Computação Gráfica

Agostinho Brito

Departamento de Engenharia da Computação e Automação
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

22 de março de 2005

O que é computação gráfica

Saída	Entrada: IMAGEM	Entrada: MODELO
IMAGEM	Processamento digital de Imagens	**Computação gráfica**
MODELO	Visão computacional	Geometria Computacional

É aplicada em:

- Interfaces de usuário;
- Traçado de gráficos (interativos);
- Automação de escritório;
- CAD;
- Simulação de sistemas;
- Animação;
- Arte e comércio; etc.

O que será estudado

- OpenGL;
- Dispositivos de exibição;
- Algoritmos de rastreamento;
- Algoritmos de preenchimento;
- Recortes;
- Transformações geométricas 2D e 3D;
- Projeções em perspectiva;
- Modelagem geométrica;
- Representação de curvas no plano e no espaço;
- Tratamento de linhas e superfícies escondidas;
- Rendering;
- Modelos de iluminação;
- Modelos de cor;
- Tratamento de sombras;
- Ray Tracing/Radiância;
- Textura;

Dispositivos Vetoriais

Foram os primeiros dispositivos gráficos de exibição. Tais dispositivos apresentavam as seguintes características:

- Uma tela de fósforo era sensibilidada por um feixe de luz;
- Linhas podiam ser traçadas de qualquer ponto para qualquer ponto na tela;
- O tempo de traçado dos desenhos dependia velocidade de comunicação entre o computador e o dispositivo gráfico e do número de objetos a serem desenhados;
- Ausência de cor;
- Traçado de objetos tridimensionais era muito custoso.

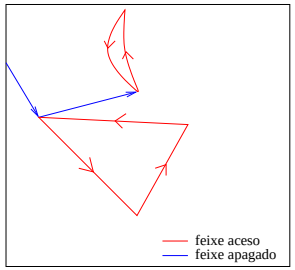


Figura: Dispositivo de exibição vetorial

Dispositivos de rastreamento

- Dispositivos raster são como matriz de células discretas que podem ser acesas ou apagadas. As linhas desenhadas aparecem serrilhadas, semelhantes a escadas. A este efeito é dado o nome de *aliasing*.
- O uso de dispositivos de rastreamento (*raster graphics*) permite que o tempo de desenho da imagem na tela seja independente do número de objetos desenhados.

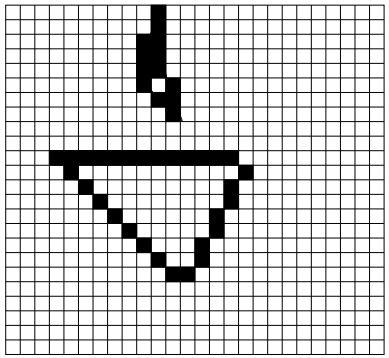


Figura: Dispositivo de exibição por rastreamento

Implementação de um dispositivo raster

A implementação de um dispositivo raster em um tubo de raios catódicos - CRT - pode ser feito com o uso de *frame buffers*, obedecendo às seguintes etapas:

- Armazenar numa matriz os pontos a serem desenhados;
- Ler a informação digital em cada elemento da matriz e converter para uma voltagem elétrica com um DAC (conversor digital-analógico).
- Sensibilizar a tela gráfica nas coordenadas correspondentes às da matriz;

Funciomanento de um CRT

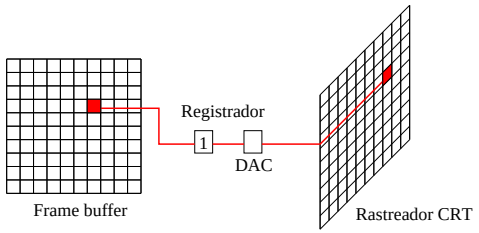


Figura: CRT monocromático (preto e branco).

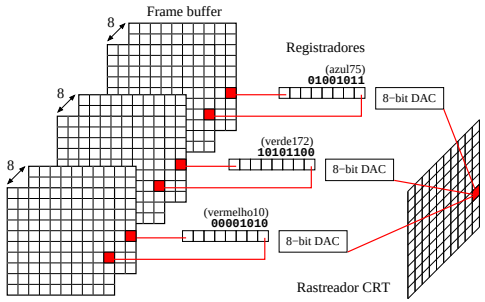


Figura: CRT colorido

Dispositivos lógicos

Locator: provê informações de coordenadas em 2 ou 3 dimensões.
Valuator: provê um valor simples, geralmente apresentado como um número real.
Button: utilizado para selecionar e ativar eventos ou procedimentos.
Pick: identifica ou seleciona objetos na tela.
Keyboard: coleção de botões.

