

基于计算机视觉的颅内压模拟测量实验仪器的设计

匡弘毅¹, 郑舒文¹, 李梓萌¹, 阮芳芳², 蔡芸晗^{2*}

¹杭州医学院临床医学院, 浙江 杭州

²杭州医学院医学影像学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2026年6月17日; 录用日期: 2026年7月11日; 发布日期: 2026年7月22日

摘要

基于计算机视觉技术设计了一套模拟颅内压测量实验仪器, 通过搭建双玻璃管恒压装置模拟脑脊液腰椎穿刺采样环境, 结合高帧率摄像头与Python图像处理算法, 实现对穿刺针末端液滴滴落过程的动态捕捉与时间间隔分析, 建立腰区脑脊液压强与相邻液滴时间间隔的标度关系模型, 并推导出模拟颅内压计算公式。该装置具有测量精度高、误差小和稳定性好等优点。本实验采用理想物理模型, 将脊髓腔简化为刚性光滑管道, 未考虑脑脊液搏动、脑组织弹性等真实生理因素, 所推导公式为基于理想模型的理论推导练习。其教学目的为引导学生理解流体力学、泊肃叶定律与计算机视觉在医学测量中的应用原理, 在模拟临床情境中体会物理原理和医学实践的内在联系和前沿图像处理技术在医学测量中的应用价值, 有助于培养医学生的跨学科思维与医工结合创新能力。

关键词

颅内压监测, 计算机视觉技术, 医学物理实验, 模拟实验

Design of an Experimental Instrument for Simulated Intracranial Pressure Measurement Based on Computer Vision

Hongyi Kuang¹, Shuwen Zheng¹, Zimeng Li¹, Fangfang Ruan², Yunhan Cai^{2*}

¹School of Clinical Medicine, Hangzhou Medical College, Hangzhou Zhejiang

²School of Medical Imaging, Hangzhou Medical College, Hangzhou Zhejiang

Received: June 17, 2026; accepted: July 11, 2026; published: July 22, 2026

*通讯作者。

文章引用: 匡弘毅, 郑舒文, 李梓萌, 阮芳芳, 蔡芸晗. 基于计算机视觉的颅内压模拟测量实验仪器的设计[J]. 交叉科学快报, 2026, 10(4): 1009-1020. DOI: 10.12677/isl.2026.104119

Abstract

An experimental instrument for simulated intracranial pressure measurement was designed based on computer vision technology. A dual-glass-tube constant-pressure device was constructed to simulate the cerebrospinal fluid sampling environment in lumbar puncture. Combined with a high-frame-rate camera and Python-based image processing algorithms, the system realized dynamic capture of the droplet falling process at the tip of the puncture needle and analysis of the time intervals between adjacent droplets. A scaling relationship model between lumbar cerebrospinal fluid pressure and the time interval of adjacent droplets was established, and the calculation formula of simulated intracranial pressure was derived. The instrument features high measurement accuracy, small error and good stability. This experiment adopts an ideal physical model, which simplifies the spinal canal as a rigid and smooth pipeline, without considering real physiological factors such as cerebrospinal fluid pulsation and brain tissue elasticity. The derived formula is only a theoretical derivation exercise based on the ideal model. Its teaching purpose is to guide students to understand the application principles of fluid mechanics, Poiseuille's law and computer vision in medical measurement, and to experience the internal connection between physical principles and medical practice as well as the application value of advanced image processing technology in medical measurement in a simulated clinical scenario, which helps to cultivate interdisciplinary thinking and medical-engineering integrated innovation ability of medical students.

Keywords

Intracranial Pressure Monitoring, Computer Vision Technology, Medical Physics Experiment, Simulated Experiment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

颅内压是指颅腔内脑组织、脑脊液和运行于脑血管内的血液各占一定容积,使颅内保持一定压力[1]。在临床上,颅内压的准确监测对于诊断和治疗颅脑损伤、颅内占位性病变、脑血管疾病等多种神经系统疾病具有重要意义[2]-[4]。

在传统医学物理实验中,尽管涉及许多物理原理,但较少引入与临床实际紧密结合的测量项目。这导致医学生在实验过程中,往往难以直观感受实验内容与自身专业之间的内在联系。在学习相关物理知识时,他们不易理解这些理论在医学诊断与治疗中的具体应用,从而影响了课程的针对性与学生的学习积极性。因此,将医学原理转化为模拟的教学实验,能够增强学生对于医学物理知识的理解,培养优秀的跨学科思维。

目前,临床上常采用脑室外引流管(EVD)进行颅内压监测,其操作依赖人工调零与读数,且存在脑脊液过度引流的风险[5]-[7]。本文以临床颅内压测量为背景,设计了一个创新性医学物理实验,引导学生从流体力学的基本原理出发,利用双玻璃管搭建的恒压装置和穿刺针模拟脑脊液恒压采样环境,结合计算机视觉技术[8],实现对脑脊液滴落过程的动态捕捉与时间间隔分析,进而建立脑脊液压强与相邻液滴时间间隔之间的标度关系模型。在仅需采集少量模拟脑脊液的采样条件下,通过实验模拟对颅内压的测量。

