

不平整地面仿人机器人行走控制策略*

帅 梅^{1,2} 付成龙² 杨向东² 陈 愚²

(1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100037;
2. 清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

摘要: 针对仿人机器人行走于不平整地面会失稳倾倒的现象, 提出基于 Kane 碰撞原理的在线调节控制算法。该调节算法可以实现快速的动力学解算, 估算出仿人机器人遇到障碍时地面对腿部的冲击力大小, 据此调节仿人机器人的腿部及躯干姿态参数, 使机器人成功稳定行走过凸起或凹陷障碍。采用 Matlab 的 Simulink 工具, 仿真验证了 5 杆仿人机器人模型基于 Kane 在线调节控制算法平稳行走过障碍的过程。

关键词: 仿人机器人 不平整地面行走 Kane 碰撞原理 控制策略

中图分类号: TP24

0 前言

仿人机器人研究中一个关键问题是如何使仿人机器人适应各种地面, 进行快速、稳定的行走。目前, 仿人机器人的步态规划通常采用离线方式进行, 即主要针对理想的平整地面环境, 设计出满足特定全局优化要求的步态序列, 然后根据规划好的步态序列控制机器人行走。在这种情况下, 若是遇见凸起或凹陷的不平整地面, 会使摆动腿末端提前或推迟触地, 使腿末端遭遇过大的地面冲击力, 导致机器人因憋劲、姿态扭曲而摔倒。因此, 一些研究机构尝试采用各种步态在线修正算法来实现针对实际行走环境的稳定持续行走, 其所使用的步态在线修正算法在机理上基本一致: 实时收集仿人机器人身体上各种传感器的信息, 如关节上角度和力矩传感器信息, 足底的六维力传感器或者压力传感器组信息, 躯干上的陀螺仪、倾斜计以及视觉等传感器的信息, 再根据这些信息, 解算得到调整身体姿态所需要的数据, 把这些数据与预先规划的步态数据作比较, 所得误差经过简单快速处理后送回控制系统进行在线步态调节控制^[1-6]。

实时快速有效解算是在线修正算法追求的目标。如文献[1], 采用具有人类行走生物学特性的基本反射活动动态模型, 根据实际地面环境, 仅对离线计算的关节控制变量进行在线快速调节, 实现不平整地面仿人机器人的行走控制; 文献[3]则以脚和地面之间的压力、摩擦力条件, 实现仿人机器人的力快速控制。

由于 Kane 方法引入了新物理量“广义速率”, 将运动方程式由二阶微分方程降为一阶常微分方程, 从而可产生简洁的运动方程式^[7-8], 更易于作计算机数值分析, 计算执行时间也更短, 从而满足实时计算的要求。因此基于 Kane 碰撞原理, 在线计算仿人机器人在不平整地面行走遇到凸起或凹陷等障碍时, 所受地面冲击力的估计值, 并据此冲击力对步态进行在线调整控制, 使机器人在不平整地面行走时, 能顺利通过障碍。

1 模型的建立

1.1 不平整地面的仿人机器人模型

因仿人机器人行走于 $x-y$ 平面内, 所以 5 杆仿人机器人的自由度为 7。5 杆仿人机器人模型结构及其参数定义如图 1 所示。图 1 中, (x_0, y_0) 为躯干质心的广义坐标, $(\alpha, \beta_L, \beta_R, \gamma_L, \gamma_R)$ 分别为躯干、髋关节和左右膝关节角度的广义坐标; M_{L1}, M_{R1} 为作用于躯干和两个大腿间的力矩; M_{L2}, M_{R2} 为作用于左

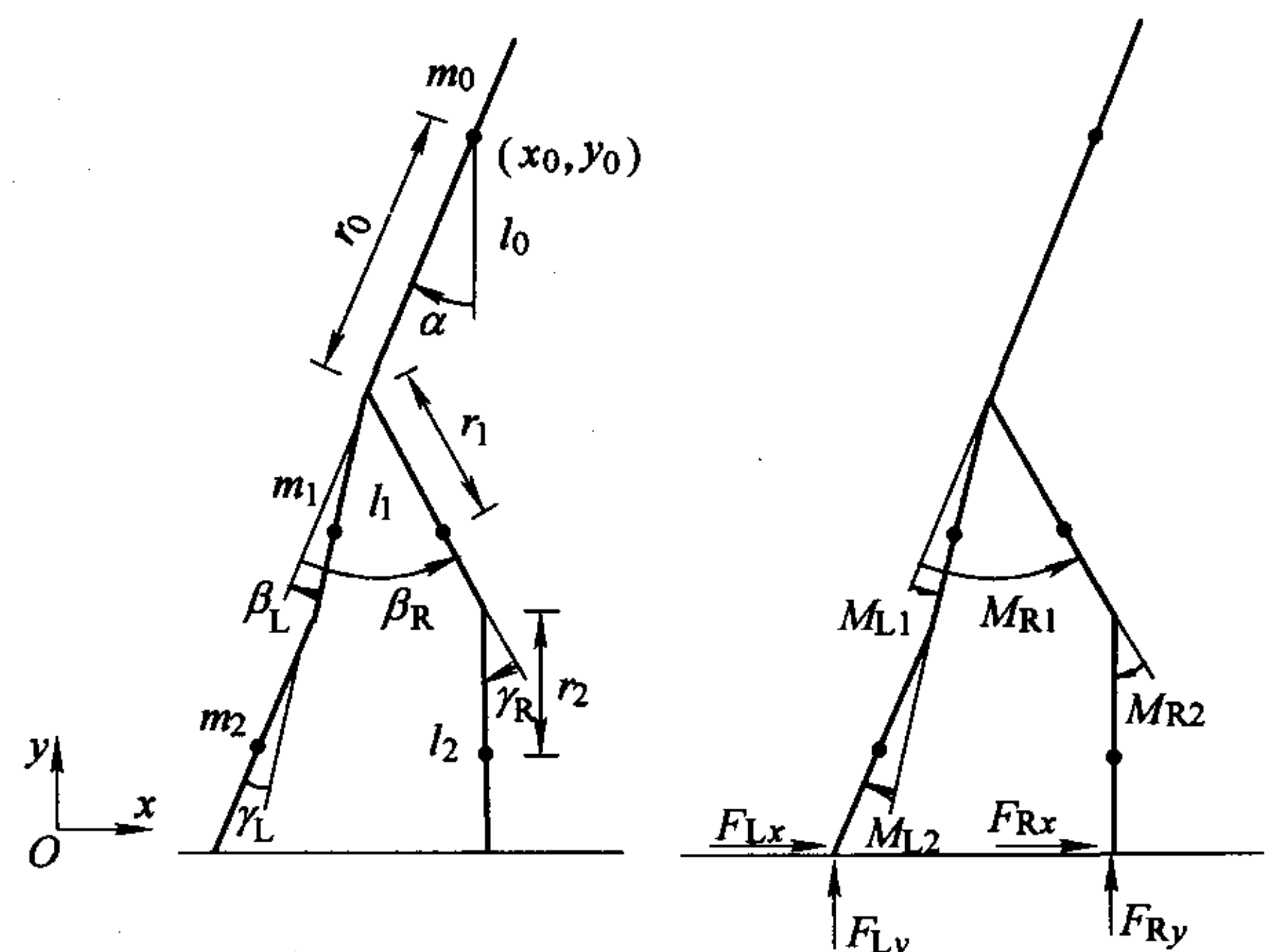


图 1 5 杆仿人机器人模型坐标系示意图

* 国家 863 计划(2003AA420010-05)、中国博士后科学基金(2004035313)和清华-中大博士后科学基金资助项目。20051125 收到初稿, 20060302 收到修改稿

