

# Self-Replication and Ontogeny in Machines

by

William R. Buckley

International Embryo Physics Course

June 11, 2009



# Information Sources Respecting von Neumann Cellular Automata

## Wikipedia –

Von Neumann Cellular Automaton

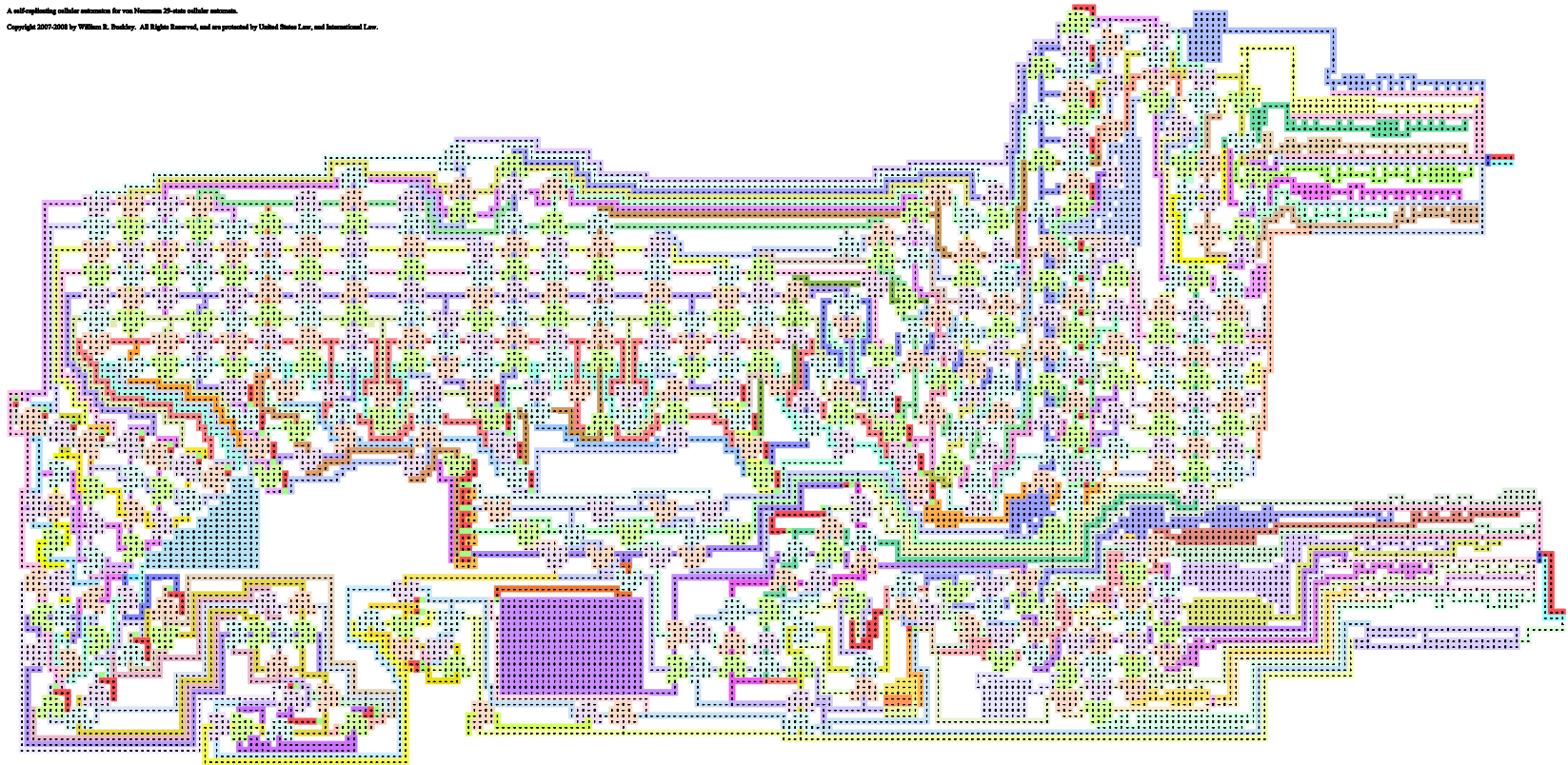
Von Neumann Universal Constructor

## Books –

Theory of Self-Reproducing Automata, John von Neumann

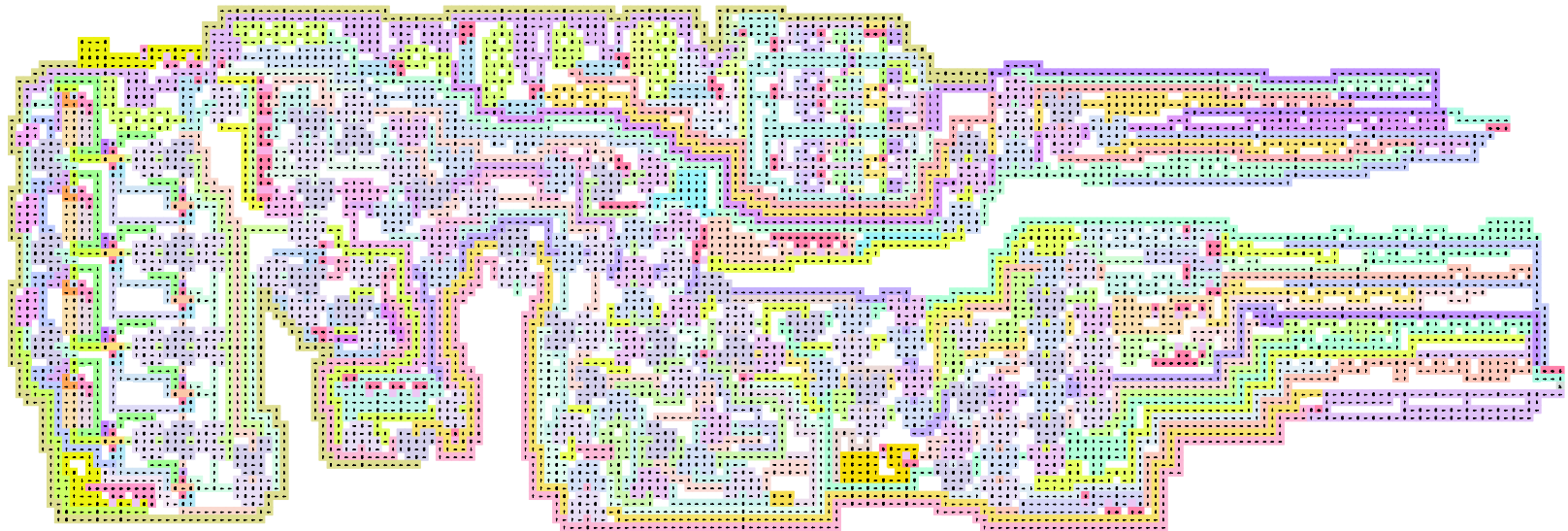
Essays on Cellular Automata, Arthur W. Burks, Ed.

Proceedings, Automata 2008 – ask me for a copy



## Sphinx

A 29-state configuration which transmits only pulse signal within its body.  
Dimensions of bounding box are 272 cells wide by 132 cells tall.



## Un-named Configuration

A 29-state configuration which transmits both pulse and packet signal within its body.  
Dimensions of bounding box are 200 cells wide by 67 cells tall.

# Other Self-Replicating Cellular Automata

Langton's Loops and Variations:

Byl

Sayama

Chou-Reggia

Tempesti

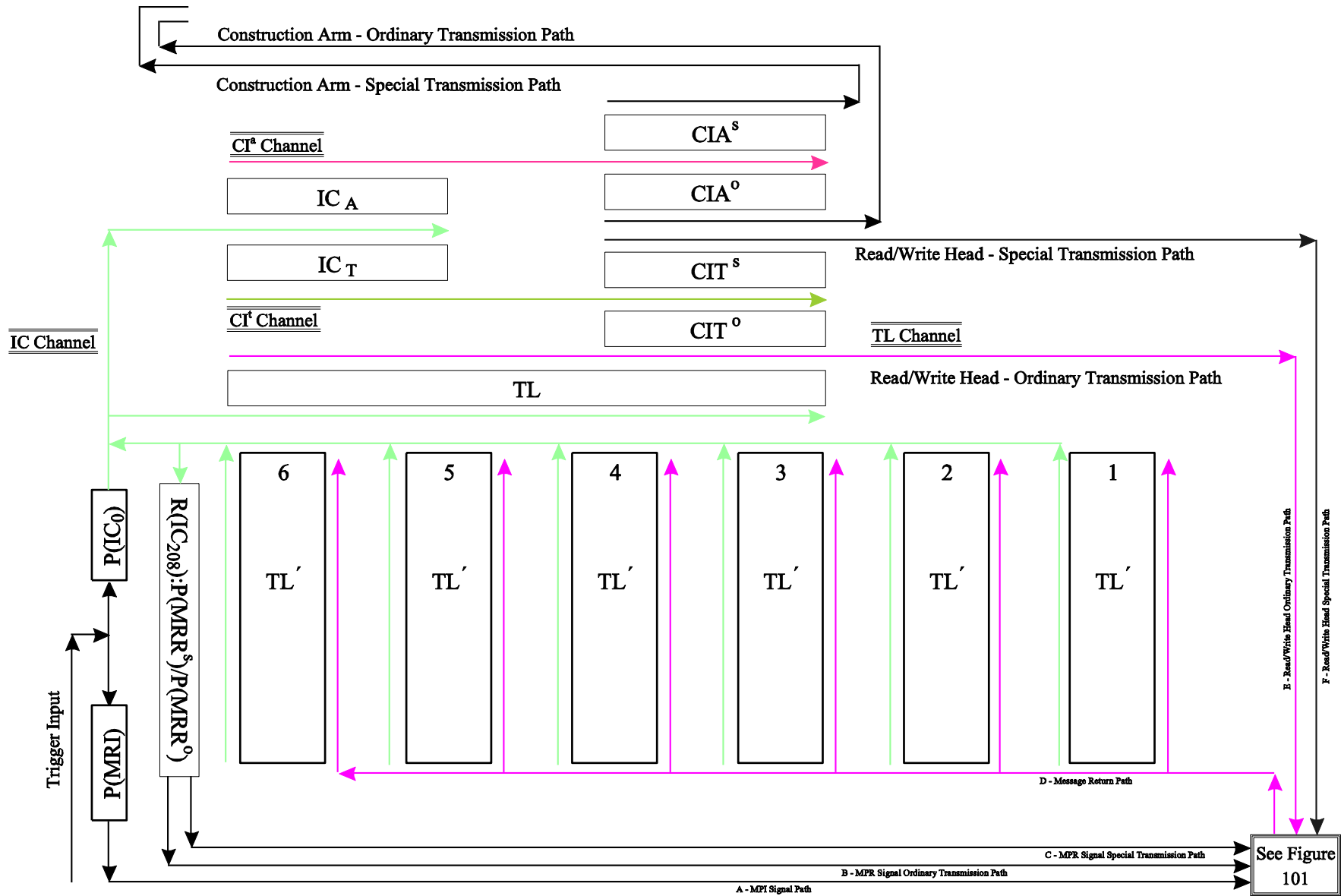
Perrier

See Wikipedia article – Langton's Loops

For relevant papers, ask me

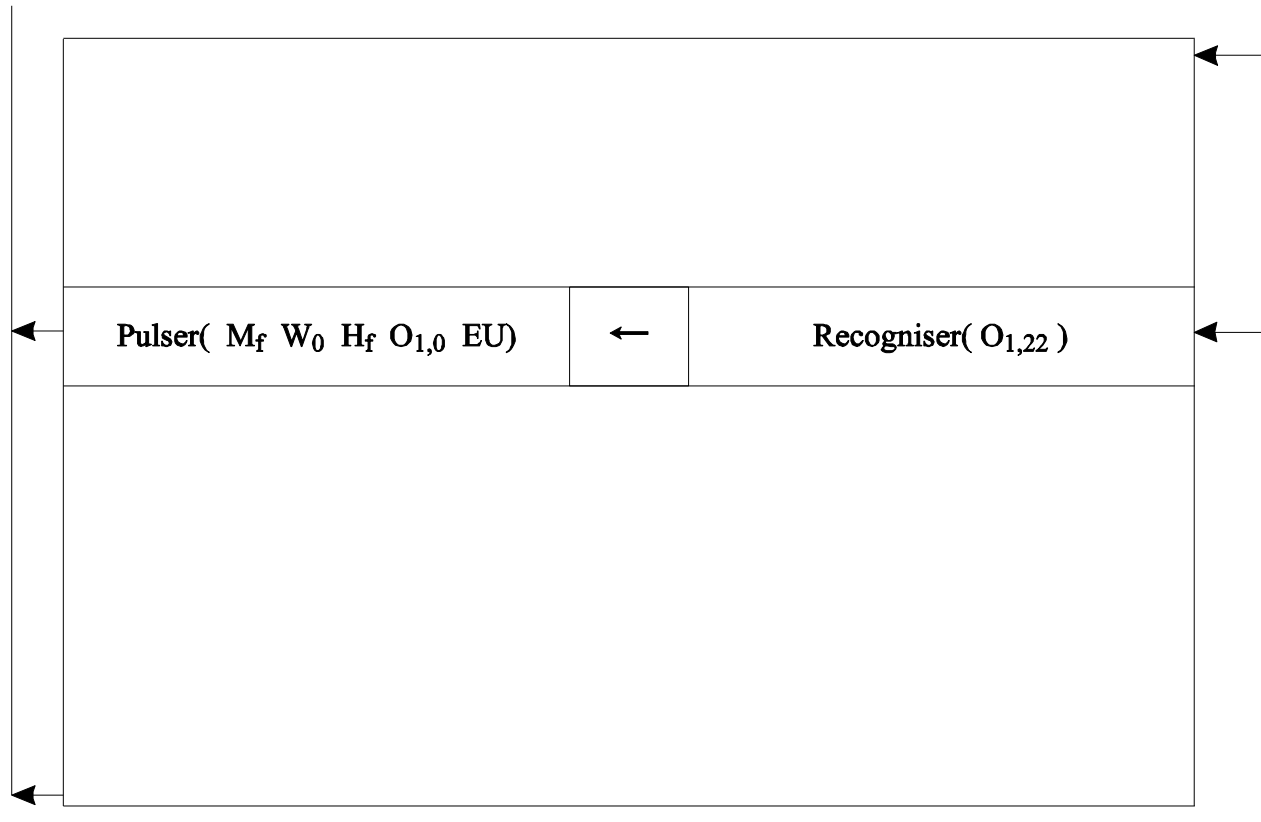
		P( $\bar{i}_n \dots \bar{i}_1$ )			↓	Delay			→	C																																		
					→					↓																																		
	→											C	→	P(11111)																														
	↑								↑																																			
<b>A</b>	C	D( $i_1 \dots i_n$ )							→	C		P(11111)												C	⇒	C	<b>B</b>																	
	↓									↓																																	↑	
	→									C	→											→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	C							

