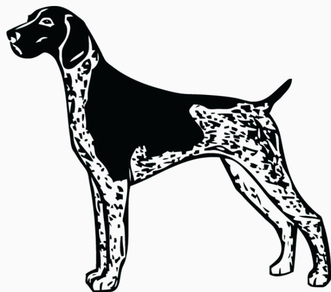
Správa paměti; ukazatele obyčejné i chytré

PB161 Programování v jazyce C++

Nikola Beneš

19. března 2024

Ukazatele



Klasické ukazatele

Datové ukazatele `typ*`

- hodnotou je
    - adresa objektu
    - adresa *těsně za* objektem (typické použití pro pole)
    - žádná adresa (*null*) – ukazatel `nullptr`
    - nevalidní adresa (objektu po konci života)
- `typ` může být i `void`
- místo typu můžeme použít `auto`

Funkční ukazatele – uvidíme později

Členské ukazatele – mimo záběr předmětu

Poznámka: klasickým ukazatelům se někdy říká „syrové“ (*raw*).

Adresa objektu – unární `&`

- jen pro l-hodnoty
- vrací hodnotu typu ukazatel
- (`&` může být přetíženo, proto máme `std::addressof`)

Dereference – unární `*`

- jen pro validní ukazatele na objekt
- vrací (l-hodnotovou) *referenci* na odkazovaný objekt
- `ptr->x` je ekvivalent `(*ptr).x`

Operace s datovými ukazateli

`ptr_cmp.cpp`

Rovnost `==`

- oba jsou *null* nebo oba reprezentují stejnou adresu

Uspořádání `<` apod.

- specifikováno pouze pro ukazatele dovnitř stejného objektu (pole, záznamu, ntice)
- menší ukazatel je ten s adresou dříve deklarované položky
  - pro pole: podle indexu
- ukazatel *těsně za* objekt je větší než ukazatel na tento objekt nebo libovolnou jeho položku

Aritmetika

- pro ukazatele dovnitř polí[1]
- přičtení / odečtení celého čísla, `++`, `--`
  - posun v poli o daný počet položek
  - je možné se posunout *těsně za* pole
- odečtení dvou ukazatelů (dovnitř stejného pole)
  - vzdálenost položek v poli (se znaménkem)
  - výsledek typu `std::ptrdiff_t` (znaménkové celé číslo)
- „indexování“ ukazatele – `ptr[i]` je ekvivalent `*(ptr + i)`

[1] ostatní objekty se pro účely ukazatelové aritmetiky chovají jako pole o velikosti 1

Použití s `const`

- rozdíl mezi `const` „před hvězdičkou“ a „za hvězdičkou“
- `const typ*` ukazatel – dereference vrací `const typ&`
    - nesmíme měnit odkazovaný objekt
    - ale ukazatel jako takový můžeme (přiřazením, `++` apod.)
- `typ* const` ukazatel – dereference vrací `typ&`
    - smíme měnit odkazovaný objekt
    - ukazatel měnit nesmíme
    - (není moc užitečné, typicky spíš chcete referenci)
- `const typ* const` – nesmíme měnit nic

Datové ukazatele

Implicitní konverze

- `nullptr` na libovolný ukazatelový typ
- `typ*` na `const typ*`
- libovolný ukazatel na `bool`
  - `false` pro *null*, `true` jinak
- `typ*` na `void*`; `const typ*` na `const void*`

Explicitní konverze – pomocí `static_cast`

- libovolná implicitní
- `void*` na `typ*` (případně s `const`)
  - je třeba zaručit, že skutečně ukazuje na objekt daného typu (resp. dle pravidel pro *type aliasing* – mimo záběr předmětu)

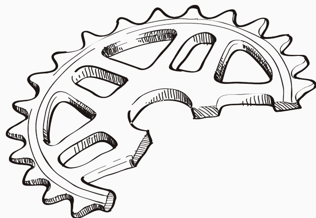
Poznámka: o konverzích při dědičnosti bude řeč později.

