

DOI: 10.13475/j.fzxb.20171005707

# 基于运动捕捉的骑行运动中人体皮肤形变分析

程宁波, 吴志明, 徐存东

(江南大学 教育部针织技术工程研究中心, 江苏 无锡 214122)

**摘要** 为揭示在骑行运动过程中人体尺寸变化以及皮肤的形变规律, 首先运用 OptiTrack 运动捕捉系统采集了骑行运动中人体标记点的位置变化及其运动轨迹, 对人体动态变化做定性分析, 然后采用体表画线法对骑行运动中人体皮肤形变规律作进一步研究。结果表明: 在骑行运动周期过程中, 腰部及以上部位的点波动较小, 尺寸变化较小, 下肢部位点的波动较大, 尤其膝部, 且垂直方向变化大于水平方向; 腿部变化复杂, 且在骑行运动中不同区域的变化存在差异, 其中围度变化率约在(-8%~16%)区间, 长度变化率在(-60%~40%)区间; 膝部的变化最为明显, 变化率最大值达-60%左右, 大腿和小腿处的变化较小。

**关键词** 骑行动作; 运动捕捉; 人体; 皮肤形变

中图分类号: TS 941.17 文献标志码: A

## Analysis on skin deformation of human body during cycling based on motion capture

CHENG Ningbo, WU Zhiming, XU Cundong

(Engineering Research Center for Knitting Technology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract** In order to reveal regularities of the change of human body size and the deformation of the skin during cycling, the paper firstly used the OptiTrack motion capture system to acquire position change of the human body marker point and track of motion in the cycling movement, and analyzed qualitatively the dynamic change of the human body. And then the regularities of leg skin deformation were further studied by lineation-on-body experiment. It is found that the fluctuation of the markers and human body size in the waist and above is slight change, the change fluctuation of the lower is larger than above the waist, especially in the knee, and the change of the vertical direction is greater than that in the horizontal direction. Furthermore, the results show that the change of the leg is complicated and differences in the changes exist on different regions during cycling, the change rate of girth is in the range from -8% to 16% and the length is in the range from -60% to 40%. The change of knee is the most obvious and the maximum change rate is about -60%, and the change of thigh and lower leg is small.

**Keywords** cycling motion; motion capture; human body; skin deformation

专业骑行服不仅有助于提高运动员成绩, 而且对人体有较好的防护作用。骑行服是高弹性的贴体服装, 需要将人体动、静态以及皮肤形变相结合进行骑行服结构设计。人体的动作基本上是由关节运动产生的, 同时也产生了人体形态的变化, 人体运动时会牵引皮肤的伸长、滑移<sup>[1]</sup>。随着科技的进步, 人

体测量方法也在不断的改进, 目前较先进的三维扫描系统都是基于人体静态的测量<sup>[2]</sup>。人体的动态测量方面, 王永进<sup>[3]</sup>、王建萍等<sup>[4-5]</sup>通过实验验证了动态人体分析系统对人体跑步动态尺寸测量的有效性和可靠性, 其中动态人体分析系统采用了光学原理对人体运动的精确捕捉。李秀青等<sup>[6]</sup>等采用体

收稿日期: 2017-10-18 修回日期: 2018-05-28

基金项目: 江苏省产学研联合创新资金-前瞻性联合研究项目(BY2016022-35, BY2015019-01); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP115A02)

第一作者简介: 程宁波(1992—), 女, 硕士生。研究方向为现代服装制造技术。

通信作者: 吴志明, E-mail: wxwuzm@163.com。

表画线法对骑行运动中男子下肢体表所画线段长度进行了记录并分析了下肢的尺寸变化规律。

研究人体动态尺寸和皮肤形变方法多样,常用方法有体表画线法、网格法和体膜法<sup>[6-7]</sup>。随着科技的发展,目前已经研发出多种动态人体分析系统,利用这些系统能够准确记录动态下人体的运动过程,同时这些系统在影视动画、机器人、生物力学和体育训练等领域的研究中也发挥了极其重要的作用<sup>[8-9]</sup>。本文用 OptiTrack 运动捕捉系统记录受试者骑行动态的运动过程及其运动特征,同时采集人体标记点的运动轨迹,该方法便于更精确地对骑行动态和人体运动变化特征进行分析。在运动捕捉实验基础上,针对性地采用体表画线法分析腿部的皮肤变化,研究骑行运动中下人体横、纵向的尺寸变化和皮肤形变。

