doi：10. 11823/j. issn. 1674 – 5795. 2021. 01. 02

基于多基站激光跟踪仪的机器人位姿精度测试方法

陈章位[1]，祖洪飞[2]，洪伟[3]，毛晨涛[4]

（1. 杭州亿恒科技有限公司，浙江 杭州 310000；2. 浙江理工大学 机械工程与自动控制学院，浙江 杭州 310000；
3. 上海市医疗器械检测所，上海 200000；4. 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室，浙江 杭州 310000）

摘 要：针对机器人末端位姿精度测试的需求，提出了基于多基站激光跟踪仪的测试方法。该方法采用三靶球测量方案，通过非线性最小二乘法求解转站参数，并融合多基站测量数据实现机器人末端位姿精度的测试。通过直线导轨和转台标准器对该方法的测试效果进行实验验证，结果显示相对于单基站激光跟踪仪的测试方法，三基站测量的定位精度提升了 38. 5%，定点重复精度提升了 42. 2%。将该多基站测试方案在型号为 IRB14000 的工业机器人上进行了试验，根据工业机器人性能规范及其试验方法国标(GB/T 12642)要求进行操作，得到了机器人位姿精度的测试结果，证明了该多基站测试方案的可行性。

关键词：机器人位姿测试；多基站测量；激光跟踪仪；转站精度；非线性最小二乘法

中图分类号：TB92；TP241. 2 **文献标识码**：A **文章编号**：1674 – 5795(2021)01 – 0010 – 07

The Accurate Robot Pose Measurement Based on Multi Base Station Laser Tracker

CHEN Zhangwei，ZU Hongfei，HONG Wei，MAO Chentao

（1. Econ Technology Ltd.，Hangzhou 310000，China；2. Zhejiang Sci-tech University，Hangzhou 310000，China；
3. Shanghai Medical Device Testing Institute，Shanghai 200000，China；
4. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronics Systems，Zhejiang University，Hangzhou 310000，China）

Abstract：In this paper，a measurement method based on multi base station laser tracker is proposed to meet the requirements of robot end-pose precision test. This method adopts the three-target measurement scheme，solves the transfer station parameters by the nonlinear least square method，and fuses the multi base station test data to realize the testing of the robots' end pose accuracy. The measuring effect of this method is verified by experiments with linear guide rail and standard apparatus of turntable. The results show that the measurement positioning accuracy of this three station measurement method is improved by 38. 5% and the repetitive positioning accuracy is improved by 42. 2% compared with that of the single base station laser tracker. The multi base station measurement scheme is tested an IRB14000 robot and the measurement results of robot pose accuracy are obtained according to the national standard GB/T 12642：Industrial robots-Performance criteria and related test methods，which proved the feasibility of the method.

Key words：pose testing of robots；multi-station measurement；laser tracker；station transfer accuracy；nonlinear least square method

0 引言

工业机器人的末端位姿精度是衡量其工作性能的重要指标[1]，目前，测试机器人末端位姿精度的主要手段有激光跟踪仪[2]、多相机视觉[3]、拉线传感器[4]等。其中激光跟踪仪因具有测量精度高、测量范围大等优点，在机器人性能测试系统中得到广泛应用。

激光跟踪仪的测量原理是：在机器人的末端安装可以原路反射激光的靶球，激光跟踪仪向靶球发射激光并检测靶球原路反射的激光，通过测量球坐标系的两个角度量和一个距离量，即可实现三维空间坐标的测量[5]。两个角度量由角度编码器测量，距离量通过激光干涉法测量[6]。其中，角度测量误差对激光跟踪仪整体三维坐标的定位精度影响较大[7]。由于单个激光跟踪仪只能测量点位坐标，很难用于姿态测量，目前一般采用在机器人末端安装三个靶球进行分时测量的方法得到姿态信息[8]。Muralikrishnan[9]指出，激光跟踪仪的测量误差主要来源于轴的非正交性和非相交性、旋转轴偏心、靶球的安装误差等几何误差或光学

误差[10]。采用多个激光跟踪仪进行多基站测量可以减小单激光跟踪仪测量的系统误差和随机误差，提升系统的测量精度[11-12]。基于视觉相机原理的测量系统使用高速像机对被测对象的运动进行捕捉，依据投影定理对捕获的多目图像进行处理，利用共线方程拟合得到被测靶标的笛卡尔坐标，该方法具有快速、非接触测量等优点[13]。Zhang[14]等人通过双目相机系统测量固定在机器人末端的 QR 码，对比双目图像来拟合并估计末端位姿。拉线传感器则通过钢丝绳伸缩的位移信号来确定机器人末端与地面固定点间的距离，但只能获取末端的一维信号，精度相对较低，并且钢丝绳存在磨损现象。成世良[4]给出了使用拉线传感器对机器人运动学校准的方法，并对拉线传感器的测量误差进行了分析。

