

文章编号: 1001-0920(2007)01-0001-06

## 机器人无标定视觉中摄像机特性的逼近

韩立伟, 徐德, 谭民

(中国科学院 a. 自动化研究所, b. 研究生院, 北京 100080)

**摘要:** 简要介绍机器人视觉中摄像机无标定产生的背景和发展现状, 给出了摄像机无标定的定义. 依据该定义, 将现有的无标定方法归为基于雅可比矩阵等 4 种主要类别, 并分别对这些方法的机理及其优缺点作了简要分析. 最后对无标定的发展前景进行了展望.

**关键词:** 机器人视觉; 视觉控制; 无标定摄像机

**中图分类号:** TP242.6 **文献标识码:** A

### Approaching methods for camera characteristics in uncalibrated visual control system for robots

HAN Li-wei, XU De, TAN Min

(a. Institute of Automation, b. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China.

Correspondent: HAN Li-wei, E-mail: liwei.han@ia.ac.cn)

**Abstract:** A brief introduction to the background and progress of the methods for camera uncalibration is presented, and the definition of camera uncalibration is introduced. Based on the definition, current uncalibration methods are classified into four typical categories, and the mechanism and characteristic of each method are analyzed. The development of the uncalibrated visual control system is predicted.

**Key words:** Robot vision; Visual control; Uncalibrated camera

#### 1 引言

为了使机器人能够完成复杂的任务, 必须赋予机器人更强的与外界交互能力. 而在感知方式中, 视觉占有很大比重, 因而对机器人视觉的研究受到人们的普遍重视. 在视觉控制系统中, 为了实现视觉测量, 通常要进行摄像机内外参数的标定<sup>[1]</sup>.

摄像机标定, 通常是指在特定的摄像机模型基础上, 在机器人执行任务之前对所用摄像机模型的内外参数进行的计算. 如果这些参数在任务执行过程中不再改变, 则标定行为也不再进行<sup>[2-4]</sup>. 文献[2]将摄像机标定方法分为两类: 传统的标定方法和自标定方法. 传统的标定方法是利用已知的标定参照物进行摄像机内外参数的计算. 然而, 在实际应用中摄像机的内外参数, 如焦距、位姿等, 往往随任务的不同而改变. 如果每次改变后都重新标定, 显然很不方便. 在某些场合, 如深海探测、抢险救灾等, 这种使用标定物的方法也是不可行的. 为此, 研究人员提出

了自标定方法. 自标定方法不是利用已知参照物, 而是利用场景特征或摄像机的特定运动来求解摄像机内外参数.

由于实际环境中存在着严重的非线性、不确定性和复杂的扰动, 静态的摄像机标定方法不可避免地存在着一些缺陷. 首先, 所用摄像机模型本身就可能存在误差; 其次, 摄像机的标定不能做到足够的精确; 再次, 标定时使用的信息不可避免地带有噪声. 这些缺陷使得机器人在工作一段时间后, 误差的累积会达到不能接受的程度<sup>[5]</sup>. 如果每过一定时间就进行重新标定, 则无论从重新标定时机的选择, 还是从工作量的负荷考虑, 都是不现实的. 正如文献[6]指出的那样, 由于多种因素的影响, 利用标定方法难以得到理想的系统模型; 标定的结果只在机器人工作区域中完成标定的位置及其有限的邻域内有效, 而标定结果却要在整个工作空间中使用. 基于上述背景, 产生了摄像机无标定方法.

收稿日期: 2005-11-08; 修回日期: 2006-05-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60672039); 国家 973 计划项目(2002CB312200).

作者简介: 韩立伟(1972—), 男, 河北青县人, 博士生, 从事机器人视觉伺服、模式识别等研究; 徐德(1965—), 男, 山东五莲人, 研究员, 博士生导师, 从事机器人视觉控制等研究.

## 2 摄像机参数与无标定

### 2.1 摄像机模型

在机器人视觉系统中,常用针孔模型对摄像机进行描述.设  $P$  为工作空间中的任一点,其笛卡儿坐标为  $[x_w, y_w, z_w, 1]^T$ ,在摄像机图像平面上的投影点坐标为  $[u, v, 1]^T$ ,则二者满足下列等式:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 X_w = M X_w. \quad (1)$$

式中:  $M$  称为投影矩阵;  $a_x, a_y, u_0, v_0$  和  $R, t$  分别为摄像机的内、外参数<sup>[1]</sup>.

