

机器人柔性视觉检测系统现场标定技术

任永杰, 郝继贵, 杨学友, 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: 针对江淮车身厂的轿车车身提出了一种基于工业机器人的柔性视觉检测系统. 通过控制机器人在空间的位姿变换, 立体视觉传感器能够依次到达空间指定测量位置采集空间特征点的图像信息, 并通过计算图像数据获得该点的三维坐标数据. 利用双经纬仪和精密靶标对机器人视觉测量系统进行整体标定, 同时完成了测试试验数据的采集及计算, 取得了较好的测量效果. 该系统柔性好、测量无死角, 能适应生产线多车型检测的需要.

关键词: 立体视觉; 经纬仪; 柔性测量; 整体标定; 虚拟传感器

中图分类号: TP24

文献标识码: B

On-line Calibration Technique of Robot Flexible Visual Inspection System

REN Yong-jie, ZHU Ji-gui, YANG Xue-you, YE Sheng-hua

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

Abstract: A flexible visual inspection system based on industrial robot is designed for the car bodies of Jianghuai Automobile Corporation. By controlling pose transformation of the robot in space, the stereovision sensor can arrive at the given measurement points to capture images of space feature points successively, and the 3D coordinate data are obtained by computing the image data. The whole calibration of the robotic visual inspection system is carried out with two theodolites and one precision drone. At the same time, the testing data is collected and calculated, and the measurement result is satisfactory. The system can meet the requirements of multi-model vehicle measurement with the benefits of good flexibility and measurement range without dead angle.

Keywords: stereovision; theodolite; flexible measurement; whole calibration; dummy sensor

1 引言 (Introduction)

立体视觉测试技术是建立在计算机视觉研究基础上的一门新兴的测试技术. 它重点研究物体的几何尺寸及空间位置测量, 尤其适用于对大型工件的非接触测量, 如汽车白车身总成、各种车身覆盖件、车架和无缝钢管等. 纵观国内外的激光视觉测量系统, 它们大多是固定框架式结构 (以美国 Perception 公司开发的视觉检测系统为代表). 系统一旦组建完成, 所有的传感器都固定不动, 因此, 它的专用性强, 自动化程度高, 适于安装在大批量生产的自动化生产线上, 实现对产品百分之百在线测量. 但是这些技术特点作为优点的同时也暴露了固定式的视觉检测系统潜在的缺陷: 通用性差, 无法适用于现今大量存在的汽车混流或小批量生产线. 而机器人视觉检测系统正是在立体视觉技术的基础上, 为适应新的测量环境、满足新的测量要求而发展起来的新研究领域. 这种测量系统不仅能够充分发挥机器

人运动灵活、占地面积小的特点, 而且随时变换程序即能够满足产品多品种、多系列的测量需求, 尤其适合在混流生产线上对大型异型零部件进行非接触、快速、精确测量^[1].

2 柔性视觉检测系统的构成 (Composition of flexible visual inspection system)

一般情况下, 机器人视觉检测系统由高精度工业机器人、立体视觉传感器 (或其他类型的传感器)、测量和控制软件、测量计算机及图像处理系统等部分构成^[2,3]. 本系统针对江淮轿车厂成车车身的关键尺寸如挡风玻璃窗尺寸、底盘安装定位孔、车门棱边、发动机舱等关键部位尺寸进行测量. 本测量系统由两台对角布置的 KUKA 机器人及安装在末端的视觉传感器构成, 工业机器人作为立体视觉传感器的运动载体, 不仅极大地拓展了视觉传感器的工作空间, 还保留了视觉检测技术非接触、快速

的特点. 通过控制机器人在空间的位姿变换, 视觉传感器能够依次到达空间指定测量位置采集空间特征点的图像信息, 并通过数据处理获得该点的三维坐标数据.

