

文章编号: 2095-2163(2020)07-0056-05

中图分类号: TP391

文献标志码: A

点特征柔性物体三维运动的研究

薛冕, 刘翔

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 由于柔性物体在不同时刻、不同区域的运动状态是不同的, 给计算机视觉研究带来了困难。针对这一问题, 本文提出一种将改进的LK光流法与双目视觉原理相结合的方法研究面料在空间中的三维运动。首先, 在时间序列重建中采用改进LK光流法将输入的图像高通滤波, 滤除图像低频的照射分量, 再将两帧之间使用加权最小二乘法获取光流, 计算目标物体三维运动中的速度、加速度; 其次, 在空间重建中, 利用三角测量法计算二维图像的三维信息, 实现点云重构。实验结果表明, 该方法提高了匹配精度与效率, 通过对面料的重建, 获取目标精确的运动信息, 进而全面准确的分析其运动情况。

关键词: 三角测量; 光流法; 运动; 加权最小二乘法

Research on 3D motion of flexible object with point feature

XUE Mian, LIU Xiang

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

【Abstract】 Due to the different motion states of flexible objects at different times and in different regions, it brings difficulty to the study of computer vision at present. In this paper, an improved LK optical flow method combined with the principle of binocular vision is proposed to study the three-dimensional movement of fabric in space. Firstly, in the reconstruction of time series, the input image is filtered by the improved LK optical flow method to remove the low-frequency illumination component of the image, then the weighted least square method is used to obtain the optical flow between the two frames to calculate the speed and acceleration of the three-dimensional movement of the target object. Secondly, in the spatial reconstruction, the three-dimensional information of the two-dimensional image is calculated by the triangulation method to realize the point cloud reconstruction. The experimental results show that this method improves the matching accuracy and efficiency. Through the reconstruction of the fabric, the accurate motion information of the target can be obtained, and then the motion of the target can be analyzed comprehensively and accurately.

【Key words】 Triangulation principle; Optical flow; Motion; Weighted least squares

0 引言

柔性物体的三维运动捕获是现阶段研究的难点, 与静态物体不同的是, 动态物体三维重建不仅需要匹配双目立体图像, 还需要匹配同一图像时间序列前后的运动。计算机能够从给定的二维图像重建三维空间中物体的结构和运动情况, 该技术通过相机拍摄物体图像, 进行空间和时间上点的匹配, 从而重建物体的空间结构和时间序列恢复^[1-2]。本文对面料进行三维重建及运动分析, 由于面料的柔性导致不同区域的运动状态是不同的, 给目前的研究带来了困难。使用立体矫正和马氏距离重建每一帧图像的三维信息, 前后帧图像使用坐标差法实现时间序列匹配, 有效准确的获取物体的三维运动数据^[3], 但该方法在物体运动过大时会偏出规定窗口, 造成匹配精度损失; 使用20台相机环绕拍摄多角度的图像, 利用光流估计图像合成不同光照下的

每一个视角, 最后利用多视图光度立体技术获得每一时刻的高精度三维模型^[4], 但该方法成本较大, 复杂度较高。

为了全面准确的分析柔性物体的三维运动, 本文提出了一种柔性物体三维运动分析方法, 从空间和时间两个角度进行探讨, 使用两台高速相机从左右两个角度对面料运动进行拍摄, 采集每一帧的图像。空间重建时, 首先建立相机成像的几何模型, 通过相机标定获取相机的内外参数、畸变系数等, 再进行SIFT特征点提取与欧氏距离匹配。完成特征点匹配后, 利用三角测量法求得点的空间三维坐标, 重建面料的空间结构; 在时间序列匹配中, 由于使用高速相机拍摄的图像两帧之间位置变化微小, 一般的特征匹配算法无法捕捉到变化的信息。本文采用改进的LK光流法, 利用相邻帧之间发生的灰度值变化, 获取图像的光流场, 光流可以看作带有灰度的像

基金项目: 国家自然科学基金(61876106); 上海市科研项目(19ZR1421500)。

作者简介: 薛冕(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机视觉; 刘翔(1972-), 男, 博士, 主要研究方向: 计算机视觉与人工生命。

