

基于光栅编码器的柔性测量臂位置精度研究^{*}

许 铀, 高 群

(广东技术师范学院 广州 510635)

摘 要:光栅编码器的误差使得柔性测量臂(AACMM)在不同位置、不同构型下的精度呈现一定的规律。掌握由光栅编码器精度引起的位置精度在工作空间的分布规律,有利于指导柔性测量臂的标定和测量。以六关节测量臂为研究对象,分析末端执行器位置精度与光栅编码器精度区间之间的关系,并定义了基于光栅编码器精度的位置精度评价指标,在整个工作空间下描述其分布情况。验证试验包括:比较不同关节下光栅编码器精度区间对末端执行器位置精度的影响;与目前常用 Monte Carlo 方式进行柔性测量臂精度分布特性对比;利用其分布特性,对不同区域进行单点和标准球直径测量。实验结果表明,本方法能更直观、全面地描述光栅编码器精度对柔性测量臂位置精度在工作空间分布情况,通过该分布确定优化测量区域,指导实际操作。

关键词: 柔性测量臂;光栅编码器精度;位置精度分布

中图分类号: TH115 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.4020

AACMM Position accuracy distribution research based on the accuracy of grating encoder

Xu You, Gao Qun

(Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510635, China)

Abstract: The error of grating encoder may affect the position accuracy of Articulated Arm Coordinate Measuring Machine (AACMM) in different poses. The position accuracy distribution effected by grating encoder accuracy may be used to guide the calibration and measurement of AACMM. The paper studies the relationship between the precision of grating encoder and the position accuracy of 6-joint measurement system. The position accuracy metric of grating encoder is defined. The distribution of AACMM in the workspace is depicted. The evaluation experiments and testing results are as follows. The comparisons of position accuracy effect of grating encoder's precision in different joints are carried out. Then, the distribution characteristic is compared with Monte Carlo method. Then, the different positions are utilized to measure the single-point test and standard ball radius. The experimental results show that the proposed method can describe the position accuracy distribution of AACMM more comprehensively and accurately. The optimized measurement region can be determined by the position accuracy distribution which can be used to guide the practical operation.

Keywords: articulated arm coordinate measuring machine (AACMM); grating encoder's accuracy; position accuracy distribution

1 引 言

多关节测量系统也称为柔性测量臂(articulated arm coordinate measuring machine, AACMM),是一种典型的工业机器人,被广泛应用于工业领域^[14]。在产品生产中,各结构参数存在一定的误差,尽管采用建模^[5]、预先标定及误差补偿的方式^[6-8]能提高设备的精度,但是由于各结

构参数本身的残差不确定性,这种情况使得测量系统在不同工作点,不同构型下会呈现不同的精度。通常,柔性测量臂精度检测方法可分为区间解析法,蒙特卡罗法(Monte Carlo)以及直接测量法。区间解析法^[9]从各种结构参数出发,采用解析方程的方法描述了各参数不确定度问题,但是与柔性测量臂整体精度之间关系及分析,其计算量大,数据结构复杂;蒙特卡罗方法^[10]则利用随机数方法,尽可能地描述系统的整体性,可由于随机问题,

对数据量的依赖很大,这种情况一方面造成计算量,另一方面数据覆盖面不完整;直接测量法^[11]则考虑各种因素对末端位置误差的影响,直接测量各种因素所造成的误差,其精度分布取决于测量策略。可见,上述方法都是从某一个角度去解析系统精度的分布,但并未从本质上全面、直观、系统地揭示测量设备本身结构参数同系统不确定度之间的联系。

