

三维医学标定物中标记点的识别和匹配方法

陈露¹

CHEN Lu

摘要

脊柱外科手术机器人的二维导航方案可利用三维标定物拍摄正侧位方向的两张二维 X 线图像进行三维重建，完成患者空间注册后，利用手术工具在患者解剖图像上的实时投影达到导航目的。其中，图像标志点提取和匹配是完成患者注册的重要环节，二维医学影像空间与三维患者手术空间匹配的精度直接影响整个手术导航系统的精度。鉴于在复杂背景中稳定提取标记点的难度，提出一种在二维 X 线图像中自动识别和匹配三维标定物中标记点的方法，以便用于之后进行准确的三维重建。识别方法融合了形态学处理技术与椭圆拟合技术，自适应匹配算法通过选取特定的非共面点并运用位姿求解算法，实现了 3D 至 2D 位置的精确匹配。这种方法适用于多种标记点排列，大幅提升了系统的自适应性和操作的灵活性。

关键词

C 型臂 X 线图像；三维标定物；目标识别；目标匹配；位姿求解

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.06.048

0 引言

脊柱外科手术机器人的技术进步正在不断推动手术的精准度和安全性的提升。与三维（3D）影像方案相比，基于二维（2D）影像的方案在减少图像采集数量、缩短扫描时间及降低患者 X 射线辐射方面具有明显优势^[1]。这一方案尤其适合于不需精确三维立体空间定位的手术类型，能够在紧急医疗情境下为患者赢得宝贵的救援时间。

为了实现基于二维影像的手术导航定位功能，需要攻克的关键技术包括 X 线图像中标志点的自动识别与匹配、成像系统的精确标定、图像路径规划，以及机械臂的精准定位。^[2]其中，标志点的自动识别与匹配尤为关键，直接关系到后续成像系统标定的精度和导航定位的成功率。

鉴于在复杂背景中稳定提取标记点的难度，本文提出了一种结合形态学处理和椭圆拟合的方法。形态学处理可以得到清晰的边缘，得到候选目标区域，椭圆拟合可以精准定位圆心并排除任何潜在的虚假点。此方法旨在有效提升标记点的检测率，并减少对非圆形暗点的误识别。

此外，针对已知坐标点与图像点间的匹配问题，本文提出了一种自适应匹配算法，通过选取特定的非共面点并运用位姿求解算法（P3P），实现 3D-2D 位姿的准确求解。该方法通过预测 3D 标记点在图像中的位置，并在该位置附近识别已检测到的标记点坐标，实现标记点从 3D 到 2D 的精确匹配，适用于各种标记点排列，增强了匹配过程的自适应性。

1 标志物投影识别

在基于 C 型臂 2D 影像的手术导航定位系统研究中，本文重点探讨了 C 型臂 X 线图像内的标志物（具有不同规格的金属小球）投影的自动识别及匹配技术。核心原理在于从 X 线图像中准确提取关键的标记点，并获取这些点的精确二维图像坐标。通过将这些坐标与三维标定物模板的坐标进行精确匹配，建立起标定物图像坐标系与世界坐标系之间的转换关系，这对于精确的手术导航至关重要。

为实现 C 型臂手术导航定位系统的功能要求，需要在 C 型臂 X 光锥束穿过的区域安置一个精心设计的 3D 标定物。该标定物由一系列根据特定规律排布的标记点（金属小球）构成，通过 3D 打印技术制成，包含两层结构^[3]，每层内嵌有金属球，如图 1 所示。这些球在 X 线图像中呈现为圆形或椭圆形投影，金属球由于密度远高于人体组织，包括骨骼和肌肉，在 X 线图像中的投影通常显示出较低的灰度值。

