

三维组织模型下的血液渗出与堆积仿真

赖颖华

摘要:本文提出了基于淹没模型的血液渗出模拟方法,用于虚拟手术中模拟组织表面因毛细血管破裂而渗血的现象。通过简化液体扩散过程,构建了一个适用于组织表面血液渗出的数学模型,并利用计算机图形学技术实现了该模型的可视化仿真。实验结果表明,该模型能够有效地模拟血液在组织表面的扩散、积聚和消散过程,具有较高的计算效率和良好的视觉效果。

关键词:虚拟手术;流血仿真;淹没模型

一、外科手术中的流血现象

手术中的流血是一个不可忽视的现象,也是影响手术效果的重要因素。在传统外科手术中,各类不同的操作都会引起流血,包括对器官进行切割、剥离或分离引起的出血,意外损伤动静脉等大血管导致大量血液喷涌,组织表皮或浅表微小血管和毛细血管破裂引起的渗血等。即使是微创手术,相比传统的开放手术切口更小,出血更少,但在切除肿瘤、切开组织时的损伤也会造成血液沿着伤口边缘和组织表面渗出,并在手术区域积聚。

手术中的流血对医生的判断和操作有着显著影响。血液在伤口周围积聚会遮挡重要的解剖结构,影响手术视野的可视效果,从而干扰外科医生手术操作的精确性,增加手术的复杂性;术中大量出血可能导致患者失血过多,影响生命体征,甚至引发休克等严重并发症,增加手术风险。如何有效控制流血、保持手术的顺利进行,成为了外科医生在手术中的关键任务之一。

因此,在使用虚拟手术系统中增加流血场景的仿真具有重要的意义。首先,流血仿真能够增加虚拟手术环境的真实程度,使医生在进行手术训练时具有沉浸式的真实操作体验,帮助医生更好地理解流血对手术操作的影响;其次,手术过程中流血的控制是重要因素,加入流血仿真后医生可以通过反复训练达到控制流血量的目的,让操作更具有精准性;最后,虚拟手术仿真系统可以模拟不同类型的血管损伤和出血情况,还能模拟不同的血液流动方式,能够训练外科医生的应急反应能力,帮助医生更好地理解 and 应对手术中可能遇到的各种出血情况。

二、流血仿真

在虚拟手术的流血仿真中,为了提高仿真的精度和真实性,需要考虑血液的多种物理特性与生理特性,包括血液的流动性、表面张力、凝固性等,以模拟血液在组织内部和表面的流动、扩散、积聚和凝固的过程。

用于血液的流体仿真方法主要包括网格法、粒子法、格子玻尔兹曼方法等。目前最主流的方法是基于光滑粒子流体动力学(SPH)的仿真方法。SPH方法采用粒子方法来模拟流体流动,能考虑到流体的体积守恒,能够很好地在复杂环境中处理复杂的自由表面、流体与固体交互的问题和动态边界问题,适合精细的、动态的流体模拟。将SPH用于流血仿真,可以很自然地模拟血液的流动和渗透效果,实现细致的动态、血液与组织的交互。

三、淹没模型进行流血仿真的设计与实现

(一)淹没模型基本原理。淹没模型是一种广泛应用于流体仿真中的数学模型,它通过模拟液体的扩展过程来描述液体在表面上的流动与积聚。该模型的核心思想是:当液体在一定区域内积聚时,它会在表面扩展,逐渐淹没周围的区域,直到形成一个稳定的液体层。在手

术仿真中,淹没模型能够用来模拟血液从毛细血管破裂点渗出,并在组织表面扩展和积聚的过程。

淹没模型在实际应用中通常包含两个主要方面:液体的扩散传播和表面的积聚。液体从初始点开始扩散,通过求解扩散方程来模拟液体在时间进程中的分布。与此同时,液体在表面上的积聚需要考虑液体与表面之间的相互作用力,这通常通过表面张力和液体的黏度来控制。在手术仿真中,淹没模型可以用来模拟血液从毛细血管破裂的点渗出,并沿着组织表面扩散,逐步堆积成可见的血液层。其核心思想是液体的扩散遵循一定的物理规律,如牛顿流体的扩散规律和液体的非线性扩展性。在血液渗出模拟中,液体扩展的速度和形态取决于液体的黏度、表面张力和组织的物理特性。为了准确模拟血液在组织表面的渗出过程,我们采用了扩散方程来描述血液的流动与积聚。

