

基于自抗扰控制器的机器人 无标定三维手眼协调¹⁾

马红雨 苏剑波

(上海交通大学自动化研究所 上海 200030)
(E-mail: mhy1@sina.com; jbsu@sjtu.edu.cn)

摘要 研究机械臂在手眼关系未知情况下依靠视觉信息引导完成三维空间定位及跟踪问题. 基于耦合自抗扰控制器原理, 设计了不依赖于特定任务的广泛意义下的手眼协调控制器. 利用两个全局摄像机组成双目视觉系统, 由图像特征可以充分地确定机器人三维空间中的位置信息. 仿真和实验对这一方法的可行性和有效性进行了验证.

关键词 视觉反馈, 手眼协调, 自抗扰控制器, 无标定

中图分类号 TP24

Uncalibrated Robotic 3D Hand-Eye Coordination Based on Auto Disturbance Rejection Controller

MA Hong-Yu SU Jian-Bo

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)
(E-mail: mhy1@sina.com; jbsu@sjtu.edu.cn)

Abstract This paper is about robot 3D positioning and tracking under the guidance of vision in the uncalibrated environment. Based on the principle of coupled ADRC (Auto Disturbance Rejection Controller), a universal controller which is independent of special task is designed, and 3D positioning and tracking information in the manipulating space is obtained through vision information using two global cameras. Simulations and experiments show the validity and feasibility of this method.

Key words Visual feedback, hand-eye coordination, auto disturbance rejection controller, calibration free

1 引言

对于智能机器人手眼关系的研究是视觉信息更好地应用于机器人领域的一个重要环

1) 国家自然科学基金(69875010)资助

Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China(69875010)

收稿日期 2003-08-12 收修改稿日期 2003-12-24

Received August 12, 2003; in revised form December 24, 2003

节.传统的机器人手眼协调是建立在对手眼关系的精确标定上^[1],然而,由于对标定条件的严格约束以及摄像机的畸变等种种因素,使得基于标定的方法在工程应用中受到了很大限制.因而,如何在无标定条件下完成手眼协调任务成为智能化机器人研究的一个热点^[2,3].无标定方法的实质是在机器人手眼关系未知的情况下,充分利用视觉信息引导机器人完成视觉定位与跟踪任务.对于无标定的研究较为经典的是采用图像雅可比矩阵在线辨识的方法^[3,4],在每一个采样瞬间试图用一种线性关系逼近系统非线性的瞬时表现并以此线性模型建立视觉反馈控制.然而,在机器人运动过程中雅可比矩阵的在线估计总面临着奇异性、滞后性等问题,这制约了该方法的普遍应用;文献[5,6]采用神经网络方法对手眼非线性映射模型进行拟合,取得了一定的成果,但这需要大量的样本学习,并不能体现出无标定方法的优越性.

自抗扰控制器 ADRC(auto disturbance rejection controller)是针对一类非线性不确定对象而设计的一种非线性控制器^[7],包括非线性跟踪-微分器 TD(tracking differentiator),扩张状态观测器 ESO(extended state observer)和非线性状态误差反馈 NLSEF(non-linear state error feedback)三个部分.它并不需要被控对象的精确的数学模型,而是利用扩张状态观测器实时估计由于模型不确定及未知外扰所带来的影响并在控制过程中对其加以补偿,最终实现在模型不确定情况下仍能达到对系统良好控制的目的.

邱文斌首先把自抗扰控制器思想应用于无标定机器人手眼协调领域^[8],针对全局单眼视觉反馈情况,完成了不依赖于手眼关系模型的针对二维定位任务的控制器的设计,是对这一领域的一个贡献.然而,所设计的控制器割裂了手眼协调内在的相互耦合关系,加大了系统误差,使得控制性能下降,在耦合关系较强的环境下甚至造成系统的不可控.

本文在此基础上,针对立体视觉下的三维目标定位与跟踪任务,设计了耦合的 ADRC 手眼协调控制器.最后的仿真和实验验证了这一方法的可行性和有效性.

2 问题描述

对于具有 n 个摄像机的机器人手眼协调系统来说,假设运动空间中某一点 A 在机器人坐标系中的位置坐标为 $W=(x_w, y_w, z_w)^T$,相应的其在第 i 个摄像机所得到的图像坐标系中的位置为 $P_i=(p_u^i, p_v^i)^T$,则可以得到

$$\dot{P} = J \cdot U \quad (1)$$

其中, $U=\dot{W}=(u_x, u_y, u_z)^T$ 表示其在机器人空间的运动矢量, $\dot{P}_{2n \times 1}=(\dot{P}_1^T, \dots, \dot{P}_i^T, \dots, \dot{P}_n^T)^T$ 为其在 n 个图像坐标系中的运动矢量, $\dot{P}_i=(\dot{p}_u^i, \dot{p}_v^i)^T$ 为点 A 在第 i 个图像坐标系中的运动矢量, $J_{2n \times 3}=(J_1^T, \dots, J_n^T)^T$ 为由机器人坐标系映射到 n 个图像坐标系的图像雅可比矩阵.

以两个摄像机构成的双目视觉为例,由以上分析,得到整个系统的图像雅可比矩阵为

$$J_{4 \times 3} = \begin{bmatrix} J^1 \\ J^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11}^1 & J_{12}^1 & J_{13}^1 \\ J_{21}^1 & J_{22}^1 & J_{23}^1 \\ J_{11}^2 & J_{12}^2 & J_{13}^2 \\ J_{21}^2 & J_{22}^2 & J_{23}^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

此时,图像特征向量 $\dot{P}=(\dot{p}_u^1, \dot{p}_v^1, \dot{p}_u^2, \dot{p}_v^2)^T$.

由于摄像机透镜畸变,图像检测误差等种种原因,使得整个系统表现出很强的非线性与不确定性,这制约了被控对象精确的数学模型的建立.经典的基于雅可比矩阵方法的实质是在每一个时刻用一线性模型不断地实时估计当前时刻雅可比矩阵的表现值,而后再根据这一线性模型规划机器人运动,最终完成手眼协调任务.本文充分利用 ADRC 自抗扰控制器的基本思想,在对被控对象模型的一个粗略估计的基础上,利用扩张状态观测器于每一时刻在线估计出模型的真实值相对于初始估计值之间的偏移及所有的外扰作用量,并在控制反馈过程中对此模型误差及外扰加以补偿,从而达到对系统的精确控制.

3 控制器设计

假设系统雅可比矩阵的估计值为 \hat{J} , 机器人控制模型由式(1)描述,则式(1)可以重写为

$$\dot{P} = \hat{J} \cdot U + \alpha(t) \quad (3)$$

其中

$$\alpha(t) = (J - \hat{J}) \cdot U + \xi(t) \quad (4)$$

为考虑了模型真实值与估计值之间的偏移及未知外扰 $\xi(t)$ 在内的总作用量. 设定步长为 h , 将其写成离散的 ADRC 控制器适用的形式, 为

$$P(k+1) - P(k) = h \cdot (\hat{J} \cdot U(k) + \alpha(k)) \quad (5)$$

由此,对于双目视觉系统,设计跟踪微分器 TD 如式(6),来安排系统过渡过程,跟踪输入信号.

$$\begin{cases} \epsilon_1(k) = Z_1(k) - P^*(k) \\ Z_1(k+1) = Z_1(k) - h \cdot R \cdot fal(\epsilon_1(k), \alpha_1, \delta_1) \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$fal(\epsilon_i, \alpha_i, \delta_i) = \begin{cases} |\epsilon_i|^{\alpha_i} \text{sign}(\epsilon_i), & |\epsilon_i| > \delta_i \\ \epsilon_i / \delta_i^{1-\alpha_i}, & |\epsilon_i| \leq \delta_i \end{cases} \quad (7)$$

$\epsilon_i, \alpha_i, \delta_i (i=1, \dots, 4)$ 均为 4×1 向量,分别对应于两个摄像机的各自的 x 方向和 y 方向,其它参数向量和输入输出向量与此类似, fal 运算为各向量间对应元素的运算,得到的为 4×1 向量.“ \cdot ”表示向量的点乘,即向量间各对应元素的乘积,得到的是同维数的 4×1 向量.

