

文章编号: 2095-2163(2021)06-0185-05

中图分类号: TP24

文献标志码: A

# 基于 IMU 的无线姿态采集系统设计

张夏丰, 袁梦飞, 李令环, 杨孙运

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 本文针对行为分析中姿态识别问题, 提出并设计了一款基于 IMU 的无线姿态采集系统。首先, 采用 9 轴 IMU、STM32L0 主控以及低功耗蓝牙模块设计了大小仅为  $7\times 7\times 3$  mm 的小体积、低功耗无线姿态识别硬件环境; 其次, 设计上位机软件接收、解析以及保存姿态数据; 最后, 通过小鼠跑台实验对所设计姿态采集装置进行验证, IMU 采集姿态数据经过主控模块处理后通过蓝牙模块将数据上传至上位机, 由上位机解析并保存姿态数据。结果表明, 基于 IMU 的无线姿态采集系统识别具有良好的效果。

**关键词:** IMU; 姿态采集; 低功耗

## Design of wireless attitude acquisition system based on IMU

ZHANG Xiaofeng, YUAN Mengfei, LI Linghuan, YANG Sunyun

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** An IMU-based wireless posture acquisition system is proposed and designed for the posture recognition problem in behavior analysis. Firstly, a small and low-power,  $7\times 7\times 3$  mm wireless posture recognition hardware environment is designed using a 9-axis IMU, STM32L0 host controller and a low-power Bluetooth module. Secondly, a host computer software is designed to receive, analyze and save the posture data. Finally, the designed posture acquisition device is verified by a mouse runway experiment. After processing, the data is uploaded to the host computer via Bluetooth module, and the host computer parses and saves the attitude data. The results show that the IMU-based wireless attitude acquisition system has a good effect on attitude recognition.

**[Key words]** IMU; attitude acquisition; low power consumption

## 0 引言

姿态识别在医学领域、生物研究领域等多个学科领域有着广泛的应用。实验鼠是常用的实验动物, 在神经科学、生物科学、药物开发等领域将实验鼠行为的检测与分析作为一种重要的方法进行研究, 在药物的毒理、药理研究中具有重要的价值<sup>[1-2]</sup>。传统的实验鼠姿态识别主要是通过人眼观察来实现, 这种方法对观察者经验要求较高, 受主观影响较大, 且难以进行长时间记录<sup>[3]</sup>。随着图像处理技术的发展, 基于图像方法的生物姿态自动检测方法取得了较大的进步。通过提取图像中实验鼠轮廓进行行为识别<sup>[4]</sup>; 将深度学习应用于图像中, 对实验鼠进行识别<sup>[5]</sup>。但是, 数字图像处理方法的实质是忽略动物体态及其变化, 将动物看做质点, 仅反映动物运动状态, 获得相关的运动参数, 对小鼠的姿

态细节的捕捉效果不佳, 并且该方法成本较高。

正确识别实验鼠的姿态对于众多学科领域的实验研究有着十分重要的作用。针对上述问题, 本文采用低成本的 9 轴 IMU, 设计了一款基于 IMU 的无线姿态采集系统, 其中硬件仅有  $7\times 7\times 3$  mm 大小。相对于其它方法, 该系统可通过将传感器安置在实验鼠背部或其它需要采集的位置, 可以对实验鼠的姿态细节进行更精细定量的行为记录研究, 效果较好。

## 1 系统设计

无线姿态采集系统由 9 轴 IMU 模块、无线通信模块、姿态采集模块、STM32L0 主控制器模块以及上位机软件组成。本文所设计基于 IMU 的无线姿态采集系统流程图, 如图 1 所示。所设计姿态采集系统硬件模块体积仅为  $7\times 7\times 3$  mm, 具有很好的便

**作者简介:** 张夏丰(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 生物信号的采集及应用; 袁梦飞(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 数据处理与智能优化算法; 李令环(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 生理信号采集及分析; 杨孙运(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能感知、智能控制、数据分析。

