

RECONSTRUÇÃO DA SUPERFÍCIE DIAFRAGMÁTICA A PARTIR DO REGISTRO TEMPORAL MASSIVO EM SEQUÊNCIAS DE RM

E. K. Ueda*, L. I. Abe*, A. K. Sato*, M. S. G. Tsuzuki*
 T. Gotoh**, S. Kagei**, T. Iwasawa***
 R. S. U. Rosso Jr****, A. G. Silva*****

*Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil
 Laboratório de Geometria Computacional
 **Yokohama National University, Japão
 ***Kanagawa Cardiovascular Respiratory Center, Japão
 ****Universidade do Estado de Santa Catarina, Brasil
 *****Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

e-mail: mtsuzuki@usp.br

Resumo: A visualização da superfície diafragmática em movimento é um tema importante em medicina, sendo possível apenas por meio de RM por utilizar radiação não ionizante. Sequências temporais de RM apresentam grande quantidade de informações que podem ser utilizadas para confirmar e para filtrar resultados incorretos. Este artigo apresenta um algoritmo que massivamente determina registros temporais e filtra os incorretos.

Palavras-chave: pulmão, registro temporal, superfície diafragmática.

Abstract: *The visualization of the diaphragmatic surface in motion is an important issue in medicine, and it is only possible through MR which uses non ionized radiation. Temporal sequences of MR have large amount of information that can be used to confirm and to filter incorrect results. This paper presents an algorithm that massively determines temporal registrations and filters the wrong results.*

Keywords: *lung, temporal registration, diaphragmatic surface.*

Introdução

O diafragma é o principal músculo respiratório humano, mas não é possível observar diretamente o seu movimento. O uso de dispositivos de ressonância magnética (RM) é mais recomendado em comparação à tomografia computadorizada por não utilizar radiação não ionizante.

Abe et al. [1] propuseram um algoritmo para reconstruir a superfície diafragmática e este trabalho apresenta avanços em relação ele. É apresentada uma formalização para o problema e um algoritmo para determinar registros temporais válidos e inválidos. O registro temporal massivo entre sequências coronais e sagitais produz grande quantidade de resultados que de-

vem ser validados antes de serem utilizados na reconstrução.

Conceitos básicos

O volume espaço temporal $I(x, y, t)$ é definido a partir do empilhamento das imagens de uma sequência temporal. É definido o plano vertical $Q_s(x_s)$ que contém x_s . A intersecção entre $I(x, y, t)$ e $Q_s(x_s)$ define uma imagem espaço temporal vertical 2D (2DET) em que os padrões de movimentos pulmonares gerados pela respiração estão presentes. Como detalhado por Abe et al. [1], uma imagem sagital e uma coronal possuem um segmento vertical comum, e os pixels deste segmento possuem a mesma posição 3D. Os métodos de registro temporal podem ser classificados em dois grupos: comparação de intensidade de pixels [2,3], e comparação da superfície diafragmática [4].

Neste trabalho, a superfície diafragmática é utilizada para realizar o registro temporal. A função respiração padrão $f_s(t)$ que é uma estimacão do movimento do pulmão no $I(x, y, t)$, é determinada. A $f_s(t)$ é entrada para a transformada de Hough modificada que determina a presença de movimentos síncronos $f_k(t)$ em imagens 2DET. Uma vez que o movimento do pulmão não é totalmente síncrono, um algoritmo de contornos ativos é utilizado para relaxar a restrição de sincronismo [5].

Determinação do movimento padrão do diafragma – o movimento diafragmático padrão é denotado por $f_a(t)$. Para um dado instante de tempo t_i , $f_a(t)$ representa o estado diafragmático.

$$\{l, p\} = f_a(t_i) \quad (1)$$

onde l representa o nível do diafragma e p é a fase respiratória (inspiração ou expiração). O movimento diafragmático em uma 2DET pode ser determinado a partir de uma sequência temporal de imagens A na posição em

que a sequência temporal de imagens B cruza A, que é representado por

$$f_d(t) = \Gamma(A, B). \quad (2)$$

Registro temporal – este trabalho utiliza o registro temporal proposto por Sato et al. [4]. Para uma imagem sagital (coronal) selecionada de uma sequência temporal B, o seu estado diafragmático (nível e fase respiratória), $f_d(t_B)$ é determinado. Então, a partir da sequência temporal B, é obtida a imagem coronal (sagital) com o mesmo estado diafragmático. Este procedimento é realizado a partir da comparação do movimento diafragmático $\Gamma(A, B)$. O registro temporal é representado por

$$\{t_i\} = \varrho(\Gamma(A, B), f_d(t_B)) \quad (3)$$

onde $\{t_i\}$ é o conjunto de instantes de tempo registrados. Outra forma de representar o registro temporal é

$$\{t_i\} = \varrho(\Gamma(A, B), \Gamma(A, B)(t_B)), \quad (4)$$

em que é mais clara a relação entre o movimento diafragmático das sequências temporais A e B.

