Uniwersytet Wrocławski
Instytut Informatyki
Informatyka

Praca magisterska

Implementacja dynamicznej ewaluacji kontraktów dla platformy .NET

Adam Szeliga

Promotor: dr Wiktor Zychla

Wrocław, 2011

Spis treści

Rozdział 1

Wstęp

W niniejszej pracy opisano budowę oraz zasadę działania biblioteki AsProfiled umożliwiającej kontrolę poprawności działania dowolnego programu działającego w obrębie platformy .NET.
Poprawność ta badana jest poprzez weryfikację kontraktów nałożonych na poszczególne części programów, w tym wypadku, funkcji (metod). Ten rodzaj weryfikacji nazywany jest programowaniem kontraktowym.

Pomimo tego, że początki tego paradygmatu sięgają roku 1986, to na obecną chwilę nie można powiedzieć, iż takie podejście do programowania jest powszechnie stosowane. Z drugiej strony, dla każdego ze stosowanych dzisiaj języków programowania powstały odpowiednie rozwiązania realizujące tą koncepcję. Istnieje kilka różnych podejść przy jej implementacji, są to m.in.:

- zewnętrzne biblioteki, wykorzystujące mechanizmy refleksji w celu odczytywania stanu programu - LinFu.Contracts
- odpowiednio zdefiniowane zestawy makr, wykorzystywanych przez program interpretujący - DBC for C preprocessor
- narzędzia przepisujące kod pośredni programu - Code.Contracts, AspectJ
- mechanizmy wbudowane w język - Eiffel

Należy tu wyróżnić zestaw narzędzi *Code.Contracts*, które stały się częścią najnowszej dystrybucji środowiska programistycznego .NET oznaczonej numerem 4.0. Można to odczytać jako krok w kierunku upowszechnienia paradygmatu

programowania kontraktowego.

Pomimo szerokiego wachlarza dostępnych rozwiązań, okazuje się, że jest możliwe utworzenie rozwiązania nie bazującego na żadnym z wyżej wymienionych podejść. Polega ono na wykorzystaniu specyficznych dla technologii .NET własności, które pozwalają na komunikację maszyny wirtualnej z zewnętrzną biblioteką w celu przekazywania informacji na temat zdarzeń zachodzących w programie. Ta cecha została wykorzystana przy budowie biblioteki *AsProfiled*, której proces tworzenia został przedstawiony w tej pracy. Należy wspomnieć, iż w kontekście programowania kontraktowego jest to rozwiązanie, jak do tej pory, unikalne. Aplikacja została napisana w języku C++ przy wykorzystaniu mechanizmów związanych z technologią COM. Kod źródłowy biblioteki wraz z dokumentacją znajduje się pod adresem https://code.google.com/p/asprofiled/.

1.1 Platforma .NET i CLR

Zasada działania opisywanego rozwiązania całkowicie opiera się na mechanizmach wykorzystywanych do profilowania aplikacji, dzięki którym możliwe jest odczytywanie stanu i zdarzeń zachodzących wewnątrz działającego programu.

Implementacja, o której traktuje ta praca jest ściśle związana z oficjalną wersją środowiska .NET, a konkretnie Microsoft .NET Framework. Rozszerzenia mechanizmów profilowania dla innych dystrybucji .NET, takich jak *Mono* czy też *DotGNU Portable.NET*, nie były przedmiotem tej pracy.

Technologia ta nie jest związana z żadnym konkretnym językiem programowania, aczkolwiek język C# jest uważany za flagowe rozwiązanie służące do tworzenia aplikacji pod tą platformę. Z drugiej strony, do tej pory powstało wiele innych języków, część z nich została zbudowana bezpośrednio przez firmę Microsoft, inne powstały jako niezależne projekty. Do tej pierwszej grupy, poza wspomnianym C#, zaliczają się takie języki jak C++/CLI, J#, F#, Delphi 8 dla .NET, Visual Basic .NET. W drugiej grupie znajdują się m.in. Scala, IronPython, IronRuby, Nemerle. Z każdym z nich związany jest odpowiedni kompilator, którego zadaniem jest translacja programów na język pośredni CIL (wcześniej MSIL). Dopiero tak przygotowane programy mogą być wykonane na maszynie wirtualnej CLR, która to jest środowiskiem uruchomieniowym platformy .NET.

Taka konstrukcja pozwoliła rozszerzyć zakres działania zaimplementowanego rozwiązania na wszystkie języki programowania w obrębie tej platformy, pod

warunkiem, że dany język wspiera konstrukcje programowe zwane atrybutami. W niniejszej pracy wszystkie przykłady opierają się na programach napisanych w języku C#.

1.2 Założenia

W celu zapewnienia jak największej użyteczności, przyjęto pewien zbiór założeń funkcjonalności jakie muszą być zawarte w bibliotece. Wszystkie z nich zostały szczegółowo opisane w rozdziale czwartym, jednak wprowadzamy je już teraz, aby w dalszej uzasadnić decyzje podjęte przy konstrukcji kolejnych etapów aplikacji.

- biblioteka musi śledzić proces wykonywania programu po jego uruchomieniu
- w celu weryfikacji poprawności programu musi być możliwość zdefiniowana kontraktu
- musi być możliwość odczytania zadanego kontraktu
- aplikacja musi wiedzieć, dla której metody ma się odbyć weryfikacja
- aplikacja musi umieć odczytać argumenty przekazywane do badanych metod
- aplikacja musi zachowywać stan początkowy argumentów metody do momentu jej zakończenia
- aplikacja musi być w stanie odczytać wartości zwracane z badanych metod

W kolejnych rozdziałach opisane w jaki sposób każde z powyższych założeń zostało spełnione. Nie przewidziano żadnych założeń co do wymagań poza funkcjonalnych, co oznacza, iż takie parametry jak szybkość działania aplikacji czy bezpieczeństwo rozwiązania, nie były przedmiotem zainteresowania.

Rozdział 2

Wprowadzenie do programowania kontraktowego

W tym rozdziale została przybliżona specyfika programowania kontraktowego. Programowanie kontraktowe jest jedną z metodologii sprawdzania poprawności oprogramowania.

Koncepcja programowania kontraktowego ma korzenie w pracach nad formalną weryfikacją programów, formalną specyfikacją oraz logiką Hoara. Wszystkie z powyższych są przykładami narzędzi wykorzystywanych do dowodzenia poprawności programów komputerowych, a tym samym przyczyniają się podnoszenia ich jakości. Nie inaczej jest w przypadku programowanie kontraktowego. Po raz pierwszy w obecnej postaci wprowadził je Bertrand Meyer w 1986 roku przy okazji projektu języka programowania Eiffel. Do dnia dzisiejszego powstało wiele różnych implementacji tej koncepcji. Cześć języków programowania ma wbudowane mechanizmy pozwalające na definiowanie i sprawdzanie poprawności kontraktów. Do tej grupy zaliczamy:

- Cobra
- Eiffel
- D
- języki oparte na platformie .NET w wersji 4.0

Drugą grupę stanowią języki dla których powstały rozszerzenia umożliwiające ten rodzaj weryfikacji. Ta grupa jest znacznie bardziej obszerna i obejmuje większość znaczących języków programowania, takich jak :

- C/C++,

- C#
- Java
- Javascript
- Perl
- Python
- Ruby

Biblioteka *AsProfiled* należy do drugiej grupy rozwiązań.

Metodologia programowania kontraktowego zakłada, że elementy programu powinny odnosić się do siebie na zasadzie kontraktów, czyli:

- każdy element powinien zapewniać określoną funkcjonalność i wymagać ściśle określonych środków do wykonania polecenia,
- klient może użyć funkcjonalności, o ile spełni zdefiniowane wymagania,
- dostawca zobowiązuje się do dostarczenia usługi określonej jakości,
- element zapewniający funkcjonalność powinien przewidzieć sytuacje wyjątkowe, a klient powinien je rozpatrzyć.

Widać więc, że chodzi o zawieranie swego rodzaju umowy pomiędzy dostawcą funkcjonalności i klientami. W ogólnym przypadku poprzez dostawców rozumiemy klasy lub metody zawarte w programie, klientem zaś jest każdy kto z nich korzysta.

Umowa ta, zwana dalej kontraktem jest dowolną formuła logiczna w języku logiki pierwszego rzędu, w której zmiennymi są wartości pól obiektów, a symbolami funkcyjnymi - $\eta - arne$ operacje, które są tak samo interpretowane przez obie strony zawierające kontrakt (np. sum(1,n), $+$, *). Kontrakt klasy (ang. class contract) definiowany jest jako niezmiennik, to znaczy, warunek jaki musi być spełniony przed i po wywołaniu dowolnej publicznej metody w obrębie tej klasy.
Z kolei kontrakt metody (ang. method contract) definiowany jest przy pomocy warunków początkowego i końcowego, gdzie ten pierwszy specyfikuje jakie założenia powinny być spełnione w momencie wywołania metody, a drugi określa stan aplikacji po jej zakończeniu.

W języku programowania Eiffel, skąd wywodzi się cała idea, kontrakty nakładane na metody definiowane są w następujący sposób:

Listing 2.1: Programowanie kontraktowe

```
NazwaMetody (deklaracja argumentów) is
require
 -- warunek początkowy
do
 -- ciało metody
ensure
 -- warunek końcowy
end
```

Warunek początkowy oznacza kontrakt wiążący klienta, który musi być spełniony na wejściu, aby metoda mogła poprawnie realizować zdefiniowane wewnątrz niej operacje. Warunek końcowy to kontrakt wiążący dostawcę usługi, który na pewno będzie spełniony po zakończeniu wykonywania metody.

Dla ilustracji, poniżej zamieszczono definicję klasy *ACCOUNT*, reprezentującej konto użytkownika w banku. W ramach konta można przeprowadzić operacje wpłaty i wypłaty środków. Dla metod odpowiadającym tym czynnościom, zdefiniowane zostały warunki początkowe i końcowe. Zgodnie z powyższym, warunki zostały umieszczone w ramach bloków *require* i *ensure*

Listing 2.2: Kontrakty w języku Eiffel

```
class ACCOUNT feature
 balance: INTEGER
 minimum_balance: INTEGER is 1000

 deposit (sum: INTEGER) is
 -- Zdeponowanie kwoty na koncie.
 require
  sum >= 0
 do
  add (sum)
 ensure
  balance = old balance + sum
 end

 withdraw (sum: INTEGER) is
 -- Wypłata pewnej sumy z konta.
 require
  sum >= 0
  sum <= balance - minimum_balance
 do
  add (-sum)
 ensure
  balance = old balance - sum
```

```
 end

 feature {NONE}
  add (sum: INTEGER) is
  -- Dodanie pewnej kwoty do sumy zdeponowanej na koncie.
  do
   balance := balance + sum
  end
end -- class ACCOUNT
```

Warunek początkowy dla metody *deposit* określa, że wartość, która ma zostać zdeponowana jest nieujemna. Warunek końcowy mówi, iż wynikiem działania tej metody będzie zwiększenie stanu konta o wartość do niej przekazaną.

Dla metody *withdraw* został określony warunek początkowy, który nakłada ograniczenia na argument *sum*, pozwalając na operację wypłaty pod warunkiem, iż suma jest nieujemna oraz saldo konta nie spadnie poniżej pewnego poziomu. Warunek końcowy deklaruje, iż po zakończeniu metody stan konta zostanie pomniejszony o wartość argumentu *sum*.

Warto zwrócić uwagę na słowo kluczowe *old* wykorzystane w warunkach końcowych. Jego wystąpienie przed zmienną oznacza odwołanie do wartości początkowej, czyli wartości na którą wskazywała ta zmienna przed rozpoczęciem wykonywania metody. Fakt, iż słowo to jest częścią języka Eiffel, pokazuje, że koncepcja programowania kontraktowego była wzięta pod uwagę już na etapie jego projektowania.

