

文章编号:1001-5078(2022)01-0057-07

· 红外技术及应用 ·

基于红外数字全息的水分含量检测方法研究

陈强坤, 张永安, 田凤仙, 康文杰
(昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650504)

摘要: 红外数字全息有不易受可见光干扰、对系统稳定性要求不高等优点, 在许多领域都有应用价值; 而水分对多个波段的红外光都有很强的吸收效应, 将该特点与红外数字全息相结合, 以新鲜三七切片作为被测对象, 随着时间推进, 其表面水分含量逐渐减少, 表面对物光吸收逐渐减弱, 物光逐渐增强, 全息图的条纹对比度发生变化, 通过对实验中拍摄到的全息图的条纹对比度进行计算, 其整体变化趋势与预期的水分含量变化趋势相符合, 验证了该方法的可行性。并添加模拟近红外法测水分含量实验, 对比实验结果, 体现出本文所提出方法在测量精度上的优越性。

关键词: 红外数字全息; 水分检测; 条纹对比度

中图分类号: TB877; TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2022.01.010

Research on moisture content detection method based on infrared digital holography

CHEN Qiang-shen, ZHANG Yong-an, TIAN Fen-xian, KANG Weng-jie
(School of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: Infrared digital holography has the advantages of being less susceptible to visible light interference and low requirements for system stability, and has application value in many fields. The moisture has a strong absorption effect on the infrared light of multiple bands. Combining this characteristic with the infrared digital holography, the fresh Panax notoginseng slice is taken as the tested object. As time goes on, the moisture content on the surface gradually decreases, the absorption of the object light on the surface gradually weakens, the object light gradually increases, and the fringe contrast of the hologram changes. Through the calculation of the fringe contrast of the hologram taken in the experiment, the overall change trend is consistent with the expected moisture content change trend, which verifies the feasibility of this method. Then, the experiment of measuring moisture content by simulated near infrared method is added. The comparison of the experimental results show the superiority of the proposed method in the measurement accuracy.

Keywords: infrared digital holography; moisture detection; fringe contrast

1 引言

近年来可见光波段的数字全息干涉计量凭借其

高精度的优势, 在各项检测领域中已积累相当深厚的理论基础^[1-3], 且在实际生产活动中被广泛应用。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61865007) 资助。

作者简介: 陈强坤 (1993 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字全息检测及数字图像处理。E-mail: 1285617393@qq.com

通讯作者: 张永安 (1965 -), 男, 高级实验师, 硕士, 主要研究方向为全息及光信息处理。E-mail: 1295720542@qq.com

收稿日期: 2021-06-07; **修订日期:** 2021-07-03

而红外数字全息凭借其较强的抗干扰能力^[4]、较强的透障碍物成像效果以及在大目标检测上的优势,引起了大量关注。在国际上有报道的文献中,Geltrude 等人的团队对红外数字全息在大目标检测^[5]上的应用做了细致的研究;而 Pasquale 等人的团队在红外数字全息应用于建筑震动无损检测^[6]上也有诸多成果;还有 Ferraro 等人在使用红外数字全息手段测量三维形貌上取得了一定的研究成果^[7];除此以外还有近几年较为集中的将红外数字全息应用于火场搜救也有许多研究成果^[8-12]。而国内的研究主要集中在红外全息的基础特性研究^[13]及红外全息图像处理^[14-15]等领域,在无损检测上的研究只有钟杰等人利用红外全息测量量子场^[16],其余方面的应用暂未见报道。

一般来说,全息干涉计量是依靠对干涉条纹变化进行分析从而得出物理量的变化值,其一般是分析条纹级次的变化。当该方法应用于水分含量检测时,水分含量变化所造成的条纹级次变化并不是规律的,使得相关研究进展缓慢。而传统的水分检测方法主要包括干燥法、电容法、微波法、近红外法^[17-18],其中前三种方法无法做到无损检测,且在实时监测方面也难以实现;而近红外法的理论依据是水对多个波长的红外光吸收非常敏感,这些波长被称为特征吸收波长范围,当处于特征吸收波长范围内的红外光照射到被测目标上时,若其表面有水分存在,则表面反射或透射的红外光能量会减弱,通过将反射或透射的红外光的能量与水分含量归纳出对应关系,即可通过此法对水分含量进行测量^[19-20]。虽然近红外法可以做到无损检测水分含量,但当水分含量变化值较小,其引起的光能量变化甚至小于环境干扰量引起的数据波动,使得测量精度较低。

