

文章编号: 1001-3806(2008)02-0218-04

基于光栅调制的归一化频谱三维识别

雍汉华, 曹益平*

(四川大学 光电技术系, 成都 610064)

摘要: 为了解决三维物体识别速度和识别能力问题, 提出了一种采用光栅调制基频滤波的归一化频谱相关识别新方法。基于归一化频谱相关模型, 对物体平移和旋转后的基频模进行了理论分析和实验论证, 得出了物体基频模具有平移不变性的特性。实验论证了该方法的有效性, 采用该方法不仅能有效识别三维位物体, 而且还能估计物体的旋转角度, 精度优于 $\pm 2^\circ$ 。结果表明, 由于该方法只需投影一幅正弦光栅条纹, 采集一帧变形条纹图, 可以适用于三维物体的动态识别和在线识别。

关键词: 信息光学; 归一化频谱; 基频模; 相关; 平移不变性; 光栅调制; 三维识别

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

Three-dimension recognition of normalized spatial spectrum based on grating modulation

YONG Han-hua, CAO Yi-ping

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: A new normalized first-order spatial amplitude spectrum three-dimension (3-D) recognition method based on grating modulation was presented to speed up and improve ability for 3-D recognition. The theoretical model was established in detail, the properties of rotation and shift were theoretically and practically analyzed to conclude its shift invariant speciality. Experiments showed its flexibility. It can not only recognize 3-D object efficaciously, but also estimate the rotated angle of the 3-D object with higher resolution of $\pm 2^\circ$. Because only one frame of sinusoidal grating needs to be projected and only one frame of the deformed fringe pattern needs to be collected in this method, it may be very suitable to be applied in dynamic or on-line 3-D recognition.

Key words: information optics; normalized spatial spectrum; firstorder spatial amplitude spectrum; correlation; shift invariant; grating modulation; 3-D recognition

引 言

先进制造技术的迅猛发展对产品自动化监测手段提出了更高的要求, 在线三维识别在零件的制造、装配和分选过程中起着非常重要的作用。三维识别方法根据照明方式不同可分为两大类, 一类是以机器视觉为基础的被动三维识别方法, 另一类是以投影结构光场为基础的主动三维识别方法。采用机器视觉方法可以识别零件的位姿, 辅助三坐标机测头正确寻迹, 实现三坐标机的自动化测量^[1]; 可以武装机器人实现加工自动化^[2]; 也可以从复杂场景中有效识别并分离出三维特征物体^[3]; 特别在远距离、大目标三维识别^[4]中突

显其优越性。上述机器视觉三维识别方法主要是从多个视角提取三维特征信息进行三维识别, 要求待识别物体相对静止, 并且数据量很大, 数据融合计算复杂。采用主动结构光投影将高度信息调制在结构光场中, 可使三维识别数据量减小。采用一组精细光纤激光束可实现材料表面的微观瑕疵三维识别^[5]; 采用颜色编码^[6-7]和黑白方格纹理式^[8]结构光投影方法可实现人脸识别, 但这些主动三维识别方法由于光场结构相对复杂, 数据量仍然较大, 识别速度较慢。近来出现的莫尔条纹的三维识别方法^[9-10]和采用正弦光栅投影的相位相关三维识别方法^[11]由于简化了光场结构, 数据量显著减小, 但莫尔条纹三维识别方法对环境振动非常敏感, 仅适合静态三维识别, 而正弦光栅投影的相位相关三维识别方法仍需要较为复杂的解相运算, 识别速度受到一定的限制, 因而难以适应生产线上运动工件的在线识别。本文中针对生产线上产品的在线分选, 提出了一种基于正弦光栅调制的基频滤波归一化

基金项目: 四川省科技攻关基金资助项目 (2006Z01-028)

作者简介: 雍汉华 (1981-), 男, 硕士研究生, 从事光学三维传感及光信息处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: caoyiping@mail.sc.cninfo.net

收稿日期: 2007-02-12; 收到修改稿日期: 2007-05-11

频谱三维识别新方法。该方法只需投影一幅正弦光栅,仅采集一帧受高度调制的变形条纹图,并对其进行傅里叶变换运算,将三维信息表征的基频模频谱岛滤出并归一化处理。基于计算机先前建立好的多重归一化基频模库,通过归一化频谱相关度运算,得到一系列相关峰值,最大相关峰值表征待识别物体与库中物体最佳匹配。只需对最大相关峰值进行判断,即可实现三维物体的识别。实验证实该方法可有效克服外界环境噪声的影响,并且适合动态或在线三维识别的需求。