在 GB/T 12642《工业机器人性能规范及其试验方法》[15]中详细描述了工业机器人位姿精度定义以及不同测试方案。基于激光跟踪仪的测试系统相比多相机视觉、拉线传感等系统具有测量精度高、测量范围大的优点。此外，基于多基站激光跟踪仪系统进行测量，可以减小单激光跟踪仪测量的系统误差和随机误差，提升系统的测量精度，且该方法根据机器人末端的多个测量点位置合成位姿信息进行位姿精度测试，大幅提升了测试效率。

本文针对机器人末端位姿精度测试的需求，提出基于多基站激光跟踪仪的测量方法，采用三靶球测量方案，通过非线性最小二乘法求解转站参数，并融合多基站测量数据实现机器人末端位姿精度测试。

1　转站原理和转站参数辨识

激光跟踪仪转站是指利用多台激光跟踪仪同时测量时，将不同激光跟踪仪对应的不同测量坐标系下的测量数据进行统一的过程。

多个激光跟踪仪同时测量时，选择其中一个激光跟踪仪为主站，其它激光跟踪仪为子站。主站的测量坐标系不进行坐标变换，子站的测量坐标系经过坐标变换与主站坐标系统一。

如图 1 所示，采用 3 个激光跟踪仪 A，B，C 同时测量，设某位型下工具中心点为 *TCP*，多基站为公共测量点 $\boldsymbol{p}_i(i=1,2,\cdots,n)$。令激光跟踪仪 A 为主站，不失一般性，分析主站 A 与子站 B 的转站关系。设公共点 $\boldsymbol{p}_i$ 在主站 A 的测量坐标系下的齐次坐标为 $\boldsymbol{p}_i^A=[x_{Ai}\quad y_{Ai}\quad z_{Ai}\quad 1]^{\mathrm{T}}$，在子站 B 的测量坐标系下为 $\boldsymbol{p}_i^B=[x_{Bi}\quad y_{Bi}\quad z_{Bi}\quad 1]^{\mathrm{T}}$，则转站公式为

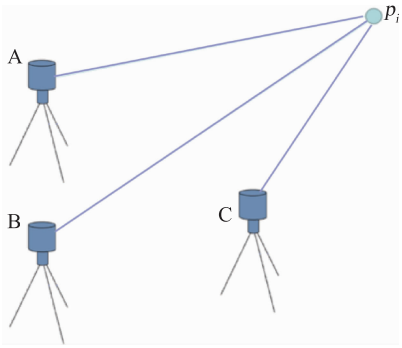

图 1　多基站转站示意图

$$\boldsymbol{p}_i^A=\boldsymbol{T}_B^A\boldsymbol{p}_i^B \tag{1}$$

$$\boldsymbol{T}_B^A=\begin{bmatrix}\cos\varphi\cos\theta & \cos\varphi\sin\theta\sin\psi-\sin\varphi\cos\psi & \cos\varphi\sin\theta\cos\psi+\sin\varphi\sin\psi & X\\ \sin\varphi\cos\theta & \sin\varphi\sin\theta\sin\psi+\cos\varphi\cos\psi & \sin\varphi\sin\theta\cos\psi-\cos\varphi\sin\psi & Y\\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\psi & Z\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{T}_B^A$ 为主站 A 到子站 B 的坐标转换矩阵；X，Y，Z 为从主站坐标系到子站坐标系的平移变换坐标量；ψ，θ，φ 为主站坐标系和子站坐标系旋转变换角度量，分别对应于 *ZYX* 欧拉角绕 X 轴，Y 轴，Z 轴方向转动量。

当激光跟踪仪数量大于两个时，需要利用式(1)和式(2)进行转站(将所有的子站坐标参数转换到主站测量坐标系下)，从而使所有基站的测量坐标系统一。实现转站测量的前提是辨识式(2)中旋转平移变换矩阵中包含的 6 个未知参数，即 ψ，θ，φ，X，Y，Z。这 6 个参数可以通过以下方法辨识：选择所有跟踪仪公共测量工作空间中的任意多个测量点(推荐为 7 个)；对于每一个测量点，均可根据式(1)写出 3 个等式方程；代入不同激光跟踪仪的测量数据，最后得到包含 6 个未知数的非线性等式方程组(如果是 7 个测量点，则对应 21 个方程)；该方程组的方程个数大于未知量个数，采用 LM 法求其非线性最小二乘解[16]。

