



工业和信息化部“十二五”规划专著



可变形人体三维建模 与运动分析

3D Modeling and Motion Analysis
of Deformable Human Body

◎ 潘海朗 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

工业和信息化部“十二五”规划专著

可变形人体三维建模与运动分析

潘海朗 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书首先介绍可变形人体三维建模与运动分析的国内、外研究现状,然后分别对人肢体三维建模、人脸三维建模、人体三维运动参数估计、人体运动检测、人体运动跟踪、人体运动力学分析、应用等方面进行了研究和探讨。本书不仅有助于研究图像、图形领域的读者全面认识可变形人体三维建模与运动分析,也可为体育科学、医学、国防、动漫制作等相关人员提供人体分析的具体解决途径。

本书内容新颖、实用,可供计算机视觉、计算机图形学、图像处理、体育科学、医学、国防、动漫制作等领域的科技人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

可变形人体三维建模与运动分析 / 潘海朗著. —北京: 电子工业出版社, 2015.12

工业和信息化部“十二五”规划专著

ISBN 978-7-121-27336-0

I. ①可… II. ①潘… III. ①三维动画软件—计算机图形学 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 234641 号

策划编辑: 王晓庆

责任编辑: 王晓庆

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.5 字数: 465 千字

版 次: 2015 年 12 月第 1 版

印 次: 2015 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 58.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

计算机视觉中的三维运动分析研究在很大程度上局限于对刚体运动的研究,学者们已经取得了一系列成果,并建立了较为完善的理论框架。然而刚体假设虽然简化了运动分析问题的复杂性,方便了某些具体问题的求解,但同时它也限制了分析弹性体等复杂运动的能力。人体是一种典型的可变形体,与刚体运动分析相比,可变形体的运动分析尚处于稚嫩阶段。由于可变形体运动形式具有多样性,获取运动物体在运动过程中所受的约束规律往往是十分困难的,所以利用视觉手段研究弹性体运动面临许多复杂性。目前,可变形体运动分析的研究大都面向具体问题,应用的效果也并不十分理想。面对越来越多的应用领域需要可变形体运动分析去介入,迫切需要对可变形体运动分析做出更为深入的研究,以进一步完善可变形体运动分析的理论框架。

本书首先介绍了可变形人体三维建模与运动分析的国内、外研究现状,然后展示了采用旋转圆锥曲面、蛋形曲面、卷积曲面、螺旋线曲面、流形 T 样条曲面、张量曲面 6 种新的人体三维建模方法,以及采用这些模型进行运动检测、运动参数估计、运动跟踪、运动力学分析、应用等方面的研究成果。全书共 8 章。第 1 章论述了可变形人体三维建模与运动分析的研究意义和国内、外的研究现状,以及本书展示的研究内容和创新点的简要介绍。第 2 章展示了采用旋转圆锥曲面、蛋形曲面、卷积曲面、螺旋线曲面、流形 T 样条曲面、张量曲面 6 种方法进行人肢体三维建模及变形参数确定。采用旋转圆锥曲面的建模方法包括采用图像标记点、图像轮廓、体积不变性 3 种方法进行人肢体三维建模及变形参数确定。采用蛋形曲面的人体三维建模包括基于图像轮廓的人手臂和腿的建模及变形参数确定。采用卷积曲面的人体建模给出卷积曲面与卷积曲线在正交投影与弱透视投影下的关系定理。螺旋线模型仅用一根曲线就可表达人肢体的形状变形,可进行细化、粗化、弯曲等,可进行大象鼻子等其他弹性连接体的建模,可完全代替常见的 5 种人肢体模型。采用流形 T 样条曲面的人体三维建模具体建模步骤包括:采用改进的全局共形参数化方法进行 T 样条网格初始化;计算曲面控制点重构 T 样条曲面模型;T 样条曲面局部修正等。采用张量曲面的人体三维建模通过改变矩形角点的偏导数来改变张量曲面的形状,用来表达人肢体形状的变化,各个角点的偏导数代表不同边缘的弯曲程度,也可以通过调和函数使曲面片的形状发生变化。第 3 章展示了采用卷积曲面和基于网格光的人脸三维建模方法。采用卷积曲面的人脸三维建模提出了在个性化人脸模型上生成皱纹的新方法,通过控制轮廓函数的参数生成不同外观的皱纹。在基于网格光的人脸三维建模方面,借助网格光根据双目视觉中的两张二维图像重建三维人脸曲面,为了保护皮肤和眼睛并且降低成本,使用的网格光来自普通的白光光源。第 4 章展示了基于人体骨架模型、基于旋转圆锥曲面模型、基于卷积曲面模型的 3 种三维运动参数估计方法。基于人体骨架模型的运动估计首先提取人体骨架信息,再根据骨架点的三维坐标求出人肢体三维运动参数。基于旋转圆锥曲面模型的运动估计根据左、右摄像机图像上拟合人肢体轮廓的二维圆锥曲线和人肢体所在的空间三维圆锥曲线的对应关系求出人肢体三维运动参数。基于卷积曲面模型的运动估计用卷积曲面的骨架来调节不同姿势,并且三维骨架产生的卷积曲面与对应的二维骨架产生的卷积曲线满足正交投影和弱透视投影定理。第 5 章展示了基于蛋形曲面模型的姿态评价方法、基于螺旋线模型的相似度度量和 H-CrCb 肤色检测方法。基于蛋形曲面模型的姿态评价方法结合图像中目标的边缘特征信息与区域特征信息,建立模型姿态评价函数来度量任意给定状态下模型与图像目标的相似性程度。基于螺旋线模型的人体运动跟踪似然函数选取了边缘、区域两种图像特征,区域特征采用了增量 PCA 获取的子空间来表示,边缘特征采

