

ĐIỀU KHIỂN VẬN TỐC IN TỰ THÍCH NGHI THEO HÌNH HỌC NHẪM NÂNG CAO ĐỘ CHÍNH XÁC BỀ MẶT TRONG IN 3D FDM

IMPROVING SURFACE ACCURACY IN FDM 3D PRINTING USING GEOMETRY-BASED ADAPTIVE SPEED CONTROL

Nguyễn Văn Cảnh, Ngô Quang Tú

Trường Cơ khí - Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

Email: tunq@hau.edu.vn

TÓM TẮT

Công nghệ in 3D theo phương pháp *Fused Deposition Modeling (FDM)* hiện được ứng dụng rộng rãi nhờ ưu điểm về tính linh hoạt và chi phí vận hành thấp. Tuy nhiên, một trong những hạn chế đáng kể của phương pháp này là độ chính xác bề mặt còn thấp, đặc biệt tại các vùng có hình học phức tạp hoặc độ nghiêng lớn. Nghiên cứu này đề xuất một kỹ thuật điều khiển vận tốc in tự thích nghi, trong đó tốc độ in được điều chỉnh theo đặc điểm hình học của mô hình: tăng tại các khu vực phẳng hoặc đơn giản, và giảm tại các khu vực yêu cầu độ chính xác cao như bề mặt nghiêng hoặc chi tiết nhỏ. Kết quả thực nghiệm cho thấy kỹ thuật điều khiển vận tốc theo vùng này giúp cải thiện đáng kể chất lượng bề mặt mà không làm gia tăng đáng kể thời gian in, qua đó nâng cao hiệu quả tổng thể của quá trình in FDM.

Từ khóa: In 3D; FDM; Điều khiển thích nghi.

ABSTRACT

Fused Deposition Modeling (FDM) is a widely adopted 3D printing technology due to its flexibility and low operational cost. However, a major limitation of FDM is its relatively low surface accuracy, particularly in regions with complex geometries or steep inclinations. This study proposes an adaptive print speed control technique, in which the printing speed is adjusted based on the geometric features of the model, which is increased in flat or simple areas and reduced in regions requiring higher precision, such as inclined surfaces or small features. Experimental results demonstrate that this region-specific speed adjustment significantly enhances surface quality without substantially increasing printing time, thereby improving the overall efficiency of the FDM process.

Keywords: 3D printing; FDM; Adaptive control.



1. GIỚI THIỆU

Công nghệ in 3D, đặc biệt là phương pháp Fused Deposition Modeling (FDM), đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như thiết kế sản phẩm, kỹ thuật cơ khí, và y sinh học nhờ vào khả năng tạo mẫu nhanh, chi phí thấp và khả năng sản xuất linh hoạt [1]. Tuy nhiên, một trong những hạn chế nổi bật của công nghệ này là độ chính xác bề mặt không ổn định, đặc biệt tại các khu vực hình học phức tạp như bề mặt nghiêng, góc nhỏ, hoặc các vùng được hỗ trợ bởi kết cấu support. Các khuyết điểm thường gặp bao gồm hiện tượng bậc thang (stair-stepping), rãnh lớp, biến dạng vi mô, và nhám bề mặt không kiểm soát [1, 2].

Trong những năm gần đây, nhiều giải pháp đã được nghiên cứu nhằm cải thiện chất lượng bề mặt in FDM. Một trong những cách tiếp cận phổ biến là giảm chiều cao lớp in (layer height), qua đó giảm độ nhám và cải thiện tính liên tục giữa các lớp. Mặc dù phương pháp này đơn giản và dễ thực hiện, nhưng nó làm gia tăng đáng kể thời gian in và có thể dẫn đến hiện tượng biến dạng nhiệt nếu không kiểm soát tốt [3]. Một số nghiên cứu khác đã tập trung vào việc tối ưu hóa vật liệu support như cấu trúc cây (tree support), support dạng hữu cơ hoặc cấu trúc lattice nhằm giảm ảnh hưởng lên bề mặt dưới (bottom face) của mẫu. Tuy nhiên, việc loại bỏ support sau khi in vẫn để lại dấu vết, đặc biệt ở các chi tiết nhỏ hoặc mặt nghiêng, gây ảnh hưởng đến độ chính xác kích thước và tính thẩm mỹ [4].

Ngoài ra, các kỹ thuật xử lý hậu kỳ như đánh bóng cơ học, xử lý bằng hơi dung môi (acetone vapor smoothing), hoặc phủ lớp hoàn thiện cũng được áp dụng nhằm cải thiện độ mịn bề mặt. Dù mang lại hiệu quả trực quan, các kỹ thuật này tốn thêm thời gian, chi phí và

không phù hợp với các mẫu có hình học phức tạp hoặc yêu cầu giữ nguyên kích thước gốc [5]. Gần đây, một số nghiên cứu đã thử nghiệm các thuật toán tối ưu đường đi đầu in (toolpath optimization) hoặc in không theo lớp phẳng (non-planar printing), nhưng các kỹ thuật này đòi hỏi phần mềm hoặc phần cứng đặc thù, khó triển khai đại trà [3].

