

Universidade de São Paulo
Instituto de Matemática e Estatística
Bacharelado em Ciência da Computação

Mateus Barros Rodrigues

Implementação de algoritmos para consultas de segmentos em janelas

São Paulo
Setembro de 2016

Implementação de algoritmos para consultas de segmentos em janelas

Monografia final da disciplina
MAC0499 – Trabalho de Formatura Supervisionado.

Supervisor: Prof. Dr. Carlos Eduardo Ferreira

São Paulo
Setembro de 2016

Resumo

Este trabalho de conclusão de curso fundamentou-se na compreensão e implementação em linguagem *python* de um algoritmo para consultas de intersecções de segmentos de retas com janelas retangulares no espaço, um subproblema de geometria computacional conhecido por: buscas em regiões ortogonais. Este algoritmo foi o foco da tese de mestrado de Álvaro Junio Pereira Franco. Além da implementação, foi feita também a adaptação do visualizador de algoritmos geométricos feito por Alexis Sakurai Landgraf para exposição dos resultados obtidos.

Palavras-chave: Geometria, janelas, segmentos, buscas.

Sumário

1	Introdução	1
2	Definições e Primitivas	3
2.1	Pontos e segmentos	3
2.2	Comparações entre pontos	3
2.3	Posição relativa entre ponto e segmento	3
3	Consultas sobre pontos em janelas	5
3.1	Janela limitada - Caso unidimensional	5
3.1.1	Pré-processamento	5
3.1.2	Realizando a consulta	6
3.1.3	Análise	8
3.2	Janela limitada - Caso bidimensional	8
3.2.1	Pré-processamento	8
3.2.2	Realizando a consulta	9
3.2.3	Análise	11
3.3	Cascadeamento fracionário	11
3.3.1	Pré-processamento	11
3.3.2	Realizando a consulta	13
4	Conclusões	15
	Referências Bibliográficas	17

Capítulo 1

Introdução

Neste trabalho de conclusão de curso foi abordado o problema de *consultas de segmentos em janelas*, um problema de *buscas em intervalos ortogonais*, que é um dos tópicos fundamentais da área de geometria computacional.

Dado um conjunto S de segmentos no espaço (Seja no \mathbb{R} , \mathbb{R}^2 , etc.) e uma janela W de lados paralelos, queremos responder rapidamente a seguinte pergunta: *quais segmentos de S estão contidos na ou intersectam a janela W ?*

Este trabalho foi baseado em *Consultas de segmentos em janelas: algoritmos e estruturas de dados* de [Álvaro Junio \(2009\)](#), portanto seguiremos a mesma divisão do problema que foi proposta nessa dissertação: Encontrar pontos contidos em janelas e achar todos os segmentos que intersectam com um dado segmento (Horizontal ou vertical). Seguiremos também a mesma divisão de capítulos: Primeiramente apresentaremos definições e primitivas geométricas, dedicaremos um capítulo para falar de consultas de pontos em janelas, um para falar de encontrar intersecção de segmentos e finalmente um onde agregaremos esses algoritmos para resolver o problema proposto. Todo o código desenvolvido foi escrito em linguagem *python* e está disponível no [gitHub](#).

Capítulo 2

Definições e Primitivas

Explicaremos a seguir algumas das noções fundamentais que serão utilizadas ao longo do trabalho:

2.1 Pontos e segmentos

Neste trabalho trataremos basicamente com pontos e segmentos de reta no espaço (\mathbb{R} e \mathbb{R}^2). Sejam $x, y \in \mathbb{R}$ definimos um **ponto** no \mathbb{R}^2 como um par $p = (x, y)$. Um **segmento** s pode ser formalmente definido como o conjunto solução de $s = u + t * v$, $t \in [0, 1]$, u, v pontos. Seremos um pouco relaxados quanto à isso e os representaremos como um par de pontos e um reta por cima para dar destaque: $s := \overline{(x_1, y_1)(x_2, y_2)}$, onde $u = (x_1, y_1)$ e $v = (x_2, y_2)$ são pontos chamados de **pontos extremos** de s .

2.2 Comparações entre pontos

Uma outra definição que será usada copiosamente ao longo desta monografia é a relação de desigualdade associada à uma dada coordenada. Sejam u, v pontos, dizemos que $u \leq_x v$ caso $x(u) < x(v)$ ou $x(u) = x(v)$ e $y(u) \leq y(v)$ (Simetricamente definido para desigualdades em relação à coordenada y), ou seja, sempre comparamos primeiro a coordenada de maior interesse e desempatamos pela segunda coordenada nas comparações.

