



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110101388 A

(43)申请公布日 2019.08.09

(21)申请号 201910409506.0

(22)申请日 2019.05.17

(71)申请人 南京东奇智能制造研究院有限公司

地址 210008 江苏省南京市雨花台区宁双
路19号云密城10号楼9层

(72)发明人 费树岷 杨金显 黄晓晖

(74)专利代理机构 北京德崇智捷知识产权代理
有限公司 11467

代理人 王斌

(51) Int. Cl.

A61B 5/107(2006.01)

A61B 5/00(2006.01)

G16H 50/00(2018.01)

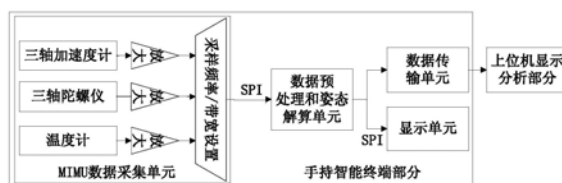
权利要求书3页 说明书8页 附图1页

(54)发明名称

一种基于MIMU的便携脊柱测量仪及方法

(57)摘要

本发明公开一种基于MIMU的便携脊柱测量仪,其特征在于包括手持智能终端,所述手持智能终端实现脊柱姿态测量功能,主要包括MIMU数据采集单元和数据预处理和姿态解算单元,所述MIMU数据采集单元利用三轴加速度计、三轴陀螺仪和温度计采集测量仪在脊柱上移动时的加速度、角速度和温度数据,并传输给所述数据预处理和姿态解算单元;所述数据预处理和姿态解算单元先进行温度漂移补偿,再采用时间序列分析和强跟踪卡尔曼滤波的处理算法,估计角速度和加速度零点偏差,进行数据零点偏差补偿,然后根据补偿后的加速度和角速度数据进行脊柱姿态解算。本发明脊柱测试仪操作简单,可即时快速三维角度动态测量,实时每个脊椎和脊柱姿态,测量精度更准确。



1. 一种基于MIMU的便携脊柱测量仪,其特征在于包括手持智能终端,所述手持智能终端实现脊柱姿态测量功能,主要包括MIMU数据采集单元和数据预处理和姿态解算单元,所述MIMU数据采集单元利用三轴加速度计、三轴陀螺仪和温度计采集测量仪在脊柱上移动时的加速度、角速度和温度数据,并传输给所述数据预处理和姿态解算单元;所述数据预处理和姿态解算单元先进行温度漂移补偿,再采用时间序列分析和强跟踪卡尔曼滤波的处理算法,估计角速度和加速度零点偏差,进行数据零点偏差补偿,然后根据补偿后的加速度和角速度数据进行脊柱姿态解算。

2. 如权利要求1所述的基于MIMU的便携脊柱测量仪,其特征在于所述手持智能终端包括数据显示单元,所述数据显示单元用于显示脊柱姿态,包括后凸角、侧凸角和侧弯角。

3. 如权利要求2所述的基于MIMU的便携脊柱测量仪,其特征在于所述数据显示单元为SPI接口的4线制的TFT真彩屏。

4. 如权利要求1所述的基于MIMU的便携脊柱测量仪,其特征在于包括上位机,所述手持智能终端包括数据传输单元,采用有线或无线传输模式,将姿态解算结果发送给所述上位机进行分析、显示。

5. 如权利要求4所述的基于MIMU的便携脊柱测量仪,其特征在于所述上位机采用LabVIEW实现界面编程,其分析、显示功能包括:测量数据波形图显示和保存;脊柱测量时脊柱的3D运动轨迹及姿态动态显示,对解算的脊柱姿态数据记录保存;远程读取,用于医护人员脊柱姿态分析。

6. 如权利要求1所述的基于MIMU的便携脊柱测量仪,其特征在于所述数据预处理和姿态解算单元由高速的嵌入式处理器、静/动态存储器、micro SD卡、外围辅助电子元件构成。

7. 如权利要求1所述的基于MIMU的便携脊柱测量仪,其特征在于所述MIMU数据采集单元采集的数据经过放大,根据设置的数据采样频率和带宽,通过SPI接口传输给所述数据预处理和姿态解算单元。

8. 权利要求1所述脊柱测量仪的姿态解算方法,其特征在于包括:

1) 坐标系转换及姿态描述:

坐标系定义如下:

基准坐标系n-系—— $Ox_n Y_n Z_n$: 根据脊柱测量需求,采用地理坐标系作为基准坐标系;

测量坐标系b-系—— $Ox_b Y_b Z_b$: 测量坐标系沿测量仪的三个坐标轴建立;其中,取测量仪的重心为b-系的原点, Ox_b 轴和 OY_b 轴在同一平面内且互相垂直, OZ_b 轴与测量仪轴线方向一致,且垂直于 Ox_b 轴和 OY_b 轴构成的平面;三轴加速度计和三轴陀螺仪固联于测量仪坐标系,并沿测量仪的三个轴向正交安装;

n-系到b-系的坐标变换矩阵为

$$C_n^b(\psi, \theta, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\gamma - \sin\psi \sin\theta \sin\gamma & \sin\psi \cos\gamma + \cos\psi \sin\theta \sin\gamma & -\sin\theta \sin\gamma \\ -\sin\psi \cos\theta & \cos\psi \cos\theta & \sin\theta \\ \cos\psi \sin\gamma + \sin\psi \sin\theta \cos\gamma & \sin\psi \sin\gamma - \cos\psi \sin\theta \cos\gamma & \cos\theta \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

