


运动控制 - 基于关节与加速度计的负载估计与离地检测1

 注：本负载估计主要基于机器人的力学分析部分，目前主要用在A1.1C上，不考虑状态估计器或者卡尔曼滤波等对于负载估计方面的优化、且存在部分工程简化的内容。

负载估计与离地检测的意义

负载估计和离地检测对于双轮足机器人的意义在于，**更好的识别机器人在地面或空中的状况**：如，机器人当前对地的正压力是多少、机器人是否离地、机器人是否处于落体状态，等等。

需要注意，虽然负载估计和离地检测是强相关的两项功能，但他们的本质是两样东西。负载估计的目的在于识别出来地面对**轮胎 / 基座**的压力（地面上）或是轮胎对于基座的压力（空中），本质是通过一定手段量化机器人的受力状况。离地检测的目的在于识别出机器人是否已经离开地面，其状态是**二值化**的，并不要求准确的识别出机器人负载的大小。

目前在A1系列机器人中，负载估计主要用于约束机器人轮毂电机的最大扭矩输出，并判断机器人是否离地或落地。

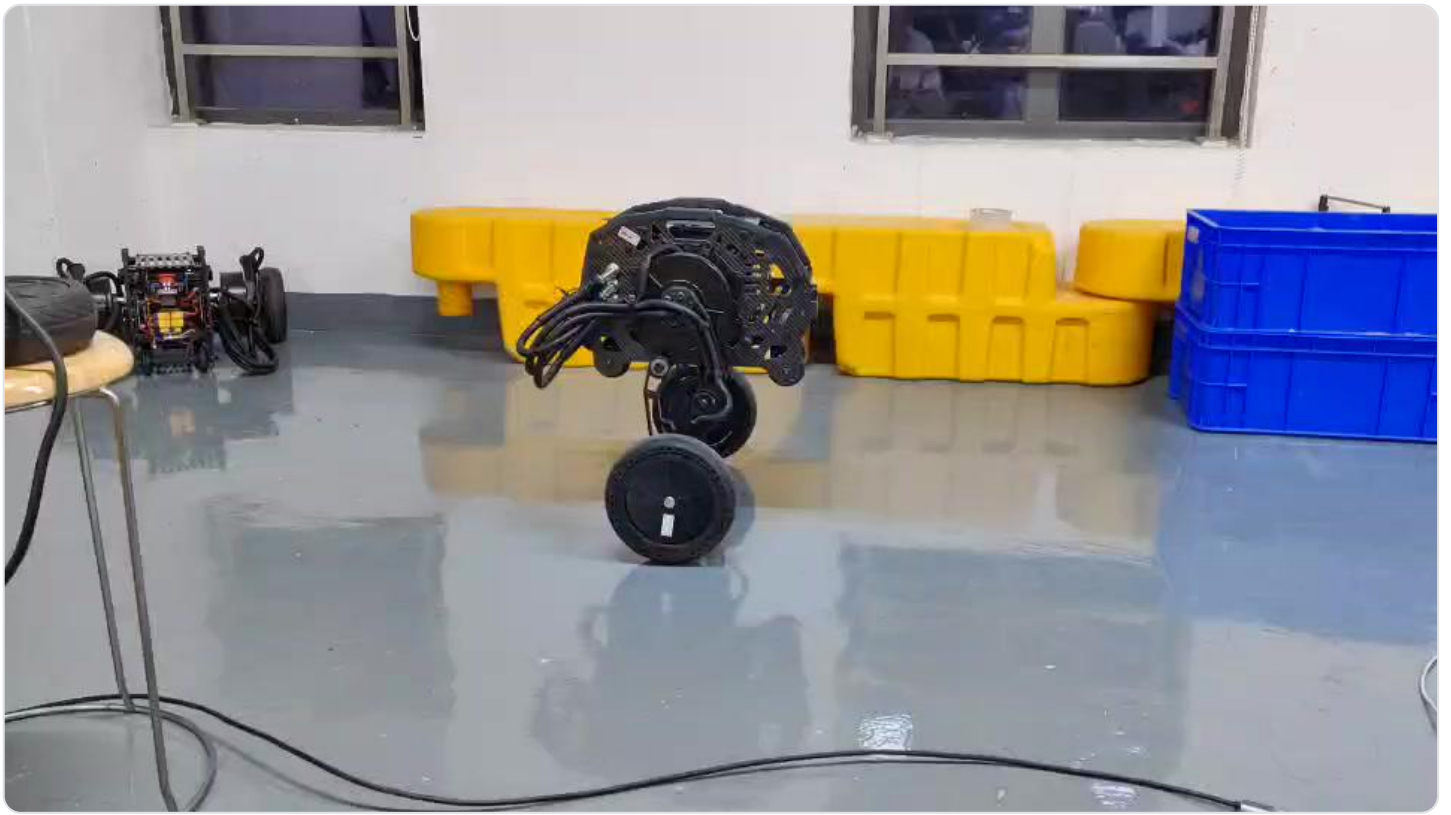
机器人落地命中状态

