

# 动力学在线更新的人和机器人握手智能控制器

谢光辉<sup>1,2,3</sup>, 梁锡昌<sup>1</sup>, 桥本稔<sup>2</sup>, 庄小红<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 日本信州大学 纤维学部, 长野 386-8567;  
3. 重庆电子工程职业学院, 重庆 401331)

**摘要:** 为实现人和机器人握手运动的同步, 本文提出了一种基于动力学在线更新的智能控制器. 首先, 建立了人和机器人握手的仿真模型; 然后对智能控制器中有任何吸引子的动力学系统进行多项式近似设计和在线更新设计, 使其具备自振动特性和输入输出同步特性; 同时通过忘却系数和负荷系数, 输入输出同步程度能实现参数可调; 最后, 将该智能控制器用于人和机器人握手的控制中, 仿真结果表明了该智能控制器设计的有效性.

**关键词:** 多项式在线更新; 握手机器人; 动力学; 吸引子; 忘却系数

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** A

## Intelligent controller for human-robot handshaking based on online update of dynamics

XIE Guang-hui<sup>1,2,3</sup>, LIANG Xi-chang<sup>1</sup>, Minoru HASHIMOTO<sup>2</sup>, ZHUANG Xiao-hong<sup>1</sup>

(1. Mechanical Transmission State Key Laboratory, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University, Nagano 386-8567, Japan;  
3. Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** To realize the human-robot handshaking, we propose an intelligent controller for synchronizing the motions based on the online update of dynamics. In the simulation model for human-robot handshaking, the system dynamics of any attractor in the intelligent controller is approximated by a polynomial expression and is updated online, so that it has the self-oscillation characteristic and the input-output synchronization characteristic. The degrees of input-output synchronization can be varied by adjusting the forgetting-parameter and the load-parameter in the system dynamics. In the process of simulation, the human-robot handshaking is realized, demonstrating the validity of the intelligent controller.

**Key words:** polynomial online update; handshaking robot; dynamics; attractor; forgetting-parameter

### 1 引言(Introduction)

人和机器人身体自然的相互作用是未来服务机器人研究的一个重要课题. 近几年, 有许多关于人和机器人身体相互作用(比如搀扶等)的研究, 取得了一定成果, 如文献[1,2], 但它们大都着眼于机器人的阻抗控制(impedance control)研究, 这种方式需要确定人和机器人之间谁是主控, 谁是被控. 但在现实生活中, 人与人之间相互作用是自然的, 不存在谁主控、谁被控, 比如握手. 故目前用阻抗控制的方式来实现人与机器人的自然交流有一定的难度. 为了实现机器人运动与周围环境保持同步, 神经元振荡器亦被应用于诸如机器人行走<sup>[3]</sup>和其他有节奏的运动<sup>[4]</sup>控制上, 但神经元振荡器有很多参数相互耦合, 找到合适的参数匹配来实现运动同步是复杂困难的, 并且其只能应用于具有周期运动规律の場合.

为寻找人与机器人实现自然交流的较简单的控制方式, 这里以人和机器人握手这样一个有节奏的运动作为例子进行研究. 正常情况下, 当人们之间握手时, 任何一方都会感觉很自然, 这主要是因为双方的握手运动频率和振幅基本上是同步的. 这种同步能被看作为一基本现象. 为了让人和机器人握手时能实现现象上面描述的自然现象, 这里首次设计了一种基于动力学系统多项式在线更新的智能控制器, 并将其应用于人和机器人握手的研究中.

### 2 人和机器人握手模型(Model of human-robot handshaking)

图1表示在二维笛卡尔空间里建立的人和机器人握手的仿真模型. 其中:  $A$ 表示机器人臂,  $B$ 表示人臂, 每个臂有3个自由度; 关节 $A1$ 和 $B1$ ,  $A2$ 和 $B2$ 以

及A3和B3分别表示机器人臂和人臂的肩、肘以及腕关节;  $x$ 和 $y$ 分别指 $x$ 轴和 $y$ 轴。

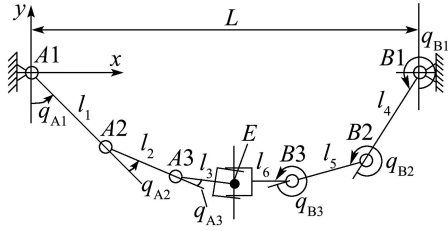


图1 人和机器人握手模型

Fig. 1 Model of human-robot handshaking

假设模型中每个臂的各连杆皆为相互约束刚体, 可以由拉格朗日方程得出如下动力学方程式:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + R\lambda. \quad (1)$$

