



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112292647 A

(43) 申请公布日 2021.01.29

(21) 申请号 201980031040.3

(22) 申请日 2019.03.07

(30) 优先权数据

62/639,942 2018.03.07 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2020.11.06

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2019/021163 2019.03.07

(87) PCT国际申请的公布数据

WO2019/173597 EN 2019.09.12

(71) 申请人 LIT汽车公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 大卫·亚瑟·贝利

丹尼尔·基勇·金

(74) 专利代理机构 北京德琦知识产权代理有限公司 11018

代理人 康泉 宋志强

(51) Int.Cl.

G05D 1/08 (2006.01)

B62K 11/02 (2006.01)

B62J 27/00 (2020.01)

B62J 45/415 (2020.01)

B62D 37/06 (2006.01)

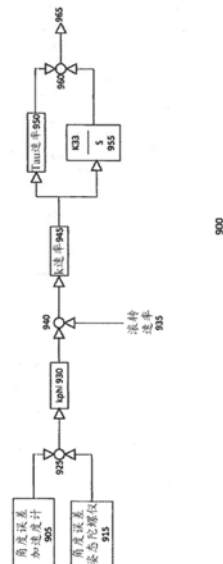
权利要求书1页 说明书10页 附图10页

(54) 发明名称

使用控制力矩陀螺仪和线控驱动转向系统来平衡两轮车的集成控制方法

(57) 摘要

转向用于增强基于CMG的两轮车(例如,自行车、电动自行车(ebike)、踏板车、电动踏板车、轻便摩托车或摩托车)的平衡控制。一种控制结构使具有同时或交替的机电姿态控制系统的两轮车能够在静止时或在机电命令动态地驱动时自主地平衡。



1. 一种用于两轮车的平衡控制系统,包括:
 - 惯性测量单元(IMU);
 - 一个或多个控制力矩陀螺仪(CMG);
 - 一个或多个CMG控制器,所述一个或多个CMG控制器用于控制所述一个或多个CMG;
 - 加速度计,所述加速度计用于测量所述车辆的y轴加速度,所述车辆的y轴垂直于车辆的行驶方向并且平行于地面;以及
 - 处理元件,所述处理元件用于:
 - 至少部分地基于由所述加速度计测量的所述y轴加速度来计算所述车辆的滚转角,
 - 至少部分地基于所计算的滚转角来确定力的分量,并且至少部分地基于所确定的力的分量来生成用于CMG万向节速率的CMG命令;
 - 转向增强单元,所述转向增强单元用于通过确定的转向增强值来增强转向命令;以及
 - 处理元件,所述处理元件用于至少部分地基于所述转向增强值的应用来修改用于所述一个或多个CMG控制器的CMG命令的确定。
2. 根据权利要求1所述的平衡控制系统,其中,在所述一个或多个CMG故障之后,所述转向增强作为备用CMG控制器来操作。

使用控制力矩陀螺仪和线控驱动转向系统来平衡两轮车的集成控制方法

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本专利合作条约 (PCT) 专利申请要求于2018年3月7日提交的题为“使用控制力矩陀螺仪和线控驱动转向系统来平衡两轮车的集成控制方法”的临时专利申请第62/639942号的优先权,其全部内容通过引用并入本文。

技术领域

[0003] 本发明的实施例涉及基于控制力矩陀螺仪 (CMG) 的两轮车平衡控制。

背景技术

[0004] 本发明的实施例涉及基于控制力矩陀螺仪 (CMG) 的两轮车平衡控制,如2018年9月17日提交的美国专利申请16/085975中所描述,美国专利申请16/085975要求于2017年3月17日提交的题为“两轮自平衡车的控制”的PCT申请PCT/US17/23025的优先权,PCT申请PCT/US17/23025要求于2016年3月17日提交的美国临时专利申请第62/309893号的优先权,其全部内容通过引用并入本文。先前,基于CMG的两轮平衡控制使用一个或多个CMG来提供围绕平行于车轮地面接触线的轴的扭矩作为唯一的控制感应平衡扭矩。

附图说明

[0005] 图1是根据实施例的两轮自平衡车的控制框图。

[0006] 图2是速度为25英里/小时 (MPH) 的两轮车的滚转扭矩分量的图示。

[0007] 图3是在两轮车运行中前轮速率和CMG万向节速率的图示。

[0008] 图4是根据实施例的两轮车的CMG万向节速率和转向导数的图示。

[0009] 图5是根据实施例的用于控制两轮车的具有转向补偿的CMG万向节速率的图示。

[0010] 图6A和图6B是根据实施例的在补偿之前和之后的CMG万向节角度偏移的图示。

[0011] 图7是用于两轮自平衡车的控制系统的部件的图示。

[0012] 图8图示出了本发明的实施例。

[0013] 图9A图示出了本发明的实施例的方面。

[0014] 图9B图示出了本发明的实施例的方面。

[0015] 图10图示出了根据本发明的实施例的5条90度曲线的仿真集合。

[0016] 图11示出了根据本发明的实施例作为时间函数的速度的曲线图。

[0017] 图12示出了基于图4中所图示的作为时间的函数的速度的曲线图得出的滚转角。

[0018] 图13图示出了根据本发明的实施例的在进入和退出转弯时为两轮车提供平衡扭矩的CMG的移动的万向节速率。

[0019] 图14图示出了根据本发明的实施例的通过偏置角度传感器使存储的角动量 (H) 为零。

[0020] 图15是根据本发明的实施例的转向角、驾驶员输入和控制微调的图。

[0021] 图16是根据本发明的实施例的产生与万向节速率成比例的扭矩的控制力矩陀螺仪的图。

具体实施方式

[0022] 本发明的实施例描述了用于控制两轮自平衡车的方法、装置和系统。在以下的描述中,阐述了多个具体细节以提供对实施例的全面理解。然而,相关领域的技术人员将认识到,在本文中描述的技术可以在没有多个具体细节的情况下或者利用其他方法、部件、材料等来实施。在其他实例中,公知的结构、材料或操作未被示出或详细地描述,以避免混淆某些方面。

[0023] 图1是根据实施例的两轮自平衡车辆的控制框图。在一些实施例中,控制流为车辆提供IMU横轴加速度100,IMU横轴加速度100被提供至噪声滤波器102。控制值 H_{cmg} 152也被应用于所存储的控制值H 150,并且然后由补偿滤波器154(可以与噪声滤波器102是相同的阶数)滤波。从补偿滤波器154的输出中减去噪声滤波器102的输出,该差被提交至第一增益104,然后将第一增益104加到存储的H值150乘以值 $k \times x(s+1)/s$ (元素110,其中k是常数,并且s是拉普拉斯算子)。结果值乘以第二增益106,并且然后加上补偿108。

[0024] 在一些实施例中,IMU滚转速率120由被加入补偿124的第二补偿滤波器122滤波(其中补偿滤波器可以比噪声滤波器小一个阶数)。从补偿108中减去结果以生成差。在一些实施例中,转向增强128被加至该差,其中转向增强将在下文进一步描述。

[0025] 在一些实施例中,结果乘以值 $k \times x(\tau s+1)/s$ (元素130,其中 τ 是传递函数中前导项的时间常数)。然后CMG增益由 $1/\cos(\beta)$ (元素132)线性化,以生成CMG速率命令140,该命令被提供至第一CMG控制器142和第二CMG控制器144,产生CMG万向节角度 δ 。万向节角度的总和被反馈在CMG速率命令的生成中,并且CMG万向节角度的差产生存储的H控制值150。如图所示,来自CMG控制器142-144的 δ 点值乘以 h_{cmg} (CMG的角动量)146和 $-h_{cmg}$ 148的值的总和是CMG滚转扭矩160。

[0026] 陀螺仪是围绕旋转飞轮构建的角动量存储元件。飞轮通过将角动量从CMG阵列(包括提供滚转扭矩的一个或多个CMG)传递至车辆而作为扭矩致动器。旋转角动量向量在旋转方向上且垂直于角动量向量产生扭矩。对该生成的扭矩的反作用扭矩被施加到车辆。使用一个角动量向量朝上并且另一角动量向量朝下的一对CMG,并以相反的方向对它们进行旋转得到在单个轴上的扭矩。感兴趣的轴是滚转轴。角动量向量不需要上下,而是被布置成使标称向量和为零,并且具有足够的精度使得角动量向量的总和可以增长并保持沿车辆的滚转轴的方向。对称性得到在车辆中传递的相等和相反的角力矩。角动量向量的长度的变化导致扭矩被施加到车辆。“CMG”通常描述专用于刚体姿态控制的陀螺仪(传统上用于卫星和航天器)。如下所描述,利用各种配置,CMG系统被应用于两轮自平衡车中。