光栅编码器是柔性测量臂各关节角度大小的获取装置,其输出结果保证柔性测量臂可以获得各种位置和构型。由于光栅刻线划分度、指标光栅扫描质量、信号处理电路质量以及光栅导向的误差等影响,使得光栅编码器会存在一定的误差^[12-15],这种情况在很大程度上影响着多关节机构性能。各个光栅编码器的读数直接决定了柔性测量臂的构型,在测量系统各杆件及结构件参数确定的情况下,如果光栅编码器精度已知,则柔性测量臂末端执行器在工作空间下的位置精度分布可以通过建立数学模型予以解决。本文对光栅编码器精度与柔性测量臂位置精度之间关系进行研究,建立了光栅编码器精度与位置精度之间的关系式,分析各关节上的光栅编码器精度对测头位置精度的影响,可用于指导设计生产过程对光栅编码器精度的选择。并以柔性测量臂常用构型作为参考,基于光栅编码器精度绘制柔性测量臂位置精度在整个工作空间下的分布图,与传统的蒙特卡罗方式进行对比,并通过单点及标准球测量试验验证本方法的有效性。

2 位置精度评价方法

以六关节测量系统为例,如图1所示,给定一组关节角度值 $(\theta_{1i}, \dots, \theta_{6i})$,即确定了一个机器人构型,此时机器人末端执行器的位置矩阵 $\mathbf{P}_i$ 也随之确定:

$$\mathbf{P}_i = \prod_{j=1}^n \mathbf{A}(\theta_{ji}) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}(\theta_{ji})$ 为第 j 关节的DH参数矩阵^[8],与关节的角度 θ_{ji} 相关。

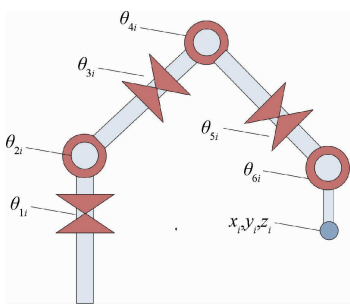


图1 六关节测量系统

Fig. 1 6R Measurement system

2.1 单一光栅编码器精度与位置精度关系

如图2所示,假设有 n 个关节,其中某一关节的光栅编码器的精度为 $\pm \Delta \theta_{ji}$,定义 γ_{ji} 是由系统理论位置绕该关节正方向旋转 $\pm \Delta \theta_{ji}$ 所得的弧长(见式(2)),即末端执行器位置所在的最大可能范围,也可作为位置精度的评价指标。

$$\gamma_{ji} = 2\Delta \theta_{ji} \sqrt{P_{j \rightarrow n} |x|^2 + P_{j \rightarrow n} |y|^2} \quad (2)$$

$$P_{j \rightarrow n} = A_j \cdot A_{j+1} \cdot \dots \cdot A_n$$

式中: $P_{j \rightarrow n}$ 为以该光栅编码器所在关节作为基点,末端执行器相对该点的位置矩阵, $P_{j \rightarrow n} |x|$ 是指该位置矩阵下的 x 轴坐标。

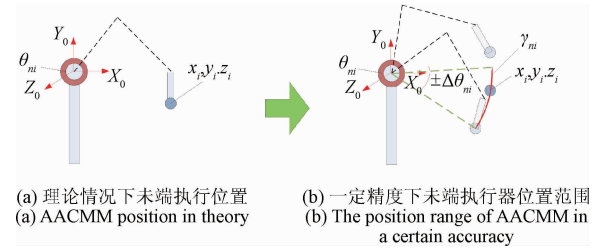


图2 单一光栅编码器精度对末端执行器位置影响

Fig. 2 Effect of single-encoder accuracy on AACMM position

2.2 多光栅编码器精度对位置精度影响

给定多关节光栅编码器精度区间,柔性测量臂末端执行器可达位置范围为各关节精度区间下引起末端执行器可达位置的空间集合体 V_{ALL} ,该空间的体积可作为精度评价指标(精度空间体积)。对于正交系统,该集合体的体积可近似为:

$$V_{ALL} = \prod_{j=1}^n \int_{-\Delta \theta_j}^{\Delta \theta_j} \sqrt{P_{j \rightarrow n} |x|^2 + P_{j \rightarrow n} |y|^2} d\theta_j \quad (3)$$

