

光学学报

基于微透镜阵列空间角度编码的高精度视觉位姿测量方法

莫亮亮, 任杰骥, 任明俊*

上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240

摘要 为提升现有视觉标记点法的角度测量精度与鲁棒性, 提出了一种融合微透镜阵列与随机微图形阵列编码的高精度视觉位姿测量方案。首先, 在标定阶段中, 利用微透镜阵列下动态变化的随机微图形阵列成像模式对角度空间进行密集的高精度编码, 通过汉明码构建高精度空间角度坐标基准。然后, 在测量阶段中, 基于观测到的显示图像构建观测角度编码, 并联合最邻近角度基准加权计算出测量位置的精确角度信息, 最终实现超高精度的三轴角度测量与位姿估计。同时, 进行了大量的真实实验以验证所提方法的有效性。实验结果表明, 所提方法可实现高于 0.08° 的角度测量精度, 与先前工作相比, 在保证位移测量精度的情况下将角度测量平均误差减小了 97%。此外, 所提算法的鲁棒性保证了自然光照条件下的高精度位姿测量。最后, 通过充分的定量比较全面地分析了阈值分割与角度编码参数等因素对测量精度的影响。

关键词 测量; 视觉标记; 微透镜阵列; 视觉测量; 位姿估计

中图分类号 TP391 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1612002

Microlens Array-Based Spatial Angle Encoding for High-Precision Visual Pose Measurement

Mo Liangliang, Ren Jieji, Ren Mingjun*

School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract To improve the precision and robustness of angle measurement by existing visual marker methods, a high-precision visual pose measurement approach that combines microlens arrays and random micrographics arrays for encoding is proposed. First, in the calibration stage, dense and high-precision encoding is carried out by dynamic imaging modes of random micrographics arrays under microlens arrays, and a high-precision coordinate datum of spatial angles is constructed by the Hamming code. Then, in the measurement stage, observation angle encoding is completed on the basis of observed display images, the weighted fusion of which with the nearest angle datum is applied to obtain the precise angles of measuring positions. In this way, the triaxial angle measurement and pose estimation with high precision can be achieved. At the same time, extensive experiments are performed to verify the validity of the proposed method. The results reveal that the angle measurement precision is higher than 0.08° , and compared with the results of previous work, the average angle measurement error is reduced by 97% without sacrificing the displacement measurement precision. In addition, the robustness of the proposed algorithm ensures high-precision pose measurement under natural illumination. Finally, by sufficient quantitative comparison, the effects of factors on angle measurement precision, such as threshold segmentation and angle encoding parameters, are comprehensively analyzed.

Key words measurement; visual marker; microlens array; vision measurement; pose estimation

1 引言

空间位姿测量在机器人抓取^[1]、高精度装配^[2]和产

品三维尺寸检测^[3]等领域中都有广泛的应用。目前常用的位姿测量方法有激光跟踪、惯导测量和视觉追踪等。其中:激光跟踪法成本高昂,需要手动安装靶标,测

收稿日期: 2022-01-25; 修回日期: 2022-02-26; 录用日期: 2022-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(52175477)、国家重点研发计划(2019YFA0706701)

通信作者: *renmj@sjtu.edu.cn

量效率低,且测量过程需要人工干预,容易受到人为因素的影响;惯导系统中由于误差会随着时间积累,故存在长期运作精度降低的问题。近年来,随着计算机和图像处理技术的不断发展,具有成本低廉、灵活性高、测量精度高和效率高等特点的视觉位姿测量技术得到了广泛应用。

基于视觉的空间位姿测量方法主要是通过提取图像特征的方式,求解待测目标的二维像素坐标与三维空间坐标的转换关系,主要分为视觉标记法、模板匹配法和深度学习等方法^[4]。其中:模板匹配的精度随模板库样本数量的增加而提升,但数量的增加会降低求解效率;深度学习依赖大量的样本数据和计算资源进行训练,进而存在泛化性不足的问题;视觉标记法具有算法相对简单、可靠性高等优点。

常见的视觉标记(ARToolKit^[5]、ARTag^[6]等)多为二维平面结构,一般由 4 个已知相对位姿的特征点(角点、圆心等)提供几何约束,也会包含用于标记识别的其他信息(如二维码)。单目视觉中基于此类视觉标记的三维位姿测量主要靠求解透视四点投影(P4P)问题,即结合已标定的相机内参、特征点的几何约束和提取到的特征点像素坐标解算出视觉标记与相机间的相对位姿。由于特征点提取的像素误差和噪声的影响,故此类视觉标记在位姿估计的精度上具有一定的局限性,尤其是当相机的拍摄角度与标记所在的平面接近垂直时,视觉标记对拍摄角度的估计精度显著降低^[7]。

