



机器人腕力传感器动态响应的实时补偿¹⁾

徐科军 李 成 朱志能 刘家军

(合肥工业大学自动化研究所 合肥 230009)

(E-mail: xukejun@mail. hf. ah. cn)

摘 要 为了提高机器人腕力传感器的动态响应速度,在对传感器进行动态标定实验的基础上,采用 FLANN 方法设计动态补偿器,以 DSP 为处理核心,研制实时动态补偿系统.实验结果表明,经过补偿腕力传感器动态响应的调整时间缩短为原来的 25% 以下.

关键词 腕力传感器,动态补偿,函数联接型神经网络,数字信号处理器.

REAL TIME COMPENSATION OF DYNAMIC RESPONSE OF ROBOT WRIST FORCE SENSOR

XU Ke-Jun LI Cheng ZHU Zhi-Neng LIU Jia-Jun

(Institute of Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

(E-mail: xukejun@mail. hf. ah. cn)

Abstract In order to speed up the dynamic responses of robot wrist force sensor, dynamic calibrating experiments are made, dynamic compensating devices are designed by using the method of FLANN, and a DSP-based real time dynamic compensating system is developed, which includes six compensating devices. Experiment results show that the adjusting time of dynamic response of wrist force sensor is reduced to less than 25%.

Key words Wrist force sensor, dynamic compensation, functional link artificial neural network, digital signal processor.

1 引言

机器人六维腕力传感器安装于机器人的手臂和手爪之间,可以感知三维力和三维力矩信号,为机器人的操作和控制提供信息.随着机器人速度的加快和一些特殊应用领域的需要,对传感器的动态性能提出了较高要求,要求它能够准确、迅速地反映被测量信号的变化.由于研制者主要根据静态性能指标设计传感器,以及机械结构本身的特点,使得腕力传感器

1) 国家“863”计划(863-512-9805-06)和国家自然科学基金(59985003)资助.

的固有频率较低,阻尼比太小,从而动态响应速度慢,到达稳态的时间长.国外对腕力传感器的研究主要集中在力学性能分析、结构优化设计和过载保护方面,迄今未见对其进行动态性能研究和动态标定的报道^[1~3].目前,国际市场上销售的腕力传感器产品说明书中,均无动态性能指标,只有模/数(A/D)转换后微处理器的信号处理时间,并不反映从加力到传感器输出到达稳态的时间.为了测试腕力传感器的动态性能指标,我们做了阶跃响应法动态标定实验.为了提高腕力传感器的动态性能指标,我们设计了动态补偿数字滤波器,研制了实时动态补偿系统.本文介绍腕力传感器的动态标定实验,动态补偿器的设计方法,实时动态补偿系统的实现以及传感器动态补偿的实验结果.

2 动态标定实验

为了准确、严格地考核腕力传感器的动态性能,利用中国科学院合肥智能机械研究所研制的腕力传感器阶跃响应法动态标定实验台,配上计算机、测试和记录设备,形成动态标定实验装置,其中包括标定台、六维腕力传感器、单维力传感器、实时数据采集与动态校正系统、RM-30C 磁带机、数字存储示波器、HP PC、586PC 机、线和砝码等.

腕力传感器水平安装在标定台的中央,其上垂直固定着一根铁杆,以便加力和力矩.标定台上还安装了多个支架和定滑轮.线的一端吊着砝码,绕过若干个定滑轮以及腕力传感器上的铁杆,将力和力矩加在腕力传感器上.线的另一端拉着一个单维力传感器.通过剪断线,突然释放砝码,来产生一个负的阶跃力和力矩.这个力和力矩信号由单维力传感器来测定.

六维腕力传感器的弹性体是一体化的浮动十字梁结构,其上贴了 32 片应变片,组成 8 个电桥;电桥输出信号经过一级放大,送给我们研制的实时数据采集和动态补偿系统.该系统对 8 路信号进行采集、静态解耦,变成代表 $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ 的 6 路信号输出;同时,可以对这 6 路信号进行动态补偿,以提高腕力传感器响应快速性.实时数据采集和动态补偿系统的程序固化在 EPROM 中,也可以通过 RS232 串行口,由 PC 装入.在动态标定中,单维力传感器测量的激励信号以及腕力传感器输出的 $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ 6 路信号送入磁带机;同时,将激励信号和腕力传感器的主通道信号送至数字存储示波器,通过 GP-IB 总线存入 HP 计算机.

