

服务机器人新型双目视觉系统及结构参数标定的研究^①孔令富^② 吴培良^③ 赵逢达

(燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

摘 要 构建了一种新型的满足服务机器人视觉任务需要的双目视觉系统,该系统是由一个云台(Pan/Tilt/Zoom, PTZ)摄像机和一个手眼系统组成的变基线双目配置,具有更大的视觉空间和灵活性。对该双目配置下实现目标定位的关键参数——双目结构参数的实时自标定方法进行了研究,提出了将大部分繁琐的坐标变换关系转移到离线环节标定的离线/在线二步标定算法。仿真实验表明,此方法可有效降低在线处理时对图像匹配点的数目要求,同时该双目系统对图像噪声和机械运动误差具有一定鲁棒性。

关键词 服务机器人, 双目视觉, 基线可变, 结构参数, 二步标定

0 引言

一般而言,机器人的视觉可分为固定视点的视觉和非固定视点的视觉。固定视点视觉的空间目标定位一般采用静止放置的两个摄像机构成双目系统^[1]。非固定视点的视觉主要是指手眼系统^[1,2]和自主移动车的视觉系统^[3]等。近年来,云台(Pan/Tilt/Zoom, PTZ)控制摄像机作为一种非固定视点视觉系统以其可变视角和变焦能力,已经越来越多地被应用于视频监控领域^[4],对 PTZ 摄像机的精确标定也进行了深入研究^[5-8]。

随着机器人技术的不断发展,以护老、助老为主要任务的面向家庭的服务型机器人概念已被广泛接受。与传统的视频监控系统不同,服务机器人为了完成取物、安保等日常作业,不仅需要具备目标跟踪监控功能,而且必须能够实现目标的空间定位,即获取目标在空间中的三维信息。众所周知,固定视点的单摄像机无法感知目标的深度信息,而由单摄像机运动虽能实现三维定位,但稳定性和效率欠佳。因此,为了更好地完成服务机器人视觉任务,一些双目主动视觉系统被设计出来^[4,5,9],这些视觉系统的欠缺之处在于双目之间的基线不可变。

本文提出了一种新颖的由一个手眼系统和一台 PTZ 摄像机组成的变基线双目视觉系统,该系统利用两种形式摄像机各自的优点,具有较宽的视觉空

间和灵活性,便于实现目标发现、定位与跟踪。在此基础上研究了该双目配置中的关键参数——双目结构参数的一种新的自标定方法。

1 新型变基线双目视觉系统

1.1 系统构成

讨论的对象是轮式移动服务机器人上由 PTZ 摄像机和手眼摄像机组成的双目系统。如图 1 所示,服务机器人主体为一台 Pioneer III 型移动机器人,机械手系统安装在机器人顶部以获得较大的操作空间,采用 Logitech S5500 作为手眼摄像机固定安装在机械手末端平台上,该摄像机直接通过 USB 2.0 接口连接到机器人主机。PTZ 摄像机采用 Canon VC-C4,其具有水平摆动角 $\theta_p \in [-100^\circ, 100^\circ]$ 、竖直俯仰角 $\theta_r \in [-30^\circ, 90^\circ]$ 和 16 倍光学变焦能力,焦距变化范围为 4.0 ~ 64.0 mm, PTZ 摄像机通过图像采集卡连接到机器人主机上。主机对机械手和 PTZ 摄像机云台的控制都通过 RS 232 串行口实现。手眼系统的机械手基座和 PTZ 摄像机云台一旦固定,在之后的应用中将保持不变。该新型双目视觉系统与传统双目系统的不同之处在于:后者两摄像机仅相对姿态可调,相对位置(双目基线)固定;而本系统中两摄像机构成基线可变的双目配置,机器人主机通过独立控制装有摄像机的机械手和 PTZ 云台运动,可同时实现双目之间相对姿态和相对位置的调整,

① 863 计划(2006AA04Z212)和自然科学基金(60975062)资助项目。

② 男,1957 年生,教授,博士生导师;研究方向:智能信息处理,智能控制,计算机视觉,机器人学等。

③ 通讯作者, E-mail: peiliangwu@gmail.com

(收稿日期:2008-12-22)

从而具备多方位、多分辨率的灵活观测能力。

一般来讲,服务机器人视觉的主要任务包括监测场景中的目标、实现对目标的空间定位和连续实时跟踪、控制机械手完成诸如目标抓取等动作。为了快速稳定地完成视觉任务,将双摄像机的功能划分如下:采用 PTZ 摄像机小焦距时的宽视角作为全局视觉,手眼系统摄像机作为局部视觉;在搜索目标时,分别控制 PTZ 摄像机和手眼摄像机进行 3D 空间目标搜索;发现目标后,调整双摄像机使目标处于图像中央,同时根据需要通过变焦(zoom)拉近观察,并利用手眼摄像机与 PTZ 摄像机组成的双目系统对空间目标精确定位;在其后的跟踪过程中,不断改变两个摄像机的位姿使被跟踪目标总是处于图像画面的中心位置。



