

纸塑复合袋双皮带差速纠偏算法研究

严国平, 朱晓凡, 钟飞

(湖北工业大学 机械工程学院, 武汉 430068)

摘要: **目的** 为了减少复合袋在缝合工位上的倾斜, 提高缝合质量, 提出了双皮带差速纠偏方法。**方法** 该方法运用 2 条速度不同的皮带实现复合袋的转向, 在缝合工位之前使复合袋归正。通过实验离散地测出不同偏移量下最佳纠偏速度和转弯半径, 运用模糊控制算法计算出连续的偏移量对应的纠偏速度和转弯半径。**结果** 通过 Matlab 仿真纠偏算法, 复合袋的轨迹符合预期纠偏路径, 在 15 s 内纠正了 50 mm 的偏移量, 且纠偏误差小于 1 mm, 满足工业要求。**结论** 双皮带差速纠偏方法不仅能应用于纸塑复合袋, 也能够很好地应用于工业柔性体独立个体纠偏, 填补柔性体纠偏领域的空白。

关键词: 复合袋纠偏; 差速纠偏; 模糊控制; 视觉定位

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)17-0188-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.17.026

Double Belt Differential Correction Algorithm of Paper Plastic Compound Bag

YAN Guo-ping, ZHU Xiao-fan, ZHONG Fei

(School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a double belt differential correction method, in order to reduce the inclination of the compound bag on the sewing station and improve the sewing quality. In this method, two belts with different speeds were used for the turning of the compound bag, and the compound bag was straightened before the sewing station. Through experiments, the best correction speed and turning radius under different offsets were measured discretely, and the corresponding correction speed and turning radius of continuous offsets were calculated by fuzzy control algorithm. Through the Matlab simulation correction algorithm, the trajectory of the compound bag met the expected correction path, and the deviation of 50 mm was corrected within 15 seconds, and the correction error was less than 1 mm, which met the industrial requirements. The double belt differential correction method can not only be applied to paper plastic compound bags, but also be well applied to the correction of industrial flexible body, filling the gap in the field of flexible body correction.

KEY WORDS: compound bag correction; differential correction; fuzzy control; visual positioning

纸塑复合袋广泛应用于化工、食品、制造业、农业等行业, 2018 年生产纸塑复合袋超 2 亿条。纸塑复合袋的生产流程为生产内袋、生产外袋、内外袋套合、袋底缝合 4 道工序。内外袋套合之后, 传送带将套合的复合袋传输至缝合工位, 在此之前, 复合袋在

传送带上的位置可能已经偏移了传送带的中心线, 从而导致缝合倾斜, 因此, 在缝合工位之前, 需要对复合袋进行纠偏^[1-3]。目前工业上常用的纠偏方法有基于 CCD 的料卷纠偏方法, 传输导向纠偏方法, 异型托辊纠偏方法。基于 CCD 的料卷纠偏方法是利用

收稿日期: 2019-11-18

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目 (2018AAA026); 湖北工业大学博士启动基金 (BSQD2016003)

作者简介: 严国平 (1978—), 男, 湖北工业大学教授, 主要研究方向为轻工机械设计。

CCD 探测卷边的偏移量，将偏移量传递给控制器控制纠偏装置平移从而达到纠偏的目的。纠偏装置分为纠偏输入辊和纠偏输出辊，该装置可绕中心位置摆动，从而近似于纠偏辊的平移，该方法响应速度比单辊纠偏更快。此纠偏方法适用于连续柔性料卷，纠偏精度高，控制简单^[4]。传输导向纠偏方法是传输辊的方向和导向轨的方向不一致，传输物会自动贴合导向轨运动。该方法适用于单个刚性物体的纠偏，其精度较低，纠偏方法简易，无需电子控制。异形托辊纠偏包括调心托辊纠偏、侧托辊前倾纠偏、V 形托辊纠偏、螺旋侧托辊纠偏和锥形托辊纠偏等纠偏方法。调心托辊上的传送带发生偏移时，传送带会与侧辊产生摩擦，其摩擦力有一个向偏移反方向的分量，实现传送带的纠偏。侧托辊前倾纠偏辊上的传送带同时受左右两边侧辊的摩擦力。未偏移时，左右两边的摩擦力垂直运动方向的分量相等；当传送带偏移时，两侧辊的摩擦力不相等，偏移侧的横向摩擦力分量更大，从而实现纠偏。其他异形托辊纠偏原理相似，均利用偏移侧的摩擦力实现纠偏^[5]。该种纠偏方法适用于硬质传送带纠偏，其纠偏装置结构简单，成本低，精度较差。传输中的复合袋具有刚度差、易褶皱、质量轻、单个独立平动运输的特点，以上的纠偏方式均不适用于复合袋纠偏。

