

ROBOTS PER A APLICACIONS A LA MICRO- I NANOESCALA

J. Brufau, J. Toset, J. Otero, A. Saiz, R. Casanova, A. Arbat, R. Ruiz, J. López, P. Miribel, A. Diéguez, M. Puig-Vidal, J. Samitier

Sistemes d'Instrumentació i Comunicacions. Departament d'Electrònica. Universitat de Barcelona

El progrés de la tecnologia de microsistemes (MST) ha permès desenvolupar sistemes sencers miniatutzats que inclouen elements sensors (per a captar informació de l'exterior), sistemes electrònics per al processament de la informació i presa de decisions (xips electrònics) i sistemes d'actuació tant per al desplaçament com per a la manipulació de l'exterior. Aquesta combinació fa possible de desenvolupar el que denominem microrobòtica. Aquests sistemes poden aplicar-se en àmbits tan variats com la mecànica de precisió, la biologia, la medicina i darrerament la nanotecnologia.^{1,2} Tanmateix, el disseny i construcció d'aquests tipus de sistemes representa un gran repte tecnològic, per tal de trobar solucions a problemes relacionats amb l'energia necessària per a les funcions dels robots (emmagatzemament d'energia, sistemes de reabastament), mobilitat del robot (micromotors, sistemes piezoelèctrics, sistemes termomecànics), sistemes de manipulació (integració de sistemes de pinces per a agafar), sistemes d'observació (tant a escala local com de tot l'espai), capacitat de cooperació entre robots per a incrementar les capacitats dels robots individuals (robots cooperatius) i en resum la integració de tecnologies diverses amb un mínim d'espai i de consum energètic.

En aquest context, robots autònoms de la mida d'un centímetre cúbic serien en aquests moments el límit per a les tecnologies actuals. A continuació presentarem algunes d'aquestes realitzacions, implementades en el context de diversos projectes finançats per la Comissió Europea com el MINIMAN³ i el MICRON,⁴ així com no-

ves aproximacions en els àmbits de robots cooperatius I-SWARM⁵ o aplicacions en medicina com a càpsules gastrointestinals ARES o VECTOR.

La figura 1 mostra l'aproximació del projecte europeu MICRON.⁶ Petits grups de robots cooperant per a desenvolupar tasques en el micromón. L'objectiu és desenvolupar agrupacions de robots autònoms (de tres a cinc) de mides al voltant d'1 cm³ i que puguin col·laborar. Per tal que els robots tinguin energia suficient per a desenvolupar les seves tasques, aquests incorporen petites bateries i un sistema de transmissió d'energia sense fils per mitjà d'un sistema d'inducció electromagnètica. Els robots porten a més a més una sèrie d'accessoris per a la manipulació a escala micromètrica (microxerines o micropinces) o nanomètrica (palanques per manipulació mitjançant forces atòmiques). Per al correcte funcionament del sistema, s'inclou en l'espai on han de desenvolupar la seva tasca els robots un sistema de localització i de comunicació entre ells.

Disseny dels microrobots

Els principals mòduls dels robots dissenyats són: un mòdul de locomoció que permet un moviment de tres graus de llibertat (x, y, θ_z); un mòdul de manipulació basat en un braç i una eina específica; un mòdul electrònic que incorpora els circuits per a fer la interfície amb els sensors i actuadors, el sistema de comunicació per mitjà d'infrarojos; un sistema d'emmagatzemar energia i un sistema de localització basat en franges de Moiré (figura 2).

1. T. FUKUNDA, F. ARAI, L. DONG i M. NAKAJIMA, «Nanolaboratory – A Prototype Nanomanufacturing System», a *5th W. C. on Intell. Control and Automation*, Xina, 2004, p. 15-19.

2. S. MARTEL, M. SHERWOOD, C. HELM, W. GARCIA DE QUEVEDO, T. FOFONOFF, R. DYER, J. BEVILACQUA, J. KAUFMAN, O. ROUSHDY i I. HUNTER, «Three-legged wireless miniature robots for mass-scale operations at the sub-atomic scale», a *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, 2001.

3. J. LÓPEZ, P. MIRIBEL, E. MONTANÉ, M. PUIG, J. SAMITIER, U. SIMU i S. JOHANSSON, «Miniature robot based on smart piezoactuator units: MINIMAN», *International Technical Group Newsletter* (Technical Publications SPIE's) (2003).

4. R. CASANOVA, A. SAIZ, J. LACORT, A. ARBAT, A. DIÉGUEZ, P. MIRIBEL, M. PUIG-VIDAL i J. SAMITIER, «Towards Co-operative Autonomous

and Intelligent 1 cm³ Robots for Micro and NanoManipulation Applications: MICRON», a *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2005*, Edmonton (Canadà), 2005, p. 760-765, ISBN: 0-7803-8912-3.

