Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт компьютерных наук и кибербезопасности

**Высшая школа кибербезопасности**

**КУРСОВАЯ РАБОТА**

**Моделирование решения Кубика Рубика 3x3**

по дисциплине «Структуры данных»

Выполнили

студенты гр. 5151003/30002 Д. А. Плотников

И. А. Штарев

Руководитель

асс. преподавателя И. Д. Панков

«07» июня 2024 г.

Санкт-Петербург

2024

**СОДЕРЖАНИЕ**

[ВВЕДЕНИЕ 3](#_Toc168422588)

[1. ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ 4](#_Toc168422589)

[1.1. ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ 5](#_Toc168422590)

[1.1.1. ГЛАВНОЕ ОКНО 6](#_Toc168422591)

[1.1.2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КУБИКА И ЕГО ОТРИСОВКА 9](#_Toc168422592)

[1.1.3. ОКНО ВВОДА КУБИКА 12](#_Toc168422593)

[1.1.4. СИНХРОНИЗАЦИЯ КУБИКОВ 14](#_Toc168422594)

[1.2. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ КУБИКА 15](#_Toc168422595)

# ВВЕДЕНИЕ

Кубик Рубика – культовая головоломка, покорившая умы миллионов людей по всему миру. С виду простая конструкция, состоящая из цветных квадратов, таит в себе невероятное количество комбинаций и алгоритмов, позволяющих достичь заветного результата – собрать все цвета на своих гранях.

Данная курсовая работа посвящена разработке алгоритма, способного решить кубик Рубика, состояние которого задаётся пользователем. В работе рассматриваются различные подходы к решению головоломки, анализируются их преимущества и недостатки.

В рамках исследования был разработан и реализован алгоритм, основанный на методе обхода в ширину.

Практическая значимость данной работы заключается в создании универсального решения для сборки кубика Рубика, доступного для использования пользователями с различным уровнем подготовки. Программа может быть использована как в развлекательных целях, так и в качестве инструмента для изучения алгоритмов решения головоломки.

# 1. ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ

Приложение «Rubik Solver» используется для решения кубика Рубика с состоянием, заданным пользователем из файла или вручную (через интерфейс ввода состояния кубика).

После ввода состояния кубика пользователю предлагается нажать на кнопку «решить» для сохранения в файл последовательности поворотов, необходимых для решения заданного им кубика. Решение можно загрузить и из заранее подготовленного файла с последовательностью поворотом.

После задания состояния кубика и получения необходимой последовательности действий пользователю предлагается просмотреть решение пошагово, вызывая каждый новый шаг очередным нажатием кнопки «следующий шаг». Повороты кубика на экране сопровождаются выведением информации о соответствующем повороте.

После просмотра всех шагов пользователю сообщается, что решение завершено.

# 1.1. ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для отрисовки графической части разработанного решения была использована библиотека OpenGL в связке со вспомогательными библиотеками GLFW и GLAD. Самый очевидный ход при отрисовке окон в OpenGL – одинарная буферизация. При ней все изменения в кадре сразу же отображаются в экранном буфере, что может привести к мерцанию экрана. Для разрешения этих ситуаций в решении использована двойная буферизация. При ней вместо одного буфера кадра используются два:

* Задний буфер (back buffer): скрытый от пользователя буфер, где происходит рисование объектов.
* Передний буфер (front buffer): буфер, который в данный момент отображается на экране.

Все операции рисования происходят в заднем буфере, невидимом для пользователя. Как только кадр полностью отрисован в заднем буфере, происходит мгновенный обмен (swap) между передним и задним буферами. Задний буфер становится видимым, а передний становится доступным для рисования следующего кадра. При двойной буферизации достигается целостность кадров: пользователь видит только полностью отрисованные кадры.

# 1.1.1. ГЛАВНОЕ ОКНО

Первое, что видит пользователь при запуске приложения – главное окно. Главное окно представлено на рисунке 1.

A screenshot of a game

Description automatically generated

Рисунок 1 – Главное окно разработанного приложения

Как можно пронаблюдать по рисунку 1, главное окно состоит из кубика и подписанных кнопок управления. Преставление кубика в памяти и процесс его отрисовки описаны в последующих главах.

Кнопка R отвечает за приведение кубика к изначальному (собранному) виду.

Цветные кнопки без надписей рядом с кнопкой R отвечают за повороты соответствующих сторон по и против часовой стрелки. Если нажать на одну из таких кнопок левой клавишей мыши, соответствующая сторона повернется по часовой стрелке, если правой – против часовой.

