

本稿では、組み込みLinuxの現状と将来課題に関する概要を述べる。特に、なぜ組み込みLinuxがインターネットアプリケーションやホームアプリケーションなどの将来の組み込みシステムにとって重要であるかを示す。また、日本エンベデッド・リナックス・コンソーシアムの活動状況に関して簡単に紹介する。最後に、将来の計算機環境とLinuxのかかわりと最新研究動向の概要を紹介する。

解説

組み込みシステム用 標準OSとしての

Linux

中島達夫

早稲田大学理工学部情報学科／
日本エンベデッド・リナックス・
コンソーシアム

tatsuo@mn.waseda.ac.jp

■組み込みシステム開発を変えるLinux

デジタル家電や携帯電話など組み込みシステムの複雑化に伴い、機器に組み込むMPU（超小型演算処理装置）上の次世代OSとしてLinuxに対する興味が高まってきている。これからの組み込みシステムはインターネット接続が標準となり、無線ネットワークや電源ネットワークを介してお互いに通信可能となると考えられる。それにより個々に稼働していた各種のサービスが統合され、従来と比較してはるかに高度な機能を提供する可能性が期待される。あらゆる機器接続の実現を考えた場合、複雑なシステムを構築するためには高度な基盤OSが不可欠となってきた。

たとえば、近い将来、家庭内ではテレビやビデオなどのAV家電からライトや冷蔵庫、電子レンジなどもネットワークに接続される。それらの機器を連携するためには複雑なミドルウェアや高度なOSが必要となってくる^{1), 8)}。現在のリアルタイムOSはこれらのミドルウェアを実装する環境としては適していない。なぜなら、OSごとにシステムインタフェースが異なるため、搭載しているOSが違う場合にはミドルウェアの移植が必要であり、通常組み込み機器は機器ごとに特有の機能を提供するため移植は容易ではないからである。一方、組み込みLinux上では、マルチメディアやGUIなどのさまざまなインタフェースがデファクト標準となっているため機器に依存しないミドルウェアを構築することが可能となる。複雑な将来の組み込みシステムを構築するためには標準的なOSが必要となり、そのOSはさまざまな要求に答えられる高性能なOSである必要がある。組み込みLinuxは将来の組み込みシステムの標準OSとして十分な機能を提供している。組み込みLinuxといっても従来のサーバやデスクトップ用のLinuxと異なるLinuxが存在するわけではない。組み込み機器の高機能化に伴い、デスクトップなどのコンピュータで用いるWebブラウザやJava仮想マシンなどのミドルウェアを組み込み機器でも使用することになった。したがって、OSも特別な組み込み向けOSではなくデスクトップOSと同じものを使用することによる開発コストの低減の方が重要とな

ったことが組込みLinuxへの注目度が高くなった原因であると考えられる。

本稿では、組込みLinuxとは何か、組込みLinuxの応用例、現状の組込みLinuxに関するいくつかの課題、さらに2000年夏に設立された日本エンベデット・リナックス・コンソーシアムの取り組みについて紹介する。最後に、将来の計算機環境とLinuxのかかわりと我々の研究の概要を紹介する。

■組込みLinuxとは?

組込みLinuxは、通常のインターネット用サーバなどで利用されているLinuxとほぼ同じものである。Linuxとはフィンランドのリーナス・トーバルズが学生であった当時に中心となって開発を始め、RedHat社などの協力により実用的になったOSである。システム構成の柔軟性に優れているため、アプリケーションの要求に応じてOSの構成を容易に変更することが可能である。Linuxを構成するコンポーネントとしてはアプリケーション、システムコマンド、サーバ、ライブラリ、カーネルなどがあるが、このうちリーナスらが開発・提供を行っているのは主にカーネル部分である。その他の多くの部分は、GNUプロジェクトで開発されたプログラムから構成されるディストリビューションと呼ばれるパッケージになっており、それらの細かい内容はディストリビューションごとに異なっている。たとえば、ウインドウシステムやブラウザなどのカーネル上のソフトウェアは各ディストリビュータが彼らのビジネスドメインに最適なものを選んでいるため、同じ組込みLinuxといっても細部はいろいろ異なっている。

