

# 基于物理模型的虚拟颜色空间

陶霖密 徐光祐

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

**摘要** 传统的色度学系统是建立在人类视觉系统的心理物理实验基础上的, 共有基于实验的色标系统(如 MUNSSELL 颜色体系)和基于实验的经验公式系统(如 CIELAB, CIELUV 体系)二类体系。但是, 人类颜色视觉系统的色度学体系及相应的颜色测量方法并不适合于机器视觉系统, 因为人类色度学体系的颜色空间是非均匀空间, 即色度图上两点之间的欧氏距离并不能代表颜色知觉的差异, 由于两者存在着非线性关系, 为此, 提出将现代计算机视觉中关于环境光照和物体表面的物理模型引入经典的色度学, 以建立一套新的基于物理模型的虚拟颜色空间, 用于标定不同颜色视觉系统的颜色值。

**关键词** 颜色知觉 颜色空间 色差计算 计算机视觉

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-896(2001)04-0396-06

## A Virtual Color Space Based on Physical Model

TAO Lin-mi, XU Guang-you

(Laboratory of Information, Department of computer science and technology Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** The measurement of color difference in machine vision is the basement of image segmentation based on the color features, but there is no colorimetric system for machine vision. Traditional colorimetry has two major systems: (1) to build a color specification system experimentally and to use it as a reference (for example, the Munsell Book of Color). (2) to develop an analytical formulation based on discrimination experiments (such as, CIELAB, CIELUV). The color space based on the psychophysical experiments of human visual system is non-flat. That means the perceptual difference of colors can not be described by the Euclidian distances between the related two points in the color space and the map from perceptual difference to the Euclidian distances is not linear. In this paper, we built a virtual color space based on the physical models of light, reflectance of surfaces and the sampling function of visual system. In this virtual color space the chromatism of machine vision can be calculated linearly. We also suggest that the chromatism measurement of machine vision is different from the spectral reflectance of physical surfaces used in present computer models of color vision.

**Keywords** Color perception, Color space, Colorimetry, Computer vision

## 0 引言

近年来, 随着计算机运算性能的不提高, 以及计算视觉研究的进展, 机器视觉系统的性能有了很大的改善。但是, 现有的机器视觉系统基本上全都是色盲, 不能辨别颜色, 而且现有的边缘检测、分割、运动分析、三维物体形状恢复等算法, 也都是色盲的<sup>[1]</sup>。当然, 这并不意味着所有这些算法都必须利用颜色信息, 而是说, 因为色盲的机器视觉系统没有利用外部世界提供的丰富颜色信息, 从而使得机器视

觉系统在物体识别、认知等功能上存在着先天的缺陷。同样, 离开了色彩缤纷的外部世界, 人类的视觉认知也是有缺陷的。

造成这种现象的原因是多方面的, 但其主要原因是以往的颜色视觉研究一直着眼于颜色恒常性的探索和集中在努力恢复物体表面的光谱反射率上<sup>[2~5]</sup>。虽然这是颜色研究的一个重要方面, 但问题在于恢复了物体表面的光谱反射率以后, 机器视觉系统依然有别于人的视觉系统。也就是说, 如今人类视觉系统的颜色描述体系、色度学系统能否适合于

机器的视觉系统,依然有待探索.众所周知,颜色现象是物理表面、光照、视环境和视觉系统相互作用的结果,因而一个完善的机器颜色视觉理论需要对物理表面、光照、视环境以及机器视觉系统本身作出解释.

和现有的机器视觉方法不同,人类的视觉系统并没有致力于恢复外部世界的物理表面光谱反射率,而是用一套主观的表象去描述外部世界,而且人类视觉系统是将无限维的物理表面光谱反射率压缩为三维的描述<sup>[6]</sup>,现已建立了主观的颜色空间和色差测量体系.同样,机器视觉系统也需要建立相似的机器视觉的颜色空间和色差测量体系,从而使机器的视觉系统能够描述机器视觉系统所见到的外部世界,并具有自身的描述体系和适合特殊任务的要求,但是,现有建立颜色空间的方法只有两种:其一是,基于心理物理实验的颜色参考体系(如,Munsell 颜色体系);其二是,基于心理物理实验的颜色解析表达体系(如,CIELAB, CIELUV 颜色体系).很显然,这些基于心理物理实验的人类视觉系统的色度学体系,并不适合于机器视觉系统.而基于物理模型的方法在得到了基函数和相应的参数后,依然需要用一定的色度计算方法来计算色度坐标和色差.

