

# 用于机器人示教的人体手臂运动捕捉方法研究

朱桁序<sup>1</sup> 姜文刚<sup>1</sup> 林永才<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学电子信息学院 镇江 212000; 2. 苏州时运机器人有限公司 苏州 215600)

**摘要:** 机器人示教是实现机器人轨迹跟踪的主要方式,其工作原理决定了机器人作业的复杂程度。而采用人体运动跟踪技术,可以简化机器人的示教程序,提高工作安全性。研究了基于MEMS的人体运动跟踪方式,选取包含加速计、陀螺仪、磁力计的九轴惯性传感器来检测人体手臂运动情况,采用传感器间的互补融合与空间关节位置叠加的方法,获得较高精度的末端位置数据,并通过固定方向直线运动与空间连续运动的实验来检测传感器对手臂运动捕捉的效果。实验结果表明,融合计算出的数据轨迹在短距离的情况下数据精度高,可以用于机器人的部分轨迹示教。

**关键词:** 跟踪示教;MEMS;运动捕捉

中图分类号: TN98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4030

## Research on motion capture method for human arm in robot teaching

Zhu Hengxu<sup>1</sup> Jiang Wengang<sup>1</sup> Lin Yongcai<sup>2</sup>

(1. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China;  
2. Suzhou Fortune Robot Co. Ltd, Suzhou 215600, China)

**Abstract:** Teaching playback is the major way of robot path tracking. Its working principle decide the complex degree of robot working. With the technology of human motion tracking, we can simplified robot teaching program and improve the safety of working environment. This article focus on the human motion tracking based on the technology of MEMS. With the 9-axis inertial sensor, which include an accelerometer, a gyroscope and a magnetometer, and the method of complementary data fusion, the data accuracy of hands will improved. The results of linear path motion and space continuous path motion experiment show that the date calculated by this method has the high accuracy, can be used in robot teaching playback.

**Keywords:** path tracking teach; MEMS; motion capture

## 1 引言

机器人的主要任务是代替人类进行一些重复性、环境差、危险性高的手工操作,其完成的前提是预先对机器人发出指示,规定机器人应该完成的动作和作业的具体内容,这个过程就是对机器人的示教。示教再现(teaching playback)是机器人普遍采用的编程方式<sup>[1]</sup>。这需要操作人员用示教盒来反复调整每个示教点处机器人的作业参数。整个示教过程结束后,机器人按照记录的数据反复作业。手把手示教也是示教再现系统的一种形式。操作员通过操纵安装在机器人末端的控制手柄对机器人进行作业轨迹演示,作业时机器人通过存储的数据,按照先前示教的轨迹运行<sup>[2]</sup>。示教再现系统利用了机器人具有较高的重复定位精度优点,应用比较广泛。但对操作员的操作技能要求较高,示教过程繁琐、费时效率不高<sup>[3]</sup>。而且这需要近距离

对机器人示教,存在安全隐患。针对示教再现方法存在的缺点和局限性,本文结合微机电技术,形成一种基于肢体运动跟踪的示教方法,以实现对工业机器臂的示教与再现<sup>[4-5]</sup>。该方法操作简单,效率较高,对操作人员的专业技术要求较低,并且可以让操作人员与机器臂保持安全距离,操作员不必处在危险的工作环境中。

## 2 人体手臂模型与传感器的安放

本文采用基于关节旋转的人体手臂模型,手臂的肩关节、肘关节、腕关节分别有3个、2个、2个自由度,分别在手臂肘处、腕处和手掌位置(图1(a)中黑点位置)安放传感器检测数据,用这三处传感器采集的数据来计算手部位置。

