

基于全局空间控制的高精度柔性视觉测量系统研究

张晓龙¹, 尹仕斌¹, 任永杰¹, 郭寅², 杨凌辉¹, 王一³

- (1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;
2. 清华大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084;
3. 河北联合大学 电气工程学院, 河北 唐山 063009)

摘要: 针对传统机器人视觉测量系统中测量精度受机器人绝对定位精度限制的问题, 构建了基于全局空间控制的高精度柔性视觉测量系统并研究其标定技术。通过全局空间测量定位系统实现机器人末端工具的高精度实时控制, 可以突破机器人自身定位精度的限制, 充分发挥其高度柔性的运动特性。为实现系统高精度测量, 提出一种基于单应性矩阵的视觉传感器外参标定方法, 该方法仅需对所设计的平面靶标进行一次成像, 结合激光跟踪仪进行坐标转换即可实现传感器坐标系与外部参考坐标系之间坐标转换关系的精确标定。实验结果表明, 基于全局空间控制的机器人视觉测量系统在其工作空间中距离测量精度优于 0.2/mm, 较传统的机器人视觉测量系统得到显著提高。

关键词: 工业机器人; 视觉测量; 全局空间控制; 外参标定

中图分类号: TP249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2805-08

High-precision flexible visual measurement system based on global space control

Zhang Xiaolong¹, Yin Shibin¹, Ren Yongjie¹, Guo Yin², Yang Linghui¹, Wang Yi³

- (1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. College of Electrical Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China)

Abstract: As the measuring accuracy of traditional robot visual measurement system is limited by the robot absolute positioning accuracy, a new high-precision robot vision measurement system based on the workspace Measurement and Positioning System was developed and its calibration technology was researched. In this system, the robot end-effector can be positioned precisely by the workspace Measurement and Positioning System in real time, freeing its positioning accuracy from the robot accuracy. The system only makes use of the high flexibility and automation of the robot. In order to realize the high-precision measurement, a new calibration method of calibrating the exterior parameters of the visual sensor based on the homography matrix was proposed. In this method, a calibration target was designed and imaged by the visual sensor. With the aid of laser tracker for coordinate transformation, the external parameters can be easily determined with only one image of the calibration target. The verified

收稿日期: 2015-01-10; 修订日期: 2015-02-13

基金项目: “十二五”国家 863 计划(2012AA041205); 青年科学基金(51005166); 天津市科技型中小企业技术创新专项基金(052HCXGX21200)

作者简介: 张晓龙(1989-), 男, 硕士生, 主要从事机器人视觉测量方面的研究。Email: zhanglong@tju.edu.cn

导师简介: 任永杰(1975-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光及光电测量技术方面的研究。Email: ryj_tj@126.com

experiment shows that the distance measuring accuracy over the robot working volume is superior to 0.2/mm, which has been improved significantly compared with the traditional robot visual system.

Key words: industrial robot; vision measurement; workspace Measurement and Positioning System; external parameters calibration

0 引言

为追求质量、效率,降低废品率,现代制造愈加关注制造过程的控制。采用先进的测量手段,对制造过程中工艺参数及产品状态进行严格,甚至是 100% 的测量和监控,确保制造过程的稳定、可控、可预测,产品质量检测与控制则是决定制造水平的关键技术之一。近年来,快速发展的多关节高度柔性运动平台为通用的零部件尺寸检测问题解决提供了一种新的思路和方法。以工业机器人为例,在高性能控制器的支持下,它可以高效率实现非常复杂的空间姿态和定位,能够以多种路径将测头送到指定位置,利用这种高度灵活的运动,就能够以合理的位姿快速地观测工位条件下的工件,从而实现高效、几乎无死角的测量。同时,随着光学非接触测量方法研究的深入与成熟,视觉测量方法已经在零部件几何尺寸测量中得到广泛应用,其中结构光视觉传感器因具有非接触性、结构简单、图像信息易于提取、实时性强及较高精度等优点已成为产品质量在线检测中最常用的测量传感器。

但是,以多关节运动机构为基础的测量,其测量精度必定受到关节机构运动精度的限制。与直线机构相比,多关节机构的定位精度明显降低,且长期稳定性差,对于关节数量多、连杆长度长的情况,问题更加突出。此外,工业机器人系统作为自动化装备,工作时温度变化复杂,温度效应非常突出,使得机器人系统在使用状态下的长期定位精度显著恶化,多数情况下处于不定状态(相对一定的精度要求),如直接用于零部件几何尺寸测量,则测量数据质量无法保证。