(二)流血建模。血液渗出模拟的关键在于描述血液在组织表面上的扩展和积聚。我们将血液的渗出过程看作是一个典型的扩散现象,并通过扩散方程进行建模。血液的扩展过程不仅与时间有关,还与血液的黏度、表面张力、组织表面特性等因素密切相关。

血液渗出过程的数学模型基于扩散方程,类似于传统的液体扩展模型。扩散方程描述了血液在组织表面的浓度随时间变化的过程:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \nabla^2 \phi + S(\phi)$$

其中, ϕ 表示血液密度, D 为血液的扩散系数, ∇^2 是拉普拉斯算子表示血液浓度在空间上的扩散,反映了血液的自然扩散行为,血液在大脑组织器官的表面会根据表面曲率、张力等因素发生扩散,因此模型通过这项来表示血液的流动性。 $S(\phi)$ 是源项,表示血液在某一位置的输入量。血液扩散过程受到外部因素影响,如血液源头的压力变化、毛细血管破裂位置以及液体的黏度等因素共同决定,这个会随着血液在组织表面渗出的不同区域而变化。

采用了有限差分法对扩散方程进行离散化,通过将空间和时间离散化,在数值计算中迭代更新血液的浓度和位置。离散化的扩散方程可以表示为:

$$\frac{\phi_i^{n+1} - \phi_i^n}{\Delta t} = D \left(\frac{\phi_i^n - \phi_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{\phi_i^n - \phi_{i+1}^n}{(\Delta x)^2} \right) + S(\phi)$$

其中, Δt 为时间步长, Δx 为空间步长, ϕ_i^n 表示在第 n 时刻、第 i 个网格位置的血液浓度, ϕ_i^{n+1} 为该位置下一时刻的血液浓度。

(三)血液扩散与组织表面的交互。血液的扩散不仅受到空间的影响,还受到组织表面特性的影响。组织表面通常具有一定的曲率和非光滑性,血液的浓度变化不仅与空间位置有关,还与表面曲率、血液的物理特性如黏度等有关,这些因素都会影响血液在表面上的流动。血液通常会沿着表面曲率扩展并在表面上堆积,因此在扩散模型中引入了表面曲率项可以更好地修正和模拟血液的扩展和积聚。脑组织器官表面上的血液浓度在

某一位置的变化率为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = (\kappa \cdot \phi) + v \cdot \nabla^2 \phi$$

其中, κ 是表面曲率,表示脑组织表面的形状变化对血液流动的影响, v 为血液的扩散系数,表示血液在组织表面上的流动速率。这个方程在考虑了液体在表面上扩散的特性的同时也结合了血液在表面上的积聚和渗透。

(四)血液的非牛顿流体特性。血液作为非牛顿流体,流动行为与传统牛顿流体不同。为了更加准确地模拟血液的渗出过程,引入血液的非牛顿流体特性。血液的流动受剪切速率影响,具有黏度随着剪切速率变化的特性。使用Casson模型来描述血液的剪切稀化行为:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$$

其中, τ 为剪切应力, τ_0 为屈服应力, η 为血液的剪切黏度, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。通过这种方式,能够提升血液在大脑组织表面上流动仿真的真实性。

(五)边界条件与表面控制。在血液渗出模型中,边界条件的设置对于模拟的准确性至关重要,尤其是在模拟组织表面时。对于血液流动的源头,通常假定血液在毛细血管破裂处突然释放,这时血液的浓度会迅速增加,形成血液渗出的原点。随着血液在表面扩散,边界条件的控制决定了血液在不同区域的行为。在某些区域,血液的浓度可能会达到一定值后被吸收或渗透到更深的组织中,这时通过吸收边界来表示血液的流失或消散。在模拟过程中,还需要设置无流边界,这种边界指示了在某些不涉及血液流动的区域,血液不会有外部流入或流出。因此,整个血液渗出过程不仅仅取决于血液本身的物理特性,还与组织表面的几何形态、局部的扩散特性以及血液渗透和吸收机制密切相关。通过合理设置这些边界条件,能够确保血液渗出过程的真实性和流动稳定性。

