

计算机视觉中传感器规划综述

孙九爱¹⁾ 吕东辉²⁾ 宋安平²⁾ 庄天戈¹⁾

¹⁾上海交通大学生物医学工程系, 上海 200030) ²⁾(上海大学, 上海 200072)

摘要 在摄影测量和目标识别等计算机视觉的应用中,为了提高三维定位精度,有必要采用传感器规划策略,即预先对摄像机和照明参数进行规划,因为这样可以更有效地完成视觉任务。为了使人们对计算机视觉中传感器规划有一概略了解,首先分析了传感器和照明参数、特征检测约束、传感器和目标模型等影响传感器规划的各种因素;然后在总结传感器规划最近研究进展的基础上,根据传感器规划所使用方法等的不同,对传感器规划问题进行了分类,并将传感器规划问题归纳为组合优化的过程;最后指出传感器规划今后几个可能的研究方向。

关键词 传感器规划 视点 摄像机 优化

中图法分类号: TP242.62 P232 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2001)11-1047-06

A Survey of Sensor Planning in Computer Vision

SUN Jiu-ai¹⁾, LU Dong-hui²⁾, SONG An-ping²⁾, ZhUANG Tian-ge¹⁾

¹⁾(Department of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

²⁾(Shanghai University, Shanghai 200072)

Abstract In photogrammetry and object recognition, it's necessary to introduce the sensor planning strategies to improve the measurement accuracy. Sensor planning is a new research area in computer vision. Planning the parameters of camera and illumination purposefully can make task be performed effectively. In this paper some affecting factors which are essential to sensor planning are analyzed firstly. They are the parameters of camera and illumination, constrain of feature detectability, the models of sensor and object. After some specific sensor planning systems were summarized, the sensor planning systems are classified based on the methods they used, the goals, the number of sensors and a prior information. Then the problem of sensor planning is concluded to the optimization process which can be done in high-dimensional space composed of the parameters of camera, lens, illumination and object models. Finally we show some possible developing directions, namely single camera system in active machine vision, multi-camera network design solution, new optimization and combinatorial search method, rebuilding the uncertainty of characters and multi-sensor data fusion.

Keywords Sensor planning, Viewpoint, Camera, Optimization

0 引言

在计算机辅助外科手术(Computer Assisted Surgery)中,被动光学定位器是定位器的发展趋势。这种被动光学定位器是基于立体视觉原理,它不仅可

以用来监视手术过程中手术器械和成像系统的空间位置,而且可以对空间目标进行理解和识别^[1]。由于它对定位精度的要求比较高,不同于一般工业应用中的定位系统,因此在计算机视觉中通常利用图象的后处理技术来提高其定位的精度,如果对图象的获取过程进行优化,则可以获取高质量的图象,这不仅可

基金项目:中法科技合作项目 A 类第 87 号;上海市科技发展基金资助项目(985107016);

上海市高等学校发展科学基金资助项目(99A24)

收稿日期:1999-12-17;改回日期:2001-01-20

减轻后续图象处理的负担,给图象的理解造成更大的便利,而且能提高对空间位置的定位精度。

传感器规划(Sensor Planning,以下简称 SP)是计算机视觉中新出现的一个研究领域,它是指利用给定的环境信息以及视觉系统将要完成的任务信息来自动决定传感器参数最佳值的策略。其原理如图 1 所示。

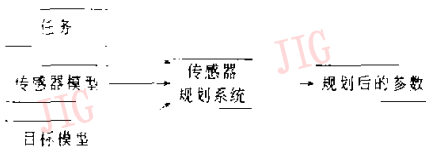


图1 传感器规划原理

以前计算机视觉的研究通常都将重点放在被观察目标上,并假设视点预先给定、适合工作,且无法控制的,而与视点布置有关的论题则很少受到重视。这与 SP 在实际应用中的重要性很不协调。显然获取最佳图象的代价要比后续图象分析低得多,而 SP 则设法理解和量化被观察目标和传感器之间的关系,以便自动、可靠地操作传感器系统。在这种目标-传感器之间的关系中,最佳视点的选择对获取图象的质量有很大影响,甚至会影响到视觉任务执行的灵活性和可行性。

