

Verifica della possibilità di utilizzo di un trasduttore piezoelettrico a disco come attuatore su scala nanometrica

Milani Giovanni - 933732

- [Introduzione](#)
- [Principio di funzionamento](#)
- [Descrizione dell'esperimento](#)
- [Schema Circuitale](#)
- [Elaborazione delle immagini acquisite](#)
- [Analisi dei dati](#)
- [Conclusioni](#)
- [Riferimenti](#)

Introduzione

Gli attuatori piezoelettrici sono spesso utilizzati nei microscopi ad effetto tunnelling (STM) e nei microscopi a forza atomica (AFM)³ per effettuare posizionamenti con risoluzioni che arrivano a 0.01nm, permettendo quindi di osservare e manipolare i singoli atomi in un substrato. Poiché tali componenti sono molto costosi, lo scopo di questo esperimento è di verificare la possibilità di utilizzo di un trasduttore piezoelettrico a disco (un comune buzzer, del costo di pochi centesimi) come un attuatore che possa raggiungere risoluzioni su scala nanometrica.

Principio di funzionamento

Un buzzer è costituito da una placca metallica sul quale è applicato un disco di materiale piezoelettrico ricoperto da un sottile elettrodo. Applicando una tensione tra la placca e l'elettrodo il piezoelettrico si deforma incurvando verso l'alto o verso il basso il disco ed è così in grado di emettere suoni.

Nell'articolo di John D. Alexander ("Simple STM Project")¹ viene proposta una modifica del trasduttore che consiste nell'incidere l'elettrodo in modo da dividere il disco in 4 quadranti; applicando diverse tensioni sui diversi quadranti è possibile produrre spostamenti su tre assi, come mostrato in [Figura 1](#).

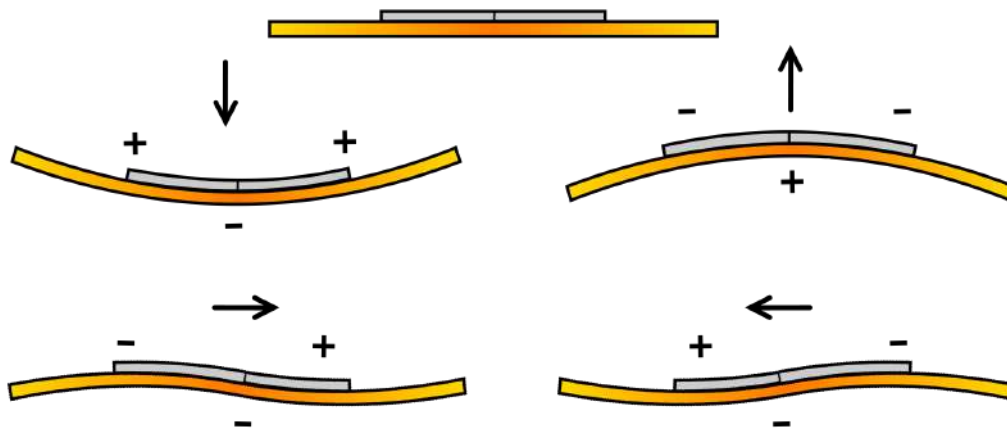


Figura 1: Il buzzer modificato può essere utilizzato per produrre spostamenti nei tre assi XYZ.⁴

Per tagliare l'elettrodo il disco è stato prima fissato con del nastro adesivo su un foglio quadrettato da usare come riferimento e successivamente inciso per mezzo di un taglierino, in modo da creare 2 diametri perpendicolari. Dopo aver aver rimosso dal

foglio il buzzer e controllato che gli elettrodi fossero tra loro isolati, sono stati saldati 5 cavi: uno sulla placca metallica e uno su ciascun quadrante. Infine il piezoelettrico è stato fissato con della colla adesiva istantanea ad un supporto in legno avente un foro leggermente più piccolo della placca; così facendo l'attuatore è in grado di deformarsi liberamente pur rimanendo saldo al supporto.

