

複合現実感技術における実シーン照明下の相互反射のCG再現

A CG Reproduction of Interreflection in Real Scene Illumination for Mixed Reality Technique

望月宏祐*

田中法博**

Kosuke MOCHIZUKI

Norihiro TANAKA

概要

本稿は実シーン照明下の物体に対して相互反射を含めコンピュータグラフィックスで高速なレンダリングかつ高精度に色再現する手法について述べる。これまでGPUを用いた一般的なリアルタイムレンダリング手法はZバッファ法と呼ばれる手法であり、レンダリングしているため色決めの計算が一回しか行われれないという問題があった。これは複数回の反射や透過の計算を精密にすることが困難であることを意味する。本稿では、そういった問題に対してマルチパスレンダリングと呼ばれる手法を用いて、仮想物体間の相互反射を実現する。ここでは、複合現実感技術に分光的な光反射モデルと分光的なImage Based Lighting (IBL)を導入して、周囲環境の照明光源の影響も含めて精密にレンダリングできる手法を提案する。この手法では、相互反射を分光的に計算するため多重反射が発生しても高い色再現精度で物体の色を再現することが期待できる。最後に本手法によってCG再現した物体の色再現精度を検証する。

キーワード: 複合現実感技術, 相互反射, 分光ベースレンダリング, マルチパスレンダリング, GPU

1.はじめに

近年、3DCG技術に基づいたデジタルアーカイブ研究が盛んになってきている。その中でも単に文化財を3DCG再現するのではなく、文化財と関係する実空間の実写映像と再現CGを合成する技術があればより自由度の高い美術品鑑賞が可能になる[1]。文化財の3DCG再現で問題となるのは、実シーン内に合成されるCGの色再現精度である。これまで我々はCG色再現性を向上させるため、分光ベースで構築した光反射モデルとImage Based Lighting (IBL)手法を導入する事で周囲環境の照明光源の影響も含めて精密にレンダリングできる手法を開発した[2]。

しかし、現実空間では物体を直接観測しているだけでなく、反射や透過といった間接的に対象を観測することが多くある。たとえば物体同士の写り込みやガラスや水などの透過などがある。一般にこういった問題には

視点から直接光線を発し、その経路を追跡するレイトレーシング法が有効である[3]。この方法では反射や透過が表現できるという利点があるが、交差判定処理に計算時間がかかることから文献[4]のような高速化のアルゴリズムが提案されてきた。しかし、レイトレーシング法では一般的なコンピュータ環境での高精細なCGの高速なレンダリングはいまだに難しい。

近年ではGraphics Processing Unit (GPU)というグラフィックス処理専用のハードウェアの高性能化が著しく、レイトレーシング法の高速化にも使われている。しかし、レイトレーシング法は、その処理手順がGPUの通常のグラフィックスパイプラインとは異なる処理をするため、GPUを汎用的に使用するGeneral Purpose Graphics Processing Unit (GPGPU)と呼ばれる方法を用いる必要がある。GPGPUでは光線追跡に関する計算をGPUが負担するので、計算精度を高めたまま処

理の高速化が図れるが、しかし、インタラクティブ性を考えた場合、一般的なGPUでは十分な速度を得ることが難しい。また、レイトレーシング法はオブジェクト数にも処理速度が依存するため、分光計算を含める場合や、ポリゴン数が多い形状を扱ったレンダリングの場合にはなお難しくなる[5]。

本論文ではこういった問題に対して、分光ベースのマルチパスレンダリングと呼ばれる手法を用いる。さらに複合現実感技術で合成するCGの仮想物体間の相互反射を実現する手法を提案し、レンダリング速度を高速化しつつも高精度な色再現精度を目指す。最後に本手法によってCG再現した物体の色再現精度を検証する。