其中:  $M$ 为惯性矩阵,  $h$ 为离心和哥氏力项,  $g$ 为重力效应,  $R\lambda$ 表示机器人臂A与人臂B之间的约束力,  $R$ 为约束方程的雅可比,  $\lambda$ 表示拉格朗日乘子:

$$R^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial q_{A1}} & \frac{\partial \phi_x}{\partial q_{A2}} & \frac{\partial \phi_x}{\partial q_{A3}} & \frac{\partial \phi_x}{\partial q_{B1}} & \frac{\partial \phi_x}{\partial q_{B2}} & \frac{\partial \phi_x}{\partial q_{B3}} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial q_{A1}} & \frac{\partial \phi_y}{\partial q_{A2}} & \frac{\partial \phi_y}{\partial q_{A3}} & \frac{\partial \phi_y}{\partial q_{B1}} & \frac{\partial \phi_y}{\partial q_{B2}} & \frac{\partial \phi_y}{\partial q_{B3}} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_x \\ \lambda_y \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\phi_x = l_1 \sin q_{A1} + l_2 \sin(q_{A1} + q_{A2}) + l_3 \sin(q_{A1} + q_{A2} + q_{A3}) - L + l_4 \sin q_{B1} + l_5 \sin(q_{B1} + q_{B2}) + l_6 \sin(q_{B1} + q_{B2} + q_{B3}) = 0, \quad (4)$$

$$\phi_y = l_1 \cos q_{A1} + l_2 \cos(q_{A1} + q_{A2}) + l_3 \cos(q_{A1} + q_{A2} + q_{A3}) + l_4 \cos q_{B1} + l_5 \cos(q_{B1} + q_{B2}) + l_6 \cos(q_{B1} + q_{B2} + q_{B3}) = 0. \quad (5)$$

为了使模型趋于稳定, 可以假设人和机器人臂在腕关节的末端E处相互约束, 且 $\phi_x = 0$ ,  $\phi_y = 0$ , 同时利用约束稳定模式(CSM)<sup>[5]</sup>, 其约束条件如下:

$$\ddot{\phi}_x + \gamma_x \dot{\phi}_x + w_x \phi_x = 0, \quad (6)$$

$$\ddot{\phi}_y + \gamma_y \dot{\phi}_y + w_y \phi_y = 0. \quad (7)$$

方程(6)和(7)皆为二阶系统, 根据代数稳定性判据, 当系统闭环特征方程式的系数都大于零时,  $\phi_x$ 和 $\phi_y$ 收敛于零, 系统稳定<sup>[6]</sup>.

结合式(4)(5), 式(6)(7)可以用式(8)(9)表达:

$$R_x \ddot{q} + (\dot{R}_x + \gamma_x R_x) \dot{q} + w_x \phi_x = 0, \quad (8)$$

$$R_y \ddot{q} + (\dot{R}_y + \gamma_y R_y) \dot{q} + w_y \phi_y = 0. \quad (9)$$

这样, 方程(1)可用如下的方程式来代替:

$$H[q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, \lambda_x, \lambda_y]^T = [k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8]^T. \quad (10)$$

解方程(10), 能够得到由于人和机器人外部约束 $R\lambda$ 而产生的关节扭矩。

### 3 智能控制器设计(Design of intelligent controller)

人和机器人相互作用的智能控制器模型如图2所示. 其核心是参数可调的动力学系统, 人与机器人相互作用所产生的扭矩信号被反馈到动力学系统输入端, 由于动力学模块具有同步特性, 使其输出与输入扭矩信号同步的关节期望位移 $\theta_d$ (角度), 从而实现人和机器人之间运动的同步. 同时, 通过同步调节模块, 运动同步的程度能被调节。

