

Ingeniería Mecatrónica

Robótica I

Trabajo Final - Levitador Acústico de 5 GDL

Lage Tejo, Joaquín

11495

Olguín, Nahuel

12297

Índice

Índice	1
Introducción	2
Motivación y descripción del robot	2
Aplicación	2
Presentación formal/técnica del robot	3
Esquemas del robot	3
Espacio de trabajo	4
Denavit y Hartenberg	5
Cinemática directa	7
Análisis del espacio de trabajo	7
Análisis de la tarea a realizar	7
Cinemática inversa	8
Consideraciones de la implementación en MATLAB	11
Relación de velocidades	12
Planificación y Generación de Trayectorias	13
Sensores y Actuadores	17
Levitador acústico	17
Sensores y cámaras de video	18
Motores y cilindro neumático	18
Conclusión y Trabajo a Futuro	19
Posibles desarrollos a futuro	19
Bibliografía y Material Consultado	20

Introducción

Motivación y descripción del robot

Se eligió como proyecto integrador de cátedra, un robot serie con un actuador que consiste en dos hemisferios cargados de transductores, constituyendo así un levitador acústico o ultrasónico. Su funcionamiento se basa en generar zonas de presión alta o baja (nodos y antinodos producto de la interferencia de las ondas de presión) dónde se ubican estáticamente, los objetos a desplazar o manipular.

La propuesta es una complejización (aumentamos los grados de libertad) del siguiente proyecto en desarrollo:

<https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2020/01/the-robot-that-grips-without-touching.html>

Se propone utilizar el mismo modelo mostrado en la figura 1, añadiendo una rotación en el plano base (suelo, pared, techo, etc.), y una traslación anterior a la última rotación propia del efector final. Se han marcado las rotaciones existentes con sus ejes respectivos (en azul) y la que se añadirá en la base (rojo). Por supuesto, la traslación añadida en el brazo final (flechas bidireccionales rojas), no posee eje de rotación.

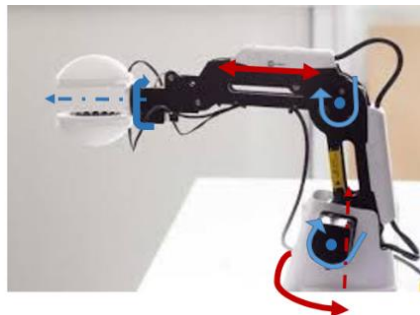


Figura 1: modelo base tomado como referencia

Aplicación

Su principal finalidad es la de manejar componentes muy frágiles ya sea al tacto (ej. manufactura de microprocesadores) o sustancias altamente reactivas a su recipiente (industria farmacéutica). Particularmente, resulta interesante el manejo de líquidos reactivos y realizar las reacciones químicas “en el aire”, de esta forma se obtendrían productos mucho más puros ya que no se contaminaría la muestra con el recipiente contenedor. Es una gran ventaja frente a otros métodos de manejo de sustancias y permite el control sobre partículas no ferromagnéticas (principal limitación de la levitación electromagnética).

Presentación formal/técnica del robot

Esquemas del robot

Nuestro robot posee cinco grados de libertad, siendo su estructura final la mostrada mediante Solid Edge en la figura 2, las dimensiones de cada eslabón son las mostradas en la Figura 3 y las características correspondientes a cada articulación son las mostradas en la Tabla 1.

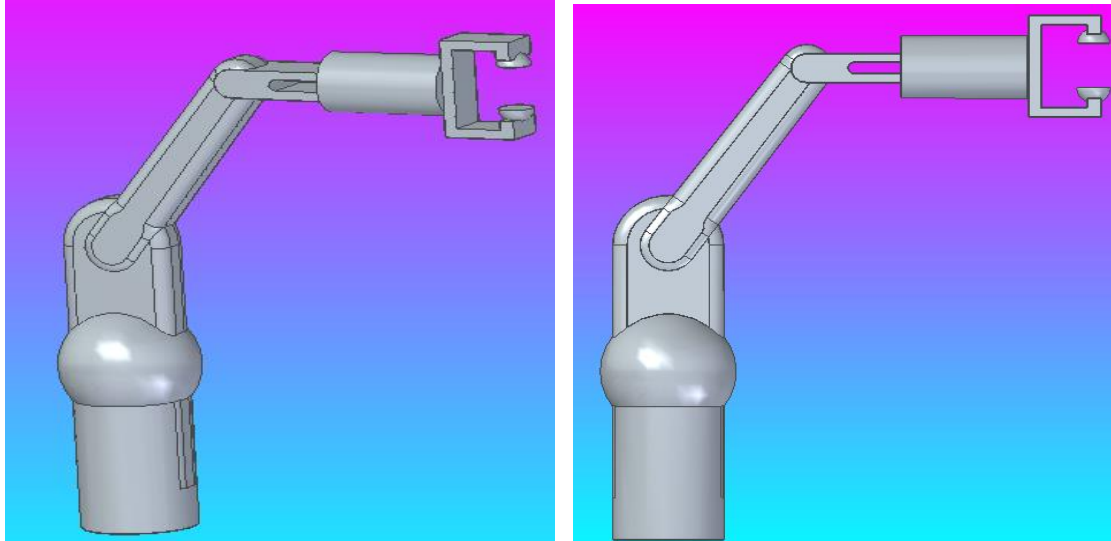


Figura 2: Diseño del robot generado por Solid Edge

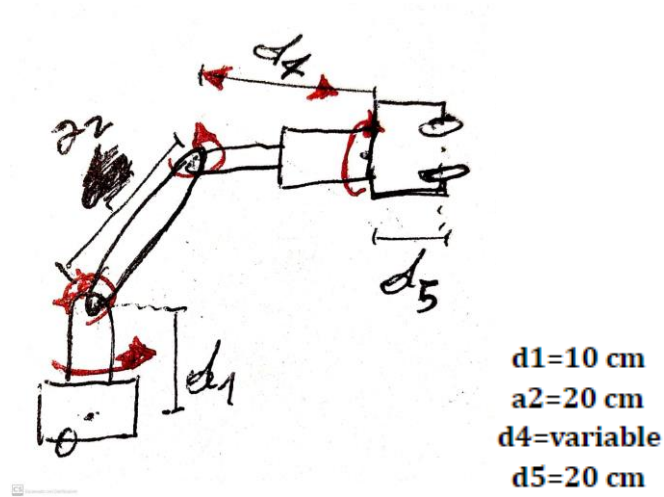


Figura 3: Dimensiones de los eslabones

Articulación	Tipo de articulación	Límite inferior	Límite superior
q1	Rotacional	-180°	180°
q2	Rotacional	-110°	110°
q3	Rotacional	-110°	110°
q4	Prismática	0.1 cm	0.2 cm
q5	Rotacional	-180°	180°

Tabla 1: Características de las articulaciones

Espacio de trabajo

En la Figura 4.1 y 4.2 se muestra una representación del espacio de trabajo del robot, desde distintos puntos de vista, tanto en planta (4.1) como en vista lateral (4.2).