右腿膝关节的力矩; $F_{Lx}, F_{Ly}, F_{Rx}, F_{Ry}$ 则为机器人行走过程中地面作用于两腿末端的力; l_0, l_1, l_2 为躯干杆件的长度; m_0, m_1, m_2 为躯干杆件的质量。

采用拉格朗日动力学模型建立 5 杆仿人机器人的动力学方程式^[5]

$$A(q)\ddot{q} = b(q, \dot{q}, M, F) \quad (1)$$

式中, $A(q) \in \mathbf{R}^{7 \times 7}$ 为惯性矩阵, $q = [x_0, y_0, \alpha, \beta_L, \beta_R, \gamma_L, \gamma_R]^T$ 为 7 自由度广义坐标, $M = [M_{L1}, M_{R1}, M_{L2}, M_{R2}]^T$, $F = [F_{Lx}, F_{Ly}, F_{Rx}, F_{Ry}]^T$ 。

1.2 仿人机器人不平整地面行走的总体控制原理

采用“离线步态规划+Kane 在线调整”算法, 针对实际行走环境进行自适应步态行走控制, 实现不平整地面的机器人稳定行走。为了简化讨论和计算精确的动力学方程, 采用 5 杆仿人机器人模型, 略去机器人的脚和脚踝, 仅以腿末端触地。所述不平整地面的障碍为一处或多处小于机器人一步跨距、高度 ≤ 2 cm 的凸起或凹陷。

系统控制原理如图 2 所示。图 2 中, S_L, S_R 分别为左、右腿末端的传感器值, 触地时为 1, 悬空时为 0; T_i 为实际单腿支撑期的时长, T 为离线步态规划时理论单腿支撑期的时长; K 为经验调节系数矩阵。

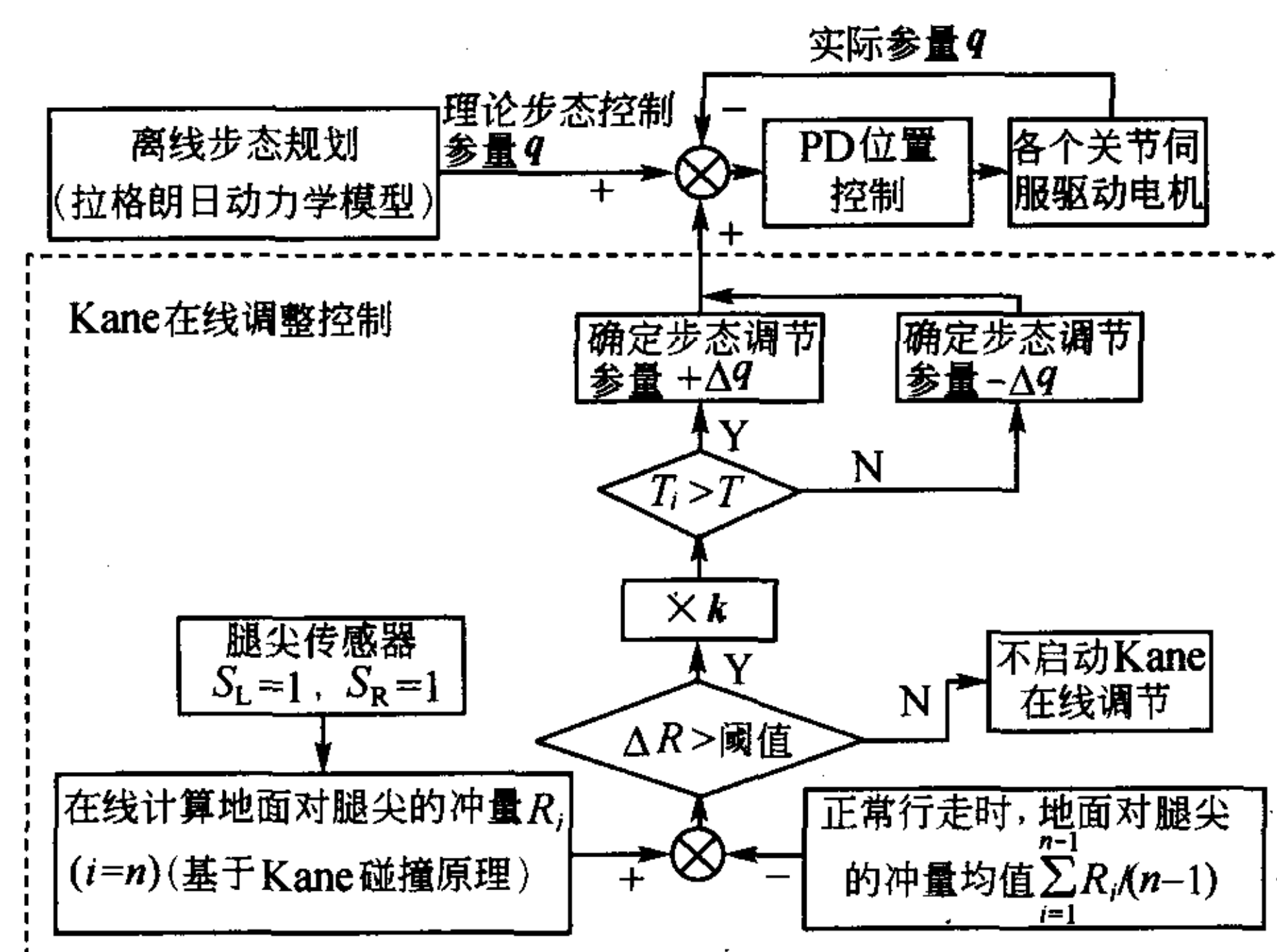


图 2 基于 Kane 碰撞原理在线调整控制系统

1.2.1 冲量差值 ΔR 计算

根据式(2)计算冲量差值 ΔR

$$\Delta R = R_n - \sum_{i=1}^{n-1} R_i / (n-1) \quad (2)$$

仿人机器人每次由单腿支撑期转变为双腿支撑期, 其摆动腿末端由开始接触地面到与地面完全接触, 地面都会对腿末端产生碰撞(在平整地面正常行走时, 这个碰撞冲量值不大, 不会造成机器人行走失败)。式(2)中 R_i 即为每次摆动腿末端触地时, 根据 Kane 碰撞原理计算得到的碰撞冲量值; n 为机

