

文章编号 1004-924X(2013)02-0488-08

高精度光学头部位置定位系统

汤 勇, 顾宏斌*, 张丛喆

(1. 南京林业大学 汽车与交通工程学院, 江苏 南京 210037;

2. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016; 3. 南京维笛而科技有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要:针对头盔式虚拟现实系统中的头部位置跟踪, 研究并实现了多摄像机下的高精度光学头部位置定位系统。通过设计初始标定方块来减小系统安装误差, 使摄像机按正交方式布置, 保持其光轴两两相互垂直。定位过程中以某一摄像机为基准, 任意给定目标深度初值; 依据摄像机成像模型计算出目标空间位置, 再将该计算结果作为其他摄像机的目标深度初值进行循环迭代计算, 收敛至给定精度后得到目标三维空间坐标值。最后以 3 个标记点空间位置为基础, 依据其空间关系计算得到目标姿态角。对比实验表明, 该定位方法定位精度高、计算速度快, 静态位置误差为 0.051 cm, 动态位置误差为 0.088 cm, 明显超过电磁跟踪器定位精度; 同时该定位系统成本低廉, 不受外界金属和电磁环境干扰, 可满足虚拟现实系统中高精度头部位置跟踪需求。

关键词:头部跟踪; 计算机视觉; 虚拟现实; 迭代

中图分类号: TP391.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0488

High accurate optical head pose tracker system

TANG Yong, GU Hong-bin*, ZHANG Cong-zhe

(1. College of Automobile and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Collega of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Nanjing Video Company, Nanjing 210000, China)

* Corresponding author, E-mail: ghb@nuaa.edu.cn

Abstract: A high accurate optical head pose tracker system based on multiple-cameras was investigated to track the high accurate head pose of a virtual reality system. A calibration square was designed to eliminate the system installation error to allow the optical axis of a camera to be perpendicular every two cameras. In positioning, the depth value of the object was given arbitrarily by taking a camera for a criterion, then, other coordinate values could be generated by a camera model. The obtained results were taken as the initial depth and used in the loop iteration to compute the object's position. At last, the object pose could be calculated based on the position of three markers. Comparative experiments show that the algorithm has high accuracy and rapid convergence. The static error is 0.51 mm, and the dynamic tracking error is 0.88 mm, which is significantly higher than that of the electromagnetic tracker system. Meanwhile, the positioning system has low-cost and can not be disturbed by metal or

收稿日期: 2012-09-25; 修订日期: 2012-10-21.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 61039002)

electromagnetic environments. It can meet the high-precision position tracking requirements of virtual reality systems.

Key words: head tracking; computer vision; virtual reality; iteration

1 引言

在头盔式(HMD)虚拟现实(VR)系统中,系统必须实时获取用户头部的位置和姿态,以驱动图形引擎中的虚拟视点同步改变,保证用户所见虚拟场景图像的正确性^[1]。精确位置信息能为用户提供与真实环境相同的虚拟视点图像或者完成正确的虚实注册与虚实融合,相反,错误的位置信息或者过大的误差则会导致不正确的显示结果,破坏用户沉浸感^[2]。为保证头部位置的跟踪精度,目前VR系统一般采用专用硬件实现位置检测和跟踪。按检测原理不同,其测量方法可分为机械法、电磁法、光电法、超声波法^[3]等,上述几种方法各有适应场合以及优缺点。机械式跟踪属于接触式测量,对用户存在机械约束;光电跟踪器存在遮挡问题,精度和稳定性有限;而超声波式法则存在频率低,延迟大等问题^[4]。从定位精度和使用便利性综合考虑,目前VR系统中电磁跟踪器使用最为普遍,但其也存在易受金属和外界环境干扰、购置成本较高等缺点。随着计算机视觉技术、光学技术的发展,采用低成本光学设备,比如摄像机进行的视觉测量方法取得了长足发展和进步^[5-6],并有学者开发出了一些实用定位方法和系统。Matsumoto Y利用单目摄像机进行头部定位获取了头部位置和姿态^[7],姿态角平均误差分别为1.7、1.5和0.9°,位置误差分别为6.6、3.4、1.5 mm。Mulder J等人设计的应用于桌面式AR系统中的双目视觉头部定位系统精度达到毫米级^[8],3个位置误差分别为1.28、2.02和0.49 mm,系统延时为66 ms。国内北京理工大学研究了利用多光学跟踪器进行数据融合的头部位跟踪方法^[9],定位精度和系统鲁棒性与单一视觉定位方法相比有所提升。虽然目前视觉定位方法取得了不少成果并得到一些实际应用,但是定位精度不足,系统软硬件成本过高仍是阻碍其进一步推广和应用的关键问题。针对上述问题,本文在课题组前期所研究的多摄像机定位方法^[10]基础上研究并实现了高精度的光学头部定位系统,采

