

三次元カラー迅速造形物へのプロジェクタ投影 重畳による高コントラスト立体ディスプレイ

島津 冴子^{†1} 岩井 大輔^{†1} 佐藤 宏介^{†1}

高コントラストな色彩をもつ立体物の形状情報・色情報をデジタル化し活用する試みが増えつつある。それに伴い、それらの形状情報の立体性と色情報のコントラストを損なうことなく詳細に表示することが可能なディスプレイへのニーズも高まっている。本論文では、三次元カラー迅速造形法 (RP: ラピッドプロトタイプング) で制作した立体物に対してプロジェクタ投影重畳を行うことで、高コントラストかつ立体感・実在感の高い表示を行うディスプレイシステムを提案する。RP は対象物の形状情報を立体的に出力できるが、コントラストが低くその色情報を十分に表現できない。そこで本システムでは、対象物の高コントラストな色情報を低コントラストな RP 機出力とプロジェクタ出力に分割する。そしてこれらを投影重畳することで、RP 機出力のもつ立体感や実在感を損なわず、かつそれぞれのデバイスを単独で用いた場合と比較して高コントラストな表示を行う。

High dynamic range 3-D display with spatially varying light projection on color rapid prototyping output

SAEKO SHIMAZU,^{†1} DAISUKE IWAI^{†1} and KOSUKE SATOU^{†1}

This paper proposes a 3-D high dynamic range display technology using a video projector and a color rapid prototyping (RP) machine. The RP machine outputs a textured 3-D physical object of a virtual model in the real world. However, the output object has a low color contrast. Instead of viewing the model under a uniform environment light, we propose to superimpose spatially varying projection light onto the model to boost the physical contrast. The result of our first proof-of-concept experiment showed that the proposed method could reproduce a 3-D virtual object in the real world with a higher color contrast than the RP output or the projected image alone. We believe that our technique is particularly useful in the reproduction of a digitally archived historical object.

1. はじめに

近年、デジタル化された物体をより高コントラストに、より立体的に表示するための研究が盛んに行われている。高コントラスト色情報をもつ立体物を表示・再現する際、その形状情報と色情報の再現性が求められる。しかし、液晶平面ディスプレイや平面スクリーンに対するプロジェクション、紙へのプリントアウトなど平面的な表現では、その立体物の形状や空間的な位置関係が把握しにくい。そのため、物体を立体的に表示するディスプレイ技術が注目を集めている。

立体ディスプレイの例として、人間の視差を利用することで画像を立体的に飛び出して見せる 3D ディスプレイは、アミューズメントパークのアトラクションや映画館などで利用されている。動画の表示にも適しており、平面ディスプレイよりも高い実在感や立体感を与えることができる。しかし、専用のメガネを装着する必要があったり、目が疲れやすいなどユーザの身体への負担が多いことが問題となる。

一方、実際に立体模型を出力するディスプレイ技術として三次元カラー迅速造形法 (RP: Rapid Prototyping) がある。立体物を生成する手法には、アクリル系光硬化樹脂を使用したインクジェット紫外線硬化方式、ABS 樹脂を使用した熱溶解積層方式、あるいはパウダーを使用した粉末固着方式などがあげられる。RP では立体のオブジェクトを造形することで、仮想物体に実体を与えると同時にその形状情報の立体性を損なうことなく、ユーザの身体への負担も少ない。しかし、液晶ディスプレイなどと比較して、RP 機出力などのハードコピーはそれ自体が発光できず、コントラストが低いという問題点がある。

そこで、本研究では RP 機出力にプロジェクタ投影重畳を行うことで、高い実在感・立体感をもつとともに高コントラスト表示が可能なディスプレイシステムを提案・実装する。本研究によって、デジタル空間で製作された物体、あるいはデジタルアーカイブされた文化財などの高コントラスト立体物を、高い再現性で表示するシステムの実現を目指す。

2. 関連研究

2.1 投影型複合現実感

複合現実感とは、CG などによって表現される仮想世界と現実世界を融合する技術であり、仮想

^{†1} 大阪大学 大学院基礎工学研究科
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

世界を主体とする拡張仮想感と、実世界を主体とする拡張現実感という2つのアプローチがある。従来の仮想現実感がコンピュータ上で仮想的に作り上げた物体のみを扱っていたのに対して、複合現実感の実世界の要素を用いる事でコンピュータを意識せずに高度な情報処理を利用することができるユーザインタフェースの形態として期待されている。

