

論文審査の結果の要旨

氏 名 飛澤和則

本論文は、メタ変数をラムダ計算に付加した計算体系であるメタラムダ計算の新たな体系 λ^* を提唱し、その数学的性質を調べ、さらに応用について論じたものである。プログラミング言語の中にはメタプログラミングの機構をもっているものがあり、テキスト代入によりプログラムを生成するようなプログラムが記述できる。その機構を実現するためには、多段階の実行が考慮されていること、および変数の束縛が動的に行われる仕組みをもっている必要がある。本論文では特に後者の問題を扱っており、メタ変数に対するテキスト代入によってオブジェクトレベルのプログラムを生成するようなプログラムを記述・実行できるような体系を提示している。これにより、メタプログラミングの解析・実装を行うための基礎理論を与えている。

メタ変数へのテキスト代入による動的束縛をラムダ計算に導入する試みは、Hashimoto-Ohori (2001) の文脈計算に始まり、その後Sato et al. (2003) やGabbay (2005) によって研究され、いくつかのメタラムダ計算の体系が提案されてきた。これらの研究の流れによって明らかになってきたことは、メタラムダ計算に素朴にテキスト代入を導入すると合流性が成り立たなくなるという困難である。このことは、インライン展開のような評価順序を変える最適化を施すときの障壁となり、解消されるべき問題である。これまでの研究では、計算体系ごとにそれぞれ技術的な差はあるが、メタレベル構成子がすべて解消されている場合にのみオブジェクトレベルの簡約を許すというように、レベルに関する制約を採用することで合流性を実現していた。メタレベルの実行を行ってから、オブジェクトレベルの実行を行うということで、ある意味自然な制約であるが、メタレベル構成子を含んでいるようなプログラムに対しては評価順序を変える最適化が行えないということでもあり、そのような制約を取り除いたメタラムダ計算の実現が望まれていた。そのような計算体系を実現するには、オブジェクトレベルの実行に現れる通常の静的な変数束縛とメタレベルの実行に現れる動的な束縛を両立させる必要があり、それらが相互に干渉する事態が出現することから、どのような計算機構を導入すれば問題が解消されるのかは明らかになっていなかった。

本論文の主要な貢献は、メタ構成子を含むかどうかにかかわらず任意の β リデックスに対して簡約を行えるようなメタラムダ計算の設計を与えたことである。それにより、これまでに提案されていたメタラムダ計算においては計算を進めることのできなかった一般の β リデックスに簡約を行い、計算を進めることが可能になっている。メタラムダ計算でテキスト代入を素朴に導入すると合流性が破綻するという上述した困難は、静的な代入を実現するための α 変換による名前替えの手法が、メタ変数の存在下では素朴に行えないことに起因するものである。その困難を回避するために、変数に de Bruijn 指標を組み合わせるというアイデアと、Abadiらによる明示的代入のアイデアを組み合わせるという手法を用いている。これらの技術をメタラムダ計算の枠組みで使用し、それにともないレベルの巧みなコントロールにより、評価順序にいったい制約がないような体系における合流性を担保した点に独創性がある。これは、今後のメタラムダ計算における標準となり得る著しい結果である。

本論文で提案されたメタラムダ計算の持つ新規性のひとつに、レベル横断的な項の計算が行えるという点が挙げられる。レベル横断的な項とは、オブジェクトレベルの変数にメタレベルの項を代入するような、レベルのミスマッチを伴う代入操作を引き起こす項のことである。レベル横断的な項は、先行研究で提示されてきたメタラムダ計算においては、レベルに関する制約や型システムにより考察の対象から除外されていた。本論文の後半では、手続き型言語をメタラムダ計算によって実装する応用例が提示されているが、その中で、実際のプログラミング言語に見られるメタプログラミング的な機構が、本論文の計算体系におけるレベル横断的な項によって実現され得ることが示されている。このことは、メタラムダ計算の新たな応用の可能性を示唆するものである。

以上のように、本論文はメタラムダ計算における主要な制約を取り除く新しい計算体系を提案した上で、その数学的性質を調べ、さらに新たな応用の可能性を示唆しており、プログラミング言語の理論的研究において重要な貢献を果たすものと考えられる。よって、論文提出者飛澤和則は、博士（数理学）の学位を受けるにふさわしい十分な資格があると認める。