

# 一种基于球面透视投影约束的鱼眼镜头校正方法

英向华 胡占义

(中国科学院自动化研究所模式识别国家重点实验室 北京 100080)

**摘 要** 鱼眼镜头摄像机具有较大视场,但是,使用鱼眼摄像机拍摄的图像会有非常严重的变形。本文研究基于球面透视投影约束的鱼眼镜头校正方法。球面透视投影约束是指空间直线的球面透视投影为球面上的大圆。我们首先使用含有变形校正参数的鱼眼变形校正模型,将空间直线的鱼眼投影曲线上的点映射为球面点,然后通过球面点到球面的球面距离最小来拟合大圆,恢复了变形校正参数,从而实现了鱼眼图像的校正。模拟实验和真实图像实验表明,本文方法能得到比较满意的校正结果。

**关键词** 鱼眼镜头; 基于图像的绘制; 变形校正; 球面几何

**中图法分类号** TP391

## 1 引 言

在机器人导航、虚拟现实、基于图像的绘制以及视觉监控等许多计算机视觉领域,需要使用具有较大视场(field of view)的广角或鱼眼摄像机。但使用广角或鱼眼摄像机拍摄的图像具有非常严重的变形。如果我们想利用这些具有严重变形图像的透视投影信息,那么就需要将这些变形图像校正为人们习惯的透视投影图像。鉴于视场为180度左右的鱼眼镜头应用比较广泛,本文仅讨论视场为180度左右的鱼眼镜头的校正。图1为一幅视场为183度的鱼眼图像。



图1 一幅实验室的鱼眼图像,图像存在严重的变形

在平面透视投影情况下,透视投影图像必须满

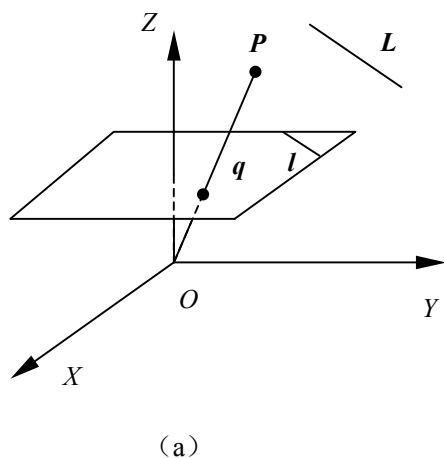
足平面透视投影约束,即空间直线的透视投影必须为图像平面上的直线。对于视场为100度左右的广角镜头的校正,已有的方法利用平面透视投影约束,通过变形校正模型将空间直线的投影曲线映射为图像平面上的直线,达到对变形图像的校正,如文献[1~3]。这些方法的共同点是不使用任何标定块,直接使用场景中的直线,且这些直线的位置和方向是任意的,不要求这些直线之间相互平行或垂直,这与利用已知空间点的三维坐标<sup>[4~6]</sup>或利用多幅图像之间的对应关系<sup>[7~9]</sup>的校正方法不同。而对于视场大于180度的鱼眼镜头,由于它能拍摄到与光轴夹角为90度的光线,如果利用平面透视投影模型来表示完整的校正图像,则校正后的图像大小将为无穷大。也就是说,文献[1~3]所使用的方法不能直接应用在视场大于180度鱼眼镜头的校正。对于视场为180度左右的鱼眼图像,我们觉得采用球面透视投影模型来表示完整的校正图像是比较合适的,此时,整幅鱼眼图像将被映射到一个单位球面上。与平面透视投影的情况不同,在球面透视投影情况下,空间直线不再投影成图像平面直线,而是球面上的大圆。

本文探讨在球面透视投影模型下,利用空间直线的球面透视投影为大圆这一球面透视投影约束来恢复鱼眼变形校正参数的方法。由于在场景直线的鱼眼投影曲线上选取采样点时,不能保证所有采样点都严格位于曲线上,因此,在将这些采样点通过变形校正模型映射为球面点后,需要对这些点进行大圆拟合。本文采用的目标函数是最小化对应于

同一条空间直线的球面点到相应拟合大圆的球面距离的平方和。因此,在鱼镜头校正中,需要使用参数来方便地描述大圆,以及定义球面点到大圆的球面距离等。本文将球面几何引入到鱼镜头校正中来,给出了大圆的球面坐标的概念以及球面点到大圆的球面距离计算公式等。上述理论使得空间直线的球面透视投影必为球面上大圆这一约束得以在鱼眼变形校正中实现。本文的结构为:在第二节首先简要地介绍球面透视投影模型;然后,在第三节讨论了鱼眼变形校正模型;第四节讨论了目标函数的建立,初始值的选取等,如何用参数来表示大圆以及定义球面点到大圆的球面距离等也在本节介绍;在第五节,我们给出了在不同噪声水平下的模拟实验和真实图像实验;第六节为本文的小结。