$P^* = [P_{1u}^* \ P_{1v}^* \ P_{2u}^* \ P_{2v}^*]^T$ 为系统输入,TD 的输出向量 Z_1 估计跟踪此输入信号.

设计扩张状态观测器 ESO,估计系统模型误差及未知外扰的总作用量,如式(8)

$$\begin{cases} \epsilon_2(k) = Z_2(k) - P(k) \\ Z_2(k+1) = Z_2(k) + h \cdot (Z_3(k) - B_1 \cdot fal(\epsilon_2(k), \alpha_2, \delta_2) + \hat{J} \cdot U(k)) \\ Z_3(k+1) = Z_3(k) - h \cdot B_2 \cdot fal(\epsilon_2, \alpha_3, \delta_3) \end{cases} \quad (8)$$

其中,向量 Z_2 跟踪系统输出 P , Z_3 估计系统未建模动态和未知外扰的总作用量 $\alpha(t)$ 的实时值,用于设计系统控制部分,控制器的设计基于非线性状态误差反馈律 NLSEF,如式(9)

$$\begin{cases} \epsilon_3(k) = Z_1(k) - Z_2(k) \\ U_0(k) = h \cdot K \cdot fal(\epsilon_3(k), \alpha_4, \delta_4) \\ U(k) = (\hat{J}^T \cdot \hat{J})^{-1} \cdot \hat{J}^T (U_0(k) - Z_3(k)) \end{cases} \quad (9)$$

在对 $\alpha(t)$ 进行估计并补偿以后,得到系统的控制输入 U . 整个控制器结构如图 1 所示.

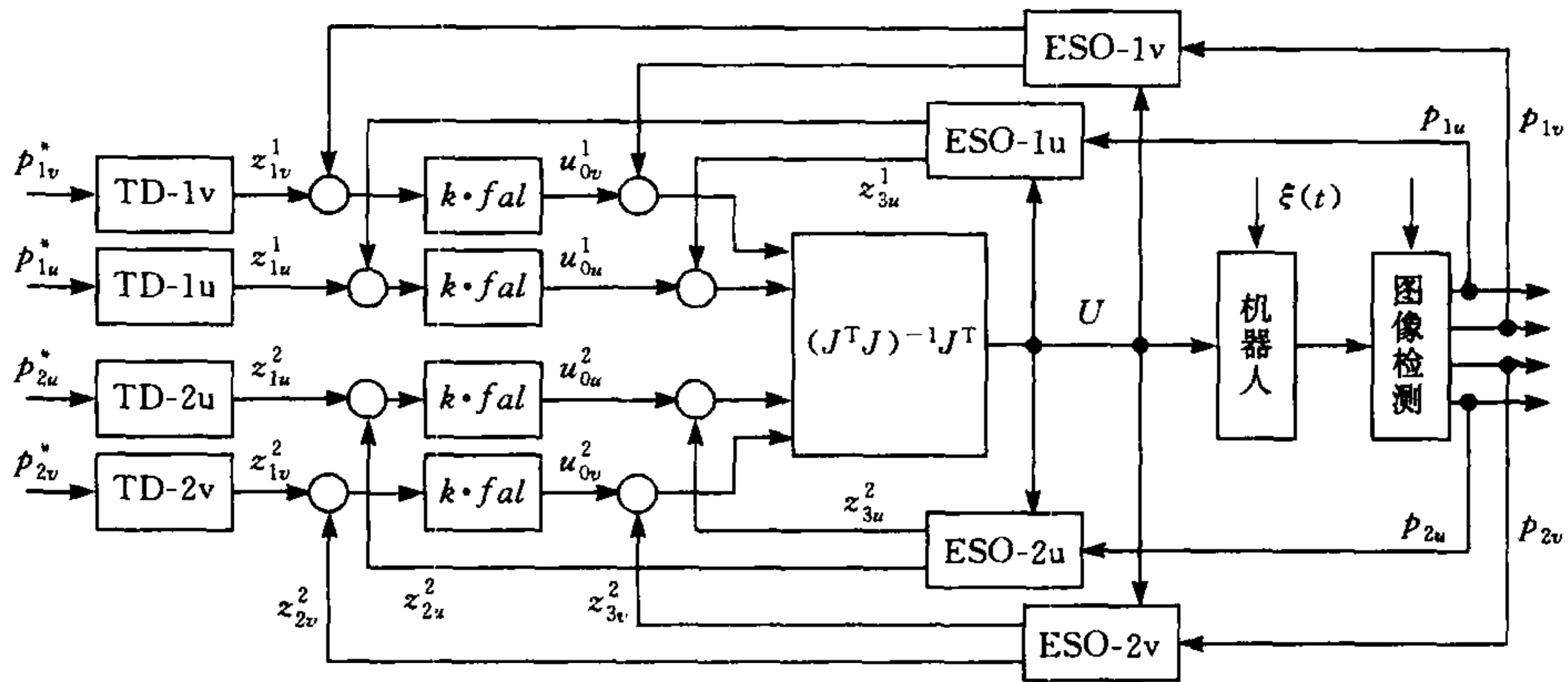


图1 基于自抗扰控制器的机器人手眼协调结构图

Fig. 1 Structure of uncalibrated robotic hand-eye coordination based on ADRC

$P^*(k)$ 为当前时刻手爪在图像中所期望达到的位置,为 4×1 向量,对于运动的目标,进行跟踪策略规划,由一阶预估得到

$$P^*(k) = P^o(k) + (P^o(k) - P^o(k-1)) = 2P^o(k) - P^o(k-1) \quad (9)$$

$P^o(k)$ 与 $P^o(k-1)$ 分别为目标在当前时刻与上一时刻在图像中的位置.

4 仿真和实验

4.1 仿真

在 matlab 5.1 仿真平台上对设计的控制器进行仿真. 摄像机 1 的参数为 $f_1 = 4.72\text{mm}$, $\psi_1 = 0.474$, $\theta_1 = -0.128$, $\varphi_1 = 0.242$, $T_1 = [-408 \ 69 \ 1065]^T$; 摄像机 2 的参数为 $f_2 = 5.13\text{mm}$, $\psi_2 = -0.486$, $\theta_2 = -0.065$, $\varphi_2 = -0.116$, $T_2 = [-396 \ -134 \ 974]^T$. 对应于第一个图像的 u 方向的 ADRC 控制器各参数取值如表 1 示,其 v 方向和对应于第二个图像的 u 方向和 v 方向 ADRC 控制器各参数取值同表 1,其雅可比矩阵估计值选择如表 2.

表 1 ADRC 控制参数选择(图像 1 u 方向)

Table 1 Selection of controller parameters (image 1, u direction)

TD			ESO						NLSEF		
α_{1u}^1	δ_{1u}^1	r_u^1	α_{2u}^1	δ_{2u}^1	b_{1u}^1	α_{3u}^1	δ_{3u}^1	b_{2u}^1	α_{4u}^1	δ_{4u}^1	k_u^1
0.5	5	20	0.5	3	10	0.5	5	20	0.5	5	12

表 2 雅可比矩阵估计值选择

Table 2 Selection of the initial estimation of image Jacobian matrix

摄像机 1						摄像机 2					
\hat{J}_{111}	\hat{J}_{112}	\hat{J}_{113}	\hat{J}_{121}	\hat{J}_{122}	\hat{J}_{123}	\hat{J}_{211}	\hat{J}_{212}	\hat{J}_{213}	\hat{J}_{221}	\hat{J}_{222}	\hat{J}_{223}
0.7	-0.2	0	0.2	0.9	-0.5	0.7	0.1	0	-0.1	0.9	0.5

假设目标在机器人空间中做螺旋线运动,并在图像检测环节加入最大幅值为正负 2 个像素的随机噪声,则得到的仿真图形如图 2,3 所示. 图 2 为两个图像平面上的跟踪误差曲

线,在稳定时图像误差在 5 个像素以内,图 3 为在机器人运动空间的跟踪曲线,可以看到在 3 个方向上都能很好地完成跟踪任务.

