Capítulo 10

Conclusões e Perspectivas

Neste trabalho nós enfocamos os modelos de contornos ativos 2D partindo do modelo original (Kass *et al.* , 1988).

Descrevemos as limitações básicas deste modelo e analisamos algumas soluções encontradas na literatura bem como os modelos alternativos correspondentes. Dentre estes modelos, o modelo Dual (Gunn & Nixon, 1997; Gunn, 1996a) e o método das T-Snakes (McInerney & Terzopoulos, 1995; McInerney, 1997) tiveram lugar central uma vez que uma contribuição desta tese é a combinação dos mesmos gerando o método das Dual-T-Snakes (Giraldi *et al.* , 2000d; Giraldi *et al.* , 2000c). Basicamente, o Dual-T-Snakes consiste em incorporar ao método das T-Snakes um *modelo Dual Generalizado*: um *contorno externo* envolvendo os objetos de interesse contrai e se divide enquanto que *contornos internos* aos objetos se expandem em direção às bordas procuradas.

Com isto, pudemos colocar as habilidades topológicas das T-Snakes juntamente com a capacidade de rejeitar mínimos locais do modelo Dual evolucionário original em uma única metodologia. Os resultados experimentais do Capítulo 9 colocam em evidências estas qualidades do Dual-T-Snakes. Estes resultados demonstram também a robustez do novo método com relação a mínimos locais.

Uma vez que o Dual-T-Snakes não faz uso de correspondência entre as snakes, ficamos livres da necessidade de um modelo de forma, como é o caso do método Dual original. Pudemos assim extender o método dual para formas e topologias mais gerais.

Do ponto de vista das T-Snakes, o Dual-T-Snakes trouxe efetivamente mais robustez quanto aos mínimos locais da energia de imagem pelo balanço da energia/afinidade e pela nova noção de proximidade (baseada na triangulação) entre as snakes internas e externas.

Em geral, o resultado do Dual-T-Snakes são duas curvas limitando a região onde está a borda procurada. Fazendo proveito desta redução do espaço de busca, nós propomos na seção 6.2 a utilização do modelo Dual Baseado em Programação Dinâmica, uma vez que as snakes internas e externas necessárias para a aplicação do algoritmo de Viterbi (seção 5.2) são exatamente o resultado do Dual-T-Snakes.

Os exemplos com imagens sintéticas do Capítulo 9 evidenciam a principal classe de aplicação do Dual-T-Snakes: imagens com background e objetos de interesse com padrões de intensidade pouco homogêneos.

A complexidade computacional do Dual-T-Snakes é $O(N_T)$, onde N_T é o número de triângulos da divisão simplicial do espaço. Uma vez que usamos sempre snakes internas e externas, o custo computacional efetivo é sempre da ordem do dobro daquele correspondente a usar apenas uma T-snake envolvendo os objetos.

A inicialização do Dual-T-Snakes pode ser feita pelo usuário, ou pelo método do Capítulo 8, este último constituindo-se em uma contribuição desta tese no contexto de inicialização de modelos deformáveis (Giraldi *et al.* , 2000e; Giraldi *et al.* , 2000b; Giraldi *et al.* , 2000a).

Esta metodologia usa os elementos básicos das T-Snakes (*estatísticas da imagem, triangulação e funções características*), bem como um conhecimento prévio da *escala local* dos objetos, para inicializar um modelo defomável próximo da fronteira dos mesmos. A complexidade deste método também é da ordem do número de triângulos da divisão simplicial do espaço.

Na seção 9.2.1 tivemos exemplos de como este método de inicialização pode ser usado para definir a snake externa e em seguida a interna, desde que tenhamos informações adicionais da geometria dos objetos.

Os exemplos do Capítulo 9 mostram que a escolha de parâmetros não é crítica para o Dual-T-Snakes. A idéia é abrir mão de uma maior suavidade da solução, uma vez que o resultado que se deseja com o Dual-T-Snakes é apenas diminuir o espaço de busca para em seguida obter a solução desejada pelo método de Viterbi.

O exemplos do Capítulo 9 indicam que a política de variação do limiar é mais eficiente para retirar uma T-Snake de um mínimo local no caso de imagens com ruídos. Neste caso também, os resultados apresentados com imagens sintéticas evidenciam a maior eficiência da definição da normal dada pela equação 7.3 com relação àquela dada pela equação (5.54).

O aumento da resolução da malha se mostrou eficiente para extrair detalhes da borda em regiões com curvatura mais alta podendo também ser usada para retirar uma T-Snake de um ponto de congelamento.

Quando o resultado do Dual-T-Snakes apresentar intersecção entre as snakes ou mesmo sobreposição das mesmas (seção 9.2.4), o espaço de busca pode ser obtido através de offsets de uma das snakes ou mesmo da solução para a primeira busca do Viterbi. Os offsets podem ser tomados na direção normal à solução parcial, uma vez que as possíveis auto-intersecção que podem ocorrer são resolvidas naturalmente pelo método de reparametrização das T-Snakes.

A utilização de métodos multigrid com o Dual-T-Snakes pode prejudicar a suavidade da solução desta fase, caso não atualizemos os parâmetros ao passarmos para uma malha mais fina. Contudo, uma vez que podemos abdicar de uma maior suavidade para a solução do Dual-T-Snakes a utilização de metodologias deste tipo pode ser eficiente uma vez que a escolha dos parâmetros fica simplificada. Os resultados das seções 9.2.4 e 9.1.4 apontam exatamente nesta direção.

O exemplo da seção 9.2.5 onde usamos um método de crescimento de região baseado na triangulação parece ser uma proposta eficiente para avançar uma T-Snake presa em artefatos da imagem (mínimo local) que não possam ser eliminados eficientemente pela variação do limiar usado na definição da força normal.