1 归一化频谱相关识别原理

根据物体面型分布情况,选择载频为 f_0 的正弦光栅投影到物体表面,正弦光栅可表示为:

$$g(x, y) = a + b \cos(2\pi x f_0) \quad (1)$$

式中, a 代表背景光强分布, b 表示光栅调制度。 x, y 表方向, f_0 表载频。由于受到物体高度影响,正弦条纹发生变形。用 CCD 摄像机采集的变形条纹可表示为:

$$g_\alpha(x, y) = a + b \cos[2\pi x f_0 + h_\alpha(x, y)] \quad (2)$$

式中, α 表征不同物体; $h_\alpha(x, y)$ 为 α 物体高度分布引起的相位调制。对 (2) 式作傅里叶变换:

$$G_\alpha(f_x, f_y) = A_\alpha(f_x, f_y) + B_\alpha(f_x - f_0, f_y) + B_\alpha^*(f_x + f_0, f_y) \quad (3)$$

式中, f_x, f_y 分别为沿 x, y 方向的空间频率, A_α 为零频成份, B_α 为包含物体高度信息的基频成份, B_α^* 表示取复共轭。

当载频 f_0 选择合适时,上式中 3 个频谱成分相对独立,不会出现频谱混叠。由于基频模包含物体高度信息,可以选取合适滤波窗口提取基频模,并以基频模为基础探索一种新的三维物体识别方法。当两个物体完全一样时,用上述方法提取的对应基频模完全一样,但受背景光、物体反射率等因素的影响,不同时刻获取的对应物体频谱的权重会有差异,若对基频模作归一化处理,可保证对应物体基频模的一致性。设 B_α 为 $h_\alpha(x, y)$ 基频模, $B_\alpha^{(0)}$ 为 B_α 归一化后的基频模,则归一化频谱可表达为:

$$B_\alpha^{(0)} = B_\alpha / \max\{B_\alpha\} \quad (4)$$

式中, $\max\{*\}$ 表示求最大值算子。假设存在 α_1, α_2 两个物体,用上述方法获取对应归一化基频模分别为 $B_{\alpha_1}^{(0)}, B_{\alpha_2}^{(0)}$ 则两物体的相似度可表征为:

$$\gamma_{\alpha_1 \alpha_2}(i, j) = \frac{\sum_{i_0=1}^M \sum_{j_0=1}^N B_{\alpha_1}^{(0)}(i_0 - i, j_0 - j) B_{\alpha_2}^{(0)}(i_0, j_0)}{[\sum_{i_0=1}^M \sum_{j_0=1}^N B_{\alpha_1}^{(0)}(i_0, j_0)^2 \sum_{i_0=1}^M \sum_{j_0=1}^N B_{\alpha_2}^{(0)}(i_0, j_0)^2]^{1/2}} \quad (5)$$

式中, (i_0, j_0) 为归一化基频模对应元素的横纵坐标, i, j 分别为 $B_{\alpha_1}^{(0)}$ 相对 $B_{\alpha_2}^{(0)}$ 的横向和纵向位移量; $M \times N$ 为滤

波窗口大小; $\gamma_{\alpha_1 \alpha_2}(i, j)$ 为 $B_{\alpha_1}^{(0)}$ 相对 $B_{\alpha_2}^{(0)}$ 分别作横向位移 i 和纵向位移 j 后的互相关度。取 $\gamma_{\alpha_1 \alpha_2}(i, j)$ 中最大值 $\gamma_{\max, \alpha_1 \alpha_2}$, 即相关峰:

$$\gamma_{\alpha_1 \alpha_2}(0, 1) \cdots \gamma_{\alpha_1 \alpha_2}(i, j) \cdots \gamma_{\alpha_1 \alpha_2}(M, N) \quad (6)$$

$\gamma_{\max, \alpha_1 \alpha_2}$ 表征了两物体的相似度,当两物体完全一样时, $\gamma_{\max, \alpha_1 \alpha_2} = 1$; 当两个物体不一样时, $0 < \gamma_{\max, \alpha_1 \alpha_2} < 1$ 。因此可根据 $\gamma_{\max, \alpha_1 \alpha_2}$ 值来识别不同物体。

