

# 高精度柔性坐标测量系统及其校准技术研究

刘常杰 马爽 郭寅 刘邈 郝继贵 叶声华

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 针对传统的机器人柔性坐标测量方法中, 机器人模型不完善及机器人固定参数不断变化导致测量精度难以提高的问题, 提出一种基于双目视觉原理的全局实时校准方法, 组建由两台相机组成的高精度全局校准单元, 通过测量布置在机器人末端视觉传感器上的控制点阵, 实时得到机器人末端的空间位姿, 实现机器人在全局空间的精确定位。提出基于空间网格控制场的相机校准方法, 构建像面坐标系上的残差库, 实现相机在全视场空间内的高精度校准。实验表明, 采用上述方法可实现 $\pm 0.1$  mm的双相机校准精度, 整个系统的测量精度可达 $\pm 0.15$  mm, 从根本上摆脱了机器人运动学模型及参数误差带来的影响, 有效地保证了柔性坐标测量系统的精度。

**关键词** 测量; 校准; 空间网格控制场; 光束空间交汇; 双目视觉

**中图分类号** TN247; TP242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1012002

## Study on Calibration Technology of High-Precision Flexible Coordinate Measurement System

Liu Changjie Ma Shuang Guo Yin Liu Miao Zhu Jigui Ye Shenghua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** To solve the problem of the traditional flexible measuring system due to the imperfect robot module and the changing parameters, a calibration technology of high-precision flexible coordinate measurement system is proposed. Binocular stereo vision method is employed to construct the global measurement unit. In order to ensure the accuracy, a camera calibration method which is based on space grid control field, and a method of the global space precise positioning are proposed. The pose transformation of the robot in space can be accurately measured by the two global cameras in the scene, through measuring the controlling points on the stereovision sensor. The experimental results verify that the error of the global camera is less than  $\pm 0.1$  mm, and the error of the whole measurement system is smaller than  $\pm 0.15$  mm. The measurement can satisfy the precision requirement of the system.

**Key words** measurement; calibration; space grid control field; space intersection of beam; binocular stereo vision

**OCIS codes** 150.3040; 330.1400; 150.6910; 150.1488; 150.5758

## 1 引言

近几年汽车制造业高速发展, 白车身检测及零部件尺寸等的稳定性对质量控制和生产效率起着至关重要的作用。工业机器人自动化技术成熟、柔性好、工作可靠, 以机器人为载体, 采用机器人与视觉传感器相结合的测量方式成为当今汽车制造业和工艺设备生产的发展趋势<sup>[1-2]</sup>。

传统柔性坐标测量系统及校准方法主要基于机器人运动学模型, 在实际应用中, 主要存在以下两个问题: 1) 所建模型无法同时将各种影响因素考虑在

内, 难以用精确的模型建模。2) 模型和参数均假设在机器人运动过程中固定不变, 但实际在线测量中, 工业机器人工作环境相当恶劣, 温度、湿度等环境因素无法预测控制, 加之机器人本体安装了多个关节电机, 工作时温度变化复杂, 温度效应非常突出, 导致机器人模型及参数发生改变<sup>[3]</sup>, 最终定位不准确。

国内外针对机器人模型设计及参数标定方面进行了大量研究。国外已经形成了较为成熟的机器人模型及参数校准方法<sup>[4]</sup>, 精度基本可以控制在 $\pm(0.2 \sim 0.25)$  mm之间<sup>[5]</sup>。考虑到工业现场的恶

收稿日期: 2013-04-11; 收到修改稿日期: 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(50805105)

作者简介: 刘常杰(1973-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事视觉检测方面的研究。E-mail: liuchangjie@tju.edu.cn

劣环境,各大公司也加强了相关方面的研究,德国 KUKA 公司研究的一种方法,能够在工业现场的环境下达到 $\pm 0.15\text{ mm}$ 水平的长时间稳定精度,但因为涉及到巨大的商业价值,国外对相关技术一直保密。国内的研究状况明显落后于国外,主要集中在机器人运动学模型与参数的标定上<sup>[6]</sup>,通过在机器人附近设置基准靶标,以 Denavit-Hartenberg (D-H)运动学模型为基础求解,但在工业现场环境下的高精度全局实时校准方面成果较少。