机器人视觉检测系统的工作过程是: 白车身在滑撬上运动到检测工作站停下并精确定位, 主线控制器给检测站控制器发“到位”信号 → 站控制器给机器人发“车型”及“启动”信号 → 机器人接到信号后开始工作, 机器人在每个测量点向测量控制器发“测量请求”和“测点 ID”信号, 等待测量控制器发回的“测量完成信号” → 测量系统接到信号后开始测量并记录数据, 然后传递到测量分析软件进行处理, 测量结束后向机器人发“测量完成”信号 → 机器人收到“测量完成信号”后开始向下一测量点运动, 由此完成全部待测点的测量.

系统预先对机器人的运动轨迹进行规划, 使每个被测量特征点处于视觉传感器的最佳视场范围内, 然后逐点测量空间特征点三维位置. 安装于机器人关节末端的立体视觉传感器对工件被测特征点进行三维测量时能够获取的仅仅是该点在视觉传感器坐标系下的坐标值, 而不是被测量点在工件坐标系下的坐标值. 然而, 利用通用测量机器人进行空间三维位置测量的目的是获取被测量特征点在工件坐标系下的三维坐标值, 这就必须建立视觉传感器坐标系与工件坐标系的坐标变换关系^[4]. 图 1 是坐标系示意图.

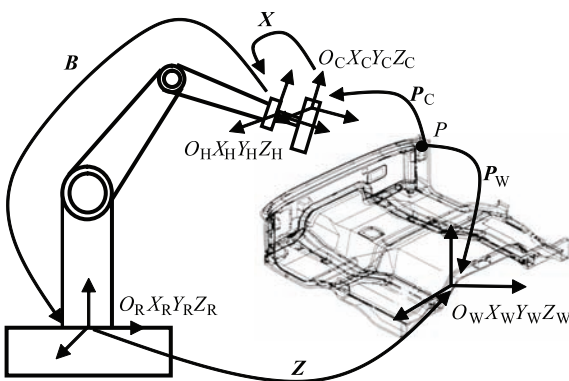


图 1 测量机器人系统坐标系示意图

Fig.1 Coordinate system of the measurement robot

系统中存在 4 个坐标系, 安装机器人时确定的基坐标系 $O_R X_R Y_R Z_R$ 和机器人末端关节坐标系 $O_H X_H Y_H Z_H$, 车身在生产线上由定位系统确定的车身坐标 $O_W X_W Y_W Z_W$ 和视觉传感器测量坐标系 $O_C X_C Y_C Z_C$. 测量结果即确定被测点 P 在车身坐标系 $O_W X_W Y_W Z_W$ 下的坐标 P_W . 从图 1 可以看出

$$P_W = Z \times B \times X \times P_C \quad (1)$$

式中: P_C 为被测点 P 在视觉传感器测量坐标系下的坐标值; X 为机器人手眼关系, 即机器人末端关节坐标系与视觉传感器测量坐标系之间的变换关系; B 为机器人末端关节坐标系与机器人基坐标系之间的坐标变换关系, 它可以由机器人的正向运动学模型及各个关节变量值获得; Z 为机器人基坐标系与白车身坐标系之间的位置变换关系. (1) 式中, X 和 Z 为未知量, 由于视觉传感器与机器人末端关节刚性连接, 测量过程中两者相对位置不变, 所以 X 在测量中恒定. 同样, 机器人基坐标系相对于白车身坐标系的位置关系也是不变的, 即 Z 值恒定. 因此, X 和 Z 都可以在测量前计算出来. 只要得到 P 点在视觉传感器测量坐标系下的坐标 P_C , 根据式 (1), 可计算出 P 点在车身坐标系下的坐标 P_W . 然而, 在使用 (1) 式的过程中, 如果使用机器人的理论运动学模型 B 进行解算, 由于机器人存在很大的绝对定位误差, 将导致最后的测量结果错误. 为此, 这里采用整体标定的方案.

3 现场标定技术 (On-line calibration technique)

3.1 标定原理

机器人柔性在线测量方面有两个关键技术: 测量点的标定技术及机器人的温度补偿技术. 其中机器人的温度补偿技术涉及到更多的机器人运动学方面的知识, 本实验室已经对此进行了深入研究并取得了显著成果, 具体可参考我们实验室此方面的文献资料, 在此不再赘述.

