

文章编号: 1001-4888(2021)06-0735-11

绳索摆角高精度视觉测量系统的设计及其在悬吊式重力补偿系统中的应用^{*}

叶雪轲¹, 甘叔玮¹, 张小虎¹, 黄奕勇², 熊丹²

(1. 中山大学 航空航天学院, 广东广州 510006; 2. 军事科学院 国防科技创新研究院, 北京 150001)

摘要: 载人航天任务中, 需要建设地面模拟微重力环境, 用于航天员适应性训练。悬吊式重力补偿系统通过绳索悬吊受训者, 利用绳索拉力平衡重力, 模拟微重力环境。为保持绳索拉力与重力平衡, 必须在受训者运动过程中控制绳索方向与重力方向相同, 为此, 需要实时高精度测量绳索在运动过程中的微小摆角, 作为绳索方向控制系统的输入。本文设计实现了一种基于相机位姿估计的高精度绳索摆角实时测量系统, 系统由固定于绳索下端点的智能相机和固定于绳索上端点的标志架组成。运动过程中, 智能相机拍摄标志架, 实时提取其合作标志并解算相机与标志架的相对位姿, 进一步通过预先标定的标志架与绳索上端点、相机与绳索下端点的安装关系计算绳索上下端点的空间坐标, 最终解算得到高精度的绳索摆角。实验结果表明系统能够以 20 Hz 的测量频率得到误差在 0.05° 以内的绳索摆角数据。该系统结构紧凑, 自主性强, 可推广应用于工业控制和科研实验中的小摆角测量。

关键词: 悬吊式重力补偿系统; 摆角测量; 相机位姿估计

中图分类号: V19

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-20-263

0 引言

太空环境与地面环境有着极大的区别, 最为明显的就是太空中的微重力环境^[1], 微重力环境会对航天员的生理、心理和活动能力造成诸多负面影响, 如何适应太空环境是载人航天任务的巨大挑战。各载人航天大国采用了抛物线飞行、中性浮力水池、悬吊式重力补偿系统等微重力模拟技术^[2], 以提高航天员对微重力环境的适应性。

抛物线机动飞行可短暂模拟空间微重力环境, 常应用于航天员失重运动学研究、航天设备失重工况实验等, 但其单次模拟持续时间短, 成本较高^[3]。浮力法利用浮力平衡重力, 多用于航天员舱外活动训练, 需要较高的保障条件, 且受液体阻力影响, 实验仿真程度受限^[4]。悬吊法利用绳索张力平衡人体所受重力, 可用于航天员微重力环境适应性训练, 也可用于空间机构重力卸载, 但其系统较为复杂, 还有较多改进空间^[5]。随着空间站的建设, 以及空间、地外星系长期驻留的需要, 悬吊式重力补偿系统模拟空间微重力环境展现出其模拟时间长、仿真度高、应用面广等优势, 成为未来载人微重力模拟技术的发展方向^[6,7]。

20 世纪 60 年代, NASA(National Aeronautics and Space Administration, 美国航空航天局)开始利用悬吊式重力补偿系统开展航天员空间微重力环境运动机能研究。最原始的系统是将航天员侧向倾斜

^{*} 收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-02-24

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF0300805)资助

通信作者: 张小虎(1973—), 男, 博士, 教授。主要研究方向: 飞行器图像感知技术。Email: zhangxiaohu@mail.sysu.edu.cn

悬吊,航天员侧向站立在斜坡上,仅有斜坡面法向量一个自由度,体感极差^[8]。后续系统提高到两个自由度,航天员可前后移动和跳跃^[9,10]。加利福尼亚大学伯克利分校研制的微重力模拟器采用了不同的设计思路,航天员站立在跑步机上,绳索通过骨盆吊带在身体重心附近施加恒定向上的力,航天员可完成在模拟微重力环境下的行走、奔跑等运动^[11]。主动悬吊式重力补偿系统通过驱动设备主动跟随航天员的位姿变化,以提升模拟效果。中国航天员科研训练中心研发的航天员舱外活动训练模拟器利用电机带动卷筒收放吊索实现竖直悬吊,弧形和径向气浮导轨实现最小阻尼水平运动,但这一系统附加了较大的惯量,可能会出现滞后或超调的情况,造成悬索摆动^[12]。NASA 研制的 POGO(Partial Gravity Simulator,微重力模拟器)通过气浮横梁实现前后运动,竖直单索采用主动气缸式恒拉力系统悬吊航天员,三轴旋转背架实现旋转,可提供 5 个自由度,大大提升了航天员悬吊的体感舒适度,但悬吊系统带来较大附加惯量的问题并未得到解决^[13]。ARGOS(Active Response Gravity Offload System,主动反应重力补偿系统)利用顶部行车主动跟随航天员移动,确保绳索张力与重力方向平行,主动恒拉力系统结合空气弹簧提供缓冲,三轴旋转背架实现旋转^[14],但其垂直与水平两个方向的控制系统都出现了系统快速反应能力不足等问题,导致了系统的不稳定并影响了微重力模拟的准确性^[1]。