Dispositivos físicos

Tablet: consiste em superfície plana e uma caneta, usada para apontar uma posição na superfície do *tablet*. Também chamado mesa digitalizadora.
Touch panel: semelhante ao *tablet*, atua como um locator, onde o dispositivo apontador pode ser, por exemplo, um dedo.
Mouse: é dotado de uma bola interna que atua sobre dois *valuators*, indicando posição. Botões adicionais servem para realizar *choice* ou *pick* de entidades na tela.
Joystick: semelhante ao mouse, mas com uma origem fixa.
Trackball: semelhante ao mouse. Utilizados quando o espaço físico é reduzido para a aplicação.
Outros: *Spaceball*, *data glove*, caneta ótica.

Rasterização

- Sendo a tela gráfica uma matriz de pontos, é impossível traçar uma linha direta de um ponto a outro. Sendo assim, alguns pontos da tela deverão ser selecionados para representar o objeto que se deseja desenhar.
- O processo utilizado na determinação dos pixels que melhor aproximam um determiado objeto é denominado **rasterização** (*rastering*).

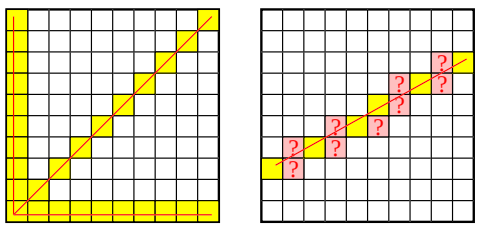


Figura: Rasterização de linhas retas.

DDA - Analizador diferencial digital

- A equação da linha direta entre dois pontos (x_1, y_1) e (x_2, y_2) é dada pela equação

$$y_{i+1} = y_i + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\Delta x, \tag{1}$$

  onde: $\Delta x = x_2 - x_1$ e $\Delta y = y_2 - y_1$.
- Para implementar um DDA simples, o maior dos valores de Δx ou Δy é escolhido como unidade de rasterização. O algoritmo DDA funciona nos quatro quadrantes.

Algoritmo DDA

if $abs(x_2 - x_1) \geq abs(y_2 - y_1)$ **then**
  Tamanho = $abs(x_2 - x_1)$
else
  Tamanho = $abs(y_2 - y_1)$
end if
{seleciona o maior dos valores entre Δx e Δy como unidade rasterização}
$\Delta x = (x_2 - x_1)/Tamanho$
$\Delta y = (y_2 - y_1)/Tamanho$
$i = 1$
while $i \leq Tamanho$ **do**
  desenhaPonto(Floor(x), Floor(y)) {**Floor**: valor arredondado de um dado número real. Inteiro(-8.6) = -9; Inteiro(-8.4) = -8}
  $x = x + \Delta x$
  $y = y + \Delta y$
  $i = i + 1$
end while

Exemplo de uso do algoritmo DDA

- Exemplo de uso do DDA para traçar uma linha do ponto (0,0) ao ponto (-5,-2). Os valores iniciais das variáveis do algoritmo são: $x_1 = 0$, $y_1 = 0$, $x_2 = -5$, $y_2 = -2$, $Tamanho = 5$, $\Delta x = -1$ e $\Delta y = -0,4$.

i	desenhaPonto	x	y
		0.0	0.0
1	(0.0,0.0)		
		-1.0	-0.4
2	(-1.0,-0.0)		
		-2.0	-0.8
3	(-2.0,-1.0)		
		-3.0	-1.2
4	(-3.0,-1.0)		
		-4.0	-1.6
5	(-4.0,-2.0)		

Tabela: Funcionamento do DDA

Limitações práticas

- Utiliza aritmética de ponto flutuante;
- Se a função *Floor* for substituída por uma função inteira verdadeira, os resultados serão diferentes;

Algoritmo de Bresenham para traçado de linhas

- Para cada ponto a ser traçado, o algoritmo verifica sua a distância entre a posição do ponto e a localização do grid. Apenas o sinal do erro é analisado. A base do algoritmo é mostrada na figura abaixo.

