのため，フォグスクリーン面の位置と投射物体の位置を用い，ユーザの手の位置が投射物体と三次元的に重なっているかどうかを算出する．

スクリーンに投射するアプリケーション上の座標軸と，測距センサが位置情報を取得するための座標軸は異なる．よって，ユーザが投射物体と接触していることを判定するには二つの座標軸とその値を一致させる必要がある．図 2 にシステム上に存在する座標軸の概要を示す．二つの座標軸を CG 軸と測距センサ軸として分けたとき，CG 軸原点，アプリケーション画面右上端，左下端の座標を測距センサ軸上の値で取得する．この座標をそれぞれ点  $a, b, c$  とする．CG 軸におけるアプリケーション画面を幅  $l$ ，高さ  $h$  とする．これらを用い，測距センサ軸上のユーザの手の位置座標  $(x, y, z)$  を CG 軸上の点  $(X, Y)$  に変換する式を式 1, 2 に示す．

$$X = (x - a_x) \times \frac{l}{b_x - a_x} \quad (1)$$

$$Y = (a_y - y) \times \frac{h}{a_y - c_y} \quad (2)$$

ユーザの手とフォグスクリーンの接触を判定するため，同じく点  $a, b, c$  から平面の式を算出する．この平面式にユーザの手の位置座標から  $x, y$  を代入し，得られる  $z$  座標の値より取得した手の位置座標  $z$  が小さいとき，ユーザの手がスクリーン画面と接触しているとする．

以上のことから， $(X, Y)$  が投射物体と重なっており，か

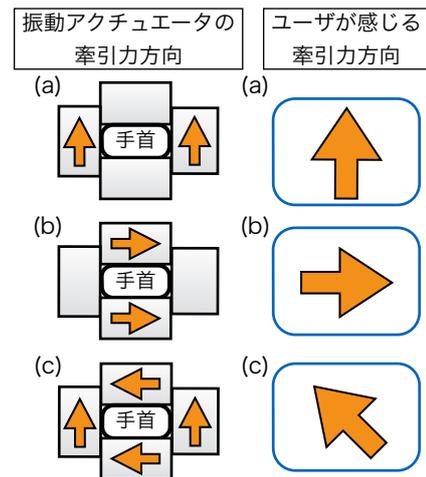


図 3 牽引力錯覚の提示方向例

Fig. 3 The mechanism of virtual force sensation.

つユーザの手がスクリーン画面と接触しているとき，ユーザの手が投射物体と接触していると判定する．

### 3.3 牽引力錯覚

ユーザの手と投射物体の接触が判定されたとき，振動デバイスの振動アクチュエータを動作させることで，ユーザに対し投射物体との接触方向に応じた牽引力錯覚を与える．振動アクチュエータには，マイコンを用いて非対称的な加速度で振動する信号を入力する．これにより，ユーザへ投射物体から押される力を表現する．

図 3 に，振動デバイスによって提示される牽引力錯覚の方向例を示す．振動デバイスには 4 つの振動アクチュエータを用い，平行な 2 つずつを同時に振動させることで，上下左右に加えて合力により斜め方向への牽引力錯覚を発生させることができる．上下左右方向へは図 3(a), (b) のように振動アクチュエータを 2 つ振動させる．また，斜め方向へ牽引する場合は 4 つの振動アクチュエータすべてを振動させる．これにより，計 8 方向への牽引力錯覚を実現する．

### 3.4 映像錯覚

ユーザの手と投射物体が接触したとき，スクリーン上に映像エフェクトを表示することで Pseudo-Haptic[4] を発生させる．これにより，ユーザが知覚する牽引力錯覚を増強し，その仮想力覚を投射物体と関連付ける．

図 4 に映像エフェクトの例を示す．ユーザの手がフォグスクリーン画面と接触すると，図 4(a) のようにスクリーン上にはユーザの手の接触点を示し，その動きに追従して移動するポインタを表示する．図 4(b) のようにポインタが投射物体と接触したとき，ポインタは図 4(c) から (d) のように，投射物体と反発する方向へ移動し，ユーザの手の位置へと戻る．