用低成本普通USB摄像机作为视频采集设备,简单迭代算法进行空间定位,并通过实际实验对其定位精度进行了测试,以验证其可行性和实用性。

2 系统构成及其工作原理

2.1 系统结构

本定位系统中3个摄像机光轴按正交方式布置,3个光轴相互垂直,指向同一原点,如图1。

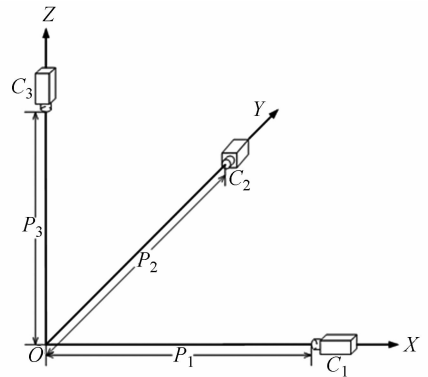


图1 定位系统结构图

Fig. 1 Structure of the tracking system

2.2 摄像机安装位置校正

为保证实际安装时3个摄像机光轴相互垂直且指向光轴交点,设计了一个标定方块对摄像机安装位置进行校正,如图2。在CAD软件(CATIA)中进行尺寸和外形设计,通过精密机械加工来保证几何外形精度,标定方块基本结构包括5根相互垂直圆柱杆,每个杆上有2个同心圆。

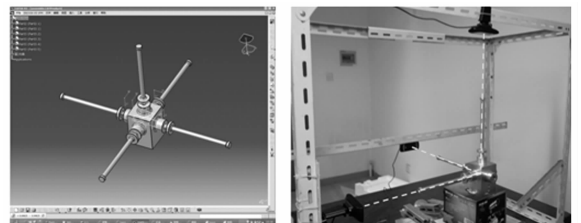


图2 系统初始位置标定

Fig. 2 Initial position calibration

安装摄像机时,使其满足以下条件:摄像机图像中的标定杆上两圆均同心,且圆心点位于摄像机光心点。轮流调整 3 个摄像机,使每个摄像机拍摄到的图像均满足此条件,调整完毕后就可为 3 个摄像机光轴已经相互垂直并指向同一原点,如图 3。



图 3 摄像机位置校正后所拍摄图像

Fig. 3 Camera images after position calibration

系统定位过程中时需已知每个摄像机与三光轴交点即坐标原点间的距离 P_1, P_2, P_3 , 该距离无法直接通过物理测量得到。本文通过棋盘格进行标定计算该距离。假设要求摄像机 S_1 距原点位置 P_1 , 则可将棋盘格模板对准, 移动棋盘格, 调整其在摄像机 C_2, C_3 中图像的位置, 保证其边缘均与摄像机 C_2, C_3 中线位置重合, 则此条件下棋盘格垂直于 C_1 光轴, 而且正交系统坐标原点正好位于棋盘格上。保存 C_1 中拍摄到的棋盘格图像, 通过离线 MATLAB 工具箱^[11] 标定外参, 外参平移矩阵中 Z 值即为摄像机距棋盘格垂直距离 P_1 。按此方法可依次计算得到摄像机 C_2, C_3 距原点距离 P_2, P_3 。

