中国科学:信息科学 2017年 第47卷 第4期:416-427

SCIENTIA SINICA Informationis

中国图形学新进展专题・论文



曲面缺陷的自动检测算法

石泽云,李全,鲍虎军,黄劲*

浙江大学计算机辅助设计与图形学国家重点实验室,杭州 310058 * 通信作者. E-mail: hj@cad.zju.edu.cn

收稿日期: 2016-07-15; 接受日期: 2016-10-13; 网络出版日期: 2017-02-23 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目 (批准号: 61522209)、重大国际 (地区) 合作研究项目 (批准号: 61210007) 和浙江大学基 本科研业务费 – 校长专项 (批准号: 2015XZZX004-19) 资助

摘要 在汽车制造行业中,曲面缺陷检测是品质控制的重要环节.本文模拟了在实际缺陷检测过程 中工程师通过平行光的影像图案形态发现车身表面缺陷的过程,提出了 Integral Reflection Map (简称 IRM) 检测算法.该方法基于光线的反射定律和光线的可逆性,通过比较标准模型和制造模型在 反射光线时表现出来的差异来检测曲面缺陷.同时,通过对有效视点区域范围的积分,该方法避免了 在不同视点位置下检测结果的不稳定性.并且针对于标准模型和制造模型的整体刚体对齐无法检测 某些尺度下的曲面缺陷的问题,本文提出了标准模型和制造模型的局部对齐方法.实验结果表明,我 们的方法自动化程度高,与视点无关,能检测出不同尺度的曲面缺陷.

关键词 曲面缺陷, 曲面质量检测, 刚体对齐, 平均曲率, reflection map

1 引言

在汽车制造业中,车体外表面的外观是衡量一个车身质量和美观的重要标准,也是消费者在选择 一款汽车产品时的重要指标.因此,工业界对汽车外表面质量检测的要求越来越高,这中间很重要的 一步就是检测曲面缺陷.车体外表面可以看作是一个曲面,曲面缺陷则是指在车体外板生产过程 (面 板冲压、回弹松弛、成型等)中,在车身表面上出现的一些不可预期且大小和深度不一的局部凹陷与 凸起.这些缺陷分布不规则且往往高度都比较小,因此,检测难度非常大.

长期以来, 曲面缺陷只能依靠工程师在实际光照条件下, 用视觉去检测, 即将平行光照射到车体外 板表面上, 观察平行光在车身表面上形成的影像, 在存在缺陷的地方平行光影像图案会出现变形. 这 种方法的检测结果依赖于技术人员的经验和客观生产线条件, 不仅效率低、不可靠, 而且无法进行定 量分析.

近年来三维扫描仪在现代制造业的逆向工程和产品检测环节中的使用技术日益成熟,扫描结果的 精度越来越高,应用也越来越广泛.此外,点云重建方法的完善与进步也为产品质量检测提供了高质

引用格式: 石泽云,李全,鲍虎军,等. 曲面缺陷的自动检测算法. 中国科学:信息科学,2017,47:416-427,doi: 10.1360/N112016-00175 Shi Z Y, Li Q, Bao H J, et al. Automatic detection of surface defects (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47:416-427, doi: 10.1360/N112016-00175

© 2017《中国科学》杂志社

量的三维模型. 这为创建一个车身外板曲面缺陷自动检测工具提供了良好的输入条件. 试想如果经过 三维扫描仪和点云重建后的模型本身就与实际模型有很大的误差, 在这基础上采取一系列检测手段检 测出来的缺陷都没有任何意义.

我们将真实车体外板经过三维扫描和点云重建后的结果称之为制造模型.针对这种模型,已经有 比较多的相关工作致力于进行车身整体曲面品质的分析^[1~4],而张广军等^[5,6]则首次提出了利用结构 光的原理和方法来检测车体表面的缺陷, Jiang 等^[7] 遵循了这一想法,开发了一款软件来创建三维虚 拟场景,在该场景中用虚拟结构光来进行曲面缺陷的检测.这一类的检测方法,一方面往往依赖于比 较多的视点、环境参数设置,另一方面因为缺少比较信息,所以主要用于曲面缺陷的可视化,而曲面缺 陷的定量分析还是得依靠专业技术人员.

事实上,在工业生产中,与制造模型相对应的,往往还有一个标准模型,它是一开始就由设计师设计好的理想模型.通过利用标准模型,可以让我们更好地检测曲面缺陷,并且对曲面缺陷提出量化的评判标准.本文的主要贡献在于,同时利用了制造模型和标准模型,提出了一种与视点无关,不需要进行环境参数设置的检测方法,即Integral Reflection Map (IRM)检测算法,该方法能够在可视化的同时给出曲面缺陷的量化指标,能检测多种尺度的曲面缺陷,从而提高了曲面缺陷的检测效率和鲁棒性.

