

文章编号: 1001-0920(2001)03-365-03

# 指端电触觉再现的传函矩阵及解耦研究

帅立国, 况迎辉, 宋爱国, 黄惟一  
(东南大学 仪器科学与工程系, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 针对电触觉再现中的解耦问题, 提出采用噪声预置解除耦合的有效方法。通过研究电触觉再现的传递函数矩阵, 从中分离出噪声预置矩阵, 然后通过实验方法求解噪声预置矩阵。两点模式下的实验表明, 采用噪声预置可以较好地改善电触觉再现的效果。

**关键词:** 触觉再现; 传函矩阵; 解耦

中图分类号: TP 24 文献标识码: A

## On Transfer Function Matrix of Electrotactile Reproduction and Decoupling

SHUAI Li-guo, KUANG Ying-hui, SONG Ai-guo, HUANG Wei-yi

(Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Initial noise matrix is put forward as an effective method of decoupling in electrotactile reproduction. The initial noise matrix is drawn by founding and analyzing the transfer function matrix. It is acquired through experimentation. Experiments on two-point pattern show the effectiveness in improving the performance of electrotactile reproduction.

**Key words:** electrotactile reproduction; transfer function matrix; decoupling

## 1 引 言

由于触觉再现在机器人触觉临场感技术应用中的重要性, 许多高校和研究机构都在致力于该领域的研究工作。如文献[1]利用触觉再现阵列研究了线、圆、矩形、三角形等基本形状的再现问题, 并分析了电极尺寸、电极间距和波形等参数对触觉再现的影响。在我国, 触觉临场感技术也正日益受到重视, 国家 863 计划、航空领域 863 计划先后将其列为关键技术。

在指端电触觉再现中, 由于人体指端皮肤电特

性的不同, 环境条件的差异, 导线间分布电容的影响, 以及不同电触点间阻抗的存在, 操作者往往能感受到触觉信息的存在, 却难以区分出究竟是哪一点被激发, 这成为机器人触觉临场感技术应用中的一个重要难题<sup>[2]</sup>。因此, 为提高电触觉再现的效果, 有必要对指端触觉再现系统进行研究, 深入分析系统的传函矩阵, 并找出解决问题的一般方法。

## 2 指端电触觉再现的传递函数矩阵

指端电触觉再现的输入输出间存在着情况不

收稿日期: 2000-02-28; 修回日期: 2000-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(69875004)

作者简介: 帅立国(1968—), 男, 江苏江都人, 博士生, 从事机器人临场感技术、传感及控制技术的研究; 黄惟一(1933—), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 从事机器人临场感技术等研究。



图1 简化的指端电触觉再现系统

同的相互联系,是一个多输入多输出的系统,其简化系统框图如图1所示。为了深入研究系统的传函矩阵,首先给出关于指端电触觉再现的两种不同形式的传函矩阵:

1) 在理想状况、没有任何噪声干扰的情况下,输入与输出呈现一一对应的关系,即若

$$Y_1 = g_{11}(X_1) \mid X_2 = X_3 = \dots = X_n = 0$$

$$Y_2 = g_{22}(X_2) \mid X_1 = X_3 = \dots = X_n = 0$$

⋮

$$Y_n = g_{nn}(X_n) \mid X_1 = X_2 = \dots = X_{n-1} = 0$$

则

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & & & \\ & g_{22} & & \\ & & \ddots & \\ & & & g_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}$$

其中  $Y_i = g_i(X_i) \mid X_1 = X_2 = \dots = X_{i-1} = X_{i+1} = \dots = X_n = 0$ 。这时传函矩阵为

$$G_1 = \begin{bmatrix} g_{11} & & & \\ & g_{22} & & \\ & & \ddots & \\ & & & g_{nn} \end{bmatrix}$$

