

板料成形回弹三维光学测量技术研究

张德海, 梁晋, 郭成

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为解决板料成形回弹预测困难、CAE 模拟软件精度不高、回弹量难于精确测量, 以及实际误差无法全面估计等问题, 提出了一种非接触式三维光学测量板料回弹的方法. 该方法由近景摄影测量系统和面扫描系统组成, 摄影测量系统可以计算出工件表面粘贴的编码点和非编码点, 导出全局标志点. 面扫描系统利用全局标志点, 扫描时可以实现每幅点云的自动拼接, 精确采集物体表面的三维数据, 经反求获得工件数模. 与模具型腔三维 CAD 数模相比, 该方法能精确获得钣金件与模具各点的差值, 并作为零件的回弹量, 为修模时的几何补偿提供参考依据. 以汽车车门为例, 结合实验数据, 证明了该方法具有较高的测量精度, 可以比较方便地测量钣金件的回弹量.

关键词: 摄影测量; 回弹; 面扫描; 精度

中图分类号: TP391; TG806 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)09-0051-05

3D Optical Measuring Technique for Springback Measurement in Sheet Forming

ZHNAG Dehai, LIANG Jin, GUO Cheng

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Facing the problems in forming process, such as difficult springback prediction, low accuracy of CAE simulation software, and difficulty in estimating fact error entirely, a non-contact 3D optical measuring method with digital close-range industrial photogrammetry technology and surface scanner technology is proposed, where un-coded point and coded-point fixed on the surface of parts may be figured out and the whole marked-points is exported via photogrammetry system. The surface scanner system makes use of the global marked points, hence every pieces of point data may be assembled automatically. Then 3D data of the object surface and CAD model of workpieces are acquired precisely. Contrasted with CAD model of die, the errors between work-piece and CAD model can be obtained with the present method as the springback values of work-piece to provide a geometric compensation for finishing die. An automobile door is taken as an example, and the experiment verifies the accuracy of the proposed springback measurement method.

Keywords: photogrammetry; springback; surface scanner; precision

金属板材在冲压过程中出现的回弹现象愈来愈引起产品制造部门工程技术人员的重视, 特别是各种浅拉深件, 回弹问题更加明显, 因此解决回弹问题的重要性也更加突出. 对回弹问题控制的准确性与否则将严重影响产品的成形质量和尺寸精度, 也是实

际工艺中很难有效克服的成形缺陷之一. 由于成形过程本身的复杂性, 因此回弹问题的解决已经成为世界性的难题^[1].

回弹问题的存在造成零件的形状及尺寸与模具工作表面不符, 直接影响了冲压件品质、表面品质和

装配性能。数值仿真已被证实可用于回弹预测,一方面冲压回弹涉及到材料性能参数、冲压方式、工艺条件、冲压件几何形状及回弹预测理论与方法等多种因素的综合影响^[2],另一方面仿真软件涉及到本构模型的建立、单元选择、截面积分点、单元尺寸、虚拟冲头速度、摩擦特性、有限元算法和合理的参数选择,造成实际物理模型和数值仿真模型存在一定的偏差,以至回弹数值的测量难以准确表述,实际误差无法全面估计。

朱东波等人^[3]对板料回弹问题的国内外研究现状进行了综述。Esat 等人^[4]以三维实体单元进行了薄板的弯曲,得出了数值仿真结果与实验结果吻合较好的结论。Li 等人^[5]以薄板拉弯为例,研究了三维实体单元和壳单元对回弹的影响规律和适用性问题。李春光^[6]研究了回弹仿真过程中材料成形的最优参数组合和补偿方法。张冬娟^[7]分析了有限元模拟参数对回弹预测精度的影响,从理论上推导了虚拟动能和与板料回弹预测精度的影响。臧顺来^[8]构建了薄板非线性弹性-高阶塑性本构模型,揭示了工艺参数、数值仿真参数和本构模型对回弹的影响规律,但都偏重于回弹理论预测的研究,对于实际工件回弹量的准确检测则研究不够。