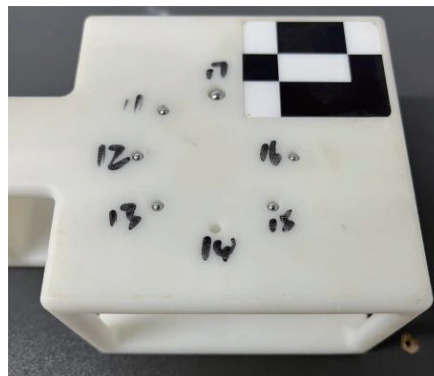


图 1 标记物实物照片

1. 北京柏惠维康科技股份有限公司 北京 100086

鉴于标定物的复杂结构及人体组织的多样性，X 线图像中的灰度分布极其复杂，使得在杂乱的背景下识别小球成为一项挑战。标志物的识别与数据提取过程涉及自动辨识每个标志物投影，并提取其面积、中心位置等几何特征，这些特征对后续的图像变形校正及 C 型臂成像系统的标定至关重要。

本文所设计的校准靶上分布的钢珠在校准靶图像上留下的投影呈现为圆形或类圆形。从 X 线图像中识别圆形目标物是计算机视觉常见问题之一。尽管基于 Hough 变换^[4-5]和联通组件（connected component）处理的现有算法在识别圆形目标物方面取得了一定成效，但它们在本地技术场景下表现不佳，难以达到理想的识别效果。

使用霍夫变换，此方法强依赖于阈值，阈值过大，会提取出虚假点，在无标记点的位置也会提取出圆形标定物。阈值过小，会遗漏真实标记点，提取结果数量太少。使用阈值分割和联通量标记的方法，固定阈值分割无法处理所有区域，对于亮度对比度低的区域，很难通过阈值分割得到清晰的边缘。联通量标记对于图像中非圆形或类圆形的区域，也会提取出连通域，无法单纯通过面积筛选出真实目标点。因此，两种方法提取出的结果不稳定，很难提取全部目标点，目标点过少，会影响后续结果的准确性。

本方案中采用的是形态学处理和椭圆拟合结合的方法，分为两个步骤来优化识别过程。首先，自适应阈值二值化，利用形态学处理，包括均值滤波后自适应二值化、开闭操作，得到标志物的清晰边缘，得到候选目标区域。接着，对边缘化后^[6]的候选区域使用阈值分割和椭圆拟合^[7-8]的方法，精确定位圆心并排除任何潜在的虚假点，最终获得准确的结果（图 2）。

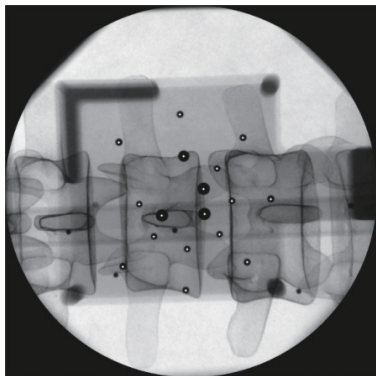


图 2 标记点识别（白点为圆心）

这种创新的方法可以提高标志物识别的精确性和稳定性，为后续标记点的匹配提供稳定的数据来源，为基于 C 型臂 2D 影像的手术导航定位系统的高效运作奠定了坚实的基础。

2 标记点的匹配

在完成标志点的数据提取后，下一步关键任务是确立标志点的索引，从而将图像中二维的点与标志物三维实体点之

间的对应关系精确匹配。这一步骤对后续的成像系统标定至关重要。虽然 2D 标记物在应用中较为普遍，但对于 3D 标记物的设计而言，最少情况下两张图像就可以重建其三维信息，使用 3D 标记物可以大幅减少拍摄的 X 线图像数量，进而减少对病人的辐射。

由于二维图像自身不包含空间深度信息，从图像提取标记点后，即使是经验丰富的医生也难以迅速确定每个标记点在 3D 模板中的对应索引。因此，依赖人工匹配在实际操作中是不现实的。

目前，点匹配技术主要基于如 SIFT^[9]、SURF^[10] 和 ORB 等特征点代表的匹配算法，这些算法通常包括：首先识别图像中携带特定特征的关键点（不同算法基于不同特征识别关键点），随后计算这些关键点的特征描述符，并基于这些描述符执行匹配过程。此方法允许将实拍的 2D 图像与一个含已知索引点的模板 2D 图像相匹配，从而为图像中的每个点分配一个索引。

