

文章编号 1004-924X(2016)06-1439-09

3D 打印中的模型分割与打包

耿国华*, 石晨晨, 魏潇然, 张雨禾

(西北大学 信息科学与技术学院, 陕西 西安 710127)

摘要: 为了提高 3D 打印技术中三维模型的打印效率, 减少打印材料耗费, 缩短打印时间, 提出了一种全局最优的模型分割与打包算法。首先, 将给定模型分割为若干金字塔形状的分块。然后利用一种改进的禁忌搜索算法寻找最优打包方案, 尽可能地减少支撑材料的体积, 根据分块体积给出利于全局优化的初始解, 并通过控制邻域生成规则以及候选解集, 使得搜索更加高效并大幅提高寻优速度。最后, 将打印成型的各部件拼成整体。实验结果表明: 生成的打包方案节省了 14%~38% 的打印时间, 节省了 21%~46% 的打印材料。该方法模型分割产生的分块个数少、打包高效合理, 不仅有效地提高打印效率, 还减少了打印时间和支撑材料消耗。

关键词: 3D 打印; 模型分割; 打包算法; 禁忌搜索

中图分类号: TP394.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1439

Model segmentation and packaging in 3D printing

GENG Guo-hua*, SHI Chen-chen, WEI Xiao-ran, ZHANG Yu-he

(College of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

* Corresponding author, E-mail: ghgeng@nwu.edu.cn

Abstract: To improve the printing efficiency of three-dimensional model of 3D printing technology and reduce the cost of printing materials and shorten printing time, a kind of global optimal model segmentation and packaging algorithm was proposed. Firstly, the model given was segmented into several blocks with the shape of pyramid. Then, the advantages of a kind of improved taboo search algorithm was taken to search for the optimal packaging scheme, and the volume of backing materials were reduced as far as possible. According to the volume of blocks, the initial solution which is beneficial to global optimization was provided, and by controlling neighborhood generative rule and candidate solution, the search was more efficient and the speed of optimization searching was sharply improved. Finally, various components formed by printing were compounded into the entirety. The experimental results indicate that for generated packaging scheme, the printing time with 14% - 38% is saved, while the printing materials with 21% - 46% are also saved. From the model segmentation by this method, there is few number of blocks caused, efficient and reasonable packages, which not only available improves printing efficiency but also reduces printing time and backing materials consump-

收稿日期: 2016-01-11; 修订日期: 2016-03-08.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 61373117, No. 61305032)

tion.

Key words: 3D printing; model segmentation; packaging algorithm; taboo search

1 引言

3D 打印技术可实现由数字化模型到实体模型的转换,但目前其打印成本与打印时间要远远超过传统制造方法。为了改善此问题,本文针对 3D 打印应用领域的模型分割和打包问题展开了讨论。分割是为了将给定模型分解为若干分块,使得各分块得以打印成型;打包算法,即能够将分解得到的分块进行智能打包,高效、智能地放置在指定大小(例如打印机工作容积大小)的容器内,从而可以同一批次打印多个分块,以高效利用打印容积、材料,进而节省打印时间和支撑材料。此外,受打印机工作容积的制约,3D 打印机单次可打印物体的最大尺寸依然有限,对于较大体积的物体,由于无法直接打印,因此也需要对模型进行分割、堆积、打包进而打印成型。

Hu 等^[1]将给定的三维模型分割为金字塔形状的分块,分块具有以正方向打印无需支撑的优良性能,减少了材料耗费。Luo 等^[2]提出名为“Chopper”的分割方案,该方案自上而下逐步构建出 BSP 树,“Chopper”综合考虑了切割方案的若干约束目标:可打印性、可组装性、有效性、可连接性、美观性。Hao 等^[3]提出了一种基于曲率的模型分割方法,但是该方法仅适用于表面特征明显的模型。此外,Chen 等^[4]提出了一种多边形面片分割拼合方法,其将三维模型转化为若干面片,然后利用连接头进行拼装。为了提高模型的稳定性,引入了积块式机构^[5-8],分割后的模型拼装时无连接器或胶水粘合,可以重复拆装。

打包问题在运输业、切割加工业乃至超大规模集成电路设计^[9]均有广泛应用,只是不同应用中的约束和优化目标不同。打包问题是典型的组合优化问题也是 NP-Hard 问题,因此学者们通常采用启发式求解算法^[10-11]来解决此问题,但目前大部分算法都是对箱体形状分块进行打包。尽管已经有了描述一般物体的数学模型^[12],但是很少有已经实现了的针对任意形状分块的打包算法。为了尽可能地节省时间和材料,Vanek 等^[13]提出了名为“PackMerger”的方案,将实体模型转化为

