

# 光电混合联合变换相关器的三维跟踪原理

邓 岗 连铜淑

(北京理工大学工程光学系, 北京 100081)

**摘 要** 把联合变换相关原理引入视差测距系统, 从而使该系统在一次图像相关处理中同时求出运动目标的方向变化和与距离值有确定唯一关系的视差。本文作了原理性实验。相关平面照片上清晰地显示出了表示运动目标方向变化和视差的各对相关点。

**关键词** 测距, 光电混合处理, 联合变换相关器, 机器人视觉, 目标跟踪。

## 1 引 言

近年来, 国内外许多学者开始利用空间光调制器作联合变换相关器的研究。Yu<sup>[1]</sup>等人成功地用液晶电视(LCTV)作空间光调制器做成联合变换相关器并用其作了多目标的跟踪实验, 而Sloan<sup>[5]</sup>等人也成功地用液晶电视构成的光学相关器进行了光纤制导飞行实验。他们的研究成果表明了光电混合联合变换相关器可以用于物体的二维跟踪。随着集成光学技术的发展, 这种相关器可以被制造成很小的一个功能单元。Jain<sup>[6]</sup>等人曾提出利用超声波和波导技术制造空间光调制器, 并设计了一种集光调制器、傅里叶变换透镜、光子探测器为一体的光学相关器。毫无疑问, 这为光学相关器的应用开辟了更广阔的前景。

视差测距技术的实质是左右两成像系统的图像相关识别, 从这个意义上讲, 这一技术将在机器人视觉等三维测量上很有应用价值。用两个光轴平行的 CCD 摄像机分别接收目标对系统成像, 再对其作图像联合变换相关运算就可以求出相应目标对这一系统的视差值, 由此可算出其距离。这样的系统称为视差测距系统。对于运动目标, 将其对该系统的时间序列图像和对其左右两成像系统的图像同时作联合变换相关运算, 于是, 其相关平面上出现了表明某一时刻的目标运动方向变化和距离值的两对相关点。在本文中, 详细研究了根据这些相关点坐标求运动目标方位和距离的理论和方法; 同时, 还用光电联合变换相关器做了有关实验。结果表明, 目标方位和系统对目标所作的联合变换相关点有对应的位置关系; 本文提出的方法是有效的。

## 2 视差测距原理

设一个由两个 CCD 摄像机构成的理想视差测距系统, 其成像透镜为  $L_L$  和  $L_R$ , 焦距为  $f$ , 基线长  $B$ , 如图 1 所示。设一目标  $T$  在  $K$  时刻离该系统距离为  $H^{(K)}$ , 而  $H^{(K)}$  相对  $f$  很大, 即像

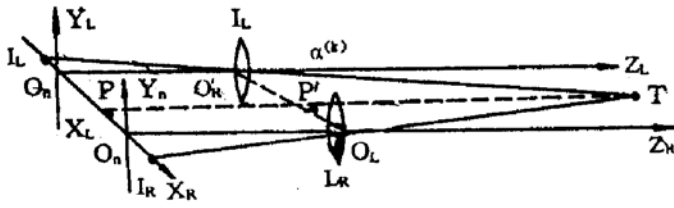


Fig. 1 Imaging principle of the system.  $L_L$  and  $L_R$  are two imaging lens with its parallel optical axes.  $I_R$  and  $I_L$  are image of the target  $T$

面接近焦面。那么：

$TP' = H^{(K)}$ ,  $PP' = f$ ,  $O_L O_R = O'_L O'_R = B$ , 为简化推导设目标位于其光轴平面上。设左成像系统像面坐标系为  $X_L O_L Y_L$  右成像系统像面坐标系为  $X_R O_R Y_R$ 。在  $K$  时刻目标对左右两成像系统所成像的位置坐标为  $I_L(x_L^{(K)}, 0)$  和  $I_R(x_R^{(K)}, 0)$ 。 $\alpha^{(K)}$  是目标  $T$  对左成像系统的方位角。则可推得

$$H^{(K)} = Bf/\Delta x^{(K)}, \quad \Delta x^{(K)} = x_R^{(K)} - x_L^{(K)} \tag{1}$$