2) 在实际情况中,考虑各种噪声及干扰的影响,同理可求得相应的传函矩阵为

$$G_2 = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nn} \end{bmatrix}$$

当  $G_2$  中加入约束条件时,便可简化为  $G_1$  那样的简单形式,使输入输出间呈现出——对应的关系,从而实现触觉再现的有效解耦。

### 3 指端电触觉再现传函矩阵分析及解耦算法

在实际电触觉再现中,当在某些电触点上施加电激励信号时,其它电触点上也会产生一定强度的耦合激励信号,反映在  $G_2$  中除主对角元外,各非对角元的参数不全为零,因此指端触觉再现的传递函

数是一个  $G_2$  形的矩阵。对于一个  $N_1 \times N_2$  的阵列,其输入输出变量均为  $N_1 \times N_2$  个,这时传函矩阵为

$$G = \begin{bmatrix} f_{1111} & f_{1112} & \dots & f_{11N_1N_2} \\ f_{1211} & f_{1212} & \dots & f_{12N_1N_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{N_1N_211} & f_{N_1N_212} & \dots & f_{N_1N_2N_1N_2} \end{bmatrix}_{N_1N_2 \times N_1N_2} = \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{12} \\ \vdots \\ G_{N_1N_2} \end{bmatrix}$$

要达到满意的电触觉再现效果,在实施电触觉再现时,只有施加了电刺激信号的点才能产生触觉输出,而凡未施加电刺激信号的电触点均不会有触觉输出,即实现——对应的关系。反映在传函矩阵上,要求所有非对角线上的元素均应变为零元,即有

$$\begin{bmatrix} Y_{11} \\ Y_{12} \\ \vdots \\ Y_{N_1N_2} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} f_{1111} & & & \\ & f_{1212} & & \\ & & \ddots & \\ & & & f_{N_1N_2N_1N_2} \end{bmatrix}_{N_1N_2 \times N_1N_2} \begin{bmatrix} X_{11} \\ X_{12} \\ \vdots \\ X_{N_1N_2} \end{bmatrix} =$$

$$J^* \begin{bmatrix} X_{11} \\ X_{12} \\ \vdots \\ X_{N_1N_2} \end{bmatrix}$$

这时传函矩阵为对角阵  $J$ , 期望的触觉实际输出为  $[Y_{11} \ Y_{12} \ \dots \ Y_{N_1N_2}]^T$ 。在实现上

$$\begin{bmatrix} Y_{11} \\ Y_{12} \\ \vdots \\ Y_{N_1N_2} \end{bmatrix} =$$

$$\left\{ \begin{bmatrix} f_{1111} & f_{1112} & \dots & f_{11N_1N_2} \\ f_{1211} & f_{1212} & \dots & f_{12N_1N_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{N_1N_211} & f_{N_1N_212} & \dots & f_{N_1N_2N_1N_2} \end{bmatrix}_{N_1N_2 \times N_1N_2} \right. +$$

$$\left. \begin{bmatrix} & -f_{1112} & \dots & -f_{11N_1N_2} \\ -f_{1211} & & \dots & -f_{12N_1N_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -f_{N_1N_211} & -f_{N_1N_212} & \dots & \end{bmatrix}_{N_1N_2 \times N_1N_2} \right\} \begin{bmatrix} X_{11} \\ X_{12} \\ \vdots \\ X_{N_1N_2} \end{bmatrix} =$$

$$G^* \begin{bmatrix} X_{11} \\ X_{12} \\ \vdots \\ X_{N_1N_2} \end{bmatrix} + (J - G)^* \begin{bmatrix} X_{11} \\ X_{12} \\ \vdots \\ X_{N_1N_2} \end{bmatrix}$$

其中,采用噪声预置矩阵  $(J - G)$ , 能实现电触觉再

现的有效解耦。其求解可通过实验方法获取。具体做法是尝试选通某些电触点并测取这些点上的电压值,同时将其余电触点上的耦合电压也一并测得;将各点上耦合电压除以刺激电压得到的比值与当前刺激电流值相乘,便得到一个与耦合相关的电流参数;经进一步换算并反相后,即可得到该模式下的噪声预置矩阵。选遍所有不同的模式,可获得全部的噪声预置矩阵。没有任何电触觉输出的情况可不予考虑,故共有  $2^n - 1$  个不同的噪声预置矩阵。