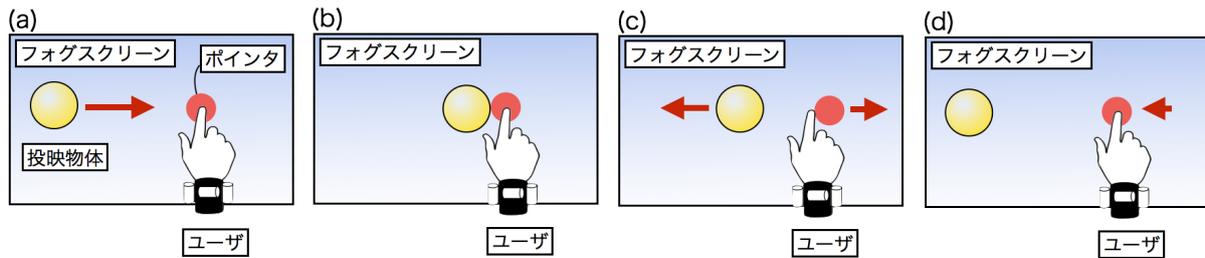


図 4 映像錯覚のエフェクト例  
Fig. 4 An example of visual effects.

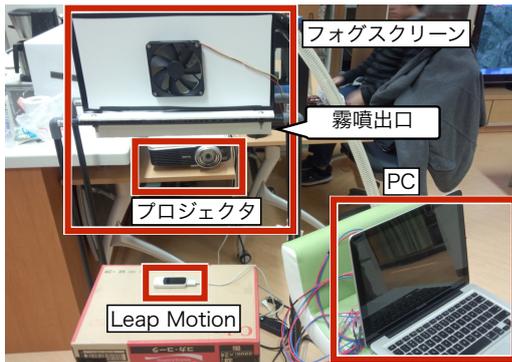


図 5 フォグスクリーン外観  
Fig. 5 Appearance of the fog screen.

## 4. 実装

### 4.1 実装環境

図 5 に実装したフォグスクリーンの外観を示す。フォグスクリーンには超音波式加湿器を用いた。測距センサには Leap Motion を用いた。振動デバイスの振動アクチュエータには Haptuator を利用し、その制御には Arduino Uno を用いた。アプリケーション制御とセンサ情報取得には PC を用いた。また、Leap Motion の制御には LeapSDK 2.2.0 を用いた。

### 4.2 振動デバイス制御

振動デバイスには Arduino Uno を用いて電圧を入力した。入力電圧波形は NTT のぶるなび [5] を参考に、10:1 のデューティ比となる非対称な加速度を入力した。また、Haptuator の適正振動周波数から、入力電圧は約 90 Hz の周波数で振動を行う。

牽引力錯覚の提示方向については、接触判定時にユーザの手の位置座標から接触した投映物体の中心座標に向かう単位ベクトルを算出し、その  $x$  成分と  $y$  成分によって一方向を決定した。図 6 に投映物体との接触方向に応じた牽引力提示方向を示す。図 6(a) のように、ユーザの手から見て左方向から投映物体が接触した場合、接触方向と反発する方向として、振動デバイスは右方向への牽引力錯覚を提示する。同様に、図 6(b) では上方向から接触した場合下

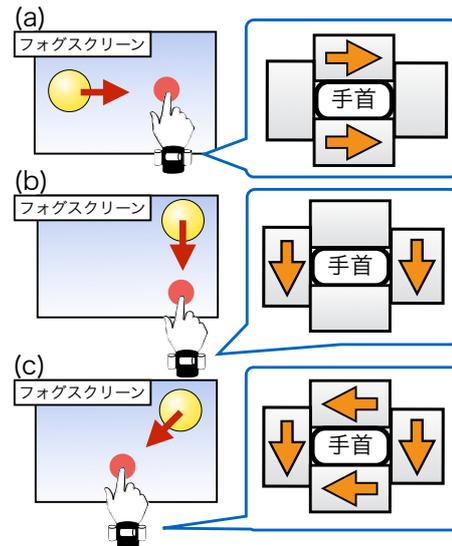


図 6 投映物体との接触時の牽引力提示方向  
Fig. 6 Directions of the virtual force induced by collision of an virtual object.

