
二成分現像剤挙動シミュレータの開発

Numerical Simulation of Carrier Behavior in a Two-component Developer Unit in Electrophotography

渡邊 孝宏*

Takahiro WATANABE

要 旨

並列計算により計算性能を向上させた二成分現像剤挙動シミュレータを開発した。本シミュレータは、複数台のコンピュータをネットワーク接続したコンピュータクラスタ上で稼動し、MPIおよびOpenMPによる並列計算が可能である。本シミュレータを利用することで、計算時間は従来の6分の1以下となり、現像ユニット設計での活用が期待される。

ABSTRACT

A new particle simulator to analyze the behavior of carrier beads around a magnet roll in a two-component developer unit in electrophotography has been developed. The simulator, which is based on Discrete Element Method, including the magnetic interaction force among particles in a magnetic field, adopts parallel processing with MPI and/or OpenMP. Parallel processing of the particle simulator with 16 processors reduces calculation time about 6 times shorter than that of uni-processing simulator. The simulator will be an excellent tool for design of two-component developer unit in electrophotography.

* 研究開発本部 基盤技術研究所

Core Technology Research Center, Research and Development Group

1. 背景と目的

電子写真システムの主要な現像方式のひとつである二成分現像方式では、二種類の粉体、トナーとキャリアからなる現像剤が用いられる。トナーは感光体表面に形成された静電潜像に付着することで可視画像を形成するもので、一方磁性粒子であるキャリアは磁気力による挙動制御が可能であり、可視画像を形成するためのトナーを、静電潜像が記録された感光体表面近傍へと搬送する役割を担っている。したがって、二成分現像方式において良好な画像形成を実現するためには、静電潜像パターンに正確にトナーを付着させることはもちろん、そのためのトナー供給に関わる磁場中におけるキャリア挙動も適切に制御することが重要である。

二成分現像方式の技術開発において、現像剤挙動を知ることは重要である。その有効な手段のひとつとして、計算機シミュレーションが考えられる。計算機シミュレーションを利用することで、観察困難な現像ユニット内における現像剤挙動と各種設計パラメータとの相関を、試作機を作ることなく、容易に把握できるようになると考えられ、開発期間の短縮や開発コストの低減を実現する非常に強力な開発ツールであると期待されている。すでに二成分現像方式を対象とした計算機シミュレーションの研究例はいくつか報告されており、キャリア挙動とトナー挙動を同時に解析した報告¹⁾やトナー挙動にのみ着目した静電潜像へのトナー付着を詳細に解析した事例²⁾などがある。しかし、従来の粉体挙動解析は膨大な計算時間を要するため、設計開発のツールとして活用される例は少ない。したがって、現像剤挙動シミュレーションを現像ユニットの設計・開発で活用できる実用的なものとするためには、計算時間を短縮することが必要となる。

計算時間を短縮する方法として、計算モデルや計算アルゴリズムを見直すことで計算コストを低減し計算時間を短縮する方法と、並列計算等により計算機のパフォーマンス向上を図ることで計算時間を短縮する方法の2つが考えられる。計算モデルについては、磁場中の磁性粒子挙動に関する過去の研究において、粒子をひとつの離散要素とした計算モデル（＝離散要素法）

での解析結果は現実の系と定量的なレベルでも一致することが示されている³⁾。一方、計算機のパフォーマンスを向上する方法のひとつである並列計算は、共有メモリ型計算機システムで用いられる並列計算手法であるOpenMPを利用した並列化（OpenMP並列とする）や、複数の計算機をネットワーク接続した分散メモリ型計算機システムではMessage Passing Interface（MPI）を用いる並列化（MPI並列とする）、さらにそれら2つの並列化手法を組み合わせた並列計算（Hybrid並列とする）を可能とするプログラミング環境が整いつつある。

本研究では、磁場中でのキャリア挙動を計算対象とし、計算モデルはそのままに、並列計算を可能とする現像剤挙動シミュレータを開発し、計算速度の向上を図る。

2. 技術

2-1 計算方法

2-1-1 現像剤挙動計算

これまでに、磁場中における磁性粒子の挙動解析を目的とした数値シミュレーションの研究は多数実施されており、その有効性が示されている³⁾。そこで、粒子挙動の計算モデルおよび計算アルゴリズムは従来手法をそのまま用いる。

