

実計算機間の OS マイグレーション技術の設計

矢野 浩邦 佐藤 記代子 前田 誠司[†]

本論文では、実計算機上で動作する既存の OS を、終了あるいは休止状態にすることなく他の計算機へ移送する OS マイグレーション技術を提案する。移送元の計算機のデバイスの状態を保存し、移送先の計算機で復元する状態管理デバイスドライバをカーネルとデバイスドライバの間に挿入することによって、OS マイグレーションを可能にする。状態管理デバイスドライバは、移送先の計算機のハードウェア構成が異なる場合にも OS が継続できるように、実ハードウェア構成の隠蔽も行う。さらに、位置管理デバイスドライバを導入することによって、OS の移送後も、移送元計算機のデバイスを継続して使用する手段を提供する。

Design of OS Migration Mechanism among Real Computers

Hirokuni Yano, Kiyoko Sato and Seiji Maeda^{††}

In this paper, we propose OS migration mechanism, which can transfer an existing OS among real computers without stopping or suspending a kernel. OS migration is enabled by status managing driver inserted between the OS and device drivers. Status managing driver keeps states of devices and restores them to the devices on destination of migration. If the devices on the computers are different, status managing driver hides their differences between them so that the OS works continuously. In addition, after the migration, location managing driver enables to use the devices on the previous computer.

1 はじめに

ユビキタス・コンピューティングでは、ユーザはいつでも計算機にアクセスすることができる。そのような環境で、ユーザの位置、使用する計算機によらず、常に同じ環境を使い続けるための研究はこれまでも行われている [4][5][6]。モバイルユーザが、どこにいてもユーザ自身の環境を利用するには、大きく分けて、ユーザの計算機に遠隔からアクセスする方法と、ユーザの環境を持ち歩く方法とが考えられる。我々は、後者の実現手段のひとつとして、オペレーティングシステム (OS) をユーザが所有する複数の計算機間で移送する、OS マイグレーション技術を提案する。計算機間で OS を移送して持ち歩くことなので、遠隔アクセス時に生じる遅延は起らない。OS マイグレーションによって、ユーザは特定のハードウェアを持ち歩く必要がなくなる。

本稿では、2 章で、ユーザが複数の計算機上で、同じ計算機環境を継続して使用する必要性について述べ、3 章では、従来のユーザに同一環境を提供する技術とその問題点について述べる。4 章では、

我々が提案する実計算機間 OS マイグレーション技術について述べ、5 章で、その実現方法を説明する。最後に、本研究の課題、関連研究について述べ、まとめを行う。

2 計算機環境移送の必要性

通常、ユーザが複数の計算機を使用して作業を行う場合、手作業でそれぞれの計算機上の OS、アプリケーションの設定を同一にし、ネットワークや記憶メディアを使用してデータを共有し、それらのデータに対する作業を行うことが多い。しかし、複数の計算機間で OS、アプリケーションのインストール状況、設定を同一にする作業を、計算機を新規に導入する度に行うのは非常に煩雑である。また、計算機ごとにアプリケーションの起動を行うので、使用する計算機を変更する度に、作業の状態をユーザが手作業で復帰させなければならず、作業を中断せずに、継続して行うことはできない。

これらの煩雑な作業は、ユーザが作業を継続したまま、常に同一の計算機環境を使用することができれば発生しない。しかし、従来の計算機や OS では、ユーザの環境を複数の計算機間で移送して、常に同

[†](株) 東芝 研究開発センター

^{††}Corporate Research and Development Center, Toshiba Corp.

じ環境をユーザに提供することはできない。

我々は、ユーザが自分の計算機環境を持ち歩く手段のひとつとして、ユーザが使用している計算機上で動作している OS そのものを、ネットワークを介して他の計算機に移動させる実計算機間 OS マイグレーション技術を提案する。実計算機間 OS マイグレーション技術によって、ユーザがどこにいても、常に同じ環境で計算機を使用することができるようになる。例えば、職場で使用しているファイル編集作業中の計算機環境を、そのまま携帯用計算機に移動させて、通勤中に継続してファイルの編集をしたり、帰宅後、さらに自宅の計算機に環境を移動させて、作業を継続するといったことが、すべて同じ環境下で可能となる。

