

lab04 - Baguenaudier

PB22081571 薄震宇

实验目的

本次实验的目的在于熟悉递归子程序的使用。利用递归的方法将一个逐步实现较为困难的问题拆分成多次相同的操作，将复杂的问题简单化。在使用递归子程序的同时，也可以加深对于栈这一数据结构的理解，熟悉入栈出栈等基本操作，了解递归程序是如何利用栈来实现的。

实验原理

正如上面所说，本次实验的关键在于完成递归子程序 REMOVE 和 PUT。其中 REMOVE(i) 用于将前i个环从板上移除，即将state的前n位由1变为0；而 PUT(i) 用于将前i个环放到板上，即将state的前n位由0变为1。二者是相反的操作。

所以下面先实现 REMOVE：

利用下面的关系式

$R(0) = \text{nothing}, R(1) = \text{remove the } 1^{st} \text{ ring}$

$R(i) = R(i-2) + \text{remove the } i^{th} \text{ ring} + P(i-2) + R(i-1), i \geq 2$

可以得到 REMOVE(n, state) 子程序的逻辑如下：

1. 若 $n = 0$ ，则直接返回state
2. 若 $n = 1$ ，则将state的最后一位由0变为1，直接对state加1即可，然后存储操作后的state于特定的存储空间，再返回state。
3. 若以上两种情况均不成立，则先将state的前n-2位全部变为1，即调用 REMOVE(n-2, state)，然后再将state的第n位由0变为1，因为state是二进制数，所以将state加上 2^{n-1} 即可，然后存储操作后的state于特定的存储空间；然后再调用 PUT(n-2, state) 将state的前n-2位复原为0，最后再调用 REMOVE(n-1, state) 将state的前n-1位由0变为1。

上述过程中所提到的将state存储于特定的存储空间中，需要使用一个全局变量来保存存储的地址，在汇编语言中，可以专门使用一个寄存器来存储。

在实现了 REMOVE 子程序后，只需要对它做以下修改即可得到 PUT 子程序：

1. 由于 REMOVE(i) 是要将state的前i位由0变成1，而 PUT(i) 是要将state的前i位由1变成0，所以在 PUT 子程序里需要将 REMOVE 子程序中的加法改为减法
2. REMOVE 子程序中是
$$R(i) = R(i-2) + \text{remove the } i^{th} \text{ ring} + P(i-2) + R(i-1), i \geq 2,$$
在 PUT 子程序中则是
$$PUT(i-2) + \text{put the } i^{th} \text{ ring} + R(i-2) + P(i-1), i \geq 2$$

在实现了以上两个递归子程序后，在主程序中调用 REMOVE 子程序即可。

实验过程

C语言实现

因为C语言中已经实现了递归函数，不需要考虑中间的变量的保存，函数的返回等问题，所以先用C语言来描述上面的过程，一方面是可以检测思路的正确性，另一方面是在用汇编语言实现时可以照着C语言来做的对应的修改，使得逻辑上更为清晰。

代码如下：

```
#include<stdio.h>
#include<math.h>

int REMOVE(int,int);
int PUT(int,int);

int STATE[10000] = {0}; //存储每一步操作后的state
int times; //times表示操作的次数

int main(){
    int n; /*the value of n in x3100*/
    printf("Please input n:");
    scanf("%d",&n);
    STATE[0] = n;
    times = 0;
    REMOVE(n,0);
    for(int i = 0;i <= times;i++)
        printf("%d\n",STATE[i]);
    return 0;
}

int REMOVE(int n,int state)
{
    if(n==0) return state; /*the state remains*/
    if(n==1){
        state++; //改变state
        STATE[++times] = state; //存储当前操作后的state
        return state;
    }
    state = REMOVE(n-2, state);
    state += pow(10,n-1); //将state的第n位变成1(用二进制表示时需要改成加2^(n-1))
    STATE[++times] = state;
    state = PUT(n-2, state);
    state = REMOVE(n-1, state);
    return state;
}

int PUT(int n,int state){
    if(n == 0) return state;
    if(n == 1)
    {
        state--; //改变state
        STATE[++times] = state; //存储当前操作后的state
        return state;
    }
    state = PUT(n-2, state);
    state -= pow(10,n-1);
```

```

STATE[++times] = state;
state = REMOVE(n-2, state);
state = PUT(n-1, state);
return state;
}