通常,柔性测量臂多为非正交系统,需用到流形方法对上述理论进行求解,算法较为复杂。针对六关节测量系统,其末端件误差体积只与六关节中的某几个关节相关,其他关节影响可以忽略(详情可见3.1节实验),此时可以用几何的方法研究与呈现位置精度情况。

2.3 基于编码器精度的位置精度评价及分布方法

综上所述,影响六关节测量系统位置精度的光栅编码器主要在第1~4关节。如图3(a)所示,给定工作点位置,系统能到达该点的构型为几个关节所在杆件绕该点旋转一周所成的集合。但考虑实际操作方便性,一般采用图3(b)构型实现测量数据采集。

因此,在光栅编码器精度 $\pm \Delta \theta_{ji}$ 以及每个关节的读数 θ_{ji} 已知下,柔性测量臂位置精度空间体积为:

$$V_{ALL} = 6\Delta \theta_1 \Delta \theta_2 R(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) \cdot R(\theta_2, \theta_3, \theta_4) \cdot |R(\theta_2, \theta_3, \theta_4 + \Delta \theta_4) - R(\theta_2, \theta_3, \theta_4 - \Delta \theta_4)| \cdot \Delta \theta_3 \cdot R(\theta_3, \theta_4) \quad (4)$$

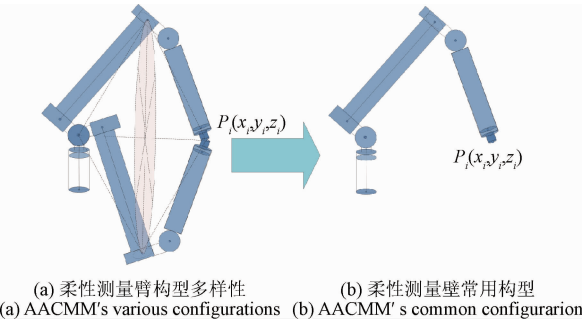


图 3 柔性测量臂构型选择

Fig. 3 Configuration selection of multi-joint measurement system

$$R(\theta_j, \cdots, \theta_k) = \sqrt{\left[\sum_{i=j}^k A_i(\theta_i) \right]^2_x + \left[\sum_{i=j}^k A_i(\theta_i) \right]^2_y}$$

(5)

式中: $R(\theta_j, \cdots, \theta_k)$ 为各关节角度 θ_i 已知情况下,末端执行器位置到关节 j 旋转轴的直线距离。

对于系统位置精度分布情况,可以用集合 S 进行表达:

$$S = \{ \mathbf{P} \mid_{i=1, \cdots, n} (\theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_{3i}, \theta_{4i}), V_{ALL} \mid_{i=1, \cdots, n} (\theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_{3i}, \theta_{4i}, \pm \Delta \theta_{1i}, \pm \Delta \theta_{2i}, \pm \Delta \theta_{3i}, \pm \Delta \theta_{4i}) \}$$

(6)

式中: $\mathbf{P} \mid_{i=1, \cdots, n}$ 为系统各个工作点的理论位置矩阵,由各关节角度决定; $V_{ALL} \mid_{i=1, \cdots, n}$ 为与工作点相应的位置精度评价指标。

根据式(6),可在整个工作空间下对各个工作点的位置精度进行描述,绘制位置精度分布图。由于基座关节各项同性的特点,描述过程只需采用工作空间剖面图进行阐述(见图4(a))。

