

xv6 の構成要素の継続の分析

清水 隆博^{1,a)} 河野 真治^{2,b)}

概要: OS 自体そのものは高い信頼性が求められるが、OS を構成するすべての処理をテストするのは困難である。テストを利用して信頼性を高めるのではなく、OS の状態を状態遷移を基本としたモデルに変換し形式手法を用いて信頼性を高めたい。

状態遷移単位での記述に適した言語である CbC を用いて、小さな unix である xv6 kernel の書き換えを行っている。このためには現状の xv6 kernel の処理がどのような状態遷移を行うのかを分析し、継続ベースでのプログラミングに変換していく必要がある。本稿では xv6kernel の構成要素の一部に着目し、状態遷移系の分析と状態遷移系を元に継続ベースで xv6 の再実装を行う。

1. OS の信頼性

様々なアプリケーションは OS の上で動作するのが当たり前になってきた。アプリケーションの信頼性を向上させるのはもとより、土台となる OS 自体の信頼性は高く保証されていなければならない。OS そのものも巨大なプログラムであるため、テストコードを用いた方法で信頼性を確保する事が可能である。しかし並列並行処理などに起因する動かしてみないと発見できないバグなどが存在するため、テストで完全にバグを発見するのは困難である。また、OS を構成する処理も巨大であるため、これら全てをテスト仕切るのも困難である。テスト以外の方法で OS の信頼性を高めたい。

数学的な背景に基づく形式手法を用いて OS の信頼性を向上させることを検討する。OS を構成する要素をモデル検査してデッドロックなどを検知する方法や、定理証明支援系を利用した証明ベースでの信頼性の確保などの手法が考えられる。形式手法で信頼性を確保するには、まず OS の処理を証明などがしやすい形に変換して実装し直す必要がある。これに適した形として、状態遷移モデルが挙げられる。OS の内部処理の状態を明確にし、状態遷移モデルに落とし込むことでモデル検査などを通して信頼性を向上させたい。既存の OS はそのままに処理を状態遷移モデルに落とし込む為には、まず既存の OS の処理中の状態遷移を分析する必要がある。分析の結果を定理証明支援系などによって証明を行うか、仕様記述言語を用いて再実装する

ことで仕様の整合性を検証する事が可能である。しかしこれらの方法では、実際に動く OS と検証用の実装が別の物になってしまうために、C 言語などの実装の段階で発生するバグを取り除くことができない。実装のソースコードと検証用のソースコードは近いセマンティクスでプログラミングする必要がある。

実装用の言語と証明用の言語の両方に適した言語として Continuation Based C (CbC) がある。CbC は C と互換性のある C の下位言語であり、状態遷移をベースとした記述に適したプログラミング言語である。C との互換性のために、CbC のプログラムをコンパイルすることで動作可能なバイナリに変換が可能である。すなわち CbC を用いて状態遷移を基本とした単位でプログラミングをすると、形式手法で証明が可能かつ実際に動作するコードを記述できる。

現在小さな unix である xv6 kernel を CbC を用いて再実装している。再実装の為には、既存の xv6 kernel の処理の状態遷移を分析し、継続を用いたプログラムに変換していく必要がある。本論文ではこの書き換えに伴って得られた xv6 kernel の継続を分析し、現在の CbC による書き換えについて述べる。

2. xv6 kernel

xv6 とはマサチューセッツ工科大学で v6 OS を元に開発された教育用の UNIX OS である。xv6 は ANSI C で実装されており、x86 アーキテクチャ上で動作する。Raspberry Pi 上での動作を目的とした ARM アーキテクチャのバージョンも存在する。本論文では最終的に Raspberry Pi 上での動作を目指しているために、ARM アーキテクチャ上

¹ 琉球大学大学院理工学研究科情報工学専攻

² 琉球大学工学部工学科知能情報コース

a) anatofuz@cr.ie.u-ryukyu.ac.jp

b) kono@ie.u-ryukyu.ac.jp

で動作する xv6 を扱う。

xv6 は小規模な OS だがファイルシステム、プロセス、システムコールなどの UNIX の基本的な機能を持つ。またユーザー空間とカーネル空間が分離されており、シェルや ls などのユーザーコマンドも存在する。

