

基于 Kalman 预测的人体运动目标跟踪^①

曲云腾, 李平康, 杜秀霞

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要: 在基于视觉图像的人体运动目标智能监控中, 为了实现快速实时跟踪, 使目标跟踪更为准确, 利用 Kalman 方程的递推预估能力, 采用基于 Kalman 预测的目标跟踪方法, 进行二维空间的运动仿真研究和室内环境下的实验测试分析。理论分析与实验结果都表明, 该方法对目标的运动趋势和方向能够做出正确的预测估计, 有效地提高目标跟踪的实时性, 为后续的图像处理和分析提供了保证。

关键词: 人体目标跟踪; 云台控制; 图像处理; Kalman 预测

Moving Human Target Tracking Based on Kalman Prediction

QU Yun-Teng, LI Ping-Kang, DU Xiu-Xia

(School of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In the process of detecting and tracking moving human target based on visual images, in order to implement fast real-time tracking and make tracking more accurately, Tracking based on Kalman prediction is used according to Kalman filter's recursion capacity to estimate the target location of the next time. Simulation analysis in 2-D space and indoor experiment are done. Both the simulation analysis and test result confirm that the tracking speed and accuracy has been improved effectively base on Kalman prediction which offers guarantee for the following image processing and analysis.

Keywords: tracking of human target; pan-tilt control; image processing; Kalman prediction

基于视觉图像的人体运动目标的自动跟踪, 融合了图像处理、模式识别、人工智能和计算机控制等多学科领域的先进技术, 在机器人视觉、可视预警、智能交通、多媒体教学以及重要场合的安全监控领域得到了广泛的应用。同时, 运动目标的自动跟踪问题具有很高的学术价值和理论研究意义, 已经成为近年来国际上研究的热点问题之一^[1]。

1 引言

基于视觉图像的运动目标自动跟踪是通过对图像传感器拍摄到的实时图像帧进行处理分析, 获取目标在每帧图像上的位置, 根据目标位置与设定位置的偏差, 控制执行机构带动摄像机进行水平方向和垂直方向的转动, 使目标始终处于摄像头的最佳观测位置^[2]。

目前, 目标自动跟踪主要采用基于模板匹配和特征匹配的跟踪算法^[3,4], 例如文献[5]中提出的基于相关匹配及自适应模板更新的目标跟踪方法, 但由于摄像头的图像采集机理存在采样延时、执行机构(云台)的转动速度较慢以及处理延时的存在, 可能使得带动摄像头运动的云台无法及时地跟踪目标, 特别是对于运动速度较快的目标^[6,7]。若要实时跟踪目标就要提前预测目标运动。

本文针对人体目标智能监控系统, 采用了基于 Kalman 预测的跟踪算法, 即由目标轨迹的一系列采样点预测估计目标的运动规律, 利用当前的采样值去预测目标在下一帧图像中的位置。同时本文对 Kalman 预测跟踪算法进行了二维空间下的仿真研究, 设计开发了“运动预测实验测试系统”并在室内环境下, 进行了实验测试和分析, 得出结论。

^① 收稿时间:2010-05-11;收到修改稿时间:2010-06-03

2 自动跟踪系统概述

2.1 基本原理

运动目标自动跟踪系统首先通过摄像机采集到运动目标图像，传输至控制计算机，经过图像处理及人体目标的检测识别，计算出运动目标所在图像的位置，得到该位置与图像设定位置或区域的偏差及方向，然后通过控制器将偏差转换为控制输出量，控制执行机构(云台)带动其上的摄像机转动到设定的位置(即消除偏差的过程)。然后由于跟踪对象人体的运动，摄像机继续进行图像的采集，重复上述图像检测与自动跟踪过程，从而始终将人体目标锁定在摄像设定范围内。人体运动目标自动跟踪系统闭环控制的原理框图如图1所示。

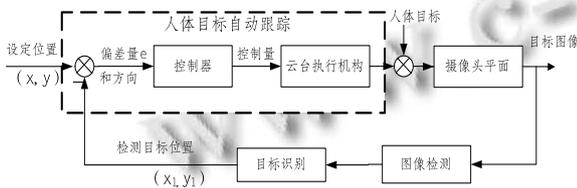


图1 人体目标自动跟踪系统原理框图

在本文中，采用基于USB的高速传输摄像头，图像格式为RGB三原色格式，图像文件大小为320×240，带动摄像头转动的执行机构选用通用性的全方位云台，分为水平、垂直两个自由度，目标的检测识别采用基于人体特征(面积、周长、长宽比和复杂度)的匹配规则识别，以运动目标的质心坐标，作为被检测目标的位置，关于图像的处理和运动目标的检测部分的内容，本文在此不做详细论述。