本文将基于中国新一代主动悬吊式重力补偿系统的关键技术问题,绳索摆角高精度实时测量开展研究。现有绳索摆角测量系统主要有基于角编码器或倾角仪、基于激光自准直仪、基于工业相机三种方案。角编码器和倾角仪装置简单、测量精度高,但易受加速度的影响,不适用于运动场景^[15]。激光自准直仪可高精度测量角度,测量频率高,但存在可测量角度范围小,系统较为复杂的问题^[16]。工业相机结合摄像测量技术的测量方案具有测量精度高、系统简单、非接触测量等优点,是最适用于主动悬吊式重力补偿系统绳索摆角测量需求的测量方案^[17]。

本文设计实现了一种基于相机位姿估计的高精度绳索摆角实时测量系统。系统由固定于绳索下端的智能相机和固定于绳索上端点的标志架组成。运动过程中,智能相机拍摄标志架,实时提取其合作标志并解算相机与标志架的相对位姿,进一步通过预先标定的标志架与绳索上端点、相机与绳索下端点的安装关系计算绳索上下端点的空间坐标,最终解算得到高精度的绳索摆角。实验结果表明系统能够以 20Hz 的测量频率得到误差在 0.05° 以内的绳索摆角数据。本文设计实现的测量系统的优势:

- (1) 系统装置简单,仅依靠单目相机,测量过程中无需额外输入信息。
- (2) 摆角测量不受绳索上端点移动、绳索长度变化的影响。
- (3) 系统的测量精度高、延迟低、效率高。

1 系统设计

1.1 系统硬件设计

为降低系统复杂度,本系统采用单台智能相机,智能相机融合了图像采集和数据处理的功能。为避免额外引入绳索长度测量装置,本系统设计了立体结构的标志架,通过图像可直接得到智能相机相对于标志架的高精度位姿数据。智能相机安装于绳索下端,标志架安装于绳索上端,合理利用有限的空间,且避免标志架的质量给绳索摆角抑制带来不利影响。标志架上每个标志点处安装 810nm 红外光源,相机镜头处安装相同波段的窄带滤光片,图像中仅保留标志点图案,降低了标志点识别复杂度,提高了系统鲁棒性。

系统硬件组成如图 1 所示。标志架与行车固连,随行车一起运动,绳索由卷筒引出,绕 P_{up} 处定滑轮转向 90° ,从标志架中间穿过向下延伸,下端点与航天员固定装置连接。通过安装支架将智能相机固

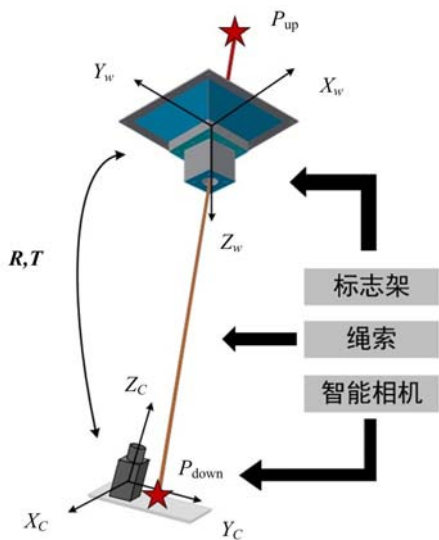


图 1 绳索摆角高精度视觉测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high-precision rope swing angle visual measurement system

定于绳索下端 P_{down} 处并调节配重使相机朝上拍摄。

智能相机选用凌华科技 NEON-1021, 搭载 EV76C570 图像传感器, 分辨率为 $1600\text{pixel} \times 1200\text{pixel}$, 内置英特尔凌动 E3845 处理器、32GB 存储空间, 安装 Windows7 操作系统。智能相机的供电和数据传输经由端子板实现, 其连接关系如图 2 所示。在系统安装、调试状态下, 智能相机可外接显示器和键盘鼠标实现便捷的操作, 如图 3 所示。在常态测量工作状态下, 端子板安装于行车处, 连接电源适配器并通过网口输出绳索摆角数据, 智能相机安装于绳索底端经沿绳索布设的数据线连接端子板。

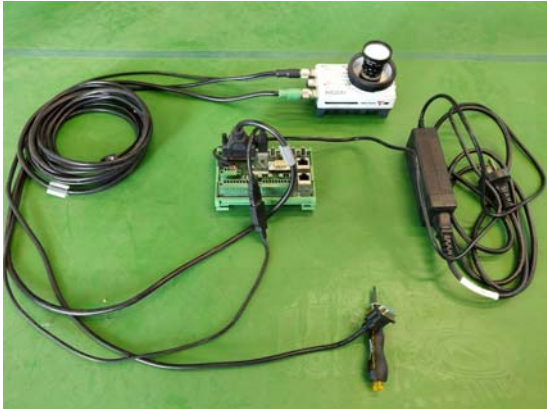


图 2 智能相机与端子板、电源适配器连接示意图
Fig. 2 Connection diagram of smart camera with terminal board and power adapter