5. J. BRUFAU-PENELLA, J. SÁNCHEZ i M. PUIG-VIDAL, «Piezoelectric Polymer Model Validation Applied to mm size Microrobot I-Swarm (Intelligent Swarm)», a *SPIE Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, 2006.

6. J. BRUFAU-PENELLA, M. PUIG-VIDAL, J. LÓPEZ-SÁNCHEZ, J. SAMITIER, W. DRIESEN, J.-M. BREGUET, J. GAO, T. VELTEN, J. SEYFRIED, R. ESTAÑA i H. WOERN, «MICRON: small autonomous robot for cell manipulation applications», a *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'05*, Barcelona, 2005.

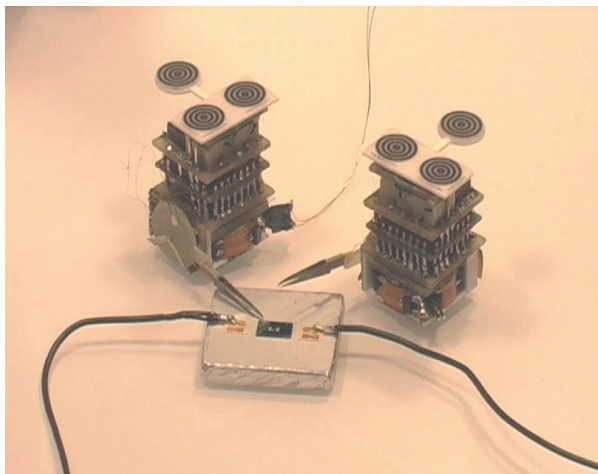


FIGURA 1. Robots MICRON cooperant per a tasques de microacoblament.

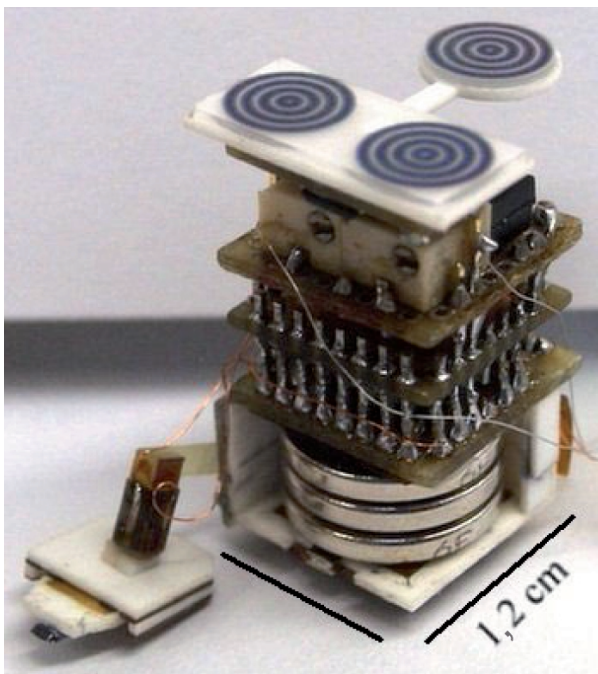


FIGURA 2. Estructura del robot MICRON.

L'autonomia del robot s'ha treballat de forma experimental fent que ells mateixos es desplaressin sobre una superfície en la qual per sota s'ha integrat un sistema de bobines. Mitjançant aquest sistema s'ha aconseguit una transmissió de potència de 500 mW.

El microrobot presenta dues parts mecàniques fonamentals: el sistema per al moviment i el braç de treball. Ambdós estan basats en material piezoelèctric, formant multicapes. Aquesta estructura permet un control del moviment de les estructures mecàniques amb resolució d'uns quants nanòmetres, quan apliquem senyals elèctrics de pocs volts.⁷ Treballar amb materials piezoelèctrics de baixa tensió és fonamental per a poder realitzar aquests tipus

7. N. SNIS, U. SIMU i S. JOHANSSON, «Piezoelectric drive platform for cm³-sized autonomous robot», a *ACTUATOR 2004, 9th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany*, juny 2004, p. 106-109.

d'estructures i que siguin compatibles amb les tensions obtingudes mitjançant xips electrònics.

El mòdul per a realitzar el desplaçament del robot i moviment del braç està governat per deu senyals AC de 20 V pic a pic, de freqüències fins a 2,5 kHz, aconseguint velocitats de desplaçament de fins a 0,4 mm/s i de 7 rpm per al braç del robot.