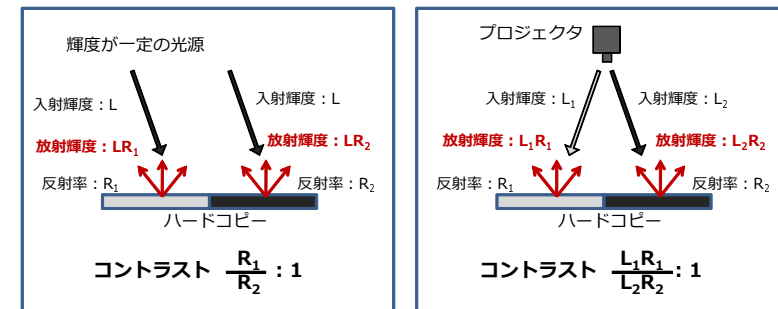
複合現実感のうち、仮想空間と現実空間を融合し表示する手法としてプロジェクタからCG画像を実物体に投影するものを特に投影型複合現実感という。投影型複合現実感では投影対象に実物体を用いることにより、その実在感を失うことなく、形状や質感などが変化したような効果をもたせることができる。Shader Lamps¹⁾やLife-Sized Projector-Based Dioramas²⁾は、3次元形状の投影用白色実物体と、コンピュータ上の仮想空間にモデル化された同形状の3次元CGを用いた投影型複合現実感システムである。コンピュータ上で3次元モデルの表面上に質感や材質などの表面属性パラメータを与え、ある視点から見たときの平面画像を求めてプロジェクタから投影することでその表面情報が変化したように見せている。しかし、これらの研究で使用されているモデルの反射率は一律であるため、使用するプロジェクタのコントラスト以上のコントラストを実現することはできない。

2.2 高コントラストディスプレイシステム

コントラストとは画像において最も暗い部分と最も明るい部分の輝度の差のことをさす。ディスプレイ上で白を表示したときの輝度を L_{max} 、黒を表示したときの輝度を L_{min} とすると、そのディスプレイのコントラストは $L_{max}/L_{min}:1$ と表わされる。現実世界のシーンにおいては、暗闇から太陽光など非常に強い光を放つものまで風景や物体の持つ輝度は幅広い。しかし、従来のディスプレイでは表現できる最小輝度・最大輝度に限界があり、またその間の諧調数も限られているためそれらを十分に表現することができない。そのため、これらの表現の幅を広げるためのディスプレイ技術に関する研究が盛んに行われている。

Bimberらは、写真などのハードコピーにプロジェクタ出力を重畳させることで高い輝度と高いコントラストを実現することができるシステムを提案した⁶⁾。ハードコピーに照明を行うとき、その放射輝度はハードコピーの持つ反射率と入射輝度の積となる。よって、図1(a)のような一様環境光下では、その放射輝度のコントラストはハードコピーのもつ反射率のコントラストと変わらない。しかし、ハードコピーにプロジェクタ出力を重畳するとき、図1(b)のようにハードコピーの反射率の低い点に低い輝度値、反射率の高い点に高い輝度値をもつ画素が重畳されるようにプロジェクタ画像を与えることにより、ハードコピーのみ・プロジェクタのみの出力よりもコントラストの高い出力結果を得る事が出来る。

しかし、これらの従来の高コントラストディスプレイの研究では平面ディスプレイのみが



(a) 一様環境光下

(b) プロジェクタ画像重畳時

図1 ハードコピーの放射輝度

提案されてきた。そのため、立体物を表示する際にはその立体性を十分に表現することができなかった。

3. 提案システム

提案システムは、デジタルデータとして表現されている高コントラストな色情報を持つ立体物を、立体的かつ高コントラストに表示することができるディスプレイである。対象モデルの形状情報はRP機より出力し、また色情報についてはRP機出力とプロジェクタ投影画像に分割し、これらを暗室環境下で投影重畳することによって高コントラストな表示を行う。システムの外観イメージを図2に示す。

対象モデルは、形状情報として頂点情報と面情報、色情報として頂点色情報を有しており、完全な面情報を持つ閉じた物体であるものとする。なお、対象モデルのもつコントラストが提案システムで表現可能なコントラストよりも高い場合には、線型圧縮によりそのコントラストを調節する。また、提案システムで対象とするのは静止物体のみである。

3.1 高コントラスト色情報の分割

投影重畳を行うことで対象モデルの持つ色情報を高コントラストに表示できるように、RP機とプロジェクタへの入力RGB値を決定する。RP機およびプロジェクタへの入力RGB値は0から255までの整数値とする。ただし、入力色と出力色の間に特性とよばれる指



図 2 提案システムの外観のイメージ

数関数の関係をもつことと、RGB それぞれのチャンネルにおいて出力 RGB 値の最小値と最大値が異なるために色合いが変化してしまうことを考慮し、任意の出力を得るためにはどのような入力をすればいいかを示す入出力変換テーブルを作成し、最終的な入力 RGB 値を決定する。

