



周期運動する実素材を用いたリアリスティックな 3次元ディスプレイの試作

Trial Manufacture of Realistic 3D Display Using Real Physical Materials Moving Cyclically

朝比奈 怜¹⁾, 吉田 貴寿²⁾, 渡辺 義浩¹⁾

Rei ASAHINA, Takatoshi YOSHIDA, and Yoshihiro WATANABE

1) 東京工業大学 情報通信系 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, asahina.r.aa@m.titech.ac.jp)

2) MIT Media Lab(77 Mass. Ave., E14/E15, Cambridge, MA 02139-4307 USA, taka_y@mit.edu)

概要: 本稿では、ポリュメトリック型の3次元ディスプレイに注目する。ポリュメトリック型の3次元ディスプレイは、広い視野角を保ちつつ裸眼立体視を実現することができる。一方、高速なプロジェクタを用いるために輝度階調が少なく、立体像の質感再現度が低かった。そこで本稿では、再現したい実素材で、ポリュメトリックのスクリーンを作る構成を提案する。またシステムを試作し、3次元形状と実素材の素材感を両立したリアリスティックな像の再現が可能かを検証した結果を報告する。

キーワード: 3次元ディスプレイ, 高速プロジェクタ, ファブリケーション

1. はじめに

3次元ディスプレイは、両眼に異なる像を呈示することで、立体像の知覚を可能とする技術である。現実と見分けがつかないほど、リアルな立体像の呈示に向けて、様々な手法が提案されている [1]。本稿は、この3次元的な像(以下、立体像と呼称する)をより現実のものに近づけるため、新しい3次元ディスプレイを開発することを目的とする。

このような目的に向けて、次のような点が3次元ディスプレイに求められる。まず、呈示したいコンテンツの3次元形状を高い空間解像度で再現できることに加え、コンテンツが持つ質感を高い再現度で呈示することが必要である。この形状と質感は、観測者の視点の移動に合わせ、それぞれが現実の物体を見ているときと同様に変化が必要がある。また、ディスプレイとして、身体に負担をかけずに映像を楽しむことができる非拘束性と、コンテンツを動的に変更することができる表現自由度が重要である。本稿では、これらの要素を満たすディスプレイを、リアリスティックディスプレイと呼ぶ。

本稿ではこれらの条件を満たすようなリアリスティックディスプレイの実現に向けて、ポリュメトリック型の3次元ディスプレイに注目する。ポリュメトリック型の3次元ディスプレイは、スクリーンの体積走査と高速プロジェクタにより、広い視野角を保ちつつ裸眼立体視を実現することができる。本稿では、再現したい実素材を、ポリュメトリック型の3次元ディスプレイのスクリーンに用いる新しいシステム構成を提案する。これは、平面のスクリーンに実素材を貼り付けることで質感のリアルさと表現自由度の高さを両立したディスプレイ [2] を応用したものである。また、システムが必要とする仕様を検討した上で、システム

を試作した結果を示す。さらに、リアリスティックな立体像を再現し、定性的に評価した結果を報告する。

2. 関連研究

2.1 ポリュメトリック型の3次元ディスプレイ

ポリュメトリック型の3次元ディスプレイは、空間内に、高速かつ連続的に光点を配置して、3次元形状を再現するディスプレイである [3]。例として、周期的に回転運動を行うスクリーンに同期して投影を行うもの [4][5] や、レーザー光の利用により、ガラスなどの媒質における発光を用いて光点配置を行うもの [6][7] が挙げられる。

ポリュメトリック型の3次元ディスプレイの利点として、広い視野角を持ち、輻輳調節の矛盾を生じない点が挙げられる。しかし、ポリュメトリック型の3次元ディスプレイに用いるプロジェクタには、非常に高速な投影速度が要求される [8]。そのため、ポリュメトリック型の3次元ディスプレイの実用に耐えうる高速性と、像の明暗や陰影などの再現性を高めるための高階調性を両立することが難しかった。

2.2 質感を再現するディスプレイ

質感の再現度向上に向けて、様々な事例がある [9]。そのなかでも、本節では呈示したい実素材をディスプレイの構成要素として直接取り込むタイプを紹介する。

例えば、ゾートローブは、テレビのような電子的な媒体を用いずアニメーションを裸眼で表示させることができる手法である。2次元のアニメーションとして利用されているほか、複数の人形などを回転円盤に沿って配置した立体的なゾートローブもある [10]。立体ゾートローブは、呈示される像の反射特性を物理的に再現するため、実物によって構成されるシーンに近い空間を作り出せる利点がある。し

