



中华人民共和国国家标准

GB/T 12642—2013/ISO 9283:1998
代替 GB/T 12642—2001

工业机器人 性能规范及其试验方法

Industrial robots—Performance criteria and related test methods

(ISO 9283:1998, IDT)

2013-11-12 发布

2014-03-15 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 定义	1
4 单位	2
5 缩略语和符号	2
6 性能测试条件与性能检测方法	4
7 位姿特性	12
8 轨迹特性	26
9 最小定位时间	33
10 静态柔顺性	34
11 面向应用的特殊性能规范	35
12 试验报告	36
附录 A (规范性附录) 对比试验的参数	37
附录 B (资料性附录) 典型应用性能规范的选择指南	41
附录 C (资料性附录) 试验报告实例	43
附录 NA (资料性附录) 基于 GB/T 12642 的工业机器人性能检测方法	47
参考文献	63

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB/T 12642—2001《工业机器人 性能规范及其试验方法》，与 GB/T 12642—2001 相比主要技术变化如下：

- 删除了原“ISO 前言”(2001 年版“ISO 前言”)；
- 增加了单位“转/分”(见第 4 章,2001 年版第 4 章)；
- 调整了缩略语和符号的顺序(见第 5 章,2001 年版第 5 章)；
- 增加 6.12 工业机器人性能检测方法(见 6.12,2001 年版第 6 章)；
- 修改了 7.2.2 中的公式(见 7.2.2,2001 年版 7.2.2)；
- 修改了 7.3.3 中的公式(见 7.3.3,2001 年版 7.3.3)；
- 将附录 C 中表 C.4“位置稳定时间和超调”改为“位置稳定时间和超调量”(见表 C.4,2001 年版表 C.4)；
- 为了方便应用,增加了资料性附录 NA“基于 GB/T 12642 的工业机器人性能检测方法”(见附录 NA)；
- 增加了参考文献(见参考文献)。

本标准采用翻译法等同采用 ISO 9283:1998《工业机器人 性能规范及其试验方法》。为了配合本标准的使用,我们将 ISO/TR 13309 的主要内容作为本标准附录 NA。

与本标准中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB/T 12643—1997 工业机器人 词汇(eqv ISO 8373:1994)
- GB/T 12644—2001 工业机器人 特性表示(eqv ISO 9946:1999)
- GB/T 16977—1997 工业机器人 坐标系和运动命名原则(eqv ISO 9787:1990)

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国自动化系统与集成标准化技术委员会(SAC/TC 159)归口。

本标准起草单位:北京机械工业自动化研究所、广州数控设备有限公司、北京理工大学。

本标准主要起草人:杨书评、靳莉、王海丹、王思斯、陆际联。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 12642—2001。

引 言

GB/T 12642 是涉及工业机器人的系列国家标准之一,其他还有诸如安全、通用特性、坐标系、术语和机械接口等方面的标准。这些标准是相互关联的,且和其他标准有关。

制定 GB/T 12642 的目的是便于机器人及其系统的制造商和用户间的沟通。GB/T 12642 定义了重要的性能指标,说明这些指标应怎样给定,并推荐了试验方法。本标准的附录 C 举例说明如何编写试验结果报告。本标准给出试验方法中的那些特性是对机器人性能起显著影响的性能指标。

本标准的用户根据具体要求选择需要测量的性能指标。

根据机器人的类型和要求,可全部或部分地采用本标准所述的试验。

GB/T 12642 标准的核心是单个特性试验。附录 A 中有位姿特性和轨迹特性对比测试的具体参数。

本标准的附录 B 对于典型应用提供了选择试验项目的指南。

本标准的附录 C 提供了试验报告的格式,包括所需的最少信息和试验结果的汇总。



工业机器人 性能规范及其试验方法

1 范围

本标准规定了操作型机器人下列性能指标及其测试方法：

- 位姿准确度和位姿重复性；
- 多方向位姿准确度变动；
- 距离准确度和距离重复性；
- 位置稳定时间；
- 位置超调量；
- 位姿特性漂移；
- 互换性；
- 轨迹准确度和轨迹重复性；
- 重复定向轨迹准确度；
- 拐角偏差；
- 轨迹速度特性；
- 最小定位时间；
- 静态柔顺性；
- 摆动偏差。

对于某一具体机器人的试验,本标准并不规定应选择上述的哪些性能指标。本标准所述的试验项目主要用于分析和检验某个机器人的指标,但也可用于样机试验、定型试验或验收试验。

为了对比不同机器人的性能指标,按照本标准的规定,下列参数必须相同:试验立方体的尺寸、试验用负载、试验速度、试验轨迹、试验循环和环境条件。

附录 A 给出了用于位姿特性和轨迹特性进行对比测试时的具体参数。

本标准适用于 ISO 8373:1994 中定义的所有工业机器人,本标准术语“机器人”指的是工业机器人。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

ISO 8373:1994 工业机器人 词汇 (Manipulating industrial robots—Vocabulary)

ISO 9946:1999 工业机器人 特性表示 (Industrial robots—Presentation of characteristics)

ISO 9787:1990 工业机器人 坐标系和运动命名原则 (Industrial robots—Coordinate systems and motion nomenclatures)

3 术语和定义

ISO 8373:1994 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

集群 cluster

用于计算准确度和重复性特性的一组测量点(图 8 表示图解法示例)。

3.2

重心 barycentre

对于由坐标 (x_j, y_j, z_j) 确定的 n 个点的集群,该集群的重心是坐标为 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 的点。 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 的计算公式在 7.2.1 中给出。

3.3

测量停顿时间 measuring dwell

记录数据前在测量点处的延迟时间(如发出“到位”控制信号与测量装置“开始测量”之间的时间。
[ISO 8373:1994,定义 6.5]

3.4

测量时间 measuring time

记录量值所用的时间。

4 单位

除非另有规定,所有单位如下:

- 长度以毫米计..... (mm)
- 角度以弧度或度计..... (rad)或(°)
- 时间以秒计..... (s)
- 质量以千克计..... (kg)
- 力以牛顿计..... (N)
- 速度以米每秒..... (m/s)
- 或度每秒..... (°/s)
- 或弧度每秒..... (rad/s)
- 或转每分计..... (r/min)

5 缩略语和符号

下列缩略语和符号适用于本文件。

5.1 基本缩略语

A	准确度	Accuracy
d	漂移	Drift
E	互换性	Exchangeability
F	波动	Fluctuation
P	位姿	Pose
R	重复性	Repeatability
T	路径(轨迹)	Path(Trajectory)
V	速度	Velocity
v	变动	Variation
W	摆动	Weaving

5.2 量值

AD 距离准确度

<i>AP</i>	位姿准确度
<i>AT</i>	轨迹准确度
<i>AV</i>	轨迹速度准确度
<i>a, b, c</i>	对 X、Y、Z 轴的姿态(角分量)
<i>CR</i>	拐角圆角误差
<i>CO</i>	拐角超调
<i>D</i>	两点之间的距离
<i>dAP</i>	位姿准确度漂移
<i>dRP</i>	位姿重复性漂移
<i>FV</i>	轨迹速度波动
<i>l</i>	实到位姿和各个实到位姿集群重心间的距离
<i>m</i>	沿轨迹测量点数
<i>n</i>	测量循环次数
<i>OV</i>	位置超调量
<i>RD</i>	距离重复性
<i>RP</i>	位姿重复性
<i>RT</i>	轨迹重复性
<i>RV</i>	轨迹速度重复性
<i>S</i>	标准偏差
<i>t</i>	位置稳定时间
<i>v</i>	轨迹速度
<i>vAP</i>	多方向位姿准确度变动
<i>x, y, z</i>	沿 X、Y、Z 轴的直线坐标
<i>WF</i>	摆频误差
<i>WS</i>	摆幅误差

5.3 下标

<i>a, b, c</i>	表示对 X、Y、Z 轴的姿态特性
<i>c</i>	指令
<i>e</i>	拐角点(边界)
<i>g</i>	机器人性能进入规定的轨迹特性内的点
<i>h</i>	表示 <i>h</i> 次方向
<i>i</i>	表示第 <i>i</i> 点
<i>j</i>	表示第 <i>j</i> 次循环
<i>k</i>	表示第 <i>k</i> 次方向
<i>p</i>	位置
<i>x, y, z</i>	表示沿 X、Y、Z 轴的定位特性
<i>1, 2, …</i>	表示位姿编号 1, 2, …

5.4 其他符号

C_1 到 C_8	试验立方体的顶点
E_1 到 E_8	用于测量轨迹特性的矩形平面顶点
G	各实到位姿集群的重心

O_c 测量系统坐标原点

注 1: 其他符号在有关章节中解释。

6 性能测试条件与性能检测方法

6.1 机器人安装

根据制造商的建议安装机器人。

6.2 测试前提条件

机器人应装配完毕,并可全面操作。所有必要的校平操作、调整步骤及功能试验均应圆满完成。

除位姿特性的漂移试验应由冷态开始外,不管制造商是否有规定,其余的试验在试验前机器人应进行适当的预热。

若机器人具有由用户使用的、会影响被测特性的设备,或如果只能用特殊函数来记录特性(如离线编程给出的位姿校准设施)的设备,则试验中的状态必须在试验报告中说明,并且(与某种特性有关时)每次试验中均应保持不变。

6.3 操作和环境条件

由制造商制定并由本标准相应的试验方法确定的性能特性,只有在制造商规定的环境和正常操作条件下才是有效的。

6.3.1 操作条件

试验中所使用的正常操作条件,应由制造商说明。

正常操作条件包括(但不限于):对电源、液压源和气压源的要求,电源波动和干扰,最大安全操作极限(见 ISO 9946:1999)等。

6.3.2 环境条件

6.3.2.1 一般条件

试验所用的环境条件应由制造商说明,参照 6.3.2.2 的要求。

环境条件包括:温度、相对湿度、电磁场和静电场、射频干扰、大气污染和海拔高度极限。

6.3.2.2 测试温度

测试的环境温度(θ)应为 20 °C。采用其他的环境温度应在试验报告中指明并加以解释。试验温度应保持在 $\theta \pm 2$ °C 范围内。

为使机器人和测量仪器在试验前处于热稳定状态下,需将它们置于试验环境中足够长的时间(最好一昼夜)。还需防止通风和外部热辐射(如阳光、加热器)。

6.4 位移测量原则

被测位置和姿态数据($x_j, y_j, z_j, a_j, b_j, c_j$)应以机座坐标系(ISO 9787:1990)来表示,或以测量设备所确定的坐标系来表示。

若机器人指令位姿和轨迹由另一坐标系(如在离线编程中使用)确定,而不是测量系统来确定,则必须把数据转换到一个公共坐标系中。用测量方法建立坐标系间的相互关系。在此情况下,7.2.1 给出的测量位姿不能用作转换数据的参照位置。参照点和测量点需在试验立方体内,且彼此距离应尽可能

大(如,若 P_1 到 P_5 为测量点,则 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 可用作参照点)。

对于性能规范的有向分量,机座坐标系和所选坐标系的关系应在试验结果中说明。

测量点应离制造商指明的机械接口一段距离,该点在机械接口坐标系(见 ISO 9787:1990)的位置应予记录(见图 7)。

计算姿态偏差时所用的转动顺序,必须使姿态在数值上是连续的。绕动轴(导航角或欧拉角)旋转,或绕静止轴旋转是没有关系的。

除非另有规定,应在实到位姿稳定后进行测量。

6.5 仪器

对于轨迹特性、超调量和位姿稳定性的测量,数据采集设备的动态特性(如采样速率)应足够高,以确保获得被测特性的充分描述。

试验中所用的测量仪器应进行校准,还应估计测量的不确定度并在试验报告中说明。应考虑下列参数:

- 仪器误差;
- 与方法有关的系统误差;
- 计算误差。

测量的不确定度不能超过被测特性数值的 25%。

本标准列出了部分适用的测量系统/传感器的实例,具体参见附录 NA。

6.6 机械接口的负载

所有试验项目都应在 100%额定负载条件下进行,即制造商规定的质量、重心位置和惯性力矩。额定负载条件应在试验报告中注明。

为表征机器人与负载有关的性能,可采用如表 1 中指出的将额定负载降至 10%或由制造商制定的其他数值进行附加试验。

如部分测量仪器附加于机器人上,应把其质量和位置当作试验负载的一部分。

图 1 是试验用末端执行器的实例,其 CG(重心)和 TCP(工具中心点)有偏移。试验时,TCP 是测量点(MP)。测量点的位置应在试验报告中说明。

表 1 试验负载

试验特性	使用负载	
	100%额定负载 (×表示必须采用)	额定负载减至 10% (○表示选用)
位姿准确度和位姿重复性	×	○
多方向位姿准确度变动	×	○
距离准确度和距离重复性	×	—
位置稳定时间	×	○
位置超调量	×	○
位姿特性漂移	×	—
互换性	×	○
轨迹准确度和轨迹重复性	×	○

表 1 (续)

试验特性	使用负载	
	100%额定负载 (×表示必须采用)	额定负载减至10% (○表示选用)
重复定向轨迹准确度	×	○
拐角偏差	×	○
轨迹速度特性	×	○
最小定位时间	×	○
静态柔顺性	—	见第10章
摆动偏差	×	○

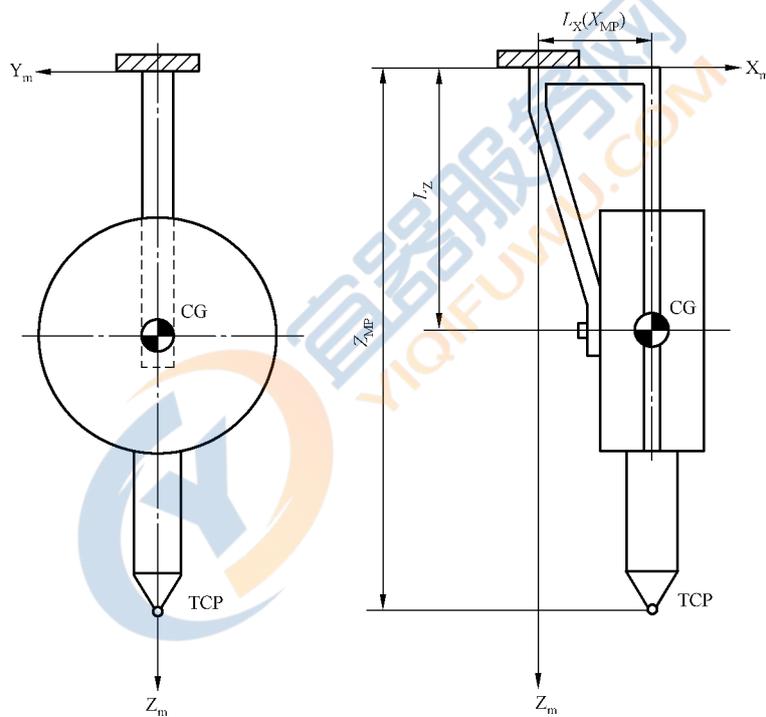


图 1 试验用末端执行器实例

6.7 试验速度

所有位姿特性试验都应在指定位姿间可达到的最大速度下进行,即在每种情况下速度补偿均置于100%,并可在此速度的50%和/或10%下进行附加试验。

对于每一种轨迹特性,应在制造商规定的额定轨迹速度的100%、50%和10%下进行试验(见表3)。在试验报告中应注明额定轨迹速度。每次试验所规定的速度取决于轨迹的形状和尺寸。机器人至少应能在试验轨迹50%的长度内达到此速度。此时,相关的性能指标才是有效的。

如果可选择,应在试验报告中说明速度是以点位方式还是以连续轨迹方式来规定的。

表2和表3给出试验速度的汇总。

表 2 位姿特性试验速度

试 验 特 性	速 度	
	100%额定速度 (×表示必测)	50%或10%额定速度 (○表示选测)
位姿准确度和位姿重复性	×	○
多方向位姿准确度变动	×	○
距离准确度和距离重复性	×	○
位置稳定时间	×	○
位置超调量	×	○
位姿特性漂移	×	—
互换性	×	○
最小定位时间	见第9章和表20	

表 3 轨迹特性的试验速度

试 验 特 性	速 度		
	100%额定轨迹速度 (×表示必测)	50%额定轨迹速度 (×表示必测)	10%额定轨迹速度 (×表示必测)
轨迹准确度和轨迹重复性	×	×	×
重复定向轨迹准确度	×	×	×
拐角偏差	×	×	×
轨迹速度特性	×	×	×
摆动偏差	×	×	×

6.8 试验位姿和跟踪轨迹的定义

6.8.1 目的

本条说明如何确定位于工作空间中立方体内一平面上的五个合适位置,还说明了要跟踪的试验轨迹。当机器人某轴运动范围较其他轴小时,可用长方体代替立方体。

6.8.2 立方体在工作空间中的位置

位于工作空间中的单个立方体,其顶点用 $C_1 \sim C_8$ 表示(见图2),应满足以下要求:

- 立方体应位于工作空间中预期应用最多的那一部分;
- 立方体应具有最大的体积,且其棱边平行于机座坐标系。

在试验报告中应以图形说明工作空间中所用立方体的位置。

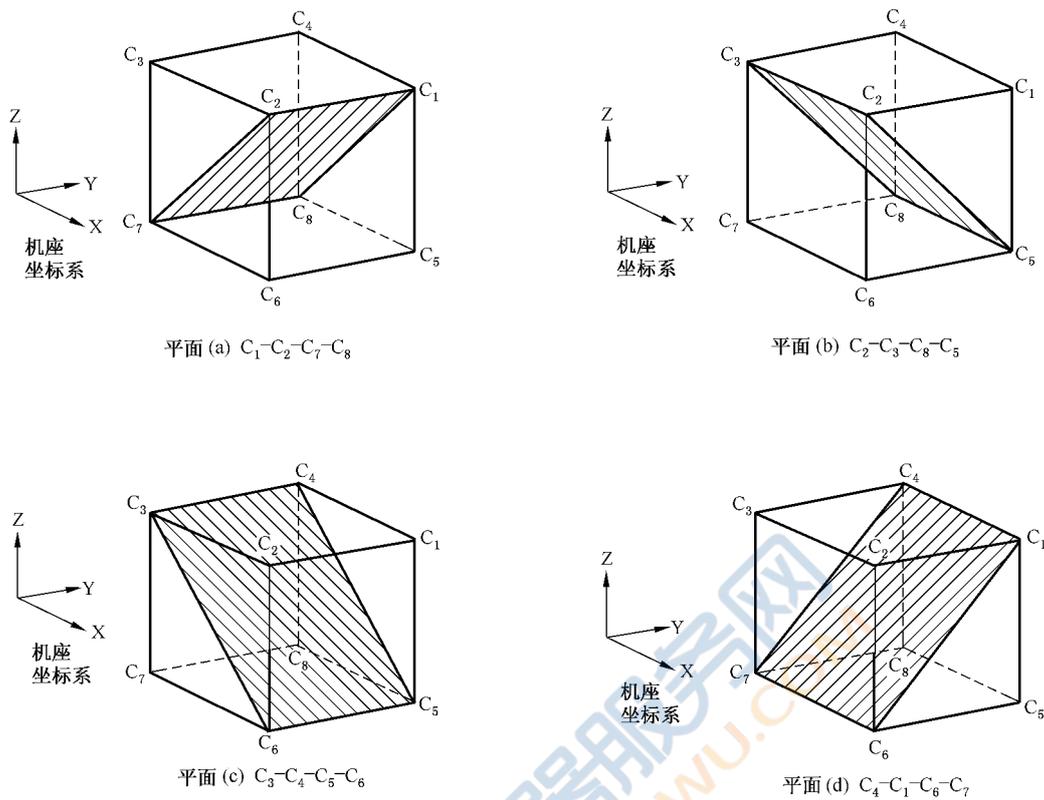


图 2 工作空间中的立方体

6.8.3 立方体内所用平面的位置

位姿试验应选用下列平面之一,对这些平面制造商已声明在说明书中的值是有效的:

- a) $C_1-C_2-C_7-C_8$;
- b) $C_2-C_3-C_8-C_5$;
- c) $C_3-C_4-C_5-C_6$;
- d) $C_4-C_1-C_6-C_7$ 。

试验报告中应指出选用了哪一个平面。

表 4 给出了位姿特性所使用的位姿。

表 4 位姿特性中选用的位姿

试验特性	位 姿				
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
位姿准确度和位姿重复性	×	×	×	×	×
多方向位姿准确度变动	×	×	—	×	—
距离准确度和距离重复性	—	×	—	×	—
位置稳定时间	×	×	×	×	×
位置超调量	×	×	×	×	×
位姿特性漂移	×	—	—	—	—
互换性	×	×	×	×	×

