

努尔阿拉德和丹尼尔赖斯菲尔德

特拉维夫大学数学科学学院
电子邮件 nurmathtauacil reifeldmathtauacil

以色列

抽象的

基于径向基函数的变换已被证明是图像变形的强大工具 在目前的工作中,我们将这些变换分解为线性和径向项,并展示了此类分解有利的示例 引入了局部支持的基函数与其他变形技术进行比较最后讨论了图像变形的一些要点

关键词图像 变形 径向基函数 局部支持 面部表情 归一化

介绍

图像扭曲是平面的有界子区域到自身的变换,与每个点相关联的颜色或灰度相应变换

目的,因为它们的使用最小化了图像扭曲的全局测量 然而,在许多情况下,全局效果是不受欢迎的

全局组件 之前我们介绍了基于 RBF 的转换,可用于强调锚点的局部影响

这些包括诸如通常由不同的计算机动画和识别系统拍摄的两个或多个图像的图像配准匹配等领域,其中扭曲用于在识别或分类之前将图像标准化为某种不变的表示
传感器

一些研究人员构建了描述特定领域中对象的扭曲模型 我们称这种方法依赖于模型并且特别用于面部动画 尽管自然对象的逼真建模非常困难并且需要许多不同的模型,但此类过程所展示的令人印象深刻的结果作为替代模型独立方法构建简单的通用转换,不使用关于被扭曲对象的特定信息

在各种应用中使用这些变换,我们已经意识到它们有两个缺点 所有锚点都对映射的全局分量有贡献,并且所有已知的径向函数都没有紧凑的支持,因此会产生一些全局效果在目前的工作中我们已经将映射分解为 ane 和 elastic 组件 ane 补偿相机视点的变化,而 elastic 模拟对象的内在变换,例如面部表情的变化 尽管这两个组件是不同的,但它们几乎同时被评估,从而产生单个变换 这种分解使我们能够定义一系列变换,如果需要,每个锚点的影响都是局部的

径向基函数理论 RBF 为图像变形提供了一个有吸引力的框架 Book stein 建议使用这些函数的一个子类,称为图像配准的薄板样条

当视点不变时,会出现一个重要的特殊情况,在这种情况下,组件会减少到恒等映射另一个结果

© 欧洲图形学协会
出版社
马萨诸塞州剑桥街
布莱克威尔出版
Cowley Road Oxford OX JF UK 和
美国
主要的

是在极端情况下指定最小数量的 chor 点的可能性,而不是之前需要的至少三个点

此外,我们发现了一个具有局部支持的平滑基函数因此每个锚点的局部影响是绝对保证的另外需要更少的计算并且实现了弱概念关联性

最后是面部图像的各种应用证明

映射

我们将图像视为 D 对象 在这方面,图像是平面的有限域,具有与每个点相关联的灰度级或颜色根据它们相关坐标的变换,我们主要关心的是构建一个

由少量锚点的映射确定的图像平面的映射,这些锚点的映射是预先确定的。这个要求使我们想到了插值理论

D RBF 变换

在维度插值理论中,涉及计算满足以下条件的函数 F

Fxi 我为我 否

该理论对函数 T 的直接推广是形式的插值

T xi yi for i dene T N哪里希翼 We

a D 径向基函数 trans

形成 RBFT 作为形式的变换

发送 x 接收

其中 Ax Mx b 是 D 变换实数矩阵,Rx 是径向变换

M 是一

个编队,由

Rx RXx RY x

RX 和 RY 都是形式的径向函数

F×XN aigk x xi k

。G

是称为径向的单变量函数

基函数,kk 表示通常的欧几里德

规范

一个 RBFT 由 N 个数系决定,N 个数系和 N 个径向分量,或者需要 N 个数系来指定每个维度的变换。我们定义了一个

基于N个锚点映射的imagewarping变换

T xi 易为我 否

其中 yi 是第 i 个点的目标坐标 这些插值条件转化为 N 个线性方程的系数

RBFT 从而为每个维度留下自由度

以前以推广一个变换的方式添加了两组三个方程只要插值条件允许,RBFT 就会退化为一个变换

使用薄板样条 gt t log t 作为基函数可确保最小化

弯曲能量泛函的 g 从这个意义上说,薄板样条本质上是全局的,并且无法避免每个锚点的全局影响 除其他外,这意味着每个像素的变换都受到每个锚点的影响,这在计算上很耗时最近,Powell 开发了一种非常有效的算法,该算法可以在规则的矩形网格上计算薄板样条,即提供锚点数量至少为数百的图像

