

Métodos de Segmentação e Parcelamento do Corpo Caloso em Imagens de Tensores de Difusão

Pedro Freitas, Leticia Rittner e Roberto Lotufo
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Campinas-SP, Brasil

Simone Appenzeller
Faculdade de Ciências Médicas
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Campinas-SP, Brasil

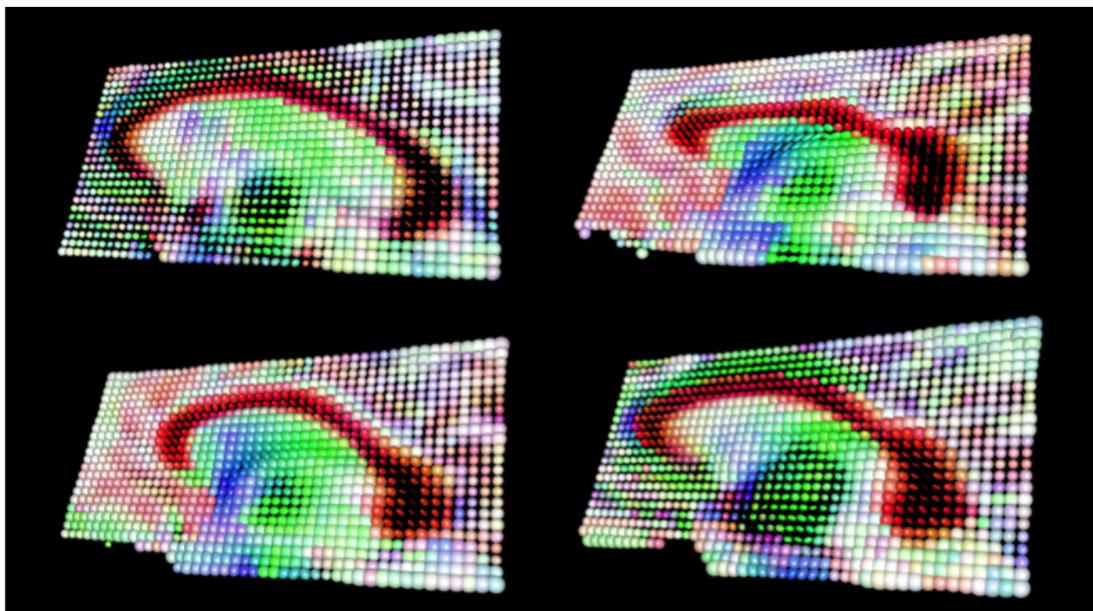


Fig. 1. Exemplo de imagens de tensor de difusão (DTI) na fatia central do cérebro, cortadas em torno do corpo caloso, para diferentes sujeitos.

Resumo—O corpo caloso é a maior estrutura de substância branca interconectando os dois hemisférios do cérebro. Devido à sua importante função, o corpo caloso é alvo de diversos estudos. O objetivo principal deste trabalho é propor métodos automáticos para a segmentação e o parcelamento do corpo caloso em imagens de tensor de difusão por ressonância magnética. Enquanto a segmentação visa separar o corpo caloso das demais estruturas do cérebro, o parcelamento do corpo caloso divide a estrutura em regiões para facilitar seu estudo. Ambos os métodos propostos são baseados na transformada de *watershed* e utilizam o gradiente morfológico externo para identificar as bordas do corpo caloso. Para realizar a segmentação do corpo caloso na fatia central é utilizado um mapa de anisotropia fracional ponderado, sobre o qual é calculado o gradiente morfológico externo. A abordagem hierárquica da transformada de *watershed* é utilizada. Ao contrário dos métodos já existentes, o método de segmentação proposto é rápido, simples e não necessita de intervenção do usuário. Os experimentos realizados mostraram que o método é pouco sensível à variação dos parâmetros predefinidos e capaz de obter resultados muito próximos aos obtidos manualmente por especialistas. O método para a segmentação volumétrica utiliza a transformada de *watershed* a partir de marcadores, com a seção do corpo caloso na fatia central sendo usada como marcador. A

