

文章编号: 1002-0446(2001)01-0015-05

## 基于散焦图像深度测量的一种新方法

田 涛 潘俊民

(上海交通大学自动化系 上海 200030; 上海交通大学信控系 上海 200030)

**摘 要:** 提出了基于散焦图像深度测量的一种新方法. 该方法采用一台带有远心镜头的 CCD 摄像机, 沿光轴方向移动摄像机拍摄两副图像, 根据所拍摄目标图像的散焦半径与图像的大小计算目标景物距摄像机的距离. 采用远心光学镜头代替普通镜头可使图像的大小与散焦半径之间的关系简单. 该方法融合了图像的大小与散焦半径两种信息, 使深度计算更加准确. 由于该方法只需要一台参数固定的 CCD 摄像机, 可以免除图像间的配准和特征点的选取, 有利于实时系统的实现. 实验结果表明该方法的有效性.

**关键词:** 散焦图像; 深度测量; 信息融合

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

## A NEW METHOD OF DEPTH MEASUREMENT BASED ON DEFOCUS IMAGES

TIAN Tao PAN Jun-min

(Dept. of Automation, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030)

**Abstract:** A new method for depth measurement based on defocus images was proposed. This method uses a single standard CCD camera with telecentric lens, moving camera along optical axis, images are taken at two camera position. According to the defocus radius and magnification of images, the depth is calculated. The relation between magnification and blurring can be simplified, using telecentric lens instead of traditional lens. Fusing the two disparate sources of depth information, magnification and blurring, the proposed method provides more accurate depth calculation. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** defocus image, depth measurement, information fusing

### 1 引言

在机器人视觉中,特别是在手-眼机器人视觉系统中,计算出机械手到目标的距离是至关重要的. 立体视觉是最常用的方法,但立体视觉需要特征点的选取与匹配,而且需要两台摄像机. 这种方法的结构复杂,计算量大,不利于实时系统的实现<sup>[1]</sup>.

本文提出了一种计算目标距离的新方法. 该方法只需要一台 CCD 摄像机,当目标距摄像机距离为  $\mu_1$  时得到一幅散焦图像,将摄像机沿光轴方向移动一段距离  $\delta$ ,如果摄像机内部参数固定,将得到目标的另一副散焦图像. 图像的散焦半径与移动的距离有关,距离发生变化的同时目标图像的尺寸也发生变化. 根据图像的散焦半径、像的大小变化以及摄像



图 1 远心光学镜头

机沿光轴方向移动一段距离  $\delta$ , 可以求出目标距摄像机的距离  $u_1$ . 由于该方法只需要一台 CCD 摄像机, 免除图像间的配准和特征点的选取, 有利于实时系统的实现.

## 2 成像系统的模型

根据透镜成像原理有以下的基本公式:

$$\frac{1}{u_0} + \frac{1}{v_0} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

其中,  $f$  为摄像机镜头的焦距,  $u_0$  为目标到摄像机镜头的距离,  $v_0$  为图像的聚焦点到摄像机镜头的距离. 当目标到摄像机镜头的距离为  $u_0$ , 像检测器到摄像机镜头的距离为  $v_0$  时, 得到清晰的聚焦图像. 改变目

标到镜头的距离  $u$ , 在像检测器上得到目标的模糊图像. 当摄像机内部参数固定, 图像的模糊程度与目标到摄像机镜头的距离  $u$  有下列关系<sup>[1]</sup>:

$$u = \frac{fv_0}{v_0 - f - F\sigma} \quad (2)$$

式中,  $F$  为镜头的  $F$  数;  $\sigma$  为模糊图像的散焦半径. 目标到摄像机镜头距离的变化不但引起图像散焦半径的变化, 而且引起图像尺寸的变化. 为了使模糊半径与图像尺寸之间的关系简单, 我们采用远心镜头代替普通镜头拍摄景物, 将普通镜头变成远心镜头的方法参见文献[3], 远心镜头光学成像图如图 2 示. 采用远心镜头后图像的聚焦点始终是散焦图像的中心<sup>[3,4]</sup>.

