

実物影シミュレーションと2台のプロジェクタによる インタラクティブシャドウ

水野 慎士¹ 岩崎 妃呂子¹ 近藤 桃子¹ 伊藤 玲¹ 杉浦 沙弥¹ 大葉 有香¹

概要: 本研究ではプロジェクタの前に人が立ったり物を置いたりすることでスクリーンに映し出される実物影と、CGで生成されてプロジェクタでスクリーンに投影された仮想影とのインタラククションを実現するシステムを提案する。このシステムでは、虫かごを揺らすと虫かごの実物影から蝶の仮想影が飛び出してユーザの実物影に止まったり、じょうろの実物影から水の仮想影が溢れ出したりする。システムはKinectを用いてプロジェクタとスクリーン間にある物体形状を三次元的に取得しており、スクリーンに写る全ての実物影をシミュレーションする。そしてシミュレーション結果に基づいて仮想影を制御することで、実物影と仮想影との様々なインタラククションを実現している。さらにシミュレーション結果に基づいてもう1台のプロジェクタで実物影の内部に仮想光源を投影することで、実物影に穴を開けたり変形させたりなど、さらに多様な実物影とのインタラククションを実現する。

Interaction Shadows using Real Shadow Simulations and Two Projectors

SHINJI MIZUNO¹ HIROKO IWASAKI¹ MOMOKO KONDO¹ REI ITO¹ SAYA SUGIURA¹ YUKA OBA¹

Abstract: We propose a system which enables users to enjoy interaction with virtual shadows generated by CG and projected to a screen through real shadows of a user and objects in front of a projector. When a user rocks a birdcage, virtual shadows of butterflies fly away from a real shadow of the birdcage and alight on the user's real shadow. When a user uses a watering can, virtual shadows of water come out from a real shadow of the watering can. The system scans 3D shapes of objects in front of the projector with a Kinect, and simulates real shadows on the screen generated by the projector. Interaction with virtual shadows by real shadows is realized by controlling virtual shadows based on the simulated results of real shadows. When projecting virtual light sources inside real shadows with another projector, other various interactions are realized such as deforming real shadows.

1. はじめに

近年のコンピュータ技術の発達に伴い、CG等を用いたデジタルコンテンツの制作が盛んになってきている。特に、センサ技術や画像処理技術、音声処理技術などを組み合わせることで、ユーザの動作に対してリアルタイムに反応するインタラクティブデジタルコンテンツが可能となり、広告媒体やコミュニケーションツール、エンタテインメントの分野で大きな注目を浴びてきている [1][2][3]。

一方、映像表現の一つとして影を用いたコンテンツがしばしば見られる。影は物体に光を当てることで簡単に作り出すことができ、日常のあらゆる場面で目にするものでもある。そして、影を効果的に使ったり普段とは異なる見え方をさせることで、逆に大きな印象を与えることが可能となる。例えば、古くから現代に至るまで影絵を使った芝居が公演されており、舞台の演出としても影を使った例がいくつも見られる。近年はCG等で仮想的な影を生成するデジタルコンテンツもいくつか提案されている [4][5]。

そのような背景の中、本研究では物に光を当てて生成された実物影とCGで生成された仮想影とのインタラクシ

¹ 愛知工業大学 情報科学部
Graduate School of Business Administration and Computer Science, Aichi Institute of Technology

