

移动双臂机械手系统协调操作的视觉伺服技术

杨唐文^{1,2†}, 高立宁¹, 阮秋琦¹, 韩建达²

(1. 北京交通大学 信息科学研究所, 北京 100044; 2. 中科院沈阳自动化所 机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 本文利用双目泛倾斜变焦摄像机(pan-tilt-zoom, PTZ)像机, 实现移动双臂机械手系统的视觉伺服协调操作, 重点研究室内复杂环境和光照变化情况下目标物体的检测、识别和定位问题. 首先, 提出了色调、饱和度、亮度颜色模型(hue-saturation-value, HSV)空间下图像分割的改进算法, 通过阈值更新和外接矩形改善分割结果, 提高检测算法对环境光照变化的适应性; 然后, 基于Hu不变矩, 利用物体形状特征, 对检测得到的物体加以识别; 在此基础上, 利用摄像机投影矩阵, 计算目标物体的空间坐标, 实现其定位测量; 最后, 在实验室平台上, 通过模拟双臂倒水操作, 验证提出的图像处理和分析算法以及视觉伺服协调操作方案的有效性. 实验结果表明移动双臂机械手系统能够成功完成倒水动作的协调操作.

关键词: 移动双臂机械手系统; 视觉伺服; 协调操作; HSV空间; 不变矩

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Visual servo technology for coordinated manipulation of a mobile dual-arm manipulator system

YANG Tang-wen^{1,2†}, GAO Li-ning¹, RUAN Qiu-qi¹, HAN Jian-da²

(1. Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, CAS, Shenyang Liaoning 110016, China)

Abstract: Two pan-tilt-zoom (PTZ) cameras are used in this study to realize visual servo for coordinated manipulation of a mobile dual-arm manipulator system. The focus of this study is mainly on the problems of target object detection, recognition and localization in the indoor environment of scattered background and varying illumination. First, a modified algorithm is proposed to detect objects in the hue-saturation-value (HSV) color space based on updated segmentation thresholds and bounding rectangles, which improves the detection algorithm's adaptability to illumination variation. Second, the target is identified from the detected objects using the target contour features and the Hu's moment invariants. Then, the spatial coordinates of the target object are computed with the cameras' perspective matrices, and the target position is consequently determined. Finally, to verify effectiveness of the image processing and analysis algorithms presented and the visual servo technology, experiments are done on a mobile platform in our lab to mimic the manipulation of pouring water with two arms, and the results show that the mobile manipulator system can complete the task successfully.

Key words: mobile dual-arm manipulator system; visual servo; coordinated manipulation; HSV space; invariant moment

1 引言(Introduction)

基于未知环境探索及物体夹持操作的需要, 如星空探测、核工业、扫雷排爆和家庭服务等, 移动机械手系统在近些年受到了广泛关注. 整体上, 它由机械手和移动基座构成, 因而兼具了可移动性和可操作性的特点. 移动基座将机械手带到作业区域附近, 然后通过机械手完成物体抓取、搬运、检测等操作任务. 对于高度灵巧性或者重载、大结构物体的操作, 双臂移动机械手系统是更理想的选择. 它具有更好的灵活性,

能够协调完成更复杂的精密操作, 更能适应不同的作业任务. 但是, 目前移动双臂机械手的研究比较少, 连美国最先进的火星探测器“Curiosity”都是单臂移动机器人^[1].

据统计, 人类获取的信息70%以上来自于视觉感官, 利用自身发达的视觉系统, 人类可以很轻松地获取不同场景中的三维信息, 解释物体形状、透明度、颜色、纹理和粗糙度等属性及甚至微小细节的变化, 快速地将物体从背景中分割出来, 并粗略定位. 对机器

收稿日期: 2014-05-28; 录用日期: 2014-08-28.

†通信作者. E-mail: twyang@bjtu.edu.cn; Tel.: +86 10-51684902.

国家自然科学基金项目(61375109, 61273356), 机器人学国家重点实验室开放基金项目(2013-O12)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61375109, 61273356), State Key Laboratory of Robotics (2013-O12).