3.1.1 プロジェクタと RP 機の出力値の算出

高コントラストな色情報をもつ立体モデルのある頂点の RGB 値を (r, g, b) とすると、その頂点の輝度値 L は ITU-R BT.601 の規定により

$$L = 0.2989r + 0.5866g + 0.1145b \quad (1)$$

で与えられる。いま、この対象モデルのもつ高コントラストな色情報を、低コントラストな 2 つの色情報に分割することを考える。対象モデルのもつ色情報の最大輝度が 1 となるように各頂点の輝度値及び RGB 値を正規化し、ある頂点の輝度値 L と RGB 値 (r, g, b) から以下のように (r_1, g_1, b_1) と (r_2, g_2, b_2) を定める。

$$r_1 = \sqrt{r} \quad g_1 = \sqrt{g} \quad b_1 = \sqrt{b} \quad (2)$$

$$r_2 = \frac{r}{\sqrt{r}} \quad g_2 = \frac{g}{\sqrt{g}} \quad b_2 = \frac{b}{\sqrt{b}} \quad (3)$$

全ての頂点について (r_1, g_1, b_1) と (r_2, g_2, b_2) を求めると、それぞれのコントラストがもとの色情報のコントラストの平方根となるような低コントラスト色情報を得ることができ、またこれらを重畳するともとの高コントラスト色情報を再現することができる。そこで、この (r_1, g_1, b_1) をもとにプロジェクタ出力値を、また (r_2, g_2, b_2) をもとに RP 機の出力値を決定する。

いま、ある光源輝度をもつプロジェクタから、暗室環境下で白色平面スクリーンに投影をした際に表現可能な色の最小輝度を $L_{\min 1}$ 、最大輝度を $L_{\max 1}$ とする。式 (1) より求められる (r_1, g_1, b_1) の RGB 値を持つ頂点の輝度 L_1 を用いて輝度値 L'_1 と RGB 値 (r_P, g_P, b_P) を次のように定め、これをプロジェクタ出力とする。

$$L'_1 = L_1(L_{\max 1} - L_{\min 1}) + L_{\min 1} \quad (4)$$

$$r_P = \frac{L'_1}{L_1} r_1 \quad g_P = \frac{L'_1}{L_1} g_1 \quad b_P = \frac{L'_1}{L_1} b_1 \quad (5)$$

また、RP 機についても同様に、表現できる輝度反射率の最小値・最大値をそれぞれ $L_{\min 2}, L_{\max 2}$ 、式 (1) から求めた (r_2, g_2, b_2) の輝度反射率を L_2 として以下のように L'_2 と (r_R, g_R, b_R) を定め、これを RP 機の出力とする。

$$L'_2 = L_2(L_{\max 2} - L_{\min 2}) + L_{\min 2} \quad (6)$$

$$r_R = \frac{L'_2}{L_2} r_2 \quad g_R = \frac{L'_2}{L_2} g_2 \quad b_R = \frac{L'_2}{L_2} b_2 \quad (7)$$

すると、これらの重畳結果の RGB 値 (R, G, B) はそれぞれの RGB 値の積となるので、理論上重畳結果の最大輝度は $L_{\max 1} L_{\max 2}$ 、最小輝度は $L_{\min 1} L_{\min 2}$ となり、プロジェクタのみ・RP 機のみ出力と比較して高コントラストな出力を得ることができる。例として、プロジェクタ出力のコントラストが 500:1、RP 機出力のコントラストが 5:1 であった場合、提案システムのコントラストは理論上 2,500:1 となる。

3.1.2 補正と色変換テーブルの取得

目的の出力 RGB 値を得るために、プロジェクタと RP 機の入出力間の特性と色合いの変化を考慮し、色変換テーブルを取得する。

プロジェクタもしくは RP 機において、その値を γ とすると、RGB の任意のチャンネル C において、入力 RGB 値 c_{in1}, c_{in2} に対する出力 RGB 値が c_{out1}, c_{out2} であったとき、 c'_{in1} と c'_{in2} を

$$c'_{in1} = \left(\frac{c_{in1}}{255} \right)^\gamma \quad c'_{in2} = \left(\frac{c_{in2}}{255} \right)^\gamma \quad (8)$$