2 相关工作

随着三维扫描仪的发展和扫描结果精度的提高,人们可以获得车身外板的高质量的三维模型,这为曲面缺陷的自动化检测提供了基础.纪小刚等^[1]对反射线法、等照度线法和高亮线法的曲面品质分析过程进行了详细阐述,贵忠华等^[2]采取了高光线和焦点曲面法对车身曲面品质进行分析,王正如等^[3]应用模糊分析和人工神经网络的方法建立汽车车身曲面品质分析模型.徐万红等^[4]采取 CATIA 软件对车体外形进行分析.这些方法主要侧重于对车身曲面的整体质量进行评估.

张广军等^[5,6]、Jiang 等^[7]则利用结构光的原理和方法来检测车体表面的缺陷.其中 Jiang 等^[7]的工作在实际中得到了比较多的应用 (已经被通用汽车全球研究院的实验室采用).他们研发了一款软件,此软件创建了一个三维虚拟场景,在场景中用虚拟结构光来模拟真实物理环境下的平行日光灯. 将扫描和重建后的三维车身外板模型导入到场景中后,虚拟结构光照射到车体外板曲面上会形成类似 于斑马线的黑色条纹的影像,通过条纹的形态分布可以直观地判别出是否存在缺陷以及缺陷的形态. 但这种方法仍然需要技术人员与软件进行大量交互.而且使用时,需要较强的专业经验来调整光照方向,条纹线的类型、粗细、数量等参数.此外,该方法只能进行可视化而无法进行定量分析.

上述研究工作都只用到了制造模型. Metro 是 Cignoni 等^[8] 开发的一款比较两个三角网格曲面之间差异的工具,用表面采样的方法进行两个曲面网格之间的对比. 用该方法可以同时进行制造模型和标准模型之间差异的可视化与定量化分析. 该算法通过求两个曲面网格的 Hausdorff 距离^[8] (Hausdorff distance) 作为衡量两个曲面网格误差的标准. 这种方法虽然可以定量化地分析误差的大小,但是该方法设计的初衷并不是针对汽车生产制造领域的曲面缺陷检测与分析, 而是用来计算简化后的网格与原网格的差异,因此,针对性并不强. 在汽车生产制造厂商方面,他们不仅仅要求计算出来的检测结果可以定量化,而且要求得到的计算结果要有容易理解且符合实际的物理含义,而两个网格的Hausdorff 距离在这种应用背景下并不是一个好的评判标准.

针对目前曲面缺陷检测方法的种种不足,基于车体外板制造模型和标准模型的对比,我们提出了 一种鲁棒的、精确的 IRM 检测算法.该算法可以做到定量化得出误差数值,并可视化给用户.与之前 方法的不同之处在于本文的方法不需要过多与用户进行交互,也就是说使用它的用户不再需要是一个 经验丰富的工程师,即使普通用户也可以方便高效地操作使用.而且计算出的数值有实际的物理和几何含义,可以识别缺陷的类别 (凹陷或者凸起).此外,对于一些无法全局对齐的模型,我们提出了一种改进的局部对齐的方式,通过控制局部对齐半径的大小来区分不同尺度的曲面缺陷.

3 本文算法概述

本文提出了一种曲面缺陷检测的 IRM 检测算法, 整个算法主要包含 4 个步骤.

首先,给定输入的标准模型和制造模型(均为三角网格,且通过重采样保证其顶点数目的一致性),因为涉及到两个模型对应点之间的几何性质的比较,所以算法需要将两个模型进行整体刚体对齐.

然后算法给出了曲面凹凸程度的的衡量标准,并且计算了标准模型和制造模型之间凹凸程度的 差值.

接着,算法引入了基于光线的反射定律和光线的可逆性的 Reflection Map (RM)算法,并将其扩展为与视点无关的 IRM 算法.

最后,算法通过引入一种模型的局部对齐方法实现了对不同尺度的曲面缺陷的检测. 下面几节将详细介绍每个步骤的具体实现过程.

4 整体刚体对齐

本文所使用的整体刚体对齐算法为 Iterative Closest Point (ICP)^[9] 算法. 下面简单介绍一下 ICP 算法的具体实现步骤.

三维空间中的两个点 $\mathbf{p}_1 = (x_1, y_1, z_1), \mathbf{p}_2 = (x_2, y_2, z_2),$ 它们之间的欧式距离可以表示为 $d(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ = $\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$. 进而我们定义一个点 \mathbf{p}_1 到一个点的集合 $A = \{\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n\}$ 的距离为

$$d(\mathbf{p}_1, A) = \min_{i \in 1, \dots, n} d(\mathbf{p}_1, \mathbf{a}_i), \tag{1}$$

并且可以得到集合 A 中与 \mathbf{p}_1 距离最近的那个点.

