

文章编号: 1001-4888(2021)03-0299-10

光杠杆补充尺度因子的大视场 扫描式摄像测量方法^{*}

宁振飞¹, 于军昕¹, 马沁巍¹, 马少鹏²

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 摄像测量方法因具有全场、非接触和观测尺度易调节等优势, 在材料/结构运动/变形测量方面的应用越来越广泛, 但是该方法的观测范围和测量分辨率之间存在矛盾, 导致其在大视场测量应用下出现了观测精度不足的问题。本文发展了一种基于光杠杆补充尺度因子的扫描式摄像测量方法, 利用光杠杆放大扫描相机的运动参数, 将光斑几何位置改变作为补充方程, 确定扫描相机每一时刻下的精确位姿信息, 再通过多目立体视觉原理对被测目标进行三维重建。结果表明, 该方法能够准确求解扫描相机三维位姿参数, 在大视场条件下获得比双目测量更高的观测精度。

关键词: 摄像测量; 大视场测量; 扫描测量; 光杠杆; 位姿测量

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-20-261

0 引言

摄像测量方法, 是利用摄像机、照相机等采集设备对动态/静态景物或物体进行拍摄得到单帧或序列数字图像, 再应用数字图像处理分析等技术结合目标三维信息的求解算法, 对目标结构参数或运动参数进行测量和估计的一种方法^[1]。因该方法具有全场、非接触、观测尺度易调节等诸多优势^[2], 被广泛应用于航空航天^[3]、土木交通^[4]、机械船舶^[5]、体育运动^[6]等领域。在上述实际应用中, 存在许多大视场条件下高精度测量的需求, 如风电叶片变形测量^[7]、飞机机翼颤振测量^[8]和火箭箭体结构变形测量^[9]等。考虑到摄像测量所使用的图像采集器件的物理分辨率不能无限制地提升(有时还受到采集速度的限制), 摄像测量的测量分辨率和视场大小之间存在天然的矛盾, 限制了其在大视场条件下高精度测量需求的应用。为解决上述问题, 国内外研究者发展了阵列式摄像测量的方法。如使用多个相机组成采集系统, 通过空间拼接或融合的方式将其等效为一台更高分辨率的数字相机。东南大学邵新星等人用 5×5 的 CCD 阵列测量应变, 使分辨率达到 $1 \mu\epsilon$, 比单相机应变测量技术精度提高 $1 \sim 2$ 个量级^[10]。杜克大学用 98 片图像传感器拼接一台高达 10 亿像素的 AWARE-2 相机^[11], 美国 NASA 基于相机阵列研发了像素高达 40 亿的数字相机^[12]。但阵列式摄像测量需要解决相机同步触发采集、联合标定等问题, 同时成本较高。在对采集速度要求不高的一些应用中, 也可以使用时间上“拼接”的扫描式摄像测量技术^[13], 如 3D 人体扫描技术^[14]和利用线阵相机扫描实现三维重建等^[15], 该方法仅使用 1 台相机就能完成测量, 可以大大降低测量系统的复杂性。在三维测量应用中, 相机需要时刻改变自身的位置, 测量结果如要统一在一个坐标系下, 就必须实时获取相机相对于被测物所在坐标系的位置姿态信息, 而测量精度极大程度上依赖于上述位置姿态的测量精度。

^{*} 收稿日期: 2020-12-29; 修回日期: 2021-01-20

通信作者: 马沁巍(1983—), 男, 博士研究生, 高级实验师。主要研究领域: 光测实验力学。Email: maqw@bit.edu.cn

相机位姿的实时测量,一般有两类方式:第一类是使用其他传感器测量相机的位姿,如 IMU 惯导融合^[16]或伺服机构自带传感器^[17];前者使用 IMU 惯导(加速度计和陀螺仪)与相机固连,通过坐标系融合的方式获取相机实时位姿,但传感器零漂导致的累计误差会严重影响位姿测量精度;后者使用伺服机构精确控制相机平移或转动,通过伺服机构自身的传感器(如转台通过光电编码器测量转动角度)解算扫描相机每一帧对应的位姿信息,但加工误差和机械振荡等同样会对扫描相机位姿的获取造成误差,最终都会影响测量精度。第二类是视觉方法:包括控制点标定法^[18,19]以及相机链路法^[20]。控制点标定法需要在视场中布置大量的已知三维世界坐标(或相互位置关系)的标志点,通过对应点的三维世界坐标和像素坐标,结合成像方程解算出相机位姿,如“P4P”算法^[21-23]和本质矩阵算法^[24,25]。控制点标定法在相机扫描技术中,常因为每一时刻相机扫描获得的数字图片之间时间间隔小,标志点像素变化小,引起的误差较大。相机链路法是在扫描相机上安装靶标,采用另外一台固定视角相机来观察扫描相机的位姿变化,在此方法中,如希望实现扫描相机位姿的高精度测量,则需要扫描相机及附着标志物在固定视角相机中所占视场较大,这对于不断运动的扫描相机来讲显然难以满足要求。

