

修士論文

コンピューテーショナルファブリケーションによる
半透明感制御手法

藤田 紘樹

2019 年 1 月 31 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

藤田 紘樹

審査委員：

向川 康博 教授	(主指導教員)
萩田 紀博 教授	(副指導教員)
船富 卓哉 准教授	(副指導教員)
久保 尋之 助教	(副指導教員)
田中 賢一郎 助教	(副指導教員)

コンピュータシヨナルファブリケーションによる 半透明感制御手法*

藤田 紘樹

内容梗概

デジタルファブリケーションとよばれるコンピュータ制御によるものづくりが近年盛んに行われるようになってきている。近年では3D プリンタを用いることで物体の形状を忠実に再現することが可能であるが、物体の質感を思い通りに制御することは現状難しい。そこで、本研究では目に見える質感のうち半透明感に着目し、デジタルファブリケーションにおいて半透明感を制御する手法を2つ提案する。1つ目はUV プリンタを用い、半透明材質とUV インク印刷層の組み合わせによって印刷材質の半透明感を制御する手法である。本手法では、印刷材質やインク1層ごとの反射率、透過率から全体の反射率を推定し、層の組み合わせによる半透明感制御を行う。2つ目はカラー3D プリンタを用い、事前に物体の反射率を変化させるテクスチャを計算し、モデルデータに適用し物体を印刷する手法である。本手法では、間接的に物体を照らす光について着目し、コンピュータグラフィックスのレンダリングに用いられる近似的手法をファブリケーションに導入することで半透明感の制御を行う。本稿で示す2手法はデジタルファブリケーションに質感を制御するための計算を加えている。これらの手法をコンピュータシヨナルファブリケーションと称する。

キーワード

デジタルファブリケーション, 半透明感, 2D/3D 印刷, 層構造, CG レンダリング

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文, 2019 年 1 月 31 日.

Controlling Translucency by Computational Fabrication*

Koki Fujita

Abstract

Nowadays, to make something using digital fabrication machines, for example, 3D printer, UV printer, laser cutter and more, is common for anyone. We can create any objects which have shapes we expected, using these machines, but can't create real appearance. I propose two methods of replicating translucency on digital fabrication. The first one I propose is to use layered structure of UV printing. I measure the reflectance and transmittance of the single translucent material and UV-ink layer, synthesize translucency using layered structure equation. The second one is to apply rendering techniques of Computer Graphics (CG) to output of color 3D printer. I investigate the relationship between shading and translucency, add shading color to the object using ambient occlusion, which is the technique of CG rendering. These methods combine the calculation of controlling translucency with digital fabrication. In this thesis, I propose these methods as "computational fabrication".

Keywords:

Digital Fabrication, Translucency, Two-Dimensional/Three-Dimensional Printing, Layered Structure, CG Rendering

*Master's Thesis, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, January 31, 2019.

目 次

1. はじめに	1
2. 本研究における質感およびファブリケーション	3
2.1 視覚的質感と半透明感	3
2.2 ファブリケーション	4
3. 関連研究	7
3.1 コンピュータグラフィックスにおける質感表現	7
3.2 ファブリケーションにおける質感制御	7
3.3 本研究の位置づけ	8
4. 層構造を用いた半透明感制御手法	10
4.1 本手法の背景	10
4.2 MTF を用いた半透明感の定義	10
4.3 層構造による半透明感制御手法	12
4.4 手法の検証実験	13
4.5 印刷結果および考察	19
5. テクスチャの情報付加による半透明感制御手法	21
5.1 本手法の背景	21
5.2 3D 印刷における出力物体の質感	21
5.3 テクスチャ変化による半透明感制御手法	22
5.4 手法の検証実験	23
5.5 印刷結果および考察	27
6. おわりに	31
謝辞	33
参考文献	34

図 目 次

1	カラー 3D 印刷の制作例 (寿司) [2]	2
2	本稿で取り扱う質感	3
3	材質によって異なる応答を示す PSF	4
4	左:カラー 3D プリンタ [3], 右:UV プリンタ [1]	5
5	PSF と MTF の関係	11
6	半透明材質の反射 MTF 計測結果	11
7	UV インク 1 層の反射 MTF 計測結果	14
8	UV インク 1 層の透過 MTF 計測結果	14
9	半透明材質と UV インク 1 層の組み合わせによる合成結果	16
10	サーモン, 牛肉, キウイを対象とした反射 MTF 再現の比較	18
11	ロウソクを対象とし, サーモンの半透明感を再現した印刷結果	19
12	Ambient Occlusion の模式図	23
13	元の dragon, テクスチャなし (不透明)	24
14	半透明感を付加した dragon	24
15	AO による色を付加した dragon	25
16	半透明感と AO による色を付加した dragon	25
17	元の dragon(図 13) と図 16 の差	26
18	bunny の印刷結果, 室内光源下	27
19	bunny の印刷結果, 暗室単一光源下	28
20	dragon の印刷結果, 室内光源下	28
21	dragon の印刷結果, 暗室単一光源下	29

表 目 次

1	半透明材質と UV インク 1 層の組み合わせの合成 MTF と印刷物の 計測 MTF を比較した RMSE.	16
2	カラー 3D 印刷時の設定パラメタ	27
3	主観評価結果	29

1. はじめに

ファブリケーションとは芸術や工芸品の制作，工業製品の製造など，ものづくりを指す単語である．そのうち，3D プリンタや UV プリンタ，レーザーカッターなどのデジタル工作機械をコンピュータで制御して行うものづくりをデジタルファブリケーションと呼ぶ．デジタルファブリケーションは，コンピュータ上で作成した 3DCG などのデジタルデータを機器に入力とし，アクリルや金属，木材などさまざまな材質の物体から所望の形に作り上げることができるという利点がある．近年では，共用施設などでデジタル工作機械が広く普及し始めており，個人レベルでのものづくりが簡単にできるようになっている．

デジタルファブリケーションにおいて所望の見た目を得るためには，物体の形状と質感を思い通りに再現する必要がある．質感を再現したい例として，医療分野での義手・義足や質感を考慮した試作品の製作などが挙げられる．義手・義足は使用者の肌に合った質感を，試作品は高速に完成品に近い質感を再現することが求められている．デジタルファブリケーションで高速かつ常に思い通りの質感の物体を出力することができるようになれば，社会的に有意義であると考えられる．そこでデジタルファブリケーションにおいて質感を制御する手法について着想した．

本研究では，デジタルファブリケーション機器のうち，社会に広く普及している点，および汎用性が高いという観点から 3D プリンタと UV プリンタに着目した．現在用いられている 3D プリンタの多くは物体の形状を正確に印刷することが可能であるのに対して，透き通った感じ (半透明感) やつやのある感じ (光沢感) といった物体が持つ質感を思い通りに出力することは難しい (図 1)．そのため，出力した物体はそのまま製品とすることはできず，印刷した物体に対して後から研磨や色付け，仕上げを人の手で行う場合が多い．そこで，3D プリンタの出力によって形状だけでなく質感も思い通りに制作できるようになれば，人の手による質感付与を必要としなくなり，所望の質感を常に得ることができると考えられる．



図 1 カラー 3D 印刷の制作例 (寿司) [2]

質感を再現・制御するという観点では、コンピュータグラフィックス (CG) の分野において現実世界での見え方に近い描画を実現する研究がこれまで数多く取り組まれてきた。現実世界では、光は物体間で反射，散乱，屈折といった現象を起こしており，これら複数の光学現象が組み合わさって見え方を決定している。そこで，CG では複雑な光の挙動を幾何学的な数式でモデル化し，半透明度合いや金属の光沢などの質感を表現することが行われてきた。多数の研究とコンピュータなどの技術発展により，質感再現のクオリティは飛躍的に向上した。ここから，CG の質感表現手法をデジタルファブリケーションに適用することを着想した。

本研究では，ファブリケーションを現実世界におけるコンピュータグラフィックスと解釈し，デジタルファブリケーションにおける質感制御について取り組んだ。ここでは，目で見てわかる質感のうち物体が透けて見える感じ，すなわち半透明感に着目した。半透明感是非金属材料の物体の大多数が持つ質感であり，リアルな表現のためには半透明感の再現が重要であるといえるためである。本稿では，デジタルファブリケーションに質感を制御するための計算を加えている。これをコンピュテーショナルファブリケーションと呼称する。

本論文の構成を述べる。2 章では本稿で取り扱う質感およびファブリケーションについて詳しく述べ，3 章では CG およびファブリケーションにおける質感表現・制御の関連研究を示す。4 章および 5 章では半透明感制御の 2 手法をそれぞれ説明する。6 章では本稿を総括する。