四、实验设置与结果

为了验证基于淹没模型的血液渗出模拟方法的有效性和实时性,使用一个三维组织模型进行实验,模拟血液在组织表面上的渗出、扩散与积聚的动态过程,评估血液仿真的真实性和实时性。

实验的实现步骤为:使用一个基于实际病患的CT或MRI的三维几何模型来表示大脑组织表面,该模型包括复杂的解剖形态,模拟真实大脑组织的表面特性,例如表面曲率和组织的不同层次结构。通过在模型的毛细血管破裂点设置血液源,模拟血液从破裂点开始渗出。逐步增加源点的位置和血液渗出的初始浓度,以评估不同条件下的血液扩散效果。实验的核心参数包括血液的扩散系数、组织表面的曲率、血液的黏度以及血液渗出的初始量。为了验证模型的精确性,设置不同的组织类型和血液特性,以模拟不同类型的手术场景。随着血液源的设定,血液将在组织表面进行扩散并逐步积聚。通过监测血液浓度的变化,分析血液的扩散速度、积聚量以及血液沿表面曲率的流动方式。

实验设计的重点首先在于模型离散化与网格划分,为确保模型的精度和计算效率,将组织模型离散为三维网格。在网

格划分时,考虑到组织表面曲率的影响,对表面进行更精细的网格划分,以提高血液扩散和积聚的精确度。其次在于时间步长与稳定性控制,时间步长的选择对血液的扩散效果和实时性有着重要影响,设置一个合适的时间步长,并根据克朗条件进行调整,以确保模拟过程的稳定性。再次在于参数调节与对比,通过调整血液的扩散系数、组织的表面特性、毛细血管破裂位置等不同的实验参数进行对比实验,帮助理解血液渗出过程中各种因素对扩散和积聚的影响,并验证淹没模型在复杂三维组织表面上的表现。

为了评估血液渗出模拟的效果,采用以下几个关键指标:血液扩散速度。通过计算血液浓度的变化率,评估血液从源头到表面不同位置的扩散速度。速度的计算将考虑血液的物理属性和组织表面的曲率变化。积聚量与覆盖区域。随着时间的推移,血液会在组织表面积聚。跟踪血液在表面上的积聚量,并通过血液浓度图来展示血液覆盖的区域。实时性能。由于该模型需要在虚拟手术模拟中实时运行,重点评估模型的计算性能,包括模拟的帧率和响应时间。

实验结果表明,基于淹没模型的血液渗出模拟能够真实地再现血液从破裂点扩散并在表面上积聚的过程。随着时间的推移,血液沿着表面曲率扩展并逐渐堆积,形成血液积层。通过调节扩散系数、黏度等参数,可以模拟不同类型的血液行为,并实现更为精细的仿真效果。

五、总结与展望

本文提出了一种基于淹没模型的血液渗出模拟方法,能够有效模拟手术中组织表面因毛细血管破裂而渗出血液的过程。通过三维组织模型实验结果表明,该模型能够实时地在虚拟环境中实现血液渗出和积聚的模拟,并具有较高的计算效率,验证了淹没模型在虚拟手术组织表面渗出血液仿真的可行性,但研究仍然存在许多可以进一步优化和提升的方面。

第一是模型精度与物理参数的细化。目前的血液渗出模型在一定程度上简化了血液的物理特性,特别是血液作为非牛顿流体的特性。未来的研究将进一步引入血液的非牛顿流动特性,以便更准确地模拟血液的流动行为。

第二是组织变形与血液相互作用的增强。当前的实验尚未充分考虑组织表面的变形和血液与组织间的相互作用,在实际手术过程中,组织在出血点附近会受到物理拉伸、压缩等变形影响,血液也会随着组织的变形而发生扩散。未来研究将考虑引入组织弹性变形模型,并探讨血液渗出与组织变形的耦合效应。

第三是高性能计算与实时仿真。随着手术场景的复杂性增加,如何保证模拟的实时性仍然是一个挑战。未来的研究将致力于进一步优化算法并采用并行计算技术来提高计算效率,如何在保证实时性和精度之间取得平衡将是我们的研究重点。

作者系江西飞行学院电子与信息工程学院副教授。本文为江西省教育厅教育科技项目重点项目“虚拟手术中流血仿真的真实感与实时性问题研究”(项目编号:GJJ191468)的研究成果。