

Simulação computacional do sangue usando o método Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

Thiago Carvalho Sousa
Programa de Pós-graduação em Sistemas de
Informação
Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil
thiago.carvalho.sousa@usp.br

Helton Hideraldo Bísaro
Programa de Pós-graduação em Sistemas de
Informação
Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil
heltonhb@usp.br

RESUMO

Simular computacionalmente o sangue é relevante para aperfeiçoar a formação dos futuros profissionais de saúde. Apesar disso, há carência de sistemas nesse sentido; e os existentes são pouco realistas, de baixa qualidade, e com elevado tempo de execução. O objetivo de nosso trabalho é usar o método numérico SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) para desenvolver uma ferramenta computacional que simule o sangue humano, com relevância, que atenda aos quesitos de avaliação estabelecidos e que apresente bons resultados em relação aos sistemas disponíveis no atual estado da arte. Neste artigo apresentamos os princípios deste modelo, o problema de pesquisa, a proposta de solução, critérios de avaliação, as tarefas elencadas para atingir o objetivo, e na conclusão discutimos algumas contribuições esperadas e as limitações deste trabalho.

Palavras-Chave

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics); Sangue; Métodos numéricos; Simulação computacional

ABSTRACT

Computational simulation of blood is relevant to improve the training of future health professionals. Although this, there is a lack of these systems, and those that exist are few realistic, low quality, and with a high execution time. The purpose of our work is to use SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) to develop a computational tool that simulates human blood, with relevance, that achieves the established evaluation criteria and that presents good results in relation to the systems available in the current state of the art. In this paper we present the principles of this model, the research problem, the solution proposal, the evaluation criteria, the tasks assigned to reach the goal, and in the conclusion we discuss some expected contributions and the limitations of this work.

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. To copy otherwise, or republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee.

SBSI 2018 June 4th – 8th, 2018, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil
Copyright SBC 2018.

CCS Concepts

•Computing methodologies → Physical simulation;

Keywords

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics); Blood flow; Numerical simulation; Simulation; Computational

1. INTRODUÇÃO

Simular computacionalmente um sistema consiste em utilizar certas técnicas matemáticas, empregadas em computadores, que permitirão imitar o funcionamento de praticamente qualquer tipo de operação ou processo do mundo real. Permite estudar o comportamento de sistemas reais através do exercício de modelos [11].

O campo da realidade virtual - particularmente, na simulação computacional do sangue - tem apresentado importantes contribuições para a área médica. Ambientes virtuais de treinamento médico, sistemas de apoio a decisão para especialistas, e desenvolvimento de novos equipamentos médicos são algumas das aplicações já desenvolvidas [4, 3, 15, 16, 1].

Como exemplo, podemos citar uma sub-área da Realidade Virtual conhecida como “Cirurgia Virtual” [13]. Especificamente essa área busca fornecer ambientes de treinamento imersivos para cirurgiões. É intuitivo o fato de que, num procedimento cirúrgico, sangramentos são naturais e até mesmo inevitáveis devido aos cortes nos tecidos. Dessa forma, simulações de sangramento podem não apenas aumentar o realismo dos ambientes de treinamento, mas também podem aumentar a habilidade do cirurgião de lidar com o fato. Nesse mesmo contexto, o trabalho de Holland, Pop e John [7] trabalha com a hipótese de que treinamento e suporte durante uma intervenção cirúrgica cardíaca podem ser dramaticamente melhorados com o uso de ferramentas que envolvem Realidade Virtual, Realidade Mista e simulações computacionais. De acordo com os autores, os cirurgiões devem ser capazes de interferir com a geometria da região em análise de maneira a investigar como o fluxo será afetado pelo tratamento. Isso implicaria num sistema capaz de rodar diferentes cenários num tempo útil aos profissionais, o que proporcionaria informações valiosas para o planejamento da intervenção.

Outro exemplo de aplicação possível é a análise de anomalias no sistema circulatório humano, tal como a trombose [14], que pode ser a causa de diversas doenças no corpo humano. Com o aumento da capacidade computacional, sistemas - tanto de treinamento virtual, quanto de suporte à

decisões/diagnóstico - têm sido cada vez mais utilizados e estão sendo difundidos na comunidade médica.

