



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107076554 B

(45)授权公告日 2019.08.20

(21)申请号 201580047290.8

(22)申请日 2015.10.01

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107076554 A

(43)申请公布日 2017.08.18

(30)优先权数据
62/058,517 2014.10.01 US
62/101,942 2015.01.09 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2017.03.02

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2015/053521 2015.10.01

(87)PCT国际申请的公布数据
W02016/054394 EN 2016.04.07

(73)专利权人 英特尔公司
地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 S·齐哈杰扎德 T·J·李

J·W·帕克 R·A·霍斯金森
H·阿卜杜勒拉伊

(74)专利代理机构 北京尚诚知识产权代理有限公司 11322
代理人 龙淳 岳磊

(51)Int.Cl.
G01C 5/06(2006.01)
G01C 21/16(2006.01)

(56)对比文件
CN 203116727 U,2013.08.07,
US 2006206267 A1,2006.09.14,
US 2007072158 A1,2007.03.29,
US 2009007661 A1,2009.01.08,
US 6298287 B1,2001.10.02,
CN 103528565 A,2014.01.22,
WO 0239138 A1,2002.05.16,

审查员 刘魁

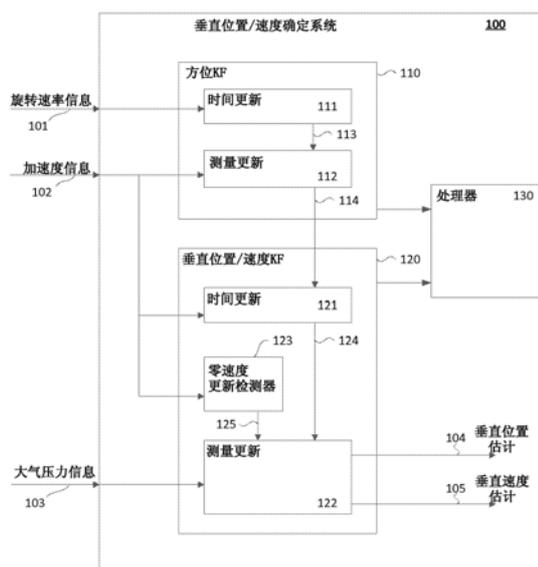
权利要求书3页 说明书12页 附图5页

(54)发明名称

用于垂直轨迹确定和自动跳跃检测的方法和系统

(57)摘要

本公开提供了一种用于与气压高度计集成在同一设备中的惯性测量单元(IMU)(IMU-baro)的跳跃检测系统。处理器被配置为:记录测得的IMU-baro加速器的垂直分量和IMU-baro的所估计的垂直速度两者的时间序列数据;通过将测得的IMU-baro加速度的垂直分量与一个或多个加速度阈值进行比较来检测潜在跳跃;以及通过将IMU-ECU的所估计的垂直速度的时间序列数据中的潜在跳跃附近内的最大速度和最小速度之间的差与速度阈值进行比较来验证潜在跳跃。



1. 一种用于与气压高度计集成在同一设备中的惯性测量单元IMU-baro的跳跃检测系统,所述系统包括:

第一Kalman滤波器,连接到旋转速率输入和加速度输入,用于:基于测得的IMU-baro方位和测得的IMU-baro加速度来估计IMU-baro的侧倾和俯仰;

第二Kalman滤波器,连接到所述加速度输入、大气压力输入和所述第一Kalman滤波器;所述第二Kalman滤波器与所述第一Kalman滤波器级联,用于:从所述第一Kalman滤波器接收IMU-baro的所估计的侧倾角和俯仰角,并且基于测得的IMU-baro加速度、使用气压高度计测得的大气压力以及IMU-baro的所估计的侧倾和俯仰,来估计IMU-baro的垂直位置和垂直速度;和

处理器,连接到所述第一Kalman滤波器和所述第二Kalman滤波器,所述处理器被配置为:

记录测得的IMU-baro加速度的垂直分量和IMU-baro的所估计的垂直速度两者的时间序列数据;

通过将测得的IMU-baro加速度的垂直分量与一个或多个加速度阈值进行比较,来检测潜在跳跃;以及

通过将IMU-baro的所估计的垂直速度的时间序列数据中的潜在跳跃附近内的最大速度和最小速度之间的差与速度阈值进行比较,来验证所述潜在跳跃。

2. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述处理器进一步被配置为:通过将测得的IMU-baro加速度的垂直分量与第一加速度阈值进行比较来检测潜在的跳跃起跳,并且通过将测得的IMU-baro加速度的垂直分量与第二加速度阈值进行比较来检测潜在的跳跃着陆。

3. 根据权利要求2所述的系统,其中,所述处理器进一步被配置为:基于潜在跳跃起跳的检测和潜在跳跃着陆的检测来记录所述潜在跳跃的持续时间,并且将所述潜在跳跃的持续时间与持续时间阈值进行比较,以便进一步验证所述潜在跳跃。

4. 根据权利要求3所述的系统,其中,所述处理器通过搜索潜在跳跃开始前的最大垂直速度并搜索潜在跳跃结束后的最小垂直速度,并且通过从所述最大垂直速度中减去所述最小垂直速度,来确定所估计的垂直速度的时间序列数据中的差。

5. 一种计算机程序产品,包括计算机可用介质,所述计算机可用介质具有体现在其中的计算机可读程序代码,所述计算机可读程序代码适于被执行以实现如下指令:

测量与气压高度计集成在同一设备中的惯性测量单元IMU-baro的旋转速率、IMU-baro的加速度和大气压力;

基于旋转速率测量和加速度测量,根据第一Kalman滤波器操作估计IMU-baro的侧倾和俯仰;

将来自所述第一Kalman滤波器操作的侧倾和俯仰估计提供到第二Kalman滤波器操作;

基于加速度测量、大气压力测量和侧倾和俯仰估计,根据所述第二Kalman滤波器操作估计IMU-baro的垂直位置和速度;以及

基于所估计的垂直位置和速度来确定IMU-baro的垂直位置和速度;以及

记录测得的IMU-baro加速度的垂直分量和IMU-baro的所估计的垂直速度两者的时间序列数据;

通过将测得的IMU-baro加速度的垂直分量与一个或多个加速度阈值进行比较,来检测

潜在跳跃;以及

通过将IMU-baro的所估计的垂直速度的时间序列数据中的潜在跳跃附近内的最大速度和最小速度之间的差与速度阈值进行比较,来验证所述潜在跳跃。

6. 根据权利要求5所述的计算机程序产品,所述计算机可读程序代码进一步适于被执行以实现如下指令:

通过将测得的IMU-baro加速度的垂直分量与第一加速度阈值进行比较来检测潜在跳跃起跳,并且通过将测得的IMU-baro加速度的垂直分量与第二加速度阈值进行比较来检测潜在跳跃着陆。

7. 根据权利要求5所述的计算机程序产品,所述计算机可读程序代码进一步适于被执行以实现如下指令:

基于潜在跳跃起跳的检测和潜在跳跃着陆的检测来记录所述潜在跳跃的持续时间,并且将所述潜在跳跃的持续时间与持续时间阈值进行比较,以便进一步验证所述潜在跳跃。

8. 根据权利要求5所述的计算机程序产品,所述计算机可读程序代码进一步适于被执行以实现如下指令:

通过搜索潜在跳跃开始前的最大垂直速度并识别潜在跳跃结束后的最小垂直速度,并且通过从所述最大垂直速度中减去所述最小垂直速度,来确定所估计的垂直速度的时间序列数据中的差。

9. 一种用于跳跃检测的装置,包括与气压高度计集成在同一设备中的惯性测量单元IMU-baro,所述装置包括:

第一Kalman滤波器,连接到旋转速率输入和加速度输入,用于:基于测得的IMU-baro方位和测得的IMU-baro加速度来估计IMU-baro的侧倾和俯仰;

第二Kalman滤波器,连接到所述加速度输入、大气压力输入和所述第一Kalman滤波器;所述第二Kalman滤波器与所述第一Kalman滤波器级联,用于:从所述第一Kalman滤波器接收IMU-baro的所估计的侧倾角和俯仰角,并且基于测得的IMU-baro加速度、使用气压高度计测得的大气压力以及IMU-baro的所估计的侧倾和俯仰,来估计IMU-baro的垂直位置和垂直速度;和

处理器,连接到所述第一Kalman滤波器和所述第二Kalman滤波器,所述处理器被配置为:

记录测得的IMU-baro加速度的垂直分量和IMU-baro的所估计的垂直速度两者的时间序列数据;

通过将测得的IMU-baro加速度的垂直分量与一个或多个加速度阈值进行比较,来检测潜在跳跃;以及

通过将IMU-baro的所估计的垂直速度的时间序列数据中的潜在跳跃附近内的最大速度和最小速度之间的差与速度阈值进行比较,来验证所述潜在跳跃。

10. 根据权利要求9所述的装置,其中,所述处理器进一步被配置为:

通过将测得的IMU-baro加速度的垂直分量与第一加速度阈值进行比较来检测潜在跳跃起跳,并且通过将测得IMU-baro加速度与第二加速度阈值进行比较来检测潜在跳跃着陆。

11. 根据权利要求10所述的装置,其中,所述处理器进一步被配置为:

