

平成 16 年 2 月 10 日

琉球大学大学院
理工学研究科長 殿

論文審査委員

主査 氏 名 和田 知久 (印)

副査 氏 名 玉城 史朗 (印)

副査 氏 名 宮城 隼夫 (印)

学位 (博士) 論文審査及び最終試験の終了報告書

学位 (博士) の申請に対し、学位論文の審査及び最終試験を終了したので、下記のとおり報告します。

記

申請者	専攻名 総合知能工学専攻 氏名 赤嶺 有平 学籍番号 [REDACTED]		
指導教官名	和田 知久		
成績評価	学位論文 (合格) 不合格	最終試験 (合格) 不合格	
論文題目	複雑系に対するセルオートマトン計算環境の構築とその応用 研究		
審査要旨 (2000 字以内)			
<p>従来の計算機シミュレーションモデルの中心は、微分方程式を基礎とするモデルであったが、こうした手法で解明することが難しいものとして、複雑現象が最近注目されている。複雑現象の例としては、流体の乱流などの複雑な流れや経済における景気や経済構造の変動などがある。これらの現象は、複雑すぎて微分方程式を解くことができないか、あるいは微分方程式としてその振る舞いを定義することができない。セルラ・オートマトン (CA) 法は、局所的な相互作用 (近傍則) を定義することで複雑現象を不規則性も含めて再現することができるため、流体の乱流、交通渋滞、自然災害など従来の微分方程式を基礎とするモデルでは解析の難しかった現象も解明</p>			

(次頁へ続く)

論文要旨

できるとされている。本研究では、CA モデルの設計・シミュレーションを効率的に行うための総合的な実験環境の構築を行っている。

開発システムの主な特長は、以下の3点である。

- ・ CA 近傍側をセル間を移動するモデルを含め簡潔に記述できる
- ・ 近傍側設計を効率化するインタプリタ型シミュレータ
- ・ 拡張 SIMD(Single Instruction Multiple Data)命令を用いた並列化コンパイラ

本研究では、CA の近傍側を記述するための言語の設計を行っている。記述言語は、対象とする CA モデルを明らかにした上で設計されており、非同期的 CA を除くほとんど全ての CA モデルの近傍側を記述可能である。同言語は、シミュレータを SIMD 命令で並列化することを前提に設計されており、言語仕様も並列性を考慮したものとなっている。一方で、記述性を高めるための工夫もなされており、CA モデルの記述において十分実用的な設計がなされている。

開発システムは、設計用シミュレータと高速化シミュレータの二種類を実装している。CA モデルの近傍側の設計は、「対象となる現象もしくは事象から近傍側を仮定し、それを基にシミュレーションを行い、その結果が意図したものであるかどうかの検証を行う」というサイクルによって行われる。そのため、近傍側の変更と検証を頻繁に行う必要があるが、設計用シミュレータはインタプリタの形式をとることで、このような試行錯誤を効率的に行う仕組みを提供している。また、CA は近傍側設計そのものが試行錯誤的であるため言語記述における誤りを見つけにくい、本研究では、静的に検出できる誤りの種類を増やすことで近傍側の記述効率を高めている。

交通シミュレータのような、物体の移動現象を CA でモデル化するとき、「移動」の概念を CA の近傍側関数として記述すると非常に複雑化する。具体的には、移動するエージェントが存在するセルと移動先セルのそれぞれの視点から近傍側を定義しなければならない。開発システムは、より直感的に「エージェントは右隣のセルに移動する」といった記述を可能にしている。

CA モデルを現象に適用し、現象の解析を進める段階では、シミュレーションの速度が問題となる。開発システムは、拡張 SIMD 命令を用いて並列化を行う並列化コンパイラを実装している。拡張 SIMD 命令は、一般的なパーソナルコンピュータに採用されているため、普及率が非常に高い。コンパイラは、前述の言語によって記述された近傍側をもとに、高速な CA シミュレータを生成する。拡張 SIMD 命令を用いる際は、演算対象となるデータをレジスタにロードする処理の効率化が重要となるが、本コンパイラは必要なデータをあらかじめ並べ替えておくことでロード処理を効率化している。IF 文などの条件分岐文は、通常は条件分岐命令を用いてコード化するが、SIMD 命令を用いる場合は分岐命令を使用することはできない。それに対して、本コンパイラは、条件分岐文を比較演算に変換することで、条件分岐文に対しても SIMD 命令を用いてコード化することが可能になっている。本研究においては、C 言語を用いて作成した CA シミュレータと開発システムによるシミュレータの実行速度の比較を行っている。実験の結果は、開発システムを用いたシミュレータが数倍から数十倍高速化されることを示しており、十分実用的な速度が得られていると考えられる。さらに、本手法は他の SIMD アーキテクチャへも比較的容易に実装可能である。現在のプロセッサは、SIMD 命令による並列演算をより多く提供する傾向にあり、画像処理プロセッサに関しては画像処理に特化した実装からより単純な SIMD アーキテクチャへの傾倒が見られるため、今後、開発システムによるシミュレータがさらに高速化されることが期待できる。

