バックエンド方式によりプロセッサを結合した AIワークステーション「WINE」の構成法

正員 岡本利夫 (東芝)・非会員 山田朝彦 (東芝)
非会員 宮本 出 (東芝)・非会員 斎藤光男 (東芝)

1. ま え が き

近年人工知能の研究が急速に実用化に向けて進み、様々な応用システムの開発が進められている。それにとともに、応用システムを効率良く開発し、かつ実用的な速度で実行する AI 用計算機、特にマンマシンインタフェースのよい AI ワークステーションの開発が強く望まれている。

従来の AI ワークステーションは、Symbolics⁽¹⁾、PSI⁽²⁾などに代表される AI 言語専用ワークステーションか、または汎用のエンジニアリングワークステーション (EWS) に単に AI 言語処理系を載せたものであった。そのため、前者においては他言語で書かれたプログラムを実行することができず、後者においては、AI 言語で書かれたプログラムの実行速度が十分でなかった。

我々は、AI 開発環境と AI 言語の実行形態の特徴を考慮して、高速推論でしかも従来と変わらない使いやすさを目標においた。その結果、AI プロセッサ (以下 AIP と称する) を開発し、汎用の EWS をベースに、バックエンド方式でプロセッサを結合する方式の AI ワークステーション WINE (Workstation with Intelligent and Native Environment) を開発した。両者の機能を兼ね備えた実用的なものにするもので、広い応用範囲が期待されるものである。

更に、AI 言語処理系の構成は、従来のバックエンド方式での実現法 (処理系をすべてバックエンド側に

置く構成)⁽³⁾⁽⁴⁾とは異なり、ホスト側にインタプリタ部、AIP 側にコンパイルされたオブジェクトをのせる方式のため、両プロセッサ間の通信回数が減少しオーバーヘッドを減らす構成にした。

その性能を測定したところ、通常のアプリケーションプログラムにおいては、上記の目標を満足したシステムにすることができた。

本論文では、まずその AI ワークステーションシステムの目標とその構成法を述べ、次にハードウェア、ソフトウェア上での実現法を述べる。次に、AI 言語の環境の構成法について Prolog 言語を例にとり述べる。最後に、通信のオーバーヘッドについて測定して評価する。

2. AIワークステーションの開発目標と構成

AI 用言語の特徴は、柔軟性が高いため、知識処理のような複雑であらかじめアルゴリズムの確定していない問題を解くために、試行錯誤をするのに非常に適しているが、速度が遅いのが難点と言われてきた。

そこで従来は、AI 言語で開発しアルゴリズムが確定したのち、通常の言語に書き替えるといった方法が取られてきた。しかし、この方法はその手間が大変になってきており、また多くのケースでは、書き替えることが不可能になってきている。

例えば、実際の応用問題においては、1,000 ルール程度が必要と言われているが、これを Prolog で 30 KLIPS (kilo logical inferences per second) 程度の計算機で解くと 1 時間以上かかると言われており、実用にならない。このような問題を実用的な速度 (数分以内) で実行できる AI マシンが望まれていた⁽⁵⁾。

そこで AI マシンが供えていなければならない機能のうちの、

- ① 速度が早いこと (300 KLIPS 以上)。
- ② 目的に応じて、最適な言語でプログラムを開発

An AI Workstation "WINE" using Two Processors via Back-end connection. By Toshio Okamoto, Member, Izuru Miyamoto, Non-member, Asahiko Yamada, Non-member & Mitsuo Saito, Non-member (TOSHIBA CORPORATION).