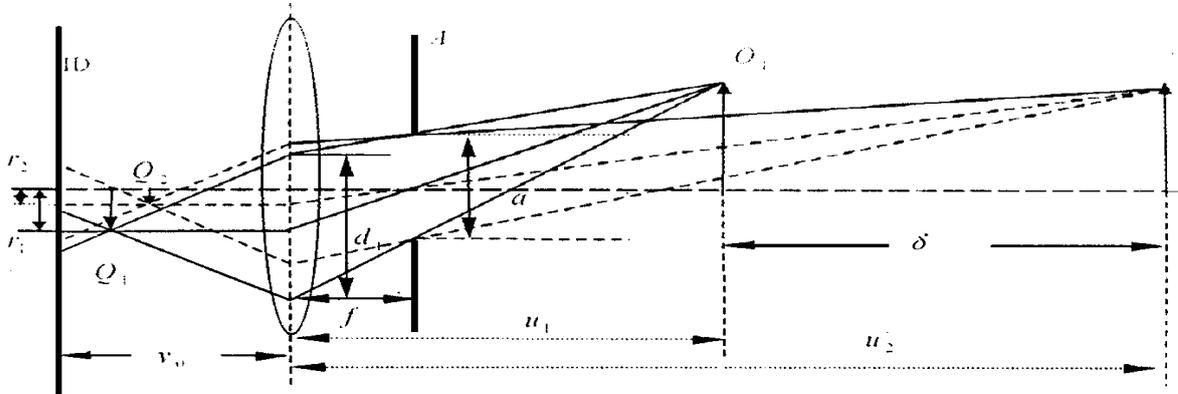


图 2 远心镜头成像

设目标高度为  $R$ , 到摄像机镜头的距离为  $u_1$ . 目标在  $O_1$  时像检测器(CCD 阵列) ID 上所成的像  $Q_1$  是一个半径为  $\sigma_1$  的圆斑,  $\sigma_1$  值的大小代表了图像的模糊程度, 这时像高为  $r_1$ ; 沿光轴方向移动目标到  $O_2$ , 移动的距离为  $\delta$ , 在像检测器(CCD 阵列) ID 上所成的像  $Q_2$  是一个半径为  $\sigma_2$  的圆斑, 这时像高为  $r_2$ , 物体距镜头的距离为

$$u_2 = u_1 + \delta \quad (3)$$

由几何光学得

$$d_1 = \frac{u_1}{u_1 - f} \times a \quad (4)$$

散焦半径为

$$\sigma_1 = v_0 \left| \frac{1}{f} - \frac{1}{u_1} - \frac{1}{v_0} \right| d_1 \quad (5)$$

像的高度为

$$r_1 = \frac{f}{u_1 - f} R \quad (6)$$

同理得

$$d_2 = \frac{u_2}{u_2 - f} a$$

$$\sigma_2 = v_0 \left| \frac{1}{f} - \frac{1}{u_2} - \frac{1}{v_0} \right| d_2$$

$$r_2 = \frac{f}{u_2 - f} R$$

设  $\alpha$  为放大比例因子,  $\beta$  为散焦半径比例因子. 则得

$$\alpha = \frac{r_1}{r_2} = \frac{u_2 - f}{u_1 - f} = \frac{u_2 - f}{u_1 - f} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\left| \frac{1}{f} - \frac{1}{u_1} - \frac{1}{v_0} \right| d_1}{\left| \frac{1}{f} - \frac{1}{u_2} - \frac{1}{v_0} \right| d_2} \quad (8)$$

## 3 深度计算

从上式可以看出, 由于  $u_1, v_0, f$  已知, 因此求出  $\beta$  便可求出  $u_2$ . 由于  $\beta$  是  $\sigma_2$  与  $\sigma_1$  的比值, 直接计算  $\sigma_2, \sigma_1$  很困难, 为此间接的求  $\beta$ . 对于图 2 所示的纹理图像, 由于目标沿光轴移动了一段距离, 得到图像的

纹理密度与模糊程度都不同. 图 3(a) 的图像纹理较清晰, 方格较宽; 图 3(b) 的图像较模糊, 方格也较窄.

