

基于层次分析法的 CCD 像元细分算法综合评价

陈家伟 张元飞* 张 禹 谢宗武

哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 基于 CCD 的激光测距传感器通过像元细分, 可有效提高该类传感器的测量精度。诸多的像元细分算法, 每种都有其优缺点及特定应用。然而针对特定的测距传感器, 如何综合评价哪种算法更优, 尚缺乏有效手段。因此, 提出了基于层次分析法的像元细分算法优劣的综合评价方法, 该方法基于像元细分算法在传感器测量范围的近段、中段和远段的实际定位精度、方差和极差等指标, 利用层次分析法构建综合评价模型。利用该方法, 实验分析了二分法、加权质心法、加权多项式插值法和按比例求中心法等像元细分算法对特定测距传感器的适用性。实验结果表明, 该方法能够有效获取适用于特定测距传感器的最优像元细分算法。

关键词 传感器; CCD 像元细分; 综合评价; 层次分析法; 激光测距传感器

中图分类号 TP212.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0728002

A Comprehensive Evaluation Method Based on Analytic Hierarchy Process for CCD Pixel Subdivision Algorithms

Chen Jiawei Zhang Yuanfei Zhang Yu Xie Zongwu

State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The accuracy of laser range finder based on CCD can be effectively improved by pixel subdivision. There are many pixel subdivision algorithms, and each has advantages and specific application. However, according to the specific range finder, there is no effective mean to evaluate which algorithm is better comprehensively. Hence, a comprehensive evaluation method is proposed, which is based on analytic hierarchy process (AHP) and is used to evaluate the pixel subdivision algorithms. This method is based on actual positioning precision, variance and range of the pixel subdivision algorithms in the proximal, the middle and the distal of measuring range of the laser range finder. And it constructs the comprehensive evaluation model by AHP. According to the method, the applicability of the dichotomy, weighted centroid, weighted polynomial interpolation and center from the proportion algorithm for the specific range finder is analyzed by experiment. The experimental results show that the method can be used to obtain the optimal pixel subdivision algorithm for specific range sensor effectively.

Key words sensors; pixel subdivision for CCD; comprehensive evaluation; analytic hierarchy process (AHP); laser range finder

OCIS codes 280.3420; 040.1520; 150.1135

1 引言

从问世以来, 由于具有测量速度快、精度高、抗干扰能力强等优点, 基于 CCD 的激光测距系统取得了飞速的发展, 并有着广泛的应用^[1-5]。CCD 作为激光测距系统的主要探测元件, 其研究直接关系到测距系统的测量精确度, 而光斑中心的精确定位就是针对 CCD 的关键研究之一。以线阵 CCD 为例, 线阵 CCD 是由若干个光敏像元紧密排列组成的, 要精确定位 CCD 的光斑中心, 可以将光敏像元制造的足够小, 或者研究线阵

收稿日期: 2015-01-21; 收到修改稿日期: 2015-03-30

基金项目: 国家 973 计划(2013CB733103)

作者简介: 陈家伟(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事机器人技术及传感器研究。E-mail: chenjiawei0427@163.com

导师简介: 谢宗武(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事机电一体化技术、空间机器人等方面的研究。

E-mail: xiezongwu@hit.edu.cn

*通信联系人。 E-mail: zhangyuanfei-110@163.com

CCD像元的细分算法以满足实际工程的需要。减小光敏元件的尺寸具有较大技术难度并增加经济成本;而线阵 CCD 的像元细分算法实现简单,成本较低,在实际应用中效果显著。

对线阵 CCD 像元细分算法的研究一直都在进行。常见的像元细分算法有二分法、质心法、截止电压法、按比例求中心法以及阶梯法等^[6]。对于正态分布的像元灰度信息,对质心法作改进,以灰度值的平方作为权值,求得的像元中心称为平方加权质心法,可以降低白噪声对像元中心定位的影响^[7]。将被测物面不同倾斜角度时的测量偏差与倾斜角度建立一个函数库,对该函数库进行曲线拟合,产生一条标准倾斜角度误差曲线,根据该曲线对测量结果进行校正,该算法可以很好地减小表面倾斜对激光测量的影响^[8]。

虽然对 CCD 像元亚细分算法的研究始终没有停止过,并且取得了不错的成果,但是各种细分算法都有各自的优缺点,如二分法计算简单、易于实现,但分辨率较低,定位精度不高;曲线拟合的方法定位精度较高,但计算复杂。并且针对不同测量距离和测量频率,同一种算法的测量精度和稳定性等也有所不同,不能单从某一方面就对细分算法进行简单的评价,算法的优劣应该结合实际需要进行综合考虑。而对于 CCD 像元亚细分算法的优劣,还没有固定的评判体系。

