

NÂNG CAO ĐỘ CHÍNH XÁC CỦA HỆ THỐNG ĐO ĐỘ PHẪNG KHÔNG TIẾP XÚC BẰNG CÔNG NGHỆ ĐỆM KHÍ

ENHANCING THE ACCURACY OF NON-CONTACT SURFACE FLATNESS MEASUREMENT SYSTEMS USING AIR BEARING TECHNOLOGY

Trương Minh Đức¹, Hoàng Đức Cường², Vũ Toàn Thắng²

¹Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

²Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

Email: thang.vutoan@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bảo đảm độ phẳng bề mặt là yêu cầu then chốt trong chế tạo cơ khí chính xác, đặc biệt tại các vị trí lắp ghép, truyền lực hoặc yêu cầu độ kín cao. Nghiên cứu này đề xuất một hệ thống đo độ phẳng không tiếp xúc tích hợp đầu đo laser vào thiết bị đo sử dụng hệ thống đệm khí. Khác với các cơ cấu truyền động cơ học truyền thống, việc ứng dụng đệm khí giúp giảm thiểu ma sát, hạn chế dao động vi mô và tăng độ ổn định khi di chuyển đầu đo. Dữ liệu đo được thu thập qua hệ thống điều khiển sử dụng Arduino và xử lý bằng phần mềm lập trình tùy biến trên Matlab. Thử nghiệm thực tế trên các chi tiết gia công cho thấy hệ thống đạt độ lặp lại cao và sai số đo nhỏ. Kết quả nghiên cứu thể hiện tính mới trong việc tận dụng kết hợp công nghệ đệm khí với đo không tiếp xúc, đồng thời khẳng định tiềm năng ứng dụng trong thiết kế các hệ thống đo thông minh, linh hoạt, đáp ứng yêu cầu sản xuất hiện đại.

Từ khóa: Đo độ phẳng bề mặt; Hệ thống đệm khí; Cảm biến laser; Kiểm tra chính xác; Đo lường không tiếp xúc.

ABSTRACT

Ensuring surface flatness is a critical requirement in precision mechanical manufacturing, especially at assembly interfaces, load transmission areas, or locations demanding high sealing performance. This study proposes a non-contact flatness measurement system by integrating a laser displacement sensor into a measuring device equipped with an air bearing system. Unlike conventional mechanical drive structures, the application of air bearings significantly reduces friction, minimizes micro-vibrations, and enhances stability during probe movement. Measurement data is acquired through a control system based on Arduino and processed using a customized algorithm developed in Matlab. Experimental validation on machined parts demonstrates high repeatability and low measurement error. The research highlights a novel approach that combines air bearing technology with non-contact measurement, and confirms its potential for developing intelligent, flexible metrology systems that meet the demands of modern manufacturing environments.

Keywords: Surface flatness measurement; Air bearing system; Laser sensor; Precision inspection; Non-contact metrology.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh sản xuất cơ khí hiện đại, yêu cầu về độ chính xác hình học ngày càng trở nên nghiêm ngặt, đặc biệt với các chi tiết có bề mặt lắp ghép, truyền động hoặc cần độ kín khít cao. Trong số các thông số kiểm tra hình học, độ phẳng bề mặt là một chỉ tiêu quan trọng có ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng lắp ráp và vận hành của sản phẩm. Tuy nhiên, hầu hết các phương pháp đo truyền thống vẫn chủ yếu dựa vào tiếp xúc cơ học, vốn tồn tại nhiều hạn chế như ma sát, độ mòn đầu đo, và khó đảm bảo độ chính xác khi đo các bề mặt mỏng, mềm hoặc có hình dạng phức tạp.

Trước thực tế đó, các hướng tiếp cận đo không tiếp xúc sử dụng cảm biến laser đang được quan tâm phát triển để nâng cao độ chính xác và mở rộng khả năng ứng dụng trong các dây chuyền kiểm tra tự động. Đồng thời, để đảm bảo sự ổn định trong quá trình di chuyển đầu đo, việc ứng dụng đệm khí như một giải pháp thay thế cho hệ dẫn động cơ khí truyền thống đang được xem là hướng tiếp cận hiệu quả. Các nghiên cứu gần đây như [1], [2] đã chỉ ra rằng ổ đệm khí có khả năng giảm thiểu dao động vi mô, triệt tiêu ma sát tiếp xúc, từ đó góp phần nâng cao độ chính xác và độ tin cậy trong các hệ thống đo siêu chính xác.

