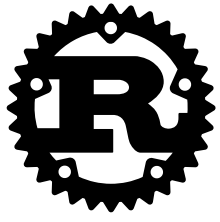
Rust 2019

compscicenter.ru

aleksey.kladov@gmail.com



Лекция 12
Коллекции

Выделение Памяти

Выделение Памяти

`std::alloc`

```
impl Layout {
    pub fn from_size_align(size: usize, align: usize)
        -> Result<Layout, LayoutErr>;
    pub fn size(&self) -> usize;
    pub fn align(&self) -> usize;
}
```

`std::alloc::Layout` описывает память, которую нужно выделить:

- размер
- ограничения по выравниванию

Для сравнения, `malloc` принимает только размер

Выделение Памяти

`std::alloc`

```
pub unsafe fn alloc(layout: Layout) -> *mut u8
pub unsafe fn dealloc(ptr: *mut u8, layout: Layout);
```

Аналоги `malloc` и `free`

Safety:

- `layout` должен иметь не нулевой размер,
- `ptr` в `dealloc` должен быть получен из `alloc`

`dealloc` требует **`layout`**, можно эффективнее реализовать аллокатор

GlobalAlloc

```
pub unsafe trait GlobalAlloc {
    unsafe fn alloc(&self, layout: Layout) -> *mut u8;
    unsafe fn dealloc(&self, ptr: *mut u8, layout: Layout);
    ...
}
```

`GlobalAlloc` — другая сторона API выделения памяти, позволяет поменять аллокаор по умолчанию

Safety:

- трейт **`unsafe`**, имплементация должна гарантировать, что `alloc` возвращает пустую память
- функции **`unsafe`** — вызывающий код должен гарантировать, что `dealloc` вызывается корректно

GlobalAlloc

Системный аллокатор (libc::malloc):

lib.rs

```
use std::alloc::System;

#[global_allocator]
static GLOBAL: System = System;
```

jemalloc:

Cargo.toml

```
[dependencies]
jemallocator = "0.3.0"
```

lib.rs

```
#[global_allocator]
static GLOBAL: jemallocator::Jemalloc = jemallocator::Jemalloc;
```

Vec

Box

Почему смотрим на `Vec` а не на `Box`?

- `Vec` — на 100% библиотечный тип, `Box` — на 90%, как `[T]`
- `Vec` — интереснее

Vec

src/liballoc/vec.rs

```
pub struct Vec<T> {
    buf: RawVec<T>,
    len: usize,
}
```

src/liballoc/raw_vec.rs

```
pub struct RawVec<T, A: Alloc = Global> {
    ptr: Unique<T>,
    cap: usize,
    a: A,
}
```

Разделение **`struct`** и **`impl`** это большой бонус к читаемости: 7 строк, и уже понятна имплементация в общих чертах

Vec

`src/liballoc/vec.rs`

```
pub struct Vec<T> {
    buf: RawVec<T>,
    len: usize,
}
```

`src/liballoc/raw_vec.rs`

```
pub struct RawVec<T, A: Alloc = Global> {
    ptr: Unique<T>,
    cap: usize,
    a: A,
}
```

`RawVec` — управляет памятью под `cap` объектов, не вызывает деструкторы

`Vec` — `RawVec` + `len`, вызывает `drop`

RawVec

```
pub struct RawVec<T, A: Alloc = Global> {
    ptr: Unique<T>, (1)
    cap: usize,
    a: A,
}

pub struct Unique<T: ?Sized> {
    pointer: *const T, (3)
    _marker: PhantomData<T>, (2)
}
```

1. указатель на буфер
2. маркер для dropcheck: `Unique<T>` владеет `T`
3. `*const` для ковариантности

RawVec

```
pub struct RawVec<T, A: Alloc = Global> {
    ptr: Unique<T>,
    cap: usize, (1)
    a: A,
}
```

(1) размер буфера (не все элементы инициализированы)