长期以来,国内外学术界和工业界一直对应用于测量中的工业机器人定位误差补偿系统开展深入的研究,并取得了大量科研成果,在一定程度上得到了较广泛的应用。其中较有代表性的是基于机器人运动学模型参数标定方法及基于非模型的误差补

偿方法。基于运动学模型的标定方法发展分为以下 3 个阶段:(1) 标定关节传感器值与实际关节值之间的关系。(2) 标定机器人运动学模型。最经典的机器人运动学模型是 Denavit-Hartenber 模型^[1](D-H 模型),其建立方法是按照一定的规则把关节坐标系固定在机器人的每个连杆上,相邻连杆间通过齐次变换矩阵联系起来,该模型的不足之处在于机器人各参数互相耦合,导致机器人结构参数不易直接辨识,并且当相邻两轴平行或接近平行时,机器人参数辨识矩阵存在奇异性问题。为此,许多学者提出多种修正的 D-H 模型(Modified D-H 模型,MD-H 模型)来避免奇异性问题,如 Hayati^[2]针对转动关节提出的 4 参数 MD-H 模型,该模型的主要原理是当机器人相邻转轴平行或接近平行时,引入 1 个绕 y 轴的旋转参数;由 Zhang Hanqi^[3]等提出 CPC(Complete and Parametric-ally Continuous Kinematic Model)模型,实际参数的微小变化能引起位姿的微小变化,而不会引起突变,这种建模方法必须要保证机器人参数的完整及连续。(3) 非几何参数的标定,其中包括温度误差^[4],关节柔性,摩擦,齿轮间隙,连杆柔性等。但是影响机器人绝对定位精度的因素众多、相互关系复杂,仅通过单一模型对其进行准确描述是难以实现的,而且已有的运动学模型中所有参数是非线性耦合在一起的,未能有效分离,参数辨识算法复杂,辨识精度和可靠性难以保证。非模型误差标定方法通常将机器人运动空间划分成多个立体网格,利用高精度测量设备测量各网格节点处的定位误差,以此估计空间中任意点处的定位误差。如周炜^[5]等提出的基于空间插值的工业机器人精度补偿理论,这种方法避免了复杂的建模过程,克服了参数辨识的不足,但是标定过程复杂,随着标定精度需求提高,网格分割越细,网格测量的工作量将成倍增加,而且误差补偿精度有限,尚缺乏成熟的应用。

为此,文中提出一种基于全局空间测量定位系统(workspace Measurement and Positioning System, wMPS)实现机器人末端工具高精度定位控制的方法。

法,并以此搭建高精度机器人视觉测量系统,此时机器人系统仅作为高度柔性自动化运动机构,其末端定位精度完全由全局空间定位方法所决定,与机器人自身定位精度无关,从而突破机器人多关节机构定位精度低的限制。同时,在机器人视觉测量系统中,视觉传感器的测量结果通常需要转换至外部工件坐标系下进行评价,因此文中提出一种基于单应性矩阵的视觉传感器外参标定方法。通过对设计的平面靶标进行一次成像,借助激光跟踪仪进行坐标转换,可以实现传感器坐标系到外部参考坐标系之间坐标转换关系的精确标定。最后,文中设计了基于标准球测量的系统精度验证实验,实验结果表明,系统测量精度较传统机器人视觉测量系统有显著的提高。

1 基于 wMPS 全局控制的机器人柔性视觉测量系统

传统机器人柔性视觉测量系统主要由工业机器人、结构光视觉传感器构成,如图 1 所示。将结构光视觉传感器安装在机器人末端法兰,控制机器人在其工作空间中按规划的路径运动,可以将视觉传感器送达指定的测量位置并实现被测点图像信息的采集。传统的机器人视觉测量系统通常需要利用机器人正向运动学模型将传感器测量结果统一到工件坐标系,如图 1 所示,系统坐标系包括:机器人基坐标

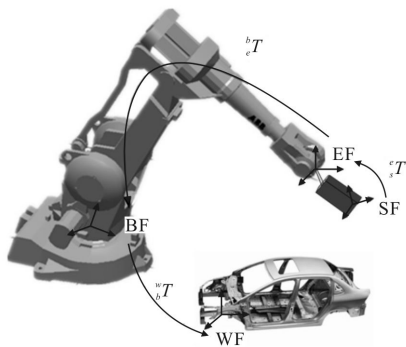


图 1 传统机器人柔性视觉测量系统示意图

Fig.1 Traditional robot flexible vision measurement system

系(BF)、末端法兰坐标系(EF)、传感器坐标系(SF)、工件坐标系(WF),被测点在传感器坐标系下的坐标 X_s 与工件坐标系下坐标 X_w 关系如下:

$$X_w = {}^w T_b \cdot {}^b T_e \cdot {}^e T_s \cdot X_s \quad (1)$$

式中: ${}^w T_b$ 为机器人基坐标系到工件坐标系之间的坐

标转换关系; ${}^b T_e$ 为机器人末端法兰坐标系到机器人基坐标系之间的坐标转换关系,通过机器人正向运动学可以得到; ${}^e T_s$ 为传感器坐标系到机器人末端法兰坐标系之间的坐标转换关系,即手眼关系。

