文章编号:1001-5078(2010)10-1136-05

·图像与信号处理·

基于双焦成像的测距技术研究

刘红波[1],赵勋杰[1],彭 翔[2]
(1.苏州大学物理科学与技术学院,江苏 苏州 215006;2.光电子器件与系统(教育部、广东省)重点实验室,深圳大学,广东 深圳 518060)

摘 要:单目双焦立体成像是计算机视觉近年发展的一个重要分支,有着广泛的应用前景。单目双焦成像测距系统,通过改变相机焦距对空间物体两次成像并通过计算可以得到物体的距离。研究了摄像机标定精度、像点径向视差以及相机旋转或平移对测距精度的影响,分析了物体成像面积不随光轴变化的特性,提出了基于成像面积的测距算法,在新的目标距离公式中,用目标的成像面积代替了传统算法中的像点矢量,因此新算法不需要在频繁地改变相机焦距的同时反复地标定摄像机主点位置,这样就解决了双焦成像测距的实时性问题。实验结果表明,提出的算法较传统测距算法有更高的测距精度。

关键词:单目立体;双焦成像;被动测距;相机标定;图像面积
中图分类号:TP24 **文献标识码**:A

Research on range techniques based on bifocal imaging

LIU Hong-bo[1], ZHAO Xun-jie[1], PENG Xiang[2]
(1. School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;
2. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: In recent years, the monocular stereo system based on bifocal imaging is becoming an important branch of computer vision. It has a widespread application prospect. Monocular stereo system get the depth estimation of objects by two images, which are captured at two different focus. Based on the principle of the depth-estimation, we analyzed the factors that influence the range accuracy and then proposed a new ranging algorithm. In the algorithm, the object area was used instead of the image vector, which is used by traditional depth-measurement algorithm. By this way, the process of the tedious camera demarcation was avoided. The experimental results indicate that the new algorithm not only simplifies the depth-measurement process, but also enhances the accuracy of depth-measurement.

Key words: monocular stereo system; bifocal imaging; passive ranging; camera calibration; image area

1 引 言

随着光电技术的发展,光电成像系统广泛的应用在跟踪和制导等军事装备中。由于光电成像系统只能提供目标的角度信息,不能提供目标的距离信息,极大地限制了它的目标识别能力和在武器系统中的作战效能。如果光电成像系统能够获取到目标的距离信息,既可以提高光电系统的跟踪精度,又能够提高系统自动识别目标的能力,还可以为其他武器系统提供重要的目标信息。因此,光电成像测距技术一直备受关注[1]。

传统的立体视觉测距是采用两个或多个摄像机对同一目标从不同位置成像获得立体像对,通过图像匹配算法找到同名点,进而计算出视差,然后采用基于三角测量的方法得到目标的距离。由于需要两个以上摄像系统,该测距技术无法应用在成像跟踪和制导系统中。单目双焦立体视觉是使用一个成像

基金项目:光电子器件与系统(教育部、广东省)重点实验室基金项目资助。
作者简介:刘红波(1977-),男,硕士,主要从事单目双焦立体视觉方向的研究。E-mail:yate1006@163.com
收稿日期:2010-04-12;**修订日期**:2010-06-30

系统,通过改变成像系统的焦距实现立体成像,再通过图像处理技术得到目标的距离信息。由于跟踪和制导成像系统本身就是变焦系统,因此,单目双焦立体测距技术在军事光电系统中将有着广泛的应用前景。

单目立体视觉测距的精度受多方面因素的影响,其中摄像机的标定精度对提高测距精度起决定性的作用。摄像机的标定精度越高,测距精度也就越高。在摄像机的标定方面,国内外学者进行了较深入的研究并取得了一定的研究成果,但由于单目双焦视觉系统需要频繁地改变摄像机的焦距,这就需要频繁地对摄像机进行标定[3-6],这对于实时性要求较高的系统来说是不可行的。我们知道,目标的像面积具有旋转和侧移不变的特点,本文用目标的像面积代替像点矢量计算目标的距离,省去对摄像机标定这一环节,从而提高算法的效率和实用性。

