

小视场环境下的摄像机标定

郭 涛 达飞鹏 方 旭

(东南大学自动化研究所, 江苏 南京 210096)

摘要 摄像机标定旨在建立三维世界坐标与二维图像坐标之间的映射关系。传统标定板为数十个整齐排列的标准圆或网格,通过提取圆心坐标或网格角点坐标进行标定。在微小物体测量系统中,摄像机视场较小,无法从传统标定板提取足够多点坐标信息。针对这一问题,提出一种基于二次曲线与直线的混合标定方法。该方法抛弃了利用点对点关系的标定方法,转而利用二次曲线方程及直线方程在两种坐标系下相对应的关系进行标定,使摄像机即使是在非常小的范围内仍然能够提取足够的信息进行标定。仿真与实验证明,相对于基于点的标定方法,混合标定方法精度高,具有更好的稳健性。另外,标定模板为一个标准的半圆,制作简单,方便应用到小视场的环境中。

关键词 机器视觉;摄像机标定;小视场;二次曲线;直线

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0808001

Camera Calibration under Small Field of View

Guo Tao Da Feipeng Fang Xu

(Institute of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract Camera calibration aims at building up the mapping relationship between 3D world coordinate and 2D image coordinate. The traditional calibration board contains dozens of neatly arranged standard circles or grids. Calibration is completed by extracting the center coordinates of standard circles or grid corner coordinates. In a micro-object measurement system, the camera field of view is very small and camera cannot extract enough points from the calibration board. To solve this problem, a new method based on conic and lines is proposed. This method uses conic and lines equation instead of points to calibrate so that enough information can be extracted from calibration board even under small field of view. Both computer simulation and real data test show that the proposed method has higher accuracy and better robustness. In addition, the calibration board is a standard semicircle which is very easy to be made and easy to be used under small field of view.

Key words machine vision; camera calibration; small field of view; conic; line

OCIS codes 150.1488; 150.0155; 120.6650; 100.2000; 100.301

1 引 言

摄像机标定是三维测量中必不可少的前期步骤。标定的精度在很大程度上影响着整个系统的精度。传统的摄像机标定使用的模板主要分为三维模板与二维模板。基于三维模板^[1,2]的标定方法精度高,但标定过程费时费力,且精确的三维标定物制作成本高、难度大,只适用于对精度要求高的场合。目

前广泛采用的是基于二维平面模板的标定方法^[3~10]。Zhang^[3]提出的基于平面模板的两步标定法采用了棋盘格式的标定物,通过检测模板上的角点进行标定。由于圆的特性,圆形标志物得到了广泛的应用。基于圆环点的标定方法^[4]将二维标定物从棋盘格式换成了圆,提高了标定精度。使用同心圆^[5,6]进行标定的方法,只需一对同心圆即可完成标定。

收稿日期: 2012-03-16; **收到修改稿日期**: 2012-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(51175081,61107001)和江苏省自然科学基金(BK2010058)资助课题。

作者简介: 郭 涛(1989—),男,硕士研究生,主要从事三维测量及图像处理等方面的研究。

E-mail: guotao08007217@126.com

导师简介: 达飞鹏(1968—),男,博士,教授,主要从事三维测量及三维人脸识别等方面的研究。

E-mail: dafp@seu.edu.cn

以上基于三维标定物或二维平面模板的方法都需要标定板提供足够多的点对点的信息才能完成标定。而在小视场的环境下,摄像机的成像范围有限,无法从传统标定物上提取足够的信息。将标定物做小同时保证精度又相对困难。相对传统标定法,自标定^[11,12]是一种灵活多变的方法。自标定不需要任何标定物,利用绝对二次曲线或者绝对二次曲面的方程仅与摄像机内部参数有关的特性进行标定。但自标定^[11~14]精度较低,且稳健性不佳,只适用于场景变化较快且对精度要求不高的场合。本文从二维平面模板出发,利用射影变换的交比不变性求出三条直线方程,结合椭圆曲线方程进行标定。该方法的模板仅为一个标准半圆,且无需模板的位置信息,可以方便地应用到小视场的环境中。

2 基于二次曲线与直线的混合标定法

2.1 摄像机成像模型

摄像机标定是指建立图像中每个像素与空间位置之间的对应关系。在摄像机模型中,涉及三种坐标系:图像坐标系 OUV 、摄像机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 和世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 。空间中任意一点 (X_w, Y_w, Z_w) 与图像中对应点 (u, v) 的关系为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 s 为比例因子。 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}]$ 为摄像机外部参数矩阵, \mathbf{A} 为摄像机内部参数矩阵。用 m 表示图像坐标, M 表示世界坐标, 则(1)式可表示为

$$\tilde{m} = \mathbf{H}\tilde{M}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{H} 为单应性矩阵。

