

文章编号:1002-2082 (2020) 03-0611-07

# 基于 IGES 的激光扫描投影文件解析方法研究

范成博<sup>1</sup>, 张梦梦<sup>2</sup>, 刘继强<sup>1</sup>, 陈雨情<sup>1</sup>, 李丽娟<sup>1</sup>, 侯茂盛<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学 光电工程学院 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;  
2. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

**摘要:** 激光扫描投影仪能够实现待装配零部件线框轮廓的精准位置投影, 能够大幅度改善由传统装配方式所引起的精度差, 效率低等问题。为了在自主研发的激光扫描投影系统中实现可直接读取 IGES (初始化图形交互规范) 格式的三维数模激光投影, 研究了多特征图元提取和文件自动生成方法。该方法通过提取待投影线框图形的点、线、面等数据特征, 以元胞的方式存储在.ply 格式文档中, 通过.ply 文件对数控开关进行延时控制以及对二维振镜轨迹进行操控, 实现更加智能化地控制激光扫描投影。应用 12 个 IGES 格式图元的投影实验验证, 该方法可实现所有图元清晰投影且激光轮廓线宽优于 0.3 mm, 通过这种新型投影系统可提高车间装配生产效率, 改善装配精度。

**关键词:** 激光投影; IGES; 数据转换; 多特征; 投影文件

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0305004

## Research on analytical method of laser scanning projection files based on IGES

FAN Chengbo<sup>1</sup>, ZHANG Mengmeng<sup>2</sup>, LIU Jiqiang<sup>1</sup>, CHEN Yuqing<sup>1</sup>, LI Lijuan<sup>1</sup>, HOU Maosheng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology(Ministry of Education), School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Beijing Satellite Manufacturing Co., Ltd., Beijing 100094, China)

**Abstract:** The laser scanning projector can realize the precise position projection of the wire frame contour for the components to be assembled, and can also greatly improve the problems of low precision and low efficiency caused by the traditional assembly method. In order to realize the 3D digital model laser projection in IGES format that can be read directly in the independently developed laser scanning projection system, the multi-feature image primitive extraction and the automatic files generation method were studied. In this method, the data features such as points, lines, and surfaces of the wire frame graphics to be projected were extracted and stored as the cellular in the .ply format file. The delay control of the numerical control switch and the control of the 2D vibrating mirror track were carried out by the .ply format file, which realized the more intelligent control of the laser scanning projection. The projection experiment of 12 IGES format image primitives verify that the proposed method can achieve the clear projection of all the image primitives, and the laser contour width is better than 0.3 mm. The assembly efficiency of the workshop and the assembly precision can be improved by using this new projection system.

**Key words:** laser projection; IGES; data conversion; multi-feature; projection file

收稿日期: 2019-09-04; 修回日期: 2019-11-22

基金项目: 国家自然科学基金 (61805022); 吉林省科技发展计划重点科技攻关项目 (20160204052GX)

作者简介: 范成博 (1994-), 男, 硕士, 主要从事现代光学测试理论与技术方面的研究。E-mail: 630749027@qq.com

通信作者: 侯茂盛 (1984-), 男, 讲师, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为先进光学仪器与精密测量。E-mail: houmsh@cust.edu.cn

## 引言

近年来由于模型定义、数字孪生等技术在我国制造业的拓展和深入,先进装配制造技术领域朝着数字化、智能化和柔性化方向不断发展。对于飞机制造业而言,机械臂、激光跟踪仪等数字化设备已在内主要先进制造企业得到广泛应用。在日趋激烈的竞争环境下,各先进制造企业如何通过数字化设备来提高产品精度,如何提高生产效率就成为各企业所关注的核心问题。对于飞机装配的定位问题,小型连接件约占飞机零件总数的 30%,数量极为庞大,外形多样且装配工艺繁多,但目前却仍采用固定夹具,量尺划线,钻铆模板等人工装配方式<sup>[1]</sup>。上述加工装配方法存在着定位精度低、效率差等问题。这些问题目前先进制造装配业亟待解决的技术瓶颈。

激光扫描投影技术是将零部件的三维 CAD 数模,通过驱动二维振镜扫描系统使激光器射出的光线被快速转折,绘制出由激光线快速循环扫描形成的零部件外形轮廓线框。其利用激光在待安装和加工区域扫描形成的清晰、明亮的零部件轮廓线框,帮助技术人员得到更加直观和实用的信息,使其操作更加精确、高效。这种方法有效地将数据模型与实际制造和装配衔接起来<sup>[2-3]</sup>。