岡本利夫: 正員, (株) 東芝総合研究所情報システム研究所

宮本 出: 非会員, (株) 東芝情報通信システム技術研究所開発第七部

山田朝彦: 非会員, (株) 東芝情報通信システム技術研究所開発第七部

斎藤光男: 非会員, (株) 東芝総合研究所情報システム研究所

し、これらを組み合わせて実行できること。

③ 開発環境が良いこと。

の3点に重点を置いて検討を進めた。

④の速度に対する検討を進めた結果、AI用の言語を能率良く実行できるプロセッサが必須であることがわかった。

その結果、考えられるAIマシンの実現形態として、次の三つが考えられる。

- (1) AI強化CPUによるシングルプロセッサタイプ⁽⁶⁾
- (2) AI専用コプロセッサタイプ⁽³⁾
- (3) AI専用バックエンドプロセッサタイプ⁽⁴⁾

そのほか、並列プロセッサという実現法⁽⁷⁾もあるが、実用域に達していない。この中で、(3)のバックエンドプロセッサタイプは、AI用言語で書かれたプログラムと、ホスト上のプログラムとの結合を行う際に、プロセッサ間の通信が必要なため、多少能率が悪い。しかし、要求②に関しては本体側に既にその機能が存在するので、AIに関連した部分のみを開発すれば良い。また、本体に比較的独立であるため比較的簡単に高性能を実現できることと、他のマシンに移行しやすい点で有利である。また、要求③に関しては、EWS上の豊富な環境がそのまま利用できる。本AIワークステーションは、(3)のバックエンドプロセッサタイプで開発することにした。

次に、バックエンドプロセッサタイプとした場合、両プロセッサ間の通信方式が問題となる。ここで、推論演算の特性について、数値演算のそれと比較してみると表1ようになる。

つまり、数値演算では数バイト程度のサイズの数値データを繰返し何回も処理するのに対して、推論では数メガバイト程度の大きなデータベースを参照しながら推論を繰返す。そこで、AIマシンの性能は両プロセッサ間のデータエリアの結合性能に大きく係わってことになる。

以上の特性から図1のような構成を考えた。つまり、推論処理はすべてAIP上で行って高速推論を実現するのはもちろん、AIPはローカルなしかも大容

表1 数値演算と推論処理の特徴比較

Table 1. Comparison between numerical and inferential execution.

	データサイズ	ホストとの通信	実現手段	結合度
数値演算	小さい	多い	コプロセッサ	タイト
推論処理	大きい 散在している	少ない	バックエンド プロセッサ	ルーズ

図1 ホストプロセッサとAIプロセッサとの結合方法

Fig. 1. Connection model of multi processors (host processor and AI processor) system.

量のメモリを持ち、この中で推論処理を行う。そのメモリをホストプロセッサのメモリの一部としても扱えるようにシェアする。こうすることにより、推論中のオーバーヘッドはなく、ホストがAIPのデータを参照する際に発生するインタフェースのロスを最少限に抑えることができる。

次に、入出力に関して検討する。既存のプログラムとの整合性と、ホストマシンであるEWSの利点である豊富な入出力装置をそのまま利用したいため、AIPでは、直接入出力制御は行わず、ホスト側に任せる構成にした。その際、通信の単位は、入出力単位ではなく述語単位で行うことにより通信回数は少なくできる。

最後に、同期制御に関するインタフェースの方式を検討する。上で述べたように、両者の通信が比較的少なくできることから、割込み信号と、割込みハンドラによる通常の入出力装置と同様なやり方で十分であることがわかった。

以上、本システムの構成を述べた。これを一言でまとめると、ホストプロセッサ側から見ると、AIPは、巨大なメモリを持った入出力装置のように見える。

3. AIプロセッサのアーキテクチャ

AIワークステーションのハードウェア構成を図2に示す。ここで破線で囲まれた部分が今回新たに開発したAI専用プロセッサ部分であり、それ以外はEWS(AS 3000シリーズ)である。すなわち本構成においては、AI言語で書かれたプログラムは専用プロセッサで高速に実行され、通常の処理や、入出力などはEWS本体が受け持つようにしている。

本プロセッサは、Prologはもちろん、通常の言語で書かれたプログラムを高速に実行するアーキテクチャを目標として検討を進め、LISPに関しても、高速化が可能なように配慮して開発を進めた。

図 2 AI ワークステーションのハードウェア構成

Fig. 2. Hardware architecture of AI workstation.