测量点的标定技术分为 3 种: 整体标定、同时标定和分步标定. 前者借用其他三维坐标测量工具直接获取在某一特定点时视觉传感器坐标系与工件坐标系之间的位置关系, 而同时标定方法则是利用数学方法同时求解出系统的未知坐标变换环节. 最后一种分步方法分别确定各相邻坐标系之间的位置关系, 然后通过坐标变换, 最终确定视觉传感器坐标系与工件坐标系之间的位置关系. 由于第一种方法的精度较高, 原理较成熟, 故现场使用第一种标定技术, 其余两种方法的原理请参考我们实验室的相关文献.

3.2 机器人视觉检测系统的标定技术

本系统采用整体标定方法, 当机器人带动视觉传感器到达每一个有效测量位置时, 只能采集一个被测量特征点的相关信息, 换句话说, 所有被测量点与机器人的某一空间位姿一一对应. 由前面的介绍可知: 为了获得被测点在工件坐标系下的坐标值,

必须建立在每个位置时视觉传感器局部坐标系与工件坐标系之间的变换关系. 它的实现可以采用双经纬仪(或激光跟踪仪)组成的移动式高精度空间坐标测量装置和一块事先经过标定的精密靶标作为中介工具, 建立一个中间工具坐标系(见图2). 对每一个测量位置进行标定时, 首先将靶标放置在被标定视觉传感器的视场范围内固定, 用视觉传感器测量靶标上的标准圆孔族, 可以得到传感器坐标系与靶标坐标系之间的位置关系; 其次, 用经纬仪观测靶标在空间的位置, 得到靶标与经纬仪测量装置之间的位置关系; 然后用经纬仪观测工件坐标系, 得到二者之间的关系. 最后由变换链: 传感器坐标系 → 靶标坐标系 → 经纬仪坐标系 → 工件坐标系, 实现某一测量位置下视觉传感器坐标系与工件坐标系之间的统一. 对每个测量位置依次重复上面的步骤, 则可以最终实现通用测量机器人的全局标定^[5], 不同于固定式测量系统, 这里也将每个位置下的传感器叫做虚拟传感器.

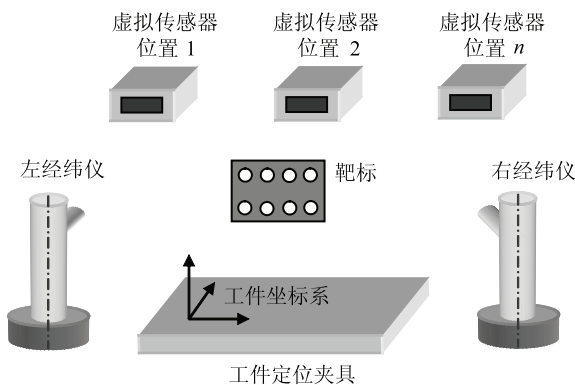


图2 利用中间工具坐标系进行机器人视觉测量系统的标定
Fig.2 Calibration of robot visual measurement system using middle tool coordinate

3.3 车身坐标系的建立和统一

(1) 标准坐标系^[6,7]

本系统中, 由于视觉传感器测量对象是特定棱孔、特定孔, 所以需通过全局标定来确定视觉传感器的空间位置, 即建立视觉传感器的空间坐标系. 同时待测白车身自身也有其车身坐标系, 因此, 需要将这些不同的坐标系统一到一个标准坐标系中. 我们采用两台经纬仪建立的光学三坐标系统作为此标准坐标系.

