

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.01.001

球铰链的多维回转角度测量方法研究综述*

王 文 张 敏 朱晔文 唐超锋

(杭州电子科技大学 机械工程学院 杭州 310018)

摘 要:球铰链具有结构紧凑、运动灵活和承载能力强等优点,是一种应用较普遍的多自由度机械关节,其回转角度的检测对系统运动误差预测分析、反馈和控制具有十分重要的意义。首先介绍球铰链的应用与结构特点,然后分析球铰链多维回转角度的测量需求,对国内外球铰链多维角度检测的相关研究发展进行综述,主要包括基于结构解耦测量、基于光学原理测量和基于磁场理论测量等方法。最后,对球铰链多维回转角度测量的研究现状进行总结,指出了其研究的重点、难点以及关键技术突破面临的挑战。

关键词: 球铰链;多自由度;角度测量;综述

中图分类号: TH113.2; TN201 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Review of multi-dimensional angular displacement measurement method for spherical joint

Wang Wen Zhang Min Zhu Yewen Tang Chaofeng

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Spherical joint is a commonly multi-degree-of-freedom mechanical hinge which has many advantages such as compact structure, good flexibility, and high carrying capacity. Realization of its multi-dimensional angular displacement measurement is of great significance in the prediction, feedback, and control of the system motion error. Firstly, the application of spherical joint and its structural characteristics were presented in the paper. Then, the motion description of the spherical joint and needed angles for measurement were analyzed. A review of multi-dimensional angular displacement measurement method, including structural decoupling detection method, optical-based detection method and magnetic-field-based detection method, at home and abroad was provided. Finally, the development of research on multi-dimensional angular displacement measurement method for spherical joint was summarized. The focus and the difficulty of the research were pointed out, and the challenges and the breakthroughs in the key technologies were also stated.

Keywords: spherical joint; multi-degree-of-freedom; angular displacement measurement; review

1 引 言

球铰链是一种典型的多自由度机械关节,具有结构紧凑和运动灵活等优点,广泛应用于连接自动控制系统中的执行器与调节机构,是并联机构、工业机器人、光学器件、汽车零部件和医疗器械等设备仪器的关键构

件^[1-4]。高精度仪器装备对系统中基础关键构件的工作精度、运动控制和智能检测等提出了较高的要求。目前国内外在球铰链结构与误差分析等方面的研究成果较多,而对球铰链多维回转角度的检测技术还不成熟,但是其应用需求较广泛,已成为机械装备领域中亟待突破的难点之一。例如球铰链应用于仿生机器人的设计中,其多维回转角度检测有利于机器人的姿态控制和运动执

收稿日期:2016-08 Received Date: 2016-08

* 基金项目:国家自然科学基金(51275465)、浙江省自然科学基金重点项目(LZ16E050001)、浙江省先进制造技术重点实验室开放基金资助项目

行,但是现有的检测技术还不能满足高精度的测量要求^[5]。

球铰链回转角度的检测对空间运动机构的运动误差预测分析、反馈和控制具有十分重要的意义。然而在一些应用领域,多自由度关节运动难以检测,使得其应用范围受到局限。例如,对于空间操作机械臂或管道环境作业机器人,若能实现球铰链空间回转角度的高精度测量,则可利用球关节代替传统的单自由度旋转关节,从而有效减少使用关节的数目,提高系统的测量精度与运动灵活性,简化系统结构。

目前对于传统的单自由度旋转关节,其转角测量方法较多并且具有较高的测量精度,如基于圆光栅角度传感器测量^[6]、基于感应同步器测量^[7],然而这些方法难以直接用于球铰链多自由度回转角度的测量。

2 球铰链结构与类型

球铰链(又称球关节)根据其机械结构形式与复杂程度,分为普通球铰链和复合球铰链。

普通球铰链结构如图1所示,主要由球头和球窝构成,其中球头与输出杆固定连接,球窝与支撑杆或支撑底座相连,输出杆具有绕X、Y和Z轴旋转的3个自由度。由于普通球铰链的输出杆摆动范围受到约束球窝的结构限制导致其工作空间有限,极限摆角是球铰链设计与应用的重要技术参数之一,其值与球铰链中输出杆的杆径、球头半径和约束球窝的高度有关,可表示为^[8]:

$$\theta_{\max} = 90^\circ - \arcsin(h/R) - \arcsin(r/R) \quad (1)$$

式中: R 为球头的半径,等于约束球窝的半径; r 为输出杆的半径; h 为约束球窝的高度。

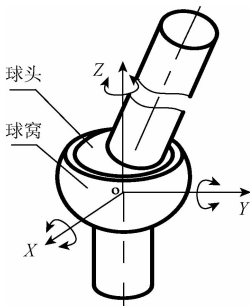


图1 普通球铰链

Fig.1 Spherical joint

根据式(1)可知,约束球窝的高度和球头半径比 h/R 、球铰链输出杆半径与球头半径比 r/R 是球铰链极限摆角 θ_{\max} 的关键影响因素,如图2所示。当球头半径固定时,通过减小输出杆半径或约束球窝的高度可增大极限摆角值,但是为保证机械强度的要求,一般情况下输出杆半径、约束球窝的高度不能过小。普通型号的球铰链具