基于上述坐标系描述,定义测量仪测量的侧弯角、后凸角和侧弯角,侧弯角 ϕ 定义为地磁北向沿逆时针方向与 OZ_b 轴在地平面的投影之间的夹角, ϕ 的取值范围为 $90^\circ \sim 90^\circ$;后凸角 θ 定义为 Ox_b 轴与地平面之间的夹角, θ 的取值范围为 $-90^\circ \sim +90^\circ$;侧凸角 γ 定义为 OY_b 轴与地平面之间的夹角, γ 的取值范围为 $90^\circ \sim \pm 90^\circ$;

在b-系中,测量仪稳定时沿三个轴向安装的加速度计只受到重力加速度的影响,此时加速度计实际测量值为重力加速度;在n-系中,重力矢量的方向始终朝下,而在其它轴向上的分量为零;重力加速度信号从b-系到n-系的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \\ a_{zc} \end{bmatrix} = C_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, C_n^b 为b-系到n-系的姿态变换矩阵, g_0 为重力加速度, a_{xc} , a_{yc} , a_{zc} 为重力加速度在b-系中三个轴向上的计算分量;

将式(1)代入式(2)得

$$\begin{cases} a_{xc} = g_0 \cos \theta \sin \gamma \\ a_{yc} = -g_0 \sin \theta \\ a_{zc} = -g_0 \cos \theta \cos \gamma \end{cases} \quad (3)$$

对(3)求解,采用测量仪中的加速度计数据计算后凸角 θ_a 和侧凸角 γ_a 为

$$\begin{cases} \theta_a = \tan^{-1} \frac{-a_y}{(a_x^2 + a_z^2)^{1/2}} \\ \gamma_a = \tan^{-1} \frac{a_x}{a_z} \end{cases} \quad (4)$$

其中, a_x , a_y , a_z 为加速度计输出数据;

当后凸角或侧凸角的大角度测量时, $a_z \rightarrow 0$, 导致 γ_a 角度大范围波动, 当 $\theta_a > 85$ 度时, 在

计算 γ_a 时补偿一个 a_y 项,
$$\begin{cases} \theta_a = \tan^{-1} \frac{-a_y}{(a_x^2 + a_z^2)^{1/2}} \\ \gamma_a = \tan^{-1} \frac{a_x}{(a_y^2 + a_z^2)^{1/2}} \end{cases};$$

2) 姿态矩阵也可用四元数表示为

$$C_n^b = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix};$$

初始四元数计算: 采用 θ_a 、 γ_a 、0初始化四元数

$$\begin{aligned} q_0 &= \cos(\gamma_a/2) \cos(\theta_a/2) \cos(\psi/2) + \sin(\gamma_a/2) \sin(\theta_a/2) \sin(\psi/2) \\ q_1 &= \sin(\gamma_a/2) \cos(\theta_a/2) \cos(\psi/2) - \cos(\gamma_a/2) \sin(\theta_a/2) \sin(\psi/2) \\ q_2 &= \cos(\gamma_a/2) \sin(\theta_a/2) \cos(\psi/2) + \sin(\gamma_a/2) \cos(\theta_a/2) \sin(\psi/2); \\ q_3 &= \cos(\gamma_a/2) \cos(\theta_a/2) \sin(\psi/2) - \sin(\gamma_a/2) \sin(\theta_a/2) \cos(\psi/2) \end{aligned}$$

更新四元数: 通过陀螺仪测量的三轴的加速度数据 g_x , g_y , g_z 计算四元数

$$\begin{aligned} q_0 &= q_0 + (-q_1 * g_x - q_2 * g_y - q_3 * g_z) * T / 2 \\ q_1 &= q_1 + (q_0 * g_x + q_2 * g_z - q_3 * g_y) * T / 2 \\ q_2 &= q_2 + (q_0 * g_y - q_1 * g_z + q_3 * g_x) * T / 2; \\ q_3 &= q_3 + (q_0 * g_z + q_1 * g_y - q_2 * g_x) * T / 2 \end{aligned}$$

利用陀螺仪数据获得的四元数计算后凸角 θ_g 、侧凸角 γ_g 和侧弯角 ψ_g :

$$\begin{aligned}\theta_g &= \sin^{-1}(-2(q_1 * q_3 + q_0 * q_2)) \\ \gamma_g &= \tan^{-1}(q_2 * q_3 + q_0 * q_1) / (q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2) ; \\ \psi_g &= \tan^{-1}(2(q_1 * q_2 + q_0 * q_3) / (q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2))\end{aligned}$$

采用加速度计输出的数据 a_x, a_y, a_z 解算的后凸角和侧凸角,由于 a_x, a_y, a_z 可能包含外界加速度,即不全是重力加速度,所以利用加速度计实际输出的数据得需要调节,设计自动调节参数 $k = \frac{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}{g_0^2}$,即 $k > 1$ 时,说明利用加速度计输出的数据解算的后凸角和侧弯角有一定的误差,和 k 有关, k 越大,误差越大,此时利用加速度解算的角度要小一些;当 $k \approx 1$ 时,完

