

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2005-500578  
(P2005-500578A)

(43) 公表日 平成17年1月6日(2005.1.6)

(51) Int. Cl. <sup>7</sup>	F I	テーマコード (参考)
GO2B 27/22	GO2B 27/22	5B050
GO6T 15/00	GO6T 15/00 100A	5B080
GO6T 17/40	GO6T 17/40 A	5C061
HO4N 13/04	HO4N 13/04	

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 131 頁)

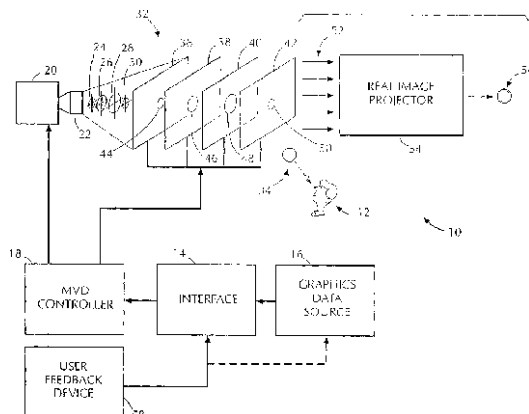
(21) 出願番号	特願2003-522075 (P2003-522075)	(71) 出願人	504066852 ライトスペース・テクノロジーズ・アクチ ボラグ LIGHTSPACE TECHNOLO GIES AB スウェーデン国、78173 ボルランゲ 、テュナヴァーゲン 281 Tunavagen 281, 7817 3 Borlange, Sweden
(86) (22) 出願日	平成14年8月19日 (2002.8.19)	(74) 代理人	100057874 弁理士 曾我 道照
(85) 翻訳文提出日	平成16年2月20日 (2004.2.20)	(74) 代理人	100110423 弁理士 曾我 道治
(86) 国際出願番号	PCT/US2002/026718	(74) 代理人	100084010 弁理士 古川 秀利
(87) 国際公開番号	W02003/017246		
(87) 国際公開日	平成15年2月27日 (2003.2.27)		
(31) 優先権主張番号	09/933,424		
(32) 優先日	平成13年8月20日 (2001.8.20)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 3次元アンチエアシングを用いた多平面ポリュメトリック表示システムおよびその動作方法

(57) 【要約】

多平面ポリュメトリックディスプレイシステム(10) および方法は、複数の画像深さに対応する複数の個々の光学要素(36~40)を含む多面光学装置(32)を使用してポリュメトリック3次元画像(34および56)を生成する。画像プロジェクタ(20)は、それぞれの光学要素(36~40)に画像(24~30、44~50)を選択的に投影することにより、多面光学装置(32)で観察可能なポリュメトリック3次元画像(34)を生成させる。3次元画像(34)の生成中に物理的視覚キューを追加することにより、3次元画像を見ている時の深さ知覚を向上させる。フローティング画像生成器(54)は、向上した深さを有する3次元画像を投影することにより、空間中にフローティングするように見える第2のポリュメトリック3次元画像(56)を生成させる。



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

仮想深さ  $D_V$  を有する 3 次元シーンのポリュメトリック 3 次元画像を表示するシステムであって、

(a) 前記 3 次元シーンを通して種々の深さで一連の 2 次元スライスを表すデータを生成するコントローラと、

(b) 複数の光学要素を含む、物理的深さ  $D_D$  を有する多面光学装置と、

(c) 前記データに応じて、前記多面光学装置のそれぞれの光学要素上に前記一連の 2 次元スライスを選択的に投影することにより前記多面光学装置で観察可能な第 1 のポリュメトリック 3 次元画像を表示し、前記 3 次元シーンの前記仮想深さ  $D_V$  が前記多面光学装置の前記物理的深さ  $D_D$  に対応するようにマップされるものである画像プロジェクタと、

(d) 前記多面光学装置に形成される前記第 1 のポリュメトリック 3 次元画像を投影することにより、前記多面光学装置外の空間において観察可能な第 2 のポリュメトリック 3 次元画像を生成するプロジェクタと、

を具備する仮想深さ  $D_V$  を有する 3 次元シーンのポリュメトリック 3 次元画像を表示するシステム。

## 【請求項 2】

前記 3 次元シーンの前記仮想深さ  $D_V$  は、線形関係により前記多面光学装置の物理的深さ  $D_D$  にマップされる請求項 1 に記載の仮想深さ  $D_V$  を有する 3 次元シーンのポリュメトリック 3 次元画像を表示するシステム。

## 【請求項 3】

前記 3 次元シーンの前記仮想深さ  $D_V$  は、非線形関係により前記多面光学装置の物理的深さ  $D_D$  にマップされる請求項 1 に記載の仮想深さ  $D_V$  を有する 3 次元シーンのポリュメトリック 3 次元画像を表示するシステム。

## 【請求項 4】

前記複数の光学要素は、深さ軸に沿って等しく間隔が空けられている請求項 1 に記載の仮想深さ  $D_V$  を有する 3 次元シーンのポリュメトリック 3 次元画像を表示するシステム。

## 【請求項 5】

前記複数の光学要素は、深さ軸に沿って不均等な間隔が空けられている請求項 1 に記載の仮想深さ  $D_V$  を有する 3 次元シーンのポリュメトリック 3 次元画像を表示するシステム。

## 【請求項 6】

前記第 1 の 3 次元画像内の深さは、前記複数の光学要素のうちの 1 つに対応するようにさらにマップされる請求項 4 または 5 に記載の仮想深さ  $D_V$  を有する 3 次元シーンのポリュメトリック 3 次元画像を表示するシステム。

## 【請求項 7】

3 次元シーンのポリュメトリック 3 次元画像を表示するシステムであって、

(a) 3 次元シーンの選択された部分を通して種々の深さで一連の 2 次元スライスを表すデータを生成し、前記選択された部分が、最大仮想深さ値  $Z_{MAX}$  と最小仮想深さ値  $Z_{MIN}$  に対応するものであるコントローラと、

(b) 複数の光学要素が配置された多面光学装置と、

(c) 前記データに応じて、前記多面光学装置のそれぞれの光学要素に前記一連の 2 次元スライスを投影することにより前記多面光学装置において観察可能な第 1 のポリュメトリック 3 次元画像を表示し、前記最小仮想深さ値  $Z_{MIN}$  に関連する前記スライスは該多面光学装置の前方の光学要素上に投影され、前記最大深さ値  $Z_{MAX}$  に関連する前記スライスは、前記多面光学装置の後方の光学要素上に投影され、残りのスライスはそれらの間のそれぞれの光学要素上に投影されるものである画像プロジェクタと、

を具備する 3 次元シーンのポリュメトリック 3 次元画像を表示するシステム。

## 【請求項 8】

前記最大仮想深さ値  $Z_{MAX}$  を越える前記 3 次元シーンの部分は、後方の光学要素上に 2 次元画像として表示される請求項 7 に記載の 3 次元シーンのポリュメトリック 3 次元画像

10

20

30

40

50

を表示するシステム。

【請求項 9】

前記  $Z_{MAX}$  および  $Z_{MIN}$  の値は、観察者によって対話的に割当てられる請求項 7 に記載の 3 次元シーンのポリメトリック 3 次元画像を表示するシステム。

【請求項 10】

前記  $Z_{MAX}$  および  $Z_{MIN}$  の値は、アプリケーション起動中に観察者によって割当てられる請求項 7 に記載の 3 次元シーンのポリメトリック 3 次元画像を表示するシステム。

【請求項 11】

前記最小深さ値  $Z_{MIN}$  に関連する前記スライス、前記多面光学装置の最前方の光学要素上に投影され、前記最大深さ値  $Z_{MAX}$  に関連する前記スライスは、該多面光学装置の最後方の光学要素上に投影される請求項 8 または 9 に記載の 3 次元シーンのポリメトリック 3 次元画像を表示するシステム。

10

【請求項 12】

前記多面光学装置に形成される前記第 1 のポリメトリック 3 次元画像を投影することにより、該多面光学装置外の位置において空間中にフローティングするように見える第 2 のポリメトリック 3 次元画像を生成するフローティング画像生成器をさらに具備する請求項 7 または 8 に記載の 3 次元シーンのポリメトリック 3 次元画像を表示するシステム。

【請求項 13】

3 次元シーンの 2 次元スライスのポリメトリック 3 次元画像を生成する方法であって、(a) 前記 3 次元シーンの選択された部分を通して種々の深さで一連の 2 次元スライスを表すデータを生成するステップであって、前記選択された部分が最大深さ値  $Z_{MAX}$  と最小深さ値  $Z_{MIN}$  とに対応するものであるデータを生成するステップと、

20

(b) 多面光学装置のそれぞれの光学要素上に前記一連の 2 次元スライスを投影するステップであって、それにより、該多面光学装置において観察可能な第 1 のポリメトリック 3 次元画像を表示し、前記最小深さ値  $Z_{MIN}$  に対応する前記スライスが、該多面光学装置の前方の光学要素上に投影され、前記最大深さ値  $Z_{MAX}$  において生成された前記スライスが、該多面光学装置の後方の光学要素上に投影され、残りのスライスが、それらの間のそれぞれの光学要素上に投影されるものである投影するステップと、

を含む 3 次元シーンの 2 次元スライスのポリメトリック 3 次元画像を生成する方法。

【請求項 14】

前記最大深さ値  $Z_{MAX}$  を越える前記 3 次元シーンの部分は、後方の光学要素上に 2 次元画像として投影される請求項 13 に記載の 3 次元シーンの 2 次元スライスのポリメトリック 3 次元画像を生成する方法。

30

【請求項 15】

前記  $Z_{MAX}$  および  $Z_{MIN}$  の値は、観察者によって対話的に割当てられる請求項 13 に記載の 3 次元シーンの 2 次元スライスのポリメトリック 3 次元画像を生成する方法。

【請求項 16】

前記  $Z_{MAX}$  および  $Z_{MIN}$  の値は、アプリケーション起動中に観察者によって割当てられる請求項 13 に記載の 3 次元シーンの 2 次元スライスのポリメトリック 3 次元画像を生成する方法。

40

【請求項 17】

前記最小深さ値  $Z_{MIN}$  に対応する前記スライスは、前記多面光学装置の最前方の光学要素上に投影され、前記最大深さ値  $Z_{MAX}$  に関連する前記スライスは、前記多面光学装置の最後方の光学要素上に投影される請求項 13 または 14 に記載の 3 次元シーンの 2 次元スライスのポリメトリック 3 次元画像を生成する方法。

【請求項 18】

前記光学装置外の位置において空間中にフローティングするように見える第 2 のポリメトリック 3 次元画像を生成する前記多面光学装置から前記第 1 のポリメトリック 3 次元画像を投影するステップををさらに含む請求項 13 または 14 に記載の 3 次元シーンの 2 次元スライスのポリメトリック 3 次元画像を生成する方法。

50

**【請求項 19】**

ポリメトリック 3 次元画像を生成するシステムであって、

(a) 3 次元シーンをレンダリングすることにより少なくとも 1 つの心理的視覚キューを提供し前記ダリングした 3 次元シーンを通して一連の 2 次元スライスを生成するコントローラと、

(b) 前記 2 次元スライスが投影されることが可能な光学装置と、

(c) 前記光学装置上に前記一連の 2 次元スライスを選択的に投影することにより第 1 のポリメトリック 3 次元画像を生成させ、前記少なくとも 1 つの心理的視覚キューにより、該第 1 のポリメトリック 3 次元画像の見かけ上の深さが前記光学装置の物理的深さを超えるものである画像プロジェクタと、

を具備するポリメトリック 3 次元画像を生成するシステム。

10

**【請求項 20】**

前記少なくとも 1 つの心理的キューは、前記レンダリングされた 3 次元シーンにシェーディングを含めることによって提供される請求項 19 に記載のポリメトリック 3 次元画像を生成するシステム。

**【請求項 21】**

前記少なくとも 1 つの心理的キューは、前記レンダリングされた 3 次元シーンに影を含めることによって提供される請求項 19 に記載のポリメトリック 3 次元画像を生成するシステム。

**【請求項 22】**

前記少なくとも 1 つの心理的キューは、前記レンダリングされた 3 次元シーンの閉塞部分によって提供される請求項 19 に記載のポリメトリック 3 次元画像を生成するシステム。

20

**【請求項 23】**

前記少なくとも 1 つの心理的キューは、前記レンダリングされた 3 次元シーンに強制的な透視を含めることによって提供される請求項 19 に記載のポリメトリック 3 次元画像を生成するシステム。

**【請求項 24】**

前記少なくとも 1 つの心理的キューは、前記レンダリングされた 3 次元シーンのより遠方の部分の表面テクスチャにおける解像度を低減することによって提供される請求項 19 に記載のポリメトリック 3 次元画像を生成するシステム。

30

**【請求項 25】**

前記少なくとも 1 つの心理的キューは、前記レンダリングされた 3 次元シーンのより遠方の部分のぼやけを増大させることによって提供される請求項 19 に記載のポリメトリック 3 次元画像を生成するシステム。

**【請求項 26】**

前記少なくとも 1 つの心理的キューは、前記レンダリングされた 3 次元シーンのより遠方の部分を青色に向かってシフトさせることによって提供される請求項 19 に記載のポリメトリック 3 次元画像を生成するシステム。

**【請求項 27】**

前記少なくとも 1 つの心理的キューは、前記レンダリングされた 3 次元シーンのより遠方の部分の表面テクスチャにおける輝度を低減することによって加えられる請求項 19 に記載のポリメトリック 3 次元画像を生成するシステム。

40

**【請求項 28】**

前記光学装置は、複数の光学要素を含む、請求項 19 に記載のポリメトリック 3 次元画像を生成するシステム。

**【請求項 29】**

前記複数の光学要素は、深さ軸に沿って配置されている請求項 29 に記載のポリメトリック 3 次元画像を生成するシステム。

**【請求項 30】**

50

前記光学装置から前記第1のポリメトリック3次元画像を投影することにより、該光学装置外の位置において空間中にフローティングするように見える第2のポリメトリック3次元画像を生成するフローティング画像生成器をさらに具備する請求項19に記載のポリメトリック3次元画像を生成するシステム。

【請求項31】

3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法であって、

(a) 少なくとも1つの心理的視覚キューを提供するように前記3次元シーンをレンダリングするステップと、

(b) 前記3次元シーンを通して2次元画像スライスのセットに対応する画像データを生成するステップと、

(c) 前記3次元シーンの前記2次元スライスのセットに対応する前記画像データを画像プロジェクタに提供するステップと、

(d) 前記画像プロジェクタから光学装置に前記2次元スライスの各々を選択的に投影するステップであって、それにより、第1のポリメトリック3次元画像を生成させ、前記少なくとも1つの心理的視覚キューにより、該第1のポリメトリック3次元画像の見かけ上の深さが該光学装置の物理的深さを超えるものである投影するステップと、

を含む3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項32】

前記少なくとも1つの心理的キューは、前記3次元シーンのレンダリング中にシェーディングを加えることによって提供される請求項32に記載の3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項33】

前記少なくとも1つの心理的キューは、前記3次元シーンのレンダリング中に影を加えることによって提供される請求項32に記載の3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項34】

前記少なくとも1つの心理的キューは、前記3次元シーンのレンダリング中に前記シーンの閉塞部分によって提供される請求項32に記載の3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項35】

前記少なくとも1つの心理的キューは、前記3次元シーンのレンダリング中に強制的な透視を加えることによって提供される請求項32に記載の3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項36】

前記少なくとも1つの心理的キューを、レンダリング中に前記3次元シーンのより遠方の部分の表面テクスチャにおける解像度を低減することにより提供する請求項32に記載の3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項37】

前記少なくとも1つの心理的キューを、レンダリング中に前記3次元シーンのより遠方の部分のぼやけを増大させることにより提供する請求項32に記載の3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項38】

前記少なくとも1つの心理的キューを、レンダリング中に前記3次元シーンのより遠方の部分を青色に向かってシフトさせることにより提供する請求項32に記載の3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項39】

前記少なくとも1つの心理的キューを、レンダリング中に前記3次元シーンのより遠方の部分の輝度を減らすことにより提供する請求項32に記載の3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項40】

10

20

30

40

50

前記少なくとも1つの心理的キューを、レンダリング中に前記3次元シーンのより遠方の部分の焦点整合 (focus) を減ずることにより提供する請求項32に記載の3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項41】

前記光学装置は、複数の光学要素を含む、請求項32に記載の3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項42】

前記複数の光学要素は、深さ軸に沿って配置されている請求項42に記載の3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項43】

前記第1のポリメトリック3次元画像を投影することにより、該光学装置外の位置において空間中にフローティングするように見える第2のポリメトリック3次元画像を生成するフローティング画像生成器をさらに含む請求項32に記載の3次元シーンのポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項44】

複数の光学要素を具備する多面光学装置を使用してポリメトリック3次元画像を生成する方法であって、

- (a) 深さ軸を有する3次元シーンをレンダリングするステップと、
- (b) 該3次元シーンを通して種々の深さで2次元画像スライスのセットに対応するデータを生成するステップであって、該2次元画像スライスの各々が、各々が深さ座標 (z) を有する複数のトライデルによって画定されるものである生成するステップと、
- (c) 前記トライデルのそれぞれの前記深さ座標 z を、前記多面光学装置内の対応する深さ座標 z' にマップするステップと、
- (d) 前記トライデルのそれぞれの前記深さ座標 z' を、前記複数の光学要素のうちの1つに対応する深さ座標 k を有する少なくとも1つのボクセルにマップするステップと、
- (e) 前記深さ座標 k における前記ボクセルを対応する光学要素に選択的に投影することにより前記多面光学装置において観察可能な第1のポリメトリック3次元画像を生成するステップと、

を含むポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【請求項45】

前記第1のポリメトリック3次元画像を投影するステップであって、それにより前記多面光学装置外の空間において観察可能な第2のポリメトリック3次元画像を形成する投影するステップをさらに含む請求項45に記載のポリメトリック3次元画像を生成する方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

[関連出願の相互参照]

この出願は、2001年8月20日に提出された米国特許出願第09/933,424号の利益を請求する。

【0002】

[発明の背景]

本発明は、3次元(3D)イメージングに関し、特に、ポリメトリック3次元画像(volumetric three-dimensional image)を空間中に生成するための3Dアンチエリアシングを用いた多平面表示システムに関する。

【0003】

3次元(3D)画像とは、生成すると空間中に現れるように見えるものであることが知られている。通常、ゴーグルおよび/またはヘルメットなどの特殊メガネ類が用いられるが、このようなメガネ類の装着は違和感を感じさせることがある。さらに、眼への付属品としての性質から、このようなメガネ類を装着すると、実際の3D画像を見る認知力が低下

10

20

30

40

50

する。また、このようなメガネ類を用いることで眼に疲労が生じる（眼の疲労は、3D画像を見る時間が制限されることにより改善される）可能性があり、このメガネ類は大きく、装着することで不快感を感じる人が多い。

【0004】

このように、上記のようなメガネ類を用いることにより生じる欠点をもたないポリュメトリック3D画像およびディスプレイを生成する必要がある。

【0005】

他のポリュメトリックシステムでは、例えば、自己発光ポリューム要素、すなわち、ボクセルを用いてこのようなポリュメトリック3D画像を生成する。かかるシステムの例を提供する前に、非常に濫用される「ボクセル(voxel)」という用語を、3Dデータ要素（本明細書では「トライデル(tridel)」と呼ぶ）から区別することが重要である。ボクセルは、3Dディスプレイにおいて実際に光を放っている点であり、2Dディスプレイにおけるピクセルに類似する。しかしながら、トライデルは、抽象的な3Dデータタイプである。より詳細には、ボクセルは、整数( $i, j, k$ )である位置を有し、色および輝度の特性しか有していないが、トライデルは、仮想画像空間における浮動小数点位置( $x, y, z$ )に画定されるパラメータのセットによって特徴付けられる。このため、トライデルは、その最も一般的な意味で、3Dデータタイプであり、任意数のアプリケーション特定データタイプを包含することができる。たとえば、トライデルを使用して3Dオブジェクトの多角形頂点を画定する場合、この抽象的な3Dデータタイプのデータパラメータは、色(R、G、B)と視覚的不透明度(A)とである。別の例として、トライデルが、医療コンピュータX線断層撮影(「CT」)スキャナによって生成される画像のデータ要素を表す場合、データパラメータは、X線不透明度である。さらに別の例では、トライデルが熱核プラズマを記述する場合、データパラメータはプラズマ成分のプラズマ密度、温度および平均速度であってもよい。

【0006】

上述したことから、2Dまたは3Dのいずれかの画像を製作するために、各トライデルを数学的に処理してピクセルまたはボクセルにしなければならない、ということが理解されよう。この処理には、回転、スケーリング、伸張または圧縮、透視、投影および視点変換を含む幾何学変換が含まれてもよく、それらはすべて、トライデルの $x, y, z$ 座標に対して作用する。さらに、ピクセルまたはボクセルの色および輝度を確定するプロセスにおいて、トライデルを、1つのボクセルの空間内に多く存在する場合は互いに平均化してもよく、あるいは2つのトライデルの空間内に多くのピクセルがある場合は補間してもよい。トライデルとボクセルとの区別は、トライデルの深さ座標をMOE装置32内のボクセル深さ座標にマップするための後述する深さ変換を考慮することによってより明確に理解されよう。

【0007】

当技術分野で知られている別のポリュメトリック表示システムの例では、ポリュメトリック画像システムとしてはカリフォルニア州マウンテンビューの3Dテクノロジー・ラボラトリーズ(3D TECHNOLOGY LABORATORIES)のシステムが一例であり、このシステムでは、希土類不純物イオンをドーピングした中実の(solid)ガラスまたはプラスチックポリューム内で赤外線レーザービームを交差させるとことによって、このようなボクセルベースの画像を生成する。しかしながら、2本の不可視光の赤外線レーザービームから可視光を作り出す非線形効果の効率は、約1%と非常に低いため、大画面ディスプレイに明るい画像を作り出すには強力なレーザーが必要となる。このようにレーザーが強力なものになると、眼を害する要因となる場合があるため、ディスプレイの周りに相当な保護用の囲いを設ける必要が生じる。さらに、通常、走査型のレーザーは低解像度となるため、ボクセル数が少なくなり、さらには、ポリュメトリック機構の中実性(solid nature)であるため、非常に重量のある大型のシステムとなる。

【0008】

マサチューセッツ州ケンブリッジのアクチュアリティ・システムズ、インコーポレイテッ

10

20

30

40

50

ド(Actuality Systems, Inc.)による別のポリュメトリック表示システムでは、高速スピン多面鏡から高速スピン投影スクリーンに反射されるレーザーダイオードの線状アレイが用いられている。しかしながら、このような高速スピン部品は、その大きさが比較的大きい場合があり、振動や起こる可能性がある規模の大きな破壊を防ぐように慎重にバランスをとらなければならない。さらに、ディスプレイ内のボクセルのサイズ、形状および向きは、それらの位置に左右されるため、ディスプレイの解像度が位置依存性のものとなる。

【0009】

別のポリュメトリック表示システムが、フロリダ州メルボルンのネオズ・テクノロジーズ、インコーポレイテッド(NEOS TECHNOLOGIES, INC.)により提供されており、このシステムは、高速スピン螺旋状投影スクリーンに音響光学的にレーザービームを走査する。このようにスピン部品が大きいと、ディスプレイの動きと無関係に慎重にバランスを維持させる必要が生じる。レーザー走査システムは、低解像度・低速のもので、ボクセル数が大幅に制限されてしまう。さらに、ディスプレイ内のボクセルのサイズ、形状および方位は、それらの位置に左右されるため、ディスプレイの解像度が位置依存性のものとなる。最後に、ディスプレイが著しく非ユークリッド性ではない(non-rectilinear nature)ため、異なる2次元画像を計算する処理要件が大幅に増大する。

10

【0010】

立体ディスプレイなど、知られている他のタイプの3Dイメージングシステムでは、あるシーンの僅かに異なる透視図を両眼のそれぞれに与える。次いで、脳が別々の画像を合わせて1つの3D画像にする。これらのシステムの中には、単一の視点のみを与えて特殊メガネ類を必要とするか、またはヘッドトラッキングを実行してメガネ類を不要にするものもあるが、これは3D画像の観察者が1人だけに限られてしまうことになり得る。別法として、ディスプレイは、多視野自動立体ディスプレイなど、異なる角度にある複数の視野ゾーンに、視点に合わせた各ゾーンの画像を与える場合もある。ユーザーの眼は、3D画像を見るためには、離れてはいるが隣り合う視野ゾーン内になければならず、さらに、ディスプレイに対して観察者が移動する際の不安定なジャンピングを防ぐには、視野ゾーンを非常に狭くしなければならない。このようなシステムの中には、横方向の視差/見る範囲のみしかないものがある。さらに、深さの焦点収束が一致しなければ、急速に眼精疲労が生じる場合があり、観察時間が大幅に限られてしまう。さらに、立体ディスプレイは、視野が限られていることから、仮想現実および/またはフォースフィードバックインタフェースなどの直接的な相互作用技術とともに現実的に使用不可能である。

20

30

【0011】

仮想現実の応用では、通常、ヘッドマウンティング式ディスプレイ(HMD)が用いられており、このディスプレイでは、一对のビデオディスプレイが左右眼のそれぞれに適切な透視図を提示する。1つのHMDは、一度に1人のみでしか使用できず、それぞれの眼に与える視野は制限される。ヘッドトラッキングは、視差をもたらすように使用されなければならない。

【0012】

他の表示システムには、ホログラフィーディスプレイがあり、このディスプレイでは、ホログラフィー回折格子として知られる非常に微細なラインのパターンとコヒーレントレーザー光を相互作用させて画像が作り出される。この回折格子は、入射光の方向および強度を変えるため、表示される物体の位置からくように見える。しかしながら、通常の光ホログラムには大量の情報が含まれているため、ホログラフィーディスプレイを高速に更新することは、計算量的に集中的なものとなる。比較的サイズが大きく視野も十分なホログラフィーディスプレイの場合、ピクセル数は一般に、2億5千万個よりも多くなる。

40

【0013】

したがって、処理システムに対して計算量的に許容可能な要求を課し、見やすさおよび実行性が改善された高品質ポリュメトリック3Dイメージングが必要とされている。

【0014】

さらに、3次元イメージングにおいて、別々のボクセルを用いると、例えば、ポリュメト

50



リック3D画像の別々の深さ間での移行部にある特徴のピクセル化により、画像の部分がギザギザな状態に見える。ポリュメトリック3D画像部分間の移行部を和らげる方法が必要とされている。

【0015】

[発明の概要]

ポリュメトリック3次元画像を生成する多平面ポリュメトリックディスプレイ(MVD: Multi-planar volumetric display)システムおよびその動作方法を開示する。MVDシステムは、アレイ状に配設された複数の個々の光学要素を含む多面光学装置と、多面光学装置のそれぞれの光学要素上に画像のセットを選択的に投影する画像プロジェクタと、多面光学装置から第1のポリュメトリック3次元画像を投影して、多面光学装置から離れた位置で、空間中にフローティングするように見える第2のポリュメトリック3次元画像を生成するフローティング画像生成器とを含む。

10

【0016】

多面光学装置の複数の個々の光学要素はそれぞれ、制御可能な可変の半透明性を有する液晶要素を含む。また、液晶要素の半透明性を制御するために、光学要素コントローラが設けられていることで、1つの液晶要素が不透明の光散乱状態をもつように制御されて、画像プロジェクタから画像のセットのそれぞれ1つを受けて表示し、さらに残りの液晶要素が、ほぼ透明になるように制御されて、不透明な液晶要素上に表示された画像が観察可能になる。

【0017】

光学要素コントローラが、複数のイメージングサイクル中に高速で複数の液晶要素にラスト走査を実行して、ある特定のイメージングサイクル中に不透明な光散乱状態になるように、複数の液晶要素から1つの液晶要素を選択し、不透明な光散乱状態が液晶要素を介して移動して、画像のセットを連続して受け、3次元の深さを有するポリュメトリック3次元画像を生成するようにする。

20

【0018】

画像プロジェクタが、画像のセットを多面光学装置に投影して、35Hzよりも高速に第1のポリュメトリック3次元画像全体を多面光学装置に生成させて、人間が認知可能な画像のちらつきを防ぐ。例えば、ポリュームレートが約40Hzであってもよい。一実施形態では、例えば、約50個の光学要素が約40Hzのポリュームレートで用いられる場合、画像プロジェクタが、2kHzのレートで画像のセットのそれぞれを各光学要素に投影する。

30

【0019】

画像プロジェクタは、画像のセットを出力する投影レンズを含む。また、このプロジェクタは、投影レンズからの画像のセットの投影の解像度と深さを制御するために、画像のセットのそれぞれの焦点を各光学要素上に合わせる適応光学集束システムを含む。この替わりとして、またはこれに追加して、画像プロジェクタは、複数の色で画像のセットを生成させ投影するために、赤、緑、青のレーザー光をそれぞれ投影する複数のレーザー光源を含む。

【0020】

さらに、3Dアンチエリアシング法を用いて、多面光学装置にある光学要素間の移行部で投影された画像の部分を滑らかにする。アンチエリアシングにより、光学要素間の遷移部のボクセルの表示が調節されることで、ボクセルの色値が、光学要素からのボクセルの距離の関数として修正されて、ポリュメトリック3次元画像の部分間の移行部が滑らくなる。

40

【0021】

[好適な実施形態の詳細な説明]

以下図1を参照すると、事実上ポリュメトリックである3次元(3D)画像を生成する多平面ポリュメトリック表示システム10が設けられており、この3D画像は、3D空間のある一定の限定されたポリュームを占め、画像が現れるロケーションに存在する。したが

50

って、立体表示方法などにより光学的な視覚の錯覚を生じさせて、画像が3Dであるように認識させるものと異なり、このような3D画像は真の3Dである。

【0022】

このシステム10により生成する3D画像は、解像度が非常に高く、広い色範囲で表示できるため、実際の物体を見ているような特性を備えることができる。例えば、このような3D画像は、横と縦の両方の動きの視差または見る範囲をもつ場合があるため、3D画像を3Dに見える状態のまま、視覚的キューを観察者12が動いても与えることができる。

【0023】

さらに、3D画像を見るために立体表示用のバイザやメガネなどの、特殊なメガネ類を、観察者12が全く装着する必要がなく、これは、そのようなめがね類が眼精疲労などを起こして違和感を感じさせるために利点である。さらには、3D画像は、横方向と縦方向の両方に連続した視野をもつもので、横方向の視野はあるディスプレイ構造で360°に等しいものである。さらに、観察者は、3D認知を失わずに、MVDシステム10から任意の視距離の位置にいてよい。

10

【0024】

多平面ポリュメトリック表示システム10は、グラフィックデータ源16から3Dグラフィックデータを受信するインタフェース14を含み、このグラフィックデータ源16は、システム10に組み込まれたり、または例えば、遠隔地から通信チャネルを介してシステム10に動作可能に接続され、従来の遠隔通信リンクやインターネットなどの任意のネットワークで接続されてもよいコンピュータなどである。インタフェース14は、カリフォルニア州サンタクララのインテル社(INTEL)から入手可能な、PCIバスや高速グラフィックポート(AGP)インタフェースであってよい。IEEE1014規格で標準化されたVMEバックプレーインインターコネクションバスシステム、小型コンピュータシステムインタフェース(SCSI)、アップル社(Apple)のMacintoshコンピュータで使用されているNuBus高性能拡張バスシステム、および他のシステムと共に、インダストリー・スタンダード・アーキテクチャ(ISA)インタフェース、拡張ISA(EISA)インタフェース、ユニバーサル・シリアル・バス(USB)インタフェース、現在IEEE1394規格として標準化され、コンピュータに高速通信および等時性リアルタイムデータサービスを提供するファイアワイヤバスインタフェースと共に、公開または独占的なインタフェースなど、他のインタフェースを用いてもよい。

20

30

【0025】

インタフェース14は、非常に高速な画像バッファを含む多平面ポリュメトリックディスプレイ(MVD)コントローラ18に、3Dグラフィックデータを送信する。ポリュメトリック3D画像として見える3次元画像は、MVDコントローラ18により、3D画像を介して深さが変化するロケーションにある連続した2次元画像スライスに変換される。次いで、画像のスライスに対応するフレームデータは、MVDコントローラ18の高速画像バッファから画像プロジェクタ20へと高速に出力される。

【0026】

MVDコントローラ18およびインタフェース14は、カリフォルニア州マウンテンビューのシリコン・グラフィックス社(SILICON GRAPHICS)から市販されているOCTANEグラフィックワークステーションなどのコンピュータで実行されてもよい。また、例えば、195MHzの縮小命令セットコンピュータ(RISC)のマイクロプロセッサを用いたパーソナルコンピュータ(PC)など、他の一般的なコンピュータを用いたシステムを使用してもよい。したがって、開示するMVDシステム10およびその部品は、ハードウェアおよび/またはソフトウェアの特定の実施態様または現実化に限定されるものではないことを理解されたい。

40

【0027】

グラフィックデータ源16は、任意に、アプリケーション・プログラム・インタフェース(API)を動作するコンピュータのグラフィック用アプリケーションプログラムや、イ

50

ンタフェース 14 などの入出力 (I/O) デバイスを介してコンピュータの MVD コントローラ 18 に適切な形式で 3D 画像データを与えるデバイスドライバであってもよい。MVD コントローラ 18 は、例えば、パーソナルコンピュータで実行され、任意に、特殊なデータ処理用の拡張カードを用いたハードウェアおよび/またはソフトウェアであってもよい。

**【0028】**

例えば、MVD コントローラ 18 の拡張カードには、グラフィックデータ源 16 からの 3D データセットを、スライス 24 ~ 30 に対応する多平面データセットを形成する連続した 2 次元画像スライスに変換するグラフィックハードウェアおよび/またはソフトウェアが含まれていてもよい。このように、3D 画像 34 は、手術のシミュレーション、航空交通制御、または軍事用の指令および統制など、実世界の応用に、リアルタイムまたはほぼリアルタイムの更新レートで生成される。また、このような拡張カードには、3D データセットとテクスチャメモリを操作して、3D 画像のテクスチャマッピングを実行するジオメトリエンジンが含まれていてもよい。

10

**【0029】**

画像データを画像プロジェクタ 20 に送信する前に、MVD コントローラ 18 または、その替わりとしてグラフィックデータ源 16 が、画像データ上に 3D アンチエイリアシングを実行することで、3D 画像 34 に表示される特徴を滑らかにして、z 軸に垂直な x-y 平面に整列させた光学要素 36 ~ 42 を有する MOE デバイス 32 の本来別個のボクセル構造により生じるディスプレイのピクセル化により、例えば、z 方向に沿った平行平面間の深さのギザギザな線が出ないようにする。画像スライス 24 ~ 30 に対応するデータを生成するにつれ、画像素子が、平面の移行部縁付近、すなわち、例えば、光学要素 36 ~ 38 の光学要素間に現れることがある。特定の画像素子で突然に移行しないように、スライス 24、26 は共に、画像 44 ~ 46 のそれぞれが特定の画像素子を含むように生成されるため、画像素子は、光学要素 36 ~ 38 により形成された両平面間で共有され、移行部を滑らかにして、3D 画像 34 がより連続的に現れるようにできる。それぞれの連続した光学要素上の画像素子の輝度は、画像データの画像素子の位置に応じて変化するものである。

20

**【0030】**

また、グラフィックデータ源 16 および MVD コントローラ 18 は、MVD コントローラ 18 への画像データの転送レートを最大限にして画像を生成するように、インタフェース 14 を介してゼロラン符号化 (zero run encoding) を実行してもよい。モーション・ピクチャ・エキスパート・グループ (MPEG) データ通信規格やデルタ ( ) 圧縮など、他の画像データの転送技法を用いてもよいことが理解される。

30

**【0031】**

3D 画像には、40 Hz のレートで更新される約 50 SVGA 解像度の画像が含まれている場合があり、表示される生データ信号レートが 2 GB/sec よりも大きくなる。このような生データ信号レートは、ゼロを送信しないことにより大幅に低減される。通常、物体の内部、前景物体により遮られている背景物体、およびその周りの空の空間に関連する多数のゼロにより、ポリメトリック 3D 画像が表される。グラフィックデータ源 16 は、ゼロのランがゼロランフラグ (ZRF) またはゼロラン符号により表され、その後ランレンクスが続くすなわちそれに伴うように画像データを符号化してもよい。このように、ゼロのカウントは、ゼロを送出せずに表示して送われてもよい。MVD コントローラ 18 の 3D データ画像バッファが初期化されて、すべてのゼロを格納してもよく、画像データが画像バッファに格納されると、ZRF フラグを検出することによって、MVD コントローラ 18 が、ゼロのランレンクスに等しいデータ位置またはピクセル数だけ、バッファで先に飛び越すことができる。次いで、3D データ画像バッファは、2 次元画像を生成するために、SLM を動作する SLM ドライバを含む場合がある画像プロジェクタ 20 に出力される 3D データを含む。

40

**【0032】**

50

画像プロジェクタ 20 は、高フレームレートで時系列に 3D 画像の 2 次元スライス 24 ~ 30 を複数の光学要素 (MOE) からなる装置 32 に投影し、選択的にイメージングして、観察者 12 には MOE 装置 32 の空間にあるように見える第 1 のポリュメトリック 3 次元画像 34 を生成する関連する光学要素 22 を有する。MOE 装置 32 は、複数の光学要素 36 ~ 42 を含み、これらの光学要素は、MVD コントローラ 18 の制御下で、2 次元画像 44 ~ 50 が表示される場合、スライス 24 ~ 30 をそれぞれ選択的に受け、1 つの光学要素は、各フレームレートサイクル中にそれぞれのスライスを受けて表示する。MVD コントローラ 18 により生成した深さスライス数は、光学要素 36 ~ 42 の数に等しいものであり、言い換えれば、各光学要素は、生成および表示されるポリュメトリック 3D 画像の深さ解像度の単位を表すものである。

