Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Факультет вычислительной математики и кибернетики
Кафедра алгоритмических языков

Оуян Лэйло

Разработка компонентов электронного задачника по параллельному программированию в системе Unix

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., доцент
М. Э. Абрамян

Москва, 2023

Аннотация

Разработка компонентов электронного задачника
по параллельному программированию в системе Unix

Оуян Лэйло

В роботе описываются дополнительные компоненты электронного задачника Unix Taskbook [1], позволяющие адаптировать для него набор учебных заданий по параллельному программированию на базе технологии MPI-2, ранее реализованный в электронном задачнике Programming Taskbook for MPI-2 [2].

В ходе адаптации создана базовая динамическая библиотека, содержащая алгоритмы генерации всех учебных заданий по параллельному программированию, ранее разработанные для задачника Programming Taskbook. Кроме того, подготовлен специальный модуль, подключаемый к параллельному приложению и позволяющий каждому процессу считывать исходные данные, подготовленные задачником, и пересылать результаты на проверку.

Для каждой группы учебных заданий разработана динамическая библиотека, которая загружается из ядра задачника Unix Taskbook, использует базовую динамическую библиотеку для генерации всех необходимых данных, связанных с выполняемым заданием, управляет компиляцией и запуском учебной программы в параллельном режиме и обеспечивает проверку правильности полученных результатов.

Содержание

1 Введение

Традиционным способом создания практических заданий в области IT-дисциплин является разработка программ, связанных с изучаемыми технологиями, библиотеками и алгоритмами. Использование специализированных программных средств - электронных задачников [3] может значительно упростить и ускорить процесс решения и проверки задач как студентами, так и преподавателями.

Примером электронного задачника по программированию является Programming Taskbook. Хотя уже существуют группы задач по параллельному программированию в задачнике Programming Taskbook, в настоящее время он работает только на системах Windows. Поэтому, чтобы создать версию, которая будет работать под Unix-системами, была создана unixTaskbook [1]. Разработка unixTaskbook основана на принципы, лежащие в основе архитектуры задачника Programming Taskbook [4]. Затем поверх unixTaskbook можно легко перенести группы задач из задачника Programming Taskbook.

Задачник Unix Taskbook реализован на языке C++ для Unix и включает ядро, обеспечивающее его основную функциональность, и набор интерфейсов, которые позволяют нам легко расширить целевую группу Unix Taskbook.Эта диссертация использует этот набор интерфейсов для расширения динамической библиотеки групп задач по параллельной программированию для Unix Taskbook.

В дополнение к этим динамическим библиотекам, также был разработан специальный модуль, подключаемый к параллельному приложению и позволяющий каждому процессу считывать исходные данные, подготовленные задачником, и пересылать результаты на проверку. Прежде всего работа дается подробное описание особенностей архитектур задачников Programming Taskbook и Unix Taskbook. Во-вторых посвящен дополнительный модуль ut1.cpp, подключаемый к учебной программе. И потом, описывает реализацию набора динамических библиотек, подключаемых к задачнику Unix Taskbook. Наконец, показано практическое применение данного набора динамических библиотек.

2 Постановка задачи

Разработайте динамические библиотеки для пяти групп задач параллельного программирования и сделайте их загружаемыми в Unix Taskbook.

Для этого:

- Изучить архитектуру электронного задачника по программированию Programming Taskbook и Unix Taskbook;
- Разработка набора инструментов, обеспечивающих удобный интерфейс к динамической библиотеке каждой группы задач, позволяет динамической библиотеке управлять генерацией данных задачи, печатью информации о задаче, проверкой результатов выполнения задачи и другими функциями;
- Разработка специального модуля, подключаемого к параллельному приложению и позволяющий каждому процессу считывать исходные данные, подготовленные задачником, и пересылать результаты на проверку;
- Изучить, как запускать и компилировать программы MPI;
- Разработка пяти динамических библиотек для групп задач параллельного программирования на основе соответствующих характеристик задач MPI;

3 Особенности архитектур задачников Programming Taskbook и Unix Taskbook

Электронный задачник по программированию Unix Taskbook, разработанный Ли Шэнюем в рамках выполнения выпускной работы в 2022 году, использует ту же архитектуру, что и задачник Programming Taskbook. Она основана на применении динамических библиотек и позволяет расширять набор заданий без перекомпиляции ядра задачника. Каждая группа заданий реализуется в виде отдельной динамической библиотеки со стандартным набором функций, которые вызываются из ядра на различных этапах выполнения задания (основными этапами является этап инициализации, при котором генерируются исходные данные, передаваемые учебной программе, и этап итоговой проверки, на котором результаты, полученные программой, сравниваются с контрольными данными). Кроме того, в динамической библиотеке можно определить способ отображения на экране всей информации, связанной с заданием. Подобная расширяемая архитектура дает возможность разрабатывать задачи самого разного содержания, в том числе связанные с обработкой файлов и каталогов (которые автоматически создаются при инициализации задания) и с многопоточным программированием, что было также продемонстрировано в выпускной работе. Близость архитектур задачников Unix Taskbook и Programming Taskbook и их гибкость дает основания предполагать, что перенос уже имеющихся групп задач из задачника Programming Taskbook в задачник Unix Taskbook окажется не слишком сложным. Все задачи, входящие в задачник Programming Taskbook, подготовлены на основе конструктора учебных заданий TaskMaker, содержащего набор функций для генерации формулировок заданий, исходных и контрольных данных, настройки их отображения на экране, задания дополнительных свойств конкретной задачи (например, количества необходимых тестовых испытаний учебной программы). Конструктор TaskMaker реализован для нескольких языков (Pascal, C++, C#, PascalABC.NET), однако базовый набор из 1100 задач реализован на языке Pascal в среде Delphi (в которой было первоначально реализовано и ядро задачника Programming Taskbook). В то же время, задачник Unix Taskbook реализован на языке C++; именно это позволяет легко адаптировать его к различным операционным системам на базе Unix. Поэтому необходимо разработать механизм, который дал возможность переносить задания из базового набора (а также расширений) задачника

Programming Taskbook в задачник Unix Taskbook без переписывания кода, связанного с генерацией заданий.

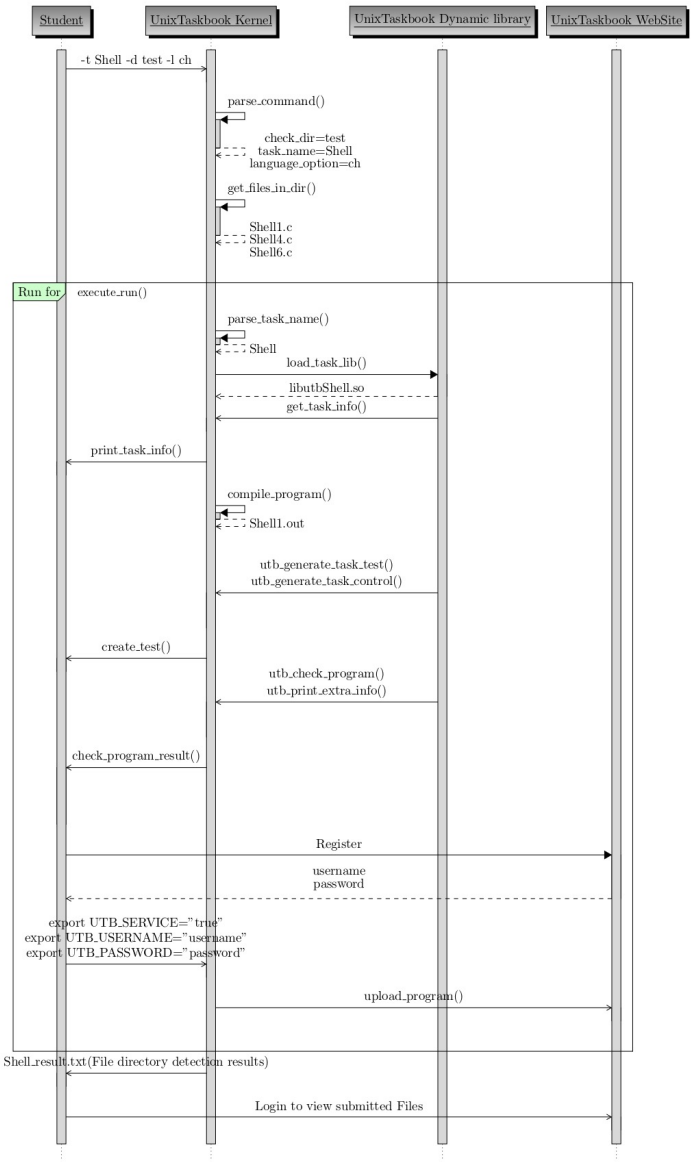


Рис. 1: архитектур Unix Taskbook [5]

