



Tác giả:
TS. Tạ Đức Tùng

Đơn vị công tác: Đại học Tokyo,
Nhật Bản

Email: tung@akg.t.u-tokyo.ac.jp

Tạ Đức Tùng đang làm nghiên cứu sau tiến sĩ tại khoa Điện và Hệ thống Thông tin, Đại học Tokyo. Tạ Đức Tùng tập trung nghiên cứu các mảng gia công kỹ thuật số, chế tạo mạch điện mềm dẻo, và robot thân mềm. Tùng nhận bằng tiến sĩ năm 2019, và thạc sĩ năm 2016 từ khoa Điện tử Viễn thông, Đại học Tokyo. Tùng tốt nghiệp từ khoa Kỹ nghệ Phần mềm thuộc trường đại học FPT vào năm 2012. Hiện Tùng là thành viên của ACM, IEEE, IEICE, IPSJ, SICE, và VANJ.

<https://doi.org/10.15625/vap.2021.0012>

Ứng dụng gia công kỹ thuật số trong thiết kế robot thân mềm

Tạ Đức Tùng

Nghiên cứu sau tiến sĩ, Đại học Tokyo, Tokyo, Nhật Bản

TÓM TẮT:

Robot thân mềm (Soft-bodied Robot) là một hướng nghiên cứu mới trong ngành thiết kế robot. Khác với robot truyền thống được làm bằng các vật liệu cứng, robot thân mềm dựa vào các tính chất mềm dẻo, biến dạng, hoặc đàn hồi của vật liệu để thiết kế và điều khiển hoạt động của robot. Do đặc tính dễ dàng thích ứng với sự thay đổi hình dạng để phù hợp với môi trường xung quanh, robot thân mềm phù hợp cho những nhiệm vụ liên quan đến tương tác với con người, khám phá, và quan trắc môi trường. Trong hầu hết các thiết kế, robot thân mềm thường được hợp thành bởi một khối vật liệu mềm liên tục (Soft Continuum). Điều này khiến cho robot thân mềm có thể dễ dàng được chế tạo hàng loạt bằng các công nghệ gia công kỹ thuật số (Digital Fabrication). Bài viết này sẽ đi qua một số công nghệ gia công kỹ thuật số được sử dụng để thiết kế, chế tạo, và điều khiển robot thân mềm. Những robot này được lấy cảm hứng từ cấu trúc cơ thể của các loài côn trùng (sâu đo, tuyến trùng) và bò sát (rắn). Các công nghệ gia công kỹ thuật số được nhắc đến trong bài viết bao gồm: mực dẫn điện và in mạch điện lên giấy, in 3D vật liệu đàn hồi, tích hợp gia công mạch điện vào chu trình in 3D.

Từ khóa: robot thân mềm, mực dẫn điện, in 3D, gia công kỹ thuật số

1. Giới thiệu

Nghiên cứu robot là một trong những ngành thể mạnh của Nhật Bản. Đặc biệt những cánh tay robot của các hãng như FANUC hay DENSO đang được sử dụng hết sức phổ biến trong các ngành công nghiệp chế tạo cũng như các dây chuyền lắp ráp. Tuy nhiên, để đảm bảo tính chính xác trong các thao tác, robot truyền thống được chế tạo từ các vật liệu cứng, điều này phần nào hạn chế khả năng thích ứng với sự thay đổi của môi trường xung quanh. Xuất phát từ thực tế đó, một nhánh mới của ngành nghiên cứu robot - robot thân mềm - ra đời với tư tưởng sử dụng các vật liệu mềm dẻo và đàn hồi để thiết kế, chế tạo, và điều khiển robot. Đối với đại chúng, một ví dụ điển hình của ý tưởng robot thân mềm có thể tìm thấy trong nhân vật người máy Baymax (từ bộ phim hoạt hình “Big Hero 6”), một robot được chế tạo từ một bong bóng khí có thể cử động và tương tác với con người. Tuy nhiên, trong giới nghiên cứu thì ý tưởng về robot thân mềm được manh nha từ khá lâu với những thử nghiệm ban đầu về cơ cấu chấp hành mềm [1]. Tuy nhiên sau đó các nghiên cứu về robot thân mềm đều rải rác và chưa có thêm đột phá mới. Năm 2011, nhóm nghiên cứu của Whitesides tại ĐH Harvard trình bày một robot hình sao 4 cánh [2], với toàn bộ cơ thể được làm từ silicon và điều khiển bởi các khoang và ống dẫn khí (Pneumatic actuator). Nghiên cứu này đã đánh thức nhánh robot thân mềm đang trong thời gian ngủ đông. Với sự phổ cập của công nghệ in 3D, nhiều nhóm nghiên cứu đã dễ dàng chế tạo các robot thân mềm khác, góp phần thúc đẩy các thành quả khám phá của việc thiết kế và điều khiển robot thân mềm. Có nhiều nguyên nhân khiến robot thân mềm thu hút được sự chú ý của giới nghiên cứu robot.

