

文章编号: 1001-3806(2012)03-0416-05

基于自标定双目视觉算法的3维图像构建

王其华¹ 李希宇²

(1. 黄淮学院 电子科学与工程系, 驻马店 463000; 2. 鹤壁职业技术学院 公共基础教研部, 鹤壁 458030)

摘要: 为了解决传统双目视觉标定方法构建3维图像的缺点, 采用自标定双目视觉算法建立了双目视觉系统, 确定了空间对象点; 通过自标定数学模型构造矩阵, 对两相邻图像的本质矩阵求解; 并用立体空间方程的投影矩阵得到4个线性方程, 用外极线约束法得图像点的世界坐标值。结果表明, 物体空间轮廓清晰, 避免重影, 不再具有双重轮廓, 3维表面比较逼真, 具有较强的立体感。

关键词: 激光技术; 矩阵; 外极线; 自标定

中图分类号: TP391 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.034

3-D image construction based on self-calibration binocular vision algorithm

WANG Qi-hua¹, LI Xi-yu²

(1. Department of Electronic Science and Engineering, Huanghuai College, Zhumadian 463000, China; 2. Public Infrastructure Department, Hebi Occupation Technology College, Hebi 458030, China)

Abstract: In order to solve the defaults of the traditional binocular vision calibration method for constructing 3-D images, a binocular stereo vision system was designed based on self calibration algorithm of binocular vision, and the spatial objective points were determined. The essential matrix for two adjacent images was solved based on the matrix constructed according to calibration mathematical model. Four linear equations were obtained according to the 3-D spatial equations of projection matrix. Coordinates of image points in the world coordinate by means of external the epipolar constraint method. The results show that the outline of the objective space is clear without ghost, and the 3-D surface is more realistic, stereographic.

Key words: laser technique; matrix; outside line; self-calibration

引言

双目视觉是机器视觉的一种重要形式,它是基于视差原理并由多幅图像获取任意物体的3维轮廓,因此可以应用在多个领域。双目立体视觉系统一般由双摄像机从不同角度同时获得被测物的两幅数字图像,或由单摄像机在不同时刻从不同角度获得被测物的两幅数字图像,并基于视差原理恢复出物体的3维几何信息,重建物体3维轮廓及位置^[1-2]。

目前研究大都采用传统标定方法,要求有标定参照物,GRIMSON最早提出并实现了一种基于人类视觉系统的计算视觉模型及算法。国外研究比较先进的是日本大阪大学自适应机械系统研究院研制了一种自适应双目视觉伺服系统,利用双目体视的原理,以每幅

图像中相对静止的3个标志为参考进行3维构建。国内研究比较前沿的是浙江大学与哈尔滨工业大学,其中浙江大学仅需从两幅对应图像中抽取必要的特征点进行3维坐标构建,哈尔滨工业大学的3维构建后可同时获得多个有效目标。但是若由各种边缘组成的较有规则的物体,而对于一些圆滑镂空的物体,构建效果就很不理想了^[3]。

本文中采用依靠摄像机本身的约束以及主动控制摄像机做一定的运动来达到标定的自标定方法。在得到空间任一点在两个图像中的对应坐标和两摄像机参量矩阵的条件下,采用外极线结束法对实际空间重建,通过两个成像平面上的极线的约束关系建立对应点之间的关系,并由此联立方程,求得图像点的世界坐标值,本文中可构建镂空的物体。

1 双目视觉算法描述

目前的人类双目成像采用的是传统的摄像机标定技术,利用标定参照物对摄像机进行标定,即通过已知的形状和尺寸的标定参照物在图像成像的图像标定,计算获得摄像机的内外参量。但是如果摄像机内外参

基金项目: 河南省教育厅科学技术研究重点项目资助项目(12B510016)

作者简介: 王其华(1975-),男,副教授,硕士,研究方向为红外光学成像处理。

E-mail: wapineten@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-09-23; 收到修改稿日期: 2011-10-17

量变化或者特定参照物改变,需要重新标定,本文中采用自标定技术。

1.1 双目视觉

从两个不同的位置观察同一物体,获取物体的 2 维图像信息,然后通过匹配运算重建物体的 3 维立体信息的方法称为人类立体视觉。摄像机标定要解决的就是世界坐标、摄像机坐标与实际图像坐标之间的关系,其实质是要建立图像与真实景物的对应关系。

