

文章编号:1000-582X(2010)06-055-05

触觉传感阵列信号的信息融合处理

郭 兵^{1,2}, 秦 岚¹, 魏 彪¹

(1. 重庆大学 教育部光电技术及系统重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆广播电视大学, 重庆 400052)

摘 要:在智能机器人服装中,压力传感器阵列输出性能易受环境温度、电压扰动等非目标参量因素的影响,其间存在的交叉干扰常导致测量精度显著降低。针对上述问题,提出了一种新的用于测量分布压力的压电传感阵列及其信号处理的方法。设计了传感信号的处理流程;析取并有效地处理了置信距离矩阵和关系矩阵融合中的有用数据;提出了用概率最大值法和极大似然法对多传感器信息作有效融合处理的方法。实验结果表明,该方法可消除温度对压力传感器的影响,减小了单个传感器不确定性的误差影响,提高了压力分布测量数据的稳定性和测量精度,可显著改进压力图像重构精度。

关键词:压力传感阵列;信息融合;信号处理

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Information fusion for tactile sensor array signals

GUO Bing^{1,2}, QIN Lan¹, WEI Biao¹

(1. 1. Key Lab of Optoelectronic Technology & Systems Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Chongqing Radio & TV University, Chongqing 400052, P. R. China)

Abstract: In the intelligent robot suit, the output performance of piezoelectric sensor array is easy to be influenced by non-target factors, such as environment temperature, voltage fluctuation and so on, resulting in obvious measurement precision decrease due to the intercross interference among the sensors. Aiming at the above problem, a new tactile sensor array as well as signal processing method for distributed pressure measurement is presented. The processing flow of sensor signal is designed to extract and effectively process the useful data in the confidence distance matrix and relation matrix by means of mathematical statistics-based approach. The fusion processing technique with maximum probability method and maximum likelihood method for multi-sensor information is presented. The experimental result shows that the proposed method can eliminate the temperature impact on pressure sensor to reduce the error influence from uncertainty of single sensor and enhance the stability and measure precision for distributed pressure measurement data, which outstandingly improves the reconstruction precision of pressure image.

Key words: tactile sensor array; information fusion; signal processing

机器人触觉通过传感器获取位置、压力等的传感数据在空间上表现为二维平面信息,除空间数据、

压力分布数据外,借助触觉传感器还可以获取接触物的多种物理信息,以便于人机信息的交互。其研

收稿日期:2010-02-03

基金项目:教育部重点基金资助项目(重点 104159)

作者简介:郭兵(1974-),男,重庆大学博士研究生,副教授,主要从事传感器技术与信号处理研究。

秦岚(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65102335;(E-mail)qinlan@cqu.edu.cn。

究难点在于如何对众多的不确定性传感器数据进行有效处理^[1-4]。由于各传感器的特性参数互不相同,接受作用的状态和效果也不相同^[5-7],不仅要考虑对获得的数据进行补偿,更重要的是如何处理多传感器信息的融合问题^[8-11]。鉴于多传感系统信息的多样性和复杂性,在目前的机器人触觉传感服装研究中,其信息融合问题很少涉及。在国家“863 计划”支持下,国内仅对压阻式 16×16 触觉敏感阵列的触觉图像识别、三维触觉信息获取方法和热觉与力觉信息融合实现目标样本分类等作了研究,日本将视觉和触觉数据融合用于粗略参数精细处理作了研究。上述研究很少涉及触觉传感阵列信息融合问题,笔者提出一种触觉传感阵列信息融合处理的新方法。