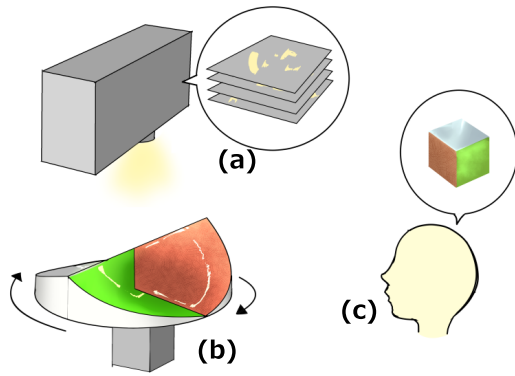


図 1: システムの構成図 (a) 高速プロジェクタによる投影制御 (b) 実素材を配置したスクリーンの高速周期運動 (c) 反射光が時間的に積分され、3 次元形状と実素材の質感を同時に知覚する観測者

かし、事前に用意した人形などでそのまま形状を呈示するため、その動的な変更が難しい問題がある。

このほか、このような問題を解決する事例も報告されている。例えば、臨界融合周波数を超える速度で周期運動する実素材にパターン光を投影するものがある [2]。これによって、空間中にあたかも実素材が自在に配置されたような呈示を可能としている。これによって、毛糸を用いたアニメーションなどを実現した。また、ソーマトロープの残像効果を利用し、同じ場所に複数の実素材を呈示するものもある [11]。これによって、複数の実素材を自在に合成した呈示を可能とした。これらは実素材を呈示する位置や質感合成を操作することができる利点があるが、自由な立体像を実素材によって再現するには至っていない。

3. 実素材を用いた 3 次元リアルスティックディスプレイの設計

3.1 設計方針及びシステム構成

本稿では、視野角が広い、裸眼での観測が可能、輻輳調節矛盾が生じない、呈示される形状表面の質感を高精度に再現可能、以上の 4 点を同時に満たしうる新たな 3 次元ディスプレイを提案する。この目標に向けて、ボリュメトリック型の 3 次元ディスプレイと、実素材を用いた走査型ディスプレイの融合を図る。

システムの具体的な構成を図 1 に示す。まず、呈示したい複数の実素材を用いてディスプレイのスクリーンを作り、全ての実素材が呈示領域内を通過するように高速に周期運動させる。次に、スクリーンの周期運動に同期して、プロジェクタから予め生成された複数のパターン光を投影する。これにより、パターン光をそれぞれ投影する瞬間においては、最終的に呈示したい像の部分集合が照らされていることになる。これを 1 周期内で連続かつ高速に行うと、残像効果により、時間的に積分された立体像として知覚させることが可能となる。本稿では投影されるパターン光の列のことを高速時分割構造化光列と呼ぶ [2]。

3.2 システムの仕様とディスプレイ解像度の関係

ボリュメトリック型の 3 次元ディスプレイには複数の方式が提案されている [8]。本システムは異なる複数の実素材をスクリーンに用いる前提がある。また、半透明の物質をスクリーンに用いて、透過と反射の性質を利用することができない。以上の理由に基づき、任意の方向から視認可能でかつ、スクリーンによる自己遮蔽の発生を抑えることが可能な螺旋形状のスクリーンを回転させる方式を採用する。このため、ディスプレイの呈示領域はスクリーンの高さ、及び半径に依存し、ディスプレイのリフレッシュレートはスクリーンの回転速度に一致する。

次に、ディスプレイの解像度について述べる。プロジェクタの投影方向に垂直な 2 方向の解像度は、スクリーンに投影されるピクセル数に一致する。プロジェクタの投影方向の解像度 Z_d は、プロジェクタのフレームレートを f_p [fps]、実素材の数を N 、ディスプレイのリフレッシュレートを f_m [Hz] として、以下のように求められる。

$$Z_d = \frac{f_p}{f_m N}$$

このため、ディスプレイに導入できる実素材の数と、リフレッシュレート、そして投影方向の解像度には、それぞれトレードオフの関係がある。つまり、十分高いフレームレートを持つプロジェクタを用いることで、高解像度、高リフレッシュレートのディスプレイを実現することが可能である。

