Информатика

функциональное программирование

© Марченко Антон Александрович 2017 г.

Императивное программирование

- То, как мы обычно программировали на C#
  - *писали инструкции*, описывающие ***как*** решать задачу и представить результат
    - инструкции – приказы (imperative)
    - do – сделай, write – запиши, new - создай
  - *использовали переменные* для хранения состояний
  - *присваивали значения* переменным

Есть и другой подход

- **Декларативный**
  - declarative – описательный
  - *написание спецификаций* решения
  - описание того, **что** представляет задача и ожидаемый результат
  - человеко-ориентированный
  - нет указаний (как) и машинной детализации

Примеры декларативных языков

- Языки разметки:
  – HTML
  – XML
- *SQL* – язык структурированных запросов к реляционным базам данных

Мы использовали декларативность

- Инициализация

```
List<Person> team = new List<Person>
{
    new Person() { Age = 25, Name = "Anna" },
    new Person() { Age = 30, Name = "Bob" },
    new Person() { Age = 35, Name = "Charlie" },
    new Person() { Age = 30, Name = "Dixin" },
};
```

```
List<Person> team = new List<Person>();

Person anna = new Person();
    anna.Age = 25;
    anna.Name = "Anna";
team.Add(anna);
Person bob = new Person();
    bob.Age = 30;
    bob.Name = "Bob";
team.Add(bob);
Person charlie = new Person();
    charlie.Age = 35;
    charlie.Name = "Charlie";
team.Add(charlie);
Person dixin = new Person();
    dixin.Age = 30;
    dixin.Name = "Dixin";
team.Add(charlie);
```

Функциональное программирование

Неважно с каким языком вы работаете, программирование в функциональном стиле имеет преимущества. Вам следует использовать его когда это удобно и серьёзно задуматься о своём решении когда оно не удобно.

Джон Кармак
(http://ubm.io/1HOVGWs)

ФП vs ООП

Объектно-ориентированное программирование делает код понятнее за счёт инкапсулирования движущихся частей. Функциональное программирование делает код понятнее, минимизируя количество движущихся частей.

Майкл Фезерс
(http://bit.ly/1HOVBSM)

Функциональное программирование

- Это *декларативное* программирование
- Основное понятие – **функция**
  - в отличном от императивного программирования смысле
- Исполнение программы – вычисление значений функций
- *Нет переменных и состояний*

ФП

- ФП – программирование с *математическими функциями*
  - не методами класса
- Математическая функция – отображение, преобразующая входные значения в выходные
  - Одни данные – один результат

Рассмотрим концепции ФП

- Принципы, характерные для функциональных языков
- Использование этих принципов в языке C#
- Обсудим специфику, применимость

Ссылочная прозрачность

- Детерминированность
- Когда одни и те же данные приводят к одному и тому же результату
- Недетерминированность – неопределённость, когда такой предсказуемости нет

Одни данные – один результат

```
public double Calculate(double x,double y)
{
    return Math.Sqrt(x*x + y*y);
}

public long TicsElapsedFrom(int year)
{
    return (DateTime.Now - new DateTime(year, 1, 1))
           .Ticks;
}
```

Одни данные – один результат

Ссылочная прозрачность (referential transparency)
Не влияет и не зависит от глобального состояния

```
public double Calculate(double x,double y)
{
    return Math.Sqrt(x*x + y*y);
}
```

```
public long TicsElapsedFrom(int year)
{
    return (DateTime.Now - new DateTime(year, 1, 1))
           .Ticks;
}
```

Честная сигнатура метода

- Точно описывает все возможные входы и выходы
- Нечестная сигнатура. Почему?

```
public static int Divide(int x, int y)
{
    return x / y;
}
```

Честная сигнатура

- Гарантии за счёт использования собственного типа

```
public static int Divide(int x, NonZeroInteger y)
{
    return x / y.Value;
}
```

