 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i9.11785

Overview of 3D Endoscopic Technology

Qianlan Yang

Shanxi University of Engineering Technology, Yangquan, Shanxi, 045000, China

Abstract

The 3D endoscope is a non-destructive inspection device that leverages stereoscopic vision technology to achieve three-dimensional imaging through dual-lens systems, structured light, or laser scanning, thereby compensating for the lack of depth information inherent in traditional 2D endoscopes. Its core technologies encompass stereoscopic matching algorithms, real-time point cloud reconstruction, and high-precision depth measurement; these capabilities enable the quantification of defect dimensions and find extensive applications in complex industrial scenarios such as aerospace engines and pipeline welds, as well as in medical fields like minimally invasive surgery. Compared with 2D endoscopes, the 3D endoscope offers advantages in spatial perception and data measurability; when integrated with AI algorithms, it can automatically identify defects and generate 3D models. Current research and development efforts are focused on lightweight design, wireless connectivity, and multimodal fusion; however, challenges such as high costs and complex data processing remain. In the future, 3D endoscopes will evolve toward greater intelligence and portability, becoming core tools for Industry 4.0 and precision medicine.

Keywords

endoscope; 3D model; 3D endoscope

三维内窥镜技术概述

杨倩兰

山西工程技术学院，中国 · 山西 阳泉 045000

摘　要

三维内窥镜（3D Endoscope）是依托立体视觉技术的无损检测设备，借助双镜头、结构光或激光扫描达成三维成像，弥补传统2D内窥镜没有深度信息的不足。它的核心技术涵盖立体匹配算法、实时点云重建和高精度深度测量，能量化缺陷尺寸，大量用于航空发动机、管道焊缝等复杂工业场景，以及微创手术等医疗领域。和2D内窥镜比，它在空间感知能力和数据可测量性上有优势，搭配AI算法可自动识别缺陷并生成三维模型。目前发展重点放在轻量化、无线化及多模态融合，不过存在成本高、数据处理复杂等难题。后续，三维内窥镜将朝智能化、便携化方向发展，成为工业4.0和精准医疗的核心工具。

关键词

内窥镜；三维模型；三维内窥镜

1 引言

1.1 内窥镜技术的发展历程从硬性内窥镜到电子内窥镜的技术演进

内窥镜技术是现代医学诊断、微创手术里的核心工具之一，它从简单光学器械起步，逐步发展成高精度电子成像系统，整个过程耗时很久。本文将梳理这项技术的发展脉络，分析核心技术突破，以及这些突破给临床医学带来的变化。

1806 年德国医生 Philipp Bozzini 研制出全球首款硬性内窥镜“Lichtleiter”（光导器），这款设备用蜡烛提供照明，整体为金属管结构，仅能用于尿道和直肠的观察。1853 年法国外科医生 Antonin Jean Desormeaux 对原有设计做了调整，改用酒精和松节油混合燃料的灯源，第一次将这类设备用于膀胱检查，还正式提出“内窥镜”这个术语。1879 年 Max Nitze 与 Joseph Leiter 联手，把铂丝电光源和透镜组加入膀胱镜，让设备能提供更高亮度，观察范围也更广。1932 年德国的 Schindler 与 Wolf 合作开发出可弯曲胃镜，但设备仍采用硬质光学镜片，患者接受检查时耐受度不高。

硬件内窥镜存在不少问题，比如得靠外部光源提供照明，常出现亮度不够、设备发烫的情况，硬质的机身没法扩大检查范围，也没法记录图像，全靠操作的医生用眼睛观察，这些问题让它没法满足使用需求，纤维内窥镜也因此诞生。1957 年，南非医生 Basil Hirschowitz 的团队造出了第一台纤维胃镜，借助玻璃光纤束传输图像和光线，实现了内窥镜可弯曲的技术突破。19 世纪 60 年代，日本 Olympus 公司将纤维内窥镜推向商业化，推进它在胃肠病学领域的普及。

