

文章编号 1004-924X(2009)03-0506-07

应用振幅调制纯相位滤波器实现旋转不变识别

吴丹, 路远, 凌永顺, 马超杰, 李玉波

(电子工程学院 安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:提出了一种基于振幅调制纯相位滤波器(AMPOF)的旋转不变识别新算法。该算法充分利用振幅调制纯相位滤波器区分能力强的优点,结合综合鉴别函数方法,拓展了综合鉴别函数(SDF)在畸变不变模式识别领域的应用。利用各幅训练图像傅里叶变换的振幅和相位信息,逐一构建子滤波器,并将它们加权求和得到合成滤波器;然后采用迭代算法求解出合理的权重系数。仿真实验结果表明:对于实验采用的目标训练图像和非训练图像,改进算法的相关输出峰值大约提高95%~112%;对于只有少量像素的局部训练图像,改进算法的相关输出峰值大约提高74%。这种优化算法使得振幅匹配和相位匹配更加充分,相关输出增益明显增强,能够一定程度地降低训练量。

关键词:旋转不变识别;振幅调制纯相位滤波器;综合鉴别函数;Newton-Raphson迭代算法

中图分类号:O438;TN713 文献标识码:A

Rotation invariant pattern recognition based on amplitude-modulated phase-only filter

WU Dan, LU Yuan, LING Yong-shun, MA Chao-jie, LI Yu-bo

(Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province,
Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: In order to get good general performance of optical matched filtering correlation recognition, a new algorithm based on Amplitude-modulated Phase-only Filter(AMPOF) is proposed for rotation invariant pattern recognition. The algorithm extends the application of Synthetic Discriminant Function(SDF) to distortion invariant recognition efficiently by utilizing good discrimination capacity of the AMPOF and employs both amplitude and phase information of Fourier transforms of training images to construct a series of sub filters, and to get a synthetic filter by weighted sum of sub filters. Finally, the algorithm can obtain the weight coefficients by using a iterative algorithm. The simulation results indicate that the correlation peak value of improved algorithm can be enhanced by 95%~112% for training images and non-training images in experiment, and can be enhanced by 74% for one local training image with a few of pixels. The amplitude matching and phase matching will be much sufficient under new algorithm, consequently, the correlation output gain will be enhanced evidently, and the training data can be reduced to a certain extent.

收稿日期:2008-04-29;修订日期:2008-07-23.

基金项目:安徽省红外与低温等离子体重点实验室基金资助项目(No. 2007A010010X)

Key words: rotation invariant pattern recognition; Amplitude-modulated Phase-only Filter(AMPOF); Synthetic Discriminant Function(SDF); Newton-Raphson iterative algorithm

1 引言

光学相关器包括光学匹配滤波相关器和光学联合变换相关器^[1]。使用传统的光学匹配滤波方法进行目标图像的特征识别处理有其局限性,主要缺陷之一是输出相关峰较宽,区分能力差。针对这一问题,Horner JL 等人提出了纯相位滤波器(POF)^[2]的概念,这是目前光学模式识别领域应用最广泛的一种非线性滤波器。纯相位滤波器输出相关峰尖锐,光能利用率高,这是因为频谱函数相位部分包含的特征信息较振幅部分更重要。后来人们发现,频谱函数的振幅部分也不能忽视,将振幅信息和纯相位滤波器结合起来,制成振幅调制纯相位滤波器(AMPOF)^[3-4],区分能力进一步提高。然而上述滤波方法都不能避免另一主要缺陷,即其对识别目标图像的尺寸缩放和方位旋转都极其敏感。针对畸变敏感,人们利用梅林变换法(RHF)解决目标空间尺寸改变的问题;利用圆谐变换法(CHC)解决目标转动的问题^[5]等等,但是这些方法在实际应用中存在较大的困难,比如空间光调制器(SLM)的低分辨率不能满足某些坐标变换的要求;圆谐变换的识别过程强烈依赖于极坐标系原点的选择和圆谐分量级次的选择,运算较繁琐。目前研究热点是 D. Casasent 提出的利用综合鉴别函数(SDF)^[6]方法实现畸变不变相关识别,该算法后来也产生出许多改进的算法^[7-8],如:使相关峰锐化的最小平均相关能量 SDF(MACE SDF);降低滤波器对噪声敏感度的最小方差 SDF(MV SDF);提高滤波器区分和抗噪声能力的核函数 SDF(kernel SDF);提高滤波器畸变容限的扩展等相关峰 SDF(EECP SDF)等等。