两台经纬仪组成一个空间点三维坐标移动测量设备, 原理如图3所示. 经纬仪是精密测角仪器, 它在自身坐标系中测量空间点的水平角和竖直角, 记两台经纬仪的坐标系分别为 $O_1X_1Y_1Z_1$ 、 $O_2X_2Y_2Z_2$, 空间被测点 P 在 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中的坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 在

$O_2X_2Y_2Z_2$ 中的坐标为 (x_2, y_2, z_2) , 经纬仪测得 P 点的水平角和竖直角分别为 $\alpha_1\beta_1$ 、 $\alpha_2\beta_2$, 由空间关系可知

$$\begin{cases} x_1 = z_1 \cdot \cot \alpha_1 \\ y_1 = z_1 \cdot \tan \beta_1 / \sin \alpha_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_2 = z_2 \cdot \cot \alpha_2 \\ y_2 = z_2 \cdot \tan \beta_2 / \sin \alpha_2 \end{cases} \quad (3)$$

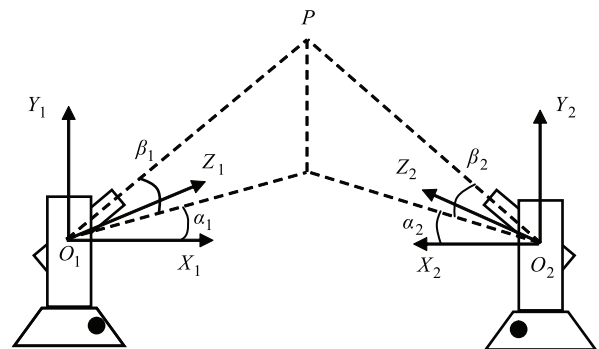


图3 经纬仪坐标系示意图
Fig.3 Theodolite coordinate system

设坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 到坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 之间的变换关系为

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$, $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$ 分别为坐标

系间的旋转矩阵和平移矩阵. (\mathbf{R} 为正交矩阵, 满足正交约束条件 $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{1}$)

经纬仪测量设备在使用之前, \mathbf{R} 、 \mathbf{T} 已严格标定出, 测量时, 由已知的 \mathbf{R} 、 \mathbf{T} , 联立式(2)~(4)就可以准确测量 P 点在 $O_1X_1Y_1Z_1$ 坐标系中的三维坐标. 表1给出了每次用经纬仪建立标准坐标系后用于校验的实测数据.

表1 标准坐标系实测数据

Tab.1 Actual measured data of standard coordinate

基准尺标准长度 /mm	实际测量长度 /mm
1021.981	1021.995
1021.981	1021.974
1021.981	1021.978
1021.981	1022.001
1021.981	1022.013

殷钢尺因具有良好的物理特性，在建系过程中作为长度基准和验证基准。标准长度为 1021.981 mm，最大绝对误差为 0.032 mm，相对误差为 0.00313%。由此可见，采用双经纬仪建立基准坐标系是可行的。

(2) 坐标系的统一

为了得到被测点在车身坐标系中的坐标，需要以标准坐标系为中介，把被测点在传感器坐标系中的坐标转换到车身定位坐标系中。这就需把传感器坐标系、车身定位坐标系与标准坐标系统一起来，

称为中介坐标统一法，具体过程见文 [6]。

在实际操作过程中分两步进行：

(1) 传感器坐标系和靶标坐标系的变换关系

$$R_{\text{sentodr}}$$

为减小现场坐标变换的劳动强度，在实验室中已经确立 R_{sentodr} ，现场只需在经纬仪坐标系下观测靶标上标记点就可以将传感器测量值转换到经纬仪坐标系下，在此过程中靶标是坐标变换的中介。现场系统由两个传感器构成，传感器坐标系到靶标坐标系（由其上的三个小陶瓷球建立）的转换参数为：

$$R_{1\text{sentodr}} = \begin{bmatrix} 0.988873 & 0.028026 & 0.146097 & -20.622100 \\ -0.026571 & 0.999576 & -0.011898 & -15.375551 \\ -0.146368 & 0.007884 & 0.989199 & 256.928600 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{2\text{sentodr}} = \begin{bmatrix} 0.987404 & 0.023163 & 0.156516 & -17.486891 \\ -0.021670 & 0.999702 & -0.011236 & -17.007231 \\ -0.156729 & 0.007703 & 0.987612 & 245.010181 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 靶标坐标系和经纬仪坐标系间关系 R_{drtofm} 以及经纬仪坐标系和车身坐标系间关系 R_{fntobody}

