文章编号: 1000-8608(2018)01-0105-06

低成本MEMS磁力计校正方法研究

CHOE Namchol*[1,2]，赵红宇[1]，仇　森[1]，SO Yongguk[2]

(1.大连理工大学 电子信息与电气工程学部，辽宁 大连 116024；
2.金策工业综合大学 电子工学系，朝鲜 平壤 1001)

摘要: 基于MIMU(magnetic and inertial measurement unit)的人体动作捕捉技术，每个测量单元在使用前，均需要对其磁力计进行校正.然而，一套人体动作捕捉系统具有7至十几个MIMU，因此缩短MIMU中磁力计校正的总时间是亟需解决的关键问题.磁力计校正可采用的旋转形式主要有两种，分别为八字旋转的校正方法和绕着各单轴旋转的校正方法.为了节省磁力计的校正时间并保证磁力计的校正精度，提出了一种优化的校正方法.即采用最小二乘法的椭球拟合方法，根据求得的椭球模型原点和半径均方根误差，确定最佳的旋转形式和旋转次数，以较快、较准确地校正磁力计.实验结果表明，绕各单轴各旋转1次的校正方法效果最佳.

关键词: 磁力计校正；动作捕捉；椭球拟合；MPU-9250

中图分类号: TP212.9　　**文献标识码:** A　　**doi:** 10.7511/dllgxb201801016

0 引　言

近年来，人体运动分析系统已广泛应用于医疗康复、体育训练以及人机交互等领域[1-3].其中，基于MIMU的运动捕捉技术，由于成本低且对室内和室外环境均具有良好的适应性，成为了近年来的一大研究热点.然而，由于MIMU的精度不高，许多科研人员致力于提高基于MIMU的运动捕捉系统的准确性.其中传感器的初始对准是一个重要的问题，如果不进行初始对准，便无法计算每个身体部位的姿态.传感器的初始对准旨在解决传感器坐标系与身体坐标系精确一致的问题，即求解每个身体部位坐标系和传感器坐标系之间的旋转矩阵.一些研究人员在分析人体行走步态时，使用MIMU中的加速度计和陀螺仪进行了传感器的初始对准，该对准过程需要人体下肢进行旋转运动[4-6]；另一些研究人员在分析人体上身运动时，也需要通过人体上身肢体的旋转运动来进行传感器的初始对准[7-9].以上初始对准方法均利用了MIMU中的加速度计和陀螺仪，导致在旋转过程中身体部位的任何微小或异常运动都将影响初始对准的精度.因此，文献[10]提出了一种易于操作的初始对准方法，即利用MIMU中的加速度计和磁力计来进行对准，由于该方法无需任何身体部位的旋转，只需保持直立站姿即可进行初始对准，与上述方法有着显著的差异，使用方便.

实际使用过程中，MIMU中MEMS磁力计的测量精度，直接关系到动作捕捉的精确性.由于低成本MEMS磁力计的测量误差较大，在系统开始对准工作之前，需要对磁力计进行误差校正，且在系统开始捕捉工作之后，也需要利用磁力计的测量数据.然而，磁力计误差校正的问题，在文献[10]中并未提及.通常情况下，一套运动捕捉系统有7至十几个MIMU，在进行磁力计校正时，需要考虑校正工作的难易程度和时间成本.因此，在利用磁力计进行初始对准时，较快、较准确地进行磁力计误差校正是亟待解决的关键问题之一.

在惯性导航领域，磁力计的使用非常普遍，科研人员提出了多种用于解决磁力计校正问题的方法.其中，经典的校正方法是旋转法(swing algorithm，SA)[11]，该方法虽然实用且易于实现，

收稿日期: 2017-05-20；　**修回日期:** 2017-11-27.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473058)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT15ZD114，DUT16RC(3)015).
作者简介: CHOE Namchol*(1981-)，男，博士生，E-mail：cnc103@mail.dlut.edu.cn；赵红宇(1984-)，女，博士，讲师，硕士生导师，E-mail：zhaohy@dlut.edu.cn；仇　森(1987-)，男，博士，讲师，E-mail：qiu@dlut.edu.cn；SO Yongguk(1974-)，男，博士.