1 压力传感阵列

压力触觉传感阵列是一种新型的触觉传感器阵列,可提供可靠和准确的触觉传感信息^[12-14]。根据其空间分辨率、敏感单元灵敏度、稳定性等要求的不同,可采用相应的传感原理和敏感材料制作,其中特别重要的就是对于大面积阵列式传感器,敏感材料应有良好的柔软性。采用导电橡胶作为敏感传感单元,其基底材料选用质轻体薄、软而牢固和耐磨耐高温的 FPC (flexible printed circuit) 材料,具有以下特点:1) 可自由弯曲、折叠、卷绕,可在三维空间随意移动及伸缩;2) 散热性能好,可利用 FPC 缩小体积;3) 实现轻量化、小型化、薄型化,可达到元件装置和导线连接一体化;4) 绝缘阻达到 $500 \text{ M}\Omega$,耐压 5 kV ,抗剥强度 1.2 hgf/cm ,弯曲寿命 $500\,000$ 次以上,柔性板厚度仅为 $12.5 \mu\text{m}$ 。如图 1 所示,柔性触觉传感阵列为 32×24 点阵,尺寸为 $10 \text{ cm} \times 8.7 \text{ cm}$,其中敏感阵列区为 $10 \text{ cm} \times 7.5 \text{ cm}$,盲区与传感区的占空比为 23%。若以人的指尖为触摸物,则受力传感器都在 10 个以上,因此该传感阵列的空间分辨率可以满足常规接触触摸物的接触形状复原,作用力分布及其大小测量的需要。

2 传感阵列信号处理模型

压力传感阵列数据处理模型的流程如图 2 所示。

- 1) 建立传感阵列数据库,包括传感器物理位置、获取数据时间、特性参数及恢复误差的补偿系数;
- 2) 数据获取:采集压力传感阵列所有传感器的数据,并将其送至计算机缓存器;
- 3) 对缓存数据作预处理。将每一个传感数据依次按时序作滤波和补偿处理,根据时序控制信号确定对应传感器的地址信息,构建出包括传感器的物

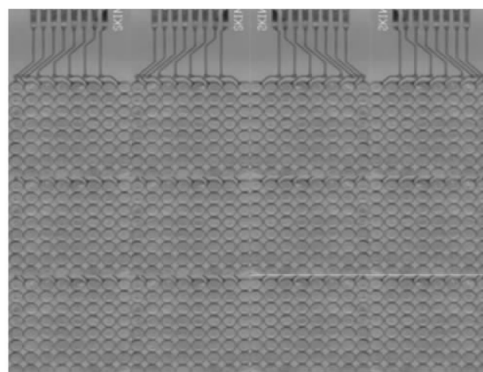


图 1 高密度压力传感阵列

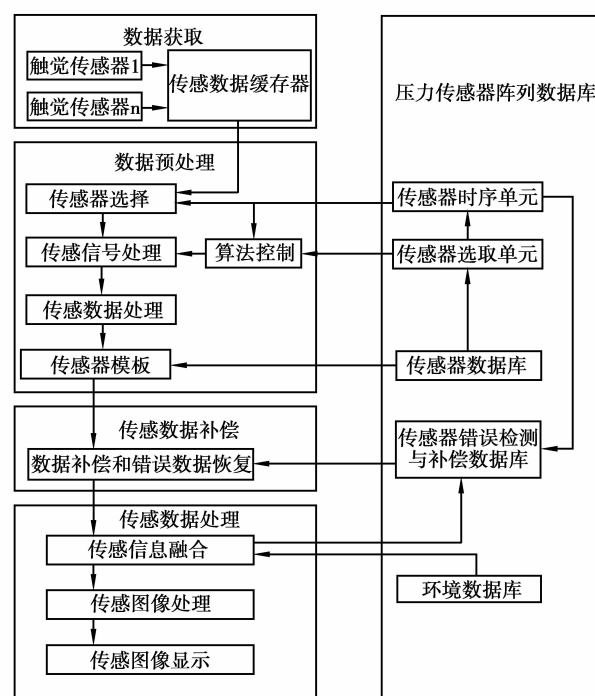


图 2 压力传感阵列数据处理流程

理地址、数据格式和传感器数量在内的传感器模板;

4) 传感数据补偿:对第 3) 步处理后的数据,结合传感阵列数据库中的特性参数和补偿系数作数据补偿和修正;

5) 传感信息融合:综合成内在数据单元,据地址关联性逐一融合所有数据,以便补偿和检错;

6) 将第 5) 步处理后的数据作二维和三维图像显示以得到接触物的外形轮廓和接触面压力分布。

3 信息融合处理方法

从图 2 可见,在传感阵列信号处理模型中,信息融合处理是技术关键,其目的在于合并恰当的传感数据以获得一个具有代表性的模板。如果传感数据具有不确定性或者相互之间有冲突,则说明在该传感器中有错误发生,因此必须构建一个所有的数据