2.2 云台的角度控制

对云台的运动控制，实质上是对云台电机的水平、垂直角度的控制。图2为人体运动目标在图像上的位置坐标示意图。

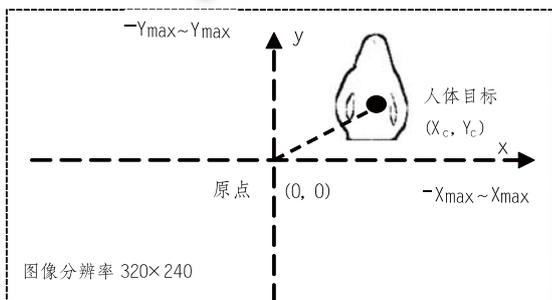


图2 人体运动目标位置坐标示意图

设人体目标质心的位置坐标为 (X_c, Y_c) ，设 θ_x, θ_y 分别为摄像头水平、垂直视角的一半， r 为摄像头中心与目标平面的距离，云台的控制量为：水平方位角度 α ，垂直高低角度 β ，云台控制的目的是通过调整 α, β 的角度值，使与云台联动的摄像头所得到的人体目标的图像质心始终处于屏幕中心的约束区域内。

云台的角度控制算法推导如下：

$$X_{\max} = r \tan \theta_x \quad Y_{\max} = r \tan \theta_y \quad (1)$$

X_{\max}, Y_{\max} 取值大小与图像的分辨率有关，在本文中摄像头的分辨率为320×240，则 $X_{\max} = 160, Y_{\max} = 120$ 。

$$X_c = r \tan \alpha \quad Y_c = r \tan \beta \quad (2)$$

$$\frac{X_c}{X_{\max}} = \frac{r \tan \alpha}{r \tan \theta_x} \quad \frac{Y_c}{Y_{\max}} = \frac{r \tan \beta}{r \tan \theta_y} \quad (3)$$

从而得出云台控制量：

$$\text{水平方位角度: } \alpha = \arctan(X_c \tan \theta_x / X_{\max})$$

$$\text{垂直方位角度: } \beta = \arctan(Y_c \tan \theta_y / Y_{\max})$$

3 基于Kalman预测的目标跟踪模型

Kalman滤波器是一线性递归滤波器，基于系统以前的状态序列对下一个状态做最优估计，预测时具有无偏、稳定和最优的特点^[8]。

为简化模型，假设摄像头目标跟踪系统为线性离散系统，则摄像头观测系统可以描述为：

$$\text{状态方程: } x_k = F_{k|k-1} x_{k-1} + W_{k-1}$$

$$\text{观测方程: } Y_k = H_k x_k + V_k$$

其中 x_k 为系统状态的 $n \times 1$ 维状态向量； Y_k 为观测到的系统状态的 $m \times 1$ 维向量； $F_{k|k-1}$ 是状态转移矩阵， $n \times n$ 维。

从 t_{k-1} 时刻到 t_k 时刻； H_k 是 t_k 时刻观测矩阵， $m \times n$ 维。 W_{k-1} 为系统噪声， V_k 为观测噪声，为互不相关的零均值的正态白噪声，满足：

$$p(w) \square N(0, Q) \quad p(v) \square N(0, R) \quad (4)$$

令 Q_k 和 R_k 分别为 W_{k-1} 和 V_k 的协方差矩阵。

由于跟踪系统已经确定，则 $F_{k|k-1}$ 和 H_k 已知， W_{k-1} 和 V_k 满足一定的假设，设 P_k 是 \hat{x}_k 的协方差阵， P'_k 是 x_k 和 \hat{x}_k 的误差协方差阵。可以得到Kalman预测算法的计算公式：

在 t_0 时刻，用 x 均值向量初始化 \hat{x}_0 ，并求 P_0 ；

在 t_k 时刻，系统状态预测方程为：

$$\hat{x}_k = F_{k|k-1} \hat{x}_{k-1} + K_k (Y_k - H_k F_{k|k-1} \hat{x}_{k-1}) \quad (5)$$