Sytuacja ma odmienny charakter w przypadku platformy .NET, gdzie nie występuje bezpośrednie wsparcie dla tego typu koncepcji. Przy budowie biblioteki AsProfiled wykorzystano cechę szczególną środowiska .NET, a w szczególności języka C#, jaką jest możliwość dekorowania metod atrybutami. Atrybuty stają się częścią meta danych o danej metodzie, które mogą być wykorzystywane przy jej inspekcji. Dzięki tej własności mogły one posłużyć jako nośnik informacji o kontraktach. Alternatywą byłoby użycie zewnętrznych plików XML, zdecydowano się jednak wykorzystać atrybuty jako elementy będące bliżej weryfikowanego kodu. decyzją. Dla ilustracji, poniżej została zademonstrowana ogólna postać zapisu kontraktów jako atrybuty w języku C#:

Listing 2.3: Definicja kontraktu

```
[NazwaAtrybutuDefiniującegoKontrakt( warunek początkowy,
   warunek końcowy )]
NazwaMetody( deklaracja argumentów )
{
```

```
    -- definicja metody
  }
```

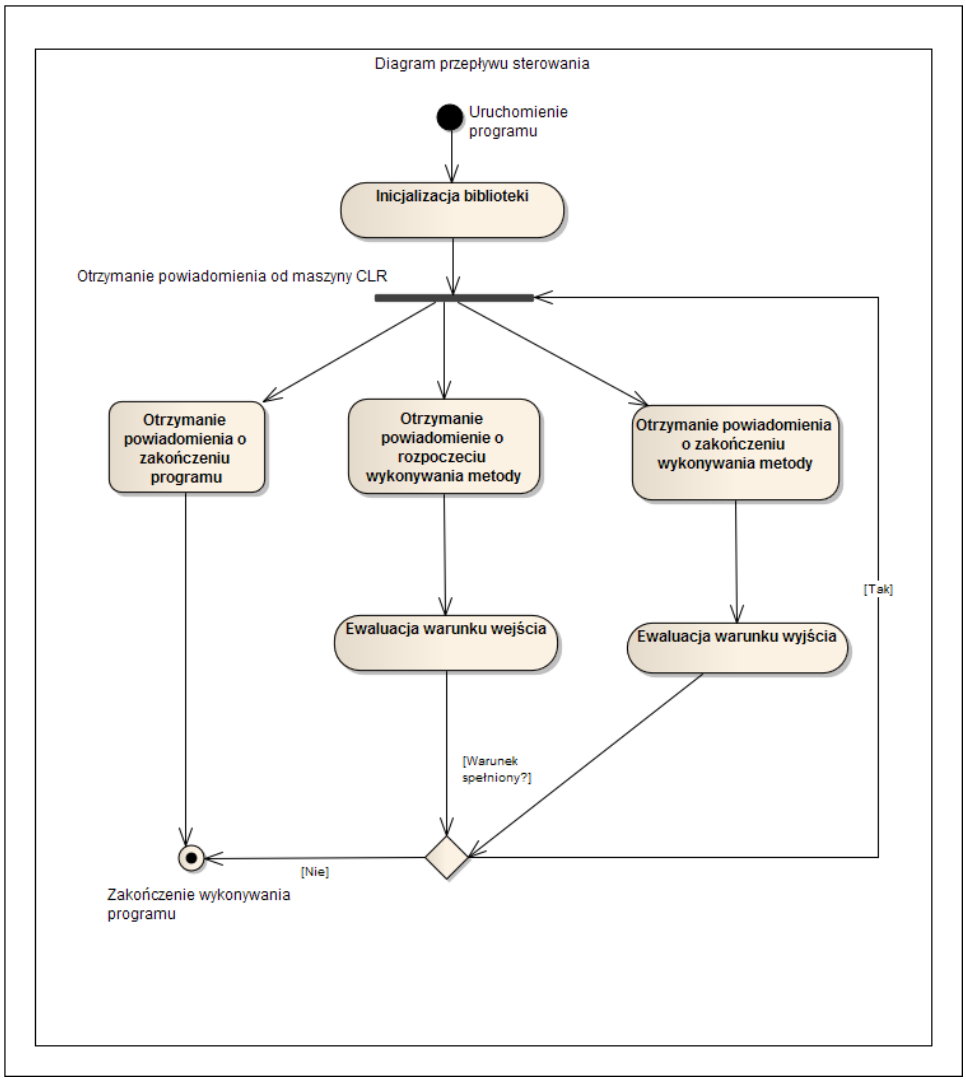
Rozdział 3

Omówienie funkcjonalności biblioteki

W tym rozdziale opisane zostały funkcjonalności jakie udostępnia biblioteka AsProfiled.

3.1 Ogólny schemat architektury biblioteki AsProfiled

Poniżej przedstawiony jest ogólny schemat działania biblioteki AsProfiled.



Rysunek 3.1: Schemat działania aplikacji

Na rysunku 3.1 wyszczególniono kolejne kroki w procesie weryfikacji kontraktów. Biblioteka AsProfiled zaczyna swoje działanie w momencie uruchomienia programu na maszynie wirtualnej .NET w odpowiednio przygotowanym środowisku. Środowisko uruchomieniowe CLR ładuje bibliotekę do pamięci, po czym następuje proces inicjalizacji biblioteki. Uruchamianie poszczególnych funkcji biblioteki jest konsekwencją odebrania jednego zdefiniowanych wcześniej zdarzeń zachodzących wewnątrz programu, którego poprawność jest sprawdzana. Biblioteka obsługuje następujące zdarzenia:

1. Rozpoczęcie wykonywania metody.
2. Zakończenie wykonywania metody.
3. Zakończenie wykonywania programu.

Reakcją na pierwsze dwa zdarzenia jest ewaluacja kontraktu metody, jeśli takowy został dla niej zdefiniowany. Cykl ten trwa do momentu, w którym badany program kończy działanie lub w przypadku, gdy któryś z warunków początkowych lub końcowych nie został spełniony.

3.2 Przykład wykorzystania biblioteki AsProfiled

W celu demonstracji użycia biblioteki *AsProfiled* niech dany będzie przykładowy zestaw klas.

Listing 3.1: Definicja klas

```
// Prosta klasa reprezentująca konto bankowe
class Account
{
 public int Balance;
}

// Klasa definijąca zestaw operacji na kontach bankowych
class AccountManager
{
 // Kontrakt nakładający warunki na wejściowe i wyjściowe
    dane
 [AsContract("source.Balance > amount",
 "@returnValue == true && ^source.Balance + ^destination.
    Balance ==
source.Balance + destination.Balance")]
```

```
 // Realizacja przelewu pewnej kwoty pomiędzy dwoma
    kontami
 public bool Transfer(Account source, Account destination,
     int amount)
 {
 if (amount < 0)
  return false;
 source.Balance -= amount;
 destination.Balance += amount;
 return true;
 }
}
```

W tym przykładzie nałożono kontrakt, wyrażony przy pomocy atrybutu *AsContract*, na metodę *Transfer*. Określa on warunek początkowy, nakładający więzy na dane wejściowe metody i oznacza tyle, że kwota przelewu nie może być większa niż stan konta źródłowego. Warunek końcowy, zdefiniowany przy pomocy drugiego argumentu atrybutu, mówi iż metoda powinna zwrócić wyniki *true* i suma początkowych stanów kont jest równa ich sumie po zakończeniu wykonywania metody.

Niech dany będzie kod wykonujący tą metodę.

Listing 3.2: Wykonanie przelewu

```
Account acc1 = new Account();
acc1.Balance = 500;
Account acc2 = new Account();
acc2.Balance = 300;
AccountManager manager = new AccountManager();
manager.Transfer(acc1, acc2, 100);
```

Nie jest trudno sprawdzić, że w tym wypadku kontrakt jest spełniony. Potwierdza to uruchomienie tego przykładu z włączoną opcją weryfikacji kontraktów przez *AsProfiled*. Dla tego przypadku wynik jej działania jest następujący.

Listing 3.3: Wynik działania AsProfiled

```
TestApplication.Calculator.AccountManager.Transfer
source.Balance > amount
Program
 Cmp Exp
  Value
   Identifier:source.Balance
  Cmp Operator
```

```
    >:>
   Value
    Identifier:amount
Precondition:TRUE
TestApplication.Calculator.AccountManager.Transfer
@returnValue == true && ^source.Balance +
 ^destination.Balance == source.Balance + destination.
    Balance
Program
 Boolean Exp
  Cmp Exp
   Value
    ReturnValue:@returnValue
   Cmp Operator
    ==:==
   Value
    BooleanLiteral:true
  Boolean Operator
   &&:&&
  Cmp Exp
   Add Exp
    Value
     InitialValue:^source.Balance
    Add Operator
     +:+
    Value
     InitialValue:^destination.Balance
   Cmp Operator
    ==:==
   Add Exp
    Value
     Identifier:source.Balance
    Add Operator
     +:+
    Value
     Identifier:destination.Balance
Postcondition:TRUE
```

Oczywiście, są to tylko komunikaty diagnostyczne, ukazuje jednak cykl pracy aplikacji. Wypisywane są nazwy metod z przypisanym atrybutem *AsContract*, odczytywane jest wyrażenie opisujące warunek początkowy lub końcowy, następnie jest tworzone jego drzewo rozbioru, w końcu następuje jego ewaluacja i wypisanie wartości oznaczającej czy kontrakt został spełniony czy też nie. Naturalnie, jeśli, któryś z warunków nie byłby spełniony to zgodnie z zasadą programowania kontraktowego następuje przerwanie wykonywania dalszych in-

strukcji programu. Jak widać na listingu 3.3 zarówno warunek wejścia jak i warunek wyjścia były spełnione w momencie ich ewaluacji.

Tak poglądowo przedstawia się sposób działania biblioteki *AsProfiled*. W dalszej części poszczególne elementy zostały opisane w szczegółowy sposób.

3.3 Inspekcja nadzorowanego programu

W obrębie środowiska Microsoft .NET jedyny sposób rozszerzenia mechanizmu profilowania o własną funkcjonalność polega na zaimplementowania odpowiednich interfejsów profilera. Dodatkowo, biblioteka implementująca te interfejsy musi być utworzona w technologii COM (ang. **C**omponent **O**bject **M**odel). Jest to standard definiowania i tworzenia interfejsów programistycznych na poziomie binarnym, niezależnym od konkretnego języka programowania, dla komponentów oprogramowania wprowadzony przez firmę Microsoft. Obecnie czynione są starania, aby odejść od tego standardu, właśnie poprzez upowszechnianie platformy .NET. Należy jednak dodać, że część tej platformy ma postać bibliotek COM, więc całkowita rezygnacja z tego rozwiązania nie jest możliwa.

Rozpoczęcie procesu profilowania/weryfikacji aplikacji odbywa się poprzez uruchomienie programu z linii poleceń w odpowiednio przygotowanym środowisku. Etap ten polega na ustawieniu zmiennych środowiskowych, instruujących maszynę wirtualną CLR, aby używała wskazanego obiektu implementującego interfejs profilera, przekazując do niego powiadomienia na temat zdarzeń zachodzących wewnątrz uruchamianej aplikacji. Zmienne, których wartości należy ustawić to *COR_ENABLE_PROFILING* oraz *COR_PROFILER*, można to zrobić na przykład poprzez użycie podanego skryptu powłoki:

Listing 3.4: Inicjalizacja środowiska

```
SET COR_ENABLE_PROFILING=1
SET COR_PROFILER={GUID}
```

Identyfikator GUID jest wykorzystywany do określenia lokalizacji biblioteki.

Liczba i rodzaj wysyłanych powiadomień określany jest wewnątrz biblioteki profilującej. W szczegółach temat ten opisany jest w kolejnym rozdziale.

3.4 Kontrakty

Podstawowym elementem, dzięki któremu możliwa jest weryfikacja metod, jest możliwość definiowania kontraktu. Zgodnie z tym co zostało powiedziane kontrakty definiujemy za pomocą atrybutów.

Atrybuty są to znaczniki o charakterze deklaracyjnym zawierające informację o elementach programu (np. klasach, typach wyliczeniowych, metodach) przeznaczoną do wykorzystania w trakcie działania programu.

W tym kontekście istotne jest to, iż są one pamiętane jako meta dane danego elementu programu. Definicja atrybutów jest jedynym elementem, wchodzącym bezpośrednio w skład omawianego rozwiązania, który musi znajdować się po stronie weryfikowanej aplikacji.

Atrybuty określające kontrakt mają postać:

Listing 3.5: Ogólna postać kontraktu

```
AsContract(Warunek początkowy, Warunek końcowy)
```

Oba warunki zdefiniowane są poprzez pewne, określone przez użytkownika wyrażenie. Te z kolei mają postać określoną przez zadaną gramatykę, której definicję przedstawiono w następnym rozdziale dotyczącym implementacji. Należy tu jednak wspomnieć, iż oba warunki zapisywane są jako łańcuchy znakowe. Oznacza to, iż przed ewaluacją takiego wyrażenia musi być zaimplementowany mechanizm pozwalający na jego analizę składniową. W jej wyniku otrzymywane jest drzewo rozbioru, które następnie poddawane jest ewaluacji. Ostatecznie, otrzymywana jest wartość określająca czy udekorowana metoda spełnia założony na nią kontrakt w kontekście danego wywołania.

3.5 Metadane

Metadane w kontekście platformy .NET, to dodatkowe informacje opisujące składowe programu. Są usystematyzowanym sposobem reprezentowania wszystkich informacji, których CLI używa do lokalizowania i ładowania klas, ułożenia obiektów w pamięci, wywoływania metod, translacji języka MSIL do kodu natywnego.

Dane te, emitowane przez kompilator, przechowywane są wewnątrz każdego wykonywalnego programu w postaci binarnej.

3.6 Odczytywanie wartości argumentów metod

Dzięki informacjom zawartym w metadanych, możliwe jest określenie liczby i typów parametrów przekazywanych do metod. Są to dane statyczne, w tym sensie, że są one stałe w ramach raz zdefiniowanego programu. Z drugiej strony, wartości parametrów mogą być inne dla każdego wywołania metody, tak więc nie mogą w żaden sposób stanowić części metadanych. Musi więc zatem istnieć osobny mechanizm pozwalający na realizację tego zadania.

