

Artigo REF: 05A007

## SEGMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO DE CONTORNOS EM IMAGENS ATRAVÉS DE PROCESSOS FÍSICOS

Patrícia C. T. Gonçalves, João Manuel R. S. Tavares<sup>(\*)</sup> e R. M. Natal Jorge

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Porto, Portugal

<sup>(\*)</sup>Email: tavares@fe.up.pt

### RESUMO

O objectivo principal deste trabalho é, a partir de duas imagens de um mesmo objecto em dois instantes distintos, simular as formas intermédias que o objecto assume quando o seu comportamento é guiado por princípios físicos. Para tal, é preciso começar por segmentar o objecto nas duas imagens em questão extraíndo o seu contorno, após definição manual de um contorno inicial em cada uma delas. Seguidamente, cada um dos contornos definidos evoluirá automaticamente ao longo de um processo iterativo até alcançar a fronteira do objecto desejado. Para isso, é construído um modelo deformável para cada um dos contornos usando o método dos elementos finitos. Posteriormente, a evolução temporal do modelo físico até ao contorno final desejado é obtida resolvendo a equação de equilíbrio dinâmico que contrabalança as forças externas e internas virtualmente aplicadas no objecto modelizado.

Para simular a deformação entre os dois contornos obtidos na segmentação, é utilizada análise modal complementada com técnicas de optimização para estabelecer a correspondência entre os dados pontuais dos mesmos. Após esta fase de emparelhamento, o campo dos deslocamentos entre os dois contornos é simulado através da equação de equilíbrio dinâmico.

### INTRODUÇÃO

No domínio da Visão Computacional, a identificação de um objecto representado numa imagem, processo geralmente designado por segmentação, é uma das tarefas mais comuns e mais complexas. Normalmente, quando se pretende extrair informação de alto nível de uma imagem ou de uma sequência de imagens, o processo de análise começa por segmentar as mesmas.

Existem vários métodos para segmentar objectos representados em imagens: contornos activos, métodos de *level set*, modelos de formas activas e protótipos deformáveis, são alguns. Os contornos activos, também conhecidos como *snakes*, introduzidos por [Kass, Witkin & Terzopoulos, 1988], usam uma curva inicial que está imersa num campo de potencial e é deformada elasticamente função das características da imagem que atrai a curva para a fronteira do objecto e das suas propriedades internas. O objectivo deste método é minimizar a energia total da curva utilizada de modo a definir o contorno do objecto a segmentar.

Com os métodos de *level set*, [Sethian, 1999], a deformação do contorno utilizado na segmentação é formulada como uma onda em propagação que é considerada como um *level set* específico da função adoptada. Esta função tem um termo de velocidade definido pelo objecto na imagem que pára a propagação da onda assim que esta o delimite.

Os modelos de formas activas, [Vasconcelos & Tavares, 2006], precisam de conhecimento prévio: o objecto a segmentar é amostrado por um conjunto de pontos em cada uma das imagens de um conjunto de treino, bem como pelos níveis de cinzento em torno de cada ponto. Depois, os vários conjuntos de pontos dos objectos de treino são alinhados de forma a minimizar a distância entre pontos correspondentes e, analisando a variação dessa distância no conjunto de treino, obtém-se o modelo da distribuição pontual que é utilizado para definir uma forma média para o objecto em causa e restringir a deformação desta na segmentação do objecto modelizado em novas imagens.

Um outro método que também utiliza conhecimento prévio é o dos protótipos deformáveis, [Carvalho & Tavares, 2006]. Os protótipos são definidos por parâmetros que descrevem a forma geométrica do objecto a segmentar e interagem dinamicamente com a imagem original. Tal como no caso das *snakes*, é definida uma função de energia que atrai o protótipo para a fronteira do objecto, correspondendo o mínimo dessa energia à melhor segmentação possível.

Todos os objectos reais são deformáveis, pelo que a maior parte não pode ser correctamente modelizada se forem considerados como corpos rígidos. A simulação de objectos não rígidos pode ser conseguida utilizando modelos deformáveis, o que pode ser uma tarefa difícil pois áreas distintas têm exigências específicas; por exemplo, algumas requerem exactidão, como a análise de imagens médicas, outras exigem interactividade em tempo real, como ambientes virtuais. No entanto, simular computacionalmente a deformação de objectos com exactidão e rapidez não é tarefa fácil.

A ideia de considerar restrições físicas na modelização de objectos tem sido utilizada por vários autores. Por exemplo, em [Terzopoulos, Platt, Barr & Fleischer, 1987] foi aplicada a teoria da elasticidade na modelização do comportamento de curvas, superfícies e sólidos não rígidos. Estes modelos elasticamente deformáveis respondem a forças externas e interagem com objectos vizinhos. A equação de equilíbrio dinâmico, também conhecida como equação de movimento, governa a dinâmica do modelo deformável submetido à influência de forças nele aplicadas.

Em [Terzopoulos, Witkin & Kass, 1988] foi proposto um modelo de base física para a reconstrução da forma e do movimento de objectos deformáveis a partir de imagens. Neste trabalho, os objectos foram modelizados como corpos elasticamente deformáveis sujeitos às leis da mecânica.