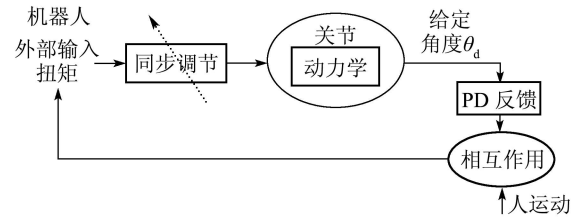


图2 智能控制器模型

Fig. 2 Model of intelligent controller

#### 3.1 动力学系统多项式近似设计(Polynomial expression approximation design of dynamics system)

Okada等人<sup>[7]</sup>提出了用多项式近似方法来设计非线性动力学系统, 其原理是在任意的机器人目标规迹(吸引子)周围设计矢量场, 然后用多项式去近似它, 最后将这样得到的高度非线性的近似多项式与吸引子和矢量场一起作为动力学系统来处理输入(如扭矩)和输出(如关节期望位移)之间的关系。

如图3所示, 吸引子 $C$ 是二维空间里关于时间的离散函数, 由各离散点 $\xi(k)$ 组成,  $k = 1, 2, \dots, n$ ; 在 $C$ 的周围设计矢量场, 且单个矢量 $f(\eta_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ )的定义如图4和式(11)(12)所示:

$$\delta_i(k) = \eta_i - \xi^{\eta_i}(k), \quad (11)$$

$$\delta_i(k+1) = (\eta_i + f(\eta_i)) - \xi^{\eta_i}(k+1). \quad (12)$$

这里:  $\eta_i$ 表示矢量场样点,  $\xi^{\eta_i}(k)$ 表示位于吸引子 $C$ 上且距样点 $\eta_i$ 最近的点. 同时, 必须满足式(13):

$$\|\delta_i(k+1)\| = \|\delta_i(k)\|. \quad (13)$$

这样, 能够保证矢量 $f(\eta_i)$ 收敛于吸引子 $C$ , 并且其收敛程度可由 $\|\delta_i(k)\|$ 与 $\|\delta_i(k+1)\|$ 的比值决定, 从而设计出不同的矢量场。

对于式(11)~(13)所描述的矢量 $f(\eta_i)$ , 可以用多项式去逼近它, 从而近似吸引子 $C$ . 现假设有以下4次多项式:

$$Q(x) = c_{40}x_1^4 + c_{31}x_1^3x_2 + c_{22}x_1^2x_2^2 + c_{13}x_1x_2^3 + c_{04}x_2^4 + c_{30}x_1^3 + c_{21}x_1^2x_2 + c_{12}x_1x_2^2 +$$

$$c_{03}x_2^3 + c_{20}x_1^2 + c_{11}x_1x_2 + c_{02}x_2^2 + c_{10}x_1 + c_{01}x_2 + c_{00},$$

其中  $c_{ij}$  为系数. 运用最小二乘法原理, 得到矢量场的近似多项式  $Q(\eta_i)$  如下所示:

$$Q(\eta_i) = \Phi(c_{40}, c_{31}, c_{22}, \dots, c_{00})\theta(\eta_i), \quad (14)$$

$$\eta_i = [x_1^4, x_1^3x_2, x_1^2x_2^2, \dots, 1]^T, \quad (15)$$

$$\Phi(c_{40}, c_{31}, c_{22}, \dots, c_{00}) = F\Theta^\#, \quad (16)$$

$$F = [f(\eta_1), f(\eta_2), f(\eta_3), \dots, f(\eta_m)], \quad (17)$$

$$\Theta = [\theta(\eta_1), \theta(\eta_2), \theta(\eta_3), \dots, \theta(\eta_m)], \quad (18)$$

这里  $\Theta^\#$  为矩阵  $\Theta$  的伪逆矩阵.

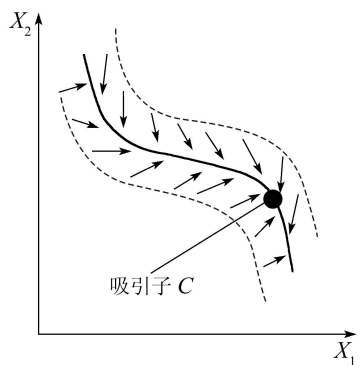


图 3 矢量场  
Fig. 3 Vector field

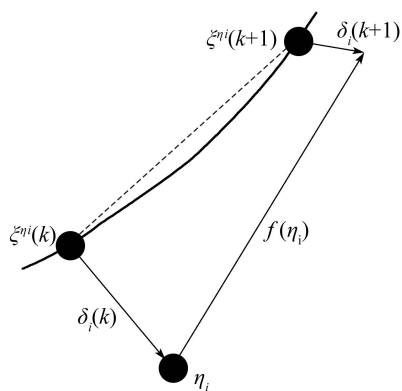


图 4 定义矢量  
Fig. 4 Defining vector

通过近似多项式  $Q(\eta_i)$ , 可以得到与每个离散时刻点  $\xi(k)$  相对应的矢量, 从而得到表示机器人运动规迹的近似点, 这些点组合就近似于目标规迹, 如直线、曲线以及握手的周期运动规迹等:

对以上所设计的动力学系统分析后发现, 其具有无输入时的自振动特性和有输入时的输入输出不同步特性:

1) 自振动特性.