针对上述问题,本文提出一种不依赖机器人运动学模型的高精度柔性坐标测量系统,并且能不受机器人长时间运动及现场恶劣环境的影响。系统基于双目视觉原理,在机器人外部设置两台全局相机,实时获取视觉传感器坐标系与全局相机坐标系的转换关系,代替了传统坐标测量模型中的机器人本体坐标系转换,摒弃了机器人关节及连杆的复杂标定过程,实时高精度获取机器人末端工具的空间位姿;为进一步确保测量结果的精确程度,在测量前,利用空间网格控制场的方法,建立像面坐标系上的残差库,对全局相机进行包含深度方向的精密校准。根据现场实际测量环境,利用光束定向交汇原理完成两台相机的外参校准。在双相机参数精确校准的基础上,系统测量精度可达到 $\pm 0.15\text{ mm}$ ,实现空间坐标的高精度测量及测量系统的实时校准。

## 2 测量系统构建

高精度柔性坐标测量系统主要由工业机器人、立体视觉传感器、全局相机等部分组成,如图 1 所示。立体视觉传感器安装在机器人末端关节上,通

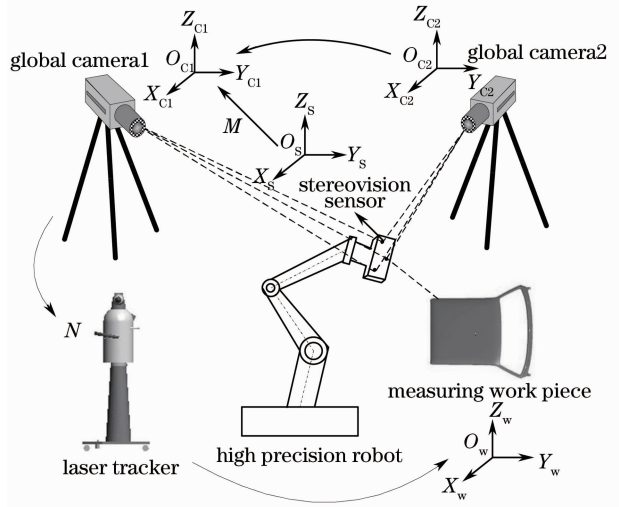


图 1 测量系统结构

Fig. 1 Structure diagram of the measurement system

过控制机器人在空间的位姿变换,视觉传感器能够依照规定路径到达空间指定的测量点采集图像信息。为保证空间点三维坐标的测量精确程度,根据空间网格控制场的方法对全局相机的内部参数进行校准;利用光束定向交汇原理校准双相机的外部参数。在保证全局相机精度的基础上,基于双目立体视觉测量原理,利用高精度校准过的双相机,测量安装在机器人末端的视觉传感器上不共线的控制点阵,通过事先标定的控制点阵坐标系与传感器坐标系的转换关系,求出在空间某一位姿时视觉传感器坐标系与全局相机坐标系之间的关系,并由激光跟踪仪确定的全局相机坐标系到工件坐标系的链接,完成空间被测点的三维坐标的精确测量。

测量系统中,全局相机的内部参数校准、双相机的外部参数标定及测量系统全局空间实时校准是确保测量结果精确度的三个关键技术。全局相机内部参数的校准工作可提前在实验室完成,而双相机的外部参数标定及测量系统全局空间实时校准则需根据现场的具体测量环境进行校准。

## 3 基于空间网格控制场的全局相机内部参数校准

全局相机校准的精确度直接决定了整个系统的测量不确定度。基于空间网格控制场的相机内参标定技术,可补偿高阶不可精确参数化的成像畸变因素,其实质就是根据空间被测点的实际三维坐标,由相机成像模型解算出的图像坐标与实际成像坐标之间的偏差,在二维成像平面上建立残差库( $\Delta x_i, \Delta y_i$ )。