长春理工大学在激光扫描投影技术方面已进行了多年的研究,完成了基于四元数法的坐标转换参数求解方法的研究,提高了所研制激光扫描投影系统的校准精度<sup>[4]</sup>,可实现对 3D 投影空间进行智能定位分析<sup>[5]</sup>,并应用反远距结构提高动态自聚焦精度要求<sup>[6]</sup>,采用 Fleury 算法优化了投影路径<sup>[7]</sup>。本文为了使自主研发的激光扫描投影系统可直接读取三维数模,更快速智能地实现激光扫描投影,研究了一种多特征图元提取与投影文件自动生成方法,可以直接获取 CAD 数模中扫描投

影轮廓线框图形所需的点、线、面等特征数据,并对这些数据进行分析处理形成激光扫描投影控制文件。

## 1 IGES 文件分析

IGES(Initial graphics exchange specification, 初始图像交换规范)作为一种 CAD/CAM 间的产品数据交换文件方式被普遍接受。通过这种文件的结构与使用数据和字符串的表达方式,可对几何及非几何产品数据进行规定<sup>[8]</sup>。

### 1.1 IGES 文件格式表述

IGES 的整个文件由若干行组成,每行固定有 80 个字符,行数任意,采用二进制格式<sup>[9]</sup>。

IGES 文件一般由五、六个部分构成,每一部分的行数各异,各部分的标志都被记录于该行文字的第 73 个字符上,这些标志来源于英文释义首字母,如目录条目段(directory entry section)的数据便采用目录的英文首字母 D 来标记,用 P 对参数数据段(parameter data section)进行标识,结束段(terminate section)会以字母 T 来注明<sup>[10]</sup>。

目录条目段的作用如同一本书的目录索引一样,引导读者于数据段查找对应信息,该段记录了图形的种类与数据的编号等。

参数数据段记录了如三维坐标,绘制形式等所绘实体的数据参数,按照绘制种类,参数坐标的顺序排列。

结束段位于文末对其他段落行数进行交代。

### 1.2 IGES 文件的具体解析方法和流程

IGES 文件中描绘框图的数据信息被尽数记录于目录段和参数段。其中目录段记录了该图形中所有实体的基本属性信息。每个实体信息需占据两行目录条目段来记录,记录次序为任意的,表 1 列出了目录段各条目信息<sup>[11-12]</sup>。

表 1 目录条目段数据信息

Table 1 Data information of directory entry segment

1-8	9-16	17-24	25-32	33-40
实体类型号	参数数据起始行号	结构	线性模式	层
实体类型号	线宽	颜色号	参数行计数	格式号
41-48	49-56	57-64	65-72	73-80
视图	变换矩阵	相关性	状态号	序号
保留	保留	实体标号	实体下标	序号

其中实体类型号是对实体类型进行编码,用以区分不同实体,参数数据起始号即为该数据于数

据段的首行号;层为该实体所占据的图层号,二维图形的图层为 0;变换矩阵是指 2 个坐标系下对图

形进行映射的矩阵指针号, 不需要变换矩阵时其值为 0; 状态号是由 4 个双字节来表征其可见、从属、使用、标志属性; 线宽为所绘制线段可见宽度, 其最值受限于全局段, 最小值为 0; 颜色号为区分图形颜色所设的数字代号; 参数行计数代表该数据于参数数据段所占行数, 格式号为在原有解释上的再说明<sup>[13-14]</sup>。

从参数数据段可获得边框图形的坐标数据。通过对 D 段以及 P 段分析可以获得轮廓图中有关图形种类、图层、端点坐标等数据信息, 可用来指导工人进行零部件的定位安装。

如图 1 所示, 这是一份 IGES 文件的 TXT 格式打开。目录段的实体类型号 106 代表所画图形为矩形; 参数数据起始行号为 1, 表示这个数据占据数据信息段的首行; 由上图目录段信息可知图层, 线性模式均为 0; 无变换矩阵, 线宽代号为 70; 其中颜色代号为 8, 代表所画矩形为白色; 参数行计数为 1, 代表该信息在数据信息段仅占一行; 由状态号可看出, 该图形为可见、独立、几何, 层状态为总体自顶向下的, 格式号为 63。