### 2.2 无标定视觉的定义

众所周知,在视觉系统工作之前,对式(1)中的摄像机参数进行标定的系统属于有标定的视觉系统.那么,在视觉系统工作之前,不对式(1)中的摄像机参数进行标定的系统是否就属于无标定系统呢?到目前为止,在什么是无标定系统或无标定方法的问题上,研究人员仍存在着不同的理解和定义.例如,有的文献所使用的“无标定”方法,是通过已知的场景信息,在工作过程中计算工作空间与图像平面坐标的投影矩阵<sup>[7]</sup>.从本质上讲,投影矩阵的求取和内外参数的标定具有等价性.因此,这些方法应该属于有标定方法.有的文献所指的“标定”方法<sup>[8]</sup>,并未求取内外参数或投影矩阵,而是对目标的图像坐标与世界坐标的关系进行多项式逼近,这样的方法宜归为无标定方法.

文献[9]将无标定模型定义为使用一个  $3 \times 4$  矩阵描述的三维工作空间到图像空间的映射关系,是包含摄像机内参数及双摄像机之间运动关系的基本矩阵未知的模型.文献[10]对无标定系统完成任务的能力进行了探讨,认为一个任务具有投影不变性,对弱标定系统(基本矩阵已知)而言,是以任意精度完成该任务的充要条件;而对无标定系统而言,是以任意精度完成该任务的必要条件.

标定的本质是对图像空间与工作空间之间关系的函数逼近问题.对内外参数的事先求取只是众多

方法中的一种,其优点是保证了较高的控制精度.因此,本文给出摄像机无标定的定义如下:

**定义1** 通过不断迭代,实时获得、更新图像空间与工作空间之间的某种定量关系,而不进行摄像机内外参数的显式计算的方法,称为机器人视觉的无标定方法.

根据上述定义,无标定方法主要可分为图像雅可比矩阵法、函数逼近法、智能计算方法、最优化法等.下面对这些无标定方法分别予以介绍.

### 3 基于图像雅可比矩阵的逼近

基于图像雅可比矩阵的逼近是一种线性方法,简单直观,是最重要也是使用最广泛的无标定方法.图像雅可比矩阵的方法最初是由 Weiss 等引入<sup>[11]</sup>,是对图像空间与机器人工作空间之间的运动关系的线性微分近似,主要应用于基于图像的视觉伺服.设机械手末端在世界坐标系中的速度记为  $\dot{p}$ ,相应的关节空间的速度记为  $\dot{q}$ ,图像平面中的速度记为  $\dot{u}$ ,则它们的关系为

$$\dot{u} = J_p \dot{p} = J_p J_q \dot{q} = J \dot{q}. \quad (2)$$

其中:  $J_p$  为  $\dot{u}$  与  $\dot{p}$  之间的速度传动比矩阵,  $J_q$  为  $\dot{p}$  与  $\dot{q}$  之间的速度传动比矩阵,  $J$  一般称为图像雅可比矩阵.

雅可比矩阵法,就是通过实时估计图像雅可比矩阵,利用图像平面中的偏差修正末端执行器或关节的位置,实现目标的定位和跟踪.

图像雅可比矩阵是一种对图像空间与工作空间的非线性关系的一种线性微分近似,因而是局部的.也就是说,在当前位置计算的结果,一般只在一个不大的邻域内保持精度.雅可比矩阵应根据工作位置的不同而变化,即应具有自适应性.文献[12]通过实验比较了采用和不采用自适应机制估计雅可比矩阵的差异.

在对运动目标跟踪时,目标的位置是时间的函数.为保证图像清晰度,需调整摄像机参数.在图像空间中,机器人末端与目标的位置偏差不仅受机器人关节参数的影响,而且也与时间有关.因此,估计雅可比矩阵时还应考虑到时间的因素,也就是说它应是时变的.

