

# 变光照环境中的数字摄像机参数自适应调整算法

王红睿,田彦涛,顾 庆

(吉林大学 通信工程学院,长春 130022)

**摘要:**为了提高机器视觉系统对光照变化的鲁棒性,提出了数字摄像机参数自适应调整的算法。根据外界环境的光照条件,在线地估计摄像机参数并调整数字摄像机的模数转换级数、增益、黑电平、曝光时间,以保证抓取图像的像素灰度均值在预先设定的范围内。实验表明,在光照变化范围较大的情况下,此参数自适应调整方法都可抓取到质量稳定的标准图像,在很大程度上减弱了光照变化对机器视觉系统的影响,提高后续位置提取的精度,并保证机器视觉系统在变光照环境中自动地运行。

**关键词:**自动控制技术;机器视觉;光照;数字摄像机;视觉伺服

**中图分类号:**TP273   **文献标识码:**A   **文章编号:**1671-5497(2009)05-1262-06

## Adaptive tuning methods for digital camera parameters under variou illuminations

WANG Hong-rui, TIAN Yan-tao, GU Qing

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Adaptive tuning methods for digital camera parameters are proposed to increase the robustness of machine vision system under various illuminations. Camera parameters are online estimated first; then, analog to digital conversion level, gain, black level and exposure time are tuned according to the environmental illumination to guarantee that the average intensity of binary image is within a predetermined range. Experiments demonstrate that the method of adaptive tuning is helpful to capture canonical images in a large scale of illumination variation. The proposed method can weaken most influences of various illuminations on the machine vision system. The precision of subsequent position measurement is improved and automatic running of the machine vision system is guaranteed under various illuminations.

**Key words:** automatic control technology; machine vision; illumination; digital camera; visual servo

在工程应用中,复杂多变的外界光照给机器视觉系统带来了极大的挑战。在某些依靠自然光源而缺少主动光源的文字识别、尺寸测量、人脸识别等机器视觉系统中,光照变化将影响采集图像

的质量和系统的性能。在某些光照过暗或者过亮的情况下,待识别的目标和背景间的对比度较低,图像细节信息丢失,可能导致机器视觉系统无法正常工作。图像预处理可减弱外界光照条件的影

收稿日期:2008-01-03.

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060183006).

作者简介:王红睿(1980-),男,博士研究生.研究方向:视觉伺服,非线性控制.

E-mail:wang\_hongrui@yahoo.com.cn

通信作者:田彦涛(1958-),男,教授,博士生导师.研究方向:复杂系统建模、控制与优化. E-mail:tianyt@jlu.edu.cn

响<sup>[1]</sup>,其目的是获取标准图像,一类主要方法是调整图像的对比度,例如直方图均衡化<sup>[2]</sup>及各种改进方法<sup>[3-5]</sup>等。此类方法在增加图像对比度的同时,引入了额外的噪声,损失了部分信息。当图像对比度较差时,预处理方法可能失效。提取具有光照不变性的特征<sup>[6]</sup>,或应用光照模型等方法<sup>[7]</sup>也可减弱光照的影响,但这些方法局限于人脸识别、目标跟踪等特定的领域。上述方法大都依靠软件处理来减弱光照影响,没有主动地依据外界的光照条件调整图像抓取装置的参数。仅靠软件处理有时较难获得标准图像。为提高机器视觉系统的光照鲁棒性,本文提出了数字摄像机参数的自适应调整方法,由外界光照条件在线地改变摄像机的参数,保证抓取图像的像素灰度均值在预先设定的范围内。

## 1 机器视觉系统的构成和原理

机器视觉系统如图1所示,它是视觉伺服球板系统的一个组成部分<sup>[8]</sup>,用于测量球在平板上的坐标位置。机器视觉系统的主要组成部件包括DH-HV1300FM型工业数字摄像机、IEEE1394接口转换卡、工业控制计算机和支架等。系统的工作流程图见图2。借助SDK开发包,可在线调整数字摄像机的内部参数,包括模数转换级数a、