然而，若直接采用 SURF 特征进行匹配，可能导致生成大量不准确的特征点及其匹配关系。若将检测到的标记点直接作为关键点并计算其特征描述符进行匹配，将面临“一对多”匹配的问题（图 3），显著增加了错误匹配的风险。经过筛选后，剩余的有效匹配点对无法支持后续计算过程。

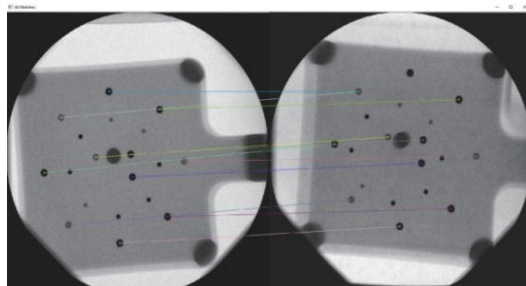


图 3 使用 SIFT 特征匹配关键点

因此，从二维图像坐标到三维空间坐标的转换需要引入额外的约束条件，可以利用特征点的空间位置约束。无论是在单目还是多目视觉系统中，确立特征点的物理位置与其影像位置之间的对应关系是进行姿态求解算法的前提。例如，PnP（Perspective-n-Point）位姿求解算法就是在已知若干个三维空间点及其在二维图像中的投影位置时，用来估计成像系统位姿的一种算法。特别是 P3P 算法，它能够仅通过最少的四个不共面点对完成 3D 至 2D 位姿的精确估算^[11]。

成像系统位姿的求解基于一个前提，即特征点在三维空间中的位置与它们在二维图像中的位置之间的对应关系已经被准确确定。这些对应关系往往需要由操作人员基于特征点在物理世界的位置和在影像中的位置进行手动匹配。然而，哪怕是最少数量的四个点，人工匹配过程也既耗时又易出错。随着特征点数量的增加，人工匹配的准确度不可避免地会降

低，因此实现特征点物理位置与影像位置匹配过程的自动化和精确性变得极其重要。

以使用特征点数最少的 P3P 算法为探究对象，选择四个不共面的特征点来计算成像系统的位姿。如果这些特征点在物理位置和影像位置之间的对应关系不正确，则位姿的计算结果亦会出错。利用错误位姿所计算的这四个特征点的重投影误差，将会明显高于基于正确位姿计算的重投影误差。基于这一原理，可以通过遍历这四个特征点在物理位置与影像位置之间所有可能的组合，计算不同组合下的重投影误差，误差最小的组合则代表了这四个特征点在物理位置与影像位置间正确的对应关系。这一发现为本文提出的自动匹配算法奠定了基础。

本方案突出了四个不共面的特殊标记点的应用，这些标记点因其半径显著大于其他标记点而易于区分，见图 4。确定这些特殊标记点的位置之后，接下来的任务便是确定这四个点的精确索引。在本研究中，采用了 P3P 算法，这是一种高效的方法，通过最少数量的点来对估算从三维空间到二维影像的位姿。针对这四个不共面特征点，存在 24 种可能的物理位置与影像位置的组合关系。对每种组合，根据每个点的物理三维坐标和影像二维坐标，结合已知的成像系统内参，应用 P3P 位姿求解算法来计算 3D 到 2D 的位姿，并据此计算外参。然后，通过计算这四个点反投影后的重投影误差，从这 24 种组合中识别出误差最小的组合，即为正确的顺序，见图 5。值得一提的是，这整个过程效率高，耗时短。