① 根据矢量场设计的不同, 可以得到频率不一样的输出信号. 这能从子图5(a)(b)看到.

② 根据吸引子振幅的不同, 能得到振幅不一样的输出. 这亦可从子图5(a)(b)不难看出.

2) 输入输出不同步特性.

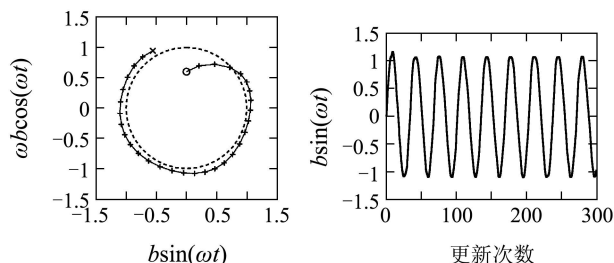
动力学系统输入输出信号不同步. 这可以从图6看到.

由特性2)知, 以上的动力学系统不满足在智能控制器模型中输入输出同步这一要求, 故需改进.

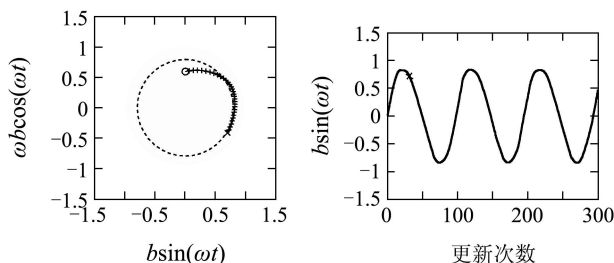
**注 1** 在图5~7中, 正弦信号为  $b\sin(\omega t)$ , 余弦信号为  $b\cos(\omega t)$ , 其中:  $b$  表示吸引子的振幅,  $\omega$  表示由矢量场决定的角频率.

**注 2** 在图5左边部分子图中, 虚线表示具有周期运动规迹的各种吸引子, 细实线表示矢量场每次更新后输出点的运动轨迹, 即输出(“○”表示输出始点, “×”表示更新30次后的输出终点); 右边部分表示信号输出.

**注 3** 在图6和7的左边部分子图中, 虚线、粗实线和细实线分别表示吸引子、输入信号和输出信号(“○”为输出始点, “×”为更新300次后的输出终点), 在右边部分子图中粗实线和细实线分别表示输入信号和输出信号.



(a)



(b)

图 5 周期运动的动力学自振动

Fig. 5 Dynamics self-oscillation of periodic motion

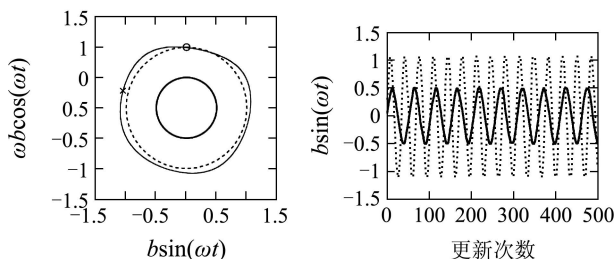


图 6 矢量无更新时输入输出

Fig. 6 Input-output signal with no-update about vector

### 3.2 动力学系统多项式在线更新设计(Polynomial on-line update design of dynamics system)

对于3.1节所设计的动力学系统,其之所以存在输入输出不同步,原因是矢量场设计好后,没引入输入信号和对已输入信号的记忆和学习,矢量场始终保持不变,无法进行更新.因此,提出了如式(19)~(21)所示的多项式在线更新方法:

$$\hat{F} = [\alpha F, \beta f(\eta_{m+1})], \quad (19)$$

$$\hat{\Theta} = [\alpha \Theta, \beta \theta(\eta_{m+1})], \quad (20)$$

$$\hat{\Phi} = \hat{F} \hat{\Theta}^\#. \quad (21)$$

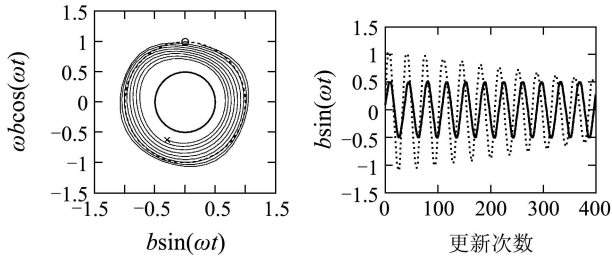
其中:  $\eta_{m+1}$ 表示新检测到的输入信号,  $\alpha$ 为忘却系数,  $\beta$ 为输入负荷系数.

当  $0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$  时,用最小二乘法可以得到

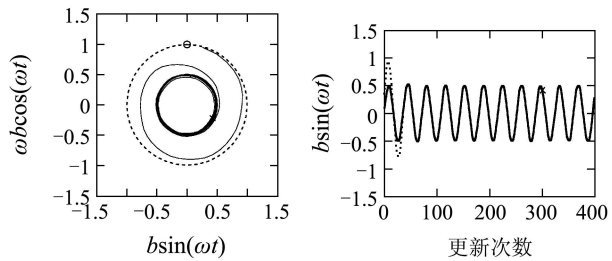
$$\hat{\Phi}_{m+1} = \hat{\Phi}_m + \{\beta^2 f(\eta_{m+1}) - \hat{\Phi}_m \beta^2 f(\eta_{m+1})\} \cdot \theta^\top(\eta_{m+1}) P_{m+1}, \quad (22)$$

$$P_{m+1} = P_m - \frac{P_m \beta^2 \theta(\eta_{m+1}) \theta^\top(\eta_{m+1}) P_m}{1 + \theta^\top(\eta_{m+1}) P_m \beta^2 \theta(\eta_{m+1})}, \quad (23)$$

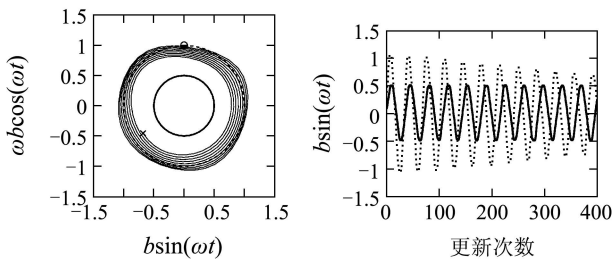
$$P_m = (\alpha^2 \Theta \Theta^\top)^{-1}. \quad (24)$$



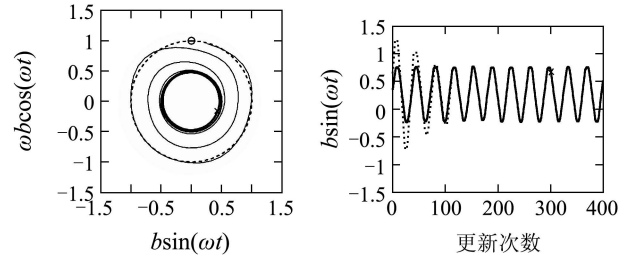
(a)  $\alpha = 1.0, \beta = 1.0$



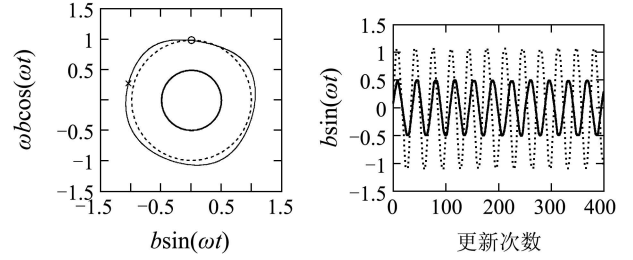
(b)  $\alpha = 0.2, \beta = 1.0$



(c)  $\alpha = 0.6, \beta = 0.5$



(d)  $\alpha = 0.2, \beta = 0.5$



(e)  $0 \leq \alpha \leq 1, \beta = 0$

图7 系数 $\alpha, \beta$ 不同时输入输出

Fig. 7 Input-output signal with different  $\alpha$  and  $\beta$  parameters

对以上设计的多项式在线更新动力学系统分析后发现,其矢量场不但可以被更新,而且能继承以前矢量场的特性,从而实现输入输出信号的同步,这从图7(a)~(d)与图6的比较可以看出.同时,这种同步的程度能够通过忘却系数 $\alpha$ 和负荷系数 $\beta$ 进行调节,它们的取值对系统的影响如下:

1) 忘却系数 $\alpha$ 对同步的影响.

