

基于 MEMS 传感器的运动加速度提取技术研究

牛同锋^{1,2} 周渝淞^{1,2} 屈 纯^{1,2}

(1.中国航天科技集团公司第四研究院第四十二所 襄阳 441000; 2.应急救援与安全防护湖北省重点实验室 襄阳 441000)

摘 要: 结合多种现有物体运动加速度测量方法的特点,提出了一种基于 MEMS 运动传感器低成本且便捷的运动加速度测量方法。该方法采用多传感器数据融合技术实时求解物体的运动姿态,进而从 MEMS 运动传感器的实测数据中提取物体运动加速度。通过搭建基于 MEMS 运动传感器的加速度测量系统对该方法的可行性进行试验验证,试验结果表明,在静止状态下该方法的加速度求解误差为 0.03 m/s^2 ,与 MEMS 加速度计采集精度基本一致,具有较高的求解精度;在自由落地运动时该方法的加速度求解误差为 0.07 m/s^2 ,虽然物体长时间剧烈运动时耦合运动加速度会降低求解精度,但在短时间运动时仍具有较高求解精度。

关键词: 加速度;运动传感器;数据融合;提取;求解精度

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.30

Research on motion acceleration extraction based on MEMS sensor

Niu Tongfeng^{1,2} Zhou Yusong^{1,2} Qu Chun^{1,2}

(1. The 42nd Institute of Fourth Academy of CASC, Xiangyang 441000, China;

2. Laboratory of Emergency Rescue and Safety Protection of Hubei Province, Xiangyang 441000, China)

Abstract: Combining the characteristics of various existing object motion acceleration measurement methods, a low-cost and convenient motion acceleration measurement method based on MEMS motion sensor is proposed. The method uses multi-sensor data fusion technology to solve the motion posture of the object in real time, and then extracts the motion acceleration of the object from the measured data of the MEMS motion sensor. The feasibility of the method is verified by the MEMS motion sensor based acceleration measurement system. The experimental results show that the acceleration solution error of the method is 0.03 m/s^2 at rest, which is basically consistent with the acquisition accuracy of MEMS accelerometer. The acceleration solution error of the method is 0.07 m/s^2 when free-floating motion. The coupled motion acceleration will reduce the accuracy of the solution when the object is moving for a long time, but it still has high accuracy in short-time motion.

Keywords: acceleration; motion sensor; data fusion; extraction; solution accuracy

0 引 言

加速度是描述物体运动状态的关键物理量,目前测量物体加速度的方法主要有直接测量法、光学测量法、基于卫星导航系统的微分求解法和基于多传感器数据融合的加速度求解法。直接测量法即通过采用加速度计直接测量物体运动加速度,常见加速度计包括液浮摆式加速度计、挠性加速度计、静电加速度计等^[1-3],但其受传感器安装精度影响较大,且仅适用于做直线运动的物体^[4];光学测量法是一种基于高速摄影和运动分析技术的测量方法,利用高速摄像机拍摄物体的运动过程,并采用计算机软件对运动物体分离全过程进行运动学分析,并通过运动学参数计算得出物

体的运动加速度,光学测量法虽然具有非接触、抗干扰等优点,但要求物体在整个运动过程中必须处于高速摄影的可视范围内,且测量系统复杂^[5];基于卫星导航系统的微分求解法是通过卫星导航系统获得物体的地理位置坐标,进而利用运动学分析计算出物体的运动加速度,测量空间范围较大,但易受干扰、测量精度低;基于多传感器数据融合的加速度求解法常见于导弹火箭等飞行器的惯性导航系统,其利用高精密陀螺仪和加速度计,通过数据融合技术实时求解物体运动加速度^[6-8],其具有动态性好、测量精度高等优点,但其惯性导航系统复杂且价格昂贵。

