

9-2-2020

Modeling and Simulation for Target Tracking System Based on Dual-Pan-Tilt Camera

Kaishun Xiahou

1. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;;

Shanxing Chen

1. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;;

Yilin Wu

2. Department of Computer Science, Guangdong University of Education, Guangzhou 510310, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation for Target Tracking System Based on Dual-Pan-Tilt Camera

Abstract

Abstract: Mathematical model of each component of target tracking system based on dual-pan-tilt camera was established. The rotation angles both in horizontal and vertical direction of each pan-tilt and the relative position of two cameras were adopted to estimate the real-time position of moving target with *Extended Kalman Filter* (EKF) tracking algorithm. *A new real-time calibration method for pan-tilt camera was proposed to deal with the calibration problem that the external parameters of camera changes as the pan-tilt rotates in the process of camera modeling.* In addition, the target's image feature, extracted from the projected point on the camera image plane of estimated position of the target, was used as feedback information of visual servo system to control the pan-tilt to track the trajectory of the moving target. The Matlab/Simulink simulation system was built and the results show the scheme feasibility and effectiveness. It also provides a test platform for further research in the controller design of visual servo system.

Keywords

pan-tilt camera, binocular stereo vision, target tracking, EKF, visual servo

Recommended Citation

Xiahou Kaishun, Chen Shanxing, Wu Yilin. Modeling and Simulation for Target Tracking System Based on Dual-Pan-Tilt Camera[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(2): 362-368.

基于双目云台相机的目标跟踪系统建模与仿真

夏侯凯顺¹, 陈善星¹, 邬依林²

(1. 华南理工大学自动化科学与工程学院, 广州 510640; 2. 广东第二师范学院计算机科学系, 广州 510310)

摘要: 对双目云台相机目标跟踪系统的各个环节建立数学模型。采用扩展 Kalman 滤波(Extended Kalman Filter, EKF)作为定位跟踪算法, 利用双目云台相机在水平方向、垂直方向转动角及其相对位置估计出目标实时位置; 针对云台相机建模过程中相机外部参数随云台旋转发生变化的问题, 提出一种云台相机实时标定方法; 利用云台相机模型将目标估计位置投影到相机图像平面, 提取出目标的图像特征作为视觉伺服系统的反馈信息控制云台旋转跟踪目标轨迹。在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真模型, 仿真结果证实了方案的可行性和有效性, 为视觉伺服控制器进一步设计提供了仿真平台。

关键词: 云台相机; 双目立体视觉; 目标跟踪; EKF; 视觉伺服

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2015) 02-0362-07

Modeling and Simulation for Target Tracking System Based on Dual-Pan-Tilt Camera

Xiahou Kaishun¹, Chen Shanxing¹, Wu Yilin²(1. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Department of Computer Science, Guangdong University of Education, Guangzhou 510310, China)

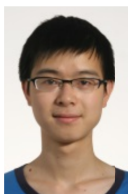
Abstract: Mathematical model of each component of target tracking system based on dual-pan-tilt camera was established. The rotation angles both in horizontal and vertical direction of each pan-tilt and the relative position of two cameras were adopted to estimate the real-time position of moving target with *Extended Kalman Filter* (EKF) tracking algorithm. A new real-time calibration method for pan-tilt camera was proposed to deal with the calibration problem that the external parameters of camera changes as the pan-tilt rotates in the process of camera modeling. In addition, the target's image feature, extracted from the projected point on the camera image plane of estimated position of the target, was used as feedback information of visual servo system to control the pan-tilt to track the trajectory of the moving target. The Matlab/Simulink simulation system was built and the results show the scheme feasibility and effectiveness. It also provides a test platform for further research in the controller design of visual servo system.

Keywords: pan-tilt camera; binocular stereo vision; target tracking; EKF; visual servo

引言

计算机视觉的研究目标是使计算机具有通过二维图像认知三维环境信息的能力, 使机器能感知三

维环境中物体的形状、位置、姿态、运动等信息^[1]。基于双目立体视觉对运动目标进行定位与跟踪是目前计算机视觉领域的研究热点问题, 主要包括双目定位和图像目标跟踪两个方面。双目定位是根据目标在两部相机的图像坐标以及相机间的相对位置计算出目标的三维坐标, 实现在立体空间对目标的实时定位。图像目标跟踪是从摄像头采集到的图像序列中检测、识别、提取出目标在每一帧图像中的位置、大小等特征信息, 实现在图像平面对目标的实时跟踪。