通讯作者: 刘翔 Email: xliu@sues.edu.cn

收稿日期: 2020-03-30

素点在图像平面运动产生的瞬时速度场。由于光流法会受到光照条件的干扰,对物体检测运动目标产生影响,本文对拍摄图像进行高通滤波处理,降低照射分量的影响,对两帧之间使用加权最小二乘法估计光流,再通过光流场计算得出面料在运动过程中的物理特性,分析面料同一时刻不同区域的运动状态,该方法提高了图像匹配的精度与效率,具有较好的鲁棒性。

1 时间序列重建

1.1 基于光流法的时间序列重建

光流可以看作带有灰度的像素点在图像平面运动产生的瞬时速度场。在空间中,运动可以用运动场描述,而在一个图像平面上,物体的运动往往是通过图像序列中不同图像灰度分布的不同体现的,空间中的运动场转移到图像上就表示为光流场,光流场反映了图像上每一点灰度的变化趋势。LK 光流法是一种两帧差分光流估计算法,由 Bruce D.Lucas 和 Takeo Kanade 提出,它计算两帧在时间 t 到 $t + \delta t$ 之间每个像素点位置的移动^[5]。由于是基于图像信号的泰勒级数,这种方法称为差分,对于空间和时间坐标使用偏导数。包含三个假设条件:亮度恒定,小运动,空间一致。由于采用假设的局限性使得光流法对噪声、多光源特别敏感,再加上阴影、透明性等原因,很容易产生错误的结果。这些缺点造成光流法与实际使用之间还存在着很大距离。

1.2 改进 LK 光流法

针对 LK 光流法对多光源敏感的问题,本文提出采用滤波处理的方式改进 LK 光流算法,在输入图像频率域中采用高通滤波器滤除光照成分。对于一幅图像 $f(x, y, t) = i(x, y, t) r(x, y, t)$, 其中 $f(x, y, z, t)$ 为点 (x, y, z) 位置的灰度值, $i(x, y, z, t)$ 为图像照射分量, $r(x, y, z, t)$ 为图像反射分量,对图像取对数分离照射分量和反射分量并做傅里叶变换得式(1):

$$Z(k, l, m, n) = Fi(k, l, m, n) + Fr(k, l, m, n). \tag{1}$$

使用高斯高通滤波器 H 进行滤波处理,减弱低频增强高频,从而减少光照影响,式(2)、式(3):

$$H(u, v) = 1 - e^{-\frac{D^2(u, v)}{2D_0^2}}, \tag{2}$$

$$S(k, l, m, n) = H * Z = HFi(k, l, m, n) + HFr(k, l, m, n). \tag{3}$$

反傅里叶变换,式(4):

$$s(x, y, z, t) = IDFT(S(k, l, m, n)). \tag{4}$$

最后,取对数(反指数)得到最后的图像,式(5)
 $I(x, y, z, t) = e^{s(x, y, z, t)} = I(x, y, z, t) + R(x, y, z, t).$ \tag{5}

其中, $I(x, y, z, t)$ 、 $R(x, y, z, t)$ 是图像高通滤波后的照射分量与反射分量。

图像约束方程可以写为式(6):

$$I(x + \delta x, y + \delta y, z + \delta z, t + \delta t). \tag{6}$$

假设移动足够的小,那么对图像约束方程使用泰勒公式,可以得到式(7):

$$I(x + \delta x, y + \delta y, z + \delta z, t + \delta t) = I(x, y, z, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial z} \delta z + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t + H.O.T. \tag{7}$$

H.O.T 指更高阶,在移动足够小的情况下可以忽略。从这个方程可以得到式(8)和式(9):

$$\frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial z} \delta z + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t = 0, \tag{8}$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} V_x + \frac{\partial I}{\partial y} V_y + \frac{\partial I}{\partial z} V_z + \frac{\partial I}{\partial t} = 0. \tag{9}$$

其中, V_x, V_y, V_z 分别是 $I(x, y, z, t)$ 的光流向量中 x, y, z 的组成。 $\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y}, \frac{\partial I}{\partial z}, \frac{\partial I}{\partial t}$ 则是图像在 (x, y, z, t) 这一点相应方向的差分。由公式(8)和(9)可以推导出式(10):

$$\tilde{N}I^T \cdot \vec{V} = -I_t. \tag{10}$$

假设流 (V_x, V_y, V_z) 在一个大小为 $m \times m \times m (m > 1)$ 的小窗中是一个常数,那么从像素 $1 \dots n, n = m^3$ 中可以得到一组方程(11) ~ (14):