但需要提供外部航向参考且始终保持平台水平.文献[12]采用了非线性最小二乘法来估计磁力计的误差参数;文献[13]采用了迭代批处理最小二乘法;文献[14-15]采用了自适应最小二乘法,为磁力计误差校正提供了一种通用的解决方案;文献[16]提出未知噪声方差的自适应最小二乘法,该算法可以在存在噪声的环境中精确地估计校正参数;文献[17]采用了一种基于迭代极大似然估计的几何方法,进行了磁力计测量值的椭球拟合;文献[18]将最小二乘估计算法用于解决磁力计的椭球拟合问题,以提供一种精确且通用的拟合方法.以上方法通过误差校正均可以提高磁力计测量的准确性,但上述研究均只考虑了提高磁力计校正精度的问题,并没有考虑校正过程中具体的旋转形式和旋转次数.且上述研究中只利用了一个传感器,校正时间的相关问题并没有引起研究人员的重视.此外,所采用的校正算法需要足够的样本量,需要通过多次旋转磁力计采集大量的数据后才能完成磁力计的校正工作.如此,一整套动作捕捉系统需要的校正时间会很长.因此,本文基于两种可靠的旋转形式,即常用的八字旋转形式(手机里磁力计的校正形式)和绕各单轴旋转形式,通过多次实验验证,确定 MIMU 中磁力计的最佳校正方法.

1 磁力计校正方法

1.1 磁力计误差模型

目前,MEMS 磁力计的测量误差较大,可分为环境干扰误差和自身误差[19].其中,环境干扰误差包括硬铁和软铁误差,自身误差包括偏置误差、灵敏度误差和非正交误差.

考虑上述误差源,完整的磁力计误差模型如下:

$$\boldsymbol{h}=\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{E}_{\mathrm{n}}(\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}i}\boldsymbol{H}+\boldsymbol{E}_{\mathrm{h}i})+\boldsymbol{E}_0+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{h}=(h_X\quad h_Y\quad h_Z)^{\mathrm{T}}$,是 MIMU 中磁力计的输出值;$\boldsymbol{H}=(H_X\quad H_Y\quad H_Z)^{\mathrm{T}}$,是当地真实的地磁场;$\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}$ 表示灵敏度误差矩阵;$\boldsymbol{E}_{\mathrm{n}}$ 表示非正交误差矩阵;$\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}i}$表示软铁误差矩阵,$\boldsymbol{E}_{\mathrm{h}i}$表示硬铁误差矢量;$\boldsymbol{E}_0$ 表示偏置误差矢量;$\boldsymbol{\varepsilon}$ 表示白噪声.

为了简化式(1),引入变量 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$,得

$$\boldsymbol{h}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{H}+\boldsymbol{B}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{2}$$

其中 $\boldsymbol{A}=\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{E}_{\mathrm{n}}\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}i}$,$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{E}_{\mathrm{n}}\boldsymbol{E}_{\mathrm{h}i}+\boldsymbol{E}_0$.

1.2 磁力计误差校正

若不存在测量误差和干扰磁场,MIMU 中的磁力计测量数据的投影轨迹应是一个球体,其半径等于当地的磁场强度.基于这一理论前提,有

$$\|\boldsymbol{H}\|^2=\|\boldsymbol{h}\|^2=H_0^2 \tag{3}$$

其中 H_0 为当地的磁场强度(在大连理工大学,北纬 38°53′34.72″,东经 121°32′12.35″,−49.313 μT).

由于 $\boldsymbol{A}$ 是一个可逆矩阵,忽略白噪声,方程(2)可表示为

$$\boldsymbol{H}=\boldsymbol{A}^{-1}(\boldsymbol{h}-\boldsymbol{B}) \tag{4}$$

于是,得

$$(\boldsymbol{h}-\boldsymbol{B})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{h}-\boldsymbol{B})=H_0^2 \tag{5}$$

其中 $\boldsymbol{M}=(\boldsymbol{A}^{-1})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}$.

式(5)是椭球方程的广义形式.从式(5)可以看出,在环境干扰误差和自身误差的影响下,磁力计的输出数据位于一个椭球面上.若要校正磁力计,必须计算式(5)中 $\boldsymbol{M}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 的值,二者可以通过最小二乘法进行椭球拟合得到.