方向へ、図 6(c) では右斜め上方向から接触した場合左下方方向への牽引力錯覚を提示する。

### 4.3 アプリケーション

図 7 に今回実装したアプリケーションの動作風景を示す。図 7(a) のポインタは、ユーザの手とフォグスクリーンが接触している点を示す。このポインタに図 7(b) のように投映物体が接触したとき、ユーザの手と投映物体が接触したと判定される。接触が判定されたとき、ユーザの手首に装着した振動デバイスがユーザに牽引力錯覚を与える。図 7 中では、投映物体がユーザの手に左側から衝突しているため、振動デバイスは右方向への牽引力錯覚を発生させる。同時に、図 7(c), (d) のように、ポインタがユーザの手の位置から投映物体と反発する方向へ移動し、ユーザの手の位置に戻ってくるという映像エフェクトが表示されている。

## 5. 評価実験

作成したプロトタイプシステムを利用し、牽引力錯覚の認識方向について精度評価を行った。また、提案手法・牽

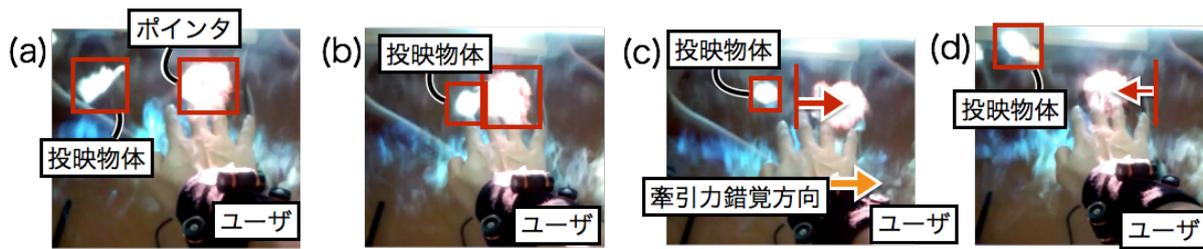


図 7 アプリケーション動作風景  
 Fig. 7 Behavior of the application.

引力錯覚のみ・映像錯覚のみの場合についてアンケート評価を行った。

## 5.1 牽引力錯覚精度評価

### 5.1.1 実験手順

提案手法では、ユーザと投映物体が接触したとき投映物体と反発する方向へ牽引力錯覚を提示する。この牽引力錯覚のユーザに対する強度と方向性の提示精度について、評価を行った。

被験者 15 名に振動デバイスを装着してもらい、8 方向に対応した振動を順に例示した。その後、ランダムに決定した方向への振動を提示し、被験者に感じた牽引力方向を回答してもらった。これを間に 2 秒の振動停止時間を設け、5 回繰り返した。

### 5.1.2 実験結果

図 8 に被験者ごとに算出した正答率を示す。正答率は被験者ごとに正答数を出題数で割った値であり、0 から 1 までの値をとる。図 8 では、正答率を出題方向に対し、回答が一致した場合、回答の誤差が 45 度以内の場合、上下方向・左右方向のどちらか 1 要素が合っていた場合の 3 通りについて集計を行った。また、図 8 の点線は被験者全体の正答率平均であり、下から完全一致、誤差 45 度以内、1 要素一致の場合の値である。

正答率の全体平均は、それぞれの場合においてランダムに回答した場合の確率を上回った。しかし、被験者ごとに正答率を見ると、完全一致の場合では最高で 5 問中 3 問、最低で 0 問となり、個人差と考えられるばらつきが大きい。この結果から、現状の振動デバイスでは明確な牽引力錯覚が提示できていないとわかった。この正答率は、振動デバイスの振動強度や入力電圧波形、振動アクチュエータの変更などを行うことで多少の改善が見込めると考えられる。

