Capítulo 9

Resultados Experimentais

Neste capítulo apresentamos resultados experimentais para imagens 2D obtidos utizando-se o Dual-T-Snakes juntamente com Programação Dinâmica (Viterbi), bem como com o método de inicialização do Capítulo 8. Os exemplos apresentados são constituídos basicamente por imagens sintéticas e imagens médicas.

Na discussão que segue procuramos inicialmente demonstrar a viabilidade e eficiência do Dual-T-Snakes, tanto para evitar mínimos locais quanto no que diz respeito às suas habilidades topológicas. Neste sentido, um ponto crítico é a escolha dos parâmetros das forças do modelo 7.1, e como este se comporta quando aumentamos o ruído da imagem ou mudamos a resolução da triangulação.

O desenvolvimento de procedimentos sistemáticos para a escolha de parâmetros é um campo ainda aberto no contexto de modelos deformáveis em geral, e snakes em particular, como ressaltado em (R. Fisker, 1998). Assim, nossa política para a escolha de parâmetros é empírica, baseada em tentativa e erro.

Esta dificuldade na "calibração" do método de snakes exige que os valores destes coeficientes tenham alguma "estabilidade" com relação a fatores tais como aumento de ruído na imagem e presença de artefatos. Este ponto é crucial para o Dual-T-Snakes uma vez que temos potencialmente duas snakes para calibrar.

Assim, uma vez determinado um conjunto de parâmetros eficiente para uma dada imagem, a metodologia seguida nesta apresentação será analisar o comportamento do modelo quando alteramos características da imagem tais como ruído e artefatos no background ou mudamos a resolução da malha.

Neste sentido, o primeiro ponto a ser destacado são as conseqüências da definição para força normal dada pela equação 7.3. Em imagens com ruídos, esta política melhora a estabilidade do algoritmo e conseqüentemente sua performance. Contudo, analogamente ao caso do Balloon (seção 3.4), a snake continua sensível com relação aos mínimos locais da energia de imagem; um problema que o Dual-T-Snakes tem recursos para resolver.

O limiar usado para a intensidade de imagem pode deixar "artefatos" no background ou mesmo eliminar partes da borda introduzindo subjetividade na mesma.

É interessante portanto analisar o comportamento do Dual-T-Snakes com relação a artefatos e bordas subjetivas.

Comparamos os resultados obtidos com aqueles usando o modelo das T-Snakes, particularmente com relação aos mínimos locais. Esta comparação se faz pertinente para mostrar como a metodologia dual acrescenta robustez à T-Snake sem limitar suas habilidades topológicas.

Os resultados obtidos são avaliados mediante comparação visual.

Nos casos estudados, indicamos os valores do parâmetros e o número de interações, possibilitando assim uma análise mais completa.

O resultados obtidos com o Viterbi (seção 5.2), os quais fornecem a borda desejada, são mostrados no final de cada seção.

Os resultados da seção 9.2.1 a seguir ilustram como o método da seção 8.3 pode ser usado para inicializar automaticamente o Dual-T-Snakes. As seções 9.2.3, 9.2.4 e 9.2.6 mostram resultados deste mesmo método para imagens de células e imagens extraídas do Projeto Homem Visível. As demais seções são dedicadas exclusivamente ao Dual-T-Snakes/Viterbi

Na apresentação abaixo entendemos por uma *interação* a uma execução de algum dos loops do fluxograma da Figura 7.13. De maneira equivalente, diremos que cada interação corresponde a um *instante de tempo* t da evolução da snake. Durante toda a discussão, chamamos *Snake* 0 a snake externa de um dual snakes e *Snake* i, $i = 1, 2, ..$ as internas.

9.1 Imagens Sintéticas

Nesta seção, os testes feitos têm a finalidade principal de demonstrar o comportamento do Dual-T-Snakes e do Viterbi com relação a ruídos, artefatos no background e mudança na resolução da malha.

Iniciamos com uma imagem com um único objeto imerso em um meio ruidoso. Analisamos o comportamento do Dual-T-Snakes para as duas definições da força normal (equações (7.3) e (5.54)).

Em seguida, analisaremos o comportamento do modelo (e dos parâmetros) quando aumentamos o ruído . Posteriormente, a resolução da malha é alterada.

Finalmente, usamos imagens com vários objetos, quando então as habilidades topológicas do método são demonstradas.

9.1.1 Circunferência em Ruído

A imagem a seguir mostra uma circunferência imersa em um meio ruidoso. Embora a forma geométrica seja simples, este exemplo caracteriza uma típica situação onde o Dual-T-Snakes mostra sua potencialidade, uma vez que o interior da circunferência e seu exterior oferecem dificuldades para o movimento da snake.

Caso contrário, em imagens onde o background ou o interior do objeto são simples (pouco ruído e poucos artefatos) a possibilidade mais direta seria usar uma única snake evoluíndo na região que oferece menor dificuldade ao seu movimento.

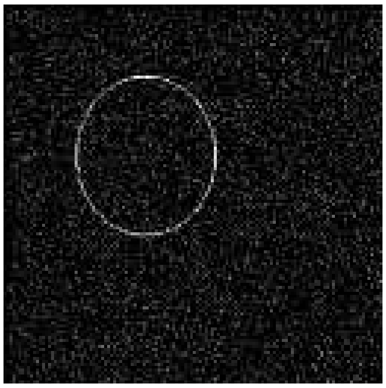


Figura 9.1: Círcunferência em meio com Ruído.

O imagem tem resolução (128×128) e a inicialização do Dual-T-Snakes neste caso foi feita usando-se uma malha triangular com resolução (3×3). A Figura 9.2 mostra as snakes no instante inicial e a malha em questão.

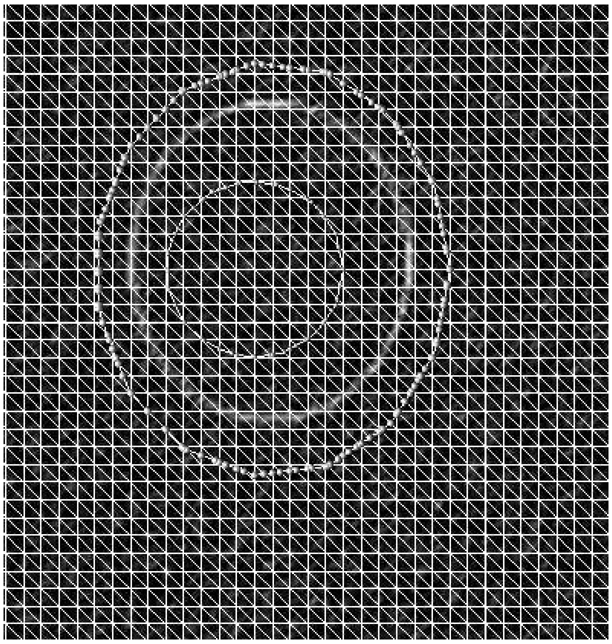


Figura 9.2: Inicialização do Dual-T-Snakes.

Os valores dos parâmetros usados no modelo 7.1 são os seguintes: $k = 200.0$, $\lambda = 50.1$, $b = 50.0$, *ponto de congelamento*$= 5$.

A imagem tem ruído aproximadamente gaussiano, com média 20.0. Assim, assumimos um limiar $T = 20.0$ na equação 7.3 e variamos este limiar quando necessitamos retirar uma snake de um mínimo local. O intervalo de variação depende da variância correspondente. No caso, usamos um $T + \Delta T \leq 30.0$.

A Figura 9.3 mostra posições intermediárias das snakes.

A solução obtida pelo Dual-T-Snakes está na Figura 9.4.

O número de interações para a snake interna foi igual a 22 enquanto que para a externa foi 14. Pela distância máxima entre a snake externa e a borda observada na Figura 9.2 vemos que, em média, temos que esta snake avança 9/14 pixels a cada interação, o que é considerado aceitável.

A Figura 9.5 mostra o exemplo acima usando a definição da normal usada originalmente nas T-Snakes (equação (5.54)). O número de interações aumentou para 26 no caso da snake interna mantendo-se para a externa. Apesar da mudança de performance ser pouco significativa neste caso, podemos observar que o movimento no caso anterior se faz de forma mais suave. Na próxima seção veremos um exemplo bem mais crítico deste comportamento.

É importante observar o que aconteceria caso tivéssemos apenas uma T-Snake. A Figura 9.5.c mostra a T-Snake externa congelada. A aplicação de estatísticas para retirar a snake da posição de congelamento (equação (5.55)) poderia ser útil. Contudo, como saber automaticamente se a T-Snake congelada está ou não sobre a borda desejada?

Na metodologia do Dual-T-Snakes, o algoritmo identifica primeiramente que o critério de proximidade da seção 6.1 não está satisfeito. Isto é um indicativo de que alguma das snakes não está sobre a borda desejada. A idéia agora, é que a snake com energia maior (equações (6.1)-(6.2)) esteja mais longe da borda, e portanto, deverá ser evoluída, caso sua função de afinidade não seja nula.

Na Figura 9.6 usamos a mesma imagem acima, contudo diminuímos a resolução da malha para (5×5). Neste caso, o ponto de congelamento precisa ser alterado uma vez que a dimensão das células aumentou. Em geral, escolhemos um valor da ordem da dimensão da diagonal das células (10, no caso).

De acordo com a discução do Capítulo 7, a mudança na resolução da malha altera as forças internas. De fato, a tendência é aumentar a força de rigidez uma vez que a distâcia entre os snaxel aumenta em média. Uma vez que dobramos a dimensão da célula, é razoável usar a proporção entre as dimensões das células como diretriz para redefinir a elasticidade. Assim, usamos $b = 25.0$ neste caso.

Todos os outros parâmetros foram mantidos com os valores especificados na Tabela 9.1. As Figuras 9.6.(a)-(d) mostram posições intermediárias das snakes. A solução do Dual-T-Snakes está na Figura 9.6.d. O número de interações correspondente está na Tabela 9.2. O resultado é satisfatório mais uma vez.

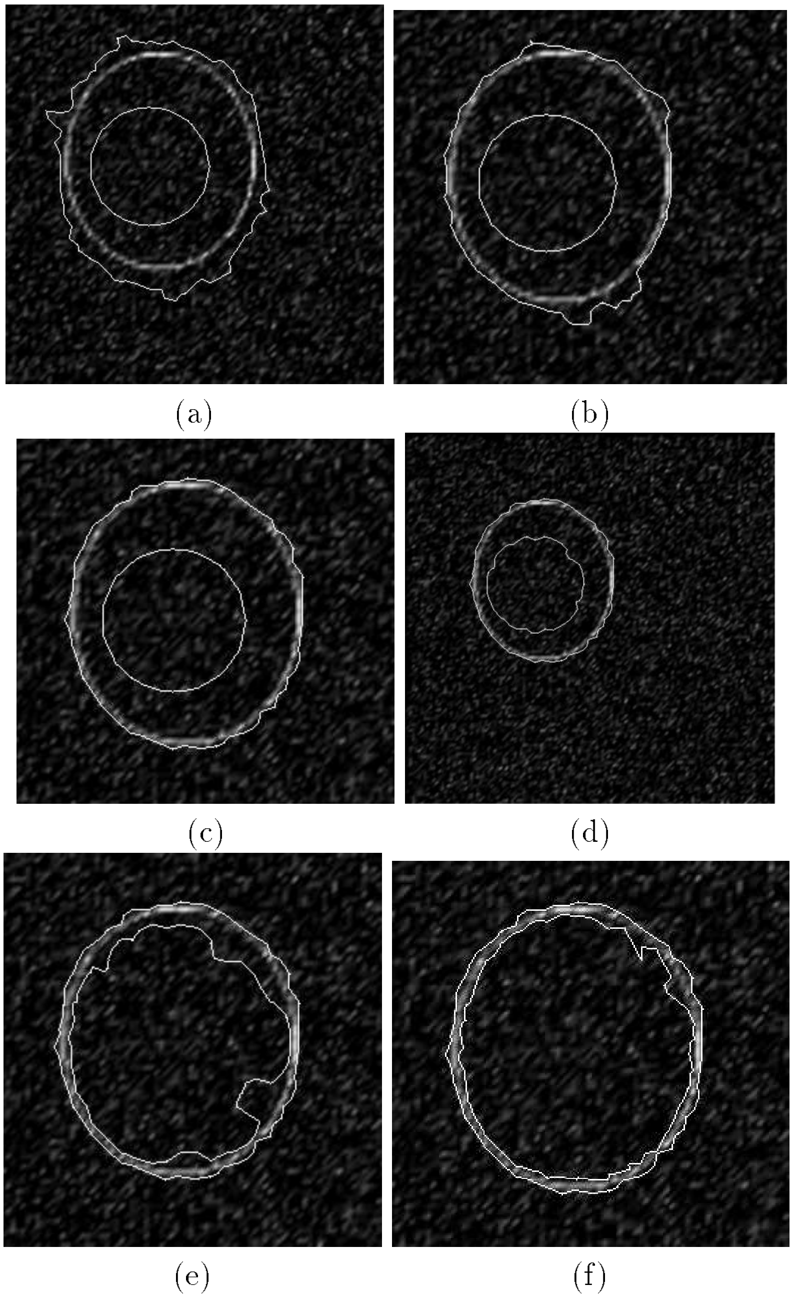


Figura 9.3: Evolução do Dual-T-Snakes para a Figura 9.2: (a)Snake externa antes do ponto de congelamento. (b)Mínimo local da snake externa. (c)Snake externa congelada novamente. (d)Snake interna inicia movimento. (e)-(f)Posições intermediárias da snake interna.

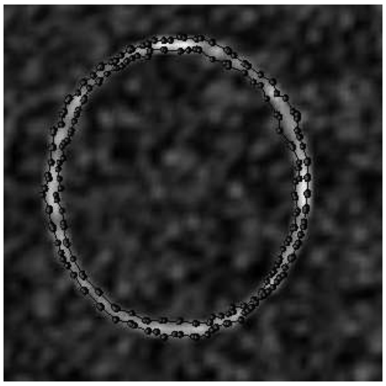


Figura 9.4: Solução do Dual-T-Snakes correspondente a Figura 9.2.

Assim como na Figura 9.4, a solução final tem boa suavidade. Número de interações neste caso foi 21 para a externa e 39 para a interna. De maneira geral, a performance deste caso, quando comparado com o inicial (Figura 9.2) não teve mudanção significativa, como pode ser observado pelas Tabelas 9.1-9.2 que resumem as estatícas desta seção.

Imagem	k	λ	b	malha	P. Congelamento
Figura 9.3	200.0	50.1	50.0	3×3	5
Figura 9.5	200.0	50.1	50.0	3×3	5
Figura 9.6	200.0	50.1	25.0	5×5	10

Tabela 9.1: Parâmetros usados nos testes desta seção para o Dual-T-Snakes.

As Figuras 9.7 mostram as soluções obtidas pelo Viterbi para os exemplos desta seção. Os parâmetros usados nesta fase foram os seguintes: $\alpha = 1200.0, \beta = 0.5$ and $\lambda = 140.0$.

9.1.2 Variando Ruído

Nos exemplos que seguem partimos da imagem inicial na Figura 9.8 e variamos o ruído como indicado na Tabela 9.3. A resolução usada é sempre (5×5) nos exemplos correspondentes. Os parâmetros do Dual-T-Snakes estão também listados nesta tabela.

A Tabela 9.4 mostra o número de interações de cada snake com relação aos loops do fluxograma da Figura 7.13.

Consideremos o pior caso, Tabela 9.4.d. Pela Figura 9.8 observamos que distância máxima entre a snake interna (Snake 1) e a borda procurada é da ordem de 45 pixels. Assim, teríamos nestas regiões uma velocidade média de 45/149 pixels por interação.

