

采摘机械臂自适应输入整形控制研究

刘德馨¹, 张建成^{1†}, 李媛¹, 方建军²

(1. 北京联合大学 机器人学院, 北京 100101;

2. 北京联合大学 城市轨道交通与物流学院, 北京 100101)

摘要: 采摘机械臂在夹住柔性果茎后运输果实时, 执行器末端的加减速运动使得果实移动过程中产生摆动, 易引发掉落, 进而导致采摘失败. 本文以单个西红柿作为负载, 将果茎近似为柔性连杆. 由于每一个果实的质量是不同的, 因此, 针对机械臂抓取可变柔性负载移动过程中的振动抑制问题, 提出了自适应输入整形控制方法. 当系统模型由于负载的不确定性发生变化后, 传统的输入整形算法无法抑制柔性连杆移动过程中产生的振动. 因此采用自适应输入整形算法, 实时计算脉冲的幅值和时间. 构造二次性能指标函数, 通过对机械臂移动的加速度和负载的摆角实时数据进行迭代运算, 达到零残余振动的目的. 仿真实验结果表明, 在变负载情况下, 自适应输入整形算法有良好的末端振动抑制能力, 获得满意的控制效果.

关键词: 采摘机械臂; 可变柔性负载; 振动控制; 自适应输入整形

引用格式: 刘德馨, 张建成, 李媛, 等. 采摘机械臂自适应输入整形控制研究. 控制理论与应用, 2022, 39(6): 1043 – 1050

DOI: 10.7641/CTA.2021.10692

Research on adaptive input shaping control of fruits and vegetable harvesting robot arm

LIU De-xin¹, ZHANG Jian-cheng^{1†}, LI Yuan¹, FANG Jian-jun²

(1. College of Robotics, Beijing Union University, Beijing 100101, China;

2. College of Urban Rail Transit and Logistics, Beijing Union University, Beijing 100101, China)

Abstract: The acceleration and deceleration motion of the end of the actuator causes the fruit swing during the movement after vegetable harvesting robot arm clamp the stem, which is easy to lead to fruit falling and failure of picking. In this paper, a single tomato is treated as a payload and stem as flexible link. An adaptive input shaping algorithm for vibration control of variable flexible load of the fruits and vegetable harvesting robot arm was proposed as the mass of each fruit is different. Traditional input shaping algorithm could not restrain vibration of flexible link in the process of movement while the system model changed during load varied. Then an adaptive input shaping algorithm where amplitude and timing of impulses are tuned during operation to match the system under control. Solutions giving zero residual vibration are formulated in terms of a quadratic cost function and constructed by iterative operations on measured sets of robot arm and slant angle of load data. The adaptive input shaping algorithm is tested on a one-dimensional numerical control slide rail, and the results show the adaptive input shaping algorithm can solve load-varying vibration control problem. Simulations are carried out and tail vibration suppressing ability is qualified.

Key words: harvesting robot arm; variable flexible load; vibration control; adaptive input shaping

Citation: LIU Dexin, ZHANG Jiancheng, LI Yuan, et al. Research on adaptive input shaping control of fruits and vegetable harvesting robot arm. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(6): 1043 – 1050

1 引言

农业装备从机械化到智能化的跨越正在加快, 农用采摘机器人的应用也越来越广泛. 在鲜食蔬果中, 番茄是采摘难度最大的果蔬种类之一. 番茄果实密集

生长相互触碰, 且果皮柔软易破, 因此夹剪一体式采摘机器人成为了主流. 采摘作业时, 末端执行器接触到番茄穗所在主枝干后, 并拢夹住切断果茎, 而后运输到指定位置. 但在移动过程中, 往往发生果实的掉

收稿日期: 2021-07-30; 录用日期: 2021-12-10.

[†]通信作者. E-mail: jdtjiancheng@buu.edu.cn; Tel.: +86 10-64900517.

本文责任编辑: 吴敏.

北京市教育委员会科技计划一般项目(KM202011417003), 北京联合大学科研项目(ZK30202102)资助.

Supported by the Project of S&T Plan of Beijing Municipal Commission of Education (KM202011417003) and the Academic Research Projects of Beijing Union University (ZK30202102).

落问题,其中果穗的抖动,是掉落的重要原因之一.因此,如何抑制果穗运输过程中的抖动,是提高采摘成功率的关键^[1-2].

输入整形(input shaping)作为一种前馈控制方法,能实现柔性结构的振动抑制.上世纪50年代,伯利克大学Smith在悬垂物的移动实验中,发明Posicast控制方法消除残余振动.90年代中期,麻省理工学院的Singer等^[3]学者改进了这种方法,并将之称为输入整形技术.其后,国内外专家学者对输入整形器的研究相当活跃,并取得了丰硕的成果.文献[4-6]把输入整形从单输入单输出系统,扩展到多输入多输出系统.文献[7]在闭环回路中加入Smith预测器,克服输入整形器造成的时间延迟;文献[8]针对汽车生产线中的装配机器人,提出一种鲁棒性较强的整形器,对移动中的车体执行车轮装配任务;文献[9]把输入整形技术应用到医用X光机上,实现零相位误差周期信号的跟踪;文献[10]对一类带有完整约束的双吊车系统进行分析,根据求取的振荡周期设计出合适的输入整形器;文献[11]提出一种基于S型曲线轨迹生成法,实现旋转起重机两级残留摆角的抑制;文献[12]基于输入整形算法针对深海起重机系统提出了一种实时轨迹规划方法,有效抑制了负载摆动;文献[13]通过引入基函数参数化的前馈控制器和输入整形滤波器,消除期望轨迹引入的扰动;

到目前为止,绝大多数输入整形器(如ZV, ZVD, ZVDD)在求取脉冲的作用时间和幅值时,要求精确的数学模型,控制效果对模型参数的变化很敏感^[14-18].但在实际应用中,如采摘机器人的柔性负载是变化的,系统随机性强,参数变化较大,设计的整形器不能很有效的消除残余振动.因此,研究参数不精确已知情况下的振动抑制控制器设计方法有着重要的意义.

