

論文の内容の要旨

論文題目	直接的分岐アルゴリズムによる決定性プッシュダウン変換器の等価性判定
学位申請者	清野 和司

決定性プッシュダウンオートマトン (dpda) の等価性判定問題は、任意のクラスに対して可解であることが、Sénizergues により Theoretical Computer Science 誌 (vol.251, pp.1-166, 2001年) において発表され、2002年に、この発表論文に対して、理論計算機科学の分野における最も栄誉ある賞のひとつとして知られるゲーデル賞が与えられている。しかしながら、この論文を含め、発表されている dpda の等価性判定アルゴリズムの多くは、非常に複雑な方式であり、その可解性の証明も非常に難解なものとなっている。

一方、dpda に更に出力機構を付与した決定性プッシュダウン変換器 (dpdt) に対する等価性判定問題についても、dpda の等価性判定問題の研究に並行して、幾つかの結果が得られている。dpdt は、受理・非受理のみを判定する dpda に比較して、より実用的な意味を持ち重要であるが、その等価性判定は一般に更に複雑となる。

dpda, dpdt の等価性判定は、オートマトンや形式文法を基礎とするシステムにおける学習過程において主要な役割を果たすことができる。今後の理論計算機科学の分野において、学習可能性の検討や、適応的学習機能の実現は、更に重要性を増してくることが予想される。

従って、単純化され改善しやすく、かつ、単純で効率の良い dpda の等価性判定アルゴリズムの実現は非常に重要である。そこで、申請者らは、長年にわたり、直接的分岐アルゴリズムと名付けた、他の方式と比較して非常に直接的かつ単純で、その正当性の証明も明解な等価性判定手法を提唱してきた。また、この手法は、時間計算量に関する検討なども直接的に見通しが良く、dpda に関連する他の各種問題に対する適用可能性にも優れている。

このような背景の下において、本論文では、直接的分岐アルゴリズムによる dpdt の等価性判定に関して、次の 2 つの面から検討を行った。ひとつは、本手法を用いた dpdt の等価性判定を可解とする十分条件の緩和に関する検討であり、もうひとつは、最大時間計算量の改善に関する検討である。

前者の成果としては、Weak Segmental Property と名付けた性質を持つ ε -推移を許した dpda 対に、ある条件のもとで出力機構を付与した dpdt 対に対しても等価性判定が可解であることを示した。ここで対象とする dpdt 対は、一方が実時間空スタック受理式である任意の dpdt 対を含んでいる。この結果により、直接的分岐アルゴリズムによる dpdt の等価性判定を可解とする十分条件を従来より大きく緩和した。現時点において、ここで提唱する dpdt 対を真に包含する等価性判定可能なクラス対は存在しない。

後者の成果については、スタック記号が単一で、かつ、 ε -推移を許さない、実時間空スタック受理式決定性限定ワンカウンターオートマトン同士に対して出力機構を付与した、実時間空スタック受理式決定性限定ワンカウンター変換器同士の等価性判定が多項式時間で解決できることを示した。そのアルゴリズムとしては、前者と同様のアルゴリズムを、対象 dpdt に特化して単純化したものであるが、具体的に、詳細な計算量解析とその証明を行っている。この結果は、2007年に Bastien らにより発表された、出力を付与した単純決定性言語同士の多項式時間等価性判定に関する結果とも比較不能であり、現時点において、これを真に包含する結果は存在しない。

本論文は、5つの章で構成されている。

第1章は序章であり、研究の背景、位置づけ、目的、従来の研究状況、本研究の基礎的概念、および、本論文の章構成について述べている。

第2章では、本論文で共通的に使用する、用語の定義、および、記法について述べている。

第3章と第4章が本論文の主要な内容となり、上記における前者の成果を第3章に、後者の成果を第4章で詳細にまとめている。なお、第3章、第4章ともに、その等価性判定アルゴリズムの単純さや効率性を直感的に理解し易くするために、実際の dpdt に対する等価性判定の基本例題を示している。

最後の第5章では、本論文の成果を総括し、今後の展望を述べている。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名	清野 和司
審査委員主査	富田 悦次
委員	高橋 治久
委員	尾関 和彦
委員	西野 哲朗
委員	小林 聡
委員	
委員	

決定性プッシュダウンオートマトン (dpda) の等価性判定問題は、任意のクラスに対して可解であることが、SénizerguesによりTheoretical Computer Science誌 (vol.251, pp.1-166, 2001年) において発表された。これは、言語理論の分野において非常に大きな成果であり、2002年に、この発表論文に対して、理論計算機科学の分野における最も荣誉ある賞のひとつとして知られるゲーデル賞が与えられている。論文発表から受賞までの期間も異例の早さであり、このことからdpdaの等価性判定問題の重要性を認識することができる。

dpdaの等価性判定は、オートマトンや形式文法を基礎とするシステムにおける学習過程において主要な役割を果たすことができる。今後の理論計算機科学の分野において、学習可能性の検討や、適応的学習機能の実現は、更に重要性を増してくることが予想される。従って、単純化され改善しやすく、かつ、単純で効率の良いdpdaの等価性判定アルゴリズムの実現は非常に重要である。しかしながら、上記のゲーデル賞受賞論文を含め、発表されているdpdaの等価性判定アルゴリズムの多くは、非常に複雑な方式であり、その可解性の証明も非常に難解なものとなっている。