有较小的运动范围(通常为 $\pm 15^\circ$),也有一些公司为满足市场应用需求研究扩大球铰链极限摆角,但是一般不超过 $\pm 60^\circ$ ^[9]。

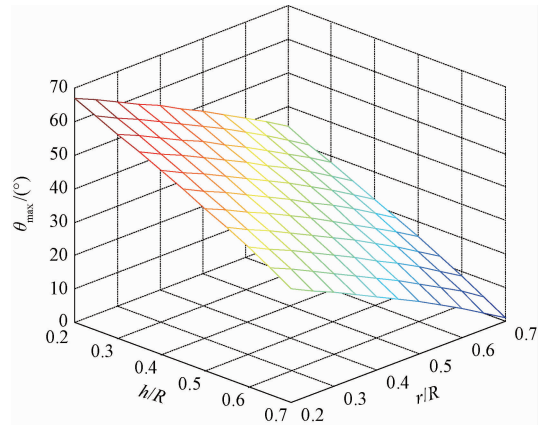


图2 球铰链的极限摆角的影响因素

Fig.2 The influence factor of the maximum tilt angle of spherical joint

复合球铰链通常是指在球副的基础上与其他运动副组合形成具有球副功能的新型运动副,其具有运动范围大、间隙小和加工精度较高等优点。例如燕山大学邱雪松等人^[10]设计了双耳支架固定型被动球面铰链和球/窝换位型被动球面铰链结构,实现球铰链较大的工作空间。由于复合球铰链的结构复杂、惯性大,因此在体积、重量较小的机构应用中,普通球铰链的应用更为广泛。此外,柔性球铰链通常具有一体化结构型式,消除了传统球窝和球头间隙的缺点,逐步被国内外学者研究,例如气动柔性球关节^[11]。

球铰链根据球窝结构形式有横向剖分球窝型和纵向剖分球窝型。球铰链也可根据球头和球窝的接触方式分为点接触、滚动接触和面接触形式^[12],常见有滚珠球铰链、磁性球铰链、摩擦球铰链和静压球铰链等。综合考虑球铰链的转角范围、刚度、使用寿命、摩擦力和耐磨性等指标,滚珠球铰链的综合性能较好,具有代表性的产品有日本HEPHAIST精工株式会社研制的Hephaist Seiko滚珠球铰链和德国INA高精度滚珠球铰链^[13]。此外,美国麻省理工学院研制的滑动球铰链和气浮式球铰链具有良好的传动精度和性能^[14]。

3 球铰链多维回转角度的测量分析

以普通球铰链为例,在不考虑球头在球窝中运动偏心的理想情况下,球铰链输出杆具有绕球头中心(球窝中心)运动的3个自由度。不妨定义 $oxyz$ 为在球头上的运动坐标系, $OXYZ$ 定义为在球窝上的固定坐标系,其中点 O 与 o 重合,初始位置时两坐标系重合。因此球铰链的

空间转动可通过固定坐标系和运动坐标系间相对位置关系描述,从而便于球铰链多维回转角度的测量分析。

根据机器人运动学中对物体的位姿描述方法和坐标变换相关理论可知,不妨以RPY角描述方法为例进行分析。如图3所示,当球铰链输出杆由初始位置运动到空间某位置时,可等价于以下形式的变换:首先使坐标系 $oxyz$ 绕 X 轴旋转 γ 角;然后再绕 Y 轴旋转 β 角;最后绕 Z 轴旋转 α 角,获得坐标系 $oxyz$ 的最终姿态。其中,绕 Z 轴的旋转称为滚动(Roll),绕 Y 轴的旋转称为俯仰(Pitch),绕 X 轴的旋转称为偏转(Yaw)^[15]。

