

基于线结构光扫描的手背注射入针平面测量优化方法

朱子涵¹, 张广渊^{1*}, 靳华磊¹, 王朋^{1,2**}

¹山东交通学院信息科学与电气工程学院, 山东 济南 250357;

²山东省科学院自动化研究所, 山东 济南 250013

摘要 新冠肺炎疫情的暴发使得非接触式静脉注射机器人备受医务人员青睐,但目前对机器人入针角度的研究较少,多以粗略的角度进行入针操作,这会增加穿刺失败率,且由于患者本身存在的个体差异,有时会有明显疼痛感。为此,针对手背静脉注射机器人入针角度的确定展开研究,重点完成对手背测量数据的优化,以保证入针角度计算结果的准确性。首先通过单目相机与线结构光扫描相结合的方法获得手背入针区域空间点云,利用最小二乘法对手背点云进行拟合得到手背平面;在线结构光系统标定过程中,通过构造误差函数,采用最优化方法进行迭代求解来消除测量误差;然后以得到入针区域平面为依据确定入针角度;最后设计实验,验证所提方法的准确性。实验结果表明,优化后结构光平面位置的平均误差约为 0.1 mm,满足项目需求,为后续全自动注射奠定基础。

关键词 手背静脉; 线结构光扫描; 平面拟合; 入针角度

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2411003

Optimization of Needle Plane Measurement for Dorsal Hand Injection Based on Linear Structured Light Scanning

Zhu Zihan¹, Zhang Guangyuan^{1*}, Jin Hualei¹, Wang Peng^{1,2**}

¹School of Information Science and Electrical Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, Shandong, China;

²Institute of Automation, Shandong Academy of Sciences, Jinan 250013, Shandong, China

Abstract Medical professionals have started favoring the use of non-contact intravenous injection robots owing to their importance during the COVID-19 outbreak. However, there are currently few studies considering the robot's needle insertion angle, and most of the needle insertion operations are performed at a steep angle. This increases the rate of puncture failure, and sometimes causes significant pain in patients depending on their individual differences. Therefore, the intravenous injection of the dorsal hand is performed in this study to investigate the determination of the robot's needle insertion angle, with a focus on the optimization of the measurement data to ensure accuracy in the calculation of the needle insertion angle. First, the space point cloud of the needle insertion area on the dorsal hand is obtained by combining a monocular camera with the linear structured light scanning method, and the dorsal hand plane is obtained via fitting dorsal hand point clouds using the least squares method. During the calibration process for the linear structured light system, the measurement error is eliminated by formulating an error function and using the optimization method to iteratively solve it. Subsequently, the needle insertion angle is determined based on the obtained needle insertion area plane. Finally, experiments are conducted for the accuracy verification of the proposed method. Based on the experimental results, the average error in the optimized structured light plane position is approximately 0.1 mm, and this serves as a foundation for subsequent automatic injection studies.

Key words dorsal hand vein; linear structured light scanning; plane fitting; needle insertion angle

1 引言

新冠肺炎疫情暴发以来,现已引起全球范围内累

计超 5.16 亿人次感染新冠病毒,其中有一部分是医务人员,虽然目前对医务人员的保护措施已经逐渐完善,但在与感染患者直接接触时仍会有暴露感染风险。手

收稿日期: 2022-06-14; 修回日期: 2022-06-21; 录用日期: 2022-09-05

基金项目: 中国博士后科学基金(2021M702030)、山东省交通运输厅科技计划项目(2021B120)

通信作者: *zhanggy@sdjtu.edu.cn; **knightwp@126.com

背静脉注射作为医务人员的日常护理工作,在工作过程中约一半的时间是与患者直接接触的,且穿刺成功率主要依赖于医务人员的积累经验,但即使是经验足够丰富的医务人员,在面对老年群体和幼儿群体时仍会有较高的失败率^[1-3]。若由机器人来代替医务人员对感染患者进行手背静脉注射工作,便可以有效降低医务人员的感染风险,缓解医资力量紧缺问题,还可以显著提高静脉穿刺成功率和工作效率。

目前,国内外团队对智能注射机器人应用领域的研究主要集中在静脉成像、检测与分割、入针点决策、机器人系统设计等方面^[4-8],而对于手背静脉注射机器人入针角度的确定,相关研究较少。Li等^[9]针对静脉穿刺机器人的穿刺针和血管方向的对准问题进行研究,在入针速度、偏摆角和俯仰角三方面对穿刺力大小的影响进行实验,但并未给出入针角度如何确定的结论。同济大学齐鹏团队^[10]提出一种基于超声评估的手肘静脉血管入针角度确定方法,该方法以针轴与患者整个手臂的夹角为入针角度,通过超声评估血管粗细来粗略选择大角度或小角度入针,但其仅针对手肘处静脉,与手背相比,手肘处静脉血管更加粗壮明显,易于识别,且由于患者的个体差异有时会有明显的疼痛感。

针对上述问题,本文对手背静脉注射机器人入针角度的确定展开研究。入针角度理应以手背曲面为参考面,但因个体的高矮胖瘦不同对手背曲面进行建模过于复杂。考虑到入针区域只需一个较小的范围,可通过以直代曲来得到手背面,这就需要获取手背的深度信息。因单个相机缺少约束条件无法从像素坐标恢复至空间坐标,为得到完整的空间坐标,目前常用增加约束的方法有增加相机个数、改变相机位置、增加额外传感器(如线结构光)等。对比三种方法:增加相机个数的方法需要在多相机视图下匹配对应点的位置,对环境光照特别敏感,且计算复杂度较高^[11-13];改变相机位置的方法需要实时估算相机间的位姿,存在尺度问题^[14-16];增加传感器的方法虽需要额外的设备,但是能够快速得到深度信息且无尺度问题^[17-18]。

