

インクジェットプリンターによる印刷画像に対する 数値シミュレーション技術

New Numerical Simulation for Images Printed by Inkjet Printer

田丸 剛 士*
Tsuyoshi TAMARU

伊藤 智 映*
Tomoaki ITO

篠村 将 人*
Masato SHINOMURA

畔柳 祐 一*
Yuichi KUROYANAGI

浜田 健 史*
Takeshi HAMADA

要旨

産業用インクジェットプリンター製品の高画質化においては、ノズル欠や液寄りに伴う白筋の抑制、あるいは粒状性の向上などが重要であり、その対応策のひとつとしてスクリーン設計の工夫が挙げられる。コニカミノルタではインクジェットプリンター AccurioJet KM-1 (以下、KM-1) の開発にあたり、画像シミュレーションを活用したスクリーン性能の仮想評価を行うことでスクリーン設計の効率化と高画質化を進めてきた。

KM-1 後継機の開発に画像シミュレーションを展開し更なる高画質化を図るにあたり、流体シミュレーションによってインク液滴 (以下、液滴) の濡れ広がり・複数液滴の結合といった挙動を解析し、液滴の着弾時間差といった因子の寄与も考慮できるように改良した。また、射出液量むらやメディア蛇行といった誤差因子も考慮できるようにすることで、安定した高画質を実現するための検討にも有用な画像シミュレーションシステムとした。

今回改良したシミュレーションシステムによって予測される画像が低濃度領域において実測結果と合致する結果となることを確認した。また、高濃度領域についても一部機能的には使えるレベルであるが、更なる精度向上が必要なことがわかった。

今後も本取り組みを発展させ、高画質でロバストな印刷のための技術に磨きをかけ、それぞれのお客様が望む画像の実現へ繋げる。

Abstract

In order to improve image quality of industrial inkjet printer, it is important to suppress white streaks or graininess caused by failing nozzles or bulging instability. A possible measure is creating a new design to avoid these problems. In the development of new inkjet printer, AccurioJet KM-1 (hereinafter referred to as KM-1), Konica Minolta has virtually evaluated new screen designs by using image simulation, then successfully enhanced image quality as well as efficiency of designing screens.

We have also developed a new image simulation system which employs fluid simulator to achieve more stable and higher quality images for the successor of KM-1. By employing it, we can simulate behaviors such as wetting, spreading and coalescence of ink droplets (hereinafter referred to as droplets). At the same time, contribution of other factors, such as, time difference in landing of droplets can be taken into consideration now. Furthermore, the system accounts for error factors such as uneven injection volume or media skew so that it can stably produce high quality images.

It is experimentally proved that the image predicted by the improved simulation system matches the printed result in the low-density region, but we also found that simulation accuracy at high-density region need to be improved because only limited part of the simulation result is currently correct and useful.

We will continue this work to realize higher quality and more robust printing until we achieve the level that is desired by our customers.

1 はじめに

産業用インクジェットプリンター製品において、高画質化の重要性は高い。高画質化のためには、インク詰まり等によってノズルから液滴を射出できなくなるノズル欠やメディアに着弾した液滴が他の液滴の方向へ移動する液寄りに伴う白筋の抑制が課題となる。他にも粒状性向上の課題などがあり、これらの対応策のひとつとして、スクリーン設計の工夫が挙げられる。スクリーン設計を行うにあたり、その効率化がひとつの重要な課題である。効率化によってその分の工数をより良いスクリーンの探索に充てることができ、更なる高画質化を検討できる。

コニカミノルタではUVゲルインクを用いたインクジェットプリンター KM-1の開発にあたり、結合する2液滴の画像測定結果に基づくシミュレーションシステム（以下、ゲルインクシミュレーションシステムv1）を構築し、その内容を報告した¹⁾。従来は設計したスクリーンの性能確認を行うにあたって毎回実機で画像出力を行う必要があり非常に手間が掛かっていた。シミュレーションにより実機を使わず短時間でスクリーン性能の仮想評価を行えるようになり、効率的なスクリーン設計が可能となった。

