

# 非刚性运动分析方法的现状与展望

李防震 胡匡祐

(中国科学院生物物理研究所图像分析与模式识别实验室, 北京 100101)

**摘要** 鉴于非刚体的运动分析业已成为计算机视觉中的一个重要应用领域,为了使人们对该领域的研究现状有个概略了解,首先基于微分几何上的高斯曲率变化,对不同非刚性物体(简称非刚体)进行了分类,指出可把所有运动物体分为8类;然后对该领域目前存在的各种算法进行归纳总结,指出可把它们分为基于特征的方法和基于形状模型的方法两大类,并讨论了这两类方法各自的优势和不足之处;最后分析了该领域面临的困难,并展望了它未来可能的发展方向。同时指出,非刚性运动的视觉分析虽是一个蓬勃发展的研究领域,但目前仍处于初期阶段,因为近年来所进行的工作只是涉及众多困难问题中的较少部分,而且现有的各种模型和算法都还很不完善,人们还远未找到解决非刚性运动视觉分析问题的最有效的途径,但已有成果表明,一些相关研究领域,如语音识别和计算机图形学将会对该领域的发展提供帮助。

**关键词** 非刚性运动 特征对应 可变形模型 鲁棒性

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2005)01-0011-07

## Proceeding of Non-rigid Motion Analysis

LI Fang-zhen, HU Kuang-hu

(Laboratory of Image Analysis and Pattern Recognition, Institute of Biophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

**Abstract** The visual analysis of non-rigid motion is becoming a major area in computer vision. A classification of non-rigid motion performed by objects on various degrees of non-rigidity is elucidated in this paper according to the curvature changes of the objects, indicating that an 8-class scheme can cover all the objects from rigidity to high non-rigidity. A large number of existing approaches in this area are surveyed and divided into two major categories: feature-based methods and model-based methods, and the advantages and disadvantages of the two classes are discussed respectively. The last section of this paper expatiates on the difficulties confronted by non-rigid motion analysis and expects its possible future directions. Non-rigid motion analysis is a burgeoning research area but still in its early development. The available body of research has begun to make inroads into only a few of the many difficult problems. Most of the extant models are far from perfect and people are far from a general solution to this problem. Some related research fields, such as speech recognition and computer graphics, may benefit this field.

**Keywords** non-rigid motion, feature correspondence, deformable model, robustness

## 1 引言

近20多年来,运动分析已成为计算机视觉中的一个重要研究领域,并在生物学、医学、交通监控、客流量统计、天文观测等领域有着非常重要的实用价

值和广阔的发展前景。近期大部分的研究都是基于运动物体在整个时间序列里保持形状不变的刚性假设,但是,由于现实世界多数物体是非刚性的,尤其是在生物医学领域中,因此大量实际应用中的刚性假设往往不再适用。

近年来,在各类功能成像和基于模型的图像压

基金项目:国家自然科学基金资助项目(39970217)

收稿日期:2003-07-20;改回日期:2004-07-26

第一作者简介:李防震(1976~),男,2002年毕业于山东大学物理系,获理学硕士学位,现在中国科学院生物物理研究所攻读博士学位。主要从事于非刚性生物体自动跟踪与识别、图像分割和神经网络等方面的研究工作。E-mail:Fzliclever@yahoo.com.cn

缩领域中,非刚性运动分析显示出非常重要的作用。它广泛应用于医学领域,如研究心脏<sup>[1]</sup>和肺<sup>[2]</sup>的运动,血液的流动<sup>[3]</sup>以及对肿瘤生长的分析等。大家知道,心脏成像的目的之一是分析心脏的非刚性运动及其变形特征的量化估计,医生运用 CT 技术或核磁共振成像技术,首先获得患者心脏活动周期的序列图像中的 3 维高密度数据,然后对其非刚性运动参数进行分析,可诊断出心脏受损伤的程度。非刚性运动分析还可应用于更多的领域<sup>[4-6]</sup>,其中包括唇读、人脸识别、指纹识别、生物晶体生长检测、微血管中红血球变形能力的测定<sup>[7-9]</sup>、堤坝及桥梁物质形变可视化结构检测、可视电话会议中基于模型的图像压缩以及天气预报中云层变化的跟踪等等,而机器人的视觉也需要处理非刚体的形状,如工业设备中带关节和可弯曲的部件、自然环境下机器人操作非刚体等。另外,虚拟现实技术也要求同时对刚体和非刚体进行重建和模拟。

