

# 基于多线谱驱动的虚拟人手运动及约束控制

信琴琴<sup>1</sup> 陈志翔<sup>1</sup> 冯晓霞<sup>2</sup> 朱月秀<sup>1</sup>

(闽南师范大学福建省高校粒计算重点实验室 漳州 363000)<sup>1</sup>

(闽南师范大学数学与统计学院 漳州 363000)<sup>2</sup>

**摘 要** 针对现有手部运动模拟控制的复杂性,通过分析人手解剖学结构及运动特性,提出了基于多线谱控制的虚拟人手运动及控制机制。针对单指运动,通过控制该指上的多条肌肉归一化收缩量,驱使单指关节的灵活运动;在多指协同运动中,由于相邻手指之间存在运动促进和制约的关系,因此要考虑其他手指的影响,根据其约束关系,控制相应的肌肉收缩,实现多指协同运动。实验表明,所建立的控制机制能较好地仿真单指及多指间的各种运动,在多线谱的控制下,能够方便快捷地仿真多种手势及手语,且运动效果逼真,手部运动自然灵活。

**关键词** 虚拟建模,手部模型,肌肉控制,多线谱,运动约束

中图法分类号 TP391.9

文献标识码 A

## Movement Drive and Control Constraints of Virtual Hand Based on Multi-curve Spectrum

XIN Qin-qin<sup>1</sup> CHEN Zhi-xiang<sup>1</sup> FENG Xiao-xia<sup>2</sup> ZHU Yue-xiu<sup>1</sup>

(University Key Lab for Granular Computing of Fujian, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China)<sup>1</sup>

(School of Mathematics and Statistics, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In view of the complexity of existing motion simulation control of the hand, through the analysis of structure and movement characteristics of human anatomy, the movement and control mechanism of virtual hand was proposed which is based on multi-curve spectrum. For the movement of single finger, flexible movement of single knuckle can be driven by controlling the normalization contraction of muscle. However, in the cooperative movement of fingers, because the movement promotion and restriction relationship between adjacent finger exists, the effect of other fingers should be considered. According to the constraint relate, the coordinated movement can be realized by controlling the corresponding muscle contraction. Experiments show that the established control mechanism can well simulate not only the movement of single finger but also coordinated movement of fingers. Under the control of multi-curve spectrum, it is convenient and quick to simulate a variety of gestures and sign language. Besides, the movements are vivid, and the hand movements are natural and flexible.

**Keywords** Virtual modeling, Hand modeling, Muscle control, Multi-curve spectrum, Motion constraints

## 1 引言

虚拟人物的设计是当今的研究热点,其中最关键的就是虚拟人物真实性及自然性的设计。虚拟人物模型越接近于真实的人体运动特征,则产生的效果就越逼真。手部是人体的重要组成部分之一,在仿真人物的真实性方面起着重要作用,因此,在虚拟人物设计中建立手部模型及其控制机制具有重要意义。

到目前为止,关于手部建模及手语合成的控制技术都在不断发展。例如,李锋等人提出了人手部骨组织建模的 B 样条拟合方法,其采用几何变化对冷冻切片图像序列进行配准,再对图像进行分割处理,使用 B 样条将特征点拟合成封闭曲

面,所建立的手骨较为逼真,然而曲线逼近技术有待进一步提高<sup>[1]</sup>。N. Shimada 和 J. Davis 等采用了参数较少的几何元素(诸如一般柱面和二次曲面等)来构造手部模型,通过控制这些几何元素模拟手部运动,使得模型中控制参数和控制点大大减少,计算复杂度降低,但其仿真结果的真实性受到较大的影响<sup>[2,3]</sup>。饶敏等人的层次模型首先建立手部骨架,而后建立肌肉模型和皮肤模型,通过控制骨架的运动,使手部肌肉运动,进而达到控制手部运动的目的,这种模型也降低了计算复杂度,然而由于手部纹理的缺失,该模型控制下形成的仿真效果的真实性受到较大影响<sup>[4]</sup>。侯文生等人的虚拟人手可视化模型采用图像处理技术和可视化工具,为我们展示了一个十分逼真的手部,遗憾的是,这种基于图像的方法由于不存在运

