

基于加速度的行走运动模型的研究

何先照^{1,2}, 龙希文^{2*}, 马苏湖¹, 陈燎原¹

(1. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国科学院合肥智能机械研究所, 运动与健康信息技术研究中心, 安徽 合肥 230031)

摘要:针对现有人体运动速度模型的不足,主要研究了在不同速度模式下的加速度信息与步态变化规律,提取了其中最能够反映运动速度的特征参数。20 名年轻男性志愿者分别以 3 km/h、4 km/h、5 km/h、6 km/h 的速度模式在跑步机上行走,分别考察了各个速度模式下加速度最大值、最小值、均方根、峰值、步频、支撑时间、摆动时间等与速度的关系。实验结果表明:在综合分析各个参数的变异系数、可操作性、相关性后,最终确定步频、均方根、峰值可用于估测行走过程中的实时速度,为计步器与能耗仪的开发提供基础理论支撑。

关键词:加速度;步态;特征参数

中图分类号:TH824.4

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)01-0042-05

Movement patterns during walking based on acceleration

HE Xian-zhao^{1,2}, LONG Xi-wen², MA Su-hu², CHEN Liao-yuan¹

(1. College of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
2. Information Technology Research Center of Sports and Health, Institute of Intelligence Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In view of the existing human body velocity of movement model's insufficiency, it was mainly studied which characteristic parameter of acceleration information and the gait change rule can reflect the velocity of movement under the different speed pattern. 20 young masculine volunteers were recruited, the characteristic parameters which including the maximum value, the minimum value, the root-mean-square, the valley value, step frequency, the support time and the duration of oscillation were obtained while walking speed at 3 km/h, 4 km/h, 5 km/h, the 6 km/h in jogs machine on walks. The experimental result indicates that the step frequency, the root-mean-square, the valley value can estimate the walking speeds in real-time, after the integration analysis of correlation coefficient, operability and the coefficient of variation of every parameter. All of conclusion can offer basic theoretical support for the development of pedometer and the instrument of specific power consumption.

Key words: acceleration; gait; characteristic parameters

0 引 言

步行运动是最常见的一种健身方法,实时监测行走速度是个性化健康促进服务的基本要求,可以为制定个性化的健康促进服务系统提供重要参数。加速度信号的获取装置具有低成本、微体积、低功耗等优点,

加速度传感器在便携式计步器、能耗仪的设计中得到了广泛应用。国内外学者在基于加速度信息的运动速度模型的建立上都作了有益的探讨,如刘志、龙希文等^[1]在研究电子步道在步态时空参数中的可靠性时,建立了步频、步长与速度的关系;Q. Li 等^[2]人通过获取小腿上的线性加速度积分来估测行走速度;Nike、欧

姆龙等公司生产的计步器也建立各自的速度估测模型对行走过程中速度的监测。

然而,现有的速度估测模型在应用中由于其精确性不足而受到质疑。因此,有必要对现有模型的准确性进行验证,以及研制新型的加速度信号获取装置并建立准确的速度估测模型。本研究主要通过自行研制的新型加速度信息获取装置进行一系列的实验,通过设定几种固定的速度模式,分别考察不同速度下的加速度及步态的变化规律,提取出最能反映速度变化的特征参数,再利用得到的特征参数来估测行走速度。

1 研究方法

1.1 硬件设计

人体运动加速度信息提取装置原理图如图1所示,包括单片机 MSP430、三维加速度芯片 KXSC7-2050、存储器、电源管理器、串口等。整个系统均在单片机 MSP430 的控制之下以 200 Hz 的采样频率工作,加速度信号经过单片机 MSP430 内部自带的 A/D 转换器将加速度信号转换成数字信号传递给存储器,数据采集完毕将存储器上的数据传输到计算机上。

