

光学リニアブレンディングを用いた テーブル型裸眼 3D スクリーンシステムの提案と基礎検討

巻口 誉宗¹ 高田 英明¹

概要：我々はテーブル型裸眼 3D スクリーンシステムの実用化に向けたプロジェクタ数の削減と設置場所の自由度向上のため、視覚メカニズムを活用したリニアブレンディングの適用検討を進めている。本稿では初期検討として、光学構成検討と再現可能な被写体の奥行き検討、50 インチサイズのスクリーンと 13 台のプロジェクタを用いたプロトタイプによる原理確認を行った。これによりリニアブレンディングを用いた提案システムでは、従来手法より 1/4~1/10 のプロジェクタ数でなめらかな視点移動が可能な裸眼 3D 映像表示が可能なことを示した。

Tabletop type Glassless 3D Screen System using Optical Linear Blending

Motohiro MAKIGUCHI¹ Hideaki TAKADA¹

1. はじめに

被写体があたかもテーブル上に実在するかのように再現するテーブル型の 3D 映像表示技術は、スポーツ競技のフィールド全体を俯瞰できるライブビューイングや、工業製品等の 3D モデリング、手術のシミュレーション、都市計画の可視化等、幅広い応用が考えられる。特にスポーツ競技のライブビューイングのような複数人がテーブルを取り囲んでコンテンツを共有する用途では、自分の応援したいチームサイドといった観察者が望む視点位置から、観察者同士のコミュニケーションを妨げる 3D メガネ等の装着物なしに 3D の被写体を観察できる 360 度の視点移動に対応した裸眼 3D 映像表示技術が必要となる。

これまで 360 度の視点移動に対応した裸眼 3D 映像表示技術の研究は多数行われている。Seirert ら [1] は動的視差バリアと指向性バックライトを LCD と組み合わせ、観察者の視点位置に応じた 3D 映像を提示する手法を提案している。この手法では観察者をトラッキングしてバックライトの指向性を制御するため、同時に視聴可能な観察者数に制限がある。Yoshida ら [2] は、円錐形の特殊なスクリーンに対し、1.25 deg の間隔で設置した 288 台のプロジェクタ

で視点映像を投影し、直径 200 mm の円形の表示エリアに 360 度から視聴可能な 3D コンテンツを表示する手法を提案している。この手法では観察者数に制限はないものの、大量のプロジェクタが必要なため、機材コストの増加が問題となる。

観察者数の制限なしにプロジェクタ等の表示装置を少なくするアプローチとして、ミラー [3] やスクリーン [4]、ホログラム素子 [5] 等にプロジェクタの投影光を反射・拡散させ、これらを高速で回転させる手法も提案されている。中でも Takaki ら [6] は、数台のプロジェクタと回転スクリーンを組み合わせたハイブリットシステムを提案し、プロジェクタ数の削減と回転速度の低下を実現した。しかし、これらの回転機構を有する手法は、表示側に大掛かりな装置構成が必要となり、設置場所が限定されるという問題がある。

我々はこれまで、垂直型の裸眼 3D スクリーンシステムに対し、隣り合う視点映像の輝度を光学的に合成することで、中間視点の映像を視覚的に補間して知覚させる「光学リニアブレンディング」を適用することで、プロジェクタ数の削減を進めてきた [7]。このシステムでは、表示側にはシート状の反射型スクリーンのみが設置されるため、テーブル型裸眼 3D スクリーンシステムへ適用できれば、プロ