3 目标定位算法

3.1 坐标定义

将摄像机 C_1, C_2, C_3 的光轴分别沿 X, Y, Z 轴以正交的方式布置好后, 假设摄像机光心与原点的距离分别为 P_1, P_2, P_3 , 摄像机的成像平面均以摄像机光心为原点, 坐标轴方向与地面坐标系的 X, Y, Z 轴一致。如图 4, 目标在 C_1, C_2, C_3 中的图像坐标记为 $(y_{img}^{C_1}, z_{img}^{C_1})$ 、 $(z_{img}^{C_2}, x_{img}^{C_2})$ 、 $(x_{img}^{C_3}, y_{img}^{C_3})$; 目标在 C_1, C_2, C_3 中进行第 t 次迭代所得到的三维位置计算值记为 $(x_t^{C_1}, y_t^{C_1}, z_t^{C_1})$ 、 $(x_t^{C_2}, y_t^{C_2}, z_t^{C_2})$ 、 $(x_t^{C_3}, y_t^{C_3}, z_t^{C_3})$, 算法最终输出的坐标值为 (x_t, y_t, z_t) 。

3.2 算法流程

(1) 给定算法迭代初始值为 (x_0, y_0, z_0) , 并

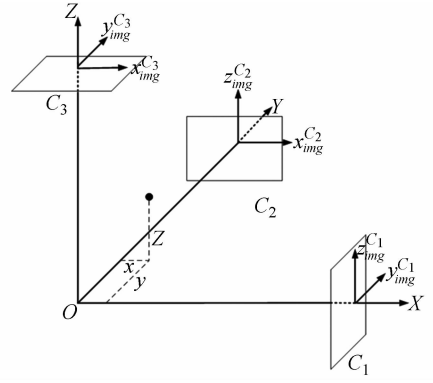


图 4 定位系统坐标系示意图

Fig. 4 Coordinate system of the tracking system

令 $x_0^{C_1} = x_0^{C_2} = x_0^{C_3} = x_0, y_0^{C_1} = y_0^{C_2} = y_0^{C_3} = y_0, z_0^{C_1} = z_0^{C_2} = z_0^{C_3} = z_0$ 。

(2) 在当前采集的图像帧内对检测到目标进行迭代, 逼近真实值。若第 $t-1$ 次迭代得到的目标值为 $(x_{t-1}, y_{t-1}, z_{t-1})$, 则:

a. 摄像机 C_1 中, 有沿 X 轴的坐标值 x_{t-1} 以及目标的图像坐标 $(y_{img}^{C_1}, z_{img}^{C_1})$, 根据摄像机成像模型有:

$$\begin{cases} y_t^{C_1} = (P_1 - x_{t-1}) y_{img}^{C_1} / f_y^{C_1} \\ z_t^{C_1} = (P_1 - x_{t-1}) z_{img}^{C_1} / f_z^{C_1} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $f_y^{C_1}$ 和 $f_z^{C_1}$ 是摄像机 C_1 的焦距。

若 C_1 未检测到目标, 保持 $y_t^{C_1}$ 和 $z_t^{C_1}$ 的值不变, 有:

$$\begin{cases} y_t^{C_1} = y_{t-1}^{C_1} \\ z_t^{C_1} = z_{t-1}^{C_1} \end{cases} \quad (2)$$

b. 摄像机 C_2 中, 应用 $y_t^{C_1}$ 以及目标的图像坐标 $(z_{img}^{C_2}, x_{img}^{C_2})$, 得到:

$$\begin{cases} z_t^{C_2} = (P_2 - y_t^{C_1}) z_{img}^{C_2} / f_z^{C_2} \\ x_t^{C_2} = (P_2 - y_t^{C_1}) x_{img}^{C_2} / f_x^{C_2} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $f_z^{C_2}$ 和 $f_x^{C_2}$ 是摄像机 C_2 的焦距。

若 C_2 未检测到目标, 保持 $z_t^{C_2}$ 和 $x_t^{C_2}$ 的值不变:

$$\begin{cases} z_t^{C_2} = z_{t-1}^{C_2} \\ x_t^{C_2} = x_{t-1}^{C_2} \end{cases} \quad (4)$$

c. 摄像机 C_3 中, 应用 $z_t^{C_2}$ 以及目标的图像坐标 $(x_{img}^{C_3}, y_{img}^{C_3})$, 得到:

$$\begin{cases} x_t^{C_3} = (P_3 - z_t^{C_2}) x_{img}^{C_3} / f_x^{C_3} \\ y_t^{C_3} = (P_3 - z_t^{C_2}) y_{img}^{C_3} / f_y^{C_3} \end{cases} \quad (5)$$