使用其他基函数,例如 Gaus

sian gt et 使我们能够通过适当调整每个锚点的局部参数来合并局部约束 在薄板、高斯函数和其他几类函数的情况下,可以保证唯一的解决方案 我们现在将考虑一个 dif

一组不同的约束

变换的分解

RBFT 方程中采用的符号提出了一种添加附加方程的替代方法,我们可以简单地先验地确定 RBFT 的一个分量,然后求解受这些约束约束的插值方程

例如,可以使用恒等映射作为 RBFT 的一个组成部分。这对应于一种情况,其中视点固定的,并且所有扭曲都是由于对象的非刚性变换 (例如其表达式的变化)引起的

作为另一个例子,可以考虑人脸归一化问题正如我们已经证明的那样,由眼睛和嘴巴的位置决定的变换有助于人脸识别

因此可以标记两组锚点一组确定映射的一部分而另一组径向集控制面部表情变化的生成注意这些集可能相交甚至可能相同

控制an分量Axin是根据an集合中锚点的个数进行如下如果没有指定点an分量是恒等映射如果指定一个点平移两点平移缩放三点一般an变换由最小二乘近似程序确定的三个以上的通用变换 或者,可以决定承认的最通用的映射是相似性平移缩放和旋转,在这种情况下,当集合包含时,需要最小二乘近似方案

三个或更多点强制组件成为相似性映射的重要性将在后面的部分讨论

在计算出轴分量 Ax 之后,我们转向确定径向分量
Rx in From 并且它遵循径向分量满足

Rxi 易阿喜 否
由于 ane 分量是预先确定的,因此等同于具有纯径向和的插值问题,即每个坐标中的系数 ai ,即 k 是通过求解来确定的

线性系统

XN ajkg kxi xjk
j
yik Axik 为我 否

径向基函数理论确保了锚点不同的可解性

然而,径向基函数 g 必须符合我们在下面讨论的某些条件

选择基础
径向基函数 g 的任何选择都应考虑以下几点

方程解应该是稳定的 应该总是可以解决的
的
转换的运行时间应该很短
应建立锚点转换的全局和局部效果之间的权衡

状况 和被几个家庭接见
功能,包括 Hardy multiquadrics gt
吨 C 并且高斯 gt et 提供了锚点的数量没有达到数千 可以通过使用具有适当 s 的高斯来确保局部条件但是高斯具有无穷大的支持,这意味着

c 欧洲图形学协会

每个像素再次受到每个锚点的影响,或者高斯可以近似为求和它对于大参数消失为了获得合理的近似值,高斯的切点应该考虑绝对值

方程的系数 ai 的 lute 值对于锚点的每个设置都是不同的更多这些系数由高斯本身确定 ,因此产生循环依赖

这些缺点导致我们寻找高斯
具有紧凑支持的形状基函数

我们发现了两个符合的功能系列
对这些限制

过渡函数



数字 左图显示了这些函数与高斯函数一起绘制的图。局部参数用于满足要求
它们的计算速度都很快,特别是
如果使用查找表,由于它们的紧凑支持,我们没有发现这两个基函数在性能上的显着差异,尽管单边三次样条比仅C

溶解性和稳定性

可解性条件的问题很微妙 纯径向和在 in 插值问题可解性的充分必要条件是径向函数 gt 具有表示

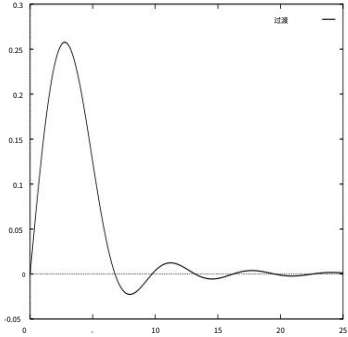
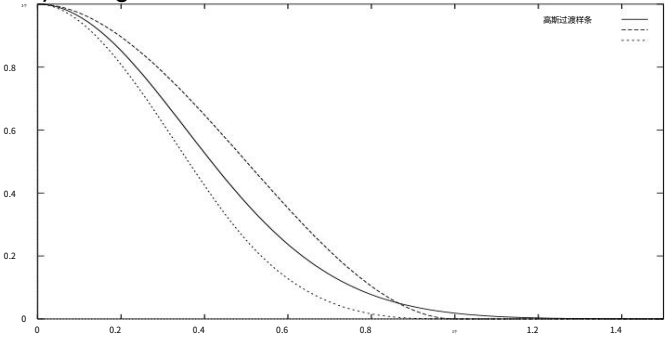
gt Z mtu u du

