

ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT MÁY TÍNH



KIẾN TRÚC MÁY TÍNH (CO2007)

Báo cáo

Bài tập lớn Kiến trúc máy tính

Giảng viên hướng dẫn: Võ Tấn Phương
Sinh viên: Trần Đình Gia Hải - 1911105
Phạm Nhật Minh - 1910346
Lê Hoàng Anh - 1910752

THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH, 2020



Mục lục

1	Danh sách phân công nhiệm vụ	2
2	Cơ sở lý thuyết	3
2.1	Yêu cầu đề bài	3
2.2	Giới thiệu về Merge Sort	3
3	Thực thi chương trình Merge Sort trên MIPS	7
3.1	Test case 1	7
3.2	Test case 2	11
3.3	Test case 3	15
3.4	Test case 4	19
3.5	Test case 5	23
3.6	Test case 6	27
3.7	Test case 7	31
3.8	Test case 8	35
3.9	Test case 9	39
3.10	Test case 10	43
4	Tính thời gian thực thi	47
4.1	Thống kê các loại lệnh	47
4.2	Tính thời gian	48



1 Danh sách phân công nhiệm vụ

STT	Họ và tên	MSSV	Nhiệm vụ	Đóng góp
1	Trần Đình Gia Hải	1911105	- Kiểm tra Test case - Thống kê, làm báo cáo	30%
2	Phạm Nhật Minh	1910346	- Hoàn thiện code	40%
3	Lê Hoàng Anh	1910752	- Lên ý tưởng giải thuật	30%

2 Cơ sở lý thuyết

2.1 Yêu cầu đề bài

Sắp xếp một chuỗi 20 số nguyên theo thứ tự tăng dần bằng giải thuật Merge Sort trên hợp ngữ assembly MIPS. Xuất ra màn hình từng bước của quá trình.

Thống kê số lệnh, loại lệnh đã sử dụng.

Tính và trình bày cách tính thời gian chạy của chương trình trên máy tính MIPS có tần số 2GHz. Biết CPI là 1.

2.2 Giới thiệu về Merge Sort

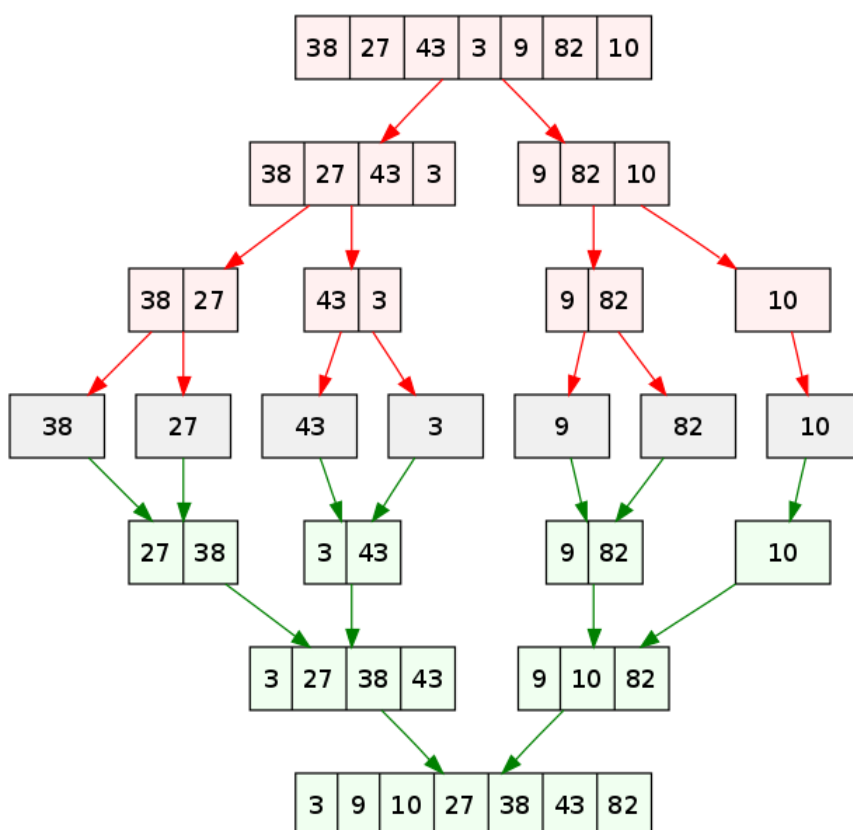
Thuật toán sắp xếp Merge Sort là một trong những thuật toán có độ phức tạp ở mức trung bình và sử dụng phương pháp chia để trị.

Thuật toán này liên tục chia mảng cần sắp xếp thành 2 nửa cho đến khi mỗi mảng con chỉ có 1 phần tử. Sau cùng gộp các nửa đó thành mảng đã sắp xếp. Hàm `merge()` được sử dụng để gộp hai nửa mảng. Hàm `merge(arr, l, m, r)` là tiến trình quan trọng nhất sẽ gộp hai nửa mảng thành 1 mảng sắp xếp, các nửa mảng là `arr[l...m]` và `arr[m+1...r]` sau khi gộp sẽ thành một mảng duy nhất đã sắp xếp.

Hãy xem pseudo-code dưới đây:

```
mergeSort(arr[], l, r)
if r > l
    1. Tìm chỉ số nằm giữa mảng để chia mảng thành 2 nửa:
       middle m = (l+r)/2
    2. Gọi đệ quy hàm mergeSort cho nửa đầu tiên:
       mergeSort(arr, l, m)
    3. Gọi đệ quy hàm mergeSort cho nửa thứ hai:
       mergeSort(arr, m+1, r)
    4. Gộp 2 nửa mảng đã sắp xếp ở (2) và (3):
       merge(arr, l, m, r)
```

Hình ảnh dưới đây từ Wikipedia sẽ hiển thị toàn bộ sơ đồ tiến trình của thuật toán Merge Sort cho mảng $\{38, 27, 43, 3, 9, 82, 10\}$. Nếu nhìn kỹ hơn vào sơ đồ này, chúng ta có thể thấy mảng ban đầu được lặp lại hành động chia cho tới khi kích thước các mảng sau chia là 1. Khi kích thước các mảng con là 1, tiến trình gộp sẽ bắt đầu thực hiện gộp lại các mảng này cho tới khi hoàn thành và chỉ còn một mảng đã sắp xếp.



Cách hàm merge hoạt động khi gộp hai mảng con: với trường hợp khi 2 mảng con chỉ có 1 phần tử, ta chỉ việc xem phần tử nào nhỏ hơn và đẩy lên đầu, phần tử còn lại đặt phía sau. Do vậy, các mảng con cần gộp lại có tính chất luôn được sắp tăng dần.

```
Giả sử ta có 2 mảng con lần lượt là:
arr1 = [1 9 10 10] , n1 = 4 //Chiều dài của mảng con
arr2 = [3 5 7 9], n2 = 4

sort_arr = [] //Mảng lưu lại tiến trình gộp

Khởi tạo i = 0, j = 0 tương ứng là chỉ số bắt đầu của arr1 và arr2

Xét thấy arr1[i] < arr2[j] → Chèn arr1[i] vào cuối mảng sort_arr, tăng i lên 1 đơn vị
→ sort_arr = [1], i = 1

Xét thấy arr1[i] > arr2[j] → Chèn arr2[j] vào cuối mảng sort_arr, tăng j lên 1 đơn vị
→ sort_arr = [1, 3], i = 1, j = 1

Xét thấy arr1[i] > arr2[j] → Chèn arr2[j] vào cuối mảng sort_arr, tăng j lên 1 đơn vị
→ sort_arr = [1, 3, 5], i = 1, j = 2

Xét thấy arr1[i] > arr2[j] → Chèn arr2[j] vào cuối mảng sort_arr, tăng j lên 1 đơn vị
→ sort_arr = [1, 3, 5, 7], i = 1, j = 3

Xét thấy arr1[i] = arr2[j] → Chèn arr1[i] hoặc arr2[j] vào cuối mảng sort_arr
Giả sử chọn arr1, tăng i lên 1 đơn vị
→ sort_arr = [1, 3, 5, 7, 9], i = 2, j = 3

Xét thấy arr1[i] > arr2[j] → Chèn arr2[j] vào cuối mảng sort_arr, tăng j lên 1 đơn vị
→ sort_arr = [1, 3, 5, 7, 9, 9], i = 2, j = 4

Do j >= n2, tiếp tục tăng i chừng nào i < n1 thì thêm phần tử ở arr1[i] vào sort_arr

Sau cùng ta được mảng đã sắp xếp là sort_arr = [1, 3, 5, 7, 9, 9, 10, 10]
```