用了 Chamfer 距离来表征,采用二值图像距离算法求得。肤色检测结合了 H-CrCb 颜色空间。第 6 章展示了基于蛋形曲面模型和基于螺旋线曲面模型的人体运动跟踪。基于蛋形曲面模型的粒子滤波跟踪对的手臂及各肢体运动进行跟踪,针对链接型运动的高维空间特性,结合分块采样策略,采用自上而下的搜索方式完成基于蛋形曲面模型的粒子滤波算法,展示了基于蛋形曲面模型并采用判别方法和生成模型方法、协方差比例采样方法、平面模板匹配方法、稀疏表示方法、“跟踪-学习-检测”方法的 5 种人体运动跟踪方法,展示了基于螺旋线模型并采用线性回归生成式方法的人体运动跟踪方法,展示了基于螺旋线模型和稀疏性协同模型方法的人体运动跟踪方法。第 7 章展示了基于蛋形曲面模型进行运动生物力学分析和基于螺旋线模型进行步态动力学分析。人体转动动力学分析根据转动动力学相关原理采用人体蛋形曲面模型对各环节的转动分别进行分析,从而得到人体各环节的重力、角速度、转动惯量、转动动能、动量矩等转动动力学的参数,并结合转动定律、动量矩定理等进行分析。步态动力学分析采用螺旋线模型进行各环节的质量、转动惯量、重心、速度、加速度、角速度、角加速度、线性动量及其变化等步态动力学参数的计算。第 8 章展示了三款人体三维建模相关产品,分别是虚拟人三维模型运动控制平台软件、婴幼儿颅骨畸形三维检测仪、汉维肢体语言差异模型库及转换平台软件。

本书的研究内容的开展主要分为两个阶段:第一个阶段是作者在上海交通大学图像处理与模式识别研究所与石磊博士、仝明磊博士、何青博士共同完成的,得到了刘允才教授主持的国家自然科学基金面上项目、国家 973 计划等项目的资助;第二个阶段是作者在南京理工大学电子工程与光电技术学院与李存东、皮仕蝉、左爱平、邵佩琳、陈慕举、吴旭东、王飞、毛飞、陈浩、刘若晨等研究生共同完成的,得到了美国加州大学默塞德分校 Ming-Hsuan Yang 教授的指导。该书研究成果的应用是与南京体育学院、上海新华医院、上海杜比汝意医疗科技有限公司、新疆华德软件科技有限公司等单位合作完成的,得到了作者负责的国家自然科学基金面上项目(61075031)、“十二五”国家科技支撑计划(2014BAH06F02)、上海市科技型中小企业技术创新资金项目(1502H181900)、浦东新区科技发展基金创新资金(生物医药)项目(PKJ2015-S19)等的资助。由于时间仓促,本书中部分研究成果尚未正式发表。

作者
2015 年 11 月于南京

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	意义	1
1.1.1	研究意义	1
1.1.2	运动生物力学应用	1
1.1.3	步态分析应用	3
1.1.4	军事应用	4
1.1.5	娱乐应用	6
1.2	国内、外研究现状	7
1.2.1	二维建模与运动分析	7
1.2.2	三维曲面建模与运动分析	9
1.2.3	基于几何的建模与运动分析	14
1.2.4	基于物理的建模与运动分析	16
1.2.5	基于解剖的建模与运动分析	17
1.2.6	人体运动生物力学研究	18
1.2.7	人体步态动力学研究	19
1.3	研究内容	20
1.4	创新点	22
第 2 章	人肢体三维建模	25
2.1	引言	25
2.1.1	超二次椭球曲面人体模型	25
2.1.2	元球隐式曲面人体模型	26
2.1.3	建模方法比较	28
2.1.4	本章研究内容	29
2.2	旋转圆锥曲面人肢体模型	29
2.2.1	旋转圆锥曲面	29
2.2.2	人体骨架	32
2.2.3	虚拟人模型	32
2.2.4	基于图像标记点的人肢体建模	34
2.2.5	基于图像轮廓的人肢体建模	35
2.2.6	基于体积不变性的人肢体建模	38
2.3	蛋形曲面人肢体模型	41
2.3.1	蛋形曲面	42
2.3.2	基于图像轮廓的人肢体建模	44
2.4	卷积曲面人肢体模型	48
2.4.1	概况	48
2.4.2	卷积曲面	49

2.4.3	卷积曲线	50
2.4.4	卷积曲面和卷积曲线投影对应关系	50
2.4.5	人体模型及其初始化	53
2.5	螺旋线曲面人肢体模型	55
2.5.1	螺旋线模型参数方程	55
2.5.2	螺旋线形状分析	57
2.5.3	螺旋线拟合	59
2.5.4	基于图像的肢体建模	60
2.5.5	虚拟人模型	62
2.6	流形 T 样条曲面人肢体模型	63
2.6.1	概述	63
2.6.2	三角网格曲面参数化	66
2.6.3	流形 T 样条	70
2.6.4	曲面重建	70
2.7	张量曲面人肢体模型	71
2.7.1	张量积曲面	71
2.7.2	张量椭球	72
2.7.3	度量张量	74
第 3 章	人脸三维建模	76
3.1	引言	76
3.2	基于网格光的三维人脸建模	81
3.2.1	网格条纹的提取与细化	81
3.2.2	特征点的定位与匹配	90
3.2.3	三维人脸重建	97
3.3	卷积曲面人脸模型	106
3.3.1	通用人脸网格变形	106
3.3.2	卷积曲面人脸建模	108
3.3.3	脸部皱纹的生成	109
3.3.4	实验	110
第 4 章	人体三维运动参数估计	112
4.1	引言	112
4.2	基于骨架的运动估计	113
4.2.1	原理	113
4.2.2	实验	114
4.3	基于旋转圆锥曲面模型的运动估计	117
4.3.1	原理	117
4.3.2	实验	120
4.4	基于卷积曲面模型的关节角度参数估计	121
4.4.1	目标函数与约束函数	122
4.4.2	实验	122