全利用加速度解算的数据,即

$$\begin{aligned}\theta &= (1 - \frac{1}{k})\theta_g + \frac{1}{k}\theta_a ; \\ \gamma &= (1 - \frac{1}{k})\gamma_g + \frac{1}{k}\gamma_a\end{aligned}$$

3) 计算姿态矩阵下的重力加速度,即把重力加速度投影到姿态矩阵下,即得

$$C_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 \cos \theta \sin \gamma = a_{xc} \\ -g_0 \sin \theta = a_{yc} \\ -g_0 \cos \theta \cos \gamma = a_{zc} \end{bmatrix}, \text{如果姿态矩阵准确,则计算的重力加速度和三个轴向上输出的重}$$

力加速度是一样的,但实际上存在误差,设侧弯角误差 $\Delta \psi$,该误差正比于向量 $\begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \\ a_{zc} \end{bmatrix}$ 和向量 $\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}$ 的叉乘中的 $a_x * a_{yc} - a_y * a_{xc}$ 项,设比例系数为 p ,则 $\Delta \psi = p(a_x * a_{yc} - a_y * a_{xc})$,利用 $\Delta \psi$ 进行补

偿 ψ_g ,考虑加速度波动的影响,即 k 的影响,即侧弯角 $\psi = \psi_g - (1 - \frac{1}{k})\Delta \psi$;

$$\text{补偿后的后凸角、侧凸角和侧弯角为} \begin{cases} \theta = (1 - \frac{1}{k})\theta_g + \frac{1}{k}\theta_a \\ \gamma = (1 - \frac{1}{k})\gamma_g + \frac{1}{k}\gamma_a \\ \psi = \psi_g - (1 - \frac{1}{k})\Delta \psi \end{cases}。$$

一种基于MIMU的便携脊柱测量仪及方法

技术领域

[0001] 本发明专利公开了一种基于MIMU的便携脊柱测量仪,为医疗器械技术领域。

背景技术

[0002] 在门诊诊断过程中,脊柱外科医生需要得到脊柱侧弯的病人cobb角,在测量cobb角时需要在X光片上多处多道辅助线,并通过量角器测量出夹角,通过计算其补角方可得到最后结果即cobb角。在测量脊柱cobb角的过程中需要使用各种医疗器械,但是在测量过程中极易导致人为的出错,使用繁琐且可靠性不高,而针对脊柱的测量专用仪器则又存在着不易携带,设备笨重且使用成本高的弊端。

[0003] 目前,电子脊柱测量仪,如瑞士的Idiag SpinalMouse和以色列的SpineScanTM,其测量原理是一样的,基于大地倾角的测量,也即是三维电子重力角度感应技术;由于测量角度是根据重力三个轴向上计算的,必定会受重力提取精度的影响;由于一次只能测量一个角度,要想其他角度测量时,就必需得设计其他模式,导致测量操作繁琐;在大角度测量时,会存在很大的抖动误差;还有一种脊柱电子测量仪的核心测量传感器采用电阻式应变计或应变片,而应变是用来测量应力变化,一般测量微小变化,而脊柱可能大角度的变化,所以在测量原理上可能存在一些问题;另外,由于这些脊柱测量仪由主机、计算机、打印机组成,还不能做到便携。

发明内容

[0004] 近年来,MEMS惯性器件以其成本低、体积小、寿命长、集成化、抗冲击能力强和可靠性高等优势,成为姿态测量的首选器件。

[0005] 本发明的目的在于通过构建由三轴MEMS加速度计和三轴MEMS陀螺仪的MIMU惯性测量系统,通过脊柱测量仪在脊柱上滑动时的加速度和角速度,进而互补组合测量,同时高精度的解算出每个脊椎的三个角度(后凸角、侧凸角、侧弯角),进而就能获得整个脊柱的角度变化。

[0006] 脊柱测量仪主要包括两部分:手持智能终端测量部分和上位机分析显示部分。

[0007] 手持智能终端测量部分包括:MIMU数据采集单元、数据预处理和姿态解算单元、数据显示单元、数据传输单元,该智能终端测量部分实现姿态测量功能,可单独使用。

[0008] MIMU数据采集单元包括三轴加速度计、三轴陀螺仪和温度计,加速度计和陀螺仪输出加速度、角速度和温度数据,经过放大,根据设置的数据采样频率和带宽,经过SPI接口传输到数据预处理和姿态解算单元。

[0009] 数据预处理和姿态解算单元也即是脊柱姿态测量的核心单元,硬件上由高速的嵌入式处理器、静/动态存储器、micro SD卡、外围辅助电子元件构成,先进行温度漂移补偿,然后采用时间序列分析和强跟踪卡尔曼滤波的处理算法,估计角速度和加速度零点偏差,进行数据零点偏差补偿,然后根据补偿后的加速度和角速度数据进行姿态解算,并将原始加速度、角速度和脊柱姿态数据记录到micro SD卡。

[0010] 数据显示单元为SPI接口的4线制的TFT真彩屏。

[0011] 数据传输单元为无线传输,采用有线和无线传输模式,有线传输模式采用USB数据格式传输,无线传输采用蓝牙加密模式传输。

[0012] 上位机分析显示部分采用LabVIEW实现界面编程,其功能包括:

[0013] 1) 测量数据波形图显示和保存,即惯性测量数据(振动加速度和角速度);

[0014] 2) 脊柱测量时脊柱的3D运动轨迹及姿态动态显示,对解算的脊柱姿态数据

[0015] 记录保存;

[0016] 3) 远程读取,用于医护人员脊柱姿态分析。

[0017] 脊柱测量仪的姿态解算步骤如下。

[0018] 坐标系定义及其之间的转换关系是测量仪姿态解算的必备基础之一,坐标系定义坐标系及姿态描述:

[0019] 基准坐标系—— $Ox_nY_nZ_n$ (n-系):根据脊柱测量需求,采用地理坐标系作为基准坐标系。地理坐标系是相对于大地水平面定义的东北天坐标系,其原点位于地球表面, OZ_n 轴沿地心与坐标系原点的连线并指向天向,垂直于当地水平面。 Ox_nY_n 所组成的平面位于当地水平面内,两水平坐标轴分别指向东向和北向,三个坐标轴指向符合右手定则。

[0020] 测量坐标系—— $Ox_bY_bZ_b$ (b-系):测量坐标系沿测量仪的三个坐标轴建立。其中,取测量仪的重心为b-系的原点, Ox_b 轴和 OY_b 轴在同一平面内且互相垂直, OZ_b 轴与测量仪轴线方向一致,且垂直于 Ox_b 轴和 OY_b 轴构成的平面。三轴加速度计和三轴陀螺仪固联于测量仪坐标系,并沿测量仪的三个轴向正交安装。

[0021] 脊柱的姿态和侧弯角,是由测量仪b-系相对于n-系的方位关系确定的。根据欧拉定理可知,测量仪任一姿态都可以采用b-系相对n-系的一系列转动来描述。每次旋转的角度依次为侧弯角 ψ 、后凸角 θ 和侧凸角 γ ,即欧拉角。进一步,可得到n-系到b-系的坐标变换矩阵为

$$[0022] \quad C_n^b(\psi, \theta, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\gamma - \sin\psi \sin\theta \sin\gamma & \sin\psi \cos\gamma + \cos\psi \sin\theta \sin\gamma & -\sin\theta \sin\gamma \\ -\sin\psi \cos\theta & \cos\psi \cos\theta & \sin\theta \\ \cos\psi \sin\gamma + \sin\psi \sin\theta \cos\gamma & \sin\psi \sin\gamma - \cos\psi \sin\theta \cos\gamma & \cos\theta \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0023] 基于上述坐标系描述,可定义测量仪测量的侧弯角、后凸角和侧弯角,侧弯角 ψ 定义为地磁北向沿逆时针方向与 OZ_b 轴在地平面的投影之间的夹角, ψ 的取值范围为 $90^\circ \sim 90^\circ$;后凸角 θ 定义为 Ox_b 轴与地平面之间的夹角, θ 的取值范围为 $-90^\circ \sim +90^\circ$;侧凸角 γ 定义为 OY_b 轴与地平面之间的夹角, γ 的取值范围为 $90^\circ \sim \pm 90^\circ$ 。

[0024] 在b-系中,测量仪稳定时沿三个轴向安装的加速度计只受到重力加速度的影响,此时加速度计实际测量值为重力加速度。在n-系中,重力矢量的方向始终朝下,而在其它轴向上的分量为零。重力加速度信号从b-系到n-系的转换关系为:

$$[0025] \quad \begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \\ a_{zc} \end{bmatrix} = C_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0026] 其中, C_n^b 为b-系到n-系的姿态变换矩阵, g 为重力加速度, a_{xc} , a_{yc} , a_{zc} 为重力加速度在b-系中三个轴向上的计算分量。

[0027] 将式(1)代入式(2)得

$$[0028] \begin{cases} a_{xc} = g \cos \theta \sin \gamma \\ a_{yc} = -g \sin \theta \\ a_{zc} = -g \cos \theta \cos \gamma \end{cases} \quad (3)$$

[0029] 对(3)求解,可采用测量仪中的加速度计数据计算后凸角 θ_a 和侧凸角 γ_a 为

$$[0030] \begin{cases} \theta_a = \tan^{-1} \frac{-a_y}{(a_x^2 + a_z^2)^{1/2}} \\ \gamma_a = \tan^{-1} \frac{g_x}{g_z} \end{cases} \quad (4)$$

[0031] 当后凸角或侧凸角的大角度测量时, $a_z \rightarrow 0$,导致 γ_a 角度大范围波动,当 $\theta_a > 85$ 度

时,在计算 γ_a 时补偿一个 a_y 项,
$$\begin{cases} \theta_a = \tan^{-1} \frac{-a_y}{(a_x^2 + a_z^2)^{1/2}} \\ \gamma_a = \tan^{-1} \frac{g_x}{(a_y^2 + a_z^2)^{1/2}} \end{cases}。$$