6.8.4 试验位姿

五个要测量的点位于测量平面的对角线上,并对应于选用平面上的 $P_1 \sim P_5$ 加上轴向 (X_{MP}) 和径向 (Z_{MP}) 测量点偏移。点 $P_1 \sim P_5$ 是机器人手腕参考点的位置。

测量平面平行于选用平面,见图 3 和图 7。

制造商可规定试验位姿应以机座坐标系(最佳)和/或关节坐标系来确定。

P_1 是对角线的交点,也是立方体的中心。 P_2 到 P_5 离对角线端点的距离等于对角线长度的 $(10 \pm 2)\%$ (见图 4)。若不可能,则在报告中说明在对角线上所选择的点。

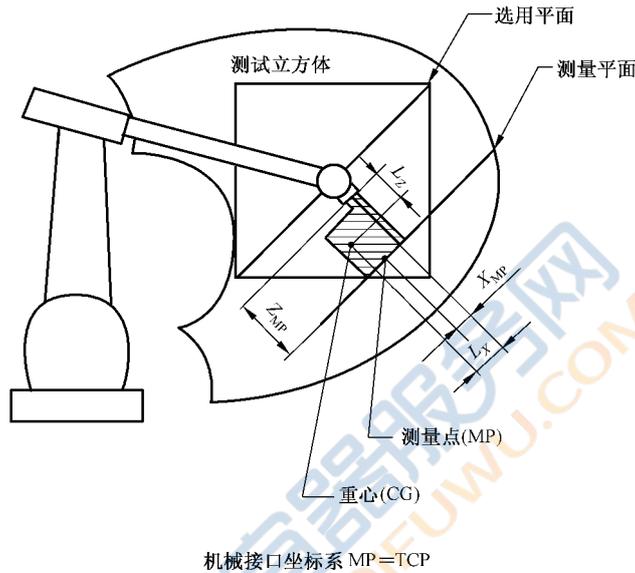
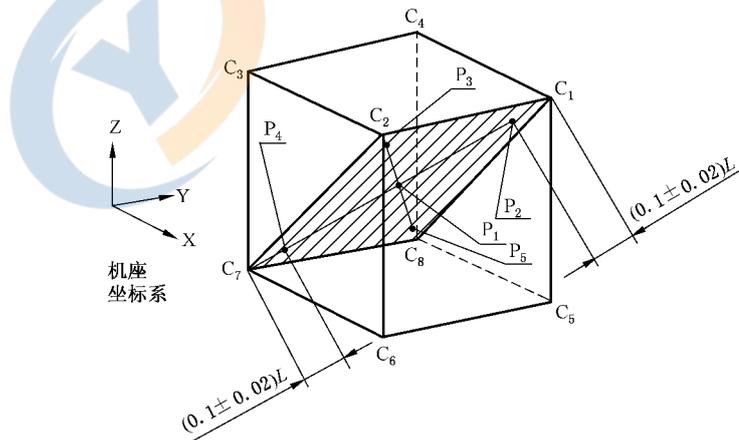


图 3 选用平面和测量平面



L = 对角线长度

示例平面 (a) $C_1-C_2-C_7-C_8$ 和位姿 $P_1-P_2-P_3-P_4-P_5$

图 4 使用的位姿

6.8.5 运动要求

当机器人在各位姿间运动时,所有关节均应运动。

试验时,应注意不超出制造操作规范。

6.8.6 跟踪的轨迹

6.8.6.1 试验轨迹的位置

采用 6.8.2 中说明的立方体。

试验轨迹应位于图 5 所示的四个平面之一。对于 6 轴机器人,除制造商特殊规定外,应选用平面 1。对少于 6 轴的机器人,应由制造商指定选用哪个平面。

在轨迹特性测量时,机械接口的中心应位于选用平面上(见图 3),且其姿态相对于该平面应保持不变。

6.8.6.2 试验轨迹的形状和尺寸

图 6 给出了在四个可用试验平面之一上的一条直线轨迹、一条矩形轨迹和两条圆形轨迹的位置示例。

除测量拐角偏差外,试验轨迹的形状应是直线或圆(见 8.5 和图 22)。若采用其他形状的轨迹,制造商应说明并附于试验报告中。

在立方体对角线上的直线轨迹,轨迹长度应是所选平面相对顶点间距离的 80%,如图 6 中 P_2 到 P_4 的距离是一实例。

另一直线轨迹 P_6 到 P_9 ,可用于 8.4 中所述的重复定向试验。

对圆形轨迹试验,需测试两个不同的圆,见图 6。

大圆的直径应为立方体边长的 80%,圆心为 P_1 。

小圆的直径应是同一平面中大圆直径的 10%,圆心为 P_1 ,见图 6。

应使用最少的数目的指令位姿。在试验报告中应说明指令位姿的数目、位置和编程方法(示教编程、人工输入数字数据或离线编程)。

对于矩形轨迹,拐角记为 E_1 、 E_2 、 E_3 和 E_4 ,每个拐角离平面各顶点的距离为该平面对角线长度的 $(10 \pm 2)\%$ 。在图 6 的实例中, P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 分别与 E_1 、 E_2 、 E_3 和 E_4 重合。

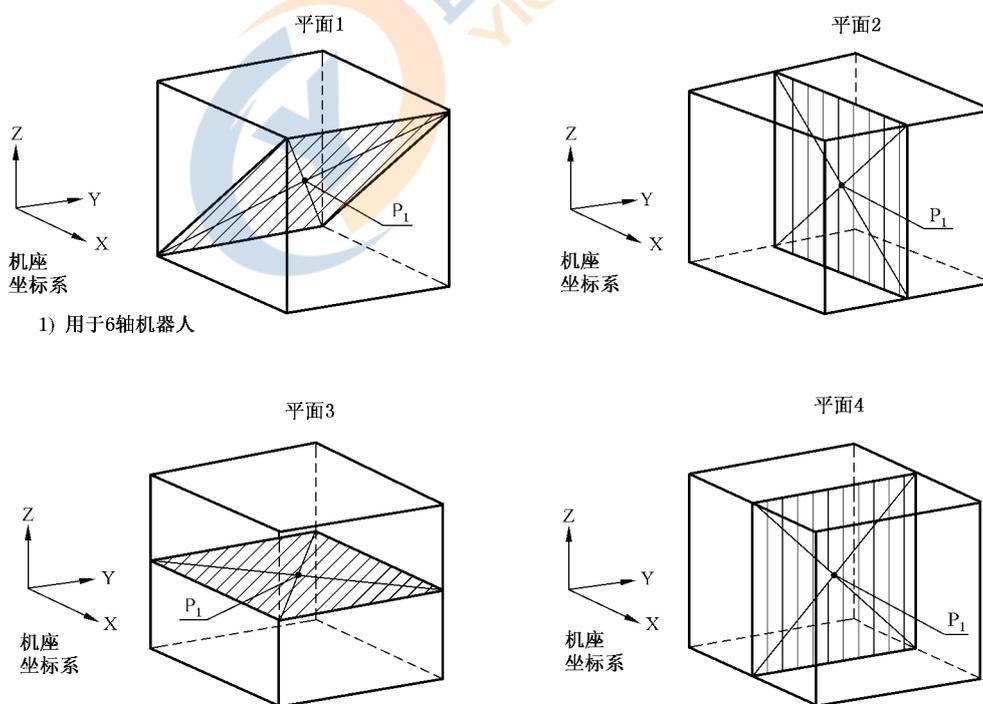


图 5 试验轨迹定位平面的确定

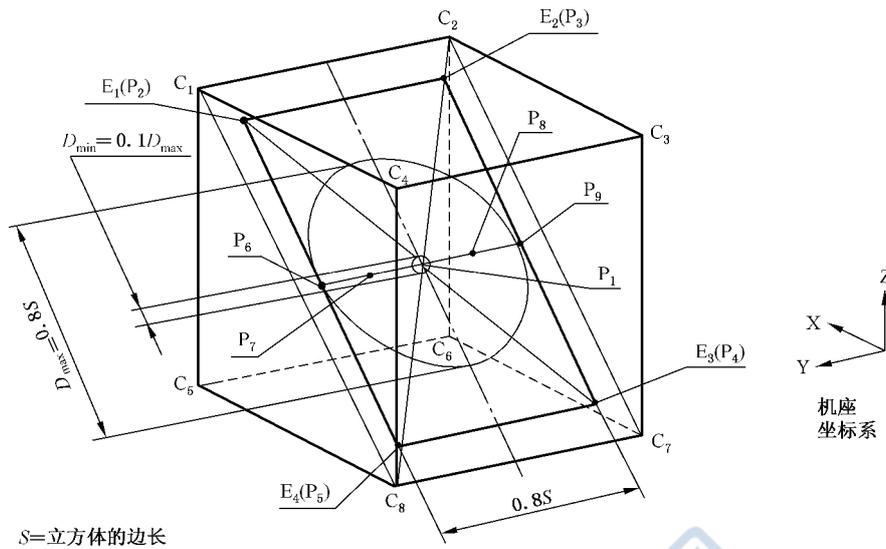


图 6 试验轨迹实例

6.9 循环次数

表 5 给出了测试每种特性时实施的循环次数。

表 5 循环次数

试验特性	循环次数
位姿准确度和位姿重复性	30
多方向位姿准确度变动	30
距离准确度和距离重复性	30
位置稳定时间	3
位置超调量	3
位姿特性漂移	连续循环 8 h
互换性	30
轨迹准确度和轨迹重复性	10
重复定向轨迹准确度	10
拐角偏差	3
轨迹速度特性	10
最小定位时间	3
摆动偏差	3

6.10 试验步骤

试验顺序对试验结果没有影响,但为了确定测量停顿时间,建议先进行位置稳定时间试验后,再进行位姿重复性试验。位置超调量、位姿准确度和重复性试验可同时进行。位姿特性漂移试验应独立进行。

位姿特性试验应在点位或连续轨迹控制下进行,轨迹特性试验应在轨迹控制下进行。

如果测试设备允许,轨迹准确度及重复性试验可与速度试验同时进行。

建议速度试验在轨迹准确度试验之前进行,并使用相同的轨迹参数,这样可保证在确定轨迹时使用正确的参考量。

当编程恒定轨迹速度时,应注意确保把速度补偿控制设为 100%,并保证机器人不因在跟踪轨迹上的任何限制而使速度自动减小。

下列特性可同时进行测试:

——轨迹准确度/重复性和速度特性;

——拐角超调和圆角误差。

除位姿特性漂移外,一种条件下每一特性的数据采集应在最短的时间内进行。

试验时所有的程序延时,如测量停顿时间和测量时间应在试验报告中说明。

6.11 试验特性——应用

根据机器人的类型和要求(应用),可全面或部分采用本标准所述的试验。

对于某些典型应用,附录 B 提供了基本的机器人试验选择指南。

6.12 工业机器人性能检测方法

本标准推荐了数种可用于本标准描述的工业机器人性能试验的方法。具体方法参见附录 D。

7 位姿特性

7.1 一般说明

指令位姿(见图 7):以示教编程、人工数据输入或离线编程所设定的位姿。

示教编程机器人的指令位姿定义为机器人的测量点(见图 7)。编程时,通过机器人的运动,使该点尽可能接近立方体的确定点(P_1, P_2, \dots)。把测量系统显示的坐标值用作为“指令位姿”以便根据逐个实到位姿计算准确度。

实到位姿(见图 7):机器人在自动方式下响应指令位姿而实际达到的位姿。

本章中所定义的位姿准确度和重复性特性,由指令位姿和实到位姿间的偏差和重复接近指令位姿的一系列实到位姿的分布来确定。

这些误差产生的原因有:

——内部控制分辨率;

——坐标变换误差;

——关节的实际结构尺寸与机器人控制系统所用的模型尺寸间的差异;

——机械缺陷,如间隙、滞回、摩擦及外部条件如温度等的影响。

指令位姿数据输入方法取决于机器人控制设备,并对准确度特性有重大影响。使用的数据输入方法应在数据表和试验报告中清楚地说明。

若指令位姿由数字数据输入设定,则不同指令位姿间的关系(即距离和姿态)是已知的(或可确定的),这对距离特性的规范和测量是需要的。

对于使用数字数据输入的位姿准确度测量,需知道测量系统相对于机座坐标系的位置(见 6.8.4)。

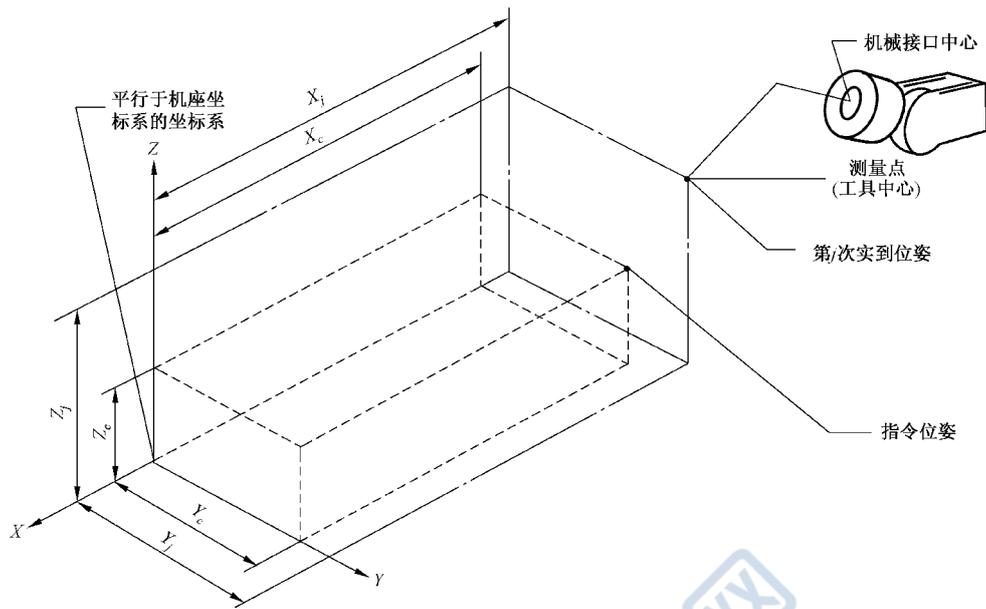


图 7 指令位姿与实到位姿的关系

(图 8 和图 9 也表示该关系)

7.2 位姿准确度和位姿重复性

7.2.1 位姿准确度(AP)

位姿准确度表示指令位姿和从同一方向接近该指令位姿时的实到位姿平均值之间的偏差。位姿准确度分为：

- a) 位置准确度：指令位姿的位置与实到位置集群重心之差(见图 8)；
- b) 姿态准确度：指令位姿的姿态与实到姿态平均值之差(见图 9)。

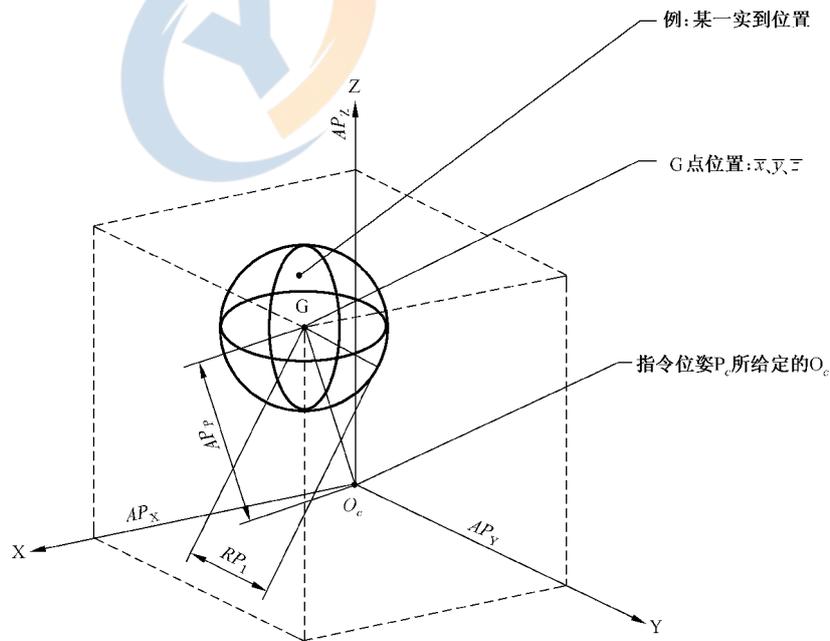
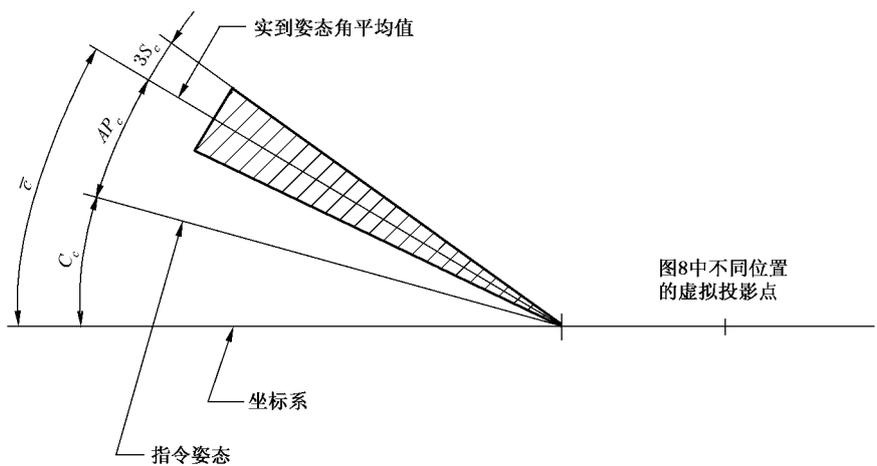


图 8 位置准确度和重复性



说明：
 \bar{a} 和 \bar{b} 可用同一图。

图 9 姿态准确度和重复性

位姿准确度计算如下：
 位置准确度

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2}$$

$$AP_x = (\bar{x} - x_c)$$

$$AP_y = (\bar{y} - y_c)$$

$$AP_z = (\bar{z} - z_c)$$

和

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j$$

式中： \bar{x} 、 \bar{y} 和 \bar{z} 是对同一位姿重复响应 n 次后所得各点集群中心的坐标。

x_c 、 y_c 、 z_c 是指令位姿坐标。

x_j 、 y_j 、 z_j 是第 j 次实到位姿的坐标。

姿态准确度

$$\begin{aligned} AP_a &= (\bar{a} - a_a) \\ AP_b &= (\bar{b} - b_b) \\ AP_c &= (\bar{c} - c_c) \end{aligned}$$

和

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j$$

$$\bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j$$

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j$$

这些值是在对同一位姿重复响应 n 次所得的姿态角的平均值。

式中： a_c 、 b_c 、 c_c 是指令位姿的姿态角。

a_j, b_j, c_j 是第 j 次实到位姿的姿态角。
表 6 给出了位姿准确度试验条件的汇总。

表 6 位姿准确度实验条件

负 载	速 度	位 姿	循 环 次 数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	P ₁ —P ₂ —P ₃ —P ₄ —P ₅	30
额定负载降至 10% (选用)	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度		

——机器人从 P₁ 点开始,依次将机械接口移至 P₅、P₄、P₃、P₂、P₁。采用如图 10 所示的循环之一,以单一方向接近每个位姿。试验时所用的接近方向应与编程时的接近方向类同。
——计算每个位姿的位置准确度(AP_P)和姿态准确度(AP_a、AP_b、AP_c)。