我们将机器人落地时轮子的选项以及质心偏移量（tilt）称为机器人命中地面时的状态，简称**命中状态**。在实际使用轮足机器人的过程中，经常会遇到以下两种情况

机器人原地跃起、下落

如以下视频所示，也就是机器人原地跃起后，原地下落。大部分情况下，机器人**命中地面**的时候腿部是垂直于地面，且没有向前或者向后的加速度，因此对于机器人的平衡控制器来说，质心偏移量（tilt）比较少，LQR控制器的压力比较小，比如机器人原地跳跃。

注意，机器人原地条约后会往前摆一下，也是因为机器人起立得太快，z轴加速度过大，导致姿态估计出现偏差。只需要调整机器人起立速度即可，



机器人冲坡

如以下视频所示，即机器人通过一段坡道、或到了某个台阶的边缘后，带初速度开始抛物线下落。此时，机器人在地面上的命中点将出现难以预测的变化。



首先，冲出坡道时，轮子速度低于基座速度，身子会前倾，tilt会变大。由于tilt变大，LQR控制器会开始起作用，但由于此时模型从**倒立摆变成了单摆**，原控制器增益不能匹配当前模型；再加上自由落体状况下加速度计的状况也会发生变化，导致轮胎**落地前的旋向不可控**。这种不可控，随着机器人冲坡高度变大，影响会越来越明显，使得机器人落地时的**命中状态一致性差**。