のように定める。いま、出力の最小 RGB 値と最大 RGB 値をそれぞれ c_{\min}, c_{\max} とすると

$$c_{out1} = c_{\min} + c'_{in1}(c_{\max} - c_{\min}) \quad (9)$$

$$c_{out2} = c_{\min} + c'_{in2}(c_{\max} - c_{\min}) \quad (10)$$

が成り立つ。よって、この 2 式より、 c_{\min} および c_{\max} は

$$c_{\min} = \frac{(c_{\text{out}1}c'_{\text{in}2} - c_{\text{out}2}c'_{\text{in}1})}{c'_{\text{in}2} - c'_{\text{in}1}} \quad (11)$$

$$c_{\max} = \frac{c_{\text{out}1} - c_{\min}(1 - c'_{\text{in}1})}{c'_{\text{in}1}} \quad (12)$$

と求められる。この式より RGB それぞれの出力の最小 RGB 値・最大 RGB 値を求めれば、出力の輝度値あるいは輝度反射率の最小値および最大値が式 (1) を用いて求められる。

次に、入力 RGB 値が $(r_{\text{in}}, g_{\text{in}}, b_{\text{in}})$ のときの輝度値あるいは輝度反射率を式 (1) より求め L_{in} とすると、入力の最小値は 0、最大値は 255 であることからその時の出力値 L_{out} は

$$L_{\text{out}} = \left(\frac{L_{\text{in}}}{255}\right)^{\gamma} (L_{\max} - L_{\min}) + L_{\min} \quad (13)$$

となる。ただし、 L_{\min} および L_{\max} は RP 機出力もしくはプロジェクタ出力の最小値および最大値である。すると、このとき任意の RGB いずれかのチャンネル C での入力 RGB 値 c_{in} から出力 RGB 値 c_{out} への変換は

$$c_{\text{out}} = c_{\min} + \frac{L_{\text{out}}}{L_{\text{in}}}(c_{\text{in}} - c_{\min}) \quad (14)$$

となるので、ある出力 RGB 値 $(r_{\text{out}}, g_{\text{out}}, b_{\text{out}})$ を得たいとき、その輝度値 (輝度反射率) を式 (1) より求めて L_{out} とすると入力の輝度値 (輝度反射率) L_{in} およびチャンネル C での入力 c_{in} は、出力 c_{out} より

$$L_{\text{in}} = 255 \left(\frac{L_{\text{out}} - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (15)$$

$$c_{\text{in}} = c_{\min} + \frac{L_{\text{in}}}{L_{\text{out}}}(c_{\text{out}} - c_{\min}) \quad (16)$$

とすればよい。ただし、ある出力を得るための入力を上の式から求めたときに 0 以下もしくは 255 以上となる場合は、入力値が 0 から 255 の範囲になるようにクリッピングを行うものとする。

3.1.3 プロジェクタと RP 機への入力値の算出

以上の高コントラスト色情報分割の流れを図 3 に示す。対象モデルの各頂点の色情報について式 (1) ~ 式 (7) よりプロジェクタと RP 機がそれぞれ出力すべき RGB 値が求められ、その出力を得るための RP 機とプロジェクタへの入力値が式 (8) ~ 式 (16) より得られる。対象モデルのすべての頂点についてこれらの入力値を計算することで、各デバイスへの入力値を得ることができる。

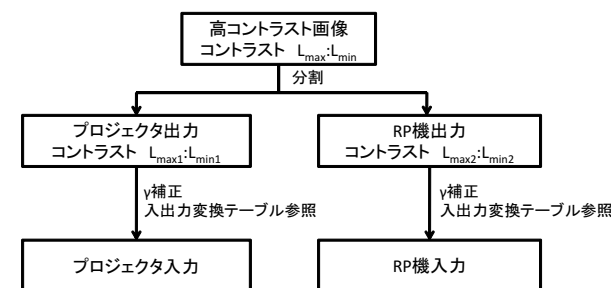


図 3 高コントラスト色情報の分割の流れ

3.2 対象 RP 機出力の位置姿勢推定

提案システムでは、立体物に対して色情報をプロジェクタから投影するため、実世界での投影対象物体とプロジェクタの相対位置を正確に知る必要がある。そこで、設置した RP 機出力の形状情報の一部の頂点情報をグレーコードパターン投影法などの三次元計測によって取得し、デジタル空間上で対象モデルの頂点情報とのマッチングを行うことによってそれらの位置姿勢の関係を調べる。このマッチングには ICP アルゴリズムを用いる。ICP アルゴリズムとはパターンマッチングの一種であり、二つの点群データの対応点間の距離を最小にするような変換と対応点の更新を繰り返し行う事でマッチングを行う手法である。