第 5 章	人体运动检测	125
5.1	引言	125
5.2	基于蛋形曲面模型的姿态评价	126
5.3	肤色检测	129
5.3.1	图像预处理	130
5.3.2	常用目标检测算法	130
5.3.3	H-CrCb 颜色空间的肤色分割	132
5.4	基于螺旋线模型的相似度度量	135
5.4.1	增量 PCA	136
5.4.2	二值距离变换	138
第 6 章	人体运动跟踪	139
6.1	引言	139
6.2	基于蛋形曲面模型的粒子滤波跟踪	140
6.2.1	粒子滤波相关理论	141
6.2.2	基于粒子滤波的视觉跟踪框架	146
6.2.3	基于蛋形曲面模型的粒子滤波跟踪	147
6.2.4	实验	150
6.3	采用判别和生成模型方法的运动跟踪	157
6.3.1	图像特征	157
6.3.2	形状和姿态的判别式估计	159
6.3.3	形状和姿态的生成式随机优化	161
6.3.4	实验	161
6.4	采用协方差比例采样方法的运动跟踪	165
6.4.1	算法框架	165
6.4.2	优化粒子滤波算法	166
6.4.3	实验	168
6.5	采用平面模板匹配方法的运动跟踪	172
6.5.1	算法框架	173
6.5.2	相关性	173
6.5.3	创新性	174
6.5.4	最小化	174
6.5.5	实验	174
6.6	采用稀疏表示方法的运动跟踪	179
6.6.1	粒子滤波	179
6.6.2	L_1 最小化运动跟踪	180
6.6.3	实验	182
6.7	采用线性回归生成式方法的运动跟踪	183
6.7.1	带有 Gaussian-Laplacian 噪声的线性回归求解	183
6.7.2	运动跟踪	185
6.7.3	实验	186

6.7.4	跟踪算法对比	190
6.8	采用“跟踪-学习-检测”方法的运动跟踪	203
6.8.1	概述	203
6.8.2	TLD 内部模块	203
6.8.3	相关理论	206
6.8.4	实验	211
6.9	采用稀疏性协同模型方法的运动跟踪	211
6.9.1	概况	211
6.9.2	基于稀疏的可区别分类器 (SDC)	212
6.9.3	稀疏生成模型	214
6.9.4	协同模型	215
6.9.5	更新方案	215
6.9.6	实验	215
6.10	采用动力学约束的运动跟踪	216
第 7 章	人体运动力学分析	218
7.1	运动生物力学分析	218
7.1.1	引言	218
7.1.2	分析原理	219
7.1.3	实验	222
7.2	步态动力学分析	225
7.2.1	分析原理	225
7.2.2	实验	227
7.3	重心比较实验	230
第 8 章	应用	232
8.1	虚拟人三维模型运动控制平台软件	232
8.1.1	软件	232
8.1.2	数据格式	236
8.2	婴幼儿颅骨畸形三维检测仪	239
8.2.1	新生宝宝头形偏的原因和症状	239
8.2.2	产品现状	241
8.2.3	产品概述	242
8.3	汉维肢体语言差异模型库及转换平台软件	245
参考文献		252

第1章 绪 论

1.1 意 义

1.1.1 研究意义

运动估计的研究对象主要分为刚性物体、连接刚体和非刚性物体等。计算机视觉中的运动分析研究均主要集中在对刚体运动的研究，且学者们已取得了一系列成果，并建立了较为完善的理论框架，但是，在现实世界中大多是非刚体运动。人体是连接刚体和非刚体的结合，人体是一种典型的弹性连接体（可变形）。与刚体运动分析相比，非刚体和弹性连接体的运动分析则尚处于十分稚嫩的阶段^{[1][2]}。

近十年来，基于视觉的人体三维建模和运动分析是计算机视觉和图像学领域的一个研究热点，其内容是研究如何从运动人体的图像序列，获取人体的三维形状、大小、结构、纹理等信息，并结合图形学的方法进行三维建模，然后进行基于模型的人体三维姿态估计、三维运动分析、跟踪和理解。该研究在虚拟现实、三维动画游戏、高级人机交互、安全监控、视频会议、医疗诊断、体育训练、人体生物特征识别及基于内容的图像存储与检索等方面具有广泛的应用前景及潜在的经济价值。

在虚拟现实领域，通过基于视觉的人体运动获取方法来捕捉人的运动，生成动画，从而代替价格昂贵的基于传感器的捕获设备，通过人体运动模型和关节运动的规律合成新的运动，从而自动生成复杂的人体运动场景，取代那些手工的费时费力的动画合成方法。三维人体建模与运动分析可以应用于虚拟卡拉 OK，在虚拟舞台上，娱乐者可以与虚拟演员进行交互动作，这些可以通过摄像机将参与者的运动信息输入系统并用真实参与者的图像进行实时渲染。在人机交互和高级人机接口领域，我们希望未来的机器能够像人一样与我们进行更加便捷的交流，如手势驱动控制、语言翻译等，人手势的识别可以应用在面向聋哑人的各种服务设施，面向聋哑人的自动售后机将能识别哑语，体现对残疾人的更多关心。在智能安全监控方面，利用基于视觉的人体运动分析可以在预防和减少犯罪方面发挥重要的作用，这种智能监控系统可以在无人值守的情况下自动理解人的行为，从而及时发出警报，减少损失，可以在所关注的环境中对犯罪行为做出预警，步态识别可以配合其他的生物特征信息进行远距离身份识别。在体育运动训练方面，通过对运动员图像序列的分析，跟踪分析感兴趣的运动模式，对于建立人体几何模型研究关节运动机制从而推动运动员运动水平有着积极的推动作用。在人体运动分析方面，分割图像中的人体部分并在图像序列中提取出人体的骨架，跟踪分析感兴趣的关节运动，对于建立人体的几何模型、解释人体的运动行为机制从而提高它的运动性能有着积极的推动作用，这可以应用于体育运动、舞蹈等训练中。人体运动建模与运动分析有着广泛的应用前景，但是该研究本身处于起步阶段，有很多难点有待解决，比如合适的人体建模方法、快速的人肢体跟踪算法、真实感渲染算法、遮挡处理等。