图 1 服务机器人及其新型双目视觉系统

1.2 双目系统中各坐标系描述

本视觉系统包括两个摄像机,即一个 PTZ 摄像机和一个固定安装在机械手末端动平台上的 CMOS 摄像机,此外还有机械手系统和 PTZ 云台,因此该双目系统中主要涉及到以下几个坐标系:机械手基座坐标系 C_{am} 、机械手末端夹持器坐标系 C_{hand} 、机械手末端摄像机坐标系 C_{h_cam} 、PTZ 摄像机坐标系 C_{p_cam} 及其云台坐标系 C_{PTZ} ,各坐标系及其转换关系如图 2 所示,其中 (R_a, t_a) 表示坐标系 C_{hand} 和 C_{am} 之间的关系,其值可由机械手控制器直接读出; (R_b, t_b) 表示坐标系 C_{am} 与 C_{PTZ} 之间关系; (R_c, t_c) 即双目结构参数矩阵,表示两个摄像机坐标系 C_{h_cam} 与 C_{p_cam} 之间关系; (R_1, t_1) 和 (R_2, t_2) 又称为手眼关系矩阵,分别表示坐标系 C_{h_cam} 与 C_{hand} 以及 C_{p_cam} 与 C_{PTZ} 之间的转换关系。

手眼关系 (R_1, t_1) 和 (R_2, t_2) 分别采用不同的

方法得到,对于比较成熟的商用一体 PTZ 摄像机满足以下两个假设:(1)旋转中心和光心重合;(2)Pan 和 Tilt 的旋转轴正交。基于此,可得到平移矢量 t_2 和旋转矩阵 R_2 :

$$t_2 = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (1)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_p & 0 & \sin\theta_p \\ -\sin\theta_p\sin\theta_T & \cos\theta_T & \cos\theta_p\sin\theta_T \\ -\sin\theta_p\cos\theta_p & -\sin\theta_T & \cos\theta_p\cos\theta_T \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, θ_p 和 θ_T 分别为 PTZ 摄像机摆动(pan)和俯仰(tilt)的角度,其值可由控制器直接读出。对于更一般的 PTZ 摄像机,即以上两个假设不成立,文献[7]对这种情况做了较为深入的研究,这里不再详细说明。对于 (R_1, t_1) 的计算,文献[10]提出了一种利用虚设旋转变换将摄像机旋转转化为平移的摄像机标定方法,标定过程只需控制机械手进行两次平移运动和一次旋转运动,且只需场景中两个特征点,具体方法参见该文献,在此不作赘述。

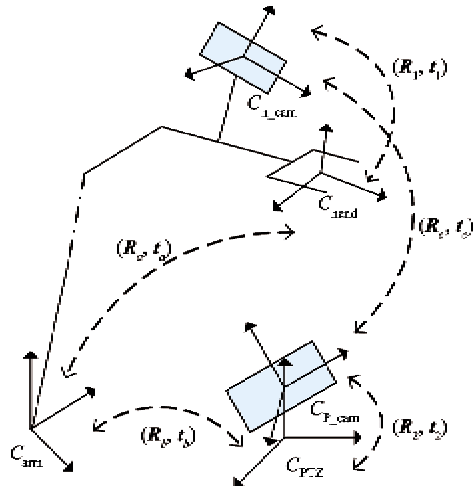


图 2 双目系统中各坐标系及其转换关系

另外,为各坐标系建立一个公共的世界坐标系可以大大简化各坐标系之间的转换关系,使坐标转换变得明朗。这里假设世界坐标系与 C_{am} 重合,从而将各坐标系统一到公共的坐标系 C_{am} 中,以便于模型的简化和各坐标系之间转换,这在图 2 中也可直观地观察到。

1.3 双目结构参数在线计算

双目视觉系统模型参数的标定是其能否成功完成预定任务的关键,主要包括摄像机内部参数标定以及双摄像机之间的结构参数标定。本系统中,摄像机内部参数不随双目之间的结构而改变,可以离线标定,并且对于摄像机内部参数标定的研究已经较为成熟^[1,6-8],在此不作赘述。双目之间的结构参