器人摆动腿的触地次数。

1.2.2 Kane 在线调节控制原则

根据 $K\Delta R$ 的量值, 对离线规划的行走步态参数 q 进行调节、控制。具体步骤为以下两步。

(1) 当实际单腿支撑期的时长 $T_i > T$ 时, 说明障碍为凹陷型, 此时摆动腿触地时间晚于正常落地时间。摆动腿在这个行走周期中, 从本应触地的 T 时刻至实际触地的 T_i 时刻, 会按照已离线规划好的双腿支撑期步态继续行走, 导致这个单腿支撑期过长, 而紧接着的双腿支撑期过短, 机器人身体前倾。因此, 在机器人腿末端接触障碍后的双腿支撑期及接下来的 1 个单腿支撑期即障碍步行周期中, 根据 $K\Delta R$ 值, 给接触障碍腿的髋关节、膝关节等步态控制参数加上调节量 Δq , 使机器人基于新的 $q = q + \Delta q$ 参数完成跨越障碍的行走。

(2) 当 $T < T_i$ 时, 障碍物为凸起型, 摆动腿会提前触地, 机器人身体后仰。为不使接触障碍腿末端按照原规划好的步态继续向前向下运动从而憋劲摔倒, 在障碍步行周期内, 需保证接触障碍腿末端的 x, y 值一直为初始接触障碍时的坐标值不变, 并给接触障碍腿的髋关节、膝关节步态控制参数 q 减去调节量 Δq , 使 $q = q - \Delta q$ 。

1.2.3 步态调节参数 Δq 的确定

在障碍行走周期中, 根据 Kane 在线调节控制原则, 确定每个时刻的步态调节参数 Δq 为

$$\Delta q = [\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta \alpha, \Delta(\beta_R - \beta_L), \Delta \gamma_L, \Delta \gamma_R]^T = K\Delta R = [K_x \ K_y \ K_\alpha \ K_\beta \ K_{\gamma_L} \ K_{\gamma_R}]^T \Delta R \quad (3)$$

式(3)中, 相对于 Δq 各个广义坐标调节量, 调节经验系数矩阵 $K = [K_x \ K_y \ K_\alpha \ K_\beta \ K_{\gamma_L} \ K_{\gamma_R}]^T$ 中的元素值各不相同。另, 左右髋关节转角 β_L 和 β_R 的调节以调节左右大腿之间的夹角 $(\beta_R - \beta_L)$ 实现。

1.2.4 仿人机器人行走控制过程

(1) 根据拉格朗日动力学模型离线规划的步态, 控制机器人在平整地面正常行走, 并计算 $\sum_{i=1}^{n-1} R_i / (n-1)$ 值。

(2) 当腿末端传感器检测到行走过程由单腿支撑期转换为双腿支撑期时($S_L=1$ 且 $S_R=1$), 采用 Kane 碰撞在线调整算法, 计算地面对腿末端的冲量 R_n 。

(3) 根据式(2)计算冲量差值 ΔR 。

(4) 当冲量差值 ΔR 大于经验阈值时, 表明此时腿末端遇到障碍物, 启动 Kane 在线调节控制。

(5) 从开始接触障碍时的双腿支撑期到其后的

一个单腿支撑期结束，摆动腿末端落到平整地面后，接触障碍腿末端离开障碍物成为摆动腿，机器人恢复到正常行走状态，继续依照事先规划的离线步态在平整地面行走。

1.3 基于 Kane 原理的碰撞建模与冲量计算

根据 Kane 动力学碰撞理论建立在线调整控制算法^[7]。在仿人机器人由单腿支撑期过渡到双腿支撑期的行走过程中，将仿人机器人完全当成刚体模型来处理，并且认为机器人在摆动腿着地以后不会再弹起离地，这样可以把机器人摆动腿着地的情况以完全非弹性碰撞的模型来处理。

碰撞的过程中，广义坐标值保持不变，广义速度发生突变，从而导致过大的冲击力产生。通过求解突变的广义速度并最终求出冲量积分，实现对机器人姿态的在线调整。

图3所示为5杆仿人机器人单腿末端碰触障碍时的 Kane 碰撞模型。其上躯干质心 L_0 至髋关节的距离为 r_0 ，质心 L_1 、 L_3 至髋关节的距离为 $l_1/2 = r_1$ ， L_2 、 L_4 至膝关节的距离为 $l_2/2 = r_2$ 。杆0质量为 m_0 ，杆1、3质量都为 m_1 ，杆2、4质量都为 m_2 。