图1 机器视觉系统

Fig. 1 Machine vision system

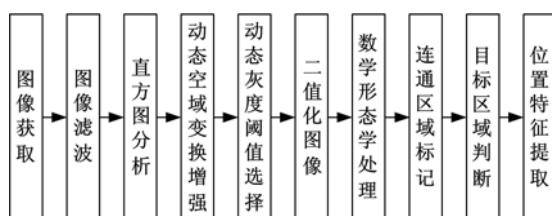


图2 机器系统工作流程图

Fig. 2 Flowchart of the machine vision system

增益g、黑电平b、曝光时间t<sub>e</sub>、白平衡等参数。其中的几个参数简介如下:①模数转换级数a。代表采集图像的量化范围,分为4个级别{0,1,2,3}。a=0时,采集到的图像最亮,细节最清晰,噪声最大;a=3时,采集到的图像最暗,细节最模糊,噪声最小。②增益。用于定义信号放大倍数,取值范围是0~127。增益越大,细节越清晰;增益越小,细节越模糊。增益变大,图像的黑白反差也变大,层次感增强,增益变小,图像黑白反差也变小,图像层次感减弱。③黑电平。代表图像数据为0时对应的信号电平,取值为-255~255。黑电平减小,图像将变暗;黑电平增大,图像将变亮。④曝光时间,决定像素在一个时间周期所能够积累的电荷数量。为降低待处理的数据量,采用动态子图方法<sup>[9]</sup>。子图大小设置为100像素×100像素。由于图像受到阴影、反光的影响,以动态空域变换提高小球和阴影之间的对比度,减弱背景的影响。图像二值化后,以快速Otsu方法确定灰度阈值,进而分割图像。采用区域重心法求取球的中心位置:

$$x_c = \frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in B} x \quad (1)$$

$$y_c = \frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in B} y \quad (2)$$

式中:B为小球区域所有像素的集合;n为B中像素的个数;x<sub>c</sub>为小球中心X坐标;y<sub>c</sub>为小球中心Y坐标。

## 2 数字摄像机参数的自适应调整

由于外界环境的光照变化,抓取图像与标准图像可能有一定的差距。手动调整摄像机参数获取的图像像素灰度均值不稳定,不利于机器视觉系统的自动工作。在某些极端的光照条件下,由于抓取图像对比度较低或较高,视觉系统将无法获取小球的位置。为保证抓取图像的亮度水平在合适的范围内,选择模数转换级数、增益、黑电平、曝光时间等4个参数来自动调节图像像素的灰度均值。图像像素的灰度均值反映了抓取图像时外部环境的光照信息。图像像素的灰度均值u定义为

$$u = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i,j)}{MN} \quad (3)$$

式中:f(i,j)为像素点坐标(i,j)的灰度均值;M和N表征图像尺寸大小。

保持摄像机的其他参数不变,图像像素灰度均值与数字摄像机模数转换级数、增益、黑电平、曝光时间的曲线见图3。由图3(a)可知,随着模拟数字转换级数的提高,图像像素的灰度均值大幅度地下降,灰度均值随着光照的增加而增加。3种光照条件下灰度均值与增益的关系曲线见图3