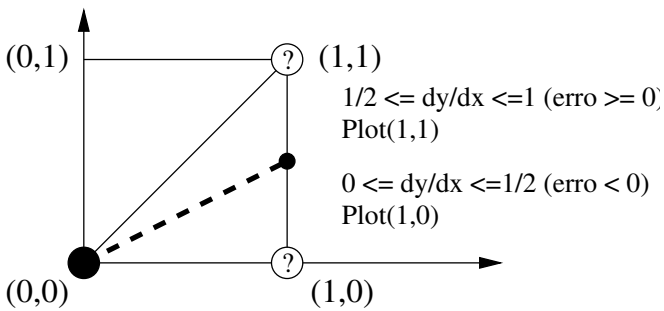


Figura: Base do algoritmo de Bresenham para linhas

Algoritmo real de Bresenham para retas

- O erro é iniciado com valor igual a $-1/2$. A cada iteração, $e = e + \Delta y/\Delta x$. Quando o erro assume um valor positivo, é necessário reinicializá-lo, subtraindo "1" do seu valor.

$x = x_1$
$y = y_1$
$\Delta x = x_2 - x_1$
$\Delta y = y_2 - y_1$
$m = \Delta y/\Delta x$
$e = m - 1/2$
for $i = 1$ to Δx **do**
  desenhaPonto(x,y)
  while $e \geq 0$ **do**
    $y = y + 1$
    $e = e - 1$
  end while
  $x = x + 1$
  $e = e + m$
end for

Algoritmo inteiro de Bresenham para retas

- O algoritmo de bresenham pode ser melhorado se a divisão por Δx for eliminada, passando a utilizar somente aritmética inteira. O novo erro será agora:

$$\overline{e} = 2e\Delta x$$

- As modificações são apresentadas no algoritmo inteiro de Bresenham para retas.

```
...
ē = 2Δy − Δx
for i = 1 to Δx do
   desenhaPonto(x,y)
   while ē ≥ 0 do
      y = y + 1
      ē = ē − 2Δx
   end while
   x = x + Δx
   ē = ē + 2Δy
end for
```

Algoritmo generalizado de Bresenham para retas

```
x = x1
y = y1
Δx = abs(x2 − x1)
Δy = abs(y2 − y1)
s1 = Sinal(x2 − x1)
s2 = Sinal(y2 − y1)
if Δy > Δx then
   Temp = Δx
   Δx = Δy
   Δy = Temp
   Troca = 1
else
   Troca = 0
end if
ē = 2Δy − Δx
for i = 1 to Δx do
   desenhaPonto(x,y)
   while ē ≥ 0 do
      if Troca = 1 then
         x = x + s1
      else
         y = y + s2
      end if
      ē = ē − 2Δx
   end while
   if Troca = 1 then
      y = y + s2
   else
      x = x + s1
   end if
   ē = ē + 2Δy
end for
```

Algoritmo de Bresenham para traçado de circunferências

- A geração dos pontos é feita apenas para o segundo octante da circunferência e replicados para os demais octantes.
- O pixel selecionado na figura foi previamente escolhido como o mais adequado. O próximo ponto a ser selecionado para o traçado será o que mais se aproximar da circunferência.

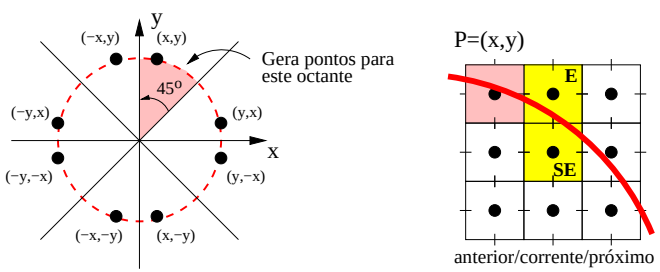


Figura: Base do algoritmo de Bresenham para circunferências

Determinação do ponto seguinte no traçado da circunferência

- Seja $F(x,y) = x^2 + y^2 - R^2$. $F(x,y)$ vale zero, positivo ou negativo, caso o ponto (x,y) esteja sobre, fora ou dentro da circunferência.
- Seja d a variável de decisão, o valor da função $F(x,y)$ no ponto central entre os dois pixels.

