

УДК 519.85

А.М. Чугай, О.В. Панкратов, Т.Є. Романова, Ю.Є. Стоян

Інститут проблем машинобудування імені А.М. Підгорного НАН України, Харків

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ 3D-ДРУКУ ДЛЯ SLS ТЕХНОЛОГІЇ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

В роботі пропонуються конструктивні засоби оптимізації процесу 3D-друку для SLS технології адитивного виробництва. Представлено моделі та методи, що дозволяють одночасного здійснити друк великої кількості виробів із забезпеченням максимального заповнення об'єму робочої камери 3D принтеру з урахуванням технологічних обмежень. Це дозволяє мінімізувати час та вартість створення прототипів виробів за рахунок істотного скорочення циклів друку.

Ключові слова: 3D-друк, SLS-технології, пакування, метод ϕ -функцій, нелінійна оптимізація

Стан проблеми та огляд літературних джерел

Сучасним підприємствам необхідно оптимізувати матеріальні та фінансові ресурси, підвищувати ефективність виробництва й у цілому міняти світогляд промислового виробництва.

Прискорити процеси проектування, розробки й виготовлення конструкторських деталей сьогодні дозволяють технології 3D-прототипування [1]. Сучасне проектування неможливо представити без тривимірного прототипування, яке дозволяє швидко створювати дослідні зразки або працюючої моделі системи для демонстрації замовникові або перевірки можливості реалізації абсолютно нової ідеї. На даний момент значного прогресу досягли технології пошарового формування тривимірних об'єктів по їхніх комп'ютерних моделях. Ці технології називаються адитивними і відомі під різними термінами: STL — stereolithography, SLS — Selective Laser Sintering, FDM — Fused Deposition Modeling та інші.

В цій роботі розробляються методи оптимізації процесу 3D-друку для SLS технології адитивного виробництва. Ця технологія використовує лазер високої потужності для спікання невеликих часток пластику, кераміки, скляної борошна або металу в тривимірну структуру.

Головною особливістю цієї технології є застосування порошків, що складаються з частинок металу, покритих полімером. Після процесу спікання деталь поміщається в високотемпературну піч, де пластик вигорає, а його місце займає легкоплавка бронза. До переваг технології можна віднести відсутність необхідності в матеріалах підтримки. Деталь занурена в порошок, який і виконує функцію підтримки (рис. 1) [2].

В останні 10 років технології 3D-прототипування бурхливо розвиваються: з'являються нові, удосконалюються існуючі, з'являються нові напрямки використання існуючих технологій. Метою досліджень є розробка сучасних інформаційних техно-

логій, які дозволять вдосконалити процес 3D-друку із застосуванням сучасних адитивних технологій.

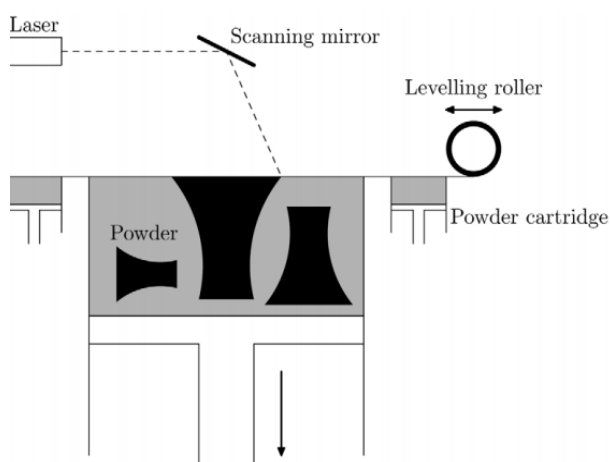


Рис. 1. Технологічна схема 3D-друку із застосуванням SLS-технології

Пропонується розробка методів прискорення циклів друку за рахунок одночасного друку відразу декількох моделей із забезпеченням щільного заповнення усього об'єму робочої камери 3D принтера, що використовує SLS технологію. З цією метою розв'язуються оптимізаційні задачі компоновки тривимірних об'єктів на основі конструктивних засобів математичного та комп'ютерного моделювання, математичних моделей, ефективних методів оптимізації та сучасних NLP-solvers (програмне забезпечення для розв'язування задач нелінійного програмування).

Процес створення нових прототипів умовно можна розбити на дві основні складові: створення віртуальних моделей та виготовлення прототипів. Це дослідження призначено для розробки технологій вдосконалення названих етапів створення прототипів. На першому етапі необхідно створити віртуальні моделі 3D об'єктів (комп'ютерних моделей прототипів).

