

激光测体积术

提要—激光测体积术是利用激光器直接对非编码的三维物体信息照相的技术。这里描述的特殊激光测体积仪利用了当锁模脉冲激光入射到物体上,在光的回波中与距离有关的时间延迟。在物体的几米深处达到了小于毫米的深度分辨率。

I 诸 言

逐渐增长的对周围环境中物体的定量的三维或“测体积”信息的要求,有助于使人们把注意力集中在测体积传感器技术的可能改进上。在这方面,最近参与人工智能工作的人员以及在新的仿生测体积术领域的研究者已完成了许多工作,这是以解析几何原理为依据的生物学形式和功能的空间和时间分析完成的。但是,一般认为目前测体积手段的装备能够而且应当有更大的进展。

测体积传感器的最简单型式是从早期测量引伸出来的机械装置。15世纪 Leon Battista Aeberti 利用改进了的这种装置反复推敲,测量和复制了一个雕刻品。摄影光学,电子光学和其它更奇特的测体传感器已有很长的历史,这可以追溯到古代天文学所用的仪器。

最近的方法(十九世纪中期发明的)是以近距离立体摄影测量术为基础的。虽然最近几年由于它发展的缓慢、价格昂贵、结构太复杂,或者其它一些原因,常常受到人们的批评,但是因为一个简单的原因这些批评被容忍了,即它是在形形色色的条件下对各式各样的物体作测量的。在朝着立体图象分析手续自动化的方向已经有了一些进展,但是完满地解决方法还没有找到。与此同时半自动立体摄影测量的方法继续广泛地应用,而且十分有效。

最近二十年,各种干涉方法,主要是那些以全息照相和波纹干涉为基础的方法,对于测体传感器来说,是有希望的,但是实际问题限制了它们定量分析大动态范围的物

体,例如人体的应用。

重要的是注意到,三维图象记录和立体成象[2]的目的是完全不同的,因为前者必须使之最适宜人们的观察,而后者必须使之最适合于自动测量。例如全息照相给出一个理想的三维象(这个象用光学方法能从物体探测出来,但是很难用于测体积术,而且不适于在长距离上工作)。一旦了解了这个主要差别我们就能把注意力转到这样一个技术上,对于人的观察它可能没有什么价值,但对与全息照相相反的测体积术则很有价值。这就是本文开始着手所遵循的线索。

这样一个测体积术的方法最近已经描述过了。本文概括了这个方法的物理基础(以激光测距为依据)看来它对广泛应用目前可获得的各种传感器是一个有益的补充。

II 基础方案

激光测距轮廓仪是一个利用锁模激光器,透镜系统和超速扫描相机的简单装置,它瞬时地从沿着图象的一条线上的各点抽出距离数据。结果是直接产生和记录了物体的距离轮廓。允许把这个系统改进成一个绝对测距轮廓仪。另一些改进改善了它的其它方面的性能。在讨论这些改进之前,我们将详细研究一下简单激光测距轮廓仪。

图1说明基本装置。物体被从锁模激光器发出的准直光照明。朝着光沉向后散射的光线用来形成物体的普通象。在象面上放一个狭缝,它把我们的注意力限制在横过物体的窄条上,如图1所示。用超速扫描相机把不同的时间延迟(由于物体上深度的变化)转换成相应的空间延迟。于是显示了一个二

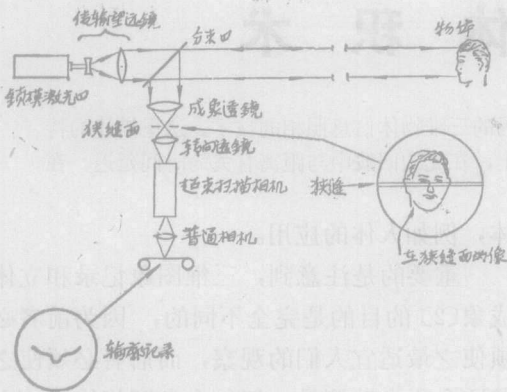


图1 表示狭缝在像面位置和所得到的轮廓的基本激光测体本

维表面。一个方向对应于狭缝在象面上的横向位置。另一方向对应于在每一横向位置处物体相对深度。两个方向（今后称“横向”和“纵向”）都是线性记录的（忽略光学和电子学透镜畸变和非线性扫描速率）但是，由于不同的放大倍率它们又是和物体的实际横向和距离方向有关系的。