人来说,视觉是其感知系统中必不可少的部分,在机器人移动导航和物体灵巧操作中的作用也是毋庸置疑的.视觉使机器人系统具有更强的环境和任务适应能力^[2-4].但是,从图像信息提取到环境理解,对当今的机器人而言,还是一个极具挑战性的任务.其中的原因是多方面的,一方面,人类对视觉机理的认识存在不足,视觉系统的复杂性使得现有的理论框架还不能严格地用数学方法描述视觉信息;另一方面,图像信息的歧义性使得同一个物体在不同的光照、视角等条件下的成像效果会不同,不同形状的物体在图像平面上亦可能产生相同的形状.此外,图像容易受环境影响,遮挡、光照变化等都是影响视觉应用的因素.

视觉提供丰富的环境信息,将其加入到机器人控制回路中,形成闭环,即构成所谓的视觉伺服控制.对移动机械手系统来说,视觉完成环境物体的识别和目标定位、跟踪,用于系统进行正确的运动决策,实现移动平台的安全导航,并控制机械手完成相应的操作.利用视觉伺服,单臂移动机械手系统可以执行简单的目标抓放和工件装配等任务^[5-6].而拥有双臂的系统则能完成更复杂的工作,例如,PR2叠手帕^[7]、本田ASIMO^[8]和德国宇航中心JUSTIN^[9]倒水动作.目前,视觉的应用多为单目^[5-6]或双目^[7-10]系统.

单目因视觉结构简单而被普遍采用,但是,要想实现目标定位计算,需为映射方程至少建立一个约束.双目视觉则可以直接计算空间任意一点的三维信息,在测量精度和稳定性方面高于单目,因而双目视觉的研究引起更多关注.本文利用双目视觉系统,研究移动双臂机械手系统的视觉伺服协调操作问题.

2 移动双臂机械手系统(Mobile dual-arm manipulator system)

实验平台是一台拥有双臂的智能移动机器人系统,它采用模块化的设计,具有良好的开放性和可扩展性.整体上,该平台由3部分组成,即移动基座、双臂和双目视觉系统,如图1所示.

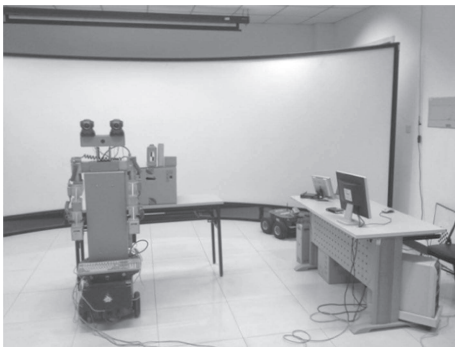


图1 移动双臂机械手系统

Fig. 1 A mobile dual-arm manipulator system

移动基座是两轮驱动的移动机器人,其底层控制系统操作和硬件结构对用户是开放的,可以添加

第3方的功能卡,并提供了网络控制、图像处理、运动目标跟踪、语音识别和声纳测距等开发包.操作系统软件为Windows XP,采用VC++开发工具.移动基座可独立搭载视觉系统、语音采集、声纳测距、云台和机械手等外加设备,其基本结构如图2所示.

