

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 7 月 2 日 (02.07.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/133288 A1

(51) 国际专利分类号:
B25J 9/06 (2006.01) **B62D 57/032** (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2018/125103

(22) 国际申请日: 2018 年 12 月 28 日 (28.12.2018)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 深圳市优必选科技有限公司 (UBTECH ROBOTICS CORP) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区学苑大道1001号南山智园C1栋16、22楼, Guangdong 518000 (CN)。

(72) 发明人: 熊友军 (XIONG, Youjun); 中国广东省深圳市南山区学苑大道1001号南山智园C1栋16、22楼, Guangdong 518000 (CN)。 葛利刚 (GE, Ligang); 中国广东省深圳市南山区学苑大道1001号南山智

园C1栋16、22楼, Guangdong 518000 (CN)。 刘益彰 (LIU, Yizhang); 中国广东省深圳市南山区学苑大道1001号南山智园C1栋16、22楼, Guangdong 518000 (CN)。 陈春玉 (CHEN, Chunyu); 中国广东省深圳市南山区学苑大道1001号南山智园C1栋16、22楼, Guangdong 518000 (CN)。 谢铮 (XIE, Zheng); 中国广东省深圳市南山区学苑大道1001号南山智园C1栋16、22楼, Guangdong 518000 (CN)。 庞建新 (PANG, Jianxin); 中国广东省深圳市南山区学苑大道1001号南山智园C1栋16、22楼, Guangdong 518000 (CN)。

(74) 代理人: 深圳中细软知识产权代理有限公司 (SHENZHEN CIPRUN INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.); 中国广东省深

(54) Title: METHOD FOR CONTROLLING GAIT OF BIPED ROBOT, AND BIPED ROBOT

(54) 发明名称: 一种双足机器人步态控制方法以及双足机器人

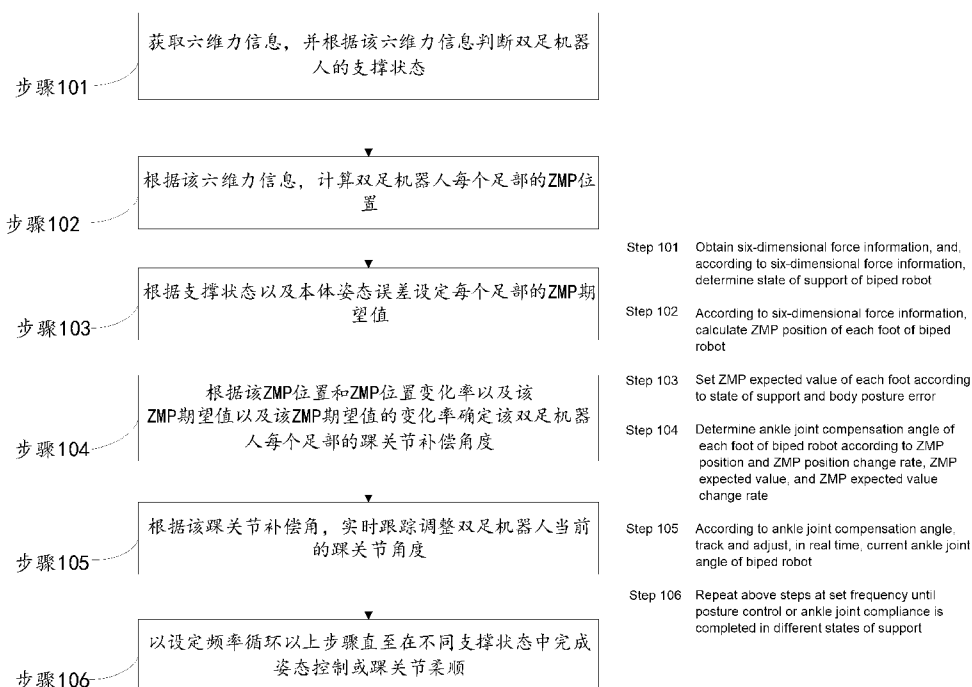


图 1

(57) Abstract: Provided are a method for controlling the gait of a biped robot, and a biped robot, comprising the following steps: obtaining six-dimensional force information, and, according to the six-dimensional force information, determining the state of support of a biped robot; according to the six-dimensional force information, calculating a ZMP position of each foot of the biped robot; setting a ZMP expected value of each foot according to the state of support and body posture error; determining the ankle joint compensation angle of each foot of the biped robot according to the ZMP position and the ZMP position change rate, the ZMP expected value, and

圳市南山区粤海街道粤兴四道1号中山大学深圳
产学研大楼11楼, Guangdong 518000 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家
保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,
BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,
CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS,
JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,
LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

the ZMP expected value change rate; according to the ankle joint compensation angle, tracking and adjusting, in real time, the current ankle joint angle of the biped robot; repeating the above steps at a set frequency until posture control or ankle joint compliance is completed in different states of support.

(57) 摘要: 一种双足机器人步态控制方法以及双足机器人, 包括以下步骤: 获取六维力信息, 并根据该六维力信息判断双足机器人的支撑状态; 根据该六维力信息, 计算双足机器人每个足部的ZMP位置; 根据支撑状态以及本体姿态误差设定每个足部的ZMP期望值; 根据该ZMP位置和ZMP位置变化率以及该ZMP期望值以及该ZMP期望值的变化率确定该双足机器人每个足部的踝关节补偿角度; 根据该踝关节补偿角, 实时跟踪调整双足机器人当前的踝关节角度; 以设定频率循环以上步骤直至在不同支撑状态中完成姿态控制或踝关节柔顺。

一种双足机器人步态控制方法以及双足机器人

技术领域

本申请涉及双足机器人步态控制技术领域，特别是涉及一种双足机器人步态控制方法以及双足机器人。

背景技术

随着科学技术的进步，双足机器人获得了快速发展并在多个领域被广泛应用。目前大多数建筑和工具是依照人的身高和形体设计的，因此双足机器人作为一种机器人平台具有更好的使用灵活性。同时，双足机器人步态的稳定性控制是机器人顺畅行走的前提和基础。步态是指在站立或步行过程中，各个关节在时间和空间上的一种相互关系，可以由关节的运动轨迹来描述。

现有的双足机器人步态的稳定性研究都是基于零力矩点（Zero Moment Point, ZMP）的方法，建立双足机器人的数学模型，并根据 ZMP 必须落在稳定区域，比如机器人足部的脚掌范围，去推导控制法则。

双足机器人的行走控制法则通过步态规划的方式实现，并且多数为开环形式。通常是基于倒立摆模型，规划质心和足部点轨迹，并通过逆运动学解算，得到机器人各个关节角度，再由电机驱动器根据（Proportion Integral Differential, PID）算法跟踪轨迹，从而实现整个行走过程。但是，如果双足机器人在行进过程中机器人机身姿态出现误差，比如受到外力干扰或者地面不平整运动时，会引起机器人机身姿态出现偏差。但是，现有的双足机器人一般没有包含姿态控制的处理算法，因此机器人的机身姿态会在干扰出现时逐步发散，导致行走失败，甚至出现双足机器人摔倒的现象。