次に、プロジェクタの投影とスクリーンの周期運動の同期について考える。像の更新に要する時間 $1/f_m$ [s] の間に、プロジェクタが N_p 枚のパターン光を投影するものとする。なお、リフレッシュレート f_m [Hz] は、1 秒あたりのモータの回転数 ω [Hz] に一致する。プロジェクタは 1 秒あたりに、 f_p 枚の画像を投影するので、それぞれの同期を取るためには以下の関係を満たしている必要がある。

$$\frac{1}{\omega} = \frac{1}{f_m} = \frac{N_p}{f_p}$$

3.3 高速時分割構造化光列の生成

呈示したいコンテンツの 3 次元モデルから、3.1 節で定義した高速時分割構造化光列を生成する手法の概要を図 2 に示す。

実素材が配置されたスクリーンと、分割されたモデルとの交差面を抽出する。このとき、モデル上の実素材とスクリーン上の実素材が一致したときのみ交差したと判定する。抽出された交差面をプロジェクタ画像上に再投影することで、1 枚のパターンを生成する。この生成を、スクリーンの位置を変えながら繰り返すことで、 N_p 枚で構成される高速時分割構造化光列を生成する。

3.4 像の鮮明さの向上

運動する物体に対し、長時間の投影を行うとモーションブラーが生じ、形状の解像度や実素材のテクスチャの解像度の低下につながる。提案するシステムは、高速に運動する実物体に対して光を投影しているため、モーションブラー

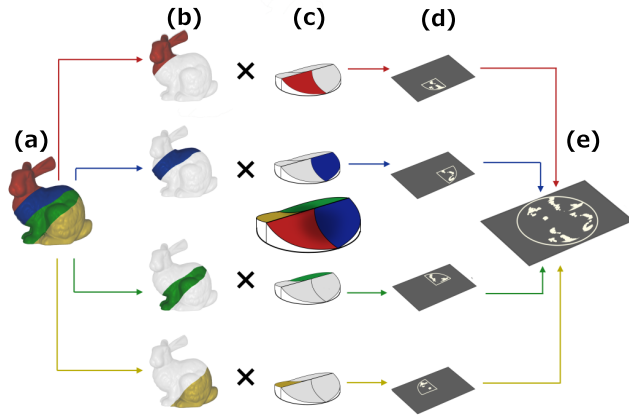


図 2: パターン光の生成手法 (a) 呈示したい 3 次元モデルのデータ (b) 呈示したい実素材ごとに抽出した 3 次元モデル (c) 特定のタイミングにおけるスクリーンの位置 (d) (b) と (c) の交差面を再投影することで生成した画像 (e) 最終的な投影パターン

の発生を避けることができない。しかし、プロジェクタからの 1 枚の高速時分割構造化光の投影時間 Δt を十分短くすることで、モーションブラーの大きさを抑えることができる。ただし、投影時間は立体像の明るさに直結するので、投影時間の短縮を行うと同時に立体像の視認性が低下してしまう。そのため、許容できる投影時間の上限を理論的に求めておく必要がある。

本システムでは、形状の解像度に影響を及ぼすブレと、テクスチャの解像度に影響を及ぼすブレの 2 種類が存在すると思われる。今回は、形状の解像度に影響する、投影方向のブレを抑える為に必要な投影時間の上限を導出した。半径 a 、高さ H 、用いる実素材の数を N 、スクリーンの回転速度を ω とする。モーションブラーの大きさを ϵ 以下に抑えるためには、投影時間 Δt が以下の式を満たす必要がある。

$$\Delta t \leq \frac{2\pi\epsilon}{HN\omega}$$

4. 試作システム

まず、試作したシステムを図 3 に示す。本システムでは、高速投影が可能なプロジェクタ [12] と、定速回転を行う AC サーボモータを利用する。

前節で導出した、本システムが満たすべき条件から、本ディスプレイの各種パラメータを決定する。まず、本システムで利用する高速プロジェクタの被写界深度と投影時の距離、投影画像のサイズ関係を実験的に調査した。この結果から、システム全体のサイズを考慮した上で、利用するスクリーンの仕様を、半径 100[mm]、高さ 50[mm] の螺旋形状のスクリーンと決定した。次に、リフレッシュレート f_m を決定する。人間の残像特性により点滅を知覚できなくなる周波数の下限値から、15[Hz] 以上であることが望ましい。しかし、後述の投影方向の解像度を高い値に保つことを優先し、本システムでは 10[Hz] に決定した。投影方向の解像度 Z_d の値は、同軸のボクセルサイズの値として 1[mm]