組込みLinuxは、組込みシステム向けのカーネル構成と組込みシステムに適したコマンド、サーバ、ライブラリ群から構成されており、ハイエンドの組込みシステムになるとデスクトップ用Linuxの構成と大きな違いはない。つまり、カーネルとしては通常のデスクトップなどで使用しているものと同じものを用いる。しかし、組込みシステムでは応答性が重要な場合が多いため、MontaVista社のHard Hat LinuxやTimeSys社のLinux/RTなど通常配布されているLinuxカーネルのリアルタイム性能を改善したLinuxも存在する。

また、BusyBoxやMicrowindowsなどのメモリフットプリントやファイルシステムのサイズを小さくすることを可能とするコマンド類、バッテリー制御機構の改良や、システムのコンフィギュレーションを容易にするための開発環境などさまざまな拡張が行われ組込みシステム開発に必要な要求をほぼ満足させるものとなってきている。

■なぜ組込みLinuxか?

それでは、なぜ最近組込みLinuxが注目を集めているのだろうか？ 本稿では4つの理由について説明する。

第1は、Linuxがファイルシステムやネットワークシステムをはじめからコンポーネントとして含んでいることである。従来のリアルタイムOS（以下RTOS）の多くはファイルシステムやネットワークシステムをミドルウェアとして提供しており、原則として開発者は開発システムに適したファイルシステムやネットワークシステムを選択することが可能である。しかし、実際にはこれらのソフトウェアを開発システムの特성에応じて変更することは大変困難であるため、RTOSベンダから提供されるものをそのまま利用しているのが現状である。この現状を踏まえると、ファイルシステムやネットワークシステムをミドルウェアとして提供する従来のRTOSに対して、それらを標準でサポートしているLinuxの方が、一貫したシステムを構成しやすい。加えて、これからの多くの組込みシステムはフラッシュメモリファイルシステムやインターネットプロトコルスタックが必要不可欠であるが、Linuxではこれらのコンポーネントもはじめてからカーネルに含まれている。

サイズに関していうと、カーネル全体は最小構成で500kバイト程度であるが、ファイルシステム、ネットワークシステム、デバイスドライバを除いたカーネルサイズは100kバイト以下である。Linuxは大きすぎるという批判があるがこれは正しいとはいえない。

第2には、Linuxのカーネルインタフェースが、Unixをベースにした国際標準のカーネルインタフェースであるPOSIXに準拠していることである。POSIXは世界的に最も普及しているカーネルインタフェースであり、POSIXに基づく多くの研究・教育が存在し、またPOSIXに関する多くの書籍や刊行物も出版されている。このためPOSIXインタフェースをマスタしているプログラマが世界中に多数存在する。開発コスト削減が大きな課題である現在、組込みシステムでPOSIXに基づくOSを用いることは教育コストの削減やグローバルな開発体制を容易に実現可能という点で、大変魅力的である。

第3には、Linuxがオープンソースアプローチという方式により開発されていることである。設計図にあたるソースコードが公開されているため、開発者が世界中の地理的に離れた場所に点在していても事実上共同開発が可能となる。この方式では1人のコーディネータが他の開発者から提示された変更をチェックし、変更が好ましい場合はマスターソースコードに変更を追加する。開発されたソフトウェアは無償で入手可能であ

り、興味がある人ならば誰でもテストできる。テスト結果はコーディネータにフィードバックされ、さらに誰か他の開発者により改良されていく。潜在的に多数のプログラマがテストやバグの修正を行うため、従来に比べてすばやく安定したソフトウェアの構築が可能となる。