Một số đặc điểm có thể kể đến như sau:

- Robot thân mềm dễ dàng thay đổi hình dạng để phù hợp với không gian và đặc điểm môi trường.
- Do đặc tính mềm và đàn hồi của vật liệu, robot thân mềm an toàn hơn khi tương tác với con người.
- Do robot thân mềm thường là một khối vật liệu mềm liên tục, nó dễ dàng được chế tạo và tùy biến bằng các công cụ gia công kỹ thuật số.

Tuy nhiên, bên cạnh các lợi điểm hấp dẫn, thì thiết kế robot thân mềm cũng có những thử thách cần phải nghiên cứu tính toán kỹ lưỡng. Mặc dù toàn bộ cơ thể được làm bằng vật liệu mềm dẻo, các cơ cấu chấp hành và cảm biến hiện có trên thị trường lại được chủ yếu làm từ vật liệu cứng. Những chi tiết bộ phận này chỉ thích hợp cho chế tạo robot cứng. Khi đem những bộ phận này tích hợp vào robot thân mềm, do sự không tương thích giữa tính chất cơ học của vật liệu, robot thân mềm chế tạo ra sẽ bị giới hạn về khả năng điều khiển và phạm vi hoạt động. Ngoài ra, do tính chất liên tục của kết cấu cơ thể, điều khiển chính xác hành vi của robot thân mềm là một thử thách lớn đối với cộng đồng nghiên cứu robot thân mềm. Một điểm yếu nữa của robot thân mềm nằm ở hiệu năng cũng như cường độ lực tác động mà robot thân mềm có thể sản sinh khi hoạt động. Tính tới thời điểm hiện tại, lực tác động sản sinh bởi robot thân mềm thường yếu hơn so với robot truyền thống. Cùng là cánh tay robot, nhưng robot truyền thống thì chính xác và mạnh mẽ, còn robot thân mềm, mặc dù uyển chuyển hơn, thì lại yếu và khó điều khiển. Tìm kiếm giải pháp cho những điểm yếu nêu trên của robot thân mềm cũng là các hướng đi chính của cộng đồng nghiên cứu robot thân mềm Nhật Bản. Bài viết này, thay vì đề cập hết các vấn đề nêu trên, sẽ thảo luận và giới thiệu về ứng dụng của các công nghệ gia công kỹ thuật số trong thiết kế chế tạo robot thân mềm. Thiết nghĩ, cũng giống như sự phổ cập của phần mềm máy tính đã đem lại cơ hội cho Việt Nam hoà mình vào dòng chảy công nghệ của thế giới, sự phổ biến của các thiết bị gia công kỹ thuật số đang mở ra cơ hội mới cho các ngành chế tạo và nghiên cứu trong nước tiếp cận và hòa nhập với trình độ nghiên cứu sản xuất của thế giới. Chính vì vậy tác

giả tin rằng viết tập trung vào công nghệ gia công kỹ thuật số sẽ đem lại nhiều giá trị cho người đọc.