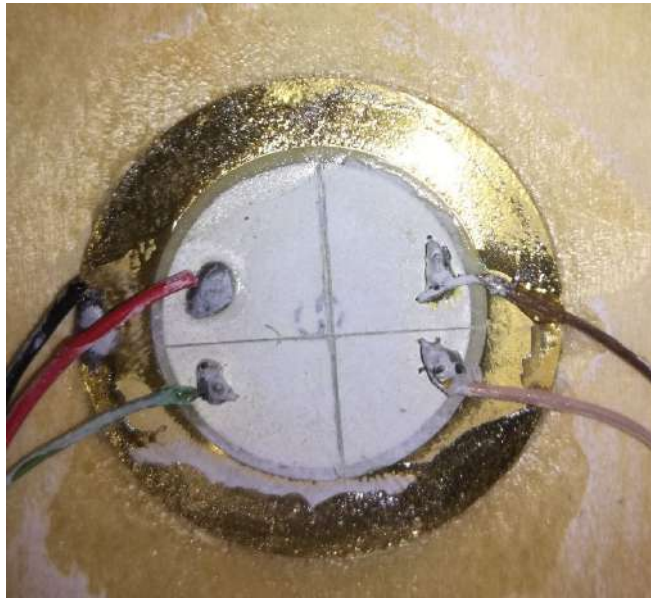


Figura 2: Il disco utilizzato per l'esperimento, montato su supporto ligneo.

Descrizione dell'esperimento

Per misurare il cambiamento di direzione dell'attuatore è stato montato uno specchio sul disco metallico, in modo tale che rifletta il fascio proiettato da un puntatore laser verso il lato opposto di una stanza; dall'altra parte della stanza un foglio di carta millimetrata è attaccato ad una lastra d'acciaio sulla quale è visibile il punto laser proiettato, il quale viene inquadrato da una fotocamera.

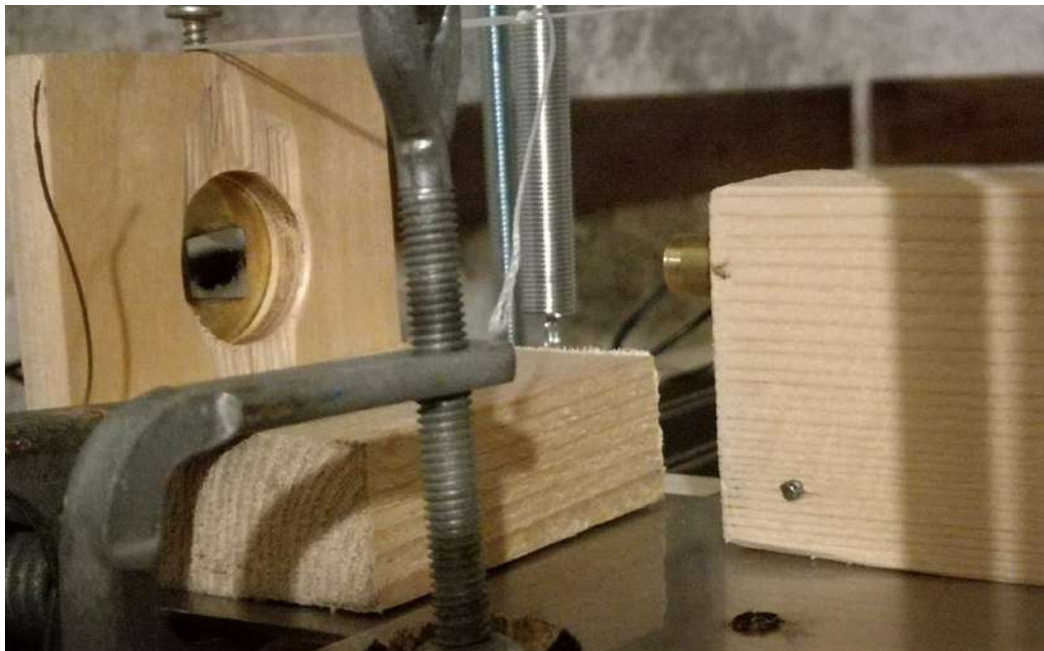


Figura 3: Il puntatore laser (a destra) proietta sullo specchio montato sul buzzer.