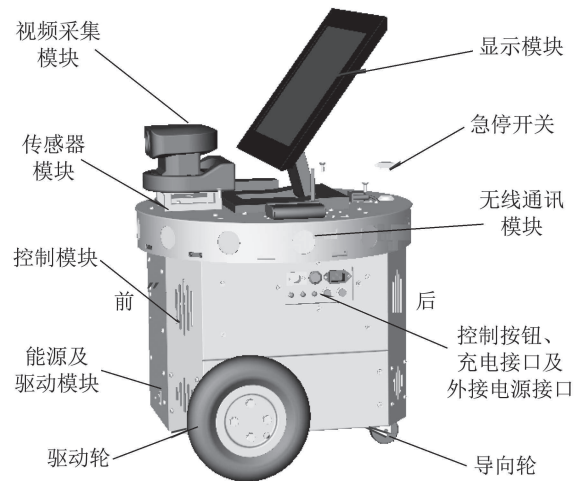


图2 移动基座

Fig. 2 A mobile base

两臂均是模块化关节串联的机械手,且由多个PowerCube模块组成,有独立的数字信号处理(digital signal process, DSP)芯片,既可实现独立的关节运动控制,又可与其它模块进行通信,实现联动.模块之间的通信采用控制器局域网络(controller area network, CAN)总线方式,保证了模块之间数据传输的实时性.通过上位机的开发软件,可以直接调用CAN-API函数,传递模块的运动控制量.这里,机械手有3个自由度,即有肩、肘和腕关节模块,此外,还有一手抓模块,如图3所示.

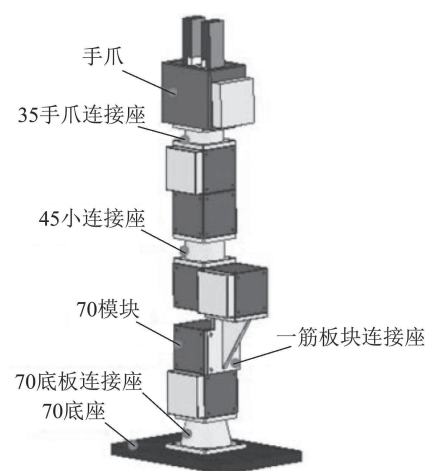


图3 机械手

Fig. 3 An arm

尽管单手的自由度较少,当双臂协调工作时,还是能够完成一些较复杂的动作.机械手的控制由主控计

算机、通信模块及底层控制器完成。根据操作任务和算法的需要, 主机完成运动规划, 实时求解机械手各个关节的运动量, 通过数据传输总线, 发送给底层驱动控制器, 实现关节模块的运动控制。

系统的视觉模块是两个相同的、带有云台的Sony CCD摄像机, 如图4所示。它们通过外设部件互连标准(peripheral component interconnect, PCI)视频卡与主机相连, 采集环境图像。该双目视觉系统安装在移动机械手系统的顶上, 如图1所示。采取这种配置方式, 可以保证摄像机有最大的拍摄视野。同时, 云台的Pan/Tilt运动, 又进一步增加了视觉控制的灵活性, 避免机械手遮挡摄像机的视线。两台摄像机系统的基本参数如下: 分辨率 640×480 像素, 帧率30 Hz, 水平视角 $[6.6^\circ, 65^\circ]$, 云台的Pan角范围 $[-100^\circ, 100^\circ]$, Tilt角范围 $[-25^\circ, 25^\circ]$ 。

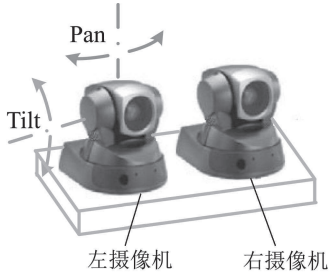


图4 双目视觉系统

Fig. 4 A binocular vision system

3 物体检测、识别与定位(Object detection, recognition and localization)

在复杂背景和变化光照的环境下, 为了保证移动机械手顺利抓取目标物体, 本文利用视觉系统, 实时采集图像, 检测和识别被抓的物体, 并进行目标定位。在此基础上, 实现移动平台导航和机械手运动规划, 完成视觉伺服控制下的物体操作任务。

3.1 物体检测(Object detection)