图 1 所示的立体视觉测量几何图分别以下标 l 和 r 标注左、右摄像机的相应参量。两摄像机的焦距为 f , 它们之间的距离是 b , 左右两台摄像机的焦距及其它内部参量均相等^[4], 光轴与摄像机的成像平面垂直, 两台摄像机与 x 轴重合和 y 轴相互平行。由空间点 A 及左右两摄像机的光心 O_l 和 O_r 确定的极平面分别与左成像平面 C_l 和右成像平面 C_r 的交线 p_l, p_r 为共轭极线对, 它们分别与各自成像平面的坐标轴 u_l, u_r 平行且共线。世界空间中一点 $A(X, Y, Z)$ 在左右摄像机的成像面 C_l 和 C_r 上的像点分别为 $a_l(u_l, v_l)$ 和 $a_r(u_r, v_r)$ 。这两个像点是世界空间中同一个对象点 A 的像, 称为“共轭点”分别作它们与各自相机的光心 O_l 和 O_r 的连线, 即投影线 $a_l O_l$ 和 $a_r O_r$, 它们的交点即为世界空间中的对象点 $A(X, Y, Z)$ 。

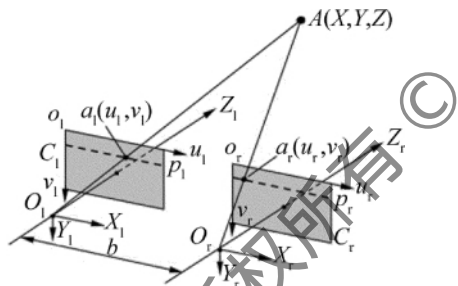


Fig. 1 Stereo vision system parallel to the optical axis

1.1.1 自标定数学模型 假定 $A(X, Y, Z)$ 在图像平面上投影为 $p(u, v)$, 则关系如下:

$$p = K \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} A \quad (1)$$

式中 $\begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$ 为摄像机外参量矩阵, 旋转矩阵 R 是

3×3 的正交单位矩阵 $t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$ 为 3 维 X, Y 和 Z 方向

的平移向量; $K = \begin{bmatrix} f/d_x & \alpha & u_0 \\ 0 & f/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为摄像机内参量矩

阵, d_x 和 d_y 为每个像素在 X 轴与 Y 轴方向上的物理尺寸, α 为扭曲因子, (u_0, v_0) 为摄像机主点坐标。则:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/d_x & \alpha & u_0 \\ 0 & f/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 f/d_x 为图像 x 轴的尺度因子; f/d_y 为图像 y 轴的尺度因子; 在 $\alpha = 0$ 时, 摄像机拍摄两幅图像时的投影矩阵分别为 $p_1 = K[R_1, t_1]$ 和 $p_2 = K[R_2, t_2]$ 。其中 R_1 和 R_2 为摄像机在第 1 个和第 2 个拍摄位置对应的旋转矩阵, t_1 和 t_2 分别为摄像机在第 1 个和第 2 个拍摄位置对应的平移向量, 其中 K 为本质矩阵。 $[X Y Z 1]^T$ 为 A 点的齐次坐标, $[u v 1]^T$ 为 A 点的投影坐标^[5]。

1.1.2 矩阵求解 两相邻图像的一一对应点 m 与 m' 之间满足如下关系^[6]:

$$m^T F m = 0 \quad (3)$$

式中 F 是基本矩阵:

$$F = [t] K^{-T} R K^{-1} \quad (4)$$

$[t]$ 为 $t = [t_x, t_y, t_z]^T$ 的反对称矩阵:

$$[t]' = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

变换为:

$$K^T F K R^T \approx [t]' \quad (6)$$

基本矩阵的 F 求解:

$$F = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$h = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_9 \end{bmatrix} \quad (8)$$