本文将实验心理学中的色度实验结果和计算机视觉的物理模型有机地结合在一起,从分析标准色度学系统入手,探讨了人类视觉系统中非均匀颜色空间的起因,并建立了颜色视觉系统中感受器和心理输出之间的关系表达,同时分析了色度学基本现象的产生原因,并在此基础上建立了第3种颜色解析表达体系和虚拟颜色空间.

## 1 人类非均匀色度空间的形成机制

### 1.1 非均匀颜色空间

由于外界的光学辐射作用于人的视觉系统后,即产生颜色感觉,因此为了标定颜色,首先必须研究人眼的颜色视觉特性.然而,人的视觉系统是有个体差异的,这就要求根据许多观察者的颜色视觉实验,来确定一组比配等能光谱色所需的三原色数据,即“标准色度观察者光谱三刺激值”,并以此代表人眼的平均颜色视觉特性.通过绘制色度图,将其用于色度学计算和标定颜色<sup>[7]</sup>.CIE-1931 标准色度观察者光谱三刺激值就是根据上述原理通过实测获得的.

人类的视觉系统对亮度相同,但波长不同的单

色光的波长分辨力是不同的,这种分辨力的差别反应在 CIE 色度图上,就是色品(包括色调和饱和度)的宽容量的不同.在对亮度相同的两个颜色比较色差时,理想的色度图上两个色品点的欧氏距离即真正代表人眼对此两个颜色知觉差异的大小,但由于欧氏空间里没有均匀的色品图,因此色差测量时,也不能以颜色空间中的欧氏距离来表示知觉色差,两者之间存在着非线性的关系.换言之,人类的视觉系统并不以颜色空间的欧氏距离来作为其知觉色差的基础,而 CIE-1976 均匀颜色空间及相应的色差、色调差测量公式也只是人为的一套以非线性变换为基础,以欧氏距离为测量方法的描述体系.该体系的主要功能是以近似均匀颜色空间中的欧氏距离来近似地模拟人类颜色知觉中的色差.

造成这种非均匀颜色感知空间的原因是多种多样的,其虽然也可能涉及到人类视觉认知等视觉的高级功能,但是,其主要原因却在于人眼视锥细胞的光谱吸收函数<sup>[8,9]</sup>(图1),也就是最初的输入上.由图1可见,人眼视锥细胞光谱吸收函数 $S$ ,即人眼颜色视觉系统的输入采样函数是非线性的,即在明视觉的条件下,当具有某一波长的光入射到视网膜时,3种锥细胞的输出分别是 $(L_\lambda, M_\lambda, S_\lambda)$ ,当入射光的波长产生 $\Delta\lambda$ 的变化时,相应的输出变化是 $(\Delta L_\lambda, \Delta M_\lambda, \Delta S_\lambda)$ ,而且当这些变化达到一定程度时,人眼的颜色视觉系统就能感觉到颜色的变化,由此可见,人眼视颜色空间的不均匀性产生的根源主要是3种锥细胞的光谱敏感度函数的非线性.

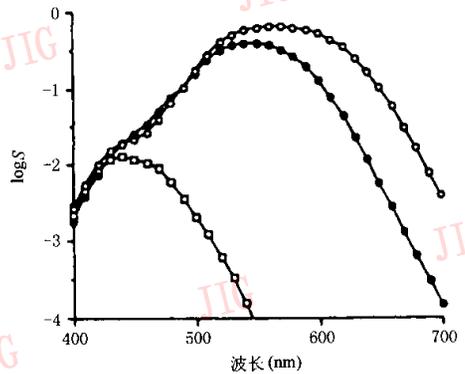


图1 人类视锥细胞的光谱敏感度函数

(横坐标是可见光的波长,单位是纳米;纵坐标  $\log S$  是人眼视网膜中光感受器细胞的敏感度的对数,是实验测得的相对值)