Por outro lado, em [Sclaroff & Pentland, 1995] foi usado um método do emparelhamento modal para estabelecer a correspondência entre objectos modelizados fisicamente e a energia de deformação para o reconhecimento de objectos – quanto mais baixa for a energia resultante da deformação de um objecto noutra, maior será a semelhança entre eles.

Utilizando o método dos elementos finitos juntamente com análise modal, em [Pentland & Horowitz, 1991] foi fisicamente simulado o movimento elástico não rígido tendo sido obtidos boas estimativas quer para a velocidade quer para a forma do objecto envolvido.

Estes e outros trabalhos provaram que quando os objectos são representados de acordo com princípios físicos, a deformação, nomeadamente a sua componente não rígida, pode ser adequadamente modelizada.

O objectivo principal deste trabalho é o seguinte: tendo duas imagens do mesmo objecto em dois instantes diferentes simular as formas intermédias que o objecto teve. Para isso, é preciso segmentar o objecto nas duas imagens dadas extraíndo o seu contorno depois de definir manualmente um contorno inicial. Cada um desses contornos definidos manualmente, usualmente de forma algo grosseira, vai evoluir até atingir a fronteira do objecto desejado através de um processo iterativo. Para isso, é construído um modelo deformável para cada um dos

contornos iniciais utilizando o método dos elementos finitos, mais especificamente o elemento finito isoparamétrico proposto em [Sclaroff, 1995]. Assim, cada modelo terá um comportamento de acordo com princípios físicos, como o proposto em [Nastar, 1994], utilizando-se para tal a equação de equilíbrio dinâmico.

Para simular realisticamente a deformação entre os dois contornos, usa-se a abordagem proposta em [Terzopoulos, Platt, Barr & Fleischer, 1987] e [Terzopoulos, Witkin & Kass, 1988] considerando um modelo elástico e a resolução da equação de equilíbrio dinâmico. Tendo construído o modelo físico de cada contorno, considera-se a descrição modal da forma proposta em [Shapiro & Brady, 1992] complementada com uma técnica de otimização tal como sugerido em [Bastos & Tavares, 2006], e a decomposição da deformação em modos vibratórios rígidos e não rígidos como a indicada em [Pentland & Horowitz, 1991]. Em complemento, desenvolveu-se uma solução para aplicar a abordagem física seguida a modelos de contornos que não tenham todos os seus nodos (dados pontuais) emparelhados.

A metodologia utilizada está resumida na Figura 1. O primeiro passo consiste em definir um contorno grosseiro em cada uma das duas imagens originais. Esses contornos são considerados os contornos iniciais dos objectos. De seguida, cada um dos contornos é modelizado de acordo com princípios físicos através do elemento finito isoparamétrico de Sclaroff. Para mover o modelo físico em direcção à fronteira do objecto a segmentar, resolve-se a equação de equilíbrio dinâmico que descreve o equilíbrio entre as forças internas e externas envolvidas. As forças internas são definidas pelas características físicas adoptadas para o modelo, determinadas pelo material virtual escolhido e pelo nível de interacção entre os seus nodos. As forças externas provêm do realce de características do objecto na imagem; neste trabalho, intensidade, orlas e distância de cada píxel à orla mais próxima. Após a extracção dos dois contornos nas imagens dadas, os nodos dos modelos físicos associados são emparelhados e a deformação de um no outro é simulada pela resolução da equação de equilíbrio dinâmico.

As principais contribuições deste trabalho são as seguintes: a adopção do método dos elementos finitos para modelizar fisicamente os objectos considerados, em vez do usual métodos das diferenças finitas; uma solução para determinar as forças externas aplicadas nos nodos do modelo no processo de segmentação; e uma solução para calcular as forças externas envolvidas na simulação, em particular quando alguns nodos do modelo não estão devidamente emparelhados.

## **MODELIZAÇÃO FÍSICA**

Após a definição do contorno inicial para o objecto a segmentar, é altura de o modelizar em termos físicos; ou seja, atribuir massa, rigidez e amortecimento a cada ponto do contorno, i.e., a cada nodo do modelo construído.

Para modelizar o contorno inicial e simular o seu comportamento elástico, em [Nastar, 1994] foram utilizadas funções afins de interpolação juntamente com diferenças finitas. Neste trabalho, são usados com o mesmo propósito interpoladores gaussianos e o método dos elementos finitos. Mais especificamente, o elemento finito isoparamétrico proposto em [Sclaroff, 1995] é considerado para construir o modelo físico para o contorno. Este elemento finito usa um conjunto de funções de base radial que permite a fácil inserção de pontos no modelo. Assim, são utilizados interpoladores gaussianos e os nodos do modelo não precisam de ser ordenados. Com este elemento finito isoparamétrico, quando um objecto é modelizado é como se cada um dos seus pontos estivesse coberto por uma membrana elástica, [Sclaroff & Pentland, 1995, Tavares, Barbosa & Padilha, 2000].

