

フィルム写真のための プリント技法シミュレーションシステム

田中洸平¹ 寺田 努^{1,2} 塚本昌彦¹

概要: 近年、カメラユーザにとって「写真」とはデジタル写真が主流であるが、フィルム写真にはデジタル写真では得られない粒状感や色味があり、またフィルムや印画紙の消費による作るという意識は魅力的な写真を生み出す。フィルム写真はプリント方法によってさまざまな表現ができ、写真の良さや意図するものが変わる。しかし、暗室で行われるプリントの作成は、露光段階では写真の仕上がりを見ることはできず、現像後に初めて写真が見えるため、初心者にとって難しく、慣れるまでに時間がかかる。そこで本研究では、露光段階で写真の仕上がりをシミュレートしユーザに提示するシステムを提案し、初心者のプリント技術向上を目的とする。評価実験では、ユーザのプリント技法に関する理解が深まることが示唆された。

キーワード: 写真, プリント, シミュレーション, 暗室

1. はじめに

1888年、Eastman Kodak社がフィルムカメラを発売して以降、フィルムカメラは一般大衆にも普及し長期にわたって利用されてきた。その後、1935年にはカラーフィルムも登場し、フィルム写真技術の発達は加速した [1, 2]。1994年にカシオが民生用デジタルカメラ QV-10 [3] を発売して以降、デジタルカメラの生産が増え、カメラはフィルムからデジタルへと移行し、フィルム関連の事業は縮小されてきた [4]。しかし、フィルム写真にはデジタル写真では得られない粒状感や色味があり、またフィルムや印画紙の消費による作るという意識は魅力ある写真を生み出すことから、デジタルカメラはフィルムカメラに代わるものではないため、フィルム写真の文化を継承し、フィルムを使い続けることは重要なことである。

以降では、カラーフィルム写真に比べて容易で自家現像、プリントが可能な白黒フィルム写真に限定して話を進める。フィルム写真の制作工程には、撮影、フィルムの現像、プリントの作成がある。撮影では、感光剤の塗布されたフィルムに光を当てて目に見えない像（潜像）をフィルムに記憶させる。フィルムの現像では、潜像を目に見える像にしたフィルムを作成する。プリントの作成では、フィルムの像を大きくして白黒反転した、普段目にする写真を作る。写

真家の Ansel Adams が「The negative is the equivalent of the composer's score, and the print the performance (ネガは楽譜であり、プリントは演奏のようなもの)」 [5] と発言したように、プリントの作成は単にフィルムの白黒反転を行うのではなく、プリントの作成方法によって写真の良さや意図するものが変わる。

プリントの作成には、露光と現像、停止、定着、水洗という過程があり、暗室内で行う。露光では引き伸ばし機を用いて、印画紙に光を当ててフィルムの像を焼き付ける。印画紙は表面に感光剤を塗布したプリント用紙で、引き伸ばし機はフィルムを印画紙に投影するための機械である。印画紙上の露光された箇所には潜像が生成される。現像では現像液を用いて潜像が見える像になる。露光量が多い箇所ほど黒くなり、フィルムの明暗を反転したポジの写真ができる。停止では停止液を用いて現像の進行を止める。定着では定着液を用いて感光剤を取り除く。最後に、水洗では印画紙から薬品を洗い流す。

プリントの作成の中でも特に露光工程の問題点として、写真の仕上がりが現像工程に進むまでわからない点が挙げられる。そのため初心者は適切な露光時間を見つけるまでに時間がかかる。また、引き伸ばしレンズとフィルムの間にはフィルタを入れることによってコントラストを変化できる多階調印画紙がよく用いられるが、コントラストの変化による仕上がりの印象の変化も想像が困難である。さらに、手や紙などで投影光を遮り画面の一部の露光時間を調節して濃度に変化を付ける焼き込みや覆い焼き [6] という

¹ 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University
² 科学技術振興機構さきがけ
Japan Science and Technology Agency, PRESTO