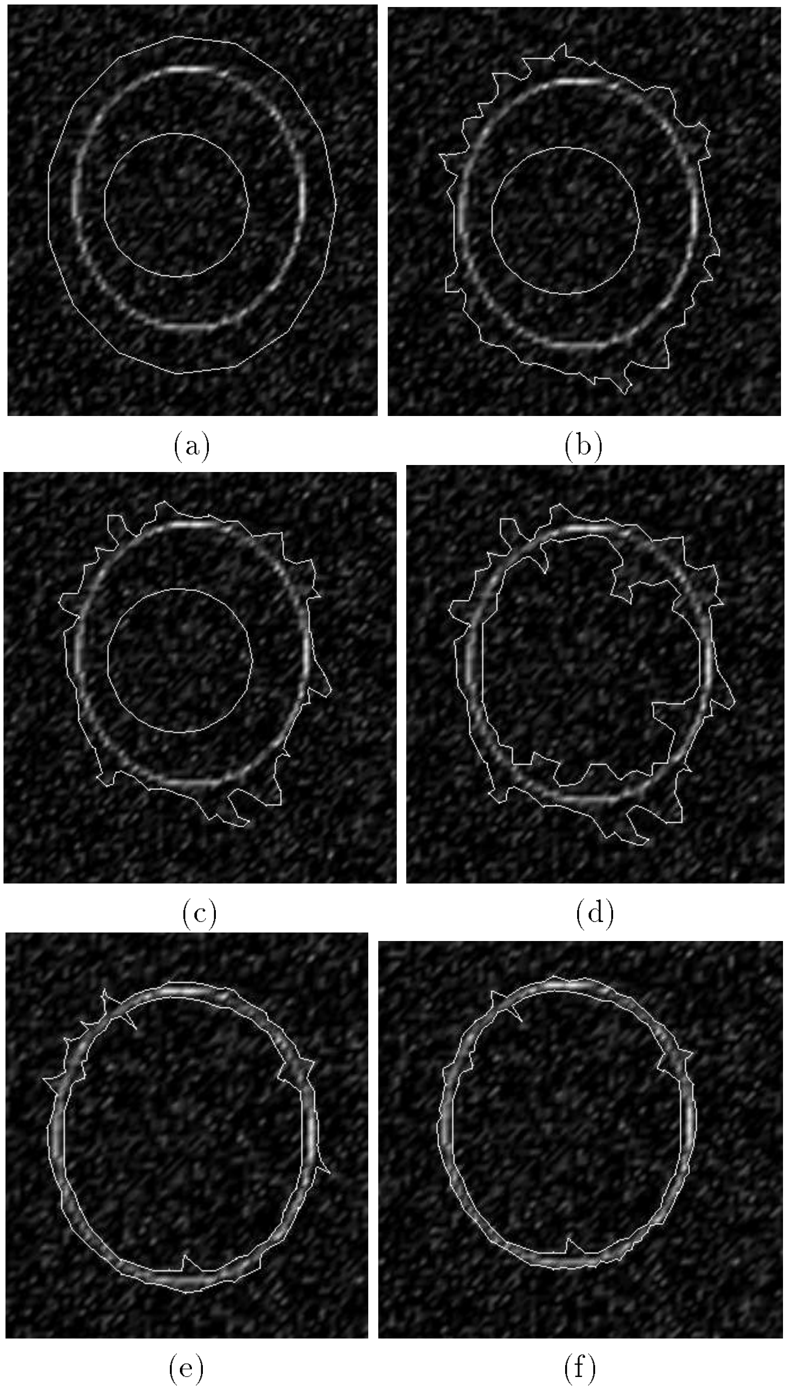
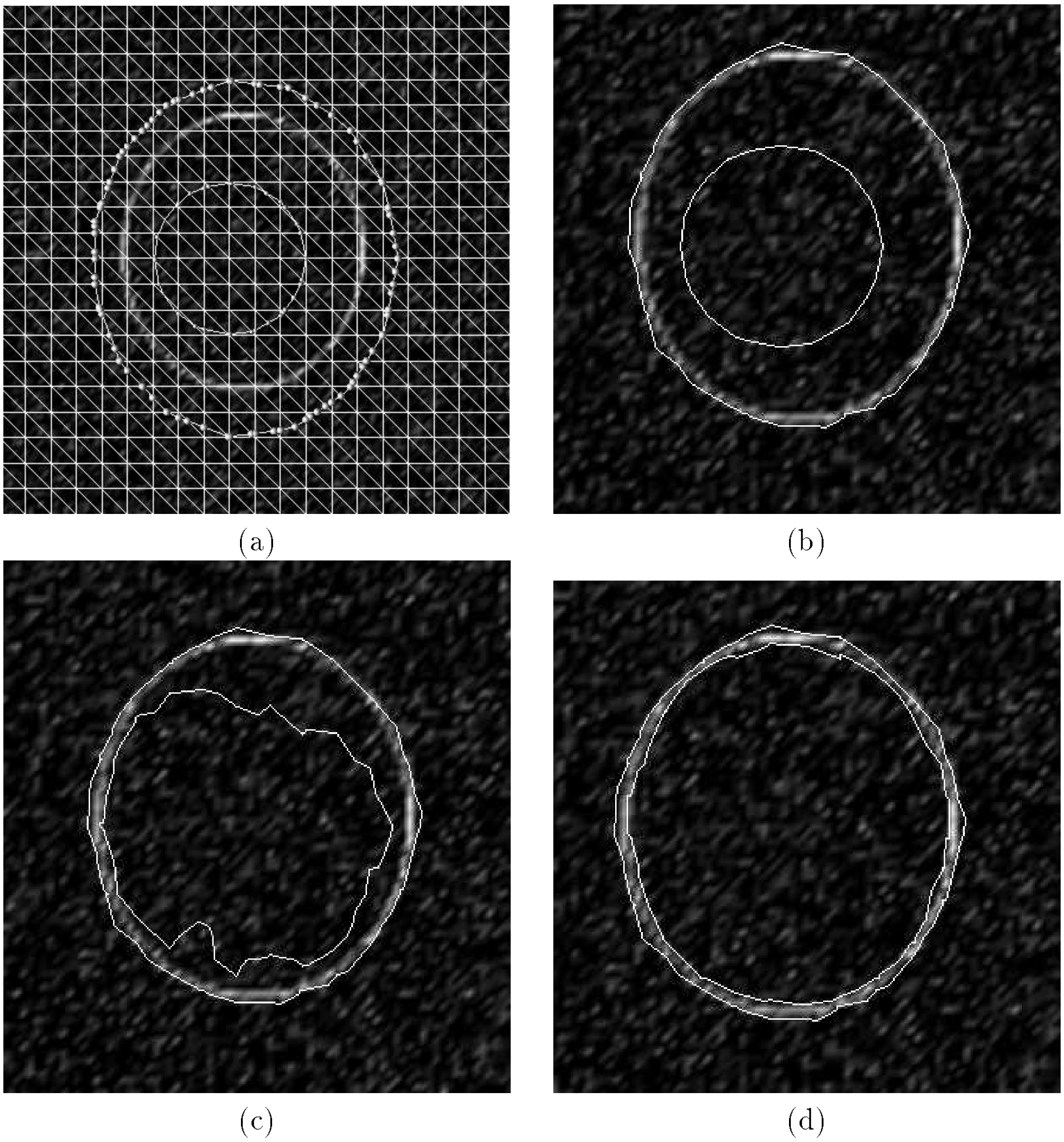
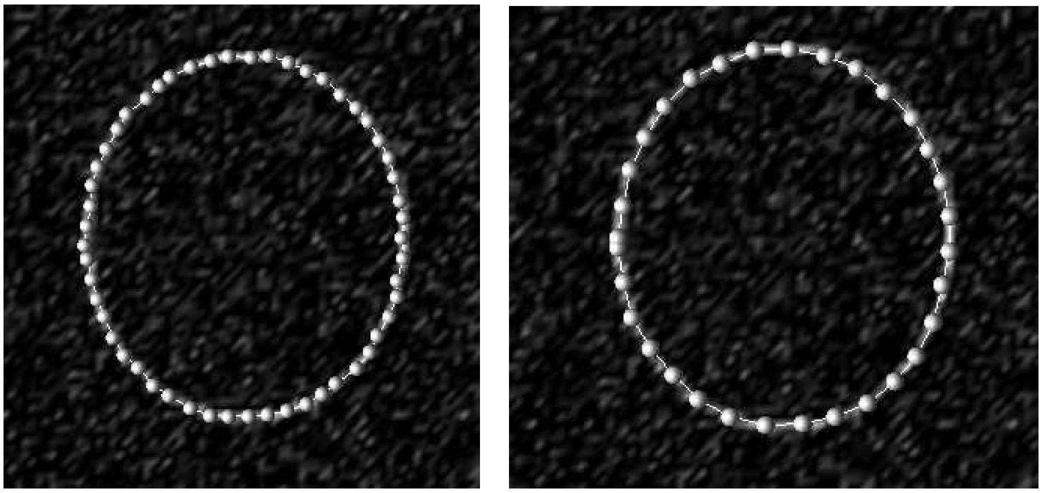


Figura 9.5: Evolução do Dual-T-Snakes para força normal usual: (a)Interação 3. (b)Posição intermediária (c)Mínimo local da snake externa (interação 7). (d)Mínimo local da snake interna. (e)Posição intermediária. (f)Solução final.



(a) (b) (c) (d)

Figura 9.6: Dual-T-Snakes em malha 5×5: (a)Inicialização. (b)Interação 21. (c)Interação 31. (d)Solução final do Dual-T-Snakes.



(a) (b)

Figura 9.7: (a)Solução do Viterbi para Figura 9.4.f. (b)Solução do Viterbi para Figura 9.6.d.

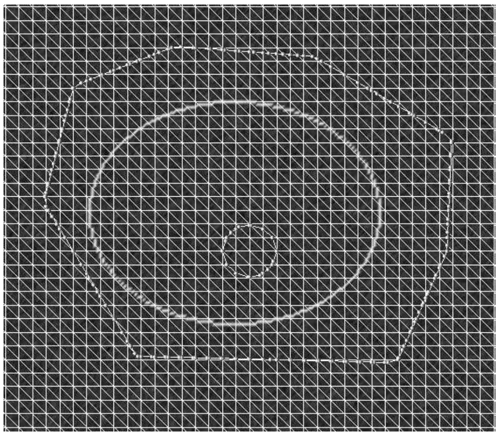


Figura 9.8: Inicialização para os exemplos desta seção.

Imagem 9.3	loop 1	loop 2
Snake 0	2	12
Snake 1	10	12

(a)

Imagem 9.5	loop 1	loop 2
Snake 0	6	8
Snake 1	10	16

(b)

Imagem 9.6	loop 1	loop 2
Snake 0	0	21
Snake 1	19	20

(c)

Tabela 9.2: (a)Performance para força normal dada pela equação 7.3. (b)Performance para força normal dada pela equação 5.54. (c) Performance para malha com resoluçã 5×5.

Imagem	Média , Variância	k	λ	b	T
9.9.a	$\mu = 30.0$, $\sigma = 5.0$	200.0	50.1	50.0	30.0
9.9.c	$\mu = 30.0$, $\sigma = 10.0$	200.0	50.1	50.0	30.0
9.9.e	$\mu = 50.0$, $\sigma = 25.0$	200.0	50.1	50.0	50.0
9.9.g	$\mu = 50.0$, $\sigma = 40.0$	200.0	50.1	50.0	50.0

Tabela 9.3: Parâmetros usados nos testes desta seção para o Dual-T-Snakes.

Considerando que nesta figura temos um ruído com média 50.0 e variância 40.0, esta performance nos parece aceitável.

As Figuras 9.9 mostram os resultados do Dual-T-Snakes correspondentes. Ao lado de cada resultado mostramos também as snakes projetadas sobre a triangulação para facilitar a avaliação de cada caso. Observando estas figuras, o primeiro aspecto que chama atenção é a distância entre as snakes interna e externa em certas regiões (Figura 9.9.c, por exemplo).

Este comportamento decorre do critério de parada baseado nas propriedades (a) e (b) da seção 6.1. Ao final de cada interação, o algoritmo analisa a snake sendo processada procurando vizinhanças cortadas pelas duas snakes. Uma vez identificado que todos os snaxels das duas snakes satisfazem este critério, a execução do algoritmo é interrompida. Os defeitos observados não têm se mostrado comprometedores do resultado final do Viterbi, exceto para regiões da borda com curva alta, o que veremos a seguir.

Vejamos novamente o efeito da força normal dada pela equação 7.3. Se mantido os valores dos parâmetros acima mas tomada a definição da normal dada pela equação (5.54), observamos uma diminuição considerável de performance. Enquanto

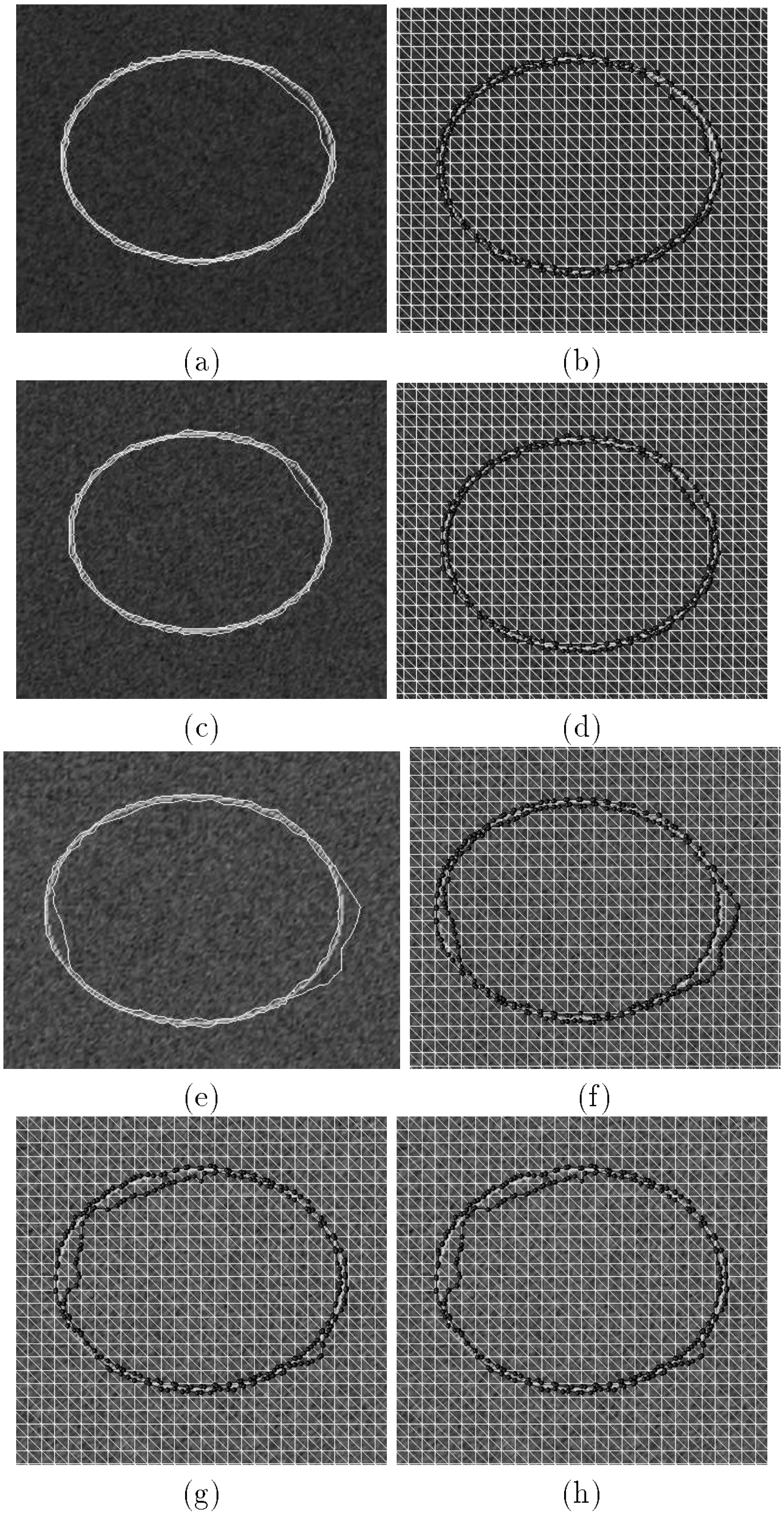


Figura 9.9: Dual-T-Snakes: Solução e solução projetada na malha 5×5.

Imagem 9.9.a	loop 1	loop 2
Snake 0	0	40
Snake 1	7	90

(a)

Imagem 9.9.c	loop 1	loop 2
Snake 0	0	41
Snake 1	6	83

(b)

Imagem 9.9.e	loop 1	loop 2
Snake 0	4	34
Snake 1	0	112

(c)

Imagem 9.9.g	loop 1	loop 2
Snake 0	0	43
Snake 1	6	143

(d)

Tabela 9.4: (a)-(d)Performance para Dual-T-Snakes inicializado de acordo com Figura 9.8.

acima a snake interna chega na borda com $(6 + 143)$ interações (Tabela 9.4.d), neste caso temos $(17 + 151)$ e ainda estamos longe da borda (Figura 9.10). Isto acontece porque a força normal, que tem a função de *puxar* as snakes para a borda, muda de sentido a todo momento (devido ao ruído), criando instabilidade e oscilações no movimento.

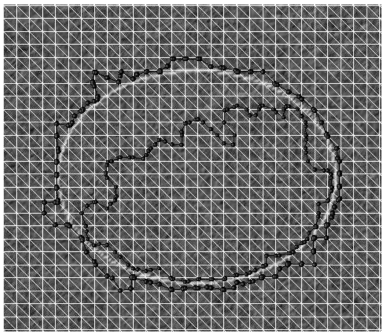


Figura 9.10: Instante $t = 168$ do Dual-T-Snakes para força normal dada por (5.54).

Pela Tabela 9.3 observamos apenas mudança do limiar para intensidade da imagem usado, o que se justifica pela mudança da média do ruído Gaussiano. Isto é um indicativo de *estabilidade* dos parâmetros com relação à mudança da intensidade de ruído da imagem, o que é desejável, como já ressaltado acima.

A Figura 9.11 mostra as soluções obtidas pelo Viterbi para os exemplos desta seção.

Assim como na seção anterior, os parâmetros do Viterbi são dados por: $\alpha = 1200.0, \beta = 0.5$ and $\lambda = 140.0$. Novamente temos estabilidade dos parâmetros com relação ao ruído, o que é um bom resultado.

9.1.3 Background com Ruído e Artefatos

Neste caso, vamos analisar o comportamento do método quando aumentamos o ruído da imagem e introduzimos artefatos na mesma. A Figura 9.12.a mostra uma elipse imersa em um meio com ruído gaussiano com média 50.0 e variância 25.0. A imagem e a malha têm resoluções (256×256) e (3×3), respectivamente. A inicialização do Dual-T-Snakes está mostrada na Figura 9.12.b.

Os valores dos parâmetros são os seguintes: $k = 200.0$, $\lambda = 50.1$, $b = 50.0$, Ponto de Congelamento=5, $T = 50.0$.

Novamente, vemos a característica do Dual-T-Snakes de sair de mínimos locais. A snake externa ficou congelada na posição mostrada na Figura 9.13.c. Em seguida, a snake interna foi processada até estabilizar na posição indicada na Figura 9.13.e. Repete-se este processo até obter-se a solução final da Figura 9.13.f. O resultado final é bastante satisfatório.

Se mudamos a resolução da malha para (5×5) obtemos o resultado mostrado na Figura 9.14, partindo da mesma inicialização dada na Figura 9.12.

Aproveitaremos este exemplo para discutir um aspecto importante. A resolução da malha está diretamente relacionada ao número de snaxels e conseqüentemente com a complexidade do método. Assim, em imagens com alta resolução pode ser útil aplicar procedimentos multigrid para diminuir o custo computacional. Contudo, para tal método ser prático é necessário procedimentos sistemáticos para atualizar os valores dos parâmetros quando passamos de uma resolução para outra.

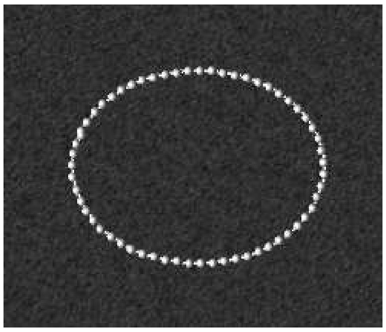
Na seção 9.1.1 nós reduzimos o parâmetro de suavização b à metade quando diminuímos a resolução. Neste caso, nós optamos por manter os mesmos valores dos parâmetros. O resultado obtido (Figura 9.14.f) é satisfatório.

A Figura 9.15 mostra as soluções finais obtidas pelo Viterbi. Os parâmetros são os mesmos da seção anterior.

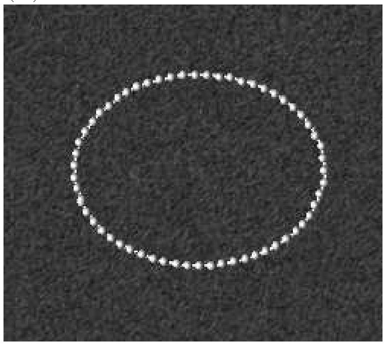
9.1.4 Mudanças Topológicas

Nos exemplos que seguem enfocamos as habilidades topológicas do Dual-T-Snakes. Iniciamos com uma imagem com três objetos e um fundo quase uniforme e acrescentamos ruído a esta imagem.

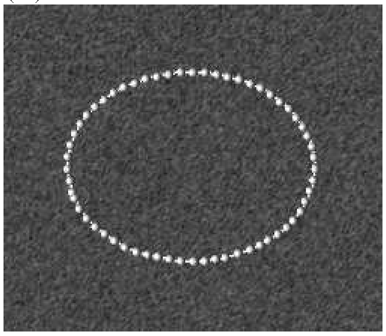
Assim, tomamos a imagem da Figura 9.16.a e usamos um detetor de bordas usual. O resultado obtido esta mostrado na Figura 9.16.b e tem um background com pouco ruído.



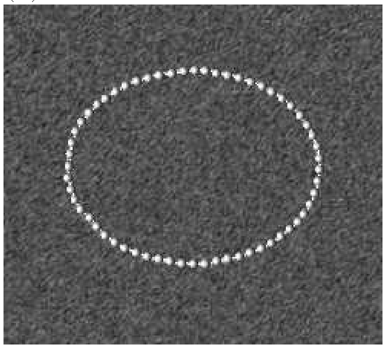
(a)



(b)

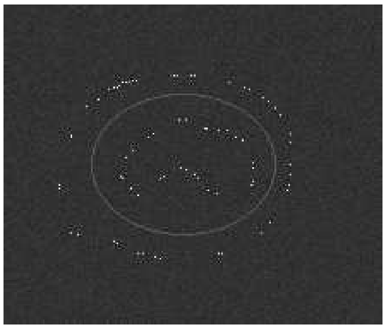


(c)

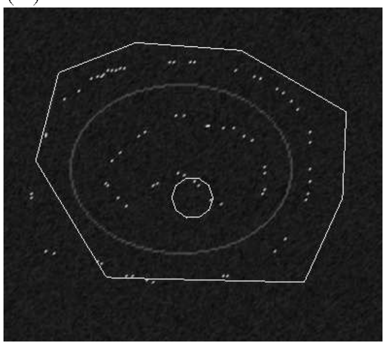


(d)

Figura 9.11: (a)-(d) Soluções do Viterbi para os exemplos das Figuras 9.9.



