

Lighty: ロボティック照明のためのペインティングインタフェース

橋本 直 盧 承鐸 山中 太記 神山 洋一 稲見 昌彦 五十嵐 健夫*

概要. 本論文では実世界におけるライティングの制御を行うためのシステム「Lighty」を提案する. 本システムは明るさと方向を制御可能なロボティック照明群と, タブレットデバイスを用いたペインティングインタフェースから構成される. ユーザは部屋の天井に設置されたカメラのリアルタイム映像が映し出されたタブレット上でペインティングを行うことによって, 部屋の中の輝度分布を自在にデザインできる. 入力された目標輝度分布はカメラ画像上に等高線で可視化される. システムはユーザによって指定された輝度分布を満足させるような照明のパラメータの組み合わせを最適化によって求め, その結果を直ちに照明に反映させる. GPU を用いた並列処理によって最適化計算が高速に行われ, ユーザは塗りながらインタラクティブにライティングの結果を確認できる. 我々はミニチュアスケールの実験環境を構築し, 被験者実験を行った. 提案手法と, 照明の明るさと方向を直接操作する手法を比較した結果, 提案手法のほうがタスク達成時間が短く, ライティングの結果に対するユーザの満足度が高いことが示された.

1 はじめに

現在の照明操作のためのユーザインタフェースには, シンプルなスイッチやフェーダが広く用いられている. しかし, そのようなインタフェースでは照明の数が増大した場合に操作が難しくなる. 舞台照明で用いられるプロ仕様の調光操作卓には多数のスイッチやフェーダが並んでおり, ライティングの細かい調整を行うことができるが, 居住空間における日常的な照明操作に適しているとは言えない. そのような装置では, 事前に登録しておいた照明のセッティングを1つのスイッチに割り当てることができるが, その場ですぐに思い通りにカスタマイズするような操作は難しい. また, 照明の位置や方向が制御可能になればライティングデザインの自由度は増大するが, 操作はより複雑になってしまう.

そこで本研究では, 室内の輝度分布をペインティングによって自在にデザインできる「Lighty」というシステムを提案する. Lighty は明るさと方向を制御可能なロボティック照明群とタブレットデバイスを用いたペインティングインタフェースから構成される. 本システムのユーザは, 部屋の中のどこを明るくしてどこを暗くするかという輝度分布を, 部屋の天井に設置されたカメラの映像上でのペイント操作によって指定することができる. システムはGPUを用いた高速な最適化計算によって目標輝度分布を満たすような照明のパラメータを求め, 直ちに照明を駆動する. 我々の手法は, コンピュータグラフィックス (CG) の分野で研究されているゴールベース

のライティング最適化のアプローチに着想を得ており, それらを現実の居住空間に対して適用するものである [3][6][7][9]. 我々は提案手法の検証のためにミニチュアスケールの実験環境を構築した. また, 被験者実験を行い, 照明パラメータを直接操作する手法との比較を行った. 本稿では, システムの概要について述べ, 開発したプロトタイプについて説明した後, 実験の結果について報告する.

2 関連研究

これまでコンピュータ内の仮想環境におけるライティングデザインの研究が行われてきた. Pellaciniらは, CG をレンダリングした画像上で影をドラッグするなどのインタラクティブな操作によって照明効果を制御するインタフェースを提案した [8]. CGにおけるライティングデザインのためのペインティングインタフェースは複数提案されている [6][7][9]. それらの傾向として, ユーザがペイントによって希望のライティング結果を入力し, それを満たすような照明のパラメータ群を最適化によって導く方法であることが挙げられる.

実世界の照明を対象としたシステムもさまざまなものが提案されている. Light Stage[2] は球状に並べられた照明アレイを制御して, 人物に当たる環境光を再現するシステムであり, 映画制作で用いられている. Anrys と Dutré は, 写真撮影のためのフルカラー照明群の制御手法を提案した [1]. Mohanらは, 1台のパンチルト照明をさまざまな照明条件で駆動して撮影を行い, それらを合成して1枚の写真を生成するシステムを提案した [5]. [1] と [5] は, ユーザがペインティングによって所望のライティング結果を指定する点と, 画像ベースのライティングシミュレーションを行い, 照明パラメータの組み合

Copyright is held by the author(s).

