

# Research on Knee Displacement Measuring in Vehicle Crash Safety Test

Hang SUN, Zhendong SUN

Auto Standardization Research Institute, China Automotive Technology & Research Center, Tianjin, 300300

Email: sunhang@catarc.ac.cn

**Abstract:**This paper provides an optimized method for measuring dummy's knee displacement in vehicle sled crash test. The proposed method utilizes the combination of new elements for measurement, which are acceleration and angular velocity of dummy's pelvis, as well as the rotational angle of its femur. Compared with the traditional measurement which simply uses camera-based high-speed motion image analysis, the optimized method not only maintains the measuring accuracy, but also avoids the disturbance caused by dummy moving, dashboard blocking and knee deformation during the crash. An experiment is made to verify the accuracy of the proposed method, which eliminates the strong dependence on single target tracing in traditional method. Moreover, it is very appropriate for calculating the knee displacement in vehicle crash test and sled simulation, as well as measuring knee penetration depth to the dashboard.

**Keywords:**knee mapping;vehicle crash safety test ; high-speed motion image analysis ; knee displacement measurement

## 汽车碰撞试验乘员膝部位移测量方法研究

孙航,孙振东

中国汽车技术研究中心标准化研究所, 天津, 300300

Email: sunhang@catarc.ac.cn

**摘要:**本文提出了一种在汽车碰撞试验中将假人骨盆加速度、角速度以及假人大腿转动角度结合在一起计算假人膝部位移量的方法,并与通常基于高速运动图像分析的方法进行了对比验证。本文提出的方法可以定量准确的获得假人膝部位移量,不受假人运动姿态、仪表板遮挡和膝部皮肤碰撞变形等因素的影响,避免了通常图像分析方法必须依赖单一可见目标点的缺点。用于模拟碰撞台车试验、实车碰撞试验中对假人膝部位移的测量,以及 Knee Mapping 试验中膝部侵入车辆仪表板位移的准确判定,并进行了试验验证。

**关键词:** Knee Mapping; 汽车碰撞试验; 高速运动图像分析; 膝部位移测量

### 1 引言

在发生汽车正面碰撞事故时,乘员膝部所受到的伤害主要是由膝部与仪表板的碰撞接触造成的<sup>[1]</sup>。在进行碰撞试验时,一般采用大腿压缩力和膝部滑移量两项指标来评价试验假人膝部的伤害值,该伤害值的大小与仪表板所使用的材料及其内部结构密切相关<sup>[2]</sup>。同时,假人膝部在碰撞过程中承受的伤害与其对仪表板的侵入量直接相关,且会随着侵入量的增加而逐步增大<sup>[3]</sup>。这就需要方便、有效的方法在实际试验过程中测量出膝部对仪表板侵入的准确深度,并以此来指导设计人员对约束系统进行安全优化。

目前,无论是台车模拟还是实车碰撞,假人膝部位移量的测量往往只能通过计算机建模的方法进行仿真计算,无法在实际的碰撞试验中准确测量该数值,欧洲新车评价规程(Euro-NCAP)通常也只是结合高速摄像等相关数据对结果进行粗略估计,没有客观的评价准则。作为碰撞试验中高速运动目标的客观计算方法——高速运动图像分析技术,则必须依赖于视频图像中清晰可见的目标点,但实际试验中的假人由于姿态变化、手臂摆动和膝部目标位置侵入仪表板等运动学的现象,极易造成测试目标被遮挡而无法定位和追踪。在实车碰撞试验过程中更是如此,由于两侧车门的遮挡,根本无法通过外部摄像机捕捉到假人膝部的运动状态,也就无法测量假人膝部在碰撞过程中的实际位移。