为解决上述问题,提升位姿测量的精度,近年来利用微透镜阵列(MLA)动态显示特性的视觉标记被提出。此类标记的主要思想是:利用微透镜阵列的动态显示作用,通过在微透镜阵列下方放置微图形阵列,编码不同拍摄角度下的显示图案,获取三维位姿中的角度信息;结合传统视觉标记的测量结果进行优化,获得精度更高的三维位姿测量结果。

基于微透镜阵列的视觉标记主要分为三类。第一类是基于动态莫尔条纹的标记。Tanaka等^[8-9]提出了利用柱状透镜阵列和微透镜阵列叠放一维微图形阵列的视觉标记和二维微图形阵列的视觉标记,二者产生随着拍摄角度变化而移动的直线莫尔条纹和平面莫尔条纹,通过莫尔条纹的相对位移解算出相机相对标记的 x 轴与 y 轴的旋转角。一维微图形阵列的视觉标记和二维微图形阵列的视觉标记能提供较好的位姿估计结果,但标记制造难度较大,且对图片分辨率有较高的要

求。第二类是基于颜色编码的标记。Schillebeeckx等^[10]提出了一种基于柱状透镜阵列叠放周期性彩色条纹的视觉标记,通过绘制色相响应曲线对拍摄角度进行编码。由于色相值对光照条件较为敏感,故该方法在复杂光照条件下的角度估计精度会受到影响。第三类是基于灰度值阈值编码的标记。Schillebeeckx等^[11]提出了一种微透镜阵列下方叠放二维随机黑白点阵的视觉标记。首先,在不同角度拍摄多张照片并进行图像处理,得到每颗子透镜中心区域的灰度值。然后,通过最大信息熵方法^[12]进行灰度阈值分割,建立状态向量数据表^[13]。最后,通过求解待测图片与数据表中向量的最小汉明距离^[14]得到角度估计结果。然而,该标记有两个缺点:采用线性拟合的方式上采样扩充图片,未考虑角度空间和透镜成像中的非线性因素,降低了测量精度;使用单一阈值对所有图片的灰度值进行状态划分,未考虑拍摄条件变更导致光照变化而产生的影响,降低了数据表的鲁棒性。

为提升测量精度和测量结果的稳定性,本文提出了一种基于最邻近点加权联合姿态估计的微透镜阵列视觉标记,主要由微透镜阵列、微图形阵列和 4 个已知相对位姿的特征圆环组成。基于微透镜阵列的动态显示特性,通过改变拍摄角度采集到不同的显示图案。提取每个图案中微透镜阵列中每个子透镜中心区域的灰度值进行二值化,形成包含角度信息的状态向量,并汇总所有状态向量形成角度编码。将待测位姿的状态向量与已编码的向量数据表进行比对,通过对汉明距离的加权运算相对精确地估计拍摄角度。最后,将得到的角度值代入重投影误差公式中进行优化,进而求解出三维位姿结果。实验结果表明,所提视觉标记相比传统的视觉标记具有更高的角度估计精度。

2 基本原理

2.1 基于传统视觉标记法的位姿求解原理

传统的视觉标记通常基于相机成像模型,通过已知相对位姿关系的特征点进行位姿解算,即求解 N 点透视问题。相机成像模型的数学表达式为

$$q = K(RQ + T), \quad (1)$$

式中: q 为特征点的像素坐标; K 为相机的内参矩阵; Q 为特征点的世界坐标; R 和 T 为待解算的位姿信息,表达式为

$$R = R_z(\phi) R_y(\theta) R_x(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi & \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ \cos \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi \\ -\sin \theta & \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$T = [t_x \ t_y \ t_z]^T, \quad (3)$$

式中: ψ 、 θ 和 ϕ 分别为绕 x 、 y 和 z 轴的欧拉角; T 为平移向量; $R_z(\phi)$ 为绕 z 轴的旋转矩阵; $R_y(\theta)$ 为绕 y 轴的旋转矩阵; $R_x(\psi)$ 为绕 x 轴的旋转矩阵; t_x 为 x 方向平移

量; t_y 为 y 方向平移量; t_z 为 z 方向平移量。若要完整求解 ψ 、 θ 、 ϕ 和 T 至少需要 4 个已知相对位姿关系的共面特征点^[15],基于 4 个特征点求解 P4P 问题。P4P 问题的求解是通过传统视觉标记获取位姿的主要手段,也为本文的位姿估计提供了初值。