式中的  $\Delta x^{(K)}$  即是目标在  $K$  时刻对视差测距系统的视差。因此，只要能求出目标对视差测距系统的视差  $\Delta x^{(K)}$  就可以根据(1)式算出该目标在  $K$  时刻对该系统的距离  $H^{(K)}$  值。

### 3 系统联合变换相关原理

设在  $K$  时刻目标对视差测距系统左右两个成像系统的像分别为

$$f_L^{(K)}(X_L - x_L^{(K)}, Y_L), \quad f_R^{(K)}(X_R - x_R^{(K)}, Y_R) \tag{2}$$

那么， $K - 1$  时刻目标对其左成像系统的像为：

$$f_L^{(K-1)}(X_L - x_L^{(K-1)}, Y_L) \tag{3}$$

为了实现这三个图像的联合相关变换，必须用它们在一个左标系  $XOY$  中构成一个图像函数。如图 2 所示，把右成像系统的像面坐标系  $X_R O_R Y_R$  平移至  $XOY$  中的位置  $O_R(X_{RO}, Y_{RO})$ ，把左成像系统像面坐标系  $X_L O_L Y_L$  平移至  $XOY$  中的位置  $O_L(X_{LO}, Y_{LO})$  和  $O'_L(X_{LTO}, Y_{LTO})$ 。在  $X_R O_R Y_R$  中的图像是  $f_R^{(K)}$ ；在  $X_L O_L Y_L$  中的图像是  $f_L^{(K)}$ ；在  $X_L O'_L Y_L$  是图像  $f_L^{(K-1)}$ 。于是，在图 2 所示的坐标里可得如下图像：

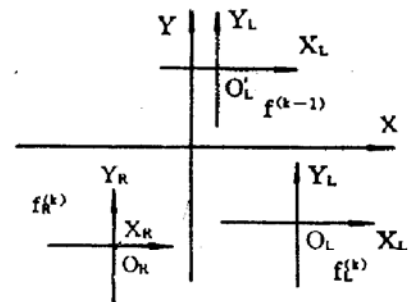


Fig. 2 Coordination transform of the images

$$\begin{aligned} g(X, Y) &= f_L^{(K)}[X - X_{LO} - x_L^{(K)}, Y - Y_{LO}] \\ &\quad + f_R^{(K)}[X - X_{RO} - x_R^{(K)}, Y - Y_{RO}] \\ &\quad + f_L^{(K-1)}[X - X_{LTO} - x_L^{(K-1)}, Y - Y_{LTO}] \\ &= f_L^{(K)}[X, Y] \otimes \delta[X - X_{LO} - x_L^{(K)}, Y - Y_{LO}] \\ &\quad + f_R^{(K)}[X, Y] \otimes \delta[X - X_{RO} - x_R^{(K)}, Y - Y_{RO}] \\ &\quad + f_L^{(K-1)}[X, Y] \otimes \delta[X - X_{LTO} - x_L^{(K-1)}, Y - Y_{LTO}] \end{aligned} \tag{4}$$