椭球可以用下面给出的一般形式来表示:

$$a_1X^2+a_2Y^2+a_3Z^2+2a_4XY+2a_5XZ+2a_6YZ+2a_7X+2a_8Y+2a_9Z+a_{10}=0 \tag{6}$$

定义

$$\boldsymbol{\xi}=(X_n^2\quad Y_n^2\quad Z_n^2\quad 2X_nY_n\quad 2X_nZ_n\quad 2Y_nZ_n\quad 2X_n\quad 2Y_n\quad 2Z_n\quad 1)^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{\theta}=(a_1\quad a_2\quad a_3\quad a_4\quad a_5\quad a_6\quad a_7\quad a_8\quad a_9\quad a_{10})^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

其中 $\boldsymbol{\xi}$ 为 $n\times 10$ 的矩阵,$\boldsymbol{\theta}$ 为 10×1 的矢量,n 为样本量.

将式(7)、(8)代入式(6)整理得

$$\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta}=0 \tag{9}$$

通过最小二乘法得到椭球方程系数,然后将式(6)变换成广义形式,得

$$\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{h}+(2\boldsymbol{E})\boldsymbol{h}+F=0 \tag{10}$$

其中矩阵 $\boldsymbol{D}=\begin{pmatrix}a_1 & a_4 & a_5\\ a_4 & a_2 & a_6\\ a_5 & a_6 & a_3\end{pmatrix}$,矢量 $\boldsymbol{E}=(a_7\quad a_8\quad a_9)$,常数 $F=a_{10}$.

将式(10)进一步变换,得

$$(\boldsymbol{h}-(-\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{E}))^{\mathrm{T}}\left(\frac{\boldsymbol{D}}{(-\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{E})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}(-\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{E})-F}\right)\times(\boldsymbol{h}-(-\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{E}))=1 \tag{11}$$

对比式(5)和式(11)可得

$$\boldsymbol{B}=-\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{E},\ \boldsymbol{M}=\frac{1}{(-\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{E})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}(-\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{E})-F}\boldsymbol{D}H_0^2 \tag{12}$$

由于 $\boldsymbol{M}=(\boldsymbol{A}^{-1})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}$,可以通过 $\boldsymbol{M}$ 的奇值分

解求取 $\mathbf{A}^{-1}$，从而可以利用式(4)完成磁力计的校正.

2　磁力计旋转形式和旋转次数选定评估方法

本文旨在准确地校正磁力计误差，并减少校正时间. 磁力计校正需要一定的测量样本，而样本需在磁力计旋转状态下进行采集，所以不能随机地选取校正的操作时间. 从统计学角度看，样本量越大，越能反映数据的总体特征. 这意味着样本量越大，越可以获得更好的校正结果. 然而，动作捕捉系统通常由至少 7 个(下半身)，甚至十几个(全身)MIMU 构成. 如果每一个磁力计的校正均需要采集大量的样本，则易导致动作捕捉系统的准备工作耗时过长. 因此，需要设计适合的磁力计校正方法. 如果旋转形式不合适，则有限次旋转所获得的样本并不能反映磁力计测量误差的总体特征.

实际工作中，低成本 MEMS 磁力计自身具有较大的测量误差，导致旋转形式会影响其校正精度. 如 1.2 节中所述，若求得椭球方程的参数，便可以较准确地校正磁力计误差. 图 1 中所示是把磁力计随机旋转 20 次以后，基于磁力计测量数据所构建的地磁场椭球拟合模型. 从图 1 可以看到，随机旋转 20 次以后所获得样本量，可以准确地反映磁力计测量误差的总体特征.

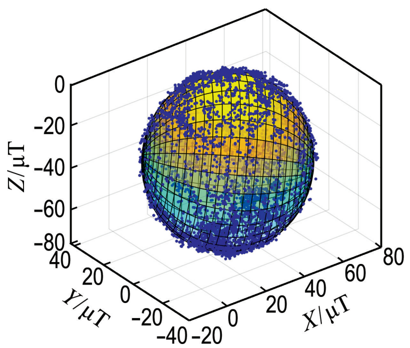


图 1　随机旋转 20 次后得到的椭球拟合模型

Fig. 1　Ellipsoid fitting model obtained after twenty random rotations

令(X_c, Y_c, Z_c)表示原点坐标，(X_r, Y_r, Z_r)表示三轴的半径，则拟合后的各椭球参数为$(X_c, Y_c, Z_c) = (30.501\ 7, 1.880\ 6, 35.930\ 4)$ μT，$(X_r, Y_r, Z_r) = (37.883\ 3, 36.313\ 1, 35.564\ 6)$ μT.