## 1 实验部分

### 1.1 实验对象

实验选取 10 位男性骑行爱好者,身体健康并具有一定的骑行运动经验,实验对象基本数据见表 1。

表 1 实验对象的基本信息

Tab. 1 Basic information of subjects' body

人数	身高/cm	体重/kg	胸围/cm	腰围/cm	臀围/cm
10	175 ~ 180	60 ~ 70	86 ~ 92	74 ~ 78	89 ~ 94

### 1.2 实验设备与工具

实验主要设备为 OptiTrack 运动捕捉系统,是一种典型的光学式运动捕捉系统,系统组成如图 1 所示。此外还有医用胶带、铅垂线、卷尺、可擦画笔、卫生纸、动感单车等。

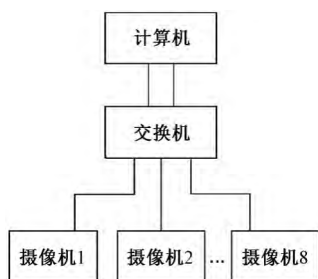


图 1 OptiTrack 运动捕捉系统图

Fig. 1 Basic composition of the OptiTrack system

### 1.3 骑行动作分析

由于在整个骑行运动中上车、站姿、上坡、下坡并不是长时间的骑行动作,故可将骑行看作是个周期运动,上身向前倾,整个重心靠前,减少阻力,手臂弯曲,向前支撑在龙头,臀部坐在坐垫上,腿部弯曲

蹬车。在骑行运动中,踏蹬是骑行的动力因素,踏蹬时下肢是连动骨杠杆的复合运动,运动中主要涉及髌、膝、踝关节,大腿绕髌关节做周期运动,小腿绕膝关节运动<sup>[10]</sup>。在周期运动中,上身动作基本保持不变,腿部动作分别取 0°、90°、180°、270°位置,分别记为动作 1、动作 2、动作 3、动作 4,如图 2 所示。

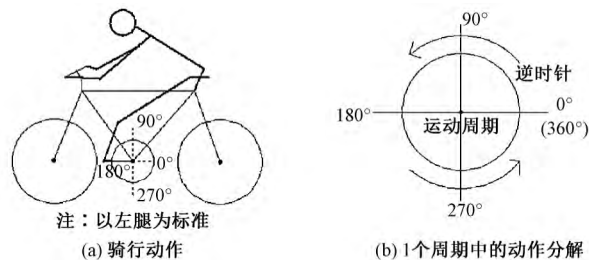


图 2 骑行周期运动

Fig. 2 Cycle movement of riding. (a) Cycling motion; (b) Action decomposition in one cycle

### 1.4 实验过程

整个实验过程要求被测试者光脚,不戴任何配饰,仅穿贴身的内裤。实验分为运动捕捉和腿部体表画线实验,运动捕捉实验记录骑行运动的整个动态过程,采集人体标记点的运动轨迹,通过对骑行动作下人体动态特征的定性分析,为体表画线实验奠定基础 and 提供依据,使得体表画线实验更具有针对性和有效性,而体表画线实验是对腿部变化规律进一步的定量分析。

#### 1.4.1 运动捕捉实验

1.4.1.1 实验环境 实验的 OptiTrack 摄像机采用主动照明工作方式,系统工作环境中应该避免近红外 850 nm 谱段光线干扰,正常室内照明光不会影响系统运行。

1.4.1.2 运动捕捉系统标定 确定摄像机在空间中的相对位置关系,建立起标记点跟踪的区域模型,使摄像机能够拍摄到人体活动范围;对摄像机进行参数设置,使得标定的精度和质量都达标;确定摄像机系统相对于水平面的相对位置关系。

1.4.1.3 数据采集 按照实验需求,在 Markerset 系统中选择相应人体模型,即选择所需要的标记点个数,如图 3 所示。再根据模型上的标记点位置在模特身上相应位置用医用胶带贴上标记点(即直径为 14 mm 且具有反光功能的小球),作为骑行过程中的抓捕标识点;贴完标记点后,让受试者站在摄像机的最佳捕获区域,做 T-pose,建立模型;受试者开始匀速骑行,运动捕捉系统开始采集并记录标记点的运动轨迹和数据;测试 3 次,减少误差。

1.4.1.4 人体尺寸与标记点定义 根据 ISO 8559—1989《服装结构和人体测量》,系统模型

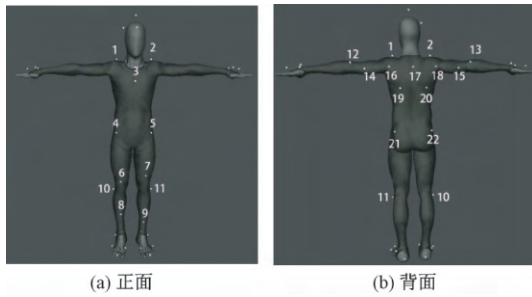


图 3 人体模型的标记点

Fig. 3 Human body model's markers. (a) Front; (b) Back

标记点与人体生理标识点对应,从局部与整体的关系来看,可通过标记点的位置变化来反应尺寸的变化。由于系统人体模型标记点较多,故本文根据实验需要选取部分标记点并编号,抓捕标记点位置不同方向的波动反应尺寸的变化趋势,以及人体各部位的变化幅度。表 2 示出标记点设定的方法及目的。