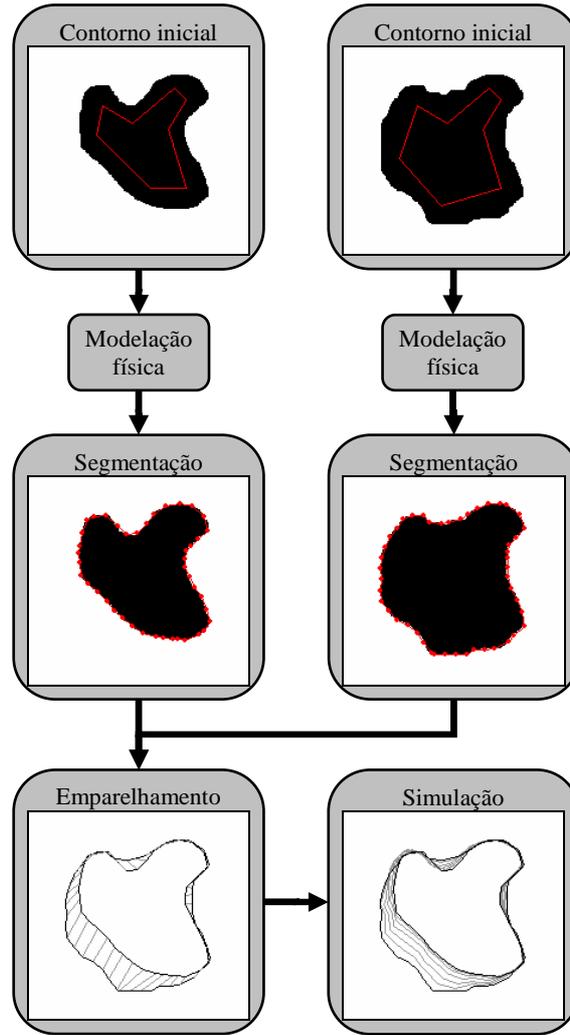


Figura 1. Esquema da metodologia utilizada neste trabalho para segmentar, emparelhar e simular a deformação de objectos representados em imagens.

Começando com uma colecção de  $m$  nodos (dados pontuais)  $X_i(x_i, y_i, z_i)$  do objecto a modelizar fisicamente, a matriz de interpolação  $\mathbf{H}$ , que relaciona as distâncias entre estes e as suas inter-relações é definida usando, [Sclaroff, 1995, Sclaroff & Pentland, 1995]:

$$g_i(\mathbf{X}) = e^{-\|\mathbf{x}-\mathbf{x}_i\|^2/2\sigma^2}, \quad (1)$$

onde  $\sigma$  é o desvio padrão que controla a interacção entre nodos. As funções de interpolação,  $h_i$ , são dadas por:

$$h_i(\mathbf{X}) = \sum_{k=1}^m a_{ik} g_k(\mathbf{X}), \quad (2)$$

onde  $a_{ik}$  são coeficientes que satisfazem  $h_i = 1$  no nodo  $i$  e  $h_i = 0$  nos outros  $m-1$  nodos. Estes coeficientes de interpolação compõem a matriz  $\mathbf{A}$  e podem ser determinados pela inversão da matriz  $\mathbf{G}$  definida como:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1(\mathbf{X}_1) & \cdots & g_1(\mathbf{X}_m) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_m(\mathbf{X}_1) & \cdots & g_m(\mathbf{X}_m) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Então, a matriz  $\mathbf{H}$  será:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & \cdots & h_m & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & h_1 & \cdots & h_m \end{bmatrix}. \quad (4)$$

A matriz de massa do elemento finito de Sclaroff é definida por, [Sclaroff, 1995, Sclaroff & Pentland, 1995]:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}' & 0 \\ 0 & \mathbf{M}' \end{bmatrix}, \quad (5)$$

onde  $\mathbf{M}'$  é uma submatriz  $m \times m$  definida por  $\mathbf{M}' = \rho\pi\sigma^2 \mathbf{A}^T \mathbf{\Gamma} \mathbf{A} = \rho\pi\sigma^2 \mathbf{G}^{-1} \mathbf{\Gamma} \mathbf{G}^{-1}$  (como a matriz  $\mathbf{A}$  é simétrica, tem-se  $\mathbf{A}^T = \mathbf{A}$ ),  $\rho$  é a densidade de massa do material virtual adoptado para o objecto, e os elementos da matriz  $\mathbf{\Gamma}$  são as raízes quadradas dos elementos da matriz  $\mathbf{G}$ .

Por outro lado, a matriz de rigidez é dada por:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

onde  $\mathbf{K}_{ij}$  são submatrizes  $m \times m$  simétricas, cujos elementos dependem das constantes  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\lambda$  dependentes do material adoptado, definidas como, [Sclaroff, 1995, Sclaroff & Pentland, 1995]:

$$K_{11ij} = \pi\beta \sum_{k,l} a_{ik} a_{jl} \left[ \frac{1+\lambda}{2} - \frac{\hat{x}_{kl}^2 + \lambda \hat{y}_{kl}^2}{4\sigma^2} \right] \sqrt{g_{kl}}, \quad (7)$$

$$K_{22ij} = \pi\beta \sum_{k,l} a_{ik} a_{jl} \left[ \frac{1+\lambda}{2} - \frac{\hat{y}_{kl}^2 + \lambda \hat{x}_{kl}^2}{4\sigma^2} \right] \sqrt{g_{kl}}, \quad (8)$$

$$K_{12ij} = K_{21ij} = -\frac{\pi\beta(\alpha+\lambda)}{4\sigma^2} \sum_{k,l} a_{ik} a_{jl} \hat{x}_{kl} \hat{y}_{kl} \sqrt{g_{kl}}, \quad (9)$$

onde  $\hat{x}_{kl} = x_k - x_l$ ,  $\hat{y}_{kl} = y_k - y_l$ ,  $\hat{z}_{kl} = z_k - z_l$ .

