

XXVII Brazilian Congress in Biomedical Engineering
October 26-30 2020 Vitoria (Brazil)



CBEB2020

XXVII Congresso Brasileiro
de Engenharia Biomédica

Localização Tridimensional a partir de Imagens Radiográficas em Sistemas Portáteis

L. C. Santos¹, M. Bergmann¹, F. Malta²; G. F. Silva¹, M. P. Morais¹, A. M. Marques da Silva^{1,3}.

¹ Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, RS, Brasil

² Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Curso de Engenharia Elétrica, Porto Alegre, RS, Brasil

³ Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Laboratório de Computação em Imagens Médicas, Porto Alegre, RS, Brasil

Resumo — Este artigo tem por objetivo apresentar o desenvolvimento e teste de conceito de um sistema de estimativa da localização 3D de estruturas a partir de imagens radiográficas planas em sistemas portáteis, utilizando marcas fiduciais. O método combina duas imagens radiográficas adquiridas em posições ortogonais associadas a três marcações fiduciais identificadas na imagem de um objeto de teste e um *phantom* especialmente construído para a calibração. As marcações fiduciais são identificadas de forma automática através da transformada circular de Hough. A partir da aplicação das equações de localização das marcas fiduciais é possível estabelecer a localização de um alvo em relação a marcadores posicionadas na placa de captura. As correções de perspectiva e de magnificação com o *phantom* de calibração tornam possível a localização das estruturas no espaço 3D. O sistema foi testado de forma experimental em um sistema de raios X portátil com placa de captura direta. A aquisição das imagens foi simulada com a movimentação do objeto de teste em ângulos de 90°, com distância foco-filme fixa. A exatidão e precisão do sistema mostrou-se dependente da qualidade dos testes de controle de qualidade do sistema de raios X portátil. Na prova de conceito o sistema de raios X portátil apresentou desvio no alinhamento do feixe, alterando as dimensões em dois quadrantes da placa de captura. O sistema foi capaz de identificar a localização espacial de estruturas de radiopacidade aumentada dentro de um volume com um erro de 3 mm, apesar das distorções nos quadrantes. Conclui-se que a calibração do sistema usando marcas fiduciais e a realização de testes de controle de qualidade da imagem radiográfica são pré-requisitos necessários para a implementação do sistema em equipamentos reais com segurança. Aprimoramentos no sistema podem permitir sua implementação em um sistema de raios X portátil, embarcado em uma unidade móvel, facilitando o acesso do diagnóstico por imagem em áreas remotas ou em uso veterinário.

Palavras-chave — Radiografia, imagens biplanares, localização tridimensional, sistema portátil.

Abstract — This article aims to present the development and concept test of a system for estimating the 3D location of structures from flat radiographic images in portable systems, using fiducial marks. The method combines two radiographic images acquired in orthogonal positions associated with three fiducial markings identified in the image of a test object and a phantom specially built for calibration. The fiducial markings are identified automatically through the circular Hough transform. From the application of the equations of the location of fiducial marks,

it is possible to establish a target's location concerning markers positioned on the capture plate. Perspective and magnification corrections with the calibration phantom make it possible to locate structures in 3D space. The system was experimentally tested on a portable x-ray system with a direct capture plate. The acquisition of the images was simulated by moving the test object at 90° angles, with a fixed focus-film distance. The accuracy and precision of the system proved to be dependent on the quality of the quality control tests of the portable x-ray system. In the proof of concept, the portable x-ray system showed a deviation in the beam alignment, changing the dimensions in two quadrants of the capture plate. The system was able to identify the spatial location of structures with increased radiopacity within a volume with an error of 3 mm, despite the distortions in the frames. Concluding, the calibration of the system using fiducial marks and the performance of quality control tests of the radiographic image are necessary prerequisites for implementing the system in actual equipment with safety. Improvements in the system may allow its implementation in a portable x-ray system, embedded in a mobile unit, facilitating the access of diagnostic imaging in remote areas or for veterinary use.

Keywords — Radiography, biplane images, three-dimensional location, portable system.

I. INTRODUÇÃO

Apesar do avanço e da disponibilidade atual da tecnologia de imagens médicas tridimensionais (3D), a imagem de raios X planar continua sendo uma das técnicas de diagnóstico por imagem mais usadas na rotina clínica, pois possui baixo custo e fornece uma maneira conveniente de aquisição de imagens, principalmente em sistemas portáteis.