Reconstrução da superfície diafragmática

Existem duas estratégias para utilizar o registro temporal na reconstrução da superfície do diafragma: registro temporal linear e cíclico.

Registro temporal linear – uma imagem é utilizada como guia e diversos registros temporais são realizados com as sequências temporais ortogonais. Tsuzuki et al. [4] utilizaram o registro linear junto com o algoritmo de registro baseado na comparação da altura do pulmão a fim de reconstruir o modelo 3D animado do pulmão a partir de silhuetas.

O registro temporal linear que utiliza o algoritmo proposto por Sato et al. [3] pode ser implementado utilizando o Algoritmo 1. Note que $\{t_s^{s_1c_1}\}$ pode conter mais de um elemento, e não é possível discernir a melhor opção. Quando o conjunto é vazio, é necessário interpolar silhuetas adjacentes.

Algoritmo 1 Registro temporal linear

procedimento REGLINEAR($C_1, S_i, t_c^{c_1}$)

para <Todas as sequências sagitais S_i > **faça**

$$\{l_c, p_c\} = \Gamma(C_1, S_i)(t_c^{c_1})$$

$$\{t_s^{s_1c_1}\} = \varrho(\Gamma(C_1, S_i, B), \{l_c, p_c\})$$

fim para

retorna $\{t_s^{s_1c_1}\}$

fim procedimento

Registro temporal cíclico – quatro sequências temporais são utilizadas com a confirmação do resultado. Considere que quatro sequências temporais são fornecidas: S_1 e S_2 (sagitais), e C_1 e C_2 (coronais). As quatro sequências se cruzam nos pontos A, B, C e D. Uma ima-

gem de C_1 é fixada. O registro temporal cíclico busca por instantes em que é possível realizar o registro coerente simultâneo dos quatro pontos de intersecção.

O Algoritmo 2 mostra o registro temporal cíclico aplicado ao algoritmo de Sato et al. [3]. No algoritmo, após realizar o registro temporal nos pontos A e B, dois conjuntos de instantes de tempo são determinados ($\{t_s^{s_1c_1}\}$ e $\{t_s^{s_2c_1}\}$). O operador \star é utilizado para criar a correspondência entre os registros primário e secundário. O resultado obtido para o registro temporal de C_2 é filtrado a fim de que o mesmo instante de tempo possa ser registrado nas posições C e D. O conjunto final de instantes registrados são $\{t_c^{c_2}\}$, $\{t_s^{s_1}\}$ e $\{t_s^{s_2}\}$.

Algoritmo 2 Registro temporal cíclico

procedimento REGCÍCLICO($C_1, C_2, S_1, S_2, t_c^{c_1}$)

// Registro do ponto A

$$\{t_s^{s_1c_1}\} = \varrho(\Gamma(S_1, C_1), \Gamma(C_1, S_1)(t_c^{c_1}))$$

// Registro do ponto B

$$\{t_s^{s_2c_1}\} = \varrho(\Gamma(S_2, C_1), \Gamma(C_1, S_2)(t_c^{c_1}))$$

// Registro do ponto C

$$\{t_s^{c_2s_1}\} = \{(t_1^{c_2s_1}, t_s^{s_1c_1})\} = \emptyset$$

para <Todo $t_i \in \{t_s^{s_1c_1}\}$ > **faça**

$$\alpha = \varrho(\Gamma(C_2, S_1), \Gamma(S_1, C_2)(t_i))$$

$$\{t_s^{c_2s_1}\} = \{t_s^{c_2s_1}\} \cup \alpha$$

$$\{(t_c^{c_2s_1}, t_s^{s_1c_1})\} = \{(t_c^{c_2s_1}, t_s^{s_1c_1})\} \cup \{\alpha \star t_i\}$$