由于机器人制造和安装误差,机器人实际的运动学模型参数和其理论参数存在偏差,这个偏差将导致机器人末端法兰坐标系和机器人基坐标系之间的坐标转换关系 ${}^b T_e$ 存在偏差。同时,机器人手眼关系标定过程通常需要机器人做多次变位姿运动,因此机器人运动学模型的误差将传递至手眼关系 ${}^e T_s$ 中。虽然通过标定机器人实际的运动学参数,可以有效地提高机器人运动学模型的精度,进而提高被测点在工件坐标系下的坐标测量精度。但是影响机器人绝对定位精度的因素众多、且相互关系复杂,仅通过单一模型对其进行准确描述是难以实现的,因此仅通过机器人标定仍然无法满足高精度测量场合对机器人定位精度的需求。

为突破机器人机构定位精度低的局限,实现更高精度的现场测量,文中拟在机器人工作空间外部设置精密测量设备,对机器人末端的视觉传感器进行实时的跟踪测量,以此确定其精确的位置信息,此时末端传感器的定位精度与机器人机构的精度无关,仅由外部精密测量系统测量给定。如图 2 所示,采用两台空间定位测量系统(wMPS)发射站建立全局测量控制系统,通过在末端传感器上布置多个接收球构建接收器坐标系。在系统测量过程中,机器人通过变位姿运动带动视觉传感器对空间中被测特征进行测量,在每个机器人姿态下,wMPS 测量接收球的球心坐标,实时确定接收器坐标系与 wMPS 系统坐标系下的位姿,从而实现末端传感器的高精度实时定位。

wMPS 是空间多点测量系统^[6],具有测量范围广、可实现多点测量的显著优势,它由多台发射站组成,接收器接收多台发射站的光信号,根据空间几何关系,通过扇面扫过接收器的时间关系与扇面姿态,定位接收器的空间坐标。接收器坐标系的建立过程如图 2 所示,通过在视觉传感器上固定 3 个 wMPS 接收球的精密球座,以 1 号球座的球心位置作为接收器坐标系的原点位置,以 3 个球座球心构成平面的法向作为接收器坐标系的 z 方向,以 1 号球座球心

指向 2 号球座球心的方向作为接收器坐标系的 x 方向,建立右手坐标系。基于全局空间控制的机器人视觉测量系统的坐标系系统包括:传感器坐标系(SF)、接收器坐标系(RF)、wMPS 系统坐标系(MF)、工件坐标系(WF),被测点在传感器坐标系下的坐标 X_s 与工件坐标系下坐标 X_w 的关系如下:

$$X_w = {}_m^w T \cdot {}_r^m T \cdot {}_s^r T \cdot X_s \quad (2)$$

式中: ${}_m^w T$ 为 wMPS 系统坐标系到工件坐标系之间的坐标转换关系; ${}_r^m T$ 为接收器坐标系到 wMPS 系统坐标系之间的坐标转换关系; ${}_s^r T$ 为传感器坐标系到接收器坐标系之间的转换关系。由公式(2)可以看出,基于全局控制的机器人柔性测量系统的坐标转换链中不包含机器人运动学模型,机器人系统仅作为高度柔性自动化运动机构,末端传感器定位精度完全由 wMPS 系统测量精度所决定,与机器人自身定位精度无关,从而突破了机器人运动学模型误差的限制,可以满足高精度的测量需求。

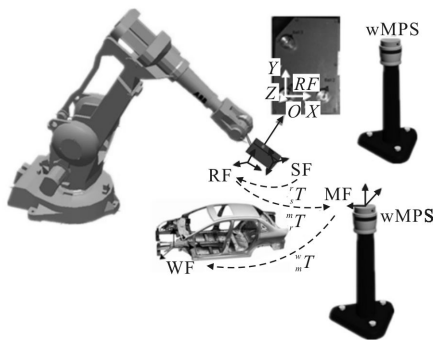


图 2 基于 wMPS 的机器人柔性视觉测量系统示意图

Fig.2 Flexible robot vision measurement system based on wMPS

在每个机器人测量姿态下,wMPS 测量接收球的球心坐标,实时确定接收器坐标系与 wMPS 系统坐标系下的位姿。为将传感器测量结果统一到工件坐标系下,需要对文中构建的基于全局空间控制的机器人视觉测量系统进行以下几部分校准:(1) wMPS 系统坐标系到工件坐标系之间的坐标转换关系的校准;(2) 传感器坐标系到接收器坐标系之间的坐标转换关系的校准。由于前期的工作已经对 wMPS 系统发射站内部参数校准及两个发射站坐标系之间匹配做了充分的研究,文中利用两个经过标定的 wMPS 发射站构建全局空间控制系统,通过在工件上固定多个(>3)接收器球座,利用校准后的 wMPS 系