为了有效评价仪表板和整个约束系统设计对乘员膝部安全的保护能力，作为 Euro-NCAP 评价规程项目之一，Knee Mapping 膝部评价规程<sup>[4]</sup>中明确规定了仪表板侵入量的评价范围，即在假人膝部向仪表板内的实际侵入位置基础上，对再向内扩展 20mm 的深度。于此同时，为了证明 Knee Mapping 试验数据的有效性，还需提供在台车验证试验中实际达到的侵入量。文献<sup>[5]</sup>对 Knee Mapping 的试验流程进行了介绍，文献<sup>[6]</sup>对提升膝部保护性能进行了优化设计，但均未提及膝部位移量如何测量。利用加速度与位移的物理关系，对加速度传感器数据做积分来求解位移量是一种可行方法，文献<sup>[7]</sup>解释了此方法在实际应用中的原理与可能形成的误差，文献<sup>[8]</sup>将此原理与高速摄像技术相结合并实现了台车碰撞试验中假人头部位移量的计算。然而，假人膝部碰撞仪表板是个更为复杂的运动学过程，不可控因素较多。本文综合物理运动分析、几何结构计算等方法，利用假人骨盆加速度向量数据积分求解膝部位移量，并根据假人腿部转动角度的变化对位移量做进一步修正，以绘制出整个碰撞试验过程中假人膝部的位移曲线，进而计算出膝部对仪表板的侵入量。

## 2 基于高速运动图像分析的膝部位移计算

在模拟碰撞台车试验中，基于高速摄像机采集到的视频图像对碰撞过程进行运动学分析是一种比较常用的技术手段<sup>[9]</sup>。高速摄像技术采用小孔成像原理，如图 1 所示：在参考平面上选定长度已知的标尺 $l_{ab}$ ，通过与其在图像中的显示长度 $l_{a'b'}$ 之间的比例关系可构造真实空间与图像像素之间的比例关系 $\frac{l_{ab}}{l_{a'b'}} = \frac{m}{d}$ ，结合可以测量的标尺物距与待测目标物距之间的比例关系构造出待测目标与图像像素之间的比例关系 $\frac{l_{pp'}}{l_{pp'}} = \frac{m}{m+n}$ ，这样便可以通过目标点在图像中的像素点位移量求解目标在实际空间中的位移量。

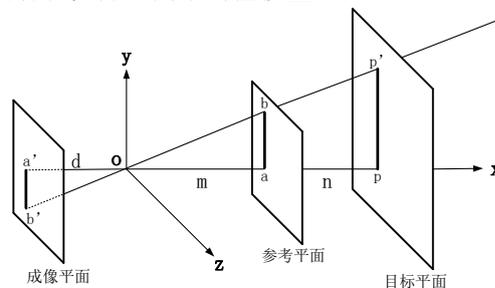


图 1 高速运动图像分析基本原理

在实际应用中，以模拟碰撞台车为平台的乘员膝部碰撞试验为例，如图 2(a) 所示，首先选取平行于台车运动方向长度为  $m$  的 S1, S2 两点线段作为基准标尺，以此参考平面建立空间坐标系，然后以假人膝部铰接点位置作为测量基准点，并标记为 K。同时记录各个标记点到摄像机的垂直距离，即标尺点物距  $d1$  与 K 点物距  $d2$ 。根据以上信息，在碰撞的整个过程中可以通过追踪 K 点运动轨迹的方法构造出 K 点沿水平 X 轴的位移值曲线，并通过设置接触开关的方法确定膝部与仪表板的接触时刻  $t_0$ ，那么假人膝部对仪表板的侵入量便可以由膝部最大位移量减去  $t_0$  时刻位移量计算出来，如图 1(b) 所示。