fim para

// Registro do ponto D

$$\{t_s^{c_2s_2}\} = \{(t_1^{c_2s_2}, t_s^{s_2c_1})\} = \emptyset$$

para <Todo $t_j \in \{t_s^{s_2c_1}\}$ > **faça**

$$\beta = \varrho(\Gamma(C_2, S_2), \Gamma(S_2, C_2)(t_j))$$

$$\{t_s^{c_2s_2}\} = \{t_s^{c_2s_2}\} \cup \beta$$

$$\{(t_c^{c_2s_2}, t_s^{s_2c_1})\} = \{(t_c^{c_2s_2}, t_s^{s_2c_1})\} \cup \{\beta \star t_j\}$$

fim para

// Checar validade

se $\langle \{t_c^{c_2s_1}\} \cap \{t_c^{c_2s_2}\} \neq \emptyset \rangle$ **então**

$$\{t_c^{c_2}\} = \{t_c^{c_2s_1}\} \cup \{t_c^{c_2s_2}\}$$

$$\{t_s^{s_1}\} = \text{filtrar}(\{(t_c^{c_2s_1}, t_s^{s_1c_1})\}, \{t_c^{c_2}\})$$

$$\{t_s^{s_2}\} = \text{filtrar}(\{(t_c^{c_2s_2}, t_s^{s_2c_1})\}, \{t_c^{c_2}\})$$

senão

$$\{t_s^{s_1}\} = \{t_s^{s_2}\} = \{t_c^{c_2}\} = \emptyset$$

fim se

retorna $\{t_s^{s_1}\}, \{t_s^{s_2}\}$ e $\{t_c^{c_2}\}$

fim procedimento

Método proposto

O método proposto combina a simplicidade do registro temporal linear com a confiabilidade do método de registro temporal cíclico. É dividido em três etapas: registro temporal maciço, validação do registro e reconstrução da superfície diafragmática.

Registro temporal maciço – o registro temporal é realizado para todas as intersecções entre coronais e sagitais, como mostrado no Algoritmo 3. Alguns

detalhes podem ser observados na Fig. 1. Inicialmente, uma imagem coronal (no instante de tempo $t_c^{c_1}$) é definida como raiz. O primeiro laço representa o primeiro nível do algoritmo em que o registro temporal é feito para todas as sequências sagitais intersectantes. Os quadrados azuis da Fig. 2(a) representam as posições em que o estado diafragmático da imagem coronal foi determinado. Os quadrados em verde correspondem à posição em que o registro temporal foi bem sucedido com pelo menos um instante de tempo sagital $\{t_s^{s_i c_1}\}$. Os quadrados sem preenchimento indicam que nenhum registro foi possível.

Algoritmo 3 Registro temporal maciço

procedimento REGMACIÇO($C_j, S_i, t_c^{c_1}$)

// Registro de primeiro nível

para <Todas as sequências sagitais S_i > **faça**

$\{t_s^{s_i c_1}\} = \varrho(\Gamma(S_i, C_1), \Gamma(C_1, S_i)(t_c^{c_1}))$

// Registro de segundo nível

para <Todas as sequências coronais C_j > **faça**

$\{t_c^{c_j s_i}\} = \{(t_c^{c_j s_i}, t_s^{s_i c_1})\} = \emptyset$

para <Todo $t_i \in \{t_s^{s_i c_1}\}$ > **faça**

$\gamma = \varrho(\Gamma(C_j, S_i), \Gamma(S_i, C_j)(t_i))$

$\{t_c^{c_j s_i}\} = \{t_c^{c_j s_i}\} \cup \gamma$

$\{(t_c^{c_j s_i}, t_s^{s_i c_1})\} = \{(t_c^{c_j s_i}, t_s^{s_i c_1})\} \cup \{\gamma * t_i\}$

fim para

fim para

retorna $\{(t_c^{c_j s_i}, t_s^{s_i c_1})\}$

fim procedimento

O segundo e terceiros laços no algoritmo de registro temporal maciço são responsáveis pela realização do registro temporal de segundo nível. Todas as sequências temporais coronais, com exceção da raiz, são registradas considerando os registros determinados no primeiro nível. A Fig. 2(b) mostra quadrados vermelhos representando posições em que foi possível realizar o registro temporal no segundo nível. Os quadrados em amarelo correspondem às posições em que o nível diafragmático foi determinado como consequência do registro temporal de segundo nível.