数不仅受到双目安装位姿的影响,而且根据任务的需要而实时改变。本文假定摄像机内参数已知,下面重点讨论双目配置下的结构参数标定。

由于手眼摄像机随机械手运动,同时 PTZ 摄像机也可能改变自身姿态,故手眼摄像机坐标系 C_{h_cam} 与 PTZ 摄像机坐标系 C_{p_cam} 之间的位姿关系 (R_c, t_c) (即双目结构参数)是变化量,确定 C_{h_cam} 与 C_{p_cam} 之间的结构参数的过程被称为双目结构参数标定。实际上,直接从实时图像中计算摄像机的位姿信息比较困难,需要花费大量的计算资源,而且要求双摄像机图像中存在多组特征对应点^[11,12]。

对于 PTZ 摄像机和手眼摄像机共同视场中的空间目标点 Q , 其世界坐标系即 C_{am} 下的齐次坐标为 $Q = [x \ y \ z \ 1]^T$, 假设 Q 在 C_{hand} 和 C_{PTZ} 坐标系下的齐次坐标分别为 Q_h 和 Q_p , 则有下式:

$$\begin{cases} Q_h = \begin{bmatrix} R_a & t_a \\ O^T & 1 \end{bmatrix} Q \\ Q_p = \begin{bmatrix} R_b & t_b \\ O^T & 1 \end{bmatrix} Q \end{cases} \quad (3)$$

其中 O 为 3×1 的零向量。又通过 (R_1, t_1) 和 (R_2, t_2) , 得到 Q 点在两摄像机坐标系 C_{h_cam} 与 C_{p_cam} 下的齐次坐标为 $Q_{h,c}$ 和 $Q_{p,c}$, 有

$$\begin{cases} Q_{h,c} = \begin{bmatrix} R_1 & t_1 \\ O^T & 1 \end{bmatrix} Q_h = \begin{bmatrix} R_1 & t_1 \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_a & t_a \\ O^T & 1 \end{bmatrix} Q \\ Q_{p,c} = \begin{bmatrix} R_2 & t_2 \\ O^T & 1 \end{bmatrix} Q_p = \begin{bmatrix} R_2 & t_2 \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_b & t_b \\ O^T & 1 \end{bmatrix} Q \end{cases} \quad (4)$$

由上式可得空间点 Q 在两摄像机坐标系之间的转换关系

$$Q_{p,c} = \begin{bmatrix} R_2 & t_2 \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_b & t_b \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_a & t_a \\ O^T & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_1 & t_1 \\ O^T & 1 \end{bmatrix}^{-1} Q_{h,c} \quad (5)$$

又由前已知 $Q_{p,c} = \begin{bmatrix} R_c & t_c \\ O^T & 1 \end{bmatrix} Q_{h,c}$, 故可知 (R_c, t_c) 和 (R_b, t_b) 之间存在如下转换关系:

$$\begin{cases} R_c = R_2 R_b R_a^{-1} R_1^{-1} \\ t_c = -R_2 R_b R_a^{-1} R_1^{-1} t_1 - R_2 R_b R_a^{-1} t_a + R_2 t_b + t_2 \end{cases} \quad (6)$$

其中, R_1, R_2, t_1, t_2 均为已知, 因此实时标定双目结构参数的关键在于得到 C_{am} 和 C_{PTZ} 之间的转换关系 (R_b, t_b) 。如前所述, PTZ 摄像机的云台与手眼系统的机械手基座固定之后, 坐标系 C_{am} 和 C_{PTZ} 之间的转换关系将保持不变, 即 (R_b, t_b) 为一常数矩阵,

故可对其离线标定, 基本思路是通过双目图像之间的极线几何约束和本质矩阵分解得到双摄像机坐标系之间的转换关系 (R_c, t_c) , 再通过式(6)解出 (R_b, t_b) 。下面详细介绍 (R_b, t_b) 的标定过程, 为了简化计算, 这里只考虑摄像机的线性模型, 即小孔成像模型, 而不考虑透镜引起的畸变。

1.4 离线标定 (R_b, t_b)

