

Activity 8: Memory management

ชื่อกลุ่ม LigmaBoy

	ชื่อ - นามสกุล	รหัสนิสิต
1	นายเนติภัทร โพธิพันธ์	6631331621
2	นายวรลภย์ ศรีชัยนนท์	6632200221
3	นายสิปปภาส ขวานนท์	6630333721

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นิสิตเข้าใจหลักการทำงานของ address translation
2. เพื่อให้นิสิตสามารถเปรียบเทียบการทำงานและคุณสมบัติของ page table แบบต่างๆ

กิจกรรมในชั้นเรียน

ให้นิสิตศึกษาการทำงานของโปรแกรม paging_1level.c ที่ให้ข้างล่าง

โปรแกรมนี้จำลองการทำงานของ memory management แบบ paging โดยใช้ page table แบบง่ายๆ โดยกำหนดให้

ขนาดของ physical address space = 2^{15} = 32,768 bytes

ขนาดของแต่ละ frame = 2^8 = 256 bytes

จำนวน frame = 2^7 = 128 frames

ขนาดของ physical address = 15 bit แบ่งเป็น frame no. 7 bit และ offset 8 bit

ขนาดของ logical address space = 2^{16} = 65,536 bytes

ขนาดของแต่ละ page = 2^8 = 256 bytes

จำนวน page = 2^8 = 256 pages

ขนาดของ logical address = 16 bit แบ่งเป็น page no. 8 bit และ offset 8 bit

paging_1level.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdint.h>

#define FRAME_SIZE 256
#define FRAME_ENTRIES 128
```

```

#define PAGE_SIZE 256
#define PAGE_ENTRIES 256

typedef struct PageTableEntry {
    uint16_t present : 1;
    uint16_t frame : 15;
} PageTableEntry;

PageTableEntry page_table[PAGE_ENTRIES];
uint8_t *physical_memory;

uint16_t translate_address(uint16_t logical_address) {
    uint8_t frame_number;
    uint8_t page_number = logical_address >> 8;

    if (page_table[page_number].present == 0) {
        // Page not present, allocate a frame for it.
        // For simplicity, just random a frame. Must fix this later.
        frame_number = rand() % FRAME_ENTRIES;

        page_table[page_number].present = 1;
        page_table[page_number].frame = frame_number;
    }

    uint16_t physical_address = (page_table[page_number].frame << 8) + (logical_address & 0xFF);

    printf("Translate logical address 0x%X (page number 0x%x, offset 0x%02x) to physical address 0x%X \n",
           logical_address, page_number, logical_address & 0xFF, physical_address);

    return physical_address;
}

void read_from_memory(uint16_t logical_address, uint8_t *value) {
    uint16_t physical_address = translate_address(logical_address);
    *value = physical_memory[physical_address];
}

void write_to_memory(uint16_t logical_address, uint8_t value) {
    uint16_t physical_address = translate_address(logical_address);
    physical_memory[physical_address] = value;
}

// Print the current state of the page table
void print_page_table() {
    printf("Page Table State:\n");
    printf("Page Number | Present | Frame Number\n");
    printf("-----\n");

    for (int i = 0; i < PAGE_ENTRIES; i++) {
        printf("    0x%02X    |    %d    |    0x%04X\n",
               i, page_table[i].present, page_table[i].frame);
    }
}

int main() {
    // Allocate physical memory
    physical_memory = calloc(PAGE_ENTRIES, PAGE_SIZE);

    // Read and write to memory
    uint8_t value;
    write_to_memory(0x123, 0xA);
    read_from_memory(0x123, &value);
    printf("Value read from memory: 0x%02X\n", value);
    write_to_memory(0x1234, 0xAB);
    read_from_memory(0x1234, &value);
    printf("Value read from memory: 0x%02X\n", value);
    write_to_memory(0xFF12, 0xC);
    read_from_memory(0xFF12, &value);
}

```

```

printf("Value read from memory: 0x%02X\n", value);

// Print the page table state
print_page_table();