表面薄层,然后将薄层模型分解成块,再通过堆积、打印、组装成型。Chen 等^[14]提出“DAP(decompose-and-pack)”问题,将模型分割与打包两个问题结合到一起,并给出了名为“Dapper”的解决框架,该打包方案降低了打印时间、节省了材料耗费。

针对模型的分割和打包这种几何方面的优化问题,本文提出一种解决框架,对于给定模型和具体的打印机工作容积,利用该框架可以得到相应的分割和打包方案,其模型分割个数少、分块堆积紧凑,改善了模型打印效率不高这一急需解决的问题。本文算法与“PackMerger”^[13]的不同之处在于,该算法打包的对象是若干薄片,本文处理的是实心物体;此外本文算法与“Dapper”^[14]在搜索策略以及函数定义方面也有较大差异。

2 算法概述

算法以三维模型作为输入,可输出由若干分块堆积而成的适合 3D 打印的打包方案。受熔融沉积成型(FDM)技术限制,模型表面的悬空部分需要支撑结构才可以打印成型,由于支撑结构无法回收使用、属于材料耗费,因此出于节省打印材料的目的,人们期望打包方案要尽可能地减少对支撑结构的需求。

算法首先将给定模型分解为若干金字塔形状^[1]的分块,并将其进行体素化处理。然后寻找体素化分块的摆放位置,为此引入对接测试(如图 4 所示)确定分块的旋转与平移,将分块与已打包形成的堆进行对接测试,确定最优摆放位置后将其打包入堆。

由于分块的堆放顺序对于最终打包方案的影响很大,因此本文对分块对接测试序列进行了优化。提出一种改进的基于全局的禁忌搜索策略,以整堆的支撑结构体积的大小评价候选序列的优劣,进而得到最优的分块序列。至此,得到全局最优的打包方案,然后对打包形成的整体模型进行打印,去除少量支撑结构后,将各分块拼合成整体。算法主要流程如图 1 所示,本算法可以应用于各种类型的三维模型。

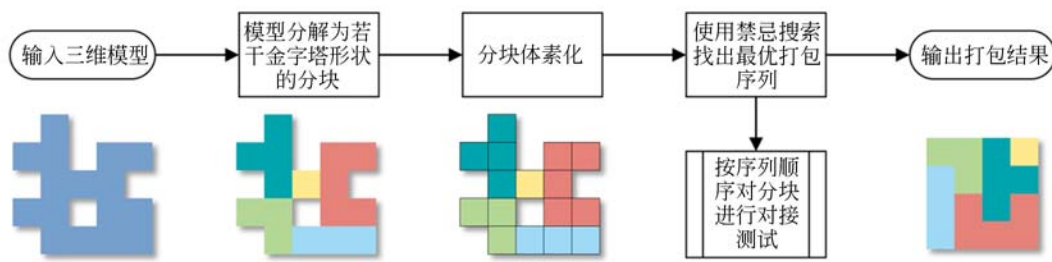


图 1 算法流程示意图

Fig. 1 Flowchart of proposed algorithm

3 模型分割与打包算法

3.1 金字塔形状分解

在算法设计之初,考虑到采用不同的基本几何体对模型进行分解和打包会产生截然不同的方案。如果对模型的分解形状不做限制,即分解为任意形状的分块,的确可以使分块数量较少,但是任意形状的打包问题极其复杂。此外,如果将模型分解为利于打包的立方体(盒子)形状,则会产生过多的分块,不利于打印和后期拼装。

本文使用 Hu 等^[1]定义的金字塔形状(如图 2 所示)作为分解的基本形状,利用文献[1]的方法将三维模型分解为少量的金字塔形状分块,以在 3D 打印领域充分发挥其形状优势。在图 2 中, S 为金字塔形状,定义 S 的边界 $B(S)$ 为平底, P 为 S 内部任意一点, P' 为 P 在 $B(S)$ 上的垂直投影,金字塔形状满足: P 与 P' 的连线完全在 S 内部;将与 $B(S)$ 垂直的方向 $O(S)$ 定义为 S 的指定正方向。