2.3 Posição relativa entre ponto e segmento

Usaremos também bastante a noção de posição relativa entre pontos e segmentos, isto é, dado um ponto p e um segmento s , queremos saber se p se encontra **à esquerda**, **à direita** ou **sobre** o segmento s .

Sejam $p := (x_1, y_1) \in \mathbb{R}^2$, $s := \overline{(x_2, y_2)(x_3, y_3)}$ e $d := \det \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{pmatrix}$

Dizemos que p está **à esquerda** de s caso $d > 0$, que está **sobre** s caso $d = 0$ e que está **à direita** de s caso contrário. Seguem a seguir os trechos de código que foram usados no trabalho para realizarmos essas verificações:

Algoritmo 1 Retorna **TRUE** caso p esteja à esquerda de s .

```
1 def left(p,s):
2     b = s.beg
3     c = s.end
4     if b.x == c.x and p.x == b.x: return p.y > c.y
5     if b.y == c.y and p.y == b.y: return p.x < c.x
6     return (b.x-p.x)*(c.y-p.y) - (b.y-p.y)*(c.x-p.x) > 0
```

Algoritmo 2 Retorna **TRUE** caso p esteja à direita de s .

```
1 def right(p,s):
2     b = s.beg
3     c = s.end
4     if b.x == c.x and p.x == b.x: return p.y < b.y
5     if b.y == c.y and p.y == b.y: return p.x > c.x
6     return not(left_on(p,s))
```

Algumas ressalvas sobre essas funções:

- A única diferença da função *left_on* em relação à função *left* é que ela também retorna *true* caso o ponto esteja sobre o segmento dado.
- As modificações presentes nas linhas 4 e 5 foram adicionadas apenas para resolverem os casos degenerados apresentados no capítulo x .

Capítulo 3

Consultas sobre pontos em janelas

Nesse capítulo mostraremos os algoritmos implementados para localizarmos todos os pontos numa dada janela e algumas variações desse problema. Todas as provas de corretude e de eficiência dos algoritmos expostos, tanto deste capítulo quanto dos próximos, poderão ser encontradas na dissertação de [Álvaro Junio \(2009\)](#).

3.1 Janela limitada - Caso unidimensional

Analisaremos primeiramente o problema no espaço \mathbb{R} , ou seja, nossos pontos estarão todos contidos na reta. Sejam u, v pontos na reta tais que $u \leq v$, definimos uma **janela** como sendo um *intervalo fechado* com extremos u e v .

3.1.1 Pré-processamento

Para resolvermos rapidamente sucessivas consultas sobre um dado conjunto de pontos, precisaremos armazenar esses dados em uma estrutura de dados apropriada. A estrutura que usaremos será um tipo de **árvore de busca binária balanceada** (ABBB) chamada de árvore limite, onde cada nó terá 3 campos: o ponto associado, um ponteiro para o filho esquerdo e um ponteiro para o filho direito. A seguir está o trecho de código referente à construção da árvore:

Algoritmo 3 Retorna uma raiz v de uma árvore limite 1D construída sobre um conjunto de pontos ordenados.

```
1 def buildTree(self, points):
2     v = Node(None)
3     l = points[:len(points)//2]
4     r = points[len(points)//2:]
5
6     v.point = points[len(points)//2-1]
7
8     if len(points) == 1:
9         v.l = v.r = None
10    else:
11        v.l = self.buildTree(l)
12        v.r = self.buildTree(r)
13    return v
```

3.1.2 Realizando a consulta

Seja P um conjunto de pontos e seja $W = [w_1, w_2]$ uma janela. Podemos consultar todos os pontos de $P \subset W$ da seguinte forma:

1. Construimos a ABBB sobre o conjunto P .
2. Aachamos o **ponto divisor** de P , este é o ponto que se encontra na raiz da subárvore que contém os pontos $S := (v \mid w_1 \leq v \leq w_2)$, chamaremos esse ponto de v_{div} .
3. Percorremos a subárvore esquerda de v_{div} verificando se o ponto r da raiz é tal que $w_1 \leq r$, caso seja, adicionamos todos os pontos dessa subárvore na resposta e nos movemos para a subárvore esquerda, caso contrário vamos para a subárvore direita. Ao chegar na folha apenas verificamos se $w_1 \leq r \leq w_2$ e adicionamos na resposta caso seja verdade.
4. Percorremos a subárvore direita de v_{div} de forma simétrica ao item 3.