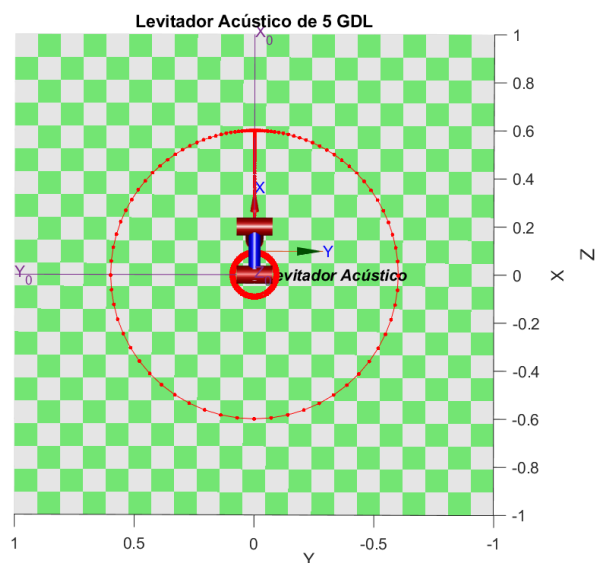


Figura 4.1: Espacio de trabajo en plano XY

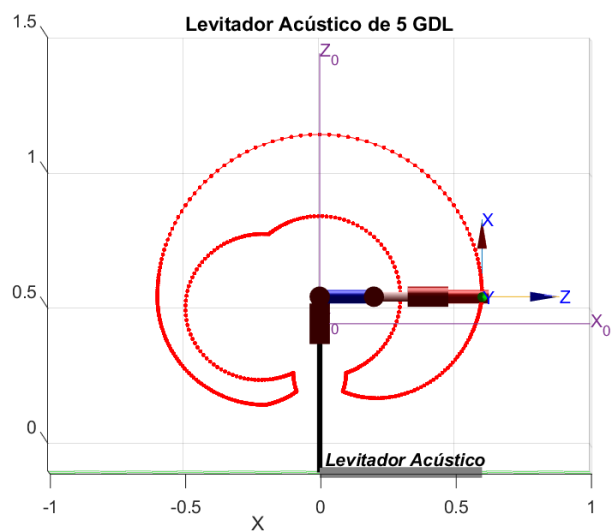


Figura 4.2: Espacio de trabajo en plano ZX

Los límites articulares mostrados previamente en la Tabla 1, fueron seleccionados para evitar colisiones con la propia estructura del robot, haciendo una suposición de sus medidas físicas. La articulación prismática Q4 debe tener un valor mínimo y máximo establecido, debido a su naturaleza; pero Q2 y Q3, si bien son rotacionales, se encuentran en el mismo plano, por lo que se consideró como límite $\pm 110^\circ$ ya que, si ambos adoptan dicho límite, el robot llegaría a tocar justo la recta del eje Z0, por debajo de su base de apoyo. Por supuesto esta posición es imposible físicamente, pero ayuda a representar los límites del espacio de trabajo. Los mismos, serían optimizables una vez definidas las dimensiones de cada eslabón.

En la Figura 4.2, se llevaron las articulaciones a 110° y 90° , para evitar colisionar con una presunta base de la estructura.

Denavit y Hartenberg

Procedemos a aplicar la convención estándar a nuestro robot. En la Figura 5 se observa cómo identificamos los ejes de cada articulación:

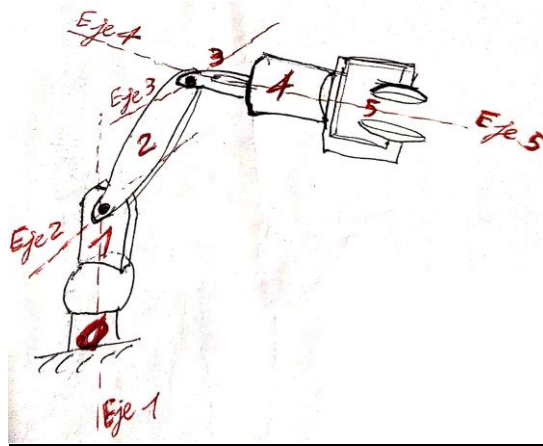


Figura 5: Identificación de los ejes de cada articulación

En la figura 6 se muestran los sistemas ubicados en sus orígenes (del 0 al 2):

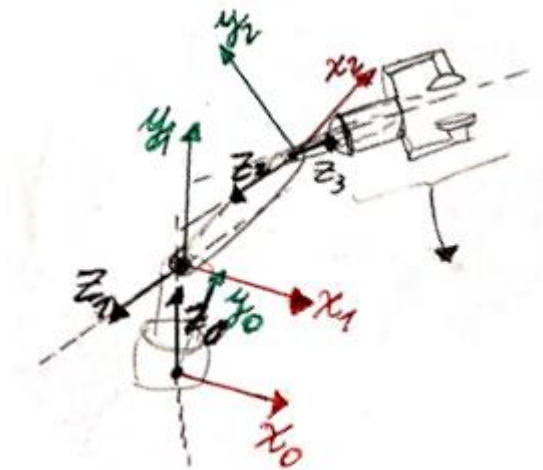


Figura 6: Ubicación de los sistemas del 0 al 2

Para mayor claridad, la figura 7 muestra los sistemas subsiguientes (del 3 al 5) en una imagen ampliada:

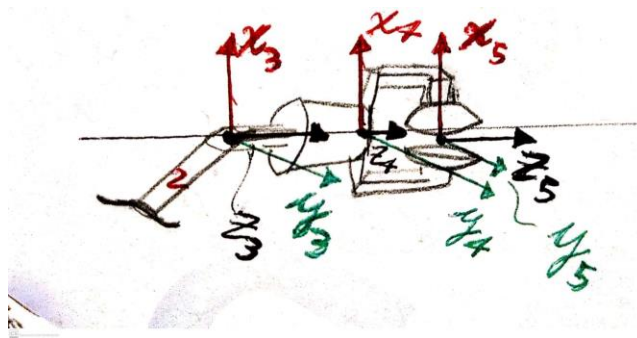


Figura 7: Ubicación de los sistemas del 3 al 5

Ahora en la Tabla 2 obtenemos la matriz de Denavit y Hartenberg mediante la determinación de los parámetros:

Sistema	θ	d	a	α	σ
1	$q1$	$d1$	0	$\pi/2$	0
2	$q2$	0	$a2$	0	0
3	$q3$	0	0	$\pi/2$	0
4	0	$q4$	0	0	1
5	$q5$	$d5$	0	0	0

Tabla 2: Matriz de Denavit y Hartenberg

El offset para obtener una postura “home” deseada es:

```
R.offset = [0 pi/2 pi/2 0 pi];
```

Finalmente, en la figura 8 se muestra la verificación en Matlab de que nuestros resultados sean correctos y acordes a una situación real, en la posición de Home y con los sistemas de referencia inicial y final para mejor visualización de la posición y orientación:

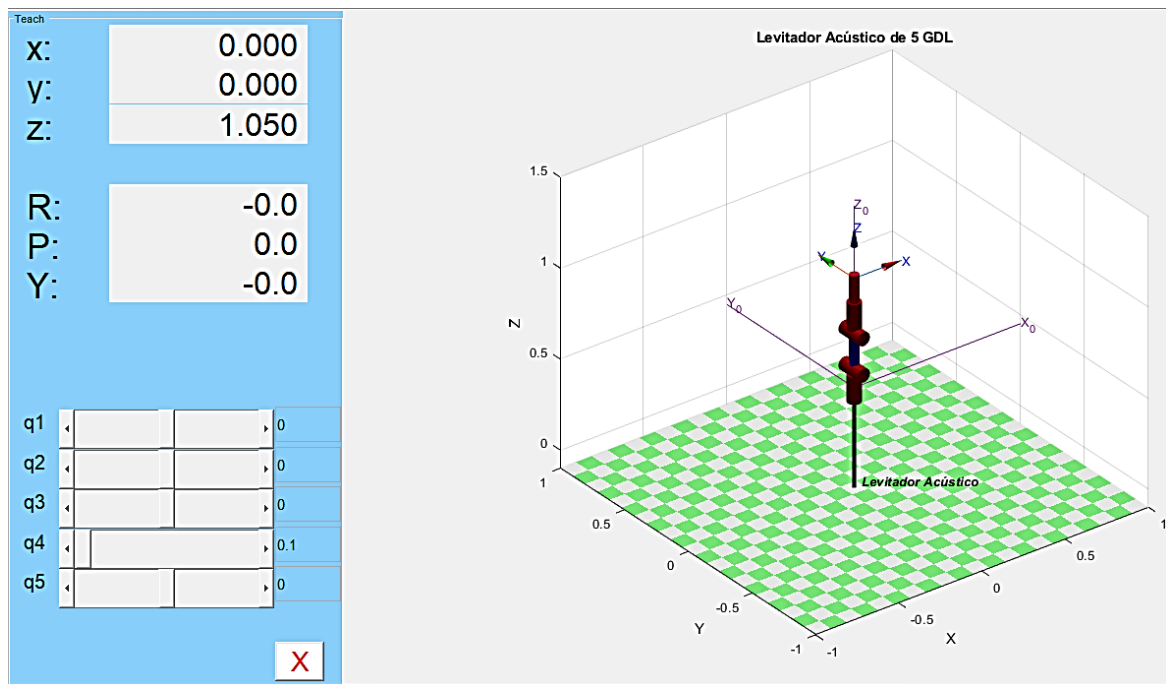


Figura 8: Verificación del procedimiento mediante Matlab

Cinemática directa

Análisis del espacio de trabajo

Dado que la primera articulación permite un giro de 360° alrededor del eje Z_0 (lo que describe una circunferencia, imagen 9 derecha), el análisis más representativo surge de analizar los posibles movimientos (con la herramienta “teach”) en el plano X_0 - Z_0 (imagen 9 izquierda).

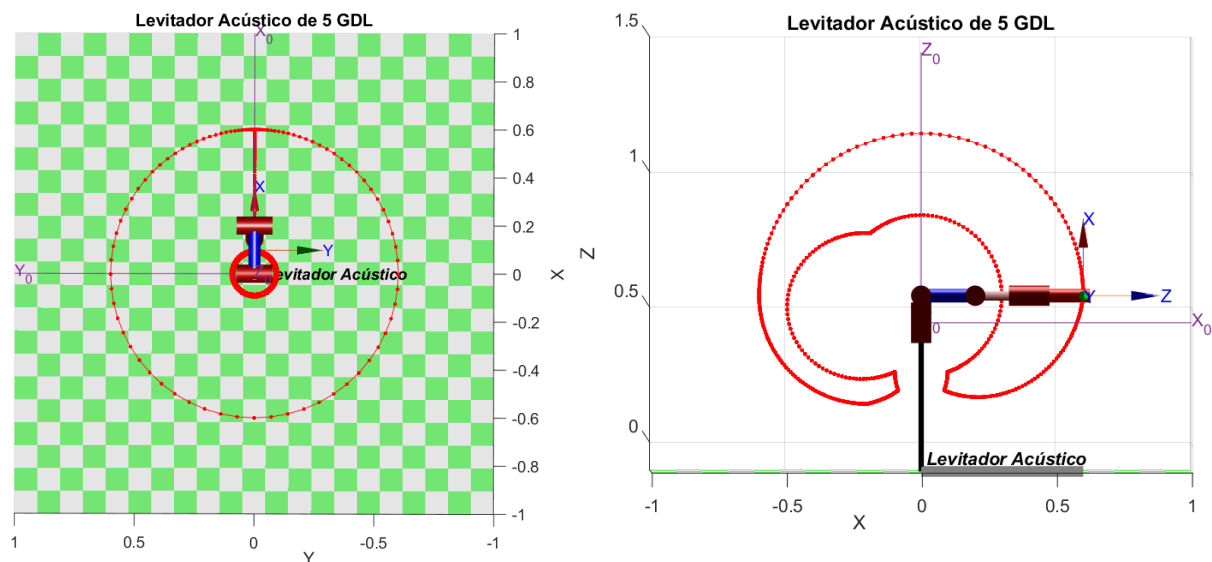


Figura 9: Espacio de trabajo

El espacio de trabajo final, es simétrico respecto al eje Z_0 central de la imagen 9 izquierda, por lo tanto, se debe imaginar cómo ambas zonas superpuestas a ambos lados del eje. Esta imagen 9 se dejó de esta forma para ser obtenida en una sola trayectoria, demostrando las posibilidades de movilidad del brazo robótico.

El espacio de trabajo queda delimitado por la imagen 9, que describe un espacio similar a una esfera con un hueco compuesto por una superposición de esferas, de su base a su centro, con distancias (aproximadas) entre un radio interno de 10cm a uno exterior de 50cm.

Análisis de la tarea a realizar

El robot realizará trabajos de posicionamiento de pequeños objetos con alta precisión, y el trabajo fino se realiza con el control de la levitación acústica, con lo cual es necesario que el robot sea capaz de posicionar el efector final en una posición aproximada a la deseada. Dado que no se utilizará para grandes movimientos ni grandes cargas, no es necesario una gran área de trabajo, pero sí se lograría aprovechar más su movilidad si se colocara sobre una mesa de trabajo, a unos 45cm del suelo (como se vio en la Figura 9 a derecha). Esto fue incluido en el programa añadiendo una matriz de “base” al robot.

Cinemática inversa

Asumimos que el robot se encuentra inicialmente en la posición de Home, esto es con todas las variables en 0 (considerando el offset y los límites articulares detallados anteriormente). Luego, recibirá una consigna de posición y orientación deseada (se asume, a priori, que dicha orientación y posición pueden ser alcanzadas, y con ello se comienza a calcular), del tipo:

$$TF = \begin{bmatrix} n1 & o1 & A1 & p1 \\ n2 & o2 & A2 & p2 \\ n3 & o3 & A3 & p3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Antes que nada, debemos independizar los cálculos de la matriz de base (aplicada para elevar el robot del piso y maximizar su utilidad dado su espacio de trabajo). Para ello hacemos:

$${}^0T_5 = ({}^{base}T_0)^{-1} * {}^{base}T_5$$

Recordando que, en todo momento, el eje Z5 (del efector final) es coplanario con el eje X0 (de la base), y que la posición del efector final no depende de la rotación de la articulación q5, podemos obtener los dos valores posibles de q1, con la orientación del efector final en la posición deseada, por los valores de "p" de la matriz "TF". Calculamos de la siguiente manera:

$$\tan(q_1) = {}^0y_5 / {}^0x_5$$

$$q1 = \text{atan2}({}^0p_5(2), {}^0p_5(1)) \quad ; \quad \text{sumamos o restamos } \pi \text{ para obtener el otro resultado}$$

Obtenido q1, podemos suponer el problema con 1 gdl menos, y sabemos que la posición (pero no la orientación) del efector final (p1, p2, p3) dependerá de las articulaciones q2, q3 (rotacionales) y q4 (traslacional), lo cual se puede observar en la Figura 11. Para ello busco dichas variables en función de ${}^1x_4, {}^1y_4, {}^1z_4$.