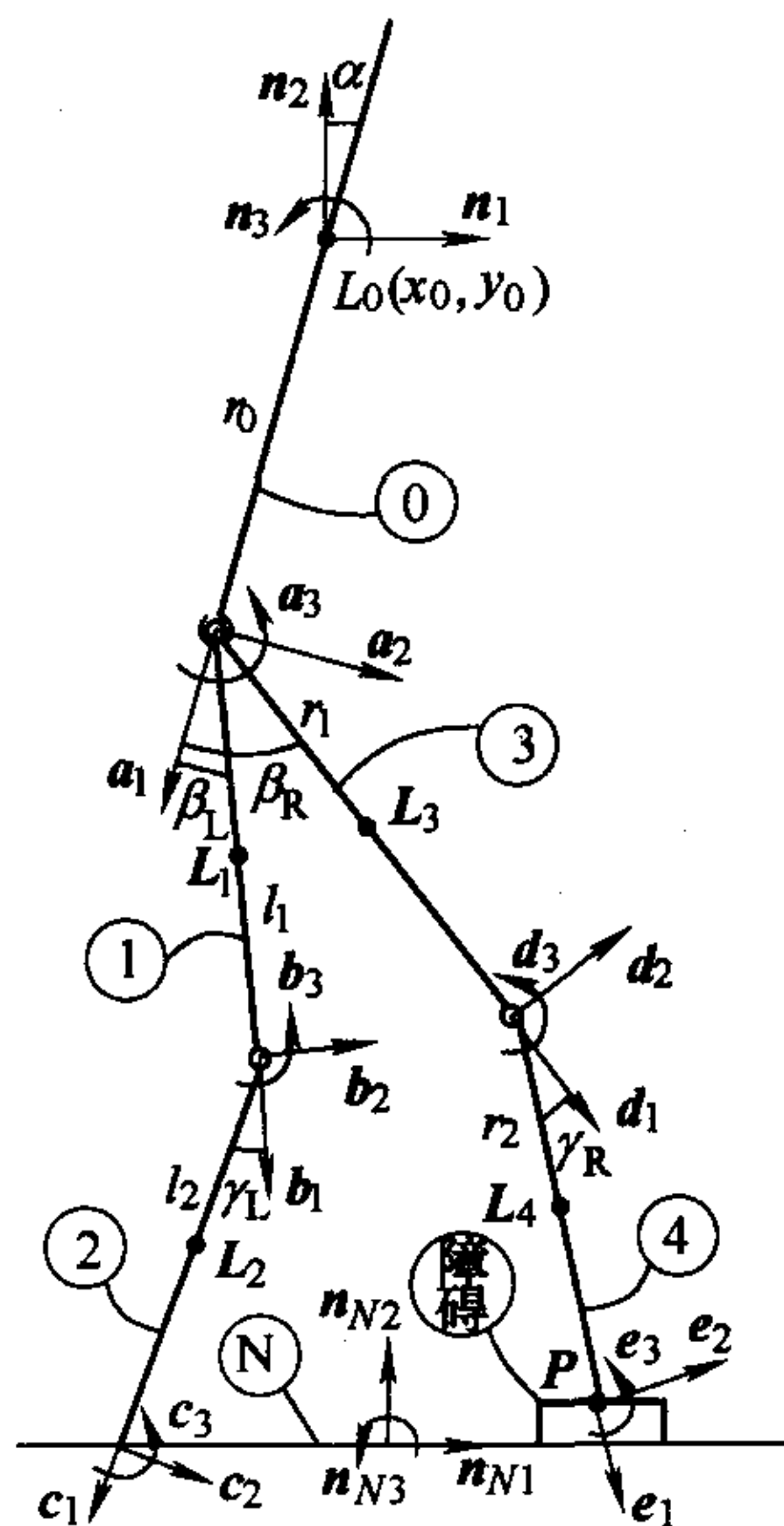


图3 5杆仿人机器人 Kane 模型

图3所示仿人机器人的7自由度广义坐标定义 $q = [x_0, y_0, \alpha, \beta_L, \beta_R, \gamma_L, \gamma_R]^T$ ，与图1一致。设大地为惯性参考体 N ，其正交单位矢量为 $n_{Ni} (i=1,2,3)$ 。为与广义坐标 q 的定义保持一致，建立仿人机器人的 Kane 碰撞模型时，以杆0质心 L_0 的广义坐标 (x_0, y_0) 为基点。因此，设杆0质心 L_0 的正交单位矢量为 $n_i (i=1,2,3)$ ，其定义与惯性参考体 N 的正交单位矢量 n_{Ni} 一致，如表1所示。杆0至杆4依次各设有一组正交单位矢量 $a_i (i=1,2,3)$ 、 $b_i (i=1,2,3)$ 、

$c_i (i=1,2,3)$ 、 $d_i (i=1,2,3)$ 、 $e_i (i=1,2,3)$ ，单位矢量 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 e_1 的方向分别为杆0至杆4的杆长方向。

杆0质心 L_0 单位矢量与杆0单位矢量间的方向余弦关系式如表2所示。

杆0与杆1、杆1与杆2、杆0与杆3、杆3与杆4单位矢量间的关系分别如表3~6所示。

表1 单位矢量 n_{Ni} 和 n_i 的关系

	n_{N1}	n_{N2}	n_{N3}
n_1	1	0	0
n_2	0	1	0
n_3	0	0	1

表2 单位矢量 n_i 和 a_i 的关系

	n_1	n_2	n_3
a_1	$-\sin \alpha$	$-\cos \alpha$	0
a_2	$\cos \alpha$	$-\sin \alpha$	0
a_3	0	0	1

表3 单位矢量 a_i 和 b_i 的关系

	a_1	a_2	a_3
b_1	$\cos \beta_L$	$\sin \beta_L$	0
b_2	$-\sin \beta_L$	$\cos \beta_L$	0
b_3	0	0	1

表4 单位矢量 b_i 和 c_i 的关系

	b_1	b_2	b_3
c_1	$\cos \gamma_L$	$-\sin \gamma_L$	0
c_2	$\sin \gamma_L$	$\cos \gamma_L$	0
c_3	0	0	1

表5 单位矢量 a_i 和 d_i 的关系

	a_1	a_2	a_3
d_1	$\cos \beta_R$	$\sin \beta_R$	0
d_2	$-\sin \beta_R$	$\cos \beta_R$	0
d_3	0	0	1

表6 单位矢量 d_i 和 e_i 的关系

	d_1	d_2	d_3
e_1	$\cos \gamma_R$	$-\sin \gamma_R$	0
e_2	$\sin \gamma_R$	$\cos \gamma_R$	0
e_3	0	0	1

1.3.1 运动学分析

适当选取7广义速率如下

$$\begin{aligned} u_1 = \dot{x}_0 \quad u_2 = \dot{y}_0 \quad u_3 = \dot{\alpha} \quad u_4 = \dot{\beta}_L \\ u_5 = \dot{\beta}_R \quad u_6 = \dot{\gamma}_L \quad u_7 = \dot{\gamma}_R \end{aligned} \quad (4)$$

于是得到杆0质心 L_0 的速度为

$$v^{L_0} = u_1 n_1 + u_2 n_2 \quad (5)$$

杆0、1、2、3、4的角速度分别为

$$\begin{aligned} \omega^0 = u_3 n_3 \quad \omega^1 = u_4 b_3 \quad \omega^2 = u_6 c_3 \\ \omega^3 = u_5 d_3 \quad \omega^4 = u_7 e_3 \end{aligned} \quad (6)$$

则杆0在髋关节处的速度为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^{\text{hip}} &= \mathbf{v}^{L_0} + \mathbf{v}^{\text{hip}/L_0} = \mathbf{v}^{L_0} + \boldsymbol{\omega}^0 \times \mathbf{r}_0 \mathbf{a}_1 = \\ & (u_1 \mathbf{n}_1 + u_2 \mathbf{n}_2) + r_0 u_3 \mathbf{a}_2 \end{aligned} \quad (7)$$

杆1、3质心 L_1 、 L_3 的速度分别为

$$\begin{cases} \mathbf{v}^{L_1} = \mathbf{v}^{\text{hip}} + \mathbf{v}^{L_1/\text{hip}} = \mathbf{v}^{\text{hip}} + \boldsymbol{\omega}^1 \times \mathbf{r}_1 \mathbf{b}_1 = \\ \quad u_1 \mathbf{n}_1 + u_2 \mathbf{n}_2 + r_0 u_3 \mathbf{a}_2 + r_1 u_4 \mathbf{b}_2 \\ \mathbf{v}^{L_3} = \mathbf{v}^{\text{hip}} + \mathbf{v}^{L_3/\text{hip}} = \mathbf{v}^{\text{hip}} + \boldsymbol{\omega}^3 \times \mathbf{r}_1 \mathbf{d}_1 = \\ \quad u_1 \mathbf{n}_1 + u_2 \mathbf{n}_2 + r_0 u_3 \mathbf{a}_2 + r_1 u_5 \mathbf{b}_2 \end{cases} \quad (8)$$

左、右腿膝关节的速度分别为

$$\begin{cases} \mathbf{v}^{\text{Lknee}} = \mathbf{v}^{\text{hip}} + \mathbf{v}^{\text{Lknee}/\text{hip}} = \mathbf{v}^{\text{hip}} + \boldsymbol{\omega}^1 \times l_1 \mathbf{b}_1 = \\ \quad u_1 \mathbf{n}_1 + u_2 \mathbf{n}_2 + r_0 u_3 \mathbf{a}_2 + l_1 u_4 \mathbf{b}_2 \\ \mathbf{v}^{\text{Rknee}} = \mathbf{v}^{\text{hip}} + \mathbf{v}^{\text{Rknee}/\text{hip}} = \mathbf{v}^{\text{hip}} + \boldsymbol{\omega}^3 \times l_1 \mathbf{d}_1 = \\ \quad u_1 \mathbf{n}_1 + u_2 \mathbf{n}_2 + r_0 u_3 \mathbf{a}_2 + l_1 u_5 \mathbf{b}_2 \end{cases} \quad (9)$$