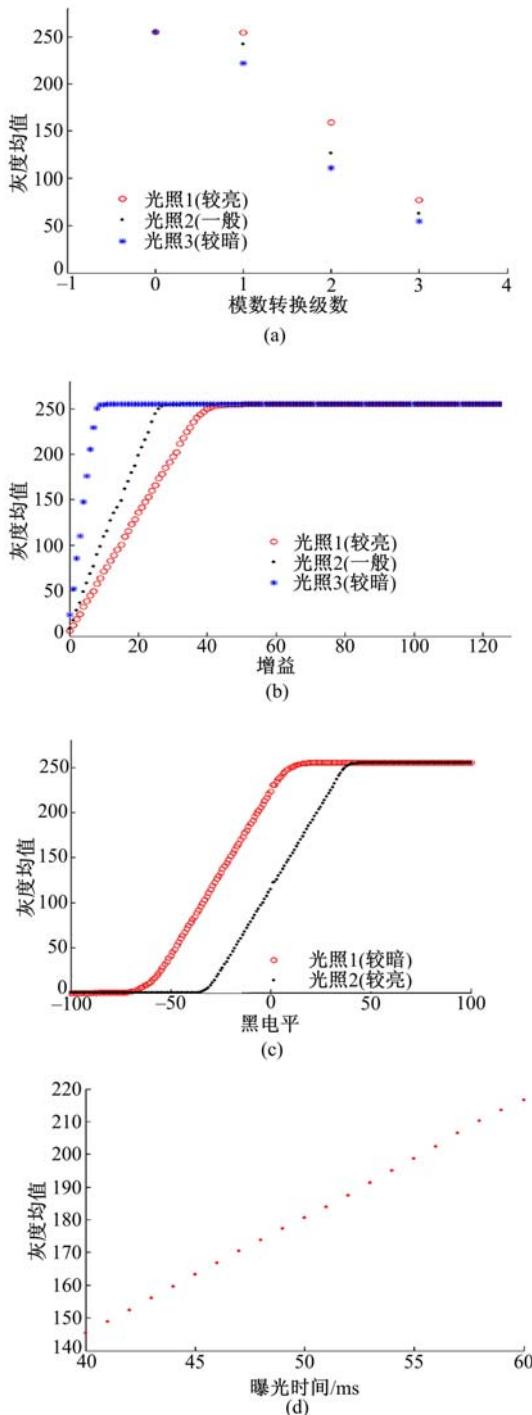


图3 图像像素灰度均值和数字摄像机参数的关系  
Fig. 3 Relationship between average intensity of binary image and parameters of digital camera

(b)。当增益超过一定幅度时,像素灰度均值进入饱和区,近似保持不变;两者在其余的区域近似满足线性关系。线性区斜率由光照决定,光照越强则斜率越大;光照较稳定时,其斜率近似不变。3种光照条件下的图像像素灰度均值与黑电平的关系曲线见图3(c)。当黑电过大或过小时,像素灰度均值进入饱和区;在其余区域,两者近似满足线性关系。随光照强度的变化,曲线的位置平移,但形状基本稳定。图3(d)为像素灰度均值与曝光时间的关系曲线图。两者近似满足线性关系。曝光时间对采集速度的影响较大,为了不影响系统的采样时间,仅在光线过强的情况下微调此参数。为便于图像处理,设置图像像素灰度均值的目标区间为[190,210]。摄像机初始参数为图中初始参数,即  $a=1, g=10, b=0, t_e=60 \text{ ms}$ 。在线估计像素灰度均值和增益曲线中的线性区斜率,以便调整像素灰度均值到指定的范围。

摄像机参数自适应调整算法步骤简述如下。

(1) 判断图像像素的灰度均值是否处于饱和区。若  $u > u_s$ , 像素的灰度均值处于饱和区,转步骤(2);否则处于线性区,转到步骤(3)。

(2) 饱和区处理。首先逐一增加模数转换级数,转步骤(1),直到  $a=3$ 。当  $a=3$  时,再逐次减少曝光时间,转(1),直到  $t_e=40 \text{ ms}$  时,再逐次减少增益,转步骤(1),直到  $g=0$  时,说明光照太强,以至于超出摄像机可调节范围,退出。

(3) 求解线性区内的参数。假设在线性区内,像素的灰度均值和增益满足

$$u = kg + c \quad (4)$$

采用最小二乘法计算直线斜率  $k$ 。设置增益  $g_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 9$ ) 分别为  $\{0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16\}$ , 采集图像后得到图像的像素灰度均值  $u_j$ 。由最小二乘原则,设置目标函数

$$S(k, g) = \sum_{j=1}^9 [(kg_j + c) - u_j]^2 \quad (5)$$

最优解  $k^*, c^*$  满足

$$\frac{\partial S}{\partial k} = 0, \frac{\partial S}{\partial c} = 0 \quad (6)$$

整理得到

$$\begin{cases} 9c + 72k = \sum_{j=1}^9 u_j \\ 72c + 816k = \sum_{j=1}^9 g_j u_j \end{cases} \quad (7)$$

解上述方程得到直线参数的最小二乘解。转到步

骤(4)。

$$k^* = \frac{1}{40} \sum_{j=1}^9 (g_j - 8) u_j \quad (8)$$

$$c^* = \frac{77}{45} \sum_{j=1}^9 u_j - \frac{1}{5} \sum_{j=1}^9 g_j u_j \quad (9)$$

(4) 判断外界环境中的光线是否过暗。若  $k^* < k_s$ , 则说明外界光线过暗, 转步骤(5)。由于线性区的直线斜率过小, 以至于增益  $g=0$ , 灰度均值  $u<190$ 。若  $k^* \geq k_s$ , 转到步骤(6)。

(5) 光线过暗调节。降模数转换级数  $a=a-1$ , 转步骤(4), 直到  $a=0$ 。如果  $a=0$ , 依然为  $k^* < k_s$ , 则说明此时的光照太弱, 以至于无法调节像素灰度均值, 退出。

