

仮想カメラにおける広角での周辺湾曲を 表現可能なレンズモデルの提案

馬場 雅志^{1,a)} 藤木 陽太¹ 古川 亮¹ 宮崎 大輔¹

概要: 実世界では、より広い範囲を撮影できるレンズとして、広角レンズや魚眼レンズが使用されている。しかし、CG におけるカメラモデルでは 90 度以上の画角で透視投影を行うと物体の間延びなど不自然な点が生じるため、90 度以上の広角が使用されることはほとんどない。本研究では、広角時に樽型の湾曲を付加することで、物体の形状が崩れることなく、自然に描画できるレンズモデルを提案する。

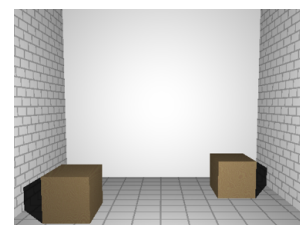
A lens model expressing peripheral curvature at a wide angle of a virtual camera

1. はじめに

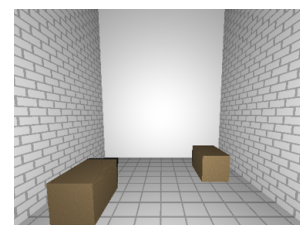
実世界では、様々な特徴を持つレンズが存在し、用途によって使い分けられている。代表的なものとして、遠くの物体を拡大して写すことができる望遠レンズや広い範囲を写す広角レンズ、広角レンズよりもさらに広い範囲を円形に歪めることで写せる魚眼レンズ、複数のレンズを移動させることで望遠から広角まで画角を変化させることができるズームレンズなどが挙げられる。中でも広角レンズや魚眼レンズは、広い範囲を写すためにレンズの形状や歪曲に関する工夫を加えている。一方、コンピュータグラフィックス (CG) でのカメラモデルは、実世界のカメラよりも自由にパラメータを変化させることができるが、その反面、レンズのように屈折や歪曲を与える仕組みが存在しない。そのために、CG のカメラで画角を大きくすればするほど、画面の端が伸びてしまったり、手前の物体が間延びしてしまう。このような問題から、一般的に CG のカメラを扱う際は 90 度以上の画角を取ることは避けられている。図 1 は、同じ空間内でカメラの画角を変化させたときの描画の様子である。画角が 90 度以上の広角になると、画像が不自然に引き延ばされていることがわかる。

本研究では、こうした画角が大きくなるにつれて起きる不自然な空間描画を改善し、画角が 90 度を越えても実用

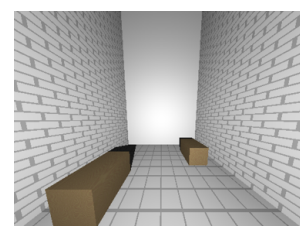
的であるようなカメラモデルを実現することを主な目的とする。また、こうした描画を行うとともに、画角が狭いときは、歪みがほとんどなく遠くの物体を拡大して写すことができる望遠レンズの映し方を行い、画角が広いときは広



(a) 画角 60 度



(b) 画角 120 度



(c) 画角 150 度

図 1 描画画角を変化させた時の CG 画像の変化

¹ 広島市立大学
Hiroshima City University
^{a)} baba@hiroshima-cu.ac.jp

角レンズや魚眼レンズのように歪みを持たせて広い範囲を映すことができるようなカメラモデルの実現を行う。

2. 提案手法

2.1 提案レンズモデル

CG におけるカメラでは、画角の拡大によって画像周辺部が伸びる現象が起こる。この現象を改善するために、図 2 に示すように単レンズを再現した透明物体を CG のカメラの前方に配置することで透過させる光を屈折させる。これにより、樽型の歪曲 [1] を発生させて CG を描画する。

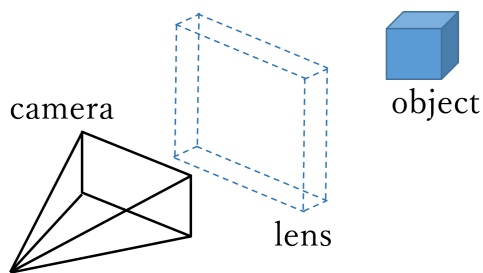
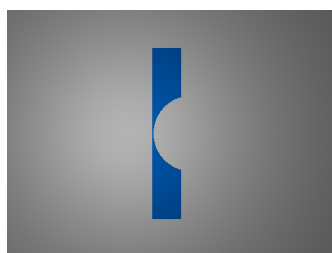