2.2 基于微透镜阵列的拍摄角度编码

微透镜阵列由数个微小的子透镜紧密排列组成。在微透镜阵列下方放置微图形阵列可以获得随着观察角度变化而变化的动态显示效果。如图 1 所示,在微透镜阵列焦平面处放置黑白图形阵列,观察角度的变化会导致每个子透镜聚焦位置发生变化,从而引起显示效果的变化。可以看出,当观察角度变化时,微透镜阵列显示效果的变化速率取决于微图形阵列的频率。微图形阵列的频率越高,微透镜阵列对观察角度的变化越敏感,动态显示效果也就越明显,反之亦然。根据此

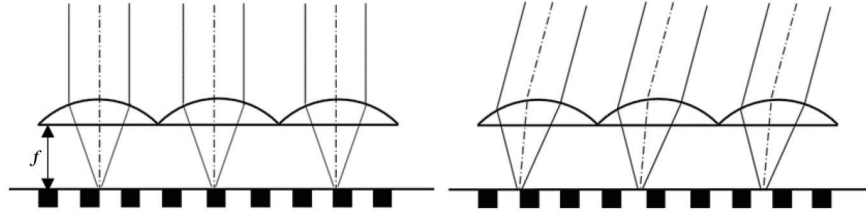


图 1 微透镜阵列动态显示原理

Fig. 1 Principle of dynamic display by microlens array

本文选用图 2(a)所示的二维微图形阵列,该阵列由许多随机的微小黑白方形单元格构成。将微图形阵列放置于微透镜阵列焦平面处,变化相机的拍摄视角可以得到不同的显示图案,如图 2(b)、(c)所示。针对图 2 中的显示结果,提取每个子透镜中心区域的灰度值组成灰度值向量。若使用最大类间方差(OTSU)法^[16]进行阈值化处理,则每个子透镜的最终显示结果为 0 或 1。若一个微透镜阵列中共有 n 个子透镜,则它们的状态可

现象,若以微透镜阵列所处的平面为 $x-y$ 平面,垂直该平面的方向为 z 轴建立三维坐标系,则可知微透镜阵列的显示图案会随着 x 轴和 y 轴的旋转而发生变化,水平放置时 z 轴旋转并不影响显示效果。光强的表达式为

$$I = f(\psi, \theta), \quad (4)$$

由式(4)可知,若在某一视场范围内密集地采集微透镜阵列的显示图案,经过图像处理提取出对应角度的某种特征,则可建立显示图案和二维旋转角的一一对应关系,对该视场内的 f 进行离散编码。

组成一个 n 维向量,理论上最多可以对 2^n 组拍摄角度进行编码。

基于微透镜阵列的空间角度编码的本质是微透镜阵列对微条纹阵列的动态显示,因此该方法的角度编码范围主要取决于微透镜阵列中每个子透镜能有效显示的视场范围。针对特定的应用场景,可以通过对子透镜的口径、焦距等参数进行设计来满足相应的测量范围需求。

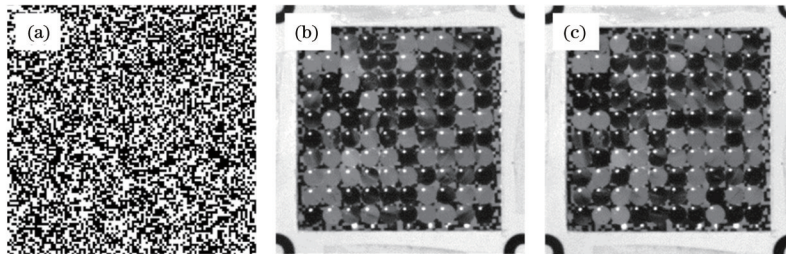


图 2 微图形阵列与动态显示效果。(a)微图形阵列;(b)(c)不同拍摄视角下的显示图案(透视变换后)

Fig. 2 Micrographics array and dynamic display effect. (a) Micrographics array; (b)(c) display patterns at different shooting angles (after perspective transformation)

2.3 微透镜阵列视觉标记姿态估计

基于 2.2 节的角度编码原理,在设定的视场角范围内拍摄多张照片,照片经过图像处理、灰度值提取和阈值化操作后即可建立由状态向量组成的数据表。针对待测位姿,在得到其状态向量后先与已建立的数据表中的向量进行比较,通过向量间汉明距离的运算求出 x 、 y 轴旋转角度的估计值。两个相同维数向量间的汉明距离是二者对应位置下不同元素的数目,即对二者进行异或运算后结果为 1 的数量。