其中，

$$P'_k = F_{k|k-1} P_{k-1} F_{k|k-1}^T + Q_{k-1}$$

$$K_k = P'_k H_k^T (H_k P'_k H_k^T + R_k)^{-1} \text{ 为增益系统矩阵}$$

$$P_k = (1 - K_k H_k) P'_k$$

根据 Kalman 预测的原理可知，在人体目标的跟踪系统中，假设 T 为采样时间间隔，则可以得到状态向量、观测矩阵和状态转移矩阵分别为：

$$x_k = [x, y, x_v, y_v, x_a, y_a] \quad (6)$$

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$F_{k|k-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T & 0 & T^2/2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

4 二维空间下预测跟踪仿真

为了验证上述模型的可行性^[9]，在基于 Matlab7.1 环境下进行了二维空间下的跟踪仿真实验^[10-11]。假设人体目标在二维平面内运动，运动目标的初始位置为 (15, 15)，初始速度为(1.5, 1)，加速度为(0.8, -1)，采样周期为 1s。

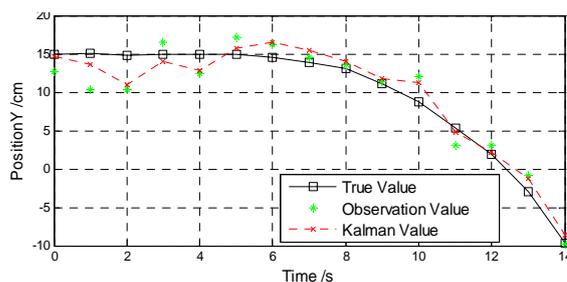
动态噪声和测量噪声均假设为白噪声，且互不相关。由于摄像头跟踪目标过程中，测量误差相对较小，误差主要来源于摄像头抖动等引起的系统误差，则可以假设系统误差方差 Q_k 、观测误差方差 R_k 和初始协方差 P_0 分别为：

$$Q_k = 0.3E_6 \quad R_k = 2E_2 \quad P_0 = 1E_6 \quad (9)$$

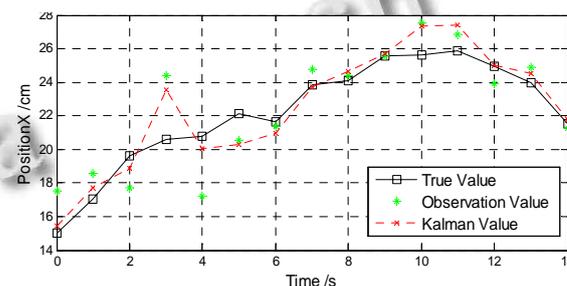
其中表示为维的单位矩阵。

根据以上的初始数据得到如图 3 所示的仿真结果，图 3(a)表示运动目标 X 坐标随时间变化曲线，图 3(b)表示运动目标 Y 坐标随时间变化曲线。

由图可以看出，预测轨迹与真实轨迹逐渐收敛，Kalman 预测值与实际值的偏差明显小于测量值与实际值的偏差，仿真结果表明：根据实际情况建立合理的状态模型以及选取合适的参数，能够很好地完成跟踪运动目标的任务。



(a) 运动目标 X 坐标



(b) 运动目标 Y 坐标

图 3 二维空间 Kalman 预测跟踪仿真结果

5 实验测试与分析

在人体运动目标自动跟踪系统的实际应用中，考虑到 Kalman 预测算法需要进行大量的矩阵运算，故在本文中 Kalman 运动预测跟踪方法做了简化，不考虑系统误差和观测误差对系统的影响^[12]，在室内环境，固定背景情况下，通过背景帧差法，获取人体目标轮廓，利用质心法对人体运动目标(PositionX, PositionY)进行定位，并采用 Kalman 预测方法，预测下一时刻目标最可能出现的位置，获取实验数据，并对结果进行分析。



图 4 Kalman 运动预测实验测试系统

实验测试平台选用自行开发的“运动预测实验测试系统”，如图 4 所示，测试系统主要分为参数设置区、操作控制区、监控显示区和运动目标显示区。摄像头选用天敏系列，USB 总线输出，分辨率设为 320×240。

系统采样周期设为 200ms, 连续采集多帧目标图像, 通过与背景图像比较, 得到运动目标的连续位置坐标, 如图 5 所示, (a)为背景图像, (b)第 6 帧图像, (c)第 10 帧图像。