该实验的重点在于通过可视化、自动化的数据采集过程，帮助学生理解流体力学原理在医学测量情境中的应用方式，本模拟实验所采用的生理模型存在一定局限性：将人体脊髓腔简化为刚性光滑管道，未考虑真实人体脑脊液循环会受到的颅腔和脊髓腔结构、脑脊液成分、体温、血流搏动等多种真实临床因素，属于理想物理模型而非真实生理系统，最终推导的颅内压计算公式也仅为基于理想模型的理论推导练习。本实验的教学目的是引导学生在可控实验条件下理解流体力学、泊肃叶定律与计算机视觉在医学测量中的应用原理，完成物理原理与医学场景的教学性融合，而非提供可直接用于临床的测量方法。

本实验将计算机视觉技术引入到测量过程中，可实现自动化数据采集方法的改进，提升测量的精度与稳定性，在教学应用中展现了良好前景。通过实验，学生可直观认识图像处理技术对传统测量方法的改进作用，理解物理原理与医学实践的内在关联，由此，本实验可作为医学物理教学中的综合性实验案例，促使学生在模拟临床情境中理解物理原理、实验建模和计算机视觉分析之间的联系，提升其医工交叉意识和创新实践能力。

2. 实验原理

腰椎穿刺前，患者侧卧在平坦的病床上，由于脑脊液充满了整个颅腔以及脊髓腔，可认为腰区脑脊液压等于颅内压。而当穿刺针进入腰区脊髓腔时，脑脊液通过腰椎穿刺针流出，导致腰区脑脊液压小于颅内压，因此，位于颅腔内的脑脊液会向腰区缓慢流动，假设脊髓腔为刚性光滑管道，根据泊肃叶定律[9]可以得到：

$$P_{ic} = P_{icp} + Q_{cl} R_{cl}, \quad (1)$$

其中， P_{ic} 为颅内压强， P_{icp} 为腰区脑脊液压强， Q_{cl} 为流量， R_{cl} 为脑脊液由颅腔向脊髓转移时的流阻。脑脊液流量等于单位时间内流出脑脊液的体积，即

$$Q_{cl} = \frac{\Delta V_{cl}}{T_0}, \quad (2)$$

其中， ΔV_{cl} 为从穿刺针滴落的一滴脑脊液的体积， T_0 是相邻液滴的时间间隔。

人体脊髓腔呈椭圆形，本文将脊椎简化为由 22 段椭圆管道串联而成的，并采用相对简单的计算方法对脊髓腔内的流阻进行计算[10]，即流阻为

$$R_{cl} = \sum_{i=1}^{22} \frac{8\eta L_i (a_i^2 + b_i^2)}{2\pi^2 a_i^3 b_i^3}, \quad (3)$$

其中， η 为脑脊液的粘滞系数， L_i 为第 i 节脊髓腔的长度， a_i 为第 i 节脊髓腔截面的横状径， b_i 为第 i 节脊髓腔截面的矢状径。由于不同身高的人脊椎长度各不相同，临床测量时可以通过计数椎骨的体表标志对患者脊髓每一部分的长度进行测量，得到对应 L_i 的值。表 1 为人体脊髓腔从第一颈椎至第四腰椎的横矢状径 MRI 测量结果[11]。

Table 1. MRI measurements of normal adult spinal cord
表 1. 正常成人脊髓 MRI 测量结果

序号	脊髓节段	矢状径(mm)	横状径(mm)	序号	脊髓节段	矢状径(mm)	横状径(mm)
1	C1/C2	9.8	12.2	12	T5/T6	6.7	8.0
2	C2/C3	9.4	12.8	13	T6/T7	6.7	7.9
3	C3/C4	9.0	13.3	14	T7/T8	6.7	7.9
4	C4/C5	8.7	13.9	15	T8/T9	6.8	8.0

续表

5	C5/C6	8.4	13.1	16	T9/T10	6.8	8.1
6	C6/C7	8.0	11.9	17	T10/T11	6.9	8.2
7	C7/T1	8.1	10.6	18	T11/T12	7.3	8.4
8	T1/T2	7.1	8.2	19	T12/L1	11.0	14.1
9	T2/T3	6.9	8.2	20	L1/L2	14.6	19.8
10	T3/T4	6.8	8.1	21	L2/L3	13.3	18.3
11	T4/T5	6.8	8.0	22	L3/L4	12.0	16.8

由于穿刺针管内的液体流速较慢,且针管内径较小($d < 1 \text{ mm}$),满足层流的雷诺数检验公式:

$$Re = \frac{\rho v r_p}{\eta} < 2300, \quad (4)$$

因此,当一段恒压的脑脊液在规则的圆柱形针管中稳定流动时,可近似看作为牛顿流体在其中做层流运动。在脑脊液黏滞系数 η 已知的情况下,由于临床采样的穿刺针规格一定,可将管道半径 r_p 与穿刺针长度 L_p 看作常数,根据泊肃叶定律,可得穿刺针内脑脊液流量 Q_{cl} 与腰区脑脊液压强 P_{lcp} 呈正比,即