给定标准模型 P 和制造模型 Q 的顶点集合,我们可以求出集合 $P = \{\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_m\}$ 中每个点到集 合 $Q = \{\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_n\}$ 的最小距离与对应的最近点 (集合 P 和 Q 的顶点个数 m 和 n 可以不相同).在 得到 P 到 Q 的点与点的对应关系后可以用最小二乘法^[10]计算旋转矩阵和平移向量,用旋转矩阵和 平移向量对点集合 P 进行旋转得到新的点集合,并求出平移前后点集合的平均方差 d,这样重复进行 上面操作直到完成迭代次数或者两次迭代的方差之差小于一个给定阈值 τ .

在 ICP ^[9] 迭代之前先初始化数据, $P_k = P$, k = 0, 初始化平均方差 $d = \infty$. 初始化结束之后进行 ICP ^[9] 迭代过程.

Step 1. 计算 P_k 中每一个点到 Q 的最近点, 在这里可以利用空间数据结构来优化最近距离点的 计算, 例如: k-d tree.

Step 2. 用最小二乘法^[10] 计算出旋转矩阵和平移向量,并求出当前的平均方差 d_k.

Step 3. 运用旋转矩阵和平移向量对 P_k 进行旋转和平移,得到下次迭代的点集合 P_{k+1} .

Step 4. 判断是否完成迭代次数, 如果完成则退出迭代. 判断连续两次迭代的平均方差之差是否小于阈值 $|d_k - d_{k+1}| < \tau$, 如果条件成立同样退出迭代. 否则继续迭代直到满足退出迭代的条件.

最终得到与制造模型对齐的标准模型顶点集合,即完成迭代时的集合 Pk.

5 曲面凹凸程度衡量

我们在检测曲面缺陷时不仅仅希望得到缺陷大小,还希望获得缺陷的形态特征 (凸起或凹陷),因此在车体外板曲面缺陷检测算法中对曲面凹凸程度的判断至关重要.下面介绍曲面顶点凹凸程度的衡量方法.

对于某一三角网格曲面 *S* 上一点 $\mathbf{v} \in S$, 我们用 Normal(\mathbf{v}) 表示顶点上的单位法向量, $N(\mathbf{v})$ 表示 \mathbf{v} 的一环邻域顶点, Area(\mathbf{v}) 表示 \mathbf{v} 的一环邻域三角形的面积和. 设想让顶点 \mathbf{v} 邻域内的点都沿着 该点的法向量方向移动距离 t, 即将所有点 $\mathbf{v}_j \in N(\mathbf{v})$ 移动到 $\mathbf{v}_j + t \cdot \text{Normal}(\mathbf{v}_j)$. 如果顶点 \mathbf{v} 的邻 域空间形态是凸起的, 那么移动邻域内的点后, Area(\mathbf{v}) 将会变大, 如果顶点 \mathbf{v} 的邻域空间形态是平面 的, 那么经过移动后邻域的总面积 Area(\mathbf{v}) 不变, 否则, Area(\mathbf{v}) 会减小. 所以, 我们可以用 Area(\mathbf{v}) 的 梯度来衡量点 \mathbf{v} 处的凹凸程度, 而面积的梯度可以通过平均曲率法向算子 ^[11] K_H 来计算. 因此, 我们 将点 \mathbf{v} 处的凹凸程度定义为

$$\operatorname{Convex}(\mathbf{v}) = \frac{\sum_{\mathbf{v}_j \in N(\mathbf{v})} K_H(\mathbf{v}_j) \cdot \operatorname{Normal}(\mathbf{v}_j)}{|N(\mathbf{v})|},\tag{2}$$

其中 $|N(\mathbf{v})|$ 表示 $N(\mathbf{v})$ 中元素个数. 上面计算得到的 Convex(\mathbf{v}) 是一个实数, 当 Convex(\mathbf{v}) < 0 时表 示点 \mathbf{v} 一环邻域内区域是凹坑, 且数值越小, 凹得越利害, 当 Convex(\mathbf{v}) = 0 时表示点 \mathbf{v} 一环邻域区 域是平面, 当 Convex(\mathbf{v}) > 0 时表示点 \mathbf{v} 一环邻域区域是凸包, 且数值越大凸得越利害.

在这基础上可以比较标准模型 P 和制造模型 Q 上对应点对 p 和 q 处的凹凸程度. 将曲面凹凸 程度差值定义为

$$Diff(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = Convex(\mathbf{q}) - Convex(\mathbf{p}), \tag{3}$$

其计算结果也是实数. 这个实数的大小和符号同样具有不同的几何意义.

