·论 著·

基于3D激光扫描、多刚体重建和遗传算法优化的车-人碰撞事故再现模拟与损伤分析

孙 杰[1,2],王 涛[3],李正东[2],邵 煜[2],张志勇[2],冯 浩[2],邹冬华[2],陈忆九[2]
(1.复旦大学上海医学院法医学系,上海 200032; 2.司法鉴定科学研究院 上海市法医学重点实验室 上海市司法鉴定专业技术服务平台,上海 200063; 3.上海市公安局松江分局刑事科学技术研究所,上海 201600)

摘 要:目的 利用3D激光扫描技术,结合多刚体动力学和遗传算法优化对一起汽车与自行车及其骑车人碰撞的交通事故进行再现模拟与损伤分析,为法医学死因鉴定提供生物力学依据。 **方法** 利用3D激光扫描技术对肇事汽车进行测量,根据测量数据建立人-自行车-汽车多刚体模型,并设置优化变量的取值范围,利用多目标遗传算法,带精英策略的快速非支配排序遗传算法求最优近似解,并与事故现场附近监控视频记录进行比较。 **结果** 事故车辆激光扫描重建结果良好,通过遗传算法优化收敛所获得的最优近似解中的假人、自行车、汽车的动力学行为与监控视频中所记录的三者动力学行为相符合,假人的损伤参数也与事故中骑车人的损伤情况及部位相一致。 **结论** 利用3D激光扫描技术,结合多刚体动力学和遗传算法优化可以对人-自行车-汽车碰撞前的运动状态、碰撞致伤过程进行重建,并对受害者的损伤进行力学分析,在交通事故受害人致伤方式鉴定及死因分析中具有应用价值。

关键词: 法医病理学;生物力学;多刚体动力学;图像处理,计算机辅助;事故,交通;遗传算法;3D激光扫描技术
中图分类号: DF795.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1004-5619.2017.06.001
文章编号: 1004-5619(2017)06-0575-06

Reconstruction of Vehicle-human Crash Accident and Injury Analysis Based on 3D Laser Scanning, Multi-rigid-body Reconstruction and Optimized Genetic Algorithm

SUN Jie[1,2], WANG Tao[3], LI Zheng-dong[2], SHAO Yu[2], ZHANG Zhi-yong[2], FENG Hao[2], ZOU Dong-hua[2], CHEN Yi-jiu[2]
(*1. Department of Forensic Medicine, Shanghai Medical College, Fudan University, Shanghai 200032, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Forensic Medicine, Shanghai Forensic Service Platform, Academy of Forensic Science, Shanghai 200063, China; 3. Institute of Criminal Science and Technology, Songjiang Branch of Shanghai Public Security Bureau, Shanghai 201600, China*)

Abstract: Objective To reconstruct a vehicle-bicycle-cyclist crash accident and analyse the injuries using 3D laser scanning technology, multi-rigid-body dynamics and optimized genetic algorithm, and to provide biomechanical basis for the forensic identification of death cause. **Methods** The vehicle was measured by 3D laser scanning technology. The multi-rigid-body models of cyclist, bicycle and vehicle were developed based on the measurements. The value range of optimal variables was set. A multi-objective genetic algorithm and the nondominated sorting genetic algorithm were used to find the optimal solutions, which were compared to the record of the surveillance video around the accident scene. **Results** The reconstruction result of laser scanning on vehicle was satisfactory. In the optimal solutions found by optimization method of genetic algorithm, the dynamical behaviours of dummy, bicycle and vehicle corresponded to that recorded by the surveillance video. The injury parameters of dummy were consistent with the situation and position of the real injuries on the cyclist in accident. **Conclusion** The motion status before accident, damage process by crash and mechanical analysis on the injury of the victim can be reconstructed using 3D laser scanning technology, multi-rigid-body dynamics and optimized genetic algorithm, which have application value in the identification of injury manner and analysis of death cause in traffic accidents.