三个未知数但是有多于三个的方程,这个方程组自然是个超定方程,也就是说方程组内有冗余。

$$\begin{matrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_2 \\ \hat{e} \\ \hat{e}_n \end{matrix} \begin{matrix} I_{y_1} \\ I_{y_2} \\ \vdots \\ I_{y_n} \end{matrix} \begin{matrix} I_{z_1} \\ I_{z_2} \\ \vdots \\ I_{z_n} \end{matrix} \begin{matrix} \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \end{matrix} \begin{matrix} \hat{V}_x \\ \hat{V}_y \\ \hat{V}_z \end{matrix} \hat{u} = \begin{matrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_2 \\ \hat{e} \\ \hat{e}_n \end{matrix} \begin{matrix} -I_{t_1} \\ -I_{t_2} \\ \hat{u} \\ -I_{t_n} \end{matrix} \hat{u}. \tag{11}$$

记作:

$$A \vec{v} = -b. \tag{12}$$

采用最小二乘法:

$$A^T A \vec{v} = A^T (-b). \tag{13}$$

得到:

$$\begin{matrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_2 \\ \hat{e} \\ \hat{e}_n \end{matrix} \begin{matrix} \hat{V}_x \\ \hat{V}_y \\ \hat{V}_z \end{matrix} \hat{u} = \begin{matrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_2 \\ \hat{e} \\ \hat{e}_n \end{matrix} \begin{matrix} \sum I_{x_i}^2 \\ \sum I_{x_i} I_{y_i} \\ \sum I_{x_i} I_{z_i} \\ \sum I_{x_i} I_{t_i} \end{matrix} \begin{matrix} \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \end{matrix} \begin{matrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_2 \\ \hat{e} \\ \hat{e}_n \end{matrix} \begin{matrix} -\sum I_{x_i} I_{t_i} \\ -\sum I_{y_i} I_{t_i} \\ \hat{u} \\ -\sum I_{z_i} I_{t_i} \end{matrix} \hat{u}. \tag{14}$$

其中,求和是从1到 n ,算出光流(V_x, V_y, V_z)。

改进的光流算法利用高通滤波衰减图像低频,减弱照射分量从而减少光照的干扰,整体提高了光流计算的精度与速度。

2 空间重建

2.1 相机标定

相机拍摄出的图像是平面的,为了获取图像的三维信息,需要确定三维世界映射到二维相机成像平面的关系,建立相机成像的几何模型,几何模型的参数就是相机参数,通过相机标定获得相机参数,求出相机的内、外参数以及畸变系数,消除径向和切线方向上的镜头畸变,获得无畸变图像。

2.2 图像的特征点提取与匹配

由于面料本身在运动过程中容易收缩、缩放,因此采用较为成熟稳定的 SIFT 特征点提取算法。SIFT 算法是由 Lowe 提出的,该算法对图像的尺度、旋转、亮度保持不变性,且具有一定的鲁棒性。具体包括以下四步:尺度空间的关键点检测,定位关键点,确定关键点位置和生成特征描述符。

在寻找两幅图的匹配点时,当生成两幅图的 SIFT 特征向量后,通过第一张图的关键点坐标确定它与第二张图欧氏距离最近的两个关键点坐标,若最近的距离除以次近的距离小于某个比例阈值,则判定为一对匹配点,此时称这个比例阈值为 $distRatio$ 。当降低这个比例阈值, SIFT 匹配点数目会减少,但更加稳定。本文不断调整阈值,测出不同阈值下图像的匹配点个数,进行对比分析,一般情况下取 $distRatio=0.5$,进行实验。

SIFT 匹配后会存在误匹配点对,使用随机采样一致性(RANSAC)算法优化匹配结果,将匹配过程中出现的误匹配点对剔除,得到本文所提及的内点个数,该算法是根据一组包含异常数据的样本数据集,计算出数据的数学模型参数,从而得到有效数据。RANSAC 通过反复选择数据中的一组随机子集来达成目标,被选取的子集被假设为内点,并用下述方法进行验证:

(1)需要一组内点拟合模型,该内点可以随机假设,通过计算假设的内点获得未知参数,并且此模型适应于该组假设的内点;