4 Дополнительный модуль ut1.cpp, подключаемый к учебной программе

4.1 Схема использования данных, связанных с заданием, в учебной программе: дополнительный модуль ut1.cpp

Таким образом, при использовании описанной схемы выполнения заданий, импортированных из задачника Programming Taskbook, задачник Unix Taskbook должен выполнять следующую последовательность действий:

На следующем этапе реализации проекта переноса базового набора заданий задачника Programming Taskbook в задачник Unix Taskbook было необходимо разработать схему использования данных, подготовленных при инициализации задания, в учебной программе, выполняющей это задание. Задачник Programming Taskbook содержит встроенные средства для ввода исходных данных и вывода результатов; эти средства импортируются из ядра задачника и позволяют учебной программе получать исходные данные и передавать результаты задачнику на проверку. В задачнике Unix Taskbook подобных встроенных средств нет; это, в частности, означает, что при его использовании нет необходимости в подключении особых модулей к учебной программе. Например, можно реализовать группу заданий, в которой все исходные данные передаются в виде параметров командной строки, а результаты сохраняются в некотором файле. В этом случае учебная программа может разрабатываться как независимое приложение, которое можно запускать отдельно от задачника Unix Taskbook, явно указывая необходимые параметры командной строки и анализируя файлы, полученные в результате выполнения программы. Однако при ее запуске под управлением задачника появляются дополнительные возможности: задачник сам формирует набор параметров и сам проверяет правильность полученных файлов. Такая схема была использована при разработке групп заданий, связанных с различными темами курса по операционным системам. Аналогичную схему можно реализовать и для заданий, перенесенных из задачника Programming Taskbook. Однако при этом всё же требуется подключать к учебной программе дополнительный набор функций, которые позволяют при запуске программы под управлением задачника получать исходные, сгенерированные задачником, и передавать полученные результаты ему на проверку. Если же программа запуще-

на как отдельное приложение, то эти же функции позволяют ввести исходные данные с клавиатуры и вывести полученные результаты на экран. В набор дополнительных функций включены также функции отладочного вывода, которые упрощают вывод отладочных данных на экран как при запуске учебной программы под управлением задачника, так и при ее независимом запуске. Заметим, что данный набор функций оказывается особенно удобным для учебных программ, разрабатываемых на языке C, так как стандартные функции ввода-вывода в этом языке являются достаточно сложными. Признаком того, что учебная программа запущена под управлением задачника Unix Taskbook, является наличие в рабочем каталоге особого файла ut1inf.dat с основными характеристиками задания. При его наличии функции ввода получают информацию из еще одного дополнительного файла (одного или нескольких — в случае выполнения задания по параллельному программированию), а функции вывода и отладочного вывода выводят результаты не на экран, а в специальные файлы, которые в дальнейшем анализируются задачником. Кроме того, в особый файл также записывается информация об ошибках, которые можно обнаружить непосредственно при работе учебной программы (это ошибки, связанные с операциями ввода: ввод недостаточного или избыточного числа исходных данных или попытка ввода данных неверного типа). Заметим, что при обнаружении какой-либо ошибки учебная программа немедленно завершается. Окончательная проверка правильности решения выполняется задачником на заключительном этапе, когда анализируются полученные результаты, проверяется их количество, тип и соответствие контрольным значениям. В текущей реализации дополнительный файл ut1.h включает набор функций, позволяющий выполнять ввод, вывод и отладочный вывод на языках C и C++:

```
1  #include <stdlib.h>
2  #include <stdio.h>
3  #include <string.h>
4  #include <stdbool.h>
5
6  void ShowB(bool b);
7  void ShowN(int n);
8  void ShowD(double d);
9  void ShowC(char c);
10 void ShowS(const char *s);
11
12 void Show(const char *cmt);
```

```
13 void ShowW(const wchar_t *cmt);
14
15 void ShowLineB(bool b);
16 void ShowLineN(int n);
17 void ShowLineD(double d);
18 void ShowLineC(char c);
19 void ShowLineS(const char *s);
20
21 void ShowLine(const char *cmt);
22 void ShowLineW(const wchar_t *cmt);
23
24 void PutB(bool a);
25 void PutN(int a);
26 void PutD(double a);
27 void PutC(char a);
28 void PutS(const char *a);
29
30 void GetB(bool *a);
31 void GetN(int *a);
32 void GetD(double *a);
33 void GetC(char *a);
34 void GetS(char *a);
35
36 void SetPrecision(int n);
37 void SetWidth(int n);
```

Он соответствует набору, реализованному в задачнике Programming Taskbook версии 4.23 для языка C. На базе этого набора функций несложно реализовать более гибкий набор средств ввода-вывода для языка C++ (подобно тому, как это сделано в задачнике Programming Taskbook). Более того, поскольку исходный набор данных и другая исходная информация считывается из обычных текстовых файлов, а результаты и другие данные, связанные с выполнением задания (сообщения об ошибках и отладочные данные), также записываются в текстовые файлы, несложно разработать аналогичный набор функций и для других языков. В качестве иллюстрации того, как реализованы функции, описанные в файле ut1.h, приведем текст вспомогательной функции put_, используемой во всех функциях вывода, и пример ее использования в функции для вывода целых чисел PutN:

```
1 void put_(char id, double n, char c, const char *s)
2 {
3   if (psize == -1)
```

```
4       init_();
5     if (psize == 0)
6     {
7       switch (id)
8       {
9       case 'b':
10        ShowB((int)n);
11        break;
12      case 'i':
13        ShowN((int)n);
14        break;
15      case 'r':
16        ShowD(n);
17        break;
18      case 'c':
19        ShowC(c);
20        break;
21      case 's':
22        ShowS(s);
23        break;
24      }
25    }
26    else
27    {
28      FILE *f = fopen(outdat, "a");
29      fprintf(f, "%c\n", id);
30      switch (id)
31      {
32      case 'b':
33        fprintf(f, "%d\n", (int)n);
34        break;
35      case 'i':
36        fprintf(f, "%d\n", (int)n);
37        break;
38      case 'r':
39        fprintf(f, "%0.14e\n", n);
40        break;
41      case 'c':
42        fprintf(f, "%c\n", c);
43        break;
44      case 's':
45        fprintf(f, "%s\n", s);
46        break;
47      }
48      fclose(f);
```

```
49    }
50  }
51
52  void PutN(int a)
53  {
54    put_('i', a, ' ', 0);
55  }
```

4.2 Порядок действий задачника Unix Taskbook при выполнении заданий, импортированных из задачника Programming Taskbook

1. определение группы задач и номера задачи в этой группе; эта информация передается в качестве параметра командной строки при запуске задачника Unix Taskbook;

2. компиляция учебной программы (если в ходе компиляции были обнаружены ошибки, то вывод соответствующего сообщения и немедленное завершение работы);

3. загрузка динамической библиотеки, связанной с указанной группой заданий и передача ей управления;

4. вызов из данной динамической библиотеки функций initgroup и inittask базовой динамической библиотеки, перенесенной из задачника Programming Taskbook (см. выше ее описание); в результате этого вызова на диске будет создан файл $$pt4dat$$.dat; анализ этого файла; в частности, определение количество требуемых тестовых запусков;

5. считывание данных из файла $$pt4dat$$.dat и генерация на их основе дополнительных файлов, которые будут использоваться при выполнении учебной программы; после этого файл $$pt4dat$$.dat желательно удалить;

6. запуск откомпилированной учебной программы и ожидание ее завершения;

7. анализ файлов, созданных при работе учебной программы, проверка правильности решения и отображение всей информации, связанной с решением, на экране;

8. при успешном прохождении текущего теста повторный вызов функции inittask для того же задания с целью генерации очередного набора тестовых данных и повторное выполнение шагов 5–8, пока не будут успешно пройдены все требуемые тесты или пока не будет обнаружена ошибка в решении.