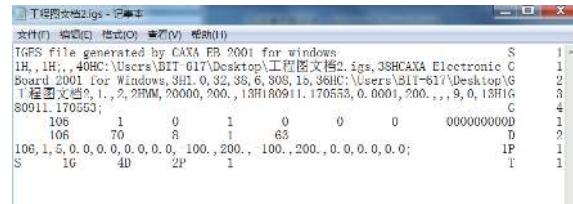


图 1 长方形 IGES 文件

Fig. 1 Rectangular IGES file

从参数数据段我们可以获悉, 这个矩形是通过第 1 种方式绘制的, 即依次序给出 5 个关键坐标点(首末端点重合)的坐标信息而绘制而成。通过其坐标信息可以得知该图形是一个以原点为起点, 长为 200 mm, 宽为 100 mm 绘制在第四象限的矩形。

鉴于以上对 IGES 文件的研究, 自主研发出一套可进行多特征图元提取和文件自动生成的程序, 进而控制激光扫描投影系统。

### 1.3 IGES 文件数据信息提取及.ply 文件生成

为获取一个可控制激光扫描投影的.ply 格式文件, 可先从三维设计软件中进行创成式设计。边框提取获得该数模轮廓图, 将得到的轮廓图存储为 IGES 格式。将 IGES 文件导入自主研发的多特征图元提取和文件自动生成程序中, 进行文件解锁分析。

将文件导入后, 程序首先会访问其目录条目

段, 获取其第 4 列偶数行信息。通过这条信息来判断该图形在参数数据段的起始位置及占用的存储空间。经程序做出初步判断后会对占用两行及两行以上的数据信息进行拼接。待数据信息处理好后将其进行循环判断, 并根据图形的类型进行分类。如首行信息为 100 的是圆形, 需将其归总到圆类, 然后获取其圆心坐标和半径。当实体类型号为 106 时该图形为多边形, 需判断其边数及绘制方法, 进而获取关键点坐标。将分类好的参数信息按照图形的关键点数据, 利用拆分、重组、导入结构体等方法将关键数据存入对应形状的元胞中按照其所属类别导出。

最后需根据装配所需求的加工方式、材料以及加工步骤的不同, 将从元胞中导出的数据加以整理生成.ply 文件。.ply 文件首先根据图形的类型将不同的元胞数据做组别区分, 每一组包含一个完整的图形信息; 之后按照图形所属整体图形的不同区域进行项目划分; 最后按照加工工艺、加工技术、图层等因素进行图层划分。整个.ply 文件遵循由组别到项目, 最终到图层的层层递进方式设计而成。在.ply 文件的控制下, 激光扫描投影系统便可进行分图层投影, 从而指导工人在工件上进行零部件的装配加工。图 2 为 IGES 格式经多特征图元提取和文件自动生成程序处理后转换成.ply 格式的结果图。

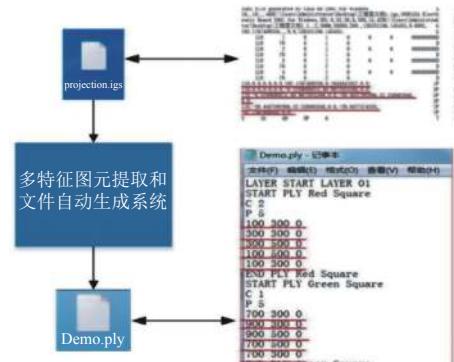


图 2 IGES 转换成.ply 结果图

Fig. 2 Result diagram of IGES converting to .ply

## 2 基于 IGES 文件的投影系统实验

### 2.1 新型激光扫描投影系统设计

基于多特征图元提取和文件自动生成的激光扫描投影系统主要由可调谐激光器组模块、聚焦模块、二维振镜模块、反馈光强探测模块、驱动控制模块以及数据处理模块组成<sup>[15]</sup>。其中驱动模块

是由基于自主研发系统生成的.ply 文件完成的。通过对数控开关的开合延时以及对二维振镜偏转轨迹的控制,该系统可以将计算机辅助设计的 CAD 模型以激光束轮廓线的形式按照 1:1 的比例精确地成像到工作面上,从而指导工人装配<sup>[16]</sup>。该套系统能够将 CAD 工程设计与激光辅助制造衔接起来,直接指导工人在主体上进行零部件装配。

