

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação
ISSN 0103-2569

**Morcego – Um Agente para Análise e Descrição
de Estruturas Tubulares**

Rodrigo de Oliveira Plotze
Odemir Martinez Bruno

Nº 189

RELATÓRIOS TÉCNICOS



São Carlos – SP
Fev./2003

SYSNO	<u>1305367</u>
DATA	<u>1</u> / <u>1</u>
ICMC - SBAB	

Morcego – Um Agente para Análise e Descrição de Estruturas Tubulares

Rodrigo de Oliveira Plotze
Odemir Martinez Bruno

Universidade de São Paulo
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação
Departamento de Computação e Estatística
13560-670, São Carlos, SP, Brasil.
email: {roplotze, bruno}@icmc.usp.br

Resumo: Este artigo descreve um novo algoritmo para análise e descrição de estruturas tubulares baseado no conceito de agentes. O algoritmo do Agente Morcego pode ser aplicado em imagens de estruturas tubulares como vasos sanguíneos, conjunto de nervuras das folhas, ramificações dendríticas dos neurônios, dentre outras. A técnica foi inspirada no vôo do morcego dentro das cavernas, que através de seu sonar traça o caminho a ser percorrido. A partir das imagens de estruturas tubulares várias informações podem ser extraídas quanto suas medidas, espessuras, bifurcações, arranjos geométricos, além da possibilidade de comprar imagens de uma mesma estrutura.

Abstract: This article describes a new algorithm for analysis and description of tubular structures based in the concept of agents. The algorithm of the Bat Agent can be applied in images of tubular structures as sanguineous vases, set of ribbings of leaves, ramifications of the neurons, amongst others. The technique was inspired in the flight of the bat inside of the caves that through its sonar traces the way to be covered. From the images of tubular structures some information can be extracted how much its measures, thicknesses, bifurcations, geometric arrangements, beyond the possibility buying images of one same structure.

1. Introdução

As estruturas tubulares exercem papéis fundamentais em diversos ramos da biologia, caracterizando células, tecidos, órgãos, sistemas de irrigação, entre outros. Podemos citar como exemplos de estruturas tubulares as raízes das plantas, os troncos e galhos das árvores, as nervuras das folhas, os vasos sanguíneos dos seres vivos, os esqueletos dos vertebrados e as ramificações dendríticas dos neurônios. A Figura 1 apresenta alguns exemplos de estruturas tubulares. Devido à semelhança entre as estruturas tubulares, o desenvolvimento de métodos computacionais que possibilitem sua análise e descrição geométrica, pode trazer inúmeras contribuições para diferentes áreas da biologia. Com esses algoritmos podem ser extraídas informações quanto às medidas, espessuras, bifurcações, arranjos geométricos, além da possibilidade de comparar várias imagens de uma mesma estrutura tubular.

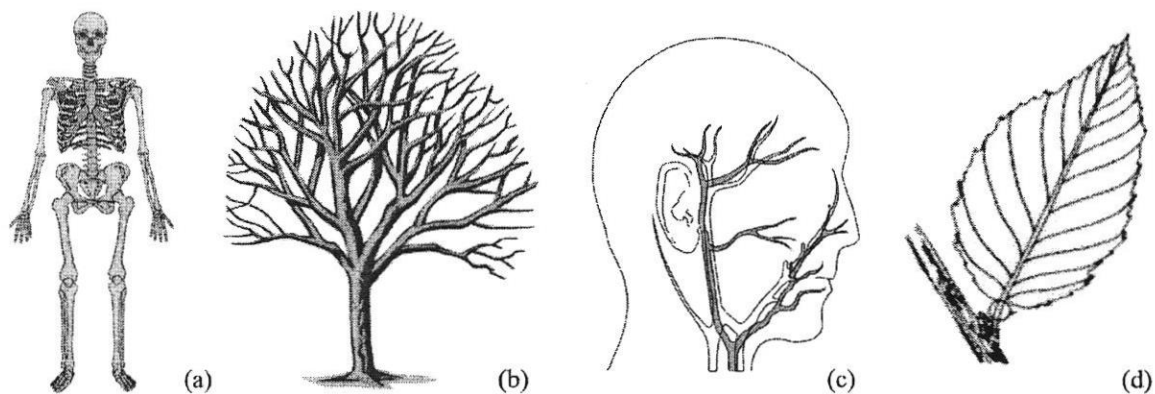


Figura 1: Exemplos de estruturas tubulares presentes na natureza.
(a) esqueletos dos vertebrados; (b) troncos e galhos das árvores;
(c) vasos sanguíneos dos seres vivos; (d) conjunto de nervuras da folhas.