5 Реализация набора динамических библиотек, подключаемых к задачнику Unix Taskbook

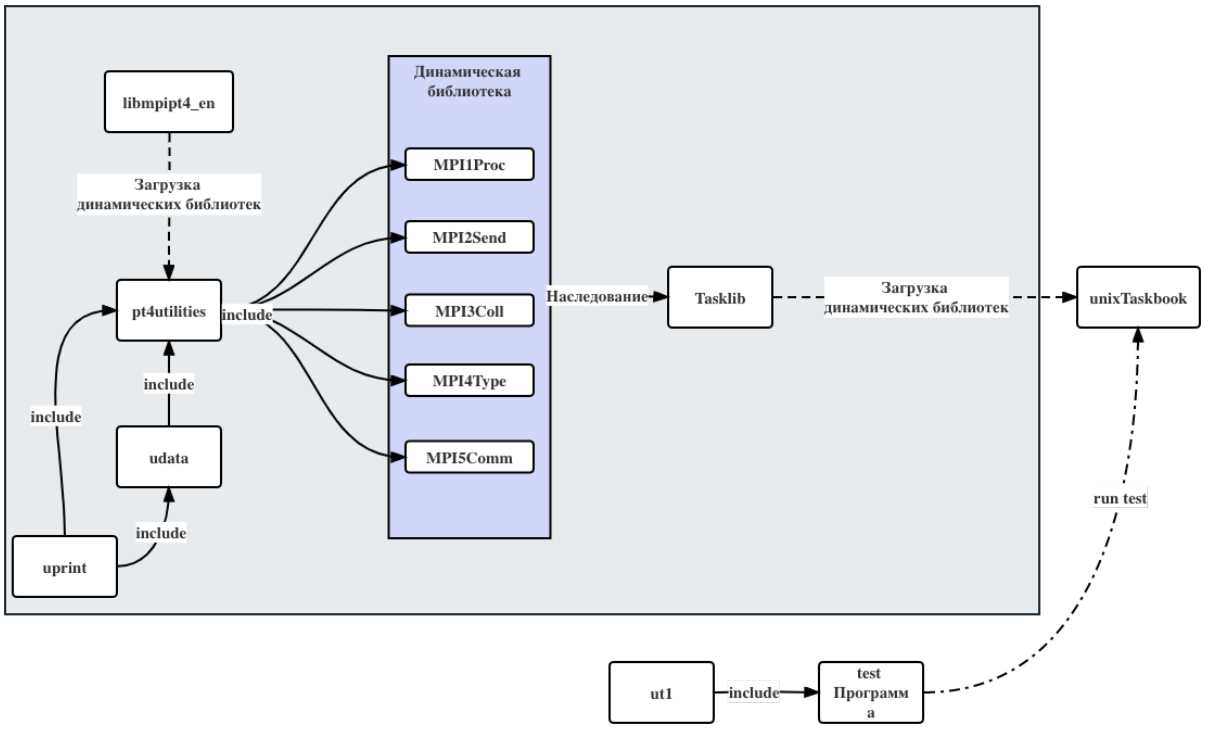


Рис. 2: Отношения между динамическими библиотеками и компонентами.

5.1 Проектные решения для динамических библиотек

Учитывая различия между разными группами задач, например, они могут иметь разные методы компиляции, параметры компиляции, количество задач и т.д., для совместимости с разными группами задач нам необходимо разработать интерфейс для регулирования различных реализаций динамических библиотек. То есть, все эти динамические библиотеки будут реализовывать этот интерфейс, поэтому все динамические библиотеки будут иметь некоторые общие поля или методы, но эти поля и методы могут иметь различные значения или реализации.

5.1.1 Интерфейс TaskLib

```
#ifndef TASKLIB_HPP
#define TASKLIB_HPP

#include "header.hpp"

class TaskLib
{
protected:
    std::vector<std::string> task_text_russian;
    std::vector<std::string> task_text_chinese;
    std::vector<std::string> task_text_english;

    std::vector<std::string> compile_argv;

    std::vector<std::string> execute_argv;

    std::vector<std::string> test_files;
    std::string control_file = "_control.tst";
    std::string result_file;

    std::string compiler;

    std::string library_name;

    int task_count;
    int output = 1;
    int f_control;
    int total_test_count;

public:
    bool print_file = true;
    bool print_task_info = false;
    // Public real function
    // Implemented by tasklib itself
    TaskLib() {}
    int get_task_count() const;
    std::vector<std::string> get_execute_argv() const;
    std::string get_task_info(int task_num, int
        language_option) const;
    // The virtual function (interface)
    // Implemented by each tasklib itself
```

```
41      virtual void utb_print_task_info(int task_num, int
            language_option) {}
42      virtual void utb_generate_task_test(int task_num, int
            test_num) = 0;
43      virtual void utb_generate_task_control(int task_num) = 0;
44      virtual void utb_print_extra_info(int task_num) = 0;
45      virtual int utb_check_program(int test_num) const = 0;
46      virtual ~TaskLib() {}
47
48      // friend class
49      friend class UnixTaskbook;
50  };
51
52  // the types of the class factories
53  typedef TaskLib *create_t();
54  typedef void destroy_t(TaskLib *);
55
56  #endif
```

Данный заголовочный файл TaskLib.hpp содержит объявление класса TaskLib, который является базовым классом для библиотек задач. Класс TaskLib содержит ряд защищенных полей, таких как векторы для хранения тестов, аргументов компиляции и исполнения программы, а также строк для имени файла управления и результата. Также есть строка для хранения имени компилятора и счетчики задач и тестов.

Класс TaskLib определяет несколько чисто виртуальных функций, которые должны быть реализованы в производных классах библиотек задач. Эти функции позволяют выводить информацию о задаче на разных языках, генерировать тесты и файлы управления, проверять ответы программы на тестах и выводить дополнительную информацию о задаче.

Таким образом, класс TaskLib является основой для создания библиотек разных задач на программирования и предоставляет удобный интерфейс для работы с задачами.

Класс TaskLib содержит защищенные поля:

- **std::vectorstd::string task_text_russian** - вектор строк, содержащий текст задач на русском языке;
- **std::vectorstd::string task_text_chinese** - вектор строк, содержащий текст задач на китайском языке;

- **std::vectorstd::string task_text_english** - вектор строк, содержащий текст задач на английском языке;
- **std::vectorstd::string compile_argv** - вектор строк, содержащий аргументы компиляции программы;
- **std::vectorstd::string execute_argv** - вектор строк, содержащий аргументы исполнения программы;
- **std::vectorstd::string test_files** - вектор строк, содержащий имена файлов с тестами;
- **std::string control_file** - строка, содержащая имя файла управления;
- **std::string result_file** - строка, содержащая имя файла с результатами;
- **std::string compiler** - строка, содержащая имя компилятора;
- **std::string library_name** - строка, содержащая имя библиотеки задач;
- **int task_count** - целое число, содержащее количество задач в библиотеке;
- **int output** - целое число, определяющее формат вывода результатов;
- **int f_control** - целое число, определяющее формат файла управления;
- **int total_test_count** - целое число, содержащее общее количество тестов для всех задач в библиотеке.

Класс TaskLib определяет несколько методов:

- **TaskLib()** - конструктор класса;
- **int get_task_count() const** - метод, возвращающий количество задач в библиотеке;
- **std::vectorstd::string get_execute_argv() const** - метод, возвращающий вектор аргументов исполнения программы;
- **std::string get_task_info(int task_num, int language_option) const** - метод, возвращающий текст задачи на определенном языке;

- **virtual void utb_print_task_info(int task_num, int language_option)** - чисто виртуальный метод, выводящий информацию о задаче на определенном языке;
- **virtual void utb_generate_task_test(int task_num, int test_num) = 0** - чисто виртуальный метод, генерирующий тест для задачи;
- **virtual void utb_generate_task_control(int task_num) = 0** - чисто виртуальный метод, генерирующий файл управления для задачи;
- **virtual void utb_print_extra_info(int task_num) = 0** - чисто виртуальный метод, выводящий дополнительную информацию о задаче;
- **virtual int utb_check_program(int test_num) const = 0** - Чисто виртуальный метод для проверки правильности результата выполнения задачи программирования;
- **virtual ~TaskLib()** - виртуальный деструктор, который должен быть реализован в подклассах;

Этот файл также определяет два типа фабрик классов: create_t и destroy_t, которые используются для создания и уничтожения экземпляров TaskLib.

Наконец, также объявляет класс UnixTaskbook как друга, что означает, что он имеет доступ к защищенным членам этого класса. Вероятно, это сделано для того, чтобы класс UnixTaskbook мог управлять задачами, реализованными в классе TaskLib, и использовать его функциональность в своих собственных целях. Фактически, Unix Taskbook, как ядро, используется для управления всем процессом, включая создание и управление тестовыми сценариями, которые проверяют реализацию задач в TaskLib.

```
1 #include "tasklib.hpp"
2
3 int TaskLib::get_task_count() const
4 {
5     return task_count;
6 }
7 std::vector<std::string> TaskLib::get_execute_argv() const
8 {
9     return execute_argv;
```

```
10 }
11
12 std::string TaskLib::get_task_info(int task_num, int
       language_option) const
13 {
14     switch (language_option)
15     {
16     case 0:
17         return task_text_russian[task_num - 1];
18     case 1:
19         return task_text_chinese[task_num - 1];
20     case 2:
21         return task_text_english[task_num - 1];
22     default:
23         return task_text_russian[task_num - 1];
24     }
25 }
```

Класс TaskLib реализует несколько методов, которые позволяют получить информацию о задачах и их количестве.