设  $p$  为图像中模糊边缘区与整个图像区域的比值, 则当整个图像区域的大小不变时,  $p$  的大小与模糊边缘区域的大小及整个图像区域中方格的数量有

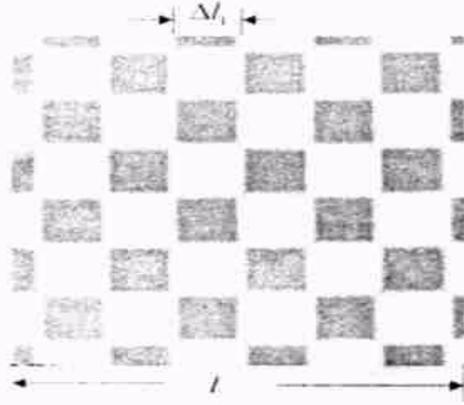


图 3(a) 距离为  $u_1$  时的图像

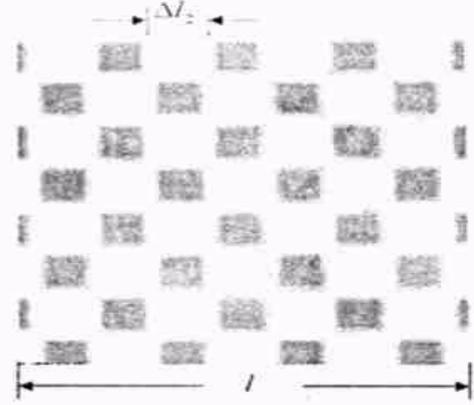


图 3(b) 移动距离  $\delta$  时的图像

$$p_1 = \frac{4\sigma_1 n_1 \Delta l_1}{l^2} \quad (9)$$

其中,  $n_1$  为图 3(a) 中方格的个数. 当图像的纹理较密时, 可近似得:  $n_1 = \left| \frac{l}{\Delta l_1} \right|^2$ . 同理对于图 3(b) 得

$$p_2 = \frac{4\sigma_2 n_2 \Delta l_2}{l^2} \quad (10)$$

其中,  $n_2$  为图 2(b) 中方格的个数,  $n_2 = \left| \frac{l}{\Delta l_2} \right|^2$ , 则

$$\beta = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\frac{p_1}{n_1 \Delta l_1}}{\frac{p_2}{n_2 \Delta l_2}} = \frac{p_1 \Delta l_1}{p_2 \Delta l_2} \quad (11)$$

由于同一幅图像中方格的宽度相等, 摄像机沿光轴方向运动, 因此通过计算可得

$$\frac{\Delta l_1}{\Delta l_2} = \frac{r_1}{r_2} = \alpha \quad (12)$$

将(12)代入(11)得

$$\beta = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \alpha \frac{p_1}{p_2} \quad (13)$$

令  $\rho = \frac{p_1}{p_2}$ , 将(3)(7)(13)式代入(8)式得

$$u_1 = \frac{\delta \rho \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{v_0} \right) - \rho + 1}{(1 - \rho) \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{v_0} \right)} \quad (14)$$

关. 设整个图像区域的大小为  $l^2$ , 图像中方格的宽度为  $\Delta l$ , 随着距离的变化, 图像的散焦半径  $\sigma$  变化, 模糊边缘区域也变化; 图像中方格的数量也变化, 则对于图 3(a)  $p_1$  为

#### 4 $\rho$ 的计算

为了计算  $p_1, p_2$  将所得的模糊图像转换为梯度图像. 在梯度图像中模糊边缘区较亮, 有较高的梯度值; 非边缘部分较暗, 有较小的梯度值. 随着图像散焦半径  $\sigma$  的不同, 亮区占整个图像区域的比  $p$  也不同. 对于散焦半径  $\sigma$  小的图像  $p$  较小, 散焦半径  $\sigma$  大的图像  $p$  较大. 因此, 计算梯度图像中  $p$  的大小变化可计算出  $p_1, p_2$ .

对于如图 3(a) 所示的图像  $f_1(x, y)$ , 其梯度图像为  $g_1(x, y)$ . 设梯度图像中亮区、暗区与整个图像区域的比值分别为  $p_1, w_1$ . 采用矩保持法(moment-preserving) 计算  $p_1, w_1$ , 设图像  $g_1(x, y)$  中亮区与暗区的灰度值分别为  $z_0, z_1$ , 则  $z_0 > z_1, 0 \leq p_1, w_1 \leq 1, p_1 + w_1 = 1$ . 图像  $g_1(x, y)$  的前三阶矩为<sup>[2,5,6]</sup>:

$$m_j = \frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in N(x,y)} [g_1(x, y)]^j, j = 1, 2, 3 \quad (15)$$

其中,  $N(x, y)$  为图像区域. 采用矩保持法得到下面 4 个方程:

$$\begin{aligned} p_1 z_0^1 + w_1 z_1^1 &= m_1 \\ p_1 z_0^2 + w_1 z_1^2 &= m_2 \\ p_1 z_0^3 + w_1 z_1^3 &= m_3 \end{aligned}$$

以及

$$p_1 + w_1 = 1$$

解以上 4 个方程<sup>[2]</sup>得  $p_1, w_1$ .