2.2 单应性矩阵的求取

针对小视场环境下传统标定板的不足,设计了标准半圆模板。如图 1 所示。

图 1 中 O 为圆心。直径 AB 所在直线为 L_3 。任意选取 L_3 上两点,分别计算这两点与 A, O, B 的交比。不失一般性,选取 $\overline{DA} = \overline{AO} = \overline{OB} = \overline{BC}$, 则有 $\text{cross}(D, A, O, B) = \text{cross}(C, B, O, A)$ 。过 C, D 两点的圆的切线分别为 L_1 和 L_2 。经过摄像机的射影变换,半个正圆退化为半个椭圆, L_3 映射为 l_3 , 如图 2 所示。根据射影变换的交比不变性,可由 $\text{cross}(D, A, O, B) = \text{cross}(D', A', O', B')$ 求出图像坐标中的 D' 。再根据射影变换的相切不变性,可知直线 L_1 对应的图像坐标中的直线为 l_1 。同理可知直线 L_2 对应

的图像坐标中的直线为 l_2 。

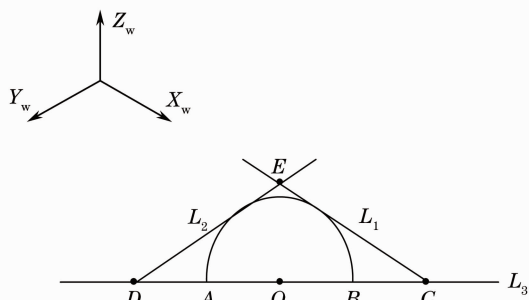


图 1 标准半圆模板

Fig. 1 Standard semi-circular template

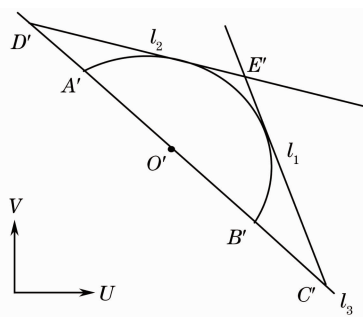


图 2 射影变换后的模板

Fig. 2 Template after projective transformation

设 m 为图像坐标中的点,其对应的世界坐标中的点为 M 。若 m 在直线 l_1 上,由分析可知 M 则在直线 L_1 上。结合(2)式有

$$\mathbf{H}^T l_1 = s_1 L_1. \quad (3)$$

应用到三条直线上,有

$$\mathbf{H}^T [l_1, l_2, l_3] = [L_1, L_2, L_3] \mathbf{S}, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{S} = \text{diag}\{s_1, s_2, s_3\}$ 为未知量。

设图像坐标下椭圆方程为 Q , 世界坐标下方程为 P , 则有

$$\mathbf{H}^T Q \mathbf{H} = P. \quad (5)$$

联立(4)与(5)式消去 \mathbf{H} 可求得 \mathbf{S} , 代入(4)式中即可得到单应性矩阵 \mathbf{H} 。

$$\mathbf{H} = [l_1, l_2, l_3]^{-T} \mathbf{S} [L_1, L_2, L_3]^T. \quad (6)$$

2.3 内部和外部参数的确定

在平面模板中,可令 $Z_w = 0$, 可得

$$\lambda \mathbf{A}^{-1} [h_1, h_2, h_3] = [r_1, r_2, \mathbf{T}], \quad (7)$$

式中 r_1, r_2 为旋转矩阵 \mathbf{R} 的列向量, λ 为比例因子。根据旋转矩阵的单位正交性, 则有

$$\begin{cases} h_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} h_1 = h_2^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} h_2 \end{cases}. \quad (8)$$

内部参数矩阵 \mathbf{A} 中有 5 个未知量, 每幅图像可以提供两个约束方程, 因此在不同角度下拍摄 3 幅图像即可根据(8)式完整解出内部参数矩阵。拍摄

超过 3 幅图像的时候得到的则是一个最优解。

外部参数各个参数为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1, & \mathbf{r}_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \\ \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2, & \mathbf{T} = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_3 \end{cases}, \quad (9)$$

式中 $\lambda = 1 / \|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1\| = 1 / \|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2\|$ 为比例因子。