* Sunao Hashimoto, Seung-tak Noh, Daiki Yamanaka, Youichi Kamiyama, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi, JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト

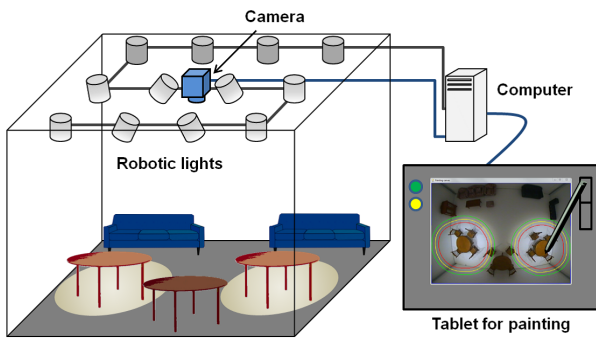


図 1. システムの全体像

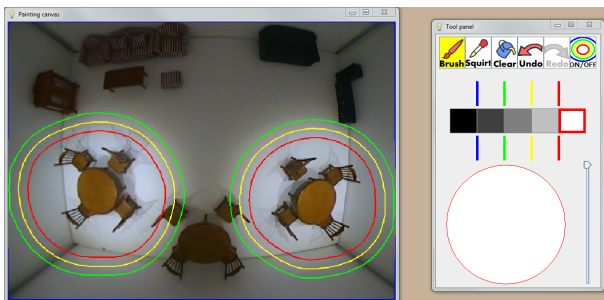


図 2. ユーザインタフェース

わせ問題を探索的に解くという点で我々のアプローチと共通しているが、インタフェースの点で異なっている。

3 システムの概要

提案システムの構成を図1に示す。ロボティック照明は、明るさと方向をコンピュータから制御することができる。天井カメラは、部屋全体のシーン画像を撮影する。撮影された画像はライティングシミュレーションに用いられる。ユーザは液晶タブレットに表示されたペインティングインタフェースをスタイラスで操作して照明の制御を行う。コンピュータ上で動作するソフトウェアは、ペインティングインタフェース、最適化モジュール、照明制御モジュールから構成される。ペインティングインタフェースにおいてユーザが室内の目標輝度分布の入力を行うと、最適化モジュールがその目標輝度分布を満たすような照明パラメータを計算し、最後に、照明制御モジュールによってその計算結果が照明に反映される。

3.1 ユーザインタフェース

ユーザインタフェースの外観を図2に示す。画面左が天井カメラからのライブビュー、画面右がパレット、ブラシ、スポイト、クリア、Undo、Redoなどを備えたツールパネルである。以下、従来手法[1][4][5][9]にはない2つの特徴について説明する。

第1の特徴として、ライブビュー上でペイント操作を行える点が挙げられる。従来手法では、目標画像のペイント編集を行うキャンバスと、ライティングを行った結果を確認する画面は分かれていた。この方法は多くの画面領域を占有するため、スマートフォンのような小さな画面を持つデバイスでの利用において不便である。我々のシステムでは、2つのビューを1つに統合し、ペイント操作で入力された目標輝度分布を等高線で可視化する仕様にした。等高線の色が明暗を表し、暖色は明るい領域、寒色は暗い領域を示す。等高線の表示/非表示はツールパネル上で変更可能である。ペイント操作中は最適化と照明パラメータの更新が自動的に実行されるため、まるで光と闇のブラシで空間を塗っているような感覚で操作を行うことができる。ユーザが画面からスタイラスを浮かせている間もこの処理は行われるため、スタイラスを画面に接触した際にどのような塗りになるのかを事前に知ることができる。