总之,非刚体的运动分析已得到广泛的应用,并在研究者的努力和近年来与此相关的实时捕捉、传输等技术不断更新的支持下,该技术获得了迅速发展,然而,仍然面临着许多困难,例如图像分割、模型的使用、跟踪中的初始化、多目标跟踪、遮挡、计算量等方面的问题。目前,非刚体的运动分析仍处于早期发展阶段,还远未找到解决非刚性运动视觉分析问题的最有效的途径。

## 2 非刚性运动的分类

由于非刚性运动物体的形状,甚至拓扑结构的变化,致使对非刚体进行运动分析比较困难。由于非刚体不能由一套固定的参数表达出来,除非对它施加一些确定性限制,为此,不能像对待刚体运动那样可以找到一个普适的算法来确定运动参数,而首先需要非刚性运动进行分类,然后选择和建立可行的方法并使不同的方法分别适用于不同的类型,这样把非刚性分析问题限制在某个特殊的类型中,就可以在设计算法时,以计算的简便性为出发点做出特殊的非刚性假定。

非刚性运动的初步分类是由 Huang 于 1990 年首先提出的,他建议分为以下 3 大类物体:带关节的 (articulated)、弹性的 (elastic) 和流动的 (fluid) 物体<sup>[10]</sup>。Goldgof 等人基于曲率特性对弹性的非刚性运动做了进一步分类<sup>[11]</sup>。Kambhamettu 等人基于物

体的非刚性程度又提出了一个范围广泛的分类方案<sup>[12]</sup>,即把运动物体分为 8 类(如图 1 所示)。

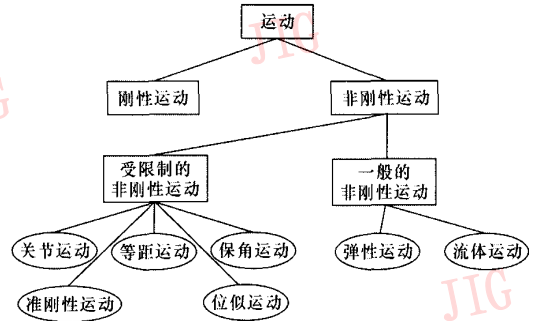


图 1 非刚性运动的分类

Fig. 1 The classification tree for motion of objects

图 1 所示的分类囊括了从近似刚性的物体到高度非刚性的物体。在非刚性运动中,除了弹性运动 (elastic) 和流体运动 (fluid) 是一般的非刚性运动外,其余都是受限制的非刚性运动。对于一般的非刚性运动问题,运动除了保持拓扑不变性之外,几乎没有其他限制。相对于受限制的非刚性运动,虽然对此类运动的分析工作还很少,但如果能够依据特定的应用,并加入一定的先验知识来得出相应的特殊模型,那么对一般非刚体的运动分析就成为了可能。

## 3 非刚性运动的分解

通常可以把一个一般的运动分成整体运动和局部运动两部分,其中整体运动又可进一步分为整体刚性运动和整体非刚性运动,同理,可把局部运动进一步分为局部刚性运动和局部变形。其中整体刚性运动包括物体的整体平移和转动,而整体非刚性运动则包括沿 3 个正交方向的比例变形以及相对于物体主轴方向的扭曲变形。整体运动模型的一个典型例子是压力-容积 (pressure-volume) 模型<sup>[13]</sup>,它描述了非刚体表面的整体动力学变化;另一个例子是线性变换 (linear transformation) 模型<sup>[14]</sup>,该模型则通过由输入的标记点求取本征容积,以进一步计算整体变形。局部刚性运动和非刚性变形可用亥姆霍兹运动学理论来统一描述<sup>[15]</sup>,这个理论是用局部体元的伸缩张量来表示局部变形。目前有以下两个广泛应用的方法用来分析非刚体的局部变形:在非刚体表面的标记点之间能够建立对应关系的情况下,可以采用张量分析方法;否则可采用有限元方法,因为