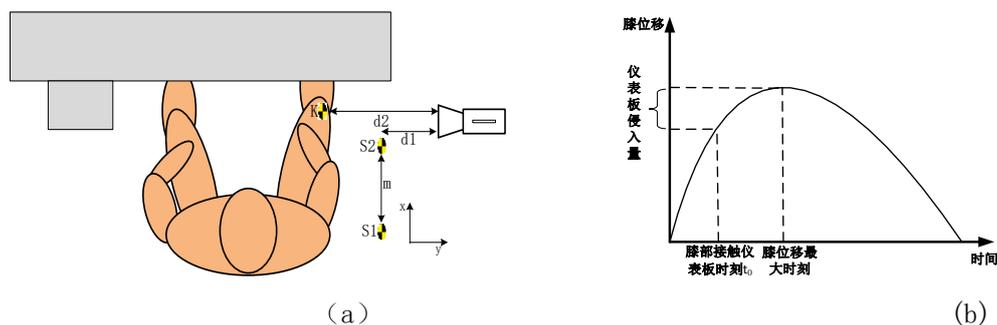


图 2 基于高速运动图像分析的膝部位移计算

## 3 基于传感器的膝部位移计算

上述采用高速运动图像分析法追踪膝部的位移具有很大的不确定性，这种方法完全依赖于可见的目标点，而假人手臂摆动和车辆内饰的遮挡、膝部侵入仪表板后目标点的消失或膝部皮肤变形造成的目标点移位，都会造成无法准确计算膝部位移的问题。这些问题可以通过新的测量方法有效解决，基本原理如下：车辆碰撞试验用假人的骨盆中心可装配骨盆运动加速度和角速度传感器，将试验过程中通过传感器采集到的骨盆加速度值以

骨盆角向水平 X 轴进行投影，连续两次积分后可以得到假人骨盆沿 X 轴方向的位移量。假人的大腿是一个通过 H 点与骨盆铰接的刚性体，其长度在接触仪表板的整个过程中基本保持不变，即 H 点到膝关节铰接点的长度是固定的，根据几何关系，可以假人 H 点沿 X 轴方向位移量来代替膝部沿 X 轴方向位移量，从而进一步得出假人膝部对仪表板的侵入量。为了得到更为准确的结果，仍需考虑另外一个重要影响因素：假人下肢在受到仪表板的反向作用力时会使假人下肢沿各关节形成转动，造成实际的膝部位移量小于骨盆位移量，因此还需要对通过 H 点位移量的推测结果进行一定的修正。

加速度和角速度传感器安装在假人的骨盆位置，其与地面坐标系的夹角同假人骨盆角 $\theta$ 相一致，可在试验前测量，如图 3 所示，X, Z 为地面参考坐标系，X0, Z0 为传感器指示自身测量方向的坐标系。

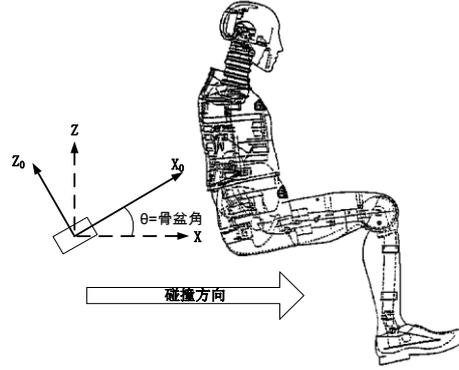


图 3 骨盆传感器安装方向示意图

为了计算骨盆相对车身的前向位移量，应首先将骨盆传感器数值投影到地面坐标系上：

$$ACC_x = ACC_{x0} \cdot \cos\theta - ACC_{z0} \cdot \sin\theta \quad (1)$$

式中假人骨盆角 $\theta$ 在碰撞过程中不断变化，可由采集到的骨盆角速度对时间的积分算出：

$$\theta = \int_0^t \omega(x) dx \quad (2)$$

同理，分别令假人骨盆和台车加速度对时间进行二次积分，并做相减运算，可以得出假人骨盆相对于车身的前向位移量：

$$d_{pelvis} = \int_0^t \int_0^u ACC_{pelvis}(x) dx du - \int_0^t \int_0^u ACC_{sled}(x) dx du \quad (3)$$