第2の特徴として、ユーザが入力した目標輝度分布が現実には再現が難しい分布にならないようにするための工夫が施されている点が挙げられる。従来手法ではペイントを行う際、目標画像に対して任意の絶対値で塗る方法が採られてきたが、この方法では、現実にはその場所では起こり得ない値を与えることが簡単にできてしまうという問題がある。これに対し我々のシステムでは、照明群を最大輝度で点灯させたときの明るさを上限値として、それに対する相対値で塗ることによってこの問題を回避している。また、再現可能な輝度分布の細かさには限界があることと、ハイコントラストな境界を持つ輝度分布を現実に再現するのが難しいことを考慮して、ブラシのサイズを大きめ(120×120~240×240ピクセルの円)に設定し、放射状のぼかしをかけている。また、我々のシステムでは塗りながらインタラクティブに照明の状態が更新されるため、入力と結果が極端に異なるような状況には陥りにくくなっている。

3.2 アルゴリズム

我々のアプローチは、画像ベースのライティングシミュレーションを行い、照明パラメータの組み合わせ問題を探索的に解くというものである。複数の照明が点灯している状態の画像は、個々の照明が単独で点灯している画像の線形和によって推定することができる(厳密には照射輝度に変換してから合成を行う)。この計算に用いる画像データ群を収集する作業(キャリブレーション)をシステム導入直後または家具の配置が変化した際に行う。キャリブレーションでは、それぞれの照明がさまざまなパラメータ設定で単独点灯している様子を天井カメラで撮影する。また、これとは別に、すべての照明を鉛直下方に向け、最大出力で点灯させて撮影を行い、そのシーン画像を起こり得る最大輝度の画像(基準画像)



図 3. ミニチュアスケールの実験環境

と定義する．システムはユーザがペイント操作で入力した目標輝度分布と基準画像から目標画像を生成する．その後，照明パラメータを変更しながら繰り返しライティングシミュレーションを行い，目標画像と予測結果画像の誤差が最小になるようなパラメータの組み合わせを探索的手法によって発見する．実装において我々は山登り法による探索アルゴリズムを採用し，GPU を用いた並列処理によって高速な処理を実現した．

4 ミニチュアスケールの実験環境

1/12 のミニチュアスケールの実験環境を構築した (図 3)．装置のサイズは $800 \times 600 \times 460\text{mm}^3$ で，現実における $9.6 \times 7.2 \times 5.5\text{m}^3$ の広さの部屋を想定している．床にはテーブル，椅子，ソファ，棚などのミニチュア家具が並べられており，天井には 200mm 間隔で 12 個の照明が取り付けられている．また，天井の中央には広角レンズを装着したカメラを設置した．部屋は 6 枚の白いパネルで囲まれており，外光を遮断しているため，消灯時には完全暗室になる．各々の照明は，発光ダイオード (LED) と 2 個のサーボモータ，マイクロコントローラから構成される．LED には電球色で視野角が $50[\text{deg}]$ のもの (NICHIA NSPL510DS) を使用した．サーボモータとジンバル状の機構によって，2 軸の回転を行うことができる．照明の方向制御の分解能は各軸 5 段階，明るさ制御の分解能は 9 段階とした．すなわち，1 ユニットあたり $5 \times 5 \times 9 = 225$ 通りのパラメータの組み合わせを持つ．照明の数は 12 個であるため，キャリブレーションで取得する個別点灯画像の総数は $12 \times 225 = 2700$ 枚となる．我々が使用した LED は入力値と出力輝度の線形性が確認できたため，明るさを変化させながら撮影する必要はなく，実際には 300 枚の撮影を行った．計算量を削減するために 640×480 で撮影したカメラ画像を 80×60 に縮小して最適化計算を行った．また，我々の実験環境では単色光源を使用したため，画像はグレースケールとした．各画像データは放射輝度値に