$$d_{velho} = F(x_p + 1, y_p - 1/2) = (x_p + 1)^2 + (y_p - 1/2)^2 - R^2$$

- Se $d_{velho} < 0$, E é escolhido. Logo:

$$\begin{aligned} d_{novo} &= F(x_p + 2, y_p - 1/2) = (x_p + 2)^2 + (y_p - 1/2)^2 - R^2 \\ d_{novo} &= d_{velho} + (2x_p + 3) \end{aligned}$$

- Se $d_{velho} \geq 0$, SE é escolhido e o novo valor de d será:

$$\begin{aligned} d_{novo} &= F(x_p + 2, y_p - 3/2) = (x_p + 2)^2 + (y_p - 3/2)^2 - R^2 \\ d_{novo} &= d_{velho} + (2x_p - 2y_p + 5) \end{aligned}$$

Algoritmo de Bresenham para circunferências

- O primeiro ponto da circunferência é $(0, R)$.
- O próximo ponto central cai em $(1, R - 1/2)$, logo $d = 5/4 - R$.
- Como d é incrementado com valores inteiros, a mudança $d \longrightarrow d = 1 - R$ não afetará no processo de desenho.
- **pontosDaCircunferência():** replica os pontos no segundo octante para os octantes restantes.

$x = 0$
$y = raio$
$d = 1 - raio$
PontosDaCircunferencia(x,y)
while $y > x$ **do**
  if d < 0 **then**
    $d = d + 2 * x + 3$
    $x = x + 1$
  else
    $d = d + 2 * (x - y) + 5$
    $x = x + 1$
    $y = y - 1$
  end if
  PontosDaCircunferencia(x,y)
end while

Algoritmos de preenchimento

- Servem para definir o conjunto de pixels que será desenhando dentro de um determinado contorno fechado. Este contorno geralmente pode ser representado na forma poligonal.
- A triagem dos pixels normalmente é feita dentro de uma região limitante, denominada *bounding box*, como mostra a figura.

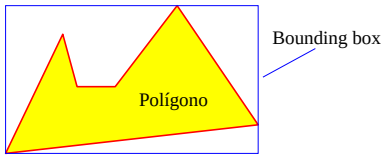


Figura: *bounding box* de um polígono

Conversão de varredura

- Exceto nas bordas, pixels adjacentes em um polígono possuem as mesmas características. Esta propriedade é chamada coerência espacial. Assim, os pixels de uma dada linha (*scan line*) variam somente nas bordas do polígono.
- O processo de determinar quais pixels serão desenhados no preenchimento é chamado conversão de varredura (*scan conversion*), mostrado na figura 9.

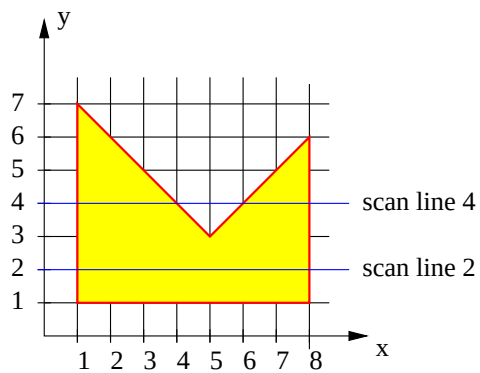


Figura: conversão de varredura para um polígono fechado

Conversão de varredura

A *scan line* 4, por exemplo, pode ser dividida nas seguintes regiões:

Intervalo	Situação
$x < 1$	fora do polígono
$1 \leq x \leq 4$	dentro do polígono
$4 < x < 6$	fora do polígono
$6 \leq x \leq 8$	dentro do polígono
$x > 8$	fora do polígono

- A determinação dos pontos de intersecção não é feita necessariamente da esquerda para a direita. Caso o polígono seja definido pela lista de vértices $P_1P_2P_3P_4P_5$, a seqüência das intersecções será 8, 6, 4, 1. É necessário então ordenar a lista obtida, ou seja, 1, 4, 6, 8.
- As intersecções podem ser consideradas em pares. Pixels contidos no intervalo formado por estes pares são desenhados na cor do polígono.

Exemplo de conversão de varredura

Considere o traçado do retângulo definido pelas coordenadas (1,1), (5,1), (5,4), (1,4). O resultado do preenchimento utilizando este algoritmo é mostrado na figura.