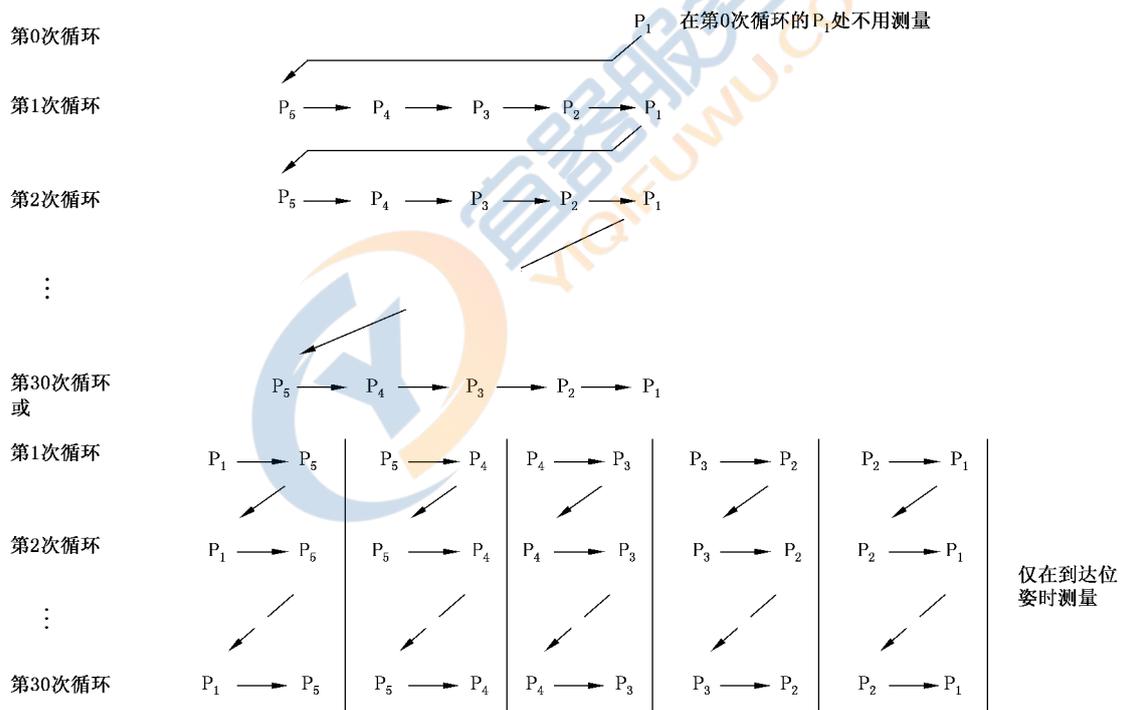


图 10 可循环的图示

7.2.2 位姿重复性(RP)

位姿重复性表示对同一指令位姿从同一方向重复响应 n 次后实到位姿的一致程度。

对某一位姿,重复性可表示为:

——以下式计算且以位置集群中心为球心的球半径 RP_l 之值(见图 8)。

——围绕平均值 $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$ 的角度散布 $\pm 3S_a, \pm 3S_b, \pm 3S_c$, 其中 S_a, S_b, S_c 为标准偏差(见图 9)。

位置重复性

$$RP_l = \bar{l} + 3S_l$$

式中：

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2}$$

其中： \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 和 x_j 、 y_j 、 z_j 已在 7.2.1 中定义。

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}}$$

姿态重复性

$$RP_a = \pm 3S_a = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_j - \bar{a})^2}{n-1}}$$

$$RP_b = \pm 3S_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_j - \bar{b})^2}{n-1}}$$

$$RP_c = \pm 3S_c = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c})^2}{n-1}}$$

注 2：即使距离不正常分布，此指标也是可计算的。

表 7 给出了位姿重复性试验条件汇总。

表 7 位姿重复性试验条件

负 载	速 度	位 姿	循 环 次 数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	P ₁ —P ₂ —P ₃ —P ₄ —P ₅	30
额定负载降至 10% (选用)	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度		

——试验步骤与 7.2.1 相同。

——计算每个位姿的位置重复性 RP 和角度偏差 RP_a 、 RP_b 、 RP_c 。对于一些特殊应用， RP 也可用其分量 RP_x 、 RP_y 、 RP_z 。

7.2.3 多方向位姿准确度变动 (vAP_p)

多方向位姿准确度变动表示从三个相互垂直方向对相同指令位姿响应 n 次时，各平均实到位姿间的偏差(见图 11)。

—— vAP_p 是不同轨迹终点得到的实到位置集群中心间的最大距离。

—— vAP_a 、 vAP_b 、 vAP_c 是不同轨迹终点得到的实到姿态平均值间的最大偏差。

多方向位姿准确度变动的计算公式如下：

$$vAP_P = \max \sqrt{(\bar{x}_h - \bar{x}_k)^2 + (\bar{y}_h - \bar{y}_k)^2 + (\bar{z}_h - \bar{z}_k)^2} \quad h, k = 1, 2, 3$$

式中:1,2,3 是接近轨迹的编号。

$$\begin{aligned} vAP_a &= \max |(\bar{a}_h - \bar{a}_k)| & h, k = 1, 2, 3 \\ vAP_b &= \max |(\bar{b}_h - \bar{b}_k)| & h, k = 1, 2, 3 \\ vAP_c &= \max |(\bar{c}_h - \bar{c}_k)| & h, k = 1, 2, 3 \end{aligned}$$

表 8 给出了多方向位姿准确度变动的试验条件汇总。

表 8 多方向位姿准确度变动试验条件

负 载	速 度	位 姿	循 环 次 数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	P ₁ —P ₂ —P ₁	30
额定负载降至 10% (非选用)	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度		

- 经过编程,使机器人的机械接口沿平行于机座坐标系轴线的三条接近轨迹运动到各指令位姿点。对于 P₁,以坐标的负方向接近,对于 P₂ 和 P₁,则从立方体内部接近(见图 11 和图 12)。
如果不可能,应使用制造商指定的接近方向并在报告中说明。
- 计算每个位姿的 vAP_P 、 vAP_a 、 vAP_b 、 vAP_c 。

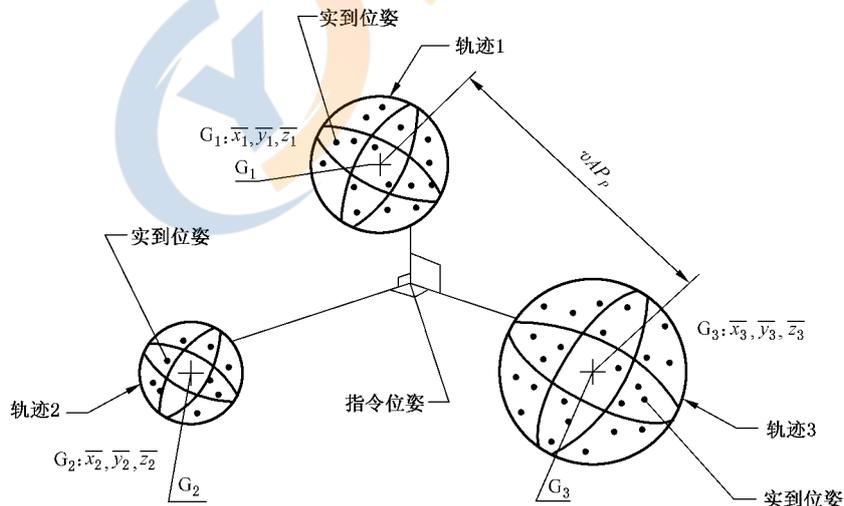


图 11 多方向位姿准确度变动

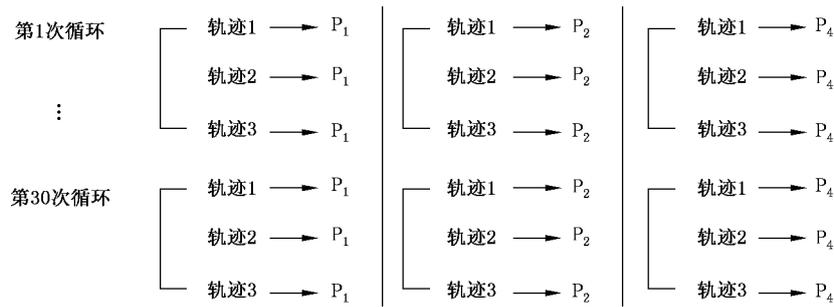


图 12 循环图解

7.3 距离准确度和重复性

本特性仅用于离线编程或人工数据输入的机器人。

7.3.1 一般说明

本章所定义的距离准确度和重复性由两个指令位姿与两组实到位姿均值之间的距离偏差和在这两个位姿间一系列重复移动的距离波动来确定。

对位姿用下列两种方法之一控制,可测量距离准确度和重复性。

- a) 使用离线编程控制两位姿;
 - b) 用示教编程控制一个位姿,并通过人工数据输入对距离编程。
- 应在报告中说明所使用的方法。

7.3.2 距离准确度(AD)

距离准确度表示在指令距离和实到距离平均值之间位置和姿态的偏差。

设 P_{c1} 、 P_{c2} 是指令位姿, P_{1j} 、 P_{2j} 是实到位姿,位置距离准确度是 P_{c1} 、 P_{c2} 和 P_{1j} 、 P_{2j} 间距离之差(见图 13),且该距离被重复 n 次。

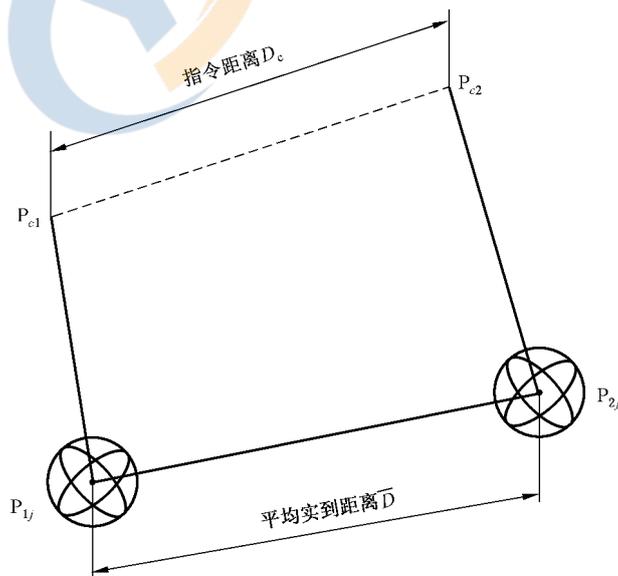


图 13 距离准确度

距离准确度由位置距离准确度和姿态距离准确度两个因素决定。

位置距离准确度 AD_P 计算公式如下：

$$AD_P = \bar{D} - D_c$$

式中：

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j$$

$$D_j = |P_{1j} - P_{2j}| = \sqrt{(x_{1j} - x_{2j})^2 + (y_{1j} - y_{2j})^2 + (z_{1j} - z_{2j})^2}$$

$$D_c = |P_{c1} - P_{c2}| = \sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2 + (z_{c1} - z_{c2})^2}$$

其中：

x_{c1} 、 y_{c1} 、 z_{c1} 是在机器人控制中可用的 P_{c1} 的坐标；

x_{c2} 、 y_{c2} 、 z_{c2} 是在机器人控制中可用的 P_{c2} 的坐标；

x_{1j} 、 y_{1j} 、 z_{1j} 是 P_{1j} 的坐标；

x_{2j} 、 y_{2j} 、 z_{2j} 是 P_{2j} 的坐标；

n 是重复次数。

位置距离准确度也可用机坐标系各轴分量来表示，计算公式如下：

$$AD_x = \bar{D}_x - D_{cx}$$

$$AD_y = \bar{D}_y - D_{cy}$$

$$AD_z = \bar{D}_z - D_{cz}$$

式中：

$$\bar{D}_x = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{xj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |x_{1j} - x_{2j}|$$

$$\bar{D}_y = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{yj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_{1j} - y_{2j}|$$

$$\bar{D}_z = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{zj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |z_{1j} - z_{2j}|$$

$$D_{cx} = |x_{c1} - x_{c2}|$$

$$D_{cy} = |y_{c1} - y_{c2}|$$

$$D_{cz} = |z_{c1} - z_{c2}|$$

姿态距离准确度计算方法相当于单轴距离准确度，计算公式如下：

$$AD_a = \bar{D}_a - D_{ca}$$

$$AD_b = \bar{D}_b - D_{cb}$$

$$AD_c = \bar{D}_c - D_{cc}$$

式中：

$$\bar{D}_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{aj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |a_{1j} - a_{2j}|$$

$$\bar{D}_b = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{bj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |b_{1j} - b_{2j}|$$

$$\bar{D}_c = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{cj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |c_{1j} - c_{2j}|$$

$$D_{ca} = |a_{c1} - a_{c2}|$$

$$D_{cb} = |b_{c1} - b_{c2}|$$

$$D_{cc} = |c_{c1} - c_{c2}|$$

和

a_{c1} 、 b_{c1} 、 c_{c1} 是在机器人控制中可用的 P_{c1} 的姿态；

a_{c2} 、 b_{c2} 、 c_{c2} 是在机器人控制中可用的 P_{c2} 的姿态；

a_{1j} 、 b_{1j} 、 c_{1j} 是 P_{1j} 的姿态；

a_{2j} 、 b_{2j} 、 c_{2j} 是 P_{2j} 的姿态；

n 是重复次数。

表 9 给出距离准确度试验条件的汇总。

表 9 距离准确度实验条件

负 载	速 度	位 姿	循环次数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	P_2-P_4	30

——经过编程,使机器人的机械接口从 P_4 开始,在 P_2 、 P_4 位姿间连续运动,应单方向进行测量(见图 14)；

——在报告中至少要有 AD_F 的值。

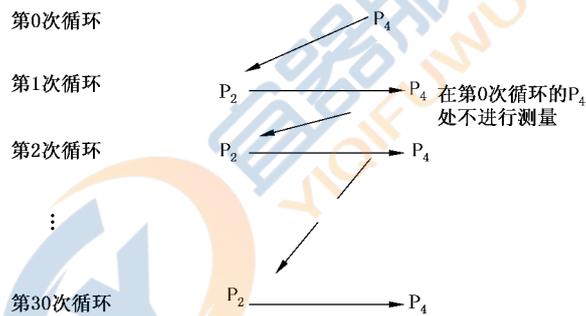


图 14 循环的图示

7.3.3 距离重复性(RD)

距离重复性表示在同一方向对相同指令距离重复运动 n 次后实到距离的一致程度。

距离重复性包括位置距离重复性和姿态距离重复性。

对于给定的指令距离,位置距离重复性计算公式如下：

$$RD = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - \bar{D})^2}{n - 1}}$$

$$RD_x = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{xj} - \bar{D}_x)^2}{n - 1}}$$

$$RD_y = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{yj} - \bar{D}_y)^2}{n - 1}}$$

$$RD_z = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{zj} - \bar{D}_z)^2}{n-1}}$$

姿态距离重复性计算公式如下：

$$RD_a = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{aj} - \bar{D}_a)^2}{n-1}}$$

$$RD_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{bj} - \bar{D}_b)^2}{n-1}}$$

$$RD_c = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{cj} - \bar{D}_c)^2}{n-1}}$$

其中：各变量的定义与 7.3.2 相同。

表 10 给出距离重复性试验条件的汇总。

表 10 距离重复性试验条件

负 载	速 度	位 姿	循环次数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	P ₂ —P ₄	30

——步骤与 7.3.2 相同。在报告中至少给出 RD 值。

7.4 位置稳定时间

位置稳定时间是用于衡量机器人停止在实到位姿快慢程度的性能。图 15 的实例是接近实到位姿的三维图示。同时应知道稳定时间与超调量及机器人的其他性能参数有关。

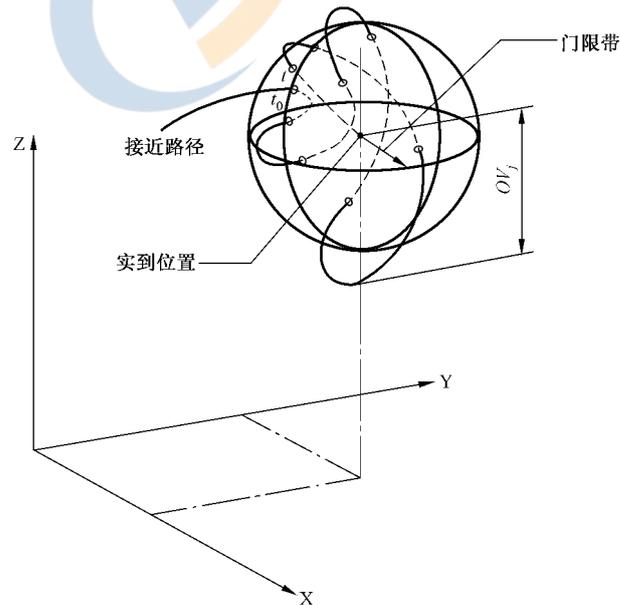
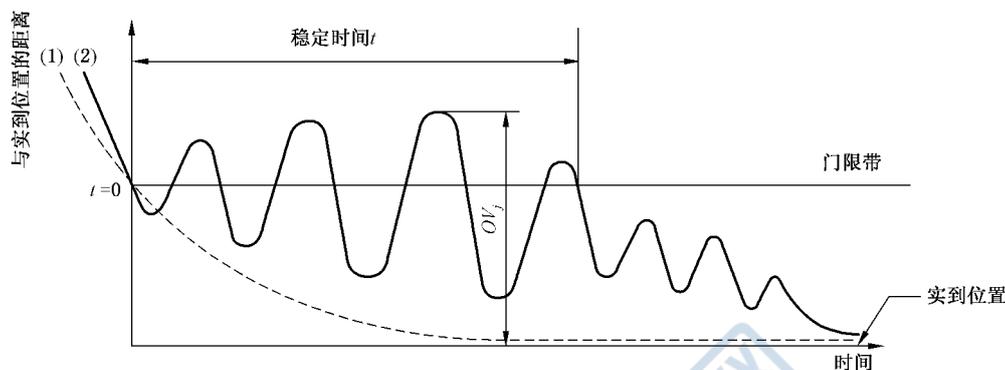


图 15 三维表示的稳定时间和位置超调量

位置稳定时间的测量与在 7.5 中测量超调量的方式相同。以 7.2.1 中的循环方式使机器人在试验负载和试验速度下运行。当机器人达到指令位姿 P_n 后,应连续测量测试点的位置,直到稳定。

位置稳定时间是从机器人第一次进入门限带的瞬间到不再超出门限带的瞬间所经历的时间,门限带可定义为 7.2.2 中的重复性或由制造商制定。

这一测量步骤需重复 3 次,对于每个位姿计算 3 次测量平均值(见图 16)。



说明:

曲线(1):过阻尼接近示例,见注 3;

曲线(2):振荡接近示例,有 OV_j 存在。

图 16 稳定时间和位置超调量

表 11 给出位置稳定时间试验条件汇总。

表 11 位置稳定时间试验条件

负 载	速 度	位 姿	循 环 次 数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	P_1	3
额定负载降至 10% (选用)	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度		

7.5 位置超调量

测量位置超调量的目的是为了衡量机器人平稳、准确地停在实到位姿的能力。应明白,位置超调量与位置稳定时间有关。

位置超调量是机器人第一次进入门限带再超出门限带后瞬时位置与实到稳定位置的最大距离。

注 3: 对于过阻尼机器人(图 16 曲线 1),其超调量为 0。

测量位置超调量时,机器人以 7.2.1 的循环方式在试验负载和试验速度下运行。位置超调量等于超出测量点 P_1 的移动距离。超调量应测量 3 次,计算 3 次中的最大值(见图 16)。

$$OV = \max OV_j$$

$$OV_j = \max D_{ij} \quad \text{若 } \max D_{ij} > \text{门限带}$$

$$OV_j = 0 \quad \text{若 } \max D_{ij} \leq \text{门限带}$$

$$\max D_{ij} = \max \sqrt{(x_{ij} - x_j)^2 + (y_{ij} - y_j)^2 + (z_{ij} - z_j)^2} \quad i=1,2,\dots,m$$

式中 i 表示机器人进入门限带后测量的采样点号。

对于某些特殊应用, OV 也可用其分量 OV_x 、 OV_y 、 OV_z 来表示。

表 12 给出位置超调量试验条件的汇总。

表 12 位置超调量试验条件

负 载	速 度	位 姿	循 环 次 数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	P ₁	3
额定负载降至 10% (选用)	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度		

7.6 位姿特性漂移

位姿准确度漂移(dAP)是在指定的时间(T)内位姿准确度的变化,其计算公式如下:

$$dAP_p = |AP_{t=1} - AP_{t=T}|$$

$$dAP_a = |AP_{at=1} - AP_{at=T}|$$

$$dAP_b = |AP_{bt=1} - AP_{bt=T}|$$

$$dAP_c = |AP_{ct=1} - AP_{ct=T}|$$

式中 AP 在 7.2 中已定义,指令位姿应在冷态下示教。

试验报告中记录最大值。

位姿重复性漂移(dRP)是在指定的时间(T)内位姿重复性的变化,其计算公式如下:

$$dRP_p = |RP_{t=1} - RP_{t=T}|$$

$$dRP_a = |RP_{at=1} - RP_{at=T}|$$

$$dRP_b = |RP_{bt=1} - RP_{bt=T}|$$

$$dRP_c = |RP_{ct=1} - RP_{ct=T}|$$

式中 RP 已在 7.2.2 中定义。

试验报告中记录最大值。

表 13 给出位姿特性漂移试验条件的汇总

表 13 位姿特性漂移试验条件

负 载	速 度	位 姿	循 环 次 数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	P ₁	8 h 连续循环