如图7(a)~(d)所示.忘却系数 $\alpha$ ( $\beta$ 恒定)的大小影响输入输出信号同步的程度,当其值较大时,输入输出不易同步;而当取值较小时,输入输出较易同步.

2) 负荷系数 $\beta$ 对同步的影响.

负荷系数 $\beta$ ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )的取值决定系统输入输出是否同步:当 $\beta = 0$ 时,输入输出始终不同步,图7(e)表明了这一结论;当 $0 < \beta \leq 1$ ,输入输出同步程度由 $\alpha$ 大小决定,这可从图7(a)~(d)看出.

### 4 仿真分析(Simulation and analysis)

人和机器人握手的仿真模型如图1所示.在仿真的过程中,假设人臂运动亦是如图2所示的智能控制器中的动力学系统产生,即其和机器人臂各关节都用第3节所描述的在线设计动力学系统来控制,每个关节的期望位移(角度)是动力学系统的输出信号.而后,将此期望位移通过PD控制来实现与实际角度(关节实际旋转角度)的跟随.

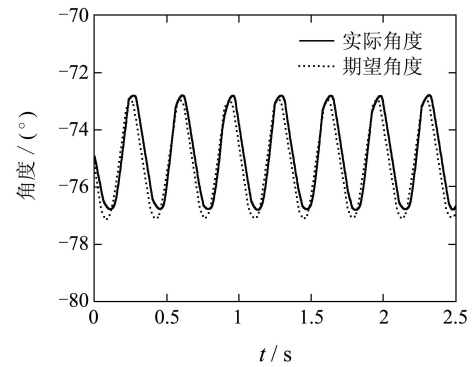
仿真时,机器人和人臂连杆参数如表1所示.同时,从第3.2节的分析可知,忘却系数 $\alpha$ 取值决定动力学系统输入输出同步的程度:当其值较小时,同步程度较高;当其值较大时,同步程度较低.根据这,对

于人和机器人握手时运动同步结果的验证, 忘却系数 $\alpha$ 可以依据同步程度高低取不同的值. 这里选择在同步程度较低的情况下进行验证(因为如果在同步程度较低时运动能够同步, 那么较高时亦能同步), 且确定机器人臂和人臂各关节的动力学忘却系数和负荷系数分别为 $\alpha_A = \alpha_B = 1.0$ 和 $\beta_A = \beta_B = 1.0$ .

表1 机器人和人臂连杆参数

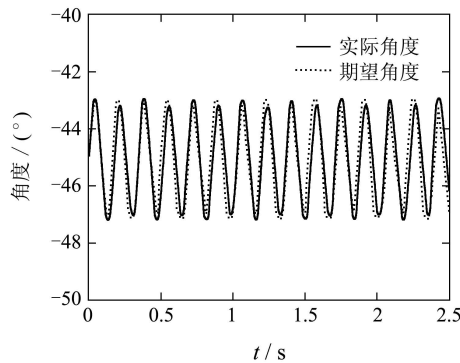
Table 1 Link parameters of robot and human arms

	长度 / m			质量 / kg		
	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$m_1$	$m_2$	$m_3$
臂A, B	0.275	0.22	0.1	1.5	1.2	0.3