// Calculate page table size
size_t page_table_size = PAGE_ENTRIES * sizeof(PageTableEntry);
printf("Page table size: %lu bytes\n", page_table_size);

return 0;
}

```

Output ของโปรแกรม

```

Translate logical address 0x123 (page number 0x1, offset 0x23) to physical address 0x6723
Translate logical address 0x123 (page number 0x1, offset 0x23) to physical address 0x6723
Value read from memory: 0x0A
Translate logical address 0x1234 (page number 0x12, offset 0x34) to physical address 0x4634
Translate logical address 0x1234 (page number 0x12, offset 0x34) to physical address 0x4634
Value read from memory: 0xAB
Translate logical address 0xFF12 (page number 0xff, offset 0x12) to physical address 0x6912
Translate logical address 0xFF12 (page number 0xff, offset 0x12) to physical address 0x6912
Value read from memory: 0x0C

```

Page Table State:

Page Number	Present	Frame Number
0x00	0	0x0000
0x01	1	0x0067
0x02	0	0x0000
0x03	0	0x0000
0x04	0	0x0000
0x05	0	0x0000
0x06	0	0x0000
0x07	0	0x0000
0x08	0	0x0000
0x09	0	0x0000
0x0A	0	0x0000
0x0B	0	0x0000
0x0C	0	0x0000
0x0D	0	0x0000
0x0E	0	0x0000
0x0F	0	0x0000
0x10	0	0x0000
0x11	0	0x0000
0x12	1	0x0046
0x13	0	0x0000
0x14	0	0x0000
...
0xFA	0	0x0000
0xFB	0	0x0000
0xFC	0	0x0000
0xFD	0	0x0000
0xFE	0	0x0000
0xFF	1	0x0069

0x00	0	0x0000
0x01	1	0x0067
0x02	0	0x0000
0x03	0	0x0000
0x04	0	0x0000
0x05	0	0x0000
0x06	0	0x0000
0x07	0	0x0000
0x08	0	0x0000
0x09	0	0x0000
0x0A	0	0x0000
0x0B	0	0x0000
0x0C	0	0x0000
0x0D	0	0x0000
0x0E	0	0x0000
0x0F	0	0x0000
0x10	0	0x0000
0x11	0	0x0000
0x12	1	0x0046
0x13	0	0x0000
0x14	0	0x0000

0xFA	0	0x0000
0xFB	0	0x0000
0xFC	0	0x0000
0xFD	0	0x0000
0xFE	0	0x0000
0xFF	1	0x0069

Page table size: 512 bytes

เนื่องจาก **page table** แบบนี้ใช้เนื้อที่หน่วยความจำเปลืองมาก จึงได้มีความพยายามปรับปรุงเป็นโปรแกรม **paging_2level.c** ดังนี้

- ใช้ two-level page table ที่แบ่ง page number ออกเป็นสองส่วนคือ p1 เป็น index ของ outer page table มีขนาด 4 bit (outer page table มี 16 entries) และ p2 เป็น index ของ inner page table มีขนาด 4 bit (page of page table แต่ละ page มี 16 entries)
- outer page table จะถูก allocate แบบ static เมื่อโปรแกรมทำงาน แต่ inner page table จะถูก allocate แบบ dynamic เมื่อจำเป็นต้องใช้
- เพิ่มการเก็บข้อมูลของ frame ที่ถูก allocate ไปแล้วใน array ชื่อ frame_allocated ซึ่งเก็บค่า 0 เมื่อ frame ยังว่าง และ 1 เมื่อ frame ถูก allocate แล้ว และมีการเช็คค่านี้เพื่อไม่ให้เกิดการ allocate ซ้ำ
- ฟังก์ชัน print_page_tables() พิมพ์ outer page table และ inner page table แต่ละตารางแยกกัน

paging_2level.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdint.h>

#define FRAME_SIZE 256
#define FRAME_ENTRIES 128
#define PAGE_SIZE 256
#define PAGE_ENTRIES 16
#define OUTER_PAGE_ENTRIES 16

typedef struct PageTableEntry {
    uint16_t present : 1;
    uint16_t frame : 15;
} PageTableEntry;

PageTableEntry *page_table;
PageTableEntry *outer_page_table[OUTER_PAGE_ENTRIES];

uint8_t *physical_memory;
uint8_t frame_allocated[FRAME_ENTRIES]; // 0 = free, 1 = allocated

uint16_t translate_address(uint16_t logical_address) {
    // Assignment: get outer page number and page number from logical address
    uint8_t outer_page_number = ?;