```

运行结果如下：

n = 3:

```

3
1
101
100
110
111

```

n = 5:

```

Please input n:5
5
1
101
100
110
111
10111
10110
10010
10011
10001
10000
10010
10011
11011
11001
11000
11001
11101
11100
11110
11111

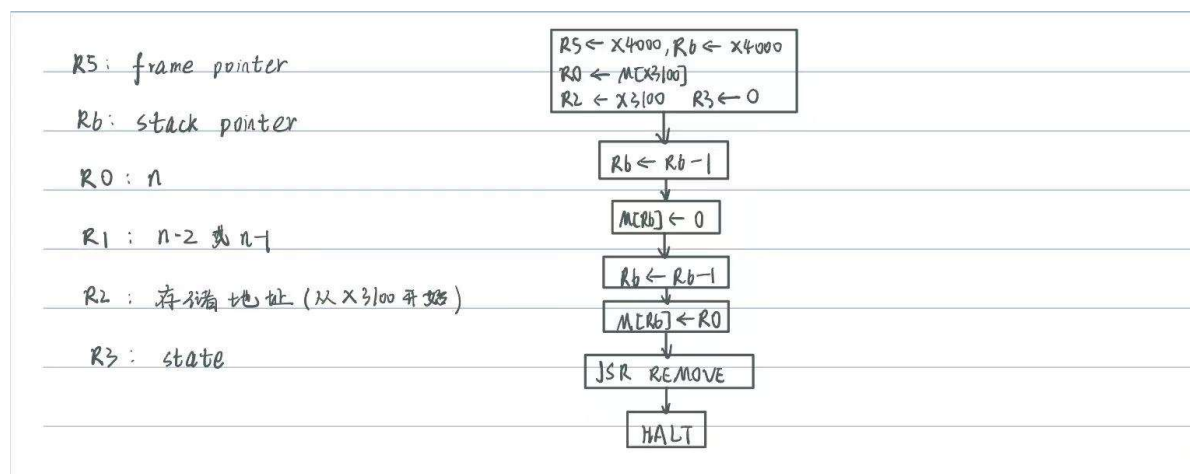
```

