

## 基于相干光纤束的无扫描无透镜 3D 内窥成像方法

吴童<sup>1,2</sup>, 柯佳仪<sup>1,2</sup>, 宋子奇<sup>1</sup>, 默迪<sup>1</sup>, 吴谨<sup>1\*</sup><sup>1</sup>中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;<sup>2</sup>中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100094

**摘要** 提出一种基于相干光纤束(CFB)的无扫描、无透镜 3D 内窥成像方法。与传统内窥成像方法相比,该方法以裸光纤束端面为探头,无需集成任何微光机元件,结构简单,体积小,极易微型化。该方法融合了合成孔径激光雷达(SAL)、宽带线性调频激光雷达和数字全息激光雷达等,利用宽带线性调频激光器产生主动照明信号,并采用 CFB 收集、传输目标散射回波,同时根据离轴数字全息原理通过使用高速 CCD 阵列相机记录回波信号,最后利用 SAL 数据处理方法重构目标 3D 图像。建立了 3D 内窥成像系统的数学模型,给出了 3D 内窥成像的数据处理方法。理论和仿真结果表明,所提方法克服了光纤束固有结构造成的像素化图像伪影,具有精确的横向和纵向 3D 成像感知能力。

**关键词** 成像系统; 图像探测系统; 3D 内窥成像; 合成孔径激光雷达; 离轴数字全息

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1811003

## Scanless and Lensless 3D Endoscopic Imaging Through Coherent Fiber Bundle

Wu Tong<sup>1,2</sup>, Ke Jiayi<sup>1,2</sup>, Song Ziqi<sup>1</sup>, Mo Di<sup>1</sup>, Wu Jin<sup>1\*</sup><sup>1</sup>*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*<sup>2</sup>*School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*

**Abstract** A scanless and lensless 3D endoscopic imaging method based on a coherent fiber bundle (CFB) is proposed. Compared with conventional endoscopic imaging method, the proposed method uses the end face of a bare fiber bundle as a probe and does not require integrating any low-light-level mechanical components. Therefore, the proposed method provides a simple structure, small volume, and easy miniaturization. Moreover, it combines synthetic aperture lidar (SAL), broadband linear frequency-modulated lidar, and digital holographic lidar. A broadband linear frequency-modulated laser generated an active illumination signal, and the CFB collected and transmitted the scattering echo of a target. Simultaneously, based on off-axis digital holography, a high-speed CCD array camera recorded the echo signal. Finally, SAL data processing method is used to reconstructed a 3D image of the target. The mathematical model of the 3D endoscopic imaging system is established, and the corresponding data processing method is detailed. Theoretical and simulation results show that the proposed method overcomes image pixilation caused by the inherent structure of the CFB and has the ability of precise transversal and longitudinal 3D imaging perceptions.

**Key words** imaging systems; image detection system; 3D endoscopic imaging; synthetic aperture lidar; off-axis digital holography

**OCIS codes** 110.2970; 110.6880; 110.1650

收稿日期: 2021-03-12; 修回日期: 2021-03-30; 录用日期: 2021-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(62071452)

通信作者: \*jwu909@263.net

# 1 引言

由于光纤具有微型化、柔软可弯曲的特点,基于光纤或光纤束的柔性内窥镜能够深入狭小空间内部,提供硬质内窥镜无法看到的内部精细结构的可视化图像。这种柔性三维内窥镜所具备的微型化柔性探针和精密成像能力使其广泛应用于生物研究、医疗诊断、精密工业检测等方面<sup>[1-3]</sup>。

目前,柔性内窥镜构造三维可视化图像最常用的方法是利用可进行二维横向扫描和一维纵向扫描的运动部件来获取被测目标的三维信息,其本质上是一种扫描成像方法<sup>[4-9]</sup>。典型的技术手段有结构光照明技术<sup>[4-5]</sup>、光学相干层析(OCT)技术<sup>[6-7]</sup>及波前整形技术<sup>[8-9]</sup>等。然而,这些技术的成像性能均受限于扫描成像方式。例如,结构光照明技术受限于结构光复杂的设计、传输和解码;OCT技术受限于复杂的机械结构和高难度的制作与装配;波前整形技术的成像速度受限于空间光调制器的更新速率。

近期,一种称为无扫描柔性内窥镜成像的新方法有望克服扫描成像法的局限。这种方法无论在柔性光纤的远端还是近端都无需扫描运动机制。2015年,文献[10]以随机散射介质作为二维光谱色散器,展示了一种无扫描、无透镜的二维柔性内窥镜成像方法。2016年,文献[11]利用散斑自相关理论,给出了一种基于裸光纤束的单帧、无透镜、无扫描二维内窥镜成像方法。2020年,文献[12]将多模光纤用作编码器生成空时编码函数,展示了一种基于多模光纤

的无扫描一维深度剖面成像技术。虽然无扫描柔性内窥镜技术还没有实现 3D 成像,也还未达到扫描机制内窥镜的成像水平,但已经展现了柔性内窥镜在不采用任何扫描机制的情况下,仅以裸光纤作为传感探头就可以生成样品目标 3D 图像的潜力。

为实现无扫描 3D 成像,本文提出了一种基于光纤束的无扫描、无透镜 3D 内窥镜成像方法。该方法融合了合成孔径激光雷达(SAL)技术、宽带雷达技术、全息雷达技术,仅以一根裸光纤束作为探头,无需扫描即可获得目标表面形貌的 3D 图像,为在不同工作距离下构造具有精确深度感知的三维柔性内窥镜提供了一种具有前景的方法。本文从方法的设计框架出发,首先建立了 3D 内窥镜成像方法的数学模型;然后利用回波数据方程,对该方法的成像数据进行处理;最后通过仿真测试验证了所提方法的可行性。