随着微电子学和微制造技术的发展,硅基传感器技术取得较大进步,已成为研究的热点。微机电系统(micro-

electro-mechanical system, MEMS) 运动传感器具有体积小、重量轻、功耗低、可靠性高、灵敏度高、集成度高等优点,可快速检测物体的加速度和角速度等运动参数,正在逐渐取代传统机械传感器,广泛应用于消费电子产品、汽车工业、航空航天、机械等各领域^[9]。利用 MEMS 运动传感器采用直接测量法测量物体加速度时,由于 MEMS 运动传感器的测量值中耦合重力加速度,运动过程中 MEMS 运动传感器的姿态可能实时发生变化,无法通过补偿固定值的方法获得物体的真实运动加速度。整合型六轴 MEMS 运动传感器可同时测量物体的三轴加速度信号和三轴角速度信号,本文拟利用 MEMS 运动传感器,采用多传感器数据融合技术实时求解物体的运动姿态,从 MEMS 运动传感器的实测数据中提取物体运动加速度,从而构建低成本微型物体运动加速度测量系统。

1 运动姿态的求解

MEMS 运动传感器集成三轴加速度计和三轴角速度计,加速度计用于测量加速度,陀螺仪用于测量角速度。陀螺仪长期精度较差,但是在很短时间内可以很好保证测量精度;而加速度计测量不随时间漂移,但动态响应较慢^[10-12]。互补滤波算法利用两者频率方面的互补特性对多组数据结合互补,并进行滤波处理稳定输出,通过加速度计的输出来修正陀螺仪的漂移误差,得到物体的四元数等姿态数据,进而根据四元数求解物体的姿态矩阵^[13-14]。互补滤波姿态估计算法框图如图 1 所示。

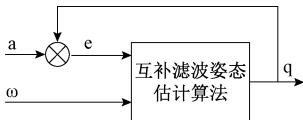


图 1 互补滤波姿态估计算法框图

定义大地坐标系 n 和传感器载体坐标系 b 如图 2 所示,其中大地参考坐标系 b 采用东北天右手坐标系,坐标原点位于地心;载体坐标系是固连于运载体的坐标系。

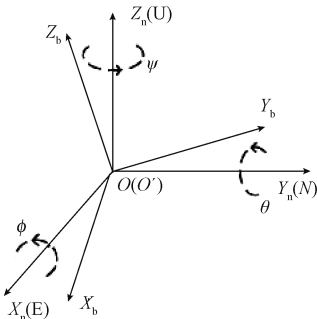


图 2 大地坐标系与传感器载体坐标系的关系

设传感器载体坐标系 b 相对大地坐标系的姿态四元数为 q 。

$$q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T$$

则使用四元数表示传感器载体坐标系 b 至大地坐标系 n 的旋转矩阵为 C_n^b ^[15]。

$$C_n^b = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

大地坐标系 n 至传感器载体坐标系 b 的旋转矩阵为 C_n^b 。

$$C_n^b = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

定义导航坐标系 n 中标准重力加速度 g , 定义为 $g^n = [0 \quad 0 \quad 1]^T$, 将标准重力加速度从导航坐标系 n 下的 g^n 转换为载体坐标系 b 下为 g^b 。

$$g^b = C_n^b g^n = \begin{bmatrix} 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

设 MEMS 传感器在坐标系 b 中的测量值为三轴加速度 $a = [a_x \quad a_y \quad a_z]^T$, 三轴角速度 $\omega = [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T$, 对加速度测量值进行归一化处理。

$$a^b = \begin{bmatrix} \frac{a_x}{|a|} & \frac{a_y}{|a|} & \frac{a_z}{|a|} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

式中: $|a|$ 为加速度 a 的模, $|a| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$ 。

对 g^b 和 a^b 做向量叉乘, 即可得到给陀螺仪的校正补偿值 e 。

$$e = g^b \times a^b = \begin{bmatrix} i & j & k \\ v_x & v_y & v_z \\ a_x & a_y & a_z \end{bmatrix} = (v_y a_z - v_z a_y) \vec{i} - (v_x a_z - v_z a_x) \vec{j} + (v_x a_y - v_y a_x) \vec{j} \quad (5)$$