以上のように、本論文は工学的に価値のある新しい研究成果が示されており、また、上記の者は専門分野および関連分野の十分な知識を有することも確認できたので、学位論文および最終試験とも合格とする。

赤嶺有平

(様式第3号)

論 文 要 旨

論 文 題 目

複雑系に対するセルオートマトン計算環境の開発とその応用

従来の計算機シミュレーションモデルの中心は、微分方程式を基礎とするモデルであったが、こうした手法で解明することが難しいものとして、複雑現象が最近注目されている。複雑現象の例としては、流体の乱流などの複雑な流れや経済における景気や経済構造の変動などがある。これらの現象は、複雑すぎて微分方程式を解くことができないか、あるいは微分方程式としてその振る舞いを定義することができない。セルラ・オートマトン(以下、CA と記す)法は、局所的な相互作用を定義することで複雑現象を不規則性も含めて再現することができるため、流体の乱流、交通渋滞、自然災害など従来の微分方程式を基礎とするモデルでは解析の難しかった現象も解明できるとされている。そのため、これまでも数多くの研究がなされており、様々な CA モデルが提案されてきた。しかし、その実験環境に関する研究は非常に少なく、標準的といえるような実験支援システムは存在しない。本研究の目的は、CA 法の研究そのものを支援するための総合的な実験環境の構築を行うことである。

CA モデルの近傍則の設計は、「対象となる現象もしくは事象から近傍則を仮定し、それを基にシミュレーションを行い、その結果が意図したものであるかどうかの検証を行う」というサイクルによって行われる。したがって、シミュレーションの実行速度よりも近傍側の変更と小規模なシミュレーションの結果が素早く確認できることが重要である。

本研究では、シミュレータにインタプリタを採用することで設計効率の高い計算環境の構築を行った。提案システムの特長は、以下の3点である。

- ・ 近傍側を専用の言語で記述するため汎用性が高い
- ・ 近傍側の記述中の論理的な誤りの可能性を指摘する
- ・ 近傍側の変更が即座にシミュレーション結果に反映される

近傍側の記述に用いる言語は、本研究にて新たに設計した言語で、CA の近傍側を容易に記述できるように設計した。近傍側の論理的な誤りの検出は、CA の状態値が整数型であるといった CA の性質を利用して行っている。また、本システムは実行速度よりもレスポンスを優先するためインタプリタ方式を用いた。

本論文では、提案システムの言語仕様、検出可能な誤りの種類及び実例、提案システムを用いて実装可能な CA モデルの例を示す。道路交通シミュレータモデルに関しては、モデルの実装とモデルを用いたシミュレーション実験を行う際の提案システムの利便性について述べる。

CA モデルを実際の工学問題に応用する段階では、大規模なシミュレーションを行うために高速

なシミュレータが必要となる。本研究では、Pentium プロセッサシリーズに搭載された SIMD 型演算命令セットである MMX テクノロジーを用いて並列化を行う手法を提案した。Pentium プロセッサシリーズは一般的なパーソナルコンピュータに採用されているため、普及率が非常に高くかつローコストである。また、プロセッサを特定することにより、そのプロセッサに特有の最適化も可能となるため、MMX テクノロジーによる並列化と、このような最適化技術を組み合わせて、ハードウェアのもつポテンシャルを最大限に引き出すことができる。

本研究では、提案した手法を用いて高速化された CA シミュレータを生成するコンパイラの開発を行った。本コンパイラは、前述の言語によって記述された近傍則をもとに、高速な CA シミュレータを生成する。また、CA シミュレーションの部分(局所近傍則を処理するコード)は全て SIMD 命令を用いてコード化する。IF 文などの条件分岐文は、C などの一般的なコンパイラは条件分岐命令を用いてコード化するが、SIMD 命令を用いる場合は分岐命令を使用することはできない。それに対して、本コンパイラは、条件分岐文を比較演算に変換することで、条件分岐文を SIMD 命令を用いてコード化することが可能になっている。

本コンパイラを用いて生成したライフゲーム、HPP 両モデルの CA シミュレータの性能評価を行った。その結果、C 言語を用いて作成したシミュレータと比較して、ライフゲームで 6.5 倍、HPP モデルで 4.5 倍高速化されることが示された。

提案システムは、ユーザが状況に応じて 2 種類のシミュレータを選択できる。そのため、インタプリタ型シミュレータを用いて効率的に CA モデルの設計を行い、コンパイラ型シミュレータで高速にシミュレーションを実行する、といった使い方が可能である。また、CA モデルの設計、シミュレーションを行う際に必要と思われるほとんどの機能を実装したつもりである。したがって、CA 法を利用した多くの研究が効率化されることが期待できる。

氏名 赤嶺 有平