

# 基于视觉技术的林木生长状态无损测量方法

许 杰<sup>1</sup>, 戚大伟<sup>2</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学 信息技术学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 东北林业大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘 要:**为提高林木生长状态测量的准确性,克服传统测量方法的不足。从视差处理的角度出发,将图像处理技术与视觉理论有机结合,根据不同时间点采集到的树木图像信息,判断出一段时间内树木生长状态的变化情况。试验过程中,将待采集图像的树木上标出红色的矩形信息点,并利用双摄像机针对标出的特征点进行采集,然后将2幅树木图像进行对比研究,分别计算出在一定时间间隔内树木上信息点空间信息,从而确定该段时间内信息点的位置变化。试验结果表明,针对标定的信息点,传统测量方法在高度和粗度分别增长5.63 mm和5.75 mm,二者数值相近,与林木生长实际不符;而基于视觉技术的测量,高度和粗度分别增长2.4 mm和1.5 mm,高度变化是粗度变化的1.6倍,与林木的实际增长过程是一致的。所以,基于视觉技术的测量方法,能够很好地实现对树木的无损测量研究,判断出树木的生长状态变化情况。

**关键词:**双目视觉;颜色提取;目标匹配;特征点

**中图分类号:**S758      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2016)02-0268-07

## Nondestructive Measuring Methods of Tree Growth State Based on Vision Technology

XU Jie<sup>1</sup>, QI Da-wei<sup>2</sup>

(1. College of Information Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

2. College of Science, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

**Abstract:** Departing from the angle of disparity processing, the image processing technology and the theory of binocular vision were combined, and according to tree image information collected at different time points, judgment was made about the change of tree growth state within a period of time. Meanwhile, the traditional measuring method was applied to measure the depth change and changes in horizontal and vertical directions of trees, thus changes in calibration points of trees were judged within a given period. In the experiment, red rectangular information points on the tree were marked and two cameras were used to capture feature points, then the color information of that of the images collected was extracted, according to which the information of the calibration points to be studied was separated and calculated with the pixel center coordinate replacing the calibration points. And at last, the two tree images were compared to calculate the spatial information points on the trees in a certain time interval, so the position change of the time could be determined. The traditional measuring method mainly employs the measuring tools such as meter rule and caliber rule to realize the measuring of the distance between marked information points, and the data processing is relatively simple. But because the center of the calibration points is to be determined artificially, the deviation is not small. Besides, the method has been greatly influenced by the environment, so it is difficult to realize precise measuring. The horizontal increment and vertical increment of this method are very small, which is not consistent with trees growth pattern of the height grow fast and roughness length

收稿日期:2015-05-13    修回日期:2015-08-07

基金项目:国家自然科学基金(31170518);黑龙江省攻关项目(GC01KC156);黑龙江省教育厅科研项目(12531445)。

作者简介:许 杰,男,副教授,博士,研究方向:图像处理及农、林业信息化。E-mail:byndxj@163.com

grow slowly. From the results, the visual measuring method which combines the image processing and the binocular vision can be more precise and accurate in data processing, and the experimental results measured are more consistent with the actual growth laws of tree growth than the traditional one. In addition, it perfectly achieves nondestructive measurement for tree growth, and judge the change of growth process of trees.

**Key words:** binocular vision; color extraction; target matching; feature point

树木生长受自然环境的影响较大,传统的测量方法受到树木外形特征等因素的影响,很难找到一种通用的方法实现对树木空间信息的有效测量<sup>[1]</sup>,而机器视觉可代替人眼对物体进行判断和识别,来满足人们获取树木空间信息的需要<sup>[2-3]</sup>。有关视觉理论在林木生长状态方面的研究,国内外的相关研究已取得了部分成果:胡天翔<sup>[4]</sup>等将双摄像头竖起放置,对树木图像间距进行了测量,但局限于模拟树木;张超<sup>[5]</sup>等将立体视觉技术应用于林木分布测定研究,提高了林木分布的测量精度,但对林木的生长状态未做描述;蔡健荣<sup>[6]</sup>等实现了对果树三维信息的获取与重构,但只局限于某一时间点的果树图像,并未对其生长特征做出具体的分析;项荣<sup>[7]</sup>等利用双目立体视觉实现了对番茄的定位研究,但缺少对不同时间点的对比分析。