- Использование nullable int

```
public static int? Divide(int x, int y)
{
    if (y == 0)
        return null;
    return x / y;
}
```

Уменьшение сложности

- Функции в математическом смысле облегчают:
  - композицию
  - понимание
  - тестирование
- Следовательно, уменьшают сложность

Чистые функции

- *Детерминированные*
  обладают ссылочной прозрачностью
  один вход – один выход
- *Не обладающие побочными эффектами*
  не изменяют состояние

Неизменяемость

- *Immutability* – невозможность изменить данные
- *Состояние* – данные, изменяемые со временем
- *Побочные эффекты* – изменения некоторого состояния

Почему неизменяемость важна?

Изменяемые операции = Нечестный код

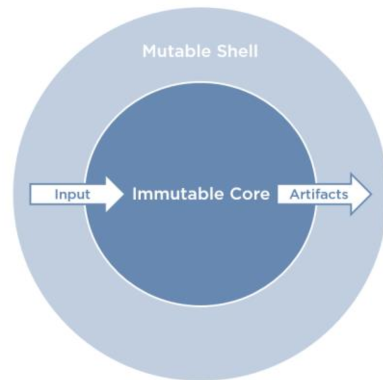
- Улучшает читаемость кода
- Валидация требуется только в одном месте (при создании)
- Автоматически гарантирует потокобезопасность

Борьба с побочными эффектами

- Предположим, нужно уметь изменять данные пользователя
- Разделить операции на команды и запросы (**command-query request separation**: **CQRS**)
  - *команды* – содержат побочные эффекты, ничего не возвращают, изменяют состояние
  - *запросы* – свободны от побочных эффектов, возвращают результат

Борьба с побочными эффектами

- Выделить
  – логику предметной области
    не меняет состояние
  – изменяемое состояние
    не содержит логики, но меняет состояние



- *Неизменяемое ядро в изменяемой оболочке*

Исключения

- Исключения – как goto
  – может даже хуже, т.к. могут перемещать поток управления между методами разных компонент
- ***Метод с исключениями – не математическая функция***
  – скрывается информация об исключении
- Возвращение значение предпочтительнее исключений
- Исключения не работают в многопоточном окружении

Когда использовать исключения

- В исключительных ситуациях
- Исключение - сигнал для программиста о баге (неисправимой ситуации)
- Лучше не использовать там, где вы ожидаете возникновение исключения
  – валидация ≠ исключительная ситуация
    валидация – фильтр

Функции первого класса

- В ФП ключевое понятие – функция
- Нужно уметь создавать, изменять и передавать функции в качестве аргументов другим функциям

Функции должны быть отдельными объектами

Типы для функций в C#

- *Делегат* – ссылка на метод(ы)
- Ссылочный тип, содержащий
  - Адрес метода
  - Ссылку на экземпляр
  - Ссылку на массив цепочки делегатов

Делегат

```
internal delegate void Feedback(Int32 value);
```

генерирует после компиляции класс

```
internal class Feedback : System.MulticastDelegate
{
    // Конструктор
    public Feedback(Object object, IntPtr method);
    // Метод, прототип которого задан в исходном тексте
    public virtual void Invoke(Int32 value);
    // Методы, обеспечивающие асинхронный обратный вызов
    public virtual IAsyncResult BeginInvoke
    (Int32 value,AsyncCallback callback, Object object);
    public virtual void EndInvoke(IAsyncResult result);
}
```

Метод как значение делегата

```
// Делегат как класс (правила объявления те же)
delegate int MyDelegate(int x, int y);

static int SumMethod(int x, int y)
{
    return x + y;
}

...

MyDelegate d1 = SumMethod;
```

Анонимные методы

- Позволяют описать тело метода без указания имени (C# 2.0)

```
delegate int MyDelegate(int x, int y);

...

MyDelegate d2 = delegate(int x, int y) { return x + y; };
```