建立空间网格控制场,如图 2 所示,在一个支撑框架上安装网格控制点,每个网格控制点均采用反光标记点制作。

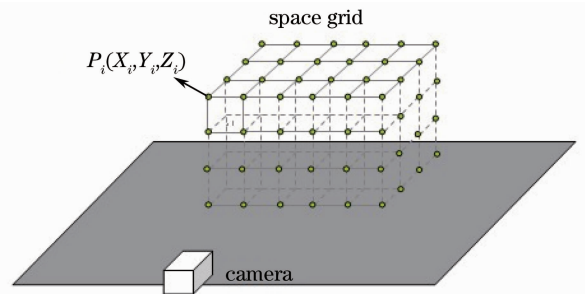


图 2 空间网格控制场

Fig. 2 Space lattice controlling field

利用激光跟踪仪测量空间网格控制场的每一格点  $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ ,得到精确的空间三维坐标,根据理想相机成像模型<sup>[7-9]</sup>:

$$Z_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

计算  $P_i$  的理论像面坐标  $p_i(x_i, y_i)$ 。(1) 式中, 空间网格控制场的任一格点  $P_i$  的空间三维坐标为  $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ ,  $f$  为全局相机的有效焦距。计算所得相机图像坐标系下的坐标  $p_i(x_i, y_i)$  作为真值。用相机拍摄空间同一被测点  $P_i$ , 在相机成像平面上的实际成像坐标为  $p_{ri}(x_{ri}, y_{ri})$ , 与理论成像点  $p_i(x_i, y_i)$  相比较, 解算残差  $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ , 当被测点遍布整个空间控制场时, 即可建立空间网格控制场的残差库:

$$(\Delta x_i \quad \Delta y_i) = (x_i - x_{ri} \quad y_i - y_{ri}), \quad (2)$$

实际测量时, 利用两台全局相机对被测点  $A_r$  进行测量, 在左相机成像平面上的实际坐标  $A_{rl}(x_{rl}, y_{rl})$ , 右相机成像平面上的实际坐标  $A_{rr}(x_{rr}, y_{rr})$ , 并根据两台全局相机测量  $A_r$  点的空间三维坐标, 搜索到其距离最近的八个网格格点, 如图 3 所示。

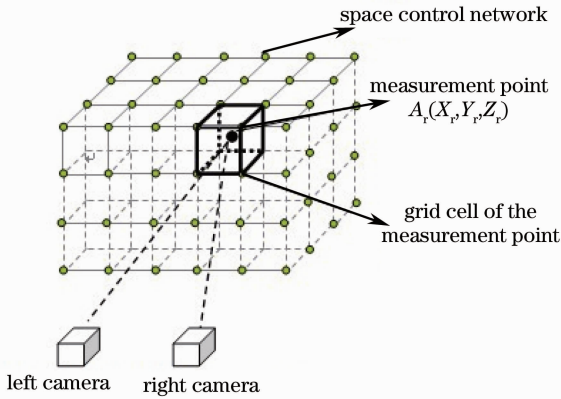


图 3 空间网格控制场的实际测量

Fig. 3 Actual measurement of the space lattice controlling field

空间被测点  $A_r$  距所在网格单元的八个格点的距离分别为  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8$ :

$$D = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6 + d_7 + d_8, \quad (3)$$

根据所建立的残差库, 利用被测点  $A_r$  邻近的空间网格格点的残差对  $A_r$  进行线性插值, 以左相机为例, 如图 4 所示, 有

$$\Delta x_{rl} = \frac{d_1}{D} \Delta x_1 + \frac{d_2}{D} \Delta x_2 + \frac{d_3}{D} \Delta x_3 + \frac{d_4}{D} \Delta x_4 + \frac{d_5}{D} \Delta x_5 + \frac{d_6}{D} \Delta x_6 + \frac{d_7}{D} \Delta x_7 + \frac{d_8}{D} \Delta x_8, \quad (4)$$

$$\Delta y_{rl} = \frac{d_1}{D} \Delta y_1 + \frac{d_2}{D} \Delta y_2 + \frac{d_3}{D} \Delta y_3 + \frac{d_4}{D} \Delta y_4 + \frac{d_5}{D} \Delta y_5 + \frac{d_6}{D} \Delta y_6 + \frac{d_7}{D} \Delta y_7 + \frac{d_8}{D} \Delta y_8. \quad (5)$$

