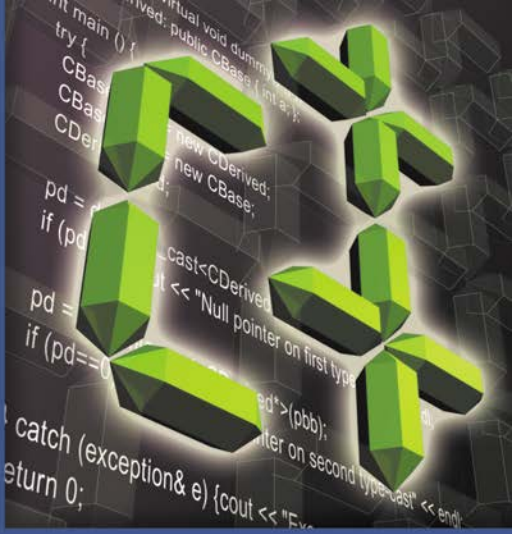
KANON INFORMATYKI



Nowoczesne projektowanie w C++

Uogólnione implementacje wzorców projektowych

KORZYSTAJ Z NOWOCZESNYCH TECHNIK W C++!

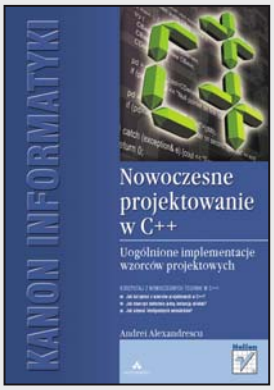
- Jak korzystać z wzorców projektowych w C++?
- Jak stworzyć dokładnie jedną instancję obiektu?
- Jak używać inteligentnych wskaźników?

Andrei Alexandrescu

ADDISON-WESLEY

Helion

Nowoczesne projektowanie w C++. Uogólnione implementacje wzorców projektowych



Autor: Andrei Alexandrescu
Tłumaczenie: Przemysław Szeremiota
ISBN: 978-83-246-3301-2
Tytuł oryginału: Modern C++ Design: Generic Programming and Design Patterns Applied
Format: 172×245, stron: 352

Korzystaj z nowoczesnych technik w C++!

- Jak korzystać z wzorców projektowych w C++?
- Jak stworzyć dokładnie jedną instancję obiektu?
- Jak używać inteligentnych wskaźników?

Język C++ jest obecny na rynku już niemal trzydzieści lat, a jednak nadal świetnie spełnia swoje zadania. Jest powszechnie używany, a wręcz niezastąpiony w wielu dziedzinach programowania. Wszędzie tam, gdzie potrzebna jest najwyższa wydajność oraz pełna kontrola nad zasobami i przebiegiem programu, sprawdza się wyśmienicie. Wystarczy odrobina chęci, dobry podręcznik i trochę czasu, aby wykorzystać pełną moc C++ w nowoczesnych technikach programowania.

Książkę, która Ci w tym pomoże, trzymasz właśnie w rękach. Czy znajdziesz czas i ochotę, aby zgłębić zawartą w niej wiedzę? Gwarantujemy, że warto! W trakcie lektury dowiesz się, jak zaimplementować w C++ najpopularniejsze wzorce projektowe. Dzięki nim błyskawicznie oprogramujesz typowe rozwiązania. Nauczysz się tworzyć dokładnie jedną instancję obiektu oraz zobaczysz, jak korzystać z fabryki obiektów czy inteligentnych wskaźników. Ponadto zapoznasz się z technikami projektowania klas, asercjami w trakcie kompilacji oraz uogólnionymi funktorami. Dzięki tej książce poczujesz na nowo satysfakcję z pisania programów w języku C++!

- Projektowanie klas
- Asercje czasu kompilacji
- Listy typów
- Alokowanie małych obiektów
- Funktory uogólnione
- Inteligentne wskaźniki
- Fabryka obiektów i fabryka abstrakcyjna
- Tworzenie dokładnie jednego obiektu – wzorzec singleton
- Multimetody

Czerp satysfakcję z korzystania z nowoczesnych technik programowania w C++!

Helion SA
ul. Kościuszki 1c
44-100 Gliwice
tel. 32 230 98 63
e-mail: helion@helion.pl

Spis treści

8.

9.

10.

11.

2

Techniki

Ten rozdział będzie prezentował zbiór technik C++, które będą stosowane w dalszej części książki. Są to techniki pomocne w rozmaitych kontekstach, a jako takie najczęściej bardzo ogólne i użyteczne uniwersalnie, co pozwala znajdować dla nich zastosowania również w innych dziedzinach. Niektóre z tych technik, jak częściowa specjalizacja szablonu, to mechanizmy wbudowane w język; inne, jak asercje statyczne (asercje czasu kompilacji), wymagają dodatkowego kodu obsługującego.

W rozdziale przedstawione zostaną następujące techniki (tudzież narzędzia):

- Asercje statyczne.
- Częściowa specjalizacja szablonu.
- Klasy lokalne.
- Odwzorowania typ-wartość (szablony klas `Int2Type` i `Type2Type`).
- Szablon klasy `Select` — narzędzie do wyboru typu w czasie kompilacji, zależnie od wartości warunku logicznego.
- Statyczne (w czasie kompilacji) wykrywanie dziedziczenia i możliwości konwersji.
- `TypeInfo` (poręczny dodatek do `std::type_info`).
- `Traits` — kolekcja cech typów stosowalnych do dowolnych typów C++.

Rozpatrywana z osobna, każda z tych technik (oraz kod ją realizujący) sprawia wrażenie trywialnej; zazwyczaj składa się na nią pięć do dziesięciu wierszy łatwego do ogarnięcia kodu. Ale wszystkie one mają istotną cechę: są technikami „nieterminalnymi", co należy rozumieć tak, że dają się łączyć z innymi technikami, czego wynikiem są idiomy wyższego poziomu. Razem stanowią zaś solidny fundament usług wspomagających budowanie efektywnych struktur architekturalnych projektu.

Omówienia technik nie są nadto suche, bo uzupełniają je przykłady. Zawartość rozdziału polecam również do referencji przy dalszej lekturze książki, gdzie pojawią się odniesienia do poszczególnych technik i ich konglomeratów.

2.1. Asercje statyczne

Od kiedy zaczęto w C++ programować w sposób uogólniony, pojawiła się również potrzeba lepszej statycznej kontroli (i lepszych, konfigurowalnych komunikatów o błędach), to znaczy kontroli realizowanej w czasie kompilacji.

Załóżmy dla przykładu, że pracujemy nad funkcją do bezpiecznego rzutowania typów. Chcemy wykonać rzutowanie jednego typu na inny przy zapewnieniu zachowania kompletu informacji: chcemy zapobiec rzutowaniu typów większych na mniejsze.

```
template <class To, class From>
To safe_reinterpret_cast(From from)
{
   assert(sizeof(From) <= sizeof(To));
   return reinterpret_cast<To>(from);
}
```

Funkcję tę wywołuje się przy użyciu składni identycznej jak dla zwyczajnego rzutowania w C++:

```
int i = ...;
char *p = safe_reinterpret_case<char*>(i);
```

Argument szablonu `To` określa się jawnie, a typ `From` kompilator wysnuwa sam na podstawie typu argumentu wywołania, czyli na podstawie typu zmiennej `i`. Asercja nałożona na porównanie typów pozwala wymusić, aby typ docelowy pomieścił całość informacji przechowywanej w typie źródłowym. Dzięki temu zabezpieczeniu powyższy kod albo wykona skuteczną konwersję typu[1], albo sprowokuje niespełnioną asercję w czasie wykonania.

Z oczywistych względów wolelibyśmy wykrywać tego rodzaju błędy już w czasie kompilacji. Przecież feralne rzutowanie może na przykład zostać użyte w rzadko wykonywanej ścieżce przebiegu programu i niekoniecznie musi się ujawnić w testach. Dalej, przy przenoszeniu aplikacji na nową platformę albo do nowego kompilatora trudno zapamiętać wszystkie potencjalne aspekty nieprzenośności programu; tak czy inaczej, błąd rzutowania może zagnieździć się w kodzie na dłuższy czas i spowodować krach programu dopiero dużo później, najpewniej na oczach klienta.

Jest nadzieja: wyrażenie obliczane w ramach asercji jest stałą czasu kompilacji, co oznacza, że potencjalnie jej kontrolę mógłby wykonać kompilator, a nie środowisko wykonawcze. Pomysł polega na przekazaniu do kompilatora konstrukcji języka C++ tak użytej, aby była dozwolona dla wyrażeń niezerowych i niedozwolona dla wyrażeń, których obliczona statycznie wartość wynosi zero. W ten sposób, jeśli w kodzie pojawi się wyrażenie o wartości zerowej, kompilator zasygnalizuje błąd czasu kompilacji.

Najprostszym mechanizmem asercji statycznych, działającym również w języku C, jest mechanizm oparty na zakazie deklarowania tablicy o zerowej liczbie elementów (Van Horn 1997):

```
#define STATIC_CHECK(expr) { char unnamed[(expr) ? 1 : 0]; }
```

Teraz, jeśli napiszemy:

```
template <class To, class From>
To safe_reinterpret_cast(From from)
```

[1] Poprawną na większości komputerów — z `reinterpret_cast` nigdy nie można mieć absolutnej pewności — *przyp. autora.*

```
{
   STATIC_CHCEK(sizeof(From) <= sizeof(To));
   return reinterpret_cast<To>(from);
}
...
void* somePointer = ...;
char c = safe_reinterpret_case<char>(somePointer);
```

i jeśli w danym systemie wskaźniki są większe niż znaki, kompilator zaprotestuje przeciwko utworzeniu tablicy o zerowej liczbie elementów, protestując tym samym przeciwko niepożądanej przez nas konwersji.

