

# 基于视频的倒立摆摆起控制

岳大志 吴刚

(中国科学技术大学自动化系 合肥 230027)

**摘要** 在视觉信息用于连续反馈中,人们提出了基于视觉的伺服控制形式,对视觉传感器得到的图像进行快速处理,在尽量短的时间内给出反馈信息,构成系统的位置闭环控制。本文基于视频的倒立摆摆起控制,提供了一个视觉反馈倒立摆摆杆位置来控制的途径。文中对视频采集系统和软件设计进行了详细介绍,并给出了实际效果图。

**关键词** 倒立摆, 图像处理, 视觉伺服

## Swing-up Control of an Inverted Pendulum Based on Vision Feedback

YUE Da-Zhi WU Gang

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

**Abstract** Visual serving is given in the process of using vision information to feedback control, the images which are given by the vision sensor have been process quickly, and the feedback information can be given to construct a position feedback control system. In this paper we present a method how to swing up an inverted pendulum based on vision feedback in a control system. The image process system and software design are discussed in the article.

**Keywords** Inverted pendulum, Image process, Visual serving

## 1 引言

倒立摆装置是控制理论中的典型实验设备,是一个高阶次、多变量、严重不稳定、强耦合的非线性系统,它形象直观、结构简单、构件组称参数和形状易于改变。对倒立摆的研究不仅可以解决控制中的理论问题,同时该对象的研究成果在火箭飞行控制和机器人控制等领域具有重要的实践意义<sup>[1]</sup>。目前对倒立摆系统的研究是控制领域中的热门课题之一。有学者提出了基于视觉的伺服控制形式(visual serving),即利用机器视觉的原理,对从视觉传感器得到的图像进行快速处理,在尽量短的时间内给出反馈信息,构成系统的位置闭环控制。这种方式可以减少对系统的依赖性,非接触方式可以减少对系统的干扰<sup>[2]</sup>。

人的视觉中枢对图像的处理速度只有 25 帧/秒,却可以用手指稳定地托住一根木棍<sup>[2]</sup>。现在的 CCD 摄像头的图像传输速率一般在 20 帧/秒以上,这个速度是大大低于电位器和光电编码器的采用频率,而且采样精度易受到外界环境因素的影响。如何设计一种算法在采样频率低,信号质量差的情况下能控制倒立摆的摆起是本文的关键问题。

本文的倒立摆系统是由视觉传感器、倒立摆本体、运动控制器和 PC 机组成。由视觉传感器获取视频信息,经过图像处理得到倒立摆摆杆位置信息,作为反馈量输入计算机,由摆起算法计算机输出控制信号经由运动控制器控制摆杆摆起。

## 2 倒立摆系统硬件组成

本系统的硬件组成图如图 1 所示。

本系统的视觉传感器由 LG GMC-455 CCD 摄像头和 OK-C30 彩色图像采集卡组成。采样频率为 30 帧/秒,图像采集显示分辨率最大 768×576。

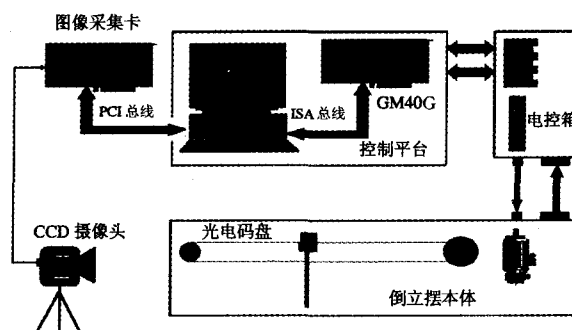


图 1 倒立摆系统结构图

倒立摆采用的是固高科技生产的 GIP-200-L 型直线倒立摆,它由基座、交流伺服电机、同步带、同步轮、滑竿、小车、摆杆、光电码盘和限位开关组成。其结构参数分别为: M-小车质量 1.096kg; m-摆杆质量 0.109kg; b-小车摩擦系数 0.1N/m/sec; l-摆杆转动轴心到杆质心的长度 0.25m; I-摆杆惯量 0.0034kg·m<sup>2</sup>。