——漂移测量应从冷态(打开主电源时)开始,并在热机状态下持续数小时。

应遵循下述操作顺序:

- a) 上电进行试验循环编程;

- b) 关闭机器人电源 8 h;
- c) 重新启动机器人并开始程序的自动循环。
- 测量循环:被编程的机器人其机械接口从 P_2 开始运动到 P_1 。当从 P_1 返回 P_2 (10 次)时,所有关节都必须运动。
- 热机循环:当从 P_1 返回 P_2 (10 min)时,所有关节应以最大可能的速度在其全程 70% 的范围内运动(见表 13),见图 17 的流程图。对于特殊的应用可选择不同的值。
- 测量中若连续五次测量漂移(dAP)的变化率小于第 1 小时内的最大漂移变化率的 10%,则可以提前结束测量,不用等到 8 h。用测量值计算位姿准确度和重复性(见 7.2.1 和 7.2.2)。所得的结果作为时间的函数制作图表。两个测量循环间的时间应是 10 min(热机程序见图 17 和图 18)。

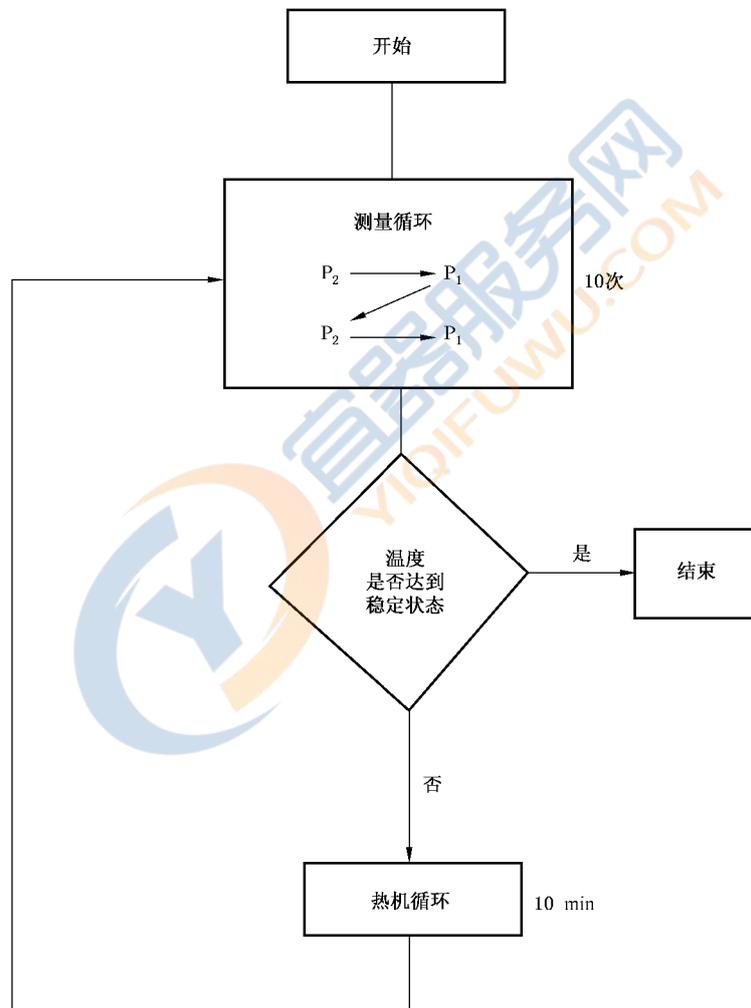


图 17 漂移测量流程图

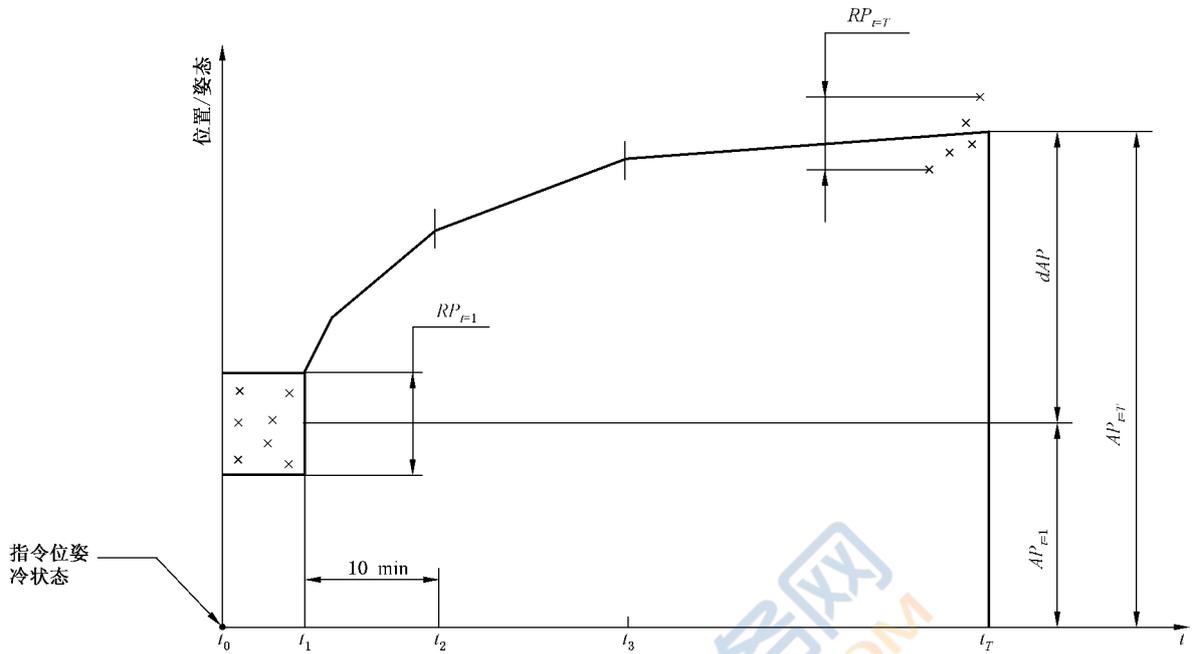


图 18 位姿特性漂移

7.7 互换性(E)

互换性表示在相同环境条件、机械安装和使用相同作业程序的情况下,更换同一型号的机器人时集群中心的偏差。

E 值是试验中偏差最大的两个机器人集群中心间的距离(见图 19)。

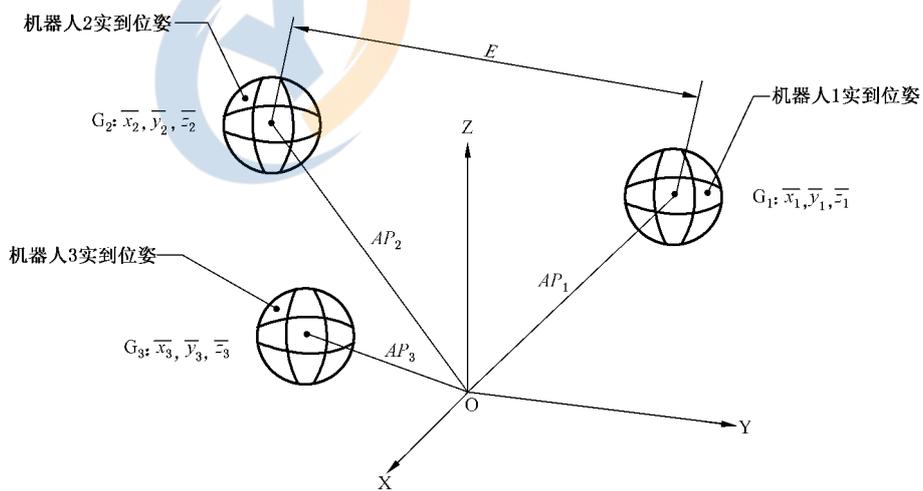


图 19 互换性

互换性是由于机械公差、轴校准误差和机器人安装误差形成的。

互换性试验的试验位姿应是 P₁、P₂、P₃、P₄ 和 P₅, 且对所有被测机器人均应相同。

五个点的指令位姿应用第一台机器人设定,在测试其他机器人时应保持不变。

试验在 100% 额定负载和 100% 额定速度下进行,并应在 5 台同型号的机器人上进行试验。

表 14 给出互换性试验条件汇总。

表 14 互换性试验条件

负 载	速 度	位 姿	每台机器人循环次数	机器人台数
100%额定负载	100%额定速度	P ₁ -P ₂ -P ₃ -P ₄ -P ₅	30	5

第一台机器人应安装在制造商指定的安装场所。对于 P₁、P₂、P₃、P₄ 和 P₅ 各点,应以相同的参照坐标系来计算各集群中心。

其他各台机器人的位姿准确度(AP_{pi})的计算,采用相同的机械安装基础,保持测量系统固定不变并使用相同的作业程序。

互换性计算公式如下:

$$E = \max \sqrt{(x_h - x_k)^2 + (y_h - y_k)^2 + (z_h - z_k)^2} \quad h, k = 1, 2, \dots, 5$$

注 4: 试验可用同一个机器人控制器进行,根据制造商的规定使用各操作机(见 GB/T 12643)的校准数据。

8 轨迹特性

8.1 概述

轨迹准确度和重复性的定义与轨迹形状无关。图 20 给出了轨迹准确度与重复性的一般性说明。以下各条所述的轨迹特性适用于所有的编程方法。

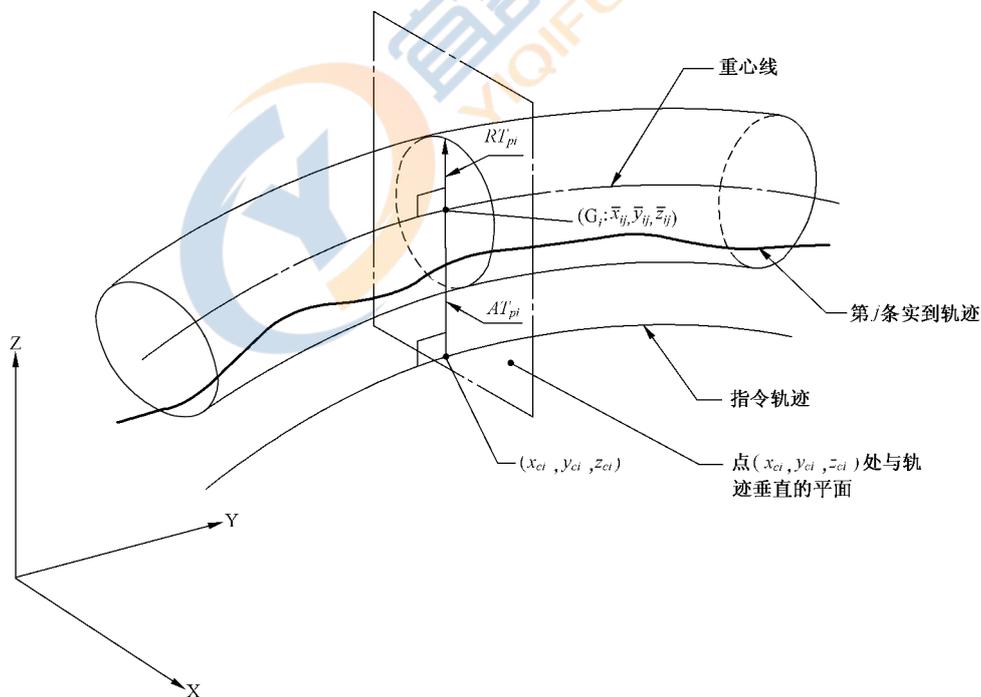


图 20 对某一指令轨迹的轨迹准确度与轨迹重复性

8.2 轨迹准确度(AT)

轨迹准确度表示机器人在同一方向上沿指令轨迹 n 次移动其机械接口的能力。

轨迹准确度由下述两个因素决定：

- 指令轨迹的位置与各实到轨迹位置集群的中心线之间的偏差(即位置轨迹准确度 AT_p , 见图 20)；
- 指令姿态与实到姿态平均值之间的偏差(即姿态轨迹准确度)。

轨迹准确度是在位置和姿态上沿所得轨迹的最大轨迹偏差。

位置轨迹准确度 AT_p 定义为指令轨迹上一些 (m 个) 计算点的位置与 n 次测量的集群中心 G_i 间的距离的最大值。

位置轨迹准确度由下式计算：

$$AT_p = \max \sqrt{(\bar{x}_i - x_{ci})^2 + (\bar{y}_i - y_{ci})^2 + (\bar{z}_i - z_{ci})^2} \quad i = 1, \dots, m$$

式中：

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad \bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad \bar{z}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij}$$

计算 AT_p 时, 应该考虑下述因素：

- 根据指令轨迹形状与试验速度, 沿指令轨迹选择一些计算点及相应的正交平面。所选正交平面数应在试验报告中说明；
- x_{ij} 、 y_{ij} 和 z_{ij} 是在指令轨迹上第 i 点的坐标；
- x_{ij} 、 y_{ij} 和 z_{ij} 是第 j 条实到轨迹与第 i 个正交平面交点的坐标。

姿态轨迹准确度 AT_a 、 AT_b 和 AT_c 定义为沿轨迹线上指令姿态的最大偏差。

$$\begin{aligned} AT_a &= \max |\bar{a}_i - a_{ci}| & i = 1, \dots, m \\ AT_b &= \max |\bar{b}_i - b_{ci}| & i = 1, \dots, m \\ AT_c &= \max |\bar{c}_i - c_{ci}| & i = 1, \dots, m \end{aligned}$$

式中：

$$\bar{a}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad \bar{b}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad \bar{c}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}$$

a_{ci} 、 b_{ci} 、 c_{ci} 是点 $(x_{ci}$ 、 y_{ci} 、 $z_{ci})$ 处的指令姿态。

a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 是点 $(x_{ij}$ 、 y_{ij} 、 $z_{ij})$ 处的指令姿态。

表 15 给出轨迹准确度试验条件的汇总。

表 15 轨迹准确度试验条件

负 载	速 度	轨 迹 形 状	循 环 次 数
100% 额定负载	100% 额定速度 50% 额定速度 10% 额定速度	直线轨迹 E ₁ —E ₂ 圆形轨迹	10
额定负载降至 10% (选用)	100% 额定速度 50% 额定速度 10% 额定速度	大圆和小圆 见 6.8.6.2 和图 6	

在与指令轨迹垂直的平面上计算轨迹准确度时, 实到轨迹可作为距离或时间的函数进行测量。编程时, 循环的起点与终点应位于所选测试轨迹之外。

8.3 轨迹重复性(RT)

轨迹重复性表示机器人对同一指令轨迹重复 n 次时实到轨迹的一致程度。

对某一给定轨迹跟踪 n 次, 轨迹重复性可表示为:

- RT_p 等于以下式计算的在正交平面内且圆心在集群中心线上圆的半径 RT_{pi} 的最大值(见图 20);
- 在不同计算点处围绕平均值的最大角度散布。

轨迹重复性由下式计算:

$$RT_p = \max RT_{pi} = \max [\bar{l}_i + 3S_{li}] \quad i=1, \dots, m$$

式中:

$$\bar{l}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{ij}$$

$$S_{li} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_{ij} - \bar{l}_i)^2}{n-1}}$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2 + (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 + (z_{ij} - \bar{z}_i)^2}$$

其中 $\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i, x_{ij}, y_{ij}$ 和 z_{ij} 的含义同 8.2。

$$RT_a = \max 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_{ij} - \bar{a}_i)^2}{n-1}} \quad i=1, \dots, m$$

$$RT_b = \max 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_{ij} - \bar{b}_i)^2}{n-1}} \quad i=1, \dots, m$$

$$RT_c = \max 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - \bar{c}_i)^2}{n-1}} \quad i=1, \dots, m$$

式中 $\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i, a_{ij}, b_{ij}$ 和 c_{ij} 的含义同 8.2。

轨迹重复性应该用与轨迹准确度相同的试验步骤来测量。

对于特殊应用, RT 也可用其分量 RT_x, RT_y, RT_z 来表示。

8.4 重复定向轨迹准确度

为了以简单方法表示在一条直线轨迹上沿三个方向交替变换姿态的影响, 仅测量位置轨迹准确度 (AT_p), 采用下述试验, 如图 21 所示。

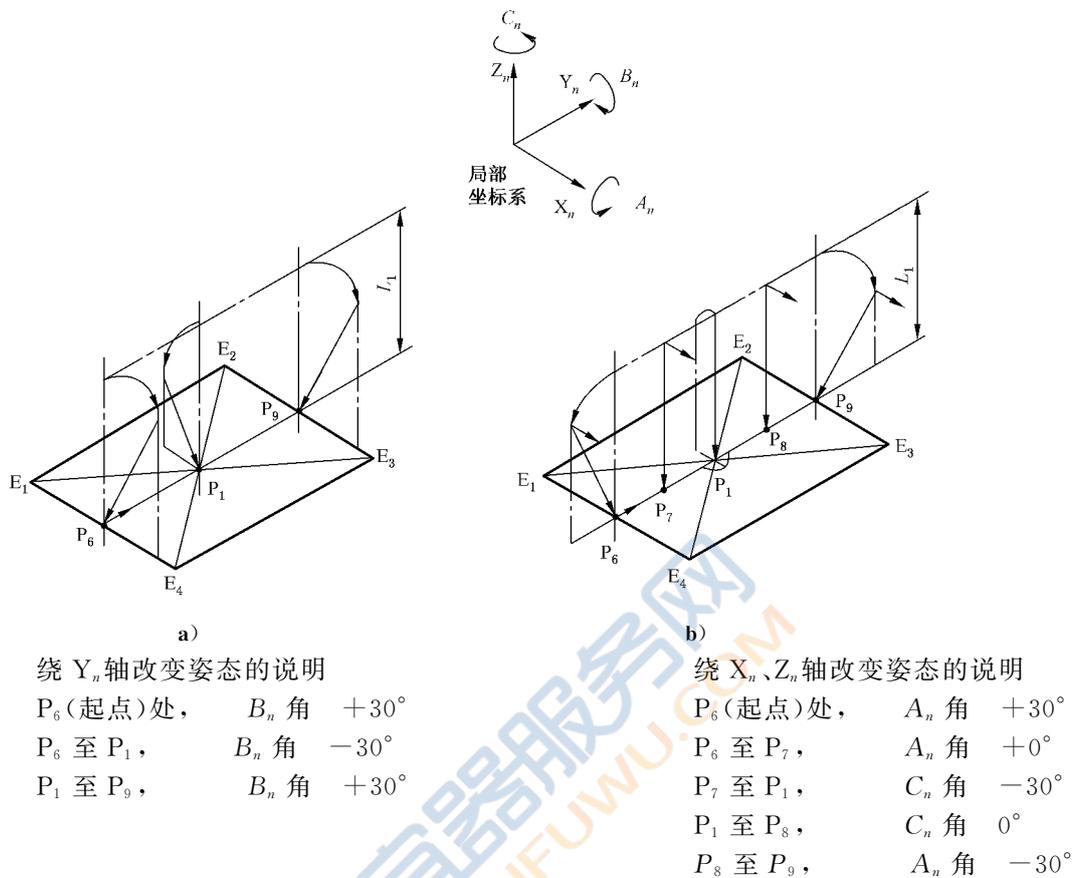


图 21 改变姿态的说明

在图 4 的试验平面 E_1, \dots, E_4 内, 应像图 6 一样等距标记好另一些点 P_6, \dots, P_9 。为了确定姿态, 应建立一个坐标系, 其 X_n, Y_n 面平行于所选择的 E_1, \dots, E_4 平面, 直线轨迹 P_6, \dots, P_9 平行于 Y_n 轴。

从起点 P_6 至 P_9 或从 P_9 返回至 P_6 时, 工具中心点 (TCP) 应以恒定速度跟踪轨迹。在图 21 所述的区域中, 姿态应连续改变, 不要在 P_6, \dots, P_9 点停顿。速度与负载按 8.2, 见表 16。

重复定向轨迹准确度的计算应类于 8.2 中所示所定义的轨迹准确度的计算。

表 16 给出了重复定向轨迹准确度试验条件的汇总。

表 16 重复定向轨迹准确度试验条件

负 载	速 度	轨 迹 形 状	循 环 次 数
100% 额定负载	100% 额定速度 50% 额定速度 10% 额定速度	直线轨迹 P_6-P_9 见 8.4, 图 6 和图 21	10
额定负载降至 10% (可选)	100% 额定速度 50% 额定速度 10% 额定速度		