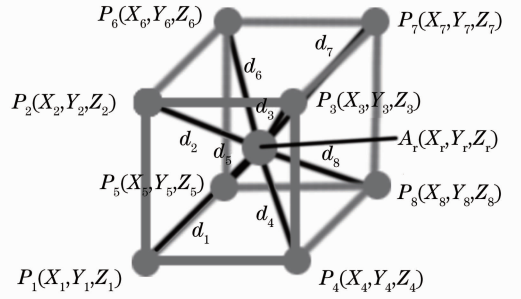


图 4 被测点残差计算

Fig. 4 Residuals of the measuring point

(4)、(5) 式中,  $d_i/D$  为网格单元格点  $P_i$  处的残差对被测点  $A_r$  的影响比例。得到控制点  $A_r$  在左相机成像平面上的残差  $(\Delta x_{rl}, \Delta y_{rl})$ , 对左相机图像坐标  $A_{rl}(x_{rl}, y_{rl})$  进行修正, 得到修正后的图像坐标  $A_{rl}(x_{rl} + \Delta x_{rl}, y_{rl} + \Delta y_{rl})$ 。右相机图像坐标的修正方法同上所述。

由于相机成像平面上的像点对应于空间的一条射线, 利用左右两台全局相机像平面上修正后的图像坐标, 重新求解两条射线的交点, 即为被测点  $A_r$  的空间坐标。为保证被测点空间坐标的准确性, 可重复利用残差进行修正, 将修正后的值作为迭代初值, 反复利用上述方法, 进行多次迭代计算后, 全局相机可以达到很高的精度。

## 4 现场校准技术

### 4.1 基于光束定向交汇的双相机外部参数校准

双相机的外部参数校准, 就是求取两台全局相机之间的空间位姿关系, 即确定两台全局相机间的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矩阵  $\mathbf{T}$ 。双相机在不同姿态下, 测量空间同一被测点时, 成像光束必然在空间相交于一点, 并且每个被测点均满足共线条件<sup>[10]</sup>: 相机的投影中心、被测点对应的像点和被测点, 三点必在同一直线上, 如图 5 所示。

双相机的空间变换关系为<sup>[11-12]</sup>

$$\begin{bmatrix} X_{1i} \\ Y_{1i} \\ Z_{1i} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_{2i} \\ Y_{2i} \\ Z_{2i} \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{R}$  为相机 2 到相机 1 的旋转矩阵,  $\mathbf{T}$  为相机 2 到相机 1 的平移矩阵。同时利用旋转矩阵  $\mathbf{R}$  满足的正交条件<sup>[13-14]</sup>, 在基于空间网格控制场的相机内参校准基础上, 联立所有被测点的共线条件方程, 可得到以旋转矩阵和平移矩阵为未知量的非线性方程组, 即可解算双相机间的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矩阵  $\mathbf{T}$ , 从

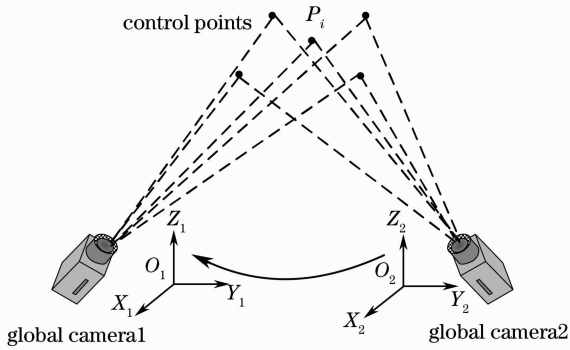


图 5 标定模型

Fig. 5 Calibration model

而完成两台全局相机的外部参数校准。

#### 4.2 测量系统全局空间实时校准

##### 4.2.1 基础坐标系的建立

测量工件上某一被测点时,机器人按照规定路径带动视觉传感器运动到某一特定位置,即被测点与视觉传感器的空间位姿一一对应。为实现传感器坐标系到工件坐标系的转换,需事先标定两个基础转换关系:全局相机坐标系与工件坐标系的转换关系  $N$ ,视觉传感器上的控制点阵坐标系与视觉传感器坐标系的转换关系  $H$ 。