(2)将剩余数据代入1中模型进行测试,若某个点适用于估计的模型,判定它为内点,并将内点扩充;

(3)越多的点被判定为内点,模型的合理性就越大,当有足够多的点被判定为内点时,便认为估计

的模型合理;

(4)用扩充好的内点重新拟合模型,对模型进行更新;

(5)通过估计内点与模型的错误率来评估模型。

以上整个过程为一次迭代,此过程被重复执行固定的次数,每次产生的模型有两个结论:

(1)由于内点较少,评估出的模型不如上一次,被舍弃;

(2)比现有的模型更好而被选用。

本文加入 RANSAC 算法剔除误匹配点,得到较为精确的匹配数据。

2.3 空间点重建

完成特征点匹配后,本文利用三角测量法求得点的空间三维坐标。假设空间的一点 x 在左右视图上的对应点坐标为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ,左右相机矩阵为 P_1, P_2 ,则有式(15)和式(16):

$$\begin{bmatrix} \alpha_1^1 \ddot{o} \\ \zeta \ddot{\div} \\ \zeta P_1^3 \ddot{+} \\ e_1 \ddot{\emptyset} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \ddot{o} \\ \zeta \ddot{\div} \\ \zeta y_1 \ddot{\div} \\ e_1 \ddot{\emptyset} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_2^1 \ddot{o} \\ \zeta \ddot{\div} \\ \zeta P_2^3 \ddot{+} \\ e_1 \ddot{\emptyset} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_2 \ddot{o} \\ \zeta \ddot{\div} \\ \zeta y_2 \ddot{\div} \\ e_1 \ddot{\emptyset} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

以左相机为世界坐标系的原点,左相机转换到世界坐标系的旋转矩阵为单位矩阵 I ,平移矩阵为 O 。右相机转换到世界坐标系的旋转矩阵为 R ,平移矩阵 T ,左右相机的内参为 K_1, K_2 ,由 *matlab* 相机标定工具箱得到,则左右相机的投影矩阵可以由式(17)和式(18)构成:

$$P_1 = K_1 [I/O], \quad (17)$$

$$P_2 = K_2 [R/T]. \quad (18)$$

利用公式得到一个关于三维点 x 的方程组(19):

$$\begin{cases} x_1 P_1^3 X - P_1^1 X = 0 \ddot{i} \\ y_1 P_1^3 X - P_1^2 X = 0 \ddot{i} \\ x_2 P_2^3 X - P_2^1 X = 0 \ddot{i} \\ y_2 P_2^3 X - P_2^2 X = 0 \ddot{i} \end{cases}. \quad (19)$$

求得空间点的三维坐标,双目视觉原理获取图像的深度信息, *meshlab* 形成点云。

3 实验结果与分析

实验采用两台 Flare 4M180CCL 高速相机如图1所示,分辨率 2048×2048 ,帧率 179 fps,由三脚架支

撑并排平行放置,间距约 20 cm,高度与焦距均已校准,对目标物体进行左右拍摄。



图 1 实验设备图

Fig. 1 Experimental equipment diagram

3.1 帧序列光流场结果

通过高速相机获取 600 张面料连续运动的图像,在时间序列重建时,使用改进的光流法得到前后帧的光流场图像,每隔 100 帧选取一张光流场图像共 6 张,代表当前帧到下一帧图像每一点灰度的变化趋势,如图 2 所示,色调表示偏移量的方向,色调强度表示偏移量的大小。获取面料的运动信息,可以全面准确地分析面料的运动状态。

动状态不同,中下区域抖动较快,形变较大。

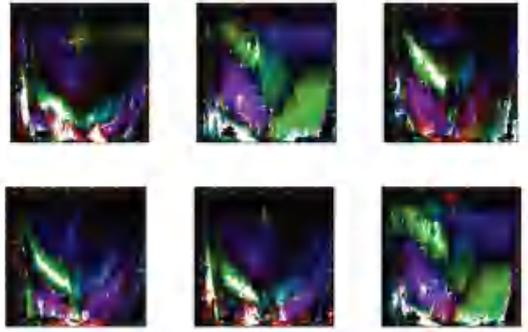


图 3 光流场图像

Fig. 3 Optical flow field image

表 1 空间 6 个点瞬时速度变化

Tab. 1 Velocity changes of 6 spatial points

帧	速度/(mm · s ⁻¹)					
	1	2	3	4	5	6
1	97.65	18.41	108.52	102.16	193.50	172.23
10	53.32	104.68	143.60	93.43	133.38	129.87
20	15.74	65.75	112.43	200.51	235.10	189.73
30	120.51	87.65	161.45	186.83	174.34	167.39
40	55.85	94.91	151.84	194.68	163.49	164.03
50	67.80	106.29	245.85	148.83	140.25	173.91