在前期的研究中,本课题组已经解决了手背静脉入针点位置决策问题,得到了高精度的入针点坐标与入针方向,本文则重点对手背平面进行测量与优化。选择单目相机结合线结构光的方法,对手背进行扫描得到空间点云,筛选入针区域空间点云进行拟合,得到手背平面;针对拟合过程中测量数据存在误差导致测量结果不准确的问题,通过构造误差函数,采用最优化方法进行迭代求解来消除误差;在得到入针区域手背平面后,针轴的方向向量与手背平面的夹角即为入针角度。

2 实现方法

本课题组设计的手背静脉注射机器人控制系统的整体工作流程如下:首先患者将手臂放于指定位置;打

开相机对手背进行静脉识别分割、入针点位置与入针方向决策;然后利用线结构光扫描手背,得到入针区域平面,以此平面为依据调整机器人到最佳入针角度,移动针管至指定位置进行入针操作;同时对针管轴向穿刺力进行反馈分析,并结合视觉检测针头输液管处的回血情况来判断入针状态;最后在穿刺成功后进行压针推针操作,使针管进入静脉血管。机器人的整体工作效率较人工操作会有明显提高。

通过前期工作,本课题组利用基于剪枝算法的手背静脉入针点位置决策方法(PT-Pruning)提取出手背静脉像素坐标,考虑每条静脉血管入针区域的血管截面积和弯曲值,综合决策获得手背静脉最佳入针点和入针方向^[19]。当得到高精度的入针点位置和入针方向后,为了实现静脉精准穿刺,还需要设定入针角度,而入针角度是根据手背入针区域平面得到的。

为得到手背入针区域的平面,本文先获取手背空间点云,然后筛选出入针区域的空间点云,通过最小二乘法^[20]对其拟合,得到手背入针区域平面。因相机获取的是二维图像,要确定手背空间点云与其在图像中对应点之间的关系,就必须建立相机成像模型,通过相机标定获得相机的内外参数。但是单个相机并不能从图像坐标恢复到相机坐标,双目相机是获取深度信息的重要途径,但是该途径对环境光照特别敏感,且计算复杂度较高^[11-13],因此引入线结构光来辅助获得深度信息。整个工作流程如图1所示。

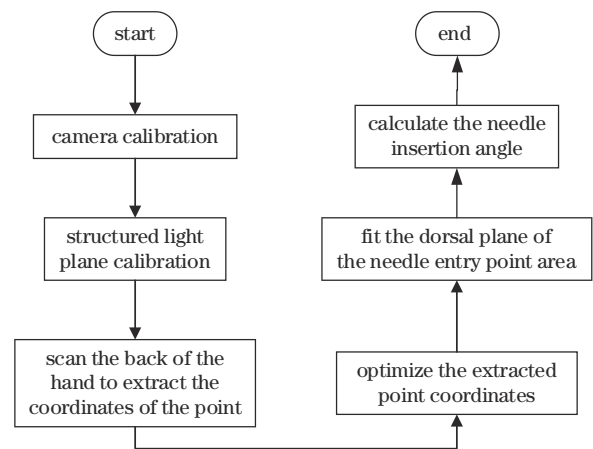


图1 工作流程图

Fig. 1 Work flow chart

搭建的实验平台模型如图2所示,将相机与电机—轴平台固定在一起,使相机光轴穿过手背,结构光投射器固定在轴上的滑台上,使结构光平面尽量垂直于轴移动方向,对手背进行扫描。

2.1 相机标定

目前相机标定流程已经发展得较为成熟,有多种标定方法,本文选用 8×6 规格的棋盘格平面标定板,采用张正友标定法,此种方法操作简单灵活,且精度可以满足项目要求^[21]。

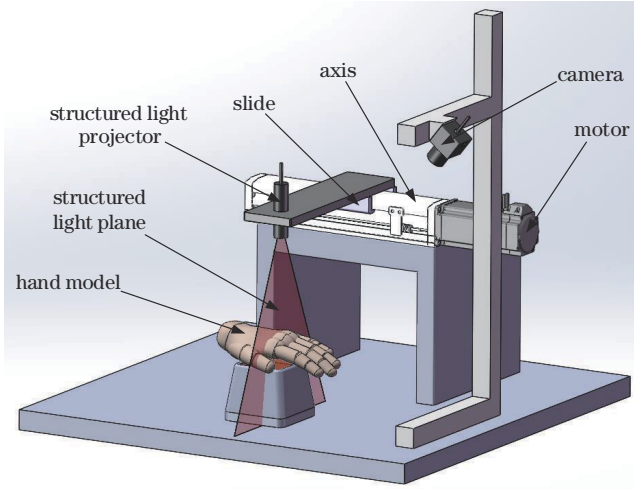


图 2 实验平台模型

Fig. 2 Experimental platform model

相机坐标系以相机光心为原点, x 、 y 轴与图像的 X 、 Y 轴平行, z 轴为相机光轴, 光轴与图像平面的交点即为图像坐标系的原点。考虑现实世界到图像的投影关系, 假设存在一空间点 $\mathbf{P} = (X_c, Y_c, Z_c)$, 其对应的图像像素坐标为 $\mathbf{p} = (u, v)$, 则 \mathbf{P} 与 \mathbf{p} 间的变换关系^[11]可表示为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{K} \ 0] \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为相机内参数矩阵; $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$ 为变换矩阵。因 \mathbf{M} 不可逆, 故无法通过像素坐标得到空间坐标。

因相机制作工艺影响, 相机所捕获图像会存在一定程度扭曲, 称之为相机畸变。一般相机畸变模型^[16]可表示为

$$x_{\text{corrected}} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)], \quad (2)$$

$$y_{\text{corrected}} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy], \quad (3)$$

$$r^2 = x^2 + y^2, \quad (4)$$

式中: (x, y) 为得到的图像中的理想点坐标, 但是存在畸变; $(x_{\text{corrected}}, y_{\text{corrected}})$ 为畸变校正后的实际点坐标; k_1 、 k_2 、 k_3 为径向畸变系数; p_1 、 p_2 为切向畸变系数。相机标定的目的在于得到相机的内参数矩阵和畸变系数, 便于后续准确计算。