Okazuje się, że w momencie wysyłania powiadomienia o zajściu zdarzenia wywołania metody, maszyna wirtualna .NET wypełnia strukturę *_COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_INFO*, która jest przekazywana do odbiorcy. Jej definicja przedstawia się w sposób następujący:

```
typedef struct _COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_INFO {
    ULONG numRanges;
    ULONG totalArgumentSize;
    COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_RANGE ranges[1];
} COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_INFO;
```

Objaśnienia:

- *numRanges* - Liczba bloków pamięci, wewnątrz których znajdują się wartości argumentów. Określa liczbę elementów tablicy typu *COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_*
- *totalArgumentSize* - Całkowita długość wszystkich argumentów wyrażona w bajtach.
- *ranges* Tablica obiektów typu *COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_RANGE*, z których każda reprezentuje jeden blok pamięci, gdzie zawarte są wartości argumentów metody

Struktura ta reprezentuje wartości argumentów metody, zgodnie z porządkiem od lewej do prawej. Typ *COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_RANGE* użyty w ramach tej struktury określony jest jak następuje:

```
typedef struct _COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_RANGE {
    UINT_PTR startAddress;
    ULONG length;
} COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_RANGE;
```

,gdzie

- startAddress - Adres początku bloku.

- length - Wielkość bloku pamięci.

Te dane w połączeniu z informacją o typie argumentu pozwalają na poprawny odczyt argumentów metody.

3.7 Wartości zwracane

Kolejnym elementem jest możliwość weryfikacji kontraktów zawierających w sobie odniesienia do wartości zwracanej przez metodę.

W dalszych przykładach wykorzystano klasę *Account* reprezentującą konto bankowe, której częściowa definicja zawarta jest poniżej.

Listing 3.6: Klasa Account

```
class Account {
 // Identyfikator konta
 public long AccountId;
 // Stan środków na koncie
 public int Balance;
 // Nazwisko posiadacza
 public string OwnerName;

 ...
}
```

Dodatkowo, niech dana będzie klasa *AccountManager* definiująca operacje na obiektach typu *Account*.

Listing 3.7: Klasa AccountManager

```
class AccountManager {
 public Account ChangeOwnerName(Account account, string
    newName) {
  // Wywołanie metody rejestrującej bieżącą operację w
     bazie danych
  // Zwraca zapisaną wartość
  account.OwnerName = Database.SetAccountOwnerInternal(
     account.accountId, newName);
  return account;
 }
}
```

Metoda ta zwraca obiekt typu *Account*, z uaktualnioną wartością *OwnerName* mówiącą o dostępnych środkach. W celu sprawdzenia poprawności działania

tej funkcjonalności możliwe jest nałożenie odpowiedniego kontraktu na metodę *ChangeOwnerName*. Przy użyciu atrybutów z biblioteki *AsProfiled* możliwa jest inspekcja obiektu zwracanego z metody. Warto zaznaczyć, że takie odniesienia mają tylko sens przy warunkach końcowych, po odebraniu notyfikacji o zdarzeniu opuszczenia metody. W ramach atrybutów *AsContract* odwołanie do wartości zwracanej odbywa się poprzez użycie identyfikatora *@returnValue*. Mając to na uwadze, warunek końcowy, sprawdzający czy nazwisko posiadacza rzeczywiście zostało uaktualnione, nałożony na tą metodę, mógłby mieć następującą postać:

Listing 3.8: Sprawdzenie poprawności operacji uaktualnienia nazwiska posiadacza konta

```
    [AsContract(null, "@returnValue.OwnerName == newName")]
    public Account ChangeOwnerName(Account account, string
       newName) {
     account.OwnerName = Database.SetAccountOwnerInternal(
        account.accountId, newName);
     return account;
    }
   }
```

Sposób odczytu wartości zwracanej jest analogiczny do odczytywania wartości parametrów metody. W tym wypadku, odbiorca zdarzenia otrzymuje dostęp do pojedynczego obiektu typu *COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_RANGE*, który zawiera w sobie informacje na temat położenia wartości zwracanej w pamięci.

3.8 Wartości początkowe

Termin wartości początkowe odnosi się do stanu argumentów w momencie wywołania metody. Zgodnie z założeniami z rozdziału pierwszego, biblioteka powinna udostępniać funkcjonalność definiowania kontraktów złożonych z odwołań do początkowych wartości obiektów. Naturalnie, stan obiektów może ulec zmianie w czasie działania metody, należało więc przedsięwziąć kroki umożliwiające tego rodzaju odwołania do początkowych wartości obiektów.

Jedyną sytuacją jaką należy rozważyć jest przypadek, w którym odwołania do wartości początkowych ma miejsce w warunku końcowym w ramach danego kontraktu. Rzecz jasna, odwołania do tych wartości nie mają sensu w przypadku warunków początkowych, gdyż te ewaluowane są zanim sterowanie dojdzie do momentu wykonywania instrukcji wewnątrz metody, a które mogłyby zmodyfikować stan obiektu. Z drugiej strony, co wynika ze specyfiki otrzymywanych

powiadomień, odczytywanie argumentów jest możliwe tylko w momencie wywoływania metody.

Niech dana będzie metoda zwiększająca bilans konta bankowego po wpłynięciu na nie środków.

Listing 3.9: Metoda zwiększająca bilans konta

```
class AccountManager {
 public Account Deposit(Account account, int sum) {
  // Wywołanie metody zapisującej do bazy danych nowy stan
      konta o danym
  // identyfikatorze
  // Zwraca uaktualniony obiekt typu Account
  int newBalance = Database.DepositInternal(AccountId, sum
     );
  account.Balance = newBalance;
  return account;
 }
}
```

W tej sytuacji ma sens weryfikacja stanu konta po zakończeniu metody *Deposit*. W ramach biblioteki *AsProfiled* możliwe jest zdefiniowanie warunku końcowego, który weryfikuje tą wartość, przy uwzględnieniu wartości początkowej elementu Balance. W tej konkretnej sytuacji będzie miał on następującą postać:

Listing 3.10: Odwołanie do wartości początkowej

```
[AsContract(null, "account.Balance == ^account.Balance +
   sum")]
public Account Deposit(Account account, int sum) {
 int newBalance = Database.DepositInternal(AccountId, sum)
    ;
 account.Balance = newBalance;
 return account;
}
```

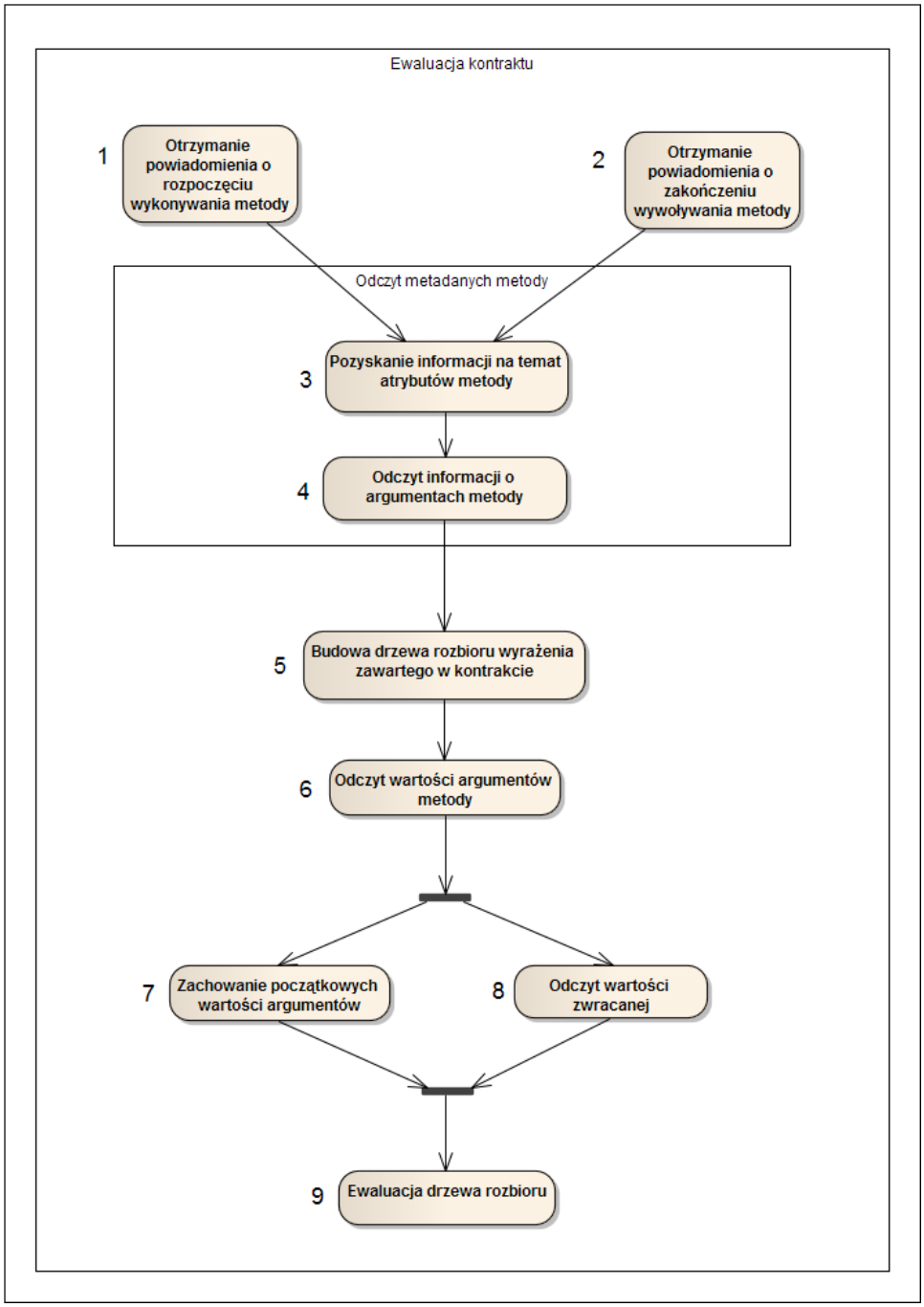
Kontrakt ten nakłada warunek określający, iż po spełniony po zakończeniu wykonywania metody nowa wartość pola *Balance* obiektu typu *Account* musi być równa początkowej wartości tego pola powiększonej o wartość *sum* Odwołanie do wartości początkowych danego argumentu odbywa się poprzez poprzedzenie jego nazwy symbolem ^, tutaj ^account.Balance.

Zgodnie z tym co zostało powiedziane wcześniej, niezbędne jest zachowanie stanu obiektu w momencie otrzymania notyfikacji o rozpoczęciu wykonywania metody i odwoływanie się do niego w czasie weryfikacji warunków końcowych. Dodatkowo, nie wystarczy zachowanie referencji do obiektu. Wynika to z faktu, iż pomimo tego, że przekazywanie argumentów do metody odbywa się poprzez kopiowanie, to kopiowana jest tylko referencja do obiektu, a nie sam obiekt. Oczywiście, kopia referencji dalej wskazuje na ten sam obiekt, więc zmieniając stan obiektu przy jej użyciu, zmieniany jest oryginalny obiekt. Z tego powodu niezbędne okazuje się kopiowanie poszczególnych wartości do których występuje odwołanie w warunkach końcowych. Konieczne jest więc przeprowadzanie przetwarzania wstępnego, tzn. w chwili otrzymania powiadomienia o wywołaniu metody przeprowadzona zostaje analiza zarówno warunków początkowych i warunków końcowych kontraktu. W czasie tej analizy warunek końcowy sprawdzany jest pod kątem występowania elementów odnoszących się do stanu początkowego argumentów funkcji. Następnie argumenty, do których takie odwołania występują poddawane są inspekcji i wyłuskiwana jest wartość składowej obiektu, do którego odniesienie znajduje się w warunku końcowym. Ta wartość zapisywana jest w pamięci podręcznej aplikacji, do której dostęp jest możliwy w momencie otrzymania powiadomienia o zakończeniu wykonywania weryfikowanej metody, kiedy to może zostać użyta do weryfikacji warunku końcowego.

Rozdział 4

Szczegóły implementacji

W tym rozdziale opisano szczegóły dotyczące implementacyjne biblioteki. Poniższy diagram ilustruje proces przetwarzania jakiemu poddawany jest kontrakt w celu oceny jego prawdziwości. Poszczególne elementy opisane są w odpowiadających im podrozdziałach.



Rysunek 4.1: Schemat przedstawiający proces ewaluacji kontraktów

4.1 Atrybuty jako kontrakty

Kontrakty definiowane są jako atrybuty, którymi dekorowane są metody. Definicja atrybutów ogranicza się do elementarnej klasy, której implementacja zawiera jest w następującym bloku kodu:

Listing 4.1: Definicja atrybutu jako nośnika danych o kontrakcie

```
[AttributeUsage(AttributeTargets.Method, AllowMultiple =
   false)]
public class AsContractAttribute : Attribute
{
  public AsContractAttribute(string preCondition, string
     postCondition)
  { }

  public string PostCondition { get; set; }

  public string PreCondition { get; set; }
}
```

Pierwsza linia określa, iż atrybut może być przypisywany tylko do metod oraz może występować co najwyżej jeden raz przy każdej z nich.