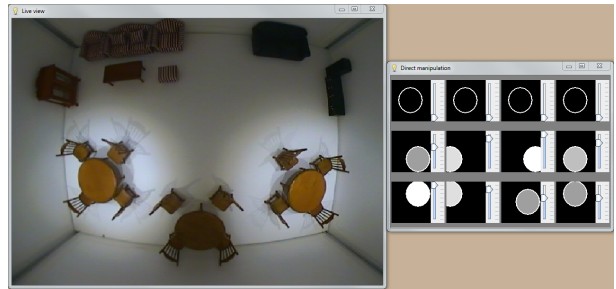


図 4. 直接操作法のインタフェース

変換して扱われ，各画素値は float 値 (4byte) で保存される．これにより，個別点灯画像のデータベースのサイズは $80 \times 60 \times 4 \times 300 = 5.49\text{MB}$ となった．キャリブレーションにかかる時間はおよそ 15 分となった．最適化の計算にかかる時間は目標輝度分布によって異なるが，およそ $24 \sim 63\text{ms}$ の範囲に収まった．

5 評価実験

ミニチュアスケールの実験環境を用いて被験者実験を行った．実験において，提案手法と個別の照明パラメータを直接操作する手法 (直接操作法) の比較を行った．

5.1 直接操作法のインタフェース

比較対象として，直接操作法によるインタフェースを実装した (図 4)．画面左が天井カメラから得られたライブビュー，画面右が照明制御のためのウィジェットである．12 個の照明それぞれに対して，明るさを制御するためのスライダと，方向を制御するためのハンドルがある．照明の方向を変える場合は，円形のハンドルをドラッグして所望の方向に移動させる．ハンドルの入力方向と，ライブビューで観測されるスポット光の移動方向が一致するようにした．また，ウィジェットの配置はライブビューにおける照明の配置と対応させている．このインタフェースは液晶タブレット上に表示され，ユーザはスタイラスで操作を行う．

5.2 実験方法

20～35 歳の 10 人の被験者を集めて実験を行った．実験は被験者内比較で行われ，各被験者は 2 種類のインタフェースを体験する．それぞれの条件において，インタフェースの使い方を説明し，2 種類の練習を体験させた．その後，5 種類のタスクを実施した．練習およびタスクはすべての被験者において共通の順番で行った．我々のシステムはリビングスペースにおける照明制御を想定しているため，日常生活で起こり得る状況を考慮し，被験者へのタスク指示は自然言語とした ([4] で行われているような画像によ



図 5. 実験環境（初期状態）

表 1. タスクの内容

練習 1	部屋を初期状態より全体的に明るくしてください。ただし、左上のソファは現在より暗くしてください。
練習 2	部屋の右半分を暗くしてください。なお、左の丸いテーブルを特に明るくしてください。
タスク 1	他の場所の明るさを維持しながら、左と右の丸テーブルを明るくしてください。
タスク 2	中央と右の丸テーブルを明るく照らしてください。ただし、部屋の左上のソファと戸棚があるところは暗くしてください。
タスク 3	部屋を全体的に明るくしてください。ただし、左の丸テーブルと右上のソファだけ特に暗くしてください。
タスク 4	部屋の左端を明るく、右に行くにしたがって徐々に暗くなるようにしてください。
タスク 5	右上のソファを明るくして、ソファから遠くなるほど徐々に暗くなるようにしてください。

る目標指示は行わない）。与えられるタスクの内容を表 1 に、対象となる環境を図 5 に示す。各タスクの制限時間は最大 3 分とし、被験者は自分のデザインした結果に満足した時点で、終了ボタンを押してタスクを終了する。それぞれのタスク開始前に、すべての照明を鉛直下向き、明るさ 50% に初期化するものとした。また、タスク毎にタスク達成時間を計測し、被験者がデザインしたライティング結果についての満足度を 7 段階のリッカートスケール（高得点ほど満足）で答えさせた。タスク終了後、被験者に対して表 2 に示すアンケートを実施した。アンケートの回答は、7 段階のリッカートスケール（1: そうは思わない, 7: そう思う）の点数で答えるものとした。2 条件の比較において、実験順のカウンタバランスをとるために、被験者のうち半数は提案手法を先に体験し、残りの被験者は直接操作法を先に体験させた。すべての実験の終了後、被験者に対してインタビューを行った。

5.3 実験結果

タスク達成時間を図 6 に示す。タスクの 80% が 90 秒以内に終了した。ほとんどの被験者が 3 分間の制限時間内にタスクを終えたが、1 名の被験者はいくつかのタスクにおいて制限時間に達した。t 検定によって