2. 本研究における質感およびファブリケーション

本章では、本研究で対象とする質感および取り扱うファブリケーションについて総合的に述べる。

2.1 視覚的質感と半透明感

質感とは、人間の五感によって知覚される物体の性質であり、その認知である。ここで質感という単語が指す内容は非常に多岐にわたっている。例として、物体が湿っている感じ・乾いている感じや物体表面がざらざらしている・つるつるしている感じ、また新鮮な感じ・古びた感じといったものが挙げられる。これらの質感は人間の目で感知する視覚的質感と肌で触れることで感知する触覚的質感に大別される [18]。

本研究では、質感のうち視覚的質感に着目している (図 2)。なぜなら、視覚的質感の多くは光の反射，屈折，透過などの物理現象によってもたらされるものであり，コンピュータグラフィックスの取り扱うことができる範疇にあるためである。

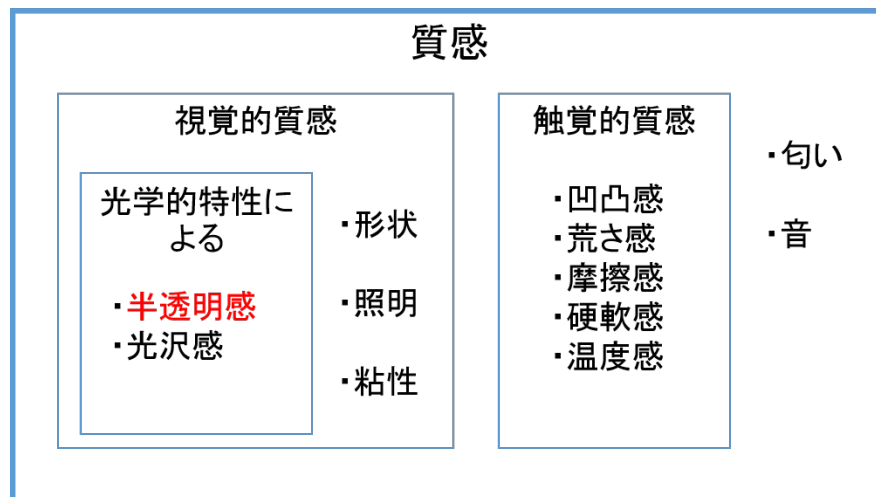


図 2 本稿で取り扱う質感

次に本研究で制御を行う半透明感について述べる。ロウソクや人の肌などの物体は光を当てると透き通って見える。この透き通った感じを半透明感と呼ぶ。現

実世界に存在する非金属物体の大半は半透明であるため、半透明感の再現は物体のリアリティ向上に大きく貢献すると考えられる。

半透明物体では、光が入射されるとその入射位置から物体内部で光が散乱し、異なる位置から光が出射される。この現象を表面下散乱と呼ぶ。材質が不透明に近ければ光は入射位置からあまり広がらず、透明に近ければ光が入射位置から大きく広がる。半透明感を光学系で計測する際には、入射した光線が物体でどの程度広がるかを半透明感の指標とする。半透明物体にレーザー光を入射すると、入射した点を中心としてある広がりを持った明るさが観測される(図3)。これを横軸に位置、縦軸に強度を取る関数で表したものが点像分布関数 (PSF : Point Spread Function) である。PSF の広がりが大きければより透明に近く、広がりが小さければ不透明に近いといえる。PSF は入射光に対する材質の応答であり、物体の材質や形状に依存する関数。本稿では形状の依存性を考慮しないものとする。図3左のように入射した光が同心円状に広がる散乱を等方的であると呼び、図3右のように光線の入射した方向に指向性を持って広がる散乱を異方的であるという。

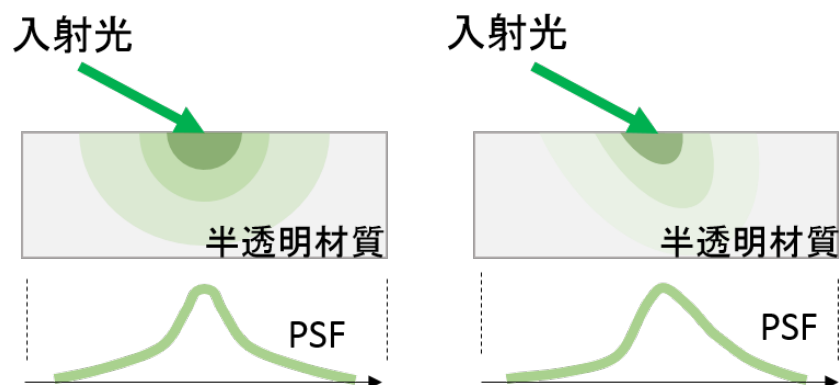


図3 材質によって異なる応答を示すPSF

2.2 ファブリケーション

1章で述べた通り、ファブリケーションの原義は芸術や工芸品の制作、工業製品の製造を指す単語であり、手作業で行う工作や工具を使ったものなどを広く含む。そのうち、コンピュータで印刷、切削などの制御計算を行い、デジタル工作

機械に入力して動かすことで行うものづくりをデジタルファブリケーションと呼ぶ。デジタルファブリケーションに用いられる工作機械として、3D プリンタ、UV プリンタ、レーザーカッター、CNC ルータなどが挙げられる。近年では特許の保護期限切れや機器の品質向上から共用施設などで安価に導入できるようになり、個人でも気軽に利用可能となってきた。

また、コンピュータ上で作成されたデジタルデータと、ファブリケーション機器で使用する材料やテクスチャの関係を知る研究はコンピューテーショナルファブリケーションと呼称されている。コンピューテーショナルファブリケーションの語は、Wang ら [16] の物体の浮かび方を最適化する研究や、Birsak ら [5] の弦によるアーティスティックな画像を自動計算する研究にて用いられている。

次に、本研究で使ったファブリケーション機器である 3D プリンタおよび UV プリンタについて詳しく述べる。



図 4 左:カラー 3D プリンタ [3], 右:UV プリンタ [1]

3D プリンタは、セラミックや金属、石膏の粉末、また PLA や ABS といったプラスチックなどを素材とし、3D に成形することで三次元物体を印刷する機器である。成形方法は数種類あり、いずれも特許の期限切れなどより低価格化と技術発展が進んだことから、用途に応じて印刷方式と素材を選択し印刷することが可能となってきた。3D プリンタを用いる利点として、モデルデータが作成できれば従来は組み立てが必要だったものや複雑で作ることが難しいものが制作可能である点が挙げられる。

UV プリンタは、紫外 (UV : Ultraviolet) 光を照射することによって硬化するインクを用いる印刷機器である。商業用としては金属やプラスチック等を対象とするパッケージ印刷に多く使われている。UV プリンタは2D のインクジェット印刷であるが、数 mm 程度の凹凸がある物体に対しても印刷可能である。加えて、金属表面やプラスチック、皮革、木材、布などさまざまな材質に印刷可能という特徴を持つ。また、クリアインクを使用することもでき、インクを塗り重ねることで物体表面に光沢感を付加することも可能である。

3. 関連研究

コンピュータグラフィックス分野での質感表現はこれまでに多く取り組まれており、ファブリケーションにおいても質感制御の研究は数多く行われている。以下に関連研究を示し、本研究の位置づけを述べる。

3.1 コンピュータグラフィックスにおける質感表現

コンピュータグラフィックス (CG) において、物体を正確にレンダリングする方法は主に光線を逐一追跡するというを行っている。よって計算負荷が高くなりレンダリングに時間がかかるという問題が生じる。そのため半透明物体のより実用的なレンダリング手法について研究が進められている。半透明感を与える表面下散乱現象のモデル化として、久保ら [11][12] はフォトン追跡法を用いて物体の曲率と透過度合いを取得し、曲率に依存する反射関数 (CDRF) を提案した。CDRF を用いることで半透明材質をリアルタイムにレンダリングすることが可能となり、実際にゲームなどで実用化されている。

他に、本吉ら [14][15] は物体の透明度の見え方の変化は非鏡面反射成分 (シェーディング) によるものであり、鏡面反射成分 (ハイライト) には依存しないことを示し、非鏡面反射成分のコントラストやぼけ具合を操作することで半透明感を変化させることができると示した。

3.2 ファブリケーションにおける質感制御

次に、ファブリケーションによる質感制御の関連研究を述べる。Weyrich ら [17] は CNC (Computerized Numerical Control) フライス盤と呼ばれる機器を用い、物体の表面を削ることで光沢感を制御する手法を提案した。Matusik ら [13] は所望の反射特性を持つ画像を物体に印刷することによって光沢感を制御する手法を提案した。Hašan ら [9] は物体の散乱特性を計測し、3D プリンタを用いて半透明感制御を行った。Dong ら [8] は複数のマテリアルを使用できる 3D プリンタを用い、マテリアルを層状に印刷して BSSRDF (Bidirectional Scattering Surface Reflectance

Distribution Function, 双方向散乱面反射率分布関数) と呼ばれる, 半透明物体での反射を示す関数を再現する手法を示した. 3D 印刷であるため空間的に変化する BSSRDF を表現することが可能であるが, 表面下散乱現象のうち多重散乱に着目しており表現可能な範囲は限られる. Brunton ら [6] はカラー 3D プリンタの色のにじみを利用し, 再現可能なカラーバリエーションを増やす手法を提案した. 浅田ら [21] は和紙に墨で描かれた書画の筆使いや墨のにじみに着目し, 反射特性と散乱特性を再現するために印刷した複数の紙を組み合わせることで光学特性を計測し, 反射率および透過率を同時に再現する手法を提案した.