Centralnym elementem tej klasy jest dwuparametrowy konstruktor, przyjmujący dwa napisy jako parametry. Właśnie te napisy określają kontrakt. Pierwszy z nich określa warunek początkowy (*precondition*), a drugi dotyczy warunku końcowego (*postcondtion*)

Wyrażenia opisujące kontrakty muszę być obliczalne do jednej z dwóch wartości: prawdy albo fałszu, co oznacza odpowiednio, że kontrakt został lub też nie został spełniony.

4.2 Gramatyka kontraktów

Możliwy zbiór wyrażeń, wyrażalnych poprzez kontrakty, definiowany jest przez gramatykę bezkontekstową. Gramatyka ta została wykorzystana w aplikacji GOLD Parsing System, która na jej podstawie generuje tablicę stanów dla deterministycznego automatu skończonego. Poniżej znajduje się jej definicja :

Listing 4.2: Gramatyka kontraktów

```
"Start Symbol" = <Program>
```

```
! Zbiory

{ID Head}      = {Letter} + [_]
{ID Tail}      = {Alphanumeric} + [_]
{String Chars} = {Printable} + {HT} - [\\]
{Number Without Zero} = {Number} - [0]

! Symbole terminalne

Identifier = {ID Head}{ID Tail}*(.{ID Head}{ID Tail}*)*
StringLiteral = '"' ( {String Chars} | '\' {Printable} )*
   '"'
DecimalNumber = {Number Without Zero}{Number}* | {Number}
BooleanLiteral = 'true' | 'false'
ReturnValue = '@returnValue'(.{ID Head}{ID Tail}*)*
InitialValue = '^'{ID Head}{ID Tail}*(.{ID Head}{ID Tail
   }*)*

! Symbole nieterminalne i zasady wyprowadzania wyrażeń

<Program>           ::= <Boolean Exp>
<Boolean Exp>       ::= <Boolean Exp> <Boolean Operator> <
   Cmp Exp>
                    |   <Cmp Exp>

<Boolean Operator>  ::= '||'
                    |   '&&'

<Cmp Exp>           ::= <Cmp Exp> <Cmp Operator> <Add Exp>
                    |   <Add Exp>
<Cmp Operator>      ::= '>'
                    |   '<'
                    |   '<='
                    |   '>='
                    |   '=='
                    |   '!='

<Add Exp>           ::= <Add Exp> <Add Operator> <Mult Exp
   >
                    |   <Mult Exp>
<Add Operator>      ::= '+'
                    |   '-'

<Mult Exp>          ::= <Mult Exp> <Mult Operator> <Negate
    Exp>
                    |   <Bit Exp>
<Mult Operator>     ::= '*'
```

```
                    |   '/'
<Bit Exp>           ::= <Bit Exp> <Bit Operator> <Negate
   Exp>
                    |  <Negate Exp>
<Bit Operator>      ::= '&'
                    |   '|'

<Negate Exp>        ::= <Negate Operator> <Value>
                    |  <Value>
<Negate Operator>   ::= '-'
<Value>             ::= Identifier
                    |  StringLiteral
                    |  DecimalNumber
                    |  '(' <Boolean Exp> ')'
                    |  BooleanLiteral
                    |  ReturnValue
                    |  InitialValue
```

Poniżej przedstawiono kilka przykładów wyrażeń, które mogą być zbudowane przy użyciu reguł zawartych w gramatyce:

Listing 4.3: Przykładowe wyrażenia

```
i > 4 || test.inner == 3
i * j == k
str == "napis" || @returnValue == 0 && !false
```

Wyrażenia te nabierają sensu w momencie kiedy możliwe jest podstawienie wartości w miejsce identyfikatorów.

4.3 Omówienie i implementacja interfejsów

Wszystkie interfejsy przedstawione w tym i kolejnych rozdziałach zdefiniowane są w bibliotekach, wchodzący w skład SDK platformy .NET. W tabeli zaprezentowano wykorzystywane nagłówki wraz z opisem ich zawartości :

cor.h	Główny plik nagłówkowy zawierający API do operowania na metadanych
corhdr.h	Definicja struktur przechowujących metadane
corprof.h	Interfejsy profilujące

AsProfiled jak każda biblioteka typu COM udostępnia swoją funkcjonalność poprzez interfejsy. Niezależnie od przeznaczenia biblioteki musi ona przynajmniej implementować interfejs IUnknown, dzięki któremu możliwe jest uzyskanie uchwytu do innych obiektów implementujących bardziej szczegółowe interfejsy. W tym przypadku konieczne jest uzyskanie uchwytu do obiektu implementującego interfejs ICorProfilerCallback2. To poprzez niego odbywa cała komunikacja pomiędzy maszyną CLR a biblioteką AsProfiled. Interfejs ten zawiera kilkadziesiąt metod, poprzez które maszyna wirtualna może powiadomić odbiorcę o zdarzeniach zachodzących w obrębie profilowanego programu. Na potrzeby tej pracy wystarczające jest omówienie dwóch z nich, mianowicie :

Listing 4.4: ICorProfilerCallback2

```
STDMETHOD(Initialize)(IUnknown *pICorProfilerInfoUnk);
STDMETHOD(Shutdown)();
```

Naturalnie, implementując dowolny interfejs, niezbędne jest zdefiniowanie każdej zawartej w nim metody, jednak w przypadku metod, które nie stanowią przedmiotu zainteresowania wystarczające jest zwrócenie rezultatu świadczącego o poprawnym wykonaniu metody. W tym przypadku, taką wartością jest S_OK (0), standardowo określającą poprawne zakończenie wykonywania funkcji.

Metody z listingu 4.4, jak sama nazwa wskazuje, są wywoływane podczas inicjalizacji biblioteki i w momencie zakończenia wykonywania programu. W ramach funkcji *Shutdown()* zwyczajowo zwalniane są uchwyty do obiektów wykorzystywanych w bibliotece. Przeciwnie do niej, w metodzie Initialize() tworzone są obiekty, do których dostęp jest potrzebny w kontekście całej biblioteki, jest to odpowiednie miejsce na inicjalizację globalnych wskaźników do obiektów wykorzystywanych w trakcie działania aplikacji. W tym miejscu następuje też pozyskanie uchwytu do obiektu typu ICorProfilerInfo2, który to udostępnia zestaw metod pozwalających na komunikację ze środowiskiem CLR, umożliwiających monitorowanie i uzyskiwanie dodatkowych informacji o programie.

Kolejnym krokiem jest zarejestrowanie tego obiektu jako odbiorcy podzbioru zdarzeń określonych poniżej.

Listing 4.5: Zdarzenia

```
COR_PRF_MONITOR_NONE  = 0,
COR_PRF_MONITOR_FUNCTION_UNLOADS  = 0x1,
```

```
COR_PRF_MONITOR_CLASS_LOADS = 0x2,
COR_PRF_MONITOR_MODULE_LOADS  = 0x4,
COR_PRF_MONITOR_ASSEMBLY_LOADS  = 0x8,
COR_PRF_MONITOR_APPDOMAIN_LOADS = 0x10,
COR_PRF_MONITOR_JIT_COMPILATION = 0x20,
COR_PRF_MONITOR_EXCEPTIONS  = 0x40,
COR_PRF_MONITOR_GC  = 0x80,
COR_PRF_MONITOR_OBJECT_ALLOCATED  = 0x100,
COR_PRF_MONITOR_THREADS = 0x200,
COR_PRF_MONITOR_REMOTING  = 0x400,
COR_PRF_MONITOR_CODE_TRANSITIONS  = 0x800,
COR_PRF_MONITOR_ENTERLEAVE  = 0x1000,
COR_PRF_MONITOR_CCW = 0x2000,
COR_PRF_MONITOR_REMOTING_COOKIE = 0x4000 | COR_PRF_MONIT
   OR_REMOTING,
COR_PRF_MONITOR_REMOTING_ASYNC  = 0x8000 | COR_PRF_MONIT
   OR_REMOTING,
COR_PRF_MONITOR_SUSPENDS  = 0x10000,
COR_PRF_MONITOR_CACHE_SEARCHES  = 0x20000,
COR_PRF_MONITOR_CLR_EXCEPTIONS  = 0x1000000,
COR_PRF_MONITOR_ALL = 0x107ffff,
COR_PRF_ENABLE_REJIT  = 0x40000,
COR_PRF_ENABLE_INPROC_DEBUGGING = 0x80000,
COR_PRF_ENABLE_JIT_MAPS = 0x100000,
COR_PRF_DISABLE_INLINING  = 0x200000,
COR_PRF_DISABLE_OPTIMIZATIONS = 0x400000,
COR_PRF_ENABLE_OBJECT_ALLOCATED = 0x800000,
COR_PRF_ENABLE_FUNCTION_ARGS  = 0x2000000,
COR_PRF_ENABLE_FUNCTION_RETVAL  = 0x4000000,
COR_PRF_ENABLE_FRAME_INFO = 0x8000000,
COR_PRF_ENABLE_STACK_SNAPSHOT = 0x10000000,
COR_PRF_USE_PROFILE_IMAGES  = 0x20000000,
```

Do realizacji celów przedstawionych przed biblioteką AsProfiled potrzebne jest określenie następującej kombinacji flag:

```
COR_PRF_MONITOR_ENTERLEAVE |
COR_PRF_ENABLE_FUNCTION_RETVAL |
COR_PRF_ENABLE_FUNCTION_ARGS |
COR_PRF_ENABLE_FRAME_INFO
```

Pozwala to na otrzymywanie komunikatów na temat wejścia/wyjścia do/z metody wraz z danymi na temat jej argumentów i wartości zwracanej.

Kolejnym wykorzystywanym interfejsem jest *IMetaDataImport*. Spełnia kluczową rolę w procesie uzyskiwania informacji na temat dowolnych encji zdefiniowanych w ramach aplikacji przeznaczonych na platformę .NET. *IMetaDa-*

taImport zawiera cały szereg metod, dzięki którym możliwe jest odszukanie i odczytanie wartości metadanych. Metoda dzielą się na cztery główne kategorie :

- Iterujące po kolekcjach zawierających encje z metadanymi opisującymi określoną encję.
- Odszukujące określoną encję na podstawie zadanych kryteriów.
- Pobierające informacje na temat konkretnych encji

W bibliotece AsProfiled interfejs *IMetaDataImport* wykorzystywany jest do odczytu metadanych na temat kontraktów oraz metod nimi udekorowanymi.

4.4 Odbieranie notyfikacji o zdarzeniach zachodzących w programie

W zadaniu ewaluacji kontraktów nakładanych na metody niezbędne jest aby biblioteka AsProfiled miała możliwość odbierania zdarzeń na temat wywołania metody oraz wyjścia z niej. Jest to realizowane poprzez przekazanie adresów funkcji zwrotnych, do maszyny CLR. Cel ten realizowany jest poprzez wywołanie metody o sygnaturze

Listing 4.6: SetEnterLeaveFunctionHooks2

```
HRESULT SetEnterLeaveFunctionHooks2(
    [in] FunctionEnter2    *pFuncEnter,
    [in] FunctionLeave2    *pFuncLeave,
    [in] FunctionTailcall2 *pFuncTailcall);
```

na rzecz obiektu implementującego interfejs ICorProfilerInfo2. Jako argumenty podawane są wskaźniki do funkcji zdefiniowanych w ramach biblioteki AsProfiled. Zgodnie z dokumentacją MSDN, metody te muszą zostać udekorowane atrybutem __declspec(naked) co oznacza ze kompilator nie generuje dla tych funkcji tzw. prologu ani epilogu, czyli odpowiednich fragmentów kodu, które przywracają odpowiedni stan stosu oraz rejestrów. Konsekwencją tego jest to, iż te czynności muszą być zaimplementowane w ramach biblioteki. Po ich wykonaniu możliwe jest przekazanie sterowania do innych funkcji, gdzie przetwarzanie zdarzenia jest kontynuowane. W ramach AsProfiled funkcje te są zadeklarowane w sposób następujący:

Listing 4.7: FunctionEnter

```
// deklaracja funkcji wywoływanej w momencie wejścia do
   metody
FunctionEnter(FunctionID functionID, UINT_PTR clientData,
   COR_PRF_FRAME_INFO func, COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_INFO
    *argumentInfo);
```

oraz

Listing 4.8: FunctionLeave

```
// deklaracja funkcji wywoływanej w momencie wyjścia z
   metody
FunctionLeave(FunctionID functionID, UINT_PTR clientData,
   COR_PRF_FRAME_INFO func, COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT
   _RANGE *retvalRange);
```

,gdzie *functionID* - identyfikator funkcji, używany do uzyskania dostępu do jej metadanych
argumentInfo - wskaźnik do struktury COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_INFO, która określa położenie argumentów funkcji w pamięci
retvalRange - wskaźnik do struktury COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_RANGE, która określa położenie wyniku funkcji w pamięci

Te funkcje mają bezpośrednie przełożenie na zadanie ewaluacji kontraktów. W ramach funkcji FunctionEnter odbywa się sprawdzenie warunków początkowych, a implementacja FunctionLeave zawiera w sobie sprawdzenie warunków końcowych.

