

面向彩色物体的双目三维测量编码新方法

车建强 戴 宁 崔海华 程筱胜 翁金平

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要 为了实现彩色物体三维(3D)形貌的精确测量,提出了一种新的面向双目立体匹配的彩色编码方法。根据三原色(RGB)颜色空间模型和光谱原理对不同颜色赋予相应的视觉编码值,设定相邻彩色条纹波长变化明显、颜色差别大、码值唯一的原则并进行编码设计;利用改进的色彩标定方法消除背景色彩的影响;实验验证了提出的彩色编码方法。结果表明,该编码新方法消除了物体彩色纹理背景的影响,满足了彩色物体三维形貌精确测量的要求,可以快速、有效地实现彩色物体的三维形貌测量。

关键词 机器视觉;编码;色彩混淆;色彩校正;三原色模型;双目匹配

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1115001

A Novel Encoding Method for Binocular Three-Dimensional Measurement of Color Objects

Che Jianqiang Dai Ning Cui Haihua Cheng Xiaosheng Weng Jinping

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract A novel encoding method is proposed for precise binocular three-dimensional (3D) measurement of colorful objects. According to the combination of the red-green-blue (RGB) model and the spectrum analysis methods, unique visual code values are attached with different colors respectively. The color code pattern is designed based on the principles of obvious change of wavelength, evident difference in color between adjacent color stripes, and unique code values for neighbors. A color calibration optimization algorithm is proposed to achieve color compensation and eliminate color confusion during the 3D measurement processing. A series of measurement experiments are performed to acquire the 3D shape of the colorful objects. The experimental results show that the 3D shape of the colorful objects can be easily and fast obtained by using this novel encoding method.

Key words machine vision; encoding; color confusion; color compensation; red-green-blue model; binocular matching

OCIS codes 150.1135; 150.2945; 150.5670; 150.6910

1 引 言

双目立体视觉直接模拟人类双眼处理场景的方式,利用两部摄像机获取外部图像并将其转化为计算机可处理的信号,进而利用计算机处理这种数字

信号,是机器视觉的一种,在许多领域都具有广泛的应用价值。在双目立体视觉中立体匹配是其中的关键问题之一。近年来,彩色编码结构光因为包含大量的颜色信息,越来越多地用于解决立体匹配问

收稿日期: 2014-05-04; **收到修改稿日期**: 2014-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(51305201,51205192)、国家 863 计划(SS2013AA040801-02)、江苏省精密与微细制造技术重点实验室开放课题

作者简介: 车建强(1988—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉和工业检测方面的研究。

E-mail: chejianqiang1@126.com

导师简介: 戴 宁(1978—),男,博士,副教授,主要从事数字化设计与制造、生物医学工程等方面的研究。

E-mail: dai_ning@nuaa.edu.cn (通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

题^[1-2]。

文献[3]利用彩色条纹的边缘信息,对采集到的彩色条纹图进行边缘提取,从而进行匹配运算;该方法受不同颜色间相互混淆的影响,得不到非常准确的彩色边缘,而且会出现不同的相邻颜色之间彩色边缘相同的情形,从而增加匹配难度。文献[4]将彩色编码条纹和正弦条纹结合起来,利用彩色条纹编码的唯一性来确定正弦条纹的周期性,辅助其进行解包裹相位;但该方法中编码图上单个条纹的颜色深度呈正弦分布,由于电荷耦合元件(CCD)相机对三通道响应程度不同,采集后的图像三通道数据变化较大,仅仅依靠阈值化很难实现整个条纹颜色的准确识别。文献[5]采用二维彩色编码图像,投影具有局部唯一性的彩色编码图案从而确定物体上每一点的唯一位置;该方法同样是利用彩色方块的颜色信息,但相邻方块之间的颜色串扰现象更加严重,而且没有考虑彩色物体本身颜色对彩色编码图案的干扰。文献[6]利用彩色条纹本身的色彩信息,对采集到的图像进行颜色识别、分割,提取彩色条纹中心,进而进行匹配运算;该方法同样受不同颜色间相互混淆的影响,而且还会受到被测物本身颜色的影响,导致彩色条纹中心提取不准确甚至错误。文献[7]将彩色格雷码和正弦条纹结合进行投影,利用彩色格雷码辅助进行相位展开,该方法在进行色彩标定时仅仅使用三幅基色图,计算结果不够精确,而且在解码过程中,为了确定条纹的唯一性,需要寻找相邻14个条纹才能确定,比较复杂,效率不高,从而给三维(3D)重建带来影响。

针对彩色编码条纹图像颜色混淆干扰问题,本文分析得出干扰主要源自不同色光之间波长的重叠,进而基于三原色(RGB)彩色空间模型和波长学说提出一种新的彩色条纹编码方案;将编码图案投影到物体上并采集后,利用 Caspi 等^[8]提出的彩色响应模型对色彩进行校正补偿,本文对其中图像预处理部分做出了优化改进,增加了数据的处理量,提高了双目系统参数的准确性,从而使得彩色条纹更易被识别、分割,同时提出的彩色编码条纹的编码序列的特殊性也为后续的匹配运算带来极大的方便,