都是确定且有序的新环境^[15-16]。如用来自不同传感器的数据表示同一个物体的属性,显然其结果很有可能会发生偏离。考虑如图 3 所示的 2 个概率分布 $P_i(x)$ 和 $P_j(x)$,如 $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$, x_i, x_j 分别代表第 i 个和第 j 个传感器的读数,定义条件概率分布函数 P_{ij}

$$P_{ij} = P(x_i/x_j), \quad (1)$$

同样,可以定义 P_{ji}

$$P_{ji} = P(x_j/x_i), \quad (2)$$

如图 3 所示, P_{ij} 比 P_{ji} 大,在概率分布 $P_i(x)$ 中, x_i 是第 i 个传感器的值。对应 x_i 时,条件概率函数值 $P_{ij} = 0.75$,意味着第 j 个传感器为准确读数的概率为 75%。相反,概率分布 $P_j(x)$, $P_{ji} = 0.3$,意味着第 i 个传感器有准确读数的概率为 30%。

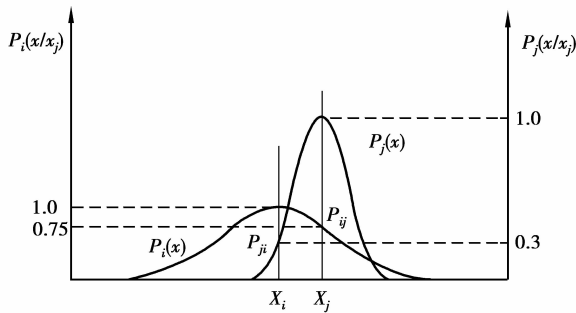


图 3 具有不同方差的 2 个概率分布函数

由图 3 可见:在函数 $P_i(x)$ 中, x_i 和 x_j 的值更加接近。同样的,在函数 $P_j(x)$ 中, x_i 和 x_j 的值就没那么接近了。因此图 3 展示了 2 个概率分布函数 $P_i(x)$ 和 $P_j(x)$ 的间距具有不同的值,其值的不同是由所选择的概率分布函数决定的。因为多传感器的数据含有大量的不确定性,可以把一些很接近的传感器数据融合在一起。基于上述分析,定义一种新的间距测度,用 d_{ij} 或者 d_{ji} 表示探测传感器的误差,称为可信间距度。

$$d_{ij} = 2 \left| \int_{x_i}^{x_j} P_i(x/x_i) P_i(x_i) dx \right| = 2A, \quad (3)$$

$$d_{ji} = 2 \left| \int_{x_j}^{x_i} P_j(x/x_j) P_j(x_j) dx \right| = 2B, \quad (4)$$

A 和 B 分别是在概率分布曲线 $P_i(x)$ 或 $P_j(x)$ 条件下传感器取值 x_i 和 x_j 之间所围的面积。一般说来, $d_{ij} \neq d_{ji}$ 。可信间距度不仅提供了与上述描述相同的抽象标度值,也提出了间距和“一致性”测度的关系。比如, $d_{ij} = 0.6$ 表示,如果传感器的值 x_i 是正确的,则传感器值 x_j 在概率分布函数 $P_i(x)$ 下也具有 60% 的置信区间。值得注意的是, x_i 和 x_j 之间的距离越大,置信度也越高。

高斯分布是最常用且最实用的概率分布函数,可用高斯分布作为传感器分布模型。

考虑在一维空间中高斯分布的实例,

$$P_i(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i}} e^{-\frac{1}{2(\sigma_i/x_m)^2}}, \quad (5)$$

其中: σ_i^2 是第 i 个传感器的方差; x_i 是在第 i 个传感器的测量值。

在多维空间中,

$$P_i(x) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |C_i|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2} |x-x_m|^T C_i^{-1} |x-x_m|}, \quad (6)$$