则杆2、4质心 L_2 、 L_4 的速度为

$$\begin{cases} \mathbf{v}^{L_2} = \mathbf{v}^{\text{Lknee}} + \mathbf{v}^{L_2/\text{Lknee}} = \mathbf{v}^{\text{Lknee}} + \boldsymbol{\omega}^2 \times r_2 \mathbf{c}_1 = \\ \quad u_1 \mathbf{n}_1 + u_2 \mathbf{n}_2 + r_0 u_3 \mathbf{a}_2 + l_1 u_4 \mathbf{b}_2 + r_2 u_6 \mathbf{c}_2 \\ \mathbf{v}^{L_4} = \mathbf{v}^{\text{Rknee}} + \mathbf{v}^{L_4/\text{Rknee}} = \mathbf{v}^{\text{Rknee}} + \boldsymbol{\omega}^4 \times r_2 \mathbf{e}_1 = \\ \quad u_1 \mathbf{n}_1 + u_2 \mathbf{n}_2 + r_0 u_3 \mathbf{a}_2 + l_1 u_4 \mathbf{b}_2 + r_2 u_6 \mathbf{c}_2 \end{cases} \quad (10)$$

因图3所示为右腿末端碰触到障碍物,于是得到碰撞点 P 的速度为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^P &= \mathbf{v}^{\text{Rknee}} + \mathbf{v}^{P/\text{Rknee}} = \mathbf{v}^{\text{Rknee}} + \boldsymbol{\omega}^4 \times l_2 \mathbf{e}_1 = \\ & u_1 \mathbf{n}_1 + u_2 \mathbf{n}_2 + r_0 u_3 \mathbf{a}_2 + l_1 u_4 \mathbf{b}_2 + l_2 u_7 \mathbf{e}_2 \end{aligned} \quad (11)$$

若为左腿末端碰触到障碍物,则碰撞点 P 的速度为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^P &= \mathbf{v}^{\text{Lknee}} + \mathbf{v}^{P/\text{Lknee}} = \mathbf{v}^{\text{Lknee}} + \boldsymbol{\omega}^2 \times l_2 \mathbf{c}_1 = \\ & u_1 \mathbf{n}_1 + u_2 \mathbf{n}_2 + r_0 u_3 \mathbf{a}_2 + l_1 u_4 \mathbf{b}_2 + l_2 u_6 \mathbf{c}_2 \end{aligned} \quad (12)$$

1.3.2 Kane碰撞模型建立

图3所示5杆仿人机器人的Kane碰撞模型方程为

$$\begin{cases} I_r = p_r(t_2) - p_r(t_1) = \\ \quad \mathbf{v}_r^P(t_1) \int_{t_1}^{t_2} R(t) dt \quad r=1,2,\dots,7 \\ p_r = \frac{\partial K}{\partial u_r} \quad r=1,2,\dots,7 \end{cases} \quad (13)$$

式中 p_r ——广义动量

I_r ——广义冲量

t_1 ——碰撞前的时刻

t_2 ——碰撞后的时刻

$\mathbf{v}_r^P(t_1)$ ——碰撞点 P 在 t_1 时刻的偏速度

$$\mathbf{v}_r^P(t_1) = \frac{\partial \mathbf{v}^P(t_1)}{\partial u_r} \quad r=1,2,\dots,7$$

$\int_{t_1}^{t_2} R(t) dt$ —— $[t_1, t_2]$ 期间内系统的碰撞冲量

5杆仿人机器人的系统动能 K 为

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^4 (J_i \boldsymbol{\omega}^i + m_i v^{L_i}) \quad (14)$$

则广义动量

$$p_r = \frac{\partial K}{\partial u_r} = \sum_{i=0}^4 \left(J_i \boldsymbol{\omega}^i \frac{\partial \boldsymbol{\omega}^i}{\partial u_r} + m_i v^{L_i} \frac{\partial v^{L_i}}{\partial u_r} \right) \quad r=1,2,\dots,7 \quad (15)$$

于是根据式(16)可得到7个方程

$$I_r = \mathbf{v}_r^P(t_1) \int_{t_1}^{t_2} R(t) dt = p_r(t_2) - p_r(t_1) \quad (16)$$

所得7个方程中含有8个未知数 $\int_{t_1}^{t_2} R(t) dt$ 、 $u_1(t_2)$ 、 $u_2(t_2)$ 、 $u_3(t_2)$ 、 $u_4(t_2)$ 、 $u_5(t_2)$ 、 $u_6(t_2)$ 、 $u_7(t_2)$ 。因此根据碰撞结束后, t_2 时刻 P 点速度 $\mathbf{v}^P(t_2)=0$ 的条件,建立方程如下

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^P(t_2) &= u_1(t_2) \mathbf{n}_1 + u_2(t_2) \mathbf{n}_2 + r_0 u_3(t_2) \mathbf{a}_2 + \\ & l_1 u_5(t_2) \mathbf{d}_2 + l_2 u_7(t_2) \mathbf{e}_2 \end{aligned} \quad (17)$$

至此,用8个方程和8个未知数,即可求出碰撞冲量 $\int_{t_1}^{t_2} R(t) dt$ 。

2 仿真结果与分析

参照文献[9],建立仿人机器人在平整地面行走的仿真模型,并在此基础上将Kane碰撞在线调整控制算法加入仿真模型中。仿真工具采用Matlab7.04 Simulink。仿真采样时间为0.01 s。

仿真所用的仿人机器人躯干参数如表7所示,躯干参数定义如图1所示。

表7 仿人机器人身体参数表

杆件几何参数	$l_0=0.8$ m	$l_1=l_2=0.5$ m	
杆件质心几何参数	$r_0=l_0/2$	$r_1=l_1/2$	$r_2=l_2/2$
杆件质量	$m_0=5$ kg	$m_1=2$ kg	$m_2=1$ kg

在进行仿真时,未计入运动控制板、伺服控制板及伺服电机的质量,因此仿真机器人模型总质量仅11 kg,较实际为轻。在仿真过程中,设定仿人机器人步行跨距为0.30 m/步,步行周期为0.85 s/步,步行速度较实际仿人机器人为快。

为验证Kane在线调整控制算法的有效性,针对行走中所遇到的典型情况,做了以下三类仿真。

(1) 机器人在平整地面行走仿真。在这个仿真中,因行走过程中的Kane碰撞冲量小于阈值,所以未启动Kane碰撞在线调整控制,仅用拉格朗日动力学模型离线规划步态参数控制仿人机器人在平整地面行走。

(2) 不加Kane碰撞在线调整控制,仿真机器人单腿走过一块长为2 cm凸起的不平整地面;在同样的控制方法下,再仿真机器人单腿走过一块长为1.5 cm凹陷的不平整地面。

