

基于欧拉角的关节活动度测量系统

李文浩 葛云 陈颖

(南京大学电子科学与工程学院 南京 210093)

摘要: 人体关节活动度的测量在司法鉴定、康复医学等领域有着重要的意义。设计并实现了一种基于欧拉角的关节活动度测量系统,系统利用光学定位设备获取标记点位置信息,通过旋转矩阵变换与欧拉角反解算法计算角度,实现了精确、实时的关节活动度测量。系统适用于人体颈部关节、腰部关节、肩关节、肘关节、腕关节、髋关节、膝关节以及踝关节的活动度测量。精度验证实验结果显示,系统的测量精度可达到 0.3° 。

关键词: 关节活动度;光学定位;欧拉角

中图分类号: TP216 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 320.1410

Joint motion measurement system based on Euler angle

Li Wenhao Ge Yun Chen Ying

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Human joint motion measurement means a lot in judicial expertise, rehabilitation medicine and other fields. This paper designs and realizes a kind of joint motion measurement system based on euler angle. The System get marker location information through optical positioning device, then compute angles using algorithm of rotation matrix and euler angle inverse solution. System has realized the accurate, real-time motion measurement and it suit to the motion measurement of neck, waist, shoulder, elbow, wrist, hip, knee and ankle. Accuracy verification experiment show that the system precision can reach within 0.3 degrees.

Keywords: joint angles; optical positioning ;Euler angle

1 引言

关节活动度,是指关节活动时关节远端尽最大能力运动所通过的运动弧或转动的角度。如图1,所示即为人体肘关节屈曲方向的活动度^[1]。临床上根据解剖学的相关定义,将关节的运动分为屈和伸、展和收以及内旋和外旋三大类,关节活动度测量系统包含对上述3种运动的测量。

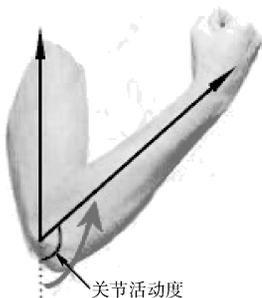


图1 肘关节活动度定义

关节活动度的测量主要应用在司法鉴定、康复医学等领域。在司法鉴定中,关节活动度是鉴定伤残等级的重要依据,对于量刑与赔偿判定有着重要意义;在康复医学中,关节活动度是评定关节运动机能受损程度的一项重要指标,精确测量关节活动度将有助于判断关节的活动是否受到限制、受到限制的程度以及为此制定合适的治疗方案。

国际上采用的关节活动度测量方法主要有机械式测量系统、超声测量系统、电磁式测量系统等^[2],这些测量系统虽然活动度测量精度可以满足临床需求,但普遍存在造价昂贵、操作复杂、设备环境限制多等问题。国内传统采用的关节活动度测量方法为通用量角器法,通用量角器用两根直尺连接一个半圆量角器或全圆量角器制成。使用时将量角器的中心点准确对到所测关节活动轴中心,两尺远端分别与活动轴中心的两端肢体的长轴相平行。随着关节运动,在量角器刻度盘上读出关节活动度。使用通用量角器测量活动度不能客观显示数值,重复性差,精确度低,通常最小刻度值为 5° ,影响医生对关节伤残程度和伤残等级的评定^[3]。为了克服通用量角器的不足,本文设计了该测量系统。

2 系统实现

2.1 系统框架

如图2所示,系统由5部分构成:光学定位设备、定位小球、塑料载具、通信线以及计算机软件。

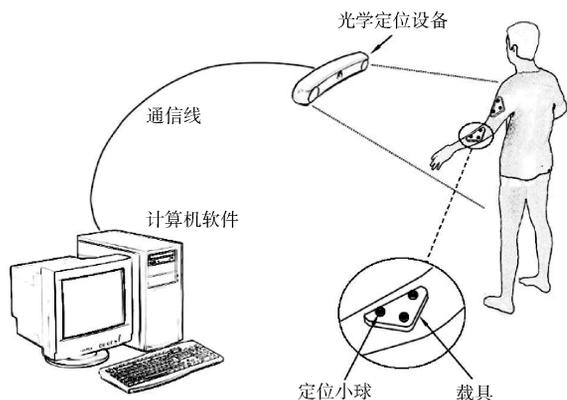


图2 系统结构

系统利用光学定位设备监控人体的关节运动,光学定位设备通过通信线将体表载具上固定的定位小球的坐标数据传入计算机,计算机软件利用这些坐标数据,根据坐标系转换和欧拉角反解的原理计算出待测关节在各个方向上的活动角度,并实时显示计算结果。