Per a la localització dels robots en l'espai de treball, s'ha fet servir un sistema basat en franges de Moiré. Aquest sistema consta de cinc cercles concèntrics que es superposen de forma virtual sobre una graella que representa tot l'espai.⁸ Amb aquest sistema s'aconsegueix un error de localització inferior a 1 micra.

El sistema de subjecció que porta el braç del robot permet que pugui intercanviar els braços segons la tasca assignada al robot. Un braç que incorpora un sistema de microxeringa o un capçal de microscòpia de forces atòmiques (AFM) en són dos exemples. El sistema de microxeringa inclou una agulla d'injecció amb un recipient per a emmagatzemar el líquid a injectar i un sistema d'actuació termopneumàtic per a impulsar el líquid.⁹

El braç que incorpora el sistema de microscòpia de forces atòmiques inclou un sistema de piezoelèctrics per a controlar una petita palanca amb una punta molt afilada (de desenes de nanòmetres) com les que incorporen els microscopis de forces atòmiques per a realitzar experiències d'indentació a escales submicromètriques.¹⁰

Muntatge del sistema

Un dels majors reptes del microrobot és el muntatge dels sistemes mecànics amb els sistemes electrònics per tal que tot el conjunt sigui operatiu. Cal remarcar com a reptes tecnològics les petites dimensions, la necessitat de minimitzar el consum de potència per tal de mantenir l'autonomia en potència i la necessitat de rebre i transmetre informació de forma autònoma, és a dir, implementar un sistema sense cablejat.

Específicament el sistema electrònic integrat en el robot requereix incorporar diferents mòduls amb funcionalitats específiques:

- Llegir/escriure les instruccions necessàries en el robot per tal de realitzar-ne el moviment.
- Controlar els deu diferents piezoactuadors inclosos que com a característiques elèctriques presenten capaci-

8. R. ESTAÑA i H. WOERN, «Moire-based positioning system for microrobots», a *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III, Proc. SPIE*, Munic, 2003.

9. F. TAGLIARENI i T. VELTEN, «Microfabrication of microfluidic SyringeChip with integrated Actuator», a *Mechatronics & Robotics*, vol. 1, Aachen, 2004, p. 173-177.

10. J. LACORT, R. CASANOVA, J. BRUFÀU, A. ARBAT, A. DIÉGUEZ, M. NIERLICH, O. STEINMETZ, M. PUIG-VIDAL i J. SAMITIER, «An integrated controller for a flexible and wireless Atomic Force Microscopy», a *Microtechnologies for the new millenium 2005*, Sevilla, 2005.

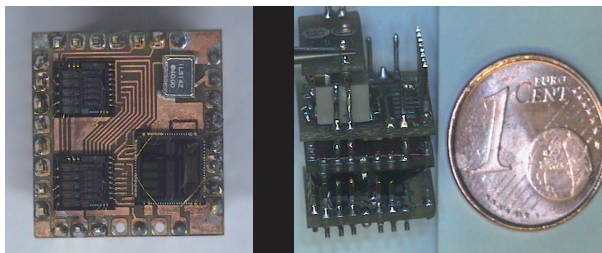


FIGURA 3. Sistema electrònic del microrobot MICRON.

tats entre 10 nF i 35 nF amb senyals AC de freqüència variable fins a 2,5 kHz.

— Incloure un sistema realimentat de control de força per a alguns dels sistemes de manipulació com és el cas de la microxeringa o el capçal d'AFM.

Per acomplir aquests requeriments, el sistema electrònic s'ha dividit en quatre mòduls: el sistema de generació de potència (PSG), el sistema per captació de forces (ISC), un sistema de control digital (MXS) i un sistema de control dels actuadors (PAA). Tots aquests sistemes es van dissenyar de forma específica i es van muntar en petits circuits impresos de dimensions 12 mm x 12 mm (figura 3).

Aplicacions dels microrobots en manipulació a la micro- i nanoescala

Una de les idees principals en projectes de microrobòtica consisteix a desenvolupar un equip de microrobots intel·ligents per tal de resoldre tasques que un sol robot no hauria pogut fer. Això s'ha demostrat experimentalment, per exemple, en tasques d'acoblament en tres dimensions mitjançant micropinces,¹¹ en tasques de manipulació de cèl·lules mitjançant braços equipats amb microxeringues¹² o en tasques de nanomanipulació mitjançant un braç equipat amb una punta de forces atòmiques.¹³

Aquesta darrera experiència ens porta al descobriment apassionant del món a l'escala nanomètrica. El capçal AFM implantat en el robot consta de dos elements: actuator piezoelèctric i sensor AFM (figura 4). L'actuator piezoelèctric té quatre entrades per tal de controlar la posició i el sensor té una sortida que ens dóna el valor de la força efectuada sobre la mostra a manipular.