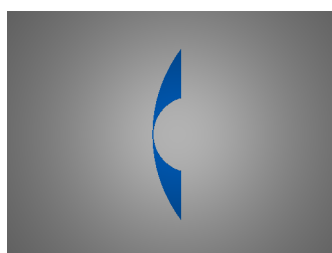
図 2 レンズを前方に配置したカメラモデル

2.2 レンズの基本形状

一般に、単レンズはその断面図によって細かく分類することができ、それぞれのレンズで性質に違いがある [2]。この中で実装するレンズの候補を、物体側が平面でカメラ側が凹形状の平凹レンズと、物体側が凸形状でカメラ側が凹形状のメニスカスレンズ [2] とした。この二つを同一空間での描画による実験によって比較し、実装するレンズの大まかな形状を決定する。CG 上で作成した 2 つのレンズの断面図を図 3 に示す。なお、実物のレンズは透明であるが、ここでは形状を見やすくするために色を付けている。ここ



(a) 平凹レンズ



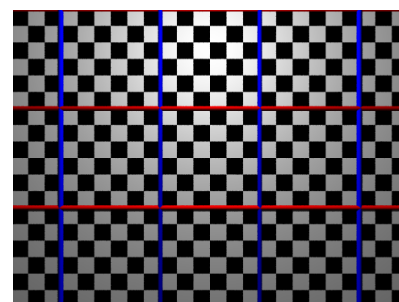
(b) メニスカスレンズ

図 3 2 つのレンズの断面図

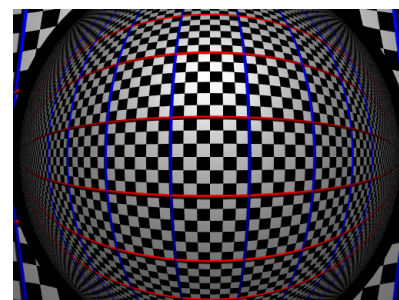
で、カメラ側の凹形状の曲率や面取り幅、レンズ上で最も薄い部分である光軸上の物体側の面とカメラ側の面の厚さ、全体における厚さは 2 つのレンズで同一に設定している。

レンズの形状によってどのような描画の違いがあるのかを比較したところ、平凹レンズでは、画角が 100 度の時、画像周辺部で歪みが付与されないことがわかる (図 4 参照)。これは、凹形状側から入射した光が平面側から出射する際の角度が臨界角よりも大きくなり、レンズ内部で全反射を起こすためであると考えられる。これは、全体的なレンズの大きさを変えたとしても起きる現象である。

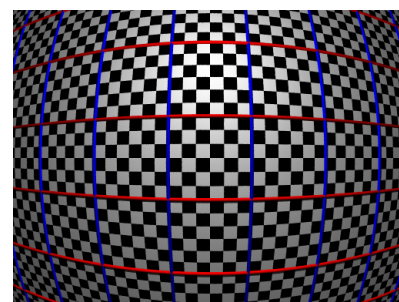
本研究では、主に広角側での歪曲による物体形状の自然な描画が目的であるため、画角が 90 度以上では画像に歪みを持たせるが、画角が狭い望遠側ではできる限り歪ませずに描画することが理想である。一方、歪曲付与を行う広角側ではより広い画角でもレンズによる不具合は起きないことが望ましい。この 2 点から、本研究で作成するレンズは、物体側が凸形状でカメラ側が凹形状のメニスカスレンズが適切であると言える。



(a) 透視投影 (レンズなし)



(b) 平凹レンズ



(c) メニスカスレンズ

図 4 画角 100 度における各レンズでの描画結果

2.3 レンズ形状パラメータの決定

レンズの詳細な設計を行うには、レンズに関する様々なパラメータを決定する必要がある。決定するパラメータを推定するために用いるレンズの断面図は、実際に販売されている魚眼レンズの断面図を参考にした。レンズ形状を決定する際に用いたパラメータを図5に示す。図5では、実際に設計するレンズの形状を実線で示している。