4.5 Odczyt metadanych

W tym podrozdziale opisano kolejny krok na drodze do ewaluacji kontraktu, jakim jest interpretacja metadanych w celu uzyskania informacji o wywoływanych metodach i jej argumentach.

4.5.1 Reprezentacja metadanych

W ramach systemu Windows zdefiniowany jest format plików wykonywalnych - PE (eng. Portable Executables), określający strukturę jaką musi posiadać każdy program, aby mógł być w nim uruchomiony. Aplikacje przeznaczone na platformę .NET naturalnie również muszą być zorganizowane w sposób zgodny z

tym standardem. Jednym z pól w ramach nagłówka PE jest offset określający położenie zbioru metadanych w ramach pliku wykonywalnego czy biblioteki.

W skład tego zbioru wchodzi pięć rodzajów strumieni. W tym kontekście, przez pojęcie strumień, określana jest sekcja w obrębie metadanych, w której przechowywane są informacje posegregowane względem ich typu. Te strumienie to:

1. #Strings - zawiera listę napisów, które określają nazwę programu, metod, parametrów.

2. #US (User Strings) - zawiera tablicę wszystkich stałych łańcuchowych definiowanych przez użytkownika.

3. #GUID - przechowuje listę wszystkich użytych w aplikacji 128 bitowych wartości GUID, m.in. tą która jednoznacznie identyfikuje aplikację

4. # - ten strumień jest tablicą tablic. Każda tablica nadrzędna identyfikowana przy pomocy pojedynczego bajtu o wartości od 0x00 do 0x29. Tablice wewnętrzne opisują metody, pola, parametry, typy.

5. #Blob - zawiera ciągi danych binarnych, które nie mogą być przedstawione w prosty sposób jako napisy. Dane te wykorzystywane są do opisywania sygnatur metod.

Metadane przechowują informacje na temat typów definiowanych w ramach programu (klasy, struktury, interfejsy), globalnych funkcji i zmiennych. Każda z tych abstrakcyjnych encji identyfikowana jest przez wartość typu mdToken (metadata token). Jest ona używana przez mechanizmy odczytujące metadane do określenia położenia w pamięci informacji na ich temat.

Token metadanych ma postać czterobajtowej wartości. Najbardziej znaczący bajt określa typ tokenu, pozostałe określają położenie pozostałych informacji w tablicy metadanych. Dla przykładu, wartość 1 przechowywana w MSB (most significant byte) oznacza, iż token jest typu mdTypeRef, który oznacza referencję do typu, a informacje na jego temat są przechowywane w tablicy TypeRef.

Pozostałe, mniej znaczące bajty, oznaczają identyfikator rekordu (record identifier - RID) i zawierają w sobie indeks do wiersza w/w tablicy, która określona jest przez wartość najbardziej znaczącego bajtu.
Przykładowo, token o wartości 0x02000007 odnosi się do siódmego wiersza tablicy TypeRef. Podobnie, wartość 0x0400001A oznacza odwołanie do wiersza dwudziestego szóstego tabliy FieldDef. Wiersz zerowy każdej z powyższych tablic nigdy nie zawiera w sobie danych, więc jeśli identyfikator RID jest równy

zeru, to znaczy to, że token jest pusty, ma wartość nil. Taki token zdefiniowany jest dla każdego typu encji, np. wartość 0x10000000 określa pusty token mdTypeRefNil.

W poniższej tabeli znajdują się typy tokenów wykorzystywane w ramach aplikacji, typy które opisują oraz nazwy tablic metadanych. Wszystkie tokeny są pochodnymi typu bazowego - mdToken.

Typ tokenu	Nazwa tablicy z metadanymi	Opis
mdTypeDef	TypeDef	Token odnoszący się do typów referencyjnych (klasy i interfejsy) i wartościowych (struktury)
mdMethodDef	MethodDef	Token odnoszący do informacji opisujących metody będące częścią klasy lub interfejsu
mdParamDef	ParamDef	Typ tokenu, którego wartości odnoszą się do informacji określających parametry metod
mdFieldDef	FieldDef	Odniesienie do metadanych dotyczących składowych wchodzących w skład klas, interfejsów
mdCustomAttribute	CustomAttribute	Zawiera odniesienie do metadanych atrybutów

Tabela 4.2: Typy tokenów

4.5.2 Interpretacja metadanych

Do zaimplementowania procesu weryfikacji programów przy obranym podejściu zachodzi potrzeba interpretacji metadanych. W tym celu potrzebna jest wiedza na temat reprezentacji metadanych i w jaki sposób należy je interpretować. Jak to zostało opisane w poprzednim paragrafie, metadane przechowywane są w tablicach, do których dostęp uzyskiwany jest poprzez token odpowiedniego typu.

W ramach tych tablic, które są częścią strumienia #~ znajdują się odwołania do strumienia #Blob. W strumieniu tym zawarte są dane opisujące sygnatury metod. Sygnatura opisująca metody zawiera w sobie wszelkie dotyczące jej informacje, m.in. typy argumentów, typ wartości zwracanej. Inne rodzaje sygnatur przechowują informację o typach pól klasy, propercji czy też zmiennych lokalnych. Niezależnie od opisywanego elementu języka, sygnatura przechowywana jest jako tablica bajtowa. Istnieje kilka rodzajów sygnatur, z których każda opisuje inny rodzaj encji:

- MethodRefSig
- MethodDefSig
- FieldSig
- PropertySig
- LocalVarSig
- TypeSpec
- MethodSpec

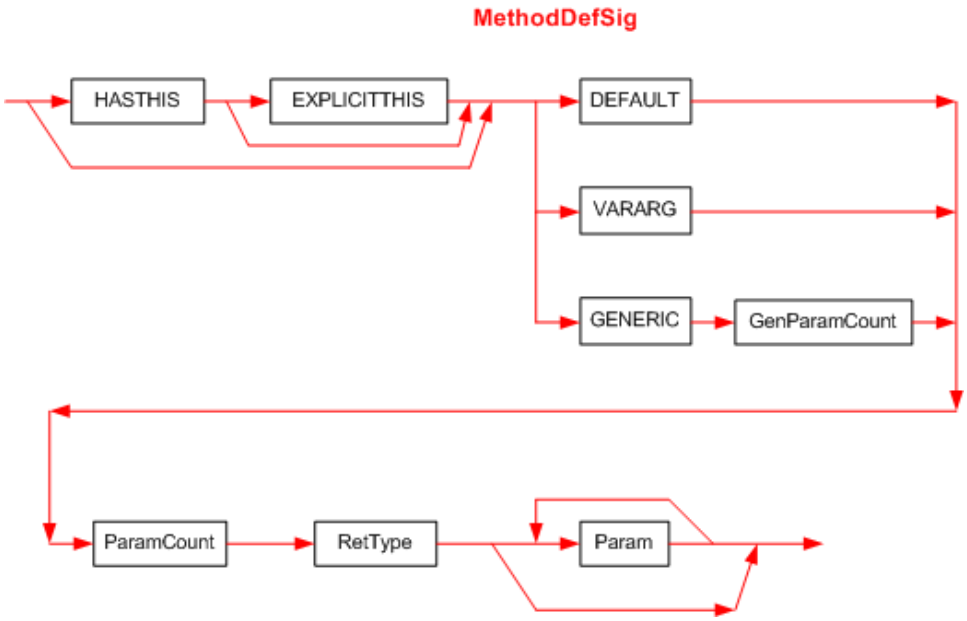
W przypadku biblioteki AsProfiled konieczne jest odczytywanie informacji na temat metod, w tym celu konieczna jest funkcjonalność sygnatur typu MethodDefSig.

Poniżej przedstawiono strukturę tej sygnatury:

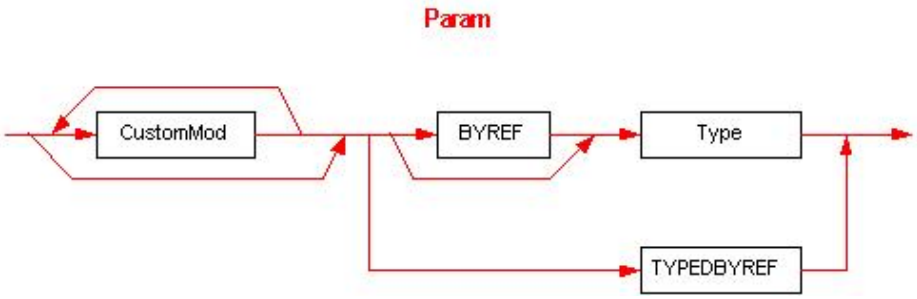
Legenda:

- HASTHIS = 0x20, EXPLICITTHIS = 0x40, DEFAULT = 0x0, VARARG = 0x5 - konwencja w jakiej wywoływana jest metoda
- GENERIC = 0x10 - oznaczenie określająca czy metoda posiada co najmniej jeden parametr generyczny
- GenParamCount - oznacza liczbę parametrów generycznych
- ParamCount - określa liczbę parametrów metody
- RetType - niesie informację o typie wartości zwracanej
- Param - opisuje typ każdego parametru metody, w ramach sygnatury element ten powinien występować ParamCount razy

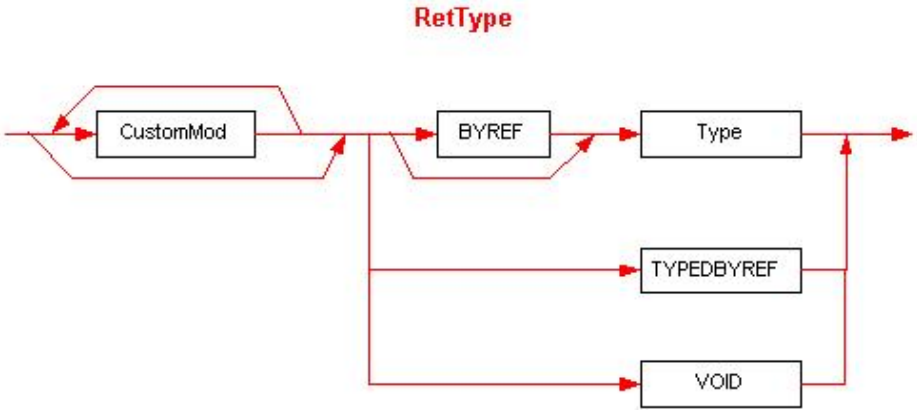
Poniżej zamieszczono schematy ilustrujące strukturę parametrów metody oraz jej wartość zwracaną.



Rysunek 4.2: Struktura sygnatury metadanych opisujących metodę



Rysunek 4.3: Struktura sygnatury parametru metody



Rysunek 4.4: Struktura sygnatury określającej wartość zwracaną

Powyższe ilustracje różnią się tylko dodatkowym rozgałęzieniem z elementem VOID, który oznacza, iż metoda nie zwraca żadnej wartości.

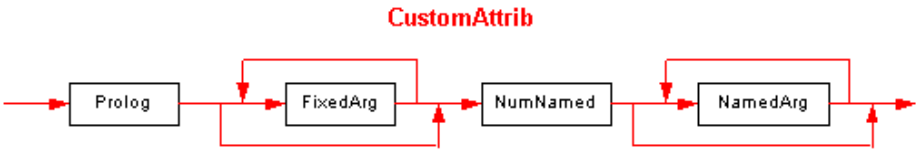
Element TYPE zdefiniowany jako jedna z wartości:

Listing 4.9: Znaczenie elementu TYPE

```
BOOLEAN | CHAR | I1 | U1 | I2 | U2 | I4 | U4 | I8 | U8 |
   R4 | R8 | I  | U |
| VALUETYPE TypeDefOrRefEncoded
| CLASS TypeDefOrRefEncoded
| STRING
| OBJECT
| PTR CustomMod* VOID
| PTR CustomMod* Type
| FNPTR MethodDefSig
| FNPTR MethodRefSig
| ARRAY Type ArrayShape
| SZARRAY CustomMod* Type
```

Wartości te odpowiadają typom w ramach platformy .NET.

Innym ważnym elementem istotnym z punktu widzenia biblioteki AsProfiled jest struktura sygnatury atrybutów, które służą jako nośnik kontraktów. Ilustruje ją poniższy schemat:



Rysunek 4.5:

Interpretacja tych sygnatur jest podstawowym elementem, który należy wziąć pod uwagę w zadaniu ewaluacji kontraktów. Dzięki tym informacjom można określić typ obiektu, w szczególności argumentów funkcji, co z kolei umożliwia odczytanie ich aktualnych wartości w momencie wywołania funkcji.

Proces ten rozpoczyna się od pobrania wartości tokenu o typie jednym z przedstawionych w tabeli 4.5.1. Tokeny odpowiedniego rodzaju uzyskiwane są poprzez wywołania odpowiednich metod na obiektach implementujących określone interfejsy. Dzięki informacjom zawartym w metadanych możliwy jest odczyt niezbędnych informacji.