11. A. EISENBERG, K. HOUSTON, F. CAPARELLI, B. AMAVASAI, M. BOISENIN i P. DARIO, «Marking techniques for vision recognition of microgrippers for micromanipulation», a *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2006)*, Orlando, Florida, 15-19 de maig, 2006.

12. F. TAGLIARENI, M. NIERLICH, O. STEINMETZ, T. VELTEN, J. BRUFAU, J. LÓPEZ-SÁNCHEZ, M. PUIG-VIDAL i J. SAMITIER, «Manipulating biological cells with a micro-robot cluster», a *Int. IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Edmonton, Alberta, Canadà, 2-6 d'agost, 2005, p. 426-431.

13. J. OTERO, A. SAIZ, J. BRUFAU, J. COLOMER, R. RUÍZ, J. LÓPEZ, P. MIRIBEL, M. PUIG-VIDAL i J. SAMITIER, «Reduced Dimensions Autonomous AFM System for working in Microbirobotics», a *IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, Pisa, 2006.

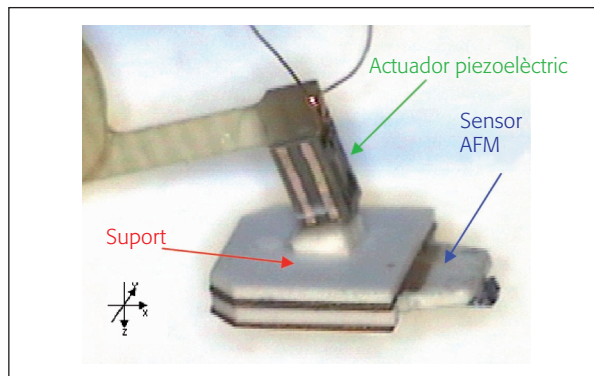


FIGURA 4. El capçal AFM.

Un capçal AFM clàssic en un microscopi de forces atòmiques conté un sistema làser de detecció de força. En el cas del microrobot no és possible integrar aquest sistema i per això utilitzem puntes comercials AFM on hi ha una resistència piezoelèctrica integrada que fa el paper de sensor de força. Amb aquest sistema reduïm dràsticament les dimensions i la potència consumida en comparació amb un capçal AFM clàssic.

Una experiència comuna per tal d'estudiar les propietats mecàniques de cèl·lules és la *nanoindentació*. Consisteix a aplicar una força amb una punta d'AFM sobre la cèl·lula i mesurar la penetració de la punta sobre la cèl·lula. Amb aquesta experiència es pot extreure la corba de força de la cèl·lula, representant el desplaçament en z en un eix i la força aplicada en l'altre. Analitzant aquesta corba és possible extreure el mòdul de Young de la cèl·lula.¹⁴

El muntatge experimental desenvolupat ha permès extreure les primeres corbes de força sobre diferents superfícies. Presentem en la figura 5 la corba desplaçament-força mesurada en el sensor AFM integrat durant la nanoindentació sobre una mostra de vidre. Tal com era d'esperar, tenim una relació lineal entre el desplaçament del capçal i la força produïda sobre la mostra.

Un pas endavant després d'aconseguir interactuar entre capçal AFM i mostra a l'escala nanomètrica és poder efectuar la manipulació d'aquestes mostres.

Manipulació de nanopartícules

Com que la ciència i la tecnologia tendeixen cada cop més a una constant reducció de les dimensions, ha sorgit la necessitat de poder arribar a manipular objectes cada cop més petits per a poder formar dispositius o per a poder estructurar elements a escala nanomètrica com ara cadenes d'ADN, proteïnes, nanopartícules funcionalitzades, etc. A

14. J. ALCARAZ i L. BUSCEMI, «Microrheology of Human Lung Epithelial Cells measured by Atomic Force Microscopy», *Biophysical Journal*, vol. 84 (març 2003), p. 2071-2079.

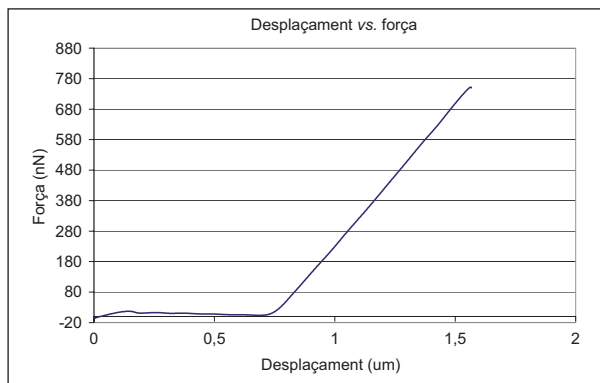


FIGURA 5. Corba desplaçament-força mesurada en el sensor AFM integrat durant la nanoindentació sobre una mostra de vidre.