Ukazatele vs. reference

Používat reference nebo ukazatele?

- *„use references if you can, pointers if you must"*
- dávejte přednost použití referencí
- ukazatele jen tam, kde
  - dává smysl **`nullptr`** (a jste připraveni se s ním vyrovnat)
  - dává smysl přesměrování v průběhu života ukazatele

Iterátory



Motivace

- zobecnění ukazatelů do pole
    - nevlastní položky, jen na ně ukazují
    - „lehké objekty“, je v pořádku je kopírovat
- pro různé druhy kontejnerů, ale nejen pro ně
    - (iterátor pro čtení ze / zápis do souboru, …)
- umožňují generické algoritmy
    - nezávislé na konkrétní datové struktuře
    - (více o knihovně algoritmů později)
- různé druhy iterátorů podporují různou podmnožinu „ukazatelových“ operací
    - https://en.cppreference.com/w/cpp/iterator

Operace

- dereference `*`
    - dereference pro čtení / zápis dle druhu iterátoru
    - nemusí nutně vracet referenci
    - některé druhy navíc i operátor `->`
- inkrement `++`
- typicky také: porovnání `==`/ `!=`
    - minimálně s iterátorem *za konec*[2]
- další operace podle druhu iterátoru
    - obousměrný (bidirectional): dekrement `--`
    - s náhodným přístupem (random-access): „ukazatelová“ aritmetika `+`, `-`, `[]`, `<` apod.

[2] od C++20 obecnější zarážka (*sentinel*)

Minimum nutné pro použití cyklu `for` po prvcích

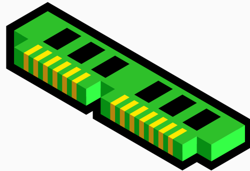
- metody `begin()`, `end()`
- dereference `*`, prefixový inkrement `++`, porovnání `!=` s iterátorem *za konec* (zarážkou)

Přetížený operátor unární `*`

- typická implementace jako metoda
- vrací (pokud možno) referenci na položku kontejneru

Poznámka: operátor `->` se automaticky nevygeneruje, je třeba jej případně přetížit (složitější, mimo záběr předmětu)

Správa (dynamické) paměti



Dynamická alokace

Nízkoúrovňová

- „zděděno“ z C: `std::malloc` / `std::free`
  - v C++ nepoužíváme, jen při nutnosti interagovat s C
- s inicializací: **`new`** / **`delete`**
  - v moderním C++ spíše nepoužíváme
  - ale je vhodné vědět, jak funguje
- bez inicializace, s pomocí tzv. alokátorů
  - mimo záběr předmětu

Vysokoúrovňová

- souvisí s konceptem vlastnictví
  - automatická dealokace v rámci „úklidu“
- prostředky standardní knihovny, příp. jiných knihoven
  - `std::vector` a jiné kontejnery
- chytré ukazatele

Nízkoúrovňová dynamická alokace

`new_delete.cpp`

Operátor `new` – alokace s případnou inicializací

- jeden objekt nebo („Céčkové“) pole objektů
- výsledkem je ukazatel na objekt nebo na první položku pole

```
int* ptr = new int;
int* array = new int[size];
```

- když se alokace nezdaří, vyhodí výjimku `std::bad_alloc`

Operátor `delete` – destrukce a dealokace

```
delete [] array;
delete ptr;
```

- musí odpovídat použitému `new`
- nehlídá kompilátor! (někdy ovšem umí dát varování)

Inicializace alokovaných objektů

```
int* ptr1 = new int;    // uninitialised!
int* ptr2 = new int{ 17 };
int* ptr3 = new int{};  // initialised to zero

auto* ptr4 = new point;  // calls point()
auto* ptr5 = new point{ 4, 2 };
```