Bài báo đề xuất kỹ thuật điều khiển vận tốc in tự thích nghi theo hình học chi tiết, bằng cách tự động điều chỉnh tốc độ in dựa trên đặc điểm địa hình của mô hình số – giảm tốc ở vùng nghiêng, chi tiết nhỏ và tăng tốc ở vùng phẳng, đơn giản. Phương pháp tận dụng khả năng phân vùng của các phần mềm slicing hiện đại như Cura hoặc PrusaSlicer, giúp cải thiện độ chính xác bề mặt mà không làm tăng thời gian in đáng kể. Khác với các cách truyền thống, giải pháp này không yêu cầu chỉnh sửa phần cứng hay hậu xử lý phức tạp, dễ tích hợp qua G-code hoặc script. Nhờ vậy, kỹ thuật mang lại sự cân bằng giữa chất lượng và hiệu suất, phù hợp cho ứng dụng FDM quy mô nhỏ và trung bình.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, chúng tôi xây dựng một mô hình kỹ thuật số đại diện cho các dạng hình học thường gặp trong in 3D FDM gây khó khăn cho việc đảm bảo chất lượng bề mặt. Mô hình gồm ba vùng đặc trưng: Bề mặt nghiêng lớn (từ 45° đến 80°): là vùng dễ xuất hiện hiện tượng stair-stepping do hiệu ứng phân lớp; Bề mặt ngang ($0-10^\circ$): ít nhạy cảm với tốc độ in, thường không ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác bề mặt; Bề mặt lồi hoặc lõm phía trên support: dễ xuất hiện vồng, nhẵn và độ kết dính lớp kém do không có nền vững.



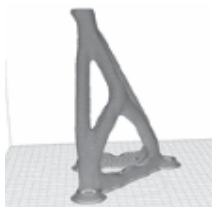
Hình 1. Hình học mẫu

Hình học mẫu được thiết kế dạng tổ hợp khối đơn giản: một khối hộp có mặt nghiêng, một mái vòm (cầu bán nguyệt) được in trên support, và một mặt phẳng chuẩn nằm ngang để làm đối chứng. Mô hình này đại diện cho các bề mặt mà chất lượng thường bị ảnh hưởng nhiều nhất bởi vận tốc in.

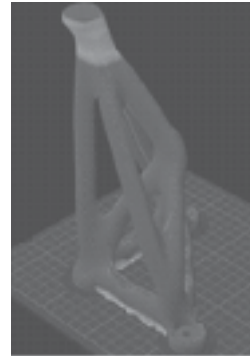
Xu hướng vận tốc in được đề xuất trong nghiên cứu này là điều chỉnh vận tốc theo từng khu vực của mô hình: giảm vận tốc tại các vùng nghiêng và vùng có support để tăng độ chính xác định hình và độ bám dính lớp, đồng thời tăng vận tốc tại các vùng phẳng nhằm rút ngắn thời gian in mà không ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng bề mặt. Sự biến thiên này là cơ sở cho kỹ thuật điều khiển vận tốc tự thích nghi được áp dụng.

2.2. Thiết lập thí nghiệm

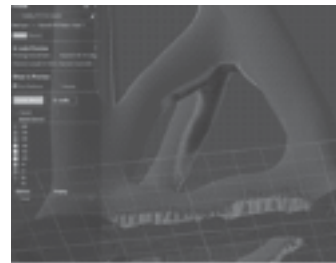
Nhằm đánh giá giả thuyết đặt ra, hai mẫu in được tạo ra từ cùng một mô hình 3D, cùng vật liệu và máy in, chỉ khác nhau về cách điều khiển vận tốc in:



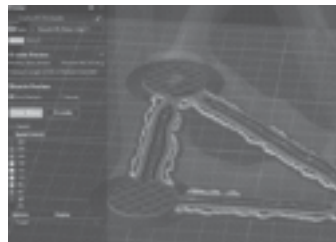
a. Lập trình bằng UltiMaker Cura với vận tốc không đổi



b. Lập trình bằng Creality print với vận tốc điều khiển thích nghi



c. Vùng có góc nghiêng lớn từ 45-80°



d. Vùng có góc nghiêng lớn hơn 80° và tiếp xúc với support

Hình 2. Điều khiển vận tốc thích nghi từng vùng

- Mẫu A (đối chứng): Cài đặt vận tốc in cố định 265 mm/s cho toàn bộ mô hình, không phân vùng điều chỉnh.