纤维内窥镜有不少临床应用，它靠光纤束把物镜端的图像全反射传导到目镜端，用冷光源通过独立光纤输送光

【作者简介】杨倩兰（1993–），女，中国山西长治人，硕士，助教，从事三维重建、图像处理研究。

线，能避免灼伤组织，还增设活检通道，支持取样、息肉切除这类诊疗操作。不过这类内窥镜存在局限，图像分辨率受光纤数量制约，光纤容易老化断裂，维护成本比较高，也没法直接输出电子图像，1983 年美国 Welch Allyn 公司推出首台电子视频内窥镜，用 CCD 替换光纤传导图像，实现数字图像输出。1985 年，日本 Pentax 和 Olympus 相继推出高分辨率电子胃镜，推进消化内镜的数字化变革。电子内窥镜具备多项优势，CCD 传感器可直接捕捉电子图像，分辨率提升至数十万像素，能实现图像冻结、放大和数字存储，术者可通过显示器观察画面，减少眼部疲劳，操作更顺手。之后 Olympus 又推出窄带成像（NBI）技术以及超声内镜（EUS）。

立体视觉技术的研究与应用催生出现代三维电子内窥镜，2000 年代初德国 Karl Storz 公司推出首款 3D 腹腔镜系统，这套系统搭载双镜头同步成像功能，给微创手术提供深度感知支持。2010 年后，4K/8K 超高清、荧光导航、人工智能辅助成了行业新标准。

当前的三维电子内窥镜技术有两类，一类是双通道 3D 内窥镜，依靠两条独立的光学路径模拟人眼的视差效果；另一类是单镜头 3D 技术，借由分光或偏振光的方式完成立体成像。

内窥镜技术历经硬质光学器械阶段，再到电子化、三维化阶段，每一步都紧扣提升成像质量、降低侵入性、强化功能集成这三个核心目标。材料科学、人工智能和精密光学持续发展后，内窥镜还会朝着智能化、精准化方向实现更多突破。

1.2 三维内窥镜的应用

三维（3D）内窥镜靠立体视觉与深度感知功能，提升微创手术的操作精准度和执行效率。当前，3D 内窥镜已在多类医学场景中普及，逐步成为复杂手术的核心工具。达芬奇手术系统（Intuitive Surgical）配套双通道 3D 内窥镜，结合机械臂可完成腹腔镜手术的高精度操作；3D 腹腔镜用于妇科手术，让手术时间缩短 18%，术中出血量也有所降低；3D 电子胃肠镜搭配 NBI 技术，能提升胃肠镜检查时的早期肿瘤诊断率；德国 Karl Storz 的 3D 神经内镜系统，可应用于微创颅底手术。

三维内窥镜技术已在医疗领域大量使用，还覆盖工业检测、设备维护、航空航天、汽车制造等多个领域。它能提供立体视觉与深度感知，让操作人员精准观察、测量并操作狭窄或复杂空间内的目标。波音公司用 3D 内窥镜检测 787 梦想客机的复合材料结构，减少拆解环节，压缩维护成本；壳牌石油借助 3D 激光扫描内窥镜，为深海钻井平台管道构建腐蚀模型，预估剩余使用时长；水下机器人（ROV）搭载 3D 内窥镜，检查船体水下部分生物附着状况。

1.3 技术挑战与研究现状

三维内窥镜技术最近几年在医疗、工业领域有比较大的进展，不过还存在好几项技术难题。学术和产业领域一直在探索新的解决办法，优化成像质量、操作便捷性和应用范围。当前 3D 内窥镜的核心技术难题及最新研究进展：（1）光学设计与成像质量：实现双路成像的精准对齐，融合荧光与 3D 成像，提升低光环境下的信噪比；（2）计算与实时性：满足实时 3D 重建的算力需求，处理运动模糊与遮挡问题；（3）人机交互与临床适配性：缓解视觉疲劳问题；（4）标准化与性能评估：缺少统一的检测标准；（5）新型光学设计：研发超细径 3D 内窥镜、散射器内窥镜；（6）人工智能辅助 3D 重建：用深度学习完成特征匹配，开展胶囊内窥镜的 3D 建模；（7）多模态融合与增强现实（AR）：搭建荧光 +3D 导航系统，完成实时 AR 叠加。