$$P_{lcp} \propto Q_{cl}. \quad (5)$$

液体通过穿刺针口以液滴形式下落,在穿刺针规格一定时,假设每个下落的液滴的体积 ΔV_{cl} 近似不变,在恒压条件下,相邻下落液滴的时间间隔 T_0 不变,则

$$Q_{cl} = \frac{\Delta V_{cl}}{T_0}, \quad (6)$$

由此可得

$$P_{lcp} \propto \frac{1}{T_0}, \quad (7)$$

根据上述推导可以建立腰区脑脊液压强与相邻液滴时间间隔的线性回归模型,即

$$P_{lcp} = k \frac{1}{T_0} + b, \quad (8)$$

最终得到颅内压 P_{ic} 的表达式为

$$P_{ic} = P_{lcp} + Q_{cl} R_{cl} = k \frac{1}{T_0} + b + \frac{\Delta V_{cl}}{T_0} \sum_{i=1}^{22} \frac{8\eta L_i (a_i^2 + b_i^2)}{2\pi^2 a_i^3 b_i^3}. \quad (9)$$

3. 实验材料与装置

3.1. 模拟脑脊液的物理性质

实验所用模拟脑脊液为市售人工脑脊液(artificial cerebrospinal fluid, ACSF),购自商业渠道。该溶液主要由 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 H_2PO_4^- 等无机离子及葡萄糖组成,用于模拟脑脊液的基本电解质环境,模拟脑脊液黏滞系数在室温下近似为 $1.002 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。在实验过程中保持温度恒定,并在相同条件下完成标度模型建立和测量效果测试。本文所得标度关系是相对理想化的模型,主要服务于医学物理教学实验,不作为临床脑脊液压强测量的替代方法。

3.2. 腰椎穿刺模拟恒压装置的设计

用于模拟腰区脑脊液恒压环境的实验装置如图 1 所示，在空心玻璃管中利用橡胶塞和两根玻璃管(直型玻璃管、L 型玻璃管)创建恒压环境，两根玻璃管垂直嵌入橡胶管形成一定高度差，同时满足液面高于长玻璃管的 A 端，由于玻璃管与外界导通，A 端与大气压 P_0 相同。当 A、B 端之间的高度差保持恒定时，液体流入 L 型玻璃管末端的穿刺针时(可看作毛细管)，可认为穿刺针两端的压强差恒定。实验中可通过上下移动 A 端来调整双玻璃管高度差来调整模拟腰区脑脊液的恒压大小。

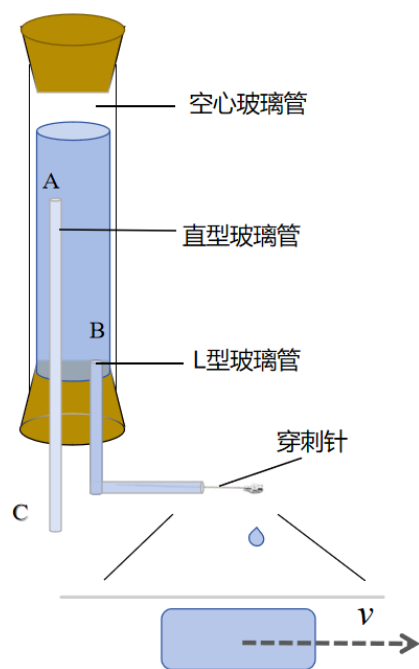


Figure 1. Diagram of the constant-pressure device for cerebrospinal fluid
图 1. 脑脊液恒压环境模拟装置

3.3. 图像帧捕捉与时间分析装置的设计

采用帧率为 90 fps 的高帧率摄像头，对穿刺针末端滴落的液滴进行动态捕捉。摄像头通过数据传输线将实时视频流导入计算机，基于 Python 编程语言，利用计算机视觉库中的 VideoCapture 对象实时获取视频流数据，并逐帧进行动态分析与处理。通过图像处理算法识别液滴滴落画面，从而计算相邻两滴液滴滴落的时间间隔平均值。

图像帧捕捉与时间分析的程序设计思路如图 2 所示，主要可分为视频图像预处理、水滴识别检测和波峰检测模块。

3.3.1. 视频图像预处理模块

首先对实时视频流进行分辨率标准化处理，将图像尺寸统一调整为 640×480 像素，视频采集阶段采用 MJPG 编码格式。在预处理阶段进行色彩空间转换，将 RGB 三通道图像转化为单通道灰度图像。应用高斯滤波算法，采用 11×11 像素的卷积核对图像进行平滑处理，有效抑制图像噪声同时保留边缘特征。