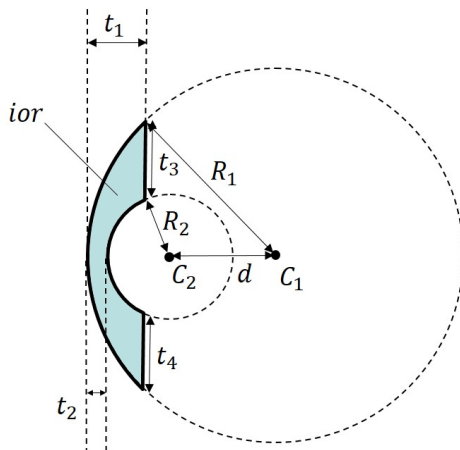


図5 決定すべきレンズ形状のパラメータ

次に、各パラメータの説明を行う。 R_1, R_2 はレンズの物体側、カメラ側それぞれの曲率半径を表す。これは、レンズの曲面を決定するパラメータである。 C_1, C_2 は、レンズの物体側、カメラ側それぞれの曲率中心を表す。特に、 C_2 は平凸レンズから切り取る球体の位置を指定する重要なパラメータである。 t_1 はレンズ全体の厚さを示す。 t_2 は物体側のレンズ中心からカメラ側のレンズ中心までの距離である。つまり、レンズの中で最も薄い部分である。また、 t_3, t_4 は上部と下部の面取り幅である。さらに、物体の内部パラメータとして、屈折率 (ior) を設定する。

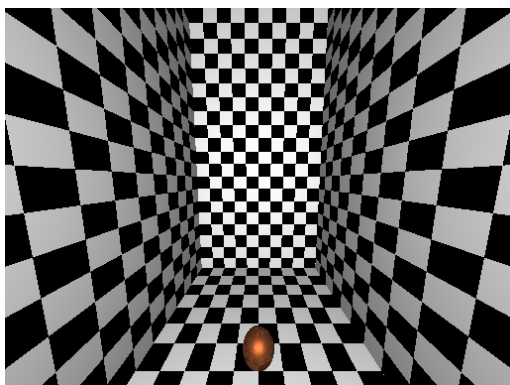


図6 比較に用いるシーン

図5で示したパラメータを変化させて比較を行いながら、最適なレンズの形状を決定する。比較は、床と左右の壁、前面に白黒のチェックボードを置き、さらに床に球体を置いた空間を描画することで実施する。カメラの画角はレンズを通すことで歪曲が起こる120度設定する。レンズを通さずにCGを描画したものを図6に示す。

2.3.1 屈折率

透明な物体をレンズやガラスなど屈折の起きる物体にするために、レンズの屈折率を設定する。実在するガラスや単一レンズの屈折率がおおよそ1.4から1.55であるので、本研究では屈折率を1.4とした。

2.3.2 物体側とカメラ側の曲率半径に関する検討

まず、 R_1, R_2 に関する検討を行う。検討を行うのは、 $R_1 > R_2$ の場合と $R_1 < R_2$ の場合、 $R_1 = R_2$ の場合である。まず $R_1 = 15$ で固定として、 $R_2 = 4$ に設定したとき、 $R_2 = 20$ に設定したとき $R_2 = 15$ に設定したときのレンズの断面図とそのレンズを使って作成したCG画像を図7に示す。図7より、物体側の曲率半径よりもカメラ側の曲率半径が小さいときは樽型の歪曲収差が起き、等しいときは糸巻き型の歪曲収差が起きる。よって、実装するレンズは、