- Diff(**p**,**q**) > 0 表示 **q** 相对于 **p** 更加凸起, 其数值大小表示凸起的程度.
- Diff(**p**,**q**) = 0 表示 **q** 和 **p** 是重合的, 既没有凸起也没有凹陷.
- Diff(**p**,**q**) < 0 表示 **q** 相对于 **p** 更加凹陷, 其数值大小表示凹陷程度.

图 1 用 2 维平面上的两条曲线 a 和 b 来显示不同符号的 Diff(a,b) 所对应的几何形态.

6 IRM 算法

首先介绍与视点位置相关的 Reflection Map (RM) 算法. 再引入 Integral Reflection Map (IRM) 算法.

6.1 RM 算法

在一个给定的视点位置 **r** 观察某一三角网格曲面 *S* 上的一个点 **v** \in *S*, **v** 的法向量为 **n**. 根据这 些条件我们可以确定一条反射光线,反射光线的方向为 **r**'(**v**) – **v**. 如图 2 所示,其中 **r**'(**v**) 是视点位置 **r** 关于点 **v** 处法向 **n** 的对称点 **r**'(**v**) = **r** – 2**nn**^T(**r** – **v**).

在实际环境中,光线照射到车体外板表面经过反射后到达人的眼睛中.由于光线是可逆的,从光 源发射一条光线经过反射照射到人眼睛这个过程中光走过的路径与从人眼睛位置发射一条光线经过 反射后到达光源的路径是重合的,只是光线的方向相反.由于在计算机中模拟无限条光线,然后判断哪 些光线经过反射后到达人眼中是困难的,所以,我们利用光的可逆性来简化模拟过程.





图 1 (网络版彩图) 曲线凹凸程度差值几何形态示意图 **Figure 1** (Color online) Illustration of the different cases of Diff(*a*, *b*)



我们假设从视点位置发射一条光线去观察标准模型 P 和制造模型 Q 上对应点对 p 和 q, 根据它 们的法向方向可以计算出两条反射光线.如果两个点位置重合并且法向方向一致, 那么这两个点不存 在误差, 否则我们用两条反射光线的差异来衡量这两个顶点处曲面缺陷大小, 即,

$$ReflError(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r}) = \|\mathbf{r}'(\mathbf{p}) + \mathbf{q} - \mathbf{r}'(\mathbf{q}) - \mathbf{p}\|.$$
(4)

但是, 缺陷大小并不能表现出缺陷的形态, 因为它是一个非负数值, 无法区分凹陷与凸起. 因此, 为了 真实体现出缺陷的几何形态, 需要将缺陷大小与曲面凹凸程度差值结合起来, 我们最终得到 RM 算法 的曲面缺陷量化指标为

$$RM(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r}) = Diff(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \cdot ReflError(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r}).$$
(5)

当 RM(**p**,**q**,**r**) 接近 0 时表示当前位置在当前视点 **r** 处观察不存在缺陷, 而 RM(**p**,**q**,**r**) 为负或为正则 代表出现了凹陷或凸起的曲面缺陷.

6.2 IRM 算法

上一节详细介绍了单个视点位置情况下检测曲面缺陷的 RM 方法. 该方法是对现实检测方法的 一种模拟,因此便于工程师理解和使用,并且提供了直观的、定量的可视化结果供用户查看. 但是,它 也有很明显的缺点,即 RM 算法的结果会依赖于视点的位置,不同视角下会检测出不同形态的缺陷, 即使是相同的一处缺陷,在不同视角下也会呈现出不同形态. 这个因素导致 RM 算法不能做到全自动 检测,本节介绍的 Integral Reflection Map (IRM) 算法可以有效地解决这个问题.

首先, 给定曲面上的一个顶点, 以及该顶点的法向量方向就可以确定出该点的有效视点区域, 即 法向正方向的半球区域. 我们可以这样理解, 法向量方向实际就是指出了正方向, 因此有效的视点区域 实际上就是在法向的正方向去观察, 在实际实验环境中就相当于在模型正面观察车体. 对于标准模型 P 和制造模型 Q 上对应点对 \mathbf{p} 和 \mathbf{q} , 分别计算出这两个顶点各自的有效视点区域, 取它们的交集则为 检测曲面缺陷时公共的有效视点区域. 在实际计算时, 我们做了一步近似, 认为点对 \mathbf{p} 和 \mathbf{q} 的位置重 合在它们的中心点 \mathbf{o} 上, 这样可以大大提高计算公共的有效视点区域的效率, 同时不会对结果产生很 大的影响. 如图 3 所示, \mathbf{n}_p 为点 \mathbf{p} 处的法向, \mathbf{n}_q 为点 \mathbf{q} 处的法向, M 为当前公共的有效视点区域.