Neste trabalho é utilizada a matriz de amortecimento de Rayleigh,  $\mathbf{C}$ , obtida por combinação linear das matrizes de massa e de rigidez com pesos,  $\mu$  e  $\gamma$ , baseados no amortecimento crítico do material adoptado, [Bathe, 1996, Cook, Malkus & Plesha, 1989]:

$$\mathbf{C} = \mu\mathbf{M} + \gamma\mathbf{K}. \quad (10)$$

## EMPARELHAMENTO DOS NODOS DOS OBJECTOS

Após a extracção dos contornos dos dois instantes do mesmo objecto, chamados objectos inicial e final daqui para a frente, é preciso encontrar as correspondências entre os seus nodos. Para isso, é resolvido um problema de valores e vectores próprios para cada objecto, utilizando:

$$\mathbf{K}\mathbf{\Phi} = \mathbf{M}\mathbf{\Phi}\mathbf{\Omega}, \quad (11)$$

onde  $\mathbf{\Phi}$  é a matriz modal dos vectores de forma – os vectores próprios – que descrevem o deslocamento modal ( $u, v$ ) de cada nodo devido ao modo de vibração  $i$ , e  $\mathbf{\Omega}$  é a matriz diagonal cujas entradas são os quadrados dos valores próprios ordenados crescentemente.

Depois de construída a matriz modal para cada um dos dois objectos, os seus nodos podem ser emparelhados comparando os deslocamentos associados no respectivo espaço próprio modal, [Shapiro & Brady, 1992]. A ideia-chave do emparelhamento modal é que os modos de vibração de menor frequência de duas formas similares devem ser semelhantes mesmo na presença de transformações afins, deformações não rígidas, variações locais de forma ou ruído. Assim, para fazer corresponder os nodos do objecto inicial,  $I$ , com os do objecto final,  $F$ , é construída uma matriz de afinidades,  $\mathbf{Z}$ , com os seus elementos definidos como:

$$Z_{ij} = \|u_{I,i} - u_{F,j}\|^2 + \|v_{I,i} - v_{F,j}\|^2, \quad (12)$$

onde a afinidade entre os nodos  $i$  e  $j$  é 0 (zero) se o emparelhamento for perfeito e aumenta à medida que o emparelhamento piora.

Neste trabalho são considerados dois métodos na procura dos melhores emparelhamentos: um método local e um global. O método local de busca foi proposto em [Shapiro & Brady, 1992] e consiste em procurar em cada linha e cada coluna da matriz de afinidade pelos seus menores valores. Se o menor valor da linha  $i$  estiver na coluna  $j$ , e se esse valor for também o menor dessa coluna, então o nodo  $i$  do objecto inicial corresponde ao nodo  $j$  do objecto final. Este procedimento tem a desvantagem de negligenciar a estrutura do objecto, pois procura o melhor emparelhamento para cada nodo independentemente. Por outro lado, o método global de busca proposto em [Bastos & Tavares, 2006] consiste em descrever a tarefa de emparelhamento como um problema de afectação e resolvê-lo utilizando um algoritmo de optimização apropriado. Nesta abordagem, casos em que o número de nodos dos objectos inicial e final sejam diferentes também podem ser considerados: inicialmente, o algoritmo de emparelhamento adiciona nodos fictícios ao objecto com menos elementos; depois, os nodos emparelhados com nodos fictícios são emparelhados com nodos reais utilizando critérios de vizinhança e afinidade.

## EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO

Depois de o contorno inicial ter sido transformado num modelo físico elástico, pretende-se estimar a sua evolução na direcção da fronteira do objecto, obtendo assim a segmentação desejada; e, depois de os contornos dos objectos inicial e final serem extraídos, pretende-se simular a deformação do primeiro no segundo. Para atingir estes dois objectivos, é resolvida a equação diferencial ordinária de segunda ordem, comumente conhecida como equação de equilíbrio dinâmico, ou equação do movimento:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}^t + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}^t + \mathbf{K}\mathbf{U}^t = \mathbf{F}^t, \quad (13)$$

para cada passo temporal  $t$ , onde  $\mathbf{U}$ ,  $\dot{\mathbf{U}}$  e  $\ddot{\mathbf{U}}$  são, respectivamente, os vectores de deslocamento, velocidade e aceleração, e  $\mathbf{F}$  representa as forças externas [Gonçalves, Pinho & Tavares, 2006, Pinho & Tavares, 2004]. Esta equação descreve o equilíbrio entre as forças externas e internas envolvidas nos nodos do modelo elástico. As forças internas são definidas pelas características físicas adoptadas para o modelo, determinadas pelo material virtual escolhido para o mesmo e pelo nível de interacção entre os seus nodos aquando da construção do elemento finito isoparamétrico de Sclaroff. As forças externas dependem do problema considerado: segmentação ou simulação da deformação.

## Forças Externas na Segmentação

Para segmentar um objecto representado numa imagem, as forças externas,  $\mathbf{F}$ , são determinadas pelas características que melhor descrevem o objecto a segmentar na mesma imagem.