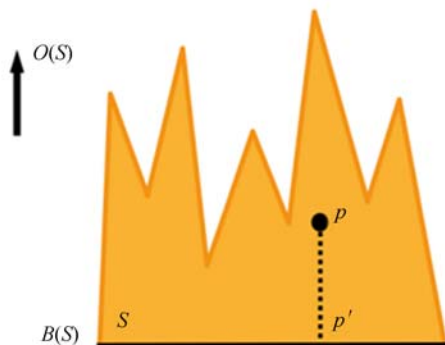


图 2 金字塔形状的定义

Fig. 2 Definition of pyramidal shape

文献[1]的算法首先在模型内部散列若干样

本点,通过聚类方法逐渐构建出越来越大的分块,将这些分块进一步合并形成若干候选金字塔形状块,而后通过解决精确覆盖问题确立最终的分解方案,这也是该算法的关键所在。

以金字塔形状作为问题处理的基本形状可以减少计算,因为该形状底部是平坦的,这一特性也有利于对接测试和打包方案生成。使用该形状产生的分块数量较少,而且产生的打包结果与箱体形状相同,如图 3 所示。此外金字塔形状在以正方向打印时不需要支撑,这一特性有效地减少了材料耗费。



(a) 4 个金字塔形状 (b) 7 个箱体形状
(a) Four pyramidal shapes (b) Seven box shapes

图 3 两种不同形状生成的打包方案

Fig. 3 Packing solutions formed by two kinds of different shapes

3.2 分块打包方案生成

经过上述流程,模型已被分解为若干具有理想打包性质的分块,下面进入打包流程。首先,为了使全局搜索空间离散化和便于分块打包,本文将各分块体素化处理。然后,给定初始分块打包序列,并将其作为搜索的开始。最后,使用改进的禁忌搜索算法对所有分块打包序列进行搜索,找到最优的打包序列。

禁忌搜索是一种亚启发式搜索算法,它从一个初始可行解出发,对该解的邻域进行搜索,设置禁忌表记录已搜索过的局部最优解信息,禁止重复前面的搜索,且可接收劣解,从而在一定程度上避免搜索陷入局部最优,使搜索转向解空间的其

他区域,是一种兼顾局部搜索能力的全局迭代寻优算法,可以高效地解决组合优化问题。对于 N 个三维实体分块,列举出所有堆放方案是不可能的,本文将分块打包序列作为搜索的对象,最终确定最优打包序列。

打包的意义在于将各分块紧密地打包在一起,从而减少材料耗费与打印时间,同时使得多个分块可以同一批次被打印成型。分块有两种状态:已打包和尚未打包。对于已打包分块形成的打包方案,文中称之为“堆”。本文定义打包方案的全局目标方程,打包的目的在于使得支撑材料耗费最小且堆包围盒体积不超过打印机工作容积,由此可得如下方程:

$$\begin{aligned} f(P) &= \operatorname{argmin} V_s, \\ \text{s. t.} \quad S_{\text{pile}} &\leq S_p, \\ H_{\text{pile}} &\leq H_p. \end{aligned} \quad (1)$$

算法企图找到满足上述方程的堆,其中 V_s 表示打印所需的支撑结构体积,本文采用体素化模型,容易求得 V_s 。 S_{pile} 与 S_p 为整堆垂直方向投影面积以及打印机托盘的面积, H_{pile} 与 H_p 整堆的高度以及打印机工作空间的高度。

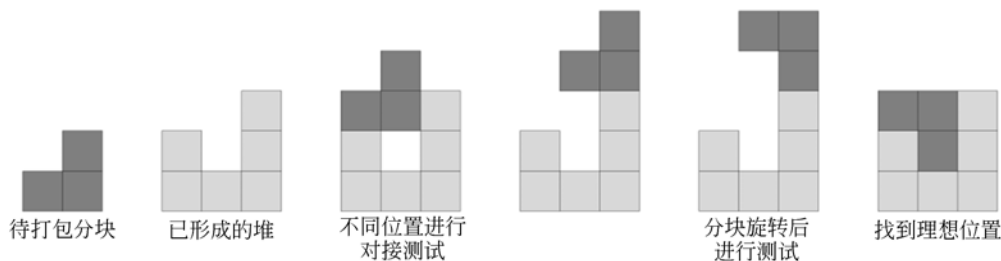


图 4 分块对接测试示意图

Fig. 4 Sketch map of docking test

3.2.2 分块打包序列优化

由于每次只能对一个分块进行对接测试并打包,因此分块对接测试顺序对最终的打包方案影响很大。本文提出一种改进的禁忌搜索算法对解空间(所有序列顺序)进行探索,选出满足方程(1)的序列,最终找到使得材料耗费少、打印用时短的打包方案。

在禁忌搜索的过程中,每产生一个新的序列,都要找到序列中各个分块的最优摆放位置,因此要按照序列中分块的前后顺序,对每个分块与已打包的整体进行一系列的对接测试,对接测试产生大量移动方案(平移、旋转),本文期望找到一个