综上,虽然扫描式三维摄像测量理论上可以很好地解决大视场高精度测量问题,但是受限于相机位姿的获取精度,在实际应用中仍面临着精度不足的问题。本研究提出了一种通过光杠杆补充位姿信息的扫描式摄像测量方法,利用激光束构成光杠杆放大扫描相机的位姿参数,通过使用激光杠杆在投影面上的几何位置移动量作为补充方程求解运动尺度因子,对扫描相机的位姿进行高精度解算,解决了扫描相机位姿高精度测量的问题。

1 方法原理

1.1 扫描式摄像测量原理

基于时间上“拼接”的扫描式摄像测量方法的原理是将大范围目标视场分割,不同时刻下的相机分别对目标视场中的小区域单独成像,获取高分辨率图像 I_n ,如图 1 所示。

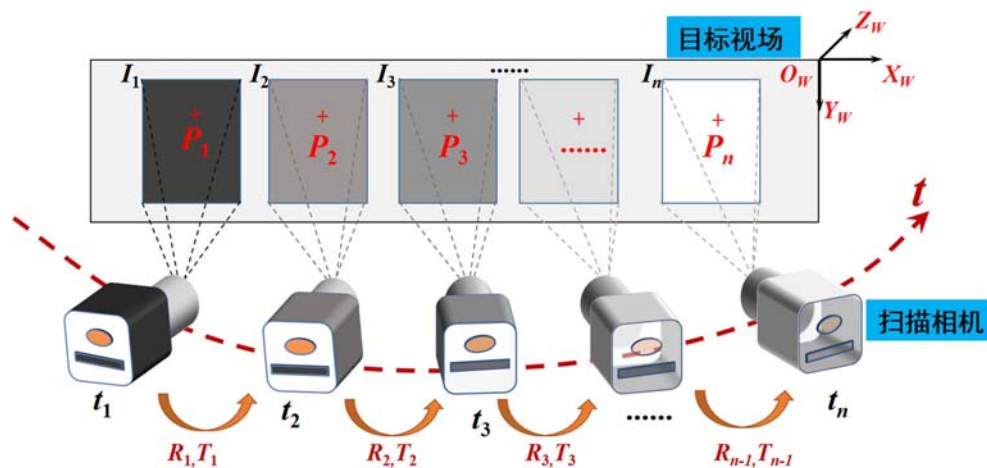


图 1 扫描式摄像测量方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scanning camera measurement method

摄像测量的分辨率通常与测量区域(L)、相机图像分辨率(N)和算法性能(K)有关:测量区域越小,图像分辨率越大,算法的分辨性能越好,误差(δ)越小,即摄像测量方法的性能越好。对于固定尺寸大小的被测物,通过相机扫描,以小视场逐步覆盖目标视场,可以同时保证大视场和高测量分辨率。

在图 1 所示的扫描式摄像测量中,扫描相机时刻改变自身的位置,相机坐标系也随之改变,导致测量结果无法统一到同一个世界坐标系下。若想统一坐标系,必须知道每一时刻下相机坐标相对于世界坐标系(设为基准)的位置和姿态(由旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和平移向量 $\mathbf{T}$ 表示)。视场中的目标点 P_n 的世界坐标设为 $[X_n, Y_n, Z_n]$,则该坐标与对应点像素坐标 $[x_n, y_n]$ 间的关系可由式(1)描述。三维测量精度极大程度上依赖于相机坐标相对于基准世界坐标系的旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和平移向量 $\mathbf{T}$ 。

$$[x_n, y_n] = f(X_n, Y_n, Z_n, \mathbf{R}, \mathbf{T}) \quad (1)$$

式中: x_n, y_n 表示目标点像素坐标; $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{T}$ 分别表示相机坐标相对于基准世界坐标系的旋转矩阵和平移向量; f 表示空间成像关系方程(如小孔成像方程)。

为了求解相机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和平移向量 $\mathbf{T}$, 引入本质矩阵 $\mathbf{E}$ 的概念, $\mathbf{E} = \mathbf{R}\mathbf{S}$, 其中 $\mathbf{S}$ 为平移向量 $\mathbf{T}$ 的反对称矩阵, 如式(2)所示。

$$\mathbf{S} = [\mathbf{T}]_x = \begin{bmatrix} 0 & -T_z & T_y \\ T_z & 0 & -T_x \\ -T_y & T_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由此, 相机位姿矩阵求解就变成了本质矩阵 $\mathbf{E}$ 的求解。在相差一个尺度因子的条件下, 根据对极几何约束, 使用归一化八点法结合相机内参最少只需要 8 个匹配点即可求解出本质矩阵 $\mathbf{E}$, 如式(3)、式(4)所示。得到本质矩阵后, 按照式(5)~(7), 对其进行奇异值分解即可得到旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和平移向量的反对称矩阵 $[\mathbf{T}]_x$ 。从 $[\mathbf{T}]_x$ 中提取出缺少尺度因子的平移向量, 记作 $\mathbf{T}_0$, 如式(8)所示。

$$p_2^T \mathbf{F} p_1 = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{A}^T \mathbf{F} \mathbf{A} \quad (4)$$