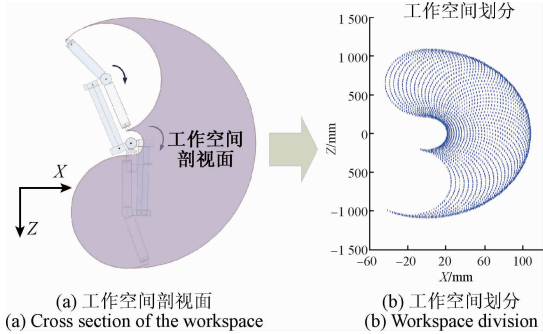


图 4 测量系统工作空间剖面

Fig. 4 Cross section of measurement system's workspace

因此,基于光栅编码器精度的六关节测量系统位置精度分布方法如下。

- 1) 对各关节最大旋转角度进行平分,将工作空间划分为若干个离散工作点(见图4(b))。
- 2) 参考图3(b)构型,通过多关节系统反解算法计

- 算每个工作点所对应的关节角度。
- 3) 利用式(4)、(5)计算每个工作点的位置精度指标值。
 - 4) 利用颜色深浅或等高线的方式描述各工作点在工作空间剖面图下的位置精度分布情况。

3 位置精度分布及评价实验

3.1 实验对象及目标

实验采用本单位自主研发的六关节测量系统SINO5,如图5所示。结构参数如表1所示。实验中光栅编码器的测角精度为 $\pm 5''$ 。



图 5 SINO5 六关节测量系统

Fig. 5 SINO5 measurement system

实验目标如下:1) 比较单一关节处光栅编码器精度对系统位置精度影响;2) 与蒙特卡洛随机数情况进行比较,验证本文方法有效、合理的特性;3) 通过单点、标准球半径测量,验证位置精度分布与测量精度的关联性 & 本文方法的有效性。

表 1 SINO5 DH 参数

Table 1 SINO5's DH parameters

关节	杆件长度 l_i/mm	关节偏距 d_i/mm	杆件扭角 a_i/rad	关节转角 θ_i/rad
1	0	0	-1.571	0
2	-90	0	1.571	0.000
3	90	-650	-1.571	0.002
4	0	0	1.571	0.003
5	0	-435	1.571	0.005
6	155.479	65.931	0	0.004

3.2 光栅编码器精度对各关节的位置精度影响研究

本实验通过设置不同构型,分析单一光栅编码器在不同关节上,对系统位置精度的影响,步骤如下。

1) 不失一般性,考虑各个关节尽可能地沿着其最大旋转角度范围活动;通过尽可能遍历的排列组合去设定六关节角度值(表现为一个机器人构型),据此选择24组具有代表性的关节角度组合进行实验。

2) 假设某一关节光栅编码器存在误差,其他关节的光栅编码器无误差,根据式(2)计算不同关节处光栅编码器精度对系统末端执行器所产生的位置精度,实验利用3.1节所述六关节测量系统SINO5的光栅编码器(其测角精度为 $\pm 5''$)。

3) 比较不同测角精度的光栅编码器对系统精度分布的影响。

各个关节受光栅编码器测角精度影响,导致系统的位置精度变化的计算结果如表2所示。根据数据可知,靠近基座关节所产生的位置精度影响较大,这是因为多关节系统是串行链接,末端执行器位置到靠近基座关节的直线距离相对末端关节的要大。相比之下,靠近末端执行器的关节所产生的位置精度的影响要小很多。因此,在分析柔性测量臂上,可采忽略近执行器关节的影响,使系统分析过程得以简化。在实际应用过程中,对于靠近基座关节的编码器,其精度的要求应比靠近末端执行器关节编码器精度要求高。

表2 不同关节受光栅编码器精度影响的位置精度

Table 2 Position accuracy based on grating encoder in different joint

(mm)