此方法能够把数据点插入到附近的单元节点中,并能根据这些节点的位移估计变形。

## 4 非刚性运动分析方法

所谓跟踪运动目标就是从图像序列中确定运动物体的位置和运动参数。依据非刚性运动研究领域的大量文献,目前可以确定非刚性运动的分析方法可分为基于模型的方法和基于特征的方法两类。前者虽不需要限制实验背景,但是不能进行精确的关节点跟踪;后者虽然关节点定位精度高,但一般只有严格限制实验环境才能实现自动跟踪。

### 4.1 基于特征的方法

在基于特征的方法中,建立特征的对应关系是恢复运动结构的关键一步。当存在变形时,由于其不同于刚性假定的情况,因此此时物体形状和几何信息的特征不能再有效地使用。这就大大限制了可以用来分析非刚性运动的匹配原型的种类。通常来讲,有低层次的点<sup>[16]</sup>和高层次的曲线<sup>[17,18]</sup>两种层次的特征可以利用,其中,前者计算简易,后者抗噪性能好。

特征点得到广泛应用的原因,不仅是因为它们在实际情况中通常是唯一可用的特征,而且还因为特征点具有可变形变换的不变性。由于特征点是低层次的表示,因此匹配结果的精度就严重依赖于运动平滑性假定的有效性,也就是说,它不适合处理较大的变形。

2维物体的边界曲线或3维物体的表面可归为高层次的特征,由于这类表示较边缘或特征点集能提供更加丰富的信息,因此,在建立曲线(2维)或表面(3维)间的对应关系时,局部刚性假定或小帧间运动假定在一定程度上可以放宽。另外,由于曲线包含了物体的结构信息,因此可以期望由其得到的匹配结果会比低层次特征的匹配结果更加准确。然而,从非刚性形状序列中提取可靠的曲线(表面),这本身就是一个困难的问题,尤其是在图像对比度较低时。在这种情况下,结合参数化的可变形模型却可以帮助完成边缘检测的任务<sup>[19]</sup>。

在非刚性运动分析中有显式匹配<sup>[20]</sup>和隐式匹配<sup>[21]</sup>两种特征对应方法,其中,显式匹配是从图像序列中提取特征的有限集合来在某些相似性度量的基础上经过检验和比较达到一一映射;在隐式匹配中,由于每个特征不是互相孤立的,相反,它是

通过建立一个综合内部力(如平滑性约束)和外部力(如特征能量)的能量函数来将特征跟踪问题转化为最优化问题,这样特征集的提取就不再是必须的,而且,由于匹配是在整体范围内实现的,因此局部特征的一一映射关系可能不存在,或者不再重要。

通常建立特征间的显式对应只能给出某些特定区域的流矢量,而要获得密集映射,则必须应用内插技术。特征点的隐式匹配算法虽可以产生更加密集的光流场,但结果往往噪声较大,且受平滑过程的影响严重。总之,需要采用另外的过程来重建物体的整体运动变换,这个关键问题往往被大多数研究者忽视。

### 4.2 基于模型的方法

在非刚性运动分析中,动态的形状建模可以提供拟合及跟踪可视化数据的机制,而可变形模型则可以通过少量参数把似乎没有固定结构的弹性运动简洁地表示出来<sup>[6-8]</sup>,这样运动恢复的问题就常常可转化为参数估计的问题。目前有参数化模型和基于物理的模型两类形状建模原型,其中,前者可以简洁地捕获物体的整体形状,适于描述静态物体,如果经过适当改进,也可用来对可变形表面进行建模;后者本质上是动态的,由于其服从由一组拉格朗日运动方程(Lagrangian equations of motion)所表达的刚性和非刚性动力学机制,从而可以更加全面地描述复杂的局部变形。