Анонимные методы

- Позволяют описать тело метода без указания имени (C# 2.0)

```
delegate int MyDelegate(int x, int y);

...

MyDelegate d2 = delegate(int x, int y) { return x + y; };
```

Лямбда-выражения

- При объявлении анонимного метода ключевое слово delegate можно опустить
- И использовать ‘=>’ вместо return

```
MyDelegate anonymous = delegate(int x, int y)
                       { return x + y; };
MyDelegate lambda = (int x, int y)=>x + y;
```

[статья на хабре по использованию делегатов и лямбд в калькуляторе]

Лямбда-исчисление Чёрча

- Формальная система, разработанная Алонзо Чёрчем для формализации понятия вычислимости, использующая функции
- Альтернатива формальной системе Алана Тьюринга (машине Тьюринга)

Анонимные обобщенные делегаты

Начиная с C# 3:

- **Action** – семейство делегатов, не возвращающих значения
- **Func** – семейство делегатов, возвращающих значение
- **Predicate** – делегат, возвращающий bool

Анонимные делегаты

- Позволяют сэкономить время, избавляя от необходимости объявлять делегаты с одинаковыми определениями
- Активно используются с методами расширения и LINQ

```
Func<int, int, int> funcAndLambda = (x, y) => x + y;
```

Action

- Семейство из 17 делегатов, не возвращающих значение

```
public delegate void Action<T>(T obj);
public delegate void Action<T1, T2>(T1 arg1, T2 arg2);
public delegate void Action<T1, T2, T3>(T1 arg1, T2 arg2, T3 arg3);
...
public delegate void Action<T1, ..., T16>(T1 arg1, ..., T16 arg16);
```

```
Action<string, string> Hello = (x, y) => Console.WriteLine($"{x} {y}");
```

Func

- Семейство из 17 делегатов, возвращающих значение

```
public delegate TResult Func<TResult>();
public delegate TResult Func<T, TResult>(T arg);
public delegate TResult Func<T1, T2, TResult>(T1 arg1, T2 arg2);
public delegate TResult Func<T1, T2, T3, TResult>
(T1 arg1, T2 arg2, T3 arg3);
...
public delegate TResult Func<T1,..., T16, TResult>
(T1 arg1, ..., T16 arg16);

Func<int, int, int> funcAndLambda = (x, y) => x + y;
```

Multicast

```
// Реализация метода Invoke класса Delegate
public void Invoke(Int32 value)
{
    Delegate[] delegateSet = _invocationList as Delegate[];
    if (delegateSet != null)
    {
        foreach (Feedback d in delegateSet)
            d(value); // Вызов каждого делегата
    }
    else
    {
        _methodPtr.Invoke(_target, value);
        // Строка выше – имитация реального кода.
    }
}
```

Арифметика на делегатах

```
delegate void HelloWorld();

static void Hello()
{
    Console.Write("Hello ");
}
static void World()
{
    Console.WriteLine
    ("world!");
}
...
```

```
HelloWorld hello = Hello;
hello += World;
hello();

hello -= World;
hello();
```

```
Hello world!
Hello
```

Замыкания

- *Замыкание* – структура данных для хранения функции вместе с окружением © Wiki
- Замыкание, прикрепленное к родительскому методу имеет доступ к членам, определённым в теле родительского метода

Замыкания

```
public Person FindById(int id)
{
    return this.Find
    (
        delegate (Person p)
        {
            return (p.Id == id);
        }
    );
}
```

Захват переменной в замыкание

- Переменная, захваченная в замыкание продлевает время жизни пока живо замыкание
- Не важно, какого она типа: ссылочного или типа значения

Статья Теплякова по замыканиям

Замыкания на переменных цикла

```
var actions = new List<Action>();
foreach (var i in Enumerable.Range(1, 3))
{
    actions.Add(() => Console.WriteLine(i));
}

foreach (var action in actions)
{
    action();
}
// До    C# 5:  3 3 3
// После C# 5:  1 2 3
```