在每个经纬仪坐标系下，根据全局标定的方法都可以得到每个被测点位置下靶标坐标系和经纬仪坐标系的关系 R_{drtofm} 。现场测量点数为 84 点，为了简单起见，选择 1 号传感器以及在 1 号经纬仪测量

坐标系下的变换点，故挑选 8, 10, 12, 16, 18 号测量点，如表 2 所示。

则在每个点位时，靶标坐标系到 1 号经纬仪坐标系的变换关系如表 3 所示。其中的 $r_1 \sim r_9, t_x, t_y, t_z$ 表示坐标系间的旋转矩阵和平移矩阵的元素，如式 (4) 所示。

表 2 经纬仪坐标系下的坐标值

Tab.2 Coordinate values in theodolite coordinate system

测点	P ₁ /mm			P ₂ /mm			P ₃ /mm		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
8 号点位	2524.788	1849.223	-785.93	2546.799	1770.58	-779.763	2464.98	1787.945	-796.922
10 号点位	2503.344	1846.304	-467.26	2519.196	1766.237	-460.696	2438.644	1789.723	-476.126
12 号点位	1101.244	2060.389	-67.137	1089.775	2075.683	12.551	1021.835	2053.175	-33.876
16 号点位	1032.354	2230.567	193.795	971.132	2224.283	247.861	991.088	2302.012	219.14
18 号点位	970.686	2591.311	201.507	909.844	2584.982	255.888	929.382	2662.778	226.978

表 3 靶标坐标系到 1 号经纬仪坐标系的变换关系

Tab.3 Transformation relation from drone coordinate to the 1st theodolite coordinate

	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9	t_x	t_y	t_z
$R_{\text{drtofm}8}$	0.268	-0.94	0.201	-0.960	-0.278	-0.020	0.075	-0.187	-0.979	-2524.78	1849.22	-785.93
$R_{\text{drtofm}10}$	0.1935	-0.965	0.174	-0.977	-0.204	-0.045	0.080	-0.162	-0.983	2503.34	1846.30	-467.26
$R_{\text{drtofm}12}$	-0.139	-0.974	0.175	0.186	-0.199	-0.961	0.972	-0.101	0.209	1101.24	2060.38	-67.137
$R_{\text{drtofm}16}$	-0.747	-0.130	-0.651	-0.076	0.990	-0.11	0.659	-0.032	-0.750	1032.35	2230.56	193.795
$R_{\text{drtofm}18}$	-0.743	-0.132	-0.655	-0.077	0.990	-0.112	0.664	-0.033	-0.746	970.68	2591.31	201.507

表4 经纬仪坐标系到车身系的变换关系
Tab.4 Transformation relation from theodolite coordinate to body coordinate

测点	P ₁ /mm			P ₂ /mm			P ₃ /mm		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
BODY	457.447	-637.942	79.214	3653.281	-502.231	299.764	2143.451	582.452	14.707
THD1	3266.96	3629.724	-903.74	111.666	3104.213	-682.236	1743.019	2212.133	-967.752
THD2	1950.924	2080.368	-1017.676	5141.402	2307.093	-796.384	3601.359	3348.37	-1081.577
THD3	3267.203	3629.761	-903.889	111.782	3104.204	-682.363	1743.117	2212.169	-967.679
THD4	-1780.792	3846.473	-902.282	1100.973	2458.412	-681.147	281.546	4127.039	-966.367
THD5	2750.281	3014.746	-829.31	2659.364	6211.709	-607.703	1553.538	4717.481	-893.053

这些变化都通过固定于车身定位工装上的3个小陶瓷球(P₁、P₂、P₃)转移到车身系下,也即这3个小球是坐标变化的中介.由于受现场环境的限制,一次不可能将所有的传感器都统一到车上坐标系,现场共经过5次经纬仪坐标系的变换,将车

身系 BODY,经纬仪坐标系 THD1、THD2、THD3、THD4、THD5 间的变换置于表 4.