3 ユーザに同じ環境を提供する 従来技術とその問題点

本章では、ユーザが常に同じ環境を使用することを可能にする従来技術として、

- 画面転送による遠隔操作
- プロセスマイグレーション
- 仮想マシンを使った環境の移送

を紹介し、それぞれの手法と、ユーザが常に同じ計算機環境を使用するために、これらの技術を使う場合の問題点について述べる。

3.1 画面転送による遠隔操作

ユーザが常に同じ環境で計算機を使えるようにするために、VNC[4]、リモートデスクトップ [5] といった、遠隔で動作している計算機の画面を、ネットワークを介してユーザの手元の計算機に転送し、遠隔操作を実現するソフトウェアが提供されている。しかし、このような遠隔操作を行うソフトウェアでは、画面転送、ユーザの操作入力に、ネットワーク通信のレイテンシがあるため、手元の計算機で動作しているソフトウェアと比較して、快適な作業は困難である。また、計算機間のネットワーク接続が切断されてしまうと、全く使用できなくなってしまう問題もある。

3.2 プロセスマイグレーション

プロセスマイグレーション [1] は、プロセスが使用しているメモリの内容や CPU レジスタ値などの実行コンテキストを、他の計算機に転送し、転送され

た実行コンテキストを用いて、プロセスを復元し、実行を再開する技術である。

この技術をユーザ環境の移送に適用して、複数の計算機間でアプリケーションプログラムを移送すれば、ユーザが使用する計算機が変わった場合でも、ユーザは継続してアプリケーションを使用できるようになる。

しかし、その一方で、アプリケーションが OS 環境の変化に対応するのは困難である。多くの場合、OS の環境やハードウェア構成は移送元と移送先で異なるので、マイグレーション時には、アプリケーション自身が移送先の環境に対応しなければならないという問題がある。そのため、既存のアプリケーションを、プログラムに対する変更なしで、計算機間で移送することは難しい。

3.3 仮想計算機を使用した環境の移送

仮想計算機は、ソフトウェアによって CPU やデバイスの動作をエミュレートすることによって、仮想的な計算機を作り出す技術である。仮想計算機の製品として、VMware 社の VMware[2] や、Connectix 社の Virtual PC[3] などがある。

仮想計算機上の OS は、仮想化された CPU、メモリ上で実行され、仮想計算機上の仮想デバイスを使用することによって動作する。

仮想計算機の構成と、仮想計算機上の OS を他の仮想計算機へ移送する仕組みの概略を、図 1. に示す。

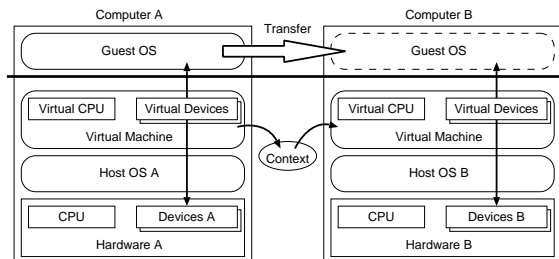


図 1: 仮想マシンの構成と OS の移送

仮想計算機上の OS に見せる仮想計算機のハードウェア構成を複数の仮想計算機で同一にしておけば、OS は、他の仮想計算機に移送されても、自身が動作している計算機が変わったことには気が付かずに動作を継続することができる。

仮想計算機はソフトウェアによって実現されているので、仮想 CPU や仮想計算機のメモリ、仮想デバイスの状態を含む仮想計算機のコンテキストを、すべて取得可能である。このコンテキストを元に、他の仮想計算機を移送元の仮想計算機と同一の状態にすることができ、その結果、OS 継続して実行することができる。

しかし、OS が仮想計算機が提供する仮想デバイスに対してアクセスを行った場合には、仮想計算機がそのアクセス内容をソフトウェアでエミュレーションし、さらに、仮想計算機が動作する OS を通じて実際のデバイスにアクセスを行う必要がある。この変換のためのオーバーヘッドは大きく、仮想計算機上の OS の動作が遅くなってしまうという問題がある。また、移送先の計算機から移送元の計算機のデバイスを継続して使用することはできないという問題もある。