到稿日期:2013-04-26 返修日期:2013-06-23 本文受国家自然科学基金(61170128),福建省自然科学基金(2012J05128),福建省教育厅资助科技项目(JA11169),闽南师范大学研究生课题项目(1300-1314)资助。

信琴琴(1989—),女,硕士生,主要研究领域为计算机视觉、图论及其应用;陈志翔(1982—),男,博士,讲师,主要研究领域为计算机视觉、虚拟现实建模;冯晓霞(1969—),女,博士,教授,主要研究领域为小波分析、矩阵理论及其应用;朱月秀(1978—),女,讲师,主要研究领域为计算机视觉、模式识别。

动范围的约束,使得其仿真出的手部运动无法与真实生理运动相一致,影响了模型的真实感<sup>[5]</sup>。Cem Keskin 及 Furkan Kirac 等人基于深度传感器的手势模拟控制中,将 3D 手部模型分成 21 个不同的区域,采用文献<sup>[6,7]</sup>的方法,合成手部图像,标记 21 个部分,这样便可获得手部的骨架,进而进行手势模拟的控制。该模型控制下的手势逼真,然而由于模型中将手部分成了 21 个区域,其计算复杂度较大,且模型中要用到深度传感器,信息的采集也比较繁琐,影响了实用性<sup>[8]</sup>。针对手部运动学,许多学者也分别进行了各种研究,并取得了一些成绩。邵宏伟等人研究并分析了冷刺激下食指运动学及动力学特性<sup>[9]</sup>;于洪等人分析了基于杆组法的假手食指运动学和静力学,重点介绍了运动学和静力学分析的数学模型<sup>[10]</sup>;Frank P. J. van der Hulst 等人提出了基于机能解剖学的运动人手控制模型,根据人体比例,该模型可以适应不同大小的人手,仅需输入参数手部的长度,便可模拟手指长度,并且给出其运动的最终位置<sup>[11]</sup>。然而这些模型均没有给出仿真结果,且模型的控制机制较为复杂,所需参数量大。

根据手部生理结构及运动特征<sup>[12]</sup>,本文采用多线谱控制技术并实现符合真实运动范围的单指运动及多指协同运动。多线谱由于具有操作简单、控制灵活等性质,能够在时空两个角度同时描述单指运动及多指协同运动,因此减小了控制模型的复杂度,实现了单指运动及多指协同运动灵活控制的目的,且由于时间的显现,使得手部仿真的动态性进一步得到提高,为其应用于手势识别奠定了一定的基础。该控制技术能够广泛应用于手语的合成、机器人手的精确抓取、手部残疾者的康复训练、临床医学中假肢的设计、矫形手术的训练等领域。

## 2 手部的解剖结构

根据解剖学知识<sup>[12]</sup>,人手是一个多关节的复杂结构,它由 27 块骨骼组成,分为腕骨、掌骨和指骨。腕骨共 8 块,排列成近远两列,构成一掌面凹陷的腕骨沟,由关节巧妙地连接着,并且在手的运动过程中只有微小的形状变化,因此在手模型中将其忽略;掌骨共 5 块,由桡骨向尺骨依次为 1~5 掌骨,近端为底,接腕骨,远端为头,接指骨,中间部分为体,第一掌骨最短而且粗;指骨属长骨,共 14 块,除拇指仅有 2 节指骨外,其余各指都有 3 节指骨,分别为近指骨、中指骨和远指骨,它们由关节互相连接着。其解剖结构如图 1 所示。当手部肌肉扩张和收缩时,各关节也随之不断地发生着变化,各块骨骼也在进行相应的运动,即人手产生运动。故仅需控制相应肌肉收缩,便可实现手部的各种运动控制。

