

三维目标旋转畸变不变光学相关 滤波器组的设计

聂守平 卞松玲 刘 峰 李爱民 陶纯堪

(南京理工大学 432 教研室, 南京 210094)

提要 研究了三维目标旋转畸变不变光学相关滤波器组的设计原理, 完成了滤波器组参数的计算和编码, 以及光学相关识别的计算机模拟。

关键词 三维目标, 光学相关, 滤波器组, 计算机模拟

1 引 言

三维目标旋转既包括目标在平面内的旋转, 又包括在空间的俯仰, 基于其投影图像对三维目标旋转进行识别, 即具有面外旋转不变性的模式识别是一个重要的课题, 而模式识别的关键是滤波器的设计。本文从提取目标的本征信息^[1]出发, 由本征图像来设计一组滤波器, 用光学相关识别的计算机模拟验证滤波器组设计正确性。并用计算全息^[2]法完成了滤波器的编码。

2 设计原理

在三维目标旋转畸变不变滤波器组设计过程中, 要求所设计的滤波器满足两个要求: 一为每个滤波器必须包含三维目标各个畸变状态下的完备信息; 二为滤波器组必须能够实现对真假目标的识别。

2.1 三维目标的本征信息

设三维目标的坐标参量为 X , 畸变参量为 P , 则 $f(X; p)$ 表示目标在不同畸变 $p \in P$ 下的畸变图像, 如果一个相关滤波器由 $f^*(X; q)$ 构成, 且输入图像为 $f(X; p)$, 那么光学相关器就在相关平面原点显示两个图像的内积, 即:

$$C^{ff}(p, q) = \int_{R^2} f(X; p) f^*(X; q) dX \quad p \in P, q \in P \quad (1)$$

式中 R^2 为二维平面空间。

可见相关核 $C^{ff}(p, q)$ 包含了图像 f 在畸变集 P 上各种畸变之间的信息, 其本征方程为:

$$\int_p C^{ff}(p, q) \Phi_m(q) dq = \lambda_m \Phi_m(p) \quad (2)$$

式中, λ_m 和 $\Phi_m(p)$ 为本征值和本征矢。

因为 $C^{ff}(p, q)$ 是 Hermitian 的, 本征值 λ_m 是实数, 函数集 $\{\Phi_m(p)\}$ 构成了整个畸变空间上所有图像的完备正交基, 所以任何一幅图像都可以通过这一组完备正交基展开为:

$$f(X; p) = \sum_m f_m(X) \Phi_m(p) \quad p \in P \quad (3)$$

其中系数 $f_m(X)$ 为:

$$f_m(X) = \int_p f(X; p) \Phi_m^*(p) dp \quad (4)$$

可以证明^[2], 系数 $f_m(X)$ 在空间坐标 X 上是正交的。(4) 式表明每一个系数都是由对应的基函数和所有畸变集上图像的线性组合, 其包含了畸变图像的所有信息, 因此称系数 $f_m(X)$ 为对应于畸变图像 $f(X; p)$ 的本征图像, 它是和畸变参量 P 无关的。

上面的分析表明, 采用(3)式对畸变图像集展开, 提取本征信息, 其特点是基函数 $\Phi_m(p)$ 及其系数 $f_m(X)$ 分别在畸变集 P 和空间坐标 X 上是正交的。

2.2 滤波器设计方程组与约束条件

设所要设计的滤波器组为 $g_k(X)$, 为了使其包含所有畸变图像的信息, 可将其表示为:

$$g_k(X) = \int_p f(X; p) a_k^*(p) dp \quad (5)$$

式中 $k = 1, 2, \dots, k$ 为滤波器的序号, $a_k(p)$ 是各个滤波器的权函数。

用正交基 $\{\Phi_m(p)\}$ 对权函数 $a_k(p)$ 展开可得:

$$a_k(p) = \sum_m a_{mk} \Phi_m(p) \quad p \in P \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式, 经过整理可得到滤波器组新的表达形式:

$$g_k(X) = \sum_m a_{mk} f_m(X) \quad (7)$$

实际上(7)式和(3)式的含义是一样的, 不过从(7)式可以更清晰地反映滤波器的组成, 即它是本征图像 $f_m(X)$ 的线性组合。由于本征图像包含了畸变图像的所有信息, 所以由(7)式设计的滤波器组是满足前面所提的第一个要求的, 即每个滤波器必须包含三维目标各个畸变状态下的完备信息。