8.5 拐角偏差

拐角偏差通常可分成以下两类:

- 尖锐拐角；
- 圆滑拐角。

为了得到尖锐拐角,必须允许改变速度,以保持对轨迹的精确控制。一般来说,这样会导致较大的速度变动。因此,为了维持稳定的速度,就需要圆滑拐角。

当机器人按程序设定的恒定轨迹速度无延时地从第一条轨迹转到与之垂直的第二条轨迹时,便会出现尖锐拐角偏差。

拐角附近的速度变化取决于控制系统的类型,应予记录(在某种情况下,速度的下降可达到所用试验速度的 100%)。

为防止过大的超调并使机构的变形保持在一定的限度内,可用圆滑拐角。不同的控制系统可以用编制程序或自动采用一些独立的轨迹,如给定半径或样条函数(平滑方法)。在此情况下,不希望速度下降,若不另外说明,速度的下降应控制在所用试验速度的 5% 以内。

若编程中使用了平滑方法,应在试验报告中说明。

8.5.1 圆角误差(CR)

圆角误差定义为连续三次测量循环计算所得的最大值。对于每一次循环,拐角点(图 22 中的 x_e 、 y_e 、 z_e)与实到轨迹间的最小距离按以下公式计算。

$$CR = \max CR_j \quad j=1,2,3$$

$$CR_j = \min \sqrt{(x_i - x_e)^2 + (y_i - y_e)^2 + (z_i - z_e)^2} \quad i=1, \dots, m$$

x_e 、 y_e 、 z_e 是指令拐角点的坐标；

x_i 、 y_i 、 z_i 是实到轨迹上的指令拐角附近第 i 个点的坐标。

8.5.2 拐角超调(CO)

拐角超调定义为连续三次测量循环计算所得的最大值。对于每一次循环,是计算机器人不减速地以设定的恒定轨迹速度进入第二条轨迹后偏离指令轨迹的最大值。

如第二条指令轨迹是沿 Z 轴方向定义,且第一条指令轨迹在负 Y 轴方向,则拐角超调由下式计算。

$$CO = \max CO_j \quad j=1,2,3$$

$$CO_j = \max \sqrt{(x_i - x_{a_i})^2 + (y_i - y_{a_i})^2} \quad i=1, \dots, m$$

式中:

x_{a_i} 、 y_{a_i} 是指令轨迹上对应于 z_{a_i} 的点的坐标；

x_i 、 y_i 是实到轨迹上对应于 z_i 的点的坐标。

此公式仅当 $(y_i - y_{a_i})$ 为正时才是正确的,若 $(y_i - y_{a_i})$ 为负,则不存在拐角超调。

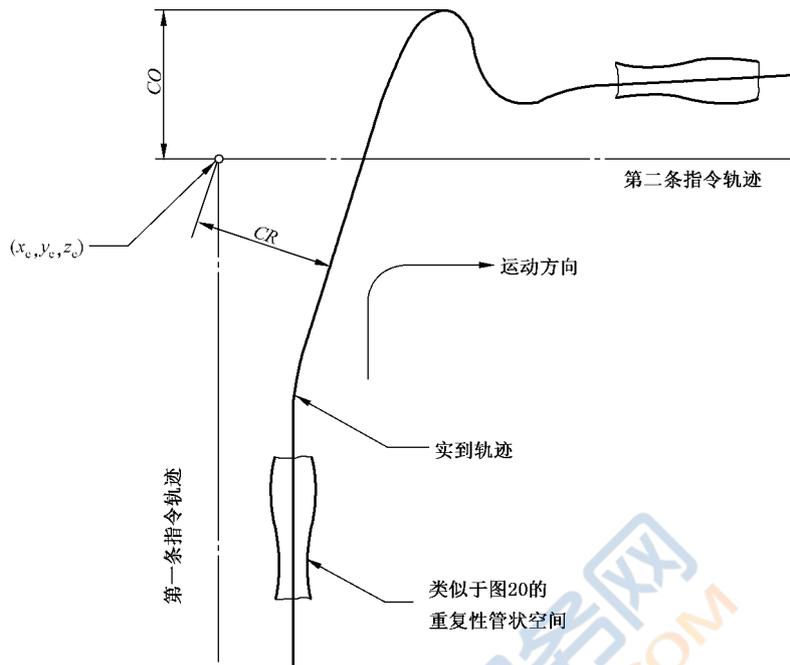


图 22 尖锐拐角处的超调和圆角误差

8.5.3 一般试验条件

表 17 给出了拐角偏差试验条件的汇总。

表 17 拐角偏差试验条件

负 载	速 度	拐 角	循 环 次 数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	$E_1-E_2-E_3-E_4$ (见 6.8.6.2 中图 6)	3

起始位置应在 E_1 与 E_4 的中点。四个拐角均应测量。应采用连续轨迹编程以得到矩形指令轨迹。当实现轨迹时,任何自动的速度下降均应按制造商的规定,且应在试验报告中说明。

若不另外说明,姿态是垂直于矩形轨迹平面的。

拐角超调可以由测量指令轨迹与每条已测的轨迹偏差来计算。为了确定指令轨迹,拐角点位置既可以在示教编程的示教过程中测量,也可以从人工输入数据中得知。

CR 与 CO 的指令应在相同的测量步骤中测量,任何程序的变动(如尖锐的拐角、平滑)都应在试验报告中说明。

8.6 轨迹速度特性

8.6.1 一般说明

机器人轨迹速度的性能特性可分为下述三项指标,它们是:

- 轨迹速度准确度(AV);
- 轨迹速度重复性(RV);

——轨迹速度波动(FV)。

图 23 表示了这些指标的理想化图形。

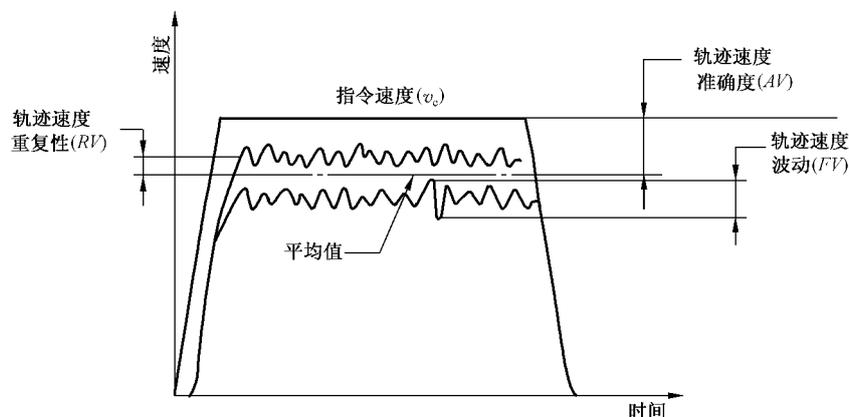


图 23 轨迹速度特性

表 18 给出了轨迹速度特性试验条件的汇总。

表 18 轨迹速度特性试验条件

负 载	速 度	循 环 次 数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	10
额定负载降至 10%(选用)	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	10

当轨迹有比较大的速度波动出现时,作为时间函数所进行的重复测量,必须参照指令轨迹上同一空间点来进行。

测量应在位于试验轨迹长度中部稳定速度段且在 50%长度上进行。

轨迹速度特性应该在与测试轨迹准确度(见 8.2)相同的直线轨迹上进行测量。计算 AV、RV 和 FV,所用的循环次数 $n=10$ 。

8.6.2 轨迹速度准确度(AV)

轨迹速度准确度是指令速度与沿轨迹进行 n 次重复测量所获得的实到速度平均值之差。可用指令速度的百分比表示。轨迹速度准确度可按下式计算。

$$AV = \frac{\bar{v} - v_c}{v_c} \times 100$$

式中:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{v}_j$$

$$\bar{v}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_{ij}$$

- v_c ——指令速度；
 v_{ij} ——第 j 次测量第 i 点处的实到速度；
 m ——沿轨迹测量的次数。

8.6.3 轨迹速度重复性(RV)

轨迹速度重复性是对同一指令速度所得实到速度的一致程度。
 如不另外说明,轨迹速度重复性应以指令速度的百分比来表示。

$$RV = \pm \left(\frac{3S_v}{v_c} \times 100 \right)$$

式中:

$$S_v = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{v}_j - \bar{v})^2}{n-1}}$$

v_c 、 \bar{v}_j 、 \bar{v} 的定义见 8.6.2。

轨迹速度重复性应采用与轨迹速度准确度一样的试验步骤进行测量。

8.6.4 轨迹速度波动(FV)

轨迹速度波动是在再现一种指令速度的过程中速度的最大变化量。
 轨迹速度波动定义为每次再现时速度波动的最大值。

$$FV = \max_{i=1}^m [v_{ij}] - \min_{i=1}^m [v_{ij}] \quad j = 1, \dots, n$$

式中 v_{ij} 与 8.6.2 相同。

轨迹速度波动应采用轨迹速度准确度一样的试验步骤进行测量。

9 最小定位时间

定位时间是机器人在点位控制方式下从静态开始移动一预定距离和/或摆动一预定角度到达稳定状态所经历的时间。7.4 中所定义的机器人稳定于实到位姿所用的时间包含于总的定位时间内。

如不另外说明,机器人以规定的最小定位时间在测试位姿间运动时,应能得到规定的位置准确度与重复性。

定位时间与运动距离没有线性关系。

注 5: 机器人的定位时间有助于确定循环时间,但不是其中唯一的因素。因此,从定位时间的测量结果可以大概表示循环时间的长短,但不能用来直接计算循环时间。

试验时,机械接口的负载与速度和 6.6 中位姿特性的试验一样。

若想得到较短的定位时间,试验所用的速度为 100% 额定速度,且试验应在循环每一部分的最佳速度下进行。所用的速度应在试验报告中说明。

试验的循环次数是 3 次。

表 19 与表 20 给出了最小定位时间试验条件的汇总。

表 19 最小定位时间的试验位姿与距离

位姿	P	P ₁₊₁	P ₁₊₂	P ₁₊₃	P ₁₊₄	P ₁₊₅	P ₁₊₆	P ₁₊₇
与前一位姿的距离/mm (D _x =D _y =D _z)	0	-10	+20	-50	+100	-200	+500	-1 000

表 20 最小定位时间试验条件

负 载	速 度	拐 角	循 环 次 数
100%额定负载	100%额定速度 最佳速度	P ₁ -P ₁₊₁ -P ₁₊₂ -P ₁₊₃ - P ₁₊₄ -P ₁₊₅ -P ₁₊₆ -P ₁₊₇	3
额定负载降至 10% (选用)	100%额定速度 最佳速度	(见表 19)	3

- 为了在定位时间测量中有较短的距离,在沿 6.8.4 中定义的立方体对角线上,由程序或示教设定一系列位姿。相邻位姿间的距离分量 D_x=D_y=D_z 之值符合表 19 中所示的数列(见图 24)。
- 位姿的个数与距离取决于所选的立方体大小。
- 对于每一个运动过程,计算三次循环的平均值,列表给出结果和位姿间的距离。

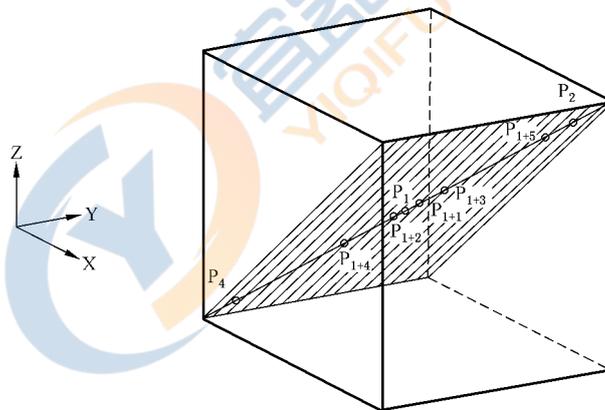


图 24 循环的图示

10 静态柔顺性

静态柔顺性是在单位负载作用下最大的位移。应在机械接口处加载并测量位移。

静态柔顺性应在机座坐标系下以毫米每牛顿为单位来表示。

试验中所用的力应加在平行于机座坐标轴的三个方向上,既有正也有负。

力应以 10%额定负载逐步增加到 100%额定负载,每次一个方向。对于每个力和方向,测量相应的位移。

应在伺服系统通电、制动器脱开的情况下进行测量。

每个方向上重复三次测量,试验应在 6.8.4 中所定义的位于 P₁ 的机械接口的中心进行。

11 面向应用的特殊性能规范

11.1 摆动偏差

机器人的摆动偏差特性可分为两个指标,它们是:

——摆幅误差(WS);

——摆频误差(WF)。

摆动是轨迹上一个或多个运动的组合,主要用于弧焊。

11.1.1 摆动试验轨迹

图 25 的轨迹是锯齿状摆动轨迹,指令摆幅 S_c ,和以指令摆频 F_c 完成的摆动距离 WD_c 产生,二者由制造商给定。在图 5 与图 6 中的所选平面内,以 P_1 为对称点,中线平行于 P_2-P_3 ,至少应有 10 次摆动。

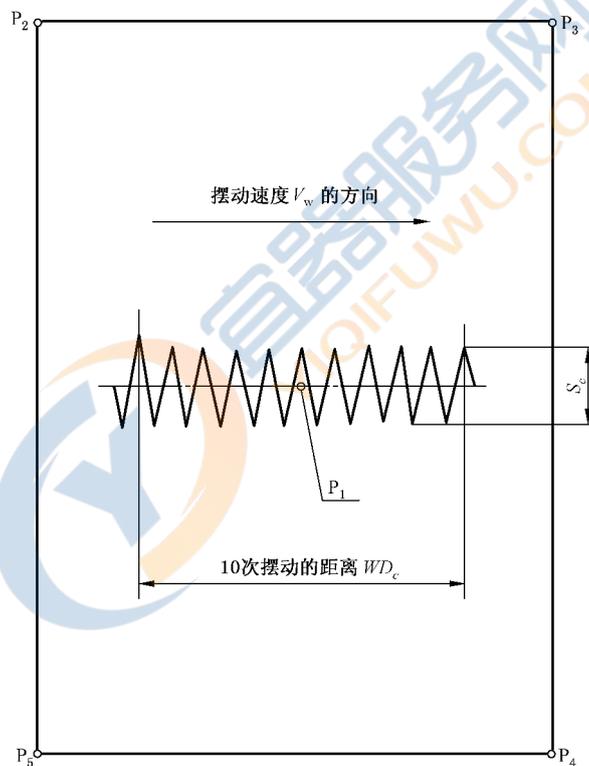


图 25 在所选平面内的摆动试验轨迹

11.1.2 摆幅误差(WS)

以百分比表示的摆幅误差应由测得的实到摆幅平均值 S_a 与指令摆幅 S_c 之间的偏差计算而得,见图 26,它可按下式计算:

$$WS = \frac{S_a - S_c}{S_c} \times 100\%$$

11.1.3 摆频误差(WF)

以百分比表示的摆频误差应由测得的实际摆频 F_a 与指令摆频 F_c 之间的偏差来计算,可按下式计算:

$$WS = \frac{F_a - F_c}{F_c} \times 100\%$$

式中: $F_a = 10 \times \frac{WV_a}{10 - WD_a}$ 和 $F_c = 10 \times \frac{WV_c}{10 - WD_c}$

WV_c = 指令摆动速度

WV_a = 实际摆动速度

WD_c = 指令摆动距离

WD_a = 平均的实际摆动距离

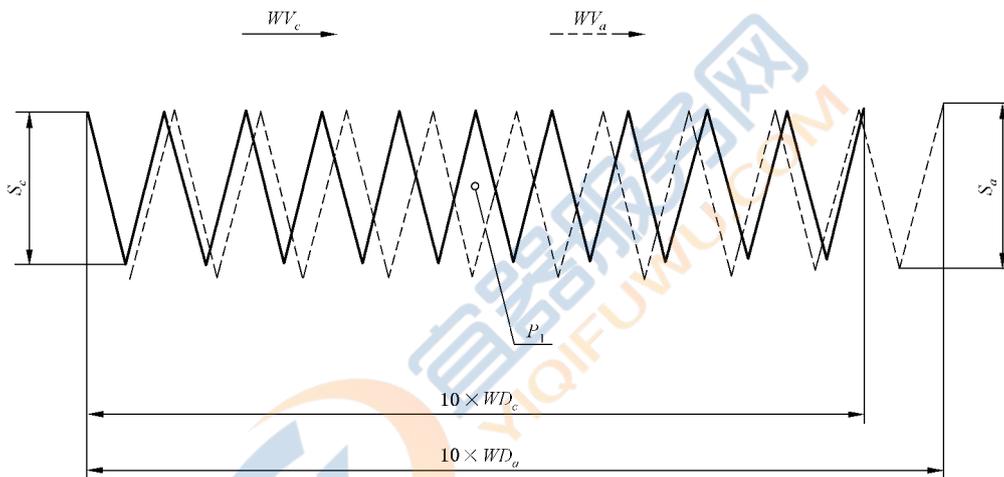


图 26 实际和指令摆动轨迹示意图

12 试验报告

试验报告应由封面及一张或多张试验结果表格组成。封面应提供关于机器人的测量装置及试验条件(物理环境、安装/预热、仪器、编程方法等)的一般信息和所进行的试验。试验结果表格应提供所进行的各项试验数据的汇总及测量设备的不确定性。

所有报告应包含每一种试验所用的机器人程序与软件参数。

附录 C(资料性附录)给出了一个试验报告的实例,它说明了封面与试验表格所必须的一些信息。

附 录 A
(规范性附录)
对比试验的参数

A.1 概述

如本标准范围所述,本附录为一些典型的位姿和轨迹特性对比试验提供了一些规定的参数。

对于表 A.1 中所列特性的对比试验,如供应商与用户对参数没有提出别的数值,应采用本附录所述的立方体尺寸、平面、负载、速度和轨迹形状等参数。表 A.1 还提供了一些本附录其他地方没有规定的特定试验参数。

对于本附录中未提出的一些参数,应采用本标准正文部分规定的试验条件和参数,如位姿点、循环次数等。

仅当在外作用力未对末端执行器没有影响时,对比试验才有意义。

表 A.1 特性表

测试特性	备 注
位姿准确度与重复性	
多方位姿准确度变动	
距离准确度与重复性	
位置稳定时间	
位置超调量	
位姿特性漂移	
位置轨迹准确度	直线试验轨迹的长度按 6.8.6.2 的原则选定的立方体的尺寸而定
重复定向轨迹准确度	直线试验轨迹的长度按 6.8.6.2 的原则选定的立方体的尺寸而定
拐角偏差(尖锐拐角)	
轨迹速度	
最小定位时间	
静态柔顺性	
摆动	对于 11.1.1 与图 25 中的轨迹 $S_c = 10 \text{ mm}$, $f = 1, 2$ 或 5 Hz

A.2 立方体的尺寸与测试平面的选取

若不另外说明,应采用边长为 250, 400, 630, 1 000 mm 中最大的立方体。所选立方体的中心点 (P_1 , 见 6.8.4 与图 4) 应与具有最大容积的立方体中心一致,且其棱边平行于机座坐标系。立方体在机器人机座坐标系中的位置应在试验报告中说明。

应采用图 2 中的平面 (a) $C_1 - C_2 - C_7 - C_8$ 。

对于少于六轴的机器人,应采用图 5 中的平面 2、3 或 4。

A.3 机械接口的负载

所有试验应按表 A.2 选择尽可能大的负载进行,亦可选用该试验负载的 10%。CG(重心)的轴向偏移,CG 的径向偏移和 MP(测量点)的轴向偏移如图 3 所示。

表 A.2 标准试验负载一览表

试验负载分类	质量 kg	CG 的轴向偏移			CG 与 MP 径向偏移			MP 的轴向偏移		
		L_z /mm			L_x, X_{MP} /mm			Z_{MP} /mm		
1	1	20			0			40		
2	2	40			20			80		
3	5	60			30			120		
4	10	80			40			160		
5	20	100			50			200		
6	40	120			60			240		
7	60	140			70			280		
8	80	160			80			320		
9	100	180			90			360		
10	120	200			100			400		
11	140	220			110			440		

A.4 试验速度

位姿特性应采用 A.3 中规定的速度进行测试,如果速度不能达到 1 600 mm/s,则应采用 630 mm/s 的速度。表 A.3 中门限带已在 7.4 与 7.5 中说明。

