Zaawansowane CPP/Wykład 9: Szablony wyrażeń

From Studia Informatyczne

< Zaawansowane CPP

Spis treści

Wprowadzenie

Rozważmy implementację funkcji całkującej inne funkcje:

```
double integrate(double (*f)(double ),double  min,double max,double ds) {
  double integral=.0;
  for(double x=min;x<max;x+=ds) {
    integral+=f(x);
  }
  return integral*ds;
}
```

(Źródło: integrate.cpp)

Pomijając prostotę zaimplementowanego algorytmu numerycznego, możemy jej używać następująco:

```
std::cout<<  ::integrate(sin,0,3.1415926,0.01)<<std::endl;
```

Jest to standardowy sposób implementowania takich zagadnień w C czy w Fortranie. W C++ szablony dają nam większe możliwości. Funkcja `integrate` przyjmuje jako swój pierwszy argument wskaźnik do jednoargumentowej funkcji zwracającej `double`, ale to co jest naprawdę istotne to to, że można użyć w stosunku do niego notacji wywołania funkcji: `f(x)`. W C++ możemy wyposażyć w tę możliwość każdą klasę poprzez zdefiniowanie w niej metody `operator()`. Jeśli zdefiniujemy funkcję `integrate` jako szablon, to będziemy mieli możliwość przekazywania również takich obiektów nazywanych obiektami funkcyjnymi lub funktorami.

```
template<typename  F> double integrate(F f,double  min,double max,double ds) {
  double integral=.0;
  for(double x=min;x<max;x+=ds) {
    integral+=f(x);
```

```
  }
  return integral*ds;
}
```

(Źródło: integrate_temp.cpp)

Wywołanie

```
std::cout<<  ::integrate(sin,0,3.1415926,0.01)<<std::endl;
```

dalej zadziała, ale można używać również:

```
class sina {
  double _a;
public:
  sina(double a): _a(a) {};
  double operator()(double x) {return sin(_a*x);}
};
  std::cout<<  ::integrate(sina(0),0,3.1415926,0.01)<<std::endl;
  std::cout<<  ::integrate(sina(1),0,3.1415926,0.01)<<std::endl;
  std::cout<<  ::integrate(sina(2),0,3.1415926,0.01)<<std::endl;
```

(Źródło: integrate_temp.cpp)

Widać tu już pierwszą zaletę funktorów: jako obiekty mogą one posiadać stan. W przypadku funkcji do takich celów musielibyśmy używać zmiennych globalnych. Ale żeby móc funktora używać musimy go najpierw zdefiniować. Pytanie na które bedę się starał odpowiedzieć na tym wykładzie brzmi: czy możemy definicję funktora uprościć? Np. czy nie moglibyśmy pisać

```
integrate(sin(2*x),...)
```

lub

```
integrate(1.0/(1.0+x),...)
```

Okazuje się, że można i technika, która to umożliwia, nosi nazwę "szablonów wyrażeń". Z pozoru wydaje się to być tylko ciekawostką, ale w następnej części tego wykładu pokażemy jak za pomocą tej techniki można istotnie przyspieszyć program.

Naszym celem jest napisane kodu, który będzie generował funktory automatycznie z "normalnych" wyrażeń typu $1/(1+x)$ i umożliwi pisanie wyrażeń w rodzaju:

```
integrate(1/(1+x),0,1,0.01);
```

x oznacza tu zmienną, po której całkujemy. Oznacza to, że kompilator musi wyrażenie $1/(1+x)$ przekształcić na funktor

```
class _some_functor_ {
public:
double operator()(double x) return {1/(1+x);}
}
```

Zmienne

Chińczycy mówią, że podróż stumilową zaczyna się od pierwszego kroku. Zróbmy więc pierwszy krok i spróbujmy doprowadzić do prawidłowej kompilacji i wykonania wyrażenie:

```
integrate(x,...);
```

Żeby to działało prawidłowo, `x` musi być funktorem który zwraca własny argument:

```
class Variable {
public:
  double operator()(double x) {
    return x;
  }
};
```

(Źródło: expr_templates.h)

Możemy więc już wykonać całkę $\int_0^1 x \, \mathrm{d}\, x$

```
Variable x;
integrate(x,0,1,0.001);
```

co nie jest jakimś porywającym wyczynem :). Żeby się posunąć dalej potrzebujemy kolejnych elementów.