2　坐标系对齐

图 2 是单激光跟踪仪测试系统中机器人基坐标系 $\{b\}$、工具坐标系 $\{n\}$、测量坐标系 $\{m\}$ 的示意图。激光跟踪仪测量的点位数据是靶球的中心点(*TCP*)坐标，而靶球中心点在末端法兰盘的坐标未知，需要在机器人不同位型下通过激光跟踪仪的测量结果对*TCP*

坐标进行标定得到。此外，由于激光跟踪仪的测量结果是在其测量坐标系下的，需要先将其与基坐标系对齐，再进行位姿精度评价。

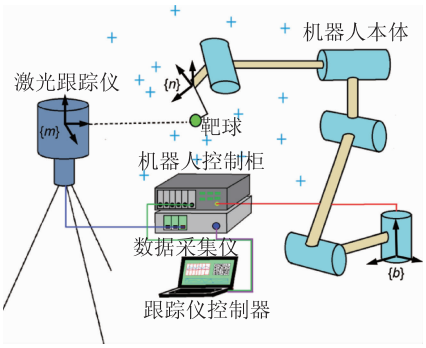

图 2 单激光跟踪仪测试系统示意图

2.1 *TCP* 坐标计算

如图 3 所示，设工具中心点 *TCP*(靶球)在末端法兰盘坐标系下的齐次坐标为 $\boldsymbol{p}_t^n = [X_t \quad X_t \quad X_t \quad 1]^{\mathrm{T}}$，机器人在不同位型下的 *TCP* 坐标 $\boldsymbol{p}_t^n$ 是固定不变的，可通过测量多组位型求解。

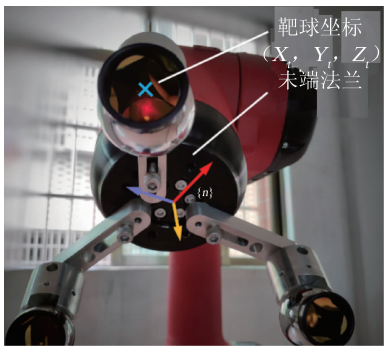

图 3 *TCP* 坐标示意图

图 4 是机器人在位型 i 和位型 j 下的工具坐标系，所对应的靶球中心点分别为 P_i 和 P_j。

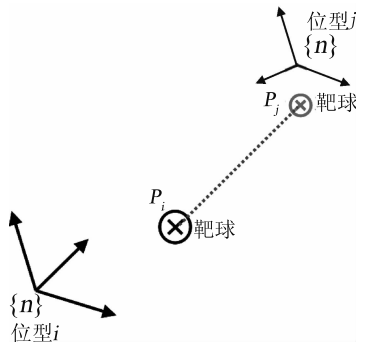

图 4 *TCP* 坐标计算方案

P_i 和 P_j 的坐标既可以在机器人基坐标系下描述，也可以在激光跟踪仪的测量坐标系下描述，但无论在哪种固定坐标系下，P_i 和 P_j 之间的距离为定值。在测量坐标系下，P_i 和 P_j 的距离计算公式为

$$D_m^{i\text{-}j} = \left\| \boldsymbol{y}_t^{m(i)} - \boldsymbol{y}_t^{m(j)} \right\| \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{y}_t^{m(i)}$，$\boldsymbol{y}_t^{m(j)}$ 分别为 P_i 点和 P_j 点在测量坐标系下的坐标。

P_i 和 P_j 在基坐标系下的名义距离为

$$D_c^{i\text{-}j} = \left\| \boldsymbol{p}_t^{b(i)} - \boldsymbol{p}_t^{b(j)} \right\| \tag{4}$$

若机器人各个位型的基坐标系-工具坐标系的转换矩阵 $\boldsymbol{T}_n^{b(i)}$ 已知，式(4)可进一步表示为 *TCP* 工具坐标 $\boldsymbol{p}_t^n$ 的形式，由约束条件 $D_m^{i\text{-}j} = D_c^{i\text{-}j}$ 可得

$$\left\| \boldsymbol{y}_t^{m(i)} - \boldsymbol{y}_t^{m(j)} \right\| = \left\| (\boldsymbol{T}_n^{b(i)} - \boldsymbol{T}_n^{b(j)}) \boldsymbol{p}_t^n \right\| \tag{5}$$