(a)



(b)

Figura 9.12: (a) Elipse em meio com Ruído e artefatos. (b) Inicialização do Dual-T-Snakes

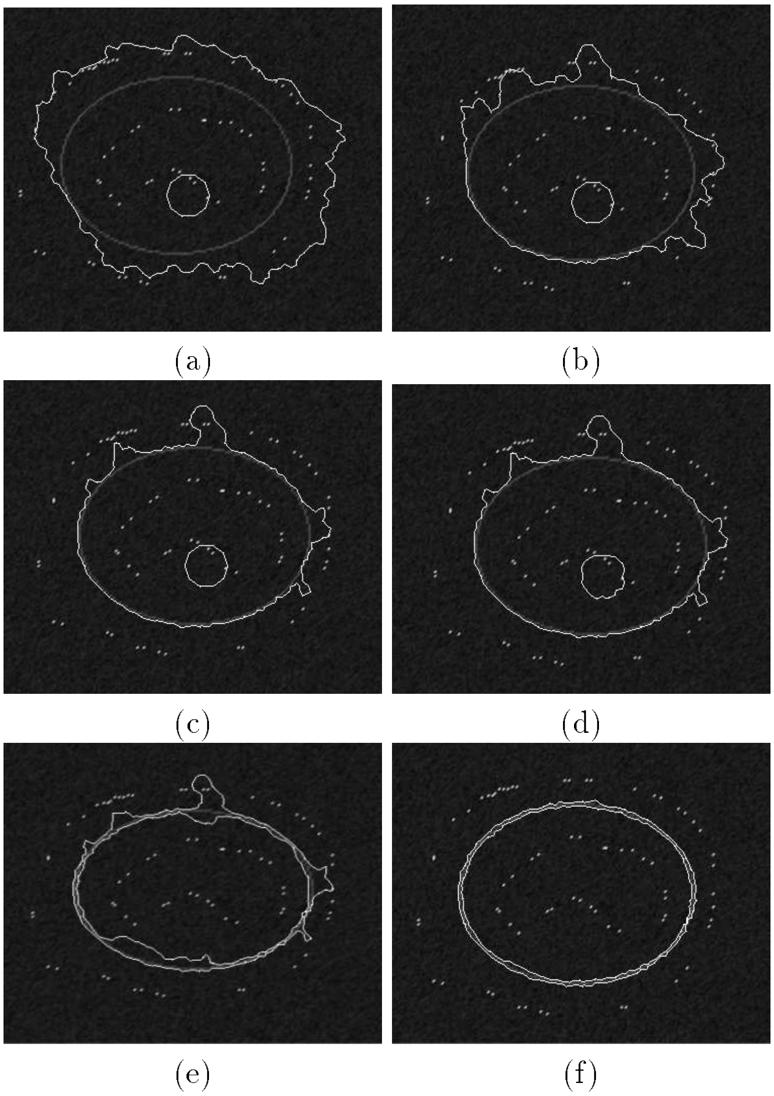


Figura 9.13: Evolução do Dual-T-Snakes para a Figura 9.12.b: (a)Interação 10. (b)Posição intermediária (t = 30) (c)Mínimo local da snake externa (t = 41).(d)Inicio do movimento da snake interna (t = 42). (e)Mínimo local da interna (t = 152). (f)Solução final.

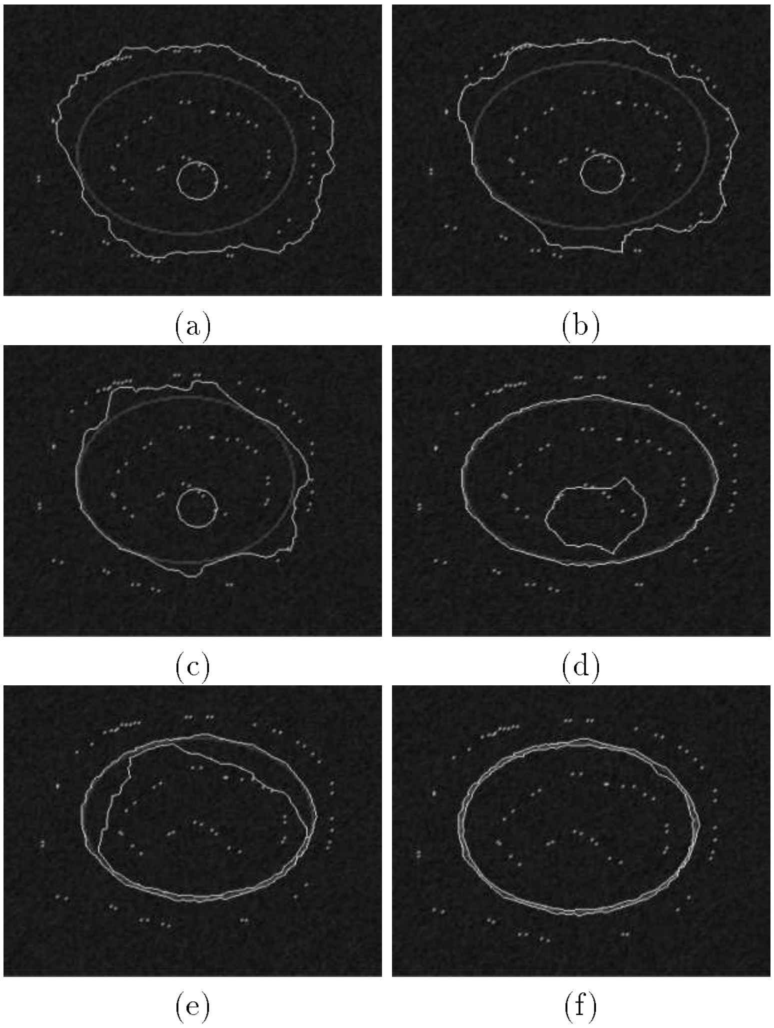


Figura 9.14: Dual-T-Snakes em malha 5×5: (a)Interação 12. (b)Posição intermediária ($t = 21$) (c)Posição em $t = 31$. (d)Mínimo local da snake interna ($t = 90$). (e)Mínimo local da interna ($t = 191$). (f)Solução final.

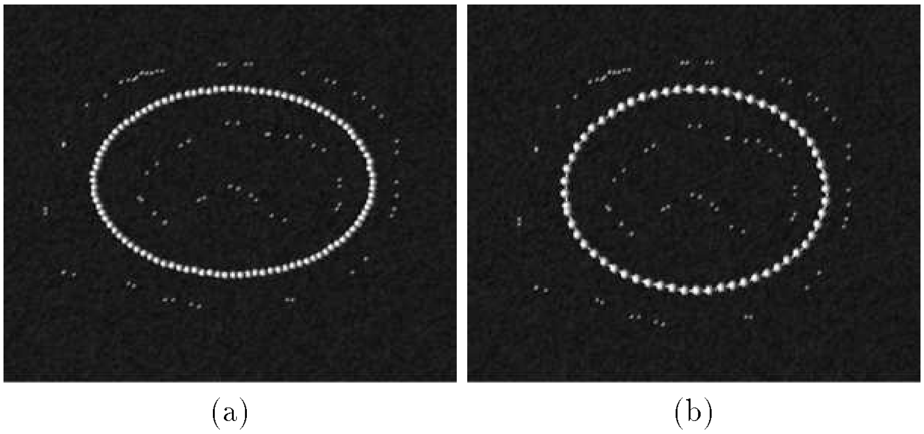
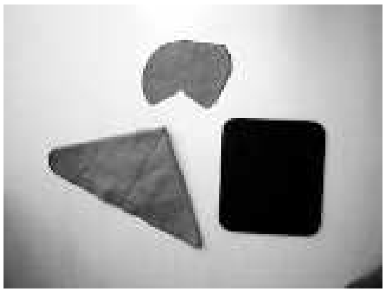
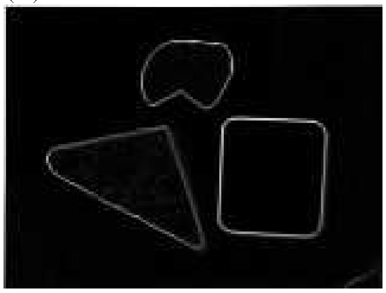


Figura 9.15: (a)-(b)Solução do Viterbi para as Figuras 9.13.f e 9.14.f, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 9.16: (a) Figura contendo três objetos de interesse. (b) Detetor de bordas aplicado.

Em seguida, acrescentamos a esta imagem um ruído gaussiano com média 40.0 e variância 0.2. A Figura 9.17.a mostra a imagem obtida. As Figuras 9.17.b,c mostram a malha (3×3) e as T-Snakes usadas na inicialização do Dual-T-Snakes.

A Figura 9.18 mostra algumas situações intermediárias. A solução do Dual-T-Snakes está na Figura 9.19.

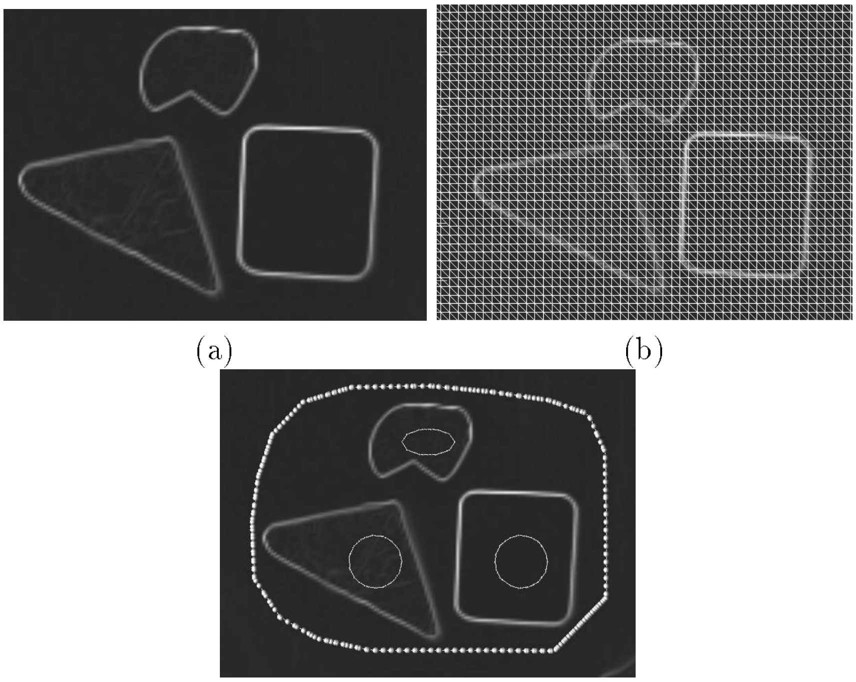
Novamente vemos alguns defeitos na solução final, os quais são decorrentes do critério de para usado, como já comentado na seção 9.1.2.

Os valores dos parâmetros usados são os seguintes: $k = 200.0$, $\lambda = 50.1$, $b = 50.0$, $T = 44.0$. O número de interações da snake externa, desde o inicio passando pelos splits e chegando à configuração final da Figura 9.19 foi 49. As snakes internas somaram 78 interações para chegar a posição final.

A Figura 9.20 mostra o mesmo exemplo, mas agora diminuindo a resolução da malha para 5×5.

A Figura 9.21 mostra a imagem da Figura 9.16.b, mas agora acrescentado um ruído gaussiano com média 40.0 e variância 1.0. Os parâmetros possuem os mesmos valores listados acima. Observamos que o resultado para o objeto superior ficou ruim nas regiões com curvatura mais elevada. Para os outros objetos as bordas ficam bem limitadas pelas snakes, que é o resultado desejado nesta fase.

Este exemplo mostra uma dificuldade extra que surge ao tratarmos imagens



(a) (b) (c)

Figura 9.17: (a)Imagem a ser processada. (b)Malha usada (3×3). (c)Inicialização do Dual-T-Snakes: uma snake externa e uma snake interna a cada objeto.

com mais de um objeto de interesse: parâmetros ótimos para um objeto podem ser ineficientes para outro.

Isto decorre, por exemplo, de diferenças nas curvaturas dos objetos, ou padrões de intensidade variados nas bordas. Uma forma de corrigir este problema é aumentado a intensidade da força de imagem. Este procedimento faz com que a snake encontre mais resistência ao seu movimento nas proximidades da borda. Contudo, esta idéia traz a dificuldade de tornar a snake mais sensível a mínimos locais, o que pode ser tratado pelo Dual-T-Snakes.

Assim, fazendo $\lambda = 100.1$ obtemos um resultado satisfatório, o que pode ser verificado pela Figura 9.23.b.

Nas Figuras 9.22-9.23, mostramos duas seqüências de resultados obtidos para as imagens indicadas na Tabela 9.5, usando inicialmente malhas com resolução 3×3 e em seguida 5×5.

Os valores dos parâmetros usados estão nas Tabelas 9.8-9.9. A performance do método pode ser avaliada pelas Tabelas 9.6 e 9.7 onde fornecemos o número de interações necessário para obter os resultados apresentados (nestas tabelas, o número de interações das snakes internas deve ser entendido como o a soma do número de interações de todas as snakes internas).

Neste momento, é interessante fazermos uma comparação entre estas seqüências

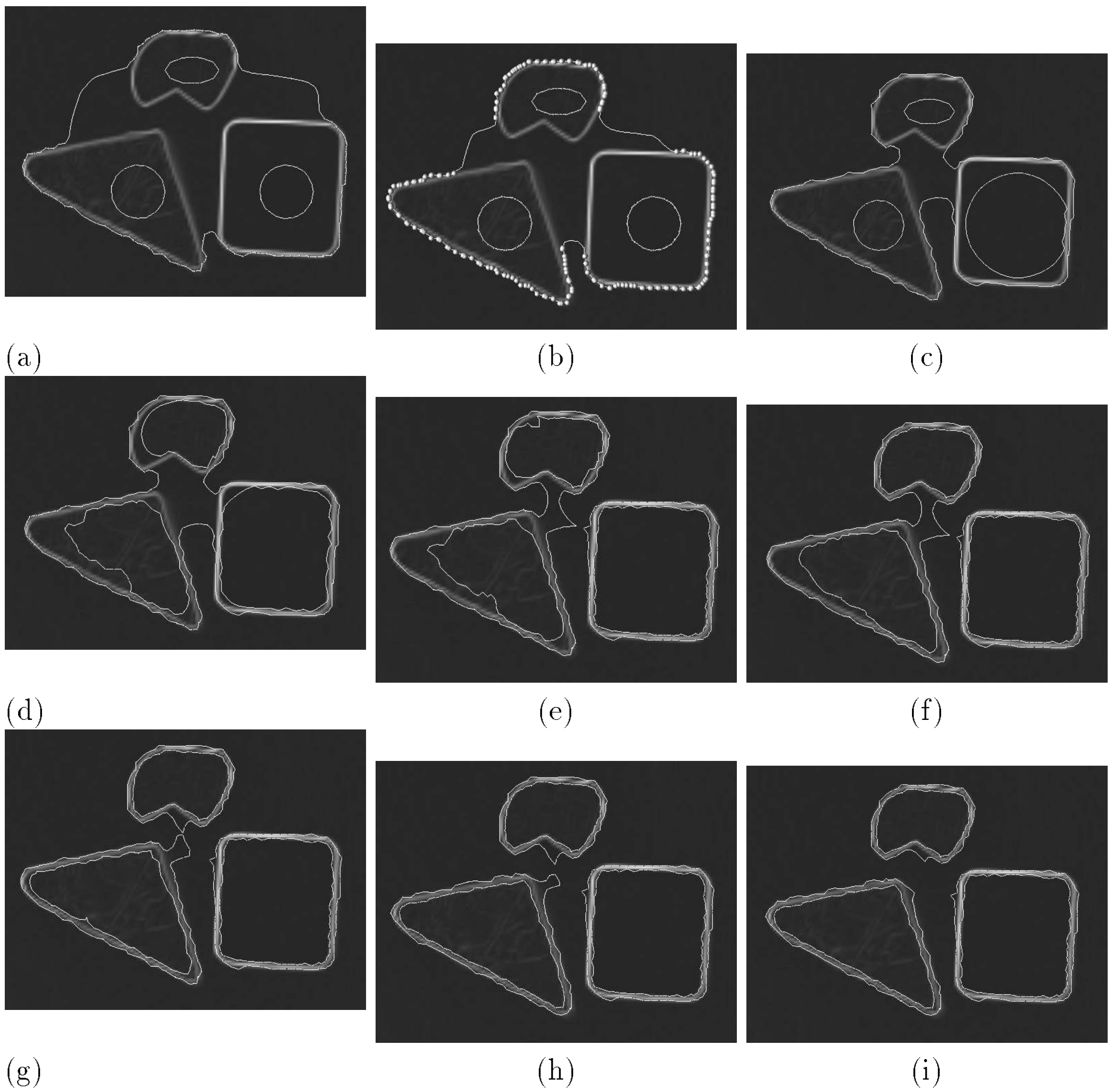


Figura 9.18: Evolução do Dual-T-Snakes para a Figura 9.17: (a) Interação 15. (b) Interação 25 (snake externa congelada). (c) Interação 35 (snake interna ao retângulo congelada). (d) Mínimo local da snake interior ao objeto triangular. (e) Snake externa sofre split. (f) Dual Snakes formados após split evoluem. (g) Novo split da snake externa. (h) Temos agora três dual snakes independentes. (i) Instantes finais do método.

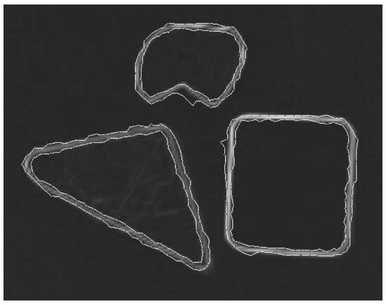


Figura 9.19: Solução do Dual-T-Snakes para a evolução da Figura 9.18.