在禁忌搜索寻找最优打包序列的过程中,按照序列顺序依次对分块进行对接测试(详见 3.2.1),对接测试类似于“俄罗斯方块”游戏,目的在于通过旋转和移动找到各分块的最佳摆放位置(如使得各分块间垂直方向的缝隙最小)。对所有分块进行对接测试打包入堆后,求出支撑结构体积,以此来判断不同打包序列的优劣,在找出最优序列的同时,也得到了具体的打包方案。

3.2.1 对接测试

通过迭代将尚未打包的分块与堆进行对接测试,如图 4 所示,逐步将所有分块打包成堆。对接测试是为了找到分块的最佳移动旋转方式,从而与已打包整体更好地紧密对接。

对于一个有序的分块集合,按照顺序对每个分块进行对接测试。对于每个分块,应当考虑对分块的 6 个视图以及对每个视图进行 5 个方向(上、左、右、前、后)的对接测试。在对接测试过程中,用深度图表示分块和堆,将对接测试转换为匹配问题进行解决,这也是首先对分块体素化处理的原因,否则,对接测试复杂程度过高,不利于问题的解决。

分块打包入堆后,堆的支撑结构体积最小的移动方案。由此定义了方程(2)来确定单个分块的最优移动。

$$\mu(\text{move}) = \operatorname{arg} \min (V_s(P + \text{part})), \quad (2)$$

上式中, move 表示移动方案, P 为打包形成的堆, part 为当前待打包的分块, $V_s(P + \text{part})$ 表示分块加入堆中后,堆的支撑结构体积,满足上述方程的移动方案为最优移动。

3.3 TS 算法主要思想和细节优化

对于 n 个分块来说,设它们的对接测试序列为有序列表 $L(S)$,则 $L(S)$ 有 $n!$ 种排列组合。为了尽快地找到满足方程(1)的分块对接序列,本

文提出一种改进的禁忌搜索算法。禁忌搜索算法(Tabu Search Algorithm, TS)^[15],由美国工程院院士 Fred Glover 教授于 1986 年提出,它是一种亚启发式搜索算法,可以避免陷入局部最优搜索,针对全局优化问题十分有效。

禁忌搜索的主要思想:从一个初始解开始,对该解的邻域进行搜索并选优,设置禁忌表(Tabulist)存储已搜索过的局部最优点,在后续搜索中有意识地避开(而非绝对禁止)禁忌表中所包含的局部最优点,即在搜索过程中,如果禁忌表中候选解,则用未被禁忌的次优候选解替换当前解。此外,引入特赦准则(aspiration criterion, 又称藐视准则),当候选解优于最优解、但该解被禁忌时,使用特赦准则更新最优解。

通过实际应用中算法的分析发现,初始解对算法的性能影响很大,经典禁忌搜索算法通常以一个随机的初始解作为开始,若随机的初始解较差,则容易使得搜索时间冗长,对于一些复杂的约束优化问题,甚至达不到最优解。对于三维模型的打包问题来说,搜索过程以拼接测试作为子程序,好的初始解对于搜索时间的节省相当可观。本文根据分块体积由大到小生成一个初始序列,即优先堆放体积较大的分块。按照 3.2.1 节所述,对序列进行逐步对接测试,生成该序列的打包方案。举例说明如下:设现有 4 个分块 p_1, p_2, p_3, p_4 , 分块体积按由大到小的顺序排列为 $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$, 然后按照序列顺序对分块实施对接测试、打包入堆,利用方程(2)确定每个分块的最优移动方式,4 个分块均打包入堆后,可以求得整体支撑结构体积,至此,得到初始解序列 $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ 以及其所对应的支撑结构体积,以此序列作为搜索算法的开始。

禁忌表是一个动态更新的循环表,每次迭代都往表中加入一个禁忌对象,随着迭代的不断进行,当禁忌表填满且有新的禁忌对象加入时,最早被禁忌的对象会从表中剔除继而解禁。禁忌对象,即禁忌表中的元素,主要包括三种:移动产生的解、移动规则、目标函数值。在后续的搜索选择中会避开禁忌对象,达到一些没有搜索的解空间,实现更广泛的搜索。禁忌表的长度被称为禁忌长度,它的选取对于算法性能影响也很大,禁忌长度过短容易导致陷入局部最优死循环,即搜索在几个解之间循环;反之,若禁忌长度过长,则搜索也

会相应变长,甚至有可能导致无法继续求解。

特赦准则,亦称藐视准则,也是禁忌搜索中的核心思想,该准则是说,如果候选集中存在一个新解,且优于当前记录的最优解,即使新解被禁忌表禁止,算法仍然会选择这个更优的新解,因此加入特赦准则有利于实现全局优化。