4 実計算機間 OS マイグレーションの概要

本章では、3章で挙げた従来技術の問題点を解決するために我々が提案する、実計算機間 OS マイグレーションの概要とその特長について述べる。

実計算機間 OS マイグレーションは、

- 既存 OS の動作状態を実計算機間で移送可能
- 異なるハードウェア構成間でも移送可能
- 移送元の計算機のデバイスを継続使用可能

という特長を持つ。

以下では、それぞれの特長について説明する。

4.1 既存 OS の実計算機間での移送

実計算機間 OS マイグレーションのイメージ図を、図 2. に示す。

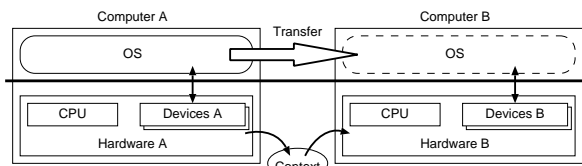


図 2: 実計算機間 OS マイグレーション

実計算機間 OS マイグレーションでは、画面転送による遠隔操作や、プロセスマイグレーションとは異なり、OS を動作させたまま、実行環境そのものをネットワークを介して計算機間で移送する。

また、図 2. に示すように、対象となる OS は、仮想計算機上の OS ではなく、実計算機上で動作している OS である。移送された OS は、実計算機に接続されたデバイスに対して直接アクセスを行う。その結果、仮想計算機で生じていたデバイスアクセスのためのオーバーヘッドを無くすことができ、仮想計算機上で OS を動作させるよりも高速に実行可能になる。

4.2 異なる HW 構成の計算機間での移送

移送元の計算機と、移送先の計算機でハードウェア構成が異なる場合、そのままでは移送元の計算機に接続されたデバイス用のデバイスドライバが、移送先の計算機で動作しないため、OS は動作し続けることが出来ない。そこで、実計算機間 OS マイグレーションでは、図 3. に示すように、移送先の計算機が備えるデバイスを、移送元の計算機が備えるデバイスに見せかけ、デバイスへのアクセス内容を変換する仕組みを用意する。

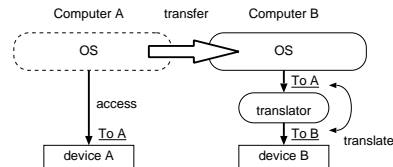


図 3: 異なる HW 構成の計算機間での移送

4.3 移送元計算機のデバイスの継続使用

実計算機間 OS マイグレーションでは、移送元の計算機で備えていたデバイスを、移送先の計算機では備えていないような場合に、移送先の計算機から、移送元の計算機が備えるデバイスを継続して使用することができる。そのイメージを、図 4. に示す。

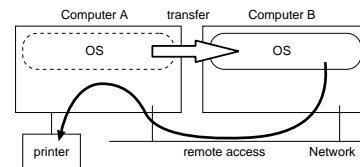


図 4: 移送元計算機のデバイスの継続使用

例えば、移送元の計算機にはプリンタが接続されているが、移送先の計算機にはプリンタが接続されていないという場合にも、移送後の計算機から、ネットワークを介して移送元の計算機に接続されたプリンタを継続して使用し続けるようにする。これによって、デバイスを備えている計算機から、デバイスを備えていない計算機に OS が移送されても、OS にデバイスが接続されていないことに気づかせずに、デバイスの継続使用ができる。

5 実計算機間 OS マイグレーションの実現方法

本章では、実計算機間 OS マイグレーションの実現方法を説明する。まず、システム構成と新たに追

加するソフトウェアモジュールの役割の説明をし、次に、実計算機間 OS マイグレーションの実装と動作について述べる。

5.1 システム構成

図 5. に OS マイグレーションを行う計算機 2 台からなるシステムの構成図を示す。各計算機は、ネットワークによって接続されている。計算機 A と計算機 B で、ネットワークインタフェースカードは、同種類のものを使用している。また、計算機 A のビデオカード (VGA) と、計算機 B のビデオカードの種類は異なり、それぞれ専用のデバイスドライバによって制御される。プリンタ (PRT) は、計算機 A のみ接続されており、OS マイグレーション後も計算機 B から使用する。計算機 B 上で動作する OS は、後述する OS マイグレーションの動作によって、計算機 A から移送されたものである。