其中: $f_x^{C_3}$ 和 $f_y^{C_3}$ 是摄像机 C_3 的焦距。

若 C_3 未检测到目标, 保持 $x_t^{C_3}$ 和 $y_t^{C_3}$ 的值不

变:

$$\begin{cases} x_i^{c3} = x_i^{c\Delta 1} \\ y_i^{c3} = y_i^{c\Delta 1} \end{cases} \quad (6)$$

d. 将由 C_1, C_2, C_3 所得到的三维位置值取平均,有:

$$\begin{cases} x_t = (x_i^{c2} + x_i^{c3}) / 2 \\ y_t = (y_i^{c1} + y_i^{c3}) / 2, \\ z_t = (z_i^{c1} + z_i^{c2}) / 2 \end{cases} \quad (7)$$

若 x_t, y_t, z_t 满足:

$$\max |x_t - x_{t-1}| \leq \epsilon^*, \quad (8)$$

则将 x_t, y_t, z_t 作为正交定位的输出值,并结束迭代,转步骤(2)。其中, ϵ^* 为给定的收敛精度。否则,转步骤(3),继续迭代,图 5 为算法流程图。

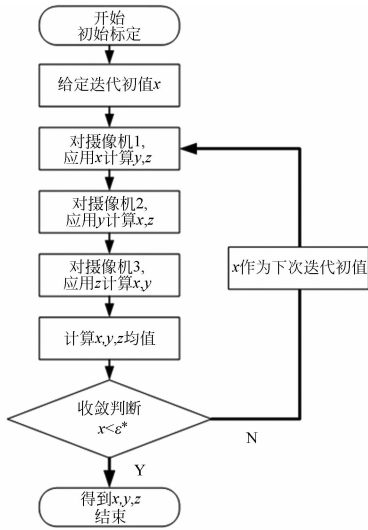


图 5 定位算法流程图

Fig. 5 Block diagram of tracking algorithm

4 头部姿态计算

头部位置跟踪不仅要跟踪三维坐标位置,还必须实时跟踪目标姿态。空间内 3 个点确定一个平面,因此可在三维空间内同时检测跟踪 3 个目标点位置,再由其位置关系计算出该平面姿态角。

4.1 标记点 2D 图像位置检测

根据课题组之前对标记颜色稳定性的研究^[12],选用图 6 中的紫,绿,蓝三种颜色的圆形标记作为定位目标,采用区域增长^[13]算法同时检测多个目标 2D 图像位置,再利用上节迭代算法计算目标 3D 空间位置,区域增长算法描述如下:

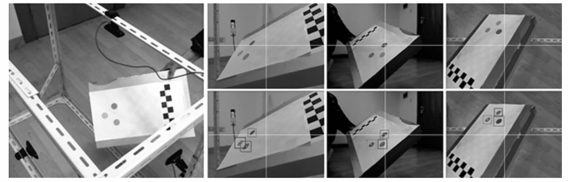


图 6 区域增长算法检测标记点

Fig. 6 Detecting markers by region growing algorithm

遍历图像像素,搜寻满足式(9)的第 x 行第 y 列的像素点 $P(x, y)$ 。其中, $Cr'(x, y)$ 和 $Cb'(x, y)$ 为该像素的色度分量值, Cr'_{dest} 和 Cb'_{dest} 为预设的颜色标记色度分量值, $\Delta_{Cr'}$ 和 $\Delta_{Cb'}$ 为色度分量偏移值。

$$\begin{cases} Cr'_{dest} - \Delta_{Cr'} \leq Cr'(x, y) \leq Cr'_{dest} + \Delta_{Cr'} \\ Cb'_{dest} - \Delta_{Cb'} \leq Cb'(x, y) \leq Cb'_{dest} + \Delta_{Cb'} \end{cases} \quad (9)$$