mesura que reduïm les dimensions fins a escales nanomètriques, ens adonem que les lleis de la física tenen efectes diferents que en el món macroscòpic. La manipulació a escala nanomètrica es veu afectada en aquest sentit, per exemple, per la gravetat, que és una de les principals forces a tenir en compte en el moment de manipular objectes macroscòpics. Aquesta força de la gravetat no té cap rellevància a escala nanomètrica, i, per contra, sí que adquireixen més importància altres forces com poden ser la força de van der Waals i la força electrostàtica. Un altre factor a tenir en compte és que, en la majoria de casos, utilitzem la mateixa eina per a manipular que per a fer la imatge, encara que hi ha mètodes que utilitzen la combinació d'aparells com ara el SEM (microscopi electrònic de rastreig) i l'AFM. Això implica que no podem fer imatges d'allò que estem manipulant i fer la manipulació simultàniament. Per tant, estem obligats a fer primer una imatge per a saber l'estat inicial, fer la manipulació i després fer una altra imatge per a saber quin ha estat el resultat real d'aquesta manipulació.

Les primeres manipulacions a escala atòmica es van realitzar amb el microscopi d'efecte túnel. Actualment el microscopi d'efecte túnel continua essent una eina fonamental en la nanomanipulació, però presenta mancances importants. Les mostres han de ser conductores i la seva preparació és molt costosa. D'altra banda, l'AFM és més versàtil quant a la preparació de les mostres, ja que poden arribar a treballar dins de fluids. En el nostre cas, un altre avantatge de l'AFM és que detecta forces en lloc de corrents, cosa que ens serà molt útil en el moment de manipular la partícula.

Les primeres manipulacions que es van fer amb l'AFM es basaven en el fet d'empènyer la partícula amb la punta (*pushing*),^{15,16} fent-la lliscar per sobre del substrat. Aquest mètode s'ha demostrat molt útil en el moviment de nombroses partícules, ja que permet moure més d'una partícula

abans de realitzar la imatge següent. Tot i això, té dues mancances significatives. La primera és que no hi ha forma de saber si la partícula que manipulem ha arribat al seu destí fins que fem la segona imatge. Tenint en compte que la pèrdua de partícules pel camí és força freqüent, hem de fer diferents manipulacions sobre la mateixa partícula amb la consegüent realització d'imatges intermèdies abans que la partícula o conjunt de partícules arribin al seu destí. La segona mancança i la més important és que no podem realitzar estructures en tres dimensions només empenyent les partícules.

Actualment ja s'han arribat a manipular partícules de forma electrostàtica,¹⁷ però la manca de control sobre la punta fa que no es sàpiga amb certesa en quin moment la partícula s'ha adherit a la punta. El mètode que es proposa requereix un control més precís de la punta, però per contra és capaç de detectar el moment en què hi ha la transferència de la partícula sobre la punta, així com una eventual pèrdua de l'esmentada partícula durant el procés de translació.

Forces que intervenen en la nanomanipulació

Tal com hem dit, a mesura que anem disminuint les dimensions del sistema, les forces de van der Waals i les forces electrostàtiques van prenent un paper més rellevant, fins al punt que en el nostre sistema (fins a alguns nanòmetres) només tindrem en compte aquestes forces.

Les forces de van der Waals¹⁸ es poden considerar com a forces atractives, tot i que tenen una força de repulsió de curt abast i l'efecte que provoca sobre la partícula és que s'adhereixi sobre les superfícies.

El sistema consisteix en un substrat de grafit, una nanopartícula d'or de 50 nm de diàmetre i la punta d'AFM. El que es fa és estudiar les tres interaccions (partícula-substrat, partícula-punta AFM i punta AFM-substrat) per separat i considerar que són forces additives.

En la figura 4 es poden veure les tres forces d'interacció i es pot comprovar que la força entre la partícula i el substrat és sempre major que la força entre la partícula i la punta.

Amb aquesta figura es veu que no es tindran problemes per a fer la transferència de la partícula des de la punta al substrat, però per contra no ens serà possible fer la transferència de la partícula del substrat fins a la punta. Per tal de solucionar això aplicarem sobre la partícula un camp elèctric.

Aquestes tres forces són les forces reals que interactuen entre els tres objectes, però quan fem una corba de forces amb l'AFM no és aquesta força (punta-substrat) la que nosaltres veiem, sinó que és la força d'equilibri entre la força de la punta-substrat i la força de recuperació de la micropalanca.