本文在计算空间位置时,需要涉及到肩部坐标系(S):以人体肩部为基点,在手臂运动时相对人体固定不变。肘部坐标系(E)、腕部坐标系(W):这两个坐标系相对于人体

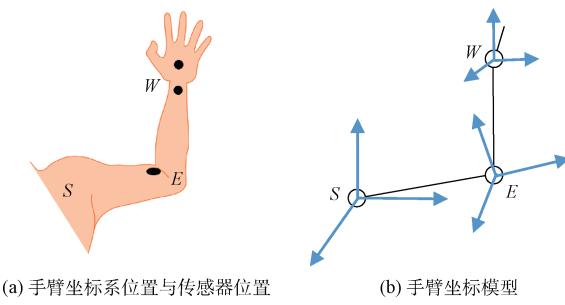


图1 人体手臂模型

的位置会随着人体运动而变化。

目前,对人体动作进行识别主要有两种方法<sup>[6]</sup>:一种是基于外部观测传感器进行数据采集;另一种是通过可穿戴式的传感器来获知运动情况。基于外部传感器的方法一般先在人体关键点安放传感器,再通过视频分析来检测运动<sup>[7-8]</sup>。这种方法复杂度和成本均较高,且灵活度较差。而基于可穿戴式的传感器可以直接固定在人体上,直接感知运动情况,是一种直接的动作识别方法,这种方法受环境干扰低,运动起来更为灵活。

本文采用穿戴式 MPU-9150 型 9 轴 MEMS 传感器采集运动数据。该型传感器是由一个 MPU-6050 惯性传感器与一个 AK-8975 地磁传感器叠加而成。MPU-6050 含有一个加速度传感器和一个陀螺仪,可以测得物体运动时的加速度变化和旋转情况。由于人体手臂运动时是处于低速运动的状态,选择陀螺仪量程为  $\pm 250^\circ/\text{s}$ ,加速度计的量程为  $\pm 2 \text{ g}$ ,完全满足人体运动测量需求。AK-8975 磁力计可以测得物体所在空间中的地磁大小和方向,量程为  $\pm 1200 \mu\text{T}$ ,结合当地的地磁数据可以推算出物体在旋转与运动中的重力方向。由于传感器采用微机电系统技术,传感器器件封装大小只有  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,可以方便地安置在测量位置。为尽可能得到准确的数据,测量时将传感器模块固定在手臂腕处和手臂肘处,固定后保持传感器在运动的时候不会相对于手臂发生位移。

### 3 空间位置计算

#### 3.1 手臂运动分析

设初始位置时,人体手臂处于水平放置,手心垂直向上,如图 2 所示。S 坐标系中,上臂肩关节有 3 个自由度,可以绕 X、Y、Z 三个轴旋转;E 坐标系中,下臂肘关节由两个自由度,可以绕 X、Y 轴旋转;W 坐标系中,腕关节有 2 个

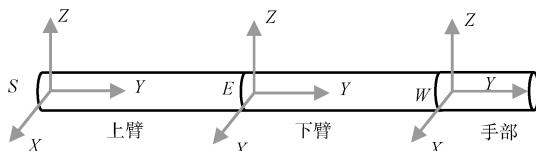


图2 初始位置示意图

自由度,可以绕 X、Z 轴旋转。想得到手部在 S 坐标系中的运动轨迹,需要对手臂的每一段进行运动分析。

首先对手臂上臂的空间位置进行分析,如图 3 所示,设上臂的长度为  $r$ ,上臂肩关节(A 点)所在位置为 S 坐标系的坐标原点,在 S 坐标系中,手臂转动时肩关节不会相对于坐标系变化,传感器是固定在手臂的末端(B 点),在该条件下转动手臂上臂,B 点会在一个半径为  $r$  的球面上运动。并且当手臂运动在球体空间中任意一个位置时,有且仅有一个的姿态数据与当前位置所对应,所以可以通过当前传感器的姿态数据,结合已知的该段手臂的长度  $r$ ,来计算出该段手臂在人体坐标空间中的位置信息。手部运动时虽然只有两个自由度,但缺失的自由度是自转方向的,不影响空间坐标位置,所以手部位置也可以用类似上臂的方法解算出来。