Neste trabalho são considerados os valores de intensidade de cada píxel da imagem inicial, o valor dos píxeis da imagem de orlas e a distância de cada píxel à orla mais próxima. Assim,  $\mathbf{F}$  é a soma das forças devidas à intensidade da imagem original,  $\mathbf{F}_{int}$ , à imagem de orlas,  $\mathbf{F}_{orl}$ , e à imagem de distâncias,  $\mathbf{F}_{dist}$ :

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{int} + \mathbf{F}_{orl} + \mathbf{F}_{dist}. \quad (14)$$

A imagem de orlas é obtida neste trabalho aplicando o operador de detecção de orlas de Shen & Castan, [Shen & Castan, 1992], na imagem original e a imagem de distâncias é obtida calculando a distância de cada píxel à orla mais próxima usando o método de Chamfer.

Após a modelização física do contorno inicial, o algoritmo calcula a linha ortogonal à linha tangente ao contorno em cada nodo do modelo. É ao longo de cada uma destas linhas que as forças são calculadas. Sendo  $Q_i$  todos os píxeis pertencentes à linha ortogonal do nodo  $P$ , a força de orlas em cada ponto  $P$  é então dada por:

$$\mathbf{F}_{orl}(P) = k \frac{\sum_{i=1}^N Orl(Q_i)}{N}, \quad (15)$$

onde  $Orl(Q_i)$  é o valor do píxel  $Q_i$  na imagem de orlas,  $k$  é uma constante de rigidez e  $N$  é o número de píxeis da linha ortogonal. As forças de distância e de intensidade são equivalentes à Equação (15).

Se a soma das forças dos  $N$  píxeis da linha ortogonal for menor que um dado valor,  $val$ , a linha continuará a aumentar de comprimento até a soma das forças ser maior ou igual a  $val$ . Assim, usando este procedimento adaptativo, cada linha tem o comprimento de que necessita para obter uma força capaz de mover o nodo que lhe está associado.

### Forças Externas na Simulação

Para estimar a força externa aplicada em cada nodo  $i$  do objecto inicial que tenha correspondente no objecto final, considera-se que a força em cada nodo é proporcional ao deslocamento que lhe está associado, [Pinho & Tavares, 2004]:

$$\mathbf{F}(i) = q(\mathbf{X}_{F,i} - \mathbf{X}_{I,i}), \quad (16)$$

onde  $\mathbf{F}(i)$  é a força aplicada no nodo  $i$ ,  $\mathbf{X}_{I,i}$  é as coordenadas do nodo  $i$  no objecto inicial,  $\mathbf{X}_{F,i}$  as coordenadas do nodo correspondente ao nodo  $i$  no objecto final e  $q$  é uma constante global de rigidez. Porque esta equação é actualizada a cada iteração da resolução da equação de equilíbrio dinâmico, a sua forma geral é:

$$\mathbf{F}(i) = q(\mathbf{X}_{F,i} - \mathbf{X}_{J,i}), \quad (17)$$

onde  $\mathbf{X}_{J,i}$  representa as coordenadas do nodo  $i$  na forma do objecto obtida na iteração  $J$ .

Contudo, alguns nodos do objecto inicial podem não ter nenhum nodo correspondente no objecto final. Para ultrapassar este problema, suponha-se que  $b$  é um nodo não emparelhado situado entre os nodos  $a$  e  $c$ , emparelhados com os nodos  $a'$  e  $c'$  do objecto final, respectivamente (Figura 2). Então, se  $b$  é o  $i$ -ésimo nodo na  $J$ -ésima forma estimada, a  $i$ -ésima componente do vector da força externa pode ser dada por:

$$\mathbf{F}(i) = q \left( \sum_{p \text{ (nodes between } a' \text{ and } c')} [W_p (\mathbf{X}_{F,p} - \mathbf{X}_{J,b})] \right), \quad (18)$$

onde  $W_p$  é o peso do nodo  $p$  de acordo com a sua afinidade com o nodo  $b$ , dada pela Equação (12) – quanto maior for o valor da afinidade, menor será o peso.

Se não existirem nodos não emparelhados entre os nodos  $a'$  e  $c'$ , então eles próprios serão considerados no cálculo da força externa aplicada no nodo  $b$ .

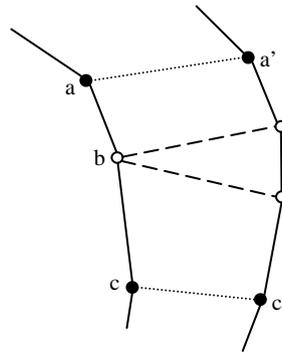


Figura 2. Estimação das forças externas aplicadas em nodos não emparelhados.

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para ilustrar os resultados da metodologia considerada neste trabalho para segmentar um objecto representado numa imagem identificando o seu contorno, considerem-se as imagens da Figura 3. Na primeira, pode ver-se a vermelho o contorno inicial definido manualmente para o objecto em questão. A segunda imagem representa a segmentação obtida, usando um modelo físico com 122 nodos feito de borracha e considerando  $k = 2.000\text{N/m}$ . Neste caso, o processo computacional demorou 25s a alcançar o resultado final. De salientar que para a obtenção dos resultados aqui apresentados foi utilizado um computador pessoal com processador Intel Pentium D a 3GHz e 2GB de RAM e Microsoft Windows XP.