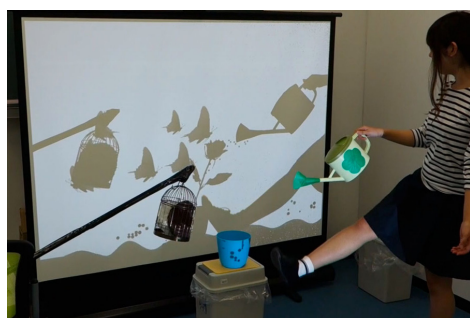


図 1 提案システムの実行例

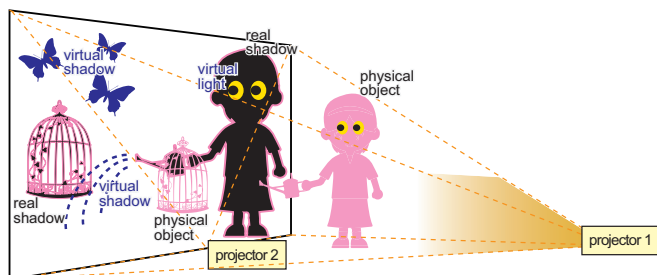


図 2 提案システムの概要

ン手法を提案する．実物影と仮想影は同じスクリーン上に生成されており，見かけ上はほとんど区別が付かない．そして，虫かごの実物影から蝶の仮想影が飛び出したり，蝶の仮想影が人の実物影に止まったりするなど，実空間には存在しない物と影を通じたでインタラクションを実現する．また，仮想光源を用いて穴の空いていない物体の実物影に穴を開けるなど，実物影の変形も可能である．図 1 に提案システムの実行例を示す．

影とのインタラクション手法は他にもいくつか提案されているが，手先だけを想定したり [6][7]．影をすべて仮想的に生成したものが大部分である [8][9][10]．それに対して，本研究の手法では人の全身像や様々な物体に光を当てて生成された実際の影によって仮想の影とのインタラクションを実現している．そして，実際の影に穴を開けるなどの変形も可能である．そのため，いつもと同じ影がいつもと少し異なる振る舞いをするることになり，人に対してより大きな印象を与えることが期待できる．

2. システムの概要

提案システムは，2 台のプロジェクタ (プロジェクタ 1 およびプロジェクタ 2)，スクリーン，Kinect，PC，そして影を生成するための物体で構成される．プロジェクタ 1 は離れた場所から投影する一般的なタイプのもので，物体の実物影を生成するための光源，および仮想影の投影のために用いる．プロジェクタ 2 は超短焦点タイプのもので，スクリーン直下から実物影に仮想光源を投影して影を変形させるために用いる．図 2 にシステムの概要を示す．

ユーザや物体がプロジェクタ 1 とスクリーンの間に入ると，その実物影がプロジェクタ 1 によってスクリーン上に

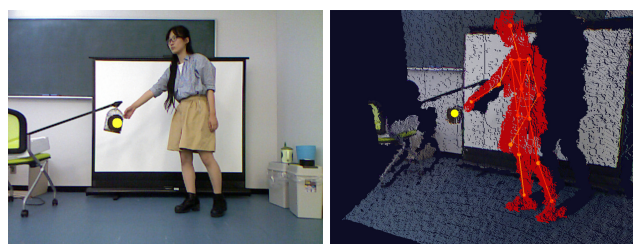


図 3 虫かごの識別結果 (黄色の点)

生成される．また，PC で CG による仮想影を生成してプロジェクタ 1 で投影する．そのため，スクリーン上には実物影と仮想影が合わせて映し出される．さらに必要に応じてプロジェクタ 2 で実物影内に仮想光源を投影する．

そして，ユーザが物体を動かしたり自身が動いたりすることで実物影を動かすと，仮想影が生成されたり仮想影とのインタラクションを楽しんだりすることができる．例えば，虫かごを揺らすと虫かごの実物影から実空間には存在しない蝶の仮想影が飛び出して，ユーザの実物影に到達するとその場所で止まる．また，穴の空いていないカボチャの実物影に仮想光源が投影されて，まるで中身をくり抜いて生成されたような目や口が現れる．

システムでは実物影と仮想影とのインタラクションを実現するため，Kinect を用いて影を生成するための物体の三次元情報を取得して，スクリーンに生成される実物影のシミュレーションを行っている．

3. 実現手法

3.1 実物体の識別と三次元情報取得

提案システムではプロジェクタ 1 付近に Kinect を設置する．プロジェクタ 1 は実物影を生成する光源として使用しており，Kinect をプロジェクタ 1 付近に設置することで，実物影を生成するために配置したすべての物体を三次元的にスキャンすることができる．スキャンデータとして，毎秒 30 フレームで深度画像，色画像，人の関節点三次元座標を取得する．そして，各フレームの情報を用いて実物影を生成するために配置した物体の三次元形状と位置の取得と物体の識別を行っている．現行の提案システムでは，影を生成する実物体として，虫かご，じょうろ，植木鉢，かぼちゃ，および人を用いている．