Neste artigo, apresentamos o algoritmo do morcego que propõe um novo método para análise e descrição de estruturas tubulares utilizando o conceito de agentes. O método foi baseado em aprimoramentos realizados no algoritmo *maze-tracing* [KUROKAWA, 1998]. Seu funcionamento foi inspirado no voo do morcego no interior das cavernas, que através de seu sonar é capaz de “traçar” o caminho a ser percorrido e identificar obstáculos. A Figura 2 apresenta uma ilustração do sistema de navegação do morcego dentro uma caverna.

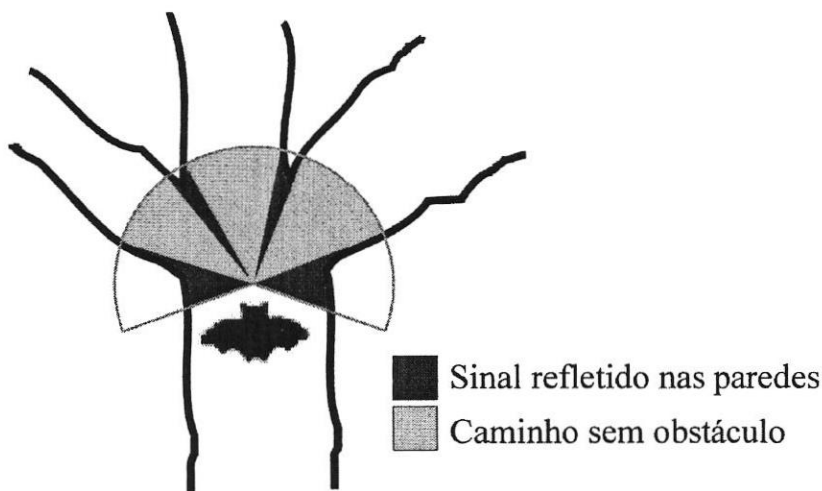


Figura 2: Navegação do morcego no interior das cavernas através do seu sistema de sonar.

Os morcegos possuem um sistema de navegação através de ultra-som (sonar) que os permite voar em cavernas com total ausência de luz. Essa técnica é denominada localização por eco. A técnica consiste no envio de um sinal sonoro para o ambiente, e na recepção deste sinal após sua colisão com anteparos.

Basicamente, o algoritmo consiste em sete passos: (1) definir um ponto inicial e uma direção, (2) informar o valor do raio R , (3) seguindo a direção informada no passo 1, distanciar R a partir do ponto de origem, (4) tentar encontrar as extremidades da estrutura, caso não seja possível o valor de R deve ser redimensionado (raio variável), (5) verificar se existe desvio, (6) obter o ponto central da reta formada pelas duas extremidades, (7) considerar o ponto central obtido anteriormente como ponto inicial e utilizar como direção inicial o vetor formado pelos pontos dos passos 1 e 6, com isso, o algoritmo volta para o passo 1.

2. O algoritmo do Morcego

De modo geral, o funcionamento do agente consiste em traçar as estruturas das imagens concatenando segmentos de reta. Inicialmente deve se introduzir o ponto P_0 dentro da imagem e definir uma direção. A partir desses dados o algoritmo selecionará o ponto P_1 , que fica no sentido da direção inicial e a uma distância r do ponto P_0 . A Figura 3a ilustra o passo inicial para determinação do sentido do algoritmo. O próximo passo é determinar a localização do ponto P_2 dentro da estrutura, para isso é traçado um arco S que se origina em P_1-CI e termina em P_1-Cr . À distância entre o ponto P_1 e a extremidade esquerda do arco (CI) é dada pelo valor do raio r , da mesma forma, à distância entre o ponto P_1 e a extremidade direita do arco (Cr) é dada pelo raio r . A Figura 3b ilustra como é traçado o arco S .

O valor do raio r é um parâmetro inicial do algoritmo, contudo, quando o algoritmo esta em execução seu valor passa a ser determinado de forma automática, variando de acordo com o diâmetro da estrutura tubular. A medida do ângulo de origem do arco S , formado pelas retas P_0-P_1 e P_1-CI e o ângulo de término do arco, correspondente pelas retas P_0-P_1 e P_1-Cr , foi determinado experimentalmente através da análise de imagens de estruturas tubulares em 70° .

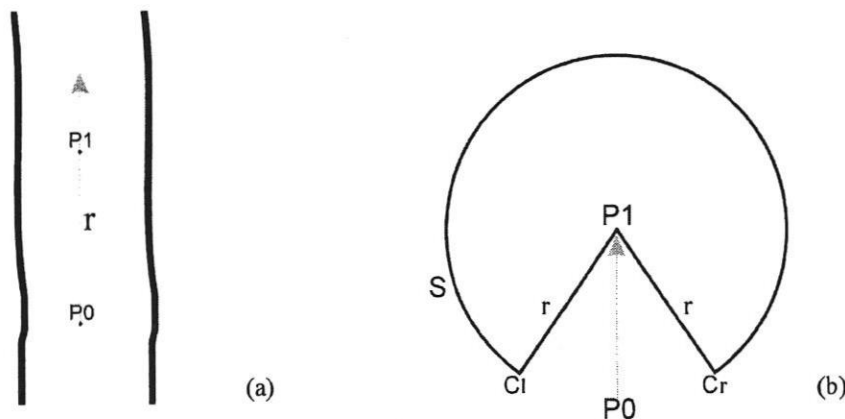


Figura 3: Passos iniciais do algoritmo do Morcego.
(a) Determinação do sentido inicial, (b) Arco S .