得:

$$F = \begin{bmatrix} x_1 \hat{x}_1 & x_1 \hat{y}_1 & x_1 \hat{z}_1 & y_1 \hat{x}_1 & y_1 \hat{y}_1 & y_1 \hat{z}_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 \hat{x}_2 & x_2 \hat{y}_2 & x_2 \hat{z}_2 & y_2 \hat{x}_2 & y_2 \hat{y}_2 & y_2 \hat{z}_2 & x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n \hat{x}_n & x_n \hat{y}_n & x_n \hat{z}_n & y_n \hat{x}_n & y_n \hat{y}_n & y_n \hat{z}_n & x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由于存在噪声,此时是一个超定方程组,一般采用最小二乘法进行求解,即要求在向量 h 的模为 1 (即 $\|h\| = 1$) 的约束下,使 $\|Fh\| = \min$,由线性代数理论可知,上述的 h 即为 $F^T F$ 的最小特征值所对应的单位特征向量^[7]。假定图像序列中有 n 幅视图,相连的两幅视图得到一个基础矩阵,得到 $n - 1$ 个基础矩阵,对应应有 $n - 1$ 个本质矩阵。

1.2 3 维构建

1.2.1 立体空间方程 用立体视觉技术进行 3 维重建,由两幅或者两幅以上的 2 维图像恢复物体 3 维几何形状的方法。空间任意点 A 在两个摄像机上的图像点 a_1 与 a_r 已经从两个图像中分别检测出来,即已知 a_1 与 a_r 为空间同一点 A 的对应点^[8],摄像机已标定,其投影矩阵分别为 p_1 与 p_r ,有:

$$\begin{cases} (u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1) X + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1) Y + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1) Z = m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ (v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1) X + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1) Y + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1) Z = m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ (u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2) X + (u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2) Y + (u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2) Z = m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ (v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2) X + (v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2) Y + (v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2) Z = m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{cases} \quad (11)$$

1.2.2 外极线约束 在得到空间任一点在两个图像中的对应坐标和两摄像机参量矩阵的条件下,作者在实际重建中采用外极线约束法。即首先在两摄像机的内外参量确定的情况下,通过两个成像平面上的极线的约束关系建立对应点之间的关系,并由此联立方程,求得图像点的世界坐标值。

设第 2 个摄像机坐标系可由第 1 个摄像机坐标系经由旋转 R 和平移 t 得到。这样同一个 3 维点在第 1 个坐标系中的坐标 (X, Y, Z) 和其在第 2 个摄像机坐标系中的坐标 (X', Y', Z') 满足:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} + t \quad (12)$$

式中 $R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$, $t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$ 。

R 中只有 3 个自由参量,因为旋转矩阵 R 满足 $RR^T = I$ 且 $\det(A) = 1$ 。

设 p_1 与 p_r 分别为第 1 台和第 2 台摄像机的投影矩阵。记 $p_1 = [B \ b]$,其中 B 为 3×3 矩阵 b 为 3 维

向量。类似地有 $p_r = [B' \ b']$ 。 $s\tilde{m} = [B \ b] \begin{bmatrix} M \\ 1 \end{bmatrix}$,

$$\begin{cases} Z_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11}^1 & p_{12}^1 & p_{13}^1 & p_{14}^1 \\ p_{21}^1 & p_{22}^1 & p_{23}^1 & p_{24}^1 \\ p_{31}^1 & p_{32}^1 & p_{33}^1 & p_{34}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \\ Z_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11}^2 & p_{12}^2 & p_{13}^2 & p_{14}^2 \\ p_{21}^2 & p_{22}^2 & p_{23}^2 & p_{24}^2 \\ p_{31}^2 & p_{32}^2 & p_{33}^2 & p_{34}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $[u_1 \ v_1 \ 1]^T$ 与 $[u_2 \ v_2 \ 1]^T$ 分别为成像点的齐次坐标, $[X \ Y \ Z \ 1]^T$ 为 A 点在世界坐标系下的齐次坐标; m_{ij}^k ($k = 1, 2; i = 1, \dots, 3; j = 1, \dots, 4$) 分别为 m^k 的第 i 行第 j 列元素^[9]。将式中的 Z_1 和 Z_2 消去,得到关于 X, Y, Z 的 4 个线性方程:

$$s\tilde{m}' = [B' \ b'] \begin{bmatrix} M \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中 M 是 3 维点在世界坐标系