その結果, RISC (Reduced Instruction Set Computer) 風の通常命令, Prolog 処理用のマイクロコードによる D. Warren の提唱する仮想マシン命令 WAM (Warren Abstract Machine)⁽⁸⁾ の直接実行, および LISP の基本関数の直接実行, リアルタイムガーベジコレクションのマイクロコードによるサポート, 複数バスによる同時転送, 命令とデータを分けたキャッシュメモリ, レジスタの退避・復元を高速に行うツインレジスタを採用した高速なアーキテクチャとなっている。その詳細については, 文献(9), (10)に述べられている。

ホストプロセッサとして, EWS の AS 3000 シリーズ (sun 3) を利用した。これは UNIX マシンで, マルチウインドウ (SunView), 分散ファイルシステム (NFS) などを搭載したワークステーションであり, 特にソフトウェア開発環境に勝れたものである。また, ハード的にも, VME バス (IEEE 1014) を採用していて, ユーザが VME バス用のインタフェースボードを付加できるように考慮されている。VME バスは, マルチバスとならんで広く普及しているバスの一つである。

ホストプロセッサと AIP とは, この VME バスで結合している。また, AIP をこの規格で製作することで, 他のホストマシンへの移値も容易であろう。データ 32 ビット, アドレス 32 ビットの VME 空間上で AIP のメインメモリが 24 M バイトの空間を占める。AIP の制御レジスタも同様に VME 空間につながっている。

4. ソフトウェア構成

このようなシステムの開発にあたっては, EWS の開発環境をフルに利用することを考え, 段階的に開発していく方針を取ったが, Prolog と LISP ではその方法は異なっている。

図 3 AI ワークステーションのソフトウェア構成

Fig. 3. Software architecture of AI workstation.

Prolog は, 言語としての歴史が浅く, いまだそれほどたくさんのアプリケーションプログラムが蓄積していない。そのため, これから開発するための開発環境の充実の方が望まれている。よって, 開発環境を一定に保ちつつ次第に実行速度を上げていく方針で望んだ。

それに対して, LISP は既にソフトウェアの蓄積があるため, それらのプログラムが高速に実行できる方がより強く望まれていた。そこで, 最初からプログラム全体を AIP 上で高速実行させることに重点をおいて開発を進めた⁽¹¹⁾。

ここでは, 以後, Prolog 言語に限定して話を進める。

AI ワークステーションの Prolog 関係のソフトウェア構成を図 3 に示す。この中で破線で囲んだ部分が AIP を接続するために開発した部分である。それ以外の部分は EWS 既存のものを利用している。開発しなければならないプログラムには, EWS 上のものと AIP 上のものがあるが, いずれも開発は EWS 上で行うことができた。

このような構成にすることにより, EWS と AIP 間の通信は, AIP ドライバーと AIP モニタの間で, VME バスを介して行われる。ホストから AIP へのリクエストは, OS (operating system) 内の AIP ドライバーを介して, AIP モニタへ伝える。AIP モニタは, その指示にしたがって AIP 上のオブジェクトを実行させ, その結果をふたたび逆の経路でホストへ返す。

この方法で, EWS と AIP の通信量を減らせば, 比較的容易に高性能を実現できる。この方式に基づき, Prolog コンパイラを開発した。

ここではまず、モニタ、ドライバーなどの OS に係わるローレベルなインタフェースの構成法について述べる。更に次章で、この上に構築した Prolog コンパイラに関して述べる。

〈4.1〉 データエリアのシェア EWS 上の各プロセスがアクセスするメモリはページと呼ばれる単位に分割され OS で管理されている。そして、MMU (memory management unit) の仮想アドレス—物理アドレス変換機能により、プロセスのアドレス空間は、ページ単位に実際のメモリに割当てられる。したがって、データエリアのシェアに関しては、この機能を利用して実現した。

つまり、AS 3000 の MMU 内の該当エントリーには、物理アドレスのタイプを表すフィールドがある。ここを通常のメインメモリから VME 空間上の AIP のメモリに変更する。この処理は、AS 3000 の OS に用意されている mmap と呼ばれるルーチンを用いて実現できる。一度マッピングを変更すると以後、そのページへのアクセスはシステムコールなしに、VME 空間の該当メモリへアクセスする。この方式により、ホストは入出力に必要なデータを直接アクセスすることができ、不用なデータのコピーを防ぐことができる。