1 影响传感器规划的因素

摄像机是计算机视觉研究中的主要输入设备,由于这里讨论的传感器通常均是指摄像机,因此传感器规划有时也称摄像机规划或视点规划。

SP 是基于模型和任务驱动的,这里模型是指环境中的目标信息和传感器信息,这种先验知识和满足任务需要的知识一起合成于规划算法中,即根据环境、传感器和任务需求等知识,来决定传感器和照明参数,以满足视觉任务的需要。

1.1 传感器和照明参数

SP 中最基本的任务是确定视点和照明的有关参数。

1.1.1 视点参数

习惯上视点被认为只是摄像机的位置, Tarabanis 给出的一个更广泛意义上的视点定义更实用,因为它包含观察方向和下述一些有关的光学参数^[1]。

(1) 3 个位置自由度 它一般采用与摄像机相

连点的位置向量来表示,因为 C 安装(C-Mount)方式可保持镜头与成像平面间的相对位置不变,所以一般采用 C 安装方式的镜头表面点的位置向量;虽然它也可以使用镜头本身的特征点(如主点和节点),然而由于这些点不是刚性的,也不是固定于摄像机的,因此当镜头的光学设置改变时,则需要考虑这些点的相对运动。

(2) 3 个方向自由度 其最方便的表达方式是沿观察方向的单位方向向量,因为这样即使当镜头光学设置变化时,其光轴方向都保持不变。

(3) 镜头后主点到图象平面的距离 这个参数在多焦距控制机制中可改变,以获得聚焦图象。

(4) 入瞳直径 由镜头孔径和光圈的大小决定,而镜头孔径和入瞳直径则影响图象的聚焦和亮度。

(5) 镜头焦距 是镜头最基本的特征,它提供了镜头折射能力的度量,在焦距可调的镜头中,焦距是一个参数,否则(焦距不可调)可将其视为一个常数。

这些都是决定视点的主要参数,其中参数(1)、(2)是视点的几何参数,参数(3)~(5)是视点的光学参数,且几何参数独立于光学参数,另外,有些情况下还要包括摄像机的曝光时间、视频信号放大增益、成像系统谱响应等可控参数。

1.1.2 照明参数

照明参数也可分为几何的和辐射的(radiometric)两类,且几何照明参数独立于光源的物理特性^[3,4],主要包括如下几个参数:

(1) 光源的 3 个位置自由度 通常是指与光源相连点的位置向量。

(2) 光源的 3 个方向自由度 在定向照射的情况下,是指沿光束对称轴方向的单位方向向量。

(3) 照明光柱的几何特性,如圆锥立体光柱的顶角等。

其照明光源辐射特性由照明光源的发光强度、强度的空间分配、强度的谱分布、描述照明的偏振化参数等物理和光学特征决定。

由此可以看出,在通常情况下,传感器规划问题的解空间是由摄像机和照明参数构成的高维空间。在目前已有的系统中,一般只简化地考虑其中的某个子空间,例如假定摄像机与目标的距离固定,或光轴通过目标上的固定点。

1.2 特征检测约束

这里讨论的特征检测约束,对人部分视觉任务来说,都是基本的约束。

(1) 可视性 对于将要被检测的特征,首先需让摄像机看到,这意味着从摄像机到每个特征点之间的光路不能被遮挡。

(2) 视场 可视性是要求从每个特征点来的光线必须能到达摄像机,而视场约束则要求这些光线必须将特征成像到象平面的有效区域,并要求所有特征表面完全位于摄像机的视野范围之内。

(3) 景深 该约束的目的是要保证特征在焦距范围之内,根据摄像机可接受的分辨率,让物距上存在一个比较大的范围,以使特征所成的象仍满足要求,这个范围就是景深,摄像时,焦距约束要求感兴趣的特征位于镜头的景深范围之内。

(4) 象素分辨率 要求任何两个特征点由成像平面上不同象素区分,这个约束限制着特征图象尺寸的大小。

(5) 入射角 实际工作中,不允许视点与被观察表面接近共面,通常是在摄像机方向与表面法线方向间规定一个最大可接受角。

(6) 透视失真 图象在投影下严重失真是不可接受的。

(7) 照亮性(Illuminability) 对一个被检测特征,仅仅可视还不行,该特征还应该至少被光源有效地照到,否则特征将不被照亮,因而也就可能检测不到或被误解为其他特征。