Minh họa thuật toán sắp xếp Merge Sort sử dụng C/C++:

```
// Gộp hai mảng con arr[l...m] và arr[m+1..r]
void merge(int arr[], int l, int m, int r)
{
    int i, j, k;
    int n1 = m - l + 1;
    int n2 = r - m;

    // Tạo các mảng tạm
    int L[n1], R[n2];

    // Copy dữ liệu sang các mảng tạm
    for (i = 0; i < n1; i++) L[i] = arr[l + i];
    for (j = 0; j < n2; j++) R[j] = arr[m + 1 + j];

    // Gộp hai mảng tạm vừa rồi vào mảng arr
    i = 0; // Khởi tạo chỉ số bắt đầu của mảng con đầu tiên
    j = 0; // Khởi tạo chỉ số bắt đầu của mảng con thứ hai
    k = l; // Khởi tạo chỉ số bắt đầu của mảng lưu kết quả

    while (i < n1 && j < n2)
    {
        if (L[i] <= R[j])
        {
            arr[k] = L[i]; i = i + 1;
        }
        else
        {
            arr[k] = R[j]; j = j + 1;
        }
        k = k + 1;
    }

    // Copy các phần tử còn lại của mảng L vào arr nếu có
    while (i < n1)
    {
        arr[k] = L[i]; i = i + 1; k = k + 1;
    }

    // Copy các phần tử còn lại của mảng R vào arr nếu có
    while (j < n2)
    {
        arr[k] = R[j]; j = j + 1; k = k + 1;
    }
}

// l là chỉ số trái và r là chỉ số phải của mảng cần được sắp xếp
void mergeSort(int arr[], int l, int r)
{
    if (l < r)
    {
        // Tương tự (l+r)/2, nhưng cách này tránh tràn số khi l và r lớn
        int m = l+(r-l)/2;

        // Gọi hàm đệ quy tiếp tục chia đôi từng nửa mảng
        mergeSort(arr, l, m);
        mergeSort(arr, m+1, r);

        merge(arr, l, m, r);
    }
}
```

3 Thực thi chương trình Merge Sort trên MIPS

3.1 Test case 1

{20, 19, 18, 17, 16, 15, 14, 13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1}

Mars Messages	Run I/O
	20 19 18 17 15 16 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
	Mang con ben trai
	20
	Mang con ben phai
	19
	Mang con merge
	19 20
	Mang hien tai sau khi merge
	19 20 18 17 15 16 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
	Mang con ben trai
	19 20
	Mang con ben phai
	18
	Mang con merge
	18 19 20
	Mang hien tai sau khi merge
	18 19 20 17 15 16 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
	Mang con ben trai
	17
	Mang con ben phai
Clear	15
	Mang con merge
	15 17
	Mang hien tai sau khi merge
	18 19 20 15 17 16 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
	Mang con ben trai
	18 19 20
	Mang con ben phai
	15 17
	Mang con merge
	15 17 18 19 20
	Mang hien tai sau khi merge
	15 17 18 19 20 16 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
	Mang con ben trai
	16
	Mang con ben phai
	14
	Mang con merge
	14 16
	Mang hien tai sau khi merge
	15 17 18 19 20 14 16 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
	Mang con ben trai



Mars Messages

Run I/O

Clear

14 16
Mang con ben phai
13
Mang con merge
13 14 16
Mang hien tai sau khi merge
15 17 18 19 20 13 14 16 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
Mang con ben trai
12
Mang con ben phai
11
Mang con merge
11 12
Mang hien tai sau khi merge
15 17 18 19 20 13 14 16 11 12 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
Mang con ben trai
13 14 16
Mang con ben phai
11 12
Mang con merge
11 12 13 14 16
Mang hien tai sau khi merge
15 17 18 19 20 11 12 13 14 16 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
Mang con ben trai
15 17 18 19 20
Mang con ben phai
11 12 13 14 16
Mang con merge
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
Mang hien tai sau khi merge
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
Mang con ben trai
10
Mang con ben phai
9
Mang con merge
9 10
Mang hien tai sau khi merge
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 9 10 8 7 6 5 4 3 2 1
Mang con ben trai
9 10
Mang con ben phai



Mars Messages

Run I/O

Clear

8
Mang con merge
8 9 10
Mang hien tai sau khi merge
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 8 9 10 7 6 5 4 3 2 1
Mang con ben trai
7
Mang con ben phai
6
Mang con merge
6 7
Mang hien tai sau khi merge
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 8 9 10 6 7 5 4 3 2 1
Mang con ben trai
8 9 10
Mang con ben phai
6 7
Mang con merge
6 7 8 9 10
Mang hien tai sau khi merge
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 6 7 8 9 10 5 4 3 2 1
Mang con ben trai
5
Mang con ben phai
4
Mang con merge
4 5
Mang hien tai sau khi merge
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 6 7 8 9 10 4 5 3 2 1
Mang con ben trai
4 5
Mang con ben phai
3
Mang con merge
3 4 5
Mang hien tai sau khi merge
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 6 7 8 9 10 3 4 5 2 1
Mang con ben trai
2
Mang con ben phai
1
Mang con merge



Mars MessagesRun I/O

Clear

```
1 2
Mang hien tai sau khi merge
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 6 7 8 9 10 3 4 5 1 2
Mang con ben trai
3 4 5
Mang con ben phai
1 2
Mang con merge
1 2 3 4 5
Mang hien tai sau khi merge
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 6 7 8 9 10 1 2 3 4 5
Mang con ben trai
6 7 8 9 10
Mang con ben phai
1 2 3 4 5
Mang con merge
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Mang hien tai sau khi merge
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Mang con ben trai
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
Mang con ben phai
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Mang con merge
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
Mang hien tai sau khi merge
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

-- program is finished running (dropped off bottom) --
```

3.2 Test case 2

{120, -19, 8, 47, 0, 16, 16, 133, 2, 68, -10, -89, 81, 72, 6, 25, 21, 9, 3, 1}

Mars Messages	Run I/O
	120 -19 8 47 0 16 16 133 2 68 -10 -89 81 72 6 25 21 9 3 1
	Mang con ben trai
	120
	Mang con ben phai
	-19
	Mang con merge
	-19 120
	Mang hien tai sau khi merge
	-19 120 8 47 0 16 16 133 2 68 -10 -89 81 72 6 25 21 9 3 1
	Mang con ben trai
	-19 120
	Mang con ben phai
	8
	Mang con merge
	-19 8 120
	Mang hien tai sau khi merge
	-19 8 120 47 0 16 16 133 2 68 -10 -89 81 72 6 25 21 9 3 1
	Mang con ben trai
	47
	Mang con ben phai
Clear	0
	Mang con merge
	0 47
	Mang hien tai sau khi merge
	-19 8 120 0 47 16 16 133 2 68 -10 -89 81 72 6 25 21 9 3 1
	Mang con ben trai
	-19 8 120
	Mang con ben phai
	0 47
	Mang con merge
	-19 0 8 47 120
	Mang hien tai sau khi merge
	-19 0 8 47 120 16 16 133 2 68 -10 -89 81 72 6 25 21 9 3 1
	Mang con ben trai
	16
	Mang con ben phai
	16
	Mang con merge
	16 16
	Mang hien tai sau khi merge
	-19 0 8 47 120 16 16 133 2 68 -10 -89 81 72 6 25 21 9 3 1
	Mang con ben trai



Mars Messages	Run I/O
	16 16 Mang con ben phai 133 Mang con merge 16 16 133 Mang hien tai sau khi merge -19 0 8 47 120 16 16 133 2 68 -10 -89 81 72 6 25 21 9 3 1 Mang con ben trai 2 Mang con ben phai 68 Mang con merge 2 68 Mang hien tai sau khi merge -19 0 8 47 120 16 16 133 2 68 -10 -89 81 72 6 25 21 9 3 1 Mang con ben trai 16 16 133 Mang con ben phai 2 68 Mang con merge 2 16 16 68 133 Mang hien tai sau khi merge -19 0 8 47 120 2 16 16 68 133 -10 -89 81 72 6 25 21 9 3 1 Mang con ben trai -19 0 8 47 120 Mang con ben phai 2 16 16 68 133 Mang con merge -19 0 2 8 16 16 47 68 120 133 Mang hien tai sau khi merge -19 0 2 8 16 16 47 68 120 133 -10 -89 81 72 6 25 21 9 3 1 Mang con ben trai -10 Mang con ben phai -89 Mang con merge -89 -10 Mang hien tai sau khi merge -19 0 2 8 16 16 47 68 120 133 -89 -10 81 72 6 25 21 9 3 1 Mang con ben trai -89 -10 Mang con ben phai



Mars Messages	Run I/O
	81
	Mang con merge
	-89 -10 81
	Mang hien tai sau khi merge
	-19 0 2 8 16 16 47 68 120 133 -89 -10 81 72 6 25 21 9 3 1
	Mang con ben trai
	72
	Mang con ben phai
	6
	Mang con merge
	6 72
	Mang hien tai sau khi merge
	-19 0 2 8 16 16 47 68 120 133 -89 -10 81 6 72 25 21 9 3 1
	Mang con ben trai
	-89 -10 81
	Mang con ben phai
	6 72
	Mang con merge
	-89 -10 6 72 81
	Mang hien tai sau khi merge
	-19 0 2 8 16 16 47 68 120 133 -89 -10 6 72 81 25 21 9 3 1
Clear	Mang con ben trai
	25
	Mang con ben phai
	21
	Mang con merge
	21 25
	Mang hien tai sau khi merge
	-19 0 2 8 16 16 47 68 120 133 -89 -10 6 72 81 21 25 9 3 1
	Mang con ben trai
	21 25
	Mang con ben phai
	9
	Mang con merge
	9 21 25
	Mang hien tai sau khi merge
	-19 0 2 8 16 16 47 68 120 133 -89 -10 6 72 81 9 21 25 3 1
	Mang con ben trai
	3
	Mang con ben phai
	1
	Mang con merge