Кнопка O отвечает за открытие файла с шагами решения. Если у пользователя уже есть готовое решение для кубика, он может нажать на эту кнопку, далее откроется системный диалог выбора файла. После выбора файла он загружается в программу, становясь готовым для исполнения. Для реализации файлового диалога в Windows используется системная функция GetOpenFilename, в Linux используется встроенная в стандартный пакет Ubuntu утилита zenity. В файле с шагами каждое действие записывается в новой строке. Далее записывается название стороны в соответствии с общепринятой нотацией (F – Front, B – Back, U – Up, D – Down, L – Left, R – Right). Допускаются как строчные, так и прописные буквы, однако при решении куба в файле с шагами используются прописные. Далее опционально записывается требуемое число поворотов. Далее опционально записывается символ ‘'’ (одинарная кавычка), являющийся показателем того, что соответствующий поворот происходит против часовой стрелки. Пример файла с шагами представлен на рисунке 2.

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Рисунок 2 – Пример файла с шагами

Кнопка N исполняет следующий шаг из открытого файла с шагами, выводя инструкцию к шагу наверху окна. В случае если файл не открыт, либо в случае если все шаги из открытого файла исполнены, выводится соответствующее сообщение.

Кнопка С открывает окно ввода кубика, который необходимо решить. Вызов этого окна переключает так называемый контекст, делая главное окно неактивным. Окно ввода кубика описано в последующих главах.

Кнопка S решает кубик и сразу предлагает пользователю сохранить решение в файл с шагами, а далее загружает этот файл в программу. После решения кубика пользователь может последовательно исполнить шаги решения, нажимая на кнопку N. Алгоритм решения кубика описан в последующих главах.

# 1.1.2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КУБИКА И ЕГО ОТРИСОВКА

В программе используется два представления кубика: в виде одномерного массива и в виде двумерного. Такое решение было принято по причине того, что для отрисовки кубика с использованием OpenGL более оптимальным является линейное представление, в то время как решение с помощью метода обхода в ширину становится более оптимальным с точки зрения программного кода именно при использовании представления в виде матрицы. В обоих случаях кубик хранится в памяти в виде структуры, поля которой отражают цвета каждого квадрата на каждой грани. Порядок записи квадратов для каждой грани линейного представления изображен на рисунке \_. Индексы двумерных массивов, указывающие на цвета соответственных квадратов в матричном кубе, представлены на рисунке \_.

A colorful squares with numbers

Description automatically generated

Рисунок \_ – Индексы квадратов линейного куба

A colorful squares with numbers

Description automatically generated

Рисунок \_ – Индексы квадратов матричного куба

При запуске программы экземпляры этой структуры создаются в виде глобальных переменных. Хотя использование глобальных переменных и является небезопасной практикой, в данной случае решение об их использовании является оправданным, так как это обеспечивает удобный доступ к редактированию кубика из любого места программы.

Важно отметить, что в программе установлено чёткое соответствие между общепринятыми обозначениями сторон и их цветами:

U (Up) – Синий

L (Left) – Оранжевый

F (Front) – Белый

R (Right) – Красный

B (Back) – Желтый

D (Down) – Зеленый

В связи с этим все повороты, предлагаемые программой, следует совершать на кубике, ориентированном именно таким образом.

Пользователю не дается возможность выбрать цвета центральных квадратов при вводе начального состояния кубика с помощью мыши как раз по причине того, что соответствие сторон и их цветов строго зафиксировано.

Оба кубика хранятся в памяти программы, их состояния синхронизируются при каждом изменении состояния кубика. Синхронизация кубиков описана в последующих главах.

Отрисовка кубика происходит в изометрии: пользователю видны три смежных стороны, чего вполне достаточно для полноценного отображения любого поворота. За отрисовку кубика отвечают функции drawSide и drawSquare. Первая принимает на вход информацию о том, какую сторону следует отрисовать (левую, правую или верхнюю) и массив цветов, соответствующих этой стороне. Вторая вызывается первой девять раз, по каждому на каждую клетку. Эта функция принимает на вход координаты угла клетки и три компоненты цвета этой клетки.

Состояние кубика обновляется каждый кадр, а хранение его состояния в глобальной переменной позволяет делать повороты сторон из любой точки программы, моментально получая отрисованный результат.

# 1.1.3. ОКНО ВВОДА КУБИКА

На рисунке 3 представлен внешний вид окна ввода кубика.

