

# 周期運動する実素材を使った3次元ディスプレイの解像度向上

朝比奈 怜<sup>\*1</sup> 吉田 貴寿<sup>\*2</sup> 渡辺 義浩<sup>\*1</sup>

## Resolution Improvement of Realistic 3D Display Using Real Physical Materials Moving Cyclically

Rei Asahina<sup>\*1</sup> and Takatoshi Yoshida<sup>\*2</sup> and Yoshihiro Watanabe<sup>\*1</sup>

**Abstract** — ボリュメトリック型の3次元ディスプレイは広い視野角で表示できるとともに、裸眼での立体視が可能である。このタイプの3次元ディスプレイのスクリーンに、表示したい実素材を導入することで、高い質感再現度で立体像表示を試みる手法が提案された。本稿では、同手法の発展として、より高解像度な立体像を表示するための手法を提案する。また、用いる実素材に応じた適切な解像度の選択が必要であることを示す。

**Keywords** : 3次元ディスプレイ, 高速プロジェクタ, 解像度, ファブリケーション

### 1 はじめに

近年、3次元ディスプレイの需要が増加している。特に本稿では、ボリュメトリックディスプレイの方式に着目する。これは、空間内に光点を配置することで3次元形状を表示するディスプレイである。ボリュメトリックディスプレイは、視野角が広く、任意の方向から輻輳調節矛盾を起こすことなく裸眼立体視が可能である。また、複数の人間が同時に本来の物体をその方向から見たときと同様の像を視認できる利点がある。

しかし、同方式では表示する物体表面の質感を高品質に再現することが難しかった。これは、使用するスクリーンの材質が透過と拡散反射の特性を持つ半透明のものに限定される点や、高速なプロジェクタを用いるために高階調の表示が困難である点で問題を抱えていたためである。

そこで我々は、表示する実素材をボリュメトリックディスプレイのスクリーンに直接利用するシステムを提案した [1]。これは、ボリュメトリックディスプレイの手法と、実素材の持つテクスチャを表示に用いる手法を融合することで、2つの課題の達成を試みるものである。

しかし、同システムでは、プロジェクタのフレームレートが十分に高速でなかったため、表示像の3次元形状の解像度の上限値が低かった。そのため、本来の形状が十分に再現できていない場合があった。また、実素材を用いる同システムでは、実素材が持つテクスチャを適切に再現するために、表示像の解像度を上げ過ぎない方がよいと判断できる場合があった。例えば、

毛糸などのように、テクスチャの特徴が比較的大きな範囲に現れる実素材は、解像度の向上により、毛糸の特徴が失われてしまう傾向が見られた。一方、ナイロンなどのように、テクスチャの特徴が小さな範囲に収まる実素材は、表示像の解像度がテクスチャの再現に与える影響が小さい。よって、3次元形状を正確に再現するため、解像度を十分上げる方が望ましい。このように、同システムは使用する実素材によって、再現に適切な解像度が異なっていると考えられる。

そこで本稿では、まずバイナリ階調での、最大約22,700[fps]の投影により、従来より最大約8倍の解像度での表示を可能にするシステムを構築する。さらに、実素材ごとに異なる解像度での表示を可能にするシステムを実装する。以上のシステムによって、実素材ごとに最適な解像度を求める一次検証を行った。

### 2 関連研究

#### 2.1 ボリュメトリック型の3次元ディスプレイ

ボリュメトリックディスプレイでは、スクリーンを周期的に運動させる。この運動と同期して、立体像の各点と同スクリーンが交差するタイミングで、プロジェクタから投影を行う。これによって、立体像を表示する。システムの構成方法の例として、平面形状の板をスクリーンに用いて、平面の回転運動に合わせて光路を制御することで光点配置を行うもの [2] や、螺旋形状のスクリーンを回転させるもの [3] などがある。他にも、スクリーンを用いないボリュメトリックディスプレイも提案されている。例として、ガラスなどの媒体中に、レーザー光による蛍光やプラズマ発光によって光点配置を行うディスプレイがある [4, 5]。