然后通过 PI 控制器进行滤波, 消除陀螺仪累计的漂移误差。控制的效果取决于 P 和 I 参数, 分别对应比例控制参数 K_p 和积分控制参数 K_i 。

这里给出 PI 控制的公式:

$$\dot{e}(\omega) = K_p e(\omega) + K_i \int_0^t e(\omega) dt \quad (6)$$

式中: $\dot{e}(\omega)$ 为负反馈给陀螺仪进行校正补偿的值; $K_p e(\omega)$ 是比例控制项; $K_i \int_0^t e(\omega) dt$ 是积分控制项。

将得到的补偿值 $\dot{e}(\omega)$ 加在陀螺仪输出的数据上进行校正, 并结合陀螺仪数据通过四元数微分方程转换为四元数输出^[16-18], 从而实现四元数的更新。

2 运动加速度的提取

加速度传感器测量值 a 转换至大地坐标系下得到 A 。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \mathbf{C} \mathbf{a} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

则物体相对大地坐标系的竖直加速度,即物体在竖直方向上的运动加速度:

$$A_v = A_z - g \quad (8)$$

物体在水平方向上的运动加速度:

$$A_h = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} \quad (9)$$

物体合运动加速度:

$$A_t = \sqrt{A_h^2 + A_v^2} \quad (10)$$

3 试验验证

3.1 试验系统搭建

采用基于 6 轴 MEMS 运动传感器 ICM20689 搭建试验系统,试验系统主要由控制器、MEMS 运动传感器、电源管理系统、蓝牙通信系统和声光指示系统等组成,试验系统如图 3 所示。控制器采用基于 Cortex-M4 内核的 STM32F410 单片机,控制器通过 I²C 总线采集 6 轴传感器的数据输出,将上述运动加速度提取算法编程内置至 STM32F410 单片机内部,控制器实时求解并输出物体运动水平方向加速度 A_h 和竖直方向的运动加速度 A_v 。运动传感器 ICM20689 经校准后,加速度采集精度为 0.02 m/s^2 。试验系统的数据输出频率为 200 Hz ,试验系统模块体积仅为 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$,可通过魔术贴、双面胶等方式与被测物体连接。



图 3 试验系统实物

3.2 静态测试

分别将试验系统坐标系(即传感器载体坐标系 b)的 X 轴、 Y 轴、 Z 轴与大地坐标系 n 的 Z 轴重合,并静止放置,同时实时求解并输出试验系统竖直方向运动加速度 A_v 。试验系统竖直方向运动加速度分别如图 4~6 所示。