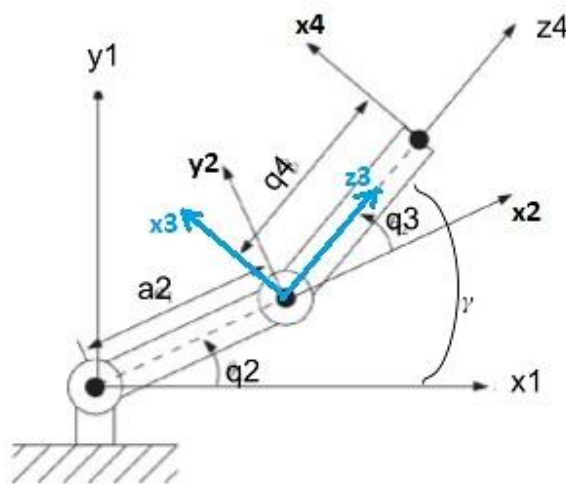


Figura 11: La posición final queda definida por q2, q3 y q4

Así mismo, vemos que tanto Z_3 como Z_4 son siempre paralelos a Z_5 (Se observa en la figura 7), lo que nos indica que la orientación del sistema 3 define la orientación del efector final. Esto reduce el problema considerablemente

Basándonos en la Figura 11, sabemos que el brazo a_2 describe una circunferencia alrededor de su origen cuya ecuación es:

$$(a_2)^2 = ({}^1y_3)^2 + ({}^1x_3)^2 \quad (\text{Ec. de una circunferencia})$$

Sabemos que la inclinación del eslabón de longitud q_4 debe coincidir con la orientación del efector final, es decir con la orientación del eje z_5 . Entonces con la orientación y la posición final obtenemos la ecuación de una recta:

$${}^1p_5 = ({}^0T_1)^{-1} * {}^0p_5 \quad (\text{Posición final respecto al sistema 1})$$

$$\gamma = 90^\circ - \arccos({}^0T_5[3,3]) \quad (\text{ángulo entre } z_5 \text{ y } x_1)$$

$${}^1y_3 = \tan(\gamma) * ({}^1x_3 - {}^1x_5) + {}^1y_5 \quad (\text{Ec. de una recta})$$

Ahora los valores de q_2 que nos permiten obtener una posible solución están dadas por la intersección de la recta y la circunferencia descrita anteriormente, esto se puede visualizar en la Figura 12:

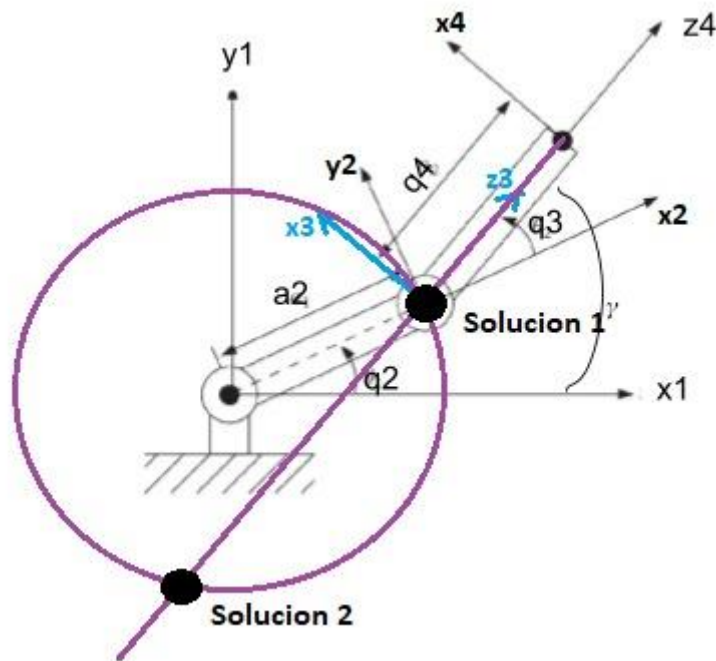


Figura 12: Soluciones obtenidas en las intersecciones recta y circunferencia

Obtenemos los valores de q_2 mediante la siguiente expresión

$$\tan(q_2) = {}^1y_3 / {}^1x_3$$

Una vez obtenido q_2 podemos calcular fácilmente q_3 (recordar que en nuestro robot):

$$q_2 + (q_3 - 90^\circ) = \gamma$$

$$q_3 = \gamma - q_2 + 90^\circ$$

Esta ecuación se ve levemente alterada cuando los ángulos no están en el primer cuadrante. Esto se puede ver en el código implementado.

Ahora q_4 se obtiene como la longitud necesaria que el brazo debe estirar para alcanzar el punto deseado. El método utilizado para su obtención se observa en la Figura 13:

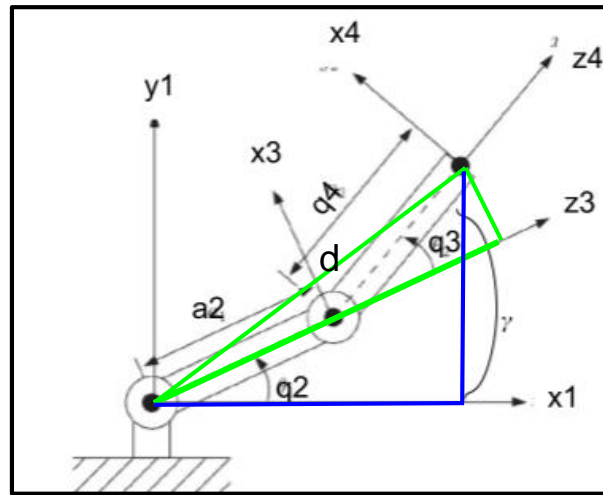


Figura 13: Método de obtención de q_4

De la gráfica obtuvimos las siguientes relaciones matemáticas

$$d^2 = ({}^1x_4)^2 + ({}^1y_4)^2 = (a_2 + q_4 \cos(q_3 - 90^\circ))^2 + (q_4 \sin(q_3 - 90^\circ))^2$$

$$d^2 = ({}^1x_4)^2 + ({}^1y_4)^2 = a_2^2 + 2 \cdot a_2 \cdot q_4 \cos(q_3 - 90^\circ) + (q_4 \cos(q_3 - 90^\circ))^2 + (q_4 \sin(q_3 - 90^\circ))^2$$

$$d^2 = ({}^1x_4)^2 + ({}^1y_4)^2 = a_2^2 + 2 \cdot a_2 \cdot q_4 \cos(q_3 - 90^\circ) + q_4^2$$

$$0 = (a_2^2 - ({}^1x_4)^2 - ({}^1y_4)^2) + 2 \cdot a_2 \cdot \cos(q_3 - 90^\circ) \cdot q_4 + q_4^2$$

Finalmente, obtenemos el q_5 de acuerdo a la rotación que presenta el sistema 5 respecto al sistema 4:

$$q_5 = \text{atan2}({}^4T_5[2,1] / {}^4T_5[1,1])$$

El resultado de este proceso es una matriz de 4 combinaciones articulares del tipo:

$$Q = \begin{bmatrix} q_{1_1} & q_{2_1} & q_{3_1} & q_{4_1} \\ q_{1_2} & q_{2_2} & q_{3_2} & q_{4_2} \\ q_{1_3} & q_{2_3} & q_{3_3} & q_{4_3} \\ q_{1_4} & q_{2_4} & q_{3_4} & q_{4_4} \\ q_{1_5} & q_{2_5} & q_{3_5} & q_{4_5} \end{bmatrix}$$

Una vez encontradas las combinaciones de coordenadas articulares que resuelven el problema de Cinemática Inversa, se realiza una validación para corroborar si las 4 matrices de transformación homogénea obtenidas, coinciden entre sí, y a su vez coinciden con la matriz deseada. Con ello, comprobamos la efectividad del algoritmo resolvente.