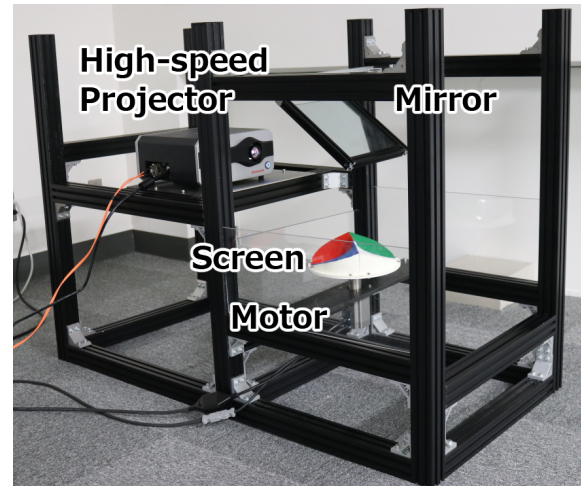


図 3: 試作したシステムの全体図。高速プロジェクタの投影光が鏡を通じて、モータと接続したスクリーンに投影される。

未満であることから 64、用いることが可能な実素材の上限を 4 とした。これにより、スクリーン 1 周あたりの投影枚数 N_p は 256 枚となる。モータの回転速度は $20\pi[\text{rad/s}]$ とし、プロジェクタのフレームレート f_p は 2560[fps] と決定した。また、3.4 節で求めた投影時間の上限に基づき、 Δt が 381[us] となるようにプロジェクタの投影時間を設定した。

実素材の数の上限の決定に伴い、スクリーンとして用いる螺旋状の斜面を有する物体を 4 つ用意した。それぞれの斜面は、50[mm] に渡り、1/4 周の螺旋を形成する。そして、それぞれの斜面に異なる視覚的特性を持つ実素材を貼り付ける。これらを組み合わせることで、スクリーンを作成し、AC サーボモータに結合した。そして、回転に同期して高速プロジェクタから投影を行う。

なお、今回用いたプロジェクタは低階調化することで高フレームレート化が可能である。今回の実験では、8 ビット投影モードで、バイナリのパターン画像を用いている。このため、上記で設定した f_p は限界値ではない。

5. 評価

5.1 動作確認

提案システムが正しく動作していることを確認するため、呈示したいモデルと、システムによって呈示された立体像の比較を行った。図 4 に、それらの比較に加えパターン光の投影とスクリーンの回転の同期を確認した結果を示す。

5.2 立体像の評価

まず、3 次元形状の呈示について評価する。図 5 に示すように、側面が見える視点から観測を行った場合、顔の側面の鼻の形状まで呈示できることを確認した。

次に、実素材として用いたフェルトについて、静止時と、システムによって呈示しているときの様子を同図で比較した。静止時と立体像では、色合いがわずかに異なるが、これは双方の撮影時の照明や環境光の違いで説明できる。目視で視点を観察を行うと、視野角全域でそれぞれのフェルトの質感を再現することができた。

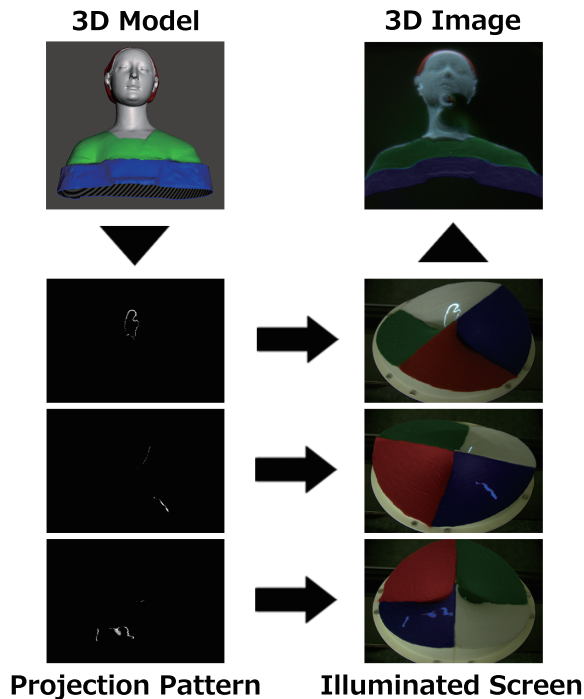


図 4: システムの動作検証. 3D モデルが, 提案システムにより右下の 3 枚のパターン光のような, 計 256 枚の高速時分割構造化光列に分解される. スクリーンの回転運動に合わせて各パターン光の投影を高速で行うことで, 観測者には右上のような立体像として知覚される.