这个区域相当于是一个球面上的一部分,区域内所有视点位置都是有效的,为了实现检测结果与 视点无关,我们提出对该区域内所有视点位置检测出缺陷大小进行积分的 IRM 方法.







图 4 公共的有效视点区域中某一视点位置下, 曲面缺陷 大小示意图

 $\label{eq:Figure 4} \begin{array}{ll} \mbox{Illustration of the defect under a viewport in common valid view area} \end{array}$

如图 4 所示,利用上一节中的原理,可以得到视点位置为 r 时缺陷大小为两条反射光线的差异 $\|\mathbf{r}'(\mathbf{p}) - \mathbf{r}'(\mathbf{q})\|$.取 c_p 为三角形 $\triangle \mathbf{ror}'(\mathbf{p})$ 中边 rr'(p) 的中点, c_q 为三角形 $\triangle \mathbf{ror}'(\mathbf{q})$ 中边 rr'(q) 的中 点,可以得到 $\|\mathbf{r}'(\mathbf{p}) - \mathbf{r}'(\mathbf{q})\| = 2\|\mathbf{c}_p - \mathbf{c}_q\|$.

又因为 $\overrightarrow{\mathbf{oc}_p} = \overrightarrow{\mathbf{or}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{n}}_p$, $\overrightarrow{\mathbf{oc}_q} = \overrightarrow{\mathbf{or}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{n}}_q$, 可以计算出 $\|\mathbf{c}_p - \mathbf{c}_q\| = \|\overrightarrow{\mathbf{or}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{n}}_p - \overrightarrow{\mathbf{or}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{n}}_q\|$, 对区域 *M* 内所有 视点位置积分, 可以得到缺陷大小为

InteError(
$$\mathbf{p}, \mathbf{q}$$
) = 2 $\iint_{M} \|\vec{\mathbf{or}} \cdot \vec{\mathbf{n}}_{p} - \vec{\mathbf{or}} \cdot \vec{\mathbf{n}}_{q} \| \mathrm{d}M.$ (6)

到此为止,就可以计算与视点无关的曲面缺陷大小.但上述积分式不能求出解析公式,因此,为了在计算机中进行处理,我们需要对上式进行离散化,即在积分区域中进行离散采样来近似得到计算结果.值得注意的是,为了保证采样是均匀的,我们将积分区域*M*,通过换元法,从最原始的球面经过一步积分转换到平面上的圆形区域,再通过极坐标转换成平面矩形区域,如图 5 所示,最终可以在矩形区域中进行均匀离散采样.

与 RM 算法一样, 曲面缺陷量化指标需要考虑到曲面凹凸程度差值, 最终我们得到 IRM 算法的 曲面缺陷量化指标为

$$IRM(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = Diff(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \cdot InteError(\mathbf{p}, \mathbf{q}).$$
(7)

7 局部刚体对齐的 IRM 算法

使用 IRM 算法进行曲面缺陷检测的前提是对车体外板表面的标准模型和制造模型进行刚体对齐, 但有些情况下全局对齐是没有意义,或者存在歧义的.如图 6 所示的 2 维平面上的两条曲线 *a* 和 *b* 的 对齐情况.

图 6 的两条曲线,如果将它们的右半部分完全对齐,则左半部分就会有偏差,因此通过 IRM 算法 得到的结果会显示右半部分没有曲面缺陷,而左半部分则存在大的缺陷.相反,如果将左半部分完全对



图 5 有效视点积分区域的积分转换 Figure 5 Change of integral area in the valid view area





齐后, 右半部分就会有偏差, 因此通过 IRM 算法得到的结果会显示左半部分没有曲面缺陷, 而右半部 分则存在大的缺陷. 但是实际上, 两条曲线的左右部分的形态是完全相同的, 曲面缺陷主要存在于中 间的部分. 可见, 整体刚体对齐无法满足这种情况下的检测需求, 而且导致 IRM 算法无法得到正确结 果. 这样的情况在同时存在多个不同尺度的曲面缺陷时并不少见, 本文提出一种局部刚体对齐方法来 解决这个问题.

具体来说,已知车体外板表面的标准模型 P 和制造模型 Q 上一组对应点对 p 和 q,局部刚体对 齐算法的步骤如下.

Step 1. 首先从用户那里获得局部对齐半径 R.

Step 2. 分别在标准模型 *P* 上找到点 **p** 在半径 *R* 内的邻域 $N(\mathbf{p})$, 和制造模型 *Q* 上找到点 **q** 在 半径 *R* 内的邻域 $N(\mathbf{q})$, 具体实现时可以使用 Dijkstra 算法^[12] 进行搜索.