Problem w tym, że otrzymany wtedy komunikat o błędzie nie będzie ani słowem wspominał o próbie konwersji; najprawdopodobniej będzie informował o niemożności utworzenia tablicy o zerowym rozmiarze. Nijak z tego nie wynika, że rozmiar typu `char` jest mniejszy od rozmiaru typu wskaźnikowego. Udostępnienie własnego komunikatu o błędzie jest trudne, zwłaszcza jeśli ma to być mechanizm przenośny. Komunikaty o błędach nie podlegają żadnym regułom; steruje nimi wyłącznie kompilator. Na przykład w przypadku niezdefiniowanej zmiennej kompilator nie ma nawet obowiązku podawać nazwy tej zmiennej w komunikacie o błędzie.

Lepszym rozwiązaniem jest sięgnięcie po szablon o odpowiednio sugestywnej nazwie; przy odrobinie szczęścia kompilator wymieni nazwę szablonu w komunikacie o błędzie.

```
template<bool> struct CompileTimeError;
template<> struct CompileTimeError<true> {};

#define STATIC_CHECK(expr) \
   (CompileTimeError<(expr) != 0>();
```

`CompileTimeError` to szablon z parametrem pozatypowym (parametryzowany stałą typu `bool`). Szablon jest zdefiniowany wyłącznie dla wartości `true` tej stałej. Jeśli spróbujemy skonkretyzować szablon `CompileTimeError` dla wartości `false`, kompilator będzie zmuszony do zgłoszenia błędu z komunikatem o niezdefiniowanej specjalizacji `CompileTimeError<false>`. Taki komunikat jest już dużo lepszą wskazówką co do przyczyny błędu.

Nie jest to, rzecz jasna, rozwiązanie już doskonałe. Co z treścią komunikatu o błędzie? Można by przekazywać do `STATIC_CHECK` dodatkowy parametr i jakoś wymuszać ujawnienie go w komunikacie o błędzie. Sęk w tym, że przekazany komunikat o błędzie musi być dozwolonym identyfikatorem C++ (bez znaków odstępu, niezaczynającym się od cyfry itd.). Ten tok myślenia prowadzi nas do ulepszonej wersji szablonu `CompileTimeError`, widocznej poniżej. W sumie nazwa `Compile`
`↪TimeError` przestaje wtedy być odpowiednio sugestywna; za chwilę okaże się, że znacznie lepszą nazwą jest `CompileTimeChecker`.

```
template<bool> struct CompileTimeChecker
{
   CompileTimeChecker(...);
};
template<> struct CompileTimeChecker<false> { };
#define STATIC_CHECK(expr, msg) \
{\
    class ERROR_##msg; \
    (void)sizeof(CompileTimeChecker<\
        (expr) != 0>((ERROR_##msg())));\
}
```

Załóżmy, że `sizeof(char) < sizeof(void*)` (standard nie gwarantuje prawdziwości takiej relacji w każdym przypadku). Zobaczmy, co się stanie, kiedy napiszemy:

```
template <class To, class From>
To safe_reinterpret_cast(From from)
{
   STATIC_CHECK(sizeof(From) <= sizeof(To),
      Destination_Type_Too_Narrow);
   return reinterpret_cast<To>(from);
}
...
void* somePointer = ...;
char c = safe_reinterpret_cast<char>(somePointer);
```

Po rozwinięciu makrodefinicji `STATIC_CHECK` kod funkcji `safe_reinterpret_cast` będzie prezentował się następująco:

```
template <class To, class From>
To safe_reinterpret_cast(From from)
{
   {
      class ERROR_Destination_Type_Too_Narrow {};
      (void)sizeof((
         CompileTimeChecker<sizeof(From) <= sizeof(To)>(
            ERROR_Destination_Type_Too_Narrow())));
   }
   return reinterpret_cast<To>(from);
}
```

Powyższy kod definiuje *klasę lokalną* o nazwie `ERROR_Destination_Type_Too_Narrow`, o pustym ciele. Następnie tworzy tymczasową wartość typu `CompileTimeChecker<sizeof(From) <= sizeof(To)>`, inicjalizowaną wartością tymczasową typu `ERROR_Destination_Type_Too_Narrow`. Na koniec operator `sizeof` oblicza rozmiar wynikowej wartości tymczasowej.

Gdzie jest trik? Otóż specjalizacja `CompileTimeChecker<true>` posiada konstruktor akceptujący dowolne argumenty (lista parametrów w postaci wielokropka). Oznacza to, że kiedy sprawdzane wyrażenie jest obliczane jako wartość `true`, wynikowy program jest poprawny. Natomiast kiedy porównanie pomiędzy typami da wartość `false`, dojdzie do błędu kompilacji: kompilator nie będzie mógł znaleźć konwersji z typu `ERROR_Destination_Type_Too_Narrow` na typ `CompileTimeChecker<false>`. A najlepsze, że porządny kompilator wypisze wtedy całkiem dokładny komunikat o błędzie, w rodzaju: „Nie można skonwertować `ERROR_Destination_Type_Too_Narrow` na `CompileTimeChecker<false>`.

Jesteśmy w domu!

2.2. Częściowa specjalizacja szablonu

Częściowa specjalizacja szablonu pozwala na specjalizowanie szablonu klasy dla podzbioru konkretyzacji możliwych dla tego szablonu.

Przypomnijmy na razie pełną specjalizację szablonu. Otóż posiadając szablon klasy `Widget`:

```
template <class Window, class Controller>
class Widget
{
    ... uogólniona implementacja klasy Widget ...
};
```

możemy jawnie specjalizować szablon klasy `Widget` dla wybranego zestawu typów, na przykład:

```
template <>
class Widget<ModalDialog, MyController>
{
    ... specjalizowana implementacja klasy Widget ...
};
```

gdzie `ModalDialog` i `MyController` to klasy definiowane przez aplikację.

Kiedy kompilator napotyka w kodzie definicję specjalizacji szablonu `Widget`, wykorzystuje tę specjalizowaną implementację wszędzie tam, gdzie definiujemy obiekt typu `Widget<ModalDialog, MyController>`, a dla wszelkich innych konkretyzacji szablonu używa definicji ogólnej `Widget`.

Niekiedy jednak chcemy specjalizować `Widget` dla dowolnych wartości parametru `Window` w połączeniu z typem `MyController`. Potrzebujemy wtedy częściowej specjalizacji szablonu:

```
// częściowa specjalizacja szablonu Widget
template <class Window>
class Widget<Window, MyCOntroller>
{
    ... częściowo specjalizowana implementacja klasy Widget ...
};
```

W częściowej specjalizacji szablonu klasy dookreślamy zazwyczaj tylko niektóre z wymaganych parametrów szablonu, a resztę pozostawiamy w ujęciu ogólnym. Przy konkretyzowaniu szablonu klasy w programie kompilator próbuje dopasować najlepszą wersję szablonu. Algorytm dopasowania jest bardzo zawiły i ścisły, co pozwala na dość nietypowe zastosowania częściowych specjalizacji. Na przykład załóżmy, że posiadamy szablon klasy `Button` parametryzowany jednym parametrem. Wtedy, nawet jeśli wyspecjalizowaliśmy już `Widget` dla dowolnego parametru typowego `Window` i klasy `MyController`, możemy dalej specjalizować szablon `Widget` dla wszystkich konkretyzacji szablonu `Button` w połączeniu z typem `MyController`:

```
template <class ButtonArg>
class Widget<Button<ButtonArg>, MyCOntroller>
{
    ... dalsza specjalizacja szablonu klasy Widget ...
};
```

Jak widać, możliwości częściowej specjalizacji szablonów są dość niezwykłe. Przy konkretyzowaniu szablonu kompilator przeprowadza dopasowanie wzorca istniejących częściowych i pełnych specjalizacji w poszukiwaniu najlepszego dopasowania; w ten sposób zyskujemy niebagatelną elastyczność.

Niestety, częściowa specjalizacja szablonów nie dotyczy funkcji — czy to samodzielnych, czy metod szablonów klas — co poniekąd redukuje elastyczność i precyzję specjalizacji:

- Chociaż można *całkowicie specjalizować* metody szablonu klasy, nie można *częściowo specjalizować* metod.
- Nie można częściowo specjalizować szablonów funkcji o zasięgu przestrzeni nazw. Najbliższe modelowi częściowej specjalizacji funkcji jest przeciążanie. W ujęciu praktycznym oznacza to, że precyzyjna specjalizacja dotyczy jedynie parametrów wywołania funkcji, ale nie może już dotyczyć wartości zwracanej ani typów wykorzystywanych wewnętrznie. Na przykład:

```
template <class T, class U> T Fun(U obj);  // szablon główny
template <class U> void Fun<void, U>(U obj);  // niedozwolona specjalizacja częściowa
template <class T> T Fun (Window obj); // dozwolona specjalizacja (przeciążenie)
```

Brak możliwości precyzyjnego częściowego specjalizowania funkcji ułatwia pracę programistom kompilatorów, ale dla programistów aplikacji ma same słabe strony. Niektóre z narzędzi prezentowanych w dalszym omówieniu (na przykład `Int2Type` i `Type2Type`) powstały wyłącznie jako odpowiedź na tę niedogodność.

W niniejszej książce częściowe specjalizacje szablonów wykorzystywane są bardzo szeroko. Chociażby cały rozdział 3. omawiający mechanizm list typów jest zbudowany w oparciu właśnie o specjalizacje częściowe.