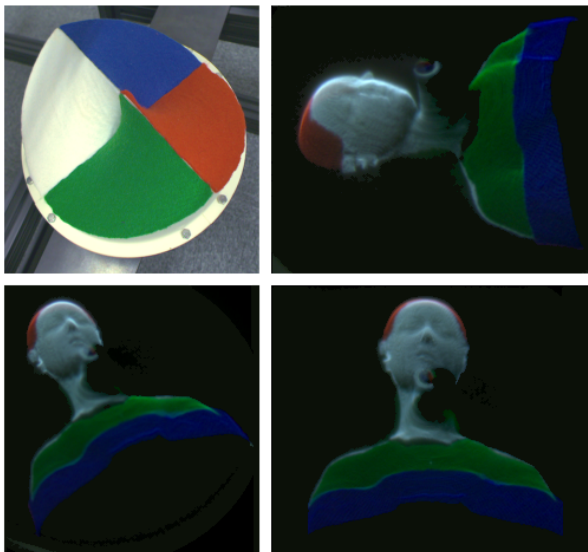


図 5: 異なる視点から観測することで, 裸眼で人の 3 次元形状が知覚できることを確認した. 同時に, 静止時と同様のフェルト生地質感で人型の立体像を再現することができた.

6. まとめ

本稿では, ボリュームメトリック型の 3 次元ディスプレイの体積走査と, 実素材を利用することで表現できる高い質感の自由度に着目し, 新しい 3 次元ディスプレイを提案した. また, 実際にプロトタイプとなるディスプレイを開発し, 3 次元モデルから生成した高速時分割構造化光列の投影を行った. それにより, 実際に 3 次元形状と質感の呈示が可能で

あることを示した. 本稿では, フェルトの反射特性を持つスクリーンでのみの評価であるが, 素材の種類次第で本システムは多種多様な表現が可能となると考えられる.

今後は, 多種の実素材を導入し, それぞれの実素材ごとの立体像品質の定量評価を行う. また, 現在のディスプレイが抱える陰面消去への対応などの課題について解決していく予定である.

参考文献

- [1] Geng, J.: Three-dimensional display technologies, *Advances in Optics and Photonics*, Vol.5, No. 4, pp. 456–535, 2013.
- [2] 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誌*, Vol.22, No. 2, pp. 229–240, 2017.
- [3] Grossman, T.: *Interaction with Volumetric Displays*, PhD thesis, 2008.
- [4] Gregg, E. F., Joshua, N., Deirdre, M. H., Rick, K. D., Michael, G., Michael, J. R., Won, S. C.: 100-million-voxel volumetric display, *Proceedings of 16th Annual International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls 2002*, Vol. 300, 2002.
- [5] Geng, J.: A volumetric 3D display based on a DLP projection engine. *Displays*, Vol. 34, pp. 39–48, 2013.
- [6] Hisatake, S., Suda, S., Takahara, J., Kobayashi, T.: Transparent volumetric three-dimensional image display based on the luminescence of a spinning sheet with dissolved Lanthanide(III) complexes, *Opt. Express*, Vol. 15, pp. 6635–6642, 2007.
- [7] Nayar, S.K., Anand, V.N.: 3D Display Using Passive Optical Scatterers, *IEEE Computer Magazine*, Vol. 40, No. 7, pp. 54–63, 2007.
- [8] 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.
- [9] Matthias, B. H., Ivo, I., Wolfgang, H., Tim, W., Gerwin, D., Martin, F.: *Computational Fabrication and Display of Material Appearance*, *Hullin2013ComputationalFA*, Eurographics, 2013.
- [10] Yokota, T., Hashida, T.: Magic Zoetrope: Representation of Animation by Multi-layer 3D Zoetrope with a Semitransparent Mirror, *SIGGRAPH Asia*, 2018.
- [11] Miyashita, L., Ishihara, K., Watanabe, Y., Ishikawa, M.: ZoeMatrope: A System for Physical Material Design, *ACM Trans. Graph.* Vol. 35, No. 4, pp. 66:1–66:11, 2016.
- [12] Watanabe, Y., Narita, G., Tatsuno, S., Yuasa, T., Sumino, K., Ishikawa, M.: High-speed 8-bit Image Projector at 1,000 fps with 3ms Delay, *The International Display Workshops*, pp. 1064–1065, 2015.