轨迹特性应采用表 A.4 中规定的速度进行测量。

表 A.3 位姿特性的试验速度

被测特性	速 度											
	低 速						高 速					
	10 mm/s			25 mm/s			630 mm/s			1 600 mm/s		
	门限带/mm			门限带/mm			门限带/mm			门限带/mm		
	0.1	0.5	1.0	0.1	0.5	1.0	0.1	0.5	1.0	0.1	0.5	1.0
位置稳定时间	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×
位置超调量	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×
最小定位时间	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×
位姿准确度和位姿重复性	×			○			○			×		
多方位姿准确度变动	×			○			○			×		
距离准确度和重复性	×			○			○			×		

注: ×表示必选;○表示可选。

注 6: 在 1 600 mm/s 速度下门限带可在三个数值中择其一。

表 A.4 轨迹特性试验速度

被测特性	速 度			
	低 速		高 速	
	10 mm/s	25 mm/s	630 mm/s	1 600 mm/s
位置轨迹准确度	×	×	○	×
重复定向轨迹准确度	×	×	○	×
尖锐拐角偏差	—	×	○	×
轨迹速度特性	×	×	○	×
摆动偏差	×	○	—	—

注：×表示必选；○表示可选。

低速适用于焊接、切割、抛光/去毛刺等用途，而高速用于喷漆、涂胶等用途。

A.5 可选用的轨迹形状与尺寸

图 A.1 所示是一条可选用的试验轨迹，它包括各种单元轨迹，可用于位置轨迹准确度测试。对于 400 mm×400 mm 和 800 mm×800 mm 的平面，表 A.5 中给出了点 P₁ 和 P₁₀ 到 P₃₆ 的坐标。

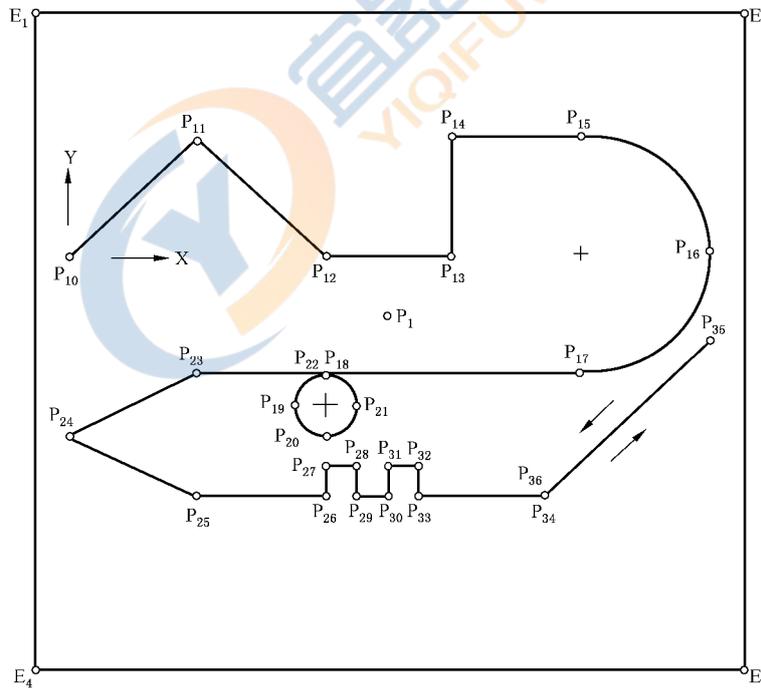


图 A.1 可选用的试验轨迹

表 A.5 可选用的试验轨迹的坐标

点	400 mm×400 mm 的平面		800 mm×800 mm 的平面	
	X=	Y=	X=	Y=
1	180	-50	360	-100
10	0	0	0	0
11	70	70	140	140
12	140	0	280	0
13	210	0	420	0
14	210	70	420	140
15	280	70	560	140
16	260	-10	720	-20
17	280	-90	560	-180
18	140	-90	280	-180
19	120	-110	240	-220
20	140	-130	280	-260
21	160	-110	320	-220
22	140	-90	280	-180
23	70	-90	140	-180
24	0	-130	0	-260
25	70	-170	140	-340
26	140	-170	280	-340
27	140	-160	280	-320
28	150	-160	300	-320
29	150	-170	300	-340
30	160	-170	320	-340
31	160	-160	320	-320
32	170	-160	340	-320
33	170	-170	340	-340
34	260	-170	520	-340
35	360	-70	720	-140
36	260	-170	520	-340

附录 B

(资料性附录)

典型应用性能规范的选择指南

引言

本引言和 6.11 均指出各项试验可全部或部分采用,取决于机器人的类型以及对它的要求。根据用户本身的特殊要求,对 GB/T 12642 标准的使用者提供选择试验项目的方法。

本附录的目的是为一些典型的应用场合提供选择机器人基本试验的指南。因此,试验项目数可以是有限的。

表 B.1 列举了一些典型的机器人的应用。对于不同的用途,所选的基本试验项目以“×”表明。

表 B.1 的注解:

- 1) 用于点位控制场合;
- 2) 用于连续轨迹控制场合;
- 3) 仅用于离线编程情况下;
- 4) 仅指位置。

表 B.1 典型应用的性能规范选择指南

应用规范	GB/T 12642 中的参考章节	应用场合									
		点焊 ¹⁾	搬运/ 上下料 ¹⁾	装配		检验		机加工/去 毛刺/抛光/ 切割 ²⁾	喷漆 ²⁾	弧焊 ²⁾	涂粘/ 密封 ²⁾
				1)	2)	1)	2)				
位姿准确度	7.2.1	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾			× ³⁾	
位姿重复性	7.2.2	× ⁴⁾	× ⁴⁾	× ⁴⁾	× ⁴⁾	× ⁴⁾	× ⁴⁾			× ⁴⁾	
多方向位姿准确度变动	7.2.3		× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾				
距离准确度/重复性	7.3	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾				
位置稳定时间	7.4	×	×	×	×	×	×				
位置超调量	7.5	×	×	×	×	×	×			×	
位姿准确度漂移	7.6	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾			× ³⁾	
位姿重复性漂移	7.6	× ⁴⁾	× ⁴⁾	× ⁴⁾	× ⁴⁾	× ⁴⁾	× ⁴⁾			× ⁴⁾	
互换性	7.7										
轨迹准确度	8.2					× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾
轨迹重复性	8.3					× ⁴⁾	× ⁴⁾	× ⁴⁾	× ⁴⁾	× ⁴⁾	× ⁴⁾
重复定向轨迹准确度	8.4										
拐角偏差	8.5					×	×	×			×
轨迹速度准确度	8.6.2								× ³⁾	× ³⁾	× ³⁾

表 B.1 (续)

应用规范	GB/T 12642 中的参考章节	应用场合									
		点焊 ¹⁾	搬运/ 上下 料 ¹⁾	装配		检验		机加工/去 毛刺/抛光/ 切割 ²⁾	喷漆 ²⁾	弧焊 ²⁾	涂粘/ 密封 ²⁾
				1)	2)	1)	2)				
轨迹速度重复性	8.6.3								×	×	×
轨迹速度波动	8.6.4								×	×	×
最小定位时间	9	×	×	×							
静态柔顺性	10	×	×	×	×			×			
摆动偏差	11.1									×	



附 录 C
(资料性附录)
试验报告实例

机器人

控制系统

制造商: _____
 类型: _____
 型号: _____
 系列号: _____
 安装方向: _____
 软件版本: _____
 编程方法: _____
 试验场所: _____

物理环境

环境温度: _____
 不正常状态: _____
 注:对超出预期范围状态的说明
 预热时间: _____ 测量时间: _____
 测量停顿时间: _____

测量系统

类型: _____ 型号: _____ 系列号: _____
 说明: _____

试验条件

额定负载条件:

质量(kg) _____ 重心位置(坐标 L_X, L_Y, L_Z) _____
 惯性矩(kg/m²) _____ 测量点位置(坐标 X_{MP}, Y_{MP}, Z_{MP}) _____

按 GB/T 12642 所进行的试验

- | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 位姿准确度 | <input type="checkbox"/> 轨迹准确度和轨迹重复性 |
| <input type="checkbox"/> 位姿重复性 | <input type="checkbox"/> 重复定向轨迹准确性 |
| <input type="checkbox"/> 多方向位姿准确度变动 | <input type="checkbox"/> 拐角偏差 |
| <input type="checkbox"/> 距离准确度和距离重复性 | <input type="checkbox"/> 轨迹速度准确度、重复性和波动 |
| <input type="checkbox"/> 位置稳定时间 | <input type="checkbox"/> 最小定位时间 |
| <input type="checkbox"/> 位置超调量 | <input type="checkbox"/> 静态柔顺性 |
| <input type="checkbox"/> 位姿特性漂移 | <input type="checkbox"/> 摆动偏差 |
| <input type="checkbox"/> 互换性 | |

试验者: _____ 日期: _____
 审核者: _____ 日期: _____

试验结果表

注：以下表格仅供参考。

表 C.1 位姿准确度与位姿重复性

负 载	速 度	P_1		P_2		P_3	P_4	P_5
100%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.3 中的高速和低速	$AP_p =$ $AP_a =$ $AP_b =$ $AP_c =$	$RP_l =$ $RP_a =$ $RP_b =$ $RP_c =$	$AP_p =$ $AP_a =$ $AP_b =$ $AP_c =$	$RP_l =$ $RP_a =$ $RP_b =$ $RP_c =$			
10%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载的 10%	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.3 中的高速和低速	$AP_p =$ $AP_a =$ $AP_b =$ $AP_c =$	$RP_l =$ $RP_a =$ $RP_b =$ $RP_c =$			

表 C.2 多方向位姿准确度变动

负 载	速 度	P_1	P_2	P_4
100%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.3 中的高速和低速	$vAP_p =$ $vAP_a =$ $vAP_b =$ $vAP_c =$	$vAP_p =$ $vAP_a =$ $vAP_b =$ $vAP_c =$
10%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载的 10%	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.3 中的高速和低速	$vAP_p =$ $vAP_a =$ $vAP_b =$ $vAP_c =$

表 C.3 距离准确度和距离重复性

负 载	速 度	P_2		P_4	
100%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.3 中的高速和低速	$AD_p =$ $AD_a =$ $AD_b =$ $AD_c =$	$RD_l =$ $RD_a =$ $RD_b =$ $RD_c =$		
编制方法：					

表 C.4 位置稳定时间和超调量

负 载	速 度	P_1	门 限 带
100%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.3 中的高速和低速	$t=$ $OV=$	规定的门限:
10%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载的 10%	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.3 中的高速和低速	$t=$ $OV=$	规定的门限:

表 C.5 互换性

负 载	速 度	互 换 性
100%按 6.6 选择	100%按 6.7 选择	$E=$

表 C.6 轨迹速度准确度与轨迹重复性

负 载	速 度	轨迹形状与长度	准确度	重复性	重复定向准确度
100%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.4 中的高速和低速		$AT_p=$ $AT_a=$ $AT_b=$ $AT_c=$	$RT_p=$ $RT_a=$ $RT_b=$ $RT_c=$	$AT_p=$
10%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载的 10%	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.4 中的高速和低速		$AT_p=$ $AT_a=$ $AT_b=$ $AT_c=$	$RT_p=$ $RT_a=$ $RT_b=$ $RT_c=$	$AT_p=$

表 C.7 拐角偏差

负 载	额 定 速 度	速度下降量	超 调	圆角误差
100%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.4 中的高速和低速		$CO=$	$CR=$
最大额定轨迹速度			m/s	
拐角处最大轨迹速度的下降量			m/s	
拐角处轨迹速度下降的起点与终点之间的距离			mm	

表 C.8 轨迹速度准确度、重复性和波动

负 载	速 度	轨迹速度准确度	轨迹速度重复性	轨迹速度波动
100%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.4 中的高速和低速	AV= %	RV= %	FV= %
10%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载的 10%	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.4 中的高速和低速	AV= %	RV= %	FV= %

表 C.9 最小定位时间

起始位姿	到达位姿	距离/mm	时间/s
所用速度			

表 C.10 静态柔顺性

力的方向	X ⁺	X ⁻	Y ⁺	Y ⁻	Z ⁺	Z ⁻
力的大小	__ N					
柔顺性	__ mm/N					

表 C.11 摆动偏差

负 载	速 度	摆幅误差	摆频误差
100%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.4 中的高速和低速	WS= %	WF= %
100%额定负载,或在对比试验时选表 A.2 中被测机器在人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度,或在对比试验时选表 A.4 中的高速和低速	WS= %	WF= %

附录 NA

(资料性附录)

基于 GB/T 12642 的工业机器人性能检测方法

NA.1 概述

本附录推荐了数种可用于本标准描述的工业机器人性能试验的方法。

NA.2 性能测量方法的主要类别

有数种方法被用于依据 GB/T 12642 评价机器人的性能。分类如下：

- a) 试验探头法；
- b) 轨迹比较法；
- c) 三边测量法；
- d) 极坐标测量法；
- e) 三角测量法；
- f) 惯性测量法；
- g) 坐标测量法；
- h) 轨迹描绘法。

在 NA.4 中简要讨论了这些方法。在参考文献中有这些系统的详细描述。

NA.3 推荐的机器人性能测量方法

表 NA.1 给出了推荐的机器人性能测量方法的一览表。在 NA.2 中被分成 8 类的这些方法被列举为 16 种单独的方法，说明了每种方法的功能。有些方法可用于测量位姿和路径特性，但有些方法有局限性，即：

- a) 在位姿特性试验中仅能测量位置(或姿态)。
- b) 仅能沿限定的指令(直线或圆形)路径测量路径特性。
- c) 只能测试有限超调的机器人。
- d) 对于一些特殊特性的测量，测试设备的准确度或不确定性可能不够。
- e) 测量受限于测试设备的自由度数。
- f) 相较于本标准规定的试验立方体，测试设备提供的测量空间可能有限。
- g) 测试设备的取样频率可能不适合于要测量的机器人运动的最高频率。

当规划性能测量时，试验人员应与测试设备制造商讨论上述局限性。

表 NA.2 是推荐方法的典型特性及功能的概要。建议在机器人试验前，试验人员应了解该机器人的性能并选择恰当的试验方法。

NA.4 机器人性能测量方法

本节是表 NA.1 中列举的方法的说明和示意图。

NA.4.1 试验探头法

可使用有足够数量的位移或接近传感器的探头来测量实到位姿特性,探头由机器人放置,以便缓慢地接触位于规定位置的精密样标来测量位姿特性或在其附近来测量可能的超调。图 NA.1 为典型配置的示意图。图 NA.2 说明了该方法的某些其他应用。根据所需的位姿参数的数目,有数种形式的样标和探头相互配合。

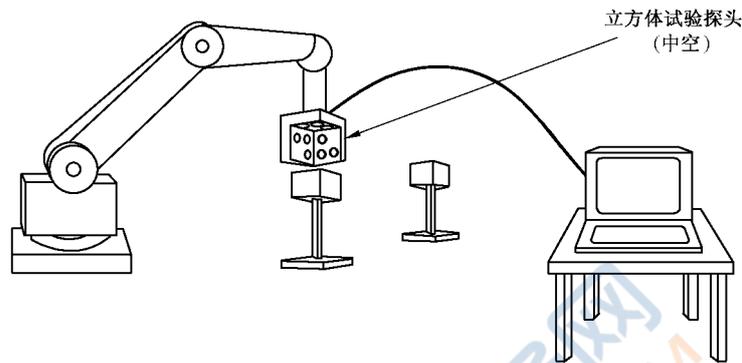


图 NA.1 试验探头法(立方体制品)

	接触测量 (测量 x 、 y 、 z 坐标)	非接触测量 (测量 x 、 y 、 z 、 a 、 b 、 c 坐标)
样标		
探头		
	装于机器人上	

图 NA.2 放置试验探头方法中的制品

NA.4.2 轨迹比较法

NA.4.2.1 机械量具比较法

本方法把实到的轨迹与指令轨迹相比较,该指令轨迹可能由直线段或圆形段组合而成。所述轨迹用精密的机械量具或其他位置参照构件来确定。图 NA.3 说明了该方法的设备布置,接近(觉)传感器安装在角形探头上,而量具的直棱表示指令轨迹。完成该轨迹过程中产生的偏差由适当数量的传感器感知,并用于确定实到轨迹的特性参数(准确度和重复性)。当使用足够的传感器时,还可确定位姿偏差(位置和姿态)。

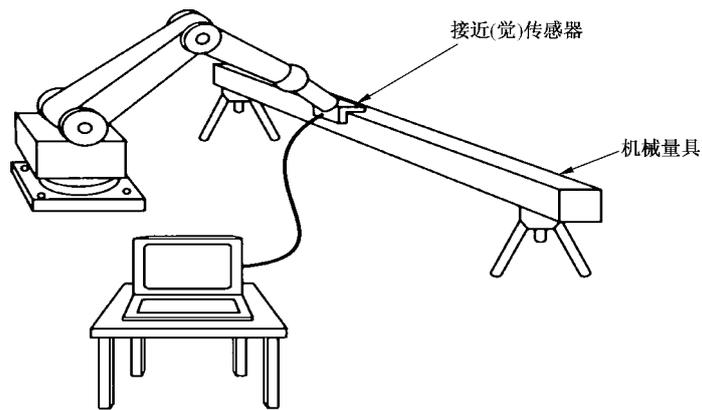


图 NA.3 机械量具比较法

NA.4.2.2 激光束轨迹比较法

可用光电传感器测量沿激光束的轨迹准确度/重复性,该光电传感器能检测入射光束对传感器中心的位置误差。图 NA.4 显示了系统的配置。如果用激光干涉仪代替激光光源且光电传感器具有光反射能力,则沿光束的机器人位姿可作为时间函数计算出来。

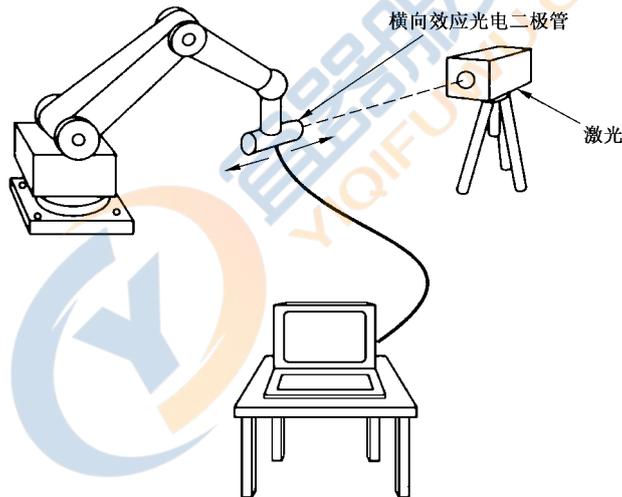


图 NA.4 激光束路径比较法

NA.4.3 三边测量法

三边测量方法是确定三维空间中 P 点直角坐标 (x, y, z) 的一种方法,该方法应用的是 P 点与 3 个观察点之间的距离以及 3 个固定观察点之间的基线长度。图 NA.5 解释了以二维平面表示的三边测量法的原理。

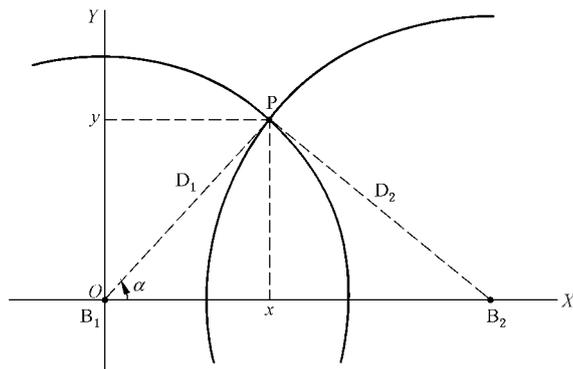


图 NA.5 三边测量的测量原理(表示的是二维平面)

NA.4.3.1 多激光跟踪干涉仪法

本方法使用由3个具有两轴伺服跟踪的激光干涉仪产生的3束激光瞄准装在机器人手腕上公共靶标。图NA.6所示为系统配置。三维空间中的机器人位置特性可根据3个干涉仪得到的距离数据来确定。如果使用6个干涉仪,6束光束瞄准机器人上3个独立靶标,就可以测得姿态。