(8) 摄像机的动态范围 当目标点的辐照度在摄像机的动态范围之外时,目标点在图象中将检测不到,如果低于相应光接受单元的灵敏度,则表现为黑色,若高于该灵敏度,则过饱和。

(9) 对比度 边缘特征的检测由图象中边缘的对比度决定,即根据图象边缘处的灰度值的差别来检测,当相邻区域不能被边缘检测算子检测到时,则边缘特征就检测不出来。

上述这些约束都是决定特征能否由特定参数的传感器探测到的问题,而对于每个约束特征化观察空间的一个区域,其 SP 就是尽量找到满足所有这些约束的解。粗略地看,约束(1)~(6)是关于传感器的约束;约束(7)~(9)是关于照明条件的约束,其中,约束(4)限制了传感器到目标的最大距离,约束(2)和约束(3)则限制了传感器到目标的最小距离,约束(1)和约束(5)同时影响观察距离和方向。

1.3 传感器和目标模型

这里,传感器模型是指由摄像机、镜头和光源等组成的透视投影成象模型;目标模型通常包含目标的几何和拓扑信息,但有时为了在光线和目标表面间建立起精确的模型,则目标的光度学特性也需要包含进目标模型。

2 传感器规划的研究现状

早在 20 世纪 70 年代,大地摄影测量领域的研究者就对传感器规划问题进行了研究,当时他们是利用多个传感器间的冗余信息来提高测量精度^[1]。近几年,人们也已经意识到这样的传感器规划成分对新一代计算机视觉系统的重要性。

2.1 传感器规划的主要方法

从 1987 年 Sakane 等人提出 SP 以来,又依次出现了产生-测试方法(Generate and-Test)、合成(Synthesis)方法、专家系统方法和计算机仿真方法,其中前两者是基础。

(1) 产生-测试方法的原理是先产生传感器的参数,然后相对于任务约束进行估计,为了能够方便地考虑传感器参数,通常采用以目标为中心的网格球面来离散化观察空间,这种球的半径和网格的分辨率由与任务有关的启发式搜索过程来确定,如图 2 所示,这样就可以用球面的网格形式来确定可能的传感器观察位置。

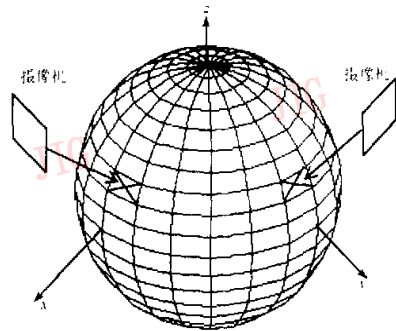


图 2 利用 Tesselated Viewing Sphere 进行搜索

产生-测试方法是解决 SP 问题的最初方法,它来源于大地摄影测量技术,由于它是利用离散化空间和有效的搜索等方法,因此具有如下优点:①算法简单可行、可搜索整个球面,是解决遮挡问题相对简单的方法;②球面的网格镶嵌(Tesselation)过程是

启发式过程,可使搜寻更有效;③可通过球面上多个约束交叉,以发现合理的区域;④可以用与可视性约束表达同样的方法来对照明约束进行建模。

当然该方法还有许多问题需解决,如,①虽然使用了启发式方法,但计算和搜索网格的高维参数空间仍需很大的计算量;②存在网格尺寸比例(采样率)问题;③虽对点特征有很好的效果,但对线、面或更复杂的特征,其计算量却大大增加;④对视点参数的一些假设和规定,将导致对多特征观察能力的削弱。

(2) 合成方法是用解析函数的方式来对约束进行建模,其任务的需求也可以解析的方式特征化,即

$$h = \max \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i g_i \right\} \quad (1)$$

其中, h 为目标函数, g 为约束函数, α 为权系数,它表示各个约束函数对目标函数贡献的大小。

这样,满足任务约束的传感器参数值就可直接由这些解析关系式确定。

虽然这里所构造的目标函数和约束函数是高维的,需要很大的计算量,但是以合成函数来特征化这些空间(或子空间)却可获得许多优点,因为合成方法能主动理解待计划参数与实现目标之间的因果关系,而不是盲目地去搜索。这些优点为:①任务约束以解析的方式建模,可以用于特征化更多的问题;②利用解析方式,可以结合各种优化技术进行处理;③利用合成方法可从解析式中直接计算出精度,并容易对特定的任务进行调整。