式(3)中 p_1 是运动前空间中的点在相机上的投影点像素坐标; p_2 是运动后在相机上对应的投影点像素坐标; $\mathbf{F}$ 是基础矩阵, 是对极几何的代数表示。式(4)中 $\mathbf{A}$ 表示扫描相机的内参数矩阵。

$$\mathbf{E} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T \quad (5)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} 0 & -k & 0 \\ k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d \end{bmatrix} \mathbf{V}^T \quad (6)$$

式中: $k = \pm 1, d = \det(\mathbf{U})(\mathbf{V})$, 一般 $d = \pm 1$, 可以根据文献[25]判断 $\mathbf{R}$ 的两个可能值的正确解。

$$[\mathbf{T}]_x = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{E} \quad (7)$$

$$\mathbf{T}_0 = [T_{x0} \quad T_{y0} \quad T_{z0}]^T = [[\mathbf{T}]_x(3,2) \quad [\mathbf{T}]_x(1,3) \quad [\mathbf{T}]_x(2,1)]^T \quad (8)$$

1.2 光杠杆法补充尺度因子

1.1 中获得了缺少尺度因子的平移向量 $\mathbf{T}_0$, 为了补充缺少的尺度因子, 本文发展了基于光杠杆信息补充的扫描式摄像测量方法, 如图 2 所示。该方法在实施时, 需要布置被测目标、扫描相机、固定相机、光杠杆和激光投影面。光杠杆由 3 个激光器发射的激光束组成, 激光器的布置如图 3 所示: 首先认为相机靶面与相机后表面平行, 将一个激光器固定在相机上表面中间位置且与相机后表面垂直, 使得激光束 L_B 沿相机坐标系 Z_C 轴射出。另外两个激光器分别平行固定于相机两侧并与相机坐标系 Z_C 轴形成一定夹角 θ (小于 90°), 使得激光束 L_A, L_C 朝相机后表面方向斜向下射出。由此, L_A, L_B 与 L_C 三束激光在激光投影面上投射出 3 个激光斑点, 组成 $\triangle ABC$ 。

扫描相机 C_1 移动, 获取被测物或被测场景的一系列图像, 从图像中提取同名点, 获得基本矩阵和本质矩阵。与其固连的光杠杆激光束也随之移动, 投影到墙面上的激光斑点发生几何位置改变。固定相机 C_2 调整好位置, 提前标定出基准站成像平面和激光投影面之间的二维相对关系, 也就是建立固定相机图像平面和墙面的映射(可以调整固定相机位置和朝向, 使之与墙面正对应, 即激光投影面与相机光轴垂直, 简化成二维平面测量), 并在激光投影面上建立世界坐标系 $O-X_W Y_W Z_W$ 。将采集到的激光斑点几何位置改变量作为补充方程, 结合本质矩阵解出扫描相机每一时刻下的位置和姿态。最后利用扫描相机的位姿信息和采集到的被测目标像素坐标进行三维重建, 获取大视场被测目标的形貌、变形和位姿等信息。

当扫描相机对被测物扫描过程中, 一般作六自由度运动, 也就是平移加旋转, 激光投影面上激光斑点 $\triangle ABC$ 的几何位置移动量由平移和旋转共同决定。为了求解相应的平移向量的尺度因子, 首先计算出旋转产生的激光斑点几何位置改变量。以激光斑点 B 为例说明在发生旋转时, 斑点在 X_W 方向上改变量 δx_{B1} 的求解过程, 如式(9)所示。

$$\begin{bmatrix} \delta x_z \\ \delta y_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x_i - \delta x_{il} \\ \delta y_i - \delta y_{il} \end{bmatrix} \quad (11)$$

然后,建立扫描相机平移所引起的激光斑点几何位置偏移量 $(\delta x_z, \delta y_z)$ 与相机平移向量 $\mathbf{T}_w$ 之间的线性关系,如式(12)所示,即可利用最小二乘法求解世界坐标系 $O-X_wY_wZ_w$ 下相机平移向量 $\mathbf{T}_w = [T_{xw}, T_{yw}, T_{zw}]$ 。再利用向量 $\mathbf{T}_w$ 的二范数求得比例尺度因子 K_0 ,从而转换成相机坐标系 $O-X_cY_cZ_c$ 中的平移向量 $\mathbf{T}$,如式(13)所示。

$$\begin{bmatrix} d & 0 & 0 \\ 0 & d & -d\tan\theta \\ d & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 \\ d & 0 & 0 \\ 0 & d & -d\tan\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{xw} \\ T_{yw} \\ T_{zw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x_{A2} \\ \delta y_{A2} \\ \delta x_{B2} \\ \delta y_{B2} \\ \delta x_{C2} \\ \delta y_{C2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: d 为表征像素和实际物理尺寸的物面分辨率; θ 为 L_A 、 L_C 激光束与 L_B 激光束所在平面之间的夹角。

$$\|T_{xw}, T_{yw}, T_{zw}\|_2 = K_0 \times \|T_{x0}, T_{y0}, T_{z0}\|_2 \quad (13)$$