4. 実 験

提案システムを用いて実際に RP 機とプロジェクタから出力を行い、その動作を確認するとともに高コントラスト表示の有効性を確認した。

4.1 実験環境

本研究で用意した投影シーンは、黒い布を張り付けた背景および対象物体からなる暗室環境である。投影対象として、スタンフォード大学で作成された 'The Stanford Bunny' の形状情報 (面と頂点の位置情報) を用いた。このデータに拡散反射成分と鏡面反射成分からなる材質情報を与え、仮想空間上で二つのスポット光源からの照射を行い、その時の頂点の RGB 値を求めてこの物体の頂点色情報とした。対象物体の描画には OpenGL を用いて、面の色は OpenGL により頂点色情報から補間をすることで描画を行っている (図 4)。この物体の頂点色の最小輝度値は 0.149175、最大輝度値は 522.129075 であった。ただし、図 4 において色情報は線型圧縮により全ての点の輝度値が 0 から 255 の範囲内に収まるように

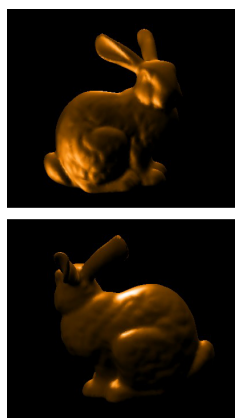


図 4 対象モデル (the Stanford Bunny)

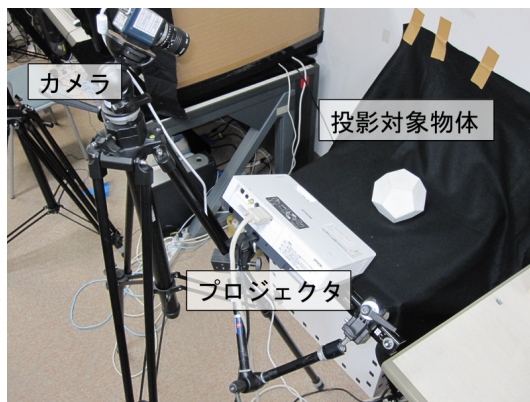


図 5 システム外観

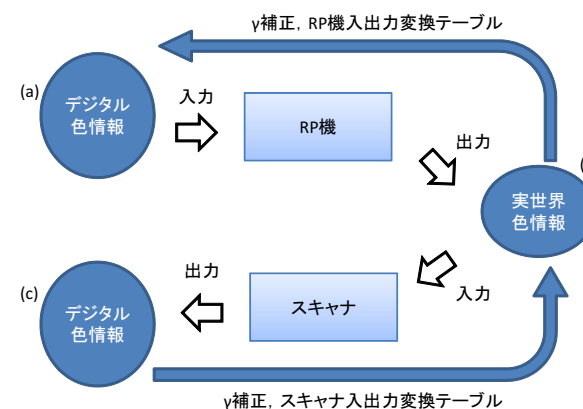


図 6 スキャナ入出力変換と RP 機の入出力変換

輝度調整を行っている．システムの概観を図 5 に示す．

4.2 デバイスの入力変換テーブルの取得

RP 機やプロジェクタなどのデバイスの出力 RGB 値は入力 RGB 値と等しくならないため、目的の出力 RGB 値を得るためにはどのような入力をすればいいか、それらの対応関係を示す入出力逆変換テーブルを取得する必要がある．これらの入出力変換テーブルを求めるために、プロジェクタと RP 機の 値やオフセット情報を調べた．

RP 機の入出力変換テーブルを求めるために、図 7(a) のカラーチャートデータを RP 機で出力し、チャートの各色が入力と出力の間でどのように変化しているか、それらの入出力関係を調べた．ここで、チャートの各色はその領域の全ての画素の RGB 値の平均値とした．しかし、このとき入力デジタルデータの RGB 値を調べる事はできるが、出力の実世界での色情報を直接求める事は容易ではない．そこで、図 6 のように、入力デジタル色情報 (a) を RP 機で出力した実世界色情報 (b) を、フラットヘッドスキャナでスキャンすることでデジタル色情報 (c) (図 7(b)) に変換し、その RGB 値を調べた．

続いて、RP 機出力 (b) とそれをスキャンした色情報 (c) の対応関係を得るために、実世界での RGB 値が既知である x-rite 社の x-rite(マクベス) カラーチェッカー (図 8(a)) をスキャンし (図 8(b))、これらの対応関係を調べた．スキャナ入出力変換テーブルは、RP 機と同様に 3.1.2 と同じ手法によって、得られた対応色の組から得られるものとする．またこの