¹ 日本電信電話株式会社 NTT サービスエボリューション研究所

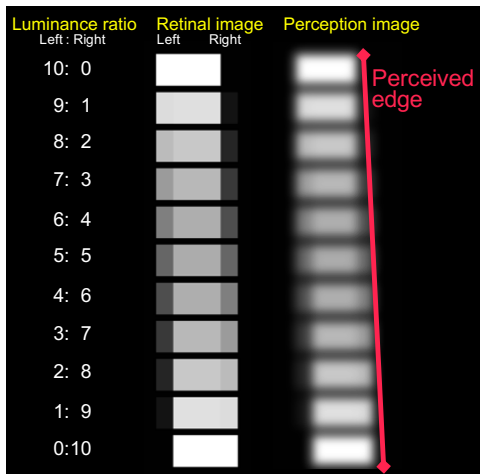


図 1 リニアブレンディングにおけるエッジ知覚メカニズム

ジェクタ数の削減に加え、設置場所の自由度向上も期待できる。そこで本稿では、テーブル型裸眼 3D スクリーンシステムへのリニアブレンディングの適用可能性について、光学構成の検討と再現可能な被写体の奥行きを検討を行い、50 インチサイズスクリーンと 13 視点分のプロジェクタを用いたプロトタイプによる原理確認を行う。

2. 適用手法

以下ではリニアブレンディングの基礎原理と、リニアブレンディングを光学的に実現する空間結像アイリス面型スクリーンの基礎原理について述べる。

2.1 リニアブレンディング

リニアブレンディングは、人間の視覚の融合限界よりも小さい間隔で並んだ 2 つのエッジの輝度比率が変化することで、知覚される 1 つのエッジの位置が 2 つのエッジ間で変化するという視覚メカニズムを応用した視覚効果である (図 1 [8])。

これまで提案されている複数のプロジェクタを用いた視点移動対応の裸眼 3D 映像表示技術 ([2], [9]) では、両眼視差となめらかな運動視差を提示するために図 2 (上) のようにプロジェクタを両眼間隔よりも狭い間隔で設置するため、広視域化するほど大量のプロジェクタが必要になる。一方、リニアブレンディングでは、視差が融合限界内に収まる 2 つの視点映像を視点位置に応じた輝度比率で合成して提示することで、中間視点が知覚的に補間されるため中間視点分のプロジェクタが不要となる (図 2 (下))。これにより、両眼間隔より広いプロジェクタ間隔でも両眼視差となめらかな運動視差をもつ 3D 映像を表示できる。

2.2 空間結像アイリス面型スクリーン

空間結像アイリス面型スクリーンは、反射層とフレネルレンズ層、拡散層から構成される反射型のスクリーンである [7]。このスクリーンは、フレネルレンズの焦点距離を

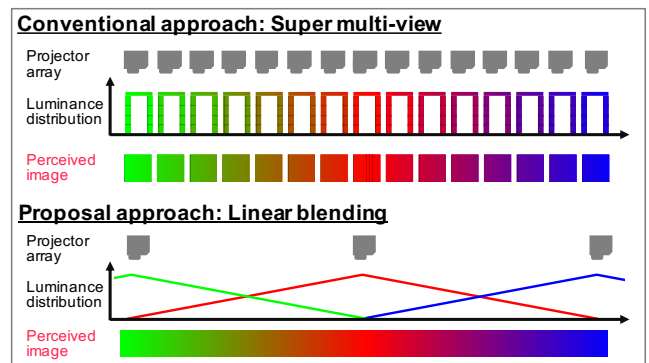


図 2 従来の超多眼裸眼 3D 映像表示 (上) とリニアブレンディング (下) の比較

f , スクリーンからプロジェクタまでの投影距離を a とした場合、 $1/f = 1/a + 1/d$ となる距離 d の位置にプロジェクタ内部のアイリス (しぼり) を結像する。観察者の視点位置が空中に結像したアイリス面の範囲内であればプロジェクタから投影した映像がスクリーン上に視認されるが、この範囲を外れると視認できなくなる。結像されるアイリス面の輝度分布は、スクリーンの拡散層によって中心が最大となり距離に応じて線形に近い減衰特性となるよう制御される。よって隣り合うプロジェクタ同士の間隔を、アイリス面の合成輝度が一定となるよう配置することで、観察者の視点位置に応じて一定の輝度で視点映像をなめらかに切り替えることができる。この際、投影する視点映像の視差を融合限界範囲内とすることで、リニアブレンディングの効果によって中間視点もなめらかに補間された 3D 映像を裸眼で観察できる。

