



## 逐次実行型Prolog専用計算機に関する研究

田村, 直之

---

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

1985-03-31

(Date of Publication)

2007-10-11

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲0524

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1000524>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・(本籍)	たむら なお ゆき 田村直之 (兵庫県)
学位の種類	学術博士
学位記番号	学博い第57号
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
学位授与の日付	昭和60年3月31日
学位論文題目	逐次実行型 Prolog 専用計算機に関する研究

審査委員	主査 教授 前川 禎 男		
	教授 松本 治 弥	教授 村上 温 夫	

### 論 文 内 容 の 要 旨

計算機が開発された当初は、計算機がハードウェアで直接実行できる機械語によってプログラミングが行われていたが、機械語によるプログラミング作業は多くの労力を必要とし、正しいプログラミングを作成するのが困難なため、より人間の思考水準に近い高レベルなプログラミング言語が開発され、広く使用されるようになった。これらの高級言語（あるいは高水準言語）には、FORTRAN, ALGOL, COBOL, PL/I, Ada, LISPなどがあり、それぞれの特徴に応じて使い分けられている。しかし、高級言語での記述のレベルと、計算機が実際に実行できる命令のレベルには大きな差があり、このセマンテックギャップの解消が計算機科学での大きな課題の一つとなっている。このため、高級言語で記述したプログラムを直接ハードウェアあるいはファームウェアによって実行できる高級言語専用計算機（以下、高級言語マシンと呼ぶ）への期待が高まり、各種の言語について研究が進められている。

高級言語のうちLISPやSNOBOLに代表される記号処理言語は、リスト（記号の列）や文字列などの非数値データ処理用の言語であり、人工知能や知識工学などの分野で使用され、その応用分野は急速に広がっている。ところが、記号処理言語では記号列や文字列などの非数値データを取り扱うため、数値データ処理用に設計された従来の計算機とのセマンテックギャップが大きく、記号処理専用マシンの必要性の認識が深まってきている。

本論文で述べるPrologも記号処理言語の一種であり、エキスパートシステムなどの人工知能や知識工学への応用が期待されている比較的新しい言語である。Prologはまた、論理型プログラミング言語

でもあり、ユニフィケーション機能やバックトラック機能などのこれまでの言語にはない数々の特徴を持っている。これらの特徴は、人工知能や知識工学での応用プログラムを書く上で、非常に強力な記述能力を与えてくれるが、一方で Prolog 処理系の効率が低くなる原因にもなっている。したがって、Prolog のプログラムを効率よく実行するためのアーキテクチャの研究が重要な課題である。

そこで、本論文では Prolog 専用計算機（以下、Prolog マシンと呼ぶ）の備えるべき特徴について検討し、実際にそのような特徴を備えた Prolog マシンの設計・開発を行った。この Prolog マシン P E K（Prolog Engine of Kobe University）は、Prolog のプログラムを高速に実行するためのアーキテクチャの研究を目的としたマシンで、

- 逐次実行
- マイクロプログラム制御
- インタプリタ方式
- ストラクチャシェアリング方式

などを、基本設計方針とし、

- タグアーキテクチャ
- メモリの分散化と低レベル並列処理
- マッチング回路
- 自動トレイル回路
- 自動アンドゥ回路

など、各種の Prolog 向きのハードウェア機能を備えている。

さらに、このマシン上にインタプリタ形式の Prolog 処理系を開発し、ベンチマークプログラムによるシステムの性能評価を行った。

以下に本論文の構成を示す。

第2章では、総論として、高級言語を効率よく実行するための高級言語マシンの必要性について、そのうち特に、人工知能・知識工学の分野での記号処理専用マシンへの要求について述べる。

第3章では、Prolog 言語の特徴と応用分野について概括したあと、Prolog を高速に実行するためのアーキテクチャについて検討する。さらに、この検討結果をもとにして、逐次実行型 Prolog マシンシステムの設計を行う。

第4章では、第3章の設計方針に基づいて作成した、逐次実行型 Prolog マシンシステムの全体構成について述べる。

第5章では、逐次実行型 Prolog マシンシステムのハードウェア構成およびアーキテクチャ上の特徴と実現方法について述べる。

第6章では、逐次実行型 Prolog マシンシステムのソフトウェア構成と開発支援用システム、Prolog インタプリタシステムについて述べる。

第7章では、ベンチマークプログラムの実行結果をもとにして、逐次実行型 Prolog マシンシステムの評価を行う。特に、Prolog 専用のハードウェア機能が実行速度の改善に寄与した割合を検討し、評

価結果の考察を行う。

ベンチマークプログラムの実行結果によれば、一回の推論を145マイクロ命令で実行でき、速度も約40K LIPS となっている。これは、実用的な Prolog 処理系として最も高速である DEC-10 Prologコンパイラとはほぼ同等の速度である。PEKと同様の回路技術を用いているLISPマシン上のインタプリタの性能が、10~20K LIPSであることを考えると、PEKのアーキテクチャが2~4倍の性能を向上させたと言える。

また、システムの評価を行うために、標準的なLISPマシンと同様のアーキテクチャを持つ仮想マシンを設定し、その上のインタプリタの実行過程との比較を行った。その比較結果によれば、一回の推論がPEKでは145命令で実行できたが、仮想マシンでは二倍以上の300命令かかった。これは、LISPマシンでの結果に良く一致している。また、PEKはユニフィケーション処理の速度を約2.3倍向上させており、PEKのユニフィケーション用ハードウェアが有効に働くことが確かめられた。さらに、性能向上に対する各ハードウェア機能の貢献度を調べ、以下の結果を得た。