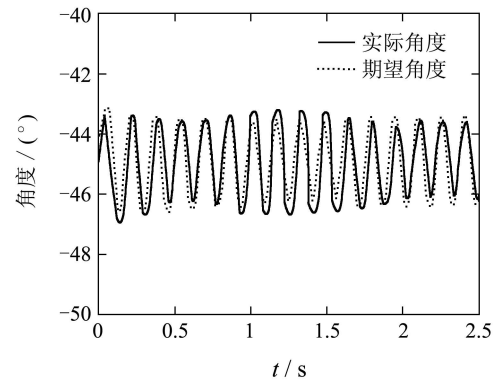


(d) 未握手时机器人和人的B2关节角度输出

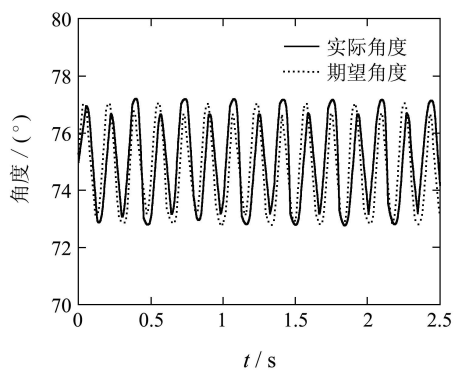
图8 未握手时振动(A臂5.56 Hz, B臂2.78 Hz)  
Fig. 8 Oscillation for no handshaking (A arm 5.56 Hz, B arm 2.78 Hz)



