

称号及び氏名	博士（工学） 松並 直人
学位授与の日付	2015年3月31日
論文名	「 Semi-Symmetric Active-Active 型 デュアルコントローラストレージシステムに関する研究」
論文審査委員	主査 辻 洋 副査 戸出 英樹 副査 宮本 貴朗 副査 新井 利明

論文要旨

情報化社会が進展し、インターネット商取引の普及や、戦略的情報活用に対する機運の高まりをうけ、情報量は増加の一途にある。大量に増え続ける情報を安全かつ高速に入出力する情報処理装置がストレージシステムである。

企業用途のストレージシステムとして、デュアルコントローラストレージシステムが普及している。デュアルコントローラストレージは、数 **100** 台の **HDD** と **2** 台のストレージコントローラを搭載するストレージシステムで、「**LU** オーナ権」と呼ぶ機構を持つことが特徴である。**2** 台のストレージコントローラのうち的一方が特定の **LU** (**Logical Unit**: 論理ユニット) のオーナ権を占有し、独占的に **LU** をアクセスできる構造とすることで、コントローラ間の排他制御を不要とし、高速な **LU** アクセス制御を実現している。以下、**LU** オーナ権を所持するストレージコントローラをオーナコントローラと称する。

本論文では、このデュアルコントローラストレージシステムを研究対象とし、新しいアーキテクチャとして **Semi-Symmetric Active-Active** 型デュアルコントローラ方式を提唱する。以下、**Semi-Symmetric Active-Active** を **sSAA** と略記する。

本研究で明らかにした課題は次の通りである。クラウドコンピューティングの普及により、仮想化されたサーバがネットワークで接続された物理サーバ上を自由に移動できるようになった。その結果、サーバのシステム構成が動的に変化するようになり、サーバからストレージシステムへのアクセス経路も変化するようになった。サーバから特定の **LU** をアクセスする際に、**2** 台のコントローラのいずれからでも、オーナ権の所持の有無に関わらずアクセスできることが必要となった。しかしながら、従来のデュアルコントローラストレージシステムは、コントローラのオーナ権の有無により **LU** アクセス性能が非対称になるという特性があった。本研究では、この特性に起因した以下に示す **3** つの課題を見出した。

(1) 高性能化の課題

システム構成変更に伴うアクセス経路の変更により、**LU** オーナ権を所持しない非オーナコントローラからの **LU** アクセスが必要になるが、その際、オーナコントローラへの処理委託を行わなくてはならず、その委託オーバーヘッドにより **LU** アクセスが低速化し、結果的にシステム性能が低下する。

(2) 高運用化の課題

クラウドコンピューティング環境における急激な負荷上昇や、仮想サーバの移動によるシステム構成の変更により、**2** 台のコントローラ間の負荷均衡状態が崩れるが、その対策のため、

オーナー権とアクセス経路の関係を考慮した、多くの人手を要する負荷均衡化処理の実施が必要となる。

(3) 高可用性の課題

24 時間無停止でストレージシステムのマイクロコードを交換することが求められるが、ストレージコントローラを **1** 台ずつ停止させながらマイクロコード交換作業を実施するため、**1** 台を停止させる間、もう **1** 台のストレージコントローラに全 **LU** オーナ権を移行するとともに、全てのコマンドを振り向けるよう、サーバのソフトウェアの操作によりアクセス経路を切り替える必要がある。このアクセス経路の切り替え作業のため、サーバ運用管理者の手助けと、多数のサーバのソフトウェア操作が必要となり、多くの作業工数が発生する。

本論文では、定義した3つの課題を解決する**sSAA** 型デュアルコントローラストレージシステムに関して論じる。以下、各章の要点を述べる。

第2章では、**3** つの課題に対処するための基本アーキテクチャとして **sSAA** 型デュアルコントローラ方式を提唱し、**LU** オーナ権の有無に関わらず実用上均質な性能対称性の実現を目指す。**sSAA** 方式では、非オーナーコントローラが受信したコマンドをオーナーコントローラに高速に移送するとともに、コマンド処理全体を委譲することで、従来発生していたオーナーコントローラへの処理委託に要するコントローラ間の相互のやり取りに起因するオーバヘッド時間を低減する。待ち行列理論を用いた **CPU** 性能予測手法を確立し、この手法を用いた基礎評価を行う。評価の結果、提案方式は、非オーナーコントローラの制御による **IO** スループット性能において、従来比 **1.8**~**4.2** 倍の性能改善を達成し、目標とする **250** 台の **HDD** を駆動可能とする、実用上均質な性能対称性を実現できることを示す。