表 2 标记点设定

Tab. 2 Markers setting

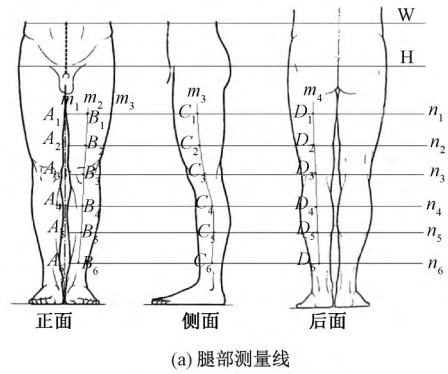
标记点编号	标记点设定方法	标记点设定目的
1,2 号	肩端点处	肩部的变化和肩宽的变化幅度
3 号	胸骨中点	前胸部的变化
4,5 号	肠棘点	腰腹部的变化
6 号	膝盖中点	膝部的变化
7 号	膝盖上方 5 cm	大腿股四头肌处的变化
8 号	小腿中点处	小腿围处的变化
9 号	胫骨偏下 1/4 处	胫骨处的变化
10,11 号	腓骨上方处	膝部附近的变化
12,13 号	肘点	肘部的变化
14,15 号	肱三头肌处	上臂的变化
16,18 号	后腋点	后腋处的变化
17 号	后腋点中点	背宽中点的变化
19,20 号	背阔肌处	背部的变化
21,22 号	髂后上棘点处	腰部处的变化

### 1.4.2 腿部体表画线实验

**1.4.2.1 体表画线** 依据人体特征在腿部体表画纵横投影线,以腰围和臀围线为基准 6 条横线依次为大腿根围  $n_1$ 、大腿中部  $n_2$ 、膝围  $n_3$ 、膝围和小腿最小围之间三等分线  $n_4$ 、 $n_5$ 、小腿最小围  $n_6$ ; 4 条纵线依次为内侧缝线  $m_1$ 、腿部前中线  $m_2$ 、外侧缝线  $m_3$ 、腿部后中线  $m_4$ ; 组成 6 条横线和 4 条纵线的腿部画线方案,如图 4 所示。

**1.4.2.2 骑行要求** 在同一实验室,受试者以相同速度开始匀速的周期运动,实验提取某一个周期的运动,分解为 4 个动作(见图 2)。

**1.4.2.3 数据测量** 为了减少误差,测量时软尺贴于体表,不可紧压皮肤,松度保持一致,且读取数据时视线垂直刻度线。测量体表所画线线段长度并记录数据(线段记号:如围度  $A_1B_1$  表示大腿围处水平



(a) 腿部测量线



(b) 体表画线

图 4 体表画线实验

Fig. 4 Experiment of lineation-on-body method.

(a) Leg measuring lines; (b) Lineation-on-body method

位置的内侧缝线到腿部前中线的长度,纵向  $C_1C_2$  表示腿部前中线位置处的大腿围到大腿中部的长度,  $n_1$  至  $n_3$  的纵向表示大腿围水平位置到膝围的长度变化)。先测量静态站立时的各标记线长度,再依次测量各骑行动态的线段长度。

### 1.5 动静态尺寸变化率的计算

动静态尺寸变化率为

$$\alpha = \frac{(L_1 - L_2)}{L_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\alpha > 0$  表示拉伸,  $\alpha < 0$  零表示收缩;  $L_1$  表示动态下线段长度,  $\mu\text{m}$ ;  $L_2$  表示静态线段长度,  $\mu\text{m}$ 。

## 2 实验数据处理与分析

### 2.1 运动捕捉中标记点的运动轨迹分析

由于运动捕捉实验中,受试者骑行时腿部对标记点的遮挡,导致数据段的不完整,因此需要通过系统编辑窗口对数据段进行自动修复。

由于测量点较多,在骑行运动中人体的测量点基本上保持对称,故选取了具有代表性的部分点来进行分析,其中各标记点代表的意义见表 2。为保证结果的可靠信,随机选取 1 个实验对象,按照图 5 所示坐标系来进行运动轨迹的分析。