2 平移和旋转特性

当物体发生平移时,物体表达式为 $h_\alpha(x - x_0, y - y_0)$, 其中 x_0, y_0 是物体在 x, y 方向上的相对位移量。将 $h(x - x_0, y - y_0)$ 代入 (2) 式和 (3) 式得基频分量:

$$B_\alpha'(f_x - f_0, f_y) = B_\alpha(f_x - f_0, f_y) \exp[-j2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)] \quad (7)$$

由上式可知, $B_\alpha'(f_x - f_0, f_y)$ 和 $B_\alpha(f_x - f_0, f_y)$ 仅存在相位上的差别,它们的模是相等的,即具有平移不变性。实验模拟标准物体 h_5 在不同位置的相关峰 $\gamma_{\max, \alpha_1 \alpha_2}$ 如图 1

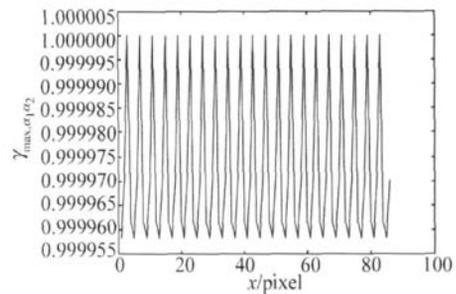


Fig 1 Correlation peak at different shift

所示,从中可以看出其峰谷之差小于 10^{-5} , 这是由计算的量化误差引起的,但比物体形状引起的相关峰 $\gamma_{\max, \alpha_1 \alpha_2}$ 小得多,因此可近似认为相关峰 $\gamma_{\max, \alpha_1 \alpha_2}$ 不变,即平移不变。当物体呈任意角度放置时,有可能影响相关峰 $\gamma_{\max, \alpha_1 \alpha_2}$ 判别,因此分析物体在不同旋转角度下对相关峰的影响是上述方法是否实用的关键。图 2 是

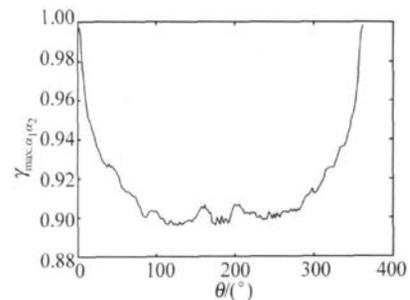


Fig 2 Correlation peak at different angle

将初始角度为 0 标准物体 h_5 按 2° 的步距旋转得到的旋转物体与标准物体的相关峰 $\gamma_{\max, \alpha_1 \alpha_2}$ 变化示意图,从图 2 中可看出,角度对相关峰 $\gamma_{\max, \alpha_1 \alpha_2}$ 影响接近 10%,

为此需要对同一物体建立不同旋转角度下的归一化频谱数据库。对 m 个标准物体 $h_m(x, y)$, 由 (2) 式 ~ (4) 式求得对应归一化基频模 $B_m^{(0)}$, 分别对每个标准放置物体以等角度旋转 n 次, 建立旋转物体模型库, 求得与其对应的归一化基频模库 $B_\theta^{(0)}$:

$$B_\theta^{(0)} = \begin{bmatrix} B_{1, \theta_1}^{(0)} & \cdots & B_{i, \theta_1}^{(0)} & \cdots & B_{m, \theta_1}^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{1, \theta_j}^{(0)} & \cdots & B_{i, \theta_j}^{(0)} & \cdots & B_{m, \theta_j}^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{1, \theta_m}^{(0)} & \cdots & B_{i, \theta_m}^{(0)} & \cdots & B_{m, \theta_m}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

待识别物体 $h_\alpha(x, y)$ 变形条纹的归一化基频模为 $B_\alpha^{(0)}$, 将 $B_\alpha^{(0)}$ 与 (8) 式建立的归一化基频模库中的样本逐一进行相关峰运算, 取相关峰的最大值为判据, 即

实现物体识别。

3 实验结果

用 peaks 函数进行模拟实验, 标准物体库由 6 个不同峰点高度的 peaks 函数组成, 其峰点高度所引起的相位差为 45° , 即:

$$h_i(x, y) = \frac{i\pi}{4} \times \frac{\text{peaks}(x, y)}{\max\{\text{peaks}(x, y)\}}, \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (9)$$

其标准物体库归一化基频模库为 $B^{(0)}$, 因物体可能呈任意角度摆放, 若只建立标准物体归一化基频模库, 可能产生误判。表 1 是标准样本库中 5 号物体按照 20° 步距旋转时归一化基频模 $B_\alpha^{(0)}$ 与标准物体库归一化基频模库 $B^{(0)}$ 的样本作最大相关峰运算情况。从表 1