统测量接收器球心坐标,并以此建立工件坐标系,可以确定 wMPS 系统坐标系到工件坐标系之间的坐标转换关系 ${}_m^w T$ 。因此,文中只需对传感器坐标系到接收器坐标系之间的转换关系 ${}_s^r T$ 进行校准。

2 结构光视觉传感器测量模型及标定方法

2.1 线结构光视觉传感器测量模型

线结构光传感器主要由线结构光投射器和摄像机组成,线结构光投射器将线状激光投射于被测物表面,在表面上形成由被测物体表面形状所调制的可视特征,由另一位置处的摄像机采集可视特征的图像,并传输到计算机系统中进行处理,可以解算出可视特征精确空间三维坐标。图 3 为线结构光传感器的数学模型^[7],设 $O_c-x_c y_c z_c$ 为摄像机三维坐标系, $O_p-x_p y_p$ 为图像坐标系, O_p 为主点(摄像机光轴与图像平面的交点)。

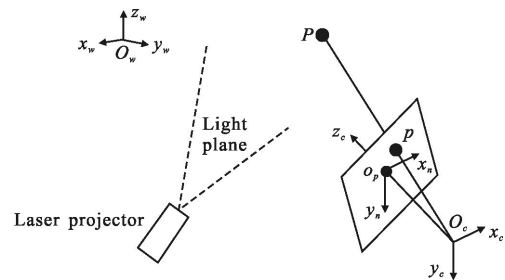


图 3 线结构光传感器测量数学模型

Fig.3 Mathematic model of line structured light sensor

设光平面上任意点 P 在摄像机坐标系下的坐标为 (x_c, y_c, z_c) ,点 P 在图像平面上透视投影点为 $P(x_n, y_n)$,则根据摄像机透视投影原理有:

$$\frac{x_c}{x_c - x_n} = \frac{y_c}{y_c - y_n} = \frac{z_c}{z_c - f} \quad (3)$$

同时,光平面在 $O_c-x_c y_c z_c$ 中的方程可表示为:

$$a_c x_c + b_c y_c + c_c z_c + d_c = 0 \quad (4)$$

公式(3)、(4)联立即构成了欧氏空间线结构光传感器测量数学模型。文中将摄像机坐标系定义为结构光传感器的测量坐标系,在传感器坐标系 $O_c-x_c y_c z_c$ 下,公式(3)确定了射线 $O_p P$ 的方程,公式(4)确定了光平面方程,射线与平面的交点即可唯一确定被测点 P 在传感器坐标系下的坐标。

2.2 线结构光视觉传感器标定方法

线结构光传感器的标定主要包括摄像机模型参

数和光平面结构参数的标定。文中采用基于张正友相机标定^[8]方法对结构光传感器中摄像机模型参数进行标定,以光刻平面靶标上的圆形标记点的圆心作为标定点,利用摄像机拍摄平面靶标在几个任意位姿下的图像,通过图像处理提取每个靶标位姿下的圆心坐标,最后结合摄像机成像模型即可对摄像机内参进行标定。该标定方法不需要提供摄像机的初始参数,平面靶标在测量空间可自由移动,不需要高成本的辅助调整机构,提高了标定效率,且标定精度高。

在完成摄像机参数标定之后,可以对线结构光传感器光平面参数进行标定,文中采用一种基于平面靶标交比不变性原理的标定方法^[9],即在投影变换下,长度以及长度之间的比率可以改变,但两个关于长度的比率之间的比值具有不变性。如图 4 所示,在传感器测量空间内放置含有多个圆心标定点的平面靶标, L_1 表示标定靶标在某一位置处时,光平面 π 与标定靶标平面 π_1 之间的交线,直线 L_1 上有 3 个点 A_1, B_1, C_1 ,以 A_1, B_1 为基础点,点 C_1 为分点,由分点和基础点所确定的两个有向线段之比为称为简比,记为:

$$SR(A_1, B_1; C_1) = A_1C_1/B_1C_1 \quad (5)$$

一条直线上四个点中两个简比的比值称为交比,记为:

$$CR(A_1, B_1; C_1, Q_1) = \frac{SR(A_1, B_1; C_1)}{SR(A_1, B_1; Q_1)} = \frac{A_1C_1/B_1C_1}{A_1Q_1/B_1Q_1} \quad (6)$$