KM-1後継機の開発へ展開し更なる高画質化を図るにあたり、液滴の濡れ広がり・複数液滴の結合といった液滴挙動を流体シミュレーションによって解析できるようにしたシステム（以下、ゲルインクシミュレーションシステムv2）へのバージョンアップを行い、液滴の着弾時間差といった因子の寄与も考慮できるようにした。また射出液量むらやメディア蛇行といった誤差因子も考慮できるようにすることで、安定した画像品質を実現するための検討にも有用なシステムとした。

2 ゲルインクシミュレーションシステムv2

2.1 課題

ゲルインクシミュレーションシステムv1を使用する中で挙げられた課題は以下のものである。

- (1) 影響の大きい因子の追加
液滴の着弾順序や着弾時間差等、液寄りの振る舞いに大きな影響を及ぼすことが明らかになった因子があり、新たにそれらに対応する必要がある。
- (2) 誤差の考慮
射出液量むらといった誤差因子の影響を実験的に確認することは難度が高く、実験をベースとするゲルインクシミュレーションシステムv1は誤差の影響を十分に考慮できていない。
- (3) 液滴挙動メカニズムの解明
結合する2液滴の画像測定結果に基づく予測を行うため、メディア上での液滴の着弾や濡れ広がり の過程についてはブラックボックス化されている。

2.2 目標

シミュレーターの改良にあたり、以下の目標を立てた。目標の実現のため、ゲルインクシミュレーションシステムv2では、実験結果の代わりに流体シミュレーションをベースとしたシステムとすることが有効と判断した。

- (1) 白筋や粒状性に影響の大きい因子の追加
ゲルインクシミュレーションシステムv1で考慮していなかった、着弾順序や時間差の影響を流体シミュレーションで解析し、扱えるようにする。
- (2) ロバスト性評価を可能とする
実験ではコントロールが困難であった射出液量むら等の誤差因子による影響を流体シミュレーション上で解析し、考慮できるようにする。誤差因子に対しロバストな設計をするのに役立つ。
- (3) 流体シミュレーションによる液滴挙動可視化
流体シミュレーションをベースとした解析を行うことにより、液滴着弾における挙動を可視化しメカニズムを理解できるようにすることでスクリーン設計に役立てる。

2.3 対応方針

ゲルインクシミュレーションシステムv2によって予測したいのは白筋の発生有無、粒状性、インク被覆面積率等であって、液滴形状の詳細な再現についてはそれほど重要ではない。またそれらの画像品質の確認に適している単色画像を対象とする。

流体シミュレーションを画像予測に組み込む場合の重要な課題は、現実的な計算時間に収めることである。3次元の流体シミュレーションは計算規模が大きくなり、画像サイズにも依るが、流体シミュレーションのみを用いて1枚の画像を予測する場合、相当な時間が必要となる。ロバスト性検証のために様々な条件を振って画像予測を行う目的に対しては実用的ではない。そのため流体シミュレーションでは高々2液滴までの計算を行うこととした。3液滴以上が結合する場合については2.4.2で説明する。

2.4 システム構成

以上を踏まえ、ゲルインクシミュレーションシステムv2の全体像を表したものがFig. 1である。まず流体シミュレーションによって2液滴の液量や着弾位置などの条件を変えながら解析を行い、液滴変形の結果データを蓄積する（2.4.1で説明）。基本的な方針はゲルインクシミュレーションシステムv1を踏襲する。即ちそれらの液滴を真上から見た形状を楕円で近似し、回帰分析の要領で、液量や着弾位置などの因子を説明変数、楕円の特徴量を目的変数としたときの、両者の関係を表す回帰式を導く（2.4.2で説明）。導いた回帰式を基に、入力パターンがどのような出力画像になるかシミュレートする（2.4.3で説明）。