Stałe

Ewidentnie potrzebujemy stałych (literałów). Stała to funktor, który zwraca wartość niezależną od swojego argumentu:

```
class Constant {
  double _c;
public:
  Constant(double c) :_c(c){};
  double operator()(double x) {return _c;}
};
```

(Źródło: expr_templates.h)

Niestety literałów nie możemy używać bezpośrednio w naszym wyrażeniu:

```
integrate(1.0,0,1,0.001);
```

nie zadziała. Musimy pisać

```
integrate(Constant(1.0),0,1,0.001);
```

Można by wprawdzie przeładować definicje `integrate` dla argumentów typu `double` ale chyba nie warto, zważywszy na to, że całkowanie stałej nie jest zbyt kłopotliwe.

Następnym krokiem będzie dodanie wyrażeń arytmetycznych.

Dodawanie

Zaczniemy od dodawania. Potrzebne będą dwa elementy: klasa funktor, która symbolizuje dodawanie oraz odpowiednio zdefiniowany operator dodawania.

Funktor symbolizujący dodawanie musi mieć dwie składowe odpowiadające dwu składnikom tej operacji. Przypominamy, że każdy z tych składników też jest funktorem, a więc posiada jednoargmentowy `operator()(double)`. Operacja dodawania polegać więc bedzie na dodaniu wyników obu funktorów składowych:

```
template<typename LHS,typename RHS > class AddExpr {
  LHS _lhs;
  RHS _rhs;
public:
  AddExpr(const LHS &l,const RHS &r) :_lhs(l),_rhs(r) {};
  double operator()(double x) {
    return _lhs(x)+_rhs(x);
  }
};
```

(Źródło: expr_templates.h)

Pozostaje nam tylko zdefiniować operator dodawania, który z dwu składników utworzy nam obiekt typu `AddExpr`. Ponieważ możemy dodawać cokolwiek, to operator dodawania będzie szablonem:

```
template<typename LHS,typename RHS >
Add<LHS,RHS>  operator+(const LHS &l,
                        const RHS &r) {
  return Add<LHS,RHS>(l,r);
};
```

(Źródło: expr_templates.h)

Żeby móc dodawać stałe potrzebujemy jeszcze specjalizacji szablonu dla przypadku, w którym jeden z argumentów jest typu `double`):

```
template<typename LHS >
Add<LHS,Constant>  operator+(const LHS &l,
                        double r) {
  return Add<LHS,Constant>(l,Constant(r));
};
template<typename RHS >
Add<Constant,RHS>  operator+(double l,
                        const RHS &r) {
 return Add<Constant,RHS>(Constant(l),r);
};
```

(Źródło: expr_templates.h)

Widać, że w identyczny sposób możemy zaimplementować pozostałe trzy działania. Odpowiadające im klasy nazwiemy odpowiednio `SubsExpr`, `MultExpr` i `DivExpr` (pominąłem jednoargumentowy `operator-()`) . Ich kod można zaobaczyć w Źródło: expr_templates.h.

Funkcje

Analogicznie implementujemy funkcje np.:

```
template<typename Arg> class SinExpr{
  Arg _arg;
public:
  SinExpr(const Arg& arg) :_arg(arg) {};
  double operator()(double x) {return sin(_arg(x));}
};
```

```
template<typename Arg> SinExpr<Arg> sin(const Arg&a) {
  return SinExpr<Arg>(a);}
```

i operatory unarne (jednoargumentowe), takie jak operator negacji:

```
template<typename LHS> class NegativeExpr {
  LHS _lhs;
public:
  NegativeExpr(const LHS &l) :_lhs(l) {};
  double operator()(double x) {
    return - _lhs(x);
  }
};
template<typename LHS>
NegativeExpr<LHS>  operator-(const LHS &l) {
  return NegativeExpr<LHS>(l);
};
```

(Źródło: expr_templates.h)

Jak to działa?

