НАСЛЕДОВАНИЕ

Динамический полиморфизм. Интерфейсы и реализация.
Виртуальное наследование

К. Владимиров, Intel, 2021
mail-to: konstantin.vladimirov@gmail.com

- Наследование
- Полиморфизм
- Множественное наследование
- RTTI

Язык ParaCL

- Базовый синтаксис: арифметика, while, if, print, ?, объявления переменных

```
fst = 0; // тип не требуется, все типы int
snd = 1;
iters = ?; // считать со stdin число, определить переменную

while (iters > 0) { // синтаксис для if такой же
  tmp = fst;
  fst = snd;
  snd = snd + tmp;
  iters = iters - 1;
}

print snd;
```

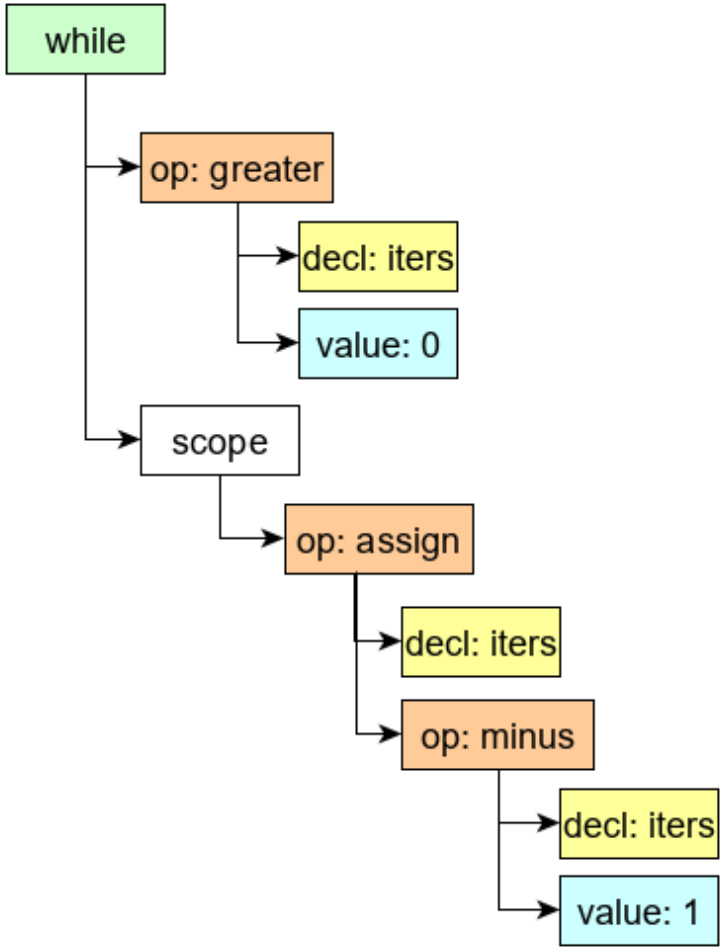

fibs.pcl

Синтаксические деревья

- Грамматика представляется синтаксическим деревом

```
while (iters > 0) {
  iters = iters - 1;
}
```

- И тут есть проблема: допустим мы хотим представить узел такого дерева
- Но все узлы очень разные



Обсуждение

- Как нам сложить разные узлы внутрь одного дерева?

Первая попытка: супер-узел

```
struct Node {
  Node *parent_;
  Node_t type_; // enum Node_t
  union Data {
    struct Decl { std::string declname_; } decl_;
    struct Binop { BinOp_t op_; } binop_; // enum BinOp_t
    // .... все остальные варианты ....
  } u;
  std::vector<Node *> childs_;
};
```

- Покритикуйте этот подход

union-ctors.cc

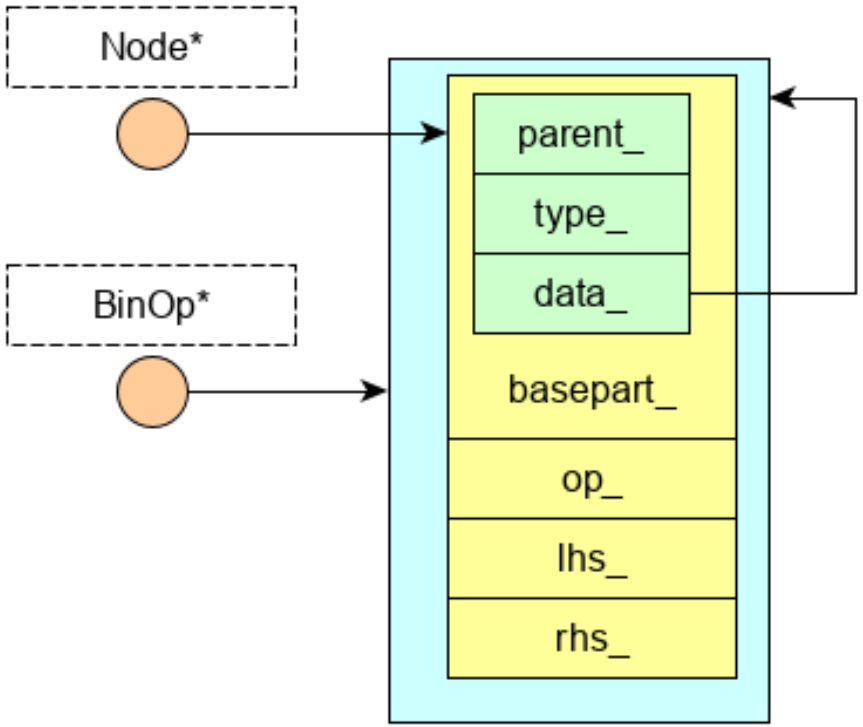
Вторая попытка: void pointers

- Что если мы заведём структуру которая знает свой тип?

```
struct Node {
  Node *parent_;
  Node_t type_;
  void *data_;
};
```

- Конкретные узлы хранят базовую часть

```
struct BinOp {
 Node basepart_;
 BinOp_t op_;
 Node *lhs_, *rhs_;
};
```



Вторая попытка: void pointers

- Теперь можно написать функцию-конструктор для бинарной операции

```
Node* create_binop(Node *parent, BinOp_t opcode) {
  Node base = {parent, Node_t::BINOP, nullptr};
  BinOp *pbop = new BinOp {base, opcode, nullptr, nullptr};
  pbop->basepart_.data_ = static_cast<void *>(pbop);
  return &pbop->basepart_;
}
```

- Мне кажется даже не надо просить это покритиковать
- Этот код является худшей критикой самого себя

https://godbolt.org/z/eGPajE91W

Лучшее решение: поддержка в языке

- Кажется для идеи "B является A" (также называется "отношение is-a") в языке нужна непосредственная поддержка
- Это называется наследование и его открытая форма записывается через двоеточие и ключевое слово public

```
class A {};

class B : public A {}; // B is also A
```

- Это отношение открытого наследования позволяет нам переписать отношения более явно