仅仅需要遍历相邻两个条纹即可实现匹配,能够高速、有效、精确地测量彩色物体的三维形貌。

2 彩色编码和色彩校正

2.1 彩色编码设计

彩色编码是对不同颜色的条纹按照一定的规则进行排列组合,然后投影到物体上,从而增加图像特征信息的方法,属于空间编码方法的一种。彩色编码图案经过光学投影仪以彩色光的形式附着到物体上,进而被光学相机捕捉采集。在整个过程中,相邻的两种不同色光会因为光波之间的相互作用而发生颜色串扰现象,使得条纹边缘处呈现出与左右条纹均不一致的颜色。这是由光波本身的特性造成的影响,会导致边缘条纹提取不准确或者条纹分割不准确^[9]。针对此问题,分析了不同色光之间发生颜色串扰的原因,并提出了一种新的彩色条纹编码方案。

由于常见的光学相机仅仅对可见光起作用,因此红橙黄绿青蓝紫七色光经常被用来进行彩色编码设计,其在 RGB 彩色空间模型中的位置如图 1 所示。

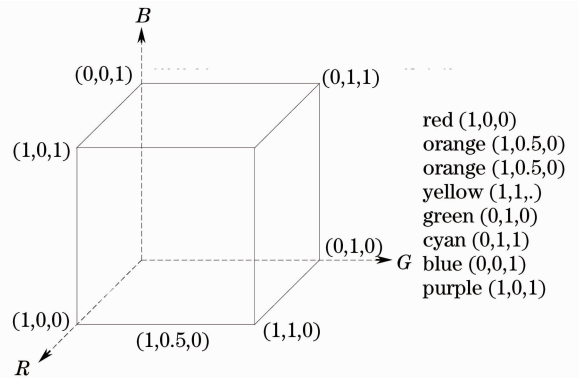


图 1 RGB 彩色空间模型

Fig. 1 RGB color space model

在物理学中,一种光的颜色是由其波长唯一决定的,如红橙黄绿青蓝紫七种色光的波长依次变短,且在相同亮度的情况下,两种色光之间波长差别越大,它们给予人视觉上的差别也越大,而且光波之间的相互作用越弱。以七色光为研究对象,假设红色和橙色给人的视觉差是 1,红色和黄色给人的视觉差为 2,以此类推,可以建立一个视觉编码表来表达不同色光之间的差异,如表 1 所示。

表 1 视觉编码表

Table 1 Code value of different colors

Color	Red	Orange	Yellow	Green	Cyan	Blue	Purple
Code value	1	2	3	4	5	6	7

从表 1 中可以发现, 编码值相差越大的两种颜色, 波长的差别也越大。由于不同颜色发生混淆干扰的主要原因就是不同色光之间的波长有重叠, 因此, 如果能够在排列条纹序列的时候将波长差别较大的颜色放在相邻位置, 则在很大程度上能够减小相邻颜色的混淆干扰。

根据上述发现, 提出了一种新的彩色投影模式设计方案, 将 RGB 模型上的 8 个点所代表的颜色作为基本单元, 按照图 2 所示标为①~⑧, 规定①代表的黑色视觉编码值最小, ⑧代表的白色视觉编码值最大, 可以看出, 从①到⑧, 颜色的视觉编码值依次变大, 相应的波长依次变小(除了黑色和白色)。挑选编码值相差大于 1 的颜色为相邻颜色组合, 并且进行连续排列, 从而得到一个足够长的彩色条纹序列。其中任意一个相邻条纹组合在整个条纹序列中是唯一的, 并且相邻条纹的颜色之间的差别足以进行精确的颜色识别和分割。

实验采取的编码图案为①③⑦②⑤⑧①④⑧⑤

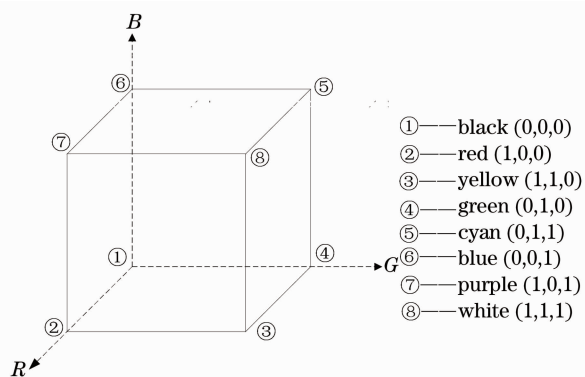


图 2 RGB 模型

Fig. 2 RGB model

⑦①⑥⑧③⑥②④⑦③⑤①⑧④⑥③⑧②⑥①⑤②
⑦④②⑧⑥④①⑦⑤③①, 具体的编码条纹图如图 3 所示。编码序列中相邻条纹之间视觉编码差大于 1, 确保了颜色在校正后可以被正确地识别和分割, 减小了色彩校正的难度, 而且任意一个相邻条纹组合在整个条纹序列中是唯一的, 加快了后续的双目匹配计算效率, 提高了双目匹配结果的准确率。