[0032] 姿态矩阵也可用四元数表示为

$$[0033] C_n^b = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}。$$

[0034] 初始四元数计算:采用 θ_a 、 γ_a 、0初始化四元数

$$q_0 = \cos(\gamma_a/2) \cos(\theta_a/2) \cos(\psi/2) + \sin(\gamma_a/2) \sin(\theta_a/2) \sin(\psi/2)$$

$$[0035] q_1 = \sin(\gamma_a/2) \cos(\theta_a/2) \cos(\psi/2) - \cos(\gamma_a/2) \sin(\theta_a/2) \sin(\psi/2)$$

$$q_2 = \cos(\gamma_a/2) \sin(\theta_a/2) \cos(\psi/2) + \sin(\gamma_a/2) \cos(\theta_a/2) \sin(\psi/2)。$$

$$q_3 = \cos(\gamma_a/2) \cos(\theta_a/2) \sin(\psi/2) - \sin(\gamma_a/2) \sin(\theta_a/2) \cos(\psi/2)$$

[0036] 更新四元数:通过陀螺仪测量的三轴角速度数据 g_x, g_y, g_z 计算四元数

$$q_0 = q_0 + (-q_1 * g_x - q_2 * g_y - q_3 * g_z) * T / 2$$

$$[0037] q_1 = q_1 + (q_0 * g_x + q_2 * g_z - q_3 * g_y) * T / 2$$

$$q_2 = q_2 + (q_0 * g_y - q_1 * g_z + q_3 * g_x) * T / 2。$$

$$q_3 = q_3 + (q_0 * g_z + q_1 * g_y - q_2 * g_x) * T / 2$$

[0038] 利用陀螺仪数据获得的四元数计算后凸角 θ_g 、侧凸角 γ_g 和侧弯角 ψ_g :

$$\theta_g = \sin^{-1}(-2(q_1 * q_3 + q_0 * q_2))$$

$$[0039] \gamma_g = \tan^{-1}(q_2 * q_3 + q_0 * q_1) / (q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2)。$$

$$\psi_g = \tan^{-1}(2(q_1 * q_2 + q_0 * q_3) / (q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2))$$

[0040] 采用加速度计输出的数据 a_x, a_y, a_z 解算的后凸角和侧凸角,由于 a_x, a_y, a_z 可能包含外界加速度,即不全是重力加速度,所以利用加速度计实际输出的数据需要调节,设计自动

调节参数 $k = \frac{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}{g_0^2}$,即 $k > 1$ 时,说明利用加速度计输出的数据解算的后凸角和侧弯角

有一定的误差,和k有关,k越大,误差越大,此时利用加速度解算的角度小一些;当 $k \approx 1$ 时,利用加速度解算数据,即

$$[0041] \quad \begin{aligned} \theta &= (1 - \frac{1}{k})\theta_g + \frac{1}{k}\theta_a \\ \gamma &= (1 - \frac{1}{k})\gamma_g + \frac{1}{k}\gamma_a \end{aligned}$$

[0042] 计算姿态矩阵下的重力加速度,即把重力加速度投影到姿态矩阵下,即得

$$C_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 \cos \theta \sin \gamma = a_{xc} \\ -g_0 \sin \theta = a_{yc} \\ -g_0 \cos \theta \cos \gamma = a_{zc} \end{bmatrix}, \text{如果姿态矩阵准确,则计算的重力加速度和三个轴向上输出的重}$$

力加速度是一样的,但实际上存在误差,设侧弯角误差 $\Delta \psi$,该误差正比于向量 $\begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \\ a_{zc} \end{bmatrix}$ 和向量

$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}$ 的叉乘中的 $a_x * a_{yc} - a_y * a_{xc}$ 项,设比例系数为p,则 $\Delta \psi = p(a_x * a_{yc} - a_y * a_{xc})$,利用 $\Delta \psi$ 进行补

偿 ψ_g ,考虑加速度波动的影响,即k的影响,即侧弯角 $\psi = \psi_g - (1 - \frac{1}{k})\Delta \psi$ 。

$$[0043] \quad \text{补偿后的后凸角、侧凸角和侧弯角为} \begin{cases} \theta = (1 - \frac{1}{k})\theta_g + \frac{1}{k}\theta_a \\ \gamma = (1 - \frac{1}{k})\gamma_g + \frac{1}{k}\gamma_a \\ \psi = \psi_g - (1 - \frac{1}{k})\Delta \psi \end{cases}$$

[0044] 本发明脊柱测试仪无需用户自定义、操作简单、无创、可即时快速度三维角度动态测量,实时每个脊椎和脊柱姿态,测量精度更准确,不仅仅应用于脊柱姿态测量,可广泛应用于其他场合,如学校、儿保科、骨科、康复科、运动医学研究所、人体解剖实验室、生理实验室、保健实验室、国民体质监测中心、社区保健中心、疗养院、体检中心、老年医学等的姿态测量。

附图说明

[0045] 图1是本发明脊柱测量仪系统结构;

[0046] 图2是本发明脊柱测量仪姿态解算流程。

具体实施方式

[0047] 如图1所示脊柱测量仪系统结构图。

[0048] 脊柱测量仪主要包括两部分:手持智能终端测量部分和上位机分析显示部分。

[0049] 手持智能终端测量部分包括:MIMU数据采集单元、数据预处理和姿态解算单元、数据显示单元、数据传输单元。

[0050] MIMU数据采集单元传感器硬件采用三轴模拟硅微MEMS陀螺PA-3ARG-01, QFN封装, 供电电压5V, 尺寸25mm×25mm×24mm, 具有SPI接口, 角速率分辨率为0.0625dps/LSB, 动态可选的全量程范围($\pm 250/\pm 500/\pm 1000/\pm 2000^\circ/s$), 输出数据频率(ODR)范围:12.5Hz至800Hz; 加速度计采用CoLibrys的MS9000系列加速度计, 具有从 $\pm 2g$ 到 $\pm 250g$ 大范围量程, 超小型LCC20封装(8.9mm×8.9mm), 加速度计和陀螺仪输出加速度和角速度数据, 经过谐振电路放大, 采用二阶系统设置数据采样频率和带宽, 再经过SPI接口传输到数据预处理和姿态解算单元。