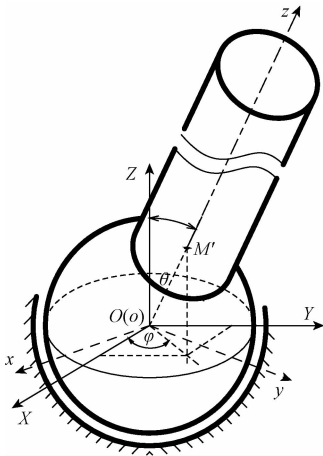


图3 球铰链回转角度测量分析

Fig.3 Measurement analysis of spherical joint rotation angle

因此,RPY角对应的旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}(\gamma, \beta, \alpha) = \mathbf{R}(Z, \alpha) \mathbf{R}(Y, \beta) \mathbf{R}(X, \gamma) = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma & c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma \\ s_\alpha c_\beta & s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma \\ -s_\beta & c_\beta s_\gamma & c_\beta c_\gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $c_\alpha = \cos\alpha$, $c_\beta = \cos\beta$, $c_\gamma = \cos\gamma$, $s_\alpha = \sin\alpha$, $s_\beta =$

$$\sin\beta, s_\gamma = \sin\gamma, \mathbf{R}(X, \gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\gamma & -s_\gamma \\ 0 & s_\gamma & c_\gamma \end{bmatrix}, \mathbf{R}(Y, \beta) =$$

$$\begin{bmatrix} c_\beta & 0 & s_\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\beta & 0 & c_\beta \end{bmatrix}, \mathbf{R}(Z, \alpha) = \begin{bmatrix} c_\alpha & -s_\alpha & 0 \\ s_\alpha & c_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

球铰链输出杆的3个自由度运动除了上述两种描述方法外,还可表示为正交的3个转动:绕 X 轴的转动、绕 Y 轴的转动、绕 Z 轴的转动。其中,由于球铰链输出杆绕自身轴线的运动无限制,绕 Z 轴的转动可实现 360° 回转,采用旋转关节转角测量的方法易于实现,从而球铰链输出杆三自由度回转角度测量可简化为检测绕 X 轴和绕 Y 轴的转角位移。

如图3所示,在初始位置时,记球铰链的球头表面和

输出杆轴线的交点为 $M(0, 0, R)$,当球铰链在空间运动一个RPY角 $(\gamma, \beta, 0)$,在坐标系 $OXYZ$ 中点 M 移动到点 $M'(x, y, z)$,根据式(2)进行坐标变换,可得点 M' 的坐标为:

$$\begin{cases} x = R \sin \beta \cos \gamma \\ y = -R \sin \gamma \\ z = R \cos \beta \cos \gamma \end{cases} \quad (3)$$

因此,球铰链输出杆的空间运动又可等价为首先使坐标系 $oxyz$ 绕 X 轴转动 γ 角;然后绕 Y 轴转动 β 角,相应地点 M 在坐标系 $OXYZ$ 中运动到点 M' 的位置;最后球铰链的输出杆绕坐标系 $oxyz$ 的 z 轴转动 λ 角。由于绕 z 轴的转动不改变点 M' 的坐标,在球坐标系中以偏摆角 θ 、方位角 φ 、球头半径 R 三个参数表示点 M' 坐标,即:

$$\begin{cases} x = R \sin \theta \cos \varphi \\ y = R \sin \theta \sin \varphi \\ z = R \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

根据公式(3)和(4),点 M' 坐标相同,则绕 X 轴旋转角 γ 、绕 Y 轴旋转角 β 与偏摆角 θ 、方位角 φ 之间的关系可得:

$$\begin{cases} \gamma = -\arcsin(\sin \theta \sin \varphi) \\ \beta = \arctan(\tan \theta \cos \varphi) \end{cases} \quad (5)$$

因此,球铰链三自由度转动位移也可通过偏摆角 θ 、方位角 φ 和球铰链的输出杆自旋角 λ 三个参数表示。综上,球铰链回转位移检测可根据待测参数的特点选择合适的测量方法,设计相应的测量传感器并布置其敏感元件的位置。

4 球铰链多维回转角度检测方法的研究进展

球铰链多维回转角度检测可转化为测量球形转子在约束球窝中绕球心多自由度转动,主要研究球形转子的2自由度(部分应用中未考虑球形转子的输出杆绕自身轴线的旋转运动)或3自由度的空间运动姿态。许多研究者针对球形转子的运动姿态测量提出相关的检测方法和装置,其研究工作主要涉及到球形电机、操纵摇杆、机器人和医学仪器等领域。目前球形转子的运动位姿测量按照测量方式可分为接触式和非接触式。其中,接触式测量方案的主要代表有采用滑轨支架机构和3个旋转编码器转化为单自由度测量问题,从结构上实现解耦和测量;非接触式测量方法主要是基于光学传感器、视觉传感器和霍尔传感器等原理进行设计,对传感器采集的信号分析处理,进而实现球形转子多自由度角位移的检测。