因此，现有的双足机器人步态控制技术还有待于改进和发展。

发明内容

本申请针对以上存在的技术问题，提供一种在机器人机身受到干扰和出现偏差时或者遇到外力冲击和地面不平整情况，实时控制 ZMP 实现本体姿态控制和柔顺落足保证行走稳定性的双足机器人步态控制方法。实时修改足端 ZMP 期

望，并通过 ZMP 跟踪控制来控制姿态并在行走时柔顺踝关节保证行走稳定性的双足机器人步态控制方法以及双足机器人。

第一方面，本申请实施方式提供的技术方案是：提供一种双足机器人步态控制方法，包括以下步骤：

获取六维力信息，并根据该六维力信息判断双足机器人的支撑状态；

根据该六维力信息，计算双足机器人每个足部的 ZMP 位置；

根据支撑状态以及本体姿态误差设定每个足部的 ZMP 期望值；

根据该 ZMP 位置和 ZMP 位置变化率以及该 ZMP 期望值以及该 ZMP 期望值的变化率确定该双足机器人每个足部的踝关节补偿角度；

根据该踝关节补偿角，实时跟踪调整双足机器人当前的踝关节角度；

以设定频率循环以上步骤直至在不同支撑状态中完成姿态控制或踝关节柔顺。

该双足机器人步态控制方法中，在判断该双足机器人的支撑状态为单脚支撑期时，获取惯性测量单元测量得到的本体姿态信息，根据该机器人本体姿态信息确定 ZMP 期望值；

根据该 ZMP 位置和 ZMP 位置变化率以及该 ZMP 期望值以及该 ZMP 期望值的变化率确定该双足机器人每一足部的踝关节补偿角度。

该双足机器人步态控制方法中，该跟踪调整当前双足机器人的踝关节角度的步骤还包括：

将 ZMP 位置的偏差项转换成引起踝关节转动的虚拟力矩；

根据该虚拟力矩和刚体转动定律，得到该踝关节补偿角；

将该踝关节补偿角度累加至双足机器人当前姿态下每个足部的踝关节角度以在单脚支撑状态中控制双足机器人的姿态。

在判断该双足机器人足部的支撑状态为摆动期或双足支撑期时，该 ZMP 期望值设置为零；

根据该 ZMP 位置和 ZMP 位置变化率确定该双足机器人的踝关节补偿角度。

该跟踪调整当前双足机器人的踝关节角度的步骤还包括：

将 ZMP 位置的偏差项转换成引起踝关节转动的虚拟力矩；

根据该虚拟力矩和刚体转动定律进行动力学计算，得到该踝关节补偿角；

将该踝关节补偿角度累加至双足机器人当前姿态下每个足部的踝关节角度以在双脚支撑期和摆动期中实现踝关节柔顺。

该虚拟力矩的计算为：

$$\tau_{virtual} = K_p * (ZMP_desire - ZMP) + K_d * (ZMP_desire_dot - ZMP_dot),$$

其中 K_p 、 K_d 为控制器参数；

该动力学计算为：

$$\tau_{virtual} = J\ddot{\theta}(t)$$

$$\theta(t) = \dot{\theta}_0 t + \frac{1}{2} \ddot{\theta} t^2$$

其中， θ 为踝关节需要补偿的角度， J 为踝关节的转动惯量， t 为时间。

该 ZMP 期望值的计算为：

$$ZMP_desire = K_{p1} * (Roll_desire - Roll_imu) + K_{d1} * (0 - Roll_dot_imu)$$

其中 K_{p1} 、 K_{d1} 为控制参数， $Roll_desire$ 为期望的滚动角， $Roll_imu$ 和 $Roll_dot_imu$ 为惯性测量单元反馈的滚动角度值和角速度值。

其中，该获取六维力信息的步骤包括，

通过设置在足底的六维力传感器获取该双足机器人的六维力信息，在垂直脚面的受力小于设定阈值时，该支撑状态为非单腿支撑期，大于该设定阈值时，该支撑状态为单腿支撑状态。

该计算双足机器人每个足部的 ZMP 位置的步骤包括：

获取该双足机器人的六维力信息，根据该六维力信息计算每个足部的 ZMP 位置；

对该 ZMP 位置进行差分及滤波处理，得到该 ZMP 位置变化率。

第二方面，本申请实施方式提供的技术方案是：提供一种双足机器人，一种双足机器人，包括机身以及第一足部与第二足部，该机身设置惯至少一处理器、存储器以及连接该至少一处理器的惯性测量单元，该第一足部包括连接该至少一处理器的第一六维力传感器以及第一关节控制器，该第二足部包括连接该至少一处理器的第二六维力传感器以及第二关节控制器，其中，

该存储器存储有可被该至少一个处理器执行的指令，该指令被该至少一个处理器执行时，使该至少一个处理器能够执行前述的方法，惯性测量单元、第

一六维力传感器以及第二六维力传感器采集数据并控制该第一关节控制器以及第二关节控制器在不同支撑状态中完成姿态控制或踝关节柔顺。

第三方面，本申请实施方式提供的技术方案是：提供一种计算机程序产品，该计算机程序产品包括存储在非易失性计算机可读存储介质上的计算机程序，该计算机程序包括程序指令，当该程序指令被计算机执行时，使该计算机执行前述的方法。

本申请实施方式的有益效果是：本实施例的双足机器人步态控制方法以及双足机器人通过在双足上分别设置第一姿态控制模块与第二柔顺控制模块在机器人机身受到干扰和出现偏差时或者遇到外力冲击和地面不平整情况，实时修改足端 ZMP 期望，并通过 ZMP 跟踪控制来控制姿态并在行走时柔顺踝关节保证行走稳定性。

附图说明

一个或多个实施例通过与之对应的附图中的图片进行示例性说明，这些示例性说明并不构成对实施例的限定，附图中具有相同参考数字标号的元件表示为类似的元件，除非有特别申明，附图中的图不构成比例限制。

图1是本申请实施例的双足机器人步态控制方法的处理流程图；

图2是本申请实施例的双足机器人的软件模块图；

图3是本申请实施例的双足机器人的设计简图；

图4是本申请实施例的双足机器人步态控制方法的硬件架构简图；

图5是本申请实施例的双足机器人步态控制方法的详细流程图；以及

图6是本申请实施例的双足机器人的硬件架构简图。

具体实施方式

为使本申请实施例的目的、技术方案和优点更加清楚明白，下面结合附图对本申请实施例作进一步详细说明。在此，本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请，但并不作为对本申请的限定。