试验中采集到的骨盆速度和加速度均为离散量，那么上述积分公式可转换为：

$$ACC_n = ACC_{nx0} \cdot \cos\theta_n - ACC_{nz0} \cdot \sin\theta_n \quad (4)$$

$$\theta_n = \sum_0^n \frac{\omega_n + \omega_{n+1}}{2} \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$d_n = \sum_0^n \frac{\sum_0^n \frac{ACC_n + ACC_{n+1}}{2} \cdot \Delta t + \sum_0^{n+1} \frac{ACC_{n+1} + ACC_{n+2}}{2} \cdot \Delta t}{2} \cdot \Delta t - \frac{\sum_0^n \frac{ACC_{sled_n} + ACC_{sled_{n+1}}}{2} \cdot \Delta t + \sum_0^{n+1} \frac{ACC_{sled_{n+1}} + ACC_{sled_{n+2}}}{2} \cdot \Delta t}{2} \cdot \Delta t \quad (6)$$

以上公式中的 $\Delta t$ 均为采样频率 f 的倒数， $n=0,1,2\dots f\dots$ 。

图 4 为假人膝部对仪表板的侵入过程，设假人膝部与仪表板接触时刻为  $t_c$ ，大腿两关节点连线  $l_F$  与 X 轴夹角为  $\alpha$ ；仪表板侵入量最大时刻为  $t_{MAX}$ ，大腿两关节点连线  $l_F$  与 X 轴夹角为  $\beta$ ；假人 H 点沿 X 轴方向位移量为  $d_H$ ，假人膝部沿 X 轴方向位移量，即仪表板侵入量为  $d_K$ ，那么根据几何关系可以得出：

$$d_K = d_H - (\cos \alpha - \cos \beta) \cdot l_F \quad (7)$$

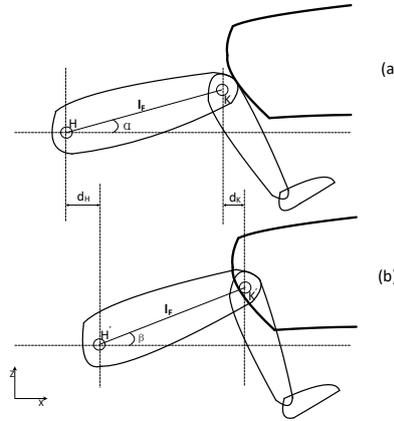
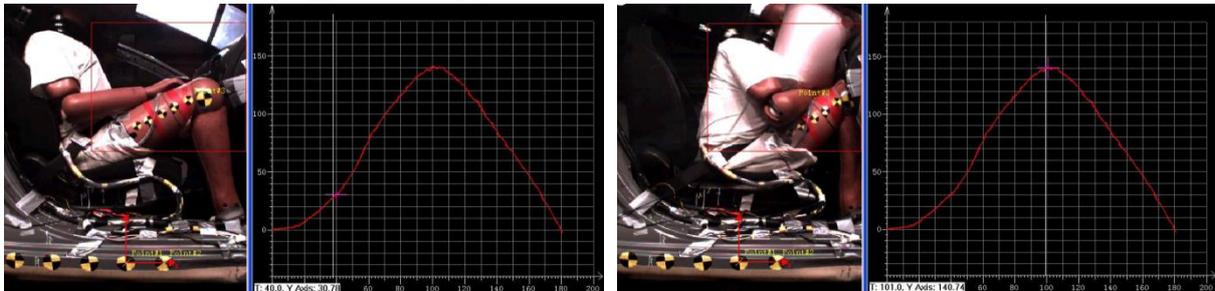


图 4 大腿转动角度与膝部侵入量修正

#### 4 试验结果对比与分析

测量乘员膝部位移量的难点在于如何准确的计算膝部侵入仪表板的深度，本文基于台车碰撞试验，对乘员膝部位移量的不同计算方法进行对比与分析。试验采用加速式模拟碰撞台车复现实车碰撞波形，分别选用 50th 及 95th 两种不同尺寸假人，输入 50km/h 与 64km/h 两种典型碰撞波形进行试验，并将试验结果与传统方法进行比较，以验证本文测量方法的有效性。

