

基于单摄像头双目成像系统在计算机视觉中的应用研究

郑元杰, 杨杰

(上海交通大学 图像处理与模式识别研究所, 上海 200030)

摘要: 利用单个摄像头和一平面镜的合体实现了双目成像系统的三维视觉功能, 并理论证明了平面镜相对于摄像头按一定条件放置时, 利用合体可以得到适于三维立体视觉的图像。在已知合体内外部参数的情况下, 由合体所得图像进行点的三维立体恢复的理论推导。对合体的标定、内外部参数的确定也进行了理论推导。最终证明, 由合体进行三维立体恢复, 其实质相当于双目成像。通过实验对合体和一双目成像系统分别进行了标定, 利用标定的结果进行了对点的三维立体恢复。结果表明两者精度相当。

关键词: 双目成像; 合体; 计算机视觉; 单摄像头; 平面镜

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)04-0392-05

Application of binocular vision system based on one camera in computer vision

ZHENG Yuan-jie, YANG Jie

(Institute of Image Processing and Pattern Recognition, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The 3D computer vision is accomplished by a new vision system based on the combination of one camera and one mirror instead of binocular vision system. It is proved theoretically that if the mirror is placed in the certain conditions, the images that can be used to accomplish 3D stereo vision restoration is obtained from the combination. The point's world-coordinates are calculated theoretically by use of the images, supposing the interior and exterior parameters of the combination are known. The calibration, parameters calculation and point's 3D stereo restoration of the combination are also deduced theoretically. It is also proved that the essence of the combination's 3D restoration is identical to the binocular vision system. Experiments are presented to contrast the performances of the two methods. The results show that the accuracies are nearly equal.

Key words: Binocular vision; Combination; Computer vision; One camera; Mirror

0 引言

计算机视觉的任务是用计算机部分地实现人的

视觉功能和在一定场合拓宽和辅助人的视觉功能。

利用计算机视觉可以通过物体的二维图像信息获得其三维形状或位置等信息。三维信息可以从单镜头成像(单目成像)、双镜头成像(双目成像)或多镜头成

像(多目成像)中获得。

单目成像和双目成像都得到了实际应用,并且都形成了一定的理论体系。在某些实际应用中,不易安装两个摄像头,但还需要利用有关双目成像的计算理论。例如,在利用高速摄像机对被抛种子的运动进行分析的研究中,就遇到了这个问题。高速摄像机价格昂贵,研究中只提供了一台,并且一台摄像机只能连接一个摄像头。在这种情况下,如果通过双目成像恢复物体深度信息,则非常方便。通过理论分析和实验证明,采用了单个摄像头加一面平面镜,利用两者的合体较好地实现了用单镜头获得双目成像系统的三维视觉功能。以下讨论的投影模型均采用线性模型。

1 合体实现双目成像条件的分析

在摄像头坐标系中进行分析。通过转动坐标系可将镜头与平面镜的任何一种相对位置视为平面镜平行于摄像头的 Y_c 轴,如图1所示。 Z_c 轴为摄像头光轴,平面镜与 Z_c 的夹角为 φ 。摄像头的视野广角为 $2\alpha_c$,其视野范围边界形成一个圆锥筒。设镜头到平面镜的距离为 D_{cm} 。空间任意一点 D 的坐标为 (x_{cd}, y_{cd}, z_{cd}) 。A平面是空间过此点并且平行于 $X_c O_c Z_c$ 的平面。

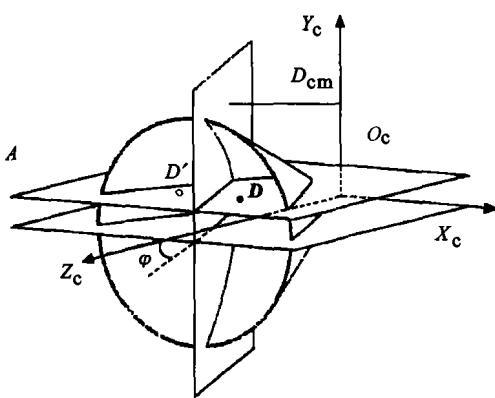


图1 平面镜放置影响空间点成像的立体分析

Fig. 1 The stereoscopic analysis of the influence of mirror's placement on the image formation