求得尺度因子 K_0 后,则扫描相机每一帧之间对应的相机的平移向量 $\mathbf{T}$ 即可用式(14)精确获取。

$$\mathbf{T} = K_0 \times [T_{x0} \quad T_{y0} \quad T_{z0}] \quad (14)$$

基于以上方法,扫描相机的位姿信息可以准确获取。最后利用立体视觉算法即可对目标视场内的结构形貌、变形和位姿等信息进行三维求解。值得一提的是,如若事先已知扫描相机只做平移三自由度运动,则可以直接利用式(12)~(14)进行快速求解,这是基于此方法的一种特殊情况,旨在用于方法的快速验证和扫描相机做平移运动情况下的方法应用。

2 实验

2.1 验证实验

为了验证本文方法能够对扫描相机的位置和姿态进行准确求解,设计了一个验证性实验,使用搭载到机械臂上的扫描相机重建已知尺寸的靶标空间距离,对比测量结果以验证本文方法的可行性。

将1台数字相机(型号:XIMEA-MQ013CG;镜头焦距4mm;幅面大小1024pixel×1280pixel)固连在一个机械臂上(型号:尔智AR5协作机械臂;绝对定位精度±0.3mm)作为扫描相机 C_1 ,将另1台型号与参数相同的数字相机固定到桌面作为固定相机 C_2 。编程控制机械臂平移(每次沿机械臂自带工具坐标系 X 方向平移20mm,移动次数22次)。将一个11×13的棋盘格(每一小格物理尺寸为25mm×25mm)作为被测物,获取被测物在相机运动过程中的一系列图像,实验布置如图4所示。

机械臂平移过程中,控制面板会显示机械臂工具坐标系的平移和旋转,将该参数作为扫描相机的位置和姿态信息,此为第一种相机位姿获取方式;同时,利用经典的“P4P”单目位姿估计方法提取棋盘格4个以上的共面特征点,结合实际空间位置也可解算出扫描相机每一帧的位姿信息,此为第二种相机位姿获取方式;此外,使用本文方法处理图像数据得到扫描相机的位置和姿态信息,此为第三种相机位姿获取方式。分别用以上3种方式求解得到的扫描相机位置和姿态参数对棋盘格对角线上角点之间的距离进行三维立体重建(标准值为 $25\sqrt{2}$ mm),重建结果与标准值之间的误差如图5所示。

根据图5重建结果,第一种扫描相机位姿获取方式下,重建靶标距离的平均绝对误差为1.12mm,对应像素误差为5.6pixel,误差较大,无法应用在测量领域;第二种扫描相机位姿获取方式下,重建靶标距离的平均绝对误差为0.63mm,对应像素误差为3.2pixel,误差也较大;而使用本文提出的基于光杠杆补充尺度因子的扫描式测量方法获取相机位姿后,重建靶标距离的平均绝对误差为0.07mm,对应像素误差为0.4pixel,误差较小。

以上结果证明:在3种方式中,由机械臂示数三维重建误差最大,“P4P”单目算法次之,本文方法误

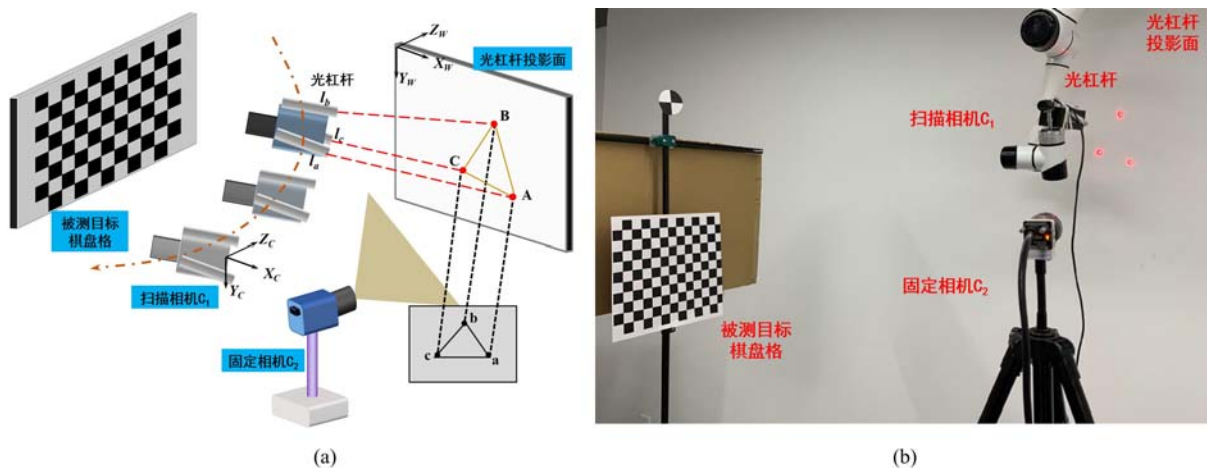


图 4 实验布置:(a)实验示意图,(b)实验现场布置图

Fig. 4 Experimental layout: (a) experimental schematic diagram; (b) experimental site layout diagram