为了便于分析，本文选用侵入量较为显著的试验配置，以 Hybrid-III 型 95th 假人，碰撞速度 64km/h 的试验输入为例介绍试验方法。假人姿态按照 Euro-NCAP 的 Knee Mapping 试验规程进行设置，骨盆角为  $22.5^\circ$ ，数据采集装置采样频率设置为  $f=10^4$  以保证精度。为了使基于可见目标点的图像运动分析方法同样适用，故在定位假人时将手臂放置于大腿上部而非两侧，同时膝部皮肤做固定处理以防止目标点移位。试验后，根据图像运动分析法绘制出膝部 X 方向运动曲线，可得出 40ms 时的膝部位移值 30.78mm，101ms 时的膝部位移值 140.74mm，如图 5 所示，其中 40ms 为通过电信号接触开关测得的膝盖与仪表板接触时刻，101ms 为膝部达到最远位置的时刻。那么膝部对仪表板的侵入量即为两者之差 109.96mm。



(a) 40ms 时膝部位移量

(b) 101ms 时膝部位移量

图 5 采用高速运动图像分析法计算膝部位移曲线

图 6 为假人骨盆处传感器采集到的沿  $X_0$  轴和  $Z_0$  轴的加速度曲线。假人骨盆加速度传感器与水平面的夹角由骨盆处的角速度传感器测出，然后可根据公式 5 绘制出如图 7 所示曲线，得出碰撞过程中假人骨盆角的变化趋势。通过公式 1 将传感器的加速度沿水平 X 轴进行投影，便可得到骨盆沿水平 X 轴方向的加速度曲线，如图 8(a)所示。采集得到的模拟碰撞台车加速度波形如图 8(b)所示。