3.3.2. 水滴识别检测模块

帧间差分法是一种通过对视频图像序列中相邻两帧作差分运算来获得运动目标轮廓方法。当监控场

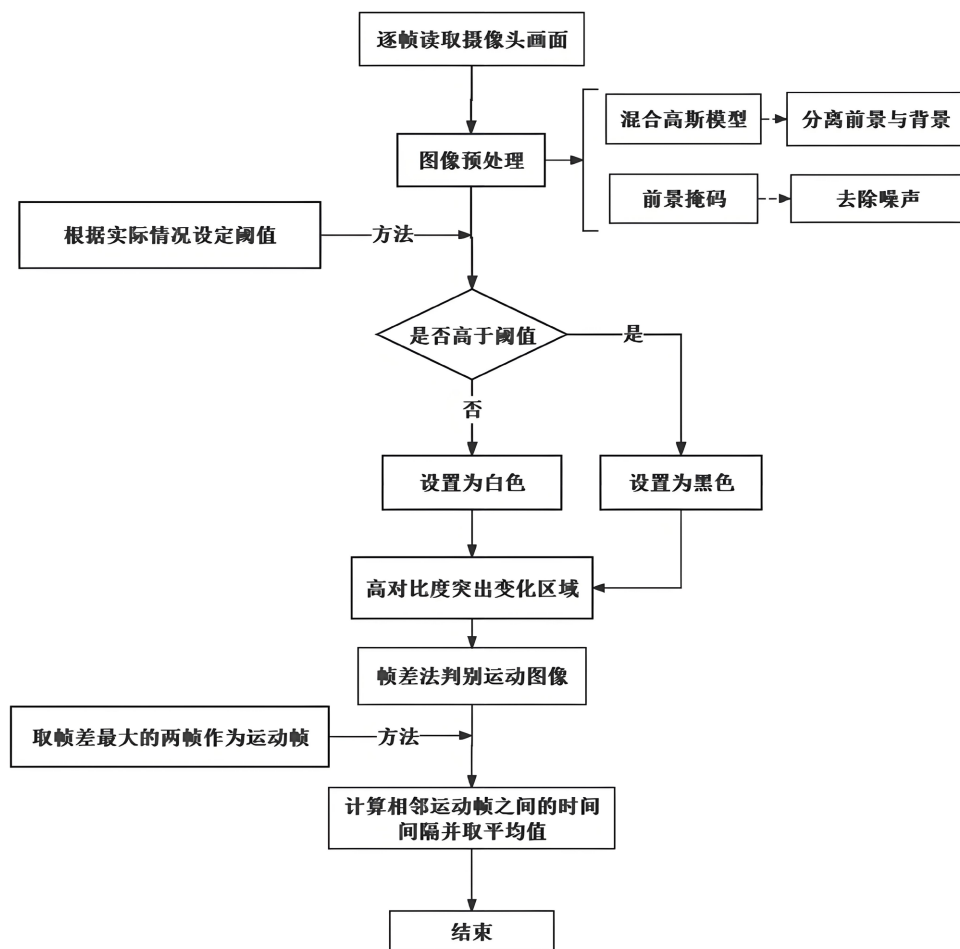


Figure 2. Main workflow of the program design

图 2. 程序设计的主体思路

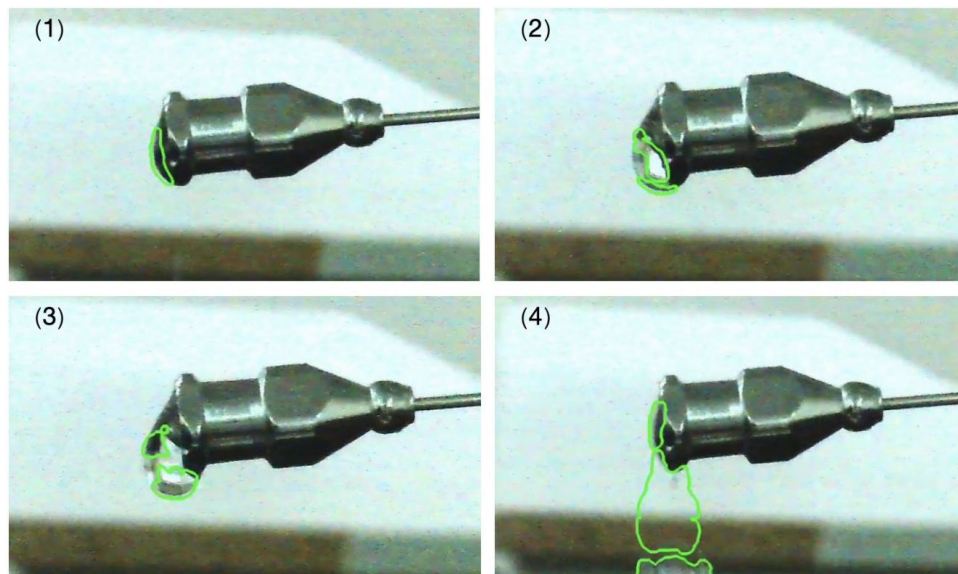


Figure 3. Motion images captured by the camera

图 3. 摄像头捕捉到的运动图像

景中出现物体运动时, 帧与帧之间会出现较为明显的差别, 通过将两帧相减的方法得到两帧图像亮度差的绝对值, 再比较该绝对值是否大于提前设定好的阈值来对视频进行运动特征分析, 从而确定图像序列中是否有物体运动。如图 3 所示, 在液滴从穿刺针滴落的整个过程中, 当液滴从穿刺针头处脱离时双帧之间的像素差距最大。

设视频序列中第 n 帧和第 $n-1$ 帧图像为 f_n 和 f_{n-1} , 两帧对应像素点的灰度值记为 $f_n(x, y)$ 和 $f_{n-1}(x, y)$, 将两帧图像对应像素点的灰度值进行相减, 并取其绝对值, 可得差分图像 $D_n(x, y)$, 即

$$D_n(x, y) = |f_n(x, y) - f_{n-1}(x, y)|, \quad (10)$$

按照公式(10)逐个对差分后的图像进行二值化处理, 得到二值化图像 R'_n 。其中, 灰度值为 255 的点为前景(运动目标)点, 灰度值为 0 的点为背景点, 即

$$R'_n = \begin{cases} 255, & D_n(x, y) > T \\ 0, & D_n(x, y) \leq T \end{cases}, \quad (11)$$

