

氏名	みやべひろし 宮部博史
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和55年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学位論文題目	計算機の記憶管理に関する研究
指導教官	東北大学教授 野口 正一
論文審査委員	東北大学教授 野口 正一 東北大学教授 城戸 健一 東北大学教授 重井 芳治 東北大学教授 伊藤 貴康 東北大学助教授 原尾 政輝

論文内容要旨

第1章 序 論

近年の電子計算機発展には、目覚しいものがあり、特に、その処理速度の向上と利用分野の拡大には、目を見張るものがある。電子計算機発展の歴史を一言で表現するならば、大量情報の高速処理化と汎用化の歴史であるともいえる。この目的に沿って、数々の研究開発がなされてきている。高速処理化の要求に対しては、記憶機器自体の高速化・高集積化によってそれを満足すると共に、構成論的立場からの問題解決も提起されており、その代表的なものがバッファ記憶方式による主記憶の階層化である。一方、計算機システムの効率的運用及び汎用化の要請に対する典型的な例としては、仮想記憶が挙げられる。ところで、階層化された主記憶もその運用上仮想記憶システムの一形態として捕えることができる。このようなことから、仮想記憶は計算機システム設計の中心的課題となっている。

本論文の目的は、このように階層化された仮想記憶計算機システムの記憶管理の問題を、記憶システムの構成評価を通して総合的に行い、システム設計の指針を与えることにある。計算機システムを最適に設計することを目的とした場合、記憶機器関係の経費が全体の経費の過半を占めるのが現状であり、また他の機器の変更が容易でないことを考え併せれば、記憶システムを最適に設計することは極めて重要な問題である。この意味から、本論文で扱う問題は、計算機システ

ム全体の最適化の中で主要な位置を占めるものといえる。

記憶システムの最適化において議論しなければならない問題点は、次の三点に大別されよう。使用状況設計の問題、システム性能評価・予測の問題、最後に、システム設計方針の問題である。従来の研究では、システム性能評価の問題に関しては、かなりなされているが、これらの問題を統一的に考察し、それらの関連を言及しているものが殆どなく、この方面の研究が叫ばれている。特に、階層化された記憶システムに対する研究は断片的であり、システム性能評価方式も確立していないのが現状である。

本論文では、記憶システム設計の問題を以上で述べた諸問題との関連から論じる。

第2章 仮想記憶システムの構成法

本章では、記憶システムを実際に構成する際に問題となる使用状況の設定問題の中で、記憶システム形態と主記憶の容量決定問題について議論している。一般に、記憶システム形態は並列接続形態と直列接続形態とに大別される。前者は、取扱う情勢が大規模で局在性が弱いものに適している。一方、後者は、情報の局在性が強いプログラムを処理するのに適したシステム形態である。

記憶階層構造システムは、直列接続形態の記憶システムの代表的なもので、低速記憶機器は上位の記憶機器に含まれる情報内容を完全に包含する性質を持つ。この性質により、情報移動などに関しては、二段の記憶システムの自然な拡張と見なせる。本章では、記憶階層構造システムの諸性質を明らかにし、各段の記憶機器が満足すべき条件を与えている。次いで、記憶階層構造システムの有効性を検証するため、三種類の記憶機器から成る幾つかの記憶システムの比較検討を行った。この結果、アクセス速度に一桁以上の差を設けるような通常の記憶機器選定においては、記憶階層構造システムが極めて有効であり、情報の局在性が強い程この傾向が大きくなることが示された。記憶システムに対し、コスト制限を設けても同様の優劣が成立することも併せて示している。

本章の後半では、使用状況設定のもう一つの問題として、主記憶容量と、多重処理による主記憶細分の効果を論じている。コスト制限のため主記憶容量が制限されているような状況において、多重度をむやみに増加させると、スラッシング現象のため、計算機システムの効率的運用ができない。ここでは、寿命関数を、記憶容量とプログラムの局在性とにより定式化し、主記憶の最適な分割法を示している。また、主記憶容量に対し、最適な多重度の決定法についても言及している。

