

基于单幅图像的三维信息提取

刘日晨^{1,2} 刘怡光^{1,2} 尹鑫¹ 赵亦明¹

(四川大学计算机学院 成都 610065)¹

(四川大学合成视觉图形图像技术国防重点学科实验室 成都 610065)²

摘要 针对单幅图像提取三维信息困难,设计了一种基于单幅图像的三维信息提取算法。该算法首先需要标定摄像机,得到摄像机从三维到二维的成像矩阵 $M_{3 \times 4}$,并计算 $M_{3 \times 4}$ 的伪逆矩阵 $M_{4 \times 3}^+$,其本质是通过最小二乘法求解矛盾方程组;利用 $M_{4 \times 3}^+$ 提取二维单幅图像中的三维信息,再把这些三维信息投影到一个平面上显示出来。实验表明,单幅图像目标物体必须满足共面等约束条件,从而可以对目标物体的三维信息做定性分析(定性视觉)。此外,还对三维空间投影到二维图像的过程进行了理论推导,得出了如果没有足够的先验知识,成像过程不可逆的结论。

关键词 伪逆矩阵,三维信息提取,单幅图片,定性视觉

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A

3D Information Extraction Algorithm Based on a Single Image

LIU Ri-chen^{1,2} LIU Yi-guang^{1,2} YIN Xin¹ ZHAO Yi-ming¹

(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China)¹

(Key Laboratory of Fundamental Synthetic Vision Graphics and Image for National Defence, Sichuan University, Chengdu 610065, China)²

Abstract A 3D information extraction algorithm based on a single image was designed in this paper for the difficulties of this research field, in this algorithm, camera imaging matrix $M_{3 \times 4}$ was obtained by camera calibration firstly, the pseudo inverse matrix $M_{4 \times 3}^+$ was calculated by $M_{3 \times 4}$, the essence of this computation was solving inconsistent equations by least squares approximation, 3D information would be extracted from a single image through $M_{4 \times 3}^+$, the result was shown in a image by projection operator. The result could be used for qualitative analysis (qualitative vision) currently due to the limited information from a single image. The experiment indicates that the extracted object should be coplanar. Moreover, the essential theories of 3D to 2D's projection were deduced, the conclusion of the deduce is that imaging process is an irreversible process.

Keywords Pseudo inverse matrix, 3D information extraction, Single image, Qualitative vision

在美国召开的第 10 届模式识别会议上, J. Atoimonos(英国马里兰大学)提出了有目的的、定性的主动视觉,他认为以马尔视觉计算理论为代表的理论将视觉规定为由场景的图像精确地获取三维几何机器视觉,其要求太高了,是不必要的,计算也太复杂,求解太困难,且这些定量计算没有必要,可用定性视觉来代表定量视觉。

立体成像的方式主要由光源、采集器和景物三者的相互位置和运动情况所决定。传统的成像方法几乎是这三者至少有一者位置不固定,如双目成像是两个采集器位于两个位置,当然也可以是同一个采集器平移到另一个位置;光移(光度立体)成像是光源运动,另两者固定;主动视觉成像是采集器运动,另两者固定;主动视觉(自运动)成像是仅光源固定,另两者运动等等^[10]。尽管图像中包含着丰富的信息,但是从一幅图像无法直接获得沿着某条投影线上的点的深度。至少需要两幅图像,才可以通过三角测量的方法得到点的深度^[9]。传

统的三维重建方法很少基于三者都固定(单幅图片)的情况。

从一幅图像中提取三维信息的原理有很多,如透视缩放(perspective scaling)、透视缩短(foreshortening)和纹理梯度(texture gradient)等^[8],因为在一幅图像中,三维信息是隐藏在所成像的几何畸变、明暗度、纹理、表面轮廓等因素之中的^[10]。值得注意的是,除非景物与像之间的距离测度比例已知,否则由 2-D 图像并不能直接得到摄像机与景物间的绝对距离,这一点在文献^[10]中亦有描述。简言之,没有足够的先验知识,从一幅图像中提取的三维信息只能做定性分析,只能得到相对的位置或方位关系。这一性质在本文 1.2 节给出了证明。