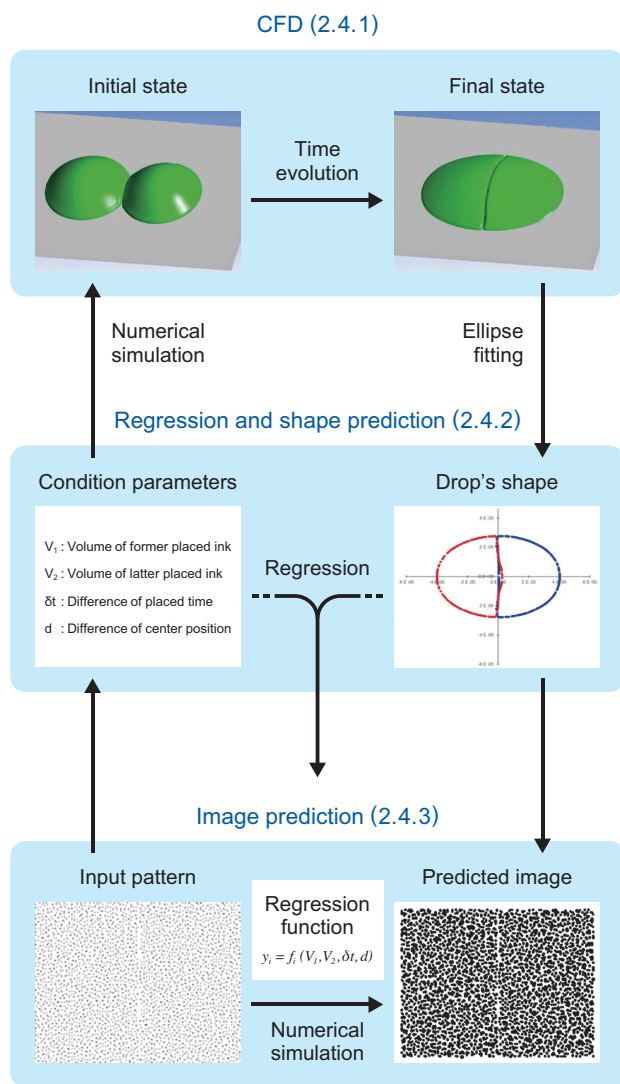


Fig. 1 Entire configuration of gel ink simulation system, version 2.
By expressing shape change of droplets with a simple mathematical formula using fluid simulation (Computational fluid dynamics = CFD) and regression analysis, we simulate output image by using the input pattern as a parameter.

2.4.1 流体シミュレーション

汎用流体シミュレーションソフトウェアAnsys Fluentを用いた気液混相流計算にて、液滴がメディア上に着弾し濡れ広がる挙動や2滴の液滴同士が結合する挙動を解析するモデルを構築した。なお自由表面形状のモデル化にはVOF法を用いた。インク着弾濡れ広がり現象はまだ完全には解明されておらず、シミュレーション手法やモデル化方法についても盛んに検討が行われている状況である²⁾。現時点で実現象を精緻に再現することは困難であり、流体シミュレーションで表現できない部分は合わせ込みのパラメータを導入し、測定結果に合致するよう工夫を行っている。

そのモデルを基に、液量や着弾位置、着弾時間差などの因子による影響を解析した。特に時間差や着弾順序についてはゲルインクシミュレーションシステムv1では考慮できていなかったが、白筋の発生有無への影響が大きいことが分かり、今回新たに組み込んだ因子である。

着弾時間差の影響について補足する。2つの液滴の接触において、同一ノズルから連続射出された液滴同士である場合と、互いに異なるヘッドから射出された液滴同士である場合がある。後者の場合は時間差が大きいので先に着弾したKM-1のインクはワックス成分がゲル化し、後に着弾したインクと接触しても変形しなくなる。そのため本流体シミュレーションにおいて、前者の場合は先着弾液滴を流体として扱い、後者の場合は固体として扱うようにした。