关节角度($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$)	编码器测角精度为 $\pm 5''$ 时系统位置精度					
	关节1	关节2	关节3	关节4	关节5	关节6
(0,0,0,0,0,0)	0.007 713	0.053 153	0.011 847	0.022 405	0.008 127	0.007 496
($\pi/2$,0,0,0,0,0)	0.007 713	0.053 153	0.011 847	0.022 405	0.008 127	0.007 496
($\pi/2$, $\pi/2$,0,0,0,0)	0.052 813	0.053 153	0.011 847	0.022 405	0.008 127	0.007 496
($\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$,0,0,0)	0.053 930	0.052 740	0.011 847	0.022 405	0.008 127	0.007 496
($\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$,0,0)	0.042 622	0.038 995	0.017 379	0.022 405	0.008 127	0.007 496
($\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$,0)	0.038 585	0.036 688	0.018 689	0.021 300	0.008 127	0.007 496
($\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$)	0.035 947	0.034 917	0.009 592	0.013 950	0.003 123	0.007 496
(π , $\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$)	0.035 947	0.034 917	0.009 592	0.013 950	0.003 123	0.007 496
(π , π , $\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$)	0.010 643	0.034 917	0.009 592	0.013 950	0.003 123	0.007 496
(π , π , π , $\pi/2$, $\pi/2$, $\pi/2$)	0.005 133	0.035 025	0.009 592	0.013 950	0.003 123	0.007 496
(π , π , π , π , $\pi/2$, $\pi/2$)	0.005 368	0.018 735	0.000 942	0.013 950	0.003 123	0.007 496
(π , π , π , π , π , $\pi/2$)	0.009 099	0.019 875	0.005 187	0.013 589	0.003 123	0.007 496
(π , π , π , π , π , π)	0.003 442	0.010 526	0.004 737	0.022 353	0.008 125	0.007 496
($3\pi/2$, π , π , π , π , π)	0.003 442	0.010 526	0.004 737	0.022 353	0.008 125	0.007 496
($3\pi/2$, $3\pi/2$, π , π , π , π)	0.010 981	0.010 526	0.004 737	0.022 353	0.008 125	0.007 496
($3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$, π , π , π)	0.011 008	0.010 555	0.004 737	0.022 353	0.008 125	0.007 496
($3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$, π , π)	0.034 817	0.024 084	0.025 301	0.022 353	0.008 125	0.007 496
($3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$, π)	0.042 864	0.034 807	0.026 200	0.021 288	0.008 125	0.007 496
($3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$)	0.047 670	0.034 964	0.032 611	0.028 775	0.003 151	0.007 496
(0, $3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$)	0.047 670	0.034 964	0.032 611	0.028 775	0.003 151	0.007 496
(0,0, $3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$)	0.033 141	0.034 964	0.032 611	0.028 775	0.003 151	0.007 496
(0,0,0, $3\pi/2$, $3\pi/2$, $3\pi/2$)	0.028 125	0.044 764	0.032 611	0.028 775	0.003 151	0.007 496
(0,0,0,0, $3\pi/2$, $3\pi/2$)	0.003 724	0.060 266	0.000 836	0.028 775	0.003 151	0.007 496
(0,0,0,0,0, $3\pi/2$)	0.003 420	0.060 171	0.004 941	0.028 614	0.003 151	0.007 496
平均位置精度/mm	0.023 992	0.034 891	0.013 943	0.021 758	0.005 632	0.007 496

3.3 系统位置精度分布实验及分析

对于位置精度分布,由于涉及多关节的角度统计问题,目前多采用蒙特卡罗的方法,随机定义各个关节角度,采用统计的方法分析位置精度在整个工作空间的分布。本文根据2.3节所述方法,与蒙特卡罗方法对SINO5测量系统位置精度分布比较,其结果如图6所述。