为了较准确地校正磁力计误差并节省校正时间，本文依据磁力计不同旋转过程中所拟合的椭球模型与图 1 中椭球模型的相似程度，来确定磁力计校正时的最佳旋转形式和旋转次数. 由于实验位置固定，可假定所获得的椭球原点和半径值为其实际参考测量值. 基于此参考测量值，可利用均方根误差(RMSE，e_{rms})来评估每种旋转形式和旋转次数对磁力计校正结果的影响.

$$e_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Y_i - Y)^2 \Big/ n} \tag{13}$$

其中 Y 是参考测量值，Y_i 是每次实验的测量值，n 是样本量.

3　实验结果与分析

本文实验采用了基于低成本 MPU-9250(磁场强度测量范围是±4 800 μT)的数据采集节点，采用的微处理器是 STM32L1 系列中的 STM32L152CBT6 芯片，通过 nRF24L01+芯片完成传感器数据从采集节点到计算机的无线传输，最后利用 Matlab 软件进行数据分析.

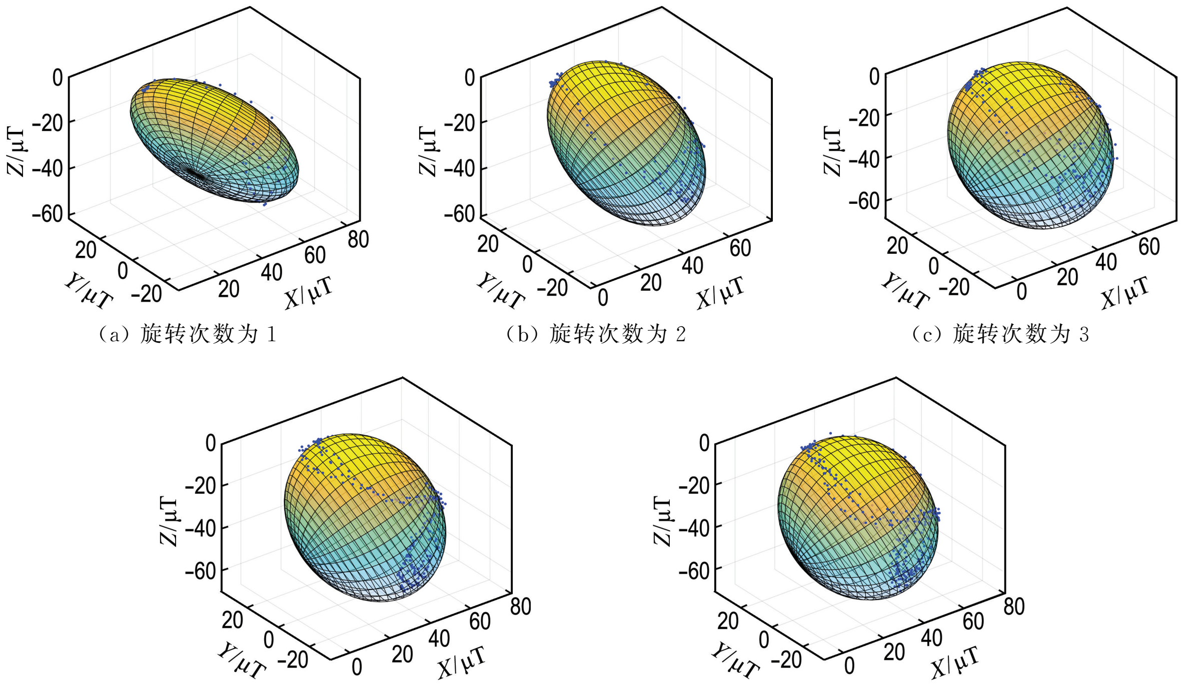
为了避免磁场干扰的影响，所有实验均在室外进行. 一般情况下，通过八字旋转形式，可对智能手机内置的磁力计进行校正. 因此，本文首先要确认在基于 MPU-9250 的动作捕捉系统中，是否可以采用这种八字旋转形式来进行磁力计校正. 实验过程中，为了获得稳定的实验结果，各类旋转实验均进行了 10 次，然后再利用式(13)计算椭球原点和半径的均方根误差.