搜索种子点领域,建立连通区域堆栈 $St(P(x, y), n)$ 。 n 为堆栈中的像素点总数,初始状态下, $n=0$ 。搜寻到种子点 $P(x, y)$ 后,将其存入 $St(P(x, y), n)$,且令 $n=n+1$ 。然后依照 $P(x+1, y) \rightarrow P(x, y+1) \rightarrow P(x-1, y) \rightarrow P(x, y-1)$ 的次序判断 $P(x, y)$ 的 4 领域是否满足生长判断条件式(9)。若满足,将该领域像素点存入 $St(P(x, y), n)$,同时令 $n=n+1$,直至所有相似的像素点全部存入 $St(P(x, y), n)$,结束生长过程。选取最大的连通区域,可直接使用式(10)计算其质心位置。

$$\begin{cases} X_{marker} = \frac{1}{n} \sum_{P(x,y) \in St(P(x,y),n)} x \\ Y_{marker} = \frac{1}{n} \sum_{P(x,y) \in St(P(x,y),n)} y \end{cases} \quad (10)$$

4.2 目标位置和空间姿态计算

假设由上节算法中得到的 3 个标记点空间坐标分别为 $p_1(x_1 \ y_1 \ z_1), p_2(x_2 \ y_2 \ z_2), p_3(x_3 \ y_3 \ z_3)$, 3 个点组成一个三角形平面,设该目标平面初始位置位于 $x-y$ 平面,旋转平移后到如图 7 所在位置,此时其平面法向量为 N_0 ,如图 7。

目标位置为三标记点位置均值,即:

$$\begin{cases} x = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \\ y = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}, \\ z = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3} \end{cases} \quad (11)$$

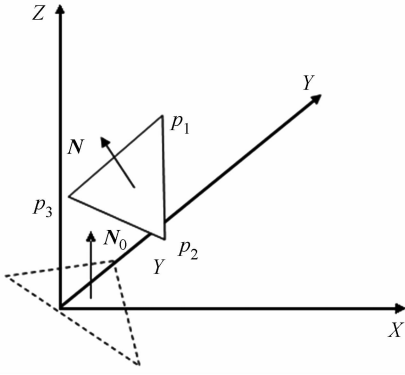


图 7 姿态角计算

Fig. 7 Pose calculation

三维空间中旋转可以通过旋转角 θ 和所围绕

$$\mathbf{M}(\hat{\mathbf{R}}, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta + (1 - \cos \theta)x_r^2 & (1 - \cos \theta)x_r y_r - (\sin \theta)z_r & (1 - \cos \theta)x_r z_r + (\sin \theta)y_r \\ (1 - \cos \theta)y_r x_r + (\sin \theta)z_r & \cos \theta + (1 - \cos \theta)y_r^2 & (1 - \cos \theta)y_r z_r + (\sin \theta)x_r \\ (1 - \cos \theta)z_r x_r - (\sin \theta)y_r & (1 - \cos \theta)z_r y_r + (\sin \theta)x_r & \cos \theta + (1 - \cos \theta)z_r^2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

三维空间中的旋转也可以通过欧拉角 (h, p, r) 来定义。如果旋转次序为“ z - x - y ”欧拉角, 在右手笛卡尔坐标中的旋转矩阵可表达为:

$$\mathbf{M}(h, p, r) = \begin{bmatrix} f_{00} & f_{01} & f_{02} \\ f_{10} & f_{11} & f_{12} \\ f_{20} & f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_z(r)\mathbf{R}_x(p)\mathbf{R}_y(h), \quad (16)$$

对上式进行矩阵运算可得:

$$\mathbf{M}(h, p, r) = \begin{bmatrix} \cos r \cosh - \sin r \sin p \sinh & -\sin r \cos p & \cos r \sinh + \sin r \sin p \cosh \\ \sin r \cosh + \cos r \sin p \sinh & \cos r \cos p & \sin r \sinh - \cos r \sin p \cosh \\ -\cos p \sinh & \sin p & \cos p \cosh \end{bmatrix}, \quad (17)$$

由此可推导出目标姿态欧拉角为:

$$\begin{cases} h = \operatorname{atan} 2(-f_{20}/f_{21}) \\ p = \arcsin(f_{21}) \\ r = \operatorname{atan} 2(-f_{01}/f_{11}) \end{cases}. \quad (18)$$

5 实验测试

为验证本文头部位置定位系统的可行性和定位精度, 设计了以下对比实验。

5.1 实验硬件设备

主要硬件设备包括:

1. 视频采集设备: 罗技高清 USB 摄像机, 帧率 60 fps, 采集分辨率 640×480。
2. 定位目标: 乒乓小球, 直径 38 mm。

的单位向量方向定义, 定义单位向量为旋转向量, 首先计算平面当前法向量, 再从法向量变化推导出旋转向量。假设目标三角形中两相邻边向量为 $\mathbf{N}_{12}, \mathbf{N}_{13}$, 两向量叉乘后可得当前三角平面法向量。

$$\mathbf{N} = \mathbf{N}_{12} \times \mathbf{N}_{13}, \quad (12)$$

从向量 \mathbf{N} 到 \mathbf{N}_0 的旋转向量为:

$$\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{N} \times \mathbf{N}_0 / \|\mathbf{N} \times \mathbf{N}_0\|, \quad (13)$$

旋转角度为:

$$\theta = \arccos(\mathbf{N} \cdot \mathbf{N}_0). \quad (14)$$

通过单位向量 $\hat{\mathbf{R}} = (x_r, y_r, z_r)$ 和旋转角度 θ 构造旋转矩阵, 即进行罗德里格斯变换得到旋转矩阵:

3. 自制摄像机固定支架, 摄像机距原点距离分别为 42.53, 38.14, 42.18 cm。

4. 转台(摄影机三脚架)。

5.2 静态误差实验

如图 8, 在游标卡尺活动端上固定乒乓球, 以乒乓球作为定位目标进行位置误差测试实验。

在空间中任意选取 4 个固定点 P_1, P_2, P_3, P_4 , 以固定点为基准移动游标卡尺活动端, 每次移动 2 cm, 移动 7 个点, 表 1 中记录了每次移动 2 cm 后由本文定位方法计算得到的距离值(即距起点距离), 从表中统计可知位置检测静态误差平均为 0.051 cm, 最大误差为 0.12 cm, 最小误差为 0.014 cm。

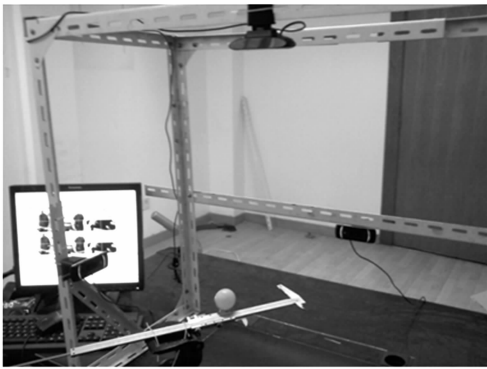


图 8 静态误差实验

Fig. 8 Static error testing

表 1 定位系统静态误差测试数据

Tab. 1 Results of static error testing (cm)

固定点	移动距离					
	2	4	6	8	10	12
P_1	1.891	4.016	6.055	7.960	10.014	11.969
P_2	2.063	3.958	5.933	7.973	10.015	11.956
P_3	2.121	4.016	6.075	7.960	10.053	12.043
P_4	2.037	3.926	5.955	8.069	9.954	11.926

5.3 动态误差实验

将乒乓球固定于摄像机三角架转台上,用手推动转台做缓慢圆周运动,连续测量并记录乒乓球空间位置,如图 9。



图 9 动态误差实验

Fig. 9 Experiment of dynamic error testing

在理想条件下乒乓球运动轨迹是空间内某个平面中的一个圆。在 MATLAB 中对所有测量数据进行拟合,得出一个圆方程,实验中以该拟合出的圆作为标准进行误差计算。设记录点数据点到拟合圆所在的平面的距离为 Δz ,该点到圆心的距

离与拟合圆半径的差为 Δr ,则总的误差定义为 $\sqrt{(\Delta z)^2 + (\Delta r)^2}$,拟合出的空间圆三维图和顶视图如图 10。