従来の計算手法の概要を説明する。各粒子に作用する力として、粒子同士および粒子と壁面との接触による作用力と、磁場および粒子間の磁気相互作用による磁気力とを考える。接触による作用力は、バネ、ダッシュポット、および摩擦スライダによる計算モデル⁴⁾に基づいて計算する（Fig.1）。

粒子に作用する磁気力は、各粒子の磁化を粒子中心の磁気双極子モーメントとして近似する計算モデル⁵⁾を採用する。また、磁気相互作用の作用距離に対して、カットオフ距離を設けることで、磁気相互作用を考慮する粒子数を制限し、計算コストを低減した（Fig.2）。

このカットオフ距離は、後述する並列計算、特に領域分割法を適用する際にも重要となる。

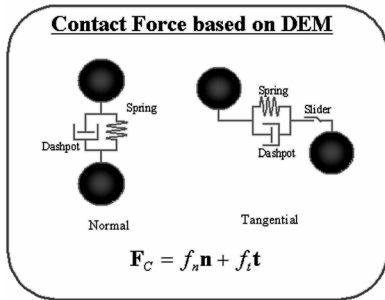


Fig.1 Contact force between two particles.

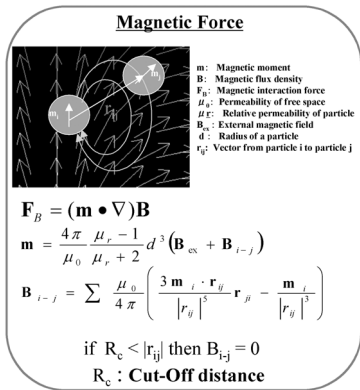


Fig.2 Magnetic interaction between particles.

2-1-2 並列計算

並列計算は、計算機システムに応じていくつかの手法が考えられる。ここでは、計算システムとして共有メモリ型計算機を複数台ネットワーク接続したコンピュータクラスタを用い、共有メモリ型計算機システムで用いるOpenMP並列、分散メモリ型計算機システムで用いるMPI並列、さらにそれらを組み合わせたHybrid並列での並列計算が可能な並列化プログラミングを実施した。

まず、MPI並列について説明する。MPIを用いた並列計算を実現する方法はいくつか考えられるが、ここでは計算領域を小領域に分割し、各小領域ごとに計算することで並列化する領域分割法を考える。以下、領域分割法によるMPI並列について述べる。いま、3台のコンピュータA、B、Cからなる分散メモリ型の計算機シ

ステムがあり、このシステムでのMPI並列を考える。このとき、計算領域全体を3つの小領域A、B、Cに分割し、それぞれに含まれる粒子計算を3台のコンピュータに分配することで、1台当たりの計算量は約3分の1なる (Fig.3)。一方、分割された各小領域の境界近傍にある粒子への作用力を計算する場合、隣接する小領域にある粒子との相互作用を考慮する必要がある。隣接する小領域にある粒子データは、着目している粒子の作用力を計算しているコンピュータとは異なるコンピュータに格納されているため、各コンピュータ間でMPIによる粒子データの送受信を行いつつ、それぞれの領域ごとの粒子挙動を計算しなければならない。例えば、磁気相互作用のカットオフ距離を設定している場合、Fig.3において、Domain Bに含まれる粒子でDomain Aとの境界からの距離が磁気相互作用のカットオフ距離未満の粒子については、Domain Aにある粒子との相互作用を考慮するため、Domain Bの粒子データはComputer BからComputer Aへと送信される。Computer Aでは、送信された粒子データを用いて、割り当てられた領域内の粒子挙動を計算する。このように領域分割によるMPI並列計算は、計算領域全体をいくつかの小領域に分割し、それぞれの小領域ごとで計算を実施することでコンピュータ1台当たりの計算量を低減し、領域分割により生じた不足データについては、それぞれのコンピュータ間の通信によって不足データを補いながら領域全体の計算を実施している。この方法では、通信時間が十分小さければ、分割数に応じた計算時間の短縮が期待できる。

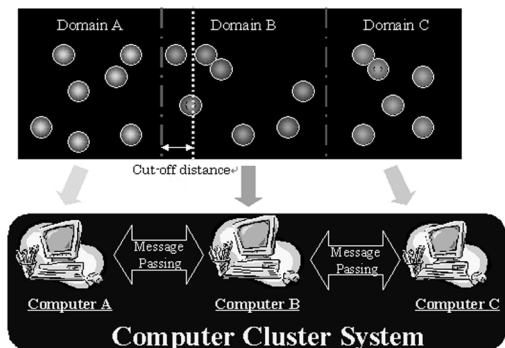


Fig.3 Parallel processing with domain decomposition on a computer cluster system.