3.1.1 虫かご

虫かごは固定された杖の先端に取り付けられており，ユーザが触れることでその場所で揺れる．そのため，虫かごの位置は大きく変化することはない．そこで，システムにはあらかじめ虫かごの三次元位置を与えておき，深度画像から虫かご三次元位置に近い座標を持つ画素値を虫かご領域として抽出して，中心の三次元座標を求める (図 3)．

3.1.2 じょうろ・植木鉢・かぼちゃ

じょうろ・植木鉢・かぼちゃの識別は深度画像に加えて色画像も用いる．

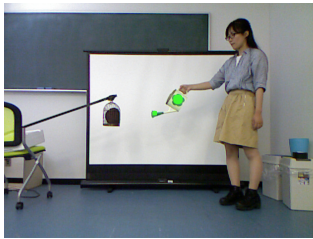


図 4 じょうろの識別結果（緑色の点）

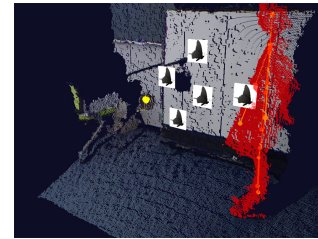
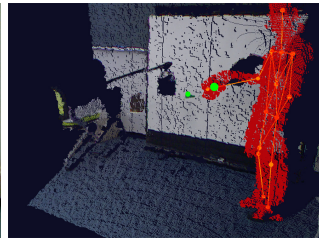


図 6 虫かごの三次元座標から蝶の CG 物体が生成される様子

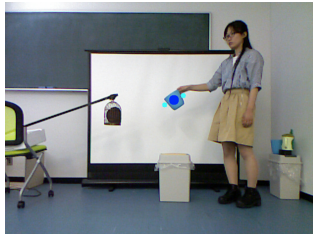


図 5 植木鉢の識別結果（青色の点・四角形）

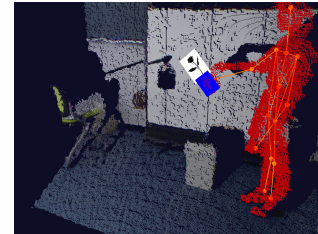
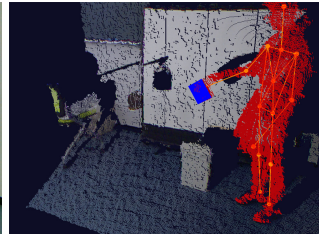


図 7 植木鉢の三次元座標から植物の CG 物体が生成される様子

じょうろ先端の蓮口部と胴体部には、それぞれサイズの異なる色マークが貼り付けられている。まず、色画像を用いて色マークの領域を抽出する。次に、領域のサイズによってじょうろの蓮口部と胴体部を識別する。そして、対応する位置の深度画像を用いて蓮口部と胴体部の中心の三次元座標を求める（図 4）。

植木鉢はじょうろの色マークとは異なる単色で形状は長方形に近いものを用いている。まず、色画像を用いて植木鉢の領域を抽出する。そして、対応する位置の深度画像を用いて植木鉢中心の三次元座標を求める。また、植木鉢領域を包含する長方形領域を算出することで、植木鉢の傾きを求めている（図 5）。

かぼちゃの識別手法は植木鉢の場合とほぼ同様であるが、傾きは求めている。

3.1.3 人

人がプロジェクタ 1 の前に立つと、システムは Kinect を用いて人の 15 カ所の関節点の三次元位置情報を取得する。また、各関節位置からの距離を用いて、深度画像の中から人領域を抽出する。そして、抽出された深度画像の人領域の各画素の三次元座標を計算して、人の三次元形状データを生成する。データは三次元空間中の点の集合となる。