Keywords: forensic pathology; biomechanics; rigid multibody dynamics; image processing, computer-assisted; accidents, traffic; genetic algorithm; 3D laser scanning technology

道路交通事故是人、车、道路、环境等因素综合作用的结果,其技术鉴定涉及法医学、痕迹学、工程学、生物力学等多学科、多领域的交叉融合。复杂的交通伤鉴定一直是法医学实践中的难点。目前,对交通事故致伤过程的分析主要依赖于法医学专家的经验,但在法医学鉴定实践中,很多情况下难以直接通过经验进行判断,并且法庭对证据的科学性要求越来越高,单纯进行经验性判断所得证据的说服力越来越弱。因此,有必要建立一套更加有效、客观的方法来实现道路交通事故重建和交通伤的生物力学分析[1-3]。

利用多刚体动力学对道路交通事故进行重建是目前较主流的道路交通事故计算机仿真方法[4-5]。多刚

基金项目:"十三五"国家重点研发计划资助项目(2016YFC0800702);国家自然科学基金资助项目(81571851,81401559);上海市法医学重点实验室资助项目(17DZ2273200);上海市司法鉴定专业技术服务平台资助项目(16DZ2290900);上海市科委社会发展专项(14231202500)
作者简介:孙杰(1992—),男,硕士研究生,主要从事法医病理学损伤与生物力学研究;E-mail:sunjie504@hotmail.com
通信作者:邹冬华,男,硕士,副研究员,主要从事法医病理学损伤与生物力学研究;E-mail:zoudh@ssfjd.cn
通信作者:陈忆九,男,研究员,博士研究生导师,主要从事法医病理学研究;E-mail:chenyj@ssfjd.cn

体重建主要依据法医学检验和车辆痕迹检验结果，结合现场遗留的车辆制动痕迹以及车辆、人体的最终位置、落点和相对位置关系，从而反推事故碰撞前的状态，并对受害者的损伤进行力学分析，为交通伤鉴定提供生物力学依据。本研究在利用 3D 激光扫描技术对肇事车辆进行测量的基础上，结合多刚体动力学对一起轻型客车与自行车及其骑车人碰撞的道路交通事故进行重建，利用遗传算法全局寻优，并将模拟结果与事故现场附近监控视频记录的真实情况进行比较，探讨 3D 激光扫描技术、多刚体重建和遗传算法优化在交通事故法医学鉴定中的应用价值。

1 材料与方法

1.1 案例资料

某日，一辆轻型客车由南向北行驶至路口时，发现一辆由东向西骑行的自行车，驾驶员进行了紧急制动并向左避让，但车头依然与自行车发生碰撞，骑车人经抢救无效于当日死亡。本案例资料由司法鉴定科学研究院提供，事故过程被事故路口监控摄像头完整记录。

1.2 主要仪器与软件

Focus 3D 高精度三维激光扫描仪及后处理软件 FARO SCENE(美国 FARO 公司)。MAthematical DYnamic MOdel(MADYMO)多刚体动力学分析软件，由荷兰国家应用科学研究院(TNO)开发。DS SIMULIA 推出的 Isight 多学科优化软件。

1.3 车辆痕迹检验与多刚体建模

1.3.1 车辆痕迹检验

肇事汽车为 IVECO 轻型客车，前挡风玻璃以距其下沿 28 cm、距其右边沿 40 cm 处为中心呈放射状碎裂，局部黏附黑色毛发(与死者顶枕部偏右侧有头皮擦伤相吻合)；发动机舱盖距其前端 0~67 cm、距其右边缘 0~40 cm 范围见由前向后刮擦痕迹，表面泥灰呈减层，局部黏附灰黑色物质(与自行车车把左把套外端痕迹吻合)；右前翼子板前部凹陷变形；右前照灯边框下部弯折变形，伴刮擦痕迹，表面白色涂层呈减层，局部黏附铁锈类物质；前保险杠距地面高 40~67 cm、距车右端 10~45 cm 范围破损，局部伴刮擦痕迹(图 1)。

自行车车把左把套外端距地面高 96~98 cm 范围见刮擦痕迹，表面灰黑色物质呈减层(图 2)。前网篮左部破裂，其左侧距地面高 70~88 cm 范围见刮擦痕迹，表面铁锈呈减层，局部黏附白色物质。

1.3.2 利用 3D 激光扫描技术对车辆进行测量

应用 Focus 3D 高精度三维激光扫描仪对车辆进行多角度、全方位扫描。扫描参数：扫描点距离为 3.068 mm/10 m，视角为 305°(垂直)×90°(水平)，彩色扫描，地平线加权测光，系统距离误差为 2 mm，单次扫描时间为 17 min。本次扫描采用了场景拼接式扫描，在车辆周围放置标准球体后，通过移动扫描仪进行多次扫描，并在后期进行无缝拼接，获得了车辆多角度、全方位的三维点云数据。