[0051] 数据预处理和姿态解算单元也即是脊柱姿态测量的核心单元, 硬件上采用STM32F4系列处理器, 32-bit, 处理速度168MHz, 具有多种接口CAN, DCMI, EBI/EMI, 以太网, I2C, IrDA, LIN, SPI, UART/USART, USB OTG等, 自带A/D24x12b数据接口, 程序存储器容量1MB, RAM容量192K, 外接256G Micro SD卡, 对接收的加速度、角速度和温度, 先进行温度漂移补偿, 然后采用时间序列分析和强跟踪卡尔曼滤波的处理算法, 估计角速度和加速度零点偏差, 进行数据零点偏差补偿, 再根据补偿后的加速度(a_x, a_y, a_z)和角速度(g_x, g_y, g_z)数据进行姿态解算, 并对手持智能终端部分测量数据进行记录, 保存到Micro SD卡中, 用于后期数据分析。

[0052] 数据显示单元采用SPI接口的4线制TFT真彩屏。

[0053] 数据传输单元为无线传输, 采用有线和无线传输模式, 有线传输模式采用USB数据格式传输, 无线传输采用蓝牙加密模式传输, 可利用小型蓝牙MS50SF A1M进行数据传输。

[0054] 脊柱测量仪使用非常便捷, 打开电源开关, 沿着脊柱移动即可, 数据显示单元就能显示姿态数据, 包括后凸角、侧凸角和侧弯角。

[0055] 上位机分析显示部分采用LabVIEW实现界面编程, 其功能包括:

[0056] 1) 测量数据波形图显示和保存, 即惯性测量数据(振动加速度和角速度);

[0057] 2) 脊柱测量时脊柱的3D运动轨迹及姿态动态显示, 对解算的脊柱姿态数据记录保存;

[0058] 3) 远程读取, 用于医护人员脊柱姿态分析。

[0059] 脊柱测量仪的姿态解算步骤如下。

[0060] 坐标系定义及其之间的转换关系是测量仪姿态解算的必备基础之一, 坐标系定义坐标系及姿态描述如下。

[0061] 基准坐标系—— $OX_nY_nZ_n$ (n -系): 根据脊柱测量需求, 采用地理坐标系作为基准坐标系。地理坐标系是相对于大地水平面定义的东北天坐标系, 其原点位于地球表面, OZ_n 轴沿地心与坐标系原点的连线并指向天向, 垂直于当地水平面。 OX_nY_n 所组成的平面位于当地水平面内, 两水平坐标轴分别指向东向和北向, 三个坐标轴指向符合右手定则。

[0062] 测量坐标系—— $OX_bY_bZ_b$ (b -系): 测量坐标系沿测量仪的三个坐标轴建立。其中, 取测量仪的重心为 b -系的原点, OX_b 轴和 OY_b 轴在同一平面内且互相垂直, OZ_b 轴与测量仪轴线方向一致, 且垂直于 OX_b 轴和 OY_b 轴构成的平面。三轴加速度计和三轴陀螺仪固联于测量仪坐标系, 并沿测量仪的三个轴向正交安装。

[0063] 脊柱的姿态和侧弯角, 是由测量仪 b -系相对于 n -系的方位关系确定的。根据欧拉定理可知, 测量仪任一姿态都可以采用 b -系相对 n -系的一系列转动来描述。每次旋转的角度依次为侧弯角 ψ 、后凸角 θ 和侧凸角 γ , 即欧拉角。进一步, 可得到 n -系到 b -系的坐标变换

矩阵为

$$[0064] \quad C_n^b(\psi, \theta, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\gamma - \sin\psi \sin\theta \sin\gamma & \sin\psi \cos\gamma + \cos\psi \sin\theta \sin\gamma & -\sin\theta \sin\gamma \\ -\sin\psi \cos\theta & \cos\psi \cos\theta & \sin\theta \\ \cos\psi \sin\gamma + \sin\psi \sin\theta \cos\gamma & \sin\psi \sin\gamma - \cos\psi \sin\theta \cos\gamma & \cos\theta \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0065] 基于上述坐标系描述,可定义测量仪测量的侧弯角、后凸角和侧弯角,侧弯角 ψ 定义为地磁北向沿逆时针方向与 OZ_b 轴在地平面的投影之间的夹角, ψ 的取值范围为 $180^\circ \sim 180^\circ$;后凸角 θ 定义为 OX_b 轴与地平面之间的夹角, θ 的取值范围为 $-90^\circ \sim +90^\circ$;侧凸角 γ 定义为 OY_b 轴与地平面之间的夹角, γ 的取值范围为 $90^\circ \sim \pm 90^\circ$ 。