式(5)中的转换矩阵 $\boldsymbol{T}_n^{b(i)}$ 和 $\boldsymbol{T}_n^{b(j)}$ 可由串联机器人的前向运动学模型求得[17]，其值与机器人各个关节的固有结构参数 a，α，d，β 和各个位型下的关节角度 θ_i 有关。

$$\boldsymbol{T}_n^{b(i)} = \boldsymbol{T}_b^m \boldsymbol{T}_1^b \boldsymbol{T}_2^1 \cdots \boldsymbol{T}_n^{n-1} = \boldsymbol{f}(a, \alpha, d, \beta, \theta_i) \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{f}(a, \alpha, d, \beta, \theta_i)$ 为 MDH 模型参数 a，α，d，β，θ_i 到基坐标系-工具坐标系转换矩阵的非线性映射。

根据机器人参数和实测关节角，即可求得转换矩阵 $\boldsymbol{T}_n^{b(i)}$。在机器人工作空间和激光跟踪仪测量空间的交集内随机测量多个点(推荐为 20 个点)，其中任意两个点可根据式(5)列出三个非线性等式方程，方程中的未知量为 3 个($\boldsymbol{p}_t^n$ 的三维坐标)，采用 LM 法求解此非线性最小二乘问题即可计算出 *TCP* 坐标。

2.2 测量坐标系与基坐标系转换

对于测量坐标系与基坐标系转换的标定，选取 20 个位型进行末端靶球的位置测量，则任意一个位型下的靶球中心点 i 在测量坐标系的坐标可以表示为

$$\boldsymbol{y}_t^{m(i)} = \boldsymbol{T}_b^m \boldsymbol{T}_n^{b(i)} \boldsymbol{p}_t^n \tag{7}$$

式(7)中的 $\boldsymbol{T}_n^{b(i)}$ 可以通过式(6)得到，$\boldsymbol{p}_t^n$ 已在 2.1 节中求得，$\boldsymbol{T}_b^m$ 为需要求解的坐标转换，其中有 6 个未知参数。对 20 个点位写出超定方程组，求解 $\boldsymbol{T}_b^m$ 的最小二乘解。

3 多基站位姿精度测试及数据处理

机器人末端位姿精度的多基站测试方案如图 5 所示，机器人末端法兰盘上安装三个靶球 A，B，C(实物如图 3 所示)，这三个靶球的坐标由三个激光跟踪仪分别测量。每个激光跟踪仪的 *TCP* 坐标和测量坐标系-基坐标系转换均采用第 2 节的方法标定，同时，由于三

个靶球的测量在不同的测量坐标系下进行，通过第 1 节的转站方法将两个子站的测量坐标均表示在主站的测量坐标系下。

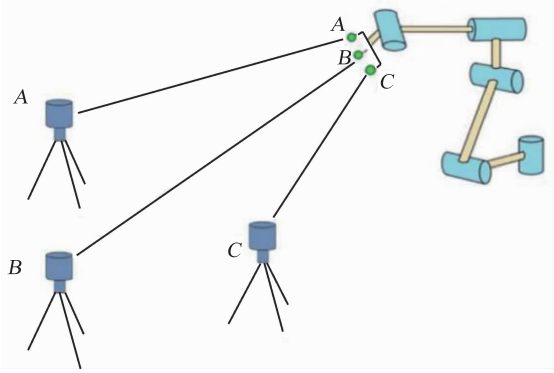

图 5　多基站位姿精度测试方案

在第 i 个位型下，三个靶球中心点在各自测量坐标系下的坐标分别为 $\boldsymbol{p}_i^A$，$\boldsymbol{p}_i^B$，$\boldsymbol{p}_i^C$，将 B，C 子站的测量点位根据式(1)转换至主站 A 上表示，将在主站坐标系下表示的三个靶球点位置信息进行融合，可表示为

$$\boldsymbol{p}_{i(\text{main})}^A = \frac{(\boldsymbol{p}_i^A + \boldsymbol{T}_B^A \boldsymbol{p}_i^B + \boldsymbol{T}_C^A \boldsymbol{p}_i^C)}{3} \tag{8}$$