其中 u 为非递减且有界

先生 兆焦耳

Jk r 是 k 阶贝塞尔函数 在我们的例子中,维度 m 是相等的,因此

r jr



图左图是文本中讨论的具有局部参数的三个径向函数的值该值用于方程式定义的函数的高斯右图

对于过渡函数

从等式和遵循 g_t 必须承认一个表示

无法产生唯一解决方案的锚点

你都

上述讨论的结论是,一个

g_t Z J图

可以遵循两种策略来确保局部效果理论上合理但耗时的方法是使用没有切割的高斯基础在这种情况下,每个像素计算的运行时间是锚点的数量乘以高斯的评估时间我们需要一个图像大小顺序的查找表,以避免直接评估高斯分布使用没有切割的高斯分布的另一个缺点在于无法实现锚点的真正局部效果我们详细说明了这一点在下一节中举例说明

为了计算 u 我们使用汉克尔变换对

$$F u Z g_t J u t t d t g_t Z F u J u t u d u$$

用 g_t 识别径向基 g_t
我们得到的汉克尔变换对

$$u u F u u Z g_t J u t t d t$$

我们已经为过渡函数和单边三次样条基函数对 u 进行了数值评估

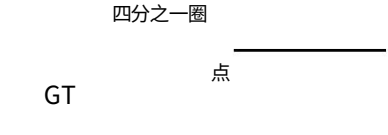
第二种策略是切换到具有紧凑支持的基函数在这种情况下,每个像素变换的运行时间是距离小于支持半径的锚点的数量过渡或单边三次样条具有自然cuto point 适用于存储在查找表中,甚至直接评估,但是像

在这两种情况下, u 都是有界的,但不幸的是,它不是非递减的。因此,不能保证每组数据点的可解性。但是,我们进行了大量的实验,始终是可解的和稳定的。此外,在任何截断点截断高斯会导致相同的理论不完美即 u 不是非递减的 右图显示了过渡函数方程式 u 的图 在这种情况下可以看出 u

截断高斯不能确保可解性

仍然有兴趣确定是否存在
存在具有紧凑支持的高斯形基函数,确保在和中插值的可解性

有时是负的 其他高斯形紧支撑径向线也表现出相同的振荡行为 很容易尝试制定一些关于锚点位置的标准,通过查看这些函数为负的区域来确保可解性 不幸的是,它们之间的联系可解性和表示是通过傅立叶分析完成的,因此 u 和 a_{cong} 的非正性之间存在建设性联系



具有局部支持正在减少并通过方程的直接数值评估确保可解性
然而
这个函数不是高斯形状的并且在原点附近有一个太快的衰减率这个缺点尽管我们已经用这个基函数进行了实验并获得了有利的结果提供了更大的

我们注意到不存在紧凑的支持
确保所有 n 的可解性的移植径向函数 这是由于这样的函数

g 承认代表

$gt Z \exp u$ 你都

u 非负且有界 由于指数始终为正且 u 为非负,因此所有 t 的积分均为正

事实上,在实践中使用具有紧凑支持的函数导致可解和稳定的方程并不是偶然的。

G 与左手相关联的 NN 矩阵
等式的边 $chor\ points$ 其中 N 是一个的数量
注意 G 的第 $i\ jth$ 个条目是
 $G_{ij} g\ kxj\ xik$ 直观地 G_{ij} 测量第 i 个锚点对第 j 个锚点处的变换的影响 由此得出 G_{ii} 和所有对角线项都是非负的且小于 1 此外由于每个锚点的局部影响 否则应该使用薄板基 G_{ij} 因为 ij 很少接近 1 并且通常为零 因此解存在并数值上是稳定的 此外方程的可解性确保一旦选择了设置 ane 分量的方案后 RBFT 的唯一性

应用

我们首先演示使用 $thin$ 的情况
板样条和部分中概述的过程产生不令人满意的结果

如图所示 薄板样条用于动画目的的使用
在薄板插值中不能令人满意强调映射的全局性质,因为全局翘曲标准被最小化高斯径向函数的使用

然而,从示例中可以看出,需要一些锚点来克服通过与径向项一起计算的 ane 分量实现的强剪切效果。使用相同的锚点和局部参数,但 ane 分量被预设为统一并使用了转换基础函数映射的真正局部性质很清楚