基于潜在跳跃起跳的检测和潜在跳跃着陆的检测来记录所述潜在跳跃的持续时间,并且将所述潜在跳跃的持续时间与持续时间阈值进行比较,以便进一步验证所述潜在跳跃。

12. 根据权利要求11所述的装置,其中,所述处理器通过搜索潜在跳跃开始前的最大垂直速度并搜索潜在跳跃结束后的最小垂直速度,并且通过从所述最大垂直速度中减去所述最小垂直速度,来确定所估计的垂直速度的时间序列数据中的差。

用于垂直轨迹确定和自动跳跃检测的方法和系统

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本公开要求于2014年10月1日提交的题为“Methods and System for Vertical Trajectory Determination”的美国临时申请No.62/058,517以及于2015年1月9日提交的题为“Methods and System for Vertical Trajectory Determination and Automatic Jump Detection”的美国临时申请No.62/101,942的权益,它们通过引用全部并入本文。

技术领域

[0003] 本公开涉及包括MEMS惯性测量单元的惯性导航系统以及用于捕获和跟踪在垂直方向上的人体运动的其它系统。

背景技术

[0004] 关键表现变量 (KPV) 是运动员表现的定量测量。通过访问和回顾运动员的KPV,运动员可以显著地提高整体表现:KPV允许运动员与教练共享表现信息,随时间记录和跟踪表现,并向运动员提供实时反馈。

[0005] 在诸如滑雪和单板滑雪的运动中,KPV可以描述跳跃的表现。跳跃的KPV可以包括:1) 空中时间(从起跳到着陆的跳跃持续时间),2) 距离(运动员从起跳到着陆的水平位移),3) 高度(运动员达到的最大垂直高度),以及4) 旋转度(运动员在跳跃期间实现的旋转)。这些KPV可以用于向运动员提供反馈和激励。

[0006] 目前可用的基于视频或基于摄像机的运动捕获(MOCAP)方法提供很少的定量变量。此外,这些MOCAP技术被限于室内使用或不适于户外体育的运动捕捉的有限区域,这些户外体育例如滑雪、单板滑雪、滑旱冰和骑自行车,因为这些活动发生在较长的距离上。

[0007] 另一方面,惯性导航系统(INS)是自足式的(self-contained),因此可以提供对高级运动和位置信息的无约束的可访问性。INS广泛用于各种MOCAP应用,例如船舶和飞机导航、紧固工具和钢笔跟踪以及运动分析,以提供诸如姿势、速度和位置等信息。

[0008] 近来,微型微机电系统(MEMS)惯性设备已经变得更加普遍,并且小尺寸的MEMS惯性设备已经导致了使用可穿戴MOCAP技术进行人体运动跟踪的INS的出现。通常,可穿戴MOCAP设备利用MEMS惯性测量单元(MEMS-IMU)和/或绝对位置传感器来捕获用于室内/室外定位的运动。例如,MOCAP相机系统可以用作绝对位置传感器并被添加到惯性设备,用于在室内环境中进行更精确的人体定位。对于室外环境,全球定位系统(GPS)是示例性绝对位置传感器,其可以用于加强惯性测量单元进行更精确的人体定位。

[0009] 上述GPS/MEMS-IMU集成方法的缺点在于,消费者级GPS导出的垂直位置(或高度)信息通常比水平位置信息在精度上低得多。GPS高度测量精度会变化高达40米(通常为10米至20米);这种不精确性的最重要原因是卫星可见度(即在地平线上几乎没有可见的卫星)以及多径信号效应。实时GPS技术,例如实时运动学GPS和差分GPS提供更高的位置精度,但是其高昂的成本对于运动消费电子市场来说是限制因素。

附图说明

[0010] 在结合附图阅读以下对具体实施例的描述之后,本公开的其他方面和特征对于本领域技术人员将变得显而易见。

[0011] 现在将参照附图仅以示例的方式描述本公开的实施例。

[0012] 图1是根据本公开的实施例的垂直位置确定系统的框图。

[0013] 图2是根据本公开的实施例的垂直位置确定的方法的流程图。

[0014] 图3是示出根据本公开的实施例的阈值处理垂直加速度、垂直速度和时间的曲线图。

[0015] 图4是根据本公开的实施例的自动检测跳跃事件的方法的流程图。

[0016] 图5是根据本公开的实施例的用于垂直轨迹确定的装置的示意性框图。

具体实施方式

[0017] 图1示出了根据本公开的实施例的示例性垂直位置和速度确定系统100的框图。如下所述,在一些实施例中,系统100可以使得计算效率增加,并且可以实现于可穿戴电子设备中,以向设备的穿戴者提供垂直运动信息。

[0018] 系统100包括用于接收旋转速率(rate of turn)信息101、加速度信息102和大气压力信息103的输入。旋转速率信息输入101可以例如连接到陀螺仪,例如三轴陀螺仪(在图5中示为MEMS-IMU 504的一部分)。加速度信息输入102可以例如连接到加速度计,例如三轴加速度计(在图5中示为MEMS-IMU 504的一部分)。大气压力信息输入103可以例如连接到气压高度计(在图5中示为MEMS气压高度计502)。系统100可以与惯性测量单元(IMU)结合使用,IMU提供加速度计和陀螺仪,并且还集成有气压高度计。如本文所使用的,术语“IMU-baro”用于指代此类具有集成的气压高度计的IMU。系统100还包括垂直位置估计输出104和垂直速度估计输出105。

[0019] 垂直位置和速度确定系统100进一步包括级联的两级Kalman(卡尔曼)滤波器(KF)系统,其包括方位(orientation)KF 110和垂直位置/速度KF 120。第一级(方位KF 110)的输出被提供作为第二级(垂直位置/速度KF 120)的输入。

[0020] 方位KF 110包括重力矢量时间更新器111和重力矢量测量更新器112。重力矢量时间更新器111从旋转速率信息输入101生成传感器系(frame)(IMU的坐标系)中的重力矢量的预测113。重力矢量测量更新器112从重力矢量预测113和加速度信息输入102的加权组合,生成传感器系中的校正的重力矢量。然后,使用传感器系中的校正的重力矢量,重力矢量测量更新器112生成侧倾角和俯仰角信息114。如本文所使用的,术语“侧倾角”是指围绕水平轴沿着第一(例如前后)方向的旋转,并且术语“俯仰角”是指围绕水平轴沿着垂直于第一方向的第二(例如左右)方向的旋转。

[0021] 垂直位置/速度KF 120包括垂直位置/速度时间更新器121、垂直位置/速度测量更新器122和可选的零速度更新检测器123。垂直位置/速度时间更新器121从侧倾角和俯仰角信息114和加速度信息输入102,生成垂直位置/速度预测124。

[0022] 垂直位置/速度测量更新器122基于垂直位置/速度预测124和大气压力信息输入103的加权组合,生成校正的垂直位置估计104和垂直速度估计105。

[0023] 可选的零速度更新检测器123从加速度信息输入102生成零速度信号125。零速度

信号125在零速度更新检测器123检测到静态阶段(still phase)时迫使垂直速度估计105为零。

[0024] INS通过对外部加速度值进行积分而求解捷联式惯性导航公式,来估计包括位置和速度在内的导航参数。因此,重要的是INS通过从加速度计信号中减去重力加速度来精确地估计动态条件期间的外部加速度。为了实现这个减法函数,INS需要对其方位的精确估计。

[0025] 图1的实施例包括级联KF,其形式为方位KF与垂直位置/速度KF级联。级联KF提供良好的计算效率。级联KF具有比全局KF小得多的计算开销,因为与方位状态相关的计算与垂直位置/速度KF分开。因此,级联KF可以使用线性函数来实现,而全局KF将需要非线性Kalman滤波方法,例如扩展Kalman滤波器(EKF)或无迹Kalman滤波器(UKF)所利用的滤波方法。除了改善的计算成本之外,与全局KF相比,级联KF使得灵活性增加,且实现和调谐更容易。

[0026] 尽管级联KF与全局KF相比,在理论上产生次优(不太精确)的估计,但是在实践中为了惯性导航的目的,级联KF的性能与全局KF能够相比拟。根据本文公开的示例对示例级联KF系统的初步测试表明,对于慢运动、垂直跳跃和下降式跳跃垂直轨迹跟踪,垂直轨迹跟踪误差分别约为26.9cm、27.2cm和28.1cm。在附录A的文章中阐述了实验设置的细节和来自初步测试的进一步结果。

[0027] 使用Rauch-Tung-Striebel(RTS)平滑器观察到垂直轨迹跟踪精度的显著改善,如以下所讨论的。此外,基于实验结果,使用RTS-平滑器的平均跳跃KPV(高度/下降)确定误差对于垂直跳跃和下降式跳跃分别为大约2.9cm和5.8cm(与在垂直方向上的一些地点的GPS的~40m误差相比)。对于跳跃高度的幅度是小的娱乐目的来说,这个实现的精度应当是足够的。另一方面,竞技体育跳跃中的跳跃高度的幅度远高于娱乐跳跃中的跳跃高度的幅度。因此,所实现的约2.9cm至5.8cm的跳跃KPV确定精度对于使用可穿戴技术的户外测量目的来说也应当是足够的。