2. Một số nghiên cứu về ứng dụng gia công kỹ thuật số trong robot thân mềm

2.1 Mực in dẫn điện - Instant Inkjet Circuits

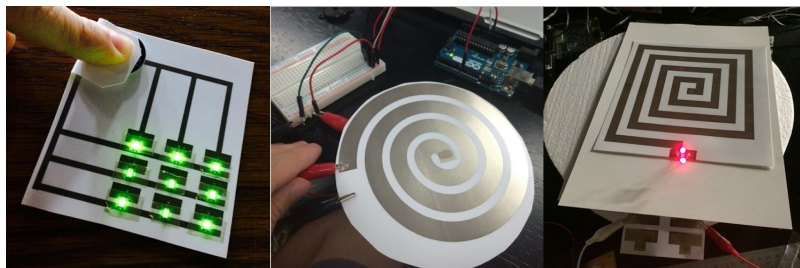
Mực dẫn điện được phát triển từ lâu. Tuy nhiên, hầu hết các mực in dẫn điện đều cần đến quá trình nung kết với nhiệt độ từ 180°C - 250°C. Không có quá trình nung kết này thì mẫu in sẽ không trở nên dẫn điện. Đặc điểm này làm giới hạn đáng kể vật liệu nền (substrate) khi in mạch điện. Năm 2013, nhóm nghiên cứu của giáo sư Kawahara đã giới thiệu loại mực in dẫn điện với có thể được nung kết ở nhiệt độ phòng (20°C) [3]. Mực này (Silver Nano-particle Ink), được sản xuất bởi Mitsubishi Paper Mills có một số đặc điểm nổi bật như sau:

- Mực bạc nano: mực được hợp thành bởi các hạt bạc cỡ 4 nm.
- Mực có thể được in bằng bất cứ máy in phun văn phòng nào.
- Mực dẫn điện có thể in lên chất liệu giấy ảnh sẵn có.
- Bản in sẽ trở nên dẫn điện chỉ ít giây sau khi in ở nhiệt độ phòng.
- Mức độ dẫn điện của bản in cải thiện hơn nhiều so với các loại mực in dẫn điện trước đó.

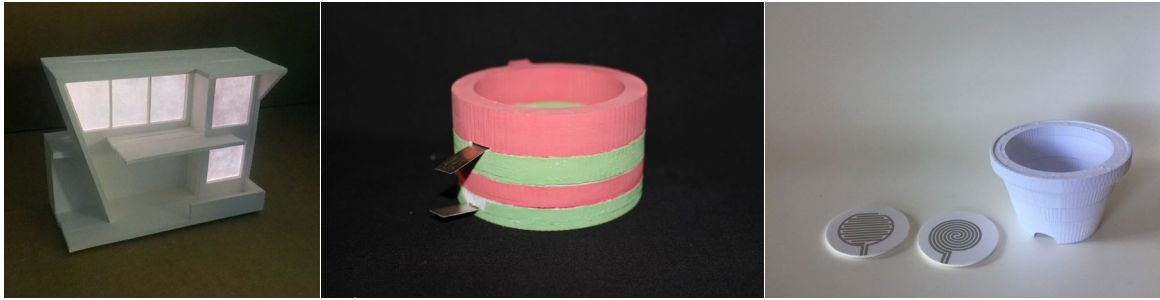
Sử dụng mực bạc này, nhóm nghiên cứu có thể nhanh chóng in mạch điện, cảm biến độ ẩm, cảm biến chạm, ăng ten RFID, ăng ten thu hoạch năng lượng từ sóng điện từ. Ngoài ra, nếu sử dụng kết quả nghiên cứu về chế tạo mạch điện nhiều lớp từ mực bạc [4], chúng ta có thể in nhiều ứng dụng phức tạp hơn như ma trận LED, loa từ giấy, hoặc cuộn dây để dùng trong các ứng dụng truyền điện không dây (xem thêm ở **Hình 1**).

2.2 In 3D với mực in dẫn điện

Máy in 3D đem đến cho người dùng một bộ công cụ mạnh mẽ để chế tác các mô hình 3D một cách nhanh chóng và chính xác. Tuy nhiên, hầu hết các máy in 3D đều chỉ tập trung vào nâng cao khả năng tạo hình. Có một nhu cầu đặt ra là ngoài việc in hình 3D, liệu máy in 3D có thể in luôn cả các thành phần chức năng



Hình 1 Một số ứng dụng của mực dẫn điện nano bạc



Hình 2: Một số thành phẩm của phương pháp in 3D với mực in dẫn điện

như mạch điện, cảm biến, cơ cấu chấp hành hay không? Một số máy in 3D tiếp cận vấn đề in mạch điện bằng cách dùng nguyên liệu là nhựa PLA chứa carbon để in các thành phần dẫn điện. Tuy nhiên do điện trở suất của loại nguyên liệu này khá cao nên mạch điện in ra bị giới hạn rất nhiều về chức năng.