如图 2 所示，本申请涉及双足机器人步态控制方法，运用双足机器人本身姿态控制的惯性测量单元 20 数据，整合设置于双足的六维力传感器数据，在双

足机器人行走受外力或者不稳时完成姿态矫正。

该方法通过设置在双足机器人第一足部 31 与第二足部 32 的足底的六维力传感器检测该双足机器人行走中的单脚、双脚支撑以及摆动等支撑状态，并通过六维力传感器来获取双足机器人在行走过程中足部与地面之间的接触力和接触力矩。

在本申请中，根据六维力传感器检测得到的足底接触力和接触力矩，分别以机器人的第一足部 31 和第二足部 32 的踝关节为参考坐标系，基于惯性测量单元 20 反馈的机身数据求解第一足部 31 和第二足部 32 在 X、Y 方向上的 ZMP 位置。惯性测量单元 20 实时测量双足机器人机身姿态数据，并基于计算的姿态偏差得到各个足部 ZMP 期望。本申请的双足机器人，设置踝关节 ZMP 跟踪控制器，控制器以设定频率获取双足机器人的机身姿态数据，并基于惯性测量单元 20 和六维力传感器的反馈数据实时对足底 ZMP 位置进行跟踪和补偿，以闭环控制的方式完成在单脚支撑期或者双脚支撑期和摆动期下的姿态控制或者踝关节柔顺。

本申请通过对足 ZMP 位置的进行追踪和补偿，实现了机身 10 姿态的闭环控制。在单腿支撑期，基于机身 10 姿态数据，计算 ZMP 的期望值，并通过 ZMP 跟踪控制器，实时控制机身 10 姿态，保证了机身 10 姿态的稳定性。本实施例中，在摆动期和双足支撑期，将 ZMP 期望值设定为零，通过 ZMP 跟踪控制器，可实现柔顺落足和地形的自适应，减小落足时冲击力对行走带来的影响，提高双足机器人行走的稳定性和环境适应能力。

请参考图 3，本申请的双足机器人，包括机身 10 以及第一足部 31 与第二足部 32，该机身 10 设置至少一处理器、存储器以及连接该至少一处理器的惯性测量单元 20，该第一足部 31 包括连接该至少一处理器的第一六维力传感器 51 以及第一关节控制器 41，该第二足部 32 包括连接该至少一处理器的第二六维力传感器 52 以及第二关节控制器 42。该惯性测量单元 20、第一六维力传感器 51 以及第二六维力传感器 52 采集数据并控制该第一关节控制器以及第二关节控制器在不同支撑状态中完成姿态控制或踝关节柔顺。

请一并参考图 1 以及图 6，该双足机器人步态控制方法，包括以下步骤：

步骤 101：获取六维力信息，并根据该六维力信息判断双足机器人的支撑状态；

步骤 102: 根据该六维力信息, 计算双足机器人每个足部的 ZMP 位置;

步骤 103: 根据支撑状态以及本体姿态误差设定每个足部的 ZMP 期望值;

步骤 104: 根据该 ZMP 位置和 ZMP 位置变化率以及该 ZMP 期望值以及该 ZMP 期望值的变化率确定该双足机器人每个足部的踝关节补偿角度;

步骤 105: 根据该踝关节补偿角, 实时跟踪调整双足机器人当前的踝关节角度;

步骤 106: 以设定频率循环以上步骤直至在不同支撑状态中完成姿态控制或踝关节柔顺。

其中, 该步骤 101 进一步包括,

本实施例中, 通过设置在足底的六维力传感器获取该双足机器人的六维力信息, 在垂直脚面的受力小于设定阈值时, 该支撑状态为非单腿支撑期, 大于该设定阈值时, 该支撑状态为单腿支撑状态。

该步骤 102 包括:

获取该双足机器人的六维力信息, 根据该六维力信息计算每个足部的 ZMP 位置;

对该 ZMP 位置进行差分及滤波处理, 得到该 ZMP 位置变化率。

请参考图 5, 双足机器人的六维力传感器安装在踝关节处, 可以检测机器人足部与地面的接触力 $f = [f_x \ f_y \ f_z]^T$ 和力矩 $\tau = [\tau_x \ \tau_y \ \tau_z]^T$ 。坐标系定义如上图所示, X 方向为机器人前进方向, Z 向竖直向上, Y 向由右手系确定。

单脚 ZMP 位置的计算方法如下:

$$p_x = (\tau_y - f_x d) / f_z$$

$$p_y = (\tau_x - f_y d) / f_z$$

其中, d 为足底与六维力传感器的高度差, p_x 为 X 方向上的 ZMP 位置, p_y 为 Y 方向上的 ZMP 位置。

因此, 第一足部 31 和第二足部 32 的 ZMP 位置分别为:

$$p_{Lx} = (\tau_{Ly} - f_{Lx} d) / f_{Lz}$$

$$p_{Ly} = (\tau_{Lx} - f_{Ly} d) / f_{Lz}$$

$$p_{Rx} = (\tau_{Ry} - f_{Rx} d) / f_{Rz}$$

$$p_{Ry} = (\tau_{Rx} - f_{Ry} d) / f_{Rz}$$

其中： $f_L = [f_{Lx} \ f_{Ly} \ f_{Lz}]^T$ 和 $\tau_L = [\tau_{Lx} \ \tau_{Ly} \ \tau_{Lz}]^T$ 为第一足部 31 六维力传感器的测量数据， $f_R = [f_{Rx} \ f_{Ry} \ f_{Rz}]^T$ 和 $\tau_R = [\tau_{Rx} \ \tau_{Ry} \ \tau_{Rz}]^T$ 为第二足部 32 六维力传感器的测量数据。

p_{Lx} ：第一足部 X 方向上的 ZMP 位置；

p_{Ly} ：第一足部 Y 方向上的 ZMP 位置；

p_{Rx} ：第一足部 X 方向上的 ZMP 位置；

p_{Ry} ：第一足部 X 方向上的 ZMP 位置；

在判断该双足机器人的支撑状态为单脚支撑时，获取惯性测量单元 20 的机器人本体姿态信息，根据该机器人本体姿态信息确定 ZMP 期望值；

根据该 ZMP 位置和 ZMP 位置变化率以及该 ZMP 期望值以及该 ZMP 期望值的变化率确定该双足机器人每一足部的踝关节补偿角度。

以滚动角为例，在单腿支撑期，ZMP 期望值计算如下：

$$ZMP_desire = K_{p1} * (Roll_desire - Roll_imu) + K_{d1} * (0 - Roll_dot_imu)$$

该步骤 105 还包括：

将 ZMP 位置的偏差项转换成引起踝关节转动的虚拟力矩；

根据该虚拟力矩和刚体转动定律，得到该踝关节补偿角；

将该踝关节补偿角度累加至双足机器人当前姿态下每个足部的踝关节角度以在单脚支撑状态中控制双足机器人的姿态。

本实施例中，在判断该双足机器人足部的支撑状态为摆动期或双足支撑期时，该 ZMP 期望值设置为零，再根据该 ZMP 位置和 ZMP 位置变化率确定该双足机器人的踝关节补偿角度。