搭建的激光扫描投影系统的结构图与实物图如图 3 所示。

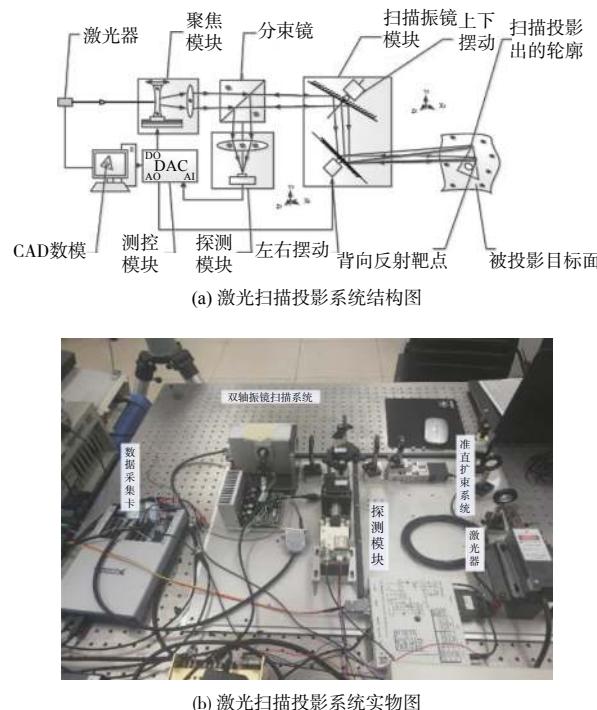


图 3 激光扫描投影系统

Fig. 3 Laser scanning projection system

激光经过聚焦模块进行准直扩束,透过分束镜激光到达二维振镜模块,通过二维振镜的快速偏转使激光束在被投影工件表面进行投影。到达靶标面后光线沿原路返回,在分束镜处反射进入探测模块。其中二维振镜转动受自主研发程序处理后生成.ply 文件。在投影过程中依照从组别到项目最终到图层,由低到高顺序投影便可实现分图层指示多种材料及多种处理工艺的零部件装配。这种方法可提高工作效率,减少人工成本。基于自主研发程序处理的激光扫描投影系统工作流程图如图 4 所示。

## 2.2 新型激光扫描投影系统实验

从 SolidWorks、CATIA 等画图软件数模中提取出所需要装配部分的结构图,如图 5 所示。将提取出的结构图存储为 IGES 格式,该结构图的 IGES

文件如图 6 所示。通过对 IGES 文件分析处理生成含有投影图像三维坐标的.ply 文件。将.ply 文件输入激光扫描投影系统,通过对二维振镜及数控开关的控制可实现在投影面根据不同加工工艺、不同加工材料投影出复杂图形,进而指导装配。