当点 D 在摄像头的视野范围之内时,此点在平面镜中的影是否也在视野范围之内。如果两者均在视野范围之内,则达到了利用平面镜的目的,称“合体正确成像”。

因为影也在 A 平面内,所以只需要讨论 A 平面。并且为了方便,把 A 平面投影到 $X_c O_c Z_c$ 平面内进行讨论。

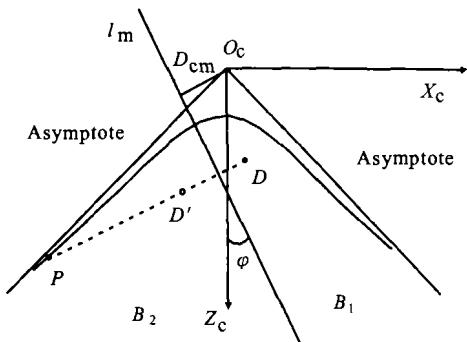


图2 平面镜放置影响空间点成像的平面分析

Fig. 2 The 2-dimentional analysis of the influence of mirror's placement on the image formation

如图2所示,曲线为镜头视野范围圆锥面与 A 平面的交线在 $X_c O_c Z_c$ 中的投影,其方程为 $z_c^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_c = x_c^2 + y_c^2$,其两条渐近线方程为: $x_c + \operatorname{tg} \alpha_c z_c = 0$ 和 $x_c - \operatorname{tg} \alpha_c z_c = 0$ 。请注意,此处两条渐近线的方程与 y_c 坐标无关,即,任何平行于 $X_c O_c Z_c$ 的平面与圆锥面的交线在 $X_c O_c Z_c$ 中的投影双曲线的渐近线都是相同的。这两条渐近线就是圆锥面与平面 $X_c O_c Z_c$ 的两条交线。直线 l_m 为平面镜与 A 平面的交线,其与 Z_c 轴的夹角为 φ , O_c 点到其距离为 D_{cm} 。 D 点为 D 在 A 平面中的投影。 D' 是 D 相对于 l_m 的对称点。 P 点是 DD' 连线与曲线的交点。可得 l_m 的方程为 $x_c = z_c \operatorname{tg} \varphi - D_{cm} / \cos \varphi$ 。在 $x_c - z_c \operatorname{tg} \varphi + D_{cm} / \cos \varphi > 0$ 的 $X_c O_c Z_c$ 的半平面部分称为 l_m 的正侧部分,另半部分称为 l_m 的负侧部分。图2中,镜头可视区在 l_m 正侧部分称为 B_1 区,负侧部分称为 B_2 区。

只需要证明 $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ 的情况。由对称可知,当 $90^\circ < \varphi \leq 180^\circ$ 时,情况相同。

点 D 和 D' 均能成像,即均在视野范围之内的条件式共有如下6个。

$$\begin{aligned} (z'_{cd} \operatorname{tg} \varphi - D_{cm} / \cos \varphi - x'_{cd})^2 &= \\ (z_{cd} \operatorname{tg} \varphi - D_{cm} / \cos \varphi - x_{cd})^2 &< \\ (z_{cp} \operatorname{tg} \varphi - D_{cm} / \cos \varphi - x_{cp})^2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$z_{cp}^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_c = x_{cp}^2 + y^2 \quad (2)$$

$$(x_{cp} - x_{cd}) / (z_{cp} - z_{cd}) = -1/\tan\alpha \quad (3)$$

$$x_{cp} - \tan\varphi z_{cp} + D_{cm}/\cos\varphi < 0 \quad (4)$$

$$x_{cd} - \tan\varphi z_{cd} + D_{cm}/\cos\varphi > 0 \quad (5)$$

$$x_{cd}^2 - z_{cd}^2 \tan^2\alpha_c + y^2 < 0 \quad (6)$$

公式(1)表示影在视野范围内,公式(2)表示P点在曲线上,公式(3)表示P在DD'连线上,公式(4)表示P点在l_m的负侧,公式(5)表示D点在l_m的正侧,公式(6)表示D点在视野范围之内。

求解以上6个公式可得,在正确成像的条件下, $\varphi, D_{cm}, x_{cd}, y_{cd}, z_{cd}$ 应满足的条件式,可用之定量地分析它们之间的关系。

但因为曲线是双曲线,使最终解非常复杂,并且难以分析。而此处只需要证明在某种条件下合体可以正确成像即可。

最终,只能通过对6个条件式、图2所示的曲线和直线特点的分析定性地得到以下结论。这些结论对于实际应用中调整平面镜的配置以取得最佳成像效果具有重要价值。

(1) 当 $D_{cm}, x_{cd}, y_{cd}, z_{cd}$ 固定时, φ 取值对合体成像的影响。

1) 当 $90^\circ - \alpha_c \leq \varphi \leq 90^\circ$ 时,只要 D 在镜头可视范围内,D'肯定也在可视范围内。在此种情况下,只要保证物体在摄像头的视场范围内,则物体在平面镜的影像一定可以在摄像头中成像。