不同部位标记点的运动轨迹如图 6 所示。从图中可看出,在骑行过程中,腿部点的运动轨迹在 Y

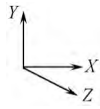


图5 坐标系

Fig. 5 Coordinate system

轴上的波动较大, X轴稍小, Z轴波动次之, 而肩部、手臂、背部、腰部以及臀部偏上处整个的波动都比较平稳, 在骑行服设计中在裤子的面料弹性应大于上衣的弹性。此外, 从图6(d)~(f)还可初步看出膝

盖部位及膝部周围的纵向波动大于横向的波动, 且运动轨迹的走向基本是一致的, 也可看出6号点横向波动的幅度小于8和11号点。说明了在1个周期运动中, 腿部的运动轨迹的波动较大, 故对于裤腿的部分, 尤其膝部的磨损就自然较大, 在骑行裤设计时应选择具有良好的耐磨性、弹性和回复性的面料, 同时可通过结构线来设置适当的松量, 或是对骑行裤进行面料分区设计, 使其满足舒适性的同时提高美观性。

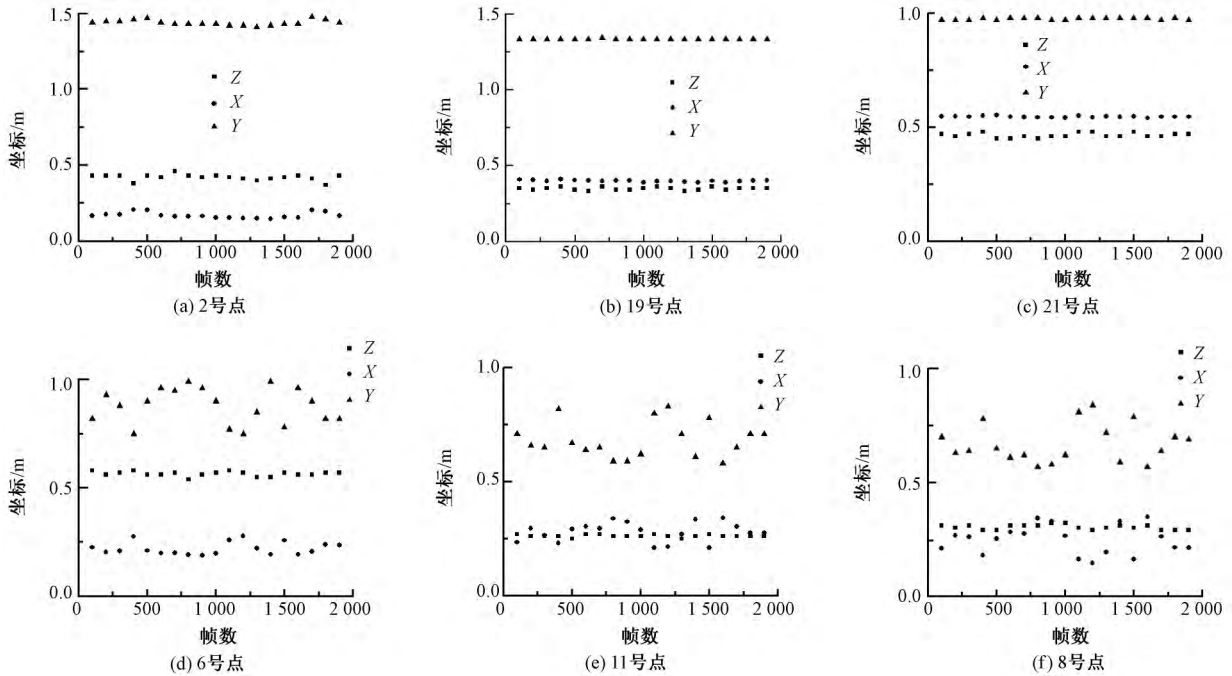


图6 不同部位标记点的运动轨迹

Fig. 6 Movement track of different markers. (a) Point 2; (b) Point 19; (c) Point 21; (d) Point 6; (e) Point 11; (f) Point 8

## 2.2 腿部的数据分析

### 2.2.1 围度方向的数据分析

0°、90°、180°和270°不同动作时围度的变化率如表3所示, 不同部位的围度变化如图7所示。腿部围度的变化率如图8所示。

表3 不同动作下肢横向线段的变化率

Tab.3 Change rate of lower extremities of horizontal lines in different positions %