式中, T 为差分图像二值化阈值。该阈值用于区分液滴运动引起的像素灰度变化与背景噪声。实验中先采集无液滴运动和液滴滴落过程的视频片段, 比较两种状态下图像的灰度差异, 选取能够稳定突出液滴运动区域、同时抑制背景噪声的阈值作为 T 。根据 R'_n 绘制折线图, 如图 4 所示。

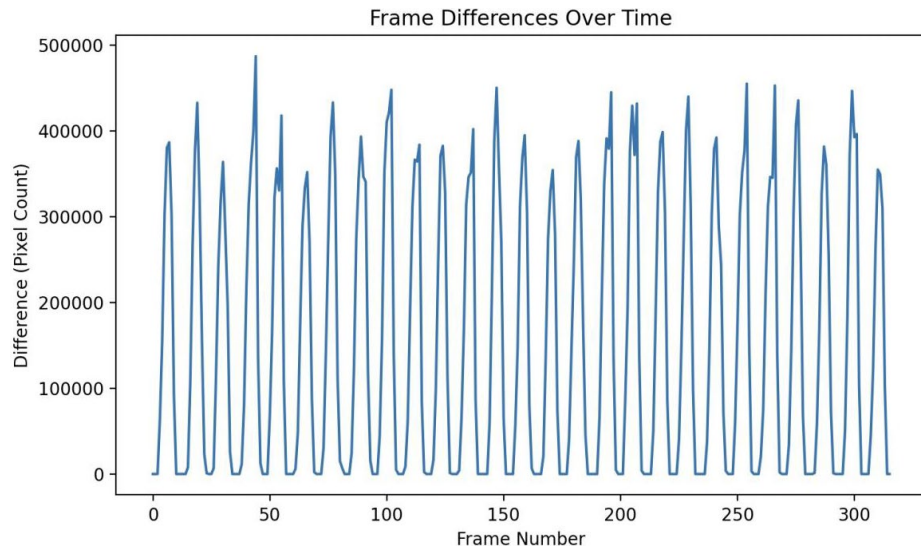


Figure 4. Line chart of pixels with grayscale value 255 in the difference image

图 4. 差分图像灰度值 255 像素点的折线图

3.3.3. 波峰检测模块

通过观察发现, 相邻液滴滴落之间存在时间间隔。在此期间, 画面中无明显运动, 故差分图像中灰度值为 255 的像素点数量极少。为了区分不同液滴, 设定阈值 θ , 当监测到像素点数量低于阈值 θ 时, 判定进入下一滴滴落的检测阶段, 并滑动分析窗口。实验中通过预实验观察前景像素数量随帧序号变化的曲线, 选取能够稳定区分“液滴阶段”和“间隔阶段”的像素点数作为判定阈值。在每个滑动窗口内, 计算每个滑动窗口内 R'_n 求最大值:

$$Max_n = \max(R_n, R_{n+1}, \dots, R_{n+l}), \quad (12)$$

以此得到最大值对应的帧序号 F_n , 将相邻的帧序号相减, 结合帧率计算相邻液滴滴落的时间间隔为

$$t = \frac{[(F_1 - F_2) + (F_3 - F_2) + \dots + (F_n - F_{n-1})]}{sum - 1}, \quad (13)$$

其中, sum 为摄像头捕捉到的所有液滴数量。

3.4. 实验装置的搭建

1) 按图 5(a)组装器材, 先将直型玻璃管与 L 型玻璃管插入带孔的橡胶塞中, 用硅胶塞将针头固定在直型玻璃管上端, 调整直型玻璃管上端针头与 L 型玻璃管上端之间的高度差到合适位置, 使用带有两根玻璃管的橡胶塞塞入空心玻璃管下端, 在空心玻璃管内注入一定量的模拟脑脊液, 使液面高于直型玻璃管上端 5 cm, 再用无孔的橡胶塞封闭空心玻璃管的上口, 在 L 型玻璃管下端出口处用硅胶塞固定穿刺针。

2) 如图 5(b)所示, 将安装好的空心玻璃管固定在铁架台上, 且与铅垂线垂直。

3) 检查装置气密性。将组装好的装置静置, 观察下方是否有液体漏出。在接口处涂上肥皂水或检漏液, 观察是否有气泡冒出。如果没有气泡形成, 意味着该部分密封良好。

4) 如图 5(c)组装实验装置。将摄像头固定在支架上并对准穿刺针末端下方。调整摄像头与穿刺针之间的距离以及摄像头的焦距, 使其能清晰得捕捉到水滴滴落的画面。尽量放大镜头, 缩小画面, 使画面内除液体滴落外尽可能没有其他干扰计算机识别的运动物体。