15. C. BAUR, A. BUGACOV, B. E. KOEL, A. MADHUKAR, N. MONTOYA, T. R. RAMACHANDRAN, A. A. G. REQUICHA, R. RESCH I P. WILL, *Nanotechnology*, 9 (1998), p. 360-364.

16. S. FAHLBUSCH, A. SHIRINOV I S. FATIKOW, *2002 IEEE/RSJ, Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2002.

17. S. DECOSSAS, F. MAZEN, T. BARON, G. BRÉMOND I A. SOUFI, *Nanotechnology*, 14 (2003), p. 1272-1278.

18. C. ARGENTO I R. H. FRENCH, *Journal of Applied Physics*, 80 (1996), p. 6081-6090.

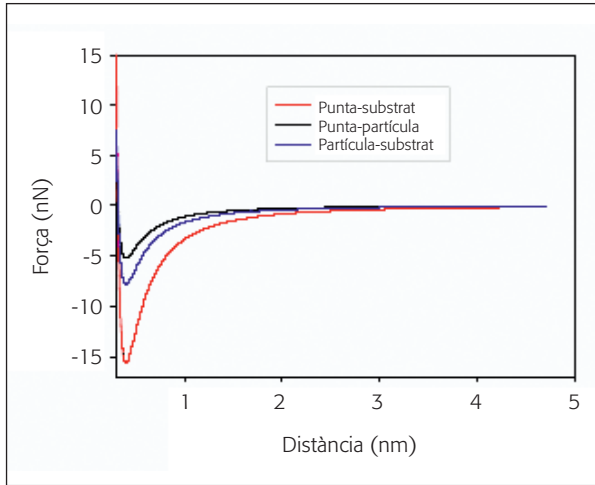


FIGURA 6. Forces d'interacció que intervenen entre la partícula i el substrat.

Aquesta força de recuperació la podem modelitzar com una molla. Per tant, si volem reproduir la corba de forces que extraurem de l'AFM, hem de calcular la posició del mínim d'energia per a cada punt en què posicionem la micropalanca.

Forces electrostàtiques

Tal com hem esmentat anteriorment, haurem d'aplicar un camp elèctric entre la punta i el substrat per tal de poder fer la transferència de la partícula cap a la punta. Això ens introdueix un problema nou, ja que en aplicar aquest camp la punta de la palanca i el substrat formen un condensador amb una diferència de potencial. Això fa que sobre la punta actuï una força deguda a la força electrostàtica i augmenti la deflexió de la micropalanca.^{19,20,21}

Per un costat tenim que la força electrostàtica que actua entre la punta i la partícula és molt sensible a la distància, ja que disminueix molt ràpidament quan aquesta augmenta. D'altra banda tenim una distància mínima a què ens podem apropar, si no la punta col·lapsaria sobre la partícula i provocaria un curtcircuit. Per tant, el control sobre la punta ha de ser com més acurat millor.

Força electrostàtica sobre la partícula

En aplicar un potencial entre la punta i el substrat, la partícula experimenta una força expressada en la gràfica de la figura 9.

Tal com hem comentat abans, la nanomanipulació mitjançant camps elèctrics requereix un control molt precís de

19. P. GIRARD, *Nanotechnology*, 12 (2001), p. 485-490.
 20. A. GIL, J. COLCHERO, J. GÓMEZ-HERRERO i M. A. BARÓ, *Nanotechnology*, 14 (2003), p. 332-340.
 21. B. M. LAW i F. RIEUTORD, *Physical Review B*, 66 (2002), 035402(1-6).

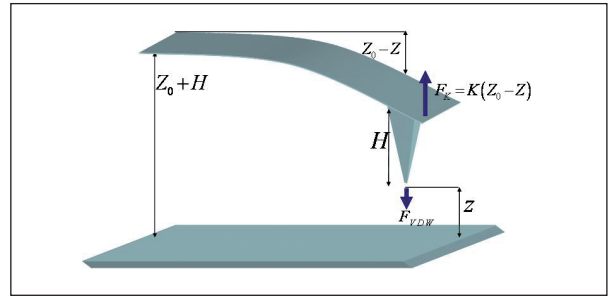


FIGURA 7. Esquema del sistema punta-substrat sense interacció electrostàtica.

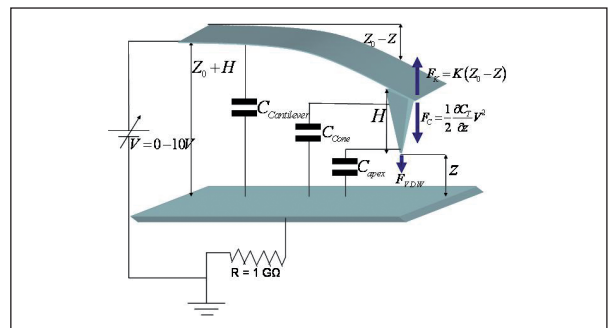


FIGURA 8. Esquema del sistema punta-substrat amb interacció electrostàtica.