## The General Recogniser



## Top Level Design





## Structure of Phases

R(O <sub>1,0</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,1</sub>	) O <sub>1,0</sub> = <1010100000000001>	
R(O <sub>1,0</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,2</sub>	) O <sub>1,1</sub> = <1010100000000011>	0
R(O <sub>1,1</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,3</sub>	) O <sub>1,2</sub> = <1010100000000101>	1
R(O <sub>1,1</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,4</sub>	) O <sub>1,3</sub> = <1010100000000111>	00
R(O <sub>1,2</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,5</sub>	) O <sub>1,4</sub> = <1010100000001001>	01
R(O <sub>1,2</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,6</sub>	) O <sub>1,5</sub> = <1010100000001011>	10
R(O <sub>1,3</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,7</sub>	) O <sub>1,6</sub> = <1010100000001101>	11
R(O <sub>1,3</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,8</sub>	) O <sub>1,7</sub> = <1010100000001111>	000
R(O <sub>1,4</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,9</sub>	) O <sub>1,8</sub> = <1010100000010001>	001
R(O <sub>1,4</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,10</sub>	) O <sub>1,9</sub> = <1010100000010011>	010
R(O <sub>1,5</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,11</sub>	) O <sub>1,10</sub> = <1010100000010101>	011
R(O <sub>1,5</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,12</sub>	) O <sub>1,11</sub> = <1010100000010111>	100
R(O <sub>1,6</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,13</sub>	) O <sub>1,12</sub> = <1010100000011001>	101
R(O <sub>1,6</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,14</sub>	) O <sub>1,13</sub> = <1010100000011011>	110
R(O <sub>1,7</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,15</sub>	) O <sub>1,14</sub> = <1010100000011101>	111
R(O <sub>1,7</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,16</sub>	) O <sub>1,15</sub> = <1010100000011111>	0000
R(O <sub>1,8</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,17</sub>	) O <sub>1,16</sub> = <1010100000100001>	0001
R(O <sub>1,8</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,18</sub>	) O <sub>1,17</sub> = <1010100000100011>	0010
R(O <sub>1,9</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,19</sub>	) O <sub>1,18</sub> = <1010100000100101>	0011
R(O <sub>1,9</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,20</sub>	) O <sub>1,19</sub> = <1010100000100111>	0100
R(O <sub>1,10</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,21</sub>	) O <sub>1,20</sub> = <1010100000101001>	0101
R(O <sub>1,10</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,22</sub>	) O <sub>1,21</sub> = <1010100000101011>	0110
R(O <sub>1,11</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,23</sub>	) O <sub>1,22</sub> = <1010100000101101>	0111
R(O <sub>1,11</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,24</sub>	) O <sub>1,23</sub> = <1010100000101111>	1000
R(O <sub>1,12</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,25</sub>	) O <sub>1,24</sub> = <1010100000110001>	1001
R(O <sub>1,12</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,26</sub>	) O <sub>1,25</sub> = <1010100000110011>	1010
R(O <sub>1,13</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,27</sub>	) O <sub>1,26</sub> = <1010100000110101>	1011
R(O <sub>1,13</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,28</sub>	) O <sub>1,27</sub> = <1010100000110111>	1100
R(O <sub>1,14</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,29</sub>	) O <sub>1,28</sub> = <1010100000111001>	1101
R(O <sub>1,14</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,30</sub>	) O <sub>1,29</sub> = <1010100000111011>	1110
R(O <sub>1,15</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	) O <sub>1,30</sub> = <1010100000111101>	1111
R(O <sub>1,15</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	) SOT	00000
R(O <sub>1,16</sub> - 0 ) : P( W <sub>0</sub> O <sub>2,0</sub>	) EOT	00001
R(O <sub>1,16</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	) EOC	00010
R(O <sub>1,17</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	INJ ) INJ	00011
R(O <sub>1,17</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	WQ ) WQ	00100
R(O <sub>1,18</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	WC ) WC	00101
R(O <sub>1,18</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	WOU ) WOU	00110
R(O <sub>1,19</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	WOR ) WOR	00111
R(O <sub>1,19</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	WOL ) WOL	01000
R(O <sub>1,20</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	WOD ) WOD	01001
R(O <sub>1,20</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	WSU ) WSU	01010
R(O <sub>1,21</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	WSR ) WSR	01011
R(O <sub>1,21</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	WSL ) WSL	01100
R(O <sub>1,22</sub> - 0 ) : P( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	WSD ) WSD	01101
R(O <sub>1,22</sub> - 1 ) : P( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>1,0</sub>	EU ) EU	01110