[0027] 两轮自平衡车(在本文中也被称为自行车)的控制涉及比火箭示例更复杂的力。需要传感器来将重心(CG)指向地面上的接触点。当自行车经过拐角时,存在必须被重力抵消的较大的离心力。如果坐标系原点在后轮胎与地面的接触处,则x轴是从后轮胎到前轮胎的方向。然后,y轴垂直于行驶方向并平行于地面,并且指向行驶方向的右侧,并且z轴朝向地面。

[0028] 在一些实施例中,利用加速度计以测量两轮车控制系统中的角度。在这种实现方

式中,检测身体坐标(相对于两轮车固定的坐标)中y方向上的加速度的加速度计可以是比基于世界坐标(相对于地球的坐标)测量姿态的陀螺仪更有用的传感器。如果惯性测量单元(IMU)被安装在远高于地面(即滚转轴)的位置,则y轴加速度存在5个基本分量。三个较大的分量是离心力引起的加速度、重力引起的加速度和CMG引起的加速度。标称速度下的两个次要加速度是前轮和后轮的角动量方向变化而引起的。

[0029] 平衡控制不能单独使用y轴加速度,而是除CMG加速度之外的所有加速度的总和是控制平衡所需的量。为了将y轴加速度转换成净力向量的角度,某些计算是需要的。如果IMU位于车辆中心,则线性加速度通过除以从滚转轴(地面)到加速度计的距离而被转换成滚转加速度。如果车辆没有打滑,则重力、离心力被路面与轮胎之间的力抵消。轮胎路面接触面的力不会导致扭矩,因为它们通过滚转轴起作用。利用滚转加速度,滚转扭矩可以通过除以滚转轴惯性矩来确定。在由CMG生成的扭矩被移除后的净扭矩是扰动扭矩。净扭矩是力乘以从CG到路面的距离乘以所需的滚转角度的正弦值。对于小角度,角度的正弦值大约为该角度。如果自行车停止或直行,则该角度是垂直方向的变化。角度也是围绕完美协调的曲线与开始滚动自行车之间的误差。

[0030] 如果轮胎不打滑,则来自IMU的姿态的滚转角可以根据前轮胎的方向和自行车的前进速度来计算。

[0031] 在一些实施例中,利用加速器单元的改进的测量使控制器能够立即检测到轮胎因为横向加速度变化而正在打滑,并且因此控制器能够对打滑做出反应。这可以防止在弯道行驶时摔倒。如以下等式所示:

$$\ddot{\phi} = \left\{ (m_{tf} \cdot R_{tfc} + m_f \cdot h_f + m_{tr} \cdot R_{trc})g \cdot \sin(\phi) + \left(\dot{\delta}_1 \cos(\delta_1) - \dot{\delta}_2 \cos(\delta_2) \right) H_{CMG} + Q_{rtc} + Q_{trx} + Q_{tfx} \right\} / J_{xxeft} \quad [1]$$

[0032] 其中:

[0033] ϕ 是滚转角

[0034] m_{tf} 是轮胎前部质量

[0035] R_{tfc} 是轮胎前部接触的半径

[0036] m_f 是车架的质量

[0037] h_{cg} 是车架重心的高度

[0038] m_{tr} 是轮胎后部的质量

[0039] R_{trc} 是轮胎后部接触的半径

[0040] g 是重力常数

[0041] δ 是CMG万向节角度

[0042] H_{CMG} 是CMG的角动量

[0043] Q_{rtc} 是来自离心滚转扭矩的扭矩

[0044] Q_{trx} 是由于角动量变化引起的围绕x轴的后轮胎扭矩

[0045] Q_{tfx} 是由于角动量变化引起的围绕x轴的前轮胎扭矩

[0046] J_{xxeft} 是围绕x轴的有效惯性矩

[0047] 离心力项都有一个共同的项。

$$[0049] \quad \omega^2 \cdot R_{\text{turn}} = \text{Speed}^2 \cdot \tan(\psi) / p \quad [2]$$

[0050] ψ (ψ) 是前轮胎的角度, 并且 p 是轴距。三个离心力是该项乘以每个轮胎的质量和车架的质量。产生的扭矩是每个部件的重心的高度乘以滚转角度的余弦。如果转向角不变, 则离心力扭矩随速度平方的增加而增加, 并且由于滚转角增加和扭力臂变小而减小。来自车轮的角动量扭矩是每个车轮的角动量向量。这是后轮的滚转角以及前轮的转向角和滚转角的函数。转动角速度向量与角动量向量的叉积得到扭矩向量, 并且该向量相对于滚转轴的分量是由于在车轮角动量的方向上的变化而导致的滚转扭矩。

[0051] 加速度计项是滚转轴角加速度乘以从道路上的接触到IMU的杠杆力臂。嵌入到自行车中的 y 轴随着自行车而滚动。将 y 轴加速度除以IMU高度, 再乘以自行车CG高度, 使加速度缩放到重心。接下来, 由CMG扭矩引起的加速度的分量被移除, 并且乘以围绕滚转轴的有效惯性矩, 从而得到力的分量。该结果是作用在自行车CG上的合力乘以力的方向与滚转轴的方向之间的角度的正弦。这是控制所需的参数, 并且这样的参数可以立即检测到车轮打滑, 并且准确地计算出自行车动力学的几何形状。相比于使用IMU姿态并试图校正用于自行车动力学的IMU姿态, 该项是更快的且更准确的。

[0052] 图2是速度为25英里/小时 (MPH) 的两轮车的滚转扭矩分量的图示。转向前馈是从研究自行车滚转扭矩分量出现的新的项。在25MPH的速度下, 当进行激进的折弯组合时, 滚转扭矩分量如图2中所图示。

[0053] 在该图示中, 离心力扭矩过大是因为在CMG使自行车翻滚以补偿离心力之前, 自行车完全进入转弯。重力扭矩在理想情况下将与离心力扭矩相匹配, 并且所有扭矩的总和减去CMG扭矩将变为零。在这种情况下, CMG必须产生超过200英尺英磅的扭矩来控制自行车。

[0054] 为了识别导致离心力的项, 针对CMG万向节速率命令对前轮角度进行微分并绘制。

[0055] 图3是在两轮车运行中前轮速率和CMG万向节速率的图示。前轮角 ψ 生成离心力。利用正确的比例因子, 转向导数可以推动CMG万向节速率命令, 并使自行车更快地滚动。进一步, 如果自行车滚动更快, 则重力扭矩将更好地补偿离心力扭矩。

[0056] 图4是根据实施例的两轮车的CMG万向节速率和转向导数的图示。在图4中, ψ 点项与图3中所图示的相同, 但是CMG速率命令更快, 幅度更小。转向补偿使离心力扭矩和重力扭矩更紧密地匹配, 得到降低的CMG扭矩要求。在一些实施例中, 转向速率测量可用于改进对两轮自平衡车辆的控制。

[0057] 图5是根据实施例的用于控制两轮车的具有转向补偿 (ψ 点或 $\dot{\psi}$) 的CMG万向节速率的图示。在图5中, CMG万向节速率反映了CMG扭矩, 并且转向速率 ($\dot{\psi}$) 超前有助于更快地推动自行车, 导致所需的CMG补偿要小得多。离心力扭矩和重力扭矩几乎彼此镜像。来自旋转前轮和后轮的角动量的扭矩仍然很小。

[0058] 图6A和图6B是根据实施例的在补偿之前和之后的CMG万向节角度偏移的图示。在图6B中, 在补偿之后, 与图6A中图示的补偿之前的要求相比, 补偿显著降低了CMG万向节角度偏移。这是重要的, 因为CMG通常仅具有大约正负70度的有用范围。

[0059] 补偿离心力引起的扭矩具有必须考虑的速度项。

[0060] 离心力的等式是:

$$[0061] \quad F_c = M \cdot v^2 \cdot r \quad [3]$$

[0062] 力与速度的平方成正比, 并且对于固定的几何曲线, 力的施加与速度项成正比。这

意味着随着速度的增加,绘制曲线的难度也会增加。在摩托车的情况下,曲线的半径是转向角(ψ)的函数。

$$[0063] \quad \tan(\psi) = \frac{p}{r} \quad [4]$$

$$[0064] \quad r = \frac{p}{\tan(\psi)} \quad [5]$$

$$[0065] \quad F_C = \frac{m \cdot v^2}{p} \frac{\sin(\psi)}{\cos(\varphi)} \quad [6]$$

[0066] 为了预测力,可以应用力的时间导数:

$$[0067] \quad \dot{F}_C = \frac{m}{p} 2 \cdot v \cdot \dot{v} \frac{\sin(\psi)}{\cos(\varphi)} + \frac{m \cdot v^2}{p} \frac{\cos(\psi)}{\cos(\varphi)} \dot{\psi} - \frac{m \cdot v^2}{p} \frac{\sin^2(\psi)}{\cos^2(\varphi)} \dot{\psi} \quad [7]$$

