

基于单视图像的球体姿态估计

邹益民 汪渤

(北京理工大学信息技术学院自动控制系 北京 100081)

摘要: 该文给出一种基于图像信息估计 3D 目标球体及其中心轴孔空间姿态的视觉检测技术。若相机焦距已知, 且给定球体与圆特征形状参数, 则可由单视方法估计球心与圆特征中心位置及其法向方向, 从而可由球及中轴构成的多个圆特征给出对目标球体姿态的初步估计。由于图像噪声及投影椭圆拟合误差的存在, 每一个特征的独立估计结果并不完全一致, 进一步引入非线性最小二乘方法对上述初步结果进行优化以改善估计精度。仿真及实际图像处理结果验证了算法的有效性。

关键词: 视觉检测; 单目视觉; 3D 位置估计; 图像处理

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-1826-03

Estimate of Ball Pose by Monocular Vision Image

Zou Yi-min Wang Bo

(Department of Automation, School of Information Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A vision inspection technique is provided, which can be used to estimate the position and orientation of the ball and its center axis hole by its projected image. When the focus length of digital camera is given, with the size of circular and spherical feature is also known, their position and/or orientation can be estimated using monocular vision. Thus, the ball pose is acquired from several spherical and circular features shaped by the contour of the ball and its axis. Besides, with the existence of image noise and fitting error of the projection ellipses, the solution base on sole feature is not concurrent with each other. The non-linear least squares algorithm is used to refine above rough solutions and to improve the estimate precise. Experiments with simulated data as well as real image is also presented to validate the algorithms.

Key words: Vision inspection; Monocular vision; 3D location estimation; Image processing

1 引言

视觉检测技术是通过非接触手段进行目标物体测量的一种有效方法。一般而言, 利用二维图像信息估计物体的三维参数需采用多个视图的立体视觉方法, 但若物体的特征模型已知, 则可通过单视估计物体的三维位置。基于特征模型的空间三维位置估计已出现了很多方法, 其中一类是利用物体与其图像之间的点^[1-3]、线^[4]对应关系从而求解其三维位置; 而对于圆形或球形特征, 由于此类实体与图像之间的点、线对应关系不复存在, 上述方法难于实施, 基于此类特征的位置估计也建立了一些方法^[5,6], 可用于估计圆特征的中心位置及法向方向或球特征的中心位置。

在笔者研制的某视觉检测系统中, 需对一球体的空间姿态进行检测, 该球体由一个圆球及贯通球心的一条中空轴孔组成, 检测的主要目的是确定轴孔端面相对于参考坐标系的方向。受Shin^[6]方法启发, 本文首先借助对目标球体中多个圆及球轮廓特征的空间位置估计, 给出对球体空间姿态的粗略估计; 由于图像噪声及投影椭圆拟合误差的影响, 基于每

一特征的独立估计结果显然并不一致, 其后利用多个特征之间的约束条件, 使用非线性最小二乘算法对初始结果进行优化, 从而获得了更为准确的估计结果。

2 基于圆特征的物体三维位置估计

首先假定空间圆的法向量指向相机方向, 半径为 r , 圆特征平面法向量可表示为 $\mathbf{V}_c = [v_x \ v_y \ v_z]^T$, 其中心位置位于 $\mathbf{P}_c = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$, 相机焦距长度为 f 。

相机光心与空间中的圆特征形成一构造圆锥, 该构造锥同时也将通过其投影图像。设投影椭圆方程为 $au^2 + bv^2 + cuv + du + ev + f = 0$, 由: $u = fx/z, v = fy/z$, 并记: $A = af^2, B = bf^2, C = cf^2, D = df, E = ef, F = f$ 可得:

$$\begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix} \mathbf{Q} \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T = 0, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} A & C/2 & D/2 \\ C/2 & B & E/2 \\ D/2 & E/2 & F \end{bmatrix} \quad (1)$$