Tuy nhiên, đa phần các công trình hiện tại mới tập trung vào tối ưu hóa đệm khí trong môi trường chân không [1] hoặc trong các thiết bị đo tích hợp có giá thành cao và phức tạp [3], [4], [5]. Việc tận dụng các thiết bị đo hiện có như máy đo tọa độ ba chiều (CMM) thế hệ cũ để tích hợp hệ thống cảm biến laser và điều khiển mới, kết hợp với cơ cấu dẫn động đệm khí, vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống và có tính thực nghiệm cao. Đây là khoảng trống mà bài báo này hướng đến.

Nghiên cứu đề xuất một phương pháp thiết kế và xây dựng hệ thống đo độ phẳng không tiếp xúc bằng cách tích hợp cảm biến laser vào máy CMM sử dụng đệm khí, với mục tiêu tận dụng thiết bị sẵn có và cải thiện hiệu năng đo. Hệ thống được điều khiển bằng vi điều khiển Arduino và phần mềm xử lý dữ liệu lập trình trên Matlab. Bài báo không chỉ trình bày quy trình thiết kế, hiệu chỉnh, mà còn thực hiện thử nghiệm thực tế nhằm đánh giá độ lặp lại, sai số và tính ổn định của hệ thống, từ đó khẳng định tiềm năng ứng dụng thực tiễn trong các cơ sở sản xuất vừa và nhỏ.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Đo độ phẳng bằng phương pháp không tiếp xúc

Trong đo lường kỹ thuật, độ phẳng là một trong những chỉ tiêu hình học quan trọng, ảnh hưởng đến khả năng lắp ghép, phân bố ứng suất và độ kín khít trong tổ hợp cơ khí. Các phương pháp đo tiếp xúc truyền thống tuy có độ tin cậy cao nhưng thường bị giới hạn bởi ma sát đầu đo, áp lực tiếp xúc, và khả năng đo trên bề mặt có độ nhám thấp hoặc mềm.

Sự phát triển của công nghệ cảm biến quang học, đặc biệt là cảm biến laser dịch chuyển, đã mở ra hướng đo không tiếp xúc với độ chính xác cao, đáp ứng yêu cầu trong đo bề mặt phức tạp, mỏng hoặc dễ biến dạng. Các hệ thống này thường dựa trên nguyên lý tam giác laser hoặc giao thoa quang học, cho phép thu nhận dữ liệu hình học bề mặt với độ phân giải micromet và tốc độ cao [6]. Theo Wang et al. (2020), việc tích hợp cảm biến laser kép có thể nâng cao độ chính xác trong giám sát độ phẳng trực tuyến tấm kim loại, đồng thời cải thiện khả năng khử nhiễu nhờ kết hợp thuật toán xử lý tín hiệu [7].



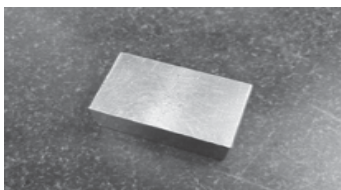
2.2. Ứng dụng đệm khí trong hệ thống đo

Đệm khí là một giải pháp công nghệ tiên tiến thay thế cho các ổ dẫn động cơ khí truyền thống trong môi trường yêu cầu độ chính xác cao. Với đặc điểm không tiếp xúc, ổ đệm khí tạo ra một lớp màng khí mỏng giữa bề mặt chuyển động và mặt dẫn hướng, giúp triệt tiêu hoàn toàn ma sát và dao động cơ học trong quá trình chuyển động tuyến tính hoặc quay.

Fan et al. (2024) đã chứng minh rằng ổ đệm khí vi lỗ có thể duy trì độ ổn định cao ngay cả trong môi trường chân không, qua đó làm rõ tiềm năng của đệm khí trong hệ thống đo lường siêu chính xác [1]. Trong khi đó, Zhang et al. (2023) đã ứng dụng lưới khí vi lưu để cải thiện độ phẳng khi xử lý vật liệu kính ITO, mở rộng khả năng kiểm soát biến dạng bề mặt nhờ điều áp cục bộ [2]. Đặc biệt, đệm khí được sử dụng phổ biến trong các hệ thống định vị tuyến tính phục vụ cho máy đo tọa độ (CMM), hệ thống wafer, và thiết bị in vi mô [8].