[0068] 如果速度是常数,则时间导数为零。

$$[0069] \quad \dot{F}_C = \frac{m \cdot v^2}{p} \left(1 - \frac{\sin^2(\psi)}{\cos^2(\varphi)} \right) \dot{\psi} \quad [8]$$

[0070] 对于固定的几何形状,旋转 ψ 点与速度成正比,并且力与速度的立方成正比。因此,理想的补偿可以表示为:

$$[0071] \quad Comp = -k \cdot \dot{\psi} \cdot v^2 \quad [9]$$

[0072] 线性运行区域中的 k 大于CMG万向节速率命令饱和时所需的 k 。计算中间速度和导致极限滚转角的速度的 k 值,可以进行以下形式的补偿拟合:

$$[0073] \quad Comp = -k \cdot \dot{\psi} \cdot v^n \quad [10]$$

[0074] 在该形式中, k 是常数,并且 n 是有理数而非整数。

[0075] 在一些实施例中,最终控制拓扑考虑是转向增强。使用计算机补偿转向减轻CMG上的负担,并在不太可能出现两个CMG在同一行程中发生故障的情况下提供备用控制。通过去除转向轮上的 ψ 点,并在转向轮与前轮之间增加转向增强,转向增强不会将前馈降低至CMG万向节速率命令中。转向增强是对命令转向的修正,使自行车开始在正确的方向上滚动。因此,转向增强与转向命令方向相反。这是通过使用超前-滞后补偿项来实现的,超前位于右手复平面中。

[0076] 图7是根据实施例的用于两轮自平衡车的控制系统的元件的图示。在一些实施例中,控制系统700包括用于两轮自平衡车的传感器和控制元件,包括如下:

[0077] 705:处理元件,用于处理车辆控制的数据。

[0078] 710:惯性测量单元(IMU),用于测量车辆的比力和角速度。

[0079] 715:加速度计,用于测量车辆的横向加速度。

[0080] 720:转向增强元件,用于增强车辆的转向命令。

[0081] 725:一个或多个CMG,可以包括第一CMG和第二CMG,第一CMG和第二CMG具有指向相反方向的角动量向量。

[0082] 730:一个或多个CMG控制器,用于控制一个或多个CMG的万向节速率。

[0083] 在一些实施例中:

[0084] (1) 用于两轮车的控制系统利用y轴加速度而非IMU角度来测量滚转轴角度。

[0085] (2) 用于两轮车的控制系统利用转向速率以使CMG万向节速率更早地移动。

[0086] (3) 用于两轮车的控制系统测量转向轮命令的转向速率,而非前轮转动速率,并且因此将来自操作者动作与车轮运动分离,以生成速率补偿。这降低了转向增强与CMG万向节速率补偿之间的干扰。

[0087] 在一些实施例中,用于两轮车的控制系统包括:惯性测量单元(IMU);一个或多个控制力矩陀螺仪(CMG);一个或多个CMG控制器,用于控制一个或多个CMG;加速度计,用于测量车辆的y轴加速度,车辆的y轴垂直于车辆的行驶方向并且平行于地面;以及处理元件,用于至少部分地基于由加速度计测量的y轴加速度来计算车辆的滚转角,至少部分地基于所计算的滚转角来确定力的分量,并且至少部分地基于所确定的力的分量来生成用于CMG万向节速率的CMG命令。

[0088] 在一些实施例中,力的分量是车辆的重心上的合力乘以力的方向与滚转轴的方向之间的角度的正弦。

[0089] 在一些实施例中,加速度计对y轴加速度的测量使得能够基于横向加速度的变化来检测车辆的轮胎的打滑。

[0090] 在一些实施例中,一个或多个CMG包括具有相反方向的角动量向量的两个CMG。

[0091] 在一些实施例中,处理元件进一步确定转向增强值以修改用于车辆的转向命令,处理元件基于转向增强值修改力的分量和CMG命令的确定。

[0092] 在一些实施例中,用于两轮车的控制系统包括惯性测量单元(IMU);一个或多个控制力矩陀螺仪(CMG);一个或多个CMG控制器,用于控制一个或多个CMG;转向增强单元,用于通过所确定的转向增强值来增强转向命令;以及处理元件,用于至少部分地基于转向增强值的应用来修改用于一个或多个CMG控制器的CMG命令的确定。

[0093] 在一些实施例中,转向增强值的应用用于导致CMG万向节速率提前。

[0094] 在一些实施例中,转向增强值的应用用于减少车辆的控制所需的CMG补偿的量。

[0095] 在一些实施例中,转向增强用于使车辆开始在正确的方向上滚动,转向增强的方向与转向命令的方向相反。

[0096] 在一些实施例中,转向增强在一个或多个CMG出现故障时作为备用CMG进行操作。

[0097] 在一些实施例中,一种方法包括利用加速度计测量两轮车的y轴加速度,车辆的y轴垂直于车辆的行驶方向并平行于地面,该车辆包括一个或多个控制力矩陀螺仪(CMG);至少部分地基于由加速度计测量的y轴加速度来计算车辆的滚转角;至少部分地基于所计算的滚转角来确定力的分量;以及至少部分地基于所确定的力的分量来生成用于CMG万向节速率的CMG命令。

[0098] 在一些实施例中,力的分量是车辆的重心上的合力乘以力的方向与滚转轴的方向之间的角度的正弦。

[0099] 在一些实施例中,该方法进一步包括使用加速度计的测量,基于横向加速度的变化来检测车辆的轮胎的打滑。

[0100] 在一些实施例中,该方法进一步包括确定转向增强以修改转向命令。

[0101] 在一些实施例中,CMG命令的生成进一步至少部分地基于转向增强。

[0102] 在一些实施例中,转向增强的应用用于导致CMG万向节速率提前。

[0103] 在一些实施例中,转向增强的应用用于减少车辆的控制所需的CMG补偿的量。

[0104] 在一些实施例中,该方法进一步包括在一个或多个CMG故障时利用转向增强来提供备用CMG控制器。

[0105] 在一些实施例中,转向增强用于使车辆开始在正确的方向上滚动,转向增强的方向与转向命令的方向相反。

[0106] 本发明的进一步实施例增加了使用转向来增强两轮车(例如自行车、电动自行车(ebike)、踏板车、电动踏板车、轻便摩托车或摩托车)的平衡控制的能力。根据该实施例的控制体系结构使具有同时或交替的机电姿态控制系统的两轮车能够在静止时或在机电命令动态地驱动时自主地平衡。通过改变使车辆转向的一个或多个车轮的角度而产生的扭矩以车辆的速度的平方增加。因此,它在零速度时不起作用,并且在车辆最高速度时产生较大的扭矩。当需要较大的力时,将转向致动添加到线控驱动转向系统以进行车辆平衡控制,提高了车辆在较高速度下的稳定性,从而能够利用更小、更轻的CMG进行稳定性控制,和/或增加受控车辆的灵活性。

[0107] 参照图8,本发明的实施例800包括待控制的两轮车825和系统部件801,系统部件801包括一个或多个姿态传感器(在惯性测量单元805中)、一个或多个状态平衡噪声滤波器810、控制系统815以及一个或多个平衡控制致动器820。

[0108] 惯性测量单元(IMU) 105接收来自一个或多个姿态传感器的输入,并测量两轮车在y轴方向上的横向加速度以及两轮车在x轴方向上的旋转速率和旋转位置。在该实施例中,坐标系原点位于后轮与地面的接触处,x轴是车辆在从后轮到前轮的方向上的滚转轴,y轴垂直于行驶方向并平行于地面,并指向行驶方向的左侧(或右侧),并且z轴垂直于行驶方向并指向上方(或指向地面)。

[0109] 根据实施例,存在两种测量用于控制两轮车的平衡:滚转速率和有效滚转角。滚转速率可以被直接使用。有效滚转角包括两个向量:离心力和重力的总和,以及从重心到车轮与地面接触中心线的方向。有效滚转角是这两个向量之间的差。

[0110] 横向加速度和陀螺仪计算的滚转角都不能直接用于控制两轮车的平衡。横向加速度测量作用在y轴方向上的力的滚转分量。该力具有三个主要项和在一阶控制中可以忽略的三个较小项。这些扭矩项可以根据来源被分为两组。加速度计测量真空中自由落体的零加速度。来自路面的向上的力是防止自由落体的加速力。如果该力平行于IMU的z轴,则不存在任何y轴分量。y轴加速度的力的分量与力以及使力达到平衡的角度的正弦成正比。