1 纠偏流程与纠偏装置结构

复合袋在传送带上会发生位置偏移和角度倾斜等 2 种影响缝纫效果的情况，见图 1。复合袋中心偏离传输平台中轴线，且袋身与平台有一个夹角。复合

袋在传送带上传输到缝纫工位之前，用工业相机拍摄复合袋在传送平台上的位姿，根据图 1 中视觉标记的信息，可以计算出平台中轴线的方程。定义下部 2 个视觉标记的连线为横向基准线，复合袋边缘与横向基准线的夹角为复合袋倾角；定义平台中轴线为纵向基准线，复合袋中心与纵向中轴线的垂直距离为复合袋的位置偏移。计算机计算出复合袋的倾斜角度和位置偏移信息，并将其传递给控制系统，控制系统控制左右电机以不同的速度运行，实现左右传送带差速纠偏。

复合袋纠偏流程见图 2，相机拍摄传送平台上的复合袋，计算机处理图片，计算复合袋的位置偏移量和倾角。若偏移量大于 0，则采取逆时针位置纠偏；

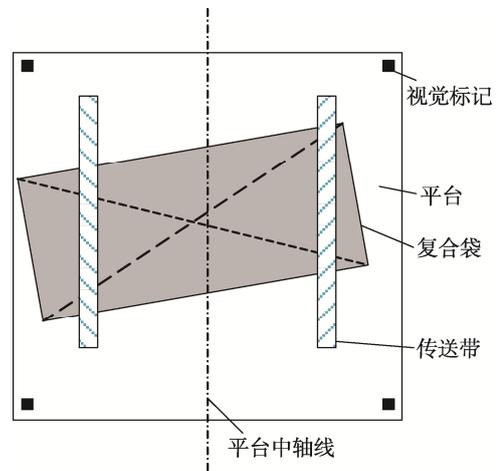


图 1 复合袋偏移
Fig.1 Compound bag deviation

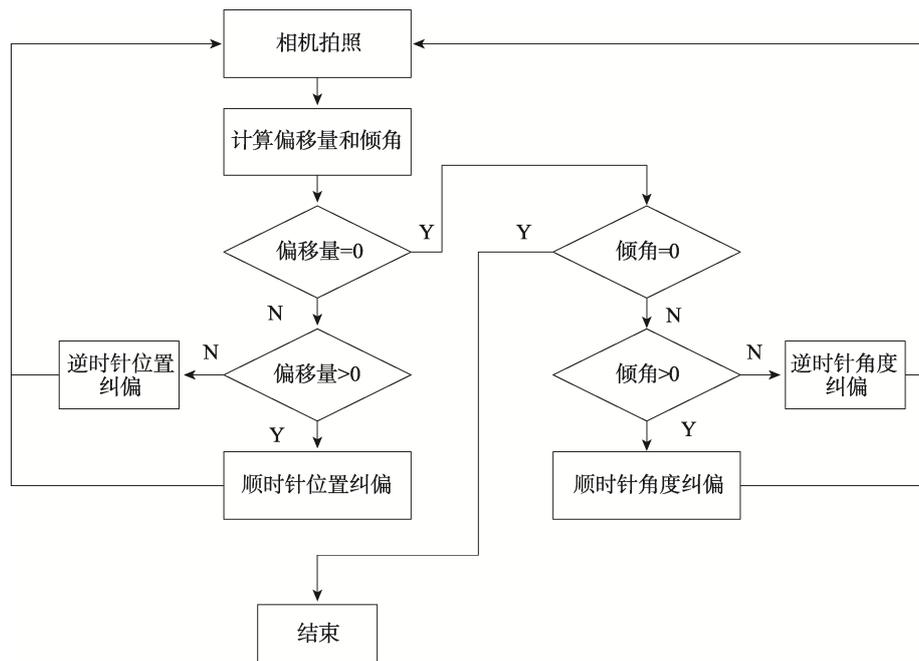


图 2 复合袋纠偏流程
Fig.2 Flow chart of compound bag correction

若偏移量小于0,则采取顺时针位置纠偏。待偏移量等于0时,开始纠正倾角。若倾角大于0,则采取顺时针角度纠偏,若倾角小于0,则采取逆时针角度纠偏。待倾角为0,停止纠偏,左右两传送带的速度相等,复合袋平行向前传输。