〈4.2〉 同期制御 次に同期制御に関して述べる。

VME バス上の割り込み信号を利用した。OS 内に割り込みハンドラとよぶソフトウェアを用意する。これは通常の入出力 (I/O) 機器へのハンドリングの仕方と同様である。

具体的には、AIP の同期制御は UNIX の入出力用のシステムコールで行う。UNIX ではユーザーが作成した I/O デバイス用のドライバーソフトを OS のカーネル内のテーブルに登録することで実現できる。そこで、AIP 用のデバイスドライバーを作成し、ここに登録する。したがって、ユーザープログラムの中から AIP 用の I/O システムコール (AIP コール) を発生することにより AIP を同期実行させる。ここで、AIP ドライバーのアルゴリズムについて説明する (図 4)。まず、ドライバーは、AIP のコントロールレジスタ中に AIP のプログラムカウンタをセットし STOP フラグを OFF にすることで、AIP が指示されたアドレスから動き出す。そして、その間ドライバーはスリープしてその終了を待つ。AIP は処理が終了すると割り込み信号を発生する。これを、ホストのカーネル中の割り込みハンドラが受け、スリープしているドライバーを起こす。よって、これで、AIP のドライバーが再び動き出す。するとドライバーは AIP

図 4 同期制御

Fig. 4. Overview of synchronous control section.

を再び停止させ、呼び出し元へもどる。

5. Prolog 言語環境

ここでは、前章で述べた結合法を用いて、どのように Prolog 言語環境を構築したかについて述べる。

〈5.1〉 Prolog 言語の特性 Prolog 言語は、その言語を用いる状況を考えてみると、実行環境のみならず、開発環境も重要である。つまり、新しいアイデアを実証するプロトタイプ作成の場となる必要がある。そのため、試行錯誤を繰り返す。したがって、基本となる実行方式はインタプリタ方式が望ましい。しかし、インタプリタ方式ではその方式上、実行速度が上がらない。よって仕様の固まったところは逐次コンパイルして実行速度を上げ、開発効率を上げる。

このような AI 言語用の開発環境を考えて、本処理系では、インタプリタ・コンパイラ方式、つまり、インタプリタ環境中からコンパイルし、それを実行する方式を採用した。

〈5.2〉 インタフェース 次に、インタプリタ・コンパイラ方式による Prolog 環境において、二つのプロセッサへの処理の分割法を検討する。

AIP と EWS との結合がルーズであるので、いかに通信回数を減らすかがポイントになる。開発目標で述べたように、その目的は、

インタプリタ側 使いやすい環境

オブジェクト側 高速実行環境

と言える。

インタプリタ側は、主にユーザとのマンマシンインタフェースを扱う。また、UNIX のファイルとのやりとりも多い。したがって、インタプリタ部は、入出力関係の処理が多い。そこで、インタプリタ部をホスト側に持っていく。すると、入出力に関してホスト

図 5 Prolog 言語環境

Fig. 5. Environment of Prolog language.

と AIP 間の通信回数が少なくなり、オーバーヘッドが小さくなる。また、AIP 側に入出力装置用のドライバが不用になり AIP 側のモニタがコンパクトになる。

一方、オブジェクト側は高速実行のみを目的とする。その間は、ホストからの干渉を受けないようにする。

以上より、インタプリタ部は AIP 側よりホスト側にあるのがよいと結論した。

次に両者間のインタフェースについて考察する。使いやすい開発環境となるにはインクリメンタルローダ、つまり部分コンパイル・部分ローディングが必要である。この方式では実行時にならないと、呼び出される述語がコンパイル済みかどうか決定できない。コンパイルされていない述語（以下、ソース述語と記す）の実行は、インタプリタ側で代行することになる。したがって、実行時にインタラクティブにインタプリタ側での実行とオブジェクト側での実行を切り替える実行制御部が必要になる。これらを図示すると、図5のようになる。また、インタプリタ側とオブジェクト側で扱うデータの表現形式が異なるので実行制御部内にデータ変換部が必要になる。