Từ một hướng tiếp cận khác, nghiên cứu có tựa đề PEP (3D Printed Electronic Papercrafts) [5] về tích hợp các thành phần chức năng vào mô hình in 3D giới thiệu tại hội thảo ACM CHI 2018 đã đề xuất dùng kết hợp mực bạc dẫn điện giới thiệu ở phần 2.1 và phương pháp gia công Laminated Object Manufacturing (LOM) để in mô hình 3D với mạch điện bên trong. Quá trình in 3D bằng phương pháp này có thể tóm tắt bao gồm:

- Thiết kế mô hình 3D
- Đặt các thành phần chức năng vào mô hình 3D
 - Cơ cấu chấp hành (Actuation Primitive)
 - Tầm phát nhiệt
 - Loa
 - Cảm biến (Sensory Primitive)
 - Cảm biến điện dung
 - Cảm biến điện trở
 - Hiển thị (Display Primitive)
 - LED
 - Electroluminescence
 - Liên lạc (Communication Primitive)
 - Radio-frequency identification (RFID)
 - Truyền điện không dây - Wireless Power Transfer (WPT)
- Dùng mực dẫn điện để in các lớp chức năng nêu trên
- Dùng máy in 3D dạng LOM để ghép các lớp vật liệu và lớp chức năng thành hình 3D thật

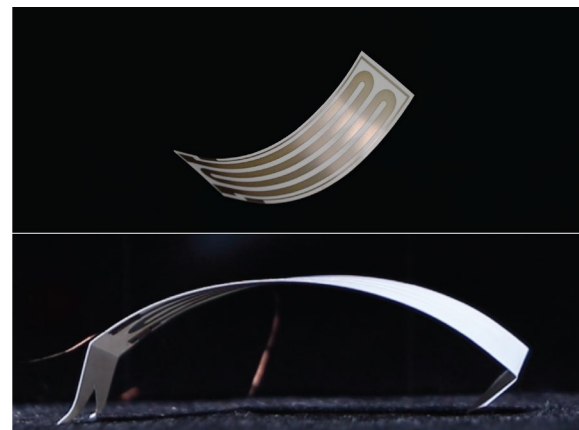
Một số thành phẩm của phương pháp in 3D với mực in dẫn điện có thể xem ở **Hình 2** và video ở đường dẫn sau: <https://vimeo.com/252080903>.

2.3 Robot sâu đo với cảm biến và cơ chế chấp hành bằng mực dẫn điện

Robot thân mềm thường được làm bằng cách gắn các thành phần cảm biến và cơ cấu chấp hành cứng vào khối vật liệu mềm. Sự khác nhau về tính chất cơ học của vật liệu cứng và mềm gây ra nhiều giới hạn trong việc thiết kế robot thân mềm. Với mục tiêu giúp cho việc thiết kế robot thân mềm được uyển chuyển và dễ

dàng hơn, nghiên cứu [6] - trình bày tại ICRA 2019 - đã đề xuất dùng cảm biến và cơ cấu chấp hành in được bằng mực bạc để thiết kế chế tạo robot thân mềm.

Nói một cách đơn giản thì bản in bằng mực dẫn điện sẽ thay đổi điện trở khi bị uốn cong. Lợi dụng đặc điểm này, nhóm tác giả đã thiết kế cảm biến uốn cong bằng việc in một điện trở bằng mực bạc. Nhóm tác giả cũng nhận ra rằng tám nền để in mực bạc dẫn điện là một cấu trúc nhiều lớp trong đó mỗi lớp lại có một hằng số giãn nở vì nhiệt khác nhau. Lợi dụng điều này, nhóm tác giả đã in một tấm phát nhiệt bằng mực bạc. Khi mắc tấm phát nhiệt này vào nguồn điện, bản in sẽ nóng lên và tự uốn cong do sự khác nhau về hằng số giãn nở vì nhiệt của các lớp giấy in. Khi tấm nền tự uốn cong thì điện trở của chính tấm phát nhiệt thay đổi. Bằng cách đó, nhóm tác giả đã thành công trong việc in cảm biến và cơ cấu chấp hành uốn cong chỉ bằng một mẫu in mực bạc dẫn điện.