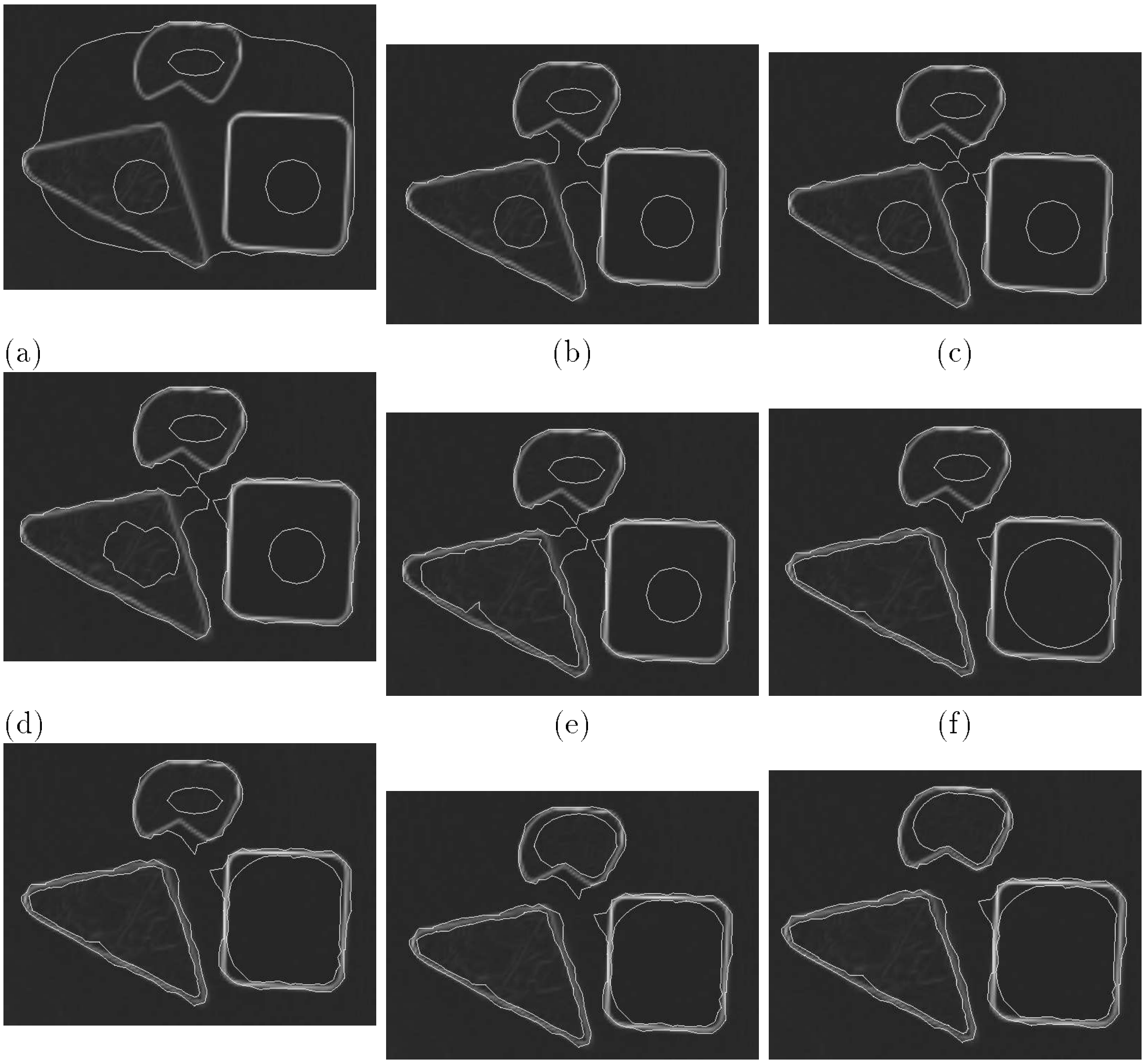


Figura 9.20: Evolução do Dual-T-Snakes para Figura 9.18.a usando malha (5×5): (a)$t = 10$. (b)Pouco antes do split (interação 58). (c)Split na interação 60. (d)Novo split (interação 65). (e)Interação 98 (mínimo local da snake interna ao objeto triangular). (f)Interação 120. (g)Snake interior ao retângulo congelada. (h)Snake do objeto superior sendo processada. (i)Solução final.

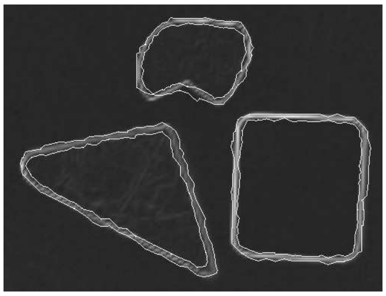


Figura 9.21: Dual-T-Snakes: Resultado insatisfatório para objeto superior.

Imagem	Média , Variância
9.22.a	$\mu = 40.0$, $\sigma = 1.0$
9.22.c	$\mu = 40.0$, $\sigma = 4.0$
9.22.e	$\mu = 40.0$, $\sigma = 20.0$
9.22.g	$\mu = 40.0$, $\sigma = 30.0$

Tabela 9.5: Parâmetros usados nos testes para o Dual-T-Snakes cujas soluções estão nas Figuras 9.22-9.23.

Imagem 9.22.a	Num. Interações
Snake Externa	67
Snakes Internas	104

(a)

Imagem 9.22.c	Num. Interações
Snake Externa	67
Snakes Internas	112

(b)

Imagem 9.22.e	Num. Interações
Snake Externa	69
Snakes Internas	102

(c)

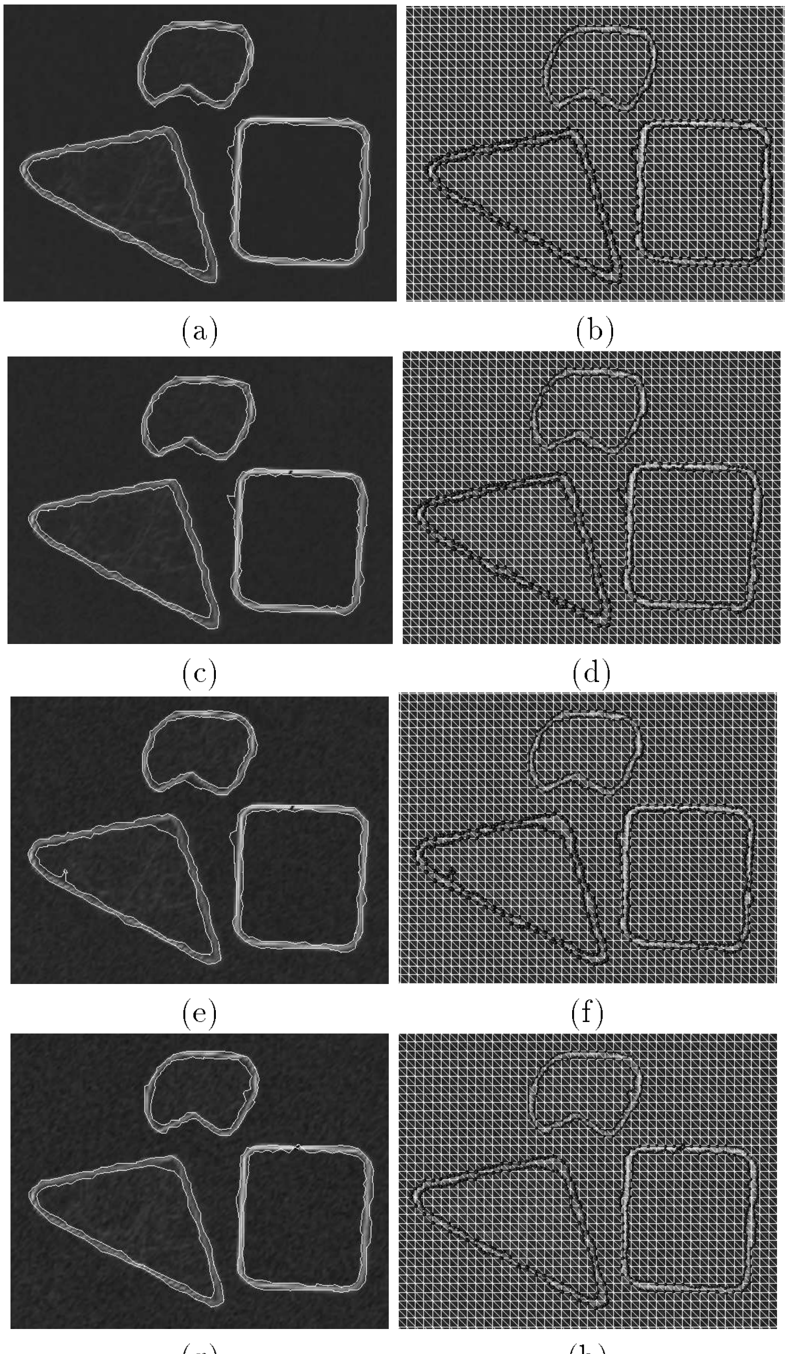
Imagem 9.22.g	Num. Interações
Snake Externa	73
Snakes Internas	118

(d)

Tabela 9.6: (a)-(d)Performance para Dual-T-Snakes correspondente aos resultados mostrados na Figura 9.22.

de resultados.

Quanto aos valores dos parâmetros, pela Tabela 9.8 observamos um mesmo conjunto de valores para os casos com malha 3×3. Ao passarmos para a malha 5×5 observamos apenas uma mudança no parâmetro de suavização b. Temos assim uma



(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (h)

Figura 9.22: Dual-T-Snakes: Solução e sua projeção na malha 3×3.

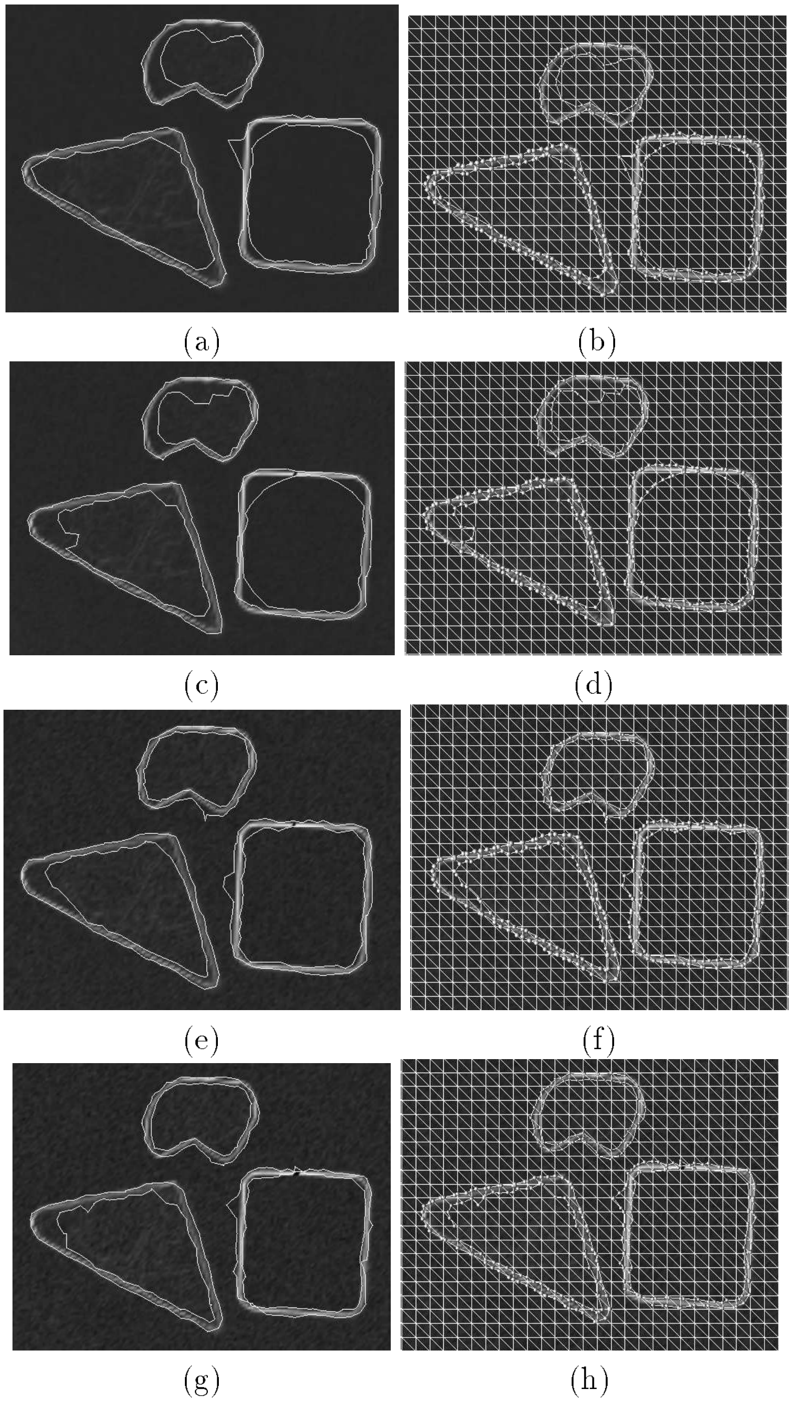


Figura 9.23: Dual-T-Snakes: Solução e sua projeção na malha 5×5.

Imagem 9.23.a	Num. Interações
Snake Externa	71
Snakes Internas	79

(a)

Imagem 9.23.c	Num. Interações
Snake Externa	79
Snakes Internas	103

(b)

Imagem 9.23.e	Num. Interações
Snake Externa	83
Snakes Internas	84

(c)

Imagem 9.23.g	Num. Interações
Snake Externa	74
Snakes Internas	125

(d)

Tabela 9.7: (a)-(d)Performance para Dual-T-Snakes correspondente aos resultados mostrados na Figura 9.23.

Imagem	k	λ	b	T	P. Congelamento
Figura 9.22.a	200.0	100.1	50.0	44.0	5
Figura 9.22.c	200.0	100.1	50.0	44.0	5
Figura 9.22.e	200.0	100.1	50.0	44.0	5
Figura 9.22.g	200.0	100.1	50.0	44.0	5

Tabela 9.8: Parâmetros usados nos testes do Dual-T-Snakes correspondentes aos resultados mostrados na Figura 9.22. A malha usada é 3×3

Imagem	k	λ	b	T	P. Congelamento
Figura 9.23.a	200.0	100.1	10.0	44.0	10
Figura 9.23.c	200.0	100.1	10.0	44.0	10
Figura 9.23.e	200.0	100.1	20.0	44.0	10
Figura 9.23.g	200.0	100.1	10.0	44.0	10

Tabela 9.9: Parâmetros usados nos testes do Dual-T-Snakes correspondentes aos resultados mostrados na Figura 9.23. A malha usada é 5×5

boa estabilidade dos parâmetros nos dois conjuntos de teste.

Quanto ao ponto de congelamento, os valores escolhidos estão vinculados à dimensão das células da triangulação e o limiar T é escolhido próximo à média do ruído gaussiano usado.

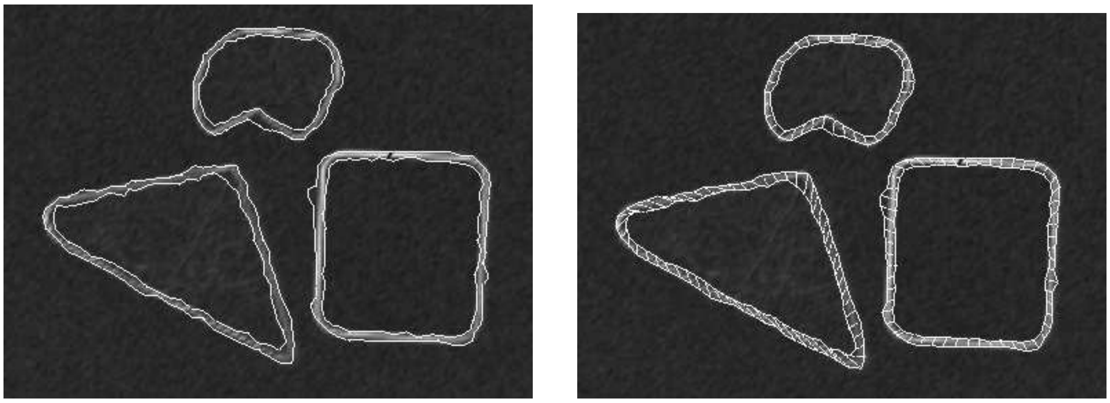
A definição para a força normal é aquela da expressão 7.3. Quando uma T-Snake está congelada, a estratégia usada para retirá-la da posição de equilíbrio é variar o limiar T para a imagem.

De maneira geral, a qualidade do resultado é melhor quando usamos a resolução 3×3 para a triangulação. Isto decorre do critério de parada usado o qual interrompe o movimento das T-Snakes em posições mais distantes quando a malha é mais grossa.

Um outro aspecto a ser destacado é com relação ao resultado da Figura 9.22.e. No objeto triangular desta figura vemos a snake interna com um detalhe com alta curvatura. A força de suavização nesta região é muito alta e assim defeitos deste tipo aparentemente não deveriam ocorrer.

O motivo deste comportamento vem da política adotada para decidir quando uma T-Snake está ou não congelada. Nestes casos, adotamos a postura de congelar uma T-Snake quando o número de snaxes com temperatura abaixo do ponto de congelamento for menor que 10% do número total de snaxels. Este procedimento tem a vantagem de evitar que uma T-Snake fique muito tempo no segundo loop em função de um pequeno número de snaxels ainda livres. Contudo, pode causar a interrupção do movimento sem que a força interna tenha exercido seu papel de suavização.

Uma maneira simples de corrigir este defeito seria, uma vez terminada a execução do Dual-T-Snakes usando o critério acima, deixar que o algoritmo evolua normalmente até que o ponto de congelamento seja atingido por *todos* os snaxels ou as snakes estejam próximas. O resultado da Figura 9.22.e é então suavizado, obtendo-se aquele da Figura 9.24.a. A Figura 9.24.b mostra o espaço de busca correspondente. Em geral, nos espaços de busca que usamos, nós discretizamos as snakes com um passo da ordem de 3 unidades e tomamos ao longo de cada segmento de reta um número do pontos da ordem do dobro da medida da aresta das células da triangulação (6, no caso da Figura 9.24.b).



(a) (b)

Figura 9.24: (a)Solução do Dual-T-Snake suavizada. (b)Espaço de busca correspondente.

Outro aspecto são as intersecções entre as T-Snakes observadas nas Figuras 9.22.g e 9.23.g Isto provém da subjetividade das bordas decorrentes do limiar usado e principalmente da discrepância entre o parâmetro da força normal e das demais forças do modelo, o que em geral prejudica a suavidade do resultado final do Dual-T-Snakes. Contudo, para bordas do tipo degrau (Figura 2.1) teremos geralmente intersecções entre as snakes ou mesmo sobreposição (seção 9.2.4), uma vez que nestes casos a borda procurada não pertence a uma faixa da imagem com uma intensidade específica.

Do ponto de vista do espaço de busca, dois aspectos são fundamentais: não pode haver intersecção entre os segmentos que interligam as snakes e a distância entre dois pontos vizinhos em um mesmo segmento deve ser da ordem da distância entre dois pixels vizinhos da imagem. O primeiro aspecto é importante para que a solução obtida seja uma curva simples e o segundo é necessário para evitar custo computacional desnecessário.

Considerando estes fatos, a primeira possibilidade seria montar o espaço de busca com o resultado do Dual-T-Snakes tomando apenas o cuidado de evitar intersecção entre segmentos vizinhos. Outra possibilidade seria usar offsets para definir um espaço de busca mais eficiente. Nos casos, desta seção usamos a primeira opção. A seguir, veremos exemplos onde a segunda opção é mais eficiente.

A Figura 9.25 mostra as soluções para o Viterbi correspondentes à Figura 9.22. O espaço de busca usado tem o aspecto daquele da Figura 9.24 sendo definido com os parâmetros usados naquele caso.

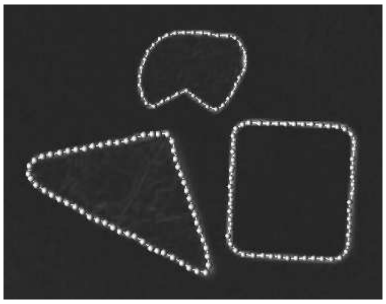
Os resultados são em geral satisfatórios, com exceção da parte inferior da região triangular. Esta região tem curvatura mais elevada e por isto exige um espaço de busca mais refinado para ser melhor coberta pelo método.