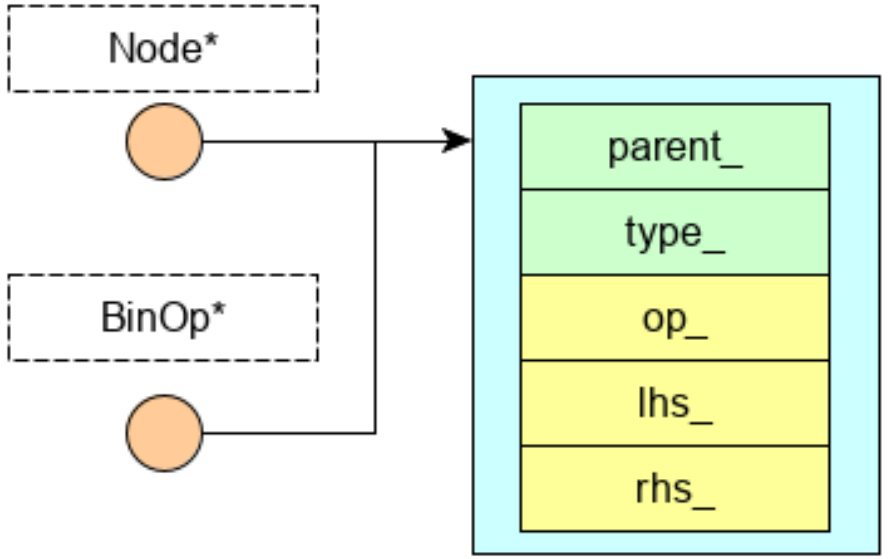
Открытое наследование

- Мы сэкономили сколько-то данных

```
struct Node {
  Node *parent_;
  Node_t type_;
};
```

- Но главное мы получили куда лучшую запись

```
struct BinOp : public Node {
  BinOp_t op_;
  Node *lhs_, *rhs_;
};
```



Открытое наследование

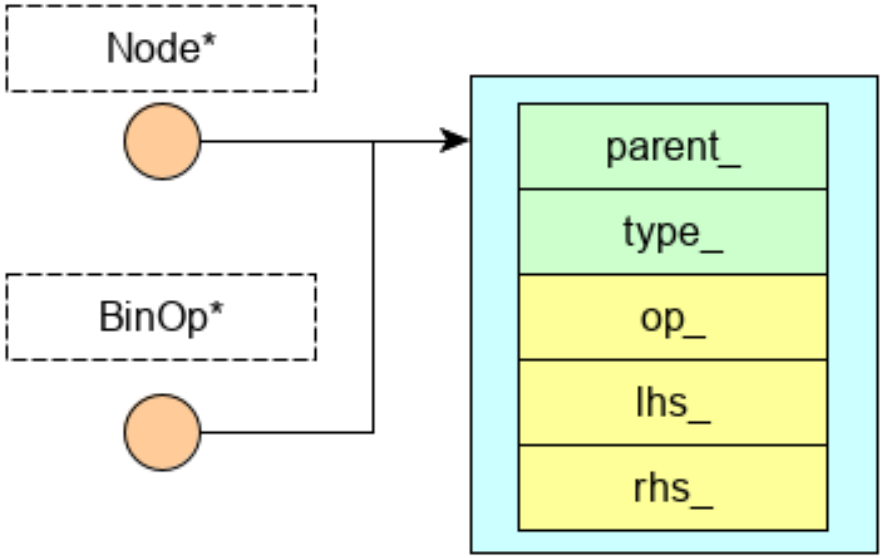
- Теперь функция-конструктор станет и впрямь конструктором

```
struct Node {
  Node *parent_;
  Node_t type_;
};

struct BinOp : public Node {
  BinOp_t op_;
  Node *lhs_ = nullptr, *rhs_ = nullptr;

  BinOp(Node *parent, BinOp_t opcode) :
    Node{parent, Node_t::BINOP}, op_(opcode) {}
};
```

Открытое наследование

- Поскольку объект производного класса является объектом базового класса, указатели и ссылки приводятся неявным приведением
- Обратно можно привести через `static_cast`

```
struct Node;
struct BinOp : public Node;

void foo(const Node &pn);

BinOp *b = new BinOp(p, op);
foo(*b); // ok
Node *pn = b; // ok
b = static_cast<BinOp*>(pn); // ok
```



binop.cc

Обсуждение: квадрат и прямоугольник

- У открытого наследования есть два несвязанных смысла:
  - B **расширяет** A
  - B **является частным случаем** A

```
struct Square {
  double x; // x*x square
  void double_square(Square &s) { x *= sqrt(2.0); }
};

struct Rectangle: public Square {
  double y; // x*y rectangle
};

Rectangle r{2, 3}; r.double_square(); // ???
```

Circle And Ellipse Problem

Обсуждение: квадрат и прямоугольник

- У открытого наследования есть два несвязанных смысла:
  - B **расширяет** A
  - B **является частным случаем** A

```
struct Rectangle {
  double x, y; // x*y rectangle
  void double_square() { s.x *= 2.0; }
};

struct Square: public Rectangle {
  // в нашем квадрате кажется есть лишнее поле
};

Square s{2}; s.double_square(); // всё стало хуже
```

Circle And Ellipse Problem

Принцип подстановки Лисков

- Типы `Base` и `Derived` связаны отношениями is-a (`Derived` является `Base`) если любой истинный предикат* относительно `Base` остаётся истинным при подстановке `Derived`
- Именно этот принцип даёт нам возможность завести в языке неявное приведение из `Derived` в `Base`
- Для C++ этот принцип обычно выполняется с точностью до декорирования
- При правильном проектировании, вы всегда можете подставить `Derived*` вместо `Base*` и `Derived&` вместо `Base&`
- Подстановка значений в C++ сопряжена с некоторыми проблемами

*любой интересующий нас истинный предикат

Проблема срезки: первое приближение

```
struct A {
  int a_;
  A(int a) : a_(a) {}
};

struct B : public A {
  int b_;
  B(int b) : A(b / 2), b_(b) {}
};

B b1(10);
B b2(8);
A& a_ref = b2;
a_ref = b1;     // b2 == ???
```

Обсуждение

- Базовая срезка возникает из-за того, что присваивание не полиморфно

```
struct A {
  int a_;
  A(int a) : a_(a) {}
  A& operator=(const A& rhs) { a_ = rhs.a_; }
};

a_ref = b1; // a_ref.operator=(b1); b1 приводится к const A&
```

- Было бы здорово если бы функция во время выполнения вела себя по разному в зависимости от настоящего типа своего первого аргумента.
- Увы, для конструкторов копирования это недостижимо на практике.

Общее правило

- Когда мы работаем с классическим ООП и наследованием, мы работаем с указателями и ссылками.

HWP: ParaCL FE + симулятор

- Разработайте фронтенд и симулятор языка ParaCL (далее – парасил) в объёме арифметика + if + while
- Симулируемая программа должна считывать со стандартного ввода всё что считывается и печатать на стандартный вывод всё что нужно распечатать
- Скрафтить хорошие тесты – важная часть задачи
- Язык парасил чуть сложнее чем приведено не этих слайдах. По мере продвижения вглубь реализации парасила будут открываться нюансы синтаксиса парасила
- Эта домашняя работа рекомендована для группового выполнения, поскольку среди высоких уровней будут и задачи на бэкенд и оптимизации

- Наследование
- Полиморфизм
- Множественное наследование
- RTTI

Общий интерфейс

- Мы можем спроектировать классы `Triangle` и `Polygon` так, чтобы они имели общий метод `square()`, вычисляющий их площадь.
- Можем ли мы сохранить массив из неважно каких объектов лишь бы они имели этот метод?
- Ответ да: для этого мы должны сделать для них общий интерфейс от которого они оба наследуют.

```
struct ISquare { void square(); };
struct Triangle : public ISquare; // реализует square()
struct Polygon : public ISquare; // реализует square()

std::vector<ISquare*> v; // хранит и Triangle* и Polygon*
```

Общий интерфейс

- Мы можем спроектировать классы `Triangle` и `Polygon` так, чтобы они имели общий метод `square()`, вычисляющий их площадь.
- Можем ли мы сохранить массив из неважно каких объектов лишь бы они имели этот метод?
- Ответ да: для этого мы должны сделать для них общий интерфейс от которого они оба наследуют.

```
struct ISquare {
  void square();
};
```

- Проблемы возникают с тем как здесь реализовать этот метод в ISquare.