Utilizando o arco S, formado pelos pontos P1-Ci e P1-Cr, é possível determinar a localização das “paredes” dentro da estrutura tubular pelo princípio do sonar. Originando-se no ponto P1, são enviados vários sinais representados por B_i para cada ponto do arco S, como ilustrado na Figura 4a. Dessa forma, caso o sinal que parte do ponto P1 intercepte a borda da estrutura, ou seja, intercepte uma região com pixels que possuam valores diferentes da estrutura pesquisada, significa que foi localizada uma parede. As paredes localizadas na estrutura são representadas por segmentos de reta, o segmento L1-L2 representa o extremo esquerdo e R1-R2 o extremo direito.

Caso contrário, quando o sinal percorrer o segmento de reta compreendido entre P1 e um ponto qualquer do arco S e não interceptar nenhum pixel diferente do pixel característico da estrutura, significa que foi localizada uma continuidade da estrutura. Nesse caso, encontramos os pontos L2 e R2, que correspondem ao extremo esquerdo (L2) e direito (R2) da região de continuidade da estrutura. Uma vez encontrados os pontos L2 e R2 podemos determinar o ponto P2, que é dado pelo cálculo do ponto médio do arco L2-R2. A Figura 4b ilustra como o algoritmo detecta as “paredes” da estrutura e uma região de continuidade.

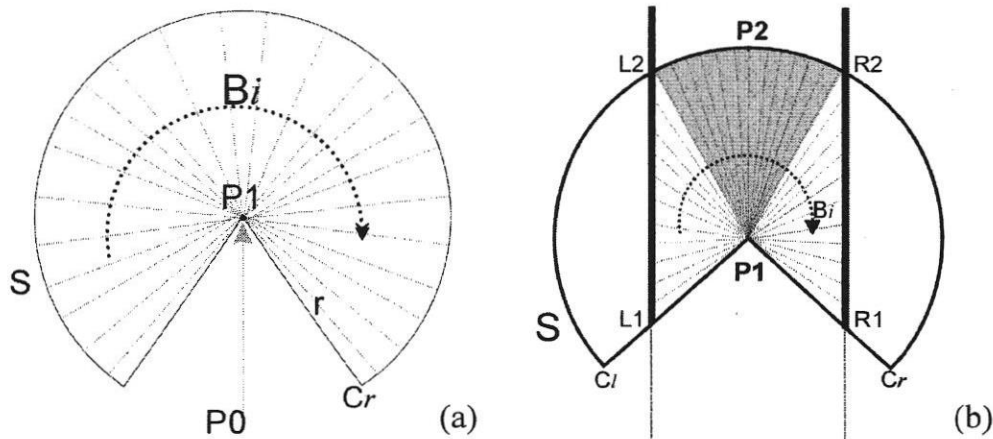


Figura 4: Propriedades do arco S. (a) Determinação do arco S através do princípio do sonar; (b) Localização de paredes e regiões de continuidade em estruturas tubulares.

A localização de desvios, ou seja, ramificações na estrutura tubular, consistem na identificação de diferentes áreas de continuidade nas quais o algoritmo pode seguir. Na Figura 5a, por exemplo, são encontrados dois pontos de continuidade, assim, quando o algoritmo se depara com essa situação ele continua seu traçado por uma direção e armazena a direção não percorrida em uma estrutura de dados do tipo pilha FILO (do inglês “*first in last out*”). Quando o algoritmo encontrar o final do caminho escolhido, ele recupera da pilha o último ponto não percorrido e inicia a navegação por esse caminho.

A Figura 5b ilustra outro exemplo de desvios, neste caso foram identificados três pontos de continuidade dos quais um deles (da esquerda ou direita) será instantaneamente percorrido pelo algoritmo e os outros dois serão armazenados na pilha.