设存在一个矩阵 \mathbf{P} 可将 \mathbf{Q} 对角化, 即: $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{P} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, 则可得到一个旋转轴为 z' 的规范锥体:

$$\lambda_1 x'^2 + \lambda_2 y'^2 + \lambda_3 z'^2 = 0 \quad (2)$$

矩阵 $\mathbf{P} = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3]$, 可由矩阵 \mathbf{Q} 的特征值 (μ_1, μ_2, μ_3) 与规范化特征矢量 $(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3)$ 求得。可以证明^[6]: μ_1, μ_2, μ_3 中有两个特征值同号, 另一个异号。不失一般性, 不妨设 μ_1, μ_2 同号且 $|\mu_1| \geq |\mu_2|$, 则可取: $\lambda_3 = \mu_3, \mathbf{e}_3 = \pm \mathbf{f}_3$, 选择 \mathbf{e}_3 的符号应保证下式成立: $\mathbf{e}_3(0,0,1)^T > 0$; 再取: $\lambda_2 = \mu_2, \lambda_1 = \mu_1, \mathbf{e}_2 = \mathbf{f}_2, \mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_2 \times \mathbf{e}_3$ 。

计算规范锥的圆截面, 可得圆心位置为

$$[x'_{01}, y'_{01}, z'_{01}] = \left[\pm r \frac{\sqrt{|\lambda_3|(|\lambda_1| - |\lambda_2|)}}{\sqrt{|\lambda_1|(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}}, 0, r \frac{\sqrt{|\lambda_1|(|\lambda_2| + |\lambda_3|)}}{\sqrt{|\lambda_3|(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \right] \quad (3)$$

表面法向方向为

$$[v'_{1x}, v'_{1y}, v'_{1z}] = \left[\pm \frac{\sqrt{(|\lambda_1| - |\lambda_2|)}}{\sqrt{(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}}, 0, -\frac{\sqrt{(|\lambda_2| + |\lambda_3|)}}{\sqrt{(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \right] \quad (4)$$

使用下式变换至相机坐标系:

$$\begin{cases} [x_0, y_0, z_0]^T = \mathbf{P}[x'_{01}, y'_{01}, z'_{01}]^T \\ [v_x, v_y, v_z]^T = \mathbf{P}[v'_{1x}, v'_{1y}, v'_{1z}]^T \end{cases} \quad (5)$$

可见, 一般情况下, 若 $|\mu_1| \neq |\mu_2|$, 则共有两组可行解, 实际有效解可结合后续对圆球球心位置的估计结果, 依据相同的轴线方向约束确认唯一的正确解。

3 基于球特征的物体三维位置估计

假定空间球特征的半径为 R , 其中心位置位于 $\mathbf{P}_s = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ 。

相机光心与空间中的球特征同样形成一构造圆锥, 该构造锥也将通过其投影图像。构造锥及规范化方法与上节完全相似, 不再赘述。此时, 应有 $\lambda_1 = \lambda_2$ 。而球心位置则为

$$[x'_0, y'_0, z'_0] = \left[0, 0, R \frac{\sqrt{(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}}{|\lambda_3|} \right] \quad (6)$$

同理可使用式(5)变换至相机坐标系。

4 基于最小二乘的估计结果优化

考虑如图 1 所示的空间球体及中心轴孔端面内外缘形成的圆形特征平面的估计问题。若相机焦距及各特征的几何参数已知, 则可由第 2 节, 第 3 节所述方法估计各独立特征的空间位置。然而, 由于图像噪声及投影椭圆拟合误差的存在, 上述估计结果均存在误差, 考虑下述约束:

(1) 轴孔端面内外缘特征具有一致的中心位置 $(\mathbf{P}_{c1}, \mathbf{P}_{c2})$ 与法向方向 $(\mathbf{V}_{c1}, \mathbf{V}_{c2})$;

(2) 球体中心 \mathbf{P}_s 与轴孔中心构成的轴线方向 (\mathbf{V}_{cs}) 应与轴孔端平面的法向方向一致;

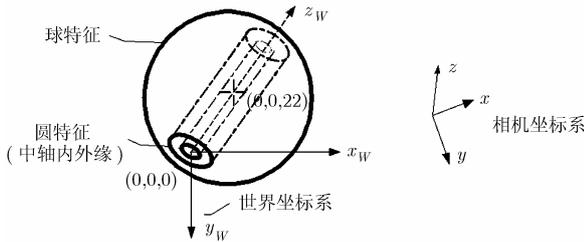


图 1 目标球体与投影坐标系

(3) 图像样本点与其重投影椭圆的误差最小。

从而可得下述代价函数:

$$\begin{aligned} C(\mathbf{P}_{c1}, \mathbf{P}_{c2}, \mathbf{V}_{c1}, \mathbf{V}_{c2}, \mathbf{P}_s, \mathbf{u}_s^{(i)}, \mathbf{u}_{c1}^{(j)}, \mathbf{u}_{c2}^{(k)}) = & \alpha_1 \cdot D_1^2(\mathbf{P}_{c1}, \mathbf{P}_{c2}) \\ & + \alpha_2 \cdot D_2^2(\mathbf{V}_{c1}, \mathbf{V}_{c2}) + \alpha_3 \cdot D_2^2(\mathbf{V}_{cs}, \mathbf{V}_{c1}) + \alpha_4 \cdot D_2^2(\mathbf{V}_{cs}, \mathbf{V}_{c2}) \\ & + \alpha_5 \cdot \sum_i D_3^2(\mathbf{u}_s^{(i)}, e_s) + \alpha_6 \cdot \sum_j D_3^2(\mathbf{u}_{c1}^{(j)}, e_{c1}) \\ & + \alpha_7 \cdot \sum_k D_3^2(\mathbf{u}_{c2}^{(k)}, e_{c2}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 α_i 决定各项误差分量的权重; D_i 为距离函数。其中 D_1 定义为两点之间的欧氏距离; D_2 定义为两矢量之间的误差角, 而 D_3 则定义为各特征样本点 $\mathbf{u}_s^{(i)}, \mathbf{u}_{c1}^{(j)}, \mathbf{u}_{c2}^{(k)}$ 与其重投影椭圆 e_s, e_{c1}, e_{c2} 之间的最短距离。 D_3 的计算需求解样本点 \mathbf{u} 在椭圆上的最近邻点 $\hat{\mathbf{u}}$, 为方便起见, 可将样本点及椭圆方程均绕椭圆中心旋转一个角度, 使其长短轴 a, b 分别与坐标轴方向平行。若仍以 $\mathbf{u}(x, y)$, $\hat{\mathbf{u}}(\hat{x}, \hat{y})$ 表示变换以后的点坐标, 则可得一组正交接点方程: $F(a, b, \mathbf{u}, \hat{\mathbf{u}}) = \begin{pmatrix} (\hat{x}^2/a^2 + \hat{y}^2/b^2 - 1)/2 \\ (y - \hat{y})\hat{x}/a^2 - (x - \hat{x})\hat{y}/b^2 \end{pmatrix} = 0$, 此式无法解析求解, 可使

$$\begin{aligned} \text{用下述 Newton 方法迭代求解: } \hat{\mathbf{u}}_{k+1} = & \hat{\mathbf{u}}_k + \alpha \Delta \hat{\mathbf{u}}, \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \hat{\mathbf{u}}_k} \Delta \hat{\mathbf{u}} = \\ -\mathbf{F}(\hat{\mathbf{u}})_k, \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \hat{\mathbf{u}}} = & \begin{pmatrix} \hat{x}/a^2 & \hat{y}/b^2 \\ (y - \hat{y})/a^2 + \hat{y}/b^2 & -(x - \hat{x})/b^2 - \hat{x}/a^2 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

一般只需 4, 5 次迭代即可求得所需的最近邻点。此外, 重投影椭圆方程可使用文献[6]所述方法计算。

式(9)所述代价函数过于复杂, 难于获得解析结果, 但可借助 MATLAB 等成熟的优化软件使用标准的最小二乘算法如 Levenberg-Marquardt 方法进行数值求解。

5 算法的实验结果

5.1 仿真数据

如图 1 所示定义世界坐标系 x_w, y_w, z_w 及相机坐标系 xyz , 不失一般性, 设球体中心位于 $(0,0,22)$, 半径 $R = 25$; 轴孔端面内外缘构成的空间圆特征中心位于 $(0,0,0)$, 半径分别为 $r_1 = 4.5, r_2 = 8$, 且设相机焦距 $f = 22$, 点距为 0.01 , 单位均为 mm。再设相机坐标系与世界坐标系的变换关系为

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8529 & -0.5 & -0.1504 & 10 \\ 0.5151 & 0.8529 & 0.0855 & -20 \\ 0.0855 & -0.1504 & 0.9849 & -150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

首先计算光心与球及圆特征形成的构造锥方程^[6], 再计算构造锥与焦平面相交所构成的投影椭圆方程, 对上述 3 个投影椭圆进行采样, 样本点取 30 个, 并加入零均值, 方差为 $0.1\text{-}2\text{pixel}$ 范围的高斯噪声, 重复 50 次, 计算估计所得的球心、轴孔端面中心与理论值的均方根位置误差, 同时计算估计所得端面法矢量与理论值的均方根角度误差, 结果如图 2 所示。由图可见, 本文所述估计方法由于使用非线性优化