また, 固体に限らない質感制御のアプローチとしては, 伏下ら [19] は散乱特性が異なる液体を計測し, その混合によって半透明感を制御する手法を示した. この手法は, 液体の混合比率と散乱特性の関係を計測に基づいた定量化によって取得しモデル化を行っている.

他に, 医療分野でも 3D プリンタを活用した研究があり, 杉本 [20] は 3D プリンタを用いて生体の質感を可視化・可触化する立体造形手法を報告した. 臓器の質感を再現するために水分を含む素材を混合し, 実際の手術で行う縫合や剥離を体験可能とした.

3.3 本研究の位置づけ

以上に述べた関連研究と比較して, 本研究の位置づけを述べる. 本研究では, デジタルファブリケーションにおいて半透明感を制御することを目的としている. 本稿で述べる 2 手法はともに物体の形状に変化を及ぼさない点が特徴である.

2 手法のうち, 1 つ目は半透明材質と UV インクの印刷層の組み合わせによって半透明感を制御する手法である. 既存手法 [17] では対象物体に対して物理的に加工を行うため, 物体の形状に影響がある. 対して本手法は半透明材質の物体表面に印刷を行うため, 物体の形状に影響を及ぼさない. 加えて, 物体内部に加工を行わないことから, 既存の質感制御手法と組み合わせることも可能であると考えられる.

2 つ目は半透明感と影の関係に着目し, あらかじめ形状による影に近いテクスチャを計算しておき半透明感を変化させる手法である. 既存手法では [14][15] に

近いものが示されているが、これはCGのレンダリング上での結果を示しており、ファブリケーションへの適用は行っていない。また、3D印刷において質感を表現する方法として、プラスチックのフィラメントに分子や素材を配合させフィラメント自体の質感を変化させたものが販売されているが、本手法では一般的なPLAフィラメントを用いており、素材に依存しないという点で汎用性が高い手法であると考えられる。

4. 層構造を用いた半透明感制御手法

本章では，UV プリントを用いる半透明感制御手法について述べる．本手法では，UV プリントによる印刷層の組み合わせによって印刷材質の半透明感を不透明方向に制御する．

4.1 本手法の背景

本研究では，ある半透明材質の物体に対して形状を変えずに半透明感を制御することを目的とする．ここでさまざまな材質の表面に印刷可能な UV プリントを用いこれを実現する．

2.2 節の通り，UV プリントは，紫外 (UV : Ultraviolet) 光を照射することによって硬化するインクを用いる印刷機器である．UV プリントは 2D のインクジェット印刷となるが，数 mm 程度の凹凸がある物体に対しても印刷可能である．また，本手法で用いる Roland 社の VersaUV LEF-300 はシアン，マゼンタ，イエロー，ブラックの 4 色に加え，ホワイトとクリアインクを使用できる．ホワイトは一般的に物体に印刷する際に下地として印刷するが，これを行わず下層の質感を消さずに印刷することも可能である．以上から，物体の形状に変化を加えず，物体表面に UV 印刷することで質感を制御するという着想を得た．

4.2 MTF を用いた半透明感の定義

半透明感は点像分布関数 (PSF : Point Spread Function) を用いて表すことができる (2.1 節)．PSF は横軸に位置，縦軸に強度を取る関数である．これに対して PSF を周波数領域で表現したものの絶対値を変調伝達関数 (MTF : Modulation Transfer Function) と呼ぶ．光線を入射する物体が等方的に散乱を起こす媒体である場合，PSF と MTF はフーリエ変換を用いて互いに変換することができる (図 5)．本手法では，印刷する半透明物体が等方的に散乱を起こすものと仮定し，物体の半透明感を MTF で表すこととする．MTF は既存の手法で計測可能であり，また MTF を用いることで 4.3 節に示す定式化が簡易となる利点がある．

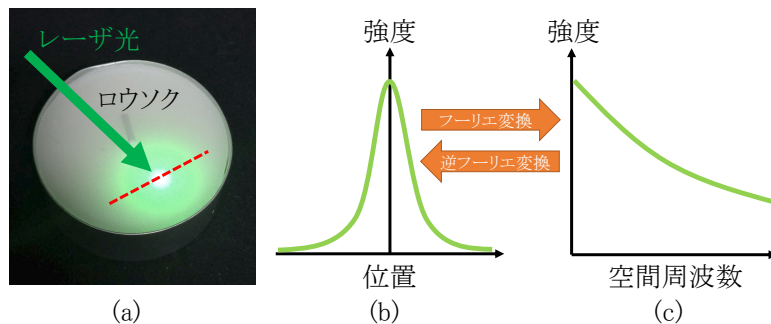


図 5 PSF と MTF の関係

一般的に MTF は空間周波数が高くなると強度が低下するが、その減衰度合いは材質によって異なる。より透明に近い材質は高周波領域で減衰が大きく、より不透明に近い材質は減衰が小さい。図 6 に本稿で対象とする消しゴム、ろうソク、アクリル板の 3 種類の半透明材質の反射 MTF を示す。これより、材質によって反射 MTF、つまり半透明度合いが異なり、アクリル板はより透明に近く、消しゴムはより不透明に近いと言える。

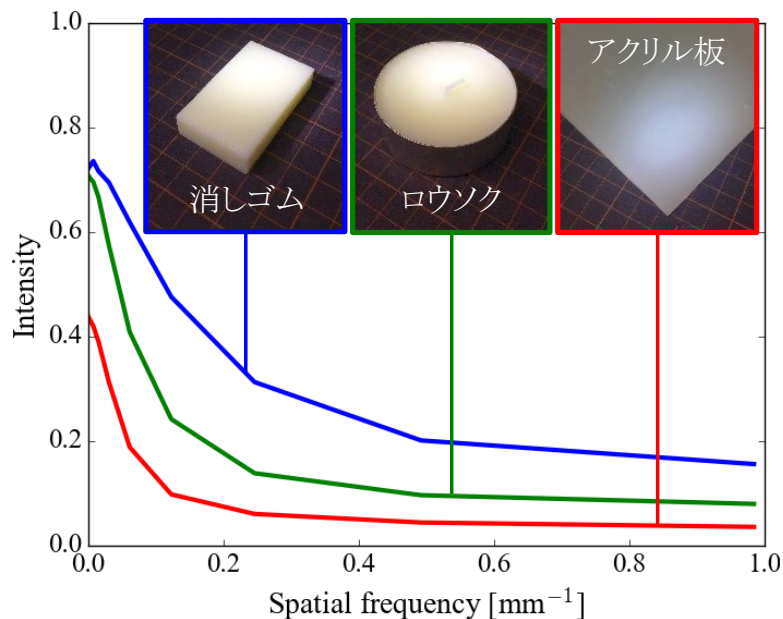


図 6 半透明材質の反射 MTF 計測結果

4.3 層構造による半透明感制御手法

光学計測によって印刷対象となる半透明材質と印刷層のそれぞれの MTF が得られるものとする．印刷対象の材質と印刷層のあらゆる組み合わせを実際に作製し，光学計測を行って得た MTF をルックアップテーブルに格納すれば，逆引きによって所望の半透明感を得ることが可能となる．しかし，半透明材質の種類や印刷層の色・層数など複数のパラメタから全ての組み合わせを実際に作製することは難しい．そこでクベルカの層理論 [10] を応用し，パラメタの組み合わせによって得られる半透明感を計算によって求め，ルックアップテーブルに格納する．

クベルカの層理論 [10] は 2 層物体における反射率および透過率と，それぞれの 1 層の反射率，透過率との関係を表す．2 層物体において 1 層目の反射率，透過率をそれぞれ r_1, t_1 ，2 層目の反射率，透過率をそれぞれ r_2, t_2 とすると，2 層物体全体の反射率および透過率 r, t は次の式で表現できる．

$$r = r_1 + t_1^2 r_2 (1 + r_1 r_2 + r_1^2 r_2^2 + \cdots) = r_1 + \frac{t_1^2 r_2}{1 - r_1 r_2} \quad (1)$$

$$t = t_1 t_2 (1 + r_1 r_2 + r_1^2 r_2^2 + \cdots) = \frac{t_1 t_2}{1 - r_1 r_2} \quad (2)$$