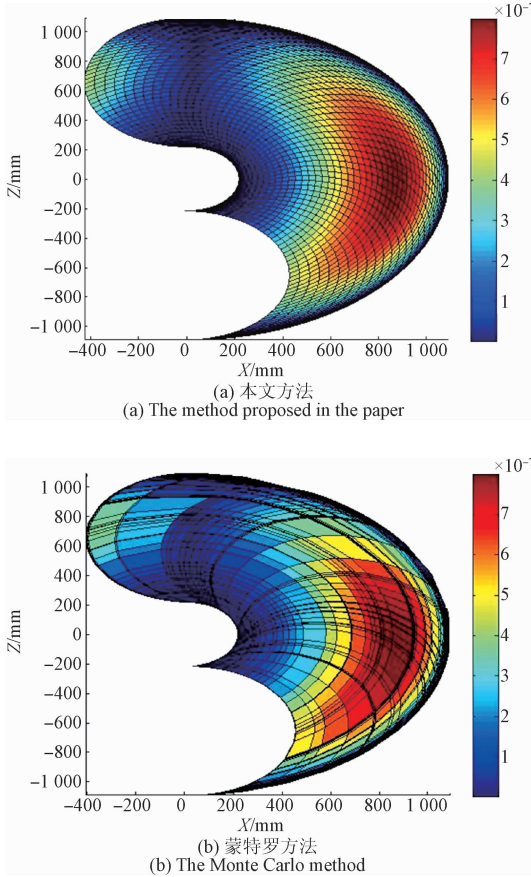


图6 与蒙特卡罗方法位置精度分布对比

Fig. 6 Position accuracy distribution compared with Monte Carlo

由图6可知,1) 不管是采用蒙特卡罗方式还是本文提出的方法,都可以描述基于光栅编码器精度的柔性测量臂位置精度分布情况;2) 由于随机数问题,采用蒙特卡罗方法所产生的数据点较为参差,同时在工作空间边缘处数据点较为离散,数据分布覆盖面不全;3) 本文方法采用关节角度平分,数据覆盖面全,精度分布数据点集中,更有利于柔性测量臂位置的分析及工作区域选择。

3.4 基于位置精度分布的单点及标准球测量精度实验及分析

为验证本文位置精度分布图的有效性,通过单点测

量及标准球半径测量的方式对本文方法进行验证,其步骤如下。

1) 不失一般性,柔性测量臂基座放置于测量平台上,为方便单点测量及半径测量,根据图6(a),在其工作空间上取5个工作点(见图7),并分别在其上方放置一单点测量锥座。

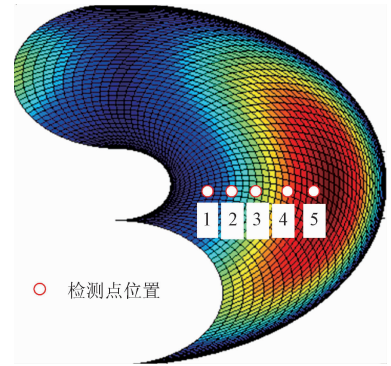


图7 检测点位置

Fig. 7 Positions of detection points

2) 分别对每个锥座进行不同构型的单点坐标采集,每个锥座采集10个数据,并计算每个检测点坐标的标准偏差 σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n-1}} \quad (7)$$

$$\delta_i = (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2 \quad (8)$$

式中: δ_i 为每次测量实际计算值 (x_i, y_i, z_i) 和平均值 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 之间的距离的平方, n 为测量的总次数。注:为保证构型多样性,对同一点测量所采用的构型应尽可能覆盖全构型的范围。

3) 比较每个检测点误差分布是否与位置精度不确定性分布相匹配。

4) 移走单点测量锥座,在所述检测点位置上放置半径为15.093 mm的标准球。如图8所示,在球面上采集9个点坐标,根据式(9)最小二乘法拟合球心位置 (x_0, y_0, z_0) 及计算球半径 r 。

$$2x_0x_n + 2y_0y_n + 2z_0z_n + d = x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 \quad (9)$$