图 3 智能相机安装、调试状态示意图
Fig. 3 Schematic diagram of smart camera installation and debugging status

镜头选用理光 FL-CC2514-2M, 焦距 25mm, 在 3m 视距下视场为 $857\text{mm} \times 643\text{mm}$, 可确保标志架完整地出现在视场中。智能相机安装于支架上, 并在对称位置安装配重块, 使静止状态下的标志架在视场中央。在绳索下端受重物拉力状态下, 可保证智能相机安装平面与绳索垂直, 即光轴与绳索处于近似平行状态, 在绳索摆动过程中标志架始终在智能相机视场内。智能相机常态测量工作状态如图 4 所示。

标志架整体为 6061 铝材质, 采用 CNC (Computer Numerical Control, 数控加工) 工艺, 高 200mm、长宽均为 360mm, 共 3 层台面各布置 4、8、9 个标志点。红外光源安装在标志架内壁, 通过标志架上的十字形孔透光。十字形孔长 15mm、宽 1mm, 在十字形孔上粘贴亚克力匀光片, 以确保图像中的十字图案亮度均匀。标志架成品送至广东省精密装备与制造技术重点实验室, 检测标志点位置精度和形状精度。检测设备为 WENZEL-LH56 三坐标测量仪, 测量精度为 0.005mm。标志架成品如图 5 所示。

1.2 绳索摆角测量模型

为方便理解, 本文定义坐标系如下:

(1) 相机坐标系 (X_C, Y_C, Z_C): 相机坐标系

原点取为相机光心, Z_C 轴与相机光轴重合, 取相机拍摄方向为正方向, X_C, Y_C 轴与图像像素坐标系的 x, y 轴平行。

(2) 世界坐标系 (X_W, Y_W, Z_W): 世界坐标系在使用全站仪标定标志架与绳索上端点、相机与绳索下端点的安装关系时建立。 Z_W 轴与铅垂线重合, 取竖直向上为正方向, X_W, Y_W 轴平行于水平面。

(3) 标志架坐标系 (X_F, Y_F, Z_F): 标志架坐标系在使用三坐标测量机测量标志架各标志点时建立。标志架各标志点的坐标均为在标志架坐标系下的坐标。



图 4 智能相机常态测量工作状态实物图
Fig. 4 Physical image of smart camera normal measurement working state



图 5 标志架实物图

Fig. 5 Sign frame physical map

如图 6 所示, 绳索由卷筒引出, 绕定滑轮转向 90° 后向下悬吊。定滑轮与绳索的分离点 P_1 为绳索上端点, 坐标为 $(X_{P_1}, Y_{P_1}, Z_{P_1})$, 绳索与航天员固定装置的连接点 P_2 为绳索下端点, 坐标为 $(X_{P_2}, Y_{P_2}, Z_{P_2})$ 。设 P_2 所在水平面与 P_1 的铅垂线的交点为 P_3 , 坐标为 $(X_{P_3}, Y_{P_3}, Z_{P_3})$, 有 $X_{P_3} = X_{P_1}$, $Y_{P_3} = Y_{P_1}$, $Z_{P_3} = Z_{P_2}$ 。以上坐标均为标志架坐标系下坐标。 P_1 与 P_2 的连线与铅垂线形成的夹角 θ 即为需要测量的绳索摆角。公式如下:

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\|P_1 P_3\|}{\|P_1 P_2\|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{Z_{P_1} - Z_{P_3}}{\sqrt{(X_{P_1} - X_{P_2})^2 + (Y_{P_1} - Y_{P_2})^2 + (Z_{P_1} - Z_{P_2})^2}} \right) \quad (1)$$

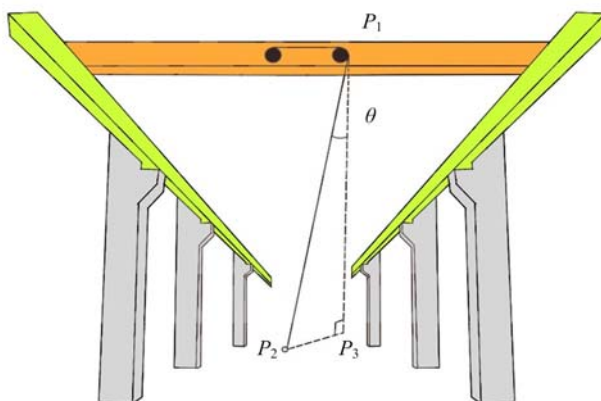


图 6 绳索摆角测量模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of rope swing angle measurement model

1.3 系统工作原理

在绳索摆动过程中, 标志架坐标系下安装在绳索下端点的相机的位置姿态会发生变化, 但绳索上端点在标志架坐标系下的坐标和绳索下端点在相机坐标系下的坐标不会发生改变。本系统采用相机位姿估计算法获得相机在标志架坐标系下的位姿数据, 进而通过相机不同的位姿解算绳索上下端点在标志架坐标系下的空间坐标, 获得实时的绳索摆角数据。系统工作原理如图 7 所示。系统工作流程如下:

- (1) 智能相机获取实时图像。
- (2) 利用目标亚像素定位算法获得标志架上各标志点在图像像素坐标系下的像素坐标。
- (3) 利用一一对应的标志点在标志架坐标系下的三维坐标和在图像像素坐标系下的像素坐标, 应用相机位姿估计算法, 获取相机坐标系到标志架坐标系的坐标转移矩阵 $[R, t]$ 。
- (4) 利用坐标转移矩阵 $[R, t]$, 结合绳索下端点在相机坐标系下的坐标, 计算绳索下端点在标志架坐标系下的坐标。

(5) 利用绳索上下端点在标志架坐标系下的坐标, 计算得到绳索摆角 θ 。

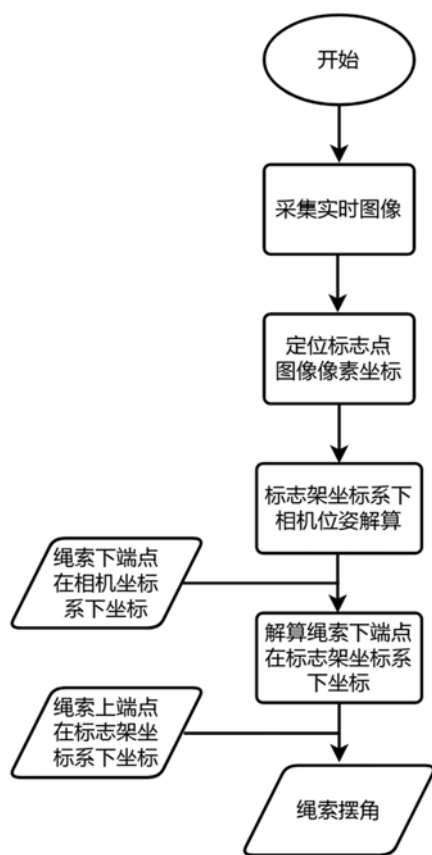


图 7 系统工作原理图

Fig. 7 System working principle diagram



图 8 待处理图像示例

Fig. 8 Examples of images to be processed

2 算法详细设计

2.1 图像目标亚像素定位

相机镜头上安装了 810nm 窄带滤光片, 因此图像中只有 21 个标志点的图案, 其中可能有 0 到 2 个标志点被遮挡。

从如图 8 的待处理图像中对标志点中心的位置进行亚像素定位。主要算法流程如图 9 所示。



图 9 目标亚像素定位算法流程图

Fig. 9 Feature extraction algorithm flowchart

通过图像二值转换, 可将大部分低灰度值噪声去除, 并降低后续处理计算量。设置连通域面积阈值为 50 个像素点, 即 80% 标志点图案成像的像素点数, 排除高灰度值的噪声像素, 余下的连通域为图像

目标。采用形心法对图像目标进行粗定位, 设目标形心为 (x_0, y_0) , 有 $x_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in S} i}{N}$, $y_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in S} j}{N}$, 其中 S 为目标连通域, N 为目标连通域像素数量。由此得到的定位精度为 1 个像素。

图像目标精定位采用数字相关亚像素定位算法。在实际图像中将标志点图案按正方形尺寸截下, 去除其上噪声点, 作为目标模板。由于图像目标定位精度需优于 0.1 个像素, 将目标模板在粗定位区域上做亚像素步长相关, 公式如下:

$$C(x+mdx, y+ndy) = \frac{\sum_{(i,j) \in w} f(x+mdx+i, y+ndy+j) g(i, j)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in w} f^2(x+mdx+i, y+ndy+j) \sum_{(i,j) \in w} g^2(i, j)}} \quad (2)$$

式中: dx, dy 为 x 和 y 方向上的亚像素步长; m, n 为整数。非整数像素点上的灰度值采用非线性插值方法获取:

$$I(\alpha, \beta) = I_{00}(1-\alpha)(1-\beta) + I_{01}\alpha(1-\beta) + I_{10}(1-\alpha)\beta + I_{11}\alpha\beta \quad (3)$$

式中: $I_{00}, I_{01}, I_{10}, I_{11}$ 为待插值点所处方格的 4 个顶点, $\alpha = ndx, \beta = ndy$ 为插值点在 $\alpha\beta$ 坐标系下的坐标值。

根据图像右下角方向辨识标志点, 可对图像上 21 个标志点进行编码(与标志架坐标系下标志点的三维坐标进行一一对应), 以便下一步进行相机位姿估计数据规整。

2.2 高精度实时相机位姿估计

本文利用相机位姿估计技术, 根据多组一一对应的二维像素坐标和三维空间坐标, 求解相机坐标系到标志架坐标系的坐标转换关系。

为实现高精度实时相机位姿估计, 本系统采用了一种加速正交迭代的相机位姿估计算法^[18]。

正交迭代算法对相机位姿进行迭代优化, 实现在物方空间最小化物方残差的目标。物方残差的目标函数为

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^n \| (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{V}}_i)(\mathbf{R}\mathbf{p}_i + \mathbf{t}) \|^2 \quad (4)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\hat{\mathbf{V}}_i = \hat{\mathbf{v}}_i \hat{\mathbf{v}}_i^T / (\hat{\mathbf{v}}_i^T \hat{\mathbf{v}}_i)$ 为视线投影矩阵; $\hat{\mathbf{v}}_i = [u_i \quad v_i \quad 1]^T$ 为标志点的归一化像点坐标; $\mathbf{p}_i$ 为标志点坐标; $\mathbf{R}, \mathbf{t}$ 分别为由相机坐标系转换至标志架坐标系的旋转矩阵和平移向量。