此处得出的结果由于未考虑镜头畸变^[15],精度有限,需进行非线性优化。根据 Tsai^[16]的分析,加入径向畸变 k_1, k_2 即可满足大部分场合的需求。引入切向畸变或更高阶次的径向畸变不仅对精度提高没有太大帮助,反而会使计算量大大增加。因此这里仅考虑径向畸变 k_1, k_2 。非线性优化目标函数为

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|\mathbf{m}_{ij} - \tilde{\mathbf{m}}(\mathbf{A}, \mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i, \mathbf{M}_j, k_1, k_2)\|^2. \quad (10)$$

3 实验结果

3.1 仿真实验

设半圆方程为 $x^2 + y^2 = 4 (y \geq 0)$, 内部参数矩

表 1 不同噪声水平下内部参数平均值

Table 1 Average of intrinsic parameters under different noise levels

Noise level	f_x/pixel	f_y/pixel	s	u_0/pixel	v_0/pixel
0	1260.0000	1320.0000	0.000000	600.0000	500.0000
0.6	1260.0418	1319.6576	0.002847	600.2643	499.8808
1.2	1260.4595	1320.7575	0.097184	598.4504	498.8899
1.8	1261.2792	1322.8049	0.451695	602.1734	503.9736
2.4	1264.4956	1317.3819	0.560422	596.3303	495.0875
3.0	1253.8786	1314.9590	0.719121	608.7946	494.2759

在仿真实验中,基于同一组内部和外部参数下,另外使用了文献[3]基于点的标定方法,以此来说明本文方法的稳健性。图 3 为在不同噪声水平下两种方法稳健性的比较。分别取内部参数的 5 个参数进行比较。图中实点曲线为基于点的标定方法求得的内部参数各个参数在不同噪声水平下的标准差,实星曲线为基于曲线和直线的混合标定法求得的内部参数各个参数在不同噪声水平下的标准差。

3.2 实物实验

在液晶显示器上显示本文的半圆模板,物理尺寸约为 $2 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$,如图 4 所示。旋转显示器,在近距离(拍摄距离小于 10 cm)下拍摄 4 幅不同角度的图像。

分别取其中 3 幅图像进行标定。最终结果取平均值,并与文献[3]的基于点的标定方法进行比较,

阵 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1260 & 0 & 600 \\ 0 & 1320 & 500 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 三幅图的外部参数分别为:

第一幅图: $\alpha_1 = 18.9^\circ, \beta_1 = 9.3^\circ, \gamma_1 = -23.4^\circ$, $\mathbf{T}_1 = [1, 1, 15]$; 第二幅图: $\alpha_2 = 25.3^\circ, \beta_2 = 11.3^\circ, \gamma_2 = -37.8^\circ, \mathbf{T}_2 = [2, 1, 15]$; 第三幅图: $\alpha_3 = 11.9^\circ, \beta_3 = -8.5^\circ, \gamma_3 = 30.5^\circ, \mathbf{T}_3 = [3, 2, 15]$; 其中, α_i, β_i 和 γ_i 为摄像机坐标系相对于世界坐标系的旋转角, \mathbf{T}_i 则是摄像机坐标系相对于世界坐标系的平移向量。根据上述参数生成 3 幅图像,图像分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1920 \text{ pixel}$ 。分别对每幅图像加入均值为零,标准差 $0 \sim 3 \text{ pixel}$ 间隔 0.6 pixel 的高斯噪声,并在每个噪声水平(NL)下单独计算 300 次,然后分别利用文献[3]的基于点的标定方法与基于直线与曲线的混合标定方法计算出结果。计算中不同噪声水平下内部参数平均值如表 1 所示。

结果如表 2 所示。评价标准为重投影到世界坐标系下的重投影误差,单位是世界坐标系下的单位长度。实验中所用摄像机为普通民用摄像机,分辨率为 $960 \text{ pixel} \times 720 \text{ pixel}$ 。

从表 2 可以看出,在小视场的环境下,本文方法所得结果的重投影误差优于文献[3]基于点的标定方法,精度提高约 40%。分析可知,当摄像机成像范围有限、标定板提供的信息较少时,基于点的标定方法无法从图像中获取足够多的信息,因而精度有限。而本文方法利用了直线与椭圆方程,能有效地从标定板中提取足够多的信息完成标定。所求图像中心坐标为 $(479.57, 357.13)$, 接近真实图像中心坐标 $(480.00, 360.00)$; 横纵坐标之间的夹角 $\varphi = \arctan[f_x/\text{abs}(s)] = 89.99974^\circ$, 接近理想摄像机的横纵坐标夹角 90° 。