Одним із завдань другого етапу є скорочення часу та вартості виготовлення прототипів виробів. Адже кожен запуск SLS принтеру потребує часу та

енергії на розігрів та підтримку температури. Так в роботі [3] наведено, якої економії можна досягти за рахунок оптимізації розміщення об'єктів, які необхідно створити.

Моделі та методи, що пропонуються у роботі, дозволяють оптимізувати процес 3D друку за наступними показниками:

- здійснювати одночасний друк відразу декількох моделей із забезпеченням щільного заповнення усього об'єму робочої камери 3D принтера; одночасний друк відразу декількох прототипів із забезпеченням щільного заповнення усього об'єму робочої камери 3D принтера

- мінімізувати час та вартість створення прототипів виробів за рахунок істотного скорочення циклів друку.

Аналіз публікацій, присвячених розв'язанню задачі оптимального розміщення об'єктів, показав, що задачі упаковки довільних 3D об'єктів (які допускають неперевні обертанні) з урахуванням мінімально припустимих відстаней є найменш дослідженими в класі задач розміщення. Серед об'єктів, як правило, розглядаються циліндри або паралелепіпеди, а довільні просторові форми апроксимуються наборами δ -паралелепіпедів. Для розв'язання задач компоновки використовуються евристичні і мета-евристичні алгоритми, що призводить до втрати оптимальних розв'язків.

Таким чином, виникає необхідність в побудові адекватних математичних моделей для задач упаковки з використанням реальних просторових форм об'єктів розміщення та контейнерів, а також з урахуванням технологічних обмежень (заданих мінімально допустимих відстаней). Важливою проблемою також є розробка ефективних алгоритмів розв'язання задач компоновки з використанням сучасних локальних і глобальних NLP-solvers.

Постановка задачі

Для того, щоб мінімізувати час, який використовується для створення прототипів за допомогою SLS-технології, об'єкти повинні бути розташовані якомога щільніше та кількість шарів повинна бути мінімізована. Тому проблема мінімізації шарів може бути сформульована як задача упаковки об'єктів у контейнер мінімальної висоти.

Нехай задані об'єкти P_i , $i \in I = \{1, 2, \dots, n\}$, та прямий прямокутний паралелепіпед

$C = \{X \in R^3 : w_2 \leq x_1 \leq w_1, l_2 \leq x_2 \leq l_1, \eta_2 \leq x_3 \leq \eta_1\}$, параметри якого η_1, η_2 є змінними. Тоді вектор $\eta = (\eta_1, \eta_2)$ визначає висоту C . Об'єкти P_i можуть приймати довільну просторову форму [4].

Розміщення об'єктів P_i у просторі R^3 визначається вектором трансляції $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ та вектором кутів обертання $\theta_i = (\phi_i, \psi_i, \omega_i)$, $i \in I$. Таким

чином, $u = (u_1, u_2, \dots, u_n) \in R^m$, де $m = 6n$, визначає вектор змінних об'єктів,

$$u_i = (v_i, \theta_i) = (x_i, y_i, z_i, \phi_i, \psi_i, \omega_i).$$

Надалі об'єкт P_i з вектором v_i та кутами θ_i позначимо через $P_i(u_i)$, а прямий прямокутний паралелепіпед C зі змінними розмірами η через $C(\eta)$.

Задача. Необхідно визначити вектор $u \in R^m$, який забезпечує розміщення $P_i(u_i)$, $i \in I$, з урахуванням мінімально припустимих відстаней в прямому прямокутному паралелепіпеді $C(\eta)$ так, щоб його висота $H(\eta) = (\eta_2 - \eta_1)$ досягала мінімального значення.

Математична модель та метод розв'язання

На основі методу phi-функцій [4-7] математична модель задачі може бути записана у вигляді наступної задачі нелінійного програмування:

$$\min_{(u, \eta) \in \Lambda} H(\eta), \quad (1)$$

$$\Lambda = \{(u, \eta) \in R^{m+2} :$$

$$\text{де } \Phi_{ij}(u_i, u_j) \geq 0, 0 < i < j \in I, \eta_2 - \eta_1 \geq 0\}. \quad (2)$$

$$\Phi_i(u_i, \eta) \geq 0, i \in I,$$

У системі (2) $\Phi_{ij}(u_i, u_j)$ – або псевдонормалізована квазі-phi-функція, або псевдонормалізована phi-функція (задає умови неперетину об'єктів P_i та P_j), $\Phi_i(u_i, \eta)$ – phi-функція для P_i і об'єкту $cl(R^3 \setminus C^*)$ (задає умови розміщення P_i у контейнері C).