2. 複合現実感技術に基づいたレンダリングシステムの構築

本章では本研究で構築するレンダリングシステムの概要について述べる。本稿では複合現実感技術として、ビデオカメラから取得した画像から位置情報を推定しCGを合成するCV技術に、独自の分光ベースの光反射モデルをGPU上に実装する。なお複合現実感を実装するためにNyARToolkitというAPIを用いている。NyARToolkitは位置決め用にマーカと呼ばれる80×80mmのIDを必要とする。そのため仮想物体を複数表示したい場合、それぞれのIDごとにモデルビュー行列が生成される。図1は複合現実感技術に独自のレンダリングシステムをGPUに実装したシステムのパイプラインを示したものである。

本研究では開発しているレンダリングシステムでは反射モデルをGPU上に実装する。このとき、レイトレーシング法では計算コストが膨大になる問題がある。一般にレイトレーシング法では視点からレイを照射するが、視線とオブジェクトとの交差判定処理はオブジェクトの数に依存するため複雑なシーンになれば計算コストが膨大になるという問題がある。また、複合現実感技術ではマーカごとにモデルビュー変換行列を作成するため、マーカどうしの座標関係の取得に更に時間をかけてしまうといった問題点もある。

3. マルチパスレンダリングによる仮想物体間の多重反射

本論文では、複合現実感技術の中で高速に仮想物体どうしの写り込みを再現する為に、マルチパスレンダリングによる疑似的な再現を行う[6]。図2はマルチパ

スレンダリングの概略図である。マルチパスレンダリングとは対象となる3DCGに対し複数のレンダリング処理を可能にする技術である。

本論文ではテクスチャメモリに直接レンダリング結果を描画するFrame Buffer Object(FBO)と呼ばれる手法を用いる。この方法の利点として、仮想物体間の位置や向きが決定すればテクスチャとしてキャプチャするだけで、各画素を操作するだけで写り込みを計算できることである。

しかしながら、分光ベースレンダリングに拡張する場合にはFBOのチャンネル数が足りないため、実際には分光分布の基底関数の重み係数をFBO上に記述するように拡張する。

4. カメラ系の外部パラメータの計算手法

仮想物体同士の位置関係を計算する必要がある。仮想物体間の位置関係はお互いの射影行列の外部パラメータとする。図3は複数のマーカが与えられた際に、マーカごとの外部パラメータの決定に関する概要を図で表したものである。

複合現実感技術ではマーカの傾きから回転ベクトルと位置情報を推定する。ここでは例として図3に示すマーカ1とマーカ2の2種類のIDを検出した場合、マーカ1を視点としてマーカ2を注視点とするための射影計算を説明する。マーカ1におけるオブジェクト座標系の頂点 P_1 と同じくマーカ2のオブジェクト座標系 P_2 をカメラ座標系 P'_1, P'_2 へ変換する式は次式の通りである。

$$\begin{aligned} P'_1 &= M_1 P_1 \\ P'_2 &= M_2 P_2 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで M_1 と M_2 は回転成分と並進成分を含む4×4の行列である。またカメラ座標系からオブジェクト座標系への変換は外部パラメータの逆行列により変換が可能となり、次式のように表現できる。

$$P_2 = M_2^{-1} P'_2 \quad (2)$$

ここで P'_1 と P'_2 は同じカメラ座標系の原点から構成される座標系であるため、次式にまとめることができる。

$$P_2 = M_2^{-1} M_1 P_1 \quad (3)$$

(3)式をモデルビュー行列として用い、また透視変換行列はOpenGLの機能を用いる。ここでは内部パラメータを独自に決定している。視野角を90度、アスペクト比をウィンドウの幅から高さを割った値を用い、Z軸方向の最小値と最大値はそれぞれ0.01と1000.0としている。

5. CG再現のためのレンダリングシステム

図4は本研究で提案しているシステムの概略図である。このシステムではマルチパスレンダリングを実装しており、2パスのレンダリングを行っている。各パスでは結果画像をGPU上で処理している。1パス目では、分光的に記述した全方位画像を3DCGにマッピングさせ、それをテクスチャとして取得する。そして2パス目では、同じく分光的に記述した拡散反射成分を3DCGにマッピングさせ、そしてテクスチャとして取得し、最終的に投影マッピングのためのテクスチャ画像として用意する。