Ativação de pixels

Problema: a área do retângulo $A = (5-1) \times (4-1) = 12$, mas 20 pixels são ativados!

Solução: realizar o teste na *scanline* $y + 0,5$. O resultado é mostrado na figura de baixo.

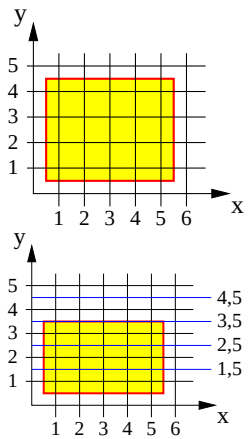


Figura: *scanlines* y e $y + 1/2$

Algoritmo da lista ordenada de arestas

Técnicas alternativas para preenchimento de polígonos utilizam a ordenação das intersecções entre as arestas do polígonos e as *scanlines* (*ordered edge list algorithm*).

Determine para cada aresta as intersecções com as $(y + 1/2)$ *scanlines*, via Bresenham.
Armazene as intersecções $(x, y + 1/2)$ em uma lista.
Ordene a lista obtida da seguinte forma: (x_1, y_1) precede (x_2, y_2) se $y_1 > y_2$ ou $y_1 = y_2$ e $x_1 \leq x_2$.
Extraia os pares de elementos da lista, (x_1, y_1) e (x_2, y_2).
Ative os pixels da *scanline* y para valores inteiros de x tais que $x_1 \leq x + 1/2 \leq x_2$.

Exemplo de algoritmo

Para o polígono da última figura, de vértices $P_1(1,1)$, $P_2(8,1)$, $P_3(8,6)$, $P_4(5,3)$, $P_5(1,7)$, os dados obtidos para cada scanline são mostrados na tabela 2.

scanline	**intersecções encontradas**
1.5	$(8, 1.5)$, $(1, 1.5)$
2.5	$(8, 2.5)$, $(1, 2.5)$
3.5	$(8, 3.5)$, $(5.5, 3.5)$, $(4.5, 3.5)$, $(1, 3.5)$
4.5	$(8, 4.5)$, $(6.5, 4.5)$, $(3.5, 4.5)$, $(1, 4.5)$
5.5	$(8, 5.5)$, $(7.5, 5.5)$, $(2.5, 5.5)$, $(1, 5.5)$
6.5	$(1.5, 6.5)$, $(1, 6.5)$
7.5	nenhuma

Tabela: determinação de de intesecções para o algoritmo *ordered edge list*

Exemplo de algoritmo

- Quando ordenadas pelo algoritmo, as intersecções com as $y + 1/2$ scanlines formarão a seguinte lista:

  $(1, 6.5), (1.5, 6.5), (1, 5.5), (2.5, 5.5),$
  $\ldots, (1, 1.5), (8, 1.5)$

- Extraindo os pares de intersecções desta lista e aplicando o processo de seleção de pontos descritos no algoritmo, será gerada a seguinte lista de pontos para ativação:

  $(1, 6), (1, 5), (2, 5), \ldots, (1, 1), (2, 1),$
  $(3, 1), (4, 1), (5, 1), (6, 1), (7, 1)$

- O resultado do processo de preenchimento é mostrado na figura.

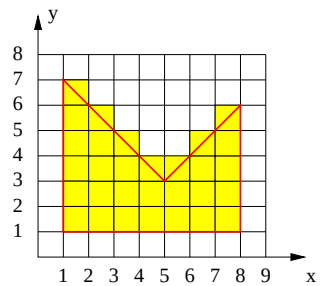


Figura: preenchimento de um polígono pelo algoritmo *ordered edge list*

Melhorando o algoritmo

O algoritmo anterior pode ser melhorado se o processo de ordenação for mais eficiente. Ao invés de ordenar toda a lista de uma só vez, para cada *scanline*, as coordenadas x da intersecção são armazenadas em uma célula (*y bucket*) correspondente à scanline, como mostrado na figura. Assim, a ordenação é feita apenas dentro de cada *scanline*.