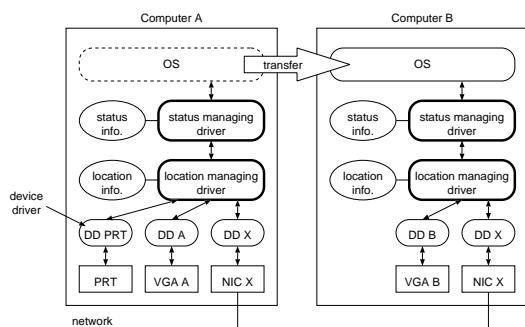


図 5: システム構成図

実計算機間 OS マイグレーションを実現するために、カーネルとデバイスドライバの間に、後述の状態管理デバイスドライバと、位置管理デバイスドライバと呼ぶソフトウェアモジュールを設けている。

以下では、それぞれのモジュールについて説明する。

5.1.1 状態管理デバイスドライバ

OS は、通常のアプリケーションプログラムと違い、ハードウェアに密着したプログラムである。従って、OS の実行環境を他の計算機に移送して継続動作させるには、OS が使用しているメモリの内容と CPU のレジスタ値のほかに、計算機に接続されたハードウェアデバイスの状態も実行状態として取得、移送し、移送元の計算機のデバイスと、移送先の計算機のデバイスの状態に同一しなければならない。

この、メモリの内容、CPU のレジスタ値、デバイスの状態を取得し、移送する役割を状態管理デバイスドライバが持つ。また、4.2 節で述べた、OS が移送元の計算機のデバイスを想定して行った入出力を、

計算機が実際に備えているデバイスに適合する形式に変換する役割も持つ。

デバイスの状態を取得するために、状態管理デバイスドライバをカーネルとデバイスドライバの間に挿入し、カーネルのデバイスドライバに対する入出力を状態管理デバイスドライバを介して行うようにする。状態管理デバイスドライバは、デバイスドライバに対する入出力を解釈し、すべてのデバイスの状態の変化をデバイス状態管理表として記録する。デバイスの状態とは、例えば、ビデオカードであれば、画面の解像度や色数、フレームバッファの内容などである。デバイス状態管理表には、OS に見せているデバイスの種類と、計算機が実際に備えているデバイスの種類も記録し、これらが異なる場合には状態管理デバイスドライバは、OS からのアクセスを計算機が実際に備えるデバイスに適合するように変換して、入出力を行う。

デバイス状態管理表の例を図 6. に示す。

デバイス	OS 種類	実際の種類	項目	状態
ビデオカード	VGA A	VGA B	画面モード	1280x1024px
			フレームバッファ	65536 色 ピクセル情報
ネットワーク	NIC X	NIC X
プリンタ	PRT	PRT

図 6: デバイス状態管理表の例

図 6. は、図 5. の計算機 B のデバイス状態管理表を表している。各デバイスについて、OS が認識しているデバイスの種類である「OS 種類」、実際に計算機に接続されているデバイスの種類である「実際の種類」を記録している。例えば、OS は、ビデオカードとして VGA A が計算機 B に接続されていると認識しているが、実際には VGA B が接続されていることを表している。そして、ビデオカードであれば、画面モードや、フレームバッファの内容のように、それぞれのデバイスの状態が格納されている。

5.1.2 位置管理デバイスドライバ

位置管理デバイスドライバは、デバイスの位置を管理し、OS とデバイスとの入出力を計算機間で転送する役割を持つソフトウェアモジュールである。位置管理デバイスドライバによって、4.3 節で述べた、遠隔デバイスを、OS に対して、直接接続されたデバイスのように見せて、OS 移送先の計算機から、移送元の計算機のデバイスを継続して利用することが可能になる。

位置管理デバイスドライバは、状態管理デバイスドライバの下位に位置し、OS がアクセスしようとしているデバイスが、OS が動作している計算機が備えるデバイスであれば、デバイスドライバを通して直接入出力を行う。遠隔の計算機のデバイスであれば、ネットワークを介してデバイスへのアクセス

を転送し、そのデバイスと入出力を行う。

位置管理デバイスドライバは、デバイスがどの計算機に接続されているかを記録するデバイス位置管理表を管理する。OS マイグレーション時にデバイスの接続形態が変化した場合、デバイス位置管理表の内容を更新する。