红色圆圈标注处示前挡风玻璃放射状碎裂，蓝色圆圈标注处示发动机舱盖刮擦痕迹，左下角黄色框内为发动机舱盖刮擦痕迹放大图

图 1 肇事汽车痕迹检验

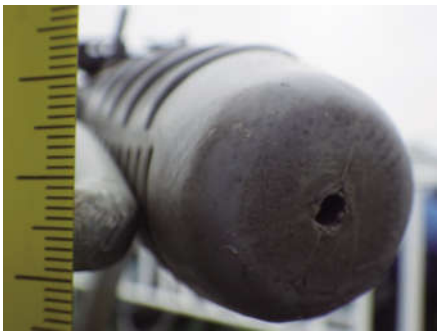


图 2 自行车车把左把套外端刮擦痕迹

1.3.3 建立车辆三维多刚体仿真模型

根据 3D 激光扫描技术获得的测量数据，建立车辆的三维多刚体仿真模型。本研究对轻型客车建模时采用曲面网格模型。有限元曲面网格能更好地反映车辆的外形，而且能更逼真地模拟人车接触时的受力分布[6]。该模型的接触刚度特性参考相似车辆在欧洲碰撞试验的结果[7]。同时，为了模拟车辆在紧急制动时的“点头”状态，在对车辆进行建模时，进行了压缩前悬挂、抬升后悬挂处理。

同样，利用 3D 激光扫描技术获得的测量数据，建立自行车的三维多刚体仿真模型，包括车架、前后轮、车把及前叉、踏板轴及左右踏板等主要部件，并设置前、后轮转动铰链，踏板轴处转动铰链和龙头处转动铰链。该模型的接触刚度特性参考相关实验的测试结果[8-10]。

1.4 人体损伤检验与多刚体建模

1.4.1 人体损伤检验

死者，男性，76 岁，身高 174 cm。尸体检验：死者顶枕部偏右侧头皮擦伤(图 3)，骨盆骨折。左侧损伤

主要为左肱骨中上段骨折，左大腿下段内侧、外侧皮肤青紫和擦伤，左内踝、外踝皮肤青紫；右侧损伤主要为身体突出部位的皮肤擦挫伤。



图3 死者顶枕部偏右侧头皮擦伤

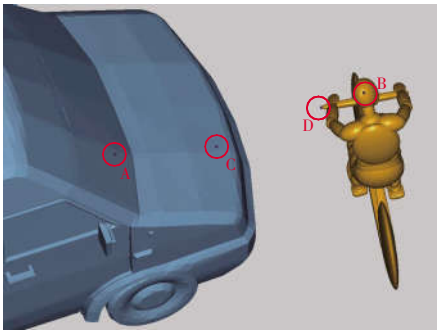
1.4.2 人体多刚体建模

本研究采用荷兰国家应用科学研究院(TNO)开发的50%男性假人模型，该假人由52个刚体组成，用64个椭球面表示人体表面，连接各刚体的铰链表现关节刚度等人体生物力学特性，并模拟骨折现象。该假人经过了严格的人体冲击试验的验证，是目前事故再现中最常用的假人模型[6,11-13]。在根据事故当事人体形特征进行缩放调整后，建立自行车与骑车人的耦合数值模型。

1.5 模拟参数设置

碰撞仿真中采用刚性面对刚性面、刚性面对网格面的接触算法。根据事故当时的现场环境，设置相应的摩擦系数[14]，其中，轮胎与地面之间的摩擦系数为0.55，假人与轻型客车之间的摩擦系数为0.3，假人与自行车之间的摩擦系数为0.4，假人与地面之间的摩擦系数为0.67，自行车与轻型客车之间的摩擦系数为0.3。同时，在轻型客车、自行车和假人模型上添加了4个碰撞标志点。在轻型客车前挡风玻璃放射状碎裂的中心添加碰撞标志点，这个标志点代表死者头部与轻型客车的初始碰撞位置；在死者顶枕部偏右侧头皮擦伤处添加相应的碰撞标志点；在轻型客车发动机舱盖前侧灰黑色物质附着处添加碰撞标志点，这个标志点代表自行车车把左把套外端与轻型客车的初始碰撞位置；在自行车车把左把套外端添加相应的碰撞标志点(图4)。