6. 不均質誘電体を対象とした分光ベースの光反射モデル構築

本研究では、プラスチック等の不均質誘電体を対象としてCG再現する。不均質誘電体の光反射モデルとして、LambertモデルとTorrance-Sparrowモデル[7]をベースとして拡張したモデルを用いる。図5はこのモデルの幾何モデル図である。ここで \mathbf{V} は視線方向ベクトル、 \mathbf{N} は物体の法線ベクトル、 \mathbf{L} は照明方向ベクトルである。 \mathbf{N} と \mathbf{L} のなす角は θ_i 、 \mathbf{N} と \mathbf{V} のなす角は θ_r となる。このモデルは表面粗さを表現するため物体表面が微小面で構成されていると仮定している。この微小面の法線ベクトルは \mathbf{H} である。 \mathbf{L} と \mathbf{H} のなす角は θ_H であり、 \mathbf{N} と \mathbf{H} のなす角が ϕ である。視覚系に到達する色信号 $C(\lambda)$ は光の波長 λ の関数として次式で記述する。

$$C(\lambda) = \alpha \cos \theta_r S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{F(n, \theta_H) D(\mu, \phi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_r} E(\lambda) + \chi F(n, \theta_i) E(\lambda) \quad (4)$$

ここで右辺第1項は拡散反射であり、第2項と第3項は鏡面反射成分であるが、第2項は粗さを持つ表面の鏡面反射(gloss)となる。第3項は滑らかな鏡面(perfect mirror)を示している。 $S(\lambda)$ は物体表面の分光反射率であり、 $E(\lambda)$ は光源の分光分布である。 α, β, χ はそれぞれ各項の重み係数である。 F は Fresnel 関数である。屈折率は n で示す。 D は物体表面の滑らかさを表す微小面の分布関数でありガウス分布を仮定した。ここでは μ 値によって滑らかさが決まる。 G は幾何的減衰係数である。

シーン内の環境光源に (4) 式のモデルをそのまま適用した場合、環境光源の影響をすべて考慮すると計算量が増大する。そこでこれらの計算負荷を大幅に

減らすために放射照度マップと呼ばれる一種のルックアップテーブルを分光的に拡張した。図6図7は文献[1]の研究で用いた全方位分光画像と放射照度マップであり、本研究でもこれらの画像を用いる。これらの画像は光源の空間分布の座標は θ と ϕ を座標で示す。このときそれぞれのとりうる範囲は $0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq \phi \leq \pi$ である。このとき環境光源下で得られる色信号 $C(\lambda, \theta, \phi)$ は先ほど放射照度マップ I_d と鏡面反射モデル $I_{\text{gloss}}, I_{\text{mirror}}$ を用いて次式で示される。

$$C(\lambda, \theta, \phi) = \alpha I_d(\lambda, \theta, \phi) S(\lambda) + \left\{ \beta I_{\text{gloss}}(\lambda, \theta, \phi) + \chi I_{\text{mirror}}(\lambda, \theta, \phi) \right\} E(\lambda, \theta, \phi) \quad (5)$$

最終的に出力された色信号はデバイスに依存されない色空間へ変換する為に、CIE-XYZ色空間上へ変換し、そしてディスプレイ毎の特性に合わせて補正している[5]。

7. 相互反射を含んだレンダリング

本研究ではFBO画像を相互反射として利用する。ここで不均質誘電体の反射モデルでは、放射照度マップと鏡面反射モデルの2項で構成されているため、放射照度マップのみ3DCGに描写させFBO画像として取得した画像と鏡面反射モデルのみ適用したFBO画像の2種類が必要となる。そのため2回マルチパスを実行する。この処理から得られた画像を色信号に加算する。次式は相互反射を考慮した最終的な反射モデルを表している。

$$C(\lambda, \theta, \phi) = \alpha I_d(\lambda, \theta, \phi) S(\lambda) + \alpha T_d(\lambda, x, y) + \left\{ \beta I_{\text{gloss}}(\lambda, \theta, \phi) + \chi I_{\text{mirror}}(\lambda, \theta, \phi) \right\} E(\lambda, \theta, \phi) + \gamma T_s(\lambda, x, y) \quad (6)$$