Este control de validación se realiza en el apartado específica de CI, pero no así en el de *“Planificación y Generación de Trayectorias”* por tratarse de puntos conocidos como alcanzables en el espacio de trabajo. Se puede ver en el código como un tipo de “sobrecarga de método”, aunque en rigor no es tal. Consúltense el archivo “cinv.m”.

Consideraciones de la implementación en MATLAB

El programa dedicado a esta tarea, evaluará la posibilidad de cumplir con dicha matriz, ya que al tratarse de un robot de 5 gdl, con rotaciones de hombro y codo coplanares, no siempre podrá cumplir con cualquier posición orientación que se pida en el espacio de trabajo. En caso de no poder conseguir lo especificado, se dejará al robot en la posición actual, para evitar colisiones. Esto, en una simulación, se hará evitando ya que notaremos “saltos” entre las posiciones alcanzables y las que no. Se hará mayor énfasis a esta situación en el apartado de *“Planificación y Generación de Trayectorias”*.

Se realizaron los respectivos controles de límites articulares, y la elección de la combinación de coordenadas articulares óptima en base a la posición anterior. Sin embargo, podrían encontrarse ciertas combinaciones de datos de entrada que puedan generar singularidades o conflictos en los cálculos, por ejemplo, en las etapas de cálculos trigonométricos o raíces polinómicas. Estos casos se han tenido en cuenta y el programa puede arrojar resultados suficientemente cercanos al buscado (por ejemplo, en ángulos conflictivos que produzcan tangentes infinitas; pruébense las matrices Tp3 y TP4 del archivo “cinv.m”), o desestimarlos completamente si, aún salvada la indeterminación, ninguna de las 4 combinaciones de coordenadas articulares obtenidas, cumple totalmente con los límites articulares. En esta última situación, como se mencionó anteriormente, el programa evita que el robot colisione con sí mismo y no realiza las trayectorias pedidas.

Deberá ser trabajo del usuario conocer el espacio de trabajo y los puntos alcanzables en posición y orientación. Esto, por supuesto, dependería de la aplicación particular y del espacio físico dónde se utilice el robot.

Relación de velocidades

Para conocer las posibles singularidades que posee el robot en su espacio de trabajo, generamos posiciones articulares aleatorias, y con cada una de ellas obtuvimos el jacobiano y su determinante. Si el determinante es muy cercano a cero es porque se trata de un punto singular. Este proceso se ve representado en la Figura 14.

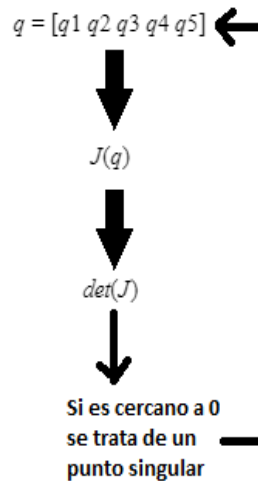


Figura 14: Proceso iterativo para hallar puntos singulares

A partir del método iterativo logramos encontrar que los puntos singulares son todos aquellos que coinciden con el eje Z_0 de la base, véase Figura 15.

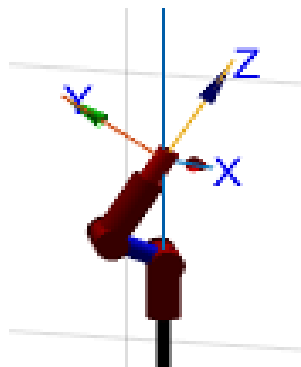


Figura 15: Ejemplo de un punto singular

En cualquier otra posición los movimientos son consistentes desde el punto de vista del análisis de manipulabilidad, como se muestra en la Figura 16.

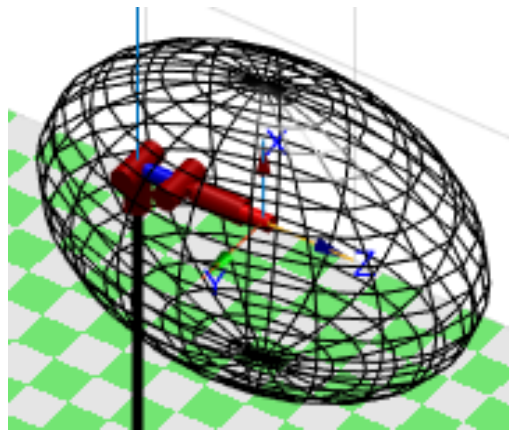


Figura 16: Ejemplo de un punto no singular

Dado que la posición de reposo (o Home) de nuestro robot es totalmente vertical, estamos posicionados en un punto singular (véase Figura 17). Por lo tanto, al momento de encender nuestro robot deberíamos desplazarnos un poco respecto a ese punto antes de comenzar el análisis de trayectorias.

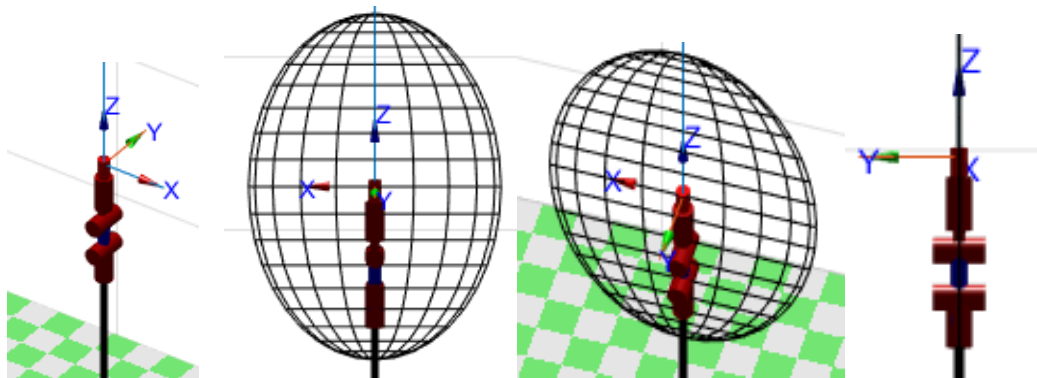


Figura 17: La posición HOMING es un punto singular

Planificación y Generación de Trayectorias

Se puede optar por realizar un proceso de Cinemática Directa para llevar al robot a una posición y orientación deseada, indicando la matriz de transformación homogénea final. En caso que este punto no sea alcanzable, posiblemente por estar fuera de los límites articulares, se corrige la posición a una que sí es posible. Este algoritmo es muy simple ya que se utiliza la función “fkine” del Toolbox de Peter Corke.

En el caso de Cinemática Inversa, se implementa la lógica explicada con anterioridad, solo considerando puntos alcanzables por el robot, evitando así colisiones en la simulación.

Para los dos casos anteriores, se utiliza la interpolación articular con la función “jtraj” dado que se comprobó, a través de sucesivas simulaciones, que este método produce trayectorias

suaves en el espacio, siguiendo trayectorias similares a una ortodrómica, o helicoidales, según el caso. Además, las aceleraciones y velocidades iniciales y finales son 0, con lo cual no se producen partidas ni frenadas bruscas.