2.2 结构光平面标定

由于单个相机的条件限制, 无法从像素坐标恢复到空间坐标。为得到手背入针区域的空间坐标, 利用线结构光辅助测量获得深度信息, 具体如下。

由式(1)可知, 若已知图像坐标 (u, v) 与 Z_c , 便可

求得相机坐标 (X_c, Y_c, Z_c) :

$$X_c = \frac{u - u_0}{f_x} Z_c, \quad (5)$$

$$Y_c = \frac{v - v_0}{f_y} Z_c. \quad (6)$$

为得到 Z_c , 设相机坐标系下线结构光平面方程为

$$AX_c + BY_c + CZ_c + D = 0. \quad (7)$$

将式(5)和式(6)代入式(7), 可得

$$Z_c = -\frac{D}{\frac{A(u - u_0)}{f_x} + \frac{B(v - v_0)}{f_y} + C}. \quad (8)$$

故为获得 Z_c , 需要首先通过线结构光平面标定确定线结构光平面方程。因线结构光投射器需沿某个固定的方向移动, 所以需要确定任一位置下线结构光平面方程。下一步还需进行多结构光平面的标定: 将线结构光投射器沿轴以相同距离间隔移动, 结合单结构光平面标定, 计算得到 n 组结构光条点坐标和 n 个结构光平面, 从而得到结构光平面共同的法向量和任一位置下的结构光平面方程。

但是对于得到的结构光条上点的相机坐标, 并未考虑相机畸变以及其他约束的影响, 计算结果会与实际位置存在偏差。为此考虑到结构光平面标定过程中存在的重投影约束、线性约束及平面约束, 构造误差函数, 采用最优化方法进行迭代求解^[22]来消除误差。

2.2.1 单结构光平面标定

单结构光平面标定流程如图 3 所示, 图中 \mathbf{K} 为相机内参数矩阵, d_{ist} 为畸变系数, A 、 B 、 C 、 D 为结构光平面方程参数。

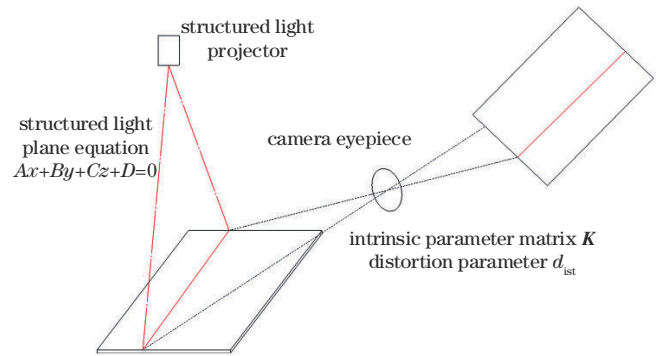


图 3 单结构光平面标定流程

Fig. 3 Flow chart of single structured light plane calibration

具体算法流程如图 4 所示, 首先以标定板平面左上角角点为原点, 令沿棋盘格线长边为 x 轴, 短边为 y 轴, 以垂直标定板向外为 z 轴建立世界坐标系, 得到角点世界坐标; 采集同一位置下带结构光与不带结构光的标定板图像, 处理得到角点像素坐标; 然后计算单应性矩阵、旋转矩阵和平移矩阵, 经透视变换后截取标定板角点感兴趣区域(RoI); 接着提取 RoI 内结构光条中心线, 经逆透视变换得到像素坐标; 再通过计算得到相

Algorithm 1: calibration of structured light plane

```

Input: acquired images of calibration plane with and without structured light: imgs; calibration board corner
point world coordinates: world_pts
Output: the parameters of the structured light plane equation obtained by fitting:  $A, B, C, D$ 
1 def laser_calibrate (imgs, world_pts):
2   for img in imgs:
3     # Extract checkerboard corner pixel coordinates
4     chess_board_corners = extract_chess_board_corners (img)
5     # Calculate the homography matrix  $H$ , rotation matrix  $R$ , and translation matrix  $t$ 
6      $H, R, t =$  comput_H (chess_board_corners, world_pts)
7     # Perspective transformation
8     img_world = perspectiveTransform (chess_board_corners,  $H$ )
9     # Extract the pixel coordinates of the center line of the structured light bar
10    laser_pts_world = extract_laser (img_world)
11    # Inverse perspective transform
12    laser_pts_image = perspectiveTransform (laser_pts_world,  $H^{-1}$ )
13    # Calculate the camera coordinates of the center line of the structured light bar
14    laser_pts_camera =  $R @$  laser_pts_image +  $t$ 
15    laser_pts_camera_l.append (laser_pts_camera)
16 # Structured light plane fitting
17  $A, B, C, D =$  fit_plane (laser_pts_camera_l)
18 # Optimize
19  $A, B, C, D =$  laser_optimize ( $A, B, C, D, laser\_pts\_camera\_l$ )
    
```

图 4 结构光平面校准算法

Fig. 4 Calibration of structured light plane

机坐标,并对其进行优化;最后根据优化后结构光条中心线的相机坐标,拟合得到结构光平面方程。

由于根据逆透视变换计算得到的二维图像坐标与实际图像坐标之间总会存在一个差值,即存在重投影误差;因结构光条在平面标定板上为一条直线,结构光条中心点坐标变换到空间点坐标后并不在一条直线上,即存在线性误差;又因全部结构光条都由同一位置结构光投射器发出,故结构光条空间点均应位于同一平面上,但计算得到的三维空间点并不会准确分布于一个平面上,故存在平面误差。于是通过标定板的辅助,考虑上述三个方面的约束,构造误差函数:

$$L = \ln(\|u_o - u_c\|_2^2) + (1 - |\cos \theta|)^2 + [\ln(1 + d) + \ln(\|n\|_2^2)]^2 \quad (9)$$