〈5.3〉 **インタプリタ** 次にベースとなるインタプリタの選択について検討する。0 から作ってあげば、開発期間がかかる。また、EWS 上には既に利用されている Prolog 処理系が存在する。したがって、今回は既存のインタプリタ上にコンパイラ環境を付け加えた。つまり、コンパイラ部、ローダ部、実行制御部を新しく作成してインプリメントした。

ベースとなるインタプリタとして C-Prolog を利用した。これは中核部分はすべて C 言語で記述されている。実行制御部のような、細かい所を記述する必要のあるものでは、C 言語で書くのが適している。よって、実行制御部を埋め込むには、C 言語で書かれてい

る C-Prolog 処理系が適している。ただし、内部のデータ表現が、WAM のそれと異なるので、実行制御部の中にデータ変換部を作成し、データの差異をここで吸収している。この方式では、インタフェースの負担が大きいのが、特殊なケースを除き、全体的な性能には影響が少ないと考え採用した。

〈5.4〉 **実行制御部** 次に実行制御部について述べる。先に述べたようにここでは、インタプリタ上で実行中にコンパイル済みの述語（以下、オブジェクト述語と記す）を呼び出す場合、および、逆にオブジェクト上で実行中にソース述語を呼び出すための制御を行う。

両者の間で制御が切替わるポイントは、次の六つある。

- ① ソース述語（インタプリタ側）からオブジェクト述語を呼び出す場合。
- ② ①に対し、その述語の実行が成功して呼び出し元へ戻る場合。
- ③ ①に対し、その述語の実行が失敗して呼び出し元へ戻る場合。
- ④ オブジェクト述語からソース述語を呼び出す場合。
- ⑤ ④に対し、その述語の実行が成功して呼び出し元へ戻る場合。
- ⑥ ④に対し、その述語の実行が失敗して呼び出し元へ戻る場合。

以上、六つの場合に制御の切替えが必要である。このときに、実行制御部がまず呼ばれる。実行制御部では、上のどのケースで呼ばれたかを判断する。①②④⑤に対しては、更にデータ変換部を読み出しデータを相手に合わせて変換する。①④では、指定された述語を実行させる。②⑤では、①④を呼び出した述語の続きを実行させるようにする。③⑥では、①④を呼び出した述語が失敗した状態にさせ、代替の述語を実行させる。

〈5.5〉 **実行制御部のオーバーヘッドの検討** ここで、問題になるのは、上で述べたデータ変換部である。インタプリタ側とオブジェクト側とで、データ表現が異なる。よって、実行が切り替わるごとにデータ変換をしなくてはならない。ソース述語とオブジェクト述語とが入り交り、変換するデータ量が多くなると、オーバーヘッドが増加し、実行速度はそれほど向上しないことが考えられる。

このようなソース述語とオブジェクト述語が交差し実行されるケースは以下の通りである。

- ① アプリケーションの開発途上。

② 組み込み述語を多用しているもの。

①のケースでは、開発段階の初期の状態に相当する。確かに両者のタイプの述語が混在する。しかし、アプリケーションプログラムが完成するにしたがって、ソース述語の比率が低下するので、実行速度は向上していく。そのため、特に問題はないと考える。

②のケースでは、プログラムが完成した後もオブジェクト側で対応しない組み込み述語が存在すると、インタプリタ側で実行することになるので、このようなプログラムでは実行速度はそれほど向上しない。

ここで、組み込み述語を二つのタイプに分ける。

(1) ライブラリー化可能なオブジェクト述語

(2) ライブラリー化困難なオブジェクト述語

(1)は、算術演算述語がその好例である。これは、頻繁に用いられる。ここに属する述語は、コンパイル化したライブラリーとすることが容易である。したがって、インタプリタへ制御を切り替える必要がなく、オーバーヘッドの問題はまったく起きない。