倒立摆的控制系统由 PC 机、固高 GT-400 ISA 运动控制卡<sup>[3]</sup>和交流伺服驱动器组成。倒立摆系统的控制方框图如图 2。

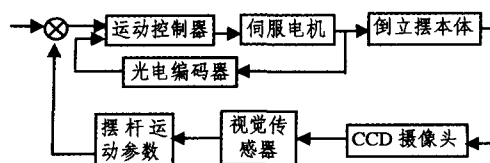


图 2 倒立摆系统控制方框图

运动控制卡、交流伺服电机驱动器和光电编码器构成内环控制系统,运动控制卡可以根据系统发送的指令,结合光电编码器反馈回来的信号,采用 PID 控制器对小车的运动(位

移、速度和加速度)进行精确控制。整个系统的闭环控制由计算机和视觉传感器实现,计算机对视觉传感器采集到的视频信息进行处理,从中提取出摆杆的角度和角速度,结合光电编码器传送的小车位移和速度信息,采用设计好的控制算法,计算出系统的输入,控制运动控制卡发送相应的指令,使小车运动达到目标。

### 3 倒立摆系统的软件设计

#### 3.1 视频图像的初步处理

在本系统获取的图像中,目标物体都是处于复杂的背景下,采集到的图像中干扰很大,但通过适当的图像预处理后可以得到比较理想的图像,给后面的摆杆位置提取带来了方便。

由于采用的是彩色图像采集卡,所获得的图像为彩色图像,其信息量过多,这使得图像处理运算量大,耗时长,因此将彩色图转换为 256 级的灰度图是必要的。本文通过下式将彩色图像转化为灰度图像。

$$I'_{(x,y)} = 0.3R + 0.51G + 0.19B$$

式中: $x, y$  表示像素的坐标值, $R, G, B$  分别表示该像素点的 RGB 值, $I'_{(x,y)}$  代表图中坐标为  $(x, y)$  的像素点的灰度值<sup>[4]</sup>。转化后的图像如图 3。

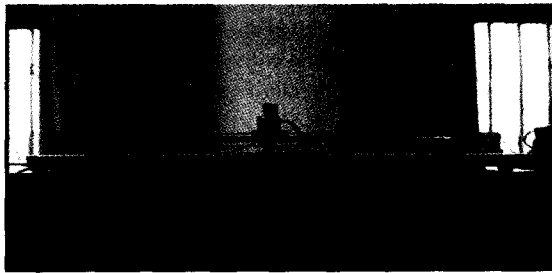


图 3 图像采集灰度图

#### 3.2 图像边缘检测

图像中的每一个点都有对应的灰度值,特别是统一特征的物体具有相似的灰度值。在倒立摆系统中,所研究的对象为摆杆,相比与背景、底座等其他物体的灰度值都各不相同,所以可以通过定义阈值来区分各个物体,最典型的是采用图像的二值化。在图像中可以定义一个阈值,这个阈值应该可以将一些高灰度值的部分与灰度值的物体分开。在此变换中将大于此阈值的像素点的灰度值置为 0,小于此值的点灰度值置为 255。

灰度值变换的公式为:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < T \\ 255 & x \geq T \end{cases}$$

其中  $T$  为所定义的阈值。

为了更好地区分摆杆、背景和底座,将摆杆标涂为黑色,并将背景用全单色布遮挡。

#### 3.3 摆杆位置提取

摄像头采集线数为 480 线,最大显示分辨率为 768 × 576。采用对采集处理后的每帧图像进行两两行扫描的方法来计算摆杆的位置。从图像中选择位置固定、相距为 50 行的两行像素,分别找出在相应行中属于摆杆的特征点,记录下它们的位置 A, B, 然后用反正切函数  $\theta = \arctg(\frac{A-B}{50})$  来计算摆杆当前的角度。因为要把摆杆从垂直向下的角度摆起到竖直向上的角度,所以在采集到图像中,设定了上下各两对位置固