Se o mesmo contorno inicial for modelizado com cobre em vez de borracha, o mesmo  $k = 2.000\text{N/m}$  faz com que o processo de segmentação leve mais de quatro horas a terminar. Como o cobre é mais rígido que a borracha, o modelo construído pode suportar forças externas maiores, então, se  $k$  tomar valores maiores, o processo corre igualmente bem sem ocorrer divergências numéricas. De facto, utilizando  $k = 1 \times 10^6\text{N/m}$  com um modelo de 122 nodos feito de cobre a segmentação é conseguida ao fim de 20 minutos. Ou seja, mesmo com uma constante de rigidez muito maior o processo de segmentação com um modelo de cobre é muito mais demorado do que quando é adoptada borracha como material virtual, o que está de acordo com o comportamento esperado de objectos reais.

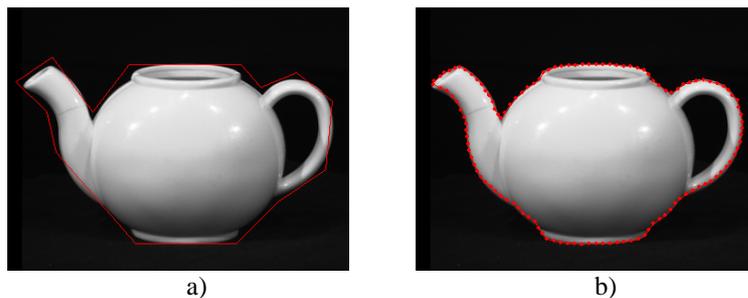


Figura 3. a) Contorno inicial. b) Resultado do processo de segmentação

usando  $k=2.000\text{N/m}$  e um modelo de borracha.

O contorno inicial da Figura 3 foi desenhado perto do objecto a segmentar, mas com a metodologia apresentada essa restrição não existe, devido ao procedimento adaptativo considerado na determinação das forças externas. De facto, o contorno inicial pode estar mais afastado da fronteira do objecto; contudo, isso torna necessariamente o processo de segmentação mais lento, pois cada píxel tem um caminho maior a percorrer. O exemplo da Figura 4 utiliza o mesmo objecto e os mesmos parâmetros para a construção do modelo físico que o exemplo anterior (Figura 3), mas com um contorno inicial mais afastado do objecto a segmentar. Neste caso, a segmentação demorou 100s.

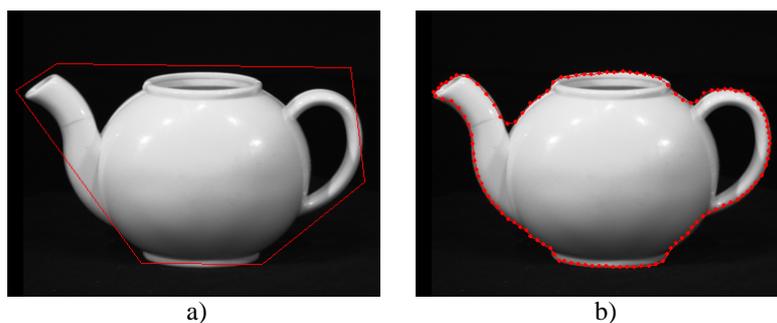


Figura 4. a) Contorno inicial mais afastado do objecto. b) Resultado do processo de segmentação usando  $k=2.000\text{N/m}$  e um modelo de borracha.

No caso de imagens mais complexas, em que há sobreposição de objectos, por exemplo, como o caso ilustrado na Figura 5, o resultado final pode não ser o esperado, pois características pertencentes a outros objectos podem ser mais fortes que as do objecto a segmentar, fazendo com que alguns nodos do modelo sejam atraídos para o objecto errado.

A segmentação da mão na Figura 6 foi obtida em 18s usando um modelo físico com 67 nodos e feito de borracha e considerando  $k = 2.000\text{N/m}$ . A Figura 7 mostra a mesma mão numa posição diferente; o modelo físico associado foi construído com 66 nodos e borracha como material virtual. Com o mesmo  $k = 2.000\text{N/m}$ , esta segmentação também levou 18s.

Utilizando análise modal e o método global de busca para determinar as correspondências entre os nodos dos contornos mostrados nas Figuras 6 e 7, todos os 67 nodos do objecto inicial são emparelhados com êxito com os 66 nodos do objecto final (Figura 8). Adoptando  $q = 30.000\text{N/m}$  para calcular as forças externas, as formas intermédias na Figura 8 são estimadas após 100s e utilizando a Equação (17).

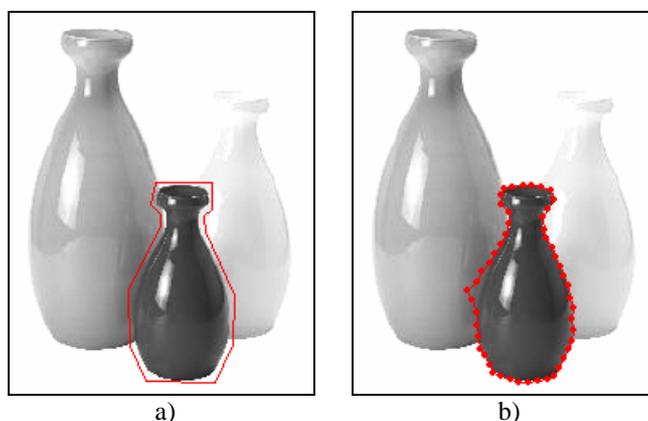


Figura 5. a) Contorno inicial. b) Resultado da segmentação com  $k = 2.000\text{N/m}$  e um modelo de 50 nodos feito de borracha.