美国运筹学家于 20 世纪 70 年代提出层次分析法(AHP),为美国各部门成功解决了电力分配、应急研究和石油价格预测等问题^[9]。层次分析法是一种将定性与定量相结合的实用决策分析方法,能够将决策者的需求予以量化,可以有效解决复杂的决策问题。该方法首先将复杂的决策问题按照一定属性分为若干层次和若干因素,对同一层两两因素之间的重要性进行比较判断,建立判断矩阵,通过计算判断矩阵的最大特征值和对应的特征向量,并进行组合权向量计算得出不同方案的重要性或适应性的权重,为选择最佳方案提供依据。作为一种成熟的复杂问题决策方法,层次分析法在很多领域都有应用。郭金玉等^[10]将层次分析法用于职业危害监管研究领域;林国金^[11]提出将层次分析法应用在企业财务风险评估中;赵保卿等^[12]认为层次分析法也可以解决内部审计外包内容决策问题,并利用层次分析法对多种外包方案进行了评价;孙亚林等^[13]运用层次分析法评价多子芋种质资源,根据评价结果对多子芋种质划分等级。CCD 像元细分算法的优劣评价需要综合考虑多方面因素,并且因素不是定量的,属于复杂的决策问题,但是还未有人利用层次分析法评价像元细分算法的优劣。这里引入层次分析法,建立线阵 CCD 像元细分算法的评价模型,该模型可有效评价各种像元细分算法对特定的传感器的适用度,并获取最优的像元细分算法。

为了验证该方法的有效性,本文针对机器人用激光测距传感器^[14],选取二分法、加权质心法、加权多项式插值法和按比例求中心法等四种典型像元细分算法,进行综合性能优劣评价。简要介绍上述四种像元细分算法,并分析各自特点;基于层次分析法,建立像元细分算法优劣综合评价模型,对模型作详细阐述;实验验证该方法的有效性。

2 线阵 CCD 像元细分算法

CCD 在近距离探测时,其探测的目标可以看作一个点。点目标辐射经过大气传输,进入光学系统成像的这一过程中,会因为大气抖动,使得目标像元点弥散。经过 CCD 的采样积分之后,其灰度分布如图 1 所示。

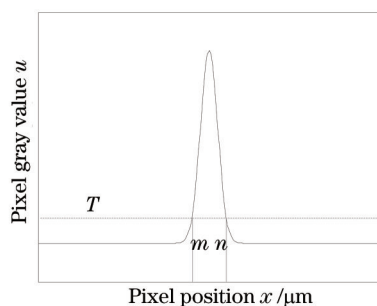


图 1 CCD 像元灰度分布

Fig.1 Pixel gray value distribution of CCD

以一个有效阈值 T 截取 CCD 模块的输出信号,设其超过阈值的部分起始像元个数为 m ,终止像元数为 n ,超过阈值的像元个数为 L ,以下对各种算法的研究均是针对这 L 个超过阈值的像元的。

2.1 二分法

二分法是最常见的细分方法,它的优点是高速、易实现,主要应用于光强的理论分布明暗变化明显的环境下,表示为

$$X = \frac{m+n}{2}. \quad (1)$$

该方法在实际工程中应用较多,但是此方法的分辨率不高,像元中心的定位不准确,这导致实际测距的精确度不高。

2.2 加权质心法

加权质心法是在质心法的基础上改进的,以灰度值的平方代替灰度值作为权值,表示为

$$X = \frac{\sum_{i=m}^n u_i^2 \cdot i}{\sum_{i=m}^n u_i}, \quad (2)$$

式中 u_i 代表第 i 个像元的灰度值。该方法将离中心比较近的灰度值较大的像素点对中心位置的影响凸显出来,可以降低系统噪声的影响。但是在被测面不平整时,CCD 输出信号会有一些的缺陷,很容易出现双峰,此时该方法所得的像元中心会严重影响系统的准确度。

2.3 加权多项式插值法

多项式插值法在实际工程中应用颇多,以二次多项式为例,对于 CCD 采集到的像元及其灰度值信号 $f(x_i, u_i)$,以灰度值最大点作为像元中心,将像元定位到像素 x_j ,在 x 方向上,以 u_{j-1}, u_j, u_{j+1} 为函数值, x_{j-1} 和 x_{j+1} 为插值节点,则像元中心为

$$X = x_j + \frac{u_{j-1} - u_{j+1}}{2(u_{j-1} - 2u_j + u_{j+1})}. \quad (3)$$

实际上,所有的像元及灰度信息对 CCD 像元的细分都是有影响的,只取最大值及附近的两个点进行插值,所得的像元中心精度不高。

以像元灰度值最大点将光斑定位到像元 x_j 之后,已知超过阈值的像元个数为 L ,选取点 $(x_{j-1}, u_{j-1}), (x_{j-2}, u_{j-2}), \dots, (x_{j-q}, u_{j-q})$ 和 $(x_{j+1}, u_{j+1}), (x_{j+2}, u_{j+2}), \dots, (x_{j+q}, u_{j+q})$ 为插值点,其中 q 为 $j-1$ 和 $L-j$ 的最小值,可以得到 q 个光斑的位置。

$$\begin{aligned} x'_1 &= x_j + \frac{u_{j-1} - u_{j+1}}{2(u_{j-1} - 2u_j + u_{j+1})}, \\ x'_2 &= x_j + \frac{2(u_{j-2} - u_{j+2})}{2(u_{j-2} - 2u_j + u_{j+2})}, \\ &\vdots \\ x'_q &= x_j + \frac{q(u_{j-q} - u_{j+q})}{2(u_{j-q} - 2u_j + u_{j+q})}. \end{aligned} \quad (4)$$