extensão do método para realizar a segmentação volumétrica também foi bem sucedida, porém seus resultados não foram tão similares à segmentação manual feita pelo especialista. De qualquer forma, o método de segmentação volumétrica pode ser usado como ponto de partida para a segmentação manual feita pelo especialista, diminuindo o tempo gasto nesta tarefa. O método de parcelamento proposto utiliza também a segmentação do corpo caloso na fatia central e realiza o parcelamento através da transformada de *watershed*. O diferencial desta abordagem é que ela utiliza somente as propriedades de difusão no interior da estrutura, para que o resultado obtido seja específico de cada sujeito, enquanto que os esquemas de parcelamento existentes representam um comportamento médio de uma determinada população. O posicionamento dos marcadores da transformada de *watershed* de acordo com as propriedades de difusão é responsável pelo funcionamento do parcelamento para praticamente todos os sujeitos do conjunto de testes. A tractografia realizada para validar os resultados do parcelamento mostrou que as subdivisões obtidas correspondem às divisões para importantes esquemas de parcelamento.

Palavras-chave- corpo caloso; anisotropia fracional; imagem de tensor de difusão; ressonância magnética; segmentação; parcelamento; transformada de *watershed*;

Abstract—The corpus callosum is the largest white matter structure interconnecting the two brains hemispheres. Due to its important function, the corpus callosum is subject of several studies. The main objective of this paper is to propose automatic methods for the segmentation and the parcellation of the corpus callosum in magnetic resonance diffusion tensor images. While the segmentation intends to distinguish the corpus callosum from other brain structures, the parcellation divides the structure into regions to allow its study. Both proposed methods are based in the watershed transform and use the external morphological gradient to identify the borders of the corpus callosum. In order to accomplish the corpus callosum segmentation in the midsagittal slice, the weighted fractional anisotropy map is used and its external morphological gradient is computed. The hierarchical watershed transform is the adopted approach. Unlike the existing segmentation methods, the proposed method is fast, simple and does not need user intervention. Experiments showed that the method is not sensitive to small variations of predefined parameters and the results achieved were very similar to the manual segmentation made by a specialist. The volumetric segmentation method uses the watershed transform from markers, and the corpus callosum section in the midsagittal slice is used as marker. The method extension to perform the volumetric segmentation was also successful, although its results were not so similar to the manual segmentation by the specialist. Anyway, the volumetric segmentation method can be used as a starting point for the manual segmentation performed by a specialist, reducing the time spent in this task. The proposed parcellation method also makes use of the corpus callosum section and obtains the parcellation through the watershed transform. The main difference of this approach is that it uses only the diffusion properties within the corpus callosum, so that the result is specific for each subject, while the existing parcellation schemes represent an average behavior of a given population. The placement of the watershed markers according to the diffusion properties is responsible for the parcellation to work for almost all subjects in the test set. The tractography used to validate the parcellation results showed that the obtained subdivisions correspond to the division for important parcellation schemes.

Keywords—corpus callosum; fractional anisotropy; diffusion tensor imaging; magnetic resonance image; segmentation; parcellation; watershed transform;

I. INTRODUÇÃO

O corpo caloso (CC) é a maior estrutura de substância branca, que interconecta os dois hemisférios do cérebro com mais de 300 milhões de fibras e está relacionado principalmente com a comunicação de regiões do córtex cerebral. Devido a sua função, o corpo caloso pode ser relacionado com diversas doenças, entre elas dislexia [1], Alzheimer [2] e epilepsia [3]. Isto faz com que o corpo caloso seja objeto de diversos estudos, seja da sua forma [4] ou de outras propriedades [5]. A maioria destes estudos é desenvolvida em imagens de ressonância magnética convencionais (ponderada por T1, por exemplo), mas o número de estudos em imagens de difusão vem crescendo significativamente.

Como a segmentação é normalmente a primeira etapa nesses estudos, é muito importante ter métodos eficientes para realizar a segmentação automática do corpo caloso em imagens de tensor de difusão (DTI). Esses métodos colaboram para reduzir o tempo gasto e os erros associados à segmentação manual, além de lidar mais facilmente com a complexidade da informação

tensorial e a variabilidade de formatos e tamanhos observada para a estrutura (Fig. 1).

