T-SNAKES DUAIS E INICIALIZAÇÃ0 DE MODELOS DEFORMÁVEIS

Gilson Antonio Giraldi

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

Prof. Antonio Alberto Fernandes de Oliveira, D.Sc.

Prof. Cláudio Esperança, Ph.D.

Prof. Edilberto Strauss, Ph.D.

Prof. Aura Conci, D.Sc.

Prof. Fabiana Rodrigues Leta, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
NOVEMBRO DE 2000

GIRALDI, GILSON ANTONIO

T-Snakes Duais e Inicialização de Modelo Deformáveis [Rio de Janeiro] 2000

XII, 104 p., 29,7 cm, (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia de Sistemas e Computação, 1999)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1 – Modelos de Contorno Ativo

2 – Snakes Duais

3 – Snakes Topológicas - T-Snakes

4 – Inicialização de Modelos Deformáveis

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Dedicatória:

À Thereza, Gabriel e André.

Agradecimentos:

Aos professores, colegas e ex-colegas do LCG: Cláudio Esperança, Ronaldo Marinho, José Brito, José Maria, Fernando Wagner, Antonio Lopes, Paulo Sérgio, Italo Matias, Mara Rios, Nelma Ribeiro, Walter, Rogério, Luiz Marcos e outros, pelo apoio e ajuda que tive de todos durante estes últimos anos,

A todos os Professores que tive, desde quem me ensinou a ler e escrever, até meu orientador, Professor Antonio Oliveira, pela formação profissional e humana que me passaram.

A minha fimília, particularmente meu Pai, Claudio Giraldi, e minha Mãe, Maria Jovina, pela vida que me deram.

A meus Tios Therezinha e Jose Marotto, que me acolheram no momento mais difícil de minha vida.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro.

Finalmente, agradeço À Deus por tudo.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

T-SNAKES DUAIS E INICIALIZAÇÃO DE MODELOS DEFORMÁVEIS

Gilson Antonio Giraldi

Novembro/2000

Orientador: Antonio Alberto Fernandes Oliveira

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Neste trabalho exploramos o modelo das T-Snakes para propor um *Modelo Dual de Contornos Ativos 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.

Como resultado, conseguimos uma nova metodologia que é dual e topológica ao mesmo tempo, daí denominá-la *Dual-T-Snakes*, ou *T-Snakes Duais*.

A inicialização é um ponto crucial para a eficiência de modelos deformáveis em geral. Tendo em vista esta questão, desenvolvemos um novo método para inicializar modelos deformáveis em geral baseado em propriedades da topologia dos objetos de interesse e da escala espacial dos mesmos. O método tem como base os elementos das T-Snakes (Triangulação, Função Característica, e modelo discreto de snakes). As aplicações abordadas serão constituídas por exemplos em imagens médicas obtidas por microscopia (citologia), ressonância magnética nuclear e imagens de raio X.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DUAL T-SNAKES AND INITIALIZATION OF DEFORMABLE MODELS

Gilson Antonio Giraldi

November/2000

Advisor: Antonio Alberto Fernandes Oliveira

Department: Computing and Systems Engineering

In this thesis we propose a *generalized dual active contour framework*: one T-Snake contracts and splits from outside the target(s) and the other one(s) expand(s) from inside during the process of seeking the objects boundaries in a scene.

This new approach - Dual-T-Snakes - maintains the topological capabilities of the T-Snakes and the ability of avoiding local minima of the Dual ACM.

Also we develop in this work a method to initialize deformable models which is based on properties related to the topology and spatial scale of the objects in 2D or 3D scenes. We assume some topological and scale properties for the objects of interest. From these constraints we propose a method which first defines a triangulation of the image domain. After that, we take a subsampling of the image field over the triangulation grid nodes. This field is thresholded, generating a binary one namely "Object Characteristic Function", from which a rough approximation of the boundary geometry is extracted.