图像检测旨在将物体从图像的复杂背景中分割出来。在现有的分割技术中, 基于颜色特征的阈值分割技术简单有效, 且实时性好。其中, 利用RGB和HSV信息的分割算法, 更是被广泛采用。相对于HSV, 基于RGB信息的算法能够简便快速地分割目标物体, 但是, 其分割结果受环境光照的影响较大。为此, 这里提出一个改进的基于HSV信息的分割算法实现物体的检测。HSV是一种色彩描述空间, 参数分别为: hue(色调), saturation(饱和度), value(亮度)。尽管它建立在RGB模型之上, 却能更好地反映人类对色彩的感知。像素由RGB转换到HSV空间的经典计算公式如下:

$$V = \max\{R, G, B\}, \quad (1a)$$

$$S = \begin{cases} 0, & V = 0, \\ \frac{V - X}{V}, & V \neq 0, \end{cases} \quad (1b)$$

$$H = \begin{cases} \text{无定义}, & S = 0, \\ (1 + \frac{G - B}{V - X}) \times 60, & S \neq 0 \text{ 且 } V = R, \\ (3 + \frac{B - R}{V - X}) \times 60, & S \neq 0 \text{ 且 } V = G, \\ (5 + \frac{R - G}{V - X}) \times 60, & S \neq 0 \text{ 且 } V = B, \end{cases} \quad (1c)$$

式中: R, G, B 分别为RGB颜色模型中红、绿、蓝分量, 取值范围均在0到255之间, $X = \min\{R, G, B\}$, 转换后的HSV模型中各分量取值范围为 $V \in [0, 255]$, $S \in [0, 1]$, $H \in [0, 360]$ 。

在HSV空间, 各分量取值范围进一步规范化为 V 和 $S \in [0, 1]$, $H \in [0, 360]$, 那么像素 $c_1 = \{h_1, s_1, v_1\}$ 和 $c_2 = \{h_2, s_2, v_2\}$ 的色彩相似度则可定义为

$$S(c_1, c_2) = 1 - \frac{D(c_1, c_2)}{\sqrt{5}}, \quad (2)$$

式中 $D(c_1, c_2)$ 为两像素之间色彩距离, 由下式给出:

$$D(c_1, c_2) = \{(s_1 \cos h_1 - s_2 \cos h_2)^2 + (s_1 \sin h_1 - s_2 \sin h_2)^2 + (v_1 - v_2)^2\}^{1/2}.$$

根据以上定义可知, 当相似度 S 为1时, 表示两种颜色完全相同; S 为0时, 表示两种颜色相似度最低。

本文在HSV空间提出一个改进的分割算法, 检测被抓取的物体, 具体的步骤如下:

第1步 首先统计抓取物体的颜色信息, 获得其颜色初值。若目标大小为 $m \times n$, 由均值统计求得颜色初值为 $C_0 = \{h_t, s_t, v_t\}$, 各颜色分量分别为

$$h_t = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n h_{ij},$$

$$s_t = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n s_{ij},$$

$$v_t = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ij}.$$

第2步 计算图像中每个像素点与初值 C_0 的色彩相似度, 则物体分割可通过下式实现:

$$p_{ij} = \begin{cases} (0 \ 0 \ 0), & S(c_{ij}, C_0) \leq \text{threshold}, \\ (255 \ 255 \ 255), & S(c_{ij}, C_0) > \text{threshold}, \end{cases} \quad (3)$$

其中: p_{ij} 为 c_{ij} 像素点分割后的RGB值, threshold为分割阈值。比阈值大的点归纳为目标点, 其RGB各分量均赋值为255, 其他像素点判定为背景, RGB各分量均赋值为0。分割阈值取值为0.7。

第3步 对分割后判定为抓取目标的像素点, 再进行均值统计, 并且更新目标物体颜色初值

$$C_{\text{new}} = \{h_{\text{new}}, s_{\text{new}}, v_{\text{new}}\},$$

各分量为

$$h_{\text{new}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i, s_{\text{new}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i, v_{\text{new}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i,$$