Mars MessagesRun I/O

Clear

```
1 3
Mang hien tai sau khi merge
-19 0 2 8 16 16 47 68 120 133 -89 -10 6 72 81 9 21 25 1 3
Mang con ben trai
9 21 25
Mang con ben phai
1 3
Mang con merge
1 3 9 21 25
Mang hien tai sau khi merge
-19 0 2 8 16 16 47 68 120 133 -89 -10 6 72 81 1 3 9 21 25
Mang con ben trai
-89 -10 6 72 81
Mang con ben phai
1 3 9 21 25
Mang con merge
-89 -10 1 3 6 9 21 25 72 81
Mang hien tai sau khi merge
-19 0 2 8 16 16 47 68 120 133 -89 -10 1 3 6 9 21 25 72 81
Mang con ben trai
-19 0 2 8 16 16 47 68 120 133
Mang con ben phai
-89 -10 1 3 6 9 21 25 72 81
Mang con merge
-89 -19 -10 0 1 2 3 6 8 9 16 16 21 25 47 68 72 81 120 133
Mang hien tai sau khi merge
-89 -19 -10 0 1 2 3 6 8 9 16 16 21 25 47 68 72 81 120 133

-- program is finished running (dropped off bottom) --
```

3.3 Test case 3

{-99, 1120, 6, 9, -5439, 160, 0, 0, 73, 228, 22, -68, 0, 5, 3, 42, 11, 21, 75, 9999}

Mars Messages	Run I/O
	-99 1120 6 9 -5439 160 0 0 73 228 22 -68 0 5 3 42 11 21 75 9999
	Mang con ben trai
	-99
	Mang con ben phai
	1120
	Mang con merge
	-99 1120
	Mang hien tai sau khi merge
	-99 1120 6 9 -5439 160 0 0 73 228 22 -68 0 5 3 42 11 21 75 9999
	Mang con ben trai
	-99 1120
	Mang con ben phai
	6
	Mang con merge
	-99 6 1120
	Mang hien tai sau khi merge
	-99 6 1120 9 -5439 160 0 0 73 228 22 -68 0 5 3 42 11 21 75 9999
	Mang con ben trai
	9
	Mang con ben phai
	-5439
Clear	Mang con merge
	-5439 9
	Mang hien tai sau khi merge
	-99 6 1120 -5439 9 160 0 0 73 228 22 -68 0 5 3 42 11 21 75 9999
	Mang con ben trai
	-99 6 1120
	Mang con ben phai
	-5439 9
	Mang con merge
	-5439 -99 6 9 1120
	Mang hien tai sau khi merge
	-5439 -99 6 9 1120 160 0 0 73 228 22 -68 0 5 3 42 11 21 75 9999
	Mang con ben trai
	160
	Mang con ben phai
	0
	Mang con merge
	0 160
	Mang hien tai sau khi merge
	-5439 -99 6 9 1120 0 160 0 73 228 22 -68 0 5 3 42 11 21 75 9999
	Mang con ben trai



Mars Messages	Run I/O
	0 160 Mang con ben phai 0 Mang con merge 0 0 160 Mang hien tai sau khi merge -5439 -99 6 9 1120 0 0 160 73 228 22 -68 0 5 3 42 11 21 75 9999 Mang con ben trai 73 Mang con ben phai 228 Mang con merge 73 228 Mang hien tai sau khi merge -5439 -99 6 9 1120 0 0 160 73 228 22 -68 0 5 3 42 11 21 75 9999 Mang con ben trai 0 0 160 Mang con ben phai 73 228 Mang con merge 0 0 73 160 228 Mang hien tai sau khi merge -5439 -99 6 9 1120 0 0 73 160 228 22 -68 0 5 3 42 11 21 75 9999 Mang con ben trai -5439 -99 6 9 1120 Mang con ben phai 0 0 73 160 228 Mang con merge -5439 -99 0 0 6 9 73 160 228 1120 Mang hien tai sau khi merge -5439 -99 0 0 6 9 73 160 228 1120 22 -68 0 5 3 42 11 21 75 9999 Mang con ben trai 22 Mang con ben phai -68 Mang con merge -68 22 Mang hien tai sau khi merge -5439 -99 0 0 6 9 73 160 228 1120 -68 22 0 5 3 42 11 21 75 9999 Mang con ben trai -68 22 Mang con ben phai



Mars Messages	Run I/O
	0
	Mang con merge
	-68 0 22
	Mang hien tai sau khi merge
	-5439 -99 0 0 6 9 73 160 228 1120 -68 0 22 5 3 42 11 21 75 9999
	Mang con ben trai
	5
	Mang con ben phai
	3
	Mang con merge
	3 5
	Mang hien tai sau khi merge
	-5439 -99 0 0 6 9 73 160 228 1120 -68 0 22 3 5 42 11 21 75 9999
	Mang con ben trai
	-68 0 22
	Mang con ben phai
	3 5
	Mang con merge
	-68 0 3 5 22
	Mang hien tai sau khi merge
	-5439 -99 0 0 6 9 73 160 228 1120 -68 0 3 5 22 42 11 21 75 9999
Clear	Mang con ben trai
	42
	Mang con ben phai
	11
	Mang con merge
	11 42
	Mang hien tai sau khi merge
	-5439 -99 0 0 6 9 73 160 228 1120 -68 0 3 5 22 11 42 21 75 9999
	Mang con ben trai
	11 42
	Mang con ben phai
	21
	Mang con merge
	11 21 42
	Mang hien tai sau khi merge
	-5439 -99 0 0 6 9 73 160 228 1120 -68 0 3 5 22 11 21 42 75 9999
	Mang con ben trai
	75
	Mang con ben phai
	9999
	Mang con merge



Mars MessagesRun I/O

Clear

```
75 9999
Mang hien tai sau khi merge
-5439 -99 0 0 6 9 73 160 228 1120 -68 0 3 5 22 11 21 42 75 9999
Mang con ben trai
11 21 42
Mang con ben phai
75 9999
Mang con merge
11 21 42 75 9999
Mang hien tai sau khi merge
-5439 -99 0 0 6 9 73 160 228 1120 -68 0 3 5 22 11 21 42 75 9999
Mang con ben trai
-68 0 3 5 22
Mang con ben phai
11 21 42 75 9999
Mang con merge
-68 0 3 5 11 21 22 42 75 9999
Mang hien tai sau khi merge
-5439 -99 0 0 6 9 73 160 228 1120 -68 0 3 5 11 21 22 42 75 9999
Mang con ben trai
-5439 -99 0 0 6 9 73 160 228 1120
Mang con ben phai
-68 0 3 5 11 21 22 42 75 9999
Mang con merge
-5439 -99 -68 0 0 0 3 5 6 9 11 21 22 42 73 75 160 228 1120 9999
Mang hien tai sau khi merge
-5439 -99 -68 0 0 0 3 5 6 9 11 21 22 42 73 75 160 228 1120 9999

-- program is finished running (dropped off bottom) --
```

3.4 Test case 4

{220, 19, 113, 21, 46, 0, -71, 21, 2, 2, 2, 31, 713, 7, 0, -1, 5, 3690, 28, 68}

Mars Messages	Run I/O
	220 19 113 21 46 0 -71 21 2 2 2 31 713 7 0 -1 5 3690 28 68
	Mang con ben trai
	220
	Mang con ben phai
	19
	Mang con merge
	19 220
	Mang hien tai sau khi merge
	19 220 113 21 46 0 -71 21 2 2 2 31 713 7 0 -1 5 3690 28 68
	Mang con ben trai
	19 220
	Mang con ben phai
	113
	Mang con merge
	19 113 220
	Mang hien tai sau khi merge
	19 113 220 21 46 0 -71 21 2 2 2 31 713 7 0 -1 5 3690 28 68
	Mang con ben trai
	21
	Mang con ben phai
	46
<button>Clear</button>	Mang con merge
	21 46
	Mang hien tai sau khi merge
	19 113 220 21 46 0 -71 21 2 2 2 31 713 7 0 -1 5 3690 28 68
	Mang con ben trai
	19 113 220
	Mang con ben phai
	21 46
	Mang con merge
	19 21 46 113 220
	Mang hien tai sau khi merge
	19 21 46 113 220 0 -71 21 2 2 2 31 713 7 0 -1 5 3690 28 68
	Mang con ben trai
	0
	Mang con ben phai
	-71
	Mang con merge
	-71 0
	Mang hien tai sau khi merge
	19 21 46 113 220 -71 0 21 2 2 2 31 713 7 0 -1 5 3690 28 68
	Mang con ben trai