Validação e reconstrução da superfície – após a execução do registro temporal maciço, é necessário filtrar os resultados e eliminar as inconsistências, de forma similar ao processamento do registro temporal cíclico. Dois tipos de consistências são considerados: consistência local de duas sequências temporais que se cruzam, e a consistência global em que todos os registros temporais originados de uma sequência temporal são considerados.

Níveis diafragmáticos localmente consistentes estão representados pelas cores azul, vermelho, verde e amarelo na Fig. 3: quadrados azuis são associados com a imagem coronal raiz, quadrados vermelhos são associados com posições em que o registro de segundo nível foi realizado com sucesso, quadrados verdes e amarelos são

associados com posições em que o nível diafragmático foi determinado exclusivamente com sequências sagitais e coronais, respectivamente. Quadrados roxos representam níveis diafragmáticos inconsistentes, em que não foi possível realizar o registro temporal, visto que, nestes casos, sequências temporais coronais e sagitais determinam níveis diafragmáticos distintos. Os quadrados cinzas representam posições em que o algoritmo não foi capaz de obter o nível diafragmático.

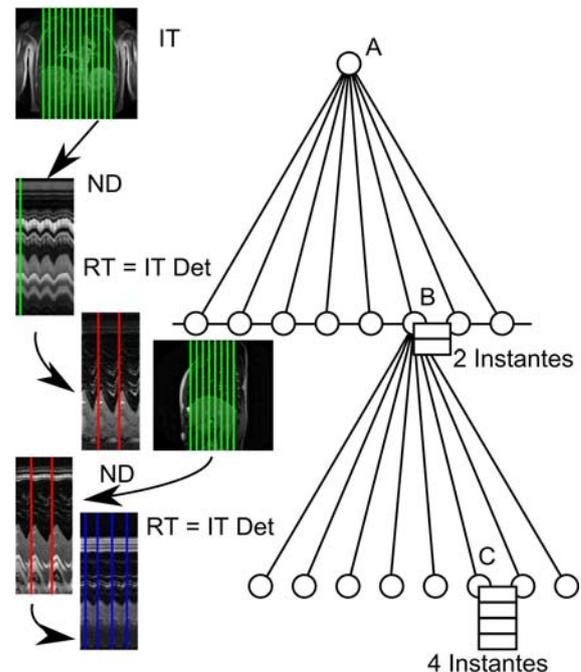


Figura 1: Fluxo do algoritmo de registro temporal maciço. IT: instante de tempo. ND: determinação do nível diafragmático. RT: registro temporal. IT Det: determinação do instante de tempo.

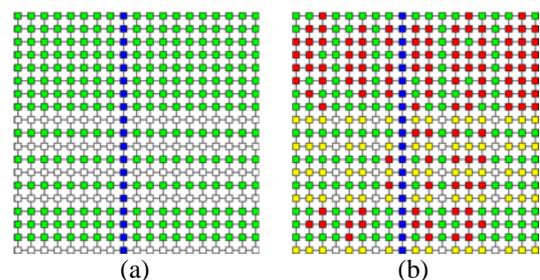


Figura 2: (a) Quadrados representam posições onde o nível diafragmático pode ser determinado (primeiro nível). Azul: imagem raiz. Verde: registro de primeiro nível. Branco: Sem registro no primeiro nível. (b) Quadrados vermelhos representam a posição em que foi possível realizar o registro no segundo nível. Quadrados amarelos correspondem a posições em que o nível diafragmático foi determinado (segundo nível).

É possível observar que muitos registros temporais cíclicos estão presentes, mas são minoria quando comparados com os demais casos. A consistência global exige que todos os níveis diafragmáticos associados a

uma mesma imagem devem ser representados pelo mesmo instante de tempo. Desta forma, o instante de tempo sagital para cada horizontal deve ser único. O mesmo é verdadeiro para as verticais representando as imagens coronais.

Todas as sequências temporais sagitais (horizontal) e coronais (vertical) são analisadas para determinar o instante de tempo associado a maioria. Este procedimento assegura a consistência global. Verticais com quadrados verdes e horizontais com quadrados amarelos

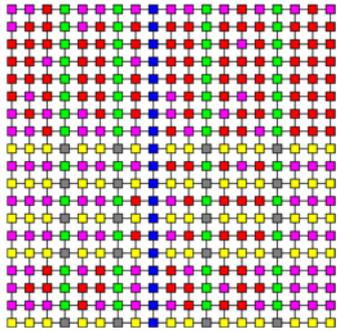


Figura 3: Quadrados azuis e vermelhos representam níveis diafragmáticos localmente consistentes. Quadrados verdes e amarelos representam níveis diafragmáticos localmente inconsistentes com consistência global. Quadrados roxos representam níveis inconsistentes. Quadrados cinzas representam posições em que o nível diafragmático não pode ser definido, necessitando a interpolação de posições adjacentes.