[0111] 第二类部件是IMU 805中的姿态传感器(例如,加速度计),姿态传感器测量作用于两轮车的扭矩。扭矩与由车轮(轮胎)接触地面生成的力相互作用。扭矩加速滚转轴中的惯性矩,并在y方向上加速IMU。在一个实施例中,由于两轮车(例如,摩托车)近乎对称,因此与离心力生成的扭矩相比,空气动力扭矩更低。如图2和图4中所示,由车轮的旋转角动量生成的扭矩也是小的。如图2和图4中所示,由一个或多个控制力矩陀螺仪(CMG)生成的扭矩是显著的,并且是测量中的一个噪声元素,并且该噪声元素可以通过减去被适当调节的CMG万向节速率信号来消除。这产生了两轮车(无论是直行还是转弯)关于其操作点的不平衡性的测量的信号。

[0112] 由姿态传感器执行的其他姿态测量是身体角度的陀螺仪测量。这提供了关于两轮车是否是直线向上和向下的信息,这在车辆直线行驶时是良好的,但是在车辆弯道行驶时

是错误的。关于作为速度的函数的适当滚转角的计算可以用于与陀螺仪角度测量进行比较,但如果轮胎在路面上打滑,则速度测量存在误差。

[0113] 平衡控制的第二模块由协调的噪声滤波器810组成,使得从滚转扭矩到滤波器输出的系统增益的幅度不相交。从施加到两轮车的滚转轴的扭矩到各种噪声滤波器的输出的增益在高频时的波特(Bode)图上应该具有相同的斜率,在高频时具有相同的相移。扭矩对扭矩是代数的,扭矩对滚转速率具有一个积分,并且扭矩对位置具有两个积分。这意味着用于滚转速率的噪声滤波器比位置滤波器多一个极点,并且加速度噪声滤波器比位置滤波器多两个极点。对于三个并联环路,高频波特图由于并联补偿设计而不会交叉,以防止高频零点。拉普拉斯域的左手平面中的零点是稳定的,但右手平面中的零点会把极点拉向它并变得不稳定。因此,根据一个实施例,滤波器被设计成这是不可能的。在另一实施例中,对于最高增益分支,波特图上的较低斜率和较低增益分支中的较大斜率防止了生成高频零点。

[0114] 控制系统815耦接到协调的噪声滤波器810的输出,并且使用作用于待控制的相同参数的两个致动器来提供位置控制。

[0115] 参照图9A中所图示的实施例900,角度误差加速度计905接收加速度计信号并生成角度误差 $k_p \cdot 210$ 。同样地,CMG万向节速率产生的加速度915获得角度分量 $1 - k_p \cdot 920$ 。比例增益值 k_p 在0和1之间,使两路径的总和等于1。最佳性能是当 k_p 等于1时。在930处,误差的总和通过增益 k_{ϕ} ,根据一个实施例,误差的总和具有每姿态误差弧度的速率命令的每秒弧度的单位。滚转速率命令(加法器925结果)与滤波后的滚转速率935进行比较,并通过具有积分器的网络,该积分器具有超前945、955、950和960。在965处输出的结果是扭矩命令。

[0116] 参考图9B,扭矩命令965被分成两条路径965A和965B。每条路径被补偿使得用于CMG控制器的通过两轮车动力学的环路增益与转向控制和致动器路径类似。控制路径协同工作,因此每条路径都在最佳工作的速度域中占优势。

[0117] 控制的这种配置在车辆控制上产生了一些显著的改进。CMG的特性使得用作滚动扭矩致动器的角动量是有限的。角动量具有扭矩秒的单位,并且因此可以在有限的时间内传递生成扭矩的角动量。随着两轮车的停止或低速行驶,有足够的扭矩来平衡自行车,包括低速转弯。随着速度的增加,由离心力生成的扭矩随着速度的平方而增加。将转向稳定性增强增加到平衡控制,能够使扭矩也随着速度的平方而增加。转向增益在低速时会减少,当车辆停止时消失,但完全能够用于高速机动。

[0118] 如图10中所图示,根据本发明的实施例,增强的转向控制系统使用5条90度曲线1000、1005、1010、1015和1020的仿真组,每条曲线的转弯半径是前一条的两倍。

[0119] 仿真示出了在车辆的全速度范围内实现了稳定性。在生成全速度范围时,第一曲线使用了适合于5度滚转角的速度,第二曲线使用了适合于15度滚转角的速度,第三曲线使用了适合于25度滚转角的速度,第四曲线使用了适合于35度滚转角的速度,第五曲线使用了适合于45度滚转角的速度。参照图11,作为时间的函数的速度的曲线图示出了六个速度平稳段,例如,在第五次转弯后的速度为每小时100英里。得到的滚转角如图12中所示。

[0120] 在图16中示出了控制力矩陀螺仪产生与万向节速率成正比的扭矩。飞轮1600围绕自旋轴转动,产生角动量 $H \cdot 1610$ 。具有垂直于自旋轴的轴 $G \cdot 1620$ 的万向节旋转角动量向量。旋转角动量向量 H 生成扭矩 $Q \cdot 1630$ 。反作用扭矩 $Q_R \cdot 1640$ 与扭矩 $Q \cdot 1630$ 相等且相反。反作用扭矩是车辆接收的扭矩。万向节旋转越快,生成的扭矩越多,并且扭矩向量进行越快。扭矩

应用于每个角的进出过渡。图13中所图示的万向节速率示出了CMG的移动,以在进入和离开转弯时提供平衡扭矩。

[0121] 通过图1的存储的角动量控制器142、144和150以及图9B的973,使CMG万向节角度回到零(中心)位置。如图14中所示,通过对车辆角度传感器进行偏置,存储的角动量(H)回到零。

[0122] 最后,参照图15,转向角由2项组成:驾驶者输入(图15中的驾驶者)和控制微调(图15中的psi微调(psi trim))。转向角psi(ψ)具有由图9B的转向控制回路980产生的微调项。随着车速的增加,转向轮的稳定性微调运动变小,因为转向轮的运动产生与速度的平方成正比的扭矩。

[0123] 驾驶者的仿真是将两轮车瞄准前方道路的优选位置的驾驶者或控制器(例如,远程控制器)。随着速度的增加,道路中的瞄准位置相对于车辆向前移动。驾驶者并不尝试平衡两轮车;所有平衡通过控制来实现。在一个实施例中,转向可以以几种不同的方式来机械化,包括:线控驱动,其中控制转向由断开机械后备的离合器来启动,并且转向的驾驶者和控制部分由控制伺服致动器以转动转向轮的计算机或处理元件来执行。在另一实施例中,机械差速器通过伺服致动器将转向轮的机械运动和控制运动相加。马达具有制动器,制动器断电以进行稳定性增强控制,并仅在机械备用模式下工作。转向可以是两个轮的前轮、后轮。因此,两轮车可以用传统的汽车式控制器来驱动,而驾驶者无需考虑平衡两轮车。

[0124] 合并后的控制仅利用CMG平衡控制,改善了自平衡摩托车或两轮车牵引力损失的恢复。在一个实施例中,在打滑时,CMG平衡控制将开始使两轮车直立,并当通过低摩擦区域并且在高摩擦表面上开始恢复时,转向的增强稳定性将降低来自车轮在干燥路面上滑动的过度扭矩。当轮胎在干燥路面上打滑时,例如在冰上,车轮和运动方向将会不同,并且轮胎在干燥路面上滑动存在恢复距离,使所有的机械装置恢复到滚动状态。

[0125] 应当理解,以上描述旨在是说明性而非限制性的。在阅读和理解以上描述之后,许多其他实施例对于本领域技术人员将是显而易见的。因此,本公开的范围应当参照所附权利要求要求以及这些权利要求所赋予的等同物的全部范围来确定。

[0126] 以上详细描述某些部分根据对计算机存储器内的数据位的操作的算法和符号表示来呈现。这些算法描述和表示是数据处理领域的技术人员向本领域其他技术人员最有效地传达他们的工作内容的手段。算法在本文通常被认为是导致所需结果的一系列自洽操作。操作是需要对物理量进行物理操纵的操作。通常,尽管不是必须的,这些量采取能够被存储、传输、组合、比较和以其他方式操纵的电或磁信号的形式。主要出于通用的原因,已经证明有时将这些信号称为位、数、元素、符号、字符、项、数字等是方便的。

[0127] 然而,应当记住,所有这些和类似术语均应与适当的物理量相关联,并且仅仅是应用于这些量的方便标签。除非从上面的讨论中另外明确指出,否则应理解,在整个描述中,利用诸如“捕获”、“传输”、“接收”、“解析”、“形成”、“监控”、“发起”、“执行”、“添加”等术语的讨论是指计算机系统或类似的电子计算设备的动作和过程,计算机系统将计算机系统寄存器和内存内以物理(例如,电子)数量表示的数据转换成类似地计算机系统内存或寄存器或其他此类信息存储、传输或显示设备内以物理量表示的其他数据。