## 2 3D 内窥镜成像方法框架

由于相干光纤束(CFB)制造技术,纤芯长度不均匀,将会在 CFB 收集目标回波过程中引入随机相位误差函数。针对这一问题,本文采用预校正的方法,在对待测目标进行成像之前,在待测空间外部首先对光纤束的相位误差函数进行测量,然后再对待测目标进行成像。针对同一 CFB,仅需进行一次预校正,且由于 CFB 弯曲会对成像造成影响,在校正和成像过程中应尽量保证 CFB 处于非弯曲状态。所提出的无扫描、无透镜 3D 内窥镜成像方法包括成像系统和相位误差预校正系统两部分,工作原理如图 1 所示。

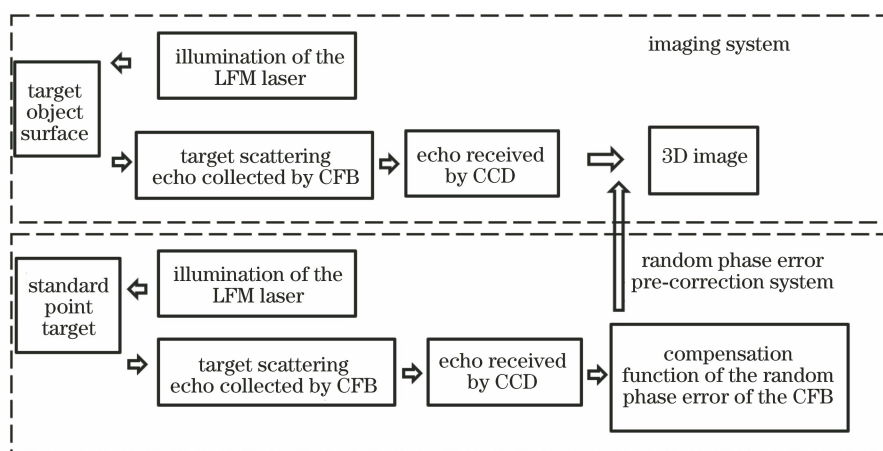


图 1 3D 内窥镜成像方法工作原理

Fig. 1 Operating principle of 3D endoscopic imaging

### 2.1 成像系统装置图

成像系统的装置原理如图 2 所示,其中  $t$  表示

CCD 采样时间。该成像系统装置主要包括宽带线性调频(WLFM)激光器、激光耦合系统(QW1,

L1, L2)、光纤耦合器(OC)、CFB、傅里叶透镜(L3)、高速 CCD 阵列相机、控制电路盒(CB)及电脑(PC 端)等。其中,光纤束近端、本振激光源(LO)和高速 CCD 阵列相机组成离轴数字全息(DH)接收系统,记录目标散射回波信号的横向相位;WLFM 激光器、激光耦合系统、OC、QW2、传输发射信号和本振信号的单模光纤(SMF)组成信号发生系统,以保证本振信号和发射信号的相干性,构成光外差探测的发生条件。

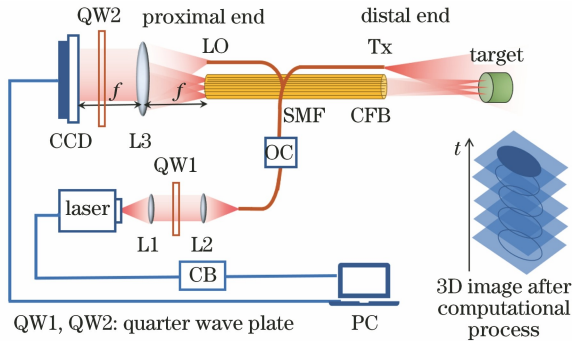


图 2 成像系统装置原理

Fig. 2 Schematic setup of imaging system

在成像系统装置中,WLFM 激光器将产生线性调频(LFM)激光信号,该信号经激光耦合系统进入 SMF,由 OC 分为两路,一路传输至 CFB 末端用作主动照明光源(Tx),另一路传输至 CFB 近端用作参考光源(LO)。CFB 近端采用离轴 DH 接收系统,目标散射回波与本振信号发生干涉后由 CCD 记录;PC 端用于控制激光器产生脉冲信号、记录 CCD 接收数据和重建目标 3D 图像。此外在成像装置中,CCD, L3 与 CFB 均处在同一光轴,即 CCD 中心, L3 中心与 CFB 中心共轴。

在成像系统中,光纤束为一特殊设计的 CFB,由规则排列的单模纤芯构成,纤芯直径极小,因而在建模时仅考虑 CFB 长度所引入的相位变化,CFB 结构如图 3 所示。其中, $D_x, D_y$  分别为 CFB 在 X/Y 方向上的全长, $\Delta x, \Delta y$  分别为 X, Y 方向上的芯到芯间距, Tx/LO 为分别位于光纤束远端/近端的 SMF。

### 2.2 相位误差预校正系统装置图

光纤束相位误差预校正系统采用典型目标法,即利用一个位置信息已知的目标点对 CFB 相位误差函数进行校正,装置原理如图 4 所示,其中  $L_s$  为位置信息已知的点目标 Tx 到 CFB 远端的距离。该装置各部分构成与图 2 所示的成像系统装置一致,不同之处在于加入了一个准直透镜(L4),并将

