

0253-2239(2001)03-0339-05

用于摄像机定位的单目视觉方法研究

祝世平¹⁾ 强锡富²⁾

1) 北京航空航天大学宇航学院第五研究室, 北京 100083
2) 哈尔滨工业大学电气工程与自动化学院自动化测试与控制系, 哈尔滨 150001

摘要: 利用单目视觉算法确定摄像机相对于被测点的聚焦位置的方法, 提出了一种新的能量谱-熵函数图像聚焦锋利性测度评价函数以及新的单目视觉测量方法, 即将单目视觉方法中的离焦法和聚焦法结合起来, 进行聚焦位置的测量。并给出了用于摄像机定位的单目视觉离集法和聚焦法的计算模型。实验验证结果证明了算法的稳定性和可靠性。

关键词: 单目视觉; 离焦法; 聚焦法; 图像聚焦锋利性测度评价函数; 图像处理

中图分类号: TB96 文献标识码: A

1 引 言

单目视觉测距方法是计算机视觉领域中一种重要的测距方法, 本文提出了一种新的用于确定摄像机相对于被测特征点聚焦位置的单目视觉算法, 该算法为后续的摄像机标定、特征点的图像处理、双目视觉测距等提供测量的先决条件^[1]。

本文的视觉测量系统采用单目视觉方法中离焦法与聚焦法相结合的办法进行摄像机的定位, 研究的重点在于图像聚焦锋利性测度评价函数的设计,

以及新的摄像机聚焦位置求取算法。

2 单目视觉方法的基本原理

单目视觉方法的基本原理如图 1 所示, 其中采用薄透镜模型。

令 P 表示被测点, P' 表示 P 点所成的聚焦像点, P'' 表示 P 点所成离焦弥散圆的圆心, f 表示透镜的焦距, u 表示物距, v 表示 P 点成聚焦图像时的像距, s 表示 P 点成离焦图像时的像距。

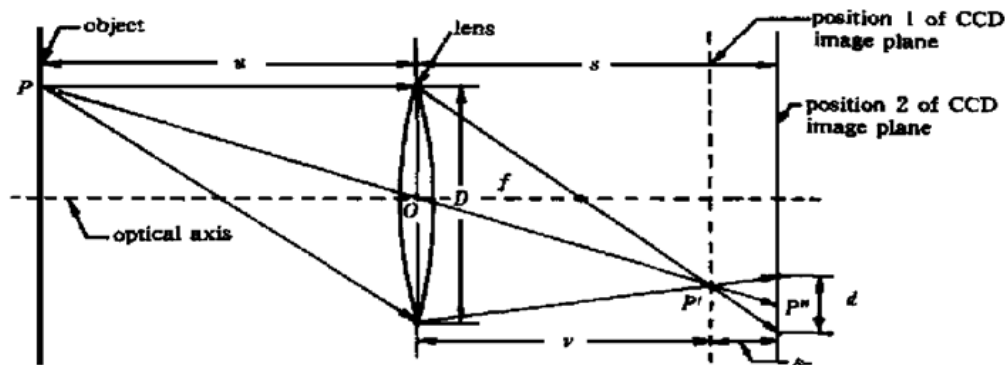


Fig. 1 The principle of depth from defocus and depth from focus method

图 1 中, P 点和 P' 点应该满足透镜成像公式

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (1)$$

以上是聚焦法测距的基本原理, 即首先要保证 P' 点是 P 点的完全聚焦像点, 要满足该条件, 则需要实现精确的聚焦和对准, 其计算依据是图像聚焦锋利性测度的评价准则。

而 P'' 点相对于 P 点处于离焦成像的位置, 根据

相似三角形关系和 (1) 式, 可求得弥散圆直径 d 为

$$d = s \cdot D \left[\frac{1}{f} - \frac{1}{u} - \frac{1}{s} \right] \quad (2)$$