定、相距为 50 行的四行像素,分别用来计算摆杆在下半平面和上半平面的角度。

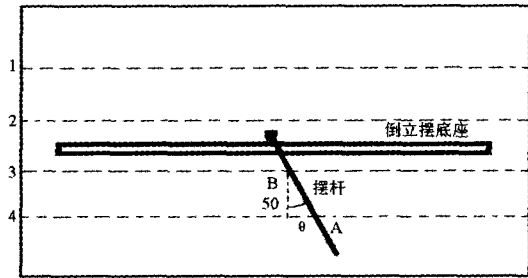


图 4 摆杆角度计算示意图

当第 1, 2, 3, 4 行都没有找到相应的摆杆特征点时,认为这时摆杆处于倒立摆底座平行的水平位置。当只有第 2 行或第 3 行找到摆杆的特征点时,可结合倒立摆小车的位置来计算摆杆的角度,倒立摆小车的位置由倒立摆的光电码盘提供,因为小车的水平位置是相对固定的,所以光电码盘提供的位置信息可以转换为图像中对应的点。

在实验中发现,阈值分割后二值化的图像很容易产生噪声点,尤其在背景光线变化情况下干扰更大,影响了目标物体的位置准确提取,下面采用视频帧间差分的办法来确定摆杆的边缘位置。

#### 3.4 帧间差分

每一个幅图像都是由一个个像素点组成的,由于在倒立摆控制系统中,其背景是不变的,变化的只有摆杆和小车位置,当对两个相邻的帧进行对比时候,就可以得到画面中变化的量,可以初步获得摆杆的位置<sup>[4,5]</sup>。

定义图像序列为  $I(x, y, i)$ , 其中  $x, y$  代表空间坐标; $i$  代表帧数( $i=1, \dots, N$ ),  $N$  为序列总帧数,在实际控制中, $N$  取决于控制时间。序列的亮度分量为  $I_L(x, y, i)$ , 则视频帧差(Change Detection Mask, CDM)反映了相邻帧之间的灰度变化:

$$CDM(x, y, i) = \begin{cases} d, & \text{if } d \geq T \\ 0, & \text{if } d < T \end{cases} \quad d = |I_L(x, y, i+1) - I_L(x, y, i)|$$

其中,阈值  $T$  被用来去除噪声。对固定的坐标位置  $(x, y)$ ,  $CDM(x, y, i)$  可以表示为帧数  $i$  的函数,它记录了在位置  $(x, y)$  处像素点沿时间轴的变化曲线。为了简化计算,将图像二值化,来确定图像的大体位置,这里取  $d$  为 255。

#### 3.5 倒立摆摆起控制

本文中,需要确定一种控制方法在较短的时间内使摆杆从自然平衡的下垂状态迅速摆起到平衡位置附近。从经验出发,可以设想:首先给小车一个向右作用力,让摆杆随小车一起快速向右移动,在小车移动快接近右边界的时候,制动小车,使摆杆的动能转换为势能;然后给小车一个向左的作用力,让小车和摆杆向左运动,在小车快接近左边界时,再次制动小车,让摆杆的动能转换为势能,往复几次,摆杆的势能将达到最大,使摆杆达到平衡位置附近。

选取驱动力为  $F$ ,  $F$  的大小与倒立摆系统驱动电机的电压有关,在起摆过程中,为避免作用力之间的相互抵消,仅在摆杆偏角位于一定范围内时,对小车施加与摆杆角速度的方向相反的驱动力,所选取的控制规则如下:

$$\begin{cases} F = +F_{\max}, \phi \in [2k\pi - \pi, 2k\pi - \beta], \phi > 0 \\ F = -F_{\max}, \phi \in [2k\pi + \beta, 2k\pi + \pi], \phi < 0 \end{cases}$$

(下转第 240 页)

结合阈值处理准确的分割出目标,是一种新颖的和有效的红外图像分割方法。

### 参考文献

- 1 Braga-neto U, Goutsias J. A theoretical tour of connectivity in image processing and analysis [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2003, 19: 5~31
- 2 Braga-neto U, Goutsias J. A multiscale approach to connectivity [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2003, 89: 70~107
- 3 Braga-neto U, Goutsias J. A Complete Lattice Approach to Connectivity in Image Analysis [R]; [Technical Report JHU/ECE 00 - 05]
- 4 Serra J. Connectivity on complete lattices [J]. J. Math. Imag.