[0028] 现在将描述级联KF中的各个滤波器,即方位KF 110和垂直位置/速度KF 120的结构。在下面的描述中,下标1和下标2分别指代方位KF 110和垂直位置/速度KF 120的变量。

[0029] 方位KF 110生成侧倾角和俯仰角信息114。侧倾角和俯仰角信息114对于在垂直方向上的重力加速度补偿和惯性运动跟踪来说是足够的。因此,不需要全部三维方位的信息。

[0030] 三轴陀螺仪和三轴加速度计分别向方位KF 110提供旋转速率信息输入101和加速度信息输入102。重力矢量时间更新器111执行下面的公式1的函数,以从旋转速率信息输入101生成传感器系中的重力矢量的预测113。

[0031] $x_1(k) = A_1(k-1)x_1(k-1) + w_1(k-1)$ (公式1)

[0032] 在公式1中, $x_1(k)$ 是在步骤k处的方位KF 110的 3×1 状态矢量;因此, $x_1(k)$ 是传感器系中的归一化重力矢量; A_1 是状态转移矩阵; w_1 是过程模型噪声矢量。重力矢量时间更新器111使用先前的重力矢量预测 $x_1(k-1)$,根据预测模型生成传感器系中的重力矢量 $x_1(k)$ 的预测113。

[0033] 重力矢量测量更新器112执行下面的公式2的函数,以使用来自加速度信息输入102的测量来更新重力矢量预测113。

[0034] $z_1(k) = C_1(k)x_1(k) + v_1(k)$ (公式2)

[0035] 在公式2中, z_1 是测量矢量(即,在加速度计的传感器系中测得的重力矢量); C_1 是 3×3 观测矩阵; V_1 是测量模型噪声矢量。

[0036] 公式1和公式2的矩阵从下面的公式3至公式13来计算。

[0037] 生成方位KF的重力矢量预测

$$[0038] \quad \mathbf{A}_1(k-1) = \mathbf{I}_3 - \Delta t \tilde{\mathbf{y}}_G(k-1) \quad (\text{公式 3})$$

[0039] 状态转移矩阵 $\mathbf{A}_1(k-1)$ 是从 \mathbf{I}_3 和 $\tilde{\mathbf{y}}_G$ 导出的, \mathbf{I}_3 是 3×3 单位矩阵, $\tilde{\mathbf{y}}_G$ 是三轴陀螺仪测量的 3×3 斜对称矩阵。

$$[0040] \quad \mathbf{w}_1(k-1) = \Delta t(-\tilde{\mathbf{x}}_1(k))\mathbf{n}_G \quad (\text{公式 4})$$

[0041] 过程模型噪声矢量 $w_1(k-1)$ 基于 $\tilde{\mathbf{x}}_1$ 和 \mathbf{n}_G , 并且被假定为不相关和零均值白高斯, 其中, $\tilde{\mathbf{x}}_1$ 是 x_1 的 3×3 的斜对称矩阵, \mathbf{n}_G 是陀螺仪测量噪声矢量。

[0042] 因此, 公式1、公式3和公式4定义了重力矢量预测113。以这种方式, 重力矢量时间更新器111从 $\tilde{\mathbf{y}}_G$ (旋转速率信息输入101) 导出 $x_1(k)$ (重力矢量预测113)。

[0043] 生成方位KF的侧倾角和俯仰角信息

$$[0044] \quad C_1(k) = g \mathbf{I}_3 \quad (\text{公式 5})$$

[0045] 在公式5中, 3×3 观测矩阵 C_1 是从 3×3 单位矩阵 \mathbf{I}_3 和重力矢量的范数 g 导出的。

$$[0046] \quad \mathbf{v}_1(k) = -{}^s\mathbf{a}_e^-(k) + \mathbf{n}_A \quad (\text{公式 6})$$

[0047] 在公式6中, 测量模型噪声矢量 V_1 是从 ${}^s\mathbf{a}_e^-(k)$ 和 \mathbf{n}_A 导出的, 并且假定为不相关和零均值白高斯, 其中, ${}^s\mathbf{a}_e^-(k)$ 是加速度计的传感器系中的外部加速度误差, \mathbf{n}_A 是陀螺仪测量噪声矢量。

[0048] 公式7和公式8描述了加速度计的传感器系中的外部加速度误差。

$$[0049] \quad {}^s\mathbf{a}_e^-(k) = {}^s\mathbf{a}^-(k) - {}^s\mathbf{a}(k) \quad (\text{公式 7})$$

$$[0050] \quad {}^s\mathbf{a}^-(k) = c_a {}^s\mathbf{a}^+(k-1) \quad (\text{公式 8})$$

[0051] 在公式7中, ${}^s\mathbf{a}(k) = c_a {}^s\mathbf{a}(k-1) + \varepsilon(k)$, 其中, $\varepsilon(k)$ 是外部加速度过程模型的时间变化误差。在公式7和公式8中, 上标+和-分别表示方位KF 110中的“后验”和“先验”估计; 上标S表示该量在传感器系中; c_a 是0和1之间的无量纲常数, 其确定外部加速度模型中的截止频率。

$$[0052] \quad z_1(k) = y_A(k) - c_a {}^s\mathbf{a}^+(k-1) \quad (\text{公式 9})$$

$$[0053] \quad {}^s\mathbf{a}^+(k) = \mathbf{y}_A(k) - g\mathbf{x}_1^+(k) \quad (\text{公式 10})$$

[0054] 公式2中的测量矢量 z_1 由公式9和公式10定义, 其中, $y_A(k)$ 是加速度计的偏置补偿输出矢量; 并且传感器系中的所估计的归一化重力矢量是 $\mathbf{x}_1^+(k)$ 。因此, 公式2以及公式5-10定义了传感器系中的所估计的归一化重力矢量 $\mathbf{x}_1^+(k)$ 。

$$[0055] \quad \gamma = \tan^{-1}\left(\frac{x_{1,y}}{x_{1,z}}\right), \beta = \tan^{-1}\left(\frac{-x_{1,x}}{x_{1,y}/\sin\gamma}\right) \quad (\text{公式 11})$$

[0056] 公式11使用传感器系中的所估计的归一化重力矢量 $\mathbf{x}_1^+(k) = [x_{1,x} \quad x_{1,y} \quad x_{1,z}]^T$, 来生

成计算出的侧倾角(γ)和俯仰角(β)。根据公式2以及公式5-11,重力矢量测量更新器112从 $y_A(k)$ (加速度信息输入102)并且从 $x_1(k)$ (重力矢量预测113),生成指示侧倾角(γ)和俯仰角(β)的方位信号114。

$$[0057] \quad \mathbf{Q}_1(k-1) = -\Delta t^2 \tilde{\mathbf{x}}_1(k-1) \Sigma_G \tilde{\mathbf{x}}_1(k-1) \quad (\text{公式 12})$$

$$[0058] \quad R_1(k) = \Sigma_{acc} + \Sigma_A \quad (\text{公式 13})$$

[0059] 公式12和公式13定义了方位KF 110中的过程和测量噪声协方差矩阵。使用过程模型噪声矢量 $w_1(k-1)$ 来计算过程噪声协方差矩阵 $Q_1(k-1)$,其等于 $E[w_1(k-1)w_1(k-1)^T]$,其中, E 是预期算子。 Σ_G 是陀螺仪测量噪声的协方差矩阵,其被定义为 $E[n_G n_G^T]$ 。通过假定陀螺噪声方差在三个轴上等于 σ_G , Σ_G 被设定为 $\sigma_G^2 \mathbf{I}_3$ 。

[0060] 测量噪声协方差矩阵 $R_1(k)$ 使用测量模型噪声矢量 $v_1(k)$ 来计算并且等于 $E[v_1(k)v_1(k)^T]$ 。 Σ_A 是加速度计的测量噪声的协方差矩阵,其被设定为 $\sigma_a^2 \mathbf{I}_3$ 。 Σ_{acc} 是加速度模型的协方差,并且被设定为 $3^{-1} \mathbf{c}_a^2 \|\mathbf{a}^+(k-1)\|^2$ 。

[0061] 生成垂直位置/速度KF的垂直位置/速度预测

[0062] 垂直位置/速度KF 120生成垂直位置估计104和垂直速度估计105。方位KF 110、三轴加速度计和气压高度计分别将侧倾角(γ)和俯仰角(β)(来自方位信号114)、加速度信息(来自输入102)和大气压力信息(来自输入103)提供到垂直位置/速度KF 120。

[0063] 垂直位置/速度时间更新器121执行下面的公式14的函数,以从来自方位信号114的侧倾角和俯仰角以及来自输入102的加速度信息生成垂直位置/速度预测124。

$$[0064] \quad x_2(k) = A_2(k-1)x_2(k-1) + B_2(k-1)u_2(k-1) + w_2(k-1) \quad (\text{公式 14})$$

[0065] 在公式14中, $x_2(k) = [h(k) v(k)]^T$ 是垂直位置/速度KF 120的状态矢量,包括垂直位置分量和垂直速度分量; $A_2(k-1)$ 和 $B_2(k-1)$ 是垂直位置/速度KF 120的状态转换矩阵和输入矩阵; $u_2(k-1)$ 是输入矢量,其包括导航系中的重力补偿加速度的垂直分量,并且是使用输入102和输入114来计算的; $w_2(k-1)$ 是过程噪声的 2×1 矢量。

$$[0066] \quad \mathbf{A}_2(k-1) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{公式 15})$$

$$[0067] \quad \mathbf{B}_2(k-1) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ \Delta t \end{bmatrix} \quad (\text{公式 16})$$