Доведено, що $\Lambda = \bigcup_{q=0}^{\zeta} \Lambda_q$, де кожна з підобластей Λ_q визначається системою нерівностей, ліві частини яких є нескінченно диференційовані функції. Таким чином, для знаходження точки глобального мінімуму задачі (1)-(2) необхідно розв'язати задачу

$$\min \{H(\eta^{*q}), q = 0, 1, \dots, \zeta\},$$

$$\text{де } \min_{(u, \eta) \in \Lambda_q} H(\eta).$$

Оскільки $\zeta \gg n!$, то за розумний час неможливо знайти розв'язок цієї задачі.

Добре відомо, що задачі упакування тривимірних об'єктів є NP-складними, а тому для пошуку їх наближеного розв'язку використовується досить широкий спектр методів, починаючи від евристичних (евристики, засновані на різних правилах, генетичні алгоритми, імітаційне відпалювання, решітки) до традиційних оптимізаційних методів. Але жоден з відомих нам авторів не розв'язує задачу тривимірного упакування за умови можливості безперервного обертання об'єктів через складність побудови адекватної математичної моделі та проведення великого об'єму обчислень.

Тому для пошуку наближення до глобального мінімуму задачі (1)-(2) пропонується підхід, який складається з наступних етапів: побудова початкових точок, пошук точок локальних мінімумів та їх спрямований неповний перебір для отримання наближення до глобального мінімуму.

Для отримання початкових точок покриваємо об'єкти P_i кулями S_i мінімальних радіусів ρ_i^∇ , $i \in I$. Припускаємо, що $\eta = \eta^0$, зафіксовано i забезпечує розміщення багатогранників у контейнері C . Радіуси ρ_i куль S_i , $i \in I$, є змінними і формують вектор $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) \in R^n$. Сформулюємо таку задачу:

$$\max_{(v, \rho) \in \Omega} \sum_{i=1}^n \rho_i, \quad (3)$$

$$\Omega = \{(v, \rho) \in R^{4n}, \Phi_{ij}^{SS}(v_i, v_j, \rho_i, \rho_j) \geq 0, \\ i < j \in I, \Phi_i^S(v_i, \rho_i) \geq 0, i \in I, \\ \rho_i - \rho_i^\nabla \geq 0, i \in I\}; \quad v = (v_1, v_2, \dots, v_n),$$

$$\Phi_{ij}^{SS}(v_i, v_j, \rho_i, \rho_j) = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + \\ + (z_i - z_j)^2 - (\rho_i + \rho_j)^2;$$

$$\Phi_i^S(v_i, \rho) = \min\{x_i - \rho_i - w_2^0, y_i - \rho_i - l_2^0, \\ z_i - \rho_i - \eta_2^0, w_1^0 - x_i - \rho_i, l_1^0 - y_i - \rho_i, \eta_1^0 - z_i + \rho_i\}.$$

Задаємо початкову точку (v^0, ρ^0) , де $v_i^0 \in C(\eta^0)$, $\rho^0 = 0$ і для цієї точки обчислюємо точку глобального максимуму (v^*, ρ^*) задачі (3)-(4).

Після цього беремо багатогранники $P_i(v_i^*)$ замість куль $S_i(v_i^*)$, задаємо випадково кути $\theta_i^s = (\phi_i^s, \psi_i^s, \omega_i^s)$, $i \in I$, фіксуємо їх та розв'язуємо задачу

$$\min_{(v, \eta) \in W \subset R^{3n+2}} H(\eta), \quad (5)$$

$$W = \{(v, \eta) \in R^{3n+2} : \Phi_{ij}(v_i, v_j) \geq 0, 0 < i < j \in I, \\ \Phi_i(v_i, \eta) \geq 0, i \in I, \\ w_1 \geq 0, l_1 \geq 0, \eta_1 \geq 0, w_2 - w_1 \geq 0, \\ l_2 - l_1 \geq 0, \eta_2 - \eta_1 \geq 0\}. \quad (6)$$

Вочевидь, що $W = \bigcup_{q=0}^{\zeta} W_q$, де Γ_q визначається лінійною системою нерівностей. Це означає, що пошук точок локальних мінімумів зводиться до розв'язання послідовності задач лінійного програмування.