- Vis., 1998, 9: 231~251
- 5 Serra J. Connections for sets and functions [J]. Fund. Inform, 2000, 41: 147~186
- 6 Braga-Neto U M, Goutsias J. Connectivity on complete lattices; new results [J]. Comput. Vis. Image Understanding, 2002, 85: 22~53
- 7 Braga-Neto U, Goutsias J. Grayscale level connectivity theory and applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(12)
- 8 Salembier P, Serra J. Flat zones filtering, connected operators, and filters by reconstruction [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4 (8): 1153~1160
- 9 吴巍, 彭嘉雄, 王海晖. 红外图像序列小目标的特性分析与检测 [J]. 红外与激光工程, 2002, 31(2)

(上接第 207 页)

trust\_sub(t, Subject\_03) and trust\_obj(t, Subject\_05)在 ABox 中无法成立。通过以上方法,我们能够基于 2 型模糊 OWL,通过 F-OntoTM 描述并处理信任管理模型中的模糊信息。

**结论** 2 型模糊 DLs 的提出是为了更加精准地表达和推理 DL 系统中的模糊信息。作为 2 型模糊 DLs 的基础,本文阐述了 2 型模糊  $\mathcal{ALC}$  的基本语法、语义、推理算法及其应用。与 1 型模糊  $\mathcal{ALC}$  相比,2 型模糊  $\mathcal{ALC}$  能够更好地处理模糊知识。除了语义网,还有很多基于 DLs 的应用(例如信任管理)需要处理模糊信息。总之,2 型模糊  $\mathcal{ALC}$  能够应用到许多领域来增强其表达及推理能力。今后的工作包括 2 型模糊  $\mathcal{ALC}$ 、 $\mathcal{ELN}$ 、 $\mathcal{SHOIN}(\mathcal{D})$  及其对这些 DL 的推理算法。

### 参考文献

- 1 Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O. The semantic web. The Scientific American, 2001, 284(5): 34~43
- 2 Horrocks I, Patel-Schneider P F, van Harmelen F. From SHIQ and RDF to OWL: The making of a web ontology language. Journal of Web Semantics, 2003, 1(1): 7~26
- 3 Baader F, Calvanese D, McGuinness D L, et al. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications. Cambridge University Press, 2003. 47~100

- 4 Calvanese D, Lenzerini M, Nardi D. Unifying class-based representation formalisms. Journal of Artificial Intelligence Research, 1999, 11(2): 199~240
- 5 Bechhofer S, van Harmelen F, Hendler J, et al. L. A. S.: OWL Web Ontology Language Reference. 2004
- 6 Blaze M, Feigenbaum J, Lacy J. Decentralized trust management. In: Dale J, Dinolt G eds. Proceedings of the 17<sup>th</sup> Symposium on Security and Privacy. Oakland; IEEE Computer Society Press, 1996. 164~173
- 7 Blaze M, Feigenbaum J, Keromytis AD. Keynote: Trust management for public-key infrastructures. In: Christianson B, Crispo B, William S, et al. eds. Cambridge 1998 Security Protocols International Workshop. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 59~63
- 8 Beth T, Borcherding M, Klein B. Valuation of trust in open networks. In: Gollmann D ed. Proceedings of the European Symposium on Research in Security (ESORICS). Brighton; Springer-Verlag, 1994. 3~18
- 9 Zadeh L A. Fuzzy sets. Information and Control, 1965, 8 (3): 338~353
- 10 Meghini C, Sebastiani F, Straccia U. Reasoning about the Form and Content for Multimedia Objects. In: Proceedings of AAAI 1997 Spring Symposium on Intelligent Integration and Use of Text, Image, Video and Audio, California, 1997. 89~94
- 11 Straccia U. Reasoning Within Fuzzy Description Logics. Journal of Artificial Intelligence Research, 2001, 14: 137~166
- 12 Straccia U. Transforming Fuzzy Description Logics into Classical Description Logics. In: Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Conference on Logics in Artificial Intelligence, Lisbon, 2004. 385~399
- 13 Straccia U. Towards a Fuzzy Description Logic for the Semantic Web. In: 1<sup>st</sup> Proceedings of Fuzzy Logic and the Semantic Web Workshop, Marseille, 2005. 3~18