借助激光跟踪仪和靶标<sup>[15]</sup>,建立全局相机坐标系与工件坐标系的转换关系  $N$ 。转换过程为:全局相机坐标系  $\xrightarrow{X}$  靶标坐标系  $\xrightarrow{B}$  激光跟踪仪坐标系  $\xrightarrow{Z}$  工件坐标系,如图 6 所示。

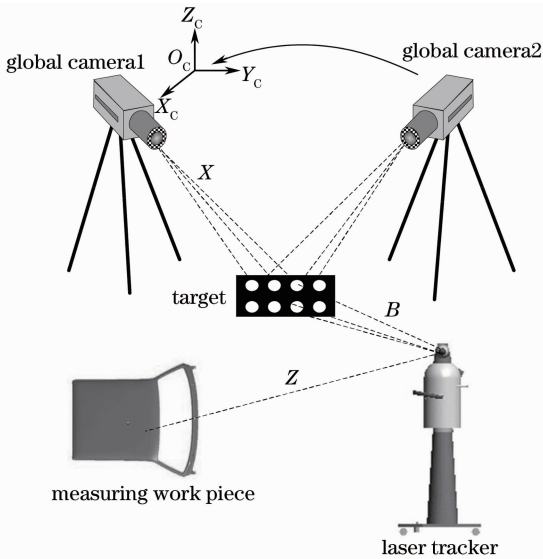


图 6 基准坐标系的建立

Fig. 6 Establishment of the reference coordinate system

将精确校准过的靶标放在全局相机的可视范围内,利用双相机拍摄靶标上的标准圆孔族,获得全

局相机坐标系与靶标坐标系的转换关系  $X$ ;利用激光跟踪仪,测量靶标的空间位置,建立靶标坐标系与激光跟踪仪坐标系的转换关系  $B$ ;利用激光跟踪仪观测被测工件,得到激光跟踪仪坐标系与被测工件坐标的转换关系  $Z$ 。统一以上坐标系,通过激光跟踪仪及靶标坐标系的链接,建立转换链:全局相机坐标系  $\rightarrow$  靶标坐标系  $\rightarrow$  激光跟踪仪坐标系  $\rightarrow$  工件坐标系,即<sup>[16]</sup>

$$N = Z \cdot B \cdot X. \quad (7)$$

视觉传感器上控制点阵坐标系与视觉传感器坐标系的转换关系  $H$  可描述为:在位于机器人手臂的视觉传感器上安装多个(3 个以上)高精度控制点,本文采用高稳定的红外 LED 作为光学控制点。建立控制点阵坐标系时需要至少 3 个不在同一直线的点,考虑机器人在某些位姿下控制点存在遮挡的情况,控制点阵的设计需遵循以下两个原则:

- 1) 所有测点不在同一直线;
- 2) 任意两个测点之间的距离不等,以保证能够判断建立控制点阵坐标系时所使用的控制点。

同时为保证控制点在视觉传感器处于不同姿态时,最大程度地被全局相机拍摄到,在视觉传感器两侧均布置控制点阵。借助激光跟踪仪对控制点阵及视觉传感器进行测量,方法同上,得到转换关系  $H$ ,如图 7 所示。

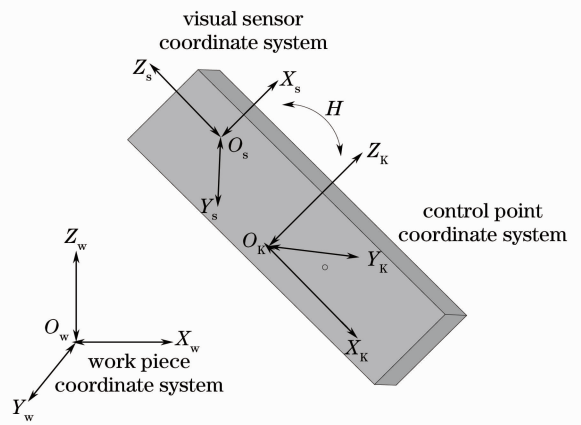


图 7 坐标系转换关系  $H$

Fig. 7 Transformation  $H$  between coordinate systems

在现场测量过程中,全局相机位置一经固定,全局相机坐标系与工件坐标系的转换关系  $N$  即可确定,并在测量过程中保持不变。控制点阵固定安装在视觉传感器上,控制点阵坐标系与视觉传感器坐标系的转换关系  $H$  确定即不变。