表 1 传感器的频域性能指标

方向	ξ	f_n	备注
F_x	0.066 819	127.566 116	侧面剪
F_y	0.035 030	129.392 634	侧面剪
F_z	0.034 083	299.923 297	中间剪
M_x	0.132 256	124.063 193	侧面剪
	0.068 874	125.891 285	中间剪
M_y	0.066 782	125.703 151	侧面剪
	0.094 042	126.736 916	中间剪
M_z	0.067 449	167.944 855	中间剪

实验结果表明,腕力传感器各个转换通道的阶跃响应,需要 20~80ms 的时间才能达到稳态($\pm 10\%$ 误差),无法满足应用要求,必须进行动态补偿.进一步对实验数据进行时域建模,再转换到频域,得出传感器的性能指标如表 1 所示.实验中,我们分别在不同的位置,例如,在标定台上、下方的中间或标定台的侧面剪断绳子.可见,阻尼比太小是动态响应时间长的主要原因.

3 动态补偿方法

本文提出基于函数连接型人工神经网络(FLANN)的腕力传感器动态补偿方法. FLANN

对许多函数具有良好的逼近能力^[4~6],通过巧妙地构造网络结构,使其具有时延关系,能够反映动态系统的特性,用其设计动态补偿器. 设传感器的输入信号为 $u(k)$, 输出信号为 $y(k)$, 传感器后面连接的动态补偿器的输出信号为 $u'(k)$. 为了提高动态响应的快速性, 准确复现被测信号, 应使 $u'(k)$ 尽量逼近 $u(k)$. 运用