A black and white sign with black letters

Description automatically generated

Рисунок 3 – Окно ввода кубика

Бирюзовым цветом отмечены квадраты, цвет которых еще не определен. Фиолетовым цветов отмечен квадрат, ввод цвета которого в данный момент ожидается от пользователя. Цвет выбирается с помощью одной из цветных кнопок, расположенных в правом нижнем углу окна ввода кубика. После указания цветов всех квадратов окно ввода кубика автоматически закрывается, а введенный пользователем кубик переносится на главное окно.

Пользователь может выбрать кубик из файла, нажав кнопку в F в левом нижнем углу окна ввода кубика. Нажатие кнопки создает системный диалог выбора файла аналогично диалогу открытия файла с шагами. Файл с состоянием кубика состоит из шести строк, порядок ввода цветов квадратов изображен на развёртке куба, представленной на рисунке 4 (индексация начинается с нуля). Сначала вводится синяя сторона, потом оранжевая, потом белая, потом красная, потом желтая, и, наконец, зеленая. Допускаются как строчные, так и прописные буквы. Пример того, как должно записываться состояние кубика в этом файла, представлен на рисунке 5.

A colorful squares with numbers

Description automatically generated

Рисунок 4 – Порядок ввода сторон, ожидаемый от пользователя

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Рисунок 5 – Пример файла с состоянием кубика

В случае ввода из файла все квадраты, введенные пользователем вручную, игнорируются, а на главном окне появляется кубик, состояние которого отражено в файле.

# 1.1.4. СИНХРОНИЗАЦИЯ КУБИКОВ

Для синхронизации двух типов кубиков (линейного и матричного) были реализованы две функции, принимающие на вход кубик-назначение и кубик-источник.

Первая функция работает следующим образом: она построчно перебирает квадраты матричного куба, записывая в них цвета из соответствующих индексов линейного куба. Соответствие для каждой грани установлено с помощью массивов, заданных с упором на данные, изображенные на рисунке \_. Эта функция не затрагивает служебные поля матричного куба, так как в линейном имеется лишь информация, необходимая для отрисовки, в то время как служебные поля необходимы только для алгоритма решения куба.

Вторая функция работает обратным образом: она построчно перебирает квадраты матричного куба, записывая их в соответствующие индексы линейного куба, руководствуясь тем же соответствием.

A screen shot of a computer code

Description automatically generated

Рисунок \_ – Соответствие индексов квадратов на развертке куба

# 1.2. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ КУБИКА

В данной работе рассматривается трёхслойный метод решения кубика, который является одним из наиболее популярных благодаря своей простоте и логичности. Метод предполагает сборку кубика слой за слоем и состоит из нескольких ключевых этапов:

Сборка креста передней грани: На первом этапе необходимо собрать крест на передней (обычно белой) грани кубика. Для этого нужно расположить четыре ребра так, чтобы их цвета совпадали с центральным элементом передней грани и с центральными элементами боковых граней. Используются простые повороты любых граней, кроме задней, для достижения этого результата. Пример кубика на данном этапе представлен на рисунке\_.



Рисунок\_ – Вид кубика после сборки белого креста

Сборка углов передней грани (всего верхнего слоя): Следующий шаг включает установку угловых элементов передней грани. Углы должны быть размещены так, чтобы их цвета совпадали с цветами соседних центральных элементов, не нарушая собранный крест. Пример кубика на данном этапе представлен на рисунке\_.



Рисунок – Вид кубика после сборки верхнего слоя

Сборка среднего слоя: На данном этапе необходимо расположить ребра среднего слоя кубика. Применяются алгоритмы, которые перемещают ребра в нужное положение, не разрушая при этом уже собранный верхний слой. Пример кубика на данном этапе представлен на рисунке\_.



Рисунок – Вид кубика после сборки среднего слоя

Этот процесс аналогичен сборке креста на передней грани, однако используются другие алгоритмы для правильного расположения ребер. Например, не используется поворот передней грани. Пример кубика на данном этапе представлен на рисунке\_.



Рисунок – Вид кубика после сборки креста на задней грани

Сборка углов на задней грани: На этом этапе угловые элементы задней грани должны быть установлены в правильные позиции. Применяются алгоритмы, позволяющие перемещать углы задней грани, сохраняя при этом собранный крест.



Рисунок – Вид кубика после перемещения углов на задней грани

Ориентирование углов на задней грани: Заключительный этап включает правильное ориентирование углов задней грани, чтобы все стороны кубика были одного цвета. Для этого используются всего лишь повороты трёх граней. Пример кубика на данном этапе представлен на рисунке\_.



Рисунок – Вид полностью собранного кубика

Трёхслойный метод обладает преимуществами, такими как простота запоминания алгоритмов и относительная лёгкость выполнения. Он является отличной основой для начинающих и служит хорошей отправной точкой для изучения более сложных методов сборки кубика.