在透视投影变换下,交比不变性原理可表示为:

$$CR(A_1, B_1; C_1, Q_1) = CR(a_1, b_1; c_1, q_1) \quad (7)$$

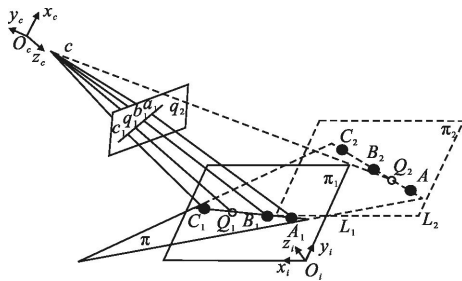


图 4 平面靶标交比不变性原理

Fig.4 Planar target cross-ratio invariability method

若已知点 A_1, B_1, C_1 在靶标坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ 的坐标值,点 a_1, b_1, c_1, q_1 的图像坐标可通过图像处理得到,由交比不变性可得到光平面上点 Q_1 的坐标。在

传感器测量范围内,将靶标平面移动到任意 4 个不同位置,利用同样方法可以得到光平面上非共线的 4 个点在摄像机坐标系下的坐标,利用最小二乘法拟合平面,即可求出光平面在线结构光传感器摄像机坐标系下的方程。

3 结构光视觉传感器外参标定

由公式(2)可知,为了将传感器测量结果统一到工件坐标系下,需要建立传感器坐标系与接收器坐标系之间的坐标转换关系,即 T_s 。文中提出一种基于单应性矩阵的结构光传感器外参标定方法,只需要视觉传感器对所涉及的靶标进行一次成像,借助激光跟踪仪进行坐标转换,即可完成结构光视觉传感器外部参数的精确标定。

如图 5 所示,在一块铝制标准平板上,通过精密机械加工制作标定平面靶标,保持线结构光传感器与平面靶标相对位置不变,可以通过平面靶标建立传感器坐标系同接收器坐标系之间的联系。靶标坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ 的建立过程如图 5 所示,以摄像机视场中某个圆的圆心作为坐标原点,以圆孔所在平面作为 $x_1O_1y_1$ 平面,圆心 1 指向圆心 5 的方向作为 x_1 轴, z_1 轴通过圆心 1 垂直 $x_1O_1y_1$ 平面向里。平面靶标上各个圆孔孔心在靶标坐标系下的坐标已提前用三坐标测量机进行标定。

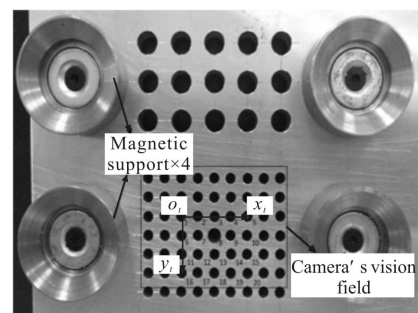


图 5 平面靶标实物图

Fig.5 Actual picture of planar target

文中视觉传感器外参标定方法分为两步,首先建立靶标坐标系与传感器坐标系之间的转换关系,设标定平面靶标位于世界坐标 $z_w=0$,像平面与二维靶标平面的映射变换为:

$$\tilde{\rho}n = A[r_1 \ r_2 \ t]\tilde{N} = H\tilde{N} = [h_1 \ h_2 \ h_3]\tilde{N} \quad (8)$$

式中: ρ 为比例因子; $A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为摄像机内部参

数矩阵, (u_0, v_0) 为主点坐标, $\tilde{n} = [u \ v \ 1]^T$ 和 $\tilde{N} = [x \ y \ 1]^T$ 为靶标平面上某一孔心 P 在图像平面和靶标平面的归一化坐标, r_i 为靶标坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵 R 的第 i 列, t 为平移向量, h_i 为单应性矩阵 H 的第 i 列。

根据平面靶标特征点在靶标坐标系下的坐标和与其对应的图像坐标, 至少需要 4 组特征点^[10], 若取 4 点, 则要求其中任意 3 点不共线, 如对应点多于 4 组, 则采用线性或非线性最小二乘法解算出单应性矩阵 H , 根据 r_1, r_2 的正交性, 有:

$$\begin{cases} h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \end{cases} \quad (9)$$

设 $B = A^{-T} A^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix}$, 即分离出摄像机外部参