文献[9]提出一种振幅调制纯相位 SDF(AMPOF SDF),该算法与其它 SDF 改进算法相比,相关输出效果有所提高,并且易于在空间光调制器上实施。本文提出了一种改进的 AMPOF SDF,使得振幅和相位匹配更加充分,区分能力进

一步提高。计算机模拟仿真实验结果证明了本文改进算法的有效性。

2 理论分析

2.1 振幅调制纯相位滤波器原理

振幅调制纯相位滤波器(AMPOF)定义如下式所示:

$$H_{AMPOF} = \left[\frac{B(u, v)}{A(u, v) + |R(u, v)|} \right] \exp[-j\varphi_r(u, v)], \quad (1)$$

其中, $|R(u, v)|$ 和 $\varphi_r(u, v)$ 分别表示目标图像函数 $r(x, y)$ 傅里叶变换的振幅和相位, u 和 v 表示频域变量, $A(u, v)$ 和 $B(u, v)$ 可以是常数,也可以是 u 和 v 的函数。

AMPOF 可以避免 >1 的光能增益,消除不定的结果,而且通过振幅和相位的匹配可获得更为优良的输出相关峰。

2.2 振幅调制纯相位 SDF 原理

综合鉴别函数(SDF)方法是把所有需要识别的畸变图像都考虑进去,以此有效地提高对目标图像的识别能力和容错能力。设有 N 幅训练图像 $r_1(x, y), r_2(x, y), \dots, r_N(x, y)$, 代表了期望的畸变图像变化,这些训练图像通过线性组合构成 SDF^[10-12], 如下式所示:

$$r(x, y) = \sum_{n=1}^N a_n r_n(x, y), \quad (2)$$

其中, a_n 表示权重系数,且有:

$$R(u, v) = \sum_{n=1}^N a_n R_n(u, v), \quad (3)$$

这里 $R(u, v)$ 和 $R_n(u, v)$ 分别表示 $r(x, y)$ 和第 n 幅训练图像 $r_n(x, y)$ 的傅里叶变换。对于任一训练图像 $r_n(x, y), n=1, 2, \dots, N$, 其与 AMPOF SDF 产生相同的相关峰值 p_n , 即:

$$\iint \frac{R_n(u, v)}{\left| \sum_{n=1}^N a_n R_n(u, v) \right|} \exp[-j\varphi_r(u, v)] dudv = p_n, \quad (4)$$

式(4)是一组非线性方程,为求解系数向量

\mathbf{a} , 采用 Newton-Raphson 迭代算法^[13-15]求解, 虽然没有严格的理论证明该迭代算法一定收敛, 但该算法在实际求解时很有效, 收敛速度快, 目前广泛应用于各种调制方式中。迭代公式如下式所示:

$$a_n^{i+1} = a_n^i + \beta [c_n - c_0 p_n^i p_0^{-i}], \quad (5)$$

其中, i 为迭代次数, β 为松弛因子, p_n^i 为第 n 幅训练图像 $r_n(x, y)$ 在第 i 次迭代时的相关输出峰值。

经过迭代计算后, 系数向量 \mathbf{a} 被确定, 于是根据式(2)构成 SDF, 将其引入到式(1), 得到 AMPOF SDF, 即:

$$H_{\text{AMPOF}}(u, v) = \left[\frac{B(u, v)}{A(u, v) + \left| \sum_{n=1}^N a_n R_n(u, v) \right|} \right] \exp[-j\varphi_r(u, v)], \quad (6)$$

对于某一输入目标图像函数 $i(x, y)$, 将其傅里叶变换与 $H_{\text{AMPOF}}(u, v)$ 相乘得到下式:

$$G(u, v) = \left[\frac{B(u, v) |I(u, v)|}{A(u, v) + \left| \sum_{n=1}^N a_n R_n(u, v) \right|} \right] \exp[-j\varphi_r(u, v)] \exp[j\varphi_i(u, v)], \quad (7)$$

其中, $|I(u, v)|$ 和 $\varphi_i(u, v)$ 分别表示 $i(x, y)$ 傅里叶变换的振幅和相位。将 $G(u, v)$ 进行傅里叶逆变换得到相关输出结果, 相对于传统的 SDF 方法, AMPOF SDF 方法相关输出效果更好, 对于每一幅训练图像产生几乎相同的相关峰值。