В приложении для реализации данного алгоритма были созданы функции проверки состояния каждого из этапов, а также функции поворота каждой из шести граней. Алгоритм основан на переборе различных поворотов граней и возвращении наиболее приближенных к нужному этапу состояний.

# 1.2.1. Функции проверок состояния куба

Для реализации алгоритма перебора с возвратом были созданы функции проверки соответствия куба каждому из этапов сборки. Количество функций проверок больше, чем этапов сборки кубика, что связано с тем, что некоторые шаги алгоритма сборки были разбиты на подшаги для ускорения поиска. Каждая из восьми функций проверки возвращает числовое значение от 0 до 4, которое обозначает уровень соответствия куба нужному этапу.

Функция checkIfCrossFront проверяет собранность переднего креста только относительно передней грани, без учёта соответствия цветов боковым граням. Данная проверка выполняется во второй функции – checkIfCrossSides.

Функция checkIfCornersFront проверяет собранность углов передней грани, а также их ориентированность, чтобы на смежных с передней гранях также было соответствие цветов. В данной функции значение собранности куба после каждой проверки увеличивается на 1 только при условии соответствия всех цветов каждой грани данного угла.

Функция checkIfMiddleRow проверяет собранность среднего ряда, а именно боковых краёв на каждой из четырёх смежных гранях. Функция проверки аналогична предыдущей, значение собранности куба после каждой проверки увеличивается на 1 только при условии соответствия всех цветов каждой грани данного края.

Функция checkIfBackCross проверяет собранность креста на задней части кубика. Особенностью функции является то, что она может вернуть только 0, 2 или 4 в результате проверки, так как она проверяет собранность креста как двух пересекающихся линий одного цвета. Это необходимо для реализации разбиения этапа сборки заднего креста на несколько шагов, то есть имеется возможность сначала собрать первую половину креста, и только потом вторую.

Функция checkIfBackSide проверяет собранность всей задней грани, функция аналогична checkIfCrossFront, только вместо частей передней грани проверяются части задней.

Функция checkIfBackCorners проверяет собранность углов задней грани. Функция по своему строению аналогична checkIfCornersFront.

Функция checkIfBackRow проверяет собранность всего последнего слоя. Так как цвета задней грани уже были проверены в функции checkIfBackSide, а углы в функции checkIfBackCorners, данная функция проверяет соответствие цветов на смежных с задней гранях.

# 1.2.2. Функции решения кубика

Для решения кубика используется перебор с возвратом различных вращений. Для оптимизации перебора на различных этапах решения доступны только некоторые возможные вращения кубика. Для сборки переднего и среднего слоя используются все повороты, кроме вращения задней грани. Для последних этапов решения. А именно ориентировки углов и сборки всего последнего слоя используются только три вращения. Такой подход позволяет отсекать повороты, которые бы не помогли привести куб в более собранное относительно конкретного этапа состояние.

Для реализации алгоритма с перебором создаётся специальная таблица поиска. SolutionTable – структура данных, которая хранит в себе счётчик открытых решений куба, счётчик закрытых решений куба, размер таблицы, а также массив состояний кубов.

В цикле по количеству этапов сборки, в том числе и подэтапов, запускается функция search с различными настройками, которые обеспечивают поиск комбинации поворотов для нужного состояния. Функция search принимает указатель на таблицу поиска, куб, из состояния которого продолжается поиск, числовое значение собранности куба, которое должно быть у куба по окончании функции, массив операций, которые могут быть применены к кубу на данном этапе сборки, числовое значение максимального погружения поиска, а также минимальное числовое значение собранности куба, которое служит для отрезания заведомо неверных путей, в случае если ветвь поиска вернула слишком маленькое значение собранности. В зависимости от этапа сборки данные параметры изменяются, повышается значение собранности куба, к которому необходимо прийти, меняются массивы операций, а также постепенно увеличивается минимальное значение для отрезания неверных путей. Функция search возвращает указатель на собранный на данном этапе куб и, в случае если этот куб не равен кубу, с которого был запущен поиск, то в файл с операциями записывается последовательность вращений при помощи которых было получено текущее состояние куба. В противном случае, если вернувшийся куб равен тому, с которого был запущен поиск, в файл ничего не записывается. Если поиск не увенчался успехом (вернулся NULL), а именно закончилась память в таблице поиска, в файл записывается символ ‘\_’, который будет означать, что куб невозможно собрать. В таком случае приложение выведет на экран «UNSOLVED».