下面给出本文 TS 算法的主要流程:

step1: 给定初始序列,置禁忌表为空;

step2: 生成集中性邻域或多样性邻域(详见 3.4);

step3: 按候选集控制策略从上述两种邻域中选取所需序列构成候选集;

step4: 从候选集中选出当前局部最优序列;

step5: 若该序列未被禁忌,则选择该序列;若该序列被禁忌表禁忌且没有当前全局最优解好,则从候选集中选择次优的未被禁忌的序列;若该序列被禁忌,但优于当前全局最优解,则更新全局最优解;

step6: 更新禁忌表;

step7: 判断算法是否结束(限定 10 次迭代最优解没有更新),若满足,则输出最优解,终止算法;若不满足,则根据候选集控制策略确定下次搜索方式,转至第三步,继续搜索,直至满足算法终止条件。

3.4 集中搜索和分散搜索均衡策略

在 TS 中,除了上述关键因素外,还应注意集中搜索与分散搜索两个策略的均衡。集中搜索策略主要用于进一步搜索优秀解的邻域,以期望找到更优的解;分散搜索则是对尚未搜索的解空间进行搜索,其可以跳出局部最优的状态,为实现全局最优奠定了基础。合理均衡地使用这两种策略可以加快算法实现全局最优化的速度。本文通过对邻域生成规则和候选解集的控制(如图 5 所示)使得搜索的集中性与分散性达到高效、合理的平衡状态。

(1) 对邻域的控制

本文将邻域分为两种:集中性邻域和多样性邻域,两种邻域分别用于集中性和分散性搜索。集中性邻域由插入法生成,如打包规模为 n , 从分块打包序列中任取一个分块,插入到剩余的 $n-1$ 个序列中,将使得支撑结构体积增长最少的序列加入到集中性邻域中,按照同样的步骤,取剩下的 $n-1$ 个分块,最终生成 n 个序列。多样性邻域利

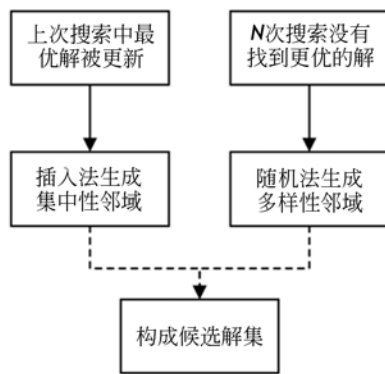


图 5 均衡搜索策略

Fig. 5 Balanced search strategy

用随机法产生,即随机交换序列中的两个分块,生成尚未搜索过的区域。

(2) 对候选解集的控制

候选解集是上述两种邻域中的某一种的子集,候选解集的大小对算法性能的影响很大,候选解集过小容易使搜索过早收敛,过大则导致搜索代价过大。若最优解在搜索过程中被更新,则执行集中搜索策略,用集中性邻域中的最优序列组成候选解集,进一步进行搜索。若在当前搜索区域进行了若干次数(本文设置为 4 次)的搜索后,依然没有找到更优的解,则实行分散搜索策略,候选解集由多样性邻域中的随机序列组成。

通过对邻域生成规则以及候选解集的控制,使得在搜索过程中,当出现了更优质的解时,可以对该解的集中性邻域进行更充分的搜索,以期望加快收敛速度,尽快达到全局最优;当在一定周期内解的质量没有得到提高时,可以加强对未知区域的搜索。上述策略可以根据解的质量动态地选择邻域,进而确定候选集,使 TS 中集中性与分散性相辅相成、平衡统一。

4 实验结果与分析

4.1 模型打包结果与打印结果

算法以 C++ 实现,硬件运行环境为 Inter (R) Core(TM) i5@2.80GHz 处理器、4GB 内存的 PC 机。本文展示了打包结果以及打印成品。使用基于 FDM 技术的 MakerBot (R) Replicator X2 打印机对打包形成的堆进行打印,打印材料为 ABS 树脂,层厚为 0.2 mm,打印机喷头扫描速度为 120 mm/s,喷头空驶速度为 150 mm/s。对 TS

算法进行参数设置:设定禁忌表长度为 3;候选集长度为 4;设定若 4 次循环内没有找到更优解则实行分散搜索;设定 10 次循环没有更新最优解,则算法终止。设定工作空间以正方形为底,设定边长 $L=1.618 \cdot V_{\text{model}}^{1/3}$,如此设定是为了便于与其他算法进行对比试验,并非为了反映设计意图或物理意义^[14]。