これらのボリュメトリックディスプレイは、視野角

<sup>\*1</sup>東京工業大学

<sup>\*2</sup>マサチューセッツ工科大学

<sup>\*1</sup>Tokyo Institute of Technology

<sup>\*2</sup>Massachusetts Institute of Technology

が広く、輻輳調節矛盾がなく、裸眼での立体視が可能である [6]。しかし、光点配置の制御のために、高速なプロジェクタが必要であり、解像度や階調が使用する機材によって制限される問題がある。

## 2.2 実素材を用いたディスプレイ

本節では、質感を再現するために、呈示したい実際の物体をそのままディスプレイに組み込む方式について述べる。例えば、ストップモーションは、実素材を少しずつ移動、変化させながら連続で撮影し、コマ送りすることでアニメーションを作る技法である。これを裸眼で観測できる技法として、ゾートロープと呼ばれる、静止画や実素材を連続して配置して回転させるものもある [7]。ゾートロープは、実素材をそのまま呈示に用いるため、実素材の形状や反射特性がそのまま再現される。しかし、予め用意した実素材しか呈示に用いることができないため、呈示可能なコンテンツが制限される。

また、反射特性を制御するディスプレイも提案されている。例として、液体表面を高速で振動させて反射特性を時間的に変化させるシステムがある [8]。また、反射特性の基底となる物体を複数用意し、高速なストロボ発光により重ね合わせることで任意の反射特性を呈示可能にしたディスプレイも提案されている [9]。しかし、いずれも反射特性の呈示に特化しており、任意の形状を呈示することが難しいと考えられる。

一方、呈示したいテクスチャを持つ実素材をスクリーンに配置するディスプレイも提案されている [10]。平面の板に毛糸や金属などを貼り付けたものをスクリーンとして利用し、ポリュメトリックディスプレイのように実素材を周期運動によって走査する。これによって、円盤内の任意の位置に実素材のテクスチャを呈示することを可能にしている。しかし、平面の呈示が前提であり、自由な 3 次元形状の呈示は困難だった。

上記のディスプレイの手法を用いて 3 次元形状を呈示できるようにする 3 次元ディスプレイ [1] も開発された。このディスプレイは、実素材を配置した螺旋形状のスクリーンを用い、実素材によるテクスチャの呈示と、ポリュメトリックの手法を両立している。しかし、呈示像の解像度の上限が低いという問題があった。具体的には、使用する高速プロジェクタの投影速度の上限が約 2,800[fps] であり、解像度の上限値がプロジェクタの速度に依存していたために呈示像の形状の分解能が最小 1mm 程度であった。また、全ての実素材で統一した解像度での投影しかできなかった。そのため、3 次元形状やテクスチャの再現が十分に達成できていなかった。

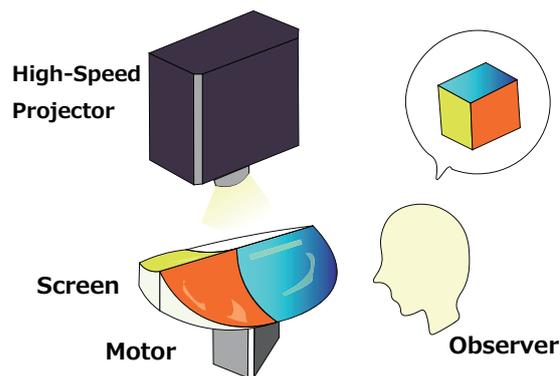


図 1 概要システムの概要  
Fig. 1 Overview of suggestion system

## 3 実素材ごとに異なる解像度で呈示を行う 3 次元ディスプレイ

### 3.1 システム構成

まず、システム構成の概要を説明する。本システムは、図 1 に示すように、投影内容を制御する高速プロジェクタ [11] と、それに同期したモータによって回転する、呈示したいテクスチャを持つ実素材を配置したスクリーンによって構成されている。これにより、1 枚の画像を投影する瞬間においては、呈示したい像の一部が照らされる。この操作をスクリーンの 1 周内で高速かつ連続で行うことで、残像効果により、反射光が時間的に積分され、観測者に立体像を知覚させることが可能になる。また、実素材上で反射した光が観測者に知覚されるため、実素材そのもののテクスチャの呈示も可能になる。