8	x	x	x	x	x	x
7	x	x	x	x	x	x
6	1.5	1	x	x	x	x
5	8	7.5	2.5	1	x	x
4	8	6.5	3.5	1	x	x
3	8	5.5	4.5	1	x	x
2	8	1	x	x	x	x
1	8	1	x	x	x	x
0	x	x	x	x	x	x

(a)

8	x	x	x	x	x	x
7	x	x	x	x	x	x
6	1	1.5	x	x	x	x
5	1	2.5	7.5	8	x	x
4	1	3.5	6.5	8	x	x
3	1	4.5	5.5	8	x	x
2	1	8	x	x	x	x
1	1	8	x	x	x	x
0	x	x	x	x	x	x

(b)

Figura: ybuckets para as *scanlines* do polígono da figura 9.

Lista ordenada de arestas usando lista de arestas ativas

O novo algoritmo ainda necessita de muita memória alocada para armazenar as listas de intersecções. Utilizar uma lista encadeada! Uma lista de fronteiras ativas indica para o algoritmo as arestas presentes (ativas) em cada *scanline*.

{Preparação dos dados}
Determine para cada aresta as intersecções com as $(y + 1/2)$ *scanlines*, via Bresenham, as maiores *scanlines* interceptadas pela aresta.
Armazene a aresta do polígono no *y bucket* da *scanline* correspondente.
Armazene a intersecção inicial x, o número de *scanlines* interceptadas pela aresta, Δy, e o incremento de x, Δx, de *scanline* para *scanline* em uma lista encadeada.
{Conversão dos dados}
Para cada *scanline*, verifique o aparecimento de novas arestas nos *y buckets* correspondentes, e adicione a aresta à lista de arestas ativas.
Ordene as intersecções da lista de arestas ativas na ordem crescente, ou seja, x_1 precede x_2 se $x_1 \leq x_2$.
Extraia os pares de elementos da lista, (x_1, y_1) e (x_2, y_2).
Ative os pixels da *scanline* y para valores inteiros de x tais que $x_1 \leq x + 1/2 \leq x_2$.
Para cada aresta na lista de arestas ativas, decremente Δy por 1. Se $\Delta y < 0$, remova aresta dessa lista.
Calcule a nova intersecção x para cada elemento da lista de arestas ativas, $x_novo = x_velho + \Delta x$.

Exemplo do algoritmo

O resultado da aplicação deste algoritmo no preenchimento do polígono usado anteriormente é mostrado na figura abaixo.

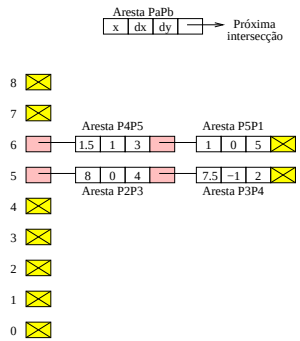


Figura: Preparação dos dados

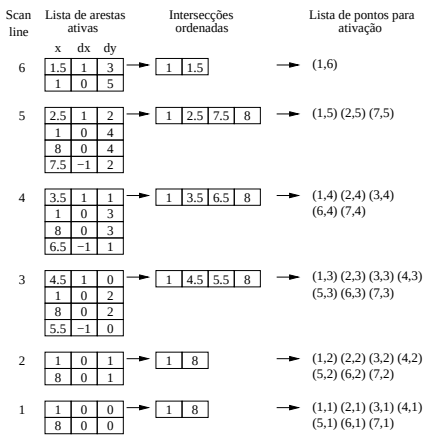


Figura: Conversão dos dados

Preenchimento baseado em semente

- Algoritmos de preenchimento baseado em semente, ou *seed fill algorithms*, assumem que pelo menos um ponto no interior do polígono é conhecido. O algoritmo tenta encontrar o restante dos pontos no interior e preenchê-los com uma determinada cor.
- Neste caso, uma informação adicional é requerida: o tipo de conectividade da região. As regiões podem ser 4-conectadas ou 8-conectadas.
- Para uma região 4-conectada, todos os pixels no seu interior podem ser alcançados com combinações dos movimentos **leste**, **oeste**, **norte** e **sul**. Para uma região 8-conectada, os pontos no interior podem ser alcançadas com combinações dos movimentos **leste**, **oeste**, **norte**, **sul**, **nordeste**, **noroeste**, **sudoeste** e **sudeste**, como mostrado na figura.
- As regiões 4-conectadas são delimitadas por fronteiras 8-conectadas. As regiões 8-conectadas são delimitadas por fronteiras 4-conectadas.