10

【0033】

光学要素 36 ~ 42 は、例えば、ネマチック、強誘電、コレステリック材料か、またはこのような組成の当業者には知られている修正ケントステート法を用いたコレステリックテクスチャなどの他のポリマー安定化材料からなる液晶ディスプレイであってもよい。

【0034】

表示される画像のセットとして、MOE 装置 32 の光学要素 36 ~ 42 によりスライス 24 ~ 30 のそれぞれはすべて、以下に示すような十分に高いフレームレート、例えば、約 35 Hz よりも速いレートで表示されるため、人である観察者 12 は、立体表示用ヘッドセットを用いずに直接見て、個々の 2 次元画像 44 ~ 50 ではなく、連続したポリュメトリック 3D 画像 34 を認知する。したがって、図 1 に示すように、画像 44 ~ 50 は、球体の断面図であるため、このように生成した 3D 画像 34 は、MOE 装置 32 を形成する光学要素 36 ~ 42 の真中に位置する球体として、観察者 12 には見えることになる。

20

【0035】

代替の実施形態では、画像 44 ~ 50 は、球体の下側にキャプションとしての 2D テキストや、球体上の 2D テキストなど、2D と 3D を混合させて表して画像全体を表示させるように生成してもよい。応用の 1 つには、グラフィック・ユーザー・インタフェース (GUI) コントロールパッドがあり、これは 2D と 3D の両方の画像特性をもつことで、仮想フラットスクリーンディスプレイとして 2D スクリーンが現れ、仮想フラットスクリーンディスプレイ上に現れる球体などの 3D 画像を有する MICROSOFT WINDOWS (登録商標) 95 などの GUI を観察者 12 が観察することができる。

30

【0036】

第 1 のポリュメトリック 3D 画像 34 は、複数の向き (orientations) の範囲内で見ることができる。さらに、第 1 のポリュメトリック 3D 画像 34 からの光 52 は、MOE 装置 32 からのある距離で空間にフローティングしている第 1 のポリュメトリック 3D 画像 34 とほぼ同じ画像であるように観察者 12 に表示される第 2 のポリュメトリック 3D 画像 56 を生成するように実像プロジェクタ 54 によってさらに処理される。実像プロジェクタ 54、あるいはその代わりにフローティング画像プロジェクタは、MOE 装置 32 から出される光 52 を集光し、3D 画像 34 を外側に自由空間に再イメージングする光学要素および/または鏡のセットであってもよい。実像プロジェクタ 54 は、従来の球面鏡あるいは放物面鏡を含み、MOE 装置 32 の光学軸上にある信号観察ゾーンを生成する高精細ポリュメトリックディスプレイ (HDVD) であってもよい。

40

【0037】

例えば、実像投影システムは、Prince の米国特許第 5,552,934 号、および Crabtree, IV の米国特許第 5,572,375 号に記載されている装置であってもよく、これらの特許の各々は参照により本明細書で援用される。代替の実施形態では、ホログラフィー光学要素は、光学軸と整列した中心領域の 1 つの観察ゾーンのような複数の観察ゾーンおよび光学軸のどちらかの側の観察ゾーンの場合を除いて、フローティング画像 56 を生成するように従来の球面鏡あるいは放物面鏡と同じ機能を有する実画像プロジェクタ 54 によって使用されてもよいので、複数の 3D フローティング画像 56 は複数の観察者によって観察されてもよい。

50

## 【0038】

他の代替の実施形態では、実像プロジェクタ54は、予め存在する物体の記録画像を示していない、ホログラフィー光学要素(HOE)、すなわち、従来の意味でホログラムを含んでもよい。その代わりに、HOEは、入射光を受光し、反射し、かつ再び向けるレンズおよび/または鏡のような従来の光学部品の役目を果たす。ガラスあるいはプラスチックのような従来の光学要素に比べて、HOEは、非常に軽量で、再生するのに安価であり、従来の光学部品で使用可能ではない固有の光学特性も持ってもよい。例えば、HOEは、所定の光学軸から異なる角度で同じ物体の複数の画像を生成できるので、比較的小さいHOEを使用するディスプレイの視野は、従来の光学素子に対して必要に応じて光学素子サイズを増加しないで大幅に増加できる。したがって、実像プロジェクタ54として少なくとも1つのHOEを使用して、MVDシステム10は、比較的にコンパクトなシステムに360°の視野を備えるように製造されてもよい。さらに、レーザ光源を組み込む画像プロジェクタ20に関しては、HOEは、HOEの波長選択性によるこのようなレーザ光源と高性能に関して特に適合している。

## 【0039】

ポリュメトリック3D画像34、56のいずれかは、観察者12に対してポリュームおよび深さ、および任意には色も有するように見えるので、多平面ポリュメトリック表示システム10は、外科手術を教示する立体感のあるアニメーションに対して後述される例のような、仮想現実および触覚の(haptic / tactile)用途に適合されてもよい。実像プロジェクタ54は、フローティング3D画像56が仮想対話に対して直接アクセスできることを可能にする。MVDシステム10は、画像34、56のいずれかを操作しようとする観察者12に対応する観察者12からの手の動きを受け取るユーザフィールドバック装置58を含んでもよい。このような手の動きは、画像34、56の1つあるいは両方を修正し、観察者12の動きに回答するように見えるようにMVDコントローラ18へのインタフェース14に伝達される制御信号として、ユーザフィールドバック装置58によって変換されてもよい。別法として、ユーザフィールドバック装置58は、画像34、56の1つあるいは両方を修正するために、3Dグラフィックスプロセッサを含むグラフィックデータ源16に動作可能に接続されてもよい。

## 【0040】

多数の新しい対話技法は、実像プロジェクタ54を使用するMVD10の改良された性能をもたらす。例えば、マサチューセッツ州ケンブリッジ市のセンシブルデバイス(SENSIBLE DEVICES)社によって開発されたフォースフィールドバックインタフェースは、MVDシステム10が手で3D画像34、56を実際感じ、操作する能力を与えることができる使用可能な強力な技術である。適切なプログラミングで、観察者12は、あたかも画像が粘土であるかのように3次元画像を、本出願の譲受人のディメンショナル・メディア・アソシエート(DIMENSIONAL MEDIA ASSOCIATES)の商品のデジタルクレイと呼ばれるシステムを使用して彫塑できる。

## 【0041】

フォースフィールドバックインタフェースを有するMVDシステム10の他のアプリケーションは、ユーザが、外科医としての許可を得て、革新的な新しい手技を実行し、あるいはさらに遠隔手術を、例えばインターネット通信プロトコルを使用するインターネットを介して実行するために、仮想鼓動のようなアニメーションを含み、ユーザによる仮想刺激(prodding)に反応する3次元仮想解剖を見て、感じることができる外科シミュレータおよびトレーナーである。

## 【0042】

触覚作用は、実時間シミュレーションおよびMVDシステム10によって生成した3D画像で作動するユーザの刺激を与えるように、アニメーションとこのように結合されてもよい。例えば、観察者12は、外科医が仮想現実で第1の3D画像34を観察し操作する医学生を教える外科医であってもよいが、学生は、第1の3D画像34の変化に回答する実像プロジェクタ54により対応して操作され、修正された第2の3D画像56を観察する

。次に、学生は、3D画像34、54のようなアニメーションをイメージングすることによって鼓動でさえあってもよい心臓の画像のような画像34を個別に操作するために回転を行ってもよい。次に、教えている外科医は、あたかもこのような画像が心臓外科手術のシミュレーションのように現実であるかのように、画像操作を実行する際に学生を観察し、採点する。

#### 【0043】

##### M O E 装置

例示された実施形態では、M O E 装置32は、ガラス、プラスチック、液体、あるいは空気スペーサによって分離される光学要素36~42として、ガラスで構成される単一ピクセル液晶ディスプレイ(L C D)のスタックで構成されている。別法では、光学要素36~42は、軽量構造のような様々な利点を有するプラスチックあるいは他の物質で構成されてもよい。ガラス、プラスチック、および/または空気スペーサは、内部界面での反射を除去するように光学的に連続している形状のガラスL C Dと結合されてもよい。L C Dおよびスペーサの表面は、光学接触、屈折率整合流体、または光学結合剤のいずれかによって光学的に結合されてもよい。別法として、スペーサは、水、鉱物オイル、または屈折率整合流体などの流体と取り換えられてもよい。このような流体は、M O E 装置32を冷却するために外部冷却装置によって循環することができる。さらに、このような流体を間に設けたM O E 装置32は、全重量を減らすように空の状態で輸送され、設置されてもよく、間に設ける液体は設置後に加えられる。

10

#### 【0044】

好ましい実施形態では、光学要素36~42は、平面であり、矩形であるが、任意に曲げられてもよいしおよび/または円筒状のような任意の形状のものであってもよい。例えば、円筒状L C Dディスプレイは、押しだし成形のような異なる技術によって製造されてもよいし、互いの内部でぴったりと重ね合わされてもよい。光学要素36~42間の間隔距離は、一定であってもよいしあるいは代替の実施形態では、M O E 装置32の深さが、光学要素36~42の数を増加させないで著しく増加されてもよいように可変であってもよい。例えば、観察者12の目が、増加された観察距離に対する深さ感度を失うので、観察者12からさらに遠くに置かれた光学要素はさらに遠くに離れて置かれてもよい。光学要素36~42間の間隔が観察者12からの距離と共に直線的に増加した、対数関数の間隔が実現されてもよい。

20

30

#### 【0045】

光学要素36~42は、図2に示されるような明るい非常に透明な状態と、図3に示されるような不透明な非常に散乱している状態との間で迅速に切り換えられるように、例えばM V Dコントローラ18のM O E 装置ドライバによって、電子的に切り換えられる特性を有する液晶形態で構成されている。図2~3を参照すると、光学要素36の断面が図示され、液晶分子60~64は、ガラス、プラスチック、あるいは空気スペーサであってもよく、基板66~68のそれぞれに加えられた透明導電層70、71も有してもよい液晶基板66~68間に懸濁されてもよい。

#### 【0046】

導電層70、71は、優れた透明性および低抵抗を有するが、ガラスあるいはプラスチックの基板66~68の屈折率に比べて比較的高い屈折率を有するインジウムスズ酸化物(I T O)のスパッタ薄膜あるいは蒸着薄膜で構成されてもよい。これらの材料間の屈折率差は、その界面で反射を生じることもあり、反射防止(A R)材の付加コーティングあるいは層は、望ましくない反射のような反射光量を減らすように、導電層70、71と基板66~68との間で基板66~68上に任意に配設されてもよい。例えば、76nmのような通常の光の波長の1/4の光学的厚さを有し、約1.8の屈折率を有するA R層は、基板導電層界面での反射を非常に低いレベルに減らす。

40

#### 【0047】

A Rコーティングを使用することによって、光学要素36~42間の間隔材料は、その間の空気あるいは真空状態を残すように取り除かれてもよいので、M O E 装置32の全重

50

量を減らす。このようなARコーティングは真空蒸着された誘電体でもよいし、あるいは蒸発またはスパッタされた誘電体であってもよい。別法では、ARコーティングは、スピコーティング、ディップコーティング、あるいはゾルゲル(SOL-GEL)を有するメニスカスコーティングによって塗布されてもよい。

【0048】

図2を参照すると、このような導電層70、71を使用して、それとの間の電源72は、例えばMVDコントローラ18から、殆どあるいは全然散乱のない光学要素36を通して光76を液晶分子60~64に整列させ、透過させる光学要素36の基板66~68間に電界74を生成するので、光学要素36はほぼ透明である。

【0049】

図3を参照すると、電圧72の除去は、例えば、MVDコントローラ18によって制御される高速に切り換え可能なスイッチ78を開くことによるような、導電層70、71間で回路を開くことによって起こり得る。電圧72のこのような除去の際に、液晶分子60~64は、ランダムな向きにあるので、光76は散乱光80を生成するようにランダムに散乱される。この構成では、光学要素36は不透明に見えるので、画像プロジェクタ20によってそれに集束されたそれぞれの画像44を受像し、表示する投影スクリーンとして働いてもよい。

【0050】

代替の実施形態では、図2および図3を参照すると、図示された光学要素36は、第1の基板66に隣接する導電層70をアースに接続すると同時に、第2の導電層68に隣接する導電層71を約50V~約250Vの範囲にある電圧のような電源に接続することによって、図2に示された透明状態にあるように作動されてもよい。光学要素36を図3のような散乱不透明状態にあるように切り換えるために、電圧の印加は反転されるすなわち、導電層71は、約1ms~約5msのような所定の遅延のためにアースにされ、次に導電層70は電源に接続される。この手順は、光学要素36を透明状態に戻すように再度反転される。したがって、平均直流(DC)すなわち直流電圧は、一定印加電圧を有することによって故障をもたらし得る光学要素36に全く印加されない。さらに、加熱を生じ、光学要素への電力要件を増加する連続的な交流(AC)すなわち交流電圧も全くない。

【0051】

動作中、MOE装置32の光学要素36~42の1つだけは、所与の時間に散乱不透明な状態にあるので、散乱平面あるいは散乱表面を形成する。画像プロジェクタ20は投影サイクル中、高レートでスライス24~30を投影し、1スライスはサイクル毎に放射されるので、散乱平面は、可変の程度が弱い投影スクリーンを形成するようにMOE装置32の深さを通して高速にラスタ走査を実行されると同時に、残りの透明光学要素によって、観察者12は受像された画像スライス24~30からの表示画像を見ることができる。

【0052】

図4~7に示されるように、連続フレームデータは、画像82~88をフレームデータから生成するようにMVDコントローラ18から画像プロジェクタ20に供給されるので、MVDコントローラ18は、画像82が図4のように光学要素36の上に放射されるとき光学要素36は不透明であり、画像84が図5のように光学要素38の上に放射されるとき光学要素38が不透明であり、画像86が図6のように光学要素40の上に放射されるとき光学要素40が不透明であり、画像88が図7のように光学要素42の上に放射されるとき光学要素42が不透明であるように、光学要素36~42の切り換えを同期化する。MVDコントローラ18は、画像プロジェクタ20が、フレームデータ1~4のセットのそれぞれからそれぞれの画像82~88を生成するのに十分な時間を遅延中に有するように、各フレームデータのセットを画像プロジェクタ20に供給することと、所与の光学要素を不透明にさせることとの間に遅延を導入してもよい。

【0053】

図4~図7を参照すると、1つの光学要素が不透明であり、それぞれの画像をその上に表示するが、残りの光学要素は透明であるので、光学要素36上の図4の画像82は、例

10

20

30

40

50

えば少なくとも光学要素 38 を通して見ることができ、同様に画像 84 は図 5 の少なくとも光学要素 40 を通して見る事ができ、画像 86 は少なくとも光学要素 42 を通して見る事ができる。画像 82 ~ 88 は、比較的高レートで不透明な状態および透明状態に切り換えられる光学要素 36 ~ 42 上に画像プロジェクタ 20 によって高速で表示されるので、画像 82 ~ 88 は単一ポリュメトリック 3D 画像 34 を形成する。

**【0054】**

認知できるちらつきなしに連続するポリュメトリック 3D 画像 34 を形成するために、各光学要素 36 ~ 42 は、それぞれの画像を受像するためにあり、約 35 Hz よりも大きいフレームレートで不透明な状態に切り換えられるべきである。したがって、全 3D 画像をリフレッシュおよび/または更新するために、画像プロジェクタ 20 のフレームレートは、約  $N \times 35 \text{ Hz}$  よりも大きくあるべきである。40 Hz の個別の光学要素フレームレートを有する MOE 装置 32 を形成する 50 個の LCD 素子のスタックに関しては、画像プロジェクタ 20 の全フレームレートは、約  $50 \times 40 \text{ Hz} = 2 \text{ kHz}$  よりも大きいべきである。MVD システム 10 による高性能および/または高品質ポリュメトリック 3D イメージングは、約 15 kHz の画像プロジェクタ 20 のより大きいフレームレートを必要としてもよい。

10

**【0055】**

一実施形態では、図 4 ~ 図 7 の画像 82 ~ 84 は、順次表示され、このような順次フレーム配列は、MOE 装置 32 の全ポリュームの光学要素 36 ~ 42 を更新するためのポリューム周期毎に一度の深さの範囲の更新である。このような順次フレーム配列は、静止画像 82 ~ 88 に対して約 32 Hz、および動きを表示する画像 82 ~ 88 に対して約 45 Hz のフレーム表示レートのような限界のフレームレート条件で十分であることもある。代替の実施形態では、半ランダム平面配列は、各光学要素が依然としてポリューム周期毎に一度だけ更新されるだけであるけれども、画像ジッタを低下させ、深さの範囲がより高い周波数で更新される動きアーティファクトを減少させるように実行されてもよい。画像プロジェクタ 20 のフレームレートを増加させないで認知されたポリュームレートを増加させるこのような半ランダム平面配列は、偶数番号の付いた平面が画像で照らされ、次に奇数番号の付いた平面が照らされる多平面インタレーシングを含む。

20

**【0056】**

MOE 装置 32 は、画像プロジェクタ 20 で最初に生成された画像解像度を保持し、高忠実度 3次元画像を提供する。液晶パネル 36 ~ 42 は、非常に透明で、明るく、透明状態にぼやけがなく、画像プロジェクタ 20 からの光および画像が有効的にほぼ散乱されている不透明な散乱状態と、明るく透明な状態とを迅速に切り換えることができる。

30

**【0057】**

さらなる実施形態では、MOE 装置 32 は軽量であるように構成されてもよい。液晶パネル 36 ~ 42 は、その内部表面上に透明導電層 70、71 を被覆された一对のガラス基板で構成されてもよく、透明導電層 70、71 は絶縁層で被覆されている。ポリマー配向層は絶縁層上に最適に配置されてもよい。所与の液晶パネルの基板間に、液晶組成の薄い層が約 10 ~ 20 ミクロンの厚さであるように配設されている。

**【0058】**

パネルの大部分のポリュームおよび重量は、パネルの横方向のサイズおよび数が増加されるとき、潜在的に非常に重い MOE 装置 32 に寄与するガラス基板に関連している。プラスチック基板で構成される液晶パネル 36 ~ 42 の実施態様は、重量の増加に対する一つの解決策である。他の実施態様は、非常に薄いプラスチック基板上にロール・ツー・ロール法で MOE 装置 32 の光学要素を製造し、連続して非常に低いコスト方法によって製造される処理方法を使用することを含む。

40

**【0059】**

MOE 装置 32 に対してこのような比較的軽量の部品を使用すると、MOE 装置 32 も、動作中でない場合、MVD システム 10 が携帯であり得るように折り畳み式であってもよい。さらに、光学要素 36 ~ 42 は、さらに、あるいはスピコーティングあるいはディ

50



ップコーティングによって有機的に塗布されるITO層のような液晶技術の代わりに、他の無機材料を含んでもよい。

【0060】

高フレームレート画像プロジェクタ

MVDシステム10によって生成された3次元画像34、56の最大解像度および色深さは、高フレームレート画像プロジェクタ20の解像度および色深さによって直接求められる。MOE装置32の役割は、主に画像プロジェクタ20からの一連の2次元画像を3Dボリュメトリック画像に変換することにある。

【0061】

一実施形態では、画像プロジェクタ20は、短いアークを有するアークランプ光源を含む。ランプからの光は、カラー分離光学素子によって赤成分、緑成分および青成分に分離され、3つの分離空間光変調器(SLM)を照明するために使用される。SLMによる変調後、3つのカラーチャンネルは、単一ビームに再結合され、スライス24~30からの各それぞれの2次元画像が、光学要素36~42の中の1つに表示されるように、集束レンズのような光学素子22からMOE装置32に投影される。

【0062】

代替の実施形態では、画像プロジェクタ20は、アークランプおよびカラー分離光学部品の代わりに高出力固体レーザを含む。レーザ光源は、効率が高いこと、ビームの指向性が高いこと、および単一波長動作をすることを含む複数の利点を有する。さらに、レーザ光源はかなり飽和した明るい色を生じる。

【0063】

さらにもう一つの実施形態において、もし高速動作が得られるとすれば、異なる技術は、SLMを実施するために使用されてもよい。例えば、高速液晶装置、マイクロ電気機械(MEMS)装置に基づく変調器、あるいは他の光変調方法は、このような高フレームレートイメージングを行うために使用されてもよい。例えば、テキサス州ダラス市にあるテキサスインスツルメンツ(TEXAS INSTRUMENTS)社のデジタルライトプロセッシング(DLP)技術、カリフォルニア州のサニーベール市にあるシリコンライトマシズ(SILICON LIGHT MACHINES)社の回折格子光弁(GLV)技術、コロラド州のボルダーにあるボルダーノンリニアシステムズ(BOULDER NONLINEAR SYSTEMS)社のアナログ強誘電型LCD装置は、画像プロジェクタ20によって出力するための画像を変調するために使用されてもよい。さらに、SLMは、強誘電型液晶(FLC)装置であってもよく、FLC SLMの偏光バイアスが実施されてもよい。

【0064】

MVDシステム10の非常に高い解像度の画像を得るために、画像44~50は、各対応する画像を光学要素上に適当な深さで表示するために、MOE装置の各対応する光学要素上に適切に迅速に再集束されねばならない。このような再集束要求を満たすために、<http://guernsey.et.tudelft.nl/focus/index.html>でインターネットで利用可能であるG. Vdo vin著「マイクロマシン適応ミラーを使用するイメージング光学部品的高速集束(Fast focusing of imaging optics using micro machined adaptive mirrors)」に記載された、高速集束装置のような当該技術分野で知られている装置であってもよい適応光学系が使用される。図8に示されるように、膜光変調器(MLM)90は、制御できる反射および集束特性を有する鏡の役目を果たす薄い可撓性膜92として有する。膜92は、プラスチック、ニトロセルローズ、「マイラー(MYLAR)」、あるいはそれから張力の下で、反射性である金属コーティングの導電性反射層で被覆されているアルミニウムのような金属膜で構成されてもよい。電極および/または圧電アクチュエータ94は、膜92にほぼ隣接しているように置かれている。電極94は、膜92の表面に対して2次元で延びるように、平坦あるいはほぼ平面であってもよい。膜92は、円形リングのような楕円取り付けリングのような取り付け構造96によって、電極94にほぼ隣接して取り付けられている。

【0065】

電極94は、電圧源98からの約1,000ボルトのような高圧に置かれることができる

。この電圧は、膜 9 2 を引き付けるおよび / またははね返すように所望の範囲内で変えられてもよい。アース 1 0 0 に接続することによってアース電位にあってもよい膜 9 2 は、このように静電引力によって歪められ、変形させられて、放物状のような曲げられた形状になる。そのように変形される場合、膜 9 2 は、焦点距離、したがって電極電圧を変えることによって高速に変えることができる投影距離を有する集束光学素子として働く。例えば、膜 9 2 の曲面は、曲げられた膜 9 2 の曲率半径の半分に等しい焦点距離を有してもよく、この曲率半径は、膜 9 2 上の張力、膜 9 2 の材料の機械的特性、膜 9 2 および電極 9 4 の分離、電極 9 4 に印加された電圧によって決定される。

#### 【 0 0 6 6 】

一実施形態では、膜 9 4 の偏位は常に電極 9 4 に向かう。別法では、電極 9 4 から膜 9 2 の反対側の透明導電層を有する窓を設置し、次に一定電圧を窓に加えることによって、膜 9 2 は両方向に、すなわち、電極 9 4 から離れてあるいは電極 9 4 の方へ偏位させられるので、より大きい範囲の集束画像を可能にする。複数の方向のこのような膜 9 2 のこのような制御された変化は、例えば、S P I E 会議議事録 ( S P I E CONFERENCE PROCEEDINGS ) V O L . 75, pp97-102 (1976) で Martin Yellin による論文に記載されている。

10

#### 【 0 0 6 7 】

M L M 9 0 の偏向の光学効果は、投影光学部品 2 2 によって拡大され、物体平面からの投影画像を、高再集束レートの画像プロジェクタ 2 0 から様々な距離で集束させてもよい。さらに、M L M 9 0 は、その全集束範囲にわたってほとんど一定の画像倍率を保持できる。

20

#### 【 0 0 6 8 】

図 9 を参照すると、M L M 9 0 は、例えば、画像を投影光学部品 2 2 に集束するために、1 / 4 波長板 1 0 4 およびビームスプリッタ 1 0 6 に隣接している適応光学系 1 0 2 に組み込まれてもよい。物体あるいは物体平面 1 1 2 からの画像 1 1 0 は、ビームスプリッタ 1 0 6 によって水平方向に偏光される偏光子 1 0 8 を通過するので、1 / 4 波長板 1 0 4 を通過し、反射および集束するために膜 9 2 に入射する円形偏光された光を生じる。反射後、このような集束画像 1 1 4 は、入射光 1 1 0 の方向に対して 9 0 ° 偏光された光 1 1 4 を生じる 1 / 4 波長板 1 0 4 を通過し戻される。次に、ビームスプリッタ 1 0 6 は、光 1 1 4 を投影光学部品 2 2 の方へ反射し、物体の画像を形成する。1 / 4 波長板 1 0 4 および偏光子 1 0 8 を M L M 9 0 とを併用することによって、適応光学系は、M L M 9 0 を軸ずれでおよび / または投影レンズ 2 2 からの距離に取り付けることを避ける比較的コンパクトな形状に折り畳まれてもよい。

30

#### 【 0 0 6 9 】

この画像は、投影光学部品 2 2 から垂直な投影平面 1 1 6 に対する垂直距離  $F_N$  に集束されてもよく、最小投影平面 1 1 8 からの最小距離  $F_{M I X}$  対投影光学部品 2 2 から最大投影平面 1 2 0 に対する最大距離  $F_{M A X}$  間で、高速に再集束されてもよく、画像の高解像度が保持される。

#### 【 0 0 7 0 】

図 1 0 に示されるように、M L M 9 0、1 / 4 波長板 1 0 4、および偏光子 1 0 8 を有する適応光学系を含む画像プロジェクタ 2 0 は、2 D スライスが少なくとも 1 つの光学要素上に集束されるように、2 D スライスが M O E 装置 3 2 の光学要素 3 6 ~ 4 4 間のスペーサ 1 2 2 上に入射しないように高集束精度で、3 D 画像の個別の 2 D スlice を個別の光学要素 3 6 ~ 4 2 上にこのように選択的に、高速に投影してもよい。

40

#### 【 0 0 7 1 】

図 9 および図 1 0 を参照すると、他の代替の実施形態では、画像プロジェクタ 2 0 は、物体平面 1 1 2 からの光 1 1 0 を変調する複数のピクセル 1 2 6 を有する S L M 1 2 4 を含む。切り換えることができる 1 / 2 波長板が、9 0 ° だけ向きが異なる S L M 1 2 4 の前部基板および後部基板上に配向層を生成することによって形成されるツイステッドネマティック ( T N ) S L M が使用されてもよい。T N S L M の液晶は、各表面上の配向層に配向し、次に、2 つの基板間で滑らかに結合し、1 / 2 周期のらせんを形成する。らせん

50

のピッチは光の波長近くに選択され、らせんは、1/2波長板の役目を果たし、入射光偏光を90°だけ回転させる。TN SLMに十分な強度の電界の印加によって、2つの基板間の大部分の液晶材料は、基板に垂直な点に再度配向し、らせんを巻き戻し1/2波長板を無効にするので、入射光の偏光の回転を除去する。固有偏光がTN液晶材料にないことによって、TN SLMは、印加電圧の符号に影響を受けなく、電圧のどちらかの符号は波長板の働きで同じ減少を生じるので、TN SLMは、印加電圧の大きさによって決まる遅延を有する波長板の役目を果たす。

#### 【0072】

別法として、図11に示されるように、SLM124は、複数のピクセル126で構成される強誘電型液晶(FLC)ベースの装置であってもよく、各ピクセル126はシリコン基板130のような半導体基板上に置かれたFLC材料128を有し、電極132はそれとの間に置かれている。電極132はアルミニウムで構成されてもよい。透明導体134は、FLC材料128の上に配設され、2.5Vの作動電圧のような電圧源に接続されている。例えば、ガラスで構成されるカバーライド136は、透明導体134上に置かれている。

10

#### 【0073】

このようなピクセル126で構成されているFLC SLMは、例えば、電極128と導体134間への電界への印加が、入射光の偏光の回転を生じるツイステッドネマティック(TN)SLMと同様に作動する。回転度は印加電圧に比例し、0°~90°まで変わる。偏光子108のような外部偏光子と組み合わせると、SLM124の偏光回転は入射光の輝度変調を生じる。

20

#### 【0074】

TN SLMと違って、FLC SLMは、印加電圧とは無関係の遅延を有する波長板を形成する所望の厚さを有するFLC SLMを生じる固有偏光を有する。FLC SLMは、印加電圧の大きさおよび符号の両方によって決まる向きを有する波長板の役目を果たす。

#### 【0075】

図11のFLC SLM124のピクセル126に関して、FLC SLM124の1/2波長板は、水平基準軸に対して約22.5°である電力供給されていない状態の(un-powred)向きを有するように一般的に実施され、入射光偏光の45°回転を生じる。電力が供給される場合、透明導体134は、ピクセル126の電極132の電圧範囲の半分であってもよい2.5Vにバイアスされる。

30

#### 【0076】

図12~図14を参照すると、FLC SLM124のピクセル126によって形成される1/2波長板の主軸の向きは、0°、45°および90°偏光をそれぞれ有するように0V、2.5V、および5Vのそれぞれで示されている。

#### 【0077】

TN SLMおよびFLC SLMの両方は正しい動作を維持するようにバランスされる直流(DC)にあるべきである。ピクセル126に連続するDC電界を加えることによって、ピクセル126を破壊する不純物イオン衝撃によって基板の配向層の破壊を生じる。このような損傷を防止するために、電界は、TN SLMの場合に約100Hz、およびFLC SLMの場合に約1Hz程度の周波数で周期的および/または不規則的に符号反転される。電界の符号に対するTN SLMの感度がないことによって、電界が反転されるとき一定の外観を有するTN SLMを通過する画像を生じる。しかしながら、FLC SLMは、通常、SLMがDCバランスされる場合に画像の黒領域が白に変わり、画像の白領域が黒に変わるグレースケール反転を生じる電界の符号に影響を受ける。

40

#### 【0078】

SLM124のDCバランス中のグレースケール反転を防止するために、入射光の偏光は、ピクセル126への電界の印加によって引き起こされる正負の画像が同じ外観を有するようにバイアスされる。SLM124および/または個別ピクセル126は、SLM12

50

4の前に入射光110を受光するように置かれている静止1/2波長板138を有する。波長板138は、入射光の偏光の22.5°回転を行うように向けられ、生じるグレイスケールは電極132に印加される0Vあるいは5Vのいずれかに対して最大輝度を有し、2.5Vが電極132に印加される場合に最大輝度を有する。代替の実施形態では、波長板138を包含することによって最大輝度の減少を防止するために、偏光バイアスされたFLC SLM124の最大輝度が波長板138なしにバイアスされていないSLMの最大輝度に一致させることができる45°の静止配向を有するFLC材料128が使用されてもよい。

#### 【0079】

前述されているように、画像プロジェクタ20の代替の実施形態では、物体平面112の彩色されたおよび/または固体のカラー生成レーザのようなレーザが使用されてもよい。このようなレーザは、例えばCDROMならびにレーザビデオシステムのような他の情報記憶および検索技術で現在で使用可能である青および緑の固体レーザを組み込んでもよい。

#### 【0080】

画像プロジェクタ20の1つの代替の実施形態では、適応光学部品は、深さで用いられておらず、その代わりに観察者12の方へあるいは観察者12から離れて移動されてもよい3D画像を生成するように、ヘッドアップディスプレイで使用されてもよい。MOE装置32を使用しないで、2D画像スライス24~30は、正しい深さで表示するために観察者12の目の中に直接投影されてもよい。このようなスライス24~30を観察者12に高速に表示することによって、3D画像は観察者12によって認知される。MVDシステム10のこの実施形態では、画像プロジェクタ20の適応光学部品および他の部品は、ヘルメット装着形ディスプレイ用のまたはコックピットでの既存のヘッドアップディスプレイ、あるいは車両のダッシュボード装着形システムに組み込まれるように非常にコンパクトであってもよい。

#### 【0081】

代替の実施形態では、スライス24~30は、画像44~50のいくつかが、単一光学要素に対応する単一深さでの代わりにMOE装置32の深さの範囲にわたって画像を表示することによって、深さをオーバーサンプリングするために光学要素36~42の2つ以上にそれぞれ表示されるように生成され、投影されてもよい。例えば、MOE装置32が画像スライス24~30の数よりも多くの光学要素36~42の平面を有する場合、オーバーサンプリングは有利であるので、画像44~50の数は画像スライス24~30の数よりも大きい。例えば、スライス24は、光学要素36~38の両方に画像44~46のそれぞれとして表示した。このようなオーバーサンプリングは、光学要素36~42の数あるいは画像プロジェクタ20のフレームレートを増加させないで、より連続している外観を有する3D画像34を生成する。このようなオーバーサンプリングは、例えば、それぞれの不透明な複数の光学要素上へのそれぞれの複数の投影サイクル中、単一の投影スライスを受け取るように複数の光学要素を不透明な状態に切り換えことによって実行されてもよい。

#### 【0082】

多平面データセットからの3D画像の生成  
3D画像34を形成するように2D画像44~50のセットとして表示される2D画像スライス24~30のセットを生成するために、多平面データセットは、グラフィックスデータ源16からMVDコントローラ18によって受信された3D画像データから生成される。スライス24~30の各々は、MOE装置32内の適切な深さで表示される。すなわち、スライス24~30は、光学要素36~42の特定の1つに選択的に投影される。3D画像34のスライス24~30が十分接近して作られている場合、画像34は連続している3D画像であるように見える。本明細書に記載されている任意の多平面アンチエリアシングも、3D画像34の連続している外観を強調するために使用されてもよい。

#### 【0083】

多平面データセット(MPD)を計算する方法は、MVDシステム10によって実行され

る。特に、MVDコントローラ18は、このような方法を実行し、グラフィックスコンピュータであってもよいグラフィックスデータ源16のフレームバッファの色バッファおよび深さ(すなわちz)バッファからの情報を結合する。この方法は一定の深さ動作およびアンチエイリアシングも含む。

#### 【0084】

図15を参照すると、この方法は、ステップ140において応答し、GUIあるいは任意のユーザフィールドバック装置58によるようなMVDシステム10を操作するユーザ12と対話し、表示される画像を選択および操作する。このような操作および/または対話から、MVDシステム10は、例えば、MVDコントローラ18のメモリであってもよいフレームバッファに記憶された画像データからの画像レンダリングをステップ142において実行する。フレームバッファは、色バッファおよび深さバッファのようなサブバッファを含んでもよい。通常のレンダリング処理中、グラフィックスコンピュータは、深さバッファの同じ(x, y)位置の各ピクセルのカラーおよび深さを計算する。新しいピクセルの深さが予め計算されたピクセルの深さよりも小さい場合、新しいピクセルは観察者により接近しているので、新しいピクセルのカラーおよび深さは、それぞれ色バッファおよび深さバッファの両方の古いピクセルのカラーおよび深さと取り換えられる。一旦シーンの全ての物体がイメージングのためのデータセットとして表現されると、この方法はステップ144~152において連続する。別法としてまたはさらに、フレームバッファの描写画像は、ポリメトリック3D画像34のような3D画像の生成の準備としての2Dコンピュータスクリーン上の3D画像として観察者12に表示されてもよいので、観察者12は、どの画像が3D画像34として生成するかを選択できる。

#### 【0085】

MVD計算のための方法を実行する際に、色バッファからのデータはステップ144において読み出され、深さバッファからのデータはステップ146において読み出される。フレームバッファは、例えば、光学要素36~42のピクセル寸法によって決定されてもよい所望の画像スライス24~42のサイズと同じ、x寸法およびy寸法のピクセル数を有してもよい。寸法当たりのピクセル数がフレームバッファと画像スライス24~30との間で同じでない場合、色バッファおよび深さバッファのデータは、画像スライス24~30の所望のピクセル寸法を有するMVDシステム10と同じ解像度を有するようにステップ148においてスケールされる。MVDコントローラ18は、前述のようにスケールされたデータであってもよい色バッファおよび深さバッファのデータから生成された最終MPDを記憶するメモリの出力バッファを含む。

#### 【0086】

出力バッファは、2D画像に対応するデータのセットを記憶し、このような2D画像は、スライス24~30によって投影される画像44~50と同じ解像度およびカラー深さを有する。好ましい実施形態では、画像44~50の数は、MOE装置32の光学要素36~42によって形成される平面数に等しい。MPD計算が完了され、2D画像のピクセルがステップ150において出力バッファに記憶された後、出力バッファは、画像プロジェクタ20のメモリに保持されてもよいMVD画像バッファに転送される。画像プロジェクタ20からの2D画像は、前述されるように、観察者12によって観察される3D画像34を形成するために画像スライス24~30に変換される。次に、この方法は、例えば3D画像34の生成と同時にステップ140にループバックし、新しい入力を処理し、それゆえ3D画像34を更新あるいは変更し、例えば動画3D画像を生成する。

#### 【0087】

MVDシステム10は、2つのモード、すなわち可変深さモードおよび固定深さモードで作動してもよい。可変深さモードでは、深さバッファは、MVDシステム10による3Dポリメトリックイメージングより前に、別個の2Dスクリーン上の3D画像の極端な深さの値に対応してもよい最大深さ値 $Z_{MAX}$ および最小深さ値 $Z_{MIN}$ を決定するために、ステップ146を含むMPD計算より前に試験される。固定深さモードでは、 $Z_{MAX}$ および $Z_{MIN}$ は、MVDシステム10によって生成される3D画像34の前部境界およ

び後部境界のそれぞれを示すために対話形式で、あるいはアプリケーション起動中のいずれかで観察者12によって割り当てられた値である。可変深さモードによって、2Dスクリーン上で見ることができる物体の全ては、このような物体を有するシーンの対話式操作による深さの範囲あるいは画像深さの変化に関係なくMOE装置32に表示できる。