作者简介: 夏侯凯顺(1991-), 男, 江西吉安人, 硕士生, 研究方向为机器视觉, 目标定位跟踪; 陈善星(1990-), 男, 四川广安人, 硕士生, 研究方向为图像处理, 机器人控制; 邬依林(通信作者 1970-), 男, 广东, 副教授, 研究方向为分布式参数系统、非线性控制、网络控制。
收稿日期: 2014-01-01 修回日期: 2014-04-28
基金项目: 国家自然科学基金(61203060, 61273109); 广东省自然科学基金(S20120100008462)

传统的双目立体视觉系统采用视角固定的静止相机, 监控视场有限, 灵活性差。云台相机将摄像机与旋转云台集成在一个单元, 云台驱动相机在水平方向(Pan)和垂直方向(Tilt)转动, 改变相机视角从而获取监控场景中不同区域的图像信息, 和静止相机相比具有监控范围大、控制方式灵活的优势。关于双目静止相机视觉系统的研究开展较早, 国内外研究已经十分广泛与深入, 目前已经有比较成熟的应用^[2-3]。对双目云台相机立体视觉的研究较晚, 主要集中在图像跟踪方面^[4-5], 在双目定位方面的相关研究还比较少。

利用双目云台相机对目标进行定位与跟踪存在诸多难点, 首先是云台相机的标定问题, 对于静止相机而言, 标定技术已经十分成熟^[6], 由于相机静止, 标定得到的相机内外参数都不会改变。然而, 云台相机的外部参数随云台旋转实时发生变化, 需要实时标定。其次是目标定位算法与云台视觉伺服控制算法问题, 云台相机将目标的图像特征作为视觉伺服系统的反馈信息控制云台旋转跟踪目标轨迹。目标定位要求目标特征点始终保持在相机图像平面的中心区域, 当目标在运动过程中姿态变化较快, 传统的 PI 算法控制速度慢、精度低, 会导致目标偏离相机中心点区域甚至不在相机视野范围, 故需要根据移动目标的运动历史信息对目标位置加以预测, 根据预测位置对云台进行预测控制^[7], 实现云台相机对移动目标的快速准确跟踪。

针对以上问题, 本文对双目云台相机立体定位跟踪系统进行建模, 采用 EKF 估计目标位置; 提出一种云台相机实时标定技术, 建立双目云台相机模型; 在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真模型对系统方案进行验证与测试, 为下一步云台控制器的设计提供仿真平台。

1 双目立体定位

如图 1 所示, P 为定位跟踪目标, 左目相机 L 与右目相机 R 位于同一平面, α_1, β_1 是左云台的航向角(水平方向转动的 Pan 角)、俯仰角(垂直方向

转动的 Tilt 角), α_2, β_2 是右云台的航向角、俯仰角, P 在 $X_w Y_w$ 平面的投影 P' 到 L, R, LR 连线的距离分别为 d_1, d_2, h 。云台相机采集监控区域的图像信息, 通过图像处理算法从图像中检测识别出目标并计算出目标特征点在图像坐标系下的坐标, 二自由度云台驱动相机在水平方向和垂直方向转动一定角度使相机的光心对准目标(称为“瞄准”目标)。已知两个相机的参考坐标 $L(x_1, y_1, z_1)$, $R(x_2, y_2, z_2)$ 以及转动角度值, 采用滤波算法估计目标位置 $P(x, y, z)$ 。

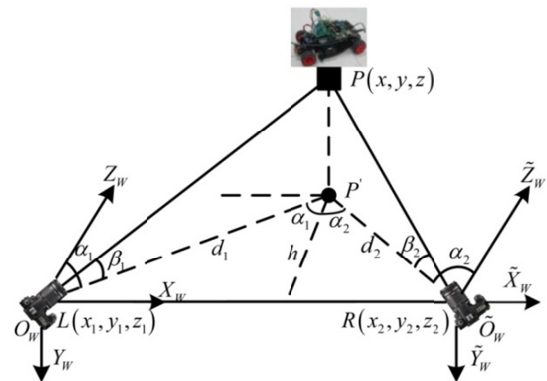


图 1 双目立体定位原理图

1.1 状态方程

取系统状态变量 $X = [x, v_x, y, v_y, z, v_z]^T$, 其中 x, y, z 分别为目标在 X_w, Y_w, Z_w 方向的位置分量, v_x, v_y, v_z 为目标在 X_w, Y_w, Z_w 方向的速度分量, 建立状态方程并离散化可得:

$$X_{k+1} = A_k X_k + G_k W_k \quad (1)$$

$$\text{其中: } A_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t_k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$G_k = \begin{bmatrix} \Delta t_k^2/2 & 0 & 0 \\ \Delta t_k & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t_k^2/2 & 0 \\ 0 & \Delta t_k & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t_k^2/2 \\ 0 & 0 & \Delta t_k \end{bmatrix},$$