禁忌长度与候选集大小是影响算法搜索性能的两个重要参数,在实验过程中,对二者设置了不同的值。通过对比得知,没有加入分散搜索策略时,若禁忌长度过小,计算速度虽然很快,但是搜索容易进入死循环,反之,将禁忌表设置过长又会增加运算时间而且并不能改善解的质量。设定禁忌长度为 3,可使算法运行时间与解的质量之间取得很好的平衡。对于鸽子模型(如图 6(a)所示)来说,若将禁忌长度设为 4,则打包结果在材料耗费与打印时间方面的改善很显著,但是算法运行时间为 92 s,而禁忌长度为 3 时则只需 65 s。若模型分块个数超过 20 个时,应使用动态禁忌表或适当增加禁忌长度。为了减少搜索时间及空间耗费,候选集应尽可能的小,但是候选集过小又将导致搜索过早收敛,经对比测试发现,候选集设置为 4 时可避免上述现象,而且搜索代价很小。

本文选取了 3 个不同尺寸、不同类型的模型(鸽子、飞机、桌子)进行实验对比,图 6 展示了模型原型、分割结果、打包结果以及打印结果。图 6(a)为鸽子模型,由于该模型分块个数多、体积大,因此算法运行耗时最高。产生的打包结果只有少数分块需要额外的支撑,但由于打包方案不规则,因此只节省了 14% 的打印时间。此外由于鸽子的两个腿部与主体的接触面积太少,拼接的整体强度不高。期望今后能找到一种可以将金字塔形状的优良性质与文献[2]提到的美学约束、连接强度约束更好地结合起来的分割方案。

图 6(b)所示的飞机模型被分为了 6 块,整体打印时间从 50 min 减少到了 39 min,打印材料从原有的 13.71 g 减少到了 9.87 g,节省了 28%。而且,分块被高效地铺满了打印托盘,使模型后期处理简单、拼合效果好。如图 6(c)所示,桌子模型的分块堆放方案不需要额外的支撑材料即可打印成型,节省的打印材料和时间最多,已是最优方案。出于对打印效率的考虑,本文从模型打印时间和材料耗费两个方面对打包方案进行评估度

