

論文の内容の要旨

論文題目 Theory and application of a meta lambda calculus with cross-level computation
(レベル横断的計算機構を持つメタラムダ計算の理論と応用)

氏名 飛澤 和則

本論文は、メタ変数に相当する統語要素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に関するものである。メタ変数は、プログラムテキストのプレースホルダとしての役割を果たす統語要素である。身近な例を挙げればC言語のマクロがメタ変数に相当する。メタラムダ計算は、メタ変数へテキストを代入する計算をモデル化するために考案された計算体系であり、C言語のマクロ展開などに見られるようなプログラムのテキスト合成に関する基礎理論を与えるものとして期待される。

メタ変数へのテキスト代入をラムダ計算に素朴な仕方で導入してメタラムダ計算を構成すると、合流性が成り立たなくなることが知られており、それがメタラムダ計算を設計する際の主要な困難となっていた。メタ変数へのテキスト代入が持つ最も重要な特徴は、その代入の結果として新たな変数束縛を動的に生じさせる点にある。一方、ラムダ計算のベータ簡約は、新たな変数束縛が生じないように代入を行う束縛回避型代入を基礎としている。上記で述べた困難の主要因は、ラムダ計算において束縛回避を実現するために用いるアルファ変換による名前替えの手法では、メタ変数の存在下で束縛構造を整合的に管理することが難しく、そのため束縛回避を正しく行うことができなくなるといふことにある。

これまでに提案されてきたメタラムダ計算は、上記で述べた困難を解決するために様々な手法を用いてきたが、それらは概して、レベル制御簡約の手法を基礎としている。レベル制御簡約は、束縛回避型代入による簡約を行う際に、もしその簡約項がメタ変数を含んでいた場合には簡約できないという制約を課すことによって、メタ変数の存在下で束縛回避型代入を行うことを禁じる手法である。そのような制約の下であれば、アルファ変換による名前替えによって正しく束縛回避を行うことができる範囲内で計算を進めることができ、結果として合流性を成り立たせることができる。

しかし、レベル制御簡約による手法を採用すると、メタ変数を含むベータ簡約形式はそのメタ変数へのテキスト代入が為された後でなければ簡約できない。特に、自由なメタ変数の出現を含むベータ簡約形式については計算を進めることができなくなる。

本論文の目的は、メタ変数を含むか否かに関わらず任意のベータ簡約形式に対して束縛回避型代入による簡約が行えるようなメタラムダ計算を設計することである。そのようなメタラムダ計算を実現することによって、これまでのレベル制約簡約による手法では簡約できなかったメタ変数を含むベータ簡約形式に対する計算を進めることが可能となり、メタラムダ計算における簡約戦略の可能性を広げることができる。

上記の目的は、変数の概念を変数名と de Bruijn 指標の組に拡張したラムダ計算を考え、その拡張されたラムダ計算に対するメタ言語をモデル化することによって実現される。de Bruijn 指標は、直近の束縛子をスキップしてさらに外側の束縛子に変数が束縛されることを可能とするため、アルファ変換による名前替えに代えて、de Bruijn 指標の書き換えによって束縛回避を行うことができるようになる。

本論文では、上記のアプローチに基づいてメタラムダ計算 λ^* を設計し、その代数的な性質を示した上で、合流性を証明した。 λ^* は、代入演算子と束縛子スキップ演算子という二種類の統語要

素の列が、メタ変数に付随するという文法構造を取る。代入演算子は「変数 x に項 M を代入する」という通常の代入操作に対応する統語要素であり、一方、束縛子スキップ演算子は、「de Bruijn 指標を適切に書き換えて束縛回避を行う」という操作に対応する統語要素である。それら二種類の統語要素が、メタ変数へのテキスト代入の際にそのテキストに作用する「保留された操作」としてメタ変数に付随することで、束縛構造を整合的に管理する。

本論文で構成したメタラムダ計算 λ^* が持つ重要な性質として、メタ変数を含むベータ簡約形式の計算を進められることの他に、レベル横断的な項の計算が可能であるという点が挙げられる。レベル横断的な項とは、例えば通常変数に対するメタレベル関数の代入を引き起こすような簡約形式など、ある種のレベル不整合を含む項のことである。そのような項はこれまで無意味な項と考えられ、レベル制御簡約や型システムにより考察の対象から外されてきた。

本論文では、上記の性質の応用例として λ^* による手続き型言語の実装を与えた。その実装を通して、手続き型言語における変数の値の更新、手続きの再帰呼び出し、局所変数、quoteやeval命令の概念が、メタ変数を用いた動的束縛によってどのように実現されるかを示した。特に、この実装がレベル横断的な項により実現されるという結果は、名前と束縛に関わる上記の諸概念に新たな見方を与えるものである。