4.1 基于结构解耦的测量方法

国外,东京农工大学 Toyama 等人^[16]提出了2自由

度球形超声波电机转子位置检测的装置,如图 4 所示^[16],采用 2 个十字交叉的圆弧形支架,其中球电机的输出轴穿过两弧形支架的滑槽,通过 2 个旋转编码器实现球电机输出轴的回转角检测。美国佐治亚理工学院 Lee 人等^[17]提出了可检测 3 自由度变磁阻球电机转子位置的测量装置,主要由 2 个圆形滑轨支架、1 个滑块和 3 个旋转编码器构成。

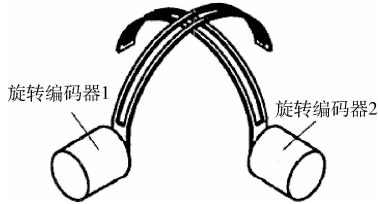


图 4 二自由度球形超声波电机转子测量

Fig. 4 Rotor motion measurement for two-degree-of-freedom spherical ultrasonic motor

国内,浙江大学傅平等^[18]提出了一种用于 2 自由度行波型超声波电机转子位置检测机构,如图 5 所示^[18],在球形转子的输出轴上安装有两自由度回转的调心轴承,轴承座圆环分别与水平面上垂直布置的两个连杆连接,球电机输出杆在空间回转带动连杆旋转,连杆同时带动 2 个光电编码器轴回转,从而把球转子姿态检测转化为两个光电编码器的转角测量。安徽工程大学李丹等人^[19]设计了一种被动 3 自由度球关节,实现了直流永磁球形电机转子三维位置的检测,被动关节随球电机转子运动而转动,通过在被动球关节上安装双轴倾角传感器和增量式光电旋转编码器实现多维转角的测量。浙江大学王剑等人^[20]基于机械式鼠标原理,提出了二自由度超声波电机位姿检测机构,球转子带动与之接触的胶质滚球转动,带动压紧在胶质滚球水平和垂直两个方向上的辊柱,进而驱动片状栅轮转动,通过脉冲信号的频率可以计算片状栅轮的转速,最终根据脉冲信号输出的个数计算得到球转子的运动位置。

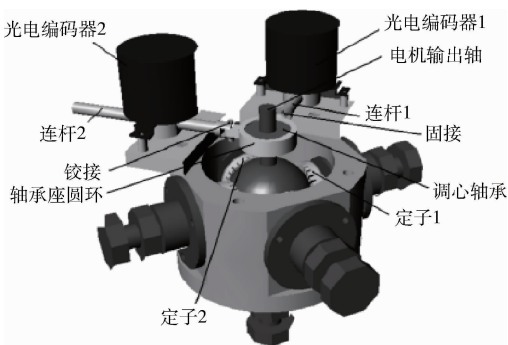
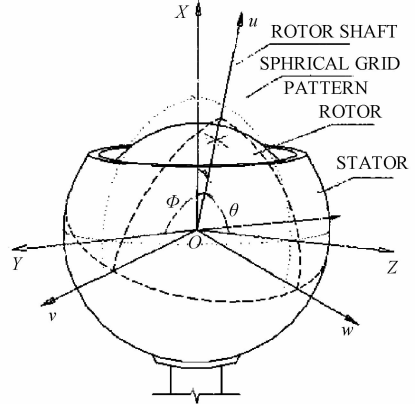


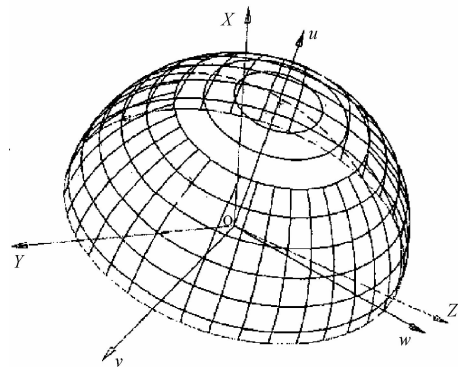
图 5 用于超声波电机转子姿态检测的机构
Fig. 5 Connecting mechanism of 2DOF USM

4.2 基于光学原理的测量方法

国外,美国佐治亚理工学院 Garner 等人^[21]提出基于视觉传感器的球形转子测量方法,如图 6 所示^[21],通过在输出轴上安装球形壳体且使之与转子同心,在该球形壳体表面喷涂特殊的网格图,把转子位置信息编码在球形壳体网格图上便于检测,测量的分辨率取决于网格的密度。Lee 等人^[22]还提出用双光学传感器来获取球形转子位置,其中转子表面经过特殊处理保证传感器能有效地检测偏移量,通过两个传感器的空间位置和相互的约束关系,可以得到转子的旋转方位和旋转角速度。