中的坐标。如果 B 和 B' 可逆,则: $M = sB^{-1}\tilde{m} - B^{-1}b = s'B'^{-1}\tilde{m}' - B'^{-1}b'$,从中消去 M ,并且两边都左乘 B ,有: $s\tilde{m} = s'BB'^{-1}\tilde{m}' + b - BB'^{-1}b'$,再两边都与 $b - BB'^{-1}b'$ 作叉乘,则: $s(b - BB'^{-1}b') \times \tilde{m} = s'(b - BB'^{-1}b') \times BB'^{-1}\tilde{m}'$,又与 \tilde{m} 作点积,得到: $\tilde{m}^T F \tilde{m}' = 0$,其中 $F = [b - BB'^{-1}b']BB'^{-1}$ 得到用投影矩阵表示的外极线方程。

根据 $C' = -B'^{-1}b'$,故 $s_e \tilde{e} = [B \ b] \begin{bmatrix} C' \\ 1 \end{bmatrix} = b -$

$BB'^{-1}b'$;同理 $s_e' \tilde{e}' = b' - B'B^{-1}b$ 。

设 m' 为第 2 个摄像机像平面上的任一点,它在第 1 个摄像机的像平面上决定了一条外极线 $l_m = F\tilde{m}'$ 。它必然经过外极点 $\tilde{e} = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$ 和 m' 的对应点 $\tilde{m} = [u \ v \ s]^T$ 根据 $F^T \tilde{e} = 0$ 和 $F \tilde{e} = 0$,可以求得:

$$\begin{cases} e_1' = F_{23}F_{12} - F_{22}F_{13} \\ e_2' = F_{13}F_{21} - F_{11}F_{23} \\ e_3' = F_{22}F_{11} - F_{21}F_{12} \end{cases} \quad (13)$$

和

$$\begin{cases} e_1 = F_{32}F_{21} - F_{22}F_{31} \\ e_2 = F_{31}F_{12} - F_{11}F_{32} \\ e_3 = F_{22}F_{11} - F_{21}F_{12} \end{cases} \quad (14)$$

这样由外极点 $\tilde{e} = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$ $\tilde{e}' = [e_1' \ e_2' \ e_3']^T$, 以及同构中的 4 个参量构成 3 维构建要素^[10]。

2 实验仿真

实验仿真平台为 Windows XP(内存为 2048MB , CPU 主频为 3.06GHz , 显存为 256MB) 的平台下使用 Visual C++6.0 和 MATLAB 7.0 开发工具进行了实验仿真 , 摄像机的内参量设置为: $f = 1200\text{mm}$, $u_0 = 600\text{mm}$ $v_0 = 400\text{mm}$ $\alpha = 0.3$, 摄像头通过底座的旋转台旋转对同一场景实现不同位置的观测 , 自带云台可进行扫视、俯仰 , 在 $30\text{cm} \times 50\text{cm} \times 40\text{cm}$ 的虚拟立方体内随机产生 20 个 3 维空间点 如图 2 所示 , 对应的摄像机旋转轴的各个分量为 3 的随机数 , 旋转角最大为 300° 。