图 3 编码条纹图

Fig. 3 Encoded pattern

2.2 解码匹配原理

在双目立体视觉中, 为了计算出图像缺失的深度信息, 需要对左右两幅图像进行匹配计算, 找出两幅图像上的对应点, 然后利用三角法进行深度计算。通常情况下具体的做法是以一幅图像为模板, 在另一幅图像中寻找相应或相近的模板。双目匹配是双目立体视觉中最重要的步骤, 其计算过程的复杂度、计算效率以及计算用时深刻影响着整个三维重建工作的复杂程度和速度, 一直以来都是人们研究的热点。

为减少匹配不确定性, 提高匹配效率, 众多研究人员提出了许多约束假设。这些约束可分为两类:

1) 基于图像几何的约束, 例如位置、朝向以及图像获取方式。具体包括极线约束、唯一性约束、几何相似性约束、光度测定学相容性约束和透视投影约束等;

2) 基于场景的约束, 例如场景中物体的性状和相互关系。具体包括视差光滑性约束、轮廓视差约束、特征相容性约束、顺序约束、互对应约束、相位约束、视差范围约束和视差梯度范围约束等。

利用这些约束, 许多约束算法被提出以用于双目图像的匹配计算, 如区域匹配算法、特征匹配算法、相位匹配算法等基于局部约束的算法; 还有动态规划算法、图割算法、人工智能算法、协作算法等基于全局约束的算法。在这些约束和算法中, 基于图像几何的极线约束和唯一性约束被众多研究人员广泛应用, 并被证明在双目匹配计算中非常有效^[10]。

为了提高双目匹配运算的速度和精度, 将双目匹配计算分为粗匹配和精匹配两个阶段。根据图 3 所示条纹图像本身具有的特征, 进行极线约束后, 利用特征匹配算法对左右图像中的彩色条纹进行匹配, 快速、准确地得到条纹宽度等级的匹配, 完成粗匹配, 从而使得精匹配可以在图像局部范围内进行, 大大节省了匹配计算时间, 加快了双目匹配效率。

图 4 上下两幅条纹图为双目测量系统中左右相机采集到的条纹图, 可以看出, 由于两个相机的摆放位置和视角的不同, 相较于左相机图像, 右相机图像有很明显的倾斜, 这样就会导致两幅图像中条纹总数不一致, 进而对左右图像条纹的匹配计算产生影响。

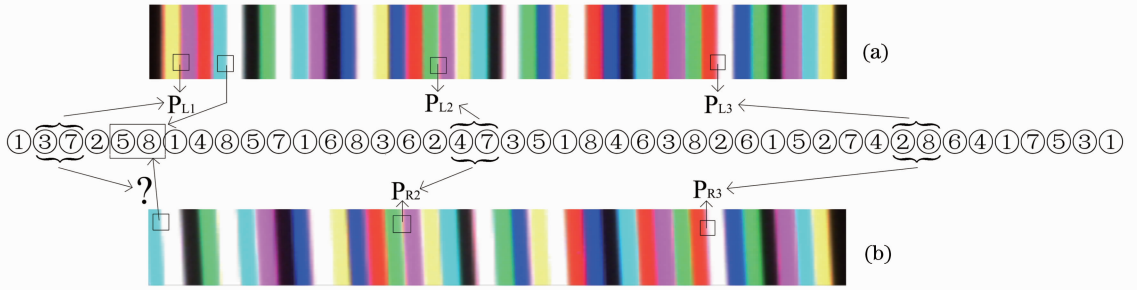


图 4 左右相机图像的条纹匹配。(a)左相机图像；(b)右相机图像

Fig. 4 Matching of binocular images. (a) Left image; (b) right image

根据本文所提出的编码方案进行编码产生的彩色条纹中,相邻两个条纹的排列组合方式在整个条纹图中是唯一的,如图 4(a),在左相机图像中, P_{L1} 代表序列③⑦, P_{L2} 代表序列④⑦, P_{L3} 代表序列②⑧;按照设想,经过极线约束后,根据相邻条纹排列的唯一性原则,在右相机图像中寻找相邻条纹序列为③⑦、④⑦、②⑧的地方,即可得到与 P_{L1} 、 P_{L2} 、 P_{L3} 严格对应的 P_{R1} 、 P_{R2} 、 P_{R3} 。但实际上, P_{R2} 、 P_{R3} 如图 4(b)所示, P_{R1} 却没有找到,即序列③⑦在右相机图像中不存在;通过完整的左右条纹匹配计算发现,左右相机图像中条纹匹配部分是从⑤⑧开始,到③①结束。这样,利用相邻条纹序列的唯一性,避免了左相机图像中序列⑤⑧之前的条纹与右相机图像中相同