2.3. Klasy lokalne

Klasy lokalne są ciekawe jako mało znana cecha języka C++. Otóż klasę można zdefiniować wewnątrz funkcji, jak poniżej:

```
vid Fun()
{
   class Local
   {
      ... składowe danych...
      ... definicje metod ...
   };
   ... kod odwołujący się do klasy Local ...
}
```

Są pewne ograniczenia: klasy lokalne nie mogą definiować składowych statycznych i nie mają dostępu do niestatycznych zmiennych lokalnych funkcji. Klasy lokalne są interesujące głównie z tego powodu, że można ich używać w funkcjach szablonowych. Klasy lokalne definiowane we wnętrzu szablonu funkcji mogą korzystać z parametrów szablonu funkcji.

Poniższy szablon funkcji `MakeAdapter` przystosowuje jeden interfejs do wymogów innego interfejsu. `MakeAdapter` implementuje interfejs w locie, za pomocą klasy lokalnej. Klasa lokalna przechowuje składowe uogólnionych typów.

```
class Interface
{
public:
   virtual void Fun() = 0;
   ...
};
```

```
template <class T, class P>
Interface MakeAdapter(const T& obj, const P& arg)
{
   class Local : public Interface
   {
   public:
      Local(const T& obj, const P& arg)
      : obj_(obj), arg_(arg) {}
      virtual void Fun()
      {
         obj_.Call(arg_);
      }
      private:
         T obj_;
         P arg_;
   };
   return new Local(obj, arg);
}
```

Można łatwo udowodnić, że każdy idiom używający klasy lokalnej można zaimplementować z użyciem szablonu klasy poza funkcją. Innymi słowy, klasy lokalne nie są mechanizmem umożliwiającym konstrukcje unikalne. Z drugiej strony, klasy lokalne mogą uprościć implementowanie i poprawiają lokalizację (ograniczenie zasięgu) symboli.

Klasy lokalne posiadają jednak pewną cechę unikatową: są klasami *finalnymi*. Użytkownicy zewnętrzni nie mogą wyprowadzać pochodnych klasy ukrytej wewnątrz funkcji. Bez klas lokalnych podobny efekt wymagałby dodania nienazwanej przestrzeni nazw w osobnej jednostce kompilacji.

Klasy lokalne wykorzystamy w rozdziale 11. do utworzenia funkcji trampolinowych.

2.4. Mapowanie stałych na typy

Prosty szablon opisany pierwotnie w (Alexandrescu 2000b) może być wielce pomocny przy wielu idiomach programowania uogólnionego. Oto on:

```
template <int v>
struct Int2Type
{
   enum { value = v };
};
```

Szablon `Int2Type` definiuje odrębny typ dla każdej przekazanej odrębnej stałej wartości całkowitej. To dlatego, że odrębne konkretyzacje szablonów stanowią pełnoprawne odrębne typy; z tego względu `Int2Type<0>` to typ odmienny niż `Int2Type<1>` itd. Dodatkowo wartość generująca typ jest „utrwalana" w składowej wyliczeniowej `value`.

Szablonu `Int2Type` można używać wszędzie tam, gdzie chcemy szybko „otypować" stałe wartości całkowite. W ten sposób można zrealizować rozprowadzanie wywołań do różnych funkcji, zależnie od wyniku wyrażenia obliczanego w czasie kompilacji. Efektywnie można w ten sposób zrealizować statyczne rozprowadzanie wywołań na bazie stałych wartości całkowitych.

Szablon w rodzaju `Int2Type` jest zazwyczaj stosowany, kiedy spełnione są poniższe warunki:

- Zachodzi potrzeba wywołania jednej z wielu wersji funkcji, zależnie od stałej znanej w czasie kompilacji.
- Zachodzi potrzeba rozprowadzenia tego wywołania w czasie kompilacji.

W przypadku rozprowadzania w czasie wykonania można uciec się do prostej konstrukcji kaskadowych instrukcji warunkowych `if-else` albo instrukcji wyboru `switch`. Niekiedy jednak jest to niepożądane. Instrukcje `if-else` wymagają poprawnego skompilowania obu alternatywnych gałęzi kodu, nawet jeśli wartość warunku znana jest już w czasie kompilacji. Niejasne? Za chwilę się wyjaśni.

Weźmy taki przypadek: zaprojektowaliśmy uogólniony kontener `NiftyContainer`, parametryzowany typem przechowywanych obiektów:

```
template <class T> class NiftyContainer
{
   ...
};
```

Powiedzmy, że `NiftyContainer` przechowuje wskaźniki do obiektów typu `T`. Aby powielić obiekt zawarty w `NiftyContainer`, trzeba albo wywołać jego konstruktor kopiujący (dla typów niepolimorficznych), albo wywołać metodę wirtualną `Clone()` (dla typów polimorficznych). Informację o trybie powielania uzyskujemy od użytkownika za pośrednictwem parametru szablonu w postaci stałej logicznej:

```
template <typename T, bool IsPolymorphic>
class NiftyContainer
{
   ...
   void DoSomething()
   {
      T* pSomeObj = ...;
      if (isPolymorphic)
      {
         T* pNewObj = pSomeObj->Clone();
         ... algorytm dla typów polimorficznych ...
      }
      else
      {
         T* pNewObj = new T(*pSobeObj);
         ... algorytm dla typów monomorficznych ...
      }
   }
};
```

Sęk w tym, że kompilator nie przepuści takiego kodu. Ponieważ w wersji polimorficznej algorytm wykorzystuje metodę `pObj->Clone()`, wywołanie `NiftyContainer::DoSomething()` nie skompiluje się dla żadnego typu, który nie definiuje metody `Clone()`. Prawda, że w czasie kompilacji jest tu oczywiste, którą gałąź instrukcji warunkowej program faktycznie wykona, ale dla kompilatora nie jest to argumentem — również kod w nieużywanej gałęzi musi być poprawny, choćby miał być później wytrzebiony z programu w ramach optymalizacji i usuwania „martwego” kodu.

Próba wywołania `DoSomething` dla typu `NiftyContainer<int,false>` nieodwołalnie zatrzyma kompilację na wierszu wywołania `pObj->Clone()`.

Błąd kompilacji może pojawić się zresztą również w drugiej gałęzi kodu, dla wersji niepolimorficznej, w której następuje próba utworzenia obiektu za pomocą wywołania `new T(*pObj)`. Błąd ten wystąpi, kiedy typ `T` nie będzie udostępniał konstruktora kopiującego (na przykład przez oznaczenie konstruktora jako prywatnego) — co zresztą w przypadku typów polimorficznych jest zalecane.

Byłoby znacznie lepiej, gdyby kompilator nie próbował nawet kompilować kodu, który i tak się nie wykona; jak to osiągnąć?

Okazuje się, że istnieje kilka rozwiązań tego problemu, a wśród nich `Int2Type` jest jednym z bardziej eleganckich. Transformuje on ad hoc wartość typu logicznego `IsPolymorphic` na dwa różne typy, reprezentujące wartości `true` i `false`. Wystarczy użyć `Int2Type<IsPolymorphic>` z prostym przeciążaniem:

```
template <typename T, bool isPolymorphic>
class NiftyContainer
{
   private:
   void DoSomething(T* pObj, Int2Type<true>)
   {
      T* pNewObj = pObj->Clone();
      ... algorytm polimorficzny ...
   }
   void DoSomething(T* pObj, Int2Type<false>)
   {
      T* pNewObj = new T(*pObj);
      ... algorytm niepolimorficzny ...
   }
public:
   void DoSomething(T* pObj)
   {
      DoSomething(pObj, Int2Type<isPolymorphic>());
   }
};
```

`Int2Type` jako mechanizm konwersji wartości na typ jest bardzo poręczny. Wystarczy przekazać wartość tymczasową uzyskanego typu do przeciążonej funkcji. Przeciążenie wybiera wtedy pożądany wariant algorytmu.

Sztuczka działa, ponieważ kompilator nie kompiluje funkcji szablonowych, które nie są używane — sprawdza jedynie ich poprawność składniową. A w kodzie szablonowym rozprowadzanie wywołań zazwyczaj odbywa się statycznie (w czasie kompilacji).

Narzędzie `Int2Type` można obejrzeć w działaniu w kilku miejscach w bibliotece Loki, a także w rozdziale 11. przy omawianiu wielometod. Mamy tam szablon klasy w roli mechanizmu podwójnego rozprowadzania, z parametrem typu logicznego określającym opcję rozprowadzania symetrycznego.

2.5. Odwzorowanie typu na typ

W podrozdziale 2.2 padło stwierdzenie, że nie można częściowo specjalizować funkcji szablonowych. Niekiedy jednak zachodzi potrzeba zasymulowania takiej możliwości. Weźmy poniższą funkcję:

```
template <class T, class U>
T* Create(const U& arg)
{
   return new T(arg);
}
```

Metoda `Create` tworzy nowy obiekt, przekazując argument wywołania do konstruktora obiektu.

Załóżmy teraz, że w aplikacji przyjęliśmy regułę: obiekty typu `Widget` są nietykalne jako kod zastany (nie mamy wpływu na ich implementację), a ich konstruktor przyjmuje dwa argumenty wywołania, z których drugi jest stałą wartością, na przykład `-1`. Z kolei nasze własne klasy, wyprowadzone z typu `Widget`, są pozbawione tego udziwnienia.

Jak można wyspecjalizować metodę `Create` tak, żeby traktowała klasę `Widget` inaczej niż wszystkie inne typy? Oczywistym rozwiązaniem byłoby utworzenie osobnej funkcji `CreateWidget`, specjalnie dla tego przypadku szczególnego. Niestety, w ten sposób pozbędziemy się jednolitego interfejsu tworzenia obiektów typu `Widget` i obiektów pochodnych względem tego typu. To z kolei zniweczy użyteczność metody `Create` w kodzie uogólnionym.