在之前的研究中, x 、 y 轴旋转角度估计的方法为找出在角度数据表中与待测位姿状态向量汉明距离最小的向量,并以该向量对应的旋转角度作为待测旋转角

的估计值^[11,17]。若记待测点为 $P(\psi, \theta)$,其状态向量为 n , m 个已知点为 $P_i(\psi_i, \theta_i)$ ($i = 1, 2, \dots, m$),状态向量为 n_i ($i = 1, 2, \dots, m$), $d(u, v)$ 为向量 u 和向量 v 间的汉明距离,则 (ψ, θ) 的估计结果可表示为

$$(\psi, \theta) = \min_{\psi_i, \theta_i} d(n, n_i), i = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

2.4 最邻近点加权联合姿态估计

直接比较状态向量间汉明距离计算最小值得出 x 、 y 轴旋转角估计值的方法未能充分利用整个二维角度场内的状态向量信息,使得角度估计精度受限。为进一步提升角度估计精度,本文使用最邻近点联合加权姿态估计的方法。该方法的主要思路是得出角度编码

数据表中与待测位姿状态向量汉明距离最小的 4 个点, 再通过加权平均的方式求得 x 、 y 轴旋转角度的估计值。

如图 3 所示, 假设待测点 $P(\psi, \theta)$ 与已知点 $P_i(\psi_i, \theta_i)$ ($i=1, 2, 3, 4$) 的汉明距离最小, 分别为 d_i ($i=1, 2, 3, 4$), 则取权重 $w_i = 1/d_i$ 。若最小汉明距离为 0, 则取权重为 1。待测点 P 的 x 、 y 轴旋转角度估计值为

$$\begin{cases} \psi = \frac{\sum_{i=1}^4 \psi_i w_i}{\sum_{i=1}^4 w_i} \\ \theta = \frac{\sum_{i=1}^4 \theta_i w_i}{\sum_{i=1}^4 w_i} \end{cases} \quad (6)$$

2.5 完整位姿参数估计

通过 2.4 节所示方法可以估计出待测位姿中的 x 、 y 轴旋转角。针对余下的 4 个参数, 即 z 轴的旋转角 ϕ 和平移向量 T , 通过对特征点重投影误差的平方和的最小值进行非线性优化的方式, 用拟牛顿法^[18]进行求解, 即

$$\min_{\phi, T} \sum_{i=1}^4 \|q_i - K[R(\phi, \theta, \psi)Q_i + T]\|_2^2, \quad (7)$$

式中: $\|\cdot\|_2$ 表示欧氏距离。 ϕ 和 T 的初值通过 4 个特征点进行 P4P 求解获取。

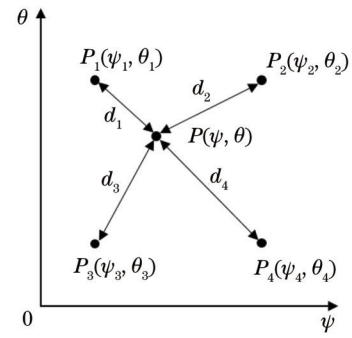


图 3 x 、 y 轴旋转角的加权估计

Fig. 3 Weighted estimation of x -axis and y -axis rotation angles

3 实验验证

3.1 实验平台

搭建一套实验装置来验证微透镜阵列视觉标记的有效性。微透镜阵列视觉标记定位实验场景如图 4 所示。为增加阈值分类的鲁棒性, 减少噪声的影响, 采用 10×10 个子透镜正方形排列组成的微透镜阵列。考虑到常见拍摄距离 (300~600 mm) 下图像均要具有足够的分辨率, 设计每个子透镜的口径为 2 mm。透镜模具采用慢刀伺服车削加工, 微透镜阵列采用纳米压印的方式制作, 为平衡加工难度与精度, 设计透镜焦距约为 12 mm。