为了保证每个滤波函数 $g_k(X)$ 中的本征图像具有相同的权重, 也就是使得所设计的滤波器能够对所有畸变集内的图像进行识别, 我们令:

$$|a_{mk}| = d_k \quad (8)$$

除此之外, 滤波器组还要满足前面所提的第二个要求。根据相关原理, 在相关平面原点处产生的畸变响应函数 $C^{fg_k}(p)$ 就是输入图像 $f(X; p)$ 和滤波器 $g_k(X)$ 的内积, 即:

$$\begin{aligned} C^{fg_k}(p) &= \int_{R^2} f(X; p) g_k^*(X) dX \\ &= \sum_m a_{mk} \int_{R^2} f(X; p) \cdot f_m^*(X) dX \\ &= \sum_m a_{mk} \int_p \left[\int_{R^2} f(X; p) \cdot f^*(X; q) dX \right] \Phi_m(q) dq \\ &= \sum_m a_{mk} \int_p C^{ff}(p, q) \Phi_m(q) dq \\ &= \sum_m \lambda_m a_{mk} \Phi_m(p) \end{aligned} \quad (9)$$

从此式可以看出, 畸变响应函数是和相关核的本征值、本征矢以及滤波器系数有关的。如果令 $C_{mk} = a_{mk} \cdot \lambda_m$ 则

$$C^{fs}(p) = \sum_m C_{mk} \Phi_m(p) \quad (10)$$

要想实现对真假目标的识别, 也就是制定一个判别标准, 我们对畸变响应函数加以限制, 即要求其振幅 $|C^{fs}(p)|$ 为常数, 这有三种方法可以实现: 1) 当目标在整个畸变集内改变(即变换 p) 时, $|C^{fs}(p)|$ 为常数; 2) 当滤波器改变(即变换 k) 时, $|C^{fs}(p)|$ 为常数; 3) 当 p, k 都改变时, $|C^{fs}(p)|$ 为常数。其中第一种方法相当于用一个滤波器识别所有目标, 这和我们采用滤波器组的原理不相符; 第三种方法则无法判断是哪一个因素的改变对相关输出有影响。所以只能选择第二种方法, 即 $|C^{fs}(p)|$ 仅仅是畸变参量 p 的函数, 而和滤波器序号 k 无关, 于是令:

$$|C^{fs}(p)| = d(p) \quad (11)$$

至此, 我们从相关核出发, 提取目标的本征信息, 用本征图像来构造滤波函数。(7)式和(10)式构成了滤波器的设计方程组, (8)式和(11)式是对设计方程组提出的两个约束条件。

2.3 相关识别参量

设光学模式识别系统的输入目标为 $f(X; p)$, 滤波器组为 $g_k(X)$, 中心点的输出光强为 $I_p(k)$, 对 k 求平均, 则光强分布的方差为:

$$\sigma_p = \sqrt{I_p^2(k) - [I_p(k)]^2} \quad (12)$$

根据(11)式可知, 输入光强仅仅是 p 的函数而与滤波器序号 k 无关, 则 σ_p 应趋于 0, 若定义相关识别参量 τ_p 为:

$$\tau_p = \overline{I_p(k)} / \sigma_p \quad (13)$$

则 τ_p 应趋向于无穷(实际计算中当 σ_p 趋于 0 时, 令 τ_p 为 10000)。当然这是对真目标而言的。而对于非目标来讲, 由于滤波函数中没有包含其本征信息, 因此非目标的识别参量将远远小于真目标的识别参量, 这也正是用滤波器组来进行模式识别的判别标准。