- Mẫu B (thử nghiệm): Sử dụng kỹ thuật điều khiển vận tốc tự thích nghi, trong đó vận tốc tối đa là 265 mm/s, tối thiểu là 10 mm/s.

Việc điều chỉnh được thực hiện thông qua tính năng modifier mesh của phần mềm UltiMaker Cura, creality print, kết hợp script

g-code thủ công để tối ưu chính xác theo chiều cao lớp. Thông số in còn lại được giữ nguyên giữa hai mẫu: Vật liệu nhựa PLA-CF, nhiệt đầu in là 210°C, tốc độ làm mát là 100%. Đây là thiết lập chuẩn hóa để đảm bảo mọi khác biệt về chất lượng bề mặt đến từ sự vận tốc in.

2.3. Quy trình đo và đánh giá

Đánh giá ngoại quan hai mẫu được quan sát và so sánh bằng mắt thường và kính lúp kỹ thuật số để nhận biết các lỗi bề mặt phổ biến: stair-step, vồng, rãnh lõp, tách lớp tại vùng nghiêng hoặc vùng trên support.

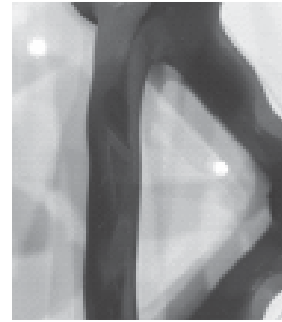
Sử dụng máy quét 3D MCAX để so sánh mô hình in thực tế với mô hình CAD ban đầu. Sai lệch hình học được thể hiện qua bản đồ màu (deviation map) và thống kê độ lệch trung bình $\pm\sigma$ giữa các vùng đo.



a. Bề mặt tiếp xúc với support

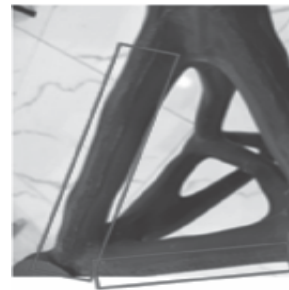


b. Bề mặt nghiêng lớn (từ 45° đến 80°)



c. Bề mặt ngang (0-10°)

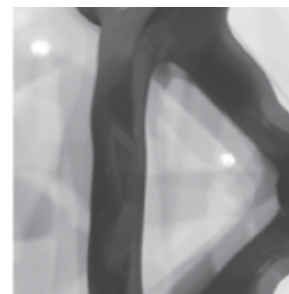
Hình 4. Mẫu in theo phương pháp điều khiển vận tốc thích nghi từng vùng



a. Bề mặt tiếp xúc với support



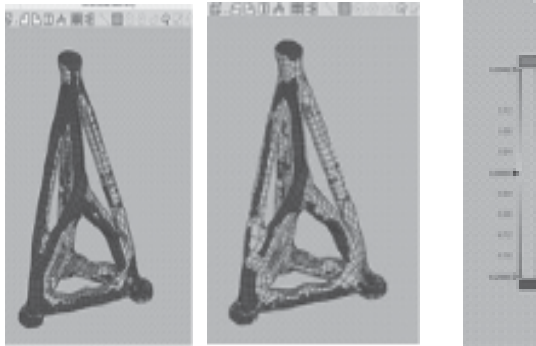
b. Bề mặt nghiêng lớn (từ 45° đến 80°)



c. Bề mặt ngang (0-10°)

Hình 5. Mẫu in theo phương pháp thông thường với vận tốc không đổi

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN



Mẫu 1 Mẫu 2 Thang đo sai số
Hình 6. Kiểm tra sai số của mô hình sau in với bản thiết kế

Các kết quả thu được từ quá trình thử nghiệm đã xác nhận rõ hiệu quả của phương pháp điều khiển vận tốc tự thích nghi đối với việc cải thiện độ chính xác bề mặt trong in FDM.

3.1. Đánh giá trực quan

Quan sát sơ bộ bằng mắt thường và kính lúp kỹ thuật số cho thấy mẫu in sử dụng vận tốc tự thích nghi (Mẫu B) có bề mặt đồng đều hơn, các chi tiết nhỏ và vùng nghiêng thể hiện độ sắc nét và độ bám dính giữa các lớp tốt hơn. Cụ thể:

- Tại vùng nghiêng (45° đến 80°), hiện tượng stair-stepping và tách lớp ở Mẫu A (vận tốc cố định) diễn ra rõ rệt, trong khi Mẫu B thể hiện các lớp mịn hơn, ít rãnh và liên kết tốt.