Метод "get_task_count"возвращает количество задач в объекте TaskLib.

Метод "get_execute_argv"возвращает вектор строк, содержащих аргументы командной строки для компиляции и запуска программы.

Метод "get_task_info"возвращает строку с текстом задачи на заданном языке. Номер задачи и язык задаются в аргументах метода. Если заданный язык не поддерживается, метод вернет текст задачи на русском языке.

Все методы класса TaskLib объявлены как константные, что означает, что они не изменяют состояние объекта TaskLib.

Защищенные члены класса TaskLib могут быть использованы только внутри класса или его наследников, а публичные методы могут быть вызваны извне.

Методы класса TaskLib являются важными для управления задачами в рамках Unix Taskbook.

5.1.2 Особенности динамической библиотеки параллельного программирования MPI

- MPICH является высокопроизводительной и широко переносимой реализацией стандарта MPI, который представляет собой интерфейс передачи сообщений для

распределенных приложений, использующих параллельные вычисления. MPICH и его производные формируют самые широко используемые реализации MPI в мире.

MPICH поддерживает последнюю версию стандарта MPI-2 и может быть установлен и запущен на платформах Windows и UNIX. MPICH предоставляет компоненты, среды выполнения и инструменты, необходимые для компиляции и запуска программ MPI [6] [7]. MPICH также обладает рядом преимуществ, таких как оптимизация коллективных операций связи [8], эффективная поддержка многопоточной связи MPI и совместимость с другими реализациями MPI.

- mpicc является оберткой над базовым компилятором C, которая автоматически добавляет необходимые опции компилятора и линковщика для MPI-программ. Использование mpicc упрощает компиляцию и сборку MPI-программ, без необходимости указывать расположение заголовочных и библиотечных файлов MPI [9] [10]. mpicc является инструментом, предоставляемым реализацией MPI (например, MPICH или Open MPI), который может адаптироваться к различным реализациям MPI и платформам [11] [12].

Для большинства задач в группе задач по программированию мы просто компилируем тестируемый файл с помощью gcc/g++ для создания исполняемого файла <имя_файла>.out и затем выполняем его с помощью . /<имя_файла>.out, чтобы выполнить его непосредственно из командной строки.

Но в группах параллельных программ мы необходимо использовать MPICH для выполнения параллельных вычислительных задач.

В этом случае, если мы используем gcc для компиляции тестового файла, нам придется вручную добавлять опции компилятора и компоновщика, связанные с MPI, что, конечно, обременительно, поэтому для классов, относящихся к группе задач параллельного программирования, нам нужно наследовать класс TaskLib и установить поле **compiler** в "mpicc".

Для компиляции файла на языке C с помощью mpicc необходимо указать следующие параметры:

- <имя_файла>.c - задает имя или путь исходного файла на языке C;

- -o <имя_файла> - задает имя или путь исполняемого файла, который будет создан при компиляции;
- -c - задает режим компиляции без сборки;

Например, следующая команда компилирует файл MPI1Proc7.c и создает исполняемый файл MPI1Proc7.out:

mpicc MPI1Proc7.c -o MPI1Proc7.out

При тестировании задачи в группах параллельных программ мы используем утилиту mpiexec для запуска программы. mpiexec является универсальной утилитой для запуска MPI-приложений, которая поддерживает различные реализации MPI и различные среды выполнения [13].

Для запуска MPI-приложения с помощью mpiexec необходимо указать следующие параметры:

- -np <число> - задает количество MPI-процессов для запуска;
- -f <имя_файла> ;

Например, следующая команда запускает MPI1Proc7.out на 8 MPI-процессах:

mpiexec -np 8 ./MPI1Proc7.out

Таким образом, чтобы реализовать динамическую библиотеку для групп задач параллельного программирования, мы должны наследовать TaskLib и указать поле **executor** как "mpiexec".

5.2 Реализованные динамические библиотеки

Для реализации динамической библиотеки для групп задач параллельного программирования необходимо написать файлы классов, соответствующие каждой группе задач, и эти классы, являющиеся подклассами класса TaskLib, реализуют интерфейсы, объявленные классом TaskLib.

В дополнение к этому, поскольку мы подключаем существующую группу задач из задачника Programming Taskbook в Unix Taskbook, нам также необходимо реализовать инструментальную библиотеку, pt4utilities, для подключения к существующей группе

задач, так что динамическая библиотека, которую мы реализуем, фактически действует как промежуточное программное обеспечение, передавая управление генерацией информации о задаче, представлением информации о задаче и проверкой файла результатов существующей группе задач.

Далее мы опишем интерфейсы, предоставляемые pt4utilities для динамических библиотек.

```
#ifndef PT4UTILITIES_HPP
#define PT4UTILITIES_HPP
#include <string>

typedef void __attribute__((stdcall)) (*TInitGroup)(const char *);
typedef void __attribute__((stdcall)) (*TInitTask)(int, int);

void pt4_print_task_info(std::string task_group, int task_num, int language_option);
void pt4_generate_task_test(std::string task_group, int task_num, int test_num);
void pt4_print_extra_info(std::string task_group, int task_num);
int pt4_check_program(std::string task_group, int test_num);
int pt4_mpi_get_size();

#endif
```

pt4utilities содержит объявления для всех функций, необходимых для работы с группами задач в задачнике Programming Taskbook.

- **void pt4_print_task_info(std::string task_group, int task_num, int language_option)** - выводит информацию о задаче, включая ее название, описание и примеры входных и выходных данных;
- **void pt4_generate_task_test(std::string task_group, int task_num, int test_num)** - генерирует тестовые данные для задачи;
- **void pt4_print_extra_info(std::string task_group, int task_num)** - выводит информацию о результатах выполнения текущего задания;
- **int pt4_check_program(std::string task_group, int test_num)** - проверяет программу на соответствие ожидаемому результату для заданного теста;

- **int pt4_mpi_get_size()** - Возвращает количество процессов, необходимых для выполнения текущего тестового задания;

Вышеуказанные функции будут доступны для всех динамических библиотек, которым необходим доступ к уже существующим группам задач задачника Programming Taskbook, чтобы обеспечить управление этими группами задач.

Имея pt4utilities в качестве необходимого условия, мы можем приступить к разработке динамических библиотек.

5.2.1 MPI1Proc

```
1  #include "tasklib.hpp"
2  #include "pt4utilities.hpp"
3
4  class utbMPI1Proc : public TaskLib
5  {
6  private:
7      std::string task_group;
8
9  public:
10     utbMPI1Proc();
11     virtual ~utbMPI1Proc() {}
12
13     virtual void utb_print_task_info(int task_num, int
           language_option)
14     {
15         pt4_print_task_info(task_group, task_num,
               language_option);
16     }
17
18     virtual void utb_generate_task_test(int task_num, int
           test_num)
19     {
20         pt4_generate_task_test(task_group, task_num, test_num)
               ;
21     }
22
23     virtual void utb_generate_task_control(int task_num) {}
24
25     virtual void utb_print_extra_info(int task_num)
26     {
27         pt4_print_extra_info(task_group, task_num);
```

```
28      }
29
30      virtual int utb_check_program(int test_num) const
31      {
32          return pt4_check_program(task_group, test_num);
33      }
34
35      // friend class
36      friend class UnixTaskbook;
37  };
38
39  extern "C" TaskLib *create()
40  {
41      return new utbMPI1Proc;
42  }
43
44  extern "C" void destroy(TaskLib *t)
45  {
46      delete t;
47  }
48
49  utbMPI1Proc::utbMPI1Proc()
50  {
51  #if defined __linux__
52      library_name = "libutbMPI1Proc.so";
53  #elif defined __APPLE__
54      library_name = "libutbMPI1Proc.dylib";
55  #endif
56
57      compiler = "mpicc";
58      compile_argv = {compiler, "-Wall", "-w", "", "ut1.c", "-o"
           };
59
60      execute_argv = {"mpiexec", "-np", std::to_string(
           pt4_mpi_get_size())};
61
62      task_group = "MPI1Proc";
63      task_count = 10;
64      total_test_count = 3;
65
66      print_file = false;
67      print_task_info = true;
68  }
```

Задачи этой группы [14] по MPI предназначены для тестирования умений студентов

работать с параллельными вычислениями, а также для проверки их знаний по работе с входными и выходными данными в MPI. Кроме того, задачи требуют от студентов умения работать с функциями ввода-вывода и отладочными функциями в MPI.