数如下:

$$\begin{cases} \lambda = B_{33} - [B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})]/B_{11} \\ r_1 = \lambda A^{-1} h_1 \\ r_2 = \lambda A^{-1} h_2 \\ r_3 = r_1 \times r_2 \\ t = \lambda A^{-1} h_3 \end{cases}$$

式中:

$$\lambda = 1/\|A^{-1}h_1\| = 1/\|A^{-1}h_2\| \quad (10)$$

由此得到靶标坐标系与传感器坐标系间的转换关系

$${}_s T_i = \begin{bmatrix} r_i & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, 3) \quad (11)$$

建立靶标坐标系与传感器坐标系之间的转换关系后, 可借助激光跟踪仪建立靶标坐标系与接收器坐标系的转换关系。由于 wMPS 接收器是 1.5 in (1 in=2.54 cm) 的接收球, 与激光跟踪仪 1.5 inch 的反射球具有互换性, 如图 6(a) 所示, 在平面靶标上固定 4 个精密球座, 在球座上放置激光跟踪仪反射球后, 利用三坐标测量机标定 4 个球座的球心在靶标坐标系下的齐次坐标, 分别记为 p_1, p_2, p_3, p_4 。通过激光跟踪仪测量固定在传感器上的 3 个精密球座的球心, 并根据图 6 所示的接收器坐标系建立方法建立接收

器坐标系。利用激光跟踪仪在接收器坐标系下测量平面靶标上 4 个球座球心, 记为 q_1, q_2, q_3, q_4 则靶标坐标系与接收器坐标系间的转化矩阵 ${}_i^r T$ 可表示为:

$$q = {}_i^r T p \quad (12)$$

式中: $p = (p_1^T, p_2^T, p_3^T, p_4^T)$, $q = (q_1^T, q_2^T, q_3^T, q_4^T)$ 。

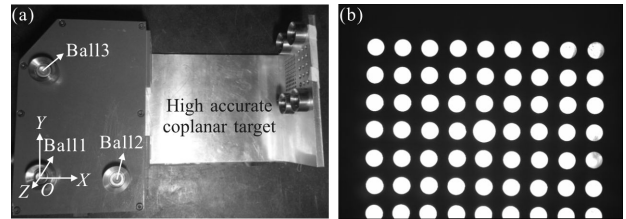


图 6 基于单应性矩阵的外参标定示意图(a) 摄像机原始图像(b)

Fig.6 External parameters calibration based on homography matrix (a) and original image of camera (b)

综合公式(11)和(12), 即可标定线结构光传感器

坐标系与接收器坐标系间的转化关系 ${}_s^r T$:

$${}_s^r T = {}_i^r T \cdot {}_i^s T^{-1} \quad (13)$$

4 实验

4.1 视觉传感器内外参数的标定结果

结构光视觉传感器标定实验中, 使平面标定靶标在摄像机测量空间内自由移动 6 个位置, 采集相应位置平面靶标图像, 对靶标图像进行图像处理, 提取标定特征点, 根据基于张正友相机标定方法, 标定线结构光传感器摄像机参数如下:

$$\begin{aligned} f_x &= 3\,477.640\,625, f_y = 3\,466.543\,945, \\ u_0 &= 344.537\,140/\text{pixels}, v_0 = 296.945\,953/\text{pixels}, \\ k_1 &= -0.033\,437, k_2 = 9.055\,436, p_1 = -0.000\,858, \\ p_2 &= -0.004\,197. \end{aligned}$$

式中: (f_x, f_y) 为有效焦距; (u_0, v_0) 为摄像机主点坐标; k_1, k_2, p_1, p_2 为畸变参数。

在结构光视觉传感器光平面参数标定过程中, 通过移动平面靶标到 4 个不同位置, 共采集 4 幅标定图像。根据基于平面靶标交比不变性传感器结构参数标定数学模型, 得到光平面方程系数:

$$[a_c \ b_c \ c_c \ d_c] =$$

$$[1.000\,000 \ -0.008\,249 \ 0.561\,941 \ -134.080\,455]^\circ$$

在结构光传感器外参标定过程中, 保持视觉传感器与标定靶标相对位置固定, 首先利用激光跟踪

仪建立接收器坐标系,传感器采集一幅平面靶标图像,原始图像如图6(b)所示。基于单应性矩阵的外参标定方法,结合图像处理技术,标定得到传感器外参如下:

$${}^r_s T = \begin{bmatrix} -0.999\ 978 & -0.003\ 527 & -0.005\ 596 & 130.063\ 238 \\ -0.005\ 560 & -0.010\ 253 & 0.999\ 932 & 67.712\ 199 \\ -0.003\ 584 & 0.999\ 941 & 0.010\ 233 & -54.666\ 528 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.2 外参标定结果验证