2) 当 $0^\circ \leq \varphi < 90^\circ - \alpha_c$ 时,如果 D 在可视范围内,D'有可能超出可视范围。但当 D 在 B_2 区沿 l_m 折叠到 l_m 的正侧和 B_1 区的交集内时,可以正确成像。这个结论表明,实际应用中,当物体可以在摄像头中成像时,物体在平面镜中的影不一定可以在摄像头中成像,但一定能找到可以正确成像的物体所在的空间范围。

(2) D_{cm}, y_{cd}^2 对合体成像的影响。

1) 在 φ, y_{cd} 一定的情况下, D_{cm} 减小,也就是平面镜更靠近于镜头时, B_1 区面积减小, B_2 区面积增大, B_2 区沿 l_m 折叠到 l_m 正侧与 B_1 的交集的面积存在一个最大值。所以 D_{cm} 存在一个与 $\varphi, y_{cd}, \alpha_c$ 相关的常数,当 D_{cm} 等于这个常数时,D点在A平面上的活动范围最大。在实际应用中,若 $90^\circ - \alpha_c \leq \varphi \leq 90^\circ$,如果只要求正确成像,不需要找到最佳的 D_{cm} ;而当 $0^\circ \leq \varphi < 90^\circ - \alpha_c$ 时,最好通过实验找到最佳的 D_{cm} 值,这样可以使物体在正确成像的条件下获得最大的可

活动范围。

2) 当 D_{cm}, φ 一定, y_{cd}^2 增大时,D点的可活动范围远离镜头。即在 $y_{cd}^2 = 0$ 附近,合体正确成像时,物体可以更靠近镜头。此结论表明,实际应用中最好使物体在摄像头光轴附近运动,即摄像头要尽量朝向物体。

(3) 关于点 D 和其影成像于同一点的讨论。

1) 当 $90^\circ - \alpha_c < \varphi \leq 90^\circ$ 时,如果点 D 在镜头光心到平面镜的垂线上时,D 和其影所成像为同一点。

2) 当 $0^\circ < \varphi \leq 90^\circ - \alpha_c$ 时,点 D 和其影不会成像于同一点。

3) 当具有一定体积的物体成像时,在所有的 φ 角情况下,物体和其影所成的像均有可能互相覆盖,造成图像分析上的麻烦。

总之,在平面镜相对于摄像头正确安置的情况下,只要物体不超过某一特定范围,合体均可正确成像。在实际应用中,兼顾以上各条结论,可以调整得到物体及其在平面镜中的影像均可正确成像的平面镜和摄像头的位置,特别是对于体积较小的物体,或者体积较大而远离摄像头成像的物体。这在对种子运动分析的实验中已经得到证明。

2 由合体所得图像进行点的三维立体恢复

合体的参数包括摄像头内外部参数和平面镜在坐标系中的安置参数。假设所有的内外部参数均已知,在摄像头坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 和图像平面坐标系 xoy 中讨论。如图3所示。

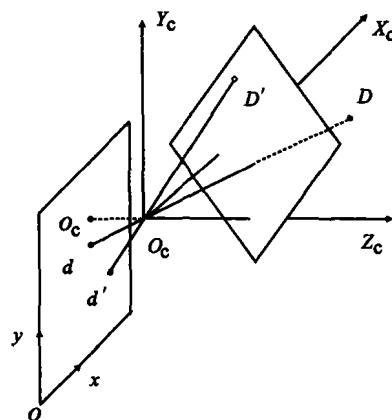


图3 空间点和其影所成像的关系

Fig. 3 The relationship among one point, its reflection in the mirror and their images

图中点 D 坐标为 (x_{cd}, y_{cd}, z_{cd}) , 其在平面镜中的影 D' 点坐标为 $(x'_{cd}, y'_{cd}, z'_{cd})$, 它们所成像分别为 d 和 d' 点, 坐标分别为 (x_d, y_d) 和 (x'_d, y'_d) 。光轴与图像平面的交点为 $o_c(x_{oc}, y_{oc})$ 。平面镜与 X_c 、 Y_c 、 Z_c 轴的夹角为 α 、 β 、 γ , 原点 O_c 到平面镜的距离为 p 。