Al variare della tensione sui quadranti il cambiamento di direzione dello specchio provoca uno spostamento del punto laser amplificato dalla dimensione della stanza (4.097m) e tramite la fotocamera è possibile scattare un'istantanea della del fascio di luce sulla carta millimetrata; tale immagine verrà successivamente utilizzata per misurare l'esatta posizione del punto luminoso.

Un microcontrollore applica tensione al dispositivo in modo tale muovere il fascio laser verso il basso, verso l'alto, a destra e a sinistra; e comanda alla fotocamera di catturare un'immagine dopo ogni transizione. Variando la tensione applicata è perciò possibile calcolare la deformazione del piezoelettrico a diversi voltaggi osservando la posizione del punto luminoso sulla carta millimetrata immortalata dalla fotocamera.

Per limitare il rumore introdotto dal sensore della fotocamera e massimizzare il contrasto tra lo sfondo e il fascio laser l'esperimento è stato condotto in una stanza buia e il sensore della fotocamera è stata impostata con una bassa sensibilità (ISO 100) e un secondo di esposizione.



Figura 4: L'utilizzo di vapore permette di fotografare il fascio laser.

Schema Circuitale

Per condurre l'esperimento è stato utilizzato un alimentatore dotato di due uscite: la prima, a 5V, alimenta il microcontrollore e permette ad alcuni relé di scattare; la seconda uscita, la cui tensione può essere regolata fra gli 0V e i 25V, viene applicata ad uno dei quadranti del piezoelettrico tramite l'utilizzo di 4 relé.

I relé sono montati su una piccola scheda che utilizza un fotoaccoppiatore per isolare l'uscita del microcontrollore dalla tensione che alimenta l'elettromagnete nel relé. Sono stati utilizzati 5 di questi moduli: 4 alimentano l'attuatore mentre l'ultimo aziona la fotocamera di uno smartphone simulando la pressione del tasto di un paio di auricolari.

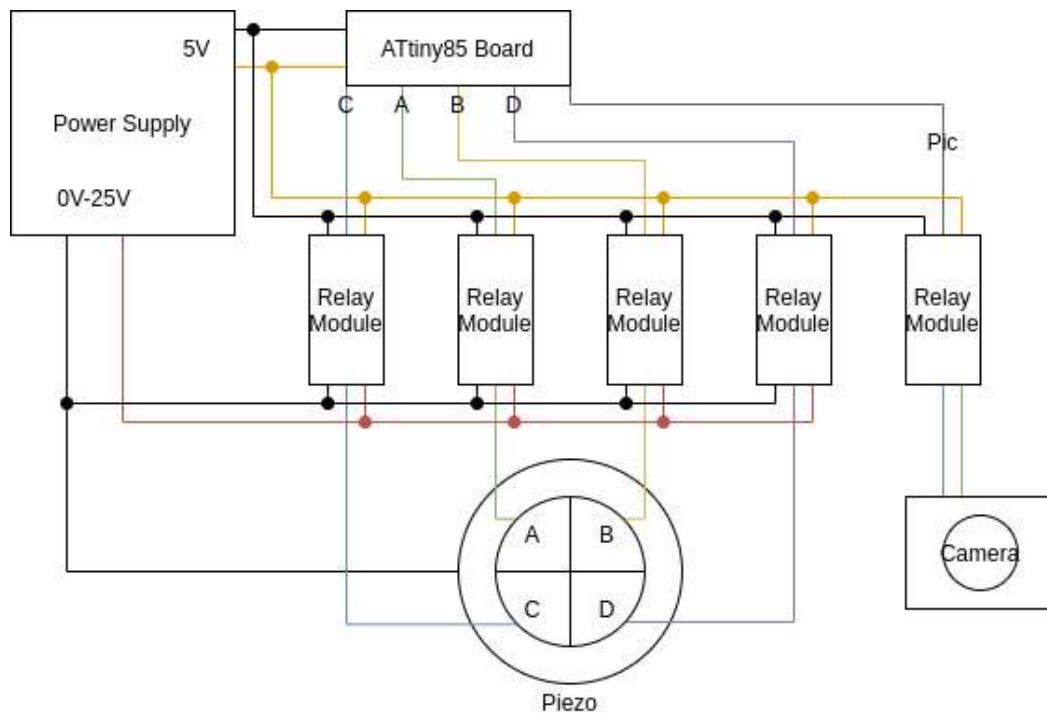


Figura 5: Diagramma del circuito utilizzato per l'esperimento.