表 2. アンケート（7 段階のリッカートスケールで回答）

Q1	この方法は部屋の照明を制御する自然な方法である
Q2	この方法は私の意図を良く反映してくれる
Q3	この方法を使うにはたくさんの練習が必要だ
Q4	この方法で照明を制御していると疲れる
Q5	この方法で部屋中の照明を操作したい

データを解析した結果、タスク 2, 3, 5 において提案手法が直接操作法より速いことが示された（統計的有意差あり：それぞれ $p < 0.01, p < 0.05, p < 0.05$ ）。タスク 1 とタスク 4 ではタスク達成時間に有意差はなかった（それぞれ $p = 0.10, p = 0.87$ ）。デザインした結果に対する満足度を図 7 に示す。t 検定によってデータを解析した結果、タスク達成時間に有意差があったタスク 2, 3, 5 において、満足度にも有意差があり、提案手法の満足度が直接操作法に比べて高い結果となった（それぞれ $p < 0.01, p < 0.05, p < 0.05$ ）。タスク 1 とタスク 4 では満足度に有意差はなかった（ $p = 0.07, p = 0.49$ ）。

アンケートの結果を図 8 に示す。Q3 と Q4 はネガティブな質問である。ウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、Q1 と Q4 において統計的有意差があった。Q1 の結果は、提案手法が照明を操作する方法としてより自然であると感じていたことを示している（ $p < 0.01$ ）。Q4 の結果は、直接操作法が提案手法に比べて疲れるということを示している（ $p < 0.01$ ）。

被験者らは、提案手法において目標輝度分布が可視化されたので、より自信を持って作業を行うことができたとコメントした。ユーザが入力した目標輝度分布の可視化は、ユーザがシステムに対して正しい指示ができていているという安心感を与えることに寄与していると考えられる。また、被験者らは提案手法は広範囲に渡って照明条件を素早く変更するのに良いとコメントした。ある被験者は、提案手法ではライティングの結果に意識を集中させながら作業することができるが、直接操作法ではカメラ画像とウィジェットを交互に見る必要があり、集中するのが難しいと答えた。等高線の表示は、提案手法における全体の作業時間の 86% で使用された。等高線が役に立ったかという質問に対しては、全員が肯定的な反応を示した。大部分の被験者が、システムの動作を等高線なしに理解することが難しかったため、ペイント操作時に等高線を有効にしたと答えた。被験者の多くは、ペインティングした後でライティングの結果を確認するために等高線の表示を一時的に無効にしたと答えた。