本次模拟的优化变量包括轻型客车的前进速度(v_1)、轻型客车的向左转弯角速度(ω)、自行车骑行速度(v_2)、人体和自行车相对于轻型客车的位置、人体头部姿势。人体和自行车相对于轻型客车的位置通过假人模型的H点(左、右髋关节铰链的中点)相对轻型客车长轴的距离(D)和自行车绕垂直轴转动的角度(α)来定义。人体头部姿势通过颈部铰链的上下转动角度(β)和左右转动角度(γ)来定义。优化变量的示意图见图5，相应优化变量的取值范围见表1。



A、B：头部-挡风玻璃碰撞标志点；C、D：左车把-发动机舱盖碰撞标志点

图4 车辆、自行车及骑车人多刚体模型上的碰撞标志点

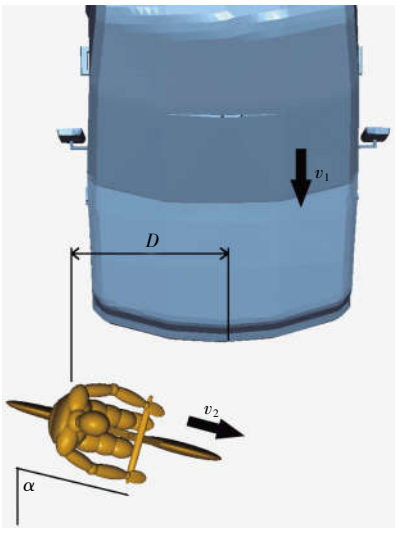


图5 车辆、自行车及骑车人多刚体模型优化变量的示意图

表1 优化变量的取值范围

优化变量	最小值	最大值
D/m	0.0	1.0
v_1/(m/s)	0	20
v_2/(m/s)	0	5
ω/(rad/s)	0	0.5
α/rad	0.0	1.5708
β/rad	−0.5	0.5
γ/rad	−1.3	1.3

1.6 遗传算法优化求解

本研究在对人-自行车-汽车碰撞交通事故进行数字化重建的过程中，利用了撞击痕迹的位置、人体损伤的位置来推测汽车、自行车和人体碰撞前的状态[15]。因此，在本案中存在两个目标函数，定义为已知的汽车、自行车和人体的碰撞点在初次碰撞时的相对位置[6]。

$$\text{Minimize}[f_1(X), f_2(X)],$$

$$f_1(X)=d_{\text{head}}|_{t_\text{head}},$$

$$f_2(X)=d_{\text{bicycle}}|_{t_\text{bicycle}}。\quad (1)$$

$f_1(X)$是指人体头部与汽车初次碰撞时(t_head)，头部碰撞标志点与汽车前挡风玻璃上的碰撞标志点之间的相对距离(d_{head})。$f_2(X)$是指自行车与汽车初次碰撞时($t_bicycle$)，自行车车把左把套外端碰撞标志点与汽车发动机舱盖前侧的碰撞标志点之间的相对距离($d_{bicycle}$)。因为存在两个目标函数，所以本次优化设计算法采用一种多目标遗传算法，带精英策略的快速非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-Ⅱ，NSGA-Ⅱ)[16]。在优化过程中，一共进行了20次迭代，每次产生20个个体，一共进行了400组模拟，计算时间为100 h。

本研究将假人模型的损伤参数与真实事故人体损伤情况进行对比。头部伤害标准(head injury criterion，HIC)是汽车领域评价头部伤害时最常使用的准则，其计算公式如下：

$$HIC=\max\left[\left(\frac{1}{t_2-t_1}\int_{t_1}^{t_2}a_{head}dt\right)^{2.5}(t_2-t_1)\right]^{[17]}, \quad (2)$$

t_1为加速度作用中的任意时间，t_2为相对于t_1、使HIC达到最大的时间，a_{head}为头部中心的合成加速度。而在交通事故的损伤评估中，最常使用的解剖学上的标准为《简明损伤定级标准》(abbreviated injury scale，AIS)[17]。AIS是一种描述损伤对生命威胁程度的指标，共分为7个等级，由AIS0至AIS6，分别代表无损伤、轻伤、中度伤、重伤、严重损伤、致命伤、无法救治的损伤。AIS等级越高说明该损伤对生命威胁越大[18]。HIC与AIS评分之间存在相关性[17]，通过HIC值来预测假人实际AIS分值，判断假人实际损伤情况。