2.3. Tích hợp cảm biến laser và cơ cấu đệm khí trên CMM

Hệ thống máy đo tọa độ ba chiều (CMM) là công cụ đo kiểm hình học quan trọng trong các dây chuyền sản xuất tự động. Tuy nhiên, nhiều hệ thống CMM thế hệ cũ sử dụng cơ cấu dẫn động bằng ổ bi cơ học, tiềm ẩn nhiều sai số do ma sát và rung động. Việc tích hợp đồng thời cảm biến đo không tiếp xúc và đệm khí là hướng cải tiến mới nhằm tái sử dụng thiết bị cũ, giảm chi phí đầu tư và nâng cao hiệu năng đo.



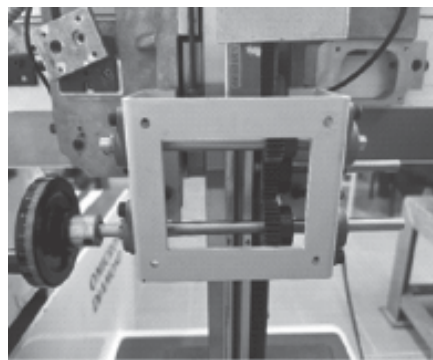
Hình 1. Chi tiết phẳng cần đo

Theo Jiang et al. (2020), xu hướng tích hợp hệ đo vào chính máy gia công đã và đang hình thành một thể hệ thiết bị “đo tại chỗ” (on-machine measurement), trong đó các yếu tố như dẫn động không ma sát và thu nhận tín hiệu quang học đóng vai trò cốt lõi [3]. Việc này không chỉ giúp giảm thời gian thao tác, mà còn cải thiện tính ổn định và tái lập của kết quả đo. Kim & Choi (2023) cũng chỉ ra rằng các hệ thống định vị tuyến tính sử dụng đệm khí có thể đạt độ lặp lại dưới 0.1 μm trong môi trường phòng sạch, mở ra khả năng ứng dụng trong các dây chuyền đo thông minh hiện đại [9].

3. THIẾT KẾ VÀ PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG

Hệ thống đo độ phẳng được xây dựng trên nền tảng máy CMM Omicron DEA có sẵn, kết hợp nâng cấp cả phần cơ khí và phần thu nhận – xử lý tín hiệu để đáp ứng yêu cầu đo không tiếp xúc độ chính xác cao.

3.1. Thiết kế cơ khí

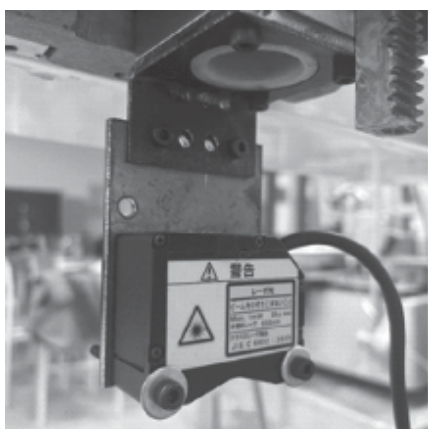


Hình 2. Hệ thống dẫn động trục Z

Do yêu cầu điều chỉnh chính xác trục Z ở mức micromet và đảm bảo cố định trong suốt quá trình đo, nhóm tác giả đã thiết kế thêm hệ thống dẫn động trục Z sử dụng thanh răng – bánh răng. Điều này giúp vận hành trơn tru mà không ảnh hưởng đến kết cấu nguyên bản của máy đo.