RawVec

```
pub struct RawVec<T, A: Alloc = Global> { (2)
    ptr: Unique<T>,
    cap: usize,
    a: A, (1)
}
```

(1) аллокатор данного вектора

(2) по умолчанию — `Global`

`Global` — ZST, размер вектора с дефолтным аллокаторм — 24

Размер `RawVec<T, &'a MyBumpAllocator>` — 32

```rust
impl<T> Vec<T> {
    pub const fn new() -> Vec<T> {
        Vec { buf: RawVec::new(), len: 0 }
    }
}

impl<T, A: Alloc> RawVec<T, A> {
    pub const fn new_in(a: A) -> Self {
        let cap = if mem::size_of::<T>() == 0 { !0 } else { 0 };

        RawVec {
            ptr: Unique::empty(),
            cap,
            a,
        }
    }
}
```

- new не аллоцирует — полезный паттерн
- ZST не магия — нужна явная поддержка со стороны stdlib

Deref / DerefMut

```
impl<T> ops::Deref for Vec<T> {
    type Target = [T];

    fn deref(&self) -> &[T] {
        unsafe {
            let p = self.buf.ptr();
            assume(!p.is_null()); 1
            slice::from_raw_parts(p, self.len)
        }
    }
}
```

1 указание оптимизатору

Бесплатно получили все методы `&[T]` и `&mut [T]`, в том числе итераторы по ссылкам

push

```
impl<T> for Vec<T> {
    pub fn push(&mut self, value: T) {
        if self.len == self.buf.cap() { self.reserve(1); } (1)
        unsafe {
            let end = self.as_mut_ptr().add(self.len); (2)
            ptr::write(end, value); (3)
            self.len += 1;
        } (4)
    }
}
```

1. самое интересное, удвоение размера, тут
2. `as_mut_ptr` — метод на `&mut [T]`
3. `unsafe fn write<T>(dst: *mut T, src: T)` — `memcpy` + `mem::forget`
4. **инвариант** - первые `len` элементов инициализированы

set_len

```
impl<T> Vec<T> {
    pub unsafe fn set_len(&mut self, new_len: usize) {
        debug_assert!(new_len <= self.capacity());

        self.len = new_len;
    }
}
```

`set_len` — публичный **`unsafe`** метод, иногда позволяет заполнить ветор эффективнее, чем `push` или `collect`

Метод не содержит **`unsafe`** операций, если убрать **`unsafe`**, код *будет* компилироваться

unsafe и инварианты

`unsafe` блок заражает весь модуль: ошибка снаружи

`unsafe` может нарушить memory safety

При корректном использовании **`unsafe`** всё публичное API должно безопасно

```
// OK!
pub unsafe fn set_len(&mut self, new_len: usize)

// Так себе, но формально OK
fn set_len(&mut self, new_len: usize)

// Неправильный unsafe код в Deref
pub fn set_len(&mut self, new_len: usize)
```

pop

```
impl <T> Vec<T> {
    pub fn pop(&mut self) -> Option<T> {
        if self.len == 0 {
            None
        } else {
            unsafe {
                self.len -= 1;
                Some(ptr::read(self.get_unchecked(self.len())))
            }
        }
    }
}
```

- `get_unchecked` — метод `&[T]`
- `unsafe fn read<T>(src: *const T) -> T` — антоним `write`
- память при `pop` не освобождается (есть `shrink_to_fit`)

Drop

```
unsafe impl<#[may_dangle] T> Drop for Vec<T> { (1)
    fn drop(&mut self) {
        unsafe {
            ptr::drop_in_place(&mut self[..]); (2)
        }
    } (3)
}
```

1. dropcheck eyepatch: `Vec<&'a T>` может чуть-чуть пережить `'a`
2. ручной вызов деструкторов для первых `len` элементов
3. вызов drop у `buf: RawVec<T>`, который освобождает память

reserve

```
impl<T> Vec<T> {
    pub fn reserve(&mut self, additional: usize) {
        self.buf.reserve(self.len, additional); (1)
    }
}
```