##### 4.2.2 机器人全局空间精确定位

基于双目立体视觉原理的机器人全局空间精确

定位,测量时的坐标变换链为:传感器坐标系→全局相机坐标系→工件坐标系,整个过程中没有涉及机器人模型,统一基础坐标系后,测量系统的精度仅取决于在每个测量点处传感器坐标系到全局相机坐标系的转换精度。

利用两台全局相机构建双目立体视觉测量系统,拍摄测量工件上不同测点时,视觉传感器的空间位姿,实时获取视觉传感器的空间三维坐标,得到传感器坐标系与全局相机坐标系之间转换关系  $M$ 。

结合系统图 1、7 可知,空间被测点  $P$  在工件坐标系下的坐标  $P_{lr}$  为

$$P_{lr} = N \cdot M \cdot H \cdot P_{cr}, \quad (8)$$

式中  $P_{cr}$  为工件上任一测量点在视觉传感器坐标系下的坐标。

测量时,控制点阵坐标系与视觉传感器坐标系的转换关系  $H$  及全局相机坐标系与工件坐标系的

表 1 基准尺 6 个位置的测量结果 (单位:mm)

Table 1 Measuring results of the standard ruler at six positions (unit: mm)

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	Standard deviation
Before correction	986.180	986.271	986.155	986.102	986.163	986.147	0.126
After correction	986.179	986.124	986.450	986.201	986.185	986.129	0.074

从表 1 中可以看出,经过残差修正后,测量数据的标准差为 0.074 mm,满足要求的测量精度,即双相机的测量精度可达到 0.1 mm 以内。

## 5.2 测量系统精度验证

实验使用的工业机器人是 motoman 的 up50N,工作半径为 2 m。采用 Leica 激光跟踪仪。全局相机为 Megaplug6.3i(3066 pixel×2048 pixel),并安装 Nikon 28 mm 广角镜头。机器人末端视觉传感器为自行研制,精度为 0.02 mm<sup>[17]</sup>。实验室环境下的实物图如图 8 所示。

实验过程如下:

- 1) 利用激光跟踪仪测量白车身上的 4 个标志点  $P_i$ ,得到在激光跟踪仪坐标系下的各点三维坐标,并计算任意两点之间的距离,作为标准值;
- 2) 利用视觉传感器测量白车身上同样的 4 个标志点,得到传感器坐标系下的各点坐标;
- 3) 利用两台全局相机测量传感器在每种位姿下的空间三维坐标,通过两个基础坐标系的链接,得到车身坐标系下被测标志点的空间三维坐标;
- 4) 计算车身坐标系下 4 个标志点任意两点之间的距离,作为实际测量值。

实验中,用激光跟踪仪测量的坐标作为基准值,

转换关系  $N$  均固定不变;传感器坐标系与全局相机坐标系的转换关系  $M$  可通过全局相机实时建立,完成机器人全局空间的精确定位。通过各坐标系的转换,完成测量系统的全局实时校准。

## 5 实验验证

### 5.1 相机内参校准精度验证

实验采用的全局相机为 Megaplug 6.3i (3066 pixel×2048 pixel),并安装 Nikon 28 mm 广角镜头,标准长度为 986.167 mm 的基准尺移动的空间范围为 120 cm×40 cm×80 cm。

利用两台全局相机测量基准尺在空间网格控制场内 6 个不同位置的长度,利用建立的残差库修正测量数据,当相邻两次迭代的结果之差在 ±0.1 mm 以内时,停止迭代,测量数据如表 1 所示。



图 8 现场实物图

Fig. 8 Experimental scene picture

对比两台全局相机的测量结果。但基准值是在激光跟踪仪坐标系下的坐标,实际测量值是在车身坐标系下的坐标,无法直接比较,因此求取任意两点间的距离,作为测量结果的对比依据。