对于图 3(b) 所示的图像  $f_2(x, y)$ , 其梯度图像

为  $g_2(x, y)$ . 设  $p_2, w_2$  分别为亮区、暗区与整个图像区域的比值. 同理可得  $p_2, w_2$ .

## 5 实验研究

实验采用分辨率为 600 线的 MTV1881CCD 摄像头, 焦距为 50mm 的光学镜头, MVPCI-V3A 黑白图像采集卡, PII -350 微机.

镜头聚焦到 1000mm 的地方, 将目标景物放置在镜头前  $u_1 = 1050\text{mm}$  处, 得到一副图像; 沿光轴移

动镜头, 移动距离为  $\delta$ , 得到目标场景的另一副图像. 用上节介绍的方法计算目标景物到摄像机镜头的距离  $u_1$ . 当  $\delta$  为不同值时计算  $u_1$  估计值, 得到的数据如表 1 所示: 镜头聚焦位置及移动方向不变,  $\delta$  固定 ( $\delta = 50\text{mm}$ )  $u_1$  变化时, 计算  $u_1$  的估计值. 实验数据如表 2 示: 测量误差随移动距离变化的曲线图如图 4 (a) 所示. 测量误差随  $u_1$  变化的曲线图如图 4 (b) 所示.

表 1 实验数据 ( $u_1 = 1050\text{mm}$ )

| $n$       | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\delta$  | 50     | 100    | 150    | 200    | 250    | 300    | 350    | 400    | 450    |
| $\hat{u}$ | 1053.9 | 1034.6 | 1089.9 | 1088.1 | 1084.6 | 1136.4 | 1224.5 | 1269.0 | 1296.3 |
| $ e(n) $  | 3.9    | 15.4   | 39.9   | 38.1   | 34.6   | 86.4   | 174.5  | 219.0  | 246.3  |

表 2 实验数据 ( $\delta = 50\text{mm}$ )

| $n$          | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $u_1(n)$     | 1050   | 1100   | 1150   | 1200   | 1250   | 1300   | 1350   | 1400   | 1450   |
| $\hat{u}(n)$ | 1051.5 | 1084.6 | 1140.5 | 1191.1 | 1241.1 | 1312.7 | 1370.1 | 1416.6 | 1438.3 |
| $ e(n) $     | 1.5    | 15.4   | 9.5    | 8.9    | 8.9    | 12.7   | 20.1   | 16.6   | 11.7   |