Come microcontrollore è stata utilizzata una scheda Arduino-compatibile basata su ATtiny85⁵, il cui compito è quello di muovere lo specchio e di catturare le immagini azionando i diversi relé. Ogni volta che la funzione `take_pic` viene eseguita la scheda attende 4 secondi per assicurarsi che il piezoelettrico sia stabile, preme il tasto della fotocamera chiudendo e riaprendo il relativo relé dopo 200 millisecondi e infine attende 2 secondi per permettere alla fotocamera di scattare. La funzione `loop` viene eseguita ciclicamente ed esegue le seguenti operazioni:

- attende 10 secondi
- per ognuna delle 4 direzioni (su, giù, sinistra, destra)
 - porta il piezoelettrico in posizione neutrale
 - cattura un'immagine tramite la funzione `take_pic`
 - fornisce tensione ai due relé che controllano i quadranti nella direzione corrente
 - ciò fa muovere il punto luminoso nella direzione opposta
 - cattura un'immagine del fascio spostato

```

/*
 A | B
 --+--
 C | D
*/
#define PINA 1
#define PINB 2
#define PINC 3
#define PIND 4
#define PINPHOTO 0

void setup() {
  pinMode(PINA, OUTPUT);
  pinMode(PINB, OUTPUT);
  pinMode(PINC, OUTPUT);
  pinMode(PIND, OUTPUT);
  pinMode(PINPHOTO, OUTPUT);
  digitalWrite(PINPHOTO, 0);
}

#define ZERO 0b0000

```

```

#define UP    0b1100
#define DOWN 0b0011
#define LEFT 0b1010
#define RIGHT 0b0101

void piezo_out(uint8_t abcd) { // set relays to given status abcd
    digitalWrite(PINA,abcd & 0b1000);
    digitalWrite(PINB,abcd & 0b0100);
    digitalWrite(PINC,abcd & 0b0010);
    digitalWrite(PIND,abcd & 0b0001);
}

void take_pic(){
    delay(4000);
    digitalWrite(PINPHOTO,1); // press camera button
    delay(200);
    digitalWrite(PINPHOTO,0); // release button
    delay(2000);
}

void loop()
{
    delay(10000);

    piezo_out(ZERO);
    take_pic();
    piezo_out(UP);
    take_pic();

    piezo_out(ZERO);
    take_pic();
    piezo_out(DOWN);
    take_pic();

    piezo_out(ZERO);
    take_pic();
    piezo_out(LEFT);
    take_pic();

    piezo_out(ZERO);
    take_pic();
    piezo_out(RIGHT);
    take_pic();
}

```

Il codice C utilizzato per la programmazione del microcontrollore

Elaborazione delle immagini acquisite

Tramite il circuito sopra descritto sono state raccolte ~1500 immagini del fascio laser riflesso sulla carta millimetrata a diverse tensioni (0V, 5V, 10V, 15V, 20V, 25V); per calcolare la posizione del punto in ciascuna immagine è stata utilizzata la libreria OpenCV⁶. È stato scritto un programma python che prende in input una serie di immagini scattate allo stesso voltaggio e restituisce una tabella che riporta le coordinate del centroide del punto luminoso di ogni immagine e successivamente calcola la media e la deviazione standard di tali misure per ogni posizione in cui viene portato l'attuatore (zero, su, zero, giù, zero, sinistra, zero, destra).

