

中图分类号: TP216.1 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)11-1996-06

论文索引信息: 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

应用多个正交视角轮流逼近3维目标的坐标

顾人舒¹⁾, 顾宏斌²⁾, 汤勇²⁾

¹⁾(南京大学电子科学与工程学院, 南京 210093) ²⁾(南京航空航天大学民航学院, 南京 210016)

摘要: 为实现目标的快速、精确3维定位和跟踪, 提出一种正交摄像机视频定位系统及其坐标轮流逼近的迭代定位算法。系统中平面摄像机光轴按照正交方式布置, 拍摄方向均指向原点。不同于现有的大部分计算机视觉方法, 本算法中没有影响定位效率和精度问题的图像配准操作。证明了迭代算法的收敛性。数值验证和实际试验表明, 本算法计算简单、误差稳定性好, 收敛快, 因此具有良好的应用潜力。

关键词: 计算机视觉; 跟踪; 迭代方法; 视频信号处理; 多摄像机

Approaching the coordinates of 3D objects alternately from multiple orthogonal views

Gu Renshu¹⁾, Gu Hongbin²⁾, Tang Yong²⁾

¹⁾(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093 China)

²⁾(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016 China)

Abstract: To achieve accurate 3D positioning and real-time tracking of moving objects, a video positioning method using multiple orthogonal cameras together with an iterative algorithm that approaches the coordinates of the 3D objects alternately is proposed. The optical axes of the cameras are set along axes of an orthogonal coordinate and all cameras are pointed to the origin of coordinate. Unlike the most of current computer vision method, the iterative algorithm does not involve image alignment operation, which could affect the positioning efficiency and precision. The convergence of the iterative algorithm is proved. Numerical examples and practical tests show that the proposed method is simple to compute, insensitive to errors, and has a rapid rate of convergence, thus has a great potential in application.

Keywords: computer vision; tracking; iterative methods; video signal processing; multiple cameras

0 引言

基于摄像机系统的视觉定位是建立在计算机视觉理论上的3维测量方法, 由于其非接触、速度快、低成本、自动化程度高, 在虚拟现实、高级人机互动和机器人等领域得到广泛应用^[1]。

目前视觉定位中应用最广泛的是单目和双目视觉测量系统, 其定位算法的研究也已经较为成熟。单目视觉测量算法具有结构简单、标定步骤少等优点, 但由于视觉传感器结构限制, 大对数算法只有在对定位参照物进行近距离成像的情况下比较有效, 而且精度较低^[2-3]。双目视觉测量系统一般是将两个摄像机平行布置, 使光轴

收稿日期: 2010-10-14; 修回日期: 2011-01-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA01Z306); 国家自然科学基金委员会与中国民用航空总局联合资助项目(60776812)。

第一作者简介: 顾人舒(1989—), 女, 南京大学电子科学与工程学院电子科学与技术专业本科生, 主要研究方向: 计算机视觉、虚拟现实。E-mail: gu_rensu@yahoo.cn。

平行,利用三角测量原理对图像特征点进行匹配和定位,由解析几何方法建立方程进行求解。双目视觉测量的精度依赖于景物的深度及摄像机之间的距离(基线长度),基线越长,精度越好。然而,当增大基线长度时,图像之间的透视形变的差别也越来越大,会给匹配带来困难^[4]。

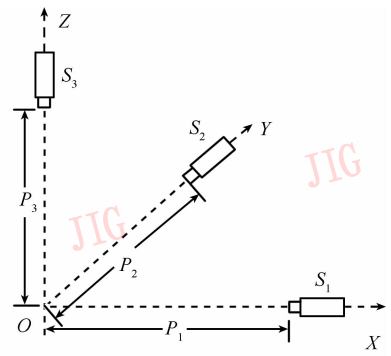
为突破单目、双目视觉测量系统的局限性,早在 20 世纪 80 年代就有学者开始研究多目立体视觉^[5]。然而这些系统的摄像机布置方案大多与双目摄像机系统相似,多摄像机的布置的目的是为了获得更大的视场角或获得目标的更多数据以便提高定位精度^[6-8]。文献[9]则基于点特征的单目视觉算法,提出一种广义正交迭代算法把所有摄像机获取的全部图像作为整体计算得到相对位姿参数。当然现在也有其他特殊方案布置的多摄像机定位测量系统,如 Enrique Munoz 等人布置的光轴相互垂直的三目摄像机系统,通过估算表征摄像机与目标相对位置函数参数进行 3D 跟踪^[10],其中每个摄像机决定雅克比矩阵的一列。