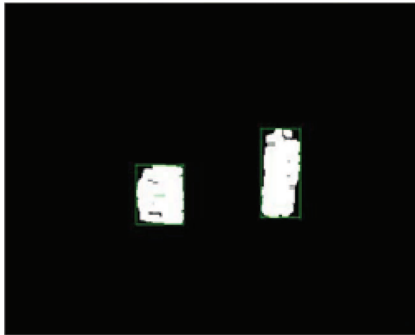
式中 N 为分割得到的目标物体像素的数量。

第4步 提高分割阈值至0.9, 利用新的目标颜色值 C_{new} , 回到第2步, 对图像再次分割。

第5步 从分割的结果提取目标物体轮廓, 由于实验中使用的抓取物体轴向截面形状为矩形, 通过最小外接矩形, 则获得目标轮廓。根据目标形状的长宽比, 可进一步去除伪外接矩形, 排除相似颜色块的干扰, 得到更准确的分割结果。利用自制的物块, 在不同光照条件下, 本文进行了分割实验。图5给出了一组实验结果。图5(a)为摄像机采集的原始图像, 图5(b)为图像分割结果。可以看出, 基于颜色模板, 改进算法可以很快地检测出操作的橙色物体。



(a) 摄像机采集的原始图像



(b) 图像分割结果

图5 物体分割结果

Fig. 5 Object segmentation results

3.2 物体识别(Object recognition)

从前面的检测结果可以发现, 当背景环境中有多個相同或相近颜色的物体, 基于颜色模板分割得到的目标可能不止一个, 因而需要进一步辨识。既然形状是描述物体的一个重要特征, 那么, 通过形状匹配实现物体识别是一条技术上可行的途径。物体形状的矩特征具有稳定和匹配效率高的优点, 因此, 在这里, 通过矩特征计算实现形状匹配, 进而识别被操作的目标物体。

首先, 基于Hu矩概念^[11], 对矩进行定义。设图像

$f(x, y)$ 大小为 $M \times N$, 其 $(p + q)$ 阶中心矩为

$$\mu_{pq} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y), \quad (4)$$

式中: p 和 q 是正整数, (\bar{x}, \bar{y}) 是图像质心。

进一步归一化, 可得

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^\gamma}, \quad (5)$$

式中 $\gamma = 1 + (p + q)/2$ 。

利用中心矩, 则可定义7个不变矩组, 即

$$\begin{cases} \varphi_1 = \eta_{20} + \eta_{02}, \\ \varphi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2, \\ \varphi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} + \eta_{03})^2, \\ \varphi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2, \\ \varphi_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + 3\eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - \\ 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03}) \times \\ [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2], \\ \varphi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + \\ 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}), \\ \varphi_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - \\ 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \\ \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]. \end{cases} \quad (6)$$

现在, 假设目标和待比较轮廓分别为 A 和 B , 利用不变矩组, 定义它们的形状相似性度为

$$I(A, B) = \sum_{i=1}^7 \left| \frac{m_i^A - m_i^B}{m_i^A} \right|, \quad (7)$$

式中:

$$\begin{aligned} m_i^A &= \text{sgn}\{\varphi_i^A\} \cdot \log |\varphi_i^A|, \\ m_i^B &= \text{sgn}\{\varphi_i^B\} \cdot \log |\varphi_i^B|, \end{aligned}$$

其中 φ_i^A 和 φ_i^B 分别为 A 和 B 的Hu矩。

$I(A, B)$ 值反映形状的相似程度。 $I(A, B)$ 为0时, 说明轮廓形状完全相同, 越接近0, 则表示形状相似度越大。

如果 C 为前面检测过程中得到的待匹配物体轮廓的集合, 且已知目标轮廓模板 T , 那么, 在集合中, 与 T 形状相似度 I 值最小的轮廓, 即认为是待识别物体的轮廓 C_{dest} , 它满足下面的条件,

$$I(T, C_{\text{dest}}) \leq I(T, C_{\text{other}}), \quad (8)$$

式中: $C_{\text{dest}}, C_{\text{other}} \in C$ 。

针对图6给出的一组图像分割结果, 本文利用不变矩进行形状匹配, 即物体识别的实验。其中, A 和 B 分别为抓取目标1和2模板, C, D, E, F 为不同视角图像分割得到的目标1的不同形状。由式(7)计算这些分割物体形状的相似度值, 结果如表1所示。由图6和表1可以发现, 目标1的图像分割结果 C, D, E, F 与模板 A 之间的相似度值是最接近的, 而模板 B 则有着明显的差

别, 已经接近一个数量级. 这样, 根据设置的相似度阈值, 可以准确地识别操作物体.