产生-测试方法和合成方法两者各有其优缺点,目前还不能确定哪种方法更好。由前述影响 SP 因素的分析可知,传感器规划就是在由摄像机和照明参数形成的高维成像空间进行搜索,以寻找符合要求的区域,其所采用的不同方法可以看作是各种组合优化策略,如产生-测试方法就类似于试错法,合成方法则类似于带约束的各类优化问题。

2.2 传感器规划的分类

传感器规划最直接的分类是根据其所使用的方法来将其分为产生-测试方法、合成方法、专家系统和计算机仿真。根据 SP 的目的可以将其分为传感器位置规划^[10]、下一个最优视点的计算^[9,11]、视点集的计算^[12]、视觉搜索的视点选择和工具定向与 CMM 路径的规划^[13]等不同规划,这种分类方法可以清楚地区分采用相同的方法去解决不同问题的能力。另外,根据传感器规划时所采用的传感器的数目,可以将其分为单摄像机系统和多摄像机系统;还

可根据要完成的视觉任务或预先知道的环境信息的多少,将其分为目标特征检测、基于模型的目标识别和定位、场景重建等不同类别。

以上这些分类只是为了清楚地区分各种传感器规划问题而提出来的,其实任何一个系统均可以是几种类别的不同组合。

Sakane 设计的 HEAVEN 系统就是采用产生-测试策略,将恢复表面法向量的可靠性和摄像机与光源探测表面的能力作为准则,并由给定半径的观察网格球面(Tessellated viewing sphere)来寻找可能的传感器的位置。这项研究后来扩展到 VIO 系统;另一个采用产生-测试策略的是 ICE 系统,其中,摄像机规划的主要约束是特征边缘的可视性,而光源的布置则基于特征边缘的对比度,其重点在照明元件的规划,这些都属单个摄像机系统。

其他单摄像机系统采用的均是合成方法,如由 SRI 的 Cowan 等人完成的 ASIP^[14]工作,就是以可视性、多面体目标处于摄像机的视野和焦距范围内、足够的分辨率和入射角、不被目标本身或工作环境中的其他目标遮挡等几何约束来优化摄像机的位置。为了观察边缘特征,Cowan 等后来又研究了照明光源的规划问题。由 Tarabanis 等开发的 MVP 系统则只优化摄像机参数^[15],而没有考虑光源的布置,其中,所有的任务约束都能解析地表达出来,这些约束方程相互竞争的交集就是符合要求的解,最近它又被扩展到动态环境中。

Tarbox 等已意识到使用多摄像机方法对克服目标遮挡问题的重要性^[16],他们在 IVS 系统中就利用主动三角测量原理实现了该方法;Cowan 等也利用多个摄像机来克服二维目标固有的遮挡问题,从而提高了系统的可靠性;Fritsh 和 Crosilla 则使用分析一阶设计的方法,通过叠代移动摄像机,直到估计目标特征坐标的协方差矩阵优于准则矩阵为止,从而实现了多摄像机参数的优化;由 Mason 开发的 CONSENS^[17]多摄像机系统则利用三角测量法和专家系统方法,克服了准则的决定问题和试验-测试方法不能求解的复杂性问题。这种方法基于组成编译专家系统的类网络理论(用于对平面网络类设计问题提供 4 个摄像机的理想参数),并先将复杂的目标分为简单的几个特征,再通过网络对这些特征进行估计,然后与其他的摄像机连接,即构成一个共同的数据体。

上海交通大学生物医学工程研究所在进行计算

机辅助手术的被动式多眼定位器的研究中,以进行高精度的空间位置测量为目的,并对多摄像机的位置参数进行优化处理。由于采用了组合优化策略,用这种方法进行多摄像机的位置规划,不仅可以很好地提高系统的定位精度,还可以定量地给出摄像机的最佳位置分布情况及其相应的定位精度,因此这是解决多眼定位器中多摄像机位置规划问题的一个好的思路。