本文采用自适应输入整形(adaptive input shaping, AIS)算法来解决系统柔性可变负载的振动问题.设置二次型性能指标函数,通过自适应迭代的方式逐步减小性能指标函数的值.根据整形后的输入量和系统输出,在线计算整形器的脉冲幅值和脉冲时间参数,求取最优解.控制算法形成闭环回路,使得输出量的残余振动为零.仿真实验表明,在变负载情况下,自适应输入整形算法具有很好的振动抑制能力,极大的改善了系统的鲁棒性.研究结果在一维数控滑台上进行验证,实验结果显示了所提方法的有效性,获得满意的控制性能.

以下几章将对本文所提出的控制算法进行详细介绍与分析.文章具体安排如下:第2节简述了输入整形控制的基本原理;第3节考虑柔性可变负载的情况,设置二次型性能指标函数,提出一种自适应输入整形控制算法;第4节将控制算法应用于采摘机械臂抓取西红柿果茎的振动抑制中,并针对负载的质量和柔性连

杆长度两个可变参数,分3种情况进行对比,验证自适应输入整形控制算法的有效性.

2 输入整形控制

输入整形控制是将系统期望输入和一组不同幅值和时滞的脉冲序列进行卷积运算,得到整形后的输入信号来驱动系统,达到消除系统的振动的目的.

在进行计算时,通常将被控对象简化为典型的2阶阻尼振动系统.设计如下整形器 $H(s)$ ^[15]:

$$H(s) = \sum_{q=1}^Q a_q e^{-t_q s}, \quad (1)$$

式中: Q 为总脉冲个数, a_q 和 t_q 分别为第 q 个脉冲的幅值和产生时刻.

在整形器设计时,需要考虑以下基本约束:

1) 残余振动约束条件.

系统在输入整形器的作用下,呈现出有限脉冲响应.即在 $t \geq t_Q$ 时刻以后,系统残余振动输出的幅值趋近于0.

2) 脉冲幅值约束条件.

在整形后的输入信号作用下,系统有和原信号相同的输出稳态值.即整形器的脉冲幅值 a_q 的和为1:

$$\sum_{q=1}^Q a_q = 1. \quad (2)$$

3) 时间最优约束条件.

脉冲序列的时长越短,给系统带来的时滞就越短.为提高系统的响应速度,考虑

$$t_1 = 0, \min(t_Q). \quad (3)$$

因此,如何求解恰当脉冲幅值 $a_1, a_2, \dots, a_Q$ 和脉冲时间 $t_1, t_2, \dots, t_Q$,是输入整形器设计的核心问题.以经典的两个输入脉冲ZV整形器为例,已知系统的自然角频率 ω_n 和阻尼率 ζ .可得到脉冲幅值和时间计算公式:

$$a_1 = \frac{1}{1+X}, a_2 = \frac{X}{1+X}, \quad (4)$$

$$t_1 = 0, t_2 = \frac{\pi}{\omega \sqrt{1-\zeta^2}}, \quad (5)$$

其中 $X = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$.

对于ZV整形器,若系统模型求解精确,整形效果非常好,产生的时滞也很短;但当模型求解存在误差时,鲁棒性较差.通过增加整形器的阶数,得到多输入脉冲的ZVD和ZVDD整形器,可以提高抑制系统自然频率或阻尼系统不确定性引起的系统性能下降;但代价是延长了时滞,使得系统响应速度变慢. EI整形器提高系统鲁棒性的方法是在系统频率左右分别选取两个频率值,令这两处余振幅度为零,但不要求在系统频率处的振幅,单峰EI整形器也包含3个脉冲,其时滞和ZVD整形器相同,等于一个振荡周期.

3 自适应输入整形控制

本文采用自适应输入整形(adaptive input shaping, AIS)控制算法, 克服由于模型不精确造成的残余振动, 增强系统的鲁棒性。

设系统 G 的原输入为 r , 在整形器 $\tilde{H}$ 的作用下, 整形后的输入为 u 。考虑添加反馈环节, 设置自适应整形器 H , 根据 u 和系统的输出 y , 在线调整 H 的脉冲幅值和时间。设置二次型性能指标函数, 求取幅值和时间的最优解 $\tilde{h}$, 并赋值给前馈环节 $\tilde{H}$, 形成闭环控制回路。自适应输入整形算法的结构如图1所示。

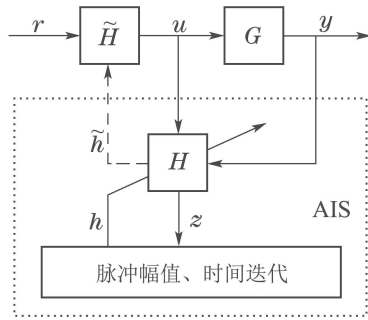


图1 自适应输入整形系统工作原理图

Fig. 1 The adaptive shaping filter

3.1 问题描述

前馈整形器 $\tilde{H}$ 由 $K+1$ 个脉冲序列构成, 脉冲时刻 $\{0, 1, \dots, K\}$ 为采样时间 T_s 整数倍, 可描述为

$$\mathbf{h} = [h_0 \ h_1 \ \dots \ h_K]^T \in \mathbb{R}^{K+1}. \quad (6)$$

设 $K+1$ 个脉冲序列中, 只在某 Q 个时刻, 对应的幅值为 $\tilde{\mathbf{a}} = \{a_1, a_2, \dots, a_Q\}$, 其他时刻为零:

$$h_k = \begin{cases} a_q, & k \in \mathbf{t}, \\ 0, & k \notin \mathbf{t}, \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\tilde{\mathbf{t}} = \{t_1, t_2, \dots, t_Q\} \subset \{0, 1, \dots, K\}$; $k = 0, 1, \dots, K$; $q = 1, 2, \dots, Q$ 。