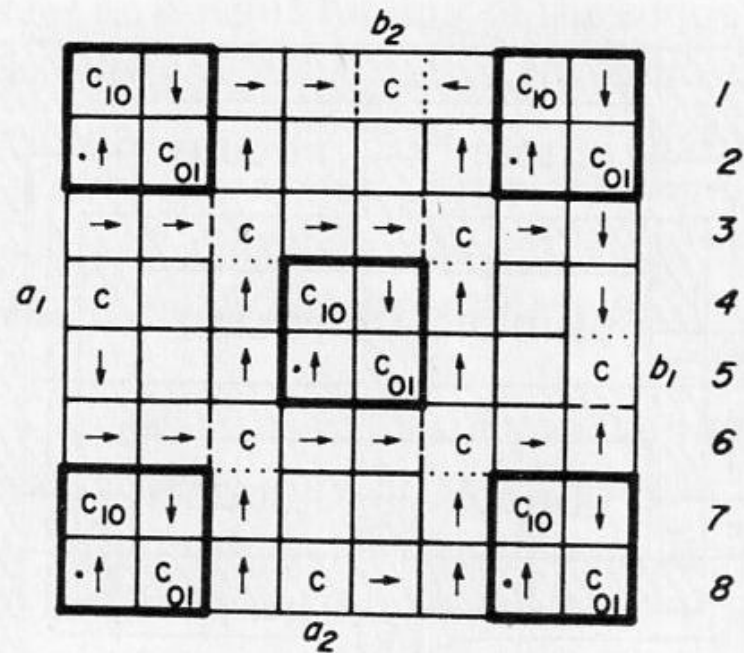
## Phase One

R (O <sub>2,0</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,1</sub>	O <sub>2,0</sub> = <1010100001000001>	
R (O <sub>2,0</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,2</sub>	O <sub>2,1</sub> = <1010100001000011>	0
R (O <sub>2,1</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,3</sub>	O <sub>2,2</sub> = <1010100001000101>	1
R (O <sub>2,1</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,4</sub>	O <sub>2,3</sub> = <1010100001000111>	00
R (O <sub>2,2</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,5</sub>	O <sub>2,4</sub> = <1010100001001001>	01
R (O <sub>2,2</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,6</sub>	O <sub>2,5</sub> = <1010100001001011>	10
R (O <sub>2,3</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,7</sub>	O <sub>2,6</sub> = <1010100001001101>	11
R (O <sub>2,3</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,8</sub>	O <sub>2,7</sub> = <1010100001001111>	000
R (O <sub>2,4</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,9</sub>	O <sub>2,8</sub> = <1010100001010001>	001
R (O <sub>2,4</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,10</sub>	O <sub>2,9</sub> = <1010100001010011>	010
R (O <sub>2,5</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,11</sub>	O <sub>2,10</sub> = <1010100001010101>	011
R (O <sub>2,5</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,12</sub>	O <sub>2,11</sub> = <1010100001010111>	100
R (O <sub>2,6</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,13</sub>	O <sub>2,12</sub> = <1010100001011001>	101
R (O <sub>2,6</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,14</sub>	O <sub>2,13</sub> = <1010100001011011>	110
R (O <sub>2,7</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,15</sub>	O <sub>2,14</sub> = <1010100001011101>	111
R (O <sub>2,7</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,16</sub>	O <sub>2,15</sub> = <1010100001011111>	0000
R (O <sub>2,8</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,17</sub>	O <sub>2,16</sub> = <1010100001100001>	0001
R (O <sub>2,8</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,18</sub>	O <sub>2,17</sub> = <1010100001100011>	0010
R (O <sub>2,9</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,19</sub>	O <sub>2,18</sub> = <1010100001100101>	0011
R (O <sub>2,9</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,20</sub>	O <sub>2,19</sub> = <1010100001100111>	0100
R (O <sub>2,10</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,21</sub>	O <sub>2,20</sub> = <1010100001101001>	0101
R (O <sub>2,10</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,22</sub>	O <sub>2,21</sub> = <1010100001101011>	0110
R (O <sub>2,11</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,23</sub>	O <sub>2,22</sub> = <1010100001101101>	0111
R (O <sub>2,11</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,24</sub>	O <sub>2,23</sub> = <1010100001101111>	1000
R (O <sub>2,12</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,25</sub>	O <sub>2,24</sub> = <1010100001110001>	1001
R (O <sub>2,12</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,26</sub>	O <sub>2,25</sub> = <1010100001110011>	1010
R (O <sub>2,13</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,27</sub>	O <sub>2,26</sub> = <1010100001110101>	1011
R (O <sub>2,13</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,28</sub>	O <sub>2,27</sub> = <1010100001110111>	1100
R (O <sub>2,14</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,29</sub>	O <sub>2,28</sub> = <1010100001111001>	1101
R (O <sub>2,14</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,30</sub>	O <sub>2,29</sub> = <1010100001111011>	1110
R (O <sub>2,15</sub> - 0 ) : P ( W <sub>0</sub> O <sub>3,0</sub>	O <sub>2,30</sub> = <1010100001111101>	1111
R (O <sub>2,15</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>	SOT	00000
R (O <sub>2,16</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>	RD	00001
R (O <sub>2,16</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>	WOL	00010
R (O <sub>2,17</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>		00011
R (O <sub>2,17</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>	WQ	00100
R (O <sub>2,18</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>		00101
R (O <sub>2,18</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>	WSL	00110
R (O <sub>2,19</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>		00111
R (O <sub>2,19</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>	EOC	01000
R (O <sub>2,20</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>	LR	01001
R (O <sub>2,20</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>	WSU	01010
R (O <sub>2,21</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>		01011
R (O <sub>2,21</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>	WOU	01100
R (O <sub>2,22</sub> - 0 ) : P ( M <sub>b</sub> W <sub>0</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>		01101
R (O <sub>2,22</sub> - 1 ) : P ( M <sub>b</sub> H <sub>b</sub> O <sub>2,0</sub>	EU	01110
		01111