Mam nadzieję, że zasada działania szablonów wyrażeń jest już jasna, ale prześledźmy jeszcze raz przykład wyrażenia:

```
\Variable x;
1.0/(1.0+x)
```

Kompilator dokonuje rozkładu gramatycznego i interpretuje to wyrażenia jako:

```
operator/(1.0,operator+(1,x))
```

Wiedząc, że `x` jest typu `Variable`, kompilator stara się znaleźć odpowiednie szablony operatorów. Najpierw dopasuje wewnętrzny `operator+<Variable>(double, Variable)`

```
operator/(double,operator+<Variable>(double 1.0 , Variable x))
```

a potem wiedząc, że typ zwracany przez ten operator to `AddExpr<Constant,Variable>`, skonkretyzuje odpowiedni szablon operatora dzielenia:

```
operator/<AddExpr<Constant,Variable> >
         (double 1.0,
          AddExpr<Constant,Variable>
          operator+<Variable>(double 1.0 ,
                              Variable x)
)
```

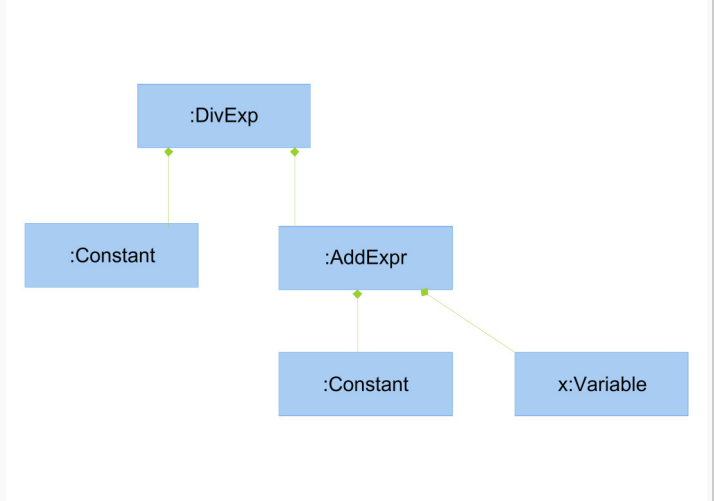
Po zastąpieniu skonkretyzowanych operatorów ich definicjami powstanie kod, który generuje tymczasowy obiekt:

```
expr=DivExpression<Constant,
AddExpr<Constant,Variable> >(Constant(1.0),
AddExpr<Constant,Variable>(Constant(1.0)
,Variable() );
```

Przedstawienie tego obiektu zamieszczone jest na rysunku 9.1.

Widać, że obiekt `expr` reprezentuje drzewo rozkładu wyrażenia $1.0/(1.0+x)$. Wywołanie operatora nawiasów spowoduje rekurencyjne wywoływanie operatorów nawiasów wyrażeń składowych i w konsekwencji obliczenie tego wyrażenia.

Proszę zwrócić uwagę, że opisana technika szablonów wyrażeń składa się z dwóch części. Pierwsza to klasy reprezentujące wyrażenia: `Constant`,`Variable`,`AddExpr`, itd., za pomocą których budujemy drzewo rozkładu gramatycznego. Druga - to przeciążone operatory i funkcje, które to drzewo generują.



Rysunek 9.1. Funktor wygenerowany z wyrażenia $1.0/(1.0+x)$.

Zmienne różnych typów

W przedstawionym przykładzie ograniczyliśmy się do wyrażeń typu `double`. W duchu programowania uogólnionego postaramy się zmienić nasz kod tak, aby można było wybierać typ wyrażenia poprzez parametr szablonu.