3.2 実物体の状態判定に基づく CG 物体生成

提案システムでは仮想影および仮想光源を実現するため、三次元 CG 空間に CG 物体を生成する。仮想影の CG 物体は白色背景に黒色で表示して、仮想光源の CG 物体は黒色背景に白色で描画する。

3.2.1 虫かごからの蝶の発生

虫かごに対しては揺れの判定を行う。虫かご中心の三次元座標のフレーム間の移動量がしきい値を越えた場合、虫かごが揺れていると判定する。

虫かごが揺れている場合には、虫かご中心に相当する三次元 CG 空間座標から仮想影のための蝶の黒色 CG 物体を発生させる。蝶の CG 物体は平面に蝶のアニメーション映像をテクスチャマッピングとして施して生成しており、三次元 CG 空間内を直線的に移動する。図 6 に虫かごの三次元座標から蝶の CG 物体が生成される様子を示す。

3.2.2 じょうろからの水滴の発生

じょうろに対しては傾きの判定を行う。じょうろの蓮口部と胴体部の三次元座標を用いて、蓮口部が胴体部よりも低い位置にある場合はじょうろが傾いていると判定する。

じょうろが傾いている場合には、じょうろの蓮口部に相当する三次元 CG 空間座標から仮想影のための水滴の黒色 CG 物体を発生させる。そして、水滴の CG 物体が床面に到達した場合には、三次元 CG 空間に仮想影のための水面の黒色 CG 物体を生成する。

3.2.3 植木鉢からの植物の発生

植木鉢中心に相当する三次元 CG 空間座標から仮想影のための植物の黒色 CG 物体を生成させる。このとき、植木鉢の傾きに依って植物の CG 物体も傾ける。図 7 に植木鉢の三次元座標から植物の CG 物体が生成される様子を示す。

3.2.4 かぼちゃからのこうもりの発生

かぼちゃに対しては人の手で触れているかの判定を行う。人の左右の手先の三次元座標とかぼちゃ中心の三次元座標との距離を計算して、距離がしきい値より小さい場合には人が手でかぼちゃを触れていると判定する。

かぼちゃが人の手で触れている場合には、かぼちゃ中心の相当する三次元 CG 空間座標から仮想影のためのこうもりの黒色 CG 物体を発生させる。発生方法は蝶の場合と同じである。

3.2.5 仮想光源の生成

人の実物影およびかぼちゃの実物影には、穴を開けたよ

うな目と口を生成する．そのため，人の頭部およびかば
ちや中心に相当する三次元 CG 空間座標に仮想光源のため
の白色 CG 物体を生成する．

3.3 仮想影および仮想光源の投影

3.3.1 CG 空間と投影環境の構築

提案システムでは実物影を生成するための物体を三次元
スキャンして，三次元形状データを取得したり三次元座標
を取得したりする．次に，得られた三次元情報に基づいて
仮想影のための CG 物体を生成する．そして，CG 物体は
プロジェクタ 1 によってスクリーンに投影されて仮想影と
なる．このとき，仮想影は実物影の位置に合わせて適切に
投影される必要がある．

これを実現するため，提案システムでは実空間と同じ
CG 空間と投影環境を構築して CG 物体の表示を行う．ま
ず，3.1 節で述べた手法により，実空間をスキャンして実
物体の三次元情報取得して，実空間と同等の CG 空間に
配置する．仮想影のための CG 物体も実空間と同等の CG
空間に配置する．そして CG の投影環境についても実空間
と同等に構築する．つまり，実空間のプロジェクタ 1 の位
置に CG 映像生成のための視点位置を配置して，実空間のスク
リーンの位置に CG 映像生成のための CG 投影面を配置
する．

3.3.2 実物影シミュレーションと仮想影投影

実空間と同等の CG 空間を構築すると，実物体をスキャ
ンして得られた三次元情報から CG を生成してプロジェ
クタ 1 で投影した場合に投影映像は実物影と一致する．そ
のため，システムでは投影結果を実物影のシミュレーショ
ンとして用いる．なお，実物影の分離・移動表現の場合を
除き，投影結果はシステム内のみで用いて実際には投影し
ない．