本文提出一种基于红外数字全息技术的水分检测方法,将名贵中药材三七的新鲜切片作为被测目标物,通过对干涉条纹的对比度变化进行分析,总结出条纹对比度变化与三七表面水分含量由自然蒸发而产生的变化的对应关系,从而获得一种高精度无损检测水分含量的方法。

2 理论推导

2.1 水分含量测量原理

光学的干涉现象是建立在电磁场线性叠加原理

之上的。假设现有两列相同频率的平面波 $E_1(r, t)$ 与 $E_2(r, t)$, 其在各自的空间产生的电场分别为:

$$\begin{cases} E_1(r, t) = E_{01} \cos(2\pi\nu t - k_1 \cdot r + \varphi_1) \\ E_2(r, t) = E_{02} \cos(2\pi\nu t - k_2 \cdot r + \varphi_2) \end{cases} \quad (1)$$

两列电磁波在相遇处的电场为这两个独立电场的叠加:

$$E(r, t) = E_1(r, t) + E_2(r, t) \quad (2)$$

而在相遇处的光强分布 I 则为 E_{01} 与 E_{02} 的合成场 E 的数性积对时间的平均值,即:

$$\begin{aligned} I &= \langle E \cdot E^* \rangle = \langle E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2(E_{10} \cdot E_{20}) \cos\theta \rangle \\ &= I_1 + I_2 + \langle 2E_{10}E_{20} \cos\varphi \cos\theta \rangle \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\langle 2E_{10}E_{20} \cos\varphi \cos\theta \rangle$ 称为干涉项,两光波各自的初相位和偏振方向在某些情况下会引起干涉项为零,此时光场一片均匀,没有干涉条纹,这时这两个光波是不相干的。

若两光波频率相同、有稳定的平均偏振方向且不正交、相位差对时间的平均值为恒量的情况下,干涉像就是不为零的恒值,此时光场中就出现了稳定的干涉条纹。若两线偏振光的偏振方向是相同的,那么光强的表达式就如下所示:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\theta \quad (4)$$

此时光强分布的极大值和极小值分别为:

$$\begin{cases} I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \\ I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \end{cases} \quad (5)$$

当引出了条纹极大值和极小值的概念后,便可据此引出条纹能见度 V :

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (6)$$

对于两束光的干涉条纹,当两光振幅相等,即 $I_1 = I_2$, 此时的 $I_{\max} = 2I_1$, $I_{\min} = 0$, 此时的条纹能见度 $V = 1$, 这时暗纹的亮度为 0, 条纹最为清晰。此时我们再引入光强比这一概念,通常以 B 来表示:

$$B \equiv I_1/I_2 \quad (7)$$

将式(7)与式(5)一起代入式(6)中可得:

$$V = \frac{2\sqrt{I_1/I_2}}{1 + (I_1/I_2)} = \frac{2\sqrt{B}}{1 + B} \quad (8)$$

由此可见,条纹的能见度 V 取决于光强比 B 。在本文试验中,两光束分别为物光与参考光,参考光保持恒定不变,而物光因三七切片表面的水分含量

变化而发生改变,从而导致物参光的光强比 B 发生变化,进而引起物参光干涉产生的干涉条纹能见度改变,通过对条纹能见度变化的量进行分析便可获取三七切片表面水分变化的信息。由于条纹能见度 V 也被称为条纹对比度,为方便读者阅读,后文将统一使用条纹对比度这一说法。

2.2 实验装置及光路

整个光学装置基于 Mach-Zender 干涉光路,整体光路如图 1(a) 所示,本文所使用的激光器是中心波长为 1064 nm 的在连续模式下工作的半导体红外激光器及波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器,其中 He-Ne 激光器用于与红外光拟合后引导光路搭建;红外激光器最大可调功率为 115.3 mW,横模模式为 TEM00,发出光束发散角为 1.5 mrad,光束直径为 1.329 mm,相干长度为 20 cm。使用的光学镜片均为普通透红外透镜,分束镜 I 分光比为 1:2,分束镜 II 分光比为 1:1,扩束镜放大倍率为 20 倍,针孔尺寸为 25 μm ,本文选用的 CCD 分辨率为 1920×1080 ,像素尺寸为 2.9 μm ,曝光时间设置为 5 ms。