**【0088】**

固定深さモードでは、このような物体はMOE装置32の仮想深さの範囲外にあってもよいので、2Dスクリーン上で見ることができる物体は、MOE装置32で見えなくてもよい。固定深さモードの代替の実施形態では、MOE装置32の「背部」あるいは最も後部の光学要素の外側にあるように決定されてもよい画像ピクセルは、その代わりに、観察者12に対して、最も後部の光学要素上に表示されてもよい。例えば、図1の観察者12の観点から、この光学要素36は、遠い画像が投影されてもよい最も後部の光学要素である。このように、物体の全シーンは目に見えるままであるが、 $Z_{MAX}$  および  $Z_{MIN}$  間の深さを有する物体だけは、MOE装置32によって生成されるポリメトリック3D画像において見える。

10

**【0089】**

本明細書に示されたMPD方法では、 $Z_{MAX}$  および  $Z_{MIN}$  の値を使用して、深さバッファ内の深さ値は、ステップ148においてオフセットされ、スケールされるので、 $Z_{MIN}$  の深さを有するピクセルは0のスケールされた深さを有し、 $Z_{MAX}$  の深さを有するピクセルは、MOE装置32の光学要素36~42の平面数に等しいスケールされた深さを有する。ステップ150において、スケールされた深さを有するこのようなピクセルは、そこで、スケールされた深さ値  $d_i$  の整数部  $[d_i]$  を試験し、色バッファからのカラー値を同じ  $(x, y)$  座標の適切なMPDスライス24~30に割り当てることによって出力バッファ内で分類され、記憶される。このカラー値は関連ピクセルあるいはボクセルの輝度を指示してもよい。

20

**【0090】**

上述したことに基づき、当業者には、MOE装置32の光学要素36~42の選択されたサブセットを使用することにより、同じ効果を達成することができるということが明らかとなる。しかしながら、好ましい実施形態では、MOE装置32のすべての光学要素36~42を利用する。

**【0091】**

上述したように、ボクセルとトライデルとの区別を考慮して、仮想空間からのトライデルの深さをディスプレイ内のそのボクセル深さ座標にマップするプロセスは、実際には2つのステップで生成する。第1のステップは、トライデルの仮想深さ座標 ( $z$ ) を多平面ディスプレイ内の実際の深さ座標 ( $z'$ ) に変換することを含む。第2のステップは、トライデルの連続した  $z'$  値を特定のディスプレイボクセル ( $k$ ) の別個の深さ座標  $k$  に変換することを含む。この理由は、後に明らかとなる。

30

**【0092】**

$z$  から  $z'$  への変換を、MVDコントローラ18において行うこともグラフィックデータ源16において行うことも可能である。この変換は幾分かディスプレイ依存であるため、好ましくは、ソフトウェア(アプリケーション、APIまたはデバイスドライバのいずれか)によるかまたはMVDコントローラ18内のグラフィックカードハードウェアによって実行される。同様に、 $z'$  から  $k$  への変換を、MVDコントローラ18かまたはグラフィックデータ源16において実行することができる。しかしながら、この変換は、ディスプレイの特定パラメータに依存するため、しばしば、MVDコントローラ18において、ハードウェアかまたはファームウェアのいずれかによって実行される。

40

**【0093】**

しかしながら、多平面フレームバッファが実際にはグラフィックデータ源16のグラフィックカードにあるシステムでは、 $z'$  から  $k$  への変換を、グラフィックカードハードウェアで実行しなければならない。この場合、グラフィックカードは、MVDコントローラ18に対して、その  $z'$  から  $k$  へのマッピング特性に関して、それらをトライデルのボクセ

50

ルへの処理中に使用することができるように問合せすることができなければならない。

【0094】

グラフィックデータ源16内の仮想深さ座標は、潜在的には、ボリュメトリックディスプレイの物理深さよりずっと深い範囲を有する可能性がある。たとえば、家および通りのシーンは、50mの仮想深さ範囲を有する可能性があるが、MOE装置32は物理的に0.3m深さでしかない可能性がある。さらに、トライデルの仮想深さ $z$ の物理深さ $z'$ へのマッピングは、一価であればいかなる関数形式をとってもよい。たとえば、上述した可変深さモードでは、もっとも単純なマッピングは、全仮想深さ範囲 $D_V$ をMOE装置32の深さ $D_D$ 内で $D_D / D_V$ に等しい一定スケールパラメータにより線形に適合するようにスケールするというものである。同様に、上述した固定深さモードでは、仮想空間の最初の0.3mを1の一定スケールでディスプレイにマップすることができる。 $D_D$ より大きい深さを有するシーンの部分は、表示しなくてもよく、または2D背景としてディスプレイの最深平面に描いてもよい。

10

【0095】

別の有用なマッピングは、非線形なマッピングであってもよく、低深さ値に対して高解像度を提供しより高い深さ値では低減した解像度を提供する。たとえば、平方根関数では、0近くで最高解像度が提供され、 $z$ が増大するにしたがい解像度が減る。 $D_V$ および $D_D$ に対する上記値を使用する例は、0~50mの範囲の $z$ に対し以下のマッピングを使用するというものである。

【0096】

20

【数1】

$$z' = \frac{D_D \sqrt{z}}{\sqrt{D_V}} = 0.0424 \sqrt{z}$$

【0097】

概して、 $z$ を $z'$ にマップするためにいかなる一価関数を使用してもよく、特定の画像またはアプリケーションに対し最も適当な $z$ から $z'$ へのマッピングをいかに行うかは、プログラマまたは観察者の判断に任される。

【0098】

30

MOE装置32内で画像を作成するためには、トライデルの所望の物理深さ $z'$ から別個のボクセル深さ $k$ を計算する方法が必要である。MOE装置32は、0と $D_D$ との間の物理深さの範囲を占有する複数の光学要素または画像平面(N<sub>planes</sub>)から構成される。最も簡単な場合では、それらの平面を、量 $= D_D / (N_{planes} - 1)$ だけ等しく間隔を空けることができる。これにより、 $z'$ と $k$ との関係が単純で、線形でかつ $k = z' /$ に等しくなる。しかしながら、時に、平面間の間隔を観察者からの深さが増大するにしたがって増大させることが望ましい場合がある。この場合、 $z'$ と $k$ との関係は非線形となる。たとえば、平面 $k$ と $k+1$ との間隔が

$$k = z_0 + z_1 k$$

によって与えられる場合、ディスプレイの深さ全体は、

40

$$D_D = (N_{planes} - 1) z_0 + (N_{planes} - 1)(N_{planes} - 2) / 2$$

であり、平面 $k$ の物理深さ $z'$ は

$$z' = z_1 k + z_0 / 2 \cdot k(k - 1)$$

である。

【0099】

上記式を、 $k$ に対して解くことにより、

【0100】

【数2】

$$k = \frac{1}{2} + \frac{\Delta_0}{\Delta_1} \left( -1 \pm \sqrt{1 - \frac{\Delta_1}{\Delta_0} + \frac{\Delta_1^2}{4\Delta_0^2} + \frac{2\Delta_1 z'}{\Delta_0^2}} \right)$$

【0101】

が得られる。

【0102】

検分することにより、上記式の負の根が明らかに非物理的な解である負の値を与えるため、正の根が、物理深さ  $z'$  からボクセル深さ  $k$  を計算するために使用すべきものであると判断することができる。ボクセル深さを、ボクセルデータがディスプレイに転送される際に「オンザフライで」上記式から計算することができるが、 $z'$  および  $k$  の両方の範囲が M O E 装置 3 2 の設計から既知となるため、事前計算されたルックアップテーブルを使用することがより効率的である場合がある。

10

【0103】

上記式から、概して結果として整数値が得られない、ということが留意される。これは、多平面アンチエリアシングが、仮想深さ  $z$  におけるトライデルに関連する深さ  $k$  におけるボクセルの輝度を 2 つの隣接するディスプレイボクセル間でいかにして分割することができるかを判断するために役立つため、許容可能である。  $k$  の整数部により、トライデルの輝度が割当てられる平面の対が確定され、  $k$  の小数部により、 2 つの平面間でいかに輝度が配分されるかが確定されるということを想起されたい。たとえば、  $(i, j)$  におけるトライデルが 5 . 3 4 に等しい  $k$  の値を有する場合、トライデルの輝度の 3 4 % が  $(i, j, 6)$  のボクセルに見られ、トライデルの輝度の 6 6 % が、  $(i, j, 5)$  のボクセルに見られる。

20

【0104】

開示された M P D 方法を使用すると、 M V D システム 1 0 によって生成されたボリュメトリック 3 D 画像 3 4 は不完全であってもよい。すなわち、このような物体あるいは部分が 2 D コンピュータスクリーン上の対応する 3 D 画像を観察する観察者の観点から見えない場合、その物体あるいは部分が完全に除去される。 M V D システム 1 0 によって生成されたボリュメトリックディスプレイでは、予め隠された物体が見えるようになるように、図 1 の観察者 1 2 が視角まで移動できる画像観察が行われるので、このような M V D システム 1 0 は、 3 D 画像の既存の 2 D 表示よりも有利である。

30

【0105】

代替の実施形態では、 M P D 方法は、スケーリングされた深さ値の分数部分、すなわち、そのようなピクセルのカラー値の分数をスライス 2 4 ~ 3 0 のセットの 2 つの隣接 M V D 画像スライスに割り当てる  $d_i - [d_i]$ 、を使用することによって、本明細書に示されるように、アンチエリアシングを実施してもよい。例えば、スケーリングされた深さ値が 5 . 5 であり、各スライスが個別の深さ値に対応する場合、ピクセルの輝度の半分はスライス 5 およびスライス 6 の各々に割り当てられる。一方、スケーリングされた深さが 5 . 2 5 の場合、スライス 5 はスケーリングされた深さに「より接近」し、カラー値の 2 5 % はスライス 6 に割り当てられるので、色値の 7 5 % はスライス 5 に割り当てられる。

40

【0106】

アンチエリアシングの異なる度合いは、異なる可視化タスクに適切であり得る。アンチエリアシングの度合いは一方の極値から変えることができるすなわち、カラー値を分数の深さ値の全てを使用する他方の極値に割り当てるために分数深さ値を無視するか、あるいはアンチエリアシングの度合いはこのような極値間の任意の値に変えることができる。このような可変アンチエリアシングは、スケーリングされた深さの分数部分をアンチエリアシングパラメータと乗算し、それから得られた値をアンチエリアシングパラメータの半分だけ負にオフセットすることによって実行されてもよい。最終カラー値は、 0 と 1 との間のように負にオフセットされた値を所定の範囲内であるように固定あるいはクランプすることによって決定されてもよい。 1 のアンチエリアシングパラメータは、全アンチエリアシ

50



ングに対応し、無限大のアンチエリアシングは全くアンチエリアシングに対応しない。1よりも小さいアンチエリアシングも実施されてもよい。

【0107】

深さバッファ値をスケールリングする際に、レンダリング動作およびイメージング動作をサポートするグラフィックスハードウェアのオープングラフィックスライブラリ（OpenGL）マルチプラットフォームソフトウェアインタフェースで特定されるような透視投影図が使用されてもよい。このような透視投影図は、深さバッファに非線形の値を生じてもよい。3D画像34の仮想深さと可視深さとの間の正確な関係に関しては、MVDコントローラ18は、ステップ148においてスケールリングされた深さバッファ値をスケールリングするためにこのような非線形性を考慮する。別法として、正投影を、ステップ148において深さバッファ値をスケールリングするために使用してもよい。

10

【0108】

当業者には、オブジェクトまたはシーンを3次元で知覚する人間の視覚の能力に寄与する多くの要素があるということが理解されよう。これらの要素には、物理的視覚キュー（cue）と心理的視覚キューとがある。たとえば、物理的視覚キューは、限定されないが以下の物理的効果から生成する。

【0109】

シーンの3次元性は、各眼に対してわずかに異なる画像が提供されるという事実に関連する。この両眼効果すなわちいわゆる立体視は、脳が、見ているものに対して3次元性を与えるために処理する重要な物理的キューである。さらに、現実の3次元シーンを見る際、観察者の眼は、3次元シーン内の異なる深さに焦点を合わせる際にそれらの焦点を変化させなければならない。時に眼の焦点調節と呼ばれるこの眼の焦点合せの差は、脳が3次元シーンを見ていると結論を下すことを可能にする別の物理的視覚キューである。密接に関連する物理的キューは、眼の輻輳であり、これは、両眼が同じ点を向きそれに焦点を合せなければならないことを意味する。現実の3次元シーンを見る際、眼が3次元シーン内の異なる深さに焦点を合わせるのにしたがって眼の輻輳の量が変化する。これにより、見ているシーンが3次元であるという別の物理的キューが脳に提供される。

20

【0110】

物理的キューの別の例は、現実の3次元シーンでは3次元シーンの異なる部分を見るために観察者が移動する必要があるという事実から発生する。このいわゆる「画像回り込み（image look around）」すなわち運動視差は、見ているシーンが実際に3次元であるという知覚を脳に与える現実の3次元シーンに関連するさらに別の物理的キューである。

30

【0111】

上記効果によって例証されるような物理的視覚キューは、空間のボリューム内に作成されそれを占有するため、本明細書で開示するポリメトリック3次元画像に本質的に存在する。これらの物理的キューは、かかる画像を、3次元であるように見えるが実際にはテレビ画面またはコンピュータモニタ等の2次元ディスプレイ上にレンダリングされる画像とは区別する。

【0112】

本質的に、本明細書で開示するポリメトリック3次元画像ディスプレイは、測定可能であるが有限の深さを有する画像を生成させる。この深さを、含まれる複数の光学要素36～42の数および間隔を含む、MOE装置32の幾何学的特徴を変化させることによって、調整することができるが、MOE32によって生成されるポリメトリック画像の知覚される深さは、必然的に実際的な考慮によって制限される。

40

【0113】

本技術分野では、現実の3次元シーンを見る場合に脳に提供される物理的視覚キューに加えて、1つまたは複数の心理的キューを使用することにより2次元画像内に深さまたは3次元性の幻影を作成し際立たせることも可能であるということが知られている。限定ではなく例として、シーンの物体に対して深さの外観を与えるように適当なシェーディングおよび/またはシャドーイングによってシーンをレンダリングすることにより、心理的視覚

50

キューを提供することができ、それによりシーンに対して全3次元外観を与えることができる。

【0114】

一般的な心理学的視覚キューは強制透視 (forced perspective) を用いることによる。既存の2Dモニタでは、透視は、観察者からより遠い物体がより小さく見え、平行線が集中するように見えるように、深さの意味を作成する3Dデータの可視化において計算上生成される。開示されたMVDシステム10では、3D画像34は、前述の深さの意味を作成する計算上の透視で生成されるので、3D画像34の深さは強められる。

【0115】

さらに、シーン内の物体を、それらが、物体の観察者からの見かけ上の距離が増大するにしたがって解像度が低減する表面テクスチャを有するようにレンダリングすることにより、シーンに3次元外観を提供することができる。これにより、表面の外観に、シーン内の見かけ上の深さが増大するにしたがって増大する「曖昧さ (fuzziness)」が提供される。この心理的視覚キューに密接に関連するのは、風景等のシーンのレンダリング中に、遠方の物体に関連する不明瞭さの度合いを増大させることにより、または遠方の物体の色を、それらの見かけ上の距離が増大するにしたがって青色に向かってシフトさせることにより、雰囲気効果 (atmospheric effect) を追加することである。シーンに3次元深さの外観を与えるさらに他の心理的視覚キューは、遠方にあるものとして知覚される物体の輝度が低減することか、またはかかる物体の焦点が合わなくなることである。

【0116】

さらに別の心理的視覚キューは、閉塞の使用であり、それは、前景の物体によってより遠方の物体の一部が不明瞭になる可能性があることを意味する。ポリュメトリックディスプレイは、画像の前景部分が画像の背景部分からの光を遮ることができないため、3D画像内に真の物理的閉塞を提供することができない。このため、3D画像の前景部分と背景部分とがともに全体として生成される場合、前景部分を中実ではなく半透明に見えるようにして、背景部分を、前景部分を透かして見えるようにする。しかしながら、前景画像によって遮られる背景画像の部分を生成しないことにより、準閉塞効果をもたらすことができる。このため、少なくとも選択された観察軸を中心とする角範囲内で、この技術により見かけ上の閉塞効果を得ることができる。

【0117】

2次元ペインティングに3次元特性を与えること等を望む画家およびアーティストには、心理的視覚キューを使用することは既知であるが、本発明者は、かかる心理的視覚キューの組合せを、本明細書において開示するポリュメトリック3次元ディスプレイによって固有に提供される物理的キューと結合した場合、見かけ上の深さがMOE装置32の物理的深さを時に大きい率で超過することが可能な3D画像が提供されるということを見出した。

【0118】

たとえば、3Dボックスの内部の画像を、本明細書で開示するシステムにより3Dポリュメトリック画像にレンダリングすることができる。ボックスを幾何学的に正確な方法でレンダリングすることにより、ボックスの内部は、ディスプレイの深さ (すなわち、MOE装置32の深さ) より深くは見えない。しかしながら、ポリュメトリック画像を形成する前に3Dボックスのレンダリング中に強制的な透視を採用することにより (それによって画像のより深い部分が低減されたスケールでレンダリングされる)、3Dボックスを、3次元画像に他の方法で現れるより、大幅に深く見えるようにすることができる。

【0119】

別の例として、ポリュメトリックディスプレイ内で遠方に後退する道路の画像を、レンダリングプロセス中にローパスフィルタリングによって実施することができるように、ディスプレイの物理的な深さと、強制的な透視と距離に対する画像解像度の低減との両方の使用と、の組合せを通して、大幅により現実的に見えるようにすることができる。

【0120】

10

20

30

40

50

上述したことから明らかであるように、ポリュメトリック3D画像を形成するためにシーンを投影する前のシーンのレンダリング中に、他のものと同様に上述した心理的視覚キューの1つまたは複数を追加することが有利な場合がある。

**【0121】**

MVDシステムを実施する際、3D Studio Max、SoftImageおよびLightwave等の市販のソフトウェアアプリケーションを使用することにより、MVDシステム10内のレンダリングプロセス中に心理的視覚キューを追加することができる。これらのソフトウェアアプリケーションは、グラフィックデータ源16、MVDコントローラ18に存在してもよく、あるいは機能的にMVDコントローラ18の一部である別個のスタンドアロンプロセッサに含まれてもよい。例として、短い焦点深度に起因する背景ぼけは、シーンの複数のレンダリングを合成することによって追加することができる心理的視覚キューであり、各レンダリングは、カメラを焦点の周囲でわずかに枢動させることによってもたらされる。

10

**【0122】**

また、グラフィックデータ源16の入力プロセッサ、MVDコントローラ18またはMVDコントローラ18の一部である別個のプロセッサにより、ぼやけ、深さに対する光の青色シフト、深さに対する輝度の低減および焦点深度という心理的視覚キュー（すなわち、雰囲気心理的キュー）も、リアルタイムで追加することができる。より詳細には、ディスプレイのフレームバッファに転送される画像データを、異なる深さにおける画像が別々の記憶領域にあるように格納することができる。これにより、雰囲気キューをもたらしように深さ依存画像処理を実行することができる。たとえば、深い方の画像のコントラストを低減することにより、ぼやけを追加することができる。深い方の画像の色バランスを青色に向けてシフトさせることにより、青色シフトを追加することができる。深い方の画像の輝度を低減することにより、減光を追加することができる。焦点深度のいずれかの側において距離が増大する画像に対し強度が増大するガウスぼけフィルタを適用することにより、焦点深度ぼけを追加することができる。

20

**【0123】**

たとえば米国特許第5,886,818号明細書に述べられているように、空間中にフローティングしているように見えるように投影される拡張2D画像に関して、しばしば物理的および/または心理的深さキューを追加することにより、2D画像の表示を「3D」外観を与えるように向上させる。しかしながら、以前は、限定されないが上述したものを含む物理的および心理的深さキューもまた、本明細書で開示したシステムおよび技法によって生成されるポリュメトリック3D画像の3D外観を大幅に向上させることができるということは認識されていなかった。このため、これらのシステムおよび技法によってポリュメトリック3D画像が生成されるという事実にも係らず、画像レンダリングプロセス中に物理的および/または心理的深さキューをその3D画像に追加することにより、3次元においてかかるキューがない場合よりさらに現実的であるように知覚される3Dポリュメトリック画像が作成される。

30

**【0124】**

他の実施形態では、スライス24~30は、画像44~50のいくつかが単一の光学要素に対応する単一の深さでの代わりに、MOE装置32の深さの範囲にわたって画像を表示することによって深さをオーバーサンプリングするために、光学要素36~42の2つ以上にそれぞれ表示されるように生成され、投影されてもよい。例えば、MOE装置32が画像スライス24~30の数よりも多い平面の光学要素36~42を有する場合、オーバーサンプリングは有利であることもあるので、画像44~50の数は画像スライス24~30の数よりも多い。例えば、スライス24は、光学要素36~38の両方に画像44~46としてそれぞれ表示した。このようなオーバーサンプリングは、画像プロジェクタ20の光学要素36~42の数あるいはフレームレートを増加させないで、より連続する外観を有する3D画像34を生成する。このようなオーバーサンプリングは、例えば、それぞれの不透明な複数の光学要素へのそれぞれの複数の投影サイクル中、単一投影スライスを受け取

40

50

るように複数の光学要素を不透明な状態にあるように切り換えることによって実行されてもよい。

【0125】

MVDシステムの代替の実施形態

1つの代替の実施形態では、MOE装置32は、10個の液晶パネル36~42を含み、長さ5.5インチ(14cm)×幅5.25インチ(13.3cm)×奥行き2インチ(4.8cm)であるような寸法にされる。画像プロジェクタ20は、赤、緑および青の光を生じる一対のイオンレーザを使用する音響光学レーザビームスキャナを含んでおり、イオンレーザは、高周波数音波によって変調され、次に走査される。レーザスキャナは、200×200ポイントの解像度の毎秒166,000ポイントをベクトル走査することができる。40Hzで作動する10個の平面MOE装置32と結合される場合、MVDシステム10は、全部で400,000ボクセル、すなわち3D画素を有する3D画像を生成する。24ビットRGB解像度のカラー深さは、1Hzの画像更新レートで得られる。実像プロジェクタ54を使用すると、100°×45°の視野を得ることができる。

10

【0126】

他の代替の実施形態では、MOE装置32は、12個の液晶パネル36~42を含み、長さ6インチ(15.2cm)×幅6インチ(15.2cm)×奥行き3インチ(7.7cm)であるような寸法にされる。実像プロジェクタ20は、180Hzのフレームレートでグレースケール画像を生成するように、フィールド順次カラーモードで作動するようにデザインされた一対のテキサスインスツルメンツDLPビデオプロジェクタを含む。2つのプロジェクタをインターレースすることによって、有効的な単一プロジェクタは、30Hzのレートで12個の平面ポリュメトリック画像を生成するように360Hzのフレームレートで形成される。達成できる横方向解像度は640×480ポイントである。30Hzで作動する12個の平面MOE装置32と結合される場合、MVDシステム10は、全部で3,686,400ボクセルを有するグレイ3D画像を生成する。実像プロジェクタ54を使用すると、100°×45°の視野を得ることができる。

20

【0127】

さらなる代替の実施形態では、MOE装置32は、50個の液晶パネル36~42を含み、長さ15インチ(38.1cm)×幅13インチ(33.0cm)×奥行き10インチ(25.4cm)であるような寸法にされる。画像プロジェクタ20は、約10kHzの高速アナログ強誘電型LCDを含む。達成できる横方向解像度は512×512ポイントである。40Hzで作動する50個の平面MOE装置32と結合される場合、MVDシステム10は、全部で13,107,200ボクセルを有するグレイ3D画像を生成する。24ビットRGB解像度のカラーの深さは、10Hzの画像更新レートで得られる。実像プロジェクタ54を使用すると、100°×45°の視野を得ることができる。このような解像度および非インタフェースの40Hzのポリュームレートに関しては、MVDシステム10は、20インチ(50.8cm)対角線を有する従来のモニタに等価のディスプレイ機能を有する。

30

【0128】

別の実施形態では、光学要素36~42は、1280×1024の横方向解像度および256の平面の深さ解像度を有してもよい。このシステムは、37.5Hzのレートで更新される全ポリュームを有する75Hzの合計レートで交互の平面が書き込まれるインターレースされた深さモードで動作する可能性がある。このようなインターレースは、画像プロジェクタ20のフレームレートを増加させないで、より高い認知されたポリュームレートを提供する。

40

【0129】

他の実施形態では、MOE装置32は、著しく大きい深さ解像度、および20億ボクセルよりも大きいボクセル数を生じる2048×2048ピクセルの横方向解像度のために500個の平面を含む。この構成のMOE装置32のサイズは、41インチ(104cm)

50

対角線を有する従来のディスプレイに相当する長さ33インチ(84cm)×幅25インチ(64cm)×奥行き25インチ(64cm)である。本実施形態の画像プロジェクタ20は、20kHzのフレームレートを供給するシリコンライトマシンの回折格子光弁技術を含む。

#### 【0130】

##### 仮想対話アプリケーション

フォースフィードバックインタフェースとしてユーザフィードバック装置58を組み込むMVDシステム10の代替の実施形態によって、観察者12は、3D画像34、56がみえる同じ位置で、3D画像34、56の触覚および感覚を認知し、経験する。MVDシステム10は、高解像度3D画像34、56を生成できるので、仮想対話は、高解像度表面テクスチャおよび非常に硬い面、すなわち、観察者12による表面の一部の仮想現実感の動きの観点から抗力の大きいかつ/またはコンプライアンスが低くみえる面を生成するように、適切なフォースフィードバック装置を使用してMVDシステムで実施される。

10

#### 【0131】

したがって、ユーザフィードバック58は、高解像度位置エンコーダおよび高周波数フィードバックループを含み、観察者12の手の運動を、3D画像34、56の修正ならびに観察者12のフォースフィードバック感覚と調和させる。好ましくは、ユーザフィードバック装置58は、部品の減少された質量およびかさばりおよび関連重量ならびに慣性が最少限に観察者12の動きを邪魔するように、フォースフィードバック誘導グローブのような軽量で、コンパクトな仮想現実部品を含む。

20

#### 【0132】

このようなユーザフィードバック装置は、観察者12によって着用された任意の着用可能な部品の重量を劇的に減らす軽量炭素複合物を含んでもよい。さらに、非常にコンパクトで、非常に高い解像度光ファイバあるいは容量性位置エンコーダは、手および頭の向きのような観察者12の一部の位置を決定するために当該技術分野で知られているかさばった光学位置エンコーダの代わりに使用されてもよい。

#### 【0133】

観察者12に着用可能な部品は、ユーザフィードバック装置58を制御する埋め込みプロセスシステムを含むので、MVDコントローラ18および/またはインタフェース14の処理オーバーヘッドを軽くする。その唯一の仕事がインタフェースを実行することにある埋め込みプロセッサを使用することによって、全MVDシステム10のためのフィードバックレートは、100kHzよりも大きくてもよい。非常に高い解像度エンコーダと結合される場合、MVDシステムは、劇的な高忠実度フォースフィードバックインタフェースを有する。

30

#### 【0134】

このような仮想対話技術を、このようなポリュメトリック3D画像34、56を表示できるMVDシステム10と併用すると、3DGUIは、観察者12が3Dデータをアクセスし、直接操作できるように実施される。データグローブのような知られているインタフェース装置、ビデオジェスチャ認識装置、およびマサチューセッツ州のケンブリッジ市のMITメディア研究所(MIT MEDIA LAB)から入手できるフィッシュセンサ(FISH SENSOR)システムは、ユーザが、例えば、3Dグラフィックスおよびコンピュータ支援設計(CAD)システムで、3Dデータを直接操作できるように使用できる。

40

#### 【0135】

このような3D画像およびデータ操作に関しては、MVDシステム10は、マサチューセッツ州のローウェル市のスペーステック(Spacetec)社から市販されているスペースボールのような3Dマウス装置、ならびに観察者12が本当の空間で手を移動させるのと同じように画像34の周りの表示ポリューム領域において3Dカーソルをどこへでも移動させる3Dポイント装置も組み込んでよい。別法として、MVDシステム10は、ユーザフィードバック装置58により、観察者12の手の移動を3Dカーソルとして解釈してもよい。

50

## 【0136】

一実施形態では、ユーザフィールドバック装置58は、観察者12の手の位置および向きを感知する部品を含んでもよい。例えば、観察者12は、ポリマス(POLYHEMUS)社から入手できる磁気センサのような位置センサ、および/または仮想現実データグローブに組み込まれた位置センサのような他の種類のセンサを保持あるいは着用してもよい。別法として、手の位置は、コンピュータ画像処理あるいはMITメディア研究所で開発されたセンサのような無線周波数センサの使用により、3D画像34の表示ボリューム内で感知される。筋肉疲労を避けるために、ユーザフィールドバック装置58は、パーソナルコンピュータの2Dスクリーン上の2Dカーソルの位置を制御するためにデスクトップのフラットな表面上の従来の2Dマウスの2D移動と同様に表示された3D画像34から、物理的に離れていて非常に小さい感知空間の観察者12の手あるいは指の移動を感知してもよい。

10

## 【0137】

## MVDシステムの利点

MVDシステム10を使用して、3D画像34、56は、観察者12による自然観察を与えるように生成されるが、それは、すなわち、3D画像34、56が、現実の物体を観察することに関連する深さキューすべてを実質的に有し、目の過労を最小限度にし、疲労せずに延長された時間の間も観察することを可能にする。

## 【0138】

MVDシステム10は、当該技術分野において知られている数多くのポリュメトリックディスプレイ上の大きさの少なくとも1つの大きさの度合いである例えば、3,000,000よりも大きなボクセル数を提供するMOE装置32により、高度の解像度/ボクセル数を提供する。さらに、2D画像44~50のように画像スライス24~30を表示するように適応させた矩形の断面を有するMOE装置32などの、3D画像34を表示するために直線幾何学を、好ましくは使用することによって、MVDシステム10は、付加的な変換ソフトウェアを必要としないで、コンピュータ性能とディスプレイ更新レートを容易にしかつ最大限にする数多くの知られているグラフィックスコンピュータならびにグラフィカルアプリケーションプログラムの内部座標システムにマッチする1つの座標システムを使用している。さらに付け加えると、1つの好適な実施形態においては、MOE32の画像ボクセルは、同一かつ定常的な形状、大きさ、向きを有しており、それにより3D画像34における画像の歪みを消去する。

20

30

## 【0139】

当該技術分野において知られているマルチビュー自動立体ディスプレイとは異なり、MVDシステム10は、たった1つだけの代わりに複数次元における観察により3D画像を「見渡せる」ことを可能にする水平と垂直の両方の視差により広範な視野を提供する。さらに、マルチビュー自動立体ディスプレイとは異なり、MVDシステム10の視野は、全方向において連続的であり、それはすなわち、MOE装置32に対して観察者12が動く際に、3D画像34で混乱させるようなジャンプがない。

## 【0140】

さらに、MOE装置32における光学要素36~42の静的構成のため、MOE装置32の全体のバランスを喪失するような場合に、MOE装置32の画像の歪み、ディスプレイ振動、また破滅的な機械的障害をも結果的に生じる可動部品がない。

40

## 【0141】

MVDシステム10はまた、閉塞、すなわち、背景物体によって放射される光の前景物体による障害を避けることが可能である。コンピュータ上の閉塞と呼ばれる閉塞の1つの限定された形態は、画像構築と表示のレートを改善するため、特定の視点を取り上げて、またその後その視点からは見ることができない表面を単に描かないことによって作り出すことができる。しかし、観察者12が前景物体を見渡そうと試みる場合には、描かれなかった背景物体の部品は見えない。1つの実施形態においては、MVDシステム10は、背景光を吸収することにより閉塞を作り出す散乱状態にある他の光学要素とともに、1つの画像を表示する散乱している光学要素を散らばらせることにより、閉塞の欠如に対する補

50

償を行う。ゲストホストポリマー分散液晶は、染料が液晶分子と一緒に混合され、印加される電圧により材料の色が変化することを許容する光学要素 36 ~ 42 において使用することができる。

【0142】

MVDシステム10はまた、実画像プロジェクタ54を使用すると、MOE装置32まで達するハウジングを必要し、そのためMOE装置32に達する周囲光の量を減らすことになり、またそれによってコントラストグラデーションを防ぐことになるため、MVDシステム10の周囲の照明によるコントラストグラデーションをほとんど有していないに等しい。

【0143】

別法として、コントラストグラデーションは、周囲の照明に比例して画像プロジェクタ20からの照明を増加することにより、また観察可能なレベルにまで画像の明るさを減らすために、MOE装置32の周囲に吸収用プラスチックの囲いを取り付けることにより、減らすことができる。周囲光が、観察者12に達するには吸収用の囲いを2度通過しなければならない。一度は途中で、またもう一度はMOE装置32の光学要素36 ~ 42を散乱させた後である。反対に、画像44 ~ 50を形成する画像プロジェクタ20からの光は、観察者12への途中で吸収用の囲いの中を通過するだけであり、またそのため、周囲光により受ける損失の平方根の関数である照明の損失が減った。

【0144】

周囲光の影響を減らす代替の実施形態の1つは、赤、緑、青における3つの狭いスペクトルのバンドパスを付けた1つの囲いと、そうした周囲光の影響を減らすためには非常に効果的であるバンド外の光に対する高度な吸収材料を使用するものである。レーザー光源からの狭いバンドの光はMOE装置32から散乱した後も減衰されずに透過し、一方、周囲の照明から得られる広域バンド光はほとんどが吸収されるため、画像プロジェクタ20でレーザー光源を使用することにより、周囲光の点でより高い性能が得られる。

【0145】

MOE装置におけるアンチエリアシング

もう1つの代替の実施形態においては、図16を参照して、また本明細書に説明されているように、画像データの画像プロジェクタ20への送信の前に、またそこからMOE装置32の光学要素160 ~ 168までの送信の前に、MVDコントローラ18または別法としてグラフィックスデータ源16が、光学要素160 ~ 168上に3D画像34に表示されている特徴を円滑にするように、画像データ上で3Dアンチエリアシングを行うことができる。3Dアンチエリアシングを使用して、システム10は、z軸に対して垂直であるx-y平面に整列している光学要素160 ~ 168により、MOE装置32の固有の分離ボクセル構成により引き起こされる表示のピクセル化による例えば、z方向に沿って平行平面162 ~ 164の間にある深さの画像のきざきざになった線または不完全な領域を回避する。

【0146】

画像スライスに対応するデータが生成されると、画像素子170が平面移行部の1つの端の近傍に現れて、すなわち、光学要素の間、例えば、光学要素162 ~ 164の間に現れる。説明的な目的のためにのみ、図16 ~ 図18に示されている光学要素160 ~ 168とボクセル170の構造形態は、開示されているアンチエリアシングシステムおよび方法をさらに明らかに説明し図示するために誇張されており、またそのため、光学要素160 ~ 168は相対的にその間に小さな間隙を有していることが理解されるべきである。

【0147】

特定の画像素子170におけるかつプロジェクタ20から光学要素162 ~ 164上に照明される3D画像における突然の移行を避けるために、光学要素162 ~ 164上の各画像172 ~ 174が、それぞれ画像素子170または一部分あるいはその誘導形態を含むように生成することができ、したがって、画像素子170は、その移行を柔軟化し、またさらに図1の3D画像34が連続的にみえることを可能にする光学要素162 ~ 164に

10

20

30

40

50

より形成される両方の平面の間で共有される。それぞれ連続的になっている光学要素 162 ~ 164 上の画像素子 172 ~ 174 の輝度は、画像データにおける画像素子 172 ~ 174 の位置により変わる。

【0148】

図 16 を参照すると、光学要素 160 ~ 168 の数  $N$  は、平面 LCD 表面 (複数) になっていて、したがって、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $\dots$ 、 $P_N$  と標識され、また MOE 装置 32 の幅である距離  $D$  にわたっている。したがって、光学要素 160 ~ 168 それぞれは、 $D_N - D_1 = D$  となるように、共通基準点から  $z$  軸に沿って距離  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $\dots$ 、 $D_N$  の間隔で配置されることができる。例えば、共通基準点は、プロジェクタ 20 に対して  $z$  軸に沿ってもっとも近い光学要素 160 であり、したがって  $D_1 = 0$ 、また  $D_N = D$  であることができる。別法として、光学要素 160 ~ 168 の距離は、プロジェクタ 20 のレンズ 22 から測定され、したがって光学要素 160 からの相対的距離を得るために、光学要素 160 とレンズ 22 からのオフセット距離  $D_{OFFSET}$  が、レンズ 22 からの光学要素 160 ~ 168 の絶対的距離  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $\dots$ 、 $D_N$  から減算される。したがって、 $D_1 = D_{OFFSET}$  となる。光学要素 160 ~ 168 はまた、その間の均一な間隙  $S$  を有してもよい、あるいは別法として、光学要素 160 ~ 168 の間の間隙は変化してもよい。

10

【0149】

本明細書に説明されているように、各ボクセル 170 の深さ値は、レンズ 22 あるいは光学要素 160 のいずれかにおいて、基準点から  $z$  軸に沿って測定され、またそうした深さ値は、色バッファのなかに格納されている関連する色値とともに深さバッファのなかに格納されている。例えば、深さ値  $D_V$  は、ボクセル 170 と関連している。

20

【0150】

アンチエリアシングを実施するために、またしたがって光学要素 162 ~ 164 の間に横たわっているボクセル 170 の外観を円滑にするために、深さ値  $D_V$  と光学要素 162 ~ 164 の間の距離  $D_A$ 、 $D_B$  がそれぞれ測定され、そうした距離はアンチエリアシングパラメータを生成するのに使用される。アンチエリアシングパラメータは、その後、2つのボクセル 172 ~ 174 のそれぞれの色値を生成するために、アンチエリアシングパラメータにより修正されたボクセル 170 に対応している色値が、光学要素 162 ~ 164 上の2つのボクセル 172 ~ 174 をそれぞれ生成するのに使用される。