误差函数由三部分组成。第一部分 $\ln(\|u_o - u_c\|_2^2)$ 对三维空间点坐标进行重投影,使原始像素坐标点 u_o 与由式(1)计算得到的像素坐标点 u_c 之间的欧氏距离最小。第二部分 $(1 - |\cos \theta|)^2$ 对结构光条相机坐标进行线性约束,因标定板是平的,故结构光条中心点坐标变换到空间点坐标后应该是一条直线。于是本文约束每一条结构光条空间点中相邻三点之间的夹角尽可能小,如图 5 所示,使相邻三点间夹角 θ 趋向于 0° 或 180° 。

$$\cos \theta = \cos \langle \vec{ab}, \vec{ac} \rangle \quad (10)$$

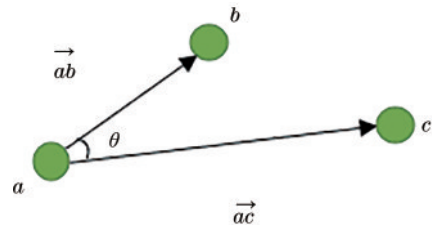


图 5 线性约束图

Fig. 5 Linear constraint graph

$$\text{第三部分} [\ln(1 + d) + \ln(\|n\|_2^2)]^2 (n = [A \ B \ C]^T)$$

对三维空间点坐标进行平面约束,因所有结构光条都由同一结构光投射器发出,故理想状态下采集到的三维空间点应处于同一平面上,为此使空间点与结构光平面的距离最小来满足此条件,如图 6 所示,使 d 趋近于 0。引入 $\ln(\|n\|_2^2)$ 的目的是保证平面法向量的模长为 1。

在误差函数的第一项和第三项中引入对数运算,目的是保证误差函数的三项均在同一个数量级,避免数值问题。最后利用迭代优化算法使上述误差达到最小,从而得到优化后的相机坐标点,进而通过最小二乘法对优化后的相机坐标点进行拟合,得到结构光平面。

2.2.2 多结构光平面标定

因结构光投射器沿固定轴方向以固定距离移动,

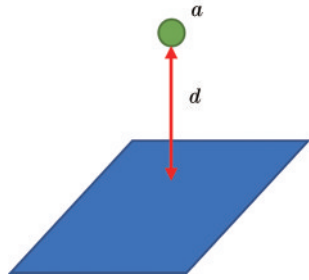


图 6 平面约束图

Fig. 6 Plane constraint graph

故理想状态下所有结构光平面有共同的平面法向量 (A, B, C) , 且相邻平面的系数 D 为等差的, 且与轴移动距离呈线性关系, 即结构光平面方程中的 D 与结构光投射器沿轴移动的距离 x 呈线性关系, 可表示为

$$D_n = ax_n + b. \quad (11)$$

利用最小二乘求解得到参数 a 和 b , 即可得到任意位置下的结构光平面方程。整个结构光标定流程如图 7 所示, 经单结构光平面标定后即可得到一个结构光平面上三维空间点准确的相机坐标, 而多结构光平面标定可以通过结构光平面方程参数 D_n 与结构光投射器移动距离 x_n 之间的线性关系得到任一位置下的结构光平面方程, 进一步便可以得到任一位置下三维空间点准确的相机坐标。

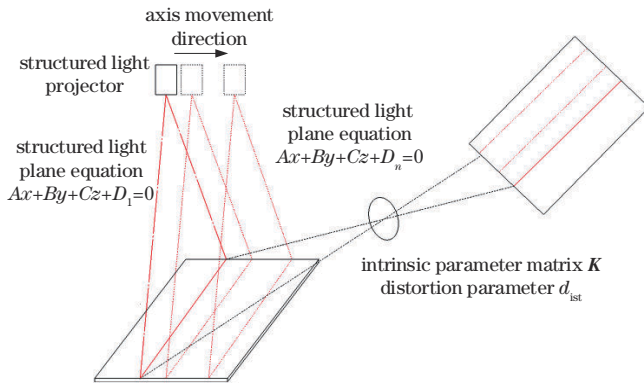


图 7 多结构光平面标定流程

Fig. 7 Flow chart of multi-structured light plane calibration

2.3 测量时空间点的优化

测量时对空间点的优化方法与前文基本一致, 唯一不同在于标定时使用的标定板为规则平面, 扫描的手背等物体为不规则曲面, 故不能对相机坐标点加以线性约束。为此在式(9)的基础上修改得到测量时的误差函数:

$$L = \ln(\|u_o - u_c\|_2^2) + [\ln(1+d) + \ln(\|n\|_2^2)]^2. \quad (12)$$

由式(12)可以看出, 测量时的误差函数只对重投影误差和平面误差两方面进行优化, 同样通过迭代优化算法最终得到优化后准确的相机坐标点。

2.4 拟合入针区域的手背平面并计算入针角度

由于通过前期工作已经得到了高精度的入针点的

图像坐标与静脉血管上部分像素坐标, 即入针方向^[19]。在扫描得到整个手背的点的位置信息后便可以对入针区域进行平面拟合。首先以入针点的图像坐标为中心点截取入针区域, 将在入针区域内的结构光条单独保存, 接着采用优化方法对点进行优化, 得到入针区域的相机坐标点, 最后通过最小二乘法拟合得到入针区域平面, 具体过程如下。