Okazuje się to jednak nie tak proste. Łatwo jest dodać dodatkowy parametr do klas reprezentujących wyrażenia:

```
template<typename T> class Variable {
public:
  T operator()(T x) {
     return x;
  }
};
template<typename T> class Constant {
  T _c;
public:
  Constant(T c) :_c(c){};
  T operator()(T x) {return _c;}
};
template<typename T, typename LHS,typename RHS > class AddExpr {
  LHS _lhs;
  RHS _rhs;
public:
  AddExpr(const LHS &l,const RHS &r) :_lhs(l),_rhs(r) {};
  T operator()(T x) {
    return _lhs(x)+_rhs(x);
  }
};
```

ale niestety operatory arytmetyczne nie będą miały jak automatycznie wydedukować typu `T`.

```
template<typename T,typename LHS,typename RHS >
Add<T,LHS,RHS>  operator+(const LHS &l,
                          const RHS &r) {
  return Add<T,LHS,RHS>(l,r);
};
```

Typ `T` nie pojawia się w argumentach wywołania, a więc nie może być wydedukowany. Mamy więć kłopot.

Rozwiązaniem może być dodanie dodatkowej klasy `Expr` "opakowującej" wyrażenia, która będzie przenosiła informację o typie:

```
template<typename T,typename R = Variable<T> > class Expr {
  R _rep;
 public:
  Expr() {};
  Expr(R rep):_rep(rep) {};
  T operator()(T x) {return _rep(x);}
  R rep() const {return _rep;};
};
```

(Źródło: expr_templates_T.h)

Odpowiednie operatory dodawania będą teraz wyglądały następująco:

```
template<typename T,typename LHS,typename RHS >
Expr<T,AddExpr<T,LHS,RHS> >  operator+(const Expr<T,LHS> &l,
                          const Expr<T,RHS> &r) {
  return Expr<T,AddExpr<T,LHS,RHS> >(AddExpr<T,LHS,RHS>(l.rep(),r.rep()));
};

template<typename T,typename LHS >
Expr<T,AddExpr<T,LHS,Constant<T> > >
operator+(const Expr<T,LHS>  &l,
                          T r) {
return Expr<T,AddExpr<T,LHS,Constant<T> > >
       (AddExpr<T,LHS,Constant<T> >(l.rep(),Constant<T>(r)));
};
```

Ponieważ teraz typ `T` pojawia się w argumentach wywołania, jest możliwa jego dedukcja. Pełna implementacja wszystkich operatorów znajduje się w Źródło: expr_templates_T.h.

W porównaniu z poprzednią implementacją jedyna zmiana to taka, że zmienne musimy teraz deklarować jako:

```
Expr<double> x;
```

lub równoważnie

```
Expr<double,Variable<double> > x;
```

Teraz możemy również definiować zmienne innych typów:

```
Expr<complex<double> > z;
Expr<int> i;
```

Niestety, to ciągle nie jest koniec naszych kłopotów, nie możemy bowiem mieszać wyrażeń różnych typów. Jeśli np. zdefiniujemy:

```
Expr<double> x;
int i;
```

to wyrażenia

```
x+1;
x+i;
```

nieskompilują się. Oczywiście możemy pisać:

```
x+1.0;
x+(double)i;
```

ale jest to niewygodne; zwłaszcza jeśli będziemy chcieli użyć zmiennych zespolonych

```
Expr<std::complex<double> > c;
double x;
std::complex<double>(x)+c
```

wydaje się trochę skomplikowane. Można jednak, używając cech promocji, tak zmodyfikować nasz kod, aby potrafił automatycznie konwertować typy. Jest to przedmiotem jednego z ćwiczeń do tego wykładu.

Więcej zmiennych

Jak na razie generowaliśmy funktory jednoargumentowe. Powyższa technika daje się łatwo zastosować również do funktorów dwuargumentowych. W tym celu musimy mieć możność rozróżnienia pierwszego i drugiego argumentu. Dlatego wprawadzamy dwie klasy, które zastąpią klasę `Variable`. Klasa

```
class First {
public:
  double operator()(double x) {
    return x;
  }
  double operator()(double x,double) {
    return x;
  }
};
```

reprezentuje pierwszy argument i może występować w funktorach jedno- lub dwuargumentowych, więc ma dwa operatory nawiasów. Klasa

```
class Second {
public:
  double operator()(double,double y) {
    return y;
  }
};
```

reprezentuje drugi argument funktora, więc może występować tylko jako funkcja dwuargumentowa, stąd tylko jeden dwuargumentowy operator nawiasów. Podobnie klasa

```
class Constant {
  double _c;
public:
  Constant(double c) :_c(c){};
  double operator()(double) {return _c;}
  double operator()(double,double) {return _c;}
};
```