(3) 加Kane碰撞在线调整控制,分别仿真机器人单腿走过与仿真(2)相同的凸起、凹陷不平整

地面。

在仿真过程中，首先根据第1.2节所述的Kane在线调节控制原则及步态调节参量 Δq 确定方法，确定在障碍行走周期中，每个时刻的步态调节参量 Δq 。如图4a所示即为仿人机器人跨越1.5cm凹陷障碍时，上躯干质心 L_0 广义坐标 y_0 的调节量值图，其 Δy_0 由下式得出

$$\Delta y_0 = K_{ry} \times \left[R_n - \sum_{i=1}^{n-1} R_i / (n-1) \right] \quad K_{ry} = 0.001$$

图4b所示为左右髋关节夹角角度 $(\beta_R - \beta_L)$ 的调节量值图。其 $\Delta(\beta_R - \beta_L)$ 表达式为

$$\Delta(\beta_R - \beta_L) = K_{r\beta} \times \left[R_n - \sum_{i=1}^{n-1} R_i / (n-1) \right] \quad K_{r\beta} = 0.01$$

图4c则为机器人腿末端与凹陷障碍地面接触过程中，经Kane在线调整控制，将相应调节参量 Δq 加入步态控制参数 q ，地面对腿末端所产生的冲量值图。从图4c可以看出，在机器人腿末端与障碍接触的步行周期的前半周期，腿末端对地面过大的作用力造成冲量越来越大，但随着Kane在线调整控制的不断调节，后半周期冲量越来越小，并在这个步行周期结束之前趋近于0。