其中: n 是传感器数据的维度; C_i 是第 i 个传感器矩阵的协方差,是 n 维空间的 n 维矢量平均值。

假设用 m 个传感器对同一个目标进行测量,得到 $x_{11}, x_{21}, \dots, x_{m1}$, 其中 x_{ik} 表示第 i 个传感器对目标进行的第 k 次测量。如果第 i 个和第 j 个传感器对目标属性进行第 k 次测量,其一维条件概率分布函数为

$$P_{ijk} = P_i(x_{jk}/x_{ik}) e^{-(1/2)(x_{jk}-x_{ik}/\sigma_{ik}(s))^2}, \quad (7)$$

$$P_{jik} = P_j(x_{ik}/x_{jk}) e^{-(1/2)(x_{ik}-x_{jk}/\sigma_{jk}(s))^2}, \quad (8)$$

其中, $\sigma_{ik}(s)$ 表示第 i 个传感器对目标进行的第 k 次测量时的标准差。

其可信间距度可以用式 (9) 的误差公式计算

$$erf(\theta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\theta e^{-z^2} dz, \quad (9)$$

令 $z = \frac{x-x_i}{\sqrt{2}\sigma_i}, dz = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_i} dx,$

得到,

$$erf(\theta) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma_i} \int_{x_i}^{x_i+\sqrt{2}\theta\sigma_i} e^{-(1/2)(x-x_i/\sigma_i)^2} dx, \quad (10)$$

现在,从式(1)、(2)、(10)可计算出可信间距度,如式(11)、(12)所示。当 $x_{jk} > x_{ik}$ 时,

$$\begin{aligned} d_{ijk} &= 2 \int_{x_i}^{x_j} P_i(x/x_i) P_i(x_i) dx = \\ &= 2 P_i(x_i) \int_{x_i}^{x_j} P_i(x/x_i) dx = \\ &= erf\left(\frac{x_{jk}-x_{ik}}{\sqrt{2}\sigma_{ik}(s)}\right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} d_{jik} &= 2 \int_{x_i}^{x_j} P_j(x/x_j) P_j(x_j) dx = \\ &= 2 P_j(x_j) \int_{x_i}^{x_j} P_j(x/x_j) dx = \\ &= erf\left(\frac{x_{jk}-x_{ik}}{\sqrt{2}\sigma_{jk}(s)}\right), \end{aligned} \quad (12)$$

设有 m 个对目标属性进行测量的传感器,其可信间距度可以矩阵形式表示,为了简化矩阵,在以下分析中,忽略目标属性指数 k 。

$$\mathbf{D}_k = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots \\ d_{21} & d_{22} & \dots \\ \cdot & \cdot & \dots \\ \cdot & \cdot & \dots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots \end{bmatrix}, \quad (13)$$

通过间距矩阵 \mathbf{D} 表示传感器间的相关关系,赋予 \mathbf{D} 矩阵经验临界值可定义相关矩阵 \mathbf{R}_k ,

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots \\ r_{21} & r_{22} & \dots \\ \cdot & \cdot & \dots \\ \cdot & \cdot & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中, r_{ij} 是 d_{ij} 的初始值,

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq \text{临界值} \\ 0, & d_{ij} > \text{临界值} \end{cases}$$