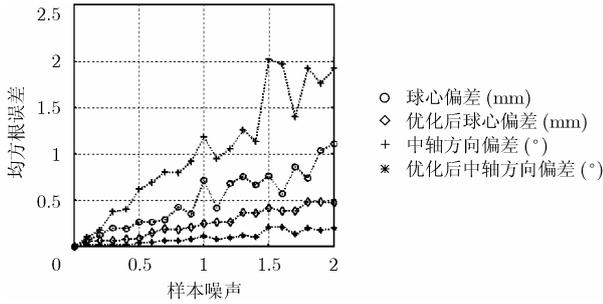


图 2 样本点噪声与估计误差

方法有效地降低了估计误差，尤其对于端面方向估计的改善效果明显。

5.2 实际图像估计结果

固定相机，将球体置于一精密转台之上，转台以每次 5° 依次作等角旋转，获得如图 3 所示 5 幅图像，使用本文所述方法对其姿态进行估计。



图 3 待估计的实际图像

已知球体半径为 25mm，轴孔端面内外缘半径分别为 4.05mm，6.70mm。实验所用相机采用FUJI S602 相机。相机标定使用Tsai单视非共面点RAC算法^[3]，可得到相机的有效焦距，纵横比、倾斜因子及径向扭曲参数。利用标定结果对图像畸变、扭曲进行补偿，以提高估计精度，然后通过手工方式获得圆球及轴孔端面投影图像上的样本点，再使用基于几何距离的最小二乘拟合算法^[7]精确拟合投影椭圆方程。最后利用上文所述算法，对轴孔端面方向、球体及端面的中心位置进行估计，表 1 列出对上述实际图像的估计结果，表中所列的是估计所得中轴方向及球心位置相对初始位置的偏转角与偏移距离。可见对于浮球位置与姿态的估计可达到一定的精度要求。

表 1 实际图像估计结果

中轴方向 (偏转角)	真实值 (°)	5.00	10.00	15.00	20.00
	估计值 (°)	4.78	10.10	15.13	19.82
	误差 (°)	-0.22	0.10	0.13	-0.18
球心位置 (偏移距离)	真实值 (mm)	0	0	0	0
	估计值 (mm)	0.78	1.16	0.89	1.04
	误差 (mm)	0.78	1.16	0.89	1.04

6 结束语

本文给出一种采用单视方法对球体的位置及姿态进行估计的计算方法。首先通过对球体及中心轴孔端面形成的各球及圆特征的三维位置估计以获取初步的估计结果，其次基于多个特征量之间的相互约束关系使用最小二乘优化算法对上述结果进行优化以提高估计精度。实际图像应用结果表明，本文方法可作为一种可行的球体位置及姿态的非接触视觉检测手段。

参考文献

- [1] Menthon D D and Davis L S. New exact and approximate solutions of the three-point perspective problem [A]. In Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, Cincinnati, OH, 1990: 40-45.
- [2] Horaud R, Conio B, and Lehoulloux O. An analytic solution for the perspective 4-points problem [J]. *Computer. Vision, Graphics Image Processing*, 1989, 47(1): 33-44.
- [3] 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, RA-3 (4): 323-344.
- [4] Haralick R M. Solving camera parameters from the perspective projective projection of a parameterized curve [J]. *Pattern Recognition*, 1984, 17(6): 637-645.
- [5] Marimont D H. Inferring spatial structure from feature correspondence [D]. [Ph. D. dissertation], Stanford Univ., Stanford, CA, Mar.1986.
- [6] Shin Y C and Ahmad S. 3D location of circular and spherical features by monocular model-based vision [A]. In Proceedings of International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Boston, MA, 1989: 576-581.
- [7] Sung J A, Wolfgang R, and Hans-Jurgen W. Least-squares orthogonal distances fitting of circle, sphere, ellipse, hyperbola, and parabola [J]. *Pattern Recognition*, 2001, 34(12): 2283-2303.

邹益民：男，1963 年生，副教授，博士生，研究方向为导航与制导、图像处理、模式识别。

汪 渤：男，1963 年生，教授，博士生导师，主要研究方向为精确制导技术。