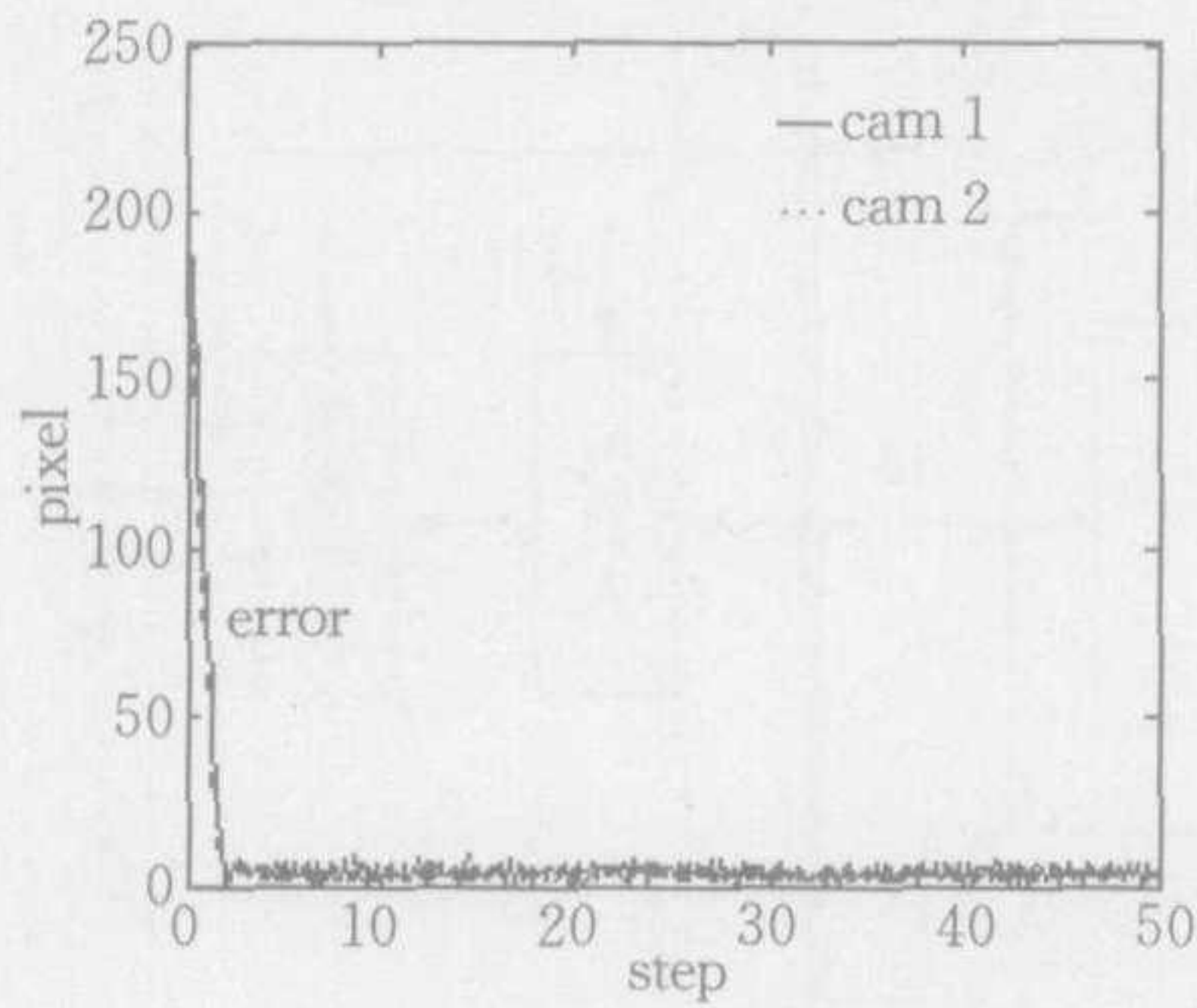


图 2 图像平面仿真跟踪误差

Fig. 2 Tracking errors from image space

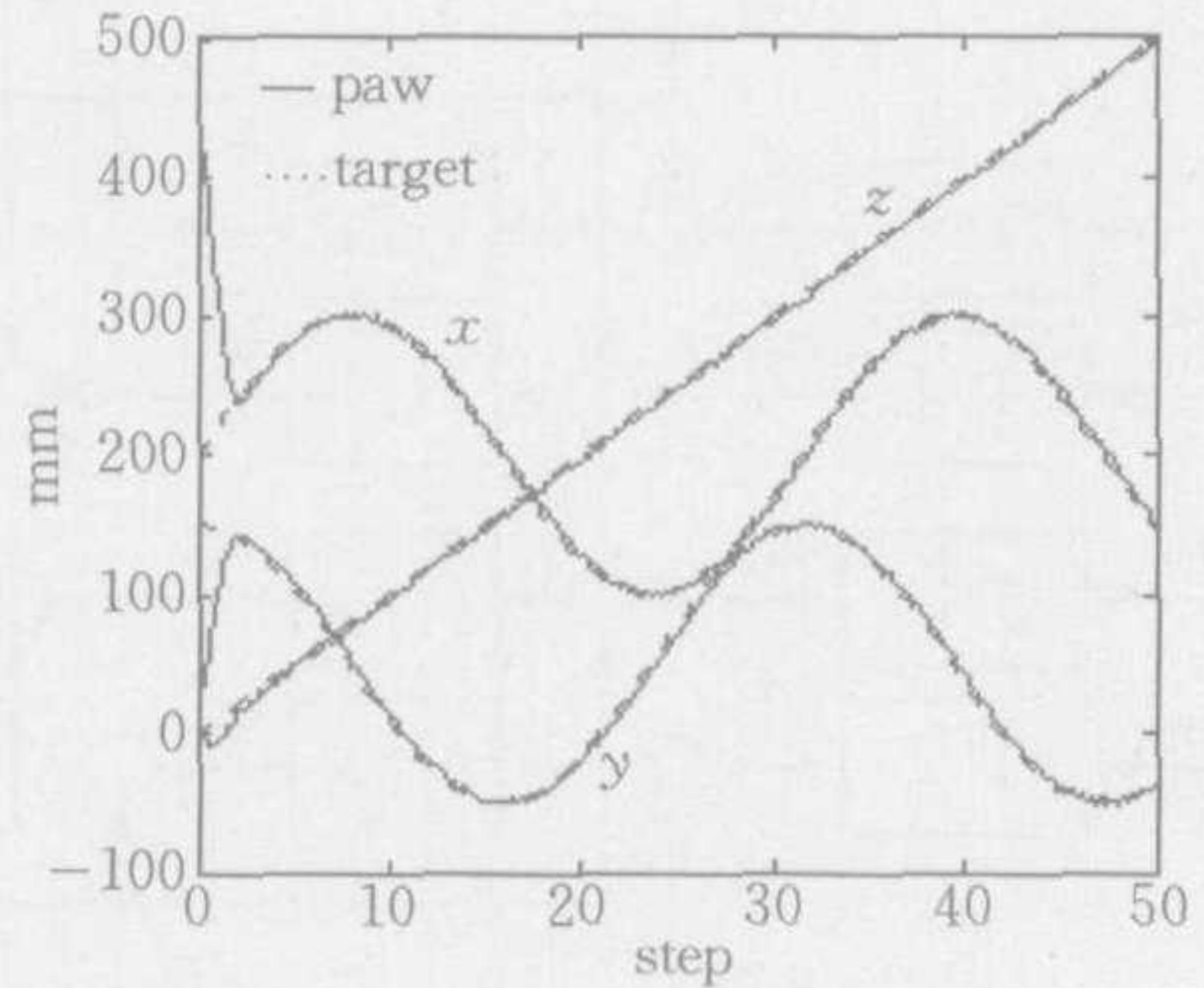


图 3 机器人坐标系仿真跟踪曲线

Fig. 3 Tracking 3-D moving object in robot space

4.2 实验

实验采用具有四自由度的 SCARA 型装配机器人,锁定其最后的转动关节,末端执行器只能做三维平动,两个 CCD 摄像机用来获取机器人空间中的三维信息.为了减少图像处理的复杂性,实验中以红色色块表示手爪,绿色色块表示目标.实验装置如图 4 所示.由于手爪和目标在图像中均有一定的面积,因而当手爪和目标在两个图像中的位置差均小于某一设定值时,即认为达到视觉定位或跟踪目的.实验设定采样步长为 0.5s.