Hình 3: Robot dạng côn trùng được in bằng mực in dẫn điện

Phát hiện này được nhóm tác giả dùng vào thiết kế và chế tạo robot sâu đo bằng giấy có thể in được (xem thêm ở **Hình 3**). Robot dạng côn trùng này có thể được phát triển thêm để trở thành các điểm thăm dò môi trường. Ngoài ra do cơ thể của robot sâu đo này là bằng giấy nên sau khi hoàn thành nhiệm vụ, robot có thể hoàn toàn tự phân hủy trong môi trường. Điều này giúp bảo vệ môi trường và giảm thiểu yêu cầu bảo trì robot. Ngoài ra, do robot có thể in rất nhanh chóng dễ dàng bằng công nghệ in mạch điện nêu ở phần 2.1, chúng ta

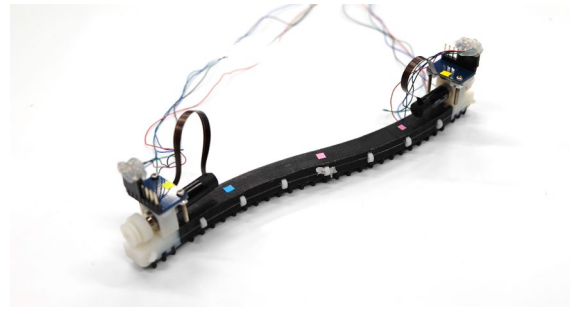
hoàn toàn có thể nhanh chóng chế tạo hàng loạt các robot sáu đo bằng giấy này. Xem thêm video về nghiên cứu này tại đường dẫn sau:

<https://www.youtube.com/watch?v=t72KasCojqE>

2.4 Chế tạo robot thân mềm hình rắn với máy in 3D

Một trong những bước phát triển quan trọng của ngành gia công kỹ thuật số chính là sự ra đời của các máy in phun 3D đa vật liệu. Ngoài các vật liệu nhựa truyền thống như PLA hoặc ABS, các dòng máy in phun 3D đa vật liệu có thể in các vật liệu mềm và đàn hồi. Các vật liệu này có thể được in kết hợp với các vật liệu cứng để tăng tính uyển chuyển trong thiết kế robot thân mềm.

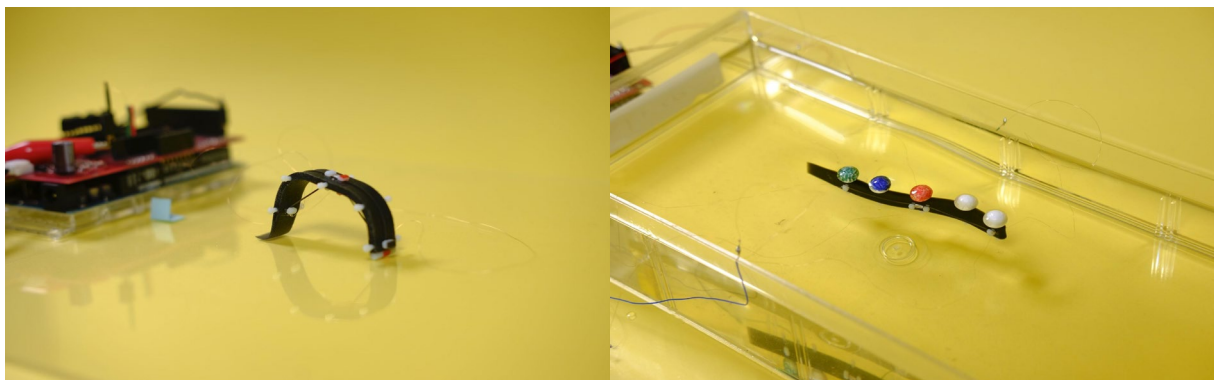
Trong ngành robot, robot hình rắn (snake-like robot) được nghiên cứu từ khá lâu. Sự uyển chuyển và khả năng thích ứng cao với môi trường hoang dã của các loài rắn đã trở thành nguồn cảm hứng cho các nhà nghiên cứu robot để bắt chước và chế tạo các robot hình rắn nhằm ứng dụng trong các nhiệm vụ thăm dò, quan trắc, và cứu hộ. Tuy nhiên, hầu hết các loại robot hình rắn này đều là robot thân cứng, và được lắp thêm bánh xe (passive wheels) để di chuyển. Trong tự nhiên, rắn thường lợi dụng tính chất ma sát đẳng hướng của các vảy trên thân để di chuyển. Các vảy trên da rắn được sắp xếp sao cho hệ số ma sát trượt về phía trước nhỏ hơn rất nhiều so với hệ số ma sát trượt về phía sau và hai bên. Dựa trên đặc điểm này, nhóm tác giả của nghiên cứu [7] đã đề xuất dùng máy in phun 3D đa vật liệu để in mẫu da cho robot thân mềm hình rắn. Mẫu da robot này có đặc điểm ma sát giống như da rắn (xem Hình 4). Bằng cách kết hợp vật liệu có hệ số ma sát trượt cao và vật liệu có hệ số ma sát trượt thấp, nhóm tác giả thiết kế và thử nghiệm tốc độ di chuyển của robot thân mềm hình rắn với các mẫu da khác nhau nhằm tìm ra mẫu da cho tốc độ di chuyển nhanh nhất. Nghiên cứu này mang lại một góc nhìn rõ hơn về việc áp dụng cơ chế di chuyển của rắn vào thiết kế, chế tạo, và tối ưu hoá phương thức di chuyển của robot thân mềm hình rắn. Xem thêm video về nghiên cứu này tại: <https://www.youtube.com/watch?v=qyOHkjAOTao>