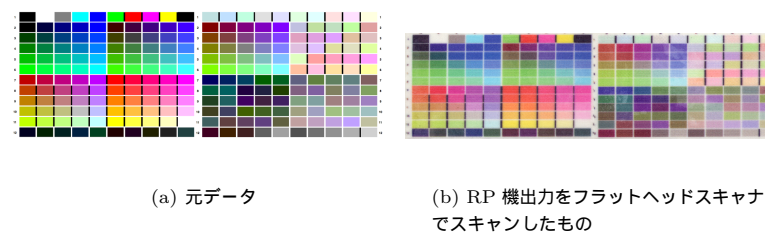


図 7 カラーチャート

スキャナの 値は仕様書より 1.7 であった．得られたスキャナ入出力変換テーブルを用いる事で、RP 機出力の実世界での RGB 値 (b) を求める事ができ、これを用いて 3.1.2 の手法から RP 機の入出力関数を得ることができる．ここで、RP 機の 値は未知であるため、入力に対して 値を 0.2 から 5.0 まで 0.1 ずつ増やしながら RP 機入出力関数テーブルを作成し、その 値での出力との誤差の二乗和を調べたところ、誤差の二乗和が最も小さくなるのは 値が 0.9 の時であったため、これを RP 機の 値とした．

また、プロジェクタ入出力の色補正は DataColor 社の Spyder2PRO を用いて行った．このとき、プロジェクタの 値は 2.1 であった．



(a) 実世界での色情報

(b) フラットヘッドスキャナでスキャンしたもの

図 8 x-rite(マクベス) カラーチェッカー

4.3 対象物体の色情報の分割

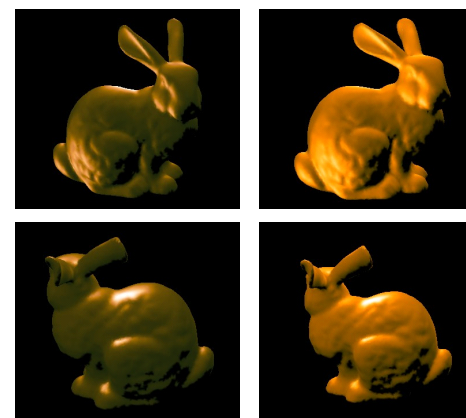
対象物体の色情報から RP 機入力とプロジェクタ入力を求めた．その結果を図 9 に示す．図 9(a) が RP 機への入力色情報，図 9(b) がプロジェクタへの入力色情報をそれぞれ形状情報と共に OpenGL で描画したものである．また、対象モデルの形状情報と図 9(a) の色情報と形状情報を入力して得られた RP 機出力を図 10 に示す．

4.4 RP 機出力の形状計測と位置合わせ

RP 機出力に対してプロジェクタから重畳投影を行うために，RP 機出力の形状計測と位置合わせを行い，プロジェクタと RP 機出力の相対的な位置関係を調べた．まず，設置したカメラとプロジェクタの較正を行い，カメラ画素とプロジェクタ画素，世界座標の対応関係を求めた．較正手法については井口らの著書⁹⁾に記載している．続いてグレーコードパターン投影法を用いて RP 機出力の一部の形状情報の取得したところ，得られた頂点の数は 168,649 個であった．その後，手で初期位置合わせを行い，ICP アルゴリズムを用いてこれらのマッチングを行った．対応点の更新と変換行列の推定・適用を 30 回反復したところ，この時点で反復ごとの位置の更新に大きな変化が見られなくなっていたため，ここで反復計算を終了した．

4.5 投影結果

実世界の RP 機出力の位置と対応する座標にプロジェクタ入力画像を描画し，投影を行った．その結果を露光時間 1.0[s] で撮影した結果を図 11 に示す．また，環境光下での RP 機出力，暗室環境下で白色コピー紙に投影したプロジェクタ出力，暗室環境下での提案システムの出力をそれぞれ露光時間 0.1[s]，露光時間 1.0[s]，露光時間 8.0[s] で撮影したときの結



(a) RP 機入力

(b) プロジェクタ入力

図 9 色情報の分割結果



図 10 RP 機出力

果を図 12 に示す．この図より，露光時間が短い場合に RP 機出力はその諧調が失われているのに対し，プロジェクタ出力や提案システムでは諧調が残っているのが確認できる．また，逆に露光時間が長い場合には，プロジェクタ出力が白飛びして暗い部分の諧調も失われているのに対し，提案システムでは暗い部分の諧調が残っている．この結果より，提案システムでは RP 機出力のみ・プロジェクタ出力のみと比較して暗い部分から明るい部分まで幅広い輝度を表現できており，そのコントラストが向上していることが確認できた．

使用した RP 機出力のコントラストは，図 7(a) のカラーチャートデータの RP 機出力をある光源環境下で撮影し，出力の最大輝度と最小輝度を比較した結果 5.77:1 であった．また，使用したプロジェクタのコントラストは仕様書より 400:1 であったため，理論上重畳投影結果のコントラストは 2,308:1 となる．