图像雅可比矩阵的时变主要是由摄像机参数变化引起的.对于运动目标的跟踪,在使用自适应算法克服图像雅可比矩阵的局部性的前提下,还必须考虑动态因素,即包含时间微变的修正项,这样才能具有较好的运动目标跟踪能力.由于静态目标的跟踪只是运动情形的特例,应用中只需将时间修正项去掉即可,故不再专门讨论.目前出现的主要方法包括牛顿法及其派生的各种方法<sup>[13-18]</sup>、递推最小二乘

法<sup>[14,19,20]</sup>、试探法<sup>[21]</sup>、动态加权因子法<sup>[22]</sup>、卡尔曼滤波<sup>[23,24]</sup>、自回归模型<sup>[25]</sup>及信赖域<sup>[12,26]</sup>等方法。

### 3.1 牛顿法

牛顿法是求取图像雅可比矩阵的一种较常用的方法。设图像平面中目标的当前位置为  $y^*(t)$ ，机器人末端为  $y(t)$ ，则二者偏差为

$$f(t) = y(t) - y^*(t). \tag{3}$$

式中  $t$  为时间， $\theta$  为关节角。选择偏差的平方作为待优化的目标函数，即

$$F(t) = \frac{1}{2} f^T(t) f(t). \tag{4}$$

设  $t$  的增量分别为  $h = t_{k+1} - t_k, h_t$ 。F 的一阶泰勒展开式为

$$F(t + h, t + h_t) = F(t, t) + \frac{\partial F}{\partial t} h + \frac{\partial F}{\partial t} h_t + O(h, h_t). \tag{5}$$

对  $F$  求偏导数，令该偏导数为零，并舍弃二阶无穷小部分。经整理，得到  $F$  的牛顿法公式

$$t_{k+1} = t_k - \left( \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} \right)^{-1} \left( \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial^2 F}{\partial t \partial h_t} h_t \right). \tag{6}$$

$\left( \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} \right)^{-1}$  包含了待求的雅可比矩阵的信息。但由于实际中该项不易计算，故常利用 Broyden 方法对其进行估计，即拟牛顿法<sup>[13,14]</sup>。

$$t_{k+1} = t_k - (J_k^T J_k)^{-1} J_k^T (f_k - \frac{\partial f_k}{\partial t} h_t), \tag{7}$$

$$J_k = J_{k-1} + \frac{(f - J_{k-1} h - \frac{\partial f_k}{\partial t} h_t) h^T}{h^T h}, \tag{8}$$

其中  $J = \partial y / \partial \theta$  为雅可比矩阵。

将式(3)和(4)代入(6)，得在最小二乘意义下的估计式

$$t_{k+1} = t_k - (J_k^T J_k + S_k)^{-1} (f_k - \frac{\partial f_k}{\partial t} h_t). \tag{9}$$

$S = \frac{\partial J^T}{\partial t} f$  为包含二阶导数信息的非线性项，在最优化附近时， $S$  相对于  $J$  很小，故可以省略。这时使用 Broyden 方法对  $J$  进行估计，即为拟高斯 - 牛顿法<sup>[15-18]</sup>。其中，文献[16,17]要求由  $h$  和  $h_t$  构成的列

向量形成的矩阵  $\begin{bmatrix} h \\ h_t \end{bmatrix} [h^T \quad h_t^T]$  非奇异。

上述方法称为“动态”拟(高斯 - ) 牛顿法。其实质是在关节参数和雅可比矩阵的估计中，同时考虑关节和时间的微动量。

### 3.2 递推最小二乘法

在估计雅可比矩阵时，递推最小二乘法(RLS)<sup>[14,19,20]</sup>对噪声表现出较好的鲁棒性。递推最小二乘法的典型形式如下：

$$\begin{cases} \hat{J}_k = \hat{J}_{k-1} + (\hat{J}_{k-1} + h^T P_{k-1} h)^{-1} (f - \hat{J}_{k-1} h - \frac{\partial f_k}{\partial t} h_t) h^T P_{k-1}, \\ P_k = \frac{1}{\lambda} [P_{k-1} - (h^T P_{k-1} h)^{-1} (P_{k-1} h h^T P_{k-1})]. \end{cases} \tag{10}$$

其中  $J$  为雅可比矩阵， $h$  和  $h_t$  为关节角和时间的增量， $f$  为位置偏差的增量。

### 3.3 基于试探性动作的方法

基于试探性动作的方法，是通过引入一些冗余动作来估计雅可比矩阵，属于一种比较简单的雅可比矩阵估计方法，因而被广泛使用。但如上所述，其缺陷也是很严重的：试探动作较为单调，反映在图像平面中的动作幅度不大，极易使估算的雅可比矩阵趋于奇异<sup>[22]</sup>。文献[27]对雅可比矩阵的时变问题进行了讨论，认为由于每次机器人的跟踪运动都是朝目标方向推进最大距离，使得雅可比矩阵趋于病态，逐渐导致估算的不精确；冗余运动的大量存在增加了运算负荷，不利于跟踪运动目标<sup>[28]</sup>。然而，从另一方面看，适当地利用试探性动作，反而可以缓解雅可比矩阵趋于奇异的问题。文献[21]利用关节变动自相关矩阵定义了“条件数”，判断出了趋于病态的时刻，在关节运动不显著的方向(上述自相关矩阵的最小特征值对应的特征向量)上引入试探性动作，可以缓解雅可比矩阵的病态问题。