在第 i 个位型下，利用三个靶球点位置信息可以合成机器人末端的姿态，可将姿态描述为 3×3 矩阵 $\boldsymbol{Q}_i$，即

$$\boldsymbol{Q}_i = [\boldsymbol{a}_i \quad \boldsymbol{o}_i \quad \boldsymbol{e}_i] \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{o}_i$，$\boldsymbol{e}_i$ 均为 3 × 1 的列向量。$\boldsymbol{a}_i = \{\boldsymbol{T}_B^A \boldsymbol{p}_i^B - \boldsymbol{p}_i^A\}_{3\times1}$；$\boldsymbol{b}_i = \{\boldsymbol{T}_C^A \boldsymbol{p}_i^C - \boldsymbol{p}_i^A\}_{3\times1}$；$\boldsymbol{e}_i = \boldsymbol{a}_i \times \boldsymbol{b}_i$；$\boldsymbol{o}_i = \boldsymbol{e}_i \times \boldsymbol{a}_i$。其中，$\{\cdot\}_{3\times1}$ 表示取该列向量的前 3 项组成的 3×1 列向量。3×1 矩阵表示的姿态 $\boldsymbol{Q}_i$ 也可以转化为欧拉角的表示方法[18]，即

$$\gamma_{ai} = \arctan\left(\frac{\boldsymbol{Q}_i(3,\ 2)}{\boldsymbol{Q}_i(3,\ 3)}\right) \tag{10}$$

$$\gamma_{bi} = \arctan\left(\frac{-\boldsymbol{Q}_i(3,\ 1)}{\sqrt{\boldsymbol{Q}_i(3,\ 2)^2 + \boldsymbol{Q}_i(3,\ 3)^2}}\right) \tag{11}$$

$$\gamma_{ci} = \arctan\left(\frac{\boldsymbol{Q}_i(2,\ 1)}{\boldsymbol{Q}_i(1,\ 1)}\right) \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{Q}_i(j,\ k)$ 为 $\boldsymbol{Q}_i$ 矩阵的第 j 行第 k 列的元素。γ_{ai}，γ_{bi}，γ_{ci} 为单位为 rad 的欧拉角。

4　多基站测试精度的标准器实验分析

为了验证多基站相对单基站对位置测试精度的提升作用，本课题组在浙江省计量科学研究院的直线导轨标准器上(如图 6 所示)进行了实验。直线导轨标准器将三台激光干涉仪的测量结果进行融合作为基准，其测量不确定度为 1 μm。通过如图 7 所示的校准过程，直线导轨标准器将量值传递给多基站测试系统和单基站测试系统。将所有的激光跟踪仪通过 I/O 通讯口与主从控制单元连接，并将所有的采样频率设置一致，保证硬件同步。开始测试时，同步触发所有的激光跟踪仪，采集的位置数据中同时包含时间戳信息，可用于后续的分析与对齐，保证软件上的同步。在直线导轨的滑块上安装三个靶球，采用三个激光跟踪仪同时测量，得到三个基站下的靶球位置坐标，根据式(8)计算多基站测量的靶球位置。

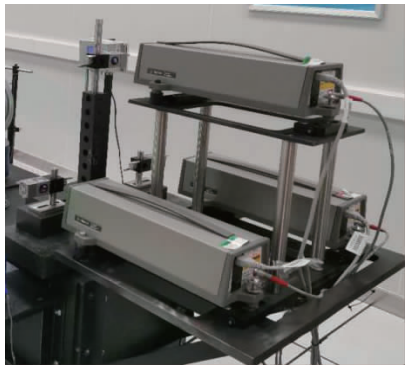

图 6　直线导轨标准器实验装置

图 7　多基站测试的直线导轨标准器实验装置

使用直线导轨标准器分别对三基站测试系统和单基站测试系统进行校准。图 8 给出了三基站和单基站测试的定位精度校准结果对比。其中黑色和蓝色分别代表多基站和单基站的测试结果，单基站测试结果直接采用了主站的测量数据。

由图 8 可知，多基站测试的最大定位误差为 0.008 mm，而单基站测试的最大定位误差为 0.013 mm。相对于单基站测试，多基站测试的定位误差降低了 38.5%。同时，采用三基站测试方案的定点重复误差为 ±0.0048 mm，而单基站的定点重复误差为 ±0.0083 mm，