(a) 传感器示意模型
(a) Schematic diagram of sensor



(b) 球面网格
(b) Spherical grid pattern

图 6 基于视觉传感器的球电机转子测量示意图

Fig. 6 Schematic diagram of spherical rotor measurement based on vision sensor

美国约翰·霍普金斯大学 Stein 等人^[23]提出二进制球面运动编码器,如图 7 所示^[23],在转子表面采用随机泰森多边形法喷涂黑白色,用光电传感器来检测球形表面颜色信号从而得到转子运动位置,通过增加传感器的数量来提高测量分辨率。

新加坡南洋理工大学 Yan 等人^[24]提出采用基于激光检测方法测量球电机的转子运动方位。如图 8 所示^[24],在球形转子的底部加工一个平面,用多个激光检

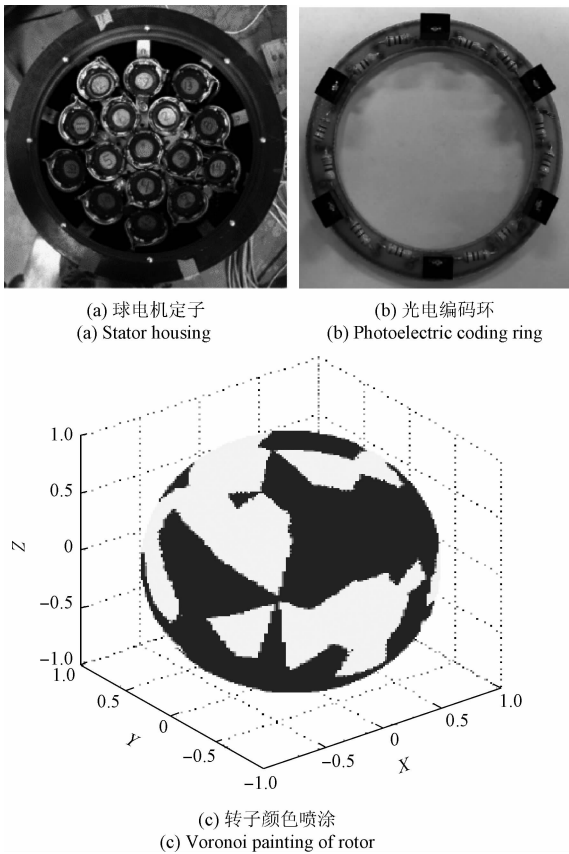


图 7 二进制球面运动编码器

Fig. 7 Binary spherical-motion encoder

测器在不同固定位置上测量从转子底部平面到检测器本身的距离,可计算出刚体的倾角;并且通过在转子底部平面径向方向上加工缝槽,根据激光束通过缝槽的数目计算出刚体的旋转角度,其中可通过增加缝槽的数目提高角位移测量的分辨率和精度。新加坡理工学院 Lim 等人^[25]基于传统光学鼠标传感器的原理提出检测球形转子几何位置的方法,将光学传感器放置在球转子底部下方且平行其表面的切向,分别检测球面上的点投影在平面上沿两个正交方向的位移,计算出球形转子的运动位置。

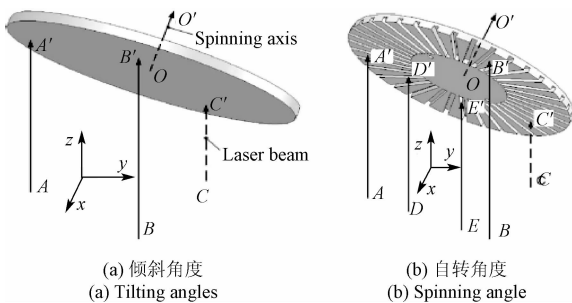


图 8 基于激光法的刚体三维空间方位测量

Fig. 8 Orientation measurement of rigid body in 3D space

国内,合肥工业大学王群京等人^[26-27]研究 3 自由度永磁球形步进电机转子位置的检测方法,主要工作包括:1)在电机转子表面喷涂用伪随机编码生成的网格图,利用图像传感器获取转子图像,通过分析所获取的图像,进而确定球形转子旋转后的空间位置;2)在转子球面上以黑、白两种颜色按随机编码规则喷涂,采用光电传感器对转子的位置识别处理。北京航空航天大学寇金桥等人^[28]利用 2 自由度光学传感器测量 3 自由度球形电机位置,根据旋量理论计算出旋转角度。天津大学 Xin 等人^[29]通过在球电机的定子上固定两个环形光学检测器,分别位于球形电机转子的上侧和下侧。对转子的上半球以纬度方向分割成两个区域,转子的下半球以经度方向分割成两部分,以黑白色喷涂。当球形转子转动时,由光学检测器对数据采集和处理后获取转子的运动位姿。