一般に基盤ソフトウェアは開発にコストがかかる割には利益が少なく、従来は少数の機関で基盤ソフトウェアを開発していたため莫大な開発費が必要だった。一方オープンソースアプローチでは、前述したように異なる組織に属する多くのプログラマが無償でソフトウェア開発を行う部分が多い。オープンソースアプローチの利用により、他の人が開発したソフトウェアの利用に対価を要求することは難しくなるが、開発コストの削減が最も重要な項目である場合はきわめて好ましいアプローチである。オープンソースアプローチに基づき開発が進められているLinuxは、すでに多くのデバイスドライバが作成され、さまざまなCPUに移植されており、結果としてカーネルの安定度はきわめて高いものとなっている。

第4には、Linux上には多くのライブラリやミドルウェアが存在し、それらのインタフェースがデファクトスタンダードとなっているため移植性の高いアプリケーションやミドルウェアを構築することが可能である。たとえば、マルチメディア処理のためのインタフェースやGUIのためのインタフェース、それらに基づいたデジタルテレビ用のインタフェースなどさまざまな標準インタフェースが提供され、それらのインタフェースを用いたアプリケーションやインタフェースの明細を記述したドキュメントも完備されつつある。また、CORBAやJavaなどのミドルウェアなどもオープンソースとして提供されているため、これらのソフトウェアを巧みに利用可能な場合は、組込みシステムの開発コストを劇的に減らすことが可能である。また、世界中のオープンコミュニティにサポートされているため、時代に応じた新しいテクノロジーが導入される可能性が高い。

■組込みLinuxを利用したシステム事例

組込みLinuxが適した組込みシステムの例としては、インターネット上のサービスアクセスおよび高度なグラフィック機能やJava仮想マシンのサポートを必要とするインターネットアプライアンスやホームアプライアンスなどがあげられる。インターネットアプライアンスでは、組込みLinux上にウィンドウシステム、Webブラウザなどのソフトウェアを利用する。

ホームアプライアンスを実現する場合もオープンソースのJava仮想マシンやIEEE1394デバイスドライバなどのサポートがあるため、実際の組込みシステムを大変廉価に構築することが可能となる。

本章では、組込みLinuxを利用したシステム事例として、早稲田大学中島研究室と富士通LSIソリューションとの共同研究により開発したHAVi (Home Audio/Video interoperability) をベースとした情報家電用のミドルウェアの構築について簡単に述べる。HAViはIEEE1394により接続された情報家電機器間の相互接続を実現するための規格であり、プラグアンドプレイ機能を提供することにより簡単にホームネットワークを実現することが可能となる。図-1に、我々が開発中のシステムのスクリーンダンプを示す。この例では、HAViソフトウェアが動作しているPCとDVカメラをIEEE1394により接続している。PCのディスプレイ上にはDVカメラを制御するためのユーザインタフェースとDVカメラから受け取ったDVビデオストリームを表示している。

Linuxを用いることにより、IEEE1394デバイスドライバやDVフォーマットのビデオデータを処理する部分など、オープンソースソフトウェアを有効に利用することにより開発コストをきわめて低くすることが可能であった⁵⁾。また、Linuxが提供するリアルタイム機能を用いることによりビデオやオーディオのような時間制約を持ったデータをうまく扱うことが可能なことも分かった。

また、電灯線ネットワークであるX10デバイスを制御するための組込みWebサーバの開発をLinux上にJavaを用いて行っており、Linuxを利用することによりPC上でプロトタイプを開発し、実際の組込みデバイス上に容易に移植可能であることが明らかとなっている⁶⁾。

■組込みLinuxの課題

前章までに述べたように、組込みLinuxは次世代の大規模な組込みシステムを構築するための基盤として非常に適したものである。しかし現在の組込みシステムの多様なエリアに応用していくためにはさまざまな課題もある。本稿では以下にそれら5つの課題について述べる。

1つ目はリアルタイム性や短い割り込み応答性の実現である。インターネット対応やWebブラウザの搭載を必要とし、かつリアルタイム性を要求するアプリケーションは数多く存在する。しかしLinuxはリアルタイム性を考慮せずにデザインされたため、時間制約を持つ