(a) 焼き込み前 (b) 焼き込み後
図 1 焼き込みでの変化

手法は、露光工程で必須であるが、それらを使いこなすことも困難である。例として、図 1 に焼き込みによる変化を示す。図 1(a) は写真上部が白く飛んでいて締まりがないプリントであるが、図 1(b) では写真上部だけ露光時間を増やす焼き込みを行うことで全体的に締まりのある写真に仕上がっている。初心者はこれらのプリント技法に慣れるまでにフィルム写真技術の習得を挫折することもある。そのうえ近年は印画紙などの写真用品の値段が高騰しており、多くの失敗を経験するためにはコストがかかることからプリント技法の習得は初心者にとってハードルが高い。

そこで本研究では、露光の段階で現像後の印画紙の仕上がりをシミュレーションし露光作業中のユーザに提示することで、印画紙を消費することなくユーザのプリント技法習得を支援するシステムを提案する。本論文では、提案システムのプロトタイプを実装し、評価実験として、システムのフィルム写真再現性を評価する実験と、システムによるプリント技術の向上を確認する実験を行った。

本論文は以下のように構成されている。2 章で関連研究について述べ、3 章では提案システムの設計について述べる。さらに、4 章でシステムの実装について説明し、5 章で評価実験と考察を行い、最後に 6 章でまとめを行う。

2. 関連研究

2.1 フィルム写真のデジタルでのシミュレーション

フィルム写真の色味や粒状感を再現する階調再現の研究は数多く行われている。犬井らの研究 [8] では、フレア曲線、ネガティブフィルムおよび印画紙の写真特性曲線に対する数式モデルを設定し、これに用いられるパラメータを実験値より求め、特性曲線の再現を行った。シャドウ部においては誤差があったが、ハイライト部および中間調部では良好な近似を示した。Geigel らの研究 [9] では、露光量と濃度の関係を表す特性曲線、分光感度曲線、解像力、粒状感の実験データに基づいてカラー画像から白黒フィルム写真を生成するシミュレーションモデルを提案している。こ

の研究は、フィルムシミュレーションの基礎となる研究であり、多くの階調再現の研究で参考にされている。Geigel らの研究で提案された特性曲線や分光感度曲線を用いたシミュレーションモデルを実装した Echevarria らの研究 [10] では、湿板写真の作成過程をデジタルでシミュレーションしたアプリケーションを作成している。本研究では、犬井らの数学モデルを採用し、Geigel らのシミュレーションモデルを参考にした。

現在、カラーフィルムや白黒フィルムの表現をデジタル写真で再現できるフィルムシミュレーションソフトやフィルムシミュレータが搭載されたカメラが多く存在し、フィルム写真の表現を引き継いでいる。フィルムシミュレータはフィルムの測定データを用いて、フィルム写真の色味や粒状感を再現する。Ishibashi らの研究 [11] や南の研究 [12] では、彩度や調子の異なるさまざまなフィルムをシミュレートしている。また、富士フィルムのデジタルカメラ X シリーズ [13] では、PROVIA, ASITIA, VELVIA といったフィルムを再現できるフィルムシミュレータが搭載されている。フィルムシミュレーションソフトのひとつに DxO FilmPack [7] がある。これは、DxO 社独自のキャリブレーションプロセスによって、フィルム写真のスタイルや色調、粒状感を再現できるソフトである。武末らの研究 [14] では、統計的なデータから現像後のフィルムの濃度を再現するのではなく、PC 上の仮想フィルムに対して化学シミュレーションを用いてフィルムへの露光、現像を行うことで、フィルム写真のもつ粒状感などといった魅力を再現した。また、工藤らの研究 [15] では、スタジオ内の光環境と撮影者のカメラ操作を仮想空間内に反映し、仮想空間上の像を得る写真撮影シミュレータを設計・構築した。この研究では、撮影、現像、印画紙へのプリントまでのフィルム写真の一連の流れをシミュレーションで再現した。これらの研究では、フィルム写真を擬似的に体験できるが、出力がデジタルデータまたはインクジェット出力であり、銀粒子で構成されるフィルム写真とは異なる。そのため、フィルム写真とは隔たりがあり、フィルム写真のプリント技術とは関連のないものである。そこで、本研究ではフィルム写真のプリントを支援することを目的とした。

2.2 直観的な画像編集に関する研究

直観的な画像編集に関する研究は数多く行われている。河原塚らの研究 [16] では、スクリーンに赤外光を発するデバイスを用いて焼き込みや覆い焼きのアナログを用いた画像処理が直観的に行えるシステムを提案している。このシステムは、赤外線 LED を用いた操作光源によって、スクリーン上にプロジェクタで投影された画像に赤外光を当て、その状況を CCD カメラで取得することで、画像にフィルタ処理を行う。ユーザは特別なジェスチャーなどを行うことなく、直観的に領域指定と強度指定を行うことが