Первая попытка: указатель на метод

```
class ISquare {
  ISquare *sqptr_;
  double (ISquare::*square_)() const;
public:
  ISquare(ISquare *sqptr): sqptr_(sqptr), square_(???) {}
  double square() const { return sqptr_->* square_(); }
};

template <typename T> struct Triangle : public ISquare {
  Point<T> x, y, z;
  Triangle() : ISquare(this) {}
  double square() const; // вычисление площади треугольника
}
```

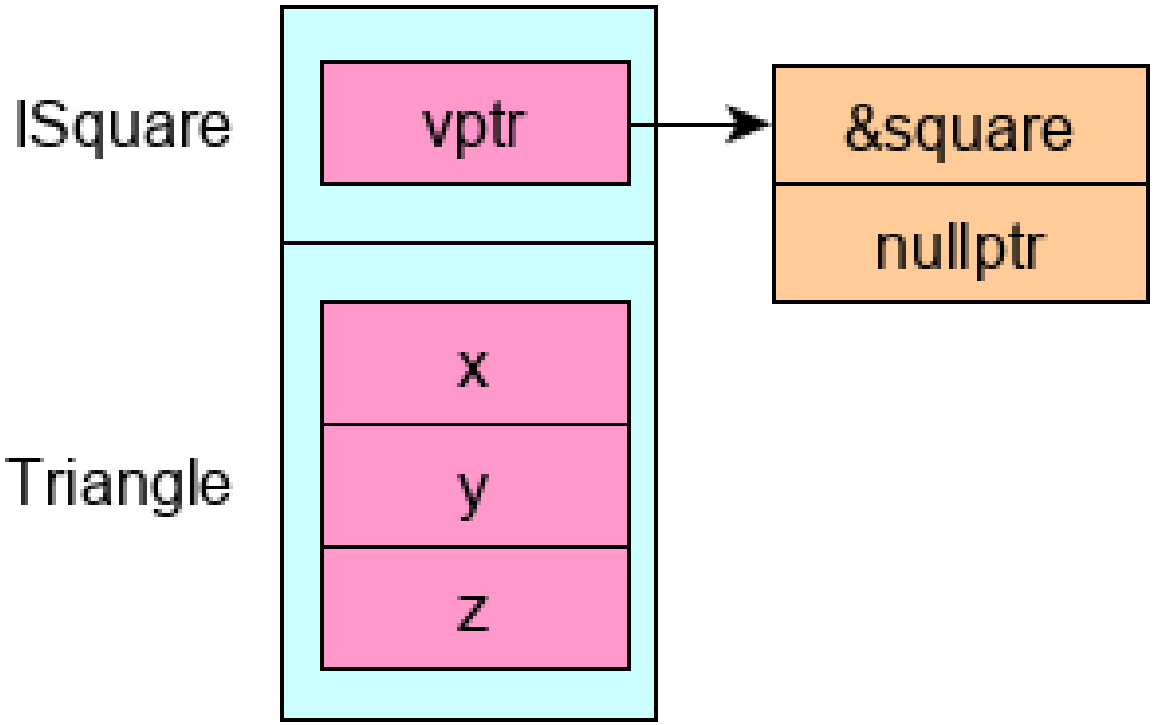
Языковая поддержка: virtual

```
struct ISquare {
  virtual double square() const;
};

template <typename T> struct Triangle : public ISquare {
  Point<T> x, y, z;
  double square() const;
}
```

- Это всё ещё **очень плохой код (здесь три ошибки в семи строчках)**, мы скоро его улучшим.
- Но он иллюстрирует концепцию. Простое совпадение имени означает переопределение (overriding) виртуальной функции.

Таблица виртуальных функций

- При создании класса с хотя бы одним виртуальным методом, в него добавляется vptr.
- Конструктор базового класса динамически выделяет память для таблицы виртуальных функций.
- Конструктор каждого потомка производит инициализацию её своими методами. В итоге там всегда оказываются нужные указатели.



Порядок конструирования

- При наследовании он имеет ключевое значение.

```
template <typename T> struct Triangle : public ISquare {
  Point<T> x, y, z;
  double square() const;
  Triangle() : ISquare(), x{}, y{}, z{} {}
}
```

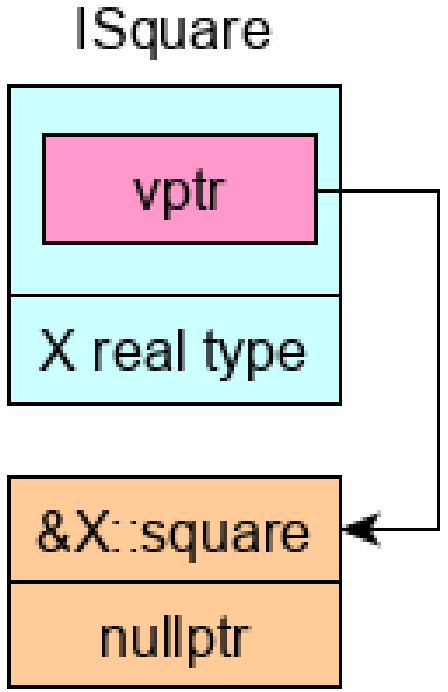
- Сначала конструируется подобъект базового класса, который невидимо конструирует себе таблицу виртуальных функций.
- Потом конструктор подобъекта производного класса невидимо заполняет её адресами своих методов.

Статический и динамический тип

- Рассмотрим функцию.

```
double sum_square(const ISquare &lhs,
                  const ISquare &rhs) {
  return lhs.square() + rhs.square();
}

Triangle t; Polygon p;
sum_square(t, p);
```

- Статическим типом для `lhs` и `rhs` является известный на этапе компиляции тип `const ISquare&`
- При этом в конкретном вызове у них могут быть разные динамические типы.



Языковая поддержка: virtual

```
struct ISquare {
  virtual double square() const;
};

template <typename T> struct Triangle : public ISquare {
  Point<T> x, y, z;
  double square() const;
}
```

- Это всё ещё очень плохой код, мы скоро его улучшим.
- Но он иллюстрирует концепцию. Простое совпадение имени означает переопределение (overriding) виртуальной функции.
- Увы, имена могут быть ещё и перегружены (overloaded).

Проблемы с overloading

- Здесь допущена обычная человеческая ошибка с типами int vs long.

```
struct Matrix {
  virtual void pow(int x); // возведение в степень любой матрицы
};

struct SparceMatrix : Matrix{
  void pow(long x);  // возведение в степень разреженной матрицы
                     // крайне эффективный алгоритм
};

Matrix *m = new SparceMatrix;

m->pow(3); // увы, вызовется Matrix::pow
```

Обсуждение: overload vs override

- Переопределение функции (overriding) это замещение в классе наследнике виртуальной функции на функцию наследника.
- Перегрузка функции (overloading) это введение того же имени с другими типами аргументов.

```
struct Matrix {
  virtual void pow(int x);
};

struct SparceMatrix : Matrix{
  void pow(int x) override; // никогда не overload
```

- Аннотация override сообщает, что мы имели в виду переопределение.

Языковая поддержка: override

```
struct ISquare {
  virtual double square() const;
};

template <typename T> struct Triangle : public ISquare {
  Point<T> x, y, z;
  double square() override const;
}
```

- Это всё ещё очень плохой код, мы скоро его улучшим.
- Следующая проблема это как нам написать тело самой общей функции? Тела наследников понятны. Но что должно быть в самой `ISquare::square`? Может быть аборт?