根据以上要求,设计了如图3所示的纠偏装置,图3中箭头表示复合袋的传送方向。纠偏装置主要包括伺服电机、皮带轮、普通皮带、磁皮带、电磁铁、相机和控制系统。复合袋质量较轻需要用双层皮带夹持复合袋前进,2层皮带之间的压紧力可根据袋子材料、袋型调节。双层皮带中,上层皮带为磁皮带,下层皮带为普通皮带。在普通皮带的下方,间断地布置电磁铁,调节电磁铁的电流量可调节两皮带之间的压紧力。复合袋在纠偏过程中,若两皮带之间的夹紧力过大,可能会产生褶皱;若皮带之间夹紧力过小,复合袋和皮带可能发生相对滑动。并且,复合袋中心偏移量较小时,不易产生褶皱;复合袋边缘夹在2层皮带之间时,最易产生褶皱。皮带连同电机安装在移动滑台上,两皮带之间的距离可以改变,以适应不同的袋型。

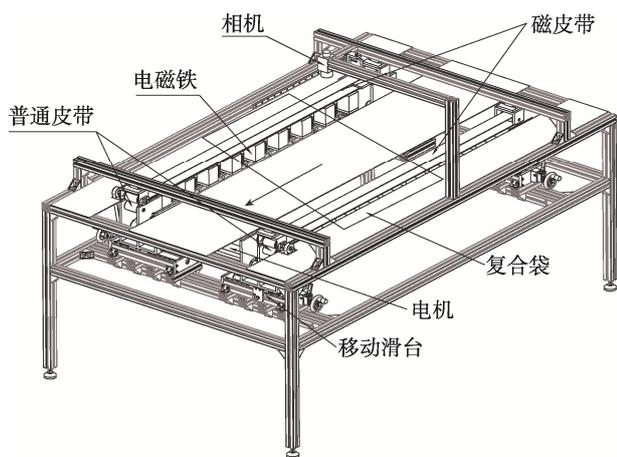


图3 复合袋纠偏装置
Fig.3 Compound bag correction device

复合袋进入相机视野时,相机开始拍摄复合袋的位置,并由计算机处理并计算复合袋的位置信息,直到复合袋位置和倾斜角度均被纠正。复合袋照片处理的过程见图4。首先将相机拍摄的三通道图片转化为单通道的灰度图,减少计算量;进行滤波处理,减少图片噪声的干扰^[6]。分2次对灰度图作二值化,一次设置阈值提取视觉标记,一次提取复合袋。视觉标记见图1,位于平台的4个角。通过定位视觉标记的位置,可以获取复合袋相对于平台的位置,避免相机或平台移动后重新标定^[7]。二值化的复合袋形成区域,然后求该区域的最小外接矩形^[8],并求此矩形与视觉标记中心轴线的距离(复合袋位置偏移),然后求矩形与视觉标记中轴线的夹角(复合袋倾角)。