2.4.2 楕円近似および予測式の作成

1液滴がメディアに着弾するケースでは、上から見た液滴の形状を円と見なせるため、特徴量は円の半径のみである。このときの予測式とは $r = F_r(V, \dots)$ で表されるような関数 F_r のことである。ここで r は円半径、 V は液量である。記載を省略した因子としては、例えば粘度や表面張力といったインク物性などがある。

2液滴がメディアに着弾し、互いに接触するケースでは、上から見た液滴の形状を楕円と見なせると仮定している。結合に伴う液滴の移動も考慮する必要があるため、特徴量は楕円の中心位置、長径、短径の3つとなる。先着弾の液滴の中心位置を例にとると、予測式とは $x_1 = F_{1x}(V_1, V_2, \delta t, d, \dots)$ で表される関数 F_{1x} のことである。ここで x は2つの液滴の中心を結ぶ方向に沿った液滴の中心位置、 V は液量、 δt は2つの液滴の着弾時間差、 d は2つの液滴の着弾中心間距離、添え字の1は先着弾の液滴を、添え字の2は後着弾の液滴を表す。記載を省略した因子としては、例えば粘度や表面張力といったインク物性などがある。長径、短径についても同様である。

予測式の作成とは、流体シミュレーションの結果を基に、上で挙げたような液滴形状の特徴量の変化を表す関数の具体形を決めることを指す。次に予測式の作成に当たって工夫した点を紹介する。

(1) 楕円による形状近似

楕円によって形状を表すため、流体シミュレーションの結果として出力される液相の分布情報から、独自のアルゴリズムにより楕円近似に必要な外殻の位置を高速に抽出する。外殻の位置の集合を近似するような楕円を最小二乗法に基づき求め、上から見た液滴の近似形状とする。

(2) 2液滴が結合する場合の形状

結合後の2液滴の形状を精度良く再現するため、1つの統合された楕円による近似と、2つの楕円による近似を使い分けるようにしている (Fig. 2)。

(3) 3液滴以上が結合する場合の形状

2.3で述べた通り、実用的な計算時間に収めることを理由に、3液滴以上が結合するケースについては、複数の2液滴間の結合の和として変形を計算したのち実測結果に合致するように補正処理を行う。

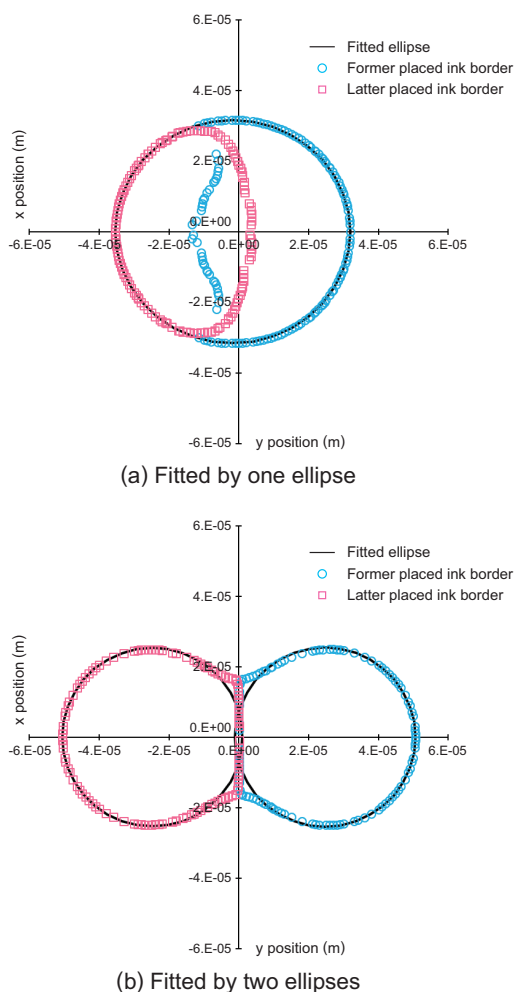


Fig. 2 Results of fluid simulation of two-droplet coalescence on media. Depending on its shape, the system selects one way of approximation; one integrated ellipse (a) or two ellipses (b).