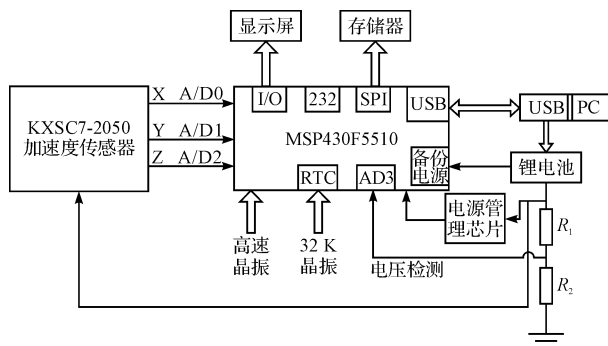


图1 信息获取装置图

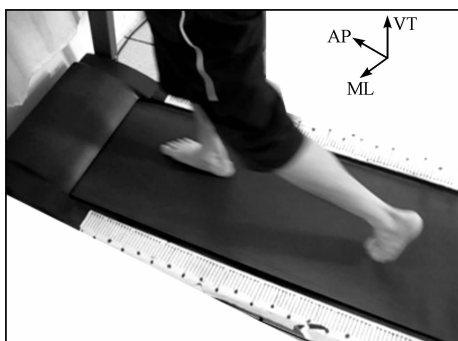


图2 行走示意图与加速度方向

1.2 实验对象

实验对象选择健康的年轻人群。20 名男性志愿者参与本次实验,年龄在 22 ~ 28 岁之间,平均年龄在

24.31 ± 1.56 岁。测试者的基本情况如表 1 所示。

表 1 受测者的基本信息 (N = 20)

	均值	标准差	最小值	最大值
年龄/岁	24.31	1.56	22.60	27.60
身高/m	1.73	2.34	1.69	1.76
体重/kg	61.71	10.90	54.00	85.00
下肢长度/cm	92.34	1.78	89.00	101.00

1.3 实验方法

三维加速度传感器的前后方向 (AP)、左右方向 (ML)、垂直方向 (VT) 按预先设定好的方向放置 (如图 2 所示),使用弹性绷带将加速度传感器固定于躯干腰椎骨部位,使传感器与身体形成紧密连接,加速度芯片的位置直接决定了人体运动过程中的加速度方向,因此每次实验之前都需要对加速度信号进行静态校核,确保加速的 3 个方向按预先设定好的方向放置,保证实验结果的准确性。

为了消除穿鞋对加速度信号的影响,让测试者赤脚在跑步机上以 3 km/h、4 km/h、5 km/h、6 km/h 的速度行走,如图 2 所示。当测试者的速度达到平稳时,按下加速度采集器上的启动按钮的同时,并启动摄像装置,主要是为了拍摄整个运动过程。取 20 步内的加速度信号作为原始信号源,用于加速度信息特征参数的提取分析。

1.4 主要特征参数说明

实验研究对象的各个特征参数的名称、缩写、单位、含义如表 2 所示。

1.5 信号处理方法

通过视频分割每帧数据的方法准确地找到左右脚着地点与蹬离点,以获得步长、步频、步态周期、站立期、摇摆期数据;本研究采用自行设计的专用软件,解析出每步加速度信号的最大值、最小值、峰谷值以及均方根,将 20 步的特征参数分别进行平均值、标准差和变异系数的计算。各个速度模式下的特征参数采用平均值、方差、变异系数进行描述。

2 实验结果

2.1 原始信号

采集到的加速度信号利用低频巴特沃兹滤波器进行滤波处理,如图 3 所示,描述的是在 5 km/h 速度模式下 4 个步态周期内的加速度原始信号。在每次步态周期内,前后方向出现一个正向的波峰,垂直方向出现两个正向的波峰和一个负向的波谷,左右方向上变化规律不是很明显。

表 2 加速度特征参数简写与单位

名称	英文缩写	单位	含义
步长	SL	cm	每步的长度
步频	SF	step · min ⁻¹	每分钟走的步数
步态周期	SC	s · step ⁻¹	每步用的时间
支撑期	SD	1	一只脚着地到这只脚离地时间与步态周期的比值
摇摆期	SW	1	一只脚离地到这只脚着地时间与步态周期的比值
最大加速度(三方向)	AP _{MAX}		每个步态周期内前后方向最大值
	ML _{MAX}	g	每个步态周期内左右方向最大值
	VT _{MAX}		每个步态周期内垂直方向最大值
最小加速度(三方向)	AP _{MIN}		每个步态周期内前后方向最小值
	ML _{MIN}	g	每个步态周期内左右方向最小值
	VT _{MIN}		每个步态周期内垂直方向最小值
均方根(三方向)	AP _{RMS}		每个步态周期内前后方向均方根
	ML _{RMS}	g	每个步态周期内左右方向均方根
	VT _{RMS}		每个步态周期内垂直方向均方根
峰谷值(三方向)	AP _{PD}		AP _{MAX} 与 AP _{MIN} 的差
	ML _{PD}	g	ML _{MAX} 与 ML _{MIN} 的差
	VT _{PD}		VT _{MAX} 与 VT _{MIN} 的差