因此, $\tilde{H}$ 的离散时间表达式等价于:

$$H(z) = \sum_{k=0}^K h_k z^{-k} = \sum_{q=1}^Q a_q z^{-t_q}. \quad (8)$$

这里设计的自适应整形器仍满足第2节的3条约束条件。

令离散系统的输入量为 r , 经过整形器 $\tilde{H}$, 得到卷积后 m 时刻的输入量 u 为

$$u(m) = \sum_{l=m-K}^m h(m-l)r(l). \quad (9)$$

设系统的传递函数 $G(z) = \sum_{k=1}^{\infty} g(kT_s)z^{-k}$, 则系统输出值 y 为

$$y(n) = \sum_{m=0}^n g(n-m)u(m). \quad (10)$$

自适应输入整形算法是通过自适应迭代的方式, 在线求解出最优的脉冲序列 $\tilde{\mathbf{h}}$, 使得系统 $\tilde{H}G$ 在 K 次迭代以后, 输出值 y 的残余振动为0。设计自适应整形器 H , 对输出信号 y 进行整形, 得到 $z = GHu$ 。由于 $\tilde{H}G = GH$, 因此迭代算法的目标可转化为寻找整形器 H 的最优参数, 使得 GH 在输入 u 的作用下, 输出 z 在 K 次迭代以后残余振动为0。 z 的表达式如下:

$$z(l) = \sum_{n=l-K}^l h(l-n)y(n) = \sum_{n=l-K}^l \sum_{m=0}^n h(l-n)g(n-m)u(m). \quad (11)$$

把 l 时刻的输出值 $z(l)$ 分为两部分考虑。在输入 u 的作用下, 式(12)中, 加号前为 GH 在0到 K 时刻的响应叠加值; 加号后为 K 到 l 时刻的响应叠加值, 也就是残余振动。

$$z(l) = [u(l) \ u(l-1) \ \dots \ u(l-K)]\mathbf{f}^0 + [u(l-K-1) \ u(l-K-2) \ \dots \ u(0)]\mathbf{f}^r, \quad (12)$$

其中:

$$\mathbf{f}^0 = \begin{bmatrix} g(0) & 0 & \dots & 0 \\ g(1) & g(0) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g(K) & g(K-1) & \dots & g(0) \end{bmatrix} \mathbf{h}, \quad (13)$$

$$\mathbf{f}^r = \begin{bmatrix} g(K+1) & g(K) & \dots & g(1) \\ g(K+2) & g(K+1) & \dots & g(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g(l) & g(l-1) & \dots & g(l-K) \end{bmatrix} \mathbf{h}. \quad (14)$$

令残余振动为 $\tilde{z}(l)$:

$$\tilde{z}(l) = [u(l-K-1) \ u(l-K-2) \ \dots \ u(0)]\mathbf{f}^r. \quad (15)$$

可看出在输入 u 为任意值的情况下, 若 $\tilde{z}(l) = 0$, $\mathbf{f}^r$ 必为零向量。

考虑 $K+1$ 至 N 时刻的 $N-K$ 个残余振动值, 令 $\tilde{\mathbf{Z}} = [\tilde{z}(K+1) \ \dots \ \tilde{z}(N)]^T$, 由式(15)可得

$$\tilde{\mathbf{Z}} = \mathbf{V}_N \mathbf{f}^r = \mathbf{Y}_N \mathbf{h} - \mathbf{U}_N \mathbf{f}^0 = 0, \quad (16)$$

其中:

$$\mathbf{V}_N = \begin{bmatrix} u(0) & 0 & \dots & 0 \\ u(1) & u(0) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(N-K-1) & u(N-K-2) & \dots & u(0) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$Y_N = \begin{bmatrix} y(K+1) & y(K) & \cdots & y(1) \\ y(K+2) & y(K+1) & \cdots & y(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N) & y(N-1) & \cdots & y(N-K) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$U_N = \begin{bmatrix} u(K+1) & u(K) & \cdots & u(1) \\ u(K+2) & u(K+1) & \cdots & u(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(N) & u(N-1) & \cdots & u(N-K) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

可看出, V_N , Y_N 和 U_N 由可直接测量的 u 和 y 构成, 但 f^0 无法直接得出. 因此, 令式(16)中, 等式两边左乘 $(I - U_N(U_N^T U_N)^{-1} U_N^T)$, 消掉第2项 $U_N f^0$, 只考虑与 f^0 无关的第1项 $Y_N h$.

$$\begin{aligned} (I - U_N(U_N^T U_N)^{-1} U_N^T) \tilde{Z} &= \\ (I - U_N(U_N^T U_N)^{-1} U_N^T) (Y_N h - U_N f^0) &= \\ (I - U_N(U_N^T U_N)^{-1} U_N^T) Y_N h &= \\ \tilde{Z}^e. \end{aligned} \quad (20)$$

定义性能指标函数 J_N :

$$J_N = (\tilde{Z}^e)^T \tilde{Z}^e = h^T (Y_N^T Y_N - Y_N^T U_N (U_N^T U_N)^{-1} U_N^T Y_N) h. \quad (21)$$

算法的目的是消除 K 时刻后的残余振动使得 $\tilde{z}(l) = 0$. 因此, 如何根据系统的实时数据, 在线求解最优的 $\tilde{h}$, 使得性能指标函数 $J_N = 0$, 并满足 $f^r = 0$, 是自适应输入整形算法的核心问题.

3.2 自适应输入整形算法推导

自适应输入整形算法是通过迭代的方式, 在线求解出 $\tilde{h}$ 的最优脉冲幅值 $\tilde{a}$ 和最优时间 $\tilde{t}$, 使得系统残余振动为零, 并且能够使性能指标函数 J_N 最小.