デバイス位置管理表の例を図 7. に示す。

デバイス	接続されている計算機
ビデオカード	計算機 B
ネットワーク	計算機 B
プリンタ	計算機 A

図 7: デバイス位置管理表の例

この例は、図 5. の計算機 B のデバイス位置管理表を表している。ビデオカード、ネットワークインタフェースカードは計算機 B に接続されており、プリンタは、計算機 A に接続されていることを表している。

5.2 システムの実装と動作

ここでは、実計算機間 OS マイグレーションに関連する、デバイスアクセス時の動作と、OS マイグレーション時の動作について、実装方法と共に説明する。

5.2.1 デバイスアクセス時の動作

ここでは、計算機 B 上で動作する OS がデバイスに対してアクセスする際の動作を説明する。図 8. は、それぞれの計算機のメモリ中にどのように OS、状態管理デバイスドライバ、位置管理デバイスドライバが配置され、どのようにデバイスアクセスを行うかを示している。

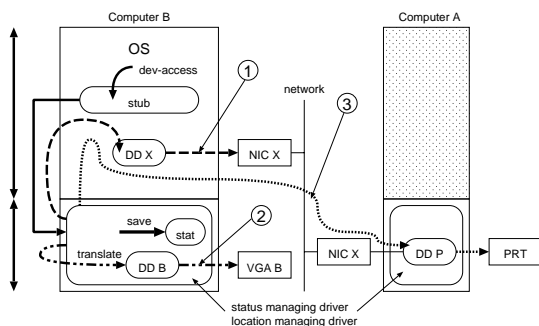


図 8: デバイスアクセス時の動作

計算機 B のメモリ中には、OS のプログラムとデータ、状態管理デバイスドライバ、位置管理デバイスドライバが存在する。状態管理デバイスドライバと位置管理デバイスドライバは、OS と独立して動作可能で、特別に確保されたメモリ領域にロードされ

る。OS と状態管理デバイスドライバを接続するスタブは、OS のデバイスドライバとして実装される。計算機 A では、状態管理デバイスドライバ、位置管理デバイスドライバが待機している。

OS がデバイスに対してアクセスすると、アクセス内容は、スタブを経由して状態管理デバイスドライバに渡される。状態管理デバイスドライバはその内容によるデバイスの状態の変化を、デバイス状態管理表に記録する。

以降は、デバイスの接続形態により、デバイスへのアクセス方法が異なる。図 8. 中の番号と対応して、以下の手順で、状態を取得しながらデバイスに対してアクセスを行う。

1. NIC X のように、実際のデバイスが OS が認識しているデバイスと同一の場合、スタブ、OS 本体のデバイスドライバを通してデバイスに対してアクセスする。
2. VGA B のように、実際のデバイスが OS が認識しているデバイスと異なる場合、状態管理デバイスドライバはアクセス内容を実際のデバイスに適合するように変換し、状態管理デバイスドライバ独自のデバイスドライバを通してデバイスに対してアクセスする。
3. PRT のように、計算機 A のデバイスに対してアクセスする場合、位置管理デバイスドライバがネットワークを経由して、計算機 A 上で動作する状態管理デバイスドライバ独自のデバイスドライバに要求を出し、デバイスに対してアクセスする。

以上が OS がデバイスに対してアクセスする際の動作である。

5.2.2 OS マイグレーション時の動作

ここでは、計算機 A 上で動作する OS を計算機 B に移送する際の動作を説明する。図 9. は、それぞれの計算機のメモリ中にどのようにソフトウェアモジュールが配置され、どのように OS マイグレーションを行うかを示している。図 9. の上図がマイグレーション開始時のステップを、下図がマイグレーション終了時のステップを表している。

OS マイグレーションのリクエストがある状態で、OS から状態管理デバイスドライバに制御が移ると、状態管理デバイスドライバは、全物理メモリの内容と、CPU のレジスタ値、5.2.1 節で説明した動作で記録したデバイス状態管理表、デバイス位置管理表を、ネットワークを介して、待機中の計算機 B に転送する。転送後は、計算機 A の OS は停止し、状態