在给定初始旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 的情况下, 平移向量 $\mathbf{t}$ 可由式(5)直接求解:

$$\mathbf{t}(\mathbf{R}) = \frac{1}{n} \left[\mathbf{I} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{\mathbf{V}}_i \right]^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{\mathbf{V}}_i - \mathbf{I}) \mathbf{R} \mathbf{p}_i \quad (5)$$

旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 通过迭代求解, 记 $\mathbf{t}^k = \mathbf{t}(\mathbf{R}^k)$, 相机坐标系下的标志点 $\mathbf{q}_i^k = \mathbf{R}^k \mathbf{p}_i + \mathbf{t}^k$, $\mathbf{R}^{k+1}$ 可通过求解以下绝对定向问题得到:

$$\mathbf{R}^{k+1} = \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \| \mathbf{R} \mathbf{p}_i + \mathbf{t} - \hat{\mathbf{V}}_i \mathbf{q}_i^k \|^2 \quad (6)$$

正交迭代算法的算法复杂度为 $O(n) + O(n) \times k$, 计算量随迭代的次数 k 线性增加。加速正交迭代算法针对这一问题提出了改进方法, 通过规整化迭代过程, 提炼出每次迭代的重复计算, 将其在迭代开始前先进行计算, 将计算复杂度降为 $O(n) + O(1) \times k$ 。

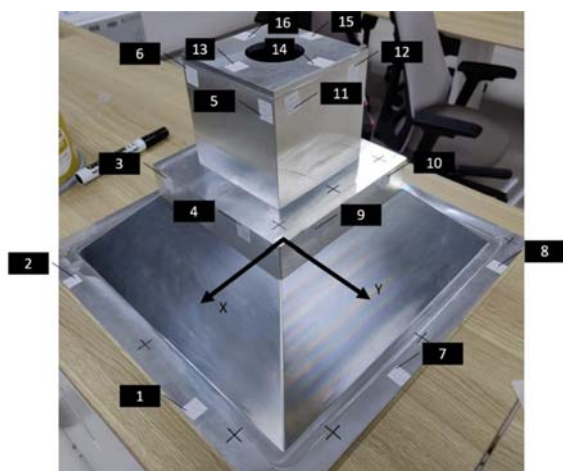


图 10 控制点布置图

Fig. 10 Control point layout

2.3 绳索摆角计算

2.3.1 绳索上端点与标志架固连关系的标定

绳索上端点与标志架的固连关系, 即标志架坐标系下绳索上端点的坐标。标志架上设计了 16 个控制点, 其排布如图 10 所示。为提高测量的准确性, 采用粘贴十字图案贴纸的方法, 在使用三坐标测量机对标志架加工精度进行检测时同步获取了 16 个控制点在标志架坐标系下的坐标。将标志架安装于行车上后, 使用全站仪测量 16 个控制点及绳索上端点的坐标, 得到在世界坐标系下的坐标。如上两步得到了一一对应的 16 个控制点在标志架坐标系下和世界坐标系下的坐标, 通过绝对定向算法可解算两个坐标系的坐标转换关系, 进而推算

出绳索上端点在标志架坐标系下坐标。

2.3.2 绳索下端点与相机固连关系的标定

绳索下端点与相机固连关系,即绳索下端点在相机坐标系下的坐标按以下步骤获取:

(1) 在使用全站仪测量标志架上的 16 个控制点及绳索上端点的坐标后,摆动绳索至不同的角度,对绳索下端点的坐标进行测量。

(2) 利用世界坐标系转标志架坐标系的坐标转换关系,将绳索下端点的三维坐标转换到标志架坐标系下。

(3) 利用对应状态下拍摄得到的图像进行相机位姿估计,计算得到标志架坐标系与相机坐标系之间的坐标转换关系。

(4) 利用步骤(3)计算得到的旋转矩阵、平移向量将绳索下端点由标志架坐标系转至相机坐标系。

(5) 由于不同摆角下绳索下端点在相机坐标系中的坐标具有不变性,对上述步骤计算得到的不同摆角下绳索下端点在相机坐标系中的坐标求平均,作为绳索下端点与相机的固连关系。

3 实验验证

3.1 仿真实验

为验证系统精度,合理分配系统软件部分和硬件部分的误差。对系统两个主要误差产生源设计两组仿真实验,分别测试标志点目标定位误差和标志架制造误差对绳索摆角测量精度的影响。