dorobiła się drugiego operatora nawiasów. Ostatnia zmiana to dodanie dwuargumentowego operatora nawiasów dla klasy

```
template<typename LHS,typename RHS > class AddExpr {
  LHS _lhs;
  RHS _rhs;
public:
  AddExpr(const LHS &l,const RHS &r) :_lhs(l),_rhs(r) {};
  double operator()(double x) {
```

```
    return _lhs(x)+_rhs(x);
  }
  double operator()(double x,double y) {
    return _lhs(x,y)+_rhs(x,y);
  }
};
```

I podobnie dla reszty działań. Operatory pozostają bez zmian.

Biblioteka lambda

Jako przykład zastosowania opisanych (lub podobnych) technik może służyć biblioteka `lambda` (http://www.boost.org/doc/html/lambda.html) z repozytorium `boost`. Korzystając z tej biblioteki możemy używać predefiniowanych zmiennych `_1`, `_2` i `_3`, które oznaczają odpowiednio pierwszy, drugi i trzeci argument. Korzystając z nich możemy przyklad z wykładu 2.6.3 (http://osilek.mimuw.edu.pl/index.php?title=Zaawansowane_CPP/Wyk%C5%82ad_2:_Programowanie_uog%C3%B3lnione#prz.2.6.3) zapisać następująco:

```
std::generate_n(v.begin(),n,SequenceGen<int>(1,2));
std::vector<int>::iterator it=find_if(v.begin(),v.end(),_1>4);
std::cout<<*it<<std::endl;
```

Szablony wyrażeń wektorowych

Wszystko to piękne, ale po co? Używając wyrażeń szablonowych zyskujemy być może na wygodzie, ale dzieje się to kosztem znacznego skomplikowania kodu, a co za tym idzie - czasu kompilacji. Kod jest również dużo trudniejszy do zdebugowania. Powyższy przykład ma głównie walor edukacyjny. Teraz pokażę jak tę technikę można zastosować do problemu, w którym daje ona istotne korzyści.

Rozważmy w tym celu kolejny typowy przykład wykorzystania C++. Przeładowywanie operatorów pozwala nam prosto rozszerzyć język o operacje wektorowe. Implementacja np. operatora dodawania dla dwóch wektorów mogłaby wyglądać następująco:

```
template<typename T> vector<T> operator+(const vector<T> &lhs,
                                         const vector<T> &rhs) {
vector<T> res(lhs) ;
  for(size_t i=0;i<rhs.size();++i)
    res[i]+=rhs[i];
  return res;
}
```

Potrzebne są jeszcze przeładowane wersje tego operatora, w których jeden z argumentów jest `double`-em. Zakładając, że zdefiniujemy pozostałe potrzebne operatory, możemy teraz pisać kod tak jakby typy wektorowe i operacje na nich były wbudowane w język (to zresztą było jednym z kryteriów przy projektowaniu C++):

```
vector<double> v1(100,1);
vector<double> v2(100,2);
vector<double> res(100);
res=1.2*v1+v1*v2+v2*0.5;
```

Niestety, powyższy kod traci wiele przy bliższej analizie. Jeśli popatrzymy na definicję operatorów, to zauważymy, że ta linijka w rzeczywistości generuje coś takiego:

```
vector<double> tmp1(100);
tmp1=0.5*v2;
vector<double> tmp2(100);
tmp2=v1*v2;
```

```
vector<double> tmp3(100);
tmp3=tmp1+tmp2
vector<double> tmp4(100);
tmp4=1.2*v1;
vector<double> tmp5(100);
tmp5=tmp3+tmp4;
res=tmp5
```

Tworzymy pięć(!) tymczasowych wektorów (przydzielając na nie pamięć!) i sześć razy kopiujemy wektory!! Pisząc ten sam kod ręcznie napisalibyśmy:

```
for(int i=0;i<100;i++)
    res[i]=1.2*v1[i]+v1[i]*v2[i]+v2[i]*.5;
```