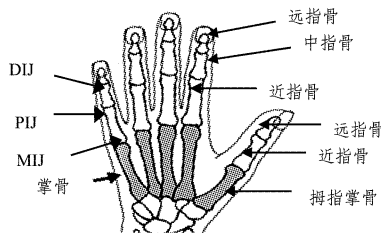


图 1 手部解剖示意图

由于拇指较其他四指不同,本文仅对四指进行研究。四指中,以食指为例, $M$ 、 $P$ 、 $D$  分别为食指中轴上的指掌关节、近指关节和远指关节, $L_m$ 、 $L_p$  和  $L_d$  分别为控制食指的 3 段肌肉,各段肌肉在指骨上的附着点分别为  $o$ 、 $m$ 、 $p$  和  $d$ 。人手具有不同的长度,个体间存在一定的差异,但从解剖学角度,大部分手指的各段骨骼长度之间存在  $MP : PD : DC = 5 : 3 : 2$  的近似

比例<sup>[4]</sup>,同时图 2 中还存在  $Mm : mP = 3 : 1$ ,  $Pp : pD = 1 : 1$ ,  $Dd : dC = 1 : 3$  的近似比例关系<sup>[13,14]</sup>。

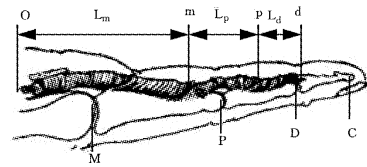


图 2 食指解剖示意图

## 3 虚拟手的多线谱驱动及描述

### 3.1 手指运动的约束性

在以往的研究中,人的手指,若想活动末关节,则必然要受到相邻关节的影响,否则手指活动不自然。在不考虑对任一手指施加外力时,每个手指的运动角度范围满足以下不等式关系<sup>[15]</sup>:

$$0^\circ \leq \theta_m \leq 90^\circ, 0^\circ \leq \theta_p \leq 110^\circ, 0^\circ \leq \theta_d \leq 90^\circ \quad (1)$$

式中, $\theta_m$ 、 $\theta_p$ 、 $\theta_d$  分别表示指掌关节、近指关节、远指关节的弯曲角度。一般地,为了使远指关节弯曲到一定的角度  $\theta_d$ ,近指关节必须也随着弯曲一定的角度  $\theta_p$ ,且这两个角度之间存在如下的线性关系<sup>[16]</sup>:

$$\theta_d = 2/3\theta_p \quad (2)$$

而事实上,由于未考虑到指间的相互约束,故得到的单指运动范围即式(1)尚不够合理。本文的前期工作发现,单指仅在一定范围内具有自由独立的弯曲能力,超出这个范围,其运动弯曲角度会受到相邻手指的制约,即多指运动间存在一定的促进与制约关系。由此提出与式(1)不同的手指运动角度范围,单指自由运动范围存在静态极大值  $S_{max}$  和静态极小值  $S_{min}$ ,相邻双指同时运动时,由于邻指对单指运动存在约束作用,单指运动范围存在动态极大值  $D_{max}$  和动态极小值  $D_{min}$ ,并且研究指间约束关系。以食指和中指的协同运动为例,通过实验,我们获得图 3 所示的关系约束图,横轴和纵轴分别表示中指和食指指掌关节的自由运动角度, $\theta_m^M$  为自变量, $D^I$  为因变量,存在  $D_{max}^I = f(\theta_m^M)$  和  $D_{min}^I = g(\theta_m^M)$  的函数关系(图中的上下两条曲线),其中上标  $M$ 、 $I$  分别表示中指和食指。可以看出,在 I 象限,随着中指指掌关节  $\theta_m^M$  的增加,即中指指掌关节向内弯曲,食指所能弯曲的最大角度可以从  $S_{max}^I$  逐渐增加;而 II 象限表示随着中指指掌关节向外弯曲,食指所能弯曲的  $S_{max}^I$  反而减小,因而,将 I、III 象限称为促进区,II、IV 象限为抑制区。除拇指外其他四指的运动相似,在此,我们仅给出食指与中指的运动约束图,其他类似,在此不做赘述。