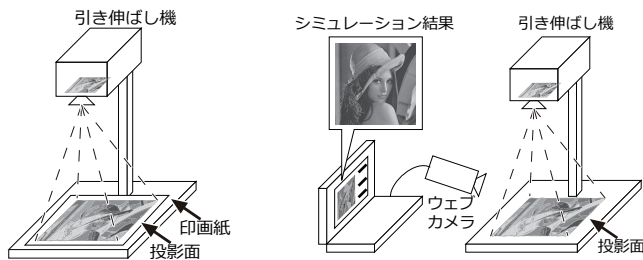


図 2 通常の露光作業

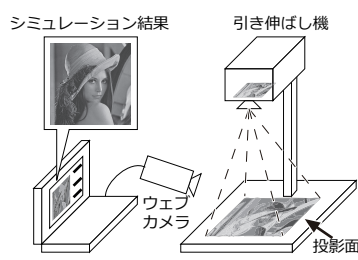


図 3 システム構成図

できる。この研究は、暗室でのプリント技法をアナログとして取り入れた画像編集システムである。本研究は、実際の暗室での作業に近いシミュレーションを用いた練習によりユーザのプリント技術向上を促し、ユーザが暗室でのプリント作業が円滑に行えるようにするシステムを目指す。

3. 設計

本章では提案するプリント技法シミュレーションシステムについて述べる。通常のプリント作業では図2に示す引き伸ばし機で投影面上に設置した印画紙にフィルムのネガの像を投影しプリントを行う。

露光時は投影されたネガの像が見えるが、ネガを白黒反転させたポジのプリントは露光、現像後まで見ることはできない。提案システムの構成を図3に示す。システムでは露光の段階で現像後の印画紙の仕上がりをリアルタイムでシミュレーションしユーザに提示することでプリント技術向上を促す。そのために、焼き込みと覆い焼きの認識と、印画紙への露光量と印画紙の濃度の関係を示す特性曲線を用いたシミュレーションを行う。焼き込みと覆い焼きの認識を行うために引き伸ばし機の横に設置したウェブカメラで投影面を撮影してPCで画像処理を行う。PCはユーザから見える位置に設置する。

通常のプリント作業では、露光を行う前に、照度を決める引き伸ばしレンズの絞り値とコントラストを決めるフィルタを選択する。システムでは、加えて引き伸ばしレンズの絞り値とフィルタの号数を入力する。また用いるフィルムはあらかじめ市販のフィルムスキャナを用いてスキャンし、システムに読み込ませ、引き伸ばし機に同じフィルムを設置する。

システムの処理の流れを図4に示す。まずウェブカメラの映像(図5(a))内から投影面のみをトリミングして台形補正を行い、垂直線上からの映像と同等の映像を取得する。なお補正した映像を以降「投影面映像(図5(b))」と呼ぶ。次に、投影面映像の各ピクセルの明度の平均値を計算し一定の閾値を超えている場合、露光していると判定する。そして露光していると判断された場合、次の処理である露光箇所認識に移る。露光作業では、画面全体に露光させるベース露光と、部分的に露光させる焼き込みと覆い焼きが行われる。よって、投影面上の露光時間は箇所により異な