ただし，各層においてそれぞれの方向への反射率，透過率は同じであると仮定した．この理論を基に，表面下散乱を PSF として表した場合の定式化を行う．2 層物体の 1 層目の反射・透過 PSF をそれぞれ $R_1(x), T_1(x)$ ，2 層目の反射・透過 PSF をそれぞれ $R_2(x), T_2(x)$ とすると，2 層物体全体の反射 PSF は次の式で表される．

$$\begin{aligned} R(x) = & R_1(x) + ((T_1 * R_2) * T_1)(x) \\ & + (((T_1 * R_2) * R_1) * R_2) * T_1(x) + \cdots \end{aligned} \quad (3)$$

ここで， $*$ は畳み込み積分を意味する演算子である．反射 PSF が等方的であると仮定したとき，式 (3) をフーリエ変換することによって反射 MTF を算出でき，次の式で表される．

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}[R](f_x) &= \mathcal{F}[R_1](f_x) + \mathcal{F}[T_1](f_x)\mathcal{F}[R_2](f_x)\mathcal{F}[T_1](f_x) + \dots \\
&= \mathcal{F}[R_1](f_x) + \frac{\mathcal{F}[T_1](f_x)^2\mathcal{F}[R_2](f_x)}{1 - \mathcal{F}[R_1](f_x)\mathcal{F}[R_2](f_x)}
\end{aligned} \tag{4}$$

ここで、 f_x は空間周波数であり、 $\mathcal{F}[\cdot]$ はフーリエ変換を意味する演算子である。PSF を用いて空間領域で考えた場合には畳み込み積分が必要であるのに対して、MTF を用いて周波数領域で考えた場合には畳み込み定理によって、式 (1) に示す一般的なクベルカの層理論と同じ形の式を得ることができる。

同様に、2 層物体全体の透過 MTF は次の式で表され、式 (2) と同じ形の式となる。

$$\mathcal{F}[T](f_x) = \frac{\mathcal{F}[T_1]\mathcal{F}[T_2]}{1 - \mathcal{F}[R_1]\mathcal{F}[R_2]} \tag{5}$$

以上の式を用いて、半透明材質の反射 MTF および UV インクの 1 層の反射・透過 MTF から印刷の組み合わせによって作成される多層での反射 MTF を合成し、ルックアップテーブル (LUT) に格納する。

実際に印刷を行うには、印刷したい物体の反射 MTF と最も近い MTF を持つ組み合わせを LUT から逆引きして決定する。本稿では逆引きに平方平均二乗誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) E_{AB} を用いる。 E_{AB} は次の式で表される。

$$E_{AB} = \sqrt{\frac{1}{|\mathbb{F}|} \sum_{f_x \in \mathbb{F}} \{(M_f^A(f_x) - M_f^B(f_x))\}^2} \tag{6}$$

ここで、 $\mathbb{F}$ は距離計算に用いる離散的な空間周波数の集合である。比較した 2 つの MTF 間における RMSE の値が小さければ類似度が高い、つまり半透明感が近いといえる。

4.4 手法の検証実験

まず、本手法を適用するにあたって半透明材質の反射 MTF および UV インク 1 層の反射・透過 MTF が必要となるため、光学計測によってそれぞれを取得した。MTF の計測手法は変調イメージング法 [7] を用いる。

UV インク 1 層の反射・透過 MTF を計測するには何らかの物体に印刷する必要がある．そこで先に計測で反射 MTF が得られた消しゴムに対して，UV インク 1 層を印刷したものと同色を 2 層印刷したものを用意し，反射・透過 MTF を得ることとした．

反射 MTF が既知の消しゴムに UV インク 1 層を印刷したものを計測すると式 (4) より，1 層目にあたる UV インク 1 層の反射・透過 MTF を未知数とする計測結果が得られる．次に，反射 MTF が既知の消しゴムに同色の UV インク 2 層を印刷したものを計測する．ここでは 1 層目が UV インク 1 層，2 層目が消しゴム+UV インク 1 層に相当する．よって先の計測と組み合わせて UV インク 1 層の反射・透過 MTF が算出される．この方法で計測された UV インク 1 層の反射・透過 MTF の計測結果を図 7 と図 8 に示す．

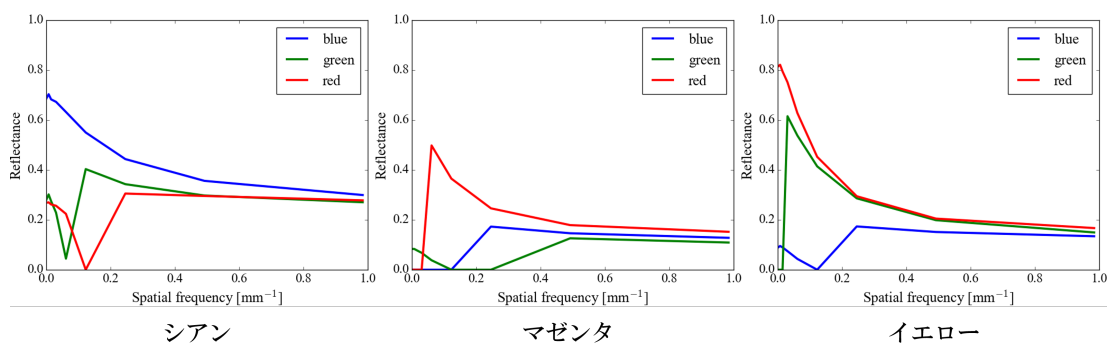


図 7 UV インク 1 層の反射 MTF 計測結果

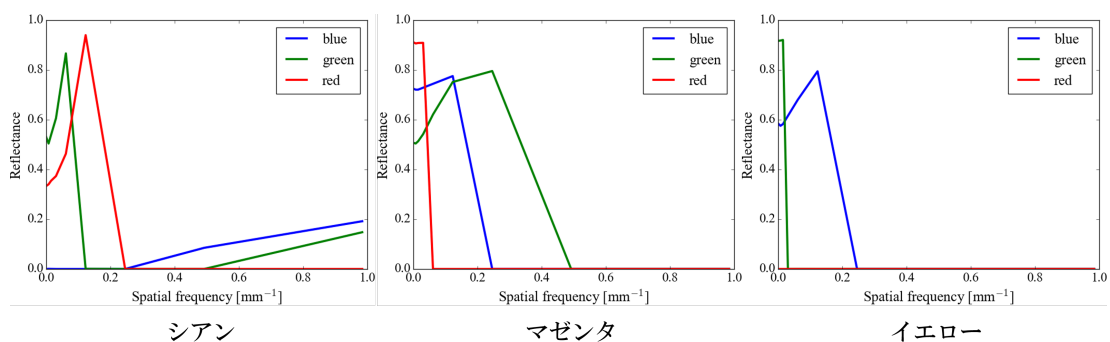


図 8 UV インク 1 層の透過 MTF 計測結果

図 6 より，半透明材質の種類によって反射 MTF が異なることが，図 7 および図 8 より，UV インクのシアン・マゼンタ・イエローの各色について反射・透過 MTF が異なることが示された．4.3 節の手法を用いて半透明感を合成する際に，以上の計測結果を用いるものとする．

次に，本手法の有用性を検証するために層構造によって合成した反射 MTF と実際に半透明材質に印刷した物体の反射 MTF の比較を行った．図 9 は半透明材質に UV インク 1 層を印刷したものと合成による反射 MTF を比較した結果である．実線は層構造を用いて合成した MTF を，点線は実際に印刷した物体を作成し計測した真値の MTF を示す．

本手法の評価として，印刷した真の MTF と合成によって計算された MTF を RMSE を用いて比較した結果を表 1 に示す．この結果より，消しゴム，ろうソク，アクリル板の順に RMSE が大きくなり，半透明感再現が難しくなると考えられる．図 6 と比較して，半透明材質の中でより透明に近いと考えられる物体で RMSE が大きくなっている．また UV インクの色によっても誤差の違いが見られ，シアンは誤差が小さくマゼンタ，イエローの順に誤差が大きくなるという結果を得た．