3 相关识别

3.1 求解滤波器组的参数

图 1 所示为所选取的坦克模型在畸变集内 160 幅畸变图像的一部分, 畸变集 P 包含目标在平面内的旋转和空间的俯仰, 其中:

平面内旋转: $-180^\circ < \theta \leq 180^\circ$

空间俯仰: $-30^\circ < \phi \leq 30^\circ$

通过求解相关核的本征方程, 由(4)式将所有畸变图像转换成类似于图 2 的本征图像。

用迭代法^[2]求解滤波器组的设计方程组, 并同时旋加两个约束条件, 如图 3 所示为所求一组滤波器系数的振幅分布, 从图中可以看出 $|a_{mk}|$ 是随各个滤波器(即不同的 k) 的变化而变化, 但基本上不随 m 变化, 这说明计算结果满足第一个约束条件即(8)式。

将滤波器系数及本征图像代入第一个设计方程, 可以求得滤波器的参数。如图 4、图 5 所示, 为第一个滤波器($k=1$) 在物空间的振幅和位相分布。

用二元计算全息干涉法对所计算出的滤波函数进行编码, 制作相应的全息滤波器如图 6 所示, 大小为 $2 \times 2 \text{ mm}^2$, 最小曝光块尺寸为 $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 。

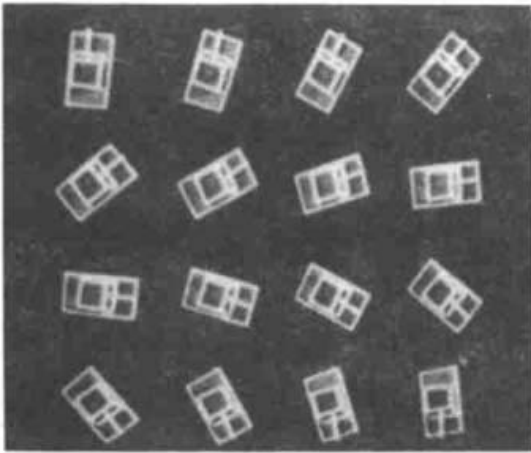