双足支撑期或摆动期：

$$ZMP_desire = K_{p1} * (Roll_desire - Roll_imu) + K_{d1} * (0 - Roll_dot_imu)$$

以滚动角为例，在单腿支撑期，ZMP 期望值设置为 0，亦即： $ZMP_desire = 0$ ，

式中 K_{p1} 、 K_{d1} 为控制器参数， $Roll_desire$ 为期望的滚动角，通常为 0， $Roll_imu$ 和 $Roll_dot_imu$ 为惯性测量单元 20 反馈的滚动角度值和角速度值。

该步骤 105 还包括：

将 ZMP 位置的偏差项转换成引起踝关节转动的虚拟力矩；

根据该虚拟力矩和刚体转动定律进行动力学计算，得到该踝关节补偿角；

将该踝关节补偿角度累加至双足机器人当前姿态下每个足部的踝关节角度以在双脚支撑期和摆动期中实现踝关节柔顺。

该虚拟力矩的计算为：

$$\tau_{virtual} = K_p * (ZMP_desire - ZMP) + K_d * (ZMP_desire_dot - ZMP_dot)$$

其中 K_p 、 K_d 为控制器参数；

该动力学计算为：

$$\tau_{virtual} = J\ddot{\theta}(t)$$

$$\theta(t) = \dot{\theta}_0 t + \frac{1}{2} \ddot{\theta} t^2$$

其中， θ 为踝关节需要补偿的角度， J 为踝关节的转动惯量， t 为时间。

本实施例的双足机器人步态控制方法以及双足机器人通过在双足上分别设置第一姿态控制模块与第二柔顺控制模块在机器人机身 10 受到干扰和出现偏差时或者遇到外力冲击和地面不平整情况，实时修改足端 ZMP 期望，并通过 ZMP 跟踪控制来控制姿态并可在行走时柔顺踝关节保证行走稳定性。

图 4 是本申请实施例提供的双足机器人设备 600 的硬件结构示意图，如图 4 所示，该设备 600 包括：

一个或多个处理器 610、存储器 620 以及通信组件 650，图 4 中以一个处理器 610 为例。该存储器 620 存储有可被该至少一个处理器 610 执行的指令，亦即计算机程序 640，该指令被该至少一个处理器执行时，通过通信组件 650 建立数据通道，以使该至少一个处理器能够执行该提高双足机器人行走稳定性的控制方法。

处理器 610、存储器 620 以及通信组件 650 可以通过总线或者其他方式连接，图 4 中以通过总线连接为例。

存储器 620 作为一种非易失性计算机可读存储介质，可用于存储非易失性软件程序、非易失性计算机可执行程序以及模块，如本申请实施例中的提高双足机器人行走稳定性的控制方法对应的程序指令/模块。处理器 610 通过运行存储在存储器 620 中的非易失性软件程序、指令以及模块，从而执行服务器的各种功能应用以及数据处理，即实现上述方法实施例中的提高双足机器人行走稳定性的控制方法。

存储器 620 可以包括存储程序区和存储数据区，其中，存储程序区可存储操作系统、至少一个功能所需要的应用程序；存储数据区可存储根据双足机器人的使用所创建的数据等。此外，存储器 620 可以包括高速随机存取存储器，还可以包括非易失性存储器，例如至少一个磁盘存储器件、闪存器件、或其他非易失性固态存储器件。在一些实施例中，存储器 620 可选包括相对于处理器 610 远程设置的存储器，这些远程存储器可以通过网络连接至双足机器人。上述网络的实例包括但不限于互联网、企业内部网、局域网、移动通信网及其组合。

所述一个或者多个模块存储在所述存储器 620 中，当被所述一个或者多个处理器 610 执行时，执行上述任意方法实施例中的提高双足机器人行走稳定性的控制方法，例如，执行以上描述的图 1 中的方法步骤 101 至步骤 106；实现附图 2 第一姿态控制模块 22 以及第二柔顺控制模块 24 等的功能。

上述产品可执行本申请实施例所提供的方法，具备执行方法相应的功能模块和有益效果。未在本实施例中详尽描述的技术细节，可参见本申请实施例所提供的方法。

本申请实施例提供了一种非易失性计算机可读存储介质，所述计算机可读存储介质存储有计算机可执行指令，该计算机可执行指令被一个或多个处理器执行，例如，执行以上描述的图 1 中的方法步骤 101 至步骤 106；实现附图 2 第一姿态控制模块 22 以及第二柔顺控制模块 24 等的功能。

最后应说明的是：以上实施例仅用以说明本申请的技术方案，而非对其限制；在本申请的思路下，以上实施例或者不同实施例中的技术特征之间也可以进行组合，步骤可以以任意顺序实现，并存在如上所述的本申请的不同方面的许多其它变化，为了简明，它们没有在细节中提供；尽管参照前述实施例对本申请进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解：其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或者对其中部分技术特征进行等同替换；而这些修改或者替换，并不使相应技术方案的本质脱离本申请各实施例技术方案的范围。

权利要求书

1. 一种双足机器人步态控制方法，其特征在于，包括以下步骤：
获取六维力信息，并根据所述六维力信息判断双足机器人的支撑状态；
根据所述六维力信息，计算双足机器人每个足部的 ZMP 位置；
根据所述支撑状态以及本体姿态误差设定每个足部的 ZMP 期望值；
根据所述 ZMP 位置和 ZMP 位置变化率以及所述 ZMP 期望值以及所述 ZMP 期望值的变化率确定所述双足机器人每个足部的踝关节补偿角度；
根据所述踝关节补偿角，实时跟踪调整双足机器人当前的踝关节角度；
以设定频率循环以上步骤直至在不同支撑状态中完成姿态控制或踝关节柔顺。
2. 根据权利要求 1 所述的双足机器人步态控制方法，其特征在于，
在判断所述双足机器人的支撑状态为单脚支撑时，获取由惯性测量单元测量得到的本体姿态信息，根据所述机器人本体姿态信息确定 ZMP 期望值；
根据所述 ZMP 位置和 ZMP 位置变化率以及所述 ZMP 期望值以及所述 ZMP 期望值的变化率确定所述双足机器人每一足部的踝关节补偿角度。
3. 根据权利要求 2 所述的双足机器人步态控制方法，其特征在于，
所述跟踪调整当前双足机器人的踝关节角度的步骤还包括：
将 ZMP 位置的偏差项转换成引起踝关节转动的虚拟力矩；
根据所述虚拟力矩和刚体转动定律，得到所述踝关节补偿角；
将所述踝关节补偿角度累加至双足机器人当前姿态下每个足部的踝关节角度以在单脚支撑状态中控制双足机器人的姿态。
4. 根据权利要求 1 所述的双足机器人步态控制方法，其特征在于，
在判断所述双足机器人足部的支撑状态为摆动期或双足支撑期时，所述 ZMP 期望值设置为零；
根据所述 ZMP 位置和 ZMP 位置变化率确定所述双足机器人的踝关节补偿角度。
5. 根据权利要求 4 所述的双足机器人步态控制方法，其特征在于，
所述跟踪调整当前双足机器人的踝关节角度的步骤还包括：
将 ZMP 位置的偏差项转换成引起踝关节转动的虚拟力矩；