颜色条纹的误匹配,而且由于匹配过程中只是用了两个条纹,所以匹配效率非常高。

2.3 彩色响应模型及色彩校正

在彩色结构光双目三维测量系统中,投影仪和相机不同颜色通道的伽马值、相同通道对不同颜色的响应程度都是不同的,而且不同通道间还存在颜色串扰;与此同时,当测量对象为彩色物体时,不同颜色的光照射到物体上时,反射光的颜色又会受到物体本身颜色的影响,整个过程如图 5 所示。因此,需要分析设定的彩色编码图案上从进入投影仪开始到相机采集到彩色图案整个过程中每个点数值的变化。



图 5 图案采集过程

Fig. 5 Process of acquiring images

参考 Caspi 等^[8]提出的彩色响应模型,在测量系统中计算机生成的图像 I 经过投影仪的转换矩阵 P 转换后投射到待测物体表面,图像在物体表面依照反射率矩阵 K 反射到成像系统成像;在成像系统

一端相机得到的图像 M 中除了含有投影仪和相机颜色通道之间的串扰 A ,同时还记录了杂散光的强度分布 M_0 。用等式描述为

$$M = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{RR} & a_{RG} & a_{RB} \\ a_{GR} & a_{GG} & a_{GB} \\ a_{BR} & a_{BG} & a_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_r & 0 & 0 \\ 0 & k_g & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{bmatrix} P \left\{ \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

即

$$M = AKP(I) + M_0, \quad (2)$$

式中 $M = [R \ G \ B]^T$ 为数码相机采集到的图像中任意一点的实际像素值,也叫采集值, $M_0 = [R_0 \ G_0$

$B_0]^T$ 为无投影光时环境光下的背景像素值,也叫背景值, $I = [r \ g \ b]^T$ 为被投影图像任意一点的设定像素值,也叫设定值, P 为设定像素值和实际投

影出的 RGB 光强之间的对应关系,矩阵 A 为数字投影仪和数码相机之间彩色三通道耦合矩阵,矩阵 K 为任意一点对 RGB 三种颜色不同的反射率。

(2)式中未知数有 3 个,分别是 A 、 K 和 P ,其中 P 决定于投影仪, A 决定于投影仪和相机构成的整个系统,二者均与被测物体无关,因此(2)式可改写为

$$M = QKI + M_0, \quad (3)$$

式中 Q 包含了 A 和 P 的影响,称为颜色串扰矩阵。矩阵 Q 的确定需要在系统测量工作开始之前完成,传统的做法是分别投影三幅 RGB 纯色图到白板上,以其响应来计算耦合矩阵 A ,并且近似认为白板对 RGB 的反射率均为 1,背景值 M 相对于投影光可以忽略^[11-12]。

为了提高三维测量结果精度,在分析了颜色串扰矩阵产生原因的基础上,认为计算颜色串扰矩阵时仅仅投影 RGB 三幅纯色图是不够的,需要将编码图案中所使用的全部颜色分别投影到白板上,从而获得足够多的数据进行精确计算。在本文中需要投

影 8 幅纯色图,则(1)式可写为

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{RR} & q_{RG} & q_{RB} \\ q_{GR} & q_{GG} & q_{GB} \\ q_{BR} & q_{BG} & q_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix}. \quad (4)$$

8 幅 RGB 纯色图的编码值 $[r \ g \ b]^T$ 分别为 $[0 \ 0 \ 0]^T, [255 \ 0 \ 0]^T, [0 \ 255 \ 0]^T, [0 \ 0 \ 255]^T, [255 \ 255 \ 0]^T, [0 \ 255 \ 255]^T, [255 \ 0 \ 255]^T, [255 \ 255 \ 255]^T$,在保证有解的前提下,三幅不同纯色图组成一组进行计算,对结果取平均值,从而得到更加精确的颜色串扰矩阵。计算结果如表 2 所示。