第3章では、非オーナーコントローラによる **LU** アクセスの高性能化を実現するため、前述した非オーナーコントローラがオーナーコントローラへコマンドを高速に移送する技術として、コマンドキャスト方式を提案する。他系のメモリ空間を自系メモリ空間にアドレス変換してマッピングすることで、直接メモリアクセスを可能とするハードウェア回路と、他系メモリ空間上にコマンドを格納するためのコマンドキャストキューと呼ぶソフトウェア機構を設ける。各種メッセージ伝送技術に対応した性能評価モデルを確立し、メッセージ伝送に要する **CPU** オーバヘッドとメッセージ伝送時間の定量評価を行う。評価の結果、本提案技術によると、**CPU** オーバヘッドが従来技術比 **1/5**~**1/10** となる **2.0us** に、メッセージ伝送時間が従来技術比 **61%**~**89%**となる **15.5us** にそれぞれ低減でき、非オーナーコントローラによる **LU** アクセスの高速化が達成できることを示す。

第4章では、**sSAA** 型デュアルコントローラストレージシステムの高運用化を実現するために、システムが自動的にデュアルコントローラ間の負荷均衡状態を維持する技術として **CPU** 負荷均衡方式を提案する。コントローラ間の負荷均衡状態が崩れた際に、**sSAA** 方式が提供する性能対称性を活用し、**CPU** 負荷率を負荷均衡化の指標として **LU** オーナ権をコントローラ間で移動することによって、デュアルコントローラ間の負荷均衡を実現する方式である。この際、**LU** オーナ権の有無により生じるアクセスモードの差異と、**Read/Write** コマンドの制御の差異の両方に起因する不均質な負荷特性を考慮することが特徴である。**sSAA** 型デュアルコントローラの動作を模擬した性能シミュレータを開発し、**CPU** 負荷均衡方式の性能評価を実施する。**VM** マイグレーションを模倣し、かつ、時間変動する実働負荷を用いたシミュレーションによる評価の結果、**CPU** 負荷均衡方式によると、**24** 時間平均応答時間が **3.5ms** であり、従来技術に対し **27%**の性能向上効果があることを示す。また、提案方式の適用により、常時、人手の介在なく、自動的なコントローラ間の負荷均衡化が可能となり、ストレージシステムの運用性向上に有効であることを示す。

第5章では、**sSAA** 型デュアルコントローラストレージシステムの高可用化を実現するために、サーバ運用管理者の手助けと、サーバ上のパス切替ソフトウェアの操作を必要とせず、ストレージ運用管理者が単独で、無停止によりマイクロコード交換を行える技術として、自律型無停止マイクロコード交換方式を提案する。**sSAA** 方式の提供する性能対称性を活用して、マイクロコード交換中のコントローラが受信した全てのコマンドを、もう一方の稼働コントローラに高速に移送して処理全体を委譲することで、**CPU** をコマンド処理から解放し、その間に無停止マイクロコード交換を実施可能とする。時間変動する実働負荷を用いたシミュレーションによる評価の結果、性能に関しては、最大許容負荷に対し **50%**以下の環境下において、無停止マイクロコード交換中の平均レスポンス時間の増加は最大 **0.54ms** であり、アプリケーションから見たオーバヘッドの増加の影響は小さいことを示す。また、可用性に関しては、マイクロコード交換処理中のコントローラ一時停止時間の最大値は約 **150ms** であり、目標とする **99.999%**の高可用性を達成できることを示す。

第6章では、本研究で得られた結果を総括するとともに、今後取り組むべき研究課題を述べる。

審 査 結 果 の 要 旨

本論文は、デュアルコントローラストレージシステムに関するもので、特に最近のクラウドコンピューティングの進展に基づく情報システムの大規模化、複雑化を鑑み、時間に伴い拡張していく著しい容量追加とダイナミックなアクセス特性変化への追従について課題を定義し、それらを解決するための手法を考究したものである。将来の情報の維持保管コストを節減するために、性能の向上、運用性の向上、可用性の向上に貢献する重要な研究成果をあげていると考えられる。

本論文の特徴は、上記の課題を解決するための基本アーキテクチャを提唱し、2つのコントローラの状況に応じて、実用上均質な性能対称性を追求しており、経済的にも優位にある次の成果をあげている。

(1) 二つのコントローラのうち、一方が他方にコマンドを高速に移送する技術を提案するとともにその性能評価モデルを確立している。典型的な事例で評価を行っており、従来の手法より、CPUオーバヘッドとメッセージ伝送時間を低減できることを定量的に確認している。

(2) 二つのコントローラの負荷が均衡しているかないかについて、アクセスモードとコマンド制御の差異に基づく評価指標を導入し、人手を介さず自動的に負荷均衡化する技術を提案している。シミュレータを開発し評価実験を行うことにより、従来の手法に比べて運用性を向上していることを確認している。

(3) 従来マイクロコードを交換する際、サーバ運用管理者とストレージ運用管理者の両者が必要であったが、提案アーキテクチャの性能対称性を利用してストレージ運用管理者が単独で行える方式を提案している。時間変動する実働負荷を用いたシミュレーションを実施することにより、提案方式がシステム全体のオーバヘッドにはならないことを確認したうえで、高い可用性を達成できることを定量的に確認している。

以上の研究成果は、包絡分析法の評価方法に関して新しいアプローチを提示しており、知能情報工学分野の発展に貢献したと考えられる。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを証したものである。本委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、申請者に対して博士(工学)の学位を授与することを適当と認める。