目前影响双目或多目视觉定位效果的一个主要因素是图像配准的效率和精度^[11]。另一方面,现有的各种摄像机系统的定位方法均是基于传统数值计算方法(如数值优化),采用复杂的计算模型试图在同一步计算中求解目标的 3 维坐标值,因而影响效率。针对目前算法精度对配准误差敏感和同步确定 3 维坐标值的不便,提出一种正交摄像机系统下用坐标轮流逼近方式进行 3 维空间定位的方法,构造了具有优良收敛性的迭代算法,使得粗糙的初始值能快速准确地收敛到目标真实值。

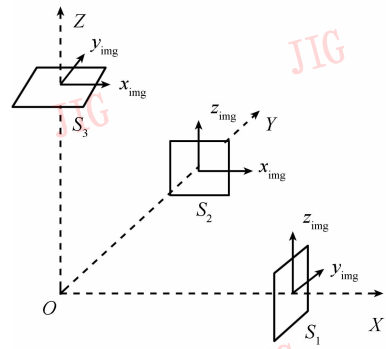
1 定位算法及收敛性分析

1.1 定位算法

将平面摄像机光轴按正交坐标系方式布置,如图 1(a)所示,3 台摄像机 S_1 、 S_2 、 S_3 光轴沿 X 、 Y 、 Z 轴布置,均指向原点,光心距原点的距离为 P_1 、 P_2 、 P_3 。设: x_{img}^i 、 y_{img}^i 、 z_{img}^i 为摄像机 S_i ($i = 1, 2, 3$) 上的目标图像 x 、 y 、 z 轴坐标,每个摄像机内的目标图像坐标均以光心为原点,坐标轴方向与空间坐标轴 X 、 Y 、 Z 轴方向保持一致,如图 1(b)所示。 f_{y1} 、 f_{z1} 、 f_{x2} 、 f_{z2} 、 f_{y3} 、 f_{x3} 分别表示 3 个摄像机对应的焦距。



(a) 摄像机布置方案



(b) 摄像机图像坐标系

图 1 正交摄像机定位系统

Fig. 1 System of orthogonal cameras

以单个目标定位为例,算法描述如下:

1) 初始化:给定目标的迭代初值 (x_0, y_0, z_0) , 并令 $x_3 = x_2 = x_1 = x_0, y_3 = y_2 = y_1 = y_0, z_3 = z_2 = z_1 = z_0$, 给定收敛判断用的参考值 $\tilde{x} = x_0, \tilde{y} = y_0, \tilde{z} = z_0$, 启动视频采集,转步骤 2)。

2) 对本采样周期内的视频图像,启动目标检测,如果至少有一个摄像头检测到目标图像,则对检测到的目标确定其图像坐标中的位置 $x_{img}^i, y_{img}^i, z_{img}^i$ ($i = 1, 2, 3$)。转步骤 3); 否则等待下一个采样周期,重复本步。

3) 开始迭代,坐标轮流逼近目标真实值:

(1) 根据目标沿 X 轴坐标值 x_1 , 由摄像机 S_1 所获目标图像坐标计算目标的 Y 、 Z 轴坐标

$$y_1 = L_1 \cdot y_{img}^1 / f_{y1} \quad (1)$$

$$z_1 = L_1 \cdot z_{img}^1 / f_{z1} \quad (2)$$

式中, $L_1 = P_1 - x_1, f_{y1}, f_{z1}$ 为摄像机对应的焦距。如果摄像机 S_1 未能检测到目标,则保留原 y_1, z_1 不变。

(2) 应用 y_1 , 由摄像机 S_2 所获图像坐标计算目标的 X 、 Z 轴坐标 x_2, z_2 。

$$x_2 = L_2 \cdot x_{img}^2 / f_{x2} \quad (3)$$

$$z_2 = L_2 \cdot z_{img}^2 / f_{z2} \quad (4)$$

式中, $L_2 = P_2 - y_1$, f_{x2}, f_{z2} 为摄像机对应的焦距。如果摄像机 S_2 未能检测到目标, 则保留原 x_2, z_2 不变。