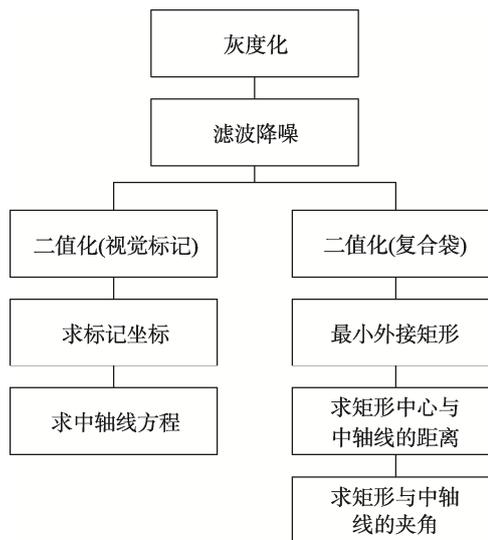


图4 视觉处理流程
Fig.4 Visual processing flow chart

2 复合袋纠偏运动分析

复合袋纠偏过程中,控制两侧电机的速度不一致,传送皮带使复合袋发生旋转,其运动示意图5,其中,复合袋传送方向为y正方向。

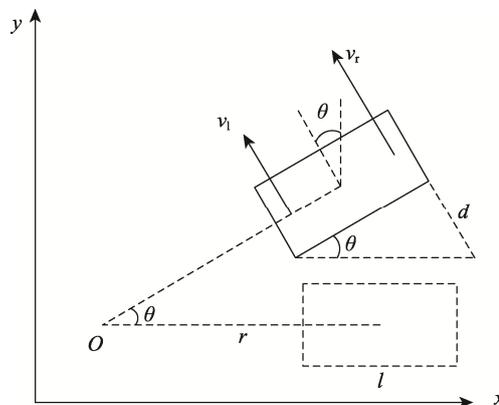


图5 复合袋纠偏运动过程
Fig.5 Motion process of compound bag correction

由运动学规律可得复合袋纠偏过程中的以下参数^[9]。

$$v = \frac{v_1 + v_r}{2} \tag{1}$$

$$\theta = \sin \theta = \frac{d}{l} = \frac{(v_r - v_1)t}{l} \tag{2}$$

$$\omega = \frac{\theta}{t} = \frac{(v_r - v_1)}{l} \tag{3}$$

$$r = \frac{v}{\omega} = \frac{(v_1 + v_r)l}{2(v_r - v_1)} \tag{4}$$

式中： v 为复合袋中心位置的速度； v_1 为左纠偏皮带的速度； v_r 为右纠偏皮带的速度； θ 为复合袋旋

转角度； r 为复合袋旋转半径； d 为左皮带与右皮带的位移差； l 为两纠偏皮带的间距； t 为时间； ω 为纠偏角速度。

纠偏策略如下所述。

1) 纠正复合袋中心位置。当纠偏轮左右两轮速度方向相同，大小不同时，复合袋会围绕复合袋中心外一点作圆周运动，可将复合袋中心移到传送带中轴线上，实现位置纠偏同时，会产生一个新的旋转角度 θ' 。

2) 纠正复合袋倾斜角度。当纠偏轮左右两轮速度方向相反，大小相同时，复合袋会围绕复合袋中心作圆周运动，可将复合袋角度纠正，实现角度纠偏。

3) 视觉系统检测出复合袋的位置偏差 d 和倾斜角 θ ，首先由 1) 中的方法纠正位置偏差 d ，同时引入新的旋转角度 θ' ，此时角度偏移为 $\theta''=\theta+\theta'$ ，然后由 2) 中的方法实现角度纠偏。

4) 位置纠偏和角度纠偏可叠加，即位置纠偏和角度纠偏可同时进行，设纠偏轮正转速度为正，反转速度为负，纠偏轮的速度为位置纠偏与角度纠偏速度的代数和。

当纠正复合袋中心位置时，旋转半径 r 与横向偏移 d 之间的关系为：

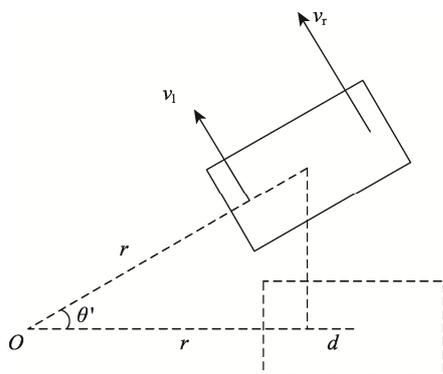


图 6 位置纠偏
Fig.6 Position correction

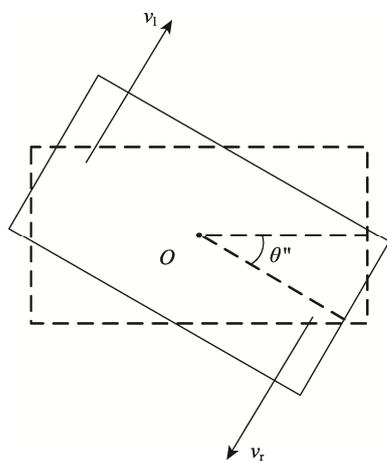


图 7 角度纠偏
Fig.7 Angle correction

$$d = r(1 - \cos \theta') \tag{5}$$

式中： θ' 为位置纠偏过程中新增的偏移角度。由此可知，位置纠偏过程中有 2 个变量。当左右 2 轮的速度差越大时，纠偏时间越短，同时也越易产生褶皱。其中 r 的最优值可由实验获得，然后可由式 (5) 计算出新增的旋转角度 θ' 。

角度纠偏时，纠偏轮左轮与右轮速度方向相反，大小相等，均为 \bar{v} 。

$$\theta'' = \frac{(v_r - v_l)t}{l} = \frac{2\bar{v}t}{l} \tag{6}$$

可知， θ'' 和 d 均由 v_l 与 v_r 这 2 个变量决定，确定 v_l 后， v_r 可由式 (6) 确定。 v_l 的最优值由实验获得。

此时，设位置纠偏时的旋转半径 r 与纠偏左轮的速度 v_l 为定值（左轮速度方向可变）。由式 (4) 可得位置纠偏时右轮的速度 v_{rp} 。

$$v_{rp} = \frac{2r+l}{2r-l} v_l \tag{7}$$

由式 (5) 可得：

$$\theta' = \arccos \left(1 - \frac{d}{r} \right) \tag{8}$$

将 θ' 代入式 (2) 中，可得位置纠偏时间 t_1 。

$$t_1 = \frac{\theta' l}{(v_r - v_l)} \tag{9}$$

位置纠偏完成后，倾斜角度为：

$$\theta'' = \theta + \theta' \tag{10}$$

角度纠偏时两轮速度大小相等，方向相反，两轮速度关系为

$$v_{ra} = v_l \tag{11}$$

式中： v_{ra} 为右轮角度纠偏时的速度。

由式 (6) 可得角度纠偏时间 t_2 。

$$t_2 = \frac{\theta'' l}{2v_l} \tag{12}$$

由叠加原理可得：

$$t_1 \leq t_2, \quad v_r = \begin{cases} v_{rp} + v_{ra} & 0 < t < t_1 \\ v_{ra} & t_1 < t < t_2 \end{cases} \tag{13}$$