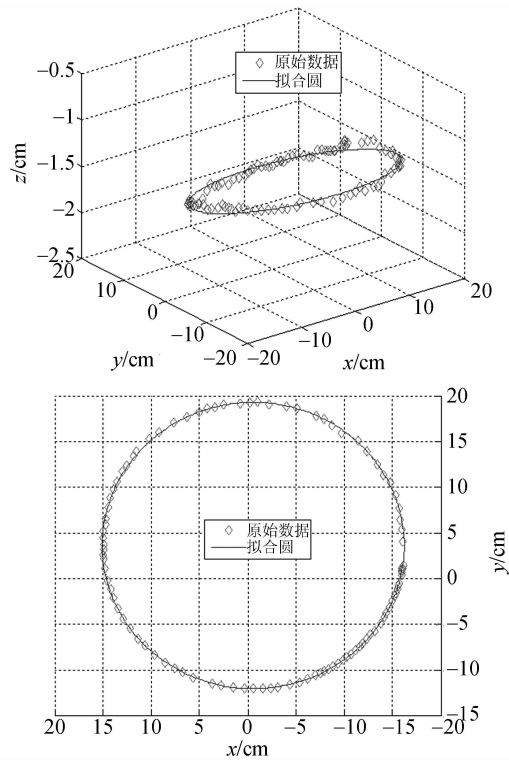


图 10 动态误差实验数据分布

Fig. 10 Data distribution of dynamic error testing

实验过程中同时对本实验室购置的电磁跟踪器 (Liberty) 进行相同条件下的动态精度测试,按同样方法将电磁跟踪器固定在转台上测试其动态误差,测试过程中将电磁跟踪器放置于空旷且远离金属环境中,尽量避免干扰,拟合出的空间圆如图 11。

表 2 中记录本文定位系统和电磁跟踪器动态定位误差对比数据。

表 2 位置误差对比

Tab. 2 Contrast of position errors (cm)

	最小误差	最大误差	平均误差
本文定位	0.002	0.363	0.088
电磁定位	0.012	0.578	0.155

从上述 2 个实验可以看出,本文定位系统平均定位误差低于 1 mm,并且精度已经明显超过电磁跟踪器。在动态误差实验数据分布图中可以

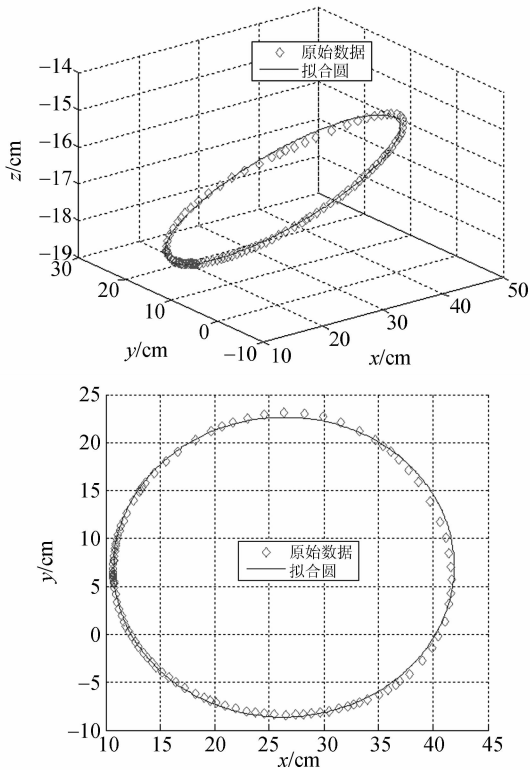


图 11 电磁跟踪器动态误差实验数据分布

Fig. 11 Data distribution of PDI dynamic error testing

发现本文定位系统误差较小,数据点分布更加贴近拟合圆,但是数据存在一定的随机抖动,这主要与目标图像位置检测的不稳定有关。电磁跟踪器

数据分布更加平滑但在某些区域数据值存在明显漂移,与正确值偏离较远导致误差较大,这可能与其磁场特性有关。

从理论推导可知,姿态角误差与 3 个标记点空间位置精度以及三标记点间相互距离有关,由于缺乏合适硬件和手段,因此本文未对目标姿态角误差进行实验测试,后续研究过程中拟通过设计电机控制系统带动标记选择固定角度后对姿态角误差进行测试。