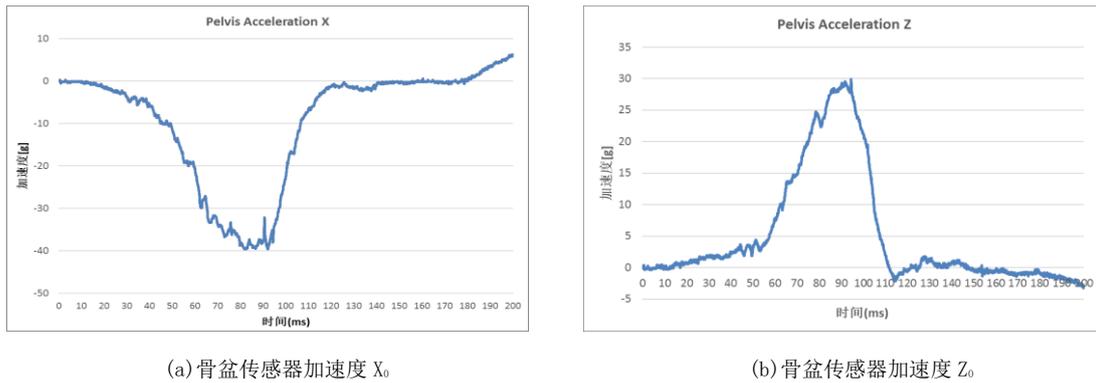


图 6 骨盆加速度曲线

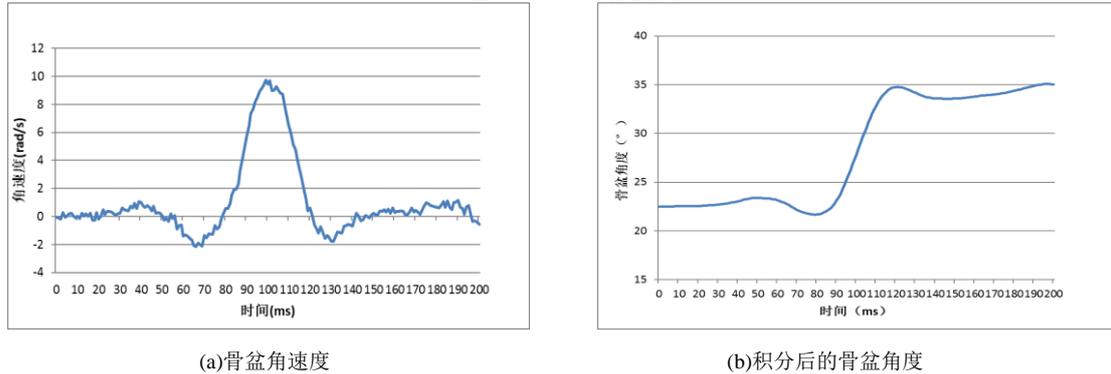


图 7 骨盆角度变化曲线

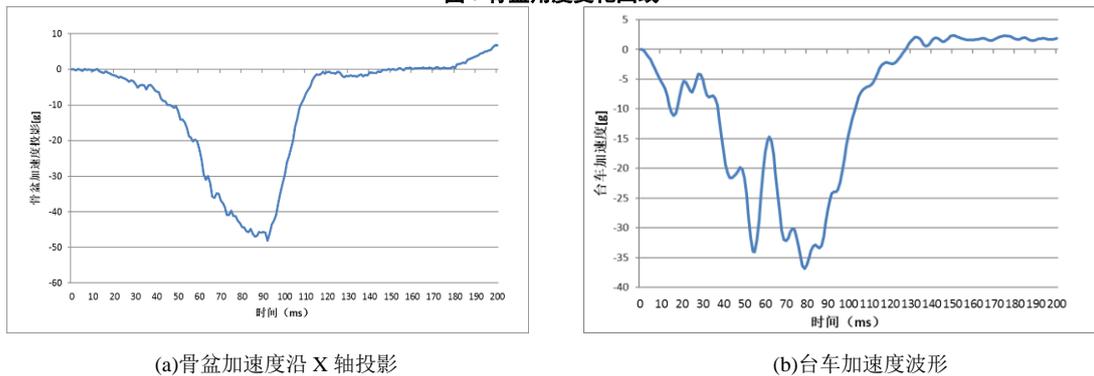


图 8 同一坐标系下骨盆与台车的加速度曲线

根据公式 6, 可得如图 8 所示曲线。从图中可以得出在膝部接触仪表板时刻 40ms 至骨盆位移最大时刻 94ms 这段时间内, 骨盆的位移为 132.19mm。

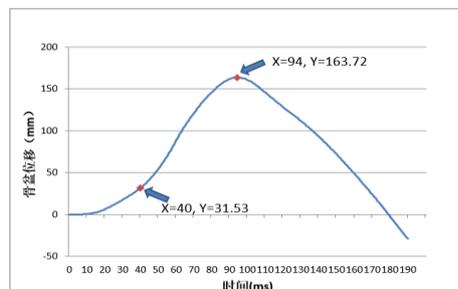


图 9 骨盆相对于台车坐标系的位移曲线

从上述两种计算方法的结果来看, 骨盆位移量比目标追踪法计算出的膝部侵入量多出 22.23mm, 偏差率超过 20%, 可知简单的通过骨盆位移估算膝部侵入量的方法是不准确的。根据上文分析可知该偏差是由于大腿的转动造成的, 如图 9 所示, 假人大腿角度在 40ms 至 94ms 间由  $27.19^\circ$  变为了  $34.18^\circ$ 。在 HybridIII 95<sup>th</sup> 假人使用手册<sup>[10]</sup>中 H 点到膝部铰接点的长度为 426.46mm, 那么根据公式 7, 则可得出采用骨盆位移加大腿转动修正