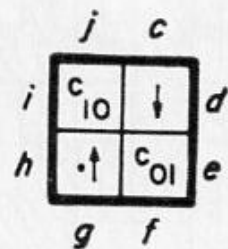
## Phase Two

R (O <sub>3,0</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,1</sub>	ER	)	O <sub>3,0</sub> = <1010100010000001>	0
R (O <sub>3,0</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,2</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,1</sub> = <1010100010000011>	0
R (O <sub>3,1</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,3</sub>	ER	)	O <sub>3,2</sub> = <1010100010000101>	1
R (O <sub>3,1</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,4</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,3</sub> = <1010100010000111>	00
R (O <sub>3,2</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,5</sub>	ER	)	O <sub>3,4</sub> = <1010100010001001>	01
R (O <sub>3,2</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,6</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,5</sub> = <1010100010001011>	10
R (O <sub>3,3</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,7</sub>	ER	)	O <sub>3,6</sub> = <1010100010001101>	11
R (O <sub>3,3</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,8</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,7</sub> = <1010100010001111>	000
R (O <sub>3,4</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,9</sub>	ER	)	O <sub>3,8</sub> = <1010100010010001>	001
R (O <sub>3,4</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,10</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,9</sub> = <1010100010010011>	010
R (O <sub>3,5</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,11</sub>	ER	)	O <sub>3,10</sub> = <1010100010010101>	011
R (O <sub>3,5</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,12</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,11</sub> = <1010100010010111>	100
R (O <sub>3,6</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,13</sub>	ER	)	O <sub>3,12</sub> = <1010100010011001>	101
R (O <sub>3,6</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,14</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,13</sub> = <1010100010011011>	110
R (O <sub>3,7</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,15</sub>	ER	)	O <sub>3,14</sub> = <1010100010011101>	111
R (O <sub>3,7</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,16</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,15</sub> = <1010100010011111>	0000
R (O <sub>3,8</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,17</sub>	ER	)	O <sub>3,16</sub> = <1010100010100001>	0001
R (O <sub>3,8</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,18</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,17</sub> = <1010100010100011>	0010
R (O <sub>3,9</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,19</sub>	ER	)	O <sub>3,18</sub> = <1010100010100101>	0011
R (O <sub>3,9</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,20</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,19</sub> = <1010100010100111>	0100
R (O <sub>3,10</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,21</sub>	ER	)	O <sub>3,20</sub> = <1010100010101001>	0101
R (O <sub>3,10</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,22</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,21</sub> = <1010100010101011>	0110
R (O <sub>3,11</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,23</sub>	ER	)	O <sub>3,22</sub> = <1010100010101101>	0111
R (O <sub>3,11</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,24</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,23</sub> = <1010100010101111>	1000
R (O <sub>3,12</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,25</sub>	ER	)	O <sub>3,24</sub> = <1010100010110001>	1001
R (O <sub>3,12</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,26</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,25</sub> = <1010100010110011>	1010
R (O <sub>3,13</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,27</sub>	ER	)	O <sub>3,26</sub> = <1010100010110101>	1011
R (O <sub>3,13</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,28</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,27</sub> = <1010100010110111>	1100
R (O <sub>3,14</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,29</sub>	ER	)	O <sub>3,28</sub> = <1010100010111001>	1101
R (O <sub>3,14</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,30</sub> WOD	ER	)	O <sub>3,29</sub> = <1010100010111011>	1110
R (O <sub>3,15</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub>	ER	)	O <sub>3,30</sub> = <1010100010111101>	1111
R (O <sub>3,15</sub> - 1 ) : P ( O <sub>4,0</sub> WOD		)	SOT	00000
R (O <sub>3,16</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub>	ER	)	EOT	00001
R (O <sub>3,16</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub> WOD	ER	)	EOC	00010
R (O <sub>3,17</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub>	ER	)	INJ	00011
R (O <sub>3,17</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub> WOD	ER	)	WQ	00100
R (O <sub>3,18</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub>	ER	)	WC	00101
R (O <sub>3,18</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub> WOD	ER	)	WOU	00110
R (O <sub>3,19</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub>	ER	)	WOR	00111
R (O <sub>3,19</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub> WOD	ER	)	WOL	01000
R (O <sub>3,20</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub>	ER	)	WOD	01001
R (O <sub>3,20</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub> WOD	ER	)	WSU	01010
R (O <sub>3,21</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub>	ER	)	WSR	01011
R (O <sub>3,21</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub> WOD	ER	)	WSL	01100
R (O <sub>3,22</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> W <sub>0</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub>	ER	)	WSD	01101
R (O <sub>3,22</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub> WOD	ER	)	EU	01110
R (O <sub>3,22</sub> - 0 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub>	ER	)	ER	01111
R (O <sub>3,22</sub> - 1 ) : P ( M <sub>f</sub> H <sub>f</sub> O <sub>3,0</sub>	ER	)	ER	10000