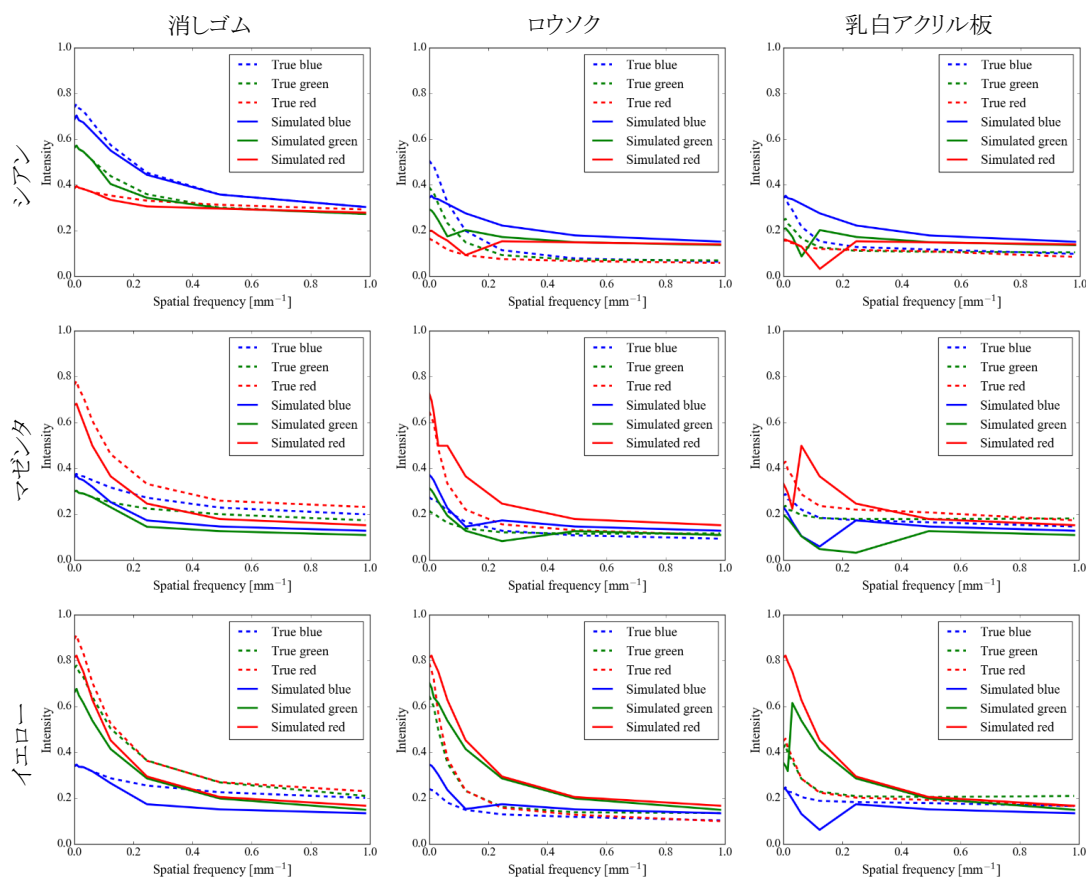


図 9 半透明材質と UV インク 1 層の組み合わせによる合成結果

UV インク	半透明材質			平均
	消しゴム	ロウソク	乳白アクリル板	
シアン	0.0242	0.0838	0.0548	0.0543
マゼンタ	0.0676	0.0726	0.0918	0.0773
イエロー	0.0741	0.1127	0.1861	0.1243
平均	0.0553	0.0897	0.1109	0.0853

表 1 半透明材質と UV インク 1 層の組み合わせの合成 MTF と印刷物の計測 MTF を比較した RMSE.

続いて、サーモン、牛肉、キウイを対象として計測と合成を行って反射 MTF

の再現を行い比較した。物体表面の光沢感などの影響が少ないと考えられる部分を選択し、再現する反射 MTF とした。半透明材質として消しゴム、ロウソク、アクリル板の 3 種類を、UV インクとしてシアン、マゼンタ、イエローの 3 種類を使用するものとし、最大 5 層まで重ねる組み合わせ 1089 通りを LUT として構築した。図 10 はそれぞれの計測による反射 MTF と合成による反射 MTF の比較結果である。実線は合成によって得られた最も近い反射 MTF を、点線は計測による反射 MTF である。

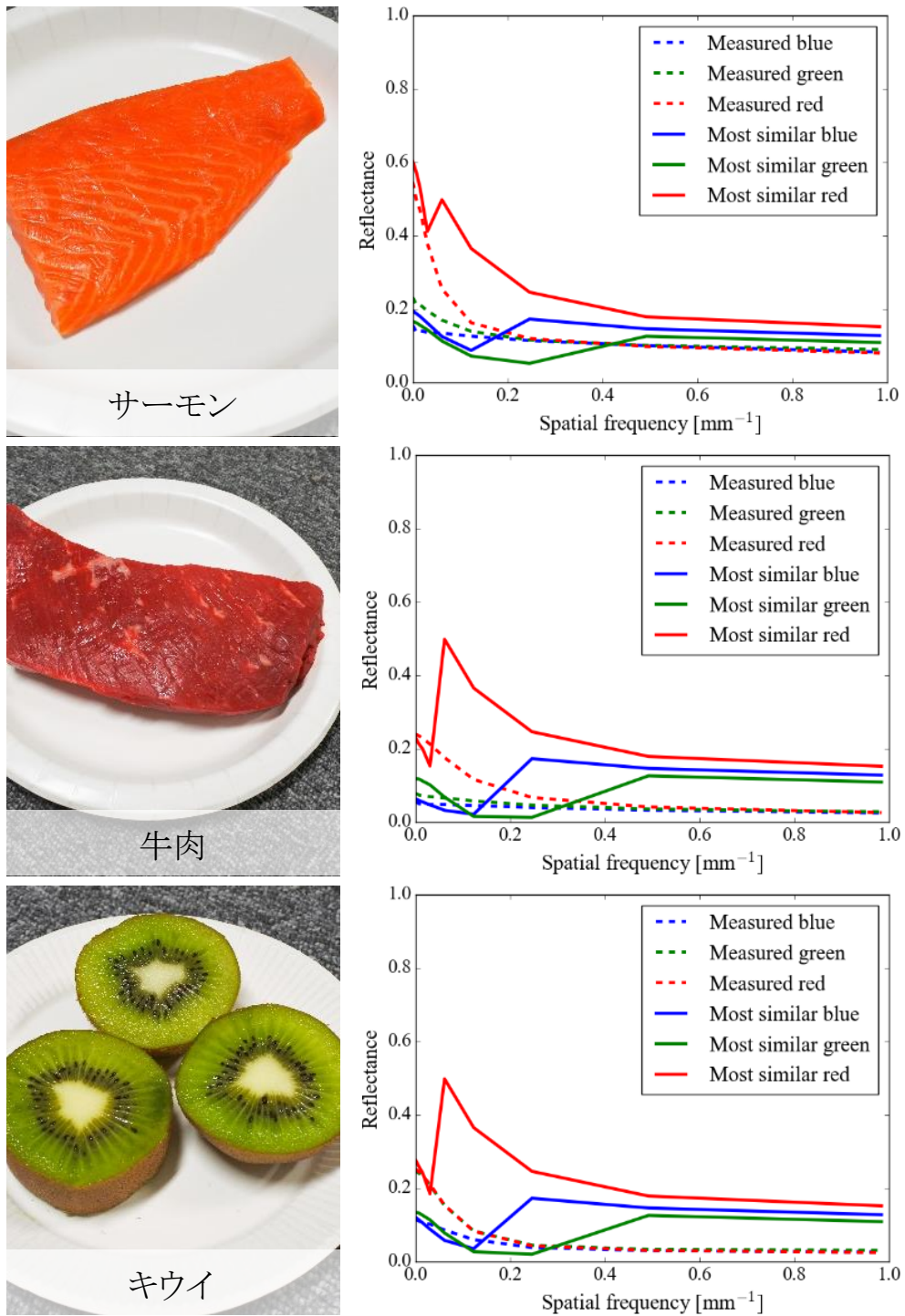


図 10 サーモン，牛肉，キウイを対象とした反射 MTF 再現の比較

この結果より，3種類の対象物体のうちサーモンは誤差が小さく，牛肉，キウイの順に誤差が大きくなることがわかる．この誤差はUVインク1層のMTFの誤差が印刷層を重ねることで伝搬し，全体としての誤差が大きくなるため，またLUTが小さく，良い組み合わせを見つけられなかったためであると考えられる．

4.5 印刷結果および考察

4.4節までを踏まえて，実際に反射MTFを計測し組み合わせ探索を行い印刷によって再現を行った．ここでは生のサーモン切り身を再現する物体とし，作成したLUTから印刷層の組み合わせを探索し，実際に印刷を行った結果を示す．