В задачах используются различные функции MPI, такие как MPI_Comm_rank, MPI_Comm_size, MPI_Send и MPI_Recv. Задачи покрывают различные аспекты параллельных вычислений, такие как ввод и вывод данных, вычисления в зависимости от номера процесса и обмен данными между процессами.

Решение этих задач требует от студентов умения анализировать поставленную задачу и правильно применять соответствующие функции MPI. Это также требует от них умения работать с различными типами данных и умения разрабатывать эффективные алгоритмы для параллельных вычислений.

5.2.2 Другие динамические библиотеки о группах задач по параллельному программированию

Реализация нескольких других классов(MPI2Send, MPI3Coll, MPI4Type, MPI5Comm) динамической библиотеки похожа на реализацию MPI1Proc, основное отличие заключается в различии некоторых переменных-членов. Например, количество задач может быть разным для разных групп задач. Конечно, имена конструкторов и деструкторов также различны.

6 Функциональный и интерактивный интерфейс Unix Taskbook

6.1 Запуск задачника

6.1.1 Установка MPICH в системе unix

Ниже описаны шаги по установке MPICH на различных системах UNIX:

- Чтобы установить MPICH на Debian или Ubuntu:

```
1       sudo apt-get update
2       sudo apt-get install mpich
```

- Чтобы установить MPICH на Fedora или CentOS:

```
1       sudo dnf update
2       sudo dnf install mpich
```

- Чтобы установить MPICH на macOS:

```
1       brew update
2       brew install mpich
```

6.1.2 Компиляция динамических библиотек

Чтобы получить динамические библиотеки, которые могут быть загружены ядром, мы сначала должны скомпилировать файлы классов отдельных динамических библиотек, которые мы написали.

Но когда количество динамических библиотек растет, компилировать их по отдельности и вручную может быть хлопотно. Поэтому мы написали файл runlib.cmd для компиляции всех необходимых динамических библиотек в одном файле.

runlib.cmd

```
1  #!/bin/bash
```

```
2  if ! [ -d ./utblib ]; then mkdir ./utblib; fi
3  g++ -fPIC -std=c++17 -Wno-attributes src/utbDir.cpp src/
       utilities.cpp -shared -o ./utblib/libutbDir.so
4  g++ -fPIC -std=c++17 -Wno-attributes src/utbFile.cpp src/
       utilities.cpp -shared -o ./utblib/libutbFile.so
5  g++ -fPIC -std=c++17 -Wno-attributes src/utbText.cpp src/
       utilities.cpp -shared -o ./utblib/libutbText.so
6  g++ -fPIC -std=c++17 -Wno-attributes src/utbShell.cpp src/
       utilities.cpp -shared -o ./utblib/libutbShell.so
7  g++ -fPIC -std=c++17 -Wno-attributes src/utbBegin.cpp src/
       pt4utilities.cpp src/udata.cpp src/uprint.cpp -shared -o ./
       utblib/libutbBegin.so
8  g++ -fPIC -std=c++17 -Wno-attributes src/utbMPI1Proc.cpp src/
       pt4utilities.cpp src/udata.cpp src/uprint.cpp -shared -o ./
       utblib/libutbMPI1Proc.so
9  g++ -fPIC -std=c++17 -Wno-attributes src/utbMPI2Send.cpp src/
       pt4utilities.cpp src/udata.cpp src/uprint.cpp -shared -o ./
       utblib/libutbMPI2Send.so
10 g++ -fPIC -std=c++17 -Wno-attributes src/utbMPI3Coll.cpp src/
       pt4utilities.cpp src/udata.cpp src/uprint.cpp -shared -o ./
       utblib/libutbMPI3Coll.so
11 g++ -fPIC -std=c++17 -Wno-attributes src/utbMPI4Type.cpp src/
       pt4utilities.cpp src/udata.cpp src/uprint.cpp -shared -o ./
       utblib/libutbMPI4Type.so
12 g++ -fPIC -std=c++17 -Wno-attributes src/utbMPI5Comm.cpp src/
       pt4utilities.cpp src/udata.cpp src/uprint.cpp -shared -o ./
       utblib/libutbMPI5Comm.so
```

Перед компиляцией мы проверим, существует ли каталог utblib в каталоге текущего пользователя, если нет, то он будет создан автоматически, и все динамические библиотеки будут автоматически сохранены в этом каталоге после компиляции, чтобы мы могли легко управлять и находить динамические библиотеки в будущем.

Чтобы запустить cmd-файл, нам нужно убедиться, что все файлы классов динамической библиотеки находятся в том же каталоге, что и cmd-файл, а затем выполнить команду **./runlib.cmd**

6.1.3 Компиляция ядра

Следующим шагом будет компиляция для получения исполняемого файла unixTaskbook.

Из-за большого количества файлов и параметров компиляции, необходимых для

компиляции, мы написали файл run.cmd, чтобы упростить команду компиляции.

run.cmd

```
#!/bin/bash
g++ main.cpp unixTaskbook.cpp utilities.cpp tasklib.cpp error.
    cpp service.cpp -o unixTaskbook -ldl
```

Чтобы запустить cmd-файл, нам нужно убедиться, что все файлы классов динамической библиотеки находятся в том же каталоге, что и cmd-файл, а затем выполнить команду **./run.cmd**

6.1.4 Выполнение тестов

После компиляции всех необходимых файлов, чтобы начать использовать unixTaskbook, нам нужно написать тестовый файл, выбрать задачу, которую мы хотим выполнить, создать .c файл с именем задачи и передать имя файла в качестве параметра выполнения в файл runtest.cmd, и мы можем начать выполнение теста.

Например, мы хотим выполнить задачу 7 в группе задач MPI1Proc:
./runtest.cmd MPI1Proc7.c

runtest.cmd

```
#!/bin/bash
LD_LIBRARY_PATH=~/utblib
export LD_LIBRARY_PATH
../unixTaskbook -t $1
```

В файле runtest.cmd мы экспортируем переменную LD_LIBRARY_PATH, которая сообщает компилятору, где находятся все динамические библиотеки.

Во время выполнения написанные нами тестовые файлы компилируются, и если в процессе компиляции что-то пойдет не так, на экран будет выведено сообщение об ошибке 3.

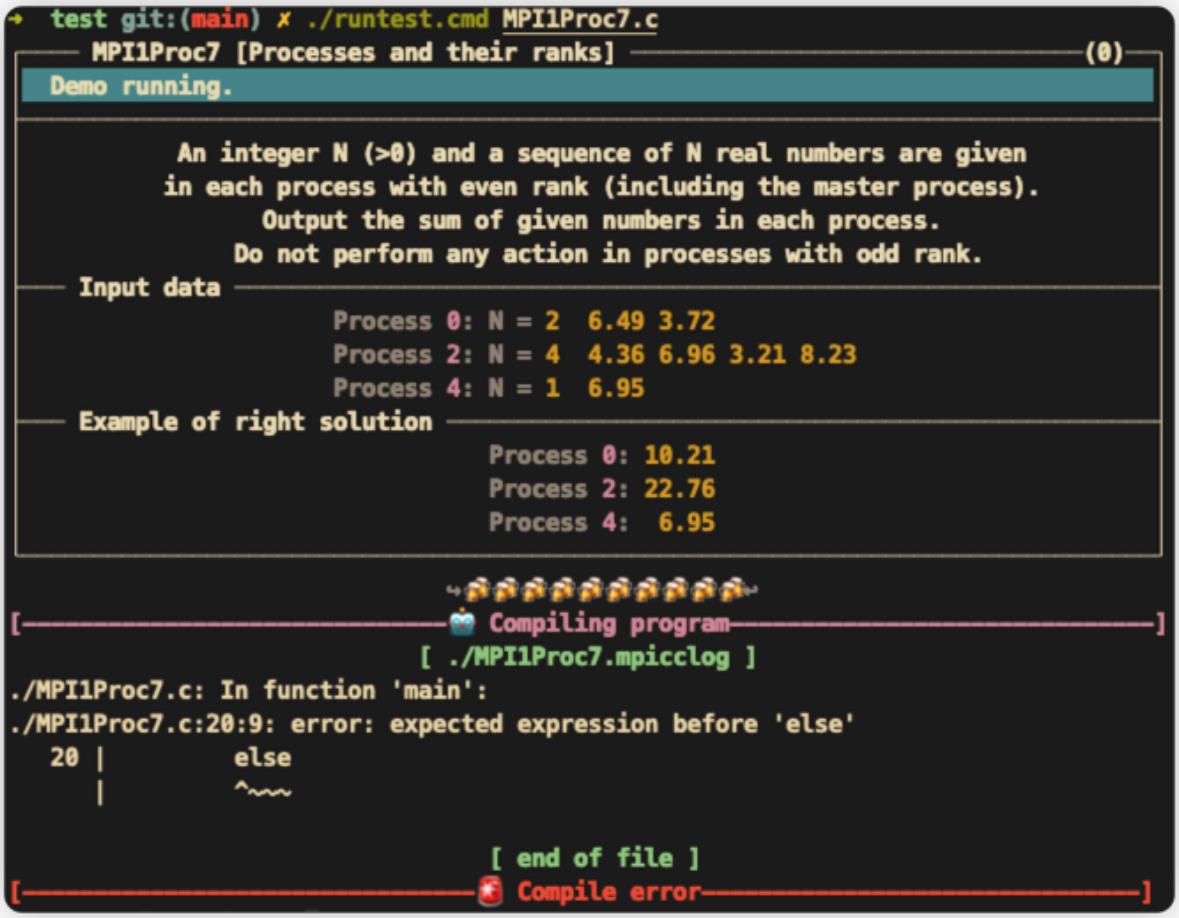
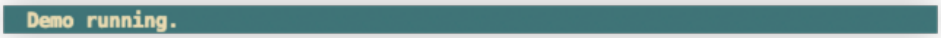
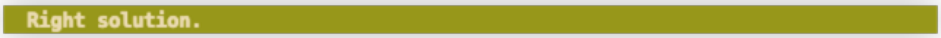