参数化模型又可分为局部模型和整体模型,其中,局部模型用于局部形状表示,其包括微分几何方法和物理上的有限元技术<sup>[22]</sup>,另一类有效的局部模型是自适应网格<sup>[23]</sup>(free-form mesh)和样条(spline)模型<sup>[24]</sup>,它们的定义包括许多局部参数,这类模型对于局部形状控制是有效的,可用于表示形状细节;整体模型通常可同时适用于刚体和非刚体,比如球谐函数(spherical harmonics)、整体多项式(global polynomial)模型、超二次曲面<sup>[25]</sup>(superquadrics)和二次超曲面(hyperquadrics)等等,这些模型可用于构建实体和表面,并可用少数参数修改。近年来,包含整体和局部特征的参数化混合模型<sup>[26]</sup>(hybrid models)也已提出,更多的模型也正在发展。

例如,超二次曲面的隐式方程可表示为

$$f(x, y, z) = \left[ \left( \frac{x}{a_1} \right)^2 + \left( \frac{y}{a_2} \right)^2 \right]^{\varepsilon_2} + \left( \frac{z}{a_3} \right)^2 = 1$$

上式由5个参数所决定,其中, $a_1, a_2, a_3$ 决定了超二次曲面在 $X, Y, Z$ 坐标轴方向的大小, $\varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_2$ 决定

了曲面的形状,其中 $\varepsilon_1$ 是曲面在 $Z$ 轴方向上的矩形程度参数, $\varepsilon_2$ 是曲面在 $X-Y$ 平面上的矩形程度参数。当 $\varepsilon_1 \approx 1, \varepsilon_2 \approx 1$ 时,生成的是(椭)球;当 $\varepsilon_1 \ll 1, \varepsilon_2 \ll 1$ 时,生成的是立方体;当 $\varepsilon_1 \ll 1, \varepsilon_2 \approx 1$ 时,生成的是圆柱体,而当 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 同时改变时,则超二次曲面可称为一个柔软的实体,它既可以生成以上的基本形状,又可以生成介于这些形状之间的圆角实体。

基于物理的模型,其数学基础包含了几何学、物理学和近似理论,其中几何学用于表示物体形状,物理学约束了形状随时间和空间的变化,最佳逼近理论则用于使模型与数据拟合起来。

基于物理的模型,若利用几何表示,则通常可收敛于多种多样的形状,这些几何表示包括多自由度的函数,如样条函数,而且这些自由度不是独立演化的,而是受物理原理的操纵。这些物理原理施加于几何基础上,则会给出具有直观意义的行为,而从物理观点看,弹性物体会对施加其上的外力和约束作出反应,其与可变形模型联系的典型情况是由几何自由度决定的变形能量函数。当模型偏离某个特定的初始形状时,能量就增大,并通常包含限制模型平滑度和对称度的项。根据拉格朗日机制,形变能产生模型内部的力,而由最佳逼近的物理学观点来看,由于外部势能函数的定义可使得模型与感兴趣的数据相一致,因此势能函数可产生外部力,使得模型与数据拟合起来。

基于物理的模型包括蛇模型<sup>[27]</sup>(Snakes)、对称寻找(symmetry-seeking)模型、可变形超二次曲面<sup>[26]</sup>(deformable superquadrics)和模态(modal)模型,而可变形模板<sup>[28]</sup>(deformable templates)则是参数化模型与基于物理的模型相结合的产物,蛇模型在撤掉外力之后也就变成了一个样条函数。