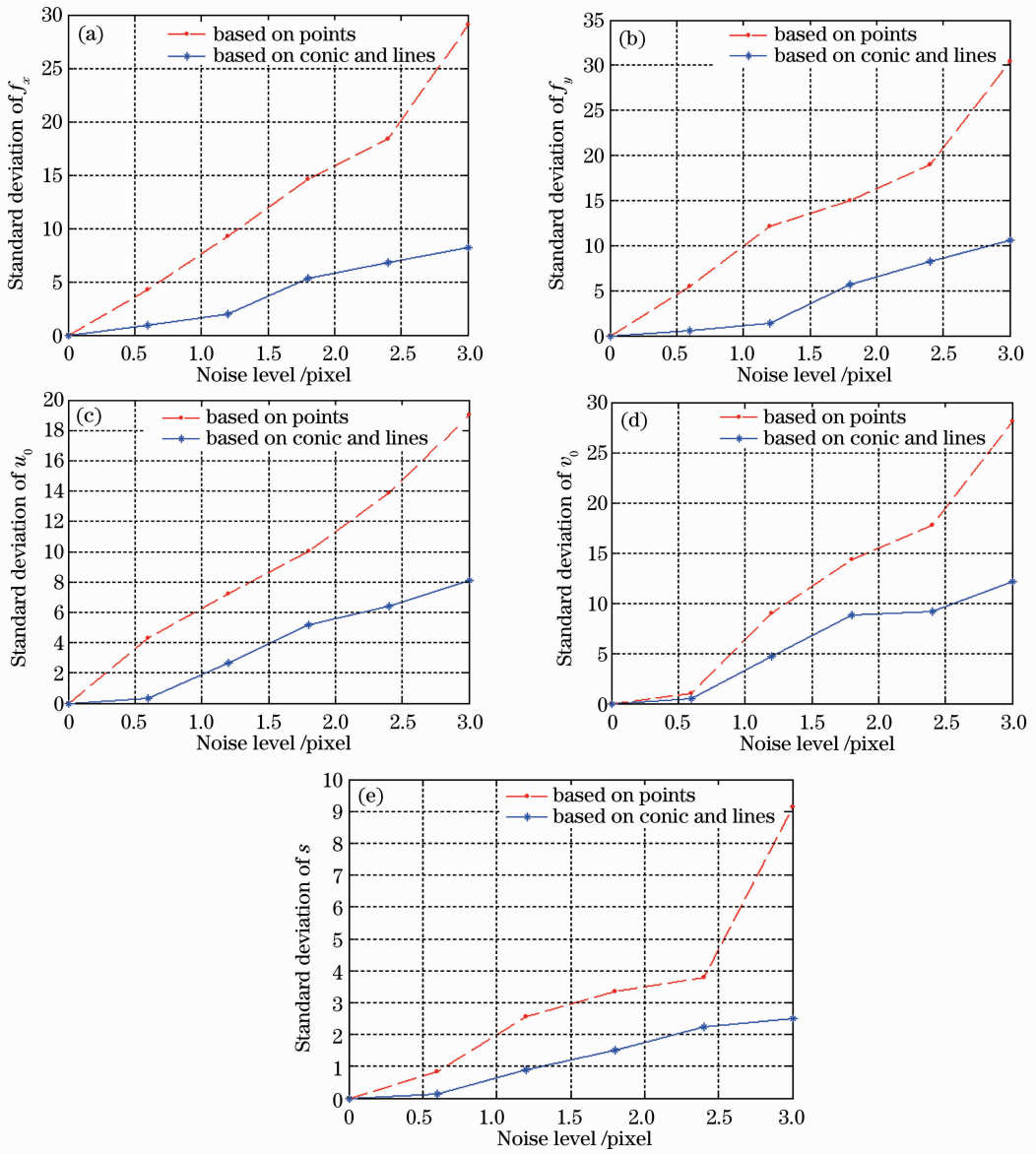


图 3 不同噪声水平下内部参数(a) f_x ; (b) f_y ; (c) u_0 ; (d) v_0 ; (e) s 的标准差

Fig. 3 Standard deviations for intrinsic parameters (a) f_x ; (b) f_y ; (c) u_0 ; (d) v_0 ; (e) s under different noise levels