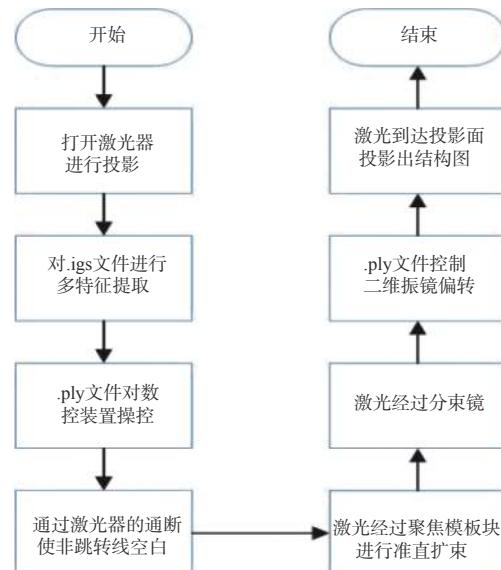


图 4 激光扫描投影系统工作流程图

Fig. 4 Flow chart of laser scanning projection system work

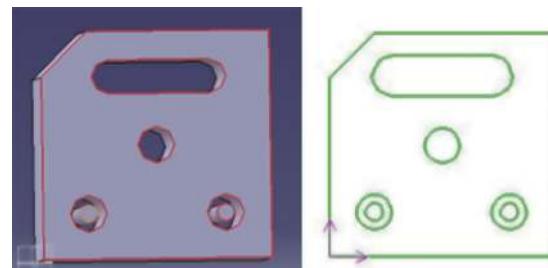


图 5 装配部分三维数模及其结构图

Fig. 5 Assembly part 3D digital model and its structure

```

1H, 1H, 0, 37HC: C:\Users\Administrator\Desktop\12.igs, 38000AXA_Electronic_Bag2
1D, 1D, 0, 1, 2, 2.2MM, 20000, 200, 13H190422.094728, 0.0001, 2.5,,9.0, 13H190422.0G
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
7010
7011
7012
7013
7014
7015
7016
7017
7018
7019
7020
7021
7022
7023
7024
7025
7026
7027
7028
7029
7030
7031
7032
7033
7034
7035
7036
7037
7038
7039
70310
70311
70312
70313
70314
70315
70316
70317
70318
70319
70320
70321
70322
70323
70324
70325
70326
70327
70328
70329
70330
70331
70332
70333
70334
70335
70336
70337
70338
70339
70340
70341
70342
70343
70344
70345
70346
70347
70348
70349
70350
70351
70352
70353
70354
70355
70356
70357
70358
70359
70360
70361
70362
70363
70364
70365
70366
70367
70368
70369
70370
70371
70372
70373
70374
70375
70376
70377
70378
70379
70380
70381
70382
70383
70384
70385
70386
70387
70388
70389
70389
70390
70391
70392
70393
70394
70395
70396
70397
70398
70399
703100
703111
703122
703133
703144
703155
703166
703177
703188
703199
703200
703211
703222
703233
703244
703255
703266
703277
703288
703299
703300
703311
703322
703333
703344
703355
703366
703377
703388
703399
703400
703411
703422
703433
703444
703455
703466
703477
703488
703499
703500
703511
703522
703533
703544
703555
703566
703577
703588
703599
703600
703611
703622
703633
703644
703655
703666
703677
703688
703699
703700
703711
703722
703733
703744
703755
703766
703777
703788
703799
703800
703811
703822
703833
703844
703855
703866
703877
703888
703899
703900
703911
703922
703933
703944
703955
703966
703977
703988
703999
703100
703111
703122
703133
703144
703155
703166
703177
703188
703199
703200
703211
703222
703233
703244
703255
703266
703277
703288
703299
703300
703311
703322
703333
703344
703355
703366
703377
703388
703399
703400
703411
703422
703433
703444
703455
703466
703477
703488
703499
703500
703511
703522
703533
703544
703555
703566
703577
703588
703599
703600
703611
703622
703633
703644
703655
703666
703677
703688
703699
703700
703711
703722
703733
703744
703755
703766
703777
703788
703799
703800
703811
703822
703833
703844
703855
703866
703877
703888
703899
703900
703911
703922
703933
703944
703955
703966
703977
703988
703999
703100
703111
703122
703133
703144
703155
703166
703177
703188
703199
703200
703211
703222
703233
703244
703255
703266
703277
703288
703299
703300
703311
703322
703333
703344
703355
703366
703377
703388
703399
703400
703411
703422
703433
703444
703455
703466
703477
703488
703499
703500
703511
703522
703533
703544
703555
703566
703577
703588
703599
703600
703611
703622
703633
703644
703655
703666
703677
703688
703699
703700
703711
703722
703733
703744
703755
703766
703777
703788
703799
703800
703811
703822
703833
703844
703855
703866
703877
703888
703899
703900
703911
703922
703933
703944
703955
703966
703977
703988
703999
703100
703111
703122
703133
703144
703155
703166
703177
703188
703199
703200
703211
703222
703233
703244
703255
703266
703277
703288
703299
703300
703311
703322
703333
703344
703355
703366
703377
703388
703399
703400
703411
703422
703433
703444
703455
703466
703477
703488
703499
703500
703511
703522
703533
703544
703555
703566
703577
703588
703599
703600
703611
703622
703633
703644
703655
703666
703677
703688
703699
703700
703711
703722
703733
703744
703755
703766
703777
703788
703799
703800
703811
703822
703833
703844
703855
703866
703877
703888
703899
703900
703911
703922
703933
703944
703955
703966
703977
703988
703999
703100
703111
703122
703133
703144
703155
703166
703177
703188
703199
703200
703211
703222
703233
703244
703255
703266
703277
703288
703299
703300
703311
703322
703333
703344
703355
703366
703377
703388
703399
703400
703411
703422
703433
703444
703455
703466
703477
703488
703499
703500
703511
703522
703533
703544
703555
703566
703577
703588
703599
703600
703611
703622
703633
703644
703655
703666
703677
703688
703699
703700
703711
703722
703733
703744
703755
703766
703777
703788
703799
703800
703811
703822
703833
703844
703855
703866
703877
703888
703899
703900
703911
703922
703933
703944
703955
703966
703977
703988
703999
703100
703111
703122
703133
703144
703155
703166
703177
703188
703199
703200
703211
703222
703233
703244
703255
703266
703277
703288
703299
703300
703311
703322
703333
703344
703355
703366
703377
703388
703399
703400
703411
703422
703433
703444
703455
703466
703477
703488
703499
703500
703511
703522
703533
703544
703555
703566
703577
703588
703599
703600
703611
703622
703633
703644
703655
703666
703677
703688
703699
703700
703711
703722
703733
703744
703755
703766
703777
703788
703799
703800
703811
703822
703833
703844
703855
703866
703877
703888
703899
703900
703911
703922
703933
703944
703955
703966
703977
703988
703999
703100
703111
703122
703133
703144
703155
703166
703177
703188
703199
703200
703211
703222
703233
703244
703255
703266
703277
703288
703299
703300
703311
703322
703333
703344
703355
703366
703377
703388
703399
703400
703411
703422
703433
703444
703455
703466
703477
703488
703499
703500
703511
703522
703533
703544
703555
703566
703577
703588
703599
703600
703611
703622
703633
703644
703655
703666
703677
703688
703699
703700
703711
703722
703733
703744
703755
703766
703777
703788
703799
703800
703811
703822
703833
703844
703855
703866
703877
703888
703899
703900
703911
703922
703933
703944
703955
703966
703977
703988
703999
703100
703111
703122
703133
703144
703155
703166
703177
703188
703199
703200
703211
703222
703233
703244
703255
703266
703277
703288
703299
703300
703311
703322
703333
703344
703355
703366
703377
703388
703399
703400
703411
703422
703433
703444
703455
703466
703477
703488
703499
703500
703511
703522
703533
703544
703555
703566
703577
703588
703599
703600
703611
703622
703633
703644
703655
703666
703677
703688
703699
703700
703711
703722
703733
703744
703755
703766
703777
703788
703799
703800
703811
703822
703833
703844
703855
703866
703877
703888
703899
703900
703911
703922
703933
703944
703955
703966
703977
703988
703999
703100
703111
703122
703133
703144
703155
703166
703177
703188
703199
703200
703211
703222
703233
703244
703255
703266
703277
703288
703299
703300
703311
703322
703333
703344
703355
703366
703377
703388
703399
703400
703411
703422
703433
703444
703455
703466
703477
703488
703499
703500
703511
703522
703533
703544
703555
703566
703577
703588
703599
703600
703611
703622
703633
703644
703655
703666
703677
703688
703699
703700
703711
703722
703733
703744
703755
703766
703777
703788
703799
703800
703811
703822
703833
703844
703855
703866
703877
703888
703899
703900
703911
703922
703933
703944
703955
703966
703977
703988
703999
703100
703111
703122
703133
703144
703155
703166
703177
703188
703199
703200
703211
703222
703233
703244
703255
703266
703277
703288
703299
703300
703311
703322
703333
703344
703355
703366
703377
703388
703399
703400
703411
703422
703433
703444
703455
703466
703477
703488
703499
703500
703511
703522
703533
703544
703555
703566
703577
703588
703599
703600
703611
703622
703633
703644
703655
703666
703677
703688
703699
703700
```