2. 4. 3 画像シミュレーション

画像シミュレーション部の基本的な処理として、入力画素に対応するような液滴を配置し、お互いがメディア上を独立して広がったとした場合の重なりの有無によって液滴同士の接触を判定し、接触する場合には楕円形状の予測式に応じた液滴の変形処理を行う。

ゲルインクシミュレーションシステムv1からの改善点等は以下の通りである。

- (1) 従来からあるノズルやヘッドの取り付け誤差再現機能に加え、ノズルからの射出液量むらやメディアの蛇行および速度変動を模擬する機能を実装した。
- (2) 処理の効率化の工夫として、ゲルインクシミュレーションシステムv1においては、幾何的な処理や計算、例えば液滴が重なった箇所の面積を求める等の処理に際し、一度ビットマップ画像状の配列情報に変換してカウントする方式をとっていた。一方ゲルインクシミュレーションシステムv2においては、接触判定や重なり具合の算出などの幾何的な処理においては配列への変換を行わず、可能な限り解析的に処理することで、計算量の軽減を図っている。

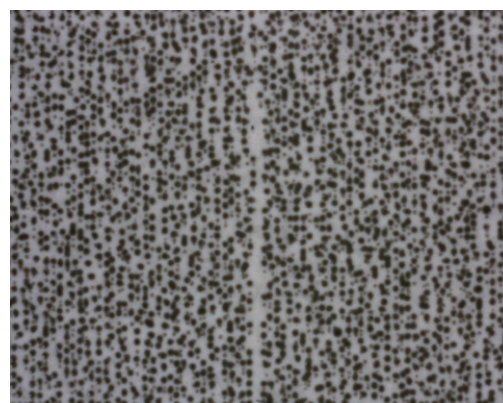
2. 5 結果

今回のアルゴリズムは2. 4. 2. (3) で述べた通り2液滴の結合をベースとした処理で3液滴以上の結合を予測しており、結合する液滴数が増加するほど実画像から乖離する可能性がある。

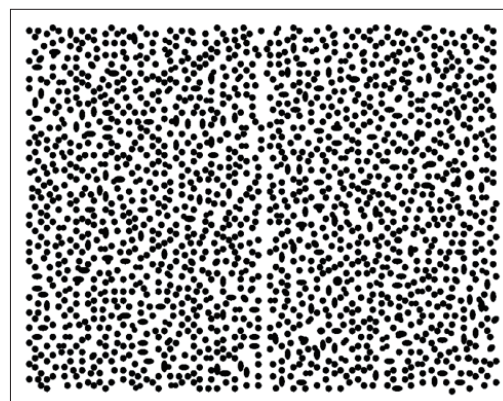
そのため結合する液滴数が比較的少ない低濃度領域に適したアルゴリズムであるが、高濃度画像も含めて紙上に印刷した実機出力画像との比較を行った。具体的には、画像濃度20%と80%の単色ハーフトーン画像を用いて比較検証を行った。

(1) 低濃度画像

シミュレーション画像と実測画像との比較結果をFig. 3に示す。シミュレーションで求めた画像は実測画像と比較して、白筋の現れ方が合致していると判断する。



(a) Printed image



(b) Simulated image

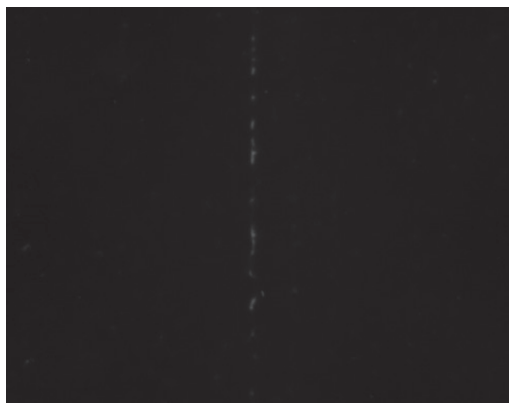
Fig. 3 Comparison between low-density printed image (input image density 20%) (a) and image predicted by gel ink simulation system version 2 (b).