第3章 プログラム動作の特性化と記憶管理方式

計算機システムの性能は、計算機自体の要因の他に、取り扱うプログラムの性質により大きく左右される。従って、記憶システムの設計・評価に際しては、プログラム動作を何らかの意味で特性化することが必要となる。一般に、プログラムの振舞いは、参照されたページの系列（参照系列）によって表現されるが、実行に先立って参照系列を完全に把握することは困難である。このことから、システムの効果的運用のための種々の情報再配置手続き（PRA）が提唱されている。

本章では、まず、プログラム動作を次の二つに分類している。一つは、プログラム・ページと呼ばれるもので、主に命令を多く含むページから成る。もう一つは、データ・ページと呼ばれるもので、主にデータを含むページから成るものである。次いで、前者の振舞いをマルコフ参照モデルで、後者の振舞いは独立参照モデルにより表現し、PRAの評価比較を行う。

3.2では、以降の議論で用いる基礎的定義及び、基礎的結果を与え、特に最適なPRAがDPAと呼ばれるクラスの中に含まれることを示す。3.3では、独立参照モデルによりプログラム動作を特性化し、PRAの比較評価を行う。このため、既存のPRAを包含するような幾つかのPRAを定義し、これらの評価を通して、既存のPRAの評価式を与える。また、この結果を用いて、各PRAの性能を考察する。3.4以降では、マルコフ参照モデルによりプログラム動作を表現した場合のPRAの評価を行っている。

3.4では、独立参照モデルにおいて成立していた各PRAの比較評価が成立しないことを示し、最適なPRAの導出を図る。次に、これを基にし、準最適なPRAを提案し、巡回マルコフ参照モデルの上で、各PRAを比較評価を行う。3.5では、主にワーキングセットPRAの評価をLRUとの関係から論じ、更に、マルコフ参照モデルにおいて成立する幾つかの性質も明らかにする。3.6においては、処理プログラム交替による局在性の変化を考察し、システム性能への影響を探る。このことより、システムの効率的運用のための条件を示す。

第4章 記憶階層構造システムの性能と評価

本章では、実際に記憶階層構造システムを設計した場合のシステム性能評価方式(4.3)と、階層化された主記憶における情報更新手続きについて議論する。4.2では、2章の結果を踏まえ記憶階層構造システム構成における問題点を整理する。4.3では、記憶階層構造システムの性能評価を行う。ここでは、従来の研究との対比、及び外部記憶機器の影響を考察するため、主に二種類の外部記憶機器とにより構成される記憶階層構造システムを考えている。この種のシステムは、隠れマルコフと再生定理を用いることにより、解析可能であり、この手法は、従来のモデルに対しても有効であることを示す。また、系応答時間についても検討し、これらの解析結果を通して、外部記憶機器の満足すべき性質を明らかにしている。更に主記憶細分の効果についても言及し、2章の結果を検証している。この節では、オーバーヘッドとの関係から、最適な主記憶段数設定法についても考察を加えている。

4.4では、階層化主記憶における情報更新手続きについて議論している。この手続きは、ストア方式、スワップ方式の二つに大別される。階層化主記憶においては、スワップ方式が用いられることが多い反面、ストア方式の利点も指摘されている。本節ではまず、種々の情報更新手続きに対し情報転送機構を明確にし、効率比較を行う。次いで、ストア方式の特徴を生かした手続きを提唱し、比較考察する。以上の結果を通じ、ストア方式がスワップ方式に比し、効率的に余り劣るものでないこと、及び、情報保護の面では極めて有効な手続きであることを示している。

第5章 記憶システムの最適化方式

記憶システムを最適に構成する方針として、平均アクセス時間最小の観点から論じることが可能であり、本章では、この立場に立ち、コスト制限の下での最適システムの構成について議論している。

まず、記憶機器をアクセス時間と、単位容量のコストによって特性化し、最適なシステムが構成されるための記憶機器選定アルゴリズムを与える。このため、将来与えられていた条件を、記憶階層構造システムにも適用できるように拡張する。次に、最適システムで成立する条件を与える。この結果、投入されたコストと、それによって達成されるシステム効率向上の割合のつり合うことが、最適記憶システムとなるために必要であるとの条件式を得た。