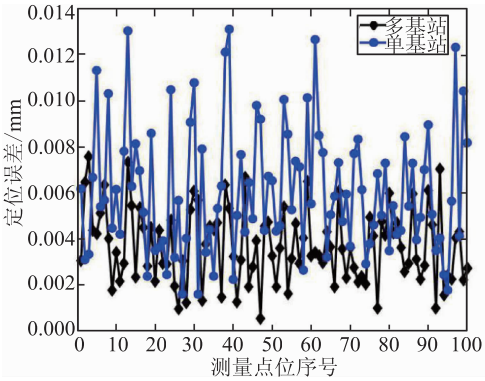

图 8 多基站与单基站测试的定位精度对比

三基站测试的定点重复误差降低了 42.2%。

使用直线导轨标准器分别对三基站测试系统和单基站测试系统的动态重复精度进行校准。直线导轨标准器重复运行一段轨迹 10 次，基于三基站测试系统和单基站测试系统分别测量计算轨迹起始点与终止点的距离。动态重复精度对比如表 1 所示。

表 1 动态重复精度(距离精度)对比 mm

轨迹序号	距离	单基站误差	多基站误差
轨迹 1	400	0.035	0.012
轨迹 2	300	0.045	0.018
轨迹 3	200	0.028	0.010

由表 1 可知，对应 3 段 400，300，200 mm 的不同距离校准试验中，多基站测试的距离误差均比单基站测试的距离误差小，动态重复误差相对单基站测试降低了 60%。总结以上基于直线导轨标准器的校准结果可知，多基站的测试方案相对于单基站测试方案，可以明显提升定点定位精度和重复精度，以及动态重复精度。

多基站测试方案还可以实现动态姿态测试，而单基站测试无法实现姿态测试。使用图 9 所示的转台标准器(不确定度 0.001°)对多基站测试系统进行校准。

图 9 多基站测试的转台标准器实验装置

在转台标准器的末端法兰平面上固定三个不共线的靶球，三台激光跟踪仪分别测量对应的靶球点坐标，获取转台末端的位姿测量信息。通过式(10)~(12)，计算得到转台位姿的欧拉角测量值。比对标准器的欧拉角数值，得到三个角度测试误差如图 10 所示，多基站激光跟踪仪系统的姿态角度测试误差不高于 0.013°。

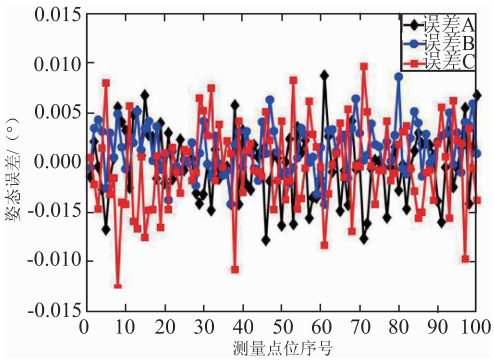

图 10 多基站测试的转台实验姿态(角度)精度

5 机器人末端位姿精度测试

依据 GB/T 12642《工业机器人性能规范及其试验方法》[15]，采用三基站测试方案对图 11 所示型号为 IRB14000 的工业机器人末端位姿精度进行测试。在机器人末端法兰盘上安装有三个靶球，当这三个靶球不共线时能够准确地反映机器人末端的位姿信息，如图 12 所示。

图 11 工业机器人的多基站测试实验系统

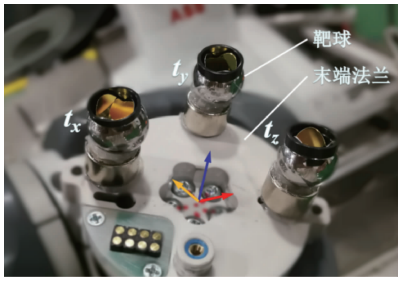

图 12 测试靶球的空间分布情况

测试系统的姿态测试精度与三个靶球的相对距离有关，距离越大，则相应的姿态测试精度越高，但有可能会造成测试不便，碰撞到其他物体。因此，综合以上因素考虑，三个靶球之间的相对距离约为 5 cm。

任意选取 5 个点位测试其位姿精度，测试结果见表 2。

由表 2 可知，5 个点位中，最大定位误差为 0.325 mm，最大姿态角度误差为 0.072 °。

表 2　位姿精度测量结果

点位序号	定位误差/mm	角度误差/(°)		
		A	B	C
1	0.205	−0.052	0.032	0.011
2	0.153	0.072	−0.018	−0.008
3	0.325	0.028	−0.060	0.035
4	0.189	−0.035	0.021	−0.052
5	0.195	−0.012	0.030	0.038