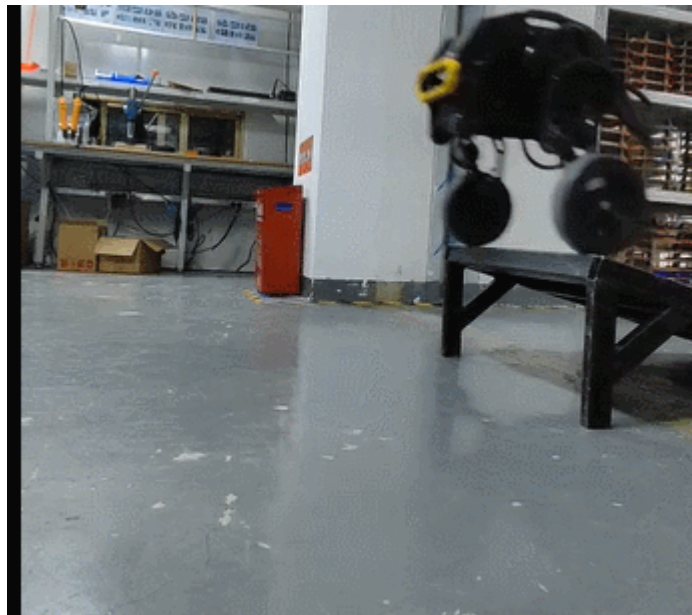


命中状态良好。机器人落到地上之后能站稳



命中状态不佳，机器人落到地上之后，大概率会摔倒或者往前冲一大段来调节。

此外，由于质心分布的问题，**机器人前进冲坡和后退冲坡的命中状态也是有区别的**，这进一步增加了机器人冲坡的控制难度。



前跳和后跳，就算控制器一致，机器人的命中状态也不一致

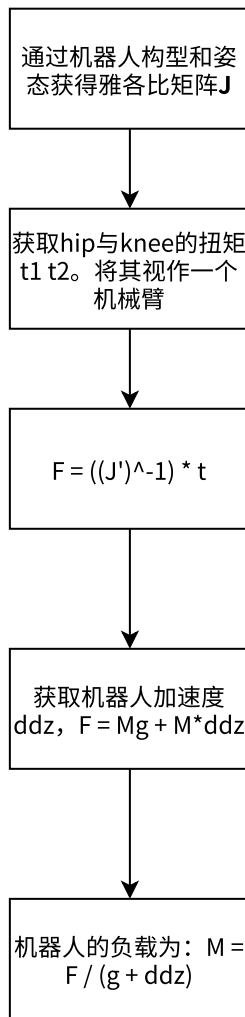
换言之，在控制机器人冲坡时，需要解决以下两个问题：

- a. 如何设计 令机器人的命中状态一致 的控制器
- b. 如何设计控制器的切换逻辑。

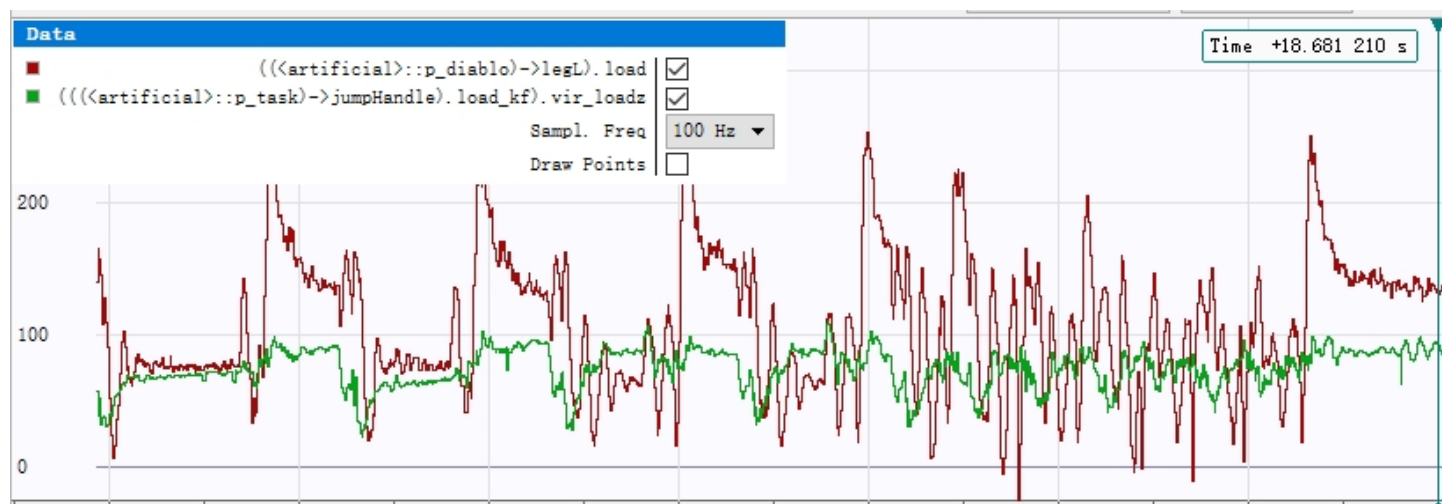
本文重点讨论的是如何解决问题b。 问题b的解法很明显：及时检测出机器人从倒立摆切换到单摆的时机，也就是机器人何时**发生离地**。

