

組み込み向け OS Lambda のメモリ管理機構*

3U-02

久住 憲嗣 九州大学 システム情報科学府[†]
北須賀 輝明 九州大学 システム情報科学研究所[‡]
中西 恒夫 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科[§]
福田 晃 九州大学 システム情報科学研究所[¶]

1 はじめに

我々は、組み込みシステムの開発効率に重点を置いた、組み込み向けマイクロカーネルオペレーティングシステム Lambda の開発をおこなっている。Lambda はマイクロカーネルに近い構成で開発、デバッグ等をおこない、開発効率の向上をはかる。また、開発終了後には必要がない部分の保護を排除し、モノリシックなバイナリに変換することによって、性能の向上をはかる [1][2]。

組み込みシステムは、さまざまなハードウェアに対応する必要があり、また、さまざまなアプリケーションの要求にも対応する必要がある。本稿では、これらのことに留意しつつ Lambda のメモリ管理機構について述べる。

2 メモリ管理の概要

Lambda では、アドレス変換機構、メモリ管理機構に厳密にわけて実装を行う。アドレス変換機構は、主にプロセッサ依存のアドレス変換機構のサポートを行う。ページのマップ、アンマップなどの操作を実現し、ページフォルトの捕捉、プロセッサに必要な情報の設定を行う。

メモリ管理機構は、主にプロセッサ非依存のメモリ管理を行う。具体的には、ユーザプロセスとカーネルに対してメモリを割り当てる。メモリ管理機構は通常はシステムサーバとして実装する。ユーザプロセスに対しては、プロセス間通信 (IPC) のマップ機能を利用して、メモリ割り当ておよびマップを行う。このように、厳密にわけて実装することにより、移植性や再利用性の向上をはかる。

MMU をもつプロセッサは、アドレス空間に関して以下のようなモードで動作する。

1. 物理アドレス空間

*The memory management system of the Lambda Operating System for Embedded Systems

[†]Kenji Hisazumi, Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

[‡]Teruaki Kitasuka, Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

[§]Tsuneo Nakanishi, Graduate School of Information Science, Nara Institute Science and Technology

[¶]Akira Fukuda, Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

2. 単一仮想アドレス空間

3. 複数仮想アドレス空間

Lambda は 2, 3 で動作させることを前提に実装を行う。Lambda を 1 で動作させることも可能であるが、ここでは議論しない。

現在、組み込みシステムでよく利用されるプロセッサには、以下のようなアドレス変換機構がある。

1. メモリ上のページテーブルをプロセッサが検索

2. TLB を OS が更新

Lambda はどのようなアドレス変換機構を持っていても簡単にサポート可能なように、アドレス変換機構の抽象化を行う。

3 実装

3.1 メモリ管理機構

Lambda の IPC は、データの転送方法として、コピーによる転送と、マップによる転送の 2 種類をサポートしている。このうちの、マップ機能を利用して、メモリ管理サーバがユーザプロセスにメモリ割り当てを行う。起動時にカーネルはすべての物理メモリをメモリ管理サーバに割り当てる。メモリ管理サーバは、この中からユーザの要求に応じてメモリの割り当てをおこない、IPC を利用して、ユーザプロセスが実際に利用できるようにする。

ページフォルトがおこると、アドレス変換機構がよばれ処理される。アドレス変換機構が処理できなかったページフォルトは、RPC 経由でメモリ管理サーバにつたえられる。メモリ管理サーバは適切な処理をおこなった後、アドレス変換機構に返答を返す。

3.2 アドレス変換機構フレームワーク

Lambda のためにアドレス変換機構を記述するには、以下のような機能の実装を行う必要がある。

- アドレス空間の初期化と生成
- 物理ページのマップ

- ページのアンマップ
- 仮想アドレスを物理アドレスに変換
- ページ属性の設定
- ページフォルトハンドラ

Lambda は保護単位ごとに id を割り当て、その id を利用して以上の操作を行う。通常は、id とプロセスは一つ一つに対応する。組込みシステムで多く採用されている ARM は、ドメインとよばれる特殊な保護機構をサポートしている [3]。この保護機構を利用すると、保護のオーバーヘッドを最小限にとどめつつも、保護を利用することが可能になる。この場合には、保護単位がプロセスとはちがったものになるが、属性の設定と組み合わせることによって、サポートする。