- Ở vùng có góc nghiêng $>80^\circ$ và tiếp xúc với support, Mẫu A xuất hiện tình trạng vồng và bề mặt nhẵn do tốc độ cao làm giảm độ kết dính lớp; trong khi đó, Mẫu B thể hiện cấu trúc ổn định hơn nhờ vận tốc thấp được áp dụng ở khu vực này.

- Tại bề mặt ngang ($0-10^\circ$), sự khác

biệt giữa hai mẫu không đáng kể, xác nhận giả thuyết rằng vùng này ít nhạy cảm với tốc độ in.

3.2. Đo sai lệch hình học bằng máy quét 3D

Kết quả đo từ hệ thống quét 3D MCAX và phần mềm Geomagic Control X cho thấy sai số trung bình tại các vùng nghiêng của Mẫu B thấp hơn đáng kể so với Mẫu A. Cụ thể:

Bảng 1. Đánh giá kết quả đo sai lệch

Vị trí đo	Mẫu A (mm)	Mẫu B (mm)	Giảm sai số (%)
Vùng nghiêng $45^\circ-80^\circ$	± 0.39	± 0.18	$\sim 53.8\%$
Vùng tiếp xúc với support	± 0.42	± 0.22	$\sim 47.6\%$
Vùng ngang ($0-10^\circ$)	± 0.10	± 0.08	$\sim 20.0\%$

3.3. Thảo luận kết quả

Kết quả trên cho thấy hiệu quả rõ rệt của kỹ thuật điều khiển vận tốc thích nghi, đặc biệt tại các khu vực hình học phức tạp. Việc giảm tốc độ in tại các vùng khó giúp tăng thời gian làm nguội từng lớp, giảm hiện tượng vồng và cải thiện độ bám dính giữa các lớp nhựa.

Ngoài ra, việc tăng tốc độ tại các vùng đơn giản giúp rút ngắn thời gian in mà không làm suy giảm chất lượng bề mặt. Phương pháp này không chỉ cải thiện tính chính xác mà còn giữ được hiệu suất in ở mức tối ưu.

So với phương pháp giảm chiều cao lớp hoặc xử lý sau in, giải pháp này có các ưu điểm sau:

- Không làm tăng đáng kể thời gian in tổng thể.



- Không cần thay đổi phần cứng hoặc can thiệp vật lý vào máy in.

- Dễ dàng triển khai qua các phần mềm slicing hiện đại có hỗ trợ phân vùng vận tốc (như Cura, PrusaSlicer).

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã chứng minh kỹ thuật điều khiển vận tốc in tự thích nghi giúp cải thiện đáng kể độ chính xác bề mặt trong in 3D FDM, đặc biệt tại các vùng hình học phức tạp như bề mặt nghiêng hoặc vùng có support. Bằng cách điều chỉnh linh hoạt vận tốc theo từng khu vực, phương pháp này giảm sai số hình học từ 40-50% so với in với vận tốc cố định, mà không cần thay đổi phần cứng hay hậu xử lý phức tạp. Giải pháp dễ triển khai qua các phần mềm Slicing phổ biến và phù hợp với nhiều loại mô hình, mang lại hiệu quả cao cho sản xuất mẫu kỹ thuật hoặc sản phẩm yêu cầu bề mặt tốt. Trong tương lai, kỹ thuật có thể được mở rộng bằng cách kết hợp với điều chỉnh chiều cao lớp, kiểm soát nhiệt độ theo vùng hoặc tối ưu hóa đường in để nâng cao chất lượng và năng suất.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội trong khuôn khổ đề tài mã số: 02-2024-RD/HĐ-ĐHCN. ❖

Ngày nhận bài: **09/6/2025**

Ngày phản biện: **24/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Hisham M, Shebeeb C M, C D, Jacob L, Butt H., “*Additive manufacturing of carbon nanocomposites for structural applications*”. J. Mater. Res. Technol. 2024;28:4674-93. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.049>.
- [2]. Li Y, Lau D., “*Advances in shape memory polymers and their composites: From theoretical modeling and MD simulations to additive manufacturing*”. Giant 2024;18.
- [3]. Kalpakjian S., “*Manufacturing Engineering & Technology*”. 7th ed. Pearson; 2013.
- [4]. Nguyen V-C, Tien DH, Ngo QT, Pham V-T, Nguyen B-N, Huy-Kien Nguyen, “*Structural Performance and Optimization of 3D- Printed PLA Lattice Structures for Sustainable Design in Load-Bearing Applications*”. Eng. Technol. Appl. Sci. Res. 2025;15:21086-92.
- [5]. Makki T, Vattathurvalappil SH, Theravalappil R, Nazir A, Alhajer A, Azeem MA, et al., “*3D and 4D printing: A review of virgin polymers used in fused deposition modeling*”. Compos Part C Open Access 2024;14:100472.