Nie możemy częściowo specjalizować funkcji, to znaczy nie wolno nam napisać czegoś takiego:

```
// niedozwolony kod - nie próbujcie tego w domu
template <class U>
Widget* Create<Widget, U>(const U& arg)
{
   return new Widget(arg, -1);
}
```

Pod nieobecność częściowego specjalizowania funkcji uciekamy się do jedynego dostępnego narzędzia: przeciążania. Rozwiązaniem byłoby przekazanie do `Create` atrapowego obiektu typu `T` i odwołanie się do przeciążania:

```
template <class T, class U>
T* Create(const U& arg, T /* atrapa */)
{
   return new T(arg);
}
template <class U>
Widget* Create(const U& arg, Widget /* atrapa */)
{
   return new Widget(arg, -1);
}
```

Rozwiązanie to wprowadza narzut związany z tworzeniem obiektów (o nieokreślonej złożoności), które pozostają nieużywane. Potrzebujemy więc możliwie skromnego środka do przeniesienia informacji o typie `T` do metody `Create`. Tu do akcji wkroczy `Type2Type`: jest to reprezentant typu, jego tani identyfikator, który można przekazać do przeciążonej funkcji.

Oto definicja szablonu `Type2Type`:

```
template <typename T>
struct Type2Type
{
   typedef T OriginalType;
};
```

`Type2Type` to klasa pozbawiona jakiejkolwiek „fizycznej” składowej, ale parametryzowana różnymi typami daje różne konkretyzacje — dokładnie tego nam potrzeba.

Teraz możemy napisać tak:

```
// implementacja metody Create na bazie przeciążania i Type2Type
template <class T, class U>
T* Create(const U& arg, Type2Type<T>)
{
   return new T(arg);
}
template <class U>
Widget* Create(const U& arg, Type2Type<Widget>)
{
   return new Widget(arg, -1);
}
// użycie metody Create()
String* pStr = Create("Ahoj", Type2Type<String>());
Widget* pW = Create(100, Type2Type<Widget>());
```

Drugi parametr wywołania `Create` służy jedynie do wybrania odpowiedniego przeciążenia. Teraz możemy specjalizować `Create` dla różnych konkretyzacji `Type2Type`, reprezentujących różne typy występujące w aplikacji (i o różnych wymaganiach względem składni kreacji obiektów).

2.6. Wybór typu

Niekiedy kod uogólniony musi wybrać któryś z typów, zależnie od wartości stałej typu logicznego.

Załóżmy, że w kontenerze `NiftyContainer`, omawianym w podrozdziale 2.4, chcemy w roli magazynu obiektów użyć kontenera `std::vector`. Rzecz jasna, typów polimorficznych nie można przechowywać przez wartość, więc w magazynie umieścimy wskaźniki. Z drugiej strony, typy monomorficzne jak najbardziej nadają się do przechowywania przez wartość i niekiedy może to być bardziej efektywne.

W przykładowym szablonie klasy:

```
template <typename T, bool isPolymorphic>
class NiftyContainer
{
   ...
};
```

chcemy przechowywać albo `vector<T*>` (kiedy `IsPolymorphic` ma wartość `true`), albo `vector<T>` (dla `IsPolymorphic` równego `false`). Zasadniczo potrzebujemy więc definicji typu, na przykład `ValueType`, która w zależności od wartości `IsPolymorphic` będzie reprezentowała `T*` albo `T`.

Można w tym celu użyć szablonu cechy (ang. *traits*) (Alexandrescu 2000a), jak tutaj:

```
template <typename T, bool isPolymorphic>
struct NiftyContainerValueTraits
{
   typedef T* ValueType;
};
template <typename T>
struct NiftyContainerValueTraits<T, false>
{
   typedef T ValueType;
};
template <typename T, bool isPolymorphic>
class NiftyContainer
{
   ...
   typedef NiftyContainerValueTraits<T, isPolymorphic>
      Traits;
   typedef typename Traits::ValueType ValueType;
};
```

Ten sposób jest jednak niepotrzebnie zawiły. Co więcej, niespecjalnie dobrze się skaluje: dla każdego wyboru typu potrzebujemy nowego, osobnego szablonu cechy.

Szablon klasy `Select` udostępniony w bibliotece Loki oferuje znacznie prostszy mechanizm wyboru typów. Jego definicja wykorzystuje częściową specjalizację szablonu:

```
template <bool flag, typename T, typename U>
struct Select
{
   typedef T Result;
};
template <typename T, typename U>
struct Select<false, T, U>
{
   typedef U Result;
};
```

Sposób działania tej specjalizacji można opisać tak: jeśli flag ma wartość `true`, kompilator używa pierwszej (uogólnionej) definicji, więc `Result` będzie się równać `T`. Z kolei jeśli flag ma wartość `false`, do gry wkracza specjalizacja szablonu i definicja `Result` jest rozwijana jako `U`.

Z takim oprzyrządowaniem definicja `NiftyContainer::ValueType` jest znacznie łatwiejsza:

```
template <typename T, bool isPolymorphic>
class NiftyContainer
{
   ...
   typedef typename Select<isPolymorphic, T*, T>::Result
```

```
    ValueType;
  ...
};
```

2.7. Statyczne wykrywanie dziedziczenia i możliwości konwersji

Przy implementowaniu funkcji i klas szablonowych niejednokrotnie powstaje wątpliwość: czy dla dwóch arbitralnych typów `T` i `U`, o których twórcy szablonu nic nie wiadomo, można wykryć relację dziedziczenia pomiędzy `U` i `T`? Wykrycie takiej relacji w czasie kompilacji to klucz do implementowania zaawansowanych optymalizacji w bibliotekach uogólnionych. W uogólnionej funkcji można na przykład wykorzystać zoptymalizowany algorytm, o ile używana w niej klasa implementuje pewien określony interfejs. Wykrycie obecności tego interfejsu w czasie kompilacji oznacza uniknięcie rzutowania `dynamic_cast`, które w czasie wykonania jest dość kosztowne.

Wykrywanie dziedziczenia odbywa się na bazie bardziej ogólnego mechanizmu, to znaczy wykrywania możliwości konwersji. Ów ogólniejszy problem można sformułować tak: jak wykryć, czy dowolny typ `T` obsługuje automatyczną konwersję na dowolny typ `U`?

Istnieje rozwiązanie tego problemu oparte na operatorze `sizeof`. Użyteczność `sizeof` jest doprawdy zadziwiająca: można go zastosować wobec dowolnie złożonego wyrażenia, a operator zwróci rozmiar tego wyrażenia bez obliczania go w czasie wykonania — wszystko w czasie kompilacji! Oznacza to, że operator `sizeof` uwzględnia przeciążanie, konkretyzację szablonów, reguły konwersji — wszystko, co może uczestniczyć w poprawnym wyrażeniu języka C++. W rzeczy samej `sizeof` zawiera w sobie kompletne oprzyrządowanie do dedukcji typu wyrażenia; ostatecznie przecież `sizeof` ignoruje wartość wyrażenia, a zwrócony rozmiar to rozmiar typu wyrażenia[2].

Pomysł na wykrywanie możliwości konwersji polega na użyciu operatora `sizeof` w połączeniu z funkcjami przeciążonymi. Udostępnimy dwa przeciążenia funkcji: jedno przyjmujące typ docelowy konwersji (`U`) i drugie przyjmujące argument dowolnego innego typu. Możemy wtedy wywołać funkcję przeciążoną z argumentem w postaci tymczasowej wartości typu `T`, którego zgodność z `U` chcemy sprawdzić. Jeśli w ramach rozstrzygania przeciążenia dojdzie do wywołania funkcji przyjmującej argument typu `U`, wiadomo, że typ `T` jest zgodny z typem `U`; jeśli wywołane zostanie drugie przeciążenie, wiadomo, że `T` nie da się skonwertować na `U`. Aby wykryć funkcję wywołaną w ramach tego sprawdzianu, zaaranżujemy dwa przeciążenia tak, aby ich typy zwracane były różnych rozmiarów — wnioskowanie można będzie wtedy oprzeć się na operatorze `sizeof` odniesionym do wartości zwracanej przeciążenia. Dokładne typy przeciążenia są nieistotne, byleby ich rozmiar był różny.

Utwórzmy najpierw dwa typy o różnych rozmiarach (to nie takie oczywiste, bo na przykład choć przeważnie `char` i `long double` są różnych rozmiarów, to standard tego nie gwarantuje). Najprostsze byłoby coś takiego:

```
typedef char Small;
class Big { char dummy[2]; };
```

[2] Istnieje propozycja uzupełnienia C++ o operator `typeof`, to znaczy operator zwracający typ wyrażenia. Obecność operatora `typeof` ogromnie uprościłaby dużą część kodu szablonowego, czyniąc go bardziej zrozumiałym. GNU C++ implementuje już taki operator w ramach własnego rozszerzenia języka. Jasne jest, że `typeof` dzieliłby z operatorem `sizeof` znaczną część jego wewnętrznej implementacji — `sizeof` przecież już teraz musi jakoś określać typ wyrażenia — *przyp. autora*.

Z definicji `sizeof(Small)` wynosi `1`. Rozmiar typu `Big` nie jest dokładnie znany, ale na pewno będzie większy od `1` — to wszystko, czego nam trzeba do rozróżnienia typów.