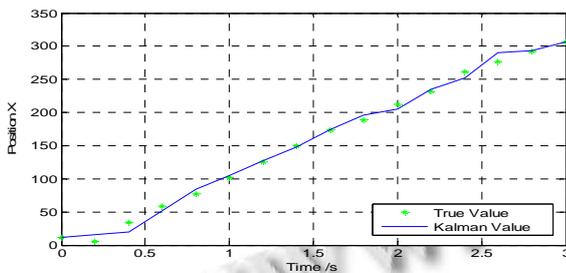
(a) 背景图像 (b) 第 6 帧图像 (c) 第 10 帧图像
图 5 运动目标图像

测试系统将运动目标的实际位置坐标(True PositionX, TruePositionY)和根据观测坐标进行 Kalman 预测得到的预测坐标以.txt 文件的形式保存, 部分存储数据如表 1 所示, 其中 X 坐标的取值范围 0~320, Y 坐标的取值范围 0~240。

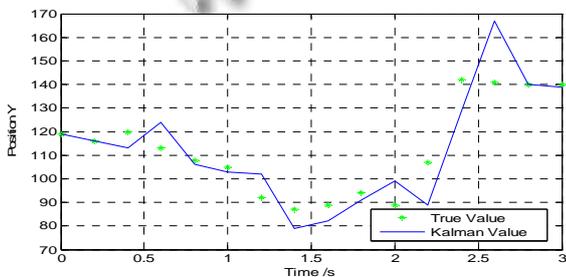
表 1 实际值与 Kalman 预测值

坐标	3 帧	4 帧	...	15 帧	16 帧
实际值	(34,120)	(59,113)	...	(292,140)	(307,140)
预测值	(20,113)	(52,124)	...	(293,140)	(307,139)

所得实际值与 Kalman 预测值数据曲线如图 6 所示, (a)为 X 坐标, (b)为 Y 坐标。



(a) 运动目标 X 坐标



(b) 运动目标 Y 坐标

图 6 Kalman 预测实验测试结果

由上图可以看出: Kalman 运动预测算法在实际的基于视觉图像的目标跟踪上, 效果也比较理想, 特别是对于 X 坐标, 预测值与下一采样时刻实际值非常接近, Y 坐标的检测受到光线干扰等因素的影响, 变化较大, 但预测误差也是在可控范围之内。

6 结束语

从仿真和实验测试结果可以看出: 在基于视觉图像的人体目标智能监控中, 采用 Kalman 预测的人体运动跟踪算法, 利用采样值预测估计目标的运动规律, 对目标的运动趋势和方向能够做出正确的预测估计, 进而控制云台提前转动到预测位置, 从而能够较准确完成目标跟踪任务, 为后续下一帧的图像处理工作和系统的整体稳定性提供了保证。

参考文献

- 1 黄绿娥.基于机器视觉的人体运动目标智能监控系统设计与研究[硕士学位论文].北京:北京交通大学,2008:2-13.
- 2 余静,游志胜.自动目标识别与跟踪技术研究综述.计算机应用研究,2005,12(3):12-15.
- 3 周永权,刘中华,刘允才.运动人体的检测与跟踪.计算机工程,2004,30(8):153-155.
- 4 马奔,史忠科,皮燕妮.成像目标跟踪算法分析.西安电子科技大学学报,2005,32(3):39-44.
- 5 黄飞,李德华,姚讯.基于相关匹配及自适应模板更新的目标跟踪新方法.计算机工程,2007,33(16):147-149.
- 6 Moeslund T, Granum. E. A survey of computer vision-based human motion capture. Computer Vision and Image Understanding, 2001,81(3):231-268.
- 7 王俊凤,雷斌.卡尔曼预测在自动跟踪云台中的应用.国外电子测量技术,2006,25(10):53-55.
- 8 王宇,程耀瑜.基于卡尔曼滤波原理的运动目标跟踪.信息技术,2008,48(3):48-51.
- 9 肖秦琨,雷斌.基于卡尔曼滤波的摄像头目标跟踪.西安工业学院学报,2006,26(1):1-4.
- 10 刘叔军,盖晓华,樊京.MATLAB7.0 控制系统应用与实例.北京:机械工业出版社,2006:110-135.
- 11 罗军晖,冯平.MATLAB7.0 在图像处理中的应用.北京:机械工业出版社,2005:100-150.
- 12 赵阳.基于图像的自动跟踪控制系统研究[硕士学位论文].大连:大连理工大学,2003:2-18.