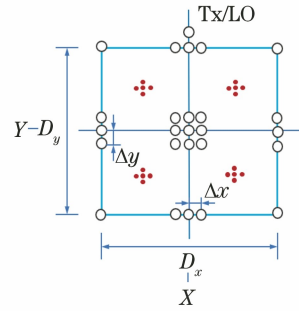


图 3 CFB 结构示意图

Fig. 3 Structure of CFB

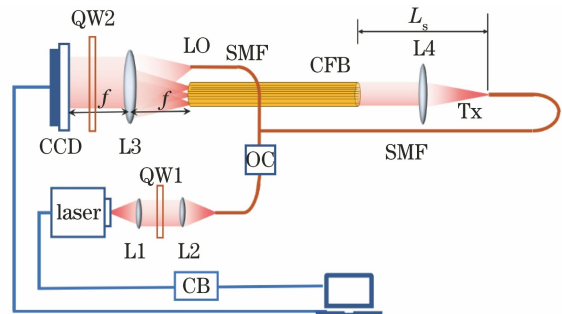


图 4 相位误差预校正系统装置原理图

Fig. 4 Schematic setup of the phase error pre-correction system

用作主动照明光源 Tx 的 SMF 移至 L4 后作为典型目标,进而通过数据处理从 CCD 记录的数据信息中得到光纤束随机相位误差补偿函数。

## 3 3D 内窥成像

### 3.1 3D 内窥成像理论模型

从右到左分别对目标、CFB 端面、L3 以及 CCD 所在平面建立坐标系,5 个坐标系共享同一纵向坐标轴  $z$ ,即系统的光轴,成像几何如图 5 所示。根据 CFB 的结构特征,CFB 近端面与远端面共用同一坐标系。坐标系之间的距离从右到左分别为  $L(z), L_0, z_1, z_2$ ,且  $z_1 = z_2 = f$ ,因而根据傅里叶波动光学,CFB 近端面光场与 CCD 表面光场间为傅里叶变换对的关系。此外,由于该系统具有深度感知的能力,目标到光纤束末端的距离  $L(z)$  是关于距离  $z$  的函数; $L_0$  是 CFB 纤芯的平均长度;传输主动照明激光信号的 SMF 作为点光源位于 CFB 远端平面坐标系  $x'-y'$  的  $(x_0, y_0)$  处;传输本振信号的 SMF 作为点光源 LO 位于 CFB 近端坐标系  $x'-y'$  内  $(a, b)$  点。

Tx 到任意目标点  $(x, y, z)$  的距离和任意目标点  $(x, y, z)$  到 CFB 任意纤芯  $(x', y')$  的距离可以表示为

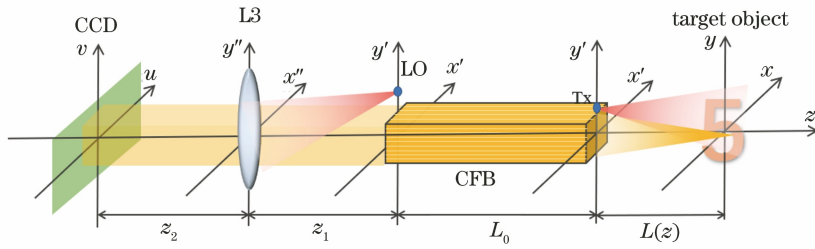


图 5 成像系统装置的成像几何

Fig. 5 Imaging geometry of imaging system setup

$$\begin{cases} L(x', y'; x, y, z) = \sqrt{z^2 + (x' - x)^2 + (y' - y)^2} \approx z + \frac{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}{2z}, x' \in [-D_x/2, D_x/2] \\ L(x, y, z; x_0, y_0) = \sqrt{z^2 + (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \approx z + \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2z}, y' \in [-D_y/2, D_y/2] \end{cases} \quad (1)$$

CFB 中各纤芯长度  $L_c(x', y')$  表示为其位置坐标的函数:

$$L_c(x', y') = L_0 + \Delta l(x', y'), \quad |\Delta l(x', y')| \ll L_0, \quad (2)$$

式中:  $\Delta l(x', y')$  为随机函数。

假设 WLFM 激光器产生的 LFM 信号表示为

$$U_0(x_0, y_0; t) = A \exp[-j(2\pi f_0 t + \pi k_r t^2 + \varphi_0)], \quad t \in [-\tau_{pul}/2, \tau_{pul}/2], \quad (3)$$

式中:  $A, f_0, k_r, \varphi_0$  分别为 LFM 信号的振幅, 载频, 调频率和信号初始相位;  $\tau_{pul}$  为信号脉宽。由此可得, LFM 信号的带宽为  $B = k_r \cdot \tau_{pul}$ 。

由于本振信号与发射信号由同一激光器分束而

来, 本振信号表示为

$$U_{LO}(a, b; t) = A_{LO} \exp\{-j[2\pi f_0(t - \tau_{ref}) + \pi k_r(t - \tau_{ref})^2 + \varphi_0]\} \times \delta(x' - a, y' - b), (t - \tau_{ref}) \in \left[-\frac{\tau_{pul}}{2}, \frac{\tau_{pul}}{2}\right], \quad (4)$$

式中:  $A_{LO}$  为本振信号振幅;  $\tau_{ref}$  为本振信号引入的参考时延, 对成像处理没有影响, 在成像处理中可以忽略。

根据准单色光光场衍射公式和傅里叶波动光学, 目标散射回波信号和本振信号在 CCD 平面处表示为

$$U_{echo}(u, v, t) = \iint dx dy \mathcal{F}\left\{AT(x, y, z) \exp\left[-j\pi k_r \left[t - \frac{L_1(x_0, y_0; x, y) + L_2(x, y; x', y')}{c} - \frac{n \cdot L_c(x', y')}{c} - \frac{2f}{c}\right]^2\right]\right\} \times \exp\left\{-j2\pi f_0 \left[t - \frac{L_1(x_0, y_0; x, y) + L_2(x, y; x', y')}{c} - \frac{n \cdot L_c(x', y')}{c} - \frac{2f}{c}\right]\right\}, \quad (5)$$

$$U_{LO}(u, v, t) = \mathcal{F}\left\{A_{LO} \exp[-j2\pi f_0 \cdot (t - \tau_{ref})] \cdot \exp[-j\pi k_r \cdot (t - \tau_{ref})^2 + \varphi_0] \delta(x' - a, y' - b)\right\} = \left\{A_{LO} \exp\left[-j\pi k_r \left(t - \frac{2f}{c} - \tau_{ref}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-j\pi k_r \left(t - \frac{2f}{c} - \tau_{ref}\right)\right] \cdot \exp\left[-j2\pi \left(\frac{u}{\lambda_0 z_2} a + \frac{v}{\lambda_0 z_2} b\right)\right]\right\}, \quad (6)$$