Para os resultados da Figura 9.23 a aplicação direta do Viterbi se torna mais complicada. Nestes casos, a falta de suavidade do resultado final e a distância entre as snakes torna o espaço de busca pouco eficiente. Assim, a melhor opção para este caso seria usar o resultado obtido para inicializar o Dual-T-Snakes em um malha mais fina (3×3, por exemplo) e então obter um resultado eficiente para definir o espaço de busca. Na seção 9.2.4 a seguir veremos um exemplo de uma metodologia multigrid aplicada conjuntamente com o Dual-T-Snakes.

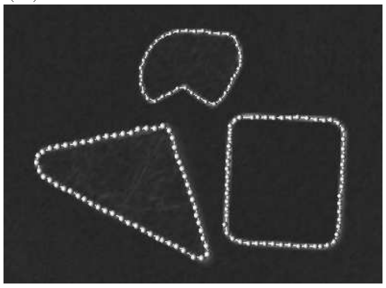
9.1.5 Conexões Fuzzy e Dual-T-Snakes

O exemplo a seguir é interessante para discutirmos a relação entre métodos de segmentação e snakes.

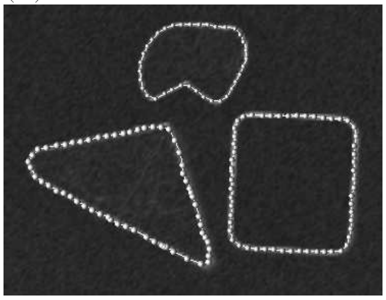
De maneira geral, snakes podem ser usadas conjuntamente com técnicas de tratamento de imagem, gerando métodos unificados de segmentação baseados na extração de contornos dos objetos (Giraldi *et al.* , 2000b; Zhu & Yuille, 1996).



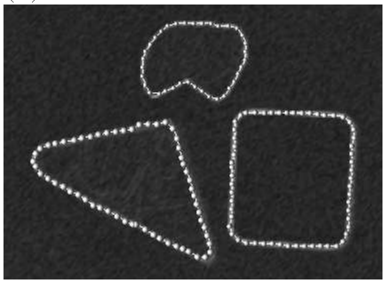
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9.25: (a)-(d) Soluções do Viterbi para os exemplos das Figuras 9.22.

Por outro lado, o resultado da segmentação pode ser usado para controlar o movimento da snake em direção às bordas desejadas (Jones & Metaxas, June, 1998). É exatamente neste último sentido que usamos o método das conexões fuzzy desenvolvido no Apêndice E juntamente com o Dual-T-Snakes.

Vejamos um exemplo. A imagem sintética da Figura 9.26 mostra dois objetos com interior ruidoso imersos em background com ruído exponencial de variância $\sigma = 1000.0$.

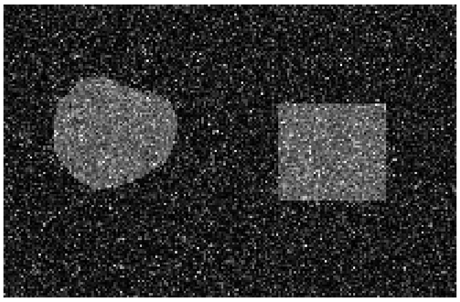


Figura 9.26: Objetos imersos em meio com ruído exponencial.

A aplicação direta do Dual-T-Snakes neste caso traz a dificuldade de definir o sentido da força normal devido a presença do ruído tanto no interior quanto no exterior dos objetos. Uma definição da força normal baseada na expressão 5.54 pode levar a instabilidades no movimento da snake diminuindo a performance e a qualidade do resultado.

Se usarmos a expressão 7.3 diminuímos as oscilações no movimento da snake, mas, por outro lado, a snake pode ficar presa nos diversos mínimos locais da energia da imagem, o que afeta novamente a performance do algoritmo.

Assim, fazer uma pré-segmentação da imagem e usar o resultado obtido para definir a força normal é uma possibilidade interessante.

O método das conexões fuzzy discutido no Apêndice E é uma opção para isto uma vez que este parte de pontos sementes estabelecidos pelo usuário. Se estes pontos pertencem ao interior dos objetos de interesse então podem ser usados para inicializar as snakes internas do Dual-T-Snakes. O resultado do método fuzzy, por sua vez, pode ser usado para definir o sinal da força normal, de acordo com a expressão E.13.

A Figura 9.27 mostra o campo σ_0 obtido pelo método das conexões fuzzy multi-semente, segundo o algoritmo da seção E.3.

A Figura 9.28 mostra a solução obtida pelo Dual-T-Snakes. A força normal segue a definição dada pela expressão E.13 e os valores dos parâmetros são os seguintes: $k = 200.0$, $\lambda = 50.1$, $b = 50.0$, Ponto de Congelamento=5, $T = 0.5$. A malha usada tem resolução 3×3.

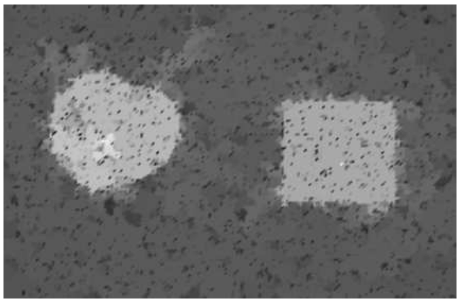


Figura 9.27: Campo σ_0 obtido pelo método das conexões fuzzy para a Figura 9.26.

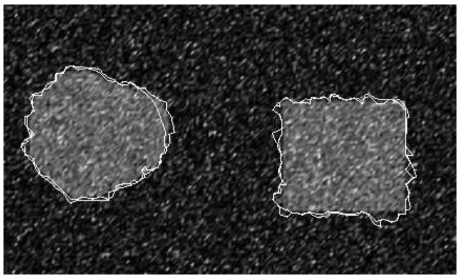
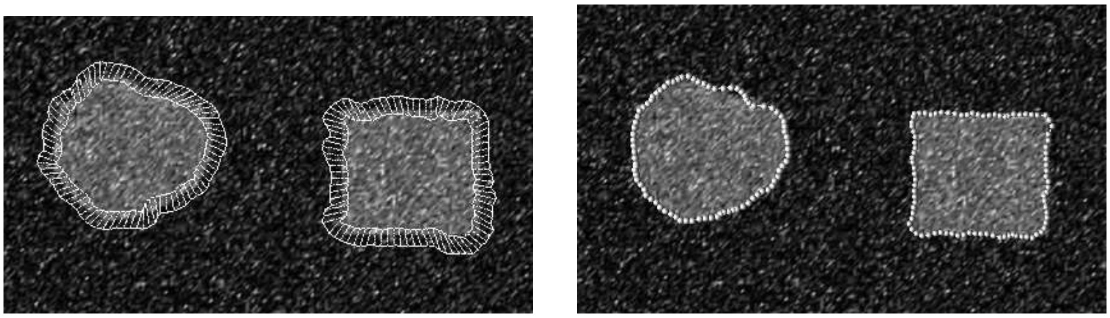


Figura 9.28: Solução do Dual-T-Snakes para normal definida segundo o campo σ_0 mostrado na Figure 9.27.

A proximidade entre as snakes neste caso torna pouco eficiente usar um espaço de busca definido entre as mesmas. Uma possibilidade mais segura é tomar dois offsets de uma das snakes e usar estas curvas para definir o espaço de busca. É exatamente o que fizemos neste caso e o resultado está mostrado na Figura 9.29.a. A solução do Viterbi está na Figura 9.29.b.



(a) (b)

Figura 9.29: (a)Espaço de busca gerado a partir de off-sets. (b)Solução final.

O resultado obtido é aceitável, observando-se contudo defeitos, particularmente na borda da figura retangular. Estes defeitos têm como origem o alto ruído da imagem, o que dificulta a escolha de parâmetros ótimos para o Viterbi. Apesar disto, este exemplo mostra que para imagens muito ruidosas o método das conexões fuzzy pode ser uma boa opção para a definição da força normal.

Isto decorre, em particular, pela definição das funções de afinidade dadas pelas expressões (E.15)-(E.17). As funções Gaussianas usadas garantem propriedades de suavização, o que torna o resultado menos sensível a variações bruscas dos gradiente, próprias de imagens com ruídos.

É importante ressaltar que a energia de campo usada no Viterbi é calculada sobre a imagem original e não sobre o resultado do método fuzzy. Os parâmetros usados nesta faze foram os seguintes: $\alpha = 1200.0, \beta = 0.5$ and $\lambda = 0.5$.

9.2 Imagens Médicas

Os exemplos desta seção serão constituídos por imagens de ressonância magnética, células, Raio-X e do Projeto do Homem Visível.

Nas imagens obtidas por ressonância magnética da cabeça de um paciente pudemos fazer uso da metodologia de inicialização da seção 8.3 para automatizar o posicionamento da snake externa do Dual-T-Snakes.

Em imagens contendo várias células, mostramos como podemos explorar este mesmo método de inicialização como ponto de partida para uma metodologia de segmentação baseada em extração de bordas dos objetos de interesse (Giraldi *et al.* , 2000b).

Nos demais exemplos de imagens contendo células mostramos a eficiência do Dual-T-Snakes em uma metodologia multigrid, bem como com a incorparação de técnicas para crescimento de regiões baseada na triangulação. Os resultados obtidos indicam que o método tem neste tipo de imagens um grande potencial de aplicação. Aliás, a eficiência de metodologias duais em imagens contendo várias células foi verificada em outras referências da literatura (P. Bamford, 1998).

A presença de regiões com alta curvatura e de artefatos no interior (ou exterior) dos objetos é outra característica destas imagens.

O último caso estudado é constituído por imagens de Raio-X do tórax onde veremos novamente as habilidades topológicas do Dual-T-Snakes.

9.2.1 Ressonância Magnética da Cabeça

Modelos anatomicamente realistas da cabeça de um paciente são necessários em várias aplicações médicas, tais como diagnósticos e modelagem de campos elétricos e magnéticos. No que diz respeito à modelagem de campos, sua aplicação está na área de tomografias funcionais para dignósticos médicos não invasivos (Schimpf *et al.* , 1998).

O primeiro passo para a obtenção do modelo geométrico é a segmentação da imagem para a extração das bordas desejadas. Em uma imagem de ressonância como a da Figura 9.30.a nós temos junto à camada óssea o couro cabeludo bem como outros tecidos internos.

Nos restringiremos à extração da camada óssea. Uma possibilidade bem conhecida para isto é o método de marching cubes (Lorensen & Cline, 1987). No entanto, este método pode falhar, particularmente devido à presença de ruído no background e bordas subjetivas. O resultado obtido deve passar por um pós-processamento para corrigir defeitos topológicos.

Contudo, uma observação extra permite fazer uso da metodologia do Capítulo 8 para a inicialização do Dual-T-Snakes, evitando possíveis defeitos topológicos comuns quando usamos métodos de busca em processamento de imagens.

Neste caso, o background apresenta a propriedade de escala local que pode ser caracterizada pela resolução dada por 5×5 e um limiar $T = 5.0$. Estes valores foram usados em um conjunto de teste contendo 79 imagens tendo fornecido resultados satisfatórios. A triangulação e Função Característica do Objeto (expressão (8.3)) para a fatia de número 60 estão representadas na Figura 9.30.b.

O resultado do método de inicialização é exatamente a curva externa da Figura 9.31.e. A curva interna é apenas um offset desta curva, tomado na direção do centróide da região limitada pela curva externa (estamos fazendo uso da convexidade da região interna à caixa craniana). O resultado do Dual-T-Snakes para esta fatia (de número 60) está na Figura 9.31.f.

As Figuras 9.31.a-d mostram os resultados da inicialização e do Dual-T-Snakes para as fatias de número 15 e 55. Os parâmetros do Dual-T-Snakes têm os seguintes valores: $k = 1.5.0$, $\lambda = 1.4$, $b = 2.0$.

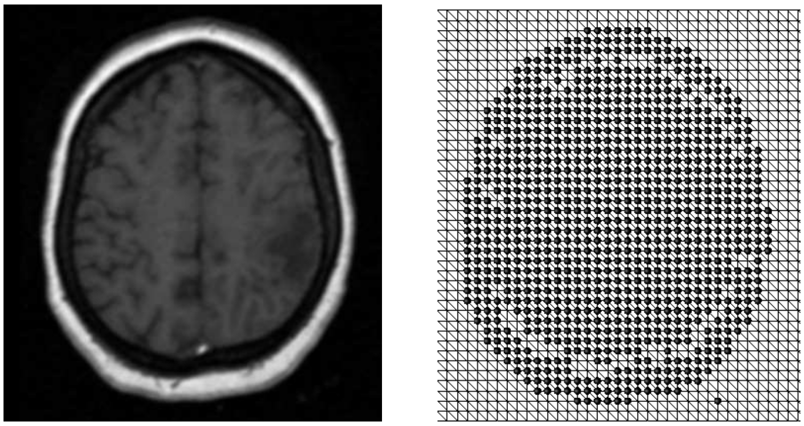
Os bons resultados obtidos nestas figuras para o Dual-T-Snakes nem sempre se repetem durante este conjunto de dados. O limiar usado para caracterizar a camada óssea ($T = 70.0$)pode variar ao longo das fatias, o que dificulta a extração da caixa craniana por completo sem a intervensão de um especialista.

Com relação ao Viterbi, devemos também fazer considerações especiais. A Figura 9.30.a é um exemplo de uma fatia onde a camada óssea é demasiado larga. Antes de aplicar o método é preciso a opinião de um especialista para que se possa definir uma curva que caracterize eficientemente esta camada para algum tipo de aplicação.

Resultado do Viterbi para a fatia de número 15 está mostrado na Figura 9.32. Neste caso, a camada óssea não é muito grossa e assim sua extração é menos subjetiva.

9.2.2 Célula do Sangue

Na seção 9.1 testamos o Dual-T-Snakes em imagens onde as bordas desejadas correspondem a faixas no plano, imersas em um background com ruído. Nesta seção, veremos como podemos criar esta situação a partir de uma imagem real.



(a) (b)

Figura 9.30: (a)Imagem original. (b) Triangulação com resolução 5×5 e Função Característica do Objeto.

A Figura 9.33 mostra a imagem de uma célula do sangue com resolução 312×270

Uma forma simples de criarmos a situação desejada é usando um filtro passa baixa e em seguida um passa-alta. Este procedimento fornece arestas espalhadas, ideais para a aplicação do Dual-T-Snakes. A Figura 9.34 mostra o resultado de uma filtragem deste tipo aplicada sobre a imagem da Figura 9.33

Como esperado, o resultado obtido não está livre de ruídos ou mesmo de artefatos no background. Contudo, a borda procurada está contida na faixa em destaque. No momento em que o Dual-T-Snakes extrair esta faixa, o Viterbi fornecerá o resultado final.

A inicialização e solução final do Dual-T-Snakes estão nas Figura 9.35.a,b, respectivamente. Os parâmetros usados nesta etapa foram os seguintes: $k = 15.0$, $\lambda = 14.0$, $b = 0.2$, $T = 16.0$.

A força normal é dada pela expressão 7.3 uma vez que temos certo nível de ruído no background.

A Figura 9.36 mostra solução do Viterbi para os parâmetros com os seguintes valores: $\alpha = 1.0, \beta = 10.0$ and $\lambda = 50.0$. O resultado é bastante satisfatório.

9.2.3 Imagens com Várias Células

Imagens contendo várias células podem constituir uma aplicação interessante para o método de inicialização do Capítulo 8.

O ponto inicial é a definição da propriedade de escala local. Seja então a imagem da Figura 9.37 a qual mostra um conjunto de células da coluna cervical. Neste caso, uma simples inspeção mostra que a propriedade de escala local pode ser caracterizada por uma malha de resolução 5×5 e por um limiar dado por $T = 150.0$

Outro aspecto, é a escala externa de separação entre células . Em algumas

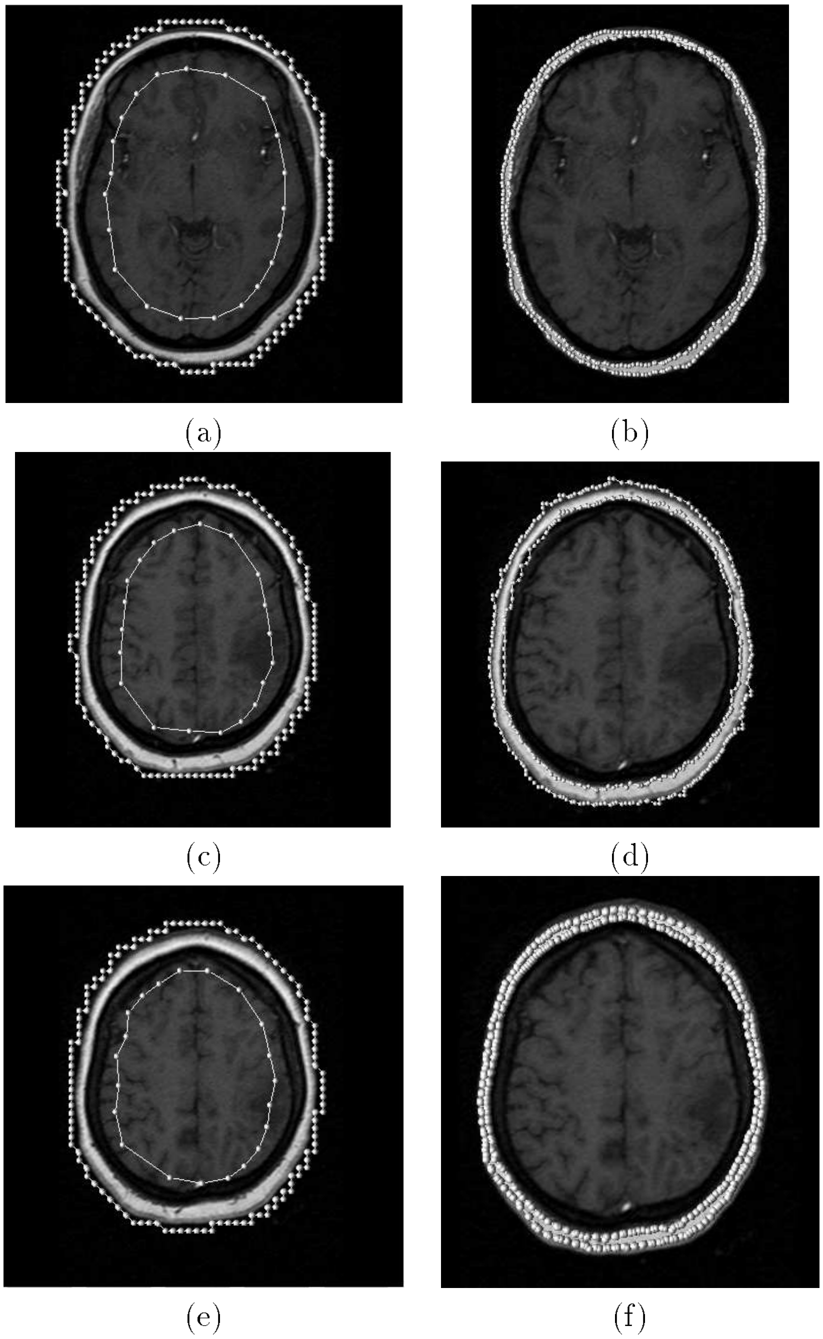


Figura 9.31: Inicialização e solução do Dual-T-Snakes para fatias 15, 55 e 60.