Como limitações do Dual-T-Snakes, temos primeiramente a necessidade de limitar o passo máximo da snake a uma unidade. Isto implica em perda de performance. A necessidade de interação com o usuário na sua inicialização é outra limitação do método.

Quanto ao método de inicialização do Capítulo 8, sua principal limitação está vinculada à necessidade de um conhecimento a priori da escala local dos objetos de interesse.

Com relação ao Viterbi, o maior problema encontrado é a necessidade de um espaço de busca mais refinado nas regiões com curvatura mais elevada (Figuras 9.25). Se tomarmos um espaço de busca mais fino ao longo de toda a região limitada pelas snakes poderemos comprometer a performance do algoritmo. Por outro lado, a identificação automática das regiões que necessitam de um espaço de busca mais refinado dependem de testes adicionais que também possuem seu custo.

10.1 Perspectivas Futuras

Os dois métodos que constituem a contribuição deste trabalho (*Dual-T-Snakes e Inicialização de Modelos Deformáveis*) são fundamentados na metodologia das T-Snakes, a qual tem extensão para 3D (T-Superfícies, Apêndice C) com eficiência já comprovada na literatura (McInerney & Terzopoulos, 1999; McInerney, 1997). Assim, toda a metodologia deste trabalho pode ser estendida para superfícies. Os fundamentos matemáticos para isto são desenvolvidos no Apêndice C.

Uma vez que estamos limitando o passo da snake a no máximo um pixel por interação, podemos testar a possibilidade de usar uma noção de afinidade baseada na energia de imagem sobre a snake; isto é, dada uma T-Snake congelada em um mínimo local, aplicaríamos força adicional em regiões onde o campo externo seja menos intenso. A detecção destas regiões da snake poderia ser feita usando-se a metodologia apresentada em (Durikovic *et al.* , 1995). Tal procedimento não seria eficiente para bordas subjetivas e implicaria em redefinir o papel da força normal no Dual-T-Snakes. Além disto, sua extensão para 3D não parece possível.

Uma possibilidade para reduzir o esforço computacional do método de segmentação baseado no Dual-T-Snakes e em Programação Dinâmica (seção 6.2) seria usar métodos multi-resolução baseados em Quadtrees ou Pirâmides. Neste caso, primeiramente aplicaríamos o Dual-T-Snakes para a imagem com resolução mais baixa. Em seguida, usaríamos uma técnica de minimização em multi-escala (Heitz *et al.* , 1994; Mignotte & Meunier, February, 2000) para fazer o tracking das bordas desejadas pelos diferentes níveis da estrutura.

Podemos abrir a possibilidade de mais de um ponto semente em um mesmo objeto tratar objetos com vários padrões de intensidade. Cada ponto semente seria o centro de uma T-Snake interior. Estas snakes expandiriam, sofrendo merges durante a sua evolução até que finalmente tenhamos um dual snakes com apenas duas snakes.

Esta possibilidade traz a perspectiva de explorar mais intensamente a simbiose natural entre o método das conexões fuzzy (Udupa & Samarasekera, 1996) e o Dual-T-Snakes discutida no Apêndice E. Os pontos sementes para o método fuzzy seriam usados para inicializar o Dual-T-Snakes e o campo gerado seria usado para definir o sentido da força normal das snakes, como feito na seção 9.1.5.

A interação com o usuário é um recurso que não exploramos no contexto do Dual-T-Snakes. Embora o grande desafio do método seja deixá-lo totalmente automático, a possibilidade do usuário estabelecer vínculos para a snake pode ser útil, particularmente para problemas onde o contraste na fronteira dos objetos de interesse é baixo, caso típico das imagens de Raios-X do tórax analisadas na seção 9.2.7.

A interação com o usuário vem naturalmente ligada ao desenvolvimento de um sistema de segmentação/extração de bordas com interfaces independentes do Data Explorer. Este sistema poderia incorporar não apenas o Dual-T-Snakes mas também o método de inicialização do Capítulo 8. Como já apontado na seção 8.3, este método pode ser ponto de partida para uma metodologia semi-automática de segmentação baseada em extração de bordas. Neste caso, a idéia básica é usar o resultado do método como uma pré-segmentação da imagem a qual seria melhorada pela ação do usuário.

Assim, regiões onde temos mais de um objeto envolvido por uma única snake, e que não foram separados na resolução mais fina, poderia ser *divididas* apropriadamente pela ação do especialista. Tal proposta pressupõe que tenhamos políticas eficientes de interação com o resultado inicial.

O *live wire* - paradigma de extração de bordas baseado em interação com o usuário (Falcão *et al.* , 1996)- poderia ser uma primeira opção neste sentido, juntamente com metodologias semi-automáticas para efetuar splits (cortes, no caso) de regiões.

O desenvolvimento de um sistema usando estes elementos é mais uma perspectiva futura para este trabalho. Em (Liang *et al.* , 1999b; Liang *et al.* , 1999a) encontramos um sistema que unifica live wire e snakes em um método único. Contudo, este sistema não pressupõe mudanças topológicas.

A análise de convexidade do Apêndice D pode ser interessante no estudo de modelos para tracking baseados em sistemas de equações diferencias de segunda ordem (Peterfreund, 1999).

Os resultados da teoria de grupos de Lie sumarizados no Apêndice B e a discussão da seção B.3 devem ser tomados como ponto de partida para uma revisão ou mesmo generalização de modelos globais de snakes baseados em conceitos de invariância, tais como o AI-Snakes (seção 5.1.3).