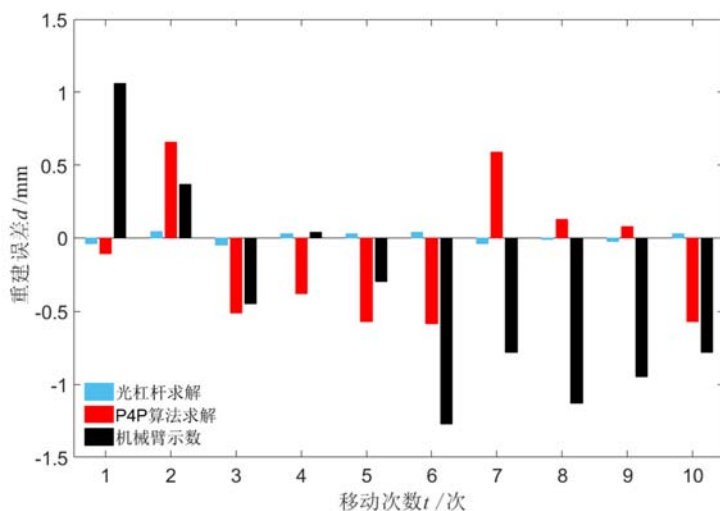


图 5 3 种方式对固定距离重建对比

Fig. 5 Comparison of three methods for fixed distance reconstruction

差最小。为了探究产生以上结果的原因,利用 3 种方式求解获得的每一时刻下相机位姿参数进行了对比,结果如图 6 所示。

由图 6(a)可知,机械臂控制扫描相机做平移运动,使用机械臂示数、光杠杆补充方法、“P4P”算法 3 种方式重建出的相机平移改变量均值分别为:19.98mm、20.73mm、21.01mm;标准差分别为:0.34mm、0.31mm、0.76mm。结果证明,扫描相机的实际运动并不稳定(并非程序设置的 20.00mm),机械臂运动过程中可能存在机械震荡和定位误差。另外由图 6(b)~(d)可知,扫描相机在平移运动时,产生微小旋转,并非机械臂面板示数恒等于 0。对比机械臂示数、光杠杆补充方法、“P4P”算法 3 种方式重建出的相机转角改变量均值分别为 0° 、 0.29° 、 0.60° ;标准差分别为 0° 、 0.07° 、 0.13° 。结果证明,“P4P”算法稳定性较差,鲁棒性较低。

上述实验表明,相机搭载到机械臂上,因机械臂运动过程中存在机械震荡和定位误差,不能直接利用机械臂面板示数;且传统的单目“P4P”位姿估计方法利用棋盘格上有限的控制点求解,测量稳定性差。使用本文提出的基于光杠杆补充的扫描式测量方法,能够对扫描相机每一时刻的位置和姿态精确求解,且能高精度地重建三维空间距离。