3.1　八字旋转实验

八字旋转实验流程：首先把磁力计拿出以后，与手机的磁力计校正方法一样按八字模样旋转，每次旋转到开始点，然后增加旋转次数. 旋转时获得的磁场强度利用无线传输到计算机，然后处理数据.

图 2 所示为八字旋转实验时，不同旋转次数下的椭球拟合模型. 由图 2 可知，旋转次数越多，椭球拟合模型越近似图 1 中的椭球模型.

表 1 所列为不同旋转次数时，八字旋转以后计算的椭球原点和三轴半径的均方根误差. 从表 1 可以看出，旋转次数为 1 时，椭球参数的均方根误差很大，特别是原点 X 坐标的均方根误差为 13.439 140 μT、原点 Z 坐标为 10.278 630 μT 和 Z 轴半径为 20.634 930 μT. 实验结果表明，旋转次数为 1 时，八字旋转不能准确地校正磁力计. 当旋转次数从 1 逐次增加到 5 时，均方根误差明显减小. 当旋转次数为 5 时，原点 X、Y 和 Z 坐标的



(a) 旋转次数为 1　(b) 旋转次数为 2　(c) 旋转次数为 3

(d) 旋转次数为 4　(e) 旋转次数为 5

图 2　通过八字旋转得到的椭球拟合模型

Fig. 2　Ellipsoid fitting model obtained by rotating along a ∞-shape trajectory

均方根误差为(4.600 275,0.759 620,2.558 613) μT,而且 X、Y、Z 轴的半径均方根误差为(1.188 907,1.494 694,6.715 467) μT.然而,仍然存在个别较大的均方根误差,如 X_{c} 和 Z_{r}.这说明,旋转次数为 5 时,也不能准确地校正磁力计.

虽然旋转次数可以增加到 5 次以上,但如果每个传感器都需要 5 次以上的旋转,那么十几个传感器则需要较长的校正时间,故 5 次以上的旋转本文并未考虑.因此,本文认为八字旋转不适宜于校正 MPU-9250 磁力计.

表 1　通过八字旋转得到的椭球原点和三轴半径的均方根误差

Tab. 1　RMSE of the origin and three major radii of the ellipsoid fitting model obtained by rotating along a ∞-shape trajectory

旋转次数	$e_{\mathrm{rms}}/\mu\mathrm{T}$					
	X_{c}	Y_{c}	Z_{c}	X_{r}	Y_{r}	Z_{r}
1	13.439 140	3.412 739	10.278 630	1.817 162	7.139 578	20.634 930
2	9.426 691	1.728 403	8.011 470	2.347 796	3.813 949	13.590 090
3	5.304 478	1.324 766	4.779 277	1.279 938	1.967 116	7.983 108
4	4.471 884	1.113 406	3.774 082	1.547 213	1.884 073	6.353 555
5	4.600 275	0.759 620	2.558 613	1.188 907	1.494 694	6.715 467

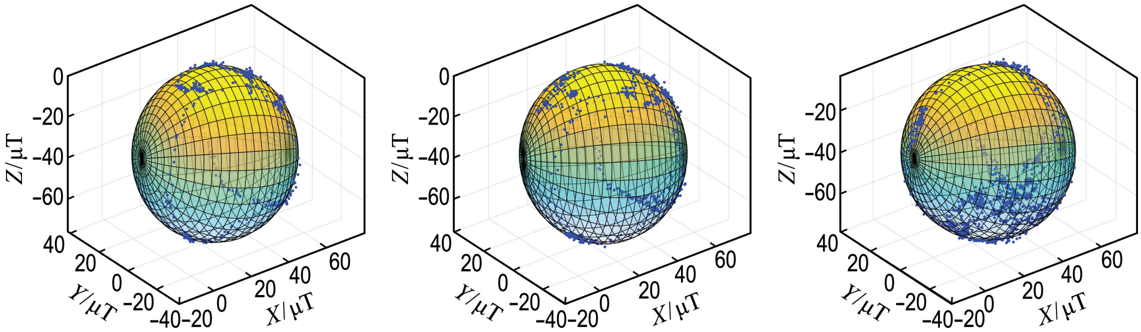
3.2　单轴旋转实验

单轴旋转实验流程:首先把磁力计拿出以后,绕传感器坐标系的 3 个轴进行旋转.绕各单轴各旋转 1 次时旋转次数为 1,绕各单轴各旋转 2 次时旋转次数为 2.获得的数据传输和处理与八字旋转实验一样.