双摄像机分别拍摄的两幅图像之间存在唯一的几何约束——极几何约束。极几何约束表明空间同一目标点在两视图中所成像点之间存在一定的几何关系, 将该关系转换为图像中目标点的位置关系, 则可用基础矩阵 F 来表征。设 q_1, q_2 是空间同一点 Q 在两个图像上的投影像点, 称 q_1 和 q_2 互为对应点, 其与基础矩阵 F 的关系如下^[13]:

$$q_2^T F q_1 = 0, F = K_2^{-T} [t_c]_{\times} R_c K_1^{-1} \quad (7)$$

其中, q_1, q_2 分别为对应像点的齐次坐标; K_1, K_2 分别为拍摄两幅图像的两摄像机内参数矩阵; 旋转矩阵 R_c 和平移矢量 t_c 描述了两摄像机之间的相对姿态和相对位置, 即双目结构参数; $[t_c]_{\times}$ 为向量 $t_c = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 的反对称矩阵:

$$[t_c]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(7)可知, 基础矩阵 F 包含了两个摄像机的基本内外参数信息。由于两摄像机的内参数 K_1, K_2 已知, 计算两摄像机之间的本质矩阵的公式为

$$E = K_2^T F K_1 = [t_c]_{\times} R_c \quad (9)$$

由式(9)可知, 本质矩阵 E 包含了 R_c 和 t_c 的基本信息。由于基础矩阵 F 和本质矩阵 E 的获取具有非常重要的意义, 故学者们对此做了大量工作^[11,14]。本文采用 Hartley 提出的归一化 8 点算法^[11]求解基础矩阵 F , 进而由式(9)得到本质矩阵 E , 对 E 进行奇异值分解(SVD)即可求得旋转矩阵 R_c 和比例意义上的平移矢量 t'_c ^[15]。

在假定 $\|t'_c\| = 1$ 的情况下, 设比例系数为 β , 使得 $t_c = \beta t'_c$, 必须得到 β 才能最终确定平移矢量 t_c 。对于 PTZ 摄像机和手眼摄像机内参数矩阵分别为 K_1, K_2 的双目系统, 其在比例意义上的结构参数为 (R_c, t'_c) 。假设空间特征点 Q 在摄像机坐标系 C_{p_cam} 中的齐次坐标为 $Q'_1 = [x'_1 \ y'_1 \ z'_1 \ 1]^T$, 在 C_{p_cam} 与 C_{h_cam} 两摄像机像平面坐标系下的齐次坐标分别为 $q'_1 = [u'_1 \ v'_1 \ 1]^T$ 和 $q'_2 = [u'_2 \ v'_2 \ 1]^T$ 。这里以摄像机坐标系 C_{p_cam} 为基准

坐标系,由摄像机成像模型有

$$\begin{cases} \lambda'_1 \mathbf{q}'_1 = [\mathbf{K}_1 & \mathbf{O}] \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{O} \\ \mathbf{O}^T & 1 \end{bmatrix} \mathbf{Q}'_1 \\ \lambda'_2 \mathbf{q}'_2 = [\mathbf{K}_2 & \mathbf{O}] \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c & \mathbf{t}'_c \\ \mathbf{O}^T & 1 \end{bmatrix} \mathbf{Q}'_1 \end{cases} \quad (10)$$

其中, λ'_1 和 λ'_2 为深度因子, $\mathbf{I}_3$ 为 3×3 的单位矩阵。联立上面两式消去 λ'_1 、 λ'_2 , 得到 Q 点在摄像机坐标系 C_{P_cam} 的坐标 $\mathbf{Q}'_1$ 。同理可得另一空间点 P 在坐标系 C_{P_cam} 下的坐标 $\mathbf{P}'_1$, 则 Q 、 P 两点在比例意义上的距离 $d' = |\mathbf{Q}'_1 \mathbf{P}'_1|$, 易知 d' 值只取决于 Q 、 P 的空间距离而不随参照坐标系改变而变化。

由摄像机成像模型可知,两个特征点之间的距离 d 、比例意义上的距离 d' 、平移矢量 $\mathbf{t}_c$ 和比例意义上的平移矢量 $\mathbf{t}'_c$ 之间存在如下关系:

$$\begin{cases} d = \beta d' \\ \mathbf{t}_c = \beta \mathbf{t}'_c \end{cases} \Rightarrow \beta = \frac{d}{d'} = \frac{\mathbf{t}_c}{\mathbf{t}'_c} \Rightarrow \mathbf{t}_c = \frac{d}{d'} \mathbf{t}'_c \quad (11)$$

可见,精确获取空间特征点之间的实际距离 d , 成为精确计算比例因子 β 并进而恢复 $\mathbf{t}_c$ 的关键。利用本文双目视觉系统多方位灵活观测的优势,在不需已知结构标定物的情况下,通过控制手眼摄像机一次运动即可实现空间点实际距离 d 的测量。

1.5 手眼系统一次平移确定 d

这里讨论的对象是由机械手和安装在机械手末端平台的摄像机构成的手眼系统,且机械手末端平台的运动被控制得精确。在手眼系统中,摄像机平移是经常需要和比较容易实现的一种运动。假设手眼摄像机的内参数矩阵 $\mathbf{K}_2$ 、手眼关系的旋转矩阵 $\mathbf{R}_1$ 和平移矢量 $\mathbf{t}_1$ 均已完成标定,只需控制手眼系统进行一次平移运动,即可恢复出两个空间特征点之间的实际深度 d 。