根据所述虚拟力矩和刚体转动定律进行动力学计算, 得到所述踝关节补偿角;

将所述踝关节补偿角度累加至双足机器人当前姿态下每个足部的踝关节角度以在双脚支撑期和摆动期中实现踝关节柔顺。

6. 根据权利要求 5 所述的双足机器人步态控制方法, 其特征在于, 所述虚拟力矩为:

$$\tau_{virtual} = K_p * (ZMP_desire - ZMP) + K_d * (ZMP_desire_dot - ZMP_dot),$$

其中 K_p 、 K_d 为控制器参数;

所述动力学计算为:

$$\tau_{virtual} = J\ddot{\theta}(t)$$

$$\theta(t) = \dot{\theta}_0 t + \frac{1}{2} \ddot{\theta} t^2$$

其中, θ 为踝关节需要补偿的角度, J 为踝关节的转动惯量, t 为时间。

7. 根据权利要求 1 所述的双足机器人步态控制方法, 其特征在于, 所述 ZMP 期望值为:

$$ZMP_desire = K_{p1} * (Roll_desire - Roll_imu) + K_{d1} * (0 - Roll_dot_imu)$$

其中 K_{p1} 、 K_{d1} 为控制参数, $Roll_desire$ 为期望的滚动角, $Roll_imu$ 和 $Roll_dot_imu$ 为惯性测量单元反馈的滚动角度值和角速度值。

8. 根据权利要求 1 所述的双足机器人步态控制方法, 其特征在于, 所述获取六维力信息的步骤包括,

通过设置在足底的六维力传感器获取所述双足机器人的六维力信息, 在垂直脚面的受力小于设定阈值时, 所述支撑状态为非单腿支撑期, 大于所述设定阈值时, 所述支撑状态为单腿支撑状态。

9. 根据权利要求 1 所述的双足机器人步态控制方法, 其特征在于, 所述计算双足机器人每个足部的 ZMP 位置的步骤包括:

获取所述双足机器人的六维力信息, 根据所述六维力信息计算每个足部的 ZMP 位置;

对所述 ZMP 位置进行差分及滤波处理, 得到所述 ZMP 位置变化率。

10. 一种双足机器人, 包括机身以及第一足部与第二足部, 所述机身设置至

少一处理器、存储器以及连接所述至少一处理器的惯性测量单元，所述第一足部包括连接所述至少一处理器的第一六维力传感器以及第一关节控制器，所述第二足部包括连接所述至少一处理器的第二六维力传感器以及第二关节控制器，其中，

所述存储器存储有可被所述至少一个处理器执行的指令，所述指令被所述至少一个处理器执行时，使所述至少一个处理器能够执行权利要求 1-5 任一项所述的方法，使惯性测量单元、第一六维力传感器以及第二六维力传感器采集数据并控制所述第一关节控制器以及第二关节控制器在不同支撑状态中完成姿态控制或踝关节柔顺。

11. 一种计算机程序产品，其特征在于，所述计算机程序产品包括存储在非易失性计算机可读存储介质上的计算机程序，所述计算机程序包括程序指令，当所述程序指令被计算机执行时，使所述计算机执行权利要求 1-9 任一项所述的方法。