Para ejemplificar un proceso de “Pick-and-Place”, tomamos dos posiciones en cuadrantes opuestos del espacio de trabajo, y desplazamos el efector final entre ellos. Para acercarnos a la posición, utilizamos interpolación articular con “jtraj”, y luego realizamos un acercamiento en línea recta con “ctrj”, simulando la recolección de una pieza a desplazar. Luego retomamos con la misma trayectoria recta hasta el punto anterior, y nos desplazamos en una trayectoria helicoidal hacia, casi, el punto destino. Nuevamente el tramo final es hecho con la interpolación cartesiana, por la misma razón mencionada. Finalmente se vuelve al punto de Home para esperar nuevas instrucciones.

Recordamos que se utilizan estas funciones e interpolaciones ya que, al tratarse de un actuador de levitación sin contacto, altas velocidades producirían fricción con el aire y podrían desplazar el objeto de los nodos de baja presión acústica, produciendo un error en el posicionamiento, y por lo tanto un error en la tarea a realizar. La trayectoria mencionada se muestra en la Figura 18.

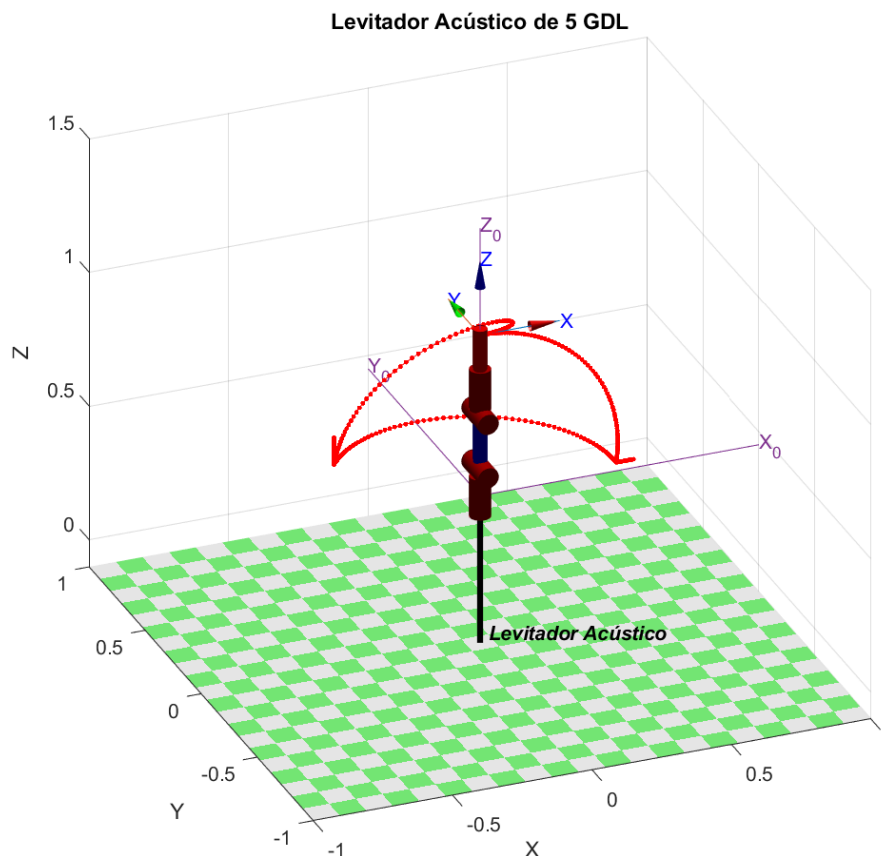


Figura 18: Trayectoria de Pick and Place

Como se mencionó en el apartado de “Cinemática Inversa”, se utilizan puntos que se saben (al menos aceptablemente) alcanzables, pero en caso de generarse una trayectoria que incluye

posiciones físicamente imposibles para el robot, el algoritmo se “queda” en el último punto posible, hasta poder tomar un nuevo punto para el cuál encuentra solución. Esto, en la simulación, se observa como un “salto” en la gráfica. Se dejó este comportamiento adrede para que sea posible estudiar posibles problemas en la trayectoria requerida, dando así la posibilidad al usuario de corregirla o reemplazarla por una acorde.

Vemos las posiciones articulares en la Figura 19, nótese que se juntaron las coordenadas Q1 y Q5 por ser ambas de rotación completa, y Q2 y Q3 por estar igual delimitadas y ser las más críticas. Finalmente vemos Q4, que es la articulación prismática. Se agregaron zonas de “reposo” entre cada movimiento. Si bien, para los desplazamientos se utilizaron 100 pasos, en los puntos de cambio de interpolación (de “jtraj” a “ctrj” o viceversa) se tomaron 25 pasos con la posición fija, para asegurar una transición suave entre las velocidades. Así mismo, en los puntos de acción (Pick o Place) se consideraron 50 pasos estáticos. Estos se pueden observar en la siguiente imagen (Figura 19).