2　结　果

2.1　事故车辆激光扫描重建结果

使用后处理软件FARO SCENE观察和处理扫描获取的点云数据，将测得的点云数据组成一个完整的点云模型。利用软件自动分段处理功能、抽取功能、模型构造功能，进行数据配准、滤波、插值、平滑、网格化(规则网格、不规则网格)和纹理映射等技术将车辆模型细节化，最终完成车辆三维建模，实现对车辆的测量。

图6为车辆的实际激光扫描点云，图中车辆的尺寸、外形及撞击痕迹等特征清晰可见，色彩纹理准确，但诸如车牌等细节之处的点云比较模糊，前挡风玻璃、车灯等激光反射效果不理想的位置存在部分数据缺失。

2.2　遗传算法优化结果

本研究采用了NSGA-Ⅱ多目标遗传算法对交通事故仿真模型进行全局寻优，经过400组模拟，遗传算法成功获得了最优近似解。为了研究遗传算法在降低设计变量的分散性、快速收敛目标函数上的作用，20次迭代中每代的20个个体的平均值和最小值被罗列在图7中。从中可以发现，应用NSGA-Ⅱ多目标遗传算法进行迭代运算，设计变量的分散性出现了明显下降。同时，第9代至第20代目标函数平均值的变化幅度相比于第8代目标函数的平均值波动在20%以内，这个现象说明目标函数已经收敛完成。经过20次迭代，在第8次迭代中发现了目标函数的最小值，这同时也是全局的最优近似解。



图6　事故车辆激光扫描重建结果

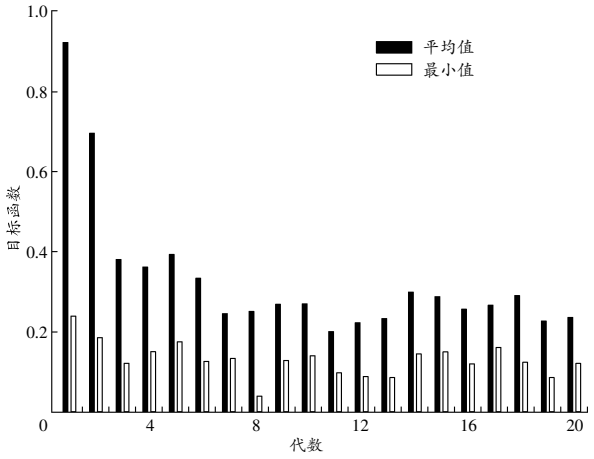


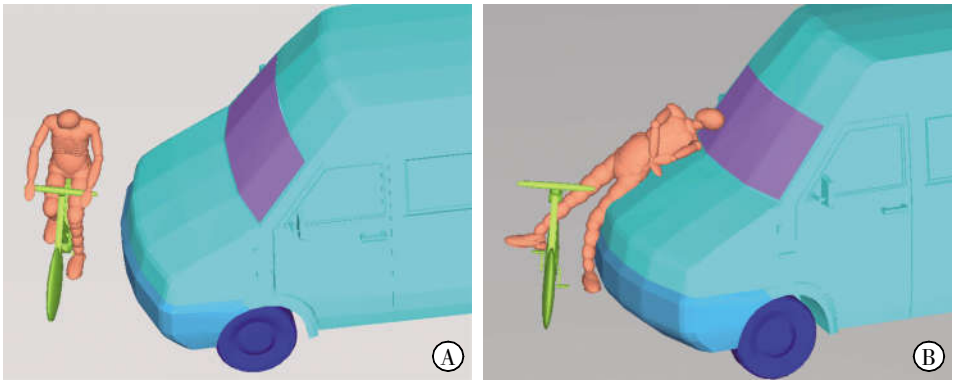
图7　遗传算法优化过程中每代个体目标函数的平均值与最小值

2.3　最优近似解

目标函数的最小值为0.039 9 m，轻型客车的前进速度(v_1)为15.48 m/s，轻型客车的向左转弯角速度(ω)为0.08 rad/s，自行车骑行速度(v_2)为1.24 m/s，人体和自行车相对于轻型客车的位置为0.82 m(D)和1.26 rad(α)，人体头部姿势为0.47 rad(β)和-1.28 rad(γ)。模型输出的假人、自行车、汽车的动力学行为(图8)与监控视频中所记录的三者的动力学行为相符合。

本研究中，假人模型的HIC值为1 397，代表着死者有46.7%的概率为AIS4损伤，这与自行车骑车人头部损伤程度相吻合。假人模型骨盆最大受力为7215 N，有研究[19]表明，髋部最大耐受冲击力限度为6 000 N，这与自行车骑车人骨盆骨折相吻合。同时，自行车骑