借助有向图可表示关系矩阵 \mathbf{R} 。首先,所有的传感器均用结点表示,如果 $r_{ij} = 1$,则用一条有方向的箭头(从结点 i 指向结点 j)将 2 个结点连接起来。完整的图形使所有被使用的传感器之间的关系一目了然,每一个传感器 i 都有它自己的输出矢量 \mathbf{x}_i 。按照有向图形表示法,至少有 l 个传感器子集能相互支撑它们之间的信息,以确定目标属性的最佳估计和融合传感数据。注意,传感器最佳综合数据的大值融合数据的协方差矩阵的值越大,测度的可信程度就越低。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0.000 & 0 & 0.045 & 1 & 0.123 & 6 & 0.995 & 6 & 0.305 & 3 & 0.134 & 8 & 0.904 & 1 & 0.384 & 4 \\ 0.052 & 1 & 0.000 & 0 & 0.193 & 5 & 0.998 & 7 & 0.301 & 9 & 0.103 & 9 & 0.953 & 2 & 0.393 & 0 \\ 0.110 & 7 & 0.150 & 5 & 0.000 & 0 & 0.992 & 8 & 0.376 & 0 & 0.228 & 9 & 0.823 & 1 & 0.443 & 6 \\ 0.907 & 2 & 0.900 & 5 & 0.923 & 7 & 0.000 & 0 & 0.852 & 7 & 0.886 & 0 & 0.992 & 2 & 0.833 & 8 \\ 0.225 & 6 & 0.193 & 8 & 0.311 & 0 & 0.927 & 3 & 0.000 & 0 & 0.129 & 2 & 0.867 & 1 & 0.063 & 8 \\ 0.127 & 1 & 0.084 & 9 & 0.124 & 0 & 0.988 & 5 & 0.166 & 3 & 0.000 & 0 & 0.916 & 4 & 0.246 & 0 \\ 0.653 & 8 & 0.669 & 9 & 0.609 & 6 & 0.989 & 4 & 0.875 & 5 & 0.700 & 7 & 0.000 & 0 & 0.779 & 8 \\ 0.318 & 1 & 0.283 & 9 & 0.408 & 7 & 0.944 & 7 & 0.071 & 3 & 0.213 & 9 & 0.923 & 2 & 0.000 & 0 \end{bmatrix}。$$

选取临界值为 0.500 对间距矩阵进行判别得到相关矩阵式(14)为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

通过判别最大的相关组有 6 个单元(分别是序号为 1,2,3,5,6,8)也就是最佳融合组数为 6。最后用总概率最大法计算出被测电压的最优融合数据为 3.151 05 V。采用融合算法将测试得到的压力传感器的输出电压与采集电路结合得到对应的压力传

4 实验与数据分析

在实验室建立了一个实验系统以验证上述压力传感阵列数据融合处理系统的可用性。实验设备由 3 个部分组成:压力传感阵列、信号处理电路和计算机数据处理系统。实验采用上述所提出方法,借助概率分布函数作为传感器的特性方程,并应用间距矩阵和相关矩阵来作为探测传感器阵列中传感单元之间的相关性,以及运用最佳数据融合方法得到融合数值的正确性。在传感阵列中使用同一施力装置用 120 N 的外力作用在相同行的 8 个传感单元的情况下,用 LabVIEW 对单个传感器的多次测量,测得 8 个传感单元的输出电压(单位为伏特)如表 1 所示。

表 1 压力传感单元的测量数据

传感器序号	1	2	3	4	5	6	7	8
测量值/V	3.136	3.152	3.092	3.942	3.247	3.184	2.665	3.278
方差 σ^2	0.08	0.06	0.10	0.23	0.15	0.09	0.25	0.12

用式(11)、(12)找出任意 2 个压力传感器之间的可信间距离,并得到间距矩阵式(13)的结果为

感单元的输出电压为 16.67 k Ω 。

采用该方法对传感阵列的传感器进行了标定实验。通过测量传感单元的输出电压并与施力装置对应,得到压力传感单元的压力与阻值关系,实验结果如表 2 所示。

表 2 导电橡胶传感器压阻关系实验数据

压力/N	电阻/k Ω	压力/N	电阻/k Ω
1	275.71	60	24.97
2	171.82	70	23.90
3	139.25	80	22.79
4	123.33	90	21.75
5	99.89	100	20.77
6	90.00	110	17.78
7	80.91	120	16.67

续表

8	73.33	130	15.32
10	61.43	150	14.10
12	52.50	160	13.26
15	47.14	180	11.98
17	44.05	200	10.41
18	42.63	230	9.61
20	40.00	250	8.52
25	37.62	280	7.86
30	35.45	300	7.09
35	33.48	350	6.13
40	31.67	400	4.29
45	29.22	450	3.51
50	27.74	500	2.99

5 结 论

上述针对压力传感阵列的多传感信号处理,提出了一种压力传感阵列的信号融合处理方法。首先将阵列触觉传感数据作智能综合,可避免单一触觉组单元的不确定性误差影响和传感器故障产生的错误信息,有效保证了融合处理结果的精确性和可靠性,与单一传感器信息相比,可获得更精确、更完全、更可靠的估计和判断。其次,该方法具有鲁棒性强,可提高压力传感阵列的空间分解力和清晰度、触觉图像测图精度、分类精度与可靠性,增强解译和动态监测能力,减少模糊度,有效提高触觉数据的利用率等。最后,该方法可克服环境温度、电压扰动等各种外界环境的影响,提高了接触物体表面轮廓数据测量和图像重构的精度,使压力传感阵列系统具有良好的稳定性、容错性和可靠性。