3 模糊控制确定最佳纠偏速度

复合袋位置纠偏过程中，设左轮的速度为基准速度，右轮的速度按照式 (7) 计算。为获得最快的纠偏速度、最佳的纠偏效果，通过实验测出几个关键偏移量时的最佳纠偏速度与纠偏半径，实验装置见图 8。

先测出将纠偏半径设为保守定值，改变左轮的纠偏速度，找出最大无褶皱左轮纠偏速度。然后改变纠偏半径 r ，找出最短纠偏时间时的纠偏半径值。复合袋偏移量通常在 50 mm 以内，倾角在 30° 以内，通过实验测试最佳的 v_l 和 r 。在实验过程中，速度以 0.05 m/s 的差值逐渐减小，直到不产生褶皱为止。同样地以 1 m 为差值测试出最佳的 r ，实验结果见表 1。

获取关键点处的最佳纠偏速度,可以在复合袋处于该状态时以最优纠偏速度纠偏,但是不适用于其他位置的纠偏。为在各个状态都能优化纠偏速度,需将离散点的纠偏速度连续化。



图8 复合袋纠偏装置实物
Fig.8 Compound bag correction device in kind

文中采用模糊控制将关键点的最佳纠偏速度应用至所有纠偏状态。

模糊控制是以模糊集理论、模糊变量和模糊推理为基础的控制方法,其过程是将专家经验制作成模糊规则,然后将输入量模糊化,将模糊化后的量输入至模糊规则中完成模糊推理,然后将解模糊后的量输出,其工作过程见图9^[10-13]。

对于纠偏平台的控制而言,输入有2个,分别为位置偏移 P 和倾斜角度 A ; 输出有2个,分别为左轮基准速度 v_1 和纠偏半径 r 。位置偏移的论域为 $P=\{0,10,20,30,40,50,60\}$, 倾斜角度的论域为 $A=\{0,10,20,30\}$, 左轮基准速度的论域为 $v_1=\{1,1.2,1.4,1.6,1.8,2,2.2,2.4,2.6,2.8,3\}$, 纠偏半径的论域为 $r=\{3,4,5,6,7,8,9,10,11,12\}$ 。采用 mamdani 模糊控制方法,输入输出变量的隶属变量中间部分采用三角隶属函数,两头部分分别采用 Z 形隶属函数和 S 形隶属函数^[14-16]。各变量隶属函数见图 10, 其中的 P 为隶属概率。

根据实验获得的关键点最佳纠偏速度和纠偏半径,定制的模糊规则见表 2, 其中 p_1-p_6 为位置偏移的模糊变量, a_1-a_4 为倾角的模糊变量, $v_{11}-v_{111}$ 为纠偏速度的模糊变量, r_1-r_{10} 为纠偏半径的模糊变量。

Matlab 可视化的模糊量输入输出见图 11, 给定偏移量和倾角的值,可得出左轮基准纠偏速度和纠偏半径的值。

模糊控制效果仿真见图 12, 其中,未使用模糊控制算法的左轮基准速度和纠偏半径取一定值,分别为 $v_1=1\text{ m/s}$ 和 $r=10\text{ m}$ 。可知,使用模糊控制的纠偏算法纠正 50 mm 偏差用时 15 s,以恒定基准速度和纠偏半径纠偏的算法纠偏用时 90 s,使用模糊控制后大大缩短纠偏时间。复合袋的轨迹仿真见图 13,展示了复合袋中心的位置变化。由图 13 可知,复合袋纠正 50 mm 的偏移,需要向前行进 1.8 m。

表 1 最佳纠偏速度与半径
Tab.1 Optimum correction speed and radius

角度/ (°)	0 mm		10 mm		20 mm		30 mm		40 mm		50 mm	
	速度/ (m·s ⁻¹)	半径/ m										
0	3	0	3.1	5	2.85	3	2.4	4	1.95	5	1.25	7
10	3	0	3.1	4	2.8	5	2.35	6	1.95	8	1.2	10
20	3	0	3.05	5	2.7	6	2.25	7	1.85	9	1.1	11
30	3	0	3	6	2.6	7	2.15	8	1.75	10	1	12