控制机械手末端夹持器从甲处平行移动到乙处,其相对于平移前的机械手末端夹持器坐标系的平移向量记为 $\mathbf{a} = [x_a \ y_a \ z_a]^T$, 不难证明,机械手末端夹持器作平移运动的同时,摄像机也进行平移运动,且其相对于平移前摄像机坐标系下的平移矢量则为 $\mathbf{b} = [x_b \ y_b \ z_b]^T = \mathbf{R}_1 \mathbf{a}$ (如图 3 所示)。假设空间中特征点 Q 在平移前摄像机坐标系中的齐次坐标为 $\mathbf{Q}_1 = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ 1]^T$, 摄像机平移前后 Q 在像平面坐标系下的齐次坐标分别为 $\mathbf{q}_1 = [u_1 \ v_1 \ 1]^T$ 和 $\mathbf{q}_2 = [u_2 \ v_2 \ 1]^T$ 。这里以平移前的摄像机坐标系为基准坐标系,由摄像机的成像模型有

$$\begin{cases} \lambda_1 \mathbf{q}_1 = [\mathbf{K}_2 & \mathbf{O}] \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{O} \\ \mathbf{O}^T & 1 \end{bmatrix} \mathbf{Q}_1 \\ \lambda_2 \mathbf{q}_2 = [\mathbf{K}_2 & \mathbf{O}] \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{b} \\ \mathbf{O}^T & 1 \end{bmatrix} \mathbf{Q}_1 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)的解法与式(10)相同,联立上面两式并消去深度因子 λ_1 、 λ_2 , 得到 Q 点在平移前摄像机坐标系的齐次坐标 $\mathbf{Q}_1$ 。采用同样方法可得空间特征点 P 在平移前摄像机坐标系的齐次坐标 $\mathbf{P}_1$, 则 Q 、 P 两点之间的实际距离 $d = |\mathbf{Q}_1 \mathbf{P}_1|$, 且 d 值只取决于 Q 、 P 的空间距离而不随参照坐标系的改变而改变。由上可知,空间中目标点 Q 、 P 之间的实际距离 d 已通过手眼摄像机的一次平移得到,由式(11)即可得到 $\mathbf{t}_c$ 。至此,双目结构的旋转矩阵 $\mathbf{R}_c$ 、平移矢量 $\mathbf{t}_c$ 均已获得。

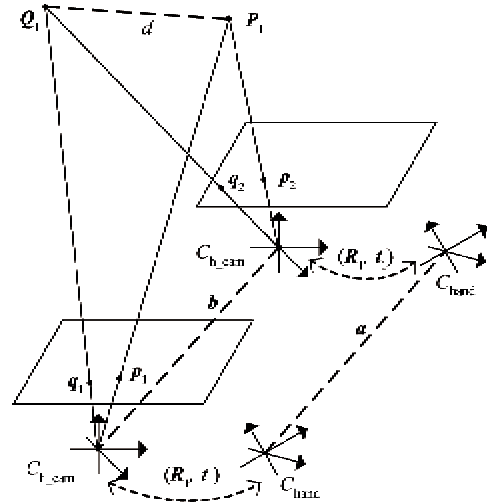


图 3 手眼系统一次平移确定两点距离

综上,双目结构参数的标定可通过下面离线和在线两个步骤完成。

A) C_{cam} 和 C_{PTZ} 的关系矩阵 $(\mathbf{R}_b, \mathbf{t}_b)$ 的离线标定

1) 选取双目图像中有明显特征的点,本文采用尺度不变特征变换(SIFT)算法^[16]选取至少 8 个特征点对。

2) 采用归一化 8 点算法求解基础矩阵 $\mathbf{F}$, 通过式(9)计算本质矩阵 $\mathbf{E}$ 并对其 SVD 分解,得到 C_{h_cam} 和 C_{p_cam} 之间的旋转矩阵 $\mathbf{R}_c$ 和比例意义上的平移矢量 $\mathbf{t}'_c$, 计算空间任意两特征点 P 、 Q 在该比例意义下的距离 d' 。

3) 控制机械手平台带动摄像机进行一次平移 $\mathbf{b}$, 恢复空间特征点 P 、 Q 的实际距离 d , 进而求出比例因子 β , 由式(11)得到 C_{h_cam} 和 C_{p_cam} 之间的平移矢量 $\mathbf{t}_c$ 。