Nízkoúrovňová správa paměti

Problémy správy paměti

- *memory leak* (alokovaná paměť, na kterou již nemáme ukazatel)
- zápis do/čtení z nealokované paměti
- čtení z neinicializované paměti
- volání `delete` na špatný ukazatel
- volání `delete` místo `delete []` a naopak
- volání `free` na paměť alokovanou `new`, nebo `delete`/`delete[]` na paměť alokovanou `malloc`

Motivace pro chytré ukazatele

- chceme ukazatel, který sám provede `delete`, když je potřeba

Chytré ukazatele

Motivační příklad

owner.cpp

Myšlenka

- chceme zřetězený seznam s automatickou dealokací
- *vlastnictví:* seznam vlastní první uzel; uzel vlastní následníka
- k úklidu použijeme destruktor (princip RAII)

```
struct node_ptr {
    node* ptr;
    node_ptr(node* ptr = nullptr) : ptr(ptr) {}
    ~node_ptr() { release(); }
};

void node_ptr::release() {
    delete ptr;
}
```

Kopírování, přesun

- pamatujme na *rule of five*! (nebo rule of four and a half)
- kopírování zakážeme (nedává smysl)
- přesun povolíme (a explicitně implementujeme)

```
node_ptr(node_ptr&& other) noexcept
  : ptr(other.ptr) {
    other.ptr = nullptr;
}

node_ptr& operator=(node_ptr&& other) noexcept {
    release();
    ptr = other.ptr;
    other.ptr = nullptr;
    return *this;
}
```

Motivační příklad

… a to je vše.

- napsali jsme si vlastní *chytrý ukazatel*
- vlastní dynamicky alokovanou paměť pro uzel
    - uklízí (dealokuje) v destruktoru
- vlastnictví umíme *explicitně předat* pomocí `std::move`
- *všimněte si:* stále můžeme používat syrové ukazatele
    - tam, kde nechceme přebírat vlastnictví
    - např. v implementaci iterátoru

Vysokoúrovňová dynamická alokace

Chytré ukazatele

- ve standardní knihovně (od C++11[3]), příp. i jinde (*boost*)
- úklid ve chvíli, kdy už paměť není potřeba (v destruktoru)
- souvisí s konceptem *vlastnictví*

`std::unique_ptr`

- unikátní vlastník alokované paměti
- nulová režie za běhu

`std::shared_ptr`

- sdílené vlastnictví; „poslední zhasne“
- režie spojená s počítáním odkazů; pomalejší

[3] v C++03 existoval `std::auto_ptr`, ale byl nahrazen `std::unique_ptr`

std::unique_ptr

- jednoduchý, ale pokrývá většinu potřeb
- nulová režie za běhu
  - výsledný kód je stejně rychlý[4] jako s ruční dealokací
- použitelný pro jednotlivé objekty i pole
  - pro dynamická pole ovšem preferujte `std::vector`
- základní princip: unikátní vlastnictví
  - `std::unique_ptr` uvnitř drží ukazatel na alokovanou paměť
  - na konci života objektu se zavolá **`delete`** na tento ukazatel
  - vlastnictví se nedá sdílet – `std::unique_ptr` se nedá kopírovat, ale může se přesouvat – explicitní *předání vlastnictví*

[4] za předpokladu kompilace *s optimalizacemi*, samozřejmě; viz https://godbolt.org/z/zx5EzY8Yx

Chytrý ukazatel `std::unique_ptr`

unique_ptr.cpp

Vytvoření ukazatele

- prázdná inicializace – `nullptr`
- inicializace ukazatelem na alokovanou paměť
- lepší řešení (od C++14) – `std::make_unique`

```
auto ptr = std::make_unique<thing>(17);
```

Práce s ukazatelem

- dereference `*`, `->` jako u klasických ukazatelů

```
ptr->do_something();
run(*ptr);
```

Chytrý ukazatel `std::unique_ptr`

`unique_ptr.cpp`

Předání vlastnictví

- přesun; použití `std::move`

```
ptr1 = std::move(ptr2);
```

Uvolnění paměti (destrukce objektu + dealokace)