目前,国内外尚未见有关利用标定点的信息变化来实现监测树木生长状态的研究报道。通过采用传统测量方法和视觉测量方法分别计算不同时间段内树木标定点图像空间信息的变化情况,并对 2 种方法的测量结果进行了比较分析,证实了采用基于视觉技术的测量方法的科学性与准确性,为实现对树木生长过程的监测研究奠定了良好的技术基础。

1 理论基础

1.1 视觉成像原理

图 1 为简单的平视双目立体成像原理图<sup>[1,8-9]</sup>,2 个摄像机的投影中心连线的距离,即基线距为  $B$ 。

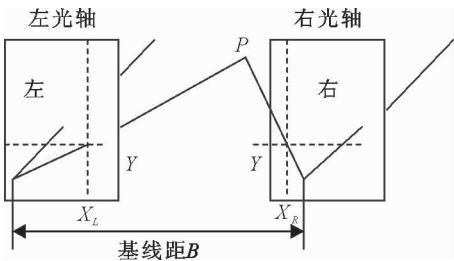


图 1 双目立体成像原理

Fig. 1 Binocular 3D imaging principle

2 个摄像机同一时刻观看空间物体的同一特征点  $P(x_c, y_c, z_c)$ , 分别在左图和右图上获取了点  $P$  的图像坐标分别为  $(X_L, Y)$  和  $(X_R, Y)$ , 设 2 摄像机

的焦距都为  $f$ , 则由三角几何关系得到:

$$\begin{cases} x_c = \frac{B \cdot X_L}{D} \\ y_c = \frac{B \cdot Y}{D} \\ z_c = \frac{B \cdot f}{D} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $D$  为视差,  $D = X_L - X_R$ , 因此左摄像机像面上的任意一点只要能在右摄像机像面上找到对应的匹配点, 就可以确定出该点的三维坐标<sup>[8,10-11]</sup>。

1.2 坐标变换

设图像的大小用  $(M \times N)$  表示, 以图像的左上角为坐标原点  $O_0$ , 设  $(u, v)$  为以像素为单位的坐标,  $(X, Y)$  是以 mm 为单位的坐标, 在  $XY$  坐标系中, 原点  $O_1$  定义在摄像机光轴与图像平面的交点, 设  $O_1$  在  $uv$  坐标系中坐标为  $(u_0, v_0)$ , 每个像素在  $XY$  轴上的物理尺寸为  $dX, dY$ , 坐标变换如图 2 所示<sup>[12-13]</sup>, 则有:

$$\begin{cases} u = \frac{X}{dX} + u_0 \\ v = \frac{Y}{dY} + v_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $dX$  为每一像素在  $X$  轴方向上的物理单位;  $dY$  为每一像素在  $Y$  轴方向上的物理单位。

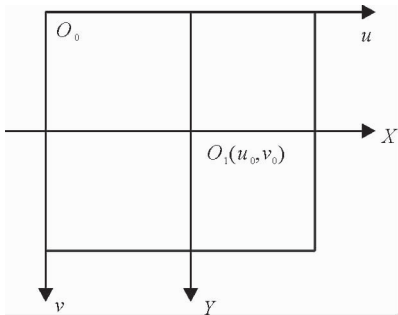


图 2 坐标变换

Fig. 2 Coordinate transformation

1.3 计算视差  $D$

将摄像机水平放置, 光轴保持平行, 成像于同一平面上, 这样视差  $D$  只与像素坐标  $u_1$  和  $u_2$  有关。根据式(2)可知, 像素坐标  $u_1$  和  $u_2$  与物理坐标  $X_1$  和  $X_2$  之间的关系可表示为<sup>[12,14-15]</sup>:

$$X_1 = (u_1 - u_0) dX \quad (3)$$

$$X_2=(u_2-u_0)dX$$

(4)

由此可得：

$$D=X_2-X_1=(u_2-u_1)dX$$

(5)

联立式(5)和式(1),即可求得树木标定点像素中心坐标的空间信息,即

$$x_c=\frac{B\cdot X_L}{(u_2-u_1)dX}$$

(6)

$$y_c=\frac{B\cdot Y}{(u_2-u_1)dX}$$

(7)

$$z_c=\frac{B\cdot f}{(u_2-u_1)dX}$$

(8)