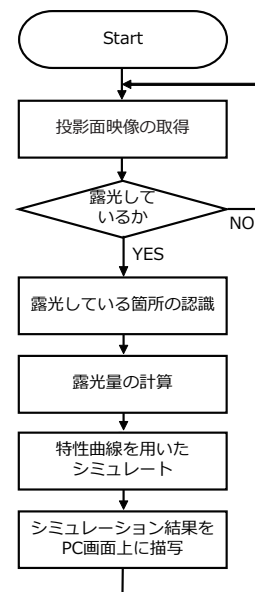


図 4 システムの処理の流れ

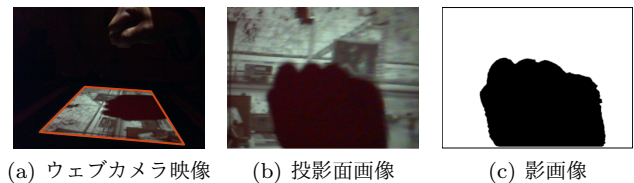


図 5 露光している箇所の認識

り、箇所ごとに計測する必要がある。そこで、投影面映像(図5(b))に一定の閾値で2値化処理を行うことで、焼き込みや覆い焼きによる影がある箇所は黒く、フィルムが投影されて露光している箇所は白くなる影映像(図5(c))が取得できるので、投影面映像上の露光箇所を認識できる。露光された箇所では露光時間を加算する処理を行う。次に、投影面映像の各画素での露光量を計算する。図6に示すように、投影されたフィルムの照度(図6(a))と投影時間(図6(b))を乗算し印画紙に対する露光量(図6(c))を計算する。図6(c)は、白ほど露光量が多いことを示す。照度は、ネガフィルムをスキャンした画像と引き伸ばしレンズの絞り値から計算する。次に、富士フィルムが公開しているフィルタごとの露光量と現像後の印画紙の濃度の特性曲線[17]を犬井らの研究[8]の式、

$$D = \frac{D_m - D_f}{1 + (sE)^{-a}} + D_f$$

を用いて近似する。ここで、Dは濃度、Eは露光量、 D_m は最大濃度、 D_f は最小濃度、sは感度因子、aは階調因子である。特性曲線を読み取った数値よりパラメータを設定し近似した特性曲線を用いて、印画紙の現像後の濃度のシミュレーションを行う。最後に、PC画面上にシミュレートした結果を描画する。

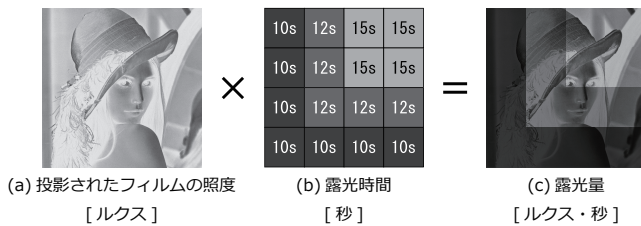


図 6 露光量の計算



図 7 プロトタイプの概観

4. 実装

提案システムのプロトタイプを実装した。ウェブカメラには Logicool 社の C920t を用いた。PC には Lenovo 社の ThinkPad X220 (CPU: Core i5 2.5GHz, メモリ: 4GB) を用いた。暗い環境でシステムを用いるため、ウェブカメラの露出とゲインは最大に調整した。引き伸ばし機は集光式モノクロ用引伸機 90M-D Classic [18] を用いた。アプリケーションの開発は Microsoft Visual C# を使用し、画像処理用ライブラリとして OpenCV Sharp [19] を利用した。プロトタイプの概観を図 7 に、PC に表示する画面を図 8 に、システムの使用風景を図 9 にそれぞれ示す。

引き伸ばしレンズの絞り値とフィルタ号数は図 10 に示すリストボックスで選択する。ウェブカメラの感度の制約より、引き伸ばしレンズの絞り値は開放として引き伸ばし機にフィルタは入れず露光を行う。投影面の座標の設定、影と投影面の閾値の設定、露光を判断する閾値は手動で図 11 に示すスライダとボタンで設定する。また、プリント作業の途中でフィルタの号数や絞り値の変更を行わないこととする。あとは通常の引き伸ばし機の操作をするとシステムがシミュレーションを行う。

5. 評価実験

提案システムの評価実験として、システムのフィルム写真再現性を評価する実験と、ユーザのプリント技術向上を評価する実験を行った。

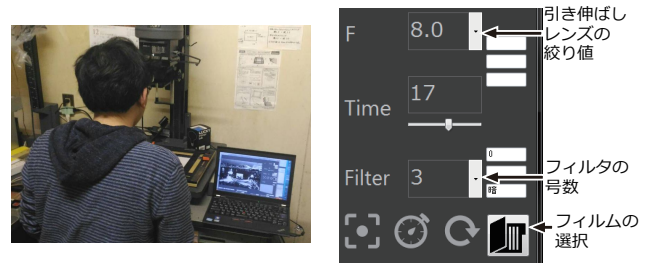


図 9 システム使用風景

図 10 絞り値、フィルタ号数の設定

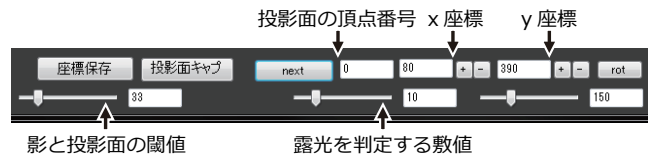


図 11 投影面の座標、影と投影面の閾値の設定



図 12 印画紙 (2 号)