Segue a implementação das rotinas supracitadas juntamente com suas funções auxiliares:

Algoritmo 4 Retorna *true* caso $w_1 \leq_x p \leq_x w_2$

```

1 def inRange(self, rng, p):
2     w1, w2 = rng
3     return w1 <= p and p <= w2

```

Algoritmo 5 Retorna o ponto divisor v_{div} de uma ABBB referente à uma dada janela rng .

```

1 def findDividingNode(self, rng):
2     w1, w2 = rng
3     div = self.root
4
5     while(not div.isLeaf() and (w1 > div.point or w2 <= div
6         .point)):
7         if w2 <= div.point:
8             div = div.l
9         else:
10            div = div.r
11     return div

```

Algoritmo 6 Devolve uma lista com as folhas de uma dada árvore.

```
1 def listSubTree(self):
2     l = []
3     self.findLeaves(l)
4     return l
5
6 def findLeaves(self, l):
7     if self.isLeaf():
8         l.append(self.point)
9
10    if self.l is not None: self.l.findLeaves(l)
11    if self.r is not None: self.r.findLeaves(l)
```

Algoritmo 7 Retorna uma lista com todos os pontos contidos numa dada janela *rng*.

```
1 def query(self, rng):
2     div = self.findDividingNode(rng)
3     p = []
4
5     if div.isLeaf():
6         if self.inRange(rng, div.point):
7             p.append(div.point)
8     else:
9         v = div.l
10        while(not v.isLeaf()):
11            if w1 <= v.point:
12                subtree = v.r.listSubTree()
13                p += subtree
14                v = v.l
15            else:
16                v = v.r
17
18        if self.inRange(rng, v.point):
19            p.append(v.point)
20
21        v = div.r
22
23        while(not v.isLeaf()):
24            if w2 > v.point:
25                subtree = v.l.listSubTree()
26                p += subtree
27                v = v.r
28            else:
29                v = v.l
30        if self.inRange(rng, v.point):
31            p.append(v.point)
32
33    return p
```

3.1.3 Análise

- O pré-processamento requer que seja feita uma ordenação sobre o conjunto de pontos de entrada, portanto tem complexidade $\Theta(n \log n)$.
- A árvore terá altura $\mathcal{O}(\log n)$ e visitaremos $\mathcal{O}(\log n)$ pontos em cada subárvore de v_{div} , além disso, consumiremos tempo $\mathcal{O}(k)$ para visitar os k pontos das folhas que estão contidos no intervalo e devem aparecer na resposta final. Portanto a complexidade final da consulta é da ordem $\mathcal{O}(n \log n + k)$.

3.2 Janela limitada - Caso bidimensional

Analisaremos agora o problema no espaço do \mathbb{R}^2 . Sejam $w_1 = (x_1, y_1)$ e $w_2 = (x_2, y_2)$ pontos no \mathbb{R}^2 , os segmentos de reta que formam um retângulo de lados paralelos ao eixos e que passam pelos pontos w_1 e w_2 são: $s_1 = \overline{(x_1, y_1)(x_1, y_2)}$, $s_2 = \overline{(x_1, y_2)(x_2, y_2)}$, $s_3 = \overline{(x_2, y_2)(x_2, y_1)}$ e $s_4 = \overline{(x_2, y_1)(x_1, y_1)}$, uma **janela** será definida como a intersecção desses 4 segmentos e sua região interna, porém, usaremos uma representação compacta representando a janela pelo segmento $s = \overline{w_1, w_2}$. Mostraremos primeiro o algoritmo mais simples que estende a ideia apresentada no algoritmo anterior e então mostraremos o algoritmo para consultas com janelas limitadas bidimensionais mais eficiente.

3.2.1 Pré-processamento

Precisaremos de uma estrutura de dados que consiga particionar o espaço de tal forma que consigamos saber a ordem entre os pontos em cada semiplano. Uma estrutura que nos fornece isso é a chamada **Árvore limite de 2 níveis**. A árvore limite é uma ABBB cuja ordem dos elementos é feita sobre a coordenada x e cada nó terá 4 elementos: uma raiz para uma ABBB cujos elementos são os mesmos da subárvore do nó com elementos ordenados pela coordenada y (que seria o “segundo nível” da árvore), um ponto, um ponteiro para o filho esquerdo e um ponteiro para o filho direito.

Segue o algoritmo de construção dessa árvore. Omitiremos a implementação da estrutura auxiliar *VerticalTree* cuja descrição está presente no trabalho de [Álvaro Junio \(2009\)](#), essa estrutura é uma ABBB construída sobre um *heap* e tem tempo de construção $\mathcal{O}(n)$.