Apesar do interesse crescente no estudo das propriedades de difusão no cérebro, ainda existem poucos métodos de segmentação desenvolvidos especificamente para DTI. Para o caso particular do corpo caloso, os métodos existentes são geralmente complexos ou necessitam de interação com o usuário [6][7][8]. Outros métodos automáticos, apesar de mais simples, não realizam uma análise profunda do desempenho obtido nem sobre os desafios da utilização do método para um novo conjunto de dados [9].

Para viabilizar o estudo das propriedades de difusão dentro do corpo caloso propusemos um método completamente automático para a segmentação do corpo caloso na fatia central do cérebro [10]. Propusemos também um método para a segmentação volumétrica do corpo caloso, com a sua seção na fatia central do cérebro sendo utilizada como ponto de partida [11]. Ambos os métodos têm origem em estudos de segmentação anteriores [12], baseados na transformada de *watershed* e em outros conceitos de morfologia matemática.

Para finalizar, apresentamos um método bastante rápido e eficiente de parcelamento automático do corpo caloso, baseado nas imagens de difusão [13]. Ele também usa a transformada de *watershed* e, enquanto que os esquemas de parcelamento existentes representam um comportamento médio de uma determinada população [14][15], a abordagem proposta utiliza somente as propriedades de difusão no interior da estrutura, para que o resultado obtido seja específico de cada sujeito.

II. SEGMENTAÇÃO DO CORPO CALOSO NA FATIA CENTRAL

Com o crescimento da utilização das imagens de tensor de difusão, que permite estudos das propriedades de difusão no interior do corpo caloso, veio a necessidade do desenvolvimento de métodos de segmentação específicos para essa modalidade de ressonância magnética. Propusemos então um método automático de segmentação do corpo caloso na fatia central do cérebro baseado na transformada de *watershed* e em outros conceitos de morfologia matemática [10]. O método proposto foi desenvolvido com o objetivo de ser mais simples que os demais métodos existentes e ao mesmo tempo apresentar um bom desempenho quando comparado à segmentação manual feita por especialistas.

A primeira etapa da segmentação é a determinação automática da fatia central, identificada através de suas propriedades de difusão no mapa de anisotropia fracional. A fatia central possui uma anisotropia fracional média mais baixa do que as demais fatias próximas e o simples cálculo da média de cada fatia, desconsiderando-se as que possuam uma seção do cérebro muito pequena, capaz de identificá-la. Uma vez determinada a fatia central, é necessário identificar informações contidas nas imagens de difusão que permitam diferenciar o corpo caloso das estruturas ao seu redor para que a segmentação propriamente dita seja realizada. Como o corpo caloso é uma estrutura de substância branca com as fibras altamente organizadas conectando os dois hemisférios do cérebro, ele apresenta anisotropia fracional (FA) alta e

a difusão nas suas fibras ocorre principalmente na direção direito-esquerda (Fig. 2a). O mapa de FA é então combinado com a componente do autovetor principal na direção direito-esquerda para ressaltar as características mencionadas e facilitar a segmentação do corpo caloso.

Após a obtenção do mapa de FA ponderado, o gradiente morfológico externo é calculado sobre esse mapa (Fig. 2b). A transformada de *watershed* a partir de marcadores [16] é então utilizada para realizar a segmentação do corpo caloso. Uma abordagem hierárquica [17] é empregada para obter as regiões mais significativas da imagem: a hierarquia dos mínimos locais é construída a partir da dinâmica de volume, e os mínimos locais com valores de extinção mais altos são utilizados como marcadores na transformada de *watershed*. O número de marcadores escolhido deve ser suficiente para capturar as bordas do corpo caloso (Fig. 2c).

Depois de obter a segmentação inicial pela transformada de *watershed*, uma etapa adicional é necessária para agrupar automaticamente as regiões resultantes, decidindo quais correspondem ao corpo caloso e quais fazem parte do fundo (Fig. 2d). A média do mapa de FA ponderado para cada uma das regiões é utilizada nesse processo, uma vez que as regiões que fazem parte do corpo caloso geralmente possuem uma média mais alta que as demais.