此外,前三个锚点不会影响映射的参数,实际上可以排除

我们介绍的 RBF 变换族在计算机中有广泛的应用

c 欧洲图形学协会

图形和计算机视觉我们展示了各个领域的例子,并讨论了应用中的要点

修改面部表情和特征

仅使用一个锚点的变换应用最好地证明了变换的 ane 和弹性分量的分解能力 由于没有为 RBFT 的 ane 分量指定任何点,因此它被视为统一 图显示了这种转换的结果 我们注意到以前实现了相同的效果,但是使用六个锚点导致运行时间显着增加

此外,六个锚点中的五个作为固定点,实际扭曲由一个点的位移驱动因此,大多数点用于克服转换结构中的技术缺陷将映射分解为一个和弹性组件能够克服这个缺点

图显示了 RBFT 在修改面部特征中的应用 由于修改的特征本质上是局部的,因此将变换分解为全局和局部径向分量是至关重要的 眉毛的拉直对眼睛有影响,因此一些锚点是用于固定眼睛 请注意,耳朵修剪或缩短的特征修改与角度的眉毛修改具有不同的性质

用于识别的人脸归一化

在前面的示例中,只使用了一张图像,并且在源图像的副本上标记了目标锚点。无需生成由不同图像诱导的表情。在处理人脸识别时,需要处理范围广泛的面部表情,理想情况下,人们希望能够将图像从一种表情转换为另一种表情

RBFT 发展的一个主要动机是成功应用面部归一化变换 Ane 映射是适用于克服由于不同相机视点引起的图像变化的单阶近似,然而这些映射不能克服面部表情的变化图显示了应用图像上的 RBFT 以补偿源图像和目标图像的面部表情差异