Teraz para przeciążeń. Jedno z nich ma przyjmować `U` i zwracać, powiedzmy, obiekt typu `Small`:

```
Small Test(U);
```

Ale jak napisać drugą funkcję, która przyjmuje „dowolny inny typ"? Szablon nie jest rozwiązaniem, ponieważ przy rozstrzyganiu przeciążenia szablon zawsze będzie kwalifikowany jako „najlepsze dopasowanie", co zakryje konwersję. Potrzebujemy czegoś, co jest „gorsze" (w sensie jakości dopasowania) od konwersji automatycznej — to znaczy potrzeba nam takiej konwersji, która jest uruchamiana jedynie przy braku konwersji automatycznej. Szybki przegląd reguł konwersji typów argumentów wywołania funkcji pozwoli wytypować wielokropek, który jest dopasowaniem najgorszym z możliwych — znajduje się na samym końcu listy rozpatrywanych konwersji. Dokładnie tego szukaliśmy:

```
Big Test(...);
```

(Przekazywanie obiektu C++ do funkcji z wielokropkiem prowokuje niezdefiniowany wynik, ale to nie jest istotne; nie będziemy faktycznie wywoływać funkcji; ba, funkcja nie jest nawet zaimplementowana — pamiętajmy, że `sizeof` nie oblicza wartości wyrażenia, jedynie jego typ).

Teraz zastosujemy operator `sizeof` do próbnego wywołania funkcji `Test`, przekazując do niej obiekt typu `T`:

```
const bool convExists = sizeof(Test(T())) == sizeof(Small);
```

I już! Funkcja `Test` otrzymuje w wywołaniu obiekt skonstruowany domyślnie (`T()`), a następnie operator `sizeof()` ustala rozmiar wyniku takiego wyrażenia. Wynik może mieć albo rozmiar `sizeof ↪(Small)`, albo `sizeof(Big)`, zależnie od tego, czy typ `T` posiada możliwość automatycznej konwersji na typ `U`, czy nie.

Został tylko jeden problem: otóż jeśli `T` posiada prywatny konstruktor domyślny, nie uda się skompilować wyrażenia `T()`, a więc i całego naszego sprawdzianu konwersji. Na szczęście to również można obejść — wystarczy użyć funkcji-atrapy z typem wartości zwracanej `T` (pamiętajmy, wciąż operujemy w kontekście operatora `sizeof`, to znaczy bez faktycznego obliczania wartości wyrażenia — a więc i bez wywoływania funkcji, tworzenia obiektów itd.) Kompilator nie będzie miał wtedy powodów do narzekania:

```
T MakeT(); // bez implementacji
const bool convExists = sizeof(Test(MakeT())) == sizeof(Small);
```

Nawiasem mówiąc, czy to nie cudowne, że tyle można zdziałać za pomocą prostych funkcji, jak `MakeT` czy `Test`, które nie tylko nic nie robią, ale wręcz nie istnieją?

Skoro mamy gotowy mechanizm, upakujmy całość w szablon klasy, który ukryje wszystkie szczegóły wnioskowania o typach i udostępni jedynie wynik sprawdzianu możliwości konwersji.

```
template <class T, class U>
class Conversion
{
   typedef char Small;
   class Big { char dummy[2]; };
   static Small Test( const U& );
```

```
   static Big Test(...);
   static T MakeT();
public:
   enum { exists =
   sizeof(Test(MakeT())) == sizeof(Small) };
};
```

Klasę sprawdzianu konwersji można już przetestować:

```
int main()
{
   using namespace std;
   cout
      << Conversion<double, int>::exists << ' '
      << Conversion<char, char*>::exists << ' '
      << Conversion<size_t, vector<int> >::exists << ' ';
}
```

Ten krótki program wypisuje `1 0 0`. Zauważmy, że chociaż `std::vector` implementuje konstruktor przyjmujący argument typu `size_t`, to test konwersji prawidłowo zwraca 0, ponieważ konstruktor ten jest wyłącznie jawny.

W szablonie `Conversion` możemy zaimplementować jeszcze jedną stałą: `sameType`, która będzie miała wartość `true`, kiedy `T` i `U` reprezentują ten sam typ:

```
template <class T, class U>
class Conversion
{
   ... jak powyżej ...
   enum { sameType = false };
};
```

Implementacja `sameType` będzie oparta na częściowej specjalizacji szablonu `Conversion`:

```
template <class T>
class Conversion<T, T>
{
public:
   enum { exists = 1, sameType = 1 };
};
```

Jesteśmy w domu. Za pomocą szablonu `Conversion` możemy teraz bardzo łatwo wykrywać relację dziedziczenia pomiędzy typami:

```
#define SUPERSUBCLASS(T, U) \
   (Conversion<const U*, const T*>::exists && \
   !Conversion<const T*, const void*>::sameType)
```

Jeśli `U` dziedziczy publicznie po typie `T`, ewentualnie jeśli `T` i `U` są w istocie tymi samymi typami, makrodefinicja `SUPERSUBCLASS(T, U)` jest rozwijana do wartości `true`. Makrodefinicja opiera się na próbie ustalenia możliwości konwersji z `const U*` na `const T*`. Taka konwersja dla arbitralnych typów `U` i `T` jest możliwa tylko w trzech przypadkach:

(1) `T` jest tego samego typu co `U`.
(2) `T` jest publiczną klasą bazową `U`.
(3) `T` jest typu `void`.

Ostatni z tych przypadków jest eliminowany przez drugi test w wyrażeniu. W praktyce pierwszy przypadek (`T` jest tego samego typu co `U`) akceptujemy jako zdegenerowaną relację dziedziczenia, ponieważ dla celów praktycznych możemy przecież uznać, że każda klasa jest w jakimś sensie swoją własną klasą bazową. Tam, gdzie potrzebny jest silniejszy sprawdzian dziedziczenia, można go zdefiniować następująco:

```
#define SUPERSUBCLASS_STRICT(T, U) \
   (SUPERSUBCLASS(T, U) && \
      !Conversion<const T*, const U*>::sameType)
```

Po co dodaliśmy w kodzie modyfikatory `const`? Otóż chcemy zapobiec nieudanym sprawdzianom w zawsze problematycznych przypadkach typów `const`. W szablonie dodanie drugiego `const` do typu już opatrzonego modyfikatorem `const` jest i tak ignorowane. W skrócie, umieszczając w makrodefinicji `SUPERSUBCLASS` modyfikator `const`, ustawiamy się zawsze po bezpiecznej stronie, niczego nie ryzykując.

Dlaczego `SUPERSUBCLASS`, a nie `BASE_OF` albo po prostu `INHERITS`? Z bardzo praktycznego powodu. Pierwotnie w bibliotece Loki stosowana była makrodefinicja `INHERITS`, ale zapis `INHE`
`↪RITS(T, U)` zawsze prowokował pytania o kierunek sprawdzianu — sprawdzamy, czy `T` dziedziczy po `U`, czy odwrotnie? Zapis `SUPERSUBCLASS` (klasa bazowa-klasa pochodna) mówi znacznie więcej o tym, jak interpretowaliśmy argumenty makrodefinicji.

2.8. TypeInfo

Standard języka C++ udostępnia klasę `std::type_info`, która daje możliwość analizowania typu obiektów w czasie wykonania. Klasę tę wykorzystuje się zazwyczaj w połączeniu z operatorem `typeid`. Operator `typeid` zwraca referencję do obiektu `type_info` odpowiedniego dla operandu:

```
void Fun(Base* pObj)
{
   // porównanie dwóch obiektów type_info odpowiadających
   // faktycznym typom *pObj i Derived
   if (typeid(*pObj) == typeid(Derived))
   {
      ... hm, pObj wskazuje tak naprawdę obiekt klasy Derived ...
   }
   ...
}
```

Klasa `type_info` oprócz operatorów porównania `operator==` i `operator!=` udostępnia jeszcze dwie metody:

- Metodę `name`, zwracającą tekstową reprezentację typu w postaci ciągu znaków `const char*`. Nie ma gwarancji co do sposobu odwzorowania nazw klas na ciągi znaków, więc nie należy oczekiwać, że `typeid(Widget).name()` każdorazowo zwróci ciąg `"Widget"`. Zgodna ze standar-

dem (choć raczej nie wzorcowa) byłaby więc nawet taka implementacja, która dla każdego typu zwraca ciąg pusty.

- Metodę `before`, wprowadzającą relację porządkowania dla obiektów `type_info`. Za pomocą `type_info::before` można przeprowadzić indeksowanie po obiektach `type_info`.

Niestety, całkiem użyteczne właściwości klasy `type_info` są opakowane w sposób niepotrzebnie utrudniający ich użycie. Klasa `type_info` blokuje konstruktor kopiujący i operator przypisania, co uniemożliwia przechowywanie obiektów `type_info` — możemy jedynie przechowywać wskaźniki. Obiekty zwracane przez `typeid` mają przydział statyczny, więc nie trzeba się martwić o kontrolę zasięgu i czas życia. Trzeba za to się troszczyć o *jednoznaczność wskaźników*.

Standard nie gwarantuje, że każde wywołanie na przykład `typeid(int)` zwróci referencję do tego samego egzemplarza `type_info`. Nie można więc bezpośrednio porównywać wskaźników do obiektów `type_info`. Należałoby raczej przechowywać wskaźniki obiektów `type_info` i następnie porównywać je za pośrednictwem operatora `type_info::operator==` z wyłuskanymi wskaźnikami.

Gdybyśmy chcieli posortować obiekty `type_info`, znów powinniśmy przechować wskaźniki do `type_info`, a także użyć ich metod `before`. W efekcie, chcąc użyć obiektów `type_info` w porządkujących kontenerach biblioteki STL, będziemy zmuszeni do napisania prostego funktora operującego na wskaźnikach.

Wszystko to jest na tyle uciążliwe, że warto napisać klasę ujmującą `type_info` i udostępniającą wskaźnik do `type_info`, a także posiadającą:

- Komplet metod klasy `type_info`.
- Semantykę wartości (a więc publiczny konstruktor kopiujący i publiczny operator przypisania).
- Proste porównania na bazie operatorów `operator<` i `operator==`.