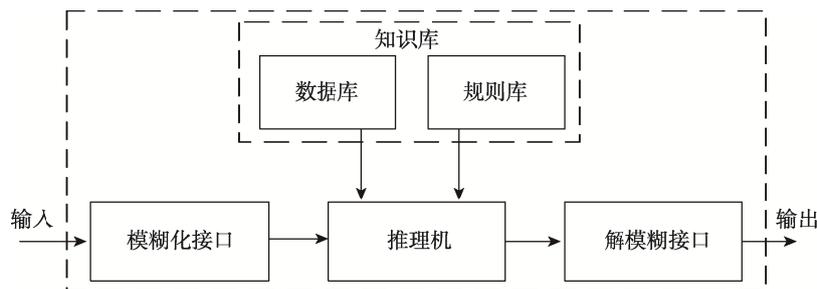


图9 模糊控制结构
Fig.9 Structure of fuzzy control

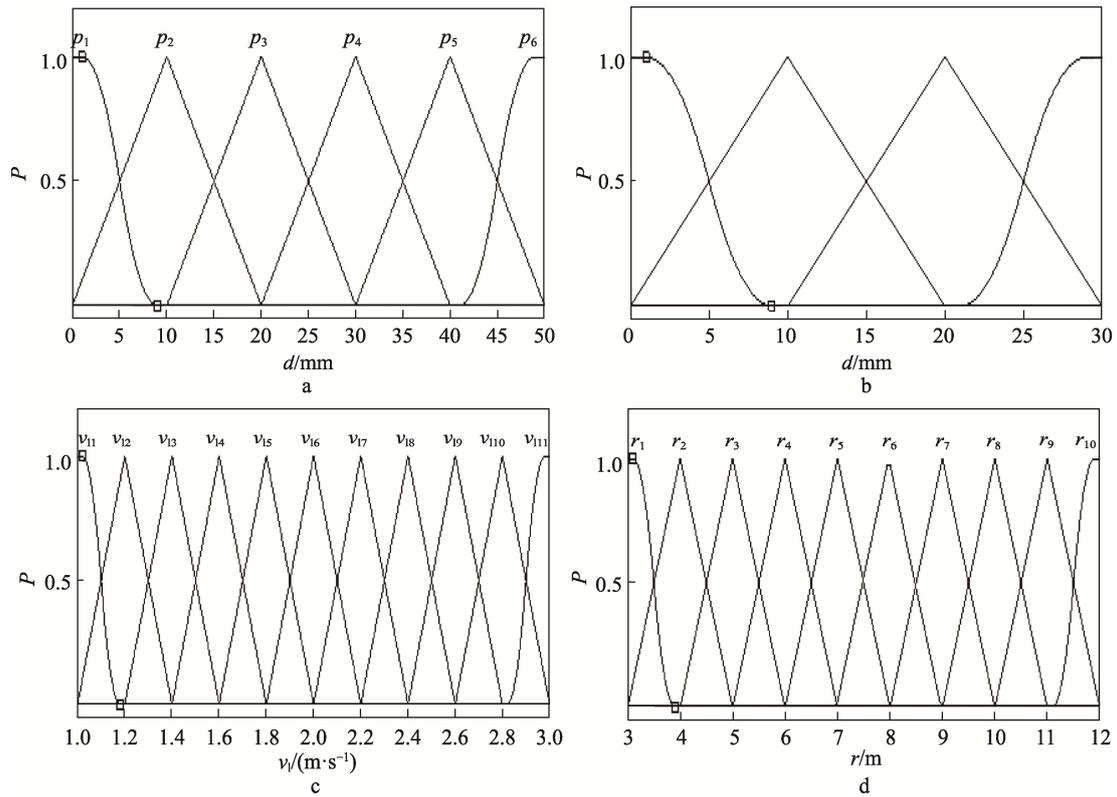


图 10 输入输出变量的隶属函数
Fig.10 Membership function of input and output variables

表 2 模糊规则
Tab.2 Fuzzy rules

模糊变量	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
a_1	v_{111}, r_1	v_{111}, r_1	v_{110}, r_1	v_{18}, r_2	v_{16}, r_3	v_{12}, r_5
a_2	v_{111}, r_1	v_{111}, r_2	v_{110}, r_3	v_{18}, r_4	v_{16}, r_6	v_{12}, r_8
a_3	v_{111}, r_1	v_{111}, r_3	v_{19}, r_4	v_{17}, r_5	v_{15}, r_7	v_{11}, r_9
a_4	v_{111}, r_1	v_{111}, r_4	v_{19}, r_5	v_{17}, r_6	v_{15}, r_8	v_{11}, r_{10}