Hình 4: Robot thân mềm hình rắn với lớp bụng được mô phỏng tính đẳng hướng của da rắn

2.5 Chế tạo và điều khiển robot dạng lươn biển/tuyến trùng

Ngoài khả năng di chuyển trên cạn, một số loài động vật hình dây có thể bơi dưới nước như lươn biển hoặc tuyến trùng. Chế tạo robot thân mềm với khả năng di chuyển trên cạn lẫn di chuyển dưới nước sẽ mở rộng phạm vi ứng dụng của robot thân mềm. Nghiên cứu tại [8] đề xuất một thiết kế cho robot thân mềm có thể bơi sử dụng hợp kim nhớ hình dạng để điều khiển một robot thân mềm mảnh dây cỡ nhỏ. Bằng việc thiết kế thân robot nhỏ (dài 50 mm) và nhẹ (nặng dưới 20 g), nhóm tác giả hướng tới sử dụng robot trong các nhiệm vụ thăm dò khám phá những vùng không gian chật hẹp mà các robot thân cứng khác gặp khó khăn trong việc tiếp cận (xem Hình 5). Một trong những thử thách khi thiết kế robot kích cỡ nhỏ biết bơi đó là việc bản thân robot phải cử động với tần số cao thì mới có thể di chuyển trong môi trường chất lỏng. Nhóm tác giả sử dụng hiện tượng Snap-through Buckling của một tấm vật liệu đàn hồi để tạo giúp robot cử động với tần số cao. Ngoài ra, lấy cảm hứng từ cách thức sắp xếp các bó cơ của các loài cá, nhóm tác giả đề xuất cách sắp xếp chông lấp các cơ cấu chấp hành dùng hợp kim nhớ hình dạng để hình thành sóng cơ học chạy từ đầu tới đuôi của robot. Chính sóng chạy dọc thân của robot là nhân tố đẩy robot bơi về phía trước. Nghiên cứu cũng



Hình 5: Robot thân mềm lưỡng cư có thể bò trên cạn và bơi trong lòng chất lỏng.

đánh giá hành vi bơi của robot khi bơi ở các môi trường chất lỏng với độ nhớt khác nhau.

Ngoài tập trung thiết kế robot thân mềm biết bơi, lợi dụng cấu trúc cơ thể mình đây giống như sâu đo, nghiên cứu này cũng đánh giá khả năng di chuyển trên cạn của robot này. Bằng cách thay đổi thông số điều khiển, robot có thể bò trên cạn như sâu đo và bơi trong lòng chất lỏng giống như lươn biển. Xem video tại: <https://www.youtube.com/watch?v=Lx5Fr-2xudw>

Dựa trên những kết quả nghiên cứu này, nhóm tác giả cũng hướng tới việc phát triển robot thân mềm có thể di chuyển bằng cách nhảy, bò, và bơi trong các môi trường khác nhau.