(2)は、assert, retract 述語などのデータベース操作関係の述語に相当し、容易にライブラリー化が困難な述語である。このような述語は、プログラムの実行初期段階に現れることが多く、比較的プログラムの外側のループで使われるケースが多い。したがって、ソース述語として、そのまま残しておいても、それほど負担になることはないと考えた。

評価の章でこのオーバーヘッドに関する測定を行い、この点について問題ないことを確認した。

6. 評価

ここではまず、マルチプロセッサ間での通信量を個々の要素に分けて測定した。

今までの考察に基づいて、

① シェアドメモリによるオーバーヘッド

② 実行制御に関するオーバーヘッド

③ データ変換に関するオーバーヘッド

に分けて測定した。

次に具体的な例題プログラムで、その総合的な影響を測定した。測定条件を表2に示す。

〈6.1〉 シェアドメモリのオーバーヘッド 測定はインタプリタ上で行い、データエリアがメインメモリにある場合と、AIP のシェアドメモリにある場合とで比較した。

テストプログラムは、Prolog コンテスト⁽¹²⁾の中の8クィーンの全解を求めるものを用いた。

測定は、組み込み関数の cputime を用いて測定した。この関数は、UNIX のシステムコール times を

表 2 システム構成

Table 2. System overview.

ホスト部	
システム名	東芝 AS 3160
プロセッサ	MC 68020 16.67 MHz
メインメモリ	8 M Byte
ディスク	ネットワークファイルシステム (NFS)
OS	OS/AS V 3.0
AIP 部	
プロセッサ	IP 704 V 1.0 10 MHz
メインメモリ	24 M Byte
ソフト	
インタプリタ	C-Prolog V 1.5
コンパイラ	AIP-Prolog V 1.0

表 3 シェアドメモリによるオーバーヘッド

Table 3. Overhead for shared memory.

	メインメモリ	シェアドメモリ
時間	46.21 s	52.63 s
比	1.0	1.14

表 4 実行制御部によるオーバーヘッド

Table 4. Overhead for execution control section.

	200 回コールの測定時間	1 回あたり
時間	0.68 s	3.41 ms

実行し、その結果中のユーザータイムを値として返すものである。測定精度は 1/60 秒である。

測定は各々 10 回行い、その平均値を算出した。結果を表3に示す。

これでわかるように、シェアドメモリを用いると 14% インタプリタの速度が低下している。前に述べたように、プログラムの開発段階初期にはこのオーバーヘッドがきいてくるが、開発が終われば一部の組み込み述語を除いてすべてオブジェクト化するので影響はかなり低下し、問題はなくなる。

〈6.2〉 実行制御部のオーバーヘッド 実行制御部のオーバーヘッドのうち、データ変換を除いたものを測定する。

これは、プログラムとして、
test.

という述語を、コンパイルしてオブジェクト化する。そして、200 回このオブジェクト述語を呼び出すテストプログラムを作成した。これを 10 回繰り返し、その平均時間を算出した。

測定は、UNIX のライブラリー関数 ftime を用いた。測定精度は 1/100 秒程度である。結果を表4に示す。

このテストプログラムでは、次の部分の実時間を測定したことになる。

- ① 実行制御部本体
- ② AIP ドライバー
- ③ AIP モニター
- ④ オブジェクト述語 “test”

このうち、④の部分は、そのオブジェクトコードが数命令しかないので実行時間はほとんどない。よって、測定時間は実行制御のオーバーヘッドのみと見なせる。

測定結果では、AIP の命令実行速度（1 命令最低 100 ns）と比較してかなり大きな値が出ている。したがって、なるべく通信回数を減らすことが必要である。よって、本方式のように入出力をまとめて行う方式は有効であることが確認できた。

この測定は、実時間で測定しているため、その間にホスト上のインタプリタのプロセスがスケジューリングによりスリープしても、その間の時間が測定時間に入ってしまう。AIP をマルチプロセス化すればこの時間は減るものと思われる。