为验证使用该波长红外激光进行实验的可行性,将被测三七切片更换为全反镜,使用 CCD 采集光场中存在水雾与不存在水雾时的干涉图样,如图 2 所示。用 mean 函数求出两图灰度平均值,其中不存在水雾时平均灰度值为 100.1019,存在水雾时灰度平均值为 85.0420,红外光被水分吸收,由此验证了波长为 1064 nm 的红外光处于水对红外光的特征吸收波长范围内,后续实验可以进行。

首先使用 Matlab 程序按照实际光路参数设置下模拟不同光强比的物参光发生干涉,整个模拟过程中参考光光强设置为一恒定值,物光光强逐渐增大,得到一组条纹对比度不同的模拟干涉图样。

正式试验中取新鲜三七切片放置于物光光路中,将其固定,调整物参光光强比使条纹对比度尽可能的大,静置光路待稳定后,以 30 s 为间隔拍摄 50 张全息图,随着时间的增加,切片表面水分逐渐蒸发减少,由切片表面漫反射至 CCD 的红外光光强发生变化,分析拍摄的全息图条纹对比度变化趋势,验证该方法测水分含量的可行性。

为了能体现本文所提出的方法在水分检测中拥

有比近红外法更高的精度,本文还设置了使用同一红外激光器用单光束红外光照射三七切片,并用同一 CCD 接收三七切片表面漫反射的红外光来模拟近红外法测水分含量,光路如图 1(b) 所示,其中照射至新鲜三七切片上的红外光光强与正式试验中照射至新鲜三七切片上的红外光光强一致。通过分析所记录的多张红外光图的平均灰度值,来测量三七片表面水分含量变化,并与本文所提出方法进行对比。

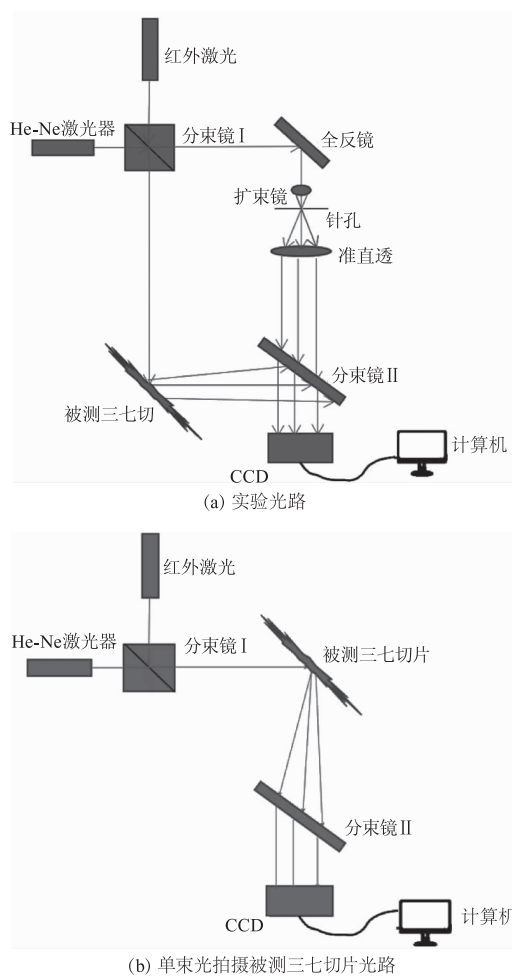
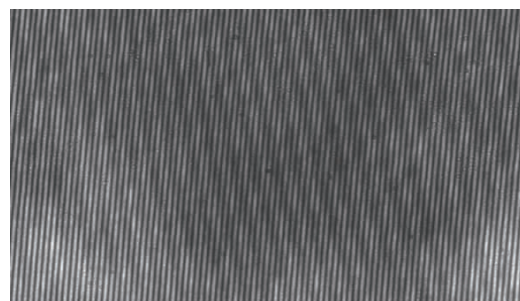