Языковая поддержка: pure virtual

```
struct ISquare {
  virtual double square() const = 0;
};

template <typename T> struct Triangle : public ISquare {
  Point<T> x, y, z;
  double square() override const;
}
```

- Это всё ещё очень плохой код, мы скоро его улучшим.
- Проблема решается чисто виртуальными методами которые не требуют определения и только делегируют наследникам.
- Объект класса с чисто виртуальными методами не может быть создан.

Внезапная утечка памяти

```
struct ISquare {
  virtual double square() const = 0;
};

template <typename T> struct Triangle : public ISquare {
  Point<T> x, y, z;
  double square() override const;
}
```

- Это всё ещё очень плохой код, мы скоро его улучшим.
- Следующая проблема: удаление по указателю на базовый класс.

```
ISquare *sq = new Triangle<int>; delete sq; // утечка
```

Обсуждение

- Мы хотим, чтобы удаление по указателю на базовый класс вызывало правильный деструктор производного класса.
- Это означает, что нам нужен виртуальный деструктор.

```
struct ISquare {
  virtual double square() const = 0;
  virtual ~ISquare() {}
};

template <typename T> struct Triangle : public ISquare {}

ISquare *sq = new Triangle<int>;
delete sq; // Ok, вызван Triangle::~Triangle()
```

Интерфейсные классы

- Класс в котором все методы чисто виртуальные служит своего рода общим интерфейсом.

```
struct ISquare {
  virtual double square() const = 0;
  virtual ~ISquare() {}
};
```

- Такой класс называется абстрактным базовым классом.
- К сожалению виртуальный конструктор (в том числе копирующий) невозможен.
- Тогда непонятно как нам скопировать по базовому классу.

Виртуальное копирование

- Обычно используется виртуальный метод clone.

```
struct ISquare {
  // всё остальное
  virtual ISquare *clone() const = 0;
};

template <typename T> struct Triangle : public ISquare {
  std::array<Point<T>, 3> pts_;
  Triangle *clone() const override
    { return new Triangle{pts_}; }
}
```

- Обратите внимание: `override` здесь законный поскольку `Triangle<T>*` открыто наследует и значит является `ISquare*`

Срезка возвращается

- Из-за невозможности виртуальных конструкторов, срезка возможна при передаче по значению.

```
void foo(A a) { std::cout << a << std::endl; }

B b(10); foo(b1); // на экране "5"
```

- Поэтому никогда не передавайте объекты базовых классов по значению
- Используйте указатель или ссылку.

```
void foo(A& a) { std::cout << a << std::endl; }

B b(10); foo(b1); // на экране "5 10"
```

Необходимость: virtual dtor

```
struct ISquare {
  virtual double square() const = 0;
  virtual ~ISquare() {}
};

template <typename T> struct Triangle : public ISquare {
  Point<T> x, y, z;
  double square() override const;
}
```

- Вот это уже неплохо.
- Но хотя этот код стал неплохим, концептуально у нас проблемы.

Обсуждение: как теперь жить?

- Допустим мы написали некий класс Foo.
- Писать ли у него виртуальный деструктор?

Языковая поддержка: final

- Допустим мы написали некий класс Foo.
- Писать ли у него виртуальный деструктор?
- Если мы хотим чтобы от него наследовались то да писать.
- Если не хотим и не хотим оверхеда на vtable, то можно объявить его final.

```
struct Foo final {
  // content
};
```

- Теперь наследование будет ошибкой компиляции.

Пишем правильно: четыре способа

- Класс в C++ написан правильно если и только если любое из условий выполнено:
  1. Класс содержит виртуальный деструктор.
  2. Класс объявлен как final.
  3. Класс является stateless и подвержен EBCO.
  4. Класс не может быть уничтожен извне, но может быть уничтожен потомком.
- Первые два варианты мы уже обсудили.
- Давайте поговорим о третьем и четвёртом.

Empty Base Class Optimizations

- Оптимизации пустого базового класса (EBCO) применяются когда базовый класс хм… пустой.

```
class A{};

class B : public A{};

A a; assert(sizeof(a) == 1);

B b; assert(sizeof(b) == 1);
```

- Заметьте, класс с хотя бы одним виртуальным методом точно не пустой.
- Пока неясно зачем нам вообще такие ребята. Они сыграют позже, так как нужны для так называемых миксинов.

EBCO и unique_pointer

- Мы говорили что unqiue_ptr выглядит как-то так:

```
template <typename T, typename Deleter = default_delete<T>>
class unique_ptr {
  T *ptr_; Deleter del_;

public:
  unique_ptr(T *ptr = nullptr, Deleter del = Deleter()) :
    ptr_(ptr), del_(del) {}

  ~unique_ptr() { del_(ptr_); }
// и так далее
```

- Но можем ли мы сэкономить, если Deleter это stateless class?

EBCO и unique_pointer

- Если делетер в unique_pointer это класс, то:

```
template <typename T, typename Deleter = default_delete<T>>
class unique_ptr : public Deleter {
  T *ptr_;
public:
  unique_ptr(T *ptr = nullptr, Deleter del = Deleter()) :
    Deleter(del), ptr_(ptr), del_(del) {}

  ~unique_ptr() { Deleter::operator()(ptr_); }
```

- Увы это невозможно если делетер функция (см. пример).
- Оставим в качестве тизера **как же** unique_pointer отличает класс от функции.

unique-deleter.cc

Обсуждение

- Разумеется при использовании таких миксинов никто не будет стирать класс по указателю на его делетер.

```
struct CDeleterTy {
  void operator()(int *t) { delete[] t; }
};

CDeleterTy *pDel =
  new std::unique_ptr<int, CDeleterTy> { new int[SZ]() };

delete pDel; // к счастью это не скомпилируется
```

- Писать виртуальный деструктор в миксин не хочется. Потому что он резко станет statefull.

Языковая поддержка: protected

- Модификатор protected служит для защиты от всех, кроме наследников.
- Он позволяет писать чисто-базовые классы.

```
class PureBase {
  // что угодно
protected:
  ~PureBase() {}
};
```

- Теперь объект класса-наследника просто нельзя удалить по указателю на базовый класс и проблема снимается.
- Если не удалять изнутри класса и тогда всё по прежнему.

Пишем правильно: два способа

- Класс в C++ написан правильно если и только если любое из условий выполнено:
  1. Класс содержит виртуальный деструктор
  2. Класс объявлен как final
  3. Класс является stateless и подвержен EBCO
  4. Класс не может быть уничтожен извне, но может быть уничтожен потомком
- Первые два варианта мы уже обсудили.
- Третий и четвёртый скорее культурно приемлимы, чем надежны.
- Кроме того ключевое слово final помогает девиртуализации.

Обсуждение

- Как вы вообще считаете: как виртуальные функции влияют на производительность? А на стабильность?

Обсуждение

- Как вы вообще считаете: как виртуальные функции влияют на производительность? А на стабильность?
- Сугубо мрачно. Виртуальная функция вызывается как минимум по указателю (в случае множественного наследования всё ещё хуже).
- Мало того, этот указатель должен быть правильно заполнен в конструкторе.
- На практике это значит целый новый класс ошибок.

Обсуждение: PVC

- Распространённой ошибкой является вызов чисто виртуального метода.

```
struct Base {
  Base() { doIt(); } // PVC invocation
  virtual void doIt() = 0;
};

struct Derived : public Base { void doIt() override; };

int main() {
  Derived d; // PVC appears
}
```

- Заметьте, вызов чисто виртуальной функции это ошибка не только в ctor/dtor, но и в любой функции, которая из них вызывается.