## 2 试验设计

本试验以 MV-VS220 双目立体视觉测量系统平台为依托,用 DS3 水准仪和 J2 经纬仪保证 2 次测量位置不变。选用维视 MV-VS078FC 高分辨率工业摄像机作为图像采集装置,AFT-0814MP 为相机镜头,通过平台提供的硬质三角架进行固定,并与 MV-1394 图像采集卡相连。摄像机的参数设置:成像平面为 3.225 mm×3.225 mm,分辨率为 1 024×768。由此计算出  $dX=3.225/1\,024=0.003\,15\text{ mm}$ ,  $dY=3.225/768=0.004\,2\text{ mm}$ 。在本试验中,摄像机焦距均调整为  $f=20\text{ mm}$ ,初始基线距离  $B=60\text{ mm}$ 。

试验过程中,先在预采集的树木上标定出 4 个类似于矩形的红色信息点,并对测量位置用 DS3 水准仪和 J2 经纬仪进行精确定位。一种方法是采取传统的测量方法通过 50 分度的游标卡尺和测量用米尺实现对标定点中心的距离测量;另一种方法是通过双目视觉测量平台来完成树木标定点的信息采集。设计时将 2 个摄像机平行放置,同时保证红色标定点处于非边缘位置。该试验主要针对树木标定点进行不同时间点、同一位置的树木图像信息采集和测量(本试验间隔为 6 个月)。

## 3 图像处理

### 3.1 图像采集

图像的采集主要以 MV-VS220 双目立体视觉测量系统为依托。本试验主要是针对树木上的红色标定点进行同一位置、不同时间点的图像采集,并对其进行识别和测量。采集时将摄像机水平放置,光轴保持平行,成像于同一平面上。初次采集到的图像如图 3 所示。

### 3.2 颜色提取

摄像机获得的树木标定点图像是含有颜色信息的,在图像处理时,由于所标定的是红色点,在 RGB 颜色空间内,只需提取它的红色通道内的数据即可,

后期的处理只需针对提取到的图像数据就可以了。本论文采用 Matlab 语言的颜色提取算法和命令<sup>[16-18]</sup>,来实现对树木红色标定点的信息提取。

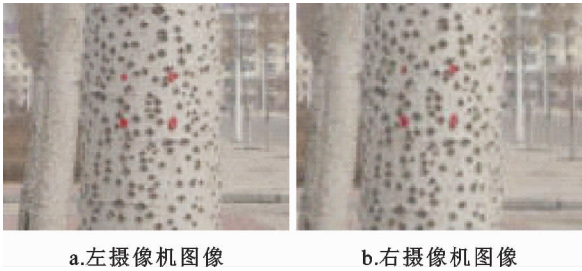


图 3 采集到的图像

Fig. 3 Collected images

### 3.3 标定点分离

由于 4 个红色标定点有别于其他图像信息点,经过颜色提取后的标定点相对稳定,很容易得到标定点的准确信息,从而实现标定点的分离。将提取后的图像进行中值滤波(模板采用 3×3),考虑到图像处理的便利,将灰度图像转化为二值图像,阈值选 0.2,并根据实际数据处理的需要,对二值图像进行取反处理<sup>[13,16-19]</sup>,得到如图 4 所示标定点图像。

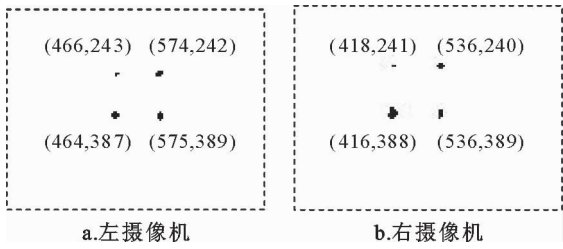


图 4 摄像机标定点及中心坐标

Fig. 4 Camera calibration point and center coordinate

### 3.4 标定点中心确定

由于所采集到的树木图像的每个标定点是由很多个像素点构成的,要精确计算每个标定点的信息很难,本文采用每个标定点的像素中心坐标来计算标定点间的位置关系。本试验中,通过 4 个标定点的基本信息,计算各标定点区域的像素中心,来决定标定点的中心坐标,计算方式如下<sup>[20-22]</sup>:

$$i_m=\frac{1}{N_s}\sum_{(i,j)\in S}i,j_m=\frac{1}{N_s}\sum_{(i,j)\in S}j$$

(9)