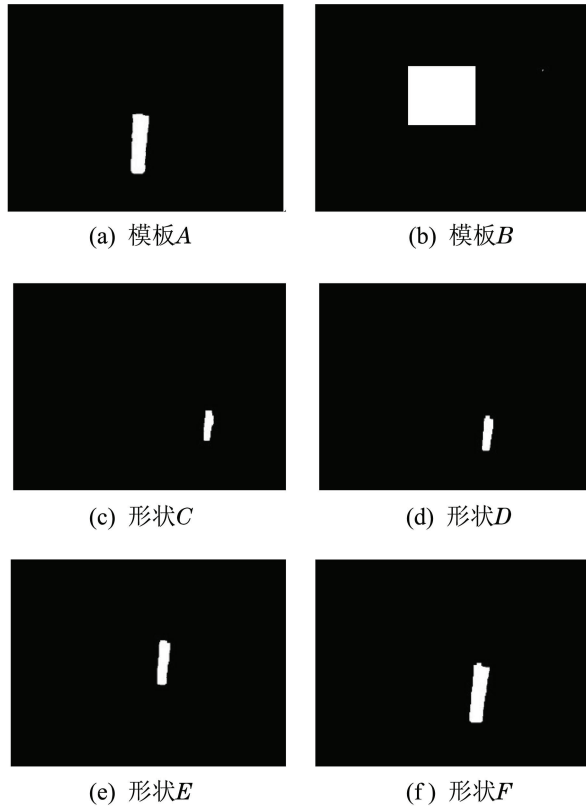


图 6 形状模板及部分图像分割结果
Fig. 6 Contour template and selected object segmentation results

表 1 物体形状相似度

Table 1 The similarity measure of object contours

X	A	B	C	D	E	F
$I(A, X)$	0	0.1114	0.0114	0.0064	0.0070	0.0035

3.3 物体定位(Object localization)

物体定位是通过双目视觉系统实现的, 其定位模型如图7所示. 对于物体上的点 P , 如果知道它在两个摄像机成像平面上的图像点 p_1 和 p_2 , 那么, 利用摄像机的成像投影矩阵, 可以建立关于点 P 坐标的4个线性方程. 求解该方程组, 则可计算点 P 的3个坐标值, 实现物体定位. 所以, 现在的问题转化为如何获得定位目标的图像点和摄像机的投影矩阵. 上面介绍的物体检测和识别方法, 能够精确获得点 P 的图像点. 考虑到物体的形状比较简单, 这里使用其质心点作为图像点, 也就是, 物体轮廓外接矩形中心.

摄像机的投影矩阵包括两部分: 内参数矩阵和外参数矩阵, 可通过摄像机定标获得. 问题是一旦定标完成, 摄像机相对于全球坐标系就只能是相对静止. 移动机械手系统中使用的是泛倾斜变焦摄像机(pan-tilt-zoom, PTZ), 允许摄像头运动. 对固焦摄像机而言, 运动即使不影响内参数矩阵, 但在物体三维定位中十

分重要的外参数矩阵也无法保证不变. 文献[12]利用云台的Pan/Tilt角度及移动平台运动与外参数矩阵关系, 提出了一个PZT摄像机的实时定标方法, 本文亦采纳此法完成操作物体的定位测量.

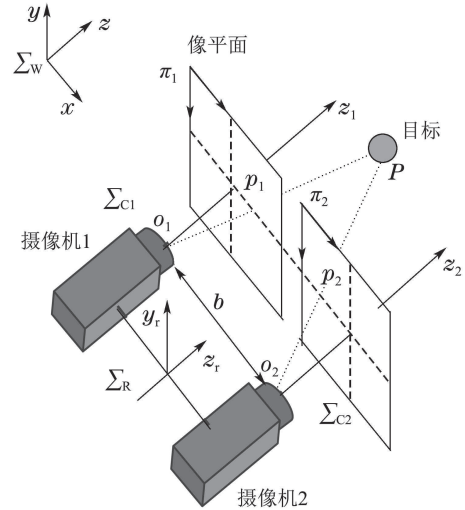


图 7 双目视觉定位模型

Fig. 7 Object localization with binocular cameras

4 实验(Experiments)