Виртуальные функции в конструкторах

- Даже если они не приводят к PVC, они работают как невиртуальные.

```
struct Base {
  Base() { doIt(); }
  virtual void doIt();
};

struct Derived : public Base {
  void doIt() override;
};

Derived d; // Base::doIt
```

- Поэтому многие вообще скептически относятся к вызовам функций в ctor/dtor.

Статическое и динамическое связывание

- Говорят, что виртуальные функции связываются динамически (так называется процесс разрешения адреса функции через vtbl во время выполнения.
- Обычные функции связываются статически.
- Даже если физически они приходят из динамических библиотек или являются позиционно независимыми и адресуются через PLT, это неважно.
- На уровне модели языка они считаются связывающимися статически.
- Увы, но многие другие вещи имеют статическое связывание, например аргументы по умолчанию.

Аргументы по умолчанию

- Как уже было сказано, они связываются статически, то есть зависят только от статического типа.

```
struct Base {
  virtual int foo(int a = 14) { return a; }
};

struct Derived : public Base {
  int foo(int a = 42) override { return a; }
};

Base *pb = new Derived{};
std::cout << pb->foo() << std::endl; // на экране 14
```

Выход из положения: NVI

- Если хочется интерфейс с аргументами по умолчанию, его можно сделать невиртуальным, чтобы никто не смог их переопределить.

```
struct BaseNVI {
  int foo(int x = 14) { return foo_impl(x); }

private:
  virtual int foo_impl(int a) { return a; }
};

struct Derived : public Base {
  int foo_impl(int a) override { return a; }
};
```

- Закрытая виртуальная функция открыто переопределена. Это нормально.

Два полиморфизма

- Полиморфной (по данному аргументу) называется функция, которая ведёт себя по разному в зависимости от типа этого аргумента.
- Полиморфизм бывает статический, когда функция управляется известными на этапе компиляции типами и динамический, когда тип известен только на этапе выполнения.
- Примеры:
  - Множество перегрузки можно рассматривать как одну статически полиморфную функцию (по перегруженному аргументу).
  - Шаблон функции это статически полиморфная функция (по шаблонному аргументу).
  - Виртуальная функция это динамически полиморфная функция (по первому неявному аргументу this).

Обсуждение: ограничения

- Давайте посмотрим насколько можно смешивать статический и динамический полиморфизм.
- Два простых вопроса:

1. Как вы думаете, может ли существовать шаблон виртуального метода?

2. Как вы думаете можно ли перегружать виртуальные функции?

Обсуждение: ограничения

- Давайте посмотрим насколько можно смешивать статический и динамический полиморфизм.
- Два простых вопроса:

1. Как вы думаете, может ли существовать шаблон виртуального метода?
   К счастью не может (какие последствия это вызвало бы для таблиц виртуальных функций?)
2. Как вы думаете можно ли перегружать виртуальные функции?
   К сожалению можно и это вызывает крайне мрачные последствия из-за скрытия имён

Перегрузка виртуальных функций

- Предположим, что мы умеем эффективно вовзводить разреженные матрицы в целые степени и хотим просто переиспользовать возведение в дробные.

```
struct Matrix {
  virtual void pow(double x); // обычный алгоритм
  virtual void pow(int x); // эффективный алгоритм
}

struct SparseMatrix : public Matrix {
  void pow(int x) override; // крайне эффективный алгоритм
}

SparseMatrix d;

d.pow(1.5); // какой метод будет вызван?
```

Сокрытие имён

- Увы, в коде ниже будет вызван SparseMatrix::pow

```
struct Matrix {
  virtual void pow(double x); // Matrix::pow(int)
  virtual void pow(int x);    // Matrix::pow(double)
}

struct SparseMatrix : public Matrix {
  void pow(int x) override; // имя pow скрывает Matrix::pow
}

SparseMatrix d;

d.pow(1.5); // SparseMatrix::pow(1);
```

Введение имён в область видимости

- Для введения имён в область видимости, используем using

```
struct Matrix {
  virtual void pow(double x); // Matrix::pow(int)
  virtual void pow(int x);    // Matrix::pow(double)
}

struct SparseMatrix : public Matrix {
  using Matrix::pow;
  void pow(int x) override; // имя pow скрывает Matrix::pow
}

SparseMatrix d;

d.pow(1.5); // Matrix::pow(1.5);
```


namehide-sol.cc

Обсуждение: контроль доступа

- К этом времени мы знаем три модификатора доступа
  - public – доступно всем
  - protected – доступно только потомкам
  - private – доступно только самому себе
- Но мы также знаем, что public означает открытое наследование и вводит отношение is-a

```
class Derived : public Base { // Derived is a Base
```

- Можем ли мы представить себе иные отношения общее-частное?

Разновидности наследования

- При любом наследовании private поля недоступны классам наследникам
- Остальные поля изменяют в наследниках уровень доступа в соответствии с типом наследования

	public inheritance	**protected inheritance**	**private inheritance**
public becomes:	public	protected	private
protected becomes:	protected	protected	private

- Приватное наследование эквивалентно композиции в закрытой части
- Говорят что оно моделирует отношение part-of
- Неявного приведения типа при этом не происходит

Наследование по умолчанию

- Второе отличие class от struct: у class по умолчанию private, у struct public

```
struct S : public D {
public:
  int n;
};

class S : private D {
private:
  int n;
}
```

- Разумеется крайне хороший тон это писать явные модификаторы, если их больше одного

Отношение part-of

- Закрытое наследование

```
class Whole : private Part {
  // everything else
};
```

- Композиция

```
class Whole{
  // everything else
private: Part p_;
};
```

- Ключевое отличие наследования это:
  - возможность переопределять виртуальные функции из базового класса
  - доступ к защищённым (protected) полям базового класса
  - возможность использовать using и вводить имена из базового класса в свой scope
- Композиция должна быть выбором по умолчанию

isocpp.org FAQ

EBCO и unique_pointer: private inh

- Логично, что мы хотим private, на него EBCO тоже работает

```
template <typename T, typename Deleter = default_delete<T>>
class unique_ptr : private Deleter {
  T *ptr_;
public:
  unique_ptr(T *ptr = nullptr, Deleter del = Deleter()) :
    Deleter(del), ptr_(ptr), del_(del) {}

  ~unique_ptr() { Deleter::operator()(ptr_); }
```

- Теперь нет опасности приведения к базовому классу:

```
DeleterTy *pD = new unique_ptr<int, DeleterTy>{}; // FAIL
```

Case study: MyArray

- Допустим у вас есть интерфейс IBuffer, использованный в Array

```
class Array {
protected:
  IBuffer *buf_;
public:
  explicit Array(IBuffer *buf) : buf_(buf) {}
  // something interesting
```

- Вы реализовали ваш собственный превосходный класс MyBuffer, наследующий от IBuffer
- Как написать класс MyArray, наследующий от Array и использующий MyBuffer?

Первая попытка: двойное включение

- Мы можем просто сохранить MyBuffer внутри

```
class MyArray : public Array {
protected:
  MyBuffer mbuf_;
public:
  explicit MyArray(int size) : mbuf_(size), Array(&mbuf_) {}
  // something MORE interesting
};
```

- Это не будет работать, так как буфер нельзя инициализировать раньше базового класса
- Но и переставить инициализаторы местами мы не можем

Обсуждение

```
class MyArray : public Array {
protected:
  MyBuffer mbuf_;
```

- Чтобы здесь в порядке инициализации MyBuffer шёл раньше, чем Array, он должен быть включён в список базовых классов
- Но это означает, что нам нужно унаследоваться сразу от двух классов
- Разве это возможно?