Atualmente os sistemas portáteis de raios X contam com várias possibilidades de aquisição digital, dentre as quais aquelas utilizando placas de captura direta e o protocolo de comunicação DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*) para o envio e armazenamento de imagens de imagens em servidores [1, 2].

A determinação de informações 3D a partir de imagens bidimensionais (2D) ou projeções é uma área muito importante em visão computacional e vem sendo bastante estudada desde a década de 90. No entanto, existem alguns problemas relacionados com a obtenção da informação 3D a partir de duas

imagens planares, como a existência de ruído ou falta de alinhamento dos planos em cada ponto correspondente.

Os sistemas de produção de imagens por raios X de projeção podem ser modelados como uma câmera estenopeica ou câmera *pinhole* [3-5]. Este modelo define um mapeamento geométrico de um objeto 3D para o plano da imagem 2D, conhecido como projeção perspectiva. No caso da câmera *pinhole*, a fonte de luz visível é externa e ao incidir sobre o objeto, o mesmo reflete difusamente a luz para produzir a imagem no detector. Diferentemente, no sistema de raios X, o objeto de interesse está entre a fonte de raios X e o detector, sendo a imagem formada ao atravessar o objeto.

Estudos vêm sendo realizados utilizando duas imagens planares de raios X para obter estimativas de dimensões e posições de estruturas 3D, particularmente na ortopedia [6, 7]. No entanto, os artigos publicados sobre o método de reconstrução a partir de apenas duas projeções [8,9] destacam a necessidade de identificar as informações do posicionamento das imagens 2D nos raios X a partir de dois pontos de referência anatômicos delimitados pelo usuário ou de forma semiautomática. Ao invés de estruturas anatômicas de interesse, marcas fiduciais, que são estruturas de padrões e tamanhos conhecidos visíveis na imagem, podem servir como referência de localização, orientação e escala. Elas podem servir como referência para as coordenadas do objeto, aumentando a capacidade de localização 3D, ajudando a criar uma fusão estável e precisa de imagens reais e sintéticas [10].

Este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de um sistema de estimativa da localização 3D de estruturas a partir de imagens de raios X planares em sistemas portáteis, utilizando marcas fiduciais e calibração do sistema.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de correção e estimativa de localização no espaço 3D foi desenvolvido no software MATLAB R2015a.

O sistema de radiologia portátil utilizado neste trabalho consiste em um equipamento de raios X portátil da marca JPI modelo 135H (120 kV e 35 mA), com distância foco-filme adotada de 90 cm e ponto focal nominal de 1,2 mm. O sistema de aquisição utiliza uma placa de captura direta marca TOSHIBA modelo FDX3543RP com dimensões de 43 cm x 35 cm em pixels 2984 x 4448 pixels (tamanho de pixel 143 μ m), instalado em uma caminhonete Mercedes Bens modelo Sprinter 313 (Fig. 1). As instalações foram adaptadas para a realização de exames veterinários, de acordo com as normas do Conselho Regional de Medicina Veterinária (CRMV).

O software de aquisição de imagens é o EXAMVUE_VET modelo 1.0.29, com capacidade de armazenamento e comunicação em DICOM e sistema de armazenamento na nuvem.



Fig. 1 Imagem da unidade móvel (superior à esquerda), com sistema de radiologia veterinária (à direita); tela com o sistema de aquisição das imagens com imagem do *phantom* de calibração (inferior à esquerda)

Para controle de qualidade foram realizados testes de alinhamento, colimação, distância foco-filme e avaliação do ponto focal de acordo com o padrão NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) [11]. O alinhamento e nivelamento dos dispositivos para controle de qualidade foram aferidos com o auxílio de um nível a laser para certificar o paralelismo entre a fonte da radiação e a placa de captura.

Por se tratar de um projeto experimental sem envolvimento de pessoas, animais ou estudos de banco de dados sigilosos, não é necessária a aprovação do Comitê de Ética local. O estudo envolveu unicamente *phantoms* (modelos de tamanhos e estruturas conhecidas). As medidas e distâncias reais dos *phantoms* foram aferidas com fita métrica e paquímetro.

O teste do sistema de localização 3D desenvolvido foi realizado usando um objeto de teste em forma de caixa manufaturado em madeira, que possui três marcas fiduciais esféricas de material radiopaco de 1,8 cm de diâmetro, posicionadas em três faces da caixa. Dentro foi posicionado um cilindro com água, com um objeto radiopaco em seu interior (Fig. 2), representando o objeto a ser localizado.