图 f 显示全局策略在这种情况下是无效的

一种对人脸归一化有用的不同策略是

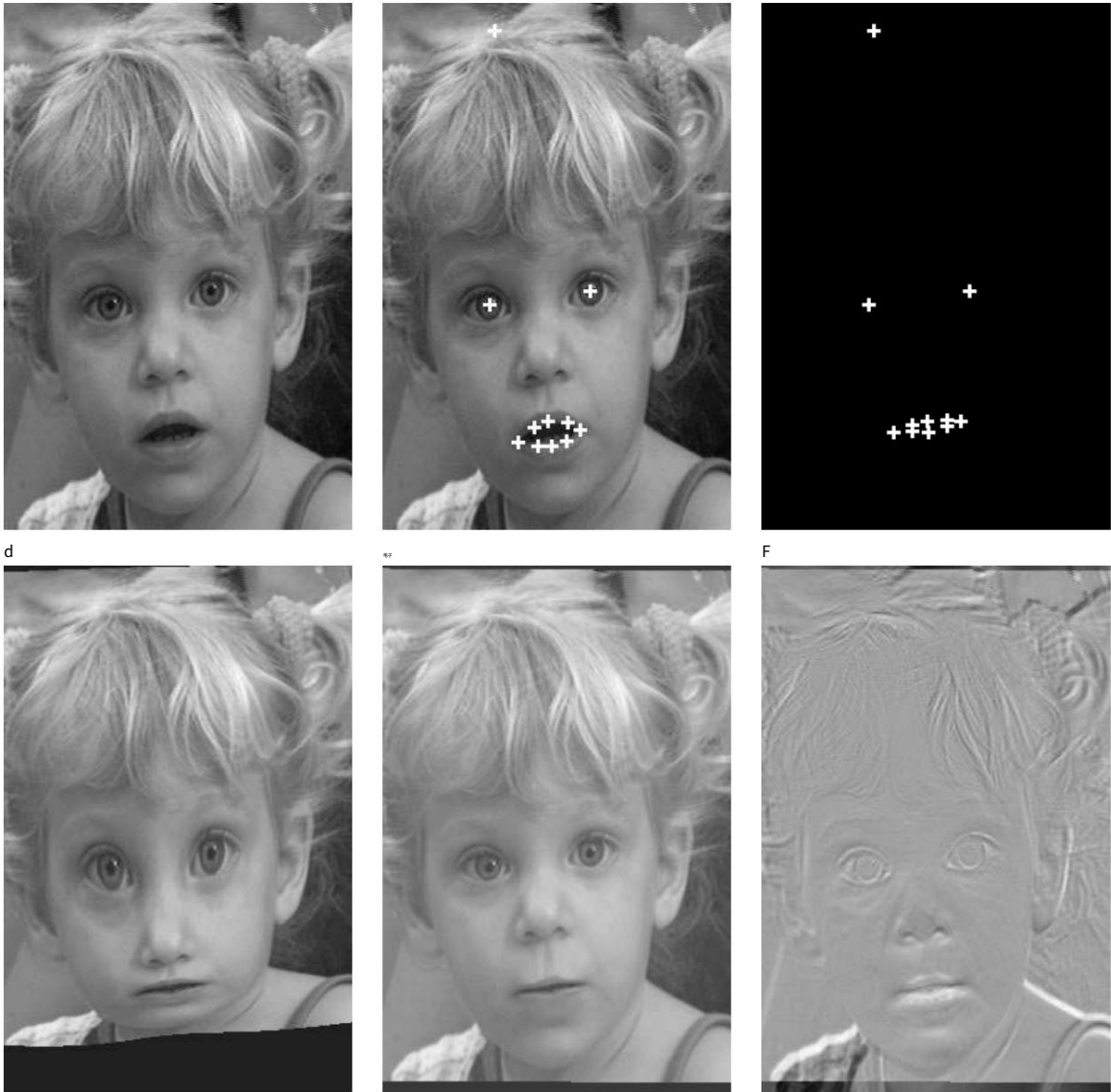


Figure Unsatisfit results obtained by using thinplate splines for animation a Original image b Source anchors on source image c Target anchors on empty image d 使用薄板样条的图像扭曲结果 e 使用高斯径向函数的扭曲结果 f e 和 a 的差异显示全局映射的性质



图 与图中使用的锚点相同,但组件约束为统一 左
左图像和原始图像之间具有高斯径向右差的扭曲输出图 a 显示了映射的完全局部性质

RBFT 在两幅图像上的应用,目标锚点是两幅源图像的源锚点的平均值

图可能 相比之下,另一个通过锚点位置定义变换的模型是 Sederberg 的自由变形模型和

然而,锚点控制点必须位于规则网格上,因此至少要施加控制点,通常要施加更多控制点此外,控制点的位置可能与要操纵的物理特征的位置不一致

讨论

与其他作品的比较

在过去的几年里,大量的研究都针对面部表情的动画 从我们的观点来看,面部动画的模型和程序可以分为两个家族 第一个依赖于模型的模型通过首先构建一个数学模型来生成面部表情物理面部模型,然后定义控制对象非刚性运动的动力学

在令人印象深刻的迈克尔杰克逊视频中积累的另一种算法是基于特征的即时通讯

年龄变形算法,其中每个点的位置是由源图像和目标图像中的相应线段确定的变换的加权平均值由于每个线段对应于两个点,因此此映射至少需要锚点才能生成非线性扭曲此外,由于在算法的原始公式中,段不能相交并非每个锚点配置都是可能的最后,控制每个段对映射的影响的权重函数不是局部的,因此每对锚点都具有全局效果最后一点可能通过使用本地支持的权重函数进行修改

这些技术可能会表现出令人印象深刻的结果,但会受到基本吸引力的影响

回到它们是依赖于对象的,即不同的非刚性对象需要不同的模型第二类技术模型独立模拟变形而不使用关于被变形对象的任何信息

最近这两种方法已经结合起来,在定义转换的数学参数和现实生活中的面部表情之间建立了关联,从而产生了表情编辑器

D 对 D

理论讨论和所示示例都是维度的 这些模拟了三维对象所经历的转换 从计算复杂性的角度来看,从三维减少到二维首先是最有吸引力的 此外,有心理物理学证据表明使用了二维表示通过生物视觉系统识别

目前的工作属于模型独立转换的范畴用户必须指定源锚点和目标锚点的位置在我们的模型中至关重要的是即使在极端情况下也需要相对较少的点来定义扭曲一个锚点,如



b



c



d



图 An RBFT using one anchor point a Original image b Source anchor point marked c target anchor point marked 注意图片本身仅供参考 d onepoint warp的结果
locality参数设置在眼睛之间的距离左右