2.2 硬件部分

硬件部分由光学定位设备、通信线、定位小球、塑料载具等部分组成。

本文采用的光学定位设备为NDI Polaris Spectra,该设备能够以50 Hz的频率跟踪定位小球的位置,并通过通讯线将定位小球的三维坐标数据传入计算机,设备的探测精度达到0.35 mm;通信线由串口线和USB线构成,其中串口线连接光学定位设备,USB线连接计算机,二者通过转接口连接;定位小球固定在塑料载具上,塑料载具通过捆绑等方式固定在待测肢体上。

2.3 软件部分

软件部分由以下模块组成:数据采集模块、界面交互模块、角度计算模块、三维展示模块。

数据采集模块负责接收和存储光学定位设备传输至计算机的坐标数据。界面交互模块提供按钮、文本框等控件进行控制操作。角度计算模块根据旋转矩阵变换与欧拉角反解算法实时计算关节活动角度。三维展示模块根据计算结果同步更新人体模型,提供三维人体动画展示。

3 软件算法原理

3.1 原理概述

临床根据解剖学的相关定义,将关节的运动分为屈和伸、展和收以及内旋和外旋这三大类^[4]。系统包含对以上3种关节运动活动度的测量。

计算关节活动度采用的方法是,将关节的屈伸、展收以及内外旋运动分别映射为物体坐标系3个坐标轴的旋转运动,这样求关节的活动角度就转化为求解坐标系之间的欧拉角问题^[5]。

以肘关节为例说明算法的原理。如图3所示,肘关节坐标系为 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 。在前臂上捆绑载具,每个载具上固定有3个定位小球,根据图中所示规则,这3个小球确定一个三维空间的物体坐标系 $O-XYZ$ 。在方向 OX 与桡骨长轴 O_0X_0 方向平行的前提下,肘关节坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 绕3个坐标轴的旋转等价于坐标系 $O-XYZ$ 绕三轴的旋转。即肘关节的屈伸运动、展收运动、内外旋运动分别对应为坐标系 $O-XYZ$ 绕 Y 轴、 Z 轴、 X 轴的旋转运动^[6-7]。

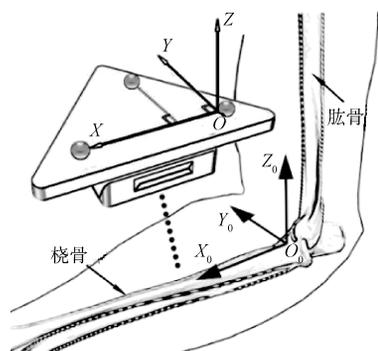


图3 肘关节坐标系示意

3.2 求解仿射变换矩阵

传统的三维直角坐标转换大多采用7参数线性模型(即包含3个坐标平移参数、3个角度旋转参数和1个尺度缩放参数),只适用于小旋转角。采用非线性最小二乘空间三维直角坐标转换算法。该方法不仅适合小旋转角也适用于大旋转角的三维坐标转换,具有计算简便、收敛速度快、计算结果精确等特点^[8-9]。

进入测量过程之后,设 $O-XYZ$ 的初始位置(即处于医学上的中立位时)为 $O-X_1Y_1Z_1$ 。在关节发生运动的某一时刻, $O-XYZ$ 的当前位置为 $O-X_2Y_2Z_2$ 。有3个标记点的前后的坐标值,可以形成9个方程。设 $O-X_1Y_1Z_1$ 对应的标记点坐标值为 (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) , $O-X_2Y_2Z_2$ 对应的3个标记点坐标值分别为 (x_1', y_1', z_1') , (x_2', y_2', z_2') , (x_3', y_3', z_3') , 则可以得到9个方程组成的线性方程组:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1, y_1, z_1, x_1') \\ f_2(x_1, y_1, z_1, y_1') \\ f_3(x_1, y_1, z_1, z_1') \\ \dots \\ f_9(x_3, y_3, z_3, z_3') \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