负载的估计机理

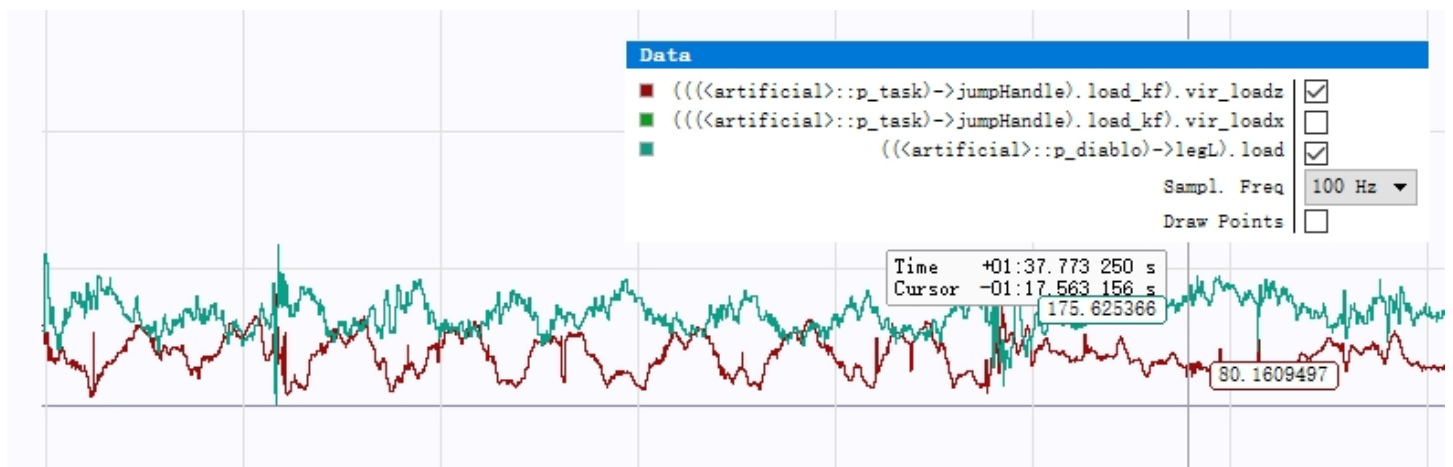
目前在A1系列的负载估计方法十分简单：



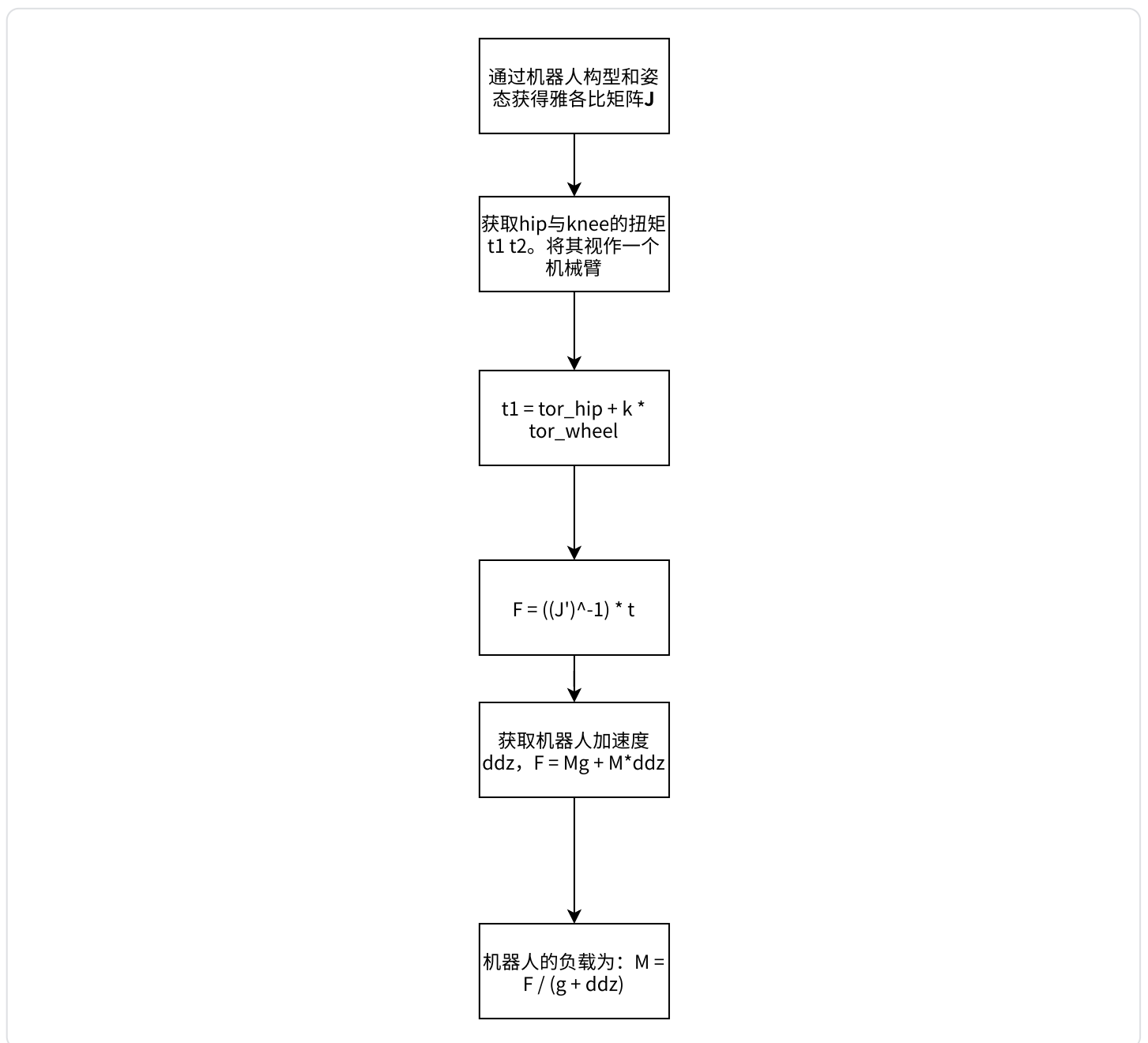
以前A1的负载检测方法使用，目前尚未判明作用机理，但通过对比可以发现，当前这一套负载估计器的负载波动较小一些，如下图所示。其中绿色为当前的负载估计器。