〈6・3〉データ変換のオーバーヘッド 前節の測定で除いたデータ変換部のオーバーヘッドを測定する。この時間はデータの大きさに比例する。ここでは要素 100 個のリスト 10 個を、

- ① インタプリタからオブジェクトの形式に変換
- ② その逆変換

の実行時間を測定した。

測定には UNIX のシステムコール times を用い、そのユーザタイムを測定した。10 回測定し、その平均時間を算出した。測定精度は 1/60 秒である。

測定結果を表 5 に示す。

実際には、このような苛酷なデータをやりとりすることはほとんどないと思われる。

データ変換処理は、数値やアトムのようなデータタイプでは両方向で各 1 回ずつ変換すればよい。ところが、リストやストラクチャタイプのデータではその要素数分、変換する必要がある。一つの述語あたり 5 回データ変換すると仮定すると、両方向で 10 回かかる。

表 5 データ変換部によるオーバーヘッド

Table 5. Overhead for data conversion section.

	インタプリタ → オブジェクト (A)	オブジェクト → インタプリタ (B)	合 計 (A+B)	1 引数 あたり $\left(\frac{A+B}{10}\right)$	リスト 1 要 素あたり $\left(\frac{A+B}{10 \times 100}\right)$
時 間	143.3 ms	161.7 ms	305.0 ms	30.5 ms	0.305 ms

図 6 テストプログラム：「8クィーン」

Fig. 6. Test program: "8 Queens".

表 6 8クィーンの実行時間

Table 6. Execution time of 8 Queens.

	①	②	③	④	⑤
実行時間 (秒)	52.63	2.78	2.81	2.60	0.55

すると、変換時間は約 3 ms となり、制御変換の時間と同程度の時間がかかる。よって、ソース述語とオブジェクト述語が引き渡すデータ量、特にリスト、ストラクチャを減らすことが有効である。

Prolog のプログラム中では、リスト処理がかなりあるのが普通である。しかし、それらの処理は AIP 内でのみ行われる。入出力の述語に代表されるソース述語では、扱うデータ量は限られているので大きな問題にはならないと思われる。

〈6・4〉総合評価 次に、サンプルプログラムをもとに、開発過程のモデル上での総合的なオーバーヘッドを測定した。

測定は、次のように行った。サンプルプログラムとして、8クィーンの問題を再び選んだ。そして、プログラムの開発作業をモデル化して、以下に示すソース述語とオブジェクト述語の混在のパターンを作成した。これは、図 6 に示すように一番下位のルーチンからコンパイルしていく、一般的な使われ方を想定している。

〈開発作業のモデル〉

- ① すべての述語が未コンパイル。(開発初期)
- ② try 述語以下がコンパイル済み。
- ③ generate, try 述語以下がコンパイル済み。
- ④ queen 述語以下がコンパイル済み。
- ⑤ q132 述語以下すべての述語がコンパイル済み。(開発完了)

実験方法は今までと同様なやり方で行った。表 6 に結果を示す。また、文献 (13) に他システムで行った実行時間が述べられている。

この結果より次のことがわかる。まず、オブジェクト化率が上がるにしたがって（番号が大きくなるのに

したがって),実行時間が小さくなっている。これは予想された結果である。ところが,②と③の間では,オブジェクト化率が上がっているにもかかわらず,逆に実行時間が少し増えている。これは,まだソース述語のままである queen 述語からみると,generate 述語と,try 述語を並列に呼んでいる。ここで,②では,オブジェクト化されたのは try 述語だけであるので,ここだけ実行制御部を経て実行される。ところが,③では,try 述語と generate 述語の二つ,つまり2回実行制御部を通らないといけない。このために,オーバーヘッドが増えたものである。

次に,速度の向上の比率をみると,①から②,④から⑤の間が大きい。これは,queen 述語,および try 述語の中での滞在時間が長いためである。つまり,一度,これらの述語を実行し始めるとその中にとどまって,推論を繰り返す。その分,実行制御部を通らなくなり,高速実行可能となった。