(1) передаём в `RawVec` текущую длину: при выделении нового буфера, `RawVec` скопирует первые `len` элементов

```
impl<T> RawVec<T> {
    pub fn reserve(
        &mut self,
        used_cap: usize,
        needed_extra_cap: usize,
    ) {
        let res = self.reserve_internal(
            used_cap, needed_extra_cap, Infallible, Amortized
        );
        match res {
            Err(CapacityOverflow) => capacity_overflow(),
            Err(AllocErr) => unreachable!(),
            Ok(()) => { /* yay */ }
        }
    }
}
```

Просим аллоцировать в два раза больше (`Amortized`)

В случае ошибки аллокатора — `abort` (`Infallible`)

```rust
fn amortized_new_size(
    &self,
    used_cap: usize,
    needed_extra_cap: usize,
) -> Result<usize, CollectionAllocErr> {
    // Nothing we can really do about these checks :(
    let required_cap = used_cap.checked_add(needed_extra_cap)
        .ok_or(CapacityOverflow)?;
    // Cannot overflow, because `cap <= isize::MAX`,
    // and type of `cap` is `usize`.
    let double_cap = self.cap * 2;
    // `double_cap` guarantees exponential growth.
    Ok(cmp::max(double_cap, required_cap))
}
```

Коэффициент роста — 2, есть гипотеза, что 1.5 — лучше:

github.com/facebook/folly/ ... /FBVector.md#memory-handling

```rust
fn reserve_internal(
    &mut self,
    used_cap: usize,
    needed_extra_cap: usize,
    fallibility: Fallibility,
    strategy: ReserveStrategy,
) -> Result<(), CollectionAllocErr> {
    unsafe {
        ...
    }
}
```

```rust
fn reserve_internal( ... ) -> Result<(), CollectionAllocErr> {
    unsafe {
        if self.cap().wrapping_sub(used_cap) >= needed_extra_cap {
            return Ok(()); (1)
        }
        let new_cap = match strategy { (2)
            Exact => used_cap.checked_add(needed_extra_cap)
                .ok_or(CapacityOverflow)?,
            Amortized => self.amortized_new_size(
                used_cap,
                needed_extra_cap,
            )?,
        };
        ...
    }
}
```

1. fast path: место уже есть (ZST попадаю сюда)
2. посчитали новую capacity:

   `max(self.cap * 2, used_cap + needed_extra_cap)`

```rust
fn reserve_internal( ... ) -> Result<(), CollectionAllocErr> {
    unsafe {
        ...

        let new_layout = Layout::array::<T>(new_cap)
            .map_err(|_| CapacityOverflow)?; (1)

        alloc_guard(new_layout.size())?; (2)

        ...
    }
}
```

1. посчитали size и alignment для массива из `new_cap` элементов типа T
2. проверили технический инвариант: `size <= isize::MAX`

```rust
fn reserve_internal( ... ) -> Result<(), CollectionAllocErr> {
    unsafe {
        ...
        let res = match self.current_layout() { (1)
            Some(layout) => {
                self.a.realloc(
                    NonNull::from(self.ptr).cast(),
                    layout, new_layout.size(),
                ) (3)
            }
            None => self.a.alloc(new_layout), (2)
        };
        ...
    }
}
```

1. посчитали текущий `Layout` (`None` если `cap == 0`)
2. случай `cap == 0`, просто аллоцируем память
3. магия!

realloc

```
pub unsafe trait GlobalAlloc {
    unsafe fn realloc(
        &self,
        ptr: *mut u8,
        layout: Layout,
        new_size: usize
    ) -> *mut u8 { ... }
}
```

`realloc` выделяет новую память, копирует данные, освобождает старую память

В Rust, `realloc` работает для *любых* объектов, так как `move` есть всегда и это `memcpy`

В C++ будут вызваны **`move`** конструкторы, если они noexcept

realloc

Хорошие аллокаторы не копируют данные при `realloc`, а меняют таблицу страниц (`mremap`)