仿真实验中,按标志架尺寸在三维空间中设置 21 个标志点,标志点加入随机误差模拟标志架制造误差,虚拟相机布置于距离标志架 3m 处,设置相机内参数为:等效焦距(5000,5000),主点坐标(800,600),利用共线方程对控制点进行成像,成像结果加入随机误差模拟标志点目标定位误差。绳索摆动范围设置为 $0^\circ \sim 3^\circ$ 。

第一组实验设置标志架制造误差为 0.05mm,绳索摆角测量误差随标志点目标定位误差增大而增大,如图 11 所示。标志点目标定位误差(提点误差)不大于 0.1pixel 时,最大角度估计误差小于 0.06° 。

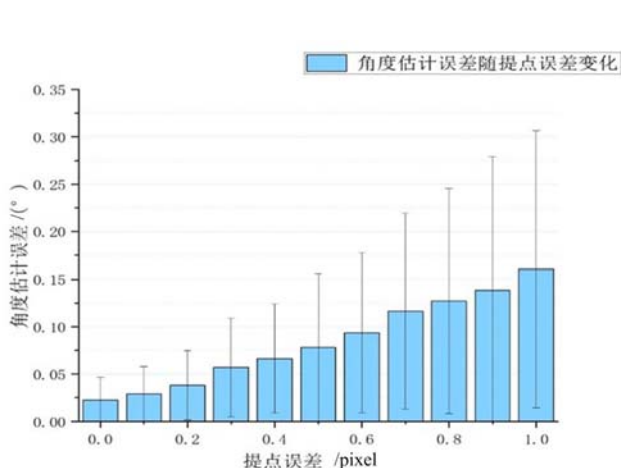


图 11 角度估计误差随提点误差变化图

Fig. 11 Angle estimation error varies with points localization error

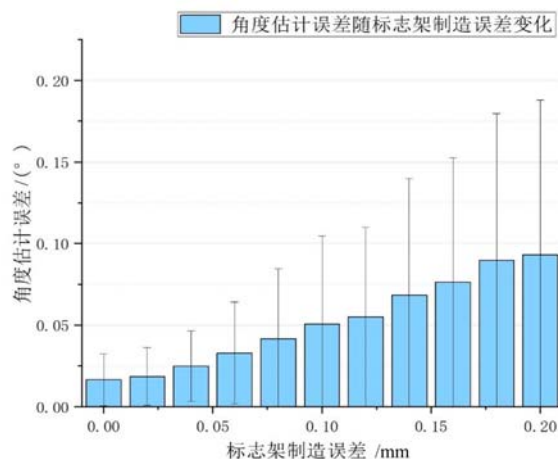


图 12 角度估计误差随标志架制作误差变化图

Fig. 12 Angle estimation error varies with frame manufacturing error

第二组实验设置标志点目标定位误差为 0.1pixel,绳索摆角测量误差随标志架制造误差增大而增大,如图 12 所示。标志架制造误差为 0.04mm 时,最大角度测量误差小于 0.05° ,平均角度估计误差为 0.025° 。

经仿真实验验证,系统总体方案具备可行性。系统实现过程中,需确保标志点定位精度优于 0.1pixel,标志架制造精度优于 0.04mm,系统整体测量精度可达 0.05° 。

3.2 实物实验

编写绳索摆角测量软件并将其移植至智能相机平台,软件界面如图 13 所示。系统硬件安装于绳索摆角实验平台,实物系统如图 14 所示,右上图为标志架及绳索悬吊装置,右下图为智能相机及相机安装支架。



图 13 软件界面图

Fig. 13 Software interface diagram



图 14 绳索摆角测量实物系统图

Fig. 14 Rope swing angle measurement system diagram

实物系统搭建完成,需标定相机内参、绳索上端点在标志架坐标系下坐标、绳索下端点在相机坐标系下坐标,并将以上参数输入软件,作为软件运行参数。

相机内参标定采用张正友标定法。标定结果为:主点坐标: $c_x=788.82$, $c_y=579.48$,等效焦距: $f_x=5626.47$, $f_y=5625.28$ 。

利用全站仪依次测量绳索上端点坐标、标志架上 16 个控制点的坐标、绳索下端点坐标。由绝对定向计算得到世界坐标系与标志架坐标系的转换关系为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.999981 & 0.004689 & 0.004077 \\ 0.004746 & -0.999891 & -0.014040 \\ 0.004010 & 0.014029 & -0.999894 \end{bmatrix}, \mathbf{t} = \begin{bmatrix} 0.080022 \\ 0.040883 \\ 0.094471 \end{bmatrix}$$

根据绳索上端点的世界坐标系坐标、世界坐标系与标志架坐标系的坐标转换关系,计算得到绳索上端点的标志架坐标系坐标 $\mathbf{U}_F$ 为

$$\mathbf{U}_F = \begin{bmatrix} -0.000149 \\ -0.009135 \\ -0.169679 \end{bmatrix}$$

计算得到绳索下端点在相机坐标系下的坐标 $\mathbf{D}_C$ 为

$$\mathbf{D}_C = \begin{bmatrix} -0.003934 \\ -0.041733 \\ 0.044101 \end{bmatrix}$$