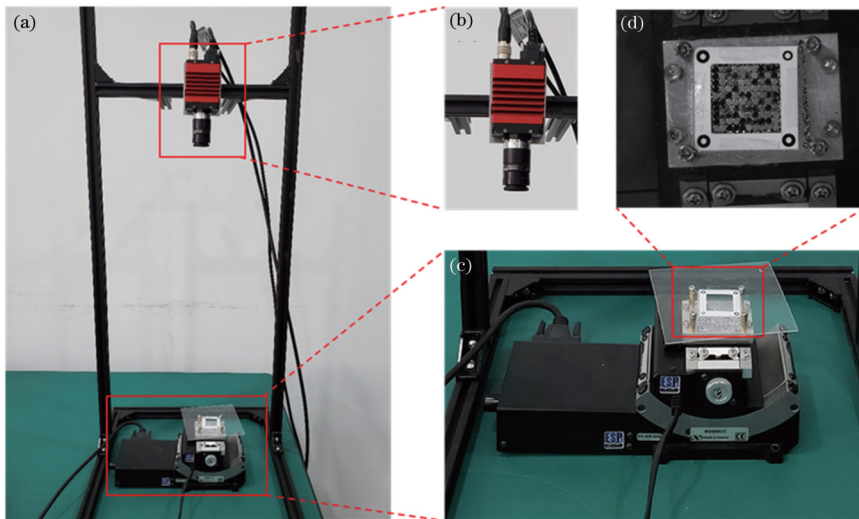


图 4 实验场景。(a) 实验平台; (b) 相机; (c) 转台和微透镜阵列基准标记; (d) 微透镜阵列基准标记显示

Fig. 4 Experimental scene. (a) Experimental setup; (b) camera; (c) rotator and microlens array fiducial marker; (d) display of microlens array fiducial marker

由于微透镜阵列的显示效果应随角度变化具有充分的随机性, 故设定微图形阵列每个单元格为黑或白的概率均为 50%。微图形采用每 2.54 cm 长度内的像素数为 600×600 的方式打印而成, 为提高其空间频率, 需提升有效编码数量, 单元数量设定为 400×400 , 每个单元格的宽度约为 0.365 mm。微透镜阵列 4 个角附近有 4 个构成正方形的圆环, 圆心距为 26 mm。微透

镜阵列视觉标记固定在由 Newport BGS80CC 和 BGS50CC 垂直组合而成的两轴高精度转台上, 二者的绝对角度定位精度为 $\pm 0.025^\circ$ 。

采用的视觉系统相机 (Allied Vision, Prosilica GT2460) 的分辨率为 $2464 \text{ pixel} \times 2056 \text{ pixel}$, 镜头 (FUJINON, HF25XA-5M) 的焦距为 25 mm, 以获得具有较高分辨率的图像。基于常见的视觉测量场景设定

相机的工作距离约为 500 mm。

基于通常的视觉系统拍摄角度,设定每个转台的旋转角度范围为 $-20^{\circ}\sim 20^{\circ}$,每旋转 0.5° 拍摄一张照片,拍摄 81×81 张照片。角度向量空间中观测方向变化范围示意图如图 5 所示,其中 i,j,k 为 x,y,z 方向上的单位向量。经过图像处理、灰度值提取和阈值化后,得到每个旋转角度下的状态向量,汇总后可建立设定视角范围内的旋转角度数据表。部分旋转角度下的照片如图 6 所示。在该视角范围内,让两轴转台处于随机的 x,y 轴旋转角度处并拍摄多张照片进行测试,分别通过基于角度编码的方法和基于 P4P 的传统方法对待测位姿进行估计,并对比它们的精确性。

3.2 实验结果

基于所提的视觉标记和传统 P4P 方法的位姿测量实验结果如图 7 所示。不同方法的 x,y 轴旋转角度的平均误差对比如表 1 所示。图 7 与表 1 中 P4P 表示使用 4 个特征点求解 P4P 问题所得的位姿结果,MLA 表示直接利用最小汉明距离估计所得的结果,MLA+ 表示最邻近点联合加权姿态估计所得的结果。由图 7 可以看出,所提方法相对传统的视觉标记,在位移量估计精度基本一致的情况下,大幅提升了 x,y 轴旋转角的估计精度。结合表 1 可知,本文采用的最邻近点联合加权姿

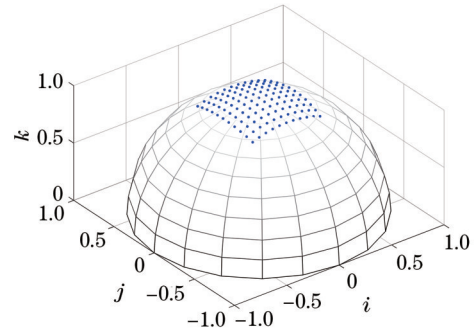


图 5 角度向量空间中观测方向变化范围示意图
Fig. 5 Schematic diagram of viewpoint variation range in angular vector space

态估计相对采用最小汉明距离估计进一步减小了 x,y 轴旋转角的测量误差。从图 7(a)、(b)可以发现,P4P 方法在拍摄角度与标记所在平面接近垂直时角度测量误差会明显增加,而微透镜阵列标记不会出现这个问题。实际的测量场景中难以保证在初始状态下相机完全垂直标记平面且不存在 z 轴旋转,同时 z 轴旋转角由式(7)估计而来,故图 7(c)中 z 轴旋转角的测量误差并不规律。