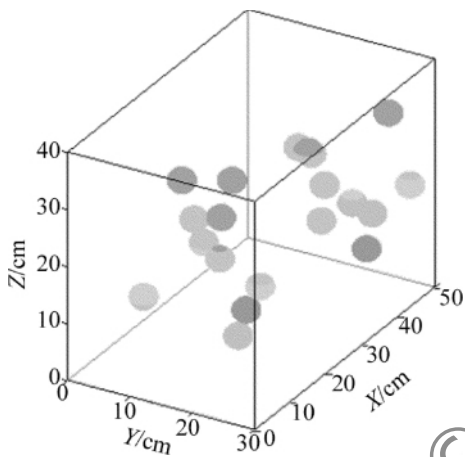


Fig. 2 3-D spatial stochastic point

图 3 中给出左右摄像机对空中的曲面物体进行拍摄 , 通过左、右各一幅图像进行 3 维构建。

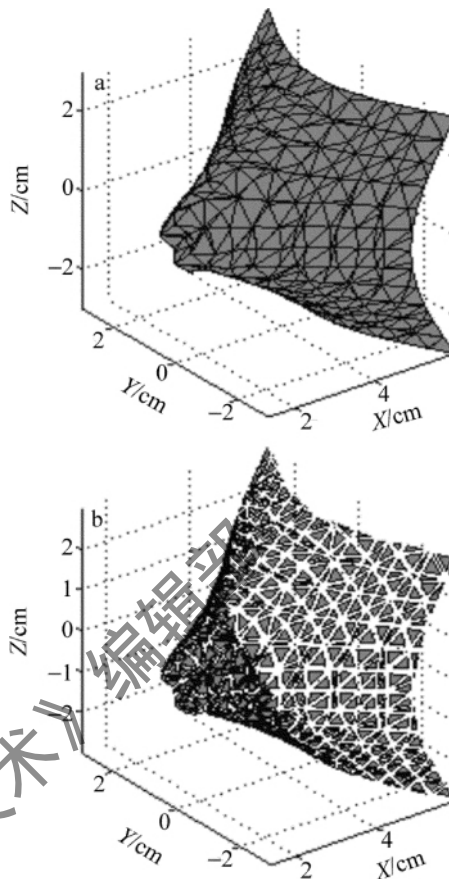


Fig. 3 Camera images

a—left camera image b—right camera image

通过提取关键点 图 4 中给出了在 MATLAB7.0 中的 3 维构建图 , 图 4a 为 3 维立体平面截取 , 图 4b 为立体 3 维曲面截取 , 图 4c 为截面等高线绘制。当表示的立体图形仅仅是为了观察大体结构时 , 就没有必要针对所有的数据点作图 , 因为数据点太多会降低显示速度。

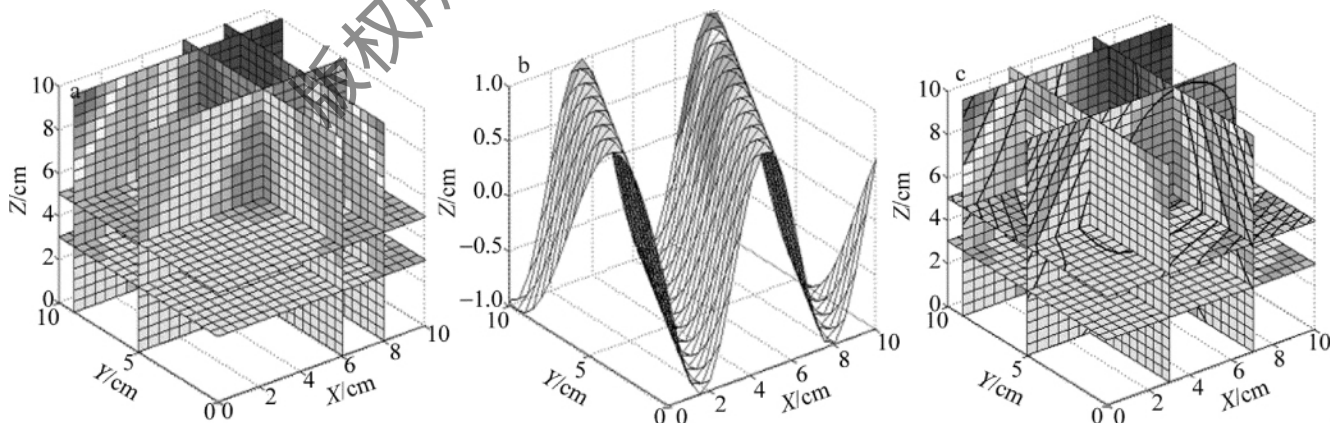


Fig. 4 3-D construction

a—3-D planar interception b—3-D surface interception c—sectional drawing of contour

为了验证该标定方法的有效性 利用真实数据的自标定结果 采用立体视觉的方法来重建 3 维场。假设图像对应点不含有噪声 , 图 5 ~ 图 7 中给出了空间中某个物体构建过程图 , 在左、右摄像机中采取了图像连续拍摄 , 同时截取相同的连续 2 帧 , 图 5 为左摄像机拍摄图