ここで $\alpha T_d(\lambda, x, y)$ は拡散反射成分に関するFBO画像で画素値を表している。また $\gamma T_s(\lambda, x, y)$ も鏡面反射成分に関するFBO画像の画素値を表している。ここで x, y はFBO画像のXY座標で、オブジェクト座標系にモデルビュー行列と透視変換行列とを乗算した値である。

8. 実験

8.1 構築したシステムによる物体のCG再現

まず物体間の相互反射に関する実験を行う。仮想空間内に配置した物体間の相互反射の再現精度を

調べる。

図8は本研究で用いるCG再現の対象とする二つの物体を並べた様子である。これらの物体は直径75mmの球体であり、材質はプラスチック製である。仮想空間内でも仮想物体としての球が実空間と同様の大きさとなるように計算した。図9からこの物体同士を並べることで、物体間に相互反射が発生している様子がわかる。

次に、レンダリングシステムに用いたビデオカメラは解像度が320万画素のSony HVR-HD 1000Jを用いる。このカメラに映った位置決め用のマーカの場所にCG物体が合成される。再現したCGを表示するディスプレイはEIZO FlexScan S2031W-HBKZを用いる。

レンダリング用PCの環境としてはCPUがAMD Phenom(tm)IIX4 955 Processor 3.19 GHz, メモリは4GB, GPUはnVidia GeForce GTX 480である。球体のポリゴンは約2万ポリゴンである。分光計算に用いる分光反射率は物体表面を別途分光光度計で計測した値を用いる。光源は図6, 7で示した全方位分光画像と分光放射照度マップを用いる。また、システム起動時におけるビデオの解像度は720×480画素である。この条件で実シーン上における合成を行った。図9は、レンダリングシステムを起動した様子である。左下は再現対象の実物の球体であり、右下は位置決め用のマーカである。上はマーカを認識し、ディスプレイ上に再現した二つの球体である。このとき、本提案手法を用いたことで相互反射を分光的に計算しつつも、ほぼリアルタイムとも言えるレンダリング速度でCG再現できた。

8.2 色再現精度の検証

次に、実験対象の物体と再現したCGの色再現精度を検証するため、分光放射計を用いて実物体と再現CGそれぞれの物体色と相互反射が発生している部位を計測した。計測はトプコンテクノハウス SR-3A-L1を用いて行った。

まず物体色の計測結果について結果を述べる。図10は異なる二つの物体の実物とそれを再現したCGを示している。物体上の点は色再現精度を検証するために計測した部位を示している。図11はxy色度図上で示した物体色である。+マークは実物体、×マークはCG物体を示している。

次に相互反射が発生している個所の結果について述べる。図12は異なる二つの物体の実物とそれを再現したCGを示しており、点は計測部位である。図13は、xy色度図上で示した相互反射が発生している部位の色

である。+マークは実物体、×マークはCG物体を示している。これらの計測結果から、相互反射を含む部位については黄色に関して高い色再現精度を維持できることがわかった。しかし赤色については色差が大きかったことがわかった。

9. まとめ

本論文では複合現実感技術を用いて周囲環境の照明光源の影響や仮想物体間の相互反射も含めて精密にレンダリングできる手法を提案した。ここでは分光ベースの反射モデルを用いて物体の色や光沢を精密に3DCG化し、さらに仮想物体間の反射や透過はマルチパスレンダリングにより実現した。また複合現実感技術で用いられるマーカを用いて仮想物体間の位置や方向を決定する手法を提案した。本手法ではこの相互反射は分光的に計算されるため、多重反射が発生しても高い色再現精度で物体の色を再現した。また、今回の実験条件においてはインタラクティブ性を維持した3DCG再現が可能となった。しかしながら、今回は実験に使用した物体色である黄色と赤色のみの検証となったことから、他の色の再現や検証には至っていない。また、より精密に質感を再現するためには物体固有の光反射モデルのモデルパラメータを推定する必要がある[8,9]。今後、他の色の検証や物体固有のモデルパラメータを推定することで本手法の妥当性を明らかにする必要がある。