Mars MessagesRun I/O

Clear

```
-71 0
Mang con ben phai
21
Mang con merge
-71 0 21
Mang hien tai sau khi merge
19 21 46 113 220 -71 0 21 2 2 2 31 713 7 0 -1 5 3690 28 68
Mang con ben trai
2
Mang con ben phai
2
Mang con merge
2 2
Mang hien tai sau khi merge
19 21 46 113 220 -71 0 21 2 2 2 31 713 7 0 -1 5 3690 28 68
Mang con ben trai
-71 0 21
Mang con ben phai
2 2
Mang con merge
-71 0 2 2 21
Mang hien tai sau khi merge
19 21 46 113 220 -71 0 2 2 2 21 2 31 713 7 0 -1 5 3690 28 68
Mang con ben trai
19 21 46 113 220
Mang con ben phai
-71 0 2 2 21
Mang con merge
-71 0 2 2 19 21 21 46 113 220
Mang hien tai sau khi merge
-71 0 2 2 19 21 21 46 113 220 2 31 713 7 0 -1 5 3690 28 68
Mang con ben trai
2
Mang con ben phai
31
Mang con merge
2 31
Mang hien tai sau khi merge
-71 0 2 2 19 21 21 46 113 220 2 31 713 7 0 -1 5 3690 28 68
Mang con ben trai
2 31
Mang con ben phai
```



Mars Messages	Run I/O
	713
	Mang con merge
	2 31 713
	Mang hien tai sau khi merge
	-71 0 2 2 19 21 21 46 113 220 2 31 713 7 0 -1 5 3690 28 68
	Mang con ben trai
	7
	Mang con ben phai
	0
	Mang con merge
	0 7
	Mang hien tai sau khi merge
	-71 0 2 2 19 21 21 46 113 220 2 31 713 0 7 -1 5 3690 28 68
	Mang con ben trai
	2 31 713
	Mang con ben phai
	0 7
	Mang con merge
	0 2 7 31 713
	Mang hien tai sau khi merge
Clear	-71 0 2 2 19 21 21 46 113 220 0 2 7 31 713 -1 5 3690 28 68
	Mang con ben trai
	-1
	Mang con ben phai
	5
	Mang con merge
	-1 5
	Mang hien tai sau khi merge
	-71 0 2 2 19 21 21 46 113 220 0 2 7 31 713 -1 5 3690 28 68
	Mang con ben trai
	-1 5
	Mang con ben phai
	3690
	Mang con merge
	-1 5 3690
	Mang hien tai sau khi merge
	-71 0 2 2 19 21 21 46 113 220 0 2 7 31 713 -1 5 3690 28 68
	Mang con ben trai
	28
	Mang con ben phai
	68
	Mang con merge



Mars Messages	Run I/O
	28 68 Mang hien tai sau khi merge -71 0 2 2 19 21 21 46 113 220 0 2 7 31 713 -1 5 3690 28 68 Mang con ben trai -1 5 3690 Mang con ben phai 28 68 Mang con merge -1 5 28 68 3690 Mang hien tai sau khi merge -71 0 2 2 19 21 21 46 113 220 0 2 7 31 713 -1 5 28 68 3690 Mang con ben trai 0 2 7 31 713 Mang con ben phai -1 5 28 68 3690 <div>Clear</div> Mang con merge -1 0 2 5 7 28 31 68 713 3690 Mang hien tai sau khi merge -71 0 2 2 19 21 21 46 113 220 -1 0 2 5 7 28 31 68 713 3690 Mang con ben trai -71 0 2 2 19 21 21 46 113 220 Mang con ben phai -1 0 2 5 7 28 31 68 713 3690 Mang con merge -71 -1 0 0 2 2 2 5 7 19 21 21 28 31 46 68 113 220 713 3690 Mang hien tai sau khi merge -71 -1 0 0 2 2 2 5 7 19 21 21 28 31 46 68 113 220 713 3690 -- program is finished running (dropped off bottom) --

3.5 Test case 5

{-1, 110, 0, 0, 0, 0, 23, 5, 89, -45, -45, -4, 330, 7, 45, -61, 56, -2, 22, 7}

Mars Messages	Run I/O
	-1 110 0 0 0 0 23 5 89 -45 -45 -4 330 7 45 -61 56 -2 22 7
	Mang con ben trai
	-1
	Mang con ben phai
	110
	Mang con merge
	-1 110
	Mang hien tai sau khi merge
	-1 110 0 0 0 0 23 5 89 -45 -45 -4 330 7 45 -61 56 -2 22 7
	Mang con ben trai
	-1 110
	Mang con ben phai
	0
	Mang con merge
	-1 0 110
	Mang hien tai sau khi merge
	-1 0 110 0 0 0 23 5 89 -45 -45 -4 330 7 45 -61 56 -2 22 7
	Mang con ben trai
	0
	Mang con ben phai
	0
Clear	Mang con merge
	0 0
	Mang hien tai sau khi merge
	-1 0 110 0 0 0 23 5 89 -45 -45 -4 330 7 45 -61 56 -2 22 7
	Mang con ben trai
	-1 0 110
	Mang con ben phai
	0 0
	Mang con merge
	-1 0 0 0 110
	Mang hien tai sau khi merge
	-1 0 0 0 110 0 23 5 89 -45 -45 -4 330 7 45 -61 56 -2 22 7
	Mang con ben trai
	0
	Mang con ben phai
	23
	Mang con merge
	0 23
	Mang hien tai sau khi merge
	-1 0 0 0 110 0 23 5 89 -45 -45 -4 330 7 45 -61 56 -2 22 7
	Mang con ben trai



Mars Messages	Run I/O
	0 23
	Mang con ben phai
	5
	Mang con merge
	0 5 23
	Mang hien tai sau khi merge
	-1 0 0 0 110 0 5 23 89 -45 -45 -4 330 7 45 -61 56 -2 22 7
	Mang con ben trai
	89
	Mang con ben phai
	-45
	Mang con merge
	-45 89
	Mang hien tai sau khi merge
	-1 0 0 0 110 0 5 23 -45 89 -45 -4 330 7 45 -61 56 -2 22 7
	Mang con ben trai
	0 5 23
	Mang con ben phai
	-45 89
	Mang con merge
	-45 0 5 23 89
Clear	Mang hien tai sau khi merge
	-1 0 0 0 110 -45 0 5 23 89 -45 -4 330 7 45 -61 56 -2 22 7
	Mang con ben trai
	-1 0 0 0 110
	Mang con ben phai
	-45 0 5 23 89
	Mang con merge
	-45 -1 0 0 0 0 5 23 89 110
	Mang hien tai sau khi merge
	-45 -1 0 0 0 0 5 23 89 110 -45 -4 330 7 45 -61 56 -2 22 7
	Mang con ben trai
	-45
	Mang con ben phai
	-4
	Mang con merge
	-45 -4
	Mang hien tai sau khi merge
	-45 -1 0 0 0 0 5 23 89 110 -45 -4 330 7 45 -61 56 -2 22 7
	Mang con ben trai
	-45 -4
	Mang con ben phai



Mars Messages	Run I/O
	330 Mang con merge -45 -4 330 Mang hien tai sau khi merge -45 -1 0 0 0 0 5 23 89 110 -45 -4 330 7 45 -61 56 -2 22 7 Mang con ben trai 7 Mang con ben phai 45 Mang con merge 7 45 Mang hien tai sau khi merge -45 -1 0 0 0 0 5 23 89 110 -45 -4 330 7 45 -61 56 -2 22 7 Mang con ben trai -45 -4 330 Mang con ben phai 7 45 Mang con merge -45 -4 7 45 330 Mang hien tai sau khi merge -45 -1 0 0 0 0 5 23 89 110 -45 -4 7 45 330 -61 56 -2 22 7 Mang con ben trai -61 Mang con ben phai 56 Mang con merge -61 56 Mang hien tai sau khi merge -45 -1 0 0 0 0 5 23 89 110 -45 -4 7 45 330 -61 56 -2 22 7 Mang con ben trai -61 56 Mang con ben phai -2 Mang con merge -61 -2 56 Mang hien tai sau khi merge -45 -1 0 0 0 0 5 23 89 110 -45 -4 7 45 330 -61 -2 56 22 7 Mang con ben trai 22 Mang con ben phai 7 Mang con merge



```
Mars Messages Run I/O
7 22
Mang hien tai sau khi merge
-45 -1 0 0 0 0 5 23 89 110 -45 -4 7 45 330 -61 -2 56 7 22
Mang con ben trai
-61 -2 56
Mang con ben phai
7 22
Mang con merge
-61 -2 7 22 56
Mang hien tai sau khi merge
-45 -1 0 0 0 0 5 23 89 110 -45 -4 7 45 330 -61 -2 7 22 56
Mang con ben trai
-45 -4 7 45 330
Mang con ben phai
-61 -2 7 22 56
Clear Mang con merge
-61 -45 -4 -2 7 7 22 45 56 330
Mang hien tai sau khi merge
-45 -1 0 0 0 0 5 23 89 110 -61 -45 -4 -2 7 7 22 45 56 330
Mang con ben trai
-45 -1 0 0 0 0 5 23 89 110
Mang con ben phai
-61 -45 -4 -2 7 7 22 45 56 330
Mang con merge
-61 -45 -45 -4 -2 -1 0 0 0 0 5 7 7 22 23 45 56 89 110 330
Mang hien tai sau khi merge
-61 -45 -45 -4 -2 -1 0 0 0 0 5 7 7 22 23 45 56 89 110 330

-- program is finished running (dropped off bottom) --
```



3.6 Test case 6

{-214, 74, -429, -273, 348, -874, 416, 543, -598, -88, 341, 386, -435, -723, 98, -60, -481, 423, 190, 438}