3. テーブル型裸眼 3D スクリーンシステムへの適用に向けた基礎検討

以下ではリニアブレンディングのテーブル型裸眼 3D スクリーンシステムへの適用に向け、光学構成と再現可能な被写体の奥行きについて述べる。

3.1 光学構成検討

これまで我々は垂直型裸眼 3D スクリーンシステムにおいて 50 インチサイズの空間結像アイリス面型スクリーンを制作し、水平に設置したプロジェクタから視点映像を投影することで、視点移動に対応した裸眼 3D 映像表示が可能であることを確認した [7]。

本稿では原理確認のため、最もシンプルな直線状プロジェクタアレイを天井に設置する構成を想定し、テーブルに設置したスクリーンを挟んだ一方向から 3D 映像を視聴する光学構成を検討した (図 3)。

3.2 再現可能な被写体の奥行き検討

垂直型裸眼 3D スクリーンシステムでは、再現可能な被

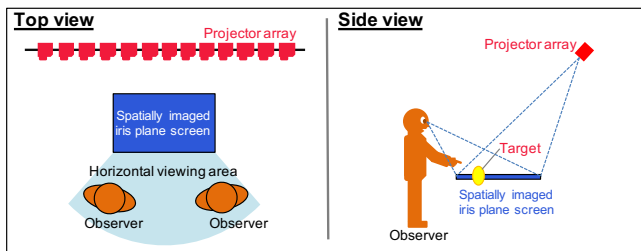


図3 直線状プロジェクタアレイによるテーブル型裸眼3Dスクリーンシステム

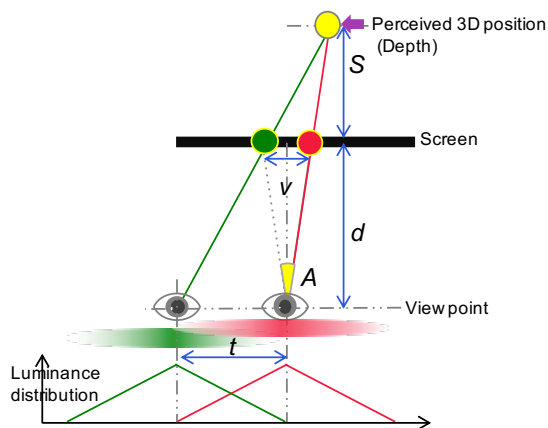


図4 リニアブレンディングを用いた垂直型裸眼3Dスクリーンシステムにおける被写体の奥行き幅（システム上面図）

写体の奥行き幅はスクリーンを基準とした引っ込み幅 S と飛び出し幅 S' の合計 ($S+S'$) となる。 S と S' はそれぞれ、図4に示す融合限界角度 A 、視聴距離 d 、空間結像アイリス面の中心間隔 t によって以下のように定式化できる [7]。

$$S = \frac{d \times v}{t - v} \quad (1)$$

$$S' = \frac{d \times v}{t + v} \quad (2)$$

$$v = 2d \tan(A/2)$$

上記を超える奥行き幅を投影した場合、視点映像の視差が融合限界を超えるため、観察者には2枚の映像が重なった2重像が知覚され、画質の低下につながる。また、上記の式から、再現したい奥行き幅を増やすためにはアイリス面間隔 t （プロジェクタの配置間隔）を狭めることが有効であることがわかる。

テーブル型裸眼3Dスクリーンシステムでは、図5に示すように観察者はスクリーンの端からスクリーンを斜めに見下ろすため、再現可能な奥行き幅をスクリーンに垂直な成分に変換することで、再現可能な被写体の高さ（例：スポーツコンテンツにおける選手の身長等）を定式化することができる。

図5において、スクリーンを基準とした垂直方向の引っ込みの高さ h と飛び出し方向の高さ h' は、スクリーンから視点位置までの高さ H 、視点位置からスクリーン上に表示