### 1.2 三原色和负比配

颜色空间的建立是以一组三原色为基础的,如

前面提到的 CIE-1931 色度学系统,就是先选定一组三原色(其中心波长分别为 700.0nm, 546.1nm, 435.8nm),并以这三原色为标准去匹配等能光谱色,其所得到的三原色数据,即“标准色度观察者光谱三刺激值”。选择的三原色不同,匹配的结果,即“标准色度观察者光谱三刺激值”也是不一样的,换言之,色度空间将随着所选择的三原色的不同而不同。

现在的问题是,究竟有多少种三原色的组合可供选择?也就是说,基于人类的颜色视觉系统能建立多少种色度空间?心理物理实验证明,如果允许负配比,那么三原色的组合是无穷的。

另外,颜色匹配的心理物理实验结果也可以从人类视觉系统的输入函数上得到解释,如图 1 所示,为了得到比较好的亮度知觉,3 种锥细胞的光吸收函数应具有很大的重叠部分,但重叠后却又无法选出独立的(或正交的)三原色来,即其输出值分别为  $(L_r, 0, 0)$ ,  $(0, M_g, 0)$ ,  $(0, 0, S_b)$ ,由此可见,这是个两难的问题。假设选择某三原色,若其相应的输出为  $(L_r, M_r, S_r)$ ,  $(L_g, M_g, S_g)$ ,  $(L_b, M_b, S_b)$ ,则对于任一波长为  $\lambda$  的光,其输出值为  $(L_\lambda, M_\lambda, S_\lambda)$ ,并且其可以表达为

$$\begin{aligned} L_\lambda &= \alpha L_r + \beta L_g + \chi L_b \\ M_\lambda &= \alpha M_r + \beta M_g + \chi M_b \\ S_\lambda &= \alpha S_r + \beta S_g + \chi S_b \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $\alpha, \beta, \chi$  为未知数,该  $(\alpha, \beta, \chi)$  即为上文提到的“色度观察者光谱三刺激值”。所谓负配比,就是由方程(1)解得的  $\alpha, \beta, \chi$  中必有一负数。

## 2 均匀颜色空间及参考颜色视觉系统

与人类的视觉认知系统不同,机器的颜色测量需要均匀的颜色空间,以解决计算机视觉研究在颜色领域存在着的两难处境:一方面,如今对人类视觉

系统的色差测量体系还不清楚,而近似的均匀颜色空间测量方法,由于存在着非线性变换,因而对计算机视觉系统来说,并不好用;另一方面,计算机视觉系统的采样函数不同于人类视觉系统的采样函数,而且基于人类视觉系统的颜色空间也不同于机器视觉的颜色空间。换言之,机器颜色视觉系统需要有自己的颜色描述体系,以便能够表达机器视觉系统和人类视觉系统对视环境中物体表面不同的测量结果。这种现象在计算机颜色计算中经常遇到,用实验心理学的词汇描述,其就是人类觉得很近似的颜色,机器的计算结果并非如此;反之,有些机器很难分辨的颜色,人类却觉得有较大的色差。

这些问题可以通过建立虚拟颜色视觉系统,即虚拟颜色空间来解决,即将人类视觉系统的测量结果和机器视觉系统的测量结果,同时映射到虚拟颜色视觉系统的颜色空间中,即可获得两者之间的可比性。

### 2.1 线性采样函数及均匀颜色空间

由于颜色知觉的非均匀性起源于视觉系统中锥细胞光谱敏感度函数的非线性,且三原色的任意性也产生于采样函数的相互重叠,因此,需要对虚拟颜色空间的线性采样函数提出如下的要求:

- (1) 有一组唯一的三原色。
- (2) 颜色空间是均匀的,即颜色空间中两点之间的欧氏距离表达了两个颜色之间的色差。
- (3) 亮度空间也是均匀的。

为了达到上述要求,本文提出了分段线性的采样函数  $R^m(\lambda)$  (图 2)。

虽然视觉系统的“标准色度观察者光谱三刺激值”可以由心理物理实验得到,也可以根据式(1)和视觉系统的光变敏感度函数计算出来,但相对于上述采样函数(图 2),则只能根据式(1)计算出来。这