2 单目双焦测距原理及测距精度分析

2.1 单目双焦测距原理

由几何光学可知,在物距相同的条件下,镜头焦距不同所形成的像的高度和相应焦距值之间存在定量的关系。如果用两个不同的焦距对物点成像,并通过图像匹配找到对应匹配点对,再结合相应的焦距值就可以计算出物点的距离,这就是双焦测距的基本原理。图 1 是单目双焦立体成像原理图。

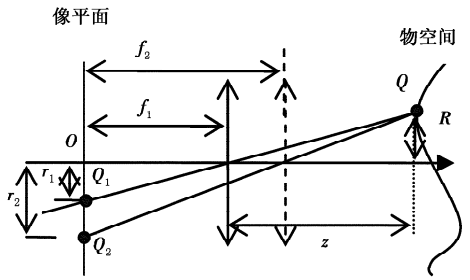


图 1 单目双焦立体成像原理图

Fig. 1 principle of the monocular bifocal imaging system

由图 1 可见,对于空间中某物点 Q,当物镜的焦距由 f_1 变为 f_2 时,可以在像平面上形成两个像点 Q_1 和 Q_2。以相机坐标系为参照系,以小焦距时的透镜中心为原点,以透镜主轴为轴。图 1 中 R 为空间物点到相机主轴的距离,Z 为物点平面到原点的距离,f_1 和 f_2 分别为小焦距和大焦距值,r_1 和 r_2 分别为相应的像点矢量的长度,所谓像点矢量是指以图像主点坐标为起始点指向像点的矢量,理想情况下可以认为矢量的起始点为图像的中心坐标。

由成像原理图和相似三角形性质可得:

$$\frac{R}{r_1}=\frac{z}{f_1} \tag{1}$$

$$\frac{R}{r_2}=\frac{z-(f_2-f_1)}{f_2} \tag{2}$$

由式(1)、式(2)联立解得:

$$z=\frac{r_2f_1(f_2-f_1)}{r_2f_1-r_1f_2}=\frac{f_1(f_2-f_1)}{f_1-\frac{r_1}{r_2}f_2} \tag{3}$$

由式(3)可见,在焦距 f_1 和 f_2 确定的条件下,距离 z 由 r_1/r_2 唯一地确定。

2.2 单目双焦测距误差分析

在单目双焦测距系统中影响测距精确度的因素很多,理论上,单目双焦测距系统的精度受物点实际距离 Z、物点离主轴距离 R 等的影响,对此文献[6]进行了详细的分析。实际成像系统是一个非理想系统,存在着与理想成像条件不一致的偏差,例如成像镜头的像差、成像面位置的偏差、数字传感器的离散误差等。这些因素对测距精度的影响可以通过采取一定的技术措施来消除或降低,如,对成像系统进行几何校正和高精度的标定;减小传感器像素的尺寸、提高同名点的匹配精度等。本文着重讨论以下影响测距精度的因素,研究降低其影响的方法。

(1)单目双焦立体测距系统需要在不同焦距下对同一目标成像来获得其距离信息。而改变摄像机的焦距需要重新对摄像机进行标定,否则计算的距离误差就很大[7]。因此在实际应用过程中需要频繁对摄像机标定才能保证其准确性,这对于实时测距系统是无法实现的。

(2)像点径向视差对测距精度的影响

为了讨论方便,令 $\Delta r=r_2-r_1$,$k=\frac{f_2-f_1}{f_1}$,由式(3)可得:

$$\begin{aligned} z &= -\left(f_1+f_2\frac{\Delta r}{\frac{(f_2-f_1)r_1}{f_1}-\Delta r}\right)\\ &= -\left(f_1+f_2\frac{\Delta r}{kr_1-\Delta r}\right)\\ &= -\left(f_1+f_2\frac{1}{kr_1/\Delta r-1}\right) \end{aligned} \tag{4}$$

式中,Δr 为径向视差,即两像点间的位移,由式(4)可知距离 z 由 $kr_1/\Delta r$ 唯一确定。

物点深度 z 与径向视差 Δr 之间的相对变化关系为:

$$\frac{\partial z}{\partial \Delta r}=f_2\frac{kr_1}{(kr_1-\Delta r)^2} \tag{5}$$