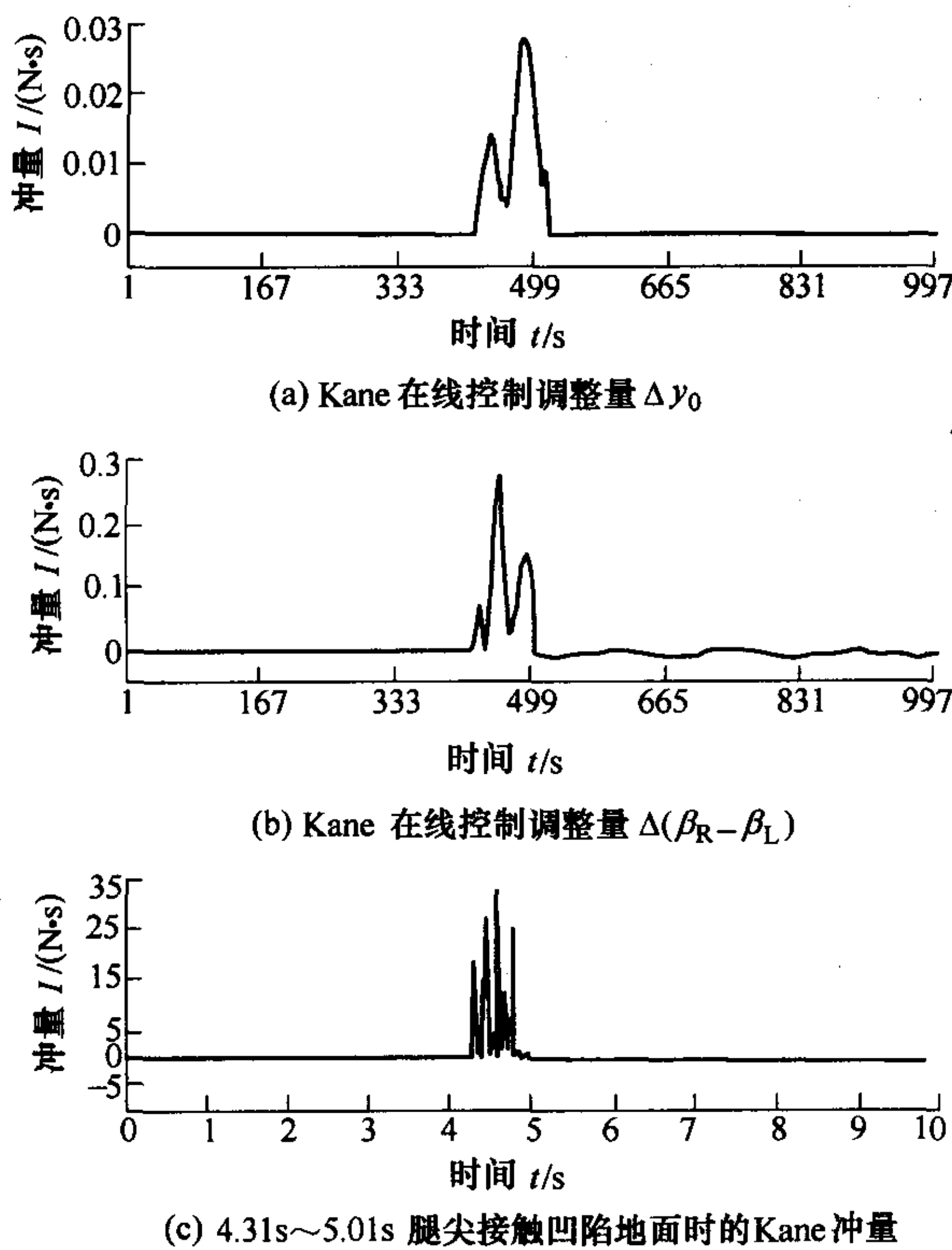


图4 机器人在凹陷障碍地面行走步态参数的在线Kane调整

仿人机器人仿真行走过程中，地面对机器人腿末端的碰撞冲量如图5~7所示，且仅显示腿末端触地瞬间的冲量值。

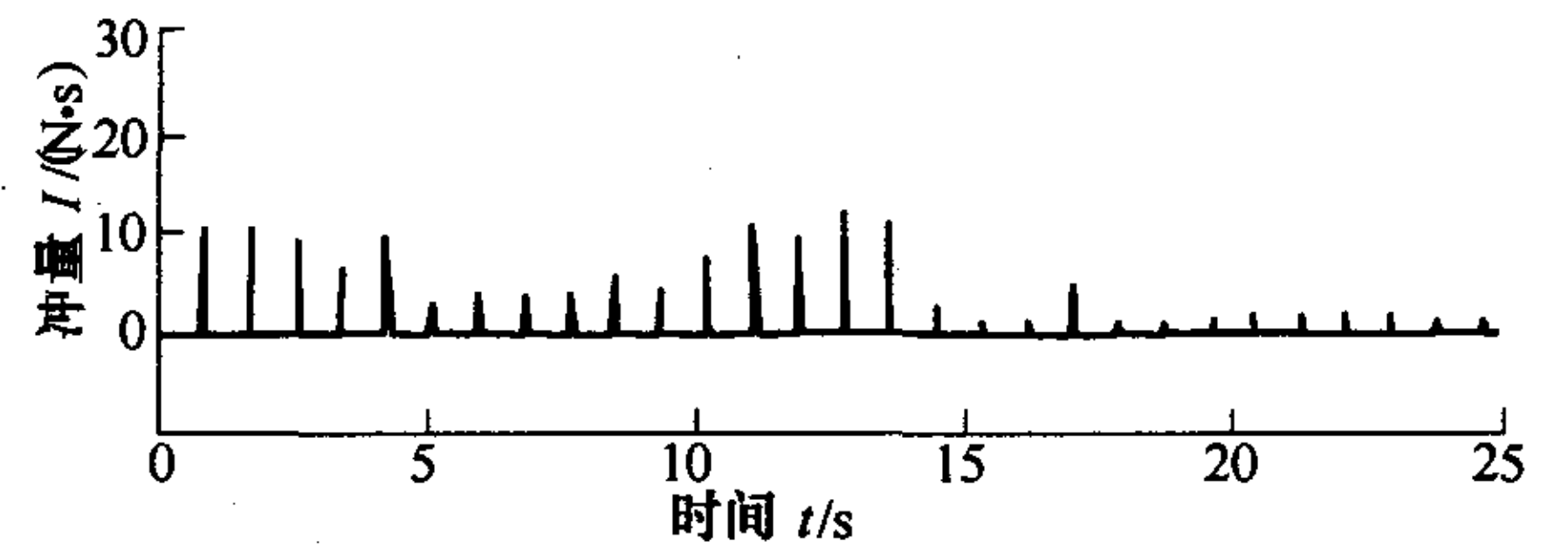


图5 仿人机器人在平整地面行走地面对腿末端的碰撞冲量

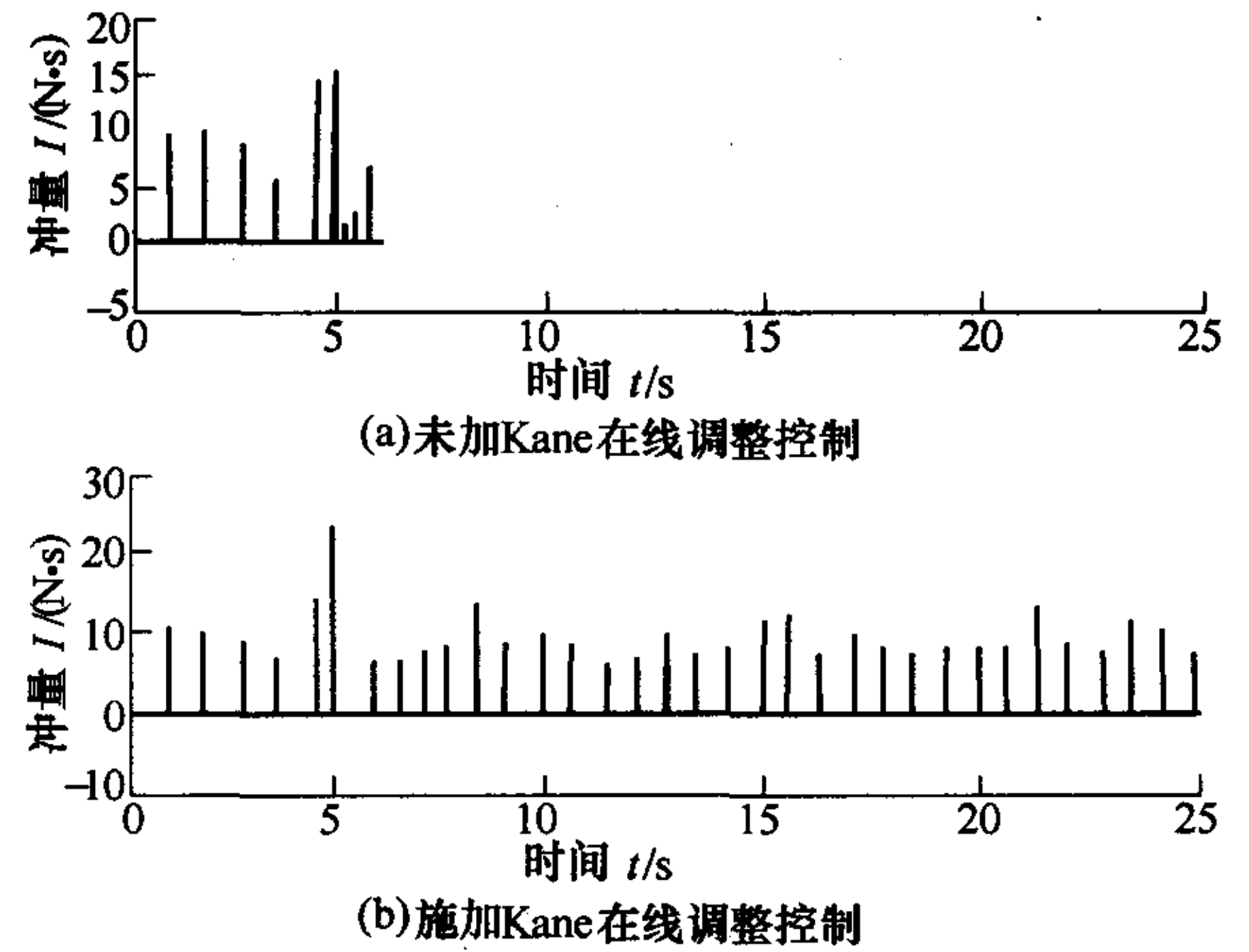


图6 仿人机器人在凹陷障碍地面行走的碰撞冲量

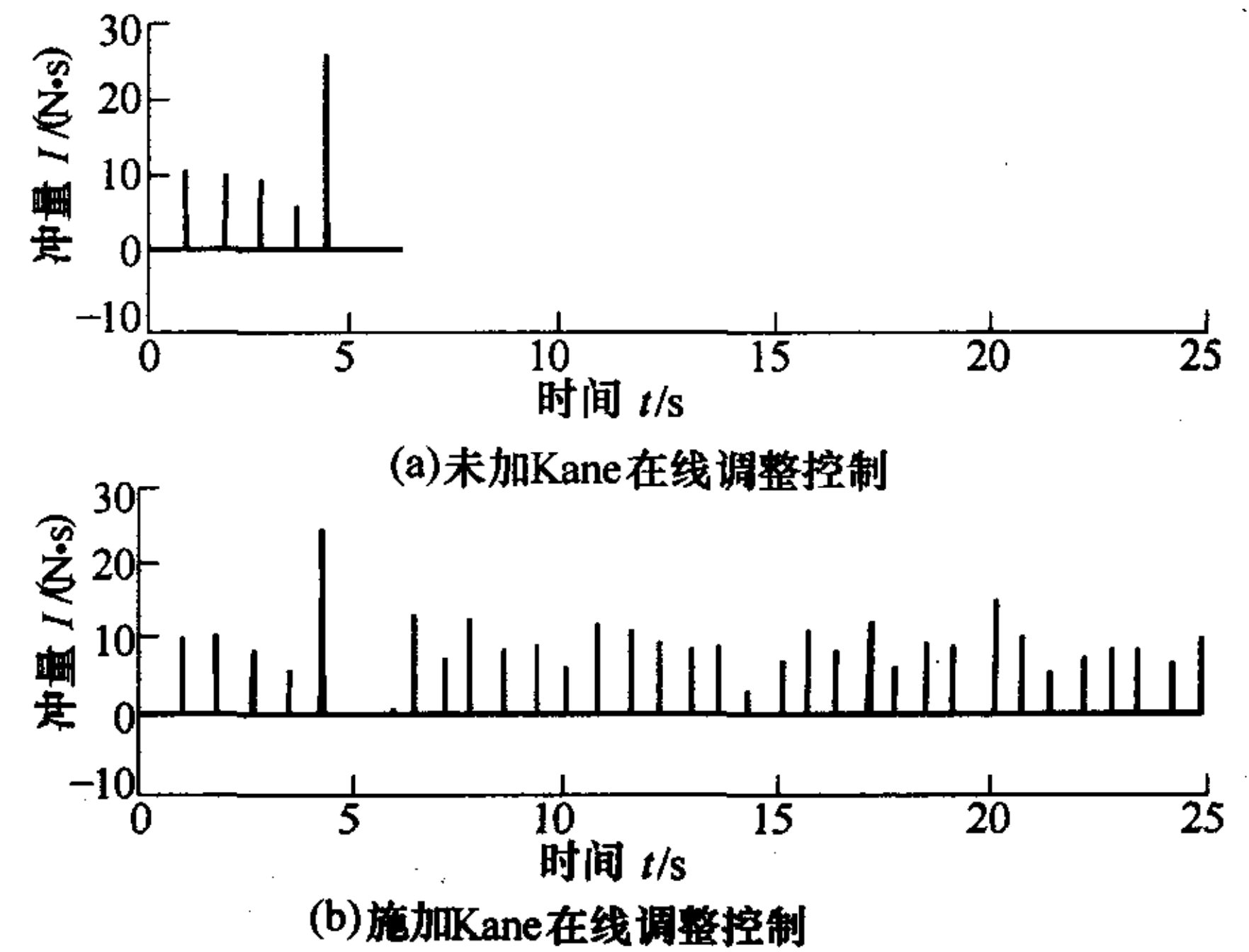


图7 仿人机器人在凸起障碍地面行走的碰撞冲量

在仿真(1)中，仿人机器人在平整地面行走，地面对触地腿末端的碰撞冲量如图5所示。从图5中可以看出，地面对触地腿末端的碰撞冲量在初始启动行走时有一些量值稍大的波动，然后机器人一直以更加平稳的状态行走。

在仿真(2)、(3)中，未加Kane在线调整控制时，地面对机器人腿末端的碰撞冲量如图6a、7a所示；施加Kane在线调整控制时，地面对机器人腿末端的碰撞冲量则如图6b、7b所示。

图6a中，仿人机器人在行走过程中，碰撞冲量在4.31s时突变为14.18 N·s，机器人腿末端碰触到凹陷障碍地面，进入失稳状态，两条腿在1s之内频繁触地5次而前倾摔倒；当加入Kane在线调整

控制后,如图 6b 所示,虽然腿末端触地时间 4.31 s 大于正常触地时间 4.25 s,且触地腿末端在接触到凹陷障碍,产生 14.18 N·s 的碰撞冲量后,另一条腿在 4.75 s 的触地冲量更高至 22.86 N·s,但在此时及后面的行走控制过程中,Kane 在线调整控制使系统成功恢复到了稳定行走状态。

仿人机器人在凸起障碍地面行走的仿真结果与在凹陷障碍地面行走类似。图 7a 未加 Kane 在线调整控制时,腿末端触地时间 4.17 s 小于正常触地时间 4.25 s,碰撞冲量突变至 25.73 N·s,机器人后仰摔倒。图 7b 加入 Kane 在线调整控制,在 4.17 s 腿末端碰触凸起障碍后,经过 2.17 s(大于两个行走周期 1.7 s,因为腿末端提前触地)的调整,机器人恢复到稳定行走状态。

3 结论

(1) 基于可将二阶微分方程降为一阶常微分方程计算执行时间更短的 Kane 在线调节控制算法,初步解决了仿人机器人在不平整地面行走时的失稳摔倒问题。

(2) 为了首先验证所采用算法的有效性,仅采用去掉脚部的 5 杆仿人机器人,以简化模型并计算精确的动力学方程。

(3) 带有脚踝部的更加复杂的 7 杆仿人机器人在不平整地面行走的算法及实机控制、验证,将在下一步的研究工作中实现。

参 考 文 献

- [1] HUANG Q, YOSHIHIKO N. Sensory reflex control for humanoid walking[J]. IEEE Transactions On Robotics, 2005, 21(5): 977-984.
- [2] LIM H. Biped walking using stabilization and compliance control[C]//Proceedings of the Second International Conference on Humanoid Robots, Tokyo, Japan, 2001: 211-217.
- [3] YASUTAKA F, SATOSHI O. Robust biped walking with active interaction control between foot and ground[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, 3(5): 2 030-2 035.
- [4] LI Q H, ATSUO T, ICHIRO K. A biped walking robot having a ZMP measuring system using universal force-moment sensors[J]. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and System IROS'91, Osaka, Japan, 1991, 11(3-5): 1 568-1 573.