式中  $\otimes$  表示卷积。其傅里叶变换和功率谱分别为：

$$\begin{aligned} G(u, v) &= F\{g(X, Y)\} = F_L^{(K)}(u, v) \exp\{-2\pi j[u(X_{LO} + x_L^{(K)}) + vY_{LO}]\} \\ &\quad + F_R^{(K)}(u, v) \exp\{-2\pi j[u(X_{RO} + x_R^{(K)}) + vY_{RO}]\} \\ &\quad + F_L^{(K-1)}(u, v) \exp\{-2\pi j[u(X_{LTO} + x_L^{(K-1)}) + vY_{LTO}]\} \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} I(u, v) &= G(u, v)G(u, v)^* = |F_L^{(K)}(u, v)|^2 + |F_R^{(K)}(u, v)|^2 + |F_L^{(K-1)}(u, v)|^2 \\ &\quad + \exp\{-2\pi j[-u(A_x + \Delta x) - vA_y]\} \cdot F_L^{(K)}(u, v)[F_R^{(K)}(u, v)]^* \\ &\quad + \exp\{-2\pi j[u(A_x + \Delta x) + vA_y]\} \cdot F_R^{(K)}(u, v)[F_L^{(K)}(u, v)]^* \\ &\quad + \exp\{-2\pi j[u(C_x + \Delta Ax^{(K)}) + vC_y]\} \cdot F_L^{(K)}(u, v)[F_L^{(K-1)}(u, v)]^* \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \exp \{-2\pi j[-u(C_x + \Delta A_x^{(K)}) - vC_y]\} \cdot F_L^{(K-1)}(u, v) [F_L^{(K)}(u, v)]^* \\
& + \exp \{-2\pi j[u(D_x + \Delta A_{xRL}^{(K)}) + vD_y]\} \cdot F_R^{(K)}(u, v) [F_L^{(K-1)}(u, v)]^* \\
& + \exp \{-2\pi j[-u(D_x + \Delta A_{xRL}^{(K)}) - vD_y]\} \cdot F_L^{(K-1)}(u, v) [F_R^{(K)}(u, v)]^* \quad (6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_x &= X_{RO} - X_{LO}, \quad A_y = Y_{RO} - Y_{LO}, \quad \Delta A_x^{(K)} = x_L^{(K)} - x_L^{(K-1)}, \quad \Delta A_{xRL} = x_R^{(K)} - x_L^{(K-1)}, \\
D_x &= X_{RO} - X_{LTO}, \quad D_y = Y_{RO} - Y_{LTO}, \quad C_x = X_{LO} - X_{LTO}, \quad C_y = Y_{LO} - Y_{LTO}, \quad (7)
\end{aligned}$$

此式就是目标对视差测距系统成像的联合变换功率谱。对其作如下逆傅里叶变换，即：

$$\begin{aligned}
I_R(X, Y) &= F^{-1}\{I(u, v)\} = [f_L^{(K)}(X, Y) \star f_L^{(K)}(X, Y) + f_R^{(K)}(X, Y) \star f_R^{(K)}(X, Y) \\
&+ f_L^{(K-1)}(X, Y) \star f_L^{(K-1)}(X, Y)] \cdot \delta[X, Y] \\
&+ \delta[X + A_x + \Delta x^{(K)}, Y + A_y] \cdot f_L^{(K)}(X, Y) \star f_R^{(K)}(X, Y) \\
&+ \delta[X - (A_x + \Delta x^{(K)}), Y - A_y] \cdot f_L^{(K)}(X, Y) \star f_R^{(K)}(X, Y) \\
&+ \delta[X + (C_x + \Delta A_x^{(K)}), Y + C_y] \cdot f_L^{(K)}(X, Y) \star f_L^{(K-1)}(X, Y) \\
&+ \delta[X - (C_x + \Delta A_x^{(K)}), Y - C_y] \cdot f_L^{(K-1)}(X, Y) \star f_L^{(K)}(X, Y) \\
&+ \delta[X + (D_x + \Delta A_{xRL}^{(K)}), Y + D_y] \cdot f_R^{(K)}(X, Y) \star f_L^{(K-1)}(X, Y) \\
&+ \delta[X - (D_x + \Delta A_{xRL}^{(K)}), Y - D_y] \cdot f_L^{(K-1)}(X, Y) \star f_R^{(K)}(X, Y) \quad (8)
\end{aligned}$$

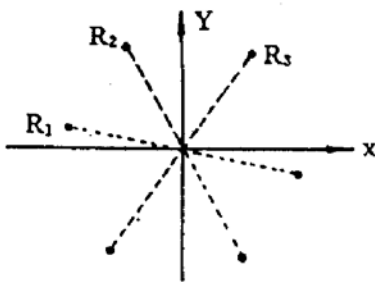


Fig. 3 Distribution of the correlation peaks each pair of peaks is indicated by one dot-line connecting them