式中,$\partial z/\partial \Delta r$ 表示像平面上单位长度的距离代表测量深度的大小,其值越小,表明成像系统的深度分辨

率越高。由 $\partial z/\partial \Delta r = f_2 k r_1/(kr_1 - \Delta r)^2$ 可知成像系统的深度分辨率与径向视差 Δr 成反比。当 Δr 越小,要求成像系统的深度分辨率越高,即要求矢量 r_1 和 r_2 的值精确度越高,在这种情况下,很小的 Δr 偏差,计算出来的深度值误差很大。所以 Δr 越小测距误差越大。对于处在同一平面的空间物点,由成像原理图可知径向视差 Δr 与 R 成正比,物点越靠近主轴,则其在像平面的径向视差 Δr 越小;在焦距确定的条件下,Δr 与 z 成反比,z 越大,径向视差 Δr 越小。对以上两种情况在标定主点坐标时,微小的误差标定误差也会导致较大的测距误差。

(3)在改变焦距获得立体图像对时,在理想的情况下图像应仅在矢径方向上产生缩放。如果相机在拍摄两幅图像时发生旋转或偏移,则像矢径 r_1 和 r_2 就会产生偏差,这将对测距精度产生影响。

3 基于目标面积的测距方法

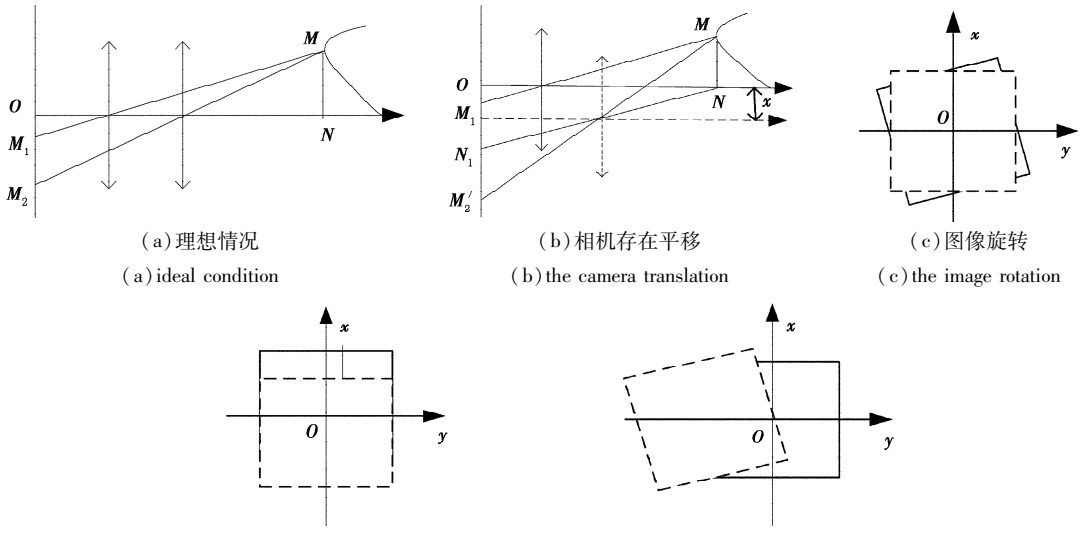
单目双焦立体测距是通过改变焦距来获得立体图像对,目前的单目双焦成像深度算法中所用的像点矢量 r_1,r_2 是以图像主点坐标(有些算法中直接取图像中心)为起点,这就要求改变焦距时相机的光轴不发生变化(这实际上是不可能的),否则频繁改变焦距就需要频繁地标定摄像机主点坐标,且要求标定的精确度很高才能达到较高的测距精度,这在实际应用中常常无法实现。为此我们提出下面解决这一问题的方法。

3.1 目标面积的不变性

我们注意到,光轴发生变化时仅仅是图像发生旋转和侧移,但目标的面积不会改变,如果目标距离的计算是基于图像的面积,变焦测距时就可以不必标定摄像机主点坐标,这样就解决了目标的实时测距问题。下面我们来说明图像的面积相对于主点坐标不变的特性。