1.1.2 运动生物力学应用

体育科学是一门新兴的边缘性科学，随着现代体育运动的迅速发展，体育科学本身也产生了一些新学科，运动生物力学就是其中之一。生物力学是研究活体系统机械运动规律的科学。运动

生物力学是生物力学的一个分支,它是研究体育运动技术力学规律的科学。运动生物力学把对体育动作技术的研究课题,赋予生物学和力学的观点及方法,使复杂的体育动作技术奠基与最基本的生物学及力学的规律之上,同生物学、力学互相结合,互相交融,并以数学、力学、生物学及体育技术原理的形式加以定量描述。教练员、运动员可依据所测定的生物力学参数来制订训练计划,改进动作技术^{[3][5]}。

一般而言,体育运动中的动力学分析的目的是根据具体的条件和需要而确定的,因此是多样的,但归纳起来主要有下述几个方面:①揭示动作技术的一般测试结果;②揭示生物力学原理;③揭示高水平运动员完成动作技术的生物力学特性;④对完成的动作技术做出生物力学诊断。

在体育运动中,人们常常用重心的位置来说明完成技术动作的好坏。研究人体重心位置的变化,有助于分析研究技术动作。在静力性动作中,人体重心的高低决定着动作的稳定程度,对保证取得优异的成绩有着十分重要的作用;在动力性动作中,人体重心的高低在完成诸如跳高、跳远、排球等的起跳、艺术体操的翻转等各种形式的运动中,更起着极其重要的作用。

在体育运动员选材方面,人体重心高度在很多体育项目中是一项重要的指标。例如,在艺术体操等观赏性项目中,人体重心需要高,因为人体重心高,则运动员动作舒展、姿态优美。而在举重等力量性项目中,人体重心则要求低,因为重心低,则人体做功距离短,有利于创造优良成绩。所以如果能够检测出人体重心位置,就能为体育运动的高、难、新动作设计和科学训练提供依据,这对体育运动员的选材意义重大。

许多运动技术强调在动作过程中重心轨迹的平稳性,目的在于减小重力的不利作用和体能的消耗。弗恩(Ferne)曾对优秀赛跑运动员的能量消耗问题进行研究,发现用于克服身体重心上下运动的功率占总功率 2.94 马力(1 米制马力=735.49875 瓦)中的 0.1 马力,即约占总功率的 1/30。赛跑中身体重心上下起伏和左右晃动的幅度越大,在这方面消耗的能量就越多。因此,取得运动的绝对成果不仅依赖于运动员身体提供更多的必要能量,还必须通过合理的动作技术转化为动作目的性所要求的有功功率或功率。错误的动作从本质上看正是指多余动作造成无用功,从而降低动作目的性所要求的动作效率。

在投掷运动过程中,身体重心在投掷方向位移不间断的特点,这是人体给投掷物产生良好施力状态的必要条件。如果身体重心在投掷方向的位移出现停顿,就会影响人体给予器械的作用力的发挥,使投掷远度下降。在投掷时身体重心速度应有明显下降现象,这是因为在投掷过程中较好地实现动量传递及产生巨大推力的结果。

在跳高运动中,人体重心在空中的运动轨迹(抛物线),是由起跳离地的瞬间人体腾起的初速度的方向和大小决定的,人在空中只能改变自身的姿势,而不能改变其重心运动轨迹,但空中所做的动作仍然是有意义的,比如跳高成绩在很大程度上取决于身体重心轨迹的最高点离地面的高度。但是在过杆时身体姿势的不同,也直接影响过杆的高度。这时必须遵循动量守恒定理和角动量守恒定律,调整四肢和躯干的相对位置,力求使身体越过的高度接近或超过身体重心所达到的最大高度的横杆,以达到提高运动成绩的目的。

在竞技体操运动中,要完成一个高质量的空翻转体动作,需提高绕重心横轴的翻转速度。运动员在腾空阶段,身体各环节质心的总动量矩守恒,因此缩小身体绕横轴的转动惯量,便可以增加角速度。例如运动员完成大回环脱手的瞬间获得一定量绕身体转轴转动的角动量 $I\omega$,如果他保持脱杠瞬间的身体姿势,靠所获的角动量是不能完成空翻两周动作的。腾空后按照角动量守恒定律的条件改变身体姿势,缩小转动惯量 I ,促使翻转角速度 ω 增大,才能完成翻转的周数。

在跑步运动中,单纯的理论分析,并不能达到揭示跑的一般规律和寻找如何跑得更快、更经济的目的,而必须运用实验测试方法对跑进行分析研究,才能逐步达到上述目的。跑步速度由步长与

步频决定。在视频测量时也可由人体质心的水平位移作为测量步长的依据,即由着地距离、腾空距离及后蹬距离3个分量组成步长。

当前,在体操、跳水、花样滑冰中,创造难新动作已成为取得胜利的重要环节。难新动作包括人体转动动作中横轴的翻腾周数、纵轴的转体度数、参与多轴转动的复合形式,以及增加人体空中转动动作中的周数、度数和旋类动作的结合形式。不同转动动作对起跳技术和调整空中动作提出了不同的要求,加大了动作的难度。