式中:  $f$  为傅里叶透镜的焦距;  $\mathcal{F}\{\cdot\}$  为空间横向二维傅里叶变换;  $T(x, y, z)$  为  $(x, y, z)$  处点目标的散射系数;  $L_1(x_0, y_0; x, y)$  为点光源到目标点的距离;  $L_2(x, y; x', y')$  为点目标到 CFB 内部各纤芯的距离;  $c$  为光速。

目标散射回波信号与本振信号经透镜傅里叶变换后, 在 CCD 平面处发生外差干涉并被 CCD 接收。CCD 接收的信号表示为目标回波信号与本振信号

混合后模的平方, 即

$$I(u, v, t) = |U_{echo} + U_{LO}|^2 = |U_{echo}|^2 + |U_{LO}|^2 + U_{echo} U_{LO}^* + U_{echo}^* U_{LO}, \quad (7)$$

式中: 等号右边前两项统称为零级像; 后两项为孪生像, 分别称为原始像和共轭像。

同理, 可以得到相位误差预校正装置的典型目标  $(x_s, y_s, L_s)$  的 CCD 接收数据:



$$U_s(u, v, t) = \mathcal{F} \left\{ \begin{aligned} & A \cdot \exp \left\{ -j\pi k_r \left[ t - \frac{L(x_s, y_s, L_s; x', y')}{c} - \frac{n \cdot L_c(x', y')}{c} - \frac{2f}{c} \right]^2 \right\} \cdot \\ & \exp \left\{ -j2\pi f_0 \left[ t - \frac{L(x_s, y_s, L_s; x', y')}{c} - \frac{n \cdot L_c(x', y')}{c} - \frac{2f}{c} \right] \right\} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

$$L(x', y'; x_s, y_s, L_s) = \sqrt{L_s^2 + (x' - x_s)^2 + (y' - y_s)^2} \approx L_s + \frac{(x' - x_s)^2 + (y' - y_s)^2}{2L_s} \approx L_s. \quad (9)$$

适当选取典型目标的位置,使其与 CFB 纤芯间距离的二次项远小于系统距离分辨率,因而近似等于水平距离。

$$I_s(u, v, t) = |U_s + U_{LO}|^2 = |U_s|^2 + |U_{LO}|^2 + U_s U_{LO}^* + U_s^* U_{LO}. \quad (10)$$

### 3.2 数据处理理论

将(1)、(5)和(6)式代入(10)式中,忽略对成像没有影响的  $\tau_{ref}$ ,经过适当近似和整理,得到待成像目标的 CCD 数据表达式:

$$\begin{cases} |U_{echo}|^2 = U_{echo} U_{echo}^* \\ |U_{LO}|^2 = U_{LO} U_{LO}^* = A_{LO}^2 \\ U_{echo}^* U_{LO} = [U_{echo} U_{LO}^*]^* \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} U_{echo} U_{LO}^* = & \mathcal{F} \left\{ \iint dx dy A_0 T(x, y, z) \exp \left[ j2\pi k_r t \left( \frac{2z}{c} + \frac{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}{2cz} + \frac{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}{2cz} + \frac{n \cdot L_c(x', y')}{c} \right) \right] \times \right. \\ & \left. \exp \left[ -j2\pi f_0 \left( -\frac{2z}{c} - \frac{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}{2cz} - \frac{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}{2cz} - \frac{n \cdot L_c(x', y')}{c} \right) \right] \right\} \times \\ & \exp \left[ j2\pi \left( \frac{u}{\lambda_0 z_2} a + \frac{v}{\lambda_0 z_2} b \right) \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

$A_0$  包含(12)式中所有常数项。由(11)、(12)式可以看出,CCD 接收的干涉全息图中的零级像实际上为直流项,孪生像则为高频交流项,且交流项就是成像所需的数据。通过对该数据进行处理后,即可

得到目标的 3D 图像。

对 CCD 接收的干涉全息图进行傅里叶逆变换,得到

$$\begin{aligned} \mathcal{F}^{-1}[U_{echo} U_{ref}^*] = & \left\{ \iint dx dy A_0 T(x, y, z) \exp \left\{ j2\pi k_r t \left[ \frac{2z}{c} + \frac{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}{2cz} + \frac{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}{2cz} + \frac{n \cdot L_c(x', y')}{c} \right] \right\} \right\} \times \\ & \exp \left\{ j2\pi f_0 \left[ \frac{2z}{c} + \frac{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}{2cz} + \frac{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}{2cz} + \frac{n \cdot L_c(x', y')}{c} \right] \right\} \otimes \delta(x' - a, y' - b). \end{aligned} \quad (13)$$

经过傅里叶逆变换后的干涉全息图,零级像为处于原点的直流信号,而孪生像则由于 DH 接收系统的离轴设置,分别被搬移至  $(a, b)$ ,  $(-a, -b)$ ,如(13)式所示。根据离轴数字全息技术,当本振光源 LO 的位置满足分离条件时,孪生像与零级像之间可以相互完全分离,空间分布如图 6 所示。

从图 6 可直观地得到离轴数字全息的分离条件,即  $a \geq \frac{3}{2} D_x, b \geq \frac{3}{2} D_y$ 。因此对 CCD 接收的干涉条纹进行傅里叶逆变换后,仅需根据 LO 的位置

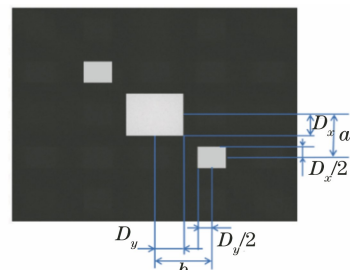


图 6 CCD 接收图经过傅里叶逆变换后的空间分布  
Fig. 6 Spatial distribution of the CDD data after inverse Fourier transform

设置简单的空间滤波器,即可得到目标回波与本振信号的外差信号,即成像所需项。此外,根据离轴数字全息的分离条件,在进行系统整体参数设计时,对于  $D_x, D_y$  的数值设置,应充分考虑到傅里叶透镜 L3 的口径和傍轴近似条件。