(3)应用 z_2 , 由摄像机 S_3 所获图像坐标计算目标的 X, Y 轴坐标

$$x_3 = L_3 \cdot x_{img}^3 / f_{x3} \quad (5)$$

$$y_3 = L_3 \cdot y_{img}^3 / f_{y3} \quad (6)$$

式中, $L_3 = P_3 - z_2$, f_{x3}, f_{y3} 为摄像机对应的焦距。如果摄像机 S_3 未能检测到目标, 则保留原 x_3, y_3 不变。

(4)取平均, 令

$$x = (x_2 + x_3) / 2 \quad (7)$$

$$y = (y_1 + y_3) / 2 \quad (8)$$

$$z = (z_1 + z_2) / 2 \quad (9)$$

(5)若平均值 x, y, z 收敛到给定精度 δ , 即

$$\max\{|x - \tilde{x}|, |y - \tilde{y}|, |z - \tilde{z}|\} \leq \delta \quad (10)$$

则将 x, y, z 作为最终目标位置值, 迭代结束, 转步骤 2)。否则令 $x_3 = x_2 = x_1 = x, y_3 = y_2 = y_1 = y, z_3 = z_2 = z_1 = z, \tilde{x} = x, \tilde{y} = y, \tilde{z} = z$, 转步骤 1) 继续迭代。

迭代初值 (x_0, y_0, z_0) 可以应用目标面积等信息估算, 也可简单给定。例如, $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$ 。

1.2 收敛性证明

本定位方法成功的关键是保证迭代过程总是收敛的, 可通过理论分析证明算法的收敛性。定义每个摄像机都检测到目标时的迭代为标准迭代。令

$$\begin{aligned} r_{y1} &= \frac{y_{img}^1}{f_{y1}}, r_{z1} = \frac{z_{img}^1}{f_{z1}}, r_{x2} = \frac{x_{img}^2}{f_{x2}}, \\ r_{z2} &= \frac{z_{img}^2}{f_{z2}}, r_{x3} = \frac{x_{img}^3}{f_{x3}}, r_{y3} = \frac{y_{img}^3}{f_{y3}} \end{aligned} \quad (11)$$

则由式(1)可得

$$y_1 = L_1 \cdot y_{img}^1 / f_{y1} = (P_1 - x_1) r_{y1} \quad (12)$$

由式(3)(4)可得

$$x_2 = (P_2 - y_1) r_{x2} = [P_2 - (P_1 - x_1) r_{y1}] r_{x2} = P_2 r_{x2} - P_1 r_{y1} r_{x2} + x_1 r_{y1} r_{x2} \quad (13)$$

$$z_2 = (P_2 - y_1) r_{z2} = [P_2 - (P_1 - x_1) r_{y1}] r_{z2} = P_2 r_{z2} - P_1 r_{y1} r_{z2} + x_1 r_{y1} r_{z2} \quad (14)$$

由式(5)

$$\begin{aligned} x_3 &= L_3 \cdot x_{img}^3 / f_{x3} = (P_3 - z_2) r_{x3} = \\ &[P_3 - (P_2 r_{z2} - P_1 r_{y1} r_{z2} + x_1 r_{y1} r_{z2})] r_{x3} = \\ &P_3 r_{x3} - P_2 r_{z2} r_{x3} + P_1 r_{y1} r_{z2} r_{x3} - x_1 r_{y1} r_{z2} r_{x3} \end{aligned} \quad (15)$$

再由式(7)

$$\begin{aligned} x &= [(P_2 r_{x2} - P_1 r_{y1} r_{x2} + x_1 r_{y1} r_{x2}) + (P_3 r_{x3} - P_2 r_{z2} r_{x3} + \\ &P_1 r_{y1} r_{z2} r_{x3} - x_1 r_{y1} r_{z2} r_{x3})] / 2 = \\ &\frac{P_3 r_{x3} + P_2 (r_{x2} - r_{z2} r_{x3}) + P_1 (r_{y1} r_{z2} r_{x3} - r_{y1} r_{x2})}{2} - \\ &\frac{r_{y1} r_{x2} - r_{y1} r_{z2} r_{x3}}{2} x_1 \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)给出了经过一轮标准迭代后坐标初值 x_1 与终值 x 的关系。特别地, 若设 x^* 为准确值, 且取 $x_1 = x^*$, 则式(1)~(9)变为坐标值计算的精确公式, 代入式(16)应有

$$\begin{aligned} x^* &= \frac{P_3 r_{x3} + P_2 (r_{x2} - r_{z2} r_{x3}) + P_1 (r_{y1} r_{z2} r_{x3} - r_{y1} r_{x2})}{2} - \\ &\frac{r_{y1} r_{x2} - r_{y1} r_{z2} r_{x3}}{2} x^* \end{aligned} \quad (17)$$