收稿日期: 2020-12-07

携性和可穿戴性。

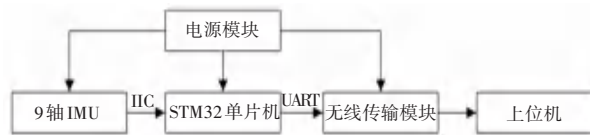


图1 采集系统流程图

Fig. 1 Flow chart of acquisition system

为实现便携化设计,本文采集系统供电模块为3.7 V 锂电池。IMU 模块采集运动姿态信息,并通过 IIC 通讯向主控模块输出加速度、角速度以及地磁等姿态数据。主控模块接收 IMU 模块数据后将数据打包,并通过无线传输模块将数据传至上位机。上位机接收模块上传数据并针对数据进行解析与分析。

## 2 硬件系统设计

### 2.1 电源模块设计

采集系统硬件电源由3.7 V 锂电池提供,但各硬件模块电压需求为1.8 V,本文选用 RT9073A-18GQZ 作为电源模块,将3.7 V 锂电池电压转换为系统需要的1.8 V 电压。RT9073A 是台湾立锜推出的一款低压差线性稳压器(LDO),具有体积小、输出电流大等特点,最高可提供250 mA 负载电流。电源模块电路原理如图2所示。

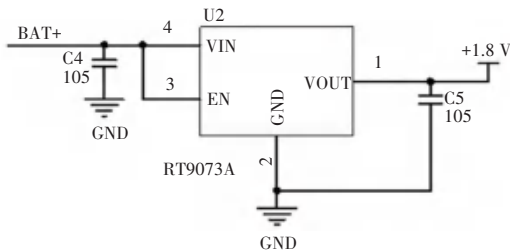


图2 电源模块

Fig. 2 Power supply module

### 2.2 姿态采集模块设计

姿态采集模块由 TDK 公司推出的9轴 MEMS 运动传感器 ICM20948 及其外围电路组成。ICM20948 是一款小体积、低功耗姿态采集芯片。姿态采集传感器电路原理图如图3所示,其内部集成有三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴地磁,且三者测量范围分别可达到 $\pm 16\text{ g}$ 、 $\pm 2\ 000\text{ dps}$ 以及 $\pm 4\ 900\ \mu\text{T}$ 。芯片在9轴模式下工作时,功耗仅为2.5 mW。芯片支持低至1.71 V 的供电电压,可通过 IIC 或 SPI 通讯接口对外通讯,本文采用 IIC 通讯接口与主控模块进行通讯。

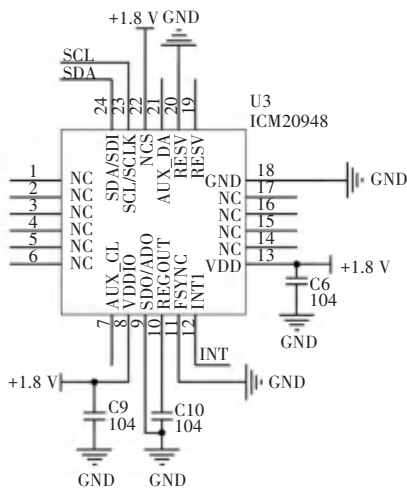


图3 姿态采集模块

Fig. 3 Attitude acquisition module

### 2.3 主控模块设计

主控模块在系统中负责接收姿态传感器数据,并将处理后的数据通过无线传输模块传至上位机,本文选用 STM32L011 单片机作为系统主控制器。STM32L0 系列单片机是意法半导体公司推出的基于 Cortex-M0+内核的32位低功耗系列单片机,运行时系统功耗低至 $76\ \mu\text{A}/\text{MHz}$ <sup>[6]</sup>。芯片内部资源主要有1个 IIC、1个 SPI、7个定时器、1个 USART 以及1个低功耗 UART 并带有16 M 内部高速时钟。主控模块电路原理图如图4所示,模块供电电压为1.8 V,其中 PA4 引脚为电池电压采集引脚,通过 R2、R3 实现对电池电压的采集。PA9、PA10 为与姿态采集模块进行 IIC 通讯的 SCL 与 SDA 引脚,所接 R4、R5 为上拉电阻,PA0 与 PA1 为串口通讯引脚,负责与无线传输模块通讯。