1 基本理论与几何性质

1.1 摄像机成像模型

式(1)是摄像机成像过程矩阵运算的齐次表示方法:

到稿日期:2009-06-26 返修日期:2009-09-12 本文受国家自然科学基金(60705005),博士点新教师基金(20070610031),四川省应用基础研究计划(2008JY0038)和教育部新世纪人才支持计划(NCET-08-0370)资助。

刘日晨(1984-),男,硕士,研究方向为计算机视觉、图像处理、机器学习, E-mail: liurichen@gmail.com; 刘怡光(1972-),男,教授,博士生导师,研究方向为计算机视觉、图像处理、神经网络、机器学习等; 尹鑫(1985-),男,硕士,研究方向为计算机视觉; 赵亦明(1989-),女,学士,研究方向为图像处理。

$$z \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu k/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & k/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & T_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, μ 表示图像的不确定尺度因子, k 表示畸变系数, 具体查看文献[1, 10]; d_x 与 d_y 分别表示图像采样时 x 方向与 y 方向像素与像素之间的长度, 单位为[毫米/像素]; u_0 与 v_0 分别表示计算机图像坐标系中图像中心的坐标值; f 表示摄像机有效焦距。

1.2 理论性质推导

1.2.1 缩放

为了得到沿坐标原点的 3D 缩放, 可以先推导这样一个公式: 向量 v 沿一个经过坐标原点 O 的方向 n 缩放后得到向量 v' 的表达式, 其中缩放因子为 s , n 为单位向量。计算缩放阵的方法很多文献中都有介绍, 以下是其中一种, 如图 1 所示。

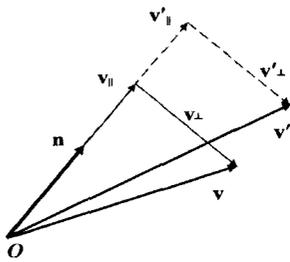


图 1 沿任意方向的向量缩放

将向量 v' 分解成垂直与平行于向量 n 的两个向量 v'_{\perp} 与 v'_{\parallel} , 再将向量 v 也分解成垂直与平行于向量 n 的两个向量 v_{\perp} 与 v_{\parallel} 。由向量的基本知识, 易得:

$$v' = v'_{\parallel} + v'_{\perp} = s \langle v, n \rangle n + v - \langle v, n \rangle n = v + (s-1) \langle v, n \rangle n \quad (2)$$

式中, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 操作表示向量的点积。由式(2)得到基向量 $p = [1, 0, 0]^T$ 沿方向 n 缩放 s 倍的表达式:

$$p' = p + (s-1) \langle p, n \rangle n = \begin{pmatrix} 1 + (s-1)n_x^2 \\ (s-1)n_x n_y \\ (s-1)n_x n_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

类似式(3), 可得到 $q = [0, 1, 0]^T$ 和 $r = [0, 0, 1]^T$ 沿方向 n 缩放 s 倍的表达式 q' 和 r' 的表达式。合在一起, 就是一个三维坐标系的缩放矩阵, 记为 $S_{3D}(n, s)$:

$$S_{3D}(n, s) = \begin{pmatrix} (p')^T \\ (q')^T \\ (r')^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + (s-1)n_x^2 & (s-1)n_x n_y & (s-1)n_x n_z \\ (s-1)n_x n_y & 1 + (s-1)n_y^2 & (s-1)n_y n_z \\ (s-1)n_x n_z & (s-1)n_y n_z & 1 + (s-1)n_z^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

在三维坐标系中进行向量缩放时, 只需将空间中的所有点左乘以该缩放阵即可。

1.2.2 投影

性质 1 摄像机坐标系中任意一个向量 $v = [x, y, z]^T$ 到像平面坐标系投影的过程可以分解成 3D 缩放 $S_{3D}([1, 0, 0], f/z)$ 、 $S_{3D}([0, 1, 0], f/z)$ 与 $S_{3D}([0, 0, 1], 0)$ 的乘积, 其中 f 为摄像机有效焦距。

证明: 从摄像机坐标系到像平面坐标系变换的矩阵形式是:

$$z \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \text{ 或 } \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f/z & 0 & 0 \\ 0 & f/z & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (5)$$