$X_k = [x_k, v_{x(k)}, y_k, v_{y(k)}, z_k, v_{z(k)}]^T$, W_k 是均值为 0、协方差为 Q_k 的过程噪声, Δt_k 为系统采样周期。

1.2 观测方程

令 $d_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$, $k_i = \tan \alpha_i$, $t_i = \tan \beta_i$, $f_i = \cos \alpha_i$ ($i=1,2$), 由图 1 中几何关系有:

$$k_1 = \frac{x-x_1}{z-z_1}, \quad k_2 = \frac{x_2-x}{z-z_1},$$

$$h = \frac{x_2-x_1}{k_1+k_2} = d_1 f_1 = d_2 f_2 \quad (2)$$

令 $k_3 = y_1 - y$, $k_4 = y_2 - y$, 计算公式如式(3)所示:

$$\begin{cases} k_3 = d_1 t_1 = h t_1 / f_1 = \frac{(x_2-x_1)t_1}{(k_1+k_2)f_1} \\ k_4 = d_2 t_2 = h t_2 / f_2 = \frac{(x_2-x_1)t_2}{(k_1+k_2)f_2} \end{cases} \quad (3)$$

非线性观测方程为:

$$Z_k = h(X_k) + V_k \quad (4)$$

其中: $Z_k = \begin{bmatrix} k_{1(k)} \\ k_{2(k)} \\ k_{3(k)} \\ k_{4(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan \alpha_{1(k)} \\ \tan \alpha_{2(k)} \\ \frac{(x_2-x_1) \tan \beta_{1(k)}}{(\tan \alpha_{1(k)} + \tan \alpha_{2(k)}) \cos \alpha_{1(k)}} \\ \frac{(x_2-x_1) \tan \beta_{2(k)}}{(\tan \alpha_{1(k)} + \tan \alpha_{2(k)}) \cos \alpha_{2(k)}} \end{bmatrix},$

$$h(X_k) = \left[\frac{x_k-x_1}{z_k-z_1}, \frac{x_2-x_k}{z_k-z_1}, y_1-y_k, y_2-y_k \right]^T, V_k \text{ 是均}$$

值为 0、协方差为 R_k 的观测噪声。

EKF 算法易于实现、计算量小, 对弱非线性、高斯噪声的系统具有比较高的估计精度^[8], 适用于本系统。EKF 预测观测值时可以用非线性的观测方程进行计算, 但是计算 Kalman 增益和协方差矩阵要求观测方程是线性的, 故对观测方程(3)进行线性化, 求 $h(X_k)$ 的雅可比矩阵 H_k 得到线性观测方程:

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (5)$$

其中: $H_k = \frac{\partial h(X_k)}{\partial X_k} = \begin{bmatrix} h_{11} & 0 & 0 & 0 & h_{15} & 0 \\ h_{21} & 0 & 0 & 0 & h_{25} & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$

$$\text{而 } h_{11} = \frac{1}{z_k-z_1}, h_{15} = \frac{x_1-x_k}{(z_k-z_1)^2}, h_{21} = -\frac{1}{z_k-z_1},$$

$$h_{25} = \frac{x_k-x_2}{(z_k-z_1)^2}。$$

1.3 扩展 Kalman 滤波算法步骤

Step 1: 状态预测 $\hat{X}_{k|k-1} = A_k X_{k-1|k-1}$

Step 2: 观测值预测 $Z_{k|k-1} = h(\hat{X}_{k|k-1})$

Step 3: 协方差预测 $P_{k|k-1} = A_k P_{k-1|k-1} A_k^T + Q_k$

Step 4: 更新 Kalman 增益

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$$

Step 5: 更新状态 $\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Z_k - Z_{k|k-1})$

Step 6: 更新协方差矩阵 $P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}$

2 云台相机建模

针对双目云台相机, 本文定义 3 种坐标系。图像坐标系: 包括左目相机图像坐标系 $o_l - u_l v_l$ 和右目相机图像坐标系 $o_r - u_r v_r$ 。相机坐标系: 包括左目相机坐标系 $O_L - x_L y_L z_L$ 和右目相机坐标系 $O_R - x_R y_R z_R$ 。世界坐标系: 当左云台的航向角和俯仰角都为 0 度时, 定义世界坐标系 $O_W - X_W Y_W Z_W$ 与此时的左目相机坐标系 $O_L - x_L y_L z_L$ 重合。