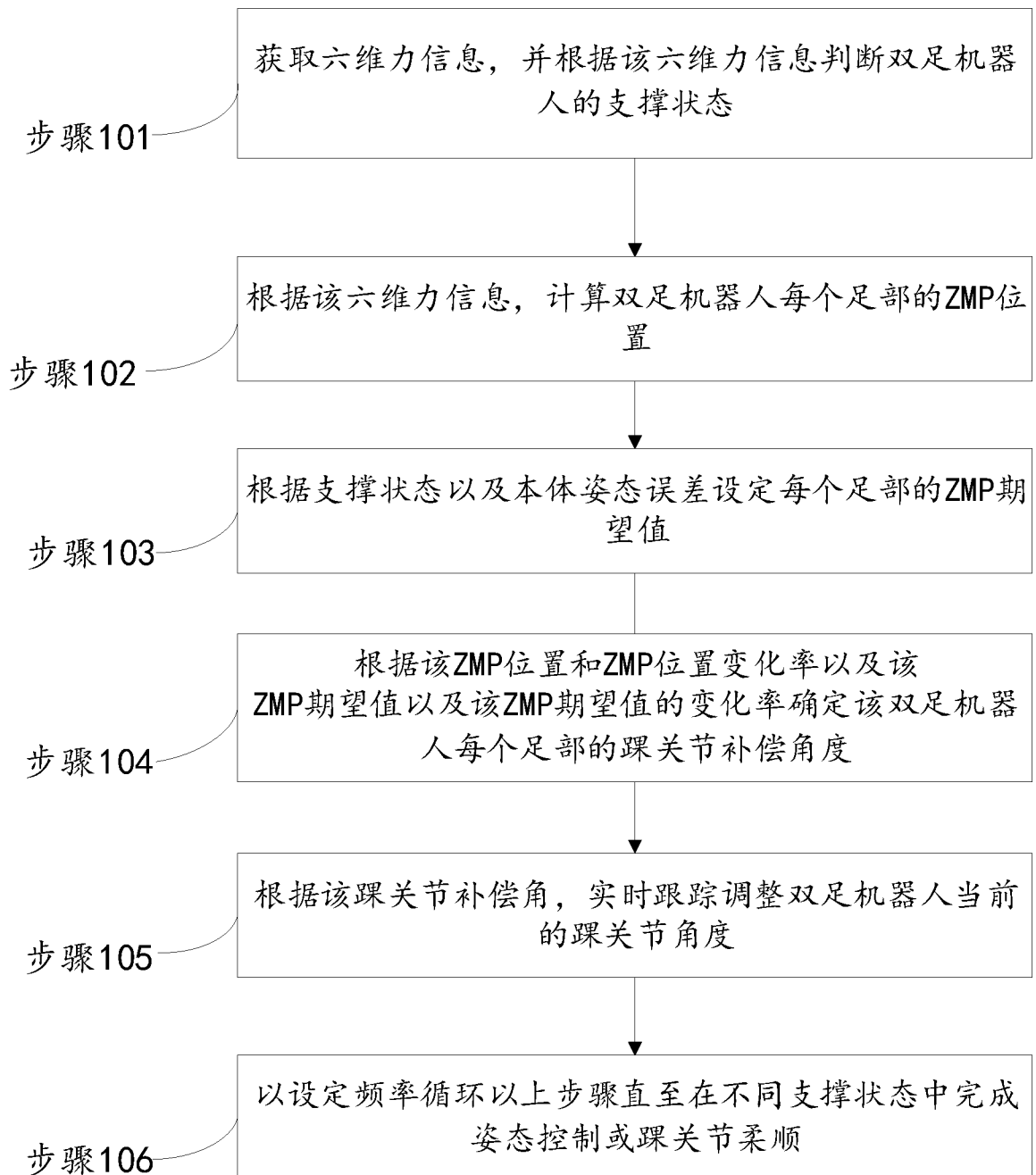


图 1

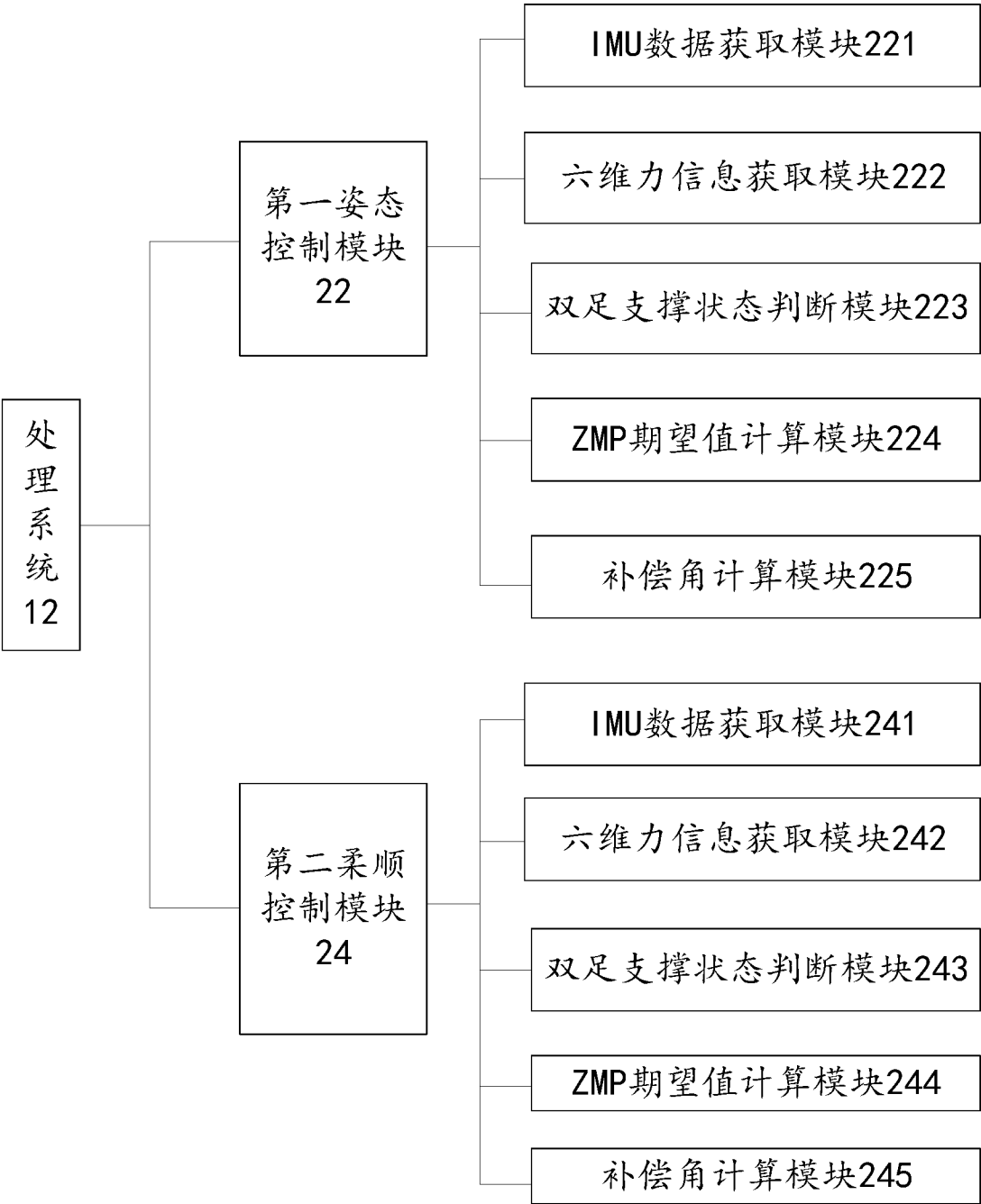


图 2

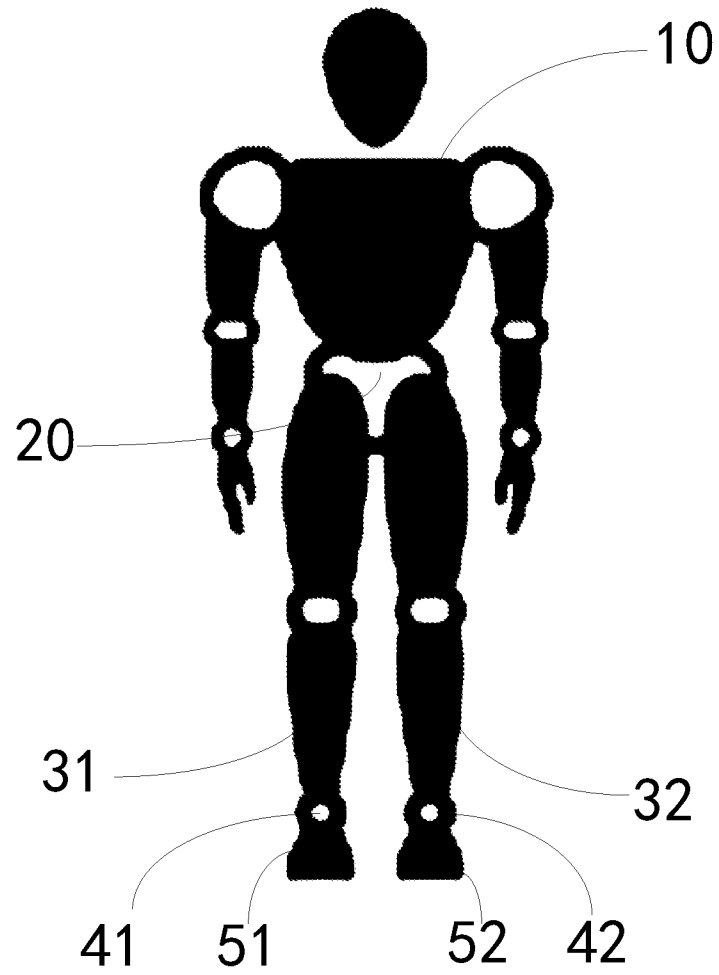


图 3

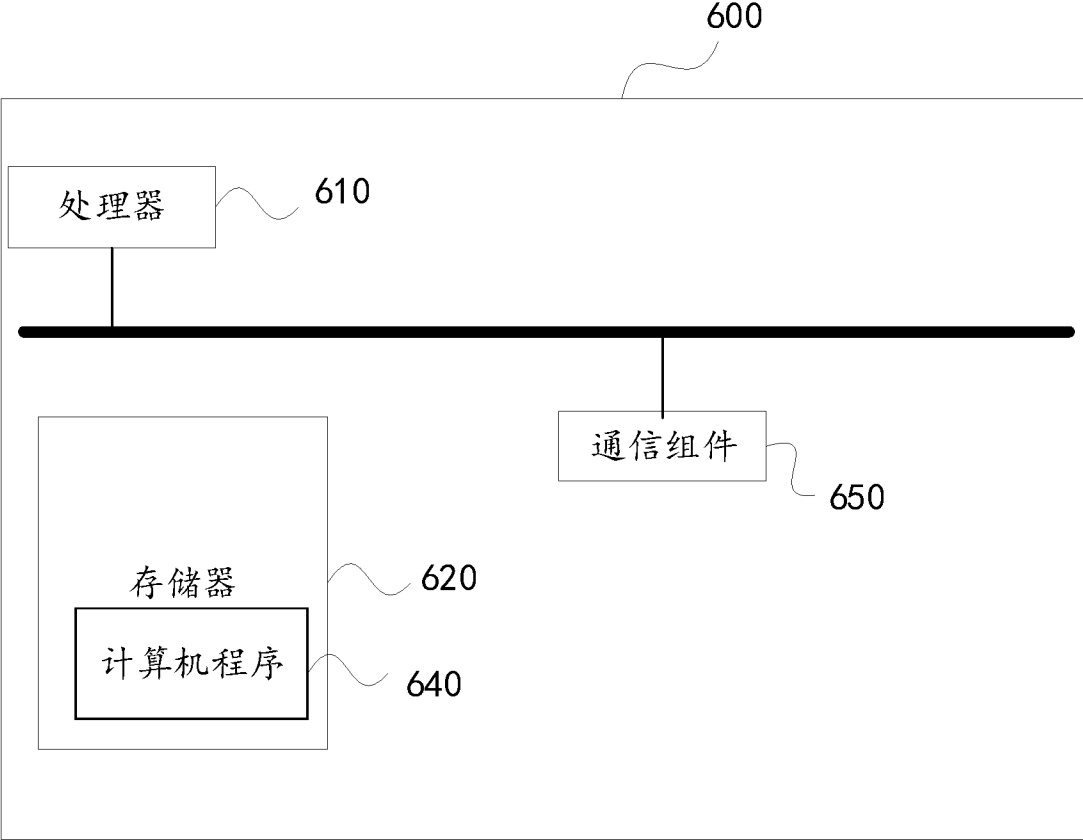


图 4

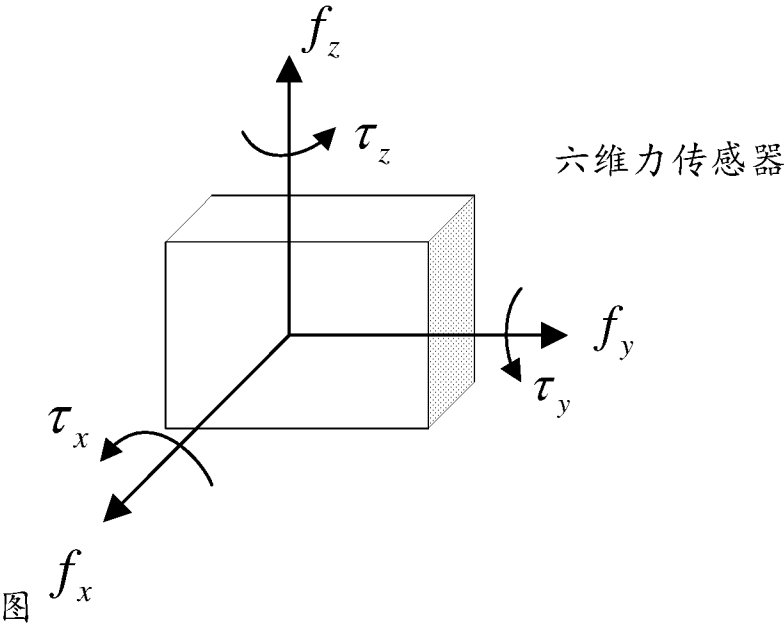


图 5

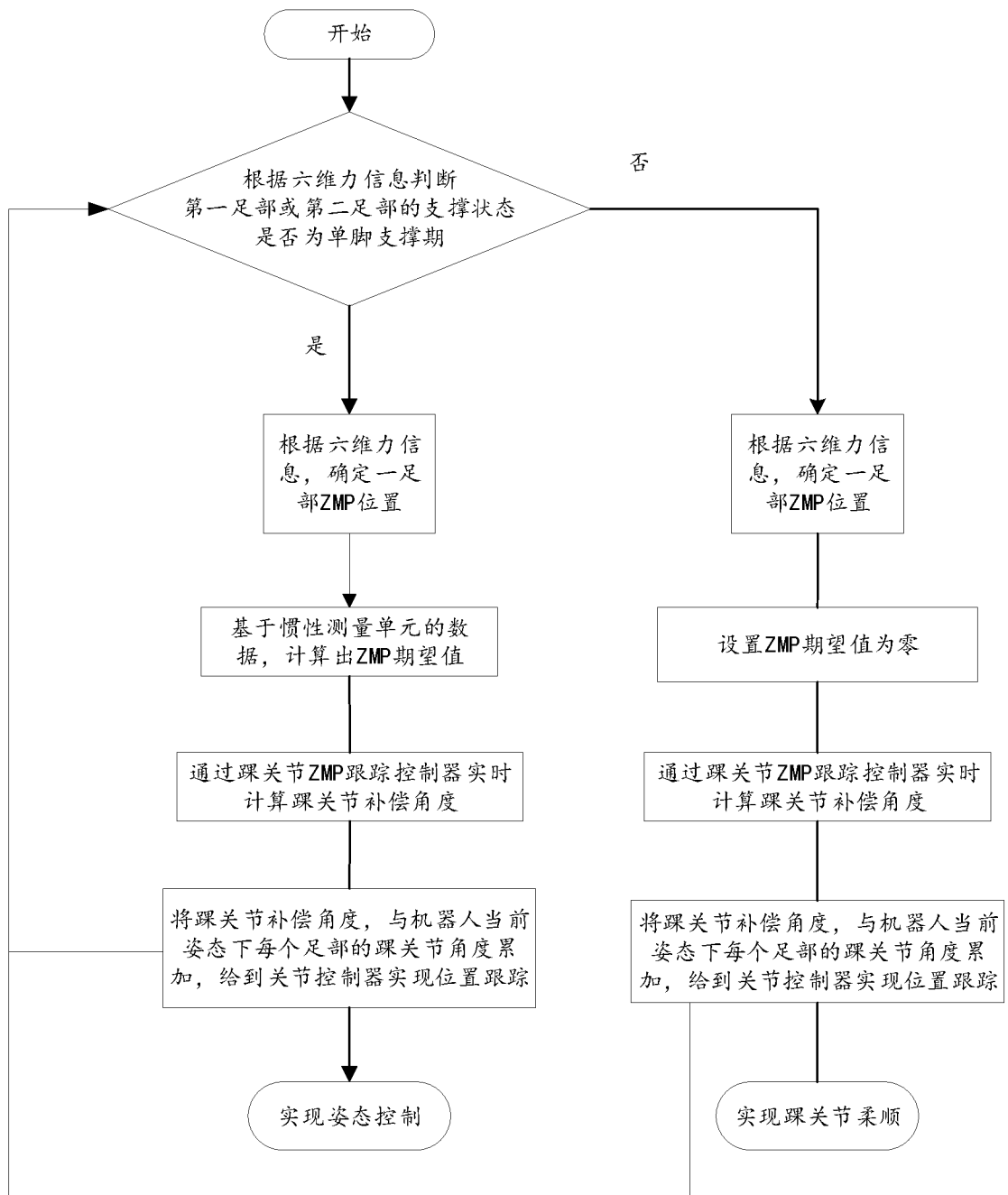


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/125103

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B25J 9/06(2006.01)i; B62D 57/032(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B25J; B62D; G05D; G01B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; VEN; CNKI; USTXT; WOTXT; EPTXT; CNTXT: 虚拟力矩, 零力矩点, 双足, 补偿角, 踝关节, 惯性测量单元, 机器人, 步态, 步行, robot?, ZMP, IMU, zero moment point, inertia, biped, double, foot, feet, ankle?, joint

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 5432417 A (HONDA MOTOR CO., LTD.) 11 July 1995 (1995-07-11) description, column 3, line 53 to column 12, line 23, and figures 1-21	1, 2, 4, 8-11
A	CN 105973143 A (BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 28 September 2016 (2016-09-28) entire document	1-11
A	CN 108013999 A (SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD.) 11 May 2018 (2018-05-11) entire document	1-11
A	CN 107891920 A (BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 10 April 2018 (2018-04-10) entire document	1-11
A	JP 2003048178 A (FUJITSU LTD.) 18 February 2003 (2003-02-18) entire document	1-11



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

04 March 2019

Date of mailing of the international search report

18 April 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2018/125103

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	5432417	A	11 July 1995	JP	3167420	B2	21 May 2001