AI 算法、新型光学材料及标准化体系逐步完善后，3D 内窥镜将在医疗诊断、微创手术和工业检测领域发挥比较大的作用。

2 三维内窥镜系统组成

2.1 光学成像模块

光学成像模块主要有：

（1）双镜头 / 双光路设计：

设置两个互不干扰的光学通道，模仿人眼双目视差原理采集图像，以此搭建立体视觉的基础，相关原理可参考图 2.1。

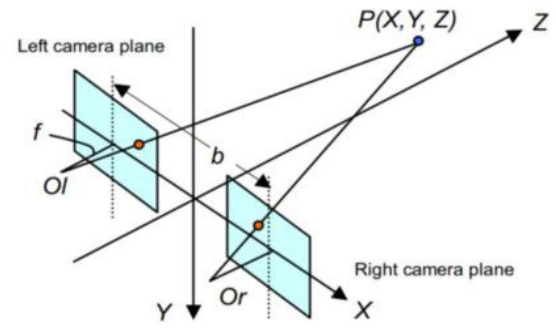


图 2.1 双目视觉原理图

（2）高分辨率摄像头：

每条光路都配有高清 CMOS 或 CCD 传感器，支持 1080P、4K 两种分辨率，保障图像细节完整。



图 2.2 CMOS 和 CCD 传感器

（3）光源系统：

照明可由 LED 或氙灯光源提供，还能搭配分时、分偏振等分光技术，避免左右图像出现串扰。

表 2.1 常见光源类型

类型	特点	应用场景
LED	高效、长寿命、可调色温 / 颜色	照明、显示屏、汽车灯
激光	高亮度、单色性、方向性好	激光切割、医疗、通信、LiDAR
氙灯	高亮度、接近日光光谱	投影仪、汽车大灯、电影放映
卤素灯	连续光谱、显色性好	摄影照明、显微镜光源
OLED	柔性、面光源、高对比度	柔性显示、透明屏幕

LED 光源的外形设计，会直接决定它的光分布状态、适用场景以及呈现的视觉效果，本文可通过封装工艺、加装透镜或是调整阵列排布的方式，让 LED 匹配不同需求，形成多种外形，下面列举几种常用 LED 光源的外形及对应特点：

表 2.2 基本 LED 封装形状

形状	特点	典型应用
圆形	最常见，直径从 1mm 到 10mm	指示灯、背光、通用照明
方形 / 矩形	适合高密度排列	LED 面板灯、电视背光、车灯
长条形	线性光源，光线均匀	橱柜照明、广告灯箱、装饰照明
异形	定制化设计	装饰灯、玩具、创意产品

2.2 图像处理单元

图像处理单元包含三类核心组件，同步控制器保障左右摄像头帧同步，控制误差在微秒级，防止 3D 图像出现错位，立体匹配算法实时运算视差图，输出深度相关信息，3D 重构引擎将左右视图整合成立体图像，可支持偏振式、主动快门式等多模式，也能完成 TOF、双目视差等方式的深度图生成。

2.3 显示系统

3D 显示器：可选用偏振、主动快门或裸眼 3D 技术，刷新率需达到 120Hz 及以上，以此减少使用者眩晕感。



图 2.3 3D 显示器



图 2.4 头戴式显示器

头戴式显示器（HMD）：部分系统整合 VR 头显设备，为手术操作提供沉浸式的视野环境。

2.4 机械结构与操控

多自由度镜体：采用可弯曲或铰接式结构，拥有平移、旋转、倾斜等多种运动形式，支持 ±180° 转向。



图 2.5 机械软管

3 工作原理与技术实现

深度图生成是借助传感器或算法，获取场景内每个像素与相机的距离信息，再生成带灰度或彩色编码的深度图像（Depth Map）。TOF 和双目视差是当前主流的两种技术，两者在原理、优缺点及适用场景上存在比较大的差异，本文接下来对两项技术做详细对比与解析。