$$R_1 > R_2 \quad (1)$$

を満たすことが望ましい。

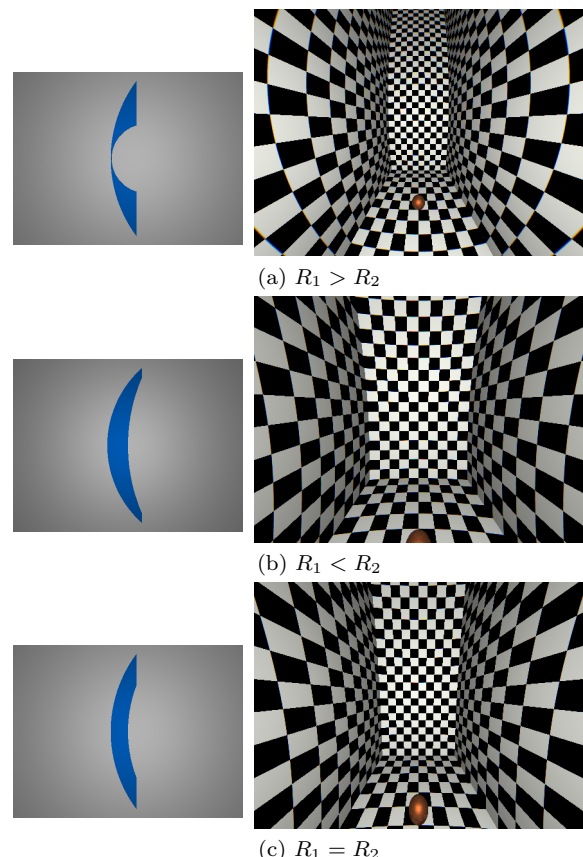


図7 R_1, R_2 を変化したときのレンズの断面図とCG画像

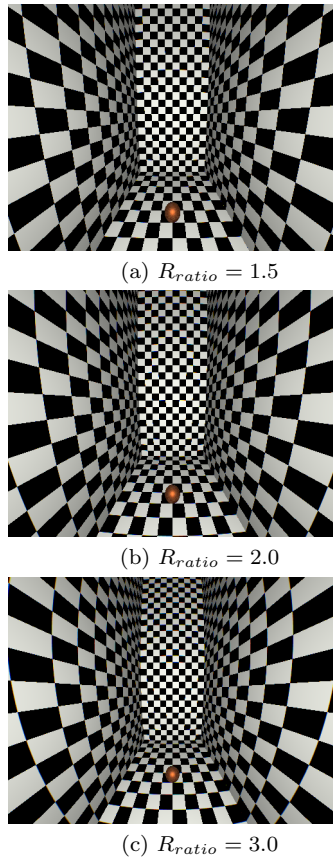


図 8 R_{ratio} を変化したときのレンズを用いて描画した CG

次に、樽型の歪曲収差の効果を確認するため、 $R_{ratio} = 1.5$ のとき、 $R_{ratio} = 2.0$ のとき、 $R_{ratio} = 3.0$ のときの CG 描画結果を図 8 に示す。図 8 より、式 (1) を満たしたとしても、 $R_{ratio} = 1.5$ の場合はほとんど樽型の歪曲が起きないことがわかる。これより、樽型の歪曲収差をより効果的にするには、

$$R_{ratio} = \frac{R_1}{R_2} > 2.0 \quad (2)$$

を満たすことが望ましい。

2.3.3 レンズの光軸上における厚さに関する検討

次に、 t_2 についての検討を行う。式 (2) を満たした上で、 t_2 の値を変化させたレンズを複数用意し、CG 描画の様子を調査する。図 9 に、 $t_2 = 0.5$ のとき、 $t_2 = 1.0$ のとき、 $t_2 = 1.5$ のときのレンズの断面図とそれぞれのレンズを用いて CG を描画した結果を示す。なお、 R_1, R_2 は 3 つのレンズそれぞれで同一である。

図 9 より、 t_2 の値を大きくするほど樽型の歪曲効果が減少し、遠くにある物体がより近くに見えるような描写をすることがわかる。画角に応じて歪曲効果を強めることが本研究では必須であるので、 t_2 の変化によって歪曲効果が薄れることは不適切である。よって、この研究において t_2 の値はできる限り小さくすることが望ましい。また、歪曲をより効果的に表現するためには、

