

6 . 電子計算機の動作原理

1. 目的

現在のデジタル型計算機は、記憶装置（主メモリ）に格納されているプログラムを順次読み出して、その命令を実行するストアプログラム（stored program）方式に基づいている。本実験では、SLOW SCAN COMPUTER（これ以降 SSC と略記する）を操作することで、計算機の動作原理を学ぶことを目的とする。

2. 計算機の動作原理

計算機が処理するプログラムは命令語とデータ語で構成される。データ語は、演算の対象となる演算数、すなわち、数値である。一方、命令語は、どのような演算処理を行なわせるかを示す操作コードと、その演算対象となる演算数が格納されている主メモリ上のアドレス（番地）とから成る。計算機は、主メモリから一つずつ命令語を読み出し、その演算処理を実行していく。通常、命令語を実行する順序は、それらが主メモリ上で格納されている順序である。命令語の読み出しアドレスを指定するプログラムカウンタ（PC）の値は、一命令を実行する度に1ずつ増加する。また、分岐命令のように実行順序を変更する場合には、PCに飛先アドレスの値を入れる。このような仕組みにより、あらかじめ主メモリ上に格納しておいたプログラムを順番に一命令ずつ実行することができる。

次に、一つの命令が実行される過程について詳しく述べる。各命令は、準備段階（Fetch Cycle, F サイクル）と実行段階（Execution Cycle, E サイクル）の二つのサイクルで実行される。F サイクルでは、その時点で実行すべき命令語をPCの値でアドレス指定された主メモリ上のアドレスから読み出して命令レジスタにセットし、次の命令に備えてPCに1を加える。そして、その命令語中の操作コードから、どのような演算処理を行なわせるのかを知り、演算対象となるデータ語（演算数）の実効アドレスを作成する。続いて、E サイクルでは、実効アドレスのデータ語に対して指定された演算を実行する。そして、E サイクルが終了すると、次の命令のF サイクルに移る。このようにして、各命令が次々に実行されていく。F サイクルやE サイクルは、主メモリからの命令語/データ語の読み出しや、PCに1を加えるなど、いくつかの基本的な操作に分けることができる。これをマイクロ操作という。つまり、一命令の実行過程は、マイクロ操作の時系列と考えられる。

3. 計算機のアーキテクチャ

本実験で用いる計算機SSCは、以下のアーキテクチャをもつ。

- (1) ストアドプログラム方式であり、1語長を8ビットとし、主メモリは32語から成る。
- (2) 計算機の構造として、5ビットのアドレスバスと、8ビットのデータバスをもつ。
- (3) 命令語は、上位3ビットを操作コード部、下位5ビットをアドレス部とする。
- (4) データ語は、2の補数形式の8ビット2進データとする。
- (5) 計算機を構成する主メモリ、カウンタ、レジスタ等について以下に解説する（図1参照）。

- 主メモリ（Main Memory: MM）：32語（ワード）の記憶容量をもち、命令語とデータ語を格納する。
- プログラムカウンタ（Program Counter: PC）：次に実行すべき命令語が置かれている主メモリ上のアドレスを格納しているカウンタである。
- アドレスレジスタ（Address Register: AR）：主メモリの読み出し時と書き込み時に、その対象とするアドレスを一時蓄えるレジスタである。
- メモリレジスタ（Memory Register: MR）：主メモリの読み出し時と書き込み時に、データを一時蓄えるレジスタである。
- 命令レジスタ（Instruction Register: IR）：主メモリから読み出された命令語を一時蓄えるレジスタである。上位3ビット（IR₅₋₇）はデコーダ（Decoder: DC）で命令の種類を判別するのに使用され、下位5ビット（IR₀₋₄）は主メモリにおける演算数を指示する実効アドレスとして使用される。

- アキュムレータ (Accumulator: ACC) : 演算のために使われる累算レジスタである。メモリレジスタとアキュムレータの内容が演算器 (ALU) で計算され、その結果が (作業レジスタを通して) アキュムレータに一時蓄えられる。
- 作業レジスタ (Working Register: WR) : 演算器からの出力結果を一時蓄えるレジスタである。
- 入力装置レジスタ (Input Register: IDR) : 入力装置として使われるレジスタであり、8 個の入力用スイッチ (ISW) の “0” , “1” の状態を一時蓄える。
- 出力装置レジスタ (Output Register: ODR) : 出力装置として使われるレジスタである。