本文提出了一种非接触式三维光学测量板料回弹的新方法,由工业数字近景摄影测量系统(标志点测量技术)和面扫面系统(计算机双目视觉技术)结合组成,可快速获取工件表面的几何特征,计算出工件的数学模型。与模具设计型腔三维 CAD 数模相比较,该方法可以精确地获得板料冲压件与模具各点的差值(回弹值)。

1 板料成形回弹光学测量的原理

板料成形回弹的计算量主要表现在 CAD 数模和实际测量的零件之间的偏差,必须在三维空间中能够清楚的表示。一般情况下,在理论上与实际测量零件几何形状之间,必须选择一个模具型腔几何形状来作为参考依据,并反馈到相应的模具型腔几何形状上。回弹区域可以用一个空间的多项式来表示,其回弹值为

$$s = \eta(v) \quad (1)$$

式中: v 为理论上的工件几何形状,即模具型腔的几何形状,其影响因素为变形条件参数和材料属性参数; η 为关系因子。

利用工业近景摄影测量技术,以待测物体为圆心(见图 1),呈圆环状均分布置摄站,并拍摄照片,

以获取所有编码标志的点和非编码标志点的信息。将照片导入标志点测量系统,设置相机、加载标尺绑定,计算所有非编码标志点和编码点的三维空间坐标矩阵,输出非编码点矩阵。面扫描系统基于非编码点矩阵,可快速扫描物体表面,覆盖物体所有表面特征信息,自动地将点云信息与导入的全局非编码标志匹配,从而得到完整物体的空间点云信息,实现点云自动拼接,并通过后处理反求得到最终的点云和 CAD 数模。

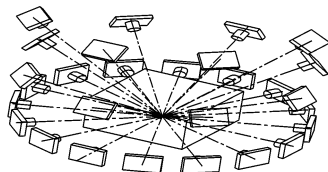


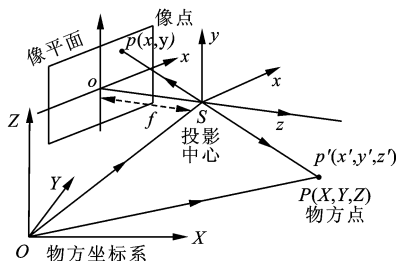
图1 多摄站拍摄的位置简图

2 标志点测量技术

标志点测量技术是基于近景摄影测量理论、采用三角形交会法、通过在不同的位置和方向获取同一物体的 2 幅以上的数字图像,经捆绑调整、图像匹配等处理及相关数学计算后,得到的待测点的三维坐标。

2.1 共线方程

确立摄像机像面与三维世界坐标系之间的关系,使测量所得到的三维数据在同一三维世界坐标系下。任意 2 个空间直角坐标系都可以通过平移、旋转、缩放进行转换,物方点经过相机镜头摄影后成像在像平面上(见图 2),理想的投影成像模型是几何光学中的小孔成像模型^[9]。



S:摄影镜头的光学中心;P:物方点;p:像点;f:主距

图2 摄影测量中心透视投影

得到像点坐标 x, y 的共线条件为

$$\left. \begin{aligned} x &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: X, Y, Z 是目标点的物空间坐标; X_s, Y_s, Z_s 是像站点的物空间坐标; a_i, b_i, c_i ($i=1, 2, 3$) 是像空间坐标系相对于物空间坐标系的方向余弦。

2.2 多摄站交会几何

如果从多个摄站对目标进行拍摄,即可获取被测物体的多个立体像对,从而构成多目立体视觉。设物方点 P_i 由 j 个摄站(j 条光线)相交(见图3),则有 j 个共线方程^[10]

$$\left. \begin{aligned} x_{ij} - x_{0j} + \Delta x_{ij} = & -f_j \frac{a_{1j}(X_i - X_{Sj}) + b_{1j}(Y_i - Y_{Sj}) + c_{1j}(Z_i - Z_{Sj})}{a_{3j}(X_i - X_{Sj}) + b_{3j}(Y_i - Y_{Sj}) + c_{3j}(Z_i - Z_{Sj})} \\ y_{ij} - y_{0j} + \Delta y_{ij} = & -f_j \frac{a_{2j}(X_i - X_{Sj}) + b_{2j}(Y_i - Y_{Sj}) + c_{2j}(Z_i - Z_{Sj})}{a_{3j}(X_i - X_{Sj}) + b_{3j}(Y_i - Y_{Sj}) + c_{3j}(Z_i - Z_{Sj})} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