### 4.3 两类方法比较

当跟踪未知物体时,尽管不依靠有关运动或物体结构先验知识的方法是必须的,然而,由于这类方法面对的主要障碍是建立特征对应的困难,而且,如果不具备关于物体形状的先验知识就无法克服特征对应的困难,因此人们往往通过施加一些合理定义的约束条件,以消除无效的匹配,并辨别唯一匹配。这类方法的另一个不足之处在于跟踪算法的过多的复杂性,另外,形状表示的特性也影响着匹配算法的复杂性。

基于模型的方法由于预先知道了物体的近似形状,从而可简化这个问题或把它转化为其他可处理

的问题。然而,如果不能利用关于物体形状的知识,则这类方法就行不通。

对于一般的变形运动,除了拓扑不变性之外,再没有其他约束。通常处理此类运动的大多数方法是首先设定一个物体模型,然后通过改变模型参数来描述变形。一般说来,由于基于模型的方法具有限制可变形物体的自由度的优点,因此,在特征匹配过程中加入形状模型可以显著地降低搜索空间,这就简化了对应问题,也就是说,在某些情况下,对应问题就转化成了参数估计问题。基于物理的模型在解决非刚性运动分析时,该模型对于经常遇到的运动物体3维重建问题,具有更加突出的优势,尤其在具备有关运动结构的先验知识时最为有效。如果预先不知道运动的特点,在运动估计和形状恢复中,采用这类方法则可能导致错误。在这种情况下,可以首先采用不依靠关于运动和物体结构的先验知识的方法来确定非刚性运动的一般性质,然后再采用适当的模型原型加以细化或增强分析。因此,在某种意义上,可以把这两种方法综合起来形成一个更加可靠的方案,用以分析一般的非刚性运动。

## 5 总结与展望

非刚性运动的视觉分析研究虽正蓬勃发展,但目前仍处于初期阶段,因为近年来所进行的工作只是涉及众多困难问题中的较少部分,且现有的各种模型和算法都还很不完善,可以预见,将来一定会出现更新的方法和算法,用于处理各种非刚性运动。

### 5.1 系统的性能评价

评价一个运动分析系统的性能优劣,应主要考虑鲁棒性、精度和速度等3方面的性能参数。

其中系统的鲁棒性与做出假定的数量有关系,通常一个系统对它的操作所做的假定越少,则这个系统就越具有鲁棒性;精度是指系统捕获的运动与真实物体的运动吻合的程度,一般来说,精度直接正比于物体在图像中所占的像素多少;系统的处理速度分为实时处理和离线处理,实时处理的定义是每幅图像在新的图像被记录之前所进行的处理。目前,大多数系统只是在某一方面显示较好的性能。

不同的应用领域对这3方面性能参数的要求是不相同的,例如,监控系统由于经常工作在偏远地区或不可控制的场所,因而要求极高的鲁棒性和较高的速度,但对精度要求并不高。在有些控制领域,由

于系统所处的环境是精心设置的,在该情况下,可以施加一系列便利的假定,因而就不要要求高的鲁棒性,但其对速度和精度的要求较高,如在远程电视外科手术中的应用。在某些分析领域,如临床诊断中,由于图像的处理过程可以离线进行,因而对速度没有特殊要求,也不要要求高的鲁棒性,但却要求极高的精度。

## 5.2 目前尚存在的困难

尽管该领域已进行了大量卓有成效的研究工作,但由于仍存在着较多的问题,诸如图像分割、模型的使用、跟踪的初始化、多目标跟踪、遮挡、计算量等等,因此人们期望获得一个系统它不仅能够实时跟踪多个物体,并能处理动态的背景、运动模式以及处理多个物体间的遮挡问题。

现有的多数跟踪方法还存在着初始化问题,即大部分研究工作仅仅处理增量状态的估计问题,而没有在开始时或者是跟踪丢失时就提供引导方法。这是一个初始化程序的实用性问题,该程序应能在大范围情况下启动,以便使系统用于真实环境时能够足够地稳定。