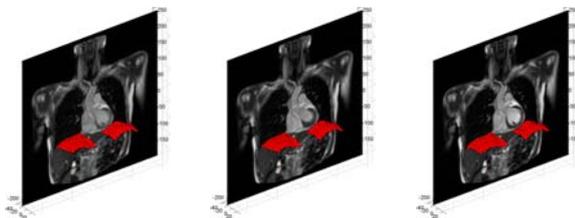


Figura 4: Superfície reconstruída do diafragma em movimento.

são desconsideradas (ver Fig. 3), uma vez que não têm níveis diafragmáticos originados de sequências coronais e sagitais, respectivamente. A fim de remover as inconsistências locais (quadrados roxos da Fig. 3), o nível diafragmático é definido como a média entre as sequências temporais coronais e sagitais intersectantes. O procedimento foi descrito utilizando uma imagem coronal como raiz e, no caso em que a raiz é uma imagem sagital, o mesmo procedimento pode ser utilizado.

Resultados

As sequências de imagens de RM utilizadas no experimento foram obtidas por um equipamento Symphony (1.5T) fabricado pela Siemens, utilizando True-FISP. As imagens foram obtidas de um paciente saudável não fumante. Imagens iniciais dos conjuntos de dados dinâ-

micos foram obtidas no estado transiente de magnetização, que possuem alta intensidade de sinal e contraste. A análise inclui todas as imagens, incluindo as imagens iniciais. Foram obtidas 28 sequências temporais, 5 coronais e 23 sagitais. A Fig. 4 apresenta as superfícies diafragmáticas reconstruídas utilizando o algoritmo proposto. O protocolo foi aprovado pelo comitê de éticas médicas do Kanagawa Cardiovascular Respiratory Center.

Conclusões e trabalhos futuros

O método proposto foi capaz de reconstruir a superfície do diafragma com alto grau de confiabilidade quando comparado com outros métodos publicados, uma vez que este utiliza informações redundantes. Consiste na combinação dos métodos de registro temporal linear e cíclico. Todos os possíveis registros temporais entre as sequências sagitais e coronais são determinados, e a coerência dos dados é mantida a partir da análise das consistências locais e globais.

Este estudo é um trabalho preliminar, e mais análises se mostram necessárias. O registro da superfície diafragmática reconstruída com uma imagem de TC 3D do pulmão pode ser utilizado para determinar o erro do método.

Agradecimentos

Este projeto foi suportado pelo CAPES/JSPP (AUXPE 1269/2014). MSG Tsuzuki é parcialmente suportado pelo CNPq (proc. 310.663/2013-0), EK Ueda é suportado pela CAPES, AK Sato é suportado pela FAPESP (proc. 2010/19646-0).

Referências

- [1] Abe LI, Chirinos JMM, Gotoh T, Kagei S, Iwasawa T, Tsuzuki MSG. Reconstrução automática da superfície diafragmática a partir de sequências de imagens de RM. Em: XXIII CBEB; Gramado, Brazil. 2012.
- [2] Stevo N, Campos R, Tavares RS, Tsuzuki MSG, Gotoh T, Kagei S, Iwasawa T. Registration of temporal sequences of coronal and sagittal images obtained from magnetic resonance. Em: Proc COBEM; Gramado, Brazil. 2009.
- [3] Sato AK, Stevo N, Tsuzuki MSG, Kadota E, Gotoh T, Kagei S, Iwasawa T. Registration of temporal sequences of coronal and sagittal MR images through respiratory patterns. Em: Biomed Signal Proces. 2011; 6:34-47
- [4] Tsuzuki MSG, Takase FK, Gotoh T, Kagei S, Asakura A, Iwasawa T, Inoue T. Animated solid model of the lung constructed from unsynchronized MR sequential images. Em: CAD. 2009; 41:573-585.
- [5] Williams, D. J., Shah, M., A fast algorithm for active contours and curvature estimation. Em: Computational Visual Graphical Image Processing, 1992, 1:14-26.