Loki definiuje taką otoczkę w postaci klasy `TypeInfo`. Klasa ta prezentuje się następująco:

```
class TypeInfo
{
public:
   // konstruktory/destruktory
   TypeInfo(); // potrzebny dla kontenerów
   TypeInfo(const std::type_info&);
   TypeInfo(const TypeInfo&);
   TypeInfo& operator=(const TypeInfo&);
   // metody zgodności
   bool before(const TypeInfo&) const;
   const char* name() const;
private:
   const std::type_info* pInfo_;
};
// operatory porównań
bool operator==(const TypeInfo&, const TypeInfo&);
bool operator!=(const TypeInfo&, const TypeInfo&);
bool operator<(const TypeInfo&, const TypeInfo&);
bool operator<=(const TypeInfo&, const TypeInfo&);
bool operator>(const TypeInfo&, const TypeInfo&);
bool operator>=(const TypeInfo&, const TypeInfo&);
```

Obecność konstruktora konwertującego przyjmującego argument typu `std::type_info` umożliwia bezpośrednie porównywanie obiektów `TypeInfo` z obiektami `std::type_info`:

```
void Fun(Base* pObj)
{
   TypeInfo info = typeid(Derived);
   ...
   if (typeid(*pObj) == info)
   {
      ... hm, pObj wskazuje tak naprawdę obiekt klasy Derived ...
   }
   ...
}
```

Możliwość kopiowania i porównywania obiektów `TypeInfo` jest istotna w wielu przypadkach. Przykłady skutecznego użycia tych obiektów znajdziemy w rozdziale 8. (w wytwórni klonów) oraz w rozdziale 11. (w mechanizmie podwójnego rozprowadzania).

2.9. NullType i EmptyType

Biblioteka Loki definiuje dwa bardzo proste typy: `NullType` i `EmptyType`. Można je wykorzystywać w obliczeniach na typach w celu wyróżnienia przypadków granicznych.

`NullType` jest klasą udostępniającą typom znacznik braku typu:

```
class NullType {};
```

Nikt raczej nie będzie tworzył obiektów tej klasy — jej zadaniem jest jedynie sygnalizowanie: „Nie jestem interesującym typem”. W podrozdziale 2.10 użyjemy `NullType` dla przypadków, w których potrzebujemy składniowej obecności typu, ale ten typ nie ma sensu semantycznego (za pomocą takiego typu można na przykład odpowiadać na pytanie: „Do jakiego typu wskazuje `int`?”). `NullType` będzie też wykorzystywany w listach typów z rozdziału 3. — do oznaczania końca listy i do sygnalizowania „braku typu”.

Drugi z przytoczonych tu pomocniczych typów to `EmptyType`. Łatwo się domyślić, jak wygląda jego definicja:

```
struct EmptyType {};
```

Po typie `EmptyType` można dziedziczyć, można też przekazywać wartości typu `EmptyType`[3]. Przydaje się on jako domyślny typ w szablonach — w taki sposób jest używany w liście typów z rozdziału 3.

[3] Wszystkie składowe `EmptyType` są publiczne, a ponieważ `EmptyType` nie definiuje własnego konstruktora, otrzymuje zestaw konstruktorów domyślnych, w tym konstruktor kopiujący — *przyp. tłum*.

2.10. Cechy typów

Cechy to uogólniona technika programistyczna, pozwalająca na statyczne (realizowane w czasie kompilacji) podejmowanie decyzji na bazie typów — w sposób analogiczny do podejmowania decyzji na bazie wartości, już w czasie wykonania (Alexandrescu 2000a). Dodając taką anegdotyczną już „dodatkową warstwę pośrednią", możemy rozwiązać szereg problemów inżynierskich — poprzez przeniesienie decyzji związanych z typami poza bezpośredni kontekst podejmowania tych decyzji. W ten sposób kod zyskuje na przejrzystości, jest bardziej czytelny i łatwiejszy do utrzymania.

Zazwyczaj programista będzie pisał własne szablony i klasy cech, odpowiednio do potrzeb. Ale można wyróżnić zestaw cech odnoszących się do każdego, dowolnego typu. Taki zestaw mógłby uprościć programowanie uogólnione, pozwalając na lepsze dopasowanie kodu szablonu do możliwości typu.

Załóżmy dla przykładu, że implementujemy algorytm kopiowania:

```
template <typename InIt, typename OutIt>
OutIt Copy(InIt first, InIt last, OutIt result)
{
   for (; first != last; ++first, ++result)
      *result = *first;
   return result;
}
```

Zasadniczo implementacja takiego algorytmu jest zbędna, bo powiela on algorytm biblioteki standardowej `std::copy`. Ale być może chcemy wyspecjalizować tę operację dla podzbioru szczególnych typów.

Załóżmy, że pracujemy nad kodem dla maszyny wieloprocesorowej, dla której zdefiniowano bardzo szybką funkcję `BitBlast`, i chcemy tę superszybką funkcję wykorzystać dla możliwie dużej liczby przypadków:

```
// prototyp BitBlast w "SIMD_Fundamentals.h"
void BitBlast(const void* src, void* dest, size_t bytes);
```

Funkcja `BitBlast`, jako wybitnie niskopoziomowa, działa wyłącznie na typach elementarnych i prostych strukturach danych. Nie można użyć `BitBlast` z typami o nietrywialnych konstruktorach kopiujących. Chcielibyśmy więc zaimplementować funkcję `Copy` tak, aby wszędzie, gdzie to możliwe, używała szybkiej funkcji `BitBlast`, a dla typów bardziej zaawansowanych stosowała klasyczne kopiowanie iteracyjne, obiekt po obiekcie. Dzięki temu operacja `Copy` na pewnym zbiorze typów będzie „automagicznie" optymalizowana.

Aby to osiągnąć, potrzebujemy dwóch sprawdzianów:

- Czy `InIt` i `OutIt` to zwyczajne wskaźniki (w odróżnieniu od typów złożonych iteratorów)?
- Czy typ wskazywany przez `InIt` i `OutIt` to obiekty dające się kopiować bajtowo?

Jeśli uda się udzielić odpowiedzi na te pytania w czasie kompilacji i jeśli na oba odpowiedź będzie brzmiała „tak", to do kopiowania kolekcji można użyć funkcji `BitBlast`. W innym przypadku trzeba zostać przy tradycyjnej implementacji kopiowania.

W rozwiązaniu tego problemu pomocne są cechy typów. Cechy opisywane w tym podrozdziale zawdzięczają bardzo wiele implementacji cech typów zrealizowanej w bibliotece Boost C++ (Boost).

2.10.1. Implementowanie cech wskaźników

Biblioteka Loki definiuje szablon klasy `TypeTraits`, ujmujący zestaw ogólnych cech typów. Szablon `TypeTraits` wykorzystuje wewnętrznie specjalizację szablonu i udostępnia wyniki specjalizacji.

Implementacja większości cech typów sprowadza się do specjalizacji pełnej albo częściowej (patrz podrozdział 2.2). Dla przykładu poniższy kod określa, czy `T` jest wskaźnikiem:

```
template <typename T>
class TypeTraits
{
private:
   template <class U> struct PointerTraits
   {
      enum { result = false };
      typedef NullType PointeeType;
   };
   template <class U> struct PointerTraits<U*>
   {
      enum { result = true };
      typedef U PointeeType;
   };
public:
   typedef typename PointerTraits<T>::PointeeType PointeeType;
   typedef typename Select<isStdArith || isPointer || isMemberPointer,
      T, ReferredType&>::Result ParameterType;
   typedef typename UnConst<T>::Result NonConstType;
   ...
};
```

Pierwsza definicja wprowadza szablon klasy `PointerTraits`, który mówi: „`T` nie jest typem wskaźnikowym, a typ obiektu wskazywanego jest pusty” (`NullType` jest tutaj sygnalizatorem braku typu).

Druga definicja (z wierszem wyróżnionym pogrubieniem) wprowadza częściową specjalizację szablonu `PointerTraits`, pasującą do każdego typu wskaźnikowego. W przypadku jakichkolwiek wskaźników specjalizacja ta pasuje lepiej niż szablon ogólny, więc składowa `result` otrzymuje wartość `true`. Dodatkowo dla typów wskaźnikowych odpowiednio definiowany jest typ obiektu wskazywanego.

Możemy teraz zerknąć do wnętrza implementacji `std::vector::iterator`; wielu docieka, czy jest to zwyczajny wskaźnik, czy jakiś złożony obiekt?

```
int main()
{
   const bool
      iterIsPtr = TypeTraits<vector<int>::iterator>::isPointer;
   cout << "vector<int>::iterator jest " <<
      (iterIsPtr ? "szybki" : "inteligentny") << '\n';
}
```

Analogicznie `TypeTraits` implementuje stałe `IsReference` wraz z definicją `ReferencedType` dla typów referencyjnych. Dla typu referencyjnego `T` typ `ReferencedType` to typ, do którego odnosi się referencja do `T`; jeśli `T` jest typem prostym, `ReferencedType` jest po prostu typem `T`.

Wykrywanie wskaźników do składowych (omówienie wskaźników do składowych znajduje się w rozdziale 5.) wygląda nieco inaczej. Potrzebna jest inna specjalizacja, jak poniżej:

```
template <typename T>
class TypeTraits
{
private:
   template <class U> struct PToMTraits
   {
      enum { result = false };
   };
   template <class U, class V>
   struct PToMTraits<U V::*>
   {
      enum { result = true };
   };
public:
   enum { isMemberPointer = PToMTraits<T>::result };
   ...
};
```

2.10.2. Wykrywanie typów elementarnych

Szablon `TypeTraits<T>` implementuje stałą `IsFundamental`, ustawioną na `true` dla tych typów, które są typami elementarnymi. Do standardowych typów elementarnych zaliczymy typ `void` oraz wszystkie typy liczbowe (a więc całkowitoliczbowe i zmiennoprzecinkowe). Szablon `TypeTraits` definiuje też stałą określającą kategorię, do której należy dany typ.