[0066] 其姿态解算流程,如图2所示。

[0067] 在b-系中,测量仪稳定时沿三个轴向安装的加速度计只受到重力加速度的影响,此时加速度计实际测量值为重力加速度。在n-系中,重力矢量的方向始终朝下,而在其它轴向上的分量为零。重力加速度信号从b-系到n-系的转换关系为:

$$[0068] \quad \begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \\ a_{zc} \end{bmatrix} = C_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0069] 其中, C_n^b 为b-系到n-系的姿态变换矩阵, g_0 为重力加速度。

[0070] 将式(1)代入式(2)得

$$[0071] \quad \begin{cases} a_{xc} = g_0 \cos\theta \sin\gamma \\ a_{yc} = -g_0 \sin\theta \\ a_{zc} = -g_0 \cos\theta \cos\gamma \end{cases} \quad (3)$$

[0072] 对(3)求解,则可利用测量仪预处理后的加速度计数据 a_x, a_y, a_z 计算的后凸角 θ_a 和侧凸角 γ_a 为

$$[0073] \quad \begin{cases} \theta_a = \tan^{-1} \frac{-a_y}{(a_x^2 + a_z^2)^{1/2}} \\ \gamma_a = \tan^{-1} \frac{a_x}{a_z} \end{cases} \quad (4)$$

[0074] 当后凸角或侧凸角的大角度测量时, $a_z \rightarrow 0$,导致 γ_a 角度大范围波动,当 $\theta_a > 85^\circ$ 度

时,在计算 γ_a 时补偿一个 a_y 项,
$$\begin{cases} \theta_a = \tan^{-1} \frac{-a_y}{(a_x^2 + a_z^2)^{1/2}} \\ \gamma_a = \tan^{-1} \frac{g_x}{(a_y^2 + a_z^2)^{1/2}} \end{cases}。$$

[0075] 姿态矩阵也可用四元数表示:

$$[0076] \quad C_n^b(q_0, q_1, q_2, q_3) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

[0077] 初始四元数计算:采用 $\theta_a, \gamma_a, 0$ 初始化四元数

$$\begin{aligned}
 q_0 &= \cos(\gamma_a / 2) \cos(\theta_a / 2) \cos(\psi / 2) + \sin(\gamma_a / 2) \sin(\theta_a / 2) \sin(\psi / 2) \\
 q_1 &= \sin(\gamma_a / 2) \cos(\theta_a / 2) \cos(\psi / 2) - \cos(\gamma_a / 2) \sin(\theta_a / 2) \sin(\psi / 2) \\
 q_2 &= \cos(\gamma_a / 2) \sin(\theta_a / 2) \cos(\psi / 2) + \sin(\gamma_a / 2) \cos(\theta_a / 2) \sin(\psi / 2) \\
 q_3 &= \cos(\gamma_a / 2) \cos(\theta_a / 2) \sin(\psi / 2) - \sin(\gamma_a / 2) \sin(\theta_a / 2) \cos(\psi / 2)
 \end{aligned}$$

[0079] 四元数更新:通过陀螺仪测量的三轴的数据 g_x, g_y, g_z 计算四元数

$$\begin{aligned}
 q_0 &= q_0 + (-q_1 * g_x - q_2 * g_y - q_3 * g_z) * T / 2 \\
 q_1 &= q_1 + (q_0 * g_x + q_2 * g_z - q_3 * g_y) * T / 2 \\
 q_2 &= q_2 + (q_0 * g_y - q_1 * g_z + q_3 * g_x) * T / 2 \\
 q_3 &= q_3 + (q_0 * g_z + q_1 * g_y - q_2 * g_x) * T / 2
 \end{aligned}$$

,T为采样周期。

[0080] 利用陀螺仪数据获得的四元数计算姿态角:

$$\theta_g = a \sin(-2(q_1 * q_3 + q_0 * q_2))$$

$$\gamma_g = a \tan 2(q_2 * q_3 + q_0 * q_1) / (q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2)。$$

$$\psi_g = a \tan(2(q_1 * q_2 + q_0 * q_3) / (q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2))$$

[0082] 采用加速度计输出的数据 a_x, a_y, a_z 解算的后凸角和侧凸角,由于 a_x, a_y, a_z 可能包含外界加速度,即不全是重力加速度,所以利用加速度计实际输出的数据需要调节,设计自动

调节参数 $k = \frac{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}{g_0^2}$,即 $k > 1$ 时,说明利用加速度计输出的数据解算的后凸角和侧弯角

有一定的误差,和 k 有关, k 越大,误差越大,此时利用加速度解算的角度小一些;当 $k \approx 1$ 时,利用加速度解算数据,即

$$\begin{aligned}
 \theta &= (1 - \frac{1}{k})\theta_g + \frac{1}{k}\theta_a \\
 \gamma &= (1 - \frac{1}{k})\gamma_g + \frac{1}{k}\gamma_a
 \end{aligned}$$

[0084] 计算姿态矩阵下的重力加速度,即把重力加速度投影到姿态矩阵下,即得

$$C_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 \cos \theta \sin \gamma = a_{xc} \\ -g_0 \sin \theta = a_{yc} \\ -g_0 \cos \theta \cos \gamma = a_{zc} \end{bmatrix}, \text{如果姿态矩阵准确,则计算的重力加速度和三个轴向上输出的重}$$