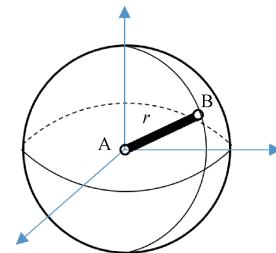


图3 上臂、手部运动分析

固定手臂上部不动,手臂下部在空间运动时就只有 2 个自由度。如图 4 所示,设下臂长度为  $s$ ,下臂的肘关节(C 点)固定在 E 坐标系的原点,传感器固定在手臂末端(D 点),在该条件下手臂运动时,D 点会在平面上以  $s$  为半径的圆弧上运动,变化角度  $\gamma$  的值小于  $180^\circ$ 。在这个运动范围内,当手臂运动到任意一位置时,也有且仅有一个姿态数据与该位置对应,所以可以用传感器的姿态数据,结合该段手臂长度,计算出传感器的空间位置。

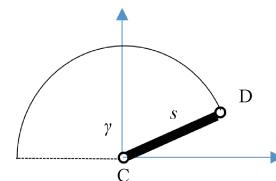


图4 下臂运动分析

在求得手臂各部位在自身坐标系中的位置后,可以通过坐标转换,把用 E 坐标系表示的下臂位置与 W 坐标系表示的手部位置转换到 S 坐标系中,这样再通过空间叠加就可以计算出 S 坐标系中手部的位置。

#### 3.2 传感器姿态数据的获取

欧拉角是用来确定定点转动刚体位置的 3 个 1 组的独立角参量,如图 5 所示,欧拉角由章动角  $\theta$ 、旋进角  $\phi$  和自转角  $\gamma$  3 个角度数据组成,这 3 个角度数据表示了坐标的旋

转情况。在这里,可以用欧拉角来表示姿态信息。在每一个传感器数据采集点,可以测量得到该位置的三轴加速度( $a_x, a_y, a_z$ )、三轴旋转角速度( $g_x, g_y, g_z$ )、三轴磁场强度( $m_x, m_y, m_z$ )的数据,通过这三组信息,可以计算出该位置的欧拉角。

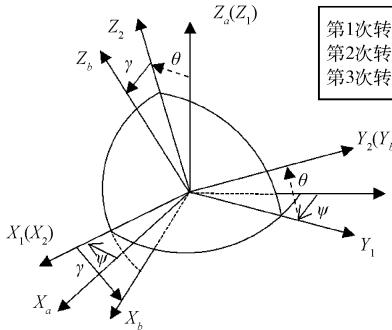


图5 欧拉角

在人体手部运动时,固定在手臂上的加速度传感器测量的加速度数值实际是重力加速度 $G_0$ 与手部运动启停产生的运动加速度 $a_m$ 。由于在手部运动时,其运动速度比较慢,所以其产生的运动加速度 $a_m$ 持续时间较短且数值很小,所以在实际计算时可以忽略不计。即传感器加速度观测值 $a_0(a_x, a_y, a_z)$ 近似等于 $G_0$ 。即可以用加速计和磁力计的数据计算欧拉角 $\theta$ 和 $\gamma$ 数值, $G_0$ 表示的是地球重力加速度。则计算公式为:

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{a_x}{a_z}\right) \quad (1)$$

$$\gamma = \sin\left(\frac{a_y}{|G_0|}\right) \quad (2)$$

磁力计测量的大地磁场,在得到前两个欧拉角数值之后,可以知道传感器所在的坐标系中 $x$ - $o$ - $y$ 平面与水平面的倾斜角。即可以通过磁力计的数据和欧拉角 $\theta$ 和 $\gamma$ 数值,计算出 $\psi$ 的值:

$$\psi = \tan\left(\frac{N_1}{N_2}\right) \quad (3)$$

式中: $N_1, N_2$ 分别为:

$$N_1 = m_x \cos\theta + m_y \sin\theta \sin\gamma + m_z \sin\theta \cos\gamma \quad (4)$$