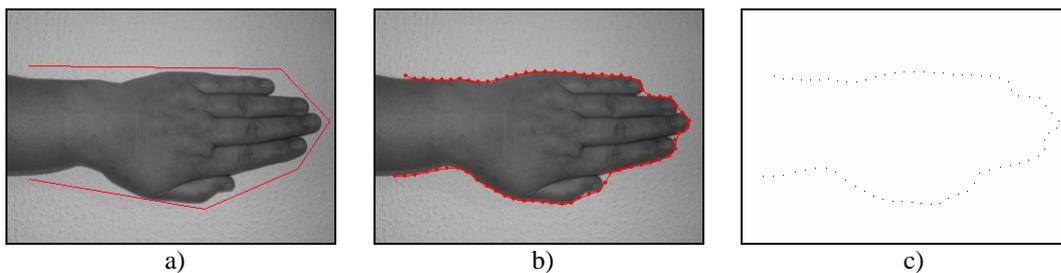


Figura 6. a) Contorno inicial. b) Resultado da segmentação com  $k = 2.000\text{N/m}$  e um modelo de 67 nodos feito de borracha. c) O contorno extraído.

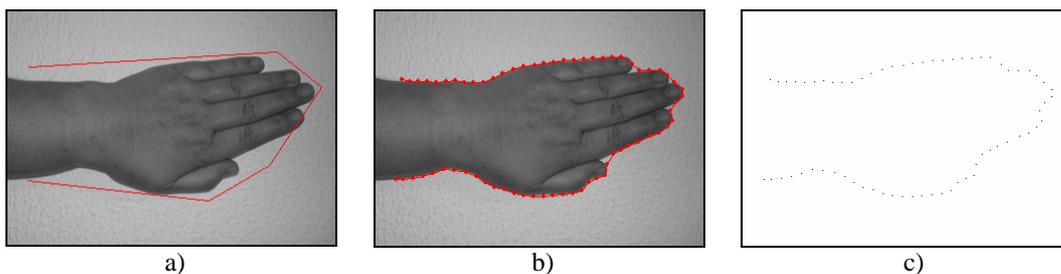


Figura 7. a) Contorno inicial. b) Resultado da segmentação com  $k = 2.000\text{N/m}$  e um modelo de 66 nodos feito de borracha. c) O contorno extraído.

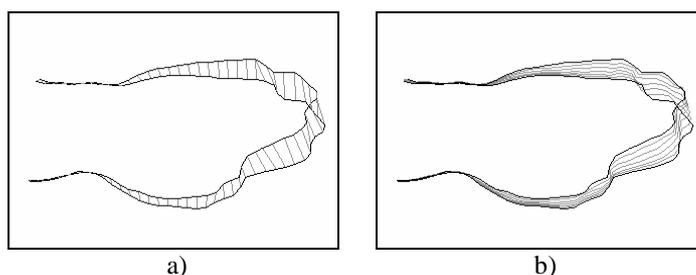


Figura 8. a) Correspondências entre os nodos dos dois contornos das Figuras 6 e 7 usando análise modal e busca global. b) Simulação obtida (a preto estão os objectos inicial e final e a cinzento cinco formas estimadas.)

Por outro lado, usando o método local de busca apenas são emparelhados com êxito 54 dos 67 nodos do modelo do contorno inicial; no entanto, com  $q = 30.000\text{N/m}$  e aplicando a Equação (18) em vez da (17) na determinação das forças externas aplicadas em cada nodo sem correspondência, a simulação da deformação da mão é idêntica à obtida com todos os nodos emparelhados (Figura 9), demorando 210s. Este comportamento mostra que a abordagem considerada para o cálculo das forças externas em nodos não emparelhados parece ser válida e adequada.

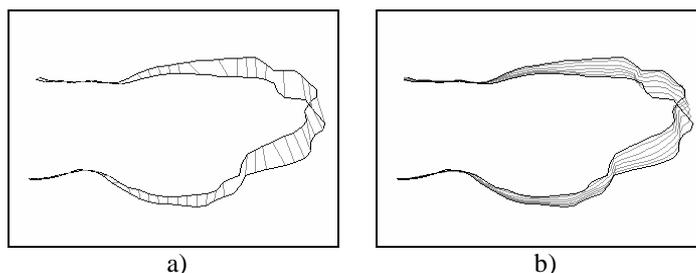


Figura 9. a) Correspondências entre os nodos dos dois contornos das Figuras 6 e 7 usando análise modal e busca local. b) Simulação obtida (a preto estão os objectos inicial e final e a cinzento cinco formas estimadas.)

## CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Os resultados experimentais obtidos com o método de segmentação guiado por princípios físicos considerado, alguns dos quais aqui apresentados, são bastante satisfatórios. No entanto, o método considerado apresenta dois problemas:

- torna-se mais lento se o contorno inicial estiver distante do objecto a segmentar;
- o resultado da segmentação pode ser comprometido se a imagem na qual o objecto está representado for muito complexa – com muito ruído ou sobreposição de objectos, por exemplo.