设 $S_N = Y_N^T Y_N$, $T_N = Y_N^T U_N$, $X_N = (U_N^T U_N)^{-1}$, 则式(21)可化简为

$$J_N = h^T (S_N - T_N X_N T_N^T) h. \quad (22)$$

对于第 N 次迭代, 根据系统的输入值 u 和输出值 y , 迭代公式如下^[5]:

$$S_N = \lambda S_{N-1} + \psi_N \psi_N^T, \quad (23)$$

$$T_N = \lambda T_{N-1} + \psi_N v_N^T, \quad (24)$$

$$X_N = \lambda^{-1} X_{N-1} - \frac{\lambda^{-1} X_{N-1} v_N v_N^T X_{N-1}}{\lambda + v_N^T X_{N-1} v_N}, \quad (25)$$

其中: $\psi_N = [y(N) \ y(N-1) \ \cdots \ y(N-K)]^T$, $v_N = [u(N) \ u(N-1) \ \cdots \ u(N-K)]^T$, $\lambda < 1$ 为遗忘因子. 通过式(23)–(25), 可根据实时的输入 u 和输出 y 迭代计算性能指标函数 J_N 的值, 并保证其有界.

进一步需要求解自适应整形器 H 的最优脉冲序

列 $\tilde{h}$, 本文从最优脉冲幅值 $\tilde{a}$ 和时间 $\tilde{t}$ 两方面分别求解.

3.2.1 最优脉冲幅值

首先固定脉冲发生时间, 也就是式(7)中 $t = \{t_1, t_2, \dots, t_Q\}$ Q 个非零元素的值. 设式(21)中 $S_N - T_N X_N T_N^T = \Gamma_N$, 则可将性能指标函数简化为: $J_N = \tilde{a}^T \tilde{\Gamma}_N \tilde{a}$. 其中, $\tilde{a} = [a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_Q]^T$ 为 h 中的 Q 个非零脉冲幅值; $\tilde{\Gamma}_N \in \mathbb{R}^{Q \times Q}$ 为 Γ_N 的子矩阵, 行和列与 h 中非零元素的位置 t 相对应.

最优脉冲幅值 $\tilde{a}$ 可以通过梯度下降法 $\nabla J_N = 2\tilde{\Gamma}_N \tilde{a}_N$ 迭代求解. 考虑 $-\nabla J_N$ 的正交向量 $d = [1 \ 1 \ \cdots \ 1]^T \in \mathbb{R}^Q$, 使得自适应算法仍满足脉冲幅值约束条件 $\sum_{k=1}^K h_k = \sum_{q=1}^Q a_q = 1$:

$$\tilde{a}_N = \tilde{a}_{N-1} - \alpha (I - \frac{1}{Q} d d^T) \tilde{\Gamma}_N \tilde{a}_{N-1}. \quad (26)$$

式中: $\alpha = \frac{1-\lambda}{E(y_n^2)Q}$ 为步长, $E(\cdot)$ 为期望值.

3.2.2 最优脉冲时间

由第3.2.1节得到了最优脉冲幅值 $\tilde{a}$ 后, 进一步计算最优脉冲时间. 此时 J_N 的大小, 由 $Q \times Q$ 阶子矩阵 $\tilde{\Gamma}_N$ 来决定. 因此, 脉冲时间最优迭代算法是通过调整 h 中 Q 个非零元素的位置, 选取最优的 $\tilde{\Gamma}_N$, 从而达到减小 J_N 的目的.

基于时间最优约束条件, 设 $t = \{t_1, t_2, \dots, t_Q\}$ 中第1个脉冲时刻 $t_1 = 0$, 进一步求解余下时刻 $\{t_2, \dots, t_Q\}$ 的值. 令 $t_q^\pm = \{t_1^\pm, \dots, t_Q^\pm\}$ 中的元素加1或-1:

$$t_p^\pm = \begin{cases} t_p \pm 1, & p = q, \\ t_p, & p \neq q. \end{cases} \quad (27)$$

对应性能指标函数 J_N 加或减的变化值 $\delta_q^\pm$ 为

$$\delta_q^\pm = \tilde{a}^T (\tilde{\Gamma}_N^{t_q^\pm} - \tilde{\Gamma}_N^{t_q}) \tilde{a}. \quad (28)$$

根据上式求解出 δ_q^+ 和 δ_q^- . 则 Δt_q 的变化的规则如下:

- 1) 若 $\delta_q^+ > 0$, $\delta_q^- > 0$, 则 $\Delta t_q = 0$;
- 2) 若 $\delta_q^+ > 0$, $\delta_q^- < 0$, 则 $\Delta t_q = -1$;
- 3) 若 $\delta_q^+ < 0$, $\delta_q^- > 0$, 则 $\Delta t_q = +1$;
- 4) 若 $\delta_q^+ < 0$, $\delta_q^- < 0$, 则 $\Delta t_q = -1$.

当 t 中的所有值在 $K+1$ 个脉冲时间内, 不发生改变时, 迭代结束, 求解出最优脉冲时间值 $\tilde{t}$.

4 机械臂柔性负载自适应输入整形控制

4.1 机械臂柔性负载控制系统

为了验证本文提出方法的有效性, 以单个西红柿作为负载, 西红柿果茎作为柔性连杆, 将自适应控制算法应用于采摘机械臂抓取西红柿果茎的振动抑制中. 机械臂的结构示意图如图2所示.

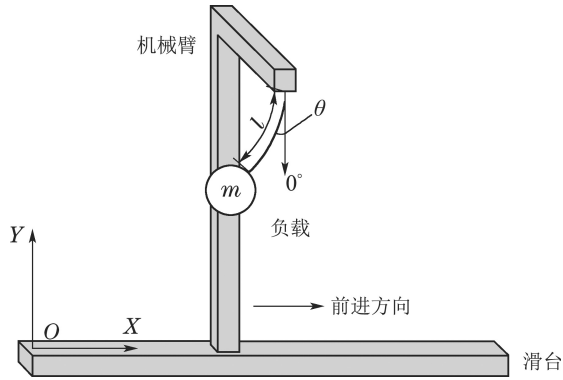


图2 机械臂滑台结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of robot arm slipway structure

图中, m 为负载的质量, l 为负载柔性连杆长度, θ 为负载的摆角. 机械臂振动抑制的目的是使柔性负载沿水平直线方向 X 从静止状态起步, 经过一段匀速运动, 到减速停止的过程中, 摆角 θ 尽可能小.