为了进一步测试机器人末端的轨迹精度，全机器人末端分别进行直线轨迹和圆轨迹运动。指令直线轨迹与实测轨迹上的采样点位姿三维图如图 13 所示。

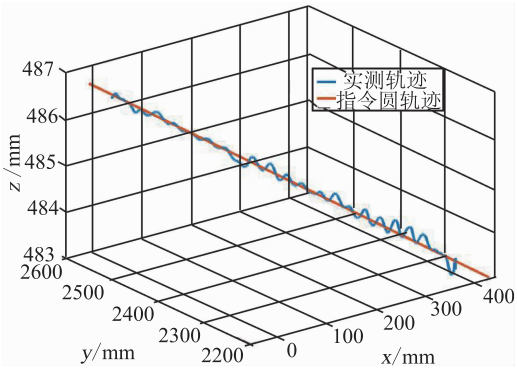

图 13　指令直线轨迹和实测轨迹图

直线轨迹运行过程中各个采样点与指令轨迹的定位误差和姿态误差，如图 14，15 所示。其中，t 从 0 到 1 表示轨迹从开始到结束。可以看出，该直线轨迹的最大定位误差为 0.587 mm，最大角度误差为 0.165 °。

图 16 是指令圆轨迹和实测轨迹上的采样点位姿三维图如图 16 所示，图 17 和图 18 分别为圆轨迹运行过程中各个采样点与指令轨迹的定位误差和姿态误差。

由图 17，18 可知该圆轨迹的最大定位误差为 0.582 mm，最大的角度误差为 0.203 °。

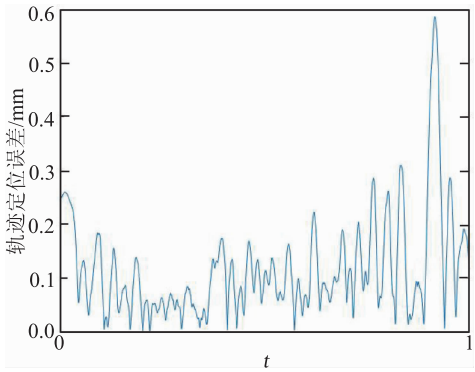

图 14　直线轨迹的定位误差

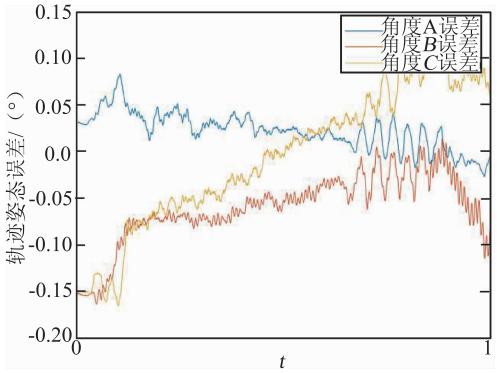

图 15　直线轨迹的姿态(角度)误差

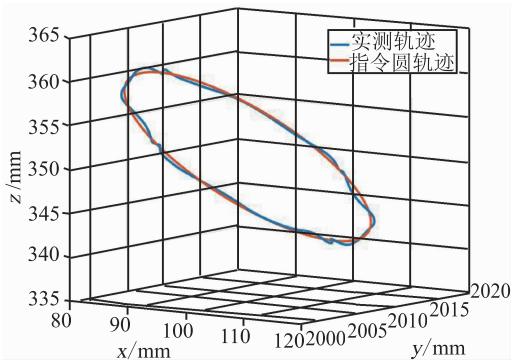

图 16　指令圆轨迹和实测轨迹图

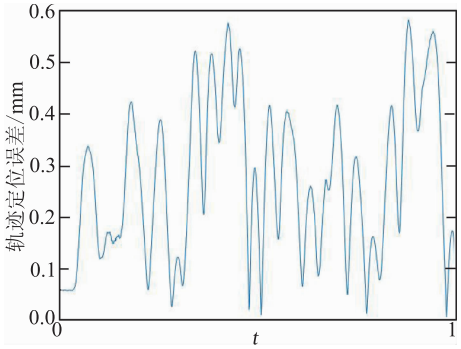

图 17　圆轨迹的定位误差

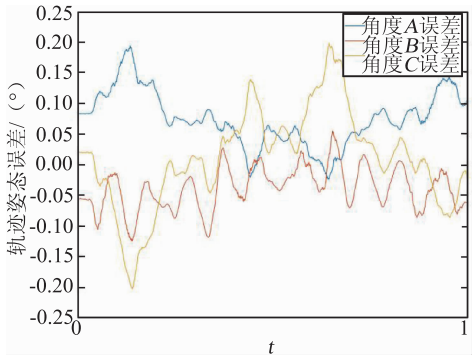

图 18 圆轨迹的姿态(角度)误差

6 结论

文章提出了基于多基站激光跟踪仪的机器人位姿精度测试方法，通过在直线导轨和转台标准器上对三基站激光跟踪仪测量系统进行精度验证，证明了相对单基站测试，三基站测试的定位误差降低了 38.5%，定点重复误差降低了 42.2%；三基站能够完成单基站所不能实现的姿态测试功能，且姿态角度误差不高于0.013 °。此外，根据工业机器人位姿精度的测试需求，通过非线性最小二乘法实现了 *TCP* 坐标、基坐标系-测量坐标系的对齐，采用三基站测试方法对型号为 IRB14000 的工业机器人的点位、轨迹的位姿精度进行测试和评价。本文的研究将对机器人位姿精度测试技术发展起到推动作用，为促进国产机器人技术发展提供支撑。

参 考 文 献

[1] 朱敏杰. 基于激光跟踪仪的工业机器人性能测试与评价[D]. 北京：北京工业大学，2018.

[2] 任永杰，邾继贵，杨学友，等. 利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法[J]. 机械工程学报，2007，43（9）：195－200.

[3] Du G，Zhang P. Online robot calibration based on vision measurement[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing，2013，29(6)：484－492.

[4] 成世良. 基于拉线传感器的工业机器人标定系统设计[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014.

[5] 周维虎. 大尺寸空间坐标测量系统精度理论若干问题的研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2000.

[6] Osawa，Sonko. High-performance laser tracker using an articulating mirror for the calibration of coordinate measuring machine [J]. Optical Engineering，2002，41(3)：632－637.