式中 $\star$ 表示相关运算。由上可见，逆傅里叶变换的结果是得到了如下结果，如图3所示：

- 1) 分布在坐标原点的图像的自相关；
- 2) 分布在坐标系中的三对相关点： $R_1[\pm(A_x + \Delta x^{(K)}), \pm A_y]$ ， $R_2[\pm(C_x + \Delta A_x^{(K)}), \pm C_y]$ ， $R_3[\pm(D_x + \Delta A_{xRL}^{(K)}), \pm D_y]$ 。当目标距离与视差测距系统的基线长相比足够大，即  $H \gg B$  时，同一目标对该系统所成两个像的形状几乎一样，即：

$$f_L^{(K)}(X, Y) = f_R^{(K)}(X, Y)$$

同时，当  $K$  时刻与  $K-1$  时刻的时间间隔足够短以致运动目标对本系统的成像形状变化很小。即有：

$$f_L^{(K)}(X, Y) = f_L^{(K-1)}(X, Y)$$

于是，上述三对相关点为三对极大点。而在第一和第二对相关点中分别含有目标对本系统的视差  $\Delta x^{(K)}$  和目标对于左成像系统的方向变化量  $\Delta A_x^{(K)}$ 。而其它的参数都是常量，所以只要求出  $R_1$  和  $R_2$  的坐标值，就可以求出目标对测距系统的视差  $\Delta x^{(K)}$  和对于左成像系统的方向变化量  $\Delta A_x^{(K)}$ 。

#### 4 系统的三维测量原理

本文为了简化推导，假设了目标在系统光轴平面上运动。因此，目标对系统的方位参数实际上仅有两个，即图1所示的方位角  $\alpha^{(K)}$  和距离  $H^{(K)}$ 。

设测得的  $R_1$  和  $R_2$  的坐标值分别为  $X_1^{(K)}$  和  $X_2^{(K)}$ ，即  $X_1^{(K)} = A_x + \Delta x^{(K)}$ ， $X_2^{(K)} = C_x + \Delta A_x^{(K)}$ 。那么  $\Delta x^{(K)} = X_1^{(K)} - A_x$ 。代入(2)式可得如下求目标距离的理论公式：

$$H^{(K)} = \frac{Bf}{X_1^{(K)} - A_x} \quad (9)$$

式中  $B$  为系统基线长， $f$  为成像系统的焦距， $A_x$  为图像  $f_L^{(K)}$  和图像  $f_R^{(K)}(X_R - x_R^{(K)}, Y_R)$  的坐标原点之间在  $X$  轴方向的距离，是一既定常数， $X_1^{(K)}$  为相应的相关点的  $X$  坐标。在文献[7]

中，作者结合系统的结构参数详细研究了求目标距离的算法。当系统不作跟踪运动时，设目标的初始位置在左成像系统的光轴上，即：

$$\begin{aligned}
 X_L^{(0)} &= 0, \\
 X_L^{(K)} &= \Delta A_z^{(K)} + X_L^{(K-1)} = X_2^{(K)} + X_L^{(K-1)} - C_z
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

因此，从图 1 可知目标的方向角  $\alpha^{[K]}$  为：

$$\alpha^{[K]} = \text{tg}^{-1} [X_L^{(K)}/f] = \text{tg}^{-1} [X_2^{(K)} + X_L^{(K-1)} - C_z/f]
 \tag{11}$$

由此递推公式可以求出目标在每一时刻的方位角。

在此基础上，结合具体的跟踪方式可实现跟踪。即用左摄像系统作方向跟踪。这同用光电混合联合变换相关器进行纯粹的方向跟踪<sup>[1]</sup>是一样的。

### 5 视差测距系统光电混合联合变换相关器的构成及其工作原理

图像的联合变换相关运算可以用纯电子电路完成也可以用光电混合的方法完成。目前，光电混合联合变换相关器在制导跟踪方面已取得了很大的成功。它的特点是用两次光学傅里叶变换完成相关运算，而用计算机图像处理技术作其予处理和图像传递。与纯电子相关运算相比，它的图像相关运算是并行的，因此，其运算速度更高。与纯光学相关器比，它的结构更紧凑。所以，本文选用光电混合和联合变换相关器对视差测距系统的图像作联合相关运算。其示意图如图 4 所示。