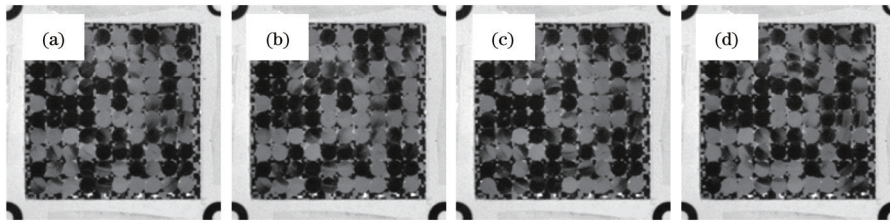


图 6 不同拍摄角度下的显示图片(透视变换后)。(a) $\psi = 0.5^{\circ}, \theta = 1.5^{\circ}$; (b) $\psi = 0.5^{\circ}, \theta = 2.0^{\circ}$; (c) $\psi = 0^{\circ}, \theta = 1.5^{\circ}$; (d) $\psi = 1.0^{\circ}, \theta = 1.5^{\circ}$
Fig. 6 Display patterns at different shooting angles (after perspective transformation). (a) $\psi = 0.5^{\circ}, \theta = 1.5^{\circ}$; (b) $\psi = 0.5^{\circ}, \theta = 2.0^{\circ}$; (c) $\psi = 0^{\circ}, \theta = 1.5^{\circ}$; (d) $\psi = 1.0^{\circ}, \theta = 1.5^{\circ}$

4 分析与讨论

4.1 灰度阈值分割算法

之前的研究工作^[11,17]采用的灰度阈值分割算法在汇总所有图片中每个子透镜灰度值后,通过遍历灰度寻找最大信息熵找到最优的灰度阈值,进而对灰度值向量进行阈值分割。该方法的最大局限性为所获得的灰度阈值和状态向量数据表只适用于当前的测量场景,当测量场景改变时,即光照条件发生变化时,要重新进行上述过程,否则会使得旋转角度估计的精度降低,甚至失效。考虑到这一点,采用背光光源照射微透镜阵列视觉标记,可在一定程度上减小光照条件带来的影响,但也增加了视觉标记的复杂性^[17]。本文采用 OTSU 法针对单幅图片进行阈值分割。该方法的优点在于不依赖具体的灰度值,而是比较待阈值化的灰度值向量中的相对灰度差,从而可以较好地避免光照条件变化对同一旋转角度下的状态向量结果的影响,使得状态向量数据表具有一定的通用性。

表 2 展示了基于信息熵的灰度阈值分割和本文采用的 OTSU 法灰度阈值分割的 x,y 轴旋转角的平均误差。表 3 为这两种方法分别使用最小汉明距离和加权最小汉明距离进行旋转角度估计的失效个数,本文进行照片采样的角度间隔为 0.5° ,这里定义角度估计的误差大于 0.5° 为失效。综合对比表 2 和表 3 的结果,可以看出本文采用的 OTSU 法具有更高的精度和更强的鲁棒性。

4.2 灰度阈值个数

本文选择将灰度值向量二值化,即灰度阈值个数为 1。在子透镜数量足够的情况下,阈值个数的增加可以更好地表征当前旋转角度下微透镜阵列的显示结果,使其与相邻角度间的结果差异性更为明显。然而,考虑到透镜个数的增加会导致视觉标记尺寸的增加,本文采用 10×10 个子透镜。同时,随着阈值数量的增加,多个阈值间的灰度值差距会减小,这有可能导致某些子透镜在状态分类过程中出错。此外,还可能造成待测角度所匹配的向量汉明距离增大,使得最近姿态