3.2. Tích hợp đầu đo laser

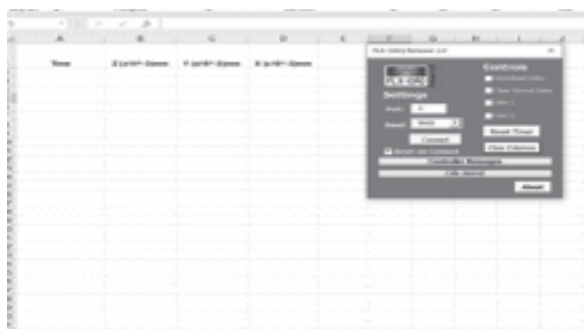
Đầu đo laser ZX-L-N được gá trực tiếp lên trục Z thông qua hệ thống gá cơ khí tùy biến (Hình 3), cho phép điều chỉnh hướng và khoảng cách đo phù hợp với từng bề mặt chi tiết. Dài đo của cảm biến là 28-32 mm với độ phân giải dưới 5 μm .



Hình 3. Gá đầu đo laser lên trục Z

3.3. Thu nhận và xử lý tín hiệu

Tín hiệu đo được thu thông qua bộ điều khiển Arduino Mega 2560 và truyền về phần mềm xử lý Matlab. Giao diện được thiết kế để hiển thị đám mây điểm, tính độ phẳng theo thuật toán bình phương tối thiểu và cho phép lưu trữ dữ liệu dưới dạng Excel phục vụ phân tích.



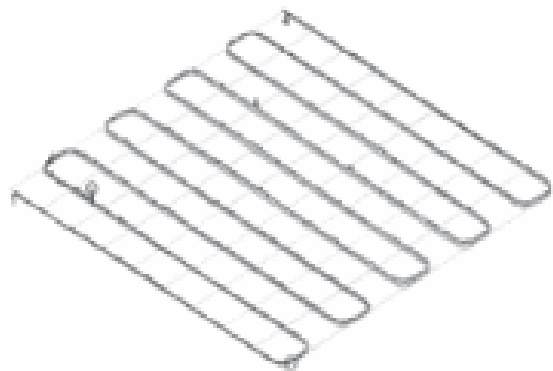
Hình 4. Giao diện PLX-DAQ

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Quy trình đo thực nghiệm

Để đánh giá hiệu quả của hệ thống đo không tiếp xúc sử dụng đệm khí, nhóm nghiên cứu đã xây dựng quy trình đo thực nghiệm gồm 9 bước chính, từ hiệu chỉnh vị trí cảm biến laser đến xử lý dữ liệu trên phần mềm Matlab.

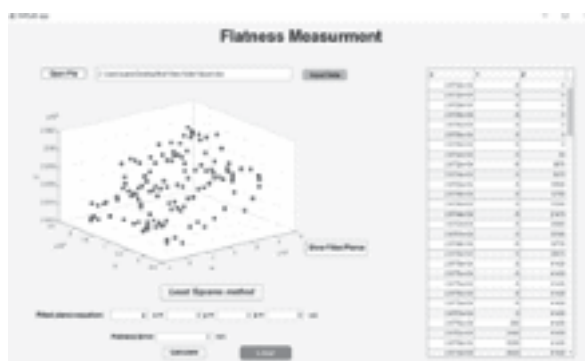
Trước tiên, cảm biến laser được gá đặt chính xác lên trục Z của máy đo CMM. Sau đó, phần mềm PLX-DAQ được kết nối với Arduino để bắt đầu thu nhận dữ liệu vị trí và độ cao tại các điểm đo. Đầu đo di chuyển trên mặt chi tiết theo mô hình zigzag nhằm bao phủ đều toàn bộ bề mặt, số lượng điểm đo khoảng từ 200-300 điểm mỗi lần đo, bảo đảm mật độ điểm và tính đại diện cho toàn bộ mặt phẳng.



Hình 5. Sơ đồ đo quét chi tiết

Sau khi hoàn tất việc thu dữ liệu trên Excel, file sẽ được nhập vào phần mềm Matlab thông qua giao diện Flatness Measurement (Hình 6). Phần mềm sẽ tính toán mặt phẳng chuẩn bằng thuật toán bình phương tối thiểu và hiển thị sai lệch phẳng trên đồ thị 3D. Độ phẳng được tính là chênh lệch giữa điểm cao nhất và thấp nhất so với mặt phẳng chuẩn.