设平面方程的一般表达式为

$$Ax + By + Cz + D = 0 (C \neq 0), \quad (13)$$

将其变换为

$$z = -\frac{A}{C}x - \frac{B}{C}y - \frac{D}{C}, \quad (14)$$

令 $a = -\frac{A}{C}, b = -\frac{B}{C}, c = -\frac{D}{C}$, 则式(14)可以表示为

$$z = ax + by + c, \quad (15)$$

此时对应的最小二乘矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} (n \geq 3), \quad (16)$$

式中: $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)$ 为空间点相机坐标, 通过对方程组求解即可得到 (a, b, c) , 也即得到平面方程。在得到手背入针区域平面方程后, 便可计算出入针角度。由式(13)可知平面的法向量为

$$n = (A, B, C). \quad (17)$$

设入针点的相机坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 穿刺针针轴的方向向量为

$$s = (m, n, p), \quad (18)$$

则穿刺针的直线方程为

$$\frac{x - x_0}{m} = \frac{y - y_0}{n} = \frac{z - z_0}{p}. \quad (19)$$

将手背入针区域平面与穿刺针针轴直线的夹角记为 α , 平面法向量与针轴方向向量的夹角记为 θ , 则手背入针区域平面与穿刺针针轴直线的夹角计算公式为

$$\sin \alpha = |\cos \theta| = |\cos \langle n, s \rangle| = \left| \frac{n \cdot s}{|n| \times |s|} \right|, \quad (20)$$

$$\alpha = \arcsin \left| \frac{n \cdot s}{|n| \times |s|} \right|. \quad (21)$$

3 实验验证

3.1 实验平台搭建

根据设计的实验模型与实验需求来进行设备选型, 搭建实验平台实体, 如图 8 所示。

3.2 相机标定实验

搭建起实验平台后, 首先进行单目相机标定实验, 以获得相机内参数矩阵 K 和畸变系数 d_{ist} 。选用 8×6 规格的棋盘格平面标定板, 如图 9 所示。

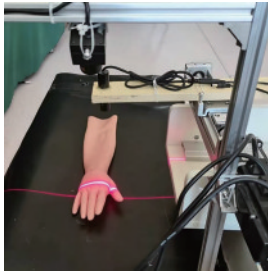


图 8 实验平台实物模型

Fig. 8 Experimental platform entity model

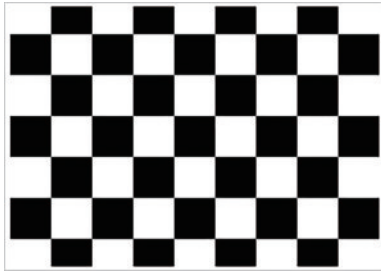


图 9 棋盘格标定图案

Fig. 9 Checkerboard calibration pattern

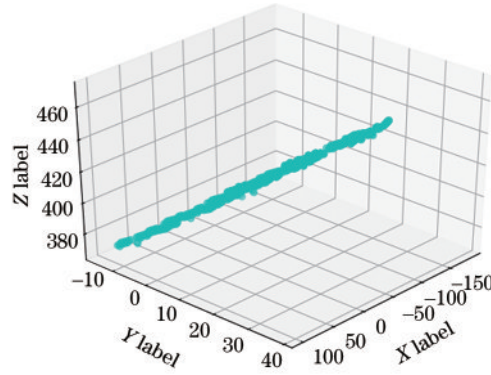
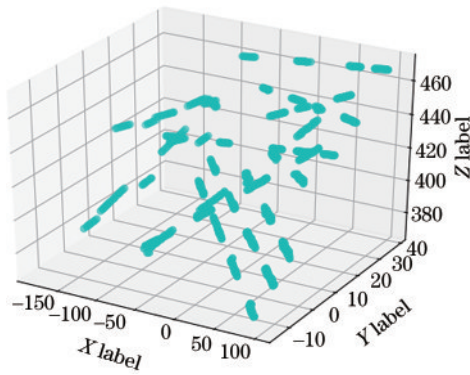


图 10 从一组图像采集到的相机坐标点

Fig. 10 Camera coordinate points collected from a group of images

通过所提方法对四等分点相机坐标进行优化,重投影误差优化结果如表 1 所示,表中 Not Optimized 是计算得到的优化前的像素坐标点与初始的像素坐标点

表 1 重投影误差优化结果

Table 1 Reprojection error optimization result

| Number | Not Optimized | Optimized |
|--------|---------------|--------------------------|
| 1 | 56.17063 | 3.06371×10^{-7} |
| 2 | 38.70779 | 3.20408×10^{-7} |
| 3 | 134.20498 | 8.62607×10^{-7} |
| 4 | 45.72296 | 2.09770×10^{-7} |
| 5 | 41.74555 | 7.59013×10^{-7} |
| 6 | 45.06997 | 2.93538×10^{-7} |
| 7 | 45.80917 | 8.53363×10^{-7} |
| 8 | 59.16142 | 3.76497×10^{-7} |
| 9 | 43.01584 | 3.02306×10^{-7} |

因为张正友标定法是利用相机与标定板之间不同的位置来求解参数的,所以编写图像采集程序来采集不同距离、不同角度下的棋盘格标定板图像,然后编写相机标定程序对采集到的图像进行标定。

3.3 结构光平面标定实验

根据所提方法来进行结构光平面标定实验,首先进行单结构光平面标定,实验步骤如下。

1) 将提取到的每幅标定板图像上结构光条中心像素点等分,取 4 个点,记为 P_{image} 。

2) 利用每幅图像的旋转矩阵 R 和平移矩阵 t , 计算得到四等分点相机坐标 P_{camera} ,

$$P_{camera} = R \times P_{image} + t \quad (22)$$

3) 对 P_{camera} 通过前文方法进行处理,得到优化后的相机坐标点 P' 。

4) 处理完所有标定图像后,对结构光条相机坐标点进行平面拟合。

图 10 为优化前的其中一组图像中所有四等分相机坐标点的显示结果,从图中可以看到所有点近乎都在一个平面上,但仍存在一定的误差。

之间的像素差,Optimized 是计算得到的优化后的像素坐标点与初始的像素坐标点之间的像素差,可以看到优化后的重投影误差很小,可忽略不计。

图 11 为所有优化前的四等分点相机坐标与优化后的对比,Not Optimized 为优化前所有点到拟合平面的平均距离,Optimized 为优化后所有点到拟合平面的平均距离,由图中数据可以看到,优化后的四等分点相机坐标明显更贴近平面。