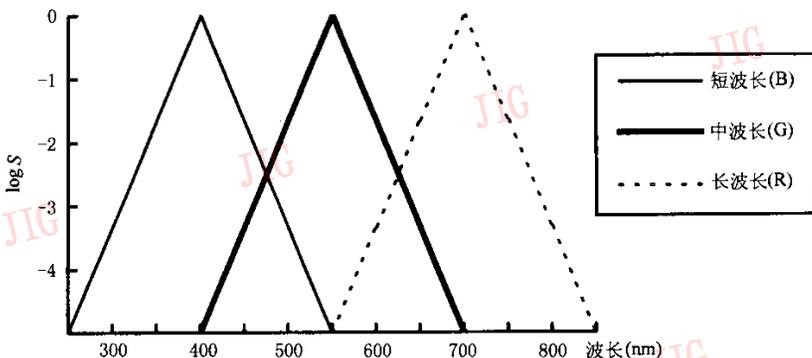
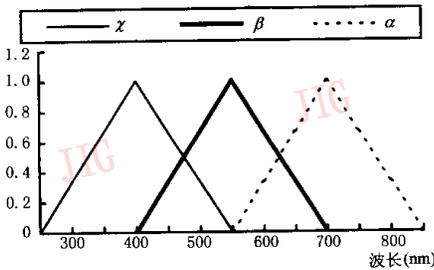


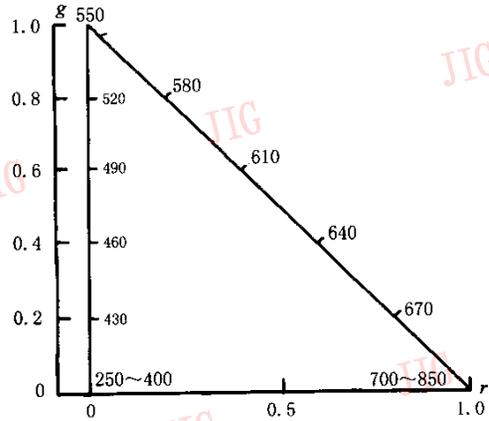
图 2 机器视觉系统的采样函数(理想的采样函数)

里假设某一机器视觉系统具有此采样函数,且三原色的中心波长选择在 400nm、550nm、700nm 处,相应的三刺激值分别为 (1,0,0)、(0,1,0)、(0,0,1),则计算的结

果就是参考视觉系统的标准色度观测者光谱三刺激值曲线(图 3a)及对应的参考颜色空间(图 3b))。



(a) 参考视觉系统的标准色度观测者光谱三刺激值曲线



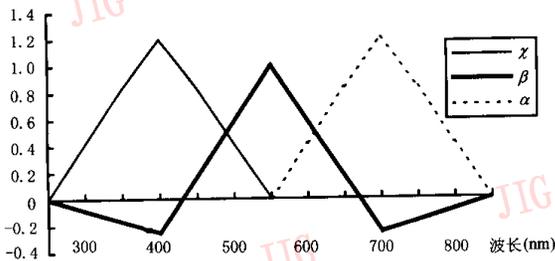
(b) 对应的参考颜色空间

图 3

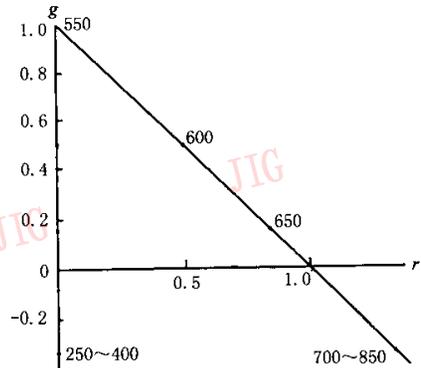
### 2.2 三原色与负比配

尽管上述参考视觉系统的标准色度观测者光谱三刺激值曲线中没有负比配,但负比配的出现与否和三原色的选择密切相关.这里不妨假设取另一组三原色的中心波长为 430nm、550nm、670nm 处,其相应的三刺激值为 (0.8, 0.2, 0)、(0, 1, 0)、(0, 0.2,

0.8).同样,根据式(1)可以得到参考视觉系统的标准色度观测者光谱三刺激值曲线及对应的颜色空间(图 4).正如 CIE 的结果一样,机器视觉系统的标准色度观测者光谱三刺激值曲线(图 4a)中出现了负比配,其对应的颜色空间(图 4b)中也出现了负值,但空间的形状和均匀性并没有变化。