4)由 (R_1, t_1) 、 (R_2, t_2) 和 (R_c, t_c) ,根据坐标转换关系式(6)解得 (R_b, t_b) 。

B)双目结构参数 (R_c, t_c) 的在线计算

1)从机械手控制器实时获取机械手末端的位姿参数 (R_a, t_a) ,结合手眼关系矩阵 (R_1, t_1) ,计算 C_{h_cam} 到 C_{arm} 的转换关系。

2)从PTZ云台控制器实时获取位姿参数并通过式(1)、(2)得到 (R_2, t_2) ,结合离线标定获得的 (R_b, t_b) ,计算 C_{p_cam} 到 C_{arm} 的转换关系。

3)在统一的世界坐标系 C_{arm} 下,由式(6)得到双目结构参数 (R_c, t_c) 。

2 仿真分析

为了验证本文方法的性能,设计了如下仿真实验。实验环境如下:虚拟PTZ摄像机内参数 $f_{Pu} = f_{Pv} = 800$, $u_{P0} = v_{P0} = 500$,获取图像大小为 1024×1024 像素;虚拟手眼摄像机内参数 $f_{hu} = f_{hv} = 500$, $u_{h0} = v_{h0} = 255$,获取图像大小为 512×512 像素。在世界坐标系中随机生成8个空间点并分别在两摄像机坐标系下成像,采用归一化8点算法获取基础矩阵 F 和本质矩阵 E ,SVD分解 E 得到旋转矩阵 R_c 和比例意义上的平移矢量 t'_c 。为了求解比例因子 β ,随机选择两个空间点 P 、 Q ,首先计算其在比例意义下的距离 d' ,然后控制手眼摄像机进行一次平移运动 b 并计算 P 、 Q 的实际距离 d ,则有 $\beta =$

$d/d', t_c = \beta t'_c$ 。至此得到了双目结构参数 (R_c, t_c) 。

采用两种方法验证上面所求结构参数标定的精度。方法一:基于系统中坐标之间的转换关系的验证方法,按照式(6),由上面计算的 (R_c, t_c) 恢复 C_{arm} 和 C_{PTZ} 的关系矩阵 (R_b, t_b) 并与其真实值进行比较。方法二:基于双目空间点定位精度的验证方法,从随机生成的空间点中任取一个,根据双摄像机的内参数和结构参数,采用与式(10)和式(12)相同的三角测量方法计算该空间点坐标并与真实值进行比较。在不存在噪声干扰的理想情况下本文方法可精确标定双目结构参数 (R_c, t_c) 以及 (R_b, t_b) ,并恢复空间目标的三维信息,两种验证方法的相关数据如表1所示。

在实际中由于图像噪声、机械手控制误差等干扰因素的存在,会对结构参数的标定产生影响,并进而影响到目标定位的精度。下面分别讨论在不同等级的图像噪声和手眼系统平移运动噪声干扰下,本文参数标定和目标三维恢复算法的精度,为此我们选择均值和均方根误差(RMSE)作为衡量算法精度的评价指标。假定对应于真实值 x 的 K 个观测值 $[x_1, x_2, \dots, x_K]$,均值 $\bar{x}$ 和均方根误差 $RMSE(x)$ 的定义如下:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^K x_i / K;$$

$$RMSE(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^K (x_i - \bar{x})^2 / K}。$$

表1 理想情况下的两种验证方法所用数据

$[R_c, t_c]$				b	β	方法一 $[R_b, t_b]$			方法二 Q 点坐标	
0.994	-0.114	0.002	1218.853	120.000		0.631	-0.715	0.301	1216.270	-159.292
0.113	0.987	-0.117	1262.567	120.000	2206.598	0.737	0.673	0.055	1294.777	191.962
0.012	0.116	0.993	1339.281	130.000		-0.242	0.187	0.952	1403.648	2346.616

2.1 图像匹配噪声对结构参数标定和目标定位的影响

检验图像匹配噪声对本文结构参数标定算法和空间特征点三维定位精度的影响。在计算双摄像机之间基础矩阵,以及获取双目结构参数用以计算空间点三维坐标时,同时在双目图像特征匹配点的 x 、 y 坐标中分别加入均值 $\mu = 0$ 、标准差 σ 从0到2变化的高斯噪声(噪声单位为pixel),在每一随机噪声水平下,运行本算法100次,计算结构参数和空间目标点 Q 的三维坐标的平均值,表2给出了不同噪声下 t_c 、 t_b 、 β 和 Q 点坐标的均值。