続いて、本システムで用いるスクリーンの仕様について述べる。ポリュメトリックディスプレイは、様々なスクリーンの形状及び、周期運動の方法が提案されている。本システムのような、実素材を使用する構成下では、スクリーンに半透明の材質を用いて透過と反射の性質を利用した呈示を行うことは困難である。また、異なる実素材を複数用いる必要がある。さらに、スクリーンの形状と実素材自身による遮蔽を可能な限り抑えることも要請される。そこで、これら 3 つの条件を両立するため、螺旋形状のスクリーンを採用する。

次に、本システムの呈示像の 3 次元形状の解像度について述べる。呈示像において、プロジェクタの投影方向の解像度は、スクリーンの 1 周あたりのプロジェクタからの投影枚数に依存している。一方、投影方向に垂直な方向の解像度は、プロジェクタが投影する画像の解像度に依存する。本システムでは、プロジェクタの投影枚数を可変として、投影方向の解像度を制御する。

### 3.2 高速時分割構造化光列とプロジェクタの関係

本システムは、呈示像を生成するために、スクリーンが1回転する間に、異なる投影画像を連続して投影する。本稿では、この投影画像の列のことを高速時分割構造化光列と呼ぶ[10]。スクリーンが1回転する間の高速時分割構造化光列の枚数を  $N_p$ 、1秒あたりのスクリーンの回転数を  $f_r$  と定義する。 $f_r$  は、呈示像を更新する頻度に相当するので、以後これをリフレッシュレートと呼称する。この2つの値の間にはトレードオフの関係があり、使用するプロジェクタの可能な最大投影速度に依存して、両者が実際に取ることのできる値の範囲が決まる。本システムにおける、プロジェクタの投影速度  $f_p$  は、 $f_r$  と  $N_p$  によって以下のように定義される。

$$f_p = f_r N_p \quad (1)$$

また、本システムでは、解像度を実素材ごとに変更する。使用する実素材の総数を  $N$ 、実素材ごとの投影方向の解像度を  $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$  とする。このとき、 $N_p$  は、 $N$  と、設定した解像度の中で最大の解像度に依存して決定する。これは、最大でない他の解像度に設定して生成した投影画像は、後述の通り、全て最大の解像度で生成した投影画像に、適宜統合されるためである。以上より、 $N_p$  は以下のようにして決定される。

$$N_p = \max(Z_1, Z_2, \dots, Z_N)N \quad (2)$$

式(1),(2)より、フレームレート  $f_p$  が十分高いプロジェクタを用いることで、リフレッシュレートと、呈示像の解像度を共に高い値に保つことが可能になる。

### 3.3 バイナリ階調の高速プロジェクタによる高解像度の呈示像生成

従来用いていた高速プロジェクタ[11]は、8bit階調での投影が可能であり、投影速度の上限が約2,800fpsであった。例として、リフレッシュレートを20Hz、実素材の総数を4とする。このとき、式(1),(2)より投影方向の解像度は最大で35しか得られないことが分かる。本システムでは、ディスプレイの投影方向の高さを50mmに固定しており、1ボクセルの投影方向の幅は、1.4mmとなる。

バイナリ階調での投影であれば、8bit時に可能であった256段階の階調制御ができなくなるが、約22,700fpsでの投影が可能である[11]。これは、同プロジェクタが、DMDと呼ばれる投影デバイスにより、1枚のバイナリ画像データの読み取りやミラーへの反映を含めて、44usで1枚のバイナリ画像を投影することが可能だからである。先述と同等の条件の場合、投影方向の解像度を最大で283に設定でき、これにより、1ボクセルの投影方向の幅は0.17mmとなる。このことが

示すように、リフレッシュレートや実素材の数が同じ条件であれば、解像度の最高値を約8倍にすることが可能である。

### 3.4 実素材ごとの解像度の変更

本システムでは、プロジェクタが投影する画像中の光点の面積を小さくすることで解像度を上げ、形状の再現度を上げることができる。一方、テクスチャの再現度を上げるためには、同面積を大きくとった方がよい場合がある。例えば、毛糸のような場合は面積を広げて、形状よりもテクスチャの再現度を上げた方がよい。一方、凹凸が小さく滑らかなテクスチャを有する実素材の場合は、形状の再現度を優先した方がよいと考えられる。