Localizado na área de Computação Gráfica, o tema geral de nosso trabalho é o uso de um modelo matemático (o SPH) para realizar uma simulação computacional aplicada à saúde (do fluido biológico sangue).

2. O MÉTODO NUMÉRICO SPH

Sabe-se da mecânica dos fluidos que existem duas principais abordagens para a simulação de fluidos: a euleriana, e a lagrangeana [11].

No modelo **euleriano**, observamos o fluido como um todo que se move.

Já no modelo **lagrangeano**, observamos cada partícula que compõe o fluido individualmente. O estudo e movimento conjunto de todas estas partículas faz o movimento.

O sangue humano possui características de um fluido viscoso e incompressível. O comportamento destes fluidos segue as equações de *Navier-Stokes* (equações 1 e 2):

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot v \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v + g. \quad (2)$$

Onde t representa o tempo, v o vetor de velocidade, ρ a densidade, p a pressão, g a aceleração do vetor gravidade, ∇ o operador de gradiente e μ representa a viscosidade do fluido.

No entanto, as soluções analíticas para essas equações são difíceis de obter e podem demandar um alto custo computacional.

O método SPH - *Smoothed Particle Hydrodynamics* (hidrodinâmica de partículas suavizadas, em tradução livre) é um modelo lagrangeano que discretiza o fluido inspirado na idéia de elementos finitos [11]. As especificidades e características não-newtonianas do sangue tornam-o um grande desafio na área de simulação numérica. Por não usar malhas geométricas e permitir modificações no modelo, o SPH oferece grande flexibilidade na modelagem de tais características; o que permite a melhoria dos efeitos visuais [13].

O método SPH foi criado na década de 1970 por Gingold e Monaghan [6] e Lucy [10] em um contexto de simulação de fluidos incompressíveis em astrofísica (formação de galáxias e supernovas). A idéia geral do método é interpolar as propriedades físicas de uma partícula em uma posição arbitrária, bem como aproximar as derivadas espaciais de um número finito de partículas adjacentes.

De um modo geral, a interpolação usada no método SPH se aproxima de uma certa quantidade A_i em uma posição arbitrária x_i de um número finito de quantidades conhecidas A_j nas posições x_j localizadas na vizinhança de x_i :

$$A_i = \sum_{j=1}^k \frac{m_j}{\rho_j} A_j W_{ij} \quad (3)$$

onde A_i é a quantidade de uma determinada propriedade na partícula i , ρ_j e m_j são, respectivamente, a densidade e a massa locais. W_{ij} é a função kernel avaliada em $|x_i - x_j|$. As funções de kernel no método SPH têm o papel de suavizar a influência das partículas vizinhas à medida que a distância

aumenta. Uma ampla variedade de funções pode ser usada de acordo com a aplicação, no entanto, a literatura aponta que as funções spline são as mais utilizadas [9].

É importante notar que cada partícula i carrega seus atributos físicos, como a densidade ρ_i , massa m_i , pressão p_i e volume ΔV_i . Além disso, ao longo do tempo t , a posição x_i das partículas e outros atributos são “transportados” de acordo com a velocidade v_i da partícula [8].

3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E LACUNA DE PESQUISA

Apesar da simulação computacional ser amplamente aplicada à diversas áreas, profissionais da saúde relatam carência de sistemas nesse sentido.

Em especial, reclamam que sistemas que simulam o sangue humano são pouco realistas e de baixa qualidade, e com elevado tempo de execução [17].

Em uma análise preliminar do estado da arte, nossa revisão mostrou que o método SPH até então foi pouco utilizado para simulação de fluidos biológicos.

4. PROPOSTA DE SOLUÇÃO

O **objetivo** de nosso trabalho é usar o método SPH para desenvolver uma ferramenta computacional que simule o sangue humano, com relevância e que atenda aos quesitos de avaliação estabelecidos.

Nossa **hipótese** é que um sistema de simulação computacional do sangue, construído com base no método SPH, apresentará um sistema rápido, realista e eficiente.