Статья на хабре

Различия в поведении

```
foreach (var i in Enumerable.Range(1, 3))
{
     actions.Add(() => Console.WriteLine(i));
}
```

```
var iterator = Enumerable.Range(1, 3).GetEnumerator();
int i;
while (iterator.MoveNext())
{
    i = iterator.Current;
    actions.Add(() => Console.WriteLine(i));
}
```

```
// До C# 5:      3 3 3
```

```
var iterator = Enumerable.Range(1, 3).GetEnumerator();
while (iterator.MoveNext())
{
    int i = iterator.Current;
    actions.Add(() => Console.WriteLine(i));
}
```

```
// После C# 5:  1 2 3
```

Функции высших порядков

- Функции могут использоваться в качестве аргументов и возвращаемых значений других функций

```
public static string Apply (Func<string,string> func, string value)
{
    return func(value);
}
...
var str=Apply(x => x.ToLower(),"Hello world!");
```

Композиция функций

$$(G \circ F)(x) = G(F(x))$$

```
static Func<X, Z> Compose<X, Y, Z>(Func<X, Y> f, Func<Y, Z> g)
{
    return (x) => g(f(x));
}


Func<double, double> sin = Math.Sin;
Func<double, double> exp = Math.Exp;
Func<double, double> exp_sin = Compose(sin, exp);
double y = exp_sin(3);
```

Рекурсия

- Вызов из функции самой себя
- Мы работали с рекурсивными методами
- Пример: вычисление n-го числа Фибоначчи (что в нём плохого?)

```
Func<uint, uint> fib = null;
fib = x => x > 1 ? fib(x - 1) + fib(x - 2) : x;
```

Мемоизация

```
public static class FuncExtensions
{
    public static Func<A, R> Memoize<A, R>(this Func<A, R> func)
    {
        var dict = new Dictionary<A, R>();
        return a =>
        {
            R r;
            if (!dict.TryGetValue(a, out r))
            {
                r = func(a);   dict.Add(a, r);
            }
            return r;
        };
    }
}
```

Сравнение

```
public static void Main()
{
    Func<uint, uint> fib = null;
    fib = x => x > 1 ? fib(x - 1) + fib(x - 2) : x;

    Stopwatch s = new Stopwatch();
    s.Start();
    Console.WriteLine(fib(37));
    Console.WriteLine("Without optimization: {0}", s.Elapsed);

    fib = fib.Memoize();
    s.Restart();
    Console.WriteLine(fib(37));
    Console.WriteLine("With optimization: {0}", s.Elapsed);
}
```

```
24157817
Without optimization: 00:00:02.6608453
24157817
Without optimization: 00:00:00.0097345
```

Частичное применение

- Частично-применённые функции уменьшают количество параметров *подстановкой (фиксацией) значений аргументов*

```
public static Func<T2, TR> Partial1<T1, T2, TResult>
(this Func<T1, T2, TResult> func, T1 first)
{
    return b => func(first, b);
}
```

Partial application по 1 аргументу

- Фиксируя первый аргумент у Math.Pow можно получать функции возведения в степень с фиксированным основанием

```
double x;
Func<double, double, double> pow = Math.Pow;

Func<double, double> exp  = pow.Partial1(Math.E);
// exp(x) = Math.Pow(Math.E, x)
Func<double, double> step = pow.Partial1(2);
// step(x) = Math.Pow(2, x)
x = exp(Math.PI);
x = step(Math.Log(int.MaxValue));
```

Partial application по 2 аргументу

- Вместо первого аргумента можно фиксировать значение любого

```
public static Func<T1, TR> Partial2<T1, T2, TR>
(this Func<T1, T2, TR> func, T2 second)
{
    return a => func(a, second);
}
```