力加速度是一样的,但实际上存在误差,设侧弯角误差 $\Delta \psi$,该误差正比于向量 $\begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \\ a_{zc} \end{bmatrix}$ 和向量

$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}$ 的叉乘中的 $a_x * a_{yc} - a_y * a_{xc}$ 项,设比例系数为 p ,则 $\Delta \psi = p(a_x * a_{yc} - a_y * a_{xc})$,利用 $\Delta \psi$ 进行补

偿 ψ_g ,考虑加速度波动的影响,即 k 的影响,即侧弯角 $\psi = \psi_g - (1 - \frac{1}{k})\Delta \psi$ 。

[0085] 补偿后的后凸角、侧凸角和侧弯角为

$$\begin{cases} \theta = (1 - \frac{1}{k})\theta_g + \frac{1}{k}\theta_a \\ \gamma = (1 - \frac{1}{k})\gamma_g + \frac{1}{k}\gamma_a \\ \psi = \psi_g - (1 - \frac{1}{k})\Delta\psi \end{cases} \circ$$

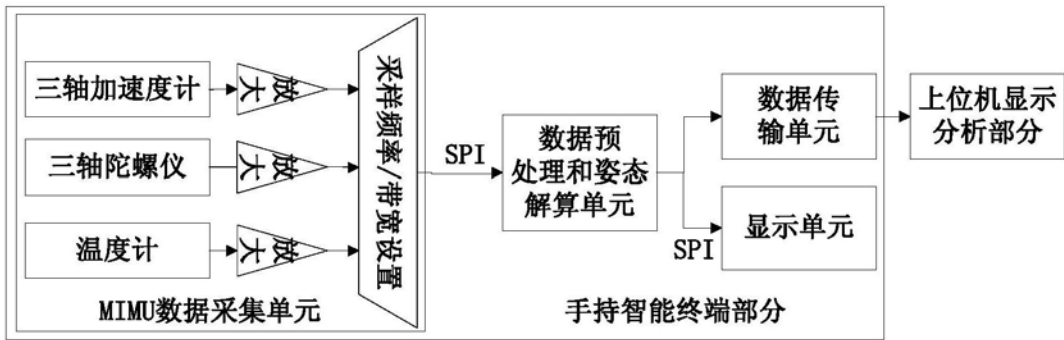


图1

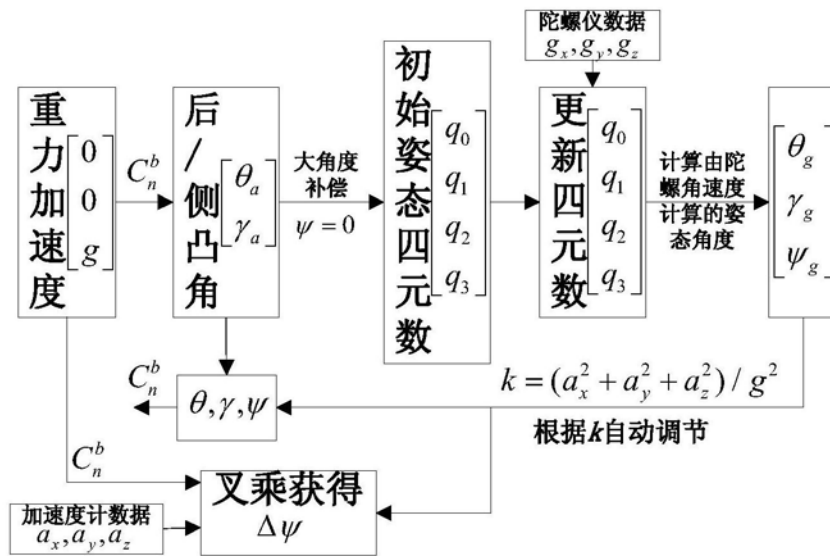


图2

专利名称(译)	一种基于MIMU的便携脊柱测量仪及方法		
公开(公告)号	CN110101388A	公开(公告)日	2019-08-09
申请号	CN201910409506.0	申请日	2019-05-17
[标]发明人	费树岷 杨金显 黄晓晖		
发明人	费树岷 杨金显 黄晓晖		
IPC分类号	A61B5/107 A61B5/00 G16H50/00		
CPC分类号	A61B5/1071 A61B5/1075 A61B5/1077 A61B5/72 G16H50/00		
代理人(译)	王斌		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

本发明公开一种基于MIMU的便携脊柱测量仪，其特征在于包括手持智能终端，所述手持智能终端实现脊柱姿态测量功能，主要包括MIMU数据采集单元和数据预处理和姿态解算单元，所述MIMU数据采集单元利用三轴加速度计、三轴陀螺仪和温度计采集测量仪在脊柱上移动时的加速度、角速度和温度数据，并传输给所述数据预处理和姿态解算单元；所述数据预处理和姿态解算单元先进行温度漂移补偿，再采用时间序列分析和强跟踪卡尔曼滤波的处理算法，估计角速度和加速度零点偏差，进行数据零点偏差补偿，然后根据补偿后的加速度和角速度数据进行脊柱姿态解算。本发明脊柱测试仪操作简单，可即时快速度三维角度动态测量，实时每个脊椎和脊柱姿态，测量精度更准确。