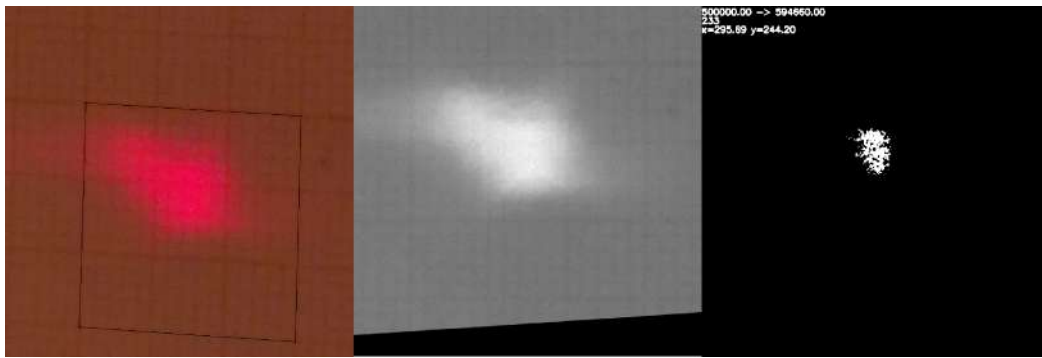


Figura 6: Da sinistra verso destra: la fotografia originale prima della trasformazione proiettiva, l'immagine proiettata di cui è stato estratto il canale rosso, l'immagine finale con il centroide calcolato.

Su ogni immagine lo script esegue le seguenti operazioni:

- estrae il solo canale rosso (poiché il laser è di colore rosso)
- ritaglia l'immagine includendo solamente il punto luminoso e il suo intorno
- applica una correzione prospettiva che fa sì che il piano della carta millimetrata coincida con quello della fotografia e che ogni pixel corrisponda a $37.5\mu\text{m}^2$ (1.5cm^2 sono $400 \times 400\text{px}$)
- trasforma l'immagine in una bitmap estraendo solamente i punti più luminosi dell'immagine
- trova il centroide e lo salva in una tabella

```
for i in range(len(images)):
    img = cv2.imread(images[i])           #Open image
    img = redch(img)                     #Extract red channel only
    img = crop(img)                      #Crop image
    img = perspective(img, imageWarp)     #Correct image perspective
    img = threshold(img, imageTresh)     #Apply threshold
    moments = cv2.moments(img)           #Image moments
    center_x = moments['m10']/moments['m00'] #X coordinate of centroid
    center_y = moments['m01']/moments['m00'] #Y coordinate of centroid
```

Parte del codice python utilizzato per il riconoscimento delle immagini

Analisi dei dati

Grazie ai dati acquisiti è stato possibile ricavare la posizione media del fascio laser riflesso a 6 diverse tensioni (da 0V a 25V) e per ognuna delle 4 direzioni (su, giù, sinistra, destra). Tali dati sono riportati in [Tabella 1](#) e in un grafico in [Figura 7](#); osservandoli è possibile notare che mentre l'asse destra-sinistra è sostanzialmente simmetrico l'asse verticale presenta invece alcune incongruenze, soprattutto per quanto riguarda la direzione "giù" (corrispondente a valori delle y positivi). Ciò potrebbe essere spiegabile osservando che i due quadranti più in basso del piezoelettrico di [Figura 2](#) risultano essere più piccoli dei due quarti superiori.

	0 Volt x	0 Volt y	5 Volt x	5 Volt y	10 Volt x	10 Volt y	15 Volt x	15 Volt y	20 Volt x	20 Volt y	25 Volt x	25 Volt y
Up	9.00	34.50	39.00	-181.50	8.25	-427.89	24.375	-514.5	-1.13	-714.38	30.75	-869.25
Down	4.88	-6.75	44.63	67.13	96.00	165.38	94.50	205.88	105.75	324.75	122.63	356.25
Left	0.75	26.63	-60.38	-68.63	-177.75	-143.25	-278.63	-132.75	-433.50	-173.63	-519.38	-172.50
Right	-18.75	11.63	169.88	-25.05	246.00	-107.63	353.63	-139.88	486.75	-162.75	534.00	-160.13

Tabella 1: Spostamento medio (in μm) del punto laser rispetto alla posizione di equilibrio nelle 4 direzioni e a diverse tensioni.