謝辞

本研究における実験では本学卒業生の宮下朋也氏に多大なる協力をいただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] 角田 哲也, 大石 岳史, 池内 克史: 影付け平面を用いた複合現実感における高速陰影表現手法, 映像メディア学会誌, Vol 62, No.5, 2008, pp788-795
- [2] 田中法博, 望月宏祐: RGBカメラによる全方位分光画像計測とIBLへの応用, 画像電子学会誌, Vol.42, No.4, 2013, pp. 466-476
- [3] Wallace, J. R., Cohen M. F., Greenberg, D. P.: A Two-Pass Solution to the Rendering Equation: A Synthesis of Ray Tracing and Radiosity Methods, Computer Graphics 21-

4, 1987, pp.311-320

[4] Hanan S: Implementing Ray Tracing with Octrees and Neighbor Finding, *Comput. & Graphics* Vol. 13, No. 4, 1989, pp. 445-460

[5] 望月宏祐,田中法博,戸谷重幸,森川英明,三浦幹彦:分光レイトレーシング法に基づいた相互反射の色再現手法,日本デザイン学会論文誌「デザイン学研究」,Vol.60, No.1, 2010, pp11-20

[6] R. Fernando et al., *GPU Gems: Programming Techniques, Tips and Tricks for Real-Time Graphics*, Addison-Wesley Professional, 2004.

[7] K. E. Torrance and E. M. Sparrow: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces,*J. of Optical Society of America A*, Vol.57, No.9, 1967, pp.1105-1114

[8] 田中法博,望月宏祐,禹在勇: 物体表面の反射特性と分光反射モデルに基づいたリアルタイムレンダリング手法, *日本感性工学会論文誌*, Vol.9, No.2, 2010, pp.311-322

[9] 田中法博,禹在勇,更科友啓,望月宏祐: 分光的な光反射計測に基づいた物体の表面反射特性推定, *日本感性工学会論文誌*, Vol. 8, No. 3, 2009, pp.943-950