围度	腿部正面横向的变化率				腿部背面横向的变化率			
	动作1	动作2	动作3	动作4	动作1	动作2	动作3	动作4
$n_1$	1.40	5.61	1.87	-3.74	0.93	2.49	-7.79	1.25
$n_2$	9.36	13.79	7.88	3.45	-1.61	-1.61	-2.82	-1.21
$n_3$	10.14	15.46	9.18	4.35	-0.58	-1.75	-4.68	1.17
$n_4$	-1.28	-4.49	0.64	-3.21	9.28	7.22	4.12	6.70
$n_5$	-0.63	-3.14	-2.52	-5.66	2.38	1.90	0.48	0.48
$n_6$	-0.85	-2.56	-3.42	-2.56	1.79	2.68	3.57	2.68

由表3可知在骑行周期运动中体表皮肤伸缩变

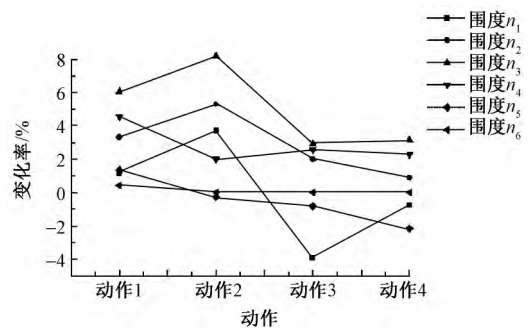


图7 围度变化

Fig. 7 Girth change of different parts of leg

化会随脚踏板位置的变化而有所不同, 就整体而言, 皮肤的拉伸比收缩要多些。横向 $n_3$ 处的变化率比较显著, 高达15%左右, 而横向 $n_6$ 处的变化率较小。

采用分段式分析局部的尺寸变化规律, 由图7可见,  $m_1$ 至 $m_2$ 的横向变化率较大,  $m_3$ 至 $m_4$

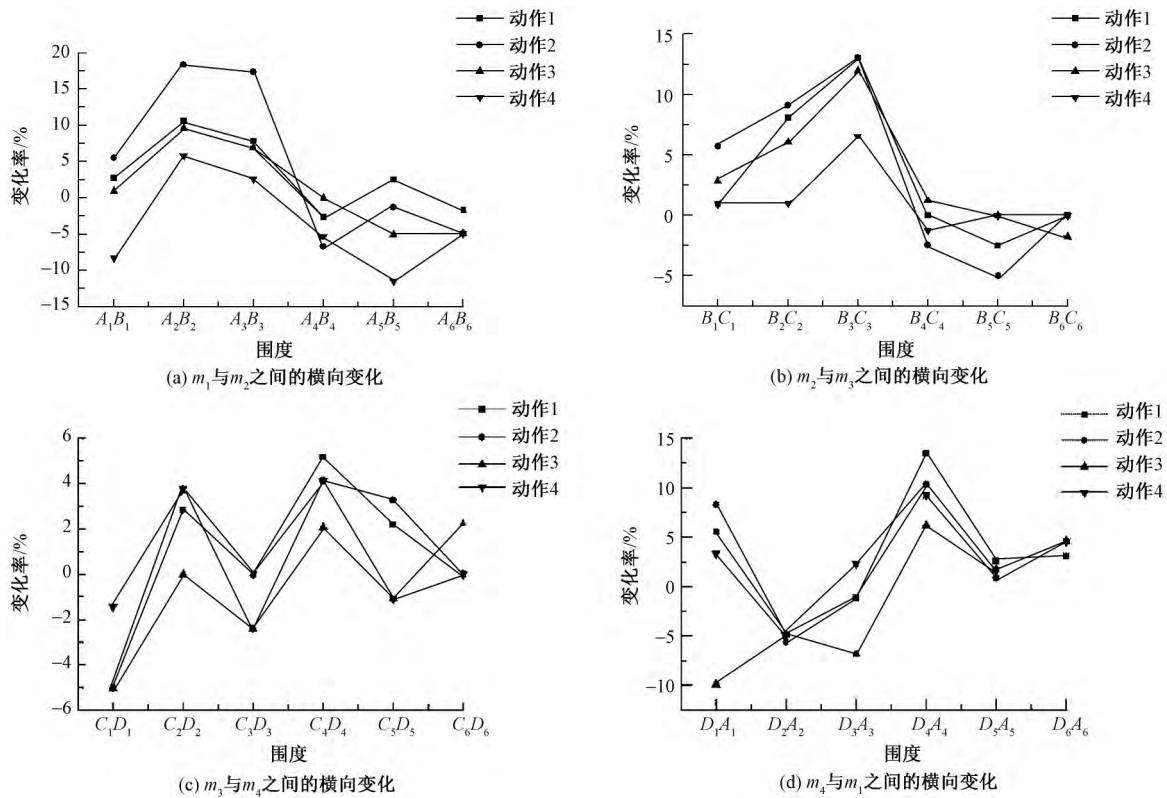


图 8 腿部区段的围度变化

Fig. 8 Changes in girth of leg section. ( a ) Lateral change between  $m_1$  and  $m_2$ ; ( b ) Lateral change between  $m_2$  and  $m_3$ ; ( c ) Lateral change between  $m_3$  and  $m_4$ ; ( d ) Lateral change between  $m_4$  and  $m_1$