Niepotrzebny jest żaden obiekt tymczasowy i tylko jedno kopiowanie. Ponadto można liczyć, że kompilator lepiej zoptymalizuje tak prosty kod np. eliminując jedno mnożenie:

```
for(int i=0;i<100;i++)
    res[i]=v1[i]*(1.2+v2[i])+v2[i]*.5;
```

Te dodatkowe niepotrzebne kopiowania i tymczasowe obiekty stanowią duży narzut, a co za tym idzie mocno ograniczją użyteczność tego typu bibliotek, a to wielka szkoda. Na ratunek przychodzą nam opisane wcześniej szablony wyrażeń. Jak widzieliśmy w poprzednim wykładzie, korzystając z tej techniki najpierw tworzymy reprezentację wyrażenia, a dopiero potem ją wykonujemy. Postaramy się więc napisać kod, który będzie tworzył reprezentację wyrażeń wektorowych, a dopiero potem obliczał je w jednej ostatniej pętli, generowanej przez operator przypisania. Podobnie jak w poprzednim przykładzie kod będzie prostszy jeśli ograniczymy się do wektorów jednego typu (`double`).

Zaczynamy więc od zdefiniowania nowej klasy `Vector`. Nie możemy użyć `std::vector` bezpośrednio, bo potrzebujemy przeładować operator przypisania, ale możemy wykorzystać `std::vector` do implementacji naszej klasy, np. korzystając z dziedziczenia:

```
class Vector : public vector<double> {
public:
  Vector():vector<double>(){};
  Vector(int n):vector<double>(n){};
  Vector(int n,double x):vector<double>(n,x){};
  Vector(const Vector& v):vector<double>(static_cast<vector<double> >(v)){};
  Vector(const vector<double>& v):vector<double>(v) {};
  Vector &operator=(const Vector& rhs) {
     vector<double>::operator=(static_cast<vector<double> >(rhs));
  }
template<typename V>  Vector &operator=(const V &rhs) {
  for(size_t i =0 ;i<vector<double>::size();++i)
    (*this)[i]=rhs[i];
  return *this;
}
};
```

Dziedziczymy cały interfejs z `std::vector` ale musimy zdefiniować własne konstruktory. Definiujemy też nowy operator przypisania. Korzystając z szablonów możemy uczynić argumentem operatora przypisania jakiekolwiek wyrażenie, które posiada operator indeksowania. Implementacja klasy `Vector` nie jest istotna jak długo posiada operator indeksowania i szablon operatora przypisania.

Podobnie jak poprzednio, potrzebne jeszcze będzie wyrażenie reprezentujące skalar, który zachowuje sie jak wektor o wszystkich polach takich samych:

```
class Const_vector {
  double _c;
public:
```

```
  Const_vector(double c):_c(c) {};
  double operator[](int i) const {return _c;}
};
```

Następnie definiujemy wyrażenie reprezentujace sumę dwóch wektorów:

```
template<typename LHS,typename RHS> class AddVectors {
  const LHS &_lhs; /* blad ! */
  const RHS &_rhs; /* blad ! */
public:
  AddVectors(const LHS &lhs,const RHS &rhs): _lhs(lhs),_rhs(rhs){};
  double operator[](int i) const {return _lhs[i]+_rhs[i];}
};
```

Proszę zwrócić uwagę, że pola `_lhs` i `_rhs` są referencjami. Gdyby tak nie było inicjalizacja klasy wymagałaby kopiowania i stracilibyśmy cały zysk. Niestety, to nie jest jeszcze poprawna implementacja. Żeby to zauważyć przyjrzyjmy sie operatorowi dodawania:

```
template<typename LHS,typename RHS> inline AddVectors<LHS,RHS>
operator+(const LHS &lhs,const RHS &rhs) {
  return AddVectors<LHS,RHS>(lhs,rhs);
}
```

a dokładniej - tej jego wersji, w której jeden z argmentów jest typu `double`:

```
template<typename LHS> inline AddVectors<LHS,Const_vector>
operator+(const LHS &lhs,double rhs) {
  return AddVectors<LHS,Const_vector>(lhs,Const_vector(rhs) );
}
```