表 2 空间 6 个点加速度变化

Tab. 2 Acceleration changes of 6 spatial points

帧	加速度/(mm · s ⁻²)					
	1	2	3	4	5	6
1	376.43	1 302.98	485.02	949.32	-1 395.7	392.94
10	53.76	-948.36	599.30	1 565.44	986.02	1 123.64
20	-165.46	-100.17	934.28	584.33	-832.71	352.00
30	218.47	32.68	355.25	1 282.13	-89.78	543.29
40	429.43	103.86	-840.83	186.31	-767.26	641.23
50	79.92	-49.98	211.92	345.47	638.90	1 612.50

由表 3 可知,HS 光流法与 LK 光流法的平均角误差相对偏高,改进的 LK 光流法有效降低了平均角误差,且缩短了运行时间,提高了运行效率。

表 3 三种算法性能比较

Tab. 3 Performance comparison of three algorithms

算法	平均角误差	每帧耗时/ms
HS 光流法	7.393	103 5
LK 光流法	14.9	210
改进 LK 光流法	4.55	158

3.3 空间点三维重建结果

完成左右图像特征点匹配后,通过三角测量法获得图像的深度信息,得到面料的三维坐标从而获

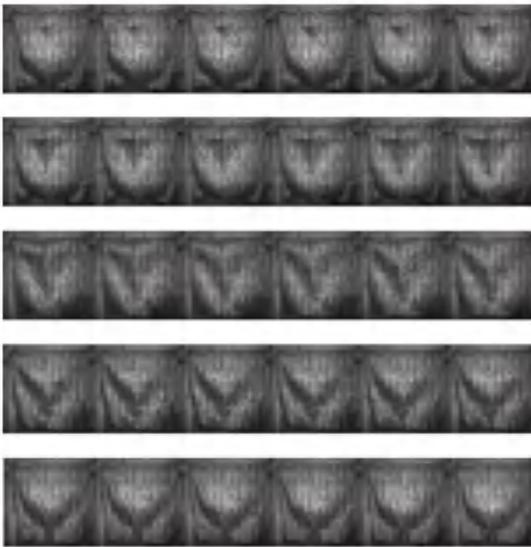


图 2 实验源图像

Fig. 2 Experimental source image

3.2 物理特性分析

通过空间和时间序列的重建,光流值获取面料的速度与加速度运动数据,相邻帧间的光流场图像如图 3 所示。面料的柔性使得其在不同区域运动不同,每隔 300 个点选取一个点代表其附近的运动状态,共有 6 个点。表 1 和表 2 分别统计了空间 6 个点瞬时速度和加速度的变化。

规定物体初始运动方向为正方向,由表 1 和表 2 可以看出,3、4、5、6 点整体运动速度及加速度相对较大,3、4、5、6 点代表面料的中间及下方区域,可以分析得出此次面料运动中,同一时刻不同区域的运