- automatická na konci života `std::unique_ptr`
- automatická na levé straně při přiřazení
- explicitní pomocí `reset()`

Chytrý ukazatel `std::unique_ptr`

Typová konverze na `bool`

- totéž jako `ptr != nullptr`

Přímý přístup k syrovému ukazateli

- metoda `get()`
- např. potřebujeme-li volat funkci s ukazatelovým parametrem
  - nezapomeňte: preferujte reference před ukazateli

Pozor! Metoda `release()` rovněž vrátí ukazatel, ale zruší vlastnictví (`std::unique_ptr` už jej dále nespravuje); raději ji nepoužívejte!

Jaký typ parametru zvolit?

- *hodnota* typu `std::unique_ptr`
    - chceme-li přebrat vlastnictví
    - volající se musí vlastnictví explicitně vzdát (`std::move`)
- syrový ukazatel na objekt `(const) thing*`
    - volání `fun(ptr.get())`
    - jasné sdělení, že nedochází ke změně vlastnictví
    - pokud dává smysl, aby funkce dostala **`nullptr`**
- reference na objekt `(const) thing&`
    - volání `fun(*ptr)`
    - nejlepší možnost, pokud nehodláme měnit vlastnictví
    - to, že ukazatel není **`nullptr`**, si zajistí *volající*

Volání funkcí a `std::unique_ptr`

`fun_call.cpp`

Nevhodné / nedoporučované způsoby volání

- (l-hodnotová) reference na `std::unique_ptr`
  - nedoporučované, volaná funkce může sebrat vlastnictví
- konstantní (l-hodnotová) reference na `std::unique_ptr`
  - nedoporučované
  - funkce smí modifikovat odkazovaný objekt
  - chová se *jako* `thing* const`
- r-hodnotová reference na `std::unique_ptr`
  - volající musí použít `std::move`
  - ale nemá záruku, že se skutečně *vzdal* vlastnictví
  - spíše nedoporučované (trochu otázka vkusu)

Datové struktury a std::unique_ptr

linked_list.cpp

- je třeba rozmyslet strukturu vlastnictví
    - nesmí být cyklická
    - jeden objekt nesmí mít dva různé vlastníky
    - tj. musí být „stromová“
- příklad: oboustranně zřetězený seznam
    - (uzly) `next` je `std::unique_ptr`, `prev` je syrový ukazatel
    - (seznam) `first` je `std::unique_ptr`, `last` je syrový ukazatel
    - nebo naopak
- příklad: binární strom
    - vztah „rodič vlastní potomky“
    - `left` a `right` jsou `std::unique_ptr`, `parent` je syrový ukazatel

Chytré ukazatele

`std::shared_ptr`

- komplikovanější, založený na počítání odkazů (*reference counting*)
- základní princip: sdílené vlastnictví
  - více různých vlastníků; `std::shared_ptr` udržuje jejich počet
  - kopie `std::shared_ptr` je sdílení (tj. nekopíruje se odkazovaný objekt)
  - zanikne-li poslední vlastník, zavolá se **`delete`**
- nutná režie s počítáním vlastníků
  - funguje i v paralelním prostředí
  - atomické počitadlo
- ukážeme si jen základní použití, `std::shared_ptr` je složitější (https://en.cppreference.com/w/cpp/memory/shared_ptr)

Chytrý ukazatel `std::shared_ptr`

`shared_ptr.cpp`

Vytvoření ukazatele

- podobně jako `std::unique_ptr`
- funkce `std::make_shared`

Práce s ukazatelem

- operátory `*`, `->`

Sdílení / předání vlastnictví

- kopírování – sdílení: `ptr1 = ptr2;`
- přesun – předání: `ptr1 = std::move(ptr2);`

Uvolnění paměti

- sníží-li se počet vlastníků na nulu
  - konec života vlastníka, přiřazení do vlastníka, `reset()`