10 人中 9 人の被験者は今後使いたい照明制御のシステムは直接操作法よりも提案手法であると答えた。その主な理由は、直接操作法に比べて提案手法のほ

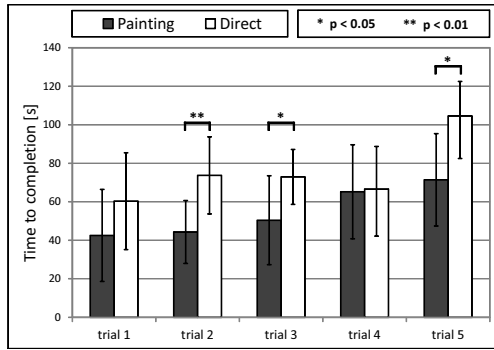


図 6. タスク達成時間

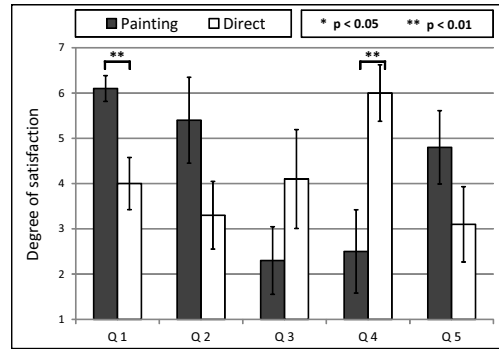


図 8. アンケート結果

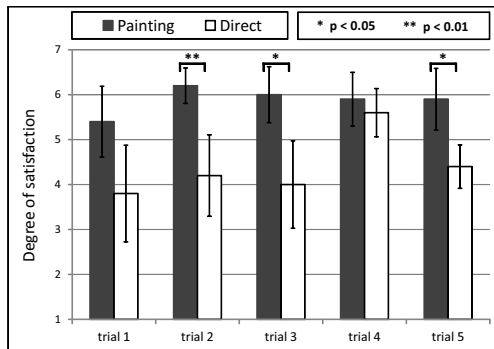


図 7. デザインした結果に対する満足度

うがより少ない操作で指示でき、疲れることなく素早く作業を終えることができる、というものだった。これとは対照的に、1名の被験者はより正確な制御ができることを理由に、直接操作法を好んだ。

6 考察

タスク達成時間と満足度についての統計的有意差が同じタスクで見られるという興味深い結果となった。ここで、2つの手法の長所と短所を確かめるために、ユーザのふるまいについて考察する。

まず、なぜ提案手法がタスク2とタスク3において優勢な結果となったのかについて述べる。これらのタスクでは、特定の場所を明るくしつつ、別な場所を局所的に暗くすることを要求している。ペインティングによる方法では、明るくする場合も暗くする場合も「塗る」という共通の操作によって実現することができる。すなわち、明るくしたい場所は明るいブラシで、暗くしたい場所は暗いブラシで塗るだけである。これとは対照的に、直接操作法では、局所的に明るくする場合と暗くする場合とでまったく異なる操作を必要とする。特定の場所を明るくすることは比較的容易であり、ユーザは単に照明の明るさを高いレベルに設定し、その照明の方向を目的の場所に向けるだけである。しかし、他の場所を明るくしつつ特定の場所を暗くするためには、その場

所を避けるように照明の方向を慎重に調節する必要がある。一部の被験者は、明るさのレベルを0に設定した照明を暗くしたい場所に向けていたが、これは完全に無意味な操作である。この事実は、直接操作法がこの種類のリクエストに応えるのが苦手であることを示している。

次に、タスク4とタスク5の違いについて述べる。これらのタスクは、空間方向に対して段階的に明るさを変化させることが要求されているという点で類似しているが、結果は大きく異なっている。タスク5は有意差を示しているが、タスク4は示していない。被験者が行った操作の観察の結果、タスク4を直接操作法で行う実験において、大部分の被験者が照明の方向を変化させていないことがわかった。これは照明の配置が目標輝度分布と同様の配置になっていることに起因しており、ユーザは照明の方向を変えることなく、単に左側にある照明を明るく、右側にある照明を暗くするだけで目標を達成することができた。これに対してタスク5は、目標輝度分布が放射状だったため、ユーザは照明の方向を操作する必要があり、より時間を要したと考えられる。この結果から、照明の方向制御を伴う状況においてはペインティングによる方法が有利であると言える。

7 今後の課題

今回ミニチュアスケールのプロトタイプで行った実験を、実スケールの環境下で人間を介在させた状態で行うことが今後の課題である。現実の環境では、移動物体の影によってシーンの輝度分布が動的に変化することが予想される。この問題の解決策として、移動物体によって輝度が低下した領域を画像処理で検出し、その場所がより明るくなるように照明のパラメータを動的に更新する方法が考えられる。現在のシステムではすべての光源が制御可能な状態を想定しているが、現実の環境では窓から入射する太陽光や街灯の光などの影響がある。そのような外光の影響も考慮できるシステムを構築することを検討している。これを解決する基本的なアイデアは、ユー

ザによって与えられる目標輝度分布と外光に起因する輝度分布の差を同定し、その差を埋めるような照明設定を計算するという方法である。今回は単色のスポットライトを使用した、フルカラーの照明や、ウォールランプのような間接照明がある場合についても調査していく予定である。また、照明を駆動することによる「正」のライティングだけでなく、カーテンやブラインドを制御することによる「負」のライティングの実現も興味深い研究課題である。