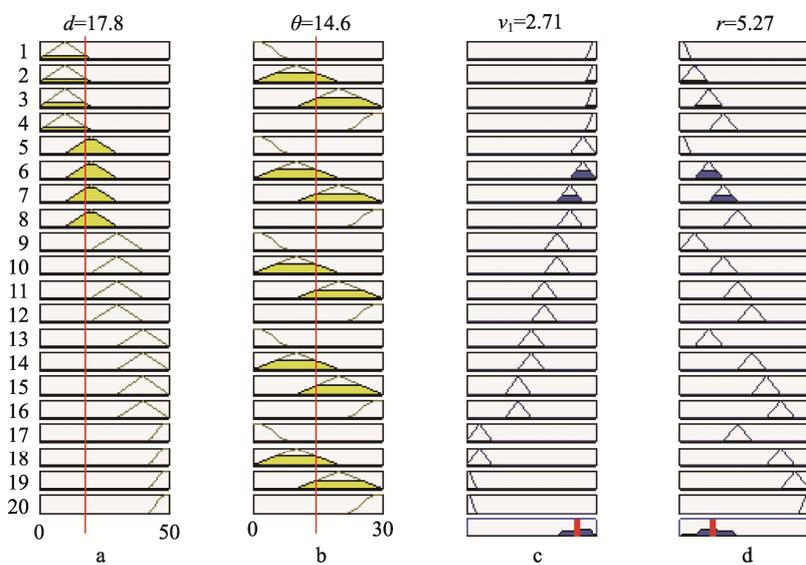


图 11 模糊控制输入输出关系
Fig.11 Input/output relationship of fuzzy control

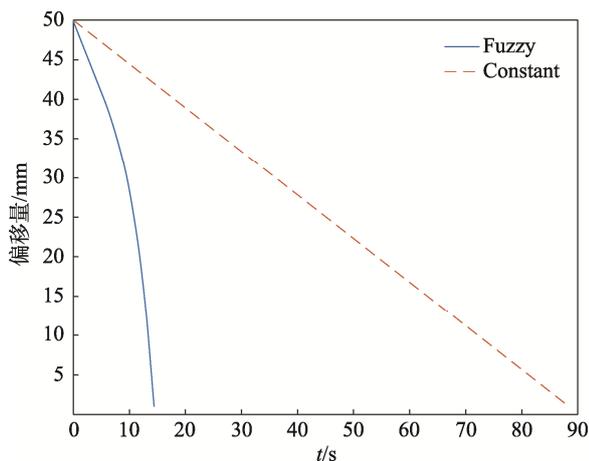


图 12 模糊控制仿真结果
Fig.12 Simulation results of fuzzy control

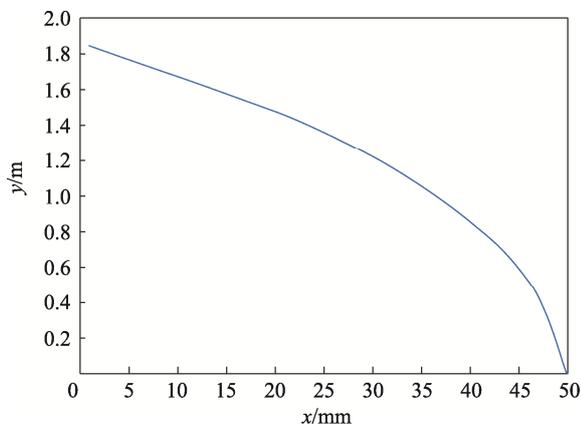


图 13 复合袋中心轨迹
Fig.13 Center track of compound bag

4 结语

针对复合袋偏移等问题提出了双皮带差速纠偏的方法,运用工业相机拍摄复合袋的位置和倾斜角度,使用视觉标记实现自标定。该方法在纠偏过程中不损坏纠偏物品的形态,适用于其他柔性制品的纠偏。

根据纠偏方法设计了纠偏装置,该装置可根据复合袋大小调节两皮带之间的间距。提出差速纠偏算法,计算相应偏移量时两轮的速度。为减少纠偏所用时间,提出位置纠偏和角度纠偏的叠加方法。

为缩短纠偏时间,实验测试出相应偏移量下不产生褶皱的最大纠偏速度和最小纠偏半径,运用模糊控制将其制定成模糊规则,可得到任意纠偏范围内的最佳纠偏速度和纠偏半径。经过仿真得到,模糊控制方法纠正 50 mm 用时 15 s,常值纠偏方法用时 90 s。

文中对两皮带之间的压紧力未做分析,但皮带压紧力是影响复合袋褶皱和限制最大纠偏速度的重要因素,优化压紧力可以提高最大纠偏速度,缩短纠偏时间。

参考文献:

- [1] 许建鸣,任朝胜.一种实用的光电跟踪自动纠偏系统[J].光学仪器,1989(1):1—5.
XU Jian-ming, REN Chao-sheng. A Practical Photoelectric Tracking and Automatic Correction System[J]. Optical Instruments, 1989(1): 1—5.
- [2] 罗桂兵.纸纱复合制袋印刷一体机关键技术研究[D].兰州:兰州交通大学,2015:6—7.
LUO Gui-bing. Research on Key Control Technology of Paper Yarn Composite Bag Making Printing Machine[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015: 6—7.
- [3] 畅靖.纸纱复合袋糊底机结构优化设计及运动实现[D].兰州:兰州交通大学,2017:5—10.
CHANG Jing. Structural Optimization Design and Motion Realization of Paper Yarn Composite Bag Paster[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017: 5—10.
- [4] 宣苓娟,张媛,周满山,等.带式输送机常见纠偏装置分析[J].煤矿机械,2011,32(8):192—193.
XUAN Ling-juan, ZHANG Yuan, ZHOU Man-shan, et al. Analysis of Common Rectifying Devices of Belt Conveyor[J]. Coal Mining Machinery, 2011, 32(8): 192—193.
- [5] 何晓东,史耀耀,秦现生.复合材料布带缠绕纠偏模糊控制技术研究[J].西北工业大学学报,2014,32(3):464—469.
HE Xiao-dong, SHI Yao-yao, QIN Xian-sheng. Research on Fuzzy Control Technology of Composite Tape Winding Correction[J]. Journal of Northwest University of Technology, 2014, 32(3): 464—469.
- [6] 迪尼斯.自适应滤波算法与实现[M].北京:电子工业出版社,2014:59—76.
Denis. Adaptive Filtering Algorithm and Implementation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2014: 59—76.
- [7] 李华,吴福朝,胡占义,等.一种新的线性摄像机自标定方法[J].计算机学报,2000,23(11):1121—1129.
LI Hua, WU Fu-chao, HU Zhan-yi, et al. A New Method of Linear Camera Self Calibration[J]. Acta Computerica Sinica, 2000, 23(11): 1121—1129.
- [8] 许龙.基于机器视觉的SMT芯片检测方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2014:13—22.
XU Long. Research on SMT Chip Detection Method Based on Machine Vision[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2014: 13—22.
- [9] 储江伟,王荣本,郭克友,等.基于机器视觉引导的两轮差速转向AGV控制问题的研究[J].机械与电子,2002(5):51—55.
CHU Jiang-wei, WANG Rong-ben, GUO Ke-you, et al. Research on AGV Control of Two Wheel Differential Steering Based on Machine Vision[J]. Mechatronics, 2002(5): 51—55.
- [10] CZERWIŃSKI K, WOJTULEWICZ A, ŁAWRYŃCZUK

- M. Fuzzy Controller for Laboratory Levitation System: Real-time Experiments Using Programmable Logic Controller[J]. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2019, 17(21): 1507—1514.
- [11] 刘璐. 基于模糊控制算法的重载列车节能运行控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016: 12—16.
LIU Lu. Research on Energy-saving Operation Control Strategy of Heavy Haul Train Based on Fuzzy Control Algorithm[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016: 12—16.
- [12] 王磊, 王为民. 模糊控制理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 71—81.
WANG Lei, WANG Wei-min. Fuzzy Control Theory and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997: 71—81.
- [13] 刘汉忠, 俞鹏. 模糊 PID 自适应控制在微型齿轮泵恒流控制系统中的应用[J]. *流体机械*, 2018, 46(12): 50—53.
LIU Han-zhong, YU Peng. Application of Fuzzy PID Adaptive Control in Constant Flow Control System of Miniature Gear Pump[J]. *Fluid Machinery*, 2018, 46(12): 50—53.
- [14] 马子龙, 詹小英. 瓦楞纸板生产线电机同步控制方法[J]. *包装工程*, 2017, 38(21): 172—176.
MA Zi-long, ZHAN Xiao-ying. Synchronous Motor Control Method of Corrugated Board Production Line[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(21): 172—176.
- [15] 张少宾, 蒋卫良, 芮丰. 基于自适应模糊 PID 的输送机带速控制仿真[J]. *工业控制计算机*, 2019, 32(6): 100—101.
ZHANG Shao-bin, JIANG Wei-liang, RUI Feng. Simulation of Conveyor Belt Speed Control Based on Adaptive Fuzzy PID[J]. *Industrial Control Computer*, 2019, 32(6): 100—101.
- [16] 郭立新, 李浩, 黄秋野, 等. 烧结机模糊控制规则设计及其仿真[J]. *东北大学学报*, 2006, 27(10): 16—19.
GUO Li-xin, LI Hao, HUANG Qiu-ye, et al. Fuzzy Control Rule Design and Simulation of Sintering Machine[J]. *Journal of Northeast University*, 2006, 27(10): 16—19.