2.3 改进的 AMPOF SDF

从相关输出增益方面来看, 上述 AMPOF SDF 由于 SDF 是若干训练图像的线性组合, 所以 SDF 傅里叶变换的振幅相对削弱了相关输出增益。当训练图像数目较多时, 增益抑制较明显, 导致输出峰值较低; 从振幅和相位匹配方面来看, SDF 傅里叶变换与单幅训练图像傅里叶变换的振幅和相位匹配不是很充分, 也影响了相关输出效果。

从计算机仿真实验的结果能够看出, 上述 AMPOF SDF 比传统的 SDF 相关峰尖锐, 区分能力显著提高, 但是相关峰值较低。本文考虑从提高振幅和相位匹配程度入手, 取消直接利用 SDF 傅里叶变换振幅和相位信息的做法, 充分利用各幅训练图像傅里叶变换的振幅和相位信息, 逐一构建成子滤波器, 并将它们加权求和得到优化的

合成滤波器, 据此在引入 SDF 到 AMPOF 的方式上做了改进, 将式(6)修正如下:

$$H_{\text{AMPOF}}(u, v) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{B(u, v)}{A(u, v) + |a_n R_n(u, v)|} \right] \{a_n \exp[-j\varphi_r(u, v)]\}, \quad (8)$$

其中, $\varphi_r(u, v)$ 表示第 n 幅训练图像傅里叶变换的相位。这种定义方法可以得到与任一训练图像傅里叶变换完全匹配的振幅调制纯相位函数项, 这样使得振幅和相位匹配更加充分, 相关输出增益明显增强, 光能利用率更高。

3 计算机仿真实验

计算机仿真实验采用的训练图像为旋转角度间隔 5° 的坦克红外波段图像序列, 如图 1 所示。

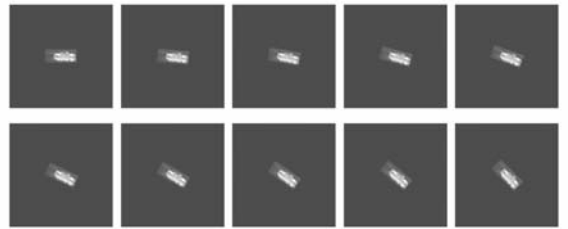


图 1 训练图像序列

Fig. 1 Training image series

基于这 10 幅训练图像构造所需要的 AMPOF SDF, 式(8)中系数向量的求解仍然采用 Newton-Raphson 迭代算法, 初始值取 $[1, 1, \dots, 1]$, 松弛因子取 0.2。该算法用于改进的 AMPOF SDF 时依然很有效, 经过 100 次迭代后, 系数收敛于稳定解, 不同训练图像的相关输出峰值趋于相同, 收敛过程以及各不同角度训练图像对应的相关峰值分别如图 2 和表 1 所示。