(6) 実行できる 8 種類の命令を表 1 に示す。

表 1: 命令の種類

命令	記述	コード	機能
分岐命令	J	000	ACC の内容が 0 以上の場合には n 番地へ分岐し、負の場合には何も起こらない。ただし、アドレス部が 0 の時は停止命令となる。
加算命令	A	001	$(ACC) + (n) \rightarrow ACC$
減算命令	B	010	$(ACC) - (n) \rightarrow ACC$
ロード命令	L	011	n 番地の内容を ACC へ格納する。
ストア命令	T	100	ACC の内容を n 番地へ格納する。
入力命令	R	101	入力装置レジスタから主メモリの n 番地へ入力する。
出力命令	W	110	主メモリの n 番地の内容を出力装置レジスタへ出力する。
シフト命令	S	111	ACC の内容を n ビット左シフトする。

表中の n は命令語中の下位 5 ビット (アドレス部) , (n) は主メモリ上の n 番地の内容を意味する。

4. SSC の操作

SSC は主メモリに格納されている命令語やデータ語を順次取り出して実行する。そこで、主メモリ内に必要な命令やデータを書き込む方法、主メモリ内の値を読み出す方法、そして作成したプログラムを実行する方法を以下にまとめる。

4.1. 主メモリへの書き込み

主メモリにデータを書き込むには、「どのアドレス」に「どんなデータ」を書くかを指定する必要がある。その手順を以下に示す。

手動書き込みの方法

- (1) STOP/RUN スイッチが “STOP” になっていることを確認する。
- (2) ADDRESS/DATA スイッチを “ADDRESS” にして、入力用スイッチに書き込むアドレスを指定し、READ/WRITE スイッチを “WRITE” に倒す。入力装置レジスタ (IDR) と Program Counter (PC) に入力したアドレスが表示される。
- (3) ADDRESS/DATA スイッチを “DATA” にして、入力用スイッチに書き込むデータを指定し、READ/WRITE スイッチを “WRITE” に倒す。これにより、(2) で指定したアドレスに入力したデータが書き込まれる。IDR には入力したデータが表示される。
- (4) PC の値に自動的に 1 が加算されていることを確認。次のアドレスに続けてデータを書き込む場合には、(3) を繰り返す。

4.2. メモリ内容の読み出し

主メモリに書き込まれた内容を確認するために、指定したアドレスの内容を出力装置レジスタ (ODR) に表示することができる。その手順を以下に示す。

手動読み出しの方法

- (1) STOP/RUN スイッチが “STOP” になっていることを確認する。
- (2) ADDRESS/DATA スイッチを “ADDRESS” にして、入力用スイッチに読み込むアドレスを指定し、READ/WRITE スイッチを “WRITE” に倒す。PC に指定したアドレスが表示されることを確認。
- (3) READ/WRITE スイッチを “READ” に倒す。(2) で指定したアドレスの内容が ODR に表示される。
- (4) PC の値が自動的に 1 が加算される。(3) を繰り返すことで、続くアドレスの内容が順次読み出される。

4.3. 作成したプログラムのステップ実行

プログラムが実行される様子を観察するために、この実験では命令をマイクロ操作ごとに実行するステップモードを用いる。その手順を以下に示す。

ステップモードの実行方法

- (1) STOP/RUN スイッチが “STOP” になっていることを確認。
- (2) CLEAR スイッチでレジスタ類を 0 にする。この操作を行っても主メモリの内容は変わらない。
- (2) STEP/AUTO スイッチを “STEP” にし、STOP/RUN スイッチを “RUN” にする。
- (3) F/E スイッチで、1 ステップずつマイクロ操作を実行させる。

5. 実験

5.1. マイクロ操作タイミング表の作成

以下の実験により、8種類の命令についてマイクロ操作タイミング表を作成し、その動作を理解せよ。

(a) (ロード命令 L), 加算命令 A, ストア命令 T

まず、次のプログラム 1 を主メモリの各アドレスに手動で書き込む (データ 1 とデータ 2 には適当な数値を与えよ)。次に、それらを手動で読み出し、正しく書き込まれていることを確認せよ。

プログラム 1		
0	L/4	01100100
1	A/5	00100101
2	T/6	10000110
3	J/0	00000000
4	データ 1	
5	データ 2	
6	結果	

プログラム 1 をステップモードで実行して、マイクロ操作のレベルで動作を確認し、加算命令 A とストア命令 T のマイクロ操作タイミング表を作成せよ。例として、ロード命令 L のマイクロ操作タイミング表を表 2 に示す。実験では、それぞれのレジスタの内容も記録すること。また、FETCH ランプ、EXEC ランプが点灯する様子も観察すること。

表 2 は、それぞれのマイクロ操作で、どのレジスタの値が変化したかを示している。例えば、最初のステップ T_1 の「(PC) → AR」は、プログラムカウンタ PC の内容がアドレスレジスタ AR へコピーされたことを表す。次のステップ T_2 の「((AR)) → MR」は、AR の内容が指示する番地の内容がメモリレジスタ (MR) へコピーされたことを示す。