式中, $S$  表示连通域,即每个标定点所处的区域, $N_s$  为连通域中像素的个数; $(i_m,j_m)$  为标定点像素中心的坐标。根据摄像机参数设置情况,可得到各标定点像素中心坐标如图 4 所示<sup>[17,23]</sup>。

## 4 数据处理

### 4.1 初始标定点空间信息

根据确定的标定点像素中心坐标,可计算出各

标定点像素中心的空间坐标信息,以图像左上角为坐标原点,世界坐标系与左摄像机坐标系重合<sup>[9,24-25]</sup>,以左上方的像素中心坐标为例,按照式(6)~式(8)计算结果如下:

$$x_{1\text{左上}}=582.50\text{ mm},y_{1\text{左上}}=405.00\text{ mm},z_{1\text{左上}}=7\,936.51\text{ mm}$$

以此类推,计算出其他像素中心坐标:右上(717.5,403.33,7 936.51)、左下(580.0,645.0,7 936.51)、右下(718.75,648.33,7 936.51),改变基线间距,每次增加 2 mm,测量 10 次(表 1)。

根据前述所测得的试验数据,经过 10 次测量后,可计算出各标定点像素中心的平均物理坐标分别为左上(581.82,406.49,7 965.79)、右上(718.67,401.83,7 938.42)、左下(582.14,650.38,7 967.79)、右下(724.94,653.63,7 958.01)。

4.2 6 个月后标定点空间信息

在保证 2 摄像机摄取图像位置不变的情况下,忽略自然因素对摄像机的影响,摄像机的焦距均为

$f=20\text{ mm}$ ,初始基线  $B=60\text{ mm}$ 。6 个月后,左上标定点像素中心的物理坐标为别为:

$$x_{2\text{左上}}=577.50\text{ mm},y_{2\text{左上}}=401.67\text{ mm},z_{2\text{左上}}=7\,936.51\text{ mm}$$

同理,计算出其他像素中心坐标分别为右上(720.0,400.0,7 936.51)、左下(578.75,646.67,7 936.51)、右下(721.25,650.0,7 936.51),改变基线间距,每次增加 2 mm,测量 10 次(表 2)。

经过 10 次测量后,可计算出各标定点像素中心的平均物理坐标分别为左上(579.57,403.1,7 964.92)、右上(717.29,399.05,7 937.67)、左下(581.74,647.11,7 966.53)、右下(722.53,651.15,7 956.7)。

4.3 数值运算与分析

4.3.1 基于视觉测量的数据计算 根据表 1 和表 2 所测得的数据可以看出,各标定点像素中心发生了微小的变化,说明树木在 6 个月的时间段内发生了生长。

表 1 10 次测量结果统计

Table 1 Statistical graph of 10-time measurement results

N	B	左上坐标/mm			右上坐标/mm			左下坐标/mm			右下坐标/mm		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	60	582.50	405.0	7 936.51	717.5	402.38	7 936.51	580.0	645.0	7 936.51	718.75	648.33	7 936.51
2	62	582.63	409.96	8 033.69	714.76	400.11	7 873.02	587.1	652.9	8 033.69	727.55	656.27	8 033.69
3	64	582.78	406.59	7 967.63	720.31	401.92	7 967.63	582.27	647.53	7 967.63	721.57	650.88	7 967.63
4	66	580.30	403.47	7 906.56	728.54	403.54	8 058.61	577.81	642.57	7 906.56	729.81	658.31	8 058.61
5	68	581.81	408.00	7 995.30	722.81	402.32	7 995.30	584.3	649.78	7 995.30	737.74	665.46	8 146.15
6	70	582.50	405.00	7 936.51	717.50	403.33	7 936.51	580.00	645.00	7 936.51	731.82	660.12	8 080.81
7	72	581.36	409.26	8 020.05	713.55	400.55	7 881.77	586.11	651.79	8 020.05	739.29	666.86	8 163.27
8	74	582.27	406.37	7 963.41	719.86	402.71	7 963.41	581.97	647.19	7 963.41	721.19	650.53	7 963.41
9	76	580.59	403.67	7 910.49	715.15	402.01	7 910.49	578.1	642.89	7 910.49	728.33	656.98	8 042.33
10	78	582.26	407.61	7 987.71	716.74	399.49	7 860.92	583.74	649.16	7 987.71	723.39	652.52	7 987.71