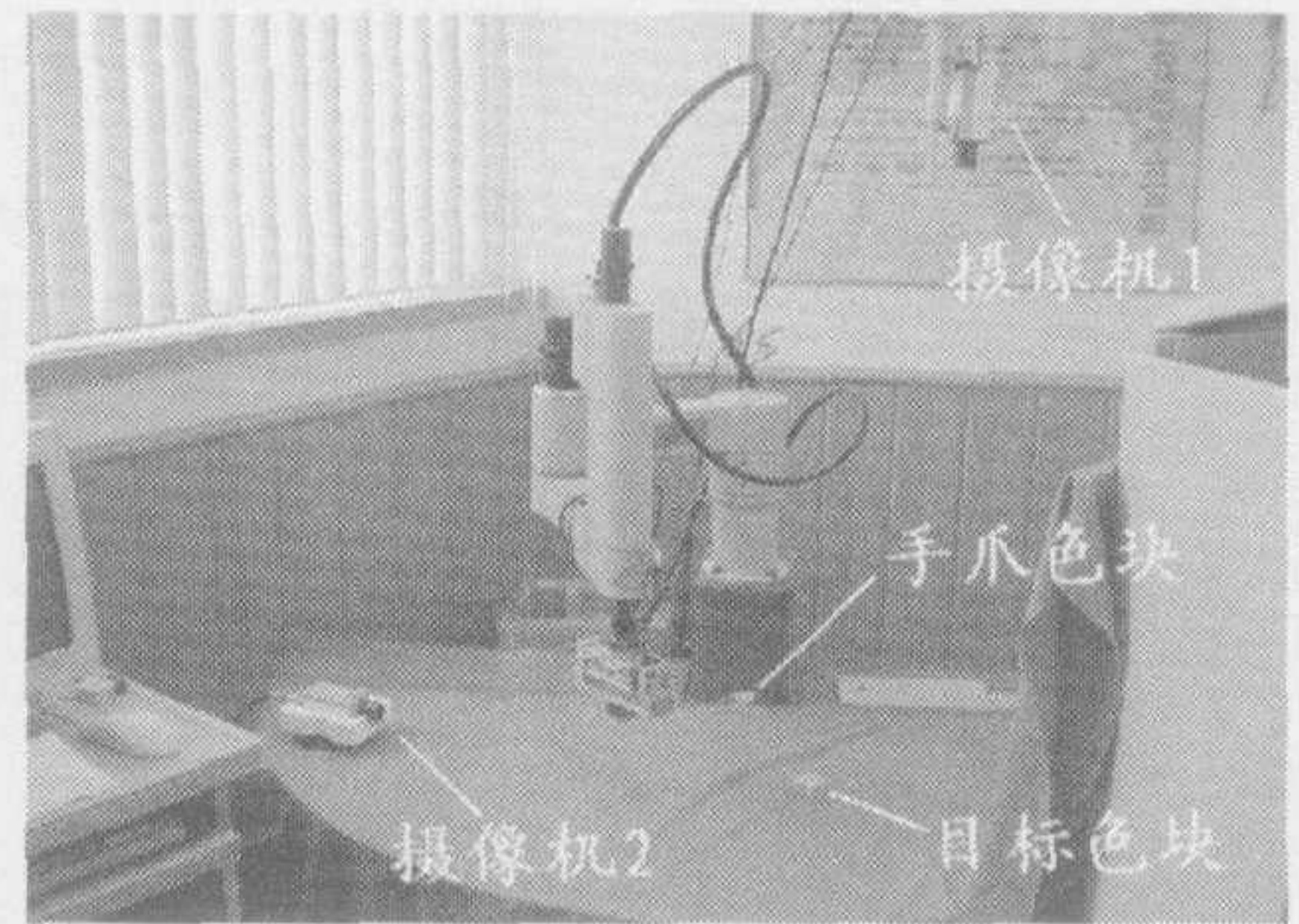


图 4 实验系统装置

Fig. 4 Setup of the experimental system

1) 目标定位

图 5,6 是在目标定位实验中两个全局摄像机观察到的手爪运动轨迹,在采样时刻,目标位置用“+”表示,手爪位置用“○”表示,在第 4.5s 时刻,两幅图像中目标与手爪的距离差均小于某一设定值,此时认为手爪接近目标,定位任务完成.由于手爪和目标在图像中均占有一定面积,其定位精度在任务结束时表现在图像中大约为 15 个像素.