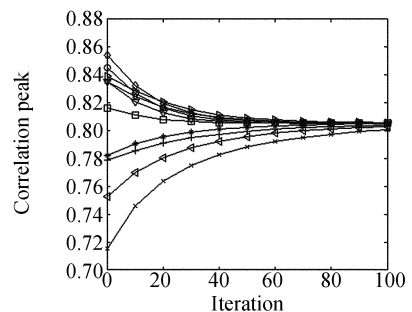


图 2 迭代收敛过程

Fig. 2 Convergence course of iteration

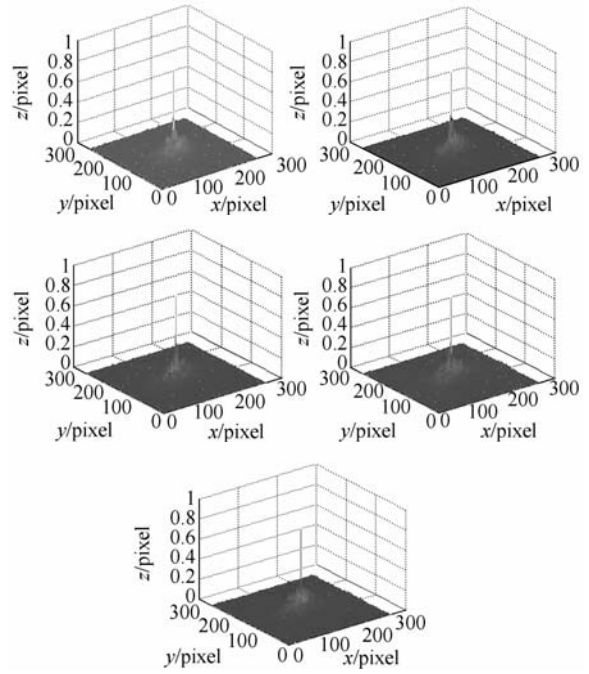
表 1 不同角度训练图像对应的相关峰值

Tab.1 Correlation peak values of training images with different rotation angles

旋转角度	相关峰值(迭代前)	相关峰值(迭代后)
0°	0.778 6	0.804 0
5°	0.782 3	0.805 0
10°	0.752 9	0.803 0
15°	0.838 9	0.805 7
20°	0.834 9	0.805 2
25°	0.854 0	0.805 3
30°	0.835 4	0.805 6
35°	0.845 4	0.805 1
40°	0.816 2	0.805 4
45°	0.715 1	0.800 6

从表 1 可以看出,和算法改进前各训练图像相关峰值约为 0.41 相比,改进后的训练图像相关峰值提高约 95%。图 3 是其中 5 幅训练图像在算法改进前后对应的相关输出三维图。

本文考察了算法改进前后对非训练图像的认识能力。如前所述,仿真实验采用的训练图像为旋转角度间隔 5° 的图像序列,若要将训练图像的



(b) 改进后的训练图像相关输出

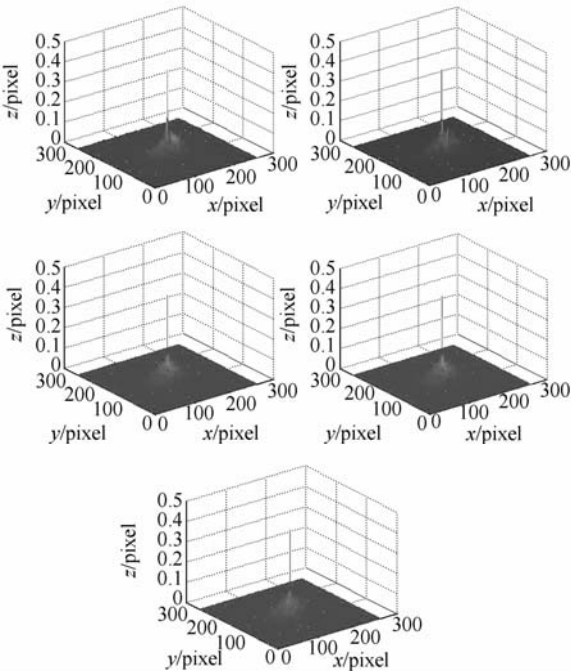
(b) Correlation outputs of training images under improved algorithm

图 3 AMPOF SDF 算法改进前后不同角度训练图像对应的相关输出

Fig.3 Correlation outputs of training images with different rotation angles between original and improved AMPOF SDF algorithms

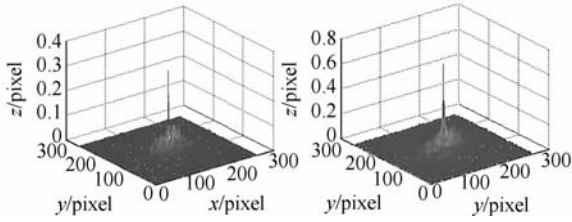
旋转角度间隔更加细化,无疑会大大增加计算量,而且训练图像过多可能会产生一种病态问题^[16],严重降低识别能力,因此要以一定数量的训练图像构建滤波器,尽可能地识别非训练图像^[17-18]。图 4 是旋转角度分别为 13°和 37°的非训练图像在算法改进前后对应的相关输出三维图,和改进前相比,改进后的相关峰值分别提高约 112%和 101%。

对于局部训练图像的识别能力,改进算法也有较好的提高。图 5 是从其中一幅训练图像中截取的局部目标图像,总像素数约占完整目标图像的 20%,图 6 是算法改进前后局部目标训练图像对应的相关输出三维图,改进后的相关峰值提高约 74%。