A segmentação obtida para cada sujeito foi comparada com um padrão ouro construído a partir de segmentações manuais realizadas por diferentes especialistas, de acordo com o apresentado por Kaus *et al.* [18]. Cada segmentação manual também foi comparada com o padrão ouro para enriquecer a análise. Diferentes métricas foram utilizadas na comparação, com destaque para a sobreposição e a métrica *kappa* [19]. Comparando os resultados da segmentação pelo método proposto com o padrão ouro, foi possível observar uma sobreposição média de 84,6%. A análise também possibilitou perceber que para a maioria dos sujeitos ele se manteve na faixa de variação da segmentação manual (Fig. 3). Isso mostra que, apesar de simples, o método proposto tem desempenho semelhante à segmentação manual.

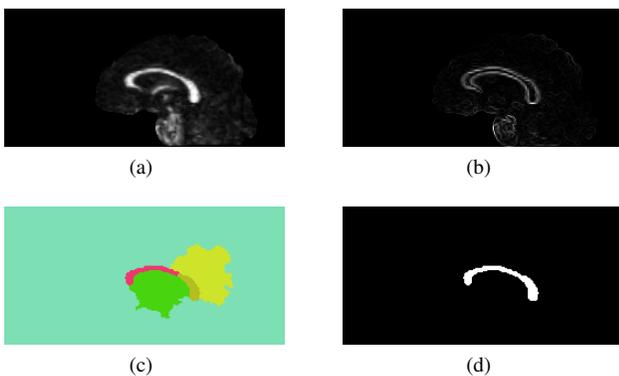


Fig. 2. As principais etapas de segmentação do corpo caloso na fatia central: (a) mapa de anisotropia fracional, (b) gradiente morfológico externo (c) transformada de *watershed* e (d) o resultado final da segmentação

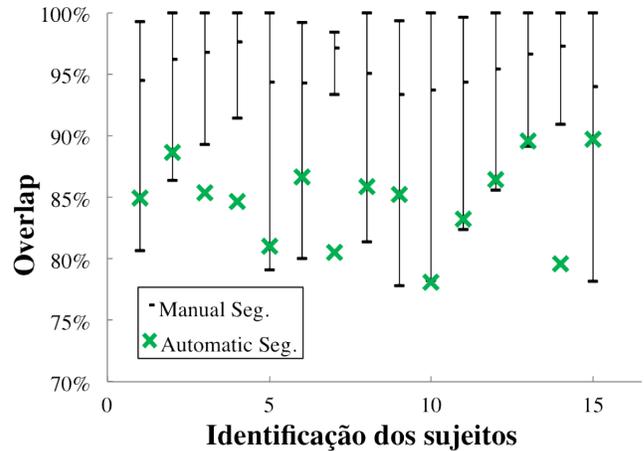


Fig. 3. Resultado dos valores da sobreposição (*overlap*) das diferentes segmentações manuais (sobreposição mínima, máxima e média) em relação ao padrão ouro.

III. SEGMENTAÇÃO VOLUMÉTRICA DO CORPO CALOSO

A segmentação do corpo caloso na fatia central do cérebro pode ser o resultado final para alguns estudos, mas também pode ser considerada como o ponto de partida para a segmentação volumétrica dessa estrutura. Foi proposta então uma extensão do método de segmentação do corpo caloso na fatia central para realizar a segmentação volumétrica [11].

A primeira etapa do método proposto é a segmentação do corpo caloso na fatia central do cérebro, seguindo o método descrito na seção II. Uma vez determinada a seção do corpo caloso na fatia central, a transformada de *watershed* a partir de marcadores [16] é novamente utilizada, agora para realizar a segmentação volumétrica da estrutura. Os marcadores para a transformada de *watershed* nessa etapa não são determinados a partir da hierarquia dos mínimos locais, mas sim definidos previamente. A seção do corpo caloso na fatia central (marcador interno), determinada na etapa anterior, e a máscara do cérebro (marcador externo), determinada nas etapas de pré-processamento, são os marcadores escolhidos para a segmentação volumétrica.

O problema de estruturas próximas ao corpo caloso com anisotropia fracional (FA) semelhante a ele é ainda mais crítico para o caso tridimensional, uma vez que as fibras do corpo caloso se aproximam dessas estruturas à medida que se afastam da fatia central do cérebro. Nesse caso, a ponderação do mapa de FA pela componente do autovetor principal na direção direito-esquerda é ainda mais importante para a segmentação volumétrica. O gradiente morfológico externo é novamente empregado para obter as bordas do corpo caloso.