表 2 6 个月后 10 次测量结果统计

Table 2 Statistical graph of 10-time measurement results after six months

N	B	左上坐标/mm			右上坐标/mm			左下坐标/mm			右下坐标/mm		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	60	577.50	401.67	7 936.51	720.00	400.00	7 936.51	578.75	646.67	7 936.51	721.25	650.00	7 936.51
2	62	572.88	398.45	7 873.02	714.24	396.8	7 873.02	585.84	649.55	8 023.69	730.08	657.96	8 011.32
3	64	579.76	403.24	7 967.63	708.92	393.85	7 814.41	581.02	649.2	7 967.63	724.08	652.55	7 967.63
4	66	586.38	407.85	8 058.61	709.11	391.11	7 760.14	576.57	644.23	7 906.56	718.53	647.55	7 936.86
5	68	581.78	404.64	7 995.30	712.15	395.64	7 849.93	572.44	639.61	7 849.93	713.38	642.91	7 958.23
6	70	577.50	401.67	7 936.51	720.0	400.00	7 936.51	578.75	646.67	7 936.51	721.25	650.00	7 898.37
7	72	583.58	405.89	8 020.05	715.03	397.24	7 881.77	584.84	650.47	8 020.05	716.28	645.52	7 963.56
8	74	579.46	403.03	7 963.41	722.44	401.36	7 963.41	580.71	648.86	7 963.41	723.69	652.2	7 964.62
9	76	575.61	400.35	7 910.49	724.50	405.33	8 042.33	586.47	647.29	8 042.33	730.87	658.67	7 972.65
10	78	581.23	404.26	7 987.71	726.52	409.18	8 118.66	592.03	648.51	8 018.66	725.9	654.19	7 957.70

4.3.1.1 标定点像素中心坐标的距离变化 由表 1 可得,左上方像素中心坐标与其他 3 个像素中心的空间距离分别为  $L_{1\text{左上右上}}=139.6\text{ mm}$ ;  $L_{1\text{左上左下}}=243.9\text{ mm}$ ;  $L_{1\text{左上右下}}=285.7\text{ mm}$ ;同理,由表 2 可计算出 6 个月后左上方像素中心点与其他像素中心点之间的距离分别为  $L_{2\text{左上右上}}=141.1\text{ mm}$ ;  $L_{2\text{左上左下}}=246.3\text{ mm}$ ;  $L_{2\text{左上右下}}=288.0\text{ mm}$ ;间隔 6 个月后,  $\Delta L_{\text{左上右上}}=1.5\text{ mm}$ ;  $\Delta L_{\text{左上左下}}=2.4\text{ mm}$ ;  $\Delta L_{\text{左上右下}}=2.3\text{ mm}$ .  $\Delta L_{\text{左上右上}}$  说明 X 方向上发生了变化,  $\Delta L_{\text{左上左下}}$  说明 Y 方向上发生了变化。虽然 X 方向和 Y 方向增量只是一个相对量,但其代表了矩形信息点在水平方向和高度方向的增量变化,说明在 6 个月时间内,所标定的矩形信息点发生了生长状态的变化,矩形的大小有所扩大。而垂直方向的变化是水平方向变化的 1.6 倍,说明树木高度上增长较快,而粗度上相对较慢,这与实际树木的生长快慢也是一致的。

4.3.1.2 标定点像素中心坐标的位置变化 由表 1 和表 2 测得的各标定点像素中心坐标来看,  $\Delta_{\text{左上}}=(2.25, 3.39, 0.87)$ ;  $\Delta_{\text{右上}}=(1.38, 2.78, 0.75)$ ;  $\Delta_{\text{左下}}=(0.39, 3.27, 1.26)$ ;  $\Delta_{\text{右下}}=(1.41, 2.52, 1.31)$ 。从试验结果看,6 个月前后各标定点空间信息发生了变化,4 个信息点的像素中心距离均有增加,说明矩形的大小也较原图像有所扩大。上述计算过程中,均采取原数据与 6 个月后图像数据之差