经过空间滤波得到的外差信号表达式如(13)式

$$H_c(x', y', t) = \exp\left\{-j2\pi k_r \left[\frac{n \cdot L_c(x', y')}{c}\right] t\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi f_0 \left[\frac{n \cdot L_c(x', y')}{c}\right]\right\} \quad (14)$$

因此,经过偏移校正(线性相位补偿)和随机相位误差校正后的数据表示为

$$s(x', y', t) = \mathcal{F}^{-1}\left\{U_{\text{echo}}U_{\text{ref}}^* \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda_0 f}(a \cdot u + b \cdot v)\right]\right\} \cdot H_c(x', y'; t) = \iint dx dy A_0 T(x, y, z) \exp\left\{j2\pi k_r t \left[\frac{2z}{c} + \frac{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}{2cz} + \frac{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}{2cz}\right]\right\} \times \exp\left\{-j2\pi f_0 \left[-\frac{2z}{c} - \frac{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}{2cz} - \frac{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}{2cz}\right]\right\} \quad (15)$$

然后参考合成孔径雷达信号的数据处理流程<sup>[13-15]</sup>,首先进行距离压缩,即对外差信号进行时域傅里叶变换,然后进行横向聚焦,其横向二维匹配滤波器表示为

$$H_m(x', y'; z) = \exp\left(-j\pi \frac{x'^2 + y'^2}{\lambda_0 z}\right) \quad (16)$$

此时,目标 3D 图像基本可以辨识,表示为

$$I(\xi, \eta; f_r) = \mathcal{F}_t[s(x', y', f_r)] \otimes H_m(x', y'; z) = A_0 \cdot \iint dx dy \cdot T(x, y, z) \cdot \sin c\left\{\tau_{\text{pul}} \cdot \left[f_r - k_r \left[-\frac{2z}{c} - \frac{x^2 + y^2}{2zc} - \frac{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}{2cz}\right]\right]\right\} \times \sin c\left[\frac{D_x}{\lambda_0 z} \cdot (\xi - x)\right] \cdot \sin c\left[\frac{D_y}{\lambda_0 z} \cdot (\eta - y)\right] \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \left[-2z - \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2z}\right]\right\} \quad (17)$$

由(17)式可以看出,图像距离信息  $z$  和横向方位信息  $(x, y)$  分别表现在频域和空间域。但由于距离信息所在的  $\sin c$  函数中还包含了多余的二次项  $\frac{x^2 + y^2}{2zc} - \frac{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}{2cz}$ ,因而会发生距离徙动。为校正距离徙动,利用(17)式得到的横向二维信

息,数据中仍然包含了偏置项和 CFB 引入的随机相位误差。可在空间频域对(13)式中本振信号 LO 引起的偏置项直接进行线性相位补偿。CFB 引入的随机相位误差补偿函数则由相位误差预校正系统获得,表达式为

息计算距离单元的移动量,将这些点移至正确的距离单元,进而逐点进行距离单元徙动校正(RCMC)。

$$\Delta z(x, y) = \sqrt{z^2 + (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + \sqrt{z^2 + x^2 + y^2} - 2z \quad (18)$$

校正后的目标 3D 图像表示为

$$I(\xi, \eta; f_r) = A_0 \iint dx dy \cdot T(x, y, z) \cdot \left\{\sin c\left\{\tau_{\text{pul}} \cdot \left[f_r - k_r \left(\tau_{\text{ref}} - \frac{2z}{c}\right)\right]\right\}\right\} \times \left\{\sin c\left[\frac{D_x}{\lambda_0 z} \cdot (\xi - x)\right]\right\} \cdot \left\{\sin c\left[\frac{D_y}{\lambda_0 z} \cdot (\eta - y)\right]\right\} \quad (19)$$

由(19)式可以得到系统的距离分辨率为

$$\rho_z = \frac{c}{2B} \quad (20)$$

横向方位分辨率为

$$\rho_x = \frac{\lambda_0}{D_x} \cdot z, \rho_y = \frac{\lambda_0}{D_y} \cdot z \quad (21)$$

同理可得相位误差预校正系统中 CCD 接收数据经过傅里叶逆变换、空间滤波和线性相位补偿后的信号表达式为

$$\mathcal{F}^{-1} \left\{ U_s U_{LO}^* \cdot \exp \left[ j \frac{2\pi}{\lambda_0 f} (au + bv) \right] \right\} = A \exp \left\{ -j2\pi k_r t \left[ \frac{L_s}{c} + \frac{n \cdot L_c(x', y')}{c} \right] \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi f_0 \left[ \frac{L_s}{c} + \frac{n \cdot L_c(x', y')}{c} \right] \right\}. \quad (22)$$

由(22)式可以发现,除了已知的常数相位项,(22)式的共轭即为(14)式所述的 CFB 随机相位误差补偿函数。

综上,无扫描、无透镜 3D 内窥成像方法的数据处理流程如图 7 所示。

### 4 仿 真

表 1 为仿真实验用到的成像系统参数设置。图 8 为待测目标的尺寸与位置示意图。在仿真设置

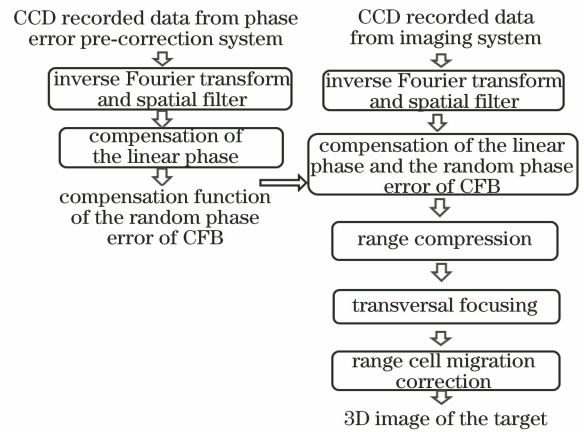


图 7 数据处理流程图

Fig. 7 Data processing flow chart

中,将目标表面的反射系数设置为 1,其他空间位置反射系数设置为 0。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulated parameter setting

