

研究報告書

「スパースモデリングと動的光線制御による視覚的質感の高速計測」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研究者: 渡辺 義浩

1. 研究のねらい

本研究の目的は、高速な視覚的質感の計測技術の実現である。本研究で着目する視覚的質感とは、物体を介したときの入射光輝度に対する観測光輝度の比率を指す。この特性は、光源の入射位置、入射角、出射角の 6 次元パラメータによって変動する。

このように、視覚的質感の情報空間は多次元であるため、計測には時間を要する。しかし、高速な視覚的質感の計測が実現できれば、広範な応用分野において各種のボトルネックを一挙に解消することができる。例えば、デジタルアーカイブ応用では、博物館・美術館・図書館に所蔵されている膨大な工芸品・美術品・書籍の電子化が全世界で強力に推し進められている。しかし、質感計測に要する時間がネックとなり、多くの場合は写真や形状を残すのみの場合が多い。また、大量生産を伴う産業・農業分野でも視覚的質感を定量的に捉える技術は生産・検査の上で重要である。さらに、映像制作分野では、撮影後に質感を自在に編集できたり、実世界の物体の質感をコンピュータ上に瞬時にコピーできれば、制作フローは劇的に効率化できる。

このような背景の下、本研究では高速な視覚的質感計測の実現に向けて、計測の回数を最小化しつつも、高い質感再現を達成することを目指す。すなわち、いかに一回の計測データに情報を埋め込み、それを抽出することができるかが本質となる。このために、質感情報のパラメータ空間を網羅的に保存するデータ駆動型における高精度な表現を導入しつつも、モデル駆動型のように部分的な計測データのみから全体の構造を再現できる可能性に着手する。

糸口は、光線が規定する 6 次元と材質の種類、さらには人間の知覚特性を包含した視覚的質感の膨大なデータ構造におけるスパース性にある。また、情報の核となるサンプリングがどこに潜んでいるか、その最適性を探り当てる能動計測も重要である。これらの方法論を、計測技術と情報技術の両面からの融合によって新たに構築する。

具体的な研究課題として、本提案では下記の 3 つに取り組む。第 1 に、光線分布を自在かつ動的制御する投影・撮像システムを独自に実現する。第 2 に、スパース性を利用した視覚的質感の能動的計測とその再現を実施する。第 3 に、視覚的質感分布の計測とその圧縮計測法に取り組む。

2. 研究成果

(1) 概要

視覚的質感として等方性の反射特性に着目した。また、1 点の反射特性を高速計測することから着手した。この戦略の下、まず多自由度照明システムを用いた高速計測アプローチに着手した。同アプローチの下、光線分布を自在かつ動的制御する投影・撮像システムとして、ドーム状の多光源照明と高速カメラを連携するものと、光線分布を多自由度に制御するものを開発した。さらに、スパース性を利用した視覚的質感の能動的計測手法として、膨大な候補の中から、どこをサンプリングすれば効率が良いかを導出する少数サンプリング最適化の手法を開発した。具体的には、人間の知覚尺度と整合する反射特性の計測誤差を新たに導入したうえで、少数サンプリング最適化を解くためにベイズ最適化が有効であることを示した。また、簡易的な進化計算の考え方を導入することで、適応的サンプリングが可能となることも示した。

次に、1 点の反射特性計測をさらに強化するために、システムの小型化に向けた機械学習による高速計測アプローチに着手した。これは、上記のアプローチにおいて、システムが大型化し、各種応用への展開が難しくなる点を解消するものである。まず、能動的計測手法として、高精度・少数サンプリングを両立するように、データ駆動方式によって反射特性の表現と推定の両方を同時最適化する手法を構築した。次に、本手法によって、既存の産業センサである光沢計が反射特性の高速計測装置として転用可能であることを実証した。また、光沢計を用いたアプローチでは、色情報が取得できない問題を、データ駆動型の鏡面反射成分・拡散反射成分の信号分離によって解決する手法を提案した。さらに、本アプローチにおける独自のシステムとして、既存の光沢計よりもコンパクトな装置の設計も実施した。

最後に、視覚的質感分布の計測とその圧縮計測法に着手した。具体的な方法として、部分計測からの反射特性分布復元を非負値行列因子分解による欠損値補間として解く手法を開発した。さらに、上記の 1 点の高速な反射特性計測と、高速な形状計測を連携させる方法も開発した。