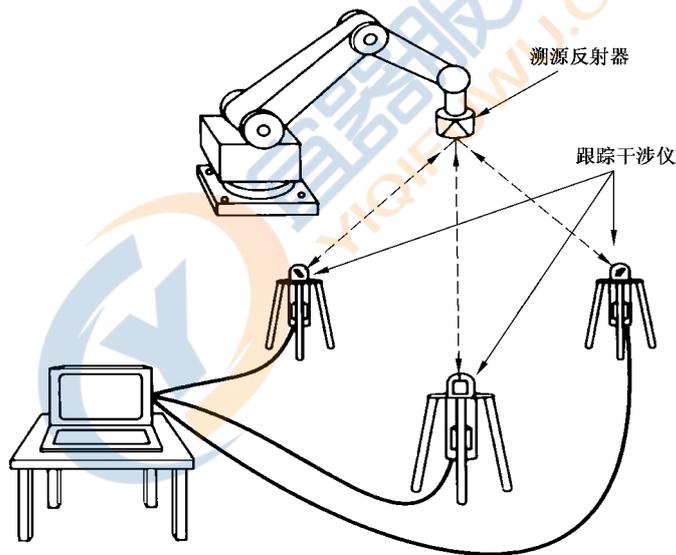


图 NA.6 多激光跟踪干涉仪法

NA.4.3.2 超声三边测量法

机器人在三维空间中的位置可用3个固定的超声话筒得到的距离数据计算出来,超声话筒接收装在机器人上的声源发出的超声脉冲串。图NA.7所示为系统配置。

如果机器人有3个独立的声源,并且每个话筒能检测来自3个声源的脉冲串,就能测出机器人的姿态。

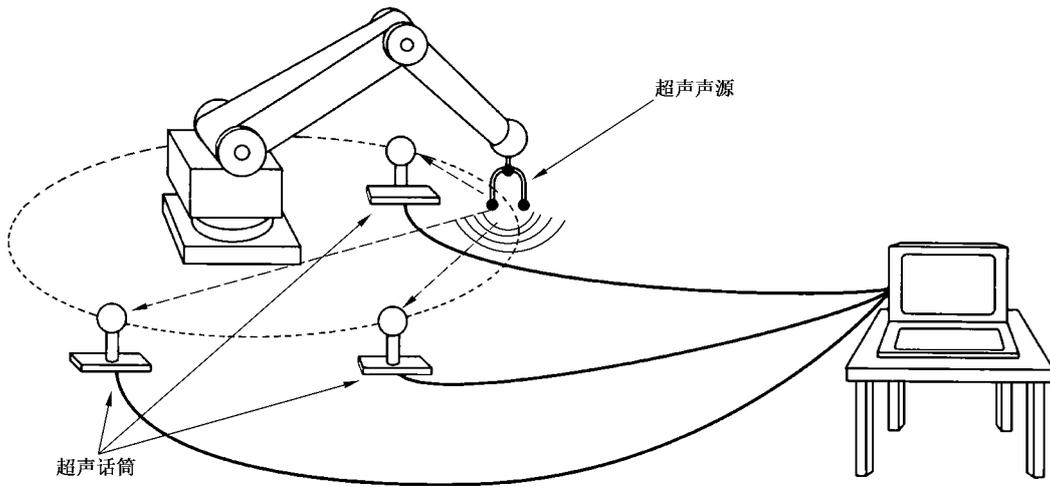


图 NA.7 超声三边测量法

NA.4.3.3 钢索三边测量法

本方法把从 3 个固定供索器拉出的 3 根钢索连接于机器人的末端,如图 NA.8 所示。用装有张紧装置的供索器上的电位计或编码器计算每根钢索的长度,就可以确定机器人末端的位置。

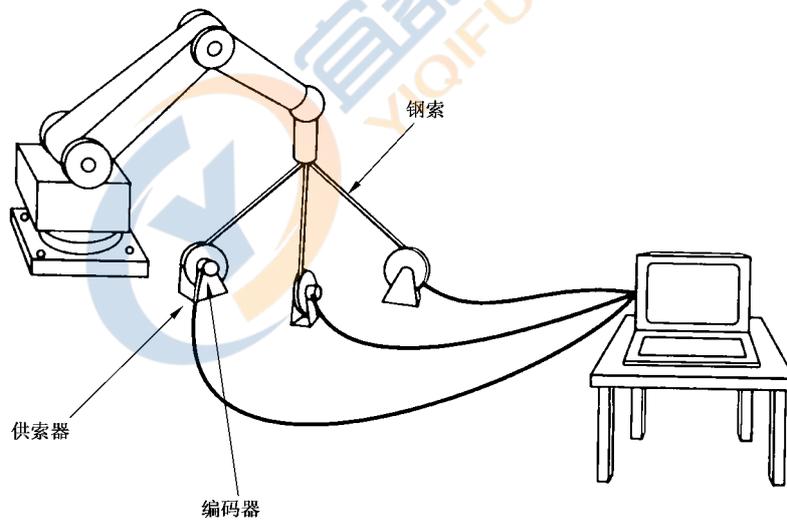


图 NA.8 钢索三角测量法

NA.4.4 极坐标测量法

如图 NA.9 中所示,测量距离 D 、方位角 (α) 和俯仰角 (β) ,就可用极坐标测量法确定空间中一点的直角坐标 (x, y, z) 。

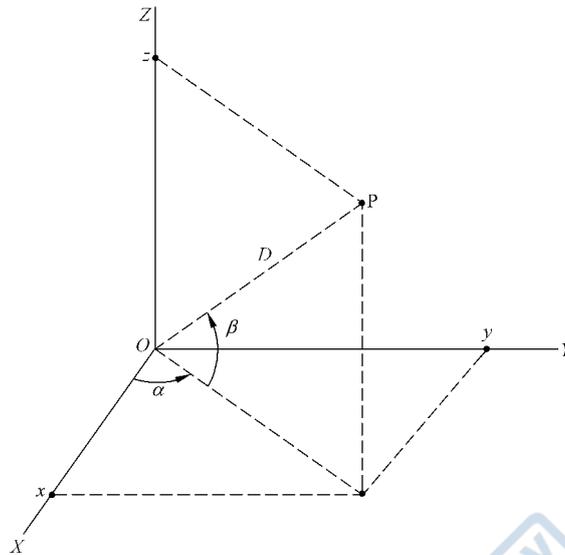


图 NA.9 三维极坐标测量法的原理

NA.4.4.1 单激光跟踪干涉仪法

激光跟踪干涉测量方法可用于测量机器人的位置或姿态。图 NA.10 表示用于位置测量的单激光干涉仪法的典型配置。机器人的位置可用激光干涉仪得到的距离数据和固定跟踪系统得到的方位角/俯仰角数据计算出来,固定跟踪系统瞄准安装在机器人末端的溯源反射镜。

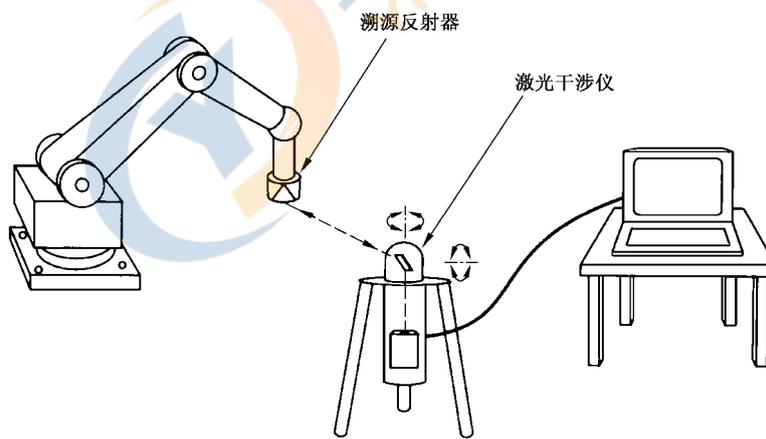


图 NA.10 用于位置测量的单激光跟踪干涉仪法

如果溯源反射镜系统能始终使自己的光轴指向固定跟踪系统,或者,如果固定跟踪系统能分析由溯源反射器反射的衍射图像,则用同样的系统(图 NA.11)也可以测量机器人的方位角(俯仰及偏转)。此方法可用于测试 6 自由度机器人。

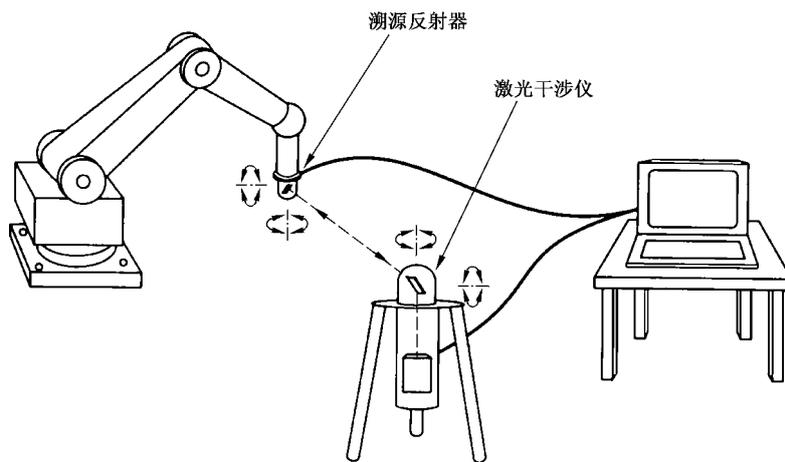


图 NA.11 用于位姿测量的单激光跟踪干涉测量方法

NA.4.4.2 单总站法(静态/跟踪)

用固定的总站(能测量距离、方位角及俯仰角),可逐点地测量机器人的实到位置。

机器人的实到姿态或实到轨迹也可用跟踪的总站测量,总站要始终跟踪装在机器人上的移动的溯源反射器。图 NA.12 表示该系统的典型配置。

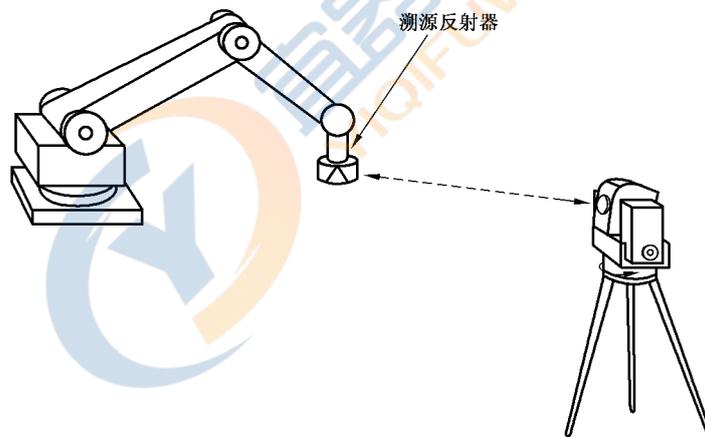


图 NA.12 单总站法(跟踪)

NA.4.4.3 直线标尺法

机器人的位置与时间的关系可用直线标尺得到的距离及方位角/俯仰角数据测量。

图 NA.13 所示的直线标尺法中,直线标尺的上端与机器人相连,测量该上端和与编码器连接点之间的距离。

用一个水平运动的编码器和另一个垂直运动的编码器来获取指向示直线标尺上端的方位角/俯仰角数据。

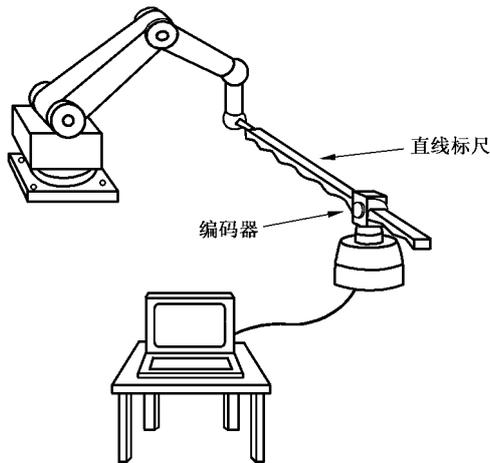


图 NA. 13 直线标尺法

NA. 4.5 三角测量法

三角测量可用于确定点在空间中的位置。在二维的三角测量中，P 点的直角坐标 (x, y) (见图 NA. 14) 可用基线长度 B_1B_2 及两个方位角 α_1 及 α_2 来确定。

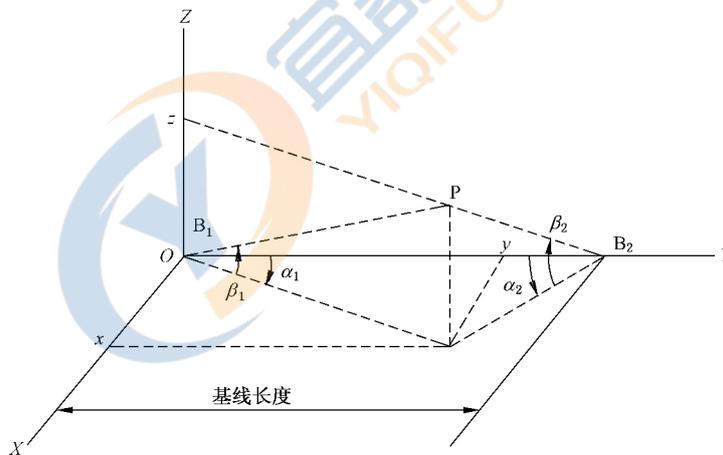


图 NA. 14 三角测量的测量原理

NA. 4.5.1 光学跟踪三角测量法

这种方法用两个二轴光学跟踪系统得到的两组方位角/俯仰角数据确定机器人位置与时间关系。因此，这种方法可用于静态和动态测量。图 NA. 15、图 NA. 16 及图 NA. 17 显示 3 个常用的光学跟踪三角测量系统的典型配置。

在图 NA. 15 所示的激光跟踪系统中，两个跟踪系统发出的两束光始终瞄准安装在机器人末端上的反射器。图 NA. 16 所示的激光扫描方法是确定机器人位置的另一种方法，它检测装在机器人上的靶标的入射光，入射光来自三个激光扫描仪，两个扫描仪发出垂直的行结构光，而第 3 个扫描仪发出水平的行结构光。

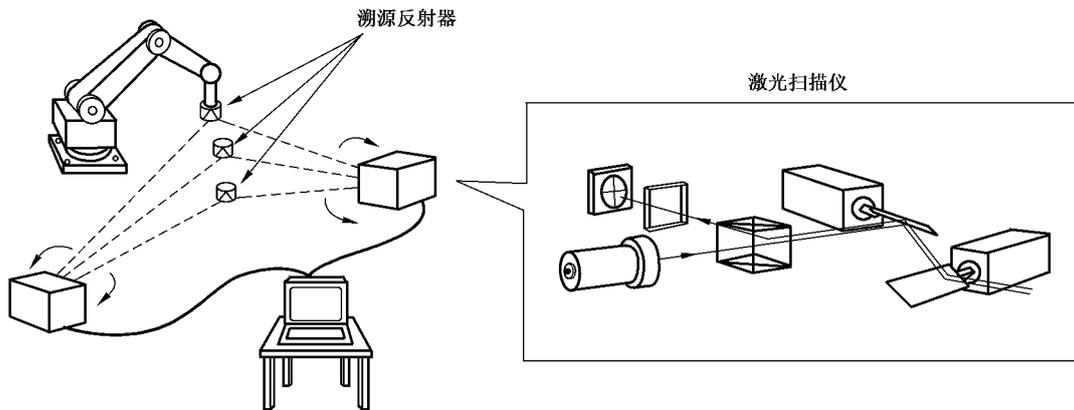


图 NA. 15 激光跟踪三角测量系统

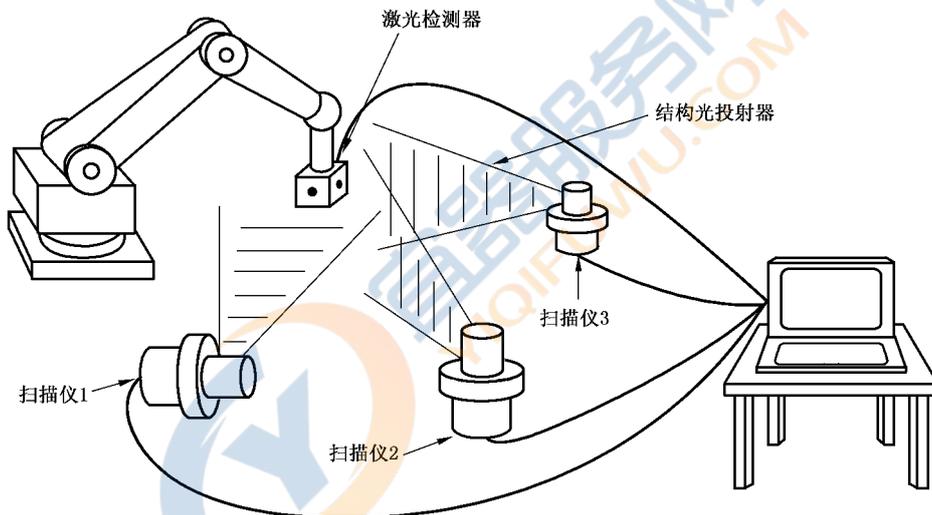


图 NA. 16 激光扫描三角测量系统

如果两个激光结构光束(十字形)跟踪在相邻侧面上装有两个 CCD 环形传感器的立方体测头(图 NA. 17),就可计算出机器人的姿态。

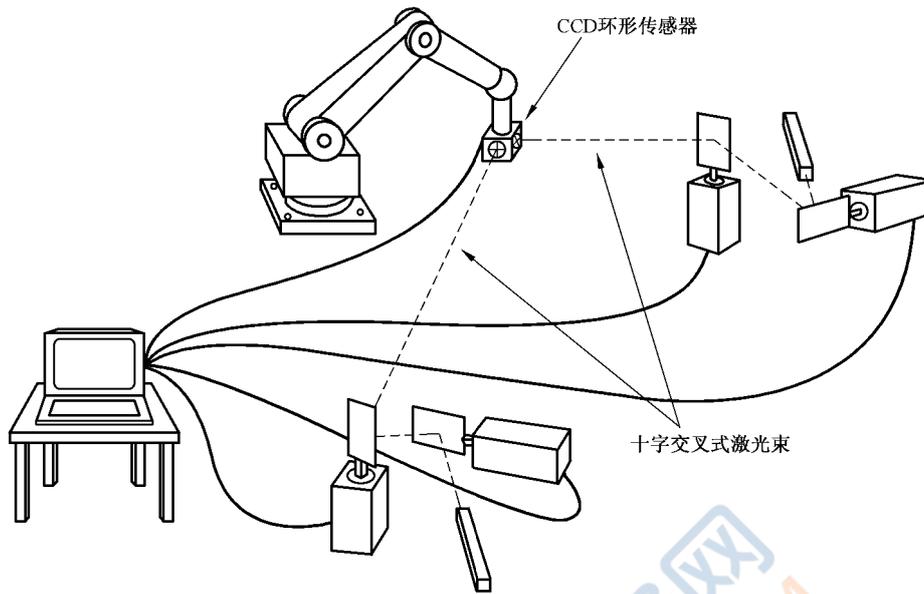


图 NA. 17 CCD环和激光跟踪三角测量系统

NA. 4. 5. 2 光学经纬仪法

用两个(或更多个)固定的光学经纬仪,使它们的光束瞄准安装在机器人末端的靶标,就能用两组方位角/俯仰角数据确定机器人的实到位置。图 NA. 18 为典型的配置。如果机器人上有多个靶标,就能计算出其姿态。手动光学经纬仪是手动操作的,通常仅用于静态测量。

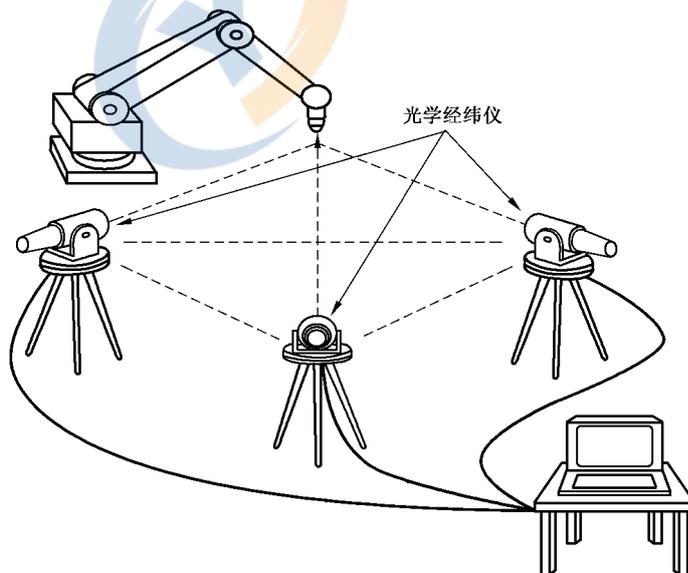


图 NA. 18 光学经纬仪法

NA.4.5.3 光学相机法

用两个成像装置(一维或二维)获取的图像确定机器人位置与时间的关系。

如果多个光源或靶标安装在被成像装置监测的机器人上,就可以确定机器人的姿态与时间的关系。

测量时,机器人上的光源顺序开启,这样就可知图像来自哪个光源。

此方法使用相隔已知距离的两个固定成像装置(相机)。图 NA.19 是该系统的典型配置。相机监测固定在机器人末端上的发光靶标,使用位置传感器(或 CCDs)确定以靶标在相机坐标系中的位置。根据这个信息和相机之间的距离可以确定靶标的位置。