[7] 刘力，陈新东，熊玲，等. 大口径非球面镜检测中激光跟踪仪测角误差研究[J]. 中国激光，2016，43（11）：160－170.

[8] Wu Y，Klimchik A，Caro S，et al. Geometric calibration of industrial robots using enhanced partial pose measurements and design of experiments[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing，2015，35：151－168.

[9] Muralikrishnan B，Phillips S，Sawyer D. Laser Trackers for Large Scale Dimensional Metrology：A Review[J]. Precision Engineering，2015，44：13－28.

[10] 欧阳健飞，刘万里，闫勇刚，等. 激光跟踪仪坐标测量精度的研究[J]. 红外与激光工程，2008(S1)：15－18.

[11] Hughes B，Forbes A，Lewis A，et al. Laser tracker error determination using a network measurement[J]. Measurement ence & Technology，2011，22(4)：045103.

[12] 倪思方. 激光跟踪仪校准中的测量不确定度评估[J]. 军工计量，2012(S1)：92－99.

[13] 雄卡. 图像处理、分析与机器视觉[M]. 北京：清华大学出版社，2011.

[14] Zhang X，Song Y，Yang Y，et al. Stereo vision based autonomous robot calibration[J]. Robotics and Autonomous Systems. 2017，93：43－51.

[15] 国家质量监督检验检疫总局 . GB/T12642－2013 工业机器人-性能规范及其试验方法[S]. 北京：中国标准出版社，2014.

[16] Motta J M S T，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.

[17] Mooring B W，Roth Z S，Driels M R. Fundamentals of Manipulator Calibration[Z]. Wiley：New York，1991.

[18] Mark W Spang，Seth Hutchinson，M Vidja Sagar. Robot Modeling and Control[M]. China Machinery Industry Press，2016.

收稿日期：2020－11－18；**修回日期**：2021－01－06

基金项目：浙江省重点研发计划(2020C01028)

作者简介

陈章位(1965－)，男，浙江大学教授，博士。主要研究领域为机器人测量与校准。1986 年毕业于浙江大学科仪系，1995 年获工学博士学位，1998 年任浙大副教授，并于 2004 年被学校聘为教授。师承我国著名科学院、工程院两院院士路甬祥教授(兼任中国科学院院长及中共中央委员、十一届全国人大常委会副委员长)。现任中国振动工程学会常务理事，全国机械振动与冲击标准化技术委员会委员，浙江省振动工程学会副理事。长期致力于智能控制、振动控制、噪声测量、信号处理和嵌入式系统等领域的理论与应用研究，发表 SCI/EI 期刊论文 40 余篇，先后主持各类项目 30 余项，授权发明专利 20 余项，获得浙江省科技进步三等奖 2 项，有着丰富的工业机器人性能检测、高端智能装备产业化经验。