Step 3. 将得到的两个邻域 $N(\mathbf{p})$ 和 $N(\mathbf{q})$ 内的顶点集合应用 ICP ^[9] 算法进行对齐 (参考整体刚体对齐部分).

应当注意的是, 在局部对齐后, 运用 IRM 算法时, 还需要考虑到邻域的大小, 我们将 IRM 算法中的曲面缺陷量化指标重新定义为

$$\operatorname{IRM}_{R}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \frac{\operatorname{Diff}(\mathbf{p}, \mathbf{q})}{\operatorname{Area}(N(\mathbf{q}))} \sum_{\mathbf{p}_{i}, \mathbf{q}_{j}} \operatorname{InteError}(\mathbf{p}_{i}, \mathbf{q}_{j}),$$
(8)

其中 $\mathbf{p}_i \in N(\mathbf{p})$, $\mathbf{q}_j \in N(\mathbf{q})$, Area($N(\mathbf{q})$) 代表邻域 $N(\mathbf{q})$ 的面积. 这样的处理方式可以使算法检测出不同尺度的缺陷, 当局部对齐半径 R 较小时可以明显地检测出小尺度的曲面缺陷 (Surface Roughness¹), 相反, 当对齐半径 R 变大时小尺度曲面缺陷逐渐被过滤掉, 而大尺度曲面缺陷将逐渐被检测出来, 这个功能相当于信号处理中的带通滤波器²).

8 实验结果与分析

首先用一组数据对比 RM 和 IRM 算法. 在一个车身模型上, 添加不同大小的三维正弦和球冠形状缺陷来模拟现实中车身模型上存在的曲面缺陷. 对模型在 3 个不同的视点下应用 RM 算法和应用 IRM 算法的结果如图 7 所示.

 $^{1)\} http://en.wikipedia.org/wiki/Surface_roughness.$

²⁾ http://en.wikipedia.org/wiki/Band-pass_filter.



图 7 (网络版彩图) RM 和 IRM 算法检测结果对比 示意图

Figure 7 (Color online) Comparison result of RM method and IRM method. (a) RM (viewport a); (b) RM (viewport b); (c) RM (viewport c); (d) IRM

图 8 (网络版彩图) 测试所使用的平板模型示意图 **Figure 8** (Color online) The plane model used in the tests

可以看到, RM 算法在不同的视角位置所检测到的误差形态有所不同, 误差大小也有所差异. 甚至 在图 7(c) 中的视点位置下, 有一处缺陷并没有检测出来. 这是因为该视点的位置处于这个缺陷的背面, 因此无法检测出该缺陷. 相对地, IRM 算法因为与视点无关, 并且充分考虑到了整个有效视点区域, 所 以始终可以得到比较好的检测效果. 这一结果也展现了我们的方法相对于以往方法^[5~7] 的优势, 因为 以往的这些方法其结果都是与视点位置相关的.

局部对齐中引入了一个需要用户输入的对齐半径 *R*,在一个平板模型上 (如图 8 所示),用 3 组实 验来说明该半径对检测多尺度曲面缺陷的影响.请注意,在这些实验中,鉴于曲面凹凸程度差值是与 局部对齐半径 *R* 无关的量,为了避免干扰,我们将 IRM 指标中该分量值统一设为 1 (Diff(**p**,**q**) = 1).

第一组实验,测试了不同局部对齐半径 R 下小尺度曲面缺陷的检测效果. 实验中,通过在平板模型上添加一处小尺度的噪音来模拟真实曲面缺陷. 在平板中心 (索引号为 10098 的顶点)的一环邻域内随机添加扰动,此时,平板模型上仅仅存在这一处小尺度缺陷. 在不同的局部对齐半径下用 IRM 算法进行检测,得到的对比结果如图 9 所示. 从图 9 中可以看到,在局部对齐半径较小的情况下,随着半径的增大,曲面缺陷变得越来越明显,但当局部对齐半径超过某一临界值后,随着半径的不断增大,检测出来的曲面缺陷将会逐渐模糊,直到接近于不可见. 为了从数值上说明这一点,我们在图 10 中给出了对应的统计直方图结果. 在图中标识出了索引号为 10098 的顶点在不同半径情况下的曲面缺陷量化值 (IRM 指标). 从该图可以看出,在局部对齐半径为 2 时检测到的曲面缺陷最明显,而半径小于或大于该半径时,曲面缺陷的量化值都会减小.