5. まとめと今後の課題

本論文では，RP 機出力にプロジェクタ投影重畳を行うことで，立体感や実在感が高く，かつ RP 機やプロジェクタ単体よりも高コントラストな表示を行うことができるディスプレイシステムを提案し，またその有効性を実験によって確認した．

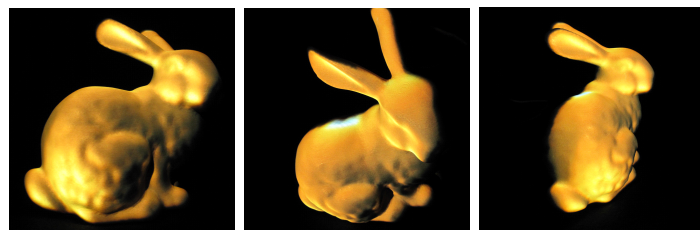


図 11 重畳結果

しかし、今回は対象モデルのコントラストが提案システムで表現できるコントラストよりも高い場合には、線形圧縮によりそのコントラストを調節した。そのため、もとの画像のもつコントラストが非常に高く、さらにその画素の輝度分布が極端に偏っている場合、色情報の分割後に画像の大部分の諧調が失われることがある。例として、図 13(a) のような高コントラスト画像を提案手法によって分割する。この画像は約 32bit の非常に高いコントラストをもち、かつその輝度分布は図 14(a) のように暗い部分に偏り高い輝度をもつ画素が非常にわずかなものである。なお、図 13(a) では 255 以上の輝度値に対してはクリッピングを行っている。これを提案手法に沿って輝度変調を行い、得られた各デバイスへの入力画像を図 13(b) と図 13(c) に示す。このように、ほとんどの画素が黒くつぶれてしまう。この原因は、元の画像の最大輝度が非常に高く、かつ輝度分布が暗い部分に偏っているために、32bit 画像を 8bit 入力に圧縮することで図 14(b) と図 14(c) のように近い輝度値をもつ画素の諧調のほとんどが失われてしまうためである。そのため、このような諧調の喪失を防ぐためには、非常に高コントラストの画像を扱う際にはあらかじめ輝度の偏りをなくすような輝度変調を行う必要がある。

また、提案システムではプロジェクタを 1 台のみ用いているため、プロジェクタ光が届かない部分については重畳投影を行う事ができなかった。そこで、複数台プロジェクタを用いて RP 機出力の周囲から投影を行うことにより、高コントラスト化できる面が増加し、複数のユーザが任意の視点から見る事ができるディスプレイシステムが実現できると考えられる。今回、仮想空間上で対象モデルの周囲に設置した 11 台のプロジェクタに投影割り当てを行い、マルチプロジェクションのシミュレーションを行ったところ、全体の 68% の面に重畳投影をすることができた。ここで投影されなかった面は、底面や床に近い面などユーザからも見えにくい点であったため、マルチプロジェクションは対象物体の全面の高コントラスト化に有効であることが確認できた。

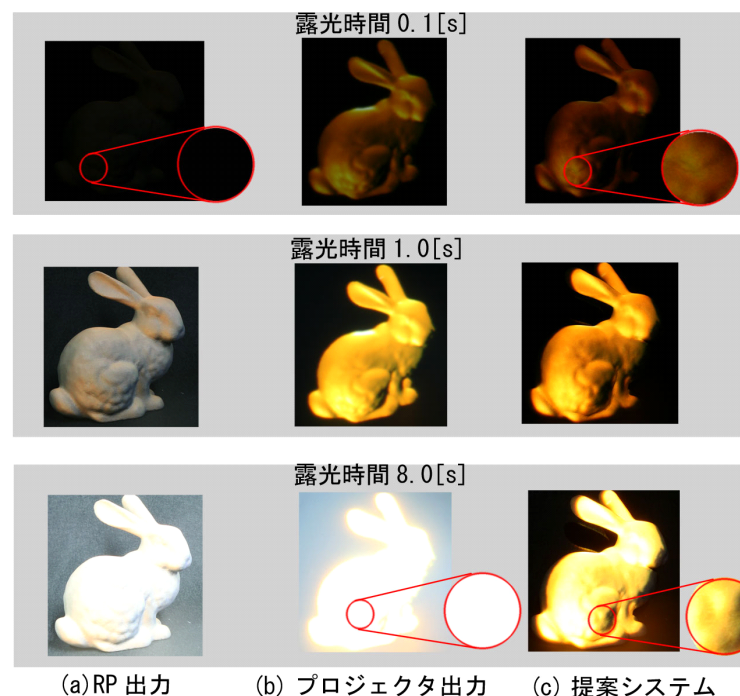
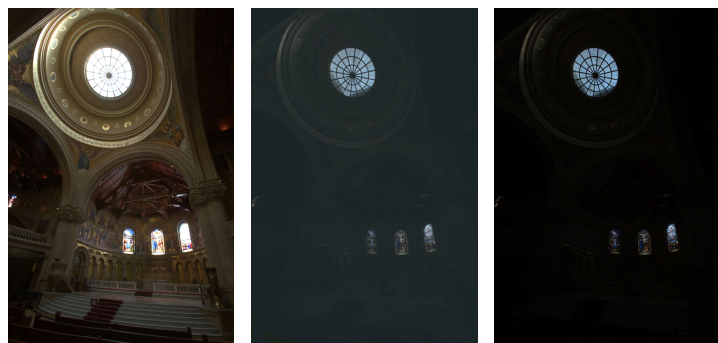