人体动作技术分析的一项重要功能是修改局部动作和设计新动作。在局部动作的修改后,整个运动图形会有一些的改变。如果在计算机显示中观测到的结果理想,则说明修改或新设计的动作值得尝试。这一功能对教练员、运动员十分有帮助,特别是对体操、跳水等技巧项目,有生物拒测性和生物体不可伤害的原则。例如,某体操教练设计出一个高难的下杠动作,教练员对该动作是否合理、是否会造成严重的运动创伤没有把握,不能贸然让运动员去尝试,此时就可以利用对应的物理模型,在计算机上进行模拟取得数据,在仿真程序中证明其可行且有效后再做实际尝试,不必让运动员冒险实验。

然而,虽然人体运动生物力学分析有着十分良好的应用前景,但是目前国际上采用非刚体模型的人体运动生物力学研究还比较少。基于这些事实,迫切需要采用简单、实用的弹性连接体模型进行人体运动生物力学研究,并且实验设备简单,操作简便,实时性强,以进一步完善基于模型的人体运动生物力学分析的理论框架。

1.1.3 步态分析应用

步态是指人或动物通过肢体运动并前进的一种周期性的形式和样子,如行走、奔跑、脚步移动等。与走路不同,走路是一个过程,而步态是一种形式。不同文献对步态的定义多有不同,模糊来说,步态就是描述人走路特点的一种周期性现象,并且每个周期可以被分为多个部分进行分析。当代关于步态分析的研究基本都是以人类为对象的,所以“步态”一般特指是人类的行为方式。步态被分为正常步态和病理步态^{[4][27]}。

步态分析可以采用下列技术进行测定:①动力学,是关于运动的产生过程中,力、能量等方面的研究;②动态肌电图,是关于运动过程中肌肉的行为活动的研究。

步态分析用来分析人类和动物的行走能力,这种技术可用于以下应用。

(1) 医疗诊断:步态的研究可以用于诊断和干预策略,并在未来的发展中负责康复工程。除了临床应用,步态分析也用在专业的体育训练中,以优化和提高运动成绩。步态分析技术可以对步态障碍和矫正骨科手术的效果进行评估。

(2) 生物特征识别和取证:步态风格的微小变化可以被用作生物标识符来识别个体的人。生物标识符包括与时空相关的参数(步长、步速、时间周期)和与运动相关的参数(髋、膝和踝关节的角度及大腿、躯干关节旋转、脚的角度)等。上面的方法属于基于模型的方法。另一种为基于外观的方法,通过步态图像序列的轮廓进行识别。

(3) 比较生物力学:通过研究非人类动物的步态,更深入地了解有关的运动机制,这对了解物种问题的生物学及运动有更广泛的影响。

步行是人类最基本的运动,步行的姿态可分为不同的类型,通过检测人体行走中的运动状态、受力状态等与生物力学有关的物理量,可以进一步分析影响步态的各种因素,如解剖结构、生理功能甚至精神状态的各种变化。步态分析在医疗、体育、康复、人类学、宇航、工业等方面均有重要的科学意义及应用价值。①能够获取人体在各体态和运动下的生理、病理的力学和数学参数,进行人体各部位和机能的检测,所检测的数据经进一步分析计算后,可获得人体各部位(特别是关节)

的受力状态及机械功、代谢能量消耗的情况。②在临床医学（包括骨科、神经科）中，该系统是重要的定量检查与分析的手段，从而改变了沿用已久的定性分析和直观描述。③可以为假肢和人工关节的设计提供所需依据，也是当前人工关节置换术前、后进行定量分析与评价的唯一手段。④为躯干和下肢的生物力学研究提供基本参数。⑤在康复医学中，可以指导患者手术后的行走训练，是设计智能化假肢的支持技术。⑥步态分析系统极适合体育运动中的训练记录分析和评价，是分析动作、提高成绩的定量依据。⑦步态分析系统还可以用于工业测量与控制，如对工业机器人的运动次序进行标定与评价，记录机器人操作时的运动，并以此为依据改进机器人。⑧在人机工程方面，该系统可以提供一个能够精确和自动地收集动、静态拟人数据的方法，这在宇航、航空方面有特殊的应用价值。

1.1.4 军事应用

1. 三维虚拟士兵训练仿真

随着虚拟战场仿真研究的不断深入，人们对其逼真程度和真实感的要求也不断提高，现已不仅满足于三维地形、武器装备（如飞机、坦克、直升机）及烟、雾等特殊效果的仿真实现，同时还关注到最具有活力及生命力的人的仿真。特别是越来越多的军事仿真应用要求有一定数量的虚拟士兵参与到仿真演练中，虚拟士兵已成为虚拟战场中重要的仿真实体，它们的仿真效果必然会影响到整个仿真系统，所以对虚拟士兵进行研究具有十分重要的意义^{[5][26]}。

2002年7月，为解决征兵难的问题，美国陆军开发了一款名为“美国陆军”的电脑游戏，并在网上免费提供这款电脑游戏的下载服务。在玩游戏的过程中，游戏者可以亲历模拟军队机构和基本训练。像“美国陆军”、“全光谱战士”等游戏软件现在已经成为美军培训人才的新平台。俄、德、日、新加坡等国家也相继开发出了专门用于本国军事人员培训的军用版电脑游戏。新加坡国防科技局和美国南加利福尼亚大学合作，为新加坡武装部队开发了一种被称为“全方位指挥官”的电脑游戏，训练军人的决策、资源管理及灵活思考等能力。

国外最著名的虚拟士兵系统是美国 Boston Dynamics 公司的 DI-GUY。该系统可以在实时虚拟环境中嵌入逼真的虚拟士兵，虚拟士兵可以做出各种动作，响应用户的命令，并能根据指定的路线在虚拟环境中漫游。可将这种合成的虚拟士兵加入已有的各种分布式交互仿真环境中去，进行有一定规模的联合作战仿真训练。作为一套成熟的商业软件，DI-GUY 在美军训练模型系统中取得了广泛的应用。但是 DI-GUY 对硬件要求较高，价格昂贵。