另外, 假设 σ 是对应于弥散圆点扩散函数二维高斯分布的标准差, 它与弥散圆直径的关系可以表示为 $d = k\sigma$ (其中 k 是一个需要标定的常数, 且其随着光学系统的不同而变化)。而通光口径 D 可以表示为 $D = \frac{f}{F}$, 其中 F 为透镜的光圈指数。此时可以求得物距 u 为

$$u = \frac{f}{s - f - Fk\sigma} \quad (3)$$

由(3)式可知,如果已知摄像机的光学系统参数(如 F 、 s 、 f)和 σ 以及 k ,则可以求得物距 u 。以上是离焦法测距的基本原理,其中 σ 和 k 的标定是比较关键和困难的问题, σ 和 k 的取值误差将作为一次误差直接引入被测物距 u ,并直接影响离焦法测距的精度^[2]。

3 图像聚焦锋利性测度的评价函数

聚焦图像比离焦图像包含更多的信息和细节,这是单目视觉聚焦方法的基础。假设物体位置不动,而摄像机前后移动,则图像聚焦锋利性测度评价函数的极大值对应的位置应该是摄像机的聚焦位置。

本文提出了一种新的能量谱-熵函数评价方法,实验结果证明该方法较常规的图像聚焦锋利性测度评价函数更加准确、可靠和稳定^[3,4]。

假定图像灰度分布用 $f_k(x_1, y_1)$ 表示,其中 k 为图像序列编号, $1 \leq k \leq N$, N 为总的图像序列数; (x_1, y_1) 为在所显示图像中像点的行、列位置坐标,其中

$$1 \leq x_1 \leq N_x, \quad 1 \leq y_1 \leq N_y,$$

N_x 和 N_y 分别是图像的总行数和总列数;灰度值范围为 $g[0, G]$,即

$$0 \leq f_k(x_1, y_1) \leq G.$$

对于图像序列中的第 k 幅图像,其二维离散傅里叶变换可以表示为

$$F_{FT2}(u, v) = \sum_{x_1=1}^{N_x} \sum_{y_1=1}^{N_y} f_k(x_1, y_1) \times \exp\left[-j2\pi\left(\frac{x_1}{N_x}u + \frac{y_1}{N_y}v\right)\right]. \quad (4)$$

对于图像序列中的第 k 幅图像,对应于二维谐波分量 (u, v) 的规范化能量谱可用下式表示:

$$S(u, v) = \left[\operatorname{Re} \left[\frac{F_{FT2}(u, v)}{\sum_{x_1=1}^{N_x} \sum_{y_1=1}^{N_y} f_k(x_1, y_1)} \right] \right]^2 + \left[\operatorname{Im} \left[\frac{F_{FT2}(u, v)}{\sum_{x_1=1}^{N_x} \sum_{y_1=1}^{N_y} f_k(x_1, y_1)} \right] \right]^2. \quad (5)$$

式中的分母表示图像中各像素的灰度值之和, Re 表示取复部的实部, Im 表示取复数的虚部。

为了对不同二维谐波分量在整个图像光强分布

中所起的作用进行加权综合分析,采用能量谱-熵的方法。对于图像序列中的第 k 幅图像,综合考虑所有二维谐波分量的能量谱的熵可按式计算

$$E_k = - \sum_{x_1=1}^{N_x} \sum_{y_1=1}^{N_y} S(u, v) \cdot \ln S(u, v), \quad (6)$$

取

$$E_{\text{optimum}} = \max_{1 \leq k \leq N} E_k, \quad 1 \leq k \leq N \quad (7)$$

则 E_{optimum} 所对应的位置是聚焦位置。

4 用于摄像机定位的单目视觉方法的计算模型

目前的单目视觉方法或者基于离焦方法,或者基于聚焦方法。离焦法的主要优点在于拍摄的图像数量少,因而计算量小、测量效率高,缺点是测量精度相对较差;而聚焦法与之相反。本文将以上两种方法结合起来,使二者的优缺点互相弥补,提出了一种新的单目视觉摄像机定位方法和计算模型^[5,6]。