5) 通过数据线连接摄像头与计算机, 以实时视频流作为数据源, 基于 Python 编程环境对视频流进行在线分析与处理, 从而提取相邻液滴滴落的平均时间间隔。

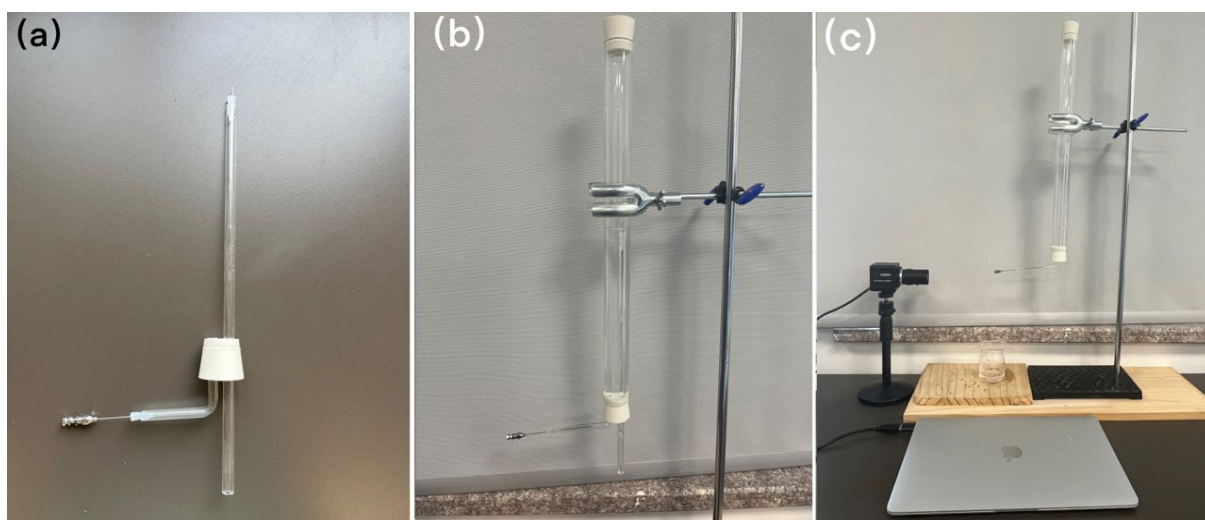


Figure 5. Experimental setup: (a) Perforated rubber stopper embedded with straight glass tube and L-shaped glass tube; (b) Constant-pressure device for simulating lumbar puncture; (c) Physical diagram of the simulated intracranial pressure measurement experimental instrument

图 5. 实验装置(a) 嵌入直型玻璃管与 L 型玻璃管的带孔橡胶塞; (b) 腰椎穿刺模拟恒压装置; (c) 颅内压模拟测量实验装置实物图

4. 实验数据测量与分析

4.1. 穿刺针型号的选择

为确定后续模拟脑脊液实验所采用的穿刺针型号, 首先以纯净水作为实验对象, 分别采用 9 号穿刺针和 12 号穿刺针进行恒压滴落实验。如图 6 所示, 9 号穿刺针和 12 号穿刺针均可获得较好的线性拟合结果。其中, 9 号穿刺针的决定系数 R^2 为 0.99593, 12 号穿刺针的决定系数 R^2 为 0.97980, 提示二者均

能较好反映模拟压强与液滴滴落时间间隔倒数之间的线性关系。相较于 12 号穿刺针，9 号穿刺针的拟合优度更高，且数据点分布与线性拟合曲线的吻合程度更好。因此，后续实验选用 9 号穿刺针进行标度模型建立和测量效果测试。

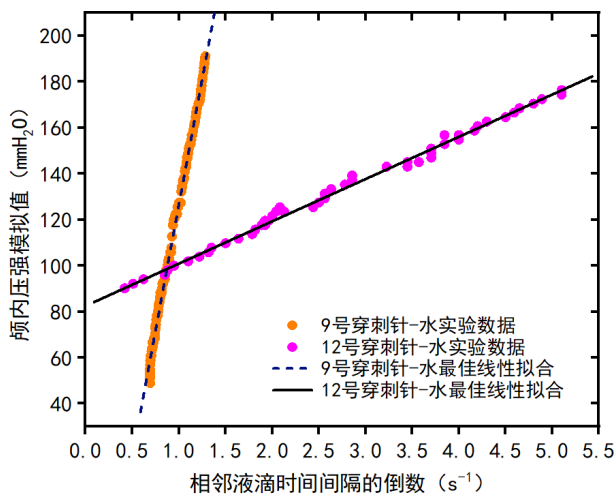


Figure 6. Linear fitting results between simulated pressure and the reciprocal of adjacent droplet interval using different puncture needles
图 6. 不同型号穿刺针下模拟压强与相邻液滴时间间隔倒数的线性拟合结果

4.2. 基于模拟脑脊液建立腰区脑脊液压强和相邻液滴时间间隔的标度模型

采用 9 号穿刺针，调整直型玻璃管和 L 型玻璃管的高度差，测量模拟腰区脑脊液压强随相邻液滴滴落时间间隔倒数的变化关系，建立两者之间的标度关系模型。利用 origin 对于实验数据进行线性拟合，结果如图 7 所示， k 和 b 的最小二乘估计 $\hat{k}$ 和 $\hat{b}$ 及其不确定度 $u(\hat{k})$ 和 $u(\hat{b})$ 如表 2 所示，决定系数 R^2 非常接近 1，说明线性拟合相关性很好。