得三维点云,利用 Meshlab 生成对应的物体如图 4 所示,该物体可以旋转 360 度观察每个空间结构。

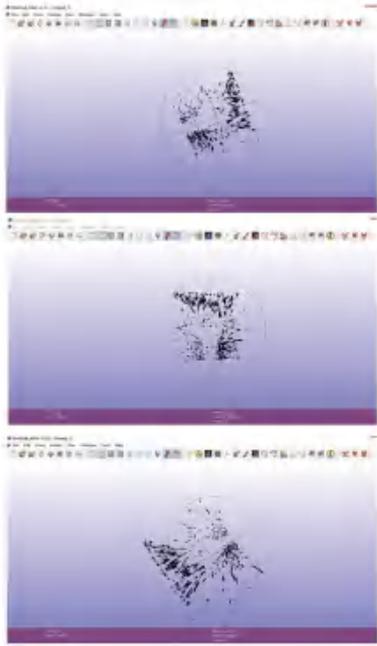


图 4 不同角度三维重建点云

Fig. 4 3D reconstruction of point clouds from different angles

4 结束语

本文实现了面料三维运动的重建,从空间和时间两方面有针对性的解决问题,在空间重建中,采用双目视觉的成像原理,通过左右视角图像的匹配获得二维坐标信息,再利用三角测量法计算出三维信息,实现点云重构;时间序列中,因为 LK 光流法对光照比较敏感,对图像进行同态滤波预处理,降低照射分量的影响,获取光流场,计算空间运动中的参数,如速度、加速度,得到较为精确的运动信息,准确的分析面料的运动状态。该方法复杂度低、准确性高,且具有良好的鲁棒性,对今后柔性物体的研究仍有价值。

参考文献

- [1] LI Huajun, JIANG Yandan, JI Haifeng, et al. 3D Reconstruction of Slug Flow in Mini-Channels with a Simple and Low-Cost Optical Sensor.[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(20).
- [2] 龚肖,史金龙,廖芳.点特征柔性物体三维运动恢复方法[J].红外与激光工程,2018,47(9):296-302.
- [3] 廖芳,史金龙,龚肖.基于点状特征柔性物体三维运动捕获方法[J].计算机系统应用,2018,27(7):230-235.
- [4] 张德嘉,梁爽,张晨,等.基于增强 PyrLK 光流法的三维树木骨架重建方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2015,27(7):1247-1254.
- [5] LUCAS B D, KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[J]. 1981.

(上接第 55 页)

各众包方案到正、负理想点间距离为式(13):

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - V_j^+)^2}, d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - V_j^-)^2},$$

$$(i = 1, 2, \dots, m). \quad (13)$$

用贴近系数 C_i 对众包方案进行排序,计算出贴近系数最大的为最佳众包方案,贴近系数计算公式(14)为:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}. \quad (14)$$

由公式(13)和公式(14),可计算出 3 个石油钻井物料众包供应方案分别到正、负理想解的距离为:

$$d_i^+ = (0.0173, 0.0422, 0.0446),$$

$$d_i^- = (0.0445, 0.0446, 0.0445).$$

贴近系数为:

$$C_i = (0.7201, 0.5138, 0.4994).$$

由贴近系数可知: $C_1 > C_2 > C_3$, 故第一个众包方案排序靠前,为最佳方案。

3 结束语

本文提出了基于众包的石油钻井物料供应方式,在众包模式下构建石油钻井物料供应方评价系统,结

合模糊理论和 TOPSIS 法建立评估模型,通过量化钻井物料众包供应方案选择过程中多指标分析的不确定性,分析得出贴近度最大的众包供应方案最优,实现了石油钻井物料众包供应方案的决策评估,有效解决了石油钻井物料供应众包方筛选效率低下的问题,为石油钻井企业的物料供应提供了更多的可能。

参考文献

- [1] 许春娇. 基于众包模式的城市事件分析系统[D]. 哈尔滨工业大学, 2016.
- [2] 黎继子,余悦,库瑶瑶,等. 众包与供应链耦合:众包供应链的类型与组织系统构建[J]. 中国科技论坛, 2019(4): 152-158, 165.
- [3] 方明,鬻滢. 网络化钻井工程协同虚拟设计系统研究[J]. 石油学报, 2005(3): 90-94.
- [4] 方明,李润洲. 石油钻井物料清单模型[J]. 系统工程, 2009, 27(7): 65-68.
- [5] 张小红. 生命周期视角下中小企业可持续发展能力评价研究[J]. 管理观察, 2019(28): 15-16.
- [6] 郑夏冰. 基于模糊多准则决策的绿色物流供应商选择研究[D]. 天津理工大学, 2015.
- [7] 谯婧,刘天时,孟雅蕾. 基于钻进过程的油井安全综合评估[J]. 电脑知识与技术, 2015, 11(10): 213-215.
- [8] 李春玲. 西北地区城乡一体化发展问题研究[D]. 陕西师范大学, 2017.
- [9] 于虎,李传春. 基于熵权模糊 TOPSIS 法的分销商评价与选择[J]. 经济研究导刊, 2011(32): 7-9.