

## 審査の結果の要旨

氏 名 味曾野 雅史

本論文は、仮想化環境で OS（オペレーティングシステム）を動作させる際に、機能要件に最適化したシステムを実現する手法に関する研究成果をまとめたものである。OS の仮想化環境は、クラウドをはじめとした現代的コンピュータ・システムの実現に欠かせない技術であるが、仮想化環境を実現する仮想マシンモニタと呼ばれるソフトウェアには、機能性と性能との間にトレード・オフの関係があり、多数の機能を持った汎用的な仮想マシンモニタでは、仮想化しない場合と同等の性能を実現することは難しい。

本論文では、主に四種類のユースケースに対して機能要件に最適化された仮想化環境を実現する手法を議論している。第一のユースケースは、仮想マシンモニタのデバイスドライバの耐ハードウェア故障性検査に関するものである。ハードウェア故障は多数のマシンが存在する環境では比較的高い頻度で発生するが、デバイスドライバがハードウェア故障を想定しておらず、仮想マシンモニタ全体の不具合を引き起こす可能性がある。そこで、検査対象の仮想マシンモニタの下に別の仮想マシンモニタを挿入し、ソフトウェア的にハードウェア故障を挿入してテストするアプローチが有効である。しかし、従来の仮想マシンモニタでは、ネステッド仮想化の性能やハードウェア環境の違いなどに問題があった。本研究では、テスト対象の仮想マシンモニタは悪意がないと仮定できる点や、なるべく実機に近い実行環境で動作させるという要件から、必要最低限のネステッド仮想化をおこなう仮想マシンモニタを設計・実装して評価をおこなった。その結果、実際の製品においてデバイスドライバの不具合によって仮想マシンモニタ全体がクラッシュする事例を複数発見した。また、ネステッド仮想化のオーバーヘッドも従来の汎用仮想マシンモニタと比べて大幅に低く抑えられていることを確認した。

第二のユースケースは、外部ハードウェアから実施するメモリ内容のセキュリティ検査を妨害する攻撃に対する対策に関するものである。近代的なコンピュータに搭載されている IOMMU を使うと外部デバイスからの DMA を妨害できてしまうため、IOMMU を仮想マシンモニタで管理するアプローチが有効であるが、従来の仮想マシンモニタをこの目的だけに使うのは弊害が大きい。そこで、IOMMU の悪用を防止するという機能要件に基づき、IOMMU のセキュリティに関わる設定と自分自身の保護だけをおこなう最小限の仮想マシンモニタを設計・実装して評価をおこなった。その結果、実際に IOMMU の保護を実現できていることや、汎用仮想マシンモニタで仮想 IOMMU を用いた場合と比べてもオ

オーバーヘッドを大幅に低く抑えられていることを確認した。

第三のユースケースは、ネットワークのパケットフィルタを確実に実現するシステムに関するものである。これも仮想マシンモニタでネットワークデバイスを管理する手法が有効であるが、ハードウェアが不必要に仮想化されるのは性能および機能性の両面において問題となる。そこで、パケットフィルタだけを確実に実現しつつ、そのポリシーはプログラマブルにするという機能要件に基づいて、仮想マシンモニタでネットワークデバイスの一部だけを仮想化しつつ、パケットフィルタリングをおこなう仮想マシンを内蔵する仕組みを設計・実装して評価をおこなった。その結果、外部からコードを送り込んで指定したパケットフィルタを確実に実行しつつ、仮想化のオーバーヘッドも低く抑えられることを確認した。

第四のユースケースは、仮想化環境において NUMA (non-uniform memory access) 構成のマシンの性能を最大限に発揮する手法に関するものである。NUMA 構成を活用するためには OS がその構成を把握してスケジューリングを最適化する必要があるが、従来の仮想 NUMA では NUMA 構成を十分に活用できない問題があった。そこで、NUMA 構成は隠蔽する必要がないという機能要件に基づいて、物理的な NUMA 構成を正確に再現した仮想化環境を構成して OS の性能評価をおこなった。その結果、Linux ではいったん vCPU が preempt されると物理 CPU がアイドル状態であっても再度 vCPU にスケジューリングされないという False Preempted State 問題を発見した。その問題を解決する手法を設計・実装した結果、仮想 NUMA 環境においても物理マシン上と同等の性能が発揮できるようになったことを確認した。

本論文では、これらのユースケースに基づく研究を通して、仮想化環境における機能性と性能との間にトレードオフの関係があることを実証的に明らかにした。また、具体的な事例に対して最適な手法を提案して、実際に設計・実装・評価をおこなうことにより、その有効性を明らかにするとともに、従来の汎用仮想マシンモニタとは異なる様々な機能性をもった専用仮想マシンモニタの構成法があり得ることを明らかにした。これらの研究を通じて、OS の仮想化環境という情報理工学の一研究領域に関する新たな知見を多数提供しており、当該分野の発展に資する学術的貢献があるものと認められる。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。