即准确值经过一轮标准迭代后仍为准确值。

如果第 k 步迭代初值 x' 有 $\Delta x^{(k)}$ 的误差, 即 $x' = x^* + \Delta x^{(k)}$, 由式(16), 经过一次标准迭代后有

$$\begin{aligned} x'' &= \frac{P_3 r_{x3} + P_2 (r_{x2} - r_{z2} r_{x3}) + P_1 (r_{y1} r_{z2} r_{x3} - r_{y1} r_{x2})}{2} - \\ &\frac{r_{y1} r_{x2} - r_{y1} r_{z2} r_{x3}}{2} (x^* - \Delta x^{(k)}) \end{aligned} \quad (18)$$

与准确值 x 相差

$$\begin{aligned} \varepsilon &= x'' - x^* = \Delta x^{(k+1)} = \\ &\frac{r_{y1} r_{x2} - r_{y1} r_{z2} r_{x3}}{2} \Delta x^{(k)} \end{aligned} \quad (19)$$

迭代 n 次与准确值相差

$$\varepsilon^n = \Delta x^{(k+n)} = \left(\frac{r_{y1} r_{x2} - r_{y1} r_{z2} r_{x3}}{2}\right)^n \Delta x^{(k)} \quad (20)$$

用收敛系数 $|K|$ 表示收敛的快慢, 本算法中

$$|K| = \left| \frac{r_{y1} r_{x2} - r_{y1} r_{z2} r_{x3}}{2} \right| \quad (21)$$

很明显, 只要上式中 $r_{y1}, r_{x2}, r_{z2}, r_{x3}$ 均小于 1, 则 $|K| < 1$ 。而 $r_{y1}, r_{x2}, r_{z2}, r_{x3}$ 均代表目标位置与光轴夹角的正切(目标视角的正切)。因此, 只要保证摄像机的工作视场角小于 90° , 理论上即有 $|K| < 1$ 。即算法在每个摄像头的目标视角均小于 45° 时可保证收敛。而普通摄像机的视场角一般都在 50° 左右, 因此收敛系数比 1 小很多, 收敛性很好。

1.3 算法精度的简单估计

本文方法的精度主要受摄像机安装误差 (P_1, P_2, P_3 和光轴安装角度的误差)、目标检测算法误差 ($x_{img}^i, y_{img}^i, z_{img}^i$ 的误差) 和定位算法误差影响。其中定位算法的精度主要受两个因素影响。一是成像器

件点阵精度引起的成像误差 Δ_{img} , 二是成像的物距与焦距之比, 即 $\frac{L}{f}$ 。若按小孔成像理论, 定位算法的目标位置误差就是 $\frac{L\Delta_{img}}{f}$ 。

例如, 设 $L = 60 \text{ cm}$, $f = 3 \text{ cm}$, CCD 对角线长度为 $\frac{1}{3}$ 英寸 = 6 mm, 点阵精度为 640×480 。则 CCD 的高和宽分别为 3.6 mm 和 4.8 mm, 分辨率为 $\frac{3.6}{480} = 0.0075 \text{ mm}$ 或 $\frac{4.8}{640} = 0.0075 \text{ mm}$ 。近似认为成像误差 Δ_{img} 就等于点阵分辨率, 则定位算法精度大致上限为 $\frac{60 \times 0.0075}{3} = 0.15 \text{ mm}$ 。

2 算法收敛性的数值验证

选取若干典型情况, 用数值算例考察算法收敛性。即给定准确值 (x^*, y^*, z^*) , 再由小孔成像条件计算出式(11)中的比值 $r_{y1} = \frac{y_{img}^1}{f_{y1}}$ 、 $r_{y2} = \frac{y_{img}^2}{f_{y2}}$ 等。或给定视角, 直接按正切关系计算式(11)中的比值。然后给定迭代初值, 应用本文算法求解坐标值 (x, y, z) , 观察收敛与否及迭代步数。其中, 收敛精度 δ 取为 0.01, $P_1 = P_2 = P_3 = 50$ 。