				JP	3148828	B2	26 March 2001
CN	105973143	A	28 September 2016	None			
CN	108013999	A	11 May 2018	EP	3318189	A1	09 May 2018
				KR	20180047955	A	10 May 2018
				US	2018116897	A1	03 May 2018
CN	107891920	A	10 April 2018	None			
JP	2003048178	A	18 February 2003	JP	4733875	B2	27 July 2011

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/125103

A. 主题的分类 B25J 9/06 (2006.01) i; B62D 57/032 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																				
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) B25J; B62D; G05D; G01B 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNABS; VEN; CNKI; USTXT; WOTXT; EPTXT; CNTXT; 虚拟力矩, 零力矩点, 双足, 补偿角, 踝关节, 惯性测量单元, 机器人, 步态, 步行, robot?, ZMP, IMU, zero moment point, inertia, biped, double, foot, feet, ankle?, joint																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>US 5432417 A (HONDA MOTOR CO LTD) 1995年 7月 11日 (1995 - 07 - 11) 说明书第3栏第53行-第12栏第23行、附图1-21</td> <td>1、2、4、8-11</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105973143 A (北京理工大学) 2016年 9月 28日 (2016 - 09 - 28) 全文</td> <td>1-11</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 108013999 A (三星电子株式会社) 2018年 5月 11日 (2018 - 05 - 11) 全文</td> <td>1-11</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 107891920 A (北京理工大学) 2018年 4月 10日 (2018 - 04 - 10) 全文</td> <td>1-11</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>JP 2003048178 A (FUJITSU LTD) 2003年 2月 18日 (2003 - 02 - 18) 全文</td> <td>1-11</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	X	US 5432417 A (HONDA MOTOR CO LTD) 1995年 7月 11日 (1995 - 07 - 11) 说明书第3栏第53行-第12栏第23行、附图1-21	1、2、4、8-11	A	CN 105973143 A (北京理工大学) 2016年 9月 28日 (2016 - 09 - 28) 全文	1-11	A	CN 108013999 A (三星电子株式会社) 2018年 5月 11日 (2018 - 05 - 11) 全文	1-11	A	CN 107891920 A (北京理工大学) 2018年 4月 10日 (2018 - 04 - 10) 全文	1-11	A	JP 2003048178 A (FUJITSU LTD) 2003年 2月 18日 (2003 - 02 - 18) 全文	1-11