(2) 詳細

多自由度照明システムを用いた高速計測アプローチ

反射特性計測の高速化に向けて、様々な方向から光を照射できる多自由度照明システムを用いるアプローチに着手した。まず、光線分布を自在かつ動的制御する投影・撮像システムとして、255 個の光源をドーム状に配置し、高速カメラと同期連携するシステムを構築した。また、さらに照射方向の自由度を上げるために、光線分布をプロジェクタによって制御するためのレンズアレイモジュールを開発した。これらの成果を図 1 (左 3 枚:ドーム型照明、光線制御型照明の光学シミュレーション、同照明のためのレンズアレイ)に示す。

次に、スパース性を利用した視覚的質感の能動的計測のために、上記のシステムを利用する手法を開発した。第 1 の手法として、反射特性の物理モデル型表現を用いた代数的解法とその少数サンプリングの最適化手法を開発した。これは、照明方向と観測方向について、ある制

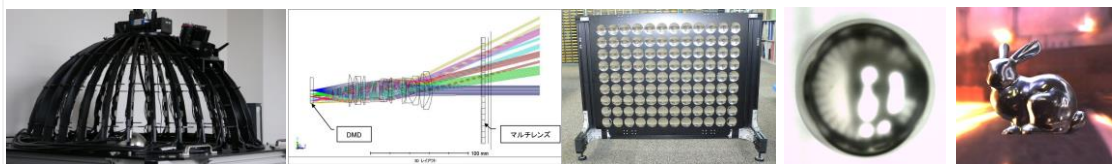


図 1. 多自由度照明システムを用いた高速計測アプローチ

約下のサンプリングをすると、少ない回数でモデルパラメータを代数的に導出できるものである。ただし、この制約を満たすサンプリングの候補は多数ある。この候補の中には、実際の特性和物理モデル型表現の間に誤差があった場合、真値に対して大きく異なる解を導出するものがある。そこで、最適なサンプリングを探索的に求める手法を設計した。上記のドーム型照明を用いて、本手法を評価した結果を図1の右2枚(実物体と計測結果による再現)に示す。結果として、ある程度の精度を達成することができたが、全探索に近い手法で効率が悪い点や、最適性を判断する尺度が人間の知覚的な質感尺度と乖離している問題があった。

そこで、これらの問題を解決する第2の手法を開発した[成果:(3)-1]。本手法では、人間が答えたデータ群を用いて、2つの反射特性が同じか否かを判定する識別器を構築する。次に、同識別器を目的関数として、代数的解法の推定品質を最大化する少数サンプリングを、ベイズ最適化によって見つけ出す。このように、人間の質感尺度を導入しつつも、同尺度がブラックボックス化されることで、最適サンプリングの探索問題が困難になる点をベイズ最適化によって解決している。

さらに、第3の手法として適応的サンプリング手法を開発した[成果:(3)-2]。これは、1回計測するごとに、そのデータを検証し、次に計測した方が良いサンプリングを適応的に決めるものである。この手法では、オンラインで計測の戦略が適応的に設計されるため、予め事前に学習する必要がない。加えて、物理モデル型とデータ駆動型のいずれの反射特性表現にも適用できる利点がある。本手法では、候補となるサンプリング条件の中から、予測されるマテリアル間の分散が最も大きいものを順次選択する。これにより、事前のサンプリング設計をしない戦略でも高精度化が達成できることを示した。

システムの小型化に向けた機械学習による高速計測アプローチ

上記のアプローチでは、システムの小型化が難しい。そこで、新たな計測手法として、高精度・少数サンプリングを両立するように、データ駆動方式によって反射特性の表現と推定の両方を同時最適化する手法を開発した[成果:(3)-4, (3)-5, (2)-1]。具体的には、特定の方向の少数のサンプリングデータを入力として、未観測の反射特性をダイレクトに出力する推定器をニューラルネットワークによって構築するものである。この戦略のもと、マテリアルのサンプル数が反射特性の次元数に対して大幅に少ないために学習が困難になる問題の解決策や、反射特性の周期性を学習させる手法を新たに提案した。また、学習のための尺度として人間の知覚に近いものを導入できることを示した。

本手法は、様々なサンプリング条件に対して、精度を最大化するような推定器を柔軟に構築できる点で有効である。この点を利用し、既に産業分野で広く使われている光沢計が、反射特性の高速計測装置として転用可能であることを示した。実証のために、光沢度から反射特性に