第二组实验,测试了不同局部对齐半径下大尺度曲面缺陷的检测效果.我们在平板中央 (索引号为 10098 的顶点)添加了一个正弦波形的缺陷作为大尺度的缺陷,同样在不同的局部对齐半径条件下



图 9 小尺度缺陷在不同局部对齐半径 R 下的 IRM 检测结果示意图 (图中从蓝到红代表数值的不断增大)

Figure 9 Illustration of the detection result of IRM method for small size defect under different local alignment radius R (blue indicates small value). (a) R=1.5; (b) R=2; (c) R=5; (d) R=10; (e) R=15; (f) R=20



图 11 大尺度缺陷在不同局部对齐半径 *R* 下的 IRM 检测结果示意图 (图中从蓝到红代表数值的不断增大)

Figure 11 Illustration of the detection result of IRM method for large size defect under different local alignment radius R (blue indicates small value). (a) R=2; (b) R=5; (c) R=10; (d) R=20; (e) R=40; (f) R=55



图 10 小尺度缺陷在不同局部对齐半径下的 IRM 指标 统计直方图

Figure 10 Histogram of IRM measurement for small size defect under different local alignment radius



图 12 大尺度缺陷在不同局部对齐半径下的 IRM 指标 统计直方图

Figure 12 Histogram of IRM measurement for large size defect under different local alignment radius

应用 IRM 算法,实验结果如图 11 所示,从图中可以看出,检测大尺度缺陷的时候,同样,在局部对齐 半径由小增大的过程中曲面缺陷逐渐明显,但当局部对齐半径超过某一临界值后,检测出来的曲面缺 陷开始变模糊.

同样,我们给出对应的统计直方图结果 (图 12).图中,统计了索引号为 10098 的顶点在不同局部 对齐半径下的曲面缺陷量化值 (IRM 指标).可以看出,在局部对齐半径为 40 的时候, IRM 指标值达 到最大,而半径小于或大于该半径时, IRM 指标值都会减小.

第三组实验,综合了以上两组测试,即同时将小尺度曲面缺陷和大尺度曲面缺陷添加到平板模型上. 我们添加了以顶点 10098 为中心的正弦波形和在顶点 9916 处的一环邻域内的局部噪声. 不同局部对齐半径下, IRM 算法的检测结果如图 13 所示, 对应的统计直方图见图 14. 可以看到, 小尺度的



图 13 混合尺度缺陷在不同局部对齐半径 *R* 下的 **IRM** 检测结果示意图 (图中从蓝到红代表数值的不断增大)

Figure 13 Illustration of the detection result of IRM method for mixed size defect under different local alignment radius R (blue indicates small value). (a) R=2; (b) R=3; (c) R=4; (d) R=10; (e) R=15; (f) R=20



图 14 混合尺度缺陷在不同局部对齐半径下的 IRM 指 标统计直方图

Figure 14 Histogram of IRM measurement for mixed size defect under different local alignment radius



图 15 局部对齐的 IRM 算法 (局部对齐半径 *R*) 在真实车体外板上的检测结果示意图 Figure 15 The detection result of local aligned IRM method (with local alignment radius *R*) for outside surface of a car. (a) *R*=1; (b) *R*=5; (c) *R*=20; (d) *R*=40

曲面缺陷会在局部对齐半径较小的情况下较为明显,并且达到最大的曲面缺陷量化值 (IRM 指标).在 这之后,继续增加局部对齐半径,小尺度缺陷 IRM 指标值减小,形态越来越不明显,而大尺度缺陷形 态逐渐清晰明显,且 IRM 指标值增大.最后,当局部对齐半径再增大时.大尺度缺陷开始逐渐不明显, IRM 指标值减少.

综合以上 3 组实验可以看出, 在局部对齐的 IRM 算法中, 用户可以选择不同的局部对齐半径, 检测和观察不同尺度的曲面缺陷.

下面给出一个在真实车体外板模型上进行测试的结果. 如图 15 所示, 在合适的半径下, 局部刚体 对齐的 IRM 算法可以很好地检测出生产模型中存在的曲面缺陷. 特别是图 15 中标记为 A, B 的两类 曲面缺陷, 在与通用汽车公司的研究员和工程师的合作和交流中发现, 这两类确实是他们十分关注的 曲面缺陷. 我们的算法能够清楚地可视化并给出这些曲面缺陷的量化指标, 对他们后续的检验与修正 工作非常有帮助.

9 结论和未来工作展望

本文提出了一种曲面缺陷的自动检测方法 (IRM 算法), 它模拟了汽车制造业中, 在实际光照条件 下, 对车体外表面上存在的曲面缺陷的视觉检测过程. 我们提出了简单、有实际意义的缺陷形态衡量 标准, 并且实现了与视点无关的、对不同尺度的曲面缺陷的检测. 实验数据说明了该方法的可靠性. 但 是, 在实际应用中, 工程师不仅希望检测出缺陷, 还希望对缺陷进行分类, 以便对不同种类的曲面缺陷 进行不同的处理. 而我们的算法目前只能粗略地将曲面缺陷分为凹陷或凸起这两种形态, 还需要做进 一步的改进.