4.3 基于磁场理论的测量方法

国外,美国克利夫兰大学医院 Johnson 等人^[30]研究功能性神经肌肉电刺激系统时,设计了一种植入式关节角度传感器,如图 9 所示^[30],在一个骨关节中植入永磁体,在关节连接的另一端骨头中植入霍尔传感器阵列,根据永磁体产生的磁场改变导致霍尔传感器输出电压变化的原理,获得关节运动的位姿。新加坡南洋理工大学 Lim 等人^[31]根据异向性磁阻传感器 (AMR) 对外部磁场矢量敏感的特点,当球形转子转动时球头上的磁场对齐投影到异向性磁阻传感器检测方向上,传感器的输出信号直接反映出角位移的变化。美国佐治亚理工学院 Foong 等人^[32]提出基于磁场理论检测球关节位置和运动方向,利用多轴磁场传感器(包括三轴霍尔传感器、双轴巨磁阻传感器)测量在球形关节转子上固有的或附加设置的永磁铁在运动中引起的磁场变化,并通过神经网络算法建立了所测磁场和球关节转子的瞬时位置之间的映射关系。

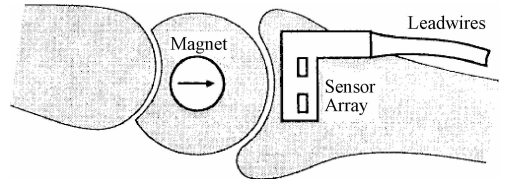


图 9 植入式关节角度传感器

Fig. 9 Implantable transducer for joint angle sensing

国内,合肥工业大学李帅鹏^[33]研制了基于磁效应的智能球铰链关节,采用一个或多个永磁体和霍尔传感器阵列来进行球铰链空间 2 自由度回转角度测量,提出了圆柱永磁体嵌入式和圆环永磁体分离式的测量方法,并且研究了永磁体和霍尔传感器的空间位置匹配问题。北京航空航天大学 Yan 等人^[34]为提高基于霍尔传感器检测球形转子运动方位时传感器检测的分辨率和测量精

度,如图10所示^[34],在永磁球形电机内外转子上布置三维磁铁阵列,在转子周围布置3个正交平面上分别布置两个霍尔传感器,通过各传感器检测不同点处磁通密度,根据传感器的输出值和理论分析模型计算出球形转子的方位。

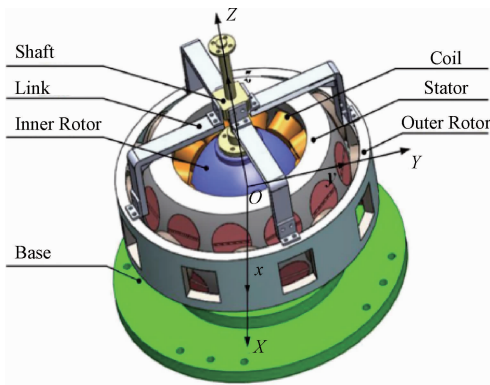


图10 三维磁体阵列的永磁球形电机转子位置检测

Fig.10 Orientation measurement for permanent magnet spherical actuators with 3D magnet array

5 结论

随着精密加工和测量技术的不断进步,位移测量逐步向高精度、大量程和多自由度等方向发展,球铰链多维回转角度测量是一种典型的多自由度运动位移检测问题。综上所述,虽然目前对于球铰链多维角度测量的研究相对较少,然而球电机、控制摇杆等应用场合中球形转子的运动位姿检测与其原理相同,主要包括基于结构解耦、光学原理、磁场理论等测量方法。上述测量方法均有各自的特点,能满足特定场合的测量要求,但总体上还不够成熟,目前各种测量方法大多处于理论设计或实验研究阶段,市场上未见广泛应用的相关产品。此外,现有的测量方法存在一些不足,关键难点有待突破。

1) 基于结构解耦的测量方法,采用传统单自由度的编码器上和机械辅助连接的方式,不可避免地引入附加的摩擦力和惯性等,不仅使得测量系统所占的空间较大,同时影响了系统的测量精度。

2) 基于光学原理的测量方法,构建的光学系统比较复杂,并且对环境要求较高。光学图像的识别方法,不论是网格划分还是表面喷涂等方法,都对加工制造技术提出了很高的要求。同时,测量系统所需空间较大。