为了进一步分析,图4绘出了在不同噪声水平

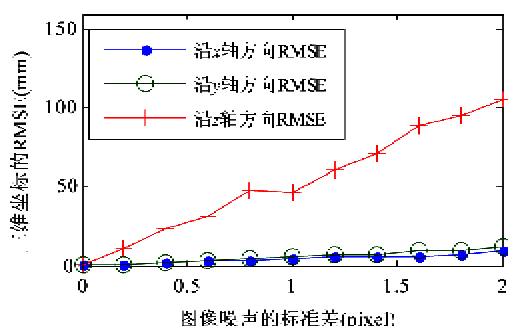


图4 Q 点三维恢复RMSE与图像特征匹配噪声的关系曲线

下恢复得到的 Q 点三维坐标的均方根误差 RMSE, 可以直观地看出, Q 点坐标在 x 、 y 、 z 三个方向上的 RMSE 与图像特征点匹配噪声水平都近似呈线性变化, 且噪声标准差取最大值 2 时, 目标点在 x 、 y 、 z

三个方向上的 RMSE 分别为 9.486、9.702 和 105.519, 与实际坐标的相对误差分别为 5.955%、5.054% 和 4.500%, 表明本算法可在较大图像匹配噪声干扰下保持稳定。

表 2 图像噪声对结构参数标定和目标定位的影响

噪声水平(pixel)	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
$\bar{t}_c$	1217.685	1215.566	1217.129	1214.900	1220.353
	1261.357	1259.163	1260.782	1258.469	1264.121
	1337.997	1335.669	1337.386	1334.934	1340.929
$\bar{t}_b$	1215.110	1212.996	1214.565	1212.260	1217.728
	1293.585	1291.423	1293.037	1290.661	1296.248
	1402.360	1400.015	1401.734	1399.308	1405.335
Q 点坐标	-159.169	-158.759	-158.762	-158.691	-159.194
	191.732	191.649	192.299	192.097	192.343
	2345.808	2345.226	2345.719	2336.154	2354.695
β	2205.451	2201.614	2204.444	2200.402	2210.284

2.2 机械手平移误差对结构参数标定和目标定位的影响

检验机械手平移误差对本文结构参数标定和空间特征点三维定位精度的影响。在通过手眼系统一次平移确定两空间点实际距离时, 同时在机械手平移向量 b 的三个分量中分别加入均值 $\mu = 0$ 、标准差 σ 从 0 到 2 变化的高斯噪声(噪声单位为 mm), 在每一随机噪声水平下, 运行本算法 100 次, 计算结构参数和空间目标点 Q 的三维坐标的平均值, 并与表 1 中的真实值进行比较, 表 3 给出了不同噪声下 $\bar{t}_c$ 、 $\bar{t}_b$ 、 β 和 Q 点坐标的均值。为了进一步分析, 图 5 绘出了在不同噪声水平下恢复得到的 Q 点三维坐标的均方根误差 RMSE, 可以直观地看出, Q 点坐标在

x 、 y 、 z 三个方向上的 RMSE 与机械运动噪声水平都近似呈线性变化, 且噪声标准差取最大值 2 时, 目标点在 x 、 y 、 z 三个方向上的 RMSE 分别为 3.303、3.981 和 48.680, 与实际坐标的相对误差分别为 2.073%、2.074% 和 1.989%, 表明本算法可在较大的机械运动误差干扰下保持稳定。

在本文的二步标定方法中, 由于 (R_b, t_b) 和比例因子 β 经由离线标定, 因此通过设置多于 8 个特征点对并控制手眼系统进行多次平移观测, 将冗余观测数据利用最小二乘法平差, 可使获得的 (R_b, t_b) 和 β 逼近理想值。在上面实验中离线标定环节只选取了 8 组对应点用以计算, 且在求解 β 时也只通过手眼系统的一次平移获取数据, 虽然如此, 上述实验结果已能反映出本文方法的有效性。

表 3 机械手平移误差对结构参数标定和目标定位的影响

噪声水平(mm)	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
$\bar{t}_c$	1218.855	1219.179	1220.916	1218.954	1220.608
	1262.570	1262.905	1264.704	1262.672	1264.385
	1339.283	1339.639	1341.548	1339.392	1341.209
$\bar{t}_b$	1216.272	1216.595	1218.332	1216.370	1218.024
	1294.782	1295.085	1296.917	1294.884	1296.598
	1403.654	1404.009	1405.918	1403.762	1405.579
Q 点坐标	-159.300	-159.342	-159.569	-159.313	-159.529
	191.971	192.022	192.296	191.987	192.247
	2346.962	2347.585	2350.930	2347.152	2350.337
β	2207.571	2208.157	2211.303	2207.750	2210.745