図2. システムの小型化に向けた機械学習による高速計測アプローチ

変換する回帰手法や、実物体の反射特性データベースを新たに開発した。図2左に示されるように、異なるメーカーの光沢計を使っても、高精度かつ高速に反射特性を計測可能であることが分かった。一方、光沢計は色情報を取得できない。そこで、光沢計によって計測された反射特性を拡散・鏡面反射成分に信号分離した後、色彩計で得られた色情報で拡散反射成分を調整し、さらに再合成することによって色情報を復元した[成果:(2)-2]。結果を図2中央に示す。

本アプローチのためのシステムとして、反射特性のデータベースを拡張するための計測装置の開発に着手した。また、既存の光沢計は自動車分野向けに設計されているため、計測エリアが大きい問題がある。そこで、より小さいエリアを計測できるように、独自の超小型センサの開発にも着手した。これらの試作結果を図2右に示す。

視覚的質感分布の計測とその圧縮計測法

本テーマの目的は、反射特性の空間分布を効率的に計測する手法の実現である。まず、反射特性が非負値である点と1つの対象の反射特性分布が少ない基底の反射特性でスパースに表現できる点に着目した。これらより、一部のサンプリング方向の観測値のみから反射特性分布を推定する問題は、スパース制約を伴う非負値因子行列分解に基づく欠損値補間として記述できることを提案した[成果:(3)-3]。その結果、欠損率が95%程度の場合までは許容範囲の再現が可能であることが分かった。

第2の手法として、上述の「システムの小型化に向けた機械学習による高速計測アプローチ」による1点計測を利用する手法を開発した。これは、対象表面上の一部の点を計測し、反射特性分布のスパース性を利用して、未計測の点はこれらの点計測結果の合成によって再現するものである。このために、高速かつ高解像度な形状計測システムを新たに構築した[成果:(1)-3, (1)-1, (1)-2]。さらに、偏光アレイカメラを用いることで、鏡面反射が強い物体も計測できるように拡張した。この形状と反射特性の計測結果から再現した3種類の結果を図3に示す。それぞれ、実際の写真と再現結果が示されている。

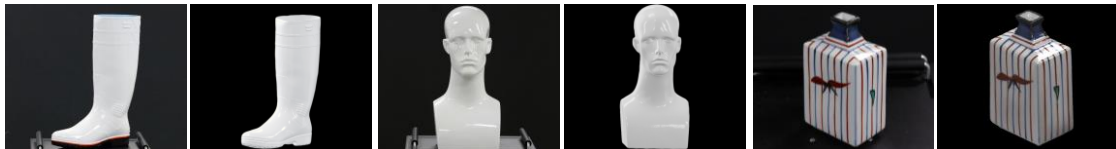


図3. 視覚的質感分布の計測とその圧縮計測法

3. 今後の展開

本課題を通して、情報技術と計測技術の融合が、反射特性の高速化に多大な貢献をもたらすことが分かった。また、新たな計測装置を開発することなく、既存の計測装置にフィットするように高速化手法を構築できることも分かった。この点は、センサメーカーが新規ハードウェアの開発をすることなく、高速な反射特性計測へマーケットを展開できることを意味している。さらに、すでに関連する計測装置を持っている場合は、ハードウェアの導入コストを払うことなく、より高度な計測を実施することができる。このような側面は、本課題の提案技術を社会へ波及していくうえで重要な意味を持つと考えられる。本課題を通して、光沢計を切り口にこのシナリオを展開できることが分かった。今後は、光沢計のセンサメーカーや既存ユーザに向けた応用展開を実施していくことを考えている。

また視覚的質感を軸とした従来応用は、大型の装置による長時間計測や、人間の眼による判断に頼っている部分が大きく、発展を阻害している。今回のように、コンパクトなモバイルの計測

装置で高速計測が可能となれば、新たな応用が拓かれる可能性が高い。具体的には、インターネットショッピングのための品質確認、デジタルアーカイブの高速化、生産分野における自動検査、高価な物品の真贋判断など多様である。これらの各種応用に適合するように、本技術の更なる進化に取り組む予定である。また、視覚的質感を等方性の反射特性を超えて扱えるように拡張していく取り組みも重要であると考えられる。これによって、人間の肌や生き物なども取り扱いが可能となり、化粧、映像メディア、デジタルアーカイブなどの発展に寄与できると考えられる。