III 放大率

几何和光学放大系数把物体表面 $S(u, v, z)$ 和超速扫描相机荧光平面上沿 ξ 和 η 轴的量联系起来。为避免多余的记号，我们将把狭缝面 (x, y) 上的所有放大率总括为荧光面 (ξ, η) 上的单一相机放大系数 M_c 。于是狭缝面上的尺度 Δx 的特征变换成荧光面上尺度 $M_c \Delta x$ 的特征。狭缝平面包含一个物体普通象，其放大倍率是

$$M_c = f / (R - f) \quad (1)$$

式中 f 是透镜的焦距， R 是物体到透镜的距离。当然，通常有：

$$M_L \cong f / R \quad (2)$$

于是在非扫描工作状态，超速扫描相机包含物体通过狭缝的那部分截面的象，被放大了 $M_L M_c$ 倍。令狭缝平行 x 轴（这个规定并不限制狭缝或图象在真实空间的取向）其中心 $y = y_0$ ，狭缝宽 Δy 。把 y_0 和 Δy 在

两个方向投影，我们求得复盖的那部分物体是一个中心在 $v = y_0 / M$ 的窄条，其宽度为 $\Delta u = \Delta y / M_L$ ，而在荧光屏上象的宽度是 $\Delta \xi = M_c \Delta y$ 。令扫描速率为 V_s ，那么我们希望

$$\Delta \xi < V_s \Delta t \quad (3)$$

式中 Δt 是脉冲持续时间，由此得出结论，狭缝宽度被限制为

$$\Delta y < V_s \Delta t / M_c \quad (4)$$

扫描方向令为 η 。在一定时间 ΔT 内扫描线移动 $V_s \Delta T$ 。对应的物体距离差是 $\Delta Z = c \Delta T / 2$ 于是 $\Delta \xi = (2V_s / c) \Delta Z$ 。称

$$M_R = 2V_s / c \quad (5)$$

为距离放大率，我们现在可以说， ξ 坐标是在高度 y_0 / M_c 处被放大了 $M_c M_L$ 倍的 u 坐标， η 坐标是对应的被放大 M_R 的深度。注意 M_R 是仪器决定的因素，可高达 0.1 或更高，而 $M_c M_L$ 是仪器决定的因素 M_c 和物体同仪器相联系的因素 M_L 两者的组合。对于距离非常长的物体， $M_c \cong f / R$ 可能相当小，因此 $M_c M_L$ 必须远小于 M_R 。就是说横向放大率比距离放大率小得多。

IV 分辨力

我们能够区分两种分辨率（横向和距离的）和两种型式的分辨极限（仪器和非仪器的）。对于每种分辨力来说，净分辨率必须是仪器和非仪器极限的平方和的平方根。

仪器对横向分辨率 Δu 的限制是由成象透镜和超速扫描相机产生的（重要的是讲物体分辨率和系统的分辨率相反）。超速扫描相机不可能再增加成象透镜损失的分辨率，所以后者是更基本的限制。对于焦距 f 和孔径 A ，工作波长 λ 的衍射极限透镜，

$$\Delta u_L \cong 2.44 \lambda R / A \quad (6)$$

相机将把它转换成

$$\Delta \xi_L = M_L M_c \Delta u_L \quad (7)$$

倘若 $\Delta \xi_L$ 不小于相机的最小分辨单元 $\Delta \xi_0$ 。在荧光屏上的净分辨率是

$$\Delta \xi = [(\Delta \xi_L)^2 + (\Delta \xi_0)^2]^{1/2} \quad (8)$$

这可以解释为一个仪器的物体分辨率

$$\Delta u_i = \Delta \xi / M_L M_C \quad (9)$$

对横向分辨率的非仪器影响,是由于横向物体运动和大气效应所造成的模糊产生的。宽 Δu 的物体格子可以有一个深度 Δz 。取一个时间 $\Delta z/c$ 来质询这个格子。于是运动造成的模糊大约是

$$\Delta u_M = V_x \Delta z / c \quad (10)$$

其中 V_x 是物体的横向速度。大气造成的模糊详细叙述是复杂的,而对于我们的目的能够写出:

$$\Delta u_A = 2.44 \lambda R / L_A \quad (11)$$

式中 L_A 是大气相干长度。

于是总的横向分辨率是

$$\Delta u = \left[(2.44 \lambda R)^2 \left(\frac{1}{A^2} + \frac{1}{L_A^2} \right) + \left(\frac{\Delta \xi_0}{M_L M_C} \right)^2 + \left(\frac{V_x \Delta \xi}{C} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