的横向的变化率较小  $m_4$  至  $m_1$  和  $m_2$  至  $m_3$  的横向变化相差不大,可分析出左腿内侧的变化要比外侧变化显著。由图 7、8 可知,整个围度的变化比局部线段的变化要小一些,在围度  $n_3$  的变化率最大,围度  $n_4$ 、 $n_5$ 、 $n_6$  在整个周期中的变化比较平稳,围度  $n_1$  在前半个周期变化率大于零,后半周期小于零。

由上可知,骑行运动中膝围、大腿围的变化幅度较大,膝围以下尺寸变化幅度较小,膝盖前面呈拉伸状态,后面收缩,在结构设计中,可在膝盖部位进行

收省或是设置分割线来调节松量。

### 2.2.2 长度方向的数据分析

表 4 示出不同动作下肢纵向线段的变化量。图 9 示出下肢纵向线段的变化率。由表 4 可知,纵向线段的变化量大体上呈现负值,  $n_2$  至  $n_3$  和  $n_3$  至  $n_4$  的整体纵向变化量明显大于其他纵向线段的变化,变化量最大达到 4.8 cm 左右,  $n_5$  至  $n_6$  的纵向变化最小,  $n_4$  至  $n_5$  和  $n_1$  至  $n_2$  的纵向变化量比较接近。纵向  $m_2$  的变化量整体值小于其他 3 条线的变化量。

表 4 不同动作下肢纵向线段的变化率

Tab. 4 Change rate of lower extremities of vertical lines in different positions

线段	纵向 $m_1$				纵向 $m_2$				纵向 $m_3$				纵向 $m_4$			
	动作 1	动作 2	动作 3	动作 4	动作 1	动作 2	动作 3	动作 4	动作 1	动作 2	动作 3	动作 4	动作 1	动作 2	动作 3	动作 4
$n_1$ 至 $n_2$	-0.4	-0.4	-0.4	-0.1	-0.4	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.3	0.2	-0.8	-1.1	-0.7	-0.1
$n_2$ 至 $n_3$	2.2	3	1.6	1.4	-0.9	-0.9	-0.3	-0.2	-2.9	-2.7	-0.8	-0.4	-1.1	-1.1	-0.1	0.6
$n_3$ 至 $n_4$	3.5	4.8	2.6	2.3	-0.4	-0.7	-0.1	-0.1	-4.4	-6.5	-2.3	-1.5	-2	-2.5	-0.8	-0.5
$n_4$ 至 $n_5$	0.2	0.4	0.3	0.3	-0.4	-0.6	-0.3	-0.2	-1.4	-1.2	-0.7	-0.5	-0.4	-0.9	-0.3	-0.3
$n_5$ 至 $n_6$	0.1	0.2	0.2	0.2	-0.1	-0.1	0.1	0.2	-0.1	-0.1	-0.4	-0.2	-0.6	-0.4	-0.1	-0.1

由图 9 可见,纵向  $m_2$  和  $m_4$  的变化率比  $m_1$  和  $m_3$  的变化率大些,动作 2 对纵向造成的变化率最大,最大变化率的绝对值达到 60% 左右。此外也可以发现纵向的变化幅度较大。

图 10 示出不部位的纵向变化。图 10( a ) 中为

膝围线以上和膝围线以下的长度变化,在动作 3 前纵向线段的变化幅度比较大,动作 4 引起的变化率差异不显著,动作 2 造成的变化率比较大。图 10 ( b ) 中腿部前中、后中、外侧和内侧线整体长度在一个周期里,整体变化率为负。