(6) 线性区调节。由式(4)得

$$g = \varphi^{-1}(u) = \frac{u - c^*}{k^*} \quad (10)$$

将  $u=190$ 、 $u=210$  分别代入式(10), 得到  $g_{u=190}$  和  $g_{u=210}$ 。增益  $g$  应该为  $0 \sim 127$  间的整数, 计算式为

$$g = \begin{cases} \{g_{u=190}\} + \left\lceil \frac{\lceil g_{u=210} - \{g_{u=190}\} \rceil}{2} \right\rceil, \\ \lceil g_{u=210} \rceil - \{g_{u=190}\} \geq 0 \\ \lceil g_{u=210} \rceil, \lceil g_{u=210} \rceil - \{g_{u=190}\} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\lceil \cdot \rceil$  表示向下取整;  $\{ \cdot \}$  表示向上取整。

由于取整运算的影响,  $u$  可能不在目标区间内, 此时调整黑电平。黑电平的调整量  $\Delta b$  计算式为

$$\Delta b = \left\lceil \frac{200 - u}{k_b} \right\rceil \quad (12)$$

式中:  $k_b$  为黑电平线性区的直线斜率,  $a=0$  时,  $k_b = 7.37$ ;  $a=1$  时,  $k_b = 3.66$ ;  $a=2$  时,  $k_b = 1.83$ ;  $a=3$  时,  $k_b = 0.91$ 。

图像的像素灰度均值估计值  $u_e$  为

$$u_e = u + k_b \Delta b \quad (13)$$

### 3 实验

球固定不动, 在平板上坐标位置为  $(0, 0)$ , 分别在较暗的光照、一般的光照、较亮的光照三种条件下, 采用两种方法抓取图像, 并求取球中心位置。比较两种方法在变光照环境中抓取图像的质量, 去除光照变化影响, 测试两者抓取图像的像素灰度均值是否处于目标区间  $[190, 210]$ 。

**方法 1** 固定数字摄像机参数抓取图像。为保证机器视觉系统自动运行, 仅仅在光照较强时调整数字摄像机的模数转换级数, 防止抓取图像曝光过度(图像全白, 没有球)。采用软件处理增

强图像, 以便减弱光照影响并增加图像的对比度。步骤如下: 先对图像作直方图均衡化处理<sup>[2]</sup>; 再进行动态空域变换<sup>[2]</sup>; 以快速 Otsu 方法确定灰度阈值并分割图像<sup>[10]</sup>; 用区域重心法求取球的中心位置。

**方法 2** 自适应调整数字摄像机参数后抓取图像。图像不经过任何增强处理, 直接以快速 Otsu 方法确定灰度阈值并分割图像, 用区域重心法求取球的中心位置。

图 4~图 6 中的“+”表示重心法获取的球中心位置。在较暗光照、一般光照和较亮光照下, 使用方法 1 抓取的图像分别如图 4(a)、图 5(a)和图 6(a)所示, 经直方图均衡化和空域增强后的图像分别如图 4(b)、图 5(b)和图 6(b)所示。在较暗光照、一般光照和较亮光照下, 使用方法 2 抓取的图像分别如图 4(c)、图 5(c)和图 6(c)所示, 其二值化后的图像分别如图 4(d)、图 5(d)和图 6(d)所示。三种光照下, 方法 1 和方法 2 数字摄像机抓取原始图像的直方图见图 7~图 9。