(上接第 215 页)

式中  $F_{\max}$ —施加的最大驱动力,  $\beta$ —切换角,  $k=0, 1, 2, \dots$ 。

### 4 系统软件设计

本软件基于 Windows98 开发, Windows98 是一个多任务操作系统,允许多个线程并行工作。本软件包括摆起控制和视觉采集两个线程。控制线程为摆起控制部分,当系统开始工作时,运行摆起程序,使摆杆摆到能够用其他稳定控制程序控制的平衡范围之内,然后可以转入通过电位器获得摆杆角度的其他稳定控制程序中。视觉采集线程主要由视觉传感器的初始化、图像采集和特征提取三部分组成。两个线程之间通过消息响应的方式进行通信。在程序开始运动时,首先启动视觉采集线程,使视觉传感器开始工作,当视觉采集线程完成一帧图像的处理,从中提取出摆杆转动的角度和角速度之后,便向控制线程发送一个消息,控制线程调用相关的消息响应函数,完成对角度和角速度的采集。

系统的运行结果如图 5 所示。

**结论** 基于视频的倒立摆摆起控制系统提供了一个从视觉角度非接触式的检测倒立摆状态的一个途径,成功的利用视频图像确定的位置反馈信息使得倒立摆摆杆从自由平衡状态摆起到竖直平衡位置附近。如能采取更好的硬件设备,提高图像处理速度,则可以在这个系统上来进行倒立摆的稳定控制,对视觉伺服开展进一步的研究。

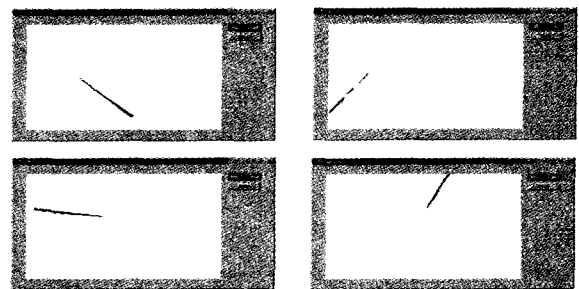


图 5 系统运行结果图

### 参考文献

- 1 丛爽, 张冬军, 魏衡华. 单级倒立摆三种控制方法的对比研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(11)
- 2 Magana M E, Holzapfel F. Fuzzy-Logic Control of an Inverted Pendulum with Vision Feedback [J]. IEEE Transactions on Education, 1998, 41(2): 165~170
- 3 GM-400 运动控制器用户手册. 深圳固高科技公司, 2001
- 4 胡俊, 苏祥芳, 刘立海. 图像序列中运动检测算法的研究及应用 [J]. 武汉大学学报(自然科学版), 2000, 46(5)
- 5 Wenzel L, Vazquez N. Computer vision based inverted pendulum [A]. In: Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000, IMTC 2000. Proceeding. of the 17<sup>th</sup> IEEE [C]. Volume: 3, 2000. 1319~1323
- 6 谢冬梅, 曲道奎, 徐方. 基于神经网络的机器人视觉伺服控制 [J]. 微计算机信息, 2006(2-1): 4~6, 274