为了验证上述的图像处理和分析算法, 本文利用实验室的移动机械手平台, 进行了模拟双臂倒水动作的试验, 即: 一个机械手拿杯, 一个机械手拿壶, 在视觉的帮助下, 系统移动并协调双臂完成倒水操作. 动作成功与否同机械手运动规划有重大关系, 而运动规划需要满足各种约束, 既要确保两臂间不发生磕碰, 在抓取物品和完成倒水动作时又要两臂保持正确的位姿, 等等.

在运动规划设计之前, 需要建立机械手末端手爪与操作物体在同一个坐标系下的位置关系. 尽管在前面的定位测量中已获得物体的3个坐标, 但获取的是固定在移动双臂机械手系统上的参考坐标系下的位置信息. 为了便于机械手运动规划和关节运动量求解, 这些位置坐标需要统一到机械手坐标系下. 如图7所示, 建立系统的参考坐标系 Σ_w 和机械手坐标系 Σ_r , 如果机械手坐标系到参考坐标系的奇次转换矩阵 T 已知, 那么, 通过下式可以得到物体在机械手坐标系下的坐标:

$$[X_M \ Y_M \ Z_M \ 1]^T = T^{-1}[X_W \ Y_W \ Z_W \ 1]^T, \quad (9)$$

式中: $[X_M \ Y_M \ Z_M \ 1]^T$ 和 $[X_W \ Y_W \ Z_W \ 1]^T$ 分别是目标物体在机械手坐标系和参考坐标系下的位置矢量, $[\]^T$ 表示向量转置.

整个物体操作任务的工作流程如图8所示, 主要包括物体检测、识别和定位、移动平台导航、物体抓取及双臂协调倒水. 两臂协调倒水实验过程中, 双目视觉系统对抓取目标进行实时定位, 通过逆运动学获得机械臂关节运动量, 形成视觉反馈控制. 这里进行倒

水动作试验时, 双臂只是通过运动规划协调完成设定的位姿. 图9给出了双臂移动机械手系统成功完成倒水动作过程中几个重要阶段的帧图. 需要说明的是, 截图中的自制道具分别用来替代水杯和水壶.

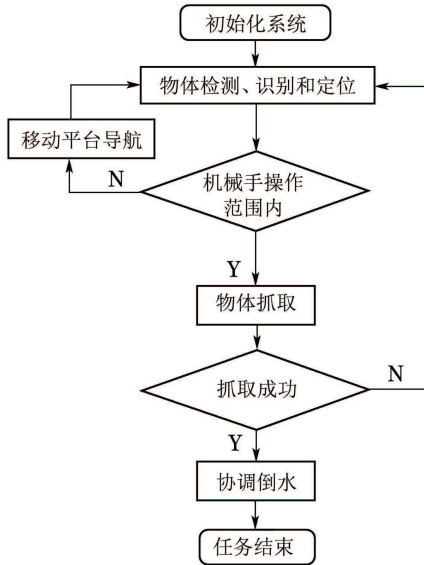


图8 移动机械手系统操作的流程图

Fig. 8 Flow chart of the mobile manipulator system

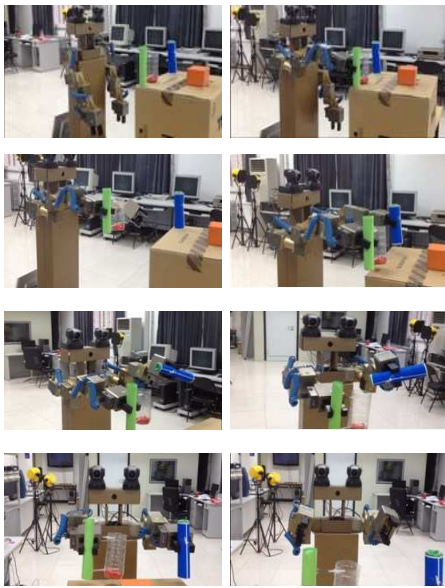


图9 倒水动作截图

Fig. 9 Selected images of of water-pouring manipulation

5 结论(Conclusions)