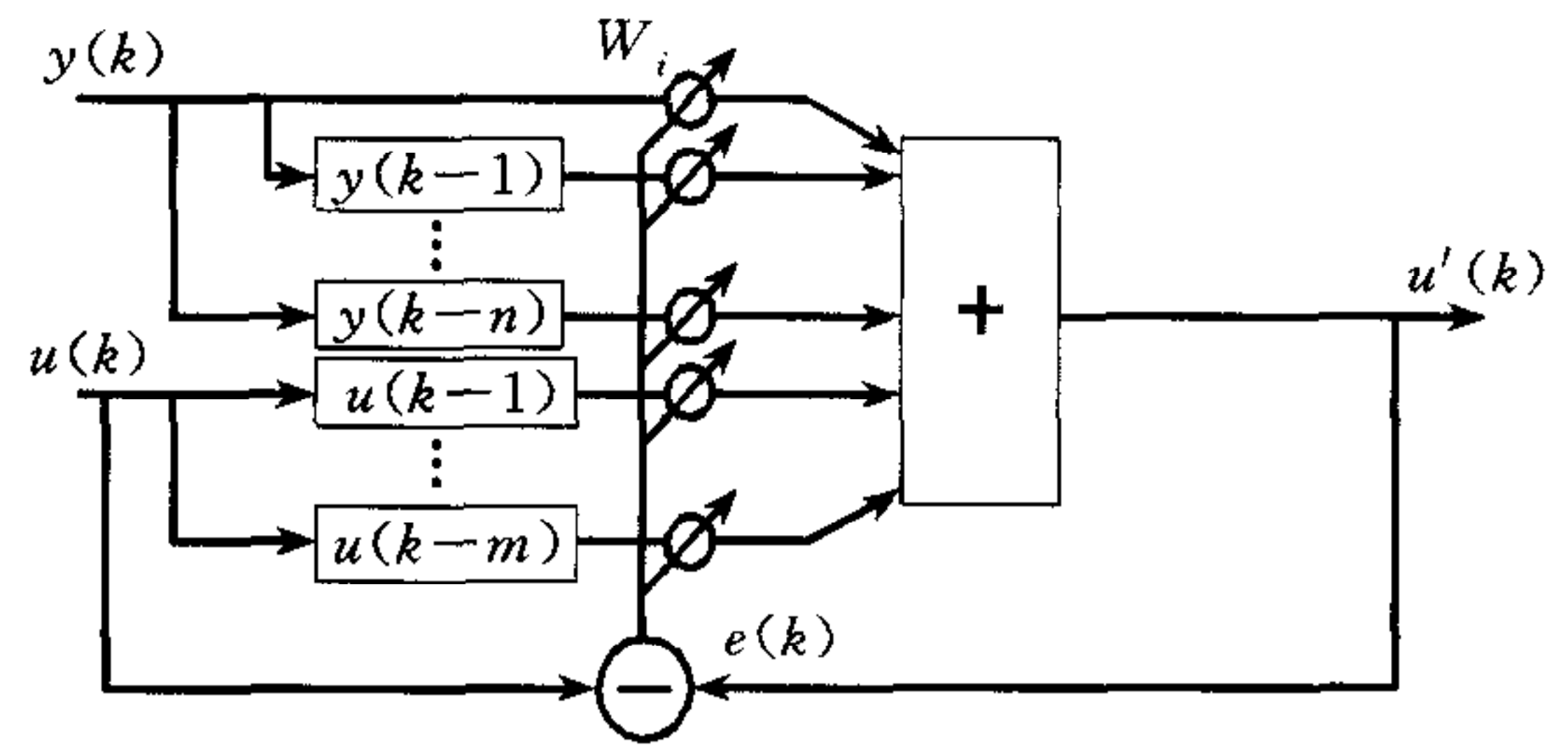


图 1 动态补偿网络训练原理图

FLANN 离线建立传感器的动态反向模型(即逆模型), 作为补偿器的模型. 在设计中, 同时利用传感器的输入 $u(k)$ 和输出 $y(k)$, 并以 $u(k)$ 作为补偿器输出的参考信号, 如图 1 所示.

为了处理实时和实现方便, 选取 $m=2, n=2$, 网络训练式为

$$u'(k) = W_0(k)y(k) + W_1(k)y(k-1) + W_2(k)y(k-2) + W_3(k)u(k-1) + W_4(k)u(k-2), \quad (1)$$

式中 W_i 为神经网络的权值, 即动态补偿器模型的系数, k 为信号数据的点数. 误差为

$$e(k) = u(k) - u'(k), \quad (2)$$

权值调整为

$$W_n(k+1) = W_n(k) + \alpha \cdot e(k) \cdot y(k-n), \quad n = 0, 1, 2, \quad (3)$$

$$W_{m+2}(k+1) = W_{m+2}(k) + \alpha \cdot e(k) \cdot u(k-m-2), \quad m = 1, 2, \quad (4)$$

式中 α 是控制稳定性和收敛速率的学习因子. α 太小, 则收敛速度慢; α 太大, 则可能导致结果分散. 一般 α 取值在 0~1 之间. 针对腕力传感器补偿器的设计, 通过试算, 认为取 0.1 左右比较合适. 经过多次训练后, 得到的 W_0, \dots, W_4 为补偿器的系数.

实现补偿时, 先取补偿输出 $u'(k) = y(k)$ 作为初始值 ($k=0, 1, 2$), 补偿器中的 $u(k)$ 由输出反馈 $u'(k)$ 代替, 动态补偿表达式为

$$u'(k) = W_0y(k) + W_1y(k-1) + W_2y(k-2) + W_3u'(k-1) + W_4u'(k-2), \quad k \geq 3. \quad (5)$$

以上只给出腕力传感器某一通道的动态补偿器的设计公式, 其余五个通道可以此类推.

4 动态补偿系统的实现

动态补偿系统包括六个方向的六个动态补偿器, 完成对腕力传感器多路数据的实时采集、解耦、动态补偿和输出任务.

4.1 硬件设计

动态补偿系统由模拟输入通道、数字信号处理器(DSP)、模拟输出通道、逻辑控制电路、EPROM、串行接口电路以及相应的软件组成. 模拟输入通道由 8 个采样/保持器(S/H)、1 个模拟多路开关(MUX)、1 个放大器(AMP)和模/数转换器(A/D)组成. 输出通道由 6 个数/模转换器(D/A)和 6 个滤波器组成. 逻辑控制电路主要由译码器组成. 该系统以 AD-SP2181 EZ-KIT LITE(AD 公司为 ADSP2181 设计的最小系统, 其中包括 ADSP2181 芯片、EPROM、串行接口电路等)为核心, 采用动态补偿算法, 实时处理腕力传感器的动态响应信号, 既消除或减少腕力传感器各个通道之间的耦合, 又提高传感器动态响应的快速性.