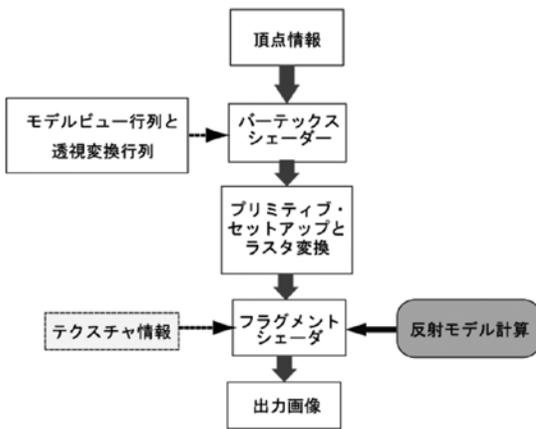


図1.GPUのグラフィックスパイプライン

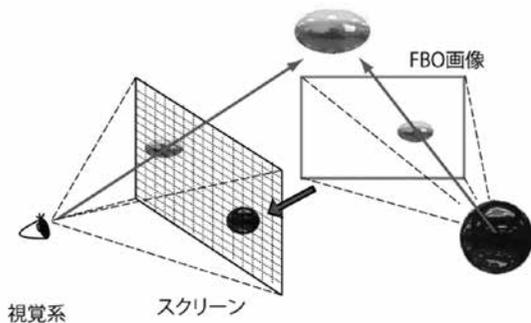


図2. マルチパスレンダリングにより実現した多重反射の概要図

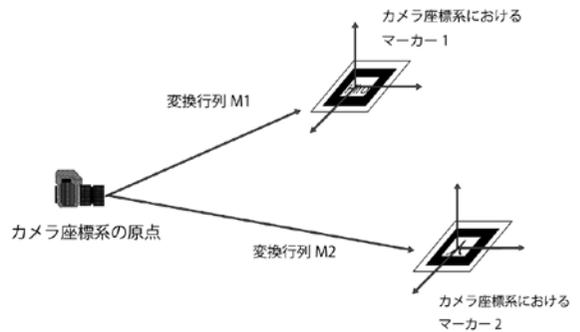


図3.多重マーカー間のモデルビュー行列の決定

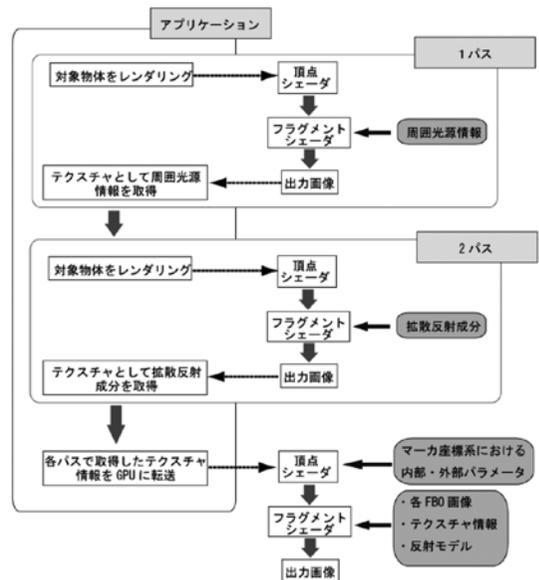


図4.本研究で提案するレンダリングシステム

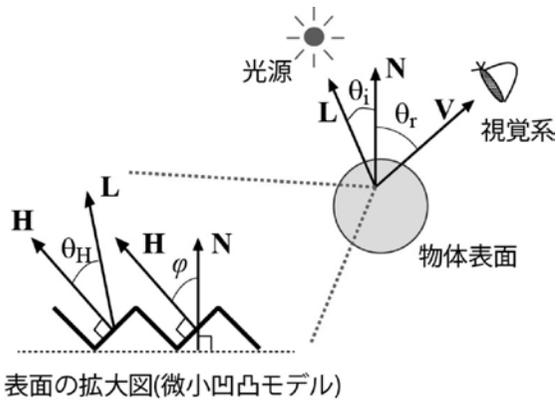


図5.光反射モデルの概略図

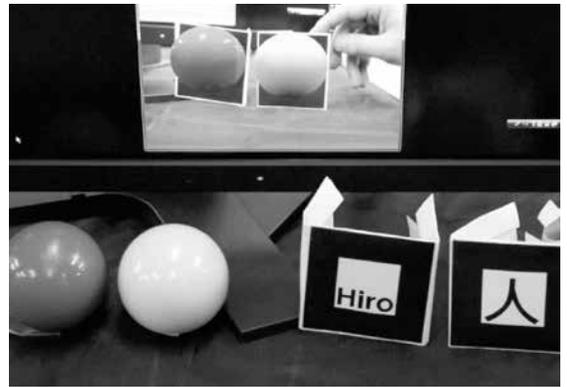


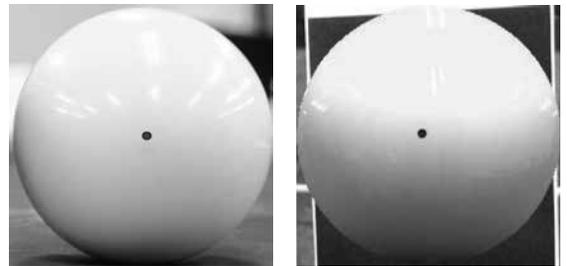
図9.再現対象物体の実物とディスプレイ上でCG再現している様子



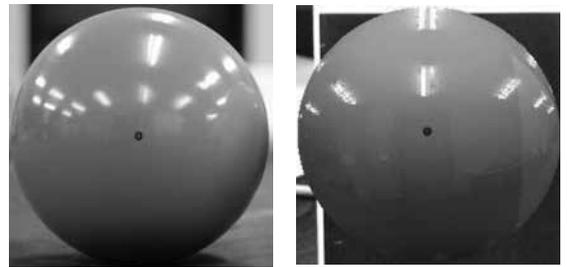
図6.CG再現に用いる全方位分光画像



図7.CG再現に用いる分光放射照度マップ画像



(a)黄色の球体(実物) (b)黄色の物体(再現CG)