三种光照下的实验数据见表 1。

比较 3 种光照下的实验结果可知, 数字摄像机参数的自适应调整减弱了光照对图像质量的影

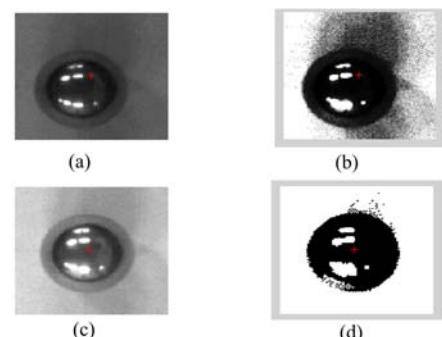


图 4 较暗光照下的图像

Fig. 4 Images under dark illumination

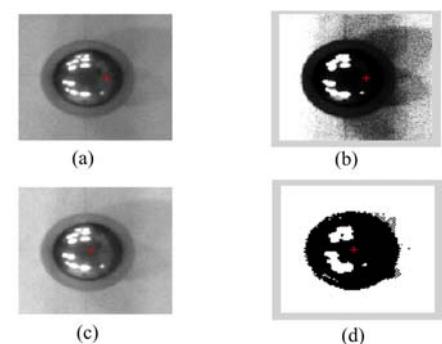


图 5 一般光照下的图像

Fig. 5 Images under normal illumination

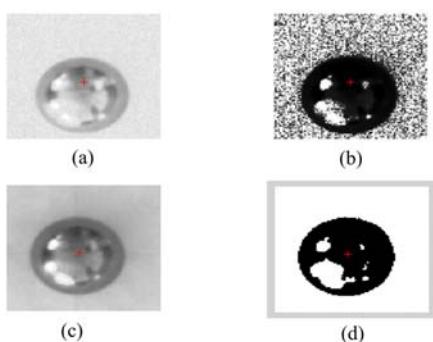


图6 较强光照下的图像

Fig. 6 Images under strong illumination

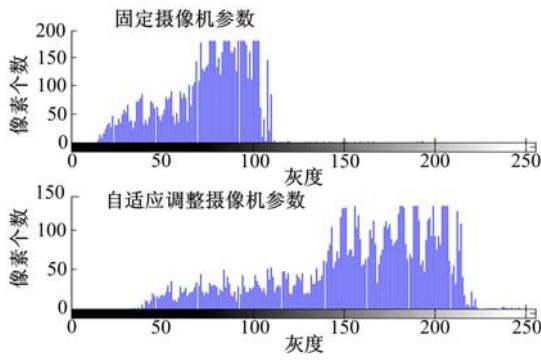


图7 较暗光照下抓取图像的直方图

Fig. 7 Histogram of grabbed images under dark illumination

响,可以在较大范围的光照条件下获得像素灰度均值稳定的标准图像。由直方图可知,自适应调整数字摄像机参数后抓取图像的像素灰度分布较为均匀。即使在光照较强和光照较暗的极端情况,灰度分布也没有出现过于集中的情况。固定数字摄像机的参数,抓取图像的像素灰度分布由光照决定,像素的灰度分布出现较大的变化。在光照较强和光照较暗的极端情况,灰度分布过于集中。相比之下,方法1抓取的图像像素灰度均

值变化很大,不都在目标区间[190,210]内;方法2抓取的图像像素灰度分布较为均匀,像素灰度均值均在目标区间[190,210]内。方法2抓取的图像质量远优于方法1抓取的图像质量。表1的数字摄像机参数说明了在不同光照下,数字摄像机参数、图像的像素灰度均值等参数的变化。

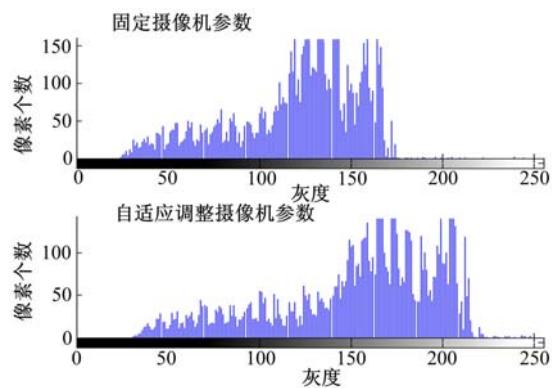


图8 一般光照下抓取图像的直方图

Fig. 8 Histogram of grabbed images under common illumination

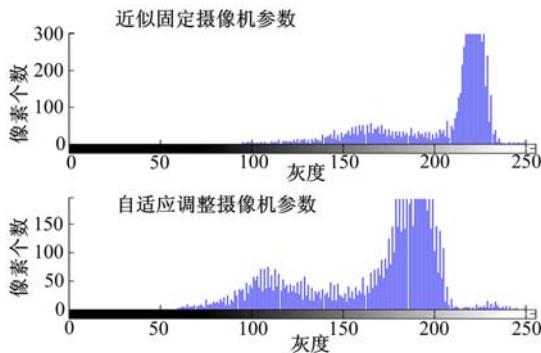


图9 较强光照下抓取图像的直方图

Fig. 9 Histogram of grabbed images under strong illumination

表1 较暗三种光照下的实验数据

Table 1 Experiment data under three kinds of illumination

参数	较暗光照		一般光照		较强光照	
	方法1	方法2	方法1	方法2	方法1	方法2
模数转换级数	1	1	1	1	3	3
增益	8	16	8	11	8	8
黑电平	0	1	0	0	0	0
曝光时间/ms	60	60	60	60	60	40
图像像素灰度均值	101.457	198.587	153.851	200.672	219.837	200.254
灰度阈值	127.5	136	132	134	141.5	136