车人躯体左侧的损伤，如左肱骨中上段骨折，左大腿下段内侧、外侧的皮肤青紫、擦伤，左内踝、外踝皮肤青紫，与模型中假人身体左侧遭受轻型客车撞击的情况相符。自行车骑车人躯体右侧的损伤主要为身体突出部位的皮肤擦挫伤，符合其躯体右侧落地在地面滑行所致。



A：碰撞前初始状态（t=0 ms）；B：假人头部与车辆挡风玻璃碰撞（t=115 ms）

图8 最优近似解中假人、自行车、汽车的动力学行为

3 讨 论

复杂的交通伤鉴定一直是法医学实践中的难点。本研究在利用3D激光扫描技术对肇事车辆进行测量的基础上，结合多刚体动力学和遗传算法优化，对交通事故进行了重建，实现了对交通伤致伤过程及应力响应机制的分析。

3.1 利用3D激光扫描技术进行车辆测量

本研究在对事故车辆进行测量时利用了3D激光扫描技术，相对于传统的人工勘测，3D激光扫描技术有非接触性、快速测量、不需要光源、精度高、采集空间点密度大、获得信息丰富、便于储存等优势，具有广阔的应用前景和价值[20-21]。利用3D激光扫描技术可以实现事故车辆证据信息的有效采集和固定，有助于鉴定过程中人-车-道路等多因素的比对分析，有助于事故仿真模拟的逆向动力学分析，对判定事故发生过程、分析事故成因、认定事故责任具有重大价值。

但在实际应用中，有多种因素会影响扫描结果的质量。如扫描仪的高度会影响扫描结果的完整性，本次扫描对象为IVECO轻型客车，车高约2.5 m，由于三脚架高度有限，客车顶部区域超过扫描范围，造成数据缺失。被扫描对象的透明度也会影响扫描质量，如前挡风玻璃、车灯等。因为玻璃几乎不反射激光，导致投射的激光穿透玻璃而出，从而无法获取前挡风玻璃、车灯部分的点云，后期可以通过在前挡风玻璃、车灯表面喷射显像剂来解决该问题。

3.2 多刚体重建和遗传算法优化

本研究利用多刚体动力学和遗传算法优化的方法逆向动力学求解事故碰撞过程，再现人-自行车-汽车碰撞前的运动状态、碰撞致伤过程等，求解所获得的假人、自行车、汽车的动力学行为与实际监控视频所记录的三者的动力学行为相符合。相比于传统交通事故致伤过程的分析依赖于法医学专家的经验，该方法在证据的科学性、直观性和说服力上都更具优势。BUCK等[22]使用3D光学扫描技术、虚拟解剖技术对一起汽车-行人碰撞事故现场进行重建，通过建立人体和车辆的三维模型进行几何拼接来分析致伤过程，解决了行人是被汽车碰撞还是碾压致死的问题，并推测出死者发生交通事故时的姿势，重建了事故发生过程。而本研究利用MADYMO多刚体重建，使用生物力学的分析方法对道路交通事故进行了动态分析，在准确推断人-自行车-汽车碰撞前状态的同时，模拟了人-自行车-汽车的动力学行为，还对人体上的局部应力进行了计算。多刚体重建在法医学交通事故调查中有着重要作用，利用计算机模拟可以使复杂的交通事故在仿真的虚拟空间中反复、准确地演算[5]，而且重建结果以动画形式进行展示，有助于非专业人员理解致伤过程[23]。

交通事故重建的本质就是通过已知部分响应结果，求解初始条件和全部响应过程的逆动力学问题，因此，需要引入优化设计算法，循环迭代进行多次正向求解，寻找满足条件的最优解[24]。遗传算法（genetic algorithm，GA）是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法。遗传算法模拟了自然选择和自然遗传过程中发生的繁殖、交叉和基因突变，在每次迭代中保留一组候选解，并从解群中选取较优的个体，利用遗传算子（选择、交叉和变异）进行组合，产生新一代候选解群，重复迭代，直到获得最优近似解[25-26]。利用遗传算法可以显著降低设计变量的分散性，从而在交通事故重建问题上获得一个快速的收敛[6]。NSGA-