3.1 立体视觉原理

立体视觉（Stereo Vision）属于三维感知技术范畴，依托双目或多目相机运行，复刻人类双眼视差原理，搭配约 1.3° 的人眼视差角与虚拟焦距完成设计，视差和深度的对应关系见公式 3-1：

$$Z = \frac{f \cdot B}{d} \tag{3-1}$$

其中，基线 B：相机之间的水平间距，焦距 f：相机镜头的焦距数值（单位：像素），视差 d：同目标左右图像像素水平偏移距离，深度 Z：物体空间深度，据此可明确：d 越小，Z 越大，物体所处位置越远。

3.2 TOF（Time of Flight）技术

TOF 技术原理：测算光脉冲或调制光波发射后，经物体反射返回的时间差（Δt），以此算出深度值：

$$Z = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \tag{3-2}$$

其中 c 为光速。TOF 相机通常集成红外光源和传感器。

3.3 技术对比

表 3.1 TOF 和 双目视差技术对比

维度	TOF	双目视差
原理	时间测量	几何三角测量
深度计算	直接输出	需算法匹配（耗时）
光照依赖	主动光源，弱光强	依赖环境光，暗光失效
精度	近距离高精度（毫米级）	远距离更优（基线决定）
实时性	高（>30fps）	低（依赖算力，通常 <15fps）
成本	高（专用传感器）	低（普通摄像头）
适用场景	动态、短距离（室内）	静态、中远距离（室外）

4 三维内窥镜典型产品应用对比

典型医用三维内窥镜：（1）Stryker 1688 3D 4K 腹腔镜依据双目立体视觉，核心特点双摄像头同步采集、K 分

辨率、主动偏振光分离、减少串扰、低延迟，应用于腹腔镜手术中；（2）Karl Storz IMAGE1 S 3D 依据单镜头分光棱镜，核心特点单镜头双传感器设计、体积小、自动对焦+HDR 增强、支持 AR 叠加，应用于神经内镜手术；（3）Medtronic 3D Laparoscope 依据结构光辅助深度重建，核心特点红外结构光投射、实时生成深度图、集成 AI 器官识别，应用于机器人辅助手术。

典型工业三维内窥镜：（1）GE Inspection Technologies XL Go+ 是无线便携款，具备无线传输、3.9mm 探头、120° 广角、可更换电池这些核心属性，可用于电力设备巡检、汽车缸体检测；（2）Sony ILME-PTZ1 为 4K PTZ 款，核心属性包括云台控制、12 倍光学变焦、低照度 CMOS，可用于核电设备检查、船舶密闭舱室检测。

5 发展趋势

三维内窥镜是微创手术、工业检测领域的核心工具，当前它的技术正朝着更高精度、智能化、多功能集成和微型化的方向快速发展。

医学领域三维内窥镜的核心发展方向包含：（1）超高清技术、实时 3D 重建与 8K+3D 双目成像技术融合。（2）借助 AI 技术增强术中实时导航的多模态影像融合能力。（3）研发搭载蛇形机械臂的柔性机器人内窥镜。（4）实现设备无线化，同步推进 5G 远程手术与无线供电技术应用。

工业三维内窥镜的主要发展方向分为：（1）4K/8K 超高清成像、3D 立体成像、低光增强等技术；（2）智能化与 AI 融合，完成 AI 自动缺陷识别、实时分析报告、语音控制与自动化功能；（3）便携性与无线化属性，实现无线传输、轻量化设计、模块化结构；（4）多功能集成能力，覆盖多光谱检测、集成传感器、AR/VR 辅助应用。

参考文献

[1] 刘腾云. 胶囊内窥镜图像特征点提取与匹配方法研究[D]. 江南大学, 2025.

[2] 袁晓涵. 窑炉监测工业内窥镜设计[D]. 长春理工大学, 2025.

[3] Yoshimoto K ,Watabe K ,Fujinaga T , et al. Evaluation of endoscopic entire 3D image acquisition of the digestive tract using a stereo endoscope[C]// SPIE, 2017: 10.1117/12.2250774.

[4] Lee S J ,Jung S G ,Won H Y . Light field 3D endoscope based on electro-wetting lens array[C]// SPIE, 2017: 10.1117/12.2251660.

[5] Le D N H ,Nguyen H ,Wang Z , et al. 3D endoscopic imaging using structured illumination technique (Conference Presentation) [C]// SPIE, 2017: 10.1117/12.2250242.