Os experimentos realizados visaram primeiro investigar se o método proposto era capaz de segmentar o corpo caloso, considerando a variação de forma e tamanho do CC observada entre sujeitos (Fig. 4). Em seguida, procurou-se avaliar a qualidade da segmentação utilizando o método proposto,

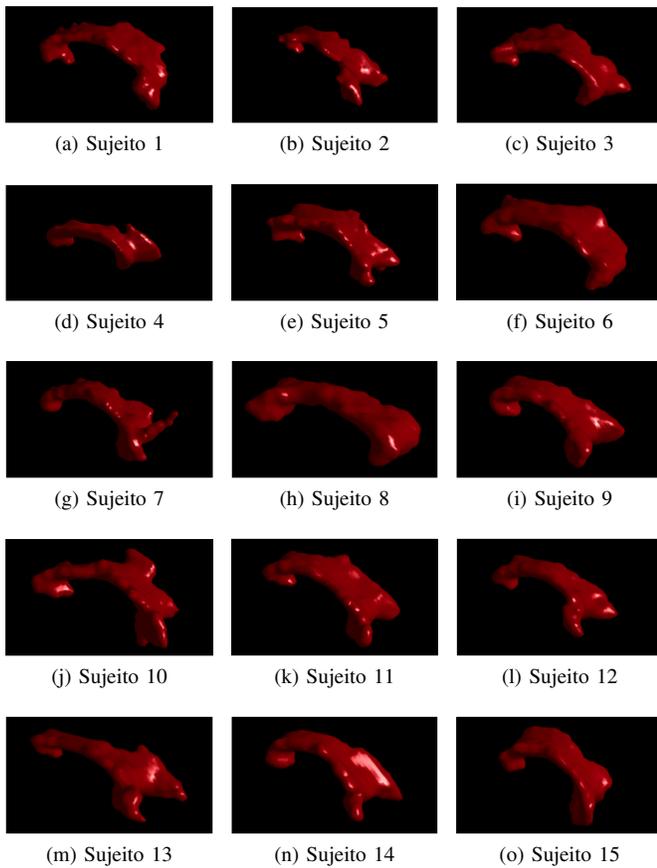


Fig. 4. Resultado da segmentação volumétrica do corpo caloso para todos os 15 sujeitos.

comparando o resultado obtido com a segmentação manual realizada por um especialista.

Apesar de ter segmentado o corpo caloso para todos os sujeitos do conjunto de testes, a segmentação volumétrica apresentou alguns problemas. O método foi capaz de identificar grande parte dos voxels assinalados como corpo caloso pelo especialista, mas em compensação também considerou como corpo caloso voxels que o especialista classificou como pertencentes ao fundo (Fig. 5).

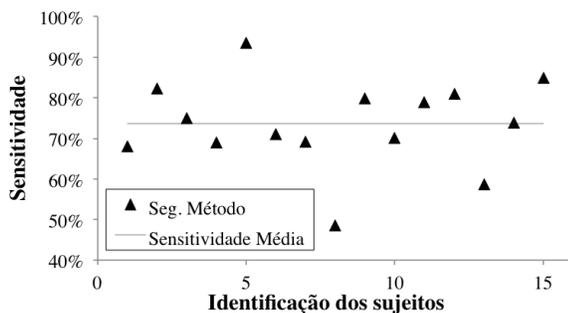


Fig. 5. Resultado dos valores de sensibilidade do método de segmentação volumétrica do corpo caloso para todos os sujeitos.

IV. PARCELAMENTO AUTOMÁTICO DO CORPO CALOSO

O parcelamento do corpo caloso, ou seja, a sua subdivisão em um número determinado de regiões, é de fundamental importância para diversos estudos sobre esta estrutura. Alterações de tamanho, forma e propriedades internas em regiões específicas do corpo caloso podem ser relacionadas tanto a doenças quanto ao processo natural de envelhecimento. Tendo isso em vista, propusemos um método automático para o parcelamento do corpo caloso em imagens de tensor de difusão [13]. O método é completamente automático e utiliza informação específica de cada sujeito contida nas imagens de difusão para realizar a divisão. O corpo caloso foi dividido em cinco regiões, por ser este o número de regiões dos esquemas existentes de parcelamento mais difundidos [14][15].