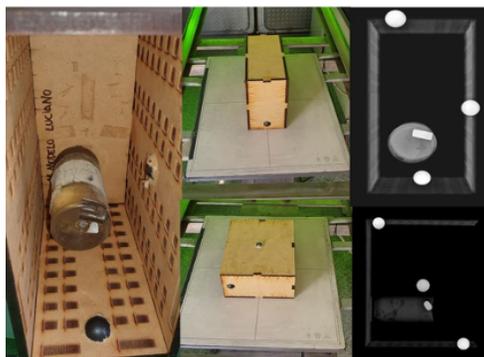


Fig. 2 Objeto de teste com um cilindro líquido e objeto radiopaco (à esquerda); posicionamento do objeto de teste simulando aquisição antero-posterior e lateral (centro); imagens radiográficas são mostradas (à direita)

A calibração do sistema foi realizada utilizando um *phantom* com localizadores metálicos quadrados com tamanhos e posições conhecidas, posicionados nos planos antero-posterior e lateral sobre a placa de captura (Fig.3).

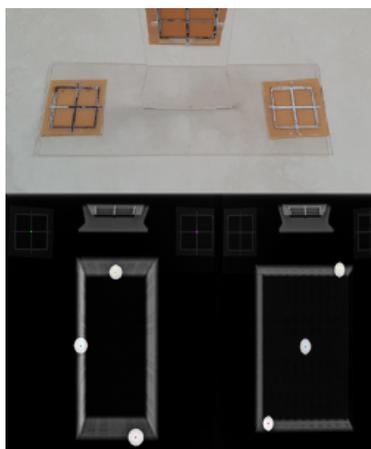


Fig. 3 *Phantom* de calibração montado sobre placas de acrílico (superior); imagens radiográficas nos planos antero-posterior e lateral contendo a caixa do objeto de teste e o *phantom* de calibração (inferior)

A estimativa da localização 3D de um ponto no objeto foi realizada através do processamento das imagens radiográficas adquiridas em dois ângulos ortogonais e cálculos de projeção perspectiva. Para tanto, um sistema de coordenadas $X'Y'Z'$ foi fixado no sistema fonte de raios X – placa de captura, e outro sistema de coordenadas XYZ foi fixado no centro do objeto a ser imageado (*phantom*). O centro da projeção perspectiva foi assumido com sendo o ponto focal do sistema de raios X e o eixo Z como a linha perpendicular à placa de captura, na direção da distância foco-filme, passando pelo centro da placa. Utilizou-se a projeção XY como equivalente a uma projeção antero-posterior e a projeção YZ como uma projeção lateral. A matemática da projeção perspectiva pode ser encontrada em Kak e Slaney (1988) [12].

A leitura das imagens em DICOM e localização dos centros das imagens e dimensões é realizada automaticamente com o *phantom* de calibração. As marcações fiduciais são identificadas de forma automática utilizando a operação *imfindcircles* do MATLAB R2015a, que usa um algoritmo baseado em Transformada Circular de Hough para encontrar círculos de tamanhos específicos [13]. Essa abordagem é usada devido à sua robustez na presença de ruído, oclusão e iluminação variável. A operação realiza a segmentação por limiarização e operações morfológicas para encontrar círculos dentro de uma faixa de tamanho, estabelecida pelas dimensões das marcas fiduciais. Cada ponto central da marca fiducial é encontrado e marcado com uma cor específica. As equações de projeção perspectivas são utilizadas para produzir uma visualização da localização dos centros das marcas

fiduciais no espaço 3D. A partir deste ponto, o usuário pode interagir com o sistema e determinar a localização espacial de uma estrutura de interesse, a partir do apontamento da estrutura nos dois planos ortogonais.

III. RESULTADOS

A validação do sistema foi realizada em duas etapas, sendo uma etapa preliminar e outra de validação técnica. Estas etapas visaram determinar a exatidão do sistema.

Na etapa preliminar foram realizadas as imagens do objeto de teste e do *phantom* de calibração. No experimento foi possível localizar e redimensionar as imagens radiográficas ortogonais. O sistema mostra as marcas fiduciais com cores distintas para cada plano de projeção (Fig. 4). Adicionalmente, o sistema oferece um marcador manual para o operador indicar a estrutura de interesse nas duas imagens. A localização é determinada por triangulação das marcações fiduciais.