为验证结构光视觉传感器外参标定精度,设计了基于标准球测量的传感器外参精度验证实验。首先利用激光跟踪仪测量传感器上球座的球心坐标,建立接收器坐标系,以1个1.5/inch的标准球作为参考物,将1个精密球座固定在基座上。由于在精密球座上,1.5/inch的标准球与激光跟踪仪1.5/inch的反射球具有互换性,因此可以先利用激光跟踪仪测量精密球座上反射球的球心,再以标准球替换跟踪仪反射球,利用结构光视觉传感器测量标准球球心。通过视觉传感器外参标定结果得到接收器坐标系下的球心坐标,以激光跟踪仪测量结果作为标准值,可以在接收器坐标系下对比视觉传感器测得的标准球球心与跟踪仪测得的反射球球心的误差。图7为实验平台及传感器采集的标准球原始图像,通过移动基座,可以实现传感器测量范围内对标准球进行多次测量。

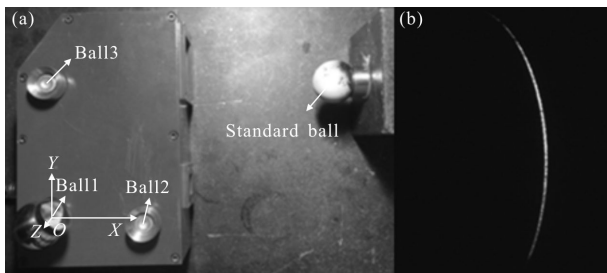


图7 传感器外参精度验证实物图及原始图像

Fig.7 Verification of sensor external parameters and the original image

线结构光传感器测量标准球的数学模型如图8所示,线结构光激光器P投射出光平面,与标准球相交形成圆弧AA'。通过最小二乘拟合,得到圆弧AA'的圆心坐标 $O'(x_c, y_c, z_c)^T$ 及其半径r。若标准球半径

R已知,在摄像机坐标系为 $O_c-x_c y_c z_c$ 下,则球心坐标 $(x_o, y_o, z_o)^T$ 满足:

$$\begin{cases} \sqrt{R^2-r^2} = \frac{ax_o+by_o+cz_o+d}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \\ \frac{x_o-x_c}{a} = \frac{y_o-y_c}{b} = \frac{z_o-z_c}{c} \end{cases} \quad (14)$$

其中球心坐标 $(x_o, y_o, z_o)^T$ 有两组解,可根据激光面在球面上的位置选择其具体坐标。

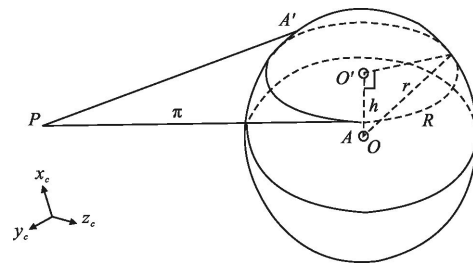


图8 线结构光传感器测量标准球的数学模型

Fig.8 Mathematic model of standard ball measured by line structured light sensor

实验测量结果如图9所示,横轴表示标准球在结构光传感器测量空间中任意移动10次,纵轴表示标准球在接收器坐标系下x、y、z方向的误差及总体距离误差。实验结果表明,利用标定得到的线结构光传感器外参,其测量距离误差优于0.12/mm。