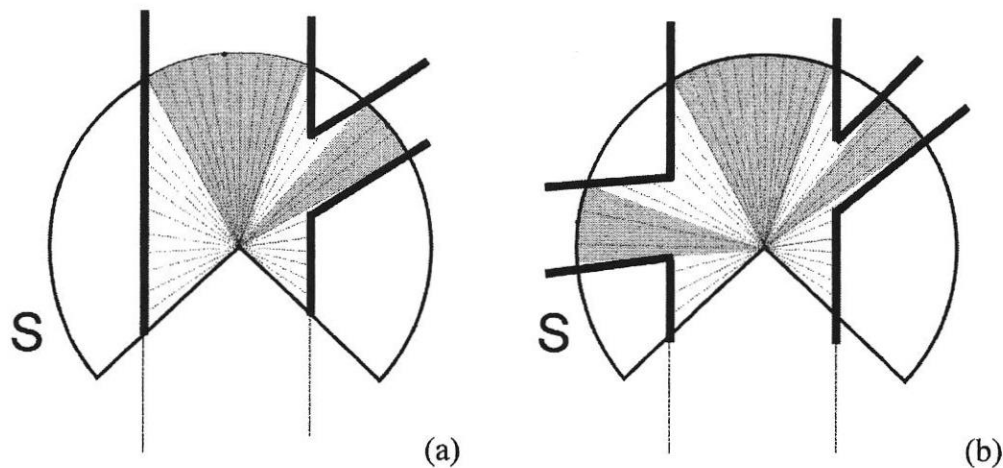


Figura 5: Localização de desvios nas estruturas tubulares.
 (a) Dois pontos de continuidade, (b) Três pontos de continuidade.

A condição para finalizar a execução do algoritmo ocorre quando, ao chegar no final de um caminho não houver mais dados (outros caminhos) na pilha. Nesse caso, todos os sinais enviados, a partir do ponto P1, ao longo do arco S, são interceptados pelas paredes da estrutura, indicando assim que não existe mais continuidade. A Figura 6 ilustra essa condição.

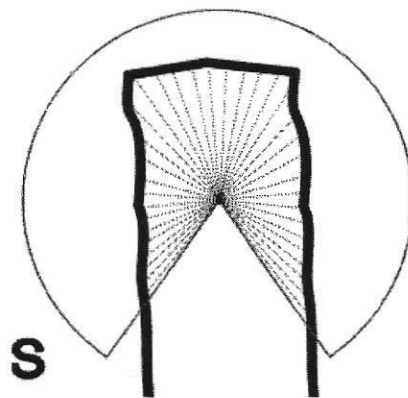


Figura 6: Condição para finalizar a execução do algoritmo.

Em algumas situações, principalmente em aplicações biológicas envolvendo vasos sanguíneos, pode ocorrer a sobreposição dos vasos, formando laços, nos quais o algoritmo ao entrar jamais terminaria sua execução. A Figura 7 ilustra a ocorrência de tais laços. Para evitar os cruzamentos e sobreposições, o algoritmo original utiliza como estratégia desconsiderar caminhos com mais de duas ramificações, como mostrado na Figura 5b. Com isso, é assumido que não existem vasos sanguíneos com mais de duas ramificações. Assim, se o caminho apresentar três ramificações, o algoritmo interpreta como sendo um ponto de cruzamento de vasos sanguíneos e prossegue pelo caminho central desconsiderando as ramificações e eliminando, desta forma, o cruzamento. Esta abordagem limita a utilização do algoritmo, uma vez que podem ocorrer situações, tanto em vasos sanguíneos como em outras aplicações, em que diversas ramificações podem ocorrer simultaneamente.

Para solucionar esse problema, Bruno e Carvalho [BRUNO & CARVALHO, 2002], inspirados por [LIU & SUN, 1993] e [LU & EIHO, 1993], realizaram uma adaptação no método do Kurokawa, fazendo com que o algoritmo marque os caminhos percorridos, criando barreiras, de forma a evitar

que o mesmo seja percorrido novamente, como é o caso dos laços. No agente morcego, adotamos com sucesso duas formas de realizar a marcação. Uma alternativa é utilizar como marcador o próprio arco S (Figura 4b). Deste modo, quando o próximo ponto é localizado, preenchemos a região formada pelo arco C1-Cr e pelas retas P1-C1 e P1-Cr, com um valor correspondente à intensidade dos pixels das paredes. Outra solução é marcar o percurso traçando uma linha entre os pontos extremos encontrados (Figura 4b – L2 –R2).

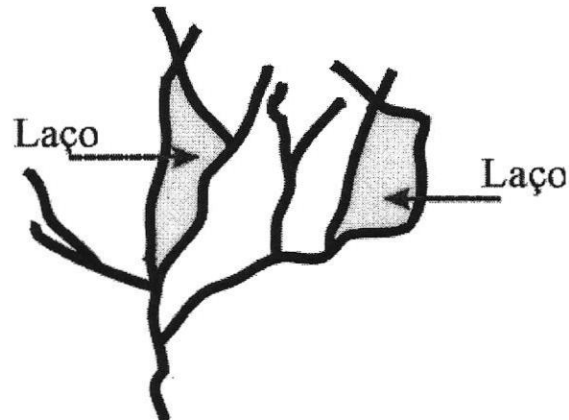


Figura 7: Exemplo de situações em que a sobreposição de estruturas pode causar laços, impedindo a finalização do algoritmo.