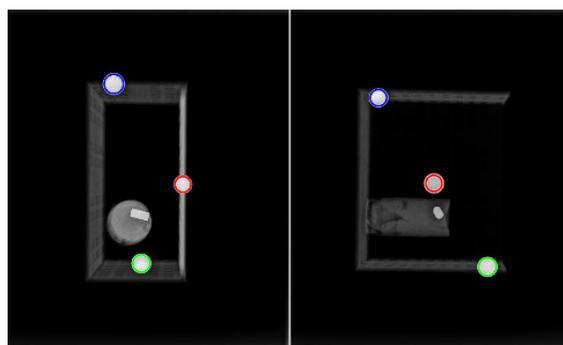


Fig. 4 Imagens radiográficas após o processamento para localização das marcas fiduciais; cada cor (verde, vermelho e azul) corresponde à marca fiducial correspondente em cada plano de projeção

A interface do sistema mostra uma imagem com os dois planos ortogonais em forma de L. O objeto de interesse é projetado e representado no espaço 3D com linhas pontilhadas, indicando a localização gerada pelo sistema (Fig.5).

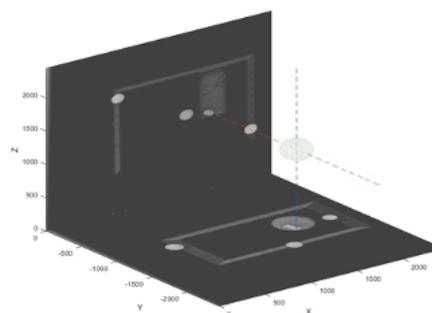


Fig. 5 Representação da posição da estrutura de interesse no espaço 3D, com as imagens radiográficas ortogonais no plano horizontal e vertical

A seguir foi realizada a validação técnica do sistema através da comparação entre as medidas das dimensões das marcas fiduciais e do *phantom* de calibração com as medidas obtidas pelo sistema diretamente das imagens. Observou-se um fator de magnificação da imagem de 1,33 no centro do campo de visão. Em relação à exatidão das medidas, observaram-se distorções que foram de 33 a 39% nas medidas das distâncias entre as marcas fiduciais particularmente em dois quadrantes da placa de captura.

A avaliação dos resultados dos testes de controle de qualidade do alinhamento do feixe de raios X mostrou um desvio de cerca de 1,5 cm em relação à área irradiada, o que explica os erros de medidas das posições e distâncias das marcas fiduciais em apenas dois quadrantes da placa de captura. Este erro mostra uma diferença entre o alinhamento do campo de colimação, gerando magnificações distintas em diferentes pontos da placa de captura.

A avaliação do ponto focal nos testes de controle de qualidade confirmou o valor nominal de 1,2 mm de ponto focal. Em relação às diferenças de posicionamento dos centros das marcas fiduciais observou-se um erro de aproximadamente 3 mm, uma margem aceitável, considerando que a identificação de um objeto de interesse na imagem é quase sempre maior do que este valor.

IV. DISCUSSÃO

Este artigo apresenta o desenvolvimento e teste do conceito de um sistema de localização 3D a partir da combinação de duas imagens planas radiográficas, em um equipamento de raios X móvel, utilizando marcas fiduciais. O objetivo era desenvolver um sistema que pudesse ser implementado com baixo custo em equipamentos de raios X portáteis, possibilitando a melhoria da visualização e facilitando a interpretação de imagens planas 2D, quando processadas e representadas no espaço 3D, para uso em radiologia veterinária. Usualmente não são utilizados sistemas de tomografia computadorizada na investigação radiológica de animais, em virtude de problemas de limitação de posicionamento e alto custo.

O teste de conceito foi desenvolvido com um modelo em forma de caixa com marcas fiduciais esféricas de 1,8 cm de diâmetro e um cilindro de água representando o corpo do animal com um objeto radiopaco em seu interior.

O mapeamento do espaço 3D foi realizado através da detecção automática dos três pontos conhecidos como marcas fiduciais, posicionadas em locais específicos do objeto de teste, visualizados nas duas imagens planas. As limitações deste arranjo referem-se à impossibilidade de estender este arranjo em caixa com marcas fiduciais para animais maiores, que precisariam estar dentro das dimensões da caixa e à

necessidade de corrigir distorções devido à problemas de alinhamento do feixe de raios X.