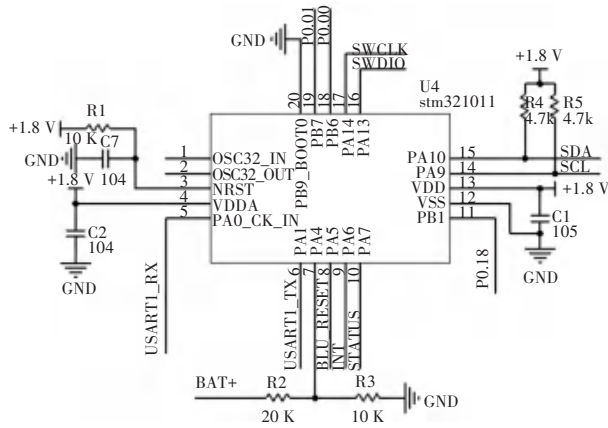


图4 主控模块

Fig. 4 Main control module

### 2.4 无线传输模块设计

为实现数据的上传,系统采用宏佳电子推出的 HJ-185 蓝牙设计了无线传输模块。HJ-185 是一款

主从一体低功耗蓝牙模块, 支持 BLE5.1, 模块内置通讯距离可达到 10~20 m 的高性能天线, 模块最大发射功率达到 +4 dBm, 休眠时电流仅 2  $\mu$ A。系统工作时模块接收主控模块数据, 并将数据上传至上位机。模块电路原理图如图 5 所示。

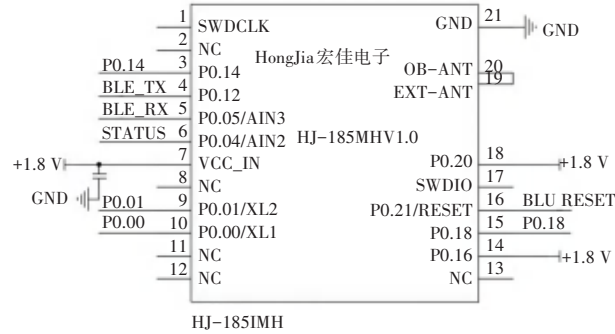


图 5 无线通讯模块

Fig. 5 Wireless communication module

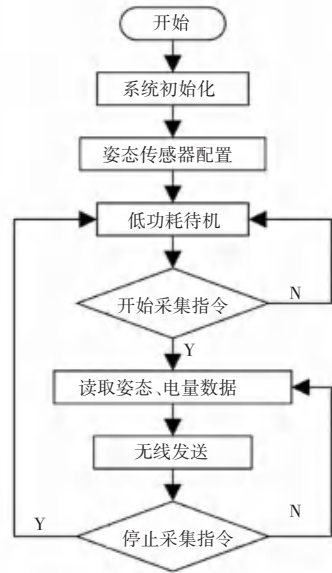


图 6 下位机软件流程图

Fig. 6 Software flow chart of lower computer

### 3 软件系统设计

#### 3.1 下位机软件设计

下位机软件流程如图 6 所示。上电后首先进行系统初始化, 再配置姿态传感器寄存器参数并进入低功耗待机状态, 等待上位机指令。当接收到上位机下发开始采集指令后, 单片机通过 IIC 通讯协议分别读取姿态传感器内各寄存器中加速度计、陀螺仪、地磁数据, 同时读取 ADC 所采集当前电池电压值。单片机接收到所需数据后按照传输协议对数据进行打包, 并以 16 进制格式通过串口将打包后数据发送至无线传输模块, 由无线传输模块传输至上位机, 当上位机下发停止采集指令时, 系统重新进入低功耗待机状态。