Item	Parameter	Value
Illuminating laser	Central wavelength $\lambda_0$ /nm	1550
	Chirping bandwidth $B_r$ /THz	3
	Pulse width $\tau_{pul}$ /ms	20
Local laser	Position $(a, b)$ /(mm, mm)	(3, 3)
CFB (facet shape: square)	Size $(D_x \times D_y)$ /(mm $\times$ mm)	1 $\times$ 1
	Core numbers $(N_x \times N_y)$	250 $\times$ 250
	Intervals $(\Delta x \times \Delta y)$ /( $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )	4 $\times$ 4
CCD	Intervals $(\Delta u \times \Delta v)$ /( $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )	20 $\times$ 20

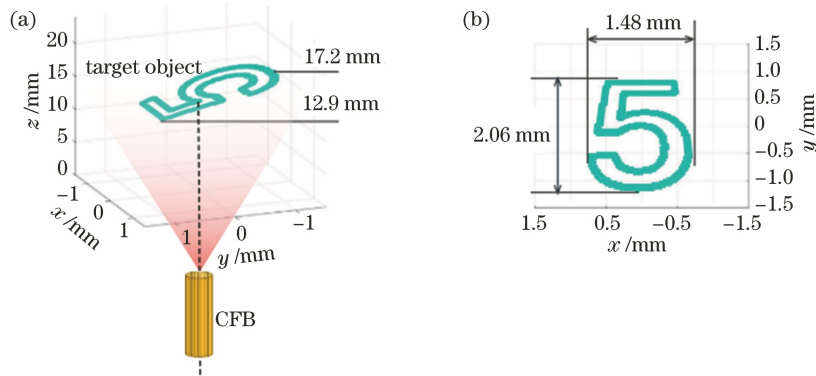


图 8 目标位置及大小。(a) CFB 及目标放置示意图;(b) 目标尺寸示意图

Fig. 8 Position and size of the target. (a) Schematic of CFB and target placement; (b) schematic of the target size

考虑到 1550 nm 波段光穿透能力强、光纤损耗小,系统采用波长 1550 nm 作为 LFM 信号的中心波长。考虑到距离分辨率,将所需的啁啾带宽设置为 3 THz,根据(20)式,可以计算系统的距离分辨率为

$$\rho_z = \frac{c}{2B} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3 \times 10^{12}} = 50 \mu\text{m}. \quad (23)$$

横向方位分辨率为

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_x &= \frac{\lambda_0}{D_x} z = \frac{1.55 \times 10^{-6}}{1 \times 10^{-3}} \times 1 \times 10^{-2} = 15.5 \mu\text{m} @ z = 1 \text{ cm} \\ \rho_y &= \frac{\lambda_0}{D_y} z = \frac{1.55 \times 10^{-6}}{1 \times 10^{-3}} \times 1 \times 10^{-2} = 15.5 \mu\text{m} @ z = 1 \text{ cm} \end{aligned} \right. \quad (24)$$

首先对距光纤束末端 1 cm 处,位于光轴上的点目标进行仿真实验,得到点目标的功率谱图,以验证

系统的分辨率。该点目标的功率谱图如图 9 所示。  
以功率谱下降 3 dB 处的宽度作为目标的分辨率(-3 dB 宽度即为光学系统常用的半峰全宽),从

图 9 可得,距离分辨率为  $42 \mu\text{m}$ ,横向方位域分辨率为  $15.5 \mu\text{m} \times 15.5 \mu\text{m}$ ,与(23)、(24)式的计算值基本一致。

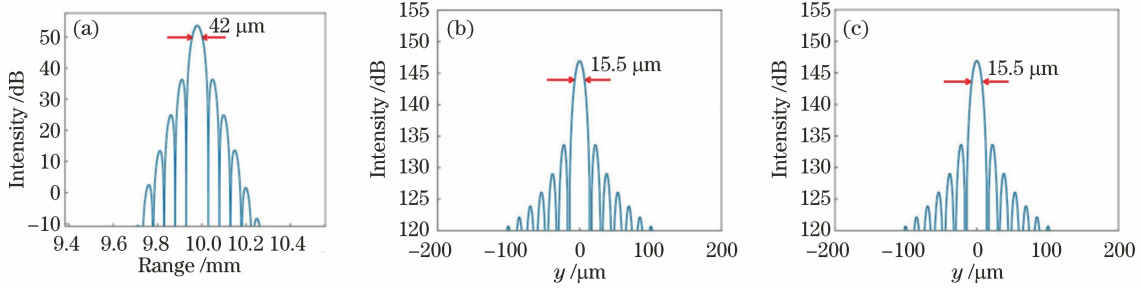


图 9 点目标的功率谱图。(a)距离分辨率;(b)  $x$  方向分辨率;(c)  $y$  方向分辨率

Fig. 9 Power spectra of a point target. (a) Range resolution; (b) resolution in  $x$  direction; (c) resolution in  $y$  direction

图 8 中目标的仿真计算成像结果如图 10 所示。图 10(a)为原始 CCD 记录的数据,由于直流量的存在,数据表现为实心立方体。图 10(b)是图 10(a)经过 DH 处理(傅里叶逆变换和空间滤波)后的相位历史数据,由于 CFB 相位误差函数的存在,呈现散斑图样。图 10(c)中,经过相位误差补偿后的相位数据表现出了明显的干涉条纹。图 10(d)为距离压缩

图像,信号能量完全收敛到目标所在的深度距离范围,但由于横向数据仍然没有聚焦,目标仍然无法区分。图 10(e)为横向聚焦图像,可以明显观察到一个空心数字“5”。图 10(f)为 RCMC 处理后的最终 3D 图像,但由于距离徙动较小,图 10(e)和图 10(f)差别不大。