相机采用经典的针孔模型^[6], 将目标特征点世界坐标由 $P(x, y, z)$ 重新记为 $P(X_W, Y_W, Z_W)$, 它与投影到左目相机的目标特征点图像坐标 $p_1(u_1, v_1)$ 的变换关系如式(6)所示:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x1} & 0 & u_{01} & 0 \\ 0 & a_{y1} & v_{01} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & t_1 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: z_1 为目标特征点在 $O_L - x_L y_L z_L$ 坐标系下 z_L 轴的坐标值, $a_{x1}, a_{y1}, u_{01}, v_{01}$ 是相机内部参数, R_1, t_1 是相机外部参数, M_1 是投影变换矩阵。相机内部参数只与相机内部结构有关, 外部参数由相机坐标系 $O_L - x_L y_L z_L$ 相对于世界坐标系 $O_W - X_W Y_W Z_W$ 的

方位决定, 变换关系如下:

$$\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & t_1 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: R_1 为旋转矩阵; t_1 为平移向量, 相机的内外参数共同决定了投影变换矩阵 M_1 。当云台相机转动一定角度时, 内部参数不变, 但是外部参数随相机旋转发生变化, 故提出一种云台相机实时标定方法在线计算投影变换矩阵, 具体过程如下:

由于世界坐标系 $O_W - X_W Y_W Z_W$ 与左目相机坐标系 $O_L - x_L y_L z_L$ 重合, 故 $t_1 = [0, 0, 0]^T$ 。根据左云台的航向角 $\hat{\alpha}_1$ 与俯仰角 $\hat{\beta}_1$ 可计算出旋转矩阵 R_1 , 从而求出相机旋转一定角度时的投影矩阵 M_1 。云台绕 X_W 轴逆时针旋转 θ 角的旋转矩阵^[7]定义为:

$$R_x(\theta) = [1, 0, 0; 0, \cos \theta, \sin \theta; 0, -\sin \theta, \cos \theta] \quad (8)$$

云台绕 Y_W 轴逆时针旋转 θ 角的旋转矩阵定义为

$$R_y(\theta) = [\cos \theta, 0, -\sin \theta; 0, 1, 0; \sin \theta, 0, \cos \theta] \quad (9)$$

云台绕 Z_W 轴逆时针旋转 θ 角的旋转矩阵定义为

$$R_z(\theta) = [\cos \theta, \sin \theta, 0; -\sin \theta, \cos \theta, 0; 0, 0, 1] \quad (10)$$

故左云台旋转矩阵为 $R_1 = R_x(\hat{\beta}_1) \cdot R_y(-\hat{\alpha}_1) \cdot R_z(0)$ 。

对于右目相机, 由于相机坐标系 $O_R - x_R y_R z_R$ 与世界坐标系 $O_W - X_W Y_W Z_W$ 不重合, 两个坐标系的平移向量无法求取, 故引入辅助世界坐标系。当右云台的航向角和俯仰角都为 0° 时, 定义辅助世界坐标系 $\tilde{O}_W - \tilde{X}_W \tilde{Y}_W \tilde{Z}_W$ 与此时的右目相机坐标系 $O_R - x_R y_R z_R$ 重合, 如图 1 所示。取 $T = [T_x, T_y, T_z]^T$ 为 $O_W - X_W Y_W Z_W$ 坐标系到 $\tilde{O}_W - \tilde{X}_W \tilde{Y}_W \tilde{Z}_W$ 坐标系的平移向量, 变换关系如式(11)所示:

$$\begin{bmatrix} \tilde{X}_W \\ \tilde{Y}_W \\ \tilde{Z}_W \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

平移量 T 由左目与右目相机的相对位置决定:

$$T_x = x_2 - x_1, T_y = y_2 - y_1, T_z = z_2 - z_1 \quad (12)$$

坐标系 $O_R - x_R y_R z_R$ 与 $\tilde{O}_W - \tilde{X}_W \tilde{Y}_W \tilde{Z}_W$ 间转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_2 & t_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{X}_W \\ \tilde{Y}_W \\ \tilde{Z}_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中: 旋转矩阵 R_2 可根据右云台航向角 $\hat{\alpha}_2$ 与俯仰角 $\hat{\beta}_2$ 由公式 $R_2 = R_x(\hat{\beta}_2) \cdot R_y(-\hat{\alpha}_2) \cdot R_z(0)$ 求得, 平移向量 $t_2 = [0, 0, 0]^T$ 。目标特征点在辅助世界坐标系下坐标 $\tilde{P}(\tilde{X}_W, \tilde{Y}_W, \tilde{Z}_W)$ 与投影到右云台相机的目标特征点图像坐标 $p_2(u_2, v_2)$ 的变换关系如式(14)所示:

$$z_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x2} & 0 & u_{02} & 0 \\ 0 & a_{y2} & v_{02} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_2 & t_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{X}_W \\ \tilde{Y}_W \\ \tilde{Z}_W \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} \tilde{X}_W \\ \tilde{Y}_W \\ \tilde{Z}_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

