

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

博士論文審査結果報告書

論 文 題 目

Study on Quantum-Inspired Optimization Approaches for Flow Shop Scheduling Problems

申 請 者
Xin WEI

情報生産システム工学専攻
生産管理情報システム研究

2012 年 9 月

進化型アルゴリズム (Evolutionary Algorithm: EA) は、組み合わせ最適化問題に対するアプローチとして広く利用されている。そして EA の新しい手法として、量子的進化型アルゴリズム (Quantum-inspired Evolutionary Algorithm: QEA) が提案されている。QEA は、量子ビットの重ね合わせメカニズムに着想を得てそれを模擬し、量子ビット列 (0-1 の確率情報列) 表現を組み合わせ問題の個体表現 (導出する解の表現) とし、その変化を進化の過程として利用した手法である。個体を量子ビット列として表現することにより、従来の EA で利用する個体表現に比べ、多様な近傍解を内包するため、少ない個体数で収束性と多様性をあわせ持つ進化の過程を実現している。そのため、準最適解を探索する計算速度の向上が期待されている手法である。そこで、本論文では、生産プロセスのフローショップスケジューリング問題 (Flow Shop Scheduling Problem: FSSP) を対象とし、QEA の適用方法を提案し効果を検証することを目的としている。

フローショップ型の生産方式とは、複数の製品を同一の生産ライン (装置の並び) で生産を行う多くの製造業で利用されている生産方式の一つである。与えられたジョブ群に対応する製品を逐次装置の並びに従って流していくものであり、FSSP は、このようなジョブ群の投入順番を決定する問題である。FSSP は NP 困難な組合せ最適化問題であり、その解法として準最適解を得る EA の手法が多く利用されているが、規模が大きい実用的な問題に対して計算速度の問題が存在する。本論文では、FSSP の中から各装置においてジョブの追い越しを許さない順列 FSSP に対して、単一目的関数および多目的関数の最適化手法として QEA を応用した手法を提案している。そして、実生産プロセスへの適用として、半導体製造の生産プロセス例をとりあげ、1 製品を生産するために同一装置を複数回利用するリエントラント FSSP の多目的最適化問題に対する適用方法を提案し、その実用性を評価している。

第 1 章「Introduction」では、本研究の背景・動機づけ、本論文で扱う問題の概要、提案する手法の概要が述べられている。そして、第 2 章以降の本論文の内容を要約している。

第 2 章「MMQEA for Permutation FSSP with Makespan Criterion」では、順列 FSSP に対してメイクスパン (最初に投入されたジョブの開始時刻から最後に投入されたジョブの終了時刻までの全生産に要する時間間隔) の最小化を目的とし、単一目的関数の最適化手法として QEA を拡張した MMQEA (Multi-uppdate Mode Quantum Evolutionary Algorithm) を提案している。QEA では、量子ビット列によって対象問題の解を表現し、導出された解が現在までに導出されている最良解より優れている場合のみ、その量子ビット列を得られた最良解に近づけるように更新することによって進化の過程を実現しているため、局所最適解に陥りやすいという欠点を有している。そこで、MMQEA では、一つの個体に 2 つの量子ビット列を持たせ、これらを同時に進化させ、最良解より優れた解が得られなかった場合には探索範囲

を拡大させる進化の過程を導入している。このような量子ビット列の更新方法は、2つの更新モード（ α 更新モード、 β 更新モード）により実現され、これらの更新モードが、2つの量子ビット列の進化情報を相互に伝えることによって、解の多様性を持たせ、かつ QEA の持つ収束性も保持している。MMQEA の評価のために、OR-library のベンチマーク問題 TA20×10（20 ジョブ 10 装置）から TA50×20 に対して、GA および QEA の結果と比較している。各手法は評価関数の同一の評価回数（メイクスパンの計算回数）を終了条件として解を導出し、メイクスパンを GA に対して 3.3%～8.1%、QEA に対して 1.8%～2.2%低減している。更に MMQEA において個体（2 個の量子ビット列）数 1 個の場合と QEA の個体（1 個の量子ビット列）数 2 個の場合を比較した結果、メイクスパンを 0.6%～2.8%低減していることが確認され、個体数が少ない場合でも良好な結果が得られていることを示している。