`realloc` это магия!

```
fn reserve_internal( ... ) -> Result<(), CollectionAllocErr> {
    unsafe {
        ...
        let res = match self.current_layout() {
            Some(layout) => {
                self.a.realloc(
                    NonNull::from(self.ptr).cast(),
                    layout, new_layout.size(),
                )
            }
            None => self.a.alloc(new_layout),
        };
        ...
    }
}
```

```rust
fn reserve_internal( ... ) -> Result<(), CollectionAllocErr> {
    unsafe {
        ...
        match (&res, fallibility) { (1)
            (Err(AllocErr), Infallible) =>
                handle_alloc_error(new_layout), // -> !
            _ => {}
        }

        self.ptr = res?.cast().into(); (1) (2)
        self.cap = new_cap; (3)

        Ok(())
    }
}
```

1. обработали ошибку
2. превратили `*mut u8` в `*mut T`
3. записали новую capacity

```rust
unsafe impl<#[may_dangle] T, A: Alloc> Drop for RawVec<T, A> {
    fn drop(&mut self) {
        unsafe { self.dealloc_buffer(); }
    }
}

impl<T, A: Alloc> RawVec<T, A> {
    /// Frees the memory owned by the RawVec *without*
    /// trying to Drop its contents.
    pub unsafe fn dealloc_buffer(&mut self) {
        let elem_size = mem::size_of::<T>();
        if elem_size != 0 {
            if let Some(layout) = self.current_layout() {
                self.a.dealloc(
                    NonNull::from(self.ptr).cast(),
                    layout,
                );
            }
        }
    }
}
```

Vec

- `RawVec` управляет куском памяти, `Vec` управляет уничтожением объектов
- рост в два раза
- реализация полагается на то, что `move = memcpy`
- весь код потенциально **`unsafe`**, потому что может нарушить инвариант `len`

IntoIter

```
impl<T> IntoIterator for Vec<T> {
    type Item = T;
    type IntoIter = IntoIter<T>;

    /// Creates a consuming iterator.
    fn into_iter(mut self) -> IntoIter<T> { ... }
}

pub struct IntoIter<T> {
    buf: NonNull<T>,
    phantom: PhantomData<T>,
    cap: usize,
    ptr: *const T,
    end: *const T,
}
```

```rust
impl<T> Iterator for IntoIter<T> {
    type Item = T;
    fn next(&mut self) -> Option<T> {
        unsafe {
            if self.ptr as *const _ == self.end {
                return None
            }

            // ZST -- особый случай
            if mem::size_of::<T>() == 0 {
                self.ptr = arith_offset(
                    self.ptr as *const i8, 1
                ) as *mut T;
                return Some(mem::zeroed())
            }
            let old = self.ptr;
            self.ptr = self.ptr.offset(1);
            Some(ptr::read(old))
        }
    }
}
```

IntoIter

```
unsafe impl<#[may_dangle] T> Drop for IntoIter<T> {
    fn drop(&mut self) {
        // destroy the remaining elements
        for _x in self.by_ref() {}

        // RawVec handles deallocation
        let _ = unsafe {
            RawVec::from_raw_parts(self.buf.as_ptr(), self.cap)
        };
    }
}
```

Drain

```rust
let before = xs.len();
for x in xs.drain(10..20) {
    process(x)
}
assert_eq!(xs.len(), before - 10);
```

`drain` это consuming итератор по части элементов

В `drop` `Drain` сдвигает элементы в образовавшуюся дырку

Композиция unsafe

Leak Amplification

Нет гарантии, что drop будет вызван

В конструкторе `Drain` устанавливает длину вектора в 0, в деструкторе — восстанавливает

Если утечь `Drain`, то не будут вызваны деструкторы оставшихся элементов вектора, leak amplification

Если бы `Drain` не обнулял длину, то можно было бы получить доступ к не валидным элементам из дырки!