表 2 不同颜色组合计算得到的 Q 矩阵

Table 2 Q matrices calculated by different color combinations

Color combination	Red+Green+Blue			Yellow+Green+Blue		
Q	0.999709069	0	0	0.999823431	0	0
	0.011704902	0.996078431	0	0.00386652	0.996078431	0
	0.007855392	0	0.984313725	0.015611471	0	0.984313725
Color combination	Purple+Green+Blue			White+Green+Blue		
Q	0.995552108	0	0	0.996078431	0	0
	0.000165245	0.996078431	0	0	0.996078431	0
	0.011713088	0	0.984313725	0.011764706	0	0.984313725
Color combination	Red+Yellow+Blue			Red+Green+Purple		
Q	0.999709069	0.000114363	0	0.999709069	0	-0.004156961
	0.011704902	0.988240049	0	0.011704902	0.996078431	-0.011539657
	0.007855392	0.007756078	0.984313725	0.007855392	0	0.988171422
Color combination	Red+Cyan+Blue			Red+Green+Cyan		
Q	0.999709069	0	0	0.999709069	0	0
	0.011704902	0.988235294	0	0.011704902	0.996078431	-0.007843137
	0.007855392	0.007843137	0.984313725	0.007855392	0	0.992156863
Color combination	Red+White+Blue			Red+Green+White		
Q	0.999709069	-0.003630637	0	0.999709069	0	-0.003630637
	0.011704902	0.984373529	0	0.011704902	0.996078431	-0.011704902
	0.007855392	0.003909314	0.984313725	0.007855392	0	0.988223039
.....						
.....						

一共计算了 26 组数据,表 2 仅列出其中一部分。表 2 说明在计算 Q 矩阵的过程中,不同的纯色图组合方案会得到不同的计算结果,通过比较红绿蓝、黄绿蓝、紫绿蓝、白绿蓝组合方案计算得到的 Q 矩阵,可以发现,在同一个颜色通道,不同颜色带来的串扰矩阵参数不同;通过比较红青蓝和红绿青组色方案计算得到的 Q 矩阵,可以发现,在不同通道,

同一种颜色带来的串扰矩阵参数也不同;但所有颜色给 RGB 任意一个颜色通道带来的串扰矩阵参数都符合该通道应该具备的特性,如 R 通道中第一个参数远大于其余两个参数,且接近 1; B 通道中第二个参数远大于其余两个参数,且接近 1; G 通道中第三个参数远大于其余两个参数,且接近 1。

计算 26 组数据的平均结果,可以得到串扰矩阵

$$Q = \begin{bmatrix} 0.99841470761689 & 0.000344989630467538 & -0.00131807032428354 \\ 0.00731729826546002 & 0.993703173076923 & -0.00409412895927601 \\ 0.00970543457767724 & 0.00278355674962294 & 0.985897578242835 \end{bmatrix},$$

小数点后保留四位,得

$$Q = \begin{bmatrix} 0.9984 & 0.0003 & -0.0013 \\ 0.0073 & 0.9937 & -0.0041 \\ 0.0097 & 0.0028 & 0.9859 \end{bmatrix}.$$

颜色串扰矩阵、左右相机内外参数、双目系统结构参数分别得到后,可以将设计好的彩色编码图投影到物体上进行三维测量,同时,(1)式中 K 矩阵是和物体上各个点相关的,因此,需要向物体投影一幅 $[255, 255, 255]^T$ 的白光图案进行辅助求得物体上每一点的反射率矩阵 K 。由于颜色串扰矩阵 Q 参与反射率矩阵 K 的计算,所以一个精确的 Q 矩阵也会给 K 矩阵带来更高的准确性。

经过一系列运算之后,消除了物体本身彩色纹理对三通道耦合矩阵 A 和反射率矩阵 K 的影响,还原出准确的彩色编码信息,彩色编码条纹之间存在的混叠与干扰被大大减小,从而使得获得的图像中彩色条纹的识别和分割工作更加精确,加快了后续的解码匹配工作。

3 实验验证与分析

3.1 测量系统和流程

为了验证上述方法的有效性,以一个表面颜色丰富且形状不规则的物体为实验对象进行实验验证。搭建的基于彩色编码结构光的双目三维测量系统如图 6 所示,测量系统的硬件设备为 1 台数字光处理(DLP)投影仪 BenQ-GP2、2 台分辨率为 1296 pixel×966 pixel 的 Basler Ace1300gc 彩色 CCD 相机以及用于数据处理的 Dell 个人电脑。具体的三维测量流程如图 7 所示。