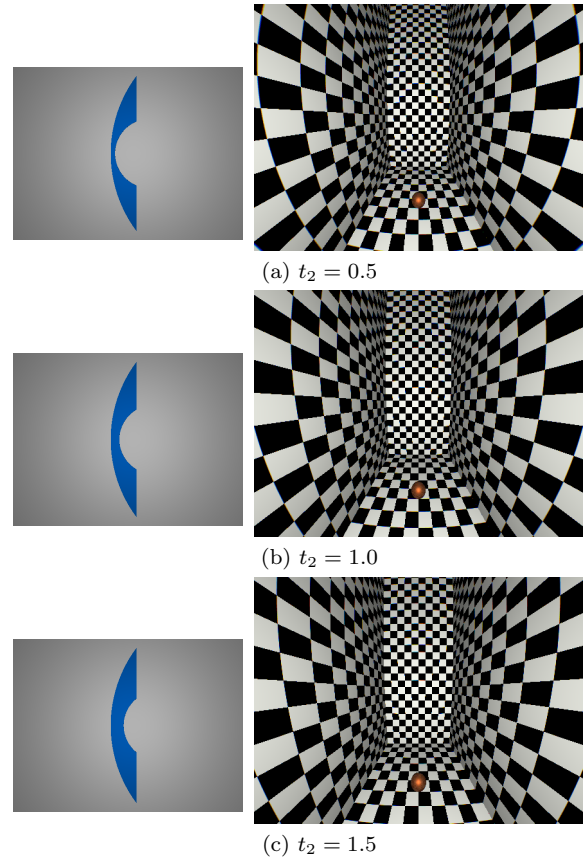


図 9 t_2 を変化したときのレンズの断面図と CG 画像

$$0 < t_2 \leq 0.1 \quad (3)$$

であることが望ましい。

2.3.4 レンズの厚さに関する検討

次に、 t_1 についての検討を行う。式 (2)、式 (3) を満たした上で、 t_1 の値を変化させたレンズを複数用意し、CG 描画の結果を観察する。図 10 に、 $t_1 = 2.0$ のとき、 $t_1 = 4.0$ のとき、 $t_1 = 6.0$ のときのレンズの断面図とそれぞれのレンズを用いて CG を描画した結果を示す。なお、 R_1, R_2, t_2 は 3 つのレンズそれぞれで同一である。

図 10 から、 t_1 の値を大きくするほど、画像中心部にある物体は遠くに見えるようになり、反対に画像周辺部にある物体は引き延ばされて見えるようになることがわかる。本研究では、画角の拡大に応じて起こる画像周辺部の間延びを改善することが目的の一つであるので、レンズの特性によって間延びが起こることは不適切であると言える。よって、作成するレンズの厚さはできる限り薄くすることが望ましい。具体的には、

$$\frac{1}{5}R_1 \leq t_1 \leq \frac{1}{3}R_1 \quad (4)$$

を満たすことが望ましい。

2.4 カメラとレンズの位置関係

作成したレンズはカメラの光軸上の前方に設置し、カメラの移動・回転に合わせてレンズも同じ動きをするように

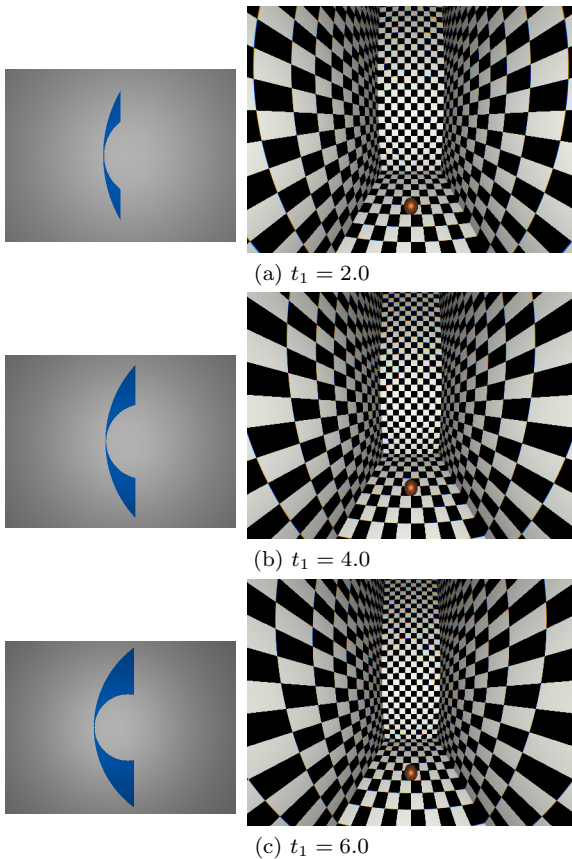


図 10 t_1 を変化させたときのレンズの断面図と CG 画像

設定する．ここで，カメラとレンズの位置を決定する必要がある．カメラとレンズの位置を離しすぎると，映すことができる画角が狭くなってしまふ．よって，カメラはレンズの凹部分に入れ込む形で配置するか，面取り幅の上端と下端を結んだ線上に配置するのが望ましい（図 11 参照）．