表 3 初始和 6 个月后 10 次测量结果统计

Table 3 Statistical graph of 10-time measurement results between initial and after six months

对应点	初次测量(10 次均值)/mm			6 个月后测量(10 次均值)/mm		
	Z	XY	L	Z	XY	L
左上右上(ULUR)	26.3	135.52	137.42	26.2	139.74	143.17
左上左下(ULLL)	25.9	242.12	243.50	26.8	247.68	249.13
左上右下(ULLR)	25.6	280.26	281.43	26.5	288.32	289.54

4.4 传统测量与视觉测量的对比分析

根据间隔 6 个月测得的结果,无论是采取视觉测量方法还是传统测量方法,各标定信息点间距均发生了变化,说明树木的生长状态发生了改变。但传统测量与视觉测量相比仍有很多不足之处,主要体现在:1)从测量精度上看,传统测量中的米尺最小分度为 1 mm,游标卡尺最小分度为 0.02 mm;而本试验的图像测量最小单位达到 0.004 2 mm,从数据精度的角度考虑,传统测量不如视觉测量。2)从测量结果上看,传统测量的水平方向增长了 5.75 (mm),说明树横向变粗了,而垂直方向增长了 5.63 (mm),说明树长高了,二者增长量非常接近,这与树木生长中高度长得快、粗度长得慢是不相符的<sup>[22,27]</sup>;而视觉测量中垂直方向的变化是水平方向

的形式进行的,而且是以图像左上角为坐标原点。而 XZ 方向的数据变化较小,Y 方向数据变化相对大一些,这与树木生长过程高度长得快一些、粗度慢一些也是相符的<sup>[13,21,26]</sup>。由此分析,若时间间隔增长,矩形点像素中心的位置和间距增量也会增加,矩形的大小也将会继续扩大。

4.3.2 基于传统测量的数据计算 在实际测量过程中,对树木深度方向用最小分度为 1 mm 的米尺来进行测量;在水平和垂直方向上采用 50 分度的游标卡尺来进行测量,而且是在测量技术人员的协助下来完成的,以保证测量方法具有可行性、准确性。本试验只针对树木信息点的间距进行了测量,采取测量 10 次取均值再进行间距计算的方式进行。初始和 6 个月后的测量结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,利用传统的测量方法也可以实现对树木生长状态各个参量的测量,间隔 6 个月后,  $\Delta L_{\text{左上右上}}=5.75\text{ mm}$ ;  $\Delta L_{\text{左上左下}}=5.63\text{ mm}$ ;  $\Delta L_{\text{左上右下}}=8.11\text{ mm}$ ,说明树木在 6 个月时间范围内发生了生长状态的变化。  $\Delta L_{\text{左上右上}}$  代表水平方向上的增长,  $\Delta L_{\text{左上左下}}$  代表垂直方向上的增长。经过 6 个月生长后,4 个矩形点的间距发生了不同程度的增长,矩形的大小也有所扩大,但由于水平方向和高度方向增量非常接近,这与树木粗度上长得慢、高度上长得快是不相符的。主要原因是在测量过程中,周围环境和人工操作等因素引起的测量误差所导致的。

变化的 1.6 倍,这与实际树木的生长快慢是一致的。

3)从误差处理上看,传统测量是人为选择信息点中心来进行距离测量,数据来源和处理方式欠准确;而视觉测量只需处理好采集到的图像信息点即可,通过计算来确定像素中心坐标,测量结果更准确、科学。4)从采集环境上看,传统测量需到试验现场进行记录,人工来完成现场测量,受自然环境影响较大,测量结果缺乏准确性;而视觉测量对测量环境要求较低<sup>[12,28]</sup>,即使树木经风雨而姿态发生改变,所标定的 4 个矩形信息点的间距也是相对稳定的。

5 结论

采用双目视觉系统平台和传统测量方法对树木标定点的图像信息进行了采集和处理,并对二者间

隔 6 个月的测量结果进行了比较研究。从结果上看,传统测量高度上与粗度上的数据变化相近,与树木的生长实际不符;基于视觉的测量方法树木标定点的高度增长(2.4 mm)是粗度增长(1.5 mm)的 1.6 倍,测量结果更合理,符合树木生长规律,充分说明该方法能够很好地实现对树木的无损测量研究。本文虽然只对给定树木标定点的空间变化进行了分析和研究,但该方法为实现对图像视场下多幅树木图像的监测研究指明了方向,也为实现对树木生长过程的远程无线监测、促进林业信息化提供必要的技术支持。

参考文献:

[1] 周博. 基于图像拼接的扩大树木图像采集视野研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.