## 2 球面透视投影模型

透视投影也叫线性投影。我们可以将透视投影图像的形成过程分为两步<sup>[10]</sup>:第一步,将每一个空间点 $P$ 映射为连结 $P$ 与投影中心 $O$ 的射线 $OP$ ;第二步,将射线 $OP$ 线性地映射为图像点。第二步中的映射是可逆的,因为每一条通过投影中心 $O$ 的射线对应于图像上的唯一一点,而图像上的每一点对应于唯一一条过投影中心 $O$ 的射线。图像可以被认为是对通过投影中心 $O$ 的射线的参数化。在文献上,有两种标准的参数化图像的方法。第一种方法是用一个在投影中心附近但不过投影中心的平面与这些通过投影中心 $O$ 的射线相交,此即为平面透视投影模型。第二种方法是使用球心在 $O$ 点的单位球面与这些通过投影中心的射线相交,此即为球面透视投影模型。



平面透视投影模型如图2(a)所示,在投影中心 $O$ 处建立摄像机坐标系, $OZ$ 为主轴(光轴)方向。则有:

$$q = \frac{1}{Z_c} P \quad (1)$$

其中, $q$ 为归一化齐次坐标 $(x,y,1)^T$ , $P$ 为空间点的

非齐次坐标 $(X_c, Y_c, Z_c)^T$ 。一般来讲, $Z_c > 0$ 。

当摄像机具有较大视场时,可以采用单位球面代替投影平面,也就是采用球面透视投影模型,如图2(b)所示。三维空间点 $P$ 在球面上的透视投影 $p$ 的三维直角坐标为:

$$p = \frac{1}{\|P\|} P \quad (2)$$

显然, $p$ 为单位方向向量,如果点 $p$ 的二维球面坐标为 $(\varphi, \theta)$ ,则点 $p$ 的三维直角坐标为

$$p = [\sin \varphi \cos \theta \quad \sin \varphi \sin \theta \quad \cos \varphi]^T。$$

由图2可以很清楚地看出,球面投影能够表示 $OP$ 与主轴 $OZ$ 的夹角大于或等于90度时空间点的透视投影,即 $Z_c$ 可以为任意实数。而平面投影只能表示夹角小于90度的情况,即 $Z_c > 0$ 的情况。当夹角为90度时,即 $Z_c = 0$ 时,空间点在平面图像上的投影为无穷远点。而视场大于或等于180度的鱼镜头拍摄到了与主轴 $OZ$ 夹角为90度的光线。因此,本文采用球面投影模型。

在平面投影模型下,空间直线 $L$ 在图像平面上的投影 $l$ 为 $L$ 与投影中心 $O$ 确定的平面与投影平面的交线。而在球面投影模型下,空间直线 $L$ 在球面上的透视投影为大圆 $g$ ,此大圆 $g$ 是由 $L$ 与投影中

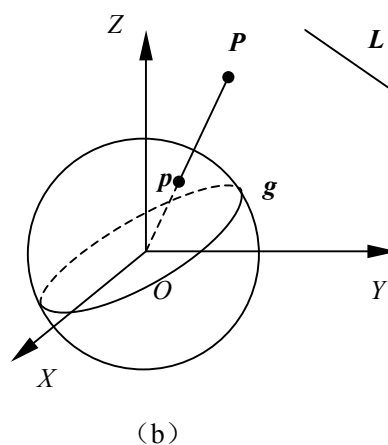


图2 (a) 平面透视投影模型与 (b) 球面透视投影模型

心  $O$  确定的平面与投影球面的交线。

在已知球面投影图像后, 将其转化为平面投影图像是很方便的。由于球面对应唯一一条过投影中心的射线, 我们首先将所有的球面点映射为过投影中心的射线, 然后, 再将这些过投影中心的射线透视投影到一个平面上去, 这样就得到了平面透视投影图像。关于投影平面的方向, 投影中心到投影平面的距离, 以及平面图像的大小等都可以根据需要指定。

### 3 鱼眼变形校正模型

与透视投影成像的过程不同, 鱼眼摄像机的成像过程是非线性的, 它可以被分为三步: 第一步, 每一个空间点  $P$  被映射为连结  $P$  与投影中心  $O$  的射线  $OP$ ; 第二步, 将射线  $OP$  线性地映射到单位球面上, 得到球面透视投影图像; 第三步, 将球面点非线性地映射到像平面上, 得到鱼眼图像。球面点  $p$  经过非线性映射为鱼眼图像点  $m$ , 用公式形式化表示为:

$$m = D(p) \quad (3)$$

$D$  被称为鱼眼变形模型。 $D$  是可逆的, 因为每一个球面点唯一地对应一个鱼眼图像点, 而每一个鱼眼图像点也唯一地对应一个球面点。因此有:

$$p = D^{-1}(m) \quad (4)$$

$D^{-1}$  被称为鱼眼变形校正模型。校正鱼眼图像就是找到鱼眼图像点到球面点之间的映射关系  $D^{-1}$ 。通过鱼眼变形校正模型  $D^{-1}$ , 可以将鱼眼图像上所有图像点都映射到球面上, 而这些球面点必须满足球面投影约束, 也就是一条空间直线的鱼眼投影曲线