    uint8_t page_number = ?;

    // Assignment: allocate inner page table
    if (outer_page_table[outer_page_number] == NULL) {
        // Inner page table not present, allocate an inner page table for it
        outer_page_table[outer_page_number] = ?;
        printf("Allocated inner page table for outer page %d\n", outer_page_number);
    }

    if (outer_page_table[outer_page_number][page_number].present == 0) {
        // Page not present, allocate a frame for it
        // For simplicity, just random a frame. Must fix this later.
        uint16_t frame_number;
        do {
            frame_number = rand() % FRAME_ENTRIES;
        } while (frame_allocated[frame_number]); // Keep trying until we find a free frame

        // Assignment: mark frame as allocated
        frame_allocated[frame_number] = 1;
    }
}
```

```

        // Assignment: fill in page table
        outer_page_table? = ?;
        outer_page_table? = ?;
    }

    // Assignment: construct physical address from frame number and offset
    uint16_t physical_address = ?;

    printf("Translate logical address 0x%X (outer page number 0x%X, page number 0x%X, offset 0x%X) to physical address 0x%X\n",
        logical_address, outer_page_number, page_number, logical_address & 0xFF,
        physical_address);

    return physical_address;
}

void read_from_memory(uint16_t logical_address, uint8_t *value) {
    uint16_t physical_address = translate_address(logical_address);
    *value = physical_memory[physical_address];
}

void write_to_memory(uint16_t logical_address, uint8_t value) {
    uint16_t physical_address = translate_address(logical_address);
    physical_memory[physical_address] = value;
}

// Print the current state of the page table
void print_page_tables() {
    printf("Outer Page Table:\n");
    printf("Outer Page | Inner Page Table\n");
    printf("-----\n");

    // Print the outer page table state
    for (int i = 0; i < OUTER_PAGE_ENTRIES; i++) {
        printf("    0x%02X    | %s\n",
            i,
            outer_page_table[i] != NULL ? "address of inner page table for this entry (see below)" : "-");
    }

    // Print the inner page tables (only for allocated tables)
    printf("\nInner Page Tables (only allocated tables):\n");
    for (int i = 0; i < OUTER_PAGE_ENTRIES; i++) {
        if (outer_page_table[i] != NULL) {
            printf("\n--- Inner Page Table for Outer Page 0x%02X ---\n", i);
            printf("Inner Page | Present | Frame Number\n");
            printf("-----\n");

            for (int j = 0; j < PAGE_ENTRIES; j++) {
                printf("    0x%02X    |    %d    |    0x%04X\n",
                    j,
                    outer_page_table[i][j].present,
                    outer_page_table[i][j].frame);
            }
        }
    }
}

int main() {
    // Allocate physical memory
    physical_memory = calloc(PAGE_ENTRIES, PAGE_SIZE);

    // Read and write to memory
    uint8_t value;
    write_to_memory(0x123, 0xA);
    read_from_memory(0x123, &value);
    printf("Value read from memory: 0x%02X\n", value);
    write_to_memory(0x1234, 0xB);
    read_from_memory(0x1234, &value);
}