[0128] 本公开的实施例还涉及用于经由电路、逻辑或处理器执行的软件模块来执行在本文中的操作的装置。该装置可以根据所需目的而专门地构造,或该装置可以包括由存储在

计算机中的计算机程序选择性地激活或重新配置的通用计算机。这样的计算机程序可以存储于非暂存计算机可读存储介质,例如但不限于包括软盘、光盘、CD-ROM和磁光盘的任何类型的盘、只读存储器 (ROM)、随机存取存储器 (RAM)、EPROM、EEPROM、磁卡或光卡,或适合存储电子指令的任何类型的介质。

[0129] 以上详细描述某些部分根据对计算机存储器内的数据位的操作的算法和符号表示来呈现。这些算法描述和表示是数据处理领域的技术人员向本领域其他技术人员最有效地传达他们的工作内容的手段。算法在本文通常被认为是导致所需的结果的步骤的自洽序列。步骤是需要对物理量进行物理操纵的步骤。通常,尽管不是必须的,这些量采取能够被存储、传输、组合、比较和以其他方式操纵的电或磁信号的形式。主要出于通用的原因,已经证明有时将这些信号称为位、数、元素、符号、字符、项、数字等是方便的。

[0130] 然而,应当记住,所有这些和类似术语均应与适当的物理量相关联,并且仅仅是应用于这些量的方便标签。除非从上面的讨论中另外明确指出,否则应理解,在整个描述中,利用诸如“捕获”、“确定”、“分析”、“驱动”等术语的讨论是指计算机系统或类似的电子计算设备的动作和过程除非另行特别说明,否则从以上讨论中显而易见,应当理解,在整个描述中,使用诸如“捕获”、“确定”、“分析”、“驱动”等术语的讨论指代计算机系统或类似电子计算设备的动作和过程,计算机系统将计算机系统寄存器和内存内以物理(例如,电子)数量表示的数据转换成类似地计算机系统内存或寄存器或其他此类信息存储、传输或显示设备内以物理量表示的其他数据。

[0131] 以上呈现的算法和显示并非固有地与任何特定的计算机或其他装置相关。根据本文的教导,多种通用系统可以与程序共同使用,或者可以证明构造更专用的装置来执行所需的方法步骤是方便的。各种这些系统所需的结构将从下面的描述中出现。此外,本公开未参考任何特定的编程语言来描述。应当理解,可以使用多种编程语言来实现如本文所述的本公开的教导。

[0132] 在整个说明书中,对“一个实施例”或“实施例”的引用意味着结合该实施例描述的特定特征、结构或特性被包括于本公开的至少一个实施例中。因此,在整个以上说明书中,多处出现的短语“在一个实施例中”或“在实施例中”不一定都是指同一实施例。此外,特定的特征、结构或特性可以在一个或多个实施例中以任何合适的方式进行组合。

[0133] 出于解释的目的,已经参考特定实施例描述了本说明书。然而,以上说明性讨论并非旨在穷举或将本公开限制为所公开的精确形式。根据上述教导,许多修改和变型是可能的。选择和描述实施例是为了最好地解释本公开的原理及其实际应用,从而使本领域的其他技术人员能够最佳地利用具有各种修改的各种实施例,这些修改可以适合于预期的特定用途。

[0134] 方法和过程尽管以特定的顺序或次序示出,但除非另有说明,否则可以修改动作的顺序。因此,上述方法和过程应仅被理解为示例,并且可以以不同的顺序执行,并且一些动作可以并行执行。附加地,在本发明的各种实施例中,可以省略一个或多个动作;因此,并非在每个实施方式中都需要所有动作。其他处理流也是可能的。