Partial application по 2 аргументу

- Фиксируя второй аргумент у Math.Pow, можно получать функции возведения аргумента в некоторую фиксированную степень (корень, квадрат, куб)

```
double x;
Func<double, double, double> pow = Math.Pow;

Func<double, double> square = pow.Partial2(2);// Math.Pow(x,2)
Func<double, double> sqrt = pow.Partial2(0.5);// Math.Pow(x,0.5)
Func<double, double> cube = pow.Partial2(3);  // Math.Pow(x,3)

x = square(5); //x = 25
x = sqrt(9);   //x = 3
x = cube(3);   //x = 27
```

Каррирование

- *Преобразование функции от N аргументов в цепочку из N функций одного аргумента*
- Названо в честь Хаскелла Карри
- Удобно для обработки аргументов по одному
- В некоторых функциональных языках каррирование автоматическое

Каррирование вычисления расстояния

- Пусть есть метод, вычисляющий расстояние от центра координат (0,0,0) до точки (x, y, z) в трёхмерном Евклидовом пространстве

```
static double Distance(double x, double y, double z)
{
    return Math.Sqrt(x * x + y * y + z * z);
}
```

Функция каррирования

- Используем функцию высшего порядка для разбиение функции от трёх аргументов в цепочку функций одного аргумента

```
public static Func<T1, Func<T2, Func<T3, TResult>>>
Curry<T1, T2, T3, TResult>(this Func<T1, T2, T3, TResult> function)
{
    return a => b => c => function(a, b, c);
}
```

Вычисление расстояния

```
Func<double, double, double, double> fnDistance = Distance;

var curriedDistance = fnDistance.Curry();

double d = curriedDistance(3)(4)(12);

double d2 = Distance(3, 4, 12);
```

Раскаррирование

- *Обратный каррированию процесс*
- Цепочка N функций одного аргумента преобразуется в одну функцию от N аргументов

```
public static Func<T1, T2, T3, TR> UnCurry<T1, T2, T3, TR>
(this Func<T1, Func<T2, Func<T3, TR>>> curriedFunc)
{
    return (a, b, c) => curriedFunc(a)(b)(c);
}
```

Раскаррирование

- Пример:

```
var curriedDistance = Curry<double, double, double, double>(Distance);
double d = curriedDistance(3)(4)(12);

Func<double, double, double, double> originalDistance =
curriedDistance.UnCurry();
d = originalDistance(3, 4, 12);
```

Ошибка на миллиард $

«Нулевые ссылки: ошибка на миллиард долларов»

Тони Хоар (QCon 2009)

- По сигнатуре метода не понять, может ли результатом быть null или нет, нужно смотреть детали реализации.

Как избежать проблему 10^9$

- Если метод может вернуть null, можно возвращать обёрнутый в Maybe<T> результат метода
  - после этого сигнатура будет честной
- Пустым значением (Nothing) у Maybe<T> будет пустой Maybe<T>

Монады

- В функциональных языках конструкция Maybe<T> называется монадой
- Монада – контейнер, инкапсулирующий функции с побочным эффектом от чистых функций
- Концепция монад унаследована из теории категорий
  - монада – моноид в моноидальной категории эндофункторов

Реализация монады Maybe

- Обычно, Maybe включает 2 метода:
  – втягивание в монаду или помещение значения в контейнер (Return)
  – связывание (Bind)
    стратегия – «если первое вычисление дало результат, то второе; иначе — отсутствие результата»

Реализация монады Maybe

```
public class Maybe<T>
{
    private readonly T _value;
    public Maybe(T value)
    {
        _value = value;
    }
    private Maybe() { }
    public static Maybe<T> Nothing
        = new Maybe<T>();
```

```
public  Maybe<T2> Bind<T2>
    (Func<T,Maybe<T2>> func)
{
        return _value != null ?
        func(_value) :
        Maybe<T2>.Nothing;
}
public Maybe<T> Bind
    (Action<T> action)
{
    if (_value == null)
        return Nothing;
    action(_value);
    return this;
} }
```