分析图 3 可得下列几个等式:

$$\frac{x_{cd}}{x_d - x_{oc}} = \frac{y_{cd}}{y_d - y_{oc}} = \frac{z_{cd}}{-f} \quad (7)$$

$$\frac{x'_{cd}}{x'_d - x_{oc}} = \frac{y'_{cd}}{y'_d - y_{oc}} = \frac{z'_{cd}}{-f} \quad (8)$$

$$x_{cd}\cos\alpha + y_{cd}\cos\beta + z_{cd}\cos\gamma - p = \\ -(x'_{cd}\cos\alpha + y'_{cd}\cos\beta + z'_{cd}\cos\gamma - p) \quad (9)$$

$$\frac{x_{cd} - x'_{cd}}{\cos\alpha} = \frac{y_{cd} - y'_{cd}}{\cos\beta} = \frac{z_{cd} - z'_{cd}}{\cos\gamma} \quad (10)$$

根据这 4 个等式可以求出 x_{cd} 、 y_{cd} 和 z_{cd} 的值。

故当合体所有的内、外部参数确定后, 可以由合体所成图像进行点的空间三维立体恢复。

3 合体的标定和内、外部参数的确定

假设空间任意一点在世界坐标中的齐次坐标为 $[x_w, y_w, z_w]^T$, 点在镜子的影的齐次坐标为 $[x'_w, y'_w, z'_w]^T$, 镜子平面与世界坐标系 X_w 、 Y_w 、 Z_w 轴的夹角分别为 α 、 β 、 γ , 世界坐标系原点到镜面的距离为 p 。

镜面在世界坐标系中的平面方程为: $x_w\cos\alpha + y_w\cos\beta + z_w\cos\gamma - p = 0$ 。由 $[x_w, y_w, z_w]^T$ 与 $[x'_w, y'_w, z'_w]^T$ 二点对镜面的离差相反, 得:

$$-\frac{x_w\cos\alpha + y_w\cos\beta + z_w\cos\gamma - p}{\sqrt{\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma}} = \\ \frac{x'_w\cos\alpha + y'_w\cos\beta + z'_w\cos\gamma - p}{\sqrt{\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma}} \quad (11)$$

由 $[x_w, y_w, z_w]^T$ 与 $[x'_w, y'_w, z'_w]^T$ 的连线与镜面的法线平行得:

$$\frac{x_w - x'_w}{\cos\alpha} = \frac{y_w - y'_w}{\cos\beta} \quad (12)$$

$$\frac{x_w - x'_w}{\cos\alpha} = \frac{z_w - z'_w}{\cos\gamma} \quad (13)$$

由公式(11)~(13)和 $\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1$ 得:

$$\begin{bmatrix} x'_w & y'_w & z'_w & 1 \end{bmatrix}^T = \\ \begin{bmatrix} 1 - 2\cos^2\alpha & -2\cos\alpha\cos\beta & -2\cos\alpha\cos\gamma & 2p\cos\alpha \\ -2\cos\alpha\cos\beta & 1 - 2\cos^2\beta & -2\cos\beta\cos\gamma & 2p\cos\beta \\ -2\cos\alpha\cos\gamma & -2\cos\beta\cos\gamma & 1 - 2\cos^2\gamma & 2p\cos\gamma \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

此处称:

$$M_c = \begin{bmatrix} 1 - 2\cos^2\alpha & -2\cos\alpha\cos\beta & -2\cos\alpha\cos\gamma & 2p\cos\alpha \\ -2\cos\alpha\cos\beta & 1 - 2\cos^2\beta & -2\cos\beta\cos\gamma & 2p\cos\beta \\ -2\cos\alpha\cos\gamma & -2\cos\beta\cos\gamma & 1 - 2\cos^2\gamma & 2p\cos\gamma \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (15)$$

为空间任一点在镜子中的影与此点的关系矩阵。

若 $[x_w, y_w, z_w]^T$ 和 $[x'_w, y'_w, z'_w]^T$ 在图像坐标系中的坐标分别为 (x, y) 和 (x', y') , 则有:

$$(x, y, 1)^T = M_1(x_w, y_w, z_w, 1)^T$$

其中 M_1 是 3×4 的摄像头参数矩阵, 由公式(14)得:

$$(x', y', 1)^T = M_1 M_c (x_w, y_w, z_w, 1)^T$$

如果记 $M_1 M_c = M_2$, M_2 也是 3×4 的矩阵, 则:

$$(x', y', 1)^T = M_2 (x_w, y_w, z_w, 1)^T$$

这也可以看成 (x', y') 是由点 (x_w, y_w, z_w) 通过一个参数矩阵为 M_2 的摄像头所成的像。

所以, 合体成像其实质相当于双目成像, 但得到的是一幅图像而不是两幅。

M_1 和 M_2 可以按照双目成像系统定标理论中的方法来求取。 M_c 可以按照下式来求取:

$$M_c = (M_1^T M_1)^{-1} M_1^T M_2$$

利用 M_1 , 采用一般双目成像系统中的方法可以求出摄像头的所有内、外部参数。利用 M_c 和公式(15)中 M_c 的表达式也可以很容易求得平面镜在世界坐标系中的位置参数。