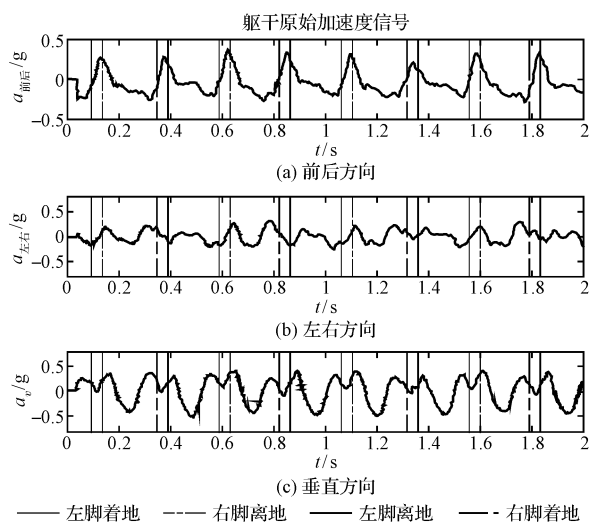


图 3 在 5 km/h 下的原始数据图

信号的波谷;在摆动后期,左脚脚后跟抬起,垂直方向再次出现加速度信号的波峰。③在右脚着地后,随后进入右脚站立期、双支撑期和左脚摆动期,加速度信号与之前变化规律基本相同,左右脚都体现出周期性的变化规律。

2.2 不同速度下特征参数

对各个特征参数进行统计学分析,统计结果如表 3 所示,从表中能够看出这些各特征参数随速度的变化情况:步长和步频与速度正相关,而步态周期与速度负相关,站立期、摇摆期比率与速度弱相关;加速度特征参数最大值、最小值、均方根、峰谷值也与速度存在正相关。

3 讨 论

3.1 参数的选择

通过对变异系数、相关系数、可操作性这 3 个方面的研究,逐层刷选出符合条件的特征参数:

(1) 变异系数。为了对比不同特征参数的变异程度,就要计算变异系数,变异系数越大意味着波动程度越大。取变异系数较小的特征参数作为研究对象,选取各个速度模式下,变异系数的绝对值都小于 0.3 的特征参数,从表 3 中能筛选出 SL、SF、SC、SD、SW、VT_{MIN}、ML_{RMS}、VT_{RMS}、AP_{PD}、VT_{PD} 作为研究对象,但 SD 与 SW 不能反应速度的变化,因此,SD 与 SW 也不能作为估测速度的特征参数。

结合步态研究成果^[3-9],将步态周期分为左脚站立期、右脚摆动期、右脚站立期、左脚摆动期,右脚离地与左脚着地的时间差和右脚着地与左脚离地的时间差称为双支撑期。本研究以左脚着地开始,对一个步态周期内的垂直方向与前后方向的加速度信号的变化规律进行简单说明:①在左脚着地时,已有向前的运动趋势,垂直方向与前后方向的加速度都为正向加速度。随后进入双支撑期,在双支撑期内,身体向前倾斜达到最大值,正向加速度值达到波峰;右脚脚后跟抬起,右膝关节弯曲在垂直方向出现局部的波谷。②在右脚离地后,左脚处于单脚站立期,在身体处于笔直站立时,垂直方向上出现波峰;右脚处于摆动期,在摆动中期,左右双膝关节都处于弯曲状态,垂直方向出现加速度