利用拉格朗日动力学对系统进行受力分析, 可得出近似线性化的仿真模型:

$$l\ddot{\theta}(k) + \frac{\mu l}{m}\dot{\theta}(k) + g\theta(k) + a(k) = 0, \quad (29)$$

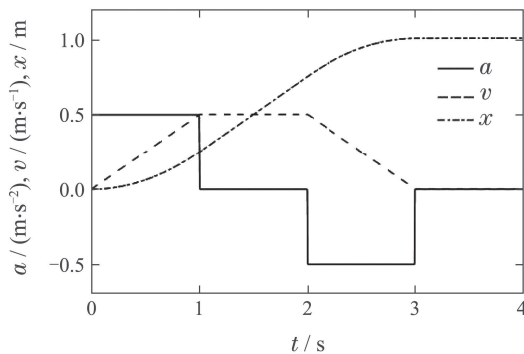
式中: a 为机械臂的加速度, μ 为负载阻尼. 以机械臂加速度 a 作为系统输入, 负载摆角 θ 作为输出, 则系统属于典型的二阶振荡环节, 可得到传递函数为

$$\frac{\theta(s)}{a(s)} = \frac{-1}{s^2 + \frac{\mu}{m}s + \frac{g}{l}}. \quad (30)$$

令系统输入 a 的参考输入 $r(t)$ 为

$$r(t) = \begin{cases} 0.5, & 0 \leq t < 1, \\ 0, & 1 \leq t < 2, \\ -0.5, & 2 \leq t < 3. \end{cases}$$

机械臂整个运动过程共耗时3 s, 先加速运行1 s, 匀速运行1 s, 最后减速运行1 s直至停止. 则机械臂的加速度 a , 速度 v , 位移 x 轨迹如图3所示.

图3 机械臂的加速度 a , 速度 v , 位移 x Fig. 3 The acceleration a , velocity v and displacement x acceleration curves

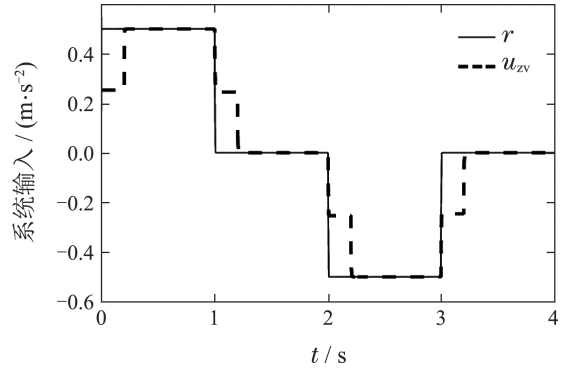
4.2 自适应输入整形控制

选取某一品种的西红柿作为采摘样本, 求取果实

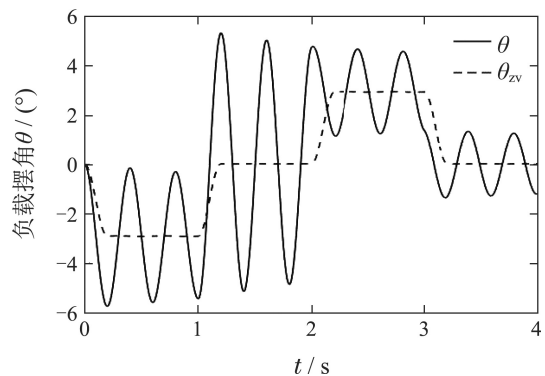
的平均质量为 $m = 0.25 \text{ kg}$, 果茎平均长度 $l = 0.04 \text{ m}$. 首先, 采用ZV输入整形算法, 取 $\mu = 0.07$, 重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$. 根据式(4)–(5)可得

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.5070, \quad a_2 = 0.4930, \\ t_1 &= 0, \quad t_2 = 0.2007. \end{aligned} \quad (31)$$

则参考输入 r 和ZV整形后的输入 u_{zv} 如图4所示.

图4 参考输入 r 和ZV整形后的输入 u_{zv} 曲线Fig. 4 The input signal r and shaping signal u_{zv} curves

在 r 和 u_{zv} 的作用下, 系统的输出摆角 θ 和 θ_{zv} 如图5所示. 可看出, 加入ZV输入整形后, 极大的减小柔性负载的摆动.

图5 输出摆角 θ 和 θ_{zv} 曲线Fig. 5 The output signal θ and θ_{zv} curves

但在实际控制中, 果实的质量和果茎长度, 也就是负载质量 m 和柔性连杆长度 l 都是变化的, 导致系统模型也会发生改变. 因此在样本果实平均质量和果茎平均长度的基础上, 考虑3组负载参数改变的情况 (Δm , Δl).

第1组: 柔性连杆长度不变, 负载质量减小或增加 $\Delta m = \pm 0.05 \text{ kg}$:

$$(-0.05, 0), (+0.05, 0).$$

第2组: 负载质量不变, 柔性连杆长度减小或增加 $\Delta l = \pm 0.01 \text{ m}$:

$$(0, -0.01), (0, +0.01).$$

第3组: 负载质量和柔性连杆长度均发生改变 $\Delta m, \Delta l$:

$(-0.05, -0.01), (+0.05, -0.01),$

$(-0.05, +0.01), (+0.05, +0.01).$

在3组变负载情况下,采用ZV输入整形控制的输出摆角 θ 如图6所示.可看出,负载质量和柔性连杆长度发生变化后,会导致ZV整形器不能起到很好的控制效果,负载摆角出现明显震荡.