Рис. 3: Log info.

6.2 Примеры использования разработанных групп заданий



(a) demo running



(b) right solution

(c) wrong solution

(d) invalid data

(e) superfluous data

(f) lack of data

Рис. 4: Task info.

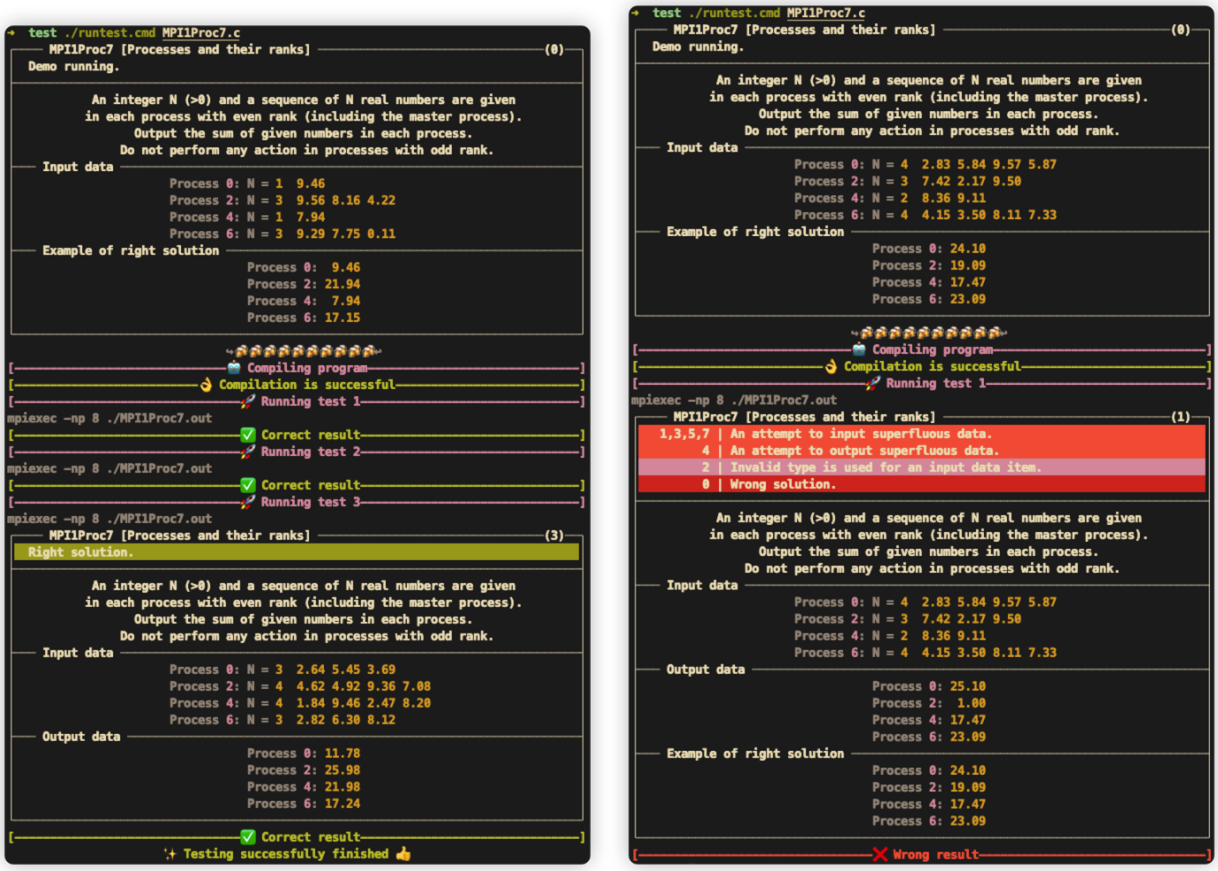
- Демонстрация задания выводится перед выполнением теста, его логотип - **Demo running** 4a;
- Если результаты всех процессов верны, на экране появляется **Right solution** 4b;
- Если выход процесса не соответствует правильному ответу, на экране появляется **Wrong solution** 4c, где число в начале обозначает номер процесса;

- Если процесс пытается ввести или вывести данные, которые не соответствуют запрошенному типу, на экране появляется сообщение **Invalid type is used for an input/output data item** 4d, где число в начале обозначает номер процесса;
- Если процесс пытается ввести или вывести лишние данные, на экране появляется **An attempt to input/output superfluous data** 4e, где число в начале обозначает номер процесса;
- Если данные в процессе не вводятся или не выводятся, на экране появляется **Data are not output/input** или **Some required data are not output/input**, где число в начале обозначает номер процесса;

Прежде чем приступить к написанию программы-задачи, мы можем выполнить **./runtest.cmd <имя_задачи>**, чтобы посмотреть информацию о задаче.

Рис. 5: info demo.

6.2.1 MPI1Proc7



(a) Правильно (b) Неисправность

Рис. 6: MPI1Proc.

```
1  #include "ut1.h"
2  int main()
3  {
4      MPI_Init(NULL, NULL);
5      int rank, size;
6      MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);
7      MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);
8      if (!(rank % 2)) {
9          int n;
10         double num;
11         double sum = 0;
12         GetN(&n);
```

```
13          for (int i = 0; i < n; ++i) {
14              GetD(&num);
15              sum += num;
16          }
17          PutD(sum);
18      }
19      MPI_Finalize();
20  }
```

Код выводит правильный ответ 6a.

```
1   #include "ut1.h"
2   int main()
3   {
4       MPI_Init(NULL, NULL);
5       int rank, size;
6       MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);
7       MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);
8       if (rank == 0) {
9           int n;
10          double num;
11          double sum = 0;
12          GetN(&n);
13          for (int i = 0; i < n; ++i) {
14              GetD(&num);
15              sum += num;
16          }
17          PutD(sum + 1);
18      }
19
20      if (rank == 1) {
21          int n;
22          double num;
23          double sum = 0;
24          GetN(&n);
25          for (int i = 0; i < n; ++i) {
26              sum += num;
27          }
28          PutD(sum);
29      }
30
31      if (rank == 2) {
32          int n;
33          int num;
34          double sum = 0;
```

```
35          GetN(&n);
36          for (int i = 0; i < n; ++i) {
37              GetN(&num);
38              sum += num;
39          }
40          PutD(sum + 1);
41      }
42
43      if (rank == 3) {
44          int n;
45          double num;
46          double sum = 0;
47          GetN(&n);
48          GetN(&n);
49          for (int i = 0; i < n; ++i) {
50              GetD(&num);
51              sum += num;
52          }
53          PutD(sum);
54      }
55
56      if (rank == 4) {
57          int n;
58          double num;
59          double sum = 0;
60          GetN(&n);
61          for (int i = 0; i < n; ++i) {
62              GetD(&num);
63              sum += num;
64          }
65          PutD(sum);
66          PutD(sum);
67      }
68
69      if (rank == 5) {
70          int n;
71          double num;
72          double sum = 0;
73          GetN(&n);
74          for (int i = 0; i < n; ++i) {
75              GetD(&num);
76              sum += num;
77          }
78          PutD(sum);
79      }
```

```
80
81      if (rank == 6) {
82          int n;
83          double num;
84          double sum = 0;
85          GetN(&n);
86          for (int i = 0; i < n; ++i) {
87              GetD(&num);
88              sum += num;
89          }
90          PutD(sum);
91      }
92
93      if (rank == 7) {
94          int n;
95          double num;
96          double sum = 0;
97          GetN(&n);
98          for (int i = 0; i < n; ++i) {
99              GetD(&num);
100             sum += num;
101         }
102         PutD(sum);
103     }
104
105
106     MPI_Finalize();
107 }
```

Мы намеренно создали ряд ошибок в различных процессах, в результате чего в конце было выведено несколько различных сообщений об ошибках 6b.