下一步进行多结构光平面标定实验,具体实验步骤为

1) 沿轴移动方向将激光投射器移动 5 mm;

2) 结合单结构光平面标定实验,得到结构光条上点的图像坐标、相机坐标及结构光平面方程;

3) 重复步骤 1) 和步骤 2), 总共得到 n 组结构光条上点坐标和结构光平面方程, n 取 13, 总共沿轴移动了 60 mm。

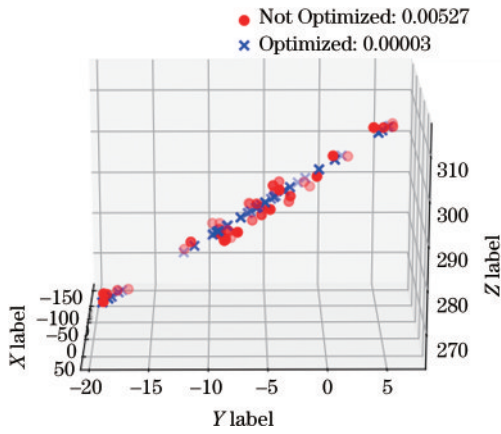


图 11 单结构光平面优化结果

Fig. 11 Optimization result of single structured light plane

多结构光平面优化结果如图 12 所示,由于优化后每个结构光平面均有共同的平面法向量

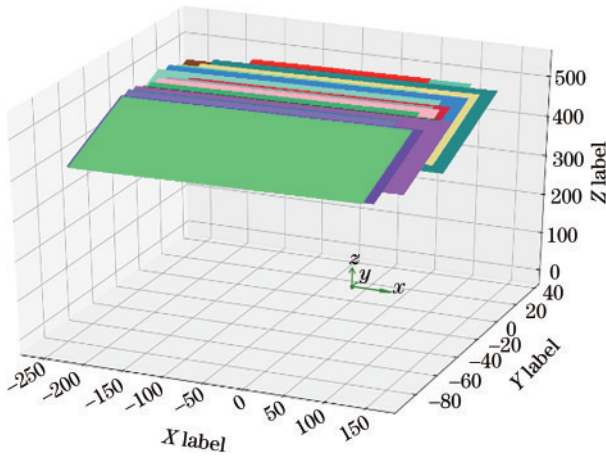


图 12 多结构光平面优化结果

Fig. 12 Multi-structured light plane optimization results

(A, B, C),所以在图中拟合得到的结构光平面都是互相平行的。

为了验证拟合的结构光平面的准确性,计算每两个平面之间的距离 d' ,设两平面方程分别为 $Ax + By + Cz + D_1 = 0$ 和 $Ax + By + Cz + D_2 = 0$,则有

$$d' = \frac{|D_2 - D_1|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (23)$$

计算结果如表 2 所示,平均误差约为 0.1 mm,可以证明结果是比较准确的。

结构光平面标定的最终目的便是得到任意位置下的结构光平面方程,表 3 为优化后的结构光平面共同的法向量 (A, B, C) 与求解 D 的参数 (a, b)。

为验证结构光平面标定的准确性,建立预测模型,对结构光平面方程参数 D 的预测值与真实值进行对比,对比结果如表 4 所示,差值平均值为 0.174。

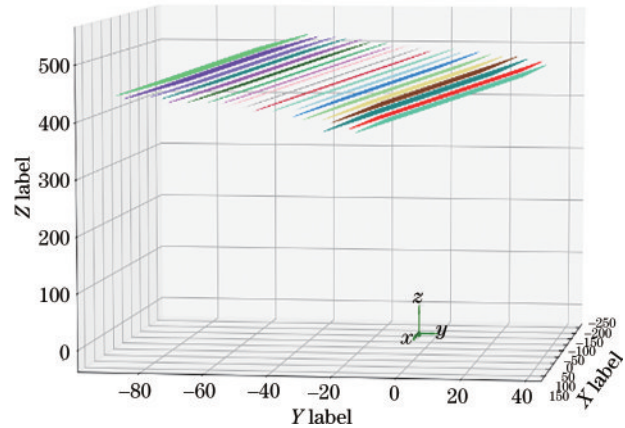


表 2 多结构光平面拟合结果

Table 2 Multi-structured light plane fitting results

unit: mm

| Structured light projector travel distance | Distance between two planes d' | Structured light projector travel distance | Distance between two planes d' |
|--|----------------------------------|--|----------------------------------|
| 5 mm | 5.21 | 35 mm | 4.83 |
| 10 mm | 5.13 | 40 mm | 5.08 |
| 15 mm | 4.98 | 45 mm | 4.84 |
| 20 mm | 5.00 | 50 mm | 4.91 |
| 25 mm | 5.21 | 55 mm | 4.98 |
| 30 mm | 4.97 | 60 mm | 5.03 |

表 3 结构光平面标定结果

Table 3 Structured light plane calibration results

| Structured light plane common normal vector: (A, B, C) | Solving parameters of structured light plane equation D : (a, b) |
|--|--|
| (0.00735, -0.87606, 0.48211) | (-1.00520, -191.71665) |