そして，実物体の三次元情報に基づいて生成した CG 物
体をプロジェクタ 1 で投影した場合も，実物影に対応した
場所に投影されることになる．白色背景に黒色 CG 物体を
配置することで，投影結果は実物影とよく似た見かけとな
り，これが仮想影となる．図 8 に実空間，実物体，CG 空
間，CG 物体の関係を示す．

これにより，例えば虫かごを揺らした場合に虫かごの三
次元座標から蝶の CG 物体が生成されるが，プロジェクタ
1 で投影した場合には虫かごの実物影から蝶の仮想影が生
成されるように観察される．また，植木鉢の三次元座標に
植物の CG 物体が生成されるが，プロジェクタ 1 で投影し
た場合には植木鉢の実物影から植物の仮想影が生えている
ように観察される．そして，植木鉢をプロジェクタ 1 に近
付けると生成される実物影は大きくなるが，このとき植物
の仮想影も特別な処理を必要とすることなく，自動的に適
切なサイズに変更されて投影される．

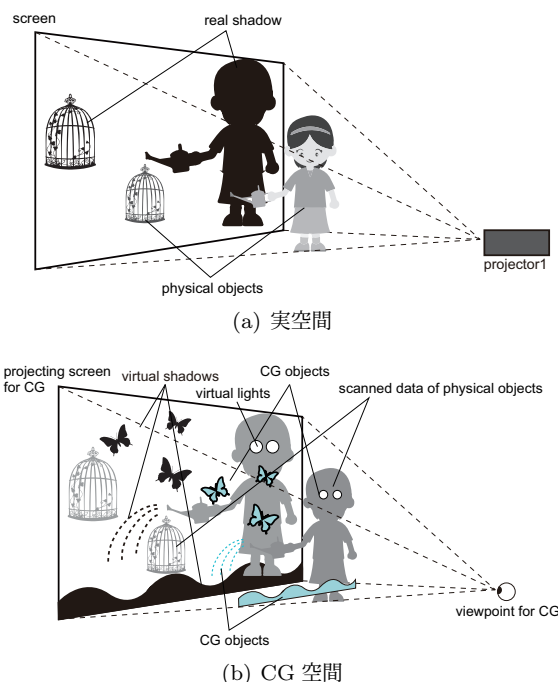


図 8 提案システムでの実空間と CG 空間の関係

3.3.3 仮想光源の投影による実物影の変形

提案システムのプロジェクタ 2 は超短焦点タイプを用い
ており，スクリーンの直下に設置されている．そのため，
実物体に影響されることなくスクリーンに様々な映像を投
影することが可能である．

そこで，プロジェクタ 2 を用いて実物影の内部に仮想光
源を投影することで，実物影を変形することが可能となる．
まず，プロジェクタ 1 用と同等の CG 空間を構築して，プ
ロジェクタ 2 の投影面をプロジェクタ 1 による投影面と一
致するように設置する．2 台のプロジェクタの映像は重な
るが，プロジェクタ 2 で黒色背景映像を投影した場合，ス
クリーン上の映像はプロジェクタ 2 を用いない場合と比べ
てもほとんど変化はない．そして実物体の位置に応じて白
色 CG 物体を CG 空間に配置してプロジェクタ 2 で投影す
ることにより，実物影内部に仮想光源を生成することがで
きる．これにより，実物影に穴が開いたような変形を行う
ことが可能となる．

3.4 インタラクション

システムでは発生した仮想影と実物影とのインタラク
ションや仮想影同士のインタラクションも行う．実物影と
仮想影とのインタラクションを考えた場合には，実物体の
三次元情報と仮想影のための CG 物体を CG 投影面に投影
したあと，CG 投影面上での座標に基づいて仮想影を制御
する必要もある．

3.4.1 実物影と仮想影とのインタラクション

人の実物影によるインタラクションは，人の三次元形状
データと関節点座標を CG 投影面に投影して行う．

蝶の CG 物体は CG 投影面に仮想影として投影されたあと、人の三次元形状データの投影像との接触判定を行う。接触していると判定された場合には、CG 物体をその場所で停止させる。これにより、蝶の仮想影が人の実物影に止まっているように観察される。