[2] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[3] 李庆中, 汪懋华. 基于计算机视觉的水果实时分级技术发展与展望[J]. 农业机械学报, 1999, 30(6): 1-7.  
LI Q Z, WANG M H. Deleopment and prospect of real time fruit grading technique based on computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(6): 1-7. (in Chinese)

[4] 胡天翔, 郑加强, 周宏平. 基于双目视觉的树木图像测距方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 158-162.  
HU T X, ZHENG J Q, ZHOU H P. Measurement method of depth information of tree images based on binocular vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 158-162. (in Chinese)

[5] 张超, 王雪峰, 唐守正. 立体视觉技术应用于林木个体分布格局测定研究[J]. 林业科学研究, 2004, 17(5): 564-569.  
ZHANG C, WANG X F, TANG S Z. Research on the application of stereo vision technology on measuring tree distribution pattern[J]. Forest Research, 2004, 17(5): 564-569. (in Chinese)

[6] 蔡健荣, 孙海波, 李永平, 等. 基于双目立体视觉的果树三维信息获取与重构[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 152-156.  
CAI J R, SUN H B, LI Y P, *et al.* Fruit trees 3-D information perception and reconstruction based on binocular stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 152-156. (in Chinese)

[7] 项荣, 应义斌, 蒋焕煜, 等. 基于双目立体视觉的番茄定位[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 161-167.  
XIANG R, YING Y B, JIANG H Y, *et al.* Localization of tomatoes based on binocular stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 161-167. (in Chinese)

[8] 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[9] 章毓晋. 图像工程: 下册. 图像理解与计算机视觉[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

[10] HIRSCHMÜLLER H, INNOCENT P R, GARIBALDI J M. Real-time correlation-based stereo vision with reduced border

errors[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1/2/3): 229-246.

[11] 多化豫, 高峰, 李福胜, 等. 基于图像处理的木片与树皮的新识别参数研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(1): 207-210.  
DUO H Y, GAO F, LI F S, *et al.* Approaching to the new identification parameter on wood and bark based on image processing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(1): 207-210. (in Chinese)

[12] 李海军, 潘晓露, 李一民, 等. 平行双目视觉系统中深度图像的生成与分析[J]. 计算机与数字工程, 2006, 34(2): 50-52.  
LI H J, PAN X L, LI Y M, *et al.* Creating and analysis of depth-map in parallel two-eyes-visual system[J]. Computer & Digital Engineering, 2006, 34(2): 50-52.

[13] 马凯. 基于立体视觉的树木图像深度信息提取研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.

[14] 严涛, 吴恩华. 基于多幅图像的树木造型方法[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(5): 565-571.  
YAN T, WU E H. Multiple-image-based modeling of trees[J]. Jurnal of System Simulation, 2000, 12(5): 565-571. (in Chinese)

[15] 李伟, 林家春, 谭豫之, 等. 基于图像处理技术的种子粒距检测方法研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 165-168.  
LI W, LIN J C, TAN Y Z, *et al.* Measuring method of seed pacing on test rig based on image processing techniques[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(6): 165-168. (in Chinese)

[16] 张汗灵. Matlab 在图像处理中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[17] 朱虹. 数字图像处理基础[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[18] STEGER C, ULRICH M, WIEDEMANN C. Machine vision algorithms and applications[M]. Berlin: Wiley-VCH, 2008: 241-257.

[19] 吕朝辉, 陈晓光, 郑元杰, 等. 立体视觉技术在秧苗直立度测定中的应用[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4): 127-130.  
LÜ C H, CHEN X G, ZHENG Y J, *et al.* Application of three dimensional vision technique inmeasuring seedling perpendicularity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2001, 17(4): 127-130. (in Chinese)

[20] CLARK M L, CLARK D B, ROBERTS D A. Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3): 682-891.