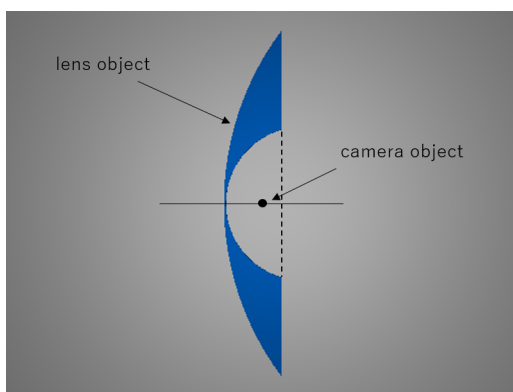


図 11 カメラとレンズの位置関係

3. 適用例

提案レンズモデルの形状パラメータをまとめたものを表 1 に示す．このレンズの有用性を調べるため，レンズを装着しない状態で作成した画像と本研究で提案したレンズを装着した状態で作成した画像の比較を行った．画像

の生成にはフリーの 3D レンダリングソフトウェアである POV-Ray version3.6 [3] を用いた．

表 1 実装したレンズのパラメータ

R_1	R_2	R_{ratio}	C_1	C_2	t_1	t_2	ior
15	4.0	3.75	(0,0,0)	(0,0,10.9)	3.0	0.1	1.4

3.1 透視投影カメラモデルとの比較

POV-Ray のデフォルトの透視投影モデルのカメラと，本研究で作成したレンズを装着したカメラそれぞれで同一の CG シーンを描画して比較を行う．カメラの画角は，両方とも (a)60 度，(b)90 度，(c)120 度，(d)150 度である．どちらも同じカメラ位置から撮影している．通常のカメラ（透視投影）で描画した CG を図 12 に，作成したレンズを装着して描画した CG を図 13 に示す．

図 12(a)，図 12(b) より，画角が 90 度よりも小さいときは通常の透視投影のカメラでも空間上の物体形状に不自然な点は見られない．また，図 13(a)，図 13(b) より，本研究で作成したレンズを装着したモデルにおいても歪みは小さく，基本的な透視投影モデルに与える影響は少ない．一方，図 12(c)，図 12(d) より，画角が 90 度以上になると遠くの物体はより遠く，近くの物体はより近くに見えるように描画されるため，見かけ上前方の物体が間延びしてしまう現象が起こる．画像では，正方形であるチェックボードが画像周辺部で伸びて表示されている．これに対して，図 13(c)，図 13(d) では，画角が大きくなるほど樽型の歪曲を主に画像周辺部に付与している．これにより，チェックボードの間延びを抑制していることがわかる．また，樽型の歪曲は画像中心部を膨らませたように見える効果もあることから，通常のカメラよりも，遠い物体が近くに表示されることがわかる．

3.2 一般的なシーンでの適用例

提案レンズモデルを他の CG シーンへ適用した例を図 14 に示す．ここで，(a)(c) が通常の透視投影によって生成した広角の画像，(c)(d) が提案したレンズを装着したカメラで生成した同じシーンの画像である．レンズを装着することにより，画像周辺部の不自然な引き延ばしがなくなり，自然な画像が生成できている．

4. おわりに

本研究では，CG において，通常の透視投影で広い範囲を写した際に生じる画像周辺部の間延びに対して，等距離射影方式による樽型歪曲を付与することでこれを改善した．提案手法として，CG 上で物体側が凸形状，カメラ側が凹形状のメニスカスレンズを再現した物体を作成し，カメラオブジェクトの前方に配置した後，レンズを通して CG