参考文献 -

- 1 Ji X G, Gong G R. Study on surface quality analysis methods. Appl Res Comput, 2007, 3: 85-88 [纪小刚, 龚光容. 曲面品质分析方法研究. 计算机应用研究, 2007, 3: 85-88]
- 2 Gui Z H, Liu Z K, Yan X M. Methods for analyzing surface quality in car body CAD. Mech Sci Tech, 1998, 5: 174–176 [贵忠华, 刘振凯, 严新民. 轿车车身 CAD 中的曲面品质分析方法. 机械科学与技术, 1998, 5: 174–176]
- 3 Wang Z R, Liang J, Wang L Z, et al. Study on quality evaluation of automobile surfaces based on fuzzy comprehensive evaluation. China Mech Eng, 2011, 6: 748–751 [王正如, 梁晋, 王立忠, 等. 基于模糊综合评价的车身曲面品质分析. 中国机械工程, 2011, 6: 748–751]
- 4 Xu W H, Li S S, Zhang G Z. Quality analyzing and application on fairness of auto body surface. Modular Mach Tool Autom Manufact Tech, 2005, 2: 48–49 [徐万红, 李书生, 张国忠. 车身曲面的光顺品质分析与应用. 组合机床与自动化加工技术, 2005, 2: 48–49]
- 5 Zhang G J, Wang H, Zhao H J, et al. Structured light 3D vision. Acta Aeronaut et Astronaut Sin, 1999, 4: 78-80 [张 广军, 王红, 赵慧洁, 等. 结构光三维视觉系统研究. 航空学报, 1999, 4: 78-80]
- 6 Zhang G J, Tian X. Structured light 3D vision and its industry application. J Beijing Univ Aeronaut Astro Nautics, 1996, 6: 16-20 [张广军, 田叙. 结构光三维视觉及其在工业中的应用. 北京航空航天大学学报, 1996, 6: 16-20]
- 7 Jiang B, Yang W H, Liu X G. A simulated surface quality inspection system for stamped panels. In: Proceedings of the International Conference on Advanced Vehicle Technologies and Integration (VTI 2012), Changchun, 2012. 732–737
- 8 Cignoni P, Rocchini C, Scopigno R. Metro: measuring error on simplified surfaces. In: Computer Graphics Forum. Hoboken: Blackwell Publishers, 1998. 17: 167–174
- 9 Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3D shapes. IEEE Trans Patt Anal Mach Intell, 1992, 14: 239–256
- 10 Arun K S, Huang T S, Blostein S D. Least squares fitting of two 3D point sets. IEEE Trans Patt Anal Mach Intell, 1987, 9: 698–700
- 11 Meyer M, Desbrun M, Schröder P, et al. Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-Manifolds. In: Visualization and Mathematics III. Berlin: Springer, 2002. 35–57
- 12 Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs. Numer Math, 1959, 1: 269–271

Automatic detection of surface defects

Zeyun SHI, Quan LI, Hujun BAO & Jin HUANG^{*}

State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China * Corresponding author. E-mail: hj@cad.zju.edu.cn

Abstract In the automobile manufacturing industry, the detection of surface defects is a crucial process for quality control. This study simulates the process by which engineers find defects on an outer surface using a parallel light reflection map and the proposed integral reflection map (IRM) detection algorithm. This method is based on the law of reflection and reversibility of light, and detects surface defects by comparing the different behaviors of the reference model and manufactured model under reflection. Furthermore, by doing integral in valid viewpoint areas, this method avoids the instability of detection results under different viewpoint positions. Moreover, to solve the problem that the global alignment of reference and manufacture models cannot detect certain scales of surface defects, this paper proposes a local alignment method. The implementation results show that our method is highly automatic, viewpoint independent, and can detect multi-scale surface defects.

Keywords surface defect, surface quality detection, rigid alignment, mean curvature, reflection map



Zeyun SHI was born in 1990. She received her B.S. degree in computer science from Xiamen University, Hangzhou, in 2011. She is currently a Ph.D. candidate at Zhejiang University, Hangzhou. Her research interests lie mainly in the areas of geometry processing and semantic modeling.



Jin HUANG was born in 1978. He received his Ph.D. degree in computer science from Zhejiang University, Hangzhou, in 2007. He is currently a professor at Zhejiang University, Hangzhou. His research interests lie mainly in the areas of geometry processing and physically based simulation.