3. Một số lab nghiên cứu tiêu biểu của nhật bản trong lĩnh vực công nghệ gia công kỹ thuật số và robot thân mềm

(1) Kawahara Lab - ĐH Tokyo (The University of Tokyo)

Website: <http://www.akeg.t.u-tokyo.ac.jp/>

Giáo sư chủ nhiệm: Yoshihiro Kawahara

Mảng nghiên cứu chính: Truyền điện không dây, Tương tác người - máy, Mực in dẫn điện, Gia công kỹ thuật số, Robot thân mềm

(2) Umedachi Lab - ĐH Shinshu (Shinshu University)

Website: <http://fiber.shinshu-u.ac.jp/umedachi-lab/>

Giáo sư chủ nhiệm: Takuya Umedachi

Mảng nghiên cứu chính: Robot thân mềm, Điều khiển phân tán

(3) ISI Laboratory - ĐH Tokyo (The University of Tokyo)

Website: <http://www.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp/>

Giáo sư chủ nhiệm: Yasuo Kuniyoshi, Ryuma Niyyama

Mảng nghiên cứu chính: Robot hình người, Lý thuyết Điều khiển, Robot thân mềm

(4) Aero/Aqua Biomimetics Lab - ĐH Công nghệ Tokyo (Tokyo Institute of Technology)

Website:

http://www.tanakah.mech.e.titech.ac.jp/index_e.html

Giáo sư chủ nhiệm: Hiroto Tanaka

Mảng nghiên cứu chính: Robot mô phỏng sinh học, Robot bay và bơi

Tài liệu tham khảo

[1] Suzumori, Iikura, and Tanaka, "Development of flexible microactuator and its applications to robotic mechanisms," in *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Jan. 1991, vol. 0, p.

1622,1623,1624,1625,1626,1627, doi: 10.1109/ROBOT.1991.131850.

- [2] R. F. Shepherd *et al.*, "Multigait soft robot," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 108, no. 51, pp. 20400–20403, Dec. 2011, doi: 10.1073/pnas.1116564108.
- [3] Y. Kawahara, S. Hodges, B. S. Cook, C. Zhang, and G. D. Abowd, "Instant inkjet circuits: lab-based inkjet printing to support rapid prototyping of UbiComp devices," in *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp '13)*, Sep. 2013, pp. 363–372, doi: 10.1145/2493432.2493486.
- [4] T. Ta, M. Fukumoto, K. Narumi, S. Shino, Y. Kawahara, and T. Asami, "Interconnection and double layer for flexible electronic circuit with instant inkjet circuits," in *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp '15)*, Sep. 2015, pp. 181–190, doi: 10.1145/2750858.2804276.
- [5] H. Oh, T. D. Ta, R. Suzuki, M. D. Gross, Y. Kawahara, and L. Yao, "PEP (3D Printed Electronic Papercrafts): An Integrated Approach for 3D Sculpting Paper-Based Electronic Devices," in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Apr. 2018, p. 441, doi: 10.1145/3173574.3174015.
- [6] T. D. Ta, T. Umedachi, and Y. Kawahara, "Inkjet Printable Actuators and Sensors for Soft-bodied Crawling Robots," in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2019, pp. 3658–3664, doi: 10.1109/ICRA.2019.8793827.
- [7] T. D. Ta, T. Umedachi, and Y. Kawahara, "Design of Frictional 2D-Anisotropy Surface for Wiggle Locomotion of Printable Soft-bodied Robots," in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE ICRA'18)*, Brisbane, Australia, May 2018, pp. 6779–6785, doi: 10.1109/ICRA.2018.8463177.
- [8] T. D. Ta, T. Umedachi, and Y. Kawahara, "A Multigait Stringy Robot with Bi-stable Soft-bodied Structures in Multiple Viscous Environments," in *2020 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IEEE IROS'20)*, Oct. 2020, pp. 8765–8772.