因此,采用两个输入脉冲的自适应控制算法,根据整形后的控制量 u ,和负载的输出摆角 θ ,在线的调整整形器的参数.设自适应算法 $K=100$,遗忘因子 $\lambda=0.999$,式(23)–(25)中的初始值为 $S_0=0, T_0=0, X_0$

$=I$,自适应整形器的脉冲幅值和时间初值仍为式(31)中ZV整形器的参数值.

在3组负载变化的情况下,自适应输入整形算法的输入 u 曲线如图7所示.可看出,自适应算法对输入的脉冲幅值和时间均进行了迭代计算.

在自适应输入 u 的作用下,3种情况的负载的输出摆角经过加速运行阶段的调整,在进入匀速运行阶段时,摆动幅度大大减小,进入减速运行阶段后,达到了满意的控制效果.3种情况的系统负载输出摆角 θ 如图8所示.

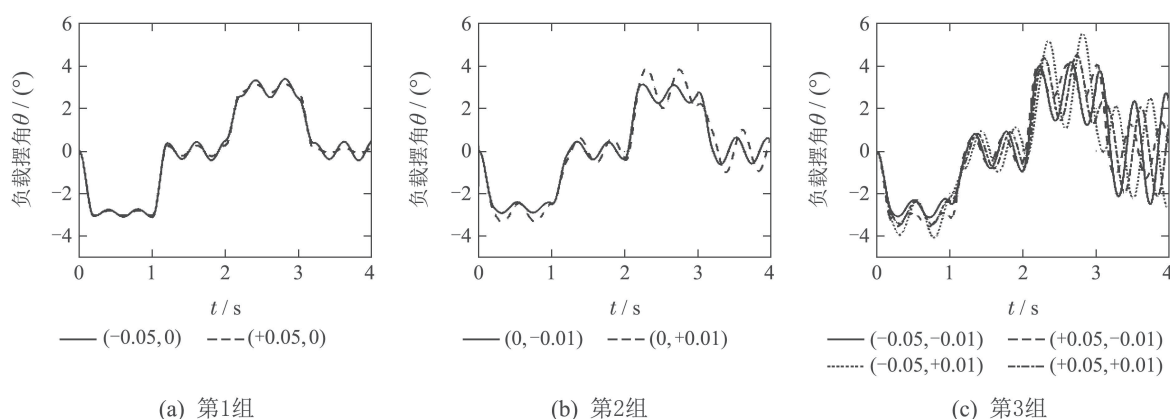


图6 负载参数改变时的输出摆角 θ 曲线
Fig. 6 The output signal θ of changing load parameters

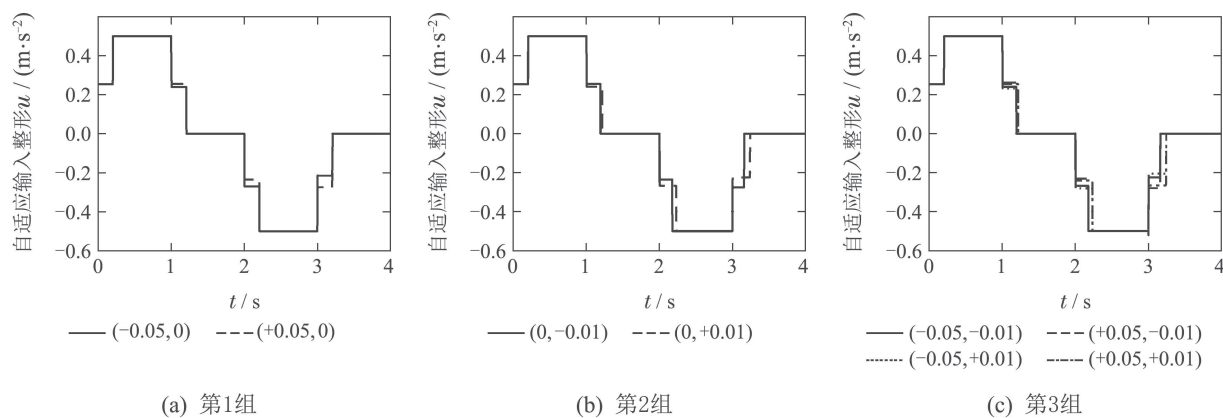


图7 自适应输入整形后的输入 u 曲线
Fig. 7 The input signal u curve of adaptive input shaping