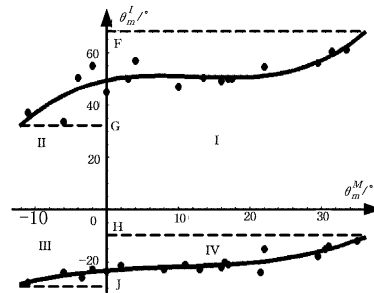


图 3 食指和中指的约束关系图

### 3.2 单指运动多线谱驱动方法

除大拇指外,其余各指都有 3 个关节,同一根手指的不同关节是相关的,则不同关节间存在内在的相互约束关系。而关节的运动要靠与它们相连的肌肉来控制,因此,只要控制相

应肌肉的收缩量,与此肌肉相连的关节便会随之运动,相应的手指即发生屈伸。

以食指为例,由本文的前期工作可知,当食指的3条肌肉 $L_m$ 、 $L_p$ 和 $L_d$ 分别收缩 $\Delta L_m$ 、 $\Delta L_p$ 、 $\Delta L_d$ 时,食指将产生不同程度的弯曲,其弯曲角度可表示为:

$$\begin{cases} \theta_m = \arccos(4L_1^2/3sL - 2329/2160) \\ \theta_p = \arccos(80L_2^2/3L^2 - 61/60) \\ \theta_d = \arccos(200L_3^2/3L^2 - 5/3) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $L_1=L_m-\Delta L_m$ , $L_2=L_p-\Delta L_p$ , $L_3=L_d-\Delta L_d$ ,分别为收缩后3条肌肉的长度, $s$ 表示掌韧带到食指掌关节的距离。由式(3)可知,只要知道 $\Delta L_m$ 、 $\Delta L_p$ 、 $\Delta L_d$ ,就能求出各关节的弯曲角度,进而仿真出食指的运动。这样计算复杂度将会大大降低,且模型控制的复杂度也将极大地减小。考虑到人手的差异,将上述变化量归一化,通过建立归一化的模型控制人手的运动。食指肌肉主要包括3段肌肉 $L_m$ 、 $L_p$ 和 $L_d$ ,当食指运动时,3段肌肉的收缩量分别为 $\Delta L_m$ 、 $\Delta L_p$ 、 $\Delta L_d$ ,则将其归一化,得:

$$\Delta L_{um} = \frac{\Delta L_m}{\Delta L_{mmax}}, \Delta L_{up} = \frac{\Delta L_p}{\Delta L_{pmax}}, \Delta L_{ud} = \frac{\Delta L_d}{\Delta L_{dmax}} \quad (4)$$

式中, $\Delta L_{um}$ 、 $\Delta L_{up}$ 、 $\Delta L_{ud}$ 分别表示归一化后的收缩量, $\Delta L_{mmax}$ 、 $\Delta L_{pmax}$ 、 $\Delta L_{dmax}$ 分别表示3段肌肉的最大收缩量,下标 $u$ 表示经过归一化处理后的收缩量。

由式(3)和式(4),可得 $\Delta L_{um}$ 、 $\Delta L_{up}$ 、 $\Delta L_{ud}$ 与 $\theta_m$ 、 $\theta_p$ 、 $\theta_d$ 之间存在一一对应的关系,故任一肌肉收缩量 $\Delta L_{um}$ 、 $\Delta L_{up}$ 、 $\Delta L_{ud}$ 已知,则可以求出相应时刻关节的角度。于是我们可以定义一个坐标系,且该坐标系横轴为时间,纵轴为肌肉归一化的收缩量,用不同性质的函数曲线可以表达不同方式的手指运动。例如,当肌肉收缩方式为线性运动时,可以用直线来描述:

$$\Delta L(t) = \Delta L_0 + \alpha t, t \geq 0 \quad (5)$$

式中, $\Delta L_0$ 为初始运动时该肌肉的收缩量。经过时间 $t$ 的运动后,肌肉的收缩量就由初始的 $\Delta L_0$ 匀速增加或减少到 $\Delta L(t)$ ,变化速度可由 $\alpha$ 来控制, $\alpha$ 取正值时,表示肌肉收缩进一步增大,取负值时,表示肌肉舒张,收缩量相应减小。