D24 可以知道整个结构图由 12 个图线组成, 分别为 7 个“圆形”, 4 个“矩形”和 1 条直线, 且均在一个图层并且颜色相同。

对照前文表 1 目录条目段数据信息, 可以获知第 2 列的奇数行代表其起始行号, 第 4 列的偶数行代表着该实体类型数据信息占据行数。根据这些信息有助于在实验阶段从参数数据段中挑选诸如端点坐标、圆心坐标、以及半径等关键数据信息。并可预先了解到某些参数数据会占据多少行, 对其进行拼接处理以方便后续操作。

将 IGES 文件导入自主研发的程序中, 程序将在去除起始段、全局段和结束段等与投影无关段落, 从而直接访问目录段与数据信息段。在此过程中程序将依据句首数字信息对其种类进行判断, 进而将其分类输入对应结构体中。将处理好的数据导入对应元胞, 并依据图形种类分类存储, 可得到如图 7 所示的分类存储元胞。

(a) 两点“矩形”元胞

	1	2	3
1	[0,0,0]		[0,2,0]
2	[1.8000,1.8000,0]		[0.7000,1.8000,0]
3	[0.7000,2.2500,0]		[1.8000,2.2500,0]

(b) 4 点“矩形”坐标

	1	2	3	4	5	6	7
1	[0.5000,2.5000,0]		[2.5000,2.5000,0]		[2.5000,0,0]		[0,0,0]

(c) 直线端点坐标

	1	2
1	[0.5000,2.5000,0]	[0,2,0]