まず，計測したサーモンの画像からピクセルごとに半透明感の組み合わせ探索を行った．この結果として，各点において半透明材質，UVインクの種類とその層数の最適な組み合わせが得られるが，実際に印刷するにあたっては下層の半透明材質は1種類に限定されるため，最初の探索結果から最も選択された回数の多い半透明材質を印刷対象に決定する．サーモンを対象とした場合にはロウソクを印刷対象に決定した．その後，印刷対象の材質を固定しUVインク層の組み合わせに対して再度探索を行い，印刷の組み合わせを決定する．図11はロウソクに対して印刷を行った結果である．

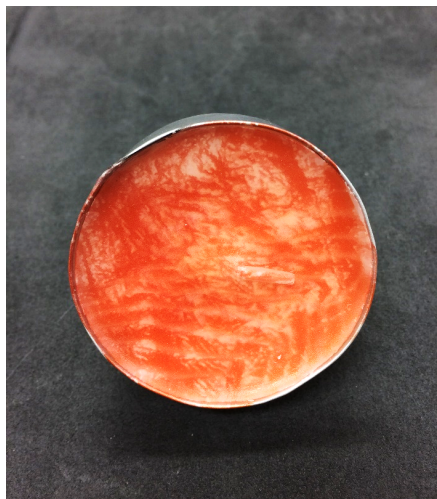


図 11 ロウソクを対象とし，サーモンの半透明感を再現した印刷結果

この結果に対しては，複数人での主観評価や印刷物体の計測による定量評価を行っていないため，印刷結果の妥当性については検討する必要がある．本手法の計測は印刷層に対して垂直方向に行っているため，同方向から観測を行うと半透明感制御が十分にできていると考えられ，一方で印刷層に斜め方向から観測すると再現が十分でないと考えられる．

5. テクスチャの情報付加による半透明感制御手法

本章では、カラー印刷可能な3Dプリンタを用いる半透明感制御手法について述べる。本手法では、不透明物体の見え方に近くなるようにあらかじめテクスチャを計算しておくことで物体の反射率を変化させ、カラー3D印刷によって出力することで半透明感を制御する。

5.1 本手法の背景

4章の手法はある半透明材質の物体に対して上から印刷することで半透明感を不透明方向に制御する手法である。つまり、ある半透明物体を用意する必要があった。ここでは、1つのファブリケーション機器で質感の制御を行うことを目的とする。カラー印刷可能な3Dプリンタを用いることでこれを実現することを着想した。

本手法ではカラーでの印刷が可能な3DプリンタであるXYZprinting社のda Vinci colorを使用する。このプリンタは物体を形作るPLAフィラメントとCMYK4色のカラーインクをセットでき、フィラメントによる積層とインクによる色付けを交互に行うことによってカラー3D印刷を可能としている。

5.2 3D印刷における出力物体の質感

3Dプリンタによって作製された物体の質感はその物体を3D成形するために使用されたフィラメントに依存すると考えられる。3Dプリンタで使用される主なフィラメントはPLA(ポリ乳酸)やABSといったプラスチックであり、これらは明らかに半透明材質である。一般的な3Dプリンタでは一度の印刷中に1種類のフィラメントのみを使用する。そのため3D印刷物体に対して得られる質感は1種類のみとなる。

ここで、半透明感と形状の関係について考える。不透明物体では光が当たっている部分は明るく、光が直接当たっていない部分は陰となり暗く見える。同様に、半透明物体でも光が直接当たっていない部分は陰となる。しかし、半透明物体で

は表面下散乱が起こるため、陰となる部分にも周囲から光が到達し真っ暗にはならない．この陰に相当する部分の見た目の違いが人間の目で知覚される半透明感の違いとなるものと考えられる．つまり、陰に相当する情報を付加することによって物体の半透明感を変化させることが可能ではないかと着想を得た．

5.3 テクスチャ変化による半透明感制御手法

対象となるモデルデータにコンピュータグラフィックス (CG) におけるレンダリング手法を適用し、半透明感を変化させる情報をテクスチャに付加する．ここで、Ambient Occlusion(AO) と呼ばれる手法を用いて形状情報からテクスチャを変化させる．AO は大域的な照明モデルを近似するために用いられる、計算負荷の小さいレンダリング手法である (図 12)．

CG において、シーン全体の明るさの強度は環境光 (Ambient Light) と呼ばれる．一般的なレンダリング手法では、全体で環境光成分は一定であるとしてきた．しかし、実際には物体の凹部分や部屋の角などにおいて環境光成分が小さくなると考えられる．これに対して、AO はシーン中の物体のある点がどの程度遮蔽されているかを計算し、その遮蔽度合いを環境光成分に乗算する．これによって、ソフトかつ自然な陰影が得られる効果がある．

物体表面の各点がどの程度遮蔽されているかを示す環境遮蔽項 A_p は以下の式で表される．

$$\begin{aligned} A_p &= \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} V(x_p, \vec{\omega}) \cos \theta d\omega \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} V(x_p, \vec{\omega}) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (7)$$

$$V = \begin{cases} 1 & (\text{点 } p \text{ が方向から遮蔽されていない}) \\ 0 & (\text{点 } p \text{ が方向から遮蔽されている}) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、関数 V は位置 x の点 p において方向 ω から遮蔽されているかを表す二値関数である (式 (8))．

環境遮蔽項 A_p は物体表面のある点が物体から遮蔽されているか否かを半球上で積分したものを意味している．ある点が全く遮蔽されていない場合には $A_p = 1$

を，完全に遮蔽されている場合に $A_p = 0$ をとる．これを各点ごとに環境光の強度に乗算することで遮蔽を考慮した環境光成分マッピングが行われることとなる．本手法では，計算した物体の遮蔽度に応じて物体のテクスチャを暗くすることで半透明感を変化させる．

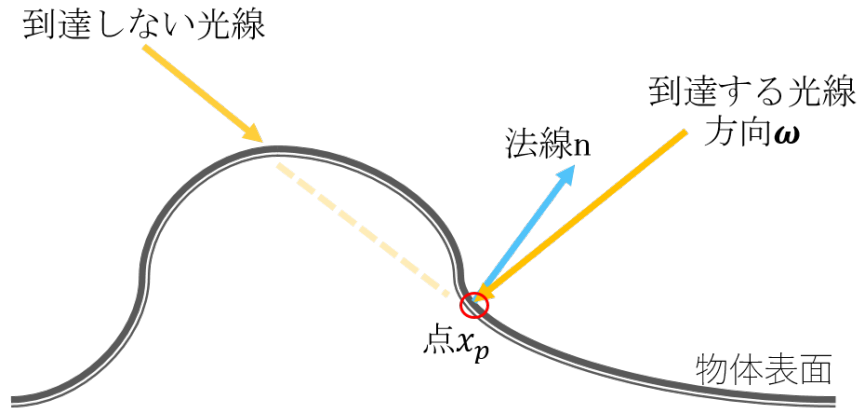


図 12 Ambient Occlusion の模式図

5.4 手法の検証実験

AO は CG 上ではソフトで自然な陰影をもたらす効果があるが，実際に印刷した際に質感にどのような影響を及ぼすかは明確でない．そのため，まず Stanford dragon をモデルデータとして本手法を適用し，レンダリングした結果を比較した．印刷対象とするデータに対して計算を行いその結果をテクスチャに反映させる．レンダリングは blender 上で行い，画像を出力して比較を行った．

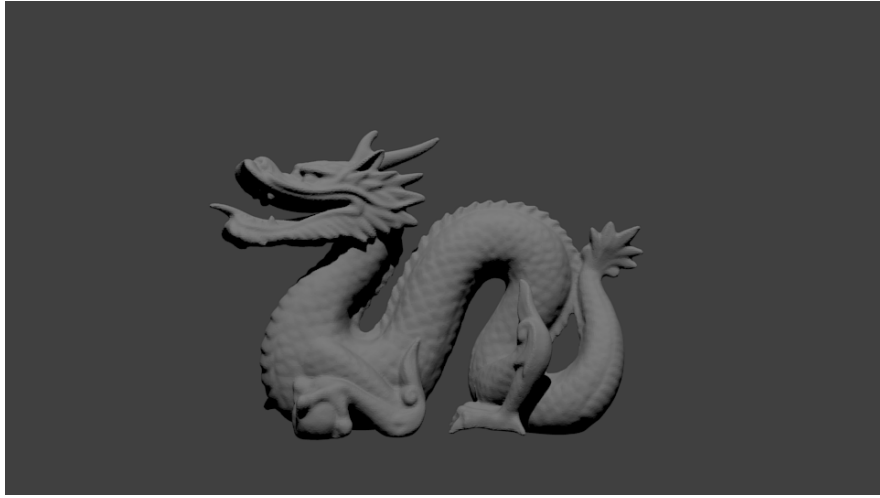


図 13 元の dragon, テクスチャなし (不透明)