将式(11)代入(14)可得右目相机的投影变化模型。通过以上标定过程可得左目和右目相机投影变

化矩阵 M_1 和 M_2 , 记 $M_1 = \begin{bmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & m_{13}^1 & m_{14}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 & m_{23}^1 & m_{24}^1 \\ m_{31}^1 & m_{32}^1 & m_{33}^1 & m_{34}^1 \end{bmatrix}$,

将式(6)展开成 3 个方程, 消去 z_1 得到

$$\begin{cases} u_1 = \frac{m_{11}^1 X_W + m_{12}^1 Y_W + m_{13}^1 Z_W + m_{14}^1}{m_{31}^1 X_W + m_{32}^1 Y_W + m_{33}^1 Z_W + m_{34}^1} \\ v_1 = \frac{m_{21}^1 X_W + m_{22}^1 Y_W + m_{23}^1 Z_W + m_{24}^1}{m_{31}^1 X_W + m_{32}^1 Y_W + m_{33}^1 Z_W + m_{34}^1} \end{cases} \quad (15)$$

将 EKF 算法对目标位置的估计值代入式(15)即可求出 $p_1(u_1, v_1)$, 同理可求 $p_2(u_2, v_2)$ 。

3 双目定位系统整体结构

基于旋转云台的双目立体定位系统结构如图 2 所示, 给定值 (u_1^*, v_1^*) , (u_2^*, v_2^*) 分别为左目、右目相机图像中心点坐标, 反馈值 (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) 分别为目标特征点在左目、右目相机的图像坐标。 d_1, d_2, d_3, d_4 共同表示目标轨迹, 以 d_1, d_2 为例, 目标移动时目标特征点投影到左目相机的坐标会偏离中心点, 在横轴和纵轴的坐标偏移量可转换为对应的补偿角 d_1, d_2 , 则左云台需要在水平方向和垂

直方向再分别转动 d_1, d_2 角度才能使相机“瞄准”目标。随着目标移动而实时变化的补偿角 d_1, d_2, d_3, d_4 可实时表征目标轨迹信息。反馈环节由两部分组成，一部分是目标定位，根据双目定位原理利用左、右云台的航向角和俯仰角由 EKF 算法估计出目标的位置 (X_w, Y_w, Z_w) ；另一部分是图像特征提取，根据云台相机模型利用目标的世界坐标与两个云台的旋转角度计算出图像中目标的特征值 (u_1, v_1) 与 (u_2, v_2) 作为反馈值构成闭环控制系统。目标定位与特征提取 2 个部分共同为视觉伺服系统提供反馈信息，控制器输出量控制云台在水平方向和垂直方向转动，实现对目标轨迹的实时跟踪。

4 仿真

在 Matlab/Simulink 中建立仿真模型如图 3 所示，被控对象云台由一个水平驱动舵机和一个垂直驱动舵机构成，实现两个自由度的旋转功能，每个舵机可作为一个控制对象。采用最小二乘法辨识对舵机辨识得到的模型为 $G_p(s) = 0.0567 / (0.1s + 1)$ ，输入信号为舵机两端平均电压，输出信号为舵机转

动角度值。采用 PI 控制策略对云台进行伺服控制，控制器传递函数为 $G_c(s) = 2 + 10/s$ 。控制对象及控制器均采用 Sub-system(子系统)封装，Kalman 滤波和特征提取部分均采用 S-Function 实现，使用的相机分辨率为 320(H)*240(V)，故给定值设置为 $u_1^* = u_2^* = 160$ ， $v_1^* = v_2^* = 120$ 。两部相机结构参数相同，根据相机的焦距和象元尺寸等信息，求得相机的内参矩阵为 $[337.84, 0, 160, 0; 0, 337.84, 120, 0; 0, 0, 1, 0]$ 。