2.2 应用实验

为了验证本方法的实用性,本文开展了一个应用实验,对某卫星模型的微小部件物理尺寸进行三维

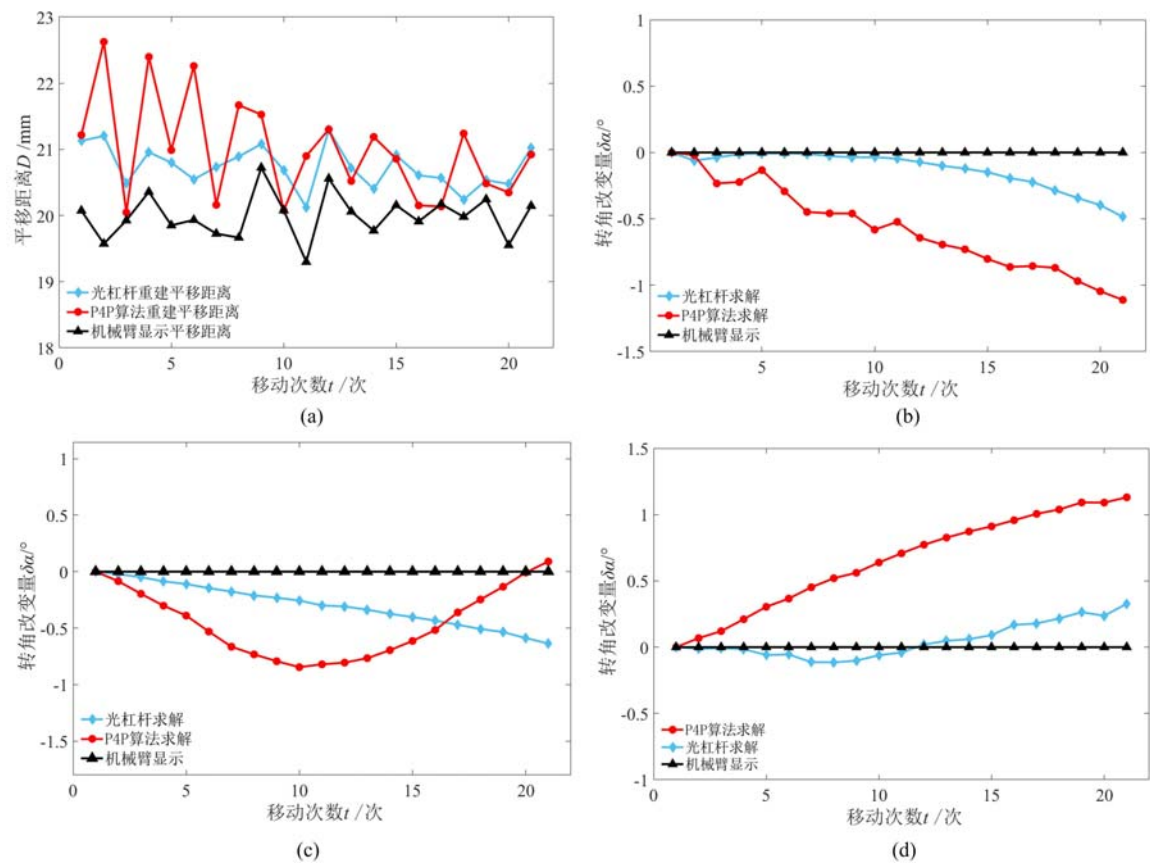


图 6 3 种方式重建可动传递站相机位姿变化量：(a) 平移距离；(b) 转角 A_X ；(c) 转角 A_Y ；(d) 转角 A_Z
Fig. 6 Three ways to reconstruct the pose change of the movable transfer station camera: (a) translation distance; (b) rotation angle A_X ; (c) rotation angle A_Y ; (d) rotation angle A_Z

测量,探究该方法的测量准确性和应用有效性。使用本文方法对一个物理尺寸约 $2\text{m}\times0.5\text{m}\times0.5\text{m}$ 的卫星模型进行扫描观测,扫描相机视场大小约为 $200\text{mm}\times200\text{mm}$,为了保证相邻视场内有公共控制点,扫描相机移动 20 次以覆盖全视场;同时假设一套双目立体视觉系统,观测视场约 $3000\text{mm}\times3000\text{mm}$,同时对其进行测量。分别使用两种方法对卫星模型上的某一微小部件(三维尺寸约 $3\text{mm}\times3\text{mm}\times2\text{mm}$)的物理尺寸进行三维重建与真实值对比。实验中用到的相机型号均是 XIMEA-MQ013CG,镜头焦距 4mm ,幅面大小 $1024\text{pixel}\times1280\text{pixel}$ 。实验布置如图 7 所示。

对图 7 所示卫星模型中一个微小部件的三维尺寸进行测量,标准值由游标卡尺(50 分度)给出,为 2.52mm 。利用双目立体视觉测量系统对该卫星模型进行三维重建,双目测量系统观测视场约 $3000\text{mm}\times3000\text{mm}$,测量误差为 1.06mm ,相对应的像素误差为 0.35pixel 。使用本文方法对该卫星模型视场扫描观测,视场大小约 $200\text{mm}\times200\text{mm}$,测量误差为 0.09mm ,相对应的像素误差为 0.46pixel ,结果对比如表 1 所示。

表 1 两种方式对大视场微小部件重建结果对比表

Tab. 1 Comparison table of the reconstruction results of the two methods for the large field of view small parts

标准值 D_0/mm	测量方式	视场大小 L/mm	测量值 D_1/mm	绝对误差 D_2/mm	像素误差 e/pixel
2.52	双目测量	约 3000	3.58	1.06	0.35
2.52	单目扫描	约 200	2.44	0.09	0.46

对比表 1 结果可知,双目立体视觉测量方法在对约 3m 大小的视场内,测量绝对误差为 mm 量级,像素误差为亚像素量级;而使用基于光杠杆补充尺度因子的扫描式摄像测量方法,扫描相机的视场大小