30

【0151】

図 17 はアンチエリアシングを使用していない、1つのボクセル表示を示している。図 17 に示されているように、光学要素 162 上のボクセル 176 ~ 178 と、光学要素 164 上のボクセル 180 ~ 184 は、ボクセル 178 ~ 180 により規定されている境界で急峻な移行を形成する。光学要素 162 ~ 164 の間の距離が大きい場合には、画像 34 の目立ったぎざぎざな、あるいは断続的な外観が、表示されたボクセル 176 ~ 184 の組み合わせにより形成される可能性がある。例えば、ボクセル 178 は光学要素 162 により近いが、光学要素 162 の上になく、またボクセル 180 は光学要素 162 により近いが、光学要素 162 上にないといった、ボクセル 178 ~ 180 が、光学要素 162 ~ 164 の間の深さ値を有することもある。こうした中間的な深さ値はその後、ボクセル 178 ~ 180 を表示するために、光学要素 162 ~ 164 の分離深さ値  $D_2$ 、 $D_3$  にそれぞれ変換されてもよい。さらに、図 17 におけるボクセル 178 ~ 180 の色値は変わらず、したがってこのボクセル 178 ~ 180 の色の強度は、このように異なった光学的深さでは異常に見えることもある。別法として、移行部のボクセル 178 ~ 180 は、それらの中間的な深さのため除外されるが、ボクセル 176 と 182 ~ 184 で構成される 3D 画像 34 には、穴あるいは破損があるように見える。

40

【0152】

アンチエリアシングを使用して、図 18 に示されているように、両方の移行ボクセル 178 ~ 180 を、光学要素 162 上に表示されているボクセル 178A ~ 180A と光学要素 164 上に表示されているボクセル 178B ~ 180B とともに、新しいボクセル 17

50



8 A ~ 178 B と、180 A ~ 180 B を生成するのに使用してもよい。さらに、図 18 に示されているように、ボクセル 176 と 182 ~ 184 の色値は変化しないように修正されるが、アンチエリアシングを実施することにより、新しいボクセルの色値が、新しいボクセル 178 A ~ 178 B と 180 A ~ 180 B がそれぞれ、異なった深さにわたって x - y 平面における画像の移行を柔軟化するために調節された色を有するように、修正されることがある。したがって、図 19 に示されているように、ボクセル 176 ~ 184 は、図 17 にある画像に関して曲線 176 により見かけ上の深さで突然の移行が行われるが、図 18 にあるボクセル 176、178 A ~ 178 B、180 A ~ 180 B、182 ~ 184 は、曲線 188 により見かけ上の深さで相対的により円滑な移行が行われる。説明的な目的のみのために、曲線 186 ~ 188 は、曲線 186 ~ 188 を明瞭に示すために、  
 図 18 に重ね描きされてはいないことに留意すべきであり、したがって、図 18 において、ボクセル 176 と 182 ~ 184 の見かけ上の深さは、アンチエリアシングをするしな  
 いに関わらず同一であることに留意されたい。

10

## 【0153】

図 19 においては、図 18 のボクセル 178 A ~ 178 B は、ボクセル 178 A ~ 178 B の深さの中間にあって、また光学要素 162 上にはないが、そのより近傍にあるように、図 17 のボクセル 178 の元の深さに対応している見かけ上の深さ 178 C をもって、光学要素 162 ~ 164 にわたる画像を形成する。同様に、図 18 のボクセル 180 A ~ 180 B は、ボクセル 180 A ~ 180 B の深さの中間にあって、光学要素 164 上にはなく、その近傍にあるように、図 17 のボクセル 180 の元の深さに対応している見  
 かけ上の深さ 180 C をもって、光学要素 162 ~ 164 にわたる画像を形成する。

20

## 【0154】

アンチエリアシングは、もっとも近傍の境界光学要素に限定されていないが、その代わりに、ボクセル 178 ~ 180 は、それぞれの複数の光学要素 160 ~ 168 上に対応する複数のボクセルを生成するのに使用してもよく、したがって、例えば、図 19 の曲線 188 よりも円滑である深さ移行曲線を提供するために使用してもよい。例えば、アンチエリアシングによる深さ移行曲線 188 は、シグモイドあるいはタンジェント関数に近似することが可能である。

## 【0155】

図 16 を参照すると、ボクセル 170 のアンチエリアシングを実施するために、少なく  
 とも 1 つの光学要素からボクセル 170 までの距離の関数である少なくとも 1 つの深さ調節値 1 が生成される。1 つの実施形態においては、各光学要素 162 ~ 164 からの距離  $D_A$ 、 $D_B$  のスケーリング値の関数である調節値 1、 $m$  が生成されてもよい。調節値 1、 $m$  はその後、ボクセル 170 の x - y 位置に等しい光学要素 162 ~ 164 上の各 x - y 位置を有するボクセル 172 ~ 174 とともに、新たに生成されたボクセル 172 ~ 174 に関連している新しい色値  $C_A$ 、 $C_B$  を生成するように、ボクセル 170 に関連する色値  $C_V$  を修正するのに使用される。

30

## 【0156】

1 つのボクセルの色値は、表示されるべきボクセルの輝度を少なくとも特定することができる。別法として、ボクセル 170 を、色づけしたボクセルの輝度を特定する少なく  
 とも 1 つのスカラを含むパラメータのセットに関連させることが可能である。したがって、色値の修正が、調節値による色値の乗算によって実施され得る。例えば、色値  $C_V = 12$  輝度単位および調節値  $= 0.5$  に関しては、修正色値  $C_A$  は、 $C_V = (12 \text{ 輝度単位}) \times (0.5) = 6 \text{ 輝度単位}$  であるとして求められる。

40

## 【0157】

1 つの実施形態においては、距離  $D_V$  は、1 から N までの深さ値であるようにスケーリングされ、N は光学要素 160 ~ 168 の数であり、例えば、図 16 に示されているように、標識  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $\dots$ 、 $P_N$  に対する指標として、各整数値 1 ~ N が光学要素 160 ~ 168 の特定の 1 つに対応している。調節値 1、 $m$  はスケーリングされた深さ値から求められる。光学要素 160 ~ 168 が距離 D に沿って定常間隔 S をもって一様な間隔

50

で配置されている場合には、すなわち、

$$S = D / (N - 1) \quad (1)$$

したがってボクセル 170 のスケーリング距離は、

$$D_{SCALED} = (D_V - D_{OFFSET}) / S + 1 \quad (2)$$

であり、ここでは、 $D_V$  はレンズ 22 ないし他の基準点から測定された絶対距離である。

例えば、レンズ 22 が z 軸の原点であれば、光学要素 160 は距離  $D_1 = D_{OFFSET}$  にあることになる。

#### 【0158】

$D_{SCALED}$  は、 $1 < D_{SCALED} < N$  であるような実数値であり、したがって 0 と 1 の間の範囲にある  $D_{SCALED}$  の分数部分は、光学要素 162 ~ 164 からの相対距離を示す。z 軸に沿っていずれの側にもボクセル 170 と接している光学要素 162 ~ 164 に関しては、光学要素 162 ~ 164 の指標はそれぞれ、

$$[D_{SCALED}] \text{ および} \quad (3)$$

$$[D_{SCALED}] + 1 \quad (4)$$

であり、ここで、 $[X]$  は、1 つの値あるいは変数  $X$  のフロアあるいは整数関数であり、すなわち、 $X$  未満の最大整数を返す関数である。

#### 【0159】

$D_{SCALED}$  の分数部分は、

$$= D_{SCALED} - [D_{SCALED}] \quad (5)$$

であり、したがって、

$$\mu = 1 - \quad (6)$$

である。ボクセル 172、174 にそれぞれ関連している各輝度を示す色値  $C_A$ 、 $C_B$  は、以下のように値を割り当てられる。すなわち、

$$C_A := C_V (1 - \quad) \quad (7)$$

$$C_B := C_V \mu = C_V (1 - \mu) \quad (8)$$

である。ここでは、シンボル「:=」は、1 つの新しい値の割り当てを示している。

#### 【0160】

例えば、レンズ 22 から深さ  $D_V = 9.2$  単位を有するボクセル 170 に関しては、オフセット  $D_{OFFSET} = 3.0$  単位であり、MOE 装置 32 が長さで 20 単位伸びている 5 つの均等に間隔を空けて配置された光学要素を有する場合には、式 (1) により、 $N = 5$ 、 $D = 20$ 、その後間隔  $S = 5$  単位であり、また式 (2) により  $D_{SCALED} = 2.24$  である。ボクセル 170 はこのように、式 (3) および (4) に対し、指標  $[D_{SCALED}] = 2$  および  $[D_{SCALED}] + 1 = 3$  を有する光学要素の間に位置決めされており、また、したがって図 16 において、標識  $P_2$  と  $P_3$  を有する光学要素 162 ~ 164 は、新しいボクセル 172 ~ 174 がボクセル 170 に対応してその上に表示されるべき光学要素として特定される。

#### 【0161】

本実施例においては、式 (5) および (6) からスケーリングされた深さの分数値は  $= 0.24$  であり、またしたがって  $\mu = 0.76$  である。したがって、 $(1 - \quad) = 0.76$ 、および  $(1 - \mu) = 0.24$  であり、また式 (7) および (8) から、ボクセル 172 の色値は、元のボクセル 170 の輝度の  $C_A = 0.76 C_V = 76\%$  であり、またボクセル 174 の色値は元のボクセル 170 の輝度の  $C_B = 0.24 C_V = 24\%$  である。したがって、ボクセル 170 は、光学要素 164 よりも光学要素 162 に「より近い」ため、対応する新しいボクセル 172 ~ 174 は、より近い光学要素 162 が、2 つのボクセル 172 ~ 174 の間の色の大部分を表示するように分布された輝度を有し、一方、さらに遠くにある光学要素 164 は、ボクセル 170 で光学要素 162 ~ 164 の間にある 3D ポリメトリック画像の移行部の外観に対してより少ないがしかしゼロ量ではなく貢献する。

#### 【0162】

光学要素 160 ~ 168 上に正確にある深さ値を有するボクセル 170 に関しては、アン

チエリアシングは必要ない。したがって、式(2)~(4)は、整数値に退化し、また式(5)および(6)の結果は、調節値、 $\mu$ はそれぞれ0と1であり、あるいはそれぞれ1と0であり、したがって、色値の調節は行われない。不必要な計算を避けるために、MVDコントローラ18は、式(2)における計算が、1パーセントといった所定の誤り公差内であって、結果的に整数になるかどうかをチェックすることができ、また、もし整数になるのであれば、ボクセル170は、光学要素160~168のうちの1つ上に正確にあるように求められ、あるいはそのように考えられる。アンチエリアシングの手順は現時点で処理されたボクセル170に関しては完了し、またその手順はその後に、3D画像34の他のボクセルを処理するよう継続することができる。

【0163】

式(1)~(8)を使用する本実施形態においては、MOE装置32の均一な間隔と他の特性が知られているため、ボクセル170の距離 $D_V$ とMOE装置の特性が、式(3)および(4)によってどの光学要素がボクセル170と接するかを判定するので、もっとも近くにある境界光学要素を検索する必要はない。

【0164】

もう一つの実施形態においては、均一な間隔か、あるいは可変および/または非均等な間隔かのいずれかを有するMOE装置32の光学要素160~168に関しては、アンチエリアシングは、上の式(7)および(8)と関連して下に説明されている式(9)~(13)を使用して実施することができる。例えば、プロジェクタ20とレンズ22からのMOE装置の可変間隔および/または可変オフセットを有するMOE装置に関しては、アンチエリアシング方法を、光学要素160~168の間隔と構造形態の修正の間にオンザフライ式に実施することができる。光学要素160~168の距離/深さが変化し得るため、代替の実施形態においては、アンチエリアシング法では、現時点で処理されているボクセル170と接している少なくとも2つの光学要素を、以下のように、距離/深さ値 $D_{NEAR1}$ と $D_{NEAR2}$ を有する2つの境界光学要素に対して光学要素160~168それぞれの深さ値を検索することにより求める。すなわち、

$$D_{NEAR1} \quad D_V \quad D_{NEAR2} \quad (9)$$

【0165】

変数 $NEAR1$ と $NEAR2$ は、光学要素160~168のなかから関連する光学要素を特定する整数指標であることができる。例えば、図16において、 $NEAR1 = 2$ と $NEAR2 = 3$ は、z軸に沿ってボクセル170と接している光学要素162~164に対応している。

【0166】

深さ調節値と $\mu$ は次のように決定される。

$$= |(D_V - D_{NEAR1}) / (D_{NEAR1} - D_{NEAR2})| \quad (10)$$

$$= |(D_V - D_{NEAR2}) / (D_{NEAR1} - D_{NEAR2})| \quad (11)$$

ここで、 $|X|$ は値すなわち変数 $X$ の絶対値すなわち大きさの関数である。

【0167】

式(10)および(11)から得られる深さ調節値は双方共が次式を満足する正の実数である。

$$0 \leq \mu \leq 1 \quad (12)$$

$$\mu + \mu = 1 \quad (13)$$

したがって、深さ調節値が、光学要素間の非一様なかつ/または可変の距離をスケールリングし、次に式(7)および(8)中で用いられて、対応する調節済み色値を持ったボクセル172~174を生成する。式(10)および(11)に示すように、深さ調節値1と $m$ は、光学要素162~164にそれぞれ関連したボクセル172~174の深さの範囲内においてボクセル170の深さの内挿に基づいている。

【0168】

一様な間隔を有する上記の例では、式(9)~(13)は $D_V = 9.2$ 単位、 $D_{NEAR1} = D_2 = 8$ 単位、 $D_{NEAR2} = D_3 = 13$ 単位という条件で適用されており、したが

10

20

30

40

50

って、

$$= |(9.2 - 8) / (8 - 13)| = 1.2 / 5 = 0.24$$

$$\mu = |(9.2 - 13) / (8 - 13)| = 3.8 / 5 = 0.76$$

となるが、これは式(1)~(8)を用いた調節値と一致している。この代替の実施形態は、MOE装置32と光学要素160~168の寸法のおよび空間的特徴が変化する場合には有用であるが、新しいボクセル172~174を生成するために適切な境界光学要素162~164を決定するための検索が必要である。

#### 【0169】

図20は本明細書に述べる3Dアンチエリアシングを実施する方法の流れ図を示すが、同図では、ボクセル170のような表示される現行のボクセルに対して、本方法は、それに対応する深さ値 $D_v$ と色値 $C_v$ をステップ190でそれぞれ深さバッファと色バッファから読み取る。次に、本方法は、光学要素間間隔が一定であるかどうかをステップ192で判断する。例えば、MVDコントローラ18の構成設定が、光学要素160~168が固定されていて、一様または非一様な分布を有しているかどうか、および/またはMVDコントローラ18とMOE装置32が、本明細書で説明するように可変間隔モードで動作するかどうかを示すこともある。

10

#### 【0170】

間隔が一定である場合、本方法は次にステップ194で、式(1)および(2)を用いて光学要素160~168の指標の範囲内にあるように深さ値 $D_v$ をスケーリングし、次に本方法はステップ196で式(3)および(4)を用いて、ステップ196において深さ値 $D_v$ に最も近く、これと接する光学要素を決定する。そうでなく、ステップ192で間隔が一定でなかった場合、本方法はこの代替の実施形態で、ステップ194なしでステップ196を実行して、式(9)を満足する光学要素を決定することができる。すなわち、光学要素160~168の各々の距離/深さの値を検索する手順を用いる。別の代替方法では、ステップ192は、MVDコントローラ18とMOE装置32の構成と動作モード次第で、任意に実行されたり省略されたりし得る。

20

#### 【0171】

次に、本方法は、本明細書で説明するように実施される実施形態によって、式(5)および(6)または式(10)および(11)を用いてステップ198で深さ調節値および/または第2の値 $\mu$ を決定する。次に、本方法は、式(7)および(8)を用いて1つまたは複数の深さ調節値を用いて最も近い境界光学要素上のボクセルに対してステップ200で色値を調節し、また、この調節された色値を持つ最も近い境界光学要素上の調節済みボクセルをステップ202で表示する。

30

#### 【0172】

別の代替の実施形態では、中程度のアンチエリアシングが実施される。例えば、調節値と $\mu$ は、例えば、ボクセル170の輝度の半分が、ボクセル172~174の各々に割り当てられるように、0.5という値に固定されてもよい。このような中程度のアンチエリアシングによって、図19の曲線189で示されるような中間移行曲線に対応する中間深さ180Dなどの見かけ上の深さが生成されることがある。

40

#### 【0173】

他の代替の実施形態では、アンチエリアシングの程度は、1つの極値から、すなわち、色値を割り当てるために深さの分数値と $\mu$ を無視して、深さの分数値と $\mu$ の全てを用いる別の極値まで変化し得るすなわち、アンチエリアシングの程度はこのような2つの極値間のいかなる値でも取り得る。このような可変のアンチエリアシングは、スケーリングされた深さの分数部分1をアンチエリアシングパラメータPで除算し、次にその結果値を1から負の方向にオフセットすることによって実行され得る。すなわち、aを式(5)および(10)で計算した後で、変数値 $v_{AR}$ が次式のように計算される。

$$v_{AR} = \quad / P \quad (14)$$

#### 【0174】

最終的な色値は、負方向にオフセットされた値を所定の範囲内、例えば0と1の間に収ま

50

るように固定またはクランプすることによって決定され得る。したがって、式(7)および(8)は可変のアンチエリアシングに対して次式のように修正される。

$$C_{A2} = C_V (1 - V_{AR}) \quad (15)$$

$$C_{B2} = C_V V_{AR} \quad (16)$$

【0175】

このように、図20のステップ198~202はそれぞれ式(14)~(16)を実施して、可変アンチエリアシングを提供することができる。

【0176】

P=1のアンチエリアシングパラメータは、全アンチエリアシングに対応し、任意の高い数値で計算的に実施され得る無限のアンチエリアシングパラメータPは、いかなるアンチエリアシングにも対応していない。1未満のアンチエリアシングパラメータもまた実施され得る。例えば、P=1である場合、上記の式(1)~(13)に対するアンチエリアシングが実施される。

【0177】

別の例では、アンチエリアシング値が $\alpha = 0.24$ でアンチエリアシングパラメータが3である場合、式(14)によって $V_{AR} = 0.08$ であり、したがって $C_{A2} = 0.92$ 、 $C_V =$ ボクセル170の色値の92%であり、一方、式(15)および(16)につき、 $C_{B2} = 0.08$ 、 $C_V =$ ボクセル170の色値の8%となる。前の数値の例と比較して、このような可変アンチエリアシングは、見かけ上の深さにおけるボクセル172の貢献度を76%から92%に増加させ、一方、ボクセル174の貢献度は24%すなわち約1/4から10%未満にまで減少する。さらなる例では、Pの場合、アンチエリアシングは消滅し、したがって、式(14)によって $V_{AR} = 0.00$ となる。このように、式(15)および(16)につき、 $C_{A2} = (1.0)$ 、 $C_V =$ ボクセル170の色値の100%であり、一方 $C_{B2} = (0.0)$ 、 $C_V =$ ボクセル170の色値の0%である。したがって、光学要素162~124の間にあるあらゆるボクセル170がアンチエリアシング無しで、より近い光学要素162上に表示され、したがって、図20のステップ202は、Pの場合、基準点からより遠い第2のボクセルを生成しない、したがって表示しないステップをさらに含む。例えば、ボクセル174は生成されない。

【0178】

可変アンチエリアシングを用いるさらなる代替の実施形態では、図20の方法は、調節された色値が所定のしきい値Tより大きい場合にだけ、新しいボクセルを表示することを含むことがある。例えば、

$$C_V (1 - V_{AR}) > T \text{ であれば、 } C_{A2} = C_V (1 - V_{AR}) \text{、そうでなければ、 } C_{A2} = 0 \quad (17)$$

$$C_V V_{AR} > T \text{ であれば、 } C_{B2} = C_V V_{AR} \text{、そうでなければ、 } C_{B2} = 0 \quad (18)$$

【0179】

例えば、Tは0.05に等しいことがあり、したがって、例えば、約5%未満の色の貢献度は無視可能であると考えられるが、その理由は、このような色値を持つボクセルは、不透明/散乱モードに切り換えられたときに光学要素160~168上に表示されるからである。したがって、全体的な3D画像に対するこのような無視可能な貢献度は切り捨てられ、また、非貢献のボクセルは表示されず、3D画像の計算処理が改善される。

【0180】

追加の代替の実施形態では、MVDシステム10は、3D画像34のある部分の外観が半透明である3D画像34を生成することが可能である。すなわち、MOE装置32の光学要素36~42上に表示される画像44~50は、1つの画像のある部分が半透明に見える、第2の画像の別の部分がこの半透明な部分を通して観測可能であるように見えるように、適切なシェーディングと色を有する。このような半透明な外観は、アンチエリアシングあるなしに関わらず生成され得る。

【0181】

3D画像34を生成するに際して、MVDシステム10が用いる方法は、例えばグラフィックデータ源16のフレームバッファの色バッファと深さ(またはz)バッファなどのOpenGLフレームバッファデータを用いて、PPD計算を実行する。この深さバッファ中の値は、色バッファ中にある対応するピクセルの深さであり、MOE装置32内に表示される図16のボクセル170などのピクセルまたはボクセルのロケーションを決定するために用いられる。このMPD計算方法は、MOE装置323からのポリメトリック画像34の背景物体の画像の部分が、このような画像が前景物体の画像によって塞がれている場合には、描写されないのが望ましい状況下では適切である。前景物体の画像が半透明であるため塞がれている背景物体に対応する画像が見えるMOE装置32中で画像を生成するために、アルファチャンネル技法が用いられるが、この場合、パラメータ(アルファ)によって、の値次第で前景物体と背景物体双方の色を合成することによって色バッファ中のピクセル/ボクセルの色が決定される。完全な不透明は $\alpha = 1$ で与えられ、完全な透明は $\alpha = 0$ で与えられる。このようなアルファチャンネルイメージングを用いて、正確に見える色画像を色バッファから生成する一方では、深さバッファ中の深さ値は不変であり、このため、最も前方にある物体の画像の深さにまだ対応している。知られている表示システムでは、深さが修正されていないとポリメトリック表示システム中で画像が適切に表示されないが、その理由は、たった1つの深さ値を用いて表示されるはずの様々な深さにある複数の表面があり得るからである。本明細書で開示するMVDシステム10は、例えば半透明な物体または部分を有するポリメトリック画像34を生成し、これによって、単一の深さ値に対する様々な深さで複数の表面を表示する際の先行技術における禁止を避けている。この開示のMVDシステム10は、OpenGLの追加の機能を用いて、MVDシステム10のモデル空間中に位置しているクリップ平面を生成するが、これでは、例えば、負の側に対面した正の側のような各クリップ平面の所定の側上で単に描写し得るだけである。

#### 【0182】

図21~図24に示すように、指標1からNで番号付けされ、これらの間に一様な間隔を有するN個の平面204~212を有するMOE装置32の場合、ポリメトリック画像34などのシーンは、互いに対面しており、距離だけ離間しており、モデル空間中の平面204~212から成る所与のMOE平面のロケーションに集中されているクリップ平面でN回も描写される。したがって、N個の異なった画像が生成し、それに対応する色バッファが、フレームバッファから検索されてMVDコントローラ18に送られる。MOE装置32中で表示するために色バッファをMVDコントローラ18に送ると、アルファチャンネルがオフされることがあるが、その理由は、MVDシステム10が、3Dポリメトリック画像34を生成するために用いられているMOE装置と関連する固有のアルファ値を有するからである。

#### 【0183】

クリップ平面で描写することは、図21および図22に示すようにアンチエリアシング無しでも実行され得るが、この場合、クリップ平面214~216を観測者218に近接して位置している画像部分に対応して用いられ、また、画像34のある部分が生成されて、クリップ平面214~216間に位置している第1の平面206上に表示され、クリップ平面214~216間にある画像部分は第1の平面206上に表示される。画像34の新しい部分はクリップ平面220~222間で生成されて、観測者218からさらに離れ、クリップ平面220~222間に置かれた第2の平面208上で表示され、クリップ平面220~222間にある画像部分は第2の平面208上に表示される。

#### 【0184】

アルファチャンネルを用いる上記の方法でアンチエリアシングを実行するために、アンチエリアシングで用いられるフォグ状イメージングを実施する雰囲気効果など、OpenGLの他の特徴が用いられる。フォグ特徴によって、フォグの密度と、そのフォグに対して指定された遠値と近値に関連した深さ範囲を基準としたモデルの深さとによって決まる比率で、各イメージングされた物体の色がフォグの色と合成される。

## 【0185】

OpenGLで利用可能なフォグ関数には、線形関数、指数関数および平方指数関数がある。本開示のMVDシステム10はこのような関数とさらに、図23および図24に示すような線形フォグ関数224~227の重ね合わせなどの、このようなフォグ関数の組合せを用いてもよい。図23および図24に示す図示の実施形態では、線形フォグ関数224~227の組み合わせはそれぞれ、フォグの近い深さで黒色の設定に応じてゼロという値から始まり、線形に進行して、真の色の設定に応じて、近い深さのロケーションから(FAR-NEAR)/2の距離だけ離れたところで1という値に達する。次に、フォグ関数はフォグの遠い深さのところでゼロに戻る。このようなフォグ関数によって、また、画像34が表示されるモデル空間中の所与のMOE平面上に中心を持つ距離2だけ離れたクリップ平面によって、画像34は、N回だけ描写されるが、毎回色バッファからのデータが、MOE装置32の対応する平面に送られる。

10

## 【0186】

ある図示の実施形態では、線形フォグ関数の組合せとこのような組合せを用いるボクセル画像データの処理とは、所与の光学要素、例えば図23の平面206に対する画像を、少なくとも2つの描写パスによって合成することによって実行される。第1のパスの間では、2つのクリップ平面が距離だけ離間されるが、第1のクリップ平面228は、現行の光学要素206の前で描写されている画像を持つ光学要素204上にあり、第2のクリップ平面はこの現行の光学要素206上にある。NEARがFAR未満であり、距離が増加する前方線形フォグ関数224が、次に上記のクリップ平面と共に用いられて、光学要素206に対する画像の第1のセットを描写する。

20

## 【0187】

第2のパスの間では、この2つのクリップ平面は距離Dだけ離間しており、第1のクリップ平面は現行の光学要素206上にあり、第2のクリップ平面230は光学要素208上に置かれて、現行の光学要素206の後でその上にある画像が描写され、第2のクリップ平面は現行の光学要素206上にある。距離が増加し、FARがNEAR未満である後方線形フォグ関数225が次に上記のクリップ平面と共に用いられて、光学要素206に対する画像の第2のセットを描写する。

## 【0188】

様々な線形フォグ関数224および225で描写されたこの2つのセットの画像は次に、MVDシステム10によって一緒に加算されて、光学要素206上で表示される。

30

## 【0189】

図23に示すように第1の画像を第1の平面206上で描写するために、フォグ関数224および225が第1の平面206の周りに集中され、クリップ平面228~230からの画像とこれら間の深さは自身の対応する色値が、関連する深さでフォグ関数224および225の対応する値によって修正される。この加算された画像を光学要素206上で関数224および225を用いて描写した後は、MVDシステム10は、連続する画像を第2の平面208上で図24に示すように描写するが、フォグ関数226および227は第2の平面208の周りに集中するように変換される。クリップ平面232~234からの画像とこれら間の深さは、自身の対応する色値が関連する深さでフォグ関数226の対応する値によって修正される。MVDシステム10は、連続的にフォグ関数を移動させ、また、対応するクリップ平面を処理して、各個別の画像をアルファチャネル方法を用いて色調節する。代替の実施形態では、例えば観測者218からの距離が大きいとフォグ密度も大きくなるように、別のフォグ関数が様々な平面204~212に対して実施され、これによって、表示された3Dポリメトリック画像34の深さ認識効果を増してもよい。

40

## 【0190】

例えば、図23を参照すると、Dと標識付けされた深さ238にあり、それぞれの色値 $C_i$ を画像の各部分に対して有する画像236の場合、深さ $D$ におけるフォグ関数224の値240は $D$ であり、したがって、画像236に対して表示される調節された色値は $D C_i$ である。この色値 $C_i$ は、本明細書で述べるように式(7)および(8)および

50

／または式(15)～(18)中のような深さ調節された色値であってもよく、したがってアルファチャネル調節は図20のステップ200で任意に実施されて、本明細書で述べるアルファチャネル技法でアンチエリアシングを実行する。

【0191】

上記によって、新規で非自明な多平面ポリュメトリック表示システム10と動作方法を、好ましい実施形態を参照として開示した。しかしながら、本発明の精神から逸脱することなく多くの修正や置換を行うことが可能である。例えば、好ましい実施形態は平坦パネル液晶表示などの平面光学要素を用いて説明したが、上記のように湾曲した光学要素を想定することも本発明の全体説明 (preview) に完全に含まれる。

【0192】

MVDシステム10は、1998年4月20日提出の同時係属中の米国仮特許出願第60/082,442号に記載の装置と方法、さらに、米国特許第5,090,789号の分割である米国特許第5,572,375号の部分継続出願である1996年11月4日提出の米国特許第5,990,990号に記載の装置と方法を用いて実施してもよい。MVDシステム10はまた、1998年1月8日提出の同時継続中の米国特許出願第09/004,722号に記載の装置と方法を用いて実施してもよい。上記のそれぞれ仮のおよび仮ではない特許出願と発行済みの特許は各々が、参照として本明細書中に援用される。したがって、本発明は制限目的ではなく図示目的で記載されたものである。

【図面の簡単な説明】

【0193】

【図1】開示する多平面ポリュメトリック表示システムを示す図である。  
 【図2】透明状態を有する液晶に基づく光学要素を示す図である。  
 【図3】散乱不透明状態にある図2の光学要素を示す図である。  
 【図4】ポリュメトリック3D画像を形成するためのもので、複数の光学要素上での連続した画像の表示を示す図である。  
 【図5】ポリュメトリック3D画像を形成するためのもので、複数の光学要素上での連続した画像の表示を示す図である。  
 【図6】ポリュメトリック3D画像を形成するためのもので、複数の光学要素上での連続した画像の表示を示す図である。  
 【図7】ポリュメトリック3D画像を形成するためのもので、複数の光学要素上での連続した画像の表示を示す図である。  
 【図8】膜光変調器を示す図である。  
 【図9】画像プロジェクタで使用される適応光学システムを示す図である。  
 【図10】複数の光学要素システムと共に、図9の適応光学システムを示す図である。  
 【図11】強誘電性液晶 (FLC) 空間光変調器 (SLM) のピクセルの横断面図である。

【図12】図11のFLC SLMの軸の角度 (angular orientation) を示す図である。

【図13】図11のFLC SLMの軸の角度を示す図である。

【図14】図11のFLC SLMの軸の角度を示す図である。

【図15】多平面データセットを生成させる方法の流れ図である。

【図16】複数の光学要素でのボクセルの3Dアンチエリアシングを示す図である。

【図17】3Dアンチエリアシングを用いない場合のボクセル表示を示す図である。

【図18】3Dアンチエリアシングを用いた場合のボクセル表示を示す図である。

【図19】3Dアンチエリアシングを用いた場合と用いない場合の見かけ上の深さを比較したグラフである。

【図20】3Dアンチエリアシングの実施方法の流れ図である。

【図21】アンチエリアシングを用いない場合の半透明の前景物体を有する3D画像の生成を示す図である。

【図22】アンチエリアシングを用いない場合の半透明の前景物体を有する3D画像の生

10

20

30

40

50

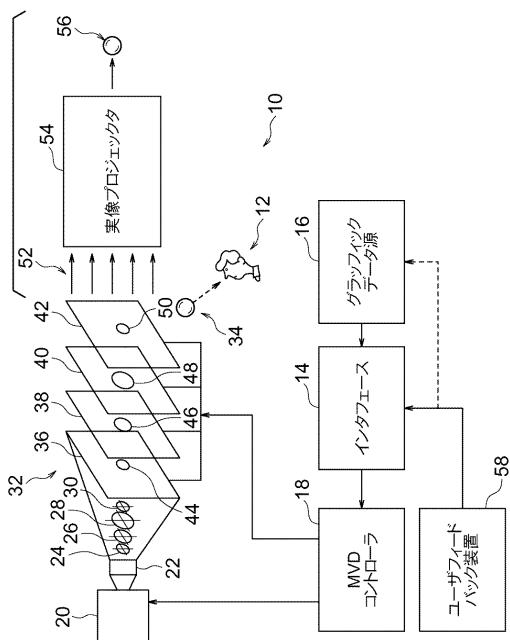


成を示す図である。

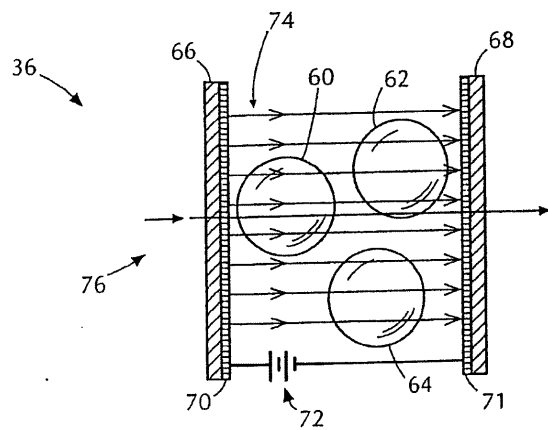
【図23】アンチエリアシングを用いた場合の半透明の前景物体を有する3D画像の生成を示す図である。