- [5] WONG T C F, HUNG Y S. Stabilization of biped dynamic walking using gyroscopic couple[J]. IEEE International Joint Symposia on Intelligence and Systems (IJSIS '96), MD, USA, 1996, 11(4-5): 102-108.
- [6] CHEW C M, GILL A P. Adaptation to load variations of a planar biped: height control using robust adaptive control[J]. Journal of Robotics and Autonomous Systems, 2001, 35: 1-22.
- [7] KANE T R, LEVINSON, D A. Dynamics: theory and applications[M]. New York: McGraw-Hill Book Co., 1985.
- [8] 涂德文. 广义速率与凯恩方程间于刚体系统之明确关系式[C]//中国台湾陆军官校 75 周年校庆综合学术研讨会, 1999.
- [9] OLLI H. Simulation tool of a biped walking robot model[R]. Report of Control Engineering Laboratory, Helsinki: Helsinki University of Technology, 2004.

CONTROL STRATEGY ABOUT HUMANOID ROBOT STABLE LOCOMOTION ON UNEVEN GROUND

SHUAI Mei^{1,2} FU Chenglong²
YANG Xiangdong² CHEN Ken²

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100037;
2. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Since a humanoid robot tends to tip over easily while walking on uneven terrain, an online regulating control algorithm is proposed based on Kane collision theory, to prevent humanoid robot from tipping over while walking on uneven ground. This regulating algorithm can compute the dynamic model of the robot rapidly, and can estimate the values of the impacting force acting on leg by ground. These data of impacting force can be used to adjust the gait of legs and torso for a humanoid robot to pass over the scraggy obstacle successfully. By using this algorithm, walking simulations of online control on a 5-link humanoid model are performed in the MATLAB/Simulink environment and the effectiveness of the proposed algorithm is illustrated.

Key words: Humanoid robot Locomoting on uneven ground Kane collision theory Control strategy

作者简介: 帅梅, 女, 1967 年生, 博士后, 副教授。主要研究方向为仿人机器人稳定性与控制。

E-mail: shuaim@tsinghua.edu.cn