### 3.4 动态加权因子法

在估计雅可比矩阵时，动态加权因子法根据偏差引入加权因子，可以在一定程度上提高动态性能，其算法如下：

$$\begin{cases} t_{k+1} = t_k - \text{Weighting} (\hat{J}^T \hat{J})^{-1} \hat{J}^T f, \\ \text{Weighting} = \frac{1}{18 \text{ err} / \text{screen} + 1}, \\ J = \frac{(f - J_k h) h^T}{h^T h}. \end{cases} \tag{11}$$

其中： $\theta$  为关节角， $J$  为雅可比矩阵， $f$  为位置偏差，Weighting 为权重因子。该方法的缺点是：由于加权因子固定不变，通用性较差，不能有效地适应不同的运动形式。

此外，较为常用的方法还有卡尔曼滤波器法、自回归模型法、信赖域法等。卡尔曼滤波器法利用卡尔曼滤波器的运动预测能力，对动态过程进行一定的补偿。其优点主要体现在：1) 对位置的测量噪声具有较好的鲁棒性；2) 能够预测目标的运动，以补偿时延。自回归模型方法是在对图像雅可比矩阵静态

修正的基础上,采用自回归模型进行目标的运动估计.信赖域的概念也用于提高雅可比矩阵的精确性和动态性能.信赖域方法通过定义、调整一个信赖域参数,在估计雅可比矩阵时使得计算始终保持在一个可靠的工作空间.该方法的缺点是信赖域的计算非常复杂,不适合实时应用的场合.

基于试探性动作、动态加权因子、自回归模型、卡尔曼滤波器和信赖域等方法,一般是在静态方法(只考虑关节微动)的基础上加以动态修正.其共同的优点在于控制策略较为简单.

牛顿法和递推最小二乘法,在估计关节空间变动的同时综合考虑了时间因素的影响,因而属于“动态”的方法,在跟踪运动目标时控制效果较为精确,适合于对性能要求较高的场合.文献[22]将牛顿法与基于试探性动作的试探法作了比较,证明该方法可以有效地避免雅可比矩阵趋向奇异的问题,以及跟踪运动目标方面较好的效果.递推最小二乘法对图像测量噪声的鲁棒性较好,而牛顿法对噪声较为敏感<sup>[19]</sup>.两种方法的共同缺点是计算量较大,算法也相对复杂,动态加权因子等方法相对简单,系统开销较小,但控制性能较差,适合于要求较低的应用场合.

#### 4 基于函数的逼近

假设  $f(x)$  是定义在某区间上的函数,能否找到另一个构造简单、计算量小的函数  $(x)$  来近似代替  $f(x)$ ,这就是所谓函数逼近问题.函数逼近的通常作法是寻求一个线性无关函数系,取  $(x)$  为这个函数系的某种线性组合.这个函数系的取法很多,常见的有:

幂函数系:  $1, x, x^2, \dots, x^n, \dots$ ;

三角函数系:  $1, \cos x, \sin x, \dots, \cos nx, \sin nx, \dots$ ;

指数函数系:  $\{e^{jx}\}$ .

在各种函数系中,基于幂函数系的多项式具有突出的优势.首先多项式便于计算,容易求微分和积分,而且是任意可微的函数;其次,其计算量较小.文献[29]使用3阶多项式,通过递推最小二乘法对目标的3维坐标进行估计.文献[8]提供了使用的多项式逼近的例子.该方法首先将工作空间约束为二维( $Z=0$ ),并证明了一个特征点在工作空间中坐标可由其在图像平面中的坐标唯一确定.设目标在世界坐标系中的坐标为  $(x, y)$ ,在图像平面中的坐标为  $(u, v)$ ,则

$$\begin{aligned} x &= a_1 u^k + a_2 v^k + a_3 u^{k-1} v + \\ &\quad \dots + a_{s-2} u + a_{s-1} v + a_s, \\ y &= b_1 u^k + b_2 v^k + b_3 u^{k-1} v + \end{aligned}$$

$$\dots + b_{t-2} u + b_{t-1} v + b_t. \quad (12)$$

其中:  $k$  为多项式的阶数;  $a_i, b_j$  为多项式的系数,  $i = 1, 2, \dots, s, j = 1, 2, \dots, t$ . 利用若干已知的参考点,通过最小二乘法可得到上述系数.