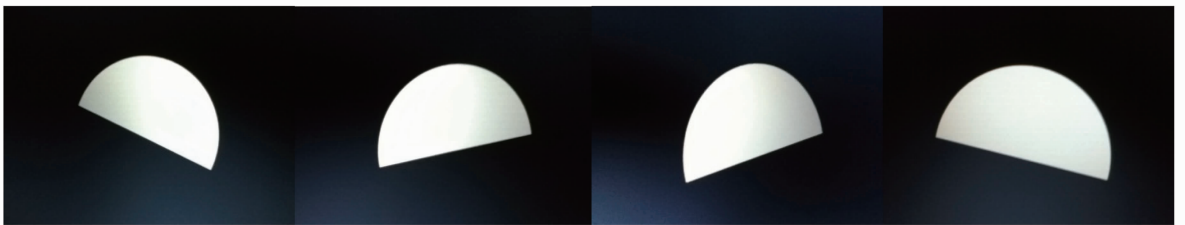


图 4 实物拍摄图像

Fig. 4 Actual images

表 2 两种方法的标定结果

Table 2 Calibration results based on different methods

Methods	f_x /pixel	f_y /pixel	s	u_0 /pixel	v_0 /pixel	Reprojective error
This paper	2181.26	2193.30	0.0096	479.57	357.13	0.0333
Zhang	2249.67	2217.75	0.0310	473.08	351.76	0.0563

4 结 论

本文提出了一种小视场环境下的标定方法。该方法是一种基于二次曲线和直线的混合标定方法。文献[3~10]传统标定使用的标定板体积较大、不能提供足够多的有效点信息。本文方法使用的标定板体积小、制作简单,而且能提供足够多的信息进行标定。仿真实验以及实物实验均证明了用本文方法进行标定的精度和稳健性。该方法属于传统标定范畴,但将标定应用到了微小物体测量领域,使得摄像机在近距离拍摄下仍能较高准确地标定出内部和外部参数。该方法在实际应用中得到了很好的验证,为后续的三维测量工作提供了一定的参考。

参 考 文 献

- 1 R. Tsai, R. K. Lenz. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration[J]. *IEEE T. Robot. Automat.*, 1989, **5**(3): 345~358
- 2 J. Y. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. *IEEE T. Pattern Anal.*, 1992, **14**(10): 965~980
- 3 Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE T. Pattern Anal.*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 4 Meng Xiaoqiao, Hu Zhanyi. A new easy camera calibration technique based on circular points[J]. *Journal of Software*, 2002, **13**(5): 957~965
孟晓桥, 胡占义. 一种新的基于圆环点的摄像机自标定方法[J]. *软件学报*, 2002, **13**(5): 957~965
- 5 W. J. Ma, Y. Q. Zheng, Y. C. Liu. Camera calibration using two concentric circles; linear approach[J]. *Opt. Engng.*, 2009, **48**(5): 053602
- 6 Yang Changjiang, Sun Fengmei, Hu Zhanyi. Planar conic based camera calibration [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2000, **23**(5): 541~547
杨长江, 孙凤梅, 胡占义. 基于平面二次曲线的摄像机标定[J]. *计算机学报*, 2000, **23**(5): 541~547
- 7 P. F. Sturm, S. J. Maybank. On plane-based camera calibration; a general algorithm singularities, applications[C]. Colorado; Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999, **1**: 432~437
- 8 Carlos Ricolfe Viala. Camera calibration under optimal conditions [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(11): 10769~10775
- 9 Bian Xintian, Su Xianyu, Chen Wenjing. A novel three-dimensional coordinates measurement method based on inverse photogrammetry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37** (7): 1832~1836
边心田, 苏显渝, 陈文静. 基于反向摄影的三维坐标测量方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1832~1836
- 10 Zhu Jia, Li Xingfei, Xu Yingxin. Camera calibration technique based on active vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1297~1303
朱 嘉, 李醒飞, 徐颖欣. 摄像机的一种主动视觉标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1297~1303
- 11 O. Faugeras, Q. T. Luong, S. Maybank. Camera self-calibration; Theory and experiments [C]. Italy; Proc. 2nd European Conference on Computer Vision, 1992. 321~334
- 12 S. Maybank, O. Faugeras. A theory of self-calibration of a moving camera [J]. *Int. J. Comput. Vision*, 1992, **8** (2): 123~151
- 13 F. Yilmazturk. Full-automatic self-calibration of color digital cameras using color targets[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(19): 18164~18174
- 14 Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 465~472
霍 炬, 杨 卫, 杨 明. 基于消失点几何特性的摄像机自标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 465~472
- 15 Li Qin, Da Feipeng, Wen Qingchuan. Calibrating lens distortion of camera in all directions [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(9): 2022~2027
李 勤, 达飞鹏, 温晴川. 任意方向下的摄像机镜头畸变标定[J]. *仪器仪表学报*, 2010, **31**(9): 2022~2027
- 16 R. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE J. Robot. Automat.*, 1987, **3**(4): 323~344

栏目编辑:何卓铭