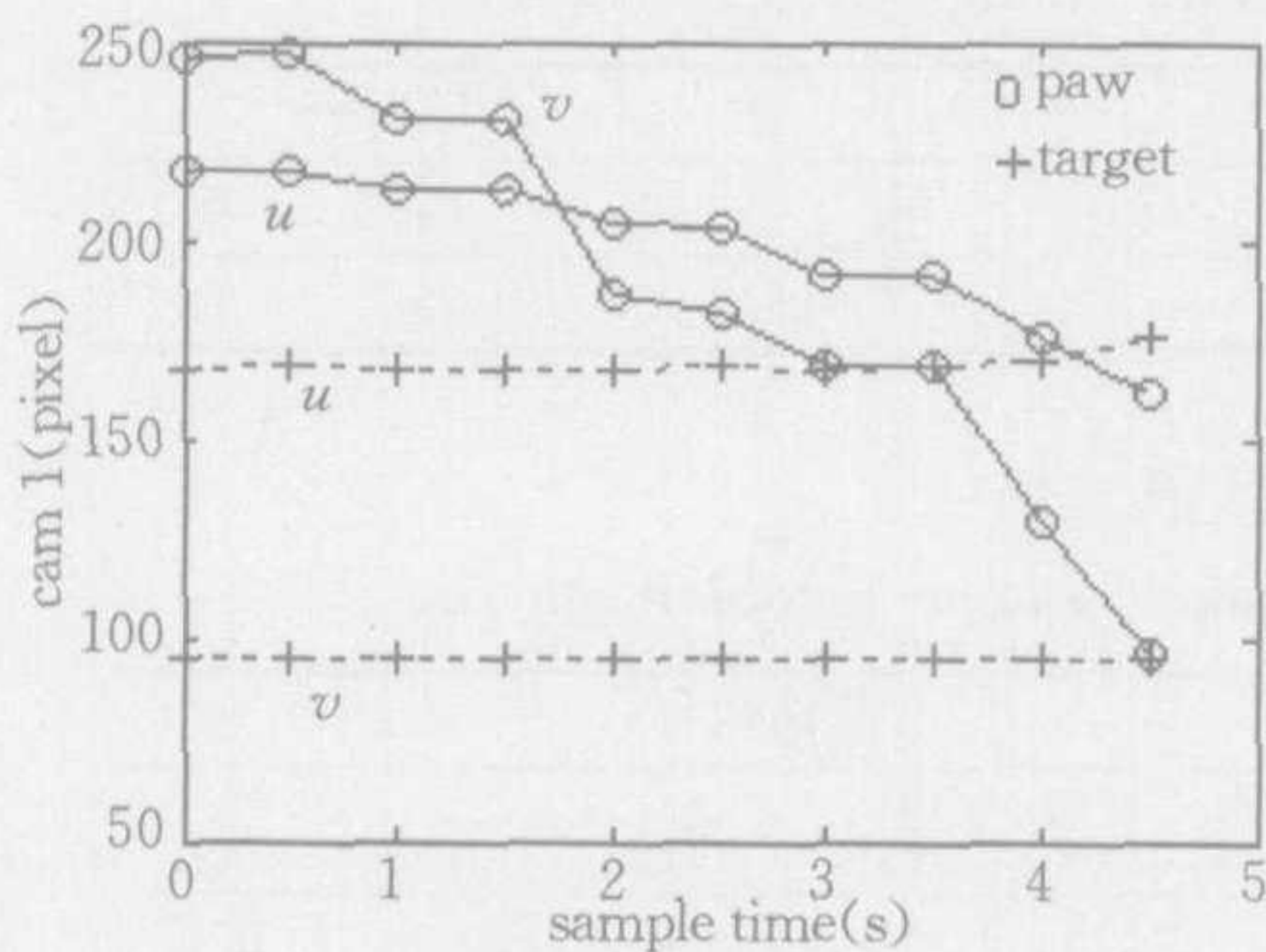


图 5 摄像机 1 定位实验

Fig. 5 Visual position captured by Camera 1

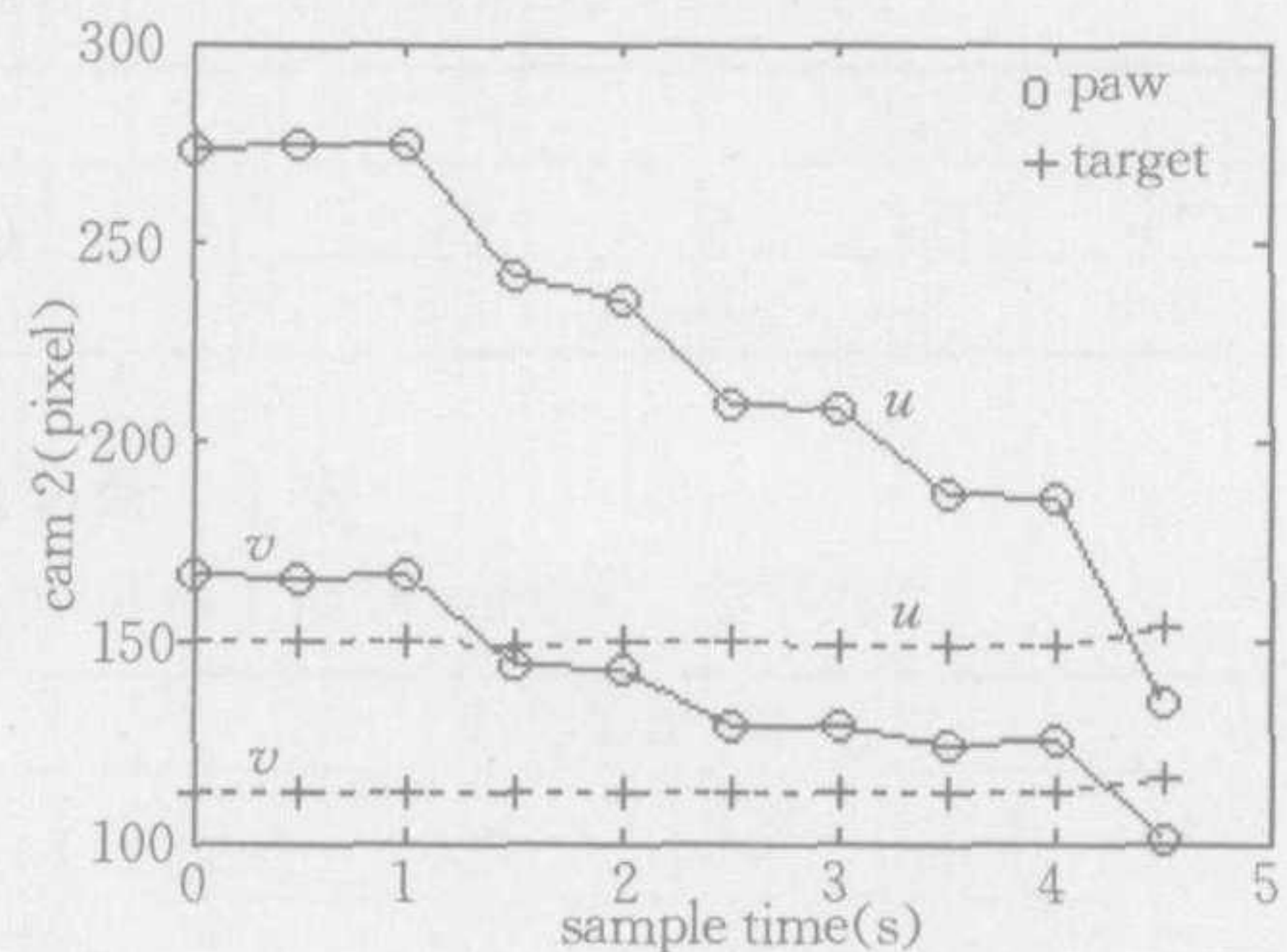


图 6 摄像机 2 定位实验

Fig. 6 Visual position captured by Camera 2

2) 目标跟踪

图 7~12 为目标跟踪实验图,图 7~10 是两个摄像机拍摄到的跟踪开始时和跟踪结束时的场景图,图 11,12 为跟踪过程中目标和手爪在两幅图像中的运动轨迹. 目标在机器人三维空间做近似直线运动,速度大约 20mm/s,在第 8.5s 时刻,手爪与目标在两幅图像中的位置差小于某一设定值,此时完成跟踪任务. 其最后的跟踪精度表现在图像上大约为 28 个像素,这是以目标和手爪两个色块的中心点为基准而得出的,而在实际的机器人空间坐标系中,目标和手爪已经相互接触并产生遮挡现象,如图 8 和图 10 所示,图 11 中最后一个时刻目标的 v 方向有所偏大,图 12 中目标的 u 方向有所偏大,均是由于手爪已接触并部分覆盖目标,使得目标中心点检测产生误差. 由实验结果可以看出,基于自抗扰控制器的方法对于无标定机器人手眼协调是可行而且有效的.