激光跟踪仪测量结果如表 2、3 所示,两台全局相机的测量结果如表 4、5 所示。

从表 3、5 的数据对比中可以看出,在重复测量时,测量系统的精度可控制在 ±0.15 mm 以内。

表 2 激光跟踪仪的测点结果 (单位: mm)

Table 2 Point coordinates obtained by the laser tracker (unit: mm)

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
$x$	-986.127	-1101.529	-1032.301	-907.075
$y$	-667.150	-805.180	-683.625	-704.837
$z$	51.734	-231.411	-342.159	31.242

表 3 激光跟踪仪测量的两点距离 (单位: mm)

Table 3 Distance between each two points obtained by the laser tracker (unit: mm)

	$D_{12}$	$D_{13}$	$D_{14}$	$D_{23}$	$D_{24}$	$D_{34}$
Distance	335.471	396.932	89.941	178.419	341.859	394.411

表 4 坐标测量系统的测点结果 (单位: mm)

Table 4 Point coordinates obtained by the measurement system (unit: mm)

No.	$P_1$			$P_2$			$P_3$			$P_4$		
	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
1	900.456	123.776	1232.823	789.481	-22.391	951.913	849.471	102.542	839.610	981.303	90.591	1211.090
2	900.501	123.761	1232.762	789.406	-22.382	951.901	849.480	102.563	839.561	981.267	90.587	1211.068
3	900.542	123.693	1232.821	789.451	-22.357	951.881	849.371	102.573	839.542	981.357	90.623	1211.102
4	900.478	123.739	1232.823	789.458	-22.349	951.892	849.441	102.579	839.612	981.283	90.676	1211.042
5	900.474	123.715	1232.763	789.456	-22.384	951.870	849.450	102.528	839.626	981.320	90.597	1211.098
Mean	900.491	123.744	1232.802	789.452	-22.373	951.867	849.443	102.565	839.591	981.310	90.614	1211.080

表 5 坐标测量系统测量的两点距离 (单位: mm)

Table 5 Distance between each two points obtained by the measurement system (unit: mm)

	$D_{12}$	$D_{13}$	$D_{14}$	$D_{23}$	$D_{24}$	$D_{34}$
Mean	335.566	396.932	89.941	178.418	341.859	394.380
Mean error	0.094	0.144	0.065	0.053	0.147	0.030

## 6 结 论

本文提出的高精度柔性坐标测量及校准方法,能够实时得到视觉传感器坐标系与全局相机坐标系的转换关系,从而确定工件上被测点在自身坐标系下的三维坐标。机器人全局空间的定位精度完全由全局空间定位方法决定,与机器人自身定位精度无关;针对测量系统的全局实时校准,由两台全局相机实时获取视觉传感器坐标系与全局相机坐标系的关系,摆脱机器人模型,突破机器人的多关节机构定位精度不高的限制。同时为确保测量系统的柔性,可在被测工件四周不同站位布置多台全局相机,保证在机器人运动过程中,至少有两台全局相机能够拍摄到视觉传感器上的标定点阵。实验证明,基于空间网格控制场的相机内参校准方法能满足系统的测量要求,并且系统的测量精度可提高到 $\pm 0.15$  mm,相比传统的校准方法,精度明显提高,实现了被测点的三维坐标的高精度测量及测量系统的全局空间实时校准。由于工业机器人现场的工作环境恶劣,仍有问题需要进一步完善,如现场环境(光线、振动