基于函数逼近的方法,其优点是算法较为简单,计算量也较小.

#### 5 基于智能计算方法的逼近

智能计算方法包括人工神经网络、模糊推理和遗传算法等.

神经网络具有如下3个突出的优点:1)可以实现非线性逼近;2)权值对周围环境变化具有自适应性;3)具有很强的容错性.机器人的无标定视觉控制过程非常复杂,手眼关系和透视模型的参数均未知,并存在着畸变的影响,控制参数也随时间和空间变化,因而神经网络便成为一种很合适的模拟手段<sup>[5,30-32]</sup>.文献[30]采用的是 RBF 网络. RBF 网络的隐结点为径向基函数,通常采用高斯函数,当其输入距高斯函数的中心点足够近时,神经元才被激活.因此,这种指数递减的局部非线性函数,使其成为一种局部的万能逼近器.理论上,只要有足够多隐单元, RBF 网络就可以逼近任意多元连续函数.另外,文献[32]给出了一个模糊-神经网络的例子.

模糊推理与神经网络一样,都是智能控制的重要手段,同样也可用于无标定领域<sup>[32-35]</sup>.模糊推理突出的优势在于能够充分发挥人的经验作用.视觉反馈作为人类最重要的交互手段,存在着大量的经验性和模糊性,因此模糊推理与神经网络一样,从原则上更加适合于视觉伺服控制.以文献[33]为例,文中使用了 Sugeno 模糊推理算法,控制系统输入选择为位置信息,输出为速度,避免了内部参数整定的困难.另外,文章还分析了3种模糊隶属度函数的差异,最终跟踪效果和稳定性较好,定位过程快速、准确.

#### 6 基于最优化方法的逼近

简单说,最优化方法就是在有限种或无限种可行方案中挑选最优的方案.按照目标函数和约束条件的特点,大致可分为线性规划、非线性规划和动态规划.在无标定视觉系统中,一般将目标与抓手的位置偏差作为目标函数,关节参数作为决策变量,约束条件通常取关节参数的合理变动范围,通过不同的策略寻找使偏差函数最小的关节参数最优解.前面曾经提到的拟牛顿法及拟高斯-牛顿法就是典型的非线性最优化方法,已大量应用于运动跟踪任务.除拟牛顿法及拟高斯-牛顿法外,文献[36,37]使用基于 Nelder-Mead 单纯法的优化方法,并通过加入一个线性再搜索过程,提高了原算法的收敛速度.

最优方法的优点在于将优化目标和优化算法分开,耦合性小、物理意义明确,易于针对不同任务进行相应的修改。例如,若需要在已有的目标跟踪任务中添加避障要求,只需在目标函数中添加有关指标即可,这时目标函数由式(3)变为<sup>[38]</sup>

$$f(\tilde{y}, t) = y(\tilde{y}) - y^*(t) + Ke^{(-\tilde{y}_1/\tilde{y}_1^2 - \tilde{y}_2/\tilde{y}_2^2)} \quad (13)$$

其中: $\tilde{y}(\cdot)$ 为抓手与障碍物的距离, $\tilde{y}_i$ 为 $\tilde{y}(\cdot)$ 的第*i*个分量。

## 7 结 语

本文通过对目前出现的无标定方法的分析,提出了无标定方法的定义,并在此基础上对无标定方法进行了初步的归类、描述和分析。

对摄像机进行预先标定,可以获得较高的控制精度,但缺点是标定过程复杂耗时,而且任务进行中存在着误差的累计,最终会影响控制的精度。如果不进行预先标定,而通过实时的自适应逼近,即无标定方法,也能获得足够的控制精度,这将大大减轻系统开销和简化控制策略。因此,无标定控制方法具有很大的研究价值和发展前景。对于无标定的研究,如果将无标定的方法定义为对视觉信息与相应反馈行为之间关系的实时估计逼近,那么这个问题的求解就可以使用已有的理论和方法,研究和探索的前景将会更加宽广。对于基于图像雅可比矩阵的方法,在传统的关节空间估计的同时,可通过引入不同的修正方法来提高其动态性能。另外,函数逼近和最优化理论方面的成果也可应用于无标定方法之中。