作为军事训练的一个重要组成部分，队列训练通过对军人进行严格的训练，使部队人员的动作协调一致，可以培养军人良好的军姿、严整的军容、过硬的作风和严格的纪律，促进部队正规化建设，巩固和提高部队战斗力。古今中外的军队，虽然队列训练的内容和形式各异，但都对队列训练十分重视。

传统的队列训练，主要由施训者讲解示范，受训者根据施训者的讲解和示范，通过大量反复练习，领会掌握动作要领，最后接受考核。这种方式比较单一乏味，难以提高受训者的兴趣和积极性，训练见效慢，所需周期长。

在部队中，士兵训练有严格的标准，一般分为队列训练、擒敌训练、单兵战术训练、体能训练、射击训练和专业训练等。队列训练分为单兵队列训练和集体队列训练，单兵队列训练又分为正步走、立正、跨立、稍息等，集体队列训练分为集合、离散、报数、出列、入列等。擒敌训练包括姿势与步伐、拳法、腿法、防击打技术和擒敌拳等。单兵战术训练包括卧倒、运动姿势（低姿匍匐、高姿匍匐、侧身匍匐、高姿侧身匍匐、滚进）等。体能训练包括 400m 障碍、5km 越野、100m 冲刺、蛙

跳、俯卧撑、单腿伸蹬、组合体能练习等。射击训练包括站姿射击、卧姿射击、跪姿射击。专业训练就是根据在部队中所从事的具体专业而进行的训练(火箭筒手、炮兵、雷达兵、通信兵等的训练)。可以采用虚拟人模型对士兵的基本动作进行仿真。

随着军事训练需求的不断提高,军事仿真训练的目的和对象有了很大的变化。从早期的单兵种、单武器平台的作战技能训练,发展为多兵种、多武器平台的分布式联合军事仿真训练,越来越多的军事仿真应用要求一定数量的虚拟士兵(步兵、伞兵等)参与到仿真演练中。而现有仿真训练系统大部分着重武器平台级实体,如坦克、直升机、飞机、自行火炮等的仿真,缺少对士兵实体的研究。三维虚拟士兵(3D Virtual Soldier)是士兵在虚拟战场(Virtual Battlefield)中的三维几何特性与行为特性的表示,可广泛应用于模拟训练、军事训练、联合军事仿真和战争预演中,以增强系统的逼真性和沉浸感。士兵实体与普通实体相比,几何模型和运动模型复杂,运动控制困难,行为模型描述复杂。在以往的虚拟战场仿真演练中,大多关注武器装备如飞机、坦克、直升机的仿真,而忽视了最具有活力及生命力的士兵仿真,使仿真可信度降低。士兵仿真与常见的武器装备仿真相比,无论在几何模型还是行为模型的描述上,都更加复杂,不但涉及动画、计算机图形学,而且涉及生物力学、心理学和人工智能等领域,研究难度较大。

虚拟士兵能否高逼真度地模拟真实士兵的行为动作,关系到整个作战仿真系统的真实性和有效性,这是一项具有挑战性和前沿性的工作。当前的行为模型都只考虑了感知活动的某一方面,具有一定的片面性,因此虚拟士兵感知活动的逼真度较低。

2. 虚拟维修

(1) 虚拟维修的分析过程中引入虚拟人的原因

维修性是系统效能的重要构成因素。同时,维修性的好坏,关系着维修所需的时间及其他物质资源消耗,甚至决定着维修费用,因而,维修性是影响装备寿命周期费用的重要因素^{[5][26]}。

如果能在装备研制设计的初期,通过模型样机(原型)进行维修仿真,由设计和维修人员对装备的维修性进行一定的分析、评价,并改进设计方案,那么,就能提高装备服役后的维修性,降低装备在维护中的成本,提高装备完好率,从而提高部队的战斗力。

对于复杂的装备,实物样机的制作本身比较复杂,需要较多的时间和较高的成本,而且往往不可能在装备研制初期就制作实物样机。为了克服实物样机的局限,随着计算机技术的发展,出现了虚拟样机(虚拟原型)的概念。虚拟样机是计算机技术和建模与仿真技术相结合的产物。虚拟样机技术发展至今已经获得了广泛的认可。大量实践证明,虚拟样机技术有效地缩短了装备的研制周期,降低了研制成本。

利用虚拟现实进行维修仿真,其中的动态对象一方面是维修部件,另一方面就是维修人员,因此人的因素是装备维修性分析中的一项重要内容。在对虚拟样机进行维修仿真中,零件的可见性、可达性、是否易于拆卸等因素的分析,需要通过人在回路的仿真来实现,而这种需求在现有的计算机辅助设计(CAD)技术中尚难以实现。基于虚拟现实的维修性分析将通过虚拟人技术,在维修仿真过程中充分考虑人的因素,从而能比较全面地进行维修性分析。而虚拟现实技术提供人与装备以自然方式交互,使人能用自然语言或手势改变装备的设计方案。

与虚拟训练环境之间进行交互最多、最频繁的是参与训练的人,整个维修工作也是通过维修人员的各种动作来实现的,因此,虚拟人是虚拟维修环境中的重要组成部分之一。为了增进维修训练的沉浸感,就要尽可能地保持人在真实空间与虚拟空间的一致性,保持虚拟人的动作姿态与人的动作姿态的一致性。两个“一致性”的实现首先需要提取现实世界中装备维修作业的概念和知识,并