Нехай точка (v^*, η^*) є точкою локального мінімуму задачі (5)-(6). Після цього будуємо початкову точку $(u^s, \eta^s) = (v^*, \theta^s, \eta^*)$. Для цієї початкової точки знаходимо точку (u^{0*}, η^{0*}) локального мінімуму задачі (1)-(2).

Спрямований неповний перебір локальних мінімумів задачі (1)-(2) зводиться до розв'язку наступних допоміжних задач.

Припускаємо, що коефіцієнти гомотетії $h = (h_1, h_2, \dots, h_n) \in R^n$ є змінними. Сформулюємо таку задачу:

$$\min_{Y=(u, \eta, h) \in \Delta} H(\eta), \quad (7)$$

$$\Delta = \{Y \in R^{7n+2}, \Phi_{ij}(u_i, u_j, h_i, h_j) \geq 0, \\ i < j \in I, \Phi_i(u_i, \eta, h_i) \geq 0, \\ h_i \geq 0, i \in I, H(\eta^{0*}) - H(\eta) \geq \varepsilon, w_1 \geq 0, l_1 \geq 0, \\ \eta_1 \geq 0, w_2 - w_1 \geq 0, l_2 - l_1 \geq 0, \eta_2 - \eta_1 \geq 0\};$$

$$\varepsilon = (0.5)^t \cdot 0.1H(\eta^{0*}), t = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

Для початкової точки $Y^0 = (u^{0*}, \eta^{0*}, h^\nabla)$ знаходимо точку локального мінімуму

$$Y^{*1} = (u^{*1}, \eta^{*1}, h^{*1}).$$

Будуємо послідовність $h_1^1 \geq h_2^1 \geq \dots \geq h_n^1$. На основі цієї послідовності та послідовності

$$1 = h_1^\nabla \geq h_2^\nabla \geq \dots \geq h_n^\nabla$$

Формуємо точку (\tilde{u}, \tilde{h}) , де

$$\tilde{u}_j = u_{i_j}^{*1}, \tilde{h}_j = \min\{h_{i_j}^1, h_j^\nabla\}, j \in I.$$

Далі для початкової точки (\tilde{u}, \tilde{h}) обчислюємо точку (u^0, h^0) локального максимуму задачі

$$\max_{(u, h) \in D} F(h) \quad (10)$$

$$F(h) = \sum_{i=1}^n h_i,$$

$$D = \{(u, h) \in R^{7n}, \Phi_{ij}(u_i, u_j, h_i, h_j) \geq 0, \\ i < j \in I, \Phi_i(u_i, h_i) \geq 0, h_i^\nabla - h_i \geq 0, h_i \geq 0, i \in I\}. \quad (11)$$

Якщо

$$\sum_{i=1}^n h_i^0 = \sum_{i=1}^n h_i^\nabla = b,$$

то всі P_i , $i \in I$, пакуються у $C(\eta^1)$. У цьому випадку для початкової точки (u^0, η^{0*}) знову розв'язуємо задачу (1)-(2) і так далі.

Якщо $j \neq i_j, j \in I$, хоча б для однієї пари індексів i $F(h^0) < b$, то збільшуємо t у (9) на 1 і розв'язуємо задачу (7)-(8) і так далі, поки не отримаємо $F(h^0) = b$ або $j = i_j, j \in I$.

У випадку $F(h^0) = b$ переходимо до розв'язування задачі (1)-(2).

Якщо $j = i_j, j \in I$, то попередня точка локального мінімуму задачі (1)-(2) приймається у якості наближення до точки глобального мінімуму цієї задачі.

Відзначимо, що для пошуку локальних екстремумів сформульованих оптимізаційних задач розроблено спеціальний метод декомпозиції, який дозволяє значно зменшити обчислювальні витрати за ра-

хунок значного зменшення кількості нерівностей у процесі пошуку локальних екстремумів. Ключова ідея процедури оптимізації дозволяє генерувати підмножини області припустимих розв'язків на кожному кроці в такий спосіб. На основі аналізу стартової точки в систему обмежень задачі додається система додаткових обмежень на параметри розміщення кожного об'єкта, що дозволяють переміщатися об'єкту в межах індивідуального прямокутного контейнера. Після цього видаляються ρ -нерівності для всіх пар об'єктів, індивідуальні контейнери яких не перетинаються. Таким чином, ми зменшуємо число обмежень і, у випадку квазіфізичних- ρ -функцій, кількість додаткових змінних. Після проводиться пошук точки локального мінімуму для побудованої підзадачі. Отриманий локальний екстремум підзадачі використовується в якості стартової точки для наступної ітерації.