1) 在测量前完成相机标定、双目系统标定以及色彩标定。

2) 将制定好的彩色编码条纹模式投影到物体

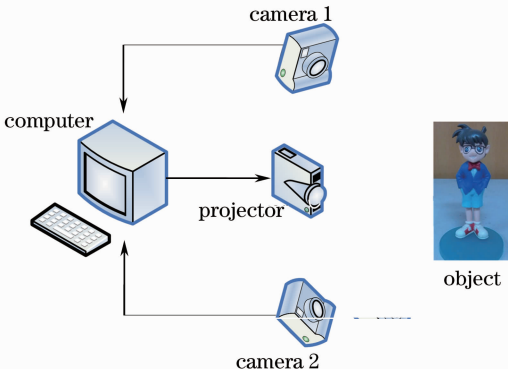


图 6 双目三维测量系统

Fig. 6 Binocular 3D measurement system

上,左右相机同时进行图像采集。

3) 根据彩色响应特性,利用 1) 获取到的色彩标定参数对图像进行色彩补偿和校正。

4) 对处理后的左右图像进行中心线提取,对照彩色编码模式进行解码、匹配运算。

5) 利用三角法测量原理进行三维数据重建。

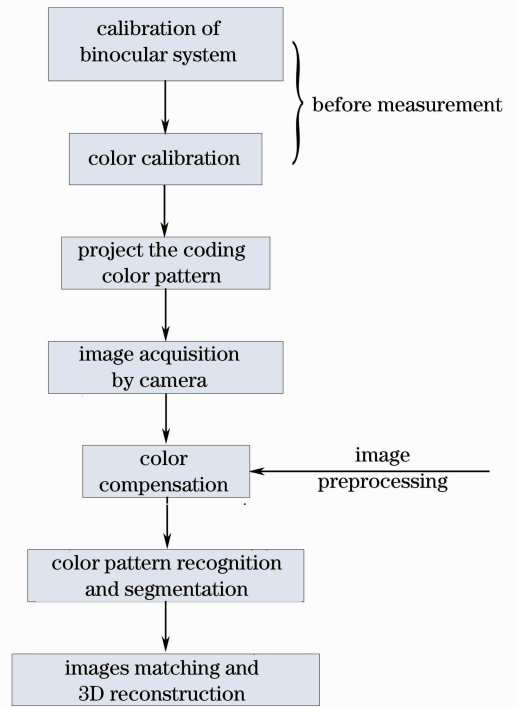


图 7 测量流程

Fig. 7 Process of 3D measurement

3.2 实验过程和分析

实验对象如图 8 所示,物体表面为彩色,颜色丰富。进行相机标定和色彩标定之后,将设计好的彩色条纹图案投影到物体上,左右相机采集被物体高度调制过的彩色条纹图,如图 9(仅列出左相机拍到的图像)所示。



图 8 彩色实验对象

Fig. 8 Color object for experiment

分析图 9 可以看出,彩色结构光照射到实验对象上之后有的条纹颜色,发生了显著的变化,如 p1 处,原本的青色条纹与实验对象上蓝色发生串扰混淆,导致同一条纹在实验对象上和在白纸上呈现出

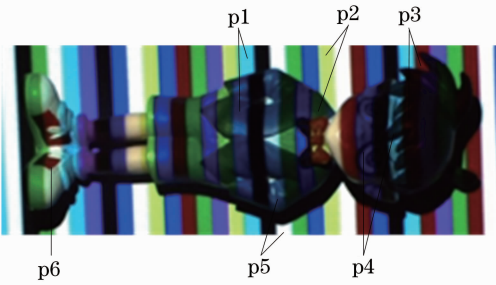


图9 被物体高度调制过的彩色条纹图

Fig. 9 Pattern image modulated by object

两种几乎完全不同的颜色；相类似的情况还有 p2。p3 和 p4 处因为实验对象上局部为黑色，导致任何色光照射上去都呈现出黑色；p5 和 p6 处则呈现出实验对象本身颜色，掩盖了条纹的颜色，这些情况在色彩校正中都得到了很好的改善。

图 10(a)、(b)是分别利用传统的色彩校正方法和本文提出的改进色彩校正方法进行色彩校正后得到的条纹恢复图。

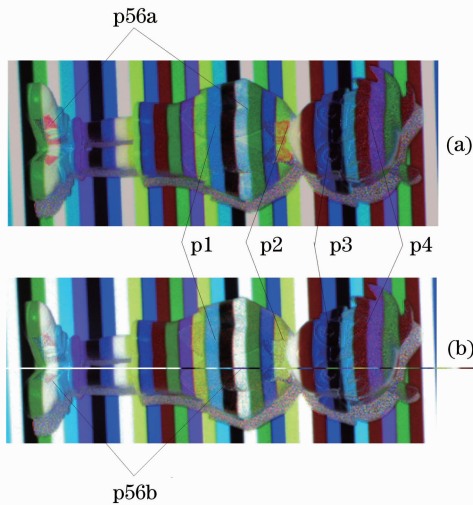


图 10 两种色彩校正方法的效果对比图。(a)传统色彩校正方法；(b)本文提出的色彩校正方法

Fig. 10 Contrast between the two color compensation methods. (a) Image by traditional color compensation method; (b) image by the proposed color compensation method

图 10 中 p1、p2 指向的条纹分别和图 9 中 p1、p2 指向的条纹一致，经过比较可以看出，经过色彩校正后，大大改善了实验对象彩色纹理对条纹颜色的干扰；进一步与投影到白纸上的条纹颜色比较，可以看出，与传统方案相比较，利用本文提出的计算方案进行计算恢复得到的条纹颜色与条纹本身的颜色更接近，去除物体彩色问题更彻底；另外，实验对象

黑色部分条纹也恢复得很好，如图 10 中 p3 和 p4 所示；对于白色条纹中物体本身的颜色，本文提出的方案明显更胜一筹，如图 10 中 p56a 和 p56b 所示。