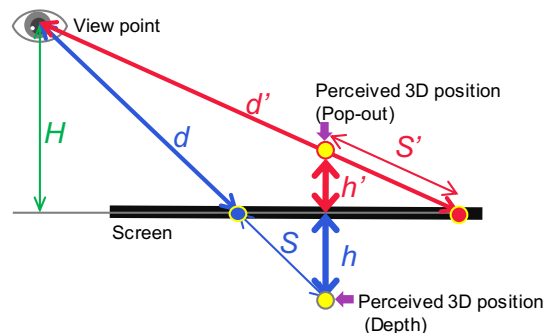


図5 リニアブレンディングを用いたテーブル型裸眼3Dスクリーンシステムにおける被写体の高さ（システム側面図）

される被写体までの斜め方向の視聴距離 d と d' 、式1・式2による S と S' によってそれぞれ以下の式で与えられる。

$$h = \frac{H \times S}{d} \quad (3)$$

$$h' = \frac{H \times S'}{d'} \quad (4)$$

上記の式から、融合限界角度 A を $8 \text{ min}[10]$ 、プロジェクタの配置間隔を 5 deg 、スクリーンの設置高さを 700 mm 、観察者の身長を $1,700 \text{ mm}$ とし、観察位置をスクリーン中心から水平に 600 mm 離れた位置と想定すると、スクリーン中心を表示位置とする被写体は、スクリーンからの引っ込みの高さ h : 27.2 mm 、飛び出しの高さ h' : 26.1 mm まで再現できる。よってコンテンツの底面をスクリーン面から $h = 27.2[\text{mm}]$ 下げた位置に設置することで、被写体の高さは h と h' の和である約 53 mm まで再現できる。一方、再現できる被写体の高さは観察者に近い表示位置ほど減少し、観察者から 300 mm 離れた位置では約 48 mm となる。このことからフィールド全体に被写体が存在するようなコンテンツでは、被写体と観察者が最も近づく表示位置を基準にプロジェクタの配置間隔と被写体の高さ設計を行う必要があることがわかる。

4. プロトタイプ実装

原理確認のため、13台のプロジェクタと50インチサイズスクリーンを用いたプロトタイプを実装した（図6）。スクリーンには、これまで垂直型裸眼3Dスクリーンシステムで用いたものと同じ空間結像アイリス面型スクリーンを用いた。視点映像を投影するプロジェクタはPanasonic社のSpacePlayer（解像度： $1,280 \times 800 [\text{px}]$ 、輝度： $1,000 [\text{lm}]$ ）を用い、投影距離は $1,700 \text{ mm}$ 、配置間隔は 150 mm （約 5 deg ）とした。スクリーンの設置高さ、観察者の想定身長、想定観察位置は前章の条件と合わせた。

コンテンツはスポーツ観戦の利用シーンを想定し、ゲーム開発エンジンであるUnity3Dを用いてサッカーフィールドをCGで作成した。サッカーフィールドを50インチサイズ（ $1,000 \times 625 [\text{mm}]$ ）の表示エリアに合わせて縮小

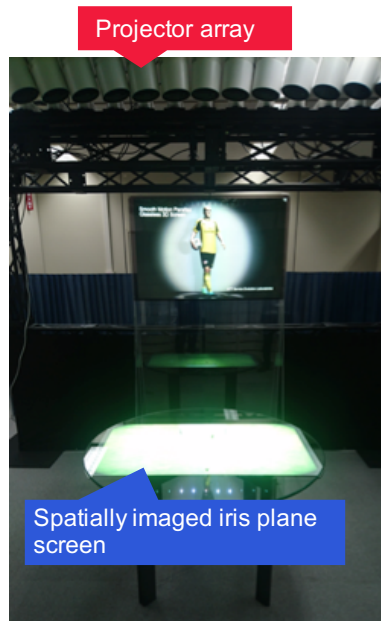


図 6 実装したプロトタイプの外観

し、選手の高さは式 3・式 4 を元に最大 45 mm となるようスケールを調整した。CG 空間内の仮想カメラの配置間隔はプロジェクタ配置間隔と同じ 5 deg とし、13 視点分の仮想カメラから毎フレーム取得した連番画像を動画化してそれぞれ視点映像とした。視点映像は同期伝送技術である MMT(MPEG Media Transport) を用い、それぞれがプロジェクタへ接続された 13 台のクライアント PC へ 1 台のサーバ PC から伝送し、フレーム単位の精度での同期再生を実現した。