図-1

たマルチメディアアプリケーションや短い割り込み応答性を要求する制御システムには適していない。そこで現在、MontaVista社のHard Hat LinuxやTimeSys社のLinux/RTのようにLinux自体にリアルタイムサポートを追加したものや、Leneo社のRTAIやFSMLabs社のRT-LinuxのようにRTOSとLinuxを融合したものなど、各企業でさまざまなアプローチにより問題を解決しようとしている。我々の調査では、現在のLinuxをプリエンプタブルにすることにより1ms以下の応答時間が実現可能であり、多くの組込みシステムに対して満足な応答性が達成されていることが分かっている²⁾。

2つ目は既存のRTOS資産の有効利用である。国内の組込みシステムを考えると相当量のITRON仕様OS（以下ITRON）上のソフトウェア資産があり、それらを見捨てて新しくソフトウェアを一から構築することは現実的ではない。現在、日本エンベデッド・リナックス・コンソーシアム（次章参照）では、従来のITRON上でLinuxを利用できるLinux on ITRONの仕様策定を行っており、これにより既存のITRON上のソフトウェアとLinux上のソフトウェアを同時に動かすことが可能となる。

3つ目の課題はLinuxのライセンスに関するものである。LinuxはGNUライセンスに基づき配布されているため、カーネル内の改造を行った場合はすべての変更を無料で配布する必要がある。原則として、動的にロード可能なデバイスドライバやGNUライセンスのライブラリを動的リンクしたアプリケーションに関しては、必ずしもソースコードの無料公開は必要でないといわれている。しかしライセンス問題は複雑で分かりにくい部分もあるため、組込みシステムでLinuxを利用する

上で注意を必要とする。

4つ目の課題はセキュリティに関するものである。組込みLinuxを利用する最大の理由の1つに簡単にインターネット接続可能な組込み機器を構築可能なことがある。近年、インターネット上のサーバへの侵入や攻撃に関する記事を新聞で見かけることが多くなったが、組込み機器をインターネットに接続することにより組込み機器もハッカーの攻撃対象となる。特に、デジタルテレビ上のオンラインショッピングなどが可能となると、クレジットカード情報などのさまざまな個人情報組込み機器上に保存される可能性がある。インターネット接続可能な組込み機器を構築する場合は、さまざまなセキュリティホールに関する情報も考慮する必要がある。

5つ目の課題は、ソフトウェアの信頼性に関する問題である。組込みシステムの複雑度は年々増加の一途をたどっている。従来のシステム構築法は完全なシステムを構築するための手法であり、ソフトウェアバグが潜在的に存在する環境では安定したソフトウェアを構築することが困難である。将来に向けては新しいシステム構築の考え方が必要と思われるが、短期的にはソフトウェアを可能な限り再利用することにより新規にコーディングする量を減らすことが唯一の解決法であると思われる。再利用可能なミドルウェアは新規に開発するコード量を減らすことを可能とする有効な手法であると考えられる。次章で述べる日本エンベデッド・リナックス・コンソーシアムでもLinux上の再利用可能なミドルウェアを構築することで将来のさらに複雑化するユビキタスコンピューティング環境実現のための要求をまとめるユビキタスコンピューティング

専門小委員会を2002年から発足する予定である。

■日本エンベデッド・リナックス・ コンソーシアム (Emblix)

日本エンベデッド・リナックス・コンソーシアム (Emblix : <http://www.emblix.org/>) は、2000年7月に組込みLinuxの普及と周辺技術の標準化を目的として設立された産学協同のコンソーシアムであり、2001年9月17日時点で92企業・団体が参加している。また米国のEmbedded Linux Consortium (ELC) と密に連携をとることにより、世界中の組込みLinuxに関する情報の会員への提供や、Emblixで策定された仕様の海外への発信を迅速に行える態勢を整えている。