我们通常选择 M_C , 来使 $(\Delta \xi_0 / M_L M_C)^2$ 项忽略不计。若我们假设是非广理学物体,就有 $(\Delta u) / (\Delta z) \sim 1$ 并且因为对大小物体来说 $(V_x / C) \ll 1$, 这个包括横向速度的项可以忽略不计的。所以从完全实用的观点来看,只有透镜和传播因素是重要的。在实验室中只有透镜因素是重要的。

限制距离分辨率的仪器因素是脉冲宽度 δ_i 和超速扫描相机的固有时间分辨率 δ_T 。对于距离分辨率仪器的贡献是

$$\Delta z_1 = C [(\delta_i)^2 + (\delta_T)^2]^{1/2} / 2 \quad (13)$$

非仪器的对于距离分辨率的贡献来自横向分辨所定义的单位格子内距离的改变,和垂直于横向的尺度 $\Delta u = \Delta y / M_L$, 其中 Δy 是狭缝宽。令 $(\partial z / \partial u)$ 和 $(\partial z / \partial v)$ 表示在格子中心处物体的表面。那么非仪器距离分辨率是。

$$\Delta z_n = [(\partial z / \partial u)^2 (\Delta u)^2 + (\partial z / \partial v)^2 (\Delta y / M_L)^2]^{1/2} \quad (14)$$

注意 Δu 和 $\Delta y / M_L$ 都随距离增加。如果我

们作一个似乎有理的假定,平均值 $(\partial z / \partial u)^2 \sim (\partial z / \partial v)^2 \sim 1$ (就是说没有一个可优先断定的方向),则(14)式简化为

$$\Delta z_n \simeq [(\Delta u)^2 + (\Delta y / M_L)^2]^{1/2} \quad (15)$$

当然,净距离分辨率就是

$$\Delta z = [(\Delta z_1)^2 + (\Delta z_n)^2]^{1/2} \quad (16)$$

对于锁模染料激光器和极好的超速扫描相机, Δz_1 能够小到 $2 \times 10^{-2} \text{ cm}$ 左右。如果我们自由选择度量 Δy 使 $(\Delta u)^2 = (\Delta y / M_C)^2$, 则

$$\Delta z_n = \sqrt{2} \Delta u \quad (17)$$

如果我们还假定:

$$\Delta u = 2.44 \lambda R / A \quad (18)$$

则认为非仪器项在下列条件下占优势。

$$\sqrt{2} 2.44 \lambda R / A > C [(\delta_i)^2 + (\delta_T)^2]^{1/2} / 2 \quad (19)$$

或者

$$R > \frac{0.14 AC [(\delta_i)^2 + (\delta_T)^2]^{1/2}}{\lambda} \quad (20)$$

对于名义值, $A = 5 \text{ m}$, $\delta_i = \delta_T = 10^{-12} \text{ s}$, $\lambda = 0.5 \times 10^{-4} \text{ cm}$, 方程(20)式化为 $R > 6.1 \text{ m}$ 。当然,许多物体比满足(16)式的假定还要平,而且在更大的距离上也能够达到仪器的极限距离分辨率。

V 准直效应

至此一个显然的假定是照明波是平面波,因此所有时间延迟都能通过物理深度的差别来解释。波前可以有多大的曲率而不要求校准呢?假定我们利用点光源(在距离目标 R 处)照明。从光源到 z 轴上最近的物点引一光线。假定物体是垂直 z 轴的平面。从离轴距离为 h 的点返回的脉冲到达狭缝面,相对于 $h = 0$ 的光线的延迟时间是 $2h^2 / R_c$ 。显然,这一效应是可以忽略的,除非 h 很大或 R 很小。知道 h , 我们能够推算出所允许的照明光束的最小曲率半径 R_0 。

$$R_0 = 2h^2 / \Delta z \quad (21)$$

对于 $\Delta z = 0.2 \text{ cm}$, $h = 1 \text{ m}$, 有 $R_0 = 1 \text{ km}$, 这个结果的要点是,就大物体或者好的距离分辨