为了利用彩色条纹中心以及条纹颜色进行双目匹配及三维重建，提取双目图像的彩色边缘，进而利用几何中心法^[13]进行条纹中心的提取。

图 11(a)、(b)两幅边缘条纹图分别对应图 10 (a)、(b)两幅彩色条纹图，采用同样的 canny 边缘检测算法进行边缘提取，同时对非边缘线条进行滤除处理，可以看出，在边缘的有无和细化方面，两幅图相差不多，但就单条边缘线的准确性来说，传统方案得到的边缘线明显不及本文提出的方案，如图 11 中的 t2、t3 和 t4 处，传统方案得到的图像中，在实验对象上部分为蓝色，而白纸上不甚蓝色，二者不一致；而用本文提出的方案得到的图像中整条边缘线均为同一颜色。可见，本文方案的计算过程真正实现了去除实验对象彩色纹理的效果。另外，传统方案有时也会导致边缘线的颜色发生错误，如图 11(a)中 t1 处，实际应该为绿色的边缘线掺杂了青色和红色。

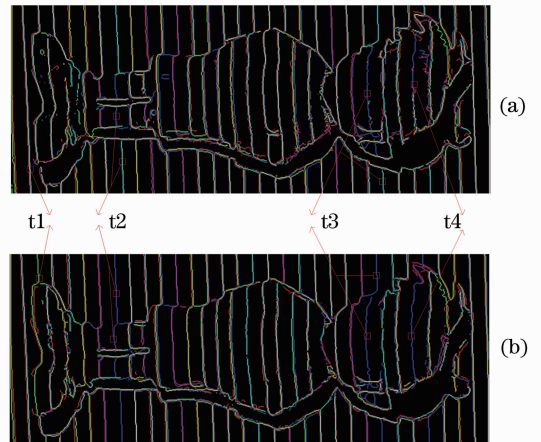


图 11 边缘条纹图。(a)传统方案；(b)本文方案

Fig. 11 Contrast images of edge stripes. (a) Traditional color compensation method; (b) proposed color compensation method

图 12 为利用图 11(b)边缘图进行彩色中心线提取的结果，可以看出得到的中心条纹位置准确，而

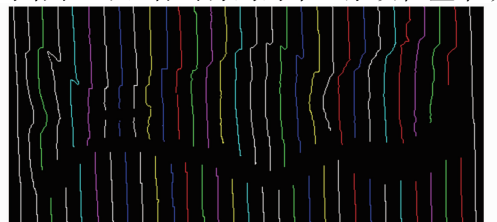


图 12 彩色条纹中心线

Fig. 12 Center lines of color pattern

且基本上都是单像素条纹,有效地保证了后续工作的准确性。

图 13 为彩色中心线被提取出来之后左右条纹中心图进行匹配的工作过程。由于双目图像已经经过极线校正,所以左右图像是行对齐的,匹配工作在左右图像对应行进行。从图中可以看出,在匹配步骤 1)中,将左边条纹中心图中一个条纹中心作为目标条纹[图 13(a)⑥]后,找到其右边相邻的条纹中心,二者组成目标序列(⑥②),此目标序列在左边条纹中心图中是唯一的;将目标序列作为匹配模板在右边条纹中心图中同一行进行遍历,很容易找到

与目标序列相同的匹配序列(匹配序列 2),同时还可以找到与目标条纹相同(⑥)但与目标序列(⑥②)不同的序列,如图 13 中上方的匹配序列 1、3、4、5;在匹配步骤 2)中,将上一步找到的匹配序列 1、3、4、5 中任意一个作为目标序列(⑥⑧),在左边条纹中心图中寻找相应的匹配序列,不但减少了匹配序列(除去了已经匹配好的序列),提高了左右条纹中心图像匹配效率,而且可以对具有相同目标条纹中心的序列进行整体过滤和匹配,准确性更高。这一点与目前大多数双目匹配工作中将一个图像固定作为源图像、另一个图像作为匹配图像有所不同。