Devido a estes dois problemas, num futuro próximo serão introduzidas algumas mudanças para acelerar e melhorar o processo de segmentação, como experimentar diferentes abordagens para a definição das forças externas. A utilização de elementos finitos mais adequados a grandes deformações e do tipo não linear é também um assunto a pensar nas próximas etapas deste trabalho.

Neste artigo foi também descrita uma abordagem física para simular a deformação de objectos representados em imagens e apresentada uma solução que permite a aplicação do método considerado a objectos que não tenham todos os seus nodos devidamente emparelhados.

Os resultados experimentais obtidos no processo de emparelhamento e na estimação da deformação envolvida são coerentes com o comportamento físico esperado de objectos reais, validando assim a abordagem considerada. Apesar de os resultados serem bastante satisfatórios, o processo computacional é algo lento. Então, futuramente, poderão ser consideradas implementações paralelizadas para que a equação de equilíbrio dinâmico seja resolvida de forma mais rápida. Além disso, poderão ser desenvolvidas outras abordagens para a determinação das forças externas nos nodos não emparelhados.

O seguimento de objectos ao longo de sequências de imagens, utilizando as metodologias aqui descritas complementadas com métodos estocásticos para estimar o movimento envolvido, é também uma possível tarefa futura.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi parcialmente realizado no âmbito do projecto de investigação “Segmentação, Seguimento e Análise de Movimento de Objectos Deformáveis (2D/3D) usando Princípios Físicos”, com a referência POSI/EEA-SRI/55386/2004, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia de Portugal.

## REFERÊNCIAS

- Bastos, M.L. & Tavares, J.M.R.S., Matching of Objects Nodal Points Improvement Using Optimization, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 14(5) (2006) 529-541.
- Bathe, K.-J. 1996. *Finite Element Procedures*. New Jersey, USA: Prentice-Hall.
- Carvalho, F.J. & Tavares, J.M.R.S., Two Methodologies for Iris Detection and Location in Face Images, *Proc. of the CompIMAGE - Computational Modelling of Objects Represented in Images: Fundamentals, Methods and Applications*, Coimbra, Portugal, (2006) 129-134.
- Cook, R., Malkus, D. & Plesha, M. 1989. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. New York, USA: John Wiley and Sons.
- Gonçalves, P.C.T., Pinho, R.R. & Tavares, J.M.R.S., *Physical Simulation Using FEM, Modal*

- Analysis and the Dynamic Equilibrium Equation, Proc. of the CompIMAGE - Computational Modelling of Objects Represented in Images: Fundamentals, Methods and Applications, Coimbra, Portugal, (2006) 197-204.
- Kass, M., Witkin, A. & Terzopoulos, D., Snakes: Active Contour Models, International Journal of Computer Vision, 1(4) (1988) 321-331.
- Nastar, C., Modèles Physiques Déformables et Modes Vibratoires pour l'Analyse du Mouvement Non-Rigide dans les Images Multidimensionnelles, Thèse de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Champs-sur-Marne, France (1994).
- Pentland, A. & Horowitz, B., Recovery of Nonrigid Motion and Structure, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13(7) (1991) 730-742.
- Pinho, R.R. & Tavares, J.M.R.S., Dynamic Pedobarography Transitional Objects by Lagrange's Equation with FEM, Modal Matching and Optimization Techniques, Lecture Notes in Computer Science, 3212 (2004) 92-99.
- Pinho, R.R. & Tavares, J.M.R.S., Morphing of Image Represented Objects Using a Physical Methodology, Proc. of the 2004 ACM Symposium on Applied Computing, New York, USA, (2004) 10-15.
- Sciaroff, S., Modal Matching: a Method for Describing, Comparing, and Manipulating Digital Signals, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA (1995).
- Sciaroff, S. & Pentland, A., Modal Matching for Correspondence and Recognition, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 17(6) (1995) 545-561.
- Sethian, J.A. 1999. Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision, and Materials Science. New York, USA: Cambridge University Press.
- Shapiro, L.S. & Brady, J.M., Feature-based correspondence: an eigenvector approach, Image and Vision Computing, 10(5) (1992) 283-288.
- Shen, J. & Castan, S., An Optimal Linear Operator for Step Edge Detection, CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 54(2) (1992) 112-133.
- Tavares, J.M.R.S., Barbosa, J. & Padilha, A.J., Matching Image Objects in Dynamic Pedobarography, Proc. of the RecPad 2000 - 11th Portuguese Conference on Pattern Recognition, Porto, Portugal, (2000).
- Terzopoulos, D., Platt, J., Barr, A. & Fleischer, K., Elastically deformable models, Proc. of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Anaheim, USA, (1987) 205-214.
- Terzopoulos, D., Witkin, A. & Kass, M., Constraints on Deformable Models: Recovering 3D Shape and Nonrigid Motion, Artificial Intelligence, 36 (1988) 91-123.
- Vasconcelos, M.J. & Tavares, J.M.R.S., Methodologies to Build Automatic Point Distribution Models for Faces Represented in Images, Proc. of the CompIMAGE - Computational Modelling of Objects Represented in Images: Fundamentals, Methods and Applications, Coimbra, Portugal, (2006) 435-440.