(d) 圆心坐标及半径

	1	2
1	[1.2500,1.2500,0]	0.2000
2	[0.5000,0.5000,0]	0.2000
3	[0.5000,0.5000,0]	0.1000
4	[2,0.5000,0]	0.2000
5	[2,0.5000,0]	0.1000
6	[0.7000,2.0250,0]	0.2250
7	[1.8000,2.0250,0]	0.2250

图 7 分类存储的元胞

Fig. 7 Classification of stored cellars

基于圆心坐标和半径, 根据下式去拟合图 7 中圆上点坐标信息的元胞:

$$c = a + r \times \cos(j \times 10 \times 0.0175) \quad (1)$$

$$d = b + r \times \sin(j \times 10 \times 0.0175) \quad (2)$$

式中:  $a$  为圆心横坐标;  $b$  为圆心纵坐标;  $r$  为半径;  $c$  为圆上点横坐标;  $d$  为圆上点纵坐标;  $j$  为从 1~36 的整数值 ( $\times 0.0175$  表示取弧度)。

最后将元胞中的数据依据其不同材料以及不同加工工艺, 通过程序将其按照组别、项目和图层由低到高分类生成可供投影的.ply 文件, 如图 8 所示。

```
LAYER START x
START PLY z1
C 1P 2
0.5 2.5 0
0 2 0
END PLY z1
START PLY z2
C 1P 2
0 0 0
0 2 0
C 1P 2
1.8 1.8 0
0.7 1.8 0
C 1P 2
0 0 0
0 8 0
C 1P 4
2 10 0
10 10 0
10 0 0
0 0 0
END PLY z2
START PLY z3
C 1P 36
3.9847 8.1741 0
3.9394 8.3429 0
3.8653 8.5012 0
3.7648 8.6442 0
3.641 8.7675 0
3.4976 8.8674 0
3.3389 8.9408 0
3.17 8.9854 0
```

图 8 可供投影的.ply 文件

Fig. 8 .ply file for projection

将.ply 文件导入激光扫描投影系统, 通过 Fleury 算法对其路径进行优化并控制激光器通断, 可以改善由于二维振镜惯性引起的端点模糊<sup>[7]</sup>, 跳转线未空白等问题。经过多次优化改良的实际投影图像如图 9 所示。

经多次实验验证, 该套系统可处理 IGES 格式的 CAD 文件, 自动生成可供激光扫描投影系统进行投影的.ply 文件, 且激光轮廓线宽优于 0.3 mm。

### 3 结论

本文研究了一种新型的可直接识别投影对象的三维数模的激光扫描投影方法。该方法通过自

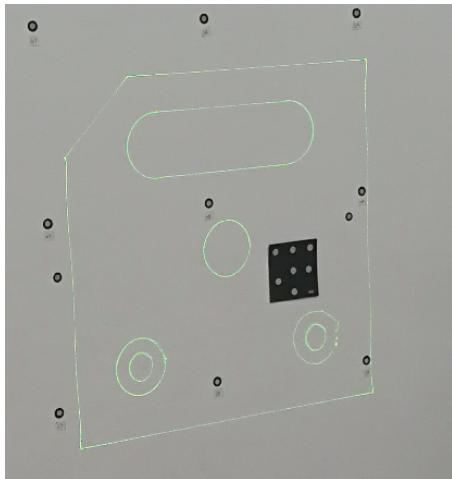


图 9 优化后的激光扫描投影图像

Fig. 9 Optimized laser scanning projection image

主研发的多特征图元提取和文件自动生成程序将存储在 IGES 中的图形颜色、尺寸、图层、样式等数据信息提取出来，并按照实体类型样式等信息对提取出的数据进行分类，最终以元胞的方式存储在.ply 格式文档中。通过.ply 文件对数控开关进行延时控制以及对二维振镜轨迹进行操控。上述方法可达到直接识别 IGES 文件进而指导激光扫描投影系统在工作面上进行投影的目的。结合长春理工大学所研发的激光扫描投影系统可广泛应用在航空航天制造工程中的飞机零部件装配、复合材料铺层、图案喷涂等工作中。通过该技术辅助装配可以大幅度提高生产效率及产品精度。