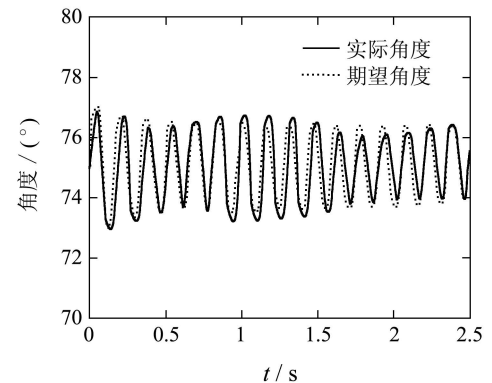
(a) 未握手时机器人和人的A1关节角度输出



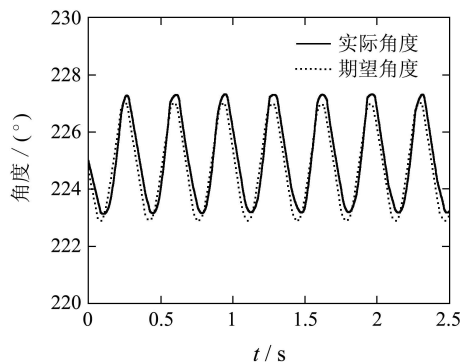
(a) 握手时机器人和人的A1关节角度输出



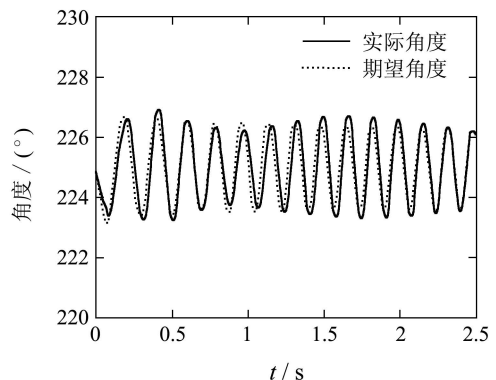
(b) 未握手时机器人和人的A2关节角度输出



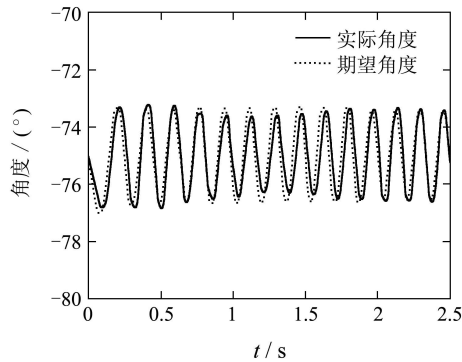
(b) 握手时机器人和人的A2关节角度输出



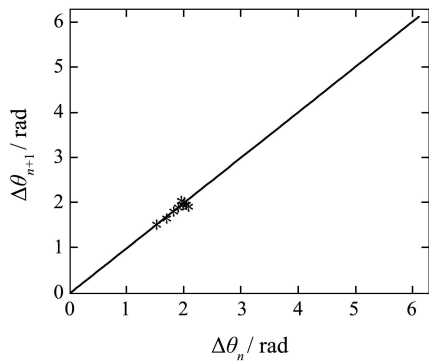
(c) 未握手时机器人和人的B1关节角度输出



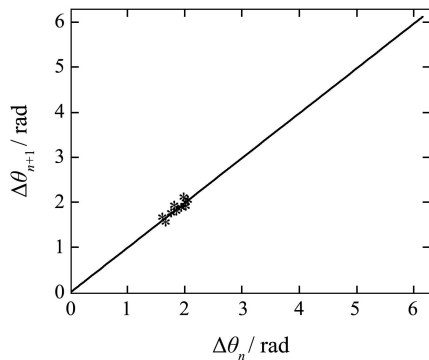
(c) 握手时机器人和人的B1关节角度输出



(d) 握手时机器人和人的B2关节角度输出



(e) A1-B1关节角度输出相位回归



(f) A2-B2关节角度输出相位回归

图9 握手时仿真结果

Fig. 9 Simulation results for handshaking

根据第3.1节所描述的动力学自振动特性<sup>1)</sup>, 通过吸引子和矢量场的设计, 可以改变人和机器人各关节的输出频率和振幅, 进而检验人和机器人握手的同步效果. 为了检查机器人和人握手运动的同步性, 这里将机器人臂(A)和人臂(B)各关节的输出频率分别调整为5.56 Hz和2.78 Hz. 图8为未握手时机器人和人的A1, A2和B1, B2关节角度输出. 从图9中A1, B1和A2, B2关节角度输出图可以看出, 机器人和人握手时, A1和B1以及A2和B2关节的输出在频率和振幅上基本保持一致, 人和机器人的运动产生了同步. 从图9机器人和人的A1-B1以及A2-B2关节角度输出相位回归图中还可以看到, 它们实际角度输出的相位差函数 $\Delta\theta_{n+1} = f(\Delta\theta_n)$ 所表

示的点明显集中于 $\frac{2\pi}{3}$ 左右, 这表明机器人和人运动不仅在频率上产生了同步, 而且各对应关节角度的相位差大约为 $\frac{2\pi}{3}$ . 这里, 相位差函数 $\Delta\theta_{n+1} = f(\Delta\theta_n)$ 的涵义如下:  $\Delta\theta_{n+1}$ 或 $\Delta\theta_n$ 分别表示两个输出(如关节A1和B1的角度)之间在第 $n+1$ 或第 $n$ 个振动时的相位差,  $n = 1, 2, \dots$ ; 当 $\Delta\theta_{n+1} = \Delta\theta_n$ 时, 表示两个输出的相位差保持一定值不变, 说明频率一致, 反之, 则频率不一致.

## 5 结论(Conclusion)

提出了一种动力学系统多项式在线更新的智能控制器, 并将其应用于人和机器人的握手研究, 其动力学系统的输出被用作关节的给定规迹, 关节的扭矩信号被反馈到动力学系统. 仿真表明, 所设计的智能控制器实现了人和机器人握手运动在频率和振幅上的同步. 同时, 通过调节动力学系统的忘却系数, 可以调节同步的程度. 其对人和机器人自然交流的实现具有较大的意义.

## 参考文献(References):

- [1] IKEURA R, INOOKA H. Variable Impedance control of a robot for cooperation with a human[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Nagoya, Japan: IEEE, 1995: 3097 - 3102.
- [2] HIRATA Y, TAKAGI T, KOSUGE K. Motion control of multiple dr helpers transportating a single object in cooperation with a human based on map information[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington D.C., USA: IEEE, 2002: 995 - 1000.
- [3] TAGA G. A model of the neuro-musculo- skeletal system for human location[J]. *Biological Cybernetics*, 1995, 73(2): 113 - 121.
- [4] KASUGA T, HASHIMOTO M. Human-robot handshaking using neural oscillators[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain: IEEE, 2005: 3802-3807.
- [5] NAGUYEN P T A, ARIMOTO S. Computer simulation of dynamics of dual fingers with soft-tips grasping an object[C] // *Proc of Japan-USA Flexible Automation Conference*. Michigan, USA: ASME Press, 2000: 1039 - 1046.
- [6] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. (LIU Jinkun. *Advanced PID Control and MATLAB Simulation*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.)
- [7] OKADA M, TATANI K, NAKAMURA, Y. Polynomial Design of the Nonlinear Dynamics for the Brain-Like Information Processing of Whole Body Motion[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington D.C., USA: IEEE, 2002: 1410 - 1415.

## 作者简介:

谢光辉 (1973—), 男, 博士研究生, 讲师, 目前研究方向为机器人技术及自动控制等, E-mail: xgh95812@yahoo.com.cn;

梁锡昌 (1934—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为CAD/CAM及自动控制等, E-mail: lxc@cqu.edu.cn;

桥本稔 (1954—), 男, 教授, 目前研究方向为机器人技术及自动控制等;

庄小红 (1983—), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为CAD/CAM及机械设计等.