在成像过程中, z 被看成是一个系数或比例因子, 因为 z 值在投影时被丢失了。要证明性质 1, 只需要证明:

$$S_{3D}([1, 0, 0], f/z) S_{3D}([0, 1, 0], f/z) S_{3D}([0, 0, 1], 0) = \begin{pmatrix} f/z & 0 & 0 \\ 0 & f/z & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

由式(4)易知

$$\text{式(6)左边} = \begin{pmatrix} f/z & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & f/z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f/z & 0 & 0 \\ 0 & f/z & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

性质 1 表明, 投影的过程分为 3 步: 第一, 沿 x 方向上缩放 f/z 倍, 其它两个方向不变; 第二, 沿 y 方向上缩放 f/z 倍; 第三, 平行投影, 将前两步缩放后的图像平行投影到摄像机坐标系的面 xoy 上, 也就是将 z 方向的比例因子变为 0, 从而 z 轴的信息丢失。

性质 2 三维空间中以任意一个单位向量 n 为方向的投影操作都是不可逆的。

证明: 把沿任意向量 n 的投影操作对应的投影矩阵记为 $P_{3D}(n, 0)$ 。

如图 2 所示, 平面 π 是经过坐标系原点 O 且垂直于单位向量 n 的一个平面, 在平面 π 中任取一经过原点的单位向量 n_x' , 再在平面 π 中取一经过原点且垂直于 n_x' 的单位向量 n_y' , 使得 3 个向量 n_x', n_y', n 与 n 构成一个三维坐标系。由性质 1 可知:

$$P_{3D}(n, 0) = S_{3D}(n_x', f/z) S_{3D}(n_y', f/z) S_{3D}(n, 0) = S_{3D}(n_x', f/z) S_{3D}(n_y', f/z) S_{3D}([n_x, n_y, n_z], 0) \quad (8)$$

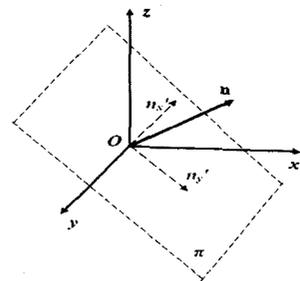


图 2 沿任意方向投影

对式(8)两边取行列式, 得:

$$\det(P_{3D}(n, 0)) = \det(S_{3D}(n_x', f/z) S_{3D}(n_y', f/z) S_{3D}([n_x, n_y, n_z], 0)) \quad (9)$$

又因为

$$\det(S_{3D}([n_x, n_y, n_z], 0)) = \det \begin{pmatrix} 1 - n_x^2 & -n_x n_y & -n_x n_z \\ -n_x n_y & 1 - n_y^2 & -n_y n_z \\ -n_x n_z & -n_y n_z & 1 - n_z^2 \end{pmatrix} = 1 - (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) = 0 \quad (10)$$

所以有

$$\det(P_{3D}(n,0)) = 0 \quad (11)$$

也就是说,投影矩阵 $P_{3D}(n,0)$ 是一个奇异阵,在 3D 坐标系中,投影操作是不可逆的。

从性质 2 可以看出,摄像机的成像过程是一个信息损失的过程,因为它是一个从 3D 到 2D 的过程。传统的三维重建就是在摄像机标定的基础上寻找丢失的纵深信息 z ,因此在不加上任何先验知识的情况下,要从一幅图像中完全重建三维场景是不可能的。从数学上看,正是因为成像过程乘上了投影矩阵 $P_{3D}(n,0)$,才使得三维到二维变换时系数矩阵不可逆。

1.3 伪逆矩阵

如果矩阵 M 是方阵且非奇异,则 M 的伪逆矩阵(记为 M^+)与 M^{-1} 相等;如果 M 不是方阵或 M 为奇异阵,则不相等。即有:

$$M^+ = \begin{cases} M^{-1} (MM^{-1} = M^{-1}M = I) \\ M^+ (MM^+M = M \text{ 且 } M^+MM^+ = M^+) \end{cases} \quad (12)$$