[0068] 公式15和公式16分别定义状态转换矩阵和输入矩阵 $A_2(k-1)$ 和 $B_2(k-1)$ 。

$$[0069] \quad u_2(k-1) = ([0 \ 0 \ 1]) \cdot ({}^n \mathbf{R}_{\gamma, \beta} y_A(k-1) + [0 \ 0 \ g]^T) \quad (\text{公式 17})$$

[0070] 公式17定义导航系中的重力补偿加速度的垂直分量。导航系中的重力补偿加速度的垂直分量的值基于旋转矩阵 ${}^n \mathbf{R}_{\gamma, \beta}$,其是使用来自方位信号114的侧倾角(γ)和俯仰角(β)以及来自输入102的加速度 $y_A(k-1)$ 计算的。 ${}^n \mathbf{R}_{\gamma, \beta}$ 将加速度计传感器系的z轴与导航系对准。

$$[0071] \quad {}_s^n \mathbf{R}_{\gamma,\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (\text{公式 18})$$

$$[0072] \quad \mathbf{w}_2(k-1) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ \Delta t \end{bmatrix} \sigma_A \quad (\text{公式 19})$$

[0073] 公式18和公式19分别描述了旋转矩阵 ${}_s^n \mathbf{R}_{\gamma,\beta}$ 和过程噪声的 2×1 矢量 $\mathbf{w}_2(k-1)$ ， ${}_s^n \mathbf{R}_{\gamma,\beta}$ 将加速度计传感器系的z轴与导航系对准。

[0074] 根据公式14-19，垂直位置/速度时间更新器121从来自方位信号114的侧倾角(γ)和俯仰角(β)以及加速度信息输入102生成垂直位置/速度预测124， $\mathbf{x}_2(k)$ 。

[0075] 生成垂直位置/速度KF的垂直位置估计和垂直速度估计

[0076] 垂直位置/速度测量更新器122执行下面的公式20的函数，以从垂直位置/速度预测124和气压计信息输入103，生成垂直位置估计104和垂直速度估计105。

$$[0077] \quad z_2(k) = C_2(k) \mathbf{x}_2(k) + v_2(k) \quad (\text{公式 20})$$

[0078] 在公式20中， $z_2(k)$ 是从气压计信息输入103计算的相对高度(Δh_{baro})； $C_2(k)$ 是观测矩阵； $v_2(k)$ 是测量噪声。

$$[0079] \quad z_2(k) \triangleq \Delta h_{\text{baro}} = 44330 \left(1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.19} \right) - h_{\text{init}} \quad (\text{公式 21})$$

[0080] 公式21描述了气压计信息输入103，P，如何用在垂直位置/速度测量更新器122中。在公式21中， Δh_{baro} 是相对于参考位置的初始高度(h_{init})的相对高度； h_{init} 是使用在参考位置处的初始压力数据来计算的，(h_{init} 可以例如使用如下所述的稳定初始化来计算)； P_0 是等于101,325Pa的标准压力。由于气压高度计中存在显著的量化噪声，因此应当使用滚动平均滤波器来提高气压高度测量的精度，并且在测量噪声 $v_2(k)$ 中应当考虑其残差。

$$[0081] \quad C_2(k) = [1 \ 0] \quad (\text{公式 22})$$

[0082] 公式22定义了观测矩阵 $C_2(k)$ 。

$$[0083] \quad \begin{aligned} \mathbf{Q}_2(k-1) &= \mathbf{B}_2(k-1) E[\mathbf{w}_2(k-1) \mathbf{w}_2(k-1)^T] \mathbf{B}_2(k-1)^T \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ \Delta t \end{bmatrix} \sigma_A^2 \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ \Delta t \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (\text{公式 23})$$

[0084] 公式23定义使用过程噪声矢量 $\mathbf{w}_2(k-1)$ 和输入矩阵 $\mathbf{B}_2(k-1)$ 计算出的过程噪声协方差矩阵 $\mathbf{Q}_2(k-1)$ 。

$$[0085] \quad \mathbf{R}_2(k) = \sigma_{\text{baro}}^2 \quad (\text{公式 24})$$

[0086] 公式24定义测量噪声协方差矩阵 $\mathbf{R}_2(k)$ ，其中， σ_{baro}^2 是气压计噪声方差。通过 $E[v_2(k) v_2(k)^T]$ 获得测量噪声协方差矩阵 $\mathbf{R}_2(k)$ 。

[0087] 根据公式20-24，垂直位置/速度测量更新器122利用从气压计信息输入103导出的相对高度测量 $z_2(k)$ 来校正垂直位置/速度预测124， $\mathbf{x}_2(k) = [h(k) \ v(k)]^T$ ，以生成垂直位置

估计104, $h(k)$ 和垂直速度估计105, $h(k)$ 。

[0088] 图1的垂直位置/速度确定系统在不使用GPS的情况下有利地提供了相对高度测量的精确估计。因此,垂直位置和速度确定系统100可以与GPS/MEMS-IMU组合,以使GPS/MEMS-IMU增强有改进的垂直位置确定。垂直位置和速度确定系统100特别地与GPS/MEMS-IMU互补,因为在稳定状态下,GPS可以用于初始化(到绝对高度)垂直位置确定系统的气压高度计;而在动态状态下,垂直位置和速度确定系统100可以提供相对高度测量的精确估计,而不依赖于GPS的不精确的动态高度测量。

[0089] 在图1的进一步实施例中,垂直位置和速度确定系统100可选地包括零速度更新检测器123,用于限制INS中的漂移误差。可选的零速度更新检测器123从加速度信息输入102生成零速度信号125。零速度信号125在零速度更新检测器123检测到静态阶段时,迫使垂直速度估计105为零。在一些实施例中,通过对由加速度计测得的加速度信号的范数设定阈值,并且加速度信号低于阈值时确定静态阶段,来检测静态阶段。

[0090] 在一些实施例中,可以使用稳态初始化(stationary initialization)来校准垂直位置和速度确定系统100。在静态初始化期间,计算初始姿态和传感器偏置。在方位KF 110中使用三轴加速度计和三轴陀螺仪数据来计算初始倾斜角的平均值。传感器系中的外部加速度 $s_a^+(k)$ 是方位KF 110的副产品。然而,由于外部加速度在稳态初始化步骤期间应该为零,所以 $s_a^+(k)$ 的平均值被认为是传感器系中的加速度计偏置矢量。假设MEMS陀螺仪对于测量地球的旋转速率是不够精确的,则陀螺仪偏置矢量被计算为在该稳态初始化步骤期间的三轴陀螺仪测量的平均值。这些偏置值被假定为在稳态初始化过程之间的操作期间是恒定的。然后从测得的加速度计和陀螺仪信号中减去所估计的加速度计和陀螺仪偏置,以用于垂直轨迹估计。在稳态初始化步骤期间,速度被设定为零,并且通过从参考系统获得的初始高度来校准气压高度计中的 h_{init} 。该参考系统可以提供用于绝对高度跟踪的实际椭球面高度(例如从GPS获得的高度),或者提供用于相对高度跟踪的相对于任意坐标系的相对高度(例如从基于相机的MOCAP系统获得的高度)。

[0091] 在本公开的又一实施例中,垂直位置和速度确定系统100包括轨迹平滑器(如图5所示)。在不需要实时数据处理的应用中,可以通过平滑来进一步提高垂直位置估计的精度,平滑将正向和反向处理的数据组合。在一个示例中,垂直位置确定系统100的轨迹平滑器被配置为Rauch-Tung-Striebel (RTS) 轨迹平滑器。RTS平滑器是在导航应用中广泛使用的轨迹平滑器,用于平滑位置和速度轨迹。RTS平滑器包括一个正向数据处理部分和一个反向数据处理部分。RTS平滑器的正向处理部分是垂直位置和速度确定系统100的垂直位置/速度KF 120。RTS平滑器存储来自正向处理部分的估计及其协方差,然后使用以下公式25-27在反向扫描中递归地更新平滑的估计及其协方差:

$$[0092] \quad \mathbf{K}_s(k) = \mathbf{P}_2^+(k) \mathbf{A}_2(k) [\mathbf{P}_2^-(k+1)]^{-1} \quad (\text{公式 25})$$

$$[0093] \quad \mathbf{P}_s(k) = \mathbf{P}_2^+(k) + \mathbf{K}_s(k) [\mathbf{P}_s(k+1) - \mathbf{P}_2^-(k+1)] \mathbf{K}_s(k)^T \quad (\text{公式 26})$$

$$[0094] \quad \mathbf{x}_s(k) = \mathbf{x}_2^+(k) + \mathbf{K}_s(k) [\mathbf{x}_s(k+1) - \mathbf{x}_2^-(k+1)] \quad (\text{公式 27})$$

[0095] 在公式25-27中, \mathbf{P}_2^+ 和 \mathbf{P}_2^- 是“后验”和“先验”协方差估计; \mathbf{K}_s 是平滑后的增益; \mathbf{x}_2^+ 和 \mathbf{x}_2^- 是“后验”和“先验”状态估计; \mathbf{x}_s 是平滑后的状态矢量。所有上述变量与垂直位置/速度KF 120有关。