Использование Maybe

```
var str = new Maybe<string>(Console.ReadLine());

str.Bind(x => new Maybe<string>(x.ToUpper()))
    .Bind(Console.WriteLine)
    .Bind(x=>new Maybe<string>(x.ToLower()))
    .Bind(Console.WriteLine);
```

Отсутствие состояний

- В чисто функциональных языках отсутствуют состояния
- Состояния можно моделировать с помощью монадических вычислений

Другие монады

- **IO** – монада строгой последовательности вычислений
  - стратегия связывания: «сначала первое, затем второе»
- **List** – монада вычислений с несколькими результатами
  - стратегия связывания: «все возможные результаты второго вычисления, применённого к каждому из вычисленных первым значений параметра»
- **State** – монада вычислений с переменной состояния
  - стратегия связывания: «начать второе вычисление с состоянием, изменённым в результате первого»

https://www.codeproject.com/articles/649989/WebControls/

Базовые функции высшего порядка в ФП

- В ФП списки играют важную роль
  - В LISP программы – списки
    списки ограничиваются скобками, поэтому в LISP много скобок
    - Определение функции
      [defun, имя, аргументы, операторы]
    - Вызов –[имя, аргументы]
- Программы составляются из функций-преобразований над списками
  - Преобразования не изменяют исходный список

LINQ

```
int[] array = { 1, 2, 3, 4, 5 };
```

- MAP

```
array.Select(elem => elem.ToString());
```

- FILTER

```
array.Where(elem => elem % 2 == 0);
```

- REDUCE/FOLD

```
array.Aggregate(0, (acc, elem) => acc + elem)
```

http://rsdn.org/article/dotnet/LinqAsStapToFp.xml

List comprehension

- [expression(a) for a in x]

```
Enumerable.Range(0, 10)
          .Select(x => x*x)
          .ToList();
```

- [x*x for x in range(10) if x%2]

```
Enumerable.Range(0, 10)
          .Where(x => x%2 != 0)
          .Select(x => x*x)
          .ToList();
```

- [(x,y) for x in range(4) for y in range(4)]

```
Enumerable
.Range(0,4)
.SelectMany(x => Enumerable.Range(0,4)
.Select(y => new Tuple<int,int>(x,y)))
.ToList();
```

```
from x in Enumerable.Range(0,4)
from y in Enumerable.Range(0,4)
select new Tuple<int,int>(x,y)
```

http://mark-dot-net.blogspot.ru/2014/03/python-list-comprehensions-and.html

IEnumerable + SelectMany = monad

- IEnumerable – функтор
- У монады есть две функции **return** и **bind** и нейтральный элемент
- **return** – втягивание в монаду: создание IEnumerable контейнера
- **bind** – связывание: реализовано стандартным методом SelectMany

IEnumerable + SelectMany = monad

Пример связывания:

```
IEnumerable<Shipper>
someWeirdListOfShippers =
    customers
        .SelectMany(c => c.Addresses)
        .SelectMany(a => a.Orders)
        .SelectMany(o => o.Shippers);
```

Ковариация и контравариация

- Любопытные могли заметить что-то странное в интерфейсе IEnumerable
- `public interface IEnumerable<out T> ...`
- В делегатах Action
- `public delegate void Action<in T>(T obj);`
- И в делегатах Func
- `public delegate TResult Func<in T, out TResult>(T arg);`

Теория

- Говорим про конструкцию с аргументами ссылочного типа (пр.: контейнер, делегат, дженерик)
- **Ковариантность** – конструкция сохраняет направление возможности присваивания (перенос наследования в прямом порядке)
- **Контравариантность** – конструкция обращает направление возможности присваивания (перенос наследования в обратном порядке)
- **Инвариантность** – наследование исходных типов не переносится на конструкции

[Статья Э. Липперта]

Немного примеров

- Ковариантность – прямой порядок
  - Множество клавиатур является множеством устройств
- Контравариантность – обратный порядок
  - Действия с устройствами распространяются на клавиатуры
- Инвариантность
  - Если нет никакой иерархической связи