对(4)式求得的 q 个像元中心,一般而言,距离 x_j 越近的对像元中心的影响越大,因此需要对这 q 个像元中心做加权处理,以加权结果作为最终的像元亚细分算法,有

$$X = \frac{\sum_{i=1}^q (q+1-i)x'_i}{\sum_{i=1}^q i}. \quad (5)$$

该方法将灰度值对像元中心的影响根据远近程度做加权处理,可以进一步提高光斑的定位精度。但是该方法计算复杂,不易实现。

2.4 按比例求中心法

超过阈值 T 的 CCD 像元灰度值图像如图 2 所示,选取一个合适的 T_{new} 对图像进行截取,与图像交于 p, q 两点,设 p, q 相邻的像元位置为 x_1, x_2, x_3, x_4 ,与之对应的像元灰度值为 u_1, u_2, u_3, u_4 。

利用线性插值,可以确定 p, q 两点的位置,表示为

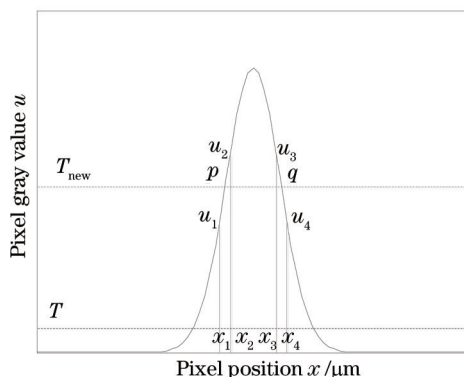


图2 按比例求中心法示意图

Fig.2 Center based on proportion algorithm

$$\begin{cases} x_p = x_2 - \frac{(x_2 - x_1)(u_2 - T_{new})}{u_2 - u_1} \\ x_q = x_4 - \frac{(x_4 - x_3)(u_4 - T_{new})}{u_4 - u_3} \end{cases} \quad (6)$$

再利用二分法求出 CCD 的像元中心,有

$$X = \frac{x_p + x_q}{2} \quad (7)$$

该方法计算简单,易于实现,相比于二分法,分辨率更高。但是该方法易受噪声的影响,同时 T_{new} 的选择也影响到像元中心定位的准确性。

3 像元细分算法综合评价的层次分析模型

利用层次分析法建模时,首先需要在分析问题的基础上,将所有因素按属性分为若干层,一般包括目标层、准则层和方案层;其次从模型的第二层开始,构造判断矩阵,直到最后一层,对因素进行量化;然后计算每一个成对矩阵的最大特征值及特征向量,并利用一致性指标和随机一致性指标进行检验;最后计算方案层对目标层的组合权向量,并进行组合一致性检验。若一致性检验通过,则所求得特征向量可作为权向量,否则,需要重新构造判断矩阵。

CCD 像元细分算法的评价不能单一地依据某一指标,而是要将多方面因素综合考虑,属于比较复杂的决策问题。设评价算法优劣的指标为 Q 。在不同的工作环境下,如测距范围、测距频率等,各种算法的工况指标为 D 。选取不同工况下,CCD 像元细分算法的计算结果指标作为评价因素 C 。通过实验的方法测得每一个工况下的评价因素,建立基于层次分析法的像元细分算法的评价系统。图 3 给出该评价系统的层次结构。

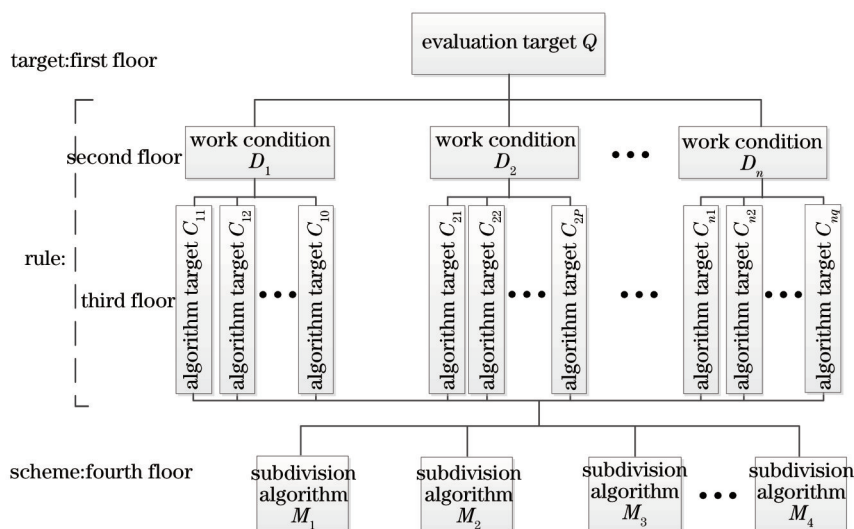


图3 像元细分算法综合评价模型

Fig.3 Comprehensive evaluation for pixel subdivision algorithms

层次分析法不是将所有因素放在一起比较,而是两两元素相互对比,从而得到某一层 n 个因素 B_1, B_2, \dots, B_n 对上层一个因素 O 的影响矩阵,该矩阵称为判断矩阵:

$$A = (a_{ij})_{n \times n}, a_{ij} > 0, a_{ji} = 1/a_{ij}, \quad (8)$$

式中 a_{ij} 表示 B_i 和 B_j 对 O 的影响之比。在进行定性比较时,采用 1~9 尺度,来说明下层某两个因素对上层某一目标的影响比例。表 1 给出了 1~9 尺度的具体比较方法。

表 1 1~9 比较尺度

Table 1 1~9 measurement of comparison

Measurement of comparison a_{ij}	Meanings
1	Influence of B_i is the same as B_j
3	Influence of B_i is a little bigger than B_j
5	The Influence of B_i is bigger than B_j
7	Influence of B_i is obviously bigger than B_j
9	Influence of B_i is absolutely bigger than B_j
2,4,6,8	Proportion of influence of B_i to B_j is between the proportion above
1,1/2,1/3, ..., 1/9	Proportion of influence of B_i to B_j is reciprocal of the proportion above

判断矩阵的一致性是指确定矩阵时,各因素的影响之比符合人们的思维习惯。若判断矩阵 A 可以通过一致性检验,则用其最大特征根 λ_{\max} 对应的特征向量 ω (归一化)作为 B_1, B_2, \dots, B_n 对上层因素 O 的权向量。

A 的一致性指标(C_1)记为 C_1 ,当矩阵的一致性比率(CR) $C_1/R_1 < 0.1$ 时,矩阵 A 通过一致性检验,CR 计算如下:

$$\begin{cases} C_1 = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \\ C_R = \frac{C_1}{R_1} \end{cases}, \quad (9)$$

式中 R_1 为随机一致性指标(RI),如表 2 表示。

表 2 随机一致性指标

Table 2 Random consistency index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

设第二层对第一层的权向量为 $\omega^{(2)}$,以第 k 层对 $k-1$ 层的权向量作为列向量的矩阵为 $W^{(k)}$,则第 k 层对第 $k-1$ 层的组合权向量为

$$\omega^{(k)} = W^{(k)} \omega^{(k-1)}. \quad (10)$$

除去对每个判断矩阵进行一致性检验外,还需进行组合一致性检验,只有通过组合一致性检验, $\omega^{(k)}$ 才可以作为判断算法优劣的权重。

若第 k 层的一致性指标为 $C_{11}^k, C_{12}^k, \dots, C_{1n}^k$, n 为第 $k-1$ 层的因素个数,随机一致性指标为 $R_{11}^k, R_{12}^k, \dots, R_{1n}^k$, 定义为

$$\begin{aligned} C_1^{(k)} &= [C_{11}^k \ C_{12}^k \ \dots \ C_{1n}^k] \omega^{(k-1)} \\ R_1^{(k)} &= [R_{11}^k \ R_{12}^k \ \dots \ R_{1n}^k] \omega^{(k-1)}. \end{aligned} \quad (11)$$

第 k 层通过一致性检验的条件为

$$C_R^{(k)} = C_1^{(k)} / R_1^{(k)} < 0.1. \quad (12)$$

定义第 k 层对第一层的组合一致性比率 C_R^* 为

$$C_R^* = \sum_{i=2}^k C_R^{(i)}. \quad (13)$$

C_R^* 足够小时, $\omega^{(k)}$ 才可以作为判断算法优劣的权重。

4 实验结果及分析

4.1 机器人用激光测距传感器

机器人用激光测距传感器如图 4 所示。

该传感器主要应用于轻型机械臂末端的近距离测距,易集成于机械臂控制系统,能有效提高轻型机械臂末端定位精度。理论上,该传感器的测距范围为25~350 mm,体积47 mm×50 mm×15 mm,质量70 g。使用的线阵CCD共有5340 pixel,像元尺寸为4 μm。文献[14]对该传感器进行了充分的介绍。

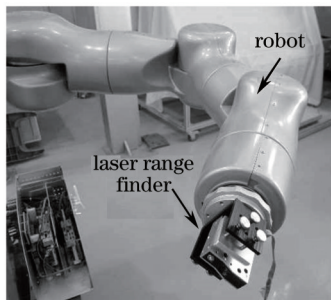


图4 机器人用激光测距传感器
Fig.4 Laser range finder for robot

4.2 判断矩阵的确定

以机器人用激光测距传感器为例,工况 D 选为这里关心的测距范围,将测距范围划分为测量的近段 D_1 、中段 D_2 和远段 D_3 。对于每一种测距范围,其算法指标为测量精度 C 和代表算法稳定性指标的方差 E 和极差 P 。CCD 像元细分算法则选择典型的二分法 M_1 、加权质心法 M_2 、加权多项式插值法 M_3 和按比例求中心法 M_4 。机器人用激光测距传感器的像元细分算法评价系统如图5所示。