以上の考察をまとめると,以下ようになる。

(1) 概して,オブジェクトの部分が増すにしたがって,実行時間は減少する。

(2) オブジェクト述語とソース述語が交錯している場合には,その効果が低下する。

(3) (2)の場合とは逆に,内部で推論処理が続く箇所では区切りながらコンパイルしていくとその効果は非常に大きい。

以上より,本方式が,プログラム開発の場においても,大きなオーバーヘッドなしに高速実行できることがわかった。

7. 終わりに

以上 AI ワークステーションに関し,主に,EWS のホストプロセッサと AIP のバックエンドプロセッサ間のマルチプロセッサ方式の実現法とその評価について述べた。

バックエンド方式の長所としては,ホストマシンに依存しない高性能の推論が可能であり,かつ,ホスト上のインタプリタと結合して用いることにより,実用的な環境も伴ったシステムができることがあげられる。

欠点としてはその間の通信量が多くなるとロスが多くなるので,ひんばんにホストとやりとりする形でのインプリメントには向かないことである。

本方式では,AI 言語の特性を分析し,大容量のデ

ータエリアとの通信はシェアドメモリの方法で行い,OS からのオーバーヘッドを避けている。更に,実行の切替え制御に関しては,オブジェクト述語とソース述語間で行い,通信量の少ない箇所で行った。

評価としては,シェアドメモリに対するシステムのロスタイムは,システムに大きな影響を与えないものの,実行制御のロスタイムはオブジェクトコードの実行速度と比較して大きく,ソース述語とオブジェクト述語をひんばんにやりとりするアプリケーションでは,性能が十分に発揮できない。しかし,そのようなケースは,アプリケーションプログラムの開発途上では起き得るが,開発途上のケースにおいても十分高速に実行できることと,また,すべての述語をコンパイル化した完成されたケースでは,一部のライブラリー化が困難な組み込み述語を使っていないかぎり問題ないことがわかった。

このような組み込み述語は限られていて,かつまた,推論の核の所には使われないので,実行時間のオーバーヘッドに関し大きな問題にはならないことがわかった。
(昭和62年10月26日受付)

文 献

- (1) D. A. Moon: "Architecture of the Symbolics 3600", Proc. of the 12th Annual Int'l. Symposium on Computer Architecture, 191 (1985)
- (2) S. Uchida, et al.: "Outline of the Personal Sequential Inference Machine: PSI" New Generation Computing, 1-2 (1983)
- (3) T. P. Dobry: "A Coprocessor for AI; LISP, Prolog and Data Bases", Comcon 87, 396 (1987)
- (4) 中崎, 他: 「逐次型推論マシンCHI小形化版の設計思想」情報処理学会第33回全国大会 5B-6 (1987)
- (5) 稲葉, 他: 「プロセッサ LSI を核に開発機から実用機へ展開する AI 専用マシン」日経エレクトロニクス, 1987, 1, 12, 91
- (6) S. Abe, et al.: "High Performance Integrated Prolog Processor IPP" Proc. of the 14th Annual Int'l. Symposium on Computer Architecture, 100 (1987)
- (7) 内田: 「並列推論マシン」人工知能学会誌 2, 4, 450 (1987)
- (8) D. H. D. Warren: "An Abstract Prolog Instruction Set" Tech. report 309, Artificial Intelligence Center, SRI International (1983)
- (9) 相川, 他: 「AIプロセッサのアーキテクチャ」人工知能学会第1回全国大会, 241 (1987)
- (10) 相川, 他: 「AIワークステーション(WINE)の開発II IP704のアーキテクチャ」情報処理学会第35回全国大会 6M-5 (1987)
- (11) 河辺, 他: 「AIワークステーション(WINE)の開発IV LISPコンパイラ」情報処理学会第35回全国大会 6M-9 (1987)
- (12) 奥乃: 「第三回 LISP コンテスト及び第一回 PROLOG コンテストの課題案」情報処理学会記号処理研究会 28-4 (1984)
- (13) H. Okuno: "The Report of The Third Lisp Contest and The First Prolog Contest" 情報処理学会記号処理研究会 33-4 (1985)