腕力传感器的多路输出信号与动态补偿系统的 8 个 S/H 的输入端相连. ADSP2181 根据采样频率控制 S/H 进行采样或保持. MUX 对多路信号轮流切换, 经 AMP 放大后, 送 A/D 处理. AMP 为 A/D 提供最佳的输入量程. A/D 的状态线 BUSY 脚与 ADSP2181 的可编程输入、输出口 (PF 口) 相连, ADSP2181 通过查询 BUSY 脚的状态来决定读数的时间. 当 ADSP2181 采进同一时刻的 8 路信号后, 先进行静态解耦, 变成代表三维空间的力和力矩分量 $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$, 然后进行动态补偿, 其结果由 6 个 D/A 同时输出, 滤波电路用来去除 D/A 转换后的毛刺. 逻辑控制电路在 ADSP2181 的程序控制下, 决定 A/D 和 D/A 的片选状态.

4.2 软件设计

软件流程包括数据采集、数据处理和结果输出等几个步骤. 系统的采样频率由定时器中断时间决定, 一般在 20K~25KHz. 在 ADSP2181 上电后, 首先对系统状态进行初始化, 包括设置输入输出口状态、设置指令执行周期和定时器中断时间等, 然后系统进入中断等待状态, 当定时器发出中断后, 开始一个循环的数据采集、处理和输出. 在本采集、处理周期中, 首先采集进来多路输入信号, 然后对每路信号进行静态解耦; 再利用解耦后的数据进行动态补偿; 最后, 将动态补偿结果输出. 如此循环, 不断地采集、处理和输出.

5 实验结果

将实时动态补偿系统与腕力传感器连在一起, 进行阶跃响应法动态标定实验, 以检验动态补偿的效果. 结果表明, 经过动态补偿, 腕力传感器各个通道达到稳态的时间均小于 5ms, 动态性能指标得到很大提高. 腕力传感器 3 个力通道的阶跃响应和动态补偿结果如图 2 至图 4 所示. 图中, 曲线 1 为腕力传感器输出信号, 曲线 2 为动态补偿结果. 传感器 6 个通道的补偿系数如表 2 所示, 表中的系数是对应于采样周期为 $50\mu\text{s}$ 的. 我们所补偿的腕力传感器, 其力的测量范围为 $\pm 100\text{N}$, 力矩的测量范围为 $\pm 500\text{N}\cdot\text{cm}$. 在此测量范围内, 表 2 中的补偿参数均有效, 能使各个通道动态响应达到稳态的时间小于 5ms.