Sumário

1 Introdução **1**

2 Detecção de Pontos de Borda **12**

2.1 Descrição Matemática 14

2.2 Bordas no Espaço de Escalas 17

3 Modelo Original de Contorno Ativo **25**

3.1 Modelo Original de Snakes 26

3.1.1 Energia da Snake 27

3.2 Generalização do Modelo Original via Mecânica Lagrangeana 30

3.2.1 Princípio de Hamilton 31

3.2.2 Formulação Geral das Snakes 32

3.2.3 Discretização do Modelo 35

3.2.4 Análise Numérica 36

3.3 Limitações do Modelo Original 39

3.4 Modelo de Balloon 40

3.4.1 Instabilidade devido a Forças de Imagem 41

3.4.2 Discretização no Espaço 42

3.4.3 Inicialização 42

3.4.4 Equações do Balloon 44

4 Métodos Matemáticos **46**

4.1 Programação Dinâmica 46

4.1.1 Programação Dinâmica no caso Discreto 47

4.2 Mudanças Topológicas 51

4.3 Fundamentos Matemáticos das T-Snakes 51

4.3.1 Decomposição do Domínio 52

4.3.2 Aproximação Linear por Partes 53

4.4 Teoria de Invariância 55

5 Modelos Alternativos de Interesse **58**

5.1 Modelos Usando Invariância 58

5.1.1 Modelo Dual 59
5.1.2 Metodologia do Dual 63
5.1.3 AI-Snakes: Modelo de Forma Ativo 63
5.2 Modelo Dual Baseado em Programação Dinâmica 71
5.3 Métodos envolvendo mudanças Topológicas 72
5.3.1 Método dos Conjuntos de Níveis 72
5.3.2 T-Snakes 76

6 Dual-T-Snakes **85**
6.1 Descrição do Dual-T-Snakes 86
6.2 Metodologia para Segmentação 90
6.3 Vantagens do Dual-T-Snakes 91
6.4 Desvantagens do Dual-T-Snakes 92

7 Implementação do Dual-T-Snakes **94**
7.1 Escolha de Parâmetros 94
7.2 Passo Máximo 96
7.3 Força Externa e Força Normal 97
7.4 Suavização e Forças Internas 100
7.5 Resolução da Triangulação 102
7.6 Condição de Entropia 103
7.7 Pré-Processamento da Imagem 105
7.8 Evitando Mínimos Locais 106
7.9 Detalhes da Implementação do Dual-T-Snakes 107

8 Inicialização de Modelos Deformáveis **111**
8.1 Trabalhos Relacionados 111
8.2 Método Multi-resolução 113
8.3 Método para Inicialização de Snakes 114

9 Resultados Experimentais **119**
9.1 Imagens Sintéticas 120
9.1.1 Circunferência em Ruído 120
9.1.2 Variando Ruído 124
9.1.3 Background com Ruído e Artefatos 131
9.1.4 Mudanças Topológicas 131
9.1.5 Conexões Fuzzy e Dual-T-Snakes 145
9.2 Imagens Médicas 149
9.2.1 Ressonância Magnética da Cabeça 149
9.2.2 Célula do Sangue 152
9.2.3 Imagens com Várias Células 155

9.2.4 Imagens de Micrografia Eletrônica 160
9.2.5 Micrografia Eletrônica de Célula de Gato 164
9.2.6 Homem Visível 167
9.2.7 Raio-X do Tórax 169

10 Conclusões e Perspectivas **172**
10.1 Perspectivas Futuras 174

A Programação Dinâmica no Contínuo **177**

B Grupos de Lie e Invariância **181**
B.1 Grupos de Lie 182
B.1.1 Espaços Topológicos 182
B.1.2 Variedades Diferenciáveis 182
B.1.3 Definição de Grupo 183
B.1.4 Definição de Grupos de Lie 184
B.1.5 Grupo de Transformações Locais 184
B.1.6 Órbitas 185
B.1.7 Campos Vetoriais em Variedades 185
B.1.8 Fluxos e Geradores Infinitesimais 187
B.1.9 Teoria de Invariantes 188
B.2 Análise Dimensional 190
B.3 Aplicações 193

C Variedades Lineares por Partes e T-Superfícies **199**
C.1 Definições Básicas 199
C.2 Aproximando Variedades Diferenciáveis Definidas Implicitamente . . 200
C.3 T-Superfícies 202

D Análise de Convexidade para Snakes **205**
D.1 Análise de Convexidade do Modelo Original 207
D.1.1 Análise de Convexidade 208
D.1.2 Hessiana da Energia Externa 209
D.2 Snakes em Dimensão Finita 212
D.2.1 Análise Numérica 214
D.2.2 Análise Qualitativa 215
D.2.3 Convexidade e Atratores 219
D.3 Discussão 221

E Método da Conexões Fuzzy **222**
E.1 Subconjuntos Fuzzy 222
E.2 Método da Conexões Fuzzy 223
E.3 Algoritmo 225
E.4 Dual-T-Snakes e Conexões Fuzzy 226
E.5 Função de Afinidade 227

Referências Bibliográficas **227**

Lista de Figuras

2.1 Modelos unidimensionais para pontos de borda. 12
2.2 Sinal irregular f com ruido. 13
2.3 (a)Imagem original. (b)Realce das bordas via limiar para o gradiente. 14
2.4 (a)Degrau da figura 2.1.a suavizado.(b)Primeira derivada.(c)Segunda derivada.(d)Terceira derivada 19
2.5 Tracking no espaço de escalas. 21
2.6 Célula de Gato: (a)Imagem de Células original.(b)Imagem suavizada por gaussiana. 21
2.7 (a)Célula de Gato: (a)Imagem de Células original.(b)Imagem obtida por difusão anisotrópica. 23