Um ponto crítico no funcionamento do algoritmo está relacionado ao tamanho fixo do raio, que no algoritmo *maze-tracing* [KUROKAWA, 1998] é um parâmetro inicial do algoritmo. Este problema ocorre em duas situações: (i) quando o tamanho do raio é muito maior do que o diâmetro da estrutura tubular a ser percorrida. Com isso, bifurcações e percursos sinuosos podem ser perdidos, como ilustrado na Figura 8a; (ii) quando a estrutura percorrida possui diâmetro variável, neste caso o algoritmo não é capaz de determinar corretamente a direção e os pontos de continuidade, como apresentado na Figura 8b.

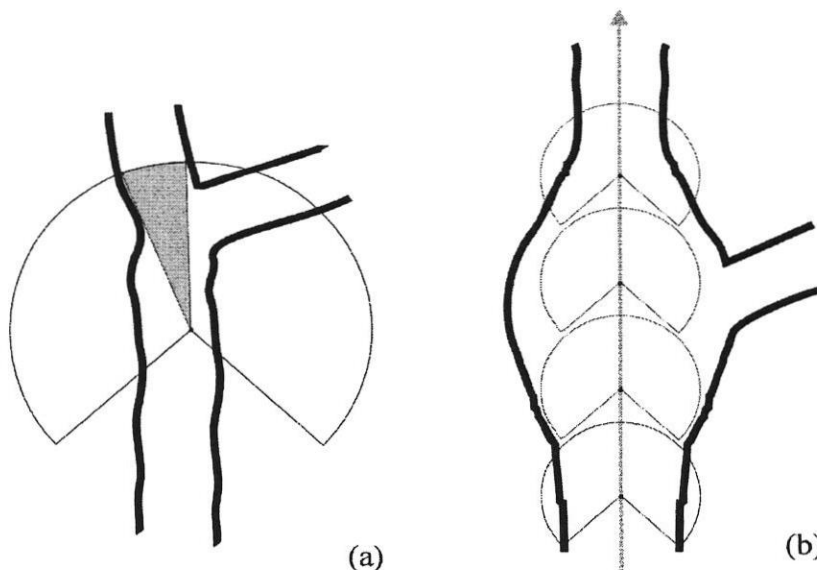


Figura 8: Problemas relacionados ao tamanho fixo do raio. (a) Raio muito maior que o diâmetro da estrutura tubular; (b) Estrutura tubular com diâmetro variável.

Para solucionar este problema é proposto que o valor do raio seja determinado de forma automática (em tempo de execução) de acordo com o diâmetro da estrutura. Com essa adaptação o raio da circunferência (arco S) se torna variável, aproximando o algoritmo do modelo natural utilizado pelo sonar dos morcegos.

O passo inicial para determinar o raio de forma automática consiste em enviar sinais partindo do ponto P em direção do ponto Cl. A distância euclidiana entre P e Cl é igual ao tamanho do raio atual. No percurso entre os pontos P e Cl os sinais podem ou não encontrar a borda da estrutura tubular, essas duas situações serão descritas separadamente.

No primeiro caso após encontrar o ponto aonde o sinal toca a borda da estrutura tubular, ponto C1, é necessário determinar a localização do ponto Cl. A posição do ponto Cl será determinada por mais 20% (determinado experimentalmente) da distância euclidiana entre P e C1. A Figura 9a ilustra como os pontos C1 e Cl são encontrados.

Na seqüência o arco S, ilustrado na Figura 4a, deverá ser gerado. Durante o processo de construção do arco S são coletadas informações relacionadas ao número de bifurcações que a estrutura tubular possui na posição atual do ponto P. Após o término desse procedimento, o diâmetro aproximado da estrutura pode ser determinado calculando a distância euclidiana entre os pontos C1 e C2, como ilustrado na Figura 9b.

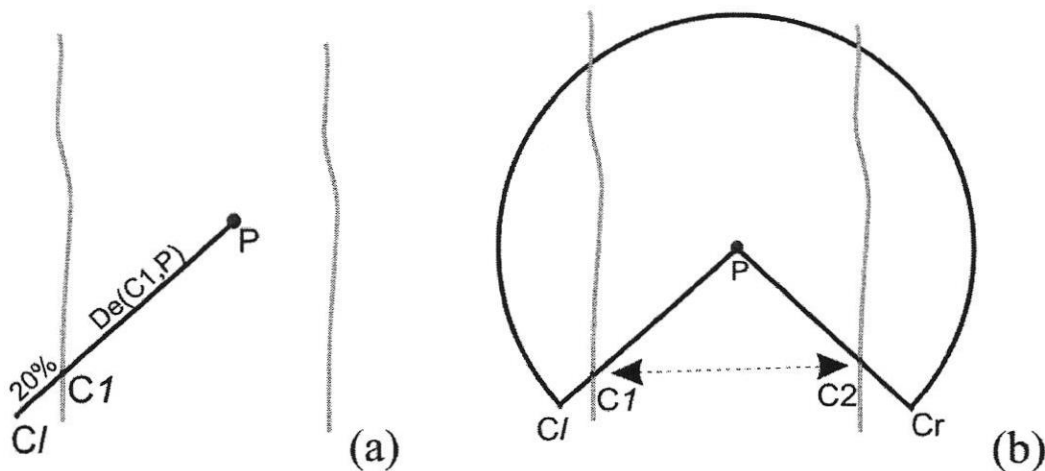


Figura 9: (a) Determinação dos pontos C1 e Cl na estrutura tubular; (b) Cálculo do diâmetro aproximado da estrutura através da distância euclidiana entre os pontos C1 e C2.