数字摄像机参数的自动调整避免了像素灰度均值随光照变化而大范围波动。固定数字摄像机参数时,即使采用直方图均衡化和空域增强等软件处理方法,增强后的图像质量也较差,不利于后续的特征提取。

由球中心位置的标注结果可知,在3种光照条件下,方法2的位置提取精度都优于方法1。与近似固定摄像机参数的方法相比,自适应调整数字摄像机参数后抓取的图像质量稳定,有利于后续处理,提高了位置提取的精度。与未引入任何图像增强处理的方法2相比,即使在经过直方图均衡化和图像增强等软件处理后,方法1的位置提取精度也低于方法2的位置提取精度。数字摄像机参数的自动调整减弱了光照变化的影响,提高了位置特征提取精度,有利于机器视觉系统在变光照环境中高质量地自动运行,极大限度地减少了人的参与,提高了系统的可靠性。

#### 4 结束语

数字摄像机参数的自适应调整提高了机器视觉系统的光照鲁棒性,有利于机器视觉系统的自动运行。根据外界光照的情况,在线地估计数字摄像机增益的线性区斜率,进而调整摄像机的模数转换级数、增益、黑电平等参数,调整图像像素灰度均值到给定范围。实验证明,光照变化范围较大的情况下,应用此方法都可抓取到质量稳定的标准图像。抓取图像的像素灰度均值波动较小,有利于后续的图像处理工作。与近似固定摄像机参数的直方图均衡化和空域增强的软件处理方法相比,自适应调整数字摄像机参数的方法保证了抓取图像的像素灰度均值质量满足预先要求,提高了位置提取的精度。这种数字摄像机参数的自动调整方法可应用到其他的机器视觉系统,对保证机器视觉系统在变光照环境中可靠地自动运行、提高机器视觉系统的光照鲁棒性产生积极作用。

#### 参考文献:

- [1] Leung Chung-Chu, Chan Ka-Shing, Chan Hoi-Mei, et al. A new approach for image enhancement applied to low-contrast-low-illumination IC and document images [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 6(1): 769-778.
- [2] 潘海森,荣秋生. 基于 SOFM 神经网络的图像融合二值化方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 401-406.  
Pan Hai-sen, Rong Qiu-sheng. Image fusion binarization method based on SOFM neural network[J]. Optics and precision Engineering, 2007, 15 (3): 401-406.
- [3] Kim J, Kim L, Hwang S. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11 (4): 475-484.
- [4] Reza Ali. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization for real-time image enhancement[J]. Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image, and Video Technology, 2004, 38(1): 35-44.
- [5] Cheng H, Shi X. A simple and effective histogram equalization approach to image enhancement [J]. Digital Signal Processing, 2004, 14(2):158-170.
- [6] Liu Dang-hui, Lam Kin-man, Shen Lan-sun. Illumination invariant face recognition[J]. Pattern Recognition, 2005, 38(10): 1705-1716.
- [7] Kim Yeon-Ho, Martinez Aleix, Kak Avi. Robust motion estimation under varying illumination [J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(4): 365-375.
- [8] Wang Hong-rui, Tian Yan-tao, Sui Zhen, et al. Tracking control of ball and plate system with a double feedback loop structure[C]// Proceedings of the 2007 IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation, Piscataway, USA, 2007.
- [9] 顾庆. 基于视觉信息的运动体位置提取算法和实验研究[D]. 长春:吉林大学通信工程学院, 2007.  
Gu Qing. Study on the position acquiring algorithm and experiments for mobile targets with visual information[D]. Changchun: College of Communication Engineering, Jilin University, 2007.
- [10] 丁卫,龚振邦,谢少荣,等. 基于视觉的低空跟踪系统 [J]. 光学精密工程, 2007,15(6):957-965.  
Ding Wei, Gong Zhen-bang, Xie Shao-rong, et al. Vision-based low altitude tracking system[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15 (6): 957-965.