[0096] 处理器130可以连接到方位KF 110和垂直位置/速度KF 120。处理器130被配置为：记录测得的IMU-baro加速度的垂直分量和IMU-baro的所估计的垂直速度二者的时间序列数据；通过将测得的IMU-baro加速度的垂直分量与一个或多个加速度阈值进行比较来检测潜在跳跃；以及通过将IMU-baro的所估计的垂直速度的时间序列数据中的潜在跳跃附近内的最大速度和最小速度之间的差与速度阈值进行比较来验证潜在跳跃。

[0097] 图2示出了根据本公开的实施例的垂直位置/速度确定的方法200的流程图。

[0098] 在201,该方法测量与气压高度计集成在同一设备中的惯性测量单元(IMU)(IMU-baro)的旋转速率、IMU-baro的加速度,并且使用来自气压高度计的大气压力信息测量IMU-baro的高度。在实施例中,这些测量包括噪声数据;也就是说,测量值固有地包括误差,例如由传感器噪声引起的误差。

[0099] 在202,该方法根据第一Kalman滤波操作,基于旋转速率测量和加速度测量来估计IMU-baro的侧倾和俯仰。在实施例中,在202处的估计进一步包括在Kalman滤波器中进行递归的预测和校正步骤。

[0100] 预测包括:基于使用来自陀螺仪的旋转速率测量和IMU-baro传感器系中的先前重力加速度的捷联积分,来预测IMU-baro传感器系中的重力加速度矢量。校正包括:将传感器系中的重力加速度矢量的预测与来自加速度计的测量组合,以生成传感器系中的重力加速度矢量的估计。最后,侧倾角和俯仰角函数从传感器系中的所估计的重力加速度矢量计算估计的侧倾角和俯仰角。

[0101] 在203,该方法将来自第一Kalman滤波操作的侧倾估计和俯仰估计提供到第二Kalman滤波操作。在实施例中,第一Kalman滤波操作的输出是第二Kalman滤波操作的输入。

[0102] 在204,该方法根据第二Kalman滤波操作,基于加速度测量、大气压力测量以及侧倾估计和俯仰估计,来估计IMU-BARO的垂直位置/速度。在实施例中,在204处的估计进一步包括在Kalman滤波器中进行递归的预测和校正。

[0103] 预测包括:基于使用IMU-baro的加速度以及先前垂直位置和垂直速度的捷联积分来预测垂直位置(高度)和垂直速度。

[0104] 校正包括:在Kalman滤波器中,将预测的垂直位置和垂直速度与来自气压高度计的测得的垂直位置(高度测量)组合,以生成垂直位置和垂直速度估计。

[0105] 图3是示出示例跳跃的随时间的示例垂直加速度和垂直速度的曲线图。实线示出了根据本公开的实施例的来自IMU-baro设备的示例垂直加速度信号301(针对重力归一化)。虚线示出了示例垂直速度信号302,其可以例如是根据本公开的实施例的来自IMU-baro的估计速度。图3示出了根据本公开的实施例的可以与自动跳跃检测的某些阈值进行比较的加速度信号301和速度信号302的多个特性,如下面进一步讨论的。

[0106] 当加速度信号301下降到低于第一加速度阈值(例如,当加速度信号301针对重力被归一化时,为零)时,可以确定加速度信号301中的起跳指示符303,用于指示潜在跳跃事件的开始。

[0107] 可以将加速度信号301中的起跳后的峰值加速度304与第二加速度阈值进行比较,当垂直加速度超过第二加速度阈值时,指示潜在跳跃事件的结束。第二加速度阈值被选择为对应于由设备测得的典型跳跃着陆力。第二加速度阈值可以例如为大约1g或更大。在一些实施例中,第二加速度阈值可以是大约1.1g。在一些实施例中,第二加速度阈值可以是

约1.25g。

[0108] 可以使用速度差305来将潜在跳跃验证为实际跳跃。速度差305可以被确定为：加速度信号301中的起跳指示符303的预定范围内（例如前一刻）的时间的速度信号302中的局部最大值与起跳后的峰值加速度304的预定范围内的时间的速度信号302中的局部最小值之间的差。速度差305可以与速度阈值进行比较，以验证跳跃。可以将速度阈值校准为对应于大多数典型跳跃并消除假跳跃。速度阈值可以例如是大约3m/s或更大。在一些实施例中，速度阈值可以是大约3.1m/s。在一些实施例中，速度阈值可以是大约4.3m/s。

[0109] 跳跃时间306可以用于将潜在跳跃验证为实际跳跃。跳跃时间306可以被确定为起跳指示符303与在起跳后的峰值加速度304前一刻的加速度信号301中的过零点307之间的时间。跳跃时间306可以与跳跃时间阈值进行比较，以验证跳跃。跳跃时间阈值可以被校准为对应于大多数典型跳跃并消除假跳跃。跳跃时间阈值可以例如是大约0.1s或更多。在一些实施例中，跳跃时间阈值可以是大约0.12s。在一些实施例中，跳跃时间阈值可以是大约0.30s。

[0110] 在所附的附录B的文章中阐述了所进行的实验细节和进一步示例阈值。

[0111] 图4示出了根据本公开的实施例的自动检测跳跃事件的方法400的流程图。方法400处理垂直加速度和垂直速度数据，以自动检测运动员的跳跃事件。方法400包括：在401，接收IMU、GPS和大气压力信息，以提供测得的IMU-baro加速度信号301和所估计的垂直速度信号302。加速度信号301和速度信号302可以例如利用如上文所公开的系统100来提供。在一些实施例中，方法400还可以包括：接收用于初始化绝对高度的GPS信息，如上所述。

[0112] 在402，该方法将测得的IMU-baro加速度信号301与第一加速度阈值进行比较，以识别指示潜在跳跃事件的开始的起跳指示符303。如果测得的IMU-baro加速度信号301保持高于第一加速度阈值，则该方法保持在402处，并且保持检查测得的IMU-baro加速度301是否下降到第一加速度阈值以下。

[0113] 一旦在402处，测得的IMU-baro加速度301下降到第一加速度阈值以下，就检测到潜在跳跃，并且该方法前进到403，以记录潜在跳跃的开始时间。在403，该方法进一步开始于：通过搜索在记录的开始时间之前的IMU-baro的所估计的垂直速度信号302中的局部最大值，来验证潜在跳跃。

[0114] 然后，方法400进行到404，在这里，继续监测来自垂直位置和速度确定系统100的IMU-baro的测得的IMU-baro加速度信号301和所估计的垂直速度信号302。在404，方法400将测得的IMU-baro加速度信号301与指示跳跃事件结束的第二加速度阈值进行比较。第二加速度阈值被校准为对应于典型的跳跃着陆力。如果测得的IMU-baro加速度信号301超过第二加速度阈值，则该方法识别着陆，并且进行到405。如果测得的IMU-baro加速度信号301没有超过第二加速度阈值，则进行到406，以便保持检查测得的IMU-baro加速度信号301是否超过第二加速度阈值。

[0115] 方法400将仅保持检查测得的IMU-baro加速度信号301是否超过第二加速度阈值长达在406处定义的预定时间。在406，方法比较自记录的跳跃开始起经过的跳跃时间与第一定时器阈值。第一定时器阈值被设定为使该方法在404处识别着陆仅达对于典型跳跃而言为合理的时间量。第一定时器阈值可以根据上下文和预期的跳跃类型而变化。例如，初步测试数据指示跳跃通常将具有至少0.15s的空中时间。第一定时器阈值可以例如在大约

0.1s至0.3s的范围内。在一些实施例中,跳跃时间阈值可以是大约0.12s。

[0116] 一旦在406处,总经过的跳跃时间超过第一定时器阈值,则该方法确定之前在402处识别的潜在跳跃是无效的。在402处可能因例如来自运动员的头部运动的测量噪声而检测到假跳跃。该方法返回到402,在这里,该方法继续监测测得的IMU-baro加速度信号301,以便识别未来的潜在跳跃。

[0117] 返回到405,该方法基于在404处的测得的IMU-baro加速度信号301超过第二加速度阈值的时间,来记录潜在跳跃的结束时间。例如,记录结束时间可以包括:识别在超过第二加速度阈值前一刻的加速度信号301中的过零点307。在405,方法400在记录的结束时间之后还搜索IMU-baro的所估计的垂直速度信号302中的最小值。

[0118] 然后,该方法进行到407,将与潜在跳跃相关联的速度差305与速度阈值进行比较。通过从在403处所识别的IMU-baro的最大估计垂直速度302减去在405处所识别的IMU-baro的最小估计垂直速度302来计算估计速度差305。有效跳跃具有典型的最小速度差(其可以被选择为速度阈值);因此,方法400将计算出的潜在跳跃的估计速度差305与速度阈值进行比较,速度阈值被校准为对应于大多数典型跳跃并消除假跳跃。如果计算出的估计速度差305小于速度阈值,则该方法返回到402,以便继续监测测得的IMU-baro加速度信号301,以识别未来的潜在跳跃。