3) 基于磁场理论等物理效应的测量方法,测量装置易于集成,在某些产品中已有应用,例如手柄摇杆数字传感器可测量三维角度的位置。但是实现高精度大量程的角位移测量,对于永磁体和传感器的空间位置布置等要求较高,加工难度较大。

4) 球铰链回转角度的测量目标是实现3个自由度角

位移检测,各被测量之间相互耦合,在球面约束中运动位移的简化分解难度较大;球铰链的内部结构紧凑,对传感器敏感元件的设计、制造和装配技术要求较高。

球铰链是并联机构、工业机器人、光学器件、汽车零部件和医疗器械等设备的關鍵构件之一,球铰链多维回转运动精度直接影响机构的工作性能,研制具有多维角度在线监测功能的智能球铰链,便于实现仪器设备的精确空间运动控制,有利于拓宽球铰链在汽车、工业等领域应用。此外,针对球铰链多维回转角度测量问题,结合目前MEMS、集成电路等领域的研究成果,探索多维角位移测量的新方法和仪器具有重要的研究意义。

参考文献

- [1] 尚国强,陈五一,韩先国,等. 并联机床的球铰链设计与分析[J]. 机械技术史及机械设计, 2008; 286-290. SHANG G Q, CHEN W Y, HAN X G, et al. The design and analysis of the ball hinge on parallel kinematics machine tool [J]. History of Mechanical Technology and Mechanical Design, 2008; 286-290.
- [2] DASGUPTA B, MRUTHYUNJAYA T S. The Stewart platform manipulator: a review [J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(1): 15-40.
- [3] TALABA D. The angular capacity of spherical joints used in mechanisms with closed loops and multiple degrees of freedom [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(5): 637-647.
- [4] 徐新行,杨洪波,高云国,等. 提高中心球铰式快速反射镜指向精度的机构设计[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2345-2350. XU X H, YANG H B, GAO Y G, et al. Design of a flexure ring for improving the pointing precision of fast-steering mirror with spherical gemel [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10): 2345-2350.
- [5] MIZUUCHI I. A musculoskeletal flexible-spine humanoid kotaro aiming at the future in 15 years' time [C]. Mobile Robots-Towards New Applications, 2005: 45-56.
- [6] 高贯斌,王文,林铿,等. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1766-1772. GAO G B, WANG W, LIN K, et al. Error compensation and parameter identification of circular grating angle sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1766-1772.
- [7] 袁辉,刘朝晖,李治国,等. 圆感应同步器系统误差的动态提取与补偿[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 794-802. YUAN H, LIU ZH H, LI ZH G, et al. Dynamic