Статья Э. Липперта

Практический смысл

- Обеспечение типобезопасности
- Если конструкция ковариантна, то для обеспечения безопасности она должна быть неизменяемой

```
Container<Device> devices =
    new Container<Keyboard>();
devices.Add(new Device()); // ошибка
```

- Если конструкция контравариантна, то она должна быть write only

```
Container<Keyboard> keyboards =
    new Container<Device>();
keyboards.Add(new Keyboard());
keyboards[0].PressSpace();
// ошибка
```

- *Поэтому, List инвариантен*

Предусловия и постусловия

- Принцип подстановки Барбары Лисков о «правильном наследовании» говорит, что:
  - Предусловия не могут быть усилены в подклассе
  - Постусловия не могут быть ослаблены в подклассе
- Другими словами, *требовать меньше, а гарантировать больше*

Ковариация IEnumerable<out T>

- out – параметр типа говорит о ковариации
  - гарантируем больше
  - можем подставлять более узкий тип

```
// Covariance.
IEnumerable<string> strings = new List<string>();
IEnumerable<object> objects = strings;
```

Контравариация Action<in T>

- in – параметр типа говорит о контравариации
  - требуем меньше
  - можем подставлять более широкий тип

```
// Предположим что метод SetObject объявлен в классе:
// static void SetObject(object o) { }
Action<object> actObject = SetObject;
Action<string> actString = actObject;
```

Ковариация и контравариация

```
static object GetObject() { return null; }
static void SetObject(object obj) { }

static string GetString() { return ""; }
static void SetString(string str) { }

static void Test()
{
    object[] array = new String[10];

    Func<object> del = GetString;

    Action<string> del2 = SetObject;
}
```

https://habrahabr.ru/post/218753/ Статья на MSDN

Другие возможности C#

- using static
- get only properties
- expression body
- nested methods
- tuples

```
using static System.Math;
public class Circle
{
    public Circle(double radius) => Radius = radius;
    public double Radius { get; }
    public double Circumference  => PI * 2 * Radius;
    public double Area {get
    {
            double Square(double d) => Pow(d, 2);
            return PI * Square(Radius);
    }}
    public (double Circumference, double Area) Stats
        => (Circumference, Area);
}
```

https://habrahabr.ru/company/piter/blog/321546/

Сопоставление с образцом (Pattern matching)

- Is-expression

```
object o= ...
if (o is int i || (o is string s && int.TryParse(s, out i)) { /* use i */ }
```

- Switch

```
Shape shape=null;
switch (shape)
{
    case Circle c:
        WriteLine($"circle with radius {c.Radius}");
        break;
    case Rectangle s when (s.Length == s.Height):
        WriteLine($"{s.Length} x {s.Height} square");
        break;
    case Rectangle r:
        WriteLine($"{r.Length} x {r.Height} rectangle");
        break;
    default:
        WriteLine("<unknown shape>");
        break;
    case null:
        throw new ArgumentNullException(nameof(shape));
}
```

https://blogs.msdn.microsoft.com/dotnet/2017/03/09/new-features-in-c-7-0/

Вопросы

- В чем отличие императивного и декларативного подхода?
- Как соотносятся функциональное и декларативное программирование?
- Что такое ссылочная прозрачность?
- Что такое честная сигнатура метода?

Вопросы

- Что такое состояние?
- Что такое неизменяемость?
- Что такое побочный эффект и чистая функция?
- Что такое функция первого рода и функции высших порядков?

Вопросы

- Какие механизмы поддержки ФП есть в C#?
- Чем отличается каррирование от частичного применения?
- В чём состоит проблема на миллиард $ и как можно её решать?

Вопросы

- Списки, операции над списками в ФП
- List comprehension
- Что такое сопоставление с образцом?
- Что такое ковариация и контраварияция?

Вопросы?

e-mail: marchenko@it.kfu.ru

© Марченко Антон Александрович 2017 г.