[21] 童雀菊, 华毓坤, 黄元生. 用图像处理法采集原木形状参数的研究[J]. 林业科学, 1998, 34(3): 87-96.  
TONG Q J, HUA Y K, HUANG Y S. A study of gathering the log shape data by image processing[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1998, 34(3): 87-96. (in Chinese)

[22] 向海涛, 郑加强, 周宏平. 基于机器视觉的树木图像实时采集与识别系统[J]. 林业科学, 2004, 40(3): 144-148.  
XIANG H T, ZHENG J Q, ZHOU H P. Real-time tree image acquisition and recognition system based on machine vision[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(3): 144-148. (in Chinese)

[23] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration

[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[24] 吴继华,刘燕德,欧阳爱国. 基于机器视觉的种子品种实时检测系统研究[J]. 传感技术学报, 2005, 18(4): 742-745.  
WU J H, LIU Y D, OUYANG A G. Research on real time identification of seed variety by machine vision technology[J]. Journal of Translucution Technology, 2005, 18(4): 742-745. (in Chinese)

[25] 白雪冰,郭景秋,陈凯,等. 结合 C-V 模型水平集与形态学的彩色树木图像分割[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(2): 196-200.  
BAI X B, GUO J Q, CHEN K, *et al.* Color tree image segmentation method integrating a set of C-V plane models with morphological processing operation[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(2): 196-200. (in Chinese)

[26] AHUJA N. A transform for multi-scale image segmentation by integrated edge and region detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(12): 1211-1235.

[27] MÜHLMANN K, MAIER D, HESSER J, *et al.* Calculating dense disparity maps from color stereo images an efficient implementation[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1/2/3): 79-88.

[28] 王春华,杨克俭,韩栋. 基于分枝类型和空间点的三维树木建模方法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(4): 1591-1593.  
WANG C H, YANG K J, HAN D. Trees' 3D modeling based on branching type and space points[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(4): 1591-1593. (in Chinese)

(上接第 14 页)

[15] 王丹,王宾,戴伟,等. 杉木人工林土壤系统有机碳相关变量的通径分析[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 822-826.  
WANG D, WANG B, DAI W, *et al.* Path analysis on the correlative variables of organic carbon in soil system of Chinese Fir plantations [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(4): 822-826. (in Chinese)

[16] 杨允菲,葛滢. 纤毛鹅观草种群籽粒产量性状相关因素的多元分析[J]. 草业科学, 1990, 7(2): 47-51.  
YANG Y F, GE Y. Multiple analysis on the character of grain yield and the related factors of *Roegneria ciliris* population [J]. Pratacultural Science, 1990, 7(2): 47-51.

[17] 喻阳华,李光容,严令斌,等. 赤水河上游主要树种枯落物调蓄水分效应[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3): 41-46.  
YU Y H, LI G R, YAN L B, *et al.* Effect of litters of major tree species on the water storage in upper reaches of Chishui River [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(3): 41-46.

[18] 何常清,薛建辉,吴永波,等. 应用修正的 Gash 解析模型对岷江上游亚高山川滇高山栎林林冠截留的模拟[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1125-1132.  
HE C Q, XUE J H, WU Y B, *et al.* Application of a revised Gash analytical model to simulate subalpine *Quercus aquifolioides* forest canopy interception in the upper reaches of Minjiang River [J]. Acta Ecological Sinica, 2010, 30(5): 1125-1132. (in Chinese)

[19] 芦新建,贺康宁,王辉,等. 应用 Gash 模型对青海高寒区华北落叶松人工林林冠截留的模拟[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 44-48.  
LU X J, HE K N, WANG H, *et al.* Simulation of canopy rainfall interception of the *Larix principis-rupprechtii* artificial forest with the Gash model in high-code areas of Qinghai Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 44-48. (in Chinese)

[20] 芦新建,贺康宁,王辉,等. AWRA-L 模型估算区域林冠降雨截留量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 137-144.  
LU X J, HE K N, WANG H, *et al.* AWRA-L model for simulating interception of rainfall loss in large scale [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(7): 137-144.