図 13 シミュレーション (2 号)



図 14 比較 (2 号)

5.1 フィルム写真再現性の評価

提案システムのフィルム写真再現性を評価するため、富士フィルムの印画紙、フジプロ バリグレード WP にプリントした写真とフィルムをスキャンし提案システムを用いてシミュレーションした画像を比較した。2号と4号のフィルタを用いて10秒、15秒、20秒間露光し、プリントした写真をスキャンした画像を図12と図15に示す。同様に提案システムでシミュレーションした結果を図13と図16に示す。図12と図13、図15と図16について差の絶対値を用いて比較した画像を図14、図17に示す。図14、図17は暗い部分ほど差が大きいことを意味する。

図14(c)から、右のマネキンの腕などのグレーの領域では再現性が悪いことが確認できる。図14(a)、図17(a)に共通してシャドウ(暗い部分)がシミュレーションの方が薄いことがわかる。原因としては、露光量と印画紙の濃度の特性曲線の近似が適切でなかったこと、フィルムのスキャ



図 15 印画紙 (4号)

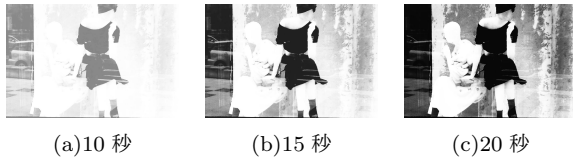


図 16 シミュレーション (4号)

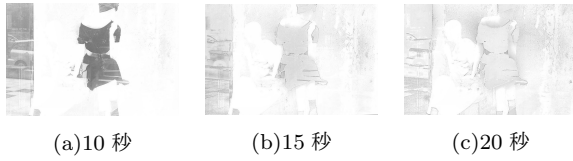


図 17 比較 (4号)



(a) ストレートプリント

(b) 見本のプリント

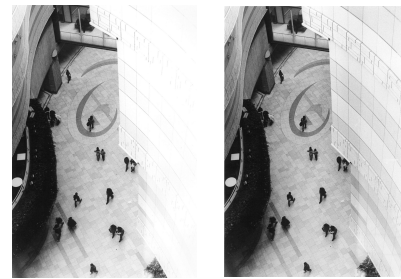


(c)A のプリント
(システムあり)

(d)B のプリント
(システムなし)

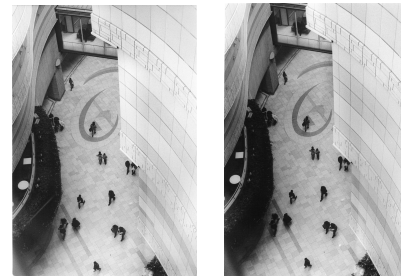
図 18 写真 S

ンの方法がよくなかったことが考えられる。特性曲線に関しては、ずれの程度は今回の実験からは不明であり、近似した特性曲線の評価を行う必要がある。フィルムのスキャンに関しては、スキャナがコントラストを低くスキャンする傾向があり、スキャンによってコントラストが低くなった可能性がある。スキャンした画像を元にして露光量を計算するため、シミュレーション結果に誤差が出た。スキャンされた画像をキャリブレーションし、正確な露光量を算出することは今後の課題である。適正露出の図 13(b)と図 16(c)ではよいシミュレート結果を得ているため、ベース露光を行った後に行う焼き込みの練習としては問題なく使えると考えられる。そのため、焼き込みの練習のみに限定してシステムによるユーザのプリント技法向上を図る実験を行った。



(a) ストレート
プリント

(b) 見本の
プリント



(c)A のプリント
(システムなし)

(d)B のプリント
(システムあり)