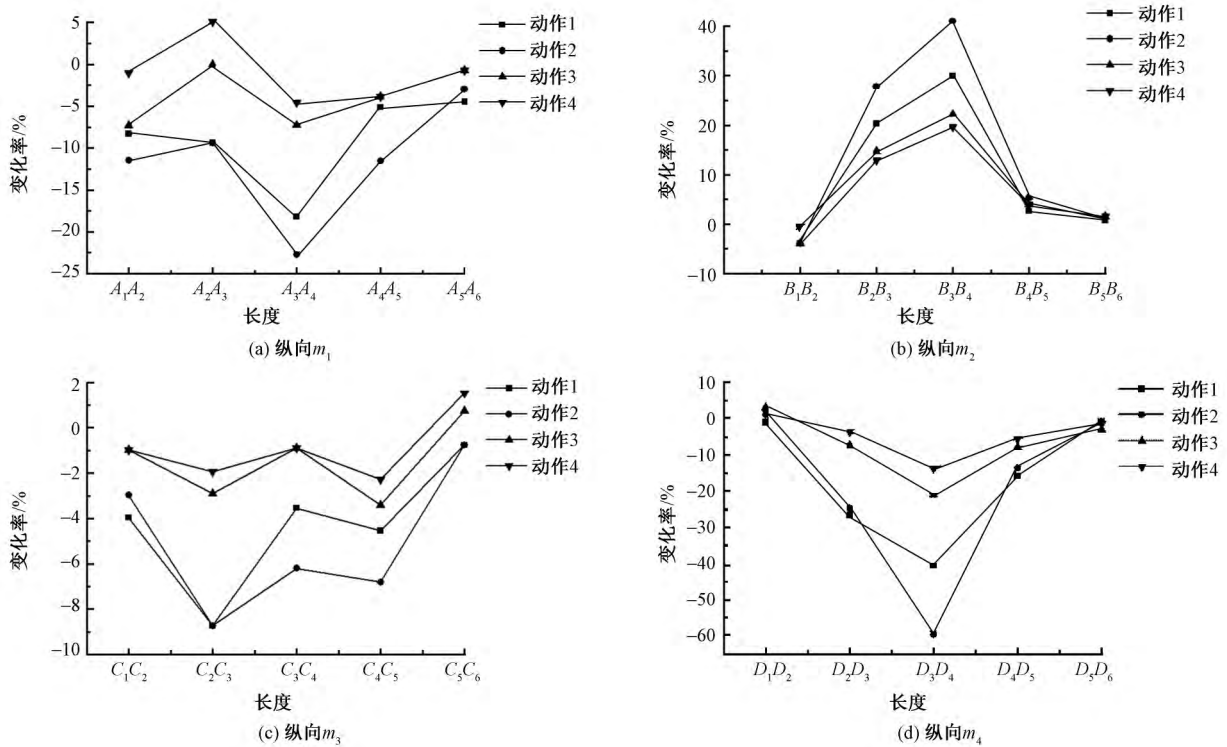


图9 腿部区段的长度变化

Fig. 9 Changes in length of leg sections. (a) Vertical  $m_1$ ; (b) Vertical  $m_2$ ; (c) Vertical  $m_3$ ; (d) Vertical  $m_4$

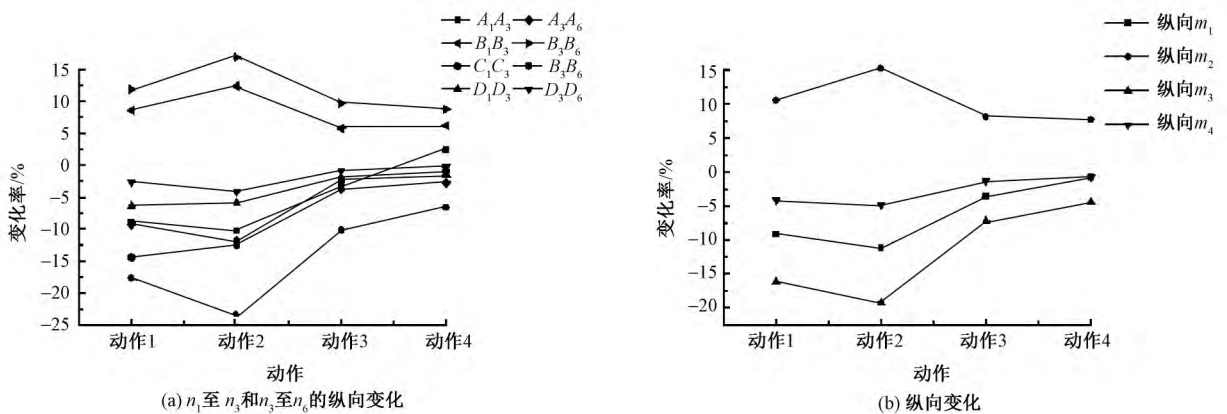


图10 纵向尺寸变化

Fig. 10 Length change of different parts. (a) Length change between  $n_1$  and  $n_3$ ,  $n_3$  and  $n_6$ ; (b) Vertical change

由以上数据分析可知,骑行过程中腿部纵向皮肤形变大于横向皮肤形变,腿部前中线的变化较明显,因此在骑行裤设计中,结构上应设置一定的松量,或是面料具有高弹性。因此在骑行裤的设计中可参考尺寸的变化采用分割线或面料分区设计来适当设置松量,使满足运动舒适性的同时增加骑行裤的美观性。