Ⅱ是一种新型的多目标遗传算法,自其出现以来,因其出色的收敛性和鲁棒性得到了大量的引用,目前已经成为进化多目标优化领域的基准算法之一。本研究将 NSGA-Ⅱ多目标遗传算法应用于交通事故多刚体重建中,所求的目标函数获得了快速收敛及最优近似解,为后续的研究提供了一种新的思路和手段[27]。

然而,本研究存在一定局限性:(1)汽车和自行车的接触刚度特性参考相似车辆的测试结果设置,与实际车辆的接触刚度特性可能存在差异;(2)摩擦系数也是参考文献设置,与实际情况可能存在差异,后期交通事故重建工作考虑在事故现场对相应的摩擦系数进行测量,以提高重建的准确性;(3)多刚体动力学仿真软件使用了简化模型,以便进行快速模拟,因此,相应的损伤指标和应力需要谨慎使用,联合应用多刚体动力学和有限元方法可以提高模拟的准确性,如利用多刚体动力学计算人体与车辆的初始撞击部位、方式和速度,利用有限元方法对损伤的应力、应变响应进行求解[28]。综上所述,本研究依然存在很多问题需要解决,后期需要对更多的交通事故进行研究以提高重建的准确性。

3.3 总结

本研究在利用 3D 激光扫描技术对肇事车辆进行测量的基础上,结合多刚体动力学和遗传算法优化对一起轻型客车、自行车及其骑车人碰撞的交通事故进行重建,模拟结果与事故真实情况吻合,再现了人-自行车-汽车碰撞前的运动状态、碰撞致伤过程,并对受害者的损伤进行了力学分析,为法医学死因鉴定提供生物力学依据,在交通事故法医学鉴定中具有应用价值。

参考文献:

[1] 陈忆九,杜志淳,邹冬华. 我国道路交通事故综合鉴定体系研究[J].中国司法鉴定,2006(3):20-23.

[2] 陈忆九,邹冬华,刘宁国. 再现技术在道路交通事故鉴定中的应用[J].中国司法鉴定,2007(3):23-27.

[3] TERESINSKI G, MADRO R. Evidential value of injuries useful for reconstruction of the pedestrian-vehicle location at the moment of collision[J]. Forensic Sci Int,2002,128(3):127-135.

[4] CARTER E L, NEAL-STURGESS C E. MADYMO reconstruction of a real-world collision between a vehicle and cyclist[J]. International Journal of Crashworthiness,2009,14(4):379-390.

[5] MCNALLY D S, ROSENBERG N M. MADYMO simulation of children in cycle accidents: a novel approach in risk assessment[J]. Accid Anal Prev,2013,59:469-478.

[6] UNTAROIU C D, MEISSNER M U, CRANDALL J R, et al. Crash reconstruction of pedestrian accidents using optimization techniques[J]. Int J Impact Eng,2009,36(2):210-219.

[7] MARTINEZ L, GUERRA L J, FERICHOLA G, et al. Stiffness corridors of the European fleet for pedestrian simulation[C]// 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Lyon, France,2007.

[8] MOORE D F, WANG E L, HULL M L. An empirical model for determining the radial force-deflection characteristics of off-road bicycle tyres[J]. International Journal of Vehicle Design,1996,17(4):471-482.

[9] SODEN P D, MILLAR M A, ADEYEFA B A, et al. Loads, stresses, and deflections in bicycle frames[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design,1986,21(21):185-195.

[10] MCLUNDIE W M. Investigation of two-wheeled road traffic accidents using explicit FE techniques[D]. Bedford: Cranfield University,2007.

[11] ELLIOTT J R, SIMMS C K, WOOD D P. Pedestrian head translation, rotation and impact velocity: the influence of vehicle speed, pedestrian speed and pedestrian gait[J]. Accid Anal Prev,2012,45:342-353.

[12] KAJZER J, MATSUI Y, ISHIKAWA H, et al. Shearing and bending effects at the knee joint at low speed lateral loading[C]// 1999 SAE International Congress and Exposition, Detroit, Michigan,1999.

[13] VAN HOOF J, DE LANGE R, WISMANS J S. Improving pedestrian safety using numerical human models[J]. Stapp Car Crash J,2003,47:401-436.

[14] 阳兆祥. 交通事故力学鉴定教程[M].南宁:广西科学技术出版社,2002.

[15] YAO J F, YANG J K, FREDRIKSSON R. Reconstruction of head-to-hood impact in an automobile-to-child-pedestrian collision[J]. International Journal of Crashworthiness,2006,11(4):387-395.

[16] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-Ⅱ[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.