第 3 章「PQEA for Multi-Objective Permutation FSSP」では、順列 FSSP に対してメイクスパンと最大納期遅延時間（各ジョブに指定された納期に対する完了時刻の遅延時間の最大値）の最小化を目的とする多目的関数の最適化手法として、QEA を拡張した PQEA(Parallel Quantum Evolutionary Algorithm)を提案している。多目的最適化問題を扱う EA として、NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II)、MOGLS(Multi Objective Genetic Local Search)等が提案されているが、それぞれ、計算速度およびパレート解分布一様性の問題、安定性の問題が存在する。PQEA は、多目的最適化問題を各評価関数の加重和による複数の単一目的最適化問題に分解しそれらを複数のグループに分割し、並列的に、各グループでは一つの量子ビット列の個体に対して評価関数を適時切り替え進化させ、各々導出した解で共通のパレート解を更新させる手法である。これにより、パレート解導出方法の一様性、パレート解更新方法の簡略化を実現し、NSGA-II、MOGLS の問題を解決している。PQEA の評価のために、OR-library のベンチマーク問題 20×20（20 ジョブ 20 装置）から 80×20 の問題に対して、NSGA-II および MOGLS の結果と比較している。各手法は同一計算時間を終了条件として解を導出し、距離指標（参照最適解からの距離）を算出している。距離指標の平均値を NSGA-II に対して 9.6%～18.3%、MOGLS に対して 9.2%～22.1%低減し、最良値を NSGA-II に対して 7.6%～29.5%、MOGLS に対して 24.2%～35.5%低減している。また、標準偏差を最大 56.1%低減し、安定性も優れていることを示している。

第 4 章「Hybridization of ANS for Multi-Objective Permutation FSSP」では、第 3 章で提案した手法を更に改善するために、局所探索手法として ANS(Alternated Neighborhood Search)を提案している。ANS では MOINS(Multi Objective INSERT)と MOEXC(Multi Objective EXchange)という 2 つの局所探索方法を提案している。これらはメイクスパンおよび最大納期遅延時間が小さくなる可能性がない部分を探索しない方法であり、これ

ら2つの局所探索方法を交互に利用することにより探索の方向性を明確にしている点が特徴である。ANSの機能を評価するために、第3章で用いたベンチマーク問題を利用し、同一方法で距離指標についてPQEAとPQEAにANSを導入した手法と比較した結果、平均値を17.5%~42.2%低減し、標準偏差を最大79.5%低減し、安定性も優れていることを示している。しかしながら、ANSをNSGA-IIに導入した場合、更により結果が導出される場合があることが示されている。これは、PQEAでは局所探索の後、量子ビット列の更新を行っていないため、局所探索の結果が進化の過程に反映していないためである。量子ビット列への反映方法については今後の課題として残されている。

第5章「PQEA with Q-to-J Method for Multi-Objective Reentrant FSSP」では、半導体製造の実生産プロセスに対するPQEAの適用について説明し、その実用性を評価している。本適用事例は、同一製造工程を複数回利用して一つの製品を製造するリエントラントFSSPであり、各工程では複数の装置が利用可能であり、工程によってはバッチ処理(複数のジョブを同時に処理)可能な工程も存在し、順列FSSPに比べ複雑な生産プロセスである。そのため、リエントラント工程に対するジョブの投入順序を取り入れたQ-to-J(Quantum-to-Job)という個体表現方法を提案し、その導入効果をシミュレーションによって確認している。従来、本適用事例では、最早納期優先(Earliest Due Date: EDD)ルールを用いてフォワードスケジューリングを行い、単一解を導出していた。それに対して、メイクスパンと最大納期遅延時間の最小化を行うPQEAを適用し、従来の解より優れている8つのパレート解を導出している。また、これらの解はNSGA-IIで同一計算時間によって得られた解をすべてパレート支配していることを確認している。以上のことから、リエントラントFSSPに対しても実用的な時間でパレート解を導出可能なことが確認され、実用的な手法であることが示されている。

第6章「Conclusion」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の研究課題について論じている。

以上を要するに、本論文は、量子的進化型アルゴリズム(QEA)を応用した新たな手法を提案し、フローショップスケジューリング問題(FSSP)への適用を通して、その有効性および実用性を示している。これらは、生産スケジューリング問題に対するQEAの新たな適用可能性を示唆しており、製造業におけるQEA応用の有効性・実用性を示した点で評価できる。また学術的にも進化型アルゴリズム(EA)の技術の進展に大きく寄与するものである。よって本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2012年8月21日

主査	早稲田大学	教授	博士(工学)(早稲田大学)	藤村 茂
	早稲田大学	教授	工学博士(早稲田大学)	吉江 修
	早稲田大学	教授	工学博士(東京工業大学)	村田 智洋