另外,目前多数系统都不能处理较严重的遮挡问题,也不能提供标准来判断何时停止及何时重新开始跟踪。这是由于多数运动分析方法是依赖于局部平滑性的增量更新,故它们需要经常设置许多假定,如,没有遮挡、被跟踪目标是图像中唯一的移动物体等。增量更新一般要求给出初始位置,但由于缺少对整幅图像的全局搜索机制,因而跟踪目标完全失去后就无法恢复;另一个重要问题是增量过程会导致错误积累的危险问题。

除了上述与增量更新有关的问题外,还有一个问题需要考虑,即许多运动在投影到图像平面上时,都会产生歧义,例如,环绕图像平面平行轴的转动同沿着某个确定方向的平移一样,其光流场保持不变,另外,稳定地记录沿光轴的运动也是困难的。解决这些问题需要采用多个摄像头<sup>[29]</sup>或多种数据<sup>[30]</sup>。一般来说,将各种数据类型结合起来以拓宽不变性和鲁棒性应是一个解决难题的较好方法。

由于鲁棒性不仅与系统所做的假定的数目有关,而且也与多数系统仅接受少于1000幅图像检验的情况有关,因此,用大量数据、并由许多不同用户在众多不同环境中检验系统的鲁棒性是很重要的。

在场景中如何提高检测和跟踪多个目标的能力是另一个急需进一步深入探索的问题,因为此时通

常采用的依靠去除背景来获取分割目标的简单技术已不再适用,而需要更强大的模型来处理多个物体间的遮挡以及特征间的对应问题。

## 5.3 展望

迄今为止,所有方案都是基于一系列的假定,以使问题能够得到处理。尽管在某些应用系统中所做的假定是可接受的,但众多假定亦表明,该研究领域尚处于初期发展阶段。近期研究的一些系统虽采用了更加先进的方法,然而,一些假定仍然不可缺少,人们还远远没有找到解决非刚性运动分析问题的有效途径。或许人们可以从相关领域,如语音识别中找到灵感。众所周知,语音识别研究领域的一个重要特点是字母表的使用,一个包含各种运动形式的字母表将使基于计算机视觉的运动捕捉更加容易得多,因为这将把运动估计问题转化为识别问题,即识别一个符号序列的问题。Bregler已进行了这项工作,他把字母称为“移动(movement)”<sup>[31]</sup>,Wren和Pentland则把字母称为“行为(behavior)”<sup>[32]</sup>。尽管他们的字母表还相当有限,但这仍然是朝一个非常有希望的方向迈出的一步。

概率模型在计算机视觉中正逐步受到更大的重视。这类模型有些用的是非监督学习方法,如EM算法。另外,HMM<sup>[33]</sup>和神经网络<sup>[34]</sup>也已用于跟踪和运动估计。由于这些方法具有处理不确定性和抑制噪声的能力,因此它们将会更多地用于未来的系统中。

快速发展的计算机图形学或许会给非刚体形状建模的发展带来帮助。由于计算机图形学主要集中于虚拟现实和个性化的物体建模,而视觉领域更注重物体模型的空间精确性,因此两者取长补短,互相融合将会产生新的方法。尽管近年来基于特征的方法也取得了一些进展<sup>[35]</sup>,但直接使用形状模型的方法已显出更可取的趋势。

目前,人们除了考虑物体边界外,已经把灰度、颜色和纹理等外观信息与可变形形状模型结合起来<sup>[36]</sup>,而通过综合多种图像信息来跟踪物体也受到了重视。可以预见,多种信息源结合起来的可变形模型可能具有更大优势。

总之,当今非刚性运动的视觉分析已成为计算机视觉中的一个重要应用领域。该技术在计算机视觉很多方面的广泛应用以及近年来的一些技术进步都促进了它的发展。这些技术进步包括实时捕捉、传输和基于价格低廉的硬件平台的图像处理等方