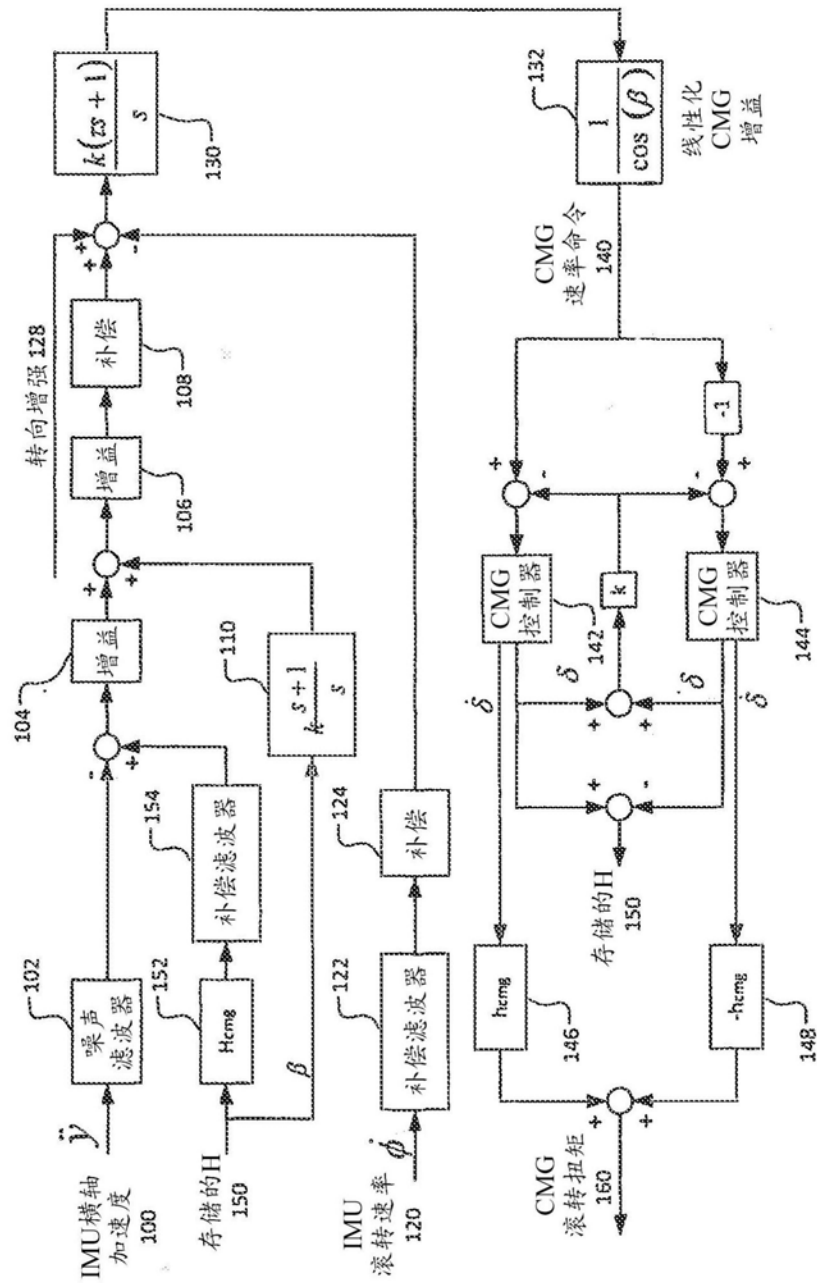


图1

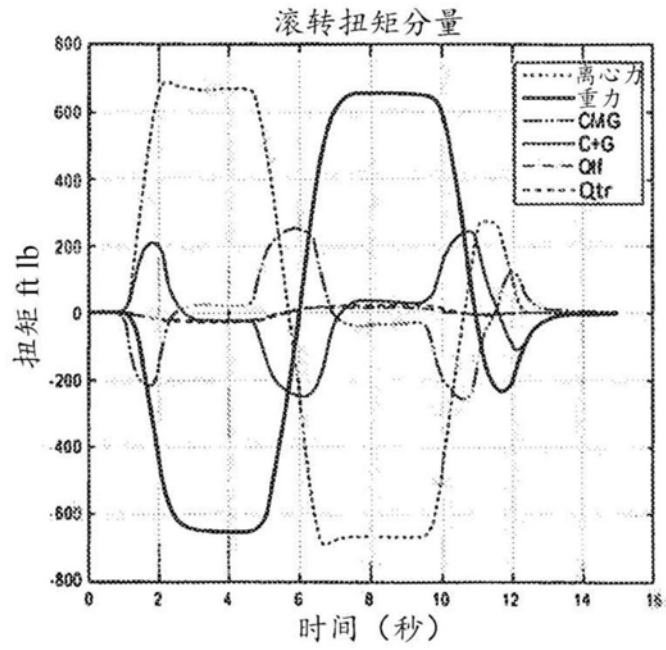


图2

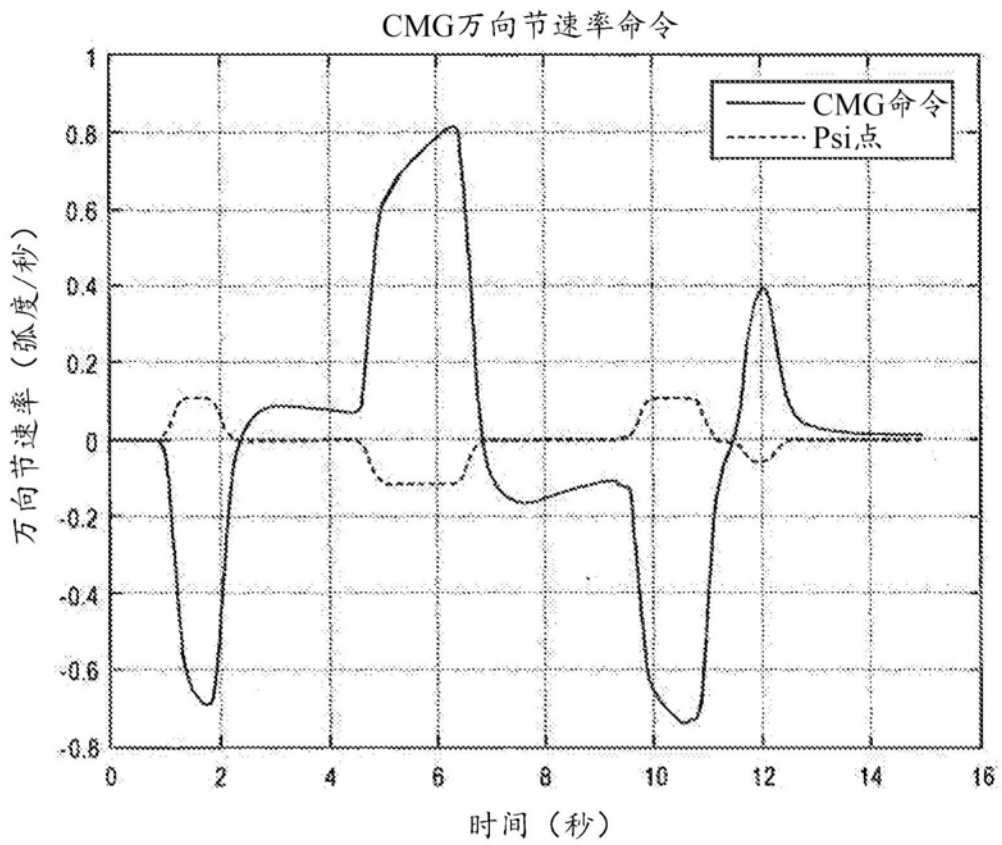


图3

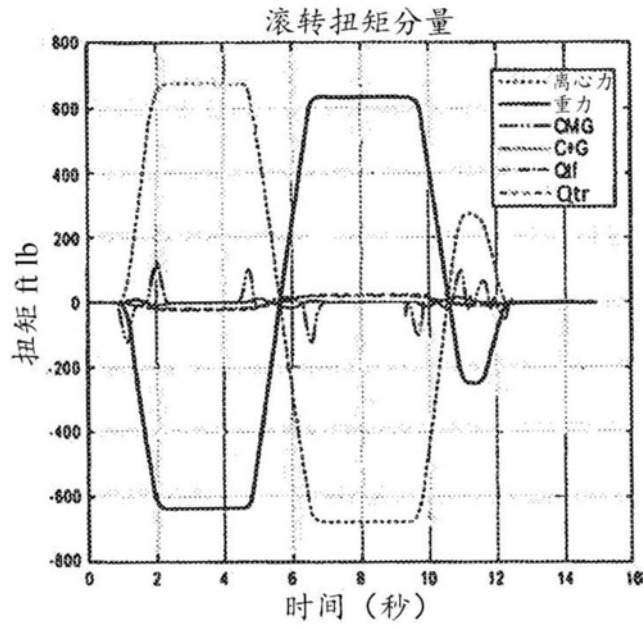


图4

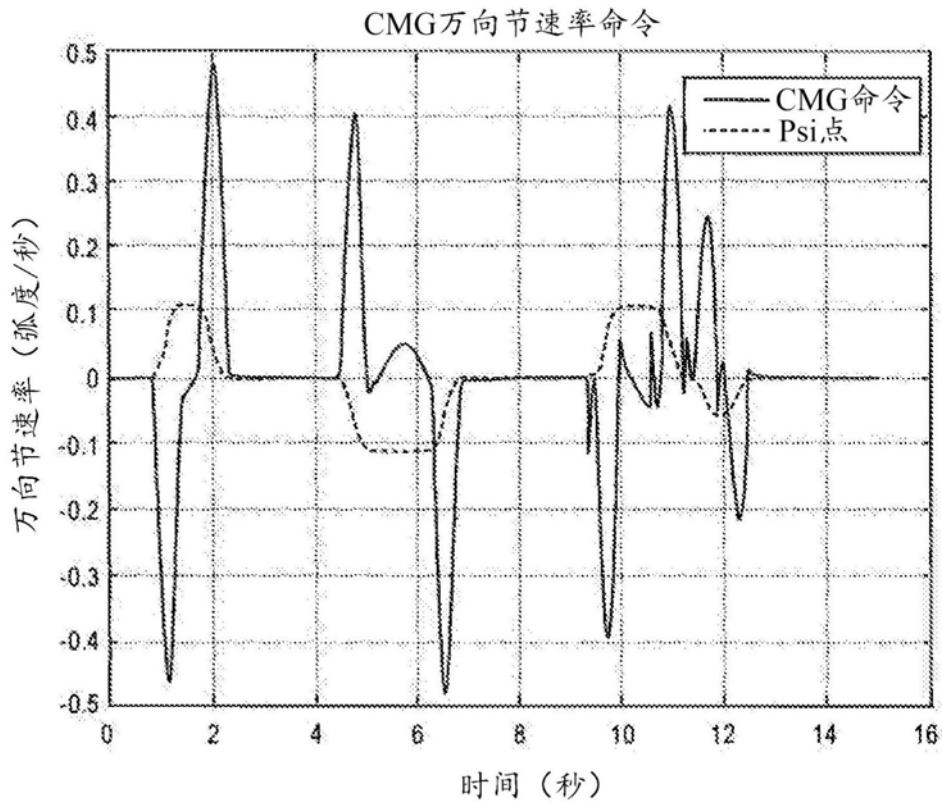


图5

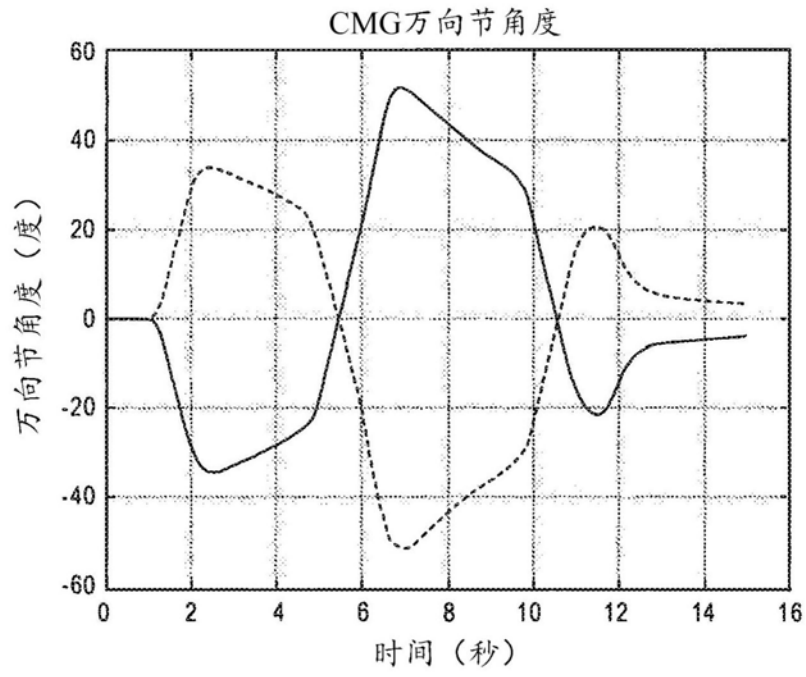


图6A