Como o parcelamento é realizado na seção do corpo caloso na fatia central do cérebro, a primeira etapa do método proposto é a identificação da fatia central e a segmentação do corpo caloso de acordo com o trabalho apresentado na seção II. O parcelamento do corpo caloso propriamente dito é, então, realizado utilizando a transformada de *watershed*. Os marcadores para o *watershed* têm posição pré-definida a partir das curvas de anisotropia da população.

O mapa de anisotropia fracional foi avaliado ao longo da linha central no interior do corpo caloso (Fig. 6), seguindo o método descrito por Park *et al.* [5]. A partir desta análise, escolhemos o posicionamento dos marcadores da transformada de *watershed* ao longo da linha central do corpo caloso de acordo com as propriedades de difusão (Fig. 7). Realizando o parcelamento do corpo caloso em cinco regiões, as divisões obtidas seguem um padrão para catorze dos quinze sujeitos (Fig. 8).

De modo geral, o método proposto se destaca por ser simples e rápido, e mesmo assim apresentar um bom desempenho. O resultado do parcelamento para os sujeitos foi específico, refletindo as propriedades internas de cada um deles, mas ao mesmo tempo o método apresentou um comportamento coerente para a população avaliada.

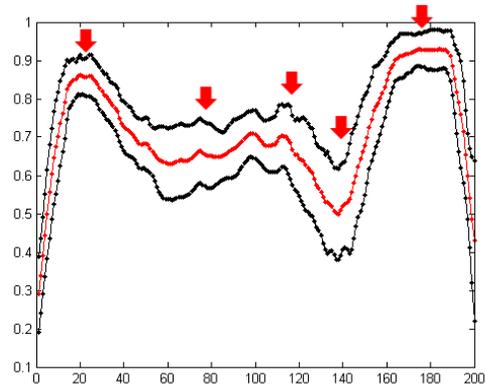


Fig. 6. Curva de anisotropia fracional ao longo do corpo caloso, com indicação dos pontos que darão origem aos marcadores.

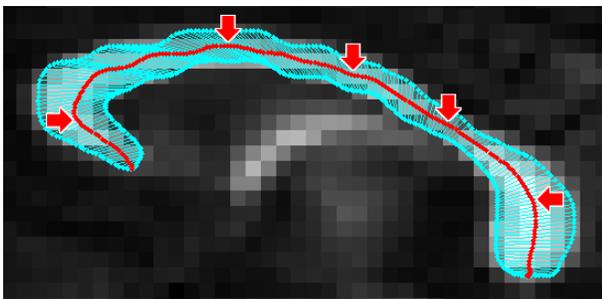


Fig. 7. Determinação dos marcadores para a transformada de *watershed*: (a) Curva de anisotropia fracional ao longo do corpo caloso; (b) Posicionamento dos marcadores.

A tractografia, construção dos caminhos dos feixes de fibras, foi realizada para um sujeito utilizando as regiões obtidas no parcelamento como semente e mostrou uma grande correspondência entre os resultados obtidos e outros achados da literatura (Fig. 9). A maior parte das fibras vindas de regiões diferentes está mapeada em áreas distintas do córtex, com pouca sobreposição entre elas.

Ainda existem melhorias que poderiam ser propostas para o método, principalmente a partir da análise do sujeito