Warto (kosztem wyprzedzenia omówienia) powiedzieć już teraz nieco o magii list typów (omawianych w rozdziale 3.) — znakomicie ułatwiają one wykrycie przynależności typu do pewnego określonego zestawu typów. Na razie wystarczy znajomość wyrażenia, które taką przynależność ustala:

```
TL::IndexOf<TYPELIST_nn(lista typów wymienionych po przecinku), T>::value
```

(gdzie *nn* jest liczbą typów na liście). Wyrażenie to zwraca indeksowaną od zera pozycję typu `T` na liście albo `-1`, jeśli typ `T` nie występuje na liście. Na przykład wyrażenie:

```
TL::IndexOf<TYPELIST_4(signed char, short int, int, long int), T>::value
```

będzie nieujemne tylko dla `T` będącego typem liczby całkowitej ze znakiem.

Oto definicja części szablonu `TypeTraits` odpowiadającej za wykrywanie typów elementarnych:

```
template <typename T>
class TypeTraits
{
   ... jak poprzednio ...
public:
   typedef TYPELIST_4(
```

```
        unsigned char, unsigned short int,
        unsigned int, unsigned long int)
      UnsignedInts;
   typedef TYPELIST_4(signed char, short int, int, long int)
      SignedInts;
   typedef TYPELIST_3(bool, char, wchar_t) OtherInts;
   typedef TYPELIST_3(.oat, double, long double) Floats;
   enum { isStdUnsignedInt =
      TL::IndexOf<UnsignedInts, T>::value >= 0 };
   enum { isStdSignedInt = TL::IndexOf<SignedInts, T>::value >= 0 };
   enum { isStdIntegral = isStdUnsignedInt || isStdSignedInt ||
      TL::IndexOf <OtherInts, T>::value >= 0 };
   enum { isStdFloat = TL::IndexOf<Floats, T>::value >= 0 };
   enum { isStdArith = isStdIntegral || isStdFloat };
   enum { isStdFundamental = isStdArith || Conversion<T,
      void>::sameType };
   ...
};
```

Użycie list typów i wyrażenia `TL::IndexOf` daje możliwość szybkiego pozyskania informacji o typach bez konieczności wielokrotnego specjalizowania szablonu. Wszystkich, którzy nie mogą oprzeć się pokusie zajrzenia do wnętrza implementacji list typów i `TL::IndexOf`, zapraszam do lektury rozdziału 3. — byleby jednak tu wrócili.

Faktyczna implementacja wykrywania typów elementarnych jest nieco bardziej wyrafinowana, pozwalając również na wykrywanie typów rozszerzonych, definiowanych przez producentów poszczególnych implementacji — jak typy `int64` czy `long long`.

2.10.3. Optymalizacja typów parametrów funkcji

W kodzie szablonowym niekiedy potrzebna jest odpowiedź na pytanie: „Jaka jest najbardziej efektywna forma przekazywania i przyjmowania obiektów typu `T` w roli argumentów wywołania funkcji dla danego typu `T`?”. Zasadniczo w przypadku typów złożonych najbardziej efektywne jest przekazywanie przez referencję; typy proste (skalarne) najlepiej przekazywać przez wartość (do typów skalarnych zaliczymy opisywane wcześniej elementarne typy liczbowe oraz wyliczenia, wskaźniki i wskaźniki do składowych). W przypadku typów złożonych przekazywanie przez referencję pozwala uniknąć narzutu związanego z wykonaniem kopii tymczasowej (z wywołaniami konstruktora i destruktora), a dla typów skalarnych przy przekazywaniu przez wartość unika się narzutu odwołań pośrednich przez referencję.

Sęk w tym, że C++ nie pozwala na tworzenie referencji do referencji. Jeśli więc `T` jest *już* referencją, nie należy próbować dodawać do niego kolejnej referencji.

Odrobina analizy przy optymalizowaniu typów parametrów w wywołaniach funkcji prowadzi do ukucia poniższego algorytmu. Na jego potrzeby nazwiemy typ wartości przekazywanej do funkcji mianem `ParameterType`.

Jeśli `T` jest referencją do jakiegoś typu, `ParameterType` będzie identyczny z `T` (brak zmiany typu). *Przyczyna*: zakaz tworzenia referencji do referencji.

W przeciwnym razie:

Jeśli `T` jest typem skalarnym (`int`, `float` itd.), `ParameterType` będzie identyczny z `T` (brak zmiany typu). *Przyczyna*: typy elementarne najlepiej przekazywać przez wartość.

W przeciwnym razie `ParameterType` to `const T&`. *Przyczyna*: co do zasady, typy inne niż elementarne najlepiej przekazywać przez referencję.

Istotnym osiągnięciem tego algorytmu jest uniknięcie błędu utworzenia referencji do referencji, który mógłby wystąpić w przypadku prostego połączenia standardowych funkcji `bind2nd` i `mem_fun`.

Cechę `TypeTraits::ParameterType` można łatwo zaimplementować na bazie już gotowej techniki i na bazie już zdefiniowanych cech typów: `ReferencedType` i `IsFundamental`.

```
template <typename T>
class TypeTraits
{
   ... jak poprzednio ...
public:
   typedef Select<isStdArith || isPointer || isMemberPointer,
         T, ReferencedType&>::Result
      ParameterType;
};
```

Niestety, w tym układzie nie uda się zoptymalizować przekazywania przez wartość typów wyliczeniowych (`enum`).

Z cechy `TypeTraits::ParameterType` korzysta szablon klasy `Functor` z rozdziału 5.

2.10.4. Obieranie typu z kwalifikatorów

Dla danego typu `T` można łatwo uzyskać jego wariant dla wartości niemodyfikowalnych — wystarczy napisać `const T`. Ale operacja odwrotna, to znaczy odjęcie typowi kwalifikatora `const`, jest nieco trudniejsza. Analogicznie, niekiedy zachodzi potrzeba pozbycia się z typu kwalifikatora `volatile`.

Implementacja „usuwania `const`" jest stosunkowo prosta, znów na bazie częściowej specjalizacji szablonu:

```
template <typename T>
class TypeTraits
{
   ... jak poprzednio ...
private:
   template <class U> struct UnConst
   {
      typedef U Result;
   };
   template <class U> struct UnConst<const U>
   {
      typedef U Result;
   };
public:
   typedef UnConst<T>::Result NonConstType;
};
```

2.10.5. Zastosowania TypeTraits

Szablon `TypeTraits` daje dostęp do wielu interesujących danych. Przede wszystkim pozwala choćby poprzez proste złożenie technik prezentowanych w rozdziale zaimplementować procedurę kopiowania obiektów z użyciem optymalizacji dla wybranych typów (patrz podrozdział 2.10). `TypeTraits` można użyć do sprawdzenia cech typów iteratorów `inIt` i `OutIt`, interesujących pod kątem optymalizacji kopiowania; w połączeniu z szablonem `Int2Type` można efektywnie rozprowadzić wywołanie do optymalizowanej funkcji `BitBlast` albo do klasycznej implementacji `Copy`.

```
enum CopyAlgoSelector { Conservative, Fast };
// procedura "klasyczna" działa dla dowolnych typów
template <typename InIt, typename OutIt>
OutIt CopyImpl(InIt first, InIt last, OutIt result, Int2Type<Conservative>)
{
   for (; first != last; ++first, ++result)
      *result = *first;
   return result;
}
// procedura szybka działa tylko dla wskaźników do danych prostych
template <typename InIt, typename OutIt>
OutIt CopyImpl(InIt first, InIt last, OutIt result, Int2Type<Fast>)
{
   const size_t n = last-first;
   BitBlast(first, result, n * sizeof(*first));
   return result + n;
}
template <typename InIt, typename OutIt>
OutIt Copy(InIt first, InIt last, OutIt result)
{
   typedef TypeTraits<InIt>::PointeeType SrcPointee;
   typedef TypeTraits<OutIt>::PointeeType DestPointee;
   enum { copyAlgo =
      TypeTraits<InIt>::isPointer &&
      TypeTraits<OutIt>::isPointer &&
      TypeTraits<SrcPointee>::isStdFundamental &&
      TypeTraits<DestPointee>::isStdFundamental &&
      TypeTraits<SrcPointee>::isStdFloat == TypeTraits<
         DestPointee>::isStdFloat &&
      sizeof(SrcPointee) == sizeof(DestPointee) ? Fast :
         Conservative };
   return CopyImpl(first, last, result, Int2Type<copyAlgo>());
}
```

Sama funkcja `Copy` nie jest specjalnie przepracowana, ale i tak dzieje się tu sporo ciekawych rzeczy. Wyliczenie `copyAlgo` wybiera pomiędzy implementacjami kopiowania. Logika wyboru prezentuje się następująco: jeśli oba iteratory są wskaźnikami, oba typy wskazywane są typami elementarnymi, typ wskazywany źródłowy i docelowy są oba liczbami całkowitymi albo oba liczbami zmiennoprzecinkowymi, wreszcie także typ wskazywany źródłowy jest tego samego typu co docelowy — wtedy można wybrać funkcję `BitBlast`. Jeśli więc w kodzie użytkowym napiszemy:

```
int* p1 = ...;
int* p2 = ...;
unsigned int* p3 = ...;
Copy(p1, p2, p3);
```

funkcja `Copy` wywoła (tak, jak powinna) szybką implementację kopiowania, mimo że typy źródłowy i docelowy są różne.