5.3では、主に記憶階層構造システムの最適設計について考察する。寿命関数を容量とプログラム局在性の因子で定式化することにより、隣り合う記憶機器間の最適な容量比が、アクセス速度と単位容量コストにより与えられることを示す。また、最適な記憶階層構造システムにおいて、隣り合う記憶機器間の使用の頻度は、各々に投入されたコストの比に釣り合うことも示す。本節の最後では、局在性の強弱との関係から考察し、局在性の強い程高速記憶機器を重視しなければならないとの結果を得た。

5.4では、記憶機器を構成する要素が与えられた下での最適な記憶階層構造システム構成を論じている。まず、コスト制限による最適な記憶段数の設定問題を考え、この問題解決のためのアルゴリズムを与える。次に、モジュール化された記憶容量に対しての、各モジュール数決定のためのアルゴリズムを与えている。また、記憶階層構造システムにおける最適化の手順は、幾つかの記憶階層構造システムの合成として表現されるような木構造の記憶システムにも適用できることを示している。

第6章 記憶システムの最適設計法

本章では記憶システムの最適化をシステム効率（CPU効率）最大の下で議論している。まず、多重処理動作の場合について考察し、前章で展開した平均アクセス時間最小が階層化主記憶内においては、システム効率最大と一致することを明らかにする。次いで、各最適化の差異を検討している。更に、システム効率を最適にするために、外部記憶間で満足されるべき条件式を与えた。この結果、記憶階層構造システムにおいては、隣り合う外部記憶機器の容量比が、アクセス時間の比で表現されることを示している。

次に、平均アクセス時間最小の意味で得られる階層化主記憶容量と、外部記憶機器間で満足される条件から得られる容量との接合を図っている。以上のことから、システム効率を最大にするような記憶階層構造システム設計は次の三つの問題を考えることにより、与えられる。すなわち、1) 主記憶容量の決定と階層化主記憶の各容量の決定、2) 外部記憶の各容量決定、3) 主記憶レベルと外部記憶レベルのコスト比決定の問題である。本章では、これらの問題を前章までの結

果から考察し，記憶階層構造システムの設計手続きを述べている。更に，一般の記憶システムへの適用についても触れている。

第7章 結 論

本章では，各章で得られた結果をまとめて示した。

審査結果の要旨

近年急速に増加した情報処理の要求に伴い、大規模計算機システムの研究開発は今後も重要な研究課題である。これに対処するためには多くの問題を解決しなければならないが、この中でも高速度の演算装置と大容量の記憶装置を効率よく結合した計算機システムの開発は重要である。特に高速度記憶装置の有効な活用をはかる仮想記憶方式の研究は大規模計算機システムを設計する上で不可欠のものである。

本論文はこの立場に立って仮想記憶方式に基づく記憶管理方式の研究を行ない、大規模計算機システムにおける記憶システム設計のための基礎を与えたもので全編7章より成る。

第1章は序論であり本研究の背景について述べる。

第2章では、各種の機器を用いて記憶システムを構成する場合の機器の構成法とシステムの能力の関係について研究し、階層構造をもつ記憶システムの特徴をプログラムの局在性をパラメータにして与えている。さらにこの結果を用いてプログラムの多重化のための最適多重度を与えている。

第3章では、仮想記憶システム設計の上で特に重要な記憶情報の再配置手続き（P R A）の問題を詳細に研究している。まずプログラムの特性をその動特性の上から3通りの代表的な型に分類し、この上で各種のP R Aの特徴を明らかにしている。ついでプログラムの型が一次マルコフ過程で表現される場合の最適なP R Aを求め、これをもとに応用上重要な準最適な二つの新しいP R Aの方式を導いている。これらは興味ある知見である。

第4章では、前章迄の結果を階層構造をもつ記憶システムに適用し、システムの性能評価を待ち合せ理論を用いて議論している。

第5章ではコスト制限条件のもとで平均アクセス時間を最小にする記憶システム構成の条件を導き、各記憶機器の容量の決定法を具体的に与えている。

第6章では、さらにC P U効率と記憶システムとの関係について論じている。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は階層構造をもつ仮想記憶システムの理論的諸性質を明らかにし、大規模計算機システムにおける記憶システム設計のための基礎を与えたもので、情報工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。