Algoritmo 8 Retorna uma raiz v para uma ABBB ordenada pela coordenada x a partir de um vetor de pontos ordenados por x e um vetor de pontos ordenados por y .

```

1 def buildTree(self, vx, vy):
2     v = Node(None)
3     v.tree = VerticalTree(vy)
4     lx = vx[:len(vx)//2]
5     rx = vx[len(vx)//2:]
6     n = len(vx)
7     ly = []
8     ry = []
9
10    for i in range(n):
11        if vy[i].x < vx[n//2-1].x or (vy[i].x == vx[n
12            //2-1].x and vy[i].y <= vx[n//2-1].y):
13            ly.append(vy[i])
14        else: ry.append(vy[i])
15
16    v.point = vx[n//2-1]
17
18    if len(vx) == 1:
19        v.l = v.r = None
20    else:
21        v.l = self.buildTree(lx, ly)
22        v.r = self.buildTree(rx, ry)
23
24    return v

```

3.2.2 Realizando a consulta

Seja P um conjunto de pontos e seja $W = \overline{(x_1, y_1)(x_2, y_2)}$ uma janela. Podemos consultar todos os pontos de $P \subset W$ da seguinte forma:

1. Construimos a árvore limite sobre o conjunto P .
2. Achamos o **ponto divisor** no primeiro nível da kd-tree de forma similar ao algoritmo anterior.
3. Percorremos a subárvore esquerda de v_{div} verificando se o ponto r da raiz é tal que $w_1 \leq_x r$, caso seja, realizamos a consulta unidimensional na árvore associada ao nó. Caso contrário, caso contrário vamos para a subárvore direita. Ao chegar na folha apenas verificamos se $w_1 \leq_x r \leq_x w_2$ e adicionamos na resposta caso seja verdade.
4. Percorremos a subárvore direita de v_{div} de forma simétrica ao item 3.

Segue a implementação das rotinas supracitadas juntamente com suas funções auxiliares:

Algoritmo 9 Verifica se o ponto p está contido na janela rng .

```

1 def inRange(self, rng, p):
2     w1, w2 = rng
3     a = w1.x < p.x or (w1.x == p.x and w1.y <= p.y)
4     b = p.x < w2.x or (p.x == w2.x and p.y <= w2.y)
5     c = w1.y < p.y or (w1.y == p.y and w1.x <= p.x)
6     d = p.y < w2.y or (p.y == w2.y and p.x <= w2.x)
7     return a and b and c and d

```

Algoritmo 10 Retorna uma lista com todos os pontos contidos numa dada janela rng .

```

1 def query(self, rng):
2     p = []
3     w1, w2 = rng
4     div = self.findDividingNode(rng)
5
6     if div.isLeaf():
7         if self.inRange(rng, div.point):
8             p.append(div.point)
9     else:
10        v = div.l
11
12        while not v.isLeaf():
13            if w1.x < v.point.x or (w1.x == v.point.x and
14                w1.y <= v.point.y):
15                p += v.r.tree.oneDimQuery(rng)
16                v = v.l
17            else:
18                v = v.r
19
20        if self.inRange(rng, v.point): p.append(v.point)
21
22        v = div.r
23
24        while not v.isLeaf():
25            if w2.x > v.point.x:
26                p += v.l.tree.oneDimQuery(rng)
27                v = v.r
28            else:
29                v = v.l
30
31        if self.inRange(rng, v.point): p.append(v.point)
32
33    return p

```

3.2.3 Análise

- No pré-processamento ordenamos 2 vezes o conjunto de pontos, levando tempo $\mathcal{O}(n \log n)$. A construção em si da primeira árvore leva tempo $\mathcal{O}(n \log n)$ e para cada um dos $\mathcal{O}(\log n)$ nós dela construímos uma estrutura auxiliar consumindo tempo $\mathcal{O}(n)$. O que nos leva ao consumo total de $\mathcal{O}(n \log n)$.
- Os caminhos esquerdo e direito a partir de v_{div} têm $\mathcal{O}(\log n)$ nós, e possivelmente chamamos o algoritmo anterior para cada um deles, o que consome tempo $\mathcal{O}(\log n + k)$. O que nos leva ao consumo total de tempo de $\mathcal{O}(\log^2 n + k)$.