Como **justificativa**, confirmada nossa hipótese de pesquisa:

- A comunidade científica poderá contar com um ambiente de simulação computacional ainda pouco conhecido, que é o da simulação biológica com o método SPH.
- Já os profissionais da área da saúde terão à sua disposição um modelo computacional funcional e de qualidade do sangue.

5. PROJETO DE AVALIAÇÃO DA SOLUÇÃO

Pretendemos avaliar o desempenho de nossa ferramenta com as métricas já existentes para avaliação de simulações computacionais do sangue, de acordo com os trabalhos pesquisados em nossa revisão. Obter alguns dados, como quantidade de partículas usadas e tempo de execução, para comparar com resultados de outras simulações.

Além disso, submeter nossa simulação a determinados testes de *benchmark* para comparar os resultados com os de outros bancos de dados já conhecidos. Alguns destes testes são - mas não limitados a:

- teste de fluxo em um canal reto (fluxo de Poiseuille) [7].
- teste de fluxo interno em um canal acionado por uma força de aceleração oscilante com pressão dada e determinado número de Womersley; e teste de fluxo em cavidades com determinados números de Reynolds [12].

6. METODOLOGIA E ATIVIDADES JÁ REALIZADAS

A seguir, descrevemos as principais atividades previstas para atingir o objetivo do trabalho:

1. Revisão da Literatura acerca da simulação computacional do sangue com uso da técnica SPH, fazendo uso de uma revisão sistemática [2].
2. Estudar funcionamento da técnica SPH, sobretudo das equações básicas e parâmetros que caracterizam o modelo.
3. Desenvolvimento de um modelo inicial para simulação de fluidos (genérico).
4. Aprimoramento do referido modelo para o sangue, levando em consideração suas especificidades.
5. Implantação dos vasos sanguíneos no modelo desenvolvido.
6. Implantar técnicas para colisão de partículas dentro de um vaso sanguíneo.
7. Aprimorar o modelo para inclusão de misturas (como um anestésico que caí na corrente sanguínea).
8. Melhorar visualização e performance do programa (inclusive, verificar viabilidade de aceleração com GPUs).
9. Escrita da versão final da Dissertação.

Da lista acima, já concluímos as 3 primeiras atividades. Neste momento estamos aprimorando o modelo (geral) para a simulação específica do sangue e para obter alguns casos de teste, visando apresentação destes no exame de qualificação (previsto para maio de 2018).

Durante o ano pretendemos concluir as demais atividades, para que até dezembro de 2018 aconteça o depósito da dissertação. A defesa está prevista para ocorrer até fevereiro de 2019.

7. CONCLUSÕES

Simular computacionalmente o sangue humano é relevante para aperfeiçoar a formação dos futuros profissionais de saúde, garantindo um ambiente realista e imersivo onde eles possam praticar procedimentos completos. Assim, mais médicos poderiam dominar as técnicas cirúrgicas em pouco tempo.

Efeitos visuais, como sangramentos, podem aumentar o realismo do sistema e melhorar a função de treinamento do sistema, além de possibilitar reformulações, melhoras em tratamentos, e desenvolvimento de novos equipamentos médicos.

Pela simulação computacional do sangue, podemos também estudar fenômenos e doenças específicos do sistema circulatório, como a trombose; como fez por exemplo Al-Saad, Kulasegaram e Bordas [1].

Nossa hipótese, corroborada com alguns trabalhos já encontrados em nossa revisão sistemática, é que um sistema de simulação computacional do sangue baseado no método SPH apresentará resultados mais significativos e de maior qualidade do que os atualmente utilizados.

Como **contribuições** do presente trabalho, destacamos o modelo computacional eficaz para treinamento e pesquisas que a comunidade médica passará a dispor; e para a

comunidade de computação, apresentaremos um modelo de simulação específico (a de um fluido biológico com SPH) e ainda pouco explorado (lacuna de pesquisa).

Como **limitações** de nossa pesquisa, consideramos usar um método lagrangeano (SPH) para simular o sangue. Mas como apontado na revisão de Ye *et al.* [17], existem outras técnicas (inclusive eulerianas) que também resolvem o problema, e que cujo uso pode ser melhor ou pior - dependendo da aplicação.