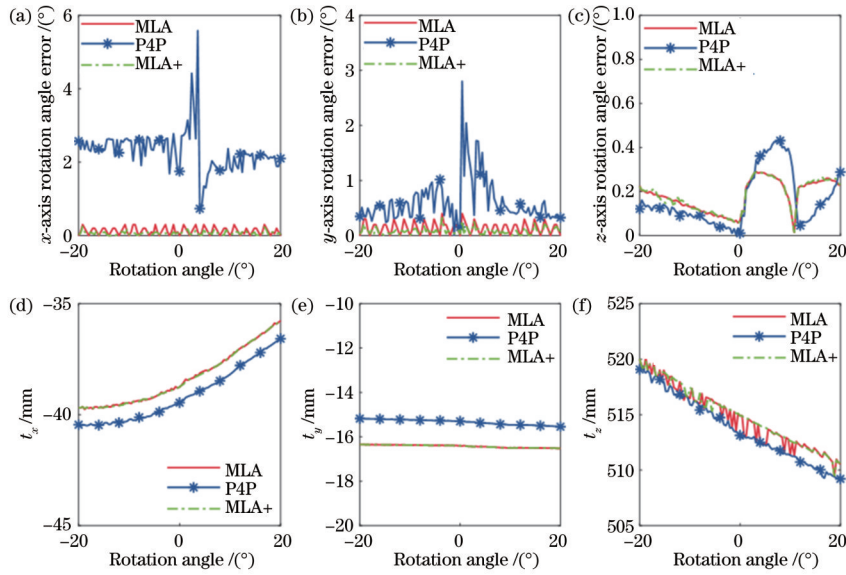


图 7 姿态测量结果。(a) x 轴旋转角度误差;(b) y 轴旋转角度误差;(c) z 轴旋转角度误差;(d) x 方向平移量估计结果;(e) y 方向平移量估计结果;(f) z 方向平移量估计结果

Fig. 7 Pose measurement results. (a) x -axis rotation angle error; (b) y -axis rotation angle error; (c) z -axis rotation angle error; (d) estimation result of translation in x direction; (e) estimation result of translation in y direction; (f) estimation result of translation in z direction

表 1 不同方法旋转角平均测量误差对比

Table 1 Comparison of average measurement error of rotation angle by different methods unit: ($^{\circ}$)

Method	x axis	y axis
MLA+	0.0659	0.0787
MLA	0.1227	0.1284
P4P	2.3061	0.6373

表 2 OTSU法和最大信息熵法下旋转角平均测量误差对比

Table 2 Comparison of average measurement error of rotation angle by OSTU method and maximum information entropy method unit: ($^{\circ}$)

Method	x axis	y axis
OTSU	0.0659	0.0787
Maximum information entropy	0.1409	0.3985

表 3 两种灰度阈值分割方法下旋转角测量失效个数对比

Table 3 Comparison of failure number of rotation angle measurement by two gray threshold segmentation methods

Method	Condition	x axis	y axis
OTSU	Unweighted	0	0
	Weighted	0	0
Maximum information entropy	Unweighted	2	21
	Weighted	1	16

的权重减小,引起最终测量结果的劣化。

表 4 对比了不同阈值个数下 x 、 y 轴旋转角度的平均测量误差。可以看出,除了两个阈值下 x 轴旋转角的测量误差减小外,其他情况下多阈值的测量结果相对

单阈值均有劣化,因此在实践中对灰度向量使用单阈值进行二值化处理是合理的选择。

表 4 不同阈值个数下旋转角平均测量误差

Table 4 Average measurement error of rotation angle under different threshold number unit: ($^{\circ}$)

Threshold number	x axis	y axis
1	0.0659	0.0787
2	0.0545	0.0856
3	0.0733	0.0860
4	0.0707	0.0838

4.3 角度编码数据表的疏密程度

文献[11]中拍摄视角的范围设置为 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 间隔设置为 2° 。在获得 677 张原始图片后通过对灰度线性插值的方式将旋转角的间隔上采样为 0.5° 以获取更多的图像。本文拍摄视角范围设置为 $-20^{\circ} \sim 20^{\circ}$, 采用 0.5° 的旋转角间隔进行拍摄, 获取的原始图片数量大约是文献[11]的 10 倍, 旋转角度的估计精度也有大幅提升。二者的 x 、 y 轴旋转角的平均测量误差对比如表 5 所示。

表 5 密集编码法和线性插值法下旋转角平均测量误差对比

Table 5 Comparison of average measurement error of rotation angle by dense encoding method and linear interpolation method unit: ($^{\circ}$)

Method	x axis	y axis
Dense encoding (ours)	0.0659	0.0787
Linear interpolation	0.4880	0.4690

4.4 微图形阵列的单元尺寸和拍摄视角间隔选择

微透镜阵列显示效果的变化频率随微图形阵列频率的提升而提升,可以通过减小微图形间隔的方式缩小旋转角的编码尺度。然而,由于微透镜阵列制造过程和标记的装配中存在误差,故实际上微图形阵列摆放的位置并不恰好在微透镜阵列的焦平面位置处。此时,微透镜阵列的聚焦区域并不是一个点而是一小片区域,最终的显示效果也是对该区域的放大。

本文通过改变拍摄视角对旋转角度进行编码,针对拍摄视角间隔的选择,本文进行了实验。表6所示为不同视角间隔下状态向量间平均汉明距离的变化。可以看出,随着拍摄视角间隔的增加,相邻视角两个状态向量的汉明距离呈现增加趋势。在理想情况下,0.1°即可作为可编码的最小角度间隔,较小的汉明距离变化可能是测量过程中的噪声导致某些子透镜状态突变引起的。此外,针对相同的视角范围,编码角度的间隔越小,照片拍摄的时间会明显增加。