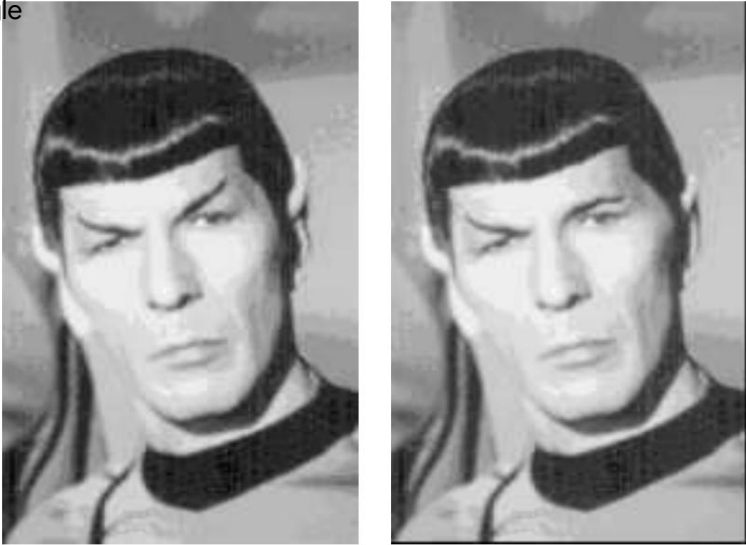


图 Humanizing Vulcan 面部特征 左边是典型 Vulcan 的原始图像 右边是右眼周围使用了变换锚点的输出,右耳需要额外

局部参数设置在大约 眼睛的长度

将该技术应用于维度对象没有困难在这种情况下,由于对象和视点的刚性运动都转换为正交映射,因此将变换分解为平面和径向分量可能非常有用在确定弹性径向分量之前计算

RBFT 和集团的组成
结构

映射的一个特征是它们的群结构 转换族在组合和反演下是封闭的 这种结构在交互系统中很有吸引力,因为锚点的位置可以连续调整 因此最终结果是无记忆的RBFT 在各个方面推广了 an 变换,但群结构被破坏了但是由于 RBFT 分解为弹性和弹性分量,并且由于使用具有紧凑支持的基函数,在某些条件下可以组合和反转 RBFT 特别是RBFT 系列与等距映射和相似映射交换,前提是局部参数根据图像大小缩放 两个 RBFT 的组合等同于由总位移确定的 RBFT,前提是锚影响不相交 在实践中,由于重叠很小,构图和单镜头之间的差异很小

埃特

c 欧洲图形学协会

此外,我们发现,在许多情况下,尽管剪切因子存在于温和剪切的分量中,但两种变换之间没有明显差异。

随着anchor数量的增加,从数值角度来看der scaling也很重要

点所涉及的线性系统可能变得高度病态,并且已知将图像缩放到单位正方形以减少系统的条件数

致谢

这项研究源于 Scitex 的咨询工作
公司 我们感谢 Amir Kaplan 和 Shay Za mir 的合作 非常感谢
Yehezkel
Yeshurun 的深刻见解,尤其是在非线性扭曲方面