表3 不同速度下的特征参数(平均值 ± 标准差)与变异系数

	3.0 m/s	4.0 m/s	5.0 m/s	6.0 m/s
SL(cm)	44.86(5.05),0.09	55.71(5.06),0.07	63.43(4.50),0.07	71.00(9.56),0.13
SF(step/min)	110.86(3.90),0.11	117.71(7.70),0.09	126.29(6.82),0.05	137.00(9.43),0.07
SC(s)	1.08(0.10),0.09	1.02(0.07),0.06	0.95(0.05),0.05	0.88(0.06),0.07
SD(%)	61.86(2.91),0.05	60.86(1.57),0.03	63.71(1.80),0.03	58.43(1.51),0.03
SW(%)	38.14(2.91),0.08	39.14(1.57),0.04	36.29(1.80),0.05	41.57(1.51),0.04
AP _{MAX} (g)	0.25(0.2),0.79	0.35(0.26),0.73	0.52(0.31),0.60	0.81(0.38),0.46
ML _{MAX} (g)	0.35(0.17),0.47	0.37(0.11),0.31	0.59(0.22),0.38	0.68(0.30),0.45
VT _{MAX} (g)	0.44(0.23),0.52	0.56(0.13),0.23	0.75(0.16),0.21	0.93(.022),0.24
AP _{MIN} (g)	-0.40(0.15),-0.35	-0.45(0.19),-0.43	-0.54(0.21),-0.38	-0.60(0.18),-0.31
ML _{MIN} (g)	-0.27(0.16),-0.60	-0.33(0.15),0.44	-0.48(0.25),-0.51	-0.62(0.28),-0.45
VT _{MIN} (g)	-0.40(0.05),-0.12	-0.42(0.07),-0.17	-0.53(0.08),-0.14	-0.67(0.11),-0.16
AP _{RMS} (g)	0.18(0.05),0.35	0.21(0.06),0.30	0.24(0.05),0.22	0.29(0.04),0.12
ML _{RMS} (g)	0.15(0.03),0.21	0.16(0.03),0.21	0.20(0.04),0.19	0.23(0.05),0.24
VT _{RMS} (g)	0.22(0.04),0.20	0.26(0.04),0.15	0.32(0.05),0.15	0.40(0.05),0.16
AP _{PD} (g)	0.66(0.15),0.22	0.80(0.16),0.21	1.06(0.22),0.21	1.40(0.27),0.19
ML _{PD} (g)	0.63(0.21),0.33	0.70(0.13),0.18	1.06(0.24),0.23	1.22(.028),0.22
VT _{PD} (g)	0.85(0.24),0.28	0.98(0.18),0.18	1.28(0.05),0.17	1.67(0.19),0.11

(2) 相关系数。将筛选出来的特征参数做线性回归,以特征参数为自变量,速度为因变量,得到的线性方程与线性相关系数如表4所示。从表中可以看出VT_{MIN}的相关性最小,将该变量剔除。

表4 特征参数的回归方程与R²

	回归方程	R ²
SL	Y = A ₁ x - 2.263	0.992
SF	Y = A ₂ x - 9.496	0.990
SC	Y = A ₃ x + 18.571	0.993
VT _{MIN}	Y = -A ₄ x - 0.539	0.918
ML _{RMS}	Y = A ₅ x - 10.817	0.956
VT _{RMS}	Y = A ₆ x - 0.391	0.978
AP _{PD}	Y = A ₇ x + 0.674	0.968
VT _{PD}	Y = A ₈ x + 0.358	0.957

(3) 可操作性。SF与SC互为倒数关系,SF易于SC的获取,二者取SF作为特征参数;SL测量方便但不能实时测量,因而从可操作性方面考虑不适合作为特征参数。

通过变异系数、相关系数、可操作性的逐层筛选后,剩余的特征参数有SF、ML_{RMS}、TV_{RMS}、AP_{PD}、VT_{PD},这些特征参数可作为自变量来估测实时运动速度。

3.2 实验结果对比

本研究以加速度信息特征参数与步态特征为研究对象,将不同速度模式下的步频和均方根与已有的研究成果进行对比,实验结果如表5所示:

表5 实验结果对比

作者	实验对象	行走速度/(km·h ⁻¹)	步频/(step·min ⁻¹)	均方根
Chiu & Wang	24.8 (15 males,15 females)	3	101.0	
		4	118.1	
		5	131.8	
刘志	25.3 ± 2.1 (37 males)	3.548 ± 0.539	102.2 ± 8.7	
		4.301 ± 0.513	113.6 ± 7.4	
		5.306 ± 0.652	126.3 ± 8.2	
Bilney	40.5 ± 17.2 (13 males,12 females)	3.996 ± 0.612	100.2 ± 8.5	
		5.292 ± 0.648	114.9 ± 6.5	
		6.876 ± 0.936	132.6 ± 10.4	
Kavanagh	23 ± 4.0 (8 young,73 ± 3.08 old)	Y 4.61 ± 0.54	Y 116.0 ± 10.5	AP _{RMS} Y 0.15 ± 0.10
		O 4.28 ± 0.54	O 111.4 ± 13.7	O 0.14 ± 0.10
				ML _{RMS} Y 0.11 ± 0.08
				O 0.11 ± 0.07
				VY _{RMS} Y 0.18 ± 0.12
				O 0.18 ± 0.11