$$N_2 = m_y \cos\gamma - m_z \sin\gamma \quad (5)$$

在处理姿态数据的时候,可以通过互补滤波来提高数据精度<sup>[9-10]</sup>。不同的传感器存在不同类型的误差<sup>[11-12]</sup>;陀螺仪输出值表示了角速度,对角速度积分即可得实时变化的欧拉角数据。由于加速的与磁力计测量的目标分别为静态的重力加速的和地磁场,这2个数值在姿态变化时改变频率较低,所以可以用低通滤波器来把高频信号滤除来提高数据精度。而陀螺仪测量的动态角速度的数值,这个数值在姿态变化的时候改变频率较高,可以用高通滤波来提高数据精度。采用互补滤波姿态解算方法如图6所示。

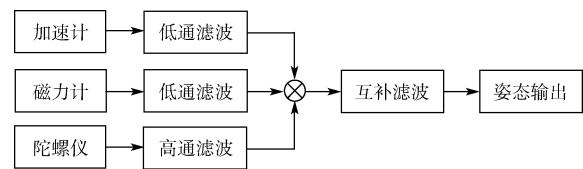


图6 互补滤波姿态解算

## 4 数据计算

### 4.1 三维空间计算

在得知传感器当前的欧拉角数值后,可以结合已知的手臂长度,计算出传感器在三维空间中的位置信息。为了方便计算,需要把欧拉角数据转换为三维球坐标,记为 $(r, \theta, \varphi)$ ,如图7所示。这里 $r, \theta, \varphi$ 的变化范围为 $r \in [0, +\infty)$ ,  $\theta \in [0, \pi]$ ,  $\varphi \in [0, 2\pi]$ 。

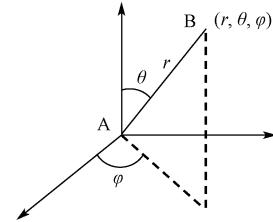


图7 三维球坐标

由于传感器固定在手臂上,所以传感器模块和手臂都有相同的旋转状态,即由传感器数据计算出的欧拉角可以用来表示手臂的旋转情况。所以,由先前得到的欧拉角推算三维球坐标中角度数据方法为:

$$\theta_{球} = 90^\circ - \theta_{欧} \quad (6)$$

$$\varphi_{球} = \psi_{欧} \quad (7)$$

转换到三维直角坐标中,可得:

$$x = r \sin\theta \cos\varphi \quad (8)$$

$$y = r \sin\theta \sin\varphi \quad (9)$$

$$z = r \cos\theta \quad (10)$$

即可得到该段手臂在三维空间中的位置与旋转数据。

### 4.2 空间数据叠加

测试时,2个传感器模块分别放在手臂的肘部与手腕处,初始状态为传感器水平放置。在实际操作中,要求机器臂的末端能正确跟随人体手腕位置的运动而运动,这就需要通过2个分段的三维位置与旋转信息得到手腕处在整体空间中的运动情况。

设三维空间中,以人体肩部为空间原点,可以得到手臂上臂在 $S$ 坐标系中的位置为 $(x_a, y_a, z_a)$ ,旋转欧拉角为 $(\phi_a, \theta_a, \gamma_a)$ ;而以肘部为原点,可以得到手臂下臂在 $E$ 坐标系中的位置为 $(x_b, y_b, z_b)$ ,旋转欧拉角为 $(\phi_b, \theta_b, \gamma_b)$ ;而以腕部为原点,可以得到手部在 $W$ 坐标系中的位置为 $(x_c, y_c, z_c)$ ,旋转欧拉角为 $(\phi_c, \theta_c, \gamma_c)$ 。由于在运动过程中,作

为手臂上部的三维坐标原点的肘部会随着手臂上臂的运动而发生位置变化,所以在进行坐标叠加的时候,需要根据手臂上臂的旋转数据对手臂上部的数据进行坐标转换,把空

$$\mathbf{C}_n^b = \begin{bmatrix} \cos\gamma\cos\psi + \sin\gamma\sin\psi\sin\theta & -\cos\gamma\sin\psi + \sin\gamma\cos\psi\sin\theta & -\sin\gamma\cos\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\gamma\cos\psi - \cos\gamma\sin\psi\sin\theta & -\sin\gamma\sin\psi - \cos\gamma\cos\psi\sin\theta & \cos\gamma\cos\theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

