

コンピューターのモデル

山本昌志*

2004年4月12日

1 本年度、学習することと目標

本年度、3年生の電子計算機では、アセンブラ言語を学習します。アセンブラ言語にはいろいろありますが、ここでは情報処理技術者試験で使われる「CASL II」というアセンブラ言語を学習します。アセンブラ言語とはどんなものであるかという疑問が湧くでしょうが、次回の授業で説明します。

1.1 2年生で学習したこと

前年の授業、2年生の「電子計算機」とのかかわりについて、簡単に述べておきます。2年生と3年生の「電子計算機」を通して、コンピューターの基本的な仕組みを理解することがこれらの授業の目的です。2年生の「電子計算機」の授業で学習したことは、大体

- 記数法
- ブール代数
- 論理回路

のようなことです。ここで、学習したことで最も重要なことは、

- いかなる真理値表であろうとも、論理和 (OR) と論理積 (AND)、否定 (NOT) のゲートで作ることが可能である

ということです。これらの例として、最後に加算の回路を学習しました。皆さんは、加算にかかわらずどんな論理を示す回路でも設計できます。言い方を変えると、どんな演算回路でも皆さんは設計できるということです。それも、3種類の素子 (OR, AND, NOT) を使うだけで、可能なのですから驚きです。

1.2 記憶する回路

本日の授業の後半で示しますが、コンピューターは演算と記憶の回路から成り立っています。記憶の回路 (メモリー) については、4年生で学習します。ただ、簡単に書くと次のような図??のような入出力線があり次に示す動作をしてみてください。

*国立秋田工業高等専門学校 電気工学科

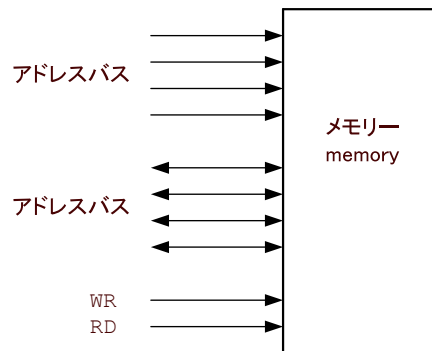


図 1: メモリーのモデル

この図のアドレスバスとデータバス、WR、RD と書かれた線は、電圧を印加するリード線です。それぞれは、以下の役割があります。これによりデータを記憶できます。

データバス データを読み書きする場所を示すための線です。この場所のことをアドレスといいます。ここでは 4 本の線が有るので、記憶場所は 16 個あります。

アドレスバス 読み書きのときのデータを受け渡すための線です。4 本有るので 4 ビットのデータの受け渡しが可能です。

WR メモリーにデータを書くと指令するための線です。

RD メモリーからデータを読み出すと指令する線です。

この回路の仕組みは皆さんは理解できないと思いますが、動作は理解してください。動作は簡単なので、このような回路を作ると巨万の富が得られると思うと挑戦したくなるでしょう。今からでは遅いですが、半世紀ほど前であれば大富豪も夢ではありません。どうやって作るかよりも、なにを作るかの方が重要ということが分かるでしょう。世界の先端に居る人は、なにを作るべきかということが分かり、そして巨万の富を得るのです。

1.3 コンピューターに必要なもの

これで、コンピューターを作るうえでの基本ハードウェアが揃いました。演算と記憶を行う回路です。しかし、これだけでは計算はできません。この状態は、人間で言うと赤ちゃんみたいなものです。脳はあるが未だ何もできません。不足しているものは、

- 演算といっても、必要な演算が分かりません。計算に必要な演算回路を決めなくてはなりません。人間で言うと、教育を行い、脳の神経細胞をつなぐことに相当します。
- 実際の計算を行わせるためのプログラムの必要です。他の人に計算をさせるためには指示が必要なのと同じです。

です。必要な演算回路とプログラムを作らないと計算ができません。この授業では、演算回路とプログラムについて、学習します。

この3年生の「電子計算機」の授業を受けると、コンピューター的设计に必要なことを学習したことになります。今、巷で評判になっている「CPUの創り方」¹という本の内容が理解できるはずで

1.4 この授業を受けて得られるもの

授業の目標は、

- コンピューター (電子計算機) の仕組みを理解する。
- 0と1で書かれた機械語とコンピューターの頭脳といわれる Central Processing Unit(CPU) の関係を理解する。
- 0と1で書かれた機械語とC言語やFORTRANのような高級言語との関係を理解する。