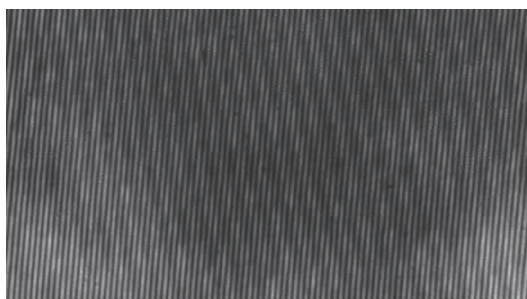
图 1 实验光路及单束光拍摄被测三七切片光路

Fig. 1 Experimental light path and light path of Panax



(a) 存在水雾

notoginseng slice photographed by single beam



(b) 不存在水雾

图 2 物光场中存在水雾与不存在水雾的干涉图样

Fig. 2 Interference pattern of water mist and non water mist in object light field

3 实验结果

3.1 模拟实验结果

使用 Matlab 程序按照实际光路参数设置,模拟不同光强比的物参光发生干涉,参考光光强设置为恒定值,物光强度逐渐增强,得到条纹对比度不同的模拟干涉图样;计算各图条纹对比度。因为只有物光逐渐增强,所以各模拟全息图的条纹相对位置不变,选择第一幅图中条纹对比度最接近 1 的一对明暗条纹的两个像素点:最小亮度为 0,像素位置为 183,

223;最大亮度为 0.984,像素位置为 197,223,亮度范围为 0~1。接下来的 8 幅图都选取这两个位置来读取最大亮度值 $I_{\max}$ 和最小亮度值 $I_{\min}$,计算出的每幅图的条纹对比度如表 1 所示。由表 1 可知,当参考光光强不变,物光逐渐增强,条纹对比度逐渐减小。从原理上证明了本文所提方法的可行性。

3.2 实际实验结果

新鲜三七切片放置于空气中,随着时间的增加,其表面水分会逐渐蒸发减少,红外光照射到切片表面后漫反射出来的红外光会随水分减少而逐渐增强,图片灰度平均值应该增加。在整个实验过程中,实验室环境保持恒定不变,室内温度恒为 20℃,室内湿度恒为 33%。此处先进行模拟近红外法测水分含量实验,按图 1(b)所示光路以 30 s 为间隔拍摄 50 组图片,由于图片亮度范围为 0~1,数值变化范围小可能造成精确度较低,所以选择以图片灰度平均值(范围 0~255)作为检测依据,处理得出所有图片的灰度平均值,如表 2 所示。

表 1 全息图条纹对比度

Tab. 1 Fringe contrast of hologram

全息图	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{\max}$	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.980	0.980	0.976	0.973
$I_{\min}$	0	0.004	0.0118	0.0275	0.0549	0.0941	0.145	0.216	0.329
$\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$	1	99.2 %	97.6 %	94.5 %	89.4 %	82.5 %	74.2 %	63.8 %	49.5 %

表 2 以 30 s 为间隔拍摄的 50 组单光束照射图片的平均亮度值

Tab. 2 Average brightness values of 50 groups of single beam images taken at 30 second intervals

拍摄时间/s	0	30	60	90	120	150	180	210	240
灰度平均值	62.3156	62.5263	62.5156	62.6729	62.7687	62.7026	62.9592	62.9704	62.9813
拍摄时间/s	270	300	330	360	390	420	450	480	510
灰度平均值	63.0485	63.0114	62.7767	63.3090	63.3870	63.5105	63.5360	63.3878	63.1797
拍摄时间/s	540	570	600	630	660	690	720	750	780
灰度平均值	63.2440	63.2547	63.3172	63.2938	63.4051	63.1265	63.4741	63.5817	63.6636
拍摄时间/s	810	840	870	900	930	960	990	1020	1050
灰度平均值	63.4907	63.1416	63.6250	63.4087	63.7553	63.7703	63.4721	63.8749	63.9424
拍摄时间/s	1080	1110	1140	1170	1200	1230	1260	1290	1320
灰度平均值	64.0618	64.0503	63.9831	63.9969	64.1567	64.0970	64.4458	64.2240	64.3767
拍摄时间/s	1350	1380	1410	1440	1470				
灰度平均值	64.3915	64.6772	64.6831	64.6983	65.0384				

为确定环境干扰是否会影响实验结果,关闭所有激光器,光路静置 1 min,拍摄十张环境红外光图片,如图 3(a),求所有图片的灰度平均值,计算得出十组数据的平均值为 0.2846,远小于实验中所采集图片得灰度平均值,判定环境红外光对实验结果影响较小。