## Phase Three



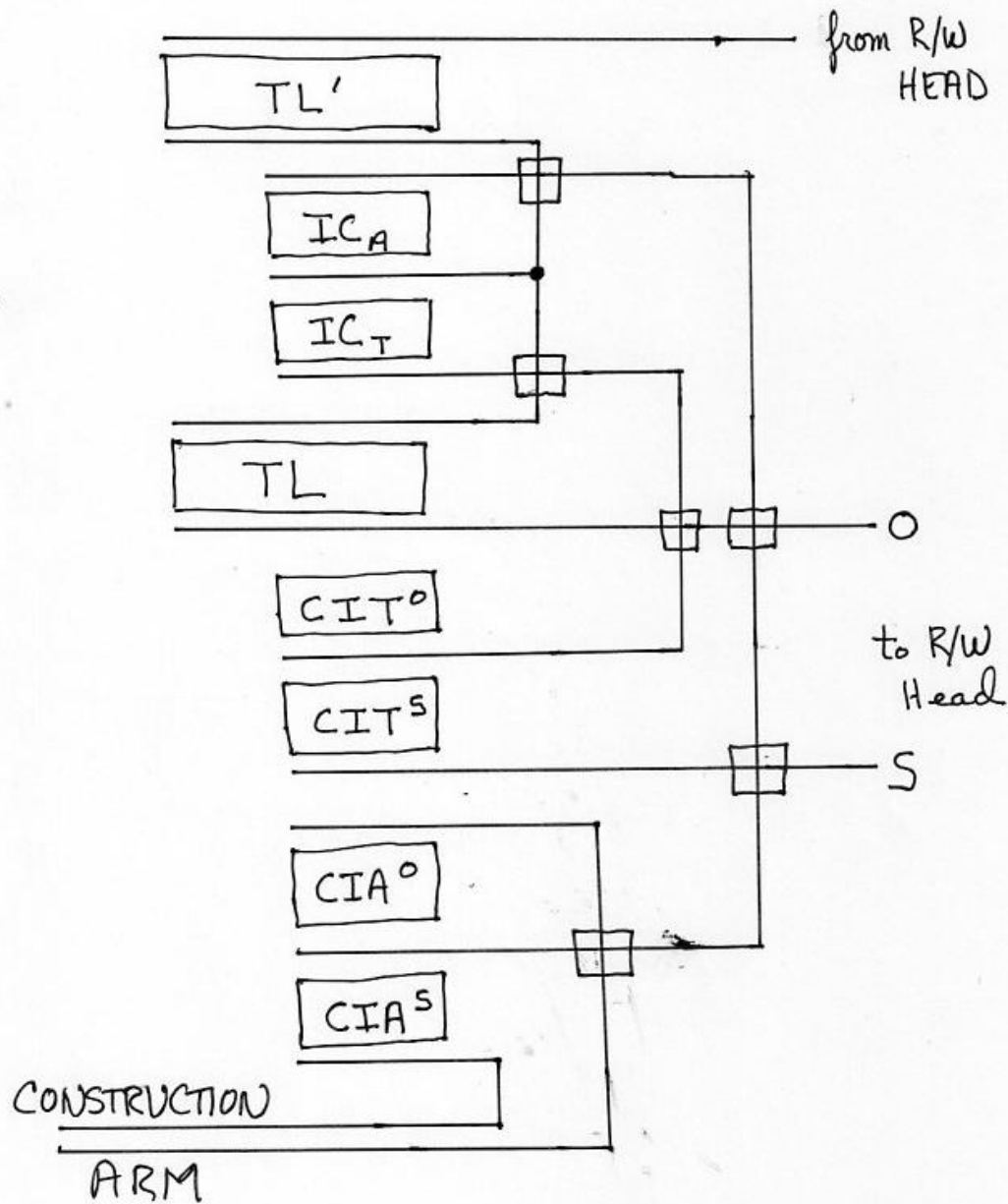
(a) CROSSING ORGAN



Output from  $i$  and  $j$  : 101010

Output from  $e$  and  $f$  : 010101

**RTCO – Real-Time Crossing Organ**



**The General Partial Constructor**