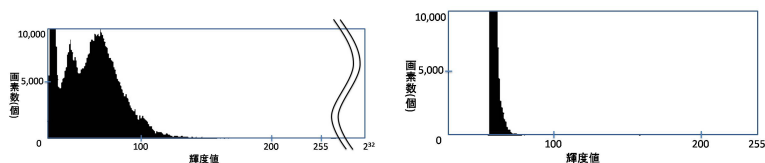
図 12 RP 機出力・プロジェクタ出力・提案システムのコントラストの比較

また、提案システムが表示する物体の輝度・コントラスト・立体性は使用する RP 機とプロジェクタのもつ性能に大きく依存するものである。プロジェクタの出力輝度が高く RP 機の形状再現性が高いほど提案システムの輝度と形状再現性が向上し、それらのコントラストが高ければ高いほど提案システムの高コントラスト性も飛躍的に向上するため、これらの技術の発展にも期待したい。提案システムの活用方法として、博物館や美術館の展示物への利用があげられる。単純に立体像に照明をあてるだけでは得られないコントラストを実現することにより、芸術性の高い展示を行う事ができると考えられる。

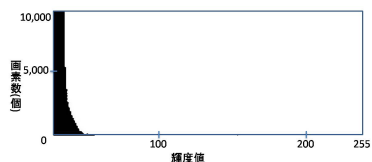


(a) 高コントラスト画像 (b) RP 機出力 (c) プロジェクタ出力

図 13 高コントラスト画像とその分割結果



(a) 高コントラスト画像 (b) RP 機出力



(c) プロジェクタ出力

図 14 高コントラスト画像とその分割結果の輝度分布ヒストグラム

参考文献

- 1) R.Raskar, G.Welch, K.Low and D.Bandyopadhyay, "Shader Lamps: Animating Real Objects With Image-Based Illumination", Proc.Eurographics Rendering Workshop(ERGW2001),pp.89-102,2001.
- 2) K.Low, G.Welch, A.Lastra, H.Fuchs, "Life-Sized Projector-Based Dioramas", Proceedings of the ACM Symposium on Virtual reality Software and technology, Banff Centre, Banff, Alberta, Canada, ACM SIGGRAPH, Addison-Wesley, 2001.
- 3) D.Bandyopadhyay, R.Raskar, H.Fuchs, "Dynamic Shader Lamps: Painting on Real Objects", The Second IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality(IEEE VR),pp.151-158,2006.
- 4) 久田 理, 山本 景子, 金谷 一朗, 佐藤 康介, "HYPERREAL 三次元形状デザイン支援システム (知的創造作業支援, <特集>インタラクションの理解とデザイン)", 情報処理学会論文誌, 48(12),pp.3873-3881,2007
- 5) H.Seetzen, W.Heidrich, W.Stuerzlinger, G.Ward, L.Whitehead, M.Trentacoste, A.Ghosh, A.Vorozcovs, "High Dynamic Range Display Systems", ACM Transactions on Graphics, Vol2, Issue3, pp.760-768,2004(Proc.SIGGRAPH 2004).
- 6) O.Bimber, D.Iwai, "Superimposing Dynamic Range", ACM Transactions on Graphics, vol.27, no.5, pp.150:1-150:8, 2008.
- 7) S.Rusinkiewicz, N.Levoy, "Efficient Variants of the ICP Algorithm ", Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, 2001.
- 8) 松下 賢治, 金子 豊久, "3次元物体表面テクスチャを得る効率的画像マッピング法", 電子情報通信学, 2001
- 9) 井口征士, 佐藤康祐: 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- 10) 長瀬 百代, 岩井 大輔, 佐藤 宏介, "複数台プロジェクタによる投影像のぼけ最小化と影除去", 情報処理学会 CVIM 研究会, 2009.
- 11) E.Reinhard, G.Ward, S.Pattanaik, P.Debevec: HIGH DYNAMIC RANGE IMAGING, Morgan Kaufmann Publishers, 2005.