Table 1 The largest correlation peak distribution between No. 5 object rotated at different angles and the standard samples

rotated angle of No. 5 object / ($^\circ$)	largest correlation peak	sequence number with peak	rotated angle of No. 5 object / ($^\circ$)	largest correlation peak	sequence number with peak	rotated angle of No. 5 object / ($^\circ$)	largest correlation peak	sequence number with peak
0	1.00	5	120	0.93	6	240	0.92	6
20	0.96	5	140	0.92	6	260	0.94	6
40	0.93	5	160	0.91	6	280	0.93	6
60	0.93	5	180	0.92	6	300	0.94	6
80	0.92	4	200	0.92	6	320	0.94	5
100	0.93	6	220	0.92	6	340	0.95	5

中可看出, 当物体处于不同角度时, 最大相关峰值发生改变并在不同的标准样本序号上, 可能引起误判, 如 5 号物体旋转到 80° 附近时被识别成 4 号物体, 而旋转

到 $100^\circ \sim 300^\circ$ 范围内, 被误识别成 6 号物体。因此需对标准物体建立角度的归一化基频模库。对标准物体 $h_i(x, y)$ 按 2° 作旋转建立的归一化基频模库 $B_\theta^{(0)}$:

$$B_\theta^{(0)} = \begin{bmatrix} B_{1,0}^{(0)} & B_{2,0}^{(0)} & B_{3,0}^{(0)} & B_{4,0}^{(0)} & B_{5,0}^{(0)} & B_{6,0}^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{1,180}^{(0)} & B_{2,180}^{(0)} & B_{3,180}^{(0)} & B_{4,180}^{(0)} & B_{5,180}^{(0)} & B_{6,180}^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{1,358}^{(0)} & B_{2,358}^{(0)} & B_{3,358}^{(0)} & B_{4,358}^{(0)} & B_{5,358}^{(0)} & B_{6,358}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其样本数为 6×180 , 按照逐个查找法会导致计算量大, 所以需对 $B_\theta^{(0)}$ 进行分析, 以减少计算量, 提高识别速度。将 $B_\theta^{(0)}$ 中第 1 列各样本分别按行对应作互相关峰运算, 其结果如图 3 所示, 图中线上标号与标准物体库中样本序号相同。从图 3 中可以看出, 对应物体在不同的角度取得的互相关峰相对独立, 具有明显的区分界限, 当待测物体归一化基频模直接与 $B_\theta^{(0)}$ 中第 1 列各样本作互相关峰运算的最大值最接近图中的第几号线时, 只需提取 $B_\theta^{(0)}$ 中以该线号值对应的列样本与待识别物体的归一化基频模作互相关峰运算, 通过最大相关峰即可实现对待测物体的识别。实验中模拟

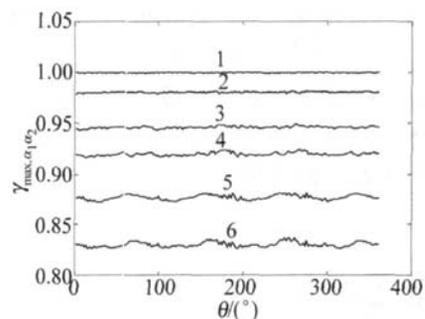


Fig 3 Correlation peak of different objects at corresponding angle
待识别物体 $h_\alpha(x, y)$ 是 5 号物体 $h_5(x, y)$ 呈 60° 放置的情况, 为分析该识别方法的抗干扰能力, 叠加 10%

的随机相位噪声,如图 4a所示,通过光栅调制产生变形条纹如图 4b所示,对应的归一化基频模为 $B_{\alpha}^{(0)}$ 。将

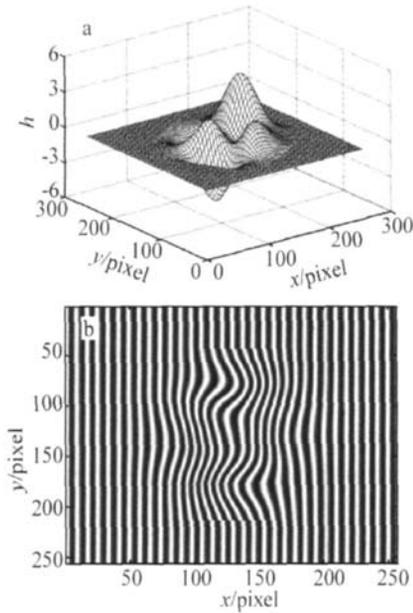


Fig 4 a—the object to be recognized b—the modulated grating $B_{\alpha}^{(0)}$ 分别与 (10)式中的第 1 列作相关度运算,结果如图 5a所示,其最大相关峰值为 0.881,最接近图 3 中的