4.5.3 Odczyt metadanych w bibliotece AsProfiled

Wywołanie każdej z metod kontrolowanego programu powoduje wywołanie metody FunctionEnter. W ramach tej funkcji odczytywane są informacje na temat metody, co do której otrzymano powiadomienie. Jest to możliwe dzięki otrzymywaniu jej identyfikatora w postaci argumentu functionID funkcji FunctionEnter, a następnie wykorzystaniu go do uzyskania dostępu do metadanych. Krok ten realizowany jest poprzez wywołanie metody o sygnaturze

Listing 4.10: GetTokenAndMetaDataFromFunction

```
HRESULT GetTokenAndMetaDataFromFunction(
    [in]  FunctionID functionId,
    [in]  REFIID     riid,
    [out] IUnknown   **ppImport,
    [out] mdToken    *pToken);
```

na rzecz obiektu implementującego interfejs ICorProfilerInfo2. Poprzez tą metodę uzyskujemy wartość typu mdToken, który jednoznacznie identyfikuje położenie informacji dotyczących funkcji. Niezbędne funkcje pozwalające na dostęp i interpretację metadanych metody zostały zgrupowane w obrębie klasy *CMethodInfo*, która udostępnia publiczny interfejs wykonanie operacji wymienionych na listingu 4.11.

Listing 4.11: Interfejs klasy CMethodInfo

```
WCHAR* GetMethodName(); // Odczytanie nazwy metody
CorCallingConvention GetCallingConvention(); // Odczyt
   konwencji wywołania
ULONG GetArgumentsCount(); // Pobieranie liczby argumentów
mdTypeDef GetTypeToken(); // Pobranie wartości tokenu
   klasy, w której zawarta jest metoda
%PCCOR_SIGNATURE GetMethodSignatureBlob(); // Adres do
%mdMethodDef GetMethodToken(); //
CParam* GetReturnValue(); // Pobiera informacje na temat
   wartości zwracanej
std::vector<CParam*>* GetArguments(); // Pobieranie
   informacji o argumentach funkcji
```

4.6 Parsowanie wyrażeń zawartych w kontraktach

Wyrażenia określające kontrakt muszą być zbudowane zgodnie z regułami gramatyki przedstawionej w 4.2 . Pierwszym krokiem na drodze do ich ewaluacji jest proces analizy leksykalnej. W tym celu wykorzystano silnik Astudillo Visual C++, który używa tablicy stanów wygenerowanych przez aplikację GOLD na podstawie zadanej gramatyki. Biblioteka mając zadane wyrażenie rozkłada ja na tokeny zdefiniowane w ramach gramatyki, a następnie tworzy drzewo rozbioru wyrażenia. Poniżej prezentowany jest efekt rozbioru kilku przykładowych wyrażeń:

Listing 4.12: Przykład 1

```
/*
 * Wyrażenie: "c.test.member == 31 && divided > 1"
 */

Program
 Boolean Exp
  Cmp Exp
   Value
    Identifier:c.test.member
   Cmp Operator
    ==:==
   Value
    DecimalNumber:31
  Boolean Operator
   &&:&&
  Cmp Exp
   Value
    Identifier:divided
   Cmp Operator
    >:>
   Value
    DecimalNumber:1
```

Listing 4.13: Przykład 2

```
/*
 * Wyrażenie: "divided / divisor > 0 && @returnValue == 0
    || val == \"test\""
 */
Program
```

```
Boolean Exp
 Boolean Exp
  Cmp Exp
   Mult Exp
    Value
     Identifier:divided
    Mult Operator
     /:/
    Value
     Identifier:divisor
   Cmp Operator
    >:>
   Value
    DecimalNumber:0
  Boolean Operator
   &&:&&
  Cmp Exp
   Value
    ReturnValue:@returnValue
   Cmp Operator
    ==:==
   Value
    DecimalNumber:0
 Boolean Operator
  ||:||
 Cmp Exp
  Value
   Identifier:val
  Cmp Operator
   ==:==
  Value
   StringLiteral:"test"
```

4.7 Inspekcja wartości zmiennych

Kolejnym etapem, koniecznym w procesie wyliczania wartości wyrażeń zawartych w kontraktach jest wykonywanie podstawień wartości argumentów pod ich wystąpienia.

Niech dane są następujące definicje klas:

Listing 4.14: Przykładowe klasy

```
class Test {
 public int member = 0;
```

```
}

class OtherClass {
 public Test test = new Test();
}
```

oraz metoda TestMe, na którą nałożono pewien kontrakt:

Listing 4.15: Kontrakt odwołujący się do parametrów metody

```
[AsContract("value > 1 && other.test.member == 31", null)]
public int TestMe(int value, OtherClass other)
{ }
```

Tak określony kontrakt definiuje warunek początkowy, po spełnieniu którego metoda TestMe może zostać wykonana. Wyrażanie zbudowane jest z dwóch warunków logicznych połączonych spójnikiem i (&&). Pierwszy warunek

$$\text{value} > 1$$

odnosi się do pierwszego argumentu funkcji, analogicznie, warunek

$$\text{other.test.member} == 31$$

odnosi się do drugiego parametru metody TestMe(...). Elementem odróżniającym te dwa przypadki jest typ argumentu, do którego występuje odwołanie.Parametr *value* zalicza się do kategorii typów wartościowych wchodzących w skład języka, zaś parametr *other* jest typem referencyjnym, zdefiniowanym przez użytkownika. Niesie to ze sobą konsekwencje przy zadaniu odczytywania wartości argumentów.

Wszystkie typy są odwzorowanie na jedną z wartości wyliczeniowej *CorElementType* zdefiniowanej wewnątrz nagłówka *corHdr.h*. Poniższa tabela przedstawia częściową definicję typu wyliczeniowego, zawężoną do typów obsługiwanych przez bibliotekę AsProfiled.

Nazwa	Wartość	Opisywany typ
ELEMENT_TYPE_END	0x0	Niezdefiniowane
ELEMENT_TYPE_VOID	0x1	Typ zwracany void
ELEMENT_TYPE_BOOLEAN	0x2	Typ bool
ELEMENT_TYPE_CHAR	0x3	Wartość znakowy

ELEMENT_TYPE_I1	0x4	Typ short
ELEMENT_TYPE_U1	0x5	Typ short bez znaku
ELEMENT_TYPE_I2	0x6	Int
ELEMENT_TYPE_U2	0x7	Int bez znaku
ELEMENT_TYPE_I4	0x8	Long
ELEMENT_TYPE_U4	0x9	Long bez znaku
ELEMENT_TYPE_I8	0xA	Int64
ELEMENT_TYPE_U8	0xB	Int64 bez znaku
ELEMENT_TYPE_R4	0xC	Float
ELEMENT_TYPE_R8	0xD	Double
ELEMENT_TYPE_STRING	0xE	String
ELEMENT_TYPE_VALUETYPE	0x11	Typ wartościowy
ELEMENT_TYPE_CLASS	0x12	Typ referencyjny

Tabela 4.3: Typ wyliczeniowy

4.7.1 Typy wbudowane

W ramach platformy .NET zdefiniowany jest pewien, ograniczony zestaw typów wbudowanych. W kontekście tabeli 4.3 są to typy o wartościach mniejszych od 0x11. Poza typem *String*, który reprezentowany jest jako *ELEMENT_TYPE_STRING* wszystkie są typami wartościowymi. Fakt ten ma znaczenie w momencie odczytu wartości obiektów o takim typie.
Dla przypomnienia, w momencie wywołania metody po stronie weryfikowanego programu biblioteka AsProfiled otrzymuje powiadomienie o tym zdarzeniu. Wraz z nim przekazywana jest struktura *COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_RANGE* (zob. 3.6), która zawiera adres do aktualnej wartości parametru. Dla typów wartościowych proces odczytania tej wartości polega na bezpośredniej interpretacji bajtów, których liczba określona jest przez pole *length* struktury *COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_RANGE* znajdujących się pod adresem wskazywanym przez *startAddress*. W bibliotece AsProfiled zdefiniowana została klasa *ValueReader*, której odpowiedzialnością jest interpretowanie tych danych. Wszystkie metody, których zadaniem jest odczytanie wartości parametrów o typach prostych mają podobną konstrukcję. Przykład:

Listing 4.16: Odczytywanie wartości typu int

```
std::wstring CValueReader::TraceInt(UINT_PTR startAddress)
{
 std::wostringstream stream;
 stream << *(int *)startAddress;
 return stream.str();
}
```

Przy odczytywaniu wartości innych typów, zmianie ulega tylko linijka, w której odbywa się rzutowanie na odpowiedni typ.

Osobnego rozważenia wymaga odczytywanie parametrów typu *string*. W przeciwieństwie do wyżej opisanych wartość tego typy nie ma z góry określonej długości, i choćby z tego powodu nie jest możliwe jego odczytanie w sposób podany powyżej.

Interfejs *ICorProfilerInfo2* udostępnia w tym celu następującą metodę:

Listing 4.17: Odczytywanie wewnętrznej struktury napisów

```
HRESULT GetStringLayout (
[out] ULONG *pBufferLengthOffset,
[out] ULONG *pStringLengthOffset,
[out] ULONG *pBufferOffset)
```

W wyniku wywołania tej metody, pod przekazane wskaźniki, przypisywane są następujące wartości:

- pBufferLengthOffset - określa względne przesunięcie do adresu w pamięci, pod którym znajduje się wartość oznaczająca liczbę zarezerwowanych bajtów dla danego napisu
- pStringLengthOffset - względne przesunięcie do adresu, w którym określona jest rzeczywista długość napisu
- pBufferOffser - względne przesunięcie adresu, gdzie znajduje się pierwszy znak napisu

Wszystkie przesunięcia określają przesunięcie adresu pamięci w obrębie obiektu. Adres do miejsca w pamięci obiektu określony jest przez wartość elementu *startAddress* struktury *COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_RANGE*. Mając te dane do dyspozycji, biblioteka AsProfiled jest w stanie odczytać wartość parametrów typu *string*.

4.7.2 Odwołania do wartości składowych obiektów złożonych

Biblioteka AsProfiled pozwala definiować kontrakty, wewnątrz których znajdują się odwołania do pól złożonych struktur czy klas. Kontrakt zdefiniowany we fragmencie kodu 4.15 przedstawia przykładowe wyrażenie, w którym warunek odnosi się do pola *member*, które jest składową klasy *Test*, a z kolei obiekt tego typu jest częścią klasy *other*. Ostatecznie, *member* jest typu prostego *int*, którego wartość odczytywana jest zgodnie z tym co zostało przedstawione w poprzednim punkcie. Pozostaje kwestia określenia miejsca w pamięci, w którym przechowywana jest ta wartość. W tym celu, biblioteka AsProfiled implementuje funkcjonalność inspekcji obiektów dowolnego typu, pod kątem zawierania składowych.

Niech wyrażenie jest postaci jak poprzednio $other.test.member > 31$ Proces składa się z następujących kroków:

1. Przeszukanie listy parametrów metody w celu odnalezienie tego, do którego odwołanie znajduje się w kontrakcie. W tym przykładzie szukanym parametrem jest *other*.
2. Pobranie struktury opisującej ułożenie pól wewnątrz klasy, określającej element *other*.
3. Przesunięcie wskaźnika do miejsca w pamięci, w którym znajdują się dane należące do obiektu wewnętrznego *test*, zgodnie z informacjami zawartymi w strukturze pobranej w poprzednim kroku.

Krok drugi i trzeci powtarzany jest do momentu, aż odnalezione zostanie pole *member*, którego odczyt odbywa się już zgodnie z procedurą określoną w poprzedniej sekcji.

4.8 Ewaluacja kontraktów

Mając do dyspozycji opisane do tej pory funkcjonalności, biblioteka jest już w stanie wykonać zadanie ewaluacji kontraktu.

W tym celu utworzona została klasa *ClousureEvaluator*. Zawiera ona w sobie dwie metody publiczne, w ramach których ewaluowany jest kontrakt.

Listing 4.18: Interfejs klasy ClousureEvaluator

```
bool CClousureEvaluator::EvalPreCondition()
bool CClousureEvaluator::EvalPostCondition( COR_PRF_FUNCT
   ION_ARGUMENT_RANGE *retvalRange)
```

Pierwsza z metod ewaluuje warunek początkowy, druga warunek końcowy. Do sprawdzenie warunku końcowego potrzebna jest wartość zwracana z metody, którą to można odczytać wykorzystując argument *retvalRange*. Uwzględnienie wartości zwracanej jest jedynym elementem różniącym te metody. Poza tym ciąg wykonywanych czynności jest taki sam i przebieg zgodnie ze schematem:

1. Pobranie obiektu reprezentującego kontrakt
2. Utworzenie drzewa rozbioru wyrażenia opisującego kontrakt
3. Podmiana węzłów reprezentujących parametry na ich wartości
4. Ewaluacja drzewa

4.8.1 Zachowywanie wartości początkowych

W ramach wyrażeń opisujących kontrakty możliwe są odwołania do wartości parametrów początkowych, które zostały przekazane do metody w momencie jej wywołania. Wartości parametrów mogą ulec zmianie w czasie wykonywania metody, dlatego potrzebne jest traktowanie takich odwołań w specjalny sposób. Należy zauważyć, że takie odwołania mają tylko sens w przypadku wyrażeń określających warunek końcowy. Zgodnie z tym co zostało powiedziane wcześniej warunek ten ewaluowany jest po otrzymaniu powiadomienia o opuszczeniu metody, jednak wtedy nie jest już możliwe uzyskanie wartości początkowych parametrów, gdyż mogły one zostać zmienione w wyniku działań wewnątrz metody. Z tego względu konieczne jest ich skopiowanie w inny obszar pamięci, skąd będzie możliwe ich pobranie w dowolnym, późniejszym momencie. Odpowiednim momentem na przeprowadzenie tej operacji jest chwila, w której przychodzi powiadomienie o rozpoczęciu wykonywania kontrolowanej metody. Tą odpowiedzialność przejmuje obiekt typu *ContractEvaluator*, dzięki informacjom przekazywanym do konstruktora klasy.