当肌肉收缩方式非线性时,采用常见的非线性函数曲线即可区分肌肉先慢后快的运动或者先快后慢的运动。比如,指数曲线快速上升的特征可以用来描述某些肌肉先慢后快的运动,表示如下:

$$\Delta L(t) = \Delta L_0 + e^{t/\tau}, t \geq 0 \quad (6)$$

可以通过控制参数 $\tau$ 的大小来调整指数曲线的上升速度,以符合需要。可以用对数曲线减速上升的特征来描述某些肌肉先快后慢的运动,表示如下:

$$\Delta L(t) = \alpha \lg(t + \beta), t \geq 0 \quad (7)$$

同样可以通过调整参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 的数值来满足实际需要。

当肌肉收缩呈类似正弦周期变化等情况时,可以使用正弦函数或余弦函数来表达相对应的运动。总之,在实际仿真过程中,可根据肌肉收缩的实际运动情况,用随时间变化、方便数学描述的曲线来仿真实际运动,从而通过控制相应的多线谱图控制手指运动。

当手指负向弯曲达到最大角度时,手指各段肌肉的收缩量为0,当手指正向弯曲达到最大角度时,手指各段肌肉的收缩量达到最大值1。由于手指正向弯曲的角度要远远大于负向弯曲的角度,设手指自然展开时为初始状态,考虑到各段肌肉所处位置的不同,对于四指而言,初始状态时 $\Delta L_{um}$ 、 $\Delta L_{up}$ 、 $\Delta L_{ud}$ 分别为3/11、1/3、2/5。在一些情况下,某些肌肉运动对

手部运动贡献很小,常可忽略,这时该肌肉收缩量不变,为了使表示简化,该曲线及相应符号约定可以略去不画。

当单指运动时,若 $L_m$ 收缩、 $L_p$ 和 $L_d$ 不收缩,则掌指关节会随 $L_m$ 收缩而弯曲,近指关节和远指关节相对于中指骨并不会发生弯曲。此种状态时, $\Delta L_{um}$ 将由初始3/11逐渐增大,然而受到近指关节和相邻手指的影响,不会增大到1,最大能增加到8/11,且其增大速度会减慢(此处用对数函数曲线表示其先快后慢的增大速度),其示意图如图4中 $0 \sim t_1$ 所示。在这段多线谱控制下,食指随肌肉 $L_m$ 收缩,离开初始位置,向斜上翘起,且速度减慢。当 $L_m$ 和 $L_p$ 收缩时,由近指关节角度与远指关节角度间的关系式(2)可知, $L_d$ 也会收缩,即食指3段肌肉共同弯曲。此种状态下, $\Delta L_{um}$ 、 $\Delta L_{up}$ 、 $\Delta L_{ud}$ 都将由初始状态逐渐增大,然而受到相邻手指的影响, $\Delta L_{um}$ 在第一状态的基础上会继续增大,但同样不会增大到1,最大能到达17/22左右,且其增大速度会减慢(此处用幂函数函数曲线表示其先快后慢的增大速度); $\Delta L_{up}$ 也不会增大到1,最大增加到2/3处,其增大速度也会减慢,且减慢的速度要快于 $\Delta L_{um}$ 的减慢速度(此处对数函数曲线表示其先快后慢的增大速度)。考虑到近指关节与远指关节角度之间的约束关系式(2),在多线谱中我们省去了远指关节对应的多线谱图。综上,这个阶段的多线谱图如图4中的 $t_1 \sim t_2$ 段所示,时刻 $t_2$ 后,各段肌肉的收缩量保持不变。

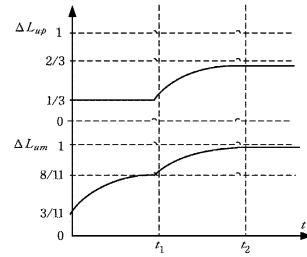
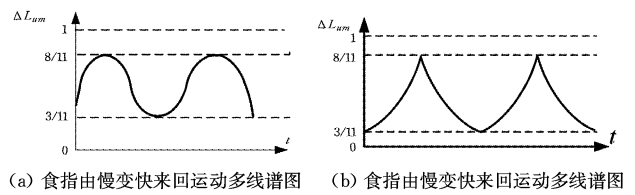
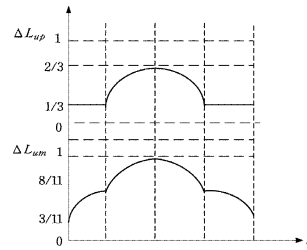