必须被映射为球面上的一个大圆。如果  $c$  为一条空间直线在鱼眼图像上的投影曲线, 通过  $D^{-1}$  将其映射为球面上的大圆  $g$ , 即:

$$g = D^{-1}(c) \quad (5)$$

相应地, 对于球面上的某一大圆  $g$ , 经过鱼眼变形模型  $D$ , 将被映射为鱼眼图像上的一条曲线  $c$ , 即:

$$c = D(g) \quad (6)$$

由于鱼眼图像的视场为 180 度左右, 所以对应的球面图像接近一个以主轴  $OZ$  为轴的半球面, 如图 3 所示。

如果点  $p$  为某一空间点的球面透视投影点, 它的球面坐标为  $(\phi', \theta')$ , 由于鱼眼变形  $D$ , 这一点被映射到鱼眼图像平面上一点  $m$ 。点  $m$  的直角坐标记为  $(x, y)$ , 主轴与鱼眼图像平面的交点, 即主点的直角坐标记为  $(x_p, y_p)$ 。以主点  $(x_p, y_p)$  为极坐标系的坐标原点建立极坐标系, 那么, 鱼眼图像点的直角坐标  $(x, y)$  与极坐标  $(r, \theta)$  之间的关系为:

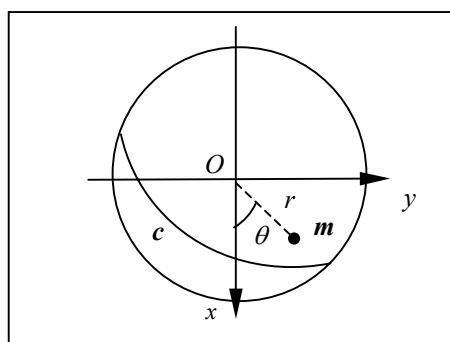
$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}, \quad \tan \theta = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} \quad (7)$$

其中  $\bar{x} = x - x_p, \bar{y} = y - y_p$ 。

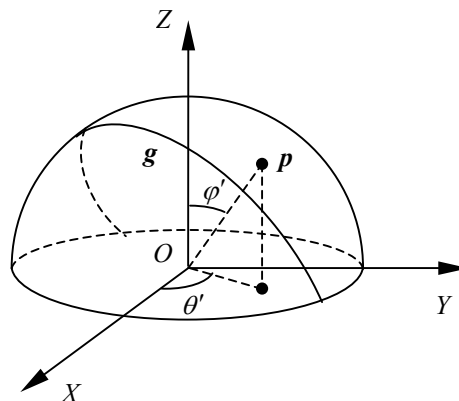
本文假定主点  $(x_p, y_p)$  位于图像的中心 (大量实

验表明这种假设是合理的), 这样鱼眼变形校正模型  $D^{-1}$  可以分为径向变形校正与切向变形校正。径向变形校正与切向变形校正分别为:

$$\phi' = D_r^{-1}(r) \quad (8)$$



(a)



(b)

图 3 (a) 一幅鱼眼图像, (b) 为 (a) 对应的校正后的球面透视投影图像, 鱼眼变形校正模型就是描述 (a) 与 (b) 之间的映射关系

$$\theta' = D_T^{-1}(\theta) \quad (9)$$

一般来讲,  $D_R^{-1}$  和  $D_T^{-1}$  是比较复杂的, 本文采用多项式来逼近。由于低次多项式不能满足精度要求, 而次数过高时需要很高的运算代价, 且对校正精度提高不大, 一般来讲五次多项式是在精度与速度之间的一种权衡。因此, 本文中径向变形校正与切向变形校正的公式为:

$$\varphi' = c_1 r + c_2 r^2 + c_3 r^3 + c_4 r^4 + c_5 r^5 \quad (10)$$

$$\theta' = a_1 \theta + a_2 \theta^2 + a_3 \theta^3 + a_4 \theta^4 + a_5 \theta^5 \quad (11)$$

由于图像平面极坐标的周期性, 当  $\theta=0$  时, 有  $\theta'=0$ , 因此, 当  $\theta=2\pi$  时, 必有  $\theta'=2\pi$ , 所以:

$$a_5 = (1 - a_1 - 2\pi a_2 - 4\pi^2 a_3 - 8\pi^3 a_4) / 16\pi^4 \quad (12)$$

因此,  $a_5$  不是一个独立的参数。

因此, 为了校正鱼眼镜头, 我们需要恢复  $\{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, a_1, a_2, a_3, a_4\}$  共 9 个变形校正参数。