参考

J Flusser 图像配准模式识别的自适应方法

M Moshfeghi 多模态医学图像的弹性匹配 CVGIP 图形模型和

图像处理

M Oka K Tsutsui A Ohba Y Kurauchi 和 T Tago 实时处理纹理贴图
表面 计算机图形学

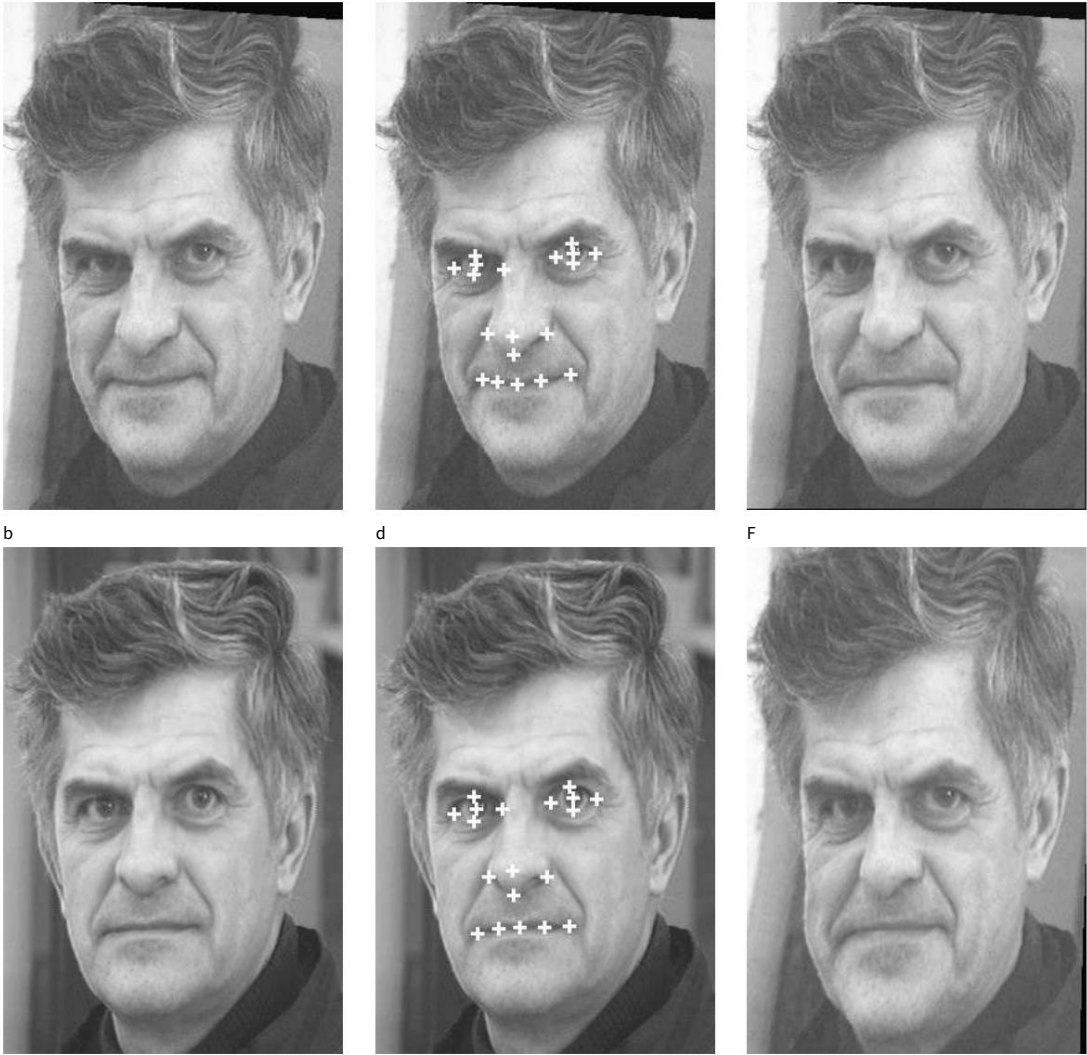


图 Facial normalization using RBFT a Original source image b Target image c Position of source anchor points marked d Position of target anchor points e RBFT applied 一个分量是统一过渡径向函数,使用等于眼睛的长度 f 使用相同的锚点但是使用 thinplate spline 最小化转换的弯曲能量注意全局效果掩盖了所需的局部变化