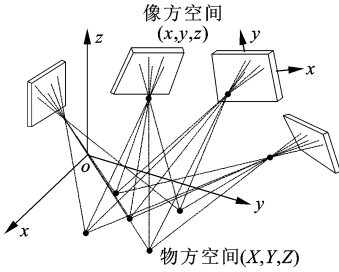


图3 多摄站交会几何示意简图

3 面扫描技术

3.1 计算机双目视觉

采用双目 CCD 相机记录,两相机和投影仪成相同的角度摆放,增加左、右相机之间的相对关系,最终获得的物体点坐标^[11]如下

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (\mathbf{AA}^T \mathbf{AA})^{-1} (\mathbf{AA}^T \mathbf{BB}) \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{AA} =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{ML}_{0,0} - \mathbf{ML}_{2,0}u_L & \mathbf{ML}_{0,1} - \mathbf{ML}_{2,1}u_L & \mathbf{ML}_{0,2} - \mathbf{ML}_{2,2}u_L \\ \mathbf{ML}_{1,0} - \mathbf{ML}_{2,0}v_L & \mathbf{ML}_{1,1} - \mathbf{ML}_{2,1}v_L & \mathbf{ML}_{1,2} - \mathbf{ML}_{2,2}v_L \\ \mathbf{MR}_{0,0} - \mathbf{MR}_{2,0}u_R & \mathbf{MR}_{0,1} - \mathbf{MR}_{2,1}u_R & \mathbf{MR}_{0,2} - \mathbf{MR}_{2,2}u_R \\ \mathbf{MR}_{1,0} - \mathbf{MR}_{2,0}v_R & \mathbf{MR}_{1,1} - \mathbf{MR}_{2,1}v_R & \mathbf{MR}_{1,2} - \mathbf{MR}_{2,2}v_R \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{BB} = \begin{bmatrix} u_L \mathbf{ML}_{2,3} - \mathbf{ML}_{0,3} \\ v_L \mathbf{ML}_{2,3} - \mathbf{ML}_{1,3} \\ u_R \mathbf{MR}_{2,3} - \mathbf{MR}_{0,3} \\ u_R \mathbf{MR}_{2,3} - \mathbf{MR}_{1,3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{ML}_{i,j}, \mathbf{MR}_{i,j}$ 为标定矩阵值; u, v 为图像坐标。

3.2 外差式多频相移技术

利用空间频接近的多个投影条纹莫尔特性的解相方法,能够非常简洁可靠地对条纹进行解包裹。在待测面上分别投影多种不同空间频率的条纹,由摄像机摄取变形的条纹图,并利用相移法求取多种条纹的相位主值,从而恢复出条纹的真实相位来。采用4步相移法^[12],每步3个频率,共投射12个光栅,获得频率周期叠加的光强

$$I_1(x, y) = \begin{cases} \frac{2I_m(x, y)}{T}x + I_{\min}(x, y) + \frac{I_m(x, y)}{2} & x \in [0, \frac{T}{4}] \\ \frac{2I_m(x, y)}{T}x + I_{\min}(x, y) + \frac{3I_m(x, y)}{2} & x \in [\frac{T}{4}, \frac{3T}{4}] \\ \frac{2I_m(x, y)}{T}x + I_{\min}(x, y) - \frac{3I_m(x, y)}{2} & x \in [\frac{3T}{4}, T] \end{cases} \quad (7)$$

$$I_2(x, y) = \begin{cases} \frac{2I_m(x, y)}{T}x + I_{\min}(x, y) & x \in [0, \frac{T}{2}] \\ -\frac{2I_m(x, y)}{T}x + I_{\min}(x, y) + 2I_m(x, y) & x \in [\frac{T}{2}, T] \end{cases} \quad (8)$$