#### 3.2 姿态解算

为减少底层功耗并提高系统的实时性, 本文中姿态解算部分交由解算能力较强的上位机来完成。

导航坐标系为  $Ox_n Y_n Z_n$ , 载体坐标系为  $Ox_b Y_b Z_b$ 。  $X_n, Y_n, Z_n$  分别指向东、北、天,  $X_b, Y_b, Z_b$  分别指向右、前、上, 如图 7 所示。姿态角是载体坐标系相对于导航坐标系的方向关系<sup>[7]</sup>。

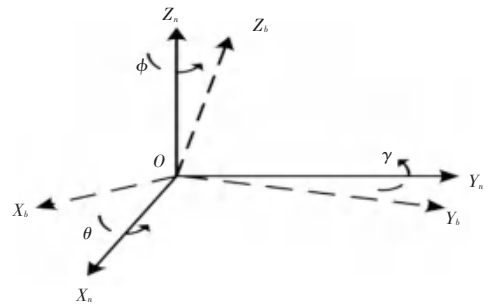


图 7 导航坐标系和载体坐标系

Fig. 7 Navigation coordinate system and carrier coordinate system

导航坐标系下的参数转换到载体坐标系下可以依次绕 Z, Y, X 旋转  $\alpha, \beta, \gamma$  得到, 旋转变换矩阵为式(1):

$$C_n^b = \begin{bmatrix} \hat{e}_n^T \cos \beta \cos \alpha & \cos \beta \sin \alpha & -\sin \beta \\ \hat{e}_n^T \sin \gamma \cos \alpha \sin \beta - \cos \gamma \sin \alpha & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \cos \beta \\ \hat{e}_n^T \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \cos \beta \end{bmatrix} \hat{u}_b \quad (1)$$

常用的姿态解析方法有欧拉角法、四元数法、方向余弦法和等效旋转矢量法<sup>[8]</sup>。本文选用计算量较少、可全姿态工作的四元数法对数据进行进一步计算, 得到航向角、俯仰角与滚转角姿态信息以方便后续数据解析。四元数  $q$  的表达式(2):

$$q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k. \quad (2)$$

其中,  $i, j, k$  分别为 3 个方向轴上的单位向量, 且  $\|q\| = 1$ , 则物体导航坐标系到载体坐标系的旋

转矩阵用四元数表示为式(3):

$$C_n^b(q) = \begin{bmatrix} \hat{e}_n^T q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ \hat{e}_n^T 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ \hat{e}_n^T 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \hat{u}_b \quad (3)$$

通过式(1)与式(3)的关系可求得航向角  $\alpha$ 、俯

仰角  $\beta$ 、滚转角  $\gamma$ 。表达式为式(4):

$$\begin{cases} \alpha = \arctan(2(q_1q_2 + q_0q_3), q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2), \\ \beta = \arcsin(-2(q_1q_3 - q_0q_2)), \\ \gamma = \arctan(2(q_2q_3 + q_0q_1), q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2). \end{cases} \quad (4)$$

在进行多种数据融合解算姿态时,为保证解算结果的正确性,需要进行误差修正。加速度计、陀螺仪、磁力计3种器件中陀螺仪具有较好的动态特性,但长时间工作时存在着一定的累积误差。加速度计和陀螺仪虽然不存在累积误差,但动态性能较差。通过扩展卡尔曼滤波(EKF)算法对3种数据进行融合,能有效提高数据解算后的精度和动态特性<sup>[9]</sup>。EKF姿态解算过程主要有以下6个步骤:

(1)状态量初始化:

给定状态量初值  $X_0$  和误差协方差矩阵  $P_0$ 。

(2)依据初始量进行状态预测,式(5):

$$X_{k/k-1} = F_{k-1}X_{k-1/k-1}. \quad (5)$$

其中,  $X_{k-1/k-1}$  表示系统  $k-1$  时刻估计  $k$  时刻的状态量,状态量设为:  $X_k = [q_0(k) \ q_1(k) \ q_2(k) \ q_3(k)]^T$ ;  $F_{k-1}$  为  $k-1$  时刻的状态转移矩阵;  $W_{k-1}$  为  $k-1$  时刻系统的状态噪声。