Leakpocalypse Now!

В Rust 1.0 функция `mem::forget` была помечена **`unsafe`**

Но можно написать безопасный `forget`!

Leakpocalypse Now!

Трюк — можно создать цикл из счётчиков ссылок

Хватит цикла длины 1:

```
fn safe_forget<T>(value: T) {
    use std::cell::RefCell;
    use std::rc::Rc;

    struct Holder<T> {
        value: T,
        link: RefCell<Option<Rc<Holder<T>>>>,
    }

    let holder = Holder { value, link: RefCell::new(None) };
    let holder = Rc::new(holder);
    let holder2 = Rc::clone(&holder);
    *holder.link.borrow_mut() = Some(holder2);
}
```

Leakpocalypse Now!

В Rust, где `mem::forget` это **`unsafe`** функция можно:

1. Написать `Rc<T>`, и это будет OK.
2. Написать `thread::scoped`, пологающийся на вызов деструктора, и это тоже будет OK!

Но 1 + 2 вместе ведут к use after free!

По отдельности, **`unsafe`** блоки в `Rc` и в `thread::scoped` корректны, но вместе кто-то из них не прав

observational-equivalence-and-unsafe-code

std::collections

Кэш

```
Latency Comparison Numbers (~2012)
----------------------------------
L1 cache reference                           0.5 ns
Branch mispredict                            5   ns
L2 cache reference                           7   ns
Mutex lock/unlock                           25   ns
Main memory reference                      100   ns  200x L1 cache
```

interactive_latency.html

CPU существенно быстрее памяти

Ключ к производительности — компактные структуры данных с хорошей spatial locality

Массив лучше связного списка

BTreeMap

Сбалансированное дерево поиска (`K: Ord`)

В узлах хранится `[(K, V); CAPACITY]`

```rust
const B: usize = 6;
pub const MIN_LEN: usize = B - 1;
pub const CAPACITY: usize = 2 * B - 1;
```

Быстрее, чем красно-чёрное или AVL дерево

В C++ `std::map` нельзя реализовать при помощи B-дерева из-за гарантий инвалидации итераторов

BTreeSet

```rust
pub struct BTreeSet<T> {
    map: BTreeMap<T, ()>,
}
```

`()` это ZST: ничего лишнего не храним!

HashMap / HashSet

Для хэш таблиц есть две основные стратегии реализации:

- chaining — bucket элементов с совпадающим хэшом это `LinkedList`
- open addressing — все элементы хранятся в одном массиве, при коллизии записываем элемент в соседний слот

В Rust — SIMD accelerated open addressing (state of the art!): https://github.com/rust-lang/hashbrown

В `C++` API `std::unordered_map` открывает `chaining` как деталь реализации

Хэш Функция

`HashMap` / `HashSet` параметризованы хэш функцией

По умолчанию — `SipHash`: не самый быстрый, но очень collision resistent хэш

`FxHash` — подвержен DoS, но быстрее, используется в компиляторе

Entry API

```
if !map.contains(key) {
    map.insert(key, value)
}
```

Performance code smell: ключ `key` ищется в коллекции два раза

```
use std::collections::hash_map::{HashMap, Entry};

match counts.entry(key) {
    Entry::Vacant(entry) => { entry.insert(1); },
    Entry::Occupied(entry) => *entry.into_mut() += 1,
}

*counts.entry(key).or_insert_with(|| 0) += 1;
```

API, похожее на entry, есть во многих языках программирования!

Ещё Коллекции

- `VecDeque` — очередь, ring buffer внутри
- `BinaryHeap` — очередь с приоритетом (интересная **`unsafe`** реализация sift-up, минимизирующая копирования)
- `LinkedList`

https://github.com/gnzlbg/slice_deque:
безумные трюки с виртуальной памятью;
`VecDeque`, на который можно посмотреть как на `[T]`

https://github.com/BurntSushi/fst:
Хранение множества строк в виде автомата, хороший способ написать fuzzy search