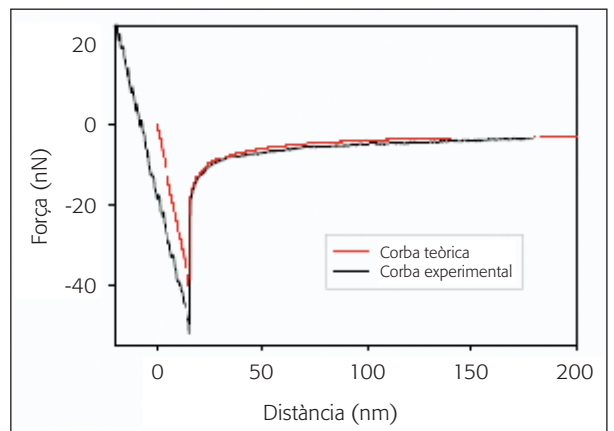


FIGURA 9. Corba de força experimental realitzada a una tensió entre la punta i substrat de 10 V. Comparació amb la corba teòrica.

la punta, ja que es tracta de situar-se a una alçada concreta sobre la partícula i sense tocar-la aplicar-li un camp elèctric per tal de desadherir-la del substrat i adherir-la a la punta. Un cop adherida a la punta, desconnectem els camps elèctrics i la força de van der Waals la mantindrà adherida fins que la dipositem un altre cop al damunt del substrat.

Podem veure (figura 10) els passos que hem seguit per tal de fer aquesta nanomanipulació. Primer, i amb mode *tapping* per tal de no moure involuntàriament la partícula, ens hem situat a sobre d'aquesta. Tot seguit hem passat a mode *contact* i aquí és on comença el procés d'adquisició de la deflexió.

Tal com es pot veure a la figura hem aixecat el capçal piezoelèctric (1). Tot seguit hem aplicat a la punta un pols quadrat de 10 V i de 6 segons de durada (2). Això ha provo-

cat una deflexió a la punta però no hi ha cap canvi, la qual cosa ens fa pensar que no hem atrapat la partícula. Per tant, hem fet baixar el capçal piezoelèctric 5 nm (4) i hem tornat a aplicar el mateix pols (5). De nou no hem observat cap anomalia i, per tant, hem tornat a baixar la punta i hem tornat a aplicar el pols (7-8-9). Mentre durava el pols hem comprovat una anomalia, la qual cosa ens ha fet pensar que hi havia hagut transferència de la partícula a la punta d'AFM. Quan ha acabat el pols, hem aixecat el capçal piezoelèctric 100 nm. Després hem fet el moviment i hem aproximat el capçal piezoelèctric a la superfície 100 nm en dos moviments de 50 nm cada un, i en el segon sí que es veu que ja hem entrat en contacte (11-12-13). Finalment, hem activat el mode *tapping* i hem tornat a fer la imatge en la qual es veu el moviment de la partícula respecte a la primera.

Un dels avantatges que té la manipulació electrostàtica és que podem dipositar la partícula a sobre d'altres partícules per tal de formar estructures en 3D. Això requereix molt de control en l'instant de dipositar la partícula, ja que si baixem molt el capçal piezoelèctric podem destruir l'estructura, mentre que si baixem poc el capçal piezoelèctric no podem deixar-la anar. També hem de tenir cura del *drift* del capçal piezoelèctric, ja que si hi ha *drifts* molt grans no deixarem la partícula en el lloc adequat. La figura 11 demostra la possibilitat de fer aquests tipus d'estructures amb nanopartícules de 50 nm.

El fet que es puguin manipular nanopartícules d'or dóna peu a manipular qualsevol tipus de partícula, molècula... que pugui ser carregada elèctricament. De forma indirecta

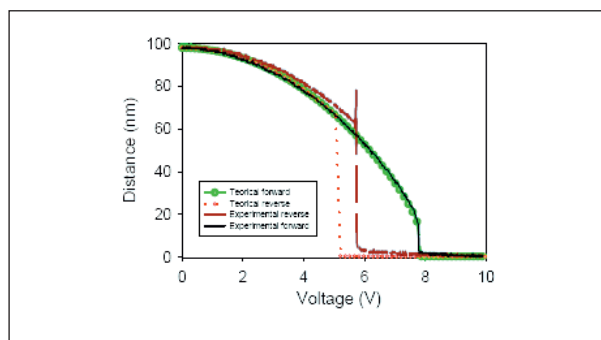


FIGURA 10. Resposta de la punta a una rampa de tensió des de 0 V fins a 10 V i des de 10 V fins a 0 V. Comparació entre els resultats experimentals i les simulacions.