等)、测量设备精度(多台全局相机的同步性)以及可能出现的外界干扰等问题。以后将在本文测量及校准的基础上,针对以上影响因素继续深入研究,进一步提高系统的测量精度。

## 参 考 文 献

- Liu Changjie, Xie Chengchao, Ye Shenghua. Study on real-time calibration and compensation of the coordinate measurement system for industry robot [J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(1): 86-90.  
刘常杰, 解成超, 叶声华. 工业机器人坐标测量系统实时校准补偿技术[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(1): 86-90.
- Ma Liqun, Wang Liding, Jin Shuyuan, et al.. Traceability status and developing trend of industrial large-scale measuring instruments [J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2006, 26(6): 1-5.  
马骊群, 王立鼎, 靳书元, 等. 工业大尺寸测量仪器的溯源现状及发展趋势[J]. *计测技术*, 2006, 26(6): 1-5.
- Wang Yi, Liu Changjie, Yang Xueyou, et al.. Online calibration of visual measurement system based on industrial robot [J]. *Robot*, 2011, 33(3): 299-302.  
王 一, 刘常杰, 杨学友, 等. 工业机器人视觉测量系统的在线校准技术[J]. *机器人*, 2011, 33(3): 299-302.
- Yiu Cheung Shiu, Shaheen Ahmad. Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form  $AX=XB$  [J]. *IEEE Trans Robotics and Automation*,

- 1989, 5(1): 16—29.
- 5 Jose Mauricio S T Motta, Guilheme C de Carvalho, R S McMaster. Robot calibration using a 3D vision-based measurement system with a single camera [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2001, 17(6): 487—497.
- 6 Ye Shenghua, Wang Yi. Calibration of robot kinematic parameters based on laser tracker [J]. J Tianjin University, 2007, 40(2): 202—205.  
叶声华, 王一. 基于激光跟踪仪的机器人运动学参数标定方法[J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 202—205.
- 7 Li Muguo, Han Bing, Wang Jing, *et al.*. Research on non-contact buoy 6-DOF detection system [J]. J Dalian University of Technology, 2004, 44(1): 114—117.  
李木国, 韩冰, 王静, 等. 非接触式浮体六自由度检测系统研究[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(1): 114—117.
- 8 Chen Zhuo, Yang Xichen. Based on machine vision laser robot pose measurement [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(s1): 312—316.  
陈卓, 杨洗陈. 基于光电视觉的激光机器人姿态检测[J]. 中国激光, 2010, 37(s1): 312—316.
- 9 Yuan Yun, Zhu Zhaokun, Zhang Xiaohu, *et al.*. Calibration method for large field of view camera based on infinite homography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0715002.  
苑云, 朱肇昆, 张小虎, 等. 基于无穷单应的大视场摄像机标定方法[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0715002.
- 10 Zhu Jigui, Guo Lei, Ye Shenghua. Principle and implementation method of three-dimensional precision positioning in large field working space [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1873—1876.  
郝继贵, 郭磊, 叶声华. 现场条件下大空间三维精密定位原理与方法[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1873—1876.
- 11 Gao Gui, Yang Xichen, Zhang Haiming. Study of binocular vision system calibration in laser remanufacturing robot [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1868—1872.  
高贵, 杨洗陈, 张海明. 激光再制造机器人双目视觉系统标定研究[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1868—1872.
- 12 Liu Jianwei, Liang Jin, Liang Xinhe, *et al.*. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 126—134.  
刘建伟, 梁晋, 梁新合, 等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 126—134.
- 13 Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330—1334.
- 14 Guo Yin, Liu Changjie, Zhu Jigui, *et al.*. Measurement system for dynamic envelope curve of high-speed train [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0208002.  
郭寅, 刘常杰, 郝继贵, 等. 高速列车动态包络线测量系统[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0208002.
- 15 Ren Yongjie, Zhu Jigui, Yang Xueyou, *et al.*. On-line calibration technique of robot flexible visual inspection system [J]. Robot, 2009, 31(1): 82—87.  
任永杰, 郝继贵, 杨学友, 等. 机器人柔性视觉检测系统现场标定技术[J]. 机器人, 2009, 31(1): 82—87.
- 16 Zhu Jigui, Yu Zhijing. The Principle of Vision Metrology [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.  
郝继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- 17 Liu Changjie, Chen Yiwei, Zhu Jigui, *et al.*. On-line flexible coordinate measurement system based on an industry robot [J]. J Optoelectronics•Laser, 2010, 21(12): 1817—1821.  
刘常杰, 陈益伟, 郝继贵, 等. 一种工业机器人柔性在线坐标测量系统[J]. 光电子•激光, 2010, 21(12): 1817—1821.

栏目编辑：何卓铭