参考文献:

- [1] 罗志增,王人成. 仿生假手触滑觉研究[J]. 传感技术学报, 2003, 16(3): 233-237.
LUO ZHI-ZENG, WANG REN-CHENG. Study of tactile sensor in bionical artificial hand[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2003, 16(3): 233-237.
- [2] LEE M H, NICHOLLS H R. Tactile sensing for mechatronics: A state of the art survey[J]. Mechatron, 1999, 9(1): 1-31.
- [3] PAN Z X, CUI H L, ZHU Z Q. A flexible full-body tactile sensor of low cost and minimal connections[C]// IEEE International Conference on, Systems, Man & Cybernetics, Oct. 5-8, 2003, Washington D C, USA, [S. l]: IEEE, 2003: 2368-2373.
- [4] LUMELSKY V J, SHUR M S, WAGNER S. Sensitive skin[J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(1): 41-51.
- [5] HEEVE D, SCHREVE K, SCHEFFER C. Tactile sensing using force sensing resistors and a super-resolution algorithm[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(1): 29-35.
- [6] ABABOU A, ABABOU N, CHADLI S, et al. Accuracy improvement of large area flexible piezoresistive digital tactile array sensing system[C]. IEEE sensors 2008 conference, October 26-29, 2008, Lecce, Italy. Lecce, Italy, IEEE, 2008: 1048-1051.
- [7] PRITCHARD E, MAHFOUZ M, EVANS III B, et al. Flexible capacitive sensors for high resolution pressure measurement [C]// IEEE sensors 2008 conference, October 26-29, 2008, Lecce, Italy. Lecce, Italy, IEEE, 2008: 1484-1487.
- [8] HUANG Y, MING X H, XIANG B, et al. Two types of flexible tactile sensor arrays of robot for three-dimension force based on piezoresistive effects[C]// Proceedings of the 2008 IEEE international conference on robotics and biomimetics, February 21-26, 2008 Bangkok, Thailand. Bangkok, Thailand, IEEE, 2008: 1032-1037.
- [9] CHUANG C H, DONG W B, LO W B. Flexible piezoelectric tactile sensor with structural electrodes array for shape recognition system [C]// The 3rd international conference on sensing technology, Nov. 30-Dec. 3, 2008, Tainan, Taiwan. Tainan, Taiwan, IEEE, 2008: 504-507.
- [10] MURAYAMA Y, HARULA M, HATAKEYAMA Y. Development of a new instrument for examination of stiffness in the breast using haptic sensor technology [J]. Sensors and Actuators A, 2008, 143(2): 430-438.
- [11] DAHIYA R S, METTA G, VALLE M. Development of fingertip tactile sensing chips for humanoid robots [C]// Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics, April 14-17, 2009, Malaga, Spain. Malaga, Spain; IEEE, 2009: 1-6.
- [12] CHENG W Y, FANG T H, LIN H J, et al. A large area flexible array sensors using screen printing technology[J]. Journal of Display Technology, 2009, 5(6): 178-183.
- [13] YANG Y J, CHENG M Y, CHENG W Y, et al. An integrated flexible temperature and tactile sensing array using PI-copper films[J]. Sensors and Actuators A, 2008, 143(1): 143-153.
- [14] PARK C S, PARK J S, LEE D W. A piezoresistive tactile sensor based on carbon fibers and polymer substrates [J]. Microelectronic Engineering, 2009, 86(4): 1250-1253.
- [15] LUO R C, LIN M H, SCHERP S. Dynamic multi-sensor data fusion system for intelligent robots[J]. Journal of Robot and Automation, 1988, 4(4): 386-396.
- [16] BERGER A D, KHOSLA P K. Using tactile data for real-time feedback [J]. International. Journal of Robotics Research, 1991, 10(8): 88-102.

(编辑 陈移峰)