図 19 写真 N

5.2 ユーザのプリント技術向上の評価

提案システムによるプリント技術の中の焼き込み技術向上の有無を評価するための実験を行った。この実験では、プリント作業の初心者には 2 種類のフィルムについて、ストレートプリント（焼き込みと覆い焼きを用いずにプリントした写真）と焼き込みを行った見本プリントの 2 枚を見せ、見本プリントを再現するための焼き込み箇所の確認をシステムを用いない場合と用いた場合の 2 回行わせた。その後、実際に暗室で焼き込みを含むプリント作業を行わせ、その仕上がりを比較した。焼き込み箇所の確認は、システムを用いない場合は印画紙を置かず露光し手などで光を遮ることで、システムを用いる場合はシステムによるシミュレーションを見ることで行った。使用するフィルムは、焼き込みを行うことによる画の印象の変化がわかりやすい、S(三宮)、N(難波)の 2 種類として、被験者は暗室経験 1 年未満の男女 2 人 (A, B) とする。なお、この実験ではフィルタ号数は N, S 共に 3 号、引き伸ばしレンズの絞り値は N は F8, S は F11、ベース露光時間は N は 18 秒, S は 17 秒、焼き込み時間は N は上部に 18 秒, S は右の建物の壁面部に 20 秒は固定した。A は、システムなしで N をプリントした後、システムでの練習後 S をプリントした。B は、システムなしで S をプリントした後、システムでの練習後 N をプリントした。

図 18(a) に S のストレートプリント、図 18(b) に見本とするプリント、図 18(c) に A がシステムを用いて練習した後に行ったプリント、図 18(d) に B がシステムを用いずに練習した後に行ったプリントを示す。図 19(a) に N のスト

レートプリント, 図 19(b)に見本とするプリント, 図 19(c)に A がシステムを用いず練習した後に行ったプリント, 図 19(d)に B がシステムを用いて練習した後に行ったプリントを示す. 図 18(b) は海から上を焼き込み主題を強調するプリントで, 図 19(b) は右の建物の白飛びを焼き込みで防ぐプリントである.

図 18(d) と図 19(c) のシステムを用いず練習した場合でも, 見本のプリントに近いプリントができた. 図 18(c) は図 18(b) より全体的に薄い仕上がりであるが, 露光時間は固定しているため露光作業の問題ではなく, 現像作業で現像時間が少し短かった, または現像液の攪拌が不十分だったことが考えられる. なお, 被験者 A は写真 S の焼き込みが単純であったため, シミュレーションは 1 度しか行わなかった. 図 19(d) では, 図 19(c) と比べて右の建物の部分がきれいにプリントできている. 被験者 B は何度かシステムでシミュレーションして, 見本もよく確認したため, 実際のプリントが丁寧になった. 被験者 A よりきれいにプリントができた直接的な原因は見本をよく確認したことであるため, システムがプリント技術の向上につながったとはいえない.

初心者がシステムを用いずに練習した場合, 仕上がりに不自然な濃淡の差が発生すると予想したが, 発生しなかった. その理由として, 今回使用したフィルムが焼き込み箇所が多いといった難易度の高いフィルムではなかったこと, 焼き込み箇所が広く, 手を自然とレンズに近づける必要があり, 影のピントが合わず不自然な濃淡の差が発生しなかったことが考えられる.

6. まとめと今後の課題

本研究では, フィルム写真プリントの露光段階において現像後の印画紙の仕上がりのシミュレーションを行いその結果を露光作業中のユーザに提示することで, ユーザのプリント技術向上を目的とするシステムを提案し, プロトタイプを実装した. 評価実験として, システムのフィルム写真再現性を評価する実験と, ユーザのプリント技術向上を評価する実験を行った. 再現性を評価する実験では, 十分に印画紙の特性を再現できない点もあった. 原因として, スキャンしたフィルムの画像から印画紙に投影される照度を計算しているが, フィルムのスキャンの状態がよくなかったことが考えられる. しかし, 適正露出の画像ではよいシミュレーション結果が得られたため, 焼き込みの練習システムとして利用できることがわかった. プリント技術向上を評価する実験では, 向上の有無は確認できなかった. しかし, 露光段階で現像後の仕上がりをユーザに提示することで, ユーザのプリント技法に関する理解が深まること示唆された.