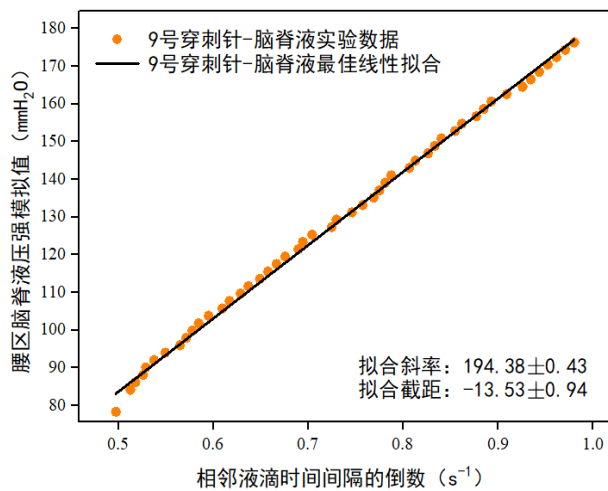


Figure 7. Best linear fitting of No. 9 puncture needle and cerebrospinal fluid
图 7. 9 号穿刺针 - 脑脊液的最佳线性拟合

Table 2. Fitting results of the scaling relationship model for No. 9 puncture needle and cerebrospinal fluid
表 2. 9 号穿刺针 - 脑脊液标度关系模型的拟合结果

$\hat{k}$	$\hat{b}$
194.38 ± 0.43	-13.53 ± 0.94

模拟腰区脑脊液压强与相邻液滴时间间隔倒数之间的关系式为:

$$P_{\text{icp}} = 194.38 \cdot \frac{1}{T_0} - 13.53. \tag{14}$$

4.3. 标度模型效果测试

基于模拟腰区脑脊液压强与相邻液滴时间间隔的标度模型，通过摄像头识别液滴滴落的时间间隔并代入公式(15)，即可测量得到模拟腰区脑脊液压强。

为了验证该实验装置和标度模型的测量效果，在十组不同的高度差下测量模拟腰区脑脊液压强(每次测量连续识别 4~5 滴脑脊液)，同时用临床使用的脑压管接入穿刺针末端同样测量模拟腰区脑脊液压强，并与通过游标卡尺测量双玻璃管高度计算得到的模拟腰区脑脊液压强作为标准压强值进行比较，结果如表 3 所示。

图 8 展示了该实验装置和脑压管测量的相对误差，可以看出该实验装置的准确度和稳定性均优于临床脑压管，且相对误差均低于 1%。在临床上使用脑压管测量脑脊液压强时，其测量结果容易受到人工操作熟练度的影响，而本文所使用的实验装置通过计算机视觉技术对滴落的脑脊液进行无接触识别，能够显著降低了人工操作引起的误差。

Table 3. Comparison of intracranial pressure measured by different methods
表 3. 不同方式测量颅内压强的结果对比

组别	标准压强值 (mmH ₂ O)	本项目测量结果 (mmH ₂ O)	本项目测量方法的 相对误差(%)	临床脑压管测量的 结果(mmH ₂ O)	脑压管测量的 相对误差(%)
1	88.14	88.77	0.72	93	5.56
2	95.98	96.29	0.32	98	2.04
3	97.94	97.54	0.40	99	1.00
4	131.23	131.53	0.22	137	4.48
5	137.11	137.15	0.03	147	7.14
6	142.99	143.22	0.17	142	0.68
7	144.95	144.50	0.31	149	2.70
8	146.90	147.11	0.14	149	1.33
9	148.86	148.45	0.28	150	0.66
10	150.82	149.81	0.67	152	0.65
平均误差	/	/	0.33	/	2.62

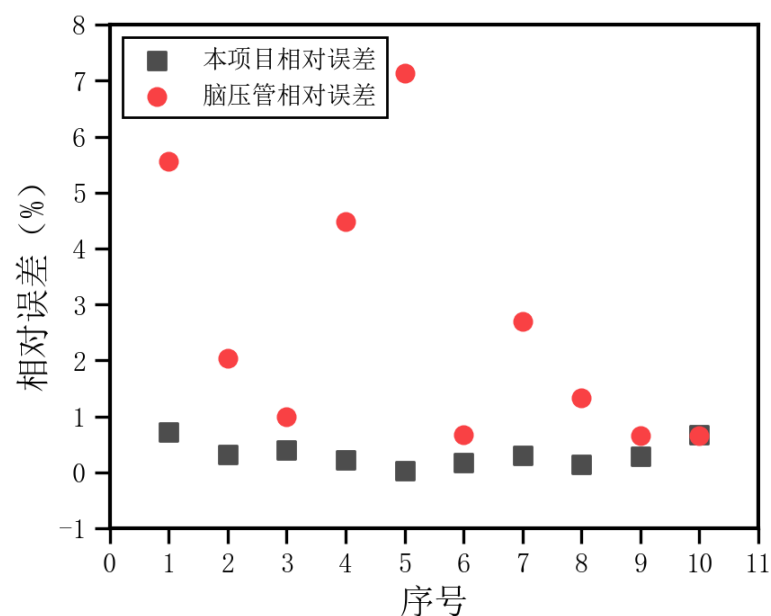


Figure 8. Scatter plot of relative errors of intracranial pressure measured by different methods
图 8. 不同方式测量颅内压强结果的相对误差散点图