【図24】アンチエリアシングを用いた場合の半透明の前景物体を有する3D画像の生成を示す図である。

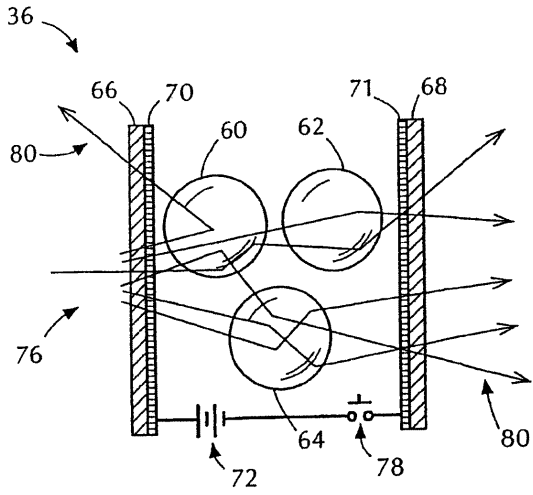
【図1】



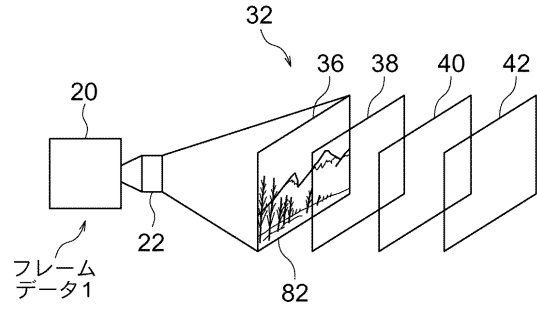
【図2】



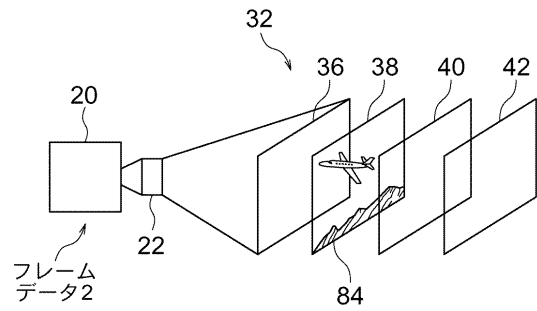
【図3】



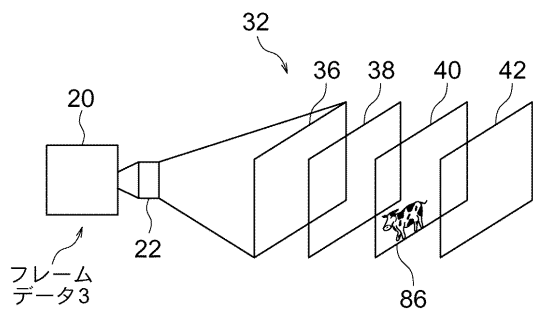
【図4】



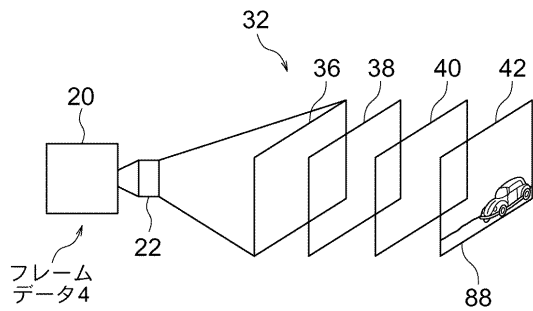
【図5】



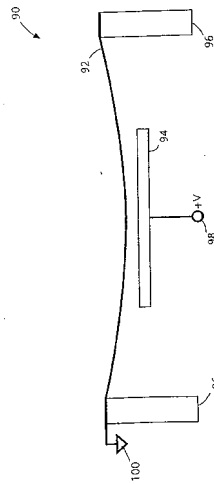
【図6】



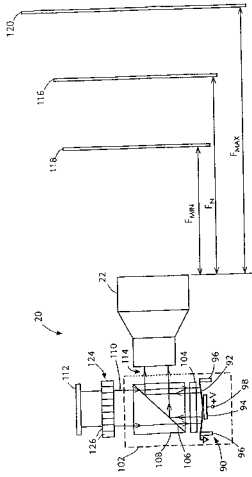
【図7】



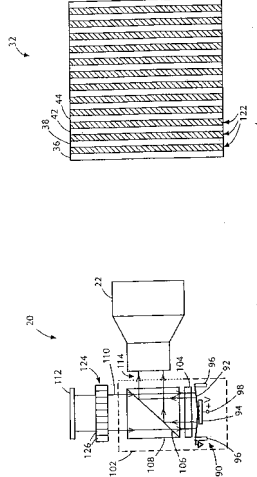
【図8】



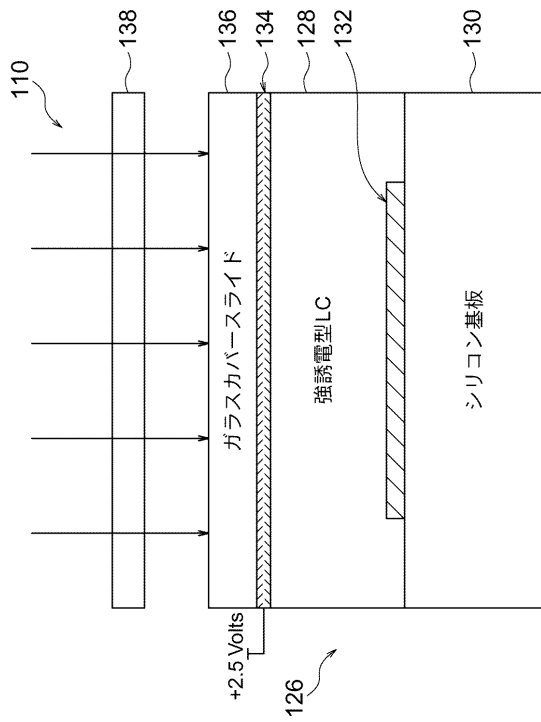
【 図 9 】



【 図 10 】



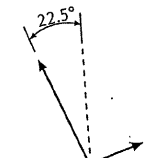
【 図 11 】



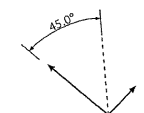
【 図 12 】



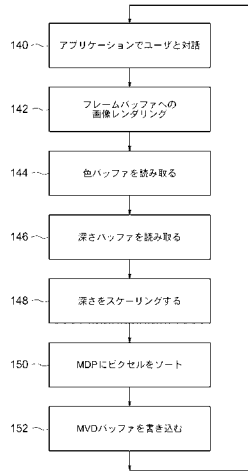
【 図 13 】



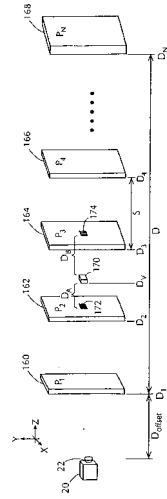
【 図 14 】



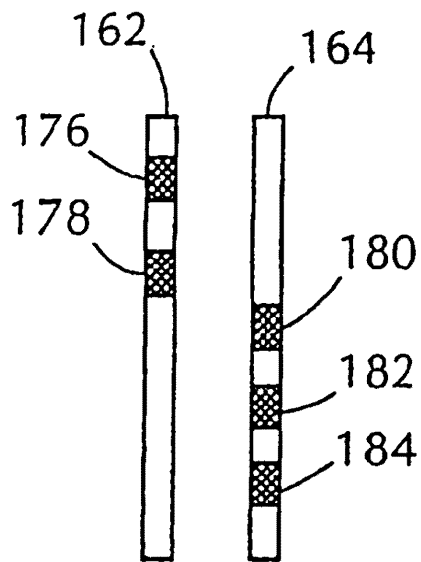
【 図 15 】



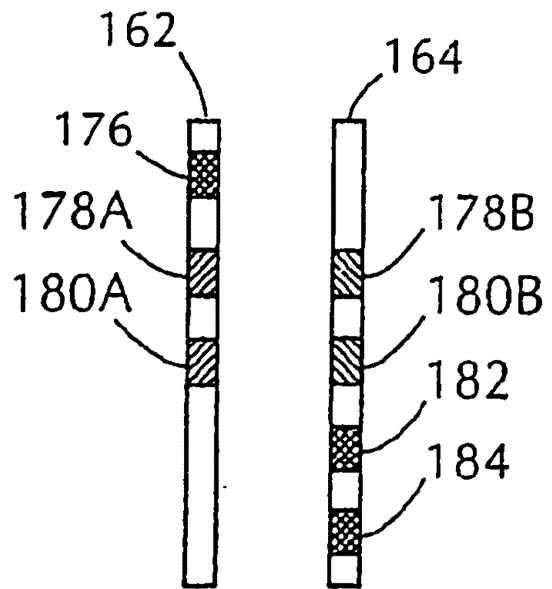
【 図 16 】



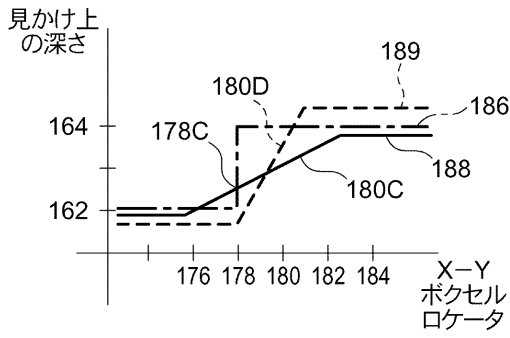
【 図 17 】



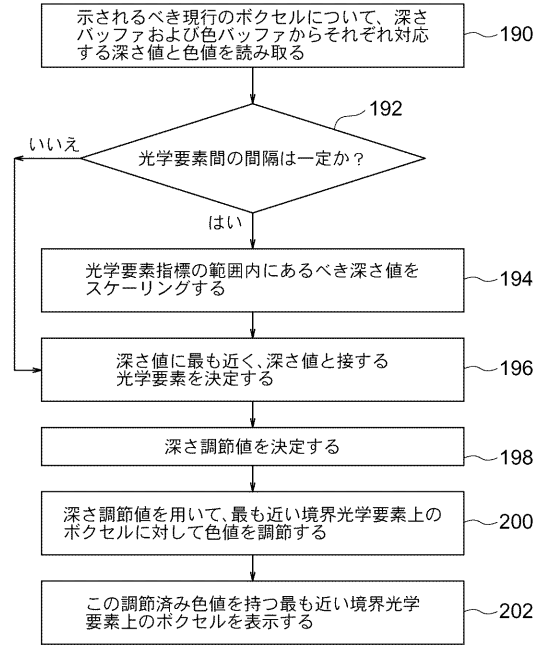
【 図 18 】



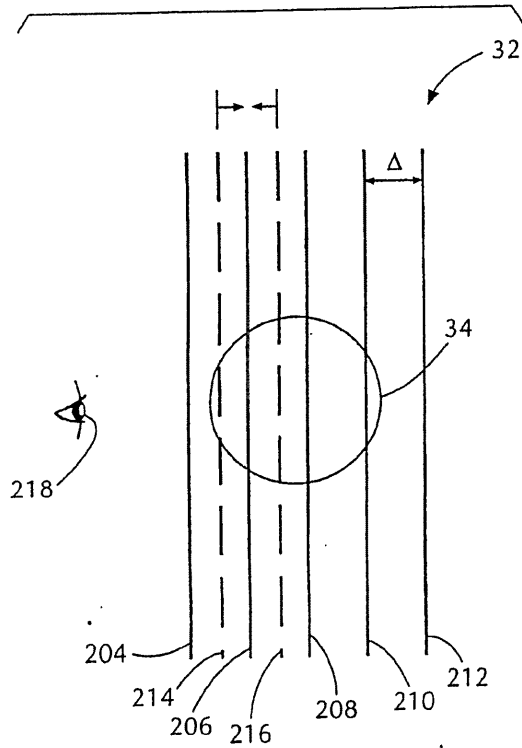
【図19】



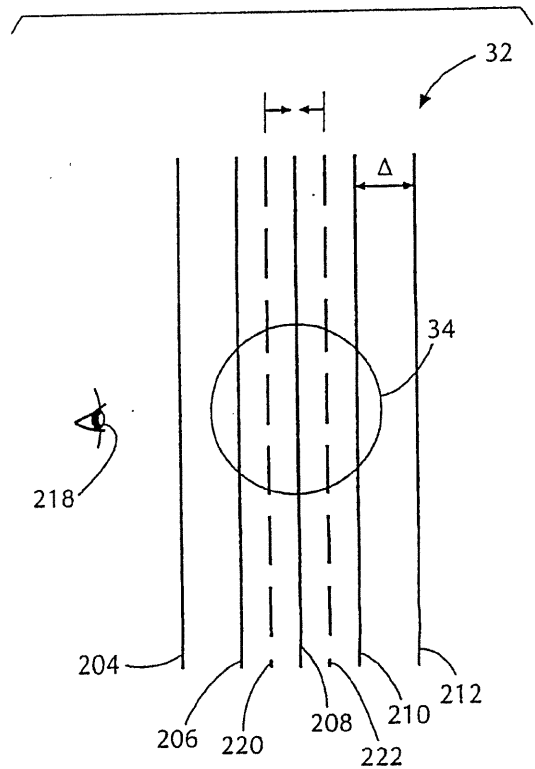
【図20】



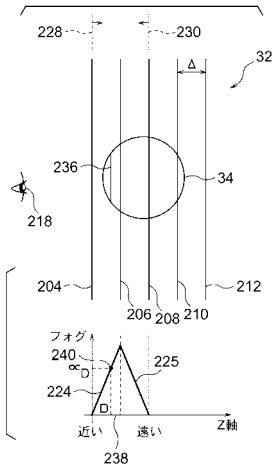
【図21】



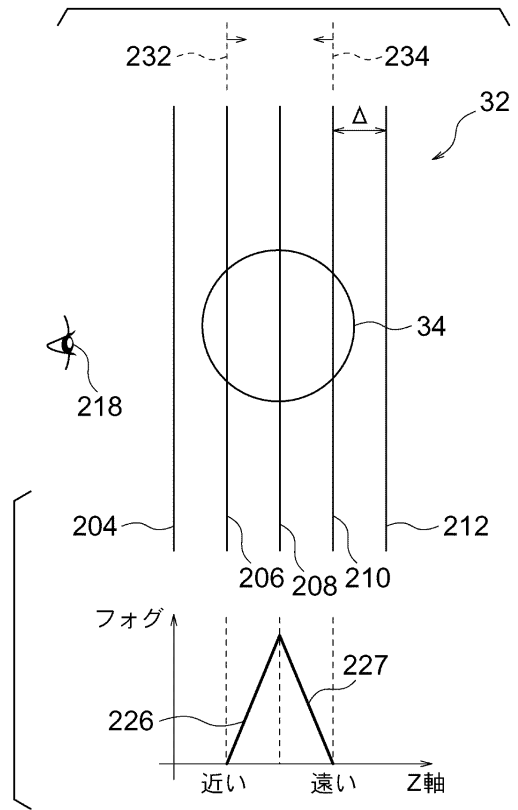
【図22】



【 図 2 3 】



【 図 2 4 】



【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau



(43) International Publication Date  
27 February 2003 (27.02.2003)

PCT

(10) International Publication Number  
WO 03/017246 A1

- (51) International Patent Classification: G09G 5/00
- (21) International Application Number: PCT/US02/26718
- (22) International Filing Date: 19 August 2002 (19.08.2002)
- (25) Filing Language: English
- (26) Publication Language: English
- (30) Priority Data: 09/933,424 20 August 2001 (20.08.2001) US
- (71) Applicant: DIMENSIONAL MEDIA ASSOCIATES, INC. [US/US]; 22 West 19th Street, New York, NY 10011 (US).
- (81) Designated States (national): AU, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GI, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KR, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FR, GB, GR, HU, IT, LU, MC, NL, PT, SI, SK, TR), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

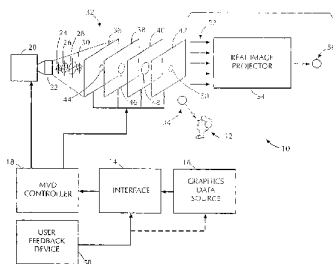
(72) Inventors: SULLIVAN, Alan; 32 Homside Lane, White Plains, NY 10605 (US). SNUFFER, John; 252 E. 61st Street, New York, NY 10021 (US).

Published:  
with international search report

(74) Agent: ROSENBERG, Neal, L.; Amster, Rothstein & Ehenstein, 90 Park Avenue, New York, NY 10016 (US).

For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: MULTI-PLANAR VOLUMETRIC DISPLAY SYSTEM AND METHOD OF OPERATION USING THREE-DIMENSIONAL ANTI-ALIASING



(57) Abstract: A multi-planar volumetric display system (10) and method generate volumetric three-dimensional images (34 and 56) using a multi-surface optical device (32) including a plurality of individual optical elements (36-40) corresponding to a plurality of image depths. An image projector (20) selectively projects images (24-30, 44-50) on respective optical elements (36-40) to generate a volumetric three-dimensional image (34) viewable in the multi-surface optical device (32). Psychological vision cues are added during generation of the three-dimensional image (34) to enhance depth perception when viewing the three-dimensional image. A floating-image generator (54) may project the three-dimensional image having enhanced depth to generate a second volumetric three-dimensional image (56) viewable as floating in space.



WO 03/017246 A1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

MULTI-PLANAR VOLUMETRIC DISPLAY SYSTEM AND METHOD  
OF OPERATION USING THREE-DIMENSIONAL ANTI-ALIASING

## CROSS-REFERENCE TO RELATED APPLICATION

- 5 [ 0001 ] This application claims the benefit of U.S. Application No. 09/933,424, filed August 20, 2001.

## BACKGROUND OF THE INVENTION

- [ 0002 ] The present invention relates to three-dimensional (3D) imaging, and, more particularly, to a multi-planar display system using 3D anti-aliasing for generating volumetric three-dimensional images in space.
- 10 [ 0003 ] It is known that three-dimensional (3D) images may be generated and viewed to appear in space. Typically, specialized eyewear such as goggle and/or helmets are used, but such eyewear can be encumbering. In addition, by its nature as an accessory to the eyes, such eyewear reduces the perception of viewing an actual 3D image. Also, the use of such eyewear can cause eye
- 15 fatigue which is remedied by limiting the time to view the image, and such eyewear is often bulky and uncomfortable to wear.
- [ 0004 ] Thus, there is a need to generate volumetric 3D images and displays without the disadvantages of using such eyewear.
- 20 [ 0005 ] Other volumetric systems generate such volumetric 3D images using, for example, self-luminescent volume elements, that is, voxels. Before providing examples of such systems, it is important to distinguish the much abused term "voxel" from a 3D data element (referred to herein as a "tridel"). A voxel is the actual glowing point of light in a 3D display and is analogous to a pixel in a 2D display. However, a tridel is an abstract 3D data type. More
- 25 specifically, voxels have positions that are integers (i, j, k) and only have the properties of color and brightness, whereas tridels are characterized by a set of parameters defined at a floating point location (x, y, z) in a virtual image space. Thus, in its most general sense, a tridel is a 3D data type any may encompass

173357.1



WO 03/017246

PCT/US02/26718

-2-

any number of application-specific data types. For example, if the tridel is used to define polygonal vertices of a 3D object then the data parameters of this abstract 3D data type are color (R, G, B) and visual opacity (A). As another example, if the tridel represents a data element of an image produced by a medical computed x-ray tomography ("CT") scanner, then the data parameter is x-ray opacity. In yet another example, if the tridel describes a thermonuclear plasma, then the data parameters might be plasma density, temperature, and average velocity of the plasma constituents.

**[ 0006]** From the foregoing, it will be understood that to produce an image, either 2D or 3D, each tridel must be mathematically processed into a pixel or voxel. This processing may include geometric transformations including rotation, scaling, stretching or compression, perspective, projection and viewpoint transformations, all of which operate on the x, y, z coordinates of the tridel. Further, in the process of determining the color and brightness of a pixel or voxel, tridels may be averaged together when there are many within the space of one voxel or interpolated between when there many pixels within the space of two tridels. The distinction between tridels and voxels will be more clearly appreciated upon consideration of the depth transformation discussed below for mapping the depth coordinate of a tridel into the voxel depth coordinate within the MOE device 32.

**[ 0007]** Turning to examples of other volumetric display systems known in the art, one example of a volumetric image system is the system of 3D TECHNOLOGY LABORATORIES of Mountain View, Calif., in which the intersection of infrared laser beams in a solid glass or plastic volume doped with rare earth impurity ions generates such voxel-based images. However, the non-linear effect that creates visible light from two invisible infrared laser beams has a very low efficiency of about 1%, which results in the need for powerful lasers to create a bright image in a large display. Such powerful lasers are a potential eye hazard requiring a significant protective enclosure around the display. Additionally, scanned lasers typically have poor resolution resulting in low voxel

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-3-

count, and the solid nature of the volumetric mechanism results in large massive systems that are very heavy.

**[ 0008]** Another volumetric display system from Actuality Systems, Inc. of Cambridge, Massachusetts, uses a linear array of laser diodes that are reflected off of a rapidly spinning multifaceted mirror onto a rapidly spinning projection screen. However, such rapidly spinning components, which may be relatively large in size, must be carefully balanced to avoid vibration and possibly catastrophic failure. Additionally, the size, shape, and orientation of voxels within the display depends on their location, resulting in a position-dependent display resolution.

**[ 0009]** Another volumetric display system is provided by NEOS TECHNOLOGIES, INC., of Melbourne, Florida, which scans a laser beam acousto-optically onto a rapidly spinning helical projection screen. Such a large spinning component requires a carefully maintained balance independent of display motion. The laser scanner system has poor resolution and low speed, drastically limiting the number of voxels. Additionally, the size, shape, and orientation of voxels within the display depends on their location, resulting in a position-dependent resolution. Finally, the dramatically non-rectilinear nature of the display greatly increases the processing requirements to calculate the different two-dimensional images.

**[ 0010]** Other types of 3D imaging system are known, such as stereoscopic displays, which provide each eye with a slightly different perspective view of a scene. The brain then fuses the separate images into a single 3D image. Some systems provide only a single viewpoint and require special eyewear, or may perform headtracking to eliminate eyewear but then the 3D image can be seen by only a single viewer. Alternatively, the display may provide a multitude of viewing zones at different angles with the image in each zone appropriate to that point of view, such as multi-view autostereoscopic displays. The eyes of the user must be within separate but adjacent viewing zones to see a 3D image, and the viewing zone must be very narrow to prevent a disconcerting jumpiness as

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-4-

the viewer moves relative to the display. Some systems have only horizontal parallax/lookaround. In addition, depth focusing-convergence disparity can rapidly lead to eyestrain that strongly limits viewing time. Additionally, stereoscopic displays have a limited field of view and cannot be used realistically with direct interaction technologies such as virtual reality and/or a force feedback interface.

**[ 0011 ]** Headmounted displays (HMD) are typically employed in virtual reality applications, in which a pair of video displays present appropriate perspective views to each eye. A single HMD can only be used by one person at a time, and provide each eye with a limited field of view. Headtracking must be used to provide parallax.

**[ 0012 ]** Other display systems include holographic displays, in which the image is created through the interaction of coherent laser light with a pattern of very fine lines known as a holographic grating. The grating alters the direction and intensity of the incident light so that it appears to come from the location of the objects being displayed. However, a typical optical hologram contains an enormous amount of information, so updating a holographic display at high rates is computationally intensive. For a holographic display having a relatively large size and sufficient field of view, the pixel count is generally greater than 250 million.

**[ 0013 ]** Accordingly, a need exists for high quality volumetric 3D imaging with computationally acceptable demands on processing systems and which has improved viewability and implementation.

**[ 0014 ]** In addition, in three-dimensional imaging, the use of discrete voxels renders portions of images to appear jagged due to pixelization, for example, for features at transitions between discrete depths in a volumetric 3D image. A need exists for a method which softens the transition between portions of a volumetric 3D image.

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-5-

## SUMMARY OF THE INVENTION

- [ 0015] A multi-planar volumetric display (MVD) system and method of operation are disclosed which generate volumetric three-dimensional images. The MVD system includes a multi-surface optical device including a plurality of individual optical elements arranged in an array; an image projector for selectively projecting a set of images on respective optical elements of the multi-surface optical device; and a floating-image generator for projecting the first volumetric three-dimensional image from the multi-surface optical devices to generate a second volumetric three-dimensional image viewable as floating in space at a location separate from the multi-surface optical device.
- [ 0016] Each of the plurality of the individual optical elements of the multi-surface optical device includes a liquid crystal element having a controllable variable translucency. An optical element controller is also provided for controlling the translucency of the liquid crystal elements, such that a single liquid crystal element is controlled to have an opaque light-scattering state to receive and display the respective one of the set of images from the image projector, and the remaining liquid crystal elements are controlled to be substantially transparent to allow the viewing of the displayed image on the opaque liquid crystal element.
- [ 0017] The optical element controller rasters through the liquid crystal elements at a high rate during a plurality of imaging cycles to select one liquid crystal element therefrom to be in the opaque light-scattering state during a particular imaging cycle, and to cause the opaque light-scattering state to move through the liquid crystal elements for successively receiving the set of images and for generating the volumetric three-dimensional images with three-dimensional depth.
- [ 0018] The image projector projects the set of images into the multi-surface optical device to generate the entire first volumetric three-dimensional image in the multi-surface optical device at a rate greater than 35 Hz to prevent human-perceivable image flicker. For example, the volume rate may be about

173857.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-6-

40 Hz. In one embodiment, for example, if about 50 optical elements are used with a volume rate of about 40 Hz, the image projector projects each of the set of images onto a respective optical element at a rate of 2 kHz.

5 [ 0019] The image projector includes a projection lens for outputting the set of images. The projector also includes an adaptive optical focusing system for focusing each of the set of images on the respective optical elements to control the resolution and depth of the projection of the set of images from the projection lens. Alternatively or in addition, the image projector includes a plurality of laser light sources for projecting red, green, and blue laser light,  
10 respectively, to generate and project the set of images in a plurality of colors.

[ 0020] In addition, a 3D anti-aliasing method is employed to smooth the portions of the projected images at transitions between optical elements in the multi-surface optical device. The anti-aliasing adjusts the display of voxels in a transition between optical elements, such that color values of the voxels are  
15 modified as a function of the distance of the voxels from the optical elements, to generate a smooth transition between the portions of the volumetric three-dimensional image.

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

[ 0021] FIG. 1 illustrates the disclosed multi-planar volumetric display  
20 system;

[ 0022] FIG. 2 illustrates a liquid crystal based optical element having a transparent state;

[ 0023] FIG. 3 illustrates the optical element of FIG. 2 in a scattering opaque state;

25 [ 0024] FIGS. 4-7 illustrate successive displays of images on multiple optical elements to form a volumetric 3D image;

[ 0025] FIG. 8 illustrates a membrane light modulator;

[ 0026] FIG. 9 illustrates an adaptive optics system used in an image projector;

178857.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-7-

- [ 0027] FIG. 10 illustrates the adaptive optics system of FIG. 9 in conjunction with a multiple optical element system;
- [ 0028] FIG. 11 illustrates a side cross-sectional view of a pixel of a ferroelectric liquid crystal (FLC) spatial light modulator (SLM);
- 5 [ 0029] FIGS. 12-14 illustrate angular orientations of the axes of the FLC SLM of FIG. 11;
- [ 0030] FIG. 15 illustrates a flow chart of a method for generating a multi-planar dataset;
- [ 0031] FIG. 16 illustrates 3D anti-aliasing of a voxel in a plurality of  
10 optical elements;
- [ 0032] FIG. 17 illustrates voxel display without 3D anti-aliasing
- [ 0033] FIG. 18 illustrates voxel display with 3D anti-aliasing
- [ 0034] FIG. 19 illustrates a graph comparing apparent depth with and without 3D anti-aliasing;
- 15 [ 0035] FIG. 20 illustrates a flow chart of a method implementing 3D anti-aliasing;
- [ 0036] FIGS. 21-22 illustrate the generation of 3D images having translucent foreground objects without anti-aliasing; and
- [ 0037] FIGS. 23-24 illustrate the generation of 3D images having  
20 translucent foreground objects with anti-aliasing.

## DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

- [ 0038] Referring now to FIG. 1, a multi-planar volumetric display system  
10 is provided which generates three-dimensional (3D) images which are volumetric in nature, that is, the 3D images occupy a definite and limited  
25 volume of 3D space, and so exist at the location where the images appear. Thus, such 3D images are true 3D, as opposed to an image perceived to be 3D due to an optical illusion of vision such as by stereographic methods.
- [ 0039] The 3D images generated by the system 10 can have a very high resolution and can be displayed in a large range of colors, and so can have the

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-8-

characteristics associated with viewing a real object. For example, such 3D images may have both horizontal and vertical motion parallax or lookaround, allowing the viewer 12 to move yet still receive visual cues to maintain the 3D appearance of the 3D images.

5 [ 00401 ] In addition, a viewer 12 does not need to wear any special eyewear such as stereographic visors or glasses to view the 3D image, which is advantageous since such eyewear is encumbering, causes eye fatigue, etc. Furthermore, the 3D image has a continuous field of view both horizontally and vertically, with the horizontal field of view equal to 360° in certain display  
10 configurations. Additionally, the viewer can be at any arbitrary viewing distance from the MVD system 10 without loss of 3D perception.

[ 0041 ] The multi planar volumetric display system 10 includes an interface 14 for receiving 3D graphics data from a graphics data source 16, such as a computer which may be incorporated into the system 10, or which may be  
15 operatively connected to the system 10 through communications channels from, for example, a remote location and connected over conventional telecommunications links or over any network such as the Internet. The interface 14 may be a PCI bus, or an accelerated graphics port (AGP) interface available from INTEL of Santa Clara, California. Other interface may be used,  
20 such as the VME backplane interconnection bus system standardized as the IEEE 1014 standard, the Small Computer System Interface (SCSI), the NuBus high-performance expansion bus system used in Apple Macintosh computers and other systems, as well as the Industry Standard Architecture (ISA) interface, the Extended ISA (EISA) interface, the Universal Serial Bus (USB) interface, the  
25 FireWire bus interface now standardized as the IEEE 1394 standard offering high-speed communications and isochronous real-time data services in computers, as well as open or proprietary interfaces.

[ 0042 ] The interface 14 passes the 3D graphics data to a multi-planar volumetric display (MVD) controller 18, which includes a large high speed  
30 image buffer. The three-dimensional image to be viewed as a volumetric 3D

173857.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-9-

image is converted by the MVD controller 18 into a series of two-dimensional image slices at varying depths through the 3D image. The frame data corresponding to the image slices are then rapidly output from the high speed image buffer of the MVD controller 18 to an image projector 20.

5 **[ 0043 ]** The MVD controller 18 and the interface 14 may be implemented in a computer, such as an OCTANE graphics workstation commercially available from SILICON GRAPHICS of Mountain View, California. Other general computer-based systems may also be used, such as a personal computer (PC) using, for example, a 195 MHZ reduced instruction set computing (RISC) microprocessor. Accordingly, it is to be understood that the disclosed MVD

10 system 10 and its components are not limited to a particular implementation or realization of hardware and/or software.

**[ 0044 ]** The graphics data source 16 may optionally be a graphics application program of a computer which operated an application program interface (API) and a device driver for providing the 3D image data in an

15 appropriate format to the MVD controller 18 of the computer through an input/output (I/O) device such as the interface 14. The MVD controller 18 may be hardware and/or software, for example, implemented in a personal computer and optionally using expansion cards for specialized data processing.

20 **[ 0045 ]** For example, an expansion card in the MVD controller 18 may include graphics hardware and/or software for converting the 3D dataset from the graphics data source 16 into the series of two-dimensional image slices forming a multi-planar dataset corresponding to the slices 24-30. Thus the 3D image 34 is generate at a real-time or near-real-time update rates for real world

25 applications such as surgical stimulation, air traffic control, or military command and control. Such expansion cars may also include a geometry engine for manipulating 3D datasets and texture memory for doing the texture mapping of the 3D images.

**[ 0046 ]** Prior to transmission of the image data to the image projector 20,

30 the MVD controller 18 or alternatively the graphics data source 16 may perform

173857.1



WO 03/017246

PCT/US02/26718

-10-

3D anti-aliasing on the image data to smooth the features to be displayed in the 3D image 34, and so to avoid any jagged lines in depth, for example, between parallel planes along the z-direction, due to display pixelization caused by the inherently discrete voxel construction of the MOE device 32 with the optical elements 36-42 aligned in the x-y planes normal to a z-axis. As the data corresponding to the image slices 24-30 is generated, an image element may appear near an edge of a plane transition, that is, between optical elements, for example, the optical elements 36-38. to avoid an abrupt transition at the specific image element, both of slices 24, 26 may be generated such that each of the images 44-46 includes the specific image element, and so the image element is shared between both planes formed by the optical elements 36-38, which softens the transition and allows the 3D image 34 to appear more continuous. The brightness of the image elements on respective consecutive optical elements is varied in accordance with the location of the image element in the image data.

15 [ 0047] The graphics data source 16 and the MVD controller 18 may also perform zero-run encoding through the interface 14 in order to maximize the rate of transfer of image data to the MVD controller 18 for image generation. It is to be understood that other techniques for transferring the image data may be employed, such as the Motion Picture Experts Group (MPEG) data communication standards as well as delta (r) compression.

20 [ 0048] A 3D image may contain on the order of 50 SVGA resolution images updated at a rate of 40 Hz, which results in a raw data rate of more than 2 GB/sec. To be displayed. Such a raw data rate can be significantly reduced by transmitting zeros. A volumetric 3D image is typically represented by a large number of zeros associated with the inside of objects, background objects, obstructed by foreground objects, and surrounding empty space. The graphics source 16 may encode the image data such that a run of zeros is represented by a zero-run flag (ZRF) or zero-run code, and followed by or associated with a run length. Thus, the count of the zeros may be sent for display without

173357.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-11-

sending the zeros. A 3D image buffer in the MVD controller 18 may be initialized to store all zeros, and then as the image data is stored in the image buffer, a detection of the ZRF flag causes the MVD controller 18 to jump ahead in the buffer by the number of data positions or pixels equal to the run length of  
5 zeros. The 3D data image buffer then contains the 3D data to be output to the image projector 20, which may include an SLM driver for operating an SLM to generate the two-dimensional images.

[ 0049] The image projector 20 has associated optics 22 for projecting the two-dimensional slices of 24-30 of the 3D image at a high frame rate and in a  
10 time-sequential manner to a multiple optical element (MOE) device 32 for selective imaging to generate a first volumetric three-dimensional image 34 which appears to the viewer 12 to be present in the space of the MOE device 32. The MOE device 32 includes a plurality of optical elements 36-42 which, under the control of the MVD controller 18, selectively receive each of the slices 24-30  
15 as displayed two-dimensional images 44-50, with one optical element receiving and displaying a respective slice during each frame rate cycle. The number of depth slices generated by the MVD controller 18 is to be equal to the number of optical elements 36-42, that is, each optical element represents a unit of depth resolution of the volumetric 3D image to be generated and displayed.

20 [ 0050] The optical elements 36-42 may be liquid crystal displays composed of, for example, nematic, ferroelectric, or cholesteric materials, or other polymer stabilized materials, such as cholesteric textures using a modified Kent State formula known in the art for such compositions.

[ 0051] The overall display of each of the slices 24-30 by the optical  
25 elements 36-42 of the MOE device 32, as a set of displayed images, occurs at a sufficiently high frame rate as set forth below, such as rates greater than about 35 Hz so that human viewer 12 perceives a continuous volumetric 3D image 34,  
viewed directly and without a stereographic headset, and instead of the individual two-dimensional images 44-50. Accordingly, in the illustration of  
30 FIG. 1, the images 44-50 may be cross-sections of a sphere, and so the 3D image

173357.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-12-

34 thus generated which would appear as a sphere to the viewer 12 positioned in the midst of the optical elements 36-42 forming the MOE device 32.

5 [ 0052] In alternative embodiments, the images 44-50 may be generated to display an overall image having a mixed 2D and 3d appearance, such as 2D text as a caption below a sphere, or 2D text on the sphere. One application may be a graphic user interface (GUI) control pad which has both 2D and 3D image characteristics to allow the viewer 12 to view a GUI, such as MICROSOFT WINDOWS 95, with 2D screen appearances as a virtual flat screen display, and with 3D images such as the sphere appearing on a virtual flat screen display.

10 [ 0053] The first volumetric 3D image 34 is viewable within a range of orientations. Furthermore, light 52 from the first volumetric 3D image is further processed by a real image projector 54 to generate a second volumetric 3D image 56 which appears to the viewer 12 to be substantially the same image as the first volumetric 3D image 34 floating in space at a distance from the MOE device 32. The real image projector 54, or alternatively a floating image projector, may be a set of optics and/or mirrors for collecting light 52 emitted from the MOE device 32 and for re-imaging the 3D image 34 out into free space. The real image projector 54 may be a high definition volumetric display (HDVD) which includes a conventional spherical or parabolic mirror to produce

20 a signal viewing zone located on an optic axis of the MOE device 32.

[ 0054] For example, the real image projection systems may be the apparatus described in U.S. Patent Nos. 5,552,934 to Prince and 5,572,375 to Crabtree, IV, each of these patents being incorporated herein by reference. In alternative embodiments, holographic optics may be employed by the real image projector 54 with the same functions as conventional spherical or parabolic mirrors to generate a floating image 56 but with multiple viewing zones, such as one viewing zone in a center area aligned with the optic axis, and viewing zones on either side of an optical axis, so multiple 3D floating images 56 may be viewed by multiple viewers.

173387.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-13-

**[ 0055]** In other alternative embodiments, the real image projector 54 may include holographic optical elements (HOEs), that is, holograms in the conventional sense which do not show a recorded image of a pre-existing object. Instead, an HOE acts as a conventional optical element such as a lens and/or mirror to receive, reflect, and re-direct incident light. Compared to conventional optical elements such as glass or plastic, HOEs are very lightweight and inexpensive to reproduce, and may also possess unique optical characteristics not available in conventional optics. For example, an HOE can produce multiple images of the same object at different angles from a predetermined optical axis, and so the field of view of a display employing a relatively small HOE can be dramatically increased without increasing the optic size as required for conventional optics. Accordingly, using at least one HOE as the real image projector 54, the MVD system 10 may be fabricated to provide a relatively compact system with a 360° field of view. In addition, for an image projector 20 incorporating laser light sources, HOEs are especially compatible for high performance with such laser light sources due to the wavelength selectivity of the HOE.

**[ 0056]** Since either of the volumetric 3D images 34, 56 appears to the viewer 12 to have volume and depth, and optionally also color, the multi-planar volumetric display system 10 may be adapted for virtual reality and haptic/tactile applications, such as the example described below for tactile animation to teach surgery. The real image projector 54 allows the floating 3D image 56 to be directly accessible for virtual interaction. The MVD system 10 may include a user feedback device 58 for receiving hand movements from viewer 12 corresponding to the viewer 12 attempting to manipulate either of the images 34, 56. Such hand movements may be translated by the user feedback device 58 as control signal which are conveyed to the interface 14 to the MVD controller 18 to modify one or both of the images 34, 56 to appear to respond to the movements of the viewer 12. Alternatively, the user feedback device 58 may be operatively connected to the graphics data source 16, which

173357.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-14-

may include a 3D graphics processor, to modify one or both of the images 34, 56.

[ 0057] A number of new interactions technologies provide improved performance of the MVD 10 using the real image projector 54. For example, a  
5 force feedback interface developed by SENSIBLE DEVICES, INC. of Cambridge, Massachusetts, is a powerful enabling technology which allows the MVD system 10 to provide the ability to actually feel and manipulate the 3D images 34, 56 by hand. With appropriate programming, the viewer 12 can sculpt three-dimensional images as if the images were clay, using a system called DIGITAL  
10 CLAY, a commercial product of DIMENSIONAL MEDIA ASSOCIATES, the assignee of the present application.

[ 0058] Another application of a MVD system 10 with force feedback interface is a surgical simulator and trainer, in which the user can see and feel three-dimensional virtual anatomy, including animation such as a virtual heart  
15 beating and reacting to virtual prodding by a user, in order to obtain certification as a surgeon, to practice innovative new procedures, or even to perform a remote surgery, for example, over the Internet using Internet communication protocols.

[ 0059] Tactile effects may thus be combined with animation to provide  
20 real-time simulation and stimulation of users working with 3D images generated by the MVD system 10. For example, the viewer 12 may be a surgeon teaching medical students, in which the surgeon views and manipulates the first 3D image 34 in virtual reality, while the students observe the second 3D image 56 correspondingly manipulated and modified due to the real image projector 54  
25 responding to changes in the first 3D image 34. The students then may take turns to individually manipulate the image 34, such as the image of the heart, which may even be a beating heart by imaging animation as the 3D images 34, 54. The teaching surgeon may then observe and grade students in performing image manipulation as if such images were real, such as a simulation of heart  
30 surgery.

173357.1

-15-

## THE MOE DEVICE

[ 0060] In an illustrated embodiment, the MOE device 32 is composed of a stack of single pixel liquid crystal displays (LCDs), composed of glass, as the optical elements 36-42, which are separated by either glass, plastic, liquid, or air spacers. Alternatively, the optical elements 36-42 may be composed of plastic or other substances with various advantages, such as lightweight construction. The glass, plastic, and/or air spacers may be combined with the glass LCDs in an optically continuous configuration to eliminate reflections at internal interfaces. The surfaces of the LCDs and spacers may be optically combined by either optical contact, index matching fluid, or optical cement. Alternatively, the spacers may be replaced by liquid such as water, mineral oil, or index matching fluid, with such liquids able to be circulated through an external chilling device to cool the MOE device 32. Also, such liquid-spaced MOE devices 32 may be transported and installed empty to reduce the overall weight, and the spacing liquid may be added after installation.

[ 0061] In a preferred embodiment, the optical elements 36-42 are planar and rectangular, but alternatively may be curved and/or of any shape, such as cylindrical. For example, cylindrical LCD displays may be fabricated by difference techniques such as extrusion, and may be nested within each other. The spacing distance between the optical elements 36-42 may be constant, or in alternative embodiments may be variable such that the depth of the MOE device 32 may be greatly increased without increasing the number of optical elements 36-42. For example, since the eyes of the viewer 12 lose depth sensitivity with increased viewing distance, the optical elements positioned further from the viewer 12 may be spaced further apart. Logarithmic spacing may be implemented, in which the spacing between the optical elements 36-42 increased linearly with the distance from the viewer 12.