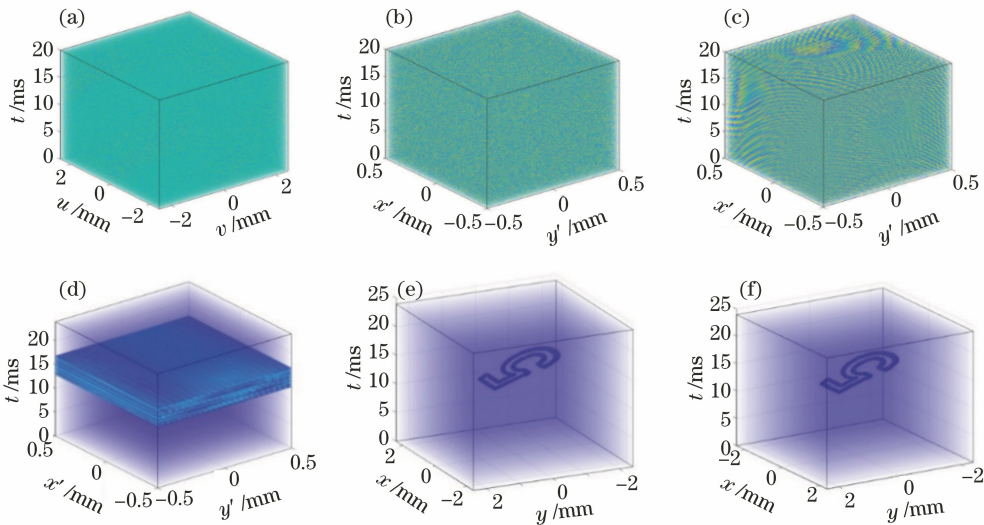


图 10 仿真结果。(a) CCD 接收数据;(b) DH 处理后的相位数据;(c)相位误差校正后的相位数据;(d)距离压缩图像;(e)横向聚焦图像;(f) RCMC 校正后的 3D 图像

Fig. 10 Simulation results. (a) CCD recorded data; (b) phase data after DH process; (c) phase data after phase error compensation; (d) range compressed image; (e) transversal focused image; (f) 3D image of the target after RCMC correcting

为进一步验证 3D 内窥成像方法的图像精确度,绘制了目标的侧视图和俯视图,如图 11 所示。图 11(a)、(b)是图 10(f)的投影图。在图 11(a)中,可以计算出图 10(f)图像的横向尺寸为  $1.48 \text{ mm} \times 2.06 \text{ mm}$ ;在图 11(b)中,计算出图 10(f)的深度延伸范围为  $12.9 \text{ mm}$  至  $17.2 \text{ mm}$ 。这些数据与图 8

中的目标设置完全一致,充分论证了所提无扫描、无透镜 3D 内窥成像方法的可行性。

## 5 分析与讨论

### 5.1 相干光纤束

根据目标散射回波到达光纤束远端平面的表达



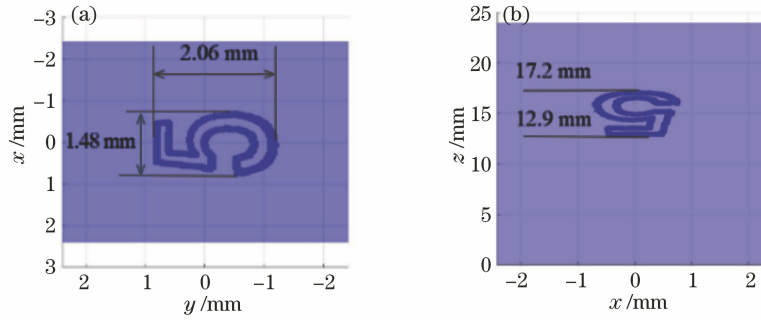


图 11 图 10(f)的投影图。(a) 俯视图;(b) 左视图

Fig. 11 Projection diagrams of Fig. 10(f). (a) Bottom view; (b) left side view

式,由奈奎斯特采样定理可以得到光纤束纤芯间距 $(\Delta x, \Delta y)$ 与光纤束尺寸 $(D_x \times D_y)$ 和成像区域 $(D_{Ox} \times D_{Oy})$ 的关系为

$$\begin{cases} \frac{1}{\Delta x} \geq \frac{D_x}{\lambda_0 \cdot z} + \frac{D_{Ox}}{\lambda_0 \cdot z} = \frac{D_x}{\lambda_0 \cdot z} + \frac{2S_{NA}}{\lambda_0} \\ \frac{1}{\Delta y} \geq \frac{D_y}{\lambda_0 \cdot z} + \frac{D_{Oy}}{\lambda_0 \cdot z} = \frac{D_y}{\lambda_0 \cdot z} + \frac{2S_{NA}}{\lambda_0} \end{cases}, (25)$$

式中: $S_{NA}$ 为用作主动照明光源  $T_x$  的 SMF 的数值孔径。

根据 Fujikura FIGH-30-650S 型光纤束的设计,且光纤束纤芯间隔遵循(25)式所示的纤芯间隔限制条件,将纤芯间距设置为  $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$  是可行的。

## 5.2 高速 CCD 阵列相机

根据 CCD 接收信号的表达式,如(8)~(12)式所示,由奈奎斯特采样定理可以得到 CCD 像素间距 $(\Delta u, \Delta v)$ 与光纤束尺寸 $(D_x \times D_y)$ 和参考光源位置 $(a, b)$ 的关系为

$$\begin{cases} \frac{1}{\Delta u} \geq \frac{2a}{\lambda_0 f} + \frac{D_x}{\lambda_0 f} \geq \frac{4D_x}{\lambda_0 f} \\ \frac{1}{\Delta v} \geq \frac{2b}{\lambda_0 f} + \frac{D_y}{\lambda_0 f} \geq \frac{4D_y}{\lambda_0 f} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta u \leq \frac{\lambda_0 f}{4D_x} \\ \Delta v \leq \frac{\lambda_0 f}{4D_y} \end{cases}. (26)$$