現在、Linuxにおけるリアルタイム性の検討を行うリアルタイムワーキンググループ、Linux on ITRONの仕様策定を行っているハイブリッドアーキテクチャワーキンググループ、組込みLinux向け開発環境の標準化を行う開発環境ワーキンググループが活動を行っている。また、Linuxのライセンス関係に関する調査を行う法務小委員会も活動をスタートさせている。特に、産業界のLinuxのライセンスに対する懸念を払拭するための根拠を示すことで組込みLinuxの普及の促進を目指すことは短期的に見て特に重要な問題と考えている。

■次世代の組込み環境に向けて

次世代の組込み環境はどのようになっていくのだろうか？ この疑問は組込みLinuxの導入により複雑化していく組込みシステムの将来像を考えることにより解が出てくると思われる。将来の我々の生活環境には数多くのコンピュータが埋め込まれそれらのコンピュータがお互いにネットワークにより接続されていくと思われる。さらに、ホームネットワーク、車載ネットワーク、パーソナルエリアネットワークなどのさまざまなネットワークがインターネットに接続されることにより世界中のあらゆる組込み機器がお互いに接続可能となっていく。これにより、我々の行動などさまざまな情報が自動的に計算機上に蓄えられ、その情報を用いてさまざまな機器の振る舞いをカスタマイズすることが可能となると思われる。

さまざまな物にコンピュータを埋め込むことにより何ができるかについて我々はまだまだ知らないことがたくさんあると思われる。つまり、我々の生活様式を一変するような新しいサービスが近い将来登場することで真の情報社会の実現が可能となるかもしれない。

組込みシステムにLinuxを導入することはそのような新しい未来への一歩となる可能性があると考えられる。

未来の生活環境を実現するための組込み機器は高度に複雑化していくと思われる。そのような組込み機器を安価に実現するためにはLinuxやJavaなどの標準ソフトウェア (COTSソフトウェア) の利用が必要不可欠だと思われる。最新の研究動向として、中島研究室での研究内容を紹介する。中島研究室では、我々の生活環境をよりインテリジェントにするためのミドルウェアアプリケーションの研究、および、その有効性を実証するためのアプリケーションの開発を行っている。また、これらのミドルウェアを構築するための基盤ソフトウェアとしてどのようにLinuxやJavaなどの標準ソフトウェアを利用するかの研究を行っている。現在は、以下の5つのプロジェクトに取り組んでいる。

1番目のプロジェクトは、将来の情報家電の構築を目指すプロジェクトである。このプロジェクトでは、HAViやJini, UPnP (Universal Plug and Play) などの組込みシステム向けミドルウェア間を接続するためのメタミドルウェアに関する研究を行っている⁷⁾。また、よりよいユーザインタフェースを提供するための将来の家電の制御法などについても研究を行っている³⁾。その他には、無線ネットワークにより接続された携帯デバイス間でのデータ共有に関する研究も行っている。この研究では、街中を歩くだけで自動的に欲しい情報を収集することを可能とするミドルウェアを開発している。

2番目のプロジェクトでは、インターネット上にあるさまざまなサービスや家電が提供するサービスを統合することで新たなサービスを構築するための基盤の実現を目指している。現在インターネット上にはさまざまな有用なサービスが提供されているので、それらのサービスを家電などの組込みデバイスが提供するサービスと統合することにより、今まで考えることができなかったようなサービスを簡単に実現することが最終目標である。

3番目のプロジェクトは、ビデオやオーディオデータを扱うツールキットの作成を目指している。このプロジェクトでは1番目のプロジェクトにおける情報家電を構築する場合に必要なマルチメディア処理部分を簡単に作成可能とするだけでなく、拡張現実感やコンテキストウェアネスなどの新しいサービスを構築する基盤の実現を目指している。