```

```

printf("Value read from memory: 0x%02X\n", value);
write_to_memory(0xFF12, 0xC);
read_from_memory(0xFF12, &value);
printf("Value read from memory: 0x%02X\n", value);

// Print page table
print_page_tables();

// Calculate total size of outer page table and inner page tables
size_t page_table_size = 0;
for (int i = 0; i < OUTER_PAGE_ENTRIES; i++) {
    if (outer_page_table[i] != NULL) {
        page_table_size += PAGE_ENTRIES * sizeof(PageTableEntry);
    }
}

printf("Outer page table size: %zu bytes\n", sizeof(outer_page_table));
printf("Inner page table size: %zu bytes\n", page_table_size);
printf("Total page table size: %zu bytes\n", sizeof(outer_page_table)+page_table_size);

return(0);
}

```

สิ่งที่ต้องทำ

ให้นักศึกษาแก้ไขโปรแกรม `paging_2level.c` ให้ทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่กำหนด

สิ่งที่ต้องส่งใน MyCourseVille

1. ไฟล์โปรแกรมที่แก้ไขแล้ว
2. capture หน้าจอผลลัพธ์

จะใส่สิ่งที่ต้องส่งโดยเพิ่มลงในไฟล์นี้ หรือส่งเป็นไฟล์แยกต่างหากก็ได้

Solution Code

ไฟล์ paging_2level.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdint.h>

#define FRAME_SIZE 256
#define FRAME_ENTRIES 128
#define PAGE_SIZE 256
#define PAGE_ENTRIES 16
#define OUTER_PAGE_ENTRIES 16

typedef struct PageTableEntry {
    uint16_t present : 1;
    uint16_t frame : 15;
} PageTableEntry;

PageTableEntry *page_table;
PageTableEntry *outer_page_table[OUTER_PAGE_ENTRIES];

uint8_t *physical_memory;
uint8_t frame_allocated[FRAME_ENTRIES]; // 0 = free, 1 = allocated

uint16_t translate_address(uint16_t logical_address) {

    // Assignment: get outer page number and page number from logical address
    uint8_t outer_page_number = (logical_address >> 8) >> 4;
    uint8_t page_number = (logical_address >> 8) & 0xF;

    // Assignment: allocate inner page table
    if (outer_page_table[outer_page_number] == NULL) {
        // Inner page table not present, allocate an inner page table for it
        outer_page_table[outer_page_number] = calloc(PAGE_ENTRIES, sizeof(PageTableEntry));
        printf("Allocated inner page table for outer page %d\n", outer_page_number);
    }
}
```

```

if (outer_page_table[outer_page_number][page_number].present == 0) {
    // Page not present, allocate a frame for it
    // For simplicity, just random a frame. Must fix this later.
    uint16_t frame_number;
    do {
        frame_number = rand() % FRAME_ENTRIES;
    } while (frame_allocated[frame_number]); // Keep trying until we find a free frame

    // Assignment: mark frame as allocated
    frame_allocated[frame_number] = 1;

    // Assignment: fill in page table
    outer_page_table[outer_page_number][page_number].present = 1;
    outer_page_table[outer_page_number][page_number].frame = frame_number;
}

// Assignment: construct physical address from frame number and offset
uint16_t physical_address = (outer_page_table[outer_page_number][page_number].frame <<
8) + (logical_address & 0xFF);

printf("Translate logical address 0x%X (outer page number 0x%X, page number 0x%X,
offset 0x%X) to physical address 0x%X\n",
    logical_address, outer_page_number, page_number, logical_address & 0xFF,
    physical_address);

return physical_address;
}

void read_from_memory(uint16_t logical_address, uint8_t *value) {
    uint16_t physical_address = translate_address(logical_address);
    *value = physical_memory[physical_address];
}

void write_to_memory(uint16_t logical_address, uint8_t value) {
    uint16_t physical_address = translate_address(logical_address);
    physical_memory[physical_address] = value;
}

```



```

// Print the current state of the page table
void print_page_tables() {
    printf("Outer Page Table:\n");
    printf("Outer Page | Inner Page Table\n");
    printf("-----\n");

    // Print the outer page table state
    for (int i = 0; i < OUTER_PAGE_ENTRIES; i++) {
        printf("    0x%02X    | %s\n",
            i,
            outer_page_table[i] != NULL ? "address of inner page table for this entry"
(see below)" : "    -");
    }

    // Print the inner page tables (only for allocated tables)
    printf("\nInner Page Tables (only allocated tables):\n");
    for (int i = 0; i < OUTER_PAGE_ENTRIES; i++) {
        if (outer_page_table[i] != NULL) {
            printf("\n--- Inner Page Table for Outer Page 0x%02X ---\n", i);
            printf("Inner Page | Present | Frame Number\n");
            printf("-----\n");

            for (int j = 0; j < PAGE_ENTRIES; j++) {
                printf("    0x%02X    |    %d    |    0x%04X\n",
                    j,
                    outer_page_table[i][j].present,
                    outer_page_table[i][j].frame);
            }
        }
    }
}

int main() {
    // Allocate physical memory
    physical_memory = calloc(PAGE_ENTRIES, PAGE_SIZE);