式中: (x_n, y_n, z_n) 为标准球表面每个采集点的坐标, $n=1, \dots, 9$, d 为球方程参数。

5) 计算每个检测点所测标准球误差情况,验证位置精度分布正确性。通过单点测量,其结果如表3所示。

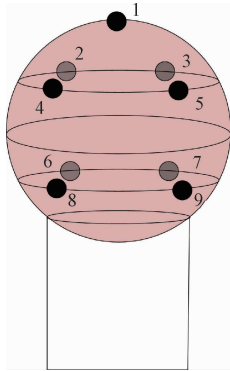


图8 标准球数据采集点位置

Fig.8 Positions of standard ball’s detection points

表3 单点测量结果

Table 3 Result of single point measurement (mm)

位置序号	平均位置			标准偏差
	X	Y	Z	
1	167.314	-348.254	-30.312	0.109
2	227.612	-389.341	-30.412	0.165
3	311.648	-464.261	-30.453	0.178
4	332.323	-590.176	-30.476	0.232
5	368.849	-690.72	-30.513	0.248

通过标准球测量,其结果如表4所示。

表4 标准球半径测量结果

Table 4 Result of radius measurement (mm)

位置序号	测量半径	实际半径	误差
1	15.042	15.093	0.051
2	15.002	15.093	0.091
3	14.972	15.093	0.121
4	15.246	15.093	0.153
5	14.905	15.093	0.188

从单点测量及标准球半径测量结果上看,在不同区域所产生的测量精度结果不同,这种规律与本文所描述的位置精度分布特性一致。可见,位置精度分布可描述系统在不同区域下的精度情况。

4 结 论

根据光栅编码器精度的情况,给出基于光栅编码器精度的末端执行器位置精度评价指标,进而研究基于光栅编码器精度的柔性测量臂位置精度评价指标及分布规

律。具体内容有如下3点。

1) 讨论单一关节光栅编码器精度对柔性测量臂位置精度的影响,说明在光栅编码器精度相同情况下,靠近基座关节对设备位置精度影响较末端关节的大,即选择更高精度的编码器应用于靠近基座关节上,有利于系统精度的提高。

2) 提出基于光栅编码器的系统位置精度评价方法。并通过常用工作构型分析及工作点反解方法,绘制基于光栅编码器精度的柔性测量臂位置精度分布图。

3) 根据柔性测量臂位置精度分布图,在工作空间内不同区域进行单点测量及标准球半径测量,验证本文所提方法的有效性;同时也说明了,位置精度可在一定程度上反映系统精度的工作空间分布。这种方法可为柔性测量臂标定及工作区域、工作构型选择带来一定的借鉴。

事实上,光栅编码器精度仅仅是柔性测量臂位置精度影响因素之一,其他结构参数的误差、运动过程中数据不确定性等影响也是构成位置精度的原因。这些方面将是本文接下来研究的重点。

参考文献

[1] 姚雪峰,孙慈,杨晋,等. 高精度角位移平台的研制及误差补偿[J]. 仪器仪表学报,2016,37(5):961-967.
YAO X F, SUN C, YANG J, et al. Development and error compensation of the high precision turntable [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(5): 961-967.

[2] 张召瑞,张旭,郑泽龙,等. 融合旋转平移信息的机器人手眼标定方法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(11):2443-2450.
ZHANG ZH R, ZHANG X, ZHENG Z L, et al. Hand-eye calibration method fusing rotational and translational constraint information [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11):2443-2450.

[3] 程银宝,陈晓怀,王汉斌,等. 基于精度理论的测量不确定度评价与分析[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(8):1175-1182.
CHENG Y B, CHEN X H, WANG H B, et al. Measurement uncertainty estimation and analysis based on accuracy theory[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(8):1175-1182.

[4] 朱桁序,姜文刚,林永才. 用于机器人示教的人体手臂运动捕捉方法研究[J]. 电子测量技术,2016,39(7):136-140.
ZHU H X, JIANG W G, LIN Y C. Research on motion capture method for human arm in robot teaching [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7):136-140.