由于直角坐标系间的变换矩阵为单位正交矩阵,并且在旋转变换时坐标系都保持为直角坐标系,则根据单位正交矩阵的性质有:

$$\mathbf{C}_b^o = (\mathbf{C}_n^b)^{-1} = (\mathbf{C}_n^b)^T \quad (12)$$

所以手臂下臂在  $E$  坐标转换到  $S$  坐标系后的数据为:

$$\begin{bmatrix} x'_b \\ y'_b \\ z'_b \end{bmatrix} = \mathbf{C}_E^S \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \quad (13)$$

手部在  $W$  坐标转换到  $S$  坐标系后的数据为:

$$\begin{bmatrix} x'_c \\ y'_c \\ z'_c \end{bmatrix} = \mathbf{C}_E^S \mathbf{C}_W^E \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

转换之后的数据与原来手臂上臂的三维空间数据是在同一坐标系  $S$  中的,所以手部空间位置在  $S$  坐标系中的位置可以由 3 个空间数据叠加得到。

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a + x'_b + x'_c \\ y_a + y'_b + y'_c \\ z_a + z'_b + z'_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

## 5 实验验证

**直线测试:**在手部各位置固定好传感器后,测量一段在垂直面  $X-O-Z$  内的运动直线轨迹,该直线轨迹与水平面  $X-O-Y$  平面呈  $30^\circ$  角向上延伸,具体测量结果的三视图如图 8~10 所示,其中曲线轨迹为测量值,直线轨迹为理论值。分析测量结果可以发现,测量时间越长,测量数据与理论值的偏差越大。这里的原因一方面是因为微机电传感器在测量时会产生数据漂移,造成数据不准确,另一方面是在测量时传感器直接固定在手臂上,人体在沿着预订轨迹移动时会有偏差。

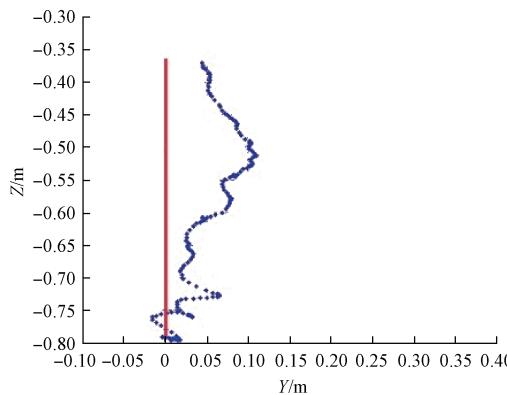


图 8  $X-O-Z$  平面数据

间位置数据转换到  $S$  坐标系中。

由欧拉角可以求得由初始位置到当前位置的旋转矩阵为式(11)所示:

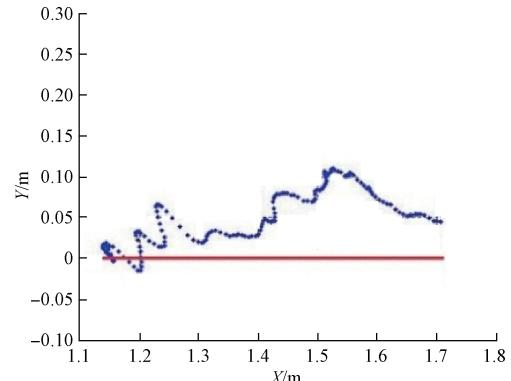


图 9  $Y-O-Z$  平面数据

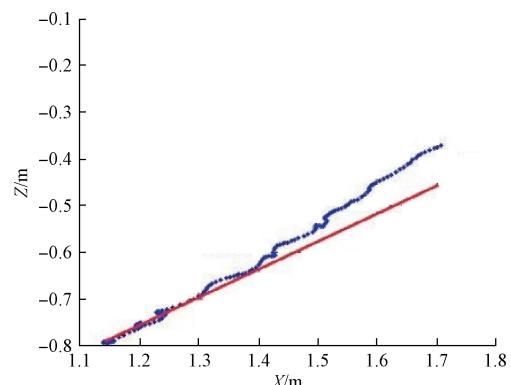


图 10  $X-O-Y$  平面数据

**连续测试:**固定好传感器后,以顺时针方向,用手部在水平面中沿着  $30\text{ cm} \times 50\text{ cm}$  的矩形运动,测量结果如图 11 所示。该测量轨迹可以基本反映手部在空间中的运动

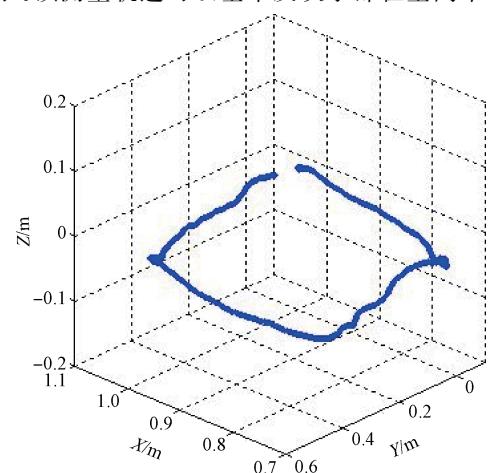


图 11 连续测试数据

情况,但也存在一定的误差,这主要是由于人体手臂在空间中沿着预计路线运动时会有误差,同时传感器测量的累积漂移会影响数据的准确性。

## 6 结 论

本文提出了一种基于 MEMS 技术的人体手臂运动捕捉方法,该方法可以反映出人体手臂在空间中的运动轨迹,以用于机器人示教中。实验结果表明,由传感器数据计算出的运动轨迹数据可以很好得跟踪手部运动情况,所产生的误差较小,可以满足部分机器人示教之中。若把该方法与传统示教器编程示教的方法相结合,可以在保证示教精度的前提下大大提高工作效率,简化操作流程。

## 参考文献

- [1] 计时鸣. 工业机器人技术的发展与应用综述[J]. 机电工程, 2015, 32(1): 1-11.
- [2] 李占贤, 李兴龙. 一种新型手把手示教型施釉机器人[J]. 机械, 2015, 42(1): 67-69.
- [3] HARUHISA K, SYUNSUKE N, TETSUYA M. Virtual robot teaching for humanoid hand robot using multi-fingered haptic interface [C]. 2011 International Conference on Communications, Computing and Control Applications(CCCA), 2011.
- [4] 刘晓燕, 周兆英. 人体运动跟踪中 MEMS 姿态测量单元设计与测试[J]. 仪表技术与传感器, 2009(增刊): 225-227.

- [5] 张庆宾. 智能空间下基于 AHRS 的人体动作识别[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [6] 汪少初, 刘昱, 郝文飞, 等. 基于惯性传感的人员行进动作识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6): 630-636.
- [7] 丁友东, 吴学纯. 基于 kinect 的人体对象视频自动分割[J]. 电子测量技术, 2013, 36(4): 48-51.
- [8] 王晓华, 李才顺. 服务机器人手势识别系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(4): 305-311.
- [9] 陈孟元, 谢义建, 陈跃东. 基于四元数改进型互补滤波的 MEMS 姿态解算[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1391-1396.
- [10] 杜杉杉, 吴昊, 张继文, 等. 一种面向 AHRS 的改进互补滤波融合算法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(3): 13-18.
- [11] 龙礼, 张合. 三轴地磁传感器误差的自适应校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 161-165.
- [12] 李艳, 管斌, 王成宾, 等. 电子磁罗盘航向角误差推导及分析[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1566-1572.

## 作者简介

朱桁序, 硕士研究生, 主要研究方向为机器人传感与控制。  
E-mail: zhuhengxupj@sina.com