また、組込みシステムは、リアルタイム性能がとくに重視されるので、キャッシュの無効化やページを静的に貼付けるといったような、特別な設定を必要とする場合が多い。これらをサポートするために、柔軟にページ属性の設定をおこなえるように実装を行う。

これらの機能を提供するにあたり、多くのプロセッサに共通して必要な実装を、アドレス変換機構フレームワークライブラリとして提供する。もちろん、独自の実装を行いたい場合には、このライブラリを使用しなくてもかまわない。

3.3 ユーザプログラム

ユーザプログラムは、遠隔手続き呼び出し (RPC) を用いてメモリの割り当て要求をメモリ管理サーバに対して行う。この RPC をメモリ割り当て RPC とよぶ。この RPC に対する返答により、実際にメモリの割り当てがおこなわれる。RPC を利用してメモリ割り当てを行うことにより、ユーザプログラムは簡単にメモリ割り当てを受けることが可能になる。

メモリ割り当て RPC を実現するために、通常の RPC でのデータ転送指定である IN, OUT 指定以外に MAP 指定をサポートする。MAP 指定は、送信側の指定されたページを受信側のアドレス空間にマップするものである。この機能は、カーネルがサポートする IPC のマップ指定を利用して実現される。

4 モノリシック化

アドレス管理機構とメモリ管理機構を厳密に分けて実装することにより、移植性が向上し、また実装も容易になるが、性能が良くない。メモリの割り当ては、とくによく行われるので、この部分の性能が低いのは、問題がある。そこで、モノリシック化の手法を用いる。モノリシック化とは RPC を関数呼び出しに置換し高速化をはかる手法のことである [2]。メモリ管理サーバをカーネル空間で動作させ、

さらにメモリ割り当てを行う RPC を関数化することにより性能を向上させる。これにより、カーネルとカーネル空間で動作するプログラムに対して、高速にメモリ割り当てをおこなえるようになる。

ただし、メモリ割り当ての RPC は他の RPC と違いメモリマップを変更するので、カーネルの機能を利用してメモリマップの変更を行う必要がある。ここで、メモリマップを変更するシステムコールを提供し、RPC スタブ内で呼び出す実装が考えられるが、この実装では性能の向上があまり見込めない。メモリ管理サーバをモノリシック化して性能の向上が見込めるのは、カーネル空間で動作させる場合のみである。そこで、メモリマップを変更するアドレス管理機構内の関数を、RPC スタブ内で直接呼び出す。これにより、メモリ割り当て RPC の意味をかえずに、高速化をはかる。

5 まとめ

本稿では、Lambda のメモリ管理についてのべた。組込みシステム向け OS はさまざまな要求にこたえるために柔軟な設定を行うことができる必要があり、メモリ管理についても例外ではない。そこで、アドレス変換フレームワークライブラリを提供し、多くのプロセッサにおいて共通して必要となる機能を再実装せずに、必要な機能のみの実装をおこなうだけで、さまざまな要求に対応できるようにする。また、開発効率と性能の両立のために、メモリ管理にもモノリシック化を適用する手法の提案をおこなった。

謝辞

本研究の一部は科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業 (CREST) の支援のもとに行われたものである。

参考文献

- [1] 福田晃, 最所圭三, 片山徹郎, 中西恒夫: 組込みシステム向け実行環境の自動生成 - δ プロジェクトの構想 -, 電子情報通信学会技術研究報告, No. 726, pp. 17-22 (2000).
- [2] 久住憲嗣, 中西恒夫, 福田晃: 組込み向けマイクロカーネル OS Lambda の保護機構, コンピュータシステムシンポジウム論文集, pp. 81-88 (2001).
- [3] S.Furber: ARM プロセッサ, CQ 出版社 (1999).