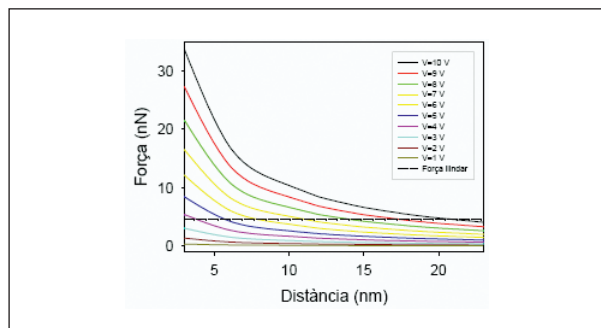


FIGURA 11. Força electrostàtica sobre la partícula per a diferents distàncies punta-partícula.

també es poden manipular altres tipus d'elements si podem funcionalitzar la partícula d'or per tal que s'hi enganxi.

Conclusions

És evident que la tecnologia de microsistemes ens permetrà en els propers anys millorar i incrementar les prestacions d'aquests tipus de robots, que han de ser la base per a l'automatització de processos a escala nanomètrica. Tanmateix, el repte que representa el disseny i construcció d'aquests tipus de sistemes requereix l'activitat de grups

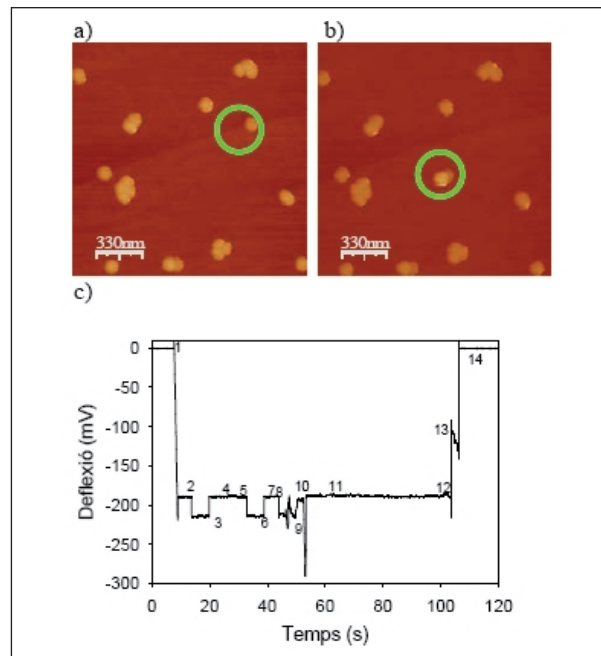


FIGURA 12. Les imatges a i b (abans i després) ens demostren el moviment de la partícula. La gràfica c és la deflexió de la micropalanca en el temps durant tot el procés.

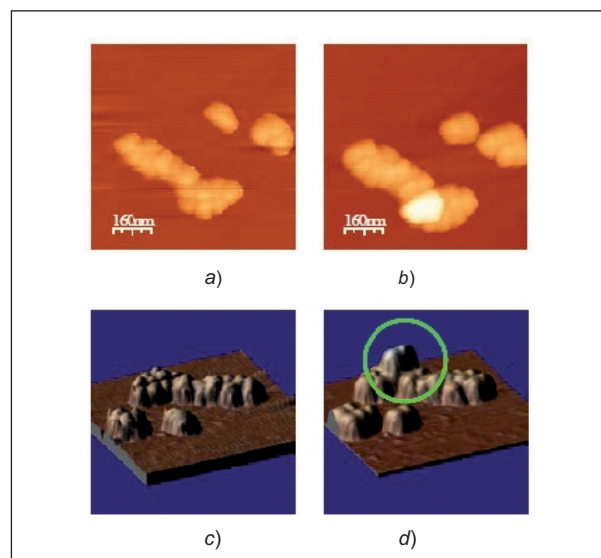


FIGURA 13. Imatges bidimensionals abans (a) i després (b) de crear l'estructura. Les imatges c i d són les mateixes que a i b però amb una perspectiva 3D d'abans (c) i després (d) de fer l'estructura.

de recerca interdisciplinària que aportin coneixements molt variats per tal d'assolir sistemes útils per a la micro-nanomanipulació. Els resultats dels projectes presentats i

d'altres en curs són una bona representació de les activitats que en aquest camp es desenvolupen a escala internacional. ■