(a) 参考视觉系统的标准色度观测者光谱三刺激值曲线



(b) 对应的参考颜色空间

图 4

## 3 颜色空间转换

建立均匀颜色空间的目的是将非均匀颜色空间转换到均匀颜色空间,以便实现基于欧氏距离的色差测量,但由于不知道非均匀颜色空间产生的原因,因此以往的转换方法,如 CIE 的 1960-UCS, 1976-L\* a\* b\* 图,都是根据实验结果和经验来直接建立某种映射,以将非均匀颜色空间拉伸到近似均匀颜色空间,其和经验公式不同,人类颜色空间到参

考颜色空间的转换可以通过基于环境光照和物体表面光谱特性的物理模型来实现。

根据有限维线性模型,环境光照  $E(\lambda)$  和物体表面光谱反射率  $S^x(\lambda)$  都可以用基函数  $E_j(\lambda)$ 、 $S_k(\lambda)$  表示为

$$E(\lambda) = \sum_{j=1}^J \alpha_j E_j(\lambda) \quad (2)$$

$$S^x(\lambda) = \sum_{k=1}^K \beta_k^x S_k(\lambda) \quad (3)$$

式中,  $J$  和  $K$  在本模型中都取 3,  $x$  为物体表面中  $X$  点的坐标, 这样视觉系统中光感受器的输出  $O_i^x$  可表示为

$$O_i^x = \int E(\lambda) S^x(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

式中,  $i$  是光感受器的种类,  $R_i(\lambda)$  是光感受器的光谱敏感度函数. 若考虑有限维线性模型, 则式(4)又可表示为

$$O_i^x = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha_j \beta_k^x \Psi_{ijk} \quad (5)$$

式中

$$\Psi_{ijk} = \int E(\lambda) S_k(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

环境光的颜色可以通过将光照在完全白色漫反射体上而求得, 即令  $S^x(\lambda) \equiv 1$ . 根据式(1)、式(2)、式(4)可解得  $\alpha_j$  ( $j=1, 2, 3$ ). 对于在该光照下任一颜色的三刺激值, 根据式(1)、式(5)即可解得  $\beta_k^x$  ( $k=1, 2, 3$ ).

在式(5)中, 若以机器视觉系统的采样函数  $R^m(\lambda)$  来代替  $R_i(\lambda)$  即可得机器视觉系统的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  值 (即  $O_i^x$ ,  $i=1, 2, 3$ ), 以便标准色度观测者光谱三刺激值及其在参考颜色空间的位置, 还可进一步计算出均匀颜色空间中任意颜色点之间的距离.

由于在实际的机器人视觉系统中, 不仅摄像机的光谱采样函数和人眼的光谱不同, 而且在具有非正常颜色视觉的人群 (如色盲) 中, 其视觉系统的光谱敏感度函数和正常人的光谱函数也不同<sup>[11]</sup>, 因此直接应用 CIE 的色度学体系来表达机器视觉系统、非正常颜色视觉人群的颜色之间的距离是没有意义的. 为此, 根据物理模型, 通过参数  $\alpha_j$  ( $j=1, 2, 3$ ) 和  $\beta_k^x$  ( $k=1, 2, 3$ ) 的传递, 来建立统一、均匀的颜色空间, 以实现各机器视觉系统之间以及机器视觉系统和人类视觉系统之间颜色的统一测量和标定, 是很有必要的.

## 4 结论

色度学是一门古老的学科, 也是一门基于心理物理实验和经验公式的学科, 而现代计算机视觉是计算的学科, 并且是基于物理模型和计算理论的学科. 这两门学科的有机结合, 对于计算机视觉的发展和对于人类视觉研究都会有很大的帮助.