#### 4 变形校正参数的确定

本文使用的约束是, 在球面透视投影情况下, 场景中的直线应该投影为球面图像上的大圆。在这些直线的鱼眼投影曲线上选取采样点可以像文献[1]那样手工选取, 也可以像文献[2][3]那样通过多项式拟合曲线的方法提取。为了得到变形校正参数的无偏估计, 选取的投影曲线应该均匀地分布在鱼眼图像上<sup>[1]</sup>。通过变形校正参数将这些采样点映射为球面点, 建立的目标函数为这些球面点到相应拟合大圆的球面距离的平方和, 通过最小化目标函数来恢复变形校正参数。因此, 在给出目标函数的公式之前, 我们有必要先定义球面点到大圆的球面距离。

##### 4.1 球面点到大圆的球面距离

一个大圆可以用两个参数来表示, 这两个参数就是大圆所在平面的法向量对应的两个方向角。在球面几何中, 与大圆所在平面垂直的直径的两个端点称为大圆的两个极点。如果其中一个极点的球面坐标为  $(\varphi, \theta)$ , 则另一个极点的球面坐标为  $(\pi - \varphi, \pi + \theta)$ 。显然, 大圆所在平面的法向量可以为  $\pm [\sin \varphi \cos \theta \quad \sin \varphi \sin \theta \quad \cos \varphi]^T$ 。为了避免二义性, 一般取  $\cos \varphi \geq 0$  情况下的法向量

$[\sin \varphi \cos \theta \quad \sin \varphi \sin \theta \quad \cos \varphi]^T$  对应的方向角  $(\varphi, \theta)$  为

大圆的参数, 我们将这两个参数称为大圆的球面坐标。为了与点的球面坐标区别起见, 大圆的球面坐标使用大写希腊字母, 即  $(\Phi, \Theta)$  来表示。

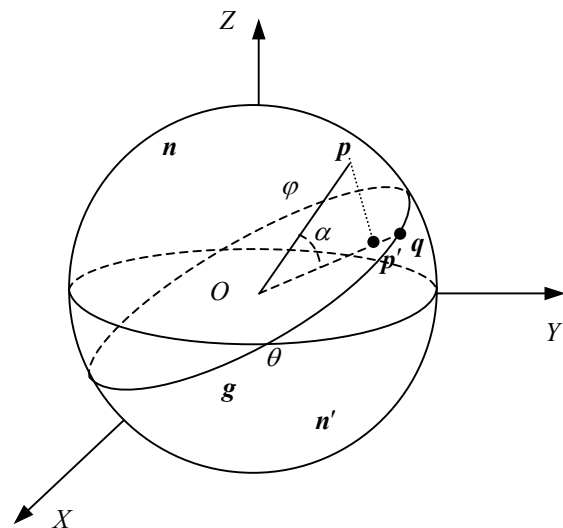


图4 球面点到大圆的球面距离示意图

所谓球面点到大圆的球面距离是指球面点与大圆上所有点之间的最短球面距离。两球面点之间的球面距离是指连结两点的最短球面曲线, 球面曲线上的所有点都在球面上。球面距离通常是某大圆上的一段弧, 用弧度来表示。由图4可以看出, 点p到大圆g的距离为弧pq, 即角 $\alpha$ 。点q是过大圆g的极点n与点p这两点的大圆与大圆g的两个交点中离点p比较近的那一个交点。点p到大圆g所在平面的垂足为p', 线段pp'的长度为d。

**定理 1** 球面点  $(\varphi, \theta)$  到大圆  $(\Phi, \Theta)$  的球面距离为:

$$d_s = d_s((\Phi, \Theta), (\varphi, \theta)) = \arcsin d \quad (13)$$

其中,  $d = |\sin \Phi \sin \varphi \cos(\Theta - \theta) + \cos \Phi \cos \varphi|$ 。

**证明:**

点  $p = [\sin \varphi \cos \theta \quad \sin \varphi \sin \theta \quad \cos \varphi]^T$  到大圆 g 的球面距离  $d_s$  为角  $\alpha$ ,  $d_s$  与 d 的关系为:

$$d_s = \alpha = \arcsin d$$

大圆所在平面的法向量为

$$n = [\cos \Phi \cos \Theta \quad \sin \Phi \sin \Theta \quad \cos \Phi]^T。$$

因为  $|n \cdot p| = |n^T p| = \|n\| \cdot \|p\| \cdot \sin \alpha$ , 又因为

$d = \sin \alpha$  ,  $\mathbf{n}, \mathbf{p}$  为单位向量, 所以,  $d = |\mathbf{n}^T \mathbf{p}|$ , 经整理得:

$$d = |\sin \Phi \sin \varphi \cos(\Theta - \theta) + \cos \Phi \cos \varphi|$$

证毕

有了球面点到大圆的球面距离公式, 就可以建立目标函数了。

## 4.2 目标函数的建立

在我们的方法中, 变形校正参数集合  $S = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, a_1, a_2, a_3, a_4\}$  作用在空间直线的鱼眼投影曲线的采样点  $\mathbf{m}(r, \theta)$  上, 得到球面点  $\mathbf{p}(\varphi', \theta')$ , 然后利用球面点  $\mathbf{p}$  来拟合大圆。如果将所有属于一条直线的鱼眼投影曲线上的采样点都映射为球面点, 使用这些球面点拟合的大圆为  $(\Phi, \Theta)$ , 则对于其中一个采样点  $(r, \theta)$  引起的误差为:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= d_s^2((\Phi, \Theta), (\varphi', \theta')) \\ &\approx d^2((\Phi, \Theta), (\varphi', \theta')) \\ &= (\sin \Phi \sin \cos(\Theta - \theta') + \cos \Phi \cos \varphi')^2 \end{aligned} \quad (14)$$

其中,  $\varphi', \theta'$  分别由式(10), (11)确定。当  $d_s$  很小时, 有  $d_s = \arcsin d \approx d$ 。因此此时可以使用  $d$  来近似地描述球面点到大圆的球面距离  $d_s$ 。如果使用  $L$  来表示用户选取的曲线条数, 使用  $N_j (j=1, \dots, L)$  表示每一条曲线上的采样点数, 那么目标函数为:

$$\begin{aligned} \xi &= \sum_{j=1}^L \left[ \sum_{i=1}^{N_j} d_s^2((\Phi_j, \Theta_j), (\varphi'_{i,j}, \theta'_{i,j})) \right] \\ &\approx \sum_{j=1}^L \left[ \sum_{i=1}^{N_j} d^2((\Phi_j, \Theta_j), (\varphi'_{i,j}, \theta'_{i,j})) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

其中  $\Phi_j$  与  $\Theta_j$  是对应于鱼眼图像曲线  $j$  的最优拟合大圆的坐标,  $(\varphi'_{i,j}, \theta'_{i,j})$  是在曲线  $j$  上的第  $i (i=1, \dots, N_j)$  个采样点对应的球面点的球面坐标。

由于这些最优拟合大圆的球面坐标未知, 大圆坐标  $\Phi_j$  与  $\Theta_j (j=1, \dots, L)$  将与变形参数集合  $S$  一起优化。关于大圆坐标  $\Phi_j$  与  $\Theta_j$  与变形参数的初始值的选取将在下一小节介绍。

## 4.3 初始值的选取

本文采用 Levenberg-Marquardt 方法对参数进行非线性优化, 在使用 Levenberg-Marquardt 方法时, 初始值的选取非常重要。对于切向变形校正模型,  $\theta' = \theta$  是一个比较合理的初始值选取方法, 即:  $a_1 = 1.0, a_2 = a_3 = a_4 = 0.0$ 。对于径向变形校正模型, 采用  $\varphi' = c_1 r$  一次式对于径向变形校正模型的近似也是合理的<sup>[11]</sup>, 因为线性部分是径向变形校正中的主要分量, 因此, 初始值可以选为:  $c_1 = \psi/w, c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = 0.0$ 。 $w$  为鱼眼图像的宽度,  $\psi$  为鱼眼镜头的视场。大圆坐标  $\Phi_j$  与  $\Theta_j (j=1, \dots, L)$  的初始值可以采用如下线性方法求解。使用带有变形校正参数初始值的变形校正模型将直线的鱼眼投影曲线上的采样点映射到球面上, 利用这些球面点拟合的大圆坐标作为 4.2 节的大圆坐标的初始值。我们以其中的一个大圆坐标初始值的求取为例, 说明此线性求解方法。假设大圆  $j$  所在平面的法向量为  $\mathbf{n}_j$ , 则对于大圆  $j$  上的任意一点  $\mathbf{p}_{i,j}$  有:

$$\mathbf{p}_{i,j}^T \mathbf{n}_j = 0 \quad (16)$$

对于多于两个球面点的情况, 有:

$$\mathbf{A} \mathbf{n}_j = \mathbf{0} \quad (17)$$

其中  $\mathbf{A} = (\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_{N_j})^T$ 。我们对矩阵  $\mathbf{A}$  进行 SVD 分解, 对应于最小奇异值的特征向量作为  $\mathbf{n}_j$  的解, 然后就可以得到  $\hat{\Phi}_j$  与  $\hat{\Theta}_j$ 。利用同样的方法可以求得所有大圆坐标的初始值  $\hat{\Phi}_j$  与  $\hat{\Theta}_j (j=1, \dots, L)$ 。

## 5 实验结果

### 5.1 模拟数据实验

模拟数据实验用来测试校正方法在不同噪声水平下恢复变形校正参数的精确性和鲁棒性。我们随机地产生 10 条空间直线, 这些直线在球面上的投影大圆的坐标由直线与投影中心确定的平面的法向量求得。为了实验方便, 也可以直接给出直线的球面投影大圆坐标。模拟鱼眼镜头的视场为 180