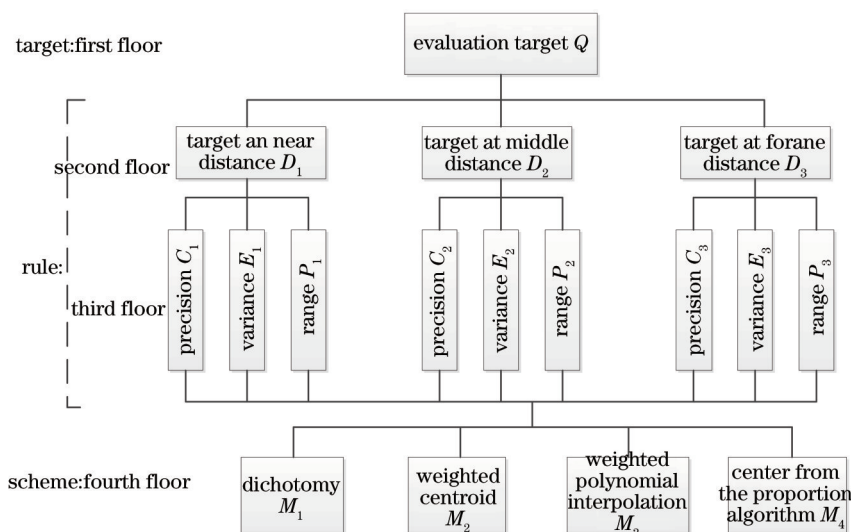


图5 激光测距传感器的像元细分算法评价系统

Fig.5 Comprehensive evaluation for pixel subdivision algorithms of laser range finder

机器人用激光测距传感器,测距的范围是25~350mm^[9],但是其主要的工作范围在测量的中段附近,因此第二层对第一层的影响,指标 D_2 权值最大;而在测量中段之后,极近段的测距精确与否,也对任务的完成有着至关重要的作用,故指标 D_1 次之。根据上述,得到 D_1 、 D_2 、 D_3 对目标 Q 的两两相互比较矩阵如表3所示。

表3 D_1 、 D_2 、 D_3 对 Q 的判断矩阵

Table 3 Pairwise comparison matrix of D_1 、 D_2 、 D_3 for Q

Q	D_1	D_2	D_3	$\omega^{(2)}$
D_1	1	1/4	3	0.2176
D_2	4	1	6	0.6910
D_3	1/3	1/6	1	0.0914

$$C_r = 0.0268, C_r = 0.0462$$

精度 C 以及稳定性指标方差 E 和极差 P 作为静态指标提取点的提取因素,其对上层目标 D 的影响由于 D 的变化而不同。根据激光测距传感器的理论灵敏度分析可以知道(图6),在测量近段,实际距离有细微的变化,像元中心也会随之变化,此时,算法的细分对结果的影响不大,应以测量的稳定性指标作为主要评判指

标;而在测量的远段,此时细分算法的精度 C 显得极为重要,应以之为主要评判指标。

根据传感器的灵敏度分析,由于噪声的存在,近段一个实际距离可能对应好几个像元,因此像元中心定位的结果浮动会比较大;与之相反,远段的计算结果浮动比较小,假设系统的噪声干扰一定,那么理想的近段和远段的像元中心计算结果如图 7 所示。

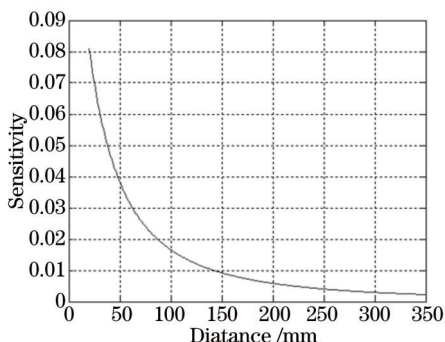


图 6 灵敏度随测距范围的变化

Fig.6 Changes in sensitivity versus range

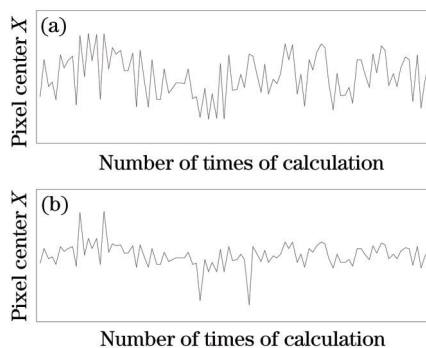


图 7 理想的(a)近段和(b)远段的像元中心波动

Fig.7 Ideal pixel center fluctuation of (a) proximal and (b) distal

对于图 7,在近段以极差 P 作为影响计算结果稳定性的主要因素,而在测量远段,方差 E 更能体现像元中心计算结果的稳定性。得到第三层对第二层的两两相互比较矩阵如表 4~6 所示。