Comparing simulation image to the actual printed image, it is confirmed the appearance of two white streaks match.

(2) 高濃度画像

シミュレーション画像と実測画像との比較結果をFig. 4に示す。実測画像では紙白部も暗くなっているためシミュレーション画像とは見た目の印象が大分異なるものの、白筋の現れ方としては両者の乖

離は小さく、白筋の発生有無の判断に使えるレベルと考えている。先述の通り今回のアルゴリズムは低濃度領域に適したものである。高濃度領域では多数の液滴同士で結合が発生し、楕円形状からの乖離が大きくなると考えられるため、更なる精度向上を図るには、基本単位として楕円を想定するのではなく、より高濃度領域の実態に即したアルゴリズムの検討が必要と考える。



(a) Printed image



(b) Simulated image

Fig. 4 Comparison between high-density printed image (input image density 80%) (a) and image predicted by gel ink simulation system version 2 (b).

Printed image and simulated one are not precisely the same. However, the simulation satisfies the level to predict the occurrence of white streak.

ゲルインクシミュレーションシステムの改良によって2.2で掲げた目標(1)~(3)について以下の結果を得た。

- (1) 着弾順序や時間差といった、白筋に影響の大きい因子を織り込んだ。低濃度領域においては実画像とよく一致する傾向であった。
- (2) 液量むら、蛇行などの機能を織り込んだ。今後これら機能をロバストな設計の検討へ活用していく。
- (3) 流体シミュレーションにより着弾直後の内部流動や温度変動が可視化できるようになった。表面張力や粘度等の物性を変化させたときの画像への影響を簡易的に検討できるようになった。

2.6 今後の課題

今後の課題としては以下のものが挙げられる。

- (1) より高濃度領域へと適用範囲を広げるようにアルゴリズムの改良を行う。
- (2) 今回は優先順位の低かった、熱変動など他の誤差因子を扱えるように機能拡張する。
- (3) 流体シミュレーションで扱える因子を拡充することにより、それらの因子の影響を推測できるようにし、インク設計やプロセス設計等、スクリーン設計以外の設計プロセスへの活用を図る。また今回は白筋の結果確認を行ったが、粒状性評価への有用性確認も進める。

3 まとめ

高画質でロバストな印刷を実現するために利用しているゲルインクシミュレーションシステムを、流体シミュレーションを基に液滴の形状変化を予測する方式に改良し、低濃度画像においては実画像とよく一致する結果が得られた。この改良により、インク粘度や着弾時間差といった液滴挙動に影響する因子、射出液量むらやメディア蛇行といった誤差因子をシミュレーション上で扱えるようにし、これらを考慮した設計検討の効率化を図った。また、今回実施した液滴挙動の流体シミュレーションについては、そのメカニズムの理解の一助としても継続して活用を進める。今後は高濃度領域への適用範囲拡張や、液滴挙動の現象解明やモデル化を進めることにより画像予測精度の向上を図る。

今後も本取り組みを発展させ、高画質でロバストな印刷のための技術に磨きをかけ、それぞれのお客様が望む画像の実現へ繋げる。

●参考文献

- 1) T. Mizutani, K. Hiramoto, M. Obata, T. Takabayashi, and T. Sugaya, Development of Image Quality and Reliability Enhancing Technology for 29 × 23 Size Digital Inkjet Press “KM-1”, KONICA MINOLTA Tech. Rep., Vol.14, pp.67-70 (2017)
- 2) M. Fukuoka and M. Kadonaga, “Numerical Simulation of Inkjet Droplet Spreading with the Consideration of the Relationship between Dynamic Contact Angle and Contact Line Velocity”, Journal of the Imaging Society of Japan, 59, pp. 96-102 (2020) [in Japanese]