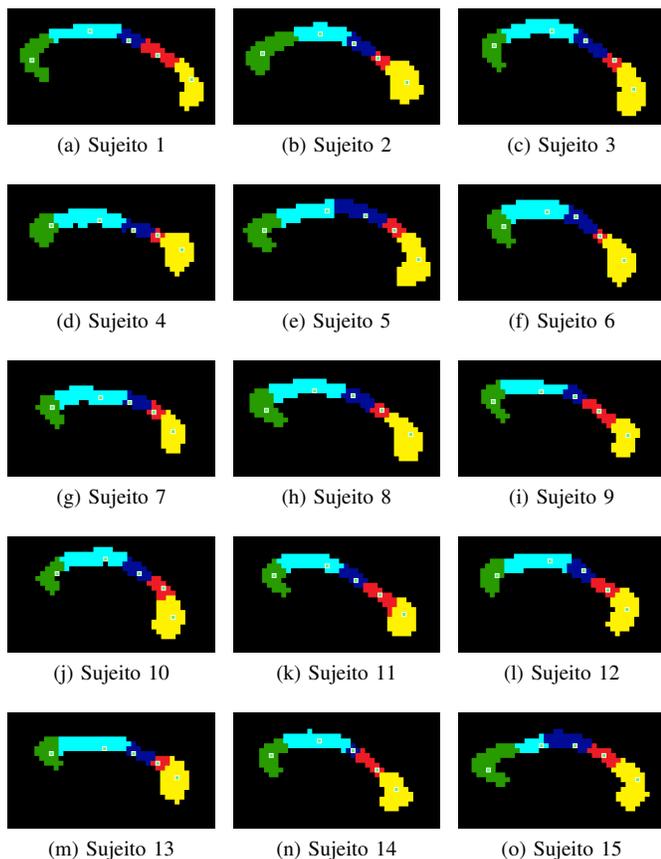


Fig. 8. Resultado do parcelamento usando o método proposto para os 15 sujeitos. Apenas o Sujeito 15 (o) não seguiu o padrão de parcelamento dos demais.

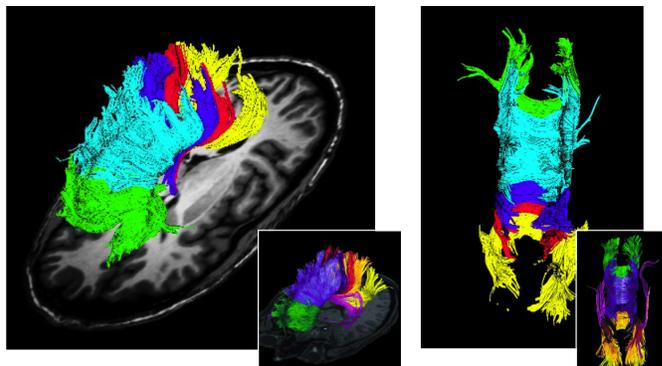


Fig. 9. Resultado da tractografia para 1 dos 15 sujeitos. As regiões obtidas no parcelamento foram usadas como sementes e estão mostradas com cores distintas. As figuras menores mostram os resultados obtidos por Hofer e Frahm [15].

cujo parcelamento não seguiu o padrão dos demais. Uma modificação na escolha dos marcadores da transformada de *watershed* poderia colaborar, enquanto que a ampliação dos experimentos de tractografia enriqueceria ainda mais a análise. De qualquer maneira, a utilização do método proposto em estudos clínicos pode ser uma importante ferramenta para a análise das alterações que o corpo caloso sofre durante o processo de envelhecimento ou quando é afetado por diferentes doenças.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um método para a segmentação automática do corpo caloso na fatia central do cérebro em imagens de ressonância magnética de tensor de difusão. O corpo caloso foi segmentado com sucesso para todos os sujeitos, com um desempenho dentro da variação das segmentação manual para a maioria deles. O método também possui uma extensão para a segmentação volumétrica da estrutura que, apesar de ter um desempenho abaixo da segmentação na fatia central, pode servir como auxílio para especialistas realizando segmentação manual.

Já o método automático de parcelamento do corpo foi capaz de realizar uma divisão coerente da estrutura para a grande maioria dos sujeitos, baseado somente nas propriedades de difusão no seu interior. O parcelamento realizado é rápido e ao mesmo tempo específico para cada sujeito, podendo ser utilizado para avaliação e acompanhamento de propriedades de regiões determinadas do corpo caloso em estudos clínicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento.