Mars Messages	Run I/O
	-214 74 -429 -273 348 -874 416 543 -598 -88 341 386 -435 -723 98 -60 -481 423 190 438
	Mang con ben trai
	-214
	Mang con ben phai
	74
	Mang con merge
	-214 74
	Mang hien tai sau khi merge
	-214 74 -429 -273 348 -874 416 543 -598 -88 341 386 -435 -723 98 -60 -481 423 190 438
	Mang con ben trai
	-214 74
	Mang con ben phai
	-429
	Mang con merge
	-429 -214 74
	Mang hien tai sau khi merge
	-429 -214 74 -273 348 -874 416 543 -598 -88 341 386 -435 -723 98 -60 -481 423 190 438
	Mang con ben trai
	-273
	Mang con ben phai
	348
Clear	Mang con merge
	-273 348
	Mang hien tai sau khi merge
	-429 -214 74 -273 348 -874 416 543 -598 -88 341 386 -435 -723 98 -60 -481 423 190 438
	Mang con ben trai
	-429 -214 74
	Mang con ben phai
	-273 348
	Mang con merge
	-429 -273 -214 74 348
	Mang hien tai sau khi merge
	-429 -273 -214 74 348 -874 416 543 -598 -88 341 386 -435 -723 98 -60 -481 423 190 438
	Mang con ben trai
	-874
	Mang con ben phai
	416
	Mang con merge
	-874 416
	Mang hien tai sau khi merge
	-429 -273 -214 74 348 -874 416 543 -598 -88 341 386 -435 -723 98 -60 -481 423 190 438
	Mang con ben trai



Mars Messages	Run I/O
	-874 416
	Mang con ben phai
	543
	Mang con merge
	-874 416 543
	Mang hien tai sau khi merge
	-429 -273 -214 74 348 -874 416 543 -598 -88 341 386 -435 -723 98 -60 -481 423 190 438
	Mang con ben trai
	-598
	Mang con ben phai
	-88
	Mang con merge
	-598 -88
	Mang hien tai sau khi merge
	-429 -273 -214 74 348 -874 416 543 -598 -88 341 386 -435 -723 98 -60 -481 423 190 438
	Mang con ben trai
	-874 416 543
	Mang con ben phai
	-598 -88
	Mang con merge
Clear	-874 -598 -88 416 543
	Mang hien tai sau khi merge
	-429 -273 -214 74 348 -874 -598 -88 416 543 341 386 -435 -723 98 -60 -481 423 190 438
	Mang con ben trai
	-429 -273 -214 74 348
	Mang con ben phai
	-874 -598 -88 416 543
	Mang con merge
	-874 -598 -429 -273 -214 -88 74 348 416 543
	Mang hien tai sau khi merge
	-874 -598 -429 -273 -214 -88 74 348 416 543 341 386 -435 -723 98 -60 -481 423 190 438
	Mang con ben trai
	341
	Mang con ben phai
	386
	Mang con merge
	341 386
	Mang hien tai sau khi merge
	-874 -598 -429 -273 -214 -88 74 348 416 543 341 386 -435 -723 98 -60 -481 423 190 438
	Mang con ben trai
	341 386
	Mang con ben phai



Mars Messages	Run I/O
	-435
	Mang con merge
	-435 341 386
	Mang hien tai sau khi merge
	-874 -598 -429 -273 -214 -88 74 348 416 543 -435 341 386 -723 98 -60 -481 423 190 438
	Mang con ben trai
	-723
	Mang con ben phai
	98
	Mang con merge
	-723 98
	Mang hien tai sau khi merge
	-874 -598 -429 -273 -214 -88 74 348 416 543 -435 341 386 -723 98 -60 -481 423 190 438
	Mang con ben trai
	-435 341 386
	Mang con ben phai
	-723 98
	Mang con merge
	-723 -435 98 341 386
	Mang hien tai sau khi merge
	-874 -598 -429 -273 -214 -88 74 348 416 543 -723 -435 98 341 386 -60 -481 423 190 438
Clear	Mang con ben trai
	-60
	Mang con ben phai
	-481
	Mang con merge
	-481 -60
	Mang hien tai sau khi merge
	-874 -598 -429 -273 -214 -88 74 348 416 543 -723 -435 98 341 386 -481 -60 423 190 438
	Mang con ben trai
	-481 -60
	Mang con ben phai
	423
	Mang con merge
	-481 -60 423
	Mang hien tai sau khi merge
	-874 -598 -429 -273 -214 -88 74 348 416 543 -723 -435 98 341 386 -481 -60 423 190 438
	Mang con ben trai
	190
	Mang con ben phai
	438
	Mang con merge



Mars Messages	Run I/O
	190 438 Mang hien tai sau khi merge -874 -598 -429 -273 -214 -88 74 348 416 543 -723 -435 98 341 386 -481 -60 423 190 438 Mang con ben trai -481 -60 423 Mang con ben phai 190 438 Mang con merge -481 -60 190 423 438 Mang hien tai sau khi merge -874 -598 -429 -273 -214 -88 74 348 416 543 -723 -435 98 341 386 -481 -60 190 423 438 Mang con ben trai -723 -435 98 341 386 Mang con ben phai -481 -60 190 423 438 <div>Clear</div> Mang con merge -723 -481 -435 -60 98 190 341 386 423 438 Mang hien tai sau khi merge -874 -598 -429 -273 -214 -88 74 348 416 543 -723 -481 -435 -60 98 190 341 386 423 438 Mang con ben trai -874 -598 -429 -273 -214 -88 74 348 416 543 Mang con ben phai -723 -481 -435 -60 98 190 341 386 423 438 Mang con merge -874 -723 -598 -481 -435 -429 -273 -214 -88 -60 74 98 190 341 348 386 416 423 438 543 Mang hien tai sau khi merge -874 -723 -598 -481 -435 -429 -273 -214 -88 -60 74 98 190 341 348 386 416 423 438 543 -- program is finished running (dropped off bottom) --

3.7 Test case 7

{-114, -195, -76, 32, 42, -58, -143, 155, -163, 137, 190, 75, 94, -34, 116, -96, -131, 160, 4, -59}

Mars Messages	Run I/O
	-114 -195 -76 32 42 -58 -143 155 -163 137 190 75 94 -34 116 -96 -131 160 4 -59
	Mang con ben trai
	-114
	Mang con ben phai
	-195
	Mang con merge
	-195 -114
	Mang hien tai sau khi merge
	-195 -114 -76 32 42 -58 -143 155 -163 137 190 75 94 -34 116 -96 -131 160 4 -59
	Mang con ben trai
	-195 -114
	Mang con ben phai
	-76
	Mang con merge
	-195 -114 -76
	Mang hien tai sau khi merge
	-195 -114 -76 32 42 -58 -143 155 -163 137 190 75 94 -34 116 -96 -131 160 4 -59
	Mang con ben trai
	32
	Mang con ben phai
	42
Clear	Mang con merge
	32 42
	Mang hien tai sau khi merge
	-195 -114 -76 32 42 -58 -143 155 -163 137 190 75 94 -34 116 -96 -131 160 4 -59
	Mang con ben trai
	-195 -114 -76
	Mang con ben phai
	32 42
	Mang con merge
	-195 -114 -76 32 42
	Mang hien tai sau khi merge
	-195 -114 -76 32 42 -58 -143 155 -163 137 190 75 94 -34 116 -96 -131 160 4 -59
	Mang con ben trai
	-58
	Mang con ben phai
	-143
	Mang con merge
	-143 -58
	Mang hien tai sau khi merge
	-195 -114 -76 32 42 -143 -58 155 -163 137 190 75 94 -34 116 -96 -131 160 4 -59
	Mang con ben trai



Mars Messages	Run I/O
	-143 -58 Mang con ben phai 155 Mang con merge -143 -58 155 Mang hien tai sau khi merge -195 -114 -76 32 42 -143 -58 155 -163 137 190 75 94 -34 116 -96 -131 160 4 -59 Mang con ben trai -163 Mang con ben phai 137 Mang con merge -163 137 Mang hien tai sau khi merge -195 -114 -76 32 42 -143 -58 155 -163 137 190 75 94 -34 116 -96 -131 160 4 -59 Mang con ben trai -143 -58 155 Mang con ben phai -163 137 Mang con merge -163 -143 -58 137 155 Mang hien tai sau khi merge -195 -114 -76 32 42 -163 -143 -58 137 155 190 75 94 -34 116 -96 -131 160 4 -59 Mang con ben trai -195 -114 -76 32 42 Mang con ben phai -163 -143 -58 137 155 Mang con merge -195 -163 -143 -114 -76 -58 32 42 137 155 Mang hien tai sau khi merge -195 -163 -143 -114 -76 -58 32 42 137 155 190 75 94 -34 116 -96 -131 160 4 -59 Mang con ben trai 190 Mang con ben phai 75 Mang con merge 75 190 Mang hien tai sau khi merge -195 -163 -143 -114 -76 -58 32 42 137 155 75 190 94 -34 116 -96 -131 160 4 -59 Mang con ben trai 75 190 Mang con ben phai