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
X	US 5432417 A (HONDA MOTOR CO LTD) 1995年 7月 11日 (1995 - 07 - 11) 说明书第3栏第53行-第12栏第23行、附图1-21	1、2、4、8-11																		
A	CN 105973143 A (北京理工大学) 2016年 9月 28日 (2016 - 09 - 28) 全文	1-11																		
A	CN 108013999 A (三星电子株式会社) 2018年 5月 11日 (2018 - 05 - 11) 全文	1-11																		
A	CN 107891920 A (北京理工大学) 2018年 4月 10日 (2018 - 04 - 10) 全文	1-11																		
A	JP 2003048178 A (FUJITSU LTD) 2003年 2月 18日 (2003 - 02 - 18) 全文	1-11																		
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																				
<table border="0"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> * 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td style="vertical-align: top;"> “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																			
国际检索实际完成的日期 2019年 3月 4日		国际检索报告邮寄日期 2019年 4月 18日																		
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 李雅娟 电话号码 86-(512)-88995583																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/125103

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
US	5432417	A	1995年 7月 11日	JP	3167420	B2	2001年 5月 21日
				JP	3148828	B2	2001年 3月 26日
CN	105973143	A	2016年 9月 28日	无			
CN	108013999	A	2018年 5月 11日	EP	3318189	A1	2018年 5月 9日
				KR	20180047955	A	2018年 5月 10日
				US	2018116897	A1	2018年 5月 3日
CN	107891920	A	2018年 4月 10日	无			
JP	2003048178	A	2003年 2月 18日	JP	4733875	B2	2011年 7月 27日