さらに、映像を実世界に投影するプロジェクションマッピングと連携することで、人間の目の前の外観を自在に操作する技術にもつなげていく予定である。このプロジェクションマッピングに関して、本研究者は世界的にトップレベルの技術を持っている。本課題の新たな質感計測技術とこのような再現技術の連携は、日常生活の魅力化、産業分野における作業支援、教育分野における教材の高機能化などにつながると考えられる。

4. 自己評価

研究目的はおおむね達成できたと考えられる。研究は、研究者本人と学生による補助の下で進めた。研究費は順調に予定通り執行した。研究計画については、一部変更があった。当初は、計測システムの照明・観測方向の自由度を最大化したうえで、同システムに即した情報計測手法を設計するアプローチを想定していた。ただし、このアプローチでは、新計測技術による高速化や高精度のメリットが、システムサイズが大きくなるデメリットによって失われる応用も多いことが分かった。この点は、反射特性技術の応用に関して、エンドユーザへのヒアリングを行った中で気づいたものである。高速化に伴って広がる応用分野は広く、よりコンパクトなセンサでの可能性を探ることに価値があることが分かった。そこで、小型化に向けた新たなアプローチを軸とした計画に変更した。この計画変更による効果は良好であり、導入した光沢計のメーカーからも興味を持たれている。また、大学側でも知財としての価値があることを認められ、出願に至った。さらに、JSTの新技术説明会で研究成果を紹介することができた。

次に、研究成果について述べる。さきがけの本事業の趣旨は、計測・解析技術に最先端の情報科学・統計数理の研究を融合させることで、豊かな社会に資するイノベーションを創出することにある。まず本研究の成果は、同事業の想定課題の一つである、より少ないデータから有用な情報を引き出す情報再構成技術を実現したものに相当する。注目した測定量の反射特性は、膨大な次元数のデータであるが高速な計測が望まれているとともに、再構成は人間の質感知覚にフィットした精度を達成する必要があった。さらには、簡易的な計測装置で実現することも重要であった。このような要請は、まさに計測技術と情報技術の融合によってはじめて解決できるものであったと考えられる。さらに、高速な反射特性計測は、単純に従来の応用を速度向上するのではなく、これまでに試されていなかった応用につながると期待できる。これは、産業や日常生活の場面で生きる技術となりうるものであり、社会に資するイノベーションをもたらす可能性が高い。計測技術における要請を明らかにし、情報技術によってサポートしていく研究アプローチは強力である。特に、本課題に関しては、カバーする視覚的質感の範囲をさらに複雑化していくミッションがある。このような今後の拡張においても、情報と計測の融合アプローチは基盤となると考えられる。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. Yoshihiro Watanabe: High-speed optical 3D sensing and its applications, Advanced Optical Technologies. Volume 5, Issue 5-6, Pages 367-376, 2016.
2. 渡辺義浩: 高速ビジョンの要素技術と応用展開の進化, 日本ロボット学会誌, Vol.35, No.8, pp.574-578, 2017.
3. Michika Maruyama, Satoshi Tabata, Yoshihiro Watanabe, Masatoshi Ishikawa: Multi-Pattern Embedded Phase Shifting using a High-speed Projector for Fast and Accurate Dynamic 3D Measurement, IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, pp. 921-929, 2018.

(2)特許出願

研究期間累積件数:2 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 渡辺義浩, 斎藤謙二郎, 宮下令央, 石川正俊: 反射特性計測の高速化に向けたベイズ最適化を利用したサンプリングの設計, 電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU2017-130)/信学技報, vol.117, no.391, pp.245-250, 2018.
2. 新田暢, 渡辺義浩, 石川正俊: モデル間分散を利用した適応的な反射特性計測手法の検討, 電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU2017-122)/信学技報, vol.117, no.391, pp.251-256, 2018.
3. 岩永朋樹, 渡辺義浩, 石川正俊: 非負値行列因子分解を用いた空間分布反射特性の推定, 電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU2017-130)/信学技報, vol.117, no.391, pp.81-86, 2018
4. 加地宏乃介, 渡辺義浩, 石川正俊: 機械学習を用いた高精度・少数サンプリングを両立する反射特性推定器の構築, 第 21 回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2018), PS2-6, 2018.
5. 渡辺義浩: 情報と計測の融合による視覚的質感の高速な取得方法, JST 新技術説明会, 2019.1.18.