图 3 所示为分别绕各单轴进行旋转实验以后的椭球拟合模型.从图 3 可以看出,旋转次数为 1、2 和 3 时的 3 个椭球模型,均与图 1 中的椭球模型比较接近.

表 2 所列为绕各单轴旋转以后计算的椭球原点和三轴半径的均方根误差.本实验与八字旋转实验形成了鲜明的对比,即旋转次数对磁力计的校正结果并无明显影响.结果表明,单轴旋转实验时,不同旋转次数下,椭球原点和半径误差几乎相同.

实验结果表明,单轴旋转形式的校正方法是



(a) 旋转次数为1　(b) 旋转次数为2　(c) 旋转次数为3

图3　绕各单轴旋转得到的椭球拟合模型

Fig. 3　Ellipsoid fitting model obtained by rotating around each single axis

表2　绕各单轴旋转得到的椭球原点和三轴半径的均方根误差

Tab. 2　RMSE of the origin and three major radii of the ellipsoid fitting model obtained by rotating around each single axis

旋转次数	$e_{rms}/\mu T$					
	X_c	Y_c	Z_c	X_r	Y_r	Z_r
1	0.382 824	0.538 990	0.467 853	0.443 757	0.550 695	0.378 134
2	0.381 453	0.543 550	0.471 775	0.448 039	0.537 249	0.366 733
3	0.387 492	0.533 570	0.488 708	0.442 662	0.549 773	0.334 477

较稳定的，且旋转次数为1时采集的数据便可以准确地反映图1中的参考磁场.

综上所述，可以确定单轴旋转的校正形式比八字旋转的校正形式更精确且更稳定.

由实验结果推定，可以采用绕各单轴各旋转1次的形式来进行磁力计校正. 本文旨在节省多个磁力计的校正时间，因此最终确定将单轴旋转的校正方法引入动作捕捉系统.

4　结　语

在动作捕捉系统中，需要部署的 MIMU 传感器较多，且把 MIMU 安装于人体之前，需要一定的时间对磁力计进行校正，因此节省 MIMU 中磁力计校正的整体时间是最为关键的问题之一，亟需确定一种较快且较准确的校正方法.

本文通过实验手段，在不同旋转形式和旋转次数下，对低成本 MEMS 磁力计(如 MPU-9250)的校正方法进行了对比测试. 采用八字旋转5次的校正方法，椭球模型拟合的 RMSE 值范围是0.759 620～6.715 467 μT；采用单轴旋转1次的校正方法，椭球模型拟合的 RMSE 值范围是0.378 134～0.550 695 μT. 实验结果说明，单轴旋转形式比八字旋转形式更准确，且在保证磁力计校正精度的前提下，仅需要1次的旋转便可以较快地校正磁力计，提高了磁力计校正工作的便捷性和快速性，有利于 MIMU 传感器在动作捕捉系统中的应用和推广.

参考文献：

[1] 陈　野，王哲龙，李政霖，等. 基于 BSN 和神经网络的人体日常动作识别方法[J]. 大连理工大学学报，2013，**53**(6)：893-897.
CHEN Ye, WANG Zhelong, LI Zhenglin, *et al*. Human daily activity recognition method based on BSN and neural network [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2013, **53**(6): 893-897. (in Chinese)

[2] 刘　江，曾辽原. 利用混合动作捕捉方法辅助排球运动技术标准化的研究[J]. 北京体育大学学报，2014，**37**(5)：133-138.
LIU Jiang, ZENG Liaoyuan. Study on hybrid motion capture method for assisting volleyball technique standardization [J]. **Journal of Beijing Sport University**, 2014, **37**(5): 133-138. (in Chinese)

[3] WANG Zhelong, QIU Sen, CAO Zhongkai, *et al*. Quantitative assessment of dual gait analysis based on inertial sensors with body sensor network [J]. **Sensor Review**, 2013, **33**(1): 48-56.

[4] HAMDI M, AWAD M I, ABDELHAMEED M M, *et al*. Lower limb motion tracking using IMU sensor network [C] // **Proceedings of the 7th Cairo International Biomedical Engineering Conference**. Giza: IEEE, 2014: 28-33.