$$I_3(x, y) = \begin{cases} -\frac{2I_m(x, y)}{T}x + I_{\min}(x, y) + \frac{I_m(x, y)}{2} & x \in [0, \frac{T}{4}] \\ \frac{2I_m(x, y)}{T}x + I_{\min}(x, y) - \frac{I_m(x, y)}{2} & x \in [\frac{T}{4}, \frac{3T}{4}] \\ -\frac{2I_m(x, y)}{T}x + I_{\min}(x, y) + \frac{5I_m(x, y)}{2} & x \in [\frac{3T}{4}, T] \end{cases} \quad (9)$$

$$I_4(x, y) = \begin{cases} -\frac{2I_m(x, y)}{T}x + I_{\min}(x, y) + I_m(x, y) & x \in [0, \frac{T}{2}] \\ \frac{2I_m(x, y)}{T}x + I_{\min}(x, y) - I_m(x, y) & x \in [\frac{T}{2}, T] \end{cases} \quad (10)$$

$$I_m(x, y) = I_{\max}(x, y) - I_{\min}(x, y) \quad (11)$$

$$\Delta\Phi = \arctan[(I_2 - I_4)/(I_1 - I_3)] \quad (12)$$

式中: $I_1(x, y) \sim I_4(x, y)$ 分别表示4步位移的光强; T 表示模式周期; $I_m(x, y)$ 是调制强度; $\Delta\Phi$ 为相位差。

4 精度分析

参照德国 VDI/VDE 2634 标准,采用西安交通

大学模具与塑性加工研究所自主开发的 XJTUDP 系统(标志点测量系统)和 XJTUOM 系统(面扫描系统)进行精度分析.

步骤 1 以单个哑铃球(见图 4)为测试对象,采用的测量工具为 Canon 400D 相机,10 位编码标志点(磁铁)和非编码标志点(低质))若干,因瓦合金标尺 1 根. 拍摄 16 张照片后,计算导出全局标志点,并存为 Q 文件.

步骤 2 以步骤 1 中的哑铃球模型作为测试对象,测量工具为 XJTUOM 面扫描系统,Computar 8 mm 镜头. 将 Q 文件输入 XJTUOM 面扫描系统,然后测量相机视区的居中、右上、右下、左下、左上 5 个位置,共 15 个位置,每组测量 5 次. 将测量获得的数据在 Imageware 中经 Merge 后,进行球拟合,测试单个球半径(使用三坐标测量机测得哑铃球的半径 $r=10.006\text{ mm}$)并作为哑铃球的真值.

由表 1 可以看出,15 个方位下的测量数据拟合球的半径都接近球的实际半径,说明本系统在视场内不同区域的测量精度具有较好的一致性. 表中拟合球的半径与球的实际半径的平均偏差为 0.007 mm ,该偏差是通过离散点拟合球反映出来的,可以认为是系统误差. 从平均差的列中可看出最大偏差为 0.02 mm ,最小偏差为 0.001 mm ,该偏差反映的是系统不同方位的测量值和真值之间的精度,可以认为是系统的随机误差,说明测量中需要注意扫描区域的选取.

表 1 测试标准球实验数据

mm			
测量位置	测量区域	半径平均值	平均差
标准距离 ^①	左上	9.986	-0.020
	左下	10.001	-0.005
	中间	10.004	-0.002
	右上	9.989	-0.017
	右下	10.012	0.006
近距离 ^②	左上	9.993	-0.013
	左下	10.001	-0.005
	中间	10.003	-0.003
	右上	9.996	-0.010
	右下	10.003	-0.003
远距离 ^③	左上	9.999	-0.007
	左下	10.007	0.001
	中间	10.004	-0.002
	右上	9.989	-0.017
	右下	9.998	-0.008
15 方位平均值		9.999	

①:1.0 m;②:0.9 m;③:1.1 m.

5 测量实例

利用本文方法对某轿车车门进行测量,计算工件几何模型和模具型腔的差值(回弹值),其外形尺寸为 $1\,000\text{ mm}\times1\,200\text{ mm}\times200\text{ mm}$,测量点云的点间距为 0.05 mm .