[17] Hayes W C, Erickson M S, Power E D. Forensic injury biomechanics[J]. Annu Rev Biomed Eng,2007,9:55-86.

[18] Association for the Advancement of Automotive Medicine. Abbreviated Injury Scale© 2005-- Update 2008[S]. Barrington, USA: Association for the Advancement of Automotive Medicine,2008.

[19] CICHOS D, DE VOGEL D, OTTO M, et al. Crash analysis criteria description[R]. Bergisch Gladbach, Germany: Federal Highway Research Institute,2006.

[20] MAKSYMOWICZ K, ZOŁNA M M, KOSCIUK J, et al. Documentation of course and results of crime scene reconstruction and virtual crime scene reconstruction possibility by means of 3D laser scanning technology[J]. Arch Med Sadowej Kryminol,2010,60(4):292-297.

(下转第 586 页)

31(1):75-82.
[7] 杜秋香,王英元. MMP-2和MMP-9与脑损伤及其法医学意义[J].中国法医学杂志,2008,23(4):247-250.
[8] 李刚莲,刘群英,夏鹏,等. 大鼠皮肤MMP-2,MMP-9表达与损伤时间相关性的实验研究[J].重庆医科大学学报,2009,34(6):698-701.
[9] ISHIDA Y, KUNINAKA Y, NOSAKA M, et al. Immunohistochemical analysis on MMP-2 and MMP-9 for wound age determination[J]. Int J Legal Med,2015,129(5):1043-1048.
[10] 陆明,汤礼军,田伏洲,等. 大鼠肝脏撞击伤动物模型的制备及评价[J].创伤外科杂志,2010,12(1):60-63.
[11] 袁发焕,李惊子. 细胞外基质、基质金属蛋白酶及其抑制因子的研究进展[J].国外医学临床生物化学与检验学分册,2000,21(2):62-65.
[12] PRYSTUPA A, BOGUSZEWSKA-CZUBARA A, BOJARSKA-JUNAK A, et al. Activity of MMP-2, MMP-8 and MMP-9 in serum as a marker of progression of alcoholic liver disease in people from Lublin Region, eastern Poland[J]. Ann Agric Environ Med,2015,22(2):325-328.
[13] ROMANIC A M, WHITE R F, ARLETH A J, et al. Matrix metalloproteinase expression increases after cerebral focal ischemia in rats: inhibition of matrix metalloproteinase-9 reduces infarct size[J]. Stroke, 1998,29(5):1020-1030.
[14] PRÉAUX A M, MALLAT A, NHIEU J T, et al. Matrix metalloproteinase-2 activation in human hepatic fibrosis regulation by cell-matrix interactions[J]. Hepatology,1999,30(4):944-950.
[15] 邓新宇,李文瑞,孙言伟,等. 肝再生[J].世界科技研究与发展,2006,28(6):1-8.

(收稿日期:2016-11-25)
(本文编辑:张建华)

(上接第580页)

[21] BUCK U, NAETHER S, RÄSS B, et al. Accident or homicide--virtual crime scene reconstruction using 3D methods[J]. Forensic Sci Int,2013,225(1-3):75-84.
[22] BUCK U, NAETHER S, BRAUN M, et al. Application of 3D documentation and geometric reconstruction methods in traffic accident analysis: with high resolution surface scanning, radiological MSCT/MRI scanning and real data based animation[J]. Forensic Sci Int,2007,170(1):20-28.
[23] FORERO RUEDA M A, GILCHRIST M D. Comparative multibody dynamics analysis of falls from playground climbing frames[J]. Forensic Sci Int,2009,191(1-3):52-57.
[24] CHONG E K P, ZAK S H. An Introduction to optimization[M]. 4th ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons,2013:1-40.
[25] 马永杰,云文霞. 遗传算法研究进展[J].计算机应用研究,2012,29(4):1201-1206,1210.
[26] SANKARASUBRAMANIAN H, CHAWLA A, MUKHERJEE S, et al. Optimisation study on multibody vehicle-front model for pedestrian safety[J]. International Journal of Crashworthiness,2016,21(1):63-78.
[27] 冯士刚,艾芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J].电工技术学报,2007,22(12):146-151.
[28] BOURDET N, DECK C, SERRE T, et al. In-depth real-world bicycle accident reconstructions[J]. International Journal of Crashworthiness,2014,19(3):222-232.

(收稿日期:2017-08-23)
(本文编辑:张建华)