3.3 Cascadeamento fracionário

Apresentaremos uma estrutura chamada **árvore limite com camadas** que utilizaremos no segundo nível do algoritmo acima para conseguirmos complexidade total $\mathcal{O}(\log n + k)$, juntamente com a consulta modificada associada. A intuição dessa técnica vem da seguinte característica das estruturas que vínhamos utilizando: Sempre ao acessarmos o filho de um dado nó passamos a lidar com um subconjunto do conjunto que tínhamos na subárvore anterior e cujos elementos mantêm a mesma ordem relativa entre si.

3.3.1 Pré-processamento

O primeiro nível da árvore limite com camadas será exatamente como mostrado anteriormente, a diferença estará presente no segundo nível onde teremos uma estrutura que definimos como **árvore de camadas**. Os “nós” dessa árvore são na verdade vetores de nós auxiliares ordenados pelos pontos associados.

Seja P o conjunto de pontos associados à um dado vetor da árvore de camadas, sejam V^x e V^y vetores com os pontos de P ordenados por x e y respectivamente, particionamos V^y em 2 vetores: V_e^y e V_d^y . Essa partição é feita da seguinte forma: Seja v_{max} o maior ponto de V^x , seja $q \in V^y$, se $q \leq_x v_{max}$, $q \in V_e^y$, caso contrário $q \in V_d^y$.

Portanto, seja P o conjunto de pontos associado ao vetor, seja $p \in P$ o ponto associado ao nó do vetor V^y , e sejam V_e^y e V_d^y como definidos anteriormente, cada elemento dos nós auxiliares terão os seguintes campos: Um ponteiro para o ponto p , um ponteiro para o menor ponto q em V_e^y tal que $q \geq_y p$, um ponteiro para o menor ponto u em V_d^y tal que $u \geq_y p$, uma variável booleana que indica se o vetor ao qual o nó pertence é V_e^y ou V_d^y e finalmente um ponteiro para o próximo elemento do vetor. Esse último ponteiro foi uma adaptação ao fato da linguagem *python* não apresentar aritmética de ponteiros, que foi utilizada na descrição desse algoritmo na dissertação de [Álvaro Junio \(2009\)](#).

Algoritmo 11 Retorna uma raiz v para um vetor ordenado de nós verticais a partir de um vetor de pontos ordenados por x e um vetor de pontos ordenados por y .

```
1 def buildTree(self, vx, vy):
2     v = Node(None)
3     lx = vx[:len(vx)//2]
4     rx = vx[len(vx)//2:]
5     n = len(vx)
6
7     ly = []
8     ry = []
9
10    for i in range(n):
11        if vy[i].point.x < vx[n//2-1].x or ((vy[i].point.x
12            == vx[n//2-1].x) and vy[i].point.y <= vx[n//2-1].
13            y):
14            ly.append(LayerNode(vy[i].point))
15        else:
16            ry.append(LayerNode(vy[i].point))
17
18    v.tree = self.createPointers(vy, ly, ry)
19    v.point = vx[n//2-1]
20
21    if n == 1:
22        v.l = v.r = None
23    else:
24        for k in range(len(ly)-1): ly[k].nxt = ly[k+1]
25
26        for k in range(len(ry)-1): ry[k].nxt = ry[k+1]
27
28        v.l = self.buildTree(lx, ly)
29        v.r = self.buildTree(rx, ry)
30
31    return v
```

Algoritmo 12 Preenche os ponteiros de um vetor v de uma árvore de camadas a partir dos dois subvetores l e r .

```
1 def createPointers(self, v, l, r):
2     il = 0
3     ir = 0
4     i = 0
5     n = len(v)
6     nl = len(l)
7     nr = len(r)
8
9     if n == 1:
10        v[0].pl = v[0].pr = None
11        return v
12
13    while i < n:
14        if il < nl:
15            v[i].pl = l[il]
16            l[il].side = False
17        else:
18            v[i].pl = None
19
20        if ir < nr:
21            v[i].pr = r[ir]
22            r[ir].side = True
23        else:
24            v[i].pr = None
25
26        if il < nl and v[i].point == l[il].point:
27            il += 1
28        else:
29            ir += 1
30
31        i += 1
32
33    return v
```

3.3.2 Realizando a consulta

Capítulo 4

Conclusões

[illegible]

¹Exemplo de referência para página Web: www.vision.ime.usp.br/~jmena/stuff/tese-exemplo

Referências Bibliográficas

Álvaro Junio(2009) Álvaro Junio. Consultas de segmentos em janelas: algoritmos e estruturas de dados. Dissertação de Mestrado, Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, Brasil. Citado na pág. [1](#), [5](#), [8](#), [11](#)