图4 食指多线谱运动控制图

利用多线谱,可以控制单指来回运动,且可以控制其运动的快慢。对于食指而言,当仅仅指掌关节弯曲时,我们可以利用图5(a)中所示的多线谱来控制食指由慢变快的来回运动,利用图5(b)中所示的多线谱可以控制食指由慢变快的来回运动,当3段肌肉同时收缩时,利用图5(c)中所示的多线谱可以控制整个食指来回运动。这样,通过控制不同的谱线,就可以拟合各种运动状态。



(a) 食指由慢变快来回运动多线谱图 (b) 食指由慢变快来回运动多线谱图



(c) 食指由慢变快来回运动多线谱图

图5 食指来回运动多线谱图

### 3.3 多指协同运动多线谱驱动方法

相对于单指运动,多指共同运动要复杂得多,因为不仅要

考虑单指的各肌肉收缩引起的关节角度的改变,还要考虑到其他手指对单指运动的影响。在本文的前期工作中,以食指和中指的运动约束为例,通过实验我们得到食指与中指之间存在如式(8)所示的约束方程,且由实验测量数据得到食指与中指的动态约束关系图,如图6所示。

$$\theta_m^M = 49.4131 + 0.560542x - 0.0536006 * x^2 + 0.00144549 * x^3 \quad (8)$$

式中,  $x = \sqrt{\theta_m^M / 0.0126267 - 1.1285 + 8.46}$ ,  $\theta_m^M, \theta_m^m$  分别为中指和食指的运动角度。图中清楚地展示了食指单指运动和中指单指运动的活动空间,分别为上下两个曲面;同时给出了双指同时运动时的活动空间,即两个空间曲面与两个坐标平面夹的空间。明显观察到,双指同时运动时,均会受到各自的影响。通过这个动态约束关系我们可以给出其相应的多线谱图(见图6)。从图中可以看出,当仅有食指运动时,它仅能在食指的运动空间中运动,且无法达到最大状态,而中指运动时,则可以促进食指的运动,使其达到运动的最大状态。

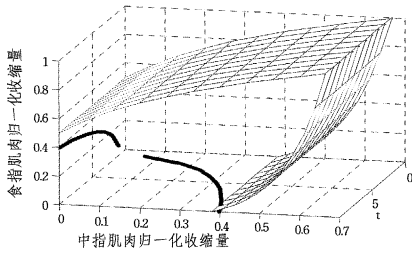


图6 食指与中指运动约束空间

#### 4 实验结果

进一步,通过采集手部图像,在三维网格中仿真出初始状态人手,通过多线谱控制手部肌肉收缩,可以实现手部单指运动及多指运动等常见运动仿真。

为验证多线谱控制下手指运动与真实手指运动是否一致,实验对食指弯曲过程进行拍照,每秒进行采样,驱动模型运动,实验中取  $L = 6.5\text{cm}$ ,  $L_m = 6.2\text{cm}$ ,通过标记特征点,可获得各个时刻关节的弯曲角度,根据弯曲角度与肌肉收缩量之间的关系式(3),即可求解出各个时刻的归一化肌肉收缩量,对这些特征点进行研究,在 matlab 中用相应的函数对其进行拟合,便可得到与之对应的多线谱图。实验发现,多线谱控制运动情况与真实运动情况基本一致(见图7)。根据式(9)误差分析法,实验仿真数据与实际运动数据得到的误差  $\epsilon$  小于 3%,较准确地仿真了真实手部运动。

$$\epsilon = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \frac{|y_{pi} - y_{fi}|}{|y_{pi}|} \quad (9)$$