次にOpenMP並列について述べる。OpenMPは共有メモリ型の並列計算機における並列計算実行のための業界標準規格のAPIで、既存のプログラムに対してOpenMP指示文を挿入することで並列化が可能である。前述のMPI並列とは異なり、領域分割など追加の処理を必要としない。

Hybrid並列は、MPI並列とOpenMP並列を組み合わせたもので、ここでは、領域分割による小領域の計算部分をOpenMP並列化することで、Hybrid並列計算を実現している。

2-2 計算結果

2-2-1 平板上での現像剤挙動計算

開発した現像剤挙動シミュレータの基本機能確認のため、平板上での現像剤挙動計算を実施した。直径50～60 μm の球形磁性粒子45,499個を平板上に配置し、その下に磁石を配置した構成を考える。このとき、磁場中において現像剤が形成する特徴的な形状である磁気ブラシ形状が本シミュレータでも同じように形成することを確認した (Fig.4)。

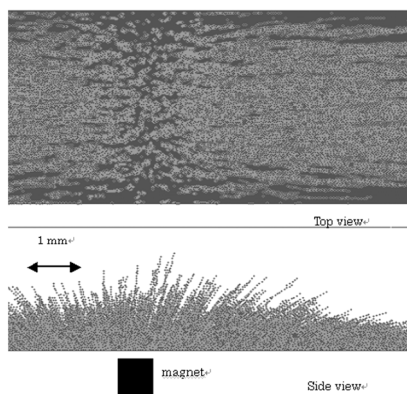


Fig.4 Shape of magnetic brush on a plate (Simulation result).

2-2-2 並列計算における計算速度

CPUを2個搭載したPC8台をギガビットイーサネットに接続した8ノード16CPUのPCクラスタを用いて、現像剤挙動シミュレータの計算速度を計測した。

現像剤に相当する直径55 μm の磁性粒子80,000個を直径25mmのローラの周りにランダムに配置した状態 (Fig.5) を初期状態とし、現像ローラに相当する磁場データを与える。この条件でローラを回転させたときの粒子挙動計算を実施したときの計算時間を計測した。この計算条件は、現像ユニット内の現像剤挙動に近い状態を再現するもので、実際に設計開発で利用する場合の計算速度に相当すると思われる。なお、計算速度は計算時間より1CPUでの計算時間を単位とした相対速度として算出している。

並列計算は、並列計算1：ノード間通信のみを利用したMPI並列計算、並列計算2：ノード間通信とノード内通信が混在したMPI並列計算、並列計算3：MPIとOpenMPによるHybrid並列計算、の3つに分類できる。それぞれの並列計算での計算時間*をFig.6に示した。

いずれの並列計算パターンにおいても、計算に用いたCPU数に比例して計算速度は増加している。しかし、計算速度向上の程度は並列計算パターンにより差が見られる。MPIとOpenMPを組み合わせた並列計算3の条件では、最大6倍以上の計算速度の向上が見られるが、MPIのみを用いた並列計算2の条件では、最大5倍弱の速度向上にとどまっている。このことから、MPIとOpenMPを組み合わせたHybrid並列は計算速度の面で優位性があることが分かる。

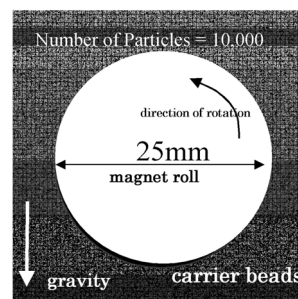


Fig.5 initial state of simulation model for performance test.

* 並列計算1の16CPUと並列計算3の2CPUでの計算速度データは存在しない。

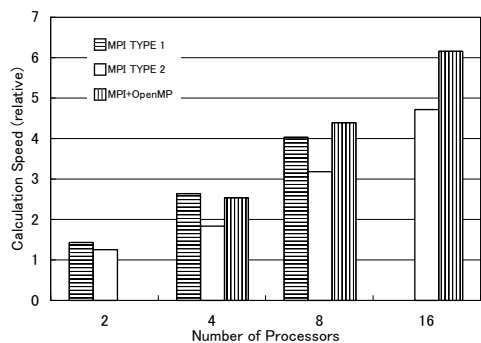


Fig.6 Relationship between number of processors and calculation speed of parallel processing.