2.1 静止目标定位

算例: 假设目标在每个摄像机中的视角均为 α , 取 $\alpha \approx 30^\circ$, $\alpha \approx -30^\circ$, $\alpha = 60^\circ$ 3 种情况。迭代过程中记录实际收敛系数 K_s 。 K_s 定义为本步迭代结果与精确值之差与上步迭代结果与精确值之差的比值, 即

$$K_s = \frac{x^* - x^k}{x^* - x^{k-1}} \quad (22)$$

算例中初值均取 $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$ 。

1) $x = y = z = 18.3$, 即 $\alpha \approx 30^\circ$ 时, 本算法能够 5 步收敛到 $x = 18.3000$, 收敛过程如图 2 所示。理论值 $K \approx 0.0704$, 迭代过程中记录的 K_s 每一步均为 0.0704 (小数点后 6 位以后有所不同, 为数值误差), 与理论相符。

2) $x = y = z = 68.3$, 即 $\alpha \approx -30^\circ$ 时, 本算法 8 步收敛到 $x = -68.2984$, 收敛过程如图 3 所示。理论值 $K \approx 0.2629$, 迭代过程中每步 K_s 均为此值。

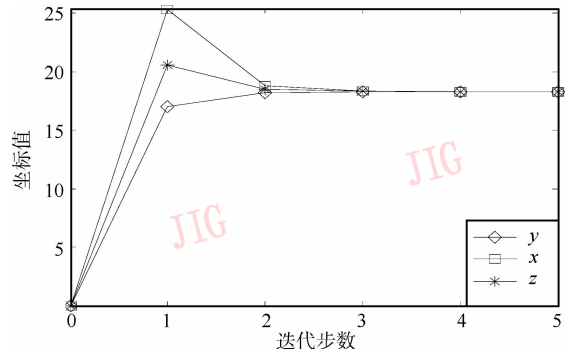


图 2 静态目标定位收敛曲线 ($\alpha \approx 30^\circ$)

Fig. 2 Iterative history of motionless object positioning ($\alpha \approx 30^\circ$)

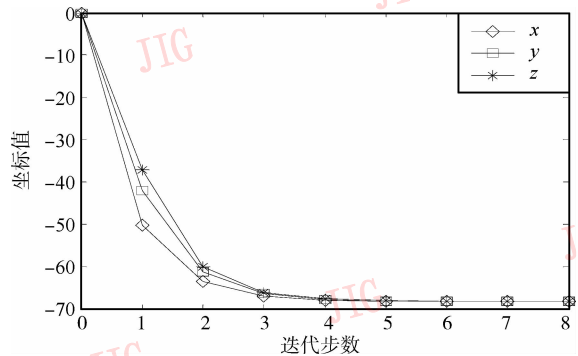


图 3 静态目标定位收敛曲线 ($\alpha \approx -30^\circ$)

Fig. 3 Iterative history of motionless object positioning ($\alpha \approx -30^\circ$)

3) $\alpha = 60^\circ$ 时, 本算法不收敛, 如图 4 所示。符合理论值 $|K| \approx 1.098 > 1$ 的结论。

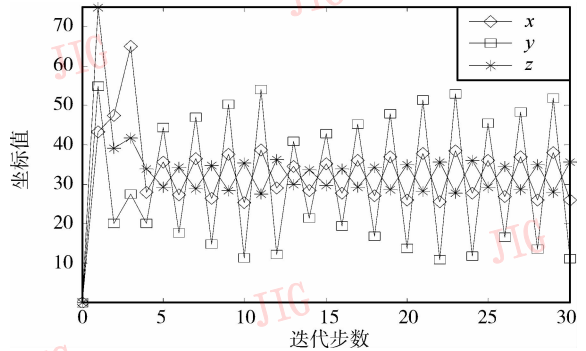


图 4 静态目标定位收敛曲线 ($\alpha = 60^\circ$)

Fig. 4 Iterative history of motionless object positioning ($\alpha = 60^\circ$)

2.2 运动目标定位

假设: 运动目标在平衡点 $(18.3013, 18.3013, 18.3013)$ 处 (此时各摄像机中的目标视角均为 $\alpha = 30^\circ$, y, z 方向坐标值固定不变) x 方向作幅度为