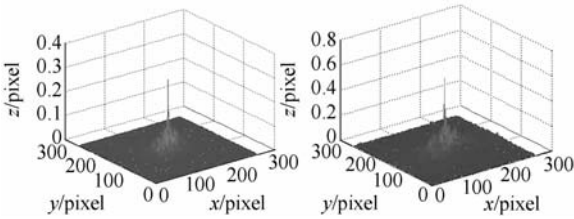
(a) 改进前的训练图像相关输出

(a) Correlation outputs of training images under original algorithm



(a) 旋转角度为 13° 的非训练图像改进前后的相关输出

(a) Correlation outputs of images with a rotation angle of 13° between original and improved algorithms



(b) 旋转角度为 37° 的非训练图像改进前后的相关输出

(b) Correlation outputs of images with a rotation angle of 37° between original and improved algorithms

图 4 AMPOF SDF 算法改进前后非训练图像对应的
相关输出

Fig. 4 Correlation outputs of non-training images with different rotation angles between original and improved AMPOF SDF algorithms

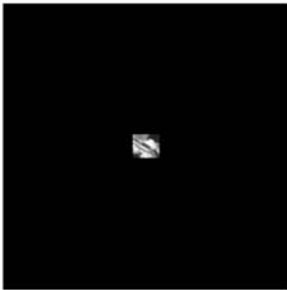


图 5 局部目标训练图像

Fig. 5 Local training image

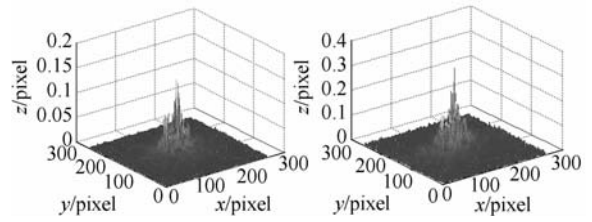


图 6 AMPOF SDF 算法改进前后局部训练图像对应的
相关输出

Fig. 6 Correlation outputs of local training images between original and improved AMPOF SDF algorithms

4 结 论

从仿真实验结果来看,对于实验采用的目标训练图像和非训练图像,改进算法的相关输出峰值大约提高 $95\% \sim 112\%$;对于只有少量像素的局部训练图像,改进算法的相关输出峰值大约提高 74% 。本文提出的优化算法使得振幅匹配和相位匹配更加充分,相关输出增益明显增强,显著提高多种识别条件下的相关峰值,能够一定程度上降低训练量。另外,实验发现即便没有使用迭代算法求解系数向量,相对于传统以及其它改进的 SDF 算法,训练图像序列在系数向量为初始值时各自对应的相关峰值差别并不大。除文中的训练图像外,还使用了若干其它目标图像重复上述实验,均得到相同结论,可见改进算法的稳定性较好,拓展了振幅调制纯相位滤波器与综合鉴别函数在畸变不变模式识别领域的应用。

参考文献:

- [1] 王玉荣,徐鹏,王青圃,等. 光电混合联合变换相关器中各元器件结构参数之间的关系[J]. 光学精密工程, 2005,13(3):376-384.
WANG Y R, XU P, WANG Q P, *et al.*. Relationship between parameters in hybrid optical/electronic joint transform correlator [J]. *Opt. Precision*

- Eng.*, 2005,13(3):376-384. (in Chinese)
[2] HORNER J L, GIANINO P D. Phase-only matched filtering[J]. *Appl. Opt.*, 1984,23(6):812-816.
[3] MU G G, WANG X M, WANG Z Q. Amplitude-compensated matched filtering [J]. *Appl. Opt.*, 1988,27(16):3461-3463.
[4] AWWAL A A S, KARIM M A, JAHAN S R. Im-