このため、本システムには、まず実素材ごとに個別に解像度を変えて呈示できる機能が必要となる。さらに、それぞれに最適な解像度を求めることが重要である。この最適な解像度の検証については次節で説明する。

次に、実素材ごとに異なる解像度を実現する手法について説明する。本システムの解像度は、高速時分割構造化光列の投影枚数を制御することによって変更が可能である。高速時分割構造化光列は、モデルとスクリーンの交差面をプロジェクタ面に再投影することで生成される。同生成は、スクリーンを少しずつ回転させながら、1周するまで連続して行う。素材ごとの回転させる位相の大きさ  $\Delta\theta_i (i = 1, 2, \dots, N)$  を次式に示す。

$$\Delta\theta_i = \frac{2\pi}{Z_i N} \quad (3)$$

位相の大きさを実素材ごとに変更することで、それぞれ  $Z_1 N, Z_2 N, \dots, Z_N N$  枚の高速時分割構造化光列が生成される。これらの中で、スクリーンの位相が同タイミングの画像同士は適宜統合することが可能である。本稿ではこの性質を利用し、 $N$ 種の高速時分割構造化光列を、枚数が最多の高速時分割構造化光列を軸に統合し、最終的な高速時分割構造化光列を生成する。高速時分割構造化光列を生成する方法を、図2及び以下に示す。

1. モデル(同図a)を呈示する実素材の領域ごとに  $N$ 個に分割する。
2. 分割されたモデル(同図b)とスクリーン(同図c)の交差面をプロジェクタの画像上に再投影し、1枚の投影画像を生成する。この時のスクリーンの回転位置を、各実素材ごとに位相  $\theta_i (i = 1, 2, \dots, N)$  で表す。

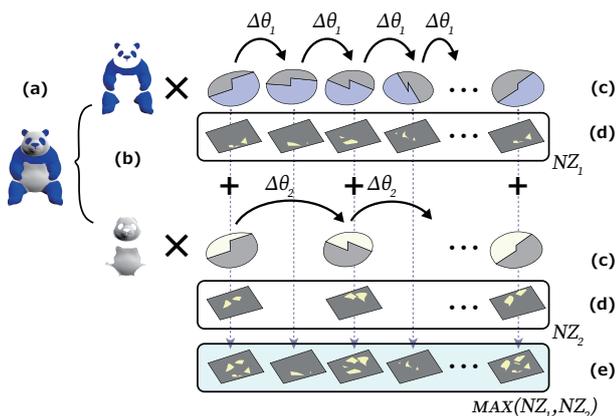


図2 高速時分割構造化光列の生成方法  
Fig.2 The method of making projection pattern

3. 全ての実素材で、スクリーンの位相  $\theta_i = n\Delta\theta_i (n = 0, 1, \dots, Z_i N - 1)$  毎に、2と同じ処理を行い、 $N$ 種の高速時分割構造化光列(同図d)を生成する。
4. スクリーンの位相が同じタイミングの画像同士を、枚数が最多の高速時分割構造化光列を軸に統合する(同図e)。

図2では、 $N = 2$ であり、 $Z_1 = 2Z_2$ である場合の例を示している。また、スクリーンは、青で示した部分と白で示した部分で異なる実素材を配置した螺旋形状の斜面が組み合わさってできていることを想定している。青のモデル部分は、スクリーンの青で示した部分のみに光点を配置しようとしているものとし、白のモデルとスクリーンの白の部分についても同様の関係であると仮定した例である。

## 4 評価実験

### 4.1 実験条件

実素材ごとに最適な解像度を求めるために検証を行った。まず、検証に用いた本システムを、図3に示す。本システムでは、バイナリ階調で22,700fpsの投影が可能なプロジェクタ[11]と、定速回転を行うACサーボモータを利用した。用いるスクリーンは、高さ50mm、半径100mmのサイズを有し、高さ50mm方向で、1/4周の螺旋を形成する物体を4つ組み合わせて作成した。なお、それぞれの物体には、同図に示すように、毛糸、フェルト、ゴム、ナイロンを持つ実素材を貼り付けた。また、リフレッシュレート  $f_r$  を、人間の残像特性によって点滅を知覚できなくなる周波数の下限値を十分上回る、25Hzに決定した。