$1/2 \times 18.3013$, 频率为 25 Hz 的正弦运动。仿真结果如图 5 所示, 每个周期内进行 10 次定位, 第 1 次迭代初值为 $(0, 0, 0)$, 以后每次迭代初值取为上次定位迭代的结果。10 次定位的迭代步数分别为: 6, 5, 1, 5, 4, 4, 4, 1, 4, 4。由于第 3 点和第 8 点分别与第 2 点和第 7 点位置相同, 因此迭代只要一步。这表明, 当目标运动速度与视频采样频率即定位频率相比较慢时, 本文方法将有较好的定位效果。这是迭代法的优点之一。

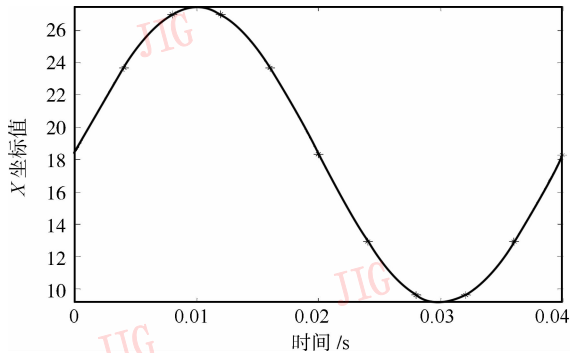


图 5 运动目标跟踪曲线

Fig. 5 Numerical example for moving object tracking

3 实验

为验证文中所述正交定位方法的实际可行性, 构建了一个实验系统, 如图 6 所示。3 台摄像机按文中所述方式按正交方案布置, 实验中使用吊在细线上的黄色乒乓球作为定位目标。



图 6 正交摄像机系统

Fig. 6 Test bed for object positioning

3 个摄像机与原点位置分别为 $P_1 \approx 60$ cm, $P_2 \approx 65$ cm, $P_3 \approx 65$ cm, 摄像机帧率为 25 帧/s, 分辨率 768×576 , 收敛精度 δ 设为 0.1 cm。实验中将

乒乓球拉离平衡位置后释放, 使其做单摆运动。实时记录目标运动过程中用本文方法计算出的目标坐标值、迭代步数与消耗时间。

跟踪情况如图 7 所示。图中弧长是根据实时记录的乒乓球坐标值计算出的乒乓球摆动弧长。图中曲线近似为振幅衰减的周期正弦运动, 与乒乓球的实际单摆运动情况相符, 证明了所述定位方法的正确性。实验同时表明, 定位过程中一般只要 2 步迭代就能收敛(最多 4 步), 且算法收敛稳定。在 CPU 主频为 2.8 GHz 的计算机上, 每次完成定位迭代一般耗时不超过 $8 \mu\text{s}$ (不含目标检测时间)。

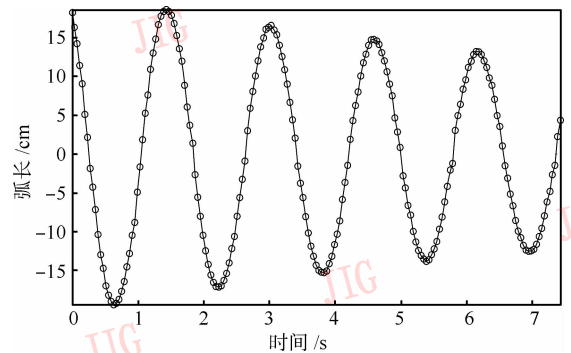


图 7 正交摄像机系统的定位实验实例

Fig. 7 Sample of test results for moving object tracking

为验证文中所述正交定位方法的精度, 应用摄影三角架进行了静态目标定位试验。方法是将乒乓球固定于三角架方位转动平台上, 手动小幅转动方位平台, 每次转动停止后用本文方法测量乒乓球位置(每次均从给定初始值开始)。理想情况下乒乓球的轨迹在空间某个平面形成一个圆。对测量的数据进行拟合, 求得其圆所在平面的方程和圆方程, 然后统计测量值与拟合圆方程的误差。设测量点距拟合圆平面的距离为 ΔZ , 测量点到圆心的距离与拟合圆半径的误差为 ΔR , 则总误差定义为 $\Delta = \sqrt{(\Delta Z)^2 + (\Delta R)^2}$ 。

典型的试验结果曲线如图 8 所示, 拟合圆半径为 12.9 cm, 最大误差 0.442 2 cm, 平均误差 0.201 9 cm。实际迭代次数在 2~4 次。按照精度的简单估计, 试验情况的算法误差应在 0.1 mm 左右。因此试验结果的定位误差远大于算法误差。主要原因是试验结果中包含了摄像头安装误差, 目标检测误差和算法误差等所有定位误差。