[5] PALERMO E, ROSSI S, MARINI F, *et al*.

Experimental evaluation of accuracy and repeatability of a novel body-to-sensor calibration procedure for inertial sensor-based gait analysis [J]. **Measurement**, 2014, **52**(1):145-155.

[6] YUAN Qilong, CHEN I M, LEE Shangping. SLAC: 3D localization of human based on kinetic human movement capture [C] // **Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation**. Piscataway: IEEE, 2011:848-853.

[7] RICCI L, FORMICA D, SPARACI L, *et al*. A new calibration methodology for thorax and upper limbs motion capture in children using magneto and inertial sensors [J]. **Sensors (Switzerland)**, 2014, **14**(1):1057-1072.

[8] LUINGE H J, VELTINK P H, BATEN C T M. Ambulatory measurement of arm orientation [J]. **Journal of Biomechanics**, 2007, **40**(1):78-85.

[9] TEACHASRISAKSAKUL K, ZHANG Z Q, YANG G Z. In situ sensor-to-segment calibration for whole body motion capture [C] // **2015 IEEE 12th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks**. Cambridge: IEEE, 2015:1-5.

[10] MENG X L, ZHANG Z Q, SUN S Y, *et al*. Biomechanical model-based displacement estimation in micro-sensor motion capture [J]. **Measurement Science & Technology**, 2012, **23**(5):55101.

[11] BOWDITCH N. **The American Practical Navigator** [M]. Bethesda: National Imagery and Mapping Agency, 1995.

[12] PANG Hongfei, LI Ji, CHEN Dixiang, *et al*. Calibration of three-axis fluxgate magnetometers with nonlinear least square method [J]. **Measurement**, 2013, **46**(4):1600-1606.

[13] GEBRE-EGZIABHER D, ELKAIM G H, POWELL J D, *et al*. Calibration of strapdown magnetometers in magnetic field domain [J]. **Journal of Aerospace Engineering**, 2006, **19**(2):87-102.

[14] MARKOVSKY I, KUKUSH A, HUFFEL S V. Consistent least squares fitting of ellipsoids [J]. **Numerische Mathematik**, 2004, **98**(1):177-194.

[15] VALÉRIE R, AFZAL M H, GÉRARD L. Complete triaxis magnetometer calibration in the magnetic domain [J]. **Journal of Sensors**, 2010, **2010**:967245.

[16] SONG Zhongguo, ZHANG Jinsheng, ZHANG Xuhui, *et al*. A calibration method of three-axis magnetometer with noise suppression [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2014, **50**(11):6971792.

[17] VASCONCELOS J F, ELKAIM G, SILVESTRE C, *et al*. Geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame [J]. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, 2011, **47**(2):1293-1306.

[18] KIANI M, POURTAKDOUST S H, SHEIKHY A A. Consistent calibration of magnetometers for nonlinear attitude determination [J]. **Measurement**, 2015, **73**:180-190.

[19] 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.
LONG Li, ZHANG He. Automatic and adaptive calibration method of tri-axial magnetometer [J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2013, **34**(1):161-165. (in Chinese)

Study of calibration method of low-cost MEMS magnetometer

CHOE Namchol*[1,2], ZHAO Hongyu[1], QIU Sen[1], SO Yongguk[2]

(1. Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Department of Electronic Engineering, Kim Chaek University of Technology, 1001, Pyongyang, DPR Korea)

Abstract: In MIMU (magnetic and inertial measurement unit) - based human motion capture technology, the calibration of magnetometer is necessary for each MIMU prior to use. Since a human motion capture system includes about seven to a dozen of MIMUs, the shortening of the total time is of critical importance to the magnetometer's calibration. Magnetometer calibration method involves two rotation modes, i. e., along a ∞-shape trajectory and around each single axis. An appropriate calibration method by which the rotation form and the number of rotations are identified, is proposed to reduce the calibration time and to accurately calibrate the magnetometer. The optimal rotation form and the number of rotations are determined based on the RMSE of the origin and the long radius of the ellipsoid model, which is obtained by least squares ellipsoid fitting method. The test results demonstrate that one time rotation calibration method around each axis is highly effective for human motion capture.

Key words: calibration of magnetometer; motion capture; ellipsoid fitting; MPU-9250