结果正确，说明上述思路正确，然后可以转换为汇编语言。

流程图

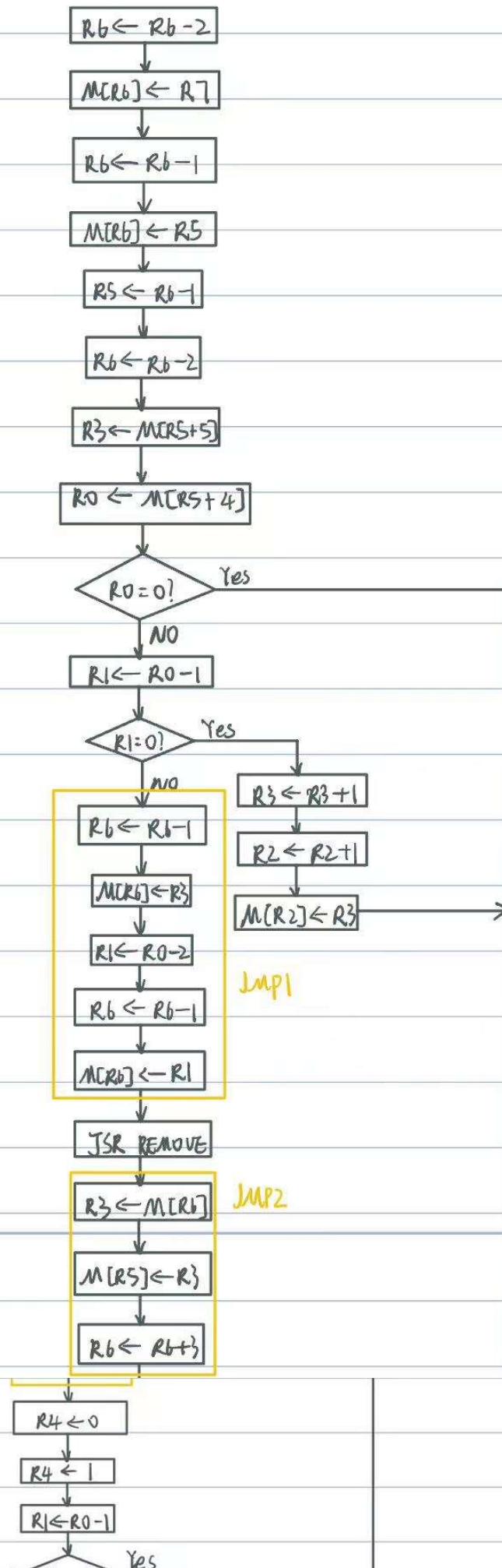
在用汇编语言来解决问题前，先画出流程图：

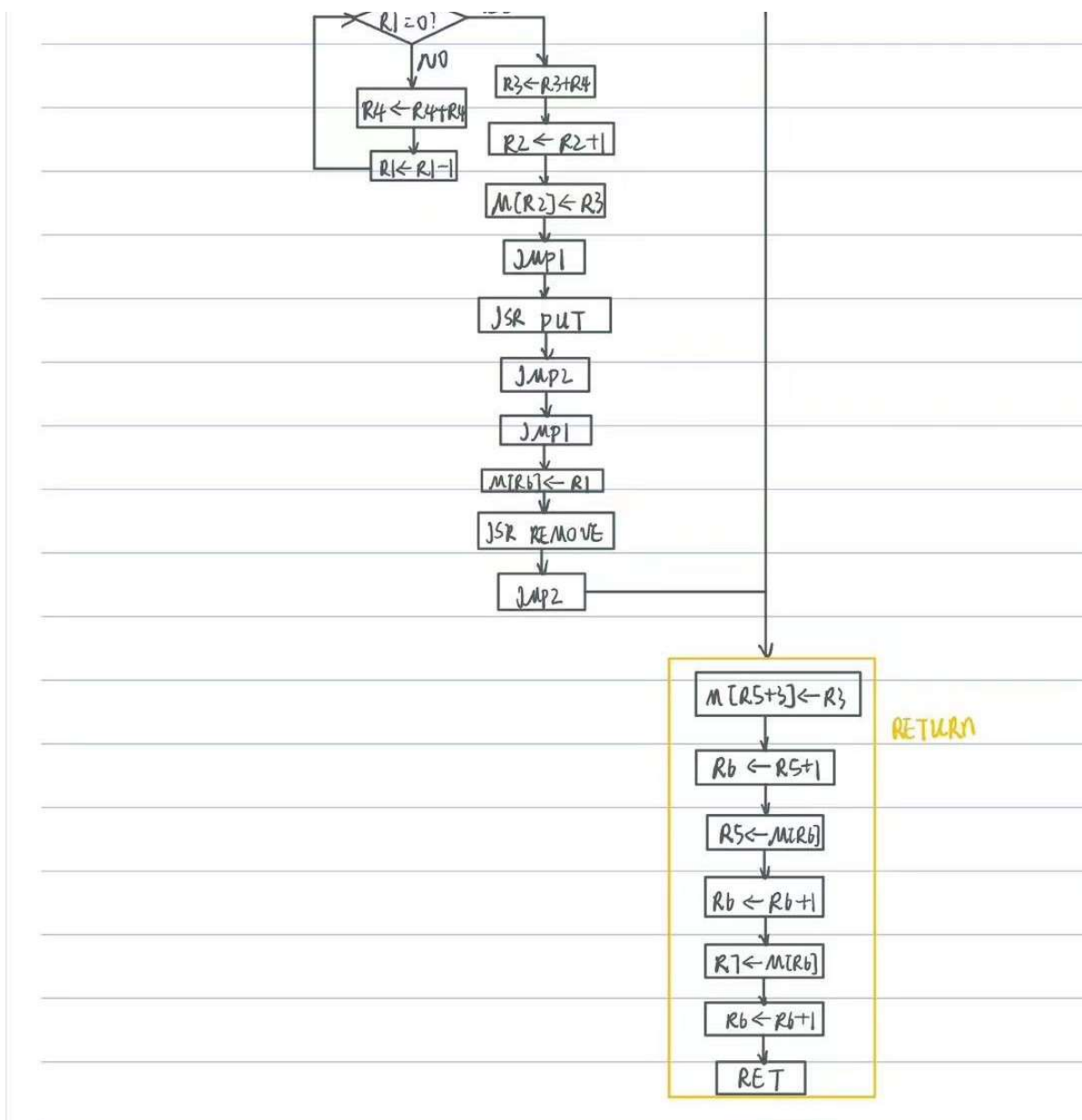
主程序：



REMOVE 子程序:

REMOVE:





PUT 子程序与 REMOVE 基本相同，只需要稍作改动，所以就不再画了。

汇编语言实现

根据上面的流程图可以写出汇编代码。

首先介绍一下各个寄存器的功能：

- R0: 用于保存 `n` 的值
- R1: 用于保存 `n-2` 或者 `n-1`，因为在 `REMOVE(n, state)` 子程序中需要递归调用 `REMOVE(n-2, state)`，`PUT(n-2, state)`，`REMOVE(n-1, state)`，`PUT` 子程序也类似，而在一次调用中 `n` 又是固定的，用 `R0` 来保存，如果放在内存中每次访存又需要较大的时间代价，所以额外使用一个寄存器 `R1` 来存储 `n-2` 或 `n-1`
- R2: 用于保存 `state` 的存储地址，因为每次改变 `state` 后需要将其存于以 `x3100` 为起始位置的连续的存储单元中，所以使用一个寄存器 `R2` 来保存存储位置，初始化存储 `x3100`，每次要存储 `state` 时先将 `R2` 自增1，再存入 `R2` 指向的存储单元。
- R3: 存储 `state`，在每次调用子程序时都需要对 `state` 做改变，所以使用一个寄存器 `R3` 来存储 `state`，方便操作，改变 `R3` 之后将其中的值存入 `R2` 指向的内存单元中，并将其存入栈中存储的

state 位置。

- R5: frame pointer, 构造调用子程序的栈所需要的指针
- R6: stack pointer, 也是调用子程序的栈所需要的指针

下面为汇编代码:

```
;
; 本题的关键在于使用栈来构造递归子程序REMOVE和PUT
;

        .ORIG    x3000
        LD       R5, BOTTOM          ;R5为frame pointer, 初始化为x4000
        LD       R6, BOTTOM          ;R6为stack pointer, 初始化为x4000
        LD       R2, START          ;R2为存储state的地址, 初始化为x3100
        LDR      R0, R2, #0          ;R0存储n的值
        AND      R3, R3, #0          ;R3用于存储state

        ADD      R6, R6, #-1         ;
        STR      R3, R6, #0          ;state = 0入栈
        ADD      R6, R6, #-1         ;
        STR      R0, R6, #0          ;n入栈
        JSR      REMOVE              ;调用REMOVE子程序
        BRnzp    OVER                ;调用完毕后程序结束, 不需要处理返回值

REMOVE   ADD      R6, R6, #-2         ;为返回值预留空间
        STR      R7, R6, #0          ;保存返回地址
        ADD      R6, R6, #-1         ;
        STR      R5, R6, #0          ;保存caller's frame pointer
        ADD      R5, R6, #-1         ;
        ADD      R6, R6, #-2         ;为局部变量state和n分配空间

        LDR      R3, R5, #5          ;R3存储state
        LDR      R0, R5, #4          ;R0存储n
        STR      R3, R5, #0          ;存储局部变量state
        STR      R0, R6, #0          ;存储局部变量n
        BRZ      RETURN1
        ADD      R1, R0, #-1
        BRZ      STORE1              ;n=1时单独处理
        JSR      JMP1                ;做子程序调用前的准备
        JSR      REMOVE              ;递归调用, REMOVE(n-2, state)
        JSR      JMP2                ;做子程序调用后的处理
        AND      R4, R4, #0
        ADD      R4, R4, #1           ;R4 <- 1
        ADD      R1, R0, #-1

JUDGE1   BRnzp    LOOP1              ;令R4的第n位为1, 后面全为0
        ADD      R3, R3, R4          ;令R3的第n位为1
        ADD      R2, R2, #1          ;存储地址加1
        STR      R3, R2, #0          ;存储state
        JSR      JMP1
        JSR      PUT                  ;PUT(n-2, state)
        JSR      JMP2
        JSR      JMP1
        ADD      R1, R1, #1          ;JMP1中令R1 <- R0-2, 这里需要令R1 <- R0-1,
故还需加1
        STR      R1, R6, #0
```