- extracting and compensation of system error for rotary inductosyn [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(3): 794-802.
- [8] 魏敏和, 韩先国, 张军. 3-UPS/S 并联转台球铰链的优化研究[J]. *航天制造技术*, 2011(3): 19-23.
- WEI M H, HAN X G, ZHANG J. Optimization research of spherical joints in 3-UPS/S parallel rotational table [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2011(3): 19-23.
- [9] MERLET J P. *Parallel Robots* [M]. Netherlands: Springer, 2006: 29-31.
- [10] 邱雪松, 杨龙, 侯雨雷, 等. 新型大工作空间仿生被动球面铰链构型及工作空间分析[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(3): 354-360.
- QIU X S, YANG L, HOU Y L, et al. Configuration and workspace analysis of a novel bionic passive spherical hinge with large workspace [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(3): 354-360.
- [11] 鲍官军, 张立彬, 杨庆华, 等. 气动柔性球关节的位姿测量系统研究[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(S1): 232-233.
- BAO G J, ZHANG L B, YANG Q H, et al. Research on position and orientation measurement of flexible pneumatic spherical joint [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 25(S1): 232-233.
- [12] ROBERTSON A, RZEPNIEWSKI A, SLOCUM A. Measurement and calibration of high accuracy spherical joints [C]. *Proceedings of the 17th ASPE Annual Meeting*, 2002: 223-227.
- [13] 张曙, HEISEL U. *并联运动机床* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 107-116.
- ZHANG SH, HEISEL U. *Parallel Kinematics Machine Tool* [M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 107-116.
- [14] ROBERTSON A P, SLOCUM A H. Measurement and characterization of precision spherical joints [J]. *Precision Engineering*, 2006, 30(1): 1-12.
- [15] 陈恳, 杨向东, 刘莉, 等. *机器人技术与应用* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 27-30.
- CHEN K, YANG X D, LIU L, et al. *Robot Technology and Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 27-30.
- [16] TOYAMA S, SUGITANI S, ZHANG G Q, et al. Multi degree of freedom spherical ultrasonic motor [C]. *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995: 2935-2940.
- [17] LEE K M, PEI J, ROTH R. Kinematic analysis of a three-degrees-of-freedom spherical wrist actuator [J]. *Mechatronics*, 1994, 4(6): 581-605.
- [18] 傅平, 郭吉丰, 沈润杰, 等. 二自由度行波型超声波电机的驱动和运动姿态控制[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(2): 25-30.
- FU P, GUO J F, SHEN R J, et al. Driving circuit and position control system of two degree-of-freedom spherical traveling-wave type ultrasonic motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(2): 25-30.
- [19] 李丹, 凌有铸, 方愿捷, 等. 一种新型直流永磁球形电机位置检测方法的研究[J]. *电气传动*, 2012, 42(12): 64-68.
- LI D, LING Y ZH, FANG Y J, et al. New type position detection method for DC permanent magnet spherical motor [J]. *Electric Drive*, 2012, 42(12): 64-68.
- [20] 王剑, 胡锡幸, 郭吉丰. 二自由度超声波电机位姿检测与控制[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2014, 48(5): 871-876.
- WANG J, HU X X, GUO J F. Attitude detection and control of two-degree-of-freedom ultrasonic motor [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2014, 48(5): 871-876.
- [21] GARNER H, KLEMENT M, LEE K M. Design and analysis of an absolute non-contact orientation sensor for wrist motion control [C]. *Proceedings of 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2001: 69-74.
- [22] LEE K M, ZHOU D B. A real-time optical sensor for simultaneous measurement of three-DOF motions [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, 9(3): 499-507.
- [23] STEIN D, SCHEINERMAN E R, CHIRIKJIAN G S. Mathematical models of binary spherical-motion encoders [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2003, 8(2): 234-244.
- [24] YAN L, CHEN I M, GUO Z, et al. A three degree-of-freedom optical orientation measurement method for spherical actuator applications [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, 8(2): 319-326.
- [25] LIM C K, CHEN I, YAN L, et al. A novel approach for positional sensing of a spherical geometry [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011, 168(2): 328-334.
- [26] 王群京, 钱喆, 李争, 等. 基于机器视觉的永磁球形步进电动机转子位置检测方法[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(36): 73-79.
- WANG Q J, QIAN ZH, LI ZH, et al. Method of measuring the rotor position of permanent magnetic spherical stepper motor based on machine vision [J].

- Proceedings of the CSEE, 2008, 28(36): 73-79.
- [27] 王群京, 雍爱霞, 陈丽霞, 等. 一种永磁球形步进电机转子位置的检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 92-96.
- WANG Q J, YONG A X, CHEN L X, et al. A kind of method of measuring the rotor position of permanent magnetic spherical stepper motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 92-96.
- [28] 寇金桥, 陈伟海, 于守谦, 等. 三自由度球形电机位置测量研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(7): 805-808.
- KOU J Q, CHEN W H, YU SH Q, et al. Orientation sensing of 3-DOF spherical motor [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(7): 805-808.
- [29] XIN J G, XIA C, LI H, et al. A novel orientation measurement using optical sensor for spherical motor [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(6): 1330-1339.
- [30] JOHNSON M W, PECKHAM P H, BHADRA N, et al. Implantable transducer for two-degree of freedom joint angle sensing [J]. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 1999, 7(3): 349-359.
- [31] LIM C K, ANG C Y, CHEN I M, et al. An alternative approach in sensing simultaneous 3-DOF motions [C]. IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, CASE, 2006: 588-593.
- [32] FOONG S, LEE K M, BAI K. Magnetic field-based sensing method for spherical joint [C]. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, ICRA, 2010: 5447-5452.
- [33] 李帅鹏. 智能球关节的测量原理及关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- LI SH P. Measurement principle and research on key technologies of intelligent ball joint [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [34] YAN L, ZHU B, JIAO Z, et al. An orientation measurement method based on hall-effect sensors for permanent magnet spherical actuators with 3D magnet array [J]. Scientific Reports, 2014, 4(6756): 1-8.

作者简介



王文, 1996年于浙江大学获得博士学位, 现为杭州电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为: 微纳驱动、测量与控制技术; 坐标测量机; 机电一体化装备; 精密工程等。

E-mail: wangwn@hdu.edu.cn

Wang Wen received Ph. D. from Zhejiang University in 1996. He is currently a professor and Ph. D. supervisor in Hangzhou Dianzi University. His main research interests include micro/nano driving, measurement and control, coordinate measuring machines, mechatronics, and precision engineering and so on.