度。我们使大圆坐标  $\Phi_j$  均匀分布在  $0 \sim \pi/2$ ,  $\Theta_j$  均匀分布在  $0 \sim 2\pi$ 。给定一组变形校正参数  $\{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, a_1, a_2, a_3, a_4\}$ , 式(10)、(11)的反函数(在最小二乘意义下最接近式(10)、(11)反函数的五次多项式)可以方便地求解, 得到变形模型  $D$ 。利用已求得的变形模型  $D$  作用在大圆上, 产生空间直线在鱼眼图像上的投影曲线。然后在每条直线的鱼眼投影曲线上随机地选取 100 个采样点, 并且在每一采样点处加入标准差  $\sigma$  在 0~2 个像素之间的高斯随机噪声。图像的大小为  $1024 \times 1024$  像素。

恢复的变形校正参数与给定的变形校正参数之间的差别, 如果采用直接比较两组多项式系数之间的差别来衡量, 一般不能很好地反映校正结果的好坏。因此, 在这里, 我们使用反投影误差来衡量恢复变形参数的精确程度<sup>[1]</sup>。反投影误差的公式为:

$$\varepsilon_{rep} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|m_i - D(D_{\sigma}^{-1}(m_i))\| \quad (18)$$

其中,  $m_i$  为未加噪声时投影曲线上的采样点,  $N$  为总采样点数(这里为 1000),  $D$  为从给定变形校正模型  $D^{-1}$  求得,  $D_{\sigma}^{-1}$  为在标准差为  $\sigma$  的高斯随机噪声图像下恢复的变形校正模型。模拟实验结果如图 5 所示。在每一个噪声水平下, 做了 100 次实验, 并且统计了相应的均值和标准差, 可以看出, 随着噪声的提高, 反投影误差有所提高, 但增长的幅度并不大。

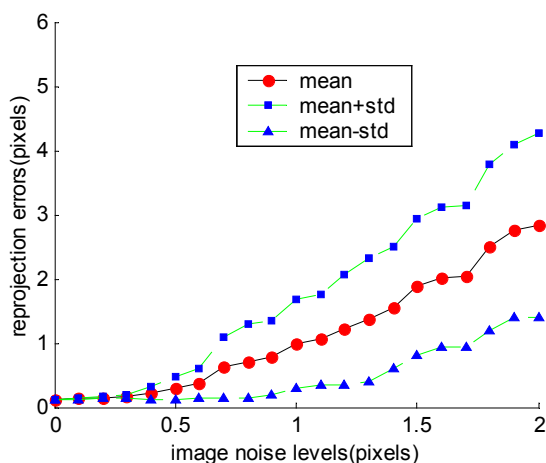


图 5 校正反投影误差

## 5.2 真实图像实验

真实实验中, 我们使用的是尼康 COOLPIX 990

数码相机, 鱼镜头的型号是 FC-E8。图 6(a) 为一幅用来校正的鱼眼图像, 我们在其上选择了大约十条直线的投影曲线, 共使用了大约 500 个采样点。变形校正参数通过优化目标函数得到, 并且应用到鱼眼图像上, 得到球面投影图像。为了从直观上表示校正结果的好坏, 我们将校正好的半球面透视投影图像转化为半立方体图像来表示, 这样就得到了 5 幅平面投影图像, 如图 6(b) 所示。我们在图 6(a) 中取出视场约为 140 度的图像部分, 其校正结果如图 6(e) 所示。从图中可以看出, 在图 6(b) 和 (e) 中的每一个平面图像上空间直线的投影都比较直, 取得了比较满意的校正结果。图 7(a) 为在摄像机参数保持不变情况下, 拍摄的另一幅鱼眼图像, 利用从图 6(a) 得到的变形校正参数, 对图 7(a) 进行校正, 校正后的图像如图 7(b) 和 (d) 所示。同样, 校正结果是比较理想的。

## 6 总结与展望

给定一幅鱼眼图像, 本文利用场景中直线的鱼眼投影曲线, 使用球面透视投影约束, 得到鱼眼摄像机的径向和切向变形参数, 取得了比较满意的校正结果。虽然本文只讨论了视场为 180 度左右的鱼眼镜头的校正, 实际上, 本文的方法同样可以用于广角镜头的校正。

对于主点的优化是我们未来的工作方向之一。再有, 如何利用空间直线的投影曲线的一些性质, 全自动地提取直线的鱼眼投影曲线上采样点也是未来的工作方向之一。如果场景中没有直线信息, 而获得了同一场景在不同视点的两幅或三幅鱼眼图像, 利用球面投影模型下的极线和三视张量约束获得变形校正参数也是未来的一个探索方向。

## 参 考 文 献

- 1 Swaminathan R, Nayar S K. Non-metric calibration of wide-angle lenses and polycameras. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(10): 1172~1178
- 2 Kang S B. Radial distortion snakes. In: IAPR Workshop on Machine Vision Applications, Tokyo, 2000, 603~606
- 3 Devernay F, Faugeras O. Straight lines have to be straight: automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments. Machine Vision and Applications, 2001, 14~24
- 4 Weng J, Cohen P and Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. IEEE