## 5.2 ユーザ評価

### 5.2.1 実験手順

提案手法の有用性と、映像錯覚によって発生する牽引力錯覚の変化について検証を行うため、ユーザにアプリケーションを利用してもらいアンケートを実施した。

被験者 15 名にはそれぞれ牽引力錯覚と映像錯覚 (大)、牽

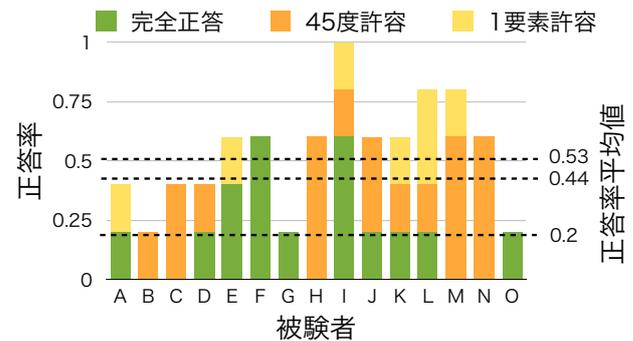


図 8 正答率グラフ

Fig. 8 The ratio of questions answered correctly for each subjects.

引力錯覚と映像錯覚 (小)、牽引力錯覚のみ、映像錯覚 (大) のみ、映像錯覚 (小) のみ、錯覚なしの各条件で投映物体に触れてもらった。映像錯覚 (大)・(小) とは、映像エフェクト内でのポインタの移動量とエフェクトを継続するフレーム数の大小を指す。牽引力錯覚は振動デバイスによる牽引力錯覚提示の有無を指す。アンケート項目は「最も投映物体との接触感を感じた条件」と、「映像錯覚により強化された牽引力錯覚の要素」の二つである。

### 5.2.2 実験結果

表 1 と表 2 にアンケートの結果を示す。最も投映物体との接触感を感じた条件では、15 人中 14 人が牽引力錯覚と映像錯覚の組み合わせを答えている。このことから、牽引力錯覚のみや映像錯覚のみに比べ、提案手法がより明確な接触感を与えられることがわかった。また、提案手法の中でも映像錯覚 (大) と答えたのが 12 名、映像錯覚 (小) と答えたのが 2 名であった。映像錯覚 (小) については、フォグスクリーンの霧に揺らぎがあるため、その揺らぎと映像錯覚のエフェクトをユーザが混同する可能性がある。この結果から、映像エフェクトが強いほどユーザに与えられる映像錯覚が強いと考えられる。しかし、エフェクトの強さがユーザがエフェクトを自身の手と関連付けられない不自然な大きさであった場合、映像錯覚が発生しない可能性がある。

映像錯覚により強化された牽引力錯覚の要素についての質問では、被験者に当てはまると感じた項目すべてを回答してもらった。その結果、「強さ」が 5 名、「方向」が 12

表 1 アンケート結果 1

Table 1 Result of questionnaire 1

最も投映物体に押されたと感じた手法	人数
牽引力錯覚+映像錯覚 (大)	12 名
牽引力錯覚+映像錯覚 (小)	2 名
映像錯覚 (大) のみ	0 名
映像錯覚 (小) のみ	0 名
牽引力錯覚のみ	0 名
錯覚なし	0 名
どれも感じなかった	1 名

表 2 アンケート結果 2

Table 2 Result of questionnaire 2

映像錯覚によって強化された 牽引力錯覚の要素	人数
強さ	5 名
方向	12 名
振動タイミング	9 名
特に変化はなかった	0 名

名,「振動タイミング」が9名となり,被験者全員がいずれか一つ以上の要素が強化されたと答えた。また,自由記述欄にも「映像錯覚により牽引力錯覚がよくわかった」という回答が多数あり,映像錯覚によって牽引力錯覚が強化できたとわかった。