3.1 (a)Imagem original. (b)Imagem filtrada. 25
3.2 (a)Força descontínua provocando oscilações. (b)Interpolação evita instabilidades melhorando convergência. 42
3.3 Gradiente não nulo apenas em uma vizinhança do ponto de borda. . . 43
3.4 (a)Segunda derivada. (b)Derivada de quarta ordem 44

4.1 Curvas limitando região contendo borda. 49
4.2 Discretização da região de interesse. 49

5.1 Modelo local de forma. 59
5.2 Perfil de energia. 61
5.3 Configurações possíveis para vértices vizinhos. 67
5.4 Comparação entre a snake e o protótipo alinhado. 69
5.5 Programação Dinâmica para contornos fechados. 72
5.6 Método dos Conjuntos de Níveis. 73
5.7 Snake projetada sobre uma triangulação do tipo Coxeter-Freudenthal. 77
5.8 Merge entre duas curvas. Nós marcados são aqueles onde χ tem valor 1. 77
5.9 Polígono contendo nó interior (queimado). 80
5.10 Subespaços usados para classificação de nós. 81
5.11 Possíveis casos para classificação. 82
5.12 Triangulação do tipo J_1. 84

6.1 Inicialização do Dual-T-Snake. 87
6.2 Proximidade entre duas snakes medida pela triangulação. 88
6.3 Split da Dual Snakes inicial. 89
6.4 Dual-T-Snake result for figure 6.1. A resolução da grade é 5×5 e os snaxels são os pontos em branco. 90
6.5 Evolução de curva na direção normal pode causar auto-intersecções. . 92

7.1 Forças internas para as Snakes do Dual-T-Snakes. 95
7.2 Forças internas com parâmetros positivos (esquerda) e negativos (direita). 95
7.3 Com passo muito alto, a snake pode avançar o degrau perdendo a borda. 97
7.4 (a)Forças de imagem e normal para as T-Snakes. (b)Forças de imagem e normal para o Balloon. 97
7.5 Snake antes e depois da reparametrização. 98
7.6 Comportamento da força normal sobre a snake podendo gerar oscilações. 99
7.7 As forças internas nulas devido alinhamento e distribuição uniforme de snaxels. 100
7.8 Distribuição não-uniforme de snaxels devido reparametrização. 102
7.9 Snaxels muito próximos após reparametrização. 104
7.10 Snake avançou para região onde função característica não muda de sinal. 104
7.11 Imagem contendo objeto com interior complicado mas background simples. 105
7.12 Imagem contendo objeto imerso em background com ruído. 106
7.13 Fluxograma descrevendo as principais partes da implementação do Dual-T-Snakes. 110

8.1 Representação do esquema de multi-resolução usado. 112
8.2 (a)Imagem original. (b)Malha e imagem truncada pelo limiar. 113
8.3 (a)Função Característica. (b)Aproximação obtida. 114
8.4 (a) Célula de mielina. (b)Variedade Linear gerada. (c)Resultado final do método. 115
8.5 (a) Células de lisossomos. (b)Aproximações lineares por partes obtidas para resolução 5×5. 115
8.6 (a) Escala de separação entre objetos mais fina que a escala interna. (b) Aproximações lineares por partes obtidas com resolução 5×5. . . 116
8.7 Resultado obtido com resolução 3×3, a partir da imagem 8.6.b . . . 117

8.8 Resultado final dos passos (1)-(5) para as imagens das Figuras 8.5.a e 8.7. As resoluções usadas são 5×5 para o resultado (a) e 3×3 para (b). 118

9.1 Círcunferência em meio com Ruído. 121
9.2 Inicialização do Dual-T-Snakes. 121
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. 123
9.4 Solução do Dual-T-Snakes correspondente a Figura 9.2. 124
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. 125
9.6 Dual-T-Snakes em malha 5×5: (a)Inicialização. (b)Interação 21. (c)Interação 31. (d)Solução final do Dual-T-Snakes. 126
9.7 (a)Solução do Viterbi para Figura 9.4.f. (b)Solução do Viterbi para Figura 9.6.d. 127
9.8 Inicialização para os exemplos desta seção. 127
9.9 Dual-T-Snakes: Solução e solução projetada na malha 5×5. 129
9.10 Instante $t = 168$ do Dual-T-Snakes para força normal dada por (5.54). 130
9.11 (a)-(d) Soluções do Viterbi para os exemplos das Figuras 9.9. 132
9.12 (a) Elipse em meio com Ruído e artefatos. (b) Inicialização do Dual-T-Snakes 133
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. 134
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. 135
9.15 (a)-(b)Solução do Viterbi para as Figuras 9.13.f e 9.14.f, respectivamente. 135
9.16 (a) Figura contendo três objetos de interesse. (b) Detetor de bordas aplicado. 136
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. 137