O número de bifurcações da estrutura tubular é utilizado para determinar o coeficiente k na equação 1. Seu valor é empregado como fator de correção para estabelecer o raio na próxima iteração do algoritmo dentro da estrutura.

De forma geral, o coeficiente k pode assumir três valores: (a) 0.0 - quando o ponto P é um ponto terminal da estrutura tubular, Figura 10a; (b) 1.0 - quando não há bifurcações na estrutura, Figura 10b ou (c) 0.8 - quando a estrutura tubular analisada apresenta bifurcações, Figura 10c. Os valores assumidos pelo coeficiente k, de acordo com a forma atual da estrutura tubular no ponto P, são ilustrados na Figura 10.

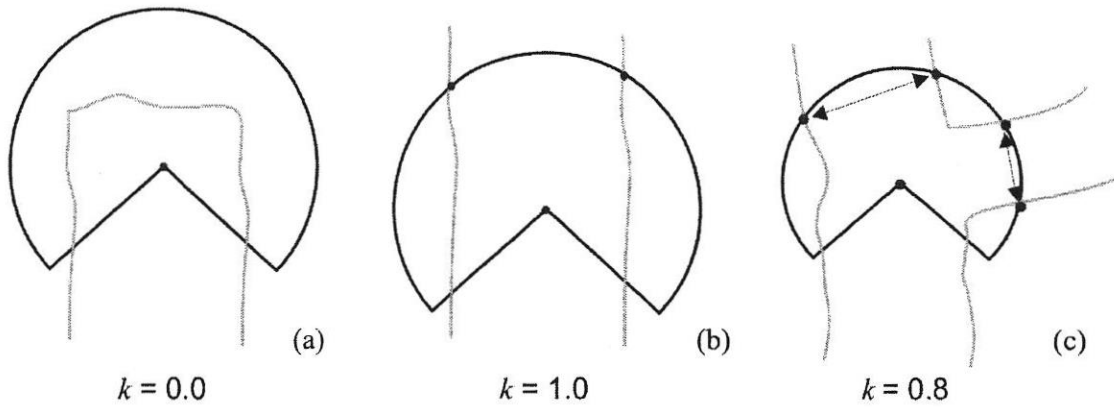


Figura 10: Valores do coeficiente k . (a) Ponto terminal da estrutura tubular; (b) Estrutura sem bifurcações; (c) Estrutura tubular com bifurcações.

Dessa forma, o raio da circunferência (arco S) é determinado substituindo os valores encontrados na equação 1. Os valores X_0 e Y_0 representam a coordenada do ponto C_1 e os valores X_1 e Y_1 corresponde à coordenada do ponto C_2 .

$$\mathfrak{R} = \left(\sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2} \right) \times K \quad (1)$$

O segundo caso ocorre quando os sinais enviados a partir do ponto P em direção do ponto C_1 , não encontram a borda da estrutura tubular. Nessa situação a distância euclidiana entre o ponto P e C_1 é igual ao valor do raio atual. O problema é ilustrado na Figura 11a.

Uma tentativa para solucionar o problema é deslocar o ponto C_1 em direção ao ponto C_r cerca de 20° , como ilustrado na Figura 11b. Caso esse deslocamento seja bem sucedido, ou seja, encontre a borda da estrutura, o ponto C_1 pode ser determinado. Porém para isso, devemos voltar para o ângulo original que fica a menos 20° da posição atual e dessa forma podemos marcar o ponto C_1 . A partir daí a posição do ponto C_1 será determinada por mais 20% da distância euclidiana entre P e C_1 . Na seqüência o arco S deve ser calculado como foi descrito anteriormente.

Caso a tentativa de deslocar o ponto C_1 em direção ao ponto C_r não seja bem sucedida, devemos voltar para o ângulo original (menos 20°). O próximo passo consiste em aumentar o valor do raio atual em cerca de 30% do seu valor atual e com isso voltamos para o início do problema.

Novamente são enviados sinais partindo do ponto P em direção ao ponto C_1 , contudo a distância euclidiana entre os pontos P e C_1 agora é 30% maior do que na tentativa anterior.