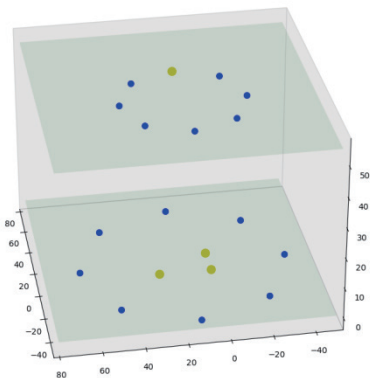


图 4 标定物三维示意图（浅色点为特征点）

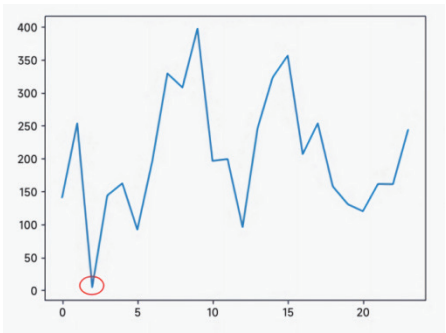


图 5 4 个特征点在不同排列组合下的重投影误差曲线（圆圈处代表正确的组合）

确立了这四个特征点在物理世界与影像中的精确对应关系之后，便可以推断出其他标记点的物理与影像位置关系。在实现了这四个特征点一一对应的基础上，不仅获得了正确的成像系统外参，而且可以对剩余的标记点进行重投影，以获得它们在当前位姿下的二维投影坐标。在预测的二维投影坐标附近进行搜索，如果在这个范围内发现了标记点识别过程中检测到的标记点，那么就能够实现该标记点的物理三维坐标与影像二维坐标的精确匹配，见图 6。

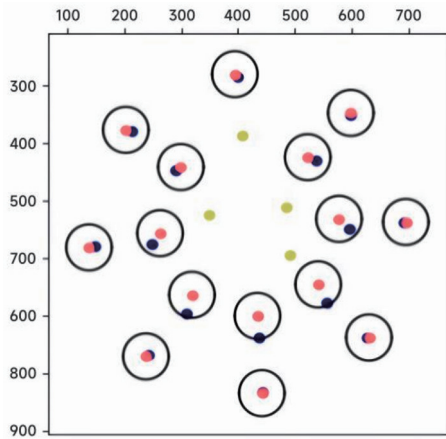


图 6 使用特征点预测其他点的结果（圆圈是以预测的坐标为圆心设置搜索范围，搜索范围内识别到的标记点为正确的标记点）

此方法的成功应用，不仅克服了传统特征点匹配技术在特定应用场景中的限制，消除了一对多匹配的问题，还确保了标记物内标记点排列的高度灵活性。无论标记点的排列如何，通过精确的位姿计算，都能够实现标记点物理坐标与影像投影坐标的一一对应，这为手术导航系统中标记物的设计提供了更大的灵活性和准确性，不仅优化了手术导航的操作流程，也使得复杂手术的规划和执行更加精确、高效。

3 实验结果

本文深入探讨并展示了一种创新的标记点提取方法，该方法融合了形态学处理技术与椭圆拟合技术。此外，本文提出了一种自适应匹配算法，通过选取特定的非共面点并运用位姿求解算法（P3P），实现了 3D 至 2D 位置的精确匹配。这种方法不仅适用于多种标记点排列，而且大幅提升了系统的自适应性和操作的灵活性。

为了验证本文提出的技术的有效性，设计了一项实验，其中使用了专门设计的三维透视标定物。这个标定物被放置在脊柱模型的特定解剖位置附近，并通过使用 3D C 型臂拍摄了两张二维透视图像。通过标记点提取算法，可以提取出标记点，并计算出标记点的圆心。其中四个特别设计的标记点，在半径和灰度值上明显区别于其他标记点，可以通过半径筛选出来，再通过位姿求解算法，计算四个特殊点物理位

置和图像位置所有排列组合情况下的3D至2D的位姿。接着,对这四个点进行重投影,计算重投影误差,选取误差最小的排列组合作为正确的匹配,从而确定这四个特殊点的ID。值得注意的是,尽管脊柱模型上存在一些可能造成混淆的小钢珠验证点,本文的方法仍然能够准确区分并匹配正确的标记点,有效地排除了干扰元素。

图7清晰地展示了本文的方法能够成功地识别标记点的圆心,并且标记点的索引与标记物设计的索引完全吻合,从而充分验证了本文提出的标记点识别与匹配方法的准确性和有效性。通过精确的标记点识别和匹配,将为后续的成像系统标定环节提供准确的输入数据,以保证标定的准确性,参与计算的标记点数量越多,标记点的中心计算越准确,成像系统标定的精度就会越高,最终在导航或者机械臂定位环节的精度就会越高。本研究中介紹的标记点提取和匹配方法,不仅能显著增强手术导航系统的精度,特别是在对高精度要求的医疗应用场景中发挥重要作用,其应用范围也不限于外科手术机器人,还可扩展至其他领域,比如作为透视成像设备标定和校准的一种通用技术方案。