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. 138
9.19 Solução do Dual-T-Snakes para a evolução da Figura 9.18. 139
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. 139
9.21 Dual-T-Snakes: Resultado insatisfatório para objeto superior. 140
9.22 Dual-T-Snakes: Solução e sua projeção na malha 3×3. 141
9.23 Dual-T-Snakes: Solução e sua projeção na malha 5×5. 142
9.24 (a)Solução do Dual-T-Snake suavizada. (b)Espaço de busca correspondente. 144
9.25 (a)-(d) Soluções do Viterbi para os exemplos das Figuras 9.22. 146
9.26 Objetos imersos em meio com ruído exponencial. 147
9.27 Campo σ_0 obtido pelo método das conexões fuzzy para a Figura 9.26. 148
9.28 Solução do Dual-T-Snakes para normal definida segundo o campo σ_0 mostrado na Figure 9.27. 148
9.29 (a)Espaço de busca gerado a partir de off-sets. (b)Solução final. . . . 148
9.30 (a)Imagem original. (b) Triangulação com resolução 5×5 e Função Característica do Objeto. 150
9.31 Inicialização e solução do Dual-T-Snakes para fatias 15, 55 e 60. . . . 151
9.32 Solução obtida por programação dinâmica para a fatia de número 15. 152
9.33 Células do sangue. 153
9.34 Imagem da Figura 9.33 filtrada. 153
9.35 (a) Inicialização do Dual-T-Snakes. (b)Solução final do Dual-T-Snakes.154
9.36 Solução final do Viterbi correspondente à Figura 9.33. 154
9.37 Células da coluna cervical. 155
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. . 156
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. 156

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. 157
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. 158
9.42 Resultado da Figura 9.41.d e malha 5×5. 158
9.43 Imagem contendo objeto amorfo. 159
9.44 Inicialização obtida para a Figura 9.43 para malha 9×9. 159
9.45 (a) Inicialização para malha com resolução da imagem. (b) Curva inicial e Offset. 160
9.46 (a) Espaço de busca definido pela solução inicial e seu offset. (b) Resultado do Viterbi. 161
9.47 Estrutura interior (*nucléolos*) de uma célula. 162
9.48 Segmentação da imagem da Figura 9.47: (a)Solução do Dual-T-Snakes para malha 15×15. (b) Solução correspondente do Viterbi. 162
9.49 (a) Offsets para inicializar Dual-T-Snakes. (b) Solução do Dual-T-Snakes para malha 5×5. (b) 163
9.50 Solução final para imagem 9.47. 163
9.51 Imagem original. 164
9.52 (a)Célula de Gato: Imagem filtrada por suavização direcional. (b) Resultado da aplicação do limiar $T = 80.0$. 165
9.53 Célula de Gato: (a)Inicialização do Dual-T-Snakes. (b) Solução parcial do Dual-T-Snakes. 165
9.54 Célula de Gato: (a)Crescimento de região baseado na triangulação. (b) Re-inicializando o Dual-T-Snakes para a célula da esquerda. . . . 166
9.55 Solução final do Dual-T-Snakes juntamente com crescimento de região para células de Gato. 167
9.56 Solução final para células de Gato. 167
9.57 (a)-(b) Imagens do Projeto Homem Visível. 168
9.58 Homem Visível: (a)Variedades lineares obtidas. (b) Resultado obtido. 168
9.59 Homem Visível: (a)Variedades lineares obtidas. (b) Inicialização final para Figura 9.57.b. 169
9.60 Radiografia do tórax. 170
9.61 Radiografia do tórax: (a)Imagem filtrada. (b) Resultado da aplicação do limiar $T = 180.0$. 171
9.62 Radiografia do tórax: (a)Inicialização do Dual-T-Snakes. (b) Espaço de busca obtido. 171

B.1 Esquema com principais etapas para aplicação da Teoria de Lie em visão computacional. 195

C.1 Subdividindo um cubo (célula) para obter triangulação tipo CF. . . . 202
C.2 Politopos para triangulação tipo CF. 202
C.3 Formação dos espaços usados para algoritmo de classificação em 3D. . 203
C.4 (a)Elemento triangular se moveu para nova posição queimando nó da triangulação. (b)Poliedro formado pelo elemento triangular na posições nova e antiga. (c) Partição do espaço. 204

D.1 Sistema de coordenadas locais no centro de curvatura da isolinha de potencial passando por um ponto q. 210
D.2 Sistemas dinâmicos hiperbólico 3D. 218
D.3 Foco instável. 218