在上述方法中,基于智能计算的方法应给予更多的关注。机器人的手-眼关系,是对人类此种行为的模拟。人类手眼之间的协调,是一个非常复杂、全局和自适应学习的过程,涉及智能进化和行为优化等各个方面。因此,对机器人手眼与工作空间关系的研究,应该充分地结合仿生学和人工智能的研究成果,从本质和机理上加以分析。由目前人工智能的研究成果可知,人类在处理手眼协调时,更多的是建立在模糊推理、经验感觉和基于反馈的自适应学习的基础上。模糊推理、神经网络及遗传算法等智能计算方法,分别是对人类智能的过程、结构和行为等方面的模拟。建立在模糊推理、神经网络、遗传算法以及人工智能之上的基于智能计算的方法,以其特有的智能性,会在无标定领域具有更大的优势,发挥更大的作用。

## 参考文献(References)

[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.  
(Ma S D, Zhang Z Y. Computer vision-computational theories and algorithm [M]. Beijing: Science Press,

1998.)  
[2] 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机标定综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43-55.  
(Qiu M L, Ma S D, Li Y. Overview of camera calibration for computer vision [J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(1): 43-55.)  
[3] 姜大志, 郁倩, 王冰洋, 等. 计算机视觉中的设备标定和三维图形重构综述[J]. 计算机工程与应用, 2001, 37(13): 53-55.  
(Jiang D Z, Yu Q, Wang B Y, et al. Overview of camera calibration and 3D reconstruction for computer vision [J]. Computer Engineering and Application, 2001, 37(13): 53-55.)  
[4] 吴文琪, 孙增圻. 机器视觉中的摄像机标定方法综述[J]. 计算机应用研究, 2004, 21(2): 4-6.  
(Wu W Q, Sun Z Q. Overview of camera calibration methods for machine vision [J]. Application Research of Computers, 2004, 21(2): 4-6.)  
[5] 潘且鲁, 苏剑波, 席裕庚. 基于神经网络的机器人手眼无标定平面视觉跟踪[J]. 自动化学报, 2001, 27(2): 194-199.  
(Pan Q L, Su J B, Xi Y G. Uncalibrated 2D robotic visual tracking based on artificial neural network [J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(2): 194-199.)  
[6] 苏剑波, 席裕庚. 机器人视觉系统非标定的平面运动跟踪[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(6): 50-53.  
(Su J B, Xi Y G. Planar motion tracking with an uncalibrated robot/ Vision system [J]. Systems Engineering and Electronics, 1999, 21(6): 50-53.)  
[7] Dodds Z, Hager G D, Morse A S, et al. Task specification and monitoring for uncalibrated hand/eye coordination [C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Detroit, 1999, 2: 1607-1613.  
[8] Hespanha J, Dodds Z, Hager G D, et al. What can be done with an uncalibrated stereo system? [C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Leuven, 1998, 2: 1366-1372.  
[9] Hodges S E, Richards R J. Uncalibrated stereo vision for PCB drilling [C]. IEE Colloquium Division Colloquium on the Applications of Machine Vision. London, 1995, 113: 4/1-4/6.  
[10] Yang G S, Yan H, Chen L C, et al. Research on algorithm of camera calibration based on polynomial for a mobile robot [C]. Proc of the Int Symposium on Test and Measurement. Shenzhen, 2003, 6: 4483-4488.  
[11] Sanderson A C, Weiss L E, Neuman C P. Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1987, 3(5): 404-417.  
[12] Jagersand M, Fuentes O, Nelson R. Experimental evaluation of uncalibrated visual servoing for precision