6.2.2 MPI2Send1

(a) Правильно (b) Неисправность

Рис. 7: MPI2Send.

```
1  #include "ut1.h"
2  int main()
3  {
4      MPI_Init(NULL, NULL);
5      int rank, size;
6      MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);
7      MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);
8      int n;
9
10     if (!rank) {
11         for (int i = 1; i < size; ++i) {
12             MPI_Recv(&n, 1, MPI_INT, i, 0, MPI_COMM_WORLD,
                   MPI_STATUS_IGNORE);
13             PutN(n);
14         }
```

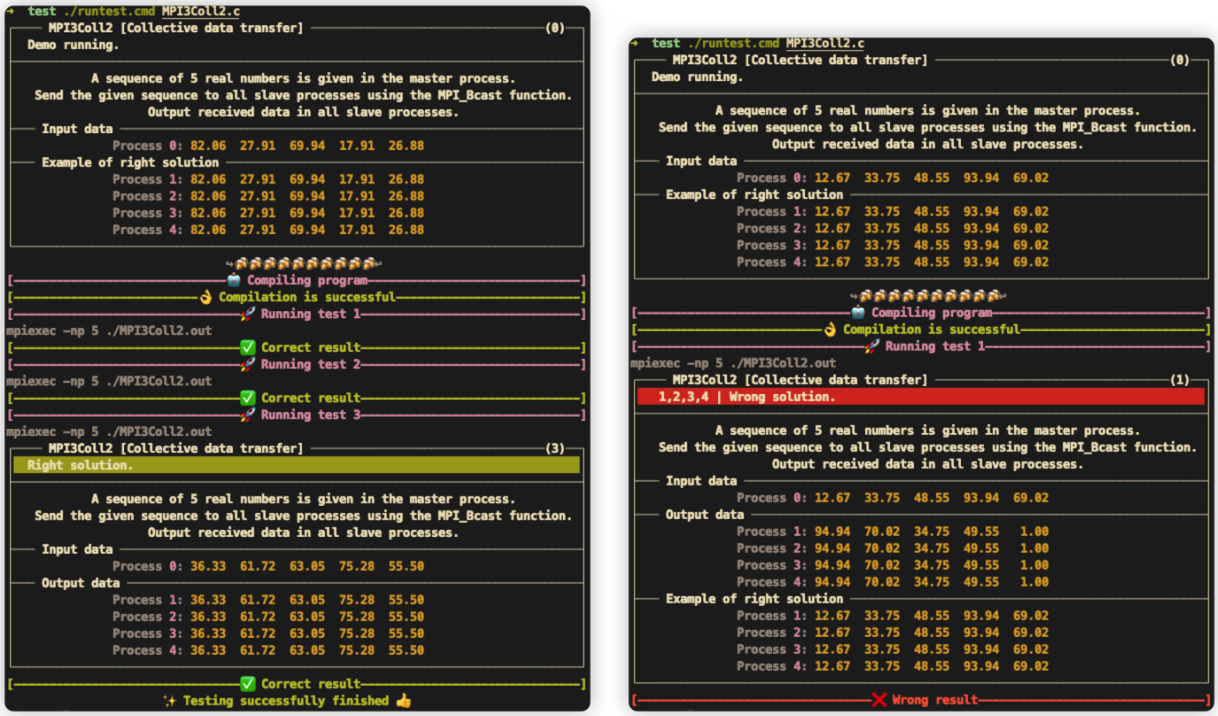
```
15      }
16      else {
17          GetN(&n);
18          MPI_Send(&n, 1, MPI_INT, 0, 0, MPI_COMM_WORLD);
19      }
20      MPI_Finalize();
21  }
```

Код выводит правильный ответ 7a.

```
1   #include "ut1.h"
2   int main()
3   {
4       MPI_Init(NULL, NULL);
5       int rank, size;
6       MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);
7       MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);
8       int n;
9
10      if (!rank) {
11          for (int i = 1; i < size; ++i) {
12              MPI_Recv(&n, 1, MPI_INT, i, 0, MPI_COMM_WORLD,
                    MPI_STATUS_IGNORE);
13              PutN(n + 1);
14          }
15      }
16      else {
17          GetN(&n);
18          MPI_Send(&n, 1, MPI_INT, 0, 0, MPI_COMM_WORLD);
19          if (rank == 1)
20              PutN(n);
21      }
22      MPI_Finalize();
23  }
```

Мы намеренно создали ряд ошибок в различных процессах, в результате чего в конце было выведено несколько различных сообщений об ошибках 7b.

6.2.3 MPI3Coll2



(a) Правильно (b) Неисправность

Рис. 8: MPI3Coll.

```
#include "ut1.h"
int main()
{
    MPI_Init(NULL, NULL);
    int rank, size;
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);
    double numbers[5];
    if (rank == 0)
        for (int i = 0; i < 5; ++i)
            GetD(&numbers[i]);
    MPI_Bcast(&numbers, 5, MPI_DOUBLE, rank, MPI_COMM_WORLD);
    if (rank != 0)
        for (int i = 0; i < 5; ++i)
            PutD(numbers[i]);

    MPI_Finalize();
```

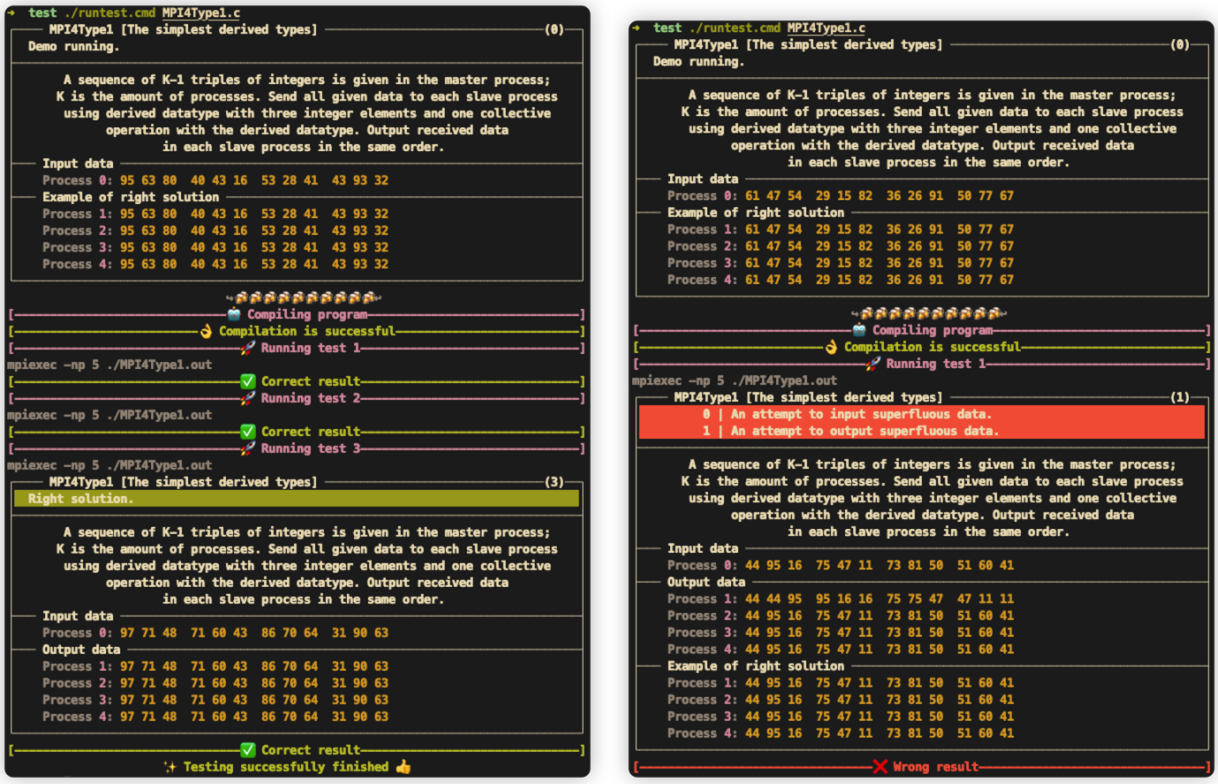
```
18 }
```

Код выводит правильный ответ 8a.

```
1  #include "ut1.h"
2  int main()
3  {
4      MPI_Init(NULL, NULL);
5      int rank, size;
6      MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);
7      MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);
8      double numbers[5];
9      if (rank == 0)
10         for (int i = 0; i < 5; ++i)
11             GetD(&numbers[(i+1)%4]);
12     MPI_Bcast(&numbers, 5, MPI_DOUBLE, rank, MPI_COMM_WORLD);
13     if (rank != 0)
14         for (int i = 0; i < 5; ++i)
15             PutD(numbers[i]+1);
16
17     MPI_Finalize();
18 }
```

Мы намеренно создали ряд ошибок в различных процессах, в результате чего в конце было выведено несколько различных сообщений об ошибках 8b.