像 图 6 为右摄像机拍摄图像 , 图 7 为 3 维图像构建 , 更直观地反映了空间镂空的实际效果 , 实验中在同一组内两次平移运动方向之间的夹角允许在一个给定的范围内随机变化 , 本文中为使实验数据更科学 , 两次平移运动方向之间的夹角 控制在一个大的范围内 , 即 30° 。

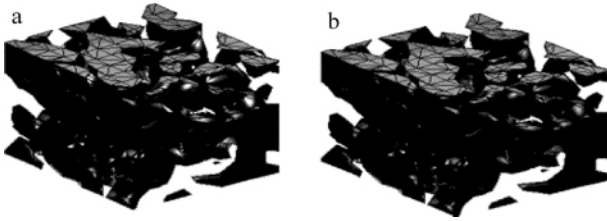


Fig. 5 Left camera image

a—thirty-fifth frame images b—thirty-sixth frame images

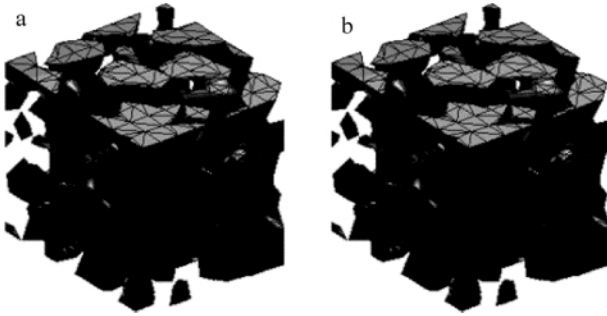


Fig. 6 Right camera image

a—thirty-fifth frame images b—thirty-sixth frame images

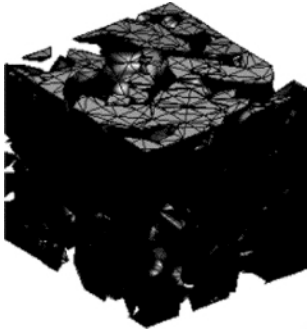


Fig. 7 3-D construction based on 2 continuous frames

a—thirty-fifth frame images b—thirty-sixth frame images

从实验结果可以看出,自标定算法 3 维构建空间轮廓清晰,避免重影,不再具有双重轮廓,重建物体的 3 维表面比较逼真,具有较强的立体感。基于自标定的双目立体视觉算法,通过外极线约束方法,是以匹配基元的各项参量信息为依据的局部特征相似程度的度量,可以大大减小匹配时的搜索空间。

3 小结

采用自标定算法对空间 3 维物体获得 2 维坐标,通过外极线约束建立空间物体模型,其重建物体的 3 维表面比较逼真,具有较强的立体感。进一步的工作是研究如何评价重建精度的问题,并与已有的研究工作进行比较。

参考文献

- [1] SU Y Ch, AI H Zh, LAO Sh H. Part detector based human pose estimation in images and videos [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(6): 1413-1419 (in Chinese).
- [2] YANG Zh G, AI H Zh. Demographical classification by shape free texture and boosting learning [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(3): 721-722 (in Chinese).
- [3] WEI J Q. Based on binocular stereo vision workpiece recognition positioning and grasping system research [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009: 20-45 (in Chinese).
- [4] ZHANG X M, LIU X L, YU Q F. Camera self-calibration based on equivalent images [J]. Optical Technique, 2008, 34(2): 217-220 (in Chinese).
- [5] WANG Zh F, WANG Zh L, FU Y L. Camera self-calibration technique for vision system in front for teleoperation system based on pointing rotation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 825-829 (in Chinese).
- [6] PEI M T, JIA Y D. Linear self-calibration technique based on active vision [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2006, 26(1): 27-30 (in Chinese).
- [7] HU J C, LIU X Y, QIU Zh Q. Camera self-calibration technique based on factorization and bundle adjustment [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(3): 63-69 (in Chinese).
- [8] PAN F. Imitation human cervical visual system theory and application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005: 22-50 (in Chinese).
- [9] WANG Zh. Vision based road recognition technology in intelligent vehicle navigation application [D]. Nanjing: Southeast University, 2006: 30-60 (in Chinese).
- [10] WANG L, CAO J F, HAN Ch Zh. A robot multi-sensor self-calibration method based on particle swarm optimization [J]. Robot, 2009, 31(5): 391-396 (in Chinese).