由于试验系统处于静止状态,不考虑外界干扰的情况下竖直方向的真实运动加速度应为 0 m/s^2 ,则由图 4~6 可

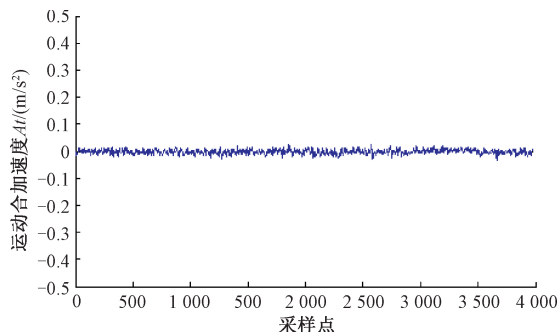


图 4 试验系统 X 轴竖直向下且处于静止状态时的运动加速度测量值

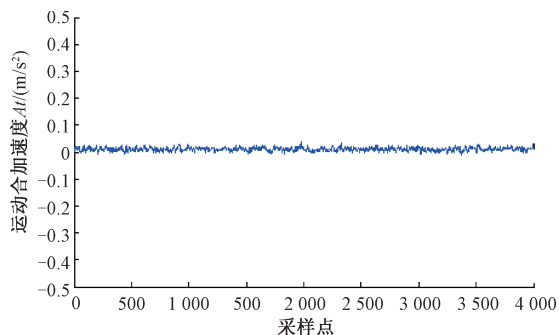


图 5 试验系统 Y 轴竖直向下且处于静止状态下的运动加速度测量值

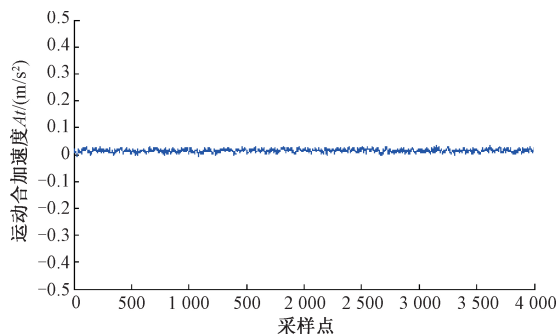


图 6 试验系统 Z 轴竖直向下且处于静止状态时的运动加速度测量值

以看出,3 次试验时试验系统竖直方向运动加速度的误差分别约为 0.02 、 0.02 和 0.03 m/s^2 ,与传感器直接测量误差基本一致。由此可见,试验系统处于任何静止的姿态情况下,该运动加速度算法均具有较高的求解精度。

3.3 动态测试

分别将试验系统坐标系(即传感器载体坐标系 b)的 X 轴、 Y 轴、 Z 轴与大地坐标系 n 的 Z 轴重合,使试验系统做自由落体运动,试验系统运动过程中伴随小幅度旋转,同时实时求解并输出试验系统竖直方向运动加速度 A_v 。试验系统竖直方向运动加速度分别如图 7~9 所示。

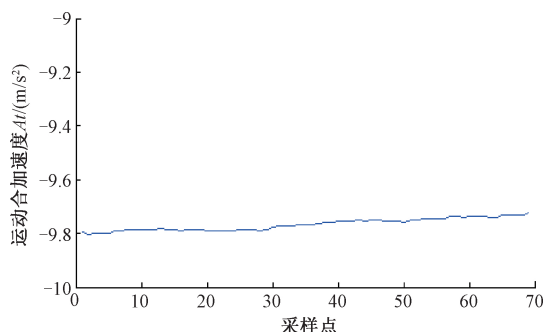


图 7 试验系统 X 轴竖直向下且处于自由落体状态时的运动加速度测量值

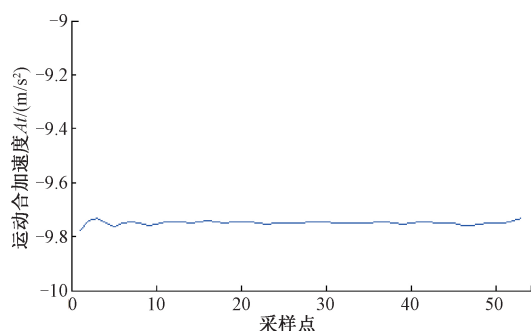


图 8 试验系统 Z 轴竖直向下且处于自由落体状态时的运动加速度测量值

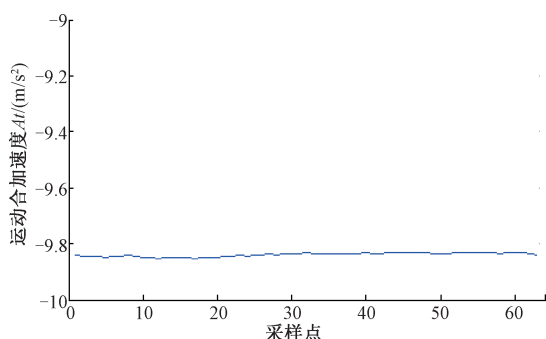


图 9 试验系统 Z 轴竖直向下且处于自由落体状态时的运动加速度计算值

试验系统处于自由落体运动时,不考虑下落阻力等影响因素,竖直方向的真实运动加速度应为标准重力加速度,即 9.8066 m/s^2 ,则由图 7~9 可以看出,3 次试验时试验系统竖直方向运动加速度的最大相对误差分别约为 0.07、0.06 和 0.07 m/s^2 。由此可见,该算法在运动状态下仍具有较高的求解精度。