[ 0062] The optical elements 36-42 are composed of a liquid crystal formulation with the property to be electronically switched rapidly, for example, by a MOE device driver of the MVD controller 18, to be switched between a

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-16-

clear, highly transparent state, as shown in FIG. 2, and a opaque, highly scattering state, as shown in FIG. 3. Referring to FIGS. 2-3 with a cross-section of the optical element 36 being illustrated, liquid crystal molecules 60-64 may be suspended between the substrates 66-68, which may be glass, plastic, or air spacers, and may also have transparent conducting layers 70, 71 applied to substrates 66-68, respectively.

**[ 0063]** The conducting layers 70, 71 may be composed of a sputtered or evaporated thin film of indium tin oxide (ITO), which has an excellent transparency and low resistance, but has a relatively high refractive index compared to the refractive indices of the glass or plastic substrates 66-68. The refractive index difference between these materials may produce reflections at the interfaces thereof, so additional coatings or layers of anti-reflection (AR) materials may optionally be disposed on the substrates 66-68 between the conducting layers 70, 71 and the substrates 66-68 to reduce the amount of reflected light, such as unwanted reflections. For example, an AR layer having an optical thickness of one quarter of a typical wavelength of light, such as 76 nm., and having a refractive index of about 1.8 reduces the reflection at the substrate-conductive layer interface to very low levels.

**[ 0064]** By using the AR coatings, the spacing material between optical elements 36-42 may be removed to leave air or vacuum therebetween, thus reducing the overall weight of the MOE device 32. Such AR coatings may be vacuum deposited, or may be evaporated or sputtered dielectrics. Alternatively, the AR coatings may be applied by spin coating, dip coating, or meniscus coating with SOL-GEL.

**[ 0065]** Referring to FIG. 2, using such conductive layers 70, 71, a source 72 of voltage therebetween, for example, from the MVD controller 18, generates an electric field 74 between the substrates 66-68 of the optical element 36, which causes liquid crystal molecules 60-64 to align and to transmit light 76 through the optical element 36 with little or no scattering, and so the optical element 36 is substantially transparent.

173357.1

-17-

**[ 0066 ]** Referring to FIG. 3, removal of the voltage 72 may occur, for example, by opening the circuit between the conductive layers 70, 71, such as by opening a rapidly switchable switch 78 controlled by the MVD controller 18. Upon such a removal of the voltage 72, the liquid crystal molecules 60-64 are oriented randomly, and so light 76 is randomly scattered to generate scattered light 80. In this configuration, the optical element 36 appears opaque, and so may serve as a projection screen to receive and display the respective image 44 focused thereupon by the image projector 20.

**[ 0067 ]** In an alternative embodiment, referring to FIGS. 2-3, the illustrated optical element 36 may be activated to be in the transparent state shown in FIG.2 by connecting the conductive layer 70 adjacent to a first substrate 66 to ground while connecting the conductive layer 71 adjacent to a second substrate 68 to a supply voltage, such as a voltage in the range of about 50 V to about 250 V. To switch the optical element 36 to be in the scattering, opaque state as in FIG. 3, the application of voltage is reversed, that is, the conductive layer 71 is grounded for a predetermined delay such as 1 ms to about 5 ms, and then the conductive layer 70 is connected to the supply voltage. The procedure is again reversed to return the optical element 36 to the transparent state. Accordingly, no average direct current (DC) or voltage is applied to the optical element 36, which can lead to failure by having a constant applied voltage. Also, there is no continuous alternating current (AC) or voltage which generates heating and increases power requirements to the optical elements.

**[ 0068 ]** In operation, only a single one of the optical elements 36-42 of the MOE device 32 is in the scattering opaque state at any given time, thus forming a scattering plane or surface. As the image projector 20 projects the slices 24-30 at a high rate through a projection cycle, with one slice emitted per cycle, the scattering plane is rapidly rastered through the depth of the MOE device 32 to form an weekly variable depth projection screen, while the remaining



WO 03/017246

PCT/US02/26718

-18-

transparent optical elements permit the viewer 12 to see the displayed image from the received image slices 24-30.

- [ 0069] As shown in FIGS. 4-7, as successive frame data is fed from the MVD controller 18 to the image projector 20 to generate images 82-88
- 5 therefrom, the MVD controller 18 synchronizes the switching of the optical elements 36-42 such that the optical 36 is opaque as the image 82 is emitted thereon as in FIG. 4, the optical element 38 is opaque as the image 84 is emitted in FIG. 5, the optical element 40 is opaque as the image 84 is as in FIG. 6, and the optical element 42 is opaque as the image 88 is emitted thereon as in FIG. 7.
- 10 The MVD controller 18 may introduce a delay between feeding each set of frame data to the image projector 20 and causing a given optical element to be opaque so that the image projector 20 has enough time during the delay to generate the respective images 82-88 from the sets of frame data 1-4, respectively.
- 15 [ 0070] Referring to FIGS. 4-7, while one optical element is opaque and displays the respective image thereon, the remaining optical elements are transparent, and so the image 82 in FIG. 4 on optical element 36 is visible through, for example, at least optical element 38, and similarly image 84 is visible through at least optical element 40 in FIG. 5, and image 86 is visible
- 20 through at least optical element 42. Since the images 82-88 are displayed at a high rate by that image projector 20 onto the optical elements 36-42 which are switched to opaque and transparent states at a comparably high rate, the images 82-88 form a single volumetric 3D image 34.
- [ 0071] To form a continuous volumetric 3D image 34 without perceivable
- 25 flicker, each optical elements 36-42 is to receive a respective image and is to be switched to an opaque state at a frame rate greater than about 35 Hz. Accordingly, to refresh and/or update the entire 3D image, the frame rate of the image projector 20 is to be greater than about  $N \times 35$  Hz. For a stack of 50 LCD elements forming the MOE device 32 having an individual optical element
- 30 frame rate of 40 Hz, the overall frame rate of the image projector 20 is to be

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-19-

greater than about  $50 \times 40 \text{ Hz} = 2 \text{ kHz}$ . High performance and/or high quality volumetric 3D imaging by the MVD system 10 may require greater frame rates of the image projector 20 on the order of 15 kHz.

**[ 0072 ]** In one embodiment, the images 82-84 of FIGS. 4-7 are displayed sequentially, with such sequential frame ordering being the updating of the range of depth once per volume period to update the entire volume of optical elements 36-42 in the MOE device 32. Such sequential frame ordering may be sufficient in marginal frame rate conditions, such as frame displays rates of about 32 Hz for still images 82-88 and about 45 Hz for images 82-88 displaying motion. In an alternative embodiment, semi-random plane ordering may be performed to lower image jitter and to reduce motion artifacts, in which the range of depth is updated at a higher frequency although each optical element is still only updated once per volume period. Such semi-random plane ordering includes multi-planar interlacing in which even numbered planes are illuminated with images, and then odd numbered planes illuminated, which increases the perceived volume rate without increasing the frame rate of the image projector 20.

**[ 0073 ]** The MOE device 32 maintains the image resolution originally generated in the image projector 20 to provide high fidelity three-dimensional images. The liquid crystal panels 36-42 are highly transparent and haze-free in the clear, transparent state, and are capable of switching rapidly between the clear, transparent state and the opaque, scattering states, in which the light and images from the image projector 20 is efficiently and substantially scattered.

**[ 0074 ]** In additional embodiments, the MOE device 32 may be constructed to be lightweight. The liquid crystal panels 35-42 may be composed of a pair of glass substrates coated on their inner surfaces, with the transparent conducting layers 70, 71 being coated with an insulating layer. A polymer alignment layer may optimally be disposed upon the insulating layer. Between the substrates of a given liquid crystal panel, a thin layer of liquid crystal composition is disposed to be about 10-20 microns thick.

173357.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-20-

**[ 0075]** The majority of the volume and weight of the panels is associated with the glass of the substrates, which contributes to a potentially very heavy MOE device 32 as the transverse size and the number of panels are increased. Implementation of the liquid crystal panels 36-42 to be composed of plastic substrates is one solution to the increase in weight. Other implementations include using processing methods to produce the optical elements of the MOE device 32 on a roll-to-roll process on very thin plastic substrates, to allow fabrication to be produced by a continuous and very low cost method.

**[ 0076]** Using such relatively lightweight components for the MOE device 32, the Moe device 32 may also be collapsible when not in operation, to allow the MVD system 10 to be portable. Also, the optical elements 36-42 may include other inorganic materials in addition to or instead of liquid crystal technology, such as an ITO layer organically applied by spin or dip coating.

#### THE HIGH FRAME RATE IMAGE PROJECTOR

**[ 0077]** The maximum resolution and color depth of the three-dimensional images 34, 56 generated by the MVD system 10 is directly determined by the resolution and color depth of the high frame rate image projector 20. The role of the MOE device 32 is primarily to convert the series of two-dimensional images from the image projector 20 into a 3D volume image.

**[ 0078]** In one embodiment, the image projector 20 includes, an arc lamp light source with a short arc. The light from the lamp is separated into red, green and blue components by color separation optics, and is used to illuminate three separate spatial light modulations (SLMs). After modulation by the SLMs, the three color channels are recombined into a single beam and projected from the optics 22, such as a focusing lens, into the MOE device 32, such that each respective two-dimensional image from the slices 24-30 is displayed on a respective one the optical elements 36-42.

**[ 0079]** In another embodiment, the image projector 20 includes high power solid state lasers instead of an arc lamp and color separation optics.

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-21-

Laser light sources have a number of advantages, including, increased efficiency, a highly directional beam, and single wavelength operation. Additionally, laser light sources produce highly saturated, bright colors.

**[ 0080]** In a further embodiment, different technologies may be used to implement the SLM, provided that high speed operation is attained. For example high speed liquid crystal devices, modulations based on micro-electromechanical (MEMS) devices, or other light modulating method may be used to provide such high frame rate imaging. For example, the Digital Light Processing (DLP) technology of TEXAS INSTRUMENTS, located in Dallas, Texas; the Grating Light Valve (GLV) technology of SILICON LIGHT MACHINES, located in Sunnyvale, California; and the analog ferroelectric LCD devices of BOULDER NONLINEAR SYSTEMS, located in Boulder, Colorado, may be used to modulate the images for output by the image projector 20. Also, the SLM may be a ferroelectric liquid crystal (FLC) device, and polarization biasing of the FLC SLM may be implemented.

**[ 0081]** To obtain very high resolution images in the MVD system 10, the images 44-50 must be appropriately and rapidly re-focused onto each corresponding optical element of the MOE device 32, in order to display each corresponding image on the optical element at the at the appropriate depth. To meet such re-focusing requirements, adaptive optics systems are used, which may be device known in the art, such as the fast focusing apparatus described in G. Vdovin, "Fast focusing of imaging optics using micro machined adaptive mirrors", available on the Internet at <http://guemsey.et.tudelft.nl/focus/index.html>. As shown in FIG. 8, a membrane light modulator (MLM) 90 has as a thin flexible membrane 92 which acts as a mirror with controllable reflective and focusing characteristics. The membrane 92 may be composed of a plastic, nitrocellulose "MYLAR", or then metal films under tension and coated with a conductive reflecting layer of metal coating which is reflective, such as aluminum. An electrode and/or a piezoelectric actuator 94 is positioned to be substantially adjacent to the

173357.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-22-

membrane 92. The electrode 94 may be flat or substantially planar to extend in two dimensions relative to the surface of the membrane 92. The membrane 92 is mounted substantially adjacent to the electrode 94 by a mounting structure 96, such as an elliptical mounting ring, such as a circular ring.

5 **[ 0082]** The electrode 94 is capable of being placed at a high voltage, such as about 1,000 volts, from a voltage source 98. The voltage may be varied within a desired range to attract and/or repel the membrane 92. The membrane 92, which may be at ground potential by connection to ground 100, is this caused by electrostatic attraction to deflect and deform into a curved  
10 shape, such as a parabolic shape. When so deformed, the membrane 92 acts as a focusing optic with a focal length and thus a projection distance which can be rapidly varied by varying the electrode voltage. For example, the curved surface of the membrane 92 may have a focal length equal to half of the radius of curvature of the curve membrane 92, with the radius of curvature being  
15 determined by the tension on the membrane 92, the mechanical properties of the material of the membrane 92, the separation of the membrane 92 and the electrode 94, and the voltage applied to the electrode 94.

**[ 0083]** In one embodiment, the deflection of the membrane 92 is always toward the electrode 94. Alternatively, by placing a window with a transparent  
20 conducting layer on the opposite side of the membrane 92 from the electrode 94, and then applying a fixed voltage to the window, the membrane 92 may be caused to deflect in both directions; that is, either away from or toward the electrode 94, thus permitting a greater range of focusing images. Such controlled variation of such a membrane 92 in multiple directions is described,  
25 for example, in a paper by Martin Yellin in the SPIE CONFERENCE PROCEEDINGS, VOL. 75, pp. 97-102 (1976).

**[ 0084]** The optical effects of the deflections of the MLM 90 may be magnified by the projection optics 22, and cause the projected image from an object plane to be focused at varying distances from the image projector 20 at  
30 high re-focusing rates. Additionally, the MLM 90 can maintain a nearly

173357.1

-23-

constant image magnification over its full focusing range.

**[ 0085]** Referring to FIG. 9, the MLM 90 may be incorporated into an adaptive optics system 102, for example, to be adjacent to a quarter wave plate 104 and a beam splitter 106 for focusing images to the projection optics 22  
5 images 110 from an object or object plane 112 pass through the polarizer 108 to be horizontally polarized by the beam splitter 106, and thence to pass through the quarter wave plane 104 to result in circularly polarized light incident on the membrane 92 for reflection and focusing. After reflection, such focused image 114 are passed back through the quarter wave plate 104  
10 resulting in light 114 polarized at 90° to the direction of the incident light 110. The beam splitter 106 then reflects the light 114 toward the projection optics 22 to form an image of the object. By using the quarter waveplate 104 and polarizer 108 with the MLM 90, the adaptive optic system may be folded into a relatively compact configuration, which avoids mounting the MLM 90 off-axis  
15 and/or at a distance from the projection lens 22.

**[ 0086]** The images may be focused at a normal distance  $F_N$  to a normal projection plane 116 from the projection optics 22, and the image may be refocused at a high rate between a minimum distance  $F_{MIN}$  from minimum projection plane 118 to a maximum distance  $F_{MAX}$  to a maximum projection  
20 plane 120 from the projection optics 22 with high resolution of the image being maintained.

**[ 0087]** As shown in FIG. 10, the image projector 20 including the adaptive optics system with the MLM 90, quarter waveplate 104, and polarizer 108 may thus selectively and rapidly project individual 2D slices of the 3D  
25 image onto individual optical elements 36-42, such that the 2D slices are focused on at least one optical element, with a high focusing accuracy such that the 2D slices are not incident on the spacers 122 between the optical elements 36-44 of the MOE device 32.

**[ 0088]** Referring to FIGS. 9-10, in another alternative embodiment, the  
30 image projector 20 may include an SLM 124 having a plurality of pixels 126 for

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-24-

modulating the light 110 from the object plane 112. Twisted nematic (TN) SLMs may be used, in which a switchable half waveplate is formed by producing alignment layers on the front and rear substrates of the SLM 124 which differ in orientation by 90°. The liquid crystal of the TN SLM aligns to the alignment layer on each surface, and then joins smoothly between the substrates to form a one-half period of a helix. If the pitch of the helix is chosen to be near the wavelength of light, the helix acts as a half-waveplate and rotates the incident light polarization by 90°. The application of an electric field of sufficient strength to the TN SLM causes the bulk of the liquid crystal material between the two substrates to reorient to point perpendicular to the substrates, which unwinds the helix and destroys the half waveplate, thus eliminating the rotation of the polarization of the incident light. The lack of an inherent polarization in the TN liquid crystal material causes TN SLMs to be insensitive to the sign of the applied voltage, and either sign of voltage results in the same reduction in waveplate action, so the TN SLM acts as waveplate with a retardation being a function of the magnitude of the applied voltage.

**[ 0089]** Alternatively, as shown in FIG.11, the SLM 124 may be ferroelectric liquid crystal (FLC) based device composed of a plurality of pixels 126, with each pixel 126 having the FLC material 128 positioned over a semiconductor substrate such as a silicon substrate 130, with an electrode 132 disposed therebetween. The electrode 132 may be composed of aluminum. A transparent conductor 134 is disposed above the FLC material 128 and is connected to a voltage source, such as a 2.5 V operating voltage. A cover slide 136 composed, for example, of glass is positioned over the transparent conductor 134.

**[ 0090]** FLC SLMs composed of such pixels 126 operate in a manner similar to twisted nematic (TN) SLMs, in which the application of an electric field, for example, between the electrode 128 and the conductor 134, results in the rotation of polarization of incident light. The degree of rotation is proportional to the applied voltage, and varies from 0° to 90°. in combination

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-25-

with an external polarizer, such as the polarizer 108, the polarization rotation of the SLM 124 results in intensity modulation of the incident light.

**[ 0091]** Unlike a TN SLM, an FLC SLM possesses an inherent polarization, which results in an FLC SLM having a desired thickness forms a waveplate with a retardation independent of the applied voltage. The FLC SLM acts as a waveplate with an orientation being a function of both the magnitude and the sign of the applied voltage.

**[ 0092]** For the pixel 126 of the FLC SLM 124 FIG. 11, a half waveplate of the FLC SLM 124 is typically implemented to have an unpowered orientation that is about 22.5° to a horizontal reference axis, resulting in a 45° rotation of the incident light polarization. When powered, the transparent conductor 134 is biased to 2.5 V, which may be half the voltage range of the electrode 132 of the pixel 126.

**[ 0093]** Referring to FIGS. 12-14, the orientations of the principle axes of the half waveplate formed by the pixels 126 of the FLC SLM 124 are shown at 0 V, 2.5 V, and 5 V, respectively, to have a 0°, 45°, and 90° polarization, respectively.

**[ 0094]** Both TN SLMs and FLC SLMs are to be direct current (DC) balanced to maintain correct operation. The application of a continuous DC electric field to the pixels 126 results in the destruction of the alignment layers on the substrates by impurity ion bombardment, which ruins the pixel 126. To prevent such damage, the electric field is periodically and/or irregularly reversed in sign with a frequency on the order of about 100 Hz for TN SLMs, and about 1 Hz for FLC SLMs. The lack of sensitivity of the TN SLM to the sign of the electric field results in the image passing therethrough having a constant appearance as the electric field is reversed. However, an FLC SLM is typically sensitive to the sign of the field, which results in grayscale inversion by which black areas of the image changing to white and white areas changing to black as the SLM is DC balanced.



-26-

**[ 0095]** To prevent grayscale inversion during DC balancing of the SLM 124, the polarization of the incident light is biased so that the positive and negative images caused by the application of the electric field to the pixels 126 have the same appearance. The SLM 124 and/or the individual pixels 126 have a static half waveplate 138 positioned to receive the incident light 110 before the SLM 124. The waveplate 138 is oriented to provide a 22.5° rotation of the polarization of the incident light, with the resulting grayscale having a maximum brightness with either 0 V or 5 V applied to the electrode 132, and has a minimum brightness when 2.5 V is applied to the electrode 132. In alternative embodiments, to prevent reduction of the maximum brightness by inclusion of the waveplate 138, FLC material 128 having a static orientation of 45° may be used, which allows the maximum brightness of a polarization biased FLC SLM 124 to match the maximum brightness of the unbiased SLM without the waveplate 138.

**[ 0096]** As described above, in alternative embodiments of the image projector 20, lasers may be used such as colored and/or solid state color-producing lasers at the object plane 112. Such lasers may, for example, incorporate blue and green solid state lasers currently available in other information storage and retrieval technologies, such as CDROMs as well as laser video systems.

**[ 0097]** In one alternative embodiment of the image projector 20, the adaptive optics may be used in a heads-up display to produce the 3D image that is not used in depth but instead may be moved toward or away from the viewer 12. Without using the MOE device 32, the 2D image slices 24-30 may be projected directly into the eye of the viewer 12 to appear at the correct depth. By rapidly displaying such slices 24-30 to the viewer 12, a 3D image is perceived by the viewer 12. In this embodiment of the MVD system 10, the adaptive optics of the image projector 20 and other components may be very compact to be incorporated into existing heads-up displays for helmet-mounted displays or in cockpit or dashboard mounted systems in vehicles.

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-27-

[ 0098] In another embodiment, the slices 24-30 may be generated and projected such that some of the images 44-50 are respectively displayed on more than one of optical elements 36-42, in order to oversample the depth by displaying the images over a range of depths in the MOE device 32 instead of at a single depth corresponding to a single optical element. For example, 5 oversampling may be advantageous if the MOE device 32 has more planes of optical elements 36-42 than the number of image slices 24-30, and so the number of images 44-50 is greater than the number of image slices 24-30. For example, a slice 24 displayed on both of optical elements 36-38 as images 44- 10 46, respectively. Such oversampling generates the 3D image 34 with a more continuous appearance without increasing the number of optical elements 36-42 or the frame rate of the image projector 20. Such oversampling may be performed, for example, by switching multiple optical elements to be in an opaque state to receive a single projected slice during a respective multiple 15 projection cycles onto the respectively opaque multiple optical elements.

#### GENERATION OF THE 3D IMAGE FROM A MULTI-PLANAR DATASET

[ 0099] To generate the set of 2D image slices 24-30 to be displayed as a set of 2D images 44-50 to form the 3D image 34, a multi-planar dataset is generated from the 3D image data received by the MVD controller 18 from the 20 graphics data source 16. Each of the slices 24-30 is displayed at an appropriate depth within the MOE device 32; that is, the slices 24-30 are selectively projected onto a specific one of the optical elements 36-42. If the slices 24-30 of the 3D image 34 are made close enough, the image 34 appears to be a continuous 3D image. Optional multi-planar anti-aliasing described herein may 25 also be employed to enhance the continuous appearance of the 3D image 34.

[ 0100] A method of computing a multi-planar dataset (MPD) is performed by the MVD system 10. In particular, the MVD controller 18 performs such a method to combine the information from a color buffer and a depth (or z) buffer of the frame buffer of the graphics data source 16, which

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-28-

may be a graphics computer. The method also includes fixed depth operation and anti-aliasing.

**[ 0101 ]** Referring to FIG. 15, the method responds in step 140 to interaction with the user 12 operating the MVD system 10, such as through a GUI or the optional user feedback device 58 to select and/or manipulate the images to be displayed. From such operation and/or interaction, the MVD system 10 performs image rendering in step 142 from image data stored in a frame buffer, which may be, for example, a memory of the MVD controller 18. The frame buffer may include sub-buffers, such as the color buffer and the depth buffer. During a typical rendering process, a graphics computer computes the color and depth of each pixel in the same (x,y) position in the depth buffer. If the depth of the a new pixel is less than the depth of the previously computed pixel, then the new pixel is closer to the viewer, so the color and depth of the new pixel are substituted for the color and depth of the old pixel in both of the color and depth buffers, respectively. Once all objects in a scene are rendered as a dataset for imaging, the method continues in steps 144-152. Alternatively or addition, the rendered images in the frame buffer may be displayed to the viewer 12 as a 3D image on a 2D computer screen as a prelude to generation of the 3D image as a volumetric 3D image 34, thus allowing the viewer 12 to select which images to generate as the 3D image 34.

**[ 0102 ]** In performing the method for MPD computation, the data from the color buffer is read in step 144, and the data from the depth buffer is read in step 146. The frame buffer may have, for example, the same number of pixels in the x-dimension and the y-dimension as the desired size of the image slices 24-30, which may be determined by the pixel dimensions of the optical elements 36-42. If the number of pixels per dimension is not identical between the frame buffer and the image slices 24-30, the data in the color and depth buffers are scaled in step 148 to have the same resolution as the MVD system 10 with the desired pixel dimensions of the image slices 24-30. The MVD controller 18 includes an output buffer in the memory for storing a final MPD

173357.1

-29-

generated from the data of the color and depth buffers, which may be scaled data as indicated above.

[ 0103] The output buffer stores a set of data corresponding to the 2D images, with such 2D images having the same resolution and color depth as the images 44-50 to be projected by the slices 24-30. In a preferred embodiment, the number of images 44-50 equals the number of planes formed by the optical elements 36-42 of the MOE device 32. After the MPD calculations are completed and the pixels of the 2D images are sorted in the output buffer in step 150, the output buffer is transferred to an MVD image buffer, which may be maintained in a memory in the image projector 20, from which the 2D images are converted to image slices 24-30 to form the 3D image 34 to be viewed by the viewer 12, as described above. The method then loops back to step 140, for example, concurrently with generation of the 3D image 34, to process new inputs and thence to update or change the 3D image 34 to generate, for example, animated 3D images.

[ 0104] The MVD system 10 may operate in two modes: variable depth mode and fixed depth mode. In variable depth mode, the depth buffer is tested prior to the MPD computations including step 146, in order to determine a maximum depth value  $Z_{MAX}$  and the minimum depth value  $Z_{MIN}$ , which may correspond to the extreme depth values of the 3D image on a separate 2D screen prior to 3D volumetric imaging by the MVD system 10. In the fixed depth mode, the  $Z_{MAX}$  and  $Z_{MIN}$  are assigned values to the viewer 12, either interactively or during application startup to indicate the rear and front bounds, respectively, of the 3D image 34 generated by the MVD system 10. Variable depth mode allows all of the objects visible on the 2D screen to be displayed in the MOE device 32 regardless of the range of depths or of changes in image depth due to interactive manipulations of a scene having such objects.

[ 0105] In fixed depth mode, objects which may be visible on the 2D screen may not be visible in the MOE device 32 since such objects may be outside of a virtual depth range of the MOE device 32. In an alternative

-30-

embodiment of the fixed depth mode, image pixels which may be determined to lie beyond the "back" or rearmost optical element of the MOE device 32, relative to the viewer 12, may instead be displayed on the rearmost optical element. For example, from the perspective of the viewer 12 in FIG. 1, the optical element 36 is the rearmost optical element upon which distant images may be projected. In this manner, the entire scene of objects remains visible, but only objects with depths between  $Z_{MAX}$  and  $Z_{MIN}$  are visible in the volumetric 3D image generated by the MOE device 32.

**[ 0106]** In the MPD method described herein, using the values of  $Z_{MAX}$  and  $Z_{MIN}$ , the depth values within the depth buffer may be offset and scaled in step 148 so that a pixel with a depth of  $Z_{MIN}$  has a scaled depth of 0, and a pixel with depth of  $Z_{MAX}$  has a scaled depth equal to the number of planes of optical elements 36-42 of the MOE device 32. In step 150, such pixels with scaled depths are then sorted and stored in the output buffer by testing the integer portion  $|d_i|$  of the scaled depth values  $d_i$ , and by assigning a color value from the color buffer to the appropriate MPD slices 24-30 at the same (x,y) coordinates. The color value may indicate the brightness of the associated pixel or voxel.

**[ 0107]** Based on the foregoing, it will be evident to one skilled in the art that the same effects can be achieved by using a selected subset of the optical elements 36-42 of MOE device 32. However, in the preferred embodiment all optical elements 36-42 of MOE device 32 are utilized.

**[ 0108]** Keeping in mind the distinction between voxels and tridels, as discussed above, the process of mapping the depth of a tridel from virtual space to its voxel depth coordinate within the display actually occurs in two steps. The first step entails conversion of the virtual depth-coordinate (z) of the tridel into an actual depth coordinate (z') within the multiplanar display. The second step entails converting the continuous z' values of the tridel to the discrete depth coordinate k of a particular display voxel (k). The reasons for this will become apparent below.

- [ 0109] The conversion from  $z$  to  $z'$  can be carried out in either the MVD controller 18 or in graphics data source 16. Since this conversion is somewhat display independent it is preferably carried out by software (either application, API, or device driver) or graphics card hardware within the MVD controller 18.
- 5 Similarly the conversion from  $z'$  to  $k$  can be carried out either in the MVD controller 18 or graphics data source 16. However, since this conversion depends on the specific parameters of the display it will often be carried out in the MVD controller 18, either by hardware or firmware.
- [ 0110] However, in systems in which the multiplanar frame buffer is actually on a graphics card of the graphics data source 16, the conversion from  $z'$  to  $k$  must be carried out in the graphics card hardware. In this case, the graphics card must be able to query the MVD controller 18 as to its  $z'$  to  $k$  mapping characteristics so that these may be used during the processing of tridels into voxels.
- 10 [ 0111] The virtual depth coordinate within the graphics data source 16 can potentially have a range that is much deeper than the physical depth of the volumetric display. For example, a scene of a house and street can have a virtual depth range of a 50 meters, whereas the MOE device 32 may be physically only 0.3 meters deep. Further, the mapping of a tridel's virtual depth  $z$  to physical depth  $z'$  may take any functional form provided it is a single valued. For example, in the variable depth mode discussed above, the simplest mapping is to scale the entire virtual depth range  $D_v$  to fit linearly within the depth  $D_p$  of MOE device 32 with a constant scale parameter equal to  $D_p/D_v$ . Similarly, in the fixed depth mode discussed above, the first 0.3 meters of the virtual space could be mapped to the display with a constant scale of 1. The parts of the scene with depth greater than  $D_p$  can be either not displayed, or be painted onto the deepest plane of the display as a 2d backdrop.
- 20 [ 0112] Another useful mapping might be one that is nonlinear and provides high resolution for low depth values and reduced resolution at higher depth values. For example, the square root function provides the highest
- 30

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-32-

resolution near zero with decreasing resolution as  $z$  increases. An example using the preceding values for  $D_v$  and  $D_D$  is in to use the mapping:

$$z' = \frac{D_D \sqrt{z}}{\sqrt{D_v}} = 0.0424 \sqrt{z}$$

- 5 for  $z$  in the range of 0 to 50 meters. In general any single valued function can be used to map  $z$  to  $z'$  and it will be left to the programmer or viewer to decide how to make the most appropriate  $z$  to  $z'$  mapping for the particular image or application.

- [ 0113] In order to create an image within the MOE device 32 a method is  
 10 required to compute the discrete voxel depth  $k$  from the desired physical depth  $z'$  of the tridel. The MOE device 32 is composed of a number of optical elements or image planes ( $N_{planes}$ ) that occupy a range of physical depths between 0 and  $D_D$ . In the simplest case the planes can be equally spaced by an amount  $\Delta = D_D / (N_{planes} - 1)$ . This makes the relationship between  $z'$  and  $k$  simple, linear and  
 15 equal to  $k = z' / \Delta$ . However, it may be sometimes desirable, to have the spacing between planes increase with increasing depth from the viewer. In this case the relationship between  $z'$  and  $k$  becomes nonlinear. For example, if the spacing between planes  $k$  and  $k + 1$  is given by:

$$\Delta_k = \Delta_0 + \Delta_1 k$$

- 20 then the overall depth of the display is

$$D_D = (N_{planes} - 1) \Delta_0 + \frac{(N_{planes} - 1)(N_{planes} - 2)}{2} \Delta_1$$

and the physical depth  $z'$  of plane  $k$  is

$$z' = \Delta_0 k + \frac{\Delta_1}{2} k(k - 1)$$

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-33-

[ 0114] The above equation can be solved for k to give

$$k = \frac{1}{2} + \frac{\Delta_0}{\Delta_1} \left( -1 \pm \sqrt{1 - \frac{\Delta_1}{\Delta_0} + \frac{\Delta_1^2}{4\Delta_0^2} + \frac{2\Delta_1 z'}{\Delta_0^2}} \right)$$

- [ 0115] By inspection we can determine that the positive root of the above equation is the one to use to compute the voxel depth k from the physical depth z' since the negative root would give negative value, a clearly nonphysical solution. Although the voxel depth could be computed from the above equation "on the fly" as voxel data is transferred to the display, it may be more efficient to use a pre-computed lookup table since the range of both z' and k will be known from the design of the MOE device 32.
- 10 [ 0116] It will be noted that the above equation does not, in general, give an integer value as a result. This is acceptable because multiplanar anti-aliasing serves to determine how the brightness of a voxel at depth k associated with a tridel at virtual depth z can be divided among two adjacent display voxels. Recall that the integer part of k determines the pair of planes to which the
- 15 brightness of a tridel is assigned and the fractional part of k determines how the brightness is apportioned between the two planes. For example, if a tridel at (i, j) has a value of k equal to 5.34, then 34% of the tridel's brightness will be found on the voxel at (i,j,6) of the tridel's brightness will be found on the voxel at (i,j,5).
- 20 [ 0117] Using the disclosed MPD method, the volumetric 3D images 34 generated by the MVD system 10 may be incomplete; that is, objects or portions thereof are completely eliminated if such objects or portions are not visible from the point of view of a viewer viewing the corresponding 3D image on a 2D computer screen. In a volumetric display generated by the MVD system 10,
- 25 image lookaround is provided allowing the viewer 12 in FIG. 1 to move to an angle of view such that the previously hidden objects become visible, and so



WO 03/017246

PCT/US02/26718

-34-

such MVD systems 10 are advantageous over existing 2D displays of 3D images.

**[ 0118]** In alternative embodiments, the MPD method may implement anti-aliasing, as described herein, by using fractional portion of scaled depth value; that is,  $d_i - \lfloor d_i \rfloor$ , to assign such a fraction of the color value of the pixels to two adjacent MVD image slices in the set of slices 24-30. For example, if a scaled depth value is 5.5 and each slice corresponds to a discrete depth value, half of the brightness of the pixel is assigned to each of slice 5 and slice 6. Alternatively, if the scaled depth is 5.25, 75% of the color value is assigned to slice 5 because slice 5 is "closer" to the scaled depth, and 25% of the color value is assigned to slice 6.

**[ 0119]** Different degrees of anti-aliasing may be appropriate to different visualization tasks. The degree of anti-aliasing can be varied from one extreme; that is, ignoring the fractional depth value to assign the color value, to another extreme of using all of the fractional depth value, or the degree of anti-aliasing can be varied to any value between such extremes. Such variable anti-aliasing may be performed by multiplying the fractional portion of the scaled depth by an anti-aliasing parameter, and then negatively offsetting the resulting value by half of the anti-aliasing parameter. The final color value may be determined by fixing or clamping the negatively offset value to be within a predetermined range, such as between 0 and 1. An anti-aliasing parameter of 1 corresponds to full anti-aliasing, and an anti-aliasing parameter of infinity corresponds to no anti-aliasing. Anti-aliasing parameters less than 1 may also be implemented.

**[ 0120]** In scaling depth buffer values, a perspective projection may be used, as specified in the Open Graphics Library (OpenGL) multi-platform software interface to graphics hardware supporting rendering and imaging operations. Such a perspective projection may result in a non-linearity of values in the depth buffer. For an accurate relationship between the virtual depth and the visual depth of the 3D image 34, the MVD controller 18 takes such non-linearity into account to scale the depth buffer values in step 148. Alternatively, an orthographic projection may be used to scale the depth buffer values in step

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-35-

148.

**[ 0121 ]** It will be appreciated by those skilled in the art that there are many factors that contribute to the ability of human vision to perceive objects or scenes in three-dimensions. Among these factors are both physical vision cues and psychological vision cues. By way of example, physical vision cues arise from, but are not limited to, the following physical effects.

**[ 0122 ]** Three dimensionality of a scene is associated with the fact that slightly different images are provided to each eye. This binocular effect or so-called stereopsis, is an important physical cue that is processed by the brain to impart three-dimensionality to what is being viewed. Further, in viewing a real three-dimensional scene, the viewer's eyes must change their focus as they focus to different depths within the three-dimensional scene. This difference in eye focusing, sometimes referred to as eye accommodation, is another physical vision cue that permits the brain to conclude that a three-dimensional scene is being viewed. A closely related physical cue is ocular convergence, which means that both eyes must point toward and focus on the same spot. In viewing a real three-dimensional scene, the amount of ocular convergence varies as the eye focuses on different depths within the three-dimensional scene. This provides another physical cue to the brain that the scene being viewed is three dimensional.

**[ 0123 ]** Another example of a physical cue arises from the fact that a real three-dimensional scene requires movement of the observer to view different portions of the three-dimensional scene. This so-called "image look around" or motion parallax is yet another physical cue associated with real three-dimensional scenes which imparts to the brain the perception that a viewed scene is indeed three-dimensional.

**[ 0124 ]** Physical vision cues, as exemplified by the above effects, are inherently present in the volumetric three-dimensional images disclosed herein because they are created in and occupy a volume of space. These physical cues distinguish such images from images that appear to be three-dimensional but

173887.1

are in fact rendered on a two-dimensional display such as a television screen or computer monitor.

[ 0125] By their very nature, the volumetric three-dimensional image displays disclosed herein produce images having a measurable but finite depth.

5 While this depth can be adjusted by varying the geometry of the MOE device 32, including the number and spacing of the plurality of optical elements 36-42 contained therein, the perceived depth of volumetric images produced by the MOE 32 is necessarily limited by practical considerations.

[ 0126] It is known in the art that in addition to the physical vision cues provided to the brain when viewing real three-dimensional scenes, it is also possible to create and emphasize the illusion of depth or three-dimensionality within a two-dimensional image by the use of one or more psychological cues. By way of example, and not limitation, psychological vision cues may be provided by rendering a scene with appropriate shading and/or shadowing to give objects in the scene the appearance of depth to thereby impart an overall three dimensional appearance to the scene.

[ 0127] A common psychological vision cue is the use of forced perspective. In existing 2D monitors, perspective is generated computationally in the visualization of 3D data to create a sense of depth such that objects further from the viewer appear smaller, and parallel lines appear to converge. In the disclosed MVD system 10, the 3D image 34 is generated with a computational perspective to create the aforesaid sense of depth, and so the depth of the 3D image 34 is enhanced.

[ 0128] Further, a scene may be provided with a three-dimensional appearance by rendering objects within that scene so that they have a surface texture whose resolution decreases with apparent distance of the objects from the viewer. This provides a "fuzziness" to the appearance of surfaces which increases as their apparent depth within the scene increases. Closely related to this psychological vision cue is the addition of atmospheric effects during rendering of a scene such as a landscape, by increasing the degree of haziness

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-37-

associated with distant objects or by shifting the color of distant objects toward the blue with an increase in their apparent distance. Still other psychological vision cues which give the appearance of three dimensional depth to a scene are a reduction in the brightness of objects perceived as being in the distance or a  
5 loss of focus of such objects.