## 4 实验与分析

为了验证解耦算法的正确性,设计一个  $3 \times 2$  的电触觉再现阵列。该触觉再现装置有 6 种模式,故共有  $2^6 - 1 = 63$  个噪声预置矩阵。现以两个电触点模式下的情形进行实验,以测试噪声预置下指端电触觉再现的效果。选择 21 点和 31 点作为触觉信号刺激点,选定刺激电流  $i$ ,这时测得 21 点上的电压值为  $V_{21}$ ,31 点上的电压值为  $V_{31}$ ,其它各点的噪声信号分别为  $V_{ij}$ 。经进一步换算后得到的噪声预置矩阵为

$$(J - G)_{21} = (J - G)_{31} =$$

$$K_{\alpha} K_T K_H K_R \times$$

$$[-\Delta i_{11} \quad -\Delta i_{12} \quad 0 \quad -\Delta i_{22} \quad 0 \quad -\Delta i_{32}]$$

其中,  $K_T$  为与温度相关的系数,  $K_H$  为与湿度相关的系数,  $K_R$  为与皮肤特性相关的系数,  $K_{\alpha}$  为由其它因素决定的系数。则有

$$Y_{21} = [G_{21} + (J - G)_{21}]^*$$

$$[X_{11} \quad X_{12} \quad X_{21} \quad X_{22} \quad X_{31} \quad X_{32}]^T$$

$$Y_{31} = [G_{31} + (J - G)_{31}]^*$$

$$[X_{11} \quad X_{12} \quad X_{21} \quad X_{22} \quad X_{31} \quad X_{32}]^T$$

需要注意的是,噪声预置电流也会在电刺激点

上产生耦合。由于该信号在相位上与刺激信号相反,因此会反过来影响电触点上的刺激电流并使电流值有所减小,情况严重时,有可能导致触觉再现失败。因此,应在刺激点上对刺激电流予以适当补偿,补偿值按下式确定。

$$\Delta_{21} = \Delta_{31} = k(\Delta i_{11} + \Delta i_{12} + \Delta i_{22} + \Delta i_{32})/4$$

其中  $k$  在 0.1 ~ 0.3 之间选取。实际的预置矩阵为

$$(J - G)_{21} = (J - G)_{31} =$$

$$K_{\alpha} K_T K_H K_R \times$$

$$[-\Delta i_{11} \quad -\Delta i_{12} \quad \Delta i_{21} \quad -\Delta i_{22} \quad \Delta i_{31} \quad -\Delta i_{32}]$$

考虑噪声预置矩阵,将各点预置电流随同触觉刺激电流一并加到触觉阵列上,分别让不同的受试者判断被激触点的位置。实验表明,采用噪声预置后,受试者对触觉再现的感知能力大为改善。同理,其它模式下的噪声预置矩阵也可按上述方法分别予以求解。当所有预置矩阵均求得后,即可借助于计算机较好地实现任意模式下的电触觉再现。

## 5 结 语

本文阐述了采用噪声预置矩阵消除耦合干扰的方法,并通过相关实验对此进行验证。在机器人触觉临场感技术中,采用噪声预置来提高电触觉再现的效果是一种行之有效的方法,值得在理论及应用技术上对其进一步研究和完善。

### 参考文献:

- [1] Tang Hui, David J Beebe. Microfabricated electrostatic haptic display for persons with visual impairments[J]. IEEE Trans on Rehabil Eng, 1998, 6(3):241-248.
- [2] 胡文松. 力觉临场感时延稳定性研究及触觉再现装置的研制[D]. 南京:东南大学, 1999. 3-5.