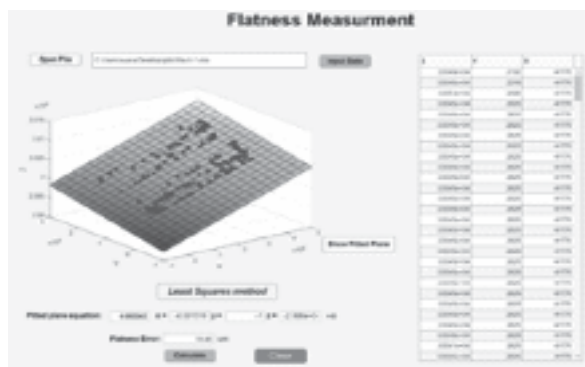




Hình 6. Nhập dữ liệu vào Flatness Measurement

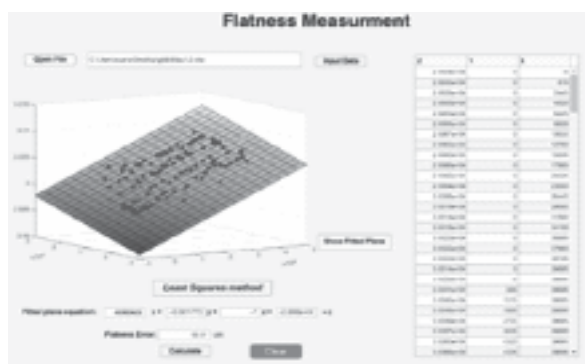
Với mỗi mẫu, ta sẽ đo 5 lần bề mặt để lấy kết quả một cách chính xác nhất.

Tốc độ lấy mẫu: 200ms/lần; Tổng số điểm đo: 306 điểm; Độ lệch phẳng: 59.49 μ m.



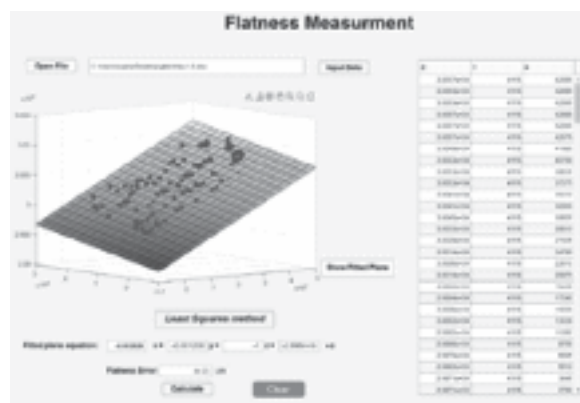
Hình 7. Kết quả đo lần 1

Tốc độ lấy mẫu: 500ms/lần; Tổng số điểm đo: 205 điểm; Độ lệch phẳng: 56.01 μ m.



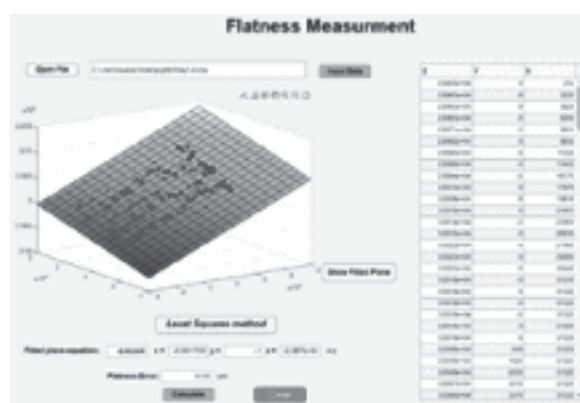
Hình 8. Kết quả đo lần 2

Tốc độ lấy mẫu: 500ms/lần; Tổng số điểm đo: 212 điểm; Độ lệch phẳng: 44.23 μ m.



Hình 9. Kết quả đo lần 3

Tốc độ lấy mẫu: 500ms/lần; Tổng số điểm đo: 198 điểm; Độ lệch phẳng: 55.95 μ m.



Hình 10. Kết quả đo lần 5

Tốc độ lấy mẫu: 500ms/lần; Tổng số điểm đo: 225 điểm; Độ lệch phẳng: 50.12 μ m.