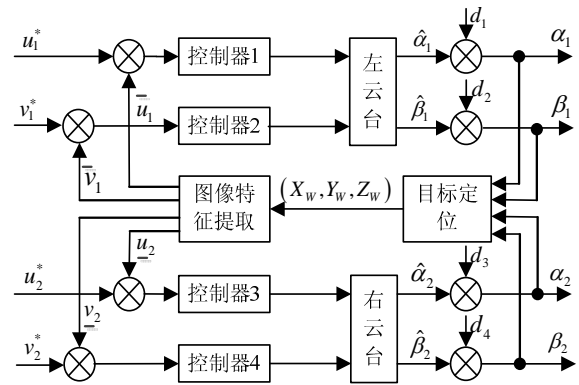


图 2 系统整体结构图

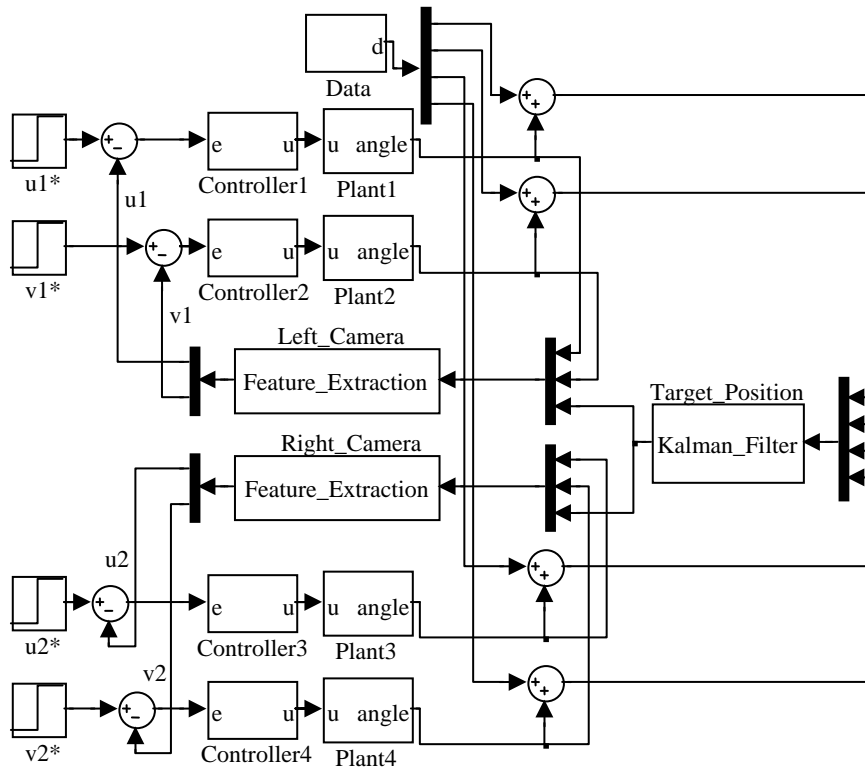


图 3 Simulink 仿真模型

搭建实验平台采集数据, 当目标在 $X_w Y_w$ 平面作圆周运动, 根据目标特征点投影到相机的坐标与中心点的偏移量计算出对应的补偿角 d_1, d_2, d_3, d_4 作为目标轨迹数据输入, 如图 3 中 Data 模块所示, 采用 S-Function 实现。系统初始时刻目标静止, 左右云台旋转角度初始值为 $\alpha_1 = -15.3^\circ, \beta_1 = 25.4^\circ, \alpha_2 = 27.3^\circ, \beta_2 = 23.7^\circ$ 。计算得到目标的初始位置为 $(17.3, -31.4, 63.6)$, 故取系统初始状态 $X_0 = [17.3, 0, -31.4, 0, 63.6, 0]^T$ 。过程噪声 $W_k \sim N(0, 1)$, 观测噪声 $V_k \sim N(0, 0.01)$, 系统采样周期 $\Delta t_k = 0.05s$, 仿真长度为 200 个周期。使用式(16)定义的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)作为目标位置估计精度的评价标准:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M [(\hat{x}_k - x_k)^2 + (\hat{y}_k - y_k)^2 + (\hat{z}_k - z_k)^2]} \quad (16)$$

其中: $(\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k), (x_k, y_k, z_k)$ 分别表示 k 时刻目标位置的估计值和真实值, M 是估计次数。