(注) ストア命令 T の最後のステップでは、計算機のレジスタに変化は観測されない。何が起こったかを考えること。ストア命令は主メモリにデータを格納する命令であることに注意。

表 2: ロード命令 L のマイクロ操作タイミング表。

ロード命令 L	T_1	T_2	T_3	T_4
	(PC) → AR	((AR)) → MR	(MR) → IR	(IR ₀₋₄) → AR
	T_5	T_6	T_7	T_8
	(PC) + 1 → PC	(IR ₅₋₇) → DC	((AR)) → MR	(MR) → WR
	T_9			
	(WR) → ACC			

表中の記法について、(レジスタ) は「レジスタの内容」、(メモリ番地) は「主メモリのその番地の内容」、((AR)) は「AR の内容で指示するメモリ番地の内容」をそれぞれ意味する。

(b) 減算命令 B

プログラム 1 の 1 行目の A/5 を B/5 に書き換えて実行することで、減算命令 B のマイクロ操作タイミング表を作成せよ。

(c) 分岐命令 J, シフト命令 S

プログラム 2 を用いて、(a) の実験と同様に、分岐命令 J とシフト命令 S のマイクロ操作タイミング表を作成せよ。データ 3 には正の値、データ 4 には負の値を設定すること。

0	L/6	01100110
1	S/4	11100100
2	L/7	01100111
3	J/8	00001000
4	L/6	01100110
5	J/8	00001000
6	データ 3	(正の値)
7	データ 4	(負の値)
8	J/0	00000000

0	R/3	10100011
1	W/3	11000011
2	J/0	00000000
3	データ 5	

(d) 入力命令 R, 出力命令 W

プログラム 3 を用いて, 入力命令 R と出力命令 W のマイクロ操作タイミング表を作成せよ.

入力命令 R が実行されると, SSC は一旦停止し, IDR にデータが入力されるのを待つ状態になる. 適当な 2 進数を指定し, READ/WRITE スイッチを “WRITE” に倒すと, IDR が点灯しマイクロ操作が再開するようになる.

(注) 入力命令 R でも, 最後のステップでレジスタに変化は観測されない. 何が起こったかを考えよ.

5.2. 入出力を伴うプログラムの作成

入力用スイッチからデータを取り込み, 適当な計算 (簡単な計算でよい) をして, 出力装置レジスタに書き出すプログラムを作成せよ. そのプログラムを主メモリに格納し, 実際に実行することで, その動作を確認せよ.

レポートには, プログラムの目的, 仕様 (使い方の説明), プログラムのコード, 命令レベルでのプログラムの動作の説明を記述すること.

5.3. プログラム課題

以下の課題から一つを選び, プログラムを作成せよ. また, そのプログラムを実行し, 正しく動作するか確認せよ.

【1】次のような数当てゲームを行うプログラムを作成せよ.

- (1) 当てたい数 (答え) を x とする.
- (2) ユーザが入力した値を y としたとき,
 - $y = x$ なら, 11111111 を出力して停止
 - $y > x$ なら, 11110000 を出力して, 再び入力を繰り返す
 - $y < x$ なら, 00001111 を出力して, 再び入力を繰り返す

SSC では, データが負の値かどうかは分岐命令 J で判定できる. このプログラムでは, $y - x$ が 0 かどうかを調べる工夫が必要になる.

【2】正の数 n を入力して

$$S = \sum_{k=0}^n k$$

で計算される S を出力するプログラムを作成せよ.

【3】主メモリにあるいくつかの数値の中から, 最小値 (最大値) を出力するプログラムを作成せよ.

【4】上記の課題以外に, グループでオリジナルのプログラムを作成してもよい.

レポートには, プログラムを作成する上で工夫した点, 改良の余地がないか, などの評価を加えること.

6. 検討事項

- (1) 命令語とデータ語は、区別なく、まったく同じ2進数として主メモリに格納されている。計算機はそれらをどのように区別して実行するのか考えよ。
- (2) マイクロプログラム制御方式とはどのようなものか調べよ。
- (3) 命令のアドレス指定方式(すなわち、実効アドレスの決定方法)にはどのようなものがあるか調べよ。

参考文献

- [1] 萩原, 黒住, 電子計算機 - ハードウェアの基礎 -, オーム社。
- [2] 渡辺, コンピュータ設計技術 [II], CQ 出版社。
- [3] 発田, コンピュータ方式の設計, 産報出版社。
- [4] 萩原, マイクロプログラム, 産業図書。