Embora usada com frequência, a interpretação correta de radiografias planas na prática clínica veterinária é desafiadora, pois as estruturas anatômicas 3D do objeto de estudo são projetadas como estruturas bidimensionais (2D). Nas situações de cirurgias em animais, os veterinários costumam ter acesso somente a radiografias planas, dificultando a localização da estrutura de interesse no espaço 3D. Devido à projeção, a percepção de profundidade do objeto é perdida. Por outro lado, o fator de magnificação radiográfica é apenas conhecido de forma aproximadamente, sem considerar distorções devido a altura e falta de alinhamento do feixe [14].

Diversos fatores interferem na qualidade da imagem radiográfica, dentre as quais a magnificação, que é a mudança do tamanho da imagem em relação ao objeto real. Quanto maior a magnificação, maior é a dose de radiação para possibilitar a obtenção da mesma qualidade de imagem [15, 16]. Assim, o sistema desenvolvido fixou a distância foco-filme, garantindo uma magnificação razoável para as aplicações veterinárias. Animais menores exigem uma distância menor, com a inserção deste valor de distância foco-filme no sistema de cálculo.

Adicionalmente, sabe-se que ponto focal, que é a capacidade do sistema de reconhecer pequenas estruturas do equipamento, usualmente é determinado somente no centro do campo; no entanto, o efeito anódico produz alterações do ponto focal em diferentes pontos do campo de visão. Para compensar a variação do ponto focal, um sistema de mapeamento do ponto focal precisaria ser desenvolvido.

Finalmente, as distorções, que são alterações do formato e tamanho das estruturas da imagem, sempre vão ocorrer. Elas podem ser minimizadas dependendo da espessura, posição e formato do objeto de interesse. Preferencialmente, o objeto de interesse (estrutura anatômica) deve ser posicionado no centro do campo e de forma perpendicular ao plano de captura da imagem. A distorção também pode ser gerada por falta de alinhamento do feixe de raios X [17].

Neste trabalho, as marcas fiduciais serviram como referência para as coordenadas do objeto projetado, aumentando a capacidade de localização 3D, orientação e escala, ajudando a criar uma fusão das imagens reais e sintéticas [10]. A diminuição do tamanho das marcas fiduciais poderia prejudicar a sua detecção automatizada. Por isso, decidiu-se pela manutenção de marcas fiduciais esféricas de quase 2 cm e cálculo do centro das esferas para sua melhor localização.

O sistema em estudo apresentou algumas limitações na localização do objeto de interesse como a distorção no direcionamento do feixe de radiação alterando a representação real do alvo de maneira diferente entre os quadrantes da placa de captura. Para melhorar o sistema de localização seria necessário garantir o alinhamento do feixe de raios X ou possibilitar a inserção da medida de desvio do alinhamento no cálculo.

A margem de erro encontrada, em comparação das medidas virtuais com o modelo real foi aproximadamente 3 mm, que não é considerável para a aplicação clínica na veterinária.

O sistema foi testado apenas de forma experimental, com a aquisição de imagens ortogonais, movimentando o objeto de teste em dois ângulos separados por 90°, simulando uma radiografia antero-posterior e lateral. Para implantação do sistema em situação real, se faz necessário a garantia da movimentação do tubo de raios X em torno de um isocentro conhecido ou a utilização de duas placas de captura perpendiculares com precisão na movimentação e parada do cabeçote de raios X.

V. CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido permitiu a obtenção de imagens radiográficas com boa resolução espacial, com capacidade para gerar a localização de um ponto no espaço 3D com uma margem de erro baixa, relacionada à falta de alinhamento do sistema de aquisição.

Conclui-se que a realização de testes de controle de qualidade da imagem radiográfica e calibração do sistema são pré-requisitos necessários para a implementação do sistema em equipamentos reais.

O sistema proposto apresenta uma relação custo-benefício interessante, pois os sistemas de raios X portáteis apresentam uma redução significativa na emissão de radiação ionizante, utilizando um exame com apenas duas projeções. Outra vantagem está no fato do sistema poder ser estruturado em uma unidade móvel autossuficiente para uso veterinário. Este sistema de baixo custo é menos prejudicial à saúde comparado aos métodos tomográficos, tornando possível a localização espacial de estruturas e determinação do melhor ponto de abordagem, particularmente na radiologia e cirurgia veterinária. O sistema proposto permitiria guiar biópsias em tempo real, dimensionar volumes e medidas de estruturas, com baixa dose de radiação.