Hybrid並列計算の優位性は、計算時間と通信時間との関係から説明できる。MPI並列ではノード数の増加とともに計算時間は短縮されるが通信時間は増加する傾向が見られる (Fig.7)。領域分割によるMPI並列では、ノード数は領域の分割数と一致しており、分割数の増加に伴う通信データの増加が通信時間の増加の原因と考えられる。ノード数8のとき、全体の計算時間に対する通信時間の割合が10%を越えており、計算速度の向上を図る上で、通信時間は無視できないことが分かる。したがって、より少ないノード数での計算が可能なHybrid並列の方がMPI並列よりも計算速度の面で優位であると考えられる。

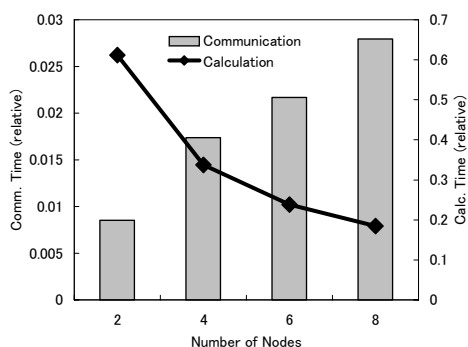


Fig.7 Relationship among calculation time, communication time and number of nodes.

2-3 考察

現像剤挙動シミュレータの並列化により、従来の6倍以上の高速化を達成した。これは、1週間の計算時間を

要した計算を1日程度で実行できることを示しており、実用上有効であると考えられる。

しかしながら並列計算に16CPUを用いていることから、その並列化効率は40%弱であり、並列化効率の観点からはまだまだ改善の余地があると考えられる。特に2CPUでの並列計算での速度向上がわずかであることは、並列化による通信以外のオーバーヘッドが大きいことを示しており、この部分のプログラムの見直しが必要と思われる。

計算速度向上の面で、MPI並列よりもOpenMP並列と組み合わせたHybrid並列でより効果が高いことがわかった。CPUのマルチコア化が進んでいる現状を考えれば、今後もHybrid並列を進めていって間違いないと判断できる。

今後、現像剤挙動シミュレータの高速化が進めば、設計・開発の分野での利用が広がり、新たなニーズも生まれてくるであろう。それによって、現像剤挙動解析にも新たな展開のあることが期待される。

3. 成果

現像剤挙動シミュレータを並列化することにより従来の6倍以上の計算速度向上を達成した。これは、1週間の計算時間を1日に短縮できるに相当し、現像ユニットの設計開発で活用する上で大きく前進した。

現像剤挙動シミュレータの並列化において、MPI並列とOpenMP並列とを組み合わせたHybrid並列が計算速度向上の面で優位であることを確認し、今後の並列化プログラム開発の方向性を明確にした。

4. 今後の展開

並列化した現像剤挙動シミュレータには、まだまだ改良の余地が残っている。計算速度の向上だけでなく、複雑な現像ユニット形状への対応など、機能的な面でも追加すべきことは多い。設計開発での活用のため、並列計算の最適化によるさらなる大規模化・高速化を達成する一方で、実用に即した機能向上を目指した開発を進める。

参考文献

- 1) 久保田哲行, 井上博之, 飯野良雄, 日高重助 : 粒子法による 2 成分磁気ブラシ現像方式における現像剤挙動の数値解析, 第 84 回日本画像学会研究討論会予稿集, (1999), p177.
- 2) 岸由美子, 門永雅史, 渡辺好夫 : 二成分現像トナー流動シミュレーション, JapanHardcopy'99 論文集, (2000), p125.
- 3) N. Nakayama, H. Kawamoto, S. Yamada and A. Sasakawa : IS & T's NIP 18 Proceedings, 742-747 (2002)
- 4) P. A. Cundall and O. D. L. Strack : Geotechnique, 29(1), 47-65 (1979)
- 5) R. S. Pranjpe and H. G. Elrod : Stability of Chains of Permeable Spherical Beads, J. Appl. Phys., 60,418 (1986).