[5] 温卓漫,王延杰,邸男,等. 基于合作靶标的在轨手眼

- 标定[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5):1005-1012.
- WEN ZH M, WANG Y J, DI N, et al. On-orbit hand-eye calibration using cooperative target [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35 (5): 1005-1012.
- [6] 许铀,熊会元,宗志坚,等. 基于测量臂构型的单点残差修正方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 775-780.
- XU Y, XIONG H Y, ZONG ZH J, et al. Single-point residual correction method for multi-joint arm based on pose configuration [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 775-780.
- [7] 邹添,倪雷雷,李斐然,等. 一种新型大中心孔绝对式磁编码器[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7):1532-1538.
- ZOU T, NI F L, LI F R, et al. A new absolute magnetic encoder with big hallow [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7):1532-1538.
- [8] 庄晋升,汪丙南,向茂生. MEMS IMU 随机误差建模在 SAR 运动补偿中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(10):88-94.
- ZHUANG J SH, WANG B N, XIANG M SH. Application of MEMS IMU random error modeling in SAR motion compensation [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(10):88-94.
- [9] 黄康,何春生,甄圣超,等. 基于区间分析的机器人绝对定位精度分析方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(11):1467-1473.
- HUANG K, HE CH SH, ZHEN SH CH, et al. An absolute positioning accuracy analysis method for robot based on interval analysis [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2016, 27(11):1467-1473.
- [10] 郑大腾. 柔性坐标测量机空间误差模型及最佳测量区研究[D]. 江苏:合肥工业大学, 2010.
- ZHENG D T. Research on spatial error models and optimal measurement areas of flexible coordinate measuring machine [D]. Jiangsu: Hefei University of Technology, 2010.
- [11] VRBA I, PALENCAR R, HADZISTEVIC M, et al. Different approaches in uncertainty evaluation for measurement of complex surface using coordinate measuring machine [J]. Measurement Science Review, 2015, 15(3):111-118.
- [12] WANG Y, XUE Z, HUANG Y, et al. Study on self-calibration angle encoder using simulation method [J]. International Symposium on Precision Mechanical Measurements, 2016, 9903:9903201-9903207.
- [13] 卢荣胜,李万红,劳达宝,等. 激光跟踪仪测角误差补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9):2299-2305.
- LU R SH, LI W H, LAO D B, et al. Angular error compensation for laser tracker[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9):2299-2305.
- [14] KOKUYAMA W, WATANABE T, NOZATO H, et al. Angular velocity calibration system with a self-calibratable rotary encoder [J]. Measurement, 2016, 82(3):246-253.
- [15] 陈欢,吕超群,吴国伟,等. 三等金属线纹尺标准装置现状及 CCD 光栅式测量研究[J]. 中国测试, 2015, 41(增刊1):56-60.
- CHEN H, LU CH Q, WU G W, et al. The status of metallic scale(Grade III) standard equipment and CCD visual grating measurement research [J]. Chinese Measurement & Test, 2015, 41(Suppl. 1):56-60.

作者简介



许铀,分别在 2006 年和 2011 年于中山大学获得学士学位和博士学位,现为广东技术师范学院副教授,主要研究方向为精密测量技术、视觉测量技术。

E-mail:80092100@qq.com

Xu You received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Sun Yat-sen University in 2006 and 2011, respectively. Now he is an associate professor in Guangdong Polytechnic Normal University. His main research interests include precision measurement technology and vision measurement technology.



高群(通讯作者),1998 年于中国石油大学获得学士学位,2003 年于华中科技大学获得硕士学位,2007 年于中山大学获得博士学位,现任广东技术师范学院讲师,主要从事精密测量技术、系统建模与仿真。

E-mail:27955034@qq.com

Gao Qun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from China University of Petroleum in 1998 and his M. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2003, and his Ph. D. degree from Sun Yat-sen University in 2007. Now he is a lecturer in Guangdong Polytechnic Normal University. His main research interests include precision measurement technology and system modeling & simulation.