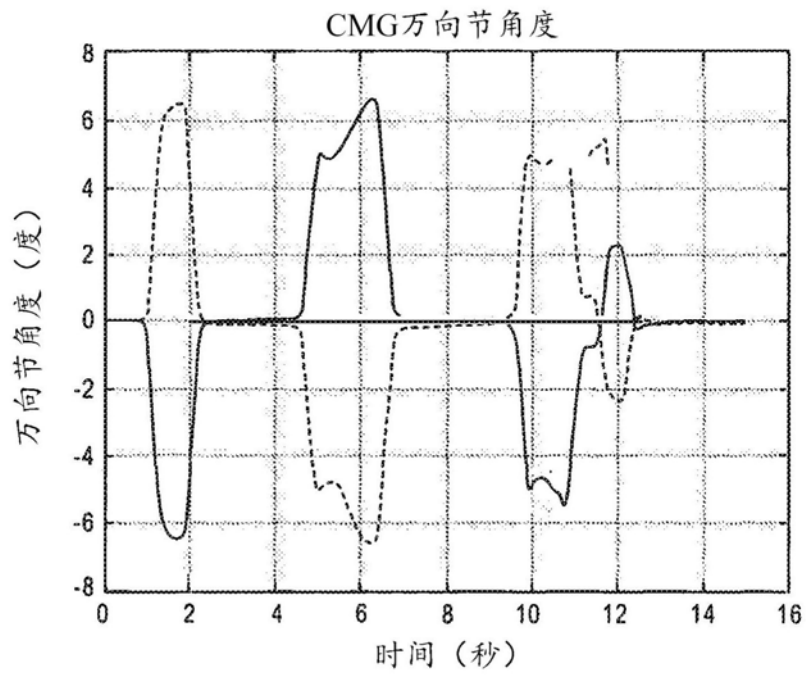


图6B

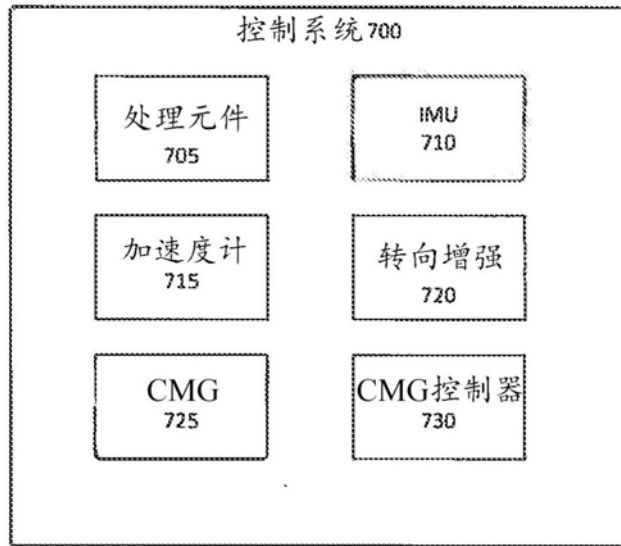


图7

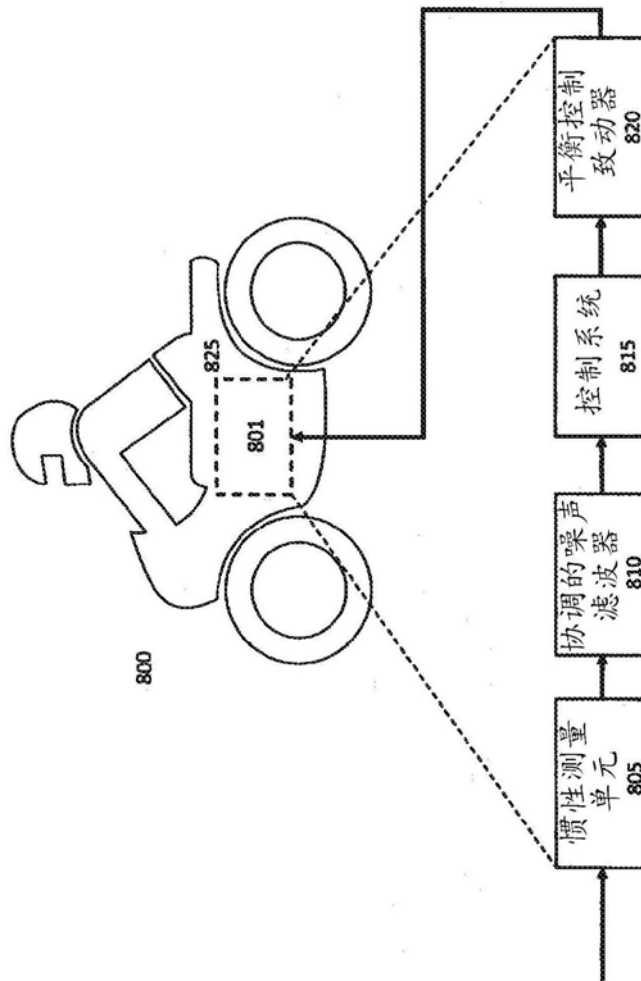


图8

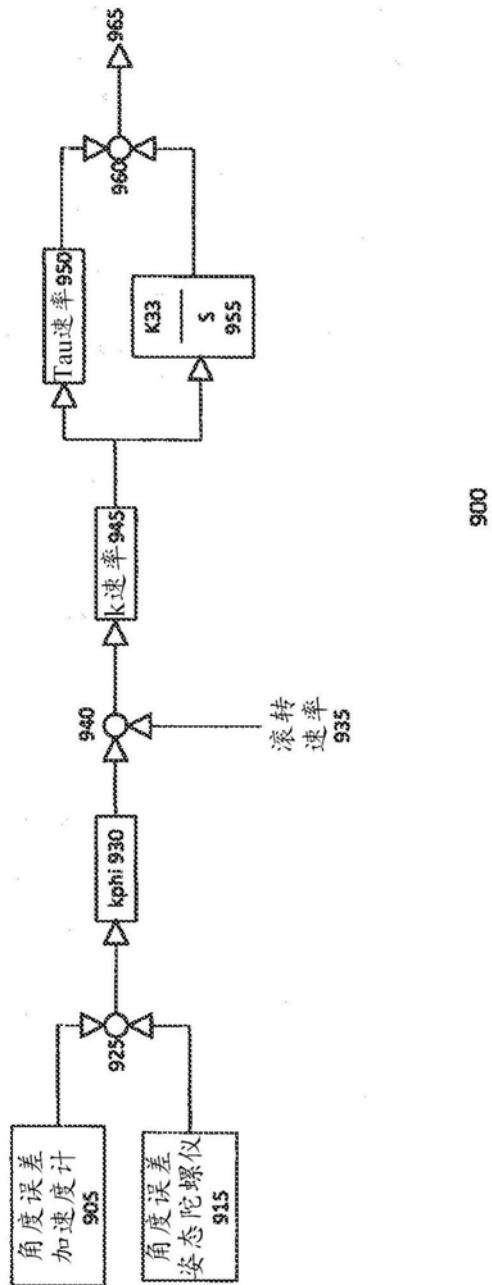


图9A

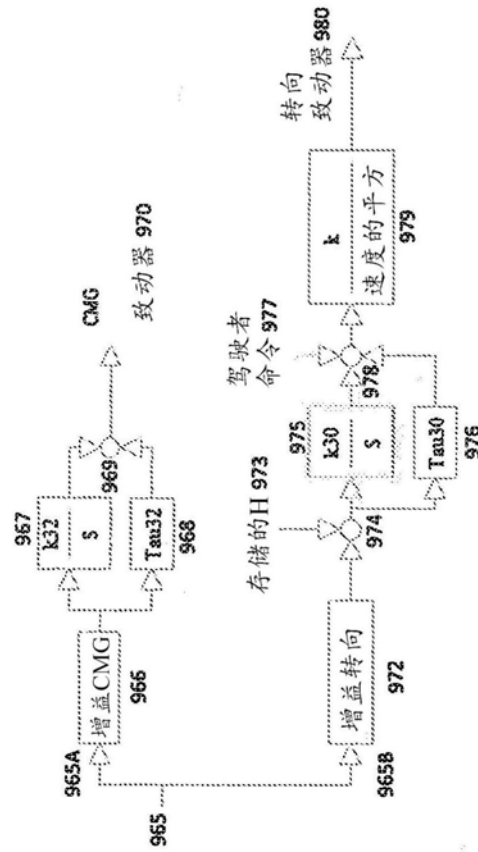


图9B

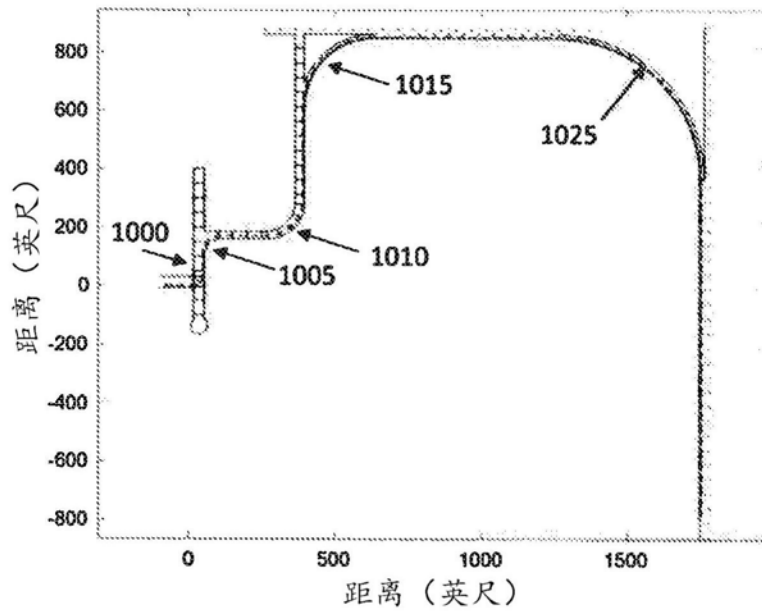


图10