Mars Messages	Run I/O
	94 Mang con merge 75 94 190 Mang hien tai sau khi merge -195 -163 -143 -114 -76 -58 32 42 137 155 75 94 190 -34 116 -96 -131 160 4 -59 Mang con ben trai -34 Mang con ben phai 116 Mang con merge -34 116 Mang hien tai sau khi merge -195 -163 -143 -114 -76 -58 32 42 137 155 75 94 190 -34 116 -96 -131 160 4 -59 Mang con ben trai 75 94 190 Mang con ben phai -34 116 Mang con merge -34 75 94 116 190 Mang hien tai sau khi merge -195 -163 -143 -114 -76 -58 32 42 137 155 -34 75 94 116 190 -96 -131 160 4 -59 <div>Clear</div> Mang con ben trai -96 Mang con ben phai -131 Mang con merge -131 -96 Mang hien tai sau khi merge -195 -163 -143 -114 -76 -58 32 42 137 155 -34 75 94 116 190 -131 -96 160 4 -59 Mang con ben trai -131 -96 Mang con ben phai 160 Mang con merge -131 -96 160 Mang hien tai sau khi merge -195 -163 -143 -114 -76 -58 32 42 137 155 -34 75 94 116 190 -131 -96 160 4 -59 Mang con ben trai 4 Mang con ben phai -59 Mang con merge



Mars Messages	Run I/O
	-59 4 Mang hien tai sau khi merge -195 -163 -143 -114 -76 -58 32 42 137 155 -34 75 94 116 190 -131 -96 160 -59 4 Mang con ben trai -131 -96 160 Mang con ben phai -59 4 Mang con merge -131 -96 -59 4 160 Mang hien tai sau khi merge -195 -163 -143 -114 -76 -58 32 42 137 155 -34 75 94 116 190 -131 -96 -59 4 160 Mang con ben trai -34 75 94 116 190 Mang con ben phai -131 -96 -59 4 160 Clear Mang con merge -131 -96 -59 -34 4 75 94 116 160 190 Mang hien tai sau khi merge -195 -163 -143 -114 -76 -58 32 42 137 155 -131 -96 -59 -34 4 75 94 116 160 190 Mang con ben trai -195 -163 -143 -114 -76 -58 32 42 137 155 Mang con ben phai -131 -96 -59 -34 4 75 94 116 160 190 Mang con merge -195 -163 -143 -131 -114 -96 -76 -59 -58 -34 4 32 42 75 94 116 137 155 160 190 Mang hien tai sau khi merge -195 -163 -143 -131 -114 -96 -76 -59 -58 -34 4 32 42 75 94 116 137 155 160 190 -- program is finished running (dropped off bottom) --



3.8 Test case 8

{25, -25, 5, 15, -1, -19, 63, 90, 34, 69, -36, -16, 20, 94, 77, 16, -50, 92, -14, 73}

Mars Messages	Run I/O
	25 -25 5 15 -1 -19 63 90 34 69 -36 -16 20 94 77 16 -50 92 -14 73
	Mang con ben trai
	25
	Mang con ben phai
	-25
	Mang con merge
	-25 25
	Mang hien tai sau khi merge
	-25 25 5 15 -1 -19 63 90 34 69 -36 -16 20 94 77 16 -50 92 -14 73
	Mang con ben trai
	-25 25
	Mang con ben phai
	5
	Mang con merge
	-25 5 25
	Mang hien tai sau khi merge
	-25 5 25 15 -1 -19 63 90 34 69 -36 -16 20 94 77 16 -50 92 -14 73
	Mang con ben trai
	15
	Mang con ben phai
Clear	-1
	Mang con merge
	-1 15
	Mang hien tai sau khi merge
	-25 5 25 -1 15 -19 63 90 34 69 -36 -16 20 94 77 16 -50 92 -14 73
	Mang con ben trai
	-25 5 25
	Mang con ben phai
	-1 15
	Mang con merge
	-25 -1 5 15 25
	Mang hien tai sau khi merge
	-25 -1 5 15 25 -19 63 90 34 69 -36 -16 20 94 77 16 -50 92 -14 73
	Mang con ben trai
	-19
	Mang con ben phai
	63
	Mang con merge
	-19 63
	Mang hien tai sau khi merge
	-25 -1 5 15 25 -19 63 90 34 69 -36 -16 20 94 77 16 -50 92 -14 73
	Mang con ben trai



Mars MessagesRun I/O

Clear

```
-19 63
Mang con ben phai
90
Mang con merge
-19 63 90
Mang hien tai sau khi merge
-25 -1 5 15 25 -19 63 90 34 69 -36 -16 20 94 77 16 -50 92 -14 73
Mang con ben trai
34
Mang con ben phai
69
Mang con merge
34 69
Mang hien tai sau khi merge
-25 -1 5 15 25 -19 63 90 34 69 -36 -16 20 94 77 16 -50 92 -14 73
Mang con ben trai
-19 63 90
Mang con ben phai
34 69
Mang con merge
-19 34 63 69 90
Mang hien tai sau khi merge
-25 -1 5 15 25 -19 34 63 69 90 -36 -16 20 94 77 16 -50 92 -14 73
Mang con ben trai
-25 -1 5 15 25
Mang con ben phai
-19 34 63 69 90
Mang con merge
-25 -19 -1 5 15 25 34 63 69 90
Mang hien tai sau khi merge
-25 -19 -1 5 15 25 34 63 69 90 -36 -16 20 94 77 16 -50 92 -14 73
Mang con ben trai
-36
Mang con ben phai
-16
Mang con merge
-36 -16
Mang hien tai sau khi merge
-25 -19 -1 5 15 25 34 63 69 90 -36 -16 20 94 77 16 -50 92 -14 73
Mang con ben trai
-36 -16
Mang con ben phai
```



Mars Messages	Run I/O
	20
	Mang con merge
	-36 -16 20
	Mang hien tai sau khi merge
	-25 -19 -1 5 15 25 34 63 69 90 -36 -16 20 94 77 16 -50 92 -14 73
	Mang con ben trai
	94
	Mang con ben phai
	77
	Mang con merge
	77 94
	Mang hien tai sau khi merge
	-25 -19 -1 5 15 25 34 63 69 90 -36 -16 20 77 94 16 -50 92 -14 73
	Mang con ben trai
	-36 -16 20
	Mang con ben phai
	77 94
	Mang con merge
	-36 -16 20 77 94
	Mang hien tai sau khi merge
	-25 -19 -1 5 15 25 34 63 69 90 -36 -16 20 77 94 16 -50 92 -14 73
Clear	Mang con ben trai
	16
	Mang con ben phai
	-50
	Mang con merge
	-50 16
	Mang hien tai sau khi merge
	-25 -19 -1 5 15 25 34 63 69 90 -36 -16 20 77 94 -50 16 92 -14 73
	Mang con ben trai
	-50 16
	Mang con ben phai
	92
	Mang con merge
	-50 16 92
	Mang hien tai sau khi merge
	-25 -19 -1 5 15 25 34 63 69 90 -36 -16 20 77 94 -50 16 92 -14 73
	Mang con ben trai
	-14
	Mang con ben phai
	73
	Mang con merge



Mars MessagesRun I/O

Clear

```
-14 73
Mang hien tai sau khi merge
-25 -19 -1 5 15 25 34 63 69 90 -36 -16 20 77 94 -50 16 92 -14 73
Mang con ben trai
-50 16 92
Mang con ben phai
-14 73
Mang con merge
-50 -14 16 73 92
Mang hien tai sau khi merge
-25 -19 -1 5 15 25 34 63 69 90 -36 -16 20 77 94 -50 -14 16 73 92
Mang con ben trai
-36 -16 20 77 94
Mang con ben phai
-50 -14 16 73 92
Mang con merge
-50 -36 -16 -14 16 20 73 77 92 94
Mang hien tai sau khi merge
-25 -19 -1 5 15 25 34 63 69 90 -50 -36 -16 -14 16 20 73 77 92 94
Mang con ben trai
-25 -19 -1 5 15 25 34 63 69 90
Mang con ben phai
-50 -36 -16 -14 16 20 73 77 92 94
Mang con merge
-50 -36 -25 -19 -16 -14 -1 5 15 16 20 25 34 63 69 73 77 90 92 94
Mang hien tai sau khi merge
-50 -36 -25 -19 -16 -14 -1 5 15 16 20 25 34 63 69 73 77 90 92 94

-- program is finished running (dropped off bottom) --
```



3.9 Test case 9

{26, 66, 102, 91, 186, 51, -26, 10, 151, -28, 164, 92, 18, 132, -23, 177, 191, 126, 153, 185}

Mars Messages	Run I/O
	26 66 102 91 186 51 -26 10 151 -28 164 92 18 132 -23 177 191 126 153 185
	Mang con ben trai
	26
	Mang con ben phai
	66
	Mang con merge
	26 66
	Mang hien tai sau khi merge
	26 66 102 91 186 51 -26 10 151 -28 164 92 18 132 -23 177 191 126 153 185
	Mang con ben trai
	26 66
	Mang con ben phai
	102
	Mang con merge
	26 66 102
	Mang hien tai sau khi merge
	26 66 102 91 186 51 -26 10 151 -28 164 92 18 132 -23 177 191 126 153 185
	Mang con ben trai
	91
	Mang con ben phai
	186
Clear	Mang con merge
	91 186
	Mang hien tai sau khi merge
	26 66 102 91 186 51 -26 10 151 -28 164 92 18 132 -23 177 191 126 153 185
	Mang con ben trai
	26 66 102
	Mang con ben phai
	91 186
	Mang con merge
	26 66 91 102 186
	Mang hien tai sau khi merge
	26 66 91 102 186 51 -26 10 151 -28 164 92 18 132 -23 177 191 126 153 185
	Mang con ben trai
	51
	Mang con ben phai
	-26
	Mang con merge
	-26 51
	Mang hien tai sau khi merge
	26 66 91 102 186 -26 51 10 151 -28 164 92 18 132 -23 177 191 126 153 185
	Mang con ben trai