    // Read and write to memory
    uint8_t value;
    write_to_memory(0x123, 0xA);
    read_from_memory(0x123, &value);
    printf("Value read from memory: 0x%02X\n", value);
    write_to_memory(0x1234, 0xB);
    read_from_memory(0x1234, &value);
    printf("Value read from memory: 0x%02X\n", value);
    write_to_memory(0xFF12, 0xC);
    read_from_memory(0xFF12, &value);
    printf("Value read from memory: 0x%02X\n", value);
}

```

```
// Print page table
print_page_tables();

// Calculate total size of outer page table and inner page tables
size_t page_table_size = 0;
for (int i = 0; i < OUTER_PAGE_ENTRIES; i++) {
    if (outer_page_table[i] != NULL) {
        page_table_size += PAGE_ENTRIES * sizeof(PageTableEntry);
    }
}

printf("Outer page table size: %zu bytes\n", sizeof(outer_page_table));
printf("Inner page table size: %zu bytes\n", page_table_size);
printf("Total page table size: %zu bytes\n", sizeof(outer_page_table)+page_table_size);

return(0);
}
```

Implementation Details

1. แกไขการกำหนดค่าของตัวแปร `outer_page_number` และ `page_number`

`logical_address` จะเป็นเลขฐานสองขนาด 16 bits ซึ่งแบ่งออกมาได้ดังนี้

- `outer_page_number (p1)` คือเลข 4 bits แรกของ `logical_address`
- `page_number (p2)` คือเลข 4 bits ถัดมาของ `logical_address`
- `offset` คือเลข 8 bits ที่เหลือของ `logical_address`

โดยที่เราจะใช้วิธีการ `shift right (>>)` และ `bitwise and (&)` เพื่อนำเลขฐานสองที่ต้องการออกมา

- `outer_page_number` เราจะใช้การ `shift right (>>)` ทั้งหมด 12 ครั้ง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นเลข 4 bits แรกของ `logical_address`
- `page_number` เราจะใช้การ `shift right (>>)` ทั้งหมด 8 ครั้ง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นเลข 8 bits แรกของ `logical_address` จากนั้นทำการ `bitwise and (&)` กับเลข `0xF` (0000 1111) เพื่อให้ผลลัพธ์ออกมาเป็น 4 bits ที่ต้องการเท่านั้น

```
// Assignment: get outer page number and page number from logical address
uint8_t outer_page_number = (logical_address >> 8) >> 4;
uint8_t page_number = (logical_address >> 8) & 0xF;
```

2. Allocation ของ `outer page number` และ `inner page table`

เนื่องจากว่า `outer_page_table` ถูก allocate แบบ static เมื่อโปรแกรมทำงาน แต่ว่า

`inner_page_table` จะถูก allocate แบบ dynamic เมื่อจำเป็นต้องการใช้งานเท่านั้น

ดังนั้นเราจะต้องเช็คว่ `inner_page_table` นั้นถูก allocate ไปหรือยัง (เช็คว่าเป็น NULL หรือไม่)

ถ้ายังไม่ถูก allocate จะต้อง allocate `inner_page_table` ด้วยคำสั่ง `calloc`

```
// Assignment: allocate inner page table
if (outer_page_table[outer_page_number] == NULL) {
    // Inner page table not present, allocate an inner page table for it
    outer_page_table[outer_page_number] = calloc(PAGE_ENTRIES, sizeof(PageTableEntry));
    printf("Allocated inner page table for outer page %d\n", outer_page_number);
}
```

3. เพิ่มการเก็บข้อมูลของ frame ที่ถูก allocate ไปแล้วใน array ชื่อ frame_allocated

- เช็คว่า frame ใดถูก allocate หรือยังโดยการเช็คค่า
outer_page_table[outer_page_number][page_number].present
(ถ้าหากยังไม่ถูก allocate ค่าจะเป็น 0 แต่ถ้า allocate ไปแล้วค่าจะเป็น 1)
- จากนั้นสุ่มค่าหมายเลข frame_number จนกว่าจะเจอ frame ที่ว่างที่จะ allocate
- เมื่อได้ค่า frame_number แล้วให้ set ค่า ใน frame_allocated[frame_number] และ
outer_page_table[outer_page_number][page_number].present ให้เป็น 1 ทั้งคู่ เพื่อ
เป็นการบ่งบอกว่าได้ allocate frame หมายเลขนี้ไปแล้ว
- จากนั้น set ค่าหมายเลข frame ที่ได้ allocate ไปแล้วใน
outer_page_table[outer_page_number][page_number].frame ก็เป็นอันเสร็จสิ้น