(c)赤色の球体(実物) (d)赤色の物体(再現CG)

図10.対象物体と計測に用いた部位

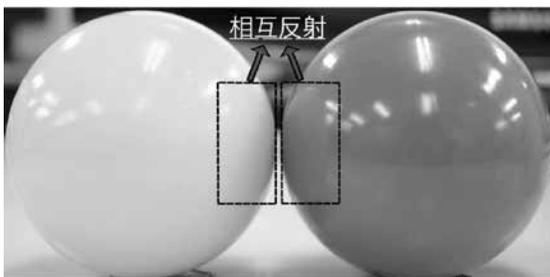


図8.実験対象の物体と相互反射を示す領域

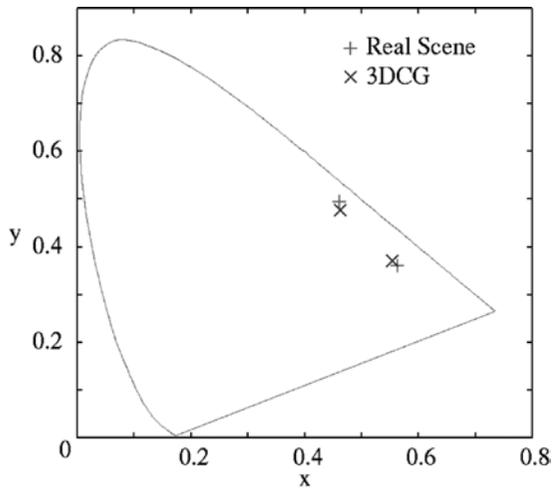


図11.対象物体の実物とCG再現した物体の計測結果

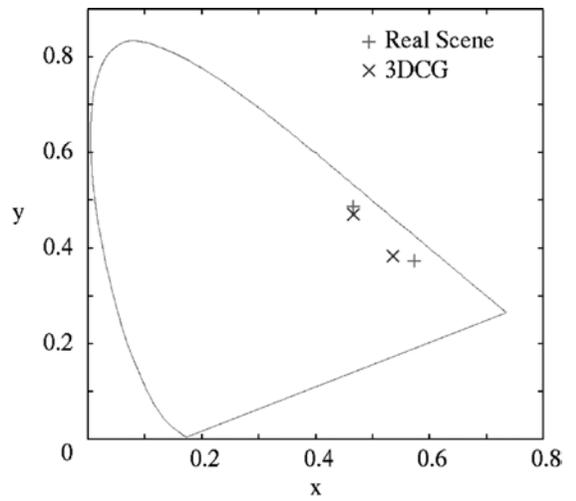
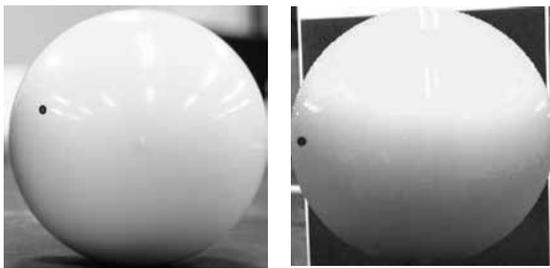
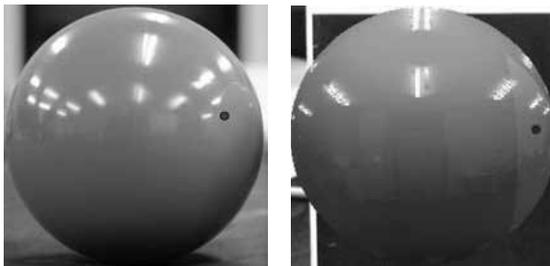


図13.対象物体の実物とCG再現した物体の計測結果



(a)黄色の物体(実物)

(b)黄色の物体(再現CG)



(c)赤色の物体(実物)

(d)赤色の物体(再現CG)

図12.対象物体と計測に用いた部位