- 
- Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965~980
- 5 Nomura Y, Sagara M, Naruse H, Ide A. Simple calibration algorithm for high-distortion-lens camera. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(11): 1095~1100
- 6 Shah S, Aggarwal J K. Intrinsic parameter calibration procedure for a (high distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation. Pattern Recognition, 1996, 29(11): 1775~1788
- 7 Zhang Z. On the epipolar geometry between two images with lens distortion. In: Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition, 1996, 407~411
- 8 Stein G P. Lens distortion calibration using point correspondences. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997, 143~148
- 9 Fitzgibbon A W. Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001, 125~132
- 10 Maybank S. Theory of reconstruction from image motion. New York: Springer Series in Information Sciences, Springer-Verlag, 1993
- 11 Xiong Y, Turkowski K. Creating image-based VR using a self-calibrating fisheye lens. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997, 237~243



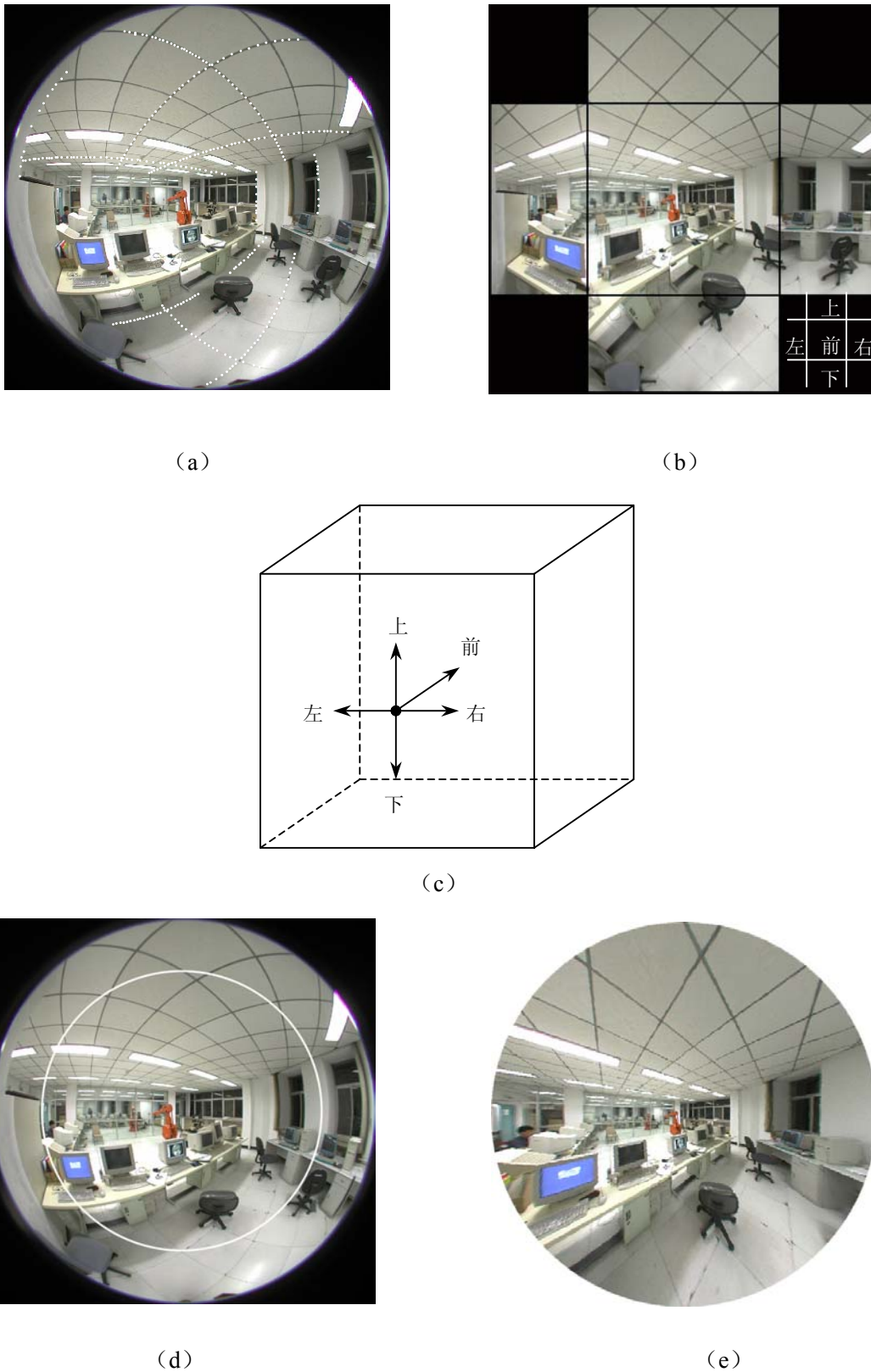
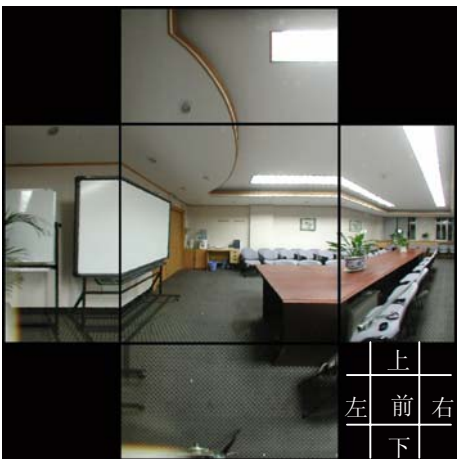