```
if (outer_page_table[outer_page_number][page_number].present == 0) {  
    // Page not present, allocate a frame for it  
    // For simplicity, just random a frame. Must fix this later.  
    uint16_t frame_number;  
    do {  
        frame_number = rand() % FRAME_ENTRIES;  
    } while (frame_allocated[frame_number]); // Keep trying until we find a free frame  
  
    // Assignment: mark frame as allocated  
    frame_allocated[frame_number] = 1;  
  
    // Assignment: fill in page table  
    outer_page_table[outer_page_number][page_number].present = 1;  
    outer_page_table[outer_page_number][page_number].frame = frame_number;  
}
```

4. แปลง logical address เป็น physical address

physical_address เป็นเลขฐานสองจำนวน 15 bits ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

- frame_number คือเลข 7 bits แรกของ physical_address
- offset คือเลข 8 bits ท้ายของ physical_address

โครงสร้างข้อมูล PageTableEntry จะมีขนาด 16 bits ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

- present คือเลข bits แรกของ PageTableEntry (มีไว้บ่งบอกว่าถูก allocate แล้วหรือยัง)
- frame คือเลข 15 bits ท้ายของ PageTableEntry

```
typedef struct PageTableEntry {  
    uint16_t present : 1;  
    uint16_t frame : 15;  
} PageTableEntry;
```

เราสามารถใช้วิธีการ shift left (<<) และ bitwise and (&) เพื่อนำเลขฐานสองที่ต้องการออกมา

- frame_number เราจะใช้การ shift left (<<) ทั้งหมด 8 ครั้ง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นเลขขนาด 7 bits แรกของ frame ในโครงสร้างข้อมูลแบบ PageTableEntry
- offset เราจะใช้การ bitwise and (&) กับเลข 0xFF (0000 0000 1111 1111) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นเลข 8 bits ท้ายของ logical_address
- จากนั้นสามารถบวกเลขตรงๆได้เลย เนื่องจากว่า frame_number เกิดจากการ shift left (<<) ทำให้มีลักษณะดังนี้ 0XXX XXXX 0000 0000 (ให้ X คือเลข 7 bits ของ frame_number) และ offset มีลักษณะดังนี้ 0000 0000 YYYY YYYY (ให้ Y คือเลข 8 bits ของ offset) เมื่อบวกเลขกันก็จะได้ physical_address ที่มีลักษณะ 0XXX XXXX YYYY YYYY ออกมา

```
// Assignment: construct physical address from frame number and offset  
uint16_t physical_address = (outer_page_table[outer_page_number][page_number].frame << 8) +  
(logical_address & 0xFF);
```

Result

1. Compile code ด้วยคำสั่ง `gcc paging_2level.c -o paging_2level` บน terminal
2. รันคำสั่ง `./paging_2level | more` และได้ผลลัพธ์ดังภาพ

```
reisenx@reisenx-VirtualBox: ~/Documents/GitHub/2110313-05-SYS-PROG/Activity 08/program$ ./paging_2level | more
Allocated inner page table for outer page 0
Translate logical address 0x123 (outer page number 0x0, page number 0x1, offset 0x23) to physical address 0x6723
Translate logical address 0x123 (outer page number 0x0, page number 0x1, offset 0x23) to physical address 0x6723
Value read from memory: 0x0A
Allocated inner page table for outer page 1
Translate logical address 0x1234 (outer page number 0x1, page number 0x2, offset 0x34) to physical address 0x4634
Translate logical address 0x1234 (outer page number 0x1, page number 0x2, offset 0x34) to physical address 0x4634
Value read from memory: 0x0B
Allocated inner page table for outer page 15
Translate logical address 0xFF12 (outer page number 0xF, page number 0xF, offset 0x12) to physical address 0x6912
Translate logical address 0xFF12 (outer page number 0xF, page number 0xF, offset 0x12) to physical address 0x6912
Value read from memory: 0x0C
Outer Page Table:
Outer Page | Inner Page Table
-----
0x00 | address of inner page table for this entry (see below)
0x01 | address of inner page table for this entry (see below)
0x02 | -
0x03 | -
0x04 | -
0x05 | -
0x06 | -
0x07 | -
0x08 | -
0x09 | -
0x0A | -
0x0B | -
0x0C | -
0x0D | -
0x0E | -
0x0F | address of inner page table for this entry (see below)
```