この条件下において、投影方向の解像度と、それに伴い変化する、高速時分割構造化光列の枚数を実験中に変化させることで呈示像を生成し、実験を行った。

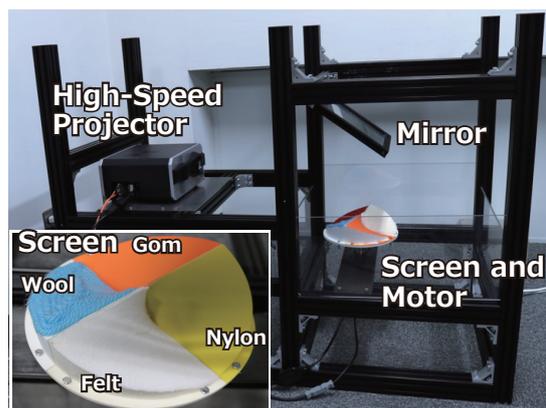


図3 システムとスクリーンの全体図  
Fig.3 Overall view of System and Screen

Model	Texture	Resolution		
		15	45	75
Panda	Wool			
	Nylon			
Sphere	Wool			
	Nylon			

図4 被験者に観測させた呈示像  
Fig.4 3DImages which showed to testers

実際に生成した呈示像の一部を、図4に示す。同図左にある、パンダと半球のモデルを用い、投影方向の解像度  $Z$  がそれぞれ15,30,45,60,75の高速時分割構造化光列を生成した。そして、それらを毛糸、ナイロンのテクスチャを持つスクリーンに投影することで、各解像度ごとに4種、計20種の呈示像を生成した。

これらの呈示像を定量的に評価をするため、複数の被験者の協力を得て、各呈示像の5段階評価を行った。事前にモデルと静止時の実素材を確認させた後、それぞれの呈示像を順番に見せ、元のテクスチャにどれだけ近いかを、5段階で評価するよう指示した。このとき、観測者の位置や環境光の条件などで差が極力発生しないよう、実験環境の調整を行った。