但同时，我们还要考虑轮毂电机出力造成的影响。由于机器人的split输出会把机器人的hip锁死，在机器人转弯时，按上述方法会认为机器人的负载增大。



目前出于模型简化考虑，我们认为轮毂电机的输出的扭矩会根据高度以一定比例叠加在hip关节上。辨识方法变为如下流程。实际上，轮子扭矩对hip关节的作用和地面摩擦力有较大关系，相当于作用在二自由度机械臂上的一个外力。



加速度的测量机理

机器人的加速度可以分为两部分，

基座在世界坐标系下的加速度

由于我们的加速度计是直接安装在机器人的基座上面的，因此我们测得得加速度 ddz ，就是基座在世界坐标系下的加速度。

需要注意一点：当机器人处于悬空状态时，加速度计测到的 ddz 为 $ddz = g = -9.8m/s^2$ 。当机器人自由落体时，加速度计测到的 ddz 为 $ddz = 0$ 。这是由[加速度计本身的测量机理](#)决定的。当机器人自由落体，机器人处于失重状态，**因此测到的加速度为0**。

轮毂在机器人坐标系下的加速度

除了通过加速度计测量加速度以外，我们还可以通过机器人关节的角度、角速度和角加速度，来算出机器人末端（轮毂）与基座之间的加速度：

$$a = \dot{J}(q)\dot{q} + J(q)\ddot{q}$$

注意，这里算出来的加速度是在机器人坐标系下的，是一个相对的加速度。记这个加速度为 az 。

不同状况下的负载估计和离地检测

根据 ddz 和 az 的数值符号，可以分为以下九种状况：（令 $g = -9.8m/s^2$ ）

	$az > 0$	$az < 0$	$az = 0$
$ddz > g$	1. 机器人在收腿，同时向上加速。（大概率被提起来了， 离地 ）	4. 机器人在蹬腿，身子在往上升（ 需要根据负载估计器做进一步判断 ）	7. 机器人向上加速，同时腿没动。（大概率被提起来， 离地 ）
$ddz < g$	2. 机器人在收腿，身子向下加速。（ 需要根据负载估计器做进一步的离地判断 ）	5. 机器人在蹬腿，同时身子向下降。（大概率是自由落体状态， 离地 ）	8. 机器人向下落，同时腿没动。（大概率是自由落体， 离地 ）
$ddz = g$	3. 机器人身子不变，收腿（机子大概率被架起来了， 离地 ）		9. 机器人没动。（ 需要靠负载检测做进一步离地判断 ）