量,同时给出了算法运行时间与分块个数,详细结果如表 1 所示。

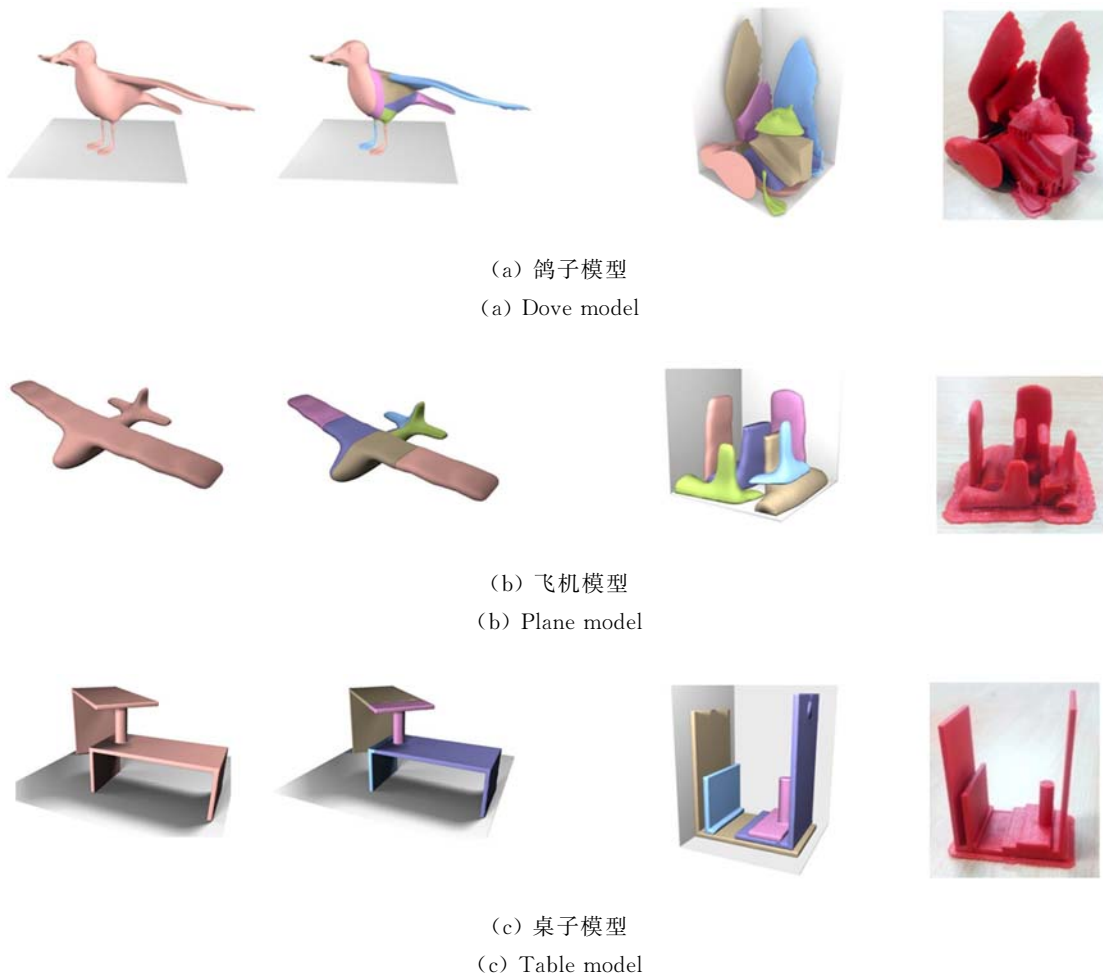


图 6 模型打包结果与打印成品

Fig. 6 Model packing results and finished products

表 1 打印时间与材料耗费

Tab. 1 Printing time and material cost

模型名称	原始打印时间	打包后打印时间	原始材料耗费/g	打包后材料耗费/g	时间节省/(%)	材料节省/(%)	分块个数	算法运行时间/s
鸽子	8 h 49 min	7 h 35 min	140.55	111.15	14	21	11	65
飞机	50 min	39 min	13.71	9.87	22	28	6	18
桌子	5 h 12 min	3 h 16 min	85.75	45.90	38	46	4	32

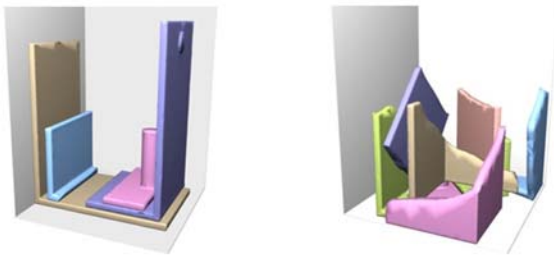
对于上述 3 个模型,本文算法均不同程度地节省了打印材料与打印时间,这证明了算法的可行性和有效性。实际打印过程中,3 个原始模型所占用的体积相当于打包整体所占工作空间的几倍,若将打包方案的工作空间设定为原始模型大小,则可进一步节省打印时间与材料。

4.2 对比试验

此外,本文选用“PackMerger”^[13]、“Dap-

per”^[14]算法做了对比实验。“PackMerger”将分解和打包时间均考虑在内,其搜索策略以及最优化函数与本文算法差异很大。对于桌子模型,本文取“PackMerger”最优打包结果与本文算法进行比较,结果如图 7 所示。

从图 7 可知,“PackMerger”也可以解决桌子模型的分割打包问题,其打印时间从 5 h 12 min 减少为 3 h 51 min,提高了打印效率;打印材料从



(a) 本文算法打包结果 (b) [PackMerger]打包结果
(a) Packed result of proposed algorithm (b) Packed result of [PackMerger]

图 7 打包结果对比

Fig. 7 Comparison of two packed methods

85.75 g 缩减至 52.43 g, 分别减少了 26% 和 38%。与此同时, “PackMerger” 要花费 68 s 才能得到图 7 (b) 所示的打包结果。由上述结果可知, 本算法生成的打包方案的效率更高。“PackMerger” 在打包过程中允许分块旋转角度为 30° 的倍数, 但这并没有产生比本文算法更好的效果。此外, 从美观性以及后期模型拼接这两面来看, 本文算法生成的打包结果拼装方便、整体模型较美观。

“Dapper” 生成的关于桌子模型的打包结果无需支撑结构, 也是最优的打包方案。该算法适用性广, 针对多种技术的打印机进行了优化。该方法使用对宽度进行约束的集束搜索确定移动方案, 虽然使得搜索空间缩小, 提升了算法执行效率, 但是对于复杂模型以及分块个数多的模型产

生的打包结果无法保证最优, 且算法运行时间要比本文算法长。

5 结 论

本文提出了一种基于 3D 打印的模型打包算法框架, 解决了 3D 打印中大体积物体无法打印的问题, 同时提出一种对解空间进行搜索的改进禁忌搜索算法。算法框架以模型整体作为输入, 最终输出为高效的分块打包方案, 由于各分块紧密地堆积在一起, 打印时间与打印材料分别节省了 14%~38%、21%~46%, 打印效率也得到了极大的提高。