使用 Canon 400D 相机拍摄照片,用标志点测量系统 XJTUDP 计算出全局标志点,采用面扫描系统 XJTUOM 实现多幅点云拼接,删除重叠面,在软件 Geomagic Studio 中处理后得到零件数模(见图 5 和图 6),并将所获点云和模具型腔数模在软件 Geomagic Qualify 中对齐. 如图 6 所示. 在 5 条纵线处作截面,从每个截面等间距处取 10 个点对作对比测量,选取的极大值和极小值如表 2 所示. 图 7 为截面 1 的极值,汽车车门在此截面处的最小回弹值为 0.009 mm ,最大为 0.010 mm ,此组数值可以作为模具的三维几何量补偿,用以指导修模,降低汽车车门成形模具的出错次数.



图 4 单个哑铃球照片

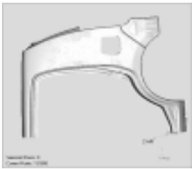


图 5 车门点云模型

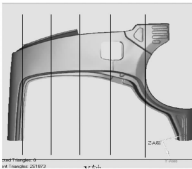


图 6 车门三角化模型

表 2 回弹截面实验数据

回弹截面	1	2	3	4	5
$S_{\min}/\text{mm}$	0.009	0.019	0.015	0.018	0.014
$S_{\max}/\text{mm}$	0.010	0.056	0.034	0.053	0.046

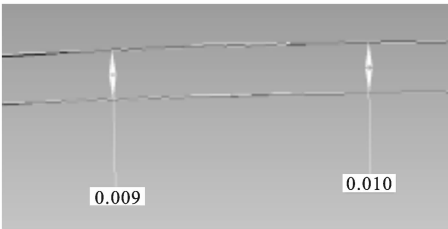


图 7 模具的 CAD 数模与点云对比(截面 1)

6 结 论

为了克服板料成形回弹量无法精确测量的工业现状,本文提出了标志点测量技术和面扫描技术相结合的光学测量方法,将该方法用以测量板料成形

的最终形状,与模具型腔(CAD数模)对比得出的差值作为该零件的回弹量,为数值模拟和现场修模提供了有力的依据.本文提出的将光学测量方法用于板金件的回弹精度检测也是今后研究发展的方向.

参考文献:

- [1] TISZA M. Numerical modeling and simulation in sheet metal forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1/3): 58-62.
- [2] HILL R. Mathematical theory of plasticity [M]. London, UK: Oxford University Press, 1996: 281-297.
- [3] 朱东波, 孙琨, 李涤尘, 等. 板料成形回弹问题研究新进展 [J]. 塑性工程学报, 2000, 7(1): 11-17.
ZHU Dongpo, SUN Kun, LI Dichen, et al. The new research progress of sheet metal stamping springback [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2000, 7(1): 11-17.
- [4] ESAT V, DARENDELILER H, GOKLER M I. Finite element analysis of springback in bending of aluminium sheets [J]. Materials and Design, 2002, 23(2): 223-229.
- [5] LI K P, CARDEN W P, WAGONER R H. Simulation of springback [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(1): 103-122.
- [6] 李春光. 汽车覆盖件冲压回弹补偿与控制方法研究 [D]. 长春: 吉林大学汽车学院, 2006.
- [7] 张冬娟. 板料冲压成形回弹理论及有限元数值模拟研究 [D]. 上海: 上海交通大学塑性成形工程系, 2006.
- [8] 臧顺来. 薄板弹塑性本构模型及冲压回弹研究 [D]. 西安: 西安交通大学机械工程学院, 2007.
- [9] 张德海, 梁晋, 唐正宗, 等. 基于近景摄影测量和三维光学测量的大幅面测量新方法 [J]. 中国机械工程, 2009, 20(7): 817-822.
ZHANG Dehai, LIANG Jin, TANG Zhengzong, et al. New measuring method of large size measurement based on close range photogrammetry and 3D optical measurement [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(7): 817-822.
- [10] 黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用 [D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2005.
- [11] 陈明舟. 主动光栅投影双目视觉传感器的研究 [D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2002.
- [12] JIA Prirong, KOFMAN Jonathan, ENGLISH Chad. Error compensation in two-step triangular-pattern phase-shifting profilometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(4): 311-320.

(编辑 管咏梅)