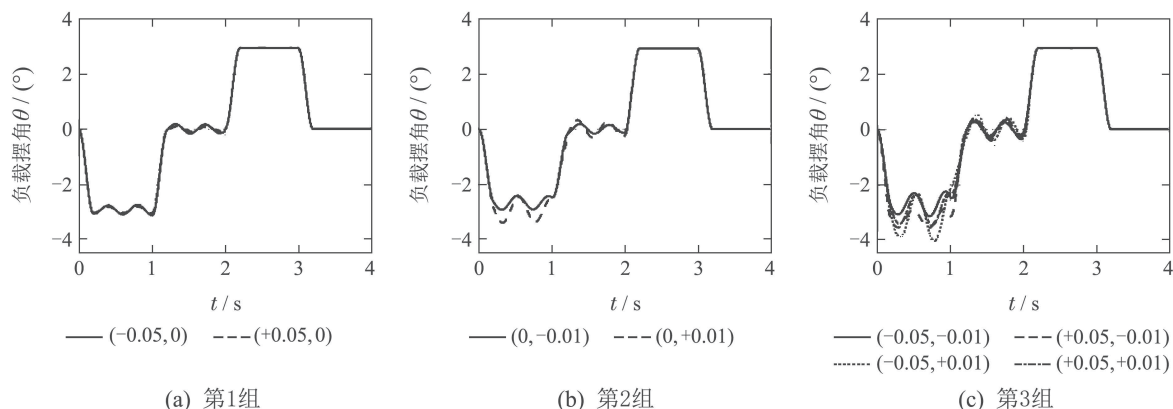


图8 自适应输入整形后的输出 θ 曲线
Fig. 8 The input signal θ curve of adaptive input shaping

自适应输入整形算法的脉冲幅值迭代过程如图9和图10所示。基于时间最优约束条件, 设第1个脉冲

时间 $t_1 = 0$, 第2个脉冲时间 t_2 的迭代曲线如图11所示。

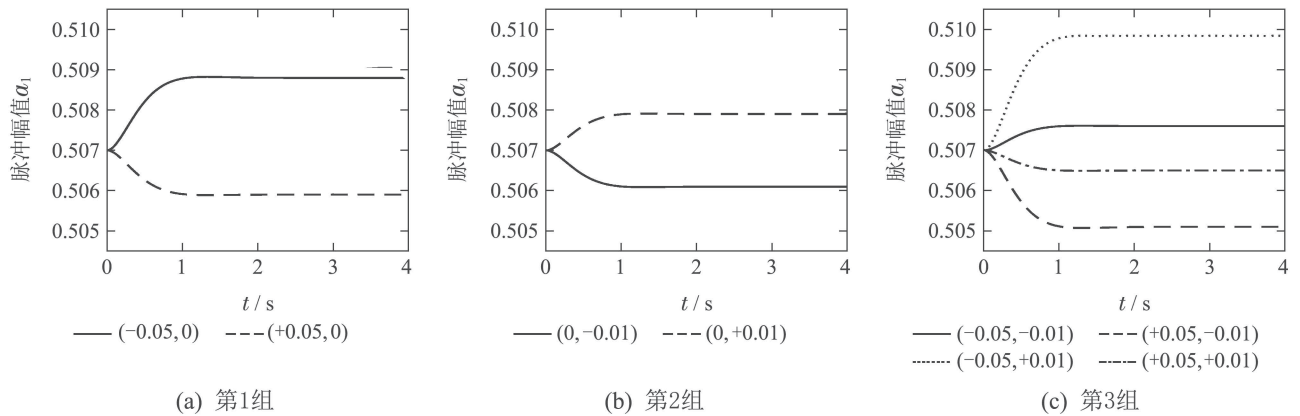


图9 自适应输入整形脉冲幅值 a_1 迭代曲线
Fig. 9 The amplitude parameters a_1 of adaptive input shaping

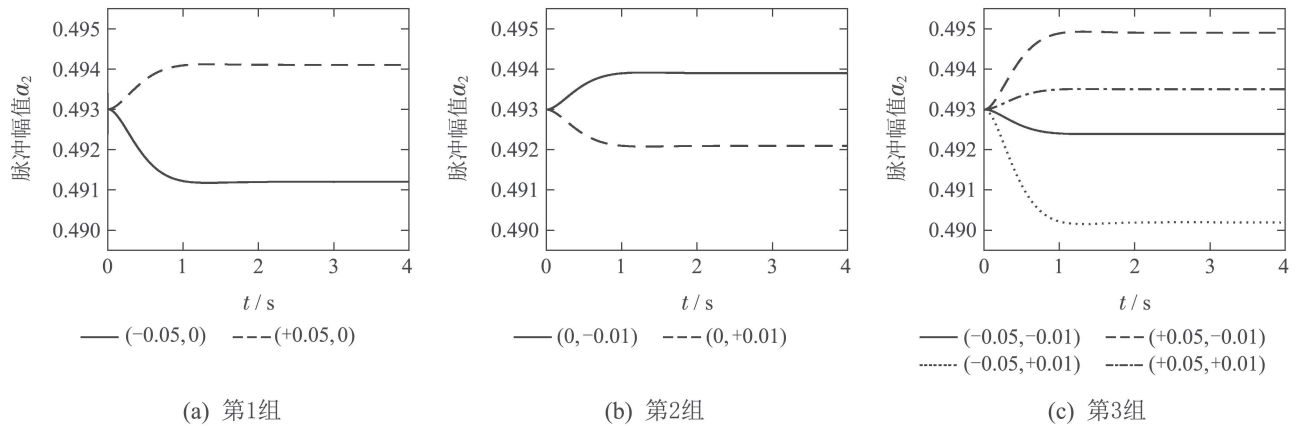


图10 自适应输入整形脉冲幅值 a_2 迭代曲线
Fig. 10 The time parameters a_2 of adaptive input shaping

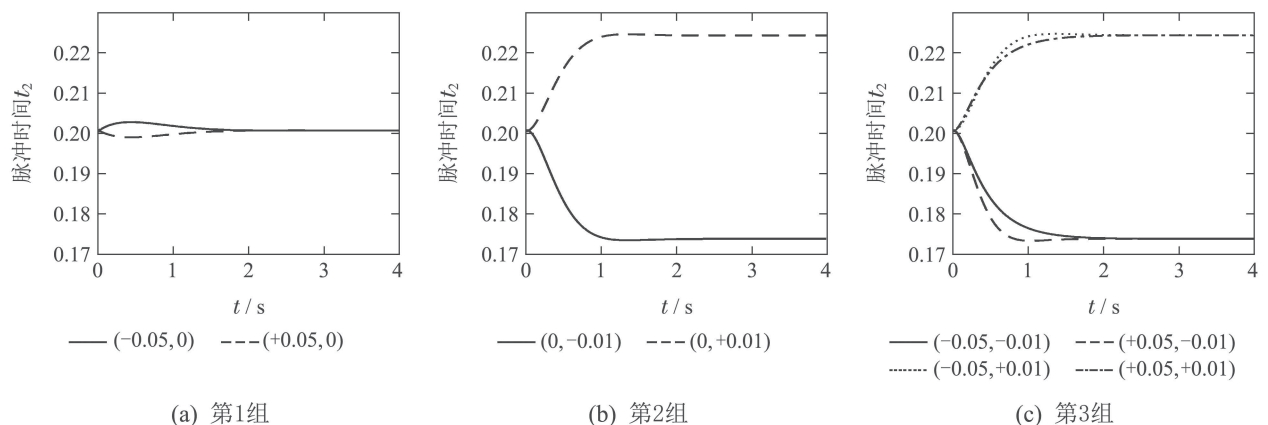


图11 自适应输入整形脉冲时间 t_2 参数迭代曲线
Fig. 11 The time parameters t_2 of adaptive input shaping