Wadą `Copy` jest to, że nie optymalizuje wszystkiego, co dałoby się zoptymalizować. Nie optymalizuje chociażby kopiowania prostych struktur C niezawierających wyłącznie składowych elementarnych — tak zwanych struktur POD (od ang. *plain old data — zwykłe stare dane*). Tymczasem standard dopuszcza bajtowe kopiowanie struktur prostych; jedynie `Copy` nie potrafi wykryć „prostoty" struktury i zrealizuje dla nich wolniejszą procedurę kopiowania obiekt po obiekcie. Powinniśmy się tu uciec do klasycznych cech typów (oprócz `TypeTraits`). Na przykład:

```
template <typename T> struct SupportsBitwiseCopy
{
   typedef typename TypeTraits<T>::NonConstType NonConstType;
   enum { result = TypeTraits<T>::isFundamental };
};
template <typename InIt, typename OutIt>
OutIt Copy(InIt first, InIt last, OutIt result,
   Int2Type<true>)
{
   typedef typename TypeTraits<typename TypeTraits<
      InIt>::PointeeType>::UnqualifiedType SrcPointee;
   typedef typename TypeTraits<typename Typetraits<
      OutIt>::PointeeType>::UnqualifiedType DestPointee;
   enum { useBitBlast =
      TypeTraits<InIt>::isPointer &&
      TypeTraits<OutIt>::isPointer &&
      SupportsBitwiseCopy<SrcPointee>::result &&
      SupportsBitwiseCopy<DestPointee>::result &&
      Conversion<SrcPointee, DestPointee>::sameType || (
         TypeTraits<SrcPointee>::isStdFundamental &&
         TypeTraits<DestPointee>::isStdFundamental &&
         TypeTraits<SrcPointee>::isStdFloat ==
         TypeTraits<DestPointee>::isStdFloat &&
         sizeof(SrcPointee) == sizeof(DestPointee)) ? Fast : Conservative };
      return CopyImpl(.rst, last, result, Int2Type<useBitBlast>());
}
```

Teraz możemy już przygotować `Copy` na szybkie kopiowanie wybranych prostych struktur danych poprzez wyspecjalizowanie szablonu `SupportsBitwiseCopy` i umieszczenie w nim wartości `true`:

```
template<> struct SupportsBitwiseCopy<MyType>
{
   enum { result = true };
};
```

Kompletny zestaw cech typów implementowanych w szablonie `TypeTraits` z biblioteki Loki wymienia tabela 2.1.

TABELA 2.1.
Składowe TypeTraits<T>

Nazwa składowej	Rodzaj	Opis
`isPointer`	stała logiczna	Wartość `true`, jeśli `T` jest wskaźnikiem.
`PointeeType`	typ	Typ wskazywany przez `T`, jeśli `T` jest wskaźnikiem, `NullType` w pozostałych przypadkach.
`isReference`	stała logiczna	Wartość `true`, jeśli `T` jest referencją.
`ReferencedType`	typ	Typ, do którego odnosi się `T`, jeśli `T` jest referencją, lub `T` w pozostałych przypadkach.
`ParameterType`	typ	Najbardziej odpowiedni typ do przekazywania obiektów typu `T` do wywołań funkcji niemodyfikujących (albo `T`, albo `const T&`).
`isConst`	stała logiczna	Wartość `true`, jeśli `T` jest typem z kwalifikacją `const` (typem wartości niemodyfikowalnej).
`NonConstType`	typ	Typ `T` pozbawiony kwalifikatora `const` (jeśli taki występował).
`isVolatile`	stała logiczna	Wartość `true`, jeśli `T` jest typem z kwalifikacją `volatile` (typem wartości ulotnej).
`NonVolatileType`	typ	Typ `T` pozbawiony kwalifikatora `volatile` (jeśli taki występował).
`NonQualifiedType`	typ	Typ `T` pozbawiony kwalifikatorów `const` i `volatile` (jeśli takie występowały).
`isStdUnsignedInt`	stała logiczna	Wartość `true`, jeśli `T` jest jednym z czterech typów całkowitych bez znaku (`unsigned char`, `unsigned short`, `unsigned int`, `unsigned long`).
`isStdSignedInt`	stała logiczna	Wartość `true`, jeśli `T` jest jednym z czterech typów całkowitych ze znakiem (`signed char`, `signed short`, `signed int`, `signed long`).
`isStdIntegral`	stała logiczna	Wartość `true`, jeśli `T` jest standardowym typem liczbowym.
`isStdFloat`	stała logiczna	Wartość `true`, jeśli `T` jest standardowym typem zmiennoprzecinkowym (`float`, `double` lub `long double`).
`isStdArith`	stała logiczna	Wartość `true`, jeśli `T` jest standardowym typem arytmetycznym (całkowitym lub zmiennoprzecinkowym).
`isStdFundamental`	stała logiczna	Wartość `true`, jeśli `T` jest typem elementarnym (jednym z typów arytmetycznych lub `void`).

2.11. Podsumowanie

Komponenty projektowe omawiane w tej książce są budowane z cegiełek, z których część stanowi samodzielne techniki programistyczne. Większość z nich przydaje się programistom szablonów. W tej roli omawialiśmy:

- *Asercje czasu kompilacji* (podrozdział 2.1), pomocne w bibliotekach chcących prezentować znaczące komunikaty o błędach z kodu szablonowego.
- *Częściowe specjalizacje szablonów* (podrozdział 2.2), pozwalające na specjalizowanie szablonu nie tylko dla kompletnego zestawu wartości parametrów, ale także dla ich podzbiorów, a więc dla całych rodzin wartości parametrów pasujących do wzorca specjalizacji.
- *Klasy lokalne* (podrozdział 2.3), ciekawe zwłaszcza wewnątrz szablonów funkcji.

- *Odwzorowania stałych całkowitych na typy* (podrozdział 2.4), ułatwiające statyczne rozprowadzanie wywołań na bazie wartości liczbowych (najczęściej — wartości warunków logicznych).
- *Odwzorowania typów na typy* (podrozdział 2.5), pozwalające na zastąpienie niedozwolonej w C++ częściowej specjalizacji szablonów funkcji przeciążaniem funkcji.
- *Selekcję typów* (podrozdział 2.6), pozwalającą na statyczne wybieranie typów na bazie wartości logicznych.
- *Statyczne wykrywanie relacji dziedziczenia i możliwości konwersji* (podrozdział 2.7), dające możliwość sprawdzenia, czy dwa dowolne typy pozostają ze sobą w relacji dziedziczenia, czy można wykonać konwersję pomiędzy nimi i czy czasem nie są one tożsame.
- *Szablon* `TypeInfo` (podrozdział 2.8) jako otoczka klasy `std::type_info`, dająca obiektom `type_info` semantykę wartości i możliwość łatwego porównywania.
- *Klasy* `NullType` *i* `EmptyType` (podrozdział 2.9) jako przydatne typy zastępcze w metaprogramowaniu szablonowym.
- *Szablon* `TypeTraits` (podrozdział 2.10), udostępniający cały szereg uniwersalnych cech dowolnych typów do łatwego wykorzystania przy dostosowywaniu kodu szablonowego do możliwości poszczególnych kategorii typów.

Skorowidz

C

D

E

F

G

H

I

K

L

M

N

O

P

R

W

X

Z

Ż

NOWOCZESNE PROJEKTOWANIE W C++

Uogólnione implementacje wzorców projektowych

KANON INFORMATYKI

Język C++ jest obecny na rynku już niemal trzydzieści lat, a jednak nadal świetnie spełnia swoje zadania. Jest powszechnie używany, a wręcz niezastąpiony w wielu dziedzinach programowania. Wszędzie tam, gdzie potrzebna jest najwyższa wydajność oraz pełna kontrola nad zasobami i przebiegiem programu, sprawdza się wyśmienicie. Wystarczy odrobina chęci, dobry podręcznik i trochę czasu, aby wykorzystać pełną moc C++ w nowoczesnych technikach programowania.

Książkę, która Ci w tym pomoże, trzymasz właśnie w rękach. Czy znajdziesz czas i ochotę, aby zgłębić zawartą w niej wiedzę? Gwarantujemy, że warto! W trakcie lektury dowiesz się, jak zaimplementować w C++ najpopularniejsze wzorce projektowe. Dzięki nim błyskawicznie oprogramujesz typowe rozwiązania. Nauczysz się tworzyć dokładnie jedną instancję obiektu oraz zobaczysz, jak korzystać z fabryki obiektów czy inteligentnych wskaźników. Ponadto zapoznasz się z technikami projektowania klas, asercjami w trakcie kompilacji oraz uogólnionymi funktorami. Dzięki tej książce poczujesz na nowo satysfakcję z pisania programów w języku C++!

Czerp satysfakcję z korzystania z nowoczesnych technik programowania w C++!

- Projektowanie klas
- Asercje czasu kompilacji
- Listy typów
- Alokowanie małych obiektów
- Funktory uogólnione
- Inteligentne wskaźniki
- Fabryka obiektów i fabryka abstrakcyjna
- Tworzenie dokładnie jednego obiektu — wzorzec singleton
- Multimetody

Nr katalogowy: 6301

Księgarnia internetowa: http://helion.pl

Zamówienia telefoniczne: 0 801 339900 0 601 339900

Helion

Sprawdź najnowsze promocje: http://helion.pl/promocje
Książki najchętniej czytane: http://helion.pl/bestsellery
Zamów informacje o nowościach: http://helion.pl/nowosci

Helion SA
ul. Kościuszki 1c, 44-100 Gliwice
tel.: 32 230 98 63
e-mail: helion@helion.pl
http://helion.pl

helion.pl księgarnia internetowa

Cena 69,00 zł

ISBN 978-83-246-3301-2

9 788324 633012

Informatyka w najlepszym wydaniu