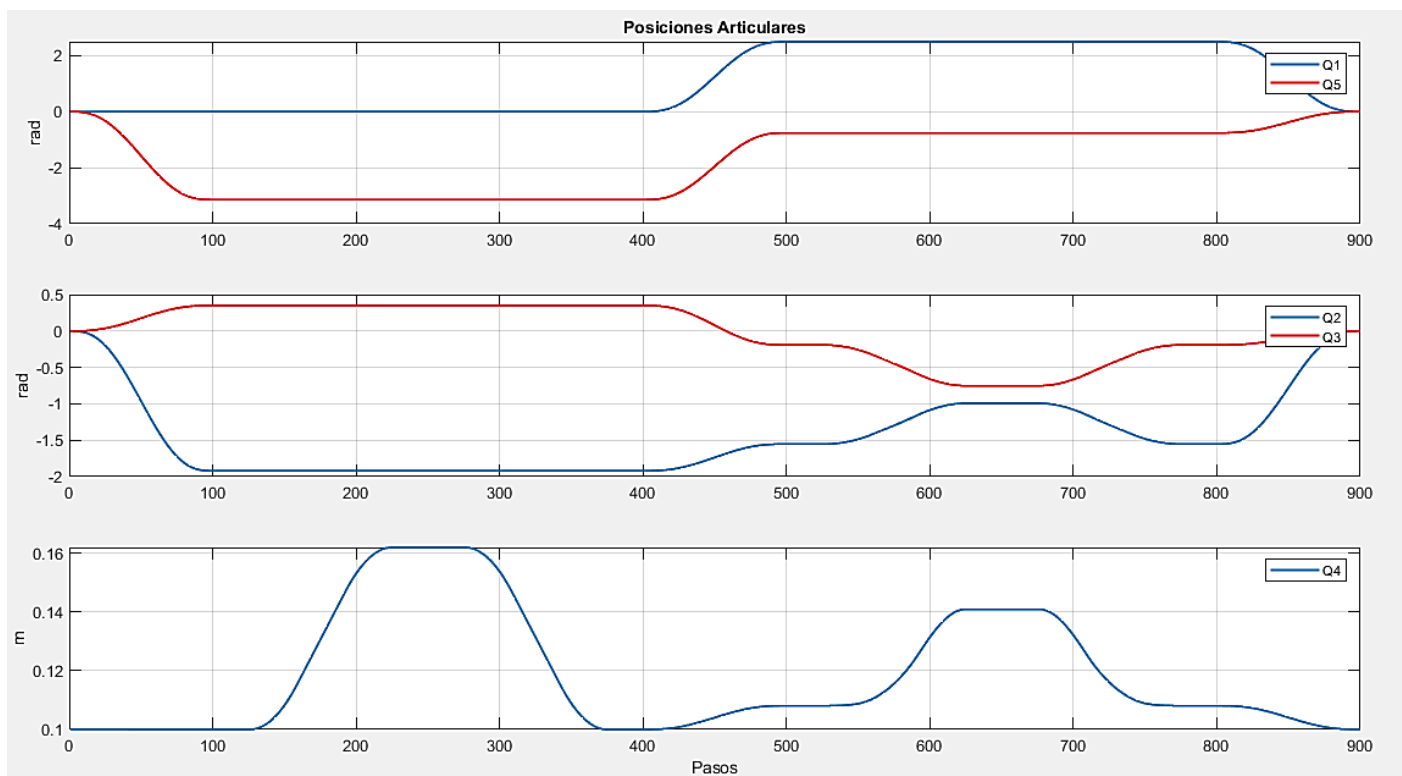


Figura 19: Posiciones Articulares en 3 gráficas

Salta a la vista las zonas de cada tipo de interpolación. En la siguiente imagen, Figura 20, vemos las velocidades articulares de los 5 grados de libertad. Se observan los perfiles de velocidad trapezoidales de la interpolación cartesiana “ctrj” a diferencia de las curvas más suaves de “jtraj”. Esto es particularmente notorio en Q4, dónde hay zonas de cambio de pendiente, sobretodo antes del paso 600 (aproximándose a la posición 4, de Place), y luego de 700 (volviendo a la posición

3). Si bien esto no presente un problema en sí para el movimiento del robot, es de esperar un comportamiento variante en las gráficas de aceleración (Figura 21, más adelante).

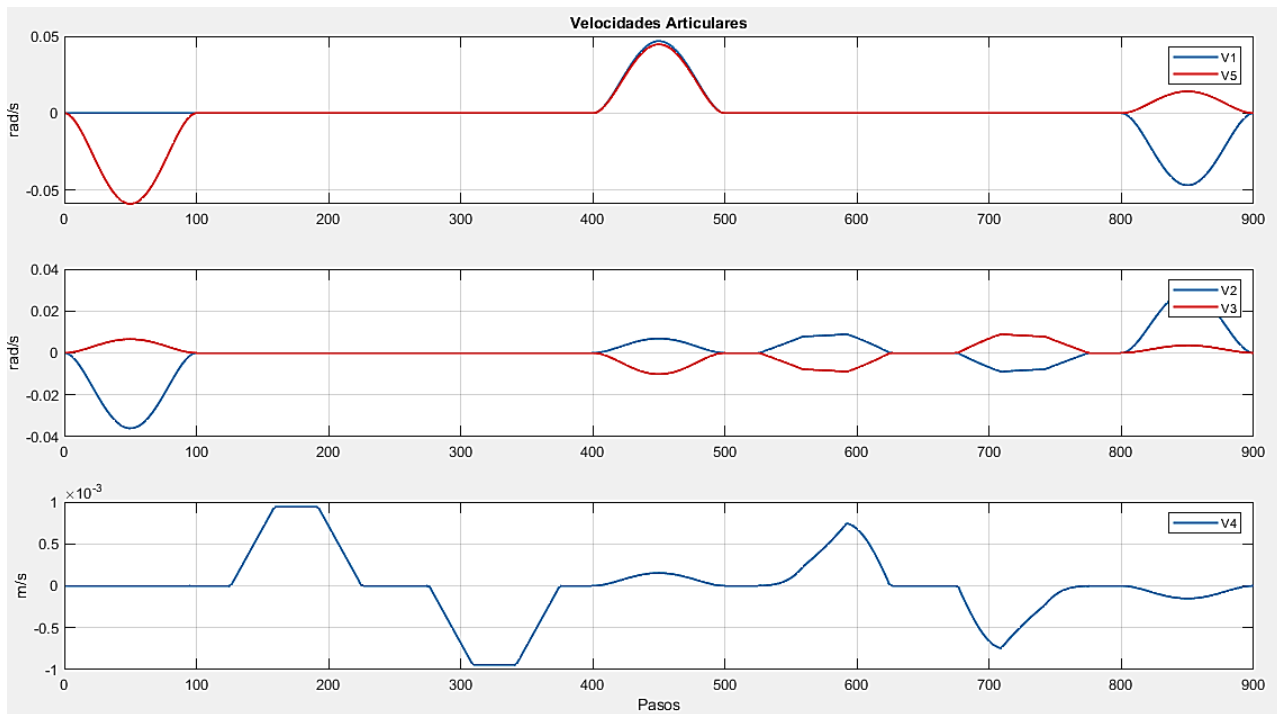


Figura 20: Velocidades Articulares

Finalmente, la Figura 21 muestra las aceleraciones articulares. Como se mencionó, vemos variaciones de aceleración en los puntos entre 600 y 700 pasos, tanto en Q2 y Q3, como en Q4. Podemos notar que se deben a que la pendiente de la curva velocidad en dichos puntos, tiene un cambio notorio, producto del perfil trapezoidal; pero notamos que están por debajo de los valores adquiridos por la aceleración en los tramos de “jttraj”, que como mencionamos son por demás aceptables.

Otro caso es el de Q4, rad/s^2 , que posee mayores “picos” en su gráfica de aceleración. Nuevamente, son de esperarse dados los cambios bruscos de velocidad en las posiciones vértice de los “trapecios”.