です。では実際に得られるものは、

- 単位
- コンピューターの仕組みは、簡単だなーという実感
- アセンブラが理解できるという優越感

くらいでしょうか。あとは基本情報処理試験のCASL IIの基礎的な勉強になります。これを合格するためには、もう少し勉強が必要です。

2 コンピューターのモデル

この辺の話は、「Interface 2002年9月号」と「ファイマン 計算機科学」、「数学セミナー 2003年12月号」を参考にしています。

2.1 コンピューターの動作

コンピューターの基本的な動作は、非常に簡単です。1人の学生に登場してもらって、CPUとメモリーの役割を担ってもらいます。メモリは、私が用意した小さな箱です。それに格納されている命令に従って、計算をしてもらいます。簡単な計算

- まずは、 2×3 の計算

を行ってもらいます。

このプログラムは、

¹渡波郁著 朝日コミュニケーションズ発行 ISBN4-8399-0986-5

- 00 番地 08 番地のデータを CPU の記憶領域 1 に格納する。
- 01 番地 CPU の記憶領域 2 の値を 1 にする。
- 02 番地 記憶領域 1 の値と 08 番地の値を加算して、記憶領域 1 に格納する。
- 03 番地 記憶領域 2 の値を 1 増加させる。
- 04 番地 記憶領域 2 から 09 番地の値を引き算する。結果が 0 ならば、CPU の記憶領域 a の値を 1 にする。
- 05 番地 記憶領域 a の値が 1 以外ならば、3 番地の命令を実行する。
- 06 番地 記憶領域 1 の値を 10 番地に格納する。
- 07 番地 おわり。
- 08 番地 2 が格納されている。
- 09 番地 3 が格納されている。
- 10 番地 計算につかう記憶領域。

となっています。実際のコンピュータの動作は、これをとてつもない速度で実行します。パソコンの 3GHz の CPU では、すうクロックで 1 つの命令を実行すると、約 1 秒間に億のオーダーの命令を実行します。またメモリーは、500Mbyte で、約 5 億個の記憶領域が用意されています。コンピュータは単純な動作しかしませんが、非常に高速で、大量のデータを処理します。これにより複雑なことを行っているように見えます。

このコンピュータのモデルで理解して欲しいことは、

- プログラムのデータもメモリー上に格納される。
- 命令に従い、データを書き換えている。

です。

2.2 チューリング機械

先に生徒諸君にコンピュータの動作を行ってもらったように、コンピュータというものは「メモリー中のデータとコンピュータの内部状態に従い、メモリーのデータを逐次的に書き換える計算機」と定義できます。こういうものを世界で最初に提案したのは、当時、ケンブリッジ大学の大学院生であったアラン・チューリングということらしい。1930 年代の半ばのことです。

現在、コンピュータの理論的モデルと言われるのが、図??に示すチューリング機械です。その特徴は、次の通りです。

- 書き換え可能な無限に長いテープと、オートマトンと言われる移動可能な機械からできている。
- テープには、いろいろな記号が書かれている。

- オートマトンには、テープの内容を読み書き可能なヘッドと内部状態を記憶する装置、テープの任意の位置に移動する装置から構成されている。
- オートマトンの動作 (テープの読み書き) や移動は、今の場所のテープの記号と内部状態により決まる。