- proved correlation discrimination using an amplitude-modulated phase-only filter[J]. *Appl. Opt.*, 1990,29(2):233-236.
- [5] BUTT J A, WILKINSON T D, Wilkinson. Binary phase only reference for invariant pattern recognition with the joint transform correlator[J]. *SPIE*, 2006,6234,62340J:1-11.
- [6] CASASENT D. Unified synthetic discriminant function computational formulation[J]. *Appl. Opt.*, 1984,23(10):1620-1627.
- [7] JEONG K H, POKHAREL P P, XU J W, *et al.*. Kernel based synthetic discriminant function for object recognition [C]. *Proceedings of ICASSP*, 2006:765-768.
- [8] 沈学举,王永仲,姚广涛,等. 扩展等相关峰综合鉴别函数算法研究[J]. *光学精密工程*, 2008,16(1):156-160.
- SHEN X J, WANG Y ZH, YAO G T, *et al.*. Study on extended equal correlation peak synthetic discriminant function algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):156-160. (in Chinese)
- [9] ALAM M S, AWWAL A A S, WHORTER P M, *et al.*. Scale invariant amplitude modulated phase-only filtering[J]. *Optics&Laser Technology*, 2000, 32: 231-234.
- [10] SABA A M E, ALAM M S, SAKLA W. Enhanced rotation and scale invariant target detection using the fringe-adjusted joint transform correlation[J]. *SPIE*, 2006,6245,62450G:1-12.
- [11] HORACHE E H, ALAM M S, LOO C H, *et al.*. SDF-based nonzero-order fringe-adjusted joint transform correlator using binary random phase mask[J]. *SPIE*, 2004,5559:358-368.
- [12] Ángel González-Fraga J, Víctor H. Díaz-Ramírez, Vitaly Kober, *et al.*. Improving the discrimination capability with an adaptive synthetic discriminant function filter[J]. *IbPRIA LNCS*, 2005,3523:83-90.
- [13] JARED D A, ENNIS D J. Inclusion of filter modulation in synthetic-discriminant-function construction[J]. *Appl. Opt.*, 1989,28(2):232-239.
- [14] ENCARNACIÓN P, IGNASI L, SANTIAGO V, *et al.*. Generalization of the Jared-Ennis method to complex transmittance objects for the generation of synthetic discriminant function filters[J]. *SPIE*, 2003,5202:227-236.
- [15] HORACHE E, ALAM M S, LOO C. Optical implementation of SDF-based fringe-adjusted joint transform correlation for invariant pattern recognition[J]. *SPIE*, 2005,5816:152-162.
- [16] TAO C K. Ill-posed problem of the constant-constraint in optical correlation pattern recognition [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995(12):2114-2121.
- [17] HUA W SH, XUE R, ZHANG Y, *et al.*. Experimental investigation of distortion range for synthetic discriminant function filter in optical correlator[J]. *SPIE*, 2005,5642:523-530.
- [18] MELA C L, IEMMI C. Joint-transform correlator tolerant to distortions of the objects to detect[J]. *SPIE*, 2004,5622:1304-1309.

作者简介:



吴丹(1981—),男,安徽无为,人,博士研究生,2003年于电子工程学院获学士学位,2006年于电子工程学院获硕士学位,主要从事光学模式识别的研究。E-mail: ironkite1801@163.com



路远(1971—),男,安徽萧县人,副教授,1998年于电子工程学院获硕士学位,2004年于电子工程学院获博士学位,主要从事光电工程方面的研究。E-mail: luyuanmail@163.com



凌永顺(1937—),男,安徽定远人,中国工程院院士,博士生导师,1960年于北京师范大学获学士学位,主要从事光电工程方面的研究。



李玉波(1966—),男,湖北公安人,讲师,1989年于电子工程学院获学士学位,主要从事计算机应用方面的研究。
E-mail: litonghuilyb@163.com



马超杰(1981—),男,河北武安人,博士研究生,2003年于电子工程学院获学士学位,2006年于电子工程学院获硕士学位,主要从事光学信息处理及目标识别方面的研究。E-mail: coolwinterman@163.com

● 下期预告

微型集成超光谱成像系统

季轶群,官广彪,朱善兵,沈为民

(苏州大学 现代光学技术研究所 江苏省重点实验室,苏州 215006)

介绍了一种便携式高集成度超光谱成像系统,该系统中的光学元件固化在两块胶合而成的普通玻璃表面。优化设计的超光谱成像光学系统由三个同心球面光学元件构成,曲率中心与入射狭缝、CCD接收器位于同一平面内,系统尺寸小于 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 。光学系统工作波段为可见光波段($0.4\sim 0.8\ \mu\text{m}$),相对孔径 $>1:2.5$,放大倍率为 $1:1$,无色畸变、谱线弯曲仅几个纳米,满足物方和像方远心,具有成像质量高、光谱分辨率高、重量体积超轻小、稳定性好、加工容易、成本低等优点,适用于航天、生物医学等领域。