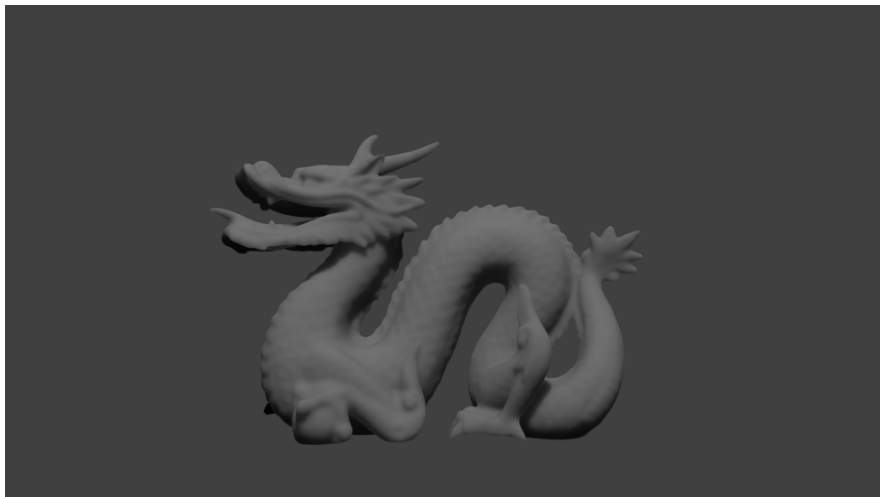


図 14 半透明感を付加した dragon

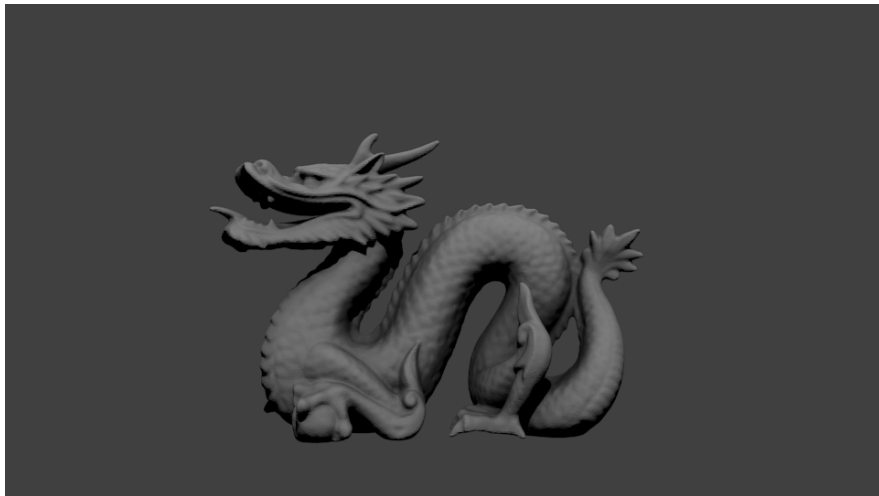


図 15 AO による色を付加した dragon



図 16 半透明感と AO による色を付加した dragon



図 17 元の dragon(図 13) と図 16 の差

図 13 は単一光源下での dragon の元データである．このデータにはテクスチャ等の情報がなく不透明物体であるといえる．これに対して半透明感を付加すると図 14 のようにディテールの陰影がぼやけ透き通った見た目が得られる．また，dragon における AO を計算し形状の遮蔽情報をテクスチャに反映させると図 15 の見た目が得られる．これは物体に色がついている状態の見た目を示している．

以上をもとに，半透明感と AO の関係を比較する．図 16 は半透明感と AO をともに付加したものである．この結果より，図 13 と比較してディテールのぼけが残っているが，陰情報が付加されることで不透明寄りに近づいたといえる．図 13 と図 16 を比較した差分画像を図 17 に示す．図の白の部分は差が小さく，黒の部分は差が大きい．dragon の胴体にあたる部分は差が小さく不透明に近い見え方になっていると考えられる．一方，背中に相当する部分では差が大きくなっており半透明に見えると考えられる．このとき平方平均二乗誤差 $RMSE=2.1894$ となった．

5.5 印刷結果および考察

モデルデータとして Stanford bunny および Stanford dragon を用い，本手法でテクスチャ計算を行って da Vinci color によりカラー 3D 印刷した出力結果を図 18～図 21 に示す．結果はいずれも左がテクスチャを変更していないデータ，右が計算による影のテクスチャを反映したデータである．印刷サイズは bunny, dragon のどちらも幅 60mm，奥行 40mm，高さ 50mm に収まるよう設定した．これは印刷時間と物理的な制約による．印刷時のプリンタのパラメタを表 2 に示す．

パラメタ	設定値
Infill Density	Low(10%)
Infill Type	Rectlinear
Layer Height	0.2mm

表 2 カラー 3D 印刷時の設定パラメタ



図 18 bunny の印刷結果，室内光源下



図 19 bunny の印刷結果，暗室単一光源下



図 20 dragon の印刷結果，室内光源下

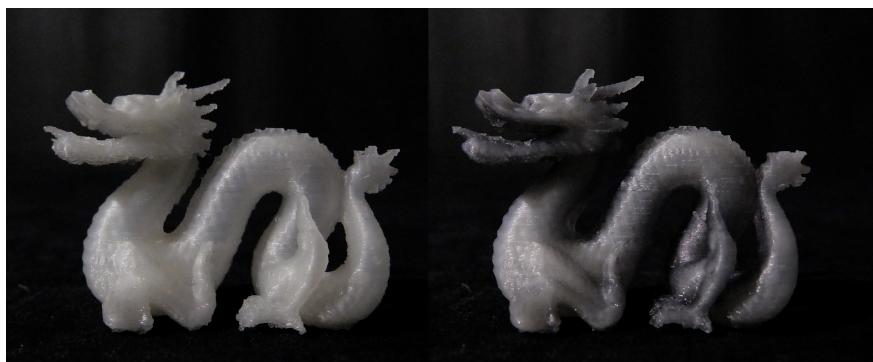


図 21 dragon の印刷結果，暗室単一光源下

以上の印刷結果に対して主観評価を行い，半透明感の違いを検証した．

図 18～図 21 の右側の印刷物体に対して画像を示し，2つの設問を設定し回答を集計した．1つは半透明感について，不透明(石膏相当,1とする)から半透明(プラスチック相当,5とする)の間でどの位置にあたるかを5段階で選択式とした．もう1つは半透明感以外の視覚的質感として，光沢感・湿り気感・粗さ感(ざらざらした感じ)が存在するかを尋ねた．

5名を対象とした主観評価の結果を表3に示す．ここでスコアは5段階評価の平均を表し，小さいほど不透明に近づいていることを表す．

結果	スコア	他の質感で優位なもの
図 18	4	光沢感
図 19	2.8	光沢感
図 20	3	光沢感
図 21	3.6	光沢感・湿り気感

表 3 主観評価結果

印刷結果より，bunny と dragon とともに提案手法によって物体の半透明感が不透明方向に変化したといえる．しかし，いずれの印刷物体も大きさ数 cm のスケールであり，印刷物体を観測する環境によって見た目が大きく影響されるため(表 3)，常に所望の見た目が得られるとはいえないと考えられる．特に室内の環境ではカラー印刷のインクのむらが目立ちやすいという問題点も存在する．また，印刷方

向に対して平行に観察すると光沢感成分が強く見られた。印刷時には PLA フィラメントを溶解して積層するが、その際に積層断面で光沢感が発生する。これは本手法で用いた 3D プリンタでは制御が難しい。光沢感成分は光の反射によるものであるため、半透明感にも影響を及ぼすと考えられる、よって所望の見た目を正確に得るためには、印刷物体の光沢感を除去する、または光沢感を適切に制御する手法が必要となると考えられる。

6. おわりに

本研究では、デジタルファブリケーションによって物体の半透明感を制御することを目的とした。本稿では、そのアプローチとして2手法を提案した。1つ目がさまざまな材質の物体に印刷可能なUVプリンタを用い、印刷の層構造によって半透明感を合成する手法である。2つ目がインクジェットカラー印刷可能な3Dプリンタを用いて、形状を考慮して物体の反射率を変化させ半透明感を制御する手法である。本稿で述べた2手法を比較し、各手法の課題、制限および今後の応用、展望について総括する。