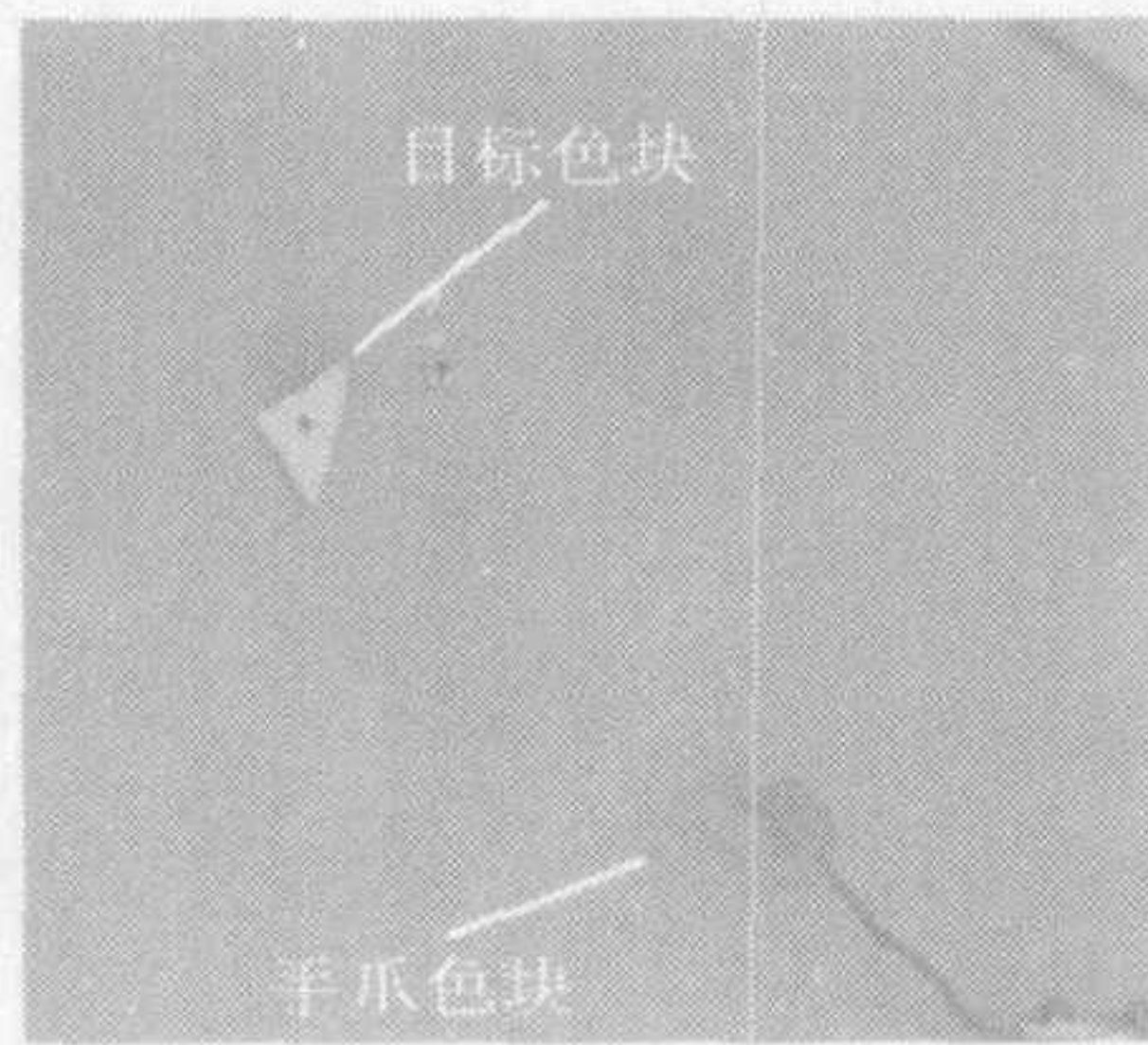


图 7 摄像机 1 跟踪开始图像
Fig. 7 Scene from Camera 1 in the beginning of tracking

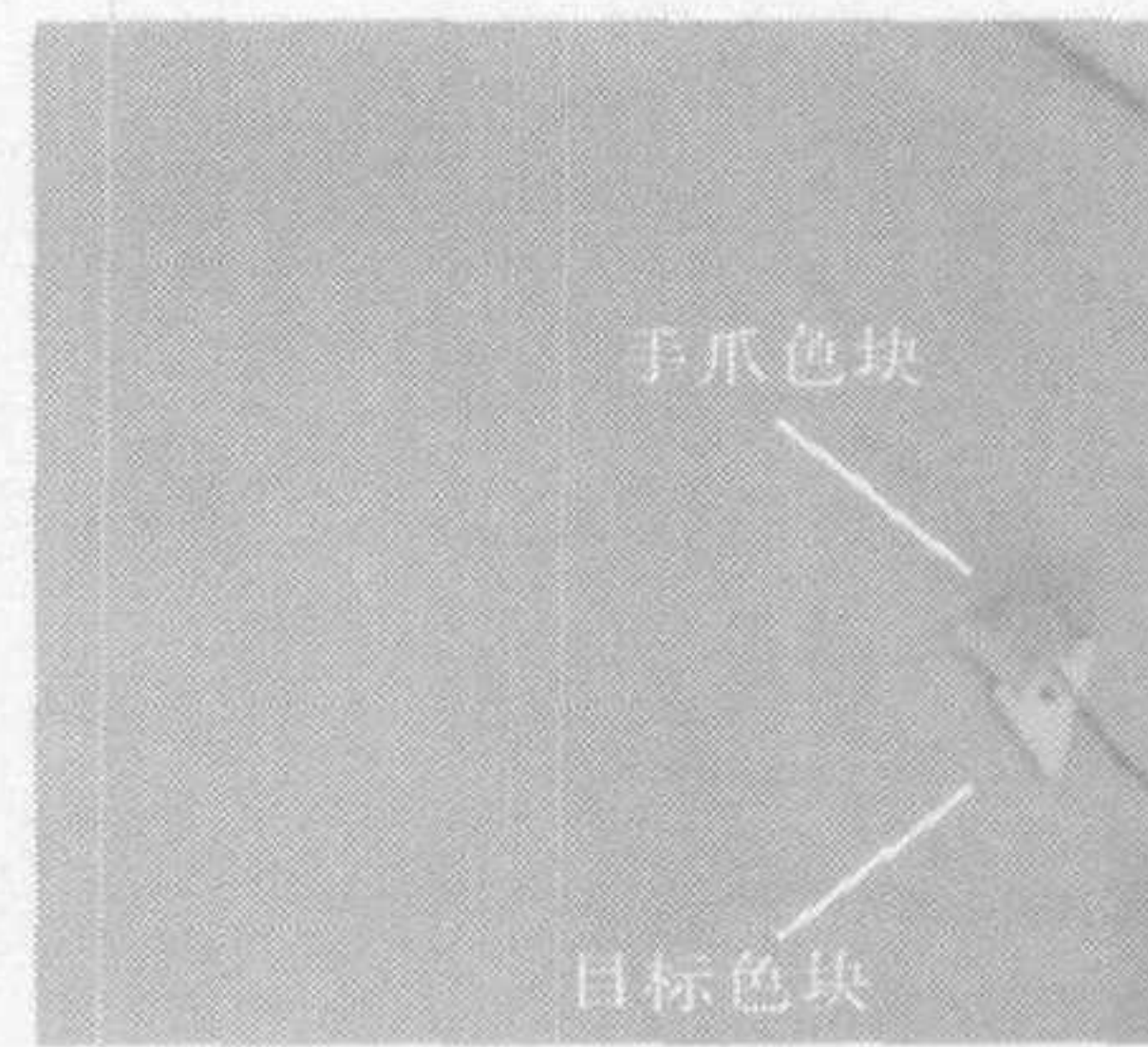


图 8 摄像机 1 跟踪结束图像
Fig. 8 Scene from Camera 1 at the end of tracking

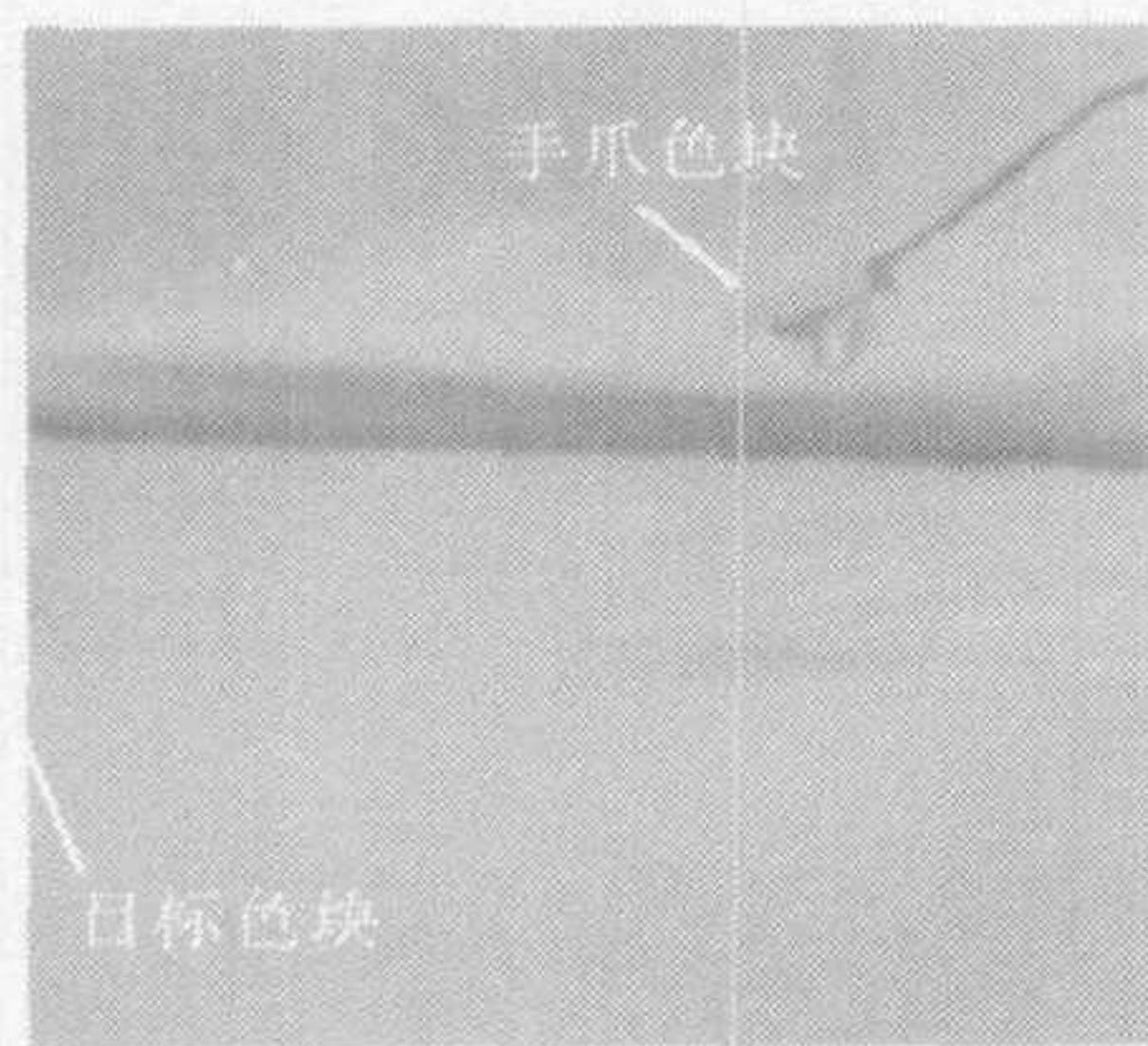


图 9 摄像机 2 跟踪开始图像
Fig. 9 Scene from Camera 2 in the beginning of tracking

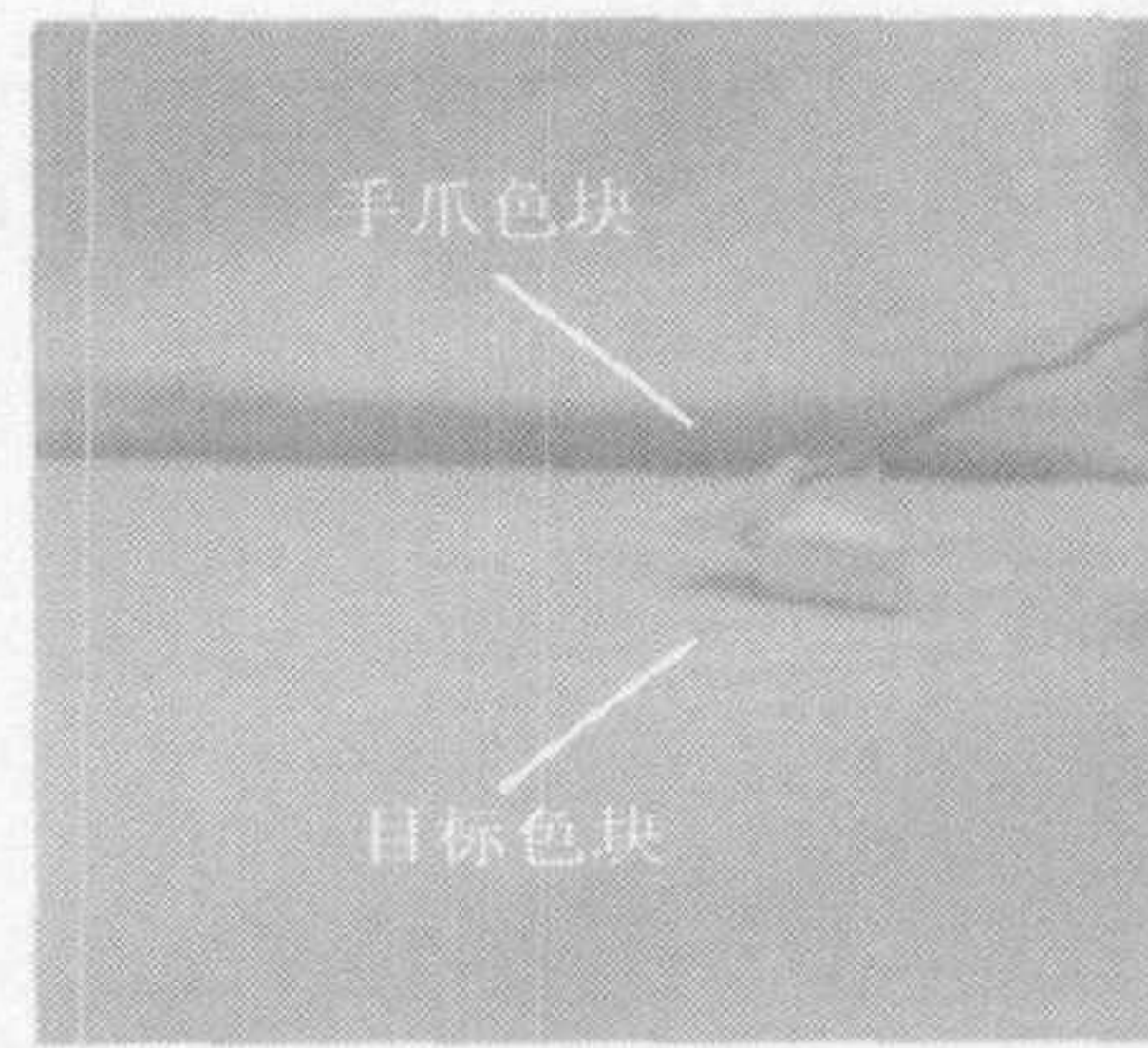


图 10 摄像机 2 跟踪结束图像
Fig. 10 Scene from Camera 2 at the end of tracking

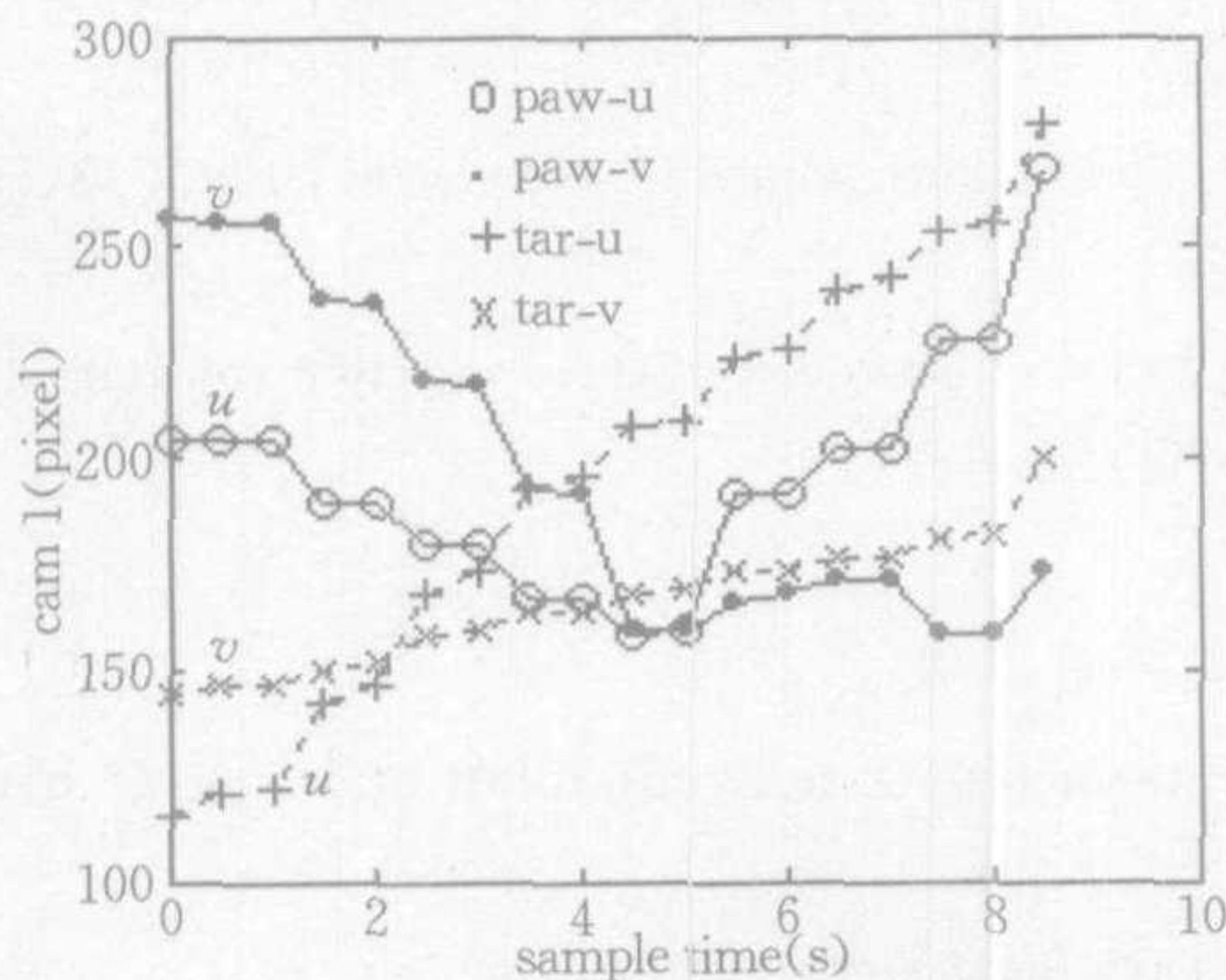


图 11 图像 1 跟踪轨迹
Fig. 11 Visual tracking trajectory by Camera 1

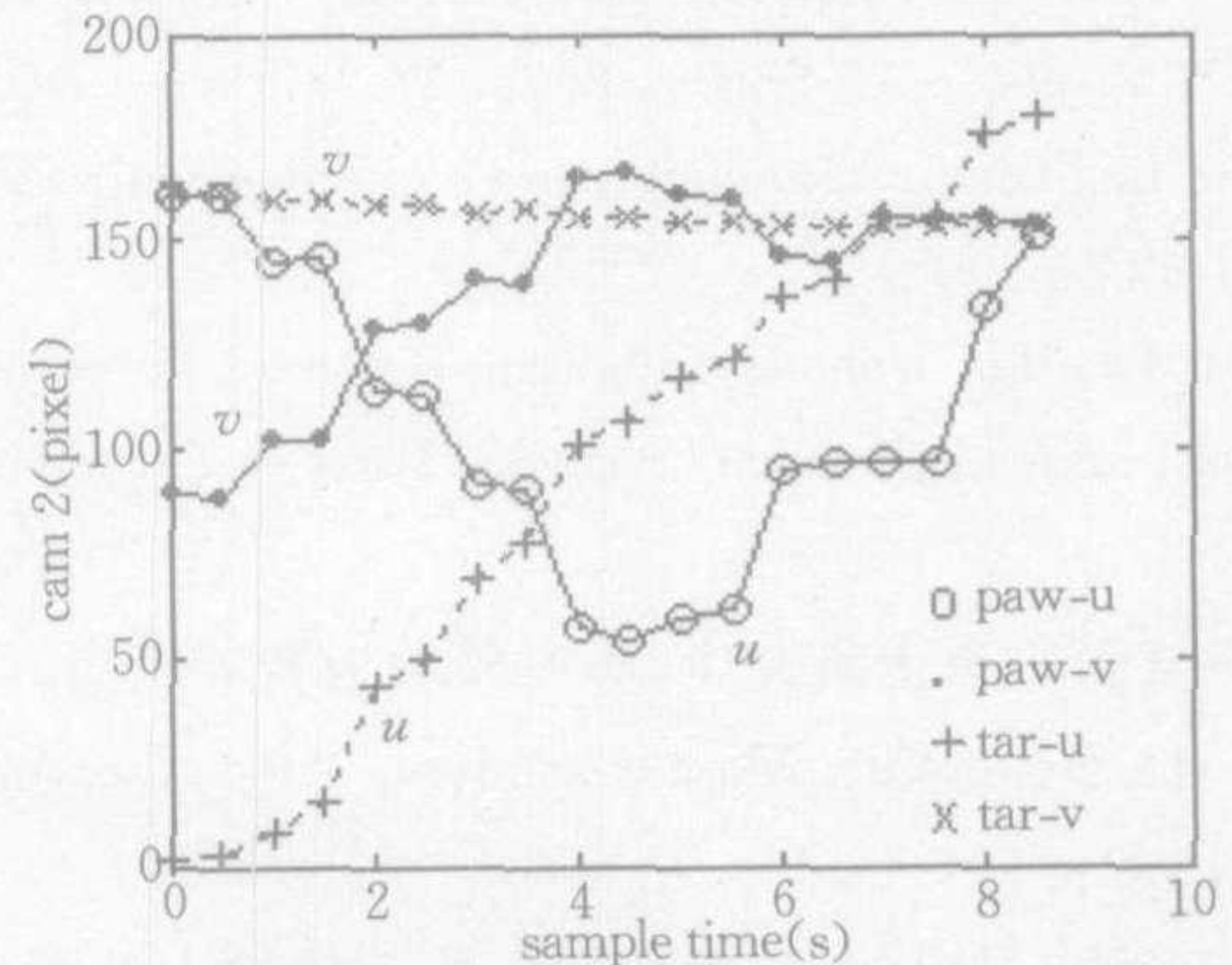


图 12 图像 2 跟踪轨迹
Fig. 12 Visual tracking trajectory by Camera 2

5 结论

本文在机器人手眼参数未知的情况下,利用对手眼关系雅可比矩阵的一个估计值建立了并不精确的手眼关系模型,在机器人运动规划中并不是在线地辨识这个模型使之趋于精确,而是利用 ADRC 控制器在线估计出由于动态模型的不确定性和未知外扰而造成的系统总扰动量并在视觉反馈中对其加以补偿,从而抵消系统的所有不确定性因素对于控制性能的影响. 整个控制系统考虑了机器人手眼协调内在的耦合关系,因而具有比文献[8]更精确的控制效果和更广泛的适用场合. 采用固定双目视觉系统,从图像特征可唯一地确定机器人空间三维位置信息,仿真和实验表明了用 ADRC 自抗扰控制器实现无标定机器人三维手眼协调的可行性和有效性.