### 4.2 評価

結果を図5に示す。毛糸の呈示像については、解像度の上昇によって、テクスチャの再現度が大きく低下する傾向がみられた。これは先述の通り、毛糸自身は

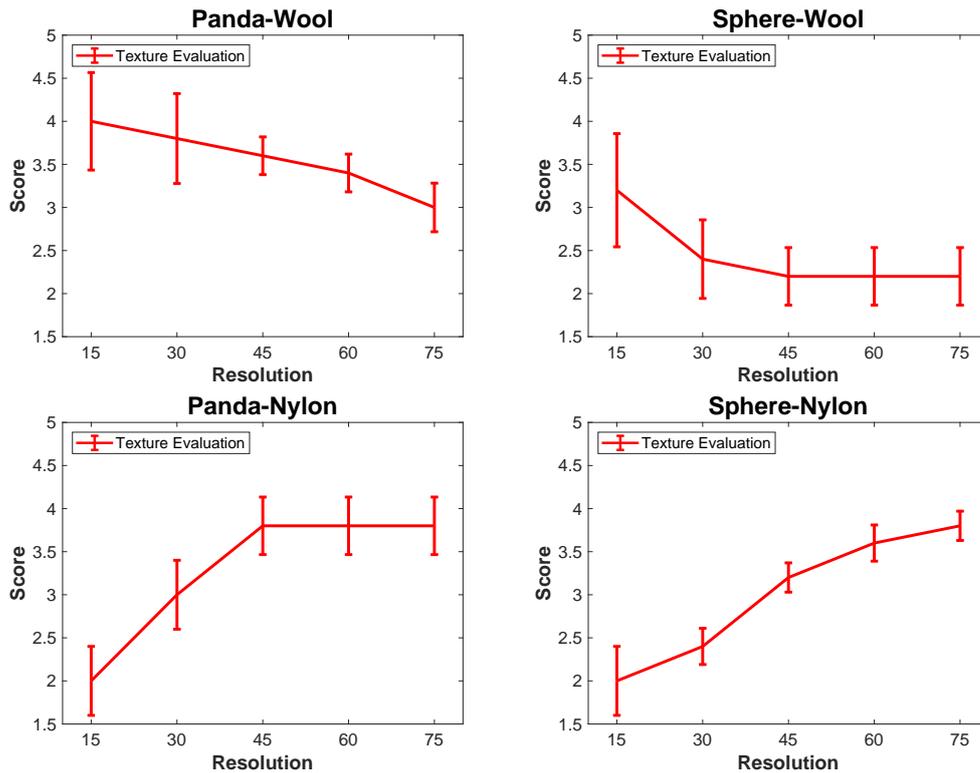


図5 呈示像のテクスチャ再現の評価  
Fig. 5 Evaluation of texture reproduction of the image presented by yarn

複雑なテクスチャを有しているためであると考えられる。解像度が高い場合は、実素材に投影される面積が減ることでテクスチャを正確に呈示するために必要最低限の面積を持った投影画像が生成できなくなる。それに対し、ナイロンについては、解像度が高い程テクスチャの再現度も向上しているという評価を得ることができた。これは、形状が滑らかに呈示されることで、ナイロンが本来持つきめの細かさが適切に再現されたからであると考えられる。

#### 4.3 結果

前節の結果より、パンダ・半球のモデル共に、毛糸による呈示部分は解像度 15、ナイロンによる呈示部分は解像度 75 が、最適な解像度と結論づけた。また、実際に最適なパラメータによる呈示像を生成した。実際の呈示像を、図 6 に示す。

## 5 まとめ

本稿では、我々が提案した実素材を用いる 3次元ディスプレイにおいて、プロジェクタの高フレームレート化による解像度の上限値が向上したことを示した。また、実際に実素材ごとに異なる解像度での呈示を可能にした。そして、本システムで用いた、毛糸及びナイロンに関して、実際に観測者実験によって評価を行い、最適な解像度を決定した。今後は、高速時分割構造化