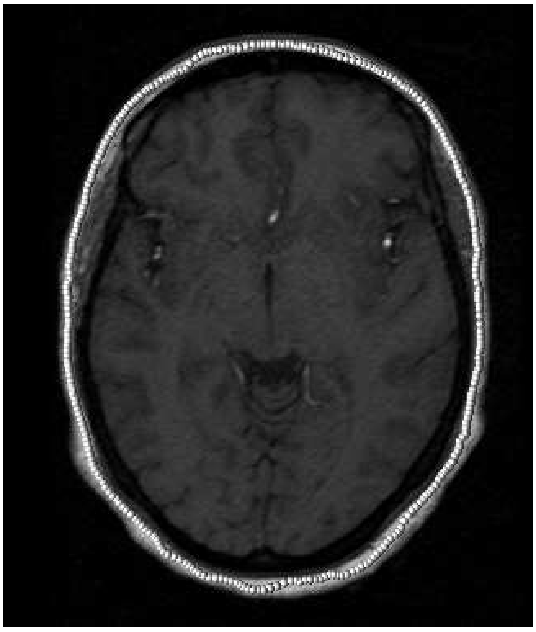


Figura 9.32: Solução obtida por programação dinâmica para a fatia de número 15.

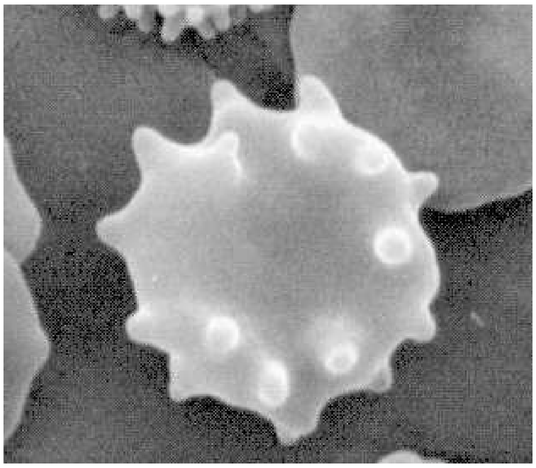


Figura 9.33: Células do sangue.

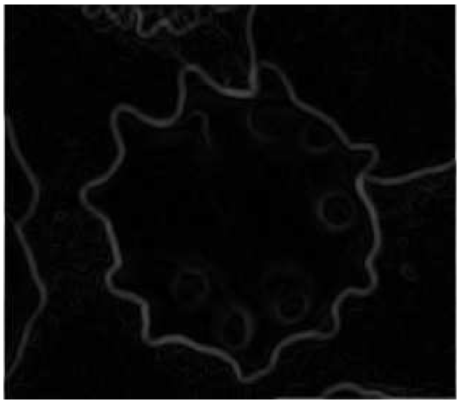
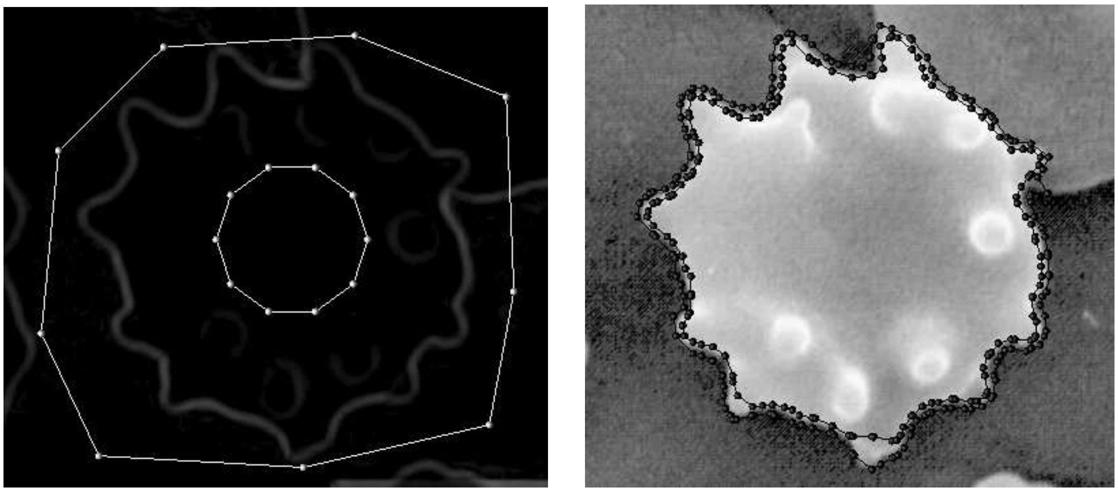


Figura 9.34: Imagem da Figura 9.33 filtrada.



(a) (b)

Figura 9.35: (a) Inicialização do Dual-T-Snakes. (b)Solução final do Dual-T-Snakes.

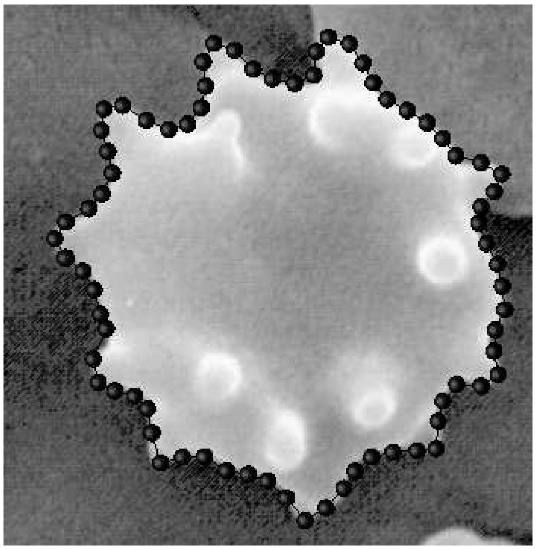


Figura 9.36: Solução final do Viterbi correspondente à Figura 9.33.

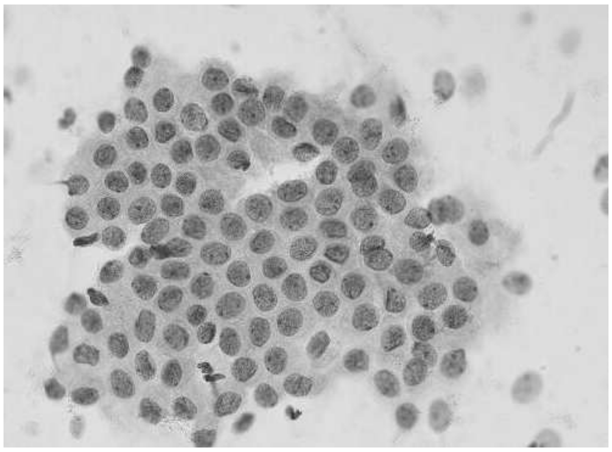


Figura 9.37: Células da coluna cervical.

regiões, esta escala é mais fina que a interna (*Problema de Duas Escalas*). Assim, como já ressaltado na seção 8.3, o resultado dos passos (1)-(4) pode conter regiões com mais de um objeto envolvidas por uma única curva, como pode ser verificado na Figura 9.38.

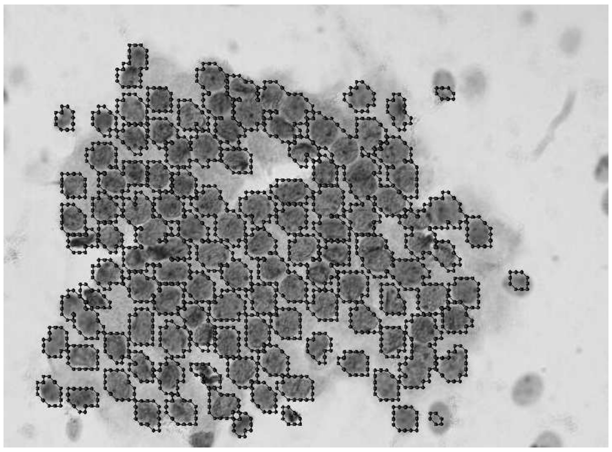


Figura 9.38: Aproximações lineares obtidas para malha 55 e limiar $T = 150.0$ aplicado sobre a imagem da Figura 9.37, sem usar limites para área.

Se usarmos um limite superior conveniente para a área, conseguiremos segmentar algumas destas regiões quando aumentamos a resolução usada. Assim, seguindo os passos (1)-(5) da seção 8.3, obtemos o resultado mostrado na Figura 9.39.

É importante ressaltar que o objetivo do passo (5) é principalmente suavizar o resultado obtido nos passos (1)-(4). Sendo assim, pode-se estabelecer um número máximo de interações e interromper o movimento da T-Snake quando este número é atingido. Um bom valor seria o próprio ponto de congelamento.

Observemos inicialmente, que o resultado obtido é uma segmentação *grosseira* da

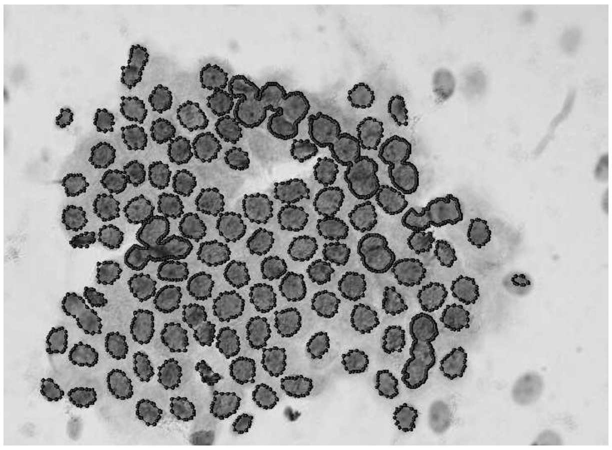


Figura 9.39: Resultado obtido para malha 1×1 e limiar $T = 150.0$, usando limites inferior e superior para area dados por 75.0 e 500.0, respectivamente.

imagem. Temos ainda regiões com mais de uma célula envolvidas por uma mesma curva, e existem células cujo padrão de intensidade não foi coberto pelo limiar usado. Nestas regiões, o problema não é a resolução usada, mas sim o limiar.

Se relaxarmos o limiar da intensidade de imagem para um valor $(T \pm \Delta T)$, poderíamos melhorar a segmentação nestas regiões (Giraldi *et al.* , 2000b). Contudo, as bordas obtidas poderiam avançar para o interior dos objetos, como mostrado na Figura (Figura 9.40). A solução automática para este problema é o ponto mais delicado do método.

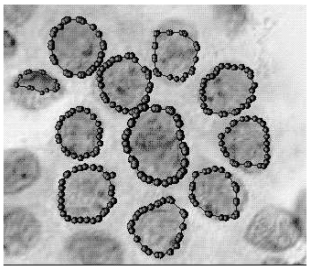


Figura 9.40: Resultado obtido para células da coluna usando malha 1×1 e limites inferior e superior para área dados por 75.0 e 500.0, respectivamente.

No presente momento, nos parece que a solução mais simples, e talvez mais eficiente, seria usar o resultado da Figura 9.39 como ponto de partida para um método semi-automático de segmentação. A questão em aberto é oferecer ferramentas para que o usuário possa alterar o resultado mostrado, dividindo regiões e melhorando bordas ainda mal definidas. Voltaremos a esta questão no Capítulo 10.

A Figura 9.41 mostra outro resultado. Neste caso temos uma imagem de células de porco. A Figura 9.41.c mostra as aproximações lineares obtidas e a Figura 9.41.d mostra o resultado final para os seguintes parâmetros: $k = 1.5.0$, $\lambda = 1.0$, $b = 1.0$, $T = 105.0$, *Área Mínima*=100.0, *Área Máxima*=250.0. A resolução da malha é dada por 5×5.

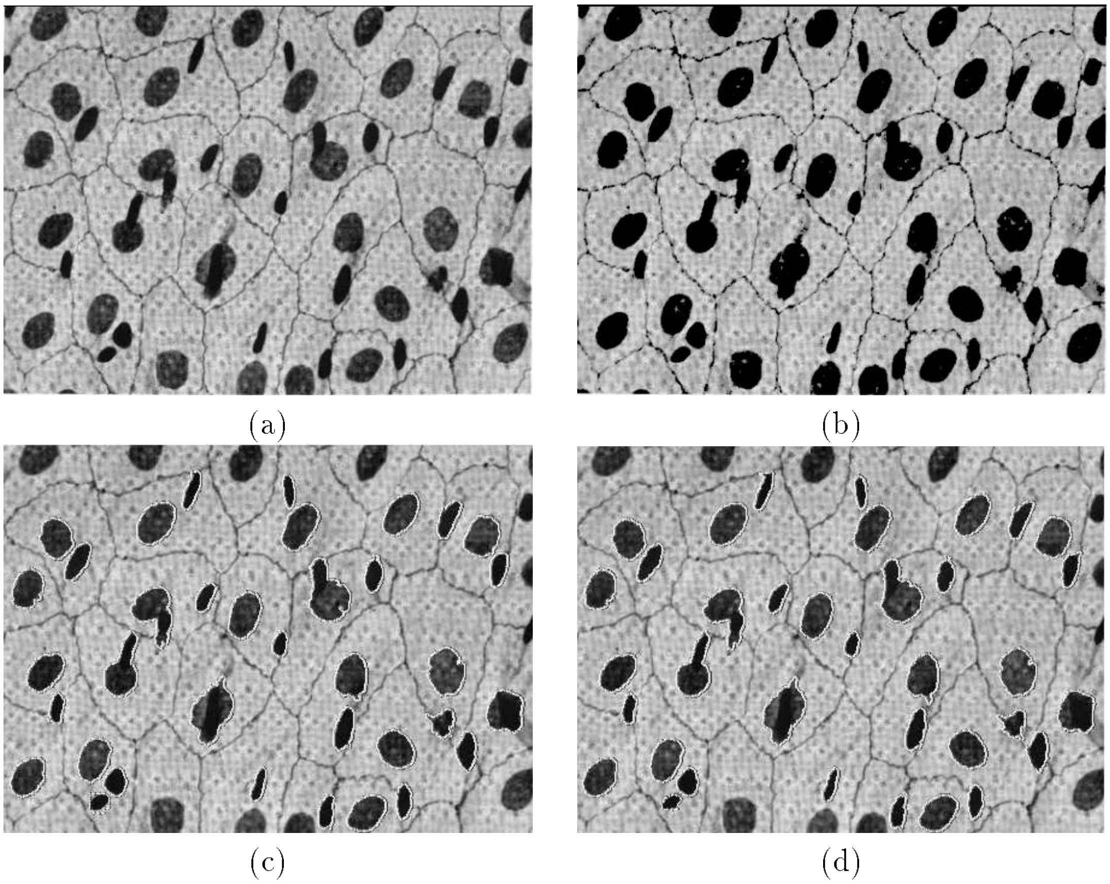


Figura 9.41: (a)Células de tecido animal (porco). (b)Aplicação do limiar $T = 105.0$ para a intensidade de imagem. (c)Variedade lineares por partes obtidas por (1)-(4). (d) Solução final.

Problemas de duas escalas podem ocorrer também quando temos apenas um objeto. A Figura 9.43 ilustra uma situação deste tipo.

Embora não seja uma figura de uma célula, o objeto amorfo nesta imagem tem características interessantes que podem ocorrer no contexto de imagens médicas também.

A escala externa neste caso se refere à separação entre partes do mesmo objeto. Nestas regiões a propriedade de escala local, que neste caso pode ser caracterizada por uma malha 9×9 e um limiar $T = 140.0$, é grosseira. Por isso, o resultado da aplicação do método de inicialização fornece uma aproximação muito distante daquela desejada.

Uma dificuldade deste caso, se comparado com os casos da seção 9.2.1 é que não podemos assumir convexidade do objeto de interesse. Se quisermos inicializar automaticamente o Dual-T-Snakes a partir da curva obtida, precisamos ser cuida-

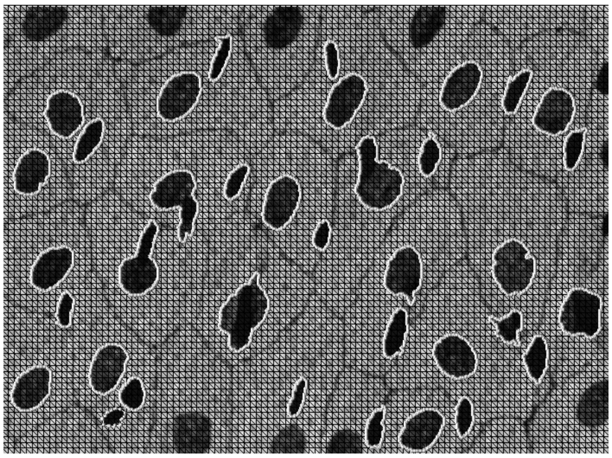


Figura 9.42: Resultado da Figura 9.41.d e malha 5×5.

Figura 9.43: Imagem contendo objeto amorfo.

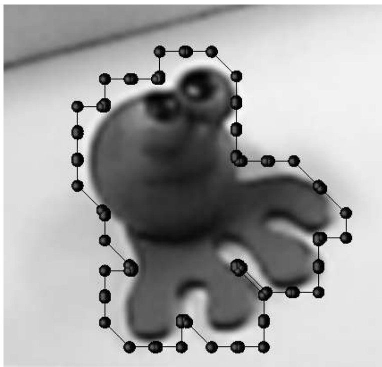
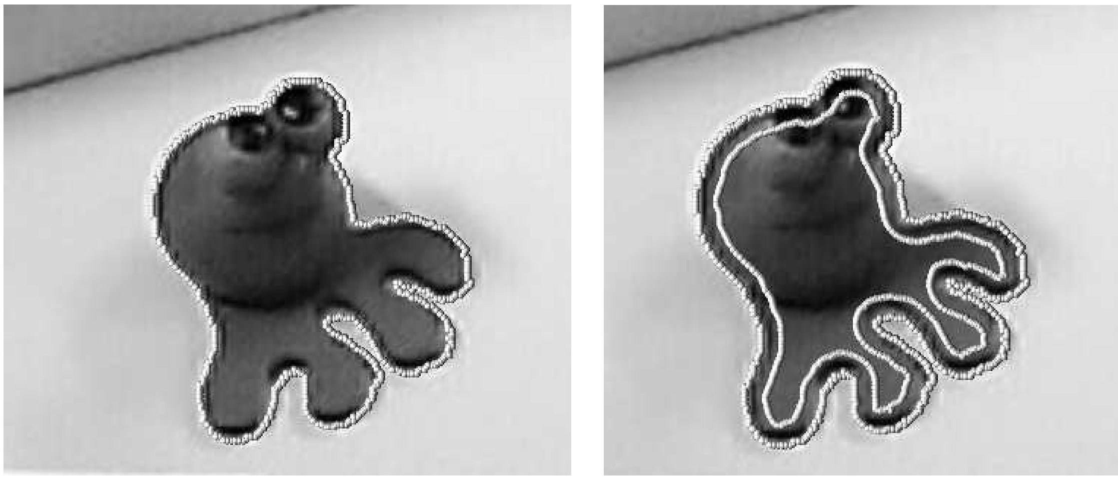


Figura 9.44: Inicialização obtida para a Figura 9.43 para malha 9×9.

dosos para que a snake interna não corte as regiões com curvatura mais elevada do objeto. Isto implica em testes adicionais e pode ser complicado dependendo da complexidade da borda procurada.