Mars Messages

Run I/O

Clear

```
-26 51
Mang con ben phai
10
Mang con merge
-26 10 51
Mang hien tai sau khi merge
26 66 91 102 186 -26 10 51 151 -28 164 92 18 132 -23 177 191 126 153 185
Mang con ben trai
151
Mang con ben phai
-28
Mang con merge
-28 151
Mang hien tai sau khi merge
26 66 91 102 186 -26 10 51 -28 151 164 92 18 132 -23 177 191 126 153 185
Mang con ben trai
-26 10 51
Mang con ben phai
-28 151
Mang con merge
-28 -26 10 51 151
Mang hien tai sau khi merge
26 66 91 102 186 -28 -26 10 51 151 164 92 18 132 -23 177 191 126 153 185
Mang con ben trai
26 66 91 102 186
Mang con ben phai
-28 -26 10 51 151
Mang con merge
-28 -26 10 26 51 66 91 102 151 186
Mang hien tai sau khi merge
-28 -26 10 26 51 66 91 102 151 186 164 92 18 132 -23 177 191 126 153 185
Mang con ben trai
164
Mang con ben phai
92
Mang con merge
92 164
Mang hien tai sau khi merge
-28 -26 10 26 51 66 91 102 151 186 92 164 18 132 -23 177 191 126 153 185
Mang con ben trai
92 164
Mang con ben phai
```



Mars Messages

Run I/O

Clear

18
Mang con merge
18 92 164
Mang hien tai sau khi merge
-28 -26 10 26 51 66 91 102 151 186 18 92 164 132 -23 177 191 126 153 185
Mang con ben trai
132
Mang con ben phai
-23
Mang con merge
-23 132
Mang hien tai sau khi merge
-28 -26 10 26 51 66 91 102 151 186 18 92 164 -23 132 177 191 126 153 185
Mang con ben trai
18 92 164
Mang con ben phai
-23 132
Mang con merge
-23 18 92 132 164
Mang hien tai sau khi merge
-28 -26 10 26 51 66 91 102 151 186 -23 18 92 132 164 177 191 126 153 185
Mang con ben trai
177
Mang con ben phai
191
Mang con merge
177 191
Mang hien tai sau khi merge
-28 -26 10 26 51 66 91 102 151 186 -23 18 92 132 164 177 191 126 153 185
Mang con ben trai
177 191
Mang con ben phai
126
Mang con merge
126 177 191
Mang hien tai sau khi merge
-28 -26 10 26 51 66 91 102 151 186 -23 18 92 132 164 126 177 191 153 185
Mang con ben trai
153
Mang con ben phai
185
Mang con merge



Mars Messages	Run I/O
	153 185 Mang hien tai sau khi merge -28 -26 10 26 51 66 91 102 151 186 -23 18 92 132 164 126 177 191 153 185 Mang con ben trai 126 177 191 Mang con ben phai 153 185 Mang con merge 126 153 177 185 191 Mang hien tai sau khi merge -28 -26 10 26 51 66 91 102 151 186 -23 18 92 132 164 126 153 177 185 191 Mang con ben trai -23 18 92 132 164 Mang con ben phai 126 153 177 185 191 <div>Clear</div> Mang con merge -23 18 92 126 132 153 164 177 185 191 Mang hien tai sau khi merge -28 -26 10 26 51 66 91 102 151 186 -23 18 92 126 132 153 164 177 185 191 Mang con ben trai -28 -26 10 26 51 66 91 102 151 186 Mang con ben phai -23 18 92 126 132 153 164 177 185 191 Mang con merge -28 -26 -23 10 18 26 51 66 91 92 102 126 132 151 153 164 177 185 186 191 Mang hien tai sau khi merge -28 -26 -23 10 18 26 51 66 91 92 102 126 132 151 153 164 177 185 186 191 -- program is finished running (dropped off bottom) --

3.10 Test case 10

{-54 -73 -18 -99 -81 -11 -62 -30 18 24 -49 -32 25 -12 -90 26 -57 -35 2 6}

Mars Messages	Run I/O
	-54 -73 -18 -99 -81 -11 -62 -30 18 24 -49 -32 25 -12 -90 26 -57 -35 2 6
	Mang con ben trai
	-54
	Mang con ben phai
	-73
	Mang con merge
	-73 -54
	Mang hien tai sau khi merge
	-73 -54 -18 -99 -81 -11 -62 -30 18 24 -49 -32 25 -12 -90 26 -57 -35 2 6
	Mang con ben trai
	-73 -54
	Mang con ben phai
	-18
	Mang con merge
	-73 -54 -18
	Mang hien tai sau khi merge
	-73 -54 -18 -99 -81 -11 -62 -30 18 24 -49 -32 25 -12 -90 26 -57 -35 2 6
	Mang con ben trai
	-99
	Mang con ben phai
	-81
Clear	Mang con merge
	-99 -81
	Mang hien tai sau khi merge
	-73 -54 -18 -99 -81 -11 -62 -30 18 24 -49 -32 25 -12 -90 26 -57 -35 2 6
	Mang con ben trai
	-73 -54 -18
	Mang con ben phai
	-99 -81
	Mang con merge
	-99 -81 -73 -54 -18
	Mang hien tai sau khi merge
	-99 -81 -73 -54 -18 -11 -62 -30 18 24 -49 -32 25 -12 -90 26 -57 -35 2 6
	Mang con ben trai
	-11
	Mang con ben phai
	-62
	Mang con merge
	-62 -11
	Mang hien tai sau khi merge
	-99 -81 -73 -54 -18 -62 -11 -30 18 24 -49 -32 25 -12 -90 26 -57 -35 2 6
	Mang con ben trai



Mars Messages

Run I/O

Clear

```
-62 -11
Mang con ben phai
-30
Mang con merge
-62 -30 -11
Mang hien tai sau khi merge
-99 -81 -73 -54 -18 -62 -30 -11 18 24 -49 -32 25 -12 -90 26 -57 -35 2 6
Mang con ben trai
18
Mang con ben phai
24
Mang con merge
18 24
Mang hien tai sau khi merge
-99 -81 -73 -54 -18 -62 -30 -11 18 24 -49 -32 25 -12 -90 26 -57 -35 2 6
Mang con ben trai
-62 -30 -11
Mang con ben phai
18 24
Mang con merge
-62 -30 -11 18 24
Mang hien tai sau khi merge
-99 -81 -73 -54 -18 -62 -30 -11 18 24 -49 -32 25 -12 -90 26 -57 -35 2 6
Mang con ben trai
-99 -81 -73 -54 -18
Mang con ben phai
-62 -30 -11 18 24
Mang con merge
-99 -81 -73 -62 -54 -30 -18 -11 18 24
Mang hien tai sau khi merge
-99 -81 -73 -62 -54 -30 -18 -11 18 24 -49 -32 25 -12 -90 26 -57 -35 2 6
Mang con ben trai
-49
Mang con ben phai
-32
Mang con merge
-49 -32
Mang hien tai sau khi merge
-99 -81 -73 -62 -54 -30 -18 -11 18 24 -49 -32 25 -12 -90 26 -57 -35 2 6
Mang con ben trai
-49 -32
Mang con ben phai
```



Mars Messages

Run I/O

Clear

25
Mang con merge
-49 -32 25
Mang hien tai sau khi merge
-99 -81 -73 -62 -54 -30 -18 -11 18 24 -49 -32 25 -12 -90 26 -57 -35 2 6
Mang con ben trai
-12
Mang con ben phai
-90
Mang con merge
-90 -12
Mang hien tai sau khi merge
-99 -81 -73 -62 -54 -30 -18 -11 18 24 -49 -32 25 -90 -12 26 -57 -35 2 6
Mang con ben trai
-49 -32 25
Mang con ben phai
-90 -12
Mang con merge
-90 -49 -32 -12 25
Mang hien tai sau khi merge
-99 -81 -73 -62 -54 -30 -18 -11 18 24 -90 -49 -32 -12 25 26 -57 -35 2 6
Mang con ben trai
26
Mang con ben phai
-57
Mang con merge
-57 26
Mang hien tai sau khi merge
-99 -81 -73 -62 -54 -30 -18 -11 18 24 -90 -49 -32 -12 25 -57 26 -35 2 6
Mang con ben trai
-57 26
Mang con ben phai
-35
Mang con merge
-57 -35 26
Mang hien tai sau khi merge
-99 -81 -73 -62 -54 -30 -18 -11 18 24 -90 -49 -32 -12 25 -57 -35 26 2 6
Mang con ben trai
2
Mang con ben phai
6
Mang con merge