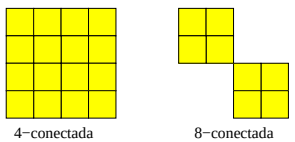


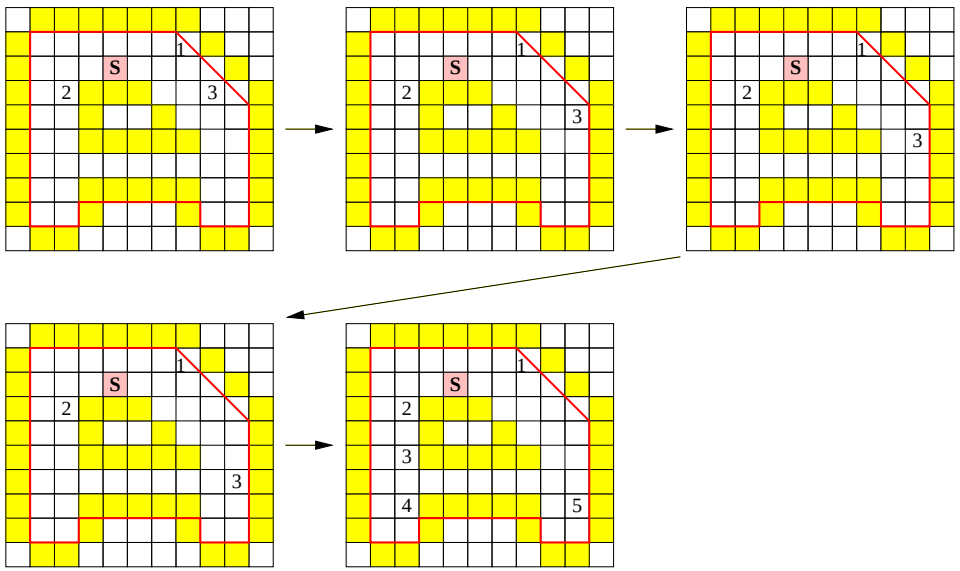
Figura: Tipos de conectividade em uma região

Algoritmo *seed fill* para regiões 4-conectadas

{Seed(x,y) é o pixel semente}
{Push/Pop: coloca/retira o pixel em uma pilha}
Pixel(x,y)= Seed(x,y)
Push Pixel(x,y)
while pilha não vazia **do**
  Pop Pixel(x,y)
  if Pixel(x,y) $\neq$ New value **then**
    Pixel(x,y) = New value
  end if
  if Pixel(x+1,y) $\neq$ New value **and** Pixel(x+1,y) $\neq$ Boundary value **then**
    Push Pixel(x+1,y)
  end if
  if Pixel(x,y+1) $\neq$ New value **and** Pixel(x,y+1) $\neq$ Boundary value **then**
    Push Pixel(x,y+1)
  end if
  if Pixel(x-1,y) $\neq$ New value **and** Pixel(x-1,y) $\neq$ Boundary value **then**
    Push Pixel(x-1,y)
  end if
  if Pixel(x,y-1) $\neq$ New value **and** Pixel(x,y-1) $\neq$ Boundary value **then**
    Push Pixel(x,y-1)
  end if
end while

Funcionamento do algoritmo *scanline seed fill*

Os números mostrados dentro dos pixels representam a posição da semente na pilha de sementes.



Algoritmo *scanline seed fill*

Embora simples, o algoritmo anterior consome muita memória com o uso de pilhas. Além disso, a pilha pode conter freqüentemente informação duplicada. O algoritmo *scanline seed fill* contorna este problema semeando apenas um pixel nos trechos de uma *scanline* a ser preenchida. Algoritmo *seed fill* para regiões 4-conectadas:

while pilha não vazia **do**
  Retire um pixel semente de um trecho de uma pilha contendo a semente.
  Preencha os trechos à esquerda e à direita da semente, até que uma fronteira seja encontrada.
  Grave as coordenadas da extrema esquerda (*Xleft*) e da extrema direita(*Xright*) do trecho preenchido.
  Na faixa $Xleft \leq x \leq Xright$, para as *scanlines* imediatamente superior e imediatamente inferior, verifique se existem apenas pixels de fronteiras ou previamente preenchidos. Se estas *scanlines* não contém apenas pixels de fronteiras ou previamente preenchidos, marque com uma semente o pixel da extrema direita de cada um dos trechos encontrados na faixa $Xleft \leq x \leq Xright$.
end while