3 应用和展望

除了上面介绍的传感器规划系统外,SP 的应用还有很多。机器人和机器视觉的一些研究领域,如机器人的任务规划、运动规划、抓取规划和装配规划等都可看作是传感器规划问题的一个方面。其中,主动视觉就是 SP 的一个成功应用的典型,这种通过传感器规划的主动视觉不仅可以获得更大的观察和活动区域,而且可增强系统的可靠性,并能解决被动立体视觉的病态问题。

采用 SP 不仅可以给定的任务要求来自动确定优化的传感器参数值,从而减小开发周期和传感器系统的价格,而且基于 SP 的系统还可自适应地重新设计自身的参数,以满足工作位置的变化。由于 SP 具有以上的很多优点,目前国际上有许多组织和机构对这个问题都在进行研究,估计今后会向下述方向发展:

(1) 单摄像机系统提供的观察目标任务的方法相对较成熟,但不是每个目标都能从单个视点看得到,对于复杂特征的目标必须采用动态的单个摄像机或多个摄像机系统,由此可见,主动视觉的单摄像机系统和多摄像机的网络化设计是一个发展方向。

(2) Yi 等虽证明了传感器规划问题的复杂性属于 NP 完全问题^[12],可是由于实际的 SP 问题中包含的传感器布置约束和自由度要更多,因此采用一般的优化方法(如产生-测试策略)就不易处理,有必要采取新的启发式搜索算法。

(3) 目前使用的模型表达,无论对于构造约束或目标解析式都很不方便,而通过重新定义特征的不确定性和传感器与照明的模型则可能会获得好的效果。

(4) 前面提到的传感器都是摄像机,事实上目前在许多应用领域中,还有其他各种传感器,包括触觉传感器、三维距离传感器、力矩传感器和声学传感

器等。这种用多传感器数据融合技术来合成多种传感器信息的思路也是一个很有前途的发展方向。

参考文献

- 1 Taylor R H, Lavallec S, Burdea G C *et al.* Computer integrated surgery[M]. Cambridge: The MIT Press, 1993.
- 2 Tarabans K, Tasi R Y, Allen P K. Analytical characterization of the feature detectability constraints of resolution, focus and field-of-view for vision sensor planning [J]. CVGIP: Image Understanding, 1994, 59(3): 540~558.
- 3 Sakane S, Ishii M, Kakikura M. Occlusion avoidance of visual sensor based on a hand eye action simulation system: HEAVEN [J]. Advanced Robotics, 1987, 2(2): 149~165.
- 4 Ikeuchi K, Robert J C. Modeling sensor detectability with the VANTAGE geometric-sensor modeler [J]. IEEE Trans. on Robot. Automat., 1991, 7: 771~784.
- 5 Sakane S, Niepold R, Sato T *et al.* Illumination setup planning for a hand-eye system based on an environment model [J]. Advanced Robotics, 1992, 6(4): 451~482.
- 6 Cowan C K, Kovese P D. Automatic sensor placement from vision task requirements [J]. IEEE Trans. on PAMI, 1988, 10(3): 407~416.
- 7 Fraser C S. Optimization of precision in closed-ranged photogrammetry [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1982, 48(4): 561~570.
- 8 Mason S, Gruen A. Automatic sensor placement for accurate dimensional inspection [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1995, 61(3): 454~467.
- 9 Connolly C L. The determination of next best views. A]. In: Int. Conf. Robotics and Automation [C], ST. Louis, MO: IEEE Computer Society Press, 1985: 432~435.
- 10 Banta J E, Zhieu Y, Wang X Z *et al.* A best-next-view algorithm for 3D scene reconstruction using range images [J]. SPIE on Intelligent Robots and Computer Vision, 1995, 2: 418~428.
- 11 Madsen C B, Christensen H L. A viewpoint planning strategy for determining true angles on polyhedral objects by camera alignment [J]. IEEE Trans. on PAMI, 1997, 19(2): 158~163.
- 12 Trucco A, Umasurthan M, Wallace A M *et al.* Model-based planning of optimal sensor placement for inspection [J]. IEEE Trans. Robotics and Automation, 1997, 13(2): 182~192.
- 13 Marshall A D, Martin R R, Huber D R. Automatic inspection of mechanical parts using geometric models and laser range finder data [J]. Image and Vision Computing, 1991, 9(6): 385~405.
- 14 Cowan C K, Modayur B. Edge-based placement of camera and light source for object recognition and location [A]. In: Int. Conf. Robotics and Automation [C], Atlanta GA, USA: IEEE Piscataway NJ USA, 1993, 2: 586~591.
- 15 Tarabans K, Tasi R Y, Allen P K. The MVP sensor planning