进而也可以求得每个经纬仪坐标系到车身坐标系的变换关系,易得经纬仪系 1 到车身系的变换关系为:

$$R_{1\text{fntobody}} = \begin{bmatrix} -0.99249 & -0.122289 & 0.00029476 & 4144.02937 \\ 0.122289 & -0.992494 & 3.352966e-005 & 2565.0552 \\ 0.00028844 & 6.93243e-005 & 0.9999999559954 & 981.759978 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

系统标定结束后,整个视觉检测系统就建立起来了,可以检测被测车身,给出被测点在车身自身坐标系中的空间三坐标.例如在8号点位时传感器测量得到的值为 $P_{\text{sen}} = [5.35 \quad -10.203 \quad 194.067]$,则最终测得的该点在传感器坐标系下的值为:

$$P = R_{1\text{fntobody}} \cdot R_{8\text{drtofm}} \cdot R_{1\text{sentodr}} \cdot P_{\text{sen}} \\ = [1294, 365, 1066.612, -235.857]$$

4 系统测量结果 (Measurement result)

本系统已投入现场使用,运行良好.系统检测结果经与三坐标测量机检测结果及标准车身相应位置坐标值比较,本系统测量精度完全符合质量要求.表5给出了视觉检测系统测量某一实际车身的测量数据(平均)与车身标准数据及均误差.该车车号为20071026216628,测试时间为2007-10-26 11:56:18.

表5 车身点测量数据
Tab.5 Measurement data of car body

序号	X /mm			Y /mm			Z /mm		
	理论值	测量均值	均误差	理论值	测量均值	均误差	理论值	测量均值	均误差
8点	1294.53	1294.36	-0.17	1068.16	1066.61	-1.55	-235.74	-235.85	-0.11
10点	1329.87	1329.65	-0.22	1080.54	1079.02	-1.52	80.95	80.30	-0.65
12点	2748.97	2747.54	-1.43	1087.86	1087.34	-0.52	1024.89	1024.33	-0.56
16点	3151.64	3151.70	0.06	518.43	518.53	0.1	851.84	848.93	-2.91
18点	3170.67	3170.63	-0.04	153.2	153.96	0.76	857.29	858.50	1.21

表6 车身点重复测量统计数据
Tab.6 Statistical data of body points by repeated measurement

序号	X /mm			Y /mm			Z /mm		
	平均值	方差	极差	平均值	方差	极差	平均值	方差	极差
8点	1294.36	0.100	0.68	1066.61	0.2168	0.58	-235.85	0.0461	0.21
10点	1329.65	0.1045	0.3864	1079.02	0.0593	0.232	80.30	0.033	0.1546
12点	2747.54	0.01763	0.0896	1087.34	0.1248	0.4394	1024.33	0.008	0.045
16点	3151.70	0.0412	0.2156	518.53	0.0206	0.0937	848.93	0.0467	0.2021
18点	3170.63	0.0333	0.1438	153.96	0.02104	0.0953	858.50	0.0606	0.2788

对上述5个被测点进行80次重复性测量,其平均值、方差及极差见表6.

通过表5和表6可以看到本测量系统的精度比较高,满足了生产中车辆检测的精度,达到了检测的目的.但是同时也应该看到,由于受环境温度和机器人本体温度的影响,测量的极差在某些点位较大,对于更高精度的检测还需要提高.

5 机器人温度补偿 (Robot temperature compensation)

现场使用的机器人是 KR 150 L110-2 型 KUKA 机器人,臂展较长,在做重复性实验时发现:由静

止开始对被测车身上第12号检测点长时间反复测量,在运行的3个多小时里y方向测量结果产生了0.43 mm的漂移,最后趋于稳定.除了机器人手臂有明显的升温之外,车体位置和机器人运动轨迹都没有发生变化,可以确定测量结果的漂移是由于机器人热膨胀变形,偏离了预先示教的姿态,如图4所示.车身现场并没有对温度进行补偿,我们实验室已经对此问题进行了深入研究,具体方法可以利用测量基准进行机器人温度误差补偿,根据温度变化前后测量值的变化,利用机器人的运动学模型动态地标定机器人连杆参数.具体参考我们实验室的相关文献,在此不再叙述.