Maiores estudos são necessários para melhorar o processo de identificação das marcas fiduciais através de algoritmos otimizados de análise das imagens radiográficas, assim como a incorporação das características de calibração dos equipamentos de raios X utilizados ao sistema de localização 3D a partir de duas imagens planas.

CONFLITO DE INTERESSE

Os autores declaram não possuir conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

1. Galvão PBA (2000) Tecnologia e medicina: imagens médicas e a relação médico-paciente. *Rev Bioét* 8(1): 127-136

2. Santos M, Ruiz, EES (2006) Distribuição de imagens médicas via web: um servidor e cliente DICOM. *Exacta* 4(1):105-112, DOI 0.5585/exactaep.v4i1.658
3. Rougée A, Picard C, Ponchut C et al. (1993) Geometrical calibration of X-ray imaging chains for three-dimensional reconstruction. *Comput Med Imaging Graph* 17(4-5):295-300, DOI 0.1016/0895-6111(93)90020-n
4. Mischke MM and Navab N (2000) Recovering projection geometry: how a cheap camera can outperform an expensive stereo system, *Proc. IEEE Conf Comput Vision & Pattern Recognition, CVPR 2000, Hilton Head Island, SC, 2000*, pp.193-200, DOI 10.1109/CVPR.2000.855819
5. Albiol F, Corbi A, Albiol A (2017) Evaluation of modern camera calibration techniques for conventional diagnostic X-ray imaging settings. *Radiol Phys Technol* 10:68–81, DOI 10.1007/s12194-016-0369-y
6. Seoud L, Cheriet F, Labelle H. et al. (2009) A novel method for the 3-D reconstruction of scoliotic ribs from frontal and lateral radiographs. *IEEE Trans Biomed Eng* 58(5):1135-46, DOI 10.1109/TBME.2009.2032530
7. Cheriet F, Laporte C, Kadoury S, et al. (2006) A novel system for the 3-D reconstruction of the human spine and rib cage from biplanar X-ray images. *IEEE Trans Biomed Eng* 54(7):1356-8, DOI 0.1109/TBME.2006.889205
8. Mitton D, Zhao K, Bertrand S, et al. (2008) 3D reconstruction of the ribs from lateral and frontal X-rays in comparison to 3D CT-scan reconstruction. *J Biomech* 41(3):706-710, DOI10.1016/j.jbiomech.2007.09.034
9. Bertrand S, Laporte S, Parent S, et al. (2008) Three-dimensional reconstruction of the rib cage from biplanar radiography. *IRBM* 29(4): 278–286, DOI 10.1016/j.irbmret.2008.03.005
10. Lightbody P, Krajnik T, Hanheide M (2017) An efficient visual fiducial localization system. *ACM SIGAPP Applied Computing Review*, New York, NY, USA 17(3):28-37, DOI 10.1145/3161534.3161537
11. Furquim TAC, Costa PR (2009) Garantia de qualidade em radiologia diagnóstica. *Rev Bras Fis Méd* 3(1): 91-99
12. Kak AC and Slaney M (1988) *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. Piscataway, NJ: IEEE
13. Atherton TJ and Kerbyson, DJ (1999) Size invariant circle detection, *Image Vision Comput* 17(11):795-803, DOI 10.1016/S0262-8856(98)00160-7
14. Schumann S, Thelen B, Ballestra S, et al. (2014) X-ray image calibration and its application to clinical orthopedics. *Med Eng Phys* 36(7): 968-974, DOI 10.1016/j.medengphy.2014.04.001
15. Nersissian DY (2004) Determinação das dimensões do ponto focal de tubos de raios X utilizando um sensor CCD e o método das funções de transferências. 2004.152 f. Tese (Doutorado em Ciências) – IPEN, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004
16. Shovkun V (2006) Measurements of micro-focus spot size in x-ray tubes and Kumakhov lenses. *Proc SPIE* 5943, X-ray and Neutron Capillary Optics II, 59431B, 2006, DOI 10.1117/12.638017
17. Villiers JP, Leuschner F W, Geldenhuys R (2008). Centi-pixel accurate real-time inverse distortion correction *Proc SPIE* 7266, *Optomechatronic Technologies*, 726611, 2008, DOI 0.1117/12.804771

Autor Correspondente:

Luciano da Costa Santos

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

Cidade: Porto Alegre, RS.

País: Brasil

E-mail: luciano.cs.vet@gmail.com