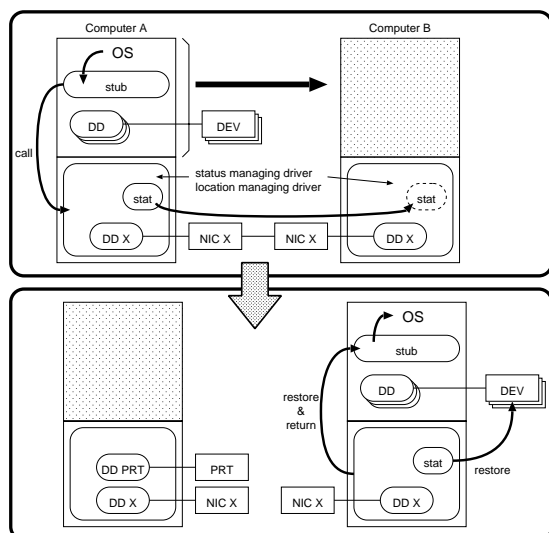


図 9: OS マイグレーション時の動作

管理デバイスドライバ、位置管理デバイスドライバは待機状態になる。

計算機 B の状態管理デバイスドライバは、デバイス状態管理表を元に、デバイスの状態を復元する。続いて、5.2.1 節で説明したデバイスアクセスを計算機 B で行えるように、遠隔のデバイスについて、デバイス位置管理表の内容を更新する。そして、最後に、OS に制御を戻し、OS の実行が再開される。

6 今後の課題

現在、今後の実計算機間 OS マイグレーションの課題として、

- 画面転送、仮想計算機と組み合わせることによって、ユーザ環境の移送を効率化する手法
- OS の電源管理、プラグアンドプレイ機能を使って、多様なデバイスへ対応を容易にする手法
- ネットワークを介した効率的なデータアクセスで、ストレージデータの転送量を低減させる手法

を検討している。

7 関連研究

独立行政法人産業技術総合研究所で行われている、「ネットワークを渡り歩けるコンピュータ」[6]は、OS マイグレーションと同様に、計算機間でユーザの環境を移送するための技術である。ネットワークを渡り歩けるコンピュータは、仮想計算機上の OS を、OS のハイパネーション機能を利用して一時的に停止させ、同じアーキテクチャの他の仮想計算機に移送す

ることによって、ユーザの環境を移送する。それに対して、OS マイグレーションでは、実際の計算機を利用する点、異なるハードウェア構成の計算機間での移送を行える点、移送元の計算機のデバイスを使用し続けることができる点が異なっている。

8 まとめ

我々は、OS の実行環境そのものを、ネットワークを介して、他の計算機に移動させることによって、ユーザが常に同じ環境で計算機を使用することを可能にする、OS マイグレーション技術を研究している。

本稿では、実計算機上で動作する既存の OS を、終了あるいは休止状態にすることなく他の計算機へ移送する実計算機間 OS マイグレーション技術を提案した。実計算機間 OS マイグレーションでは、状態管理デバイスドライバ、位置管理デバイスドライバを導入することで、既存の OS を動作させたまま計算機間で OS を移送する。さらに、実計算機間 OS マイグレーションは、異なるハードウェア構成の計算機間での OS の移送や、移送元の計算機のデバイスの継続使用も実現する。

今後は、実計算機間 OS マイグレーションの実現可能性および効率化の検討を行う予定である。

謝辞

本研究は、通信・放送機構の委託研究「ヒューマンセントリックユビキタスネットワーク基盤システムに関する研究開発」の下に行った。

参考文献

- [1] Butterfield, S.A. and Popek, G.J: Network Tasking in the Locus Distributed Unix System, Proc. Usenix Summer'84, pp.62-71 (1984)
- [2] VMware, Inc, VMware™, <http://www.vmware.com/>
- [3] Connectix Corporation, Virtual PC™, <http://www.connectix.com/>
- [4] RealVNC Ltd., RealVNC™, <http://www.realvnc.com/>
- [5] Microsoft Corporation, Windows™ XP Remote Desktop, <http://www.microsoft.com/windowsxp/>
- [6] 須崎 有康, Network Transferable Computer (ネットワークを渡り歩けるコンピュータ), <http://www.et1.go.jp/suzaki/NTC/>