如图 2 所示,假设在垂直于相机光轴的平面空间中存在至少两个物点 M,N,其在摄像机小焦距处所拍摄图像中成像分别为 M_1,O,理想情况下,镜头沿光轴方向平移到大焦距处,M,N 所成像点分别为 M_2,O。又假设实际情况下相机从小焦距调整到大焦距时,光心在像平面上的投影存在侧移 x,M,N 所成像点分别为 M_2',N_1。图 2 所示为 M,N 分布在光轴一侧和光轴上时的情况(不难推导,当 M,N 分布在光轴两侧和同侧时以下结论同样成立)。根据平面几何知识可知线段 $OM_2 = N_1M_2'$,即垂直于光轴的平面空间内两物点所成像点的矢量长度不随主点侧移而变化,即像点的矢量长度与主点坐标的变化无关。由平面几何的线面关系可知,M,N 和垂直于相机光轴的空间平面内所有其他物点所成像点矢量围成区域面积也不随主点坐标侧移而变化,即像点矢量围成区域面积与相机的主点坐标变化无关。同理,当图像在像平面发生旋转时,其所有像点矢量围成区域面积也不随图像旋转而变化。由此可得以下结论:

在单目双焦测距系统中,垂直于光轴的平面空间内的所有物点在某一焦距处所成像点矢量所围区域面积不随相机垂直光轴方向上的侧移或旋转而改变,即垂直于光轴的平面空间内所有物点所成像点矢量区域面积与主点坐标无关。如图 2(c)、图 2(d)、图 2(e)所示。



(a)理想情况 (a)ideal condition

(b)相机存在平移 (b)the camera translation

(c)图像旋转 (c)the image rotation

(d)图像平移 (d)the image translation

(e)图像平移 + 旋转 (e)the image moves and revolves

图 2 图像在垂直主轴方向上平移和旋转的情况

Fig. 2 image translation and rotation in the vertical axis direction

3.2 基于图像面积测距公式的推导

在图 2 中，令 $l_1 = |OM_1|$，$l_2 = |OM_2| = |N_1M_2'|$，则有 $l_1/l_2 = r_1/r_2$。

由上面的结论可知，各像点矢量所围区域面积与主点坐标的变化无关，令 s_1 和 s_2 分别为在小焦距和大焦距处获得的目标区域面积，则有：

$$\sqrt{s_1/s_2} = l_1/l_2 = r_1/r_2$$

因此式(3)可表示为：

$$z = \frac{f_1 f_2\left(\frac{r_1}{r_2}-1\right)}{\frac{r_1}{r_2}f_2 - f_1} - f_1$$

$$= \frac{f_1 f_2\left(\frac{l_1}{l_2}-1\right)}{\frac{l_1}{l_2}f_2 - f_1} - f_1 = \frac{f_1 f_2\left(\sqrt{s_1/s_2}-1\right)}{\sqrt{s_1/s_2}f_2 - f_1} - f_1 \quad (6)$$

由式(6)给出的测距公式可知，只要得到小焦距和大焦距处目标区域的面积，就可以计算出目标的距离。式(6)中没有出现主点坐标，即本测距算法不需要在频繁地改变相机焦距的同时反复地标定摄像机主点坐标。

3.3 图像面积的测量

目标图像面积测量的精确度是提高本文测距精度的关键因素，为此对目标图像面积进行精确计算是非常重要的。本文采用文献[8]的利用 Freeman 链码矢量分析，对边界像素标注综合处理，再进行边界像素坐标加权求和计算，求得目标图像的面积。本方法得到的图像面积值的误差主要表现在对凹凸点和拐点处理是否引入误差。

结果表明该算法运算速度快、普遍适应各种形状的封闭区域。

3.4 测距误差分析

单目双焦基于目标面积的测距方法虽然无需对主点坐标进行标定或校正，也就是说，主点坐标的漂移不会对基于目标面积的测距方法产生影响，但是在实际测量中要想提高深度恢复的精度，则需要考虑多方面的因素，例如相机光学系统参数误差对获取高质量的变焦图像对的影响、图像特征点的匹配精度、目标图像的面积获取误差等等，这些因素对双焦成像的测距精度有很大的影响，因此在实验结果中还存在一定的误差，但比传统算法的精度有所提高，下面的实验结果验证了误差分析结果。