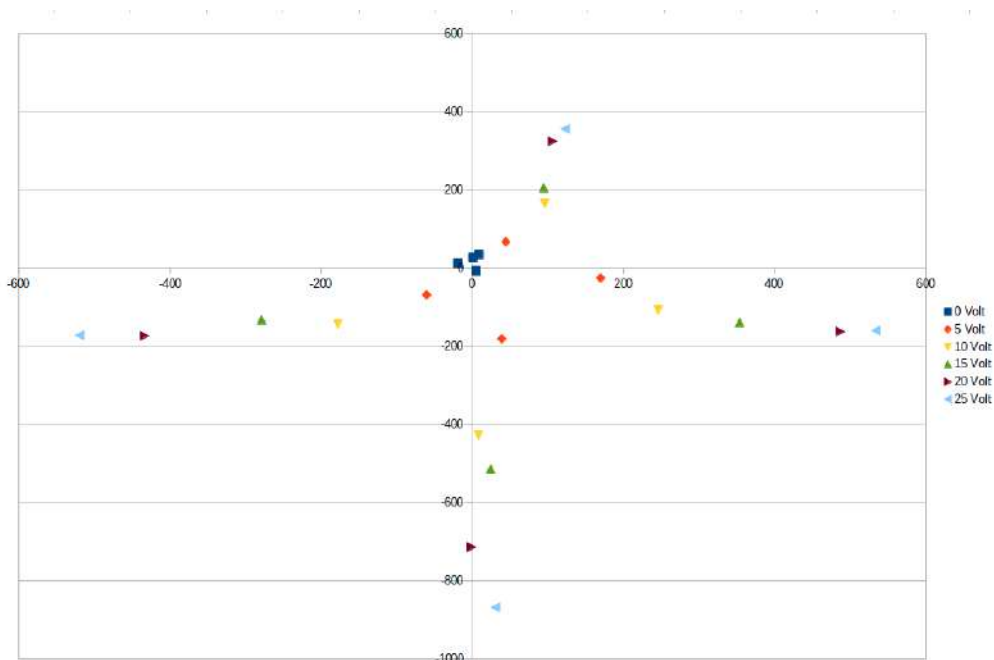


Figura 7: Grafico che mostra la posizione media (in μm) del fascio proiettato nelle 4 direzioni e a diverse tensioni.

Calcolando la distanza euclidea dei centri rispetto al punto di equilibrio (dati riportati in [Tabella 2](#)) sono stati calcolati il coefficiente di regressione lineare e il coefficiente della retta di regressione tra gli spostamenti medi nelle 4 direzioni e la tensione applicata. Tale analisi mostra una forte dipendenza lineare in tutte e quattro le direzioni, con il coefficiente di correlazione sempre superiore al 99%. È inoltre da evidenziare che i coefficienti delle rette sull'asse destra-sinistra sono particolarmente vicini l'uno all'altro.

Volt	Up	Down	Left	Right
0	35.65	8.33	26.64	22.06
5	185.64	80.60	91.40	171.77
10	427.95	191.22	228.29	268.51
15	515.08	226.53	308.63	380.28
20	714.38	341.53	466.98	513.24
25	869.79	376.76	547.27	557.49
Correlation	0.996	0.991	0.995	0.993
Coefficient	35.61	15.97	22.10	24.33

Tabella 2: Distanza media (in μm) del punto laser rispetto alla posizione di equilibrio nelle 4 direzioni e a diverse tensioni. Nelle ultime due righe sono mostrati il coefficiente di correlazione lineare e quello della relativa retta di regressione