- Наследование
- Полиморфизм
  - Множественное наследование
- RTTI

Множественное наследование

```
class MyArray : protected MyBuffer, public Array {
public:
  explicit MyArray(int size) : MyBuffer(size), Array(???) {}
  // something MORE interesting
};
```

- Синтаксис наследования: все базовые классы с модификаторами через запятую
- Здесь наследование защищённое потому что:
  - мы не хотим прятать защищённую часть MyBuffer и не можем сделать его приватным
  - мы не хотим показывать MyBuffer наружу и не можем сделать его публичным
- Но есть небольшая проблема: что написать вместо знаков вопроса?

Решение: прокси-класс

```
struct ProxyBuf {
  MyBuffer buf;
  explicit ProxyBuf(int size): buf(size){}
};

class MyArray: protected ProxyBuf, public Array {
public:
  explicit MyArray(int size) : ProxyBuf(size),
                               Array(&ProxyBuf::buf) {}
  // something MORE interesting
};
```

- Теперь всё срастается

Обсуждение: сама идея сомнительна

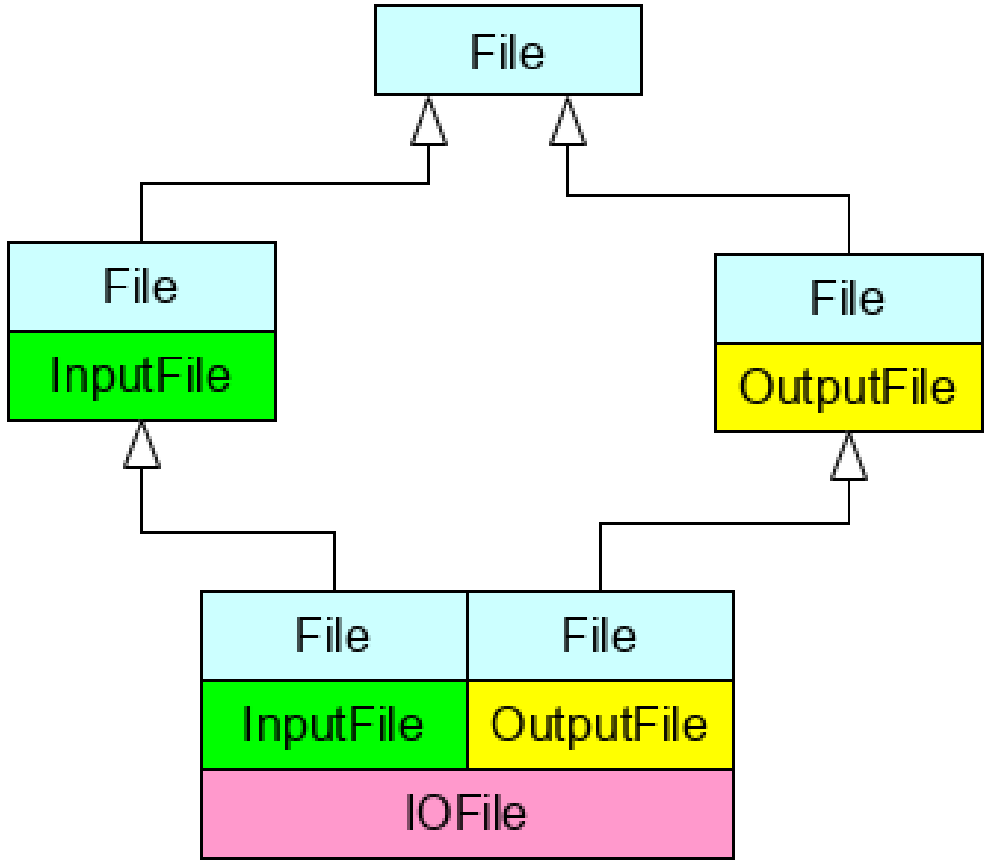
- Множественное наследование интерфейса не вызывает вопросов

```
class Man: public ITwoLegs, public INoFeather {
public:
  // методы для двуногих
public:
  // методы для лишённых перьев
// всё остальное
};
```

- Но в довольно большом количестве языков запрещено множественное наследование реализации. И сделано это неспроста

Ромбовидные схемы

```
struct File { int a; };

struct InputFile :
    public File { int b; };

struct OutputFile :
    public File { int c; };

struct IOFile :
    public InputFile,
    public OutputFile {
  int d;
};
```



Проблемы ромбовидных схем

- Поскольку в объект нижнего класса входят два верхних подобъекта, доступ к переменным неочевиден

```
IOFile f{11};
int x = f.a; // ошибка
int y = f.InputFile::a; // ok, но это боль
```

- Кроме того в принципе `f.InputFile::a` и `f.OutputFile::a` могут и разойтись в процессе работы
- В качестве решения хотелось бы иметь один экземпляр базового класса сколькими бы путями они ни пришёл в производный
- Такие базовые классы называются виртуальными

Виртуальные базовые классы

- Виртуальное наследование это поддержка в языке

```
struct File { .... };
struct InputFile : virtual public File { .... };
struct OutputFile : virtual public File { .... };
struct IOFile : public InputFile, public OutputFile { .... };

IOFile f{11};
int x = f.a; // ok
int y = f.InputFile::a; // ok, тоже работает
```

- Конечно тут сразу возникает масса вопросов....

Виртуальные базовые классы

- Что если базовый класс виртуальный не по всем путям?
- Что если базовый класс виртуальный но в нижнем подобъекте всего один?
- В каком порядке и когда конструируются обычные и виртуальные подобъекты?