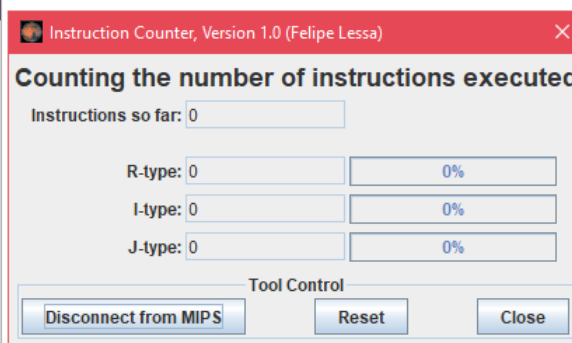
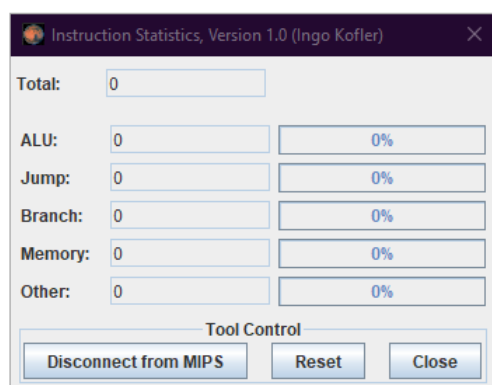
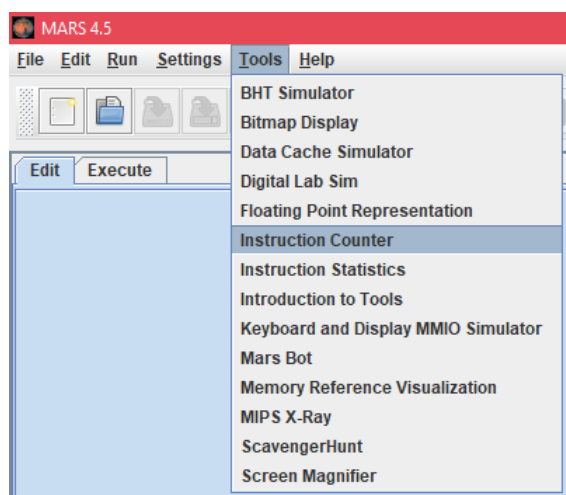


Mars Messages	Run I/O
	2 6 Mang hien tai sau khi merge -99 -81 -73 -62 -54 -30 -18 -11 18 24 -90 -49 -32 -12 25 -57 -35 26 2 6 Mang con ben trai -57 -35 26 Mang con ben phai 2 6 Mang con merge -57 -35 2 6 26 Mang hien tai sau khi merge -99 -81 -73 -62 -54 -30 -18 -11 18 24 -90 -49 -32 -12 25 -57 -35 2 6 26 Mang con ben trai -90 -49 -32 -12 25 Mang con ben phai -57 -35 2 6 26 <div>Clear</div> Mang con merge -90 -57 -49 -35 -32 -12 2 6 25 26 Mang hien tai sau khi merge -99 -81 -73 -62 -54 -30 -18 -11 18 24 -90 -57 -49 -35 -32 -12 2 6 25 26 Mang con ben trai -99 -81 -73 -62 -54 -30 -18 -11 18 24 Mang con ben phai -90 -57 -49 -35 -32 -12 2 6 25 26 Mang con merge -99 -90 -81 -73 -62 -57 -54 -49 -35 -32 -30 -18 -12 -11 2 6 18 24 25 26 Mang hien tai sau khi merge -99 -90 -81 -73 -62 -57 -54 -49 -35 -32 -30 -18 -12 -11 2 6 18 24 25 26 -- program is finished running (dropped off bottom) --

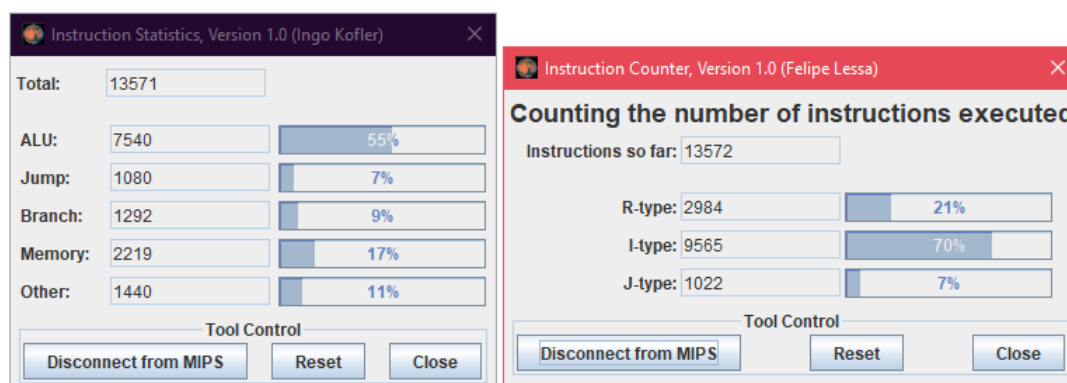
4 Tính thời gian thực thi

4.1 Thống kê các loại lệnh

Sử dụng công cụ Instruction Counter và Instruction Statistics có sẵn ở tab Tools của MARS để thống kê số lượng lệnh từng loại.



Chọn Connect to MIPS và chạy chương trình với Test case 1, thu được số lượng lệnh từng loại như sau:



Tổng số lệnh là 13571, trong đó:

$$\begin{cases} \text{R-Type: 2984, chiếm 21 \%} \\ \text{I-Type: 9565, chiếm 70 \%} \\ \text{J-Type: 1022, chiếm 7 \%} \end{cases}$$

Số lệnh tính toán sử dụng ALU: 7540, chiếm 55 %

Số lệnh nhảy: 1080, chiếm 7 %

Số lệnh rẽ nhánh: 1292, chiếm 9 %

Số lệnh thao tác bộ nhớ: 2219, chiếm 15 %

Số lệnh loại khác: 1440, chiếm 11 %

4.2 Tính thời gian

Thời gian CPU cho một chương trình bằng tổng số chu kỳ xung nhịp cần thiết để thực thi chương trình (CPU clock cycles) nhân với thời gian một chu kỳ xung nhịp (Clock cycle time).

$$CPU_{time} = CPU_{clock\ cycles} \times Clock\ cycle\ time = \frac{CPU_{clock\ cycles}}{Clock\ frequency} \quad (1)$$

Tính toán hiệu suất thông qua thời gian thực thi CPU không đề cập đến số lượng lệnh của chương trình. Tuy nhiên một chương trình khi được biên dịch sẽ bao gồm những lệnh và những lệnh này sẽ được máy thực thi. Do đó, thời gian thực thi một chương trình phụ thuộc vào số lượng lệnh của chương trình. Thời gian thực thi chương trình là tích của thời gian thực thi trung bình một lệnh và tổng số lệnh của chương trình (Instruction count). Nếu thời gian thực thi được đo dựa vào số chu kỳ thì số chu kỳ cần thiết cho một chương trình được tính như sau:

$$CPU_{clock\ cycles} = Instruction\ count \times Clock\ cycles\ per\ instruction \quad (2)$$

Đại lượng số chu kỳ trên một lệnh (Clock cycles per instruction - CPI) là số lượng chu kỳ trung bình cần thiết để hoàn thành một lệnh. Do các lệnh khác nhau sẽ thực thi những công việc khác nhau nên thời gian để hoàn thành các lệnh cũng khác nhau. Do đó, CPI được tính bằng giá trị trung bình của tất cả các lệnh trong chương trình.

Từ đó, ta có công thức như sau:

$$CPU_{time} = CPU_{clock\ cycles} \times Clock\ cycle\ time \quad (3)$$

$$\Rightarrow CPU_{time} = Instruction\ count \times CPI \times Clock\ cycle\ time \quad (4)$$

$$\Rightarrow CPU_{time} = \frac{Instruction\ count \times CPI}{clock\ rate} \quad (5)$$

Vì tất cả các loại lệnh đều có CPI là 1, ta gộp chung tất cả loại lệnh vào một lần tính. Thay số vào công thức trên, ta được:

$$CPU_{time} = \frac{13572 \times 1}{2 \times 10^9} = 6.786 \times 10^{-6} \text{ s} = 6786 \text{ ns} \quad (6)$$

Vậy, thời gian thực thi chương trình ở máy tính MIPS có tần số 2GHz là: 6786 ns.

References

- [1] Phạm Quốc Cường, “Kiến trúc máy tính”, Nhà xuất bản Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, Năm 2019, ISBN: 978-604-73-6708-5.
- [2] Nguyễn Văn Hiếu, “Merge Sort – Sắp xếp trộn”, xem 10/12/2020, <https://nguyenvanhieu.vn/thuat-toan-sap-xep-merge-sort/>.
- [3] MIPS Technologies, Inc., “MIPS32™ Architecture For Programmers Volume II: The MIPS32™ Instruction Set”, California June 9, 2003.
- [4] MIPS Technologies, Inc., “MIPS® Architecture for Programmers Volume II-A: The MIPS32® Instruction Set Manual”, December 15, 2016.
- [5] Wikibooks, “MIPS Assembly”, xem 10/12/2020, https://en.wikibooks.org/wiki/MIPS_Assembly.