计算机控制图像采集板通过 CCD<sub>1</sub> 和 CCD<sub>2</sub> 抓取到目标的像并压缩二分之一，然后再将其显示于液晶电视屏上，如图 5 所示。

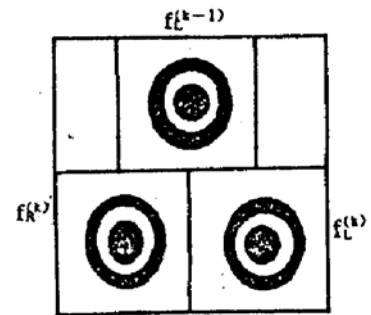
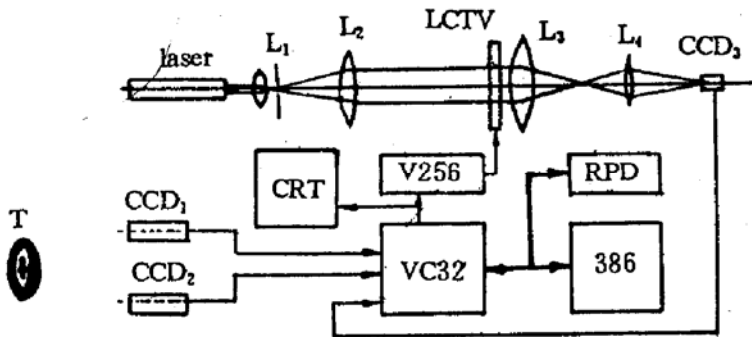


Fig. 4 Joint transform correlator of the distance measuring system

Fig. 5 Location of target images on the LCTV screen

L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>: collimating lens, RPD: detector of correlation peaks, L<sub>4</sub>: len, LCTV: liquid crystal TV, V256: image collector, 386: computer, L<sub>3</sub>: F. T. len, VC32: image processor

傅里叶透镜 L<sub>3</sub> 对液晶电视屏上的图像作傅里叶变换。成像透镜 L<sub>4</sub> 对其频谱放大后并将其成像于 CCD<sub>3</sub> 摄像机的 CCD 面阵上。由于 CCD 摄像机是平方律成像器件，所以 CCD<sub>3</sub> 接收到的是如(12)式所示的功率谱。计算机再次控制图像采集板抓取该功率谱并将其显示于液晶电视屏上。傅里叶透镜 L<sub>3</sub> 再次对液晶电视屏上的功率谱图像作傅里叶变换。由于傅里叶变换与逆傅里叶变换仅差一符号，即其结果左标方向相反。所以，可以认为此变换与上面的理论推导一致。这时的变换结果即为相关，它被成像透镜 L<sub>4</sub> 放大后成像于 CCD<sub>3</sub> 摄像机的 CCD 面阵上，其分布如图 3 所示。

由于本实验装置器件性能难以满足定量测量的要求，所以本文仅作定性的实验，以说明

目标的距离和方向变化与相应的相关点位置变化规律。

### 6 实验结果

在实验中，考虑到液晶电视屏上栅格的衍射所造成的一个十分明亮的亮线会影响相关点  $R_2$  的分辨而使视差测距系统的左右两摄像机在 Y 轴方向上错开一定距离。这样放置的结果是使左右两像的 Y 向间隔不为零。因此，相关点  $R_2$  不位于 X 轴上，而位于某一平行于 X 轴的直线上。当然  $R_3$  也会随之沿 Y 轴发生偏移。这样  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  就容易分辨了。

如图 6 所示，一目标从 A 运动到 B。A、B 两处相对于视差测距系统距离基本不变。接着目标从 B 运动到 C。从 B 到 C，目标对于该系统的方向变换较小，而距离变化较大。