4.1 用于摄像机定位的单目视觉离焦法计算模型

目前的各种离焦测距定位方法,多数是针对模拟的阶跃性边缘或实际阶跃边缘图像所提出的算法,并对实际物体和点扩散函数进行了分段线性拟合。然而对于实际课题中的复杂图像很难作出以上简化,需要提出一种新的离焦定位算法。

假设在深度方向 z 处的能量谱-熵函数值为 $E(z_i)$,能量谱-熵函数 $E(z_i)$ 曲线在峰值点附近服从高斯分布。取峰值点附近的三点按照高斯模型进行拟合,即可计算出 $E(z_i)$ 曲线峰值点的位置,该位置可认为是图像的近似聚焦位置^[7]。

如图2所示,取峰值点附近等间距的三点 $(z_i, i = m - 1, m, m + 1)$,计算出相应的能量谱-熵函数值

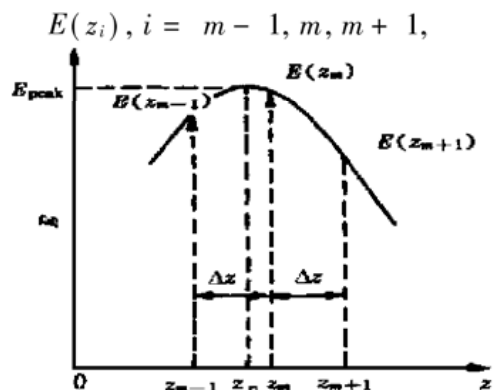


Fig. 2 The principle of position from defocus method

$$E(z_m) > E(z_{m-1}),$$

$$E(z_m) > E(z_{m+1}).$$

根据高斯函数模型, 拟合函数可以表示为

$$E(z_i) = E_{\text{peak}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z_i - z_p}{\sigma_G}\right)^2\right], \quad (8)$$

其中 z_p 和 σ_G 分别是能量谱 - 熵函数高斯分布的平均值和标准差, E_{peak} 是 z_p 所对应的 $E(z_p)$ 值。对(8)

$$z_p = \frac{[\ln E(z_m) - \ln E(z_{m+1})](z_m^2 - z_{m-1}^2)}{2\Delta z \{[\ln E(z_m) - \ln E(z_{m-1})] + [\ln E(z_m) - \ln E(z_{m+1})]\}} - \frac{[\ln E(z_m) - \ln E(z_{m-1})](z_m^2 - z_{m+1}^2)}{2\Delta z \{[\ln E(z_m) - \ln E(z_{m-1})] + [\ln E(z_m) - \ln E(z_{m+1})]\}}, \quad (10)$$

式中,

$$\Delta z = z_m - z_{m-1} = z_{m+1} - z_m. \quad (11)$$

在测量时, 首先目测取成像近似最清楚位置 z_m , 及其前后等间距的两点 z_{m-1} 和 z_{m+1} , 并计算三点的能量谱 - 熵函数值, 由(10) 式即可求得近似的聚焦位置 z_p 。由于对被测物体图像特征预先没有任何假设, 避免了建立复杂的数学模型, 同时减少了由于简化的假设与模型而造成的误差, 提高了测量精度, 适合于针对实际被测物体复杂图像的测量。

4.2 用于摄像机定位的单目视觉聚焦法计算模型

经过以上离焦定位过程, 可以基本确定摄像机相对于被测点的近似聚焦位置。为了进一步提高聚焦位置的定位精度, 需要在已求出的近似聚焦位置附近应用聚焦定位算法寻求更准确的聚焦位置。由于离焦定位算法已经求出了初步的聚焦位置, 这就为聚焦定位算法减小搜索范围, 提高了搜索速度和测量精度, 这也是将离焦法和聚焦法结合起来应用的原因所在。