- ① 水平型マイクロ命令形式の採用により、24命令減少できた。これは、減少した155命令のうち、15.5%を占める。特に、終了条件などの判断を行う時に有効に働いている。
- ② 34ビット幅の転送能力により、10命令(6.5%)減少できた。これは、変数のディリファレンスや代入処理の高速化に有効だった。
- ③ プロセスメモリの採用による減少命令数は、6命令(3.9%)であり、実行制御の効率化に役立った。
- ④ 構造体データ読み込みのパイプライン化により、55命令(35.4%)減少した。連続アドレスのデータリードの高速化、および先読みによるフラグ判断機能が有効であることが明らかになった。
- ⑤ フレームレジスタによる減少命令数は、6命令(3.9%)だった。ストラクチャシェアリング方式の場合、34ビット転送機能と合わせて使用することにより、有効に機能することが分かった。
- ⑥ マッチング回路により、9命令(5.8%)減少した。割合は低いですが、小規模のハードウェアで実現可能なことを考えると、効果は大きい。
- ⑦ グローバルスタックの専用化による減少命令数は、30命令(19.3%)であった。グローバルスタックに対する高速のアクセスを可能にし、さらに特別のフラグを設けて変数が未定義かどうかの判断を高速に行える機能が有効であることが分かった。
- ⑧ 自動トレイル回路により、16命令(10.3%)減少した。変数への代入ごとに、確実に4命令づつ減少しており、バックトラックのために必要なトレイル作業を実質的に無くすことができた。
- ⑨ 自動アンドゥによる減少はなかったが、これは実行したテストプログラムが決定的であるためであり、バックトラックを頻繁に行うプログラムに対しては、非常に強力な機能であると思われる。

以上のうち、構造体の要素のパイプライン読み出し機能や、グローバルスタック、プロセスメモリ、自動トレイル回路など、メモリやスタックの分散化・専用化による効果が最も大きく、性能向上の69%を占めることが分かった。

したがって、本マシンのアーキテクチャは Prolog プログラムの高速化に充分貢献したと考えることができる。

## 論文審査の結果の要旨

Prolog言語は記号処理言語の一種であり、人工知能や知識工学などの分野のソフトウェア開発に期待されている比較的新しい言語である。Prolog はまた、論理型プログラミング言語でもあり、ユニフィケーション機能やバックトラック機能など、これまでの言語になかった数々の特徴を持っており、前述の応用分野において非常に強力な記述能力を与えてくれるが、通常の計算機を利用する場合には、Prolog 処理の効率が著しく低下する。この理由は Prolog 等の論理型言語は非数値データを取扱うため、数値データ用に設計された従来の計算機のアーキテクチャとの整合性が悪いためである。

したがって、Prolog 言語を直接実行でき、効率よく処理できる一種の高級言語計算機、すなわち、Prolog マシンの研究が重要な課題となる。

本論文の研究はこの様な要求から、Prolog マシンの備えるべき特徴について検討し、実際にその様な特徴を備えた Prolog マシンの設計、試作を行い、その性能の評価を行っている。

ここで開発された Prolog マシンのアーキテクチャの基本的特徴は

1. 逐次実行
2. マイクロプログラム制御
3. インタプリタ方式
4. ストラクチャシェアリング方式

で、各種の Prolog 言語向きのハードウェア機能として、

1. タグアーキテクチャ
2. メモリ分散化と低レベル並列処理
3. マッチング回路
4. 自動トレイル回路
5. 自動アンドウ回路

などを備えている。

さらにこの Prolog マシン上にインタプリタ形式の Prolog 処理系を開発している。

以上の基本方針のもとに Prolog マシンを設計し、試作に成功している。

本論文は以上の研究の結果をまとめたもので、緒論に引き続き、第2章では高級言語を効率よく実行するための高級言語マシンの必要性についてのべ、特に人工知能、知識工学の分野での記号処理専用マシンへの要求についてのべている。

第3章では Prolog 言語の特徴と応用分野について概括したあと、Prolog 言語を高速に実行するためのアーキテクチャについて検討している。さらにこの結果に基づき、逐次実行型による Prolog マシンシステムの基本設計を行っている。

第4章では前章の基本設計に基づいて作成した逐次実行型 Prolog マシンの全体構成についてのべている。

第5章では逐次実行型 Prolog マシンシステムのハードウェア構成及びアーキテクチャ上の特徴と実現方法についてのべている。

第6章では逐次実行型 Prolog マシンシステムのソフトウェア構成と開発支援用システムならびに Prolog インタプリタシステムについて述べている。

第7章では試作した逐次実行型 Prolog マシンシステムにベンチマークテストプログラム を実行させ、その性能の評価を行った結果を述べている。特に Prolog 専用の各ハードウェア機能が実行速度の改善に寄与した割合を検討し、評価結果の考察を行っている。

この Prolog マシンの性能は、インタプリタで約40K LIPS (Logical Inference Per Second, 一秒間あたりの推論操作回数) であり、現在最も高速とされているDEC-2060上のDEC-10コンパイラとほぼ同等の性能を得ている。インタプリタとコンパイラの性能比は約20倍であるから、このProlog マシンのアーキテクチャは Prolog プログラムの実行の高速化に十分寄与しているといえる。

以上の様に本論文は Prolog 言語の高速処理を目標として、逐次実行型によるアーキテクチャの新しい方式を提案し、試作機を実際に構築することによりその構想の優秀性を実証し、この種の計算機の方式設計に関して多くの知見を得たとして高く評価できる。

この種の計算機は今後の高度情報化社会における知的情報処理システムの実現の一ステップとして、将来性が期待される。

本論文中に示された研究内容は情報工学、電子工学、システム科学等極めて多くの分野に寄与するところが大きいと考えられる。よって本論文提出者田村直之は学術博士の学位を得る資格があると認める。