图 7 是一组利用上述原理和实验装置对一个目标进行三维跟踪的测试结果。

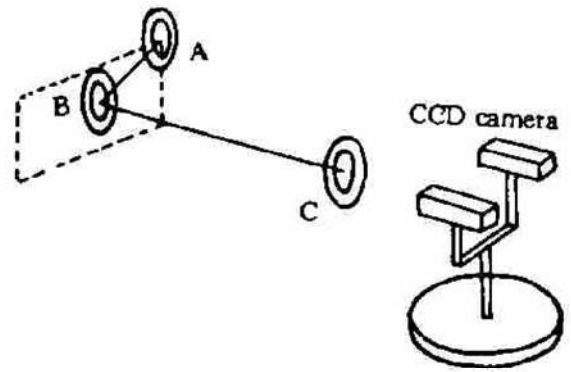


Fig. 6 Moving track of the experimental target. The target moves from A to B, then to C

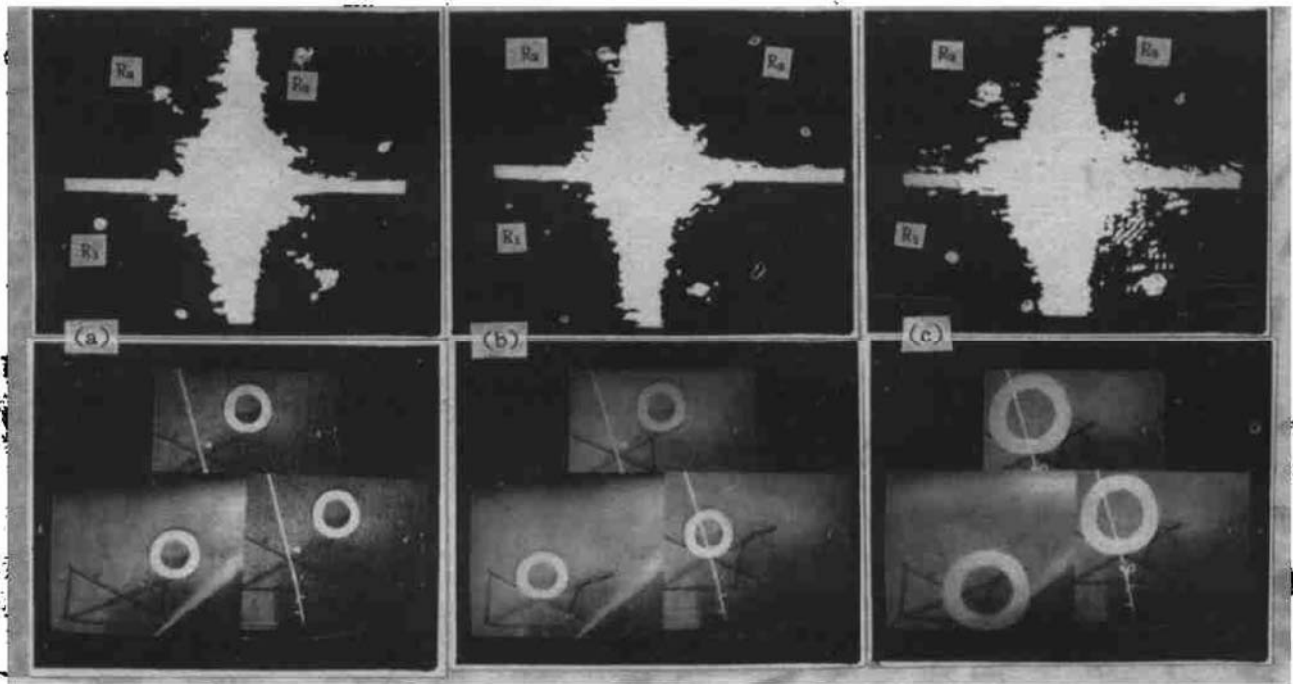


Fig. 7 Experimental results (a) processing results for the target standing on A position, (b) for the target moving from A to B, (c) for the target moving from B to C.  $R_1$  is a pair of correlation peaks concerning with the distance of target,  $R_2$  with its direction, and  $R_3$  is a pair of meaningless correlation peaks