#### 参考文献:

- [1] LIN Haifeng. Application of aircraft assembly and positioning technology based on laser projection[J]. *Science and Technology Innovation*, 2018(34): 33-34.  
林海峰. 基于激光投影的飞机装配定位技术应用[J]. 科学技术创新, 2018(34): 33-34.
- [2] GUO Lili. Research on intelligent laser 3D projection system and spatial positioning accuracy calibration technology[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.  
郭丽丽. 智能激光3D投影系统及空间定位精度标定技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [3] SUN M Y, WANG B, BI Y, et al. Application of auto white balance control in Giant screen splicing laser projection system[C]//2011 International Quantum Electronics Conference & Lasers and Electro-Optics (CLEO/
- IQEC/PACIFIC RIM), 2011. USA: IEEE, 2011.
- [4] GUO Lili, LI Lijuan, QIAO Xiaoli, et al. High precision calibration modeling method for laser 3D projection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(1): 178-185.  
郭丽丽, 李丽娟, 乔晓利, 等. 激光3D投影高精度校准建模方法[J]. 光子学报, 2018, 47(1): 178-185.
- [5] GUO Lili, LI Lijuan, HOU Maoshen, et al. Spatial position-in accuracy analysis of intelligent laser 3D projection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 131-139.  
郭丽丽, 李丽娟, 侯茂盛, 等. 智能激光3D投影空间定位精度分析[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 131-139.
- [6] HOU Maoshen, YANG Fan, SUN Minli, et al. Research on dynamic focusing technology applied to laser scanning projection instrument[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(5): 605-612.  
侯茂盛, 杨帆, 孙明利, 等. 应用于激光扫描投影仪器的动态聚焦技术研究[J]. 应用光学, 2018, 39(5): 605-612.
- [7] HOU Maoshen, SUN Mingli, YANG Fan, et al. A laser scanning projection path planning method based on Fleury algorithm[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(3): 493-499.  
侯茂盛, 孙明利, 杨帆, 等. 基于Fleury算法的激光扫描投影路径规划方法[J]. 应用光学, 2019, 40(3): 493-499.
- [8] ATTILA R. IGES-based CAD model post processing module of a setup and fixture planning system for box-shaped parts[C]//Intelligent Systems and Informatics (SISY), 2011 IEEE 9th International Symposium on. USA: IEEE, 2011.
- [9] ZHANG Shouren. IGES and its processing program[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 1990(4): 63-67.  
张守仁. IGES及其处理程序[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1990(4): 63-67.
- [10] ZHANG Yi, LI Changhua. Research on the implementation of IGES postprocessor[J]. *Modern Electronic Technique*, 2009, 32(5): 119-121.  
张毅, 李昌华. IGES后处理器的实现研究[J]. 现代电子技术, 2009, 32(5): 119-121.
- [11] WEI Jing. Research on IGES format file output of fabric geometry[D]. Zhenzhou: Zhongyuan University of Technology, 2017.  
韦静. 织物几何结构的IGES格式文件输出的研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2017.
- [12] China National Quality Supervision, Inspection and Quarantine Bureau and China National Standardization Man-

- agement Committee. GB/T14213-2008 Initial graphics exchange specification[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008-08-19.
- 中国国家质量监督检验检疫总局和中国国标标准化管理委员. GB/T14213-2008. 初始图形交换规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008-08-19.
- [13] ZHANG Y, SHI X. Research on IGES graphic input and display technology based on feature information[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3468: 644-650.
- [14] JIA Z Y, MA J W, WANG F J, et al. Investigation of a measurement scheme based on IGES[J]. Measurement, 2014, 47: 658-668.
- [15] QU Song, LI Lijuan, HOU Maoshen, et al. Study on im-
- proving the accuracy of laser scanning projection system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 147-151.
- 曲松, 李丽娟, 侯茂盛, 等. 提高激光扫描投影系统精度的方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 147-151.
- [16] WANG Shen, WU Junhao, NIU Runjun, et al. Research and application of laser projection technology in aircraft conduit bracket installation[J]. Navigation and Control, 2018, 17(3): 48-54.
- 王声, 吴军豪, 牛润军, 等. 激光投影技术在飞机导管支架安装中的研究与应用[J]. 导航与控制, 2018, 17(3): 48-54.

(上接第 610 页)

- [18] ZHAO Kun, CHE Chicheng. Design of wide spectral SWIR star sensor optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(1): 21-25.
- 赵坤, 车驰骋. 宽谱段近红外星敏感器光学系统的设计[J]. 应用光学, 2013, 34(1): 21-25.
- [19] LI Zhantao, FENG Yutao, HAN Bin. Design of optical system for multi-band all-sky airglow imager[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(5): 0522003-9.
- 李战涛, 冯玉涛, 韩斌. 多波段全天空气辉成像仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2019, 48(5): 0522003-9.