表 4 C_1, E_1, P_1 对 D_1 的判断矩阵

Table 4 Pairwise comparison matrix of C_1, E_1, P_1 for D_1

D_1	C_1	E_1	P_1	$\omega_1^{(3)}$
C_1	1	1/4	1/9	0.0633
E_1	4	1	1/5	0.1939
P_1	9	5	1	0.7429

$C_1=0.0356, C_R=0.0615$

表 5 C_2, E_2, P_2 对 D_2 的判断矩阵

Table 5 Pairwise comparison matrix of C_2, E_2, P_2 for D_2

D_2	C_2	E_2	P_2	$\omega_2^{(3)}$
C_2	1	1/2	3	0.3090
E_2	2	1	5	0.5816
P_2	1/3	1/5	1	0.1095

$C_1=0.0019, C_R=0.0033$

表 6 C_3, E_3, P_3 对 D_3 的判断矩阵

Table 6 Pairwise comparison matrix of C_3, E_3, P_3 for D_3

D_3	C_3	E_3	P_3	$\omega_3^{(3)}$
C_3	1	4	9	0.7171
E_3	1/4	1	4	0.2172
P_3	1/9	1/4	1	0.0658

$C_1=0.0185, C_R=0.0319$

由于测量范围较大,为 25~350 mm,这里选取 30、100、300 mm 三个测量点分别代表测量的近段、中段和远段,分别在测量的近段、中段和远段取四种 CCD 像元细分算法进行实际测量实验,统计实验结果 100 组,并计算其统计量,如表 7 所示。

表 7 远、中、近段实测实验计算结果的统计量

Table 7 Statistical quantity of the proximal, the middle and the distal of measuring range

	Dichotomy M_1	Weighted centroid M_2	Weighted polynomial interpolation M_3	Center from the proportion algorithm M_4
E_1	1.2516	0.3491	121.0125	0.6759
P_1	5	3.1200	36.7614	3.2500
E_2	0.3595	0.3253	0.5402	0.3926
P_2	3	3	3.7480	3.0400
E_3	0.2713	0.2718	0.3368	0.2775
P_3	2	2.3360	2.1380	2.2280

根据实验得到的统计学量,两种方法对上层因素的影响为距它们比值最近的1~9尺度,如二分法和质心加权法对近段方差 E_1 的影响之比为1/4(由于0.3491/1.2516最接近1/4,向上取整),得到四种CCD像元亚细分算法 $M_1\sim M_4$ 对于第三层各个量的相互比较矩阵如表8~13所示。

表 8 $M_1\sim M_4$ 对 E_1 的判断矩阵

Table 8 Pairwise comparison matrix of $M_1\sim M_4$ for E_1

E_1	M_1	M_2	M_3	M_4	$\omega_2^{(4)}$
M_1	1	1/4	9	1/2	0.1795
M_2	4	1	9	2	0.5004
M_3	1/9	1/9	1	1/9	0.0337
M_4	2	1/2	9	1	0.2864

$C_i=0.0618, C_R=0.0687$

表 9 $M_1\sim M_4$ 对 P_1 的判断矩阵

Table 9 Pairwise comparison matrix of $M_1\sim M_4$ for P_1

P_1	M_1	M_2	M_3	M_4	$\omega_3^{(4)}$
M_1	1	1/2	7	1/2	0.2112
M_2	2	1	9	1	0.3756
M_3	1/7	1/9	1	1/9	0.0376
M_4	2	1	9	1	0.3756

$C_i=0.0082, C_R=0.0091$

表 10 $M_1\sim M_4$ 对 E_2 的判断矩阵

Table 10 Pairwise comparison matrix of $M_1\sim M_4$ for E_2

E_2	M_1	M_2	M_3	M_4	$\omega_5^{(4)}$
M_1	1	1/2	2	2	0.2761
M_2	2	1	2	2	0.3905
M_3	1/2	1/2	1	1/2	0.1381
M_4	1/2	1/2	2	1	0.1953

$C_i=0.0404, C_R=0.0449$

表 11 $M_1\sim M_4$ 对 P_2 的判断矩阵

Table 11 Pairwise comparison matrix of $M_1\sim M_4$ for P_2

P_2	M_1	M_2	M_3	M_4	$\omega_6^{(4)}$
M_1	1	1	2	2	0.3300
M_2	1	1	2	2	0.3300
M_3	1/2	1/2	1	1/2	0.1404
M_4	1/2	1/2	2	1	0.1996

$C_i=0.0202, C_R=0.0224$

表 12 $M_1\sim M_4$ 对 E_3 的判断矩阵

Table 12 Pairwise comparison matrix of $M_1\sim M_4$ for E_3

E_3	M_1	M_2	M_3	M_4	$\omega_8^{(4)}$
M_1	1	2	2	2	0.3905
M_2	1/2	1	2	2	0.2761
M_3	1/2	1/2	1	1/2	0.1381
M_4	1/2	1/2	2	1	0.1953