Listing 4.19: Konstruktor klasy ContractEvaluator

```
CContractEvaluator::ContractEvaluator(
 CMethodInfo*, CAttributeInfo*,
 ICorProfilerInfo2*, COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_INFO*)
```

W ramach bloku inicjalizacyjnego dokonywana jest częściowa analiza warunku końcowego. Wyrażenie jest badane pod kątem występowania identyfikatorów

oznaczających odwołanie do wartości początkowych. Po tym jak takowe zostaną odnalezione, następuje przeszukanie listy parametrów metody oraz odczytanie ich aktualnej wartości. Niech dana metoda i nałożony na nią kontrakt:

Listing 4.20: Wartości początkowe

```
[AsContract(null, "^account.balance + sum == account.
   balance)]
public void Deposit(Account account, int sum)
{
 account.balance += sum;
}
W ramach warunku końcowego występuje odwołanie do wartości
    początkowej (oznaczanej przez dodanie przedrostka \
   textasciicircum) pola \emph{balance} obiektu \emph{
   account}. Fakt ten, zostanie zauważony podczas
   przetwarzania wstępnego kontraktu przez obiekt typu \
   emph{ContractEvaluator}, a w konsekwencji wartość
   początkowa zostanie zapamiętana do momentu, w którym
   metoda będzie kończyła swoje działanie.
```

4.8.2 Wartości zwracane

Ostatnim elementem, które jest potrzebny do uzyskania w pełni funkcjonalnego mechanizmu ewaluacji kontraktów, a w szczególności warunków końcowych, jest mechanizm pozwalający na uwzględnianie i obsługę wartości zwracanych z metody. Zgodnie z tym co zostało napisane w rozdziale 3.7 wykorzystywana jest tu struktura *COR_PRF_FUNCTION_ARGUMENT_RANGE*, która zawiera w sobie wskaźnik do miejsca w pamięci, w którym przechowywana jest aktualna wartość, która będzie zwrócony z metody. Odczyt jej nie powoduje żadnych komplikacji, gdyż wykorzystywane są tu dokładnie te same mechanizmy co przy interpretacji argumentów metody.

Rozdział 5

Porównanie z innymi bibliotekami

W tej części opisano dwa rozwiązania realizujące podejście programowania kontraktowego. Podobnie jak biblioteka AsProfiled są one przeznaczone dla programów pracujących w ramach platformy .NET.

5.1 Code Contracts

Code Contracts to kompleksowe rozwiązanie firmy Microsoft, początkowe tworzone w ramach komórki badawczej Mirosoft Research. Obecnie jest już dostępna na rynku w pełni funkcjonalna wersja tego zestawu narzędzi i wchodzą one w skład środowiska programistycznego Visual Studio 2010.

Z perspektywy implementacyjnej w ramach *Code Contracts* zastosowano inne podejście, od tego, które reprezentowane jest przez AsProfiled. Dla przypomnienia, AsProfiled stanowi zewnętrzną bibliotekę, do której odwołania występują na poziomie maszyny wirtualnej .NET. Sprawdzany program nie ma świadomości istnienia tej biblioteki, a jedynym elementem zewnętrznym jest klasa definiująca atrybuty, poprzez który reprezentowany jest kontrakt. W przypadku użycia *Code Contracts*, kontrolowany program (biblioteka) odwołuje się bezpośrednio do metod zdefiniowanych w ramach przestrzeni nazw *System.Diagnostics.Contracts*.

Razem z biblioteką dostarczane jest narzędzie *ccrewrite.exe*, które jest kluczowym elementem w zadaniu sprawdzania poprawności kontraktów w czasie działania aplikacji. Narzędzie to, dostając na wejściu skompilowaną bibliotekę, odnajduje wszelkie odwołania do metod zawartych w przestrzeni nazw *Sys-*

tem.Diagnostics.Contracts, a następnie modyfikuje jej kod pośredni. Transformacja ta polega na zamianie wszystkich odwołań do definicji kontraktów, na odpowiadające im bloki kodu. Na przykład, odwołania do wartości początkowych będą przetłumaczone na ciąg operacji w wyniku których zostaną one skopiowane i zachowane, dzięki czemu będą mogły być użyte w warunku końcowym.

Przepisywanie kodu skompilowanej biblioteki przy użyciu powyższego narzędzia to główna i zasadnicza różnica w podejściu w stosunku do tego co zostało wykorzystane w *AsProfiled*.

Narzędzie *Ccrewrite.exe* poprzez przepisywanie kodu umożliwia umieszczenie wszystkich deklaracji kontraktów na początku metody. Zmodyfikowany kod będzie zawierał sprawdzenie kontraktu końcowego we wszystkich miejscach, w których możliwe jest opuszczenie metody.

Z punktu widzenia użytkownika, zasadnicza różnicą, w stosunku do biblioteki AsProfiled jest sposób określania kontraktów. W tym wypadku są one definiowane jako wywołania statycznych metod klasy *Contract*, przy czym kontrakt podawany jako ich argument, w postaci wyrażenia logicznego. Poprawnym wyrażeniem jest dowolne wyrażenie zgodne z regułami ich budowania w ramach ustalonego języka programowania. Podejście to ma zasadniczą zaletę, mianowicie kontrakty są silnie typowane. Poniższy wycinek kodu ilustruje dotychczasowy opis:

Listing 5.1: CodeContracts - sposób użycia

```
public int Test(int arg1, int arg2)
{
 Contract.Requires(PreCondition);
 Contract.Ensures(PostCondition);
 int result = arg1 * arg2;
 return result;
}
```

Przy pomocy metod *Requires* i *Ensure* określane są odpowiednio warunki początkowe i warunki końcowe. Ich argumentem może być dowolnie skomplikowane wyrażenie obliczalne do wartości logicznej, a każda z tych metod może być wywołana dowolną liczbę razy.

Dla porównania, poniżej zestawiono deklaracje tego samego kontraktu początkowego w ramach bibliotek. *Code.Contracts* i *AsProfiled*:

Listing 5.2: Deklaracja kontraktu

```
// AsProfiled
[AsContract("arg1 != 0 && arg2 != 0", "@returnValue != 0")
   ]
public int Div(int arg1, int arg2)
{
 return arg1 / arg2;
}

// Code.Contracts
public int Div(int arg1, int arg2)
{
 Contract.Requires(arg1 != 0);
 Contract.Requires(arg2 != 0);
 Contract.Ensures(Contract.Result<int>() != 0);
 return arg1 / arg2;
}
```

W tym przykładnie, poza wcześniej wymienionymi metodami *Requires* i *Ensures*, znajduje się wywołanie metody *Contract.Results <int>()*. Jest to odpowiednik elementu *@returnValue* w obrębie kontraktów AsContracts, a więc oznacza odwołanie do wartości zwracanej z metody.

Wspólną cechą bibliotek *Code Contracts* oraz *AsProfiled* jest możliwość odwoływania się do wartości początkowych argumentów metody. W ramach kontraktów *AsContracts* odwołanie do wartości początkowych oznaczane są przez *^nazwaArgumentu*, z kolei tutaj tą rolę pełni metoda *Contracts.OldValue<T >(T value)*. Za zachowywanie tych wartości odpowiedzialny jest kod wygenerowany przez *ccrewrite.exe*. Poniższy kod ilustruje wykorzystanie tej funkcjonalności.

Listing 5.3: Wykorzystanie wartości początkowych

```
public void Deposit(Account account, int amount)
{
 Contract.Requires(amount > 0);
 Contract.Ensures(account.Balance == Contract.OldValue(
    account.Balance) + amount);
 account.Balance += amount;
}
```

Odpowiednik powyższego kontraktu w ramach biblioteki AsProfiled jest następujący:

Listing 5.4: Wartości początkowe w AsContract

```
[AsContract("amount > 0", "^account.Balance + amount ==
   account.Balance")]
public void Deposit(Account account, int amount)
{
 account.Balance += amount;
}
```

Dodatkowo *Code Contracts* udostępnia kilka innych, użytecznych funkcjonalności, których nie posiada biblioteka *AsProfiled*. Są to między innymi:

1. Contract.Requires<TException>(bool condition) - w przypadku, niespełnienia kontraktu, rzucany jest wyjątek określonego typu
2. Contract.EnsuresOnThrow<TException>(bool condition) - określa warunek końcowy jaki musi być zachowany w przypadku wystąpienia wyjątku typu TException
3. Deklaracja niezmiennków, czyli warunków nakładanych na obiekt, które są sprawdzane przed i po wywołaniu każdej z publicznych metod obiektu.

   Listing 5.5: Niezmiennik obiektu

   ```
   [ContractInvariantMethod]
   private void ObjectInvariant ()
   {
    Contract.Invariant ( condition1 );
    Contract.Invariant ( condition2 );
   }
   ```

   Metoda oznaczona atrybutem *[ContractInvariantMehtod]* jest wywoływana przez odpowiedni kod wygenerowany przez narzędzie *ccrewrite.exe*

Podsumowując, *Code Contracts* w obecnej postaci jest dopracowanym rozwiązaniem, o czym świadczy fakt, iż jest częścią oficjalnej dystrybucji platformy .NET 4.0. Zasadniczą różnicą w stosunku do biblioteki AsProfiled jest środowisko, w którym kontrakty są ewaluowane. W Code Contracts kontrakty wykonują się jako kod zarządzany, w AsProfiled są one pod kontrolą niezarządzanego kodu profilera. Dużą zaletą w stosunku do biblioteki AsProfiled, poza bogatszą funkcjonalnością, jest silne typowanie wyrażeń określających warunki. Ułatwia

to ich pisanie oraz uniemożliwia tworzenie niepoprawnych w sensie składniowym warunków.

5.2 LinFu.Contracts

LinFu.Contracts wchodzi w skład bibliotek zgrupowanych w ramach projektu LinFu, stworzonego przez Philipa Laureano a udostępnianego na zasadach wolnego oprogramowania. U podstaw tej biblioteki leży mechanizm generowania dynamicznych obiektów pośredniczących (ang. *dynamic proxy*), które pozwalają na przechwytywanie wywołań metod na docelowym obiekcie. Ten właśnie mechanizm wykorzystywany jest przy realizacji podejścia programowania kontraktowego.
Proces tworzenia obiektu pośredniczącego odbywa się poprzez metodę *CreateProxy<T>(IInvokeWrapper wrapper)* należącej do klasy *ProxyFactory*. W rezultacie zwracany jest uchwyt to obiektu typu *T*, przy czym każde odwołanie do jego metod będzie przechwytywane przez obiekt implementujący interfejs *IInvokeWrapper*. Interfejs ten określony jest w sposób następujący:

Listing 5.6: Interfejs IInvokeWrapper

```
public interface IInvokeWrapper
{
 void BeforeInvoke(InvocationInfo info);
 object DoInvoke(InvocationInfo info);
 void AfterInvoke(InvocationInfo info, object returnValue)
     ;
}
```

Powyższe metody wywoływane są przez obiekt pośredniczący w momentach zgodnych z ich nazewnictwem, tzn. *BeforeInvoke*, *AfterInvoke* oznaczają moment przed i po wywołaniu, natomiast *DoInvoke* to właściwe wywołanie. Należy zaznaczyć iż metoda na obiekcie docelowym może, ale nie musi być wykonana, decyduje o tym implementacja metody *DoInvoke*. Dla jasności prezentowany jest poniższy przykład:

Listing 5.7: Tworzenie obiektu pośredniego

```
// Klasa początkowa
public class Worker
{
 public virtual void Do()
 {
  Console.WriteLine("Metoda Do()");
```

```
 }
}

public class WrappedWorker : IInvokeWrapper
{
 object _target;
 public WrappedWorker(object target)
 {
  _target = target;
 }
 void BeforeInvoke(InvocationInfo info)
 {
  Console.WriteLine("Przed wywołaniem metody Do()");
 }

 object DoInvoke(InvocationInfo info)
 {
  Console.WriteLine("Wywołanie metody Do()");
  object result = null;
  // W celu wywołania oryginalnej metody Do() należy
  // usunąć komentarz z następnej linii:
  // result = info.TargetMethod.Invoke(_target, info.
     Arguments);
  return result;
 }

 void AfterInvoke(InvocationInfo info, object returnValue)
 {
    Console.WriteLine("Po wywołaniu metody Do()");
 }
}

public class Program
{
 public static void Main(string[] args)
 {
  ProxyFactory factory = new ProxyFactory();
  WrappedWorker worker = new WrappedWorker(new Worker());
  Worker wrappedWorker = factory.CreateProxy<Worker>(
     worker);

  worker.Do();
  // W rezultacie wyświetlone zostaną komunikaty:
  // Przed wywołaniem metody Do()
  // Wywołanie metody Do()
  // Po wywołaniu metody Do()
 }
```

```
}
```

Wiedząc czym jest obiekt pośredniczący, możliwe jest opisanie sposobu realizacji programowania kontraktowego przez bibliotekę *LinFu.Contracts*. Zasadniczo jest to rozwinięcie powyższej koncepcji. Wewnątrz przestrzeni nazw *LinFu.DesignByContract2.Contracts* znajduje się klasa *AdHocContract*, które zdefiniowana jest jak następuje:

Listing 5.8: Klasa AdHocContract

```
public class AdHocContract : IMethodContract,
   IContractProvider, ITypeContract
{
 public AdHocContract();
 public IList<IInvariant> Invariants { get; }
 public IList<IPostcondition> Postconditions { get; }
 public IList<IPrecondition> Preconditions { get; }
}
```

W jej polach przechowywane są odniesienia do inwariantów, warunków początkowych i warunków końcowych. W połączeniu z klasą typu *ContractChecker* implementującą interfejs *IInvokeWrapper* oraz mechanizmem tworzenia obiektów pośrednich oddawana jest funkcjonalność sprawdzania poprawności kontraktów.