可以通过最小二乘法得到矩阵的伪逆阵,也称之为通过矛盾方程组求解。文献[12]中将它称为伪逆解或 MSE 解。

本文需要求矩阵 $M_{3 \times 4}$ 的伪逆。关于 $M_{3 \times 4}$ 由哪些矩阵组合而成,第 2 节有详细介绍。为了求 $M_{3 \times 4}$ 的伪逆,构造等式:

$$X_{4 \times 3} M_{3 \times 4} = I_{4 \times 4} \quad (13)$$

式中, $X_{4 \times 3}$ 表示 $M_{3 \times 4}$ 的左伪逆,在该式中它是未知数; $I_{4 \times 4}$ 表示四阶方阵。展开式(10),可以得到 16 个方程,其中前 4 个方程如式(14)所示,它是通过 $I_{4 \times 4}$ 的第一行元素得到的 4 个方程:

$$\begin{aligned} m_1 x_1 + m_5 x_2 + m_9 x_3 &= 1 \\ m_2 x_1 + m_6 x_2 + m_{10} x_3 &= 0 \\ m_3 x_1 + m_7 x_2 + m_{11} x_3 &= 0 \\ m_4 x_1 + m_8 x_2 + m_{12} x_3 &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

为了解这 16 个方程,12 个未知数的方程组,可以通过最小二乘法来求解。首先把这 16 个方程写成方程矩阵形式,得到:

$$M'_{16 \times 12} X'_{12 \times 1} = I'_{16 \times 1} \quad (15)$$

式中, $X'_{12 \times 1}$ 是 $X_{4 \times 3}$ 的 12 个元素写成列向量的行式, $I'_{16 \times 1}$ 是单位方阵 $I_{4 \times 4}$ 写成列向量的行式, $M'_{16 \times 12}$ 就是通过上面得到的 16 个方程的系数矩阵得到的。在式(15)左边和右边分别左乘 $(M'_{16 \times 12})^T$,得到相应的正规方程组^[14],即:

$$(M'_{16 \times 12})^T M'_{16 \times 12} X'_{12 \times 1} = (M'_{16 \times 12})^T I'_{16 \times 1} \quad (16)$$

再对上述正规方程组进行求解,即可得到 $M_{3 \times 4}$ 的最小二乘伪逆阵 $X'_{12 \times 1}$ 。把 $X'_{12 \times 1}$ 写成 4 行、3 列形式,就得到 $M_{4 \times 3}^+$ 。将上述求解过程合并一下,就可以得到以下公式:

$$M_{4 \times 3}^+ = ((M_{3 \times 4})^T M_{3 \times 4})^{-1} (M_{3 \times 4})^T \quad (17)$$

显然式(17)满足式(12)关于伪逆矩阵的定义,其运算过程也满足矩阵逆的定义。可以证明,这种方法求得的伪逆解,就是最小二乘解。因为对于形如式(15)这种 $AX=b$ 的超定方程组而言, $b-AX_0$ 与 AX 子空间是正交的,其中 X_0 为最逼近真解的最近似解,因此可以看成是 AX 子空间的法线,所以该解向量到子空间 AX 的距离是最短的,亦即最小二乘原理。

2 伪逆法提取一幅图片的三维信息

(1)计算摄像机成像过程的系数矩阵可以合并成一个

3×4 的矩阵^[15],记为 $M_{3 \times 4}$ 。由式(1)的系数矩阵有:

$$M_{3 \times 4} = \begin{pmatrix} \mu k/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & k/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & T_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$= \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{pmatrix}$$

上式中在计算 $M_{3 \times 4}$ 时,前两个矩阵统称内参矩阵,第三个矩阵称为外参矩阵。内参矩阵通过标定算法计算得到,外参矩阵理论上可以任意。

(2)计算矩阵 $M_{3 \times 4}$ 的伪逆矩阵 $M_{4 \times 3}^+$,计算方法在 1.3 节中已介绍了。

(3)通过图像特征点计算特征点对应的三维坐标。这一步是式(1)的逆过程,可以通过以下公式计算特征点的三维坐标值 $(X', Y', Z')^T$,该三维坐标值的坐标系取决于第(1)步计算 $M_{3 \times 4}$ 时用到的 R 与 T ,计算公式为:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{pmatrix} = M_{4 \times 3}^+ \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m'_{11} & m'_{12} & m'_{13} \\ m'_{21} & m'_{22} & m'_{23} \\ m'_{31} & m'_{32} & m'_{33} \\ m'_{41} & m'_{42} & m'_{43} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