表6 不同角度间隔下平均汉明距离

Table 6 Average Hamming distance at different angle intervals unit: (°)

Angle interval	<i>x</i> axis	<i>y</i> axis
0.1	3.58	3.10
0.2	7.04	6.10
0.3	10.51	9.08
0.4	13.92	11.98
0.5	17.43	14.83

5 结 论

提出了一种基于微透镜阵列的视觉标记。通过微透镜阵列对随机微图形阵列的动态成像实现了高密度的空间角度编码,通过最小化观测图像编码与基准角度间的汉明距离实现了高精度的角度测量。同时,利用最邻近点联合加权的数据融合方式进一步提升了所提方法的角度测量精度。实验表明,所提方法在*x*、*y*坐标轴上的旋转角测量平均误差小于0.08°,测量精度相较传统视觉标记法实现了35倍的大幅提升。未来的研究工作将继续探索影响微透镜阵列视觉编码的限制因素,拓展其应用范围并在机器人位姿估计和工业装配等实际场景中进行应用。

参 考 文 献

- [1] 党宏社, 陆馨蕊, 孙俊龙, 等. 基于视觉的取药机器人系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(2): 0210009.
Dang H S, Lu X R, Sun J L, et al. Design of vision-based drug-grabbing robot system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(2): 0210009.
- [2] 李志宇, 林嘉睿, 孙岩标, 等. 一种基于线结构光传感器的圆位姿测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1512004.
Li Z Y, Lin J R, Sun Y B, et al. A method for

measuring circular pose based on line structured light sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1512004.

- [3] 吴军, 李鑫, 刘少禹, 等. 基于后方定位的飞机蒙皮损伤视觉检测全局三维重建方法[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1115002.
Wu J, Li X, Liu S Y, et al. Global three-dimensional reconstruction method for visual detection of aircraft skin damage based on rear positioning[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1115002.
- [4] 李航宇, 张志龙, 李楚为, 等. 基于视觉的目标位姿估计综述[C]//第七届高分辨率对地观测学术年会论文集. 北京: 高分辨率对地观测学术年会, 2020: 635-648.
Li H Y, Zhang Z L, Li C W, et al. Overview of vision-based target pose estimation[C]//The 7th China High Resolution Earth Observation Conference (CHREOC). Beijing: China High Resolution Earth Observation Conference, 2020: 635-648.
- [5] Kato H, Billinghurst M. Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system[C]//Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, October 20-21, 1999, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 1999: 85-94.
- [6] Fiala M. ARTag, a fiducial marker system using digital techniques[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 20-25, 2005, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2005: 590-596.
- [7] Zhang X, Fronz S, Navab N. Visual marker detection and decoding in AR systems: a comparative study[C]//Proceedings of International Symposium on Mixed and Augmented Reality, October 1, 2002, Darmstadt, Germany. New York: IEEE Press, 2002: 97-106.
- [8] Tanaka H, Sumi Y, Matsumoto Y. A visual marker for precise pose estimation based on lenticular lenses[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 14-18, 2012, Saint Paul, MN, USA. New York: IEEE Press, 2012: 5222-5227.
- [9] Tanaka H, Sumi Y, Matsumoto Y. A high-accuracy visual marker based on a microlens array[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 7-12, 2012, Vilamoura-Algarve, Portugal. New York: IEEE Press, 2012: 4192-4197.
- [10] Schillebeeckx I, Little J, Kelly B, et al. The geometry of colorful, lenticular fiducial markers[C]//International Conference on 3D Vision, October 19-22, 2015, Lyon, France. New York: IEEE Press, 2015: 487-499.
- [11] Schillebeeckx I, Pless R. Pose hashing with microlens arrays[M]//Leibe B, Matas J, Sebe N, et al. Computer vision-ECCV 2016. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2016, 9907: 600-614.
- [12] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 29(3): 273-285.
- [13] Mohan A, Woo G, Hiura S, et al. Bokode: imperceptible visual tags for camera based interaction

- from a distance[J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(3): 98.
- [14] Hamming R W. Error detecting and error correcting codes [J]. Bell System Technical Journal, 1950, 29(2): 147-160.
- [15] Gao X S, Hou X R, Tang J L, et al. Complete solution classification for the perspective-three-point problem[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(8): 930-943.
- [16] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [17] Sun C K, Zu Y H, Wang P. A new pose measurement method based on microlens arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11439: 114390F.
- [18] Shanno D F. Conditioning of quasi-Newton methods for function minimization[J]. Mathematics of Computation, 1970, 24(111): 647-656.