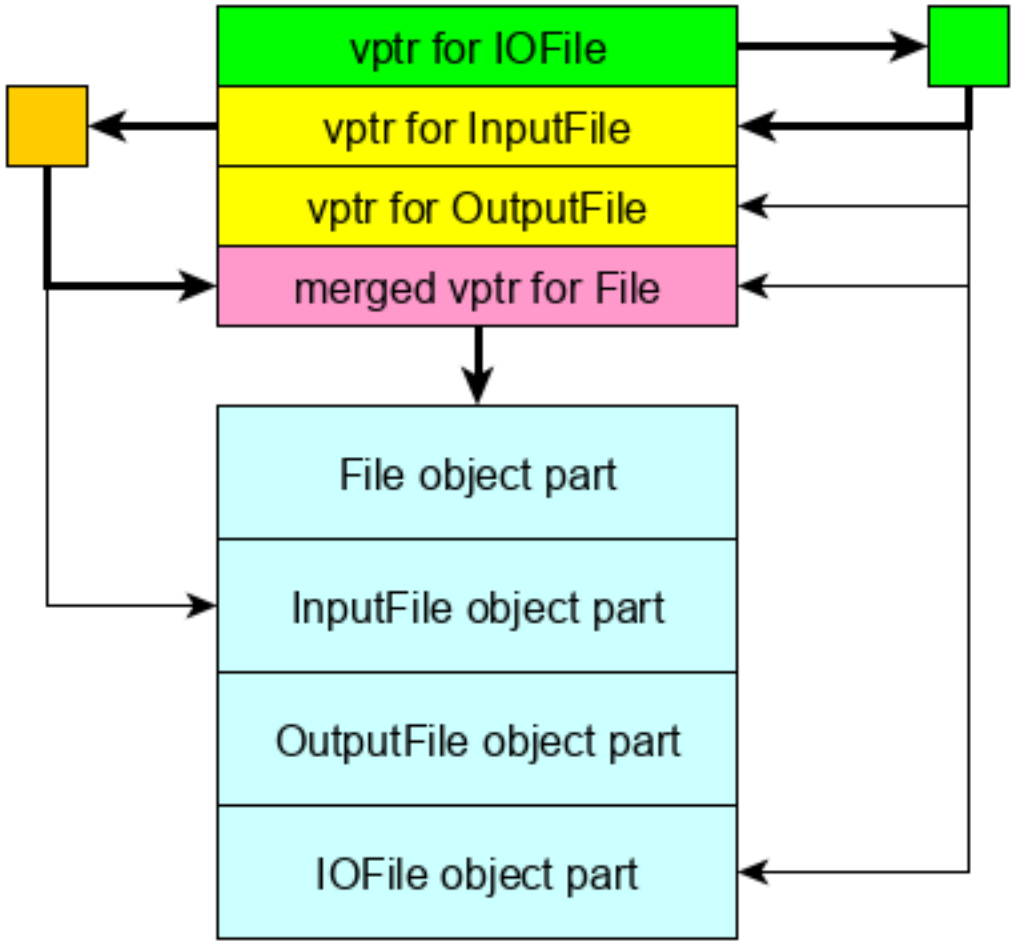
Виртуальные базовые классы

- Что если базовый класс виртуальный не по всем путям?
  никаких проблем, вниз попадёт один со всех виртуальных путей и по одному с каждого невиртуального
- Что если базовый класс виртуальный но в нижнем подобъекте всего один?
  никаких проблем, можно хоть все базовые классы всегда делать виртуальными, будет работать как обычное наследование*
- В каком порядке и когда конструируются обычные и виртуальные подобъекты?
  такое чувство что сначала должны конструироваться все виртуальные а потом все остальные

*только хуже

Виртуальные базовые классы

- Вызов виртуальной функции при множественном наследовании должен пройти через дополнительный уровень диспетчеризации
- А при виртуальном наследовании через ещё один дополнительный уровень из-за того, что таблицы для виртуальных подобъектов должны быть отдельно смержены



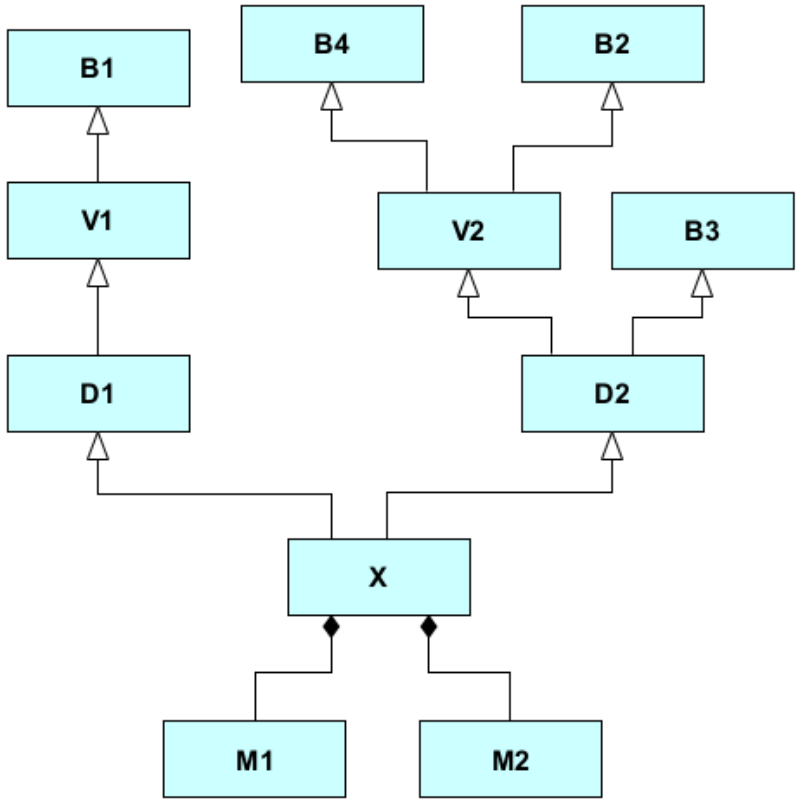
Списки инициализации

- Виртуальный базовый класс обязан появиться в списке инициализации самого нижнего подобъекта

```
struct InputFile : virtual public File {
  InputFile() : File(smths1) {} // этот File() не вызовется для IOFile
};

struct OutputFile : virtual public File {
  OutputFile() : File(smths2) {} // этот File() не вызовется для IOFile
};

struct IOFile : public InputFile, public OutputFile {
  IOFile() : File(smths3), InputFile(), OutputFile() {}
};

IOFile f; // вызовет File(smth3)
```

Case study: сложная диаграмма

Порядок инициализации?



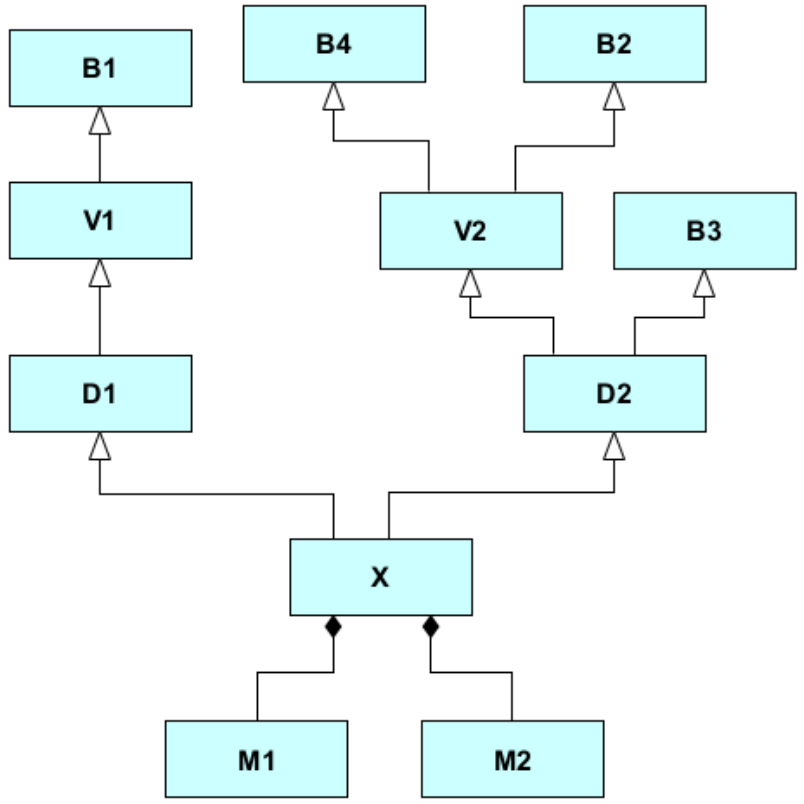
Case study: сложная диаграмма

Порядок инициализации?