本論文では xv6 のファイルシステム関連の内部処理と、システムコール実行時に実行される処理について分析を行う。xv6 kernel のファイルシステムは階層構造で表現されており、最も低レベルなものにディスク階層、抽象度が最も高いレベルのものにファイルディスクリプタがある。

3. Continuation Based C

Continuation Based C (CbC) とは C 言語の下位言語であり、関数呼び出しではなく継続を導入したプログラミング言語である。CbC では通常の関数呼び出しの他に、関数呼び出し時のスタックの操作を行わず、次のコードブロックに jmp 命令で移動する継続が導入されている。この継続は Scheme などの環境を持つ継続とは異なり、スタックを持たず環境を保存しない継続である為に軽量である事から軽量継続と呼べる。また CbC ではこの軽量継続を用いた再帰呼び出しを利用することで、for 文などのループ文を廃し関数型プログラミングに近いスタイルでプログラミングすることが可能である。現在 CbC は GCC 及び LLVM/clang 上にそれぞれ実装されている。

CbC の例題を Code 1 に示す。

```

__code code_gear1(struct str* st) {
    if (st->number) {
        goto hoge(...);
    }
    goto code_gear2(foo);
}

```

Code 1: c

参考文献

- [1] Knuth, D. E.: *Fundamental Algorithms*, Art of Computer Programming, Vol. 1, chapter 2, pp. 371–381, Addison-Wesley, 2nd edition (1973).
- [2] Schwartz, A. J.: Subdividing Bézier Curves and Surfaces, *Geometric Modeling: Algorithms and New Trends* (Farin, G. E., ed.), SIAM, Philadelphia, pp. 55–66 (1987).
- [3] Baraff, D.: Curved Surfaces and Coherence for Nonpenetrating Rigid Body Simulation, *SIGGRAPH '90 Proceedings* (Beach, R. J., ed.), Dallas, Texas, ACM, Addison-Wesley, pp. 19–28 (1990).
- [4] Nakashima, H. et al.: OhHelp: A Scalable Domain-Decomposing Dynamic Load Balancing for Particle-in-Cell Simulations, *Proc. Intl. Conf. Supercomputing*, pp. 90–99 (online), DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/1542275.1542293> (2009).
- [5] Adobe Systems Inc.: *PostScript Language Reference Manual*, Reading, Massachusetts (1985).
- [6] 山下義行: 文脈自由文法への否定の導入, 修士論文, 筑波大学大学院工学研究科 (1989).
- [7] Weihl, W.: Specification and Implementation of Atomic Data Types, PhD Thesis, MIT, Boston (1984).
- [8] Institute for New Generation Computer Technology: *Proc. Intl. Conf. on Fifth Generation Computer Systems*, Vol. 1 (1992).
- [9] Aredon, I.: T_EX 独稽古, Seminar on Mathematical Sciences 13, Department of Mathematics, Keio University, Yokohama (1989).
- [10] 情報処理学会: コンピュータ博物館設立の提言, 情報処理学会(オンライン), 入手先 (<http://www.ipsj.or.jp/03somu/teigen/museum200702.html>) (参照 2007-02-05).
- [11] 情報処理学会論文誌編集委員会: 「情報処理学会論文誌 (IPSI Journal)」原稿執筆案内, 情報処理学会(オンライン), 入手先 (<http://www.ipsj.or.jp/08editt/journal/shippitsu/ronbunJ-prms.pdf>) (参照 2010-10-28).
- [12] Kay, A.: Welcome to Squeakland, Squeakland (online), available from (<http://www.squeakland.org/community/biography/alanbio.html>) (accessed 2007-04-05).
- [13] Nakashima, H.: A WEB Page, Kyoto University (online), available from (<http://www.para.media.kyoto-u.ac.jp/nakashima/a.web.page.of.long.url/>) (accessed 2010-10-30).
- [14] Nakashima, H.: Another WEB Page, Kyoto University (online), available from (<http://www.para.media.kyoto-u.ac.jp/nakashima/a.web.page.of.much.longer.url/>) (accessed 2010-10-30).