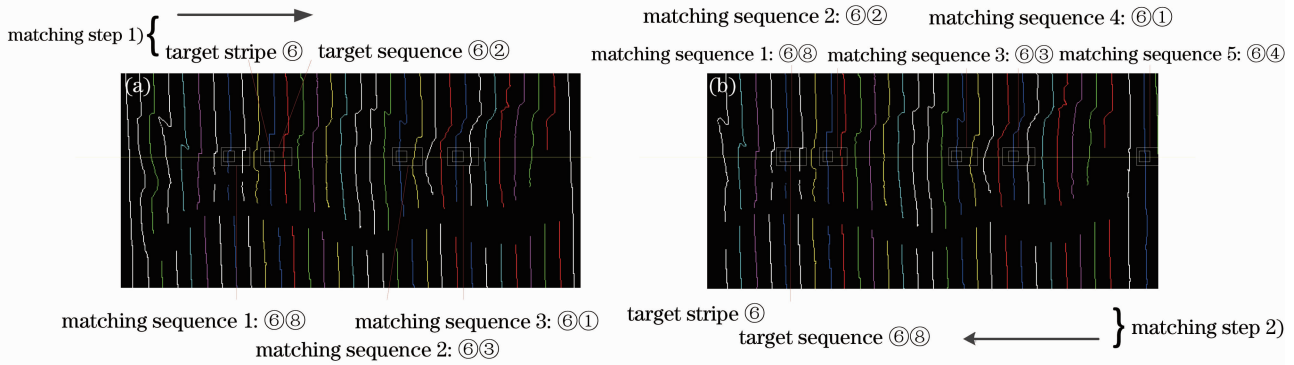


图 13 双目图像匹配。(a)左相机图像;(b)右相机图像

Fig. 13 Matching of binocular images. (a) Left image; (b) right image

由于实验中采用的条纹宽度为 6 pixel,为了得到足够密集的三维点云数据,将投影条纹沿着同一个方向(向左或者向右)移动 2 pixel,3 次投影并且进行三维重建,最终获得密集的三维点云数据,成功完成了实验对象的三维重建工作,最终结果如图 14 所示。

机和投影仪之间对于彩色信息的响应参数,使得测量结果更加准确。理论和实验均证明了该方法的有效性,使得物体即使在本身彩色信息较为复杂的情况下也可以利用彩色结构光双目测量系统进行三维重建,并获得较好的测量结果。

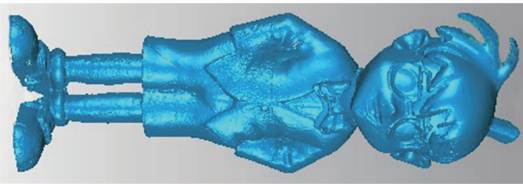


图 14 三维测量结果

Fig. 14 Result of 3D measurement

4 结 论

基于 RGB 模型提出了一种面向彩色物体的双目三维测量编码新方法,该方法利用各种颜色之间的视觉差别进行条纹排列,利用条纹的颜色进行唯一性编码,从而辅助进行双目图像匹配,最终完成三维重建;在重建过程中,对受物体本身彩色纹理影响而发生变化的彩色条纹进行了色彩校正,改善了相

参 考 文 献

- 1 J Pages, J Salvi, R Garcia, *et al.*. Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. 133-138.
- 2 F Chen, G M Brown, M Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. Opt Eng, 2000, 39(1): 10-22.
- 3 F Forster, M Lang, B Radig. Real-time 3D and color camera [C]. Proc ICAV3D 2001, 2001.
- 4 W H Su. Color-encoded fringe projection for 3D shape measurements [J]. Opt Express, 2007, 15(20): 13168-13181.
- 5 S Y Chen, Y F Li, Q Guan, *et al.*. Real-time three-dimensional surface measurement by color encoded light projection [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(11): 111108.
- 6 Yan Xuemei. Research on the Key Technology of 3D Measurement Using Binocular Vision Based on Color Coding [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. 21-37.
- 7 严雪梅. 基于彩色编码的双目三维测量关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012. 21-37.
- 8 Ma Ke, Zhang Qican. A new color structured light coding

- method for three-dimensional measurement of isolated objects [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2918—2924.
- 麻 珂, 张启灿. 分离物体三维测量的彩色结构光编码新方法 [J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2918—2924.
- 8 D Caspi, N Kiryati, J Shamir. Range imaging with adaptive color structured light [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(5): 470—480.
- 9 J Salvi, J Pages, J Battle. Pattern codification strategies in structured light systems [J]. Pattern Recognition, 2004, 37(4): 827—849.
- 10 Bai Ming, Zhuang Yan, Wang Wei. Progress in binocular stereo matching algorithms [J]. Control and Decision, 2008, 23(7): 721—729.
- 白 明, 庄 严, 王 伟. 双目立体匹配算法的研究与进展 [J]. 控制与决策, 2008, 23(7): 721—729.
- 11 Hu Luyao, Da Feipeng, Wang Luyang. A novel color fringe projection method for 3D measurement of colorful objects [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0212002.
- 胡路遥, 达飞鹏, 王露阳. 一种针对彩色物体的光栅投影三维测量方法 [J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0212002.
- 12 Ma Ke, Zhang Qican. A new method to reduce the influence of object's color texture in three-dimensional shape measurement [J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2011, 22(4): 583—588.
- 麻 珂, 张启灿. 三维面形测量中减小物体彩色纹理影响的新方法 [J]. 光电子•激光, 2011, 22(4): 583—588.
- 13 Li Yufang. The Research on the Methods of Stripe Center Extraction for Color-Encoded Structure Light [D]. Changchun: Jilin University, 2011. 31—37.
- 李瑜芳. 彩色结构光条纹中心线提取方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011. 31—37.

栏目编辑: 张浩佳