5 结论

本文针对机械臂抓取可变柔性负载移动过程中的振动抑制问题, 提出了自适应输入整形控制方法。设置二次型性能指标函数, 对机械臂移动的加速度和负

载的摆角数据进行迭代运算, 实时计算整形器的脉冲的幅值和时间, 达到减小残余振动的目的。针对负载的质量和柔性连杆长度两个可变参数, 考虑柔负载的3种变化情况, 实验结果证明了本文所提方法的鲁

棒性, 获得满意的控制性能.

参考文献:

- [1] LIU Jizhan, LI Zhiguo, LI Pingping. *Research on Rapid Non-destructive Operation of Tomato Picking Robot*. Beijing: Science Press, 2018.
(刘继展, 李智国, 李萍萍. 番茄采摘机器人快速无损作业研究. 北京: 科学出版社, 2018.)
- [2] MENG Qingxin, LAI Xuzhi, YAN Ze, et al. Position control without residual vibration for a two-link rigid-flexible. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(3): 620 – 628.
(孟庆鑫, 赖旭芝, 闫泽, 等. 双连杆刚柔机械臂无残余振动位置控制. 控制理论与应用, 2020, 37(3): 620 – 628.)
- [3] SINGER N C, SEERING W P. Preshaping command inputs to reduce system vibration. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 1990, 112: 667 – 674.
- [4] COLE M O T. A discrete-time approach to impulse-based adaptive input shaping for motion control without residual vibration. *Automatica*, 2011, 47(2011): 2504 – 2510.
- [5] COLE M O T, WONGRATANAPHISAN T. A direct method of adaptive FIR input shaping for motion control with zero residual vibration. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(1): 316 – 327.
- [6] COLE M O T, KURESANGSAI P. Convolution-based input shaping for finite-time settling in non-LTI systems: an LTV approach. *Proceedings of IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*. Hong Kong: IEEE, 2019, 8: 19 – 21.
- [7] CHATLATANAGULCHAI W, POEDAENG P, PONGPANICH N. Improving closed-loop signal shaping of flexible systems with Smith predictor and quantitative feedback. *Engineering Journal*, 2015, 20(5): 155 – 168.
- [8] ZHAO Y, CHEN W, TANG T, et al. Zero time delay input shaping for smooth settling of industrial robots. *Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. Fort Worth, TX: IEEE, 2016: 620 – 625.
- [9] OOMEN T, MAAS R, ROJAS C, et al. Iterative data-driven H_∞ norm estimation of multivariable systems with application to robust active vibration isolation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(6): 2247 – 2260.
- [10] LU Biao, WU Zhuang, FANG Yongchun, et al. Input shaping control for underactuated dual overhead crane system with holonomic constraints. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(12): 1805 – 1811.
(卢彪, 吴壮, 方勇纯, 等. 带有完整约束的双吊车系统输入整形控制. 控制理论与应用, 2018, 35(12): 1805 – 1811.)
- [11] OUYANG Huimin, WANG Jian, ZHANG Guangming, et al. Trajectory generation for double-pendulum rotary crane. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(8): 1265 – 1274.
(欧阳慧珉, 王健, 张广明, 等. 双摆旋转起重机轨迹生成. 控制理论与应用, 2019, 36(8): 1265 – 1274.)
- [12] WANG Yue, SUN Ning, WU Yiming, et al. Real-time motion planning of deep sea-oriented flexible crane systems. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(12): 2761 – 2770.
(王岳, 孙宁, 吴易鸣, 等. 深海起重机系统的实时轨迹规划方法. 自动化学报, 2021, 47(12): 2761 – 2770.)
- [13] BO Yumeng, CAO Mingsheng, GAO Huibin. A data-driven control method combining feedforward tuning and iterative learning control. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(6): 1367 – 1376.
(薄雨蒙, 曹明生, 高慧斌. 结合前馈调参与迭代学习的数据驱动控制方法. 控制理论与应用, 2020, 37(6): 1367 – 1376.)
- [14] PENG J H, HUANG J, SINGHOSE W. Payload twisting dynamics and oscillation suppression of tower cranes during slewing motions. *Nonlinear Dynamics*, 2019, 98(2): 1041 – 1048.
- [15] RHIM S, BOOK W J. Adaptive time-delay command shaping filter for flexible manipulator control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, 9(4): 619 – 626.
- [16] HANIFZADEGAN M, NAGAMUNE R. Tracking and structural vibration control of flexible ball-screw drives with dynamic variations. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(1): 133 – 142.
- [17] RAMLI L, MOHAMED Z, JAAFAR H I. A neural network-based input shaping for swing suppression of an overhead crane under payload hoisting and mass variations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 107: 484 – 501.
- [18] CHU Z, HU J. An improved recursive least square-based adaptive input shaping for zero residual vibration control of flexible system. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8: 1 – 14.

作者简介:

刘德馨 博士, 讲师, 研究方向为机器人控制和非线性控制, E-mail: liudexin@bnu.edu.cn;

张建成 博士, 教授, 研究方向为机器人技术及应用, E-mail: jdtjiancheng@bnu.edu.cn;

李媛 博士, 教授, 研究方向为智能控制和机器人技术, E-mail: zdhtliyuan@bnu.edu.cn;

方建军 博士, 教授, 研究方向为智能交通及智能机器人, E-mail: jianjun@bnu.edu.cn.