Fig. 1 Distorted images

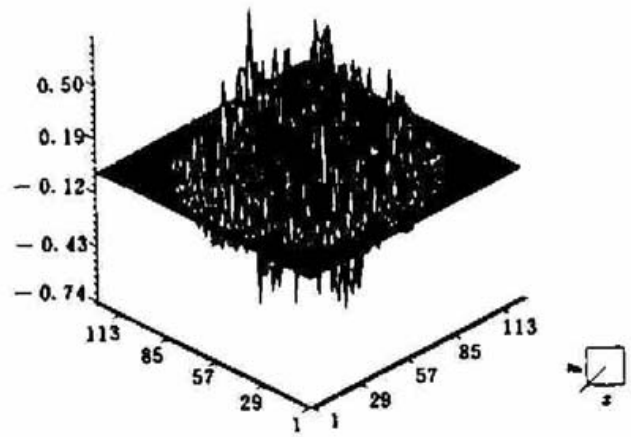


Fig. 2 Eigen image

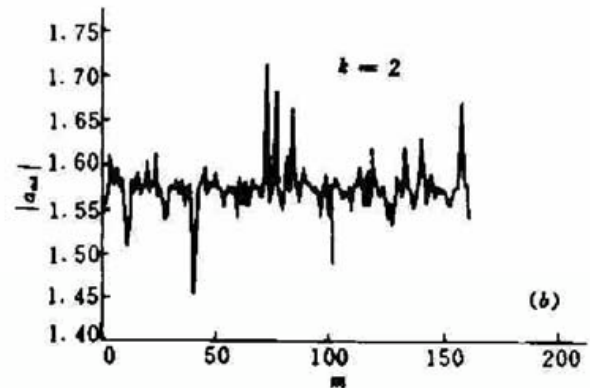
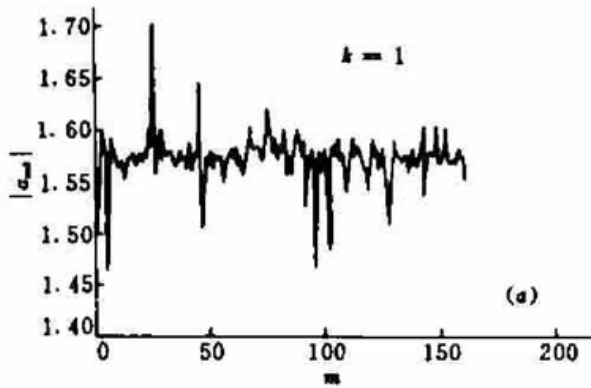
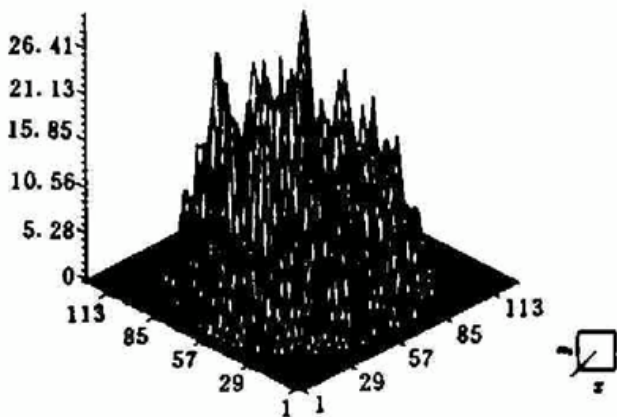
Fig. 3 Amplitude distribution of the filters' coefficient a_m ($k = 1, 2$)

Fig. 4 Amplitude distribution of the filter

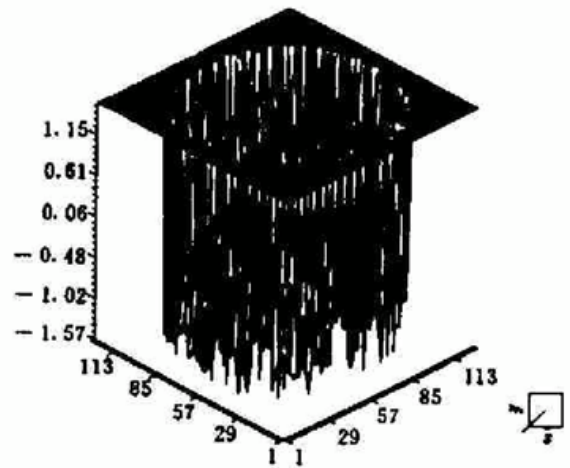


Fig. 5 Phase distribution of the filter

3.2 相关识别计算机模拟

将所采集真目标的 160 幅畸变图像、假目标(常用的各种战车)10 幅图像分别与 5 个滤波器构成的滤波器组进行相关,得到中心点的相关输出光强。由于篇幅所限,任选部分目标的相关输出光强。如图 7 所示,图中实线代表真目标,虚线代表假目标。可以看出,对于真目标中心点的输出光强仅仅是畸变的函数,而和滤波器序号无关,而对于假目标则没有这种特性。因此,所设计的滤波器较好地满足了第二个约束条件即(11)式。