REFERÊNCIAS

- [1] El-Zehiry, N.; Casanova, M.; Elmaghraby, A. Variability of the relative corpus callosum cross sectional area between dyslexic and normally developed brains. *Proc. ISBI 2008*, p.436-9, 2008.
- [2] Thompson, P.M. ; Narr, K.L.; Blanton, R.E.; Toga, A.W. Mapping structural alterations of the corpus callosum during brain development and degeneration. In: Zaidel, E.; Iacoboni, M. (Eds.) *The parallel brain: the cognitive neuroscience of the corpus callosum*, Boston: MIT Press, p.93-130, 2003.
- [3] Bernasconi, N.; Duchesne, S.; Janke, A.; Lerch, J.; Collins, D.L.; Bernasconi, A. Whole-brain voxel-based statistical analysis of gray matter and white matter in temporal lobe epilepsy, *NeuroImage*, v.23, Issue 2, p. 717-723, 2004.
- [4] Li, J.Y.; Espay, A.J.; Gunraj, C.A.; Pal, P.K.; Cunic, D.I.; Lang, A.E.; Chen, R. Interhemispheric and ipsilateral connections in Parkinsons disease: relation to mirror movements. *Mov. Disorder* , v.22, p.813 821, 2007.
- [5] Park J.S.; Yoon, U.; Kwak, K.C.; Seo, S.W.; Kim, S.I.; Na, D.L.; Lee, J.M. . The relationships between extent and microstructural properties of the midsagittal corpus callosum in human brain. *NeuroImage*, v.56, n.1, p.174-84, 2011.
- [6] Davoodi-Bojd, E.; Soltanian-Zadeh, H. Atlas based segmentation of white matter fiber bundles in DTMRI using fractional anisotropy and principal eigen vectors. *Proc. ISBI 2008*, p.879-882, 2008.
- [7] Lenglet, C.; Rousson, M.; Deriche, R. Segmentation of 3D Probability Density Fields by Surface Evolution: Application to Diffusion MRI. *Lecture Notes in Computer Science*, v.3216, p.18-25, 2004.
- [8] Lenglet, C.; Rousson, M.; Deriche, R.; Faugeras, O. Statistics on the Manifold of Multivariate Normal Distributions: Theory and Application to Diffusion Tensor MRI Processing. *Journal of mathematical imaging and vision*, v.25, n.3, p.423-444, 2006.
- [9] Lee, S.P.; Cheng, J.Z.; Chen, C.M.; Tseng W.Y. An automatic segmentation approach for boundary delineation of corpus callosum based on cell competition. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, p.5514-7, 2008.
- [10] Freitas, P.; Rittner, L.; Appenzeller, S.; Lotufo, R.A. Watershed-Based Segmentation of the Midsagittal Section of the Corpus Callosum in Diffusion MRI. *Proc. SIBGRAPI 2011*, p.274-80, 2011.
- [11] Freitas, P.; Rittner, L. Appenzeller, S.; Lapa, A.; Lotufo, R.A. Watershed-based segmentation of the corpus callosum in diffusion MRI. *Proc. SPIE Medical Imaging*, v.8314, 2012.
- [12] Rittner, L.; Lotufo, R.A. Segmentation of DTI based on tensorial morphological gradient. In *Proceedings of SPIE Medical Imaging 2009*, vol. 7259, p. 72591E-72591E-12, 2009
- [13] Freitas, P.; Rittner, L. Appenzeller, S.; Lotufo, R.A. Corpus callosum parcellation in diffusion tensor images using the watershed transform. *IEEE Trans. on Medical Imag.* (submitted).
- [14] Witelson, S.F.; Goldsmith, C.H. The relationship of hand preference to anatomy of the corpus callosum in men. *Brain research*, vol.545, n.1-2, p.175-82, 1991.
- [15] Hofer, S.; Frahm, J. Topography of the human corpus callosum revisited—comprehensive fiber tractography using diffusion tensor magnetic resonance imaging. *NeuroImage*, v.32, n.3, p.989-94, 2006.
- [16] Beucher, S.; Meyer, F. The morphological approach to segmentation: The watershed transformation. In: Dougherty, E. (Ed.) *Mathematical Morphology in Image Processing*, New York: CRC Press, p.433-81, 1992.
- [17] Meyer, F. An overview of morphological segmentation. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, v.15, n.7, p.1089-118, 2001.
- [18] Kaus, M.R.; Warfield, S.K.; Nabavi, A.; Black, P.M.; Jolesz, F.A.; Kikinis, R. Automated segmentation of MR images of brain tumors. *Radiology*, v.218, n.2, p.586-91, 2001.
- [19] Kinnard, L.M. ; Lo, S. B.; Duckett, E.; Makariou, E.; Osicka, T.; Chouikha, M. F. Mass segmentation of dense breasts on digitized mammograms: analysis of a probability-based function. *Proc. SPIE Medical Imaging*, v.5747, p.1813-23, 2005.