即 $f(x) = 0$, 将求解非线性超定方程组的问题转化为非线性最小二乘问题,则有:

$$g(x) = \nabla G(X) = 2f(x)(Df(x))^T = 0 \quad (2)$$

其中,

$$(Df(x))^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial f1}{\partial x1} & \frac{\partial f2}{\partial x1} & \dots & \frac{\partial f9}{\partial x1} \\ \frac{\partial f1}{\partial y1} & \frac{\partial f2}{\partial y1} & \dots & \frac{\partial f9}{\partial y1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f1}{\partial z1} & \frac{\partial f2}{\partial z1} & \dots & \frac{\partial f9}{\partial z1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

在求解过程中,为避免求 $f(x)$ 的二阶导数,可采用高斯-牛顿迭代法。高斯-牛顿法的基本思想是把非线性模型在未知参数初值 X_0 处进行线性化,按最小二乘准则平差估计出一次近似值 X_1 ,然后以该近似值作为下一次线性化的初值,反复迭代计算逐次逼近真正的极小点^[10]。应用高斯-牛顿迭代法,选取初始值进行迭代,在迭代过程中直到两相邻参数向量差的一范数小于某阈值时停止迭代,即可得最小二乘法下的最优解,设为:

$$M = \begin{bmatrix} m11 & m12 & m13 & a \\ m21 & m22 & m23 & b \\ m31 & m32 & m33 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: a, b, c 为平移系数, $m11, m12, \dots, m33$ 为旋转系数,构成 3×3 的旋转矩阵。

3.3 欧拉角反解

设由 $O-X_1 Y_1 Z_1$ 到 $O-X_2 Y_2 Z_2$ 的旋转矩阵为 R 。则 R 可以表示为:

$$R = \begin{bmatrix} m11 & m12 & m13 \\ m21 & m22 & m23 \\ m31 & m32 & m33 \end{bmatrix} \quad (5)$$

欧拉角是由 3 个独立的角参量组成的 1 个角变量,可以描述三维空间的一个旋转。欧拉角表示物体的旋转方位有很长历史,在航海、天文、机器人等领域已有着广泛应用^[11-12]。欧拉角由章动角、进动角和自转角组成,分别代表绕 3 个坐标轴转动的角度,此处定义旋转顺序为 $Z-Y-X$,此顺序应与实际测量中关节转动顺序保持一致。

设由第 1 次转动绕 Z 轴转过 α ,第 2 次绕 Y 轴转过 β ,第 3 次绕 X 轴转过 γ ,最终到达目标方位。则旋转矩阵 R 可以表示 3 个单坐标轴旋转矩阵的乘积:

$$R = [R_x][R_y][R_z] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R11 & R12 & R13 \\ R21 & R22 & R23 \\ R31 & R32 & R33 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据旋转矩阵求解 α, β, γ , 计算方法:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{R32}{R33} \\ \beta = \arctan \frac{-R31}{\sqrt{R32^2 + R33^2}} \\ \gamma = \arctan \frac{R21}{R11} \end{cases} \quad (7)$$

所求 α, β, γ 为关节在 3 个自由度上的活动角度。

4 结果展示

通过上述计算得到当前关节活动度之后,在软件中以数值显示和三维人体动画两种方式进行展示。

数值显示的方式为将当前测量角度直接展示在界面中,如图 4 所示。



图 4 数值展示界面

三维人体动画采用骨骼蒙皮动画的方法实现,软件实现了基于 md5 模型文件的骨骼蒙皮动画,三维场景采用 OpenGL 渲染。如图 5 所示,图中展示了肘关节变化的人体动画效果。

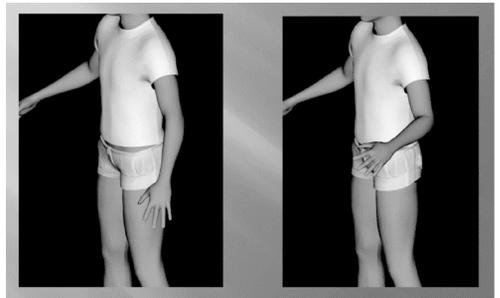


图 5 三维人体动画展示

骨骼蒙皮动画结合了关节动画和单一网格模型动画的优点,使得能完成良好动画效果的同时所占用的内存空间又特别少。骨骼蒙皮的基本原理为,将人体骨架抽象成一系列关节节点。在关节节点的控制下,加权计算体表网格的顶点位置。骨骼蒙皮技术的关键在于蒙皮,所谓蒙皮是指将体表网格中的顶点绑定在相邻节点之上,且每个顶点可以被多个节点所控制,这样在关节处的顶点由于同时受到父子骨骼的拉扯而改变位置就消除了裂缝^[13]。