Uma alternativa mais segura nestes casos seria usar uma malha com a resolução da própria imagem para o método de inicialização. O resultado obtido é uma aproximação bem mais detalhada da borda, como pode ser observado pela Figura 9.45.a.

Agora, partindo do algum conhecimento a priori do objeto, podemos fazer um offset do resultado obtido em direção ao interior do objeto, como mostra a Figura 9.45.a



(a) (b)

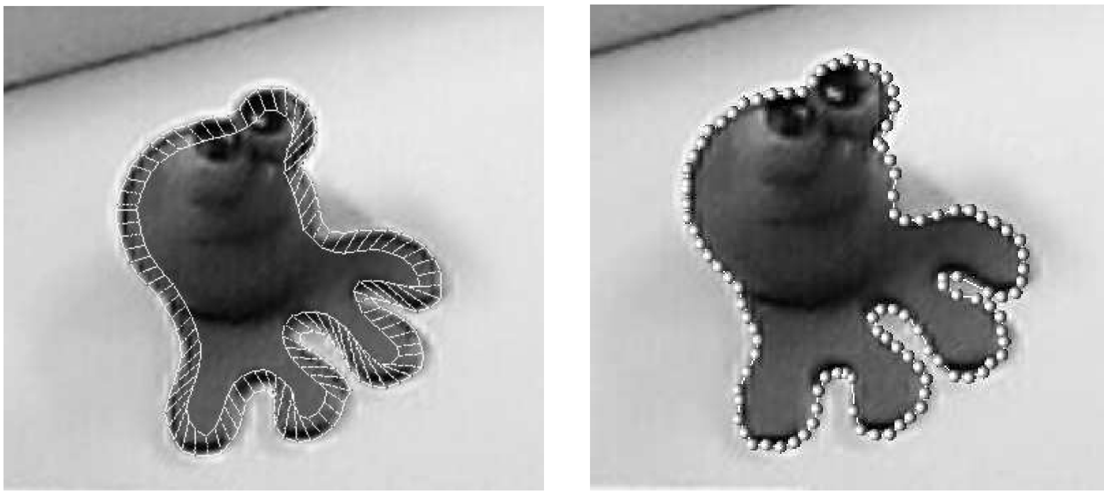
Figura 9.45: (a) Inicialização para malha com resolução da imagem. (b) Curva inicial e Offset.

Se quisermos mais segurança do resultado, poderemos usar dois offsets para limitar a borda desejada, o que será feito em um exemplo seguir. As Figura 9.46.a,b mostram o espaço de busca definido e resultado do Viterbi, respectivamente. Os parâmetros usados para o Viterbi são os seguintes: $\alpha = 1200.0, \beta = 10.0$ and $\lambda = 2.0$.

O offset é tomado na direção normal à curva resultante do método de inicialização. Possíveis auto-intersecções que venham ocorrer quando avançamos a curva da Figura 9.45.a são resolvidas naturalmente pelo método de reparametrização das T-Snakes (seção 5.3.2). A distância entre o offset e a curva inicial é o único parâmetro mais delicado e seu valor é totalmente dependente da aplicação em questão. Neste caso, usamos uma distância de 5 unidades entre as duas curvas da Figura 9.45.b.

9.2.4 Imagens de Micrografia Eletrônica

As imagens desta seção, foram obtidas via a técnica de micrografia eletrônica e retiradas do livro (Bloom & Fawcett, 1968), onde pode-se encontrar detalhes sobre



(a) (b)

Figura 9.46: (a) Espaço de busca definido pela solução inicial e seu offset. (b) Resultado do Viterbi.

este método de aquisição.

No primeiro exemplo mostramos como o Dual-T-Snakes pode ser usado em uma metodologia multigrid.

Seja então a Figura 9.47 onde temos uma imagem com resolução 895×682 contendo uma estrutura interior de uma célula (*nucléolos*). Observemos inicialmente a presença de ruído e artefatos, bem como de regiões da fronteira com alta curvatura que exigem uma malha de resolução suficientemente alta para se obter a precisão desejada.

Contudo, quanto mais alta a resolução da malha maior o efeito do ruído e dos artefatos sobre o movimento das T-Snakes. Temos assim uma situação conflitante com um complicado *trade-off* entre eficiência e performance.

No contexto de modelos deformáveis, uma solução conhecida para este problema (Terzopoulos, 1986a) é usar uma malha com resolução mais grossa para obter uma primeira aproximação da borda. Em seguida, a malha é refinada e a solução melhorada até obter a precisão desejada.

Contudo, para o Dual-T-Snakes temos que levar em conta a necessidade de duas snakes em cada etapa. Em problemas como aqueles da seção 9.1 onde a solução do Dual-T-Snakes é uma faixa contendo a borda, bastaria inicializar o método na resolução mais elevada usando o resultado já obtido na resolução anterior.

Porém, no presente caso as bordas são do tipo degrau (Figura 2.1) e assim as snakes devem ficar aproximadamente sobrepostas. Logo, detalhes das regiões com curvatura mais alta não seriam extraídos ao passarmos para o próximo nível da malha. Usar um esquema de pirâmide usando filtros do tipo Sobel (Leymarie & Levine, 1993) poderia ser uma possibilidade para criar uma faixa contendo a borda desejada, como foi o caso da seção 9.2.2. Contudo, isto tem seu custo também.

Considerando estes fatos tomamos a seguinte postura: vamos resolver o Dual-T-Snakes/Viterbi em uma malha mais grossa e usar o resultado para gerar dois offsets que inicializam o Dual-T-Snakes na resolução mais fina.

Vamos então resolver o Dual-T-Snakes para uma malha de resolução 15×15, e usando os seguintes parâmetros: $k = 200.0$, $\lambda = 50.0$, $b = 10.0$, $T = 140.0$, *Ponto de Congelamento*=15.

Diferentemente dos casos anteriores, vamos permitir o passo máximo de cada snaxel em uma interação com sendo 2 unidades, uma vez que sabemos a priori que o resultado desta fase será uma aproximação grosseira da borda desejada.

A Figura 9.48.a mostra o resultado obtido.

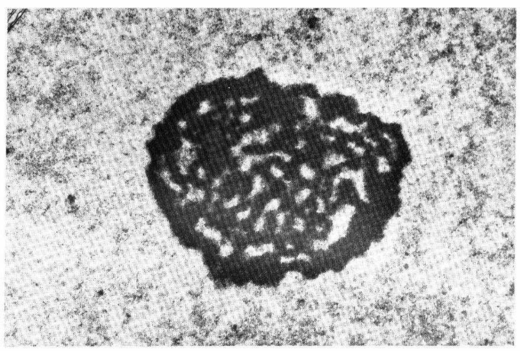
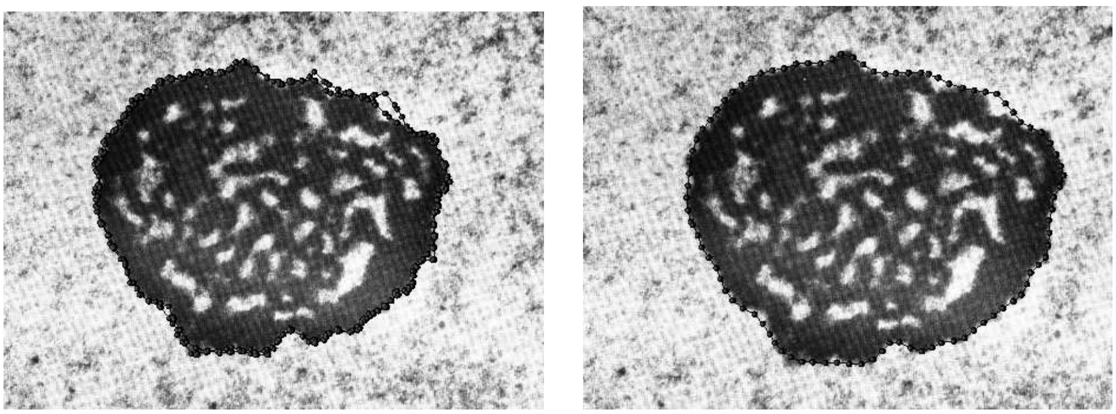


Figura 9.47: Estrutura interior (*nucléolos*) de uma célula.



(a) (b)

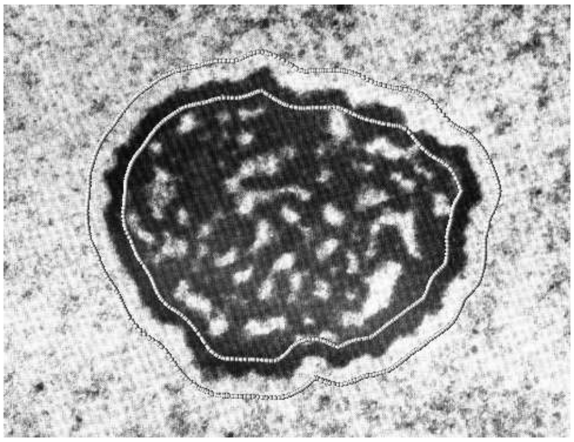
Figura 9.48: Segmentação da imagem da Figura 9.47: (a)Solução do Dual-T-Snakes para malha 15×15. (b) Solução correspondente do Viterbi.

Como já esperado, as snakes estão quase sobrepostas ao longo da borda, com exceção da região com curvatura mais elevada. A Figura 9.48.b mostra a solução do Viterbi para o espaço de busca definido por este resultado com os seguintes parâmetros: $\alpha = 1200.0, \beta = 0.5$ and $\lambda = 0.0$.

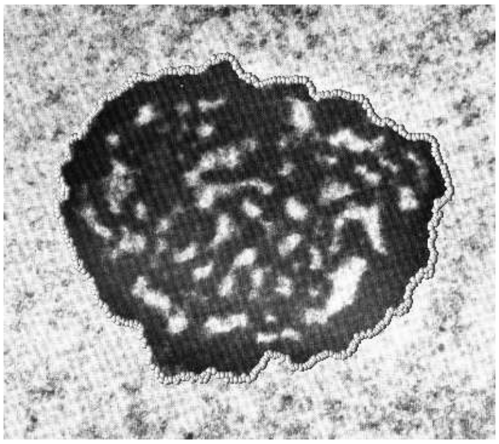
De acordo com os comentários acima, usamos agora dois offsets desta solução, um em direção ao interior e outro em direção ao exterior do objeto.

Estas curvas são obtidas avançando a curva da Figura 9.48.b na sua direção normal. Como já comentado anteriormente, possíveis auto-intersecções que possam ocorrer neste procedimento são resolvidas naturalmente pela método de reparamatrização da T-Snake (seção 5.3.2) não exigindo portando nenhum recurso extra.

A Figura 9.49.a mostra os off-sets usados para inicializar o Dual-T-Snakes para uma malha de resolução 5×5. A distância entre cada off-set e a curva geradora é de 22 unidades. A Figura 9.49.b mostra a solução do Dual-T-Snakes nesta fase.



(a)



(b)

Figura 9.49: (a) Offsets para inicializar Dual-T-Snakes. (b) Solução do Dual-T-Snakes para malha 5×5. (b)

A solução final obtida pelo Viterbi está na Figura 9.50 e os parâmetros são dados por: $\alpha = 1200.0, \beta = 0.5$ and $\lambda = 0.0$.

Observemos que para obter a solução parcial da Figura 9.48.b não há necessidade de aplicar duas buscas uma vez que partimos do pressuposto de que esta é apenas uma aproximação grosseira da borda. Quanto à distância entre os off-sets e a curva geradora, o valor da diagonal das células da triangulação é sempre um valor de referência.

9.2.5 Micrografia Eletrônica de Célula de Gato

A imagem a seguir mostra um exemplo envolvendo operações topológicas no contexto de imagens de células.

A Figura 9.51 mostra a imagem original a ser processada. Sua resolução é de 600×600.

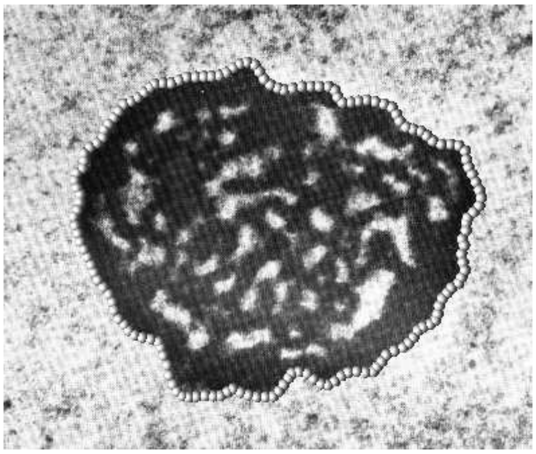


Figura 9.50: Solução final para imagem 9.47.

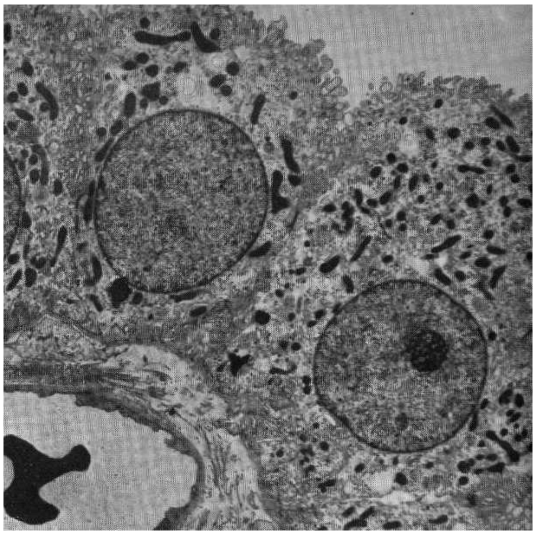


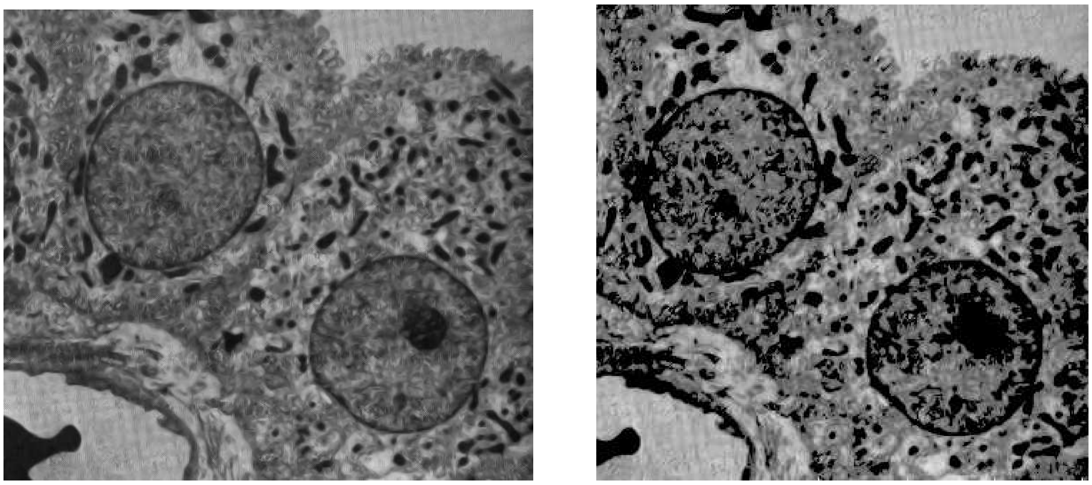
Figura 9.51: Imagem original.

A exemplo da Figura 9.47 esta imagem apresenta o interior e o exterior das células com padrões de intensidade de difícil caracterização. Neste caso em particular, vemos a presença de pequenas estruturas e artefatos os quais podem dificultar o movimento das snakes.

O primeiro ponto portanto é definir o tipo de pré-processamento da imagem. Uma observação que pode direcionar esta etapa é de que na borda das células temos uma estreita faixa com padrões de intensidade da ordem de $T = 80.0$. Contudo, existem pequenas estruturas com intensidades também dentro deste limiar. Assim, uma possibilidade interessante neste caso seria usar métodos de suavização que *respeitem* esta faixa, mas borrem o interior dos objetos.

Uma possibilidade simples para isto é a suavização direcional (Jain, 1989). Uma opção mais elaborada seria usar métodos de difusão não lineares do tipo daqueles discutidos na seção 2.2.

A Figura 9.52.a mostra a mesma imagem filtrada via suavização direcional e a Figura 9.52.b o resultado quando aplicamos o limiar dado acima:



(a) (b)

Figura 9.52: (a)Célula de Gato: Imagem filtrada por suavização direcional. (b) Resultado da aplicação do limiar $T = 80.0$.

A Figura 9.53.a mostra a inicialização do Dual-T-Snakes e a Figura 9.53.b mostra a solução parcial obtida com os parâmetros: $k = 200.0$, $\lambda = 50.0$, $b = 10.0$, $T = 80.0$, *Ponto de Congelamento*=28 e malha com resolução 20×20.

O critério usado para retirar uma T-Snake do ponto de congelamento é a variação do limiar. A força normal é definida pela expressão 7.3.

Este exemplo mostra uma dificuldade do Dual-T-Snakes: a presença de artefatos pode fazer com que o critério de parada baseado na proximidade entre as snakes nunca seja atingido.

É exatamente o que ocorre com o dual snake da direita na Figura 9.53.b. Este tipo de comportamento obriga o estabelecimento de um número máximo de inte-

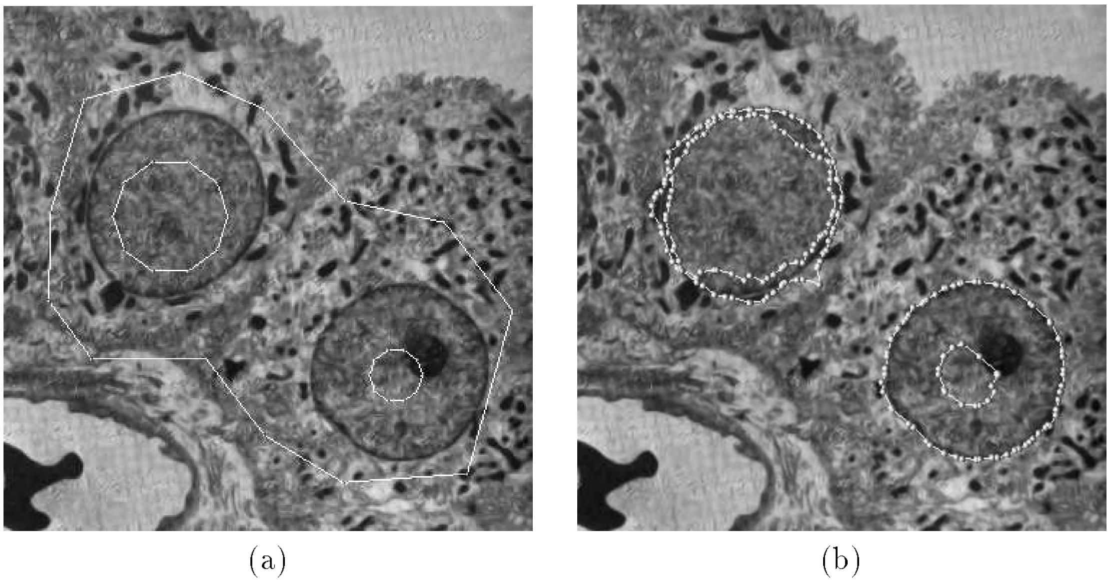


Figura 9.53: Célula de Gato: (a)Inicialização do Dual-T-Snakes. (b) Solução parcial do Dual-T-Snakes.

rações (um múltiplo do ponto de congelamento) a partir do qual assumimos que a instância atual do Dual-T-Snakes não será capaz de retirar as T-Snakes do ponto de congelamento.