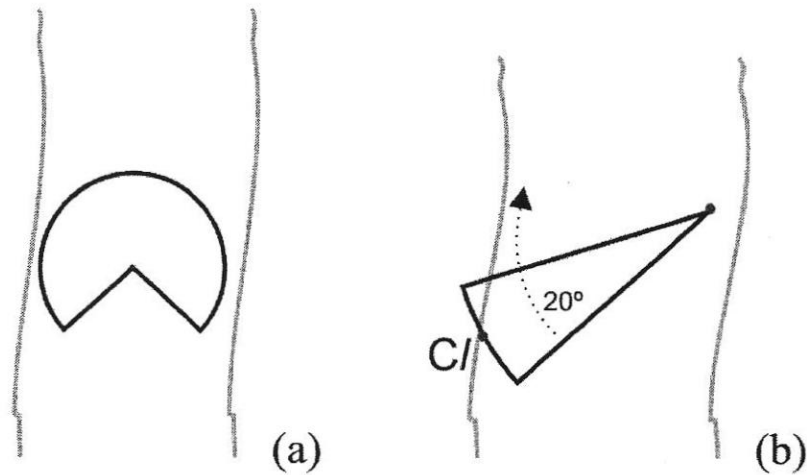


Figura 11: Resolução do problema encontrado quando a circunferência não toca a estrutura. (a) Arco S não encontra a borda da estrutura tubular; (b) Deslocamento do ponto C/ em direção a Cr na tentativa de encontrar a borda da estrutura.

Outro problema identificado no algoritmo é a representação não centralizada das estruturas tubulares analisadas. Com a solução desse problema, o algoritmo do Morcego pode ser encarado como um tipo de algoritmo de esqueletização/afinamento, uma vez que após o processamento do algoritmo pela estrutura tubular temos como resultado o esqueleto da estrutura. A Figura 12 apresenta este problema. Atualmente estamos trabalhando para tentar solucionar essa deficiência do algoritmo.

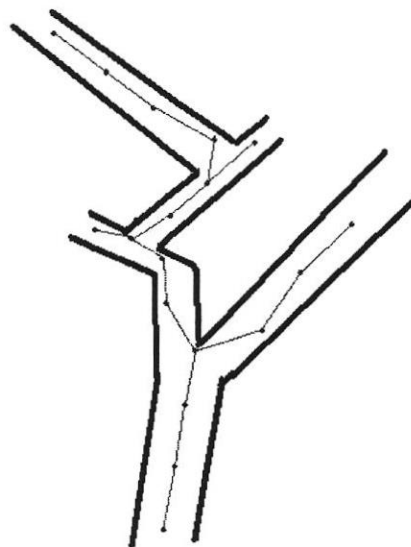


Figura 12: Diagrama apresentando o traçado do método em uma estrutura tubular. Note que o mesmo não corresponde ao centro local da estrutura.

3. Resultados

Com as novas adaptações propostas, o algoritmo analisou de forma correta as estruturas de tubulares de diâmetro irregular. A Figura 13a apresenta uma imagem analisada sem as novas adaptações, onde podemos notar a ineficiência do algoritmo. Por outro lado, a Figura 13b apresenta

uma imagem traçada pelo algoritmo com as novas adaptações. Neste caso podemos notar o correto funcionamento do algoritmo na análise de estruturas tubulares com diâmetro irregular.

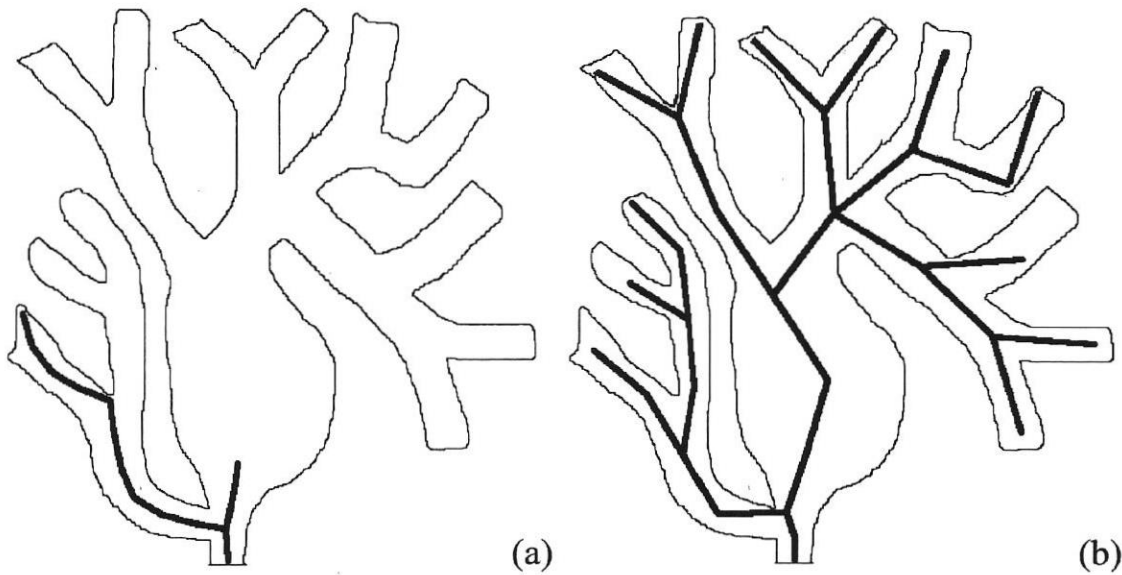


Figura 13: Imagem de uma estrutura tubular analisada pelo algoritmo. (a) Imagem analisada sem a adaptação do raio automático; (b) Imagem analisada com determinação automática do raio.

Um conjunto de imagens de estruturas tubulares foi analisado pelo algoritmo do Agente Morcego para validar a eficiência das novas adaptações. O resultado de algumas dessas imagens pode ser visto na Figura 14a e na Figura 14b, mostrado a eficiência do algoritmo.

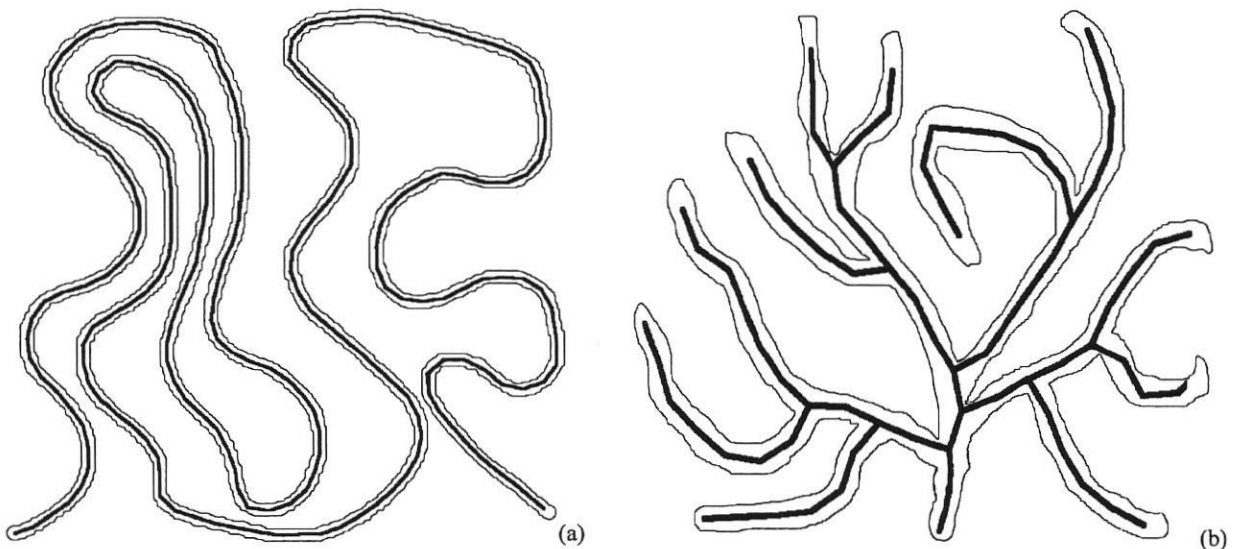


Figura 14: Imagens de estruturas tubulares. (a) Estrutura tubular com caminhos sinuosos; (b) Estrutura tubular com várias ramificações e diâmetro irregular.

4. Considerações Finais

Um novo método para análise e descrição de estruturas tubulares foi apresentado. Baseado no conceito de agentes, o novo algoritmo é capaz de navegar por imagens de estruturas tubulares como vasos sanguíneos responsáveis pela irrigação da retina, conjunto de nervuras das folhas, etc.

A partir dessas imagens, várias informações podem ser extraídas das estruturas tubulares, quanto suas medidas, espessuras, bifurcações, dentro outras, e com isso trazer inúmeras contribuições para diferentes áreas da biologia.

Referências Bibliográficas:

- BRUNO, O. M. & CARVALHO, L. A. V. Implementação, avaliação e adaptação do método Maze-tracing para descrição de estruturas tubulares. II Workshop de Informática Aplicada à Saúde. Itajaí, 2002.
- KUROKAWA, T., *et al.* Maze-tracing algorithm applied to eye-fundus blood vessels. Electronic Letters, v.34, n.10, p.976-977. 1998.
- LIU, I. & SUN, Y. Recursive tracking of vascular networks in angiograms based on the detection-deletion scheme. IEEE Transactions on Medical Imaging, v.12, n.2, p.334-341. 1993.
- LU, S. & EIHO, S. Automatic detection of the coronary arterial contours with sub-branches from an x-ray angiogram. Proc. Conf. Computers in Cardiology, p.575-578. 1993.