[0119] 如果计算出的估计速度差305大于速度阈值,则方法进行到408,以便将潜在跳跃的总经过时间与跳跃时间阈值进行比较。通过从记录的结束时间减去记录的开始时间来计算总经过的跳跃时间。跳跃时间阈值被校准为对应于大多数典型跳跃并消除假跳跃。如果总经过的跳跃时间小于跳跃时间阈值,则该方法返回到402,以便继续监测测得的IMU-baro加速度信号301,以识别未来的潜在跳跃。

[0120] 如果在408处总经过的跳跃时间大于跳跃时间阈值,则该方法确定在402处检测到的潜在跳跃是有效的,并且进行到409,以记录测得的有效跳跃的数据。

[0121] 图5是根据本公开的实施例的用于垂直轨迹确定的装置500的示意性框图。装置500包括可穿戴设备502,其可以容纳图1和图5所示的各种硬件组件和软件组件。装置500包括用于接收旋转速率信息101、加速度信息102和大气压力信息103的输入。装置500可以与提供加速度计和陀螺仪的惯性测量单元(IMU)结合使用。在一些情况下,IMU还可以具有与其集成的气压高度计。如本文所使用的,术语“IMU-baro”用于指代这种具有集成气压高度计的IMU。

[0122] 旋转速率信息输入101可以例如连接到陀螺仪,例如三轴陀螺仪(在图5中示为MEMS-IMU 504的一部分)。加速度信息输入102可以例如连接到加速度计,例如三轴加速度计(在图5中示为MEMS-IMU 304的一部分)。大气压力信息输入103可以例如连接到气压高度计(在图5中示为MEMS气压高度计502)。装置500还包括垂直位置估计输出104和垂直速度估计输出105。

[0123] 在本公开的一些实施例中,垂直位置和速度确定装置500包括轨迹平滑器506(在图5中示为RTS 506)。在不需要实时数据处理的应用中,可以通过平滑来进一步提高垂直位置估计的精度,平滑将正向和反向处理的数据组合。在一个示例中,垂直位置确定装置500的轨迹平滑器被配置为Rauch-Tung-Striebel (RTS) 轨迹平滑器506。RTS平滑器506是在导航应用中广泛使用的轨迹平滑器,用于平滑位置和速度轨迹。

[0124] 本公开提供了用于垂直位置和速度确定的方法和系统。垂直位置和速度确定将来自垂直位置传感器(例如,使用压力测量导出高度信息的MEMS气压高度计)的垂直位置信息与从MEMS-IMU导出的方位(倾斜角)和加速度信息组合。MEMS气压高度计的输出与使用级联的两级Kalman滤波器(KF)系统的MEMS-IMU的输出相融合。

[0125] 所提出的处理需要无磁力计的MEMS-IMU来提供倾斜角,因此,垂直位置确定对磁干扰是鲁棒的。另外,级联KF的使用避免了需要传播附加状态,从而提高了位置确定方法的计算效率。因此,该位置确定方法适合于运动员穿戴的小型轻质的电池供电的电子设备。

[0126] 本公开另外提供了用于自动检测运动员的跳跃事件或跳跃活动的方法和系统。自动跳跃检测包括处理根据本公开的各种实施例确定的垂直位置和速度信息。

[0127] 本公开的一个方面提供了一种用于与气压高度计集成在同一设备中的惯性测量单元(IMU)(IMU-baro)的垂直位置和速度确定系统。该系统包括:旋转速率输入,被连接以接收测得的IMU-baro方位;加速度输入,被连接以接收测得的IMU-baro加速度;大气压力输入,被连接以接收测得的IMU-baro高度;第一Kalman滤波器,连接到旋转速率输入和加速度输入,以基于测得的IMU-baro方位和测得的IMU-baro加速度来估计IMU-baro的侧倾和俯仰;以及第二Kalman滤波器,连接到加速度输入、大气压力输入和第一Kalman滤波器;第二Kalman滤波器与第一Kalman滤波器级联,以从第一Kalman滤波器接收IMU-baro的所估计的侧倾角和俯仰角,并且基于测得的IMU-baro加速度、使用气压高度计测得的大气压力以及IMU-baro的所估计的侧倾和俯仰,来估计IMU-baro的垂直位置和垂直速度。

[0128] 本公开的另一方面提供了一种用于确定IMU-baro的高度的装置。该装置包括:第一Kalman滤波器,被配置为:基于测得的IMU-baro旋转速率且基于测得的IMU-baro加速度,估计IMU-baro的侧倾和俯仰;和第二Kalman滤波器,以级联布置的方式连接到第一Kalman滤波器,用于:接收IMU-baro的所估计的侧倾和俯仰。第二Kalman滤波器被配置为:基于IMU-baro的所估计的侧倾和俯仰、测得的IMU-baro加速度和测得的大气压力,来估计IMU-baro的垂直位置和垂直速度,并且输出IMU-baro的所估计的垂直位置和垂直速度。

[0129] 本公开的另一方面提供了一种确定IMU-baro的垂直位置和速度的方法。该方法包括:测量IMU-baro的旋转速率、IMU-baro的加速度和大气压力;基于旋转速率测量和加速度测量,根据第一Kalman滤波器操作估计IMU-baro的侧倾和俯仰;将来自第一Kalman滤波操作的侧倾和俯仰估计提供到第二Kalman滤波操作;基于加速度测量、大气压力测量以及侧倾和俯仰估计,根据第二Kalman滤波器操作估计IMU-baro的垂直位置和速度;以及基于所估计的垂直位置和速度来确定IMU-baro的垂直位置和速度;以及输出所确定的垂直位置和速度。

[0130] 本公开的另一方面提供了一种用于与气压高度计集成在同一设备中的惯性测量单元(IMU)(IMU-baro)的跳跃检测系统。该系统包括:旋转速率输入,被连接以接收测得的IMU-baro方位;加速度输入,被连接以接收测得的IMU-baro加速度;大气压力输入,被连接以接收测得的IMU-baro高度;第一Kalman滤波器,连接到旋转速率输入和加速度输入,用于:基于测得的IMU-baro方位和测得的IMU-baro加速度来估计IMU-baro的侧倾和俯仰;第二Kalman滤波器,连接到加速度输入、大气压力输入和第一Kalman滤波器,第二Kalman滤波器与第一Kalman滤波器级联,用于:从第一Kalman滤波器接收IMU-baro的所估计的侧倾角和俯仰角,并且基于测得的IMU-baro加速度、使用气压高度计测得的大气压力以及IMU-

baro的所估计的侧倾和俯仰,来估计IMU-baro的垂直位置和垂直速度;和处理器,连接到第一Kalman滤波器和第二Kalman滤波器。处理器被配置为:记录测得的IMU-baro加速度的垂直分量和IMU-baro的所估计的垂直速度两者的时间序列数据;通过将测得的IMU-baro加速度的垂直分量与一个或多个加速度阈值进行比较来检测潜在跳跃;以及通过将IMU-baro的所估计的垂直速度的时间序列数据中的潜在跳跃附近内的最大速度和最小速度之间的差与速度阈值进行比较,来验证潜在跳跃。

[0131] 本公开的另一方面提供一种使用IMU-baro检测跳跃的方法。该方法包括:测量IMU-baro的旋转速率、IMU-baro的加速度、和大气压力;根据第一Kalman滤波器操作,基于旋转速率测量和加速度测量来估计IMU-baro的侧倾和俯仰;将来自第一Kalman滤波器操作的侧倾和俯仰估计提供到第二Kalman滤波器操作;根据第二Kalman滤波器操作,基于加速度测量、大气压力测量以及侧倾和俯仰估计,来估计IMU-baro的垂直位置和速度;以及基于所估计的垂直位置和速度来确定IMU-baro的垂直位置和速度;以及记录测得的IMU-baro加速度的垂直分量和IMU-baro的所估计的垂直速度两者的时间序列数据;通过将测得的IMU-baro加速度的垂直分量与一个或多个加速度阈值进行比较来检测潜在跳跃。以及通过将IMU-baro的所估计的垂直速度的时间序列数据中的潜在跳跃附近内的最大速度和最小速度之间的差与速度阈值进行比较,来验证潜在跳跃。

[0132] 在前面的描述中,为了解释的目的,阐述了许多细节以便提供对实施例的透彻理解。然而,对本领域技术人员显而易见的是,这些具体细节不是必需的。在其他实例中,以框图形式示出了公知的电气结构和电路,以免掩盖理解。例如,关于本文描述的实施例是否实现为软件例程、硬件电路、固件还是其组合,并没有提供具体细节。

[0133] 本公开的实施例可以表示为存储在机器可读介质(也称为计算机可读介质、处理器可读介质或具有体现在其中的计算机可读程序的计算机可用介质)中的计算机程序产品代码。该机器可读介质可以是任何合适的有形非瞬时性介质,包括磁、光或者电存储介质,包括磁盘、光盘只读存储器(CD-ROM)、存储器设备(易失性或非易失性)或类似的存储机构。该机器可读介质可以包含各种指令集、代码序列、配置信息或其他数据,它们在被执行时使处理器执行根据本公开的实施例的方法中的步骤。本领域技术人员将理解,实现所描述的实现方式所必需的其他指令和操作也可以存储在机器可读介质上。存储在机器可读介质上的指令可以由处理器或其他合适的处理设备执行,并且可以与用于执行所描述的任务的电路接口连接。