Num contexto inicial, nossa pesquisa está inserida no projeto *Vida Odonto*, uma parceria entre as unidades Escola de Artes, Ciências e Humanidades (EACH), Escola Politécnica (EP) e Faculdade de Odontologia de Bauru (FOB) da Universidade de São Paulo (USP), que visa desenvolver um ambiente em realidade aumentada para aperfeiçoar a formação dos alunos da Graduação em Odontologia da FOB-USP (veja artigo do Jornal da USP [5]). Logo, apesar de nosso modelo de simulação ser universal, possivelmente o uso em outros contextos pode exigir a adaptação de hardware e/ou das linguagens de programação utilizadas.

8. REFERÊNCIAS

- [1] M. Al-Saad, S. Kulasegaram, and S. Bordas. Blood flow simulation using smoothed particle hydrodynamics. In *ECCOMAS Congress 2016 - Proceedings of the 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, volume 4, pages 8241–8246, 2016.
- [2] J. Biolchini, P. G. Mian, A. C. C. Natali, and G. H. Travassos. Systematic review in software engineering. Technical report, System Engineering and Computer Science Dept., COPPE/UFRJ, 2005.
- [3] H. H. Biscaro, F. L. Nunes, J. dos Santos Oliveira, and G. R. Pereira. Comparing efficient data structures to represent geometric models for three-dimensional virtual medical training. *Journal of Biomedical Informatics*, 63:195 – 211, 2016.
- [4] M. d. L. Ribeiro and F. L. S. Nunes. Breast palpation simulation with haptic feedback: Prototype and initial results. In *2014 XVI Symposium on Virtual and Augmented Reality*, pages 268–276, May 2014.
- [5] J. da USP. Com simulador de anestesia odontológica, estudantes não precisam mais treinar nos colegas, Dec. 2016.
- [6] R. A. Gingold and J. J. Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics - Theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181:375–389, Nov. 1977.
- [7] M. I. Holland, S. R. Pop, and N. W. John. Vr cardiovascular blood simulation as decision support for the future cyber hospital. In *2017 International Conference on Cyberworlds (CW)*, pages 233–236, Sept 2017.
- [8] M. Ihmsen, J. Orthmann, B. Solenthaler, A. Kolb, and M. Teschner. SPH Fluids in Computer Graphics. In S. Lefebvre and M. Spagnuolo, editors, *Eurographics 2014 - State of the Art Reports*. The Eurographics Association, 2014.
- [9] G. Liu and M. Liu. *Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method*. World Scientific, 2003.
- [10] L. B. Lucy. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astronomical Journal*, 82, 1977.

- [11] A. P. Neto. *Uma abordagem lagrangeana para simulação de escoamentos de fluidos viscoplásticos e multifásicos*. PhD thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.
- [12] S. Shahriari, L. Kadem, B. Rogers, and I. Hassan. Smoothed particle hydrodynamics method applied to pulsatile flow inside a rigid two-dimensional model of left heart cavity. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 28(11):1121–1143, 2012.
- [13] W. Shi, M. Zheng, and P. X. Liu. Virtual surgical bleeding simulation with navier-stokes equation and modified smooth particle hydrodynamics method. In *2017 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, pages 276–281, July 2017.
- [14] N. Tanaka and T. Takano. Microscopic-scale simulation of blood flow using sph method. *International Journal of Computational Methods*, 02(04):555–568, 2005.
- [15] R. Tori, R. Nakamura, F. Nunes, J. L. Bernardes Jr, M. A. Ferreira, and E. Ranzini. Interlab: Interactive technologies laboratory. *SBC Journal on Interactive Systems*, 2(2):94–97, 2011.
- [16] C. Xiao, Y. Feng, Y. Li, Q. Zeng, J. Zhang, and Y. Wu. Real-time and authentic blood simulation for surgical training. In *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, pages 6832–6837, May 2017.
- [17] T. Ye, N. Phan-Thien, and C. Lim. Particle-based simulations of red blood cells - a review. *Journal of Biomechanics*, 49(1-2):2255–2266, 2016.