- `V1: B1, V1`
- `V2: B4, B2, V2`
- `D1: D1`
- `D2: B3, D2`
- `X: M1, M2, X`

Итого:

`B1, V1, B4, B2, V2, D1, B3, D2, M1, M2, X`



Обсуждение

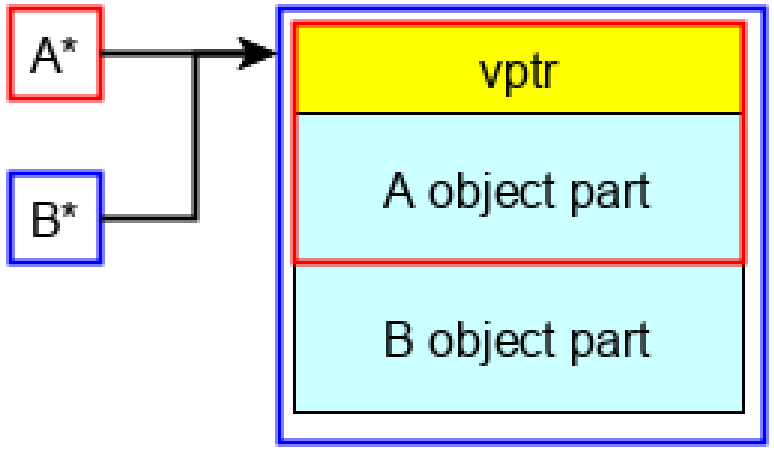
- Множественное наследование уже кажется мрачным?
- Это мы ещё не дошли до по-настоящему мрачных вещей
- Дело в том, что проблемы возможно не только с ромбовидными схемами

Проблема преобразований

- Для того, чтобы при одиночном наследовании преобразовать вверх или вниз по указателю или ссылке достаточно static cast

```
struct Base {};

struct Derived : public Base {};

Derived *pd = new Derived{};

Base *pb = static_cast<Base*>(pd); // ok

pd = static_cast<Derived*>(pb); // ok
```

- Сработает ли такой подход при множественном наследовании?

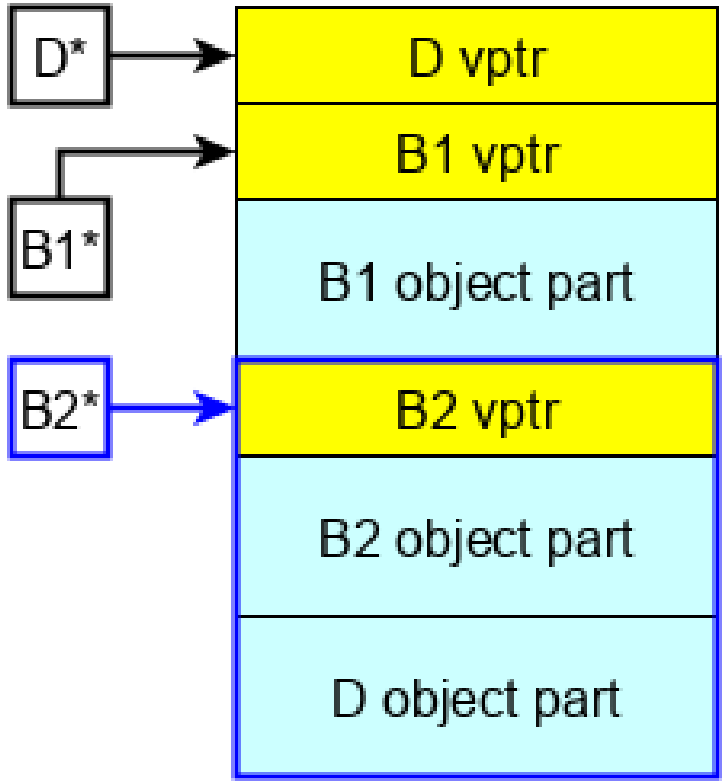


Проблема преобразований

- Как ни странно всё магическим образом прекрасно работает при касте вверх

```
struct B1 {};
struct B2 {};
struct D : B1, B2 {};

D *pd = new D{};

B1 *pb1 = static_cast<B1*>(pd); // ok

B2 *pb2 = static_cast<B2*>(pd); // ok
```

- Мало того, всё магическим образом работает и вниз (см. пример)



mult-casts.cc

Обсуждение

- Такое чувство что при виртуальном наследовании из-за смерженных таблиц не должен работать каст вниз?

- Наследование
- Полиморфизм
- Множественное наследование
- RTTI

Runtime Type Information

- Для разрешения насущных вопросов (например "какой у меня динамический тип") и свободного хождения вниз-вверх по иерархиям классов, программа на C++ должна во время исполнения поддерживать особые невидимые программисту структуры данных
- Это очень странное решение для C++ потому что оно противоречит идеологии языка
- В языке ровно два таких сомнительных механизма: RTTI и исключения
- Много раз делались попытки завести к ним какой-нибудь третий, но других ошибок с 1998 года комитет ни разу не делал
- И конечно основа RTTI это typeinfo

Возможности typeid

- Оператор typeid возвращает объект `std::typeinfo` который можно сравнивать и можно выводить на экран
- Этот объект представляет собой динамический или статический тип

```
OutputFile *pof = new IOFile{5};

assert(typeid(*pof) == typeid(IOFile)); // динамический тип
```

- typeid может брать type или expression, если он берёт expression то динамический тип выводится только если это lvalue expression объекта с хотя бы одной виртуальной функцией

```
assert(typeid(pof) != typeid(IOFile*)); // статический тип
```


mult-casts-typeid.cc

Возможности dynamic_cast

- Самым распространённым (и самым накладным) механизмом RTTI является `dynamic_cast`. Он может приводить типы внутри иерархий

```
IOFile *piof = new IOFile{}; // File это виртуальная база

File *pf = static_cast<File *>(piof); // ok

InputFile *pif = dynamic_cast<InputFile *>(pf); // ok

OutputFile *pof = dynamic_cast<OutputFile *>(pf); // ok

pif = dynamic_cast<InputFile *>(pof); // ok!
```

- Обратите внимание, возможно приведение к сестринскому типу

romb-virtual-dyn-casts.cc

Ограничения

- dynamic_cast ходит по всем путям, в том числе виртуальным. Время его работы может превышать время работы static_cast на порядки
- К тому же затраты на dynamic_cast могут изменяться при изменении иерархий наследования
- При отсутствии таблиц виртуальных функций, dynamic_cast ведёт себя как static_cast и это наиболее безумное его использование
- dynamic_cast работает только для указателей и для ссылок
- Причём он работает для них по разному

Поведение dynamic_cast при ошибке

- В случае, если dynamic_cast не может привести указатель, он возвращает нулевой указатель

```
OutputFile *pof = new OutputFile{13};
InputFile *pif = dynamic_cast<InputFile *>(pof);

assert(pif == nullptr);
```

- Но что он может сделать если он используется для ссылок?

```
OutputFile &rof = *pof;
InputFile &rif = dynamic_cast<InputFile &>(rof);
```

- Ведь нет никакой "нулевой ссылки"

dyn-casts-errs.cc

Обсуждение

- На самом деле у нас накопилось уже несколько вопросов
- Что делать dynamic_cast если он работает для ссылок?
- Что возвращать typeid если он вызван для nullptr?
- Как вернуть код ошибки из перегруженного оператора сложения?
- Похоже в языке должен быть некий фундаментальный механизм, отвечающий за такие вещи. И этот механизм – исключения
- Но о них речь пойдёт позже

Литература

- [CC11] ISO/IEC 14882 – "Information technology – Programming languages – C++", 2011
- [BS] Bjarne Stroustrup – The C++ Programming Language (4th Edition) , 2013
- [LP] Stanley B. Lippman – Inside the C++ Object Model, 1996
- [GB] Grady Booch – Object-Oriented Analysis and Design with Applications, 2007
- [LB] Barbara Liskov – Keynote address - data abstraction and hierarchy, 1987
- [DB] Alfred Aho, Jeffrey Ullman – Compilers: Principles, Techniques, and Tools (2nd Edition), 2006
- [Aut] Jeffrey Ullman – Automata Theory online course, lagunita.stanford.edu
- [$Comp$] Alex Aiken – Compilers online course, lagunita.stanford.edu