设 A 位置是目标运动的初始位置。当目标位于 A 位置时，系统对其作一次处理，其结果如图 7(a) 所示。此时目标没有移动，因此  $R_2$  位于 2、4 象限的基准位置。而 1、3 象限 X 轴（水平亮线）附近的一对点即表示目标在 A 位置对 CCD 摄像系统的视差的相关点  $R_1$ 。而另一 Y 轴（垂直亮线）附近的亮点即  $R_3$ 。由此可见，这三对相关点非常明显地互相分开。因此，分别测出它们的坐标是完全可行的。

目标从 A 位置运动到 B 位置后，系统再次抓取目标的图像并进行处理，其结果如图 7 所示。由图中可看出  $R_2$  的位置变了，由于这期间目标的距离变化很小，故靠近 X 轴的  $R_1$  位置

几乎不变。正如所有用于目标跟踪的联和变换相关器一样， $R_2$  的位移量与目标对实验系统的方向变化成线性关系。

目标从 B 向 CCD 摄像系统移动到 C 时，系统的处理结果如图 7(c)。由于目标从 B 运动到 C 时相对 CCD 摄像机的方向变化很小，所以，正如 A 情形一样， $R_2$  基本上仍在其基准位置，但是与目标距离有关的相关点  $R_1$  的 X 轴的位置却变化很大。这与上面的理论推导一致。注意  $R_1$  在 Y 轴方向的位置变化主要由两摄像机在 Y 轴方向上的错位放置而引起。

由此可见，实验表明在视差测距系统中，利用光电混合联合变换相关器，完全可以检测出运动目标的空间位置。

**结 论** 本文通过理论分析，提出了将视差测距系统与光电混合联合相关变换器结合，而完成对运动目标进行方向和距离的三维跟踪的方法原理，并用实验装置定性验证了这一原理。其重要意义之一就是可以在一次相关处理中同时求出运动目标的方向变化量和距离，从而为目标的三维跟踪提供了新方法，并为光电混合联合变换相关器开辟了新的应用领域。

在实验过程中，作者得到赵跃进博士、曲鲁杰老师、张庆生老师的关心和帮助，特在此感谢！

### 参 考 文 献

- [1] 刘培森编著，应用傅里叶变换。北京，北京理工大学出版社，95~100
- [2] Francis T. S. Yu, Eddy C. Tam, Aris Tanone *et al.*, Data Association multiple target tracking using a phase-  
mostly LCTV. *Opt. Engng.*, 1990, 29(9): 1114~1121
- [3] Kenneth H. Fielding, Joseph L. Horner, 1-f binary joint transform correlator. *Opt. Engng.*, 1990, 29(9): 1081  
~1087
- [4] David L. Flannery, John S. Loomis, Mary E. Milkovich *et al.*, Application of binary phase-only correlation to  
machine vision. *Opt. Engng.*, 1988, 27(4): 309~320
- [5] Jeffery A. Sloan, Lewis A. Holloway Jr. A self-serving optical correlator for tracking. *Proc. SPIE*, 1989, 1151  
: 307~317
- [6] F. C. Jain, K. K. Bhattacharjee, Multiple quantum well spatial light modulator structure using surface acoustic wave  
induced stark effect. *Proc. SPIE*, 1989, 1151: 495~506
- [7] 邓 岗, 连铜淑, 光电混合联合变换相关器在测距中的应用. 光学技术, 1994, (2): 30~36

## Three-Dimensional Trace Principle of the Electro-Optical Hybrid Joint Transform Correlator

Deng Gang      Lian Tongshu

(Department of Engineering Optics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

(Received 15 January 1994; revised 21 March 1994)

**Abstract** This paper introduces the principle of joint transform correlation to a CCD ranging system. As a result, the joint transform correlation of its images shows that the correlation peaks and locations are determined only by direction variation and distance respectively. Experimental pictures clearly show the peaks.

**Key words** stereo measurement, electro-optical hybrid process, joint transform correlator, machine vision, target trace.