(3)其中协方差预测过程,式(6):

$$P_{k/k-1} = F_{k-1}P_{k-1/k-1}F_{k-1}^T + Q_{k-1}. \quad (6)$$

其中,  $Q_{k-1}$  为过程噪声方差矩阵。

(4)EKF增益计算,式(7):

$$K_k = P_{k/k-1}H_k^T [H_k P_{k/k-1}H_k^T + R_k]^{-1}. \quad (7)$$

其中,  $H_k$  为  $k$  时刻的观测矩阵,  $R_k$  为  $k$  时刻测量噪声方差矩阵。

(5)依据结果进行协方差更新与状态更新,公式(8)和公式(9):

$$P_{k/k} = (I - K_k H_k) P_{k/k-1}. \quad (8)$$

其中,  $I$  为单位矩阵。

$$X_{k/k} = X_{k/k-1} + K_k [Z_k - H_k X_{k/k-1}]. \quad (9)$$

其中,  $Z_k$  表示  $k$  时刻的观测量,观测量由IMU传感器输出的三轴加速度、三轴地磁力组成,观测量为:

$$Z_k = [a_x(k) \ a_y(k) \ a_z(k) \ m_x(k) \ m_y(k) \ m_z(k)]^T.$$

(6)姿态角解算:

将解算所得四元数通过式(4)可解算得到航向角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$  与滚转角  $\gamma$ 。

### 3.3 上位机界面设计

本文基于QT平台开发了上位机软件系统,用于接收下位机上传的数据,上位机软件整体流程图

如图8(a)所示。系统工作时,上位机设定采集频率并下发,开始采集指令后,采集模块工作并开始向上位机上传数据;上位机接收数据并对数据进行解析;得到姿态信息以及电量信息后,对以16进制上传的数据进行进制转换,数据进制转换流程图如图8(b)所示。首先将16进制补码转为二进制补码,如果其最高位(即标志位)为1则为负数,转换时最高位不变,其它各位取反加1,最后将二进制转为10进制数,并标注负号;如果最高位为0,则这个数为正数,直接转为10进制数,得到10进制数后,系统按照姿态解算方法对数据进行姿态解算,并以时间戳+数据的形式在本地存储。上位机软件界面中两个显示窗口分别提供数值及波形的信息,显示实时接收得到的姿态数据以及解析后的姿态角,如图9所示。