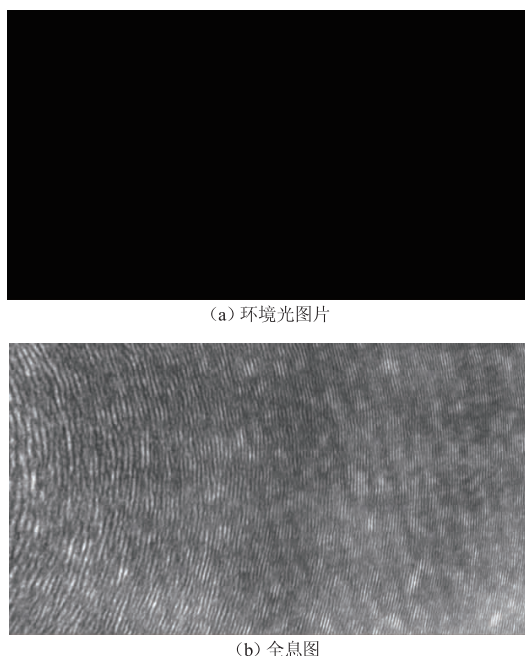


图3 环境光图片及被测物全息图
Fig.3 Ambient light picture and hologram

在进行本文所提出方法的实验验证部分中,先搭建如图 1(a)所示光路,再取一新鲜三七切片置于光路中,全息光路中照射至新鲜三七切片上的红外光光强与模拟近红外法测水分含量实验中照射至新鲜三七切片上的红外光光强一致,调整物参光光强比使条纹对比度尽可能的大,然后整个光路静置 1 min,将激光器打开后拍摄一张全息图如图 3(b),该图的灰度平均值为 124.6312,远大于环境红外光图片灰度平均值,因此忽略环境红外光对实验结果的影响。以 30 s 为间隔拍摄 50 组全息图,研究其条纹对比度的变化与水分含量变化的对应关系。选取一张全息图作为条纹对比度的处理示例,如图 4 所示。对图像进行滤波处理,滤波处理后的全息图剖面图的波峰波谷平滑很多,更易读数,如图 5 所示。截取中间部分,选择 30 对左右条纹来进行计算,读取波峰波谷值,数值的范围是 0 ~ 255。

滤波后波峰灰度平均值为 141.9,波谷灰度平均值为 102.1,以波峰平均值为 $I_{\max}$,波谷平均值为

$I_{\min}$,得出该全息图条纹对比度为 16.30 %。按如上方法,计算出 50 张全息图的条纹对比度,如表 3 所示。

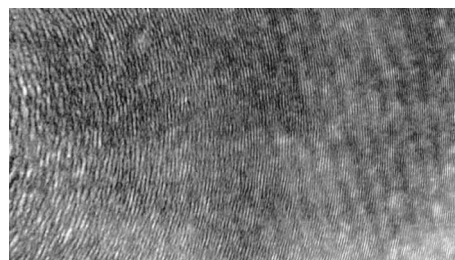


图4 作为计算示例的全息图

Fig.4 Hologram as an example of calculation

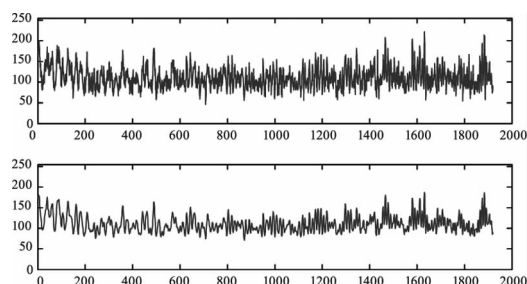


图5 滤波前后剖面图对比

Fig.5 Comparison of section map before and after filtering

4 数据分析

当使用模拟近红外法测水分含量时,新鲜三七切片表面漫反射的红外光光强由 CCD 所拍摄到的画面的灰度平均值来体现,其值随时间的变化如第 3.2 小节中表 2 所示,将数据转化为曲线图,如图 6(a)所示,可知随着时间推进,图片灰度平均值呈上升趋势,证明水分对红外光吸收逐渐减弱,与新鲜三七切片表面水分随时间蒸发减少对红外光吸收减弱的事实相吻合。但将时间间隔缩短后,会发现图片灰度平均值呈不规则变化,与水分逐渐减少的事实不相符,该现象为光强变化值小于实验环境不稳定造成的漫反射光强波动引起,因此该法在测量精度上稍有欠缺。