### 3 结论

骑行动态对人体各个部位的尺寸变化和皮肤形变有很大的影响。与人体静态相比,骑行动作会引

起肩宽、胸围、腰围、臀围和背长等尺寸发生变化,但腰部及以上尺寸在骑行周期运动中的变化幅度却是非常小的,而人体腿部的变化是显著的,尤其是膝部的变化最为明显,就整体而言,腿部的长度变化幅度大于围度上的变化幅度,局部变化率绝对值高达60%左右;长度方向整体呈收缩状态,围度上腿部的正面变化大于背面的变化,长度上则相反。

骑行运动中腿部各区域的皮肤形变是不同的,分析不同区域的皮肤变化量可应用于骑行裤设计中,如结构上可采用分割线来处理松量,面料上可进行不同面料的分区设计以满足运动的舒适性,提高骑行裤的舒适性、功能性和美观性。

FZXB

## 参考文献:

- [ 1 ] 中泽愈. 人体与服装[M]. 袁观洛,译. 北京: 中国纺织出版社, 2000: 80 - 88.  
NAKAZAWA Heal. Body and Garment [M]. YUAN Guanluo, Translating. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2008: 80 - 88.
- [ 2 ] 张文斌, 方方. 服装人体工效学[M]. 上海: 东华大学出版社, 2008: 35 - 40.  
ZHANG Wenbin, FANG Fang. Apparel Somatology [M]. Shanghai: Donghua University Press, 2008: 35 - 40.
- [ 3 ] 王永进. 动态人体尺寸的测量方法[J]. 纺织学报, 2013, 34(4): 105 - 109.  
WANG Yongjin. Study of body anthropometrical method in motion state [J]. Journal of Textile Reseach, 2013, 34(4): 105 - 109.
- [ 4 ] 王燕珍, 王建萍, 张燕, 等. 基于跑步运动状态的皮肤拉伸研究[J]. 纺织学报, 2013, 34(8): 115 - 118.  
WANG Yanzhen, WANG Jianping, ZHANG Yan, et al. Study of skin stretching based on running sport status [J]. Journal of Textile Reseach, 2013, 34(8): 115 - 118.
- [ 5 ] 吴廷雅, 王建萍, 王燕珍. 基于跑步动作的女子下体动态测量[J]. 浙江纺织服装职业技术学院学报, 2013, 12(4): 45 - 49.  
WU Tingya, WANG Jianping, WANG Yanzhen. Dynamic measurement of women's lower body based on running [J]. Journal of Zhejiang Textile and Apparel Vocational and Technical College, 2013, 12(4): 45 - 49.
- [ 6 ] 李秀青, 刘需, 赵欲晓, 等. 骑行运动中男子下肢体表尺寸变化规律[J]. 纺织学报, 2017, 38(8): 121 - 126.  
LI Xiuqing, LIU Xu, ZHAO Yuxiao, et al. Study on size changes of man's lower limb body in riding motion [J]. Journal of Textile Reseach, 2017, 38(8): 121 - 126.
- [ 7 ] 王永荣, 李嘉仪, 金枝, 等. 不同路况中骑行者皮肤变形分析[J]. 纺织学报, 2016, 37(9): 118 - 121.  
WANG Yongrong, LI Jiayi, JIN Zhi, et al. Analysis on skin deformation of rider during cycling under different road conditions [J]. Journal of Textile Reseach, 2016, 37(9): 118 - 121.
- [ 8 ] 罗逸苇. Vicon 三维运动捕捉系统在人体运动分析中的应用[J]. 浙江工贸职业技术学院学报, 2007, 7(1): 40 - 43.  
LUO Yiwei. Application of vicon sports-captured system in body sports [J]. Journal of Zhejiang Industry & Trade Polytechnic, 2007, 7(1): 40 - 43.
- [ 9 ] 黄莉, 陈敏之, 郑万里, 等. 骑行姿态下腿部皮肤伸展大小的研究[J]. 现代纺织技术, 2016(6): 43 - 46.  
HUANG Li, CHEN Minzhi, ZHENG Wanli, et al. Study on the size of skin of leg under riding attitude [J]. Advanced Textile Technology, 2016(6): 43 - 46.
- [ 10 ] 张健, 李昕. 对自行车运动员在骑行过程中踏蹬动作的生物力学分析[J]. 北京体育师范学院学报, 1996, 9(1): 52 - 55.  
ZHANG Jian, LI Xin. Biomechanical analysis of cycling movements during cycling [J]. Journal of Beijing Sport Teachers' College, 1996, 9(1): 52 - 55.