図 7 に、スクリーンへ投影したコンテンツを右視点、中央視点、左視点から撮影した画像を示す。投影の結果、50 インチの表示エリアに約 65 度の水平視域で複数人が同時に 3D 被写体を視聴できることが確認された。また、水平方向の視点移動に伴うなめらかな運動視差も確認でき、リニアブレンドのテーブル型裸眼 3D スクリーンシステムへの適用可能性は十分に高いことが確認できた。

5. 考察

テーブル型裸眼 3D スクリーンシステムへリニアブレンドを適用することによるプロジェクタ数の削減効果と、原理確認から得られた課題として視点位置による映像制御、視域の 360 度化に向けた光学設計最適化について述べる。

5.1 プロジェクタ数の削減効果

プロトタイプでは、リニアブレンドの効果によってプロジェクタ 1 台あたり 5 deg の視域をカバーできる。これは Yoshida ら [2] の 1.25 deg と比較して 1/4 のプロジェクタ数である。また、コンテンツをサッカーに特化した場合、サッカーフィールドの実サイズを横幅 110 m、縦

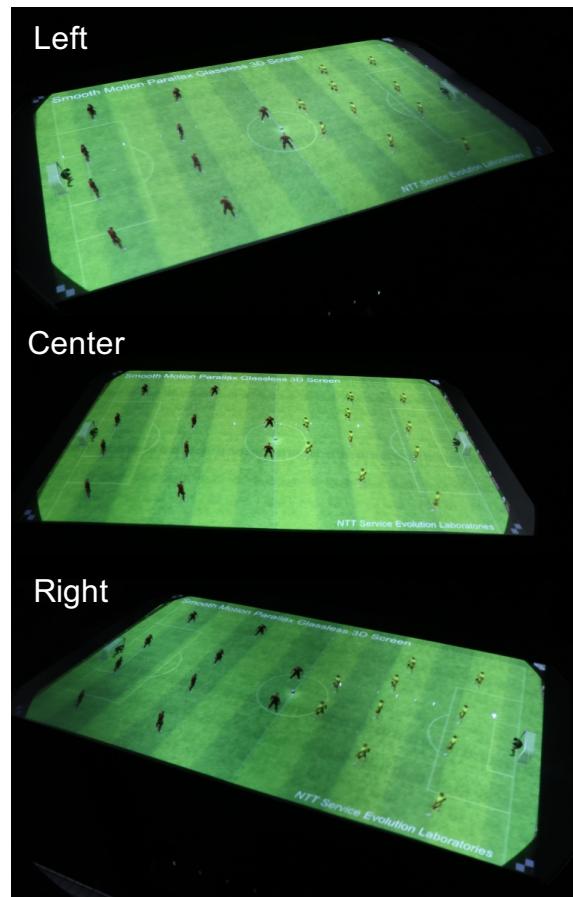


図 7 観察されるコンテンツ

幅 75 m とすると、50 インチサイズの縮尺では身長 1,800 mm の選手の高さは 15 mm となり、プロジェクタ間隔 12.5 deg の間隔でも再現できる。この場合プロジェクタ数の削減効果は 1/10 となり、テーブル型裸眼 3D スクリーンシステムにおいてもリニアブレンドによって十分なプロジェクタ数削減効果が得られると考えられる。

5.2 観察者の視点位置に応じた映像制御

プロトタイプでは、水平方向はリニアブレンドによる視点移動が実現されるが、垂直方向の視点移動は対応できず、仮想カメラと大きく異なる高さの視点位置では被写体の縦方向の比率が崩れ、被写体の高さを適切に提示できないという問題が確認された。この問題を解決するため、観察者の視点高さをトラッキングしてコンテンツの仮想カメラの高さを調整するといったインタラクティブな映像制御が有効と考えられる。今回のプロトタイプでは、視点映像はオフラインで作成した動画を再生しているためカメラ位置の動的な変更は困難である。そのため、視点位置に動的に対応するためには各視点映像を同期してリアルタイムにレンダリングする再生システムが必要である。