植物および水面の CG 物体は CG 投影面に仮想影として投影されたあと、人の関節点座標の投影結果との接触判定を行う。それぞれ接触していると判定された場合には、植物の CG 物体を揺らしたり、水面の CG 物体を波立たせたりする。これにより、植物や水面の仮想影が人の実物影に揺らされたり波立たせられたりするように観察される。

植木鉢の実物影とじょうろから流れ出た水滴 CG 物体の仮想影についても接触判定を行い、接触していると判定された場合には水滴が植木鉢に注がれていると判断する。このとき、植木鉢の実物影から生えている植物 CG 物体が成長する。

3.4.2 仮想影どうしのインタラクション

虫かごから飛び出した蝶の CG 物体の投影像は、植木鉢から生えた植物の CG 物体の投影像と接触判定を行っている。そして、植物の CG 物体が揺れていない状態で接触していると判定された場合には、蝶の CG 物体をその場所で停止させる。これにより、蝶の仮想影が植物の仮想影に止まっているように観察される。なお、蝶の仮想影が止まっている状態で植物の仮想影を揺らすことで、蝶の仮想影が逃げていくような状態が観察できる。

3.4.3 実物影からの仮想影の分離・移動

システムはプロジェクタ 1 の前に存在して実物影を生成する実物体を三次元的にスキャンしてデータを保持更新している。このデータは実物影シミュレーション用のため通常は表示しないが、黒色で表示してプロジェクタで投影すれば実物影とほぼ同等の仮想影が得られる。そこで、実物体スキャンデータを移動させながらプロジェクタで投影することで、まるで実物影が分離して移動していくような表現を行うことが可能となる。

4. 実験

提案システムを実装して実験を行った。使用した PC は MacBookPro(Core i7 2.8GHz) で、C++を用いて開発しており、OpenGL, OpenCV, OpenNI を使用している。

実空間と同等の CG 空間を構築するため、プロジェクタとスクリーンとの位置関係が必要となる。そこで、システムの起動時に画面に表示されたプロジェクタ投影面をマウスクリックで手動で指定すると、システムを構成する Kinect を用いてスクリーン 4 隅の三次元座標を取得して、プロジェクタとスクリーンとの位置関係を計算している。

虫かごを揺らすと、虫かごの実物影からまるで蝶の影が飛び出しているような様子が確認できた (図 9)。また、じょうろを持って傾けると、じょうろの実物影から水滴の



図 9 虫かごの実物影から蝶の仮想影が飛び出す様子



図 10 じょうろの実物影から水滴の仮想影が流れ出す様子



図 11 植物の仮想影が植木鉢の実物影に追従する様子

影が流れ出た (図 10)。水滴の仮想影が植木鉢の実物影に入ると、植木鉢の実物影から植物の仮想影が成長していった。そして、植木鉢を持ち上げると、植物の仮想影が植木鉢の実物影に追従していき、まるで実際に植木鉢から植物が生えているような影映像が生成された (図 11)。植木鉢の実物影のサイズは植木鉢とプロジェクタ 1 との距離によって変化するが、植物の仮想影も同じように変化した。

仮想影と人の実物影のインタラクションについても確認した。虫かごの実物影から飛び出した蝶の仮想影が人の実物影に到達すると、蝶の仮想影はその場で止まり、まるで人の手に蝶が止まっている様子が影になっているように感じられた (図 12)。また、植物の仮想影に人の実物影が触れると、その影に押されたように植物の仮想影は揺れだした (図 13)。じょうろからの仮想影によって溜まった床の水面の仮想影に足や手の実物影に触れると、水面の仮想影が波立ち始めた (図 1)。