На рис. 2 представлено приклади упаковок 3D об'єктів, отриманих за допомогою запропонованих методів.

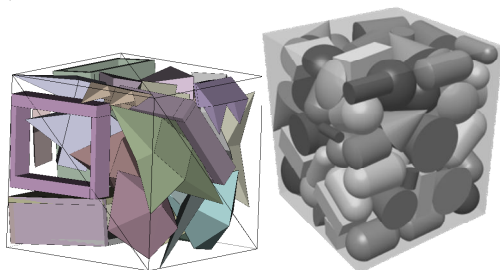


Рис. 2. Приклади локально-оптимальних упаковок 3D-об'єктів з урахуванням мінімально припустимих відстаней

Висновки

Процедура 3D-друку з використанням SLS-технології є досить тривалою за часом (друк може тривати багато годин або навіть днів) та потребує великих фінансових витрат, пов'язаних із запуском принтеру, нагрівом камери та стабілізацією температури.

ОПТИМИЗАЦІЯ ПРОЦЕСА 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ SLS ТЕХНОЛОГІЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.М. Чугай, А.В. Панкратов, Т.Е. Романова, Ю.Е. Стоян

В работе предлагаются конструктивные средства оптимизации процесса 3D-печати для SLS технологии аддитивного производства. Представлены модели и методы, позволяющие одновременно осуществлять печать большого количества изделий с обеспечением максимального заполнения объема рабочей камеры 3D принтера с учетом технологических ограничений. Это позволяет минимизировать время и стоимость создания изделий за счет существенного сокращения числа циклов печати.

Ключевые слова: 3D-печать, SLS-технологии, упаковки, метод ρ -функций, нелинейная оптимизация.

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF 3D-PRINTING FOR SLS TECHNOLOGIES OF ADDITIVE PRODUCTION

A.M. Chugay, A.V. Pankratov, T.E. Romanova, Yu.E. Stoyan

The paper studies constructive tools of optimizing the 3D printing process in SLS additive production technology. We develop NLP model and solution algorithm that allow us simultaneously printing a large number of products to maximize the volume of the working chamber of a 3D printer, taking into account technological requirements. We minimize the time and cost of creating products by significantly reducing the number of printing cycles.

Keywords: 3D printing, SLS technology, packing, ρ -functions method, nonlinear optimization.

Необхідно відзначити, що час, необхідний для спікання порошку є значно меншим, ніж час, необхідний для підготовки кожного шару порошку. В роботі пропонується скоротити часові та фінансові витрати за рахунок забезпечення одночасного друку максимальної кількості виробів із забезпеченням оптимального пакування об'єктів з урахуванням технологічних обмежень. Мінімізація висоти області, у якій буде розміщено об'єкти, призводить до мінімізації кількості шарів 3D-друку.

Список літератури

1. Ramya, A. 3D printing technologies in various applications/A. Ramya, Sai Vanapalli // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – Vol. 7, № 3. – 2016. – P.396–409.
2. Egeblad, J. Fast neighborhood search for two- and three-dimensional nesting problems/ J. Egeblad, B.K. Nielsen, A. Odgaard // *European Journal of Operations Research*. – 2007. – №183(3). – С. 1249-1266.
3. Baumers, M. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push / Baumers M., Dickens P., Tuck C., Hague R.// *Technological Forecasting & Social Change*. –2016. –№102. – P.193–201.
4. Stoyan, Y.G., Modeling Close Packing of 3D Objects/ Y.G. Stoyan, V.V. Semkin, A.M. Chugay // *Cybernetics and Systems Analysis* – 2016. –Т.52(2). – С. 296-304.
5. Chernov, N. Mathematical model and efficient algorithms for object packing problem / N. Chernov, Y. Stoyan, T. Romanova// *Computational Geometry. Theory and Application*. –2010. –№ 43(5). – С. 535–553.
6. Pankratov, A.V. Optimal packing of convex polytopes using quasi- ρ -functions/ A.V. Pankratov, T.E. Romanova, A.M. Chugay // *Проблемы машиностроения*. – 2015. –Т. 18, № 2. – С. 55-65.
7. Stoyan Yu., Romanova T., Pankratov A., Chugay A. (2015) *Optimized object packings using quasi- ρ -functions// Chapter (pp. 265-293) in contributed book Optimized Packings and Their Applications/ Springer Optimization and its Applications, G. Fasano and J.Pintér (Editors), Springer, New York, Vol. 105, 326 p.*

Надійшла до редколегії 24.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.В. Гребеннік, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.