率来说，我们必须考虑波前曲率，或者保证 $R > R_0$ 或者知道 R 而对每个 h 用 $2h^2/R$ 来校正距离。

VI 绝对距离的确定

至此所描述的技术给出了，具有刚才给出的方程所规定的放大率和分辨率的距离轮廓，但是并没有给出装置和物体的任一 y 分间的绝对距离。于是就不可能划出在不同 y 位置的轮廓，从而构成三维轮廓。这种情形是容易加上一个参考通道来补救的，如图 2 所示。

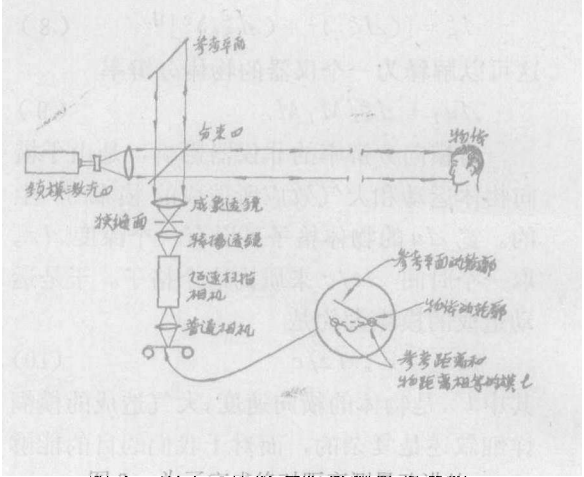


图 3 为了完成绝对距离测量改进的基本激光测距仪

一次所要求的时间。利用很容易得到的连续波锁模激光器，这将是没有任何问题的。脉冲锁模激光器的脉冲持续时间可达 10^{-6} s。它将限制物体距离，在这个距离上用内模 l 作参考将得到大约 150 米的数值。当然，这对于“实验室”测量已足够了。

VII 超速扫描相机问题

超速扫描相机带来几个问题。首先扫描线条不是在理想予测时间上触发的。这个问题，称做“触发颤动”，可以使这个时间出现的轮廓全 η 或 η 分失落。的确如果轮廓要求的时间带宽乘积与相机本身的几乎同样大，我们就不可能见到整个轮廓。其次，有限的时间带宽乘积对能记录的物体深度有限制。这些问题能减弱到一定程度，只要对基本方案作改进，这个问题我们不介绍了。

与其发射单个脉冲，不如发射一个有均匀的时间间隔 ΔT 的脉冲波列。那么这样产生的一系列轮廓的相互位移是

$$\Delta \eta = V_s \Delta T \quad (23)$$

我们这样选择 ΔT 以保证

$$\Delta \eta \ll (\Delta \eta)_{max} \quad (24)$$

对于特殊的超速扫描相机 $(\Delta \eta)_{max}$ 是扫描线的最大有效长度。我们选择脉冲的数量 P 使

$$P \Delta T \gg \text{平均触发脉冲颤动} \quad (25)$$

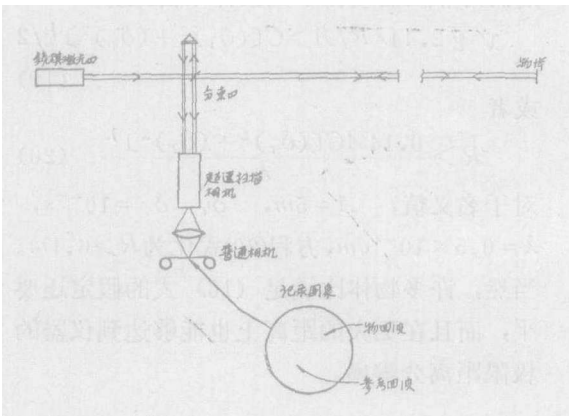


图 2 Residue 测距仪略图

因为锁模激光器发射脉冲的周期是

$$T = 2L/C \quad (22)$$

其中 L 是激光器腔的光学长度，比较物体轮廓位置同参考轮廓位置来测量它们之间的差别，这个差用模 L 来计算。典型的 L 可以是 1 米，那么得到绝对距离的问题是不困难的。对于物体轮廓的对准在深度上小于 L 的情况，这一测量是不必要的。最佳参考物体将是一个与每个 ξ 值的唯一距离值有关系的物体。漫散射斜面提供了这种性质的线性关系。图 3 说明怎样把物体轮廓和线性距离参考轮廓表现在 $\xi-\eta$ 平面上。