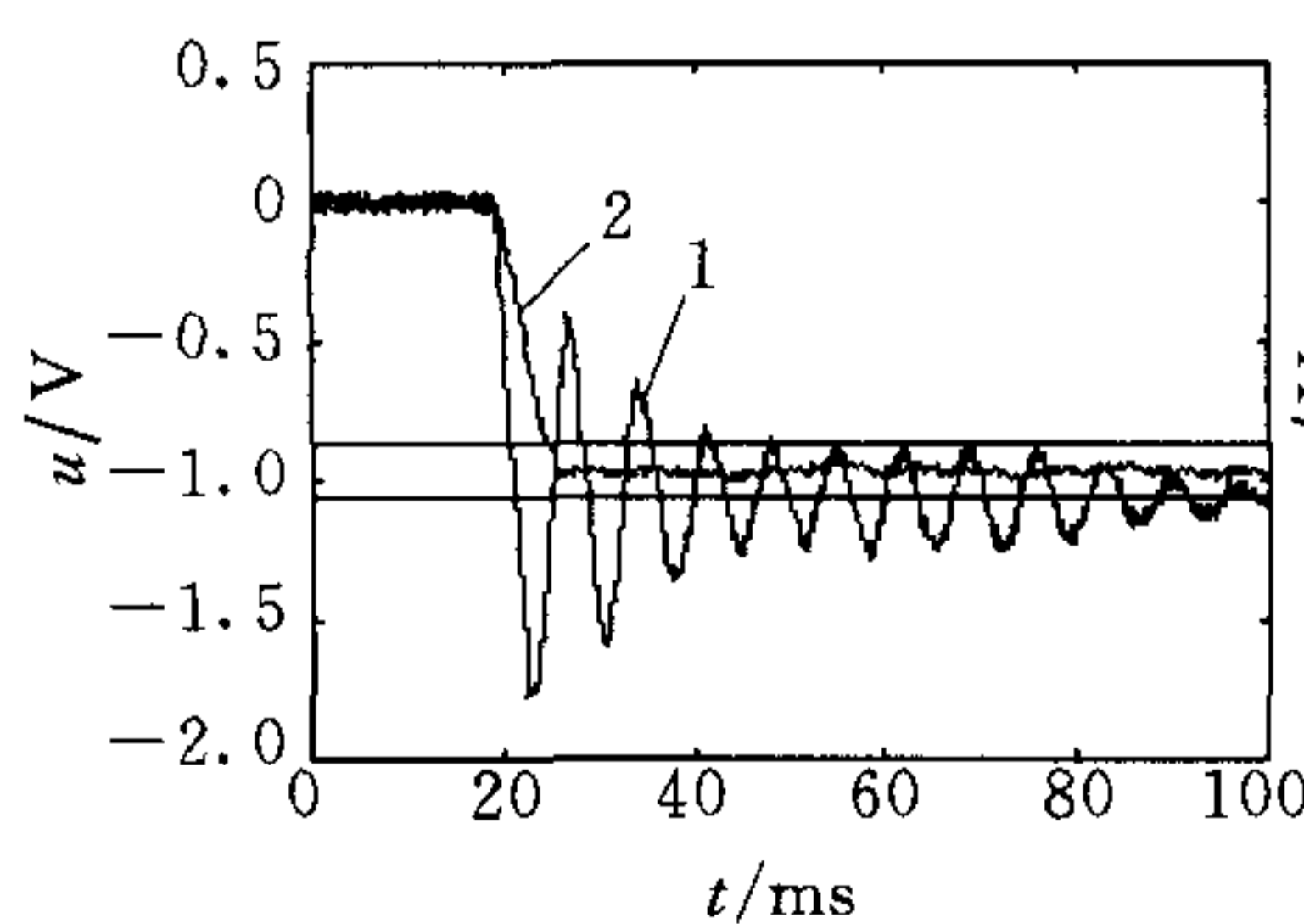


图 2 F_x 动态补偿结果

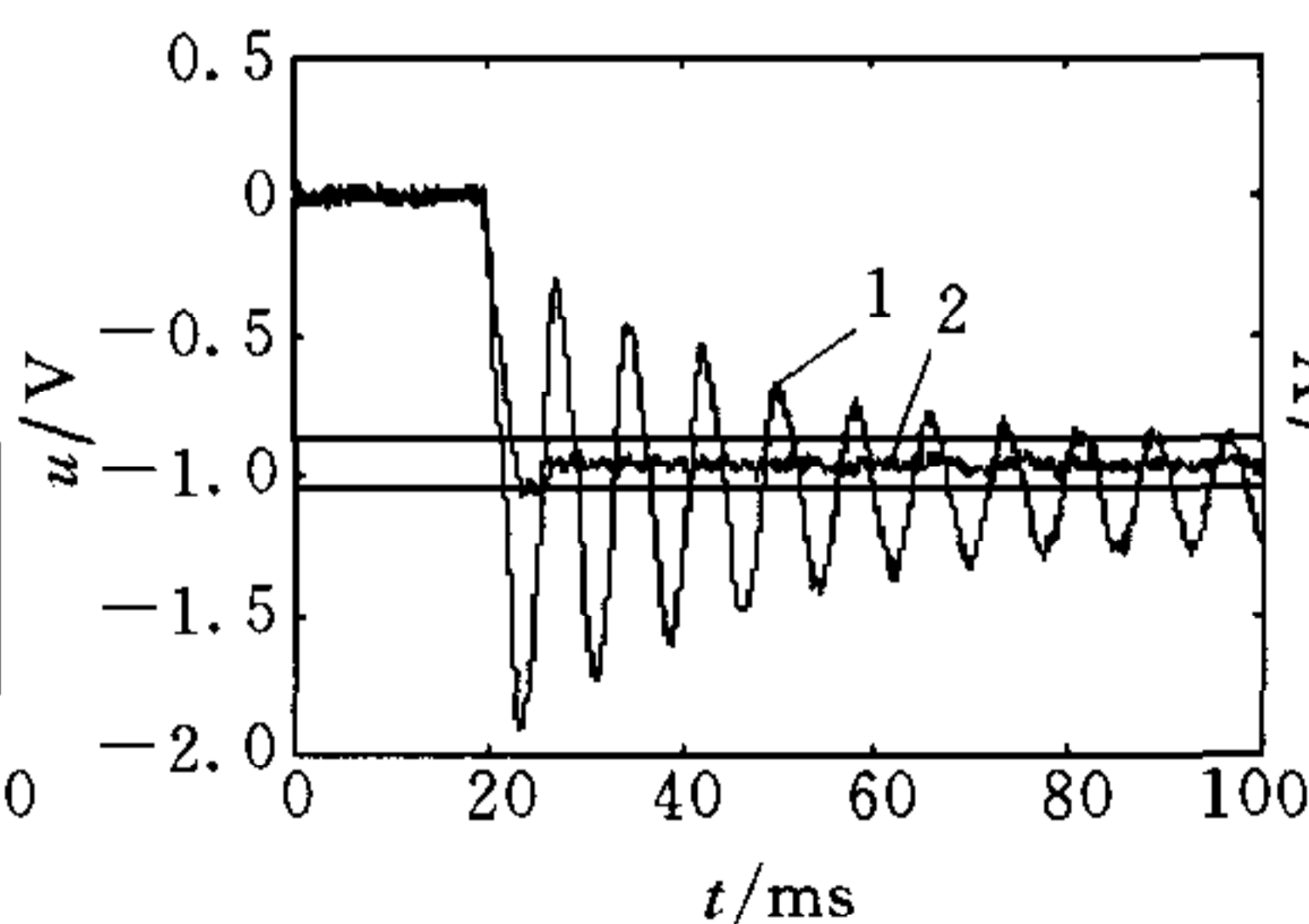


图 3 F_y 动态补偿结果

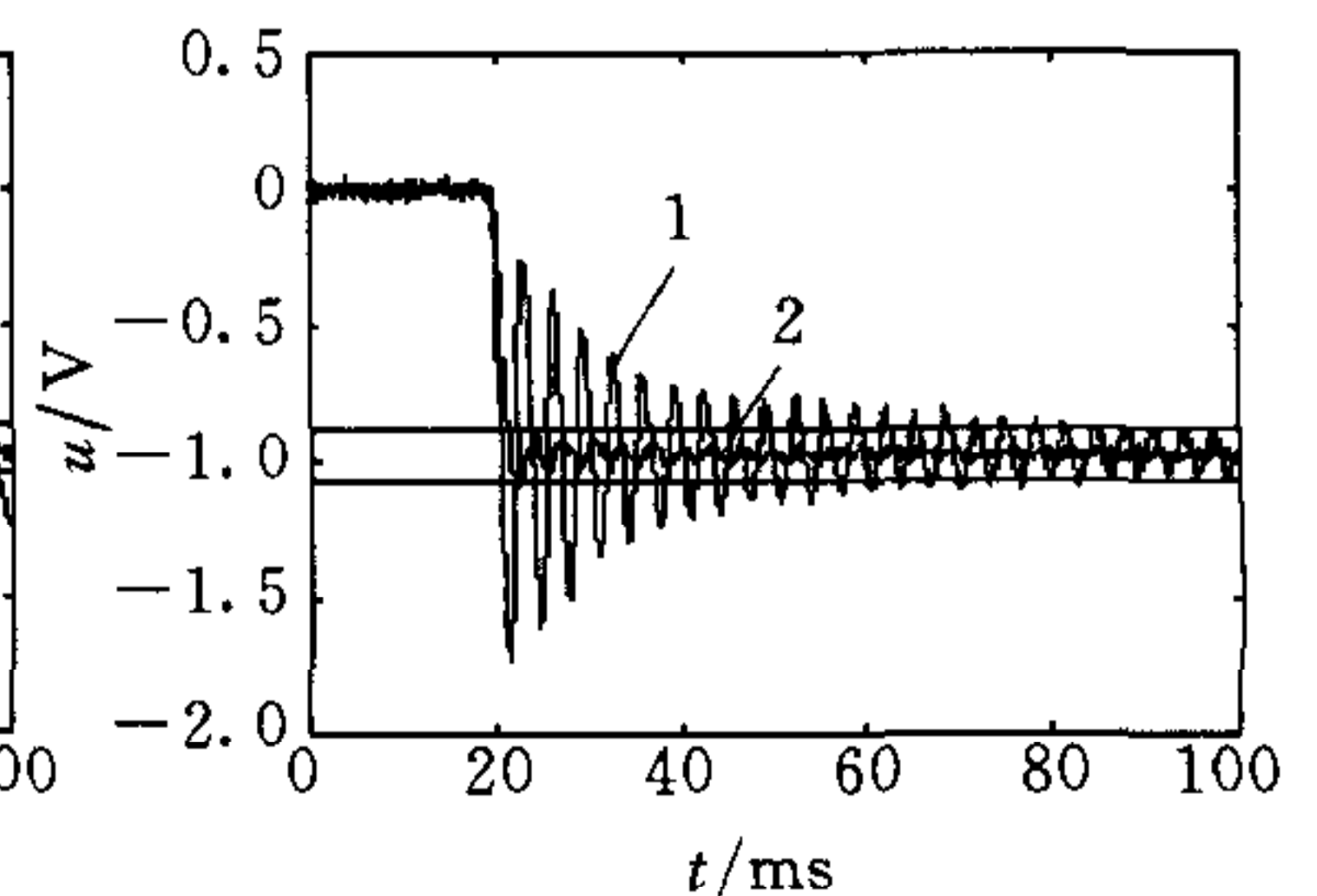


图 4 F_z 动态补偿结果

表 2 传感器补偿系数

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
W0	0.264 231	0.959 694	0.777 428	0.251 256	0.359 567	0.920 652
W1	-0.525 321	-1.915 169	-1.541 528	-0.498 779 0	-0.713 234	-1.818 204
W2	0.261 612	0.957 071	0.772 072	0.248 014	0.354 212	0.909 576
W3	1.966 720	1.956 619	1.871 834	1.969 605	1.970 583	1.846 556
W4	-0.967 239	-0.958 209	-0.879 801	-0.970 085	-0.971 131	-0.858 568