UVプリンタを用いた手法では、半透明感の計測および合成にMTFを用いることとしている。これは半透明物体が等方的な散乱を起こすと仮定することでPSFとMTFが互いに変換可能であるとしている。しかし、半透明物体が非等方的な(異方的な)散乱を起こす場合にはPSFとMTFはフーリエ変換において等価ではないため、光の散乱度合とMTFによって示される半透明度合いに誤差が生じる。この誤差については半透明物体-インク層の特定の組み合わせにおいては無視できない大きさとなることが計測から示されている。また、実際の印刷結果の見え方は光源環境などの影響を大きく受けるため参照した物体との見え方が異なる可能性があるが、実物体での評価を行えていないため今後の課題としたい。今後の展望として、下層の半透明物体を3Dプリンタで作成し、上からUVプリンタで印刷することでより自由度の高い半透明感制御が可能となると考えられる。また、本稿では光沢感について検討を行っていないが、本研究で使用したUVプリンタはクリアインクを使用することができるため、印刷層を追加することで光沢感を付与することも可能であると考えられる。

カラー3Dプリンタを用いた手法については、今回用いたカラー3Dプリンタでは3D印刷可能な最大サイズが幅200mm、奥行200mm、高さ150mmであるが、カラー3D印刷可能な最大サイズは幅185mm、奥行185mmに制限される。サイズの制限によって、物体に対して起こる鏡面反射などの影響が相対的に大きくなってしまうものと考えられる。このプリンタを用いてさらに大きな物体を作るにはパーツに分ける必要があるが、その際には接合面で質感が変化してしまう可能性が考えられる。

2手法を比較すると、1つ目の方法はUVプリンタを使用するため、数mm程度の凹凸は印刷可能であるがさらに大きな窪みがある物体には印刷できないという制限がある。これに対して、2つ目の方法は大きな凹凸にテクスチャ変化を大きくして対応することができるため、照明条件によってはより良い結果が得られると考えられる。一方、2つ目の手法で用いたカラー3DプリンタはUVプリンタと比較して解像度が低いため、特定の照明環境で印刷のむらが見えやすく見た目に影響が大きいと考えられる。この場合UVプリンタによる手法を用いる方が良い結果が得られると考えられる。

2手法に共通する制限として、物体に元から存在する半透明感に対して不透明方向に制御する手法であるため、半透明感を透明方向に変化させることは難しい。また光沢感についても検討を行っていない。そのため透明方向に制御する手法、光沢感を制御する手法と組み合わせることでより自由な質感制御が可能となると考えられる。一例として、光源と観測にプロジェクタ-カメラ系を用いて光沢感や透明感を操作する天野ら [4] の手法などがあり、組み合わせることでより良い質感を得られると考えられる。

謝辞

本研究に取り組むにあたって、多くの方々からご指導・ご支援をいただきました。この場をもちまして御礼申し上げます。

光メディアインタフェース研究室 向川康博教授には研究を進めるにあたって多くのアイデアやご助言をいただきました。研究内容だけでなく発表の心得などいただいた多くの言葉が私の糧となっております。深く感謝申し上げます。環境知能学研究室 萩田紀博教授には学生発表の場におきまして、新たな視点でのご質問、ご意見をいただきました。先生のお言葉は研究を深める一助となりました。深く感謝申し上げます。光メディアインタフェース研究室 船富卓哉准教授には多くの場面で鋭いご指摘やご提案をいただきました。先生のお言葉のおかげで人間的にも成長することができたと感じています。深く感謝申し上げます。光メディアインタフェース研究室 久保尋之助教には研究のご意見、アドバイスを多くいただきました。また興味深いお話を多くいただき私の糧となっております。特に多くの時間を割いていただき深く感謝しております。ありがとうございました。光メディアインタフェース研究室 田中賢一郎助教には他の先生方とは異なる観点からのご意見、ご質問をいただきました。自分を俯瞰して客観的に考える意識を身に着けることができました。深く感謝申し上げます。光メディアインタフェース研究室秘書の登淑恵さんには出張時の手続きなど私の学生生活を支えていただき感謝しております。ありがとうございました。光メディアインタフェース研究室 博士後期課程 高谷剛志氏には研究についてのアドバイス、ご意見を多数いただきました。また、研究のみにとどまらず普段の生活や仕事のことまでいただいたお言葉は大変有意義なものでした。深く感謝しております。誠にありがとうございました。最後に私の2年間の学生生活を最も支えてくださった家族に感謝と御礼の意を述べさせていただきます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] VersaUV LEF-300 概要—UV-LED インクジェットプリンター—Roland DG, 2016. <https://www.rolanddg.co.jp/products/printers/versaUV-lef-300-flatbed-printer>.
- [2] 従来の 3D プリンティングを革新する Stratasys J750, 2016. <https://www.stratasys.co.jp/3d-printers/j750>.
- [3] ダヴィンチ Color | 3D プリンター—XYZ プリンティング, 2017. <https://www.xyzprinting.com/ja-JP/product/da-vinci-color>.
- [4] Toshiyuki Amano. プロジェクタカメラ系を用いた光沢感と透明感の実時間操作. 映像情報メディア学会誌, Vol. 68, No. 12, pp. J528–J533, 2014.
- [5] Michael Birsak, Florian Rist, Peter Wonka, and Przemyslaw Musialski. String art: Towards computational fabrication of string images. *Computer Graphics Forum (Proc. EUROGRAPHICS 2018)*, Vol. 37, No. 2, pp. 263–274, April 2018.
- [6] Alan Brunton, Can Ates Arikan, and Philipp Urban. Pushing the limits of 3d color printing: Error diffusion with translucent materials. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 1, pp. 4:1–4:13, December 2015.
- [7] David J. Cuccia, Frederic Bevilacqua, Anthony J. Durkin, and Bruce J. Tromberg. Modulated imaging: quantitative analysis and tomography of turbid media in the spatial-frequency domain. *Opt. Lett.*, Vol. 30, No. 11, pp. 1354–1356, Jun 2005.
- [8] Yue Dong, Jiaping Wang, Fabio Pellacini, Xin Tong, and Baining Guo. Fabricating spatially-varying subsurface scattering. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 29, No. 4, pp. 62:1–62:10, July 2010.

- [9] Miloš Hašan, Martin Fuchs, Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, and Szymon Rusinkiewicz. Physical reproduction of materials with specified sub-surface scattering. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, Vol. 29, No. 3, August 2010.
- [10] Paul Kubelka. New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. part ii: Nonhomogeneous layers*. *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 44, No. 4, pp. 330–335, Apr 1954.
- [11] Hiroyuki Kubo, Yoshinori Dobashi, and Shigeo Morishima. Curvature-dependent reflectance function for rendering translucent materials. In *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 2010, Los Angeles, California, USA, July 26-30, 2010, Talks Proceedings*, 2010.
- [12] Hiroyuki Kubo, Yoshinori Dobashi, and Shigeo Morishima. Curvature-dependent reflectance function for interactive rendering of subsurface scattering. *The International Journal of Virtual Reality*, Vol. 10, No. 1, pp. 45–51, February 2011.
- [13] Wojciech Matusik, Boris Ajdin, Jinwei Gu, Jason Lawrence, Hendrik P. A. Lensch, Fabio Pellacini, and Szymon Rusinkiewicz. Printing spatially-varying reflectance. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 28, No. 5, pp. 128:1–128:9, December 2009.
- [14] Isamu Motoyoshi. Highlight–shading relationship as a cue for the perception of translucent and transparent materials. *Journal of Vision*, Vol. 10, No. 9, p. 6, 2010.
- [15] Isamu Motoyoshi, Shin’ya Nishida, and Edward H. Adelson. Luminance re-mapping for the control of apparent material. In *Proceedings of the 2Nd Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization, APGV ’05*, pp. 165–165, New York, NY, USA, 2005. ACM.

- [16] Lingfeng Wang and Emily Whiting. Buoyancy optimization for computational fabrication. *Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics)*, Vol. 35, No. 2, pp. 49–58, 2016.
- [17] Tim Weyrich, Pieter Peers, Wojciech Matusik, and Szymon Rusinkiewicz. Fabricating microgeometry for custom surface reflectance. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 28, No. 3, pp. 32:1–32:6, July 2009.
- [18] 小松英彦. 質感の科学：知覚・認知メカニズムと分析・表現の技術. 朝倉書店, 2016.
- [19] 伏下晋, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博. 光学特性の異なる液体の混合による半透明物体の散乱特性再現. 映像情報メディア学会技術報告 = ITE technical report, Vol. 41, No. 12, pp. 45–48, mar 2017.
- [20] 杉本真樹. 生体質感造形 bio-texture modeling による触感等価立体臓器組織モデリングと臓器移植保存シミュレーション. *Organ Biology*, Vol. 21, No. 2, pp. 141–144, 2014.
- [21] 浅田繁伸, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博. 書画の質感再現を目的とした反射率と透過率を同時に再現するレプリカの作成. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J99-D, No. 8, pp. 747–756, August 2016.