同时通过对比发现试验系统处于运动状态时,运动加速度的求解误差较静止状态时增大,这是由于试验系统运动时加速度中耦合运动加速度较大,降低互补滤波算法的计算精度,进而降低物体运动加速度的求解精度。

4 结 论

基于 MEMS 运动传感器,采用多传感器数据融合技术实时求解物体的运动姿态,进而从 MEMS 运动传感器的实测数据中提取物体运动加速度。通过搭建基于 MEMS 运动传感器的加速度测量系统对该方法的可行性进行试验验证,得出以下结论:

1) 基于 MEMS 运动传感器的加速度提取算法可实时求解物体运动加速度,在静止状态下具有较高求解精度,求解精度与 MEMS 加速度计采集精度基本一致。

2) 由于互补滤波算法存在连续长时剧烈运动偏差较大的问题,该算法的求解精度会在运动情况下稍微降低,但在运动剧烈程度较小或短时剧烈运动的场合仍具有较高的求解精度。针对基于 MEMS 运动传感器的连续长时间剧烈运动时运动加速度精确求解方法有待进一步研究。

3) 基于整合型 MEMS 运动传感器和单片机,采用该算法可构建低成本便捷的加速度测量系统,用于物体运动加速度的快速测量。

参考文献

- [1] 陈光锋,霍红庆,王佐磊,等.静电悬浮加速度计地面高压悬浮原理与应用[J].中国空间科学技术,2015,35(5):56-63.
- [2] 刘爽,刘云峰,董景新.闭环点位置对静电悬浮加速度计性能影响研究[J].仪器仪表学报,2015,36(7):1618-1625.
- [3] 王波.液浮摆式加速度计测量系统的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [4] 杨清,陈岭,陈根才.基于单加速度传感器的行走距离估计[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(9):1681-1686.
- [5] 刘越,周志卫,刘芳,等.加速度计在运动物体分离参数测量系统中的应用[J].科技风,2017(5):31.
- [6] 陈哲.捷联惯导系统原理[M].北京:宇航出版社,1886.
- [7] 刘付强.基于 MEMS 器件的捷联姿态测量系统技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
- [8] 郭访社,于云峰,刘书盼,等.捷联惯性导航系统姿态算法研究[J].航天控制,2010,28(1):37-39.
- [9] 韩国川.波形形态特征建模下的 MEMS 运动模式识别[J].电子测量技术,2018,41(13):84-88.
- [10] 张丽杰,常佳.微小型航姿测量系统及其数据融合方法[J].中国惯性技术学报,2011,19(3):307-311.
- [11] 刘娟花,柯熙政.多 MEMS 陀螺数据融合方法性能比较[J].电子测量与仪器学报,2017,31(8):1265-1273.
- [12] 陆辰,李荣冰,刘建业,等.微型航姿系统中三轴 MEMS 加速度计组合误差建模方法[J].测试技术学报,2011,25(1):29-34.

[13] CAVALCANTE SA R, DE ARAUJO A L C, VARELA A T, et al. Construction and PID control for stability of an unmanned aerial vehicle of the type quadrotor [C]. IEEE Latin American Robotics Symposium, 2013:95-99.

[14] LI Y, XIE Q, HAN J. Modeling and PID control of tethered unmanned quadrotor helicopter [C]. MEC, 2013:258-262.

[15] 秦永元.惯性导航[M].北京:科学出版社, 2006.

[16] HONG D, LIU G, CHEN H, et al. Application of EKF for missile attitude estimation based on “SINS/CNS” integrated guidance system [C]. International Symposium on Systems & Control in Aeronautics & Astronautics, IEEE, 2010:1101-1104.

[17] 梁延德,程敏,何福本,等.基于互补滤波器的四旋翼飞行器姿态解算[J].传感器与微系统,2011,30(11):56-58,61.

[18] 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):1391-1397.

作者简介

牛同锋,硕士、工程师,主要研究方向为运动测量技术、运动数据处理技术等。
E-mail:516287652@qq.com