在设计适用于无标定手眼协调的 ADRC 控制器时,扩张状态观测器对于系统实时总扰动的在线估计是其中的关键环节. 今后进一步的工作将着重于如何更好地减少被控对象实时强非线性模型和离线估计模型之间的误差变化量,使得 ESO 扩张状态观测器更精确地在线估计系统总扰动的实时作用量. 另外,如何有效避免或消除跟踪过程中图像平面出现的遮挡现象,如何进一步提高图像处理的精确性与快速性,从而提高整个手眼协调系统的鲁棒性和快速性,也是需要不断完善的问题.

References

- 1 Tsai RY. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami Beach, Florida, USA, 1986. 364~374
- 2 Hager G D, Chang WC, Morse AS. Robot feedback control based on stereo vision: towards calibration-free hand/eye coordination. In: Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation. San Diego, California, USA, 1994. 2850~2856
- 3 Yoshimi B H, Allen P K. Alignment using an uncalibrated camera system. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1995, 11(4):516~521
- 4 Jiang Qian. Image Jacobian-based dynamic coordination for uncalibrated robotic hand-eye system [master dissertation]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2002(in Chinese)
- 5 Hashimoto H, Kubota T, Sato M, Hurashima F. Visual control of robotic manipulator based on neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1992, 39(6): 490~496
- 6 Pan Qie-Lu, Su Jian-Bo, Xi Yu-Geng. Uncalibrated 2D robotic visual tracking based on artificial neural network. *ACTA Automatica Sinica*, 2001, 27(2):194~199(in Chinese)
- 7 Han Jing-Qing. Auto-disturbances-rejection controller and it's applications. *Control and Decision*, 1998, 13(1):19~23(in Chinese)
- 8 Qiu Wen-Bin. Robotic calibration-free hand-eye coordination based on auto disturbances rejection controller [master dissertation]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2001(in Chinese)

马红雨 硕士研究生. 研究领域为智能机器人、机器人手眼协调.

(MA Hong-Yu Master student. His research interests include intelligent robot and robotic hand-eye coordination.)

苏剑波 教授, 博士生导师. 研究领域为机器人视觉、网络机器人等.

(SU Jian-Bo Professor. His research interests include robot vision and internet robot.)