聚焦定位算法的主要误差因素在于 CCD 摄像机光学系统的景深。景深 Δl 可以表示为^[8]

$$\Delta l = \frac{2d_{\text{max}}F(1-\beta)}{\beta^2}, \quad (12)$$

式中, F 为物镜的光圈指数, β 为摄像机物镜的横向放大率, d_{max} 为像面上允许的弥散圆的最大直径, 该数值与 CCD 像面的像面面积、像元数目有关, 即与单位像素的几何尺寸有关。单位像素的几何尺寸越小, 则像面上允许的弥散圆的最大直径越小, 景深 Δl 越小, 反之亦然。作为单目视觉定位方法本身, 希望景深越小越好, 这样测量不确定性和测量误差也就越小。但景深总是存在的, 可适当选择参数 F 和 β , 以便于图像处理。

在离焦定位算法已求得的近似聚焦位置附近的 $\pm 3\Delta l$ 范围内, 拍摄 N 幅图像, 计算出每幅图像的能

式两边取自然对数得

$$\ln E(z_i) = \ln E_{\text{peak}} - \frac{1}{2} \left(\frac{z_i - z_p}{\sigma_G}\right)^2. \quad (9)$$

将 $[E(z_i), i = m-1, m, m+1]$ 和相应的 $(z_i, i = m-1, m, m+1)$ 代入(9) 式, 得到三个方程, 从中可以求得 z_p , 其表达式如下

量谱 - 熵函数值。由于图像噪声和测量过程中成像系统放大倍数变化的影响, 能量谱 - 熵函数曲线可能有一定的波动, 所以需要进行 m 次多项式最小二乘拟合 ($M_1 \leq m \leq M_2$, M_1 为最小拟合次数, M_2 为最大拟合次数)。设在 z_i 点 ($1 \leq i \leq N$) 所拍摄图像的能量谱 - 熵函数值为 $E(z_i)$, 相应的 m 次最小二乘拟合多项式的值为 $LS^m(z_i)$, 定义最小二乘拟合误差 $\delta(m)$ 为

$$\delta(m) = \delta_s(m) + \delta_a(m) + \delta_{\text{max}}(m), \quad (13)$$

其中, $\delta_s(m)$ 为 m 次最小二乘拟合多项式的计算值与能量谱 - 熵函数值之差的平方和:

$$\delta_s(m) = \sum_{i=1}^N [LS^m(z_i) - E(z_i)]^2. \quad (14)$$

δ_a 为 m 次最小二乘拟合多项式的计算值与能量谱 - 熵函数值之差的绝对值之和,

$$\delta_a(m) = \sum_{i=1}^N |LS^m(z_i) - E(z_i)|. \quad (15)$$

δ_{max} 为 m 次最小二乘拟合多项式的计算值与能量谱 - 熵函数值之差绝对值的最大值:

$$\delta_{\text{max}}(m) = \max_{1 \leq i \leq N} |LS^m(z_i) - E(z_i)|. \quad (16)$$

选取 $\delta(m)$ 的最小值所对应的似合次数 M , 求出 M 次最小二乘拟合多项式的最大值所对应的距离位置坐标, 该坐标位置即为摄像机相对于被测点的聚焦位置, 这样就完成了摄像机的聚焦定位工作。

5 实验结果

对于本文所提出的利用单目视觉方法确定聚焦位置的算法, 采用敏通 MTV-1881EX 摄像机, CCTV 镜头(焦距 25 mm, $F1.4$) 以及精密二维工作台进行重复性的测量研究。

首先固定被测工件, 将摄像机放在精密二维工

作台上,垂直对准工件上的被测点区域。移动摄像机,目测找出图像近似最清晰的位置,在其前后各取等间距的两个位置,并在以上三个位置拍摄图像。然后应用离焦定位算法进行计算,得到近似的峰值点位置。

在近似峰值点位置附近取若干个测点并拍摄图像,然后应用聚焦定位算法进一步求得精确的峰值点位置。

实验中,横坐标为精密二维工作台的移动距离(单位为 μm),纵坐标为能量谱-熵函数值。实验中离焦定位算法得到的近似峰值点位置为 $239 \mu\text{m}$,然后在该位置前后拍摄 50 幅图像(每幅图像之间的步距为 $10 \mu\text{m}$),并计算每幅图像的能量谱-熵函数值。图 3 中标记点为“o”的实线表示实测的能量谱-熵函数曲线,标记点为“+”的虚线表示相应的最小二乘拟合曲线,经过最小二乘拟合求得的精确峰值点位置为 $267 \mu\text{m}$ 。