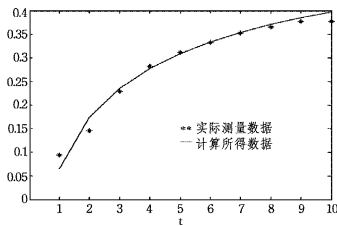


图7 误差分析图

##### 4.1 单指运动实验结果

利用上面的多线谱控制方法,我们可以仿真出各种单指运动。例如利用图4中的多线谱控制食指运动,可以得到如图8所示的仿真结果,实验结果显示了不同时刻手指的弯曲

程度,仿真效果较为逼真,运动过程较为自然。同时利用图5多线谱可以控制单指的来回运动,其实验结果如图9所示,可以看出,在该多线谱控制下的人手,可灵活控制单指的来回运动,具有较高的真实性。

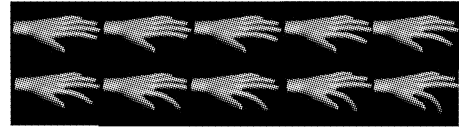


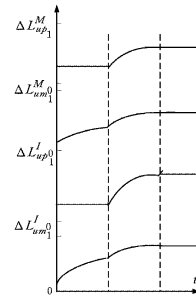
图8 多线谱控制下食指运动仿真结果



图9 多线谱控制下的先慢后快来回运动与先快后慢运动仿真

##### 4.2 多指协同运动与手势合成实验结果

各种手势是由一个或多个单指共同运动形成的,所以采用多指协同运动的多线谱驱动方法,可以实现各种手势的合成。例如,利用图10(a)中所示的多线谱控制食指与中指共同弯曲时,其仿真结果如图10(b)所示。利用图11(a)中所示的多线谱控制中指和无名指同时弯曲,即可合成“我爱你”的手势,仿真结果如图11(b)所示。此外,我们还仿真了其他没有大拇指参与的手势,如图12所示。由实验结果可见,多线谱控制下的手势的合成,其运动控制相对较为方便,实验结果较为逼真且其运动过程可以被清晰描述,这比已有模型的描述要简单很多,所以对于手势识别、机器人手的精确抓取的设计、手部残疾者的康复训练、临床医学中假肢的设计有重要的指导意义。

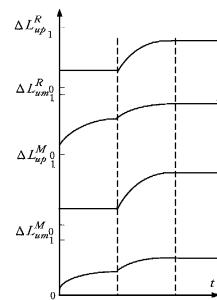


(a) 食指与中指协同运动多线谱图



(b) 食指与中指协同运动仿真图

图10 多指协同运动仿真图



(a) 手势‘我爱你’多线谱图



(b) 手势‘我爱你’仿真图

图11 ‘我爱你’运动仿真图

(下转第 151 页)

network using a fuzzy classifier system[A]//Proceedings of 35th Annual Simulation Symposium[C]. San Diego:IEEE Computer Society,2002;285-291

- [10] Gutknecht O, Ferber J. The MadKit agent platform architecture [A]//Proceedings of International Workshop on Infrastructure for Scalable Multi-Agent Systems[C]. Barcelona:IEEE Computer Society,2000;13-15
- [11] Silva L M, Simoes P, Soares G. JAMES: A platform of mobile agents for the management of telecommunication networks[A]//Proceedings of 3rd International Workshop on Intelligent Agents for telecommunication Applications[C]. Stockholm; Lecture Notes in Artificial Intelligence, 1999(1699);77-95
- [12] Inchiosa M E, Parker M T. Overcoming design and development challenges in agent-based modeling using ASCAPE [A]//Proceedings of Sackler Colloquium on Adaptive Agents, Intelligence, and Emergent Human Organization-Capturing Complexity through Agent-Based Modeling[C]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, California, 2003(99);7304-7308
- [13] North M J, Howe T R. The Repast Symphony Runtime System

[A]//Proceedings of Agent[C]. 2005(10);13-15

- [14] Tisue S. Netlogo: Design and implementation of a multi-agent modeling environment[A]//Proceedings of Agent[C]. Chicago: Argonne National Laboratory, 2004(10);3-13
- [15] 曹慕昆,冯玉强. 基于多 Agent 计算机仿真实验平台 Swarm 的综述[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(9):1-3
- [16] Railsback, Steven F, Lytinen, et al. Agent-based simulation platforms; Review and development recommendations [J]. Simulation-Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, 2004, 82(9):609-623
- [17] McFadzean D, Stewart D, Tesfatsion L. A computational laboratory for evolutionary trade networks [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2001, 5(5):546-550
- [18] 熊慕舟, 骆文振. 一种基于多 Agent 的人群仿真多机并行平台研究[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(10):64-67
- [19] 周文安, 陈微, 陈思, 等. 基于 MATLAB 的 LTE 仿真平台 CoMP 功能的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(11):2259-2263
- [20] 周昊, 覃征, 邢剑宽. 基于多 Agent 的多无人机协同决策算法仿真平台设计[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(3):587-593