本文所提出的方法中,随着时间推进,拍摄的红外全息图中的条纹对比度呈逐渐下降趋势,这与三七切片表面水分随时间蒸发减少、物光逐渐增强的事实相吻合,且缩短时间间隔,条纹对比度数据仍呈下降趋势,测量精度与抗干扰能力较模拟近红外法更高。而在最后十二组数据中出现了两次条纹对比度升高后从高点开始下降,通过分析条纹对比度突变处的全息图,发现干涉条纹发生了微小位移与形变,分析此为三七切片由于表面水分蒸发到一定程度时其表面的多孔结构发生变化,表面小孔孔径变

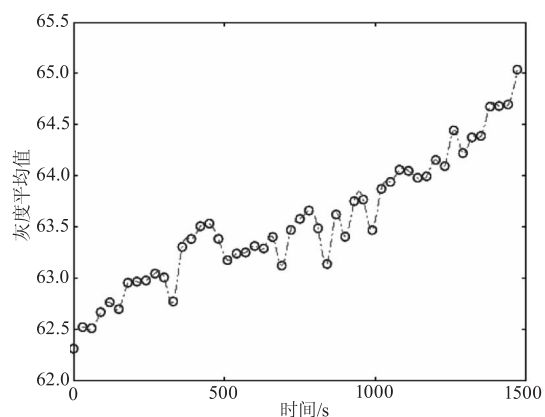
大,漫反射效应增强,使得条纹对比度发生逆转。因此,本文所用方法还可通过对比度逆转时刻的统计

快速且实时的检测表面发生形变的情况。由于本文研究重点不在于此,就不做赘述。

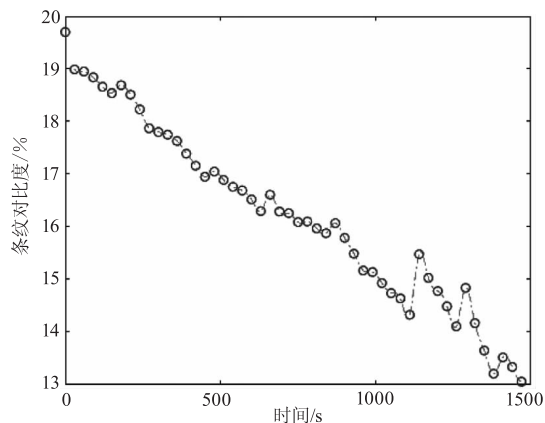
表3 以30 s为间隔拍摄的50组全息图的条纹对比度

Tab. 3 Fringe contrast of 50 holograms taken at 30 second intervals

拍摄时间/s	0	30	60	90	120	150	180	210
对比度/%	19.70	18.99	18.95	18.84	18.66	18.54	18.69	18.51
拍摄时间/s	240	270	300	330	360	390	420	450
对比度/%	18.23	17.87	17.80	17.75	17.63	17.39	17.16	16.95
拍摄时间/s	480	510	540	570	600	630	660	690
对比度/%	17.05	16.89	16.76	16.69	16.52	16.30	16.61	16.29
拍摄时间/s	720	750	780	810	840	870	900	930
对比度/%	16.26	16.09	16.10	15.97	15.88	16.07	15.79	15.49
拍摄时间/s	960	990	1020	1050	1080	1110	1140	1170
对比度/%	15.17	15.14	14.93	14.74	14.64	14.33	15.48	15.03
拍摄时间/s	1200	1230	1260	1290	1320	1350	1380	1410
对比度/%	14.78	14.49	14.11	14.84	14.17	13.65	13.21	13.52
拍摄时间/s	1440	1470						
对比度/%	13.34	13.06						



(a) 灰度平均值变化曲线



(b) 条纹对比度变化曲线

图6 两种方法测水分含量所得数据波动情况

Fig. 6 Fluctuation of data obtained by two methods

5 结论

本文提出了一种基于红外数字全息的水分含量检测方法,并通过对比实验进行了验证。实验结果表明,所提出的方法抗环境干扰能力强,且具有更高的测量精度,还可在检测水分含量变化的同时实时检测表面发生形变的情况,后期实验还可通过数据处理建立表面形变与表面水分含量的对应关系。