当然，这个方法只有在脉冲波列持续一定时间时才有用，持续时间至少等于光线通过物体距离和参考距离之差的长度上往反

为此, 在任何 ξ 上回波的总长度是 $P \Delta T$ 而不是以前的 δ_r 。于是颤动就不会使我们为得到一组要考查的轮廓而作更多的测量。同样, 有效扫描长度 (能记录的物体的最大深度) 从 $(\Delta z)_{max}$ (受扫描线持续时间的限制) 增加到 $Q(\Delta z)_{max}$, 其中 Q 是 $(\Delta \eta)_{max}$ 和 $\Delta \eta$ 之比。这样记录的物体深度的最大值是:

$$(\delta_z)_{max} = MQ(\Delta z)_{min} \quad (26)$$

我们可以取 $M = 200, Q = 10$ 做为代表。于是我们能达到在物体的 2 米深度处的 1mm 的距离分辨率。

VIII 物体运动

信息是光经过物体时加到光线上的。如果光线在 $t = 0$ 时到达最近的物体, 那么光在 $t = z/c$ 时到达物体内距离 z 处。于是, 我们在时刻 t 记录了在深度 Z 处的那部分物体。如果物体总的深度 Δz 足够大并且物体运动也足够大。我们就可以记录一个组合图片, 它的各个不同部分相应于物体运动的不同阶段。对于在这个时间内相当于 1 毫米的运动来说要探查 300mm 的物体要求纵向速度分量为 10^8 cm/s , 这是不大可能出现的。

IX 激光轮廓仪的简略分析

激光测距轮廓仪的基本物理性质已经考查了。很明显, 用连续波锁模激光和高画幅速率的超速扫描相机能够非常快的产生物体的三维信息。这些轮廓是可以直接测量获得的。对于在总深度上有几千个最小分辨深度的物体可达到小于毫米的精度。于是距离分辨率可以远远超过衍射极限。在这个意义上, 激光轮廓仪是超分辨的。

如前言所指出的, 激光轮廓仪最适宜于测体积术而不适于三维显示。取的足够靠近的轮廓将提供数据来导出一个适当的显示, 所以轮廓仪连同存储器, 微计算机将构成非常令人满意三维摄影机。

X 未来进展

可以预料有两种发展前景, 元件的改进和方法的改善。元件的改进取决于有一些不适当的元件。超速扫描相机都认为是一个重要问题。最引人注目的性能改善来沉于用径向安放的狭缝作元周扫描。如果扫描周期和光沉周期同步, 那么可获得下述益处。

1. 条纹记录 π 长。
2. 不再有触发颤动。
3. 不需要参考平面来说明这里正在扫描。
4. 如果物体在信号积累时是稳定的, 连续回波的迭加会使信噪比增大。

直接数字读出而不是用荧光屏将增加动态范围和信噪比。最基本的信噪比来沉于光量子发射噪声。当然, 这种与信号有关的噪音对探测集中信号 (点和线) 的影响要比对探测分散信号的影响小。

方法的改进也简单地预测一下。第一, 距离分辨率通过数据处理将得到很大的改善。和深度 Δz 相对应的脉冲通过脉冲矩心, 前沿, 或更精密的标准能有远小于 Δz 的定位精度, 第二, 在像面插入两个或更多个狭缝同时记录多个轮廓的可能性是有明显意义。极限情况是通过一个很宽的狭缝 (比如说遮掩了半个屏) 扫描图象。结果图象很坏, 或许并不是不可挽回的。如果有足够的信噪比, 我们能够处理这个记录, 从单个扫描中得到一个完全的三维图象。不清晰的是这个“提高”是否将有许多用途, 虽然, 因为所希望的要改进图象的数学处理的输出就是目前轮廓仪产生的一组轮廓。于是只有当简单轮廓仪的画幅率对于某些用途太慢, 多路传输轮廓仪才是有意义的。

为了保持讨论的普遍性, 没有陈述专门的应用。正是在明确划定应用的专门领域中, 我们首先致力于我们自己的研制成果。

(赵淑清 译 遂小靖 校)