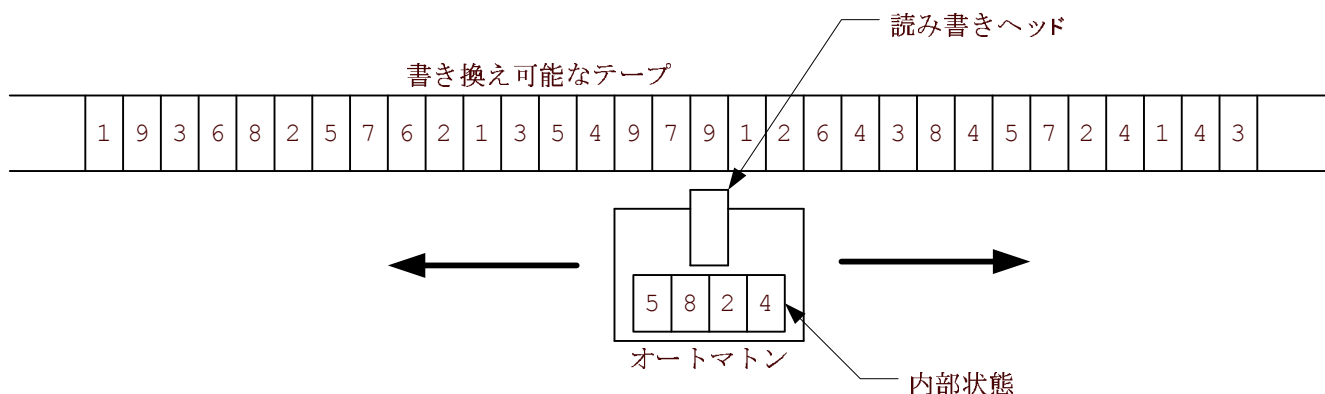


図 2: チューリング機械

これが、コンピューターそのものです。今は、分からなくても、そのうち理解できるでしょう。書き換え可能なテープはメモリーに、オートマトンはCPUに相当します。テープに書かれた記号は、プログラムであったりデータであったりします。内部状態はレジスタ²の値に対応します。

あるときチューリング機械が、図1の状態であったとします。テープの内容を読むあるいは書き直す、内部状態を変える、移動することのどれかが次の動作になります。次の動作を決めるのは、テープの内容と内部状態により一意に決まります。要するに、テープの上を行ったり来たりして、内部状態を変えたり、テープの内容を読み書きしている自動機械がチューリング機械です。

このような動作をするチューリング機械で、どんなことができるのでしょうか?。このような単純な機械で、ありとあらゆる計算ができるのです。今まで、学習してきた計算は、記号の操作の繰り返しになっています。人間の脳で計算するときも、計算と言えば記号の操作の繰り返しのはずです。要するに、チューリング機械ではこの種の計算が、可能なわけです。ただ、チューリング機械で計算できないものもあります。この問題は、込み入って複雑なので、ここでは取り扱いません。

チューリング機械の概要が分かったと思います。要するに言いたいことは、計算するという動作は、チューリング機械で表現できると言うことです。計算するという一見、知的な作業が、おもちゃのようなチューリング機械で表せことは驚きです。

2.3 ノイマン型コンピューター

ここで、少しコンピューターの発明されたころの話をしてします。1940年頃、ベル研にコンプレックスカリキュレータというものがあり、それはプログラムは人間が手に入れるもので、電卓と同じようなもので

²CPUのメモリーと思ってください

す。つまり、プログラムは、それを操作する人の頭にあり、人の手がインターフェースです。これでは、とても高速にプログラムが実行できるとはいえません。

次の進歩は、プログラムが自動で計算機に送り込まれ、それに従い実行される機械の発明です。ドイツのZ3とハーバード大学のマークIである。これらの機械は、計算はリレーで行われました。プログラムは、Z3の場合はフィルムに、マークIの場合は紙テープに書かれていました。プログラムの実行速度は、フィルムや紙テープの読み取り速度で制限されます。これは、高速に計算する上で非常に大きな問題でした。

1946年、砲弾の弾道計算用にENIACと名づけられた真空管式の電子計算機が開発されました。当時としては、とてつもない速度で計算することができる機械でしたが、大きな問題がありました。計算の内容、現在でいうプログラムを変えるとき、それはプログラムボードと呼ばれる配線板上の配線を組み替える必要がありました。この作業は大変で、1日程度の時間が必要であったようである。当然、次のコンピューターを作るとき、この点の改良が議論されたのは言うまでも無い。プログラムの変更が大変ですが、先の紙テープのように外部からプログラムを送るのではなく、本体に内蔵していた点では大きな進歩です。これにより、高速に計算ができたわけです。

次のEDVACというコンピューターの開発では、プログラムを配線ではなく、メモリーの中に入れることが議論されました。こうすることにより、プログラムの変更が容易でかつ高速で計算するコンピューターが出来上がります。この開発の中に、天才数学者ノイマンがあり、以降、このようにプログラムを内蔵したものをノイマン式コンピューターと言われるようになりました。ただし、このアイデアを出したのがノイマンかと言われると、定かではありません。このコンピューターを実現するためのメモリーの開発は大変だったようです。

紆余曲折の後、プログラムと計算処理の対象であるデータは、同じメモリー上に置かれるようになりました。このように、同じメモリー上に命令とデータがあるようなものをノイマン型コンピューターと言います。世界中のほとんどのコンピューターがこのノイマン型のコンピューターで、

- 1次元的に並んだメモリーがあり、そこにプログラム(命令)もデータも格納される。メモリーの内容は、自然数の番地で参照できる。
- メモリーに格納されたプログラム(命令)とデータの見かけ上の区別はない。プログラムをデータとして見ることも、データをプログラムとしてみることもできる。

の特徴をもっています。チューリング機械そのものです。