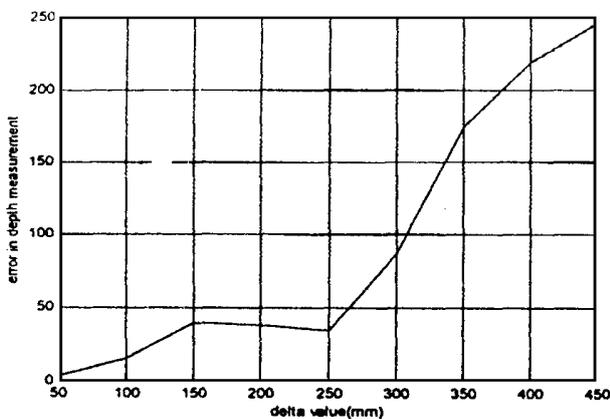


图 4(a) 表 1 的误差曲线

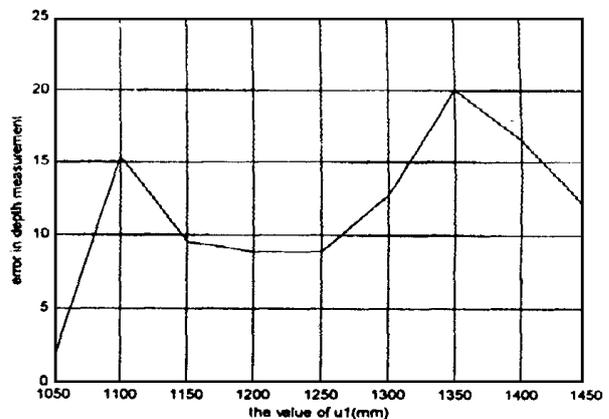


图 4(b) 表 2 的误差曲线

## 6 讨论

从误差曲线可以看出, 当  $u_1$  保持不变时, 随着移动距离  $\delta$  增大, 误差也增大. 当沿光轴移动的距离较小时, 用本文提出的算法得出的结果较准. 由图 4 (a) 当摄像机移动距离在 250mm 以内时, 误差不大于 3%; 当移动距离大于 300mm 时误差较大; 由图 4 (b) 当摄像机镜头移动的距离保持不变时, 随着  $u_1$  距清晰聚焦点距离的增大误差也增大.

从公式(14)得出的深度计算公式, 散焦半径是通过几何运算得到的, 当实际位置离聚焦位置较远时, 散焦图像会产生重叠. 此外, 散焦半径还受光学系统的干涉、衍射、光学变形的影响以及光学系统的模型不精确, 这些都为测量带来误差; 这种测量方法需要知道摄像机的内部参数, 摄像机参数校准不精确也为测量带来误差;  $\rho$  的计算是用矩保持法, 通过梯度图像计算得出的. 由于图像中存在着噪声, 使计

算值不能正确的反映图像纹理的模糊情况为测量带来误差.

## 7 结论

本文提出了一种计算目标距离的新方法. 该方法只需要一台 CCD 摄像机使系统结构简单, 提出的算法免除图像间的配准和特征点的选取, 有利于实时系统的实现. 该方法要求目标景物必须有较为明显清晰的纹理特征.

### 参考文献

- 1 Pentland A P. A New Sense for Depth of Field. IEEE Trans. PAMI, 1987, 9(4)
- 2 Tsai W-H. Moment-preserving Thresholding: A New Approach. Computer Vision Graphics Image Process, 1985, 29: 377- 393
- 3 Watanabe M, Nayar S K. Telecentric Optic for Focus Analysis, IEEE Trans. PAMI, 1997, 19(12) : 1360- 1365

- 4 Sang Chul Ahn, Sukhan Lee. Experiment Depth from Magnification and Blurring. International Conference on Intelligent Robots and System, 1997, 2: 733- 739
- 5 Thai B Nguyen, John Oommen B. Moment-Preserving Piecewise Linear Approximations of Signals and Images. IEEE Trans. PAMI, 1997, 19: 84- 91
- 6 DU-Ming Tsai, Chin-Tun Lin. A Moment-Preserving Approach for Depth from Defocus. Pattern Recognition, 1998, 31(5): 551- 560
- 7 李介谷. 计算机视觉的理论与实践(第二版). 上海交通大学出版社, 1999

### 作者简介:

- 田 涛 (1971-), 男, 博士研究生. 研究领域: 计算机视觉, 机器人等.
- 潘俊民 (1947-), 男, 博士生导师. 研究领域: 计算机视觉, 机器人.

(上接第 14 页)

### 参考文献 (Reference)

- 1 Tarn T J, Ning X, Chuanfan G, Bejezy A K. Function-based Control Sharing for Robotic Systems. Proc IEEE Int Conf Robot and Automat, 1995
- 2 Ning X, Tarn T J. Hybrid System Approach for Task Planning and Control of Robotic Manufacturing Workcell. Proc IFAC'96 World Congress San Francisco, California, USA, 1996
- 3 Ning X, Tarn T J. Action Synchronization and Control of Internet Based Telerobotic Systems. Proc IEEE Int Conf Robot and Automat, 1999: 219- 224
- 4 吴麒主编. 自动控制原理. 清华大学出版社, 1992
- 5 常文森, 朱晓峰, 张曲光, 徐小林. 操作器力和位置混合控制. 数学

模型和实验研究中的几个问题. 机器人, 1993, 15(1): 1- 9

- 6 李杰. 监控式多机器人协调控制技术的研究. 博士论文, 国防科技大学机电工程与自动化学院, 1999

### 作者简介:

- 李 杰 (1972-), 男, 博士, 研究领域: 机器人力控制, 多机器人协调控制等.
- 韦 庆 (1970-), 男, 副教授. 研究领域: 机器人力控制, 机器人智能控制等.
- 常文森 (1936-), 男, 博士生导师. 研究领域: 机器人控制, 移动机器人, 磁悬浮等.