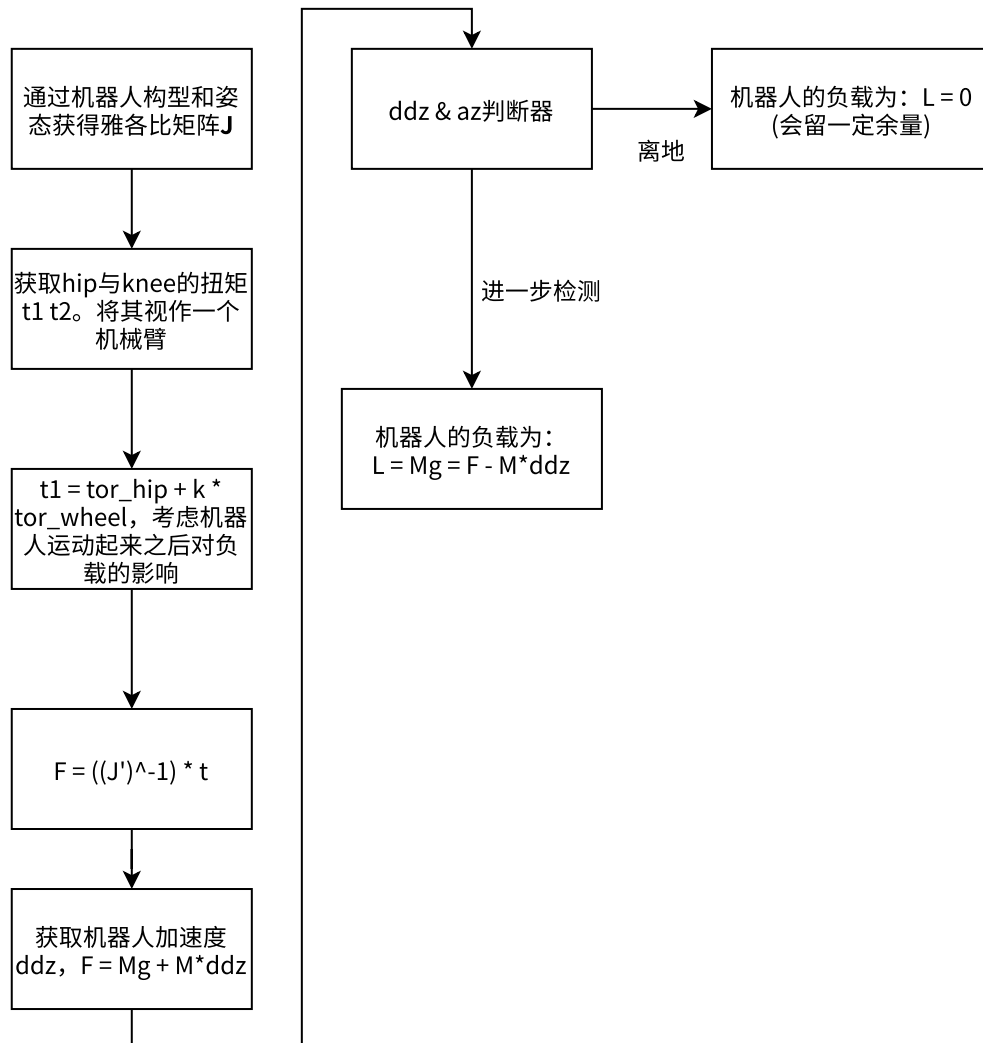
- | | | |
|--|---|--|
| | 6. 机器人身子不变，
蹬腿（机子大概率
是被架起来了，离
地） | |
|--|---|--|

其中，3种标红的状况下，是真正需要各关节扭矩参与负载估计的状况。其余6种状况下，**可直接判定机器人处于离地状态**。

换言之，在已知机器人加速度状态的情况下，机器人即可进行初步的离地检测，并不是一定要使用负载估计器才能进行检测。并且 ddz 和 az 的参与，**能够更好的避免负载估计器的误判**。

此外，由于很难存在 $ddz == g$ 或者 $az == 0$ 的情况，需要预留相应的检测阈值和检测时间，来增加离地检测的准度。

加入离地检测逻辑之后，负载估计流程变更为如下：



TODO1 :仍留存的一些问题

在A1高度到达0.26~0.27区间，即比较接近机器人绷直的高度时，会存在膝关节电流突增的情况。目前来看，膝关节电流确实出现了增加的情况，会导致机器人的负载估计准度下降。这一块还需要解决。

此外，实际上现在用的负载估计器，L**最正确的表达式**应该为：

$$L = (M + m)g = \frac{Fg}{(g + ddz)}$$

其中m为机器人身上带的额外负载。但由于ddz的噪声问题，这样算出来的L噪音很大，几乎没办法使用。可以考虑使用EKF或者其他办法对此处的负载进行优化。

TODO2：未考虑浮动基座的情况

当前负载估计的建立完全是在基座水平的情况考虑的

TODO3：与线性模型的状态观测器的有机统一 / 非线性观测器