申請者らは、長年にわたり、直接的分岐アルゴリズムと名付けた等価性判定手法を提唱している。この直接的分岐アルゴリズムによるdpdaの等価性判定手法は、他の方式と比較して、非常に直接的かつ単純で、その正当性の証明も明解である。また、時間計算量に関する検討なども直接的に見通しが良く、更に、dpdaに関連する他の各種問題に対する適用可能性にも優れているという評価を受けている。

一方、dpdaに更に出力機構を付与した決定性プッシュダウン変換器 (dpdt) に対する等価性判定問題についても、dpdaの等価性判定問題の研究に並行して、幾つかの結果が得られている。dpdtは、受理・非受理のみを判定するdpdaに比較して、より実用的な意味を持ち重要であるが、その等価性判定は一般に非常に複雑となる。しかし、上記の直接的分岐アルゴリズムを用いた手法では、その拡張の容易性の効果により、dpdaの等価性判定とほぼ同レベルの複雑さでdpdtの等価性判定を行うことができる。

ところで、これまで、dpdtの等価性判定の可解性に関する結果の殆どは、いわば原理的な可解性証明を達成しているという段階であり、極く簡単な問題に対してさえ、

その可解性を示す具体的例題を与える,あるいは,何らかの具体的計算量評価を与えることも困難な状況であった.但し,2007年に,Bastienらにより,出力を付与した単純決定性言語同士の多項式時間等価性判定の可解性が示されている.このように,最近では,dpdtの等価性判定アルゴリズムの効率向上に関する研究が注目されつつある.

このような背景の下において,本論文では,直接的分岐アルゴリズムによるdpdtの等価性判定手法の更なる改善について,以下の2つの面から検討を行っている.ひとつは,本手法を用いたdpdtの等価性判定を可解とする十分条件の緩和に関する検討であり,もうひとつは,最大時間計算量の改善に関する検討である.

前者の成果としては,第3章において,Weak Segmental Propertyと名付けた性質を持つ ϵ -推移を許したdpda対に,ある条件のもとで出力機構を付与したdpdt対に対しても等価性判定が可解であることを示している.この出力条件は,片方のdpdtにおける任意の ϵ -推移に対する出力長が,ある有限の定数以下であることを保証するもの,即ち,入力無しで出力が無限に出続けることを抑制するものであり,dpdtの動作として極めて自然な条件と考えられる.更に,ここで対象とするdpdt対は,一方が実時間空スタック受理式である任意のdpdt対を含んでいる.この結果により,直接的分岐アルゴリズムによるdpdtの等価性判定を可解とする十分条件を従来より大きく緩和しており,現時点において,ここで提唱されているdpdt対を真に包含する等価性判定可能なクラス対は存在しない.この結果は,今後の ϵ -推移を許したdpdtの等価性判定問題における,更なるクラス拡張において有効に活用できるものと考えられる.

後者の成果については,第4章において,スタック記号が単一で,かつ, ϵ -推移を許さない,実時間空スタック受理式決定性限定ワンカウンターオートマトン同士に対して出力機構を付与した,実時間空スタック受理式決定性限定ワンカウンター変換器同士の等価性判定が多項式時間で解決できることが示されている.これは,直接的分岐アルゴリズムの有効性を示す,ひとつの典型的な成果と言える.そのアルゴリズムとしては,前者と同様のアルゴリズムを,対象dpdtに特化して単純化したものであるが,具体的に,詳細な計算量解析とその証明を行っている.この結果は,先に記した,Bastienらによる,出力を付与した単純決定性言語同士の多項式時間等価性判定に関する結果とも比較不能であり,現時点において,これを真に包含する結果は存在しない.そして,今後の多項式時間等価性判定が可解であるdpdtクラスの検討における基礎となり得るものと判断する.

本論文は,5つの章より構成されている.

第1章は序章であり,研究の背景,位置づけ,目的,従来の研究状況,本研究の基礎的概念,および,本論文の章構成について記述している.

第2章では,本論文で共通的に使用する,用語の定義,および,記法について記述している.

第3章と第4章が本論文の主要な内容であり,上記における前者の成果を第3章に,後者の成果を第4章で詳細に記述している.なお,第3章,第4章ともに,その等価性判定アルゴリズムの単純さや効率性を直感的に理解し易くするために,実際のdpdtに対する等価性判定の基本例題を示している.他の多くの方式ではこのような具体的例題を示すこと自体が非常に困難な状況であり,この面でも意義深い.

第5章では,本論文の成果を総括し,今後の展望を記している.

以上より,本論文は学位論文として十分な内容を持つと考えられる.よって,申請者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める.