

報告番号	※ 乙 第	号
------	-------	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目            On Head-Normalizing Sequential Strategies for  
                         Higher-Order Rewrite Systems  
                         (高階書換え系の頭正規化逐次戦略について)

氏 名                粕谷 英人

## 論 文 内 容 の 要 旨

高階書換え系(Higher-order Rewrite System, HRS)は、項書換え系(Term Rewriting System, TRS)に高階の機能を加えた拡張であり、ラムダ計算の概念を含むモデルとして、関数型プログラミング、論理型プログラミング、定理証明などに用いられる。プログラムの遅延評価や厳密解析に関連して TRS の書換え計算戦略についての研究がおこなわれている。そのひとつが計算戦略の正規化性を示す研究である。それは、ある与えられた項の必須リデックスを繰り返し書き換えることによってその項の正規形を求めることができるという性質である。Middeldorp はこの研究結果を一般化し、頭必須リデックスを繰り返し書き換えることによってその項の頭正規形を求めることができる頭必須書換えについての研究を行った。

本論文は HRS における頭必須書換えの性質を明らかにする。強逐次、NV 逐次の各クラスについて実用を書くことのできない以下の性質をもつことを議論する。

- (1) 頭必須リデックスを書き換える計算戦略は頭正規化戦略である。
- (2) 頭正規形でない項の頭必須リデックスを見つけるアルゴリズムが存在する。
- (3) ある HRS がそのアルゴリズムを適用できるクラスに属するかどうか決定可能である。

(1)を示す上で最も問題となるのは、高階の書換え計算によって引き起こされる  $\beta$  簡約である。 $\beta$  簡約を行うと高階項の構造が変化するため、HRS のディセダントの定義が複雑になってしまう。その問題を解決するため、 $\beta$  簡約に引き起こされる部分項の位置の移動を追う関数 PV を提案した。PV を使用して HRS のディセダントの具体的な定義を行い、それにより直交高階書換え系における(1)の性質を示すことができた。

また、(2)を示す上で本論文は木オートマトンの技術を使用する。左線形項書換え系のすべてのリデックスの集合は木オートマトンにより認識可能であることが知られている。つまり、リデックスを受理する木オートマトンを構築することが可能であるということである。本論文は、この木オートマトンを用いてリデックスを受理するという項書換え系に関する結果を Nipkow の定義による高階書換え系の上に拡張する。ここで規則の左辺はすべて線形で fully-extended パターンであることを条件とする。

TRS における一階の手法を高階の HRS へと単純に拡張した場合、閉じたラムダ項であったとしても、ラムダ項に現れることのできる束縛変数をすべて区別するためには、その名前だけオートマトンの状態が必要となる。つまり、オートマトンに無限の状態が必要となる。その問題を避けるため、束縛変数を自然数で表現する de Bruijn 記法を用いる。自然数は  $0, s(0), s(s(0))$  のように表せば有限の記号で表現することが可能である。そこで de Bruijn 記法の変形として、束縛変数だけを自然数で表現し、その必要のない自由変数は自然数で表現せずに元の名前を使用する表現手法を提案して用いる。本論文では与えられた HRS のすべてのリデックスの集合とリデックスを含む項すべての集合を認識する木オートマトンの構築方法を明らかにする。

さらに(1)と(2)の性質に基づき、性質(3)を示す。HRS の書換え関係は TRS の書換え関係と同じく一般的に決定不能であるため、書換えが必須であることも決定不能である。そこで、書換えの近似を用いて決定可能とするための十分条件を与える。GTT(Ground Tree Transducer) の技術を用いることによって書換え関係の推移閉方を認識し、HRS のいくつかのクラスについて必須書換えの決定可能性に関する結果を示す。

本論文は PV 関数, db-term, パターン, ディセンダント, ディベロップメント, top-down 分解などの役に立つ具体的な定義を与える。また、HRS の望ましい性質であるダイヤモンド性や、前述の(1)~(3)の性質を明らかにする。これらの成果は、高階項や HRS を用いた議論や今後の研究に有用であるといえる。