本文通过移动机械手系统模拟双臂倒水动作, 研究了物体协调操作的视觉伺服技术. 利用双目视觉, 重点研究了在复杂背景和光照变化环境下物体的检测、识别和定位等问题. 首先改进了HSV颜色空间下的图像分割算法, 快速准确检测出图像中的物体, 检测算法对环境光照变化具有较好的适应性; 其次, 结合物体形状特征和Hu不变矩, 准确实现待操作目标物体的识别; 然后, 利用摄像机定标得到的投影矩阵, 计算待作业目标的精确位置; 最后, 为验证所提出的图

像处理算法以及视觉伺服方案的有效性, 利用笔者实验室的移动双臂机械手系统进行了模拟往水杯倒水动作的试验, 结果表明该系统能够成功地完成倒水的协调操作.

参考文献(References):

- [1] WELCH R, LIMONADI D, MANNING R. System engineering the curiosity rover: A retrospective [C] // *Proceedings of the 8th International Conference on System of Systems Engineering*. Maui, HI, 2013: 70 – 75.
- [2] MAKI J, THIESSEN D, POURANGI A, et al. The Mars science laboratory engineering cameras [J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170(1/2/3/4): 77 – 93.
- [3] SONG K T, TSAI S C. Vision-based adaptive grasping of a humanoid robot arm [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Automation and Logistics*. Zhengzhou: IEEE, 2012: 155 – 160.
- [4] CHITTA S, JONES E G, CIOCARLIE M, et al. Mobile manipulation in unstructured environments: Perception, planning, and execution [J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2012, 19(2): 58 – 71.
- [5] CHENG H, CHEN H, LIU Y. Object handling using autonomous industrial mobile manipulator [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems*. Nanjing, China: IEEE, 2013: 36 – 41.
- [6] JIANG Y, XI N, ZHANG Q, et al. Target object identification and localization in mobile manipulators [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Phuket, Thailand, 2011: 144 – 149.
- [7] MAITIN-SHEPARD J, CUSUMANO-TOWNER M, LEI J, et al. Cloth grasp point detection based on multiple-view geometric cues with application to robotic towel folding [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Alaska USA: [s.n.], 2010: 2308 – 2315.
- [8] HIROSE M, OGAWA K. Honda humanoid robots development [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A — Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2007, 365(1850): 11 – 19.
- [9] DIETRICH A, WIMBOCK T, ALBU-SHAFFER A, et al. Reactive whole-body control: dynamic mobile manipulation using a large number of actuated degrees of freedom [J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2012, 19(2): 20 – 33.
- [10] QI N, ZHAO L, LI R, et al. Dual-arm service robots for mobile operation in indoor environment [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Chengdu, China: IEEE, 2012: 1898 – 1903.
- [11] HU M K. Visual pattern recognition by moment invariants [J]. *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, 8(2): 179 – 187.
- [12] YANG T W, ZHU K, RUAN Q Q, et al. Moving target tracking and measurement with a binocular vision system [J]. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2010, 39(1/2/3): 145 – 152.

作者简介:

杨唐文 (1971–), 男, 副教授, 主要从事机器人学和微创机器人外科等方面的研究, E-mail: twyang@bjtu.edu.cn;

高立宁 (1988–), 男, 硕士研究生, 主要从事机器视觉方向的研究, E-mail: 10120383@bjtu.edu.cn;

阮秋琦 (1944–), 男, 教授, 主要从事数字图像处理 and 人脸识别等领域的研究, E-mail: qqruan@bjtu.edu.cn;

韩建达 (1968–), 男, 研究员, 主要从事先进机器人学和控制理论等领域的研究, E-mail: jdhan@sia.cn.