[0134] 上述实施例仅旨在作为示例。本领域技术人员可以对特定实施例进行改变、修改和变化。权利要求的范围不应受到本文所阐述的特定实施例的限制,而是应以与整个说明书一致的方式来解释。

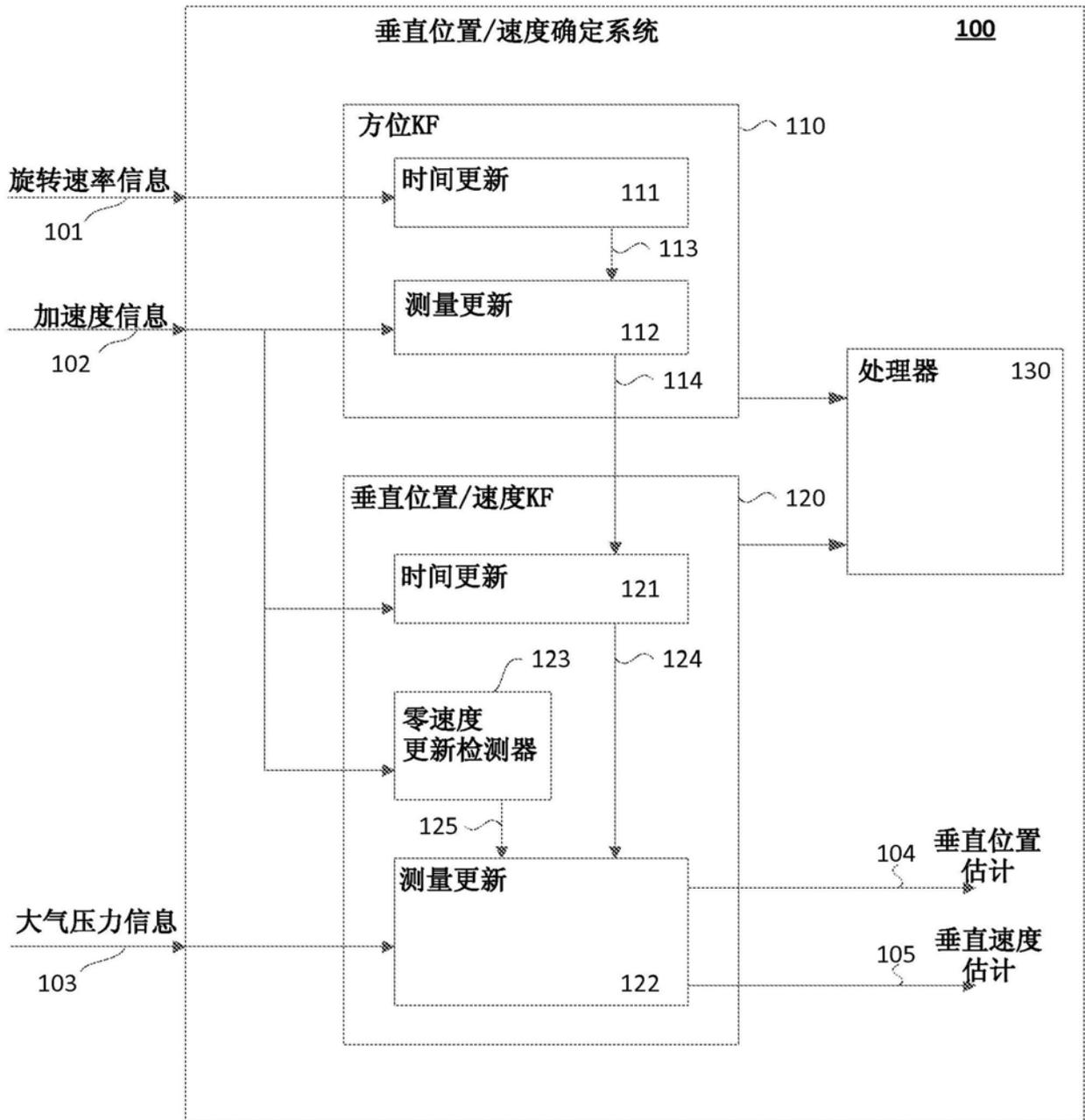


图1

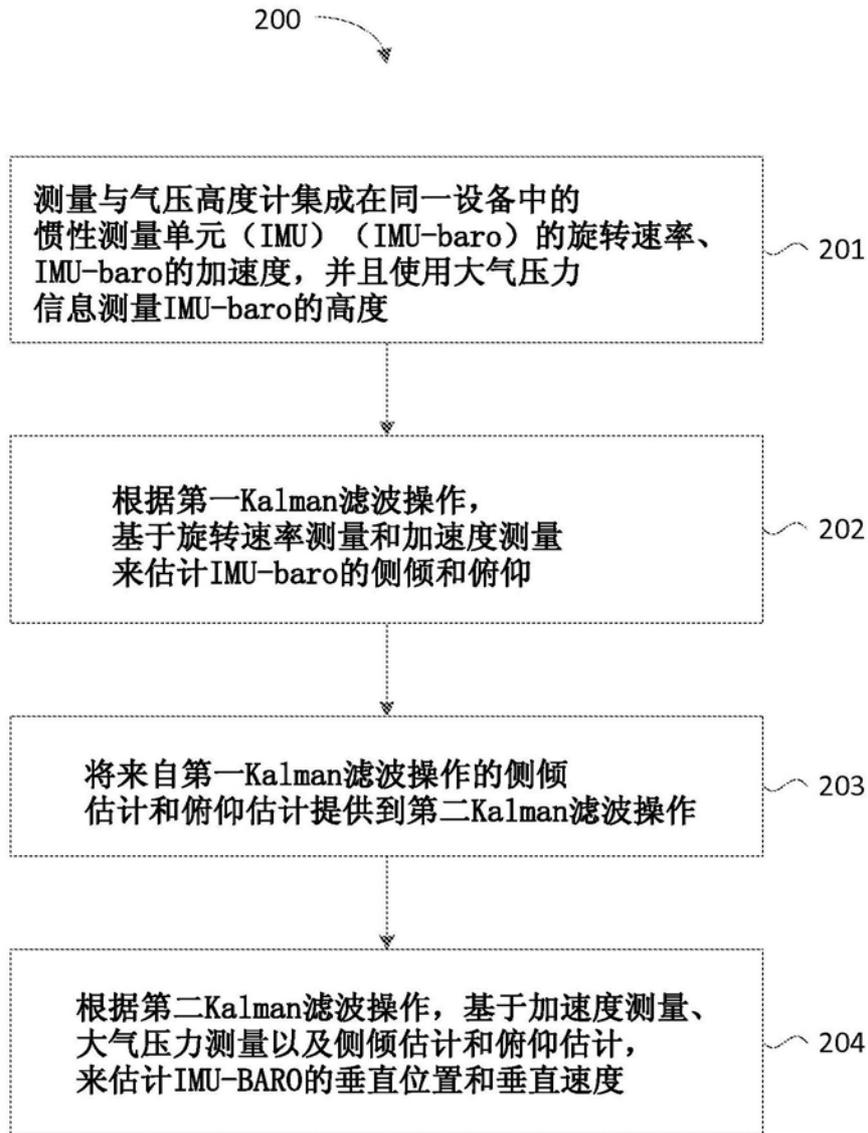