故还需加1	JSR	REMOVE	;REMOVE(n-1,state)
	JSR	JMP2	;JMP1中令R1 <- R0-2, 这里需要令R1 <- R0-1,
	BRnzp	RETURN1	
PUT	ADD	R6, R6, #-2	;为返回值预留空间
	STR	R7, R6, #0	;保存返回地址
	ADD	R6, R6, #-1	;
	STR	R5, R6, #0	;保存caller's frame pointer
	ADD	R5, R6, #-1	;
	ADD	R6, R6, #-2	;为局部变量state和n分配空间
	LDR	R3, R5, #5	;R3存储state
	LDR	R0, R5, #4	;R0存储n
	STR	R3, R5, #0	;存储局部变量state
	STR	R0, R6, #0	;存储局部变量n
	BRZ	RETURN1	
	ADD	R1, R0, #-1	;n=1时单独处理, 将最后一位由1变成0
JUDGE2	BRZ	STORE2	
	JSR	JMP1	;做子程序调用前的准备
	JSR	PUT	;PUT(n-2,state)
	JSR	JMP2	
	AND	R4, R4, #0	
	ADD	R4, R4, #1	
	ADD	R1, R0, #-1	
	BRnp	LOOP2	;R4的第n位为1, 后面全为0
	NOT	R4, R4	
	ADD	R4, R4, #1	;将R4取反加1
	ADD	R3, R3, R4	;将R3的第n位由1变成0
	ADD	R2, R2, #1	
	STR	R3, R2, #0	
	JSR	JMP1	
	JSR	REMOVE	;REMOVE(n-2,state)
	JSR	JMP2	
	JSR	JMP1	
	ADD	R1, R1, #1	;JMP1中令R1 <- R0-2, 这里需要令R1 <- R0-1,
故还需加1	STR	R1, R6, #0	
	JSR	PUT	;PUT(n-1,state)
	JSR	JMP2	
LOOP1	BRnzp	RETURN1	
	ADD	R4, R4, R4	;R4左移一位
	ADD	R1, R1, #-1	;R1自减1
	BRnzp	JUDGE1	
	ADD	R4, R4, R4	;R4左移一位
	ADD	R1, R1, #-1	;R1自减1
LOOP2	BRnzp	JUDGE2	
	ADD	R4, R4, R4	;R4左移一位
	ADD	R1, R1, #-1	;R1自减1


```

STORE1      ADD    R3, R3, #1          ;最后一位由0变为1
            ADD    R2, R2, #1          ;存储地址自加1
            STR    R3, R2, #0          ;
            BRnzp  RETURN1            ;

STORE2      ADD    R3, R3, #-1         ;最后一位由1变为0
            ADD    R2, R2, #1          ;存储地址自加1
            STR    R3, R2, #0          ;
            BRnzp  RETURN1            ;


RETURN1     STR    R3, R5, #3          ;存储state于R3中
            ADD    R6, R5, #1          ;两个局部变量出栈
            LDR    R5, R6, #0          ;获得caller's frame pointer
            ADD    R6, R6, #1          ;
            LDR    R7, R6, #0          ;获得返回地址存于R7中
            ADD    R6, R6, #1          ;返回地址出栈
            RET


JMP1        ADD    R6, R6, #-1         ;
            STR    R3, R6, #0          ;存储state
            ADD    R1, R0, #-2         ;R1 = n-2
            ADD    R6, R6, #-1         ;
            STR    R1, R6, #0          ;存储n-2
            RET


JMP2        LDR    R3, R6, #0          ;获得返回值
            STR    R3, R5, #0          ;存储返回值
            LDR    R0, R6, #3          ;
            ADD    R6, R6, #3          ;子程序的返回值和局部变量出栈
            RET


START       .FILL   x3100              ;存储n和state的起始地址，x3100处存储n，x3101
          及以后存储每次操作后的state
BOTTOM     .FILL   x4000              ;栈底地址


OVER       HALT
          .END

```

过程中遇到的问题

实验过程中最难的地方在于调用递归子程序时栈的使用，需要使用栈来保存各个变量的值，返回地址，返回空间等，十分容易混乱。起初我选择了根据脑中所假想的过程来直接写程序，但是总会有遗漏，指针的位置偶尔会有错误，所以最后我选择将栈画出来，入栈出栈等过程一目了然，根据画出来的过程写程序，成功解决了问题。

实验结果

n = 3:

!	▶	x3100	x0003	3
!	▶	x3101	x0001	1
!	▶	x3102	x0005	5
!	▶	x3103	x0004	4
!	▶	x3104	x0006	6
!	▶	x3105	x0007	7
!	▶	x3106	x0000	0
!	▶	x3107	x0000	0

n = 4:

!	▶	x3100	x0004	4
!	▶	x3101	x0002	2
!	▶	x3102	x0003	3
!	▶	x3103	x000B	11
!	▶	x3104	x0009	9
!	▶	x3105	x0008	8
!	▶	x3106	x0009	9
!	▶	x3107	x000D	13
!	▶	x3108	x000C	12
!	▶	x3109	x000E	14
!	▶	x310A	x000F	15
!	▶	x310B	x0000	0
!	▶	x310C	x0000	0
!	▶	x310D	x0000	0
!	▶	x310E	x0000	0
!	▶	x310F	x0000	0

n = 5:

!	▶	x3100	x0005	5
!	▶	x3101	x0001	1
!	▶	x3102	x0005	5
!	▶	x3103	x0004	4
!	▶	x3104	x0006	6
!	▶	x3105	x0007	7
!	▶	x3106	x0017	23
!	▶	x3107	x0016	22
!	▶	x3108	x0012	18
!	▶	x3109	x0013	19
!	▶	x310A	x0011	17
!	▶	x310B	x0010	16
!	▶	x310C	x0012	18
!	▶	x310D	x0013	19
!	▶	x310E	x001B	27
!	▶	x310F	x0019	25
!	▶	x3110	x0018	24
!	▶	x3111	x0019	25
!	▶	x3112	x001D	29
!	▶	x3113	x001C	28
!	▶	x3114	x001E	30
!	▶	x3115	x001F	31

n = 7:

❗	▶	x3100	x0007	7
❗	▶	x3101	x0001	1
❗	▶	x3102	x0005	5
❗	▶	x3103	x0004	4
❗	▶	x3104	x0006	6
❗	▶	x3105	x0007	7
❗	▶	x3106	x0017	23
❗	▶	x3107	x0016	22
❗	▶	x3108	x0012	18
❗	▶	x3109	x0013	19
❗	▶	x310A	x0011	17
❗	▶	x310B	x0010	16
❗	▶	x310C	x0012	18
❗	▶	x310D	x0013	19
❗	▶	x310E	x001B	27
❗	▶	x310F	x0019	25
❗	▶	x3110	x0018	24
❗	▶	x3111	x0019	25
❗	▶	x3112	x001D	29
❗	▶	x3113	x001C	28
❗	▶	x3114	x001E	30
❗	▶	x3115	x001F	31
❗	▶	x3116	x005F	95
❗	▶	x3117	x005E	94
❗	▶	x3118	x005A	90
❗	▶	x3119	x005B	91
❗	▶	x311A	x0059	89
❗	▶	x311B	x0058	88
❗	▶	x311C	x0048	72
❗	▶	x311D	x0049	73
❗	▶	x311E	x004D	77
❗	▶	x311F	x004C	76
❗	▶	x3120	x004E	78
❗	▶	x3121	x004F	79
❗	▶	x3122	x004D	77
❗	▶	x3123	x004C	76
❗	▶	x3124	x0044	68
❗	▶	x3125	x0046	70
❗	▶	x3126	x0047	71
❗	▶	x3127	x0046	70
❗	▶	x3128	x0042	66
❗	▶	x3129	x0043	67
❗	▶	x312A	x0041	65
❗	▶	x312B	x0040	64
❗	▶	x312C	x0042	66
❗	▶	x312D	x0043	67
❗	▶	x312E	x004B	75

!	▶	NAME	CODE	VAL
!	▶	x312F	x0049	73
!	▶	x3130	x0048	72
!	▶	x3131	x0049	73
!	▶	x3132	x004D	77
!	▶	x3133	x004C	76
!	▶	x3134	x004E	78
!	▶	x3135	x004F	79
!	▶	x3136	x006F	111
!	▶	x3137	x006D	109
!	▶	x3138	x006C	108
!	▶	x3139	x0064	100
!	▶	x313A	x0066	102
!	▶	x313B	x0067	103
!	▶	x313C	x0066	102
!	▶	x313D	x0062	98
!	▶	x313E	x0063	99
!	▶	x313F	x0061	97
!	▶	x3140	x0060	96
!	▶	x3141	x0061	97
!	▶	x3142	x0065	101
!	▶	x3143	x0064	100
!	▶	x3144	x0066	102
!	▶	x3145	x0067	103
!	▶	x3146	x0077	119
!	▶	x3147	x0076	118
!	▶	x3148	x0072	114
!	▶	x3149	x0073	115
!	▶	x314A	x0071	113
!	▶	x314B	x0070	112
!	▶	x314C	x0072	114
!	▶	x314D	x0073	115
!	▶	x314E	x007B	123
!	▶	x314F	x0079	121
!	▶	x3150	x0078	120
!	▶	x3151	x0079	121
!	▶	x3152	x007D	125
!	▶	x3153	x007C	124
!	▶	x3154	x007E	126
!	▶	x3155	x007F	127

以上结果均正确！

由于n继续增大时，存储的state过多，所以这里就不再截图展示了。