将其融会到虚拟空间中。其次需要对虚拟维修人建模和维修动作控制方法展开研究,设计并建立合理的虚拟维修人动作模型。

引入维修人员的方式有两种:一种是由真人操作虚拟样机实现维修仿真,另一种是在计算机仿真环境中,通过虚拟人作为真人的替身,同虚拟样机交互作用实现维修仿真。两种方式各有优缺点,都是维修性分析中不可缺少的。从目前的技术条件看,前者在技术和成本方面存在瓶颈,在技术上,目前的虚拟现实交互设备(如数据手套)在做比较精细的维修动作(如拧螺丝)时有困难;在成本上,真人操作虚拟样机的成本是比较高昂的。而后一种方式在前者存在困难的两个方面都有一定的优势。因此,构造作为真人替身的虚拟人,成为了在维修中引入维修人员的一个重要研究方向。

(2) 用于维修性分析的虚拟人软件系统特性分析

在维修过程中,在涉及人的物理、行为属性方面,面临如下需求:

- 通过降低维修需求,从而减少产品的生命期成本;
- 在产品设计中优化维修性;
- 保证技师能接近维修部件和工具;
- 预估维修任务的受力和时间需求。

利用虚拟人可以对产品的维修性及维修工作进行分析评价,具体体现在如下几方面:

- 维修可达性——是否留有足够的空间以便技师完成维修任务;
- 部件拆除与更换——是否所有的技师都能有效地拆除与安装部件;
- 可见性——当技师执行维修任务时能看到什么;
- 接触与抓取——技师能否有效利用工具完成维修作业;
- 受力分析——对特定维修任务的受力要求是否易于技师完成;
- 提举任务分析——技师在完成提举任务中是否面临致伤风险;
- 安全性分析——维修任务是否能够安全地完成。

在维修过程中利用虚拟人可以获得如下好处:

- 减少设计返工;
- 较快地改善维修工作;
- 降低训练成本;
- 减少生命期成本;
- 提高客户满意度;
- 提高产品竞争力。

1.1.5 娱乐应用

随着互联网络的发展,虚拟现实技术在网络上得到了广泛的应用。人与人之间的交流和沟通除了采用文本和图片的形式外,如果增加虚拟现实技术,将会给人们提供更加丰富的交互形式。虚拟人的形体、运动和行为交互的逼真性设计和网络传输的快捷性成为虚拟现实产品开发的研究重点。下列几种有应用前景的系列产品可以满足市场需求。

(1) 签名档:签名档是网络上通信、留言的个性化的 ID。现有的各种聊天软件(如 SKYPE、QQ、微信等)联系人的签名档都是用文字来代表的,在各 BBS 论坛上发表言论后也可以采用文字、图片和视频作为自己的签名档。这种软件给网络用户提供根据自己的构想设计属于自己个性的动态签名档。为了更好地表现每个人的个性,使用者用摄像头拍摄代表自己个性的一组动作,通过这项软件生成与真人动作一致的一组虚拟人动作的视频来作为此人的签名档。

(2) 动画真人秀: 动画真人秀是供 3D 动漫爱好者娱乐开发出来的功能齐全的个人版 3D 动漫制作软件。用户可以利用摄像头拍摄场景、人体运动, 然后利用这项软件对这段视频进行处理, 软件中包含卡通形象库, 用户可以挑选喜欢的卡通形象, 最后是一个被挑选出的卡通形象来再现主角的动作。(举个例子: 三岁的小明很喜欢机器猫, 于是爸爸用摄像头拍摄小明在家唱歌、跳舞、说话的视频, 运用这种软件, 可以得到机器猫在小明家唱歌、跳舞、说话的自拍动画片。) 该应用的主要对象是动漫发烧友、小朋友等, 可以实现变成某个形象的梦想, 如变成超人、蝙蝠侠、白雪公主等。这种软件还可以自制一段动画, 用来道歉、祝贺等。

(3) 虚拟主播: 虚拟主播是在网站上采用虚拟人进行新闻播报、产品报价等。现有的各种网站上, 产品介绍都是当读者单击某个选项后弹出另一个网页, 在新的网页里有详细的产品介绍, 为了给读者提供更加丰富的交互形式, 让做广告人结合自己产品的实际要求, 由做广告人自己拍摄一段人的动作视频, 然后利用该软件对这段视频进行处理生成虚拟人, 做出与真人一样的一组动作。当读者单击某个广告选项后弹出一个虚拟人, 虚拟人做出各种姿势来介绍该产品, 并弹出一文字对话框进行产品文字说明。

(4) 聊天虚拟人: 聊天虚拟人是在网络聊天中采用动态的虚拟人代表聊天的另一方。现有的各种聊天工具都采用了静止的人模型代表聊天的对方, 如果把聊天双方的虚拟人变成动态的, 当聊天一方做一个姿势时, 用摄像头拍摄他的动作, 聊天的另一方就会有一个虚拟人模型恢复他的动作。该产品满足了很多用户在聊天时并不希望让别人看到自己的真实图像, 而只是想用一个能代表自己个性或动作的虚拟人来代替, 又因为视频数据量大, 在网络上传输速度慢, 容易出现丢帧现象, 因此这项产品具有广阔的应用前景, 特别是在手机和即时通信上的应用。

1.2 国内、外研究现状

本节展示了基于可变形人体模型进行分析的研究现状^{[1][5]}, 包括二维模型、三维曲面模型、基于几何的模型、基于物理的模型、基于解剖学的模型等, 也展示了基于模型的运动生物力学^{[3][5]}和步态动力学^[4]的研究现状。