8 まとめ

本論文では、室内のライティングを自在に制御するためのロボティック照明とそれを操るためのペインティングインタフェースを提案した。従来研究にはない特徴として、明るさと方向の制御が可能な照明群を扱っている点、ユーザの入力が再現不能な目標輝度分布にならないようにするための工夫が施されている点、ユーザが入力した輝度分布がカメラ画像上に等高線で可視化される点などが挙げられる。我々はミニチュアスケールのプロトタイプを開発し、被験者実験を行った。提案手法と直接操作法を比較した結果、多くのケースで、提案手法が速くて満足度の高い結果となった。また、等高線による目標輝度分布の可視化が役に立つことも示された。今後は実スケールの環境下で実験を行う予定である。

参考文献

[1] F. Anrys and P. Dutré. Image-Based Lighting Design. In *the 4th IASTED International Conference on Visualization, Imaging, and Image Processing*, 2004.

[2] P. Debevec, A. Wenger, C. Tchou, A. Gardner, J. Waese, and T. Hawkins. A lighting reproduction approach to live-action compositing. *ACM Trans. Graph.*, 21(3):547–556, jul 2002.

[3] T. Jung, M. D. Gross, and E. Y. luen Do. Light pen sketching light in 3d. In *In Proc. of CAAD Futures*, pp. 327–338, 2003.

[4] W. B. Kerr and F. Pellacini. Toward evaluating lighting design interface paradigms for novice users. *ACM Trans. Graph.*, 28(3):26:1–26:9, jul 2009.

[5] A. Mohan, R. Bailey, J. Waite, J. Tumblin, C. Grimm, and B. Bodenheimer. Tabletop Computed Lighting for Practical Digital Photography. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 13(4):652–662, july-aug. 2007.

[6] M. Okabe, Y. Matsushita, L. Shen, and T. Igarashi. Illumination Brush: Interactive Design of All-Frequency Lighting. In *Computer Graphics and Applications, 2007. PG '07. 15th Pacific Conference on*, pp. 171–180, 29 2007-nov. 2 2007.

[7] F. Pellacini, F. Battaglia, R. K. Morley, and A. Finkelstein. Lighting with paint. *ACM Trans. Graph.*, 26(2), jun 2007.

[8] F. Pellacini, P. Tole, and D. P. Greenberg. A user interface for interactive cinematic shadow design. *ACM Trans. Graph.*, 21(3):563–566, jul 2002.

[9] C. Schoeneman, J. Dorsey, B. Smits, J. Arvo, and D. Greenberg. Painting with light. In *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '93*, pp. 143–146, New York, NY, USA, 1993. ACM.

未来ビジョン

あらゆる物理現象を「塗る」インタフェース

我々は、これまでコンピュータの中の情報世界を操作するために提案されてきた Human-Computer Interaction のさまざまな手法を、実世界を物理的に操作するために使うというアプローチで研究を行っている。本稿で紹介した Lighty は、ペインティングインタフェースを実世界に対して適用するというアイデアに基づいている。

我々は Lighty のようなペインティングインタフェースを、光だけでなく、音、香り、風、熱、湿度などを総合的に制御するためのインタフェースに応用できるのではないかと考えている。例えば、超指向性スピーカやノイズキャンセリング技術を組み合わせ、特定の場所を「無

音で塗る」ということができれば非常に有益である。また、同様に香りや風を制御することによって、局所的な無臭空間を作り出したり、分煙を行うことも考えられる。

いろいろな物理条件の組み合わせを 1 つのブラシカラーとして登録できるようになれば、よりカスタマイズの幅が広がる。例えば、オフィスの自分のデスクの周囲を「自分の家」というカラーで塗ると、事前に登録しておいた自宅の温度や騒音レベルがそこで再現され、自宅にいる時と同じような感覚で仕事に励むことができる。この他にも、過去に旅行したことがある場所の状態をペイントして楽しんだり、同時刻の別な場所の状態を自分の周囲にペイントして場の雰囲気共有を共有したりすることが考えられる。

このようなアプリケーションを実現するための方法について今後も研究を続けていく。