- system for robotic vision task [J]. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1995, 11(1):72~83.
16. Tarbox G, Gottschlich S N. Planning for complete sensor coverage in inspection [R]. Technical Report TR CAT 93-1, NYS center for advanced technology in automation and robotics, 1993.
17. Mason S. Heuristic reasoning strategy for automated sensor placement [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1997, 63(9):1093~1102.
18. Y. S. Sensor planning for 3d object search [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 73(2):135~168.



孙九爰 1971 年生, 1998 年获南京理工大学硕士学位, 现于上海交通大学生物医学工程专业攻读博士学位, 主要从事计算机辅助外科手术和计算机视觉方面的研究。



吕东辉 1966 年生, 1996 年获上海交通大学博士学位, 现为上海大学通信与信息工程学院副教授, 主要从事小波分析理论, 图象重建和计算机视觉的研究工作。



宋安平 1966 年生, 1997 年获上海大学硕士学位, 现为上海大学计算机学院讲师, 主要从事图象处理、并行算法的研究。

庄天戈 1955 年生, 1957 年毕业于交通大学电工器材制造系, 现为上海交通大学生物医学工程系教授, 博士生导师, 目前的研究兴趣为医学成像、三维重建、计算机辅助手术和 PACS 等。

广阔天地、大有作为

——惠普 8550 彩色激光打印机及其在数字化办公中的应用

纵观当今世界的打印机市场, 彩色激光打印机无疑是最引人注目的焦点, 惠普 Color LaserJet 8550N 型彩色激光打印机以其超凡的打印速度、超群的打印质量、广泛的适应性和无微不至的售后服务获得了用户的一致好评, 在广泛的领域的取得了巨大成功, 其中办公打印就是其应用的重要领域, 该领域以其广大的现实和潜在用户群, 成为各打印机厂商市场争夺的一个热点。

一些应用实例也表明, 惠普 8550 彩色打印机不仅能使原来依靠灰度不易分辨的曲线, 获得满意的结果, 而且它还具有联网功能, 使得联网共享打印成为现实。惠普 8550 彩色激光打印机、PC 机、数码相机、扫描仪以及一些其他的切纸和装订设备相互配合, 可以构成一个完整的办公打印系统。

8550 数码短版印刷系统还提供了三种设备配置方案: 一是单平台配置方案, 即由扫描仪、PC 或 MAC 电脑、HP Color LaserJet 8550 打印机、小幅面纸张裁切设备组成; 二是多平台中等配置方案, 此方案能让两台电脑共享打印, 使工作效率得到进一步提高; 三是多平台配置方案, 由数码相机、扫描仪、PC 电脑×2、HP 8550dn 打印机、裁刀、覆膜机、装订机、集线器等组成, 适合于那些想成立数码短版印刷中心的用户。

在这三种惠普 8550 数码短版印刷系统中, 最重要的部分是 HP Color LaserJet 8550 系列彩色激光打印机, 其优点在于打印速度超群、品质出色、性能优越可靠, 购置成本不高, 又可以适应多种操作平台 (MAC 或 PC) 与软件。

该系统无需出片、直接输出, 制作周期短, 极具灵活性, 既节省输出时间, 又节省支出; 具有 2400dpi 的高精度输出, 在缩短周期、降低费用的同时, 保证了用户满意的质量; 设备操作简单、一次性购置费用和耗材费用低, 能大大降低办公费用。总之, 8550 数码短版印刷系统以其灵活性、高质量、低成本成为彩色印刷领域的一匹黑马。

随着信息社会的到来, 数字化办公已成为办公领域不可逆转的趋势, 在这样的背景下, 激光打印机作为走向数字化办公不可或缺的工具, 其作用日渐凸现, 一个潜力巨大的市场业已形成, 并不断发展壮大, 展示了诱人的前景, 在这片广阔的天地里, 相信惠普 8550 彩色打印机将以其质量、服务和品牌的多重优势, 在市场竞争中脱颖而出, 在办公领域取得日益广泛的应用, 并以此推动数字化办公时代的到来。