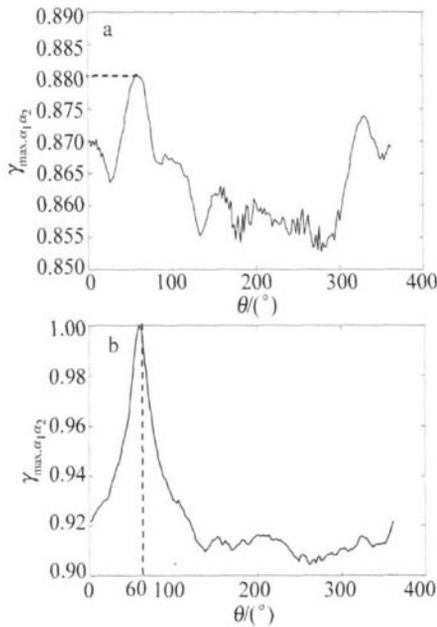


Fig 5 a—correlation peak between the unknown object and the rotation samples of the first object b—correlation peak between the unknown object and the rotation samples of the fifth object

第 5 号线,然后将 $B_{\alpha}^{(0)}$ 分别与 (10)式中的第 5 列作相关度运算,如图 5b所示,最大相关峰值为 0.990,对应样本为 $B_{5,60}^{(0)}$,即待测为旋转 60 的 $h_5(x, y)$ 物体,表明该识别方法是可行的。

4 结 论

基于光栅调制的归一化频谱三维识别方法是一种快速且实时的三维识别方法。该方法通过主动投影正弦光栅,采集一帧变形光栅条纹图,可实现对物体及其摆放角度的有效识别,因而该方法在在线识别和动态识别领域具有广泛的应用前景。为了克服由于库样本较多带来的计算量大的问题,提出了一种减少计算量提高识别速度的方法。该识别方法特别适合于生产线上产品的在线分选。

参 考 文 献

- [1] LU Sh G, ZHAO J C, LI J P, *et al* Automatic recognition for position and orientation of parts in intelligent coordinate measuring system [J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39 (10): 1241-1246 (in Chinese).
- [2] X DNG Y G, QUEK F Machine vision for 3-D mechanical part recognition in intelligent manufacturing environments [C] //Proceedings of the Third International Workshop on Robot Motion and Control Poznan: Poznan University Technology, 2002: 441-446.
- [3] AJMAL S M, MOHAMMED B, OWENS R. Three-dimensional model-based object recognition and segmentation in cluttered scenes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28 (10): 1584-1601.
- [4] SUMANTRA D R, SANTANU C, SUBHASH IS B. Recognizing large isolated 3-D objects through next view planning using inner camera invariants [J]. IEEE Transactions on System Man and cybematics, 2005, 35 (2): 282-292.
- [5] ABUAZZA A, BRABAZON D, EI-BARAD IEM A. Multi-beam fibre-optic laser scanning system for surface defect recognition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156 (1-3): 2065-2070.
- [6] TSALAKAN DOU F, FORSTER F, MALASSDTIS S, *et al* Real-time acquisition of depth and color images using structured light and its application to 3-D face recognition [J]. Real-Time Imaging, 2005, 11 (5-6): 358-369.
- [7] ZHAO M H, YOU Zh Sh, YU J, *et al* Pose robust face recognition based on CASPCM model [J]. Laser Technology, 2006, 30 (4): 429-435 (in Chinese).
- [8] DANN ISA K, GEORPDS P, GEORGE T, *et al* Three-dimensional face recognition in the presence of facial expressions: an annotated deformable model approach [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29 (4): 640-649.
- [9] PROOZAN P. Pressure measurement and pattern recognition by using neural network [C] //Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers Dynamic Systems and Control Division New York: A-merican Society of Mechanical Engineers, 2005: 897-905.
- [10] WANG H X, SU X Y, LU J. Method for 3-D object recognition based on moire fringe [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16 (3): 348-353 (in Chinese).
- [11] SONG W Zh, SU X Y. 3-D object recognition based on structured light projection [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 1999, 10 (1): 59-62 (in Chinese).