$C_i=0.0404, C_R=0.0449$

表 13 $M_1\sim M_4$ 对 P_3 的判断矩阵

Table 13 Pairwise comparison matrix of $M_1\sim M_4$ for P_3

P_3	M_1	M_2	M_3	M_4	$\omega_9^{(4)}$
M_1	1	2	2	2	0.3905
M_2	1/2	1	1/2	1/2	0.1381
M_3	1/2	2	1	2	0.2761
M_4	1/2	2	1/2	1	0.1953

$C_i=0.0404, C_R=0.0449$

由于像元细分算法的分辨率是固定的,可以得到四种 CCD 像元细分算法 $M_1 \sim M_4$ 对于 $C_1 \sim C_3$ 的相互比较矩阵均相同,以正态分布 $N(0.5, 0)$ 为标准信号,加上一段白噪声作为输出信号,用四种方法计算正态分布信号的中心,多次计算,以计算所得中心平均值作为精度的衡量指标,如表 14 所示。

表 14 四种算法的精度指标

Table 14 Precision index of the four algorithms

Subdivision algorithms	Dichotomy M_1	Weighted centroid M_2	Weighted polynomial interpolation M_3	Center from the proportion M_4
Precision /pixel	0.0550	0.0080	0.2583	0.0284

根据表 14, $M_1 \sim M_4$ 对于 $C_1 \sim C_3$ 的相互比较矩阵如表 15 所示。

表 15 $M_1 \sim M_4$ 对于 $C_1 \sim C_3$ 的判断矩阵

Table 15 Pairwise comparison matrix of $M_1 \sim M_4$ for $C_1 \sim C_3$

C	M_1	M_2	M_3	M_4	$\omega_1^{(4)}, \omega_4^{(4)}, \omega_7^{(4)}$
M_1	1	1/7	5	1/2	0.1222
M_2	7	1	9	3	0.5985
M_3	1/5	1/9	1	1/9	0.0368
M_4	2	1/3	9	1	0.2424

$C_i=0.0663, C_{ri}=0.0737$

4.3 组合权向量及一致性检验

由 4.2 小节可以得出判断矩阵均通过一致性检验,所得的因素权重是可信的。根据(10)式,可以得到第三层对第一层的权重 $\omega^{(3)}$ 为

$$\omega^{(3)} = [0.0138 \ 0.0422 \ 0.1617 \ 0.2135 \ 0.4019 \ 0.0757 \ 0.0655 \ 0.0199 \ 0.0060]^T. \quad (14)$$

根据(11)式和(12)式得出 $C_R^{(3)} = 0.0186, C_R^{(4)} = 0.0469$, 均通过一致性检验。根据(13)式, $C_R^* = 0.1117$, 组合一致性检验通过,根据(10)式,得出第四层的四种像元细分算法 $M_1 \sim M_4$ 对第一层优劣指标 Q 的影响的权重 $\omega^{(4)}$ 为

$$\omega^{(4)} = [0.2235 \ 0.4453 \ 0.0888 \ 0.2424]^T. \quad (15)$$

根据 $\omega^{(4)}$ 可以得到,对于机器人用激光测距传感器而言,这四种 CCD 像元细分算法的优劣排序为:加权质心法、按比例求中心法、二分法、改进的多项式插值法,结合文中对机器人用传感器工作范围的分析,测量中段为传感器的主要工作区域,测量近段为次核心区域。从表 7 可以得出,在测量中段,加权质心法的方差和极差是四种细分算法中最优的,二分法优于按比例求中心法,优于改进的多项式插值法,与利用层次分析法模型得到的排序稍有出入;而在传感器工作相对核心的测量近段,四种算法的方差和极差排序与利用层次分析法模型得到的排序相同。从表 14 得出,四种细分算法的精度排序也与利用层次分析法模型得到的排序相同。综合上述分析,这里利用层次分析法模型得到的对于特定激光测距传感器的细分算法排序是可靠的,即四种像元细分算法中,加权质心法最适用于机器人用激光测距传感器。

此外,对于其他的 CCD 传感器,这里建立的综合评价系统同样适用对其进行像元细分算法的选择,只需在评价系统中的第二、三、四层选取对应的指标。比如,某些 CCD 传感器更加侧重测量的速率,因此第二层可以考虑高速、中速和低速而不是这里的测距范围;对于某些 CCD 传感器,第三层的算法精度、方差和极差并不是细分算法所注重的,可以将之改为对应的指标,如低频频率、细分的准确度等;这里只是针对机器人用激光测距传感器,对四种典型的像元细分算法进行了评价,实际上,该综合评价系统还可以对其他像元细分算法做评价,将第四层的像元细分算法 $M_1 \sim M_4$ 选为需要进行评价的算法即可。