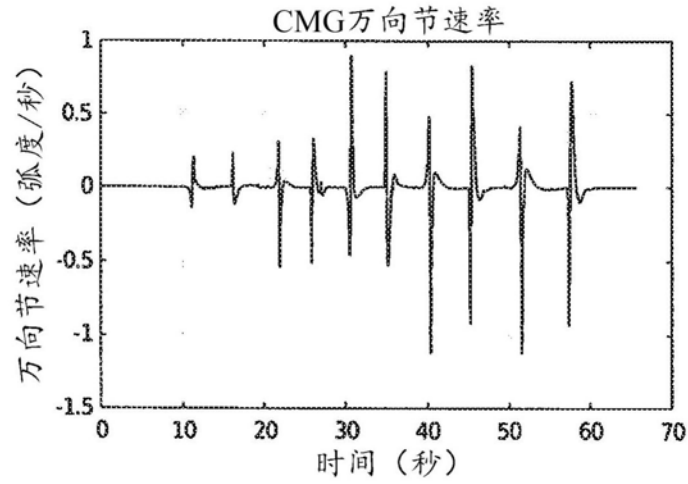


图13

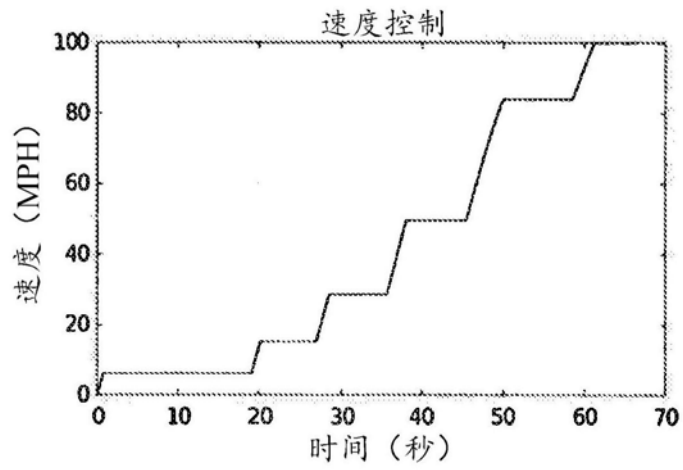


图11

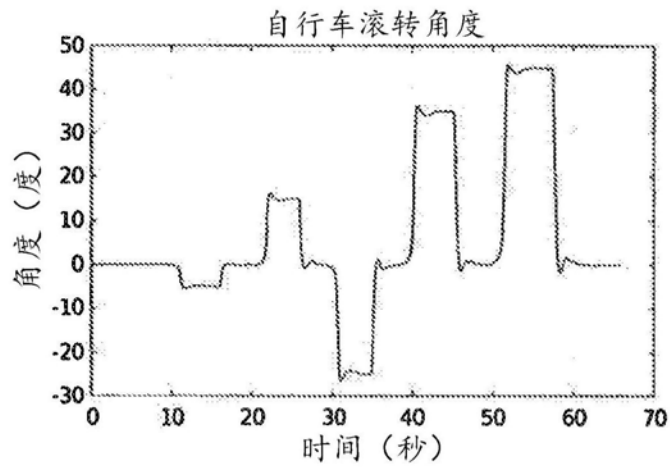


图12

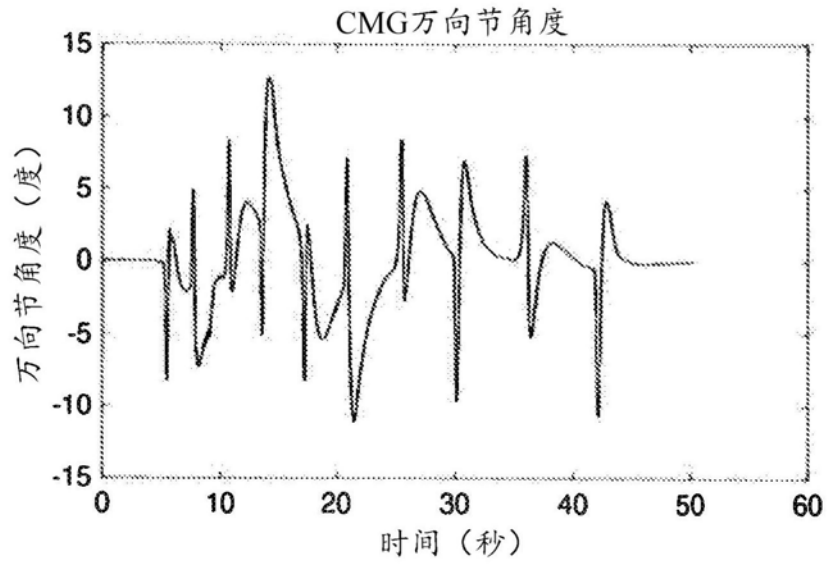


图14

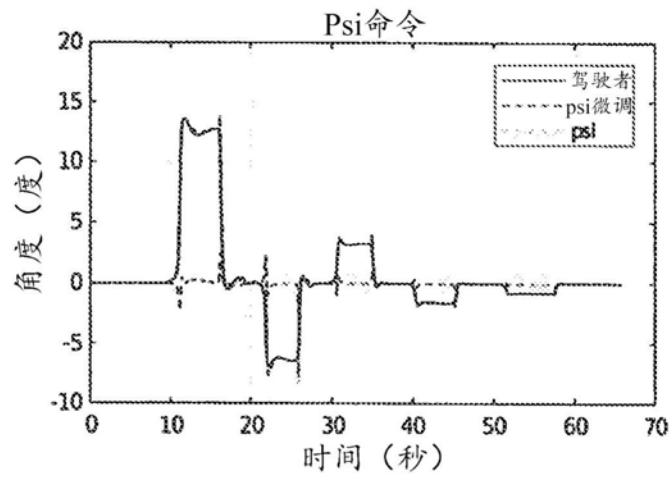


图15

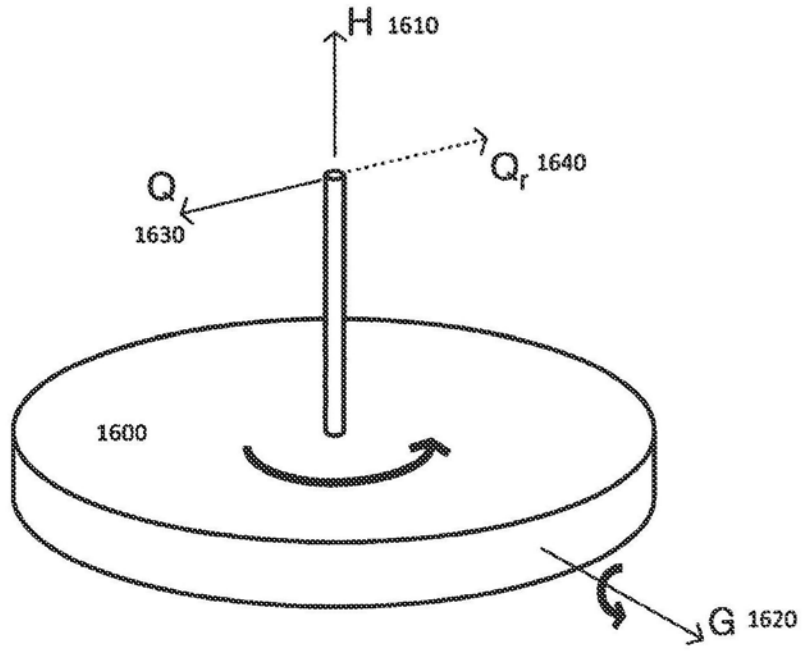


图16