6 几点讨论

1) 与脉冲响应法动态标定实验相比,阶跃响应法对传感器的考核更为全面,实验的重复性好,对力矩通道的标定方便. 在实验中,应选择弹性小的线挂砝码,挑选合适的方式和位置剪断绳子,释放砝码. 改用铜制的滑轮,并且在槽中涂上油,以加快砝码释放的速度.

2) 与其它动态补偿方法:零极点配置、系统辨识和数值微分方法相比,用 FLANN 设计动态补偿器,使用方便;设计的过程也是参数优化的过程;当腕力传感器的动态特性是非最小相位系统时,设计出的补偿器比较稳定.

3) 采用 DSP 完全可以做到实时动态补偿.

参 考 文 献

- 1 Perry D M. Multi-axis force and torque sensing. *Sensor Review*, 1997, **17**(2):117~120
- 2 Chao Lu-Ping *et al.* Shape optimal design and force sensitivity evaluation of six-axis force sensors. *Sensors and Actuators*, 1997, **63**:105~112
- 3 Chang Ying-Hwi *et al.* A novel structural design for force/torque fingertip sensors. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**(8):1196~1203
- 4 Patra J C. An artificial neural network-based smart capacitive pressure sensor. *Measurement*, 1997, **22**(2):113~121
- 5 Daponte P *et al.* Artificial neural networks in measurements. *Measurement*, 1998, **23**(2):93~115
- 6 徐科军. 传感器动态特性的实用研究方法. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1999

徐科军 男,1956 年出生. 博士、研究员、博士生导师. 从事工业自动化和仪器仪表方面的科研与教学工作,主要研究领域为传感器技术、自动化仪表和数字信号处理技术.

李 成 男,1972 年出生. 博士后,现在北京控制工程研究所博士后流动站工作. 主要研究领域为机器人控制技术和传感器技术.