4.4. 推导模拟颅内压计算公式

根据公式(14)和公式(9)，可得颅内压强的计算公式：

$$P_{ic} = 194.38 \cdot \frac{1}{T_0} - 13.53 + \frac{\Delta V_{cl}}{T_0} \sum_{i=1}^{22} \frac{8\eta L_i (a_i^2 + b_i^2)}{2\pi^2 a_i^3 b_i^3}, \quad (15)$$

其中，9 号穿刺针末端滴落液滴体积 ΔV_{cl} 会受到针尖润湿状态等因素影响，并非严格恒定值。本实验在固定 9 号穿刺针和装置条件下，收集多滴液滴估算其平均值约为 0.025 mL。基于该公式可估算本实验条件下的模拟颅内压强。

5. 结论

本研究以颅内压测量为医学背景，面向医学物理实验教学，将计算机视觉技术与医学物理实验深度融合，设计了一套基于计算机视觉的模拟颅内压测量实验装置，构建了集流体力学原理、模拟实验装置、图像识别与数据建模于一体的创新教学实验方案。该装置通过双玻璃管恒压装置、人工脑脊液、穿刺针滴落过程和图像处理算法，构建了一套方便直观的教学模型，帮助学生理解颅内压测量过程中的物理关系。实验依托双玻璃管恒压装置实现脑脊液恒压环境模拟，通过高帧率摄像头与 Python 图像处理算法，完成液滴动态捕捉与时间间隔精准分析，建立了腰区脑脊液压强与液滴时间间隔的标度关系模型并推导出颅内压计算公式，实现模拟颅内压的高精度、非接触、少样本测量。与传统人工读数方式相比，该方法能够减少主观读数误差，并通过图像采集和算法处理提高实验数据获取的稳定性和可重复性。本实验采用理想简化模型，仅用于教学演示与原理验证，将流体力学原理、图像识别和数学建模相结合，提供了一个具有医学情境的物理教学案例，有助于学生在模拟临床问题中理解物理规律的应用方式，旨在引导学生认识到物理知识与医学实践的紧密关系，掌握实验建模与数据处理方法，认识自动化数据采集方法在医学测量中的应用前景，强化医工交叉与跨学科思维，可为医学物理创新实验教学提供参考案例。

基金项目

浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划) (2025R423A003),浙江省本科教学改革项目(JGCG2025367), 教育部高教司产学研合作协同育人项目(251205876030741), 浙江省线上一流本科课程(00004D2YLLKC2206)。

参考文献

- [1] 陈孝平, 张英泽, 兰平. 外科学[M]. 第 10 版. 北京: 人民卫生出版社, 2024: 182.
- [2] 陈斐, 孟晓静, 李翔, 等. 基于颅内压监测的个体化护理模式在重型颅脑损伤患者中的疗效评估[J]. 罕少疾病杂志, 2025, 32(11): 159-161.
- [3] 于福华, 杜乐乐. 腰大池持续引流术联合标准大骨瓣减压术后颅内压监测在重型颅脑损伤患者中的应用价值[J]. 临床医学研究与实践, 2026, 11(6): 89-92.
- [4] 杨佳康, 邱胜利, 吴坤, 等. 持续颅内压监测在重型颅脑损伤患者治疗中的应用价值分析[J]. 系统医学, 2021, 6(5): 4-7.
- [5] Le Roux, P., Menon, D.K., Citerio, G., et al. (2014) Consensus Summary Statement of the International Multidisciplinary Consensus Conference on Multimodality Monitoring in Neurocritical Care: A Statement for Healthcare Professionals from the Neurocritical Care Society and the European Society of Intensive Care Medicine. *Neurocritical Care*, **21**, S1-S26.
- [6] Yang, R. and Eagles, M.E. (2025) Methods of Monitoring Intracranial Pressure. *Neurosurgery Clinics of North America*, **36**, 141-147. <https://doi.org/10.1016/j.nec.2024.11.003>
- [7] He, C., Teng, C., Xiong, Z., Lin, X., Li, H. and Li, X. (2023) Intracranial Pressure Monitoring in Neurosurgery: The Present Situation and Prospects. *Chinese Neurosurgical Journal*, **9**, Article No. 14. <https://doi.org/10.1186/s41016-023-00327-2>
- [8] 庄俊. 计算机视觉中的图像识别与处理技术分析[J]. 电子技术, 2024, 53(4): 332-333.
- [9] 濮兴庭, 董仕安, 钟熙, 等. 泊肃叶公式测定液体粘滞系数的新方法[J]. 实验室科学, 2015, 18(6): 4-6.
- [10] Valošek, J., Bédard, S., Keřkovský, M., Rohan, T. and Cohen-Adad, J. (2024) A Database of the Healthy Human Spinal Cord Morphometry in the PAM50 Template Space. *Imaging Neuroscience*, **2**, imag-2-00075. https://doi.org/10.1162/imag_a_00075
- [11] 金玮, 刘浩, 姜瑞瑶, 等. 基于 SCT 的健康颈髓形态学参数定量研究[J]. 中国医疗器械杂志, 2025, 49(2): 141-147.