光列をリアルタイムに生成することによって、現在のディスプレイの課題である隠面除去を解決することを目標としている。

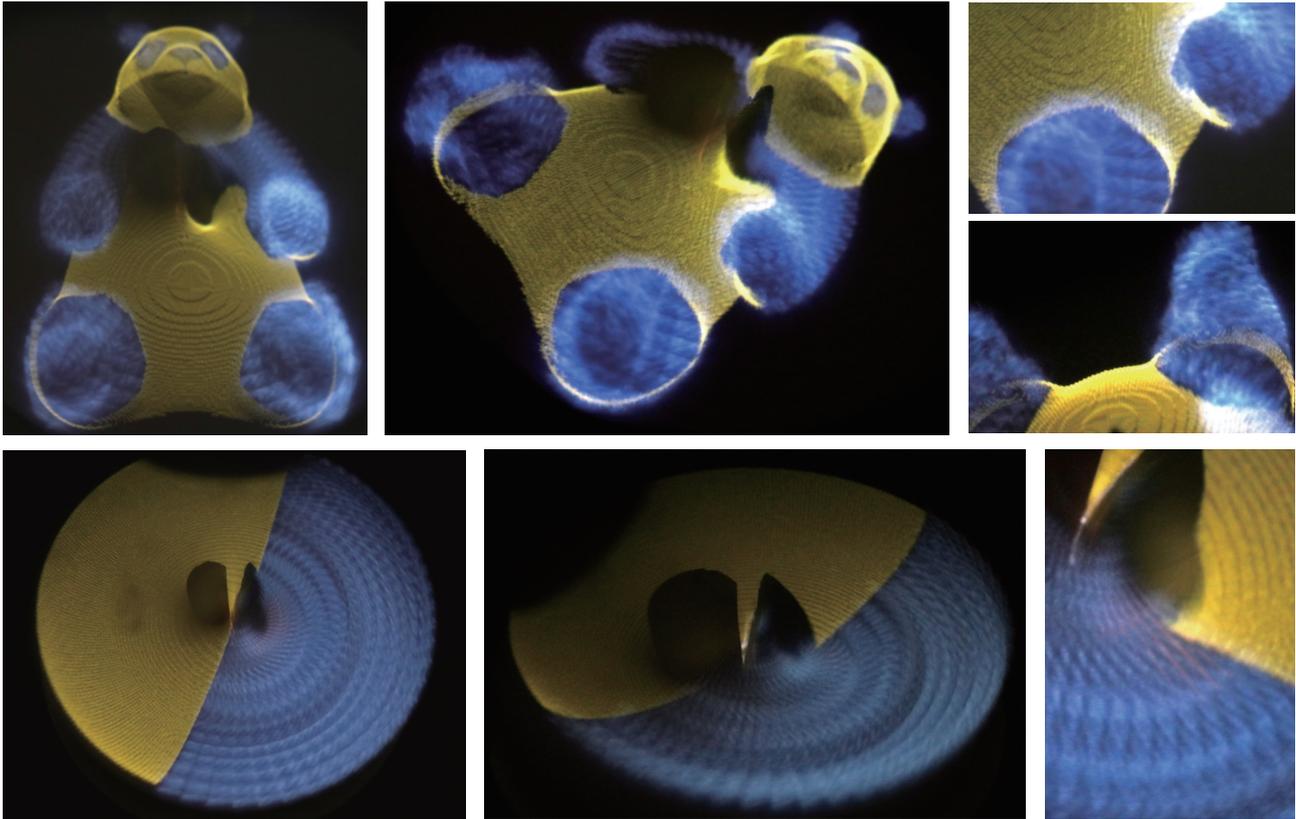


図 6 最適な解像度で呈示した呈示像  
Fig. 6 3D Images presented with optimal resolution

#### 参考文献

- [1] 朝比奈怜, 吉田貴寿, 渡辺義浩. 周期運動する実素材を用いたリアリステイックな3次元ディスプレイの試作. 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2019.
- [2] Gregg E. Falavola. 100 million-voxel volumetric display. *Proceedings of 16th Annual International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls 2002*, Vol. 300, , 2002.
- [3] Jason Geng. A volumetric 3d display based on a dlp projection engine. *Displays*, Vol. 34, p. 39–48, 01 2013.
- [4] S. Hisatake, S. Suda, J. Takahara, and T. Kobayashi. Transparent volumetric three-dimensional image display based on the luminescence of a spinning sheet with dissolved lanthanide(iii) complexes. *Opt. Express*, Vol. 15, No. 11, pp. 6635–6642, May 2007.
- [5] S. K. Nayar and V. N. Anand. 3d display using passive optical scatterers. *Computer*, Vol. 40, No. 7, pp. 54–63, July 2007.
- [6] 宮崎大介. 5. 体積表示方式. 映像情報メディア学会誌, Vol. 68, No. 11, pp. 844–849, 2014.
- [7] Tomohiro Yokota and Tomoko Hashida. Magic zoetrope: representation of animation by multi-layer 3d zoetrope with a semitransparent mirror. In *SIGGRAPH Asia 2018 Emerging Technologies*, pp. 1–2, 12 2018.
- [8] Matthias B. Hullin, Hendrik P. A. Lensch, Ramesh Raskar, Hans-Peter Seidel, and Ivo Ihrke. Dynamic display of BRDFs. In Oliver Deussen and Min Chen, editors, *Computer Graphics Forum (Proc. EUROGRAPHICS)*, pp. 475–483, Llandudno, UK, 2011. Eurographics, Blackwell.
- [9] Leo Miyashita, Kota Ishihara, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Zoematrope: A system for physical material design. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 4, pp. 66:1–66:11, jul 2016.
- [10] 吉田貴寿, 渡辺義浩, 石川正俊. 周期運動する実物体と高速時分割構造化光を用いたリアリステイックディスプレイの開発. 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol. 22, No. 2, pp. 229–240, 2017.
- [11] Yoshihiro Watanabe, Gaku Narita, Sho Tatsuno, Takeshi Yuasa, Kiwamu Sumino, and Masatoshi Ishikawa. High-speed 8-bit image projector at 1,000 fps with 3 ms delay. In *The International Display Workshops*, 12 2015.