**[ 0129]** Yet another psychological vision cue is the use of occlusion, which means that portions of a more distant object may be obscured by objects in the foreground. Volumetric displays are not able to provide true physical occlusion within the 3D images because foreground portions of the image cannot block  
10 the light from background portions of the image. Thus, if both the foreground and background portions of the 3D image are generated in their entirety, the background portion will be seen through the foreground portion, making the foreground portion appear translucent rather than solid. However, a quasi-occlusion effect can be created by not generating those portions of background  
15 images that would otherwise be occluded by foreground images. Thus, at least within an angular range about a selected viewing axis, one can obtain an apparent occlusion effect by this technique.

**[ 0130]** Although use of psychological vision cues are well-known to painters and artists desiring to impart a three-dimensional quality to two-  
20 dimensional paintings, etc., we have discovered that the combination of such psychological vision cues, when combined with the physical cues inherently provided by the volumetric three-dimensional displays disclosed herein, provide 3D images whose apparent depth can exceed the physical depth of the MOE device 32, sometimes by a large factor.

**[ 0131]** For example, an image of the interior of a 3D box may be rendered into a 3D volumetric image by the system disclosed herein. By rendering the box in geometrically accurate fashion, the interior of the box would appear no deeper than the depth of the display (i.e., the depth of MOE device 32). However, by employing forced perspective during rendering of the  
30 3D box prior to forming the volumetric image, whereby the deeper parts of the

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-38-

image are rendered at a reduced scale, the 3D box can be made to appear considerably deeper than it would otherwise appear in the three-dimensional image.

5 [ 0132] By way of another example, an image of a road receding into the distance within a volumetric display can be made to appear considerably more realistic through a combination of the physical depth of the display and the use of both forced perspective and a reduction of image resolution with distance, as could be implemented by low pass filtering during the rendering process.

10 [ 0133] As should be evident from the foregoing, it may be advantageous to add one or more of the aforementioned psychological visual cues, as well as others, during rendering of a scene prior to projection of the scene to form a volumetric 3D image.

15 [ 0134] In implementing the MVD system, the psychological vision cues can be added during the rendering process within the MVD system 10 by using commercially available software applications such as 3D Studio Max, SoftImage, and Lightwave. These software applications could be resident in graphics data source 16, MVD controller 18 or could be included in a separate stand-alone processor that is functionally part of the MVD controller 18. As an example, a background blur attributable to a short depth of focus is a psychological vision cue that can be added by compositing together a number of renderings of a scene, each rendering being created with the camera pivoted slightly around the point of focus.

20 [ 0135] The psychological vision cues of haze, blue shifting of light with depth, dimming of brightness with depth, and depth of focus (i.e., atmospheric psychological cues) can also be added in real time by the input processor of the graphics data source 16, MVD controller 18, or a separate processor that is part of MVD controller 18. More specifically, image data transferred to the display's frame buffer may be stored in such a way that images at different depths are in separate storage areas. This enables depth dependent image processing to be carried out to introduce atmospheric cues. For example, haze can be added by

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-39-

reducing the contrast of deeper images. Blue shifting can be added by shifting the color balance of deeper images toward the blue. Dimming can be added by reducing the brightness of deeper images. Depth of focus blur can be added by applying a Gaussian blur filter of increasing strength to images of increasing distance on either side of the focus depth.

5 [ 01361 Physical and/or psychological depth cues are often added to enhance the display of 2D images to give them a "3D" appearance, for example as set forth in U.S. Patent No. 5,886,818, with respect to enhancing 2D images which are projected so as to appear floating in space. However, it has  
10 previously not been recognized that physical and psychological depth cues, including but not limited to those described above, can also significantly enhance the 3D appearance of the volumetric 3D images generated by the systems and techniques disclosed herein. Thus, notwithstanding the fact that a volumetric 3D image is generated by these systems and techniques, the addition  
15 to that 3D image of physical and/or psychological depth cues during the image rendering process serves to create 3D volumetric images that are perceived as being even more realistically in three dimensions than would otherwise be the case in the absence of such cues.

[ 01371 In another embodiment, the slices 24-30 may be generated and  
20 projected such that some of the images 44-50 are respectively displayed on more than one of the optical elements 36-42, in order to oversample the depth by displaying the images over a range of depths in the MOE device 32 instead of at a single depth corresponding to a single optical element. For example, oversampling may be advantageous if the MOE device 32 has more planes of  
25 optical elements 36-42 than the number of image slices 24-30, and so the number of images 44-50 is greater than the number of image slices 24-30. For example, a slice 24 displayed on both of optical elements 36-38 as images 44-46, respectively. Such oversampling generates the 3D image 34 with a more continuous appearance without increasing the number of optical elements 36-  
30 42 or the frame rate of the image projector 20. Such oversampling may be

173357.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-40-

performed, for example, by switching multiple optical elements to be in an opaque state to receive a single projected slice during a respective multiple projection cycles onto the respectively opaque multiple optical elements.

## ALTERNATIVE EMBODIMENTS OF THE MVD SYSTEM

5 **[ 0138]** In one alternative embodiment, the MOE device 32 includes 10 liquid crystal panels 36-42 and is dimensioned to be 5.5 inches (14 cm) long by 5.25 inches (13.3 cm) wide by 2 inches (4.8 cm) in depth. The image projector 20 includes an acousto-optical laser beam scanner using a pair of ion lasers to produce red, green, and blue light, which was modulated and then scanned by  
10 high frequency sound waves. The laser scanner is capable of vector scanning 166,000 points per second at a resolution of 200 x 200 points. When combined with the 10 plane MOE device 32 operating at 40 Hz, the MVD system 10 produces 3D images with a total of 400,000 voxels, that is, 3D picture elements. A color depth of 24-bit RGB resolution is obtained, with an image update rate of  
15 1 Hz. Using a real image projector 54, a field of view of 100° x 45° can be attained.

**[ 0139]** In another alternative embodiment, the MOE device 32 includes 12 liquid crystal panels 36-42 and is dimensioned to be 6 inches (15.2 cm) long by 6 inches (15.2 cm) wide by 3 inches (7.7 cm) in depth. The image projector  
20 20 includes a pair of TEXAS INSTRUMENTS DLP video projectors, designed to operate in field sequential color mode to produce grayscale images at a frame rate of 180 Hz. By interlacing the two projectors, an effectively single projector is formed with a frame rate of 360 Hz, to produce 12 plane volumetric images at a rate of 30 Hz. The transverse resolution attainable is 640 x 480 points.  
25 When combined with the 12 plane MOE device 32 operating at 30 Hz, the MVD system 10 produces gray 3D images with a total of 3,686,400 voxels. Using a real image projector 54, a field of view of 100° x 45° can be attained.

**[ 0140]** In a further alternative embodiment, the MOE device 32 includes 50 liquid crystal panels 36-42 and is dimensioned to be 15 inches (38.1 cm)

173857.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-41-

long by 13 inches (33.0 cm) wide by 10 inches (25.4 cm) in depth. The image projector 20 includes a high speed analog ferroelectric LCD available from BOULDER NONLINEAR SYSTEMS, which is extremely fast with a frame rate of about 10kHz. The transverse resolution attainable is 512 x 512 points. When  
5 combined with the 50 plane MOE device 32 operating at 40 Hz, the MVD system 10 produces 3D images with a total of 13,107,200 voxels. A color depth of 24-bit RGB resolution is obtained, with an image update rate of 10 Hz. Using a real image projector 54, a field of view of 100° x 45° can be attained. With such resolutions and a volume rate of 40 Hz non-interfaced, the MVD system 10  
10 has a display capability equivalent to a conventional monitor with a 20 inch (50.8 cm) diagonal.

[ 0141] In another embodiment, the optical elements 36-42 may have a transverse resolution of 1280 x 1024 and a depth resolution of 256 planes. The system will potentially operate in a depth interlaced mode in which alternated  
15 planes are written at a total rate of 75 Hz, with the complete volume updated at a rate of 37.5 Hz. Such interlacing provides a higher perceived volume rate without having to increase the frame rate of the image projector 20.

[ 0142] In a further embodiment, the MOE device 32 includes 500 planes for a significantly large depth resolution, and a transverse resolution of 2048 x  
20 2048 pixels, which results in a voxel count greater than 2 billion voxels. The size of the MOE device 32 in this configuration is 33 inches (84 cm) long by 25 inches (64 cm) wide by 25 inches (64 cm) in depth, which is equivalent to a conventional display with a 41 inch (104 cm) diagonal. The image projector 20 in this embodiment includes the Grating Light Valve technology of SILICON  
25 LIGHT MACHINES, to provide a frame rate of 20 kHz.

#### VIRTUAL INTERACTION APPLICATIONS

[ 0143] Alternative embodiments of the MVD system 10 incorporating the user feedback device 58 as a force feedback interface allow the viewer 12 to perceive and experience touching and feeling the 3D images 34, 56 at the same

173857.1



WO 03/017246

PCT/US02/26718

-42-

location where the 3D images 34, 56 appear. The MVD system 10 can generate high resolution 3D images 34, 56 and so virtual interaction is implemented in the MVD system 10 using appropriate force feedback apparatus to generate high resolution surface textures and very hard surfaces, that is, surfaces which

5 appear to resist and/or to have low compliance in view of the virtual reality movements of portions of the surfaces by the viewer 12.

[ 0144] Accordingly, the user feedback device 58 includes high resolution position encoders and a high frequency feedback loop to match the movements of the hands of the viewer 12 with modifications to the 3D images 34, 56 as well as force feedback sensation on the viewer 12. Preferably, the user feedback device 58 includes lightweight and compact virtual reality components, such as force-feedback-inducing gloves, in order that the reduced mass and bulk and the associated weight and inertia of the components impede the motions of the viewer 12 at a minimum.

15 [ 0145] Such user feedback devices may include lightweight carbon composites to dramatically reduce the weight of any wearable components worn by the viewer 12. Furthermore, very compact and much higher resolution fiber optic or capacitive position encoders may be used instead of bulky optical position encoders known in the art to determine the position of portions of the viewer 12 such as hands and head orientations.

[ 0146] The wearable component on the viewer 12 include embedded processor systems to control the user feedback device 58, thus relieving the processing overhead of the MVD controller 18 and/or interface 14. By using an embedded processor whose only task is to run the interface, the feedback rate for the overall MVD system 10 may be greater than 100 kHz. When combined with very high resolution encoders, the MVD system has a dramatically high fidelity force feedback interface.

[ 0147] Using such virtual interaction technologies with the MVD system 10 which is capable of displaying such volumetric 3D images 34, 56, a 3D GUI is implemented to allow a viewer 12 to access and directly manipulate 3D data.

173357.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-43-

Known interface devices such as the data glove, video gesture recognition devices, and a FISH SENSOR system available from the MIT MEDIA LAB of Cambridge, Massachusetts, can be used to allow a user to directly manipulate 3D data, for example, in 3D graphics and computer aided design (CAD)

5 systems.

**[ 0148]** For such 3D image and data manipulation, the MVD system 10 may also incorporate a 3D mouse device, such as the SPACE BALL available from Spacetec Inc. of Lowell, Massachusetts, as well as a 3D pointing device which moves a 3D cursor anywhere in the display volume areas around image

10 34 in the same manner as a viewer 12 moves one's hand in true space.

Alternatively, the MVD system 10, through user feedback device 58, may interpret movement of the hand of the viewer 12 as the 3D cursor.

**[ 0149]** In one embodiment, the user feedback device 58 may include components for sensing the position and orientation of the hand of the viewer

15 12. For example, the viewer 12 may hold or wear a position sensor such as a magnetic sensor available from POLYHEMUS, INC., and/or other types of sensors such as positional sensors incorporated in virtual reality data gloves.

Alternatively, the position of the hand is sensed within the volume of the display of the 3D image 34 through the use of computer image processing, or a radio

20 frequency sensor such as sensors developed at the MIT MEDIA LAB. To avoid muscle fatigue, the user feedback device 58 may sense the movement of a hand or a finger of the viewer 12 in much smaller sensing space that is physically separate from the displayed 3D image 34, in a manner similar to 2D movement of a conventional 2D mouse on the flat surface of a desktop to control the

25 position of a 2D cursor on a 2D screen of a personal computer.

#### ADVANTAGES OF THE MVD SYSTEM

**[ 0150]** Using the MVD system 10, the 3D images 34, 56 are generated to provide for natural viewing by the viewer 12, that is the 3D images 34, 56 have substantially all of the depth cues associated with viewing a real object, which

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-44-

minimizes eye strain and allows viewing for extended periods of time without fatigue.

**[ 0151 ]** The MVD system 10 provides a high resolution/voxel count with the MOE device 32 providing voxel counts greater than, for example, 3,000,000 which is at least one order of magnitude over many volumetric displays known in the art. In addition, by preferably using a rectilinear geometry for displaying the 3D image 34, such as a MOE device 32 having a rectangular cross-section adapted to displaying image slices 24-30 as 2D images 44-50, the MVD system 10 uses a coordinate system which matches internal coordinate systems of many known graphics computers and graphical applications programs, which facilitates and maximizes computer performance and display update rate without requiring additional conversion software. Additionally, in a preferred embodiment, the image voxels of the MOE 32 have identical and constant shapes, sizes, and orientations, which thus eliminates image distortion in the 3D image 34.

**[ 0152 ]** Unlike multiview autostereoscopic displays known in the art, the MVD system 10 provides a wide field of view with both horizontal and vertical parallax, which allows the 3D image to be "looked around" by the view in multiple dimensions instead of only one. In addition, unlike multiview autostereoscopic displays, the field of view of the MVD system 10 is continuous in all directions, that is, there are no disconcerting jumps in the 3D image 34 as the viewer 12 moves with respect to the MOE device 32.

**[ 0153 ]** Further, due to the static construction of the optical elements 36-42 in the MOE device 32, there are no moving parts which, upon a loss of balance of the entire MOE device 32, results in image distortions, display vibrations, and even catastrophic mechanical failure of the MOE device 32.

**[ 0154 ]** The MVD system 10 may also avoid occlusion, that is, the obstruction by foreground objects of light emitted by background objects. A limited form of occlusion, called computational occlusion, can be produced by picking a particular point of view, and then simply not drawing surfaces that

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-45-

cannot be seen from that point of view, in order to improve the rate of image construction and display. However, when the viewer 12 attempts to look around foreground objects, the parts of background objects that were not drawn are not visible. In one embodiment, the MVD system 10 compensates for the lack of occlusion by interspersing scattering optical element displaying an image with other optical elements in a scattering state to create occlusion by absorbing background light. Guest host polymer dispersed liquid crystals may be used in the optical elements 36-42, in which a dye is mixed with the liquid crystal molecules, allowing the color of the material to change with applied voltage.

10 **[ 0155]** The MVD system 10 also has little to no contrast degradation due to ambient illumination of the MVD system 10, since the use of the real image projector 54 requires a housing extending to the MOE device 32, which in turn reduces the amount of ambient light reaching the MOE device 32, and thereby prevent contrast degradation.

15 **[ 0156]** Alternatively, contrast degradation can be reduced by increasing the illumination from the image projector 20 in proportion to the ambient illumination, and by installing an absorbing plastic enclosure around the MOE device 32 to reduce the image brightness to viewable levels. The ambient light must pass through the absorbing enclosure twice to reach the viewer 12 – once on the way in and again scattering off the optical elements 36-42 of the MOE device 32. On the contrary, the light from the image projector 20 which forms the images 44-50 only passes through the absorbing enclosure on the way to the viewer 12, and so had a reduced loss of illumination, which is a function of the square root of the loss suffered by ambient light.

20 **[ 0157]** An alternative embodiment reduces the effects of ambient light is to use an enclosure with three narrow spectral bandpasses in the red, green and blue, and a high absorption for out-of-band light, which is highly effective to reduce such ambient light effects. Greater performance in view of ambient light is obtained by using laser light sources in the image projector 20, since the narrowband light from laser light sources passes unattenuated after scattering

25  
30

173857.1

-46-

from the MOE device 32, while the broadband light from the ambient illumination is mostly absorbed.

#### ANTI-ALIASING IN THE MOE DEVICE

**[ 0158]** In another alternative embodiment, referring to FIG. 16 and as described herein, prior to transmission of the image data to the image projector 20 and thence to the optical elements 160-168 of the MOE device 32, the MVD controller 18 or alternatively the graphics data source 16 may perform 3D anti-aliasing on the image data to smooth the features to be displayed in the 3D image 34 on the optical elements 160-168. Using 3D anti-aliasing, the system 10 avoids imaging jagged lines or incomplete regions in depth, for example, between parallel planes 162-164 along the z-direction, due to display pixelization caused by the inherently discrete voxel construction of the MOE device 32 with the optical elements 16-168 aligned in x-y planes normal to a z-axis.

**[ 0159]** As the data corresponding to the image slices is generated, an image element 170 may appear near an edge of a plane transition, that is, between optical elements, for example, the optical elements 162-164. For illustrative purposes only, the configuration of the optical elements 160-168 and the voxel 170 therein shown in FIGS. 16-18 is exaggerated to more clearly describe and illustrate the disclosed anti-aliasing system and method, and so it is to be understood that the optical elements 160-168 may have relatively small spacings therebetween.

**[ 0160]** To avoid an abrupt transition at the specific image element 170 and in the 3D image illuminated on the optical elements 162-164 from the projector 20 may be generated such that each of the images 172-174 on the optical elements 162-164, respectively, includes the image element 170 or a portion or derivative form thereof, and so the image element 170 is shared between both planes formed by the optical elements 162-164, which softens the transition and allows the 3D image 34 in FIG. 1 to appear more continuous.

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-47-

The brightness of the image elements 172-174 on respective consecutive optical elements 162-164 is varied in accordance with the location of the image elements 172-174 in the image data.

**[ 0161 ]** Referring to FIG. 16, the number  $N$  of optical elements 160-168 may be planar LCD surfaces, and so may be labeled  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$ , and span a distance  $D$  being the width of the MOE device 32. Accordingly, each of the optical elements 160-168 may be spaced at distances  $D_1, D_2, D_3, \dots, D_N$  along the  $z$ -axis from a common reference point, such that  $D_N - D_1 = D$ . For example, the common reference point may be the optical element 160 closest along the  $z$ -axis to the projector 20, so  $D_1 = 0$  and  $D_N = D$ . Alternatively, the distances of the optical elements 160-168 may be measured from the lens 22 of the projector 20, so an offset distance  $D_{\text{OFFSET}}$  from the optical element 160 and the lens 22 may be subtracted from absolute distances  $D_1, D_2, D_3, \dots, D_N$  of the optical elements 160-168 from the lens 22 to obtain relative distances from the optical element 160. Accordingly,  $D_1 = D_{\text{OFFSET}}$ . The optical elements 160-168 may also have a uniform spacing  $S$  therebetween, or alternatively the spacing between the optical elements 160-168 may vary.

**[ 0162 ]** As described herein, a depth value of each voxel 170 is measured along the  $z$ -axis from a reference point either at the lens 22 or at the optical element 160, and such depth values are stored in a depth buffer with an associated color value stored in a color buffer. For example, a depth value  $D_V$  is associated with the voxel 170.

**[ 0163 ]** To perform anti-aliasing and thus to smooth the appearance of the voxel 170 lying between the optical elements 162-164, the distances  $D_A, D_B$  between the depth value  $D_V$  and the optical elements 162-164, respectively, are determined, and such distances are used to generate an anti-aliasing parameter. The anti-aliasing parameter to generate respective color values for the two voxels 172-174 on the optical elements 162-164, respectively with the corresponding color value of the voxel 170 being modified by the anti-aliasing parameter to generate respective color values for the two voxels 172-174.

173357.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-48-

**[ 0164 ]** FIG. 17 illustrates a voxel display without the use of anti-aliasing. As shown in FIG. 17, the voxels 176-178 on the optical element 162 and the voxels 180-184 on the optical element 164 form a sharp transition at the boundary defined by the voxels 178-180. If the distance between the optical elements 162-164 is significant, a noticeable jagged or broken appearance of image 34 may be formed by the combination of displayed voxels 176-184. For example, the voxels 178-180 may have had depth values between the optical elements 162-164, for example, with the voxel 178 being closer to but not on the optical element 162 and the voxel 180 being closer to but not on the optical element 162. Such intermediate depth values may then have been converted to the discrete depth values  $D_2$ ,  $D_3$  of the optical elements 162-164, respectively, in order to display the voxels 178-180. Further, the color values of the voxels 178-180 in FIG. 17 are unchanged, and so the intensity of the color of the voxel 178-180 may appear anomalous for such differing optical depths. In the alternative, the voxels 178-180 at the transition may be omitted due to their intermediate depths, but then the 3D image 34 composed of voxels 176 and 182-184 may appear to have holes or fractures.

**[ 0165 ]** Using anti-aliasing, as shown in FIG. 18, both transitional voxels 178-180 may be used to generate new voxels 178A-178B and 180A-180B, with the voxels 178A-178B displayed on the optical element 162 and the voxels 178B-180B displayed on the optical element 164. In addition, as shown in FIG. 18, while the color values of the new voxels may be modified such as unchanged, by performing anti-aliasing, the color values of the new voxels may be modified such that each of the new voxels 178A-178B and 180A-180B has an adjusted color to soften the image transition in the x-y plane across different depths. Accordingly, as shown in FIG. 19, while the voxels 176-184 have an abrupt transition in apparent depth according to the curve 176 for the imaging in FIG. 17, the voxels 176, 178A-178B, 180A-180B, and 182-184 in FIG. 18 have a relatively smoother transition in apparent depth according to the curve 188. It is noted that, for illustrative purposes only, the curves 186-188 are not overlaid

1733857.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-49-

in FIG. 18 in order to clearly show the curves 186-188, and so it is to be understood that, in FIG. 18, the apparent depths of voxels 176 and 182-184 are identical with and without anti-aliasing.

[ 0166] In FIG. 19, the voxels 178A-178B of FIG. 18 form an image across the optical elements 162-164 with an apparent depth 178C intermediate between the depths of the voxels 178A-178B and corresponding to the original depth of the voxel 178 in FIG. 17 to be closer but not on the optical element 162. Similarly, the voxels 180A-180B of FIG. 18 form an image across the optical elements 162-164 with an apparent depth of 180C intermediate between the depths of the voxels 180A-180B and corresponding to the original depth of the voxel 180 in FIG. 17 to be closer but not on the optical element 164.

[ 0167] It is to be understood that the anti-aliasing is not limited to the nearest two bounding optical elements, but instead the voxels 178-180 may be used to generate a plurality of corresponding voxels on a respective plurality of the optical elements 160-168, and so to provide depth transition curves which may be, for example, smoother than the curve 188 in FIG. 19. For example, the depth transition curve 188 due to anti-aliasing may approximate a sigmoid or tangent function.

[ 0168] Referring to FIG. 16, to perform anti-aliasing for the voxel 170, at least one depth adjustment value  $l$  is generated which is a function of the distance of the voxel 170 from at least one optical element. In one embodiment, adjustment values  $l, m$  may be generated which are functions of scaled values of the distance  $D_A, D_B$  from the respective optical elements 162-164. The adjustment values  $l, m$  are then used to modify a color value  $C_V$  associated with the voxel 170 to generate new color values  $C_A, C_B$  associated with the newly generated voxels 172-174, respectively, with the voxels 172-174 having respective x-y positions on the optical elements 162-164 identical to the x-y position of the voxel 170.

[ 0169] The color value of a voxel may specify at least the brightness of the voxel to be displayed. Alternatively, the voxel 170 may be associated with a

173357.1



WO 03/017246

PCT/US02/26718

-50-

set of parameters including at least one scalar specifying the brightness of the colored voxel. Accordingly, modification of the color values may be performed through multiplication of the color value by an adjustment value.

- For example, for a color value  $C_v = 12$  brightness units and an adjustment value  $\lambda = .5$ , the modified color value  $C_A$  is determined to be  $C_v \lambda = (12 \text{ brightness units}) \times (.5) = 6 \text{ brightness units}$ .

- [ 0170 ]** In one embodiment, the distance  $D_v$  is scaled to be a depth value from 1 to  $N$ , in which  $N$  is the number of optical elements 160-168 and each of the integer values 1 to  $N$  corresponds to a specific one of the optical elements 160-168, for example, as indices for the label  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$  shown in FIG. 16. The adjustment values  $l, m$  are determined from the scaled depth value. If the optical elements 160-168 are uniformly spaced with constant spacing  $S$  along distance  $D$ , then:

$$S = \frac{D}{N - 1} \quad (1)$$

- so a scaled distance of the voxel 170 is:

$$D_{\text{SCALED}} = \frac{D_v - D_{\text{OFFSET}}}{S} + 1 \quad (2)$$

in which  $D_v$  is the absolute distance measured from the lens 22 or other reference points. For example, with the lens 22 being the origin of the  $z$ -axis, the optical element 160 may be at distance  $D_1 = D_{\text{OFFSET}}$ .

- [ 0171 ]**  $D_{\text{SCALED}}$  is a real numbered value such that  $1 \leq D_{\text{SCALED}} \leq N$ , so the fractional portion of  $D_{\text{SCALED}}$ , which ranges between 0 and 1, indicates the relative distance from the optical elements 162-164. For the optical elements 162-164 bounding the voxel 170 on either side along the  $z$ -axis, the indices of the optical elements 162-164 are:

- $\lfloor D_{\text{SCALED}} \rfloor$  and  $(3)$

- $\lfloor D_{\text{SCALED}} \rfloor + 1$ ,  $(4)$

respectively, in which  $\lfloor X \rfloor$  is the floor or integer function of a value or variable  $X$ ;

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-51-

that is a function returning the largest integer less than X.

[ 0172 ] The fractional portion of  $D_{\text{SCALED}}$  is:

$$\lambda = D_{\text{SCALED}} - \lfloor D_{\text{SCALED}} \rfloor \quad (5)$$

and thus:

$$\mu = 1 - \lambda \quad (6)$$

The color values  $C_A$ ,  $C_B$  indicating respective brightnesses associated with the voxels 172, 174, respectively, are assigned the values:

$$C_A := C_V (1 - \lambda) \quad (7)$$

$$C_B := C_V \lambda = C_V (1 - \mu) \quad (8)$$

10 in which the symbol “:=” indicated assignment of a new value.

[ 0173 ] For example, for a voxel 170 having a depth  $D_V = 9.2$  units from the lens 22, with an offset  $D_{\text{OFFSET}} = 3.0$  units, with the MOE device 32 having five evenly-spaced optical elements extending twenty units in length,  $N=5$ ,  $D=20$ , then the spacing  $S=5$  units, as per Equation (1), and  $D_{\text{SCALED}}=2.24$ , accordingly to Equation (2). The voxel 170 is thus positioned between the optical having indices  $\lfloor D_{\text{SCALED}} \rfloor = 2$  and  $\lfloor D_{\text{SCALED}} \rfloor + 1 = 3$ , as per Equations (3)-(4), and so in FIG. 16, the optical elements 162-164 having labels  $P_2$  and  $P_3$  are identified as the optical elements upon which new voxels 172-174 are to be displayed corresponding to the voxel 170.

20 [ 0174 ] In this example, from Equations (5)-(6), the fractional value of the scaled depth is  $\lambda=.24$  and so  $\mu=.76$ . Accordingly,  $(1-\lambda)=.76$  and  $(1-\mu)=.24$  and from Equations (7)-(8), the color value of the voxel 172 is  $C_A=.76C_V=76\%$  of the brightness of the original voxel 170, and the color value of the voxel 174 is  $C_B=.24C_V=24\%$  of the brightness of the original voxel 170. Thus, since the voxel 170 is “closer” to the optical element 162 than the optical element 164, the corresponding new voxels 172-174 have a distributed brightness such that the closer optical element 162 displays the majority of the color between the two voxels 172-174, while the farther optical element 164 contributes a lesser but non-zero amount to the appearance at the transition of the 3D volumetric image between the optical elements 162-164 at the voxel 170.

173857.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-52-

**[ 0175]** For the voxels 170 have depth values lying precisely on optical elements 160-168, no anti-aliasing is required. Accordingly, Equations (2)-(4) degenerate to integer values, and Equations (5)-(6) result in the adjustment values  $\lambda, \mu$  being 0 and 1, respectively, or being 1 and 0, respectively, so no adjustment of the color values is performed. To avoid unnecessary computation, the MVD controller 18 may check whether the computation in Equation (2) results in an integer, within a predetermined error tolerance such as 1 percent, and if so, the voxel 170 is determined or deemed to lie precisely on one of the optical elements 160-168. The anti-aliasing procedure is terminated for the currently processed voxel 170, and the procedure may then continue to process other voxels of 3D image 34.

**[ 0176]** In this embodiment using Equations (1)-(8), since uniform spacing and other characteristics of the MOE device 32 are known, no search for the nearest bounding optical elements is necessary, since the distance  $D_v$  of the voxel 170 and the MOE device characteristics determine which optical elements bound the voxel 170, by Equations (3)-(4).

**[ 0177]** In another alternative embodiment, for optical elements 160-168 of an MOE device 32 having either uniform spacing, or having variable and/or non-uniform spacing, the anti-aliasing may be performed using Equations (9)-(13) set forth below in conjunction with Equations (7)-(8) above. For example, for MOE devices having variable spacing and/or variable offsets of the MOE device from the projector 20 and lens 22, the anti-aliasing method may be performed on-the-fly during modification of the spacing and configuration of the optical elements 160-168. Since the distances/depths of the optical elements 160-168 may vary, in the alternative embodiment, the anti-aliasing method determines at least two optical elements bounding the voxel 170 currently being processed, by searching the depth values of each of the optical elements 160-168 for the two bounding optical elements having a distance/depth values  $D_{\text{NEAR1}}$  and  $D_{\text{NEAR2}}$  such that:

$$D_{\text{NEAR1}} \leq D_v \leq D_{\text{NEAR2}} \quad (9)$$

173357.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-53-

**[ 0178 ]** The variables NEAR1 and NEAR2 may be integer indices specifying the associated optical elements from among the optical elements 160-168. For example, in FIG. 16, NEAR1 = 2 and NEAR2 = 3, corresponding to the optical elements 162-164 bounding the voxel 170 along the z-axis.

5 **[ 0179 ]** The depth adjustment values  $\lambda$ ,  $\mu$  are determined to be:

$$\lambda = \frac{|D_V - D_{NEAR1}|}{|D_{NEAR1} - D_{NEAR2}|} \quad (10)$$

$$\mu = \frac{|D_V - D_{NEAR2}|}{|D_{NEAR1} - D_{NEAR2}|} \quad (11)$$

in which  $|X|$  is the absolute value or magnitude function of a value or variable X.

10 **[ 0180 ]** The depth adjustment values from Equations (10)-(11) are both positive real numbers which satisfy:

$$0 \leq \lambda, \mu \leq 1 \quad (12)$$

$$\lambda + \mu = 1 \quad (13)$$

and so the depth adjustment values scale the non-uniform and/or variable distances between optical elements, and are then used in Equations (7)-(8) to generate the voxels 172-174 with the corresponding adjusted color values. As shown in Equations (10)-(11), the depth adjustment values  $\lambda$ ,  $\mu$  are based on interpolations of the depth of the voxel 170 within the range of depths of the voxels 172-174 associated with the optical elements 162-164, respectively.

20 **[ 0181 ]** In the above example having uniform spacing, Equations (9)-(13) are applied to with  $D_V = 9.2$  units,  $D_{NEAR1} = D_2 = 8$  units and  $D_{NEAR2} = D_3 = 13$  units, so:

$$\lambda = \frac{|9.2 - 8|}{|8 - 13|} = \frac{1.2}{5} = .24$$

$$\mu = \frac{|9.2 - 13|}{|8 - 13|} = \frac{3.8}{5} = .76$$

25 which agrees with the adjustment values using Equations (1)-(8). The

173357.1

-54-

alternative embodiment is useful if the dimensional and spatial characteristics of the MOE device 32 and the optical elements 160-168 vary, but a search is required to determine the appropriate bounding optical elements 162-164 for generating the new voxels 172-174.

- 5 [ 0182 ] FIG. 20 illustrates a flowchart of a method implementing 3D anti-aliasing as described herein, in which, for a current voxel to be displayed, such as the voxel 170, the method reads the corresponding depth value  $D_v$  and the color value  $C_v$  from the depth and color buffers, respectively, in step 190. The method may then determine if the spacing between the optical elements
- 10 constant in step 192; for example, a configuration setting of the MVD controller 18 may indicate if the optical elements 160-168 are fixed, having uniform or non-uniform distribution, and/or the MVD controller 18 and the MOE device 32 operate in a variable spacing mode, as describe herein.
- [ 0183 ] If the spacing is constant, the method then scales the depth value
- 15  $D_v$  in step 194 to be within the range of indices of the optical elements 160-168 using Equations (1)-(2) , and then the method determines the optical elements nearest to an bounding the depth value  $D_v$  in step 196 using Equations (3)-(4) in step 196. Otherwise, if the spacing is not constant in step 192, the method may perform step 196 without step 194 in the alternative embodiment to
- 20 determine the optical elements satisfying Equation (9); that is, using a search procedure through the distance/depth values of each of the optical elements 160-168. In another alternative method, the step 192 may be optionally implemented or omitted, depending on the configuration and operating mode of the MVD controller 18 and the MOE device 32.
- 25 [ 0184 ] The method then determines a depth adjustment value  $\lambda$  and/or a second value  $\mu$  in step 198 using Equations (5)-(6) or Equations (10)-(11), depending on the embodiment implemented as described herein. The method then adjusts the color values in step 200 for voxels on the nearest bounding optical elements using the depth adjustment value or values using Equations
- 30 (7)-(8) and the method displays the adjusted voxels in step 202 on the nearest

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-55-

bounding optical elements with the adjusted color values.

**[ 0185]** In another alternative embodiment, an intermediate degree of anti-aliasing may be implemented. For example, the adjustment values  $\lambda$ ,  $\mu$  may be fixed to the value of, for example, .5, such that half of the brightness of the voxel 170 is assigned to each of the voxels 172-174. Such intermediate anti-aliasing may generate apparent depths such as an intermediate depth 180D corresponding to intermediate transition curves such as shown by the curve 189 in FIG. 19.

**[ 0186]** In other alternative embodiments, the degree of anti-aliasing can be varied from one extreme; that is ignoring the fractional depth values  $\lambda$ ,  $\mu$  to assign the color values; to another extreme of using all of the fractional depth values  $\lambda$ ,  $\mu$ , or the degree of anti-aliasing can be varied to any value between such extremes. Such variable anti-aliasing may be performed by dividing the fractional portion  $l$  of the scaled depth by an anti-aliasing parameter  $P$ , and then negatively offsetting the resulting value from one. That is, after  $a$  is calculated in Equation (5) and (10), a variable  $\lambda_{VAR}$  is calculated such that:

$$\lambda_{VAR} = \lambda / P \quad (14)$$

**[ 0187]** The final color value may be determined by fixing or clamping the negatively offset value to be within a predetermined range, such as between 0 and 1. Accordingly, Equations (7)-(8) are modified for variable anti-aliasing such that:

$$C_{R2} = C_V (1 - \lambda_{VAR}) \quad (15)$$

$$C_{B2} = C_V \lambda_{VAR} \quad (16)$$

**[ 0188]** The steps 198-202 in FIG. 20 may thus implement Equations (14)-(16), respectively, to provide variable anti-aliasing.

**[ 0189]** An anti-aliasing parameter  $P=1$  corresponds to full anti-aliasing, and an anti-aliasing parameter of infinity,  $P \rightarrow \infty$ , which may be implemented computationally with an arbitrary high numerical value, corresponds to no anti-aliasing. Anti-aliasing parameters less than 1 may also be implemented. For example, when  $P=1$ , anti-aliasing as described above for Equations (1)-(13) is

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-56-

implemented.

**[ 0190 ]** In another example, for an anti-aliasing value of  $\lambda = .24$  an anti-aliasing parameter of 3,  $\lambda_{VAR} = .08$  by Equation (14) and so  $C_{A2} = .92C_v = 92\%$  of the color value of the voxel 170, while  $C_{B2} = .08C_v = 8\%$  of the color value of the voxel 170, as per Equations (15)-(16). Compared to the previous numerical example, such variable anti-aliasing increases the contribution of the voxel 172 in the apparent depth from 76% to 92% while the voxel 174 has a decreased contribution, from 24% or about one-fourth decreased to less than 10%. In a further example,  $P \rightarrow \infty$ , anti-aliasing is eliminated, and so  $\lambda_{VAR} = 0.00$  by Equation (14). Thus,  $C_{A2} = (1.0)C_v = 100\%$  of the color value of the voxel 170, while  $C_{B2} = (0.0)C_v = 0\%$  of the color value of the voxel 170, as per Equations (15)-(16). Accordingly, any voxels 170 lying between the optical elements 162-124 are displayed on the closer optical element 162, without anti-aliasing, and so step 202 in FIG.20 may further include the step of not generating and thus not displaying a second voxel farther from the reference point if  $P \rightarrow \infty$ . For example, the voxel 174 is no generated.

**[ 0191 ]** In further alternative embodiments using variable anti-aliasing, the method in FIG. 20 may include displaying new voxels only if the adjusted color values are greater than a predetermined threshold T. For example,

20 if  $C_v(1 - \lambda_{VAR}) > T$  then  $C_{A2} = C_v(1 - \lambda_{VAR})$  (17)  
else  $C_{A2} = 0$

if  $C_v\lambda_{VAR} > T$  then  $C_{B2} = C_v\lambda_{VAR}$  (18)  
else  $C_{B2} = 0$ .

**[ 0192 ]** For example, T may equal .05, and so contributions of color less than 5 % may be considered negligible, for example, since voxels with such color values are displayed on the optical elements 160- 168 when switched to opaque/ scattering mode. Accordingly, such negligible contributions to the overall 3D image are discarded, and the non-contributing voxels are not displayed and improve computational processing of the 3D image.

30 **[ 0193 ]** In additional alternative embodiments, the MVD system 10 is

173357.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-57-

capable of generating the 3D image 34 having the appearance of translucently of portions of the 3D image 34. That is, the images 44-50 displayed on the optical elements 36-42 of the MOE device 32 have appropriate shading and colors such that a portion of one image may appear translucent, with another portion of a second image appearing to be viewable through the translucent portion. Such translucent appearances may be generated with or without anti-aliasing.