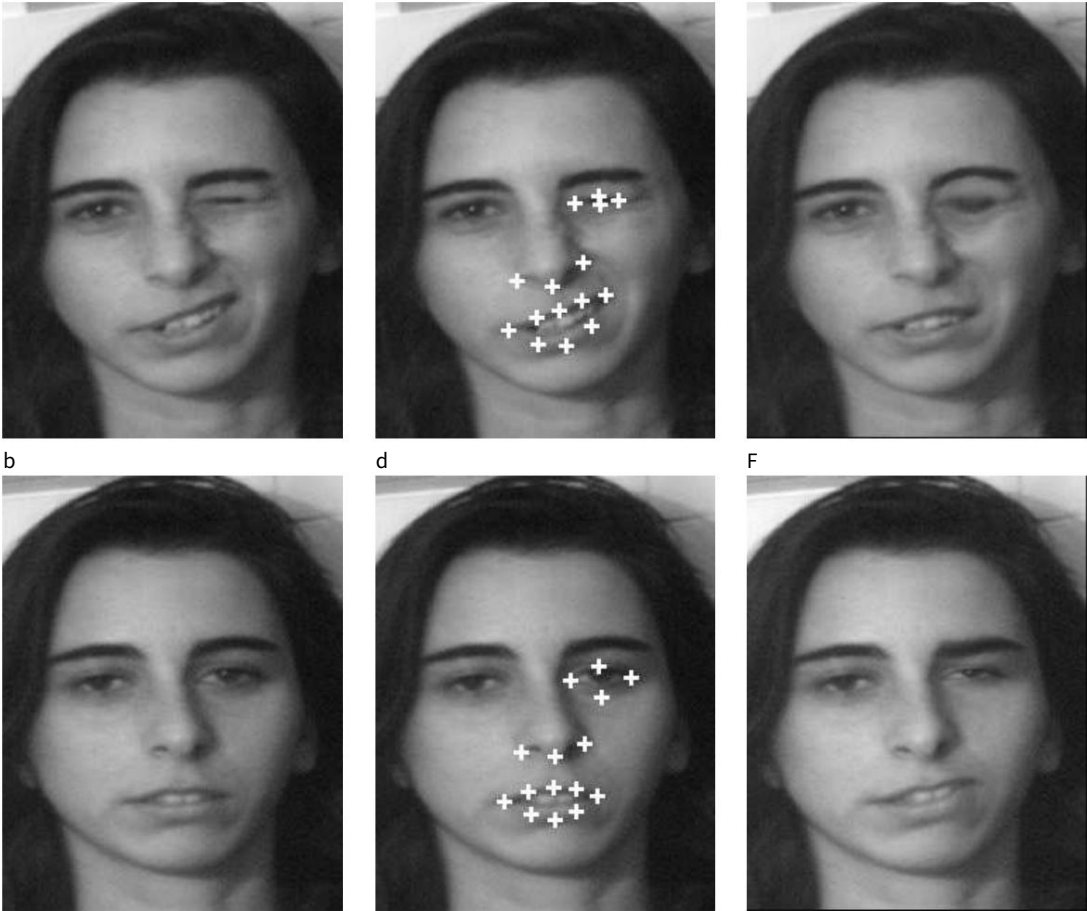


图 另一个使用 RBFT 进行面部归一化的例子 a 第一幅图像 b 第二幅图像 c 第一幅图像上锚点的位置 d 第二幅图像上锚点的位置 以下两个扭曲都使用 b 和 c 的锚点的平均值作为目标点 e RBFT on应用第一张图像 f RBFT 应用于第二张图像 注意右边图像的表达比左边的表达更相似

T Beier and S Neely Featurebased image metamorphosis
计算机图形学

S Edelman D Reisfeld 和 Y Yeshurun Learn
ing to recognize faces from examples In the nd European Conference
on Computer Vision 页面

利古雷 意大利 五月

D Reisfeld 和 Y Yeshurun 稳健检测
面部特征的广义对称性
模式识别国际会议记录海牙荷兰

九月

D Reisfeld 广义对称变换

c 欧洲图形学协会

注意机制和人脸识别
特拉维夫大学博士论文一月

D Terzopolous 和 K Waters 基于物理的面部建模分析和动画可视化与动画
杂志

FI Parke 用于面部动画的参数化模型 IEEE Computer Graphics and
Applications pages
十一月

G Wolberg 和 TE Boulton 使用空间查找表的分离图像变形计算机

图形

TW Sederberg 和 SR Parry 实体几何模型的自由变形 SIGGRAPH

页数

IEEE 模式分析与机器智能汇刊

N Arad N Dyn D Reisfeld 和 Y Yeshurun
径向基函数图像变形应用于面部表情 CVGIP 图形

出版中的模型和图像处理

MJD Powell Tabulation of thin plate splines on a very ne
twodimensional grid 技术
报告 DAMTP 数值分析
剑桥大学报道

D Reisfeld H Wolfson 和 Y Yeshurun De
使用对称性 In 的兴趣点保护
第三届计算机视觉国际会议页面
日本大阪十二月

RL Hardy 地理学和其他不规则曲面的多二次方程 Journal of

地球物理研究

N Dyn 通过 ra dial 和相关函数进行插值和逼近 In CK Chui LL

Schumaker 和 JD Ward 编辑 Approximation Theory VI 卷
页 学术
出版社

离散数据距离矩阵和条件正定函数的 GA Micchelli 插值
构造近似

IJ Schoenberg 度量空间和完全单调函数数学年鉴

B Davies Integral Transforms and their applications 斯普
林格出版社

ZC Li CY Suen TD Bui 和 QL
数字图像和图案中形状变换的 Gu 调和模型 CVGIP 图形模型和图像处理

可能

C Frederick 和 EL Schwartz 保形 im
年龄扭曲 IEEE Computer Graphics and Applications 三月

PKalra AMagnili N Magnenat Thalmann 和
D Thalmann 面部肌肉动作模拟
基于有理自由变形 CGF
C C

HH Bultho 和 S Edelman 心理物理学支持对象识别的 D 视图插值理
论

科学院