Cyklická struktura vlastnictví

`shared_cycle.cpp`

```
struct node {
    thing value;
    std::shared_ptr<node> next;
};

int main() {
    auto n1 = std::make_shared<node>();
    auto n2 = std::make_shared<node>();
    n1->next = n2;
    n2->next = n1;
}
```

- cyklická závislost (`n1` vlastní `n2` a obráceně)
- nedojde k uvolnění paměti (a destrukci objektů typu `thing`)

Řešení

- je třeba „rozbít cykly“
    - struktura vlastnictví musí být acyklický graf (*dag*)
    - ostatní ukazatele nic nevlastní
- jedna možnost: syrové ukazatele
    - pokud jejich existence zaručeně nepřežije datovou strukturu
- druhá možnost: „slabý“ chytrý ukazatel
    - `std::weak_ptr` – mimo záběr předmětu

Porušení vlastnictví

bad.cpp

Problém se špatným vícenásobným vlastnictvím

- konstruktory `std::unique_ptr`, `std::shared_ptr` berou syrový ukazatel a přebírají jeho vlastnictví
- pokud už je ale ukazatel někým vlastněn, dojde k chybě!

```
auto ptr1 = std::make_unique<thing>();
auto* raw = ptr1.get();
std::unique_ptr<thing> ptr2{ raw };
```

- destruktory obou vlastníků zavolají **delete**
- totéž v případě `std::shared_ptr`
    - extra informace nutné pro počítání referencí nejsou vázány na syrový ukazatel
- pointa: používejte `std::make_unique`, `std::make_shared`, předávejte vlastnictví (přesouvacím) přiřazením / inicializací

Doporučení

Kdy použít dynamickou alokaci?

- vyhněte se pokud možno „syndromu kladiva"
  - „právě jsem se naučil používat kladivo a všechno v okolí mi připadá jako hřebík"
- potřebujete vůbec dynamicky alokovat?
  - lokální hodnotové proměnné jsou v pořádku
  - hodnotové položky jsou v pořádku
- nenabízí požadovanou funkcionalitu standardní knihovna?
  - `std::vector` nestojí o moc víc než dynamicky alokované pole
  - a lépe se s ním zachází

Doporučení

Kdy a jak použít `std::unique_ptr`?

- dá se určit unikátní vlastník (zodpovědný za úklid)?
    - bude žít alespoň tak dlouho jako alokovaná paměť?
- pokud ano, použijte `std::unique_ptr`
- jasně si rozmyslete, kdo bude *vlastníkem*
- ostatní uživatelé mohou mít syrový ukazatel na objekt (nebo ještě lépe, referenci)
    - vlastník musí přežít všechny ostatní uživatele

Doporučení

Kdy a jak použít `std::shared_ptr`?

- nedá se určit unikátní vlastník
  - (datová struktura, v níž existuje více rovnocenných „rodičů“)
- cykly je třeba přerušit pomocí nevlastnických ukazatelů
- uživatelé, kteří nemají být vlastníky, ale mohou je přežít, musí použít `std::weak_ptr`
- syrové ukazatele pro uživatele, kteří nikdy nepřežijí vlastníky

Doporučení

Kdy a jak použít `new` a `delete`?

- v moderním C++ pokud možno *nikdy* a *nijak*
- je ovšem vhodné rozumět tomu, co dělají
- chcete-li vytvářet novou datovou strukturu
  - rozmyslete se, jestli skutečně potřebujete vlastní správu paměti
  - většinou stačí `std::unique_ptr`, vzácněji `std::shared_ptr`
  - pokud skutečně chcete vlastní správu paměti:
    naučte se používat alokátory (nad rámec tohoto předmětu)

A `shared_ptr` *represents shared ownership but shared ownership isn't always ideal: By default, it is better if an object has a definite owner and a definite, predictable lifespan. Prefer the following in order: stack or member lifetime (stack variables or by-value member variables); heap allocation with* `unique_ptr` *unique ownership; and heap allocation via* `make_shared` *with shared ownership.* *(C++ FAQ)*