目标特征点图像坐标以及云台旋转角度对目标轨迹的跟踪效果以左云台相机为例, 仿真结果如图 4 所示。从图 4(a), 4(b)可知, 图像坐标值 u_1, v_1 能够快速准确地响应目标轨迹 d_1, d_2 的变化。控制器根据反馈值 u_1, v_1 的变化控制云台的旋转, 左云台的航向角 α_1 和俯仰角 β_1 对 u_1, v_1 变化的跟踪曲线如图 4(c)所示, 云台旋转角度能够准确地响应目标轨迹变化。目标轨迹跟踪效果及误差如图 5 所示, RMSE 小于 8 cm, 平均值为 3.15 cm, 系统能够有效对目标轨迹进行跟踪, 跟踪精度较高。

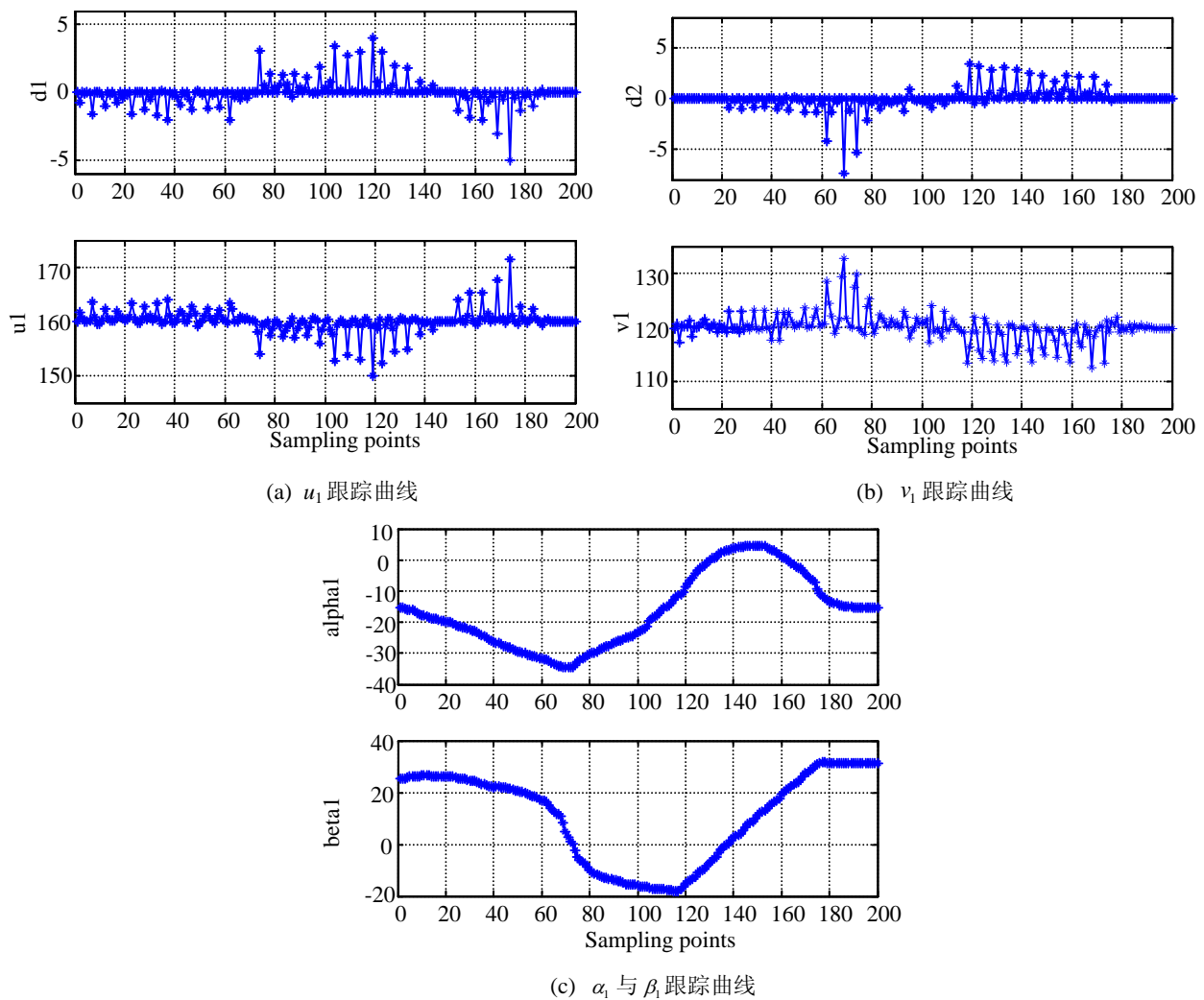
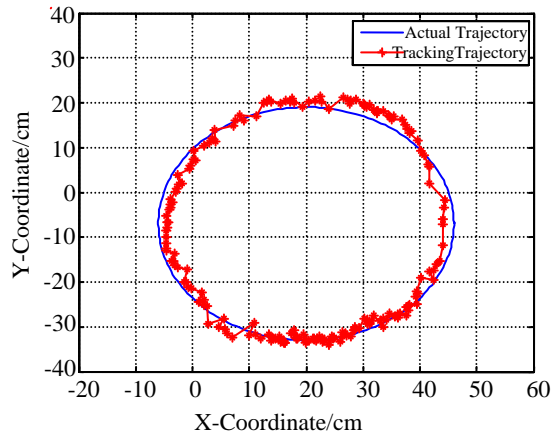
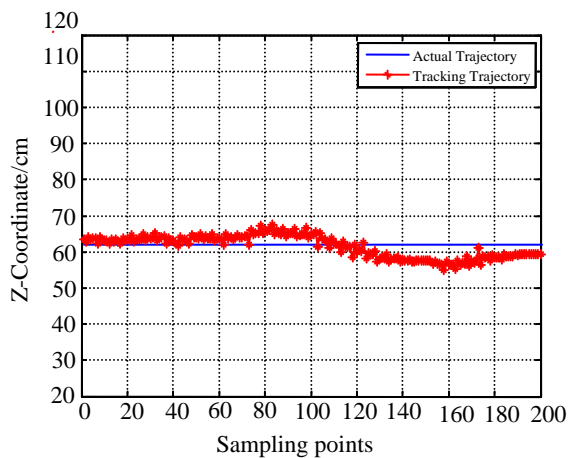