1.2.1 二维建模与运动分析

1. 曲线模型

二维曲线人体建模方法主要包括离散采样点方法、黎曼几何方法、平方根速度表示法、变分统计法、B 样条曲线法等。黎曼几何方法由 H.Tabia 等人提出, 这种方法匹配三维物体, 可用于非刚体变化和部分相似的模型。该方法采用的平方根弹性框架 (SRE) 可以简化弹性体形状分析, 定义了感兴趣封闭曲线的空间, 使用弹性度量来在这个空间中加入黎曼结构, 并且在这种度量下计算了测地路径, 这些测地路径能够被视为最优的曲线弹性变形。离散采样点法由 G. Mori 等人提出, 这种方法根据二维图像定位人体关节点位置, 使用这些关节点估计人体三维结构和姿态, 如图 1.1(a) 所示, 该方法首先使用形状内容匹配技术与运动学链状变形模型结合的方法进行输入图像和数据库图像的匹配, 然后使用关节点位置去估计人体三维结构和姿态。在这种方法中, 一个人体的形状是由形状内部和外部轮廓上一系列离散采样点来代表的。首先进行边缘检测, 采用边缘检测器获得人身体轮廓的一系列边缘像素, 然后从这些边缘像素中采样 300~1000 个点作为人体的采样点。平方根速度表示法由 A. Srivastava 等人提出, 用于分析弹性度量欧氏空间中的曲线形状, 如图 1.1(b) 所示。变分统计法由 X. L. Huang 等人提出, 这种方法用于形状配准, 如图 1.1(c) 所示。首先, 感兴趣

的形状被隐性地嵌入一个距离变换的高维空间中,在这个隐性的嵌入空间中,配准使用了分层方式的公式表示,共同的信息准则支持大量的转换模型,并通过全局配准来优化;然后,一个基于 B 样条的增量自由变形 (IFFD) 模型用于使差值平方和 (SSD) 减至最低数量,并且进一步恢复一个密集局部非刚体配准区。

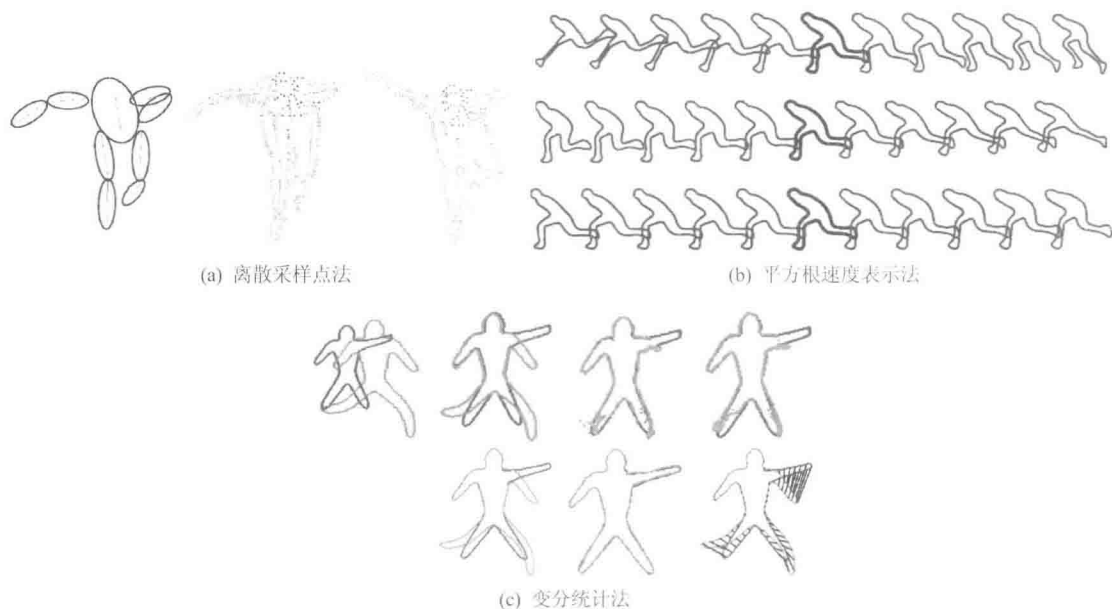


图 1.1 基于二维曲线模型的运动分析

2. 二维轮廓模型

二维轮廓人体建模方法主要包括点分布模型、二维部件模型、可变形结构 (DS) 模型、轮廓人体 (CP) 模型等。点分布模型由 X. M. Liu 等人提出,这种助推的可变形模型用于人体校准,该模型由一个点分布模型表示的形状部分和采集局部特征表示的外观部分组成,局部特征采用助推二阶分类器特殊地训练,如图 1.2(a)所示。二维部件模型由 O. Freifeld 等人定义,这种新的轮廓人体模型具有逼真三维模型的表现力和简单二维部件模型的计算效率,这种轮廓人体模型来自能表达自然形状和姿态变化的三维 SCAPE 人体模型,这种模型的投影轮廓被分割成各个部件并形成训练集,如图 1.2(b)所示,CP 模型将人体变形分成三个组成成分:形状的变化、视觉角度的转换和部件的旋转。可变形结构 (DS) 模型由 S. Zuffi 等人定义,这种模型是以前图案结构 (PS) 模型的扩展,能表现非刚体形状的变形,如图 1.2(c)所示。DS 模型的每个部分由一个低维形状变形空间和各部分之间对应的势能表示,这种势能能反映姿势引起的各个部分的形状变化,这种模型的一个关键优点是它能更精确地进行目标轮廓的建模,可以使图像似然模型比以前的 PS 似然更有判别力。这种人体 DS 模型产生于虚拟三维人体模型的二维投影,并使用非参数置信传播的一种形式来获取图像中的人体姿势。轮廓人体模型由 P. Guan 等人研究,用于人体单目图像序列的检测、跟踪、分割和姿态估计,如图 1.2(d)所示,这是一种反映人体二维形状和姿态的低维、逼真、参数化统计生成模型,这种 CP 模型由多人三维人体模型 (如 SCAPE 模型) 的形状和姿势的二维投影生成。CP 模型基于一种模板,与能变形成新的姿势和形状的参照轮廓对应。模型的变形被参数化,并把因为姿势、身体形状和拍摄摄像头参数的改变导致人体二维形状改变的因素包括进去,模型的因式分解可以将不同原因造成的形状改变进行独立建模。