i symetryczny. W takim przypadku `operator+(...)` tworzy tymczasowy obiekt typu `Const_vector`, który przekazuje do konstruktora `AddVectors<LHS,Const_vector>`. Taki obiekt nie może być przechowywany przez referencję, bo przestaje istnieć poza zakresem operatora dodawania. Obiekty tego typu muszą wiec być przechowywane jako kopie. Można to łatwo zaimplementować za pomocą klasy cech:

```
template<typename T> struct V_expr_traits {
  typedef  T const & op_type;
}  ;
template<> struct V_expr_traits<Const_vector> {
  typedef  Const_vector  op_type;
}  ;
```

za pomocą której definiujemy pola składowe `AddVectors` jako:

```
typename V_expr_traits<LHS>::op_type _lhs;
typename V_expr_traits<RHS>::op_type _rhs;
```

Pomijając te aspekty, widać więc, że implementacja jest całkowicie analogiczna do przykładu z funktorami, tyle że operator nawiasów został zastąpiony operatorem indeksowania. Zakładając, że zaimplementujemy pozostałe klasy i operatory to kompilator z wyrażenia

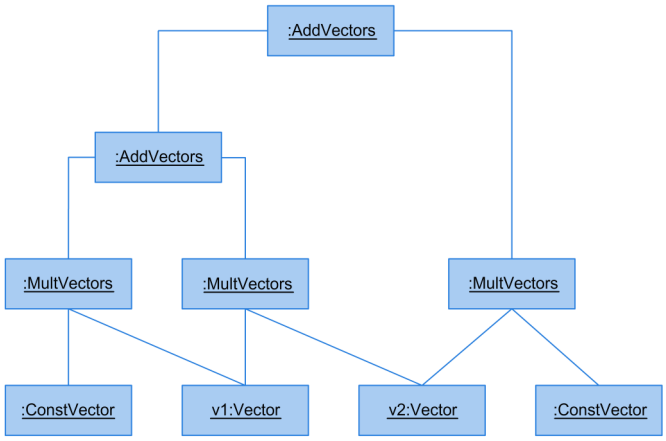
```
v1*(1.2+v2)+v2*.5;
```

stworzy nam obiekt przestawiony na rysunku 9.2.

Dopiero próba przypisania tego obiektu do wektora `res` spowoduje wywołanie w pętli operatora indeksowania dla tego obiektu, co pociągnie za sobą efektywnie obliczenie wyrażenia

```
for(int i=0;i<n;++i)
res[i]=v1[i]*(1.2+v2[i])+v2[i]*.5;
```

zgodnie z naszymi zamiarami.



Rysunek 9.2. Obiekt wygenerowany z wyrażenia `v1*(1.2+v2)+v2*.5`.

Efektywność kodu

Aby sprawdzić jak działa to w praktyce, porównałem czas wykonania wyrażenia

```
v1*(1.2+v2)+v2*.5;
```

korzystając ze "zwykłej" implementacji operatorów arytmetycznych i z szablonów wyrażeń. Pomiaru dokonywałem poprzez umieszczenie tego wyrażenia w pętli:

```
  Vector v1(100,1);
  Vector v2(100,2);
  Vector res(100);
  for(size_t j = 0 ;j< 10000000;++j){
    res=1.2*v1+v1*v2+v2*0.5;
    f(res);
  }
```

Czas wykonania programu mierzyłem poleceniem systemowym `time`. Wyniki są następujace (w sekundach):

	zwykłe	szablony
-O0	720	311
-O1	36	6.3
-O2	30	5.5
-O3	30	5.5

Proszę zauważyć, że znów włączanie optymalizacji daje dramatyczny 20 - 50-krotny wzrost szybkości programu. Podkreślam raz jeszcze, że opcja `-O0`, czyli brak optymalizacji, jest domyślną opcją dla kompilatora g++. Widać też, że używanie szablonów wyrażeń daje pięciokrotny wzrost szybkości programu. Oczywiście ten wynik będzie silnie zależał od konkretnych zastosowań. Jak zwykle gorąco zachęcam do własnych eksperymentów.

- Tę stronę ostatnio zmodyfikowano o 13:52, 11 gru 2007;