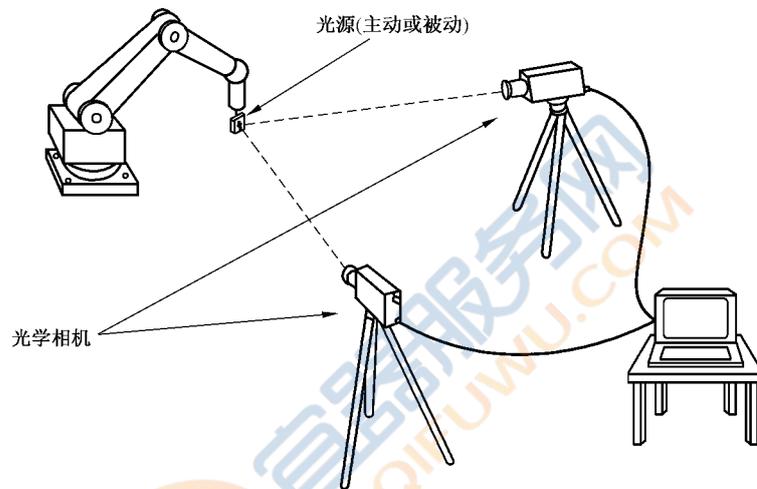


图 NA.19 光学相机法

NA.4.6 惯性测量法

如果已知机器人的初始状态,利用安装在机器人上的3个伺服加速度传感器和3个陀螺仪,不用任何外部观察装置,就能在空间的三个方向上测量机器人的位姿特性和轨迹特性。图 NA.20 是这种系统的典型配置。

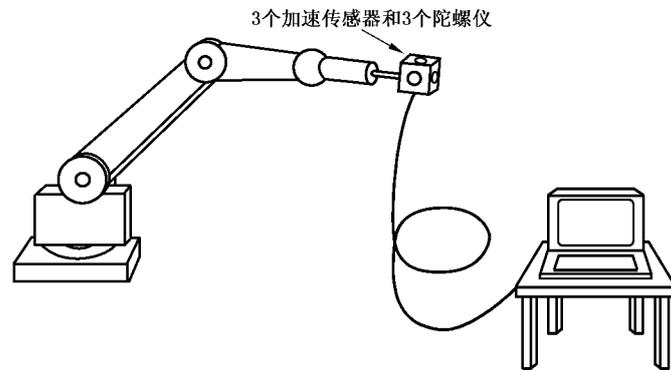


图 NA. 20 惯性测量法

NA. 4. 7 坐标测量法(直角坐标)

NA. 4. 7. 1 二维数字化法

机器人的平面位置可用安装在机器人上的高分辨率相机测量成 X-Y、Y-Z、Z-X 坐标值。典型的系统配置示于图 NA. 21 中。相机对平板上的高精度刻线进行计数, 这些高精度刻线构成测试平面的线条。

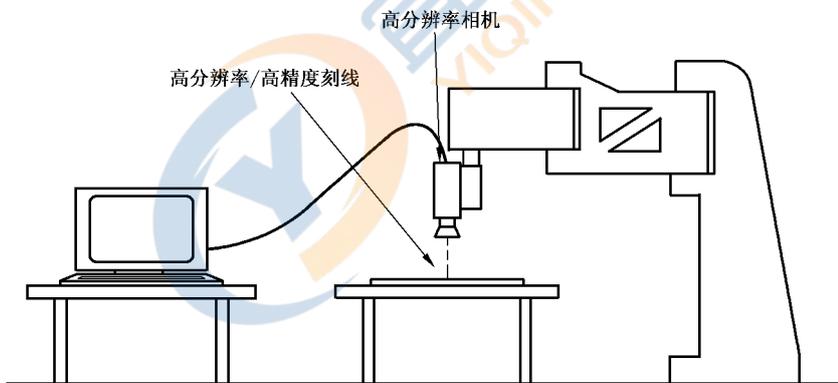


图 NA. 21 二维数字化法 1

在有限区域内的机器人平面位置可用干涉测量原理以亚微米分辨率测量。扫描头获取并分析十字网格板上的莫尔条纹, 给出二维增量(图 NA. 22)。

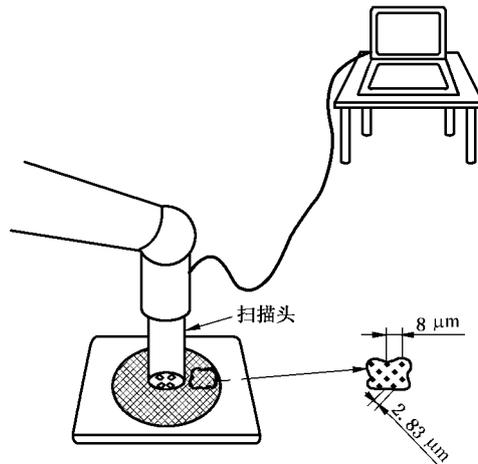


图 NA. 22 二维数字化法 2

用装在机器人上的数字化笔和作为测试平面的图形输入装置(图 NA. 23), 机器人的位置可被测量成 X-Y、Y-Z、Z-X 坐标值。此方法可用于点到点的标定或连续轨迹运动。因此, 它可用于静态和动态测量。

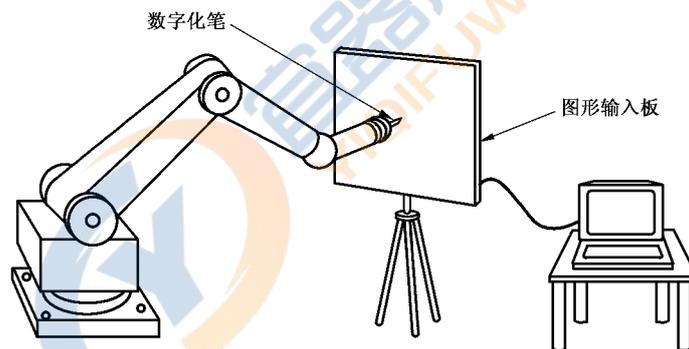


图 NA. 23 二维数字化法 3

NA. 4. 7. 2 坐标测量机法

用坐标测量机获取机器人靶点坐标可测出机器人的实到位置(图 NA. 24)。接触一个立方体靶标可获得 3 个或更多点的坐标值, 从而可测出机器人的实到姿态。

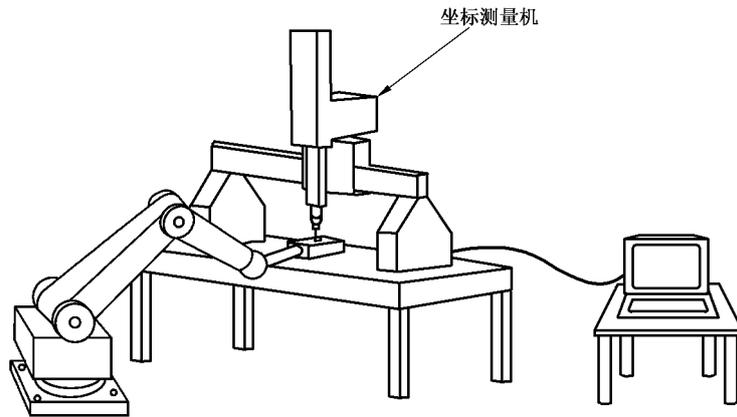


图 NA. 24 坐标测量机法

NA. 4. 8 轨迹描绘法

机器人的二维轨迹可用机械、电或喷墨笔记录在纸上。图 NA. 25 表示一个实例，它使用在传真机中用的放电纸。如果产生定时脉冲，就可测量机器人的速度特性。

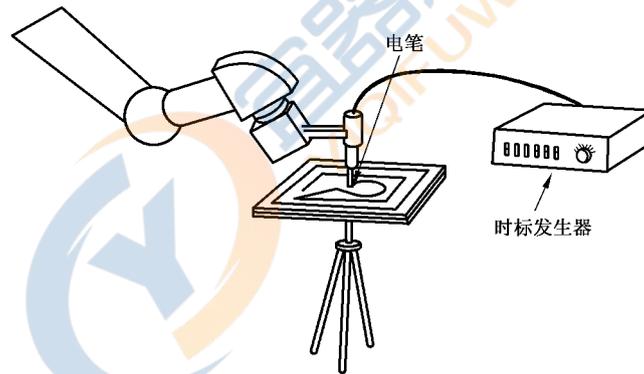


图 NA. 25 轨迹描绘法

表 NA.1 机器人性能特征的测量方法

测量方法	性能特性													
	位姿准确度	位姿重复性	位姿准确度变动	距离准确度	距离重复性	位姿稳定时间	位姿超调	位姿特性漂移	最小定位时间	静态柔性	轨迹准确度	轨迹重复性	拐角偏差	轨迹速度特性
NA.4.1 试验探头法	□	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—
NA.4.2 轨迹比较法	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
NA.4.3 三角测量法 (距离—距离)	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
NA.4.3.1 多激光跟踪干涉仪法	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎	○	○	○
NA.4.3.2 超声三角测量法	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
NA.4.3.3 钢索三角测量法	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
NA.4.4 极坐标测量法 (距离—方位角)	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎	○	○	○
NA.4.4.1 单激光跟踪干涉仪法	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎	○	○	○
NA.4.4.2 单总站法—跟踪	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎	○	○	○
NA.4.4.3 直线标尺法	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
NA.4.5 三角测量法 (方位角—方位角)	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎	○	○	○
NA.4.5.1 光学跟踪三角测量法	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎	○	○	○
NA.4.5.2 光学经纬仪法	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎	○	○	○
NA.4.5.3 光学相机法	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎	○	○	○
NA.4.6 惯性测量法	□	○	○	○	○	○	○	○	○	○	□	○	○	○
NA.4.7 坐标测量法	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
NA.4.7.1 二维数字化法	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
NA.4.7.2 坐标测量机法	—	—	—	△	△	—	—	—	—	○	—	—	—	—
NA.4.8 轨迹描绘法	—	—	—	△	△	—	△	—	△	—	△	△	△	○

◎: 这些系统具有测量系统本身和机器人机座坐标系的标定能力。这也意味着这些系统能测量绝对对准精度(位姿, 轨迹)和相对对准精度(位姿, 轨迹)。
 □: 这些系统仅能测量相对对准精度(位姿, 轨迹)。
 ○: 此方法可测试一般性能的机器人。
 △: 测量性能有一些局限性, 见第3节。
 —: 此方法不适用于测试规范。
 每种方法的性能见表 NA.2。

表 NA.2 测量方法的典型测量性能

测量方法	测量特性			最大轨迹速度	轨迹测量的取样速率
	分辨率	重复性	准确度		
NA.4.1 试验探头法	0.01 μm~1 μm 视界的0.05%	0.001 mm~0.01 mm 视界的0.1%~1%	0.002 mm~0.02 mm	—	—
NA.4.2.1 机械量具比较法	0.025 mm~0.1 mm	0.05 mm~0.2 mm	0.02 mm	10 m/s	0.01 ms/point
NA.4.2.2 激光束轨迹比较法	3 μm	0.02 mm	0.005 mm~0.01 mm	6 m/s	10 ms/point~100 ms/point
NA.4.3.1 多激光跟踪干涉仪法	0.16 μm	2 μm	0.005 mm~0.01 mm	6 m/s	100 ms/point~1 000 ms/point
NA.4.3.2 超声三边测量法	0.05 mm~1 mm	0.2 mm~1 mm	0.4 mm~3 mm	5 m/s	0.5 ms/point
NA.4.3.3 钢索三边测量方法	0.01 mm	0.02 mm	0.3 mm	6 m/s	0.01 ms/point~500 ms/point
NA.4.4.1 单激光跟踪干涉仪法	0.6 μm~5 μm	0.005 mm~0.02 mm	0.005 mm~0.05 mm	1 m/s	500 ms/point~3000 ms/point
NA.4.4.2 单总站法—跟踪	0.2 mm 5arc sec ^a	3 mm 10 arc sec.	3 mm 10 arc sec.	—	—
NA.4.4.3 直线标尺法	0.02 mm	0.1 mm	0.5 mm~1 mm	—	—
NA.4.5.1 光学跟踪三角测量法	2arc sec 0.015%	5arc sec	10arc sec	2 m/s~10 m/s	1 ms/point
NA.4.5.2 光学经纬仪法	0.1 arc sec~ 0.2 arc sec	0.5 arc sec~ 2 arc sec	0.5 arc sec~ 2 arc sec 1 mm	—	—
NA.4.5.3 光学相机法	视场的0.000 5%~ 0.025%	视场的0.001%~ 0.05%	视场的0.01%~ 0.75%	10 m/s	0.2 ms/point~4 ms/point
NA.4.6 惯性测量法	5 μm	0.01 mm	0.03 mm	5 m/s	3 ms/point
NA.4.7.1 二维数字化法	0.01 mm~0.02 mm	0.02 mm~0.2 mm	0.1 mm~0.5 mm	0.5 m/s~3 m/s	10 ms/point~100 ms/point
NA.4.7.2 坐标测量机(直角坐标)法	0.5 μm	5 μm	0.01 mm	—	—
NA.4.8 轨迹描绘法	0.2 mm	0.2 mm	0.2 mm~0.5 mm	—	—

注1: 表中的数据来源于制造商提供的额定指标。对于性能要求的验证和局限性的说明应咨询制造商。

注2: 如果仔细安装个别测量装置并在测量过程中维持整个测量系统的尺寸稳定性,此表中大多数重复性或准确度的数值是理论性能。

^a 角度制单位,角秒(arc seconds, arcsec)。

参 考 文 献

- [1] ANSI/RIA R15.05-1-1990. American National Standard for Industrial Robots and Robot Systems-Point-to-Point and Static Performance Characteristics — Evaluation.
- [2] ANSI/RIA R15.05-2. American National Standard for Industrial Robots and Robot Systems-Path-Related and Dynamic Performance Characteristics — Evaluation(Draft Revision12.).
- [3] VDI(German industrial standard)2861,Blatt 2,Entwurf,1987,Kenngrößenfür Industrieroboter,einsatzspezifischer Kenngrößen.
- [4] Lau, K. , Hocken, R. J. A Survey of Current Robot Metrology Methods. Annals of the CIRP, Vol. 32, No. 2, 1984, pp. 485-488.
- [5] Jiang, B. C. , Black, J. T. , Duraisamy, R. , (Auburn University). A Review of Recent Developments in Robot Metrology. J. of Manufacturing Systems, Vol. 7 No. 4, (1988)pp. 339-357.
- [6] Lombard, J. , Perrot, J. C. Automatic Measurement of the Positioning Accuracy of Industrial Robots, Annals of the CIRP, Vol. 32/1, 1983pp. 297-299.
- [7] Lau, K. , Hocken, R. An Overview of Techniques for Robot Performance Measurements, Internak Report, NIST, 1986.
- [8] Freeman, S. New Perspectives in 3D Theodolite-based Industrial Measuring Systems. Quality Today, May 1987, pp. 74-77.
- [9] MacFarelane, J. , Donath, M. Tracking Robot Motion in Three Dimensional Space: a Laser Scanning Approach. NATO ASI series, F11, 1984, pp. 309-318.
- [10] Lau, K. , Hocken, R. , Haight, W. Automatic Laser Tracking Interferometer System for Robot Merology. Precision Engineering, Vol. 8 No. 1, pp. 3-8, January 1986.
- [11] Lau, K. , Hocken, R. , Haynes, L. , (NBS). Robot Performance Measurements using Automatic Laser Techniques, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 2 No. 3, 1985, pp. 227-236.
- [12] Gilby, J. H. , Parker, G. A. Laser Tracking System to Measure Robot Arm Performance. Sensor Review, pp. 180-184, October 1982.
- [13] Prenninger, J. P. Position and Orientation Measurement to Industrial Robots using Laser Tracking Techniques in Six Degrees of Freedom. Doctor Thesis Institute of Flexible Automation, TU Vienna 1992.
- [14] Becker, P. -J. , Bolle, H. , Mitschke, H. Lasertriangulation für die genaue dreidimensionale Vermessung von Robotern. FHG Berichte Vol. 2, 1984, pp. 47-50.
- [15] Prenninger, J. P. , Vincze, M. , Gander, H. Contactless Position and Orientation Measurement of Robot End-Effector. Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation, 1983, pp. 183-189.
- [16] Gilby, J. , et al. Dynamic Perfotmance Measurement of Robot Arms. Department of Mechanical Engineering, University of Surrey, Guilford, Surrey, England, 1984.
- [17] Van Brussel, H. Ecaluation and Testing of Robts. Annals of CIRP Vol. 39/2, 1990, pp. 657-664.
- [18] McEntire, R. H. Three Diemensional Accuracy Measurement Method for Robots. The Industrial Robot, Vol. 3, 1976, pp. 105-112.
- [19] Vincze, M. , Prenninger, J. P. , Gender, H. A Six Degree of Freedom Robot Measurement

System III : Application of Measurement Data to System Calibration. Int. Symp. on Theory of Machines and Mechanisms, Nagoya, Japan, Sept. 24-26, 1992.

[20] Van den Bossche, J. , Van Brussel, H. RODYM: a New Approach to Robot Metrology. Internal Report, the Catholic University of Leuven, Belgium. 1989.

[21] John Wiley & Sons. International Encyclopedia of Robotics-Volume3: Applications and Automation.

[22] Hinüber, E. V. , Janocha, H. (Universität des Saarlandes, Germany) Inertial Measurement System for Industrial Robots.

[23] Day, C. P. Robot Accuracy Issues and Methods of Improvement. Robotics Today (SME), Volume 1, Number 1, Spring 1988.

[24] Nakamura, O. , Goto, M. , Toyoda, K. , Tanimura, N. , Kurosawa, T. (National Research Laboratory of Metrology et al) Development of a Coordinate Measuring System with Tracking Laser Interferometers Annals of CIRP, Vol. 40, No. 1 (August, 1991) 99. 523-526.

[25] Nakamura, O. , Goto, M. , Toyoda, K. , Takai, N. , Kurosawa, T. (National Research Laboratory of Metrology et al) A Laser Tracking Robot Performance Calibration System Using Ball-Srated Bearing Mechanisms and a Spherically Shaped Cat's-Eye Retroreflector Review of Scientific Instruments, Vol. 65, No. 4, Part 1, (April 1994) pp. 1006-1011.

[26] Prenninger, J. P. , Gander, H. , Vincze, M. (University of Technology Vienna) Real Time 6-DOF Measurement of Robot End Effectors. Proceedings of International Robots & Vision Automation Conference and 22nd International Symposium on Industrial Robots, pp. 10-13 ~ 10-24, October 1991, Detroit, Michigan USA.

[27] Seto, T. Method for Measurement of Large Scale Dimension using Field Surveying Instruments (in Japanese) Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 58, No. 5 (1992).

[28] Aoyagi, S. , Kamiya, Y. , Okabe, S. (Kanazawa University, Japan) Development of Automatic Tracking System of 3-D Position of a Robot. Proceedings of the Japan U. S. A Symposium on Flexible Automation, 1992.

[29] Oiwa, T. Suzuki, M. , Kyusojin, A. Spatial Coordinate Measurement using Structured Laser Light and a Spherical Mirror. (in Japanese) Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 59, No. 2.

[30] Brown, L. B. Merry, J. B. Interferometric Accuracy in Three-Dimensional Measurements: A Precision Laser Tracking System. Presented at Society of Manufacturing Engineers (SME), Gaithersburg, Maryland, June 1988.

[31] Gottwald, R. SPACE-An Automated Non-contact 3-D-measuring-system for Industrial Applications, 7th International Conference on Robot Vision and Sensory Controls, February 1988, Zürich, Switzerland.

[32] Priel, M. , (LNE, France) Evaluating the Performance of Industrial Robots, Robotics Res. Winter Ann. Mtg. ASME, December 1989, pp. 63-67.

[33] Mayer, J. R. R. , Parker, A. (University of Surrey, England) A Portable Instrument for 3-D Dynamic Robot Measurements Using Triangulation and Laser Tracking. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 10, No. 4, pp. 504-516, August 1994.