表 4 结构光平面标定优化结果

Table 4 Structured light plane calibration optimization results

| Structured light projector travel distance | Predicted value of structured light plane equation parameter D | Real value of structured light plane equation parameter D | Absolute value of difference |
|--|--|---|------------------------------|
| 0 mm | -191.717 | -191.428 | 0.289 |
| 5 mm | -196.743 | -196.640 | 0.103 |
| 10 mm | -201.769 | -201.771 | 0.002 |
| 15 mm | -206.795 | -206.699 | 0.096 |
| 20 mm | -211.821 | -211.701 | 0.120 |
| 25 mm | -216.847 | -217.409 | 0.562 |
| 30 mm | -221.873 | -222.175 | 0.302 |
| 35 mm | -226.899 | -227.004 | 0.105 |
| 40 mm | -231.925 | -232.084 | 0.159 |
| 45 mm | -236.951 | -236.927 | 0.024 |
| 50 mm | -241.977 | -241.839 | 0.138 |
| 55 mm | -247.003 | -246.819 | 0.184 |
| 60 mm | -252.029 | -251.849 | 0.180 |

3.4 扫描手背提取结构光条

在得到结构光平面的优化参数后,便可以求得任意位置结构光平面的方程,接下来便可以对手背进行扫描,提取手背上的结构光条。首先以 2 mm 间隔移动结构光投射器并采集手背图像,在采集完图像后便要提取出手背上的结构光条,具体步骤为

- 1) 将图像灰度化处理,截取出手背 RoI,然后对 RoI 进行伽马变换;
- 2) 对图像进行二值化处理,然后对二值化处理结果进行闭操作处理;
- 3) 对图像进行细化操作,结果如图 13 所示。

3.5 拟合入针区域的手背平面并确定入针角度

在提取到手背结构光条和入针区域结构光条的图像坐标信息后,应用所提优化方法,得到优化后的结构光条的世界坐标,然后利用最小二乘法对入针区域进行拟合平面,得到手背入针区域的平面方程:

$$-0.08176x - 0.53421y - 0.84139z + 373.38110 = 0. \quad (24)$$

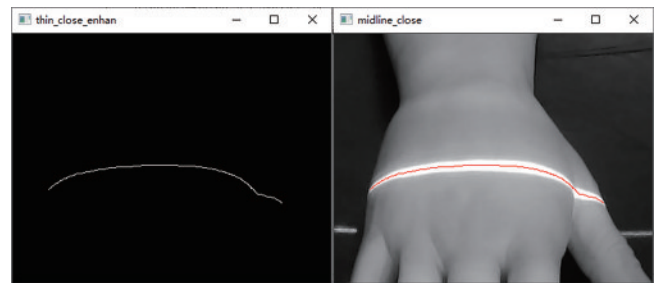


图 13 图像细化结果与结构光条提取结果

Fig. 13 Image refinement result and structured light strip extraction result

根据拟合得到的手背入针区域平面方程和入针点处的相机坐标,便可通过式(21)确定入针角度,然后以垂直于手背入针区域平面的静脉血管纵截面所在平面为辅助计算面,根据入针角度便可确定在静脉血管纵截面所在平面上指向入针点位置的唯一的一条入针路径,并在整个手背上展现出来,如图 14 所示。

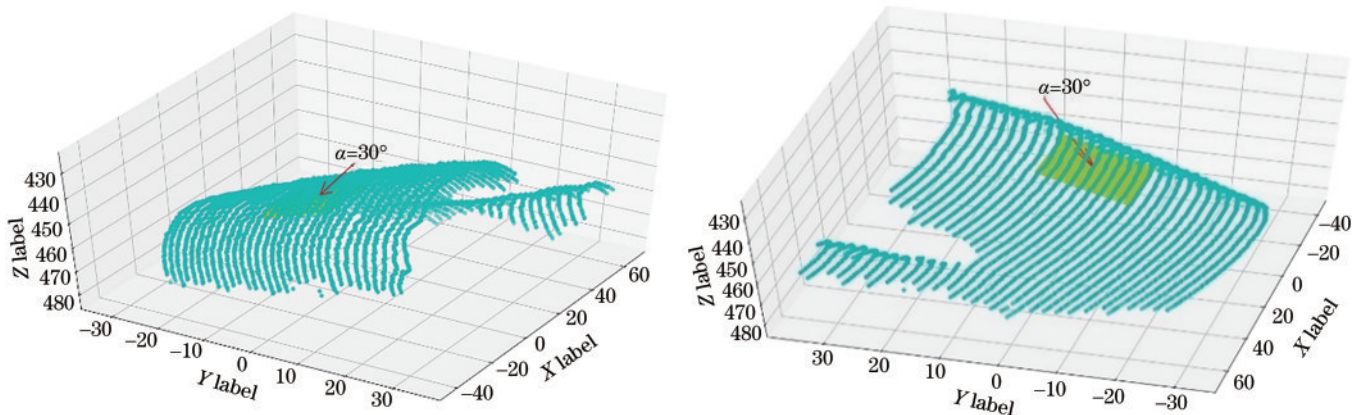


图 14 手背入针区域平面拟合结果

Fig. 14 Fitting results of the plane of the needle insertion area on the back of the hand

4 结 论

自新冠疫情暴发以来,全球范围内各大医疗机构对非接触式手背静脉注射方式的需求持续增加,本文针对非接触式手背静脉注射智能机器人的关键问题进行攻克,旨在解决手背静脉注射机器人的最佳入针角度确定问题,保证患者在最小疼痛条件下完成入针。利用单目相机结合线结构光扫描的方法得到手背入针区域空间点云,以此进行平面拟合,并提出一种线结构光系统标定与优化方法来消除测量误差。首先用张正友标定法进行相机标定,得到内参数矩阵和畸变系数;然后对结构光平面进行标定与优化,得到任意位置下的结构光平面方程;下一步扫描手背,提取结构光条,并对提取到的结构光条进行优化;最后拟合得到入针区域手背平面,以此为依据便可计算得到入针角度,并设计实验来验证所提方法的可行性。但是所提方法只是确定了手背静脉血管的入针角度,下一步还需研究在入针后如何准确进入血管中的问题,并配合其他功能最终实现非接触式手背静脉注射智能机器人设计。