4番目のプロジェクトでは、新しい組込みソフトウェアの開発法の研究を行っている⁴⁾。我々の多くのプロジェクトではJavaとLinuxを基盤ソフトウェアとして利用しているが、次世代知的生活環境を実現する多様な組込みデバイスの特徴を有効利用するためにはこれら

の基盤ソフトウェアを動的最適化する必要がある。我々のプロジェクトでは、いかに既存のプログラムを変更せずセキュリティやリアルタイム性を動的に追加可能とするかの検討を行っている。

5番目のプロジェクトでは、OSやネットワークなどのユビキタスコンピューティング環境を支える技術の開発を行っている。本プロジェクトでは、Linuxのリアルタイム化、CORBAベースの分散OS、Javaのリアルタイム化、環境情報を統一的に管理するイベントシステムなどのさまざまな基盤ソフトウェアの研究開発を行っている。

将来の組込み分散システムは我々が想像する以上に複雑なものとなっていくと思われる。従来のシンプルなものを構成的に積み上げていく手法では将来の計算機環境を実現するにはきわめて困難である。中島研究室では、Emblixにおける活動を通して得られた知見と以上述べた現在の我々の研究結果を元に、システム全体を大局的に扱う新しいシステム構築手法と将来計算機環境におけるアプリケーションに関する研究を行っていく予定である。

■おわりに

本稿では、次世代の組込みOSとして注目を集めている組込みLinuxに関して解説した。今後、組込みシステムの大規模化が進むにつれ、高度なアプリケーションを支える堅牢で高い機能を提供するOSが必要不可欠となる。組込みLinuxは組込みシステム開発に関するさまざまな問題点を解決する手段としてきわめて優れたものである。しかし、実際の組込みシステムへ適応する際解決すべき問題もまだ多く残されている。日本エンベデッド・リナックス・コンソーシアムは、これらの問題を解決し組込みLinuxに関するさまざまな情報を提供することにより国内の組込み業界の活性化を図ることを期待するものである。また、我々の研究室では、Linuxが基盤OSとして計算機に埋め込まれた知的生活環境が構築可能であることを示す研究を行っていくことで、将来のLinuxに必要な機能が何であるかを明らかにしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Hansmann,U., Merk,L., Nicklous,M.S. and Stober,T.:Pervasive Computing Handbook, Springer (2001).
- 2) Nakajima, T., Iwasaki, M. and Ochiai, S.:Issues for Making Linux Predictable, In Proceedings of the IEEE International Workshop on Linux and Internet Appliances (2002).
- 3) Nakajima,T.:System Software for Audio and Visual Networked Home Appliances on Commodity Operating Systems, In Proceedings of the IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms (2001).
- 4) Ishikawa,H.and Nakajima,T.:Some Software Design Issues for Realizing Internet-Scale Ubiquitous Computing, In Proceedings of the International Workshop on Experience with Reflective Systems (2001).
- 5) Soejima,K.,Matsuda,M.,Iino,T.,Hayashi,T. and Nakajima,T.: Building Audio and Visual Home Appliances on Commodity Software,IEEE TRANSACTIONS ON CONSUMER ELECTRONICS, Vol.47, No.3 (2001).
- 6) Ishikawa,H.,Tokunaga,E.and Nakajima,T.:A Case Study of Implementing Home Appliance Middleware on Linux and Java, In Proceedings of the IEEE International Workshop on Linux and Internet Appliances (2002).
- 7) Nakajima,T.,Ueno,D.,Tokunaga,E.,Ishikawa,H.,Satoh,I. and Aizu,H.:A Virtual Overlay Network for Integrating Home Appliances, In Proceedings of the International Symposium on Applications and the Internet (2002).
- 8) Nakajima,T.,Tokunaga,E., Ishikawa, H. and Stajano,F.:Technology Challenges for Building Internet-Scale Ubiquitous Computing, In Proceedings of the Seventh IEEE International Workshop on Object-oriented Real-time Dependable Systems (2002).

(平成 14年 12月 19日 受付)