后的膝部侵入量为 105.66mm。该值与高速运动图像目标追踪法的计算结果偏差仅为 4.3mm，偏差率为 4.1%，计算结果基本一致。骨盆到达位移最大值的时刻与图像分析法曲线所示的膝部位移到达最大值时刻相差 7ms，这是假人反弹初始阶段膝部回弹滞后于骨盆回弹造成的，该时刻假人膝部相对车身几乎是静止的，对结果几乎没有影响。

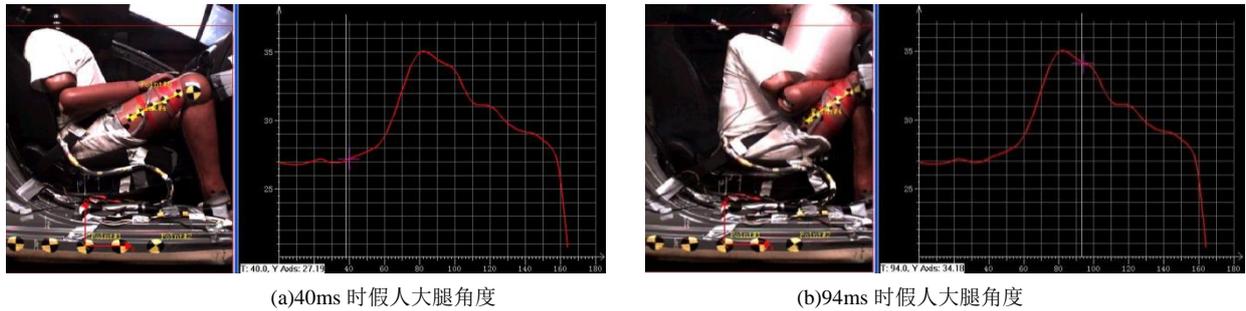


图 10 试验过程中假人大腿角度变化曲线

根据上述方法，对 4 组不同条件下的膝部碰撞试验中假人膝部对仪表板的侵入量情况进行了对比分析。如表 1 所示（其中 50th 假人 H 点到膝部铰接点的长度为 391.1mm[11]），在外部环境确定的条件下，碰撞试验速度、假人尺寸和座椅位置是影响假人膝部与仪表板的接触时刻的主要因素，碰撞速度越低，假人尺寸越小，则侵入量越小，碰撞过程中假人大腿角度的改变就随之减小，而角度变化造成的膝部位移量的修正值也就越小。且随着侵入量的减小，产生误差的干扰因素减少，图像分析法与本文方法计算结果呈现逐渐接近的趋势。在膝部轻微或未碰撞仪表板的情况下，大腿角度几乎不会发生变化，那么膝部位移的计算就简化为仅依靠传感器数据便可完成而无需任何图像数据的支持，这在视线受车门遮挡的实车碰撞试验中具有很高的应用价值。本方法除了计算精度较高外，表 2 还给出了两种试验方法在其它应用特点上的对比分析，总体来看，基于传感器的膝部位移计算方法在试验设置上所需项目较多，但其在可见性的要求上鲁棒性较好，应用场景也更为广泛，且在可靠性上较传统方法具有一定的优势，虽然计算的复杂度高，但因碰撞试验流程具有一致性的特点，设置相应计算模板后，可极大提升数据处理效率。

表 1. 膝部侵入量碰撞试验汇总表  
(时间单位:ms, 位移单位:mm, 速度单位:km/h)

编号	1	2	3	4
假人类型	95th	95th	50th	50th
座椅位置	后	后	中	中
碰撞速度	64	50	64	50
膝部接触时刻	40	48	52	59
膝部最大时刻	94	88	95	85
大腿角度@tc	27.19	27.95	20.48	20.80
大腿角度@tmax	34.18	32.10	22.93	21.17
侵入量（图像分析）	109.96	86.02	37.81	16.41
骨盆位移（tc~tmax）	132.19	98.22	42.85	17.80
侵入量（本文方法）	105.66	82.87	36.67	16.90