参 考 文 献

- [1] 高贵群. 减轻静脉注射所致疼痛的临床研究[J]. 当代护士(学术版), 2008(11): 74-75.
Gao G Q. Clinical study on relieving pain caused by intravenous injection[J]. Today Nurse, 2008(11): 74-75.
- [2] 邹玉敏, 宋文玲, 王立恒, 等. 60°~75°角静脉穿刺对病人疼痛影响的观察[J]. 黑龙江医药科学, 2006, 29(2): 104.
Zou Y M, Song W L, Wang L H, et al. Effect of 60°-75° angle venipuncture on patients' pain[J]. Heilongjiang Medicine and Pharmacy, 2006, 29(2): 104.
- [3] 蔡玉鸣, 王小梅. 浅谈如何提高静脉穿刺成功率、减轻疼痛的技巧[J]. 中国医学创新, 2012, 9(15): 95-96.
Cai Y M, Wang X M. How to improve the success rate of venous puncture and relieve pain[J]. Medical Innovation of China, 2012, 9(15): 95-96.
- [4] 陈秀莲, 黄梅珍, 富雨超. 具有活体检测功能的手背静脉身份识别方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(6): 0610002.
Chen X L, Huang M Z, Fu Y C. Recognition method of dorsal hand vein with liveness detection function[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 0610002.
- [5] Beyer L P, Michalik K, Niessen C, et al. Evaluation of a robotic assistance-system for percutaneous computed tomography-guided (CT-guided) facet joint injection: a phantom study[J]. Medical Science Monitor, 2016, 22: 3334-3339.
- [6] 何天宝, 郭闯强, 任浩, 等. 静脉穿刺机器人研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(3): 1-10.
He T B, Guo C Q, Ren H, et al. Research progress of venipuncture robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3): 1-10.

- [7] 张芬, 张吴昱, 李春澍, 等. 光声显微成像引导注射微整形术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 2107002.
Zhang F, Zhang W Y, Li C S, et al. Photoacoustic microscopy for injection navigation of microplastic surgery[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2107002.
- [8] 刘建华. 静脉进针点的体表定位方法与应用[J]. 中华现代护理杂志, 2010(12): 1462-1463.
Liu J H. Application of body surface location method to Vein Hole[J]. Chinese Journal of Modern Nursing, 2010(12): 1462-1463.
- [9] Li Z X, Li M W, Wei J Q, et al. A robotic system for investigation on mis-alignment force of needle and vein needle insertion into blood vessel[C]//2017 2nd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS), June 16-18, 2017, Wuhan, China. New York: IEEE Press, 2017: 280-283.
- [10] 齐鹏, 田智宇. 一种基于超声评估的静脉注射机器人进针角度控制方法: CN112138249A[P]. 2020-12-29.
Qi P, Tian Z Y. Intravenous injection robot needle insertion angle control method based on ultrasonic evaluation: CN112138249A[P]. 2020-12-29.
- [11] Li X, Ji J J, Zhou Q. Fingertip blood sampling robot navigation system based on binocular vision[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2029(1): 012020.
- [12] 陈亦麟, 王发宇, 刘建阳. 基于双目立体视觉与结构光的便携式非接触三维掌纹采集系统[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 0410016.
Chen Y L, Wang F Y, Liu J Y. Non-contact portable three-dimensional palmprint acquisition system based on binocular stereo vision and structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(4): 0410016.
- [13] 张展. 基于双目视觉的三维重建关键技术研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳计算技术研究所, 2019.
Zhang Z. Binocular vision based 3D reconstruction key technologies research[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [14] 胡新荣, 曾潇, 刘军平, 等. 多视角单目服装图像三维重建算法的研究与实现[J]. 现代纺织技术, 2021, 29(6): 84-90.
Hu X R, Zeng X, Liu J P, et al. Research and implementation of 3D reconstruction algorithm for images of multi-view monocular garment[J]. Advanced Textile Technology, 2021, 29(6): 84-90.
- [15] Sun J, Wang M T, Zhao X, et al. Multi-view pose generator based on deep learning for monocular 3D human pose estimation[J]. Symmetry, 2020, 12(7): 1116.
- [16] 成祺. 单目多视角三维重建算法设计与实现[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
Cheng Q. Research on algorithm of 3-dimension reconstruction based on multi-view image obtained from monocular camera[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.
- [17] 王斌, 张文清, 王众, 等. 基于线结构光扫描的结冰冰形三维测量[J/OL]. 测控技术: 1-7[2022-05-09]. DOI: 10.19708/j.ckjs.2022.01.204.
Wang B, Zhang W Q, Wang Z, et al. Ice 3D shape

- measurement with line structured light scanning[J/OL]. Measurement & Control Technology: 1-7[2022-05-09]. DOI: 10.19708/j.ckjs.2022.01.204.
- [18] Liu J H, Wang Y Z. 3D surface reconstruction of small height object based on thin structured light scanning[J]. Micron, 2021, 143: 103022.
- [19] Zhang G Y, Gao X N, Zhu Z F, et al. Determination of the location of the needle entry point based on an improved pruning algorithm[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2022, 19(8): 7952-7977.
- [20] Qin H. Estimation and identification of nonlinear parameter of motion index based on least squares algorithm[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022: 7383074.
- [21] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [22] Souley Agbodjan K, Ahmed O S, Messaoudi D, et al. Quadratic convergence of Levenberg-Marquardt method for general nonlinear inverse problems with two parameters[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2020, 97(10): 1949-1966.