4.2. KẾT LUẬN

Mẫu đo có kích thước 48 × 27 × 18 mm được tiến hành đo độ phẳng 5 lần liên tiếp để kiểm tra độ ổn định và độ lặp lại của hệ thống. Kết quả cho thấy giá trị độ phẳng thu được dao động trong khoảng từ 44.23 μ m đến 59.49 μ m, với độ lệch trung bình khoảng 53.16 μ m. Sự sai lệch giữa các lần đo không vượt quá 15 μ m,

chứng tỏ độ lặp lại tốt và hệ thống có khả năng vận hành ổn định.

Dữ liệu đo cũng cho thấy mô hình mặt phẳng được tái lập khá nhất quán qua các lần thử, thể hiện qua hình ảnh hiển thị từ phần mềm Flatness Measurement. Sai số ngẫu nhiên chủ yếu đến từ yếu tố thao tác thủ công khi dịch chuyển đầu đo và dao động môi trường, nhưng không gây ảnh hưởng lớn đến xu hướng kết quả. Kết luận cho thấy hệ thống đo đề xuất hoàn toàn có thể ứng dụng trong đánh giá độ phẳng cơ bản cho các chi tiết kích thước nhỏ đến trung bình trong điều kiện sản xuất cơ khí phổ thông.

Kết quả đo thực nghiệm cho thấy hệ thống tích hợp cảm biến laser và đệm khí hoạt động ổn định, với độ lệch phẳng trung bình khoảng 53.16 μm và độ lặp lại tốt giữa các lần đo. Sự nhất quán của dữ liệu qua 5 lần thử nghiệm khẳng định tính tin cậy của quá trình thu nhận và xử lý tín hiệu.

Việc ứng dụng đệm khí đã giúp giảm ma sát và hạn chế dao động vi mô, cải thiện độ ổn định trong quá trình dịch chuyển đầu đo. Giao diện phần mềm xử lý trên Matlab cho phép hiển thị trực quan và tính toán độ phẳng nhanh chóng, thuận tiện cho đánh giá kỹ thuật.

Tuy vẫn còn ảnh hưởng nhất định từ thao tác thủ công, hệ thống cho thấy tiềm năng ứng dụng cao trong kiểm tra độ phẳng chi tiết cơ khí kích thước nhỏ – trung bình. Đây là giải pháp phù hợp cho các cơ sở sản xuất có nhu cầu nâng cấp thiết bị đo truyền thống với chi phí hợp lý. ❖

Ngày nhận bài: 25/4/2025

Ngày phản biện: 14/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Guozhen Fan, Youhua Li and Yuehua Li, “Research on Design and Optimization of Micro-Hole Aerostatic Bearing in Vacuum Environment”. Lubricants, 12(6), 224. <https://doi.org/10.3390/lubricants12060224>.
- [2]. Zhang, Y., et al. (2023), “Improving Etched Flatness by Micro Airflow Array Pressurization in ITO Glass Laser Machining”. Micromachines, 14(3), 676. <https://doi.org/10.3390/mi14030676>.
- [3]. Jiang, X., Tong, Z., & Li, D. (2020), “On-Machine Measurement System in Ultra-Precision Manufacturing”. In Precision Machines, Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0381-4_16.
- [4]. Wang, Y., et al. (2020), “Optical Dual Laser Sensor Denoising for Flatness Estimation”. Sensors, 20(18), 5441. <https://doi.org/10.3390/s20185441>.
- [5]. Zhang, X., et al. (2020), “Focus Variation Measurement for Ultra-Precision Machining”. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 107, 3575-3586. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05767-z>.
- [6]. Zhang, X., et al. (2020), “Focus Variation Measurement for Ultra-Precision Machining”. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 107, 3575-3586. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05767-z>.
- [7]. Wang, Y., et al. (2020), “Optical Dual Laser Sensor Denoising for Online Metal Sheet Flatness Estimation”. Sensors, 20(18), 5441. <https://doi.org/10.3390/s20185441>.
- [8]. Li, B. (2020), “Assembly Techniques of Precision Machines”. In Precision Machines, Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0381-4_29.
- [9]. Kim, J., & Choi, Y. (2023), “Development of High-Precision Air Bearing Linear Stages for Nanometer-Scale Positioning Systems”. Applied Sciences, 13(7), 4012. <https://doi.org/10.3390/app13074012>.