(上接第 129 页)



图 12 数学 3,6,8 手势图

**结束语** 根据对手部解剖结构及运动的约束关系的研究,建立了基于多线谱控制的肌肉模型。该方法可以灵活控制单指运动及多指协同运动。同时针对以往传统模型单指运动独立、缺乏约束而导致不够真实的情况,进一步采用多条肌肉的多线谱间的约束关系,使得手部运动效果更加逼真,避免了仿真运动与实际运动不符合的问题。实验结果表明,所建立的手部控制机制合理,驱动所需数据仅为肌肉归一化收缩量,数据量小、仿真较便捷,同时利用肌肉间多线谱约束关系图能够保证手部运动仿真的真实感和自然性。后续将进一步研究用多线谱控制各种手势,进而将其更好地应用于手语的合成、机器人手的精确抓取、手部残疾者的康复训练、临床医学中假肢的设计、矫形手术的训练等领域。

### 参 考 文 献

- [1] 李锋,叶铭,等. 人手部骨组织建模的 B 样条拟合方法研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9):184-186
- [2] Shimada N. Hand gesture estimation and model refinement using monocular camera-Ambiguity limitation by inequality constraints[A]//Proc of The 3rd Conf. on Face and Gesture Recognition[C]. Nara, Japan; [s. n. ], 1998;268-274
- [3] Davis J, Shah M. Towards 3D Gesture Recognition[J]. International Journal of Pattern and Artificial Intelligence, 1999, 13(3):381-393
- [4] 饶敏,周淑秋,宫可想. 手部运动计算机仿真的实现[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(4):28-432

- [5] 侯文生,杨琴,张绍祥,等. 虚拟手可可视化模型的初步研究[J]. 中国临床解剖学杂志, 2008, 26(6):616-618
- [6] Shotton J, Fitzgibbon A, Cook M, et al. Real-time human pose recognition in parts from single depth images[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2011
- [7] Girshick R, Shotton J, Kohli P, et al. Efficient regression of general-activity human poses from depth images[C]//International Conference on Computer Vision, 2011
- [8] Keskin C, Klraç F, Kara Y E, et al. Real Time Hand Pose Estimation Using Depth Sensors[C]//Advances in Computer Vision and Pattern Recognition, 2013;119-137
- [9] 邵宏伟,贺纛,雷霆,等. 冷刺激下食指运动学及动力学特性研究[J]. 应用生物力学, 2010, 25(4):308-312
- [10] 于洪,姜力. 基于杆组法的假手食指运动学与静力学分析[J]. 机械制造, 2011, 49(565):10-12
- [11] van der Hulst F P J, Schätzle S, Preusche C, et al. A Functional Anatomy Based Kinematic Human Hand Model with Simple Size Adaptation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012;5123-5129
- [12] 文乐军. 人体解剖学[M]. 北京:北京医科大学出版社, 2004;83-101
- [13] 王澍寰. 屈指肌腱与腱鞘的功能解剖[J]. 骨与关节损伤杂志, 1989, 4(4):193-196
- [14] Claudia, Nolker, Ritter H. Parametrized SOMs for hand posture reconstruction[C]//Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks, 2000;139-144
- [15] Lin J, Wu Ying, Huang T S. Modeling the Constraints of Human Hand Motion[A]//Proc Workshop on Human Motion (HUMO'00)[C]. Austin, TX, 2000;161-170
- [16] 唐好选,洪炳熔,刘伟. 人手的运动学仿真及基于知识的控制方法[J]. 高技术通讯, 2001, 10:61-65