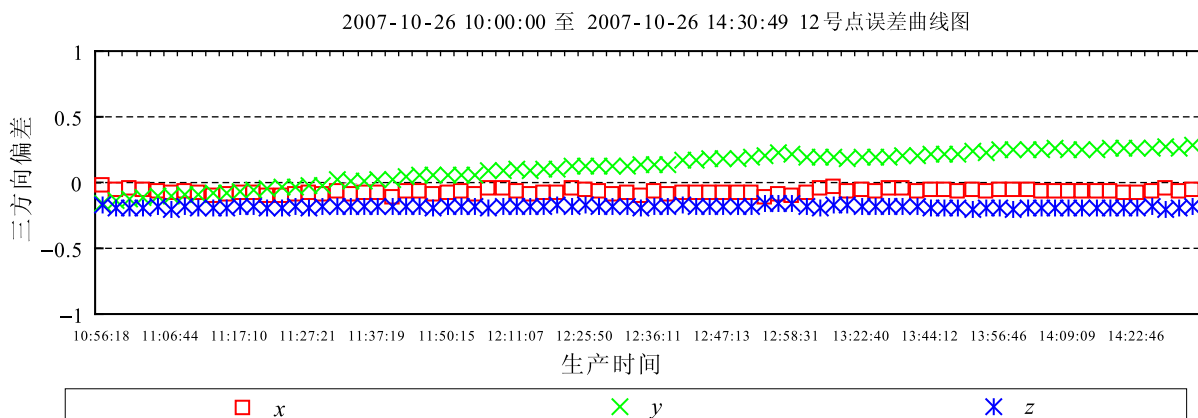


图4 测量机器人温度影响变化

Fig.4 Temperature effect of measurement robot

6 结束语 (Conclusion)

本文论述了机器人柔性视觉检测系统的基本组成,特别是系统建立后的系统空间不同坐标系的转换与统一的原理及其实现方法.利用研究开发的测量系统进行了实际测量,给出了实际的测量结果.本系统不但方便、省时省力、易操作,而且通过比对结果还可以看出,精度也比较高,达到了实用的要求,将来如果增加车型,只需重新变换机器人程序,再次标定即可使用,节约了成本.但对于精度要求更高的场合,需要构建具有温度补偿系统的测量站,以满足测量要求.

参考文献 (References)

- [1] Motta J M S T, de Carvalho G C, McMaster R S. Robot calibration using a 3D vision-based measurement system with a single camera[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2001, 17(6): 487~497.
- [2] 郑俊. 基于立体视觉的通用测量机器人标定模式研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005.
Zheng Jun. The Study on the Calibration Mode of the General Measuring Robot Based on Stereo Vision[D]. Tianjin: Tianjin

University, 2005.

- [3] 张建新. 双目立体视觉技术在工业检测中的应用研究 [D]. 天津: 天津大学, 1996.
Zhang Jian-xin. Application of Binocular Stereo Vision Technology in the Industry Detection Research[D]. Tianjin: Tianjin University, 1996.
- [4] Liu C J, Yang X Y, Zhu J G, *et al.* Flexible coordinate measurement system based on industrial robot for car body-in-white[J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2006, 17(2): 207~210.
- [5] Ren Y J, Zhu J G, Yang X Y, *et al.* The design and realization of a sort of robot vision measure system[A]. Proceedings of the SPIE (vol.6344) [C]. Bellingham WA, USA: SPIE, 2006. 63442Z-1~63442Z-6.
- [6] Liu C J, Zhu J G, Yang S H, *et al.* Car body in white inspection system with machine vision[J]. Automotive Engineering, 2000, 22(6): 373~376.
- [7] Tsai R Y, Lenz R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 345~358.

作者简介:

任永杰 (1975-), 男, 博士后. 研究领域: 视觉检测技术及应用, 机器人应用技术.