(4)模拟成像以显示提取的三维信息。主要用到摄像机的成像模型^[1],对得到特征点的三维坐标值 $(X', Y', Z')^T$ 进行以下一系列变换:旋转、平移、投影、畸变、采样(像素值化)等计算模拟成像过程以显示提取的三维信息,还可以改变 f 或 T_z 来模拟摄像机与成像目标物体的距离。其中投影和旋转是通过 1.2 节介绍的投影和旋转公式计算得到的。

第(1)步计算 $M_{3 \times 4}$ 时用到的外参矩阵理论上可以任意选,但是决定了第(3)步计算 $(X', Y', Z')^T$ 时所用的坐标系。为了减少计算量,可以取以下情况:

- 1)世界坐标系与摄像机坐标系只有平移关系;
- 2)世界坐标系与摄像机坐标系有平移关系,也有简单的旋转关系。

需要注意的是,求解 $M_{3 \times 4}$ 伪逆时引入了误差。由于是通过求解矛盾方程组来实现最小二乘逼近,该误差符合正态分布^[13],因此该算法提取的三维信息不能做定量分析,只能做定性分析。当然,只要最小二乘解很接近真实解,也可以做定量分析。另外,因为求伪逆时,平移、旋转、畸变与像素化这几步变换都可逆,唯独投影不可逆,也就是说从三维到二维的过程不可逆,它是一个信息损失的过程,这是伪逆法引入误差的很重要的一个原因。因此为了减小该信息损失过程对结果的影响,可对算法做如下约束:提取的三维点必须大致共面。

3 误差分析

假设标定时从图像中采集到的特征点数据组数为 n ,对于式(19)的 X', Y' 和 Z' ,均有 n 个方程,不妨只考察 X' 的 n 个方程,把它们写成 $Y = X\beta + e_i$ 的形式^[13]:

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 & v_1 & 1 \\ u_2 & v_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_n & v_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m'_{11} \\ m'_{12} \\ m'_{13} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix} \quad (20)$$

式中, e_i 表示的是误差项,因为伪逆解就是最小二乘解^[11,12],

所以有^[13]:

$$e_i \sim N(0_{n \times 1}, \sigma^2 I) \quad (21)$$

I 为单位阵。又因为数据矩阵 X 中的前 2 列表示是观察值,它是图像的像素坐标,所以矩阵 X 满秩,且秩为 3,因此可以得到 σ^2 的无偏估计^[13]:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_i (X_i - u_i m'_{11} - Y_{ij} m'_{12} - Z_{ij} m'_{13})^2}{n-3} \quad (22)$$

它的分子部分称为残差平方和。上面虽只分析 X' ,实际对 Y' 和 Z' 也有同样的性质。

正是因为误差 $e_i \sim N(0_{n \times 1}, \sigma^2 I)$,我们无法预知误差,所以要加上约束条件。在实验部分做了这方面的进一步分析。

4 实验与分析

本文实验首先要对摄像机进行标定,以便计算出摄像机的内参矩阵。对于旋转矩阵 R 与平移矩阵 T ,理论上可以任意取,但为了减少计算量,实验过程中用到标定时标定的 R 与 T 。实验部分使用的摄像机型号为 DM/ICE+CM2XUT/M。

本实验从一幅图片中提取三维信息进行分析与测试,提取的对象是 140 个角点。首先需要对摄像机进行标定,得到摄像机的内参。本实验采用的标定算法是 tsai 提出的标定算法^[2]。

图 3 中的组图就是实验截图。通过本文提出的算法对图 3(a) 中 140 个角点提取三维信息,提取到的三维坐标值投影后的截图如图 3(b) 所示。顺时针旋转图 3(b) (从上往下看) pitch 角,得到图 3(c),pitch 角是欧拉角中的一个角,这里表示世界坐标系 Z 轴与摄像机坐标系 z 轴之间的夹角^[10];再由图 3(c) 逆时针旋转 15 度、45 度、75 度,分别得到图 3(d)~图 3(f) 所示的结果。