Listing 5.9: LinFu.Contracts

```
// Obiekt, którego metody będą sprawdzane pod kątem
   poprawności
LinFuCalculator calculator = new LinFuCalculator();
AdHocContract contract = new AdHocContract();

ProxyFactory factory = new ProxyFactory();
ContractChecker checker = new ContractChecker(contract);
checker.Target = calculator;

// Obiekt pośredniczący
LinFuCalculator wrapped = factory.CreateProxy<
   LinFuCalculator>(checker);
// Każde wywołanie metody na rzecz tego obiektu będzie
   powodowało
// sprawdzenie odpowiednich kontraktów
wrapped.Mult(2, 3);
```

Powyższy fragment obrazuje sposób w jaki uaktywniany jest proces weryfikacji kontraktów, jednak w żaden sposób ich nie definiuje. W tym celu, konieczne

jest ich zdefiniowanie, a następnie dołączenie ich do odpowiedniej listy zdefiniowanej w ramach klasy *AdHocContract*.

Wszystkie rodzaje warunków definiuje się poprzez implementację jednego z następujących interfejsów *IInvariant*, *IPrecondition*, *IPostcondition*. Każdy z powyższych rozszerza interfejs *IContractCheck* zdefiniowany w następujący sposób:

```
public interface IContractCheck
{
 // określa czy dany kontrakt powinien być sprawdzony w
    kontekście
 // aktualnie wywoływanej metody
 bool AppliesTo(object target, InvocationInfo info);
 // Reakcja na wyjątek wyrzucany przez błędnie
    zdefiniowany kontrakt
 void Catch(Exception ex);
}
```

Warunki początkowe określa się poprzez utworzenie klasy implementującej interfejs *IPrecondition*:

```
public interface IPrecondition : IMethodContractCheck,
   IContractCheck
{
        bool Check(object target, InvocationInfo info);
        void ShowError(TextWriter output, object target,
           InvocationInfo info);
}
```

Metoda *Check* zawiera właściwą definicję kontraktu, w rezultacie zwracając wartość logiczną mówiącą o jego spełnieniu w kontekście wywoływanej metody. Pobiera ona dwa argumenty, pierwszy z nich jest obiektem na rzecz którego metoda została wywołana, drugi z nich zawiera informacje o tym wywołaniu, w szczególności zawiera wartości argumentów przekazanych do metody.

Mając te informacje możliwe jest stworzenie klasy określającej przykładowy warunek początkowy. Niech dana będzie klasa *Calculator* z metodą *Div(int arg1, int arg2)*. Definicja warunku początkowego w ramach LinFu.Contracts mogłaby mieć następującą postać:

Listing 5.10: Warunek początkowy w LinFu.Contracts

```
class CalculatorPrecondition : IPrecondition
{
```

```
 public bool Check(object target, LinFu.DynamicProxy.
    InvocationInfo info)
 {
  int argument1 = (int) info.Arguments[0];
  int argument2 = (int) info.Arguments[1];
  // warunek dla którego kontrakt nie jest spełniony
  if (argument1 == 0 || argument2 == 0)
   return false;
  // w pozostałych przypadkach warunek początkowy uważany
     jest za spełniony
  return false;
 }

 public bool AppliesTo(object target, LinFu.DynamicProxy.
    InvocationInfo info)
 {
  // Określenie, iż ten warunek ma mieć zastosowanie
  // tylko do klasy typu Calculator
  Calculator calculator = target as Calculator
  if (calculator == null)
   return false;
  // Sprawdzanie kontraktu ma się odbywać tylko dla metody
      Div
  if (info.TargetMethod.Name == "Div")
   return true;
  return false;
 }
 ...
}
```

Dla przypomnienia, pokazano jak ten sam kontrakt określany jest przy wykorzystaniu biblioteki *AsProfiled* i *Code.Contracts*

Listing 5.11: Deklaracja kontraktu

```
// AsProfiled
[AsContract("arg1 != 0 && arg2 != 0", null)]
public int Div(int arg1, int arg2)
{
 return arg1 / arg2;
}

// Code.Contracts
public int Div(int arg1, int arg2)
{
 Contract.Requires(arg1 != 0);
 Contract.Requires(arg2 != 0);
```

```
 return arg1 / arg2;
}
```

Widoczna jest tu znaczna różnica w łatwości definiowania kontraktu oraz ilości kodu potrzebnego do uzyskania tego samego efektu.

Analogiczna sytuacja występuje dla warunków końcowych. Ponownie, konieczne jest zdefiniowanie klasy implementującej tym razem interfejs *IPostcondition*, który różni się od *IPrecondition* metodą *BeforeMethodCall* oraz zmienioną sygnaturą metody *Check*.

Listing 5.12: Deklaracja BeforeMethodCall

```
void BeforeMethodCall(object target, InvocationInfo info);
bool Check(object target, InvocationInfo info, object
   returnValue);
```

Metoda *Check* posiada dodatkowy argument *returnValue*, który oznacza wartość zwracaną metody (odpowiednik @returnValue z *AsProfiled* oraz Contract.OldValue z *CodeContracts*).

Metoda *BeforeMethodCall* została dodana w celu obsługi wartości początkowych argumentów i wykonywana jest przed wejściem do metody docelowej. W tym rozwiązaniu można dostrzec pewną analogię z podejściem użytym w *AsProfiled*. Tam też dokonywane jest przetwarzanie wstępne przed wejściem do metody, właśnie w celu przechowania stanu parametrów użytych w kontrakcie. W przeciwieństwie jednak do niej, tu za poprawne zachowanie ich wartości odpowiedzialny jest twórca kontraktu. W *AsProfiled* i *CodeContracts* czynność ta przerzucona została na bibliotekę i zachodzi całkowicie bez wiedzy osoby nakładającej więzy poprawności na metodę.

Mając wiedzę na temat definiowania warunków końcowych, możliwe jest porównanie ich wykorzystania w stosunku do tego co zostało pokazane przykładzie 5.4.

Listing 5.13: Klasa Account

```
public class Account
{
 public int Balance;
 public virtual void Deposit(int amount)
 {
  this.Balance += amount;
```

```
 }
}
```

Listing 5.14: Definicja warunku końcowego

```
class AccountPC : IPostcondition
{
 private int oldBalance;
 public void BeforeMethodCall(object target,
    InvocationInfo info)
 {
  oldBalance = (target as Account).Balance;
 }

 public bool Check(object target, InvocationInfo info,
    object returnValue)
 {
  Account account = target as Account;
  return account.Balance == oldBalance + (int)info.
     Arguments[0];
 }

 public bool AppliesTo(object target, InvocationInfo info)
 {
  if (target as Account == null)
   return false;
  if (info.TargetMethod.Name == "Deposit")
   return true;
  return false;
}
```

Warunek zawiera sprawdzenie bilans rachunku po wpłynięciu depozytu jest równy jego wartości początkowej powiększonej o zadaną wartość.

Podsumowując, biblioteka LinFu.Contracts spełnia wszystkie funkcjonalności niezbędne do programowania kontraktowego. Z drugiej strony można podejrzewać, iż nie było to głównym założeniem podczas projektowania LinFu. Definiowanie kontraktów wymaga dosyć dużego nakładu pracy w porównaniu do prezentowanych wcześniej rozwiązań.

Do zalet tego rozwiązania można zaliczyć nieinwazyjność definicji kontraktów w stosunku do sprawdzanego kodu. Zestaw kontraktów może być zawarty w osobnej bibliotece, załączanej w zależności od potrzeby. Z drugiej strony, wymóg konstruowania obiektów przy użyciu metod fabrykujących może okazać się

niemożliwy do spełnienia w przypadku już istniejącego kodu, gdyż wiązało by się to z dużym nakładem pracy. Dodatkowo, użycie LinFu.Contracts wymusza definiowanie klas jako publicznych, zaś metody które mają być przesłonięte muszą być oznaczone jako wirtualne - wynika to ze specyfiki koncepcji tworzenia dynamicznych obiektów pośredniczących.

5.3 Porównanie funkcjonalności opisywanych bibliotek

W tym miejscu prezentowane jest podsumowanie funkcjonalności przedstawionych bibliotek.

Cecha	AsProfiled	CodeContracts	LinFuContracts
Określenie kontraktu	Atrybut nakładany na metodę	Wewnątrz metody przy użyciu metod z biblioteki	Osobna klasa implementująca odpowiednie interfejsy
Użyte podejście	Zewnętrzna biblioteka Odbieranie powiadomień od maszyny CLR Interpretacja danych binarnych	Przepisywanie języka pośredniego skompilowanego programu	Dynamiczna generacja obiektu pośredniczącego
Warunki początkowe	✓	✓ (Contract.Requires)	✓ (interfejs IPrecondition)
Warunki końcowe	✓	✓ (Contract.Ensures)	✓ (interfejs IPostcondition)
Wartości początkowe	✓ (^identyfikator)	✓ (Contract.Old)	✓ (metoda BeforeMethodCall, wymaga ręcznej implementacji)
Wartość zwracana	✓ (@returnValue)	✓ (Contract.Result)	✓ (parametr returnValue)
Inwariant klasy	- (łatwa implementacja, wystarczy sprawdzać kontrakt dla klasy w momencie wywołania i zakończenia metody)	✓ (metoda oznaczona atrybutem [ContractInvariantMethod])	✓ (interfejs IInvariant)

Rozdział 6

Podsumowanie

Celem tej pracy była prezentacja rozwiązania zadania weryfikacji kontraktów, którego wyróżniającym się elementem jest wykorzystanie podejścia stosowanego przy budowie aplikacji profilujących. Okazuje się, że jest to pierwsza tego typu implementacja. Z pewnością zaletą takiego podejścia jest nieinwazyjność w kod wynikowy docelowej aplikacji.

Możliwym rozwinięciem funkcjonalności biblioteki byłoby uwzględnienie czasów wykonywania metody w ramach kontraktów, dodatkowo uzależniając je od aktualnych wartości przekazywanych do metod. Przykładowo, możliwe by było nałożenie warunku końcowego mówiącego, że dla jakiś wartości argumentu czas wykonania metody musi mieścić się w określonych ramach. Dodatkowo, w bardzo prosty sposób, mierząc czasy wykonywania metod, możliwe jest uzyskanie w pełni funkcjonalnej aplikacji profilującej, co razem z możliwością weryfikacji kontraktów daje użyteczne narzędzie pozwalające na poprawę jakości aplikacji docelowej.

Z drugiej strony wykorzystane mechanizmy nie udostępniają w prosty sposób funkcjonalności wykonywania metod w ramach weryfikowanego programu, co w pewien sposób ogranicza siłę wyrażeń zawartych w kontraktach, np. w obecnej postaci nie jest możliwe odwoływanie się do propercji (ang. properties) obiektów. Inną istotną sprawą jest pewna trudność, która występuje przy pracy z niskopoziomowymi interfejsami rodzaju *ICorProfileInfo*, *IMetaDataImport*, która powodowana jest brakiem obszerniejszej dokumentacji na ich temat.

Podsumowując, podczas realizacji biblioteki *AsProfiled* udało się wykonać postawione cele, tym samym wypełniając najważniejsze założenia programowa-

nia kontraktowego. Implementacja sama w sobie jest obszernym źródłem wiedzy na temat niskopoziomowej struktury programów na platformę .NET, ich reprezentacji w pamięci oraz możliwości komunikacji z maszyną .NET.