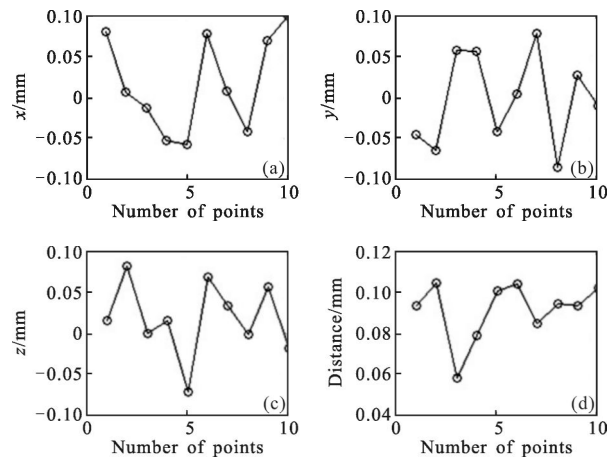


图9 线结构光传感器外参标定误差

Fig.9 Calibration error of external parameters by line structured light sensor

4.3 机器人柔性视觉测量结果

为验证系统测量精度,文中设计了基于标准球的精度验证实验。首先在机器人工作空间中利用3个精密球座构建工件坐标系,分别利用激光跟踪仪

和 wMPS 测量精密球座上的球心坐标以建立工件坐标系。将 1 个精密球座固定在 1 个可自由移动和升降的三脚架上,在每个三脚架位置处,将激光跟踪仪 1.5/in 反射球放置在球座上并测量其球心坐标,然后用 1 个 1.5/in 的标准球替换跟踪仪反射球,机器人带动视觉传感器测量标准球球心坐标。对比工件坐标系下跟踪仪测得的反射球球心坐标及机器人视觉测量系统测得的标准球球心坐标误差。如 2.1 中所述,传感器测得的球心坐标可以经过传统机器人视觉测量模型转换至工件坐标系下,也可以经过基于外部控制的机器人视觉测量模型转换至工件坐标系下,文中分别利用两种方法将传感器测得球心坐标统一至工件坐标系下进而对比两种方法的测量误差。

测量结果如图 10 所示,其中以激光跟踪仪所测结果为标准值,横轴表示标准球在机器人测量空间中任意移动了 20 次,标准球均匀分布在机器人工作空间中。纵轴表示标准球在工件坐标系下 x 、 y 、 z 方向及系统测得位置与实际位置的距离误差,实线表示基于 wMPS 的机器人柔性视觉测量结果,虚线表示基于传统机器人运动学模型的测量结果。

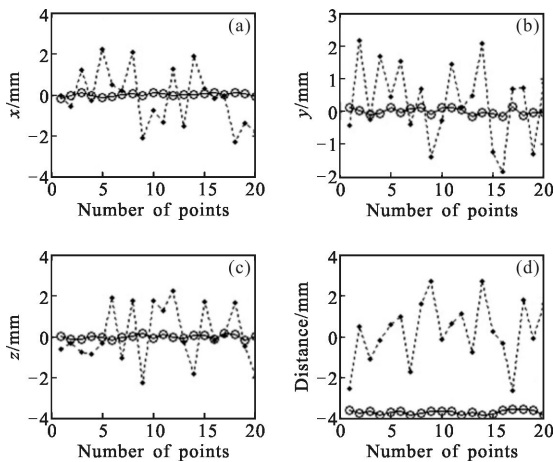


图 10 机器人柔性视觉测量误差

Fig.10 Relative measurement error of flexible robot vision system

由图 10 已知,基于传统机器人运动学模型的测量系统,测量空间距离误差在 3.5/mm,而基于 wMPS 的机器人柔性视觉测量系统,测量结果远优于基于传统机器人运动学模型的测量系统,其测量空间距离误差优于 0.2/mm。

5 结论

实现了基于全局空间控制的高精度机器人的视

觉测量。通过外部全局空间定位方法,对机器人的末端工具进行实时的精确定位,末端定位精度完全由全局空间定位方法所决定,该方法仅利用机器人系统其高度柔性自动化机构的功能,与机器人自身定位精度无关,从而突破多关节定位精度低的限制。实验结果表明,该柔性视觉测量系统,测量结果远优于基于传统机器人运动学模型的测量系统,其空间距离测量误差优于 0.2 mm。

参考文献:

- [1] Denavit J, Hartenberg R S. A kinematic notation for low-pair mechanisms based on matrices [J]. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1955, 22(1): 215–221.
- [2] Hayati S A. Robot arm geometrical link parameter estimation [C]//22nd IEEE Conference on Decision and Control, 1983: 1477–1483.
- [3] Zhuang Hanqi, Roth Zvi S. A complete and parametrically continuous kinematic model for robot manipulators[J]. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 1992, 8(4): 451–463.
- [4] Wang Yi, Ren Yongjie. On-line and dynamic thermal error compensation for measuring robot [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(4): 491–494. (in Chinese)
- [5] Zhou Wei, Liao Wenhe. Theory and experiment of industrial robot accuracy compensation method based on spatial interpolation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(3): 42–49. (in Chinese)
- [6] Duan Muqiong, Yang Xueyou, Zhu Jigui. 3D coordinate measurement system based on optoelectronic scanning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2014–2019. (in Chinese)
- [7] Wu Bin, Sun Changqin, Yang Bin. Application technology of line-structured light sensor in flexible vision measurement system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(10): 1309–1311. (in Chinese)
- [8] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330–1334.
- [9] Li Xiuzhi, Zhang Guangjun. Real-time mobile robot navigation based on structured light vision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 383–388. (in Chinese)
- [10] Arrospe Laborda, Jony Salgado. Vehicle detection and tracking using homography-based plane rectification and particle filtering [C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2010: 150–155.