图2

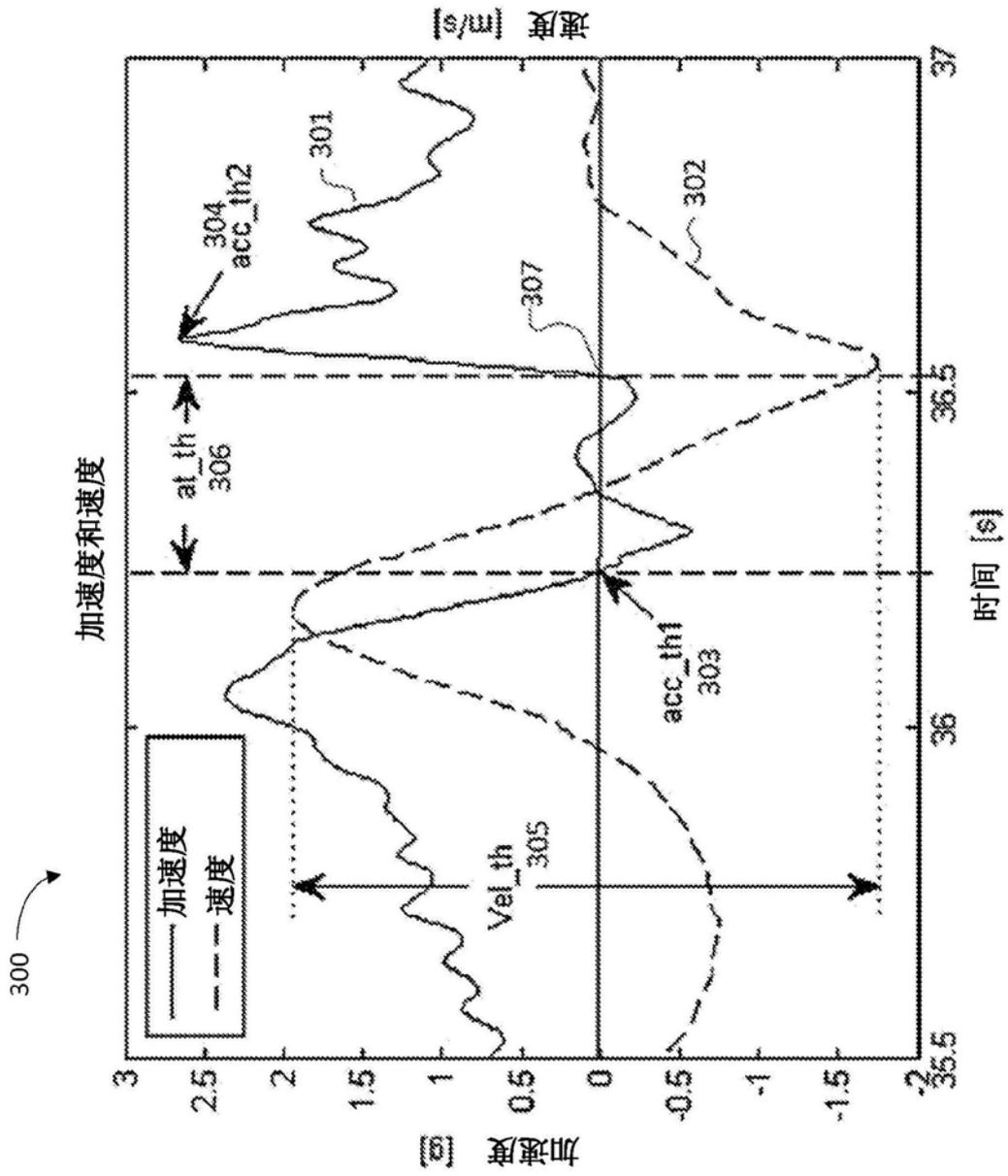


图3

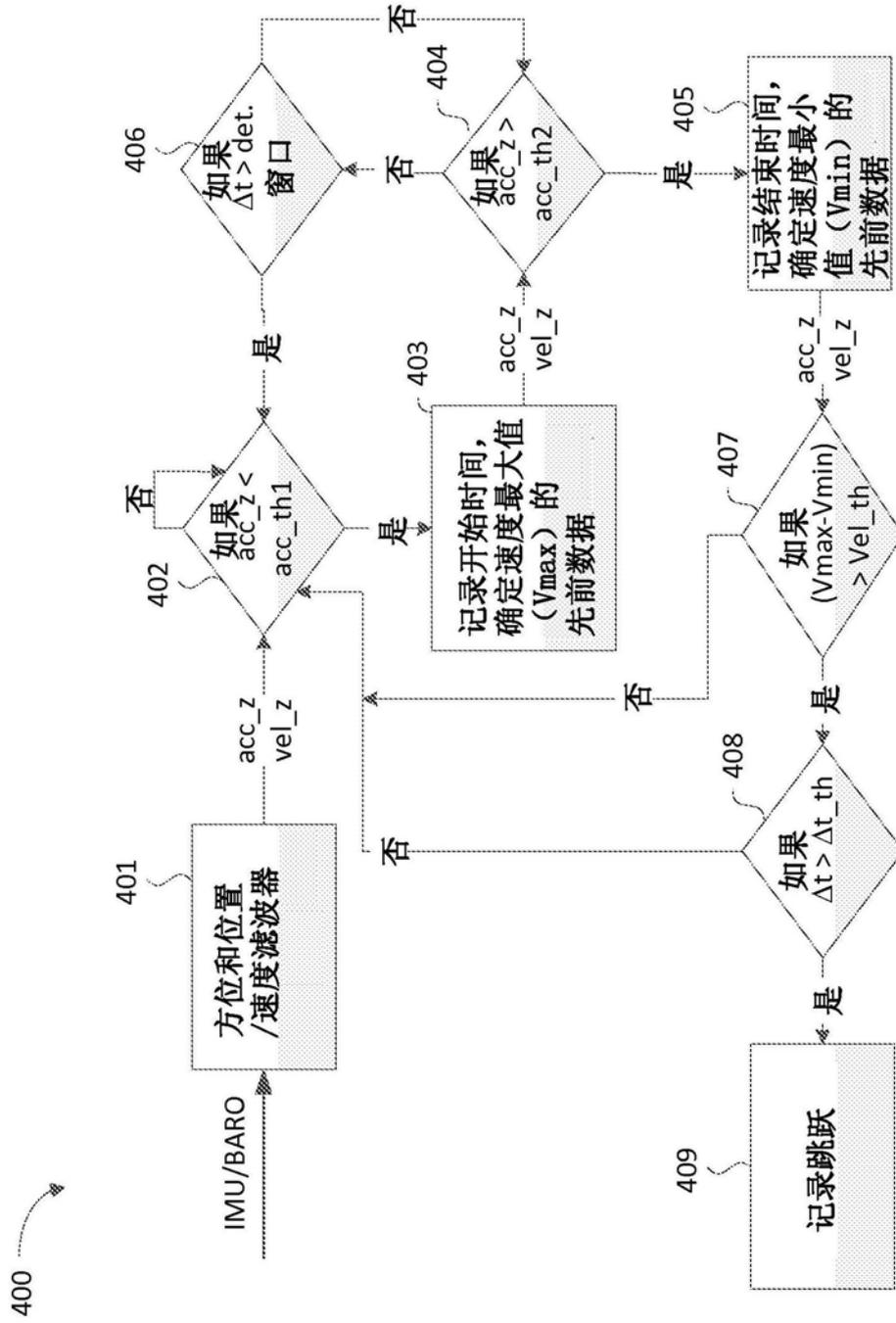


图4

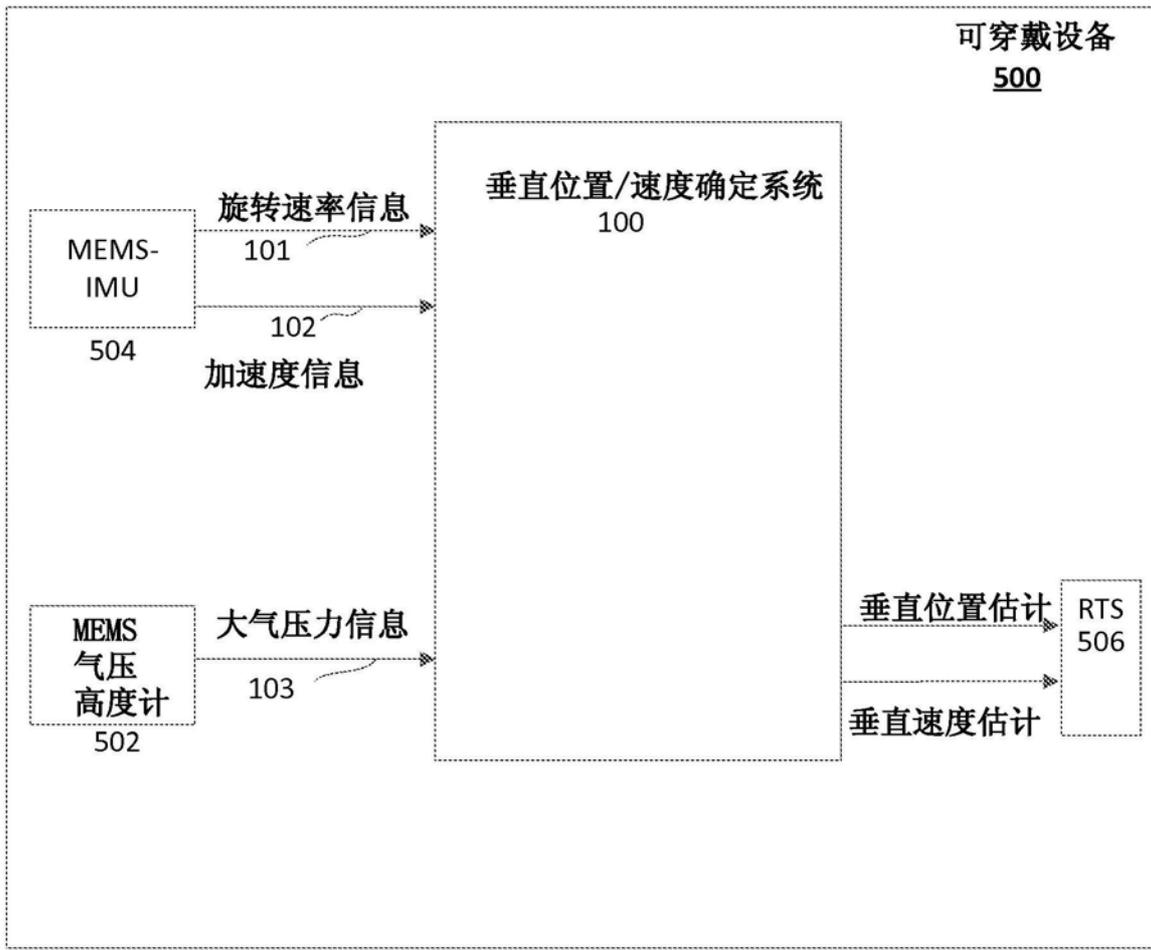


图5