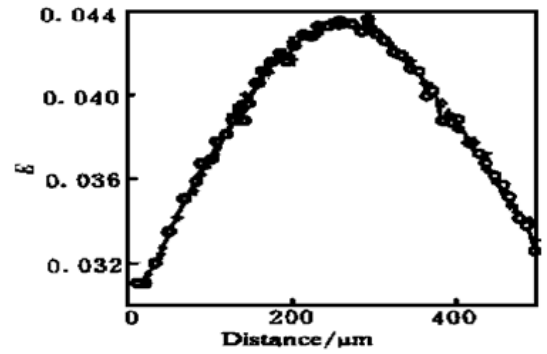


Fig. 3 The measured curve of energy spectrumr entropy function and its least square fitting curve

造成能量谱-熵函数曲线波动的主要原因有:由于隔振条件的限制,工件和摄像机的振动造成了前后拍摄的图像的成像范围有所变化;另外光学系统的放大倍数随着摄像机的移动而变化,也造成了成像范围的变化。

在重复性测量实验中,对同一被测点区域进行了 10 次测量,所求得的聚焦位置如表 1 所示。

Table 1 The measured focusing positions / μm

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Focusing position	293	256	221	245	264	226	274	297	302	294
Mean value	267.2									
Extreme difference	81.0									
standard deviation	29.8									

结论 提出了一种用于摄像机定位的单目视觉测量方法,验证性的实验结果证明了所提方法的正确性和准确性。为了进一步提高摄像机聚焦位置的测量精度,应该采用高灵敏度、单位像素尺寸较小的 CCD 摄像机(这样 d_{max} 较小),并减小摄像机和工件的拍摄序列图像过程中的振动,以及采用畸变小的摄像机镜头。另外,应该进一步研究如何选取参数 F 和 β 的最佳值,在景深尽可能小的情况下便于图像处理,以利于提高测量精度。

参 考 文 献

[1] Ens J, Lawrence P. An investigation of methods for determining depth from focus. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1993, **15**(2): 97~ 108
 [2] Pentland A P. A new sense for depth of field. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1987, **9**(4):

523~ 531
 [3] Lighthart G, Groen F C A. A comparison of different autofocus algorithms. *IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*. 1982. 597~ 600
 [4] Groer F C A, Young IT, Lighthart G. A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms. *Cytometry*, 1985, (6): 81~ 91
 [5] Subbarao M, Surya G. Depth from defocus: A spatial domain approach. *International J. Computer Vision*, 1994, **13**(3): 271~ 294
 [6] Subbarao M, Choi T. Accurate recovery of three-dimensional shape from image focus. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1995, **17**(3): 266~ 274
 [7] Nayar S K. Shape from focus system. *IEEE Computer society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 1992, 302 ~ 308
 [8] 徐家骅. 工程光学基础(第 2 版). 北京: 机械工业出版社, 1988.

Study on Monocular Vision Method Used for Camera Positioning

Zhu Shiping¹⁾ Qiang Xifu²⁾

1), *The 5th Research Unit, School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083*

2), *Department of Automatic Measurement and Control, School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*

(Received 17 July 1999; revised 2 January 2000)

Abstract: The aim of this study is to determine the focusing position of camera relative to the measured point by monocular vision algorithm, and a new monocular vision algorithm is presented. The methods of position-from-defocus and position-from-focus in monocular vision method are combined to determine the focusing position. A new kind of energy-spectrum entropy image focus criteria function and the calculation model of position-from-defocus method and position-from-focus method are given. The verification experimental results indicate the stability and reliability of the proposed algorithm.

Key words: monocular vision; position-from-defocus; position-from-focus; image focus criteria function; image processing