4 实验结果与分析

在实验中，空间各物点所处空间平面距相机镜头约为 1.00 m。以图像中心点为原点，向右和向下为 x 轴和 y 轴正方向进行特征像点的选择与匹配。下面分别采用文献[9]方法和本文的方法进行实验对比。在本文的算法中，我们使用了摄像机的两个焦距分别为：$f_1 = 8$ mm，$f_2 = 21.6$ mm，所拍图像如图 3(a)、图 3(b)所示，其中图像中黑体字部分为目标图像。实验结果列于表 1 中。实验结果表明新算法的平均百分比误差约为 4.0%。



(a)焦距 $f_1 = 8$ mm

(a) focus $f_1 = 8$ mm



(b)焦距 $f_2 = 21.6$ mm

(b) focus $f_2 = 21.6$ mm

图 3 不同焦距下的图像

Fig. 3 images of different focal

表 1 本文算法测距结果

Tab. 1 this article algorithm ranging result

NO	1	2	3	4	5
Actual distance/m	0.88	0.98	1.15	1.27	1.33
Calculative distance/m	0.917	1.006	1.162	1.236	1.457
Range error/%	4.20	2.58	1.04	2.71	9.54

文献[9]分别用焦距 $f_1 = 80$ mm，$f_2 = 100$ mm 进行成像，并经过一系列校正得到的实验数据如表 2 所示，传统算法在大焦距下实验结果的百分比误差约为 4.8%。比较表 1 和表 2 可以看出本文提出的基于面积的测距算法，不但简化了测距过程，还提高了测距的精度。这里需要说明的是，根据文献[9]的研究结论“在同一深度下，焦距越大，深度误差越小”，而本文实验中采用的相机焦距远小于文献[9]给出的焦距数据。

表 2 文献[9]实验数据

Tab. 2 literature[9] experimental data

NO	1	2	3	4	5
Actual distance/m	0.87	1.00	1.02	1.17	1.32
Calculative distance/m	0.915	1.011	1.058	1.167	1.480
Range error/%	5.24	1.14	3.75	1.79	12.1

5 结束语

单目双焦立体成像是计算机视觉近年发展的一个重要分支,有着广泛的应用前景。本文简述了单目双焦成像测距原理,深入地分析了影响测距精度的因素,提出了基于目标面积的测距方法。用面积代替像点矢量,避开了繁琐的主点标定环节,得到了较好的实验结果。本算法可以应用于实时性要求较高的测距系统。通过大量的实验我们也发现了本文算法的不足,目标图像面积测量的精确度是提高本文测距精度的关键因素,在拍摄两幅图像时如果像面照度变化较大(注意:变焦会改变像面照度),计算的目标面积就会产生一定的误差,进而影响测距结果。

参考文献:

[1] 赵勋杰,高稚允. 光电被动测距技术[J]. 光学技术,2003,29(6):652 - 656.

[2] 王元庆. 双焦距立体视觉中的光学成像模型[J]. 光学技术,2007,33(6):935 - 937.

[3] Lavest J M, Rives G, Dhome M. Three dimension alrecons truction by zooming[J]. IEEE Transactions On Robotics and Automation,1993,9(2):196 - 207.

[4] Lenz R K, Tsai R Y. Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3D machine vision metroiogy[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Raleigh, NC. USA,1987:68 - 75.

[5] Li M X, Lavest J M. Some aspects of zoom lens camera calibration[J]. IEEE Translations on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1996,18(11):1105 - 1110.

[6] 王剑,王元庆. 基于双焦成像的单眼立体视觉算法[J]. 机器人,2007,29(1):41 - 44.

[7] Carsten Steger, Markus Urich, Christian Wiedemann. Machine Vision Algorithms and Applications[M]. Berlin: Wiley-VCH,2007:279 - 283.

[8] 李波,刘东华,梁光明,等. 一种计算任意形状封闭区域面积的新方法[J]. 国防科技大学学报,2002,(4):61 - 64.

[9] 刘昕鑫,王元庆. 基于双脚的单目立体成像系统分析[J]. 计算机测量与控制,2008,16(9):1316 - 1318.