5 结 论

为了提高 CCD 激光测距传感器的精度,选择合适的线阵 CCD 像元细分算法,解决针对特定测距传感器尚缺乏有效的像元细分算法评价手段的问题,本文引入了层次分析法,分析不同像元细分算法在不同工况下的算法指标,建立了像元细分算法的综合评价系统。并且以机器人用激光测距传感器为例,通过实验,对二分法、加权质心法、加权多项式插值法和按比例求中心法四种像元细分算法进行了评价。将机器人用激光测距传感器的测量范围分为测距的近段、中段和远段,即三种不同的工况,分析测距的远近对综合评价指

标的影响;选取测距近、中、远段各一点,分别分析算法的定位精度、方差和极差在不同测距范围的重要性;通过实验获取不同算法在不同测距范围的精度、方差和极差,对四种细分算法进行综合评价。实验结果显示,针对该特定的激光测距传感器,四种细分算法的重要性权重分别为(0.2235,0.4453,0.0888,0.2424),即加权质心法最适用。建立的综合评价系统对像元细分算法进行了有效评价。

参 考 文 献

- 1 Feng Weilei, Wang Fujuan, Zeng Wanqi, *et al.*. CCD spectrum measurement system for laser induced breakdown spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 013002.
冯为蕾,王福娟,曾万祺,等.应用于LIBS的CCD光谱测量系统[J].*激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 013002.
- 2 Ueda K, Sugie H. Point-to-point control command for suppressing residual vibration[C]. Singapore: Control, Automation, Robotics and Vision, IEEE 9th International Conference on, 2006: 1 - 6.
- 3 Koch H, Konig A, Kleinmann K, *et al.*. Predictive robotic contour following using laser-camera-triangulation[C]. Buda pest: Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference on, 2011: 422-427.
- 4 Meng Xiangqian, Hu Shunxing, Wang Zhenzhu, *et al.*. Vertical distribution of aerosol extinction coefficient detection in boundary layer using CCD lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0801003.
孟祥谦,胡顺星,王珍珠,等. CCD激光雷达探测边界层气溶胶消光系数垂直分布[J].*光学学报*, 2013, 33(8): 0801003.
- 5 Ma Xiaomin, Tao Zongming, Ma Mingjun, *et al.*. Retrieval method of side-scatter lidar signal based on charge coupled device technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0201001.
麻晓敏,陶宗明,马明俊,等.基于CCD的侧向散射激光雷达信号提取方法[J].*光学学报*, 2014, 34(2): 0201001.
- 6 Yang Boxiong. CCD Subdivision Technology and Its Application Research[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2005: 71-75.
杨博雄. CCD细分技术及其应用研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所, 2005: 71-75.
- 7 Liu Libo, Zhao Hui, Zhang Haibo, *et al.*. Research on spot subdivided locating method in laser triangulation measurement[J]. *Computer Measurement & Control*, 2008, 16(10): 1396-1398.
刘立波,赵辉,张海波,等.激光三角测距中光斑细分定位方法研究[J].*计算机测量与控制*, 2008, 16(10): 1396-1398.
- 8 Yan Hangrui, Xiong Zhiyong. Study of the impact and correction of surface tilt upon laser triangulation[J].*Optical Instruments*, 2014, 36(1): 11-14.
闫航瑞,熊志勇.表面倾斜对激光三角测量的影响及校正研究[J].*光学仪器*, 2014, 36(1): 11-14.
- 9 Xu Shubai. A Practical Decision Method: the Principle of AHP[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988.
许树柏.实用决策方法:层次分析法原理[M].天津:天津大学出版社, 1988.
- 10 Guo Jinyu, Zhang Zhongbin, Sun Qingyun. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. *China Safety Science Journal*, 2008, 18(5): 148-153.
郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].*中国安全科学学报*, 2008, 18(5): 148-153.
- 11 Lin Guojin. Applications of analytic hierarchy process in financial risk evaluation of enterprise[J]. *China Management Informationization*, 2015, 18(1): 5-7.
林国金.层次分析法在企业财务风险评估中的应用[J].*中国管理信息化*, 2015, 18(1): 5-7.
- 12 Zhao Baoqing, Li Na. Study of the internal audit outsourcing decision based on analytic hierarchy process[J]. *Audit & Economy Research*, 2013, (1): 37-45.
赵保卿,李娜.基于层次分析法的内部审计外包内容决策研究[J].*审计与经济研究*, 2013, (1): 37-45.
- 13 Sun Yalin, Huang Xinfang, He Yanhong, *et al.*. Evaluation of quality of taro with analytic hierarchy process[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2015, 34(1): 16-22.
孙亚林,黄新芳,何燕红,等.运用层次分析法评价多子芋种质资源[J].*华中农业大学学报*, 2015, 34(1): 16-22.
- 14 Zhang Yu, Sun Kui, Zhang Yuanfei, *et al.*. Design of laser range finder for end perception of robot arm[J]. *Robot*, 2014, 36(5): 519-526.
张禹,孙奎,张元飞,等.用于机械臂末端感知的激光测距传感器设计[J].*机器人*, 2014, 36(5): 519-526.

栏目编辑:何卓铭