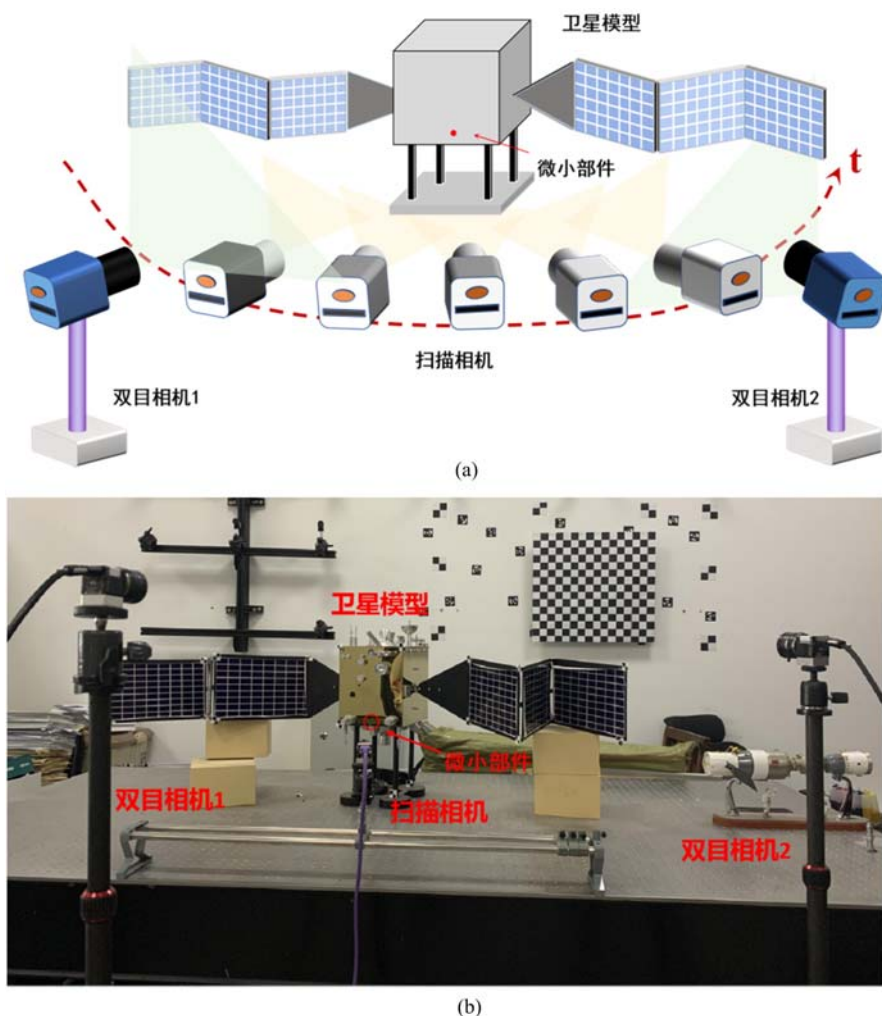


图 7 实验布置: (a)应用实验示意图; (b)应用实验相机布置

Fig. 7 Experiment layout: (a) application experiment schematic diagram;
(b) application experiment camera layout

约 200mm, 测量绝对误差在亚毫米量级, 像素误差为亚像素量级。根据前文所述, 基于两种方式使用的相机都是相同的, 即图像幅像素数 (N) 固定的情况下, 对于大视场下微小部件的测量, 基于光杠杆补充尺度因子的扫描式摄像测量方法比双目立体视觉方法视场 (L) 更小, 测量精度更高, 是一种解决视场大小和分辨率矛盾的有效方式。

3 结论

为解决摄像测量方法观测范围与测量分辨率之间的矛盾, 本文发展了一种基于光杠杆补充尺度因子的扫描式摄像测量方法。通过光杠杆放大的方式, 提升扫描相机在运动过程中位姿参数的获取精度。验证实验和实际应用实验均证明了该方法既能对扫描相机进行精准定姿态和定位, 也能对大视场微小部件进行测量。本文方法与双目立体视觉测量方法相比, 测量结果同处于亚像素误差量级。同时由于本文方法可通过扫描的方式在小视场范围下进行测量, 其测量分辨率在大视场范围下要优于双目立体视觉的测量分辨率, 因此, 本文提出的方法可应用于大型结构工程测量, 也可对航天探测等高精尖测量任务给出新的探索思路。

参考文献:

- [1] 于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009 (YU Qifeng, SHANG Yang.

- Research on the principle and application of photogrammetry[M]. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese))
- [2] 于起峰. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002 (YU Qifeng. Image-based precision measurement and motion measurement[M]. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese))
- [3] D'Amico S, Benn M, Jorgensen J L. Pose estimation of an uncooperative spacecraft from actual space imagery[J]. International Journal of Space Science & Engineering, 2014, 2(2):171—189.
- [4] Wang X, Yu H, Feng D. Pose estimation in runway end safety area using geometry structure features[J]. The Aeronautical Journal, 2016, 120(1226):675—691.
- [5] 孙聪, 刘海波, 陈圣义, 等. 基于摄像测量原理的船体垂向变形测量半实物仿真实验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(5):599—606 (SUN Cong, LIU Haibo, CHEN Shenyi, et al. Research on hardware in the loop simulation experiment of hull vertical deformation measurement based on camera measurement principle[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(5):599—606 (in Chinese))
- [6] 吴延禧, 刘宇. 运动技术扫描摄影测量方法的研究[J]. 中国体育科技, 1987(10):1—12 (WU Yanxi, LIU Yu. Research on sports technology scanning photogrammetry method[J]. China Sports Science and Technology, 1987 (10):1—12 (in Chinese))
- [7] 朱小军, 陈雪峰, 翟智, 等. 复合材料风电叶片细观失效准则及其损伤演化[J]. 机械工程学报, 2014, 50(11):17—22 (ZHU Xiaojun, CHEN Xuefeng, ZHAI Zhi, et al. Meso failure criterion and damage evolution of composite wind turbine blades[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11):17—22 (in Chinese))
- [8] 于之靖, 花贞, 王烁, 等. 飞机机翼颤振特性测试仿真研究[J]. 中国民航大学学报, 2017, 35(6):26—30 (YU Zhijing, HUA Zhen, WANG Shuo, et al. Simulation research on test of airplane wing flutter characteristics[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2017, 35(6):26—30 (in Chinese))
- [9] 郑正路, 徐振亮, 汪小卫, 等. 可重复使用运载火箭箭体结构检测及维护方法研究[J]. 航天制造技术, 2016, 1(1):68—70 (ZHENG Zhenglu, XU Zhenliang, WANG Xiaowei, et al. Research on the structure inspection and maintenance method of reusable launch vehicle[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016, 1(1):68—70 (in Chinese))
- [10] Shao X X, Chen Z N, Dai X J, et al. Camera array-based digital image correlation for high-resolution strain measurement[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(10):105—110.
- [11] Golish D R, Vera E M, Kelly K J, et al. Development of a scalable image formation pipeline for multiscale gigapixel photography[J]. Optics Express, 2012, 20(20):22048—22062.
- [12] Seabroke G M, Prod'Homme T, Murray N J, et al. Digging supplementary buried channels: investigating the notch architecture within the CCD pixels on ESA's Gaia satellite[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 430(4):3155—3170.
- [13] 徐进军, 王海城, 罗喻真, 等. 基于三维激光扫描的滑坡变形监测与数据处理[J]. 岩土力学, 2010, 31(7):2188—2191, 2196 (XU Jinjun, WANG Haicheng, LUO Yuzhen, et al. Landslide deformation monitoring and data processing based on 3D laser scanning[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7):2188—2191, 2196 (in Chinese))
- [14] 刘烈金, 梁晋, 尤威, 等. 三维人体扫描系统的研究及其应用[J]. 中国工程机械学报, 2017, 15(1):27—30, 35 (LIU Liejin, LIANG Jin, YOU Wei, et al. Research and application of 3D human body scanning system[J]. Chinese Journal of Engineering Machinery, 2017, 15(1):27—30, 35 (in Chinese))
- [15] Sakuma S, Takahashi Y, Suzuki A, et al. Measuring vehicle speed at a license plate using a pair of linescan cameras[J]. Electronics & Communications in Japan, 2006, 89(10):33—45.
- [16] 潘林豪, 田福庆, 应文健, 等. 单目相机-IMU 外参自动标定与在线估计的视觉-惯导 SLAM[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6):56—67 (PAN Linhao, TIAN Fuqing, YING Wenjian, et al. Vision-inertial navigation SLAM for automatic calibration and online estimation of monocular camera-IMU external parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6):56—67 (in Chinese))
- [17] 于之靖, 李泽川, 李鑫, 等. 基于旋转平台的全空间单目光笔测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(23):89—97 (YU Zhijing, LI Zechuan, LI Xin, et al. Full-space monocular light pen measurement method based on rotating platform[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23):89—97 (in Chinese))