视觉心理物理实验是将人脑作为黑箱来测量视觉系统的输入、输出特性的, 而本文即探讨了将复杂的心理物理实验结果解释为视觉系统的光谱敏感度

函数性质的一种可能性. 尽管这种尝试还是很初步的, 因为影响视觉系统输出特性的因素中还包括大脑的高级功能, 目前研究还很不够, 但是, 比较人眼锥细胞中色素的光谱敏感度函数和人类心理物理实验的函数<sup>[8, 10]</sup>, 却可以发现输入系统的特性直接影响其输出特性. 基于这一基本考虑指出人类颜色空间非均匀性产生的主要原因在于初级视觉系统中光谱敏感度函数的非线性, 从而解释了三原色、比配、负比配、颜色空间、色差测量等心理物理现象产生的原因, 同时提出了颜色比配公式, 并在此基础上构造了虚拟视觉系统的采样函数.

虽然机器视觉系统是模仿人类视觉系统而建立的, 但两者却有如下差别: ①实现的功能不同 (即机器视觉系统往往有特殊的应用场合); ②实现的算法也不同, 许多人类视觉系统的算法至今依然不为人知; ③实现的硬件不同, 因为计算机和人脑的构造存在着巨大的差异. 由于这些差异的客观存在, 机器视觉系统对人类视觉系统的模仿应该不仅仅限于发展机器算法这一层次, 而应该在更深的层次上分析人类视觉系统的原理, 并在此基础上建立机器视觉系统.

由于输入系统不同, 也因为色差的测量方法不同, 因此机器的视觉系统具有和人类的视觉系统不同的表象、不同的算法、不同的实现硬件, 从而具有不同的颜色知觉. 即对于同一个物理表面, 机器可以根据特殊任务的需要建立二维、三维或四维的颜色感知系统, 从而使机器所感知到的颜色和人所感知到的颜色不同. 虚拟颜色空间不仅建立了各种视觉系统之间基于参数  $\alpha_j$  ( $j=1, 2, 3$ ) 和  $\beta_k^x$  ( $k=1, 2, 3$ ) 传递的联系, 而且还实现了颜色空间之间基于物理模型的相互转换, 这将给虚拟技术的发展带来极大的前景.

## 参考文献

- 1 Crevier D, Lepage R. Knowledge-based image understanding systems: A Survey. *Computer Vision and Image Understanding*, 1997, 67(2):161-185.
- 2 Maloney L, Wandell B. Color constancy: A method for recovering surface spectral reflectance. *J. Opt. Soc. Am.*, 1986, A3(1):2933.
- 3 Maloney L. Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters. *J. Opt. Soc. Am.*, 1986, A3(8):16731683.
- 4 Zmura M D, Iverson G. Color constancy I. Basic theory of two-stage linear recovery of spectral descriptions for lights and surfaces. *J. Opt. Soc. Am.*, 1993, A10(10):21482165.

- 5 Ho J, Funt B V, Drew M S. Separating a color signal into illumination and surface reflectance components: theory and applications. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1990, 12: 966-977.
- 6 陶霖密, 姚国正, 汪云九. 人类颜色视觉的计算理论. *心理学报*, 1993, 25(3): 233-240.
- 7 CIE Publication No. 15.2, *Colorimetry*(2<sup>nd</sup> ed). Paris, Bureau Central de la CIE, 1986.
- 8 Bowmaker J K, Dartnall H J A, Lythgoe J N *et al.* The visual pigments of rods and cones in the rhesus monkey, *Macaca mulatta*. *J. Physiology*, 1978, 274: 329-384.
- 9 Stiles W S. The directional sensitivity of the retina and the spectral sensitivities of the rods and cones. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, 1939, 127: 64-105.
- 10 Baylor D A, Nunn B J, Schnapf J L. Spectral sensitivity of cones of the monkey *Macaca fascicularis*. *J. Physiology*, 1987, 390: 145-160.
- 11 Brettel H, Vienot F, Mollon J D. Computerized simulation of color appearance for dichromats, *J. Opt. Soc. Am.*, 1997, A14(12): 2647-2655.

陶霖密 1986年毕业于杭州大学生物系,1988年考入中国科学院生物物理所,曾在意大利国际高等科学研究所从事博士后及访问研究,现为清华大学计算机系人机交互与媒体集成研究所博士.目前主要研究领域为人类的视觉认知、计算机视觉.

徐光祐 1963年毕业于清华大学自动控制系,曾在美国 Purdue大学和 Illinois 大学从事访问研究,现为清华大学计算机系人机交互与媒体集成研究所责任教授.目前主要研究领域为计算机视觉、人机交互技术和多媒体技术.