今後の課題として, シミュレーション精度の向上があげられる. フィルムのスキャンの手法が適切でないため, 評

価実験でのシミュレーションの精度が悪かったと考えられる. そのため, RAW 画像でスキャンすることやスキャン後にキャリブレーションを行うことで改善を試みる. また, ユーザのレベルに合わせた実験を行いプリント技術向上の有無の確認をする. 現在, 初心者が暗室でのフィルム写真のプリント始めるためには, 暗室を持っている団体に所属するか, レンタル暗室を利用する必要がある. また, プリント技術向上には時間がかかる. そのため, システムを暗室で補助的に用いるだけでなく, 引き伸ばし機のない一般家庭でも用い練習できるシステムの構築を目標とする. 練習が気軽にできるようになり, 暗室が初心者にとって親しみやすいものとなることを期待できる.

謝辞 本研究の一部は, 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(さきがけ)および文部科学省科学研究費補助金挑戦的萌芽研究(25540084)によるものである. ここに記して謝意を表す.

参考文献

- [1] カメラの歴史を見てみよう | キヤノンサイエンスラボ・キッズ, http://web.canon.jp/technology/kids/mystery/m_03_01.html.
- [2] Kodak の歴史, http://www.kodak.com/global/ja/corp/historyOfKodak/historyIntro_ja.jhtml?pq-path=2217/2687.
- [3] 矢野渉の「クラシック・デジカメで遊ぶ」: 10 年先の写真を見据えて——カシオ「QV-10」 | ITmedia デジカメプラス, <http://camera.itmedia.co.jp/dc/articles/1101/11/news028.html>.
- [4] 木暮雅夫: デジタルカメラ時代の雇用と職場の変化, <http://www.eco.nihon-u.ac.jp/center/economic/publication/journal/pdf/42/42-1-2.pdf>.
- [5] Ansel Adams — David Sheff, <http://davidsheff.com/article/ansel-adams/>.
- [6] 名古屋大学写真部: よいこのための暗室の本, http://www2.jimu.nagoya-u.ac.jp/syasin/text_book.html.
- [7] DxO FilmPack, <http://www.dxo.com/jp/photography/写真編集ソフトウェア/dxo-film-pack/>.
- [8] 犬井正男: 数式モデルによる写真特性曲線の近似 (VII), 日本写真学会誌, Vol. 43, pp. 22–26 (1980).
- [9] J. Geigel and F. K. Musgrave: A Model for Simulating the Photographic Development Process on Digital Images, *Proc. of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '97)*, pp. 135–142 (1997).
- [10] J. I. Echevarria, G. Wilensky, A. Krishnaswamy, B. Kim, and D. Gutierrez: Computational Simulation of Alternative Photographic Processes, *Computer Graphics Forum*, Vol. 32, No. 4, pp. 7–16 (July 2013).
- [11] H. Ishibashi, and S. Shuto: Development of High-Accuracy Image Simulation System, and Its Application to Designing Tone and Color Reproduction of a New Color Reversal Film, *Journal of the Society of Photographic Science and Technology of Japan*, Vol. 62, No. 2, pp. 106–110 (1999).
- [12] 南進: フィルムシミュレーションモードの設計コンセプト, 日本写真学会誌, Vol. 71, No. 3, pp. 180–183 (2008).
- [13] X FUJIFILM | 富士フィルム, <http://fujifilm.jp/>

- personal/digitalcamera/x/.
- [14] 武末直也, 源田悦夫, 小林裕幸: 電脳現像術—化学シミュレーションによる仮想銀塩写真の生成—, 日本写真学会誌, Vol. 74, No. 2, pp. 118–119 (2011).
 - [15] 工藤達郎, 源田悦夫, 武末直也: 電脳撮影スタジオの構築, 芸術工学会誌, No. 63, pp. 115–122 (Dec. 2013).
 - [16] 河原塚有希彦, 宮田一乘: 印画紙露光アナログを用いた画像処理システム—光を用いた直感的な画像編集, 画像ラボ, Vol. 19, No. 2, pp. 60–65 (2008).
 - [17] フジプロ バリグレード WP データシート, http://fujifilm.jp/support/filmandcamera/download/pack/pdf/datasheet/ff_fujibrovarigradewp_001.pdf.
 - [18] ケンコー・トキナーオンラインショップ | LUCKY 引伸機, <http://ec1.kenko-web.jp/category/591.html>.
 - [19] OpenCV Sharp, <https://github.com/shimat/opencvsharp>.
-