图 6 (a) 一幅实验室的鱼眼图像, 直线的鱼眼投影曲线上选取的采样点用白色圆点标出。(b) 为 (a) 校正后用半立方体表示的图像。(c) 为半立方体图像的投影示意图。(d) 为从 (a) 中取出视场约为 140 度的部分, 用白线标出。(e) 由标出部分得到的校正后的平面图像。





(a)



(b)



(c)



(d)

图 7 (a) 一幅会议室的鱼眼图像, (b) 为 (a) 校正后用半立方体表示的图像。 (c) 为从 (a) 中取出视场约为 140 度的部分, 用白线标出。 (d) 由标出部分得到的校正后的平面图像。

# Fisheye Lenses Distortion Correction Using Spherical Perspective Projection Constraint

Ying Xiang-Hua    Hu Zhan-Yi

*(National Laboratory of Pattern Recognition, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)*

**Abstract** Fisheye lenses are often used to enlarge the field of view of a camera. But the images taken with the fisheye camera often have severe distortions. This paper proposes a new fisheye lenses distortion correction method using spherical perspective projection (SPP) constraint. Space lines are generally projected into curves on a fisheye image. The SPP constraint means that a space line must be projected into a great circle on a unit sphere under the SPP model. The reason of using the SPP model is to handle the situation of larger-than-180-degree view-angles, and our case happens to be true. Our proposed distortion correction process consists of the following two main steps: Firstly, polynomial models for radial and tangential distortions with free parameters are selected; Secondly, these parameters are estimated based on the fact that the projected image curves of space lines should be mapped to great circles on a unit spherical surface, i.e., the SPP constraint. By minimizing the sum of errors, more specifically, the squares of spherical distances from mapped points to their corresponding best-fit great circles, the parameters are obtained. Our minimization process also consists of two steps, at first, an initial estimation is obtained by the linearization of the two distortion models, then Levenberg-Marquardt algorithm is employed for the final non-linear optimization. Finally, experimental results with synthetic data under different noise levels as well as with real fisheye images are reported, and the results appear satisfactory.

**Keywords** fisheye lenses; image-based rendering; distortion correction; spherical geometry

## 作者简介



**英向华**, 男, 1976 年生, 博士研究生。1997 年毕业于华北电力大学计算机应用专业获学士学位。2001 年在中科院国家天文台获天文仪器专业硕士学位。2001 年至今在中科院自动化所攻读博士学位, 主要研究方向为基于图像的绘制、计算机视觉、计算机图形学等。

**Ying Xiang-Hua**, male, born in 1976, He received his B.S. degree in Computer Application from North China Electric Power University in 1997, and M.S. degree in Astronomical Instrument from the National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, in 2001. Currently, he is a Ph.D. candidate in the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests are Image Based Rendering, Computer Vision and Computer Graphics.

**胡占义**, 男, 1961 年生, 博士, 研究员, 博士生导师。1985 年毕业于北方工业大学自动化系。1986 年 12 月至 1993 年 2 月在比利时列日大学电子工程系读博士。1993 年 1 月获比利时国家博士学位, 专业为计算机视觉。1993 年至今在中科院自动化所工作。主要研究方向有: 摄像机标定与三维重建, 主动视觉, 几何基元提取, 视觉机器人导航, 基于图像的建模和绘制。

**Hu Zhan-Yi**, male, born in 1961, He received his B.S. degree in Automation from the North China University of Technology in 1985, the Ph.D. Degree (Docteur d'Etat) in Computer Vision from the University of Liege, Belgium, in Jan. 1993. Since 1993, he has been with the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, where he is now a Professor. His research interests are in Robot Vision, which include Camera Calibration and 3D Reconstruction, Active Vision, Geometric Primitive Extraction, Vision Guided Robot Navigation, Image Based Modeling and Rendering.

### 基金资助:

本课题得到国家自然科学基金 (60175009;60033010) 资助

### 通讯作者电话和 E-mail

胡占义

Tel: 010—62616540

E-mail: huzy@nlpr.ia.ac.cn