面。可以预见,会有更多的研究人员和资源投入到该领域,而且在不远的将来一定会出现令人瞩目的新成果。

### 参考文献 (References)

- 1 Young A A. Model tags: direct three-dimensional tracking of heart wall motion from tagged magnetic resonance images [J]. *Medical Image Analysis*, 1999, **3**(4): 361 ~ 372.
- 2 Brown M S, Wilson L S, Doust B D, *et al.* Knowledge-based method for segmentation and analysis of lung boundaries in chest X-ray images[J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 1998, **22**(6): 463 ~ 477.
- 3 Makowski P, Sorensen T S, Therkildsen S V, *et al.* Two-phase active contour method for semiautomatic segmentation of the heart and blood vessels from MRI images for 3D visualization [J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2002, **26**(1): 9 ~ 17.
- 4 Liew A W, Leung S H, Lau W H. Lip contour extraction from color images using a deformable model [J]. *Pattern Recognition*, 2002, **35**(12): 2949 ~ 2962.
- 5 Haddadnia J, Faez K, Ahmadi M. A fuzzy hybrid learning algorithm for radial basis function neural network with application in human face recognition [J]. *Pattern Recognition*, 2003, **36**(5): 1187 ~ 1202.
- 6 Hu Kuanghu, Su Wanfang, Li Yihua, *et al.* Studies in image automated quantitative analysis of structure deformation for movement red cells in Blood Capillary [A]. In: *First East Asian Symposium on Biophysics* [C], Hyogo, Japan. May 16-20<sup>th</sup>, 1994.
- 7 Hu Kuanghu, Su Wanfang, Li Yihua, *et al.* Studies in automated image quantitative analysis of structure deformation for movement of red cells in blood capillary [J]. *Acta Biophysica Sinica*, 1994, **10**(3): 388 ~ 392. [胡匡祐, 苏万芳, 李翔华等. 运动红细胞形变结构的图像自动定量分析的研究 [J]. *生物物理学报*, 1994, **10**(3): 388 ~ 392.]
- 8 Hu Kuanghu, Su Wanfang, Li Yihua, *et al.* Studies in image automated quantitative analysis of structure deformation for movement red cell in blood capillary [A]. In: *The 2nd International Conference on Medical Biorheology* [C], Shanghai, China, 1995: 88 ~ 92.
- 9 Li Yihua, Hu Kuanghu. A fast bithresholding segmentation method for cell image [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1995, **8**(4): 359 ~ 362. [李翔华, 胡匡祐, 苏万芳. 细胞显微图像灰度梯度双阈值的快速分割 [J]. *模式识别与人工智能*, 1995, **8**(4): 359 ~ 362.]
- 10 Huang T S. Modeling, analysis, and visualization of nonrigid object motion [A]. In: *Proceedings of IEEE 10th International Conference on Pattern Recognition* [C], Atlantic City, New Jersey, USA, 1990: 361 ~ 364.
- 11 Golof D B, Lee H, Huang T S. Motion analysis of nonrigid surfaces [A]. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* [C], Ann Arbor, MI, USA, 1988: 375 ~ 380.
- 12 Kambhamettu C, Goldof D B, Terzopoulos D, *et al.* Nonrigid motion analysis [A]. In: edited by Tzay Young *Handbook of PRIP: Computer Vision (Vol2)* [M], San Diego, CA, USA: Academic Press, 1994: 2: 405 ~ 430.
- 13 Moriarty T F. The law of Laplace, its limitations as a relation for diastolic pressure, volume, or wall stress of the left ventricle [J]. *Circulation Research*, 1980, **46**(3): 321 ~ 331.
- 14 Wattenbarger J M, Templeton G H, Seibert C B, *et al.* Ventricular ejection fractions of linear transformation and ellipsoid models [J]. *American Journal of Physiology*, 1988, **255**(1): 197 ~ 201.
- 15 Sommerfeld A. *Mechanics of deformable bodies* [M]. New York: Academic, 1950.
- 16 Li Yihua, Hu Kuanghu, Su Wanfang. Strategy of corner points extraction for micro-vessel contour [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 1998, **17**(4): 290 ~ 294. [李翔华, 胡匡祐, 苏万芳. 一种提取微血管边缘角点策略 [J]. *中国生物医学工程学报*, 1998, **17**(4): 290 ~ 294.]
- 17 Li Yihua, Hu Kuanghu. Automated extraction of characteristic structure of micro-vessel based on motion estimation of white micro-thrombus [J]. *Acta Biophysica Sinica*, 1996, **12**(2): 289 ~ 296. [李翔华, 胡匡祐. 基于微血栓运动分析的微血管特征结构自动提取 [J]. *生物物理学报*, 1996, **12**(2): 289 ~ 296.]
- 18 Li Yihua, Hu Kuanghu, Su Wanfang. Adaptive corner detection for chain coded contour of a non-rigid body [A]. In: *Second East Asian Symposium on Biophysics* [C], Seoul, Korea, May, 1997.
- 19 Staib L H, Duncan J S. Boundary finding with parametrically deformable models [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(11): 1061 ~ 1075.
- 20 Strickland R N, Mao Z. Computing correspondences in a sequence of non-rigid shapes [J]. *Pattern Recognition*, 1992, **25**(9): 901 ~ 912.
- 21 Huttenlocher D P, Noh J J, Rucklidge W J. Tracking non-rigid objects in complex scenes [A]. In: *Proceedings of 4th International Conference on Computer Vision* [C], Berlin, Germany, 1993: 93 ~ 101.
- 22 Huang W C, Goldof D B. Qualitative vision using non-linear finite element modeling [A]. In: *Proceedings of SPIE/SPSE Symposium on Electronic Imaging, Conference on Geometric Methods in Computer Vision* [C], San Diego, California, USA, 1993.
- 23 Wilson R C, Hancock E R. Bias-variance analysis for controlling adaptive surface meshes [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, **77**(1): 25 ~ 47.
- 24 Caliò F, Moroni G, Rasella M. A particular class of spline in reconstruction of revolution surfaces from 3-D data measured by CMM [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2003, **19**(1): 219 ~ 224.
- 25 Solina F, Bajcsy R. Recovery of parametric models from range images: the case for superquadrics with global deformations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, **12**(2): 131 ~ 147.
- 26 Terzopoulos D, Metaxas D. Dynamic 3D models with local and global deformations: deformable superquadrics [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(7): 703 ~ 714.
- 27 Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: Active contour models