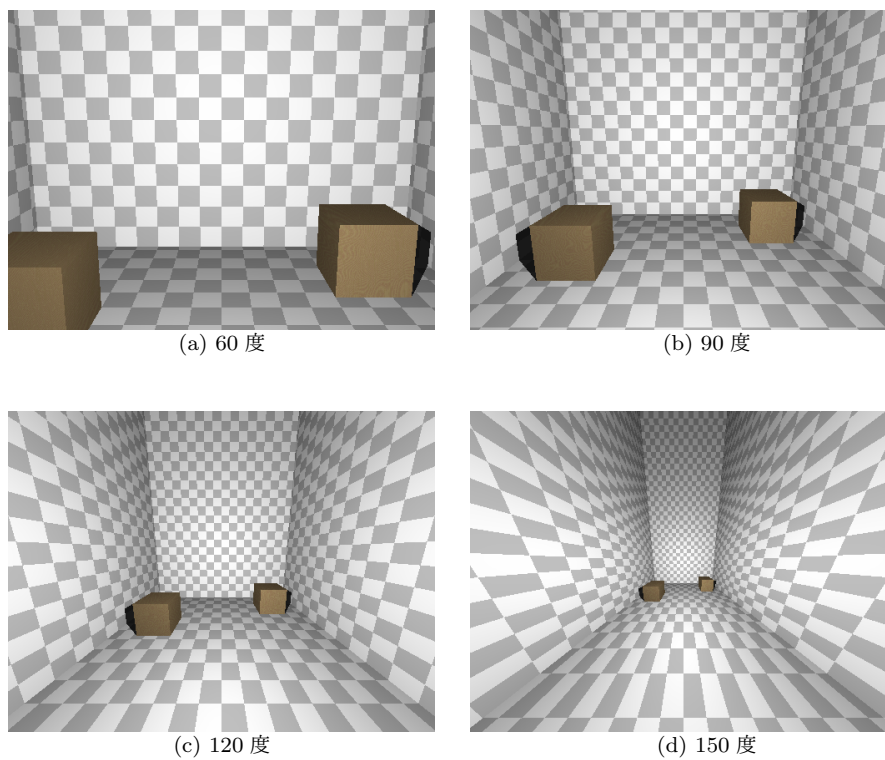


図 12 通常のカメラで描画した CG

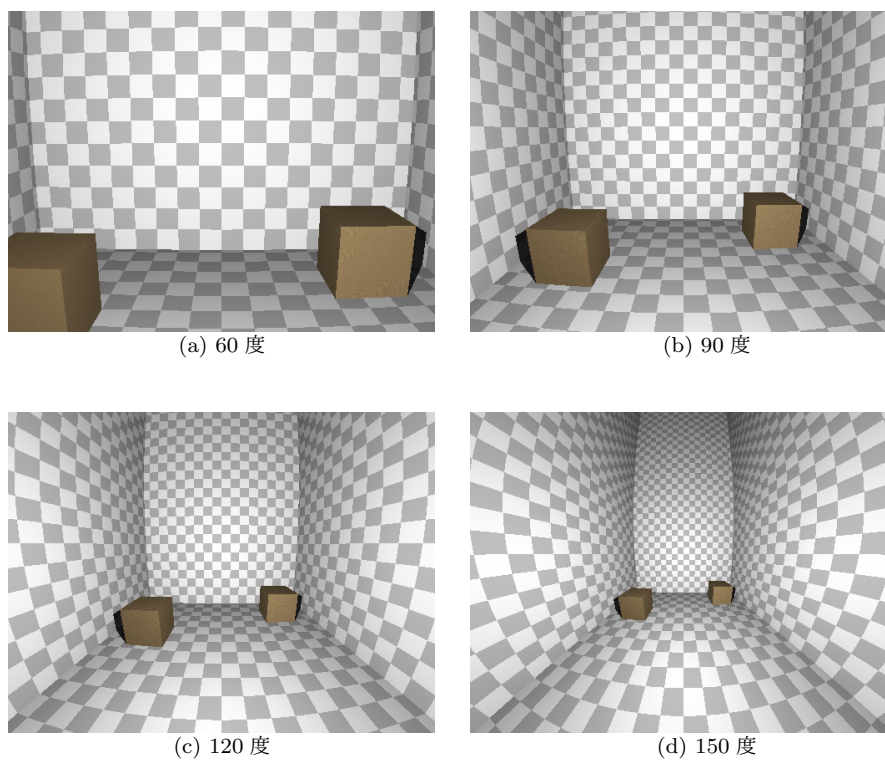


図 13 作成したレンズを装着したカメラで描画した CG

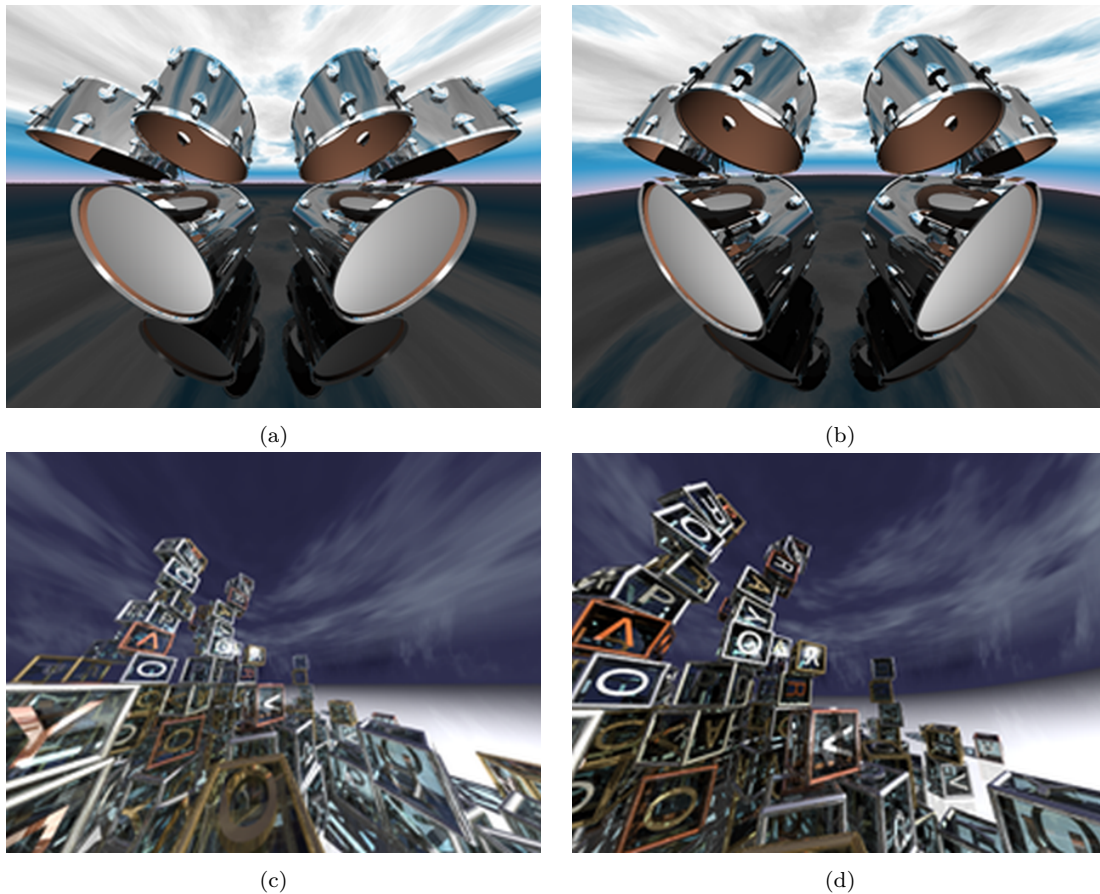


図 14 他のシーンでの適用例

を描画する。レンズ形状を表すパラメータの検討手順として、実際に販売されている魚眼レンズを参考に大まかな形状を決定した後、レンズ形状を詳細に決定するパラメータの条件を様々な比較を通して決定した。作成したレンズを用いた実験により、画角を広げるにつれて樽型歪曲が付与されるのを確認し、画像周辺部や前方の物体の間延びを改善することができた。

参考文献

- [1] 加藤欣也, “レンズ工学の基礎 3 : 工学系の収差”, 日本眼光学学会『視覚の科学』, 2015, 36(3), 40-44.
- [2] 加藤欣也, “レンズ工学の基礎 1 : レンズの基本”, 日本眼光学学会『視覚の科学』, 2015, 36(1), 1-3.
- [3] “POV-Ray - The Persistence of Vision Raytrace”, <http://www.povray.org/>, (accessed 2020-1-20).