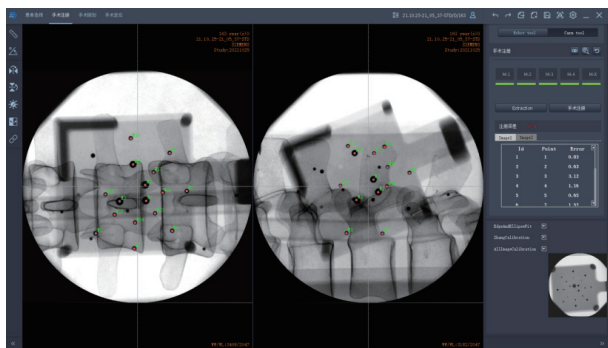


图7 标记点检测结果(圆心和标记点的索引都被正确识别)

4 讨论

在本研究中,深入探讨了手术机器人的二维影像导航系统,特别是在标记物的识别与匹配方法方面提出了创新性的解决方案,并通过模型试验成功地验证了这些方法的实用性与有效性。通过这些技术的应用与创新,本研究旨在为脊柱外科手术机器人技术的发展提供新的视角和方法,特别是在优化基于2D影像的手术导航与定位系统方面,以期实现更高的手术效率和安全性。

尽管面临诸多挑战和限制,例如三维标记物的设计尺寸较大,标记点的数量略多,以及在拍摄过程中需要对标定物位置进行多次调整以确保标定物与目标区域均被覆盖等问题,仍然能够看到这些技术潜在的改进空间。未来的研究方向将专注于继续提升这些技术的效率和实用性,其中包括寻找方法减少所需标记点的数量以降低维护成本,并优化在图像识别过程中稳定检测所有标记点的技术问题。通过不断探

索与优化,将能够更有效地将这些先进技术融入手术导航系统,从而为患者提供更加安全和高效的手术解决方案。

参考文献:

- [1]OCHS B G, GONSER C, SHIOZAWA T, et al.Computer-assisted periacetabular screw placement:comparison of different fluoroscopy-based navigation procedures with conventional technique[J].Injury,2010,41(12):1297-1305.
- [2]LI S, DU Z, YU H.A robot-assisted spine surgery system based on intraoperative 2D fluoroscopy navigation[J].IEEE access, 2020, 8: 51786-51802.
- [3]MARTINS H A, BIRK J R, KELLEY R B. Camera models based on data from two calibration planes[J].Computer graphics and image processing,1981,17(2):173-180.
- [4]DUDA R O, HART P E.Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures[J].Communications of the ACM, 1972, 15(1):11-15.
- [5]YUEN H K, PRINCEN J, ILLINGWORTH J, et al. Comparative study of hough transform methods for circle finding[J]. Image and vision computing, 1990,8(1):71-77.
- [6]CANNY J.A computational approach to edge detection[J].IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1986(6): 679-698.
- [7]LE T, DUAN Y.Circle detection on images by line segment and circle completeness[C]//2016 IEEE International Conference on Image Processing,[v.1].Piscataway:IEEE,2016:3648-3652.
- [8]FITZGIBBON A, PILU M, FISHER R B.Direct least square fitting of ellipses[J].IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence,1999,21(5):476-480.
- [9]LOWE D G.Object recognition from local scale-invariant features[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision.Piscataway: IEEE, 1999: 1150-1157.
- [10]BAY H, TUYTELAARS T, VAN G L. Surf:speeded up robust features[C]//Computer Vision-ECCV 2006 pt.1.Berlin: Springer-Verlag, 2006:404-417.
- [11]HARALICK R M, LEE C, OTTENBURG K, et al.Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem[C]//CVPR 1991.Piscataway:IEEE,1991:592-598.

【作者简介】

陈露(1993—),女,河北保定人,本科,工程师,研究方向:计算机视觉和医学图像处理。

(收稿日期:2024-03-20)