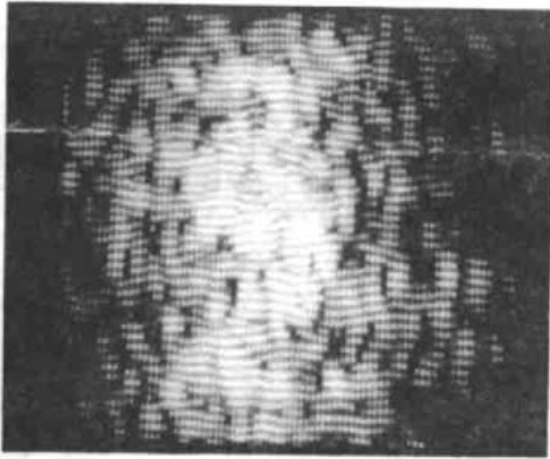


Fig. 6 CGH filter

为了直观起见,将所有目标的相关识别参量表示在图 8 中。图中虚线以上代表真目标,虚线以下代表假目标。可见,真目标的 r_r 值远远大于假目标的 r_r 值,满足真假目标判别标准,所以只要选取一个恰当的阈值 r_0 ,就可以区分出真假目标。

综上所述,本文采用提取本征信息的方法设计滤波器组,具有如下特点:(1)不是直接由畸变图像来构造滤波函数,而是首先从大量的畸变图像集中的相关核出发提取本征信息,然后用这些

本征信息来构造滤波器,使得滤波器能够包含目标的完备信息;(2)所设计的是一组而不是单个滤波器,综合各个滤波器的输出结果对输入目标的真假作出判断;(3)对相关识别参量的定义,使得相关输出的检测得以简化。

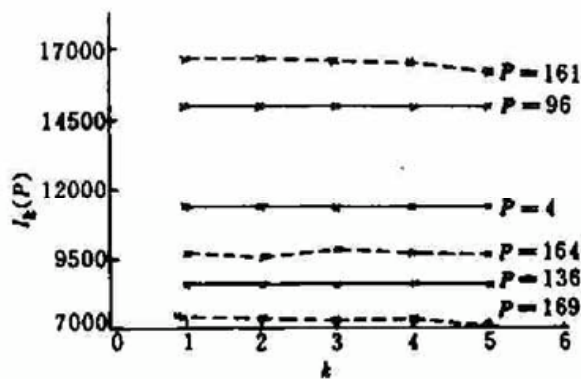


Fig. 7 Correlation output light intensity distribution at the central point

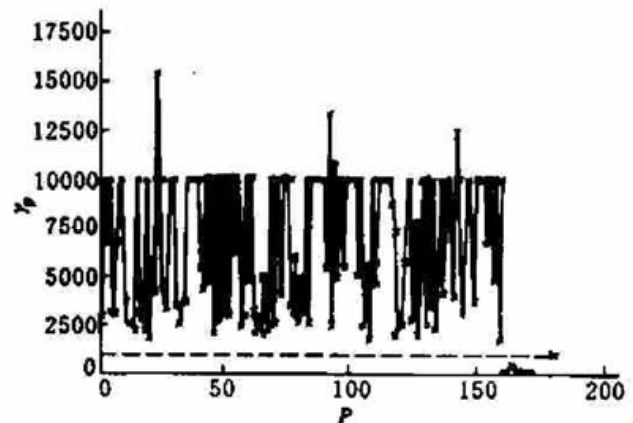


Fig. 8 Correlation recognition parameter distribution

参 考 文 献

- 1 George F. Schills, Donald W. Sweeney. Optical processor of recognition of three-dimensional targets viewed from any direction. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, 5(8): 1309~1321
- 2 Wai-Hon Lee. Binary computer-generated holograms. *Appl. Opt.*, 1979, 18(21): 3661~3669
- 3 George F. Schills, Donald W. Sweeney. Iterative technique for the synthesis of distortion-invariant optical correlation filters. *Opt. Lett.*, 1987, 12(5): 307~309

Design of Three-dimensional Object Rotation Distortion-invariant Optical Correlation Filters

Nie Shouping Bian Songling Liu Feng Li Aimin Tao Chunkan

(No. 432 Teaching and Research Section, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract In this paper, we have studied the design theory of three-dimensional object rotation distortion-invariant optical correlation filters. The parameters of the filters have been computed and coded. Computer simulation of optical correlation recognition has been carried out.

Key words three-dimensional object, optical correlation, filters, computer simulation