表 2.两种不同测量方法的对比

方法对比	图像分析法	传感器计算法
试验设置	标记假人膝部铰接点, 试验前需约束假人手臂	标记大腿任意两点, 测量骨盆角度、大腿角度, 骨盆处需要安装角度传感器, 仪表盘设置接触开关
数据处理	图像分析	公式计算+图像分析 (可选)
可见性要求	测量目标必须在全过程清晰可见	无需直接看到测量目标, 只需获得角度
应用场景	模拟碰撞	模拟碰撞, 实车碰撞
复杂度	低	中等
可靠性	低	高

## 5 结论

汽车碰撞试验中, 使用传统的高速运动图像分析方法计算目标点位移虽然流程较为简单, 但对于一些难以直接观察的目标, 尤其是假人膝部位移量和仪表盘侵入量, 相关目标的追踪过程易受多方面因素干扰, 容易出现试验数据无法正常获取的后果, 可靠性不高。本文提出的方法主要依靠假人内置的传感器数据且假人大腿角度可以根据其上任意标记的两点连线算出, 有效避免了单一点被遮挡就无法计算的问题, 消除了原有方法对单一点的强烈依赖性。其计算结果经修正后与高速运动图像分析法采用的目标追踪结果非常接近, 具有代替原有计算方法的可行性, 可应用于台车膝部碰撞试验, 解决了 Knee Mapping 评价规程中对膝部位移及其侵入量计算的难题。与此同时, 由于世界各国汽车标准法规及各主流 NCAP 评价规程在实车碰撞试验中基本上都要求使用 50th 假人, 在其膝部对仪表盘侵入量较小或无侵入情况下, 可忽略腿部转动因素, 直接使用传感器数据就能计算出被车门遮挡的膝部位移量, 从而判定试验结果, 支撑乘员下肢安全约束系统的设计和优化。汽车碰撞安全和乘员保护自汽车工业诞生以来始终是汽车技术发展的重要领域, 乘员下肢防护尤其是膝部防护正在受到越来越多的重视, 在 Euro-NCAP 已经实施膝部安全评价的发展趋势下, 未来世界各国汽车安全标准法规和评价规程都可能提出涉及膝部防护方面的相应要求。本文提出的方法从试验的角度提出了一种新的膝部位移计算方法, 在一定程度上解决了汽车碰撞试验中假人膝部运动位移难以准确测量的问题。

## 参考文献

- [1] 唐洪斌, 杨海庆等.乘员膝部碰撞台车试验与车身结构设计.汽车技术. 2012(05).
- [2] Gokhale A V, Saravate V B, Chalipat S, et al. Femur and knee injury reduction by use of knee bolsters in frontal crashes [R]. 2007-26-001.
- [3] Laurent Portier, Xavier Trosseille. Lower Leg injuries in Real-world Frontal Accidents. IRCOBI Conference. 1993.
- [4] EuroNCAP. Sled Test Procedure for Assessing Knee Impact Areas. EuroNCAP 2011-06.http://www.euroncap.com.
- [5] Chen Tangpei, Lei Peng. The Study of Knee Mapping Sled Test. 2013 第十六届中国汽车安全技术国际研讨会. 2013.
- [6] 刘珍海, 刘松梅, 乔磊磊等. Euro-NCAP 大腿伤害评价及性能提升. 汽车安全与节能学报. 2015(6-2).
- [7] 容天平. 用加速度传感器测量位移的原理与误差分析. 华中理工大学学报. 2000(05).
- [8] 雷鹏, 陈汤培, 张浩等. 台车试验中利用加速度结合高速摄像求解位移方法的研究. 中国汽车工程学会汽车安全技术学术会议. 2013.
- [9] 张慧云, 黄建民, 柳立志. 高速摄像技术在汽车安全试验中的应用. 装备维修技术, 2013 (z1).
- [10] Humanetics. User's Manual for the Hybrid III Large Male: July, 2003.
- [11] Humanetics. Hybrid III 50<sup>th</sup> Male User Manual: 2015.