5.3 視域の 360 度化に向けた光学設計最適化

プロトタイプでは、プロジェクタの正反射方向の 1 方向

に対して約 65 度の水平視域を実現した。視域の 360 度化に向けては直線状プロジェクタアレイをスクリーンを囲むように複数配置する手法や円形プロジェクタアレイを用いる手法が考えられる。一方、今回の直線状アレイでは視域内であってもプロジェクタアレイの中心から視点位置が離れるにつれて仮想カメラと視点位置にずれが生じ、被写体の縦横比が歪む現象が確認されたことから、360 度化に向けては対称性の高い円形プロジェクタアレイがより効果的と考えられる。

また、360 度化することで観察者同士がスクリーンの対角位置から同時にスクリーンを覗き込み、対角の観察者によってプロジェクタの影が生じるという問題も想定されることから、観察位置とプロジェクタ配置の最適化が今後の重要な課題である。

6. まとめ

テーブル型裸眼 3D スクリーンシステムの実用化を目標に、視覚メカニズムを活用したリニアブレンドの適用可能性について、光学構成の検討と再現可能な被写体の奥行きの定式化、50 インチサイズのスクリーンと 13 台のプロジェクタを用いたプロトタイプによる原理確認を行った。提案システムではリニアブレンドによって中間視点分のプロジェクタが不要になるため、プロジェクタ数を従来手法より $1/4 \sim 1/10$ に削減できる。また、反射型スクリーンを用いることでプロジェクタを天井に設置でき、表示側はテーブルにシート状のスクリーンを設置するだけのため設置場所の自由度も高い。提案システムで用いる空間結像アイリス面型スクリーンは大型化も可能なことから、従来よりも実用性の高いテーブル型裸眼 3D スクリーンシステムの実現が期待できる。

参考文献

- [1] H. Seifert and Q. Smithwick: "360-degree Multi-Viewer Autostereoscopic Tabletop Display with Omnidirectional Dynamic Parallax Barrier and Novel Time Multiplexed Directional Backlight," *Electronic Imaging, Stereoscopic Displays and Applications XXVII*, pp. 1-8(8) (2016).
- [2] S. Yoshida: "fVisiOn: 360-degree viewable glasses-free tabletop 3D display composed of conical screen and modular projector arrays," *Optics Express*, Vol. 24, No. 12, pp. 13194-13203 (2016).
- [3] K. Kim, H. Jeon, H. Kim, and J.Hahn: "Full-Color Table-Top Display with Rotating Transmissive Screen," 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (Optical Society of America, 2015), paper 26B3_3 (2015).
- [4] A. Jones, M. Lang, G. Fyffe, X. Yu, J. Busch, I. McDowall, M. Bolas, and P. Debevec: "Achieving eye contact in a one-to-many 3D video teleconferencing system," *ACM Trans. Graph*, Vol. 28, No. 3, pp. 1-64 (2009).
- [5] H. Horimai, D. Horimai, T. Kouketsu, P. Lim, and M. Inoue: "Full-color 3D display system with 360 degree: horizontal viewing angle," *Proc. Int. Symposium of 3D and Contents*, pp. 7-10 (2010).
- [6] Y. Takaki, and S. Uchida: "Table screen 360-degree three-dimensional display using a small array of high-speed projectors," *Optics Express*, Vol. 20, No.8, pp. 8848-8861 (2012).
- [7] M. Makiguchi, T. Kawakami, M. Sasai, and H. Takada: "Smooth Motion Parallax Glassless 3D Screen System Using Linear Blending of Viewing Zones and Spatially Imaged Iris Plane," *SID 2017*, 61-2, Vol. 48, No. 1, pp. 903-906 (2017).
- [8] T. Kawakami, M. Date, M. Sasai and H. Takada, "Optical Linear Blending of Viewing Zones Using Convolution of Iris for Smooth Motion Parallax Autostereoscopic 3D Display," *IEEE Journal of Display Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 143-152 (2016).
- [9] Y. Takaki: "High-density Directional Display for Generating Natural Three-dimensional Images," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 94, No. 3, pp. 654-663 (2006).
- [10] H. Takada, S. Suyama, and M. Date, "Evaluation of the Fusional Limit between the Front and Rear Images in Depth-fused 3-D Visual Illusion," *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E89-C, No. 3, pp. 429-433 (2006).