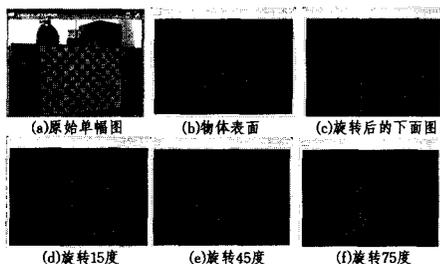


图 3 单幅图片三维信息提取(从目标物体偏左侧拍摄的图片)

另外,我们还对从目标物偏右侧拍摄的图片进行三维信息提取,截图如图 4 的组图所示。



图 4 单幅图片三维信息提取(从目标物体偏右侧拍摄的图片)

图 4(a) 是实验所用的从目标物偏右侧拍摄的图片;图 4(b) 是提取的三维坐标值投影后的结果截图,而图 4(c) 是将提取的三维坐标值逆时针旋转 pitch 角后得到的结果截图。

结束语 经过对不同单幅图片的多次实验,得到以下结论:通过伪逆法计算得到的共面物体的三维坐标值与原三维坐标有一定的关系,经过旋转后还是可以大致得到原目标物体的三维信息。正是因为伪逆法求解过程引入了误差,才使得只能进行定性分析,如判断一个共面物体的朝向、一个共面物体的方位等等。对于不满足约束条件的物体提取的三维信息,误差很大,主要原因是式(22)的残差平方和符合的正态分布是矮胖型的,也就是说数据很不规律。这些都是实验测得的,本文并没有做进一步的理论研究。其实,只要先验知识足够多,就可以从一幅图片中提取任何物体的三维信息。就像人眼一样,单眼可以通过丰富的先验知识判断物体的位置与方位。

参考文献

- [1] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge University Press, 2004: 153-158
- [2] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology Using off-the-shelf TV camera and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344
- [3] Weng Juyang, Cohen P, Herniou M. Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980
- [4] Nayar S K. Shape from focus system[C]//Proc. Comput. Vision and Pattern Recog. Champaign, Illinois: 302-308
- [5] Peleg S, Ben-Ezra M. Stereo panorama with a single camera [C]//Proc. Comput. Vision and Pattern Recog. Fort Collins, CO, June 1999, 1: 395-401
- [6] Stockman G, Lee G. Reconstructing line drawings from wings; the polygonal case[C]//Proc. of Int. Conf. Comput. Vision 3, O-saka, Japan
- [7] Subbarao M, Tyan J-K. Selecting the optimal focus measure for autofocusing and depth-from-focus[J]. IEEE-T-PAMI, 20(8): 864-870
- [8] Shapiro L G, Stockman G C. 计算机视觉[M]. 赵清杰, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2005: 383-386
- [9] Forsyth D A, Ponce J. 计算机视觉——一种现代方法[M]. 林学刚, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2004, 6: 182-183
- [10] 章毓晋. 图像工程下册——图像理解(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007, 2: 47-60, 104-105
- [11] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005, 6: 14-31, 69-79
- [12] 边肇祺, 张学工, 等. 模式识别(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000, 1: 101-102
- [13] 陈家鼎, 孙山泽, 李东风, 等. 数理统计学讲义(第 2 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006, 5: 200-227
- [14] 胡兵, 李清朗. 现代科学与工程计算基础[M]. 成都: 四川大学出版社, 2003, 9: 64-66
- [15] 许晓伟, 王知衍, 张艳青, 等. 视觉图像三维重构计算一般性框架研究[J]. 计算机科学, 2008, 35(8): 208-211

(上接第 242 页)

- [6] 刘恒殊, 彭风华, 黄廉卿. 超光谱遥感图像特征分析[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 392-395
- [7] Wang J F, Zhang K, Tang. Spectral and spatial decorrelation of Land-TM data for lossless compression[J]. IEEE Transactions

on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(5): 1277-1285

- [8] Rao A K, Bhagrava S. Multispectral Data Compression Using Bidirectional Intebrand Prediction [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(2): 385-397