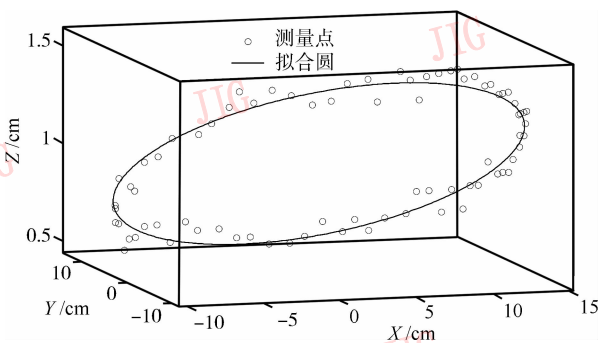


图 8 定位精度试验实例

Fig. 8 Sample of test results for motionless object positioning

4 结 论

通过布置正交排列的摄像机,提出坐标轮流逼近的迭代算法,证明了算法在每个摄像头的目标视角均小于 45° 时可保证收敛,实现了对目标的快速精确定位。这种定位方式充分利用了特殊布置的摄像机提供的位置信息,迭代算法简单,消耗计算机资源少,效率高,收敛快,尤其适用于动态目标跟踪。

从实验结果可见,这种定位方法是可行而且实用的,适用于各种实时系统的非接触 3 维测量。由于本文方法需满足摄像机光轴正交条件,尤其适合有限封闭空间中的定位。如虚拟现实系统中,实时跟踪参与者手指的位置。实际上最简单的正交摄像机系统只需 S_1, S_2 两台摄像机,可称为最简正交系统。

本文方法所涉及的摄像机系统安装误差及其校正方法,精度的细致分析与验证,与其他视频定位方法的比较及互补应用等有待进一步研究。

参考文献 (References)

[1] Jia Yunde. Machine Vision [M]. Beijing: Science Press, 2000:

3-5. [贾云得. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社,2000:3-5.]

[2] Zhu Shiping, Qiang Xifu, Study on monocular vision method used for camera positioning [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(3):339-343. [祝世平, 强锡富. 用于摄像机定位的单目视觉方法研究[J]. 光学学报, 2001, 21(3):339-343.]

[3] Guo Lei, Xu Youchun, Li Keqiang, et al. Study on real-time distance detection based on monocular vision technique [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(1):74-81. [郭磊, 徐友春, 李克强, 等. 基于单目视觉的实时测距方法研究[J], 中国图象图形学报, 2006, 11(1):74-81.]

[4] You Suyu, Xu Guangyou. State of the art and future the development of stereo vision [J]. Journal of Image and Graphics, 1997, 2(1):17-23. [游素亚, 徐光佑. 立体视觉研究的现状与进展[J]. 中国图象图形学报, 1997, 2(1):17-23.]

[5] Yachida M, Kitamura Y, Kimachi M. Trinocular vision: new approach for correspondence problem [C] //Proceedings of the 8th ICPR. Washington DC, USA: IEEE Computer Society Press, 1986:1041-1044.

[6] Devernay F, Mateus D, Guilbert M. Multi-camera scene flow by tracking 3-dpoints and surfels [C] //Proceedings of CVPR 2006 Washington DC, USA: IEEE Computer Society Press, 2006:2203-2212.

[7] Liu Bing, Yu Maoyuan, Maier Dennis, et al. An efficient and accurate method for 3D-point reconstruction from multiple views [J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 65(3):175-188.

[8] Kurada S, Rankin G W, Sridhar K. A trinocular vision system for close-range position sensing [J]. Optics & Laser Technology, 1995, 27(2):75-79.

[9] Xu Yunxi, Jiang Yunliang, Chen Fang. Generalized orthogonal iterative algorithm for pose estimation of multiple camera systems [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1):72-77. [许允喜, 蒋云良, 陈方. 多摄像机系统位姿估计的广义正交迭代算法[J]. 光学学报, 2009, 29(1):72-77.]

[10] Munoz E. Efficient Tracking of 3D Objects Using Multiple Orthogonal Cameras [EB/OL]. (2008-09-01) [2009-05-18]. <http://www.comp.leeds.ac.uk/bmvc2008/proceedings/papers/278.pdf>.

[11] Di Hongwei, Chai Ying, Li Kui. A fast binocular vision stereo matching algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8):2180-2184. [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.]