参考文献:

- [1] Guzhov V I, et al. Determination of deformation fields of diffuse objects by phase-shifting digital holographic interferometry[J]. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2021, 56(6): 608–613.
- [2] Acosta José Luis Silva, et al. Study of skin aging effects induced by near UV radiation using time average digital holographic interferometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 137: 106345.
- [3] Chikode Prashant P, et al. Investigations of defects in ceramic tiles using Double Exposure Digital Holographic Interferometry (DEDHI) technique [J]. Optik, 2020, 219: 165035.
- [4] Sergio De Nicola, et al. Infrared digital reflective-holographic 3D shape measurements[J]. Optics Communications, 2008, 281(6): 1445–1449.

- [5] A Geltrude, M Locatelli, P Poggi, et al. Infrared digital holography for large objects investigation[C]. //Proceedings of SPIE Volume 8082. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII. Part One of Two Parts. : SPIE-Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2011: 80820C-1-80820C-7.
- [6] Pasquale Poggi, et al. Remote monitoring of building oscillation modes by means of real-time Mid Infrared Digital Holography [J]. Scientific Reports, 2016, 6 (1): 3042-3063.
- [7] Sergio De Nicola, et al. Infrared digital reflective-holographic 3D shapemeasurements [J]. Optics Communications, 2008, 281(6): 1445-1449.
- [8] Massimiliano Locatelli, et al. Seeing through smoke and flames: a challenge for imaging capabilities, met thanks to digital holography at far infrared[C]. //Spie Optical Metrology. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [9] Locatelli M, et al. Imaging live humans through smoke and flames using far-infrared digital holography. [J]. Optics express, 2013, 21(5): 5379-90.
- [10] Ferraro, Pietro. Infrared digital holography as new 3D imaging tool for first responders and firefighters: Recent achievements and perspectives[C]. //2014 Conference on Lasers and Electro-Optics, 2014.
- [11] Bianco V, Paturzo M, Finizio A, et al. Revealing fire survivors hidden behind smoke and flames by IR active imaging systems[C]. //2014 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST). IEEE, 2014: 1-3.
- [12] Bianco V, Paturzo M, Finizio A, et al. Portable IR laser system for real-time display of alive people in firescenes [J]. Journal of Display Technology, 2015, 11(10): 834-838.
- [13] Liu Wanli. Research on infrared holographic detection technology[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
刘万里. 红外全息检测技术的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [14] Chai Jinyan, Huang Chao, Chen Chunyan, et al. Resolution enhancement algorithm of through flame infrared digital hologram [J]. Optoelectronic Engineering, 2019, 46(4): 39-46. (in Chinese)
柴金燕, 黄晔, 陈春燕, 等. 透火焰红外数字全息图像的分辨率增强算法[J]. 光电工程, 2019, 46(4): 39-46.
- [15] Yang Chao. Research on key technologies of infrared digital hologram enhancement[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)
杨超. 红外数字全息图像增强关键技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- [16] Zhong Jie, Li Zuoyou, Liu Zhenqing, et al. Infrared laser coaxial holography for particle field measurement[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(11): 1251-1254. (in Chinese)
钟杰, 李作友, 刘振清, 等. 测量粒子场的红外激光同轴全息技术[J]. 激光与红外, 2009, 39(11): 1251-1254.
- [17] Lu Pinzhen. Development of moisture measurement technology and moisture meter at home and abroad[J]. Analytical instruments, 1990, (1): 12-18, 83. (in Chinese)
陆品桢. 国内外水分测量技术及水分计发展概况[J]. 分析仪器, 1990, (1): 12-18, 83.
- [18] Han Xiaoqiang. Research on rapid detection method of grain moisture[J]. Rural Practical Science and Technology Information, 2013, (5): 52. (in Chinese)
韩孝强. 粮食水分快速检测方法的研究[J]. 农村实用科技信息, 2013, (5): 52.
- [19] Jian Liu, William H. Miller, Francesco Paesani, et al. Quantum dynamical effects in liquid water: a semiclassical study on the diffusion and the infrared absorptionspectrum [J]. The Journal of Chemical Physics, 2009, 131(16): 164509.
- [20] Li Shitong. Research on reflective near infrared moisture meter[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015. (in Chinese)
李士通. 反射式近红外水分仪的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.