## 6. 発展

本研究で提案した手法のエンターテインメント分野への適用例として,両面タッチパネル [6] のような複数人数対象のインタラクティブコンテンツ化が挙げられる。フォグスクリーンは透過型スクリーンと同様に,スクリーンの向こうをユーザが視認することが可能である。これを利用し,測距センサの位置や数,プロジェクタの位置を調整することで,複数のユーザが対面でスクリーンを操作することができる。

図 9 に発展例を示す。図 9 のように,両面タッチパネル化したフォグスクリーンを挟んで対面したユーザ A, B の手の位置を,その指先の向きから判別して取得する。この手 A, B に対し, A のみタッチができる投映物体 A と, B のみタッチができる投映物体 B をスクリーン上に表示する。ランダムに移動を行う投映物体 A, B に,対応したユーザが振動デバイスを装着した手で触れる・押すといった動作を行うことで,複数人での対戦・協力型の音楽ゲームコンテンツが実現できると考えられる。また,通常のタッチパネルとは異なりユーザの手がスクリーンを通り抜けることができるため,対面ユーザの動作を妨害するといった新たなゲーム性を追加することが可能である。

## 7. おわりに

本研究では,牽引力錯覚と映像錯覚の二つを利用するこ

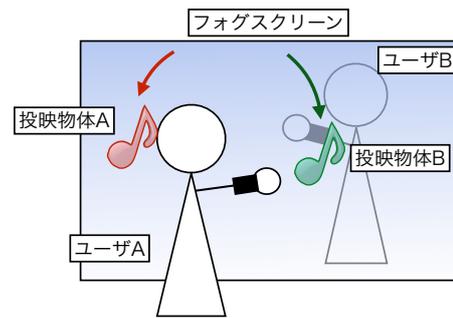


図 9 提案手法のエンターテインメント分野への適用例

Fig. 9 An application of the proposed method: rhythm action games.

とで,ユーザに空中投映物体からの方向性を有した接触感を提示する手法の提案とプロトタイプシステムの実装を行った。評価の結果,本手法により牽引力錯覚を強化し,ユーザに対し投映物体と触れた感覚を提示できたことが確認できた。

しかし,作成した振動デバイスでは8方向の牽引力錯覚を区別することは難しく,牽引力錯覚の強度について改善方法を検討する必要がある。また,本稿で実装した映像エフェクトとは異なるエフェクトを用意し,比較実験を行うことで提案手法による表現の幅を広げ,更なる改善を目指していきたい。

## 参考文献

- [1] 遠藤祐二, 稲沢綾二, 前田広一郎, 板井志郎, 三輪敬之: 霧スクリーンの多層構造化による3次元ディスプレイ装置の開発, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2010 (2010).
- [2] 須藤和敬, 金指 学, 板井志郎, 三輪敬之: 霧ディスプレイによる共創表現空間のデザイン手法, 第14回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, SI2013, pp. 1953–1956 (2013).
- [3] Rekimoto, J.: Traxion: A Tactile Interaction Device with Virtual Force Sensation, *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '13*, New York, NY, USA, ACM, pp. 427–432 (online), DOI: 10.1145/2501988.2502044 (2013).
- [4] Lecuyer, A., Coquillart, S., Kheddar, A., Richard, P. and Coiffet, P.: Pseudo-Haptic Feedback: Can Isometric Input Devices Simulate Force Feedback?, *Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2000 Conference, VR '00*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, pp. 83– (online), available from (<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=832288.835776>) (2000).
- [5] 雨宮智浩, 安藤英由樹, 前田太郎: 非接地型力覚提示装置を中空で把持したときの効果的な牽引力錯覚の生起手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 4, pp. 545–555 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008728998/>) (2006).
- [6] 小山雄大, 井上亮文, 星 徹: 透過スクリーン側面からの深度情報を用いた両面タッチパネル化システム, 情報処理学会研究報告. GN, [グループウェアとネットワークサービス], Vol. 2014, No. 41, pp. 1–6 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009676856/>) (2014).