6.2.4 MPI4Type1



(a) Правильно (b) Неисправность

Рис. 9: MPI4Type.

```c
#include "ut1.h"
int main()
{
    MPI_Init(NULL, NULL);
    int rank, size;
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);

    MPI_Datatype newtype;
    MPI_Type_contiguous(3, MPI_INT, &newtype);
    MPI_Type_commit(&newtype);

    int *numbers = (int*)malloc((size - 1) * 3 * sizeof(int));

```

```
15      if (rank == 0)
16          for (int i = 0; i < (size - 1) * 3; ++i)
17              GetN(&numbers[i]);
18
19      MPI_Bcast(numbers, size - 1, newtype, 0, MPI_COMM_WORLD);
20
21      if (rank != 0)
22          for (int i = 0; i < (size - 1) * 3; ++i)
23              PutN(numbers[i]);
24
25      MPI_Type_free(&newtype);
26      free(numbers);
27      numbers = NULL;
28      MPI_Finalize();
29  }
```

Код выводит правильный ответ 9a.

```
1   #include "ut1.h"
2   int main()
3   {
4       MPI_Init(NULL, NULL);
5       int rank, size;
6       MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);
7       MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);
8
9       MPI_Datatype newtype;
10      MPI_Type_contiguous(3, MPI_INT, &newtype);
11      MPI_Type_commit(&newtype);
12
13      int *numbers = (int*)malloc((size - 1) * 3 * sizeof(int));
14
15      if (rank == 0)
16          for (int i = 0; i < (size - 1) * 3 + 1; ++i)
17              GetN(&numbers[i]);
18
19      MPI_Bcast(numbers, size - 1, newtype, 0, MPI_COMM_WORLD);
20
21      if (rank != 0)
22          for (int i = 0; i < (size - 1) * 3; ++i)
23          {
24              PutN(numbers[i]);
25              if (rank == 1)
26                  PutN(numbers[i]);
27          }
```

```
28
29      MPI_Type_free(&newtype);
30      free(numbers);
31      numbers = NULL;
32      MPI_Finalize();
33  }
```

Мы намеренно создали ряд ошибок в различных процессах, в результате чего в конце было выведено несколько различных сообщений об ошибках 9b.

6.2.5 MPI5Comm4

(a) Правильно (b) Неисправность

Рис. 10: MPI5Comm.

```
1  #include "ut1.h"
2  int main()
```

```
{
    MPI_Init(NULL, NULL);
    int rank, size;
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);

    MPI_Group even;
    MPI_Comm even_comm;
    int color = rank % 2;
    MPI_Comm_split(MPI_COMM_WORLD, color, rank, &even_comm);

    if (rank % 2 == 0)
    {
        double nums[3];
        for (int i = 0; i < 3; ++i)
            GetD(&nums[i]);
        double result[3];
        MPI_Reduce(nums, result, 3, MPI_DOUBLE, MPI_MIN, 0,
           even_comm);
        if (rank == 0)
            for (int i = 0; i < 3; ++i)
                PutD(result[i]);
    }
    MPI_Finalize();
}
```

Код выводит правильный ответ 10a.

```
#include "ut1.h"
int main()
{
    MPI_Init(NULL, NULL);
    int rank, size;
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);

    MPI_Group even;
    MPI_Comm even_comm;
    int color = rank % 2;
    MPI_Comm_split(MPI_COMM_WORLD, color, rank, &even_comm);

    if (rank == 1)
    {
        double a;
        GetD(&a);
```

```
18      }
19      if (rank % 2 == 0)
20      {
21          double nums[3];
22          for (int i = 0; i < 3; ++i)
23              GetD(&nums[i]);
24          if (rank != 0)
25              PutD(nums[0]);
26          double result[3];
27          MPI_Reduce(nums, result, 3, MPI_DOUBLE, MPI_MIN, 0,
                even_comm);
28          if (rank == 0)
29              for (int i = 0; i < 3; ++i)
30                  PutD(result[i] + 1);
31      }
32      MPI_Finalize();
33  }
```

Мы намеренно создали ряд ошибок в различных процессах, в результате чего в конце было выведено несколько различных сообщений об ошибках 10b.

7 Заключение

В процессе выполнения поставленной задачи были разработаны следующие компоненты:

- Динамическая библиотека MPI1Proc;
- Динамическая библиотека MPI2Send;
- Динамическая библиотека MPI3Coll;
- Динамическая библиотека MPI4Type;
- Динамическая библиотека MPI5Comm;
- Модуль для работы с данными udata;
- Модуль для управления стилем вывода uprint;
- Промежуточный компонент pt4utilities, соединяющий динамическую библиотеку для параллельного программирования и группу задач по параллельному программированию задачника Programming Taskbook;

Ядро Unix Taskbook также было изменено, чтобы сделать его более совместимым с группами задач параллельного программирования и сделать интерфейс вывода более привлекательным.

Список литературы

[1] *Э., Абрамян М.* Электронный задачник по курсу «Операционные системы» / Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития. Материалы XXIX научной конференции / Абрамян М. Э., Ли Шэнюй. — Ростов н/Д, Таганрог: Изд-во ЮФУ. — P. 22–24.

[2] *Э, Абрамян М.* Электронный задачник по параллельному программированию на базе интерфейса MPI стандарта 2.0 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2017 / Абрамян М. Э // *Том.* — Vol. 13, no. 4. С. — P. 91–104.

[3] *Абрамян, М. Э.* Инструменты и методы разработки электронных образовательных ресурсов по компьютерным наукам: монография / М. Э. Абрамян. — Ростов н/Д, Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2018. — P. 260.

[4] *Абрамян, М. Э.* Об архитектуре универсального электронного задачника по программированию / М. Э. Абрамян // *Информатизация образования и науки.* — 2015. — no. 3 (27). — P. 134–150.

[5] *Э., Абрамян М.* Электронный задачник по курсу «Операционные системы» / Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития. Материалы XXIX научной конференции / Абрамян М. Э., Ли Шэнюй. — Ростов н/Д, Таганрог: Изд-во ЮФУ. — P. 9–11.

[6] *Gropp, William.* Using MPI-2: advanced features of the message-passing interface / William Gropp, Ewing Lusk, Rajeev Thakur. — MIT press, 1999.

[7] *Balaji, Pavan.* Mpi on millions of cores / Pavan Balaji, Darius Buntinas, David Goodell, William Gropp, Torsten Hoefler, Sameer Kumar, Ewing Lusk, Guillaume Mercier, Ken Raffenetti, Rajeev Thakur // *Parallel Processing Letters.* — 2009. — Vol. 19, no. 01. — Pp. 45–60.

[8] *Thakur, Rajeev.* Optimization of collective communication operations in MPICH / Rajeev Thakur, Rolf Rabenseifner, William Gropp // *The International Journal of High Performance Computing Applications.* — 2005. — Vol. 19, no. 1. — Pp. 49–66.

[9] *Gropp, William.* Using MPI: portable parallel programming with the message-passing interface / William Gropp, Ewing Lusk, Rajeev Thakur. — MIT press, 2006.

[10] *user1260391.* How to compile MPI with gcc? - Stack Overflow / user1260391 et al. — `https://stackoverflow.com/questions/11312719/how-to-compile-mpi-with-gcc`. — 2012.

[11] Open MPI Project. — mpicc(1) man page (version 3.0.6) - Open MPI, 2020.

[12] *Computing, USC Research.* Open MPI Tutorial - GitHub Pages. — `https://usc-rc.github.io/tutorials/open-mpi`.

[13] *Gropp, William.* Using MPI: portable parallel programming with the message-passing interface / William Gropp, Ewing Lusk, Rajeev Thakur. — MIT press, 2006.

[14] *Э, Абрамян М.* Programming Taskbook - MPI1Proc. — `https://ptaskbook.com/en/ptformpi2/mpi1proc.php`.