```
reisenx@reisenx-VirtualBox: ~/Documents/GitHub/2110313-05-SYS-PROG/Activity 08/program$ ./paging_2level | more
Inner Page Tables (only allocated tables):
--- Inner Page Table for Outer Page 0x00 ---
Inner Page | Present | Frame Number
-----
0x00 | 0 | 0x0000
0x01 | 1 | 0x0067
0x02 | 0 | 0x0000
0x03 | 0 | 0x0000
0x04 | 0 | 0x0000
0x05 | 0 | 0x0000
0x06 | 0 | 0x0000
0x07 | 0 | 0x0000
0x08 | 0 | 0x0000
0x09 | 0 | 0x0000
0x0A | 0 | 0x0000
0x0B | 0 | 0x0000
0x0C | 0 | 0x0000
0x0D | 0 | 0x0000
0x0E | 0 | 0x0000
0x0F | 0 | 0x0000
--- Inner Page Table for Outer Page 0x01 ---
Inner Page | Present | Frame Number
-----
0x00 | 0 | 0x0000
0x01 | 0 | 0x0000
0x02 | 1 | 0x0046
0x03 | 0 | 0x0000
0x04 | 0 | 0x0000
0x05 | 0 | 0x0000
--More--
```

```
Mar 9 07:29
reisenx@reisenx-VirtualBox: ~/Documents/GitHub/2110313-OS-SYS-PROG/Activity 08/program

--- Inner Page Table for Outer Page 0x01 ---
Inner Page | Present | Frame Number
-----
0x00 | 0 | 0x0000
0x01 | 0 | 0x0000
0x02 | 1 | 0x0046
0x03 | 0 | 0x0000
0x04 | 0 | 0x0000
0x05 | 0 | 0x0000
0x06 | 0 | 0x0000
0x07 | 0 | 0x0000
0x08 | 0 | 0x0000
0x09 | 0 | 0x0000
0x0A | 0 | 0x0000
0x0B | 0 | 0x0000
0x0C | 0 | 0x0000
0x0D | 0 | 0x0000
0x0E | 0 | 0x0000
0x0F | 0 | 0x0000

--- Inner Page Table for Outer Page 0x0F ---
Inner Page | Present | Frame Number
-----
0x00 | 0 | 0x0000
0x01 | 0 | 0x0000
0x02 | 0 | 0x0000
0x03 | 0 | 0x0000
0x04 | 0 | 0x0000
0x05 | 0 | 0x0000
0x06 | 0 | 0x0000
0x07 | 0 | 0x0000

--More--
```

```
Mar 9 07:29
reisenx@reisenx-VirtualBox: ~/Documents/GitHub/2110313-OS-SYS-PROG/Activity 08/program

0x07 | 0 | 0x0000
0x08 | 0 | 0x0000
0x09 | 0 | 0x0000
0x0A | 0 | 0x0000
0x0B | 0 | 0x0000
0x0C | 0 | 0x0000
0x0D | 0 | 0x0000
0x0E | 0 | 0x0000
0x0F | 0 | 0x0000

--- Inner Page Table for Outer Page 0x0F ---
Inner Page | Present | Frame Number
-----
0x00 | 0 | 0x0000
0x01 | 0 | 0x0000
0x02 | 0 | 0x0000
0x03 | 0 | 0x0000
0x04 | 0 | 0x0000
0x05 | 0 | 0x0000
0x06 | 0 | 0x0000
0x07 | 0 | 0x0000
0x08 | 0 | 0x0000
0x09 | 0 | 0x0000
0x0A | 0 | 0x0000
0x0B | 0 | 0x0000
0x0C | 0 | 0x0000
0x0D | 0 | 0x0000
0x0E | 0 | 0x0000
0x0F | 1 | 0x0069

Outer page table size: 128 bytes
Inner page table size: 96 bytes
Total page table size: 224 bytes
```