由于本算法将模型分成了若干分块, 因此打印成型后, 需要手工将其拼装成整体。对于几何结构复杂的模型, 手工粘合拼接成型过于费时, 为了减少拼装难度, 可以结合文献[2]的相关方法, 自动生成连接器, 以简化组装流程。目前关于不同类型三维模型几何特性的研究已十分深入^[16-18], 如何将分割方案与模型的几何特征结合起来, 是未来的研究方向。虽然较高的体素化分辨率会产生更紧凑的打包结果, 但由于分块对接测试受体素化分辨率影响较大, 因此, 体素化分辨率较高时对接测试的耗时也多, 这是目前算法的不足。提高对接测试速度、改进对接测试方法将是下一步工作的要点。

参考文献:

- [1] HU R Z, LI H H, ZHANG H, *et al.*. Approximate pyramidal shape decomposition [J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2014, 33(6): Article No. 213.
- [2] LUO L J, BARAN I, RUSINKIEWICZ S, *et al.*. Chopper: partitioning models into 3D-printable parts[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2012, 31(6):439-445.
- [3] HAO J, FANG L, WILLIAMS R E. An efficient curvature-based partitioning of large-scale STL models [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2011, 17(2):116-127.
- [4] CHEN D, PITCHAYA S, LAN J T, *et al.*. Computing and fabricating multiplanar models[J]. *Computer Graphics Forum*, 2013, 32(32):305-315.
- [5] XIN S Q, LAI C F, FU C W, *et al.*. Making burr puzzles from 3D models[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2011, 30(4):76-79.
- [6] SONG P, FU C W, COHEN-Or D. Recursive interlocking puzzles[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2012, 31(6): 439-445.
- [7] SCHWARTZBURG Y, PAULY M. Fabrication-aware Design with intersecting planar pieces [J]. *Computer Graphics Forum*, 2013, 32(2):317-326.
- [8] SONG P, FU Z, LIU L, *et al.*. Printing 3D objects with interlocking parts[J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2015, 35-36:137-148.
- [9] PAVLIDIS V F, FRIEDMAN E G. *Three-Dimensional Integrated Circuit Design*[M]. Massachusetts :Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2009.
- [10] DOWSLAND K A. Some experiments with simulated annealing techniques for packing problems [J]. *European Journal of Operational Research*,

- 1993, 68(93):389-399.
- [11] WANG H, CHEN Y. A hybrid genetic algorithm for 3D bin packing problems [C]. 2010 *IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA)*, 2010, 703-707.
- [12] CHERNOV N, STOYAN Y, ROMANOVA T. Mathematical model and efficient algorithms for object packing problem[J]. *Computational Geometry*, 2010, 43(5):535-553.
- [13] VANEK J, GARCIA J A, BENES B, *et al.*. PackMerger: A 3D print volume optimizer[J]. *Computer Graphics Forum*, 2014, 33(6): 322-332.
- [14] CHEN X, ZHANG H, LIN J. Dapper: decompose-and-pack for 3D printing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2015,34(6): Article No. 213.
- [15] GLOVER F, MARTI R. Tabu search[J]. *General Information*, 1998, 106(2):221-225.
- [16] 冯筠,陈雨,仝鑫龙,等. 三维颅骨特征点的自动标定[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5):1388-1394.
- FENG J, CHEN Y, TONG X L, *et al.*. Automatic feature point extraction for three-dimensional skull [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1388-1394. (in Chinese)
- [17] 张雨禾,耿国华,魏潇然. 散乱点云谷脊特征提取[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1):310-318.
- ZHANG Y H, GENG G H, WEI X R. Valley-ridge feature extraction from point clouds[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1):310-318. (in Chinese)
- [18] 宋长辉,杨永强,张曼慧,等. 基于数字化3D技术的股骨假体再设计与激光选区熔化制造[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8):2117-2126.
- SONG CH H, YANG Y Q, ZHANG M H, *et al.*. Redesign and selective laser melting manufacturing of femoral component based on digital 3D technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2117-2126. (in Chinese)

作者简介:



耿国华(1955—),女,山东莱西人,博士,教授,博士生导师,1978年、2002年于西北大学分别获得学士、博士学位,现任文化遗产数字化国家地方联合工程研究中心主任,主要从事计算机图形图像处理与可视化、智能信息处理与模式识别等方面的研究。E-mail:ghgeng@nwu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)