将以上参数输入软件,设置系统持续测量绳索摆角,实验时长 1h,统计测量频率,最低值 21Hz,平均值 22Hz。绳索静止状态下系统输出的测量结果波动范围为 $\pm 0.01^\circ$ 。

使用全站仪进行精度验证,全站仪型号为徕卡 TS60,测量精度为 0.6mm。验证方法为:

- (1) 使绳索下端点摆动至某一位置并使其稳定,记录本系统测得的绳索摆角值。
- (2) 利用全站仪测量绳索上下端点,计算绳索摆角,作为真值。
- (3) 改变绳索下端点位置,重复上述步骤。使绳索下端点均匀分布到各个方位和角度。

本文实验记录了 19 个绳索摆动状态下的结果,如表 1 所示。上端点和下端点为全站仪得到的绳索上端点和绳索下端点的三维坐标,计算结果为本系统输出的绳索摆角,真值为全站仪得到的绳索摆角。这一系统的平均误差为 0.0247° ,最大误差为 0.05° 。

表 1 实物实验记录
Tab. 1 Physical experiment record

序号	上端点/m			下端点/m			计算结果 /($^\circ$)	真值 /($^\circ$)	误差 /($^\circ$)
	X	Y	Z	X	Y	Z			
1	0.0413	-0.0789	-0.1639	0.0259	-0.0764	-2.5091	0.41	0.38	0.03
2	0.0364	-0.0844	-0.1637	-0.0081	-0.1123	-2.5086	1.28	1.28	0.00
3	0.0302	-0.0689	-0.1634	-0.0489	-0.0096	-2.5065	2.43	2.42	0.01
4	0.0524	-0.0813	-0.1639	0.0945	-0.0905	-2.5090	1.01	1.05	0.04
5	0.0564	-0.0816	-0.1638	0.1216	-0.0930	-2.5083	1.57	1.62	0.05
6	0.0438	-0.0906	-0.1642	0.0421	-0.1539	-2.5086	1.51	1.55	0.04
7	0.0440	-0.0689	-0.1636	0.0436	-0.0093	-2.5082	1.47	1.46	0.01
8	0.0443	-0.0649	-0.1636	0.0460	0.0160	-2.5074	2.00	1.98	0.02
9	0.0414	-0.0633	-0.1634	0.0274	0.0290	-2.5068	2.33	2.28	0.05
10	0.0356	-0.0675	-0.1632	-0.0134	0.0040	-2.5073	2.16	2.12	0.04
11	0.0360	-0.0707	-0.1636	-0.0093	-0.0205	-2.5079	1.68	1.65	0.03
12	0.0380	-0.0849	-0.1641	0.0045	-0.1155	-2.5088	1.11	1.11	0.00
13	0.0486	-0.0834	-0.1640	0.0751	-0.1063	-2.5093	0.83	0.86	0.03
14	0.0535	-0.0832	-0.1638	0.1044	-0.1031	-2.5087	1.33	1.34	0.01
15	0.0574	-0.0840	-0.1639	0.1319	-0.1089	-2.5081	1.90	1.92	0.02
16	0.0603	-0.0784	-0.1637	0.1482	-0.0694	-2.5075	2.12	2.16	0.04
17	0.0576	-0.0728	-0.1637	0.1314	-0.0335	-2.5076	2.04	2.04	0.00
18	0.0522	-0.0655	-0.1633	0.0940	0.0161	-2.5072	2.27	2.24	0.03
19	0.0299	-0.0718	-0.1636	-0.0492	-0.0263	-2.5072	2.25	2.23	0.02

4 结论

本文设计了一种应用于主动悬吊式重力补偿系统的绳索摆角高精度实时测量系统,系统由固定于绳索下端点的智能相机和固定于绳索上端点的标志架组成。运动过程中,智能相机拍摄标志架,实时提取其合作标志并解算相机与标志架的相对位姿,进一步通过预先标定的标志架与绳索上端点、相机与绳索下端点的安装关系计算绳索上下端点的空间坐标,最终解算得到高精度的绳索摆角。基于系统设计方案完成了整套系统的搭建和实物实验。该系统结构紧凑,自主性强,可推广应用于工业控制和科研实验中的小摆角测量。

参考文献:

- [1] 江一帆, 乔兵, 赵颖. 航天员低重力运动模拟训练方法与研究综述[J]. 载人航天, 2018, 24(2):227—237 (JIANG Yifan, QIAO Bing, ZHAO Yin. Review of reduced gravity simulation for astronaut training manned[J]. Spaceflight, 2018, 24(2):227—237 (in Chinese))
- [2] 刘巍, 张磊, 赵维. 载人低重力模拟技术现状与研究进展[J]. 航天医学与医学工程, 2012, 25(6):463—468 (LIU Wei, ZHANG Lei, ZHAO Wei. Space medicine current situation and research progress of low gravity simulation[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2012, 25(6):463—468 (in Chinese))
- [3] Matsuzawa T. Parabolic flight: experiencing zero gravity to envisage the future of human evolution[J]. Primates, 2018, 59(1):1—3.
- [4] Prince A. Neutral buoyancy laboratory capabilities[EB/OL]. (2016-11-25) [2020-02-27]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160013689.pdf>
- [5] Sylos-Labini F, Lacquaniti F, Ivanenko Y P. Human locomotion under reduced gravity conditions: biomechanical and neurophysiological considerations[J]. Biomed Research International, 2015, 2014(23):547242.
- [6] 马爱军, 闫利, 徐水红, 等. 国内外典型航天特因环境选拔训练设备及其应用[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(2):103—111 (MA Aijun, YAN Li, XU Shuihong, et al. Selection and training equipment for space special environment[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(2):103—111 (in Chinese))
- [7] 蒋银飞. 悬吊式低重力模拟系统研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017 (JIANG Yinfei. Research on suspended low gravity simulation system[D]. University of Electronic Science and Technology of China, 2017 (in Chinese))
- [8] Hewes D E, Letko W, Spady Jr A A. The problems of man's adaptation to the lunar environment[EB/OL]. (1995-11-22) [2020-02-27]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19680009542.pdf>
- [9] Letko W, Spady A A. Walking in simulated lunar gravity[C]//Fourth Symposium on the Role of the Vestibular Organs in Space Exploration. Scientific and Technical Information Division, Office of Technology Utilization, National Aeronautics and Space Administration, 1970:347—351.
- [10] Perusek G P, Dewitt J K, Cavanagh P R, et al. Zero-gravity locomotion simulators: New ground-based analogs for microgravity exercise simulation [EB/OL]. (2008-01-29) [2020-02-27]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080006841.pdf>
- [11] Xu Y, Jr H B B, Friedman M, et al. Control system of the self-mobile space manipulator[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 2(3):207—219.
- [12] Xu Y, Brown B, Aoki S, et al. Mobility and manipulation of a light-weight space robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1994, 13(1):1—12.
- [13] Norcross J R, Chappell S P, Clowers K G, et al. Characterization of partial-gravity analog environments for extravehicular activity suit testing [EB/OL]. (2010-12) [2020-02-27]. https://www.lpi.usra.edu/lunar/constellation/NorcrossEtAl_NASA-TM-2010-216139_PartialGravityAnalogEnvironments.pdf
- [14] Valle P. Reduced gravity testing of robots (and humans) using the active response gravity offload system[EB/OL]. (2017-09-25) [2020-02-27]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170008856.pdf>
- [15] Yang Z, Sun Y, Lei Y, et al. Realization and experimental test of a body weight support unit for simultaneous position tracking and gravity offloading[C]// 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE, 2017.

- [16] 高扬. 悬吊法水平随动控制系统设计[D]. 黑龙江: 哈尔滨理工大学, 2017 (GAO Yang. Design of horizontal servo control system by suspension method[D]. Harbin University of Science and Technology, 2017 (in Chinese))
- [17] 高德鹏. 机械臂重力补偿装置的随动系统的设计与实现[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2015 (GAO Depeng. Design and implementation of servo system for mechanical arm gravity compensation device[D]. Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese))
- [18] 李鑫, 龙古灿, 刘进博, 等. 相机位姿估计的加速正交迭代算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 266—273 (LI Xin, LONG Gucan, LIU Jinbo, et al. Accelerative orthogonal iteration algorithm for camera pose estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 266—273 (in Chinese))

Design of high-precision rope swing angle visual measurement system and its application in suspended gravity compensation system

YE Xuezhou¹, GAN Shuwei¹, ZHANG Xiaohu¹, HUANG Yiyong², XIONG Dan²

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 100190, China;

2. Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 150001, China)

Abstract: In manned space missions, it is necessary to build a ground-based simulated microgravity environment for astronaut adaptive training. The suspended gravity compensation system uses ropes to suspend trainees, balances gravity with rope tension, and simulates a microgravity environment. In order to maintain the balance between rope tension and gravity, the direction of the rope must be the same as the direction of gravity during the movement of the trainee. For this reason, it is necessary to measure the small swing angle of the rope in real time and with high accuracy as the input of the rope direction control system. This paper designs and implements a high-precision rope swing angle real-time measurement system based on monocular pose estimation. The system consists of a smart camera fixed to the lower end of the rope and a sign frame fixed to the driving (the upper end of the rope). During the movement, the smart camera shoots the marker frame, extracts its cooperation logo in real time and calculates the relative pose of the camera and the marker frame, and further calculates the rope up and down through the pre-calibrated relationship between the marker frame and the upper end of the rope, and the camera and the lower end of the rope. The space coordinates of the endpoints are finally solved to obtain a high-precision rope swing angle. The experimental results show that the system can obtain rope swing angle data with an error within 0.05° at a measuring frequency of 20Hz. The system has compact structure and strong autonomy, and can be popularized for small swing angle measurement in industrial control and scientific research experiments.

Keywords: suspension type gravity compensation system; swing angle measurement; camera pose estimation