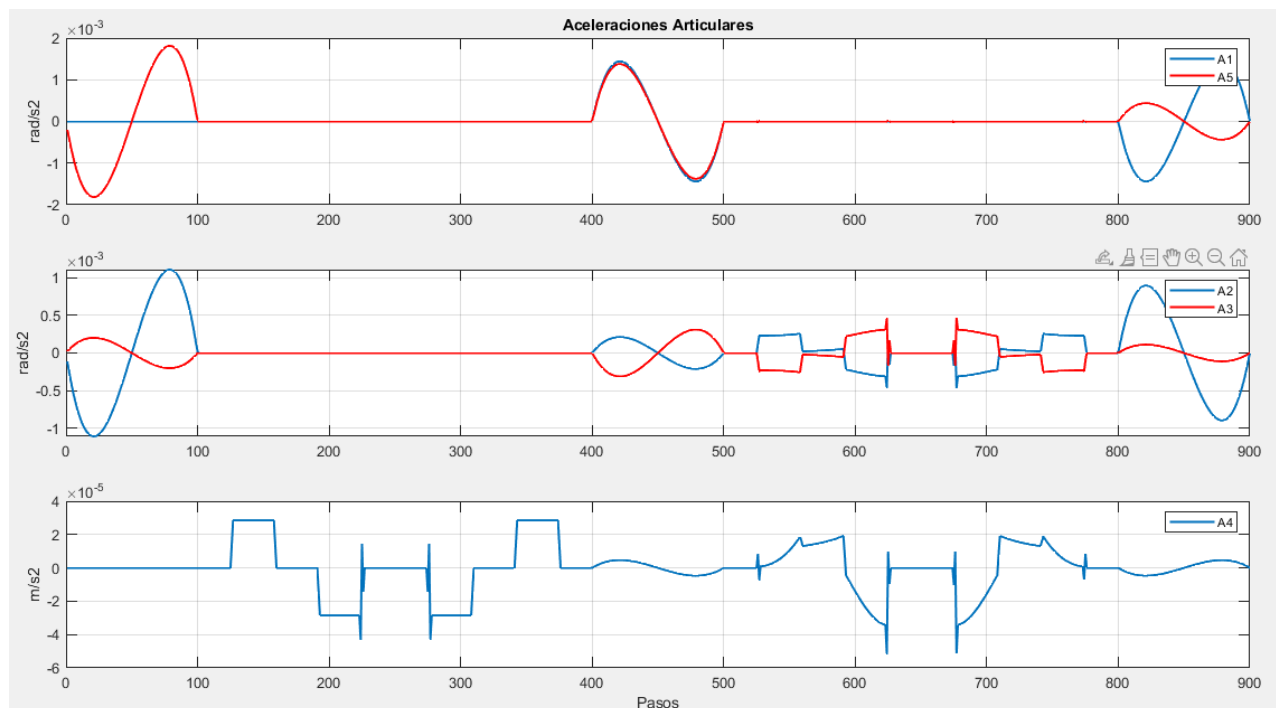


Figura 21: Aceleraciones Articulares

Si bien estos puntos no son de gran magnitud, y están dentro de las aceleraciones aceptables, sería de interés realizar un estudio a futuro de la posibilidad de utilizar la función “jtraj” entre los sucesivos puntos obtenidos por “ctrj” para asegurar una trayectoria recta en el espacio, pero manteniendo la suavidad en las curvas de velocidad y aceleración, evitando así hacer un mal uso de los actuadores que se instalen. De ellos particularmente, se habla en la siguiente sección de “*Sensores y Actuadores*”.

Sensores y Actuadores

Levitador acústico

El actuador final, consisten en dos hemisferios cargados de numerosos radiadores acústicos (ver Figura 22, a derecha). La combinación de estas ondas mecánicas, dado el fenómeno de superposición, produce zonas de alta y baja presión en el espacio, siendo posible suspender en él pequeñas partículas de bajo peso, con alta precisión. Es posible ajustar a milésimas de milímetro, e inclusive rotar los objetos. Esto lo hace muy útil para manejar materiales muy pequeños y delicados, además de facilitar la tarea del algoritmo de trayectoria, al no deber posicionar el brazo con una

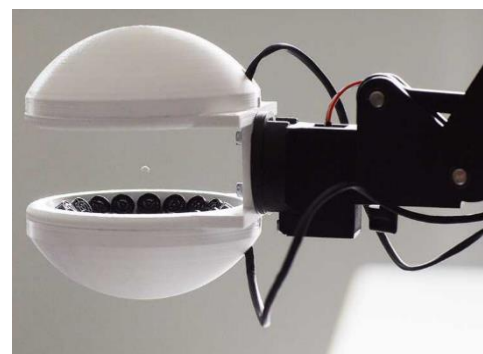


Figura 22: Levitador Acústico de 2 hemisferios

orientación en particular (no siempre se podrá, pero es una posible situación que se vería beneficiada por este tipo de “agarre sin contacto”).

Sensores y cámaras de video

Se propone instalar una cámara en la brida del actuador, colineal con el eje Z5 y que apunte hacia el objeto suspendido. Esto se hace con la intención de poder conocer con exactitud la posición y orientación del mismo respecto al actuador. Se pueden implementar algoritmos de Visión Artificial para reconocer y aislar las partículas del resto del espacio.

Se pueden utilizar, al menos 2 cámaras instaladas en el espacio de trabajo (levemente fuera del mismo) que corroboren la posición del robot en todo momento, para realizar un control más además de los encoders de los motores. Además, se pueden usar para advertir ante posibles interferencias en la trayectoria planteada, o la existencia de algún obstáculo en el mismo.

Motores y cilindro neumático

Para los motores, se pensó en los NEMA 23 (o 34, según especificaciones dinámicas) con un codificador multivuelta absoluto de 1000 líneas. Con esto se obtiene un sistema similar al de un servo, pero más económico. Se ve un ejemplo en la Figura 23.

La articulación prismática se controlará con un otro motor paso a paso, en este caso del tipo Lineal, que posee un eje torneado como un tornillo sin fin, con el cual puede traducirse su giro en un movimiento lineal. EN este caso, si bien el sistema de medición de recorrido integrado es el mismo, se debe calcular por software la relación de vueltas con el avance de la articulación.



Figura 23: PaP con Encoder Multivuelta

Conclusión y Trabajo a Futuro

A través de la realización del presente trabajo, pudimos desarrollar las aptitudes necesarias para estudiar la cinemática de un robot serie. Particularmente, debimos desarrollar las ecuaciones propias para calcular la cinemática inversa, y adaptar la planificación de trayectorias y sus velocidades, a la aplicación en particular que se planteó.

Se considera que el desarrollo real del presente trabajo es factible y comercializable, haciendo hincapié en las posibilidades de adaptarlo a distintos ambientes de trabajo dónde se requieran grandes precisiones en piezas muy pequeñas, o el manejo de reacciones químicas de alta pureza, como en la industria farmacéutica. La existencia de 5 grados de libertad, le aportan gran movilidad en un espacio suficientemente grande para una celda de trabajo de pequeña escala.

Aumentar las medidas de los eslabones es factible, pero se verá limitada la capacidad de carga debido al peso que agregan los radiadores acústicos, en caso de desear manejar objetos de mayor peso y tamaño.

Posibles desarrollos a futuro

Se debe implementar un algoritmo suficientemente robusto para evitar, con total certeza, las colisiones con sí mismo, maximizando el espacio de trabajo, y con ello optimizando los límites articulares según la construcción física empleada. Sería posible colocar las articulaciones dislocadas (no coplanares) para buscar obtener giros de 360° en todas ellas, y aumentar así su funcionalidad.

En caso de ser necesario, podría agregarse un giro perpendicular al plano del robot, para evitar poseer una singularidad sobre el eje Z0, y así convertir esa elipse en un elipsoide de manipulabilidad.

Retomando la idea planteada al final de la sección de "*Cinemática Inversa*", se puede realizar una combinación de métodos de interpolación, obteniendo los puntos con "ctraj" para asegurar una línea recta, tomando 2 o 3 puntos del total del recorrido, y utilizando finalmente "jttraj" para obtener perfiles de velocidad y aceleración mucho más suaves. Otra opción a estudiar, sería realizar la cinemática inversa de los puntos resultado de "ctraj" y emplear la función "mstraj", dando como valores de velocidad y aceleración nulos, al algoritmo.

Finalmente, para maximizar el control de velocidades y aceleraciones, y evitar que la fricción con el aire desplace al objeto, sería conveniente instalar un acelerómetro en el extremo del robot, para realizar un control a lazo cerrado de dichas variables.

Bibliografía y Material Consultado

- <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2020/01/the-robot-that-grips-without-touching.html>
- Apuntes de cátedra - "Robótica I" - Facultad de Ingeniería – 2021
- <https://la.mathworks.com/help/index.html>
- <https://la.mathworks.com/products/robotics.html>
- https://tendencias21.levante-emv.com/levitacion-acustica-para-introducir-material-genetico-en-las-celulas-sin-tocarlas_a21312.html
- <http://www.petercorke.com/robot>
- "Robotics Toolbox for MATLAB" – Corke, P. - Release 10
- "Introductions to Robotics" – Craig, J. - Pearson Prentice Hall – 3° Edición - 2005