- manipulation[C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Albuquerque, 1997, 4: 2874-2880.
- [13] Piepmeyer J A, McMurray G V, Lipkin H. A dynamic Quasi-Newton method for uncalibrated visual servoing [C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Detroit, 1999, 2: 1595-1600.
- [14] Piepmeyer J A, McMurray G V, Lipkin H A. Dynamic Jacobian estimation method for uncalibrated visual servoing [C]. IEEE/ASME Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics. Atlanta, 1999: 944-949.
- [15] Piepmeyer J A, Lipkin H. Uncalibrated eye-in-hand visual servoing [J]. The Int J of Robotics Research, 2003, 22(10/11): 805-819.
- [16] 项龙江, 司秉玉, 薛定宇, 等. 模型无关的无标定视觉伺服控制[J]. 机器人, 2003, 25(5): 424-427.  
(Xiang L J, Si B Y, Xue D Y, et al. Model independent uncalibration visual servo control [J]. Robot, 2003, 25(5): 424-427.)
- [17] 项龙江, 周云龙, 薛定宇, 等. 具有不确定性重力补偿的无标定视觉伺服[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(25): 27-30.  
(Xiang L J, Zhou Y L, Xue D Y, et al. Uncalibrated visual servo with uncertain gravity compensation [J]. Computer Engineering and Application, 2004, 40(25): 27-30.)
- [18] Piepmeyer J A, Gumpert B A, Lipkin H. Uncalibrated eye-in-hand visual servoing[C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Washington, 2002, 1: 568-573.
- [19] Piepmeyer J A, McMurray G V, Lipkin H. Uncalibrated dynamic visual servoing[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2004, 20(1): 143-147.
- [20] Kim G W, Lee B H. Adaptive regulation of robot joint velocity in uncalibrated visual servoing [C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. New Orleans, 2004: 739-744.
- [21] 周丽, 郭振民. 试探性运动在无标定视觉伺服系统中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2002, 7(1): 11-13.  
(Zhou L, Guo Z M. Application of exploratory motion in visual servoing method without calibration [J]. J of Harbin University of Science and Technology, 2002, 7(1): 11-13.)
- [22] Dodds G, Zatarri A, Bischoff R. Uncalibrated visual servoing for full motion dextrous robot systems with tracking cameras [C]. IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Maui, 2001, 1: 13-18.
- [23] Qian J, Su J B. Online estimation of image Jacobian matrix by Kalman-bucy filter for uncalibrated stereo vision feedback [C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Washington, 2002, 1: 562-567.
- [24] 田梦倩, 罗翔, 黄惟一. 视觉伺服机器人系统的无标定目标运动估计 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2004, (1): 29-32.  
(Tian M Q, Luo X, Huang W Y. A visual servo robot system based on uncalibrated object motion estimation [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2004, 1: 29-32.)
- [25] Kim G W, Lee B H, Kim M S. Uncalibrated visual servoing technique using large residual [C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Taipei, 2003, 3: 3315-3320.
- [26] Jagersand M. Visual servoing using trust region methods and estimation of the full coupled visual-motor Jacobian [C]. Proc of the IASTED Applications of Control and Robotics. Orlando, 1996: 105-108.
- [27] Sutanto H, Rajeev S, Venugopal V. Image based autodocking without calibration [C]. Proc of the 1997 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Albuquerque, 1997: 974-979.
- [28] 苏剑波, 席裕庚. 基于无标定全局视觉反馈的三维运动目标的图像跟踪方法 [J]. 高技术通讯, 2000, 10(7): 85-87.  
(Su J B, Xi Y G. Image tracking for a 3D moving object based on uncalibrated global visual feedback [J]. High Technology Letters, 2000, 10(7): 85-87.)
- [29] Nakai H, Taniguchi Y, Uenollara M, et al. A volleyball playing robot [C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Leuven, 1998, 2: 1083-1089.
- [30] 胡海峰, 沈伟, 秦家银. RBF网络在立体视觉系统中的研究 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(11): 15-19.  
(Hu H F, Shen W, Qin J Y. The research of RBF network in stereovision system [J]. Computer Engineering and Application, 2004, 40(11): 15-19.)
- [31] 潘且鲁, 苏剑波, 席裕庚. 基于立体视觉的机器人手眼无标定三维视觉跟踪 [J]. 机器人, 2000, 22(4): 293-299.  
(Pan Q L, Su J B, Xi Y G. Uncalibrated 3D robotic visual tracking based on stereo vision [J]. Robot, 2000, 22(4): 293-299.)
- [32] 苏剑波. 基于模糊神经网络的无标定全自由度手眼协调 [J]. 华中科技大学学报, 2004, 32(增): 42-44.  
(Su J B. Uncalibrated robotic hand-eye coordination of full degree-of-freedom based on fuzzy neural network [J]. J of Huazhong University of Science and Technology, 2004, 32(S): 42-44.)
- [33] 张晓华, 殷德军, 邓宗全. 一种基于视觉模糊推理的管道机器人自主定位控制方法 [J]. 微计算机信息, 2002, 18(2): 10-11.  
(Zhang X H, Yin D J, Deng Z Q. An autonomous method to the position control of the pipeline robot based on visual fuzzy reasoning [J]. Control & Automation, 2002, 18(2): 10-11.)