- [J]. *International Journal of Computer Vision*. 1987, 1 (4): 321 ~331.
- 28 Bronkorsta P J H, Reinders M J T, Hendriks E A, *et al.* On-line detection of red blood cell shape using deformable templates [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2000, 21 (5): 413 ~424.
- 29 Gavrilu D, Davis L. 3-D model-based tracking of humans in action: a multi-view approach [A]. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, San Francisco, CA, USA, 1996: 73 ~80.
- 30 Okada R, Shirai Y, Miura J. Tracking a person with 3-D motion by integrating optical flow and depth [A]. In: *The Fourth International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C]*, Grenoble, France, March, 2000.
- 31 Bregler C. Learning and recognizing human dynamics in video sequences[A]. In: *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, San Juan, Puerto Rico, 1997.
- 32 Wren C R, Clarkson B P, Pentland A P. Understanding purposeful human motion [A]. In: *The Fourth International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C]*, Grenoble, France, March, 2000.
- 33 Rigoll G, Eickeler S, Muller S. Person tracking in real world scenarios using statistical methods [A]. In: *The Fourth International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C]*, Grenoble, France, March, 2000.
- 34 Rosales R, Sclaroff S. Learning and synthesizing human body motion and posture [A]. In: *The Fourth International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C]*, Grenoble, France, March, 2000.
- 35 Brand M. Shadow puppetry [A]. In: *International Conference on Computer Vision [C]*, Corfu, Greece, September, 1999.
- 36 Heisele B, Kressel U, Ritter W. Tracking non-rigid, moving objects based on color cluster flow [A]. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97) [C]*, San Juan, Puerto Rico, 1997: 257 ~260.