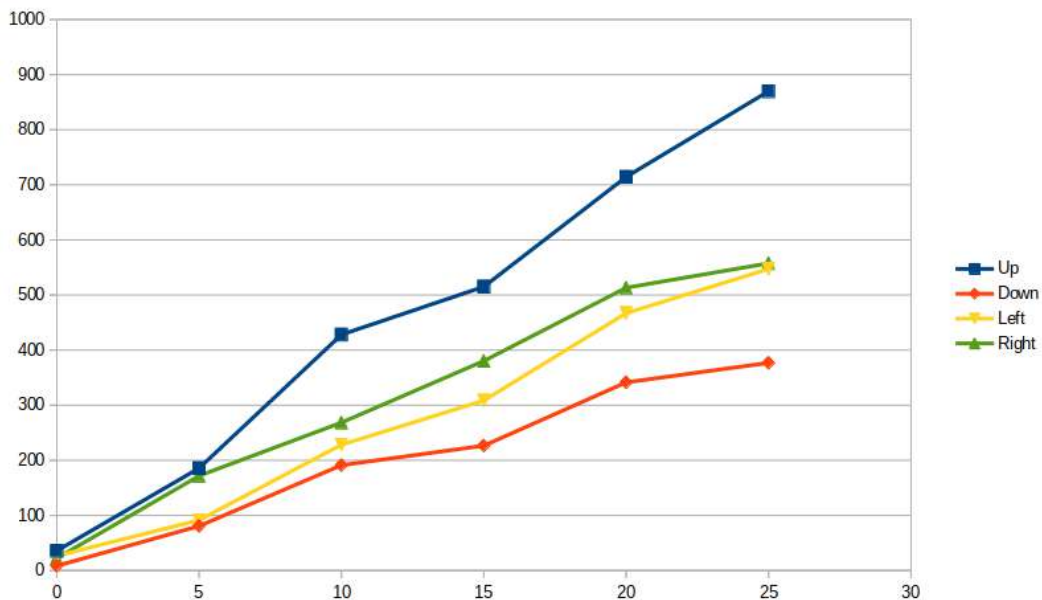


Figura 8: Grafico che mostra la distanza del punto (in μm) dalla posizione di equilibrio al variare della tensione (Volt).

Ipotizzando che l'estremità di una sonda controllata da questo attuatore si trovi a una distanza di 20mm dal disco, è possibile stimare lo spostamento per Volt applicato di un ipotetico sensore. Per farlo è stata calcolata la media dei coefficienti di regressione sui quattro assi, pari a $24.50 \mu\text{m}/\text{V}$: $\$ \$ \{ 24.50 \ \mu\text{m}/\text{V} \times 20 \ \text{mm} \ \text{over} \ 4097 \ \text{mm} \} = 119.6 \ \text{nm}/\text{V} \ \$ \$$ Inoltre è possibile determinare il movimento massimo del sensore a 15V: $\$ \$ 119.6 \ \text{nm}/\text{V} \times 15 \ \text{V} = 1794 \ \text{nm} \ \$ \$$ Tali stime sono in accordo con i dati ricavati dall'articolo di Dan Berard ("Home-Built STM")² che riportano $\sim 160 \text{nm}/\text{V}$ di spostamento della sonda e un dislocamento a 15V pari a circa ~ 2 micron.

Conclusioni

Con questo esperimento è stato realizzato l'obiettivo di effettuare misure di precisione con strumenti di costo ridotto e facilmente disponibili, inoltre dai dati ottenuti si è poi potuto inferire alcune importanti caratteristiche del sistema analizzato. Sebbene i risultati ottenuti indichino che l'attuatore costruito possa essere un valido sostituto come posizionatore su scala nanometrica, prima di poter utilizzare un tale dispositivo sarebbe necessario svolgere ulteriori test con sistemi di controllo e di misura più raffinati.

Riferimenti

1. John D. Alexander (2001) "[Simple STM Project](#)"
2. Dan Berard (2017) "[Home-Built STM](#)"
3. R. Le Letty et al. (2001) "[The scanning mechanism for ROSETTA/MIDAS from an engineering model to the flight model](#)"
4. Gregors (2011) "[PiezoBendingPrinciple.gif](#)"
5. Atmel Corporation (2013) "[Atmel 8-bit AVR Microcontroller with 2/4/8K Bytes In-System Programmable Flash](#)"
6. OpenCV team (2020) "[OpenCV](#)"