実物体のスキャンデータを移動させながら黒色で表示してプロジェクタで投影することで、実物影が分離して移動

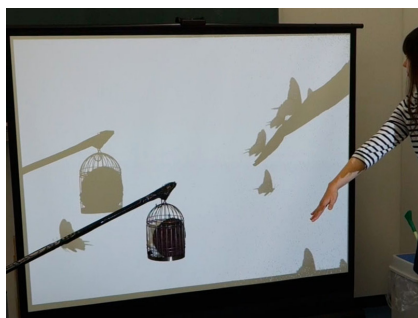


図 12 蝶の仮想影が人の実物影に止まる様子



図 13 植物の仮想影が人の実物影によって揺れる様子



図 14 人の実物影から分離・移動する仮想影

するような表現ができることも確認した。人が自身の身体の横で両手を重ねたとき、手の部分のスキャンデータを黒色で表示して仮想影を生成するとともに移動させると、まるで人が作った鳩の影絵が飛び立つような表現が可能であることを確認した（図 14）。

プロジェクタ 2 を用いて実物影内に仮想光源を投影することで、実物影を変形させるような表現が可能であることも確認した。システムが人とかぼちゃの三次元座標を追跡しながら、目と口の形を持つ仮想光源のための白色 CG 物体を配置してプロジェクタ 2 で投影することで、人の実物影に目と口が付いたり、穴の開いていないかぼちゃの実物影がハロウィン用のかぼちゃのものになったりしたような表現を実現した（図 15）。

5. まとめ

本研究では影を用いたインタラクティブデジタルコンテンツを提案して、プロトタイプを開発した。提案システムでは様々な物体の実物影と仮想影とのインタラクションと



図 15 仮想光源による実物影の変形

いう新しい体験を実現しており、エンターテインメントやデジタルサイネージなど人の興味を引きつける場面での活用を検討している。

今後の課題としては、より多くの種類の物体の実物影を用いたインタラクションの実現や手などで作る影絵の拡張などが挙げられる。

謝辞 プロトタイプ用のアニメーション映像や実物影用物体を提供して頂いた (株)SUGOI の秋葉陽児氏、佐々木章介氏に感謝する。本研究の一部は科学研究費補助金 (26330420) による。

参考文献

- [1] 松原孝志, ボンダンスティアワン, 松本和己, 徳永竜也, 中島一州: 3 次元ジェスチャ操作による テーブル型インタラクティブデジタルサイネージの開発, 情報処理学会研究報告, Vol. 2014-DCC-6, No. 6, 8pages (2014).
- [2] S. Mizuno, R. Hirano, Y. Tsutsumi: GAYAIT: An Interactive Video and Sound Art System handling a Large Number of Video Clips and its Applications, 芸術科学会論文誌, Vol. 11, No. 4, pp. 149–156 (2012).
- [3] 大島直樹, 岡澤航平, 本田裕昭, 岡田美智男: TableTalk-Plus: 参加者の共同性や社会的なつながりを引き出すアーティファクトとその効果, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 105–114 (2009).
- [4] 千田真弓, 小原悠太郎, 菅野駿哉, 本村健太, 千葉則茂, ダンスパフォーマンスを拡張表現する高さを活かした映像インスタレーション, NICOGRAPH2013 論文集, pp. 121–124 (2013).
- [5] 西出篤史, 鈴木一穂, 林成紘, 板井志郎, 三輪敬之: 共創表現の遠隔支援 — 背景に着目した影メディア表現空間のデザイン —, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2013, pp.17–20 (2013).
- [6] H. Xu, I. Kanaya, S. Hiura., K. Sato: User interface by Real and Artificial shadow, SIGGRAPH 2006 research posters (2006).
- [7] 坪倉 輝明: “Shadow Touch!!”, 入手先 <http://teruaki-tsubokura.com/works.php?ar_id=1> (2010).
- [8] Interactive Wall “BIG SHADOW”, 入手先 <<http://bigshadow.jp/>> (2006).
- [9] J. Y. Moon, S. H. Nam: “Augmented Sadow”, 入手先 <<http://joonmoon.net/Augmented-Shadow>> (2009).
- [10] “Parade - Dancing shadow sculptures”, 入手先 <<http://dpt.co/en/parade-2/>> (2014).