(下转第15页)

有输出反馈形式的非线性系统,采用神经网络观测器获得反映故障信息的残差.利用残差信息,不仅可以实现故障检测,还可以在一定的误差范围内估计出故障的幅值.基于 Lyapunov 稳定性定理,提出了故障调节的算法.从仿真结果可以明显地看出,该方法在故障检测、估计以及容错控制中的有效性.但在容错控制中的控制器条件较为严格,下一步的工作应在这方面进行改进.同时应考虑将此方法在更为一般的非线性系统中推广,以便于在实际控制系统中应用.

### 参考文献(References)

- [1] Hammouri H, Kinnaert M, Yaagoubi E H El. Observer based approach to fault detection and isolation for nonlinear systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(10):1879-1884.
- [2] Staroswiecki M, Comtet-Varga G. Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems [J]. Automatica, 2001, 37(5): 687-699.
- [3] Jiang B, Staroswiecki M, Cocquempot V. Fault diagnosis based on adaptive for a class of nonlinear systems[J]. Int J Control, 2004, 77(4): 415-426.
- [4] 周川, 胡维礼, 陈庆伟. 基于神经网络自适应观测器的鲁棒故障检测[J]. 应用科学学报, 2004, 22(1): 124-126.  
(Zhou C, Hu W L, Chen Q W. Robust fault detection based on neural network adaptive observers [J]. J of Applied Sciences, 2004, 22(1):124-126.)
- [5] Patton R J. Fault-tolerant control: The 1997 situation [C]. Proc IFAC Safeprocess. Hull, 1997:1033-1055.
- [6] Jiang B, Chowdhury F N. Fault estimation and accommodation for linear MIMO discrete-time systems [J]. IEEE Trans Control System Technology, 2005, 13(3): 493-499.
- [7] 冒泽慧, 姜斌. 基于自适应观测器的 MIMO 系统执行器故障调节[J]. 山东大学学报, 2005, 35(3):17-19.  
(Mao Z H, Jiang B. Actuator fault accommodation based on adaptive observer for MIMO system[J]. J of Shandong University, 2005, 35(3): 17-19.)
- [8] 张颖伟, 王福利, 于戈. 基于一个学习逼近的非线性系统的故障调节[J]. 自动化学报, 2004, 30(5):757-762.  
(Zhang Y W, Wang F L, Yu G. Fault accommodation of a class of nonlinear systems using a learning approach [J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(5): 757-762.)
- [9] Marino R, Tomei P. Global adaptive output-feedback control of nonlinear systems, Part : Linear parameterization[J]. IEEE TAC, 1993, 38(1):17-32.
- [10] Isidori A. Nonlinear control systems: An introduction [M]. 3rd ed. New York: Springer-Verlag, 1995.
- [11] Choi J Y, Farrell J. Adaptive observer for a class of nonlinear systems using neural network [C]. IEEE Int Symposium on Intelligent Control/ Intelligent System and Semiotics. Cambridge, 1999: 114-119.
- [12] Polycarpou M M. Fault accommodation of a class of multivariable nonlinear dynamical systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2001, 46(5): 736-742.
- [13] Theillior D, Noura H, Sauter D. Fault-tolerant control method for actuator and component faults[C]. Proc of the 37th IEEE Conf on Decision and Control. Jampa, 1998: 604-609.
- [14] Von Collani Y, Scheering C, Zhang J W, et al. A neuro-fuzzy solution for integrated visual and force control[C]. IEEE Int Conf on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. Taipei, 1999: 135-140.
- [15] Zhang Z Y, Isono K, Akamatsu S. Euclidean structure from uncalibrated images using fuzzy domain knowledge: Application to facial images synthesis[J]. J of Engineering and Applied Science, 1998: 784-789.
- [16] Miura K, Gangloff J A, De Mathelin M F. Robust and uncalibrated visual servoing without Jacobian using a simplex method [C]. IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Lausanne, 2002, 1: 311-316.
- [17] Miura K, Gangloff J, De Mathelin M, et al. Visual servoing without Jacobian using modified simplex optimization[C]. Proc of the SICE Annual Conf, SICE Annual Conf 2004. Sapporo, 2004: 1313-1318.
- [18] Piepmeier J A, McMurray G V, Pfeiffer A, et al. Uncalibrated target tracking with obstacle avoidance [C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. San Francisco, 2000, 2: 1670-1675.

(上接第 6 页)