5 精度验证

数显角度尺可以进行非常精确的角度测量,其测量精度可以达到 0.01° 。设计对比试验,使用 TIMM 型数显角度尺和本测量系统同时对假体进行角度测量,记录其数据以供比对。

选用三位操作员进行实验,每次活动假体至某一角度,记录数显角度尺的读数 d_1 和本测量系统的读数 d_2 ,同时记录二者偏差 $dis = |d_1 - d_2|$,每位操作员进行 10 次测量操作。操作员 A 使假体模拟关节的屈伸运动,操作员 B 使假体模拟关节的展收运动,操作员 C 使假体模拟关节的内外旋转运动。每组实验完成后计算 dis 的平均值、方差和最大值。得到的数据处理后如表 1 所示。

表 1 关节活动度测量系统试验偏差统计结果 ($^\circ$)

	平均值	方差	最大值
A 组	0.21	0.04	0.29
B 组	0.15	0.03	0.22
C 组	0.13	0.03	0.21

数据显示,该系统对于关节活动的活动度测量精度都达到 0.3° ,且具有很高的稳定性。

6 结 论

该关节活动度测量系统与国内传统的通用量角器测量方法相比,具有更高的精度和更好的稳定性,且具有实时显示结果、测量自由度高等优点,具有很高的应用价值。

参考文献

- [1] 严广斌. 关节活动度(Range of motion, ROM)[J]. 中华关节外科杂志:电子版, 2014(3):15-15.
- [2] 黎洪松,李达. 人体运动分析研究的若干新进展[J]. 模式识别与人工智能, 2009, 22(1):70-78.
- [3] 伊文超,胡建平,励建安,等. 关节角度测量四点法的临床价值[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2011, 33(6):425-430.
- [4] 杨宁学,李艳萍. 人体运动分析及其在三维互动娱乐中的应用[J]. 电子测试, 2013(10):122-125.

- [5] BERGMANN J H M, ANASTASOVA-IVANOVA S, SPULBER I, et al. An Attachable Clothing Sensor System for Measuring Knee Joint Angles[J]. Sensors Journal IEEE, 2013, 13(10):4090-4097.
- [6] 王琨,骆敏舟,曹毅,等. 基于多变量预测补偿的机械臂精度提升方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11):1213-1221.
- [7] 张广蔚,付新雷,肖先华,等. 一种三维直角坐标转换 7 参数模型的改进方法[J]. 黑龙江科技信息, 2011, 4(4):22-22.
- [8] 李睿,曲兴华. 工业机器人运动学参数标定误差不确定度研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10):2192-2199.
- [9] 陈宇,白征东. 基于非线性最小二乘算法的空间坐标转换[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 2(2):129-132.
- [10] 杨凡,李广云,王力,等. 一种基于罗德里格矩阵的最小二乘迭代坐标转换方法[J]. 工程勘察, 2010, 38(9):80-84.
- [11] 姬金祖,束长勇,黄沛霖. 欧拉角在飞行航迹仿真中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(2):218-224.
- [12] 于洵,申双琴,徐岩,等. 一种基于陀螺的炮塔转角动态高精度测量方法[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(12):36-39.
- [13] 张沙沙. 基于骨骼蒙皮动画的虚拟人手势合成技术的研究[J]. 计算机光盘软件与应用, 2013(7):108-108.

作者简介

李文浩,1990 年出生,硕士,主要研究方向为医学图像处理、医疗软件开发。

E-mail:li2015lwh@163.com

葛云,1967 年出生,博士,教授,主要研究方向为医学物理、生物医学工程及医学图像处理。

E-mail:geyun@nju.edu.cn

陈颖,1976 年出生,博士,副教授,主要研究方向为生物医学信号及图像的处理和分析。

E-mail:yingchen@nju.edu.cn