根据(15)式,距离向(即时间域)信号的频率与目标距离有关,可以表示为  $f = k_r \cdot \frac{2z}{c}$ ;由于最小探测深度可以通过参考光纤的延长进行补偿,则探测深度范围内的接收信号的频率为  $\Delta f = k_r \cdot \frac{2\Delta z}{c}$ 。

因此为了实现 1 cm 的探测深度,光学外差系统的接收频率应为 10 kHz,根据复信号奈奎斯特采样定理,高速 CCD 阵列相机的帧率应达到 10 kHz。根据目前的产品资料,TELOPS 公司 FAST-SWIR 系列的短波红外相机在特定型号和开窗尺寸下,采集

帧率甚至可以超过 150 kHz。因此,所要求的  $256 \times 256$  像素阵列,帧率 10 kHz 的近红外阵列 CCD 相机是完全可行的。

## 5.3 视场

对于内窥成像系统来说,视场角是评价成像系统的重要因素。在所提方法中,由于 CFB 内部纤芯离散分布,且有序排列,因此 CFB 可以类比为阵列天线。依据雷达原理,阵列天线的视场角与各子天线间的距离有关,因此所提方法的视场受限于光纤束内部纤芯间距,视场角表示为  $\theta_{FOV} = \lambda/d_{\text{inter-core}}$ ,  $d_{\text{inter-core}}$  为光纤束纤芯间距离。

## 6 结 论

为实现无扫描、无透镜 3D 柔性内窥成像,本文融合 SAL 技术、宽带雷达技术和全息雷达技术,利用相位成像的原理,提出了一种基于光纤束的无扫描、无透镜 3D 内窥成像方法。该方法包括相位误差预校正系统和成像系统两部分;相位误差预校正系统可以实施在待测空间之外的任何区域,以获得 CFB 由于制造误差引入的随机相位误差的补偿函数;成像系统仅需将裸光纤束探入待测空间内部,即可通过计算机数据处理重构目标 3D 图像。在建立了 3D 内窥成像系统的理论模型后,文中给出了目标回波数据方程,根据回波数据方程,给出了数据处理方法,从理论层面验证了基于光纤束的无扫描 3D 内窥成像方法的可行性。然后在理论模型的基础上,根据现有器件的技术水平设计了仿真实验,实验结果进一步验证了 3D 内窥成像方法的可行性。

然而在实际搭建系统实验平台时,可能由于各种条件的限制,各个器件可能无法严格满足仿真参数的设计值,因而需要根据器件的限制条件和实际实验条件进行适当调整。根据现有器件搭建实验平台,设计成像实验,并根据实验情况对成像方法进行完善将是下一步需要开展的研究。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou C, Adler D C, Tsai T H, et al. Endoscopic 3D-OCT reveals buried glands following radiofrequency ablation of Barrett's esophagus[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7558: 75580L.
- [2] He D H, Li Z L, Nan N, et al. A probe driven by miniature propeller for intravascular optical coherence tomography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1107002.  
何东航, 李中梁, 南楠, 等. 一种基于微型螺旋桨驱动的血管内光学相干层析成像探头[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1107002.
- [3] Li C, Sun M J, Ma L Y, et al. Algorithm for three-dimensional enhancement of blood vessels in photoacoustic endoscopic *in vivo* imaging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0907003.  
李超, 孙明健, 马立勇, 等. 针对活体光声内窥成像的三维血管增强算法[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0907003.
- [4] Karadagić D, Juškaitis R, Wilson T. Confocal endoscopy via structured illumination[J]. Scanning, 2006, 24(6): 301-304.
- [5] Liu Z, Luo Z W, Wang Z Y, et al. Super-resolution fluorescence microscopy image reconstruction algorithm based on structured illumination [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0307001.  
刘智, 罗泽伟, 王正印, 等. 基于结构照明的超分辨率荧光显微成像重建算法[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0307001.
- [6] Wang T S, Wieser W, Springeling G, et al. Intravascular optical coherence tomography imaging at 3200 frames per second[J]. Optics Letters, 2013, 38(10): 1715-1717.
- [7] Yang Y L, Ding Z H, Meng J, et al. Common path optical coherence tomographic system suitable for endoscopic imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 955-959.  
杨亚良, 丁志华, 孟婕, 等. 适合于内窥成像的共路型光学相干层析成像系统[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 955-959.
- [8] Papadopoulos I N, Farahi S, Moser C, et al. Focusing and scanning light through a multimode optical fiber using digital phase conjugation [J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10583-10590.
- [9] Choi Y, Yoon C, Kim M, et al. Scanner-free and wide-field endoscopic imaging by using a single multimode optical fiber[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(20): 203901.
- [10] Kolenderska S M, Katz O, Fink M, et al. Scanning-free imaging through a single fiber by random spatio-spectral encoding[J]. Optics Letters, 2015, 40(4): 534-537.
- [11] Porat A, Andresen E R, Rigneault H, et al. Widefield lensless imaging through a fiber bundle via speckle correlations [J]. Optics Express, 2016, 24(15): 16835-16855.
- [12] Lee S Y, Hui P C, Bouma B, et al. Single-shot depth profiling by spatio-temporal encoding with a multimode fiber[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 1124-1138.
- [13] Wu J. On the development of synthetic aperture lidar imaging[J]. Journal of Radars, 2012, 1(4): 353-360.  
吴谨. 关于合成孔径激光雷达成像研究[J]. 雷达学报, 2012, 1(4): 353-360.
- [14] Zhao Z L, Wu J, Su Y Y, et al. Three-dimensional imaging interferometric synthetic aperture lidar[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(9): 091101.
- [15] Sun Z W, Hou P P, Zhi Y N, et al. Two-dimensional matched filtering imaging algorithm for synthetic aperture imaging lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1228003.  
孙志伟, 侯培培, 职亚楠, 等. 合成孔径激光成像雷达的二维匹配滤波成像算法[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1228003.