6 结 论

针对 VR 系统中头部位置定位需求,本文实现了一种高精度的光学头部定位系统,在保证摄像机光轴正交条件下,采用简单迭代算法对目标进行定位,以多标记点位置为基础再计算目标姿态。对比实验表明,该系统定位精度低于 1 mm,不仅明显超过电磁跟踪器精度,并且不受外界金属环境干扰,可满足 VR 系统中头部位置跟踪要求。实验也发现该定位系统的鲁棒性有待提高;另外在用区域增长算法检测标记点时易受外界光照影响,在某些视角下标记点成像面积过小也会导致检测失败。后续研究将考虑用红外 LED 灯替代颜色标记点作为检测目标,以消除光照影响,增大检测目标面积,增强系统鲁棒性。

参考文献:

- [1] KRINIDIS M, NIKOLAIDIS N, PITAS I. 3D head pose estimation in monocular video sequences by sequential camera self-calibration [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19(2): 261-272.
- [2] BLESER G, STRICKER D. Advanced tracking through efficient image processing and visual-inertial sensor fusion [J]. *Computers & Graphics*, 2009, 33(1): 59-72.
- [3] 周仕娥,高伟清,李英杰,等. 六自由度头部跟踪系统的误差修正[J]. *光电工程*, 2010, 37(6): 35-41. ZHOU SH E, GAO W Q, LI Y J, *et al.*. Error correction of 6-DOF head-tracking system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(6): 35-41. (in Chinese)
- [4] KINDRATENKO V. A survey of electromagnetic position track calibration techniques [J]. *Virtual Reality: Research, Development, and Applications*, 2000, 5(3): 169-182.
- [5] 张业鹏,何涛,文昌俊,等. 机器视觉在工业测量中的应用与研究[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(4): 324-328. ZHANG Y P, HE T, WEN C J, *et al.*. Applications of machine vision in industry inspection and its research [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 324-328. (in Chinese)
- [6] 韩延祥,张志胜,戴敏. 基于特征点的单目视觉测量方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1110-1117. HAN Y X, ZHANG ZH SH, DAI M. Monocular vision system for distance measurement based on feature points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1110-1117. (in Chinese)
- [7] MATSUMOTO Y, SASAO N, SUENAGA T, *et al.*. 3D model-based 6-DOF head tracking by a dingle camera for human-robot interaction [C]. *IEEE*

International Conference on Robotics and Automation, IEEE CPS 2009: 3194-3199.

- [8] MULDER J, JANSEN J, RHIJN A N. An affordable optical head tracking system for desktop VR/AR systems [C]. *Proceedings of 7th International Workshop on Immersive Projection Technology*, ACM Press, 2003: 215-223.
- [9] 罗斌,王涌天,刘越. 高精度鲁棒的座舱头部姿态跟踪器研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(3): 367-372.
- LUO B, WANG Y T, LIU Y. Study on high accurate and robust head pose tracker for cockpit environment [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(3): 367-372. (in Chinese)
- [10] 顾人舒,顾宏斌,汤勇. 应用多个正交视角轮流逼近3维目标的坐标[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(11): 1996-2001. (in Chinese)
- GU R SH, GU H B, TANG Y. Approaching the coordinates of 3D objects alternately from multiple orthogonal views [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(11): 1996-2001.
- [11] http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/. [OL].
- [12] 柴功博,顾宏斌,孙瑾. 多颜色标记三维定位以及标记点稳定性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(5): 681-684.
- CHAI G B, GU H B, SUN J. Research of 3D Position Detection and Stability Based on Multicolor Marks [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2011, 16(11): 1996-2001. (in Chinese)
- [13] ADAMS R, BISCHOF L. Seeded region growing [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(6): 641-647.

作者简介:



汤 勇(1983—),男,湖南益阳人,博士,讲师,2012年于南京航空航天大学获博士学位,主要从事虚拟现实技术及其应用,计算机视觉技术等研究。E-mail: tangyong159@gmail.com



张丛喆(1974—),男,山东济南人,博士,2004年于美国新泽西理工学院获博士学位,主要从事图像处理,智能视频技术的研究及其应用。E-mail: zhangcongze@hotmail.com



顾宏斌(1953—),男,江苏常州人,教授,博士生导师,2001年于南京航空航天大学获博士学位,主要从事飞行模拟与仿真,计算机视觉等研究。E-mail: ghb@nuaa.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)