**[ 0194 ]** In generating the 3D image 34, the method employed by the MVD system 10 performs the PRD computation using, for example, OpenGL frame buffer data, such as the color and depth (or z) buffers of the frame buffer of the graphics data source 16. A value in the depth buffer is the depth of the corresponding pixel in the color buffer, and is used to determine the location of the pixel or voxel, such as 170 in FIG. 16, displayed within the MOE device 32. This MPD computation method is appropriate in situations in which it is desired that portions of the images of background objects of the volumetric image 34 from the MOE device 323 are not rendered if such images are occluded by images of foreground objects. For generated images in the MOE device 32 in which the images of foreground objects are translucent to allow the image corresponding to an occluded background object to be seen an alpha channel technique is used, in which a parameter  $\alpha$  (alpha) determines the color of a pixel/voxel in the color buffer by combining the colors of both the foreground and background objects, depending on the value of  $\alpha$ . Total opacity is given by  $\alpha = 1$ , and total transparency is given by  $\alpha = 0$ . While using such alpha channel imaging to generate color images from the color buffer that look correct, the depth values in the depth buffer may be unchanged, and so still correspond to the depths of the images of the foremost objects. In known display systems, the unmodified depths prohibit the proper display of images in the volumetric display system since there may be multiple surfaces at a variety of depths which are to be displayed using only a single depth value. The disclosed MVD system 10 generates volumetric images 34 having, for example, translucent objects or

173857.1



WO 03/017246

PCT/US02/26718

-58-

portions thereof which avoids the prohibition in the prior art in displaying multiple surfaces at a variety of depths for a single depth value. The disclosed MVD system 10 uses additional features of OpenGL to generate clip planes located in the model space of the MVD system 10, with which rendering is only  
5 allowed to occur, for example, on a predetermined side of each clip plane, such as a positive side as opposed to a negative side.

**[ 0195 ]** For an MOE device 32 having N planes 204-212 which may be numbered with indices 1 to N and having a uniform spacing  $\Delta$  therebetween, as shown in FIGS. 21-24, a scene such as a volumetric image 34 is rendered N  
10 times with the clip planes facing toward each other, separated by the distance  $\Delta$  and centered on the location of a given MOE plane of the planes 204-212 in the model space. Thus, N different images are generated, and the corresponding color buffer is retrieved from the frame buffer to be sent to the MVD controller 18. Upon sending the color buffer to the MVD controller 18 for display in the  
15 MOE device 32, the alpha channel may be turned off since the MVD system 10 has an inherent alpha value associated with the MOE device which is being used to generate the 3D volumetric image 34.

**[ 0196 ]** Rendering with clip planes may be implemented without anti-aliasing as shown in FIGS. 21-22, in which clip planes 214-216 are used  
20 corresponding to image portions positioned closer to an observer 218, and portions of the image 34 are generated and displayed on a first plane 206 positioned between the clip planes 214-216, with the image portions between the clip planes 214-216, displayed on the first plane 206. New portions of the  
25 image 34 are generated between the clip planes 220-222 for display on a second plane 208 farther from the observer 218 and positioned between the clip planes 220-222, with the image portions between the clip planes 220-222 displayed on the second plane 208.

**[ 0197 ]** To implement anti-aliasing with the above method using the alpha channel, other features of OpenGL are used, such as an atmospheric effect  
30 implementing fog-like imaging used for the anti-aliasing. The fog feature causes

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-59-

the color of each imaged object to be combined with the color of the fog in a ratio determined by the density of the fog and the depth of the model with respect to the depth range associated with far and near values specified for the fog.

5 **[ 0198]** Fog functions available in OpenGL include linear, exponential, and exponential-squared functions. The disclosed MVD system 10 may use such functions, as well as combinations of such fog functions, such as the superposition's of linear fog functions 224-227 as shown in FIGS. 23-24. In an illustrative embodiment shown in FIGS. 23-24, each of the combinations of  
10 linear fog functions 224-227 starts with a value of zero, corresponding to a black setting, at the near depth of the fog, and progresses in a linear manner to a value of one, corresponding to a true-colors setting, at the distance  $(FAR-NEAR)/2$  from the near depth location. The fog function then falls back to zero at the far depth of the fog. With such a fog function, and with the clip planes  
15 separated by a distance of  $2\Delta$  with their center being positioned on a given MOE plane in the model space upon which the image 34 is to be displayed, the image 34 is rendered N times, and each time the data from the color buffer is sent to the corresponding plane of the MOE device 32.

**[ 0199]** In an illustrative embodiment, the combination of linear fog  
20 functions and the processing of voxel image data with such combinations are performed by synthesizing images for a given optical element, such as the plane 206 in FIG. 23, with at least two rendering passes. During a first pass, two clip planes are separated by the distance  $\Delta$  with a first clip plane 228 positioned on an optical element 204 having images rendered thereon before the current  
25 optical element 206, and with the second clip plane positioned on the current optical element 206. The forward linear fog function 224, having distances increasing, with NEAR less than FAR, is then used with the aforesaid clip planes to render a first set of images for the optical element 206.

**[ 0200]** During a second pass, the two clip planes are separated by the  
30 distance D, with a first clip plane positioned on the current optical element 206,

173857.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-60-

and with the second clip plane 230 positioned on the optical element 208 to have images thereon rendered after the current optical element 206, and with the second clip plane positioned on the current optical element 206. The backward linear fog function 225, having distances increasing, with FAR less than NEAR, is then used with the aforesaid clip planes to render a second set of images for the optical element 206.

**[ 0201 ]** The two sets of images rendered with the different linear fog functions 224-225 are then added together by the MVD system 10 to be displayed on the optical element 206.

**[ 0202 ]** For rendering a first image on a first plane 206 as shown in FIG. 23, the fog functions 224-225 are centered about the first plane 206, and the images from the clip planes 228-230 and depths therebetween have their corresponding color values modified by the corresponding value of the fog functions 224-225 at the associated depths. After rendering the added images on the optical element 206 using the functions 224-225, the MVD system 10 proceeds to render a successive image on a second plane 208 as shown in FIG. 24, with the fog functions 226-227 being translated to be centered about the second plane 208. The images from the clip planes 232-234 and depths therebetween have their corresponding color values modified by the corresponding value of the fog function 226 at the associated depths. The MVD system 10 proceeds to successively move the fog function and to process corresponding clip planes for color adjustment of each respective image using the alpha channel method. In alternative embodiments, different fog function may be implemented for different planes 204-212, for example, to have higher fog densities at greater distances from the observer 21 8 to increase depth perceptible effects of the displayed 3D volumetric image 34.

**[ 0203 ]** For example, referring to FIG. 23, for the images 236 at a depth 238 labeled D and having respective color values  $C_i$  for each portion of the image, the value 240 of the fog function 224 at the depth  $\alpha_p$ , so the adjusted color value displayed for the images 236 is  $\alpha_p C_i$ . The color values  $C_i$  may be the

173857.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-61-

depth adjusted color values as in Equations (7)-(8) and/or (15)-(18) as described herein, and so the alpha channel adjustments may be optionally implemented in step 200 of FIG. 20 to perform the anti-aliasing with the alpha channel techniques described herein.

5 **[ 0204 ]** By the foregoing a novel and unobvious multi-planar volumetric display system 10 and method of operation has been disclosed by way of the preferred embodiment. However, numerous modifications and substitutions may be had without departing from the spirit of the invention. For example, while the preferred embodiment discusses using planar optical elements such as  
10 flat panel liquid crystal displays, it is wholly within the preview of the invention to contemplate curved optical elements in the manner as set forth above.

**[ 0205 ]** The MVD system 10 may be implemented using the apparatus and methods described in co-pending U.S. Provisional Patent Appln. No. 60/082,442, filed April 20, 1998, as well as using the apparatus and  
15 methods described in U.S. Patent No. 5,990,990 filed November 4, 1996, which is a continuation-in-part of U.S. Patent No. 5,572,375; which is a division of U.S. Patent No. 5,090,789. The MVD system 10 may also be implemented using the apparatus and methods described in co-pending U.S. Patent Appln. No. 09/004,722, filed January 8, 1998. Each of the above provisional and non-  
20 provisional patent applications and issued patents, respectively, are incorporated herein by reference. Accordingly, the invention has been described by way of illustration rather than limitation.

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-62-

## WHAT IS CLAIMED IS:

1. A system for displaying a volumetric three dimensional image of a three-dimensional scene having a virtual depth  $D_v$ , comprising:
- (a) a controller for generating data representing a series of two dimensional slices at varying depths through said three dimensional scene;
  - (b) a multi-surface optical device having a physical depth  $D_b$  including a plurality of optical elements; and
  - (c) an image projector responsive to said data for selectively projecting said series of two dimensional slices on respective optical elements of said multi-surface optical device to display a first volumetric three dimensional image viewable in the multi-surface optical device, wherein the virtual depth  $D_v$  of said three dimensional scene is mapped to correspond to the physical depth  $D_b$  of said multi-surface optical device; and
  - (d) a projector for projecting the first volumetric three dimensional image formed in the multi-surface optical device to generate a second volumetric three dimensional image viewable in a space outside of said multi-surface optical device.
2. The system of claim 1 wherein the virtual depth  $D_v$  of said three dimensional scene is mapped to the physical depth  $D_b$  of said multi-surface optical device by a linear relationship.
3. The system of claim 1 wherein the virtual depth  $D_v$  of said three dimensional scene is mapped to the physical depth  $D_b$  of said multi-surface optical device by a non-linear relationship.
4. The system of claim 1 wherein said plurality of optical elements are equally spaced along a depth axis.

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-63-

5. The system of claim 1 wherein said plurality of optical elements are unequally spaced along a depth axis.

6. The system of claims 4 and 5 wherein a depth within said first three dimensional image is further mapped to correspond to one of said plurality of optical elements.

7. A system for displaying a volumetric three dimensional image of a three dimensional scene, comprising:

(a) a controller for generating data representing a series of two dimensional slices at varying depths through a selected portion of a three dimensional scene, said selected portion corresponding to a maximum virtual depth value  $Z_{MAX}$  and minimum virtual depth value  $Z_{MIN}$ ;

(b) a multi-surface optical device including a plurality of optical elements arranged; and

(c) an image projector responsive to said data for projecting said series of two dimensional slices onto respective optical elements of said multi-surface optical device to display a first volumetric three dimensional image viewable in the multi-surface optical device, wherein the slice associated with said minimum virtual depth value  $Z_{MIN}$  is projected onto a forward optical element of said multi-surface optical device, and the slice associated with said maximum depth value  $Z_{MAX}$  is projected onto a rearward optical element of said multi-surface optical device, with remaining slices being projected onto respective optical elements therebetween.

8. The system of claim 7 wherein portions of said three dimensional scene which lie beyond the maximum virtual depth value  $Z_{MAX}$  are displayed as two-dimensional images on a rearward optical element.

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-64-

9. The system of claim 7 wherein the values of  $Z_{MAX}$  and  $Z_{MIN}$  are assigned interactively by a viewer.
10. The system of claim 7 wherein the values of  $Z_{MAX}$  and  $Z_{MIN}$  are assigned by a viewer during application startup.
- 5 11. The system of claims 8 and 9 wherein the slice associated with said minimum depth value  $Z_{MIN}$  is projected onto the forwardmost optical element of said multi-surface optical device and the slice associated with said maximum depth value  $Z_{MAX}$  is projected onto the rearmost optical element of said multi-surface optical device.
- 10 12. The system of claims 7 and 8 further including a floating image generator for projecting the first volumetric three dimensional image formed in the multi-surface optical device to generate a second volumetric three dimensional image viewable as floating in space at a location outside of the multi-surface optical device.
- 15 13. A method for generating a volumetric three dimensional image of a three dimensional scene, the method comprising the steps of:
- (a) generating data representing a series of two dimensional slices at varying depths through a selected portion of said three dimensional scene, said selected portion corresponding to a maximum depth value  $Z_{MAX}$  and
- 20 minimum depth value  $Z_{MIN}$ ; and
- (b) projecting the series of two dimensional slices on respective optical elements of a multi-surface optical device to display a first volumetric three dimensional image viewable in said multi-surface optical device, wherein the slice corresponding to said minimum depth value  $Z_{MIN}$  is

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-65-

projected onto a forward optical element of said multi-surface optical device, and the slice generated at said maximum depth value  $Z_{MAX}$  is projected onto a rearward optical element of said multi-surface optical device, with remaining slices being projected onto respective optical elements therebetween.

- 5           14. The method of claim 13 wherein portions of said three dimensional scene which lie beyond the maximum depth value  $Z_{MAX}$  are projected as two-dimensional images onto a rearward optical element.
15. The method of claim 13 wherein the values of  $Z_{MAX}$  and  $Z_{MIN}$  are assigned interactively by a viewer.
- 10           16. The method of claim 13 wherein the values of  $Z_{MAX}$  and  $Z_{MIN}$  are assigned by a viewer during application startup.
17. The method of claims 13 and 14 wherein the slice corresponding to said minimum depth value  $Z_{MIN}$  is projected onto the forwardmost optical element of said multi-surface optical device and the slice corresponding to said  
15           maximum depth value  $Z_{MAX}$  is projected onto the rearmost optical element of said multi-surface optical device.
18. The method of claims 13 and 14 further including the step of projecting the first volumetric three dimensional image from the multi-surface optical device to generate a second volumetric three dimensional image  
20           viewable as floating in space at a location outside of the multi-surface optical device.
19. A system for generating volumetric three dimensional images comprising:
- (a) a controller for rendering a three dimensional scene to

173357.1



WO 03/017246

PCT/US02/26718

-66-

provide at least one psychological vision cue and for generating a series of two dimensional slices through said rendered three dimensional scene;

(b) an optical device onto which said two dimensional slices can be projected; and

5 (c) an image projector for selectively projecting the series of two dimensional slices on said optical device to generate a first volumetric three dimensional image wherein said at least one psychological vision cue causes the apparent depth of said first volumetric three dimensional image to exceed the physical depth of said optical device.

10 20. The system of claim 19 wherein said at least one psychological cue is provided by including shading in said rendered three dimensional scene.

21. The system of claim 19 wherein said at least one psychological cue is provided by including shadows in said rendered three dimensional scene.

15 22. The system of claim 19 wherein said at least one psychological cue is provided by occluding portions of said rendered three dimensional scene.

23. The system of claim 19 wherein said at least one psychological cue is provided by including forced perspective in said rendered three dimensional scene.

20 24. The system of claim 19 wherein said at least one psychological cue is provided by decreasing resolution in surface textures of more distant portions of said rendered three dimensional scene.

25. The system of claim 19 wherein said at least one psychological cue is provided by increasing haziness of more distant portions of said rendered

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-67-

three dimensional scene.

26. The system of claim 19 wherein said at least one psychological cue is provided by shifting the color of more distant portions of said rendered three dimensional scene towards blue.

5 27. The system of claim 19 wherein said at least one psychological cue is added by reducing the brightness of more distant portions of said rendered three dimensional scene.

10 28. The system of claim 19 wherein said at least one psychological cue is provided by reducing the focus of more distant portions of said rendered three dimensional scene.

29. The system of Claim 19 wherein said optical device includes a plurality of optical elements.

30. The system of Claim 29 wherein said plurality of optical elements are arranged along a depth axis.

15 31. The system of claim 19 further including a floating image generator for projecting the first volumetric three dimensional image from the optical device to generate a second volumetric three dimensional image viewable as floating in space at a location outside of the optical device.

20 32. A method for generating a volumetric three dimensional images of a three dimensional scene, the method comprising the steps of:

(a) rendering said three dimensional scene so as to provide at least one psychological vision cue;

173857.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-68-

- (b) generating image data corresponding to a set of two dimensional image slices through said three dimensional scene;
- (c) providing said image data corresponding to said set of two dimensional slices of said three dimensional scene to an image projector; and
- 5 (d) selectively projecting each of said two dimensional slices from the image projector onto an optical device to generate a first volumetric three dimensional image, wherein said at least one psychological vision cue causes the apparent depth of said first volumetric three dimensional image to exceed the physical depth of said optical device.
- 10 33. The method of claim 32 wherein said at least one psychological cue is provided by adding shading during rendering of said three dimensional scene.
34. The method of claim 32 wherein said at least one psychological  
15 cue is provided by adding shadows during rendering of said three dimensional scene.
35. The method of claim 32 wherein said at least one psychological cue is provided by occluding portions of said scene during rendering of said three dimensional scene.
- 20 36. The method of claim 32 wherein said at least one psychological cue is provided by adding forced perspective during rendering of said three dimensional scene.
37. The method of claim 32 wherein said at least one psychological cue is provided during rendering by decreasing resolution in surface textures of more distant portions of said three dimensional scene.

173357.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-69-

38. The method of claim 32 wherein said at least one psychological cue is provided during rendering by increasing haziness of more distant portions of said three dimensional scene.
39. The method of claim 32 wherein said at least one psychological cue is a provided during rendering by shifting the color of more distant portions of said three dimensional scene towards blue.
40. The method of claim 32 wherein said at least one psychological cue is provided during rendering by reducing the brightness of more distant portions of said three dimensional scene.
41. The method of claim 32 wherein said at least one psychological cue is provided during rendering by reducing the focus of more distant portions of said three dimensional scene.
42. The method of Claim 32 wherein said optical device includes a plurality of optical elements.
43. The method of Claim 42 wherein said plurality of optical elements are arranged along a depth axis.
44. The method of claim 32 further including a floating image generator for projecting the first volumetric three dimensional image to generate a second volumetric three dimensional image viewable as floating in space at a location outside of the optical device.
45. A method for generating a volumetric three dimensional image using a multi-surface optical device comprising a plurality of optical elements, said method including the steps of:

173857.1

WO 03/017246

PCT/US02/26718

-70-

- (a) rendering a three dimensional scene having a depth axis;
- (b) generating data corresponding to a set of two dimensional image slices at varying depths through said three dimensional scene, each of said two dimensional image slices being defined by a plurality of tridels each  
5 having a depth coordinate (z);
- (c) mapping the depth coordinate z of each of said tridels into a corresponding depth coordinate z' within said multi-surface optical device;
- (d) mapping the depth coordinate z' of each of said tridels to at least one voxel having a depth coordinate k corresponding to one of said  
10 plurality of optical elements;
- (e) selectively projecting said voxels at said depth coordinate k onto a corresponding optical element to generate a first volumetric three dimensional image viewable in the multi-surface optical device.
46. The method of claim 45 further including the step of projecting the  
15 first volumetric three dimensional image to form a second volumetric three dimensional image viewable in a space outside of said multi-surface optical device.

WO 03/017246

PCT/US02/26718

+

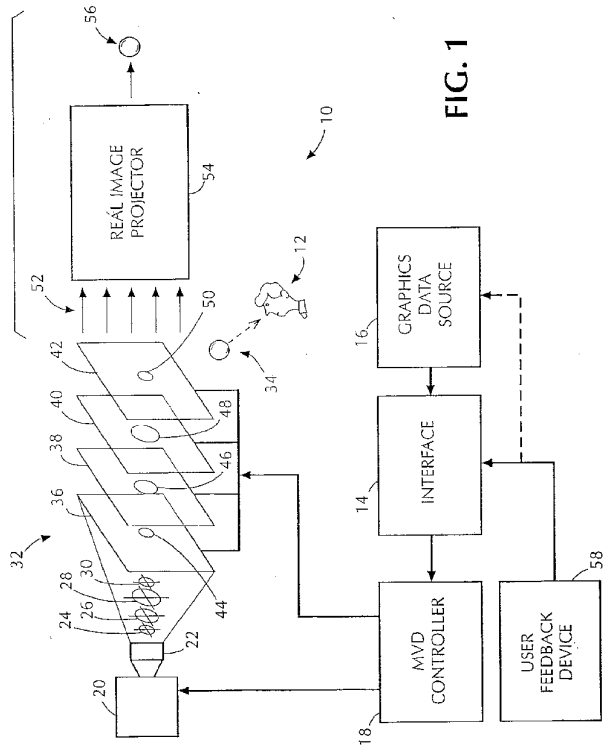


FIG. 1

V12

WO 03/017246

PCT/US02/26718

+

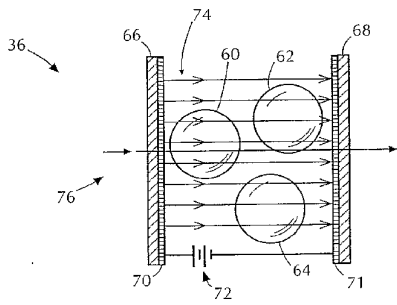


FIG. 2

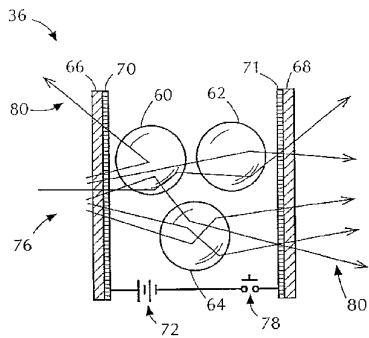


FIG. 3

WO 03/017246

PCT/US02/26718

+

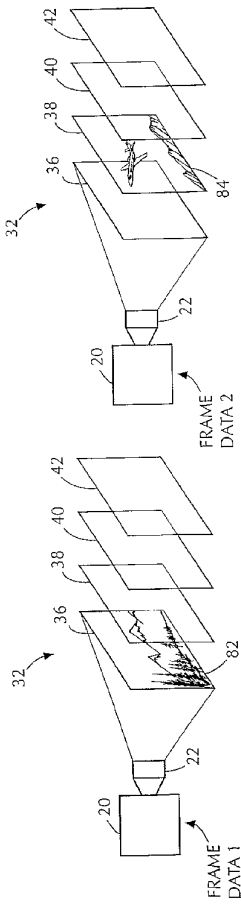


FIG. 4

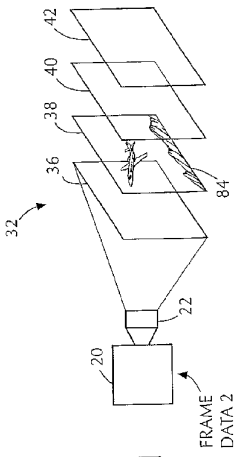


FIG. 5

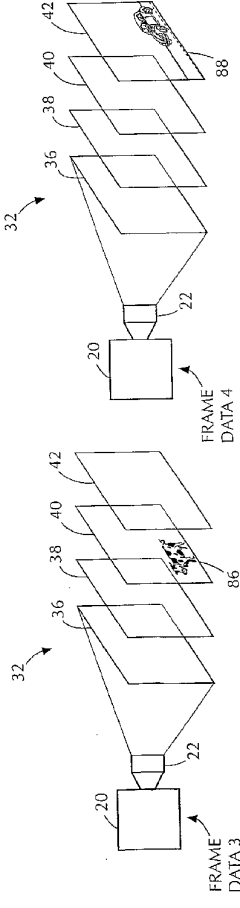


FIG. 6

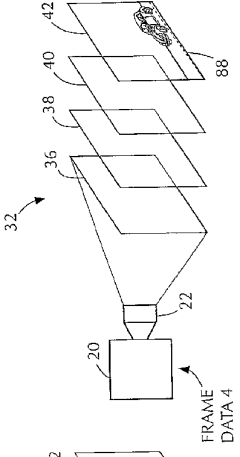


FIG. 7

3/12



WO 03/017246

PCT/US02/26718

+

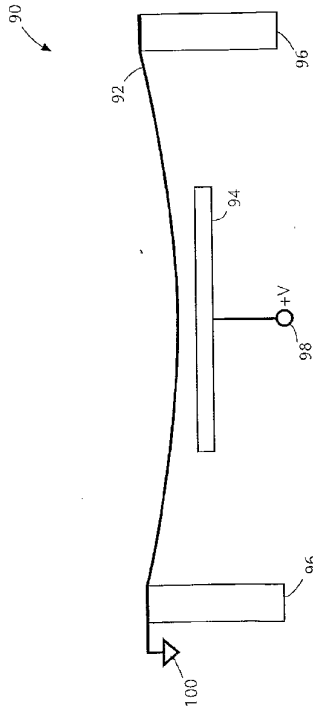


FIG. 8

4/12

+

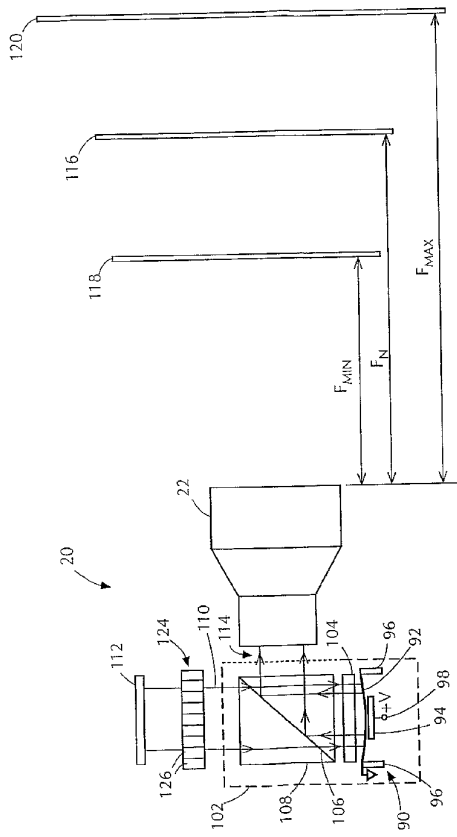
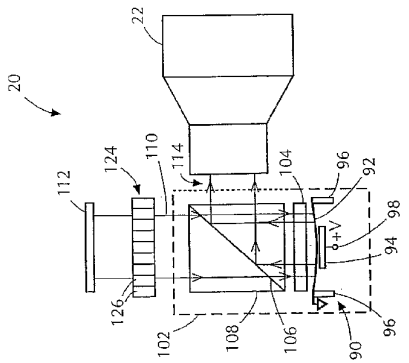
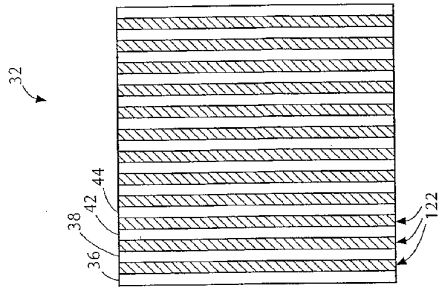


FIG. 9

+



6/12

FIG. 10

WO 03/017246

PCT/US02/26718

+

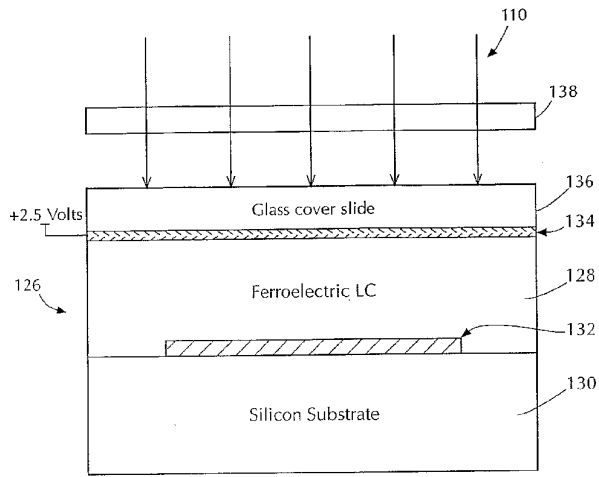


FIG. 11



FIG. 12

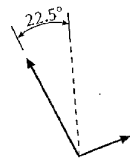


FIG. 13

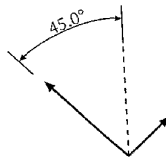
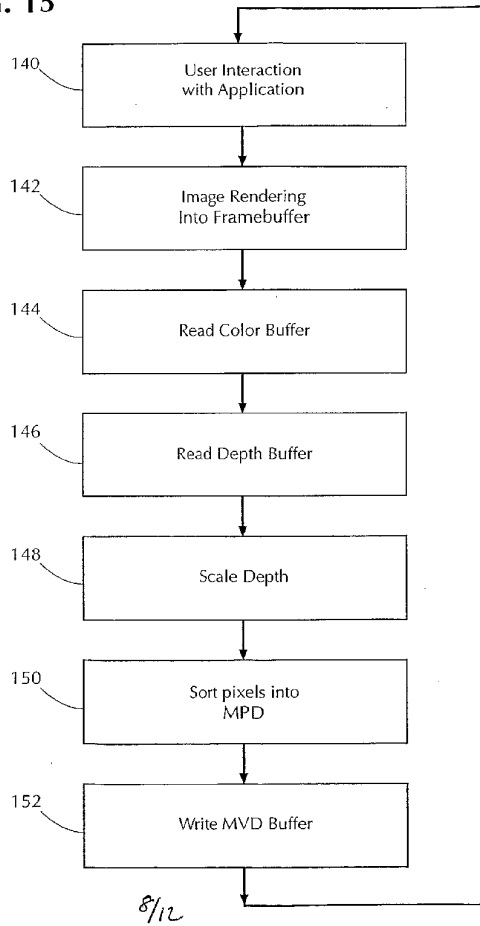


FIG. 14

7/12

+

FIG. 15



WO 03/017246

PCT/US02/26718

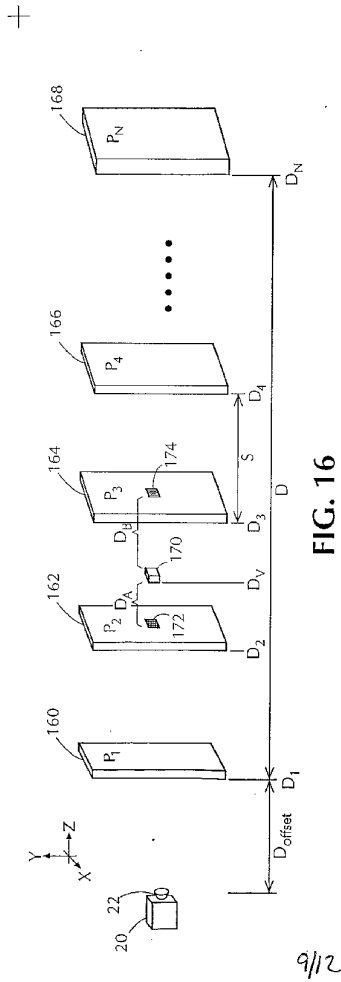


FIG. 16

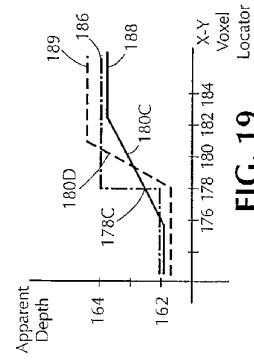


FIG. 17

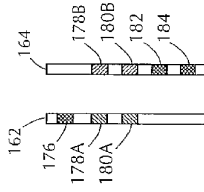


FIG. 18

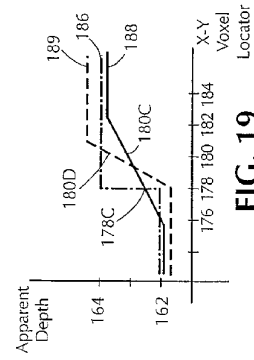


FIG. 19

+

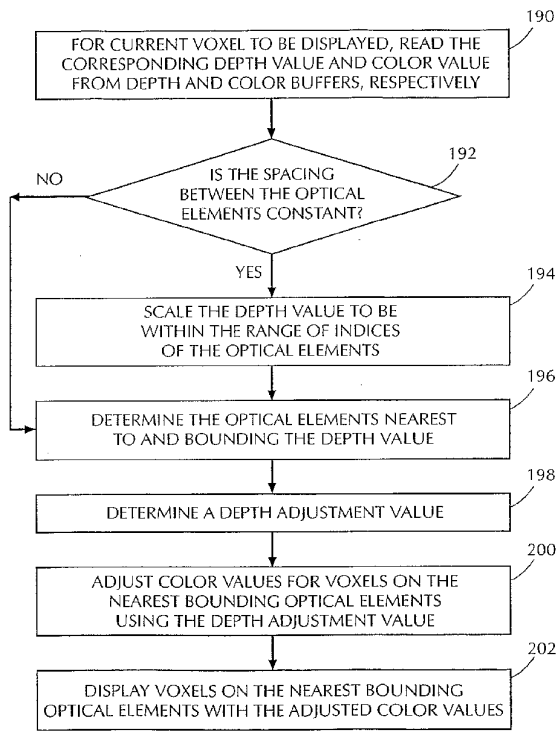


FIG. 20

10/12

WO 03/017246

PCT/US02/26718

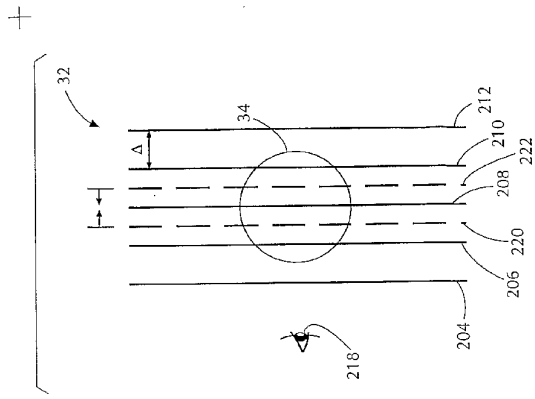


FIG. 21

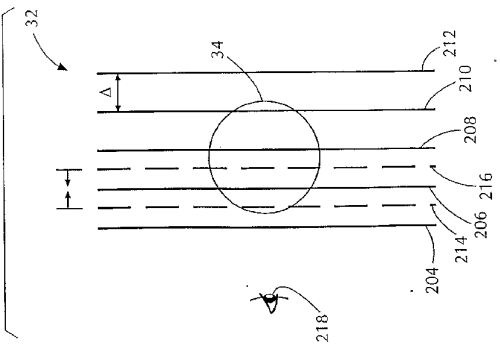


FIG. 22

11/12



WO 03/017246

PCT/US02/26718

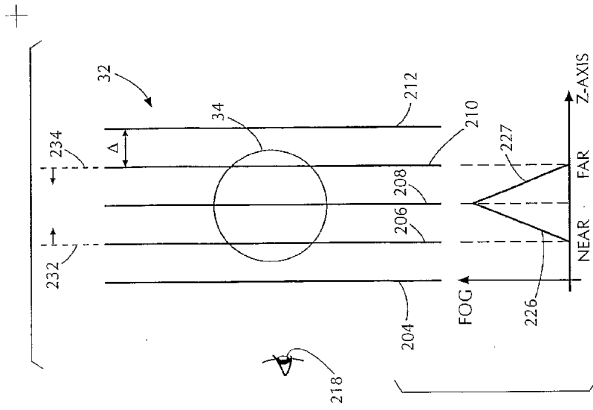


FIG. 24

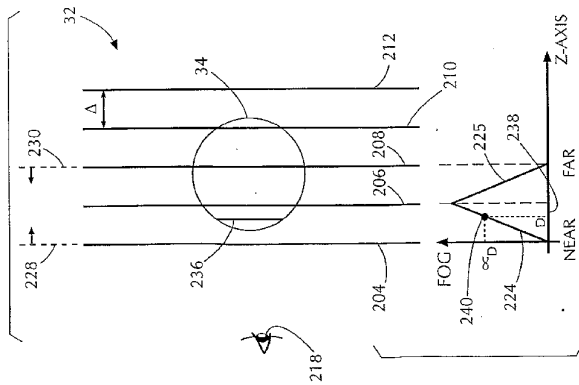


FIG. 23

12/12

【 国際調査報告 】

<b>INTERNATIONAL SEARCH REPORT</b>		International application No. PCT/US02/26718
<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
IPC(7) : G09G 5/00 US CL : 345/6		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) U.S. : 345/4, 5, 6, 419, 424, 426, 427; 348/744; 359/443, 462		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2,961,486 A (MARKS) 22 November 1960, column 1, line 14 - column 16, line 24.	1-46
A	US 3,555,349 A (MUNZ) 12 January 1971, abstract, column 1, line 47 - column 2, line 6.	1-46
A	US 5,572,375 A (CRABTREE, IV) 05 November 1996, abstract, column 2, line 25 - column 6, line 38.	1-46
A	US 5,886,818 A (SUMMER ET AL.) 23 March 1999, abstract, column 1, line 35 - column 3, line 45.	1-46
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance. *E* earlier application or patent published on or after the international filing date. *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified). *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means. *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed. *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention. *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone. *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art. *Z* document member of the same patent family.		
Date of the actual completion of the international search 01 October 2002 (01.10.2002)	Date of mailing of the international search report 20 DEC 2002	
Name and mailing address of the ISA/US Commissioner of Patents and Trademarks Box PCT Washington, D.C. 20531 Facsimile No. (703)305-3230	Authorized officer Alexander Eisen Telephone No. (703) 305-4877	

## フロントページの続き

(81)指定国 AP(GH,GM,KE,LS,MW,MZ,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT, BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,IE,IT,LU,MC,NL,PT,SE,SK,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW, ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BR,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DZ,EC,EE,ES, FI,GB,GD,GE,GH,GM,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KP,KR,KZ,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LV,MA,MD,MG,MK,MN,MW,MX,MZ,N O,NZ,OM,PH,PL,PT,RO,RU,SD,SE,SG,SI,SK,SL,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,UZ,VC,VN,YU,ZA,ZM,ZW

(74)代理人 100094695

弁理士 鈴木 憲七

(74)代理人 100111648

弁理士 梶並 順

(74)代理人 100116953

弁理士 中村 礼

(72)発明者 サリヴァン、アラン

アメリカ合衆国、ニューヨーク州、ホワイト・ブレインズ、ホームサイド・レーン 32

(72)発明者 スナファー、ジョン

アメリカ合衆国、ニューヨーク州、ニューヨーク、イースト・シックスティファースト・ストリー  
ト 252

Fターム(参考) 5B050 BA09 CA07 DA04 EA09 EA28 FA02 FA06

5B080 AA17 DA06 FA02 FA14

5C061 AA20 AB14 AB16