4 点的三维立体恢复

既然可以把合体看成双目成像, 那么三维立体恢复理论和双目成像中的理论相同。假设任一空间点 (x_w, y_w, z_w) , 其和其影所成像的图像坐标通过图像

处理求得为 (x, y) 和 (x', y') , 则有:

$$z_{c_1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$z_{c_2} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中 z_{c_1} 为空间点在摄像头坐标系中 Z_c 轴上的值; z_{c_2} 为空间点在合体假设的第二摄像头坐标系中的 Z_c 轴上的值。计算中这两个未知数可以消去。通过公式(16)和(17), 可以求得 (x_w, y_w, z_w) 的值。

5 实验研究

实验所采用的标定板由夹角为 120° 的两平面板组成, 两平面上共有 32 个参照圆, 参照圆的直径相同并且已知, 各参照圆之间的相对位置也是已知的, 如图 4 所示。

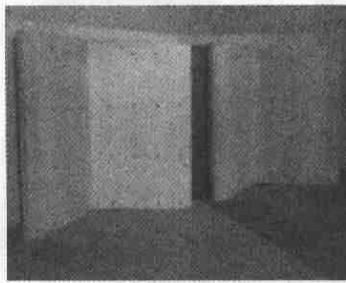


图 4 标定参照物和其在合体中所成的像

Fig. 4 The calibration reference object and its image obtained from the combination

通过确定图像中各参照圆圆心的坐标, 获得不在同一平面上的 32 个参照点, 利用这些参照点和标定理论就可以进行标定。

在合体成像中, 标定板成像如图 4 所示。

实验将一双目成像系统和合体成像系统分别进行了标定, 为了方便, 取标定板上 15 个不同的点, 将其分别在两系统中利用标定结果进行三维立体恢复, 并将结果进行了对比。结果表明: 对于标定板两平面上的点, 两者三维立体恢复的结果精度基本相当, 误差基本上都能控制在 ± 2 mm 内。

6 结 论

利用单摄像头和平面镜的合体在一定条件下可以实现双目成像系统所能实现的三维立体恢复功能, 两结果的精度基本相当。区别是由于平面镜的作用, 合体成像将双目成像中的两幅图像合为一幅。

利用合体进行成像的优点是:(1)解决了在某种情况下只能接一个摄像头, 而不能利用双目成像原理进行三维立体恢复的难题。(2)平面镜取代了双目成像系统中的一个摄像头, 降低了实验成本。(3)节省了图像的存储空间。(4)在某些情况下, 减少了处理图像的工作量。缺点是:(1)在正确成像的条件下, 合体成像较双目成像物体在空间运动的范围有所减小。(2)在某种情况下, 物体和其影所成的像发生重叠, 给图像分析带来了麻烦, 甚者无法分析图像, 对于体积大的物体更是如此。此问题可以通过调节平面镜相对于摄像头的位置和倾角得到部分解决。

参考文献:

- [1] 李介谷. 计算机视觉的理论和实践(第二版)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.
- [2] 贾云得. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [3] 郑南宁. 计算机视觉与模式识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [4] 马颂得, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [5] 高立志, 方勇, 林志航. 立体视觉测量中摄像机标定的新技术[J]. 电子学报, 1999, 27(2): 12-14.
- [6] 唐四春, 袁保宗. 计算机视觉研究进展与展望[J]. 通信学报, 1993, (4): 56-64.
- [7] 王天珍. 视觉模型与理论研究的回顾与展望[J]. 武汉汽车工业大学学报, 1996, 18(6): 7-12.
- [8] 邹国辉, 袁保宗. 一种新的摄像机标定的方法[J]. 机器人, 1999, 21(6): 431-435.
- [9] 罗飞路, 傅恩锡. CCD 摄像机内外部参数快速准确的标定方法[J]. 湖南大学学报, 1997, 24(2): 71-74.
- [10] 马传渔. 空间解析几何[M]. 南京: 南京出版社, 1991.