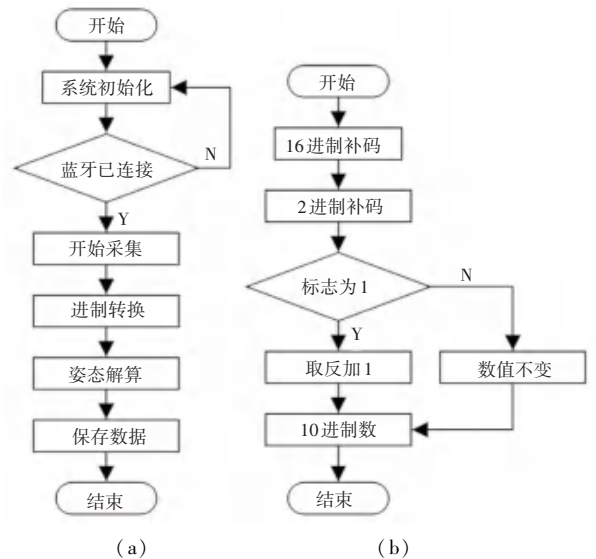


图8 上位机软件流程图

Fig. 8 Software flow chart of upper computer

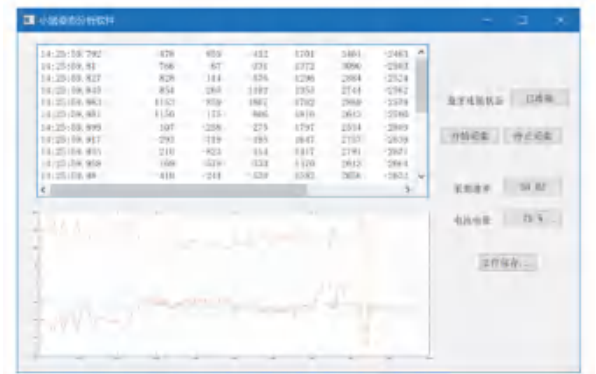


图9 上位机软件界面

Fig. 9 Upper computer software interface

## 4 实验测试

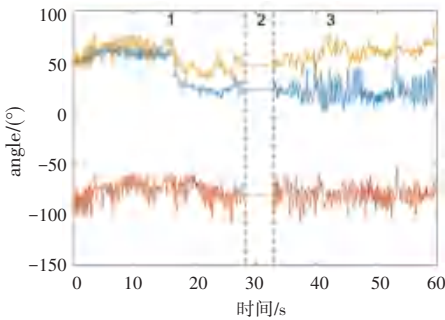
为验证姿态采集装置的有效性,本文将生物实

验中常用的跑台实验作为实验平台,做进一步验证。图 10(a)为实验图,图中小鼠置于实验跑台中,采集装置及其配套微型锂电池固定于小鼠背部,为避免对小鼠的活动产生影响,在实验前对小鼠进行多次佩戴,以保证小鼠对装置的适应。实验开始后,小鼠在跑台中自由活动,上位机软件通过蓝牙发送采集指令,采集装置开始采集实验数据并实时上传。上位机接收数据后对数据进行实时解析,得到姿态数据并将其保存;图 10(b)中展示了跑台实验中解析得到的小鼠姿态信息片段,3条曲线分别表示对应采集时间点的航向角、俯仰角以及滚转角,虚线将数据划分为3个片段,其中1、3片段为小鼠运动时装置所采集到的姿态数据,片段2为小鼠在跑台中静止时的姿态数据。



(a) 采集实验

(a) Collect experiment



(b) 姿态信息

(b) Posture information

图 10 实验测试

Fig. 10 Experimental test

## 5 结束语

对生物的姿态进行准确的采集和识别,在研究和分析生物体的行为方面具有重要意义。本文针对生物实验中小鼠的姿态采集问题,提出了一种基于IMU的姿态采集方法,并实现了系统的便携化。该系统利用9轴IMU设计了一款小体积、低功耗的无线姿态采集装置,同时针对性设计了上位机软件,完成了采集系统的设计。在动物行为实验中,通过跑台实验对采集系统的有效性进行了进一步验证。实验结果表明,本文所设计的便携式姿态采集系统在对小鼠运动信息的采集过程中具有良好的效果,为生物姿态分析提供了新的方法,该方法未来在生物医学等领域具有较好的发展前景。

## 参考文献

- [1] 刘涛,杨璐,邵肖伟. 基于PAF的深度图人体姿态估计[J]. 智能计算机与应用,2020,10(1):103-108.
- [2] 李松柏,张卫华,胡光亮. 基于轮廓的小鼠悬尾实验行为分析算法研究[J]. 计算机技术与发展,2018(8):6-11.
- [3] 巩臣,张炎杰,张檬,等. 一种开源的多功能动物行为学实验系统[J]. 中国比较医学杂志,2020,30(4):92-98.
- [4] 马玲玲,洪留荣,胡倩. 应用Log-协方差矩阵距离的实验鼠行为分类方法[J]. 计算机系统应用,2014,23(5):89-94.
- [5] 徐涌霞. 基于深度学习的实验鼠行为识别关键技术研究[J]. 佳木斯大学学报,2020,38(2):66-69.
- [6] 孙天柱,戴亚文. 基于LoRa的农田信息无线采集方案设计[J]. 计算机测量与控制,2018,26(8):208-212.
- [7] 卢艳军,陈雨荻,张太宁,等. 一种实用的四旋翼飞行器姿态融合算法研究[J]. 电光与控制,2020,27(8):84-89.
- [8] 周召发,胡文,张志利. 一种新的捷联惯性导航系统姿态四元数方程求解方法[J]. 兵工学报,2018,39(3):511-518.
- [9] SABATINI A M. Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53(7):1346-1356.