- [18] 狄红卫, 柴颖, 李逵. 一种快速双目视觉立体匹配算法[J]. 光学学报, 2009, 29(8):2180—2184 (DI Hongwei, CHAI Ying, LI Kui. A fast binocular vision stereo matching algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8):2180—2184 (in Chinese))
- [19] 熊雪菲, 尚洋. 基于双目视觉测量系统的编码标志点的检测与重建[J]. 实验力学, 2020, 35(5):771—780 (XIONG Xuefei, SHANG Yang. Detection and reconstruction of coding landmark points based on binocular vision measurement system[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(5):771—780 (in Chinese))
- [20] Yu Q F, Jiang G C, Fu S H, et al. Fold-ray videometrics method for the deformation measurement of nonintervisible large structures[J]. Applied Optics, 2009, 48(24):4683—4687.
- [21] Fishler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and auto-mated cartography[J]. Communications of the Association for Computing Machinery, 1981, 24(6):381—395.
- [22] Horaud R, Conio B, Le Boulleux O, et al. An analytic solution for the perspective 4-point problem[J]. Computer Vision Graphics & Image Processing, 1989, 47(1):33—44.
- [23] 朱帆, 于芳苏, 吴易明, 等. P4P 法相机姿态标定精度分析[J]. 光学学报, 2018, 38(11):241—249 (ZHU Fan, YU Fangsu, WU Yiming, et al. Analysis of camera attitude calibration accuracy based on P4P method [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11):241—249 (in Chinese))
- [24] Hartley R I, Hartley I R. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras[C] // European Conference on Computer Vision. Springer-Verlag, 1992, 588:579—587.
- [25] 于洪川, 唐泽, 唐龙. 运动参数估计与图像校正[J]. 模式识别与人工智能, 2003, 16(1):22—27 (YU Hongchuan, TANG Ze, TANG Long. Motion parameter estimation and image correction[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2003, 16(1):22—27 (in Chinese))

Large field of view scanning photogrammetry method with optical lever supplementing scale factor

NING Zhenfei¹, YU Junxin¹, MA Qinwei¹, MA Shaopeng²

(1. School of Astronautics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The photogrammetry method has the advantages of full field, non-contact and easy adjustment of the observation scale, so it is more and more widely used in material/structure movement/deformation measurements. However, the contradiction between the observation range and the measurement resolution of this method leads to the problem of insufficient observation accuracy in the large field of view measurement applications. In this work, a scanning photogrammetry method is developed based on the optical lever supplementary scale factor. The optical lever is used to amplify the motion parameters of the scanning camera, and the geometric position change of the spot is used as a supplementary equation to determine the precise pose information of the scanning camera at each moment. Then the principle of multi-vision is used to reconstruct the measured target in three dimensions. The results show that the method can accurately solve the three-dimensional pose parameters of the scanning camera, and obtain higher observation accuracy than that in binocular measurements under the condition of large field of view.

Keywords: photogrammetry; large field of view measurement; scanning measurement; optical lever; pose measurement