续表

作者	实验对象	行走速度/(km·h ⁻¹)	步频/(step·min ⁻¹)	均方根	
Hylton B. Menz	29.0 ± 4.3 (11 males, 19 females)	S 4.72 ± 0.22	S 109.31 ± 7.30	AP _{RMS}	S 0.19 ± 0.03
				C 0.25 ± 0.05	
		C 4.75 ± 0.21	C 104.87 ± 8.17	ML _{RMS}	S 0.19 ± 0.05
				C 0.26 ± 0.06	
本研究结果	24.31 ± 1.56 (20 young males)	3	110.86 ± 3.90	VT _{RMS}	S 0.26 ± 0.07
				C 0.28 ± 0.08	
		4	117.71 ± 7.70	AP _{RMS}	0.18 ± 0.05
				ML _{RMS}	0.15 ± 0.03
5		5	126.29 ± 6.82	VT _{RMS}	0.22 ± 0.04
				C 0.21 ± 0.06	
		6	137.00 ± 9.43	ML _{RMS}	0.16 ± 0.03
				VT _{RMS}	0.26 ± 0.04
6		5	126.29 ± 6.82	AP _{RMS}	0.24 ± 0.05
				ML _{RMS}	0.20 ± 0.04
		6	137.00 ± 9.43	VT _{RMS}	0.32 ± 0.05
				C 0.29 ± 0.04	
6		6	137.00 ± 9.43	AP _{RMS}	0.29 ± 0.04
				ML _{RMS}	0.23 ± 0.05
				VT _{RMS}	0.40 ± 0.05

注: Y—年轻人, O—老年人, S—平地, C—草地

(1) 步频与速度对比。在 3 km/h 模式下步频要比前人研究结果要大; 在 4 km/h 模式下跟 Chiu & Wang 的研究结果基本相同; 在 5 km/h 模式下与刘志等人的研究结果一致; 在 6 km/h 模式下步频比前人的研究结果稍大些。

(2) 均方根与速度对比。在 4 km/h 与 5 km/h 速度模式下, 本研究的 3 个方向的均方根介于 Kavanagh 和 Hylton B. Menz 之间。

(3) 峰谷值与速度的关系。加速度信号随位置的变化, 加速度值也随之改变, 利用峰谷值可用有效的解决这一问题。从实验结果来看, 峰谷值相关系数大、变异系数小以及可操作性好, 符合特征选取的依据, 这是本实验提出新的自变量用于估测速度。

从实验研究结果对比来看, 本实验结果与前人的研究结果存在微小的差别, 但总体变化趋势一致, 说明本实验方案是切实可行的。可用 SF、ML_{RMS}、TV_{RMS}、AP_{PD}、VT_{PD} 作自变量用于实时估测运动速度。

4 结束语

本实验通过考察各个速度模式下, 各个特征参数的变异性、相关性、适用性, 筛选适合作为估测速度的自变量的特征参数, 建立起实时速度估测模型。为了更好的运用于实际生活, 需要建立速度到能耗的模型, 最终开展加速度与能耗模型的研究。

参考文献 (References):

- [1] 刘志, 杨辉, 姚志明, 等. 电子步道在步态时空参数测量中的可靠性[J]. 传感器学报, 2010, 23(7): 913-917.
- [2] LI Q, YOUNG M. Walking speed estimation using a shank-mounted inertial measurement unit[J]. **Journal of Biomechanics**, 2010(43): 1640-1643.
- [3] CHIU M C, WANG M J. The effect of gait speed and gender on perceived exertion, muscle, activity, joint motion of lower extremity, ground reaction force and heart rate during normal walking[J]. **Gait and Posture**, 2007, 25(3): 385-392.
- [4] BILNEY B, MORRIS M, WEBSTER K. Concurrent related validity of the GAITRite walkway system for quantification of the spatial and temporal parameters of gait[J]. **Gait and Posture**, 2003, 17(1): 68-74.
- [5] KAVANAGH J J. Upper body accelerations during walking in healthy young and elderly men[J]. **Gait and Posture**, 2004, 20(3): 291-298.
- [6] MENZ H B, LORD S R, FITZPATRICK R C. Acceleration patterns of the head and pelvis when walking on level and irregular surfaces[J]. **Gait and Posture**, 2003, 18(1): 35-46.
- [7] 刘蓉, 黄璐, 李少伟, 等. 基于步态加速度的步态分析研究[J]. 传感器学报, 2009, 22(6): 893-896.
- [8] 钱竟光, 宋雅伟, 叶强, 等. 步行动作的生物力学原理及其步态分析[J]. 南京体育学院学报, 2006, 5(4): 1-7, 39.
- [9] 李爽, 罗志增, 孟明. 基于加速度传感器的下肢运动信息获取方法[J]. 机电工程, 2009, 26(1): 5-7, 16.

[编辑: 张翔]