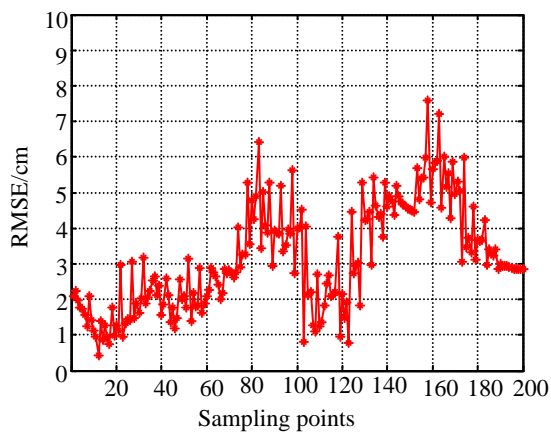
图 4 图像坐标与云台转动角度跟踪效果图



(a) x-, y-轨迹



(b) z-轨迹



(c) 跟踪误差

图 5 目标轨迹跟踪结果图

5 结论

本文对基于双目云台相机的目标定位跟踪系统进行了建模分析, 采用 EKF 估计出目标实时位置, 提出一种云台相机实时标定方法在线计算外部参数, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真模型, 仿真结果证实了方案的有效性, 两个相机的图像特征反馈值和云台旋转角度能够快速准确地响应目标轨迹变化, 系统能有效对目标进行定位跟踪, 估计精度较高。下一步是在搭建的仿真模型基础上对云台视觉伺服控制器进行进一步设计, 使目标特征点始终保持在相机图像平面的中心区域。

参考文献:

- [1] 马颂德, 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] J Wang, Q Fu, Q Quan, *et al.* Binocular Visual Tracking Based on Kalman Filter and Histogram Matching [C]// Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. USA: IEEE, 2013: 3691-3696.
- [3] M Shibata, H Eto, M Ito. Image-based Visual Tracking to Fast Moving Target for Active Binocular Robot [C]// 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. USA: IEEE, 2010: 2727-2732.
- [4] D R Wan, J Zhou. Stereo Vision Using Two PTZ Cameras [J]. Computer Vision and Image Understanding (S1077-3142), 2008, 112(2): 184-194.
- [5] P Kumar, A Dick, T S Sheng. Real Time Target Tracking with Pan Tilt Zoom Camera [C]// 2009 Digital Image Computing: Techniques and Applications (S978-0-7695-3866-2). USA: IEEE, 2009: 492-497.
- [6] Z Y Zhang. Flexible Camera Calibration by Viewing A Plane From Unknown Orientations [C]// International Conference on Computer Vision (S0-7695-0164-8). USA: IEEE, 1999: 666-673.
- [7] O Avni, F Borrelli, G Katzir, *et al.* Scanning and Tracking with Independent Cameras-A Biologically Motivated Approach Based on Model Predictive Control [J]. Autonomous Robot (S0929-5593), 2008, 24(3): 285-302.
- [8] 程进伟, 李建勋. 卡尔曼滤波算法评估平台的设计与实现 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(11): 2567-2574.