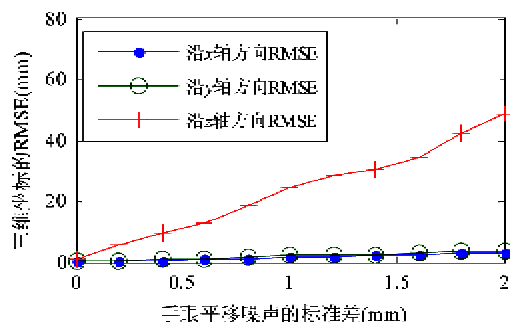


图5 Q 点三维恢复 RMSE 与手眼系统平移噪声的关系曲线

3 结论

家庭服务机器人是机器人研究领域新近发展的一个重要分支,论文为服务机器人设计了一种由一个 PTZ 摄像机和一个手眼系统组成的变基线双目视觉系统,并研究了基于该视觉系统的双目结构参数自标定方法,将大部分繁琐的坐标系关系标定环节转移到离线进行。仿真结果表明,该系统对图像特征点匹配噪声和机械手机械运动误差具有一定的鲁棒性。

本文方法中双目结构参数标定和目标点三维恢复的精度依赖于 PTZ 云台摄像机和手眼系统所提供的姿态参数,虽然离线阶段的重复标定可有效减小姿态参数误差导致的机械手基座坐标系与 PTZ 摄像机云台坐标系的相对关系(R_b, t_b)的计算误差,但在线阶段姿态参数误差所产生的影响仍然存在。因此,充分发挥双目视觉的实时反馈作用,研究图像特征点匹配约束下的在线结构参数计算误差和目标点三维恢复误差的矫正算法,是本文下一步的研究方向。

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. 北京: 科学出版社, 1997.52-71

- [2] Horaud R, Dornaik F. Hand-eye calibration. *The International Journal of Robotics Research*, 1995, 14 (3):195-210
- [3] Bertozzi M, Broggi A, Fascioli A. Vision-based intelligent vehicles: state of the art and perspective. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 32(1):1-16
- [4] Remagnino P, Shihab A I, Jones G A. Distributed intelligence for multi-camera visual surveillance. *Pattern Recognition*, 2004, 37(4):675-689
- [5] Wan D R, Zhou J. Stereo vision using two PTZ cameras. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 112(2): 184-194
- [6] Li M X, Lavest J M. Some aspects of zoom lens camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(11):1105-1110
- [7] Hayman E, Murray D W. The effects of translational misalignment when self-calibrating rotating and zooming cameras. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(8):1015-1020
- [8] Sudipta N S, Marc P. Pan-tilt-zoom camera calibration and high-resolution mosaic generation. *Computer Vision and Image Understanding*, 2006, 103(3):170-183
- [9] 杨广林, 孔令富, 赵逢达. 双摄像机系统对移动目标的跟踪. *机器人*, 2007, 29(2):133-139
- [10] 杨广林, 孔令富, 王洁. 一种新的机器人手眼关系标定方法. *机器人*, 2006, 28(4):400-405
- [11] Hartley R I. In defense of the eight-point algorithm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19(6):580-593
- [12] WU F C, Hu Z Y. 5-point and 4-point algorithm to determine of the fundamental matrix. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29 (2):175-180
- [13] Luong Q T, Olivier D F. The fundamental matrix: Theory, algorithms and stability analysis. *International Journal of Computer Vision*, 1996, 17:43-75
- [14] Stewenius H, Christopher E, David N. Recent developments on direct relative orientation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006 (60):284-294
- [15] Hartley R I. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras. In: *Proceedings of the 2nd European Conference on Computer Vision*, Genova, Italy, 1992.579-587
- [16] Lowe D G. Distinctive image features from scale invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110

Study of a novel binocular vision system for service robots and its structure parameter calibration

Kong Lingfu, Wu Peiliang, Zhao Fengda

(College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

A novel binocular vision system was established to meet the demands of vision tasks of service robots. In this vision system a Pan/Tilt/Zoom (PTZ) camera and a hand-eye system were integrated to construct a baseline-variable configuration and to obtain larger vision space and better flexibility. The method for real time self-calibration of the binocular structure parameters crucial to object location under this novel binocular configuration was studied. Then a two-step offline/online algorithm was proposed to calibrate the most part of fussy coordinate transformation at the offline stage. The simulation experiments showed that the proposed method could effectively reduce the number of matching points essential to online calculation, and the binocular vision system was robust enough to resist image noise and mechanical movement noise.

Key words: service robot, binocular vision, variable baseline, structure parameters, two-step calibration