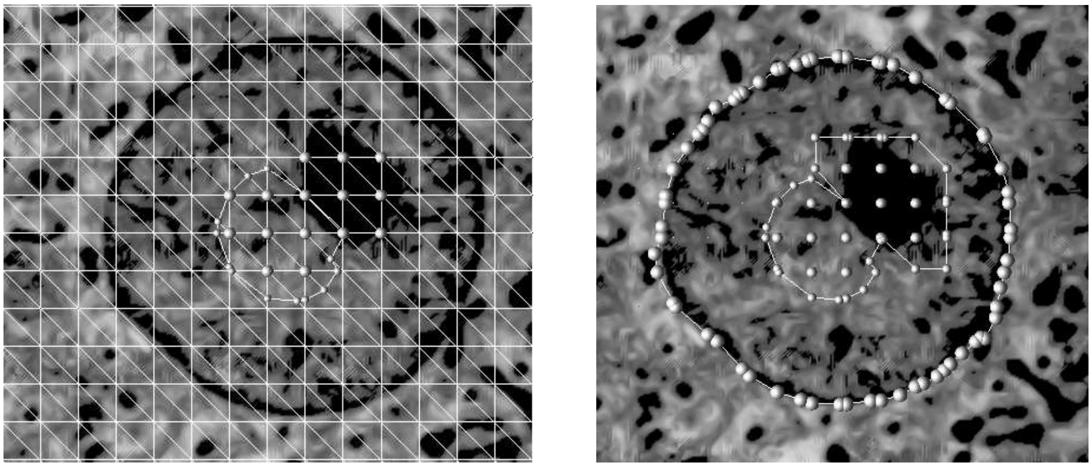
Nestes casos, poderíamos reduzir a dimensão da malha na tentativa de retirar a snake interna da posição atual. Contudo, para a figura acima, esta possibilidade não se mostrou eficiente.

O problema maior com relação à célula da direita é que o limiar usado deixa uma falha no interior da célula (Figura 9.52.b). A forma que nos pareceu mais eficiente para resolver esta dificuldade vem da seguinte observação: se os artefatos formam uma barreira para o movimento da T-Snake então poderíamos incorporar estes "objetos" ao interior da T-Snake usando um procedimento de busca simples nas vizinhanças da curva em questão.

Para visualizar esta idéia, observe a Figura 9.54.a onde marcamos os nós da triangulação interiores à T-Snake bem como os nós vizinhos desta onde a intensidade está abaixo do limiar escolhido. A variedade linear por partes dada pelo algoritmo door-in-door-out pode ser usada para re-inicializar o Dual-T-Snakes para a célula indicada (Figura 9.54.b). Com isto, obtemos um procedimento mais eficiente e robusto para tratar estas situações.

A solução do Dual-T-Snakes está finalmente apresentada na Figura 9.55. O resultado para a célula da esquerda é idêntico ao apresentado na Figura 9.53.b uma vez que neste caso o critério de parada baseado na triangulação foi satisfeito. Para a célula da direita, observamos que a snake interna pode avançar, graças ao procedimento acima, chegando finalmente ao resultado desejado nesta fase.

A Figura 9.56 mostra a solução final obtida pelo Viterbi com os parâmetros dados



(a) (b)

Figura 9.54: Célula de Gato: (a)Crescimento de região baseado na triangulação. (b) Re-inicializando o Dual-T-Snakes para a célula da esquerda.

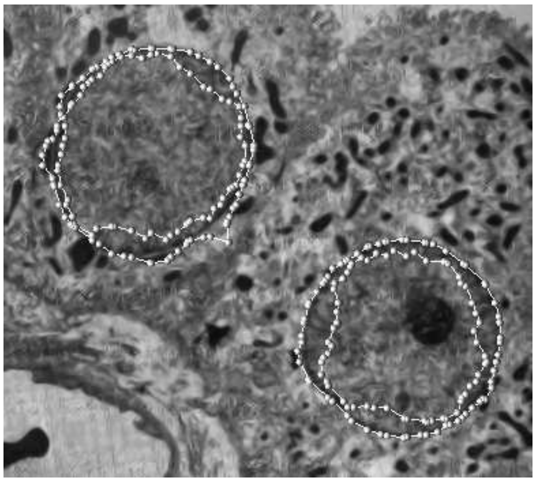


Figura 9.55: Solução final do Dual-T-Snakes juntamente com crescimento de região para células de Gato.

por: $\alpha = 1200.0, \beta = 10.0$ and $\lambda = 2.0$. O resultado obtido tem boa qualidade.

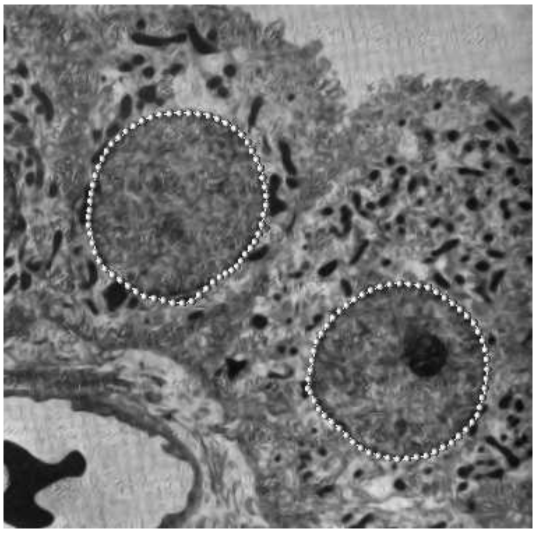


Figura 9.56: Solução final para células de Gato.

9.2.6 Homem Visível

Neste projeto um cadáver de um homem foi congelado e fatiado e estas fatias por sua vez foram digitalizadas em um equipamento especial. O resultado é um conjunto de dados colorido e muito detalhado do corpo humano.

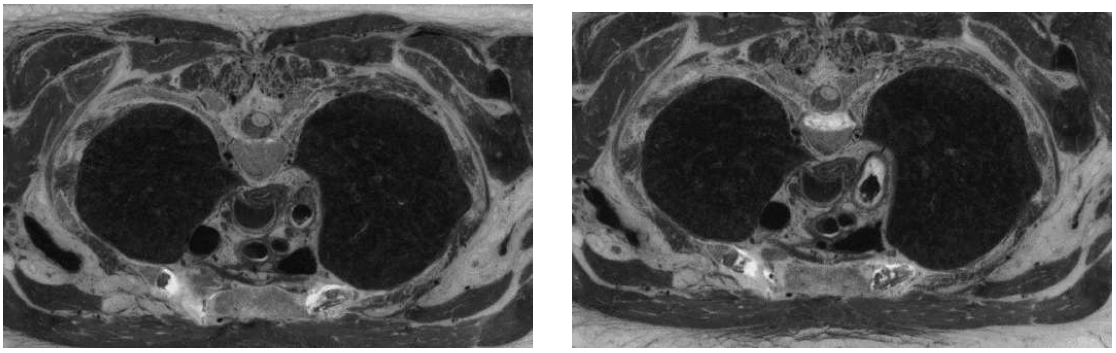
No Brasil, este projeto tem despertado interesse de pesquisadores em mecânica de fluidos interessados em aplicar métodos de simulação numérica na análise do fluxo sanguíneo e dos fenômenos relacionados. Esta é uma área da bioengenharia com muitos problemas em aberto e multidisciplinar por natureza, uma vez que envolve conhecimentos em anatomia, biologia, fluidos e processamento de imagens.

As images da Figura 9.57 constituem dois exemplos (aqui convertidos em tons de cinza) do conjunto de dados citado. Estas imagens foram cedidas pelo pesquisador Raúl A. Feijóo, do Laboratório de Computação Científica (LNCC), onde desenvolve-se atualmente uma linha de pesquisa em bioengenharia voltada para hemodinâmica.

Estas imagens mostram dois cortes próximos, na altura do peito. As estruturas em tons mais escuros correspondem a artérias, ao esôfago e aos pulmões (estruturas maiores). O bom contraste observado e a escala interna destas estruturas tornam a aplicação do método de inicialização do Capítulo uma boa opção para a etapa de segmentação.

Neste caso, a propriedade de escala local é bem caracterizada por uma malha 5×5 e o limiar para a imagem dado por $T = 35.0$.

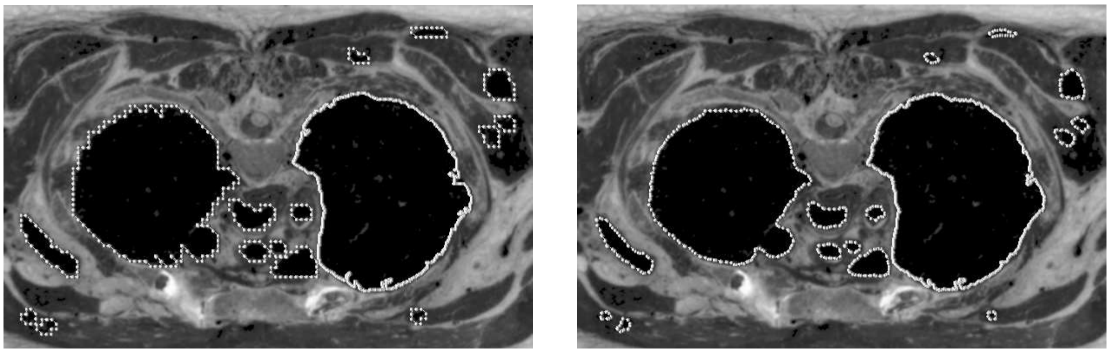
A imagem da Figura 9.58.a mostra as aproximações lineares obtidas pelo algoritmo door-in-door-out e a Figura 9.58.b mostra a solução final do método do Capítulo



(a) (b)

Figura 9.57: (a)-(b) Imagens do Projeto Homem Visível.

8.



(a) (b)

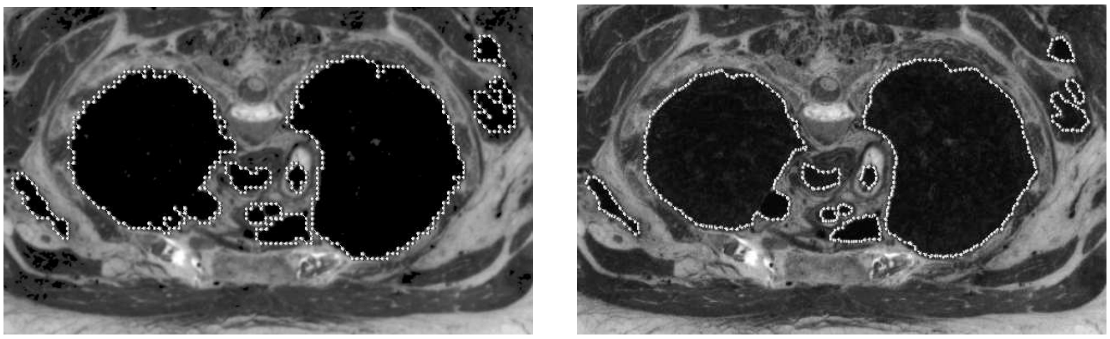
Figura 9.58: Homem Visível: (a)Variedades lineares obtidas. (b) Resultado obtido.

A Figura 9.59.a mostra as aproximações lineares para a segunda imagem. Observe que duas estruturas ficaram envolvidas por uma mesma snake. Isto veio do fato de não termos imposto um limite superior de área neste caso. A Figura 9.59.b mostra este caso resolvido, com as estruturas segmentadas corretamente.

9.2.7 Raio-X do Tórax

As radiografias do tórax constituem um importante recurso para diagnóstico de distúrbios e lesões pulmonares. O advento da radiografia digital possibilitou a pesquisa de métodos automáticos para a análise destas imagens e auxílio ao diagnóstico. Um ponto fundamental para isto é a segmentação das mesmas (van Ginneken & ter Haar Romery, n.d.).

Neste caso também, a extração do contorno que delimita cada pulmão tem papel de destaque. Em (van Ginneken & ter Haar Romery, n.d.) encontramos uma técnica com esta finalidade baseada em heurísticas e detecção de pontos de borda orientados em direções definidas previamente.



(a) (b)

Figura 9.59: Homem Visível: (a)Variedades lineares obtidas. (b) Inicialização final para Figura 9.57.b.

A Figura 9.60 mostra uma imagem deste tipo, onde vemos o resultado de uma exposição frontal de um paciente. As dificuldades de processamento deste tipo de imagem são várias.

Figura 9.60: Radiografia do tórax.

Primeiramente, observemos que o contraste nas bordas dos pulmões é muito pouco definido, o que implica que a snake terá pouca resistência ao seu movimento quando próxima às bordas desejadas. Além disso, acrescenta-se o problema dos padrões de intensidade no interior dos pulmões ser de difícil caracterização.

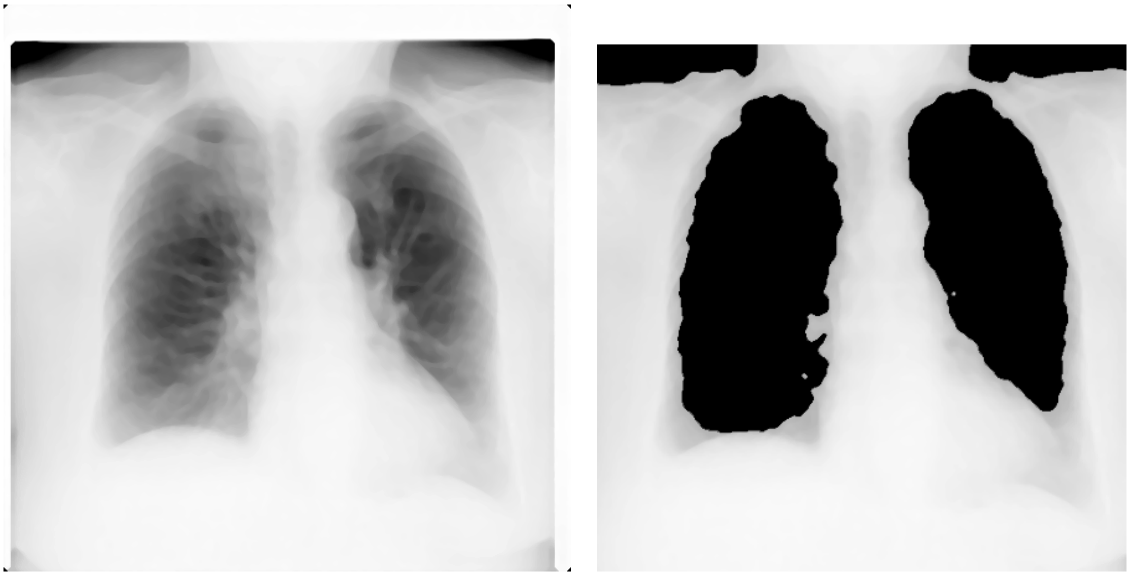
O background é mais uniforme, o que poderia fornecer um limiar para definir a força normal. Contudo, o tênue contraste nas bordas torna esta possibilidade pouco eficiente.

Apesar destas dificuldades, este é um caso onde podemos explorar o potencial do Dual-T-Snakes uma vez que temos dois objetos de interesse.

Como nos exemplos anteriores, o primeiro ponto é o pré-processamento da imagem. Uma vez que temos pouco contraste nas bordas a suavização gaussiana não parece ser adequada num primeiro momento, embora podesse ser interessante para suavizar o interior dos objetos.

Optamos assim por usar inicialmente um filtro da mediana, para uma janela de dimensão 5×5, aplicado 5 vezes sobre a imagem. Este procedimento suaviza mais intensamente o interior dos objetos do que suas fronteiras, o que é um resultado desejado neste momento.

Em seguida, aplicamos um filtro gaussiano para diminuir o efeito de possíveis artefatos criados na filtragem anterior. O resultado está na Figura 9.61.a. A Figura m9.61.b mostra o resultado da aplicação de um limiar $T = 180.0$ sobre a imagem assim obtida. Este limiar será usado na definição da força normal dada pela expressão (5.54).

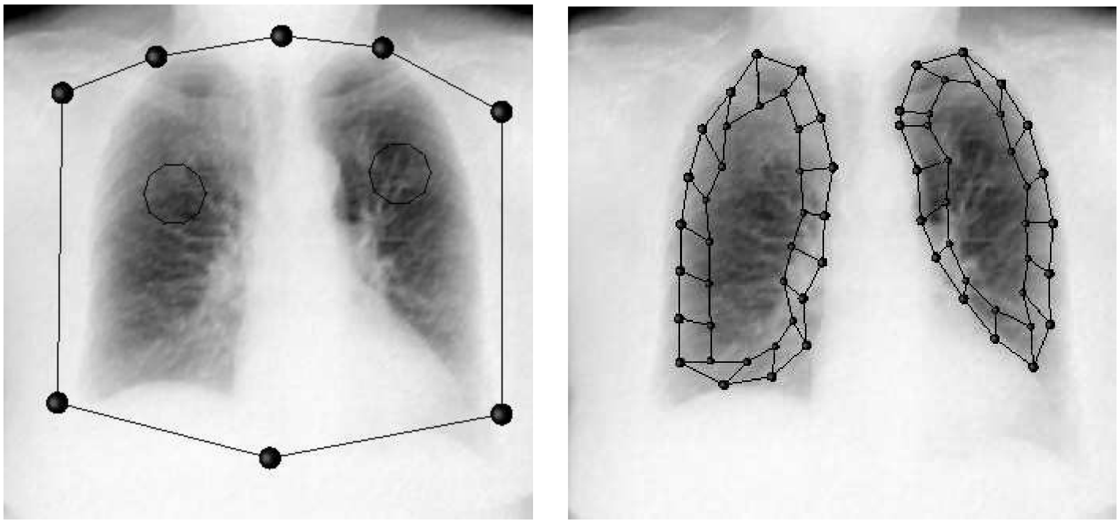


(a) (b)

Figura 9.61: Radiografia do tórax: (a)Imagem filtrada. (b) Resultado da aplicação do limiar $T = 180.0$.

A Figura 9.62.a mostra a inicialização do Dual-T-Snakes e o espaço de busca definido a partir da solução obtida. Os parâmetros usados são os seguintes: $k = 15.0$, $\lambda = 14.0$, $b = 0.2$. A malha tem resolução 4×4.

O resultado obtido está longe do desejado, principalmente nas regiões inferiores. O pré-processamento usado tem o efeito positivo de diminuir os contrastes entre os diversos artefatos no interior dos objetos. Isto é interessante pois do contrário a snake interna poderia ficar presa em uma região interna e o método *puxaria* a snake externa em direção a esta região perdendo totalmente a borda desejada, sobre a qual o contraste é pouco definido.



(a) (b)

Figura 9.62: Radiografia